



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ – ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ
ΣΤΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

από τον

Ανδρέα Τζάνη, PhD.
Λέκτορα Γεωφυσικής

Αθήνα, Μάιος 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	346
ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ	348
1. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	349
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ...	353
2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.	354
2.2 ΙΟΝΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ Η ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ (ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ).....	354
2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.	357
2.4 ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΓΩΓΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ (ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑ)	363
2.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.	365
2.6 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	367
2.6.1. <i>Ειδικές αντιστάσεις</i>	367
2.6.2. <i>Διηλεκτρικές σταθερές</i>	370
2.6.3. <i>Μαγνητικές διαπερατότητες</i>	370
3. ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΜΕΣΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ : ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	372
3.1. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ.....	372
3.2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΜΗ-ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ.....	377
4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ - ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	381
5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	385
5.1 Η ΜΑΓΝΗΤΟΤΕΛΛΟΥΡΙΚΗ (ΜΤ) ΜΕΘΟΔΟΣ.....	388
5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΗΜ ΠΕΔΙΩΝ	393
5.2.1 <i>Αισθητήρες τελλουρικού πεδίου</i>	393
5.2.2 <i>Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου</i>	394
5.2.3. <i>Διαδικασίες μετρήσεων υπαίθρου</i>	395
5.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΗΜΦΠ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟ ΜΕΘΑΝΩΝ.....	397
6. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΠΗΓΗΣ – ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	402
6.1. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	404
6.1.1. <i>Επαγωγικές διεργασίες</i>	404

	347
6.1.2. Ελλειπτική Πόλωση και Κλίση του Ολικού Πεδίου.	406
6.1.3. Ταξινόμηση	410
6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ.....	412
6.2.1 Μέθοδοι Μέτρησης Γωνίας Κλίσης.	412
6.2.1.1 Μέθοδος Μακράν Πεδίου VLF (Very Low Frequencies)	413
6.2.1.2. Μέθοδος Σταθερού Κατακορύφου Βρόχου (Εγγύς Πεδίο – Σταθερός Πομπός)	420
6.2.1.3. Μέθοδος Κατακορύφου Βρόχου – Πλευρικής Διάταξης (Εγγύς Πεδίο – Κινητός Πομπός)	424
6.2.2. Μέθοδοι διαχωρισμού φάσης.....	427
6.2.2.1. Μέθοδος Οριζοντίων Βρόχων (Κινητός Πομπός - Κινητός Δέκτης).....	428
6.2.2.2. Συστήματα Μικρού Αριθμού Επαγωγής - Αποτύπωση Εδαφικής Αγωγιμότητας	434
6.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	440
6.3.1 Εντοπισμός θραυσσιγενών ζωνών και υδροδιαπερατών σχηματισμών.	440
6.3.1.1. Διδιάστατη ηλεκτρική (dc) οριζοντιογραφία / τομογραφία	442
6.3.1.2. Σταυρωτή-τετραγωνική ηλεκτρική οριζοντιογραφία	443
6.3.1.3. Γεω-αγωγιμομετρία.....	445
6.3.1.4. Μέθοδος VLF	446
6.3.1.5. Συναξιολόγηση αποτελεσμάτων και ολοκλήρωση της ερμηνείας.....	447
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	450

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι έρευνας του υπεδάφους συνιστούν, στην ουσία, μία υπο-επιστήμη με ευρύτατες και πολυποίκιλες εφαρμογές σε όλους τους τομείς γεωεπιστημονικού και άλλου ενδιαφέροντος (ενδεικτικά αναφέρονται εφαρμογές σε κλάδους τόσο διαφορετικούς, όσο η τεχνολογία περιβάλλοντος, οι κατασκευές, η αρχαιολογία, η ιατροδικαστική κ.ά.). Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι ΗΜ μέθοδοι αποτελούν την μεγαλύτερη σε όγκο και δεύτερη μεγαλύτερη σε αξία εργασιών ομάδα γεωφυσικών εφαρμογών. Παρ' όλα αυτά, στην Ελλάδα έχουν σχετικά περιορισμένη διάδοση, πράγμα που ανακλάται στην σχεδόν παντελή έλλειψη σχετικής Ελληνόφωνης βιβλιογραφίας.

Οι ανά χείρας σημειώσεις εγράφησαν για χρήση προπτυχιακών φοιτητών γεωλογίας και δεν διεκδικούν εύσημα επιστημονικού εγχειριδίου, δεδομένου ότι αποτελούν το πρώτο βήμα μιας μακράς προσπάθειας να καλυφθεί το βιβλιογραφικό κενό και είναι ακόμη ατελείς. Έχουν πολύ περιορισμένη θεωρητική ανάπτυξη και λιγότερα των οφειλομένων παραδείγματα εφαρμογών, ενώ παραλείπουν ορισμένα σημαντικά κεφάλαια, όπως για παράδειγμα τις τεχνικές βαθυσκόπησης πεδίου χρόνου, το γεωραντάρ κ.λ.π. Τα χρονικά περιθώρια διαθέσιμα για σύνταξη και συγγραφή υπήρξαν περιορισμένα και για τον λόγο αυτό ζητάται η κατανόηση των αναγνωστών, επαϊόντων και μη. Ο συγγραφέας επιφυλάσσεται να συμπληρώσει, επεκτείνει και αναβαθμίσει τις σημειώσεις στο προσεχές μέλλον, και να τις καταστήσει ικανό και πλήρες εκπαιδευτικό βοήθημα, αλλά και χρήσιμο τεχνικό εγχειρίδιο.

Ανδρέας Τζάνης
Μάιος 2003

1. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

Οι ΗΜ μέθοδοι διασκόπησης βασίζονται σε φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) επαγωγής, λαμβάνοντα χώρα όταν ένα εξωτερικό πρωτεύον (πηγαίο) μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εισέρχεται εντός της Γης και παράγει ηλεκτρικά (πρωτεύοντα) ρεύματα και δευτερεύοντα (ανώμαλα) μαγνητικά πεδία σε γεωηλεκτρική δομή ελεύθερη πηγών ή καταναλωτών ΗΜ ενεργείας. Οι εξισώσεις του Maxwell είναι η αφετηρία της προσπάθειας να κατανοήσουμε το φυσικό υπόβαθρο και τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ΗΜ πεδία για να προσδιορίσουμε την δομή της Γης και να προσδιορίσουμε τις ηλεκτρικές και μαγνητικές της ιδιότητες.

Στην παρούσα εισαγωγή στην γεωηλεκτρομαγνητική θεωρία, θα παρουσιάσουμε τις εξισώσεις του Maxwell στην απλούστερη δυνατή μορφή τους, δηλαδή αυτή που λαμβάνουν μέσα σε ένα απεριόριστο ομογενές μέσο το οποίο πληρεί όλο τον χώρο και διεγείρεται από ένα ομογενές αρμονικό (ημιτονοειδές) επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Σε καρτεσιανό (ορθοκανονικό) σύστημα συντεταγμένων $\{x,y,z\}$, το πεδίο θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το ηλεκτρικό πεδίο έχει μόνο x-συνιστώσα (E_x),
- Το μαγνητικό πεδίο έχει μόνο y-συνιστώσα (H_y),
- Τα πλάτη του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου μεταβάλλονται μόνο κατά την z-διεύθυνση.

Μία αναπαράσταση των συνθηκών αυτών για ελεύθερο χώρο δίδεται στο Σχήμα 1.1. Αφού μόνο μία συνιστώσα του ηλεκτρικού και μία του μαγνητικού πεδίου υπάρχουν, οι εξισώσεις του Maxwell θα γράφονται:

$$\frac{\partial H_y(\omega, z)}{\partial z} = J_x(\omega, z) + i\omega D_x(\omega, z), \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial E_x(\omega, z)}{\partial z} = -i\omega B_y(\omega, z) \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0$$

Η εξίσωση (1.1) είναι ο νόμος του Ampère σε διαφορική μορφή. Αναπαριστά το γεγονός ότι η ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε αγωγό, (δεξί σκέλος), παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο (αριστερό σκέλος), όπου $H_y(z, \omega)$ είναι το η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε A/m, $J_x(z, \omega)$ είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m², $D_x(z, \omega)$ η διηλεκτρική μετατόπιση σε Cb/m² Η εξίσωση αυτή παρι-

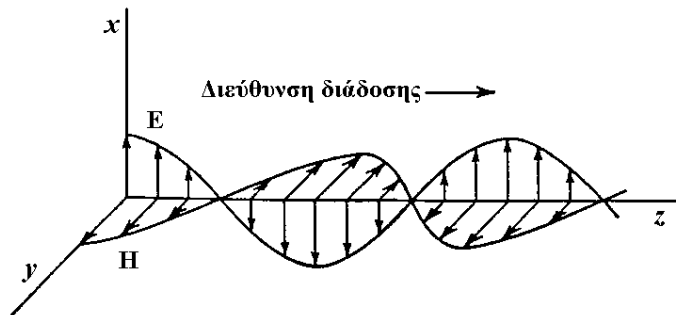
στά δύο είδη ηλεκτρικού ρεύματος: ένα (J_x) κατά το οποίο οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου κινούνται δι' ενός μέσου χωρίς εμπόδια και ένα ($i\omega D_x$) κατά το οποίο εμφανίζεται διαχωρισμός φορτίου και συνεπώς ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο που εμπεδίζει την κίνηση. Το πρώτο είδος ρεύματος συχνά ονομάζεται *ωμικό ή γαλβανικό*, ενώ το δεύτερο είναι γνωστό ως *ρεύμα μετατόπισης*.

Η εξίσωση (1.2) είναι ο νόμος του Faraday σε διαφορική μορφή. Αναπαριστά το γεγονός ότι η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής εντός αγωγού, (δεξί σκέλος $\equiv i\omega B_y$), παράγει χωρική μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου (αριστερό σκέλος), όπου $E_x(z, \omega)$ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε V/m και $B_y(z, \omega)$ είναι η μαγνητική επαγωγή σε Wb/m².

Τέλος, παρατίθενται οι δύο νόμοι του Gauss. Ο πρώτος νόμος λέγει ότι η ολική ηλεκτρική ροή καθέτως προς την διεύθυνση διάδοσης είναι μηδέν. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει κάποιος παράγοντας που να παράγει μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου σε διεύθυνση διαφορετική από την διεύθυνση διάδοσής του, δηλαδή *θεωρούμε χώρο ελεύθερο άλλων πηγών ή καταναλωτών ηλεκτρικού πεδίου*. Ομοίως, ο δεύτερος νόμος λέγει ότι ολική ροή μαγνητικού πεδίου καθέτως προς την διεύθυνση διάδοσης είναι μηδέν, οπότε δεν παράγεται ή καταναλίσκεται άλλο μαγνητικό πεδίο στον θεωρούμενο χώρο.

Οι ανωτέρω εξισώσεις του Maxwell κάλλιστα περιγράφουν την συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για γεωφυσικές εφαρμογές. Για να γίνει κατανοητή η χρήση των εξισώσεων στην μελέτη της γεωηλεκτρικής δομής θα πρέπει να τις θεωρήσουμε μέσα από τις βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες της ύλης και τις αντίστοιχες καταστατικές σχέσεις.

Αγωγιμότητα. Η σημαντικότερη ίσως εκ των καταστατικών σχέσεων για ΗΜ διασκόπηση της Γης, είναι ο νόμος του $\Omega\mu$, ο οποίος σχετίζει την πυκνότητα ρεύματος εντός αγωγού με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για να γίνει πληρέστερα κατανοητός ο νόμος, θεωρούμε κυλινδρικό στερεό σώμα μήκους L , διατομής A και ολικής ηλεκτρικής αντίστασης R , του οποί-



Εικόνα 1.1. Η γεωμετρία επιπέδου κύματος σε ελεύθερο χώρο.

ου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίδεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Εάν A μετράται σε m^2 , L σε m και R σε Ω , η ειδική αντίσταση μετράται σε Ωm (Ωm -μέτρα). Η αντίσταση R δίδεται, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης στα άκρα του κυλίνδρου εξωτερικής τάσης V (σε volt) και του διαρρέοντος τον κύλινδρο ηλεκτρικού ρεύματος I (σε Ampère) από τον νόμο του Ωm :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Volt} / \text{Ampère})$$

Η αντίστροφη ειδική αντίσταση ονομάζεται *ειδική αγωγιμότητα* σ και μετράται σε Siemes/m (S/m). Προφανώς,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} = \frac{\frac{I}{A}}{\frac{V}{L}} = \frac{J}{E} \quad \Rightarrow \quad J = \sigma E$$

Η ειδική αντίσταση και ειδική αγωγιμότητα είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του μέσου και ανεξάρτητες του σχήματός του. Οφείλει να σημειωθεί ότι η αγωγιμότητα ενός ορυκτού ή πετρώματος δεν είναι απαραίτητως σταθερή· η τιμή της μπορεί να αλλάξει συναρτήσει του χρόνου, θερμοκρασίας, πίεσης και σειράς άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων.

Διηλεκτρική Σταθερά. Η σπουδαιότερη παρατήρηση, η οποία οδήγησε τον Maxwell στην διατύπωση των ομωνύμων εξισώσεών του, είναι ότι οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου οφείλουν να είναι πάντοτε κλειστές, ακόμα και απουσία αγωγίμου μέσου. Αυτό οδήγησε στην διατύπωση της καταστατικής εξίσωσης

$$D = \epsilon E$$

που σχετίζει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου με την μετατόπιση, και ορίζει μία άλλη ιδιότητα του μέσου την *διηλεκτρική σταθερά*¹ ϵ . Σε αντίθεση με την αγωγιμότητα, η διηλεκτρική σταθερά έχει πεπερασμένη τιμή ακόμα και απουσία ύλης και στο κενό η τιμή της είναι

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ farad/m.}$$

Κατά την κλασσική θεωρία του διηλεκτρισμού, η μετατόπιση οφείλεται στην μετάθεση φορτίων (ηλεκτρονίων, πυρήνων και πολικών μορίων) από την ουδέτερη θέση ισορροπίας τους σε μετατοπισμένες, μη ουδέτερες θέσεις, υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η *πόλωση* τέτοιων φορέων φορτίου είναι μία γνωστή και καλομελετημένη ιδιότητα της ύλης.

¹ Ισοδύναμος προς την διηλεκτρική σταθερά όρος είναι η *διηλεκτρική διαπερατότητα* (*dielectric permittivity*).

Μαγνητική Διαπερατότητα. Η τρίτη από τις καταστατικές σχέσεις που διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο στις εξισώσεις του Maxwell είναι η σχέση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής που γράφεται ως

$$B = \mu H$$

και στην οποία το μέγεθος μ είναι ιδιότητα της ύλης και ορίζεται ως *μαγνητική διαπερατότητα* (*magnetic permeability*). Σε αντίθεση με την αγωγιμότητα και την διηλεκτρική σταθερά που συνήθως μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες της έντασης του εφαρμοζομένου εξωτερικού πεδίου, η μαγνητική διαπερατότητα είναι δυνατόν να εμφανίσει περίπλοκη εξάρτηση από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αν και αυτό δεν ισχύει για τα περισσότερα υλικά της Γης. Απουσία ύλης, ισχύει η σχέση $B = \mu_0 H$ όπου μ_0 η (ισοτροπική) μαγνητική διαπερατότητα του κενού με τιμή $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry / m. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών της Γης ελάχιστα διαφέρει από αυτήν του κενού, πλην ολίγων εξαιρέσεων.

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ορυκτών και των πετρωμάτων μπορεί να είναι ηλεκτρονική (Ωμική), ή διηλεκτρική ή ηλεκτρολυτική, ή, τέλος, συνδυασμός των ανωτέρω. Ηλεκτρονική αγωγιμότητα είναι ο συνήθης τρόπος ροής ηλεκτρικού ρεύματος σε υλικά φέροντα ελεύθερα ηλεκτρόνια εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, όπως κατ' εξοχήν τα μέταλλα. Αυστηρά ομιλούντες, όλα τα υλικά τα οποία δεν είναι μέταλλα, είναι *ημιαγωγοί*. Σε πάρα πολλά υλικά όμως, η ενέργεια που απαιτείται για την ενεργοποίηση των μηχανισμών ηλεκτρονικής αγωγιμότητας είναι τόσο μεγάλη, ώστε στην πράξη να μην λαμβάνει χώρα μετακίνηση φορτίων. Τα υλικά αυτά ονομάζονται *μονωτές*. Τα περισσότερα πυριτικά, ανθρακικά και άλλα κοινά ορυκτά εμπίπτουν σ' αυτήν την κατηγορία.

Στα μονωτικά υλικά η ημιαγωγιμότητα είναι τόσο χαμηλή, ώστε να κυριαρχεί ένας άλλος μηχανισμός αγωγής του ρεύματος, *ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα*. Εντός των ηλεκτρολυτών, το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται με σχετικά αργούς ρυθμούς διά της κίνησης ιόντων από υλικά εν διαλύσει. Η θερμική διέγερση του κρυσταλλικού πλέγματος μπορεί επίσης να μετατοπίσει ιόντα από τις κανονικές τους θέσεις, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα για αγωγή ρεύματος μόλις εφαρμοσθεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα των στερεών διαλυμάτων περιγράφεται σε ειδικό κεφάλαιο. Ειδική, και μάλιστα, την σπουδαιότερη για την γεωφυσική περίπτωση, αποτελεί η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα υγρών διαλυμάτων, αφού ο κοινότερος και αφθονότερος φυσικός διαλύτης είναι το H_2O για την περίπτωση αυτή θα διατεθεί επίσης ειδική, εκτενής αναφορά.

Η διηλεκτρική αγωγιμότητα χαρακτηρίζει πτωχούς αγωγούς ή μονωτές, οι οποίοι διαθέτουν μικρό αριθμό ελευθέρων ηλεκτρονίων ή και καθόλου. Στην τελευταία περίπτωση και υπό την επίδραση εξωτερικού, χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ατομικά ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρά ως προς την θέση των πυρήνων τους: αυτός ο ατελής διαχωρισμός θετικών και αρνητικών φορτίων είναι γνωστός ως *διηλεκτρική πόλωση* του υλικού (ηλεκτρονική διηλεκτρική πόλωση). Ομοίως, ιονική και μοριακή πόλωση εμφανίζεται σε υλικά με ιονικούς και μοριακούς δεσμούς αντιστοίχως.

2.1 Ηλεκτρονική Αγωγιμότητα.

Η ηλεκτρονική αγωγιμότητα οφείλεται στην ύπαρξη ελευθέρων ηλεκτρονίων εντός του κρυσταλλικού πλέγματος. Στα μέταλλα, και σε περίπτωση εφαρμογής εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια της εξώτατης στοιβάδας μπορούν εύκολα να 'εγκαταλείψουν' το άτομο και να ολισθήσουν μέσα στο πλέγμα, πράγμα που τα καθιστά αγωγούς. Στην αντίθετη περίπτωση των μονωτών, προκειμένου να εγκαταλείψουν το άτομο τα ηλεκτρόνια πρέπει να πραγματοποιήσουν ένα απαγορευτικά μεγάλο ενεργειακό άλμα. Οι ημιαγωγοί αποτελούν ενδιάμεση κατάσταση. Η κινητικότητα των ηλεκτρονίων ελέγχεται από τον ρυθμό των συγκρούσεών τους με το πλέγμα. Αν τ είναι ο χρόνος μεταξύ δύο συγκρούσεων, m η μάζα του ηλεκτρονίου και e το φορτίο του, τότε $m\mathbf{v} = q\mathbf{E}\tau$ είναι η ορμή του ηλεκτρονίου μεταξύ δύο συγκρούσεων και $M=q\tau/m$ η κινητικότητα. Αυξανόμενη της θερμοκρασίας, η συχνότητα των συγκρούσεων αυξάνει και ο χρόνος τ ελαττώνεται. Έτσι, η κινητικότητα μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Δεδομένου ότι σε ξηρά κατάσταση τα περισσότερα ορυκτά και σχεδόν όλα τα πετρώματα είναι μονωτές, αξιόλογη ηλεκτρονική αγωγιμότητα υπάρχει μόνον σε εξαιρετικές περιπτώσεις ή κάτω από ειδικές συνθήκες. Τέτοιες περιπτώσεις για παράδειγμα αποτελούν τα μεταλλοφόρα κοιτάσματα του ανώτερου φλοιού και οι ενδιαστρώσεις φυσικού γραφίτη μεταξύ των κόκκων ορυκτών στον κατώτερο φλοιό².

2.2 Ιονική Αγωγιμότητα ή Ηλεκτρολυτική Αγωγιμότητα Στερεών Διαλυμάτων (Κρυσταλλικά Πετρώματα).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πυριτικών πετρωμάτων είναι αξιοπρόσεκτες δεδομένου αυτά αποτελούν στερεούς ηλεκτρολύτες. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ' αυτά τα υλικά λαμβάνει χώρα δι' ιονικών διεργασιών σε κρυστάλλους σχηματιζόμενους δι' ιονικών δεσμών. Δίδεται από την σχέση

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-U_0}{kT}\right),$$

όπου σ_0 είναι σταθερά βασική τιμή, U_0 είναι η ενέργεια διέγερσης, k η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία.

Σε γενικές γραμμές, η δύναμη που εξασκείται από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο επί ιόντων σε κρυστάλλους ιονικού δεσμού, είναι μικρότερη από τις

² Ο σχηματισμός του γραφίτη δεν έχει επαρκώς εξηγηθεί αλλά το ορυκτό έχει παρατηρηθεί στα δείγματα εκ των πυρήνων αμφοτέρων των υπερ-βαθέων ηπειρωτικών γεωτρήσεων (Kola, Ρωσσίας και Μέλανος Δρυμού, Γερμανίας).

δυνάμεις του ιονικού δεσμού. Παρ' όλα αυτά, ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα λαμβάνει χώρα λόγω *συγγενών*³ ή *θερμικώς επαγόμενων* παραμορφώσεων του κρυσταλλικού πλέγματος που μετατοπίζονται σχετικά ευκολότερα. Το πρώτο είδος που είναι υπεύθυνο για την αγωγιμότητα χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι 700 °C), οφείλεται σε χαλαρά συγκρατούμενες ανομοιογένειες (π.χ. μολύνσεις από ξένα μόρια) και / ή εξαρθρώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος. Το δεύτερο είδος παραμορφώσεων είναι υπεύθυνο για την αγωγιμότητα υψηλών θερμοκρασιών και οφείλεται στην μετατόπιση ιόντων λόγω θερμικών ταλαντώσεων. Στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας της λιθόσφαιρας, τα φορτία στα οποία οφείλεται η *συγγενής αγωγιμότητα* (χαμηλών θερμοκρασιών) των ιονικών κρυστάλλων και κρυσταλλικών πετρωμάτων είναι κυρίως ιόντα και όχι ηλεκτρόνια. Τα ιονικά φορτία είναι σαφώς λιγότερα και, δεδομένου ότι οι φορείς τους είναι πολύ μεγαλύτεροι από τα ηλεκτρόνια, εμφανίζουν χαμηλή κινητικότητα. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι η χαμηλή αγωγιμότητα των κρυσταλλικών πετρωμάτων. Όπως έχειδειχθεί πειραματικά, η ιονική αγωγιμότητα χαμηλών θερμοκρασιών είναι κυρίως συγγενής, αποτελεί συνάρτηση της κρυσταλλικής δομής του δεδομένου δείγματος και της θερμικής του ιστορίας, και είναι δυνατόν να μεταβάλλεται από δείγμα σε δείγμα του αυτού υλικού. Αντιθέτως, η θερμικώς επαγόμενη αγωγιμότητα φαίνεται ότι *ελάχιστα* μεταβάλλεται από δείγμα σε δείγμα. Η ολική αγωγιμότητα του πετρώματος θα είναι το άθροισμα των συγγενών και θερμικώς επαγόμενων διεργασιών

$$\sigma = \sigma_{0,1} \cdot e^{\frac{-U_1}{kT}} + \sigma_{0,2} \cdot e^{\frac{-U_2}{kT}},$$

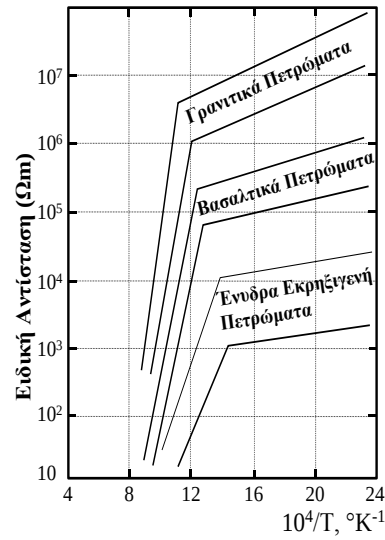
όπου οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στις χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες αντίστοιχα. Ενδεικτικές πειραματικές τιμές των ανωτέρω παραμέτρων δίδονται στον Πίνακα 3.1. Όπως είναι εμφανές η παράμετρος σ_2 είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη της σ_1 πράγμα που εξηγεί την ταχεία αύξηση της αγωγιμότητας καθώς οι θερμικώς επαγόμενες ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος υπερισχύουν των συγγενών, αλλά και την δραστική (κατά πολλές τάξεις μεγέθους) αύξησή της όταν επέλθει η λύση του κρυσταλλικού πλέγματος (τήξη), οπότε το πέτρωμα καθίσταται υγρός ηλεκτρολύτης.

Η Εικόνα 2.1 παρουσιάζει μία γενικευμένη σύνοψη της μεταβολής της ειδικής αντίστασης *ξηρών* εκρηξιγενών πετρωμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας. Εδώ θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι τα ανωτέρω αναφέρονται σε *ξηρά* δείγματα. Η παρουσία ρευστού (ύδατος) έστω και σε μικρές ποσότητες, μεταβάλλει την σχέση εξάρτησης της αγωγιμότητας από την θερμοκρασία, όπως για παράδειγμα έχει πειραματικά διαπιστωθεί από μελέτες βα-

³ Κατά την διάρκεια της κρυστάλλωσης.

Πίνακας 2.1. Τιμές σ_1 , σ_2 , U_1 και U_2 , (από Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966. "Electrical Methods of Geophysical Prospecting", Pergamon Press, Oxford)

Πέτρωμα	σ_1 (S/m)	σ_2 (S/m)	U_1 (eV)	U_2 (eV)
Γρανίτες	5×10^{-6}	10^3	0.62	2.5
Γάββροι	7×10^{-5}	10^3	0.70	2.2
Βασάλτες	7×10^{-5}	10^3	0.57	2.0
Περιδοτίτες	4×10^{-4}	10^3	0.81	2.3
Ανδεσίτες	6×10^{-5}	10^3	0.70	1.6



Εικόνα 2.1.¹ Συνοπτική εικόνα της μεταβολής της ειδικής αντίστασης ξηρών εκρηξιγενών πετρωμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας .

σαλτικών πετρωμάτων, στις η παρουσία ύδατος αύξησε δραστικά την ειδική αγωγιμότητα.⁴

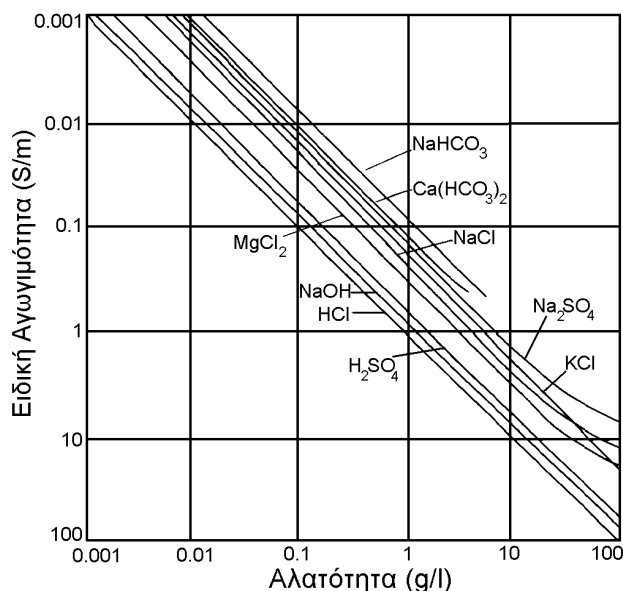
⁴ Watanabe, H., 1970. Measurements of electrical conductivity of basalts at temperatures up to 1500°C and pressure to about 20 kilobars, *Spec. Contrib. Geophys. Inst. Kyoto Univ.*, **10**, 159-170.

2.3 Ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα.

Όπως είναι προφανές από την ανωτέρω συζήτηση, τα περισσότερα ξηρά ορυκτά και πετρώματα είναι πτωχοί ως κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και οι ειδικές τους αντιστάσεις θα ήταν εξαιρετικά υψηλές, εάν αυτά δεν ήταν πορώδη, και οι πόροι τους πλήρεις αγωγίμων ρευστών (ύδατος). Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτώνται αμέσως και μόνον από την δυνατότητά τους να συγκρατούν νερό (πορώδες), από τον όγκο του περιεχομένου νερού (ποσοστό κορεσμού του πορώδους) και από την θερμοκρασία⁵. Σε κανονικές θερμοκρασίες, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πορωδών γεωλογικών σχηματισμών καθορίζονται αποκλειστικά από το περιεχόμενο νερό, έστω και αν αυτό είναι ελάχιστο, αναλόγως και του πως είναι κατανομημένο εντός του σχηματισμού. Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι η ρευστή φάση υπό μορφή εξαιρετικά αγωγίμων αλμών είναι πανταχού παρούσα στον φλοιό, όπως τείνει να φανεί από όλες τις μελέτες των τελευταίων ετών. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω, τα πραγματικά πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί.

Η ειδική αγωγιμότητα των ηλεκτρολυτικών αγωγών μπορεί, φυσικά, να περιγραφεί με τον Νόμο του Ωμ, αλλά δεν θα πρέπει ποτέ να λησμονείται ότι η διάδοση του ρεύματος γίνεται ιονικά, δηλ. με μετατόπιση των ιόντων των προερχομένων από τα διαλελυμένα μόρια. Συνεπώς, η ειδική αγωγιμότητα μεταβάλλεται συναρτήσει της κινητικότητας και συγκέντρωσης των ιόντων του διαλύματος. Κινητικότητα ονομάζεται η θερματική ταχύτητα στην οποία επιταχύνεται ένα ιόν, υπό την επίδραση σταθερού ηλεκτρικού πεδίου και καθορίζεται από την *ιζώδη τριβή* που ασκείται από το ρευστό επί του ιόντος. Η ιζώδης τριβή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Στην περιοχή των 0°C το ιζώδες ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας, ενώ σε αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες (400° - 800° C) αυξάνει συναρτήσει της θερμοκρασίας. Εντός των πορωδών πετρωμάτων, λόγω της προσρόφησης ύδατος και ιόντων στις επιφάνειες των κόκκων των ορυκτών, οι πιέσεις μπορεί να είναι υψηλές και η κινητικότητα ελαττωμένη σε σχέση με αυτή του ελεύθερου διαλύματος. Σημειωτέον ότι τα περισσότερα ιόντα των εν διαλύσει αλάτων εμφανίζουν τις ίδιες, ή παραπλήσιες κινητικότητες, της τάξης $4\text{--}40 \times 10^{-8}$ (M/s)/(V/m). Συγκέντρωση (% κατά βάρος προς όγκο) ονομάζεται ο αριθμός γραμμαρίων διαλελυμένης ουσίας ανά 100cm^3 διαλύματος, άρα είναι μέτρο του αριθμού εν διαλύσει ιόντων και προφανώς αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, η συγκέντρωση εκπεφρασμένη σε αριθμό γραμμαρίων ανά λίτρο ονομάζεται *αλατότητα*. Στην γεωφυσική πρακτική, ο όρος αλατότητα περιλαμβάνει όλα τα διαλελυμένα στερεά (και όχι κάθε ου-

⁵ Παράβαλε όμως με τα περί ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας των κρυσταλλικών πετρωμάτων.

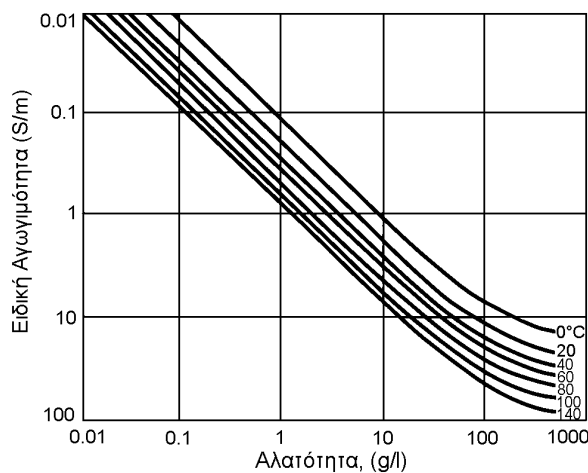


Εικόνα 2.2.⁶ Ειδική αγωγιμότητα διαλυμάτων διαφόρων αλάτων σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης. Η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 20°.

σία χωριστά), τα οποία χαρακτηρίζονται από κάποια μέση κινητικότητα. Η μεταβολή της ειδικής αγωγιμότητας υδάτινου ηλεκτρολύτη ως συνάρτηση της συγκέντρωσης διαφορετικών εν διαλύσει αλάτων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2. Η επίδραση της θερμοκρασίας, η οποία αυξάνει την κινητικότητα και την συγκέντρωση των εν διαλύσει αλάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3 για ηλεκτρολύτη NaCl.

Δραστική Αγωγιμότητα. Ένα διάβροχο πορώδες πέτρωμα είναι ηλεκτρικά ανομοιογενές στην μικρο- και μεσοσκοπική κλίμακα, λόγω των πολύ μεγάλων αντιθέσεων αγωγιμότητας μεταξύ της μονωτικής στερεάς μήτρας και του αγωγίμου πορικού ρευστού. Δεδομένου όμως ότι το ρεύμα μέσω του πετρώματος θα ρεύσει αποκλειστικά διά του πορικού ρευστού, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του συστήματος πέτρωμα - πορώδες θα καθορίζονται από την μικροδομή του πορώδους. *Δραστική ειδική αγωγιμότητα (effective conductivity)* ονομάζεται η μακροσκοπική ειδική αγωγιμότητα του συστήματος και είναι η παράμετρος που μετράμε στην πράξη. Εξαρτάται από τον κλασματικό όγκο των συνιστωσών του πετρώματος (στερεάς μήτρας και διασυνδεδεμένου πορώδους), τις ειδικές αγωγιμότητές τους και την μικροδομή του συστήματος.

⁶ Τροποποιημένη από Keller, G.V., 1987, Rock and Mineral Properties, in M.N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, Vol. 1, SEG Series: Investigations in Geophysics No 3, Tulsa, Oklahoma



Εικόνα 2.3.⁷ Ειδική αγωγιμότητα διαλύματος NaCl σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας και συγκέντρωσης.

Παράγων σχηματισμού. Λόγω των συνήθως τεραστίων διαφορών αγωγιμότητας μεταξύ του μητρικού πετρώματος και του πορικού ρευστού, ένα διάβροχο πορώδες πέτρωμα μπορεί να θεωρηθεί *διφασικό* μέσο, αποτελούμενο από υγρή φάση (πορικό ρευστό με κλασματικό όγκο ϕ και ειδική αγωγιμότητα σ_w) και στερεά φάση (στερεά μήτρα με κλασματικό όγκο $1-\phi$ και ειδική αγωγιμότητα σ_π). Εφόσον η στερεά φάση είναι μονωτής, όπως άλλωστε είναι το σύνηθες, ο λόγος των αγωγιμοτήτων των δύο φάσεων σ_π / σ_w θα είναι της τάξης 10^{-10} , δηλαδή αμελητέος! Αυτό σημαίνει ότι η δραστηκή αγωγιμότητα του συστήματος ουσιαστικά οφείλεται στην αγωγιμότητα του πορικού ρευστού, με την οποία θα σχετίζεται μέσω μίας αναλογικής σχέσης

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_w}{F}.$$

Ο παράγων F ονομάζεται *παράγων σχηματισμού* (*formation factor*) και δεδομένου ότι η στερεά φάση είναι μονωτική, η τιμή του εξαρτάται από την μικροδομή του πορώδους και τον βαθμό πλήρωσής του με υγρή αγωγίμη φάση. Έτσι, όταν $\phi \rightarrow 1$, $F \rightarrow 1$ και $\sigma_{eff} \rightarrow \sigma_w$, ενώ όταν $\phi \rightarrow 0$, $F \rightarrow \sigma_w / \sigma_\pi$ και $\sigma_{eff} \rightarrow \sigma_\pi$. Συνεπώς, ο παράγων σχηματισμού μπορεί να ερμηνευθεί ως ελάττωση της αγωγιμότητας του πορικού ρευστού, λόγω της παρουσίας της μη-αγωγίμης στερεάς φάσης.

Ο νόμος του Archie. Στην γενική περίπτωση δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την μικροδομή του πορώδους σε ένα φυσικό σχηματισμό και δεν

⁷ Τροποποιημένη, *ibid.* Keller, (1987).

είναι δυνατόν να γίνει κανενός είδους αναλυτικός υπολογισμός. Για τον λόγο αυτό, βασιζόμαστε σε εμπειρικούς νόμους μεταξύ του παράγοντα σχηματισμού και του πορώδους. Προκειμένου περί κεκορεσμένων πορώδων υλικών, ο νόμος του Archie συσχετίζει τις δύο αυτές παραμέτρους σύμφωνα με την σχέση

$$F = \alpha \cdot \phi^{-m}.$$

όπου α και m είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από το εκάστοτε πέτρωμα και κυμαίνονται ως $0.5 \leq \alpha \leq 2.5$ και $1.3 \leq m \leq 2.5$.⁸

Η μορφολογία των πόρων ενός πετρώματος, είναι αρκετά πολύπλοκη και δύσκολη να περιγραφεί με απλή γεωμετρία. Σε γενικές γραμμές, αναγνωρίζονται τρεις μορφολογικοί τύποι πόρων:

1. Χώρος μεταξύ των (ακανόνιστων) κόκκων ιζηματογενούς πετρώματος.
2. Γραμμικές μορφές (μικροδιαρρήξεις, διακλάσεις και μικρορωγμές). Αυτές συνήθως απαντούν σε σκληρά ιζηματογενή και κρυσταλλικά πετρώματα.
3. Υγρά εγκλείσματα (ρευστή φάση) κρυσταλλοσχιστωδών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων.
4. Πομφόλυγες και βακουόλες, ή άλλοι μεγάλοι, καθόλου έως ολίγο επικοινωνούντες κενοί χώροι, όπως στα έκχυτα εκρηξιγενή πετρώματα.

Για δεδομένο πορώδες και ποσοστό πορικού ρευστού, ο τύπος (2) ανωτέρω θα δώσει τις πλέον μεγάλες αγωγιμότητες, λόγω της απλούστερης μορφής και της καλύτερης δυνατότητας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων. Στο άλλο άκρο, τα πομφολυγώδη ηφαιστειακά πετρώματα (π.χ. κίσηρις), καίτοι διαθέτουν πολύ μεγάλο ποσοστό κενών χώρων συνήθως εμφανίζουν πολύ χαμηλές αγωγιμότητες λόγω της αδυναμίας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων.

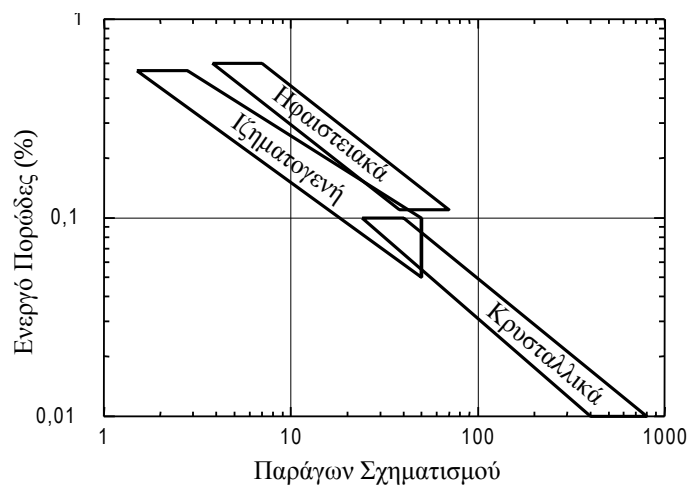
Περισσότερες μελέτες έχουν γίνει σε ιζηματογενή πετρώματα, κυρίως λόγω της σπουδαιότητάς τους ως ξενιστών (ταμιευτήρων) κοιτασμάτων υδρογονανθράκων και φυσικού αερίου. Αρκετές μελέτες της σχέσης αγωγιμότητας-πορώδους έχουν επίσης γίνει και επί εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Σε κάθε περίπτωση, ο νόμος του Archie φαίνεται να ισχύει ικανοποιητικά.

Κατά την διερεύνηση γεωθερμικών συστημάτων, πολλές φορές ανέκυψε το πρόβλημα της εκτίμησης της αγωγιμότητας σχηματισμού που περιέχει

⁸ Ο νόμος του Archie διατυπωμένος ως άνω υποδεικνύει ότι η μεταβολή του παράγοντα σχηματισμού με το πορώδες είναι *αυτο-όμοια* (self-similar) *μορφοκλασματική* (fractal) και περιγράφει νόμο μεταβολής του κλασματικού όγκου του πορώδους, χαρακτηριστικό του εκάστοτε υλικού. Σημαίνει επίσης ότι το πορώδες σχηματίζει συνεχές δίκτυο. Εναλλακτική μορφή του νόμου είναι $F = \alpha(\phi - \phi_0)^{-m}$, οπότε οφείλει να υπάρχει ένα ελάχιστο πορώδες ϕ_0 , προτού οι πόροι αρχίσουν να διασυνδέονται και σχηματίσουν συνεχές δίκτυο.

Πίνακας 2.2.⁹ Μορφές του νόμου του Archie, χρήσιμες όταν η λιθολογία είναι γνωστή.

Περιγραφή Πετρώματος	a	m
Χαλαρά συνδεδεμένα πετρώματα και σχηματισμοί (άμμοι, ψαμίτες και τύποι ασβεστολίθων) με πορώδες 25-45%.	0.88	1.37
Μετρίως συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα περιλαμβανομένων των ψαμιτών και ασβεστολίθων με πορώδες 18-35%.	0.62	1.72
Καλά συγκολλημένα και διαγεννημένα πετρώματα με πορώδες 5-25%.	0.62	1.95
Πομφολυγώδη - εξαιρετικά πορώδη ηφαιστειακά πετρώματα (τόφοι, λάβες άα, παχόεχθε κλπ.) με πορώδες 20-80%	3.5	1.44
Πυκνά εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα με πορώδες < 4%	1.4	1.58

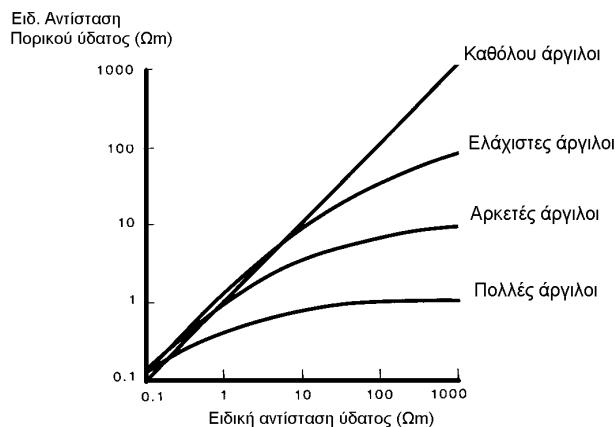


Εικόνα 2.4.¹⁰ Γενική σχέση μεταξύ του πορώδους και του παράγοντα σχηματισμού

μερικό τμήμα. Και σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Archie χρησίμευσε ως βάση εκκίνησης για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της αγωγιμότητας και του κλασματικού τήγματος.

⁹ ibid. Keller, 1987.

¹⁰ Τροποποιημένη από Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966. "Electrical Methods of Geophysical Prospecting". Pergamon Press, Oxford



Εικόνα 2.5.¹¹ Επίδραση της αλατότητας που προστίθεται από ορυκτά των αργίλων, σε υδάτινο ηλεκτρολύτη πληρουντά τους πόρους πετρώματος.

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται συνοπτικά το εύρος διακύμανσης της σχέσης του πορώδους με τον λογάριθμο του παράγοντα σχηματισμού για τρεις βασικές κατηγορίες πετρωμάτων. Τέτοιες γραφικές παραστάσεις είναι πολύ χρήσιμες για την πρόβλεψη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και χαρακτηρισμό των πετρωμάτων με βάση ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Τυπικές τιμές των σταθερών a και m δίδονται στον Πίνακα 2.2.

Επιφανειακή αγωγιμότητα - επίδραση των ορυκτών των αργίλων.

Στην μέχρι τούδε ανάλυση υποθέσαμε ότι η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη είναι ομοιόμορφη και ομοιόμορφα κατανεμημένη στον χώρο των πόρων. Η συνθήκη αυτή προσεγγιστικά ισχύει για αρκετά ιζηματογενή πετρώματα που δεν περιέχουν αργιλικά ορυκτά. Αντιθέτως, σε πολλά πετρώματα υπάρχουν πρόσθετα ιόντα στην ρευστή φάση, κοντά στις επαφές του ηλεκτρολύτη με την στερεά φάση: ο ηλεκτρολύτης αλληλεπιδρά με τα πετρογενετικά ορυκτά και μεταβάλλει την *in situ* αλατότητα.

Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότατο σε πετρώματα με αργιλικά ορυκτά, τα οποία συνηθέστατα περιέχουν φορτισμένες πλεγματικές ατέλειες (μολύνσεις), όπως για παράδειγμα Al^{3+} που αντικαθιστά Si^{4+} . Το προκύπτον έλλειμμα φορτίου αντισταθμίζεται με προσρόφηση κατιόντων στην επιφάνεια του ορυκτού, πράγμα που απολήγει στον σχηματισμό μίας διάχυτης ηλεκτρικής διπλής στοιβάδας πάχους 30 - 80 Å από την επιφάνεια του ορυκτού¹². Η

¹¹ Τροποποιημένη από Keller, G.V., 1987, Rock and Mineral Properties, in M.N. Nabighian (ed.), *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, Vol. 1, SEG Series: Investigations in Geophysics No 3, Tulsa, Oklahoma

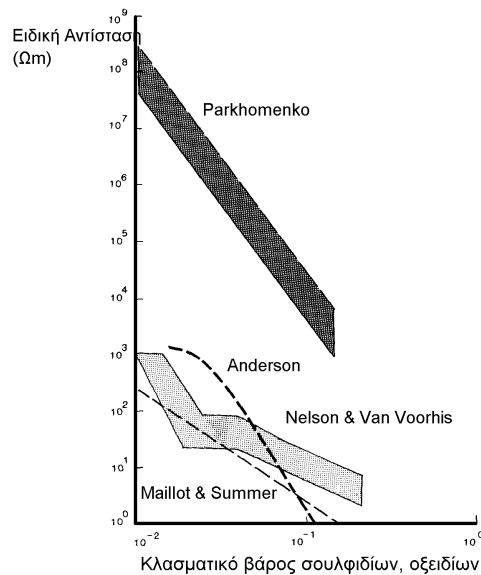
¹² Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *υδρόλυση*: ιόντα που στο πλέγμα των ορυκτών των αργίλων καταλαμβάνουν θέσεις ανταλλαγής, αποδεσμεύονται στον πορώδη η-

επιφανειακή αγωγιμότητα οφείλεται στα ιόντα αυτής της διπλής στοιβάδας. Εάν ο πόρος είναι πλήρης ηλεκτρολύτη και εφαρμοσθεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τα ιόντα της διάχυτης διπλής στοιβάδας μετατοπίζονται κατά μήκος των επαφών. Επειδή το πάχος της στοιβάδας είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μέγεθος του πόρου, η επιφανειακή ροή ρεύματος εντοπίζεται κοντά στις επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών και είναι ανάλογη του εμβαδού των. Έτσι, το μέγεθος της αλατότητας που προστίθεται με αντιδράσεις ανταλλαγής ιόντων εξαρτάται από την ποσότητα των διαθεσίμων προς ανταλλαγή ιόντων, δηλαδή από το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών εντός του πετρώματος. Σε γενικές γραμμές, τα ιόντα που διατίθενται στον ηλεκτρολύτη μέσω τέτοιων αλληλεπιδράσεων θέτουν ένα κατώφλι αγωγιμότητας (μία ελάχιστη αγωγιμότητα) για κάθε πορώδες πέτρωμα, ώστε ακόμη και η παρουσία καθαρού (απεσταγμένου) ύδατος να το καθιστά μετρίως αγωγίμο. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5 για την περίπτωση των αργιλικών ορυκτών.

2.4 Μίγματα αγωγίμων και αντιστατικών ορυκτών (μεταλλοφορία)

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις πολύ αγωγίμων ορυκτών είναι λιγότερο γνωστές από τις αντίστοιχες ιδιότητες των ηλεκτρολυτικών αγωγών. Και στην περίπτωση αυτή, η γεωμετρία της κατανομής των αγωγίμων ορυκτών αναμένεται να διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο στην ολική αγωγιμότητα του πετρώματος. Λιγότερη γνώση υπάρχει επίσης και για την επίδραση της μορφής και περιβολής των αγωγίμων κρυστάλλων επί της αγωγιμότητας, αν και έχει διαπιστωθεί ότι ο γωνιώδης αιματίτης ελαττώνει την ειδική αντίσταση ενός πετρώματος πολύ περισσότερο από ότι ο κοκκώδης. Είναι επίσης γνωστό ότι, ακόμη και μικρές συγκεντρώσεις γραφίτη καθιστούν ένα πέτρωμα πολύ αγωγίμο, λόγω της τάσης του γραφίτη να σχηματίζει συνεχή λεπτά φύλλα κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Πολλά ορυκτά που είναι γνωστό ότι καθιστούν τα ξενίζοντα πετρώματα αγωγίμα, εμφανίζονται υπό μορφή δενδριτών, συνήθως σχηματισθέντων με υδροθερμική μεταφορά και απόθεση μέσω του διασυνδεδεμένου δικτύωματος των πόρων. Σε γενικές γραμμές, οι εργαστηριακές μετρήσεις επί ξηρών δειγμάτων μεταλλοφόρων πετρωμάτων δείχνουν ότι οφείλει

ηλεκτρολύτη και αυξάνουν την ολική αλατότητα. Τα ιόντα αυτά όμως, δεν μπορούν να απομακρυνθούν τελείως, και όταν για κάποιο λόγο το ρευστό αφαιρεθεί από το πέτρωμα, τα ιόντα παραμένουν και επαναδεσμεύονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του ορυκτού.



Εικόνα 2.6.¹³ Σχέσεις μεταξύ αγωγιμότητας του πετρώματος και της συγκέντρωσης αγωγίμων ορυκτών εντός αυτού. Τα δεδομένα της Parkhomenko προέρχονται από εργαστηριακές μετρήσεις πυριτικών πετρωμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες (200°C). Οι μετρήσεις του Anderson έγιναν επί διαβρόχων δειγμάτων μεταλλοφορίας εντός γάββρου. Οι άλλες δύο μελέτες αναφέρουν αποτελέσματα από *in situ* μετρήσεις σε πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού.

- Anderson, L.A., 1960. Electrical properties of sulfide ores in igneous and metamorphic rocks near East Union, Maine, in *Short papers in the Geological Sciences: Paper 400B*, 125-128.
- Nelson P.H. and Van Voorhis, G.D., 1983. Estimation of sulfide content from induced polarization data, *Geophysics*, 48, 62-75.
- Parkhomenko, E.I., 1967. *Electrical properties of rocks*. Plenum Press.
- Parkhomenko, E.I., 1982. Electrical resistivity of minerals and rocks at high temperature and pressure. *Rev. Phys. Space Phys.*, 29, 2, 193-218.

να υπάρχει σημαντική συγκέντρωση αγωγίμων ορυκτών ώστε αυτά να αρχίσουν να σχηματίζουν διασυνδεδεμένο δικτύωμα, πριν το πέτρωμα αρχίσει να γίνεται αισθητά αγωγίμο.

Η Εικόνα 2.6 συνοψίζει δεδομένα τριών εκτεταμένων μελετών επί της αγωγιμότητας μεταλλοφόρων κοιτασμάτων συναρτήσει της περιεκτικότητας τους σε μεταλλικά ορυκτά. Όπως φαίνεται αρκετά καθαρά, παρατηρείται

¹³ Πηγή: Keller, G.V., 1987. Rock and mineral properties, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 1, M. N. Nabighian (ed), SEG series Investigations in Geophysics No 3.

δραματική αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας όταν ο κλασματικός όγκος των ορυκτών αυξηθεί άνω του 10%.

2.5 Διηλεκτρική αγωγιμότητα.

Εάν σε δεδομένο υλικό μέσο εφαρμοσθεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τότε εκτός από την ροή ελευθέρων φορτίων (ρεύμα αγωγιμότητας), επέρχεται *πόλωση*, δηλαδή εξαναγκασμένη τοπική ανακατανομή *δεσμευμένων* φορτίων σε νέες θέσεις ισορροπίας, στις οποίες οι μεταξύ τους δυνάμεις Coulomb εξισορροπούν το εξωτερικό πεδίο. Η *μετατόπιση* αντιθέτων φορτίων $\pm q$ από τις θέσεις ουδέτερης ισορροπίας κατά απόσταση x εγείρει ηλεκτρική διπολική ροπή $q|x|$ με φορά από τα θετικά προς τα αρνητικά φορτία και παράγει επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο με φορά αντίθετη προς το εφαρμοζόμενο εξωτερικό. Ως *πόλωση P* ορίζεται ως η επαγόμενη ηλεκτρική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου, η οποία είναι χαρακτηριστική του εκάστοτε υλικού. Η *παράμετρος* που περιγράφει την πολωσιμότητα του υλικού (και συνεπώς τις ιδιότητες ενός διηλεκτρικού στερεού) είναι η *διηλεκτρική σταθερά* ή *ηλεκτρική διαπερατότητα*. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού περιγράφονται πλήρως από τα ηλεκτροστατικά μεγέθη :

η : *Ηλεκτρική πολωσιμότητα* (σε farad/m).

ϵ : *Διηλεκτρική σταθερά* (σε farad/m).

E : *Ένταση ηλεκτρικού πεδίου* (σε V/m).

P : *Ηλεκτρική πόλωση* (ηλεκτρική διπολική ροπή / μονάδα όγκου σε Cb/m²)

D : *Διηλεκτρική μετατόπιση* ή *ηλεκτρική διέγερση* (ηλεκτρική ροή /μονάδα επιφανείας, Cb/m²).

Στο σύστημα SI οι σχέσεις μεταξύ των ανωτέρω μεγεθών έχουν ως ακολούθως:

$$P = \eta E \quad D = \epsilon_0 E + P = E(\epsilon_0 + \eta) = \epsilon E$$

Ως *σχετική διηλεκτρική σταθερά* ορίζεται ο λόγος της ειδικής διηλεκτρικής σταθεράς εκάστου υλικού, προς την διηλεκτρική σταθερά του κενού: $K = \epsilon / \epsilon_0$.

Η πόλωση και συνεπώς η διηλεκτρική σταθερά των υλικών, οφείλεται σε αρκετές διαφορετικές φυσικές διεργασίες που λειτουργούν σε διαφορετικές κλίμακες και σκαριφηματικά απεικονίζονται στην Εικόνα 2.7. *Ηλεκτρονική πόλωση* παράγεται από την παραμόρφωση των ηλεκτρονιακών τροχιακών σε σχέση με τον ατομικό πυρήνα. *Ατομική* ή *Μοριακή* ή *ιονική πόλωση* επέρχεται από σχετική μετατόπιση φορτισμένων ιόντων ως προς άλλα. *Διπολική* ή *Μοριακή πόλωση* λαμβάνει χώρα σε υλικά που περιέχουν πολικά μόρια,

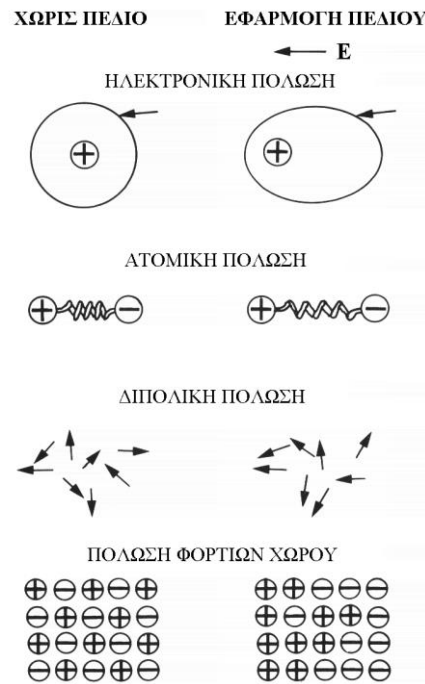
δηλαδή μόρια με ασύμμετρο δομή τα οποία εμφανίζουν διπολική ροπή.¹⁴ Τέλος, *πόλωση φορτίων χώρου* λαμβάνει χώρα υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου, όταν εντός του υλικού υπάρχουν διαφόρων τύπων φορτία που μπορούν να μετατοπισθούν ή και μετακινηθούν. Είναι προφανές ότι εάν το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο αλλάξει πολικότητα, οι διαφορετικοί μηχανισμοί πόλωσης αναπροσανατολίζουν τα φορτία, αποκρινόμενοι στην αλλαγή. Ο αναπροσανατολισμός των φορτίων δεν είναι ακαριαίος, αλλά για να ολοκληρωθεί απαιτεί κάποιο χρόνο (τον λεγόμενο *χρόνο ανακούφισης*). Σε περίπτωση που το εξωτερικό πεδίο είναι εναλλασσόμενο και μεταβάλλεται βραδέως, τα δεσμευμένα φορτία παρακολουθούν την εναλλαγή σε ισορροπία με την στιγμιαία τιμή του πεδίου. Όταν όμως το πεδίο εναλλάσσεται αρκούντως γρήγορα, και εφόσον ο χρόνος ανακούφισης είναι μακρύτερος της περιόδου του πεδίου, κάποιοι μηχανισμοί πόλωσης αδυνατούν να παρακολουθήσουν την εναλλαγή και ως εκ τούτου συμβάλλουν περιορισμένα στην ολική πόλωση. Επειδή τα φαινόμενα πόλωσης είναι προσθετικά, η ολική πόλωση και η διηλεκτρική σταθερά ελαττώνεται αυξανόμενης της συχνότητας. Η μέτρηση της συχνοτικής εξάρτησης της διηλεκτρικής σταθεράς προσφέρει ένα σημαντικό εργαλείο διερεύνησης των ιδιοτήτων ορυκτών και πετρωμάτων, εφόσον η απόκρισή τους σε διέγερση με διαφορετικές συχνότητες, παρέχει πληροφορία για την εσωτερική τους δομή.

Εάν το υλικό είναι ομογενές, τότε τα ελεύθερα φορτία εγείρουν εντός αυτού ρεύμα αγωγιμότητας. Εάν δεν είναι ομογενές και η κινητικότητα των ελευθέρων φορτίων μεταβάλλεται από θέση σε θέση, (π.χ. ασυνέχειες λόγω ατελειών ή μεταβολών του κρυσταλλικού πλέγματος), τότε θα δημιουργηθούν εναλλαγές περίσσειας και ελλείμματος φορτίου στις θέσεις των ασυνεχειών, οι οποίες εγείρουν πόλωση. Αυτός ο τύπος πόλωσης είναι συνηθέστατος σε ανομοιογενή ως ετερογενή υλικά, όπως τα πορώδη κεκορεσμένα πετρώματα.

Ρεύμα μετατόπισης. Η *εξαναγκασμένη* ταλάντωση παντός τύπου φορτίων εντός υλικού μέσου λόγω εφαρμογής εναλλασσόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου ισοδυναμεί με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, το *ρεύμα μετατόπισης*

$$J_D(\omega) = i\omega D(\omega) = i\omega \epsilon E(\omega).$$

¹⁴ Από όλα τα υλικά που απαντώνται εντός των γήινων πετρωμάτων, διπολικά μόρια έχουν σχεδόν αποκλειστικά, το H₂O και οι υδρογονάνθρακες. Το μόριο του ύδατος είναι ηλεκτρικό δίπολο, διότι τα θετικά φορτισμένα άτομα υδρογόνου είναι μετατοπισμένα ως προς το κέντρο της κατανομής του αρνητικού φορτίου που εντοπίζεται στον πυρήνα του οξυγόνου, σε τρόπο ώστε να σχηματίζεται γωνία H-O-H ίση προς 107° περίπου.



Εικόνα 2.7.¹⁵ Μηχανισμοί διηλεκτρικής πόλωσης

Δεδομένου ότι κανένα πραγματικό υλικό δεν έχει μηδενική ωμική αγωγιμότητα, θα συμπεριφέρεται ταυτόχρονα ως αγωγός και ως διηλεκτρικό. Έτσι, η ολική πυκνότητα ρεύματος θα δίδεται από το άθροισμα του ωμικού ρεύματος αγωγιμότητας και του ρεύματος μετατόπισης:

$$J_O(\omega) = \sigma E(\omega) + i\omega \epsilon E(\omega)$$

2.6 Ηλεκτρομαγνητικές σταθερές πετρωμάτων και γεωλογικών σχηματισμών

2.6.1. Ειδικές αντιστάσεις.

Από όλες τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών μονάδων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι αυτή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη και πολλές φορές

¹⁵ Τροποποιημένη από von Hippel, A.R., 1954, *Dielectrics and Waves*, Wiley, New York, σελ. 21-25.

ακραία διακύμανση, ακόμη και για το αυτό υλικό αναλόγως των συνθηκών. Αυτό άλλωστε καθίσταται προφανές από τους πίνακες και εικόνες που ακολουθούν. Αντιθέτως, το δυνατό εύρος μεταβολής ιδιοτήτων όπως η πυκνότητα, ταχύτητα ελαστικών κυμάτων κ.λ.π. είναι μάλλον μικρό.

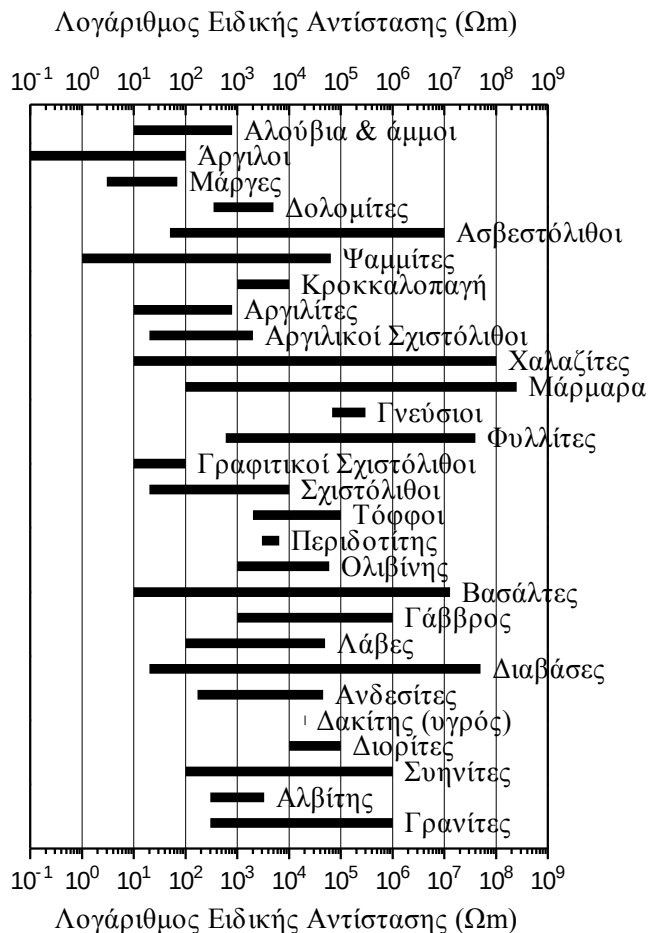
Ως *αγωγός* συνήθως ορίζεται ένα υλικό με ειδική αντίσταση μικρότερη των $10^{-5} \Omega\text{m}$, ενώ *μονωτής* είναι ένα υλικό με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των $10^7 \Omega\text{m}$. Μεταξύ των ορίων αυτών κατανέμονται οι *ημιαγωγοί*. Σύμφωνα με αυτήν την ταξινόμηση, τα μέταλλα και ο γραφίτης είναι αγωγοί και μάλιστα χαρακτηρίζονται από ηλεκτρονική αγωγιμότητα : φέρουν μεγάλο αριθμό εξαιρετικώς κινητικών ελευθέρων ηλεκτρονίων. Οι ημιαγωγοί επίσης φέρουν ελεύθερα ηλεκτρόνια δια των οποίων άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά σε σαφώς μικρότερους αριθμούς από τους αγωγούς. Οι μονωτές είναι υλικά που χαρακτηρίζονται από ιονικούς δεσμούς, οι οποίοι δεν επιτρέπουν στα ηλεκτρόνια σθένους να μετακινηθούν¹⁶. Η γεωφυσική εθμικά ακολουθεί μία χαλαρότερη μεν, αλλά πιο πρακτική ταξινόμηση σε καλούς, ενδιάμεσους και πτωχούς αγωγούς ως ακολούθως

- α) Καλοί αγωγοί : (Γεωλογικές) ενότητες με ειδική αντίσταση $10^{-8} - 1\Omega\text{m}$
- β) Αγωγοί : Ενότητες με ειδική αντίσταση $1 - 10^7 \Omega\text{m}$
- γ) Πτωχοί αγωγοί : Ενότητες με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των $10^7\Omega\text{m}$

Η ομάδα (α) περιλαμβάνει τα μέταλλα, τον γραφίτη, τα σουλφίδια εκτός των σφαλερίτη κιναβάρεως και σπιρνίτη, όλα τα αρσενίδια και θειοαρσενίδια εκτός του SbAs_2 , τα αντιμονιούχα εκτός μερικών ενώσεων του μολύβδου, τα τελλουρίδια και μερικά οξείδια όπως ο μαγνησίτης, μαγγανίτης, πυρολουσίτης και ιλμενίτης. Τα περισσότερα οξείδια, μεταλλεύματα και ένυδρα πορώδη πετρώματα είναι ενδιάμεσοι αγωγοί. Τα κοινότερα πετρογενετικά ορυκτά, πυριτικά, φωσφορικά και τα ανθρακικά, νιτρικά θειικά, βορικά κ.λ.π., είναι πτωχοί αγωγοί.

Η Εικόνα 2.9 εμφανίζει τυπικές τιμές διακύμανσης της ειδικής αντίστασης για τους βασικούς τύπους πετρωμάτων και μη διαγεγεννημένων γεωλογικών σχηματισμών. Στην τελευταία περίπτωση, οι τιμές της ειδικής αντίστασης κυμαίνονται όπως αυτές των διαφόρων τύπων ρευστής φάσης (ύδατος),

¹⁶ Παράβαλε όμως με τα σχετικά περί ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας των στερεών διαλυμάτων.



Εικόνα 2.9 Διακύμανση ειδικών αντιστάσεων των κοινωτέρων τύπων πετρωμάτων. Ειδικά για τα εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα, σημειώσατε ότι οι μικρές τιμές ειδικής αντίστασης συνήθως αναφέρονται σε κεκορεσμένα πετρώματα, ενώ οι μεγαλύτερες σε ξηρά.

το οποίο προφανώς αποτελεί και τον βασικό φορέα αγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σ' αυτούς.

Σε γενικές γραμμές, τα εκρηξιγενή - και μάλιστα τα ηφαιστειακά - πετρώματα έχουν τις μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις και τα ιζηματογενή τις μικρότερες, με τα μεταμορφωμένα να καταλαμβάνουν τον ενδιάμεσο χώρο. Παρατηρήσατε όμως ότι γενικά υπάρχουν σημαντικές αλληλοεπικαλύψεις. Επιπλέον, οι ειδικές αντιστάσεις πολλών τύπων πετρωμάτων μεταβάλλονται σε άμεση συνάρτηση με την ηλικία και λιθολογία τους, αφού το ενεργό πο-

ρώδες και η αλατότητα τους εξαρτάται από αμφοτέρους τους ανωτέρω παράγοντες. Ακόμη και μικρές μεταβολές στην ποσοστιαία συμμετοχή της ρευστής φάσης μπορούν να έχουν τεράστια επίδραση στην ειδική αντίσταση του πετρώματος.

2.6.2. Διηλεκτρικές σταθερές.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η διηλεκτρική σταθερά είναι μέτρο της ηλεκτρικής πόλωσης ενός υλικού λόγω εφαρμοζόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτή μπορεί να είναι ηλεκτρονική, ιονική ή μοριακή. Το πρώτο είδος χαρακτηρίζει όλους τους μη-αγωγούς. Ιονικά ρεύματα μετατόπισης μπορούν να λάβουν χώρα σε πολλά πετρογενετικά ορυκτά, ενώ το ύδωρ και οι υδρογονάνθρακες είναι τα μόνα κοινά υλικά που εμφανίζουν μοριακή πόλωση, η οποία, σημειωτέον, είναι το ισχυρότερο από τα τρία φαινόμενα. Λόγω της αρκετά χαμηλής κινητικότητας των φορέων φορτίου, η μοριακή και ιονική πολώσεις είναι μάλλον ασήμαντες σε πολύ υψηλές συχνότητες. Έτσι, η διηλεκτρική σταθερά, η οποία είναι ανάλογος του βαθμού πόλωσης μεταβάλλεται αντιστρόφως με την συχνότητα και επιπλέον, είναι ενδεικτική του ποσοστού ύδατος που είναι παρόν στο υλικό εφόσον αυτό έχει σχετική διηλεκτρική σταθερά $K=80$ στις χαμηλές συχνότητες. Ο Πίνακας 2.4 εμφανίζει διηλεκτρικές σταθερές για διάφορα ορυκτά και πετρώματα.

2.6.3. Μαγνητικές διαπερατότητες.

Τα περισσότερα γήινα υλικά είναι διαμαγνητικά ή παραμαγνητικά. Σ' αυτά τα υλικά τα τροχιακά ηλεκτρόνια των ατόμων (μαγνητικά δίπολα) αυτοδιευθετούνται σε σχέση με το εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει, την εναλλασσόμενη μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου). Τα φαινόμενα πόλωσης στα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά είναι εξαιρετικά ταχεία. Επιπλέον, η συμβολή των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων στο ολικό πεδίο είναι πολύ μικρή. Ως εκ τούτου, η επίδραση της μαγνητικής διαπερατότητας μ στις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις είναι επίσης πολύ μικρή και δεν διαφέρει από αυτήν του κενού παρά μόνον μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες μέρη στο εκατομμύριο. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων μαγνητίτη, πυρροτίτη και ιλμενίτη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4.¹⁷

Διηλεκτρικές σταθερές ορυκτών και πετρωμάτων. Οι μετρήσεις έχουν γίνει σε συχνότητες άνω των 100kHz. Για πολύ χαμηλές συχνότητες, οι τιμές του Πίνακα 2.4 θα ήταν αυξημένες κατά 30% περίπου. Σε κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις (πάγος), τα αποτελέσματα είναι αυξημένα κατά αρκετές τάξεις μεγέθους.

Ορυκτό	Διηλεκτρική Σταθερά.	Πέτρωμα	Διηλεκτρική Σταθερά
Γαληνίτης	18	Περιδοτίτες	8.6
Σφαλερίτης	7.9 - 69.7	Νορίτες	61
Κορούνδιο	11-13.2	Χαλαζιακοί Πορφύρες	14-49.3
Κασσιτερίτης	23	Διαβάσες	10.5 - 34.5
Αιματίτης	25	Δακίτες	6.8 - 8.2
Ρουτίλιο	31-170	Γρανίτες (ξηροί)	4.8 – 18.9
Φθορίτης	6.2 - 6.8	Γάββροι	8.5 – 40
Απατίτης	7.4 - 11.7	Διορίτες	6
Βαρύτης	7 - 12.2	Σερπεντινίτες	6.6
Οψιδιανός	5.8 - 10.4	Γνεύσιοι	8.5
Θείο (αυτο-φυές)	3.6 - 4.7	Ψαμμίτες (υγροί-ξηροί)	4.7 - 12
Ορυκτό άλας	5.6	Συμπαγείς άμμοι (υγρές ως ξηρές)	2.9 - 105
Ανθρακίτης	5.6 - 6.3	Εδάφη (υγρά ως ξηρά)	3.9 - 29.4
Γύψος	5 - 11.5	Βασάλτες	12
Βήρυλος	5.5 - 11.5	Άργιλοι (υγρές ως ξηρές)	7 - 43
Βιοτίτης	4.7 - 9.3	Πετρέλαια	2.07 - .14
Επίδοτο	7.6 - 15.4	Ύδωρ (20°C)	80.36
Ορθόκλαστα	3 - 58	Πάγος	3 - 4.3
Πλαγιόκλαστα	5.4 - 7.1		
Χαλαζίας	4.2 - 5		
Ζιρκόνιο	8.6 - 12		

¹⁷ ibid. Telford et al., 1990, 1990, *Applied Geophysics*, σελ. 290.

3. ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΜΕΣΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ : ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Μέχρι τώρα, οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες της ύλης εξετάστηκαν ξεχωριστά. Στην πραγματικότητα όμως, οι φυσικές ιδιότητες που περιγράφονται από τις τρεις καταστατικές σχέσεις του ηλεκτρομαγνητισμού συνδυάζονται και διαμορφώνουν μία χαρακτηριστική παράμετρο που περιγράφει την συμπεριφορά και τρόπο διάδοσης και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εντός της ύλης, τον *κυματαριθμό* (*wavenumber*). Αν αντικαταστήσουμε τις τρεις καταστατικές σχέσεις στις εξισώσεις (1.1) και (1.2) λαμβάνουμε

$$\frac{\partial H_y(\omega, z)}{\partial z} = [\sigma + i\omega\epsilon] \cdot E_x(\omega, z), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial E_x(\omega, z)}{\partial z} = -i\omega\mu H_y(\omega, z) \quad (3.2)$$

Απαλοιφή του μαγνητικού πεδίου από τις (3.1) και (3.2) οδηγεί στην εξίσωση διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E_x(z, \omega)}{dz^2} &= i\omega\mu[\sigma + i\omega\epsilon]E_x(z, \omega) = 0 \\ \Leftrightarrow \frac{d^2 E_x(z, \omega)}{dz^2} &= k^2 E_x(z, \omega) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Με τον τρόπο αυτό, όλες οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των πετρωμάτων και η συχνότητα συμποσούνται σε μία παράμετρο που χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με το μέσο διάδοσης:

$$k^2 = i\omega\mu[\sigma + i\omega\epsilon] = i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon \quad (3.4)$$

Η παράμετρος k είναι ο *κυματαριθμός* του πεδίου.

3.1. Διάδοση σε ομογενή χώρο.

Η εξίσωση (3.3) επιδέχεται την απλή λύση

$$E_x = E_{x,0} e^{-kz}, \quad (3.5)$$

Η $E_{x,0}$ παριστάνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο αναφοράς εντός του μέσου, έστω το $z=0$. Η διάδοση γίνεται κατά την διεύθυνση

+z, με ιδιότητες που ρυθμίζονται από τον κυματαριθμό και εκφράζονται από την εκθετική εξάρτηση $\exp(-kz)$. Από τις (3.5) και (3.2) λαμβάνουμε

$$H_y = \frac{k}{i\omega\mu} e^{-kz} = H_{0,y} e^{-kz}.$$

Η κατανόηση της συμπεριφοράς του κυματαριθμού ως συνάρτησης της συχνότητας είναι σπουδαιότατη για την περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας και χρήσης των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων διασκόπησης. Ας δώσουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα: Τα φυσικά πετρώματα μπορούν, εν γένει, να θεωρηθούν διηλεκτρικά και παραμαγνητικά στερεά, έστω με $\epsilon \approx 9 \times 10^{-11}$ F/m ($\epsilon/\epsilon_0 \approx 10$), ενώ $\mu \approx \mu_0$. Τότε,

- ➔ Για συχνότητες στην περιοχή VLF, έστω $\omega = 2 \times 10^4$
- για $\sigma = 0,001$ S/m ($\rho = 1000 \Omega\text{m}$) $\Rightarrow k^2 \approx i2,5 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-8}$
 - για $\sigma = 1000$ S/m ($\rho = 0,001 \Omega\text{m}$) $\Rightarrow k^2 \approx i25 - 4 \times 10^{-8}$
- ➔ Για συχνότητες στην περιοχή VHF, έστω $\omega = 2 \times 10^8$
- για $\sigma = 0,001$ S/m ($\rho = 1000 \Omega\text{m}$) $\Rightarrow k^2 \approx i2,5 \times 10^{-1} - 4,52$
 - για $\sigma = 1000$ S/m ($\rho = 0,001 \Omega\text{m}$) $\Rightarrow k^2 \approx i2,5 \times 10^5 - 4,52$

Όπως είναι προφανές, σε σχετικά χαμηλές συχνότητες, ή σε αγωγιμα μέσα ή σ' αμφοτέρω τα ανωτέρω, ο όρος που περιγράφει τα ρεύματα μετατόπισης είναι αμελητέος σε σύγκριση με αυτόν που περιγράφει τα ρεύματα αγωγιμότητας. Αντιθέτως, το ρεύμα μετατόπισης κυριαρχεί σε υψηλές συχνότητες και αντιστατικά σώματα. Επίσης είναι εμφανές ότι μόνο σε αγωγίμους γεωλογικούς σχηματισμούς λαμβάνουν τα ρεύματα αγωγιμότητας αξιόλογες τιμές. Συνεπώς, το HM πεδίο αποσβέννεται ελάχιστα εντός ύλης χαμηλής αγωγιμότητας, ενώ αντιθέτως αποσβέννεται ταχύτατα εντός ύλης υψηλής αγωγιμότητας.

Όταν σε χαμηλές συχνότητες το ρεύμα μετατόπισης είναι αμελητέο, το παραλείπουμε θεωρώντας το HM πεδίο σε *σχεδόν-στατική (quasi-static) κατάσταση*, όπου μόνον τα ρεύματα αγωγιμότητας έχουν σημασία. Στις συνθήκες αυτές το HM πεδίο διαδίδεται *διαχυτικά* και ο κυματαριθμός λαμβάνει την προσεγγιστική τιμή

$$k^2 \approx i\omega\mu\sigma \quad \Rightarrow \quad k = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} + i\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{1}{\delta}(1+i) \quad (3.6)$$

όπου η ποσότητα

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.7)$$

έχει μονάδες μήκους και ορίζεται ως το *επιδερμικό βάθος*¹⁸ (*skin depth*). Εάν αντικαταστήσουμε την (3.7) στην (3.5), έχουμε

$$E_x = E_{x,0} e^{-k\delta} = E_{x,0} e^{-1-i} = (E_{x,0} e^{-i})/e,$$

δηλαδή μέσα σε απόσταση δ το πεδίο έχει αποσβεσθεί κατά παράγοντα $1/e$. Το επιδερμικό βάθος αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης. Τέλος, ο λόγος

$$\zeta = \frac{E_x}{H_y} = \frac{i\omega\mu}{k} = \frac{i\omega\mu\delta}{1+i} \quad (3.8)$$

παριστά την *χαρακτηριστική εμπέδηση* (*specific impedance*), ή *χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση* του μέσου διάδοσης. Τελικά, με χρήση του κανόνα του De Moivre, έχουμε

$$\zeta = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{i\frac{\pi}{4}}.$$

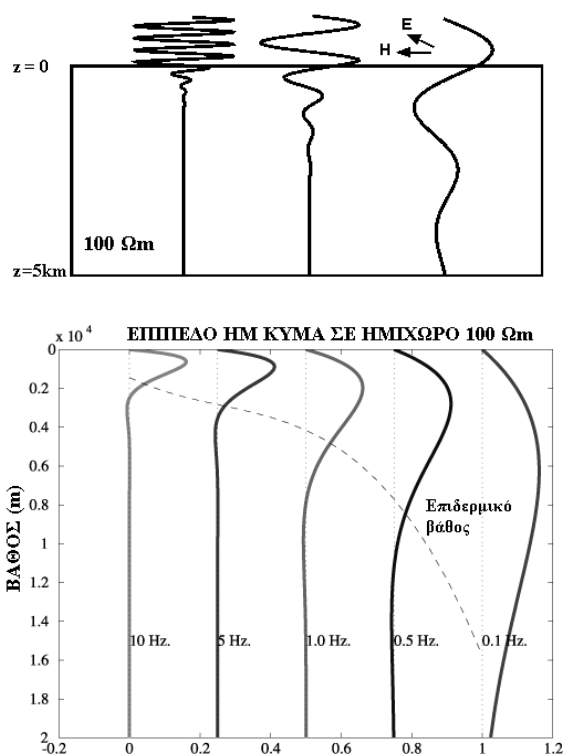
Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο βρίσκονται σε σταθερή μεταξύ τους χρονική υστέρηση (*διαφορά φάσης*) ίση προς $\pi/4$, ενώ αποσβένονται υφιστάμενα ελάττωση πλάτους κατά $1/e$ σε απόσταση δ . Για σταθερή γωνιακή συχνότητα ω , σε *αντιστατικά* μέσα, (μικρή σ , μεγάλη δ), το πεδίο διαχέεται σε *μεγάλη* απόσταση χωρίς αξιόλογη εξασθένηση, ενώ σε *αγώγιμα* μέσα, (μεγάλη σ , μικρή δ), το πεδίο *αποσβέννεται ταχέως* η ένταση του πεδίου είναι επαρκής να μετρήσει αποστάσεις συγκρίσιμες με ελάχιστα μόνον επιδερμικά βάθη και η απόσβεση είναι πολύ έντονη. Η συνθήκη αυτή είναι γνωστή ως *επαγωγικό όριο* (*inductive limit*) των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων και στις χαμηλές συχνότητες, το επιδερμικό βάθος επίσης αποκαλείται *ηλεκτρική μονάδα μήκους*. Η Εικόνα 3.1 παρέχει γραφική αναπαράσταση του επιδερμικού φαινομένου στις ULF, εικονίζοντας τη διάχυση του ηλεκτρικού πεδίου σε ομογενή ημχώρο ειδικής αγωγιμότητας 0.01S/m (ειδικής αντίστασης 100Ωm).

Στον αντίποδα, στις υψηλές συχνότητες και υψηλές αντιστάσεις, ο κυματαριθμός γίνεται

$$k^2 \approx -\epsilon\omega^2 \quad (3.9)$$

Υπό αυτές τις συνθήκες, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαδίδεται ως ακτινοβολία, χωρίς σημαντική απόσβεση και έχει την μορφή της Εικόνας 1.1.

¹⁸ Προσέξτε ότι ο κυματαριθμός έχει διαστάσεις *αντιστρόφου μήκους*.



Εικόνα 3.1. Διάχυση του ηλεκτρικού πεδίου σε ομογενή ημιχώρο. Θεωρούμε ότι επίπεδο ΗΜ κύμα ακτινοβολίας σε συχνότητες ULF, διαδιδόμενο κατά τον άξονα z σε ελεύθερο ημιχώρο ($\sigma=0$, μηδενικό ρεύμα αγωγιμότητας, βλ. Εικόνα 1.1), εισέρχεται σε ομογενή αγώγιμο ημιχώρο ($\sigma = 0.01$ S/m, αμελητέο ρεύμα μετατόπισης) και συνεχίζει να πορεύεται κατά τον άξονα z διαχεόμενο και απορροφούμενο. Το επάνω διάγραμμα δίνει σκαριφηματική εικόνα της κατάστασης και το κάτω βασίζεται σε πραγματικούς υπολογισμούς. Παρατηρήσατε ότι οι χαμηλότερες συχνότητες διεισδύουν βαθύτερα από τις υψηλότερες, πράγμα που αποτελεί την βάση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης.

Στην ενδιάμεση περιοχή συχνοτήτων, εκεί όπου ούτε τα ρεύματα μετατόπισης, ούτε τα ρεύματα αγωγιμότητας μπορούν να αγνοηθούν, η συμπεριφορά του πεδίου είναι αρκετά περίπλοκη. Οδεύοντα κύματα του τύπου αυτού χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η απόσταση (βάθος) υπεδαφικών ανακλαστήρων: αυτή είναι η ζώνη λειτουργίας του *γεωραντάρ* (*ground penetrating radar*). Το μέσο σημείο της μεταβατικής αυτής ζώνης ορίζεται από την συνθήκη

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = 1$$

η οποία προσδιορίζει ότι τα ρεύματα μετατόπισης και αγωγιμότητας συμβάλλουν ισοδυνάμως στον κυματαριθμό. Ο ανωτέρω λόγος είναι γνωστός ως *παράγων απόσβεσης ή παράγων απώλειας (loss factor)*, δεδομένου ότι αυξάνει εις μέγεθος συναρτήσει της αύξησης της σπουδαιότητας των ρευμάτων αγωγιμότητας.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω σε σχέση με την εφαρμοσιμότητα και αποτελεσματικότητα των ΗΜ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, σημειώνεται ότι η συχνότητα (ή ο χρόνος) είναι ουσιαστικά η μόνη παράμετρος που ελέγχει ο γεωφυσικός και η καλή επιλογή της είναι απαραίτητη για σωστή και χρήσιμη διασκόπηση. Όταν επιλέγουμε χαμηλές συχνότητες (VLF ως dc), αναγκαστικά εστιάζουμε την προσοχή μας στην κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας του υπεδάφους.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, θεμελιώδης ιδιότητα των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης είναι, ότι έχουν εκ φύσεως καλύτερη δυνατότητα ανίχνευσης αγωγίων, παρά αντιστατικών γεωλογικών δομών. Όταν επιλέγουμε υψηλές συχνότητες, (VHF - UHF), τότε σε αγωγία υλικά η απορρόφηση του ΗΜ πεδίου είναι ταχύτατη, το βάθος διείσδυσης εξαιρετικά μικρό και τα αποτελέσματα πτωχά, ενώ σε αντιστατικά υλικά αναγκαστικά εστιάζουμε στην μελέτη της κατανομής της διηλεκτρικής σταθεράς συγχρόνως επιτυγχάνοντας σχετικά μεγαλύτερα βάθη διείσδυσης. Εξυπακούεται ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν πολύ υψηλές συχνότητες, (δηλαδή το γεωραντάρ και οι παραλλαγές του), είναι εξαιρετικά ευαίσθητες και πρακτικά μη εφαρμόσιμες παρουσία υλικών υψηλής αγωγιμότητας.

Στο σχεδόν-στατικό όριο η διάδοση του ΗΜ πεδίου γίνεται διαχυτικά και είναι σχεδόν αδύνατη η ανίχνευση πεδίων ακτινοβολίας. Αντιθέτως, σε υψηλές συχνότητες και αντιστατικά μέσα, η διάδοση του πεδίου γίνεται κυρίως δι' ακτινοβολίας, εφόσον κυριαρχεί το ρεύμα μετατόπισης. Λόγω των διαφορετικών συνθηκών διάδοσης (που άλλωστε περιγράφονται και από τις αντίστοιχες εξισώσεις), οι δύο καταστάσεις του πεδίου είναι σημαντικά διαφορετικές και απαιτούν πολύ διαφορετική ανάλυση και ερμηνεία. Στο παρόν θα δοθεί έμφαση στις μεθόδους χαμηλών συχνοτήτων, οι οποίες άλλωστε είναι πολυάριθμες, ευρύτατα διαδεδομένες και στόχο έχουν να ανιχνεύουν μεταβολές της ειδικής αγωγιμότητας. Η μόνη διαθέσιμη μέθοδος σχετικά υψηλών συχνοτήτων (γεωραντάρ) έχει καταστεί εξαιρετικά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια και είναι ιδιαιτέρως αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σωστά, αλλά οι φυσικές και τεχνικές ιδιαιτερότητες που συνεπάγεται θα παρουσιασθούν ξεχωριστά.

3.2. Διάδοση σε μη-ομογενή χώρο

Είναι αυτονόητο ότι η Γη δεν μπορεί να προσεγγισθεί ρεαλιστικά με ένα ομογενή, συνεχή αγωγίμο χώρο, όπως αυτός που θεωρήσαμε ανωτέρω για διδακτικούς σκοπούς. Η πραγματική Γη είναι ανομοιογενής και κατά κανόνα, στις περισσότερες ΗΜ μεθόδους θεωρούμε την δομή της (*γεωηλεκτρική δομή*) ως *μη-ομογενή ή ανομοιογενή κάτω ημιχώρο*, με οροφή την μονωτική ατμόσφαιρα. Απλούστερα, η δομή θεωρείται απαρτιζόμενη από γειτνιάζοντα μεγάλα τεμάχια έκαστο των οποίων είναι ομογενές, αλλά όχι απαραίτητα ιστροπικό. Σε γενικές γραμμές, αλλά όχι πάντοτε, οι μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων συμπίπτουν με γεωλογικές επαφές ή ασυνέχειες, εντοπισμός και περιγραφή των οποίων είναι και ο σκοπός της διασκόπησης.

Η φυσική της διάδοσης ΗΜ πεδίων δια των επαφών ομογενών μέσων είναι αρκετά απλή, αλλά η μαθηματική περιγραφή της αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από την γεωμετρία του πεδίου, η οποία πάλι είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της πηγής, της απόστασης από την πηγή και της γεωμετρίας της γεωηλεκτρικής δομής. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εισαγωγική παρουσίαση θα παραλειφθούν οι περίπλοκες μαθηματικές διατυπώσεις και θα δοθεί μόνο μία σύντομη περιγραφή των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την διέλευση μίας ΗΜ διαταραχής δια μέσου ασυνεχειών στην αγωγιμότητα μεταξύ δύο ομογενών μέσων.

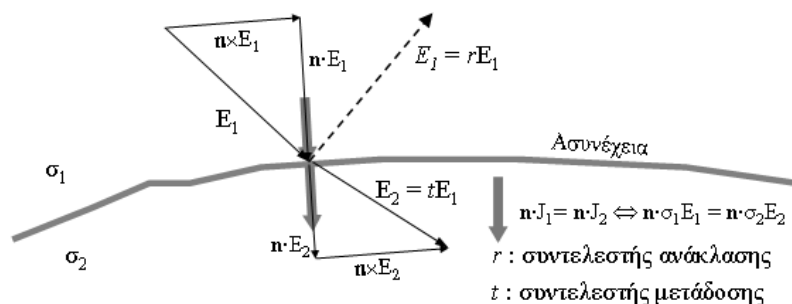
Όταν το πεδίο διαδίδεται σε μέσο 1 με ιδιότητα σ_1 και συναντήσει ασυνέχεια προς μέσο 2 με ιδιότητα σ_2 , τότε μέρος του ανακλάται και μέρος του διαθλάται στο μέσο 2, σύμφωνα με τον νόμο του Snell. Ανάκλαση και διάθλαση λαμβάνει χώρα διότι η φασική ταχύτητα και ο ρυθμός απόσβεσης είναι διαφορετικός στα δύο μέσα. Είναι εύκολο να δειχθεί ότι ο συντελεστής ανάκλασης μεταξύ των δύο μέσων είναι

$$r = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\zeta_2 + \zeta_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

και ο συντελεστής μετάδοσης $t = 1 - r$.

Σχηματική αναπαράσταση των φαινομένων δίδεται στην Εικόνα 3.2 και θα τα περιγράψουμε ξεκινώντας από την απλή παρατήρηση ότι κατά την διάρκεια της μετάβασης από το ένα μέσο στο άλλο οφείλει να ισχύει η αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Αφού δεν υπάρχουν πηγές ή καταναλωτές, όση ενέργεια προσπίπτει στην ασυνέχεια, τόση την εγκαταλείπει, ώστε η ολική ροή να είναι σταθερή.

Από τον νόμο του Ohm η πυκνότητα ενέργειας είναι ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος, άρα η βασική συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται στην επαφή είναι ότι η πυκνότητα ρεύματος που προσπίπτει στην ασυνέχεια πρέπει να είναι ίση προς την πυκνότητα ρεύματος που την εγκαταλείπει. Δεδομένου ότι η πυκνότητα ρεύματος είναι διαφορετική στα δύο μέσα (τα οποία



Εικόνα 3.2. Οριακές συνθήκες στην επαφή δύο μέσων διαφορετικών ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων.

έχουν διαφορετικές αγωγιμότητες), για να ισχύσει η συνθήκη πρέπει να υπάρχει ένας ρυθμιστικός παράγων που να διευθετεί την ροή του ρεύματος. Ο παράγων αυτός είναι τα *επιφανειακά φορτία* (*surface charges*) τα οποία συσσωρεύονται στη επαφή δύο μέσων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Η ύπαρξη ενός εξωτερικού πεδίου συγκεντρώνει και πολώνει αυτά τα φορτία κατά φορά αντίθετη προς τις δυναμικές του γραμμές. Στην προκειμένη περίπτωση αυτό μπορεί να γίνει *μόνο κάθετα* προς την ασυνέχεια, όπου η κάθετη συνιστώσα του προσπίπτοντος πεδίου διεγείρει μία *αντιηλεκτρεγερτική δύναμη ή τάση πολώσεως*, η οποία ρυθμίζει την συνέχεια της πυκνότητας ρεύματος και ενεργείας. Παράλληλα προς την ασυνέχεια, η πυκνότητα ρεύματος δεν μπορεί να είναι συνεχής, δεδομένου ότι δεν εγείρονται ρυθμιστικές τάσεις πολώσεως. Συνεπώς, η εφαπτομενική συνιστώσα του προσπίπτοντος πεδίου (παράλληλα προς την ασυνέχεια) οφείλει διατηρείται αναλλοίωτη και είναι συνεχής.

Το παραγόμενο πεδίο πολώσεως προστίθεται ανυσματικά στην κάθετη συνιστώσα του προσπίπτοντος και αποχωρούντος πεδίου και μεταβάλλει την έντασή της. Έτσι, στην σχετικά αγωγίμη πλευρά της ασυνέχειας, το ηλεκτρικό πεδίο ελαττώνεται σε σχέση με αυτό που θα υπήρχε χωρίς την επαφή και η (φαινόμενη πλέον) εμπέδηση θα εμφανίζει το μέσο αγωγιμότερο από την πραγματικότητα. Αντιστοίχως, το πεδίο στην σχετικά αντιστατική πλευρά της ασυνέχειας ενισχύεται και το μέσο αυτό φαίνεται περισσότερο αντιστατικό. Οι μεταβολές στην κάθετη συνιστώσα του πεδίου αλλάζουν και την διεύθυνση των δυναμικών γραμμών, εξ ου και το φαινόμενο της διάθλασης. Τέλος, η επί της ασυνέχειας τάση πόλωσης είναι το αίτιο των φαινομένων ανάκλασης.

Παρόμοιες συνθήκες ισχύουν για την διάδοση του μαγνητικού πεδίου, με την διαφορά ότι εδώ τον ρόλο των επιφανειακών φορτίων αναλαμβάνουν τα

στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα (τα περιστρεφόμενα τροχιακά ηλεκτρόνια των ατόμων) και οι διαφορές τους εκατέρωθεν της ασυνέχειας.

Τα ανωτέρω συνιστούν τις οριακές συνθήκες Dirichlet για την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εκατέρωθεν μιας ανομοιογενούς ασυνέχειας. Εάν $\mathbf{n}$ είναι ένα μοναδιαίο άνυσμα κάθετο προς την ασυνέχεια¹⁹, αυτές συνοψίζονται ως εξής:

$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$: Το Εφαπτομενικό Ηλεκτρικό Πεδίο είναι συνεχές.

$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$: Το Εφαπτομενικό Μαγνητικό Πεδίο είναι συνεχές.

$\mathbf{n} \cdot (\sigma_1 \mathbf{E}_1 - \sigma_2 \mathbf{E}_2) = 0$: Η Εγκάρσια Πυκνότητα Ρεύματος είναι συνεχής.

$\mathbf{n} \cdot (\mu_1 \mathbf{H}_1 - \mu_2 \mathbf{H}_2) = 0$: Η Εγκάρσια Μαγνητική ροή είναι συνεχής.

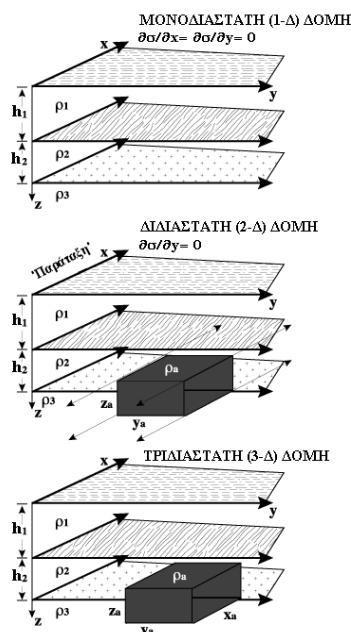
Στον χώρο μακράν της ασυνέχειας, τα φαινόμενα επαφής αποσβένυνται ταχέως και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συμπεριφέρεται όπως περιγράψαμε για διάδοση σε ομογενή χώρο.

Το παρόν εδάφιο θα κλείσει με σύντομη παρουσίαση των τριών τύπων μη-ομογενών γεωηλεκτρικών δομών, που με βάση την υπάρχουσα επιστημονική γνώση μπορούν να περιγραφούν με αναλυτικά μαθηματικά ή να προσομοιωθούν αριθμητικά με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Είναι ευνόητο και οφείλει να συνειδητοποιηθεί ό,τι τόσο η μαθηματική περιγραφή, όσο και η αριθμητική προσομοίωση, γίνονται με βάση ιδεατές αναπαραστάσεις της δομής που αποκαλούνται *προσομοιώματα* ή *μοντέλα* (από τον - δυστυχώς - δημοφιλή δάνειο αγγλικό όρο *model*). Σκαριφηματική απεικόνιση τέτοιων προσομοιωμάτων αυτών δίδεται στην Εικόνα 3.3.

Η απλούστερη περίπτωση είναι η *Μονοδιάστατη* (1-Δ) δομή, η οποία οφείλεται σε ασυνεχή μεταβολή της αγωγιμότητας συναρτήσει του βάθους (άξονας z) και αποτελείται από διαδοχικά στρώματα διαφορετικού πάχους και ηλεκτρικών ιδιοτήτων (Εικόνα 3.3, άνω). Στην περίπτωση αυτή η αγωγιμότητα είναι σταθερή κατά τους άξονες x και y , πράγμα που απλουστεύει σημαντικά την μαθηματική ανάλυση διότι όλες οι μεταβολές (μερικές παράγωγοι) κατά τις διευθύνσεις αυτές μηδενίζονται. Φυσικά γεωλογικά ανάλογα τέτοιων προσομοιωμάτων είναι τα αδιατάρακτα ιζήματα ανεξαρτήτως έκτασης, βάθους και γεωλογικού περιβάλλοντος στο οποίο ήθελαν δημιουργηθεί, αλλά και δυναμικοί γεωλογικοί σχηματισμοί όπως για παράδειγμα τα ασπιδωτά ηφαίστεια.

Διδιάστατη (2-Δ) γεωηλεκτρική δομή είναι η σημαντική εκείνη υποπερίπτωση, κατά την οποία ηλεκτρική ασυνέχεια υφίσταται συναρτήσει του βάθους (άξονας z) και κατά μήκος ενός μόνον των οριζοντίων αξόνων, ενώ η δομή εκτείνεται απεριόριστα κατά μήκος του ετέρου οριζοντίου άξονα. Έτσι

¹⁹ Τότε το εσωτερικό γινόμενο $\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_1$, εκφράζει την προβολή του προσπίπτοντος πεδίου $\mathbf{E}_1$ κάθετα προς την ασυνέχεια και το εξωτερικό γινόμενο $\mathbf{n} \times \mathbf{E}_1$ την προβολή του παράλληλα προς την ασυνέχεια.



Εικόνα 3.3. Οι τρεις περιπτώσεις ανομοιογενών προσομοιωμάτων της γεωηλεκτρικής δομής, που με βάση τα σύγχρονα δεδομένα, μπορούν να μελετηθούν αναλυτικά ή να προσομοιωθούν αριθμητικά

υπονοείται ότι η *πλευρική ανομοιογένεια* της αγωγιμότητας προκαλείται από επιμήκη σώματα ή δομές, όπως π.χ. ρήγματα, τάφροι, φλέβες κ.λ.π. Στην Εικόνα 3.3 (μέση) η διεύθυνση (*παράταξη*) της ηλεκτρικής ασυνέχειας συμπίπτει με τον άξονα x , οπότε η αγωγιμότητα μεταβάλλεται πλευρικά κατά τον άξονα y . Εξυπακούεται ότι η μερική παράγωγος της αγωγιμότητας μηδενίζεται κατά την διεύθυνση x , εφόσον η αγωγιμότητα δεν μεταβάλλεται.

Στην *τριδιάστατη* (3-Δ) δομή, η αγωγιμότητα μεταβάλλεται κατά μήκος όλων των αξόνων και δυνατόν να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα πεπερασμένα γεωηλεκτρικά τεμάχια (Εικόνα 3.3, κάτω). Στην περίπτωση αυτή καμία μερική παράγωγος δεν μηδενίζεται προς καμία διεύθυνση, πράγμα που όπως θα δούμε δυσκολεύει ακόμη περισσότερο την ανάλυση.

Χάριν πληρότητας σημειώνεται ότι σε αντιδιαστολή με την μονοδιάστατη, κοινό χαρακτηριστικό των διδιάστατων όσο και τριδιάστατων κατανομών αγωγιμότητας είναι η ανυπαρξία αναλυτικής μαθηματικής λύσης του προβλήματος διάδοσης του ΗΜ πεδίου, πλην ολίγων περιπτώσεων όπου η ανομοιογένεια οφείλεται σε σώματα απλής γεωμετρίας. Στις περιπτώσεις αυτές αναγκαστικά εφαρμόζονται τεχνικές αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Maxwell. Από μαθηματική άποψη, το γεωφυσικό πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής παραμένει δυσεπίλυτο.

4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ - ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Οι Ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης ανιχνεύουν την κατακόρυφη και οριζόντια κατανομή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, βασιζόμενες στα φαινόμενα της ενεργητικής ή παθητικής ΗΜ επαγωγής, κατά τα οποία ένα πηγαίο (πρωτεύον) μαγνητικό πεδίο διεγείρει την αγωγή Γη και επάγει πρωτεύοντα ηλεκτρικά και δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία, η ένταση και γεωμετρία των οποίων εξαρτάται από την ηλεκτρική δομή της Γης. Η διασκόπηση επιτυγχάνεται με ανάλυση της σχέσης μεταξύ των επαγόντων και επαγομένων πεδίων μέσω της κατασκευής κάποιας *συνάρτησης απόκρισης* της Γης, από την οποία εξάγεται πληροφορία για την γεωηλεκτρική δομή. Για τις πρακτικές (πραγματοποιήσιμες) πυκνότητες ρεύματος και μαγνητικής ροής, η Γη αποκρίνεται γραμμικά και έτσι, η συνάρτηση απόκρισης δεν είναι παρά κάποια μορφή λόγου του επαγομένου πεδίου προς το επάγον.

Προκειμένου να σχηματοποιήσουμε τα ανωτέρω, έστω πρωτεύον μαγνητικό πεδίο H_{Π} και έστω άγνωστη συνάρτηση Γ αντιπροσωπεύουσα την ηλεκτρική δομή του υπεδάφους στην γειτονία των μετρήσεων. Το δευτερεύον πεδίο προέρχεται από την αλληλεπίδραση του πρωτεύοντος με την γεωηλεκτρική δομή: $H_{\Delta} = H_{\Pi} * \Gamma$. Ο δέκτης μας μετρά το ολικό πεδίο $H_{\Pi} + H_{\Delta}$. Τότε, θεωρώντας λόγο της μορφής

$$Z = \frac{H_{\Pi} + H_{\Delta}}{H_{\Pi}} = \frac{H_{\Pi} + H_{\Pi} * \Gamma}{H_{\Pi}},$$

μπορούμε να απαλλαγούμε από τον πρωτεύον και να λάβουμε την *μετρήσιμη* συνάρτηση Z που περιέχει την ζητούμενη πληροφορία, βάσει της οποίας θα κατασκευάσουμε ερμηνευτικό προσομοίωμα της γεωηλεκτρικής δομής. Η συνάρτηση Z είναι η *συνάρτηση απόκρισης ή συνάρτηση μεταφοράς*²⁰.

Επειδή υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής πρωτεύοντος πεδίου και προσδιορισμού της σχέσης πρωτεύοντος-δευτερεύοντος, έχουν αντιστοίχως επινοηθεί πολλές τεχνικές και τεχνολογίες ΗΜ μεθόδων, εκάστη των οποίων βασίζεται σε διαφορετικό σύστημα πομπού και δέκτη. Για τον λόγο αυτό, στις ΗΜ μεθόδους οι όροι *μέθοδος* και *σύστημα* είναι *αλληλένδετοι* και σε πολλές περιπτώσεις *συνώνυμοι*.

²⁰ Εννοείται μεταφορά ενέργειας από το επάγον (πρωτεύον) προς το επαγόμενο πεδίο.

Η πλέον θεμελιώδης διάκριση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης βασίζεται στην θεώρηση της προέλευσης και μορφολογίας του πηγαίου πεδίου, αναλόγως των οποίων κατατάσσονται σε ΗΜ Φυσικού Πεδίου (ΗΜΦΠ), όταν το πηγαίο πεδίο παράγεται από φυσικές διεργασίες και διαθέτει άγνωστα και ασύμφωνα χαρακτηριστικά, και σε ΗΜ Ελεγχόμενης Πηγής (ΗΜΕΠ), όταν το πηγαίο πεδίο είναι τεχνητό και διαθέτει γνωστά χαρακτηριστικά. Οι πηγές των φυσικών ΗΜ πεδίων ευρίσκονται σχεδόν πάντοτε μακριά από το σημείο μέτρησης (βλ. Κεφ. 5). Οι ΗΜΕΠ χρησιμοποιούν ως πομπούς και δεκτές γεωμένα καλώδια μεγάλου μήκους, ή ορθογώνιους βρόχους μεγάλων διαστάσεων (μερικών εκατοντάδων μέτρων), ή μικρούς βρόχους οριζοντίως ή κατακορύφως διατεταγμένους (για παράδειγμα βλ. Εικόνα 4.1). Με ελάχιστες εξαιρέσεις όπως διεξοδικά θα περιγραφεί στα οικεία κεφάλαια, οι μετρήσεις λαμβάνονται κοντά στην πηγή (πομπό). Συνεπώς, οι διαφορετικές γεωμετρίες πομπού – δέκτη καθορίζουν τις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες των ΗΜΕΠ και την βασική διαφορά τους από τις ΗΜΦΠ. Έτσι,

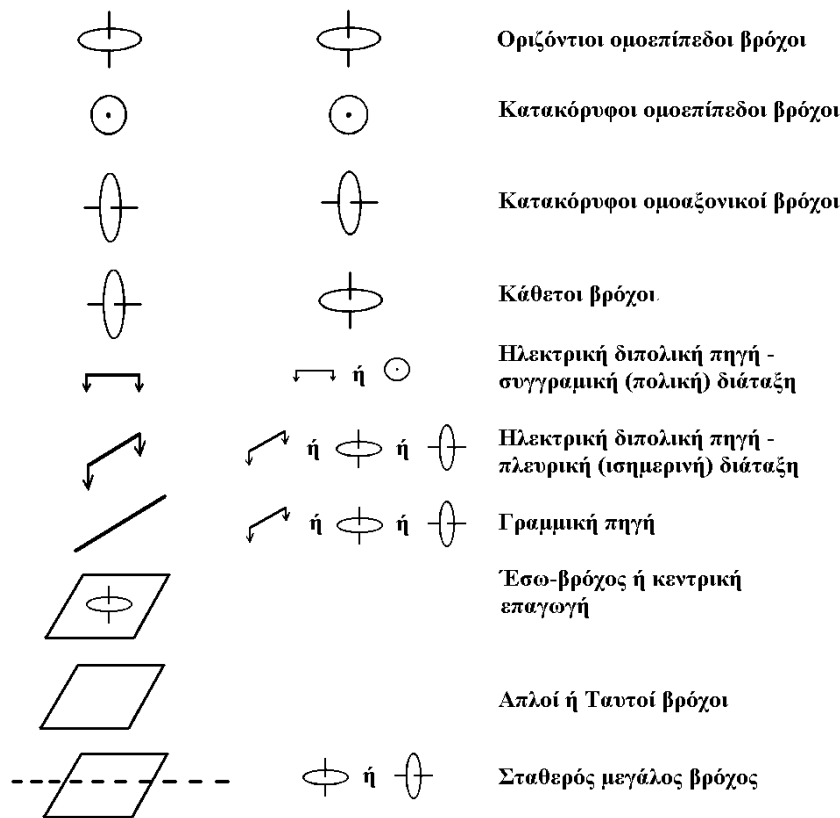
- Το πρωτεύον πεδίο όλων ανεξαιρέτως των ΗΜΦΠ είναι, ή προσομοιάζει *επίπεδο κύμα*, είτε διότι έτσι δημιουργείται, είτε διότι ο δέκτης ευρίσκεται στο *μακράν* πεδίο της πηγής, δηλαδή σε απόσταση πολλαπλάσια του μήκους κύματος του πρωτεύοντος (περαιτέρω πληροφορίες παρατίθεται στο επόμενο Κεφάλαιο 5).
- Αντιθέτως, δεδομένου ότι ο δέκτης κινείται στο *εγγύς πεδίο* της πηγής (δηλαδή σε απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος), το πρωτεύον πεδίο των ΗΜΕΠ είναι *καμπυλόγραμμο κύμα*²¹. Όπως θα αναπτυχθεί στο οικείο Κεφάλαιο 7, η γεωμετρία του πομπού καθορίζει την γεωμετρία του πρωτεύοντος και τον νόμο απόσβεσης, ενώ η γεωμετρία του δέκτη καθορίζει τον τύπο σύζευξης με τον πομπό και το είδος της απολήψιμης πληροφορίας.

Η διαφορά μεταξύ των ΗΜΦΠ και ΗΜΕΠ είναι θεμελιώδης, διότι τα επίπεδα κύματα υπακούουν διαφορετικούς (απλούστερους) νόμους διάδοσης και απόσβεσης από κύματα με καμπυλόγραμμο μέτωπο.

Οι ΗΜ μέθοδοι κατατάσσονται αναλόγως του τρόπου δημιουργίας και λήψης του πεδίου σε μεθόδους *πεδίου συχνότητας*, και σε μεθόδους *πεδίου χρόνου*.

Στις μεθόδους πεδίου συχνότητας το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο υπάρχει ή εκπέμπεται ως ημιτονοειδές κύμα μίας ή περισσοτέρων συχνοτήτων, τα δευτερεύοντα πεδία μετρώνται παρουσία του πρωτεύοντος και (αναγκαστικά) η απόκριση της Γης εξετάζεται σε μία σειρά διακριτών συχνοτήτων. Δεδομένου ότι οι φυσικές ΗΜ διεργασίες είναι συνεχείς και μη ελέγξιμες, οι

²¹ Εξαιρέση αποτελούν οι μέθοδοι VLF και AMT- Ελεγχόμενης Πηγής.



Εικόνα 4.1. Διαφορετικές διαμορφώσεις πομπού – δέκτη χρησιμοποιούμενες για ΗΜ διασκόπηση ελεγχόμενης πηγής.

μετρήσεις φυσικών πεδίων γίνονται αναγκαστικά παρουσία του πρωτεύοντος και οι ΗΜΦΠ είναι *όλες ανεξαιρέτως* μέθοδοι πεδίου συχνότητας.

Στις μεθόδους πεδίου χρόνου το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο εκπέμπεται ως ασυνεχής ακολουθία παλμών και η μέτρηση του δευτερεύοντος γίνεται απουσία του πρωτεύοντος, κατά το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών· η απόκριση της Γης εξετάζεται σε σειρά διακριτών χρόνων από την παύση της εκπομπής του πρωτεύοντος.

Η διάκριση μεταξύ πεδίων χρόνου και συχνότητας είναι πολύ σημαντικότερη στις ΗΜΕΠ, όπου η δυνατότητα ελέγχου της πηγής επέτρεψε την ανάπτυξη αμφοτέρων των κατηγοριών, οι οποίες άλλωστε είναι σημαντικά διαφορετικές εφόσον εκμεταλλεύονται διαφορετικές ιδιότητες των βασικών επαγωγικών διεργασιών. Οι ΗΜΕΠ πεδίου χρόνου παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα και γνώρισαν μεγάλη άνθηση κατά τις τελευταίες δεκαετίες,

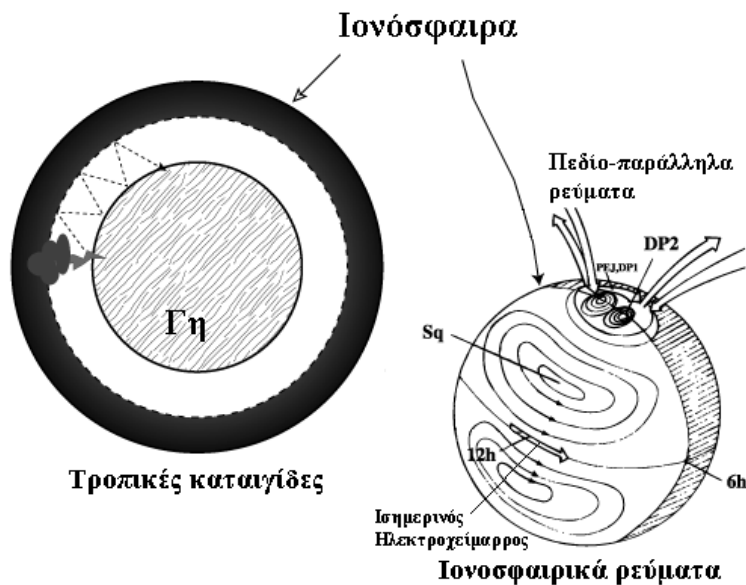
αλλά από ιστορική / τεχνολογική άποψη, τα συστήματα πεδίου συχνότητας, εμφανίσθηκαν πολύ ενωρίτερα δεδομένου ότι η διαχείριση και ανάλυση αρμονικών πεδίων είναι αρκετά απλούστερη από την αντίστοιχη ανάλυση παροδικών (παλμικών) πεδίων. Για τους ίδιους λόγους, θα αντιμετωπίσουμε τις δύο κατηγορίες μεθόδων χωριστά, ξεκινώντας από το απλούστερο και ευκολότερα κατανοητό πεδίο συχνότητας.

Οι ΗΜΕΠ γενικά δεν χρησιμοποιούνται για πολύ βαθιές διασκοπήσεις, (πέραν των μερικών εκατοντάδων μέτρων). Το βάθος διείσδυσης του ΗΜ πεδίου περιορίζεται από το μέγεθος της κεραίας του πομπού, διότι η εκπομπή σημάτων χαμηλής συχνότητας (μεγαλύτερου μήκους κύματος) απαιτεί κεραία μεγάλου μεγέθους. Εξυπακούεται ότι το μέγεθος των οργάνων που μπορούν να επιτύχουν πολύ μεγάλα βάθη διείσδυσης δυνατόν να καταστεί απαγορευτικό. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν σταθερούς (ηλεκτρικούς ή μαγνητικούς) διπολικούς πομπούς επιτυγχάνουν αρκετά βαθιά διασκόπηση χωρίς να απαιτούν μεγάλα ή δύσχρηστα μηχανήματα και ως εκ τούτου είναι πρακτικότερες. Σε γενικές γραμμές, αναλόγως και της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, το δραστικό βάθος διασκόπησης τέτοιων τεχνικών σπανίως προσεγγίζει το 1Km, ιδίως δε όταν υπάρχουν ζώνες υψηλής αγωγιμότητας. Για να επιτύχομε βαθιά ΗΜ διασκόπηση πρέπει να καταφύγουμε σε μεθόδους φυσικού πεδίου! Πάντως, το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ΗΜ μεθόδων σε σύγκριση με τις μεθόδους συνεχούς ρεύματος είναι η συνάρτηση του βάθους διασκόπησης από την συχνότητα, η οποία μεταβάλλεται χωρίς να απαιτείται αλλαγή της γεωμετρίας και του μεγέθους της διάταξης μετρήσεων. Έτσι ελαττώνεται σημαντικά το λειτουργικό κόστος, αυξάνει η παραγωγικότητα και παρακάμπτονται σημαντικά προβλήματα που συχνά δυσχεραίνουν την εκτέλεση γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων (ανώμαλο ανάγλυφο, πυκνή φυτοκάλυψη, μεγάλο ηλεκτρικό πάχος υπερκειμένων σχηματισμών κ.λ.π), ιδίως δε όταν απαιτείται εντοπισμός γεωλογικών στόχων σημαντικού βάθους.

5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Τα φυσικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία παράγονται από εξαιρετικά πολλές διαφορετικές διεργασίες και πηγές που εκτείνονται από τον πυρήνα της Γης μέχρι τα άκρα του Σύμπαντος. Χρήσιμες όμως για διασκόπηση με ΗΜΦΠ στην φασματική ζώνη 10^{-4} - 10^4 Hz είναι η *Μαγνητόσφαιρα-Ιονόσφαιρα* και η *Ατμόσφαιρα*. Μαγνητόσφαιρα είναι η περιοχή γύρω από την Γη, όπου το κύριο μαγνητικό πεδίο της Γης παγιδεύεται από τον ηλιακό άνεμο. Περιλαμβάνει την ιονόσφαιρα και την ατμόσφαιρα και περιέχει αέρια, ειδικότερα οξυγόνο και άζωτο σε συγκεντρώσεις που ελαττώνονται συναρτήσει του ύψους. Τα αέρια αυτά ιονίζονται από την υπεριώδη και λοιπή ηλιακή ακτινοβολία (δηλαδή μετατρέπονται σε πλάσμα), αλλά σε ύψη μικρότερα των 100 km η υψηλή πίεση αναγκάζει τα ιόντα να ανασυνδυασθούν ταχέως, ώστε τα αέρια να είναι περίπου ηλεκτρικώς ουδέτερα (Ατμόσφαιρα). Άνω των 100 km, τα ιόντα δεν επανασυνδέονται· η πυκνότητα των φορτισμένων σωματιδίων αυξάνει ταχέως μέχρι τα 250 km περίπου, και κατόπιν αρχίζει να ελαττώνεται συναρτήσει του ύψους και της ελαττούμενης πίεσης. Η περιοχή αυτή της σχετικά αυξημένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ονομάζεται Ιονόσφαιρα. Η Μαγνητόσφαιρα και η Ιονόσφαιρα είναι αγωγοί εντός των οποίων λαμβάνουν χώρα πολλά φαινόμενα αλληλεπίδρασης του πλάσματος με το μαγνητικό πεδίο της Γης, και τα οποία αποτελούν πηγές ακτινοβολίας ΗΜ πεδίων ULF (συχνότητες μέχρι 1 Hz) προς την Ατμόσφαιρα. Η Ατμοσφαιρική ηλεκτρική δραστηριότητα (κεραυνοί) είναι υπεύθυνη για την παραγωγή πεδίων συχνότητας άνω του 1 Hz (ULF - ELF), τα οποία διαδίδονται δια πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ της επιφάνειας της Γης και του δαπέδου της Ιονόσφαιρας. Συνοπτική σκαριφηματική αναπαράσταση των κυριοτέρων πηγών φυσικών ΗΜ πεδίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.

Τα πηγαία (πρωτεύοντα) μαγνητικά πεδία έχουν μορφή επιπέδου κύματος (διαθέτουν οριζόντιες μόνο συνιστώσες) και εισέρχονται στην Γη όπου αλληλεπιδρούν με αυτήν σύμφωνα με τα παρατεθέντα στο Κεφάλαιο 3. Σημειωτέον όμως, ότι τα πεδία ULF (ιονοσφαιρικές-μαγνητοσφαιρικές πηγές) διαδίδονται σχεδόν κατακορύφως, ενώ τα σήματα ELF διαδίδονται οριζοντίως. Σε κάθε περίπτωση όμως, λόγω της πολύ μεγάλης αντίθεσης αγωγιμότητας μεταξύ του μονωτικού αέρα και της αγωγίμης Γης, όλα τα πηγαία πεδία έχουν την αυτή συμπεριφορά στην επιφάνεια και το εσωτερικό της Γης: διαχέονται προς τα κάτω με μικρή (το πολύ 1° - 2°) απόκλιση από την κατα-

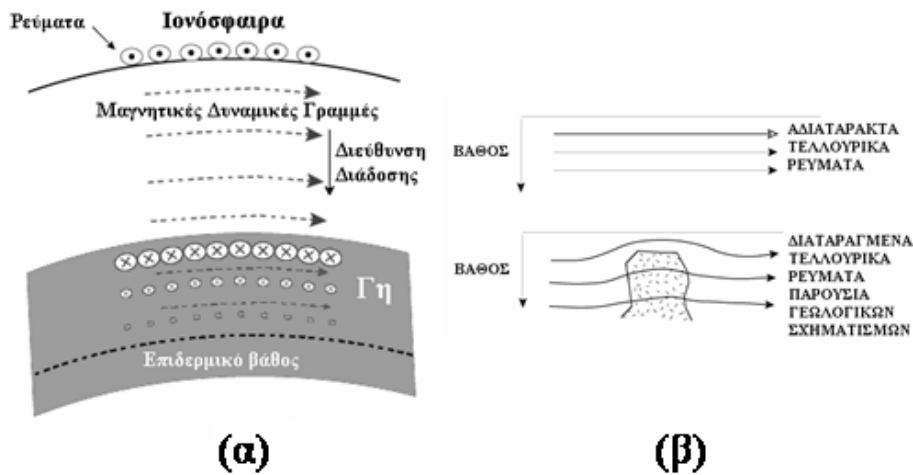


Εικόνα 5.1. Συνοπτική σκαριφηματική αναπαράσταση των κυριωτέρων πηγών φυσικών HM πεδίων.

κόρυφο (σύμφωνα με τον νόμο του Snell). Τα μαγνητικά πεδία επάγουν ηλεκτρικά πεδία, τα οποία με την σειρά τους οδηγούν τελλουρικά ρεύματα. Στην Εικόνα 5.2α δίδεται απλουστευμένη αναπαράσταση των διεργασιών αυτών.

Η πηγή του πρωτεύοντος πεδίου ULF έχει μορφή επιπέδου φυλλοειδούς ρεύματος που διαρρέει την Ιονόσφαιρα με διεύθυνση κάθετη και έξω από το επίπεδο που ορίζει η σελίδα. Το Ιονοσφαιρικό αυτό ρεύμα ακτινοβολεί πρωτεύον μαγνητικό πεδίο παράλληλο προς την σελίδα, το οποίο εισέρχεται στην (ομογενή χάριν απλότητας και συντομίας) Γη και επάγει φυλλοειδή τελλουρικά ρεύματα με διεύθυνση κάθετη και προς το εσωτερικό του επιπέδου της σελίδας. Τα τελλουρικά ρεύματα διαχέονται αποσβενύμενα κατά $1/e$ στο επιδερμικό βάθος δ . Σε μη-ομογενή Γη η διάχυση των τελλουρικών ρευμάτων είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής (οριζόντιας και κατακόρυφης κατανομής της αγωγιμότητας), η οποία τα επηρεάζει μεταβάλλοντας το ρυθμό απόσβεσής τους και εκτρέποντάς τα από την οριζόντιο (Εικόνα 5.2β). Με τον τρόπο αυτό η γεωλογία «χαράσσει τα δακτυλικά της αποτυπώματα» στο τελλουρικό πεδίο, μέσω των οποίων μπορούμε να την αποκαλύψουμε. Τα φαινόμενα αυτά θα εξετασθούν στο παρόν Κεφάλαιο 5.

Η εξάρτηση των ΗΜΦΠ από φυσικές πηγές είναι ταυτοχρόνως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα και μειονέκτημά τους. Για παράδειγμα, οι ΗΜΕΠ χρειάζονται συστήματα τροφοδοσίας και ελέγχου του πρωτεύοντος πεδίου και για επιτύχουν χαμηλές συχνότητες και βαθιά διείσδυση, απαιτούν ογκώ-



Εικόνα 5.2. (α) Απλουστευμένη αναπαράσταση των διεργασιών φυσικής ΗΜ επαγωγής με πρωτεύον πε-δίο παραγόμενο από επίπεδο ορζόντιο φυλλοειδές ρεύματος στην Ιονόσφαιρα. (β) Τα επαγόμενα τελλουρικά ρεύματα επηρεάζονται από την γεωηλ-εκτρική δομή και εντυπώνονται τα χαρακτηριστικά ίχνη της.

δεις και δύσχρηστες, πράγμα που αυξάνει το δραστικά το κόστος και συχνά απαγορεύει την προσπέλαση και εξερεύνηση δύσβατων/δυσπρόσιτων ή ορεινών περιοχών, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, προκαλεί ανεπιθύμητη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η γεωμετρία των πρωτευόντων πεδίων ΗΜΕΠ επίσης περιπλέκει την ανάλυση και ερμηνεία τους σε σύγκριση με τις ΗΜΦΠ, των οποίων το πρωτεύον είναι επίπεδο κύμα. Είναι λοιπόν εμφανές ό,τι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων φυσικού πεδίου είναι το εξαιρετικώς χαμηλό κόστος εφαρμογής τους. Η όλη οργανολογία είναι ουσιαστικά ένας δέκτης και καταγραφέας σημάτων· τα υπόλοιπα τα παρέχει δωρεάν η φύση. Η άλλη πλευρά του νομίσματος όμως, είναι η ευαισθησία των ΗΜΦΠ στον φυσικό και ανθρωπογενή ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Οι έχοντες εργασθεί με ΗΜΦΠ γνωρίζουν πόση υπομονή χρειάζεται μέχρι να συλλεχθούν ικανοποιητικά δεδομένα σε περιοχές αυξημένης ανθρώπινης δραστηριότητας.

Οι ΗΜΦΠ είναι όλες μέθοδοι πεδίου συχνότητας, με σπουδαιότερες εκπροσώπους την Μαγνητοτελλουρική μέθοδος με τα παράγωγά της και την Γεωμαγνητική Βαθοσκόπηση (ΓΒΣ). Οι ΗΜΦΠ και ιδίως η *Μαγνητοτελλουρική μέθοδος* και η *Γεωμαγνητική Βαθοσκόπηση* παρουσιάζουν σημαντικότερα πλεονεκτήματα έναντι των λοιπών μεθόδων διασκόπησης της γεωηλεκτρικής δομής διότι από σημειακές μετρήσεις

- Παρέχουν δυνατότητα διερεύνησης μεγάλου φάσματος βαθών, από μερικά μέτρα μέχρι πολλά χιλιόμετρα.
- Επιτρέπουν τον εντοπισμό πλευρικών αλλαγών της γεωηλεκτρικής δομής.
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και μεγάλη παραγωγικότητα.

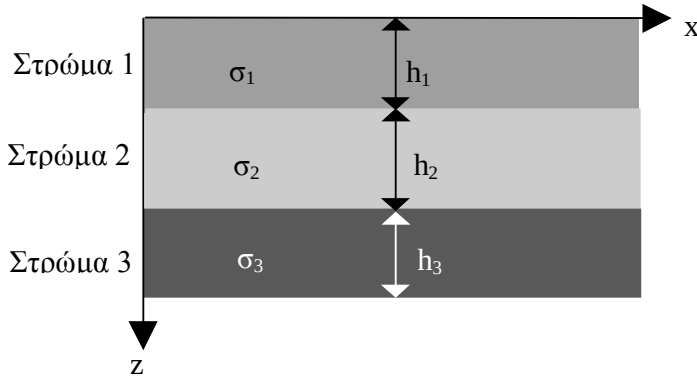
Τέτοιες ιδιότητες τις καθιστούν μεθόδους επιλογής για ανίχνευση αγωγίμων στόχων σε μέσα ως μεγάλα βάθη (αρκετών εκατοντάδων μέτρων έως μερικών χιλιομέτρων), στα οποία οι γεωηλεκτρικές και ΗΜ μέθοδοι συνήθως αδυνατούν να διεισδύσουν. Συνεπεία των ανωτέρω οι ΜΤ/ΓΒΣ μέθοδοι μπορούν να συμβάλλουν αποφασιστικά στην επίλυση προβλημάτων *υδρογεωλογίας*, (ανίχνευση βαθέων υπογείων υδροφορέων και πλευρικής κυκλοφορίας νερού), *γεωθερμίας*, (ανίχνευση βαθέων ταμιευτήρων και πλευρικής κυκλοφορίας ρευστών), *έρευνας υδρογονανθράκων*, (ανίχνευση βαθέων ταμιευτήρων), *γεωτεκτονικής ανάλυσης* και μελετών δομής του στερεού φλοιού, κ.ά.

5.1 Η Μαγνητοτελλουρική (ΜΤ) μέθοδος

Για ιστορικούς λόγους αναφέρεται ότι η Tellus ήταν η Ρωμαία θεά της Γης²², Η Tellus εδάνεισε το όνομά της στα φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα της στερεάς Γης, τα οποία αποκαλούνται *Τελλουρικά Ρεύματα*, καθώς και σε μία πρώτη και εγκαταλειφθείσα πλέον μέθοδο γεωφυσικής διασκόπησης, την Τελλουρική μέθοδο. Η *Μαγνητο-Τελλουρική* μέθοδος προφανώς οφείλει το αρμόζον και σύνθετο όνομά της στο γεγονός ότι εμβριθεί στην σχέση των γήινων ηλεκτρικών (*τελλουρικών*) και μαγνητικών πεδίων.

Η Μαγνητοτελλουρική μέθοδος εκμεταλλεύεται την σχέση μεταξύ των οριζοντίων εγκάρσιων συνιστωσών του φυσικού ΗΜ πεδίου. Όταν το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο είναι επίπεδο κύμα, η σχέση του με το επαγόμενο ηλεκτρικό είναι γραμμική και εκφράζεται μέσω μίας ποσότητας που εξαρτάται από, και μεταφέρει πληροφορία για την ηλεκτρική δομή του υλικού εντός του οποίου λαμβάνουν χώρα οι επαγωγικές διεργασίες. Η μορφή της γραμμικής σχέσης εξαρτάται από την γεωμετρία της δομής και μεταβάλλεται από απλή βαθμωτή (μονόμετρη) σε περιπτώσεις μονοδιάστατων δομών, μέχρι σύνθετη τανυστική για περιπτώσεις πολυδιάστατων δομών (σύμφωνα με τους ορισμούς του Εδαφίου 3.2). Τις ιδιότητες αυτής της σχέσης εκμεταλλευόμαστε για να ανιχνεύσουμε το εσωτερικό της Γης. Στην παρούσα εισαγωγική θεώρηση *θα περιορίσουμε την αναφορά μας στις μονοδιάστατες δομές*

²² Αντιπροσωπεύει την Θεά-Μητέρα και είναι πανάρχαια και αντίστοιχη προς την Ελληνική Γαία



Εικόνα 5.3. Ασυνεχής (στρωματοειδής) μονοδιάστατη κατανομή της αγωγιμότητας, η οποία μεταβάλλεται μόνον κατά τον άξονα z .

και την συναφή βαθμωτή σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίων.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο Εδάφιο 3.2, η μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή είναι οριζοντίως ομογενής και κατακορύφως ανισοτροπική, και σε περίπτωση ασυνεχούς μεταβολής της αγωγιμότητας συναρτήσει του βάθους, αποτελείται από διαδοχικά στρώματα διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων, (βλ. Εικόνες 3.3 και 5.3).

Μέσα σε κάθε στρώμα ισχύουν οι συνθήκες που ανεπτύχθησαν στο Κεφάλαιο 3 για διάδοση επιπέδου κύματος στο σχεδόν-στατικό όριο και σε ομογενή χώρο. Όταν όμως το πεδίο διέρχεται μεταξύ δύο στρωμάτων η αγωγιμότητα μεταβάλλεται, οπότε οφείλομε να την θεωρήσουμε (άγνωστη) συνάρτηση του βάθους z . Όταν το πηγαίο πεδίο έχει μόνο H_y συνιστώσα, οι κατάλληλες εξισώσεις Maxwell είναι

$$\frac{\partial E_x(z, \omega)}{\partial z} = -i\omega\mu H_y(z, \omega)$$

και

$$\frac{\partial H_y(z, \omega)}{\partial z} = -\sigma(z)E_x(z, \omega) \quad (5.1)$$

Απαλείφοντας το μαγνητικό πεδίο λαμβάνομε την ομογενή εξίσωση Helmholtz:

$$\frac{\partial^2 E_x(\omega, z)}{\partial z^2} = k^2 E_x(\omega, z) \quad (5.3)$$

$$k^2 = i\omega\mu\sigma(z)$$

με γενική λύση την

$$E_x(\omega, z) = Ae^{-kz} + Be^{kz} \quad (5.4)$$

όπου Α και Β άγνωστες σταθερές. Το δεξιό μέλος του αθροίσματος αντιπροσωπεύει ένα *κατακορύφως κατερχόμενο* επίπεδο κύμα και το αριστερό μέλος ένα *κατακορύφως ανερχόμενο* κύμα που προέρχεται από σκέδαση (ανάκλαση) στις ασυνέχειες μεταξύ των στρωμάτων. Συνδυάζοντας τις (5.1) και (5.4) βρίσκουμε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι

$$H_y(\omega, z) = -\frac{k}{i\omega\mu} (-Ae^{-kz} + Be^{kz}).$$

Η Μαγνητοτελλουρική συνάρτηση απόκρισης της μονοδιάστατης Γης ορίζεται από τον λόγο

$$Z(\omega, z) = \frac{E_x(\omega, z)}{H_y(\omega, z)} \quad (5.5)$$

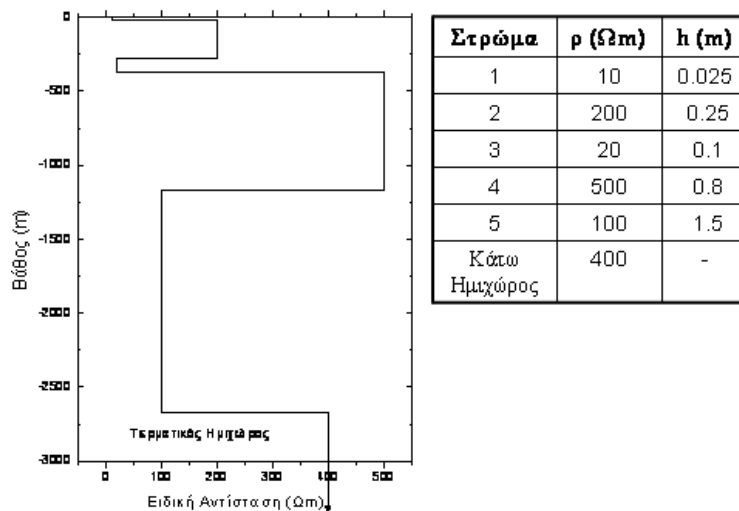
που ονομάζεται *φαινόμενη εμπέδηση*²³ του μέσου διάδοσης, είναι μιγαδικό βαθμωτό μέγεθος και εκφράζει τον βαθμό απόσβεσης του πηγαιού πεδίου Η συχνότητας ω, στο βάθος z, καθώς τούτο μεταφέρει την ενέργειά του στο ηλεκτρικό πεδίο Ε. Σύμφωνα με τον ορισμό (5.5), οι οριζόντιες συνιστώσες του ΗΜ πεδίου συνδέονται με την σχέση:

$$\begin{aligned} E_x(\omega, z) &= -\frac{i\omega\mu}{k} \cdot \frac{Ae^{-kz} + Be^{kz}}{-Ae^{-kz} + Be^{kz}} H_y(\omega, z) \\ \Rightarrow Z(\omega, z) &= -\frac{i\omega\mu}{k} \cdot \frac{Ae^{-kz} + Be^{kz}}{-Ae^{-kz} + Be^{kz}} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Εάν η γεωηλεκτρική δομή αποτελεί ομογενή αγωγίμο ημιχώρο, τότε και μόνο τότε, η φαινόμενη εμπέδηση *ταυτίζεται* με την *χαρακτηριστική εμπέδηση* του ημιχώρου. Όταν υπάρχουν πολλά στρώματα η κατάσταση περιπλέκεται, διότι μέσα σε κάθε ένα από αυτά διέρχονται κατερχόμενα κύματα που έχουν διαθλασθεί από ανώτερα στρώματα και ανερχόμενα κύματα που έχουν ανακλασθεί και διαθλασθεί από κατώτερα στρώματα. Οι συντελεστές Α και Β είναι άγνωστοι διάφοροι του μηδενός και η εύρεση κατάλληλης αναλυτικής έκφρασης για την φαινόμενη εμπέδηση προϋποθέτει την *απαλοιφή* τους. Η αναλυτική (μαθηματική) επίλυση του προβλήματος αυτού είναι σχετικά απλή αλλά επειδή εκφεύγει του σκοπού της παρούσας εισαγωγής και δεν θα μας απασχολήσει.

Το μέτρο $|Z(\omega, z)|$ της φαινόμενης εμπέδησης περιέχει πληροφορία για την ολική απώλεια (μεταφορά) ενέργειας. Το μεν πραγματικό μέρος αναφέ-

²³ Ο όρος εμπέδηση, έχει αντικαταστήσει στην σύγχρονη βιβλιογραφία τον παλαιότερο του "σύνθετη αντίσταση".



Εικόνα 5.4 Σχηματική παράσταση της στρωματοειδούς δομής που παράγει την εμπέδηση της Εικόνας 5.5.

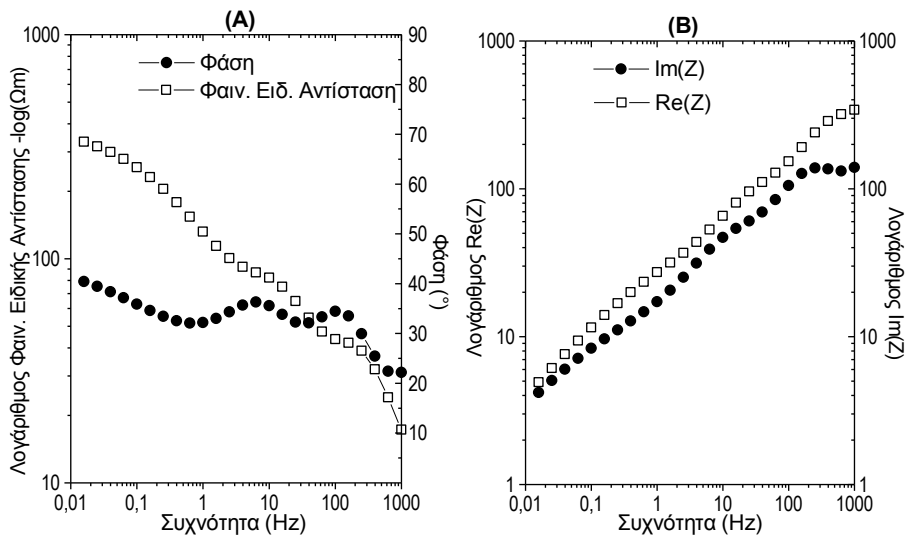
ρεται στις καθαρές ωμικές απώλειες, το δε φανταστικό μεταφέρει πληροφορία για το σχετικό μέγεθος της χρονικής καθυστέρησης που υφίσταται το πεδίο λόγω φαινομένων χωρητικής αντίστασης. Αριθμητικώς, η πληροφορία αυτή εκφράζεται από την φάση της εμπέδησης, που ορίζεται ως

$$\psi(\omega, z) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[Z(\omega, z)]}{\text{Re}[Z(\omega, z)]} \right) \quad (5.7)$$

Η φάση είναι προφανώς αδιάστατο μέγεθος. Στην ΗΜ φρασεολογία το $\text{Re}(Z)$ εκφράζει το εν φάσει μέρος του ηλεκτρικού πεδίου και το $\text{Im}(Z)$ το εκτός φάσεως μέρος. Λόγω του ορισμού (5.6), η φάση δεν θα είναι σταθερή όπως στον ομογενή ημιχώρο, αλλά θα κυμαίνεται εκατέρωθεν των 45° . Επειδή τα φαινόμενα καθυστέρησης είναι εντονότερα σε μέσα υψηλής παρά σε μέσα χαμηλής αγωγιμότητας η φάση θα στρέφεται προς τις 90° όταν τα πεδία μεταβαίνουν από αντιστατικά προς αγώγιμα στρώματα και προς τις 0° στην αντίθετη περίπτωση, όταν μεταβαίνουν από αγώγιμα σε αντιστατικά. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση συνδέεται με την εμπέδηση και κατ' επέκταση με το ΗΜ πεδίο, μέσω της σχέσεως

$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\sigma(\omega)} = \frac{1}{\omega\mu} \cdot \frac{|E_x(\omega)|^2}{|H_y(\omega)|^2} = \frac{1}{\omega\mu} \cdot |Z(\omega)|^2 \quad (5.8)$$

Οι ανωτέρω ιδιότητες της εμπέδησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5, η οποία εμφανίζει την φαινόμενη ειδική αντίσταση και φάση (Εικ. 5.5α) και το πραγματικό και φανταστικό μέρος της φαινόμενης εμπέδησης (Εικ. 5.5β),



Εικόνα 5.5. Ειδική αντίσταση και φάση (A) και Πραγματικό, Φανταστικό μέρος της εμπέδησης (B) για την ιδεατή στρωματοειδή δομή της Εικόνας 5.4.

στην επιφάνεια γεωηλεκτρικής δομής 6 στρωμάτων (Εικόνα 5.4). Παρατηρήσατε με προσοχή την συμπεριφορά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και της φάσης. Η γενική τάση μεταβολής της ρ_a είναι αυξητική, αντικατοπτρίζουσα την αντίστοιχη τάση αύξησης της πραγματικής ειδικής αντίστασης της δομής με το βάθος. Πάνω σ' αυτή υπερτίθενται διακυμάνσεις που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από σχετικά αγωγίμα σε σχετικά αντιστατικά στρώματα (τοπικά μέγιστα) και αντιστρόφως (τοπικά ελάχιστα). Οι αντίστοιχες διακυμάνσεις της φάσης είναι πολύ πιο έντονες και υποδεικνύουν την ύπαρξη μεταβάσεων από αγωγίμα προς αντιστατικά στρώματα (στροφή προς τις 0°) και από αντιστατικά σε αγωγίμα (στροφή προς τις 90°) πολύ σαφέστερα. Παρατηρήσατε επίσης, ότι η μεταβολή της φάσης *προηγείται* της αντίστοιχης μεταβολής της ρ_a για την αυτή ασυνέχεια. Οι εν λόγω διακυμάνσεις διακρίνονται μεν στο πραγματικό και φανταστικό μέρος της εμπέδησης, αλλά οπωσδήποτε όχι με την σαφήνεια που διακρίνονται στην φαινόμενη ειδική αντίσταση και φάση. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος για τον οποίο προτιμάται η χρήση του ζεύγους συναρτήσεων (ρ_a, ψ_a) , για μελέτη και ερμηνεία. Τέλος, παρατηρήσατε την σαφή και φθίνουσα μορφή της συνάρτησης $Z(\omega, 0)$, με τις μεγάλες τιμές να εμφανίζονται στις υψηλές συχνότητες και τις μικρές στις χαμηλές. Η μορφή αυτή είναι διαγνωστική μιας φυσικής συνάρτησης $Z(\omega, 0)$.

5.2. Μετρήσεις φυσικών ΗΜ Πεδίων

Επειδή τα φυσικά ΗΜ πεδία σε συχνότητες ELF-VLF είναι πολύ ασθενή, (συνήθως αρκετά ασθενέστερα του 1nT), οι ΗΜΦΠ και ειδικότερα η ΜΤ μέθοδος, παραδοσιακά χρησιμοποιήθηκαν για διασκόπηση βαθέων δομών με πεδία ULF, τα οποία είναι πολύ ισχυρότερα (βλ. Κεφάλαιο 1). Κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, η οποία επέτρεψε την κατασκευή μαγνητομέτρων υπερευαίσθητων σε πεδία υψηλών συχνοτήτων και εισήγαγε την ψηφιακή ανάλυση σήματος, οδήγησε τις ΗΜΦΠ σε μεγάλη ανάπτυξη και επέκταση στις εφαρμογές διασκόπησης ρηχών δομών. Λόγω της πληρότητας πληροφορίας την οποία προσφέρει, ο συνδυασμός ΜΤ/ΓΒΣ μεθόδων έχει εκτοπίσει αρκετές παραδοσιακές ΗΜ τεχνικές, ενώ σε περιπτώσεις δύσβατης τοπογραφίας ή ειδικών γεωλογικών συνθηκών (π.χ. ηφαιστειακά πετρώματα στην επιφάνεια), έχει υποκαταστήσει ακόμα και τις σεισμικές μεθόδους στην έρευνα υδρογονανθράκων.

5.2.1 Αισθητήρες τελλουρικού πεδίου.

Δεδομένου ότι δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί απ' ευθείας η πυκνότητα ρεύματος στην Γη, περιοριζόμαστε στην μέτρηση διαφορών δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίων τοποθετημένων εντός του στο εδάφους, ή, σπανιότερα εντός ρηχών γεωτρήσεων. Αν και φαινομενικά απλή, αυτή προϋποθέτει την τήρηση ορισμένων κανόνων απαραίτητων για την αποφυγή ανεπιθύμητου θορύβου και παρεμβολών προερχομένων από την ίδια την διαδικασία μέτρησης.

Η χρήση απλών μεταλλικών ράβδων καρφωμένων στο έδαφος ως ηλεκτροδίων, συνήθως οδηγεί σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που παράγουν δυναμικά επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου και εδάφους (συνεπώς και μεταξύ ηλεκτροδίων), τα οποία πολλές φορές είναι αρκετά ισχυρότερα από τα ανιχνευτέα τελλουρικά πεδία (πόλωση ηλεκτροδίων). Επιπλέον, το πλάτος των δυναμικών επαφής εξαρτάται από τις εδαφικές συνθήκες και μεταβάλλεται από τόπου εις τόπο αλλά και συναρτήσει του χρόνου, οπότε είναι αδύνατη η εκ των υστέρων διόρθωσή τους. Δεδομένου ότι ο μόλυβδος είναι σχετικά χημικά αδρανής, η χρήση μολυβδίνων πλακών είναι μία μερική απάντηση στο πρόβλημα αυτό. Πραγματική λύση όμως, προσφέρει μόνον η χρήση αντιπολωτικών ηλεκτροδίων. Αυτά αποτελούνται από σύστημα μετάλλου εμβαπτισμένου σε (υγρό ή στερεό) κεκορεσμένο διάλυμα ενός εκ των αλάτων του, όπως για παράδειγμα Cu σε CuSO_4 , Ag σε AgCl , Pb σε PbCl_2 κ.λ.π., το οποίο περιέχεται σε πορώδες κεραμικό που επιτρέπει στο διάλυμα να διαρρέει με βραδείς ρυθμούς και να δημιουργεί καλή αγωγή επαφή χαμηλού θορύβου με το έδαφος. Εξ όλων των ανωτέρω, τα ηλεκτρόδια Pb/ PbCl_2 είναι τα σταθερότερα και πλέον αξιόπιστα.

Σημειωτέον επίσης ότι επειδή η διαδικασία πόλωσης είναι αρκετά αργή, η χρήση ράβδων από ανοξείδωτο χάλυβα ως ηλεκτροδίων είναι αρκετά αποδεκτή και εφαρμόζεται για συχνότητες υψηλότερες των μερικών Hz.

5.2.2 Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Ο αισθητήρας επιλογής για μετρήσεις μαγνητικού πεδίου είναι το επαγωγικό πηνίο. Το όργανο αυτό είναι ένα σχετικά μακρύ σωληνοειδές κατασκευαζόμενο με πυκνή περιέλιξη λεπτού σύρματος (> 50.000 στροφές/m) γύρω από φερριτικό πυρήνα ή άλλο μέταλλο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (π.χ. μέταλλο-μ). Παλαιότεροι τύποι πηνίων ανοικτού πυρήνα, κατασκευασμένοι με πυκνή περιέλιξη γύρω από ορθογώνιο ή κυκλικό πλαίσιο (βρόχοι) δεν χρησιμοποιούνται πλέον στις ΗΜΦΠ ως μη πρακτικοί, περιοριζόμενοι σε μερικές κατηγορίες ΗΜΕΠ όπου οι συνθήκες ευνοούν τη χρήση τους. Το πηνίο είναι σε θέση να ανιχνεύει πεδία σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Δεδομένου όμως ότι το φάσμα ενδιαφέροντος για ΗΜΦΠ είναι εξαιρετικά ευρύ, ($10^{-5} - 10^4$ Hz περίπου), η κατασκευή τέτοιων οργάνων συναντά σημαντικές τεχνικές δυσκολίες και για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η χρήση διαφορετικών πηνίων στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Για παράδειγμα, οι καλύτερες σύγχρονες κατασκευές (EMI Inc.) έχουν χρήσιμο εύρος $10^{-4} - 500$ Hz περίπου (μοντέλα BF-4 / BF-7 με μήκος περί το 1 m) και $10^2 - 10^4$ Hz (μοντέλα BF-6 / BF-10 με μήκος περί τα 40cm). Σημειωτέον ότι το πηνίο στην πραγματικότητα μετρά την μεταβολή $\partial B/\partial t$ και όχι την ένταση της μαγνητικής επαγωγής B.

Επειδή η ένταση των ανιχνευτέων φυσικών μαγνητικών πεδίων ELF-VLF είναι της τάξης των pT ($10^{-3} - 1$ nT) τα επαγωγικά πηνία είναι υπερευαίσθητα όργανα και αποκρίνονται σε οποιαδήποτε μικρομετακίνησή τους εντός του μαγνητικού πεδίου της Γης. Μετακινήσεις της τάξης του χιλιοστού συνήθως παράγουν θόρυβο της ίδιας τάξης μεγέθους με το ανιχνευτέο φυσικό πεδίο, και για τον λόγο αυτό τα πηνία συνήθως θάβονται σε ρηχά ορύγματα και σκεπάζονται με χώμα.

Η ανάπτυξη των επαγωγικών πηνίων απετέλεσε σημαντικό σταθμό στην ιστορία των ΗΜΦΠ και των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γενικά, αλλά υπάρχουν και άλλα όργανα ικανά για χρήση από ΗΜΦΠ. Τα μαγνητόμετρα ροής (fluxgate) είναι αρκετά μικρά και κατάλληλα για μετρήσεις σε συχνότητες ULF όπου τα πεδία είναι ισχυρά, αλλά ανεπαρκώς ευαίσθητα για μετρήσεις σε συχνότητες άνω των μερικών δεκάτων του Hz. Είναι πιθανό ότι το μέλλον ανήκει στα κρυογενικά μαγνητόμετρα (SQUID – Superconducting Quantum Interference Devices), τα οποία εκμεταλλεύονται μακροσκοπικά κβαντικά φαινόμενα σε υπεραγωγούς (δίοδο Josephson). Θα αποφύγομε την ανάπτυξη του θέματος αυτού, δεδομένου ότι η φυσική του είναι εκτεταμένη

και δύσβατη και ότι συσκευές αυτές λειτουργούν σε θερμοκρασίες πλησίον του απόλυτου μηδενός²⁴ ώστε η τρέχουσα τεχνολογία και λειτουργία τους να είναι αρκετά ακριβή υπόθεση. Σημειώνεται όμως ότι τα μαγνητόμετρα αυτά είναι πολύ πιο ευαίσθητα από τα επαγωγικά πηνία και αποκρίνονται γραμμικά σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, ενώ δεν έχουν σοβαρά μειονεκτήματα, όπως υπερευαισθησία σε μικρομετακινήσεις.

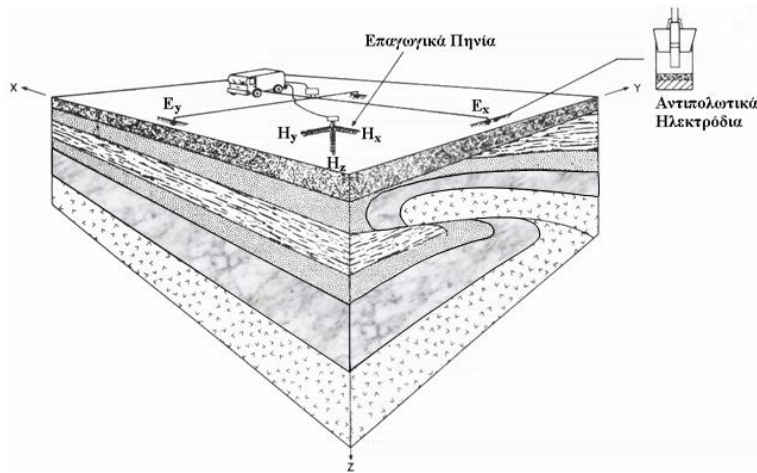
5.2.3. Διαδικασίες μετρήσεων υπαίθρου.

Αν και βασικά απλές, οι εργασίες υπαίθρου απαιτούν αρκετό σχεδιασμό και προσοχή, αφού αποτελούν και το πλέον δαπανηρό μέρος μιας MT διασκόπησης. Η χαμηλή ένταση των πεδίων και η ευαισθησία των οργάνων καθιστούν τις μετρήσεις ευάλωτες σε θόρυβο και εξωτερικές παρεμβολές, και οι διαδικασίες υπαίθρου οφείλουν να ελαχιστοποιούν τέτοια προβλήματα. Σε κάθε σταθμό μέτρησης εγκαθίστανται δύο οριζόντια, αμοιβαίως ορθογώνια ζεύγη ηλεκτροδίων και τρία αμοιβαίως ορθογώνια επαγωγικά πηνία. Τυπική εγκατάσταση μετρήσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.6.

Τα ηλεκτρόδια οφείλουν να προσφέρουν καλή αγωγή επαφή χαμηλού θορύβου με το έδαφος. Όσο μακρύτερα βρίσκονται τα ηλεκτρόδια μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη η μετρούμενη διαφορά δυναμικού, (δεδομένων φυσικά των συνθηκών της περιοχής μετρήσεων, όπως η ύπαρξη πιθανών εμποδίων, η τοπογραφία, ο διαθέσιμος χρόνος εγκατάστασης, η ελάχιστη ανεκτή απόσταση μεταξύ διαδοχικών σταθμών μέτρησης κ.λ.π.). Το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων για μελέτες βαθιάς δομής και έρευνα υδρογονανθράκων είναι της τάξης των 100 -200 m και σε ειδικές περιπτώσεις μεγαλύτερο. Για μελέτες ρηχής δομής (π.χ. μεταλλευτική έρευνα, υδρογεωλογία), είναι λογικό να χρησιμοποιούνται αναπτύγματα της τάξης των 30-50 m ή και μικρότερα. Τέλος, τα καλώδια πρέπει να μην κινούνται στο μαγνητικό πεδίο της Γης, διότι έτσι επάγεται θόρυβος και θάπτονται, ή σταθεροποιούνται με πέτρες ή σβώλους χώματος τοποθετημένους ανά ολίγα μέτρα.

Τα επαγωγικά πηνία είναι ακόμη πιο ευαίσθητα σε μετακινήσεις (από τον άνεμο, τα δένδρα κ.λ.π.) και όπως προαναφέραμε θάπτονται. Η ταφή έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της ελάττωσης του θορύβου από θερμικά παροδικά (επιδράσεις μεταβολές στην θερμική κατάσταση του περιβάλλοντος). Τα πηνία με φερριτικό πυρήνα πρέπει να απέχουν αλλήλων μερικές φορές το μήκος τους, για να αποφεύγονται οι αλληλεπιδράσεις (αμοιβαία ζεύξη). Η

²⁴ Με την πρόσφατη ανάπτυξη πρακτικών υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών, ορισμένα SQUID μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες ως και 50°K, πολύ πάνω από το απόλυτο μηδέν. Αυτό έχει τεράστια σημασία γιατί η ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με πάμφθιμο υγρό άζωτο και όχι με ήλιο.



Εικόνα 5.6.²⁵ Τυπικός σταθμός MT μετρήσεων.

τήρηση της γεωμετρίας της διάταξης μετρήσεων είναι σημαντικότερος παράγων και κάθε απόκλιση των πηνίων ή ηλεκτροδίων ή αμοιτέρων από την αμοιβαία ορθογωνιότητα παραμορφώνει τις ιδιότητες των μετρούμενων συναρτήσεων απόκρισης της Γης. Για τον λόγο αυτό, τα πηνία οριζοντιώνονται με αεροστάθμες και προσανατολίζονται μεταξύ τους, και ως προς τα ηλεκτρόδια, με ευαίσθητες πυξίδες ή τοπογραφικές τεχνικές.

Οι θέσεις μέτρησης πρέπει να επιλέγονται με προσοχή, ώστε να αποφεύγονται άλλες πιθανές πηγές θορύβου, όπως για παράδειγμα κυκλώματα καθοδικής προστασίας, γραμμές μεταφοράς ενέργειας, ηλεκτρικοί φράχτες, γειωμένοι σωλήνες κ.ά. Η τοπογραφία είναι δυνατόν να προκαλέσει παραμορφώσεις όμοιες με αυτές που θα έδιδαν πλευρικές μεταβολές της αγωγιμότητας, οι οποίες αν και είναι δυνατόν να διορθωθούν, καλό θα ήταν να αποφεύγονται, ιδίως δε όταν η τοπική μεταβολή υψομέτρου υπερβαίνει το 10% του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων.

²⁵ Τροποποιημένη από Vozoff, K., The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, **34**, 98-141.

5.3. Παράδειγμα εφαρμογών ΗΜΦΠ - Γεωθερμική έρευνα στην χερσόνησο Μεθάνων

Η χερσόνησος των Μεθάνων είναι μικρό Τεταρτογενές ηφαιστειακό συγκρότημα, οικοδομηθέν δι' εξωθήσεων βασαλτικής-ανδεσιτικής έως δακτινικής λάβας υπό μορφή θόλων και ρευμάτων. Θεωρείται ότι αποτελεί την δυτικότερη επιφανειακή έκφραση του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου, έχοντας δράσει και κατά τους ιστορικούς χρόνους.

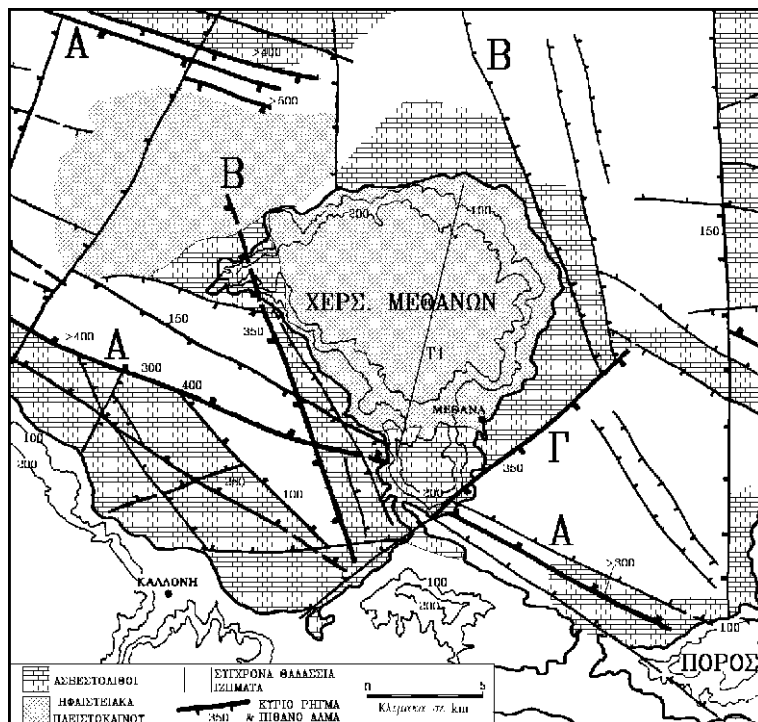
Το γεωλογικό και τεκτονικό περιβάλλον της χερσονήσου παρουσιάζεται συνοπτικώς στην Εικόνα 5.7· έμφαση δίδεται στα περιφερειακά τεκτονικά στοιχεία τα οποία απεικονίζονται λεπτομερώς, ενώ η κατανομή των λιθολογικών σχηματισμών παρουσιάζεται απλουστευμένη, με σκοπό να δείξει τον τρόπο εμφάνισης των ηφαιστειακών σχηματισμών μέσω των ιζηματογενών ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι Τριαδικού-Ηωκαίνου). Η περιφερειακή νεοτεκτονική δομή ελέγχεται από τρεις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες διευθύνσεων N-70°-W (ζώνη Α), N-20°-W (ζώνη Β) και N-50°-E (ζώνη Γ), οι οποίες επίσης φαίνονται να οριοθετούν την πλευρική ανάπτυξη του ηφαιστειακού οικοδομήματος. Στην άμεση γειτονία της χερσονήσου, οι τρεις ζώνες εμφανίζονται με άλματα της τάξης 350m. Η σημαντικότερη εκ των τριών ζώνη Α, πολλάκις εμφανίζει άλματα >400-500m και συμβάλλει θεμελιωδώς στην νεοτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής.

Οι πιθανότητες ύπαρξης άφθονης ταμιευμένης γεωθερμικής ενέργειας στην χερσόνησο Μεθάνων εκ πρώτης όψεως φαίνονται μάλλον δυσοίωνες. Τα γεωχημικά και πετρολογικά χαρακτηριστικά των ηφαιστειακών πετρωμάτων μαρτυρούν ότι οι διεργασίες διαφοροποίησης του μάγματος έχουν λάβει χώρα σε μεγάλα βάθη, (πλησίον της βάσης της λιθόσφαιρας, ή στο όριο λιθόσφαιρας-μανδύα) και όχι πλησίον της επιφάνειας²⁶. Εν τούτοις, η νεαρή ηλικία της ηφαιστειακής δραστηριότητας, ακόμα και κατά τους ιστορικούς χρόνους, δεν αποκλείει την ύπαρξη κάποιας σημαντικής γεωθερμικής ανωμαλίας σε προσπελάσιμα βάθη υπό την επιφάνεια της χερσονήσου· η έρευνα προς ανακάλυψη αυτής της ανωμαλίας παρουσιάζει αρκετά προβλήματα.

Η ερμηνεία των γεωχημικών αναλύσεων ρευστών εκ των θερμοπηγών των Μεθάνων δυσκολεύεται, ενίοτε μέχρις αποπροσανατολισμού, από την εντονότατη ανάμειξη των γεωθερμικών ρευστών με θαλάσσια ύδατα²⁷. Ορισμένες εξ αυτών εν τούτοις, υποδεικνύουν ότι τα επιφανειακά θερμά ρευστά πιθανόν να έχουν αρχική θερμοκρασία 100-120°C, υπό την προϋπόθεση ότι

²⁶ π.χ. Geotermica Italiana, slr., 1984. IGME: Methana-Poros, Loutraki-Sousaki, Paltystomon, Aedipsos Geothermal Projects. Final report, IGME, Athens, Greece.

²⁷ βλ. Επίσης Geotermica Italiana, 1984.



Εικόνα 5.7. Τεκτονικός και απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της χερσονήσου Μεθάνων. Α, Β και Γ οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής, με σημειωμένα άλματα ρηγμάτων, όπου αυτά έχουν μετρηθεί. Τ1 είναι η ΜΤ τομή της Εικόνας 5.8. Βασίστηκε στους Παπανικολάου, Δ., Χρόνη, Γ., Λυκούση, Β., και Παυλάκη, Π., 1989, «Υποθαλάσσιος νεοτεκτονικός χάρτης του Σαρωνικού κόλπου», ΟΑΣΠ, ΕΚΘΕ και Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών), και στους Φυτίκα, Μ., Innocenti, F., and Mazzuoli, R., 1984, «Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας (1:50.000), Φύλλο Μέθανα». ΙΓΜΕ, Αθήνα.

πριν εκφορτισθούν κυκλοφορούν εντός του ασβεστολιθικού υποστρώματος, ή, προέρχονται από ταμιευτήρα εντός ανθρακικών πετρωμάτων²⁸. Η ίδια πηγή κρίνει την ύπαρξη γεωθερμικού ταμιευτήρα αμφίβολη, αλλά δεν αποκλείει την συγκέντρωση θερμών ρευστών εντός ρηξιγενών δομών σε μεγάλο βάθος.

Πέραν τούτου, η χερσόνησος των Μεθάνων είναι γεωγραφικώς περιορισμένη και στενόχωρη, η δε τοπογραφία του ηφαιστειακού οικοδομήματος δύσβατη (έως άβατη σε ορισμένα σημεία), δυσχεραίνουσα μέχρι απαγόρευ-

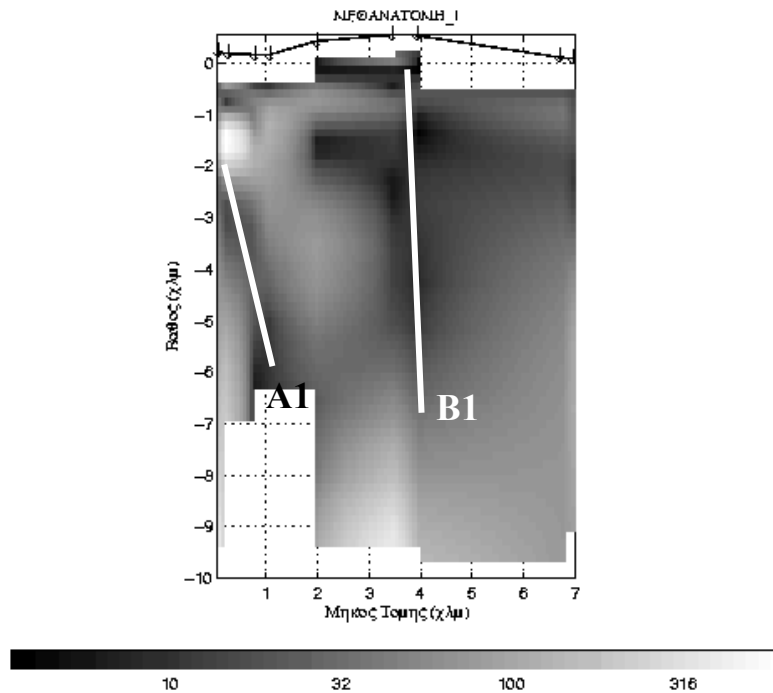
²⁸ βλ. Επίσης Geotermica Italiana, 1984.

σης την διεξαγωγή πολυκλαδικών γεωφυσικών ερευνών. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ενδείξεις τεκτονικών δομών, (βυθίσματα, τάφροι), που θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως ταμιευτήρες και να είναι ανιχνεύσιμες με βαρυτικές και μαγνητικές μεθόδους. Ενεργητικές σεισμικές μέθοδοι δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν και οι σεισμολογικές είναι αμφίβολο ότι θα αποδώσουν, λόγω απουσίας σεισμικού θορύβου και / ή μικροσεισμών παραγόμενων από το γεωθερμικό σύστημα: ίσως ορισμένες σεισμολογικές τεχνικές να έχουν δυνατότητα εκμετάλλευσης σημάτων εκ παραπλησίων σεισμών. Οι γεωηλεκτρικές (DC) μέθοδοι περιορίζονται δραστηκότητα, είτε λόγω τοπογραφικών περιορισμών (Schumberger και Wenner), είτε λόγω γεωγραφικής στενότητας (π.χ. δίπολο-δίπολο, περιπλανώμενο δίπολο). Δεν είναι λοιπόν τυχαίο ότι στην περιοχή Μεθάνων μόνον γεωλογικές και γεωχημικές μελέτες έχουν γίνει, της γεωφυσικής περιοριζόμενης στην μέθοδο Ιδίου Δυναμικού.

Οι ΗΜΦΠ (ΜΤ και ΓΒΣ στην περίπτωση Μεθάνων), μπορούν να υπερβούν πολλούς από τους ανωτέρω περιορισμούς για τρεις κυρίως λόγους. Επιτυγχάνουν βάθια διείσδυση από σημειακές μετρήσεις, από τις οποίες συνθέτουν την τριδιάστατη γεωηλεκτρική δομή σε μεγάλη έκταση και βάθος. Δεν απαιτούν ανάπτυξη μακρών καλωδιακών γραμμών και δύνανται να εκμεταλλεύονται τοπικές βελτιώσεις των τοπογραφικών συνθηκών. Τέλος, χρησιμοποιούν δωρεάν σήματα παρεχόμενα από την φύση και δεν χρειάζονται, ούτε περιορίζονται από διατάξεις παραγωγής σήματος: τα όργανα είναι σχετικά μικρά σε όγκο, ελαφρά και ευκίνητα.

Ποσοτική ανάλυση εκτίμηση της κατακόρυφης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.8. Το νότιο ήμισυ της τομής T1, από 0km έως 4.4km, παρουσιάζει ικανοποιητική πυκνότητα παρατηρήσεων και ερμηνεύεται με ευκολία. Διακρίνονται καθαρά δύο σημαντικές υποκατακόρυφες αγωγίμες ($<20\Omega\text{m}$) ζώνες, κατερχόμενες μέχρι βάθους 9km τουλάχιστον, οι οποίες συμβολίζονται ως A1 και B1. Η φαινόμενη κλίση των ζωνών αυτών είναι συμβατή προς την αναμενόμενη για κανονικές διαρρήξεις.

Σε ένα τεκτονικώς ελεγχόμενο γεωθερμικό σύστημα όπως αυτό των Μεθάνων, οι βαθείς γραμμικοί αγωγοί συνήθως αντιπροσωπεύουν διαρρήξεις μέσω των οποίων κυκλοφορούν γεωθερμικά ρευστά και παρατάσσονται παραλλήλως προς τις περιφερειακές ρηξιγενείς ζώνες. Η αγωγή ζώνη A1 συμπίπτει με την ρηξιγενή ζώνη A της Εικόνας 5.7 και συνεπώς δύναται να αποδοθεί σε αυτήν. Ειδική προσοχή οφείλεται στην ζώνη B1. Εάν η προσδιορισθείσα από την χωρική ανάλυση αγωγή ζώνη προεκταθεί προς νότο κατά την διεύθυνση N-20°-W, θα διέλθει από την πόλη των Μεθάνων: εάν προεκταθεί προς βορρά, θα διέλθει από την θέση Παλαιά Λουτρά. Αμφότερες αυτές οι θέσεις είναι γνωστές εμφανίσεις θερμών πηγών. Εύλογος λοιπόν συλλογισμός προκύπτει ότι η ζώνη B1 είναι ρηξιγενής δομή σχετιζόμενη με



Εικόνα 5.8. Κατακόρυφος κατανομή της ειδικής αντίστασης ($\Omega\text{m.}$), κατά μήκος της τομής T1 (NNΔ-BBA, βλ. Εικόνα 5.7). Τα βέλη δείχνουν τις θέσεις των μετρήσεων.

κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών σε ρήγμα παράλληλο προς τις δομές της ζώνης B, το οποίο διασχίζει την χερσόνησο. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι οι δύο διαρρήξεις πιθανώς επικοινωνούν σε βάθη $>7\text{km}$. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αγωγίμος θύλακας περί το κέντρο της χερσονήσου, σε βάθη 1200-2500m. Πιθανότατα πρόκειται για ζώνη(ες) οριζοντίου και κατακορύφου κυκλοφορίας ρευστών, οι οποία ίσως ενέχει θέση γεωθερμικού ταμιευτήρα.

Στο βόρειο ήμισυ της T1, από 4.5km έως 7.3km, η πυκνότητα μετρήσεων είναι ανεπαρκής εξ αιτίας της άβατης τοπογραφίας. Αποτελέσματα υπάρχουν μόνον για τις δύο βορειότερες θέσεις μετρήσεων, με συνέπεια να εκφράζεται αδυναμία ικανοποιητικής ερμηνείας της γεωηλεκτρικής δομής για το διάστημα 4.5-6.5km και περιορισμένες δυνατότητες για το υπόλοιπο, μέχρι τέλους της τομής. Τέλος, η ζώνη Γ δεν εμφανίζεται επί της χερσονήσου, τουλάχιστον στην άμεση γειτονία των μετρήσεων.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, σημειώνεται ότι στην χερσόνησο Μεθάνων η MT και ΓΒΣ μέθοδοι:

- ✓ Επιβεβαίωσαν τον έλεγχο της περιφερειακής ρηξιγενούς τεκτονικής επί του γεωθερμικού συστήματος και τοποθέτησαν τα ίχνη ρηξιγενών ζωνών, εκεί όπου η γεωλογική ή δορυφορική επισκόπηση δεν είχε την δυνατότητα να διακρίνει (δηλαδή συνέβαλλαν στην τεκτονικής ανάλυση της περιοχής).
- ✓ Επιβεβαίωσαν τις προβλέψεις της Geotermica Italiana, εντοπίσασες κυκλοφορία ρευστών εντός ρηξιγενών ζωνών σε μεγάλα βάθη, ταυτοχρόνως απεικονίσασες την οριζόντια χωροθέτηση και την κατακόρυφη ανάπτυξη των. Επιπλέον,
- ✓ Εντόπισαν σχετικώς εκτεταμένο θύλακα υψηλής αγωγιμότητας σε προσπελάσιμα βάθη περί το κέντρο της χερσονήσου, πιθανότατα αντιπροσωπεύοντα ζώνη κυκλοφορίας και/ή ταμίευσης ρευστών εντός εντόνως διερρηγμένου πετρώματος.

Εν κατακλείδι, σε μία περιοχή «δύσκολη» όπως ή χερσόνησος Μεθάνων, η ΗΜΦΠ εφαρμογή επέτυχε τους περισσότερους στόχους γεωθερμικής έρευνας, εντοπίσασα την θέση και το πιθανό μέγεθος των δομών κυκλοφορίας και ταμίευσης ρευστών για μεγάλο εύρος βαθών. Στην συγκεκριμένη περιοχή, τέτοια αποτελέσματα δεν ήταν επιτεύξιμα με καμία άλλη μέθοδο. *Το κόστος της παρουσιασθείσης εφαρμογής υπήρξε εξαιρετικώς χαμηλό.* Για τις εργασίες υπαίθρου των χρησιμοποιηθεισών στην παρούσα 14 βαθοσκοπήσεων, απαιτήθηκαν 2 οχήματα και 9 ημερολογιακές ημέρες από συνεργείο 3-4 ατόμων, (περί τις 40 ανθρωποημέρες, όπου 1 ανθρωποημέρα = 8 εργάσιμες ώρες). Η επεξεργασία ανάλυση και ερμηνεία των μετρήσεων διήρκεσε περί τις 30 ανθρωποημέρες. Από τα ανωτέρω καθίσταται προφανές ότι ο λόγος απόδοσης προς κόστος είναι εξαιρετικώς υψηλός, ιδίως εάν συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος των άλλων μεθόδων έρευνας, οι περισσότερες εκ των οποίων ούτε καν διανοούνται να επιτύχουν λεπτομερή ανάλυση σε βάθη της τάξης 10km (ή μεγαλύτερα).

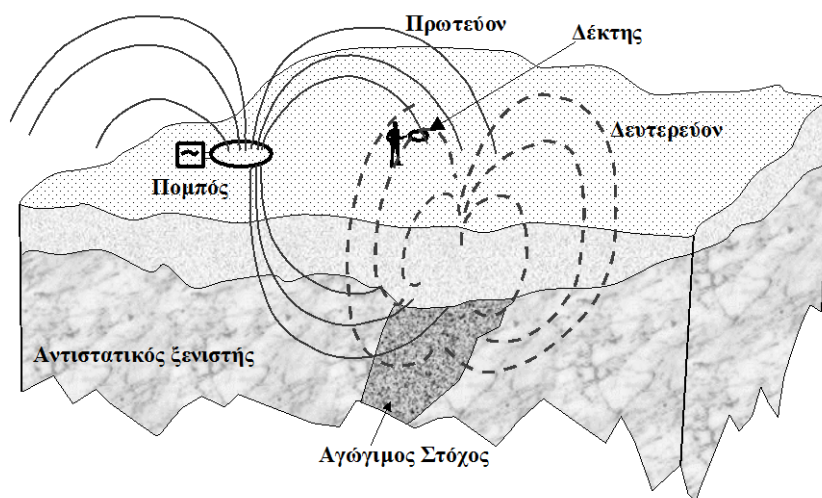
6. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΠΗΓΗΣ – ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Οι ΗΜΕΠ στηρίζονται στην εξής επαλληλία ΗΜ επαγωγικών διεργασιών:

- Τεχνητώς εκπεμπόμενο, μεταβαλλόμενο *πρωτεύον* (πηγαίο) *μαγνητικό πεδίο*, διεγείρει την αγώγιμη Γή και επάγει *ηλεκτρικά ρεύματα* εντός υπεδάφους ελευθέρου πηγών ή καταναλωτών ΗΜ ενεργείας.
- Το εξ επαγωγής *ηλεκτρικό ρεύμα* επάγει, *δευτερεύον μαγνητικό πεδίο*, μετρούμενο από κατάλληλο δέκτη.
- Από την σχέση μεταξύ των πρωτεύοντος και δευτερεύοντος *μαγνητικού πεδίου*, οι ΗΜΕΠ αποπειρώνται να προσδιορίσουν αγώγιμες γεωηλεκτρικές δομές στην γειτονία του σημείου μετρήσεων.

Σκαριφηματική απεικόνιση των ανωτέρω διεργασιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1. Επειδή υπάρχουν πολλοί τρόποι εκπομπής του πρωτεύοντος και προσδιορισμού της σχέσης πρωτεύοντος-δευτερεύοντος, έχουν αντιστοίχως επινοηθεί πολλές τεχνικές και τεχνολογίες ΗΜΕΠ, εκάστη των οποίων βασίζεται σε διαφορετικό σύστημα πομπού και δέκτη (βλ. Κεφάλαιο 4, Εικόνα 4.1 και σχετική συζήτηση). Στην Εικόνα 4.1, για παράδειγμα, εικονίζεται μία ειδική περίπτωση ΗΜΕΠ πεδίου συχνότητας, σταθερού πομπού - κινητού δέκτη.

Ιστορικά, οι ΗΜΕΠ ανεπτύχθησαν για χρήση στην μεταλλευτική έρευνα, κυρίως σε χώρες όπως ο Καναδάς και οι Σκανδιναβικές, όπου το γεωλο-



Εικόνα 7.1. Σκαριφηματική απεικόνιση των ΗΜ επαγωγικών διεργασιών επί των οποίων στηρίζονται οι ΗΜΕΠ.

γικό καθεστώς ευνοεί την εφαρμογή τους (προκάμβριες ασπίδες με περιβάλλον μεγάλης αντίστασης και μικρό πάχος επιφανειακού μανδύα). Αργότερα η χρήση των με επιφανειακά και εναέρια συστήματα, επεκτάθηκε και σε άλλα πεδία που επιγραμματικά αναφέρονται κατωτέρω.

Μεταλλευτική έρευνα: Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία που περιγράφει την έρευνα για εντοπισμό συμπαγούς και μή θειούχου μεταλλοφορίας, γραφιτικών σχηματισμών κλπ. Επίσης οι ΗΜΕΠ εφαρμόζονται εμμέσως στον εντοπισμό μη μεταλλοφόρων κοιτασμάτων που συνδέονται με ζώνες εξαλλοίωσης και στον προσδιορισμό της τεκτονικής που ελέγχει μεταλλοφορία φλεβικού τύπου. Όπως με τις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους δεν υπάρχει τρόπος διαχωρισμού μεταξύ οικονομικού και μη τύπου μεταλλοφορίας και πολλές φορές οι ΗΜΕΠ καταλήγουν σε τεχνικές επιτυχίες αλλά οικονομικές αποτυχίες, υπό την έννοια ότι εντοπίζεται μεταλλοφορία δίχως οικονομική σημασία. Προς αποφυγή τέτοιων αποτελεσμάτων, οι ερευνητικές εργασίες συμπεριλαμβάνουν και άλλες γεωφυσικές μεθόδους, εντασσόμενες σε ένα γενικότερο πλαίσιο γεωερευνητικών εργασιών.

Υδρογεωλογική έρευνα: Σαν αντικείμενα έρευνας αναφέρονται ο εντοπισμός και χαρτογράφηση γεωλογικών δομών που ελέγχουν την συγκέντρωση υδάτων (ταμιευτήρες παντός τύπου, παλαιοκοίτες σε ιζηματογενείς λεκάνες, ζώνες διάρρηξης σε κρυσταλλικά πετρώματα, μεμονωμένα ρήγματα, φλέβες, καρστικοί σχηματισμοί κλπ.), και ο προσδιορισμός της γεωλογικής στρωματογραφίας και του μετώπου υφαλμύρωσης παρακτίων υδροφορέων.

Τεχνικά Έργα: Χαρτογράφηση ρηγμάτων και ρηξιγενών ζωνών, προσδιορισμός πάχους του μανδύα αποσάθρωσης, εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων και γραμμών παροχής υπηρεσιών, έλεγχος ποιότητας, έλεγχος διαρροών, εντοπισμός θαμμένων πυρομαχικών κ.ά.

Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Η μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με την διαχείριση αποβλήτων, μόλυνση υδροφόρου ορίζοντα και άλλες ανθρωπινες δραστηριότητες αποτελεί αντικείμενο συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών ΗΜΕΠ κατά τα τελευταία χρόνια. Διαρροή οξέων, αλάτων και γενικά δραστηριότητες που προκαλούν αύξηση της αγωγιμότητας του περιβάλλοντος πετρώματος ή των υδροφόρων σχηματισμών ανιχνεύονται με ΗΜ μεθόδους. Οι τελευταίες προσφέρουν συνήθως πλεονεκτήματα αυξημένης παραγωγικότητας και ευαισθησίας.

Αρχαιομετρία: Οι ΗΜΕΠ βρίσκουν εφαρμογές στον εντοπισμό θαμμένων, μεταλλικών και μη αντικειμένων και στην χαρτογράφηση, ανιχνεύοντας διαφοροποιήσεις της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους. Οι δύο αυτές παράμετροι είναι συχνά ενδεικτικές παλαιότερων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Γεωθερμική έρευνα: Ανίχνευση και χαρτογράφηση ρηχών και ενδιάμεσων ζωνών κυκλοφορίας και ταμίευσης θερμών ρευστών.

Όπως εύκολα προκύπτει, οι ΗΜ μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης εφαρμόζονται σε κάθε τομέα της γεωερευνητικής δραστηριότητας και προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος, αυξημένη αξιοπιστία, σημαντικό εύρος βαθών διασκόπησης και σημαντική ευαισθησία στις μεταβολές της γεωηλεκτρικής δομής. Υπάρχει μεγάλος αριθμός ΗΜ μεθόδων και συστημάτων, εκάστη των οποίων παρουσιάζει τις δικές της θεωρητικές και πειραματικές ιδιαιτερότητες. Η δικαίωση της πληθωρικής αυτής ομάδας γεωφυσικών τεχνικών, έγκειται στην δυνατότητα τους να προσφέρουν πληροφορίες υψηλής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας, προσαρμοζόμενες στις ειδικές ανάγκες του εκάστοτε γεωερευνητικού προβλήματος.

6.1. Βασική Θεωρία και Φυσικές Αρχές

6.1.1. Επαγωγικές διεργασίες

Στο πεδίο συχνότητας, η ύπαρξη αγώγιμου σχηματισμού γίνεται αντιληπτή από την ανίχνευση του δευτερεύοντος πεδίου, το οποίο έχει την ίδια συχνότητα, αλλά παρουσιάζει διαφορά φάσης με το πρωτεύον. Η γενική αυτή φυσική βάση των ΗΜΕΠ, θα γίνει καλύτερα κατανοητή εάν θεωρήσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών πυλώνων της ΗΜ διασκόπησης, δηλ. του πομπού, του αγωγού-στόχου και του δέκτη, προσομοιώνοντας έκαστο εξ αυτών με ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα RL (πηνίο με ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή). Σκαριφηματικό διάγραμμα του παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Έστω, λοιπόν, ότι τον Πομπό διαρρέει αρμονικό ρεύμα της μορφής

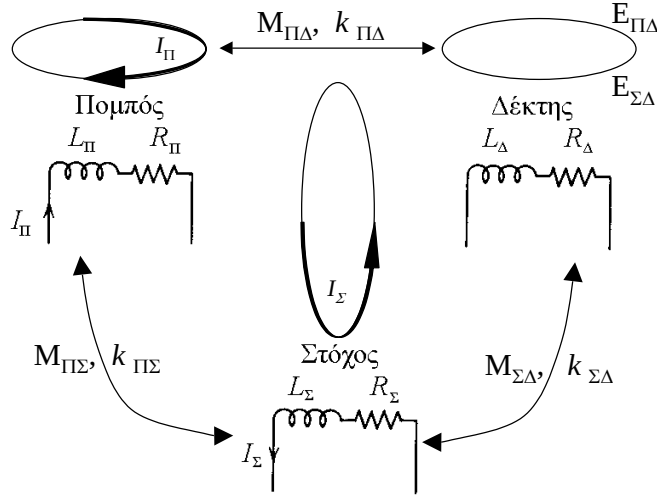
$$I_{\Pi} = I_0 \exp(i\omega t), \quad (6.1\alpha)$$

το οποίο παράγει πρωτεύον μαγνητικό πεδίο

$$H_{\Pi} = G_1 \cdot I_{\Pi} = G_1 I_0 \exp(i\omega t), \quad (6.1\beta)$$

όπου G_1 είναι γεωμετρικός συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο και ιδιότητες της πηγής. Αμέσως αποκαθίσταται τριμερής ζεύξη μεταξύ των τριών κυκλωμάτων, αφού ο Στόχος διεγείρεται από τον Πομπό και διεγείρει τον Δέκτη, ενώ ο Πομπός επίσης διεγείρει τον Δέκτη. Η αλληλεπίδραση μεταξύ κάθε δύο εκ των τριών κυκλωμάτων καθορίζεται από τον συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής M_{ij} , που αντιπροσωπεύει την μαγνητική ροή μέσω του πηνίου (i) λόγω της ροής ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο (j) και είναι συμμετρικός μεταξύ των (i) και (j). Η επαλληλία των επαγωγικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα είναι η εξής:

1. Ζεύξη Πομπού - Δέκτη. Η Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (τάση) στον Δέκτη είναι



Εικόνα 6.2. Προσομοίωση HM διασκόπησης με συνεζευγμένα κυκλώματα RL. M_{ij} είναι οι συντελεστές αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των κυκλωμάτων και k_{ij} είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές ζεύξης.

$$E_{\Pi\Delta} = -M_{\Pi\Delta} \frac{dI_{\Pi}}{dt} = -i\omega M_{\Pi\Delta} I_{\Pi} \quad (6.2a)$$

όπου $M_{\Pi\Delta}$ είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ Πομπού και Δέκτη. Το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο στον δέκτη θα είναι

$$H_{\Pi\Delta} = G_3 \cdot I_{\Pi} = G_3 \cdot H_{\Pi} / G_1, \quad (6.2b)$$

όπου G_3 είναι γεωμετρικός συντελεστής ανάλογος του G_1 .

2. Ζεύξη Πομπού - Στόχου, στον οποίο αναπτύσσεται ΗΕΔ

$$E_{\Pi\Sigma} = -M_{\Pi\Sigma} \frac{dI_{\Pi}}{dt} = -i\omega M_{\Pi\Sigma} I_{\Pi} \quad (6.3)$$

όπου $M_{\Pi\Sigma}$ είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ Πομπού και Στόχου. Το ρεύμα που ρέει στον στόχο είναι

$$I_{\Sigma} = \frac{E_{\Pi\Sigma}}{Z_{\Sigma}} = \frac{(6.3)}{Z_{\Sigma}} \rightarrow I_{\Sigma} = \frac{-i\omega M_{\Pi\Sigma} I_{\Pi}}{R_{\Sigma} + i\omega L_{\Sigma}} \quad (6.4)$$

όπου $Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + i\omega L_{\Sigma}$ είναι η εμπέδηση του Στόχου. Μετά από λίγη άλγεβρα,

$$I_{\Sigma} = -\frac{M_{\Pi\Sigma} I_{\Pi}}{L_{\Sigma}} \cdot \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}, \quad Q = \frac{\omega L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \quad (6.5)$$

Χρησιμοποιώντας και την (6.1a), με λίγη περαιτέρω άλγεβρα, η (6.5) λαμβάνει την μορφή,

$$I_{\Sigma} = \frac{\omega M_{\Pi\Sigma} I_0}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (\omega L_{\Sigma})^2}} \exp\left(i\omega t - i\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)\right). \quad (6.6)$$

Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος ρεύματος (στον Πομπό) και του δευτερεύοντος ρεύματος (στον Στόχο), είναι $\psi = \pi/2 + \varphi$, που εξειδικεύεται σε $\pi/2$ λόγω της επαγωγικής ζεύξης μεταξύ Πομπού και Στόχου, (όπως άλλωστε αναμένεται από την στοιχειώδη θεωρία της ΗΜ επαγωγής), συν μία γωνία $\varphi = \tan^{-1}(\omega L_{\Sigma}/R_{\Sigma})$ λόγω των ιδιοτήτων του Στόχου.

3. Ζεύξη Στόχου - Δέκτη, στον οποίο αναπτύσσεται ΗΕΔ

$$E_{\Sigma\Delta} = -M_{\Sigma\Delta} \frac{dI_{\Sigma}}{dt} = -i\omega M_{\Sigma\Delta} I_{\Sigma} \rightarrow$$

$$\xrightarrow{(6.4, 6.5)} E_{\Sigma\Delta} = \frac{i\omega M_{\Sigma\Delta} M_{\Pi\Sigma} I_{\Pi}}{L_{\Sigma}} \cdot \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}, \quad (6.7a)$$

η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του Πομπού και του Στόχου. Το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στον Δέκτη λόγω του ρεύματος που διαρρέει τον Στόχο είναι

$$H_{\Sigma\Delta} = G_2 \cdot I_{\Sigma},$$

όπου G_2 είναι γεωμετρικός συντελεστής ανάλογος των G_1 και G_3 . Λόγω των σχέσεων (6.1β) και (6.5), το δευτερεύον πεδίο εκφράζεται ως

$$H_{\Sigma\Delta} = -\frac{G_2 M_{\Pi\Sigma} H_{\Pi}}{G_1 L_{\Sigma}} \cdot \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}, \quad (6.7b)$$

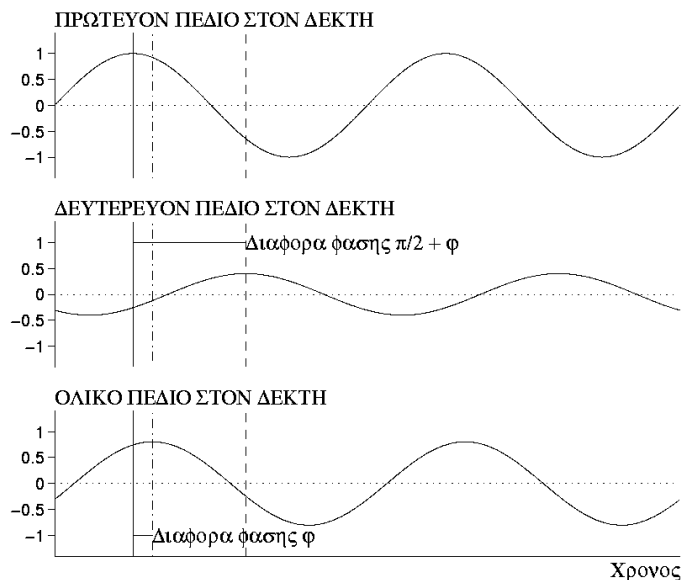
και λόγω της (6.6) ισοδυνάμως γράφεται

$$H_{\Sigma\Delta} = \frac{G_2 \omega M_{\Pi\Sigma} I_0}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (\omega L_{\Sigma})^2}} \exp\left(i\omega t - i\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)\right). \quad (6.7c)$$

Δεδομένου του ορισμού (6.2β) του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου στον Δέκτη, η διαφορά φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι επίσης $\psi = -(\pi/2 + \varphi)$.

6.1.2. Ελλειπτική Πόλωση και Κλίση του Ολικού Πεδίου.

Ο δέκτης ενός ΗΜ συστήματος πεδίου συχνότητας είναι συνήθως ευαίσθητο μικρό πηνίο και μετρά το δευτερεύον πεδίο παρουσία του πρωτεύοντος. Σε γενικές γραμμές, τα δύο πεδία δεν είναι διαχωρίσιμα κατά την ώρα των μετρήσεων και το ολικό μετρούμενο σήμα αποτελεί υπέρθεση του πρωτεύοντος με ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα από αντίστοιχο αριθμό στόχων. Στην απλούστερη περίπτωση του ενός μόνον Στόχου, η χρονική σχέση μεταξύ του πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και ολικού πεδίων φαίνεται στην Εικόνα 6.3, όπου παρουσιάζεται η υπέρθεση ενός πρωτεύοντος πεδίου $H_{\Pi\Delta} \propto \cos(\omega t)$ και

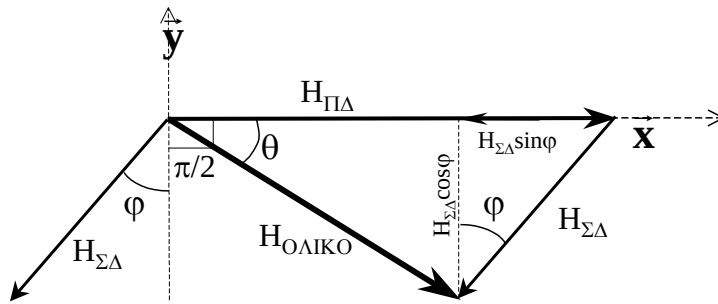


Εικόνα 6.3. Υπέρθεση Πρωτεύοντος ημιτονοειδούς (άνω) και Δευτερεύοντος ημιτονοειδούς με διαφορά φάσης $\psi = -(\pi/2 + \phi)$ ως προς το πρωτεύον. Το Ολικό πεδίο είναι επίσης ημιτονοειδές και ακολουθεί το Πρωτεύον με διαφορά φάσης ϕ .

ενός δευτερεύοντος πεδίου $H_{\Sigma\Delta} \propto \cos(\omega t + \psi)$, η οποία οδηγεί σε ολικό πεδίο με διαφορά φάσης ϕ από το πρωτεύον.

Είναι προφανές ότι αν χρησιμοποιήσουμε την διεύθυνση του πρωτεύοντος πεδίου ως άξονα αναφοράς, το ολικό μαγνητικό πεδίο στον δέκτη θα σχηματίζει γωνία θ σε σχέση με το πρωτεύον. Για να δούμε πως συμβαίνει αυτό, θεωρούμε ορθογώνιο (καρτεσιανό) σύστημα συντεταγμένων $\{x, y\}$ και έστω ότι το πρωτεύον πεδίο $\vec{H}_{\Pi\Delta}$ διευθύνεται παράλληλα προς τον άξονα x . Τότε, η γεωμετρική σχέση μεταξύ του πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και ολικού πεδίου θα παρίσταται στο ανυσματικό διάγραμμα της Εικόνας 6.4. Το ολικό πεδίο αποτελεί ανυσματική συνισταμένη του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, το οποίο διευθετείται σε γωνία $\psi = -(\pi/2 + \phi)$ ως προς το πρωτεύον, και ως εκ τούτου κλίνει κατά γωνία $\theta \neq \phi$ ως προς το άξονα αναφοράς x . Η διαφορά φάσης ϕ και η γωνία κλίσης θ είναι συναρτήσεις των γεωηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Στόχου και ως εκ τούτου *διαγνωστικές* της ύπαρξης και των ιδιοτήτων του!

Από την Εικόνα 6.4 και την εξίσωση (6.7γ) προκύπτει, ότι όταν ο Στόχος είναι πολύ καλός ωμικός αγωγός, οπότε $Q = \omega L_S / R_S \rightarrow \infty$, τότε $\phi \rightarrow \pi/2$. Στην περίπτωση αυτή το δευτερεύον έπεται του πρωτεύοντος σχεδόν κατά



Εικόνα 6.4.²⁹ Ανυσματικό διάγραμμα που εικονίζει την γεωμετρική σχέση και διαφορά φάσης μεταξύ πρωτεύοντος ($H_{\Pi\Delta}$) και δευτερεύοντος ($H_{\Sigma\Delta}$) πεδίων.

$\psi=180^\circ$. Όταν ο Στόχος είναι πτωχός αγωγός, $\omega L_\Sigma/R_\Sigma \rightarrow 0$ και $\phi \rightarrow 0$, οπότε το δευτερεύον έπεται μόνο κατά $\psi=90^\circ$ του πρωτεύοντος. Σε γενικές γραμμές, το δευτερεύον θα βρίσκεται μεταξύ $\pi/2$ και π (90° - 180°) πίσω από το πρωτεύον. Η συνιστώσα του δευτερεύοντος κατά 180° εκτός φάσεως με το πρωτεύον είναι η $H_{\Sigma\Delta} \sin \phi$, και στην «επαγγελματική» διάλεκτο ονομάζεται *πραγματική* (real) ή *εν φάσει* (in-phase). Η συνιστώσα 90° εκτός φάσεως είναι η $H_{\Sigma\Delta} \cos \phi$ και αποκαλείται *φανταστική* (imaginary), ή *εκτός φάσεως* (out-phase) ή *τετραγωνική* (quadrature).

Η υπέρθεση πολλαπλών ημιτονοειδών μαγνητικών πεδίων με διαφορετική φάση και διεύθυνση διάδοσης δίδει ολικό πεδίο που μεταβάλλει συνεχώς το πλάτος του και περιστρέφεται στον χώρο, είναι δηλαδή *ελλειπτικά πολωμένο*. Οι χωρικές ιδιότητες του ολικού πεδίου, δηλαδή η ελλειπτική πόλωση και η γωνία κλίσης είναι μεγέθη μετρήσιμα και εκμεταλλεύσιμα από πολλές και δημοφιλείς ΗΜΕΠ πεδίου συχνότητας. Για τον λόγο αυτό, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και θα αναλυθούν κατωτέρω.

Στις ΗΜΕΠ πεδίου συχνότητας χρησιμοποιείται σχεδόν μονοχρωματικό πρωτεύον πεδίο, (δηλαδή εκπέμπεται μόνο μία συχνότητα την φορά), και για ευκολία θεωρούμε ότι αυτό είναι αποκλειστικά πραγματικό. Επίσης, θεωρούμε ότι το δευτερεύον πεδίο προέρχεται από ένα και μόνο Στόχο. Χρησιμοποιώντας τις (6.1β), (6.2β) και (6.7γ), στο σύστημα συντεταγμένων $\{x, y\}$ της Εικόνας 6.4, το ολικό μαγνητικό πεδίο αναλύεται σε δύο συνιστώσες

²⁹ Τροποποιημένη από Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, σελ. 351.

$$\begin{aligned}\vec{H}_x &= \vec{H}_{\Pi\Delta} + \vec{H}_{\Sigma\Delta} \sin \varphi \\ &= \mathbf{x} \bullet G_1 I_0 \cos(\omega t) + \mathbf{x} \bullet \frac{G_2 \omega M_{\Pi\Sigma} I_0}{\sqrt{R_\Sigma^2 + (\omega L_\Sigma)^2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \sin \varphi\end{aligned}\quad (6.8\alpha)$$

και

$$\vec{H}_y = \mathbf{y} \bullet H_{\Sigma\Delta} \cos \varphi = \mathbf{y} \bullet \frac{G_2 \omega M_{\Pi\Sigma} I_0}{\sqrt{R_\Sigma^2 + (\omega L_\Sigma)^2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \cos \varphi \quad (6.8\beta)$$

Οι δύο συνιστώσες του ολικού πεδίου είναι διαφορετικές. Παράγονται από προβολές και υπερθέσεις ημιτονοειδών συναρτήσεων με διαφορετική φάση και με την σειρά τους αποτελούν νέες ημιτονοειδείς συναρτήσεις που απλούστερα αναπαρίστανται ως εξής:

$$\vec{H}_x = \mathbf{x} \bullet A \cos(\omega t + \varphi_x) \quad (6.9\alpha)$$

$$\vec{H}_y = \mathbf{y} \bullet B \cos(\omega t + \varphi_y), \quad (6.9\beta)$$

όπου φ_x και φ_y είναι οι διαφορετικές πλέον φάσεις των $\vec{H}_x, \vec{H}_y$.

Είναι σαφές και εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί γραφικά, ότι λόγω διαφοράς πλάτους και φάσης, το ορθογώνιο ζεύγος $(\vec{H}_x, \vec{H}_y)$ θα διαγράφει έλλειψη στο επίπεδο $\{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, εκφραζόμενη από την εξίσωση

$$\frac{H_x^2}{A^2} + \frac{H_y^2}{B^2} - \frac{2H_x H_y}{AB} \cos(\varphi_y - \varphi_x) = \sin^2(\varphi_y - \varphi_x) \quad (6.10)$$

(βλ. Εικόνα 6.5). Επίσης εύκολα αποδεικνύεται ότι η γωνία θ , δηλαδή η κλίση του ολικού πεδίου δίδεται από την σχέση³⁰

$$\tan 2\theta = \frac{2AB \cos(\varphi_y - \varphi_x)}{A^2 - B^2}, \quad (6.11)$$

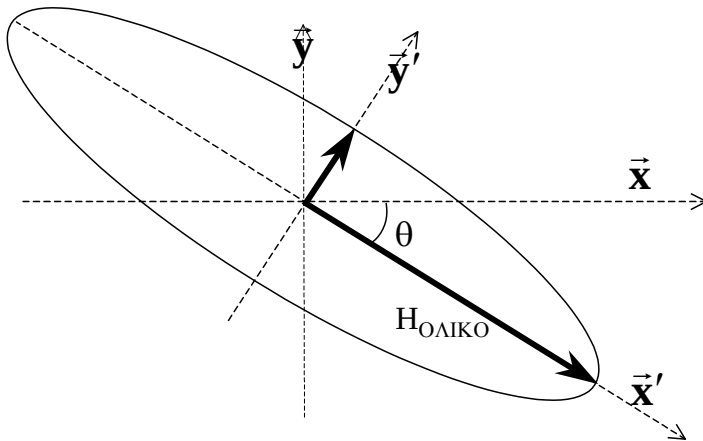
και ότι ο λόγος του μικρού προς τον μεγάλο άξονα της έλλειψης (ελλειπτικότητα), ορίζεται ως $\tan \beta = B' / A'$, με την γωνία β να υπολογίζεται από την

$$\sin 2\beta = \frac{2AB \sin(\varphi_y - \varphi_x)}{A^2 + B^2}, \quad -\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4} \quad (6.12)$$

Όταν κοιτάμε κάθετα προς το επίπεδο $\{\mathbf{x}', \mathbf{y}'\}$ όπως στην Εικόνα 6.5, η πόλωση είναι *δεξιόστροφη* όταν $\beta \geq 0$, (δηλαδή το πεδίο περιστρέφεται δεξιόστροφα), και *αριστερόστροφη* όταν $\beta < 0$, οπότε το πεδίο περιστρέφεται αντίθετα προς την φορά των δεικτών του ωρολογίου.

Στην ανωτέρω ανάλυση έχει ληφθεί υπ' όψη η ύπαρξη ενός μόνο Στόχου, ενώ στην γενική περίπτωση αναμένεται να υπάρχουν περισσότεροι του

³⁰ βλ. σελ. 24-27 των Born M. and Wolf, E., 1965. Principles of optics, Pergamon Press, New York, 3η έκδοση.



Εικόνα 6.5. Το ολικό πεδίο στον δέκτη διαδίδεται περιστρεφόμενο, διαγράφοντας έλλειψη με κλίση θ ως προς το πρωτεύον πεδίο.

ενός. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση πόλωσης που παραθέσαμε ανωτέρω ισχύει και στην γενική περίπτωση, διότι όλα τα δευτερεύοντα μπορούν να αναλυθούν σε ορθογώνιες συνιστώσες επί της ανυσματικής βάσης $\{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$ όπως στις εξισώσεις (6.8α,β), η υπέρθεσή των οποίων θα οδηγήσει σε δύο συνιστώσες του ολικού πεδίου που ούτως ή άλλως, θα έχουν τη γενική μορφή των εξισώσεων (6.9α) και (6.9β).

6.1.3. Ταξινόμηση

Οι ΗΜΕΠ Πεδίου Συχνότητας περαιτέρω διακρίνονται με βάση τα μετρήσιμα μεγέθη, και συγκεκριμένα στην μέθοδο διαχωρισμού πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πεδίου, ο οποίος γίνεται με διαφορετικούς τρόπους. Συνηθέστερα έχουμε:

- **Διαχωρισμό πόλωσης – μεθόδους μέτρησης γωνίας κλίσης.** Το δευτερεύον γίνεται αντιληπτό από την επίδραση του στα χαρακτηριστικά πόλωσης του ολικού πεδίου.
- **Διαχωρισμό φάσης,** κατά τον οποίο μετρώνται μόνον οι συνιστώσες του δευτερεύοντος πεδίου που βρίσκονται εκτός φάσης με το πρωτεύον.

Η μεγάλη ποικιλία συνδυασμών Πομπού – Δέκτη και τρόπων διαχωρισμού των πεδίων είναι και η αιτία ύπαρξης μεγάλου αριθμού ΗΜΕΠ και ΗΜ συστημάτων. Επί πλέον, πολλά από τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα να καλύπτουν συγκεκριμένες εφαρμογές για εντοπισμό στόχων με καθορισμένο εύρος αγωγιμοτήτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Μία περαιτέρω μέθοδος ταξινόμησης βασίζεται στην τρόπο σύζευξης του πρωτεύοντος πεδίου με τον Στόχο και κατατάσσει τις ΗΜΕΠ σε συστήματα *σταθερής και κινητής πηγής*. Στα πρώτα, ο πομπός παραμένει ακίνητος, διατηρώντας σταθερή την σύζευξη πηγής-υπεδάφους, ενώ ο δέκτης κινείται ερευνώντας τον περιβάλλοντα χώρο. Στα δεύτερα, η σύζευξη μεταξύ πομπού-υπεδάφους μεταβάλλεται σε κάθε σημείο μέτρησης (πομπός και δέκτης μετακινούνται).

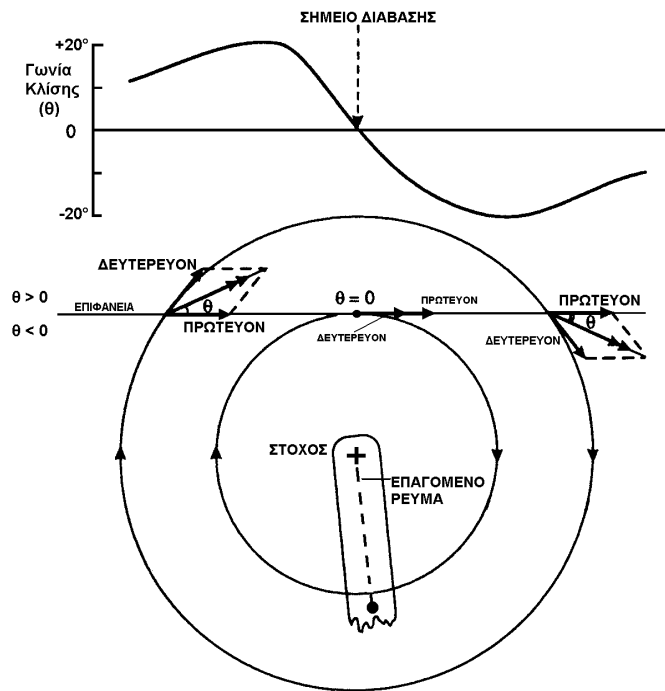
Αναφορικά με τον τρόπο εκτέλεσης της διασκόπησης, οι μέθοδοι ΗΜΕΠ ταξινομούνται στις μεθόδους *οριζόντιας αποτύπωσης (profiling)* όπου μελετάται η πλευρική κατανομή της γεωηλεκτρικής δομής και στις μεθόδους *κατακόρυφης αποτύπωσης ή βαθυσκόπησης (sounding)*, όπου προσδιορίζεται η κατακόρυφη κατανομή της. Η διάκριση αυτή καθίσταται ασαφής όταν χρησιμοποιούνται συστήματα με μεγάλο εύρος χρόνου ή συχνοτήτων, τα οποία μπορούν καλύψουν και τους δυο τρόπους έρευνας.

6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ

6.2.1 Μέθοδοι Μέτρησης Γωνίας Κλίσης.

Υπάρχουν πολλά ΗΜ συστήματα που μετρούν την γεωμετρία του ολικού (πρωτεύοντος + δευτερεύοντος) πεδίου στην θέση του Δέκτη. Αυτά μπορεί να χρησιμοποιούν φυσικά ή τεχνητά (κυρίως) πρωτεύοντα πεδία και σταθερούς ή κινητούς πομπούς, αλλά όλα υπάγονται στη γενικότερη κατηγορία μεθόδων διαχωρισμού πόλωσης και μέτρησης της γωνίας κλίσης, διότι καταγράφουν την εκτροπή του πηνίου - Δέκτη στην θέση μέτρησης, ως προς ένα οριζόντιο άξονα. Επιπλέον, όλα αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν πρωτεύοντα πεδία που στην θέση μέτρησης είναι περίπου οριζόντια.

Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι γωνίας κλίσης λειτουργούν σύμφωνα με το σκαρίφημα της Εικόνας 6.6. Δεδομένου ότι το πρωτεύον είναι οριζόντιο, το ολικό πεδίο θεωρείται ότι έχει κλίση θετική όταν το δευτερεύον είναι ανωφερές και αρνητική όταν το δευτερεύον είναι κατωφερές. Διαβαίνοντας



Εικόνα 6.6. Η Γενική αρχή λειτουργίας των ΗΜ μεθόδων μέτρησης γωνίας κλίσης.

τον Στόχο, το δευτερεύον πεδίο αλλάζει φορά. Το σημείο μηδενικής κλίσης, συμπίπτει με το *σημείο διάβασης* (crossover) του Στόχου και βρίσκεται ακριβώς (ή σχεδόν ακριβώς) επάνω από αυτόν, επιτρέποντας έτσι τον εύκολο εντοπισμό της θέσης του. Η ανωτέρω σύμβαση θετικής και αρνητικής γωνίας κλίσης θα μπορούσε να είναι εναντιόμορφη, αλλά επιλέγεται έτσι ώστε το πρόσημο της κλίσης του αγωγού να συμπίπτει με το πρόσημο της κλίσης της καμπύλης διάβασης.

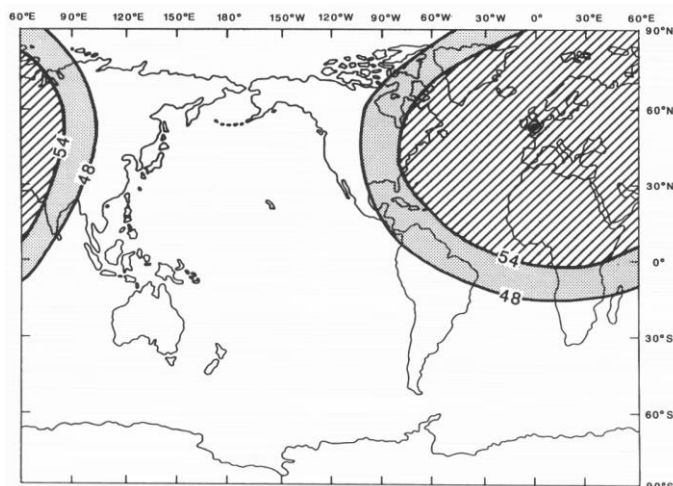
Οι μέθοδοι γωνίας κλίσης ήταν και παραμένουν πολύ δημοφιλείς παρά τους αρκετούς περιορισμούς τους, λόγω του προστιτού των οργάνων, του χαμηλού λειτουργικού κόστους και της υψηλής παραγωγικότητας, (μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης των διασκοπήσεων), ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες υπαίθρου. Οι μέθοδοι σταθερού πομπού έχουν επίσης δυνατότητα διείσδυσης σε αρκετά μεγάλα βάθη.

6.2.1.1 Μέθοδος Μακράν Πεδίου VLF (Very Low Frequencies)

Μια από τις πλέον δημοφιλείς και διαδεδομένες ΗΜΕΠ είναι η VLF. Από το 1964 που έκανε την εμφάνιση του το πρώτο σύστημα εδάφους, η μέθοδος διεδόθη ευρύτατα και από το 1969 άρχισε να χρησιμοποιείται και από αέρος. Σ' αυτό συνετέλεσε, πέρα από την αποτελεσματικότητα της, η ευχρησία, η μεγάλη παραγωγικότητα και το μικρό κόστος του συστήματος.

Η μέθοδος κάνει χρήση της ζώνης συχνοτήτων 15-30 KHz, στην οποία εκπέμπουν ισχυροί VLF ραδιοφωνικοί σταθμοί υπερπόντιων επικοινωνιών και ναυτιλίας. Αυτοί συνιστούν παγκόσμιο δίκτυο και έχουν διευθετηθεί έτσι, ώστε τουλάχιστον δύο να είναι ταυτοχρόνως ανιχνεύσιμοι οπουδήποτε της υφελίου. Η χρήσιμη εμβέλεια των πομπών αυτών είναι σημαντική και σαν παράδειγμα, στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα κάλυψης του σταθμού GBR, (Rugby, Ηνωμένο Βασίλειο), που χρησιμοποιείται συχνά στην Ελλάδα. Η λήψη είναι συνήθως καλύτερη τις πρωινές ώρες και επαρκής ολόκληρη την ημέρα.

Οι βασικές αρχές της VLF παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.8. Το πηγαίο μαγνητικό πεδίο είναι οριζόντιο και θεωρητικά εφαπτομενικό σε κύκλους ομοκέντρους ως προς την κεραία του πομπού. Το πηγαίο πεδίο (σήμα) VLF διαδίδεται παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης και εισδύει κατακορύφως και ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης, ενώ το ολικό πεδίο διαδίδεται καθέτως προς την επιφάνεια του εδάφους. Στην διασκόπηση VLF όπου συνηθέστερα γίνονται μετρήσεις παραμέτρων του μαγνητικού πεδίου μόνον, επιλέγονται σταθμοί εκπομπής τέτοιοι, ώστε η διεύθυνση διάδοσης, δηλ. η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου παράλληλα προς την ακτίνα σταθμού-δέκτη, να είναι παράλληλη προς την παράταξη του γεωλογικού στόχου και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο.

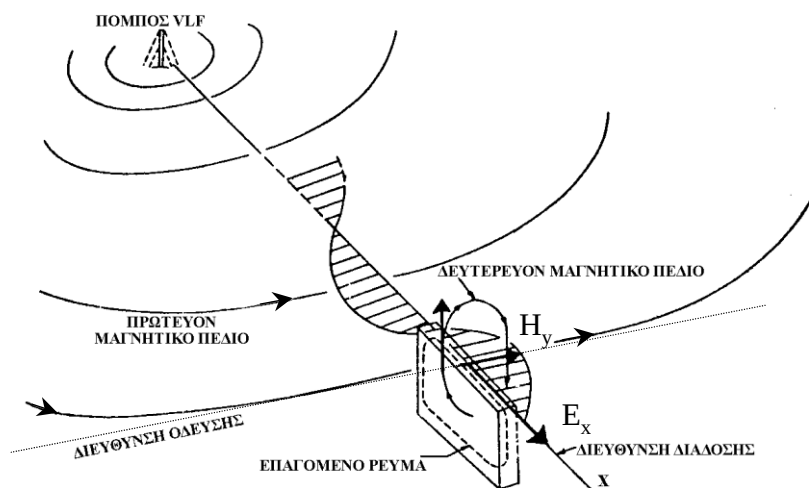


Εικόνα 6.7.³¹ Διάγραμμα ισχύος (σε db > 1μV/m) του σήματος του σταθμού GBR (Rugby, Ηνωμένο Βασίλειο). Η καμπύλη των 54 db περικλείει περιοχές με $E_z > 0.5$ mV/m (ισχυρό σήμα). Η καμπύλη των 48 db περικλείει περιοχές με $E_z > 0.25$ mV/m (οριακά ισχυρό σήμα).

Ως εκ της φύσεώς της, η μέθοδος εφαρμόζεται για τον εντοπισμό 2Δ δομών (διαρρήξεις, φλεβικοί σχηματισμοί) σε σχετικά μικρό βάθος. Το μέγιστο πρακτικό βάθος διασκόπησης θεωρείται ότι είναι περίπου το ίδιο με το ήμισυ του επιδερμικού βάθους και τυπικά αναφέρεται βάθος 30 μέτρων σε περιβάλλον ειδικής αντίστασης 100 Ωm. Σημειώνεται επίσης ότι το βάθος διείσδυσης έτι ελαττώνεται όταν ο στόχος είναι καλυμμένος από αγωγίμο μανδύα, ο οποίος επιφέρει περαιτέρω εξασθένιση του πεδίου κατά την διαδρομή από την επιφάνεια προς τον στόχο και αντιστρόφως.

Οι πρώτοι δέκτες VLF μετρούσαν την κλίση του ολικού πεδίου με χρήση δύο αμοιβαία ορθογωνίων πηνίων φερριτικού πυρήνα. Το ένα εκ των δύο πηνίων, (*πηνίο σήματος*), τοποθετείται κατ' αρχάς οριζόντιο και περιστρέφεται αζιμουθιακά έως ότου βρεθεί ένα ελάχιστο. Προφανώς, η διεύθυνση αυτή είναι ευθυγραμμισμένη με τον πομπό και συνήθως καλά προσδιορισμένη. Ακολούθως, το πηνίο σήματος τοποθετείται κατακόρυφα με το δεύτερο πηνίο (*πηνίο αναφοράς*) κατά την διεύθυνση της όδευσης και το ορθογώνιο σύστημα στρέφεται περι οριζόντιο άξονα έως ότου ευρεθεί ένα ελάχιστο, στο οποίο μετράται η γωνία κλίσης με ενσωματωμένο κλισιόμετρο. Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται η μέτρηση γωνίας κλίσης με το αρχέτυπο των συστημά-

³¹ Αναπαράγωγή από McNeill, J.D. and Labson, V.F., "Geological mapping using VLF radio fields", in Nabighian, M.N. and Corbett, J.D. (editors), *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, Volume 2, 521-640, SEG series Investigations in Geophysics No 3.

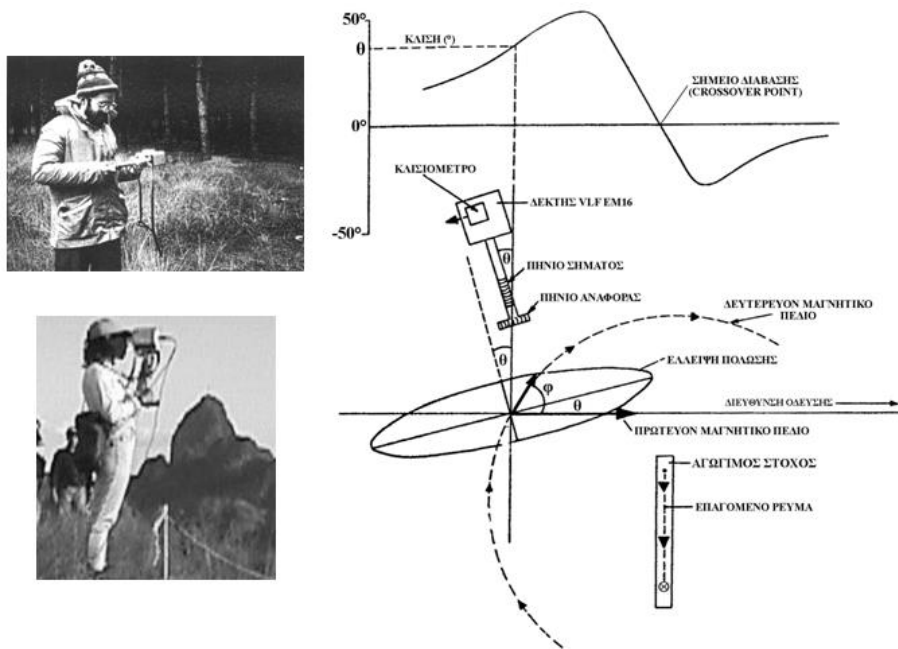


Εικόνα 6.8. Σκαριφηματική απεικόνιση των φυσικών αρχών της μεθόδου VLF.

των VLF (Geonics EM16). Εκτός από την γωνία κλίσης, το σύστημα μπορεί να προσδιορίσει τον λόγο του μικρού προς το μεγάλο άξονα της έλλειψης πόλωσης (έλλειπτικότητα) και την τετραγωνική συνιστώσα. Για να μετρηθεί η τελευταία, το σήμα του πηνίου αναφοράς υφίσταται (μέσω ειδικού κυκλώματος) καθυστέρηση φάσης 90° , συνδέεται σε σειρά με το πηνίο σήματος και τροφοδοτείται στον δέκτη. Η τετραγωνική συνιστώσα αναγιγνώσκεται σε ειδικό βαθμολογημένο όργανο, ως εκατοστιαίο ποσοστό του πρωτεύοντος.

Οι νεότερες γενεές οργάνων είναι πλήρως αυτοματοποιημένες (π.χ. ABEM WADI), ή μετρούν και πρόσθετες παραμέτρους. Για παράδειγμα, το σύστημα Geonics EM16R, πρωτοεμφανισθέν το 1973, αποτελεί αναβάθμιση του EM16 με πρόσθετη μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου δι' ενός παθητικού ηλεκτρικού διπόλου με ηλεκτρόδια υψηλής εμπέδησης, μήκους μέχρι 10m και τα σχετικά ηλεκτρονικά ελέγχου του σήματος. Ο αισθητήρας του ηλεκτρικού πεδίου τοποθετείται παράλληλα προς την διεύθυνση πηγής-δέκτη (παράλληλα προς την παράταξη του στόχου), ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης κατά τα πρότυπα της Μαγνητοτελλουρικής μεθόδου. Η πρόσθετη πληροφορία ενισχύει εξαιρετικά την αποτελεσματικότητα του οργάνου και της μεθόδου.

Ένα μειονέκτημα των ανωτέρω τεχνικών μέτρησης είναι ότι η τοπική γεωλογική παράταξη δεν είναι πάντοτε ευθυγραμμισμένη με το αζιμούθιο της πηγής (το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο δεν είναι κάθετο προς την παράταξη του στόχου). Στις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος, ή δεν είναι εφαρμόσιμη, ή δίνει αποτελέσματα ελαττωμένης αξιοπιστίας. Τέτοια προβλήματα αντιμετωπίζονται από την σύγχρονη γεωφυσική επιστήμη, η οποία επέτυχε την α-

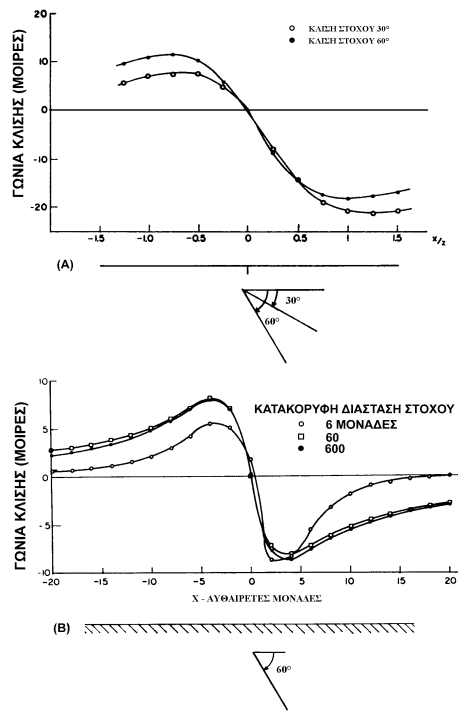


Εικόνα 6.9. Αναπαράσταση μέτρησης της γωνίας κλίσης με όργανο EM16. Άνω Αριστερά: Προσδιορισμός του αζιμουθίου του Πομπού. Κάτω αριστερά: Ακολουθεί η μέτρηση της γωνίας κλίσης. Δεξιά: Σκαριφηματική αναπαράσταση μέτρησης γωνίας κλίσης με όργανο EM16, καθώς και της φυσικής επί της οποίας βασίζεται αυτή.

νάπτυξη συστημάτων μετρήσεων και αλγορίθμων ικανών να αντεπεξέλθουν σε τέτοια προβλήματα. Δεδομένου ότι η παρουσίαση τέτοιων τεχνικών ανάλυσης εκφεύγει κατά πολύ των ορίων αυτών των εισαγωγικών σημειώσεων, θα τις παραλείψουμε εμβαθύνοντας στην ανάλυση και ερμηνεία της κλασικής μεθόδου VLF.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι μετρήσεις VLF δίδουν ανωμαλίες διάβασης (crossover), όπου η γωνία κλίσης αλλάζει πρόσημο κατά την διάβαση υπεράνω διδιαστάτων στόχων. Απλούστερη περίπτωση τέτοιων στόχων αποτελούν οι προσομοιωτέοι με κεκλιμένα (βυθιζόμενα) αγωγίμα φύλλα (π.χ. μεταλλοφόρες ή υδροφόρες φλέβες και ρήγματα εντός αντιστατικού ξενιστή). Χαρακτηριστικά παραδείγματα δίδονται στις Εικόνες 6.10.

Για κεκλιμένα φύλλα πεπερασμένης κατακόρυφης διάστασης (depth extent), οι καμπύλες διάβασης είναι ασύμμετρες, με την μέγιστη γωνία κλίσης να κείται προς την πλευρά της οροφής της ασυνέχειας. Αυξανόμενης της κατακόρυφης διάστασης όμως, τα τοπικά μέγιστα της καμπύλης διάβασης τείνουν να εξισωθούν και οι λοβοί της διευρύνονται αμφίπλευρα. Για σταθερή κατακόρυφη διάσταση, η αύξηση του βάθους ταφής (του βάθους από την

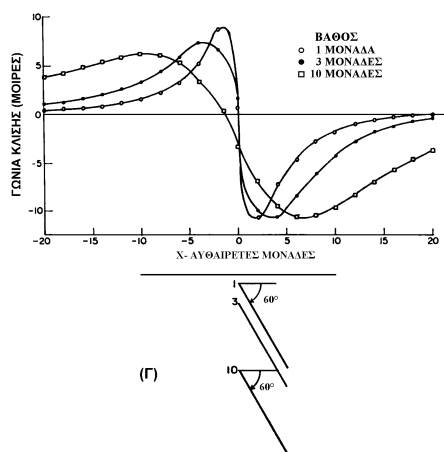


Εικόνα 6.10.³² Μεταβολές ανωμαλιών διάβασης για διαφορετικές παραμέτρους του Στόχου: (Α) Συναρτήσεις της γωνίας βύθισης· (Β) συναρτήσεις της κατακόρυφης διάστασης.

επιφάνεια μέχρι την κορυφή του στόχου) τείνει να ελαττώσει το πλάτος και πλατύνει τα τοπικά μέγιστα, να ελαττώσει την κλίση της διάβασης και να ανασηκώσει και εξισώσει τους λοβούς.

Όπως επίσης έχει αναφερθεί ανωτέρω, τα συστήματα VLF δεν ελέγχουν την διεύθυνση του πρωτεύοντος πεδίου και ως εκ τούτου, συχνότατα δεν επιτρέπουν μέτρηση της γωνίας κλίσης παράλληλα προς την διεύθυνση της όδευσης. Η Εικόνα 6.11 δείχνει την μορφή της παραμόρφωσης για την περίπτωση δύο οδεύσεων λοξών ως προς την παράταξη κατακόρυφου φυλλοειδούς αγωγού· το σημείο διάβασης δεν μετακινείται, αλλά η ασυμμετρία της καμπύλης διάβασης μεγεθύνεται ελαττωμένης της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης όδευσης και της παράταξης του στόχου. Στην περίπτωση αυτή, η καμπύλη διάβασης δίδει την εσφαλμένη εντύπωση ότι οφείλεται σε κεκλιμένο φύλλο και όχι σε κατακόρυφο όπως στην πραγματικότητα.

³² Τροποποιημένη από τον Ward, S.H., 1967, "The electromagnetic method", in *Mining Geophysics*, 2, 224-372.



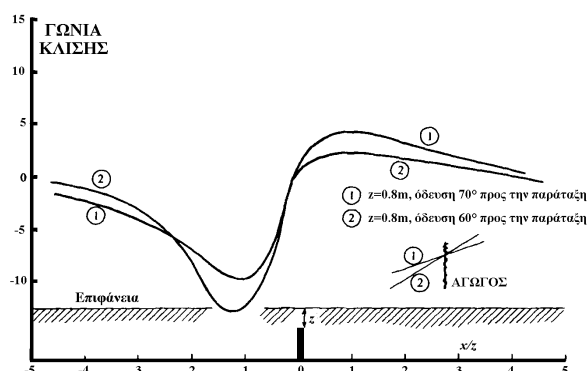
Εικόνα 6.10γ.³³ Μεταβολές ανωμαλιών διάβασης για διαφορετικές παραμέτρους του Στόχου συναρτήσει του βάθους ταφής.

Πέρα από την ανίχνευση λεπτών αγωγών, οι μέθοδοι μακράν πεδίου παρέχουν δυνατότητα αποτύπωσης της ρηχής γεωηλεκτρικής δομής, με ταχύτητα, απλότητα και χαμηλό κόστος. Για παράδειγμα, οι υποκατακόρυφες επαφές που δημιουργούνται από μεταπτώσεις ή πλευρικές πετρολογικές αλλαγές παράγουν χαρακτηριστικό ίχνος VLF, εφόσον φυσικά υπάρχει επαρκής αντίθεση αγωγιμότητας εκατέρωθεν της ασυνέχειας. Στην γειτονία της ασυνέχειας, το κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο έχει διαφορετική φάση από το οριζόντιο και είναι ελλειπτικά πολωμένο. Με τα όργανα VLF μετράμε την κλίση θ του ολικού πεδίου και την ελλειπτικότητα β , ή *τετραγωνισμό*. Όπως ήδη έχουμε δείξει, οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με τις τιμές του λόγου H_z/H_y και τη διαφορά φάσης $\varphi_z - \varphi_y$. Θεωρώντας ότι $H_z \ll H_y$, προσεγγιστικά έχουμε

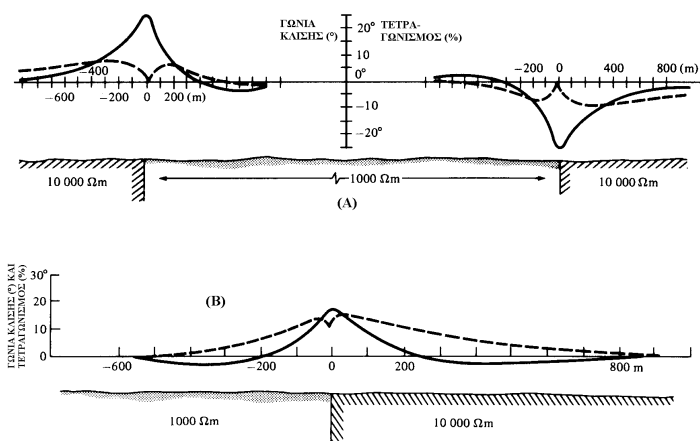
$$\tan \theta = \left| \frac{H_z}{H_y} \right| \cos(\varphi_z - \varphi_y) \quad \text{και} \quad \beta = \left| \frac{H_z}{H_y} \right| \sin(\varphi_z - \varphi_y)$$

Στην Εικόνα 6.12α παρουσιάζονται θεωρητικές ανωμαλίες VLF υπεράνω μιας κατακόρυφης πλευρικής επαφής μεταξύ *αντιστατικών* γεωηλεκτρικών δομών, υπολογισμένες με αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του EH τρόπου. Προφανώς, δεν υπάρχει κλασσική ανωμαλία διάβασης, αλλά αμφότερες η γωνία κλίσης και η ελλειπτικότητα (τετραγωνισμός) κορυφώνονται ακριβώς επάνω από την επαφή. Οι καμπύλες είναι θετικές μεταβαίνοντας από την αντιστατικότερη προς την αγωγιμότερη πλευρά, αλλά η κλίση πα-

³³ Τροποποιημένη από τον Ward, S.H., 1967, "The electromagnetic method", in *Mining Geophysics*, 2, 224-372.



Εικόνα 6.11.³⁴ Η επίδραση της λοξότητας της όδευσης, στην μορφή των ανωμαλιών VLF. Ο στόχος είναι κατακόρυφος φυλλοειδής αγωγός μεγάλης κατακόρυφης διάστασης.



Εικόνα 6.12.³⁵ Ανωμαλίες VLF υπεράνω κατακορύφων επαφών γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικές αγωγιμότητες.

ρουσιάζει τοπικό μέγιστο και η ελλειπτικότητα τοπικό ελάχιστο. Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει μεταβαίνοντας από την αγωγιμότερη προς την αντιστατικότερη πλευρά. Όλες οι καμπύλες αποσβένυνται ταχύτερα στην αγωγιμότερη πλευρά.

Στην Εικόνα 6.12β φαίνεται η επίδραση ενός αγωγίμου στρώματος (μανδύα) υπεράνω της διασκοπούμενης δομής, ο οποίος τείνει να ελαττώσει το

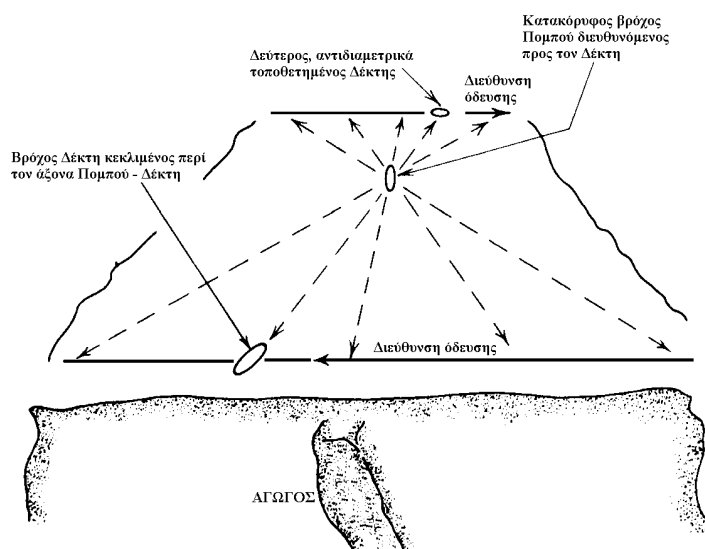
³⁴ Τροποποιημένη από Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press.

³⁵ Ibid. από Telford, et al., 1990.

μέγεθος της γωνίας κλίσης και να περιορίσει δραστικά το τοπικό ακρότατο της ελλειπτικότητας. Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι αναλυτικές ερμηνευτικές τεχνικές της Μαγνητοτελλουρικής μεθόδου είναι τα κυριότερα εργαλεία ρεαλιστικής ερμηνείας των ανωμαλιών VLF, οι οποίες παρατηρούνται υπεράνω πραγματικών γεωλογικών στόχων.

6.2.1.2. Μέθοδος Σταθερού Κατακόρυφου Βρόχου (Εγγύς Πεδίο – Σταθερός Πομπός)

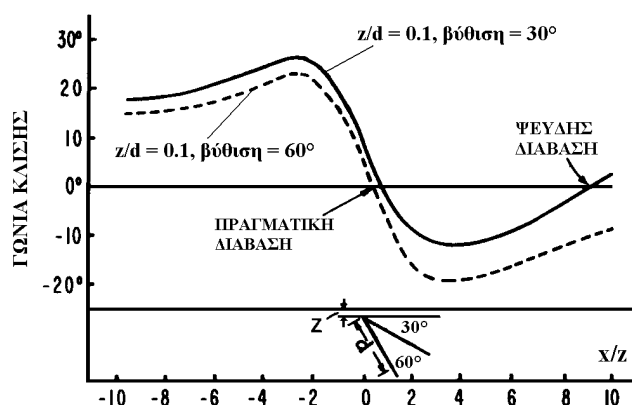
Πρόκειται για την παλαιότερη ΗΜ μέθοδο, αναπτυχθείσα κατά την δεκαετία του 1920 και εισέτι ευρέως χρησιμοποιούμενη. Η κεραία του πομπού είναι βρόχος (πολύ βραχύ πηνίο) σχήματος τετραγωνικού, τριγωνικού ή κυκλικού, με μερικές εκατοντάδες περιελίξεις και δραστική επιφάνεια της τάξης m^2 , αναρτώμενος κατακόρυφα και ελεύθερος να περιστραφεί αζιμουθιακά. Η ισχύς εκπομπής ανέρχεται συνήθως σε μερικές εκατοντάδες W. Ο δέκτης είναι επίσης βρόχος λεπτού σύρματος, περιελιγμένος σε πλαίσιο διαμέτρου της τάξης των 50cm, ή σε φερριτικό πυρήνα και συνδεδεμένος με συντονισμένο ενισχυτή μεγάλου λόγου ενίσχυσης και ηλεκτρονικά απεικόνισης ή ακουστοποίησης του σήματος, ενώ φέρει και όργανα μέτρησης της γωνίας κλίσης.



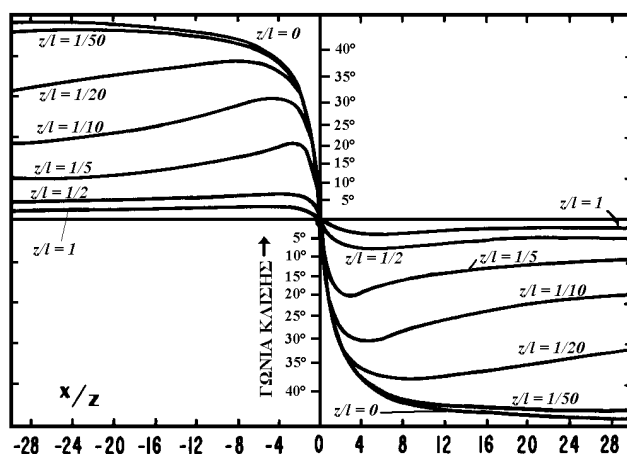
Εικόνα 6.13. Σκαρίφημα μετρήσεων γωνίας κλίσης με σταθερό πομπό. Τροποποιημένη από Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press

Σκαριφηματική απεικόνιση της μετρητικής διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.13. Ο δέκτης μετακινείται κατά μήκος οδεύσεων περίπου καθέτων επί την παράταξη του στόχου, με βήματα ολίγων μέτρων, ως ολίγων δεκάδων μέτρων. Για κάθε νέα θέση του δέκτη, ο βρόχος του πομπού στρέφεται ώστε να δείχνει τον δέκτη, δηλαδή το επίπεδο του πομπού ευθυγραμμίζεται με το αζιμούθιο του ανύσματος πομπού-δέκτη σε τρόπο ώστε το πρωτεύον πεδίο στον δέκτη να είναι περίπου οριζόντιο. Κατόπιν, ο δέκτης στρέφεται περί τον άξονα πομπού - δέκτη μέχρις ότου ευρεθεί το ελάχιστο του σήματος, οπότε και καταγράφεται η γωνία κλίσης.

Προκειμένου να επιταχυνθεί η διασκόπηση, μπορούν να χρησιμοποιη-



Εικόνα 6.14α. Χαρακτηριστική μορφή ανωμαλίας διάβασης μεθόδου Σταθερού Κατακόρυφου Βρόχου. Τροποποιημένη από Telford et al., (1990).



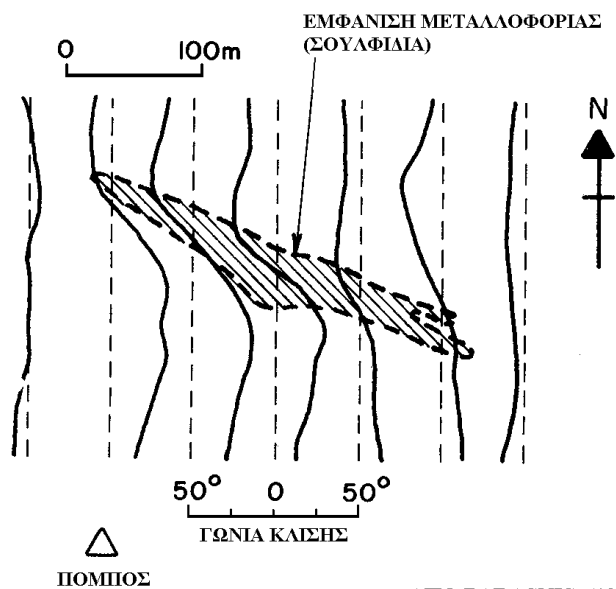
Εικόνα 6.14β. Θεωρητικές ανωμαλίες υπεράνω κατακόρυφων φυλλοειδών αγωγών διαφορετικού βάθους ταφής (z) για την αυτή απόσταση πομπού-δέκτη (l). Από Telford et al., (1990).

θούν περισσότεροι του ενός δέκτες. Είναι προφανές ότι απουσία αγωγίμου στόχου, (ή όταν αυτός είναι ηλεκτρικά πολύ λεπτός ώστε να μην παράγει σπουδαίο δευτερεύον πεδίο), το ελάχιστο θα ευρεθεί όταν ο δέκτης οριζοντιωθεί, παράλληλα προς το πρωτεύον. Εκατέρωθεν του Στόχου αγωγού η γωνία κλίσης είναι τέτοια, ώστε ο άξονας του δέκτη να δείχνει τον Στόχο.

Η απόσταση πομπού-δέκτη εξαρτάται από το μέγεθος του βρόχου του πομπού και την εκπεμπόμενη ισχύ. Για συνήθεις εφαρμογές, η μέγιστη απόσταση είναι 200 - 400m και η ελάχιστη 60-120m. Σε μικρότερες αποστάσεις είναι συνήθως δύσκολο να εντοπισθεί ένα ελάχιστο, λόγω της γεωμετρίας του πρωτεύοντος. Ενδεχομένως να υπάρχουν και άλλες συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα ελάχιστο δεν εντοπίζεται, διότι η σχετική διάταξη πομπού, δέκτη και Στόχου είναι τέτοια, ώστε να μην είναι δυνατή η αντιστάθμιση της εκτός φάσης συνιστώσας. Τέτοια προβλήματα αντιμετωπίζονται κατά περίπτωση, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες υπαίθρου.

Όταν η τοπική γεωλογική παράταξη είναι άγνωστη, η μέθοδος σταθερού πομπού τροποποιείται. Κατ' αρχάς ο πομπός τοποθετείται στο κέντρο της διασκοπούμενης περιοχής και ο δέκτης κινείται περιμετρικά, με σχετικά μεγάλο βήμα (π.χ. 50m). Εάν εντοπισθεί ένα πραγματικό σημείο διάβασης, ο πομπός μετακινείται εκεί και λαμβάνονται μετρήσεις κατά μήκος μίας όδευσης που διασχίζει το κέντρο της περιοχής. Εάν εντοπισθεί δεύτερο σημείο διάβασης, ο πομπός μετακινείται εκ νέου, προκειμένου να ελεγχθεί και επιβεβαιωθεί το πρώτο. Εάν, όπως συχνότατα γίνεται, εντοπισθούν περισσότερα του ενός σημεία διάβασης, ενδέχεται να απαιτηθούν περισσότερες της μιας εναλλαγές πομπού και δέκτη, μέχρις ότου καθοριστεί η παράταξη της δομής. Αφού οριστικοποιηθεί η παράταξη, μπορούν να γίνουν λεπτομερέστερες μετρήσεις περιχαράκωσης του Στόχου με την ίδια ή άλλες γεωφυσικές τεχνικές. Τέλος, εάν υπάρχουν περισσότεροι του ενός αποκρινόμενοι αγωγοί, η οξύτερη ανωμαλία διάβασης, (δηλαδή αυτή με την μέγιστη βαθμίδα ή μεγαλύτερη γωνία κλίσης), θα εντοπίζεται όταν ο δέκτης βρίσκεται κοντά στον πλησιέστερο προς τον πομπό αγωγό, διότι τότε προφανώς επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ζεύξη.

Οι αναμενόμενες ανωμαλίες διάβασης έχουν την μορφή της Εικόνας 6.14α. Η κλίση της καμπύλης, αυτής, *αρνητική* από δεξιά προς τα αριστερά, ορίζει μία *πραγματική* ή *ορθή* διάβαση στο σημείο της μηδενικής γωνίας κλίσης, το οποίο ως γνωστόν επισημαίνει την θέση ενός κεκλιμένου διαστάτου φυλλοειδούς αγωγού εντός αντιστατικού ξενιστή. Η Εικόνα 6.14β παρουσιάζει αρκετές θεωρητικές ανωμαλίες υπεράνω *κατακορύφων φυλλοειδών αγωγών* διαφορετικού βάθους ταφής (z) για την αυτή απόσταση πομπού-δέκτη (I). Παρατηρούμε ότι όλες είναι τέλεια αντισυμμετρικές, με την γωνία κλίσης να μεγιστοποιείται σε δύο ακρότατα αντιθέτου προσήμου εκατέρωθεν του αγωγού και να ελαττώνεται βαθμιαία με την απόσταση, δηλαδή αυξανο-



ΑΠΟ PARASNIS, (1973)

Εικόνα 6.15. Καμπύλες διάβασης μεθόδου ΣΚΒ υπεράνω πραγματικού Στόχου.

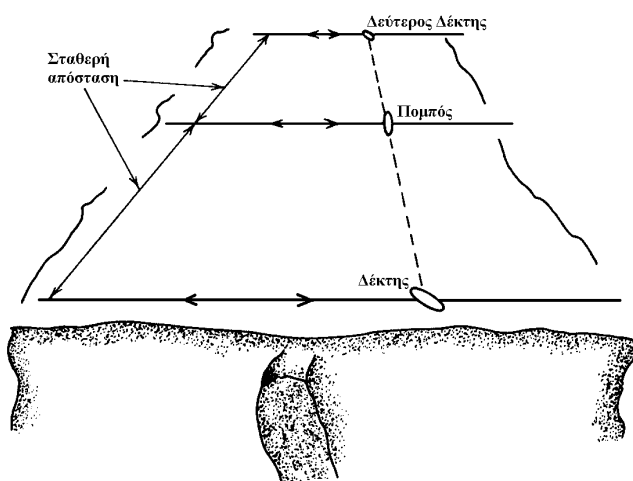
μένου του λόγου x/z . Καθώς η βύθιση του αγωγού ελαττώνεται από τις 90° στις 30° , (Εικόνα 6.14α), η θετική κορυφή (αριστερά προς το δάπεδο του αγωγού) ψηλώνει, ενώ η αρνητική κορυφή (δεξιά προς την οροφή του αγωγού) κονταίνει. Αριστερά του αγωγού, ο θετικός λοβός της γωνίας κλίσης εξασθενίζει ομαλά, ενώ δεξιά του βυθιζόμενου αγωγού, προς την πλευρά της οροφής του, ο αρνητικός λοβός εξασθενίζει ταχύτατα και η γωνία κλίσης μπορεί να υπερβεί τη μηδενική, εμφανίζοντας *ψευδή ή ανάστροφη διάβαση*, που ουσιαστικά είναι μία ανάκλαση από τα κατώτερα μέρη του αγωγού. Ανάστροφες διαβάσεις μπορούν επίσης να παραχθούν από αντιστατικές δομές και πολλαπλούς αγωγούς. Κατά τα ανωτέρω, η απόκλιση της καμπύλης διασκόπησης από την τέλεια αντισυμμετρία είναι διαγνωστική της ύπαρξης βυθιζόμενου αγωγού.

Η μέχρι τώρα συζήτηση έγινε με βάση την υπόθεση ότι ο αγωγός-στόχος φιλοξενείται σε ακάλυπτο, πολύ αντιστατικό ξενιστή. Εάν όμως ο ξενιστής έχει πεπερασμένη αγωγιμότητα και καλύπτεται από (ιζηματογενή) μανδύα επίσης πεπερασμένης αγωγιμότητας, πράγματα που συνηθέστατα συμβαίνουν, η προκύπτουσα ανωμαλία διάβασης υφίσταται σημαντική ελάττωση πλάτους λόγω της πρόσθετης εξασθένισης των πεδίων. Τότε, ο στόχος εμφανίζεται ως ευρισκόμενος βαθύτερα και με διαφορετική αγωγιμότητα από αυτή που πράγματι έχει. Όταν ο μανδύας είναι πολύ καλός αγωγός, τα πράγματα μπορεί να καταστούν αρκετά δύσκολα. Έχουν αναφερθεί πολλές περιπτώσεις όπου ένυδρα επιφανειακά στρώματα (π.χ. ελώδη ιζήματα) ειδικής

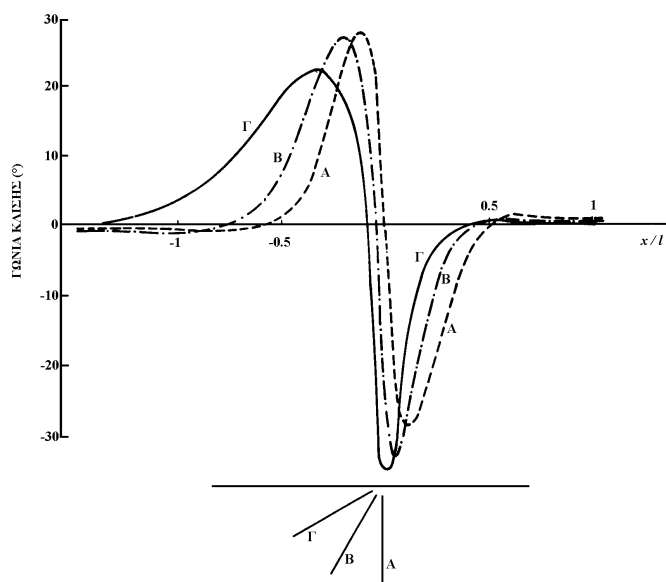
αντίστασης μερικών έως μερικών δεκάδων Ωm , απέκρυσαν τελείως την ύπαρξη μεταλλικών ή μεταλλοφόρων αγωγών σε βάθη της τάξης των 15m. Επιπλέον, όταν το κάλυμμα έχει περιορισμένες πλευρικές διαστάσεις, τότε θα παράξει τις ιδικές του ανωμαλίες διάβασης, όταν η όδευση διέρχεται τα άκρα του, συμπεριφερόμενο ως οριζόντιος φυλλοειδής αγωγός. Δυστυχώς, τέτοιου είδους ανωμαλίες εμφανίζονται αρκετά συχνά στην πράξη και απαιτούν τη δέουσα προσοχή.

6.2.1.3. Μέθοδος Κατακόρυφου Βρόχου – Πλευρικής Διάταξης (Εγγύς Πεδίο – Κινητός Πομπός)

Στην τεχνική αυτή ο Πομπός είναι κατακόρυφος, πλήρως φορητός βρόχος, ελεύθερος να περιστραφεί αξιμουθιακά και μετακινείται συγχρόνως και παράλληλα προς τον Δέκτη. Ο Δέκτης είναι επίσης φορητός βρόχος λεπτού σύρματος, συνδεδεμένος με συντονισμένο ενισχυτή και σύστημα απεικόνισης ή ακουστοποίησης του σήματος, ενώ φέρει και όργανα μέτρησης της γωνίας κλίσης. Το επίπεδο του βρόχου του Πομπού ευθυγραμμίζεται με τον άξονα Πομπού-Δέκτη, ώστε το πρωτεύον πεδίο στον Δέκτη να είναι περίπου οριζόντιο. Ο βρόχος του Δέκτη είναι κατ' αρχάς οριζόντιος και στρέφεται περί τον άξονα Πομπού-Δέκτη μέχρις ότου καταγραφεί το ελάχιστο. Ο άξονας Πομπού-Δέκτη διατηρείται κατά το δυνατόν παράλληλος προς την παράταξη της γεωλογικής δομής και συνήθως έχει μήκος 100m - 200m. Για λό-



Εικόνα 6.16. Σκαρίφημα μετρήσεων γωνίας κλίσης με τεχνική παράλληλης διάταξης. Τροποποιημένη από Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press

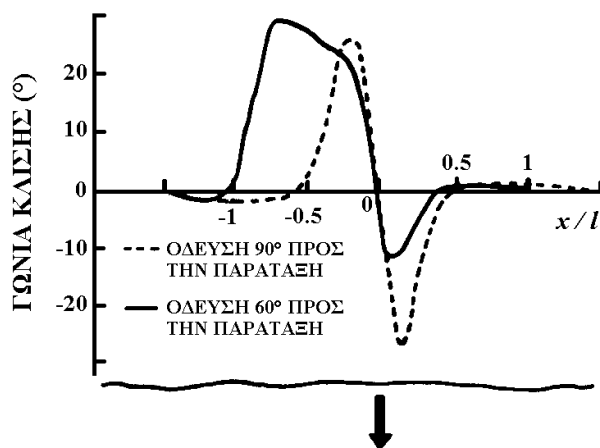


Εικόνα 6.17. Καμπύλη γωνίας κλίσης (σύστημα πλευρικής διάταξης), υπεράνω βυθιζόμενου φυλλοειδούς αγωγού πεπερασμένης κατακόρυφης διάστασης. Τροποποιημένη από Telford, et al. , (1990).

γους ευχρησίας και περιορισμού του βάρους, η ισχύς του Πομπού είναι αναπόφευκτα μικρή της τάξης 1 - 10 W. Μετρήσεις λαμβάνονται σε βήματα αρκετών μέτρων, ως μερικών δεκάδων μέτρων. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην Εικόνα 6.16 και τυπικές ανωμαλίες στις Εικόνες 6.17 και 6.18. Όπως και με την μέθοδο σταθερού Πομπού, είναι δυνατή η χρήση δύο ή περισσότερων δεκτών.

Βασική διαφορά των μεθόδων Σταθερού και Κινητού Πομπού είναι ότι στην πρώτη διατηρείται σταθερή μόνο η ζεύξη Πομπού- Στόχου, ενώ στην δεύτερη είναι σταθερή μόνο η ζεύξη Πομπού - Δέκτη. Αποτέλεσμα είναι ότι η ανωμαλία διάβασης Κινητού Πομπού θα έχει την αυτή αντισυμμετρική μορφή με την ανωμαλία της μεθόδου Σταθερού Πομπού, αλλά θα εμφανίζει οξύτερα ακρότατα και αρκετά ταχύτερη απόσβεση, εφόσον η απομάκρυνση του Πομπού ελαττώνει ταχύτερα την ένταση της διέγερσης του Στόχου και την ένταση του δευτερεύοντος πεδίου, υποχρεώνοντας την γωνία κλίσης να επανέλθει στο μηδέν σε σχετικά μικρές αποστάσεις από τον Στόχο.

Προς επίρρωση των ανωτέρω, συγκρίνοντας τις Εικόνες 6.14 και 6.17 παρατηρούμε ότι για αμφότερες τις μεθόδους το σημείο διάβασης βρίσκεται πάνω από τον αγωγό, αλλά η βαθμίδα της ανωμαλίας κοντά στο σημείο διάβασης είναι εντονότερη στην 6.17. Η μέγιστη γωνία κλίσης προσδιορίζεται πολύ καλύτερα στην ανωμαλία Κινητού Πομπού. Στο Σχήμα 6.17 παρουσιά-



Εικόνα 6.18. Καμπύλες γωνίας κλίσης μετρηθείσες με σύστημα παράλληλης διάταξης σε οδεύσεις λοξές ως προς την παράταξη κατακορύφου φυλλοειδούς αγωγού. Τροποποιημένη από Telford, et al. , (1990).

ζεται μία τριάδα ανωμαλιών πλευρικής διάταξης υπεράνω φυλλοειδών αγωγών, βυθιζομένων κατά 30° , 60° και 90° αντίστοιχα, όπου διακρίνεται ότι τα αποτελέσματα από την ελάττωση της κλίσης είναι εμφανέστερα στην πλευρά της οροφής του αγωγού. Είναι σαφές ότι η τεχνική της πλευρικής διάταξης έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα από την μέθοδο Σταθερού Πομπού, πράγμα που αποκτά ιδιαίτερη σπουδαιότητα όταν υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι. Οφείλει να σημειωθεί όμως, (και οφείλει να αναμένεται), ότι είναι και αρκετά ευαίσθητη σε περιπτώσεις λοξών οδεύσεων, δηλαδή όταν ο άξονας Πομπού- Δέκτη δεν είναι παράλληλος προς την γεωλογική παράταξη. Τότε μπορεί να υπάρξουν σημαντικές παραμορφώσεις της ανωμαλίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.18. Οι επίδραση του βάθους ταφής και της αγωγιμότητας στην μορφή της ανωμαλίας παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με τα αντίστοιχα της μεθόδου Σταθερού Πομπού.

6.2.2. Μέθοδοι διαχωρισμού φάσης

Οι ΗΜ μέθοδοι μέτρησης γωνίας κλίσης καταγράφουν μέρος μόνον, της διαθέσιμης στο δευτερεύον και ολικό πεδίο πληροφορίας και περιορίζονται κυρίως στο να εντοπίζουν ένα Στόχο, παρέχοντας περιορισμένη πληροφορία σχετικά με την ποιότητά του.³⁶ Αντιθέτως, και όπως είδαμε στο Εδάφιο 7.1 του παρόντος, η μέτρηση των εν φάσει και εκτός φάσεως συνιστωσών του δευτερεύοντος πεδίου, είναι δυνατό να παράσχει πληροφορίες περί των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του Στόχου. Το πρωτεύον πεδίο είναι κατά κανόνα πολύ ισχυρότερο και θα πνίγει το δευτερεύον, οπότε η μέτρηση του πλάτους του δευτερεύοντος και της φάσης του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον, προϋποθέτει την εξουδετέρωση του πρωτεύοντος στον Δέκτη, πράγμα που επιτυγχάνεται με αντισταθμιστικά κυκλώματα.

Η αντισταθμίστη του πρωτεύοντος επιτυγχάνεται με ένα σήμα παραγόμενο απ' ευθείας από το ρεύμα που διαρρέει τον βρόχο του Πομπού και διαβιβάζόμενο στον Δέκτη. Το πλάτος και διαφορά φάσης του σήματος αυτού μετρώνται στον Δέκτη, σε μία θέση της υπό διασκόπηση περιοχής που να είναι ελεύθερη υποκειμένων αγωγίμων Στόχων. Με άλλα λόγια, μετράται το πλάτος και η διαφορά φάσης που επιφέρει ο ξενίζων γεωλογικός σχηματισμός. Κατόπιν, τα ηλεκτρονικά του Δέκτη ρυθμίζονται ώστε να αντισταθμίζουν (εξουδετερώνουν) αυτό το πλάτος και διαφορά φάσης, οπότε οι σχετικές μετρήσεις που λαμβάνονται σε άλλες θέσεις, να αντιπροσωπεύουν δευτερεύοντα πεδία από την διέγερση θαμμένων αγωγίμων Στόχων. Παραπέμποντας πάλι στο Σχήμα 6.4, βλέπουμε ότι από την γεωμετρική σχέση του πρωτεύοντος ($H_p \equiv H_{\Pi\Delta}$) και δευτερεύοντος ($H_s \equiv H_{\Sigma\Delta}$) μαγνητικού πεδίου, και όταν ο λόγος $H_s / H_p \ll 1$, εύκολα αποδεικνύεται ότι

$$H_{\text{ΟΛΙΚΟ}} \approx H_p \left(1 - \frac{H_s}{H_p} \sin \varphi + \frac{H_s^2}{2H_p^2} \right) \quad \text{και} \quad \sin \theta \approx \frac{H_s}{H_p} \cos \varphi .$$

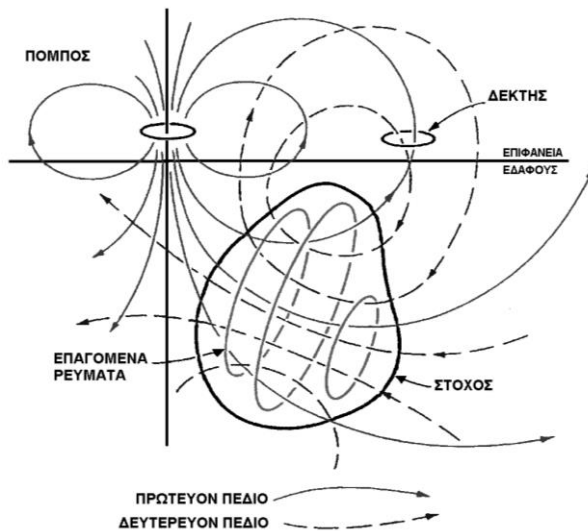
Έτσι, το αντισταθμίζον άνυσμα έχει περίπου το αυτό πλάτος με το H_p και διαφορά φάσης ($\pi - \theta$). Ασυμπτωτικά, για πολύ καλούς αγωγούς έχουμε $H_{\text{ΟΛΙΚΟ}} \approx (H_p - H_s)$ και $\theta \approx 0$, ενώ για πολύ κακούς αγωγούς

$$H_{\text{ΟΛΙΚΟ}} \approx H_p \left(1 + \frac{H_s^2}{2H_p^2} \right) \quad \text{και} \quad \theta \approx (H_s / H_p)$$

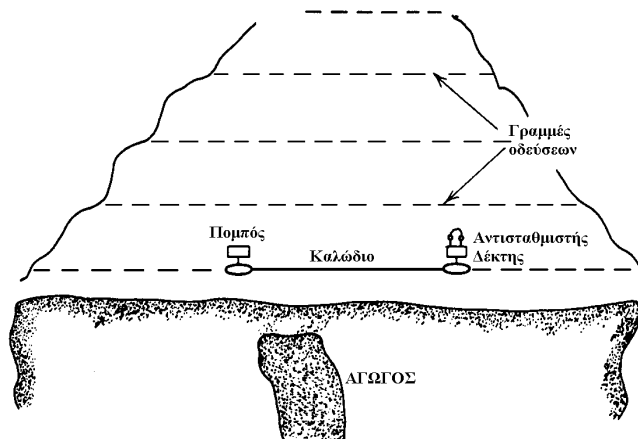
³⁶ Αυτό δεν ισχύει για τις σύγχρονες εκδόσεις των μεθόδων AFMAG και VLF, οι οποίες, όπως είδαμε ανωτέρω, παρέχουν δυνατότητα και ποσοτικής ερμηνείας των χαρακτηριστικών του Στόχου.

6.2.2.1. Μέθοδος Οριζοντίων Βρόχων (Κινητός Πομπός - Κινητός Δέκτης).

Πρωτοεμφανισθείσα στην Σουηδία με τα όνοματα Slingram και Ronka, η μέθοδος αυτή διεδόθη ευρύτατα, καθιστάμενη πολύ δημοφιλής. Καίτοι υπάρχουν πολλά σύγχρονα συστήματα τέτοιου τύπου, το όνομα Slingram έχει γίνει σχεδόν συνώνυμό της.



Εικόνα 6.19 α. Σχηματική αναπαράσταση της φυσικής αρχής της μεθόδου οριζοντίων βρόχων (Slingram).



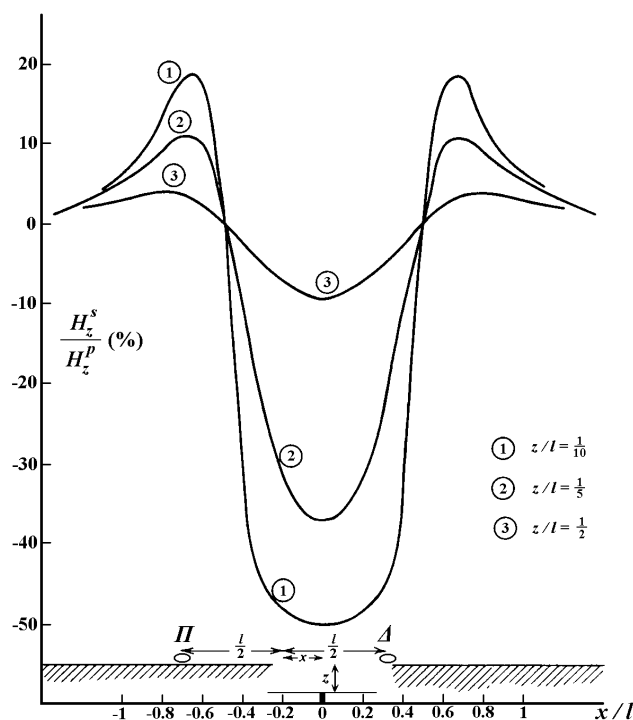
Εικόνα 6.19β. Σκαρίφημα μετρήσεων με σύστημα οριζοντίων βρόχων. Τροποποιημένη από Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press

Σκαριφήματα της φυσικής αρχής της μεθόδου και της μετρητικής διάταξης φαίνονται στην Εικόνα 6.19. Πομπός και Δέκτης κινούνται ταυτόχρονα σε σταθερή απόσταση 30 - 360 m, ενωμένοι με ένα καλώδιο. Η ισχύς εκπομπής είναι χαμηλή (1 - 10 W) και ο βρόχος του Πομπού είναι όμοιος με τον βρόχο του Δέκτη. Σε μερικά συστήματα οι βρόχοι τυλίγονται γύρω από μονωτικό πλαίσιο διαμέτρου περί το 1m, ενώ σε άλλα χρησιμοποιούνται πηνία φερριτικού πυρήνα. Οι βρόχοι είναι *ομοεπίπεδοι* και τις περισσότερες φορές προσανατολισμένοι να μετρούν το κατακόρυφο πεδίο, αν και αυτό εξαρτάται από το εκάστοτε σύστημα και μέθοδο ανάλυσης. Σε κάποια πλέον σύγχρονα συστήματα Πομπός και Δέκτης συγχρονίζονται με ραδιοφωνική ζεύξη, αλλά η χρήση καλωδίου έχει το πλεονέκτημα ότι σε πεδινές περιοχές, παρέχει ένα ακριβές μέτρο της μεταξύ τους απόστασης, η οποία είναι πολύ κρίσιμη παράμετρος.

Στην αρχή της διασκόπησης αντισταθμίζεται το πρωτεύον σε περιοχή ελεύθερη υποκειμένων αγωγίμων στόχων και κατόπιν εκτελούνται οδεύσεις κάθετα προς την παράταξη της γεωλογικής δομής, όπου αυτό είναι δυνατόν. Τυπικές ανωμαλίες παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.20. Όπως θα φανεί κατωτέρω, η ερμηνεία των ανωμαλιών είναι αρκετά απλή και αυτό οφείλεται στο ότι η σταθερή απόσταση Πομπού - Δέκτη διατηρεί σταθερό το συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής $M_{ΠΔ}$, σε τρόπο ώστε η διεύθυνση της όδευσης να είναι ανεξάρτητη από την σχετική θέση των δύο βρόχων. Με άλλα λόγια, μπορούμε να εναλλάξουμε Πομπό και Δέκτη και να λάβουμε την ίδια μέτρηση στον αυτό σταθμό.

Φυσικά, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην μέθοδο. Ένα από αυτά είναι ότι το βάθος διασκόπησης περιορίζεται από την χαμηλή ισχύ του Πομπού, πράγμα που με τη σειρά του είναι απότοκο της απαίτησης να είναι το σύστημα πλήρως φορητό. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης καλού αγωγού θεωρείται ότι φθάνει το ήμισυ της απόστασης Πομπού - Δέκτη αλλά στην πράξη είναι αρκετά μικρότερο.

Η απόσταση μεταξύ των πηνίων και ο προσανατολισμός τους είναι κρίσιμες παράμετροι. Η λανθασμένη ελάττωση μιας απόστασης 60 m κατά ένα μόλις μέτρο θα επιφέρει σφάλμα της τάξης 6%, ενώ μία γωνία 10° μεταξύ των πηνίων θα δώσει σφάλμα 1.5% ή μεγαλύτερο, αναλόγως του αν η μέτρηση γίνεται παρουσία καλού αγωγού (στόχου) ή όχι. Σε ανώμαλο έδαφος, οι χειριστές οφείλουν να προσέχουν ιδιαίτερος την διατήρηση της σωστής απόστασης και προσανατολισμού των βρόχων. Για παράδειγμα, επί κεκλιμένου εδάφους οι βρόχοι πρέπει να είναι παράλληλοι προς το έδαφος και όχι οριζόντιοι, επειδή βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαίο να γίνουν διορθώσεις των μετρήσεων, διότι δεν μετράται όλη η κατακόρυφη συνιστώσα.



Εικόνα 6.20α. Τυπικές ανωμαλίες Slingram υπεράνω κατακορύφων φυλλοειδών αγωγών, για διαφορετικά βάθη ταφής (πραγματική συνιστώσα). Τροποποιημένη από Telford et al., (1990).

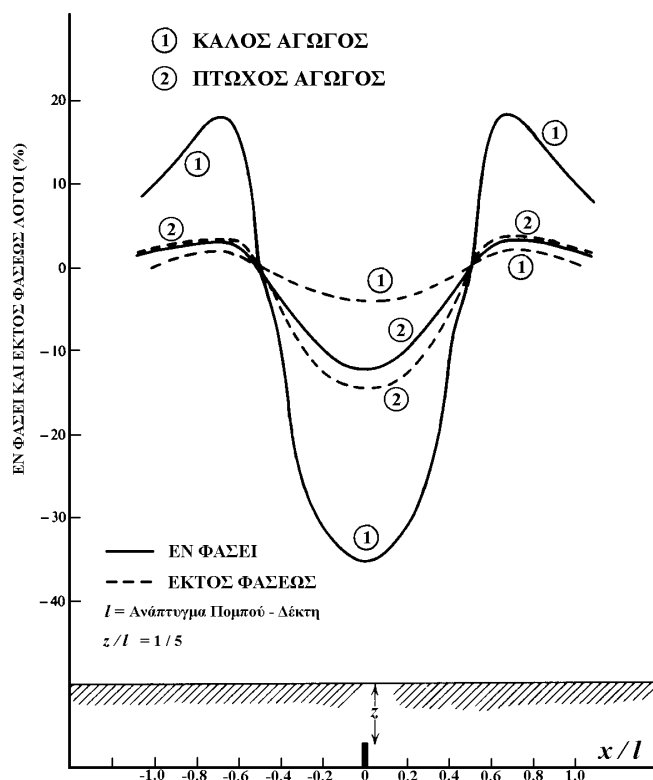
Αρκετά συστήματα οριζοντίων βρόχων λειτουργούν σε περισσότερες της μιας συχνότητες, με σκοπό να διακρίνουν ρηχές ανωμαλίες που μπορεί να αποκρύπτουν καλούς αγωγούς σε μεγαλύτερα βάθη, επιτυγχάνοντας έτσι και κατακόρυφη αποτύπωση της γεωηλεκτρικής δομής. Ένα τέτοιο δημοφιλές σύστημα το APEX MaxMin I-10 χρησιμοποιεί μέχρι 10 συχνότητες.

Τα συστήματα *οριζοντίων ομοεπιπέδων βρόχων* (ΟΟΕ) μετρούν τον λόγο του κατακορύφου δευτερεύοντος προς το κατακόρυφο πρωτεύον μαγνητικό πεδίο στην θέση του Δέκτη, για τις εν φάσει και εκτός φάσεως συνιστώσες, δηλαδή

$$\% \text{ εν φάσει} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{H_z^s}{H_z^p} \right\} \quad \text{και} \quad \% \text{ εκτός φάσεως} = \operatorname{Im} \left\{ \frac{H_z^s}{H_z^p} \right\}.$$

Οι μετρήσεις αναφέρονται στο μέσο της απόστασης Πομπού - Δέκτη.

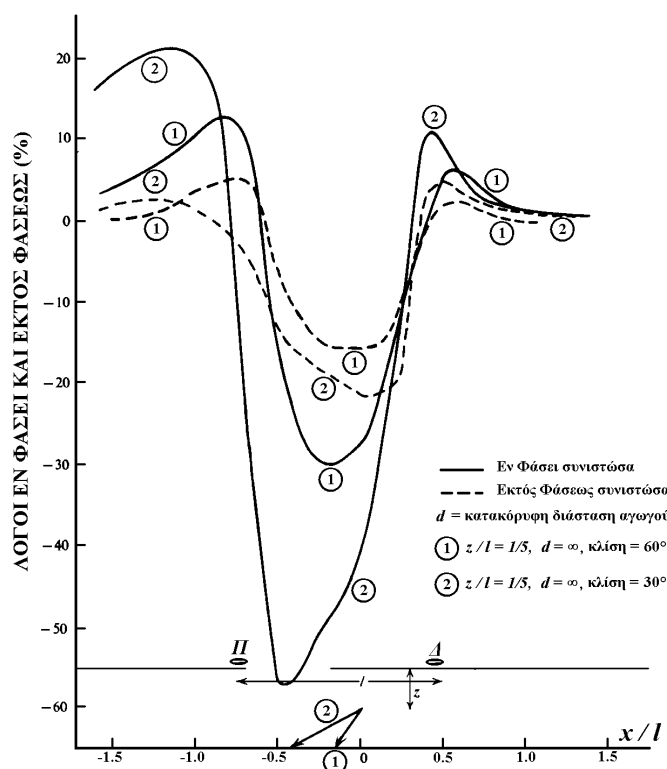
Στην Εικόνα 6.20α παρουσιάζονται ανωμαλίες ΟΟΕ υπεράνω κατακορύφων φυλλοειδών αγωγών μεγάλης κατακόρυφης διαστασης. Οι καμπύλες είναι τελείως συμμετρικές (όπως προαναφέρθηκε, εναλλαγή Πομπού και Δέκτη δεν επηρεάζει την μέτρηση και τη μορφή της ανωμαλίας). Διακρίνεται



Εικόνα 6.20β. Τυπικές ανωμαλίες Slingram υπεράνω κατακορύφων φυλλοειδών αγωγών διαφορετικής ειδικής αγωγιμότητας (πραγματική και φανταστική συνιστώσα). Τροποποιημένη από Telford et al., (1990).

ένας και μόνος αρνητικός λοβός όταν το ανάπτυγμα Πομπού - Δέκτη διέρχεται τον αγωγό, μεγιστοποιούμενος όταν το κέντρο του αναπτύγματος ευρίσκεται ακριβώς υπεράνω του αγωγού (σημείο μέγιστης ζεύξης). Διακρίνονται επίσης δύο μηδενικές τιμές όταν έκαστος βρόχος ευρίσκεται ακριβώς υπεράνω του αγωγού (σημείο μηδενικής ζεύξης) και δύο μικρότεροι θετικοί λοβοί με κορυφές σε απόσταση περίπου 0.71 από τον αγωγό, εκατέρωθεν των οποίων η ανωμαλία αποσβέννεται προς το μηδέν. Τα πλάτη των τοπικών ακροτάτων και συνεπώς η κλίση των καμπυλών, είναι συναρτήσεις του βάθους ταφής του αγωγού. Το μέγιστο βάθος ανιχνεύσιμου αγωγού εξαρτάται από την απόσταση Πομπού - Δέκτη και την ισχύ του Πομπού (που όπως προαναφέραμε θέτει σημαντικούς περιορισμούς).

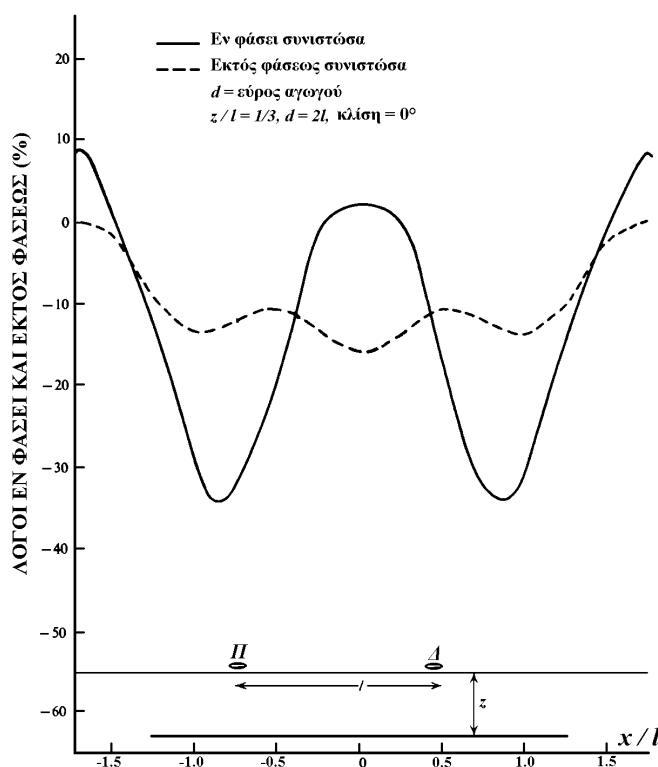
Στην Εικόνα 6.20β παρουσιάζονται αμφότερες οι εν φάσει και εκτός φάσεως καμπύλες υπεράνω κατακορύφων φυλλοειδών αγωγών και ταυτοχρόνως εξηγείται γιατί οι μέθοδοι διαχωρισμού φάσης επιτρέπουν την διάγνωση



Εικόνα 6.20γ. Ανωμαλίες Slingram υπεράνω βυθιζομένων φυλλοειδών αγωγών διαφορετικής κλίσης (πραγματική και φανταστική συνιστώσα).

της ποιότητας του Στόχου. Όπως είναι προφανές, η εκτός φάσεως συνιστώσα έχει μεν την ίδια μορφή με την εν φάσει συνιστώσα, αλλά διαφορετικό πλάτος, καθιστάμενη πολύ μεγαλύτερη της εν φάσει συνιστώσας στην περίπτωση κακού αγωγού (καμπύλες 2), ή πολύ μικρότερη σε περίπτωση καλού αγωγού (καμπύλες 1). Από τις Εικόνες 6.20α και 6.20β διαφαίνεται ότι η χρήση της εκτός φάσεως συνιστώσας παρέχει αυξημένη δυνατότητα διευκρίνισης των συγγεόμενων επιδράσεων από το βάθος ταφής και ειδική αγωγιμότητα του Στόχου, πράγμα που όπως είδαμε δυσχεραίνει την ερμηνεία των μεθόδων μέτρησης γωνίας κλίσης.

Οι βυθιζόμενοι αγωγοί παράγουν ασύμμετρες ανωμαλίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.20γ, αλλ' οι επιδράσεις καθίστανται έντονες μόνο για γωνίες βύθισης μικρότερες των 45° . Ελαττούμενης της γωνίας βύθισης, αυξάνει σημαντικά το πλάτος του αρνητικού (μεσαιίου) λοβού της εν φάσει συνιστώσας, ενώ το αρνητικό ακρότατο ολισθαίνει από την κορυφή του Στόχου προς την πλευρά της οροφής, όπως επίσης και τα σημεία μηδενικής ζεύξης (σημεία διάβασης). Το πλάτος του θετικού λοβού προς την πλευρά της οροφής αυξά-



Εικόνα 6.20δ. Τυπική ανωμαλία Slingram υπεράνω οριζοντίου φυλλοειδούς αγωγού (πραγματική και φανταστική συνιστώσα).

νει, ενώ αντιστοίχως ελαττώνεται το πλάτος του θετικού λοβού προς το δάπεδο. Εν τέλει, παράγεται εν φάσει ανωμαλία με βαθμίδα απότομη προς την πλευρά της οροφής και ομαλότερη προς την πλευρά του δαπέδου.

Η εκτός φάσης συνιστώσα είναι επίσης ασύμμετρη. Το πλάτος του αρνητικού λοβού αυξάνει ελαφρά και η κορυφή του ολισθαίνει προς το δάπεδο, τα σημεία μηδενικής ζεύξης μετατοπίζονται προς την οροφή, αλλά τα σχετικά πλάτη των θετικών λοβών δεν επηρεάζονται σημαντικά. Έτσι, η αποτομότερη βαθμίδα της εκτός φάσεως απόκρισης εντοπίζεται προς την πλευρά του δαπέδου, αντίθετα με την εν φάσει συνιστώσα. Με βάση τα ανωτέρω χαρακτηριστικά αυτά των δύο καμπυλών, είναι δυνατή η διευκρίνιση της διεύθυνσης και διεύθυνσης κλίσης του αγωγού.

Όταν ο Στόχος είναι οριζόντιος, (βλ. Εικόνα 6.20δ), η εν φάσει απόκριση ορίζει δύο ίσους αρνητικούς λοβούς με κορυφές εντοπιζόμενες στο διάστημα $-1 \leq x/l \leq 1$ και ένα θετικό μέγιστο ακριβώς πάνω από το κέντρο του αγωγού. Η εκτός φάσεως συνιστώσα εμφανίζει τρεις μικρούς αρνητικούς λο-

βούς, οι δύο ακραίοι εκ των οποίων είναι μετατοπισμένοι προς τα άκρα του αγωγού, σε σχέση με τους αντίστοιχους λοβούς της εν φάσει συνιστώσας. Τα πλάτη αμφοτέρων των συνιστωσών, επηρεάζονται σημαντικότερα από το βάθος ταφής του αγωγού, αλλά και από το εύρος του.

Η κατακόρυφη διάσταση του Στόχου επηρεάζει τις μετρήσεις μόνον όταν είναι μικρή. Εάν η κατακόρυφη διάσταση είναι μεγαλύτερη του $2l$, όπου l το ανάπτυγμα Πομπού - Δέκτη, η μορφή της ανωμαλίας ελάχιστα διαφέρει της αναμενόμενης από φυλλοειδή αγωγό απείρου βάθους. Η μεταβολή του βάθους ταφής επηρεάζει αμφοτέρως τις εν φάσει και εκτός φάσεως συνιστώσες κατά τον ίδιο τρόπο και ποσοστό.

Η λοξότητα της όδευσης ως προς την παράταξη της γεωλογικής δομής έχει μικρή επίδραση στην μορφή της ανωμαλίας, εκτός και αν η γωνία είναι μικρότερη των 30° . Και στην περίπτωση αυτή όμως, η παραμόρφωση είναι μικρή και συμμετρική, εμφανιζόμενη με σμίκρυνση του αρνητικού λοβού και μεγέθυνση - πλάτυνση των θετικών λοβών.

6.2.2.2. Συστήματα Μικρού Αριθμού Επαγωγής - Αποτύπωση Ε-δαφικής Αγωγιμότητας.

Μία ειδική κατηγορία πλήρως φορητών συστημάτων κινητής πηγής και δέκτη με ευρύτατες εφαρμογές είναι εκείνα που μετρούν την αγωγιμότητα του εδάφους και ονομάζονται συστήματα μικρού αριθμού επαγωγής. Ως *αριθμός επαγωγής* ορίζεται ο λόγος

$$B = l / \delta$$

του αναπτύγματος Πομπού - Δέκτη προς το επιδερμικό βάθος. Όταν ισχύει $B \ll 1$, ο λόγος του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον πεδίο μπορεί να εκφραστεί ως απλή συνάρτηση της ειδικής αγωγιμότητας του εδάφους,

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i}{2} B^2 = \frac{i\omega\mu_0}{4} l^2 \sigma_a.$$

Με άλλα λόγια, η επίδραση της ειδικής αγωγιμότητας του εδάφους περιέχεται στην εκτός φάσεως συνιστώσα, από την οποία μπορεί υπολογισθεί απ' ευθείας μέσω της σχέσης

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 l^2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{H_s}{H_p} \right\}$$

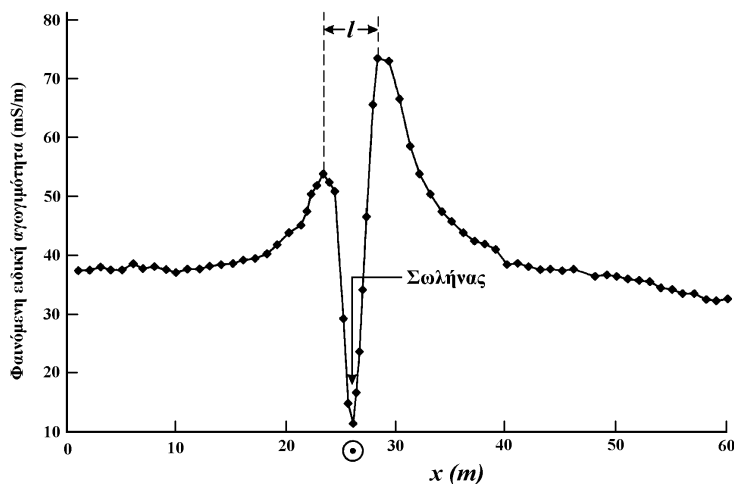
σε απ' ευθείας ανάγνωση από το κατάλληλα βαθμονομημένο όργανο. Σε γενικές γραμμές, τα *γεωαγωγιμόμετρα* μετρούν την εν φάσει συνιστώσα ως τις εν φάσει εκπεφρασμένη σε μέρη επί τοις χιλίοις και την εκτός φάσεως συνι-



Εικόνα 6.21. Άνω: Γεωαγωγιμόμετρο Geonics EM31 σε ώρα εργασίας. Κάτω Α-ριστερά: Γεωαγωγιμόμετρο Geonics EM34 σε διαμόρφωση ΚΟΕ. Κάτω Δεξιά: Γεωαγωγιμόμετρο GSSI GEM-300 σε διαμόρφωση ΟΟΕ.

στώσα βαθμολογημένη σε μονάδες φαινόμενης ειδικής αγωγιμότητας (mS/m). Επιστάται η προσοχή στο γεγονός ότι η μετρούμενη ειδική αγωγιμότητα είναι φαινόμενη και όχι πραγματική, διότι το έδαφος είναι ανομοιογενής σχηματισμός αποτελούμενος από πολλαπλά στρώματα και συχνότατες πλευρικές ασυνέχειες και μεταπτώσεις.

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις Πομπού - Δέκτη είναι η *Οριζόντια Ομοεπίπεδη* (ΟΟΕ) και *Κατακόρυφη Ομοεπίπεδη* (ΚΟΕ), οι οποίες ένεκα της διαφορετικής γεωμετρίας, επιτυγχάνουν διαφορετικά βάθη διείσδυσης. Βαθύτεροι στόχοι ανιχνεύονται με την διαμόρφωση ΟΟΕ, όπου Πομπός και Δέκτης λειτουργούν ως κατακόρυφα μαγνητικά δίπολα. Αντιθέτως, η διαμόρφωση ΚΟΕ περιλαμβάνει μόνο οριζόντια μαγνητικά δίπολα και είναι ευαίσθητη στα επιφανειακότερα χαρακτηριστικά της εδαφικής δομής. Σε γενικές γραμμές, η μικρή απόσταση πομπού-δέκτη έχει συνέπεια το σχετικά μικρό βάθος διασκόπησης (βλ. κατωτέρω). Οι συχνότητες λειτουργίας είναι υψηλές, ώστε ο αριθμός επαγωγής να διατηρείται χαμηλός και να υπάρχει αυξημένη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές αγωγιμότητας. Από μετρήσεις



Εικόνα 6.22. Ανωμαλία φαινόμενης αγωγιμότητας, μετρηθείσα με όργανο Geonics EM31 υπεράνω μεταλλικού σωλήνα διαμέτρου 10cm, θαμμένου σε βάθος 1m.

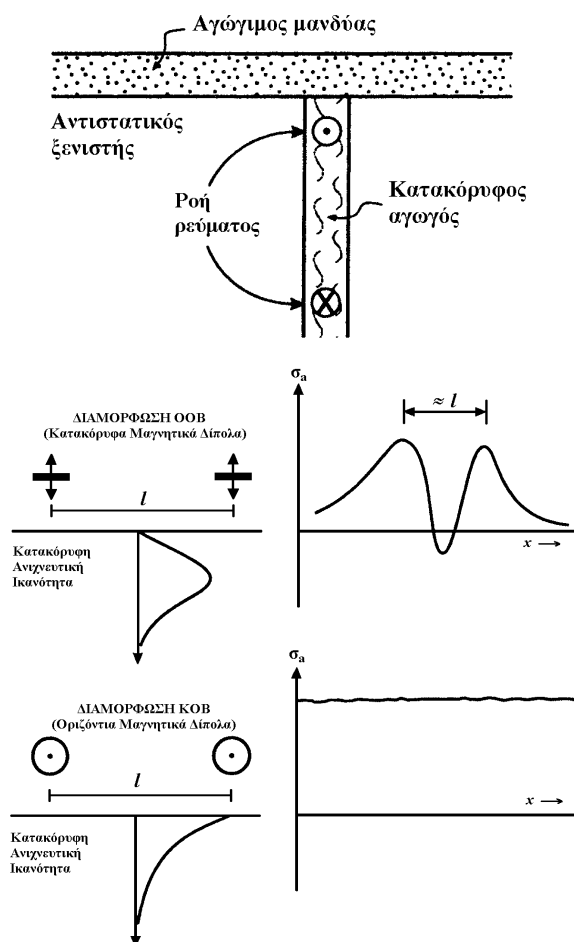
της πραγματικής συνιστώσας γίνεται υπολογισμός της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά καθιστούν τα συστήματα αυτά πολύτιμα εργαλεία για εφαρμογές που απαιτούν ταχεία χαρτογράφηση της επιφανειακής αγωγιμότητας με μικρό λειτουργικό κόστος (π.χ. αρχαιομετρία, ανακάλυψη μεταλλικών αντικειμένων, περιβαλλοντικές μελέτες κλπ.).

Τα περισσότερα γεωαγωγιμόμετρα μπορούν να λειτουργήσουν σ' αμφότερες τις διαμορφώσεις ΟΟΕ και ΚΟΕ. Για παράδειγμα, το γεωαγωγιμόμετρο Geonics EM31 (Εικόνα 6.21 άνω) λειτουργεί στη συχνότητα 9.8 kHz, με Πομπό και Δέκτη ομοεπιπέδους και σε σταθερή απόσταση 3 - 3.7 m. Κρατούμενο στην κανονική θέση όπως στην Εικόνα 6.21, οπότε οι βρόχοι είναι οριζόντιοι, το EM31 λειτουργεί ως σύστημα ΟΟΕ. Σε χαμηλούς αριθμούς επαγωγής, (ειδικές αγωγιμότητες της τάξης των 20 mS/m, το βάθος διείσδυσης φθάνει τα 6m. Εάν το όργανο περιστραφεί κατά 90° περί τον μεγάλο άξονά του, οπότε οι βρόχοι γίνονται κατακόρυφοι, το EM31 λειτουργεί ως ΚΟΕ και η διείσδυση περιορίζεται το πολύ στα 3m.

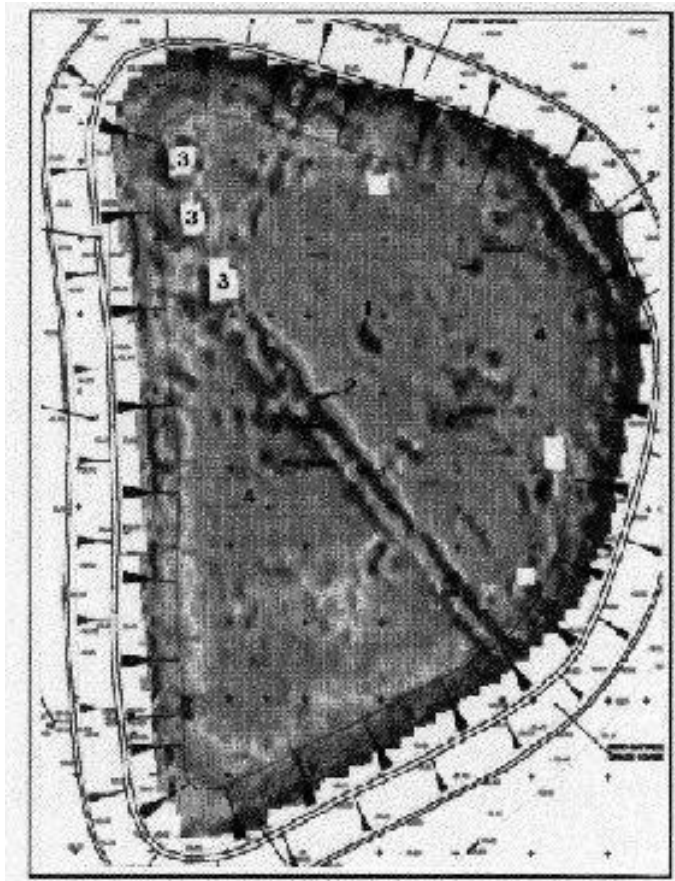
Προκειμένου να επιτευχθεί βαθύτερη διείσδυση χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα γεωαγωγιμόμετρα, (μεγαλύτερο ανάπτυγμα, χαμηλότερες συχνότητες), όπως το Geonics EM34 που στην Εικόνα 6.21 παρουσιάζεται σε διαμόρφωση ΚΟΕ. Οι δύο βρόχοι φέρονται έκαστος από ένα χειριστή και συνδέονται με εύκαμπτο καλώδιο μέσω του οποίου διαβιβάζεται το σήμα αναφοράς. Οι μετρήσεις γίνονται σε αναπτύγματα 10, 20 ή 40 m και συχνότητες 6.4, 1.6 και 0.4 kHz αντιστοίχως. Σε διαμόρφωση ΟΟΕ επιτυγχάνεται αντίστοιχη μέγιστη διείσδυση 15, 30 και 60 m, ενώ σε διαμόρφωση ΚΟΕ αυτή

ελαττώνεται τουλάχιστον κατά το ήμισυ. Όπως και με τα μεγαλύτερα συστήματα οριζοντίων βρόχων, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με σταθερό ανάπτυγμα λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της απόκρισης στην μεταβολή της απόστασης Πομπού - Δέκτη (χονδρικά, 1% σφάλμα στην απόσταση μεταφράζεται σε 3% σφάλμα στην μέτρηση).

Δεδομένου ότι τα συστήματα μικρού αριθμού επαγωγής είναι παραλλαγή των συστημάτων τύπου Slingram, η μορφή των προκυπτουσών ανωμαλιών ειδικής αγωγιμότητας και η ερμηνεία τους χωρεί κατά τα αναπτυχθέντα στο



Εικόνα 6.23. Άνω: Κατακόρυφος αγωγός εντός αντιστατικού ξενιστή, υποκείμενος λεπτού αγωγίμου επιφανειακού μανδύα. **Κάτω:** Η διαμόρφωση ΟΟΕ είναι σχετικά ανεπηρέαστη από τον μανδύα και ανιχνεύει τον αγωγό. Αντιθέτως, η διαμόρφωση ΚΟΕ αδυνατεί να διαπεράσει τον μανδύα, τον οποίο και μόνο ανιχνεύει.



Εικόνα 6.24. Χαρακτηριστικό παράδειγμα λεπτομερούς διασκόπησης εδαφικής αγωγιμότητας με όργανο EM31. Πηγή: Geo-services International (UK) Ltd.

Εδάφιο 6.2.2.1, αλλά με προσαρμογή στα (μικρότερα) σχετικά μεγέθη των χρησιμοποιούμενων αναπτυγμάτων, διασκοπούμενων στόχων και μηκών κύματος των εκπεμπομένων συχνοτήτων. Ένα παράδειγμα δίδεται στην Εικόνα 6.22, όπου παρουσιάζεται ανωμαλία φαινόμενης αγωγιμότητας μετρηθείσα με όργανο Geonics EM31 (βλέπε κατωτέρω), υπεράνω μεταλλικού σωλήνα διαμέτρου 10cm, θαμμένου σε βάθος 1 m. Η ανωμαλία παρουσιάζει δύο θετικές κορυφές, περιβάλλουσες ένα μεγάλο αρνητικό κεντρικό λοβό. Η απόσταση μεταξύ των θετικών κορυφών είναι συνάρτηση του αναπτύγματος Πομπού - Δέκτη και ο σωλήνας ευρίσκεται ακριβώς κάτω από το αρνητικό ακρότατο του κεντρικού λοβού.

Σημειώνεται επίσης ότι η μορφή της ανωμαλίας εξαρτάται και από την διαμόρφωση της μετρητικής διάταξης, αφού όπως ήδη αναφέραμε, η δια-

μόρφωση ΚΟΕ (οριζόντια μαγνητικά δίπολα) είναι ευαίσθητη στα πλέον επιφανειακά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής δομής, ενώ η ΟΟΕ (κατακόρυφα δίπολα) στα σχετικά βαθύτερα στρώματα. Στο σκαρίφημα της Εικόνας 6.23, ο Στόχος αποτελεί κατακόρυφο αγωγό σε αντιστατικό ξενιστή, θαμμένο κάτω από αγωγίμο μανδύα, ο οποίος είναι σχετικά διαφανής στην διαμόρφωση ΟΟΕ που ανιχνεύει τον αγωγό, αλλά αδιαφανής στην διαμόρφωση ΚΟΕ που 'βλέπει' μόνο τον μανδύα.

Σε γενικές γραμμές, οι ανωμαλίες των ρηχών αγωγών εμφανίζονται αρκετά περίπλοκες, συνήθως λόγω της εξάρτησής της μορφής τους από την διεύθυνση της όδευσης, η οποία επηρεάζει την ζεύξη Πρωτεύοντος – Στόχου. Οι γραμμικοί αγωγοί (σωλήνες, ρήγματα κ.ά.), συνήθως εμφανίζονται ως επιμήκει ράχες ή κοιλίες, περιστοιχιζόμενες από δύο ράχες μικρότερου πλάτους, αναλόγως του αν ο άξονας Πομπού – Δέκτη προσανατολίζεται *παράλληλα*, ή *κάθετα* προς την παράταξη του αγωγού *αντιστοίχως* (βλ. Εικόνα 6.22). Οι πλατείς οριζόντιοι αγωγοί δίδουν συνήθως ενδείξεις αρνητικού προσήμου, λόγω φαινομένων κορεσμού. Η Εικόνα 6.24 παρουσιάζει αποτελέσματα λεπτομερούς διασκόπησης EM31 πάνω από αποστραγγισμένο μικρό τεχνητό ταμιευτήρα που παρουσίαζε διαρροές. Η διασκόπηση έγινε ακριβώς επάνω από την αδιάβροχη πλαστική μεμβράνη που εκάλυπτε τον πυθμένα. Η ΒΔ-ΝΑ γραμμική μορφή έχει δομή μικρής ράχης – μεγάλης κοιλίας – μικρής ράχης και αντιπροσωπεύει επιμήκη *εσοχή* του αδιάβροχου καλύμματος του πυθμένα.³⁷ Η εσοχή αυτή διέρχεται μέσω μερικών ανωμαλιών κυκλικής μορφής, οι οποίες ερμηνεύονται ως *καταβόθρες*.

³⁷ Φαντασθείτε ότι παρατηρείτε πολλές παράλληλες ανωμαλίες του τύπου της Εικόνας 6.22 από επάνω.

6.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

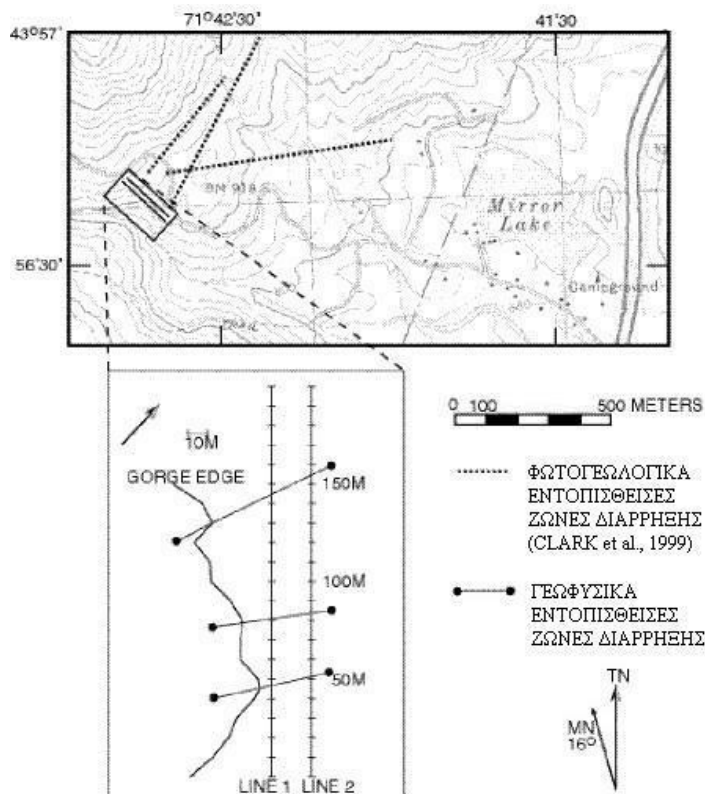
6.3.1 Εντοπισμός θραυστιγενών ζωνών και υδροδιαπερατών σχηματισμών.³⁸

Η γνώση περί της θέσης και γεωμετρίας ζωνών διάρρηξης (θραυστιγενών) έχει βαρύνουσα σημασία για την μελέτη, παρακολούθηση και προσομοίωση της ροής υπογείων υδάτων και της δι' αυτής μεταφοράς μολυντών. Πληροφορίες αυτού του είδους τυγχάνουν ευρέων εφαρμογών σε υδρολογικές, υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες και προβλήματα και φυσικά, μπορούν να αποληφθούν με γεωφυσικές μεθόδους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόζονται με ταχύτητα και χαμηλό κόστος, είτε σε συνδυασμό με γεωλογικές, υδρολογικές και γεωτρητικές μελέτες, ή και ανεξάρτητα.

Στο παρόν περιγράφεται η εφαρμογή πέντε διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, προκειμένου να προσδιορισθεί η θέση κεκορεσμένων θραυστιγενών ζωνών εντός κρυσταλλικού ξενιστή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν διδιάστατη ηλεκτρική οριζοντιογραφία (με διατάξεις Schlumberger, δίπολο-δίπολο και σταυρωτή-τετραγωνική), δύο τεχνικές γεω-αγωγιμομετρίας (EM-34 και Slingram) και η μέθοδος VLF, προκειμένου να ανιχνεύσουν ζώνες χαμηλής αγωγιμότητας, ενδεικτικές της ύπαρξης υδραυλικά διαπερατών ζωνών διάρρηξης. Αξιόπιστος εντοπισμός τέτοιων δομών κατέστη δυνατός με σύγκριση και συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων όλων των μεθόδων, πράγμα που επέτρεψε την αναγνώριση και απαλειφή όποιων ψευδοφανών ανωμαλιών αγωγιμότητας ήθελαν να εμφανισθούν.

Η μελέτη έλαβε χώρα στην Θέση Ερευνών Διερρηγμένων Πετρωμάτων (Fractured Rock Field Research Site) του USGS, και συγκεκριμένα στην κοιλάδα Hubbard Brook, Grafton County, New Hampshire, ΗΠΑ, περί το 1 km δυτικά του Mirror Lake (Εικόνα 6.25). Στην θέση αυτή υπάρχουν παγεωνικές αποθέσεις πάχους 3-6 m, οι οποίες καλύπτουν κρυσταλλικό υπόβαθρο πέτρωμα και καλύπτονται από πολύ λεπτό στρώμα (0.2 m) εδάφους, πλούσι-

³⁸ Διασκευή και μετάφραση από τους C.J. Powers, Kamini Singha and F. Peter Haeni, «Integration of Surface Geophysical Methods for Fracture Detection in Bedrock at Mirror Lake, New Hampshire», Proceedings, *USGS Toxic Substances Hydrology Meeting*, Charleston, SC, March 8-12, 1999. U.S. Geological Survey, Storrs, CT; U.S. G. S., Office of Ground Water, Branch of Geophysics, URL: <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/index.html>.

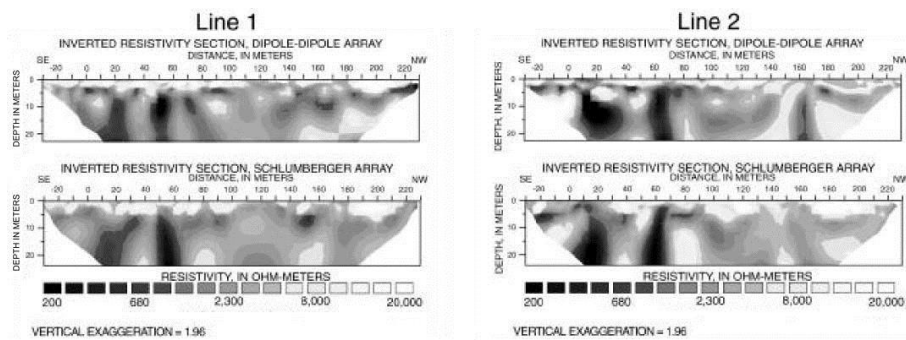


Εικόνα 6.25. Η θέση της μελέτης στο Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire, ΗΠΑ.

ου σε οργανικές ύλες. Το οργανικό στρώμα επίσης φέρει διάσπαρτες μικρές κοιλότητες, βιογενούς πιθανότατα προέλευσης.

Γεωφυσικά δεδομένα συνελέγησαν κατά μήκος δύο παραλλήλων γραμμών μήκους 200 m, προσανατολισμού $B43^\circ\Delta$ και μεταξύ τους απόστασης 20 m. Η μέση τοπογραφική κλίση κατά μήκος των δύο γραμμών είναι 8° προς ΝΑ. Οι δύο γραμμές τοποθετήθηκαν έτσι, ώστε να τέμνουν τον μεγαλύτερο δυνατό αριθμό γεωλογικών γραμμικών μορφών, που έχουν παρατηρηθεί σε αεροφωτογραφίες χαμηλού ύψους και στην ύπαιθρο³⁹. Σημειωτέον επίσης ότι τα πρώτα 140 m της Γραμμής 1 βρίσκονται από 10 ως 40 m ΒΑ του χείλους της χαράδρας του Hubbard Brook, στα πρανή της οποίας παρατηρού-

³⁹ Clark, S.F., Jr., Ferguson, E.W., Short, H.A., Marcoux, G.J., and Moore, R.B., 1999, Lineament map area 9 of New Hampshire bedrock aquifer assessment, north-central New Hampshire: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-63, scale: 1:48000.



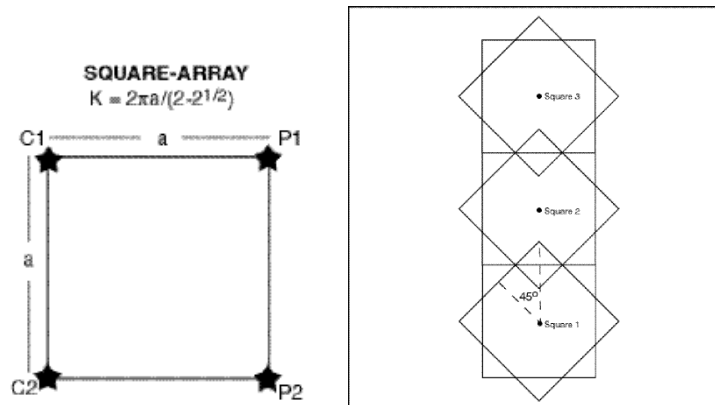
Εικόνα 6.26. Τα αποτελέσματα της διδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφικής αντιστροφής κατά μήκος των Γραμμών 1 και 2, στο Mirror Lake, New Hampshire, ΗΠΑ. Τα άνω τομογραφήματα προκύπτουν από την διάταξη διπόλου-διπόλου και τα κάτω από την διάταξη Schlumberger.

νται θέσεις κατακερματισμού, έντονης αποσάθρωσης και διαφορεικής διάβρωσης, οι οποίες πιθανότατα μαρτυρούν την θέση κάποιων σημαντικών θραυσιγενών ζωνών.

6.3.1.1. Διδιάστατη ηλεκτρική (dc) οριζοντιογραφία / τομογραφία

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εφαρμογή οι διατάξεις διπόλου-διπόλου (που προσφέρει καλύτερη οριζόντια διακριτική ικανότητα) και Schlumberger (που διαθέτει καλύτερη διεισδυτική ικανότητα). Αμφότερες οι διατάξεις εφαρμόστηκαν σε κάθε μία από τις Γραμμές 1 και 2, επί οδεύσεων (profiles), μήκους 275 m (οι μετρήσεις προεξετάθησαν περί τα 35 m πέραν εκάστου άκρου των δύο Γραμμών Διασκόπησης, ώστε να εξασφαλιστούν πλήρη δεδομένα για όλο το μήκος των 200 m εκάστης Γραμμής). Τα δεδομένα φαινόμενης ειδικής αντίστασης υπεβλήθησαν σε τομογραφική αντιστροφή⁴⁰, από την οποία προέκυψαν προσομοιώματα την υπόγειας κατανομής αγωγιμότητας που βέλτιστα αναπαριστούν την πραγματική γεωηλεκτρική δομή κατά μήκος των δύο Γραμμών Διασκόπησης και παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.26. Σ' αυτά παρατηρούνται γραμμικές ζώνες σχετικά υψηλής αγωγιμότητας, συνεχείς συναρτήσει του βάθους, οι οποίες ερμηνεύονται ως κεκορεσμένες θραυσιγενείς ζώνες. Το κρυσταλλικό υπόβαθρο εμφανίζεται με μέση ειδική αντίσταση 3.000 και 4.000 Ωm κατά μήκος των Γραμμών 1

⁴⁰ deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data: *Geophysics*, 55, 1613-1624. Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation: *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.



Εικόνα 6.27. Αριστερά: Σχηματική παράσταση τετραγωνικής διάταξης. **Δεξιά:** Όδευση σταυρωτής-τετραγωνικής διάταξης.

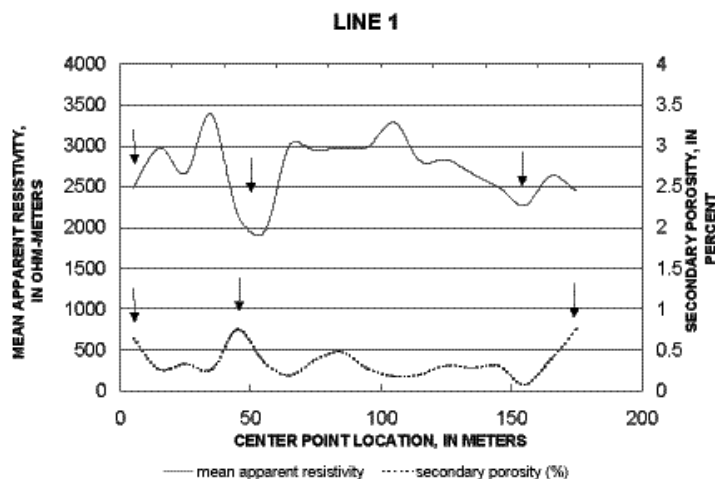
και 2 αντίστοιχα. Εντός του υποβάθρου υπάρχουν αρκετές γραμμικές μορφές σχετικά χαμηλής αντίστασης (περί τα 400 Ωm), οι οποίες πιστεύεται ότι οφείλονται σε θραυστιγενείς ζώνες και εφεξής θα αποκαλούνται "ανωμαλίες". Στην Γραμμή 1 διακρίνεται μία ευμεγέθους ανωμαλία με κλίση προς ΝΑ από τα 40 προς τα 30 m, μία κατακόρυφη γραμμική ανωμαλία από τα 40 ως τα 55 m, μία κεκλιμένη γραμμική ανωμαλία από τα 60 μέχρι τα 100 m και μία ακόμη κεκλιμένη ανωμαλία από τα 140 μέχρι τα 190 m. Η Γραμμή 2 εμφανίζει κατακόρυφες κεκλιμένες ανωμαλίες από τα 0-30 m και από τα 55-70 m, μία υπο-οριζόντια γραμμική ανωμαλία από τα 80 μέχρι τα 135 m και μία υποκατακόρυφη ανωμαλία από τα 155 μέχρι τα 175 m.

6.3.1.2. Σταυρωτή-τετραγωνική ηλεκτρική οριζοντιογραφία

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια διατεταγμένα σε δύο τετράγωνα με ίσες πλευρές a , περιστραμμένα κατά 45° γύρω από ένα κεντρικό σημείο που ορίζεται ως «θέση μέτρησης» (Εικόνα 6.27, αριστερά). Μετρήσεις φαινόμενης ειδικής αντίστασης γίνονται κατά μήκος των πλευρών εκάστου τετραγώνου και κατά τις διαγωνίους του. Σε μονοδιάστατο (στρωματοειδές) μέσο ισχύει

$$\rho_\gamma = \rho_\alpha - \rho_\beta,$$

όπου ρ_γ είναι η ειδική αντίσταση μεταξύ C1 και P2, ρ_α είναι η ειδική αντίσταση μεταξύ C1 και P1 και ρ_β είναι η ειδική αντίσταση μεταξύ C1 και C2. Η σταυρωτή-τετραγωνική ηλεκτρική οριζοντιογραφία γίνεται με μετρήσεις κατά μήκος μίας σειράς σταυρωτών (αλληλοεπικαλυπτόμενων) τετραγώνων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.27 δεξιά. Τα δεδομένα μίας τέτοιας διάταξης προσφέρουν πληροφορία για την αζιμουθιακή κατανομή της ειδικής αντίστασης σε κάθε θέση μέτρησης κατά μήκος της όδευσης (συναρτήσεως της



Εικόνα 6.28. Αποτελέσματα της στραυρωτής-τετραγωνικής οριζοντιογραφίας στο Mirror Lake, New Hampshire, ΗΠΑ.

διεύθυνσης, ανά 45°). Από αυτά υπολογίζεται η μέση φαινόμενη ειδική αντίσταση και το μέγεθος της φαινόμενης ανισοτροπίας σε κάθε θέση μέτρησης. Το μέγεθος της ανισοτροπίας χρησιμεύει επίσης για υπολογισμό του δευτερογενούς πορώδους του πετρώματος. Χαμηλές τιμές μέσης αντίστασης και υψηλές τιμές πορώδους μπορεί να σημαίνουν την ύπαρξη υδραυλικά διαπερατών θραυσσιγενών ζωνών.

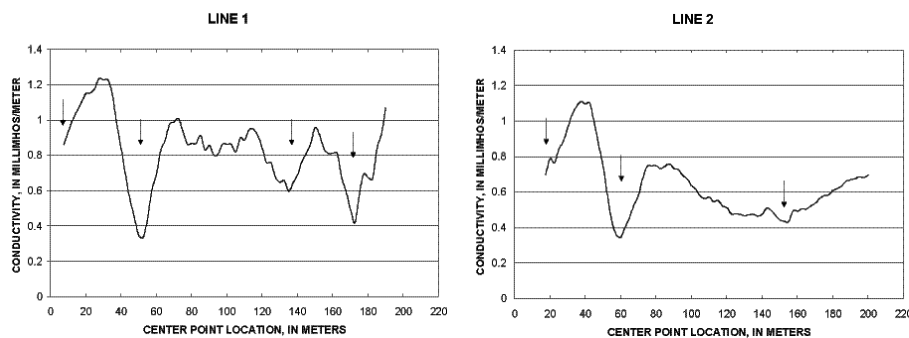
Μετρήσεις ελήφθησαν μόνο κατά μήκος της Γραμμής 1, σε θέσεις ισαπέχουσες μεταξύ τους απόσταση 10 m, με πλευρά τετραγώνου 10 m και το πρώτο τετράγωνο (θέση) κεντραρισμένο στα 5 m από την αρχή της Γραμμής. Η μέση φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε θέση μέτρησης είναι αζιμουθιακά αμετάβλητη, δηλ. ανεξάρτητη από τυχούσες ανισοτροπικές ιδιότητες του μέσου και υπολογίζεται από την σχέση⁴¹:

$$\rho_m = (\rho_{a1} \cdot \rho_{a2} \cdot \rho_{a3} \cdot \rho_{a4})^{1/4},$$

όπου ρ_m είναι ο γεωμετρικός μέσος όρος, ρ_{a1} είναι η ειδική αντίσταση παράλληλα στην Γραμμή 1, ρ_{a2} η ειδική αντίσταση σε γωνία 45° ως προς την Γραμμή 1, ρ_{a3} είναι η ειδική αντίσταση κάθετα στην Γραμμή 1 και ρ_{a4} είναι η ειδική αντίσταση σε γωνία 135° ως προς την Γραμμή 1. Το πορώδες υπολογίστηκε από την φαινόμενη ανισοτροπία της ειδικής αντίστασης,⁴² θεωρώ-

⁴¹ Βλ. Habberjam, G.M., 1972, "The effects of anisotropy on square array resistivity measurements: Geophysical Prospecting, 20, 249-266".

⁴² Σύμφωνα με τον Habberjam, G.M., 1975, Apparent resistivity, anisotropy, and strike measurements, Geophysical Prospecting, 23, 211-247.



Εικόνα 6.29. Αποτελέσματα της διασκόπησης EM-34 στο Mirror Lake, New Hampshire, ΗΠΑ.

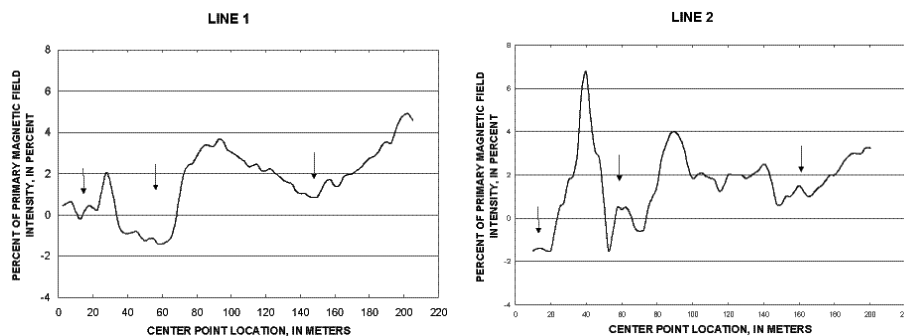
ντας ότι αυτή είναι αποκλειστικά θραυστιγενής (δευτερογενής) και δεν οφείλεται στην φύση (π.χ. σχιστότητα, ετερογένεια) του μητρικού πετρώματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Κατά μήκος της Γραμμής 1, χαμηλές μέσες αντιστάσεις εντοπίζονται στα 5 m, 45 - 55 m, και πιθανόν στα 155 m. Αυξημένο δευτερογενές πορώδες εντοπίζεται στα 5 m, 45 m και 175 m. Όπως προαναφέρθηκε, χαμηλές τιμές μέσης αντίστασης και υψηλές τιμές πορώδους μπορεί να σημαίνουν την ύπαρξη υδραυλικά διαπερατών θραυστιγενών ζωνών.

6.3.1.3. Γεω-αγωγιμομετρία.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αγωγιμομέτρων: ένα Geonics EM34 σε διαμόρφωση OOB και ένα όργανο ABEM Slingram.

Υπενθυμίζεται ότι η διαμόρφωση OOB του EM34 είναι πλέον ευαίσθητη σε βάθη 0,45 φορές το ανάπτυγμα πομπού-δέκτη και μπορεί να διεισδύσει σε βάθη μέχρι 1,5 φορές την απόσταση αυτή. Μετρήσεις ελήφθησαν ανά 2,5 m κατά μήκος αμφοτέρων των Γραμμών 1 και 2, με σταθερό ανάπτυγμα πομπού-δέκτη 20 m (Εικόνα 6.29). Με αυτή την διαμόρφωση του συστήματος (ισαπόσταση 2,5 m και ανάπτυγμα 20 m), οι πιθανές φυσικές ανωμαλίες θα πρέπει να εμφανίζονται σε τουλάχιστον οκτώ, και ίσως περισσότερα γειτονικά σημεία μετρήσεων. Τέτοιου είδους ανωμαλίες υπάρχουν σε αποστάσεις 5, 55, 135 και 170 m επί της Γραμμής 1 και 15, 60 και πιθανόν 155 m επί της Γραμμής 2.

Η μέθοδος Slingram χρησιμοποιήθηκε παρομοίως, με τα πηνία πομπού και δέκτη οριζόντια ομοεπίπεδα και σταθερό ανάπτυγμα 40 m (το βέλτιστο βάθος διείσδυσης του Slingram είναι περί τις 0,75 φορές το ανάπτυγμα πο-



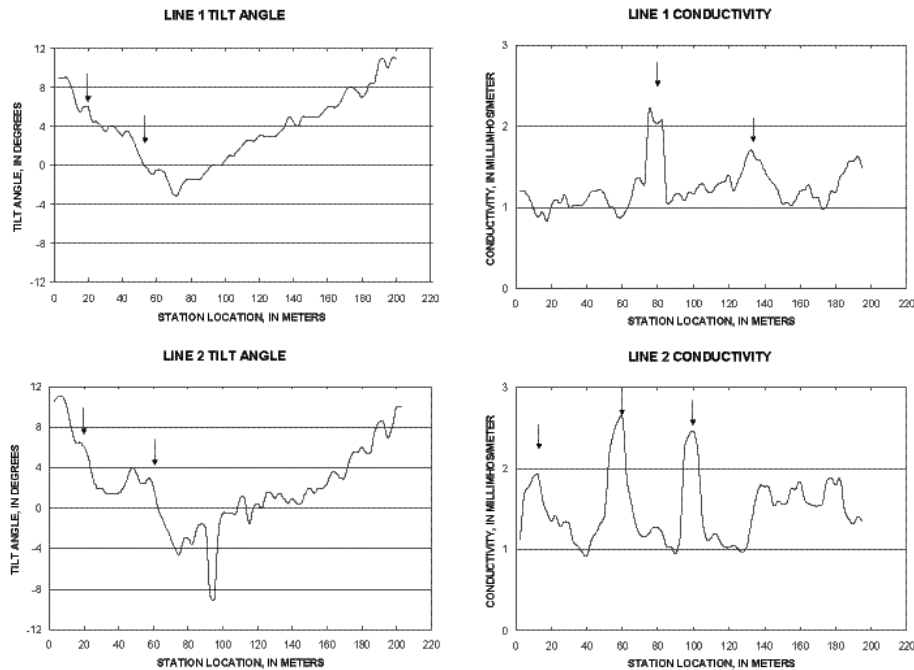
Εικόνα 6.30. Αποτελέσματα Slingram από το Mirror Lake, New Hampshire, ΗΠΑ.

μπού-δέκτη). Μετρήσεις ελήφθησαν ανά 2,5 m και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.30. Υπενθυμίζεται ότι το Slingram μετρά % ποσοστό της έντασης του πρωτεύοντος πεδίου, η οποία είναι απ' ευθείας ανάλογη προς την φαινόμενη αγωγιμότητα. Ανωμαλίες ανιχνεύθηκαν στα 15, 55, και 145 m επί της Γραμμής 1, και στα 10, 60 και 160 m επί της Γραμμής 2.

6.3.1.4. Μέθοδος VLF

Η μέθοδος VLF εφαρμόστηκε με δύο τρόπους: κλασσικές μετρήσεις γωνίας κλίσης (VLF-T) και μετρήσεις ειδικής αντίστασης (VLF-R). Υπενθυμίζεται ότι για σωστή εφαρμογή της μεθόδου VLF, πομπός οφείλει να ευθυγραμμίζεται με το στόχο, ώστε το πρωτεύον μαγνητικό παδίο να είναι κάθετο προς αυτόν και να ισχύουν συνθήκες επαγωγής κατά τον EH τρόπο. Ο πομπός VLF του Cutler, Maine (24 kHz) ήταν ο μόνος που εξέπεμπε σήμα αρκετά ισχυρό, ώστε να είναι χρήσιμο στην περιοχή μελέτης. Στην θέση Hubbard Brook, το αζιμούθιο του πομπού Cutler, Maine είναι περίπου 80° και αποκλίνει λιγότερο των 30° από την αναμενόμενη παράταξη των ανιχνευτέων θραυσσιγενών ζωνών. Η γεωμετρία αυτή επαρκεί για προσεγγιστική εκτίμηση της EH φαινόμενης ειδικής αντίστασης, αλλά είναι μάλλον οριακή για μετρήσεις γωνίας κλίσης, πράγμα που απαιτεί αυξημένη προσοχή στην μέτρηση και την ερμηνεία. Δεδομένου ότι η ελάχιστη πραγματική ειδική αντίσταση είναι της τάξης των 400 Ωm (όπως προκύπτει από την ερμηνεία των ηλεκτρικών διασκοπήσεων) και της συχνότητας του πομπού, το βάθος διείσδυσης του πεδίου VLF στην περιοχή μετρήσεων αναμένεται να είναι μεγαλύτερο των 65 μέτρων.

Μετρήσεις ελήφθησαν ανά 2,5 m κατά μήκος αμφοτέρων των Γραμμών και στις μετρήσεις VLF-R χρησιμοποιήθηκε σταθερό ανάπτυγμα ηλεκτροδίων 10 m. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην 6.31. Ανωμαλίες γωνίας



Εικόνα 6.31. Αποτελέσματα VLF από το Mirror Lake, New Hampshire, ΗΠΑ. Σημειώσατε ότι οι μετρήσεις φαινόμενης ειδικής αντίστασης (VLF-R, δεξιά) έχουν αντιστραφεί σε φαινόμενη ειδική αγωγιμότητα για καλύτερη απεικόνιση των ανωμαλιών.

κλίσης ανιχνεύονται στα 50 m και πιθανόν στα 20 m κατά μήκος της Γραμμής 1, καθώς και στα 60 m και πιθανόν στα 20 m κατά μήκος της Γραμμής 2. Ανωμαλίες φαινόμενης ειδικής αγωγιμότητας ανιχνεύονται: κατά μήκος της Γραμμής 1 στα 80 και, πιθανόν στα 135 m· κατά μήκος της Γραμμής 2 στα 15, 60 και 100 m, όπου επίσης παρατηρείται μία σχετικά αγωγίμη ζώνη στα 140 - 190 m.

6.3.1.5. Συναξιολόγηση αποτελεσμάτων και ολοκλήρωση της ερμηνείας.

Η σύγκριση και συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων όλων των εφαρμοσθεισών γεωφυσικών μεθόδων, οδηγεί στην ερμηνεία της Εικόνα 6.32. Σ' αυτήν εμφανίζονται δύο περιοχές ανώμαλης (χαμηλής) ειδικής αντίστασης που αποκαλούνται Θραυσιγενής Ζώνη 1 (Fracture Zone 1) και Θραυσιγενής Ζώνη 2 (Fracture Zone 2) και ανιχνεύονται με όλες τις μεθόδους στις αποστάσεις 0-20 m και 45-55 m επί της Γραμμής 1, και 0-25 m και 55-65 m επί

Η Θραυστιγενής Ζώνη 2 εντοπίζεται στα 45-55 m επί της Γραμμής 1 και στα 55-65 m επί της Γραμμής 2, με αζιμούθιο 17° . Είναι περίπου κατακόρυφη, δίδει τις πλέον έντονες ανωμαλίες και ανιχνεύεται από όλες τις μεθόδους. Γεωλογικές παρατηρήσεις επί των πρηνών τοιχωμάτων της χαράδρας του Hubbard Brook αποκαλύπτουν την ύπαρξη πραγματικής υποκατακόρυφης ρηξιγενούς δομής πλάτους 5-6 m και αζιμουθίου $34^\circ \pm 10^\circ$, αποτελούμενης από κατακερματισμένο σχιστόλιθο με λεπτή επίστρωση σιδηρούχου ιζήματος. Η πραγματική αυτή ζώνη προβάλλεται στα 45-50 m επί της Γραμμής 1 και στα 46-56 m επί της Γραμμής 2, ακριβώς επάνω στην θέση της ερμηνευμένης Θραυστιγενούς Ζώνης 2.

Μία ομάδα ανωμαλιών ερμηνευόμενη ως πιθανή θραυστιγενής ζώνη, εντοπίζεται από όλες τις μεθόδους στην Γραμμή 1, από τα 135 - 170 m και από τις περισσότερες μεθόδους στην Γραμμή 2, από τα 160 - 170 m. Το εύρος της ανώμαλης ζώνης επί της Γραμμής 1 είναι σχετικά μεγάλο και οι ανωμαλίες έχουν μικρό πλάτος, σε αντίθεση με τα παρατηρούμενα επί της Γραμμής 2. Στην Γραμμή 1, τα φαινόμενα αυτά μπορεί να προκαλούνται από τοπική αύξηση του πάχους των παγετωνικών αποθέσεων, ή από ελάττωση του πλάτους της ρηξιγενούς δομής, ή από την ύπαρξη πολλαπλών συγχομένων ανωμαλιών, ή, τέλος, από συνδυασμό των ανωτέρω. Εν πάσει περιπτώσει, μία πιθανή ρηξιγενής δομή που παρατηρείται στα πρηνή της χαράδρας Hubbard Brook, προβάλλεται επί της Γραμμής 1 στα 145 - 150 m, και επί της Γραμμής 2 στα 150 - 160 m, θέσεις συμβατές με την ομαδοποίηση των γεωφυσικών ανωμαλιών. Επιπλέον, μία φωτογεωλογική ευθυγράμμιση που παρατηρείται σε αεροφωτογραφίες χαμηλού ύψους προβάλλεται στα περίπου ίδια σημεία επί των Γραμμών Διασκόπησης και πιθανόν να συσχετίζεται με την Ζώνη αυτή.

Η ηλεκτρική τομογραφία δείχνει ότι η ειδική αντίσταση των θραυστιγώνων ζωνών είναι της τάξης των 400 Ωm , ενώ αυτή του ξενιστή (μητρικού πετρώματος) είναι 3,000 - 4,000 Ωm . Θεωρώντας ότι η ειδική αντίσταση του πορικού ρευστού είναι 3,3 Ωm , και με βάση τον νόμο του Archie και τα αποτελέσματα της σταυρωτής-τετραγωνικής διάταξης, υπολογίζεται ότι το πορώδες των θραυστιγώνων ζωνών είναι της τάξης 1,6% - 1,9 % και ο *παράγων συνεκτικότητας* (δηλ. ο εκθέτης m), είναι της τάξης 1,17 - 1,22 (το πορώδες θεωρείται κεκορεσμένο). Το σχετικά υψηλό δευτερογενές πορώδες πιθανότατα δείχνει ότι οι θραυστιγενείς ζώνες περιέχουν έντονα κατακερματισμένο υλικό (τρίμμα), πράγμα που άλλωστε πιστοποιείται και από τις παρατηρήσεις επί των πρηνών της παρακείμενης χαράδρας Hubbard Brook.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ
ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Περιοχή Συ- χνοτήτων	Όνομα Ζώνης και Ορια Μήκους Κύμα- τος / Συχνότητας (m / Hz)	Ζώνη Συ- χνοτήτων	
Ραδιο-κύματα	$10^4 - 10^{-2} \text{ m} / 10^4 - 10^{10} \text{ Hz}$		
	Ultra-low frequency (ULF)	3 - 30 Hz	Περιοχή Γεωφυσικών Εφαρμογών Ερεύννης Υπεδάφους.
	Extremely low frequency (ELF)	30 - 300 Hz	
	Voice frequencies (VF)	300 Hz - 3 kHz	
	Very low frequency (VLF)	3 - 30 kHz	
	Low frequency (LF)	30 - 300 kHz	
	Medium frequency (MF)	300 kHz - 3 MHz	Βραχεία
	High frequency (HF)	3 - 30 MHz	
	Very high frequency (VHF)	30 - 300 MHz	Τηλεόραση, Γεω-RADAR
	Ultra high frequency (UHF)	300 MHz - 3 GHz	
	Super high frequency (SHF)	3 - 30 GHz	Μικροκύματα (30 cm - 1 mm/1-300 GHz)
	Extremely high frequency (EHF)	30 - 300 GHz	
Υπέρυθρο	$10^{-3} - 10^{-6} \text{ m} / 10^{11} - 10^{14} \text{ Hz}$		
Ορατό	$5 \times 10^{-7} \text{ m} / 2 \times 10^{14} \text{ Hz}$		
Υπεριώδες	$10^{-7} - 10^{-8} \text{ m} / 10^{15} - 10^{16} \text{ Hz}$		
Ακτίνες Χ	$10^{-9} - 10^{-11} \text{ m} / 10^{17} - 10^{19} \text{ Hz}$		
Ακτίνες γ	$10^{-11} - 10^{-13} \text{ m} / 10^{19} -$		

	10^{21} Hz		
--	--------------	--	--