



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

**Λουκάς
Αληφραγκής**

ΑΕΜ 3674

**Μαρία
Καπαντζάκη**

ΑΕΜ 3708

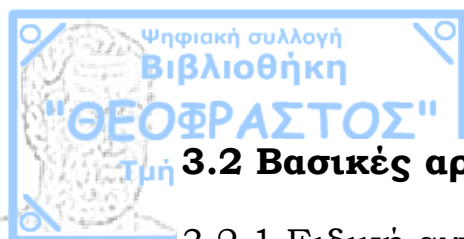
ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ

**Κωνσταντίνος Βουδούρης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ**

**Παναγιώτης Τσούρλος
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ**

Θεσσαλονίκη 2008

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ. 4
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	σελ. 6
2.1 Εισαγωγή	σελ. 6
2.2 Ηλεκτρονική αγωγιμότητα στα μεταλλικά ορυκτά και τον γραφίτη	σελ. 6
2.3 Ιοντική αγωγιμότητα στα ρευστά των πόρων	σελ. 8
2.3.1 Πορώδες	σελ. 8
2.3.2 Θερμοκρασία	σελ. 12
2.3.3 Ειδική αντίσταση ως συνάρτηση του πορώδους, της αλατότητας του ρευστού πόρων και της θερμοκρασίας	σελ. 12
2.3.4 Κορεσμός ρευστού πόρων	σελ. 13
2.3.5 Περιεκτικότητα σε άργιλο	σελ. 14
2.3.6 Πίεση	σελ. 17
2.4 Ειδική αντίσταση εξαρτώμενη της συχνότητας, επαγόμενη πόλωση (IP)	σελ. 18
2.4.1 Εισαγωγή	σελ. 18
2.4.2 Επαγόμενη πόλωση στα πετρώματα που περιέχουν τα μεταλλικά ορυκτά	σελ. 20
2.4.3 IP στα πετρώματα και στα εδάφη που περιέχουν άργιλο	σελ. 21
3. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗ	σελ. 22
3.1 Εισαγωγή	σελ. 22



3.2 Βασικές αρχές μέτρησης	σελ.25
3.2.1 Ειδική αντίσταση	σελ.25
3.2.2 Επαγόμενη πόλωση	σελ.29
3.3 Τρόποι ηλεκτρικών μετρήσεων	σελ.32
3.3.1 Οδεύσεις	σελ.33
3.3.2 Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις	σελ.34
3.3.3 Αξιμουθιακές έρευνες	σελ.36
3.3.4 Ηλεκτρική τομογραφία επιφάνειας	σελ.36
3.3.5 Ηλεκτρική τομογραφία σε μονές γεωτρήσεις	σελ.40
3.3.6 Ηλεκτρική τομογραφία μεταξύ γεωτρήσεων	σελ.42
3.3.7 Ηλεκτρικές μετρήσεις σε πυρήνες γεωτρήσεων	σελ.45
3.4 Επεξεργασία δεδομένων	σελ.45
<u>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	σελ.49
<u>5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	σελ.52

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική μελέτη της εφαρμογής των ηλεκτρικών μεθόδων στον κλάδο της υδρογεωφυσικής.

Η μέτρηση των υδρογεωλογικών παραμέτρων των υπόγειων νερών όπως το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα απαιτούν γενικά πληροφορίες που προέρχονται από άμεσες μετρήσεις των ιδιοτήτων αυτών και απαιτούν γεωτρήσεις. Η γεωφυσική παρέχει έναν έμμεσο τρόπο ώστε να εκτιμηθούν οι παραπάνω ιδιότητες χωρίς να είναι απαραίτητη η εκτεταμένη χρήση γεωτρήσεων. Η προσπάθεια σύνδεσης των γεωφυσικών ιδιοτήτων με υδρογεωλογικές παραμέτρους αποτελεί έναν καινούργιο, γρήγορα αναπτυσσόμενο, διεπιστημονικό κλάδο που ονομάζεται υδρογεωφυσική.

Ανάμεσα στις γεωφυσικές μεθόδους, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στις υδρογεωλογικές έρευνες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μελετούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους οι οποίες και παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης με διάφορες υδρογεωλογικές παραμέτρους. Η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων στα πετρώματα μέσω των ρευστών των πόρων συνδέεται άμεσα με το πορώδες και το υπάρχον νερό ενώ επίσης συνδέεται και με την υδραυλική ροή του νερού μέσα στα πετρώματα.

Η αξιοποίηση των γεωφυσικών αυτών παρατηρήσεων για τον σχετικά ακριβή προσδιορισμό των υδρογεωλογικών παρατηρήσεων αποτελεί μια σύγχρονη επιστημονική πρόκληση που συγκεντρώνει τις προσπάθειες όλο και περισσότερων επιστημόνων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια βιβλιογραφικής ανασκόπησης της εφαρμογής των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων στην υδρογεωφυσική.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων και οι σχέσεις τους με τις υδρογεωλογικές παραμέτρους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι ηλεκτρικής διασκόπησης στην υδρογεωφυσική, οι διαδικασίες μέτρησης και οι τρόποι ερμηνείας των δεδομένων.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύνοψη των παραγόντων εκείνων που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την εκτέλεση γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων στην υδρογεωφυσική.

Την επίβλεψη κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μας είχαν οι κ. Κωνσταντίνος Βουδούρης και ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης, Επίκουροι καθηγητές του Α.Π.Θ ,τους οποίους και ευχαριστούμε για την βοήθειά τους.

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1. Εισαγωγή

Τα εδάφη, τα ιζήματα, και τα πετρώματα του φλοιού της Γης αποτελούνται κυρίως από τα μεταλλεύματα πυριτικών αλάτων, που είναι ηλεκτρικοί **μονωτές**. Οι ειδικές αντιστάσεις τους είναι χαρακτηριστικά μεγαλύτερες από 10^{10} Ohm-m και δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα σε αυτά τα υλικά μεταφέρεται από τα ιόντα που είναι διαλυμένα στους πόρους τους.

Ένα υποσύνολο των μεταλλευμάτων, κυρίως μεταλλικά μεικτά θειούχα είναι ηλεκτρονικοί ημιαγωγοί. Μια μορφή άνθρακα, ο γραφίτης, είναι ένας μεταλλικός αγωγός ο οποίος βρίσκεται σε πολλά πετρώματα του γήινου φλοιού.

2.2 Ηλεκτρονική αγωγιμότητα στα μεταλλικά ορυκτά και τον γραφίτη

Στα μέταλλα οι μεταφορείς ηλεκτρικού φορτίου είναι ηλεκτρόνια που κινούνται ελεύθερα ανάμεσα στο μεταλλικό κρυσταλλικό πλέγμα. Σε σχέση με τα πετρώματα και τα εδάφη οι αγωγιμότητες είναι πολύ υψηλές. Οι ακόλουθες είναι χαρακτηριστικές τιμές για μερικά ενδεικτικά μέταλλα:

Μέταλλα	Ειδική αντίσταση [Ohm-m]
Αργίλιο	2.8×10^{-8}

Χαλκός	1.7×10^{-8}
Σίδηρος	10×10^{-8}
Υδράργυρος	95×10^{-8}
Ασήμι	1.6×10^{-8}
Χάλυβας	$15-90 \times 10^{-8}$

Ο γραφίτης, μια μορφή άνθρακα, είναι επίσης ένας ηλεκτρονικός αγωγός, με ειδική αντίσταση 10^{-4} μέχρι $5 \times 10^{-3} \text{ Ohm-m}$. Ο γραφίτης εμφανίζεται μέσα σε μεταμορφωμένα πετρώματα και είναι δύσκολο να διακριθεί από τα μεταλλικά ορυκτά.

Τα περισσότερα μεταλλικά ορυκτά έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια - το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, αλλά και από τα ηλεκτρόνια τα οποία είναι στερεωμένα κανονικά στο ατομικό πλέγμα.

Η διακύμανση της ειδικής αντίστασης για μερικά χαρακτηριστικά μεταλλικά ορυκτά είναι η ακόλουθη:

Ορυκτά	Ειδική αντίσταση [Ohm-m]
Χαλκοπυρίτης, CuFeS_2	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$
Σιδηροπυρίτης, FeS_2	$3.0 \times 10^{-5} - 1.5$
Γαληνίτης, PbS	$3.0 \times 10^{-5} - 3.0 \times 10^2$

Αιματίτης, Fe_2O_3	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
Μαγνητίτης, Fe_3O_4	$5.0 \times 10^{-4} - 5.0 \times 10^4$

2.3 Ιοντική αγωγιμότητα στα ρευστά των πόρων

Για τα περισσότερα πετρώματα και εδάφη όπου το ρεύμα μεταφέρεται από τα ιόντα στο ρευστό πόρων η ειδική αντίσταση εξαρτάται από τις ακόλουθες ιδιότητες των πετρωμάτων:

2.3.1 Πορώδες

Στα περισσότερα πετρώματα υπάρχει μια εμπειρική σχέση, καθιερωμένη από τον G. E. Archie (1942), μεταξύ της αναλογίας της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της μάζας του πετρώματος ρ_b , της ειδικής αντίστασης του ρευστού των πόρων, ρ_f , που καλείται παράγοντας σχηματισμού, F , και του όγκου του πορώδους, ϕ . Αυτή η σχέση, που καλείται νόμος του Archie είναι:

$$\frac{\rho_b}{\rho_f} = F = a\phi^{-m} \Rightarrow \rho_b = \rho_f a\phi^{-m} \quad (2.1)$$

Για τους χαρακτηριστικούς ψαμμίτες των δεξαμενών πετρελαίου ο Archie διαπίστωσε ότι ο συντελεστής a ήταν κοντά στο 1 και ο εκθέτης m ήταν κοντά στο 2. Επόμενες εργασίες με άλλα πετρώματα δείχνουν ότι αυτός ο νόμος δύναμης ισχύει γενικά αλλά με ποικίλους συντελεστές και εκθέτες.

Ο ακόλουθος πίνακας από τον Keller (1996) συνοψίζει τους συντελεστές για διαφορετικά υλικά.

Πέτρωμα	ϕ	a	m
Αδύναμα συγκολλημένο, θρυμματοποιημένο (Τριτογενές)	0.25 – 0.45	0.88	1.37
Μέτρια καλά συγκολλημένο (Μεσοζωικό)	0.22-0.35	0.62	1.72
Καλά συγκολλημένο (Παλαιοζωικό)	0.05-0.25	0.62	1.95
Συμπαγή, πυριγενή, μεταμορφωμένα	<0.05	1.4	1.6
Ηφαιστειακό με υψηλό πορώδες	0.2-0.8	3.5	1.4

Ο νόμος του Archie εξηγεί εύκολα το ευρύ φάσμα των ειδικών αντιστάσεων του παρατηρούμενου πετρώματος. Λογικές διακυμάνσεις για το πορώδες και την ειδική αντίσταση ρευστών πόρων αποδίδουν μια σειρά ειδικών αντιστάσεων πετρώματος με διακυμάνσεις έως και πέντε τάξεις μεγέθους.

Ο Archie άρχισε πραγματικά την εργασία του ελπίζοντας να βρει μια σχέση μεταξύ διαπερατότητας και ειδικής αντίστασης.

Δυστυχώς η διαπερατότητα είναι μια πολύ αδύνατη συνάρτηση της ειδικής αντίστασης και δεν έχει προκύψει καμία χρήσιμη σχέση. Στη ρίζα αυτού του προβλήματος είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει συνήθως κανένας ισχυρός συσχετισμός μεταξύ του πορώδους και της διαπερατότητας. Περαιτέρω, στη μικροσκοπική κλίμακα η αγωγιμότητα ελέγχεται από το τετράγωνο της ακτίνας (επιφάνειας) από την επιφάνεια αντιπροσωπευτικού δείγματος από τα διάκενα των πόρων μέσω του πετρώματος, ενώ η διαπερατότητα εξαρτάται από μια υψηλότερη δύναμη της ακτίνας αυτών των διάκενων.

Εξετάστε την τρέχουσα ροή μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα της ακτίνας r και του μήκους L κάτω από μια εφαρμοσμένη τάση V . Το ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\pi r^2 V}{\rho L} = \frac{\pi r^2 E}{\rho} = - \frac{\pi r^2}{\rho} \cdot \nabla \phi \quad (2.2)$$

όπου το ηλεκτρικό πεδίο E , V/L , έχει εκφραστεί ως διαφορά δυναμικού.

Ο Νόμος Darcy για το ογκομετρικό ποσοστό ροής ρευστού q_f κάτω από μια υδραυλική κλίση ∇P είναι:

$$q_f = k_h A \nabla P = k_h \pi r^2 \nabla P \quad (2.3)$$

όπου A είναι η κανονική διατομή επιφάνειας στην κατεύθυνση ροής και k_h είναι η υδραυλική αγωγιμότητα.

Για να προσδιορίσουν τις τιμές για k_h για πετρώματα φτιαγμένα από στενούς πόρους ή αγωγούς, ο νόμος του Poiseuille για τη ροή μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα ακτίνας r είναι:

$$q_f = \frac{1}{8\mu} r^2 \cdot \pi r^2 \nabla P \quad (2.4)$$

Φαίνεται ότι για την τριχοειδή ροή η ίδια η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ακτίνας της απόστασης πόρων και έτσι η γενική ροή μεταβάλλεται με την τέταρτη δύναμη της ακτίνας.

Τελικά πρέπει να διαπιστωθεί ότι ο Archie εργάστηκε με τα πετρώματα που διαποτίστηκαν με χαμηλής ειδικής αντίστασης θαλασσινό νερό, χαρακτηριστικό του περιβάλλοντος πετρελαιοπηγών. Για τέτοια πετρώματα αυτό παρατηρείται ότι για ένα δεδομένο πορώδες ο παράγοντας σχηματισμού είναι σταθερός ενώ η ειδική αντίσταση των ρευστών πόρων αλλάζει. Ωστόσο όπως η ειδική αντίσταση των πόρων ρευστού αυξάνεται, διαπιστώνεται ότι ο παράγοντας σχηματισμού αρχίζει να μειώνεται. Η προσοχή πρέπει να δοθεί στην εφαρμογή του νόμου του Archie για ιζήματα πόσιμου ύδατος επειδή η ειδική αντίσταση μπορεί να υποστεί επίδραση από αυτήν την εναλλακτική πορεία.

Το πορώδες που εξετάζεται μέχρι τώρα είναι το πρωτογενές πορώδες (κοκκώδες) που συναντάται στα περισσότερα ιζηματογενή πετρώματα. Το δευτερογενές πορώδες (θραύσης) είναι εξίσου σημαντικό για την ειδική αντίσταση καθώς οι επιφάνειες των παράλληλων σπασιμάτων είναι ουσιαστικά σύντομα κυκλώματα ή γρήγορες διαδρομές για την αγωγιμότητα του ρεύματος.

2.3.2 Θερμοκρασία

Η ειδική αντίσταση των ρευστών πόρων μειώνεται με την αυξανόμενη θερμοκρασία επειδή η κινητικότητα των ιόντων στο διάλυμα αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Αυτή η ιδιότητα των διαλυμάτων είναι αντίθετη από τη συμπεριφορά των μεταλλικών (ηλεκτρονικών) αγωγών όπου η ειδική αντίσταση αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Ο προσεγγιστικός τύπος για την ειδική αντίσταση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι:

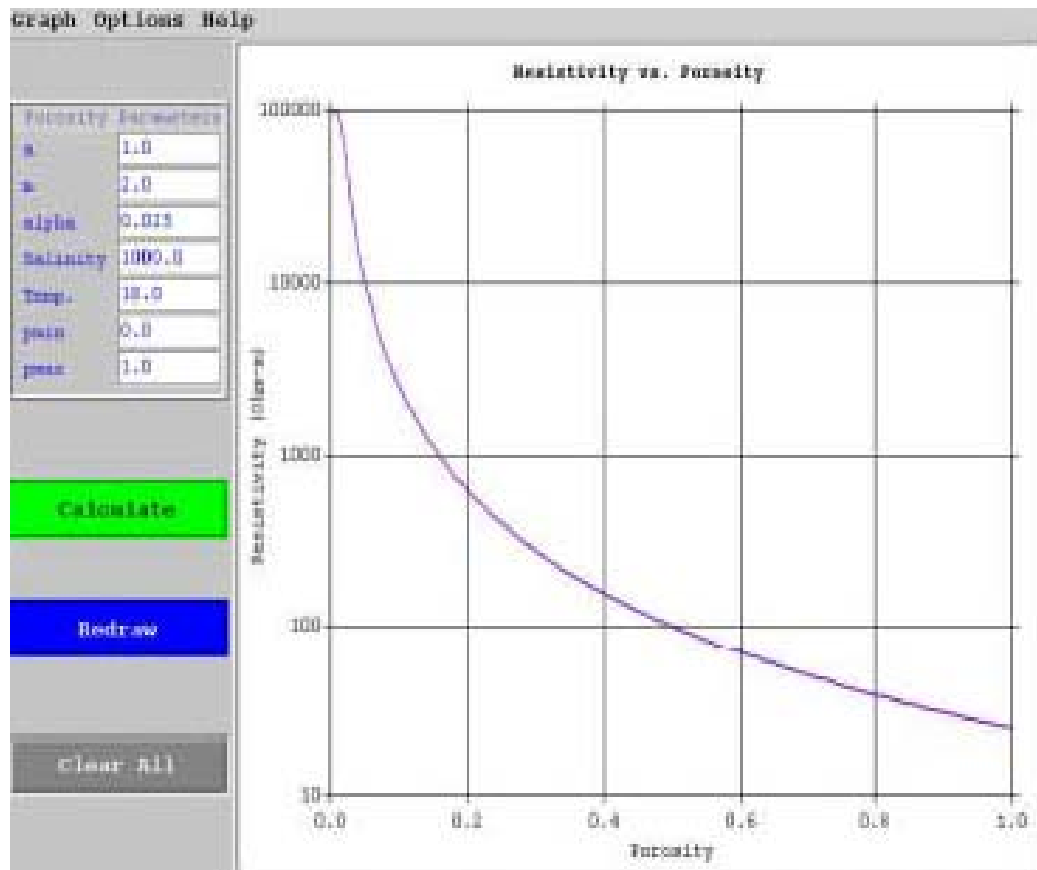
$$\rho_f(t) = \frac{\rho_{18}^{\circ C}}{1 + a(t - 18)} \quad \text{όπου } a \approx 0.025 \quad (2.5)$$

Ο σχεδιασμός της ειδικής αντίστασης προς τη θερμοκρασία για το διάλυμα NaCl, είναι αντιπροσωπευτικός για ένα ευρύ φάσμα διαλυμάτων και μπορεί να αντικατασταθεί μέσα στο νόμο του Archie για να καθορίσει την αλλαγή στη μαζική ειδική αντίσταση πετρώματος με τη θερμοκρασία.

2.3.3 Ειδική αντίσταση ως συνάρτηση του πορώδους, της αλατότητας, του ρευστού πόρων και της θερμοκρασίας.

Ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μαζικής ειδικής αντίστασης βασισμένος στο νόμο του Archie και οι παραπάνω τύποι για την ειδική αντίσταση ρευστού πόρων για διάφορες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις δίνονται στο σχήμα 2.1. Οι υπολογισμοί είναι βασισμένοι σε ένα διάλυμα NaCl. Οι συντελεστές του νόμου του Archie όπως και το σχετικό πορώδες, η θερμοκρασία, και η συγκέντρωση (ή οι επιθυμητές διακυμάνσεις αυτών των παραμέτρων)

είναι οι πρότυπες παράμετροι και οι γραφικές παραστάσεις είναι της μαζικής ειδικής αντίστασης προς το πορώδες, τη θερμοκρασία ή τη συγκέντρωση.



Σχήμα 2.1

2.3.4 Κορεσμός ρευστού πόρων

Ο κορεσμός, S , είναι το μέρος των διάκενων των πόρων που είναι πραγματικά γεμισμένο με το ρευστό. Για ψαμμίτες γεμισμένους με θαλασσινό νερό ισχύει μια άλλη σχέση νόμου δύναμης, επίσης χαρακτηριστικό του Archie, η οποία είναι η εξής:

$$\rho_b = \rho_{b100} S_w^{-2} \quad (2.6)$$

όπου ρ_{b100} είναι η ειδική αντίσταση πετρώματος με 100% κορεσμό και S_w είναι ο κορεσμός νερού.

Αυτή η σχέση ισχύει για τους κορεσμούς πάνω από τον **κρίσιμο κορεσμό**, S_c . Ο κρίσιμος κορεσμός εμφανίζεται στην αποξηράνση ενός δείγματος, όπου η περαιτέρω αφαίρεση του ρευστού αποξηραίνει τους αγωγούς των πόρων που συνδέουν τις μεγαλύτερες δεξαμενές πόρων. Μόλις διακοπούν αυτές οι συνδέσεις η ειδική αντίσταση αυξάνεται πολύ γρήγορα με τον εκθέτη του S_w να φτάνει μέχρι και την τιμή 4. Με την πλήρη αποστράγγιση παραμένει ακόμα κάποιο ρευστό που είτε παγιδεύεται στους κλειστούς πόρους είτε δεσμεύεται στις επιφάνειες των ορυκτών. Αυτό αναφέρεται ως αμείωτος κορεσμός και έτσι όλα τα πετρώματα έχουν ένα ανώτερο όριο ειδικής αντίστασης στο χαμηλό κορεσμό τους αφήνοντας πίσω τον αμείωτο κορεσμό.

2.3.5 Περιεκτικότητα σε άργιλο

Η παρουσία αργίλου χαμηλώνει τη μαζική ειδική αντίσταση του εδάφους ή του πετρώματος και αναγκάζει την ειδική αντίσταση να εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος της πηγής. Πρώτα εξετάζουμε τους λόγους που αναγκάζουν την ειδική αντίσταση να μειωθεί. Η επίδραση της αργίλου στην ειδική αντίσταση παρατηρήθηκε αρχικά στις μελέτες των πετρωμάτων που περιέχουν άργιλο όπου διαπιστώθηκε ότι η εξίσωση του Archie που ισχύει για

τα χαμηλής ειδικής αντίστασης ρευστά πόρων συστηματικά έδινε υπερεκτιμημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η επίδραση οφείλεται στο γεγονός ότι τα ορυκτά αργίλου έχουν ένα ηλεκτρικά ενεργό στρώμα επιφάνειας. Αυτή η ενεργός επιφάνεια όχι μόνο έχει επιπτώσεις στην ηλεκτρική ειδική αντίσταση των μιγμάτων ύδατος-αργίλου, αλλά έχει επιπτώσεις επίσης στο βαθμό στον οποίο το νερό κρατιέται μέσα στη δομή αργίλου και τελικά επηρεάζει τη μηχανική δύναμη και πυκνότητα των εδαφών που περιέχουν τον άργιλο. Για να καταλάβουμε καλύτερα την επίδραση της αργίλου στην ηλεκτρική ειδική αντίσταση πρέπει να αναθεωρήσουμε μερικές βασικές ιδιότητες της αργίλου.

Η βασική δομή ενός χαρακτηριστικού μορίου αργίλου αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα δύο λεπτών επιφανειών - σαν κρυσταλλικά πλέγματα. Η πρώτη είναι μια επίπεδη δομή τετράεδρου πυριτίου, όπου άτομα πυριτίου περιβάλλονται από τα άτομα οξυγόνου στις κορυφές του τετραέδρου. Η δεύτερη είναι μια επίπεδη δομή οκτάεδρων ομάδων αποτελούμενων από άτομα μαγνησίου ή αργιλίου τα οποία περιβάλλονται από υδροξύλια ή άτομα οξυγόνου στις κορυφές των οκτάεδρων.

Κατά την διάρκεια του σχηματισμού άλλα ιόντα μπορούν να αντικαταστήσουν το βασικό πυρίτιο, μαγνήσιο ή αργίλιο στο δικτυωτό πλέγμα. Στα τετράεδρα στρώματα το αργίλιο μπορεί να αντικαταστήσει το πυρίτιο και στα οκτάεδρα στρώματα το μαγνήσιο αντικαθιστά το αργίλιο ή ο σίδηρος αντικαθιστά το μαγνήσιο. Αν η αρχική ή η ιδανική δομή ήταν ηλεκτρικά ουδέτερη μετά την αντικατάσταση Mg^{++} από Al^{+++} θα άφηνε **καθαρό αρνητικό φορτίο**. Για να διατηρήσει την ηλεκτρική ουδετερότητα το μόριο

αργίλου προσελκύει τα κατιόντα στην επιφάνειά του από γειτονικά. Αυτά τα κατιόντα δεν είναι μέρος της κρυστάλλινης δομής της αργίλου, προέρχονται απλά από διάλυμα ύδατος που περιβάλλει τον άργιλο στο σχηματισμό του. Μπορεί να έχουν αντικατασταθεί από άλλα ιόντα όταν ο σχηματισμός αργίλου εξελίσσεται και τα υδάτινα περιβάλλοντα αλλάζουν. Θεωρούνται ανταλλάξιμα και η ποσότητα η οποία είναι διαθέσιμη για ανταλλαγή, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τον αριθμό των αρνητικών φορτίων που βρίσκονται στο πλέγμα του αργίλου, καλείται Ικανότητα ανταλλαγής Κατιόντων, **Cation Exchange Capacity** (CEC). Ιόντα που κρατιούνται δίπλα στην εκτεθειμένη δομή δικτυωτού πλέγματος της επιφάνειας μπορεί να απελευθερωθούν μέσα στο διάλυμα και ιόντα στο διάλυμα μπορούν να αποτραβηχτούν σε περιοχές της επιφάνειας. Οι άργιλοι μπορούν έτσι να πάρουν τα ιόντα από το διάλυμα και να τα αντικαταστήσουν με διαφορετικά ιόντα από τη δομή τους.

Μια σημαντική επίδραση είναι ότι όταν προστίθεται το νερό στην άργιλο η συγκέντρωση των ιόντων αυξάνεται στο διάλυμα κοντά στην αργιλική επιφάνεια . Ενώ μερικά από αυτά τα απελευθερωμένα ιόντα και πολικά μόρια ύδατος κρατούνται γερά στην επιφάνεια , το σταθερό στρώμα (ή αυστηρό στρώμα), άλλα κρατιούνται λιγότερο σταθερά σε ένα διάχυτο αλλά κινητό στρώμα που επεκτείνεται μέσα στο διάλυμα. Αυτά τα ιόντα διαχέονται μέσα στο διάλυμα ως αποτέλεσμα της βαθμιαίας μεταβολής συγκέντρωσης αλλά επίσης κρατιούνται από την μεταβολή τάσης (το ηλεκτρικό πεδίο) της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειας του αργίλου. Η φορτισμένη επιφάνεια και η σχετική ζώνη της συγκέντρωσης των ιόντων που μειώνεται, καλείται διάχυτο διπλό στρώμα.

Οι Waxman και Smits (1968) παρήγαγαν τη σχετικά απλή έκφραση που δίνει συγκεκριμένα τον προφανή παράγοντα F_a σχηματισμού στον αληθινό παράγοντα F σχηματισμού (ο παράγοντας σχηματισμού που μετριέται στην υψηλή συγκέντρωση διαλύματος πόρων) και την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων μέσω της σχέσης:

$$F_a = \frac{\rho_b}{\rho_w} = \frac{F}{1 + \rho_w BQ} \quad (2.7)$$

όπου το Q είναι η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων ανά μονάδα όγκου του αργίλου και B είναι ένας παράγοντας που σχετίζεται με την ιονική κινητικότητα του διαλύματος.

2.3.6 Πίεση

Ο ρόλος της πίεσης, τουλάχιστον πίεση περιορισμού, είναι να αυξήσει τη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός πετρώματος. Η επίδραση προκαλείται από τη μείωση του όγκου των πόρων καθώς το πέτρωμα συμπιέζεται. Μια απλή σχέση μεταξύ της αλλαγής στην ειδική αντίσταση και της πίεσης μπορεί να προέλθει άμεσα από το νόμο του Archie υπό τον όρο ότι η πίεση προσαρμόζεται από την αλλαγή του όγκου των πόρων. Παραγωγίζοντας ως προς την ειδικής αντίστασης όσον αφορά το πορώδες λαμβάνουμε:

$$\frac{\Delta \rho_b}{\rho_b} = -m \frac{\Delta \phi}{\phi} = -m \frac{\varepsilon}{\phi} \quad (2.8)$$

που **ε** είναι η ογκομετρική πίεση. Η πίεση ενισχύεται πρώτα από το αντίστροφο του πορώδους και επίσης από τον εκθέτη m του νόμου του Archie. Έτσι για ένα πορώδες 0,01 και έναν εκθέτη 2 η κλασματική αλλαγή στην ειδική αντίσταση είναι 200 φορές η πίεση. Κατά συνέπεια βλέπουμε ότι η ειδική αντίσταση μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητο όργανο ελέγχου για την πίεση ειδικά στα υλικά με χαμηλό πορώδες. Έχει θεωρηθεί σε αυτήν την ανάλυση ότι το πέτρωμα είναι διαπερατό και ότι το ρευστό συμπιέζεται καθώς το πορώδες μειώνεται. (Εάν δεν είναι, η πίεση των πόρων μπορεί να αυξηθεί επάνω από την υδροστατική και ο σχηματισμός λέγεται ότι είναι υπερπιεσμένος. Υπό αυτούς τους όρους η αυξανόμενη πίεση πόρων μπορεί πραγματικά να αυξήσει το αποτελεσματικό πορώδες και η ειδική αντίσταση θα μειωθεί.)

Η επίδραση της πίεσης μπορεί να είναι δραματική στα τεμαχισμένα πετρώματα όπου τα σπασίματα κανονικά στην αρχική πίεση κλείνουν, ενώ άλλα παραμένουν ανοικτά. Αυτό επιφέρει μια σημαντική αλλαγή στην ανισοτροπία του πετρώματος.

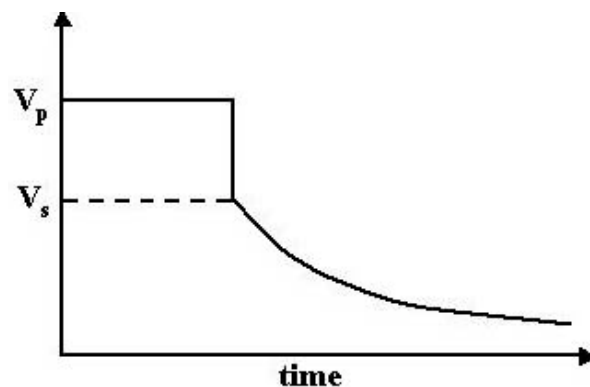
2.4 Ειδική αντίσταση εξαρτώμενη της συχνότητας, επαγόμενη πόλωση (IP).

2.4.1. Εισαγωγή

Παρατηρείται στις μετρήσεις στο υπαίθρο και στο εργαστήριο ότι η ειδική αντίσταση ή η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι συνάρτηση της συχνότητας του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Παρατηρήθηκε επίσης στις αρχικές μετρήσεις υπαίθρου

χρησιμοποιώντας συνεχές ρεύμα, ότι η τάση στα ηλεκτρόδια δυναμικού εξασθενίζει αργά μετά την παύση εισαγωγής ρεύματος. Αυτό το φαινόμενο ήταν έντονο σε πετρώματα με μεταλλικά ορυκτά καθώς και σε εδάφη που περιέχουν άργιλο.

Η χρονική μεταβολή της τάσης κατά μήκος του δείγματος ή μεταξύ των ηλεκτροδίων του υπαίθρου όταν αποκλείεται το ρεύμα έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 2.2

Η τάση ακολουθεί μια χαρακτηριστική σταδιακή πτώση από μια εκθετικής μορφής εξασθένιση με μια χρονική σταθερά που κυμαίνεται από τα χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι δεκάδες δευτερόλεπτα. Στην βιβλιογραφία η αναλογία V_s/V_p είναι γνωστή ως ικανότητα φόρτισης, **m**. Η εξασθένιση τάσης αφότου κλείσει το ρεύμα προτείνει έναν μηχανισμό αποθήκευσης της ενέργειας στο υλικό.

2.4.2. Επαγόμενη πόλωση στα πετρώματα που περιέχουν τα μεταλλικά ορυκτά

Σε πόρους πετρωμάτων που φράζονται από ένα μεταλλικό ορυκτό το ρεύμα πρέπει να διασχίσει τη διεπιφάνεια μέσω των ρευστών των πόρων. Αυτό είναι ένα κλασικό πρόβλημα στην ηλεκτροχημεία και υπάρχει μια εκτενής βιβλιογραφία που χρονολογείται από τον Michael Faraday πάνω στη φυσική και τη χημεία αυτής της διεπιφάνειας και των χημικών αντιδράσεων που εμφανίζονται στη μεταφορά του φορτίου σε αυτήν.

Το μεταλλικό πλέγμα παρουσιάζει ένα καθαρά αρνητικό φορτίο στο παρακείμενο διάλυμα και συνεπώς παρασύρει τα κατιόντα και τα πολωμένα μόρια νερού σε ένα στενά συνδεδεμένο όριο ή επιφανειακό στρώμα στην επιφάνεια του ορυκτού. Το πρόβλημα είναι περαιτέρω περίπλοκο επειδή, το μεταλλικό ορυκτό, αντίθετα από το ορυκτό της αργίλου, μπορεί πραγματικά να απελευθερώσει τα ιόντα από το πλέγμα στο διάλυμα, παρέχοντας πρόσθετα κατιόντα στο διάχυτο στρώμα. Αυτός είναι πραγματικά ο μηχανισμός της διάβρωσης όπου τα ιόντα ενός μετάλλου διαλύουν συνεχώς το διάλυμα. Εάν η διάβρωση εξαρτάται από την τάση που υπάρχει μεταξύ του μετάλλου ή του μεταλλικού ορυκτού και του παρακείμενου διαλύματος. Το ρεύμα μπορεί να ρεύσει καθώς τα ιόντα αφήνουν την επιφάνεια. Το ίδιο το διάχυτο διπλό στρώμα είναι επίσης ένας πυκνωτής.

2.4.3. IP στα πετρώματα και στα εδάφη που περιέχουν άργιλο

Ο μηχανισμός για την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου όταν η άργιλος είναι παρούσα εξαρτάται από το γεγονός ότι η κινητικότητα των ανιόντων και των κατιόντων είναι διαφορετική στο διάχυτο στρώμα δίπλα στην επιφάνεια αργίλου απ' ότι στο ρευστό πόρων σε μια ελεύθερη ζώνη αργίλου. Αυτό χαμηλώνει την αποτελεσματική κινητικότητα των ανιόντων και το αποτέλεσμα είναι μια εκλεκτική μεταφορά των ανιόντων στην ζώνη αργίλου.

Ο πραγματικός αριθμός μεταφοράς, εξαρτάται από τη σχετική συγκέντρωση των κατιόντων στους πόρους αργίλου έναντι στη συγκέντρωσή τους στο κανονικό διάλυμα. Αυτό στη συνέχεια εξαρτάται από CEC και από τη συγκέντρωση ρευστών πόρων. Στους αργίλους με καλή διάταξη, και υψηλή CEC όπως ο μοντμοριλλονίτης δεν είναι ασυνήθιστο να υπάρξουν οι αριθμοί μεταφοράς κατιόντων πάνω από 0,9. Αυτή η επιλεκτικότητα ζώνης, με τη συνοδευτική πόλωσή της όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό πεδίο, αναφέρεται συνήθως ως πόλωση μεμβρανών. Σε ένα απλό μοντέλο, το έδαφος ή το πέτρωμα αποτελείται από εναλλασσόμενες ζώνες από αργίλους-πλούσιες πόρων και από αργίλους-ελεύθερων πόρων. Επειδή οι κινητικότητες είναι διαφορετικές σε αυτές τις ζώνες, όταν εφαρμόζεται ένα πεδίο, τα ιόντα θα μαζευτούν στις διεπαφές μεταξύ των ζωνών και παρέχει το χωρητικό στοιχείο στο ισοδύναμο κύκλωμα. Μερικά ιόντα κυλούν μέσω της διεπαφής αν και με μια υψηλότερη αντίσταση στη ροή απ' ότι στους ελεύθερους πόρους αργίλου και υπάρχουν εναλλασσόμενες παράλληλες πορείες ακριβώς όπως υπάρχει στο μοντέλο στο οποίο τα μεταλλικά μόρια εμποδίζουν τις διαδρομές των πόρων. Ένα σχηματικό μοντέλο απ' αυτές τις εναλλασσόμενες ζώνες, πάρθηκε από τον Fraser (1964).

Λεπτομερώς η πραγματική μετακίνηση των ιόντων προς και από την διεπαφή, ελέγχεται από τη διάχυση και αντιπροσωπεύεται από μια Warburg σύνθετη αντίσταση.

3. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ **ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗ**

3.1. Εισαγωγή

Η ειδική αντίσταση του συνεχούς ρεύματος και οι μέθοδοι επαγόμενης πόλωσης επιτρέπουν αντιστοίχως τον καθορισμό της χωρικής κατανομής, των χαρακτηριστικών αντίστασης και πυκνωτή του υπεδάφους.

Καθώς και οι δύο ιδιότητες επηρεάζονται από τη λιθολογία, την χημεία του ρευστού των πόρων και την ποσότητα του περιεχομένου νερού, αυτές οι μέθοδοι έχουν ένα πολύ σημαντικό δυναμικό για υδρογεωφυσικές εφαρμογές.

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο εύρος εργαστηριακών αλλά κυρίως υπαίθριων εφαρμογών και είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες γεωφυσικές τεχνικές στην υδρογεωφυσική. Αυτές οι έρευνες είναι σχετικά εύκολο να γίνουν, η κτήση και χρήση οργάνων μέτρησης είναι οικονομική, τα εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων είναι ευρέως διαθέσιμα και οι σχέσεις μεταξύ αγωγιμότητας και υδρολογικών ιδιοτήτων (π.χ. πορώδες) είναι καλά θεμελιωμένες. Αντίθετα, οι εφαρμογές των μεθόδων επαγόμενης πόλωσης στην υδρογεωφυσική είναι σχετικά

περιορισμένες. Όπως παρατήρησαν οι Slater και Lesmes (2002), αυτό συμβαίνει εξαιτίας της πιο σύνθετης διαδικασίας απόκτησης των δεδομένων, και επίσης επειδή η φυσικοχημική ερμηνεία των παραμέτρων της επαγόμενης πόλωσης δεν είναι πλήρως κατανοητή.

Οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης εκτελούνται με παρόμοιο τρόπο στο ύπαιθρο και για αυτό συνήθως μελετούνται από κοινού. Σε αντίθεση με τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους και τις μεθόδους γεωραντάρ, η ειδική αντίσταση και η επαγόμενη πόλωση απαιτούν γαλβανική σύνδεση με το έδαφος. Συνεπώς αυτό μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή των μεθόδων σε κατάλληλες τοποθεσίες και επίσης απαιτεί περισσότερο χρόνο για έρευνες, σε σύγκριση με τις ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές και τις τεχνικές γεωραντάρ.

Οι μέθοδοι ειδικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης έχουν εμφανιστεί ως πρώιμα εργαλεία εξερεύνησης στις αρχές του 1900. Στο τέλος της δεκαετίας του 70 η αυξημένη υπολογιστική δύναμη οδήγησε στην εμφάνιση νέων υπολογιστικών εργαλείων ερμηνείας (για παράδειγμα Dey και Morrison, 1979) και στην ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών απεικόνισης (για παράδειγμα Lytle και Dines, 1978) που εμφανίστηκαν παράλληλα με αυτές στον κλάδο της βιοϊατρικής. Παρά την φαινομενική πολυπλοκότητα των σημερινών μεθοδολογιών και αλγορίθμων, τα εργαλεία ερμηνείας των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης και της επαγόμενης πόλωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι στενά συνδεδεμένα με εξελίξεις στο αντικείμενο που έλαβαν χώρα την δεκαετία του 70.

Οι περισσότερες μέθοδοι ειδικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης ακόμα υιοθετούν την προσέγγιση μέτρησης με τέσσερα ηλεκτρόδια, η οποία παραδοσιακά χρησιμοποιείται στη γεωφυσική

διασκόπηση. Τα δύο ηλεκτρόδια ενεργούν ως πηγή ρεύματος, ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την μέτρηση διαφοράς δυναμικού. Επιπλέον, η έλευση κατά τα τελευταία έτη οργάνων μέτρησης ειδικής αντίστασης νέας γενιάς, επέτρεψε την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης και, υπό την έννοια αυτή, κάθε συνδυασμός μετρήσεων μπορεί να ληφθεί εύκολα και γρήγορα. Αυτό σε σχέση με υδρογεωφυσικές μελέτες δίνει επίσης τη δυνατότητα της εκτέλεσης μετρήσεων που αφορούν τη διαχρονική μεταβολή των γεωφυσικών ιδιοτήτων.

Οι σύγχρονες μέθοδοι ειδικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης έχουν και οι δύο την ικανότητα απεικόνισης του υπεδάφους. Όροι όπως ηλεκτρική αντίσταση (ή ειδική αντίσταση), τομογραφία (ERT), τομογραφία σύνθετης ηλεκτρικής αντίστασης (EIT), εφαρμοσμένη τομογραφία δυναμικού (APT) χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωφυσική, βιοϊατρική και στην επιστήμη των μηχανικών για να περιγράψουν τις απεικονίσεις των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Στην γεωφυσική, ο όρος τομογραφία χρησιμοποιούνταν αρχικά για έρευνες στις οποίες οι αισθητήρες περιέκλειαν την περιοχή υπό έρευνα. Τελικά ο όρος έγινε συνώνυμος με κάθε μορφής απεικόνιση. Καθώς οι τεχνικές απεικόνισης αναπτύχθηκαν για την μελέτη τρισδιάστατων ή ακόμα και τετραδιάστατων συστημάτων (η τέταρτη διάσταση είναι η μεταβολή με το χρόνο).

3.2. Βασικές αρχές μέτρησης

3.2.1 Ειδική αντίσταση

Στην μέθοδο ειδικής αντίστασης, η χωρική μεταβολή της ειδικής αντίστασης στο ύπαιθρο καθορίζεται χρησιμοποιώντας μετρήσεις τεσσάρων ηλεκτροδίων. Δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ηλεκτρικό κύκλωμα. Η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα άλλα δύο ηλεκτρόδια επιτρέπει τον καθορισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Μέθοδοι επεξεργασίας (αντιστροφής) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες μετρήσεις για να καθορίσουν την εικόνα της υπόγειας δομής. Τα ηλεκτρόδια μπορεί να τοποθετηθούν τόσο στην επιφάνεια του εδάφους όσο και σε γεωτρήσεις.

Το ανοξείδωτο ατσάλι είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για τα ηλεκτρόδια, αν και άλλα υλικά, όπως ο χαλκός ή ο ορείχαλκος χρησιμοποιούνται επίσης. Για να αποφευχθεί η πόλωση στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται μια εναλλασσόμενη πηγή συνεχούς ρεύματος χαμηλών συχνοτήτων (0,5 έως 2 Hz) που παράγει ρεύμα με τη μορφή τετραγωνικού παλμού (σχήμα 3.1)

Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι επίσης χρονικά μεταβαλλόμενη, λόγω της μεταβαλλόμενης πηγής ρεύματος, αλλά αυτή η τάση μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί καθώς γνωρίζουμε πλήρως τα χαρακτηριστικά της πηγής.

Η ηλεκτρική αντίσταση R που μετρούμε δίνεται από τον τύπο $R=V_p/I$, όπου V_p είναι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού και I είναι η ένταση του ρεύματος (σχήμα 3.1).

Θεωρώντας τρισδιάστατη ισότροπη κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, $\sigma(r)$, το ηλεκτρικό δυναμικό $V(r)$, σε ένα σημείο r εξαιτίας ενός μονού ηλεκτροδίου ρεύματος (σημειακή πηγή) στο οποίο εισάγεται ρεύμα έντασης I καθορίζεται από την εξίσωση του Poisson :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -I\delta(r), \quad (3.1)$$

Εάν ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (3.2.a)$$

στην επιφάνεια του εδάφους

και η συνθήκη : $V=0 \quad (3.2.b)$

σε σημεία που βρίσκονται πολύ μακριά από την πηγή ρεύματος το δυναμικό δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r}, \quad (3.3)$$

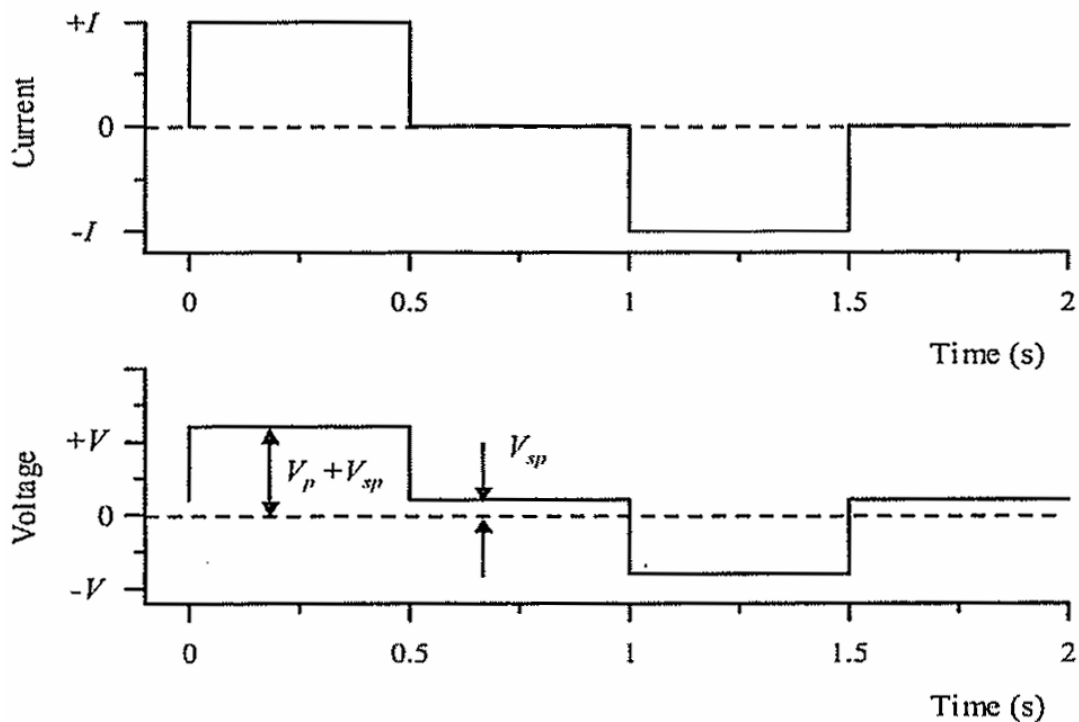
όπου ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και r η απόσταση από το ηλεκτρόδιο. Καθώς η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a , καθορίζεται ως η αντίσταση ομογενούς γης ισοδύναμη με την μετρούμενη φαινόμενη αντίσταση, αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με

την αρχή της υπέρθεσης ώστε να παραχθούν εκφράσεις για την φαινόμενη αντίσταση οποιασδήποτε διάταξης τεσσάρων ηλεκτροδίων.

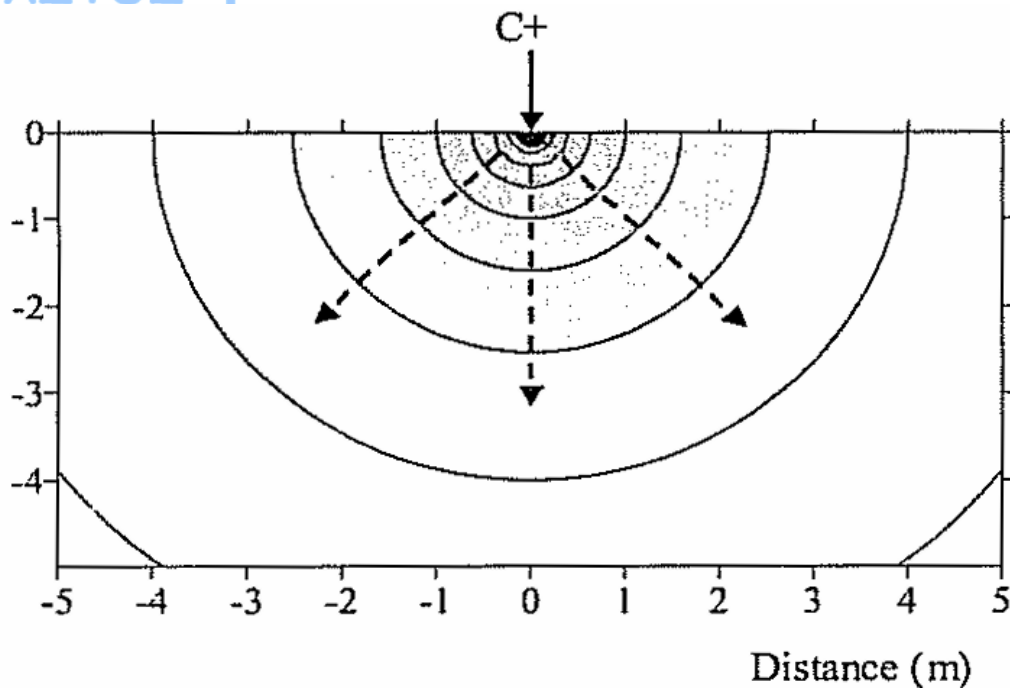
Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διατάξεων ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται συχνά για έρευνες στην επιφάνεια του εδάφους. Το σχήμα 3.3 απεικονίζει τις διατάξεις Wenner, διπόλου – διπόλου και Schlumberger. Άλλες διατάξεις (για παράδειγμα πόλου – πόλου, πόλου – διπόλου, αναπτύσσονται επίσης). Σαν παράδειγμα, για τη διάταξη Wenner, η φαινόμενη αντίσταση ρ_a δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad , \quad (3.4)$$

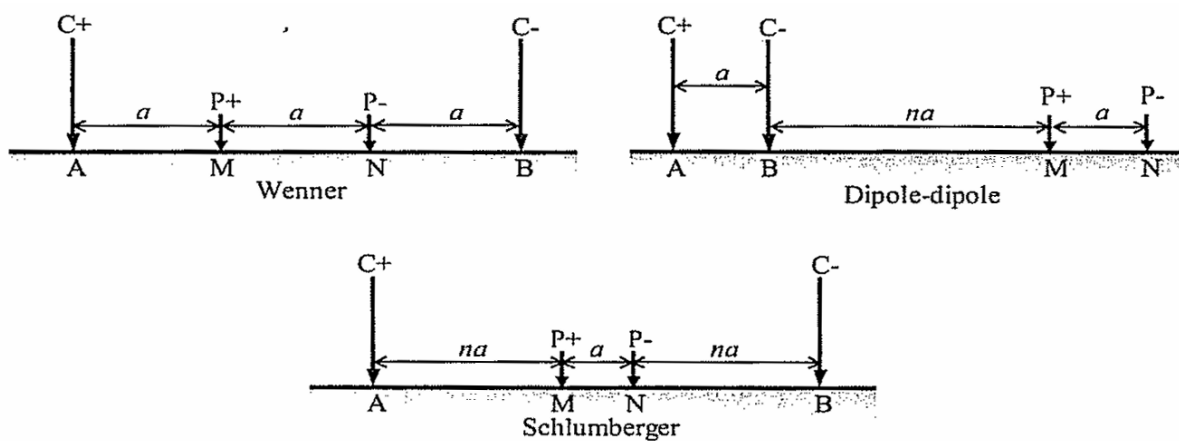
όπου a απόσταση των ηλεκτροδίων (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.1 Τυπικές και εξιδανικευμένες κυματομορφές ρεύματος για υπαίθριες έρευνες ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος. V_p είναι η αρχική τάση, V_{sp} είναι η παρατηρούμενη τάση εσωτερικού δυναμικού.



Σχήμα 3.2 Διαφορά δυναμικού στο μισό του χώρου με διανομή ενιαίας ειδικής αντίστασης του εμβαλλόμενου ρεύματος στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα επιφανειακής διάταξης ηλεκτροδίων.

3.2.2 Επαγόμενη πόλωση

Ενώ η ειδική αντίσταση του εδάφους ελέγχεται κυρίως από την ηλεκτρική αγωγιμότητα στα ρευστά των πόρων, η επαγόμενη πόλωση επηρεάζεται σημαντικά από διαδικασίες στις επιφάνειες των κόκκων των ρευστών. Με τη μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης μπορούν να μετρηθούν οι ιδιότητες αντίστασης και της χωρητικότητας των εδαφών. Σαν αποτέλεσμα οι έρευνες επαγόμενης πόλωσης τουλάχιστον στην θεωρία δίνουν πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την χωρική διαφοροποίηση στη λιθολογία και τη χημεία της επιφάνειας των κόκκων.

Οι μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης γίνονται στο ύπαιθρο χρησιμοποιώντας διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων. Στην πρώτη περίπτωση η εξασθένηση της τάσης με τον χρόνο μετριέται αφού η εισαγωγή ρεύματος έχει σταματήσει (Σχήμα 3.4). Η σταδιακή μείωση στην μετρούμενη τάση είναι μια σύνθετη λειτουργία της πόλωσης του ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια των κόκκων των ρευστών και στην αγωγιμότητα των ρευστών των πόρων και κατά μήκος των ορίων των κόκκων.

Ο Seigel (1959) καθόρισε την φαινόμενη φορτιστικότητα (m_a) ως :

$$m_a = \frac{V_s}{V_p}, \quad (3.5)$$

Όπου V_s είναι η δευτερεύουσα τάση (η τάση που μετράμε αμέσως μετά το τέλος εισαγωγής του ρεύματος) και V_p η αρχική τάση. Η δευτερεύουσα τάση είναι δύσκολο να μετρηθεί ακριβώς στο ύπαιθρο

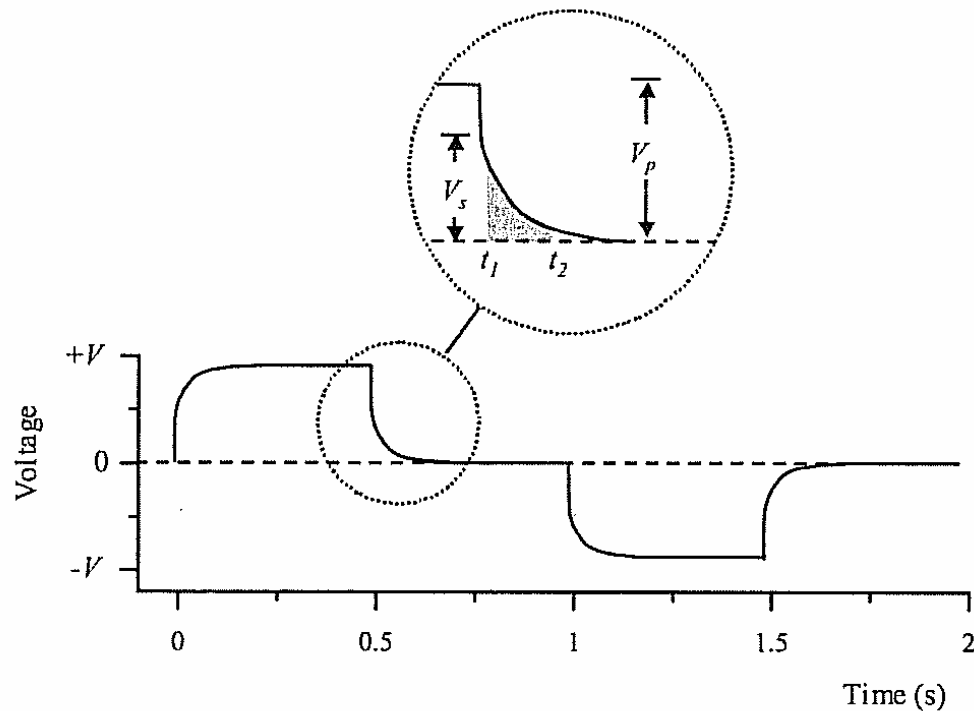
με αποτέλεσμα η φαινόμενη φορτιστικότητα να εκφράζεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$m_a = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt, \quad (3.6)$$

η οποία και υπολογίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Μονάδες μέτρησης της ικανότητας φόρτισης είναι το mV ανά V (mV/V).

Στις μετρήσεις στο πεδίο των συχνοτήτων μετριέται η διαφορά φάσης του δυναμικού σε σχέση με το εισαγόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα. Παραδοσιακά στο πεδίο των συχνοτήτων ως μέτρο της επαγόμενης πόλωσης χρησιμοποιείται το αποτέλεσμα συχνότητας (PFE). Εδώ, μία σύγκριση του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης γίνεται σε διαφορετικές συχνότητες (για παράδειγμα, Reynolds, 1998). Εναλλακτικά η σύνθετη αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρηση της επαγόμενης πόλωσης. Εισάγοντας ρεύμα σε διαφορετικές συχνότητες έχουμε ως αποτέλεσμα ένα φάσμα σύνθετων αντιστάσεων. Αυτό αναφέρεται συχνά ως φασματική επαγόμενη πόλωση.

Καθώς τα παραδοσιακά όργανα επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου μετρούν έναν αριθμό σημείων σε μια καμπύλη εξασθένησης, τα σύγχρονα όργανα ψηφιοποιούν το σήμα σε σχετικά υψηλές τιμές και επιτρέπουν αναλύσεις Fourier σε πεδίο ορισμού συχνότητας. Κάνοντας αυτό, τα όργανα πεδίου ορισμού χρόνου μπορούν επίσης να παρέχουν μία μέτρηση της επαγόμενης πόλωσης με βάση τη σύνθετη αντίσταση, αν και το εύρος της συχνότητας περιορίζεται από την ακρίβεια των οργάνων.



Σχήμα 3.4 Μετρήσεις της επαγόμενης πόλωσης του πεδίου ορισμού χρόνου

Η επαγόμενη πόλωση μπορεί να μετρηθεί και στο ύπαιθρο χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση παρόμοια με αυτή της αντίστασης του συνεχούς ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια τάσης θα έπρεπε, ιδανικά, να είναι μη πολωμένα (π.χ. χαλκός –θεικός χαλκός), αν και έχουν χρησιμοποιηθεί συμβατικά ηλεκτρόδια αντίστασης συνεχούς ρεύματος με σχετική επιτυχία.

Για να αποφευχθούν αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής το καλώδιο που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ρεύματος θα έπρεπε να είναι κοντό και απομονωμένο, όσο είναι δυνατό, από τα καλώδια που συνδέονται με τα ηλεκτρόδια τάσης. Οι διατάξεις διπόλου – διπόλου για έρευνες στην επιφάνεια του εδάφους προτιμούνται συχνά εξαιτίας μειωμένης ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που εξασφαλίζει ακριβέστερες μετρήσεις.

Για μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης, το ρεύμα που θα εισαχθεί συχνά θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ένταση από αυτό που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις συνεχούς ρεύματος, ώστε να βελτιωθεί το σήμα.

Όπως αναφέρθηκε υπάρχει μεγάλος αριθμός διαφορετικών μέτρων της επαγόμενης πόλωσης. Η φαινόμενη φορτιστικότητα για παράδειγμα εξαρτάται από το παράθυρο χρόνου (t_1 ως t_2) που θα χρησιμοποιηθεί, το αποτέλεσμα συχνότητας εξαρτάται από τις δυο επιλεγόμενες συχνότητες και η γωνία φάσης θα εξαρτηθεί από την συχνότητα εισαγωγής. Επίσης οι μετρήσεις πρέπει να σχετίζονται με την αγωγιμότητα των ρευστών πόρων και της πόλωσης της επιφάνειας των κόκκων.

3.3 Τρόποι ηλεκτρικών μετρήσεων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν με διάφορους τρόπους. Η προσέγγιση που υιοθετείται θα εξαρτάται από:

- (1) το αντικείμενο της έρευνας
- (2) την αναμενόμενη χωρική μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων
- (3) την πρόσβαση στην περιοχή μέτρησης
- (4) το διαθέσιμο εξοπλισμό
- (5) τις δυνατότητες επεξεργασίας των δεδομένων.

Οι μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης και ειδ. ηλεκτρικής αντίστασης διεξάγονται συνήθως στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων τα οποία και

μετακινούνται. Αυτό επιτρέπει έναν σχετικά χαμηλού κόστους τρόπο χαρτογράφησης της οριζόντιας και κάθετης μεταβολής της αντίστασης.

Χρήση διατάξεων ηλεκτροδίων σε γεωτρήσεις επιτρέπει βελτιωμένη διακριτική ικανότητα με το βάθος και σχετικά πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μετρήσεων μεταξύ γεωτρήσεων ("cross borehole") για αυτόν τον σκοπό. Παρακάτω αναφέρονται διάφοροι βασικοί τρόποι μέτρησης και συνοψίζονται οι δυνατότητες και οι αδυναμίες του καθενός, όταν χρησιμοποιούνται για υδρογεωφυσικές έρευνες. Σημειώνεται ότι οι τρόποι μέτρησης που παρουσιάζονται είναι παρόμοιοι για τις μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης.

3.3.1 Οδεύσεις

Ο όρος όδευση χρησιμοποιείται για να περιγράψει έρευνες της οριζόντιας μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Η όδευση γίνεται συνήθως κατά μήκος τομών στην επιφάνειας του εδάφους όπου η απόσταση των ηλεκτροδίων κάθε διάταξης ηλεκτροδίων (π.χ. Wenner, διπόλου-διπόλου κτλ., βλ.σχήμα 3.3) είναι σταθερή και οι διατάξεις μετακινούνται με σταθερό βήμα. Κάθε θέση τεσσάρων ηλεκτροδίων θα παρέχει μια ολοκληρωμένη μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Η χωρική μεταβολή του σήματος εξαρτάται από τον τύπο της διάταξης (βλ. για παράδειγμα Barker 1979) και από την (άγνωστη) μεταβλητότητα της αντίστασης. Τυπικά, η κάθε μέτρηση τεσσάρων ηλεκτροδίων αντιστοιχείται σε ένα μοναδικό σημείο: η οριζόντια θέση του σημείου είναι το κέντρο της παράταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων, ενώ η θέση του βάθους θα εξαρτηθεί από τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων. Για παράδειγμα,

χρησιμοποιώντας τη διάταξη Wenner ως βάθος διασκόπησης θεωρείται η μισή απόσταση των ηλεκτροδίων.

Η όδευση είναι χρήσιμη για σχετικά γρήγορη κάλυψη του χώρου και δεν απαιτεί εξειδικευμένα καλώδια διασκόπησης ή πολύπλοκες μονάδες μέτρησης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως από αρχαιολόγους-γεωφυσικούς για έρευνες σε μεγάλες περιοχές (βλ.πχ. Mussett and Khan, 2000).

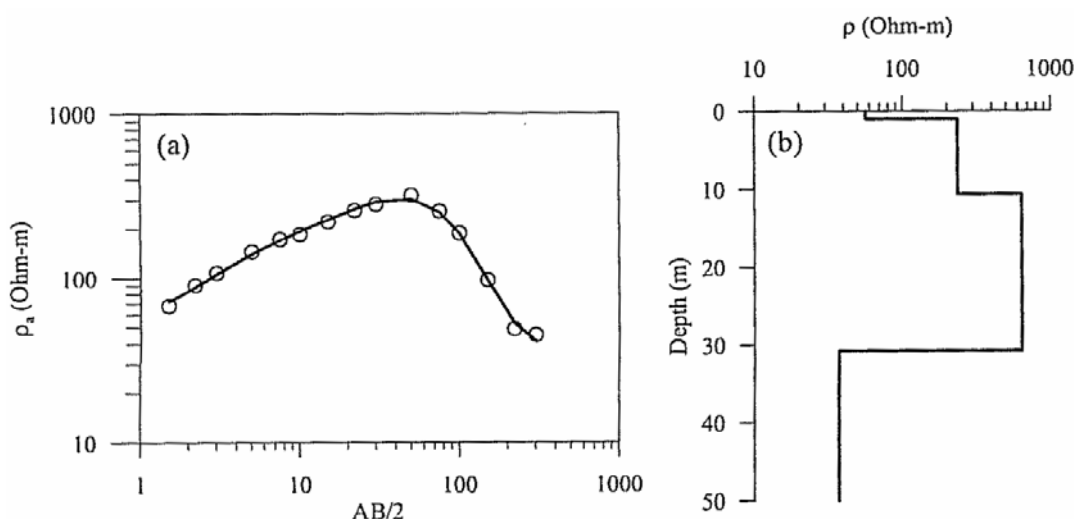
Υδρογεωφυσικές εφαρμογές τέτοιων ερευνών σχετίζονται συνήθως με καταγραφή της υγρασίας του εδάφους κοντά στην επιφάνεια, την αλατότητα ή την χαρτογράφηση της δομής του εδαφικού καλύματος. Παρ' όλα αυτά, επειδή η όδευση δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την μεταβολή της αντίστασης με το βάθος για τέτοιου τύπου έρευνες μπορεί να προτιμηθούν οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι εξαιτίας της βελτιωμένης ταχύτητάς τους. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα διαστήματα μεταξύ των ηλεκτροδίων οι βαθύτερες έρευνες θα επιτρέπουν χαρτογράφηση των κάθετων υδρογεωλογικών ορίων ή ζωνών θραύσης (πχ. Bernard και Valla, 1991).

3.3.2 Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις

Οι βυθοσκοπήσεις χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί η μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων με το βάθος, σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία στον χώρο, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει καμιά πλευρική αλλαγή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων (π.χ. οριζόντια στρωματογραφία). Οι μετρήσεις τεσσάρων ηλεκτροδίων γίνονται με όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους έχοντας ως κέντρο την ίδια θέση. Παράγεται με αυτόν τον τρόπο μια καμπύλη

βυθοσκοπήσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 η οποία μπορεί να ερμηνευθεί χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω ώστε να εντοπιστούν τα οριζόντια στρώματα.

Οι βυθοσκοπήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να εντοπιστούν υδρογεωλογικές ενότητες και σε μερικές περιπτώσεις να υπολογιστούν οι υδρολογικές ιδιότητες. Αυτή η προσέγγιση έχει επίσης υιοθετηθεί από έναν αριθμό μελετών δυναμικών υδρολογικών μεθόδων ώστε να καθοριστούν οι χρόνοι μετακίνησης των ρυπαντών στην ακόρεστη ζώνη.



Σχήμα 3.5

Η μέθοδος της βυθοσκοπήσης έχει ως μειονέκτημα την απαραίτητη, αλλά συχνά μη ρεαλιστική υπόθεση ότι υπάρχουν μεταβολές στις ηλεκτρικές ιδιότητες μόνο σε μια διάσταση, αυτή του βάθους. Λόγω του τρόπου διεξαγωγής των μετρήσεων στις βυθοσκοπήσεις δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα ταχύτητας μέτρησης που μας δίνουν τα σύγχρονα αυτοματοποιημένα όργανα μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης.

Από την άλλη μεριά οι βυθοσκοπήσεις είναι χρήσιμες όταν δεν είναι δυνατή η μέτρηση με ποιο εξελιγμένες μεθοδολογίες. Οι Simms και Morgan (1992) δείχνουν πώς η ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων μπορεί να είναι ασαφείς.

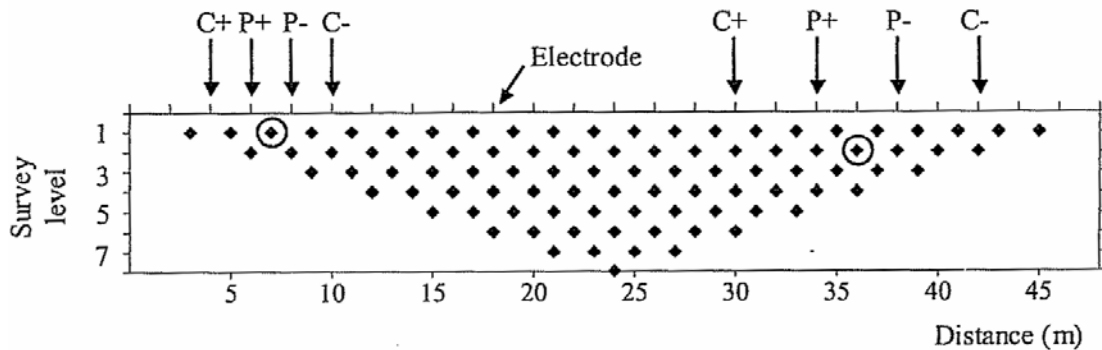
3.3.3 Αζιμουθιακές έρευνες

Οι Αζιμουθιακές έρευνες διεξάγονται κάνοντας μετρήσεις τεσσάρων ηλεκτροδίων σε διαφορετικές οριζόντιες κλίσεις που έχουν ως κέντρο ένα συγκεκριμένο σημείο. Έτσι, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την αζιμουθιακή ανισοτροπία των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Τέτοιες έρευνες μπορεί να είναι χρήσιμες για τον καθορισμό του προσανατολισμού των επιπέδων θραύσης ενός γεωλογικού σχηματισμού (για παράδειγμα, Taylor και Fleming, 1988).

3.3.4 Ηλεκτρική τομογραφία επιφανείας

Η επιφανειακή ηλεκτρική τομογραφία είναι συνδυασμός της όδευσης και της βυθοσκόπησης και μπορεί να παράγει μια δισδιάστατη ή τρισδιάστατη εικόνα της υπεδάφειας ηλεκτρικής αντίστασης ή των ιδιοτήτων επαγόμενης πόλωσης. Αν και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε εδώ και δεκαετίες, η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη ελεγχόμενων από υπολογιστές οργάνων αντίστασης συνεχούς ρεύματος και επαγόμενης πόλωσης, συνδυασμένη με τις προόδους στις τεχνικές ερμηνείας, οδήγησε σε μια πολλή διαδεδομένη χρήση αυτής της προσέγγισης σε υδρογεωλογικές εφαρμογές.

από το σχήμα κάθε τύπος διάταξης παράγει διαφορετικές εικόνες ψευδοτομής.

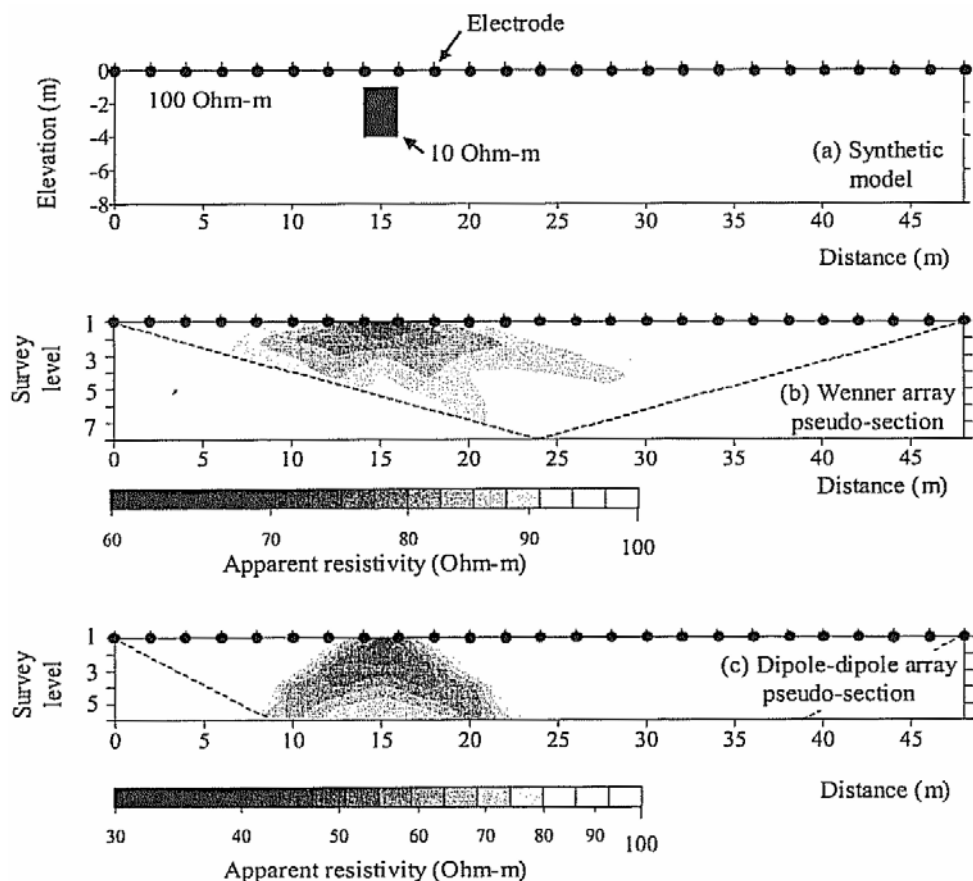


Σχήμα 3.6

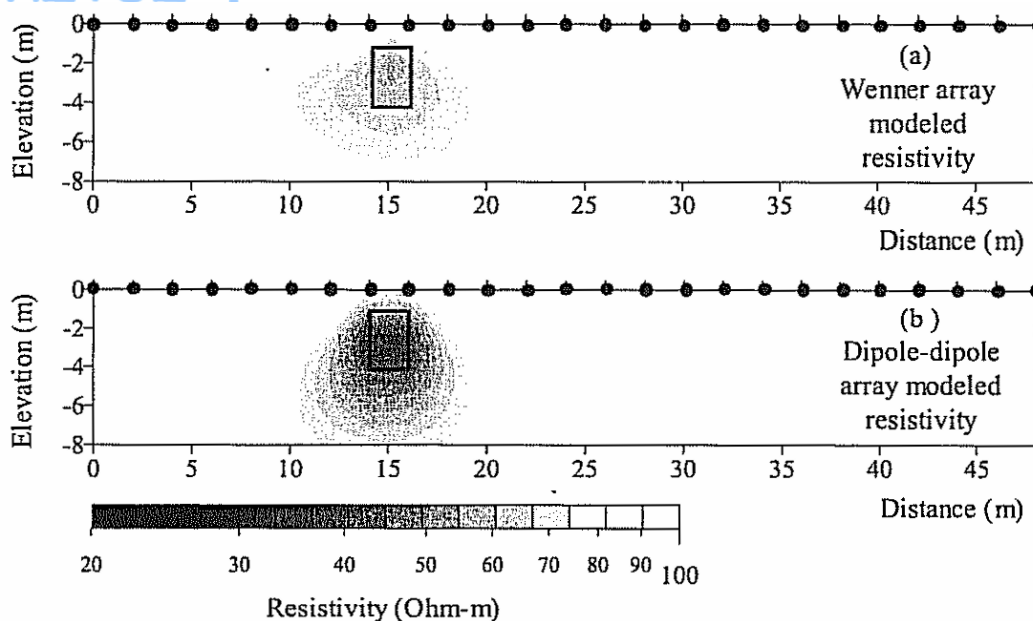
Η χρήση μοντέλων προσομοίωσης των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιώντας μεθόδους που περιγράφονται στην παράγραφο 3.4, μπορούν να παρέχουν μια ενδεικτική εικόνα των αντιστάσεων στην περιοχή έρευνας. Το σχήμα 3.8 δείχνει αυτό για το συνθετικό παράδειγμα του σχήματος 3.7. Να σημειωθεί, επίσης, ότι η διαδικασία προσομοίωσης των μετρήσεων δεν αποκαλύπτει την αληθινή δομή του στόχου. Αυτό συμβαίνει, κατά ένα μέρος, εξαιτίας της μεταβολής στην ευαισθησία σήματος μέσα στην περιοχή (κυρίως προς τις άκρες) αλλά επίσης και εξαιτίας της εξομάλυνσης στην αυτοματοποιημένη διαδικασία ερμηνείας.

Υπάρχουν πολυάριθμα παραδείγματα εφαρμογών ηλεκτρικής τομογραφίας επιφάνειας σε υδρογεωλογικά προβλήματα. Η μέθοδος αυτή τώρα χρησιμοποιείται ευρέως για ρηχές έρευνες (για παράδειγμα σε βάθη 30μέτρων). Μια ολόκληρη έρευνα κατά μήκος τομής μήκους 100-200 μέτρων, που καλύπτει βάθη από 20-30μέτρα, μπορεί να γίνει σε λιγότερο από δύο ώρες

χρησιμοποιώντας πολύκλινα καλώδια και αυτοματοποιημένα όργανα μέτρησης που ελέγχονται από υπολογιστές. Έρευνες μεγαλύτερου μήκους, ενώ διατηρείται το ίδιο βάθος έρευνας, μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας τη διαδικασία διαδοχικών επεκτάσεων του καλωδίου (roll along) (Dahlin 1993). Οι Panissod και άλλοι (1997) και Christensen και Sorensen (2001) περιγράφουν μεθόδους για συνεχείς ηλεκτρικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας διατάξεις ηλεκτροδίων που ρυμουλκούνται με όχημα.



Σχήμα 3.7

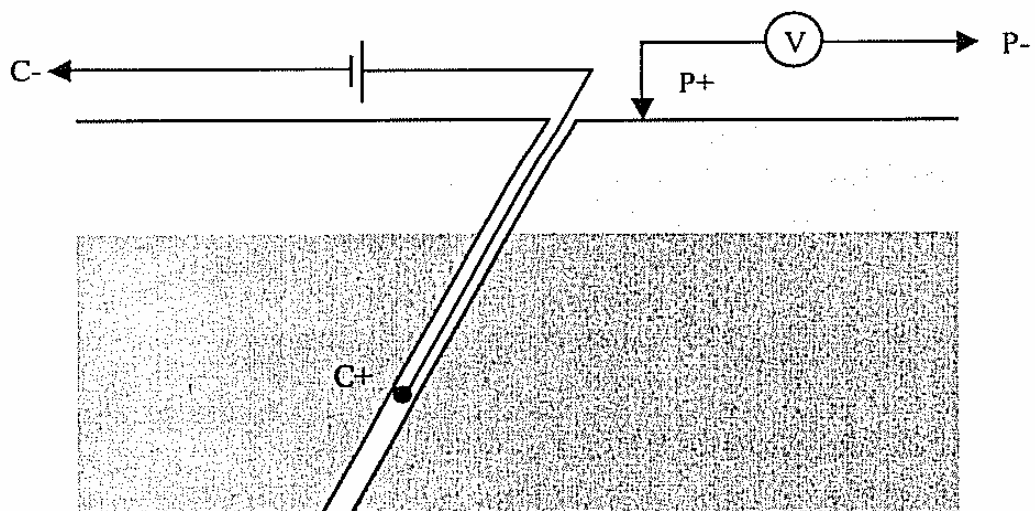


Σχήμα 3.8

3.3.5 Ηλεκτρική τομογραφία σε μονές γεωτρήσεις

Η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια που τοποθετούνται μέσα σε γεώτρηση. Τα ηλεκτρόδια μπορούν να είναι μόνιμα τοποθετημένα, χρησιμοποιώντας κατάλληλο υλικό πλήρωσης στη ζώνη κορεσμού. Μια κοινή προσέγγιση, βασισμένη σε μετρήσεις σε γεώτρηση, που χρησιμοποιείται στην έρευνα κοιτασμάτων, είναι η μέθοδος *mise-a-la-masse*. Σε μια τέτοια έρευνα ένα από τα ηλεκτρόδια που φέρουν ρεύμα τοποθετείται σε γεώτρηση και σε βάθος, ενώ το άλλο ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια, σε μια σημαντική απόσταση απ' τη γεώτρηση. Οι μετρήσεις δυναμικού γίνονται σε αρκετές θέσεις στην επιφάνεια σε σχέση με ένα απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο δυναμικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Οι μετρήσεις μπορούν να συγκριθούν με πρότυπες τάσεις για

για ομογενή αντίσταση. Σε έρευνες κοιτασμάτων, τέτοιες μετρήσεις μπορούν να βοηθήσουν να σκιαγραφηθούν καλύτερα οι ηλεκτρικά αγώγιμοι όγκοι των ορυκτών. Σε υδρολογικές μελέτες η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ταυτοποιηθεί ο προσανατολισμός των επιπέδων ρωγμωσης ή η μετανάστευση ενός ηλεκτρικά αγώγιμου δείκτη (π.χ. αλατόνευρου) που εισπιέζεται σε μια γεώτρηση (δείτε για παράδειγμα Osiensky, 1997). Βελτιωμένος χαρακτηρισμός μπορεί να επιτευχθεί συμπληρώνοντας τις επιφανειακές εδαφικές μετρήσεις με ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν σε γεωτρήσεις (για παράδειγμα Nimmer και Osiensky 2001). Σε όλες τις περιπτώσεις η ερμηνεία μπορεί να είναι υποκειμενική εκτός κι αν χρησιμοποιηθούν τεχνικές με πρότυπες καμπύλες (δείτε για παράδειγμα Bevc και Morrison, 1991).



Σχήμα 3.9

Γενικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις ηλεκτροδίων σε γεώτρηση για να αποκτηθούν μετρήσεις με τον ίδιο τρόπο όπως και στις επιφανειακές διατάξεις. Μια τέτοια προσέγγιση παρέχει μεγαλύτερο όγκο δειγματοληψίας απ' ότι η συμβατική δειγματοληψία σε γεωτρήσεις.

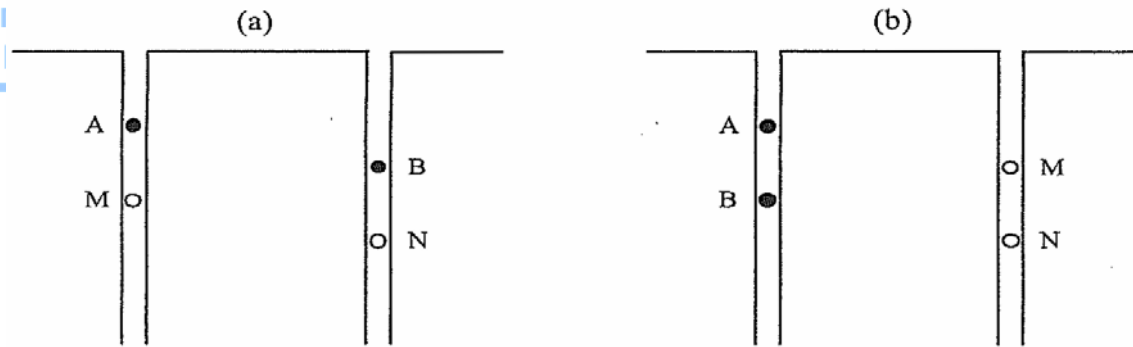
Επίσης, αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν βελτιωμένη ευαισθησία στη μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων με το βάθος, σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές έρευνες που τοποθετούνται στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, οι Binley και άλλοι, το 2002 χρησιμοποίησαν μια διάταξη 32 ηλεκτροδίων που τοποθετήθηκε στη ζώνη κορεσμού ενός ψαμμίτη για να καταμετρηθούν οι αλλαγές στο περιεχόμενο υγρασίας ενός μη κορεσμένου ψαμμίτη σε μια περίοδο 2 ετών.

Η χρήση διατάξεων ηλεκτροδίων σε μονή γεώτρηση αποτελεί μια ευθεία επέκταση της ηλεκτρικής απεικόνισης της επιφάνειας, αν και οι εφαρμογές έχουν υπάρξει σπάνιες.

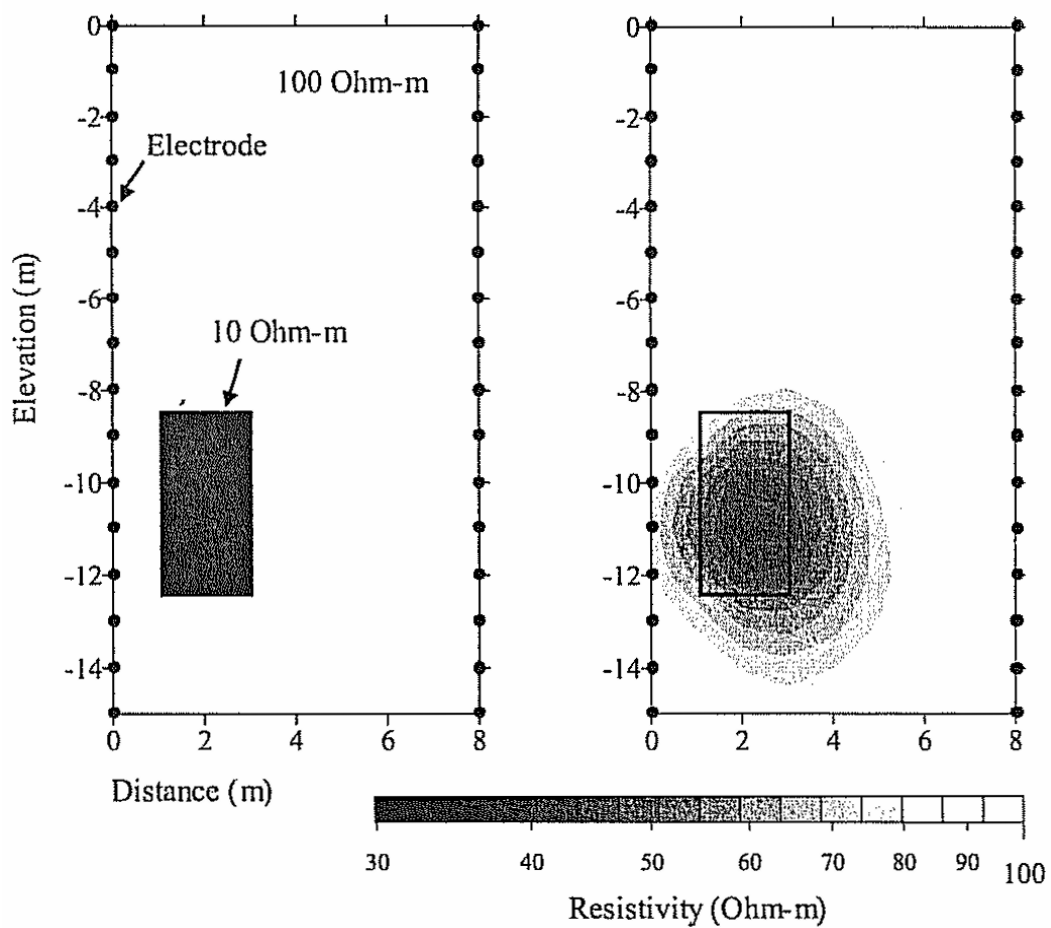
3.3.6 Ηλεκτρική τομογραφία μεταξύ γεωτρήσεων

Η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να εφαρμοστεί και μεταξύ γεωτρήσεων. ώστε να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.

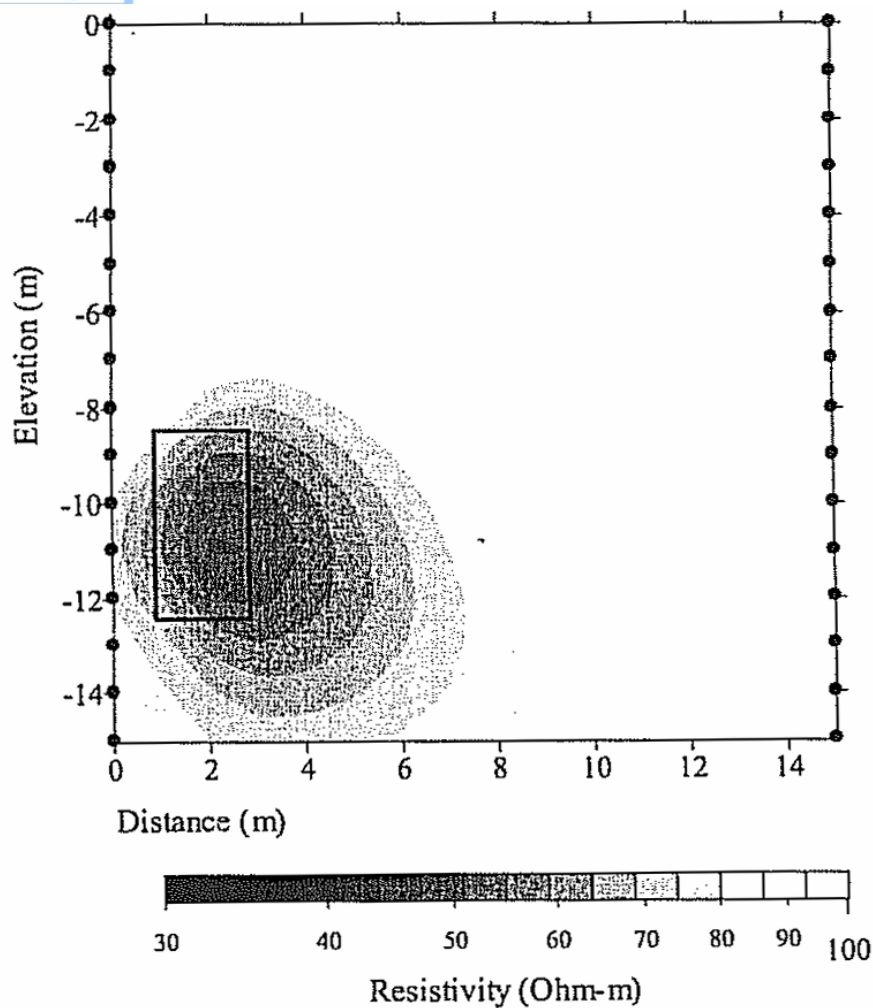
Τέτοιου είδους μετρήσεις προσφέρουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα στον εντοπισμό στόχων με μεγαλύτερη ακρίβεια, στην απεικόνιση των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων. Για τη λήψη μίας «εικόνας» μεταξύ δυο γεωτρήσεων, τοποθετούνται ηλεκτρόδια σε κάθε μία γεώτρηση σε επαφή με το υπέδαφος (Σχ. 3.11, 3.12). Σε δύο ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια ρεύματος) εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ώστε να σταλεί προκαθορισμένο ρεύμα, και μετράται η διαφορά δυναμικού σε κάποιο άλλο ζευγάρι ηλεκτροδίων (ηλεκτρόδια δυναμικού) των γεωτρήσεων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα ηλεκτρόδια με κάθε δυνατό συνδυασμό. Τέτοιου είδους μετρήσεις μοιάζουν με αυτές του διπόλου-διπόλου που γίνονται στην επιφάνεια.



Σχήμα 3.10



Σχήμα 3.11



Σχήμα 3.12

3.3.7 Ηλεκτρικές Μετρήσεις σε πυρήνες γεωτρήσεων

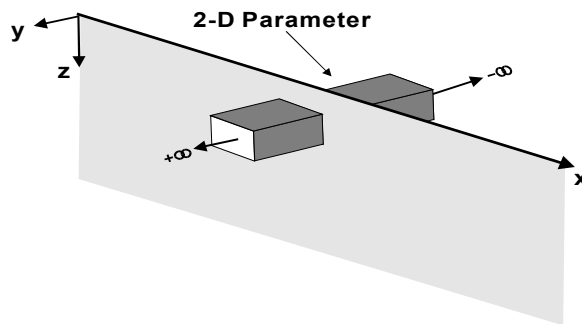
Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσουν τη διακύμανση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων πυρήνων γεωτρήσεων. Στην πραγματικότητα, μια από τις πρώτες εφαρμογές της ηλεκτρικής απεικόνισης ήταν η μελέτη των πυρήνων των πετρωμάτων από τον Daily και άλλους (1987), χρησιμοποιώντας

κυκλικές διατάξεις ηλεκτροδίων. Οι Binley και άλλοι (1996), επίσης, χρησιμοποίησαν κυκλικές διατάξεις στην έρευνά τους. Οι Raimirez και Daily (2001), δείχνουν πώς η ηλεκτρική απεικόνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετηθούν οι αλλαγές στην της υγρασίας, σε ένα τέμαχος $3\text{m} \times 3\text{m} \times 4,5\text{m}$ πετρώματος.

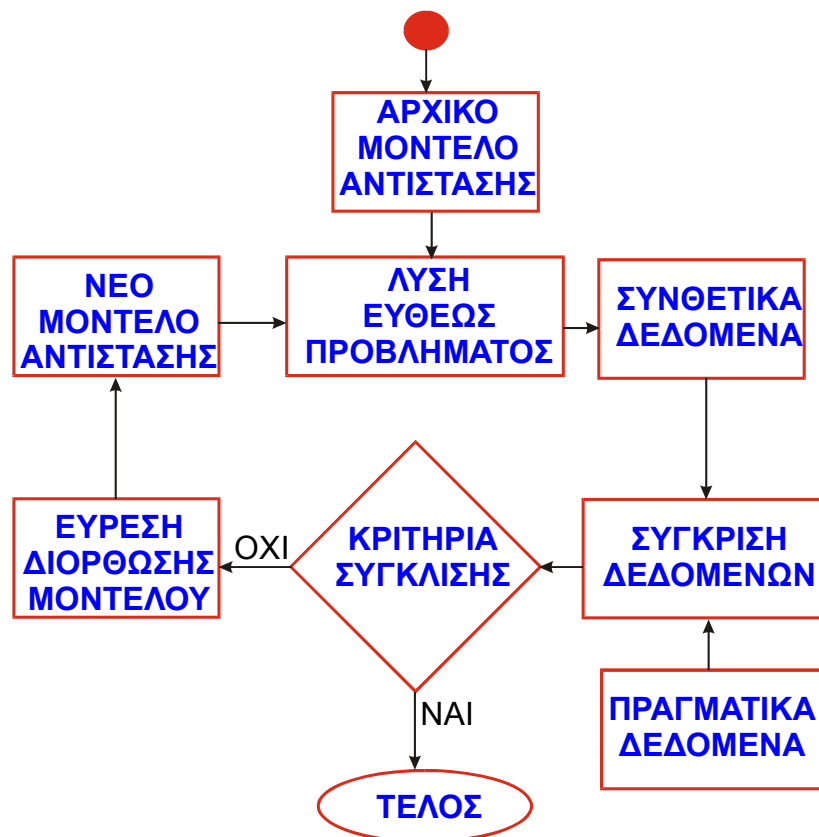
3.4 Επεξεργασία Δεδομένων

Ο στόχος των ηλεκτρικών μεθόδων είναι να δείξουν τη κατανομή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους από μια σειρά μετρήσεων που διεξάγονται στην επιφάνεια ή και σε γεωτρήσεις σύμφωνα με τις αρχές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις (Σχήμα 3.13)



Σχήμα 3.13 Γεωηλεκτρική παράμετρος δυο διαστάσεων



Σχήμα 3.14 Σχηματοποιημένη διαδικασία μη γραμμικής αντιστροφής

$$S = d\mathbf{y}^T d\mathbf{y} \rightarrow 0 \text{ \& } R = (\mathbf{C} d\mathbf{x})^T (\mathbf{C} d\mathbf{x}) \rightarrow \max$$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

1	4	7
2	5	8
3	6	9



ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \leftarrow \text{ΓΡΑΜΜΗ 5}$$

Σχήμα 3.15 Σχηματισμός του πίνακα εξομάλυνσης

Το μοντέλο αντίστασης $\mathbf{x}^{k+1}$ στην επανάληψη $k+1$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + d\mathbf{x}^k = \mathbf{x}^k + (\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \mu \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{J}_k^T d\mathbf{y}^k$$

$d\mathbf{x}$ = η διόρθωση της αντίστασης .

$\mathbf{C}$ = ο πίνακας εξομάλυνσης.

$\mathbf{J}$ = ο Ιακωβιανός πίνακας των πρώτων παραγώγων .

μ = πολλαπλασιαστής Lagrange (υπολογίζεται εμπειρικά)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά τη μακρόχρονη χρήση τους οι ηλεκτρικές μέθοδοι αναπτύσσονται ακόμα και σήμερα. Η υδρογεωφυσικές εφαρμογές ακολουθούν τη τρέχουσα ανάπτυξη των ηλεκτρικών μεθόδων και χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα σύγχρονα εργαλεία μέτρησης και απεικόνισης.

Η σύνδεση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τις ηλεκτρικές απεικονίσεις με τις υδρολογικές παραμέτρους, επιτρέπει την εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων

Για κάθε έρευνα, η πιο κατάλληλη μεθοδολογία μέτρησης και επεξεργασίας εξαρτάται σημαντικά από συγκεκριμένα αντικείμενα του ερευνητικού έργου.

Η διάταξη μετρήσεων επιφάνειας επιτρέπει ταχύτερη διασκόπηση όμως η διακριτική ικανότητα της διασκόπησης με το βάθος είναι περιορισμένη. Για τα ηλεκτρόδια απαιτείται επαφή με το έδαφος και συνεπώς σε κάποια περιβάλλοντα το εδαφικό κάλυμμα μπορεί να περιορίσει την χρήση των επιφανειακών ερευνών. Έρευνες σε περιοχές όπου τα ηλεκτρόδια δεν μπορούν να τοποθετηθούν (για παράδειγμα κάτω από κτήρια) θα παρουσιάσουν δυσκολίες. Σε κάποια περιβάλλοντα, οι διατάξεις μέτρησης σε γεωτρήσεις μπορεί να αποδειχθούν περισσότερο αποτελεσματικές. Εντούτοις, η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται για έρευνες θα πρέπει να είναι σχετικά μικρή.

Η χρήση ηλεκτροδίων σε γεωτρήσεις συχνά εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των γεωτρήσεων και από το κόστος ενδεχόμενης γεώτρησης. Για έρευνες στον υδροφόρο ορίζοντα τα ηλεκτρόδια εγκαθίστανται σε ανοικτές γεωτρήσεις χωρίς να παρουσιάζουν

προβλήματα επαφών. Για έρευνες στην ακόρεστη ζώνη τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να τοποθετηθούν με έναν κατάλληλο συμπλήρωμα για να σιγουρευτεί η καλύτερη επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα. Για τις έρευνες επαγόμενης πόλωσης, το συμπλήρωμα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την μετρούμενη πόλωση π.χ. ο μπεντονίτης, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή γεωτρήσεων θα δημιουργήσει σημαντική πόλωση, η οποία, ακόμα και για ειδική αντίσταση, θα προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα των δεδομένων.

Η διάταξη μέτρησης που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να επιλεγεί με βάση το στόχο έρευνας, αλλά θα εξαρτάται επίσης από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την διαθεσιμότητα των οργάνων. Οι έρευνες διπόλου-διπόλου, για παράδειγμα, είναι ιδανικές για την λύση εντοπισμένων στόχων, όμως μειονεκτούν στην ποιότητα της μέτρησης. Για επιφανειακές έρευνες αντίστασης, η διάταξη Wenner είναι διαδεδομένη εξαιτίας της καλής αναλογίας σήματος προς θόρυβο και την σημαντικά μικρή ποικιλία αντιστάσεων που μετρούνται σε μια τυπική έρευνα. Αυτοί οι παράγοντες επιτρέπουν την χρήση των σχετικά οικονομικών οργάνων υπαίθρου. Ενώ αυτές μπορεί να είναι ελκυστικές σε άλλες περιπτώσεις όπου η αντίθεση αντίστασης δεν είναι οριζόντια, η διάταξη Wenner μπορεί να είναι ακατάλληλη.

Ιδανικά, θα έπρεπε να γίνονται πριν από κάθε έρευνα συνθετικές μελέτες μοντέλων, για να σχεδιαστούν οι κατάλληλες διατάξεις. Τα μοντέλα είναι χρήσιμα για τον υπολογισμό των προσδοκώμενων σημάτων σε σχέση και με τα υπάρχοντα όργανα μέτρησης. Τα αντίστροφα μοντέλα, εφαρμοσμένα σε συνθετικούς στόχους, θα επιτρέψουν στον χρήστη να καθορίσει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Για πολλές υδρογεωφυσικές μελέτες δυναμικών αλλαγών η διάταξη μέτρησης που χρησιμοποιείται θα εξαρτηθεί από την ταχύτητα συλλογής των δεδομένων και από τον βαθμό στον οποίο συμβαίνουν αλλαγές κάτω από την επιφάνεια. Γι' αυτό το λόγο η ταχύτητα συλλογής των δεδομένων είναι σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό κάθε έρευνας.

Η έρευνα που επιλέγεται θα επηρεαστεί επίσης από την υπάρχουσα χωρική κατανομή ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Οι βυθοσκοπήσεις είναι προβληματικές όταν υπάρχει σημαντική δυσδιάστατη ή τρισδιάστατη μεταβολή των αντιστάσεων. Παρόμοια, οι δισδιάστατες έρευνες μπορεί να επηρεάζονται από τρισδιάστατες δομές. Άρα η επιλογή του τρόπου μέτρησης πρέπει να γίνεται βάσει των αναμενόμενων συνθηκών.

Συνοπτικά, ο υδρογεωφυσικός θα πρέπει να λάβει υπόψη ένα μεγάλο εύρος θεμάτων κατά την επιλογή του κατάλληλου τρόπου έρευνας. Όταν είναι απαραίτητο, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μοντέλα και θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ποιότητα των δεδομένων πριν την τελική επεξεργασία.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barker R.D., Signal contribution and their use in resistivity studies, *Geophys. J. Royal Astr. Soc*, 59, 123-129, 1979.
- Bernard J., and P. Valla, Ground Water exploration in fissured media with electrical and VLF methods, *Geoeploration*, 27, 81-91, 1991
- Bevc D., and H.F. Morrison, Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment, *Geophysics*, 56, 769-777, 1991.
- Binley A., S. Henry-Poulter and B. Shaw, Examination of solute transport in an undisturbed soil column using electrical resistance tomography, *Water Reour. Res.* 32, 763-769, 1996.
- Binley A., P. Winship, L.J. West, M. Pokar and R. Middleton, Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles, *J. Hydrol.*, 267, 160-172, 2002a.
- Binley A., G. Cassiani, R. Middleton and P. Winship, Vadose zone model parameterization using cross-borehole radar and resistivity imaging, *J. Hydrol.*, 267, 147-159, 2002b.
- Dahlin T., On the automation of 2-D resistivity surveying for engineering and environmental applications, PhD Thesis, Lund Univ. Sweden, 1993
- Dahlin T. and M.H. Loke, Quasi-3-D resistivity imaging-mapping of three-dimensional structures using 2-D resistivity techniques, *Proc. 3rd Mtg. Environmental and Engineering Geophysics*, Environ. Eng. Geophys. Soc., Eur. Section, 143-146, 1997
- Dahlin T., V. Leroux and J. Nissen, Measuring techniques in induced polarization imaging, *J. Appl. Geophys.*, 50, 279-298, 2002
- Dam D. and S. Christensen, Including geophysical data in ground water model calibration, *Ground Water*, 41, 178-189, 2003
- Daily, W.D., W. Lin and T. Buscheck, Hydrological properties of Topopah Spring tuff: Laboratory measurements, *J. Geophys. Res.*, 92, 7854-7864, 1987.
- Daily W., A. Ramirez and A. Binley, Remote monitoring of leaks I storage tanks using electrical resistance tomography: Application at the Hanford Site, *J. Environ. Eng. Geophys.*, 9, 11-24, 2004

- Dey A. and H.F. Morrison, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures, *Geophysics*, 44, 753-780, 1979a.
- Dey A. and H.F. Morrison, Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, *Geophys. Prosp.*, 27, 106-136, 1979b.
- Kemna A., J. Vanderborhht, B. Kulesa and H. Vereecken, Imaging and characterization of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models, *J. Hydrol.*, 267, 125-146, 2002.
- Kemna A., A. Binley and L. Slater, Cross-borehole IP imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, 69, 97-107, 2004a.
- Kemna A., J. Vanderborhht, H. Hardelauf, and H. Vereecken, Quantitative imaging of 3-D solute transport using 2-D time-lapse ERT: A synthetic feasibility study, *Proc. Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Environ. Eng. Geophys. Soc., 342-353, 2004b.
- LaBrecque D.J., M. Milles, W. Daily, A. Ramirez and E. Owen, The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, 61, 538-548, 1996.
- Liu S. and T.-C.J. Yeh, An integrative approach for monitoring water movement in the vadose zone, *Vadose Zone J.*, in press, 2004.
- Loke M.H. and R.D. Barker, Practical techniques for 3-D resistivity surveys and data inversion, *Geophys. Pros.*, 44, 499-523, 1996.
- Loke M.H., I. Acworth and T. Dahlin, A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys, *Proc. 15th Geophysical Conference and Exhibition*, Austr. Soc. Expl. Geophys., 2001.
- Lytle R.J. and K.A. Dines, An impedance camera: A system for determining the spatial variation of electrical conductivity, *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52413*, Livermore, California, USA, 1978.
- Musset A.E. and M.A. Khan, *Looking into the earth. An Introduction to Geological Geophysics*, Cambridge University Press, 2000.
- Nimmer R.E. and J.L. Osienky, Direct current and self-potential monitoring of an evolving plume in partially saturated fractured rock, *J. Hydrol.*, 267, 258-272, 2001.
- Osienky J.L., Ground water modelling of mise-a-la-masse delineation of contaminated ground water plumes, *J. Hydrol.*, 197, 146-165, 1997.

- Panissod C., M. Lajarthe and A. Tabbagh, Potential focusing: A new multielectrode array concept, simulation study and field tests in archaeological prospecting, *J. Appl. Geophys.*, 38, 1-23, 1997.
- Ramirez A. and W. Daily, Electrical imaging at the largeblock test-Yucca Mountain, Nevada, *J. Appl. Geophys.*, 46, 85-100, 2001.
- Seigel H.O., Mathematical formulation and type curves for induced polarization, *Geophysics*, 24, 547-565, 1959.
- Simms J.E. and F.D. Morgan, Comparison of four least-squares inversion schemes for studying equivalence in one-dimensional resistivity interpretation, *Geophysics*, 57, 1282-1293, 1992.
- Slater L. and D. Lesmes, IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, 67, 77-88, 2002.
- Taylor R.W. and A.H. Fleming, Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys, *Ground Water*, 26, 1988.