

6. Η ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι παρουσιάζουν ποικιλία τεχνικών έναντι άλλων μεθόδων όπως η βαρυτική, η μαγνητική, η σεισμική και η ραδιομετρική. Μετριοούνται συνήθως δυναμικά, ρεύματα (εντάσεις και πυκνότητες) και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται είτε από φυσικές ή από τεχνητές πηγές. Η κύρια παράμετρος που μετριέται εδώ είναι η **ηλεκτρική ειδική αντίσταση, ρ , ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, σ** .

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μετρήσεις φυσικού δυναμικού (SP), τελλουρικών και μαγνητοτελλουρικών ρευμάτων, μαγνητικών πεδίων σε περιοχή ακουστικο-συχνοτήτων (AFMAG), ειδικής αντίστασης, ισοδυναμικών σημείων και γραμμών και *mise-a-la-masse*, ηλεκτρομαγνητικών (FM) και επαγόμενης πόλωσης (IP). Οι ηλεκτρικές μέθοδοι συνήθως ταξινομούνται ανάλογα με την ενέργεια που χρησιμοποιούν, σε τεχνητές ή φυσικές.

6.2 Ηλεκτρικές ιδιότητες των ορυκτών και των πετρωμάτων

6.2.1 Ηλεκτρικά δυναμικά

6.2.1.α Γενικά

Οι πιο σημαντικές ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών είναι τα φυσικά δυναμικά, η ειδική αντίσταση ($E.A$) και η διηλεκτρική σταθερά. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μία έμμεση παράμετρος. Η πλέον σημαντική ιδιότητα είναι αυτή της ειδικής αντίστασης.

Η κύρια πηγή των φυσικών δυναμικών είναι η ηλεκτροχημική και η μηχανική δραστηριότητα που επιτελείται στο υπέδαφος. Ο παράγοντας που ελέγχει αυτή τη δραστηριότητα είναι το νερό. Τα φυσικά δυναμικά συνδέονται με τη διάβρωση των θειούχων σωμάτων, τη μεταβολή του ορυκτολογικού περιεχομένου των πετρωμάτων σε γεωλογικές επαφές, τη βιοηλεκτρική δραστηριότητα του οργανικού υλικού, τη θερμική και υδραυλική κλίση των υπόγειων υγρών και άλλων παρόμοιων φαινομένων.

6.2.1.β Ηλεκτροκινητικό δυναμικό

Παρατηρείται όταν διάλυμα ειδικής αντίστασης, ρ και ιξώδους, η , πιέζεται να ανέλθει μέσω τριχοειδών ή πορωδών μέσων. Η συνισταμένη της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των άκρων του αγωγού διέλευσης είναι:

$$E_k = -\frac{\Phi \Delta P \varepsilon \rho}{4\pi \eta} \quad (1)$$

όπου, Φ είναι το δυναμικό απορρόφησης, ΔP , η διαφορά πίεσης και ε , η διηλεκτρική σταθερά του διαλύματος. Η ποσότητα Φ είναι το δυναμικό του διπλού στρώματος (στερεού-υγρού) μεταξύ του στερεού και του διαλύματος.

Το ηλεκτροκινητικό φαινόμενο συνδέεται περιστασιακά με μεγάλες ανωμαλίες που οφείλονται στην τοπογραφία.

6.2.1.γ Δυναμικό επαφής

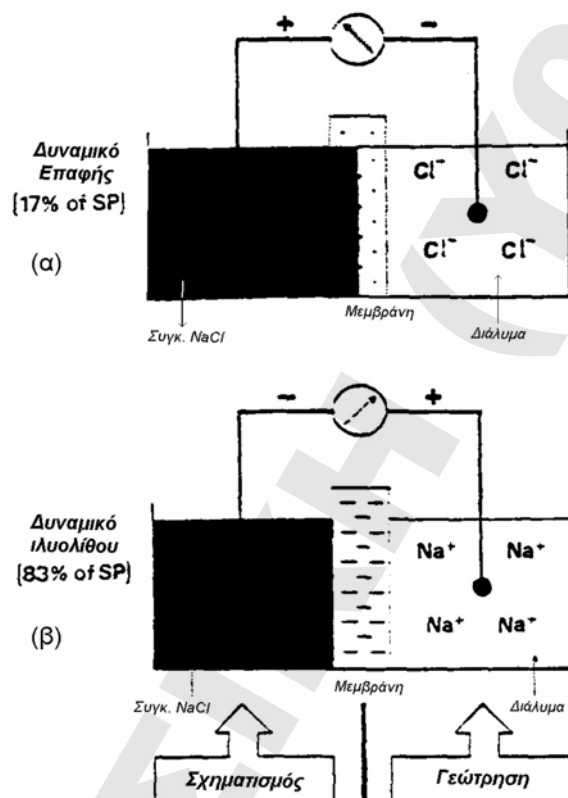
Είναι το δυναμικό που αναπτύσσεται από δύο διαφορετικής συγκέντρωσης διαλυμάτων (δυναμικό διάλυσης ή μεμβράνης). Οφείλεται στη διαφορά κινητικότητας των διαφόρων ιόντων σε διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης (εικ. 6-1α).

Η τιμή δυναμικού δίνεται από τη σχέση:

$$E_d = -\frac{R\theta(I_a - I_c)}{F\eta(I_a + I_c)} \log(C_1 / C_2) \quad (2)$$

όπου R είναι η σταθερά των αερίων (8.31 joules/c°), F=σταθερά Faraday (9,65X10⁴ C/mol), θ η απόλυτη θερμοκρασία, η = το σθένος, I_a και I_c κινητικότητες (ροές) των ανιόντων και κατιόντων, C₁ & C₂ οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων. Σε διαλύματα NaCl με I_a/I_c = 1,49 και σε 25°C, έχουμε.

$$E_d - 11,6 \log(C_1 / C_2) \quad (3) \quad \text{όπου } E_d \text{ δίδεται σε mV}$$



Εικόνα 6-1. Σχηματική παράσταση παραγωγής ηλεκτρο-χημικού φυσικού δυναμικού, SP. α) Δυναμικό διάχυσης ή δυναμικό επαφής εγκάρσια προς μία πορώδη και περατή μεμβράνη. β) Δυναμικό σχιστολίθου ή δυναμικό μεμβράνης, εγκάρσια προς μια ημι-περατή μεμβράνη.

6.2.1.δ Δυναμικό Ιλολίθου (Nernst)

Όταν δύο ίδια μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθισθούν σε ομογενές διάλυμα, δεν παρατηρείται καμία διαφορά δυναμικού. Εάν όμως, οι συγκεντρώσεις στα δύο ηλεκτρόδια είναι διαφορετικές, αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού και δίνεται από τη σχέση (εικ. 6-1β):

$$E_s = -\frac{R\theta}{F\eta} \log(C_1 / C_2) \quad (4)$$

Για η=1, θ=25°, E_s σε mV, αυτή γίνεται:

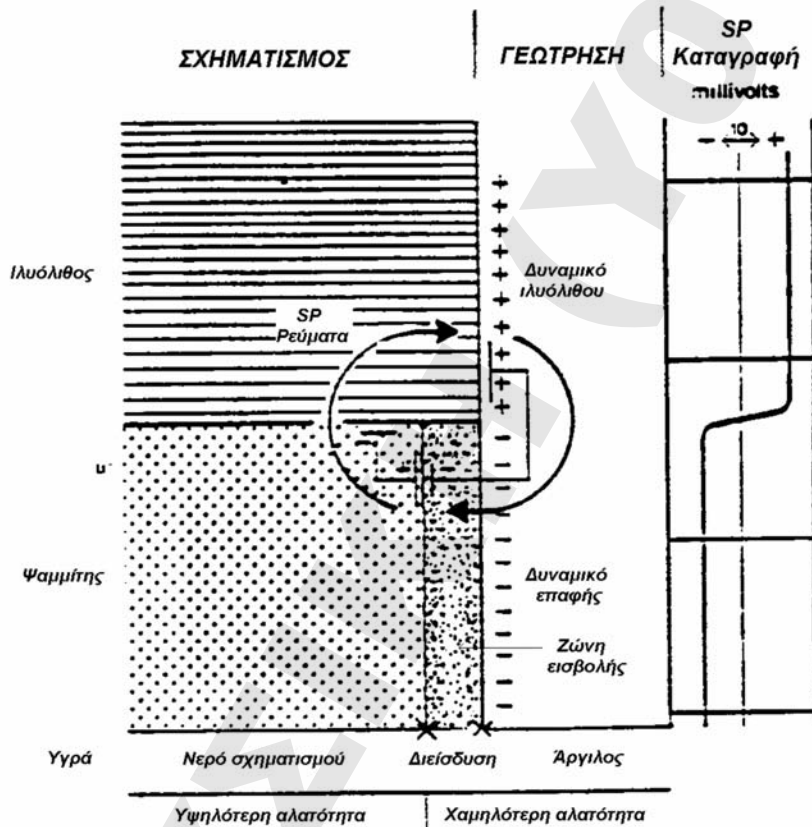
$$E_s = -59,1 \log(C_1 / C_2) \quad (5)$$

Ο συνδυασμός του δυναμικού επαφής και Nernst είναι γνωστός ως ηλεκτροχημικό ή στατικό Φυσικό Δυναμικό (SP). Για NaCl σε 25°C, το ηλεκτροχημικό φυσικό δυναμικό είναι:

$$E_c = -70,7 \log(C_1 / C_2) \quad (6)$$

Όταν δε οι συγκεντρώσεις είναι 5:1, τότε η $E_c = \pm 50$ mV.

Ένα παράδειγμα δημιουργίας φυσικών δυναμικών επαφής και ιλυόλιθου, αποτελεί η επαφή μεταξύ ιλυόλιθου-ψαμμίτη μέσα σε γεώτρηση, η οποία περιέχει υγρό διάτρησης. Οι ιλυόλιθοι είναι διαπερατοί σε κατιόντα Na^+ αλλά κατά βάση μη διαπερατοί σε ανιόντα Cl^- . Ως αποτέλεσμα δημιουργείται ένα δυναμικό όταν κατιόντα νατρίου περνούν από το αλατούχο νερό του ψαμμίτη



Εικόνα 6-2. Ροή ρεύματος από φυσικό δυναμικό μέσα σε γεώτρηση. Οι επιδράσεις των δυναμικών ιλυόλιθου και διάχυσης δρουν κυρίως στις επαφές των στρωμάτων προκαλώντας μια SP απόκλιση.

στο γειτονικό στρώμα ιλυόλιθου και από εκεί στο καθαρό διάλυμα της αργίλου (δυναμικό ιλυόλιθου ή μεμβράνης). Ένα ακόμη δυναμικό εμφανίζεται στην επαφή της διηθούμενης αργίλου στη ζώνη εισβολής και του αλατούχου νερού, πέρα από τη ζώνη αυτή (δυναμικό επαφής). Ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης ευκινησίας των ανιόντων Cl^- , σε σχέση με τα κατιόντα Na^+ , δημιουργείται ένα σύστημα ροής Cl^- προς τη ζώνη εισβολής. Στην εικόνα 6-2 φαίνεται η περιοχή ροής ρεύματος και η προκύπτουσα καμπύλη (δεξιό τμήμα) ανωμαλίας φυσικού δυναμικού.

6.2.1.ε Φυσικό δυναμικό μεταλλοφορίας

Εάν δύο ανόμοια μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθισθούν σε ομογενές διάλυμα, τότε μεταξύ των ηλεκτροδίων αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού. Αυτό το ηλεκτρολυτικό δυναμικό επαφής, μαζί με το στατικό φυσικό δυναμικό είναι αναμφίβολα το αίτιο δημιουργίας μεγάλων δυναμικών που αναπτύσσονται σε ορισμένες κοιτασματολογικές ζώνες και ο συνδυασμός των δύο αυτών δυναμικών αποτελεί το φυσικό δυναμικό μεταλλοφορίας. Αυτό παρατηρείται

σε ζώνες θειούχων μεταλλευμάτων, γραφίτη και μαγνητίτη, με μεγάλες τιμές (εκατοντάδες mV) φυσικού δυναμικού.

Υπάρχουν και άλλες πηγές ηλεκτρικών δυναμικών, όπως από διάβρωση μεταλλικών αντικειμένων, επίδραση ιονοσφαιρικών ηλεκτρικών ρευμάτων, πυρηνικών εκρήξεων, που δημιουργούν επαγόμενα ρεύματα και κατά συνέπεια και γήινα δυναμικά. Βιοηλεκτρικά δυναμικά αναπτύσσονται επίσης πλησίον φυτικών ριζών. Έχουν αναφερθεί εδώ αρνητικά δυναμικά της τάξης των 100 mV.

6.2.2 Ηλεκτρικές αγωγιμότητες

6.2.2.α Γενικά

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί στα πετρώματα με τρεις τρόπους:

- α) τον ηλεκτρονικό (Ωμικά),
- β) τον ηλεκτρολυτικό και
- γ) τη διηλεκτρική μετάδοση.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο κανονικός και γίνεται με τη ροή ρεύματος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Στον ηλεκτρολυτικό τρόπο το ρεύμα δημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Η διηλεκτρική μετάδοση λαμβάνει χώρα σε μικρής αγωγιμότητας υλικά και μονωτές, οι οποίοι έχουν πολύ λίγους ελεύθερους μεταφορείς ή κανένα. Κάτω από την επίδραση ενός εξωτερικού μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρώς σχετικά με τον πυρήνα τους. Αυτός ο ελαφρά σχετικός διαχωρισμός των αρνητικών και θετικών φορτίων είναι γνωστός ως διηλεκτρική πόλωση του υλικού. Ιοντική και μοριακή πόλωση μπορεί να εμφανισθεί σε υλικά με ιοντικούς και μοριακούς δεσμούς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η διηλεκτρική μετάδοση είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της ηλεκτρονικής, ιοντικής ή μοριακής πόλωσης που προκαλείται από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

6.2.2.β Ηλεκτρονική μετάδοση

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ενός κυλινδρικού στερεού μήκους L και διατομής A , που έχει αντίσταση R μεταξύ των δύο ακραίων διατομών (επιφανειών) δίδεται από τη σχέση:

$$\rho = RA / L \quad (7)$$

Εάν A είναι σε m^2 , L σε m και R σε Ωm , τότε η μονάδα ειδικής αντίστασης είναι το $\Omega m.m$. Από το νόμο του Ohm έχουμε:

$$R = V/I \quad (8)$$

και αν θέσουμε $\sigma = 1/\rho$, τότε

$$\sigma = 1/\rho = L/RA = (I/A)/(V/L) = j/E \quad (9)$$

όπου $j = I/A$ είναι η πυκνότητα του ρεύματος και μετριέται σε A/m^2 , $E = V/L$ είναι το ηλεκτρικό πεδίο και μετριέται σε V/m και σ , είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα που μετριέται σε $mhos/m$ ή Siemens/m.

6.2.2.γ Ηλεκτρολυτική μετάδοση

Εφόσον τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, οι ειδικές αντιστάσεις έπρεπε να είναι εξαιρετικά υψηλές, αλλά δεν είναι, διότι συνήθως έχουν πορώδη υφή και στα ενδιάμεσα κενά κυκλοφορούν υγρά και κυρίως νερό. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί των οποίων η ενεργός ειδική αντίσταση μπορεί να ορισθεί όπως για τους ηλεκτρονικούς αγωγούς (Ωμική διάδοση). Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι στην ηλεκτρολυτική μετάδοση το ρεύμα διαδίδεται με ιοντικό ή μοριακό τρόπο, με ιόντα ή μόρια που έχουν περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων. Έτσι, η ειδική αντίσταση ποικίλλει

ανάλογα με την κινητικότητα, την συγκέντρωση και το βαθμό αποσύνθεσης των ιόντων. Το τελευταίο, εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του διαλύματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ροή του ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή σε σχέση με την ωμική μετάδοση και η κίνηση εδώ παριστά μια πραγματική μεταφορά υλικού, συνήθως προκύπτοντας από χημικό μετασχηματισμό.

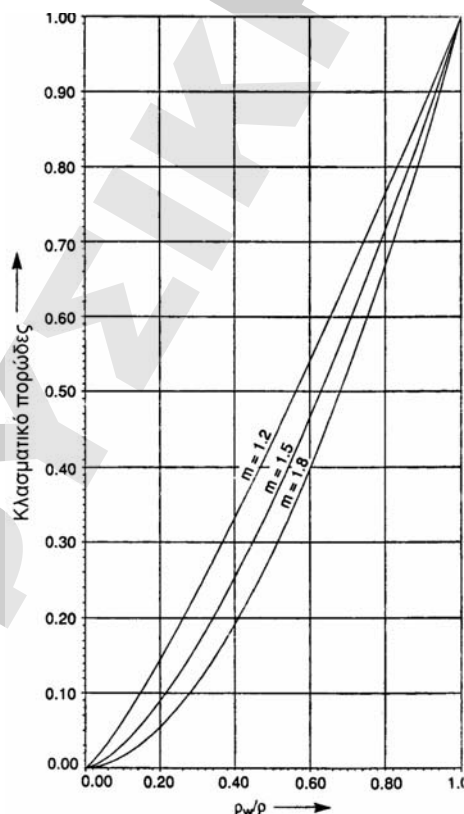
Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος ποικίλλει ανάλογα με τον όγκο και την διάταξη των διακένων και ακόμη περισσότερο με την αγωγιμότητα και την ποσότητα του πορικού υγρού (νερού). Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση του Archie έχουμε:

$$\rho_e = \alpha \Phi^{-m} S^{-n} \rho_w \quad (10)$$

όπου Φ , είναι ο κλασματικός όγκος των διακένων (πορώδες) και S είναι το κλάσμα των πόρων που περιέχουν νερό. Η ρ_w , είναι η ειδική αντίσταση του νερού, το m είναι περίπου 2 και οι σταθερές α & n κυμαίνονται μεταξύ $0.5 < \alpha < 2.5$, και $1.3 < n < 2.5$, αντίστοιχα.

Παράδειγμα: Για $S=1$, $\alpha=1.5$, $m=2$, τότε $\rho_e/\rho_w = 1.5/\Phi^2$ και για $\Phi=0.01, 0.1, 0.3$ και 0.5 , ο λόγος ρ_e/ρ_w γίνεται $1.5 \times 10^4, 150, 17$ και 6 , αντίστοιχα.

Η αγωγιμότητα του νερού μεταβάλλεται σημαντικά εξαρτώμενη από την ποσότητα και αγωγιμότητα των διαλυμένων χλωριόντων, θειούχων και άλλων ορυκτών. Στην εικόνα 6-3 απεικονίζονται οι μεταβολές του ολικού πορώδους, Φ , σε συνάρτηση με τον λόγο ρ_w/ρ και στην εικόνα 6-4, οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης του πορικού νερού σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του NaCl και τη θερμοκρασία.



Εικόνα 6-3. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης ρ σε συνάρτηση με το πορώδες, με ειδική αντίσταση πορικού νερού, ρ_w . Το m είναι 1.2 για σφαιρικούς κόκκους και περίπου 1.8 για φυλλώδεις ή πλακώδεις κόκκους.

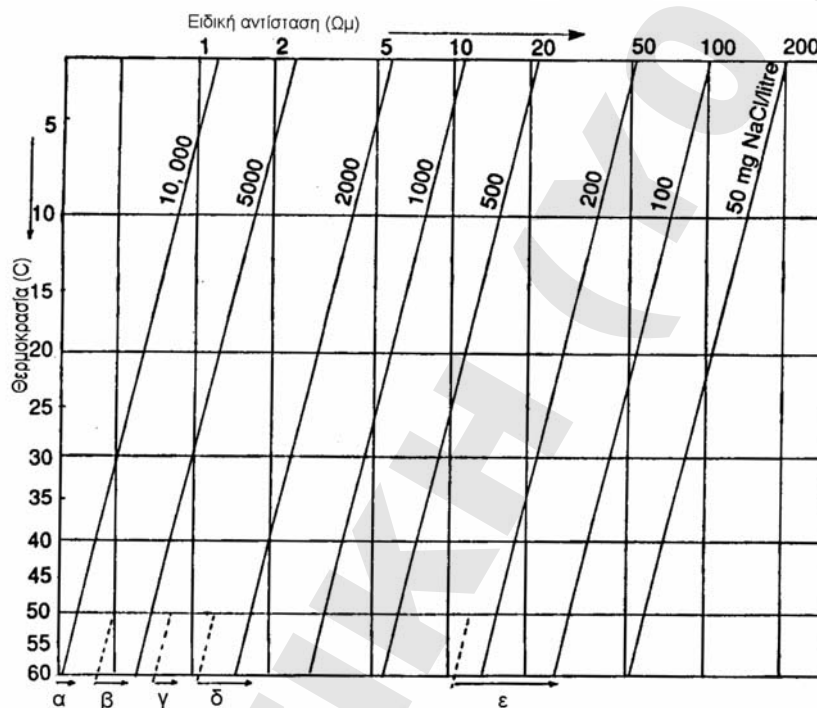
6.2.2.δ Διηλεκτρική μετάδοση

Ο μηχανισμός της διηλεκτρικής μετάδοσης-μετατόπισης του ρεύματος επιτυγχάνεται μόνο σε μονωτές (κακούς αγωγούς του ηλεκτρισμού), όταν το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά. Η διηλεκτρική σταθερά, κ , ονομάζεται μερικές φορές και ειδική επαγωγική χωρητικότητα του μέσου.

Η διηλεκτρική σταθερά δίδεται από τη σχέση:

$$\kappa = 1 + \eta / \epsilon_0 = \epsilon / \epsilon_0 \quad (11)$$

όπου ϵ , ϵ_0 , και η είναι σε Faradays/m στο MKS και η διηλεκτρική σταθερά κ , είναι καθαρός αριθμός.

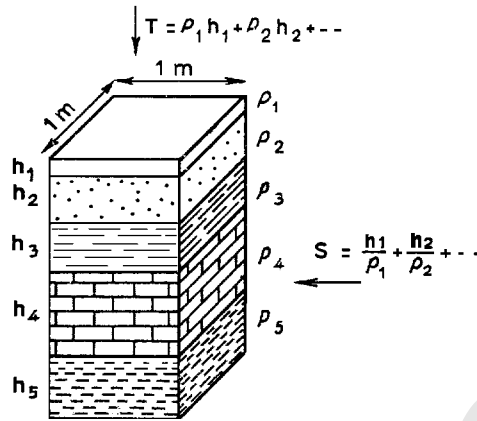


Εικόνα 6-4. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του νερού σε συνάρτηση με την ποσότητα διαλυμένου NaCl. Φαίνονται επίσης οι χρήσεις διαφορετικής ποιότητας. α) Βοοειδή, β) γαλακτοκομία, γ) χοιρινά, δ) πουλερικά και ε) ανθρώπινη κατανάλωση.

Η διηλεκτρική σταθερά είναι όμοια με την αγωγιμότητα πορωδών σχηματισμών κατά τούτο, ότι δηλαδή μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα του νερού που παρουσιάζεται (να σημειωθεί ότι το νερό έχει πολύ μεγάλη διηλεκτρική σταθερά). Γενικά, η μετατόπιση ρευμάτων είναι δευτερεύουσας σημασίας για τα γεωλογικά υλικά (πετρώματα, ορυκτά) εφόσον οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης χρησιμοποιούν συνήθως χαμηλές συχνότητες.

6.2.2.ε Ορισμός γεωηλεκτρικών παραμέτρων

Ένας παράγοντας που παίζει σπουδαίο ρόλο είναι η ανισοτροπία της ειδικής αντίστασης του υλικού σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Η ανισοτροπία είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των (στρωματοποιημένων) πετρωμάτων τα οποία είναι περισσότερο αγωγίμα παράλληλα προς τη στρώση αυτών παρά κάθετα προς αυτή.



Εικόνα 6-5. Σχηματική παράσταση της εγκάρσιας αντίστασης T και της επιμήκους αγωγιμότητας S .

Ο συντελεστής ανισοτροπίας, λ , είναι ο λόγος της μέγιστης ρ_i προς την ελάχιστη ρ_L ειδική αντίσταση και μπορεί να πάρει διπλάσιες τιμές σε μερικούς γραφιτικούς σχιστόλιθους, κυμαίνεται δε συνήθως μεταξύ 1 και 1.2 σε πετρώματα όπως οι ασβεστόλιθοι, ιλυόλιθοι και ρυόλιθοι.

Για ισότροπο μέσον $\rho_i = \rho_L$ και $\lambda=1$. Αυτές οι δευτερογενείς παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν χρησιμοποιούνται να περιγράψουν μια γεωηλεκτρική τομή αποτελούμενη από αρκετά στρώματα. Για ν στρώματα, η συνολική επιμήκης αγωγιμότητα S είναι (βλ. σχήμα 5):

$$S = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_{\nu}}{\rho_{\nu}} \quad (12)$$

η συνολική εγκάρσια αντίσταση T είναι:

$$T = \sum_{i=1}^{\nu} h_i * \rho_i = h_1 * \rho_1 + h_2 * \rho_2 + \dots + h_{\nu} * \rho_{\nu} \quad (13)$$

Η μέση επιμήκης ειδική αντίσταση ρ_L είναι:

$$\rho_L = \frac{H}{S} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} h_i}{\sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i}} \quad (14)$$

Η μέση εγκάρσια ειδική αντίσταση, ρ_t είναι:

$$\rho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} \rho_i * h_i}{\sum_{i=1}^{\nu} h_i} \quad (15)$$

Η ανισοτροπία λ είναι:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}} = \frac{\sqrt{T^* S}}{H} \quad (16)$$

Οι παράμετροι S , T , ρ_L , ρ_t και λ παράγονται από τη θεώρηση μίας στήλης με διατομή 1×1 m που τέμνεται από μία σειρά στρωμάτων μεγάλης (άπειρης) πλευρικής εξάπλωσης. Εάν το ρεύμα ρέει κατακόρυφα μόνο δια μέσου της στήλης, τότε τα στρώματα στη στήλη θα συμπεριφερθούν ως αντιστάσεις που συνδέονται σε σειρά και η συνολική αντίσταση της στήλης διατομής, 1×1 m, θα είναι:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_v \quad (17)$$

$$\text{ή} \quad R = \rho_1 \frac{h_1}{1 \times 1} + \rho_2 \frac{h_2}{1 \times 1} + \dots + \rho_v \frac{h_v}{1 \times 1} = \sum_{i=1}^v \rho_i * h_i = T \quad (18)$$

Το σύμβολο T χρησιμοποιείται αντί του R για ναδειχθεί ότι η αντίσταση μετρείται σε διεύθυνση κάθετη προς τη στρώση και ότι η μονάδα μέτρησης είναι: $\Omega \cdot \text{m}^2$ αντί Ωm της αντίστασης R . Εάν το ρεύμα ρέει παράλληλα προς τη στρώση, τα στρώματα στη στήλη θα συμπεριφερθούν ως αντιστάσεις που συνδέονται με παράλληλη διάταξη και η αγωγιμότητα θα δίδεται από τη σχέση:

$$S = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_v} \quad (19)$$

$$\text{ή} \quad S = \frac{1 * h_1}{\rho_1 * 1} + \frac{1 * h_2}{\rho_2 * 1} + \dots + \frac{1 * h_v}{\rho_v * 1} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_v}{\rho_v} = \sum_{i=1}^v \frac{h_i}{\rho_i} \quad (20)$$

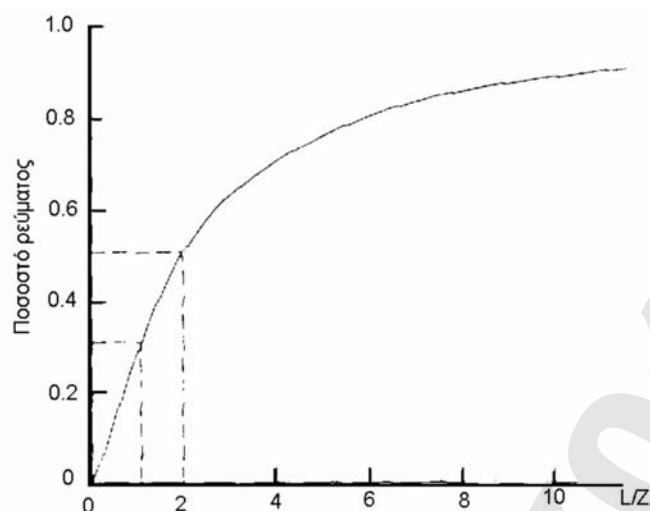
Η διάσταση της επιμήκους αγωγιμότητας S είναι $\text{m}/\Omega \text{m} \cdot \text{m} = 1/\Omega \text{m} = \text{mho}$. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η ποσότητα $S_i = h_i / \rho_i = \sigma_i h_i$, όπου σ_i είναι η αγωγιμότητα, είναι ανάλογος της μεταφορικότητας $t_i = K_i b_i$, που χρησιμοποιείται στην υδρολογία του υπόγειου νερού: όπου K_i είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και b_i είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος. Οι παράμετροι T και S ονομάστηκαν Dar Zarrouk από τον Maillet (1947).

Αξίζει επίσης να σημειώσουμε ότι στην ερμηνεία των γεωηλεκτρικών καμπύλων πολλών στρωμάτων, ο προσδιορισμός των S ή T είναι μερικές φορές ο μόνος εφικτός τρόπος που μπορούν να υπολογισθούν μοναδικά και όχι οι γεωηλεκτρικές παράμετροι ρ (ειδική αντίσταση) και h (πάχος στρώματος).

6.3 Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής ειδικής αντίστασης

6.3.1 Βάθος έρευνας

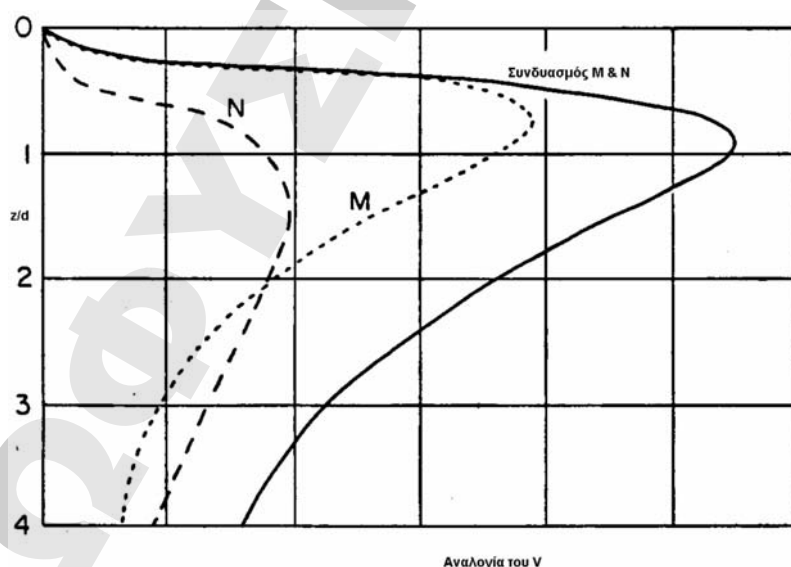
Σε ομογενές έδαφος το βάθος διείσδυσης του ρεύματος αυξάνεται, όσο η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6-6 η αναλογία ρεύματος που ρέει κάτω από ένα ορισμένο βάθος Z αυξάνεται καθώς ο λόγος διαχωρισμού των ηλεκτροδίων L ως προς το βάθος Z αυξάνει.



Εικόνα 6-6. Αναλογία ρεύματος που ρέει κάτω από ένα βάθος z (σε μέτρα). L είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Όταν $L=Z$ τότε περίπου το 30% του ρεύματος ρέει κάτω από το βάθος Z και όταν $L=2Z$ τότε περίπου 50% του ρεύματος ρέει κάτω από το βάθος Z . Στην εικόνα 6-7 φαίνονται οι καμπύλες ευαισθησίας των ηλεκτροδίων M και N και ο συνδυασμός αυτών στη διάταξη Wenner.

Η καμπύλη που απεικονίζει τη συνδυασμένη επίδραση της ευαισθησίας, δείχνει ότι η ζώνη που επηρεάζεται περισσότερο βρίσκεται σε ένα βάθος ίσο με το διάστημα, d , δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος πρέπει να επιλέγεται, έτσι ώστε το έδαφος να ενεργοποιείται στο επιθυμητό βάθος και να είναι τουλάχιστον ίση με αυτό το βάθος. Η συνθήκη αυτή δημιουργεί βέβαια πρακτικά προβλήματα στο να επιτευχθεί το βάθος διεύδυσης με απλές γεωηλεκτρικές μεθόδους, που οφείλονται στη δυσκολία ανάπτυξης μεγάλων αποστάσεων με καλώδια και τη χρησιμοποίηση ισχυρής ισχύος οργάνων. Βάθος διεύδυσης της τάξης του 1 km μπορεί να επιτευχθεί με κανονικό εξοπλισμό.



Εικόνα 6-7. Καμπύλες που δείχνουν το ποσοστό της μεταβολής του δυναμικού μεταξύ της πηγής και των ηλεκτροδίων M και N καθώς και του συνδυασμού αυτών στη διάταξη Wenner. Η συνδυασμένη καμπύλη δείχνει ότι η ζώνη που επηρεάζει περισσότερο την ειδική αντίσταση βρίσκεται σε ένα βάθος, z ίσο με την απόσταση d .

6.3.2 Γεωηλεκτρικές διατάξεις

Οι πιο γνωστές διατάξεις που έχουν περισσότερο χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα είναι οι διατάξεις **Wenner** και **Schlumberger**. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση (ΦΕΑ) στη διάταξη Wenner δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (21)$$

ενώ η φαινόμενη ειδική αντίσταση για τη διάταξη Schlumberger δίδεται από τη σχέση:

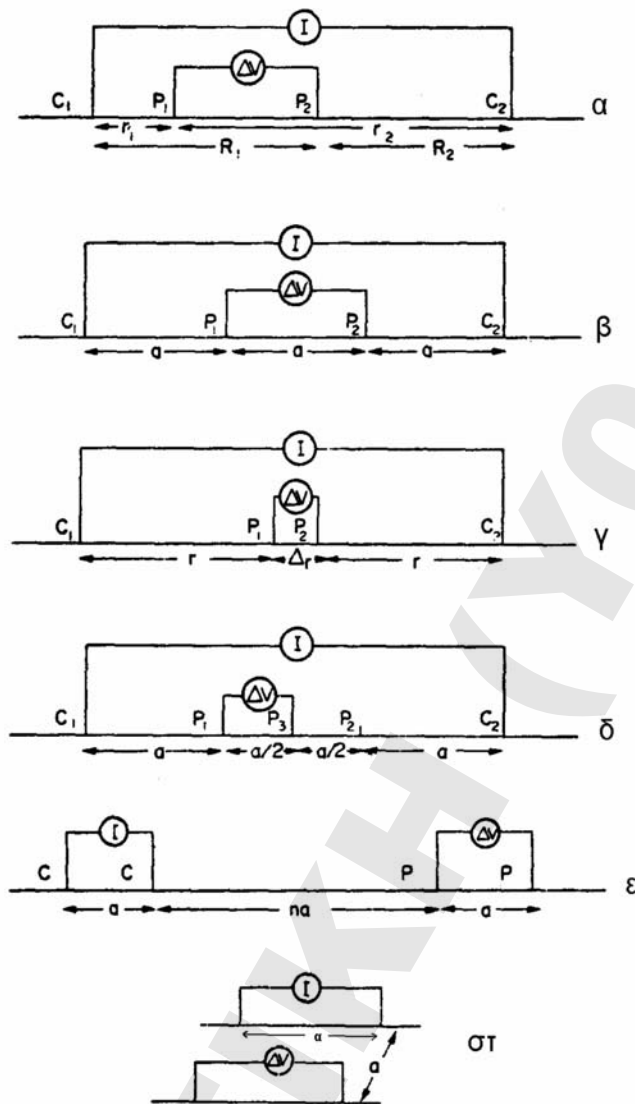
$$\rho_a = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (22)$$

Υπάρχουν αρκετές γεωηλεκτρικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση για τη διερεύνηση των υπεδαφικών δομών. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω (εικ. 6-8):

Διάταξη Lee. Η διάταξη αυτή μοιάζει με την Wenner με τη διαφορά ότι υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού στη θέση του κέντρου της διάταξης. Αυτό επιτρέπει δύο μετρήσεις να γίνουν, μια για το αριστερό και μια για το δεξιό ήμισυ του αναπτύγματος, χωρίς την ανάγκη μετακίνησης των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (23)$$

όπου, ΔV είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του κεντρικού και ενός εξωτερικού ηλεκτροδίου δυναμικού. Εάν οι μετρηθείσες τιμές του V είναι ίδιες, τότε το μέσον θεωρείται πλευρικά ομογενές, όπως βέβαια θεωρείται και στην ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



Εικόνα 6-8. α) Η διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, β) Διάταξη Wenner, γ) Διάταξη Schlumberger, δ) Διάταξη Lee, ε) Διάταξη Dipole-Dipole και στ) Τετραγωνική Διάταξη.

Διάταξη Dipole-Dipole. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δύο ζεύγη ηλεκτροδίων ίσου μήκους, ενός ζεύγους ηλεκτροδίων ρεύματος και ενός ζεύγους ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγών αυτών είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη εκείνης των ατομικών ζευγών. Διάφορες γεωμετρικές διατάξεις μπορούν να σχεδιασθούν βασισμένες στο σχετικό προσανατολισμό των ζευγών. Η απλούστερη διάταξη που χρησιμοποιείται είναι η αξονική ανάπτυξη κατά μήκος της γραμμής ανάπτυξης του τύπου CCPP και η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \pi \frac{\Delta V}{I} \eta(\eta+1)(\eta+2)\alpha \quad (24)$$

Τετραγωνική Διάταξη. Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις κορυφές ενός τετραγώνου και δίνουν τη δυνατότητα της εξομάλυνσης των τιμών από αζιμουθιακές μεταβολές της ειδικής αντίστασης, που παρατηρούνται πάνω από επαφές ή απότομων κεκλιμένων στρωμάτων. Η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{\alpha}{2 - \sqrt{2}} \quad (25)$$

όπου α είναι το μήκος της πλευράς του τετραγώνου.

6.3.3 Όργανα μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Τα όργανα αυτά έχουν σχεδιασθεί να μετρούν τον λόγο $\Delta V/I$ των παραπάνω εξισώσεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Πρέπει να είναι ικανά να μετρούν πολύ μικρές τιμές της αντίστασης που συχνά συναντώνται στις διασκοπήσεις ειδικής αντίστασης. Τα πλέον μοντέρνα όργανα μέτρησης χρησιμοποιούν χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενο παρά συνεχές ρεύμα για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, εάν χρησιμοποιηθεί πηγή συνεχούς ρεύματος θα συγκεντρωθούν ανιόντα γύρω από το θετικό ηλεκτρόδιο και κατιόντα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο δηλαδή θα εμφανισθεί ηλεκτρολυτική πόλωση και δεν θα επιτρέψει την άφιξη περισσότερων ιόντων στα ηλεκτρόδια. Περιοδική όμως αντιστροφή του ρεύματος εμποδίζει τη συγκέντρωση ιόντων και έτσι υπερπηδάται η ηλεκτρολυτική πόλωση. Δεύτερον, η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος αντιπαρέρχεται τις επιδράσεις των τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία είναι φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα του εδάφους που ρέουν παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης και δημιουργούν (προκαλούν) μεγάλης έκτασης ανωμαλίες (ήπιες κλίσεις δυναμικών γραμμών). Η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος μηδενίζει τις επιδράσεις τους, εφόσον σε κάθε αλλαγή πολικότητας του ρεύματος τα τελλουρικά ρεύματα εναλλακτικά αυξάνουν ή ελαττώνουν τη μετρηθείσα διαφορά δυναμικού με ίσα ποσά. Προσθέτοντας τα αποτελέσματα αρκετών κύκλων αφαιρείται η επίδραση των τελλουρικών ρευμάτων. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιείται στη μέθοδο ειδικής αντίστασης εξαρτάται από το βάθος διείδυσης που απαιτείται. Για βάθος διείδυσης 10 μέτρων, μια συχνότητα των 100 Hz είναι κατάλληλη και μπορεί να ελαττωθεί κάτω των 10 Hz για βάθος έρευνας 100 μέτρων. Για πολύ μεγάλο βάθος έρευνας μόνο συνεχές ρεύμα πρέπει να χρησιμοποιείται και περισσότερο πολύπλοκες μετρήσεις υιοθετούνται για να ξεπεραστεί η ηλεκτρολυτική πόλωση και οι επιδράσεις των τελλουρικών ρευμάτων.

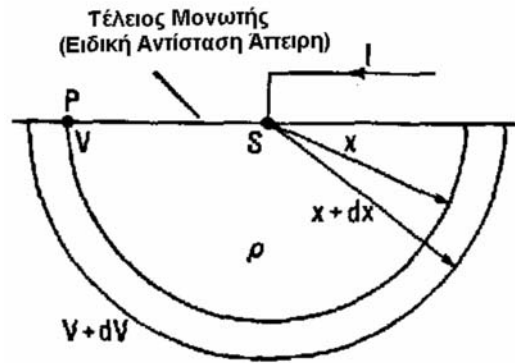
Ειδικότερα, τα όργανα μέτρησης της ειδικής αντίστασης σχεδιάζονται έτσι ώστε να μετρούν διαφορές δυναμικού όταν δεν ρέει ρεύμα. Τέτοια “ουδέτερη” μέθοδος χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν οι επιδράσεις της αντίστασης επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος. Το δυναμικό μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού εξισορροπείται από το δυναμικό που ορίζεται από ένα ποτενσιόμετρο (με μεταβλητή αντίσταση). Σ’ αυτή την περίπτωση κανένα ρεύμα δεν ρέει στο κύκλωμα, έτσι ώστε η αντίσταση επαφής να μην καταγράφεται και η μεταβλητή αντίσταση να δίδει την πραγματική αντίσταση του εδάφους (ίση με το λόγο $\Delta V/I$).

6.3.4 Δυναμικά σε ομογενή μέσα

- α. Περίπτωση σημειακής ηλεκτρικής πηγής στην επιφάνεια
- β. Περίπτωση σημειακής ηλεκτρικής πηγής σε βάθος
- γ. Περίπτωση δύο σημειακών πηγών στην επιφάνεια

6.3.4.α Περίπτωση μιας σημειακής πηγής στην επιφάνεια

Ας θεωρήσουμε μια σημειακή πηγή στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ενός μονωτή και ενός ημι-άπειρου, ισότροπου και ομογενούς μέσου, ειδ. αντίστασης ρ (βλ. εικ. 6-9). Βασίζόμενοι στη σχέση $R = \rho L/A$, η αντίσταση ενός ημι-σφαιρικού τομέα ακτίνας x είναι $R = \rho dx/2\pi x^2$.



Εικόνα 6-9. Τομή ημισφαιρικών ισοδυναμικών επιφανειών από σημειακή πηγή ρεύματος, που βρίσκεται πάνω σε ένα ημι-άπειρο, ομογενές και ισότροπο σώμα.

Από το νόμο του Ohm προκύπτει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει τον τομέα αυτό είναι:

$$I = \frac{V - (V + dV)}{\rho \frac{dx}{2\pi x^2}} = -\frac{2\pi x^2}{\rho} \frac{dV}{dx} \quad (26)$$

$$\text{και} \quad dV = -\frac{\rho I dx}{2\pi x^2} \quad (27)$$

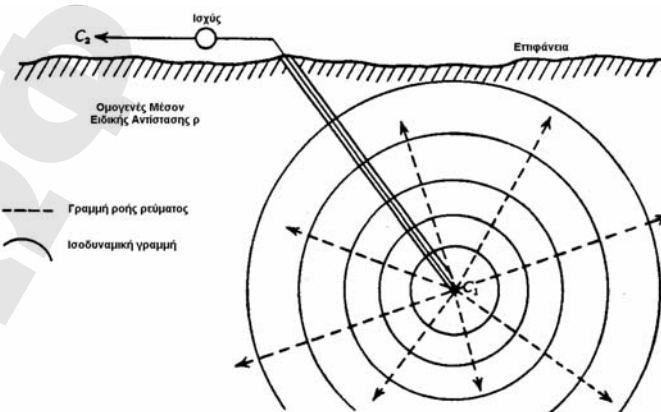
Από τον ορισμό του δυναμικού σε ένα σημείο (που ορίζεται ως το έργο που απαιτείται από το ηλεκτρικό πεδίο ώστε να μεταφερθεί η μονάδα ενός θετικού φορτίου από το άπειρο σ' αυτό το σημείο), το δυναμικό στο σημείο P δίδεται από τη σχέση:

$$V_P = \int_{x=\infty}^{x=R} dV = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{\infty}^R -\frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x} \right]_{\infty}^R = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad (28)$$

6.3.4.β Περίπτωση μιας σημειακής πηγής σε βάθος

Στην περίπτωση μιας σημειακής πηγής σε βάθος (εικ. 6-10) το δυναμικό σε ένα οποιοδήποτε σημείο P, δίδεται από τη σχέση:

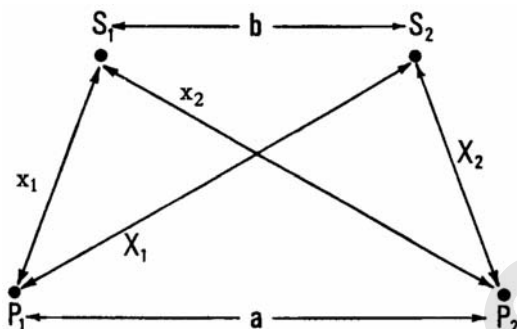
$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi R} \quad (29)$$



Εικόνα 6-10. Σημειακή πηγή ρεύματος θαμμένη σε ομογενές έδαφος.

6.3.4.γ Περίπτωση δύο σημειακών πηγών στην επιφάνεια

Το δυναμικό στο P_1 που οφείλεται στην παρουσία της πηγής S_1 (εικ. 6-11), δίδεται από τη σχέση: $\rho I_1/2\pi x_1$ και της πηγής S_2 από τη σχέση $\rho I_2/2\pi x_1$.



Εικόνα 6-11. Κάτοψη της γενικευμένης διάταξης τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Το συνολικό δυναμικό στο P_1 είναι:

$$V_{p1} = \frac{\rho I_1}{2\pi x_1} + \frac{\rho I_2}{2\pi X_1} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_1}{x_1} + \frac{I_2}{X_1} \right) \quad (30)$$

Ομοίως το συνολικό δυναμικό στο P_2 δίδεται από τη σχέση:

$$V_{p2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_1}{x_2} + \frac{I_2}{X_2} \right) \quad (31)$$

Η διαφορά δυναμικού V μεταξύ των P_1 και P_2 δίδεται από τη σχέση:

$$V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho}{2\pi} \left[I_1 \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) + I_2 \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X_2} \right) \right] \quad (32)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι οι πηγές S_1 και S_2 αποτελούν ένα δίπολο και τέτοιο μπορεί να προκύψει με την σύνδεση των S_1 και S_2 με τους πόλους μιας μπαταρίας, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλο το ρεύμα που διοχετεύεται στο έδαφος μέσω του S_1 , ουσιαστικά φεύγει μέσω του S_2 , οπότε $I_1 = -I_2 = I$.

Η σχέση 32 γίνεται:

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} - \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} \right) = K \frac{\rho I}{2\pi} \quad (33)$$

Ο συντελεστής K , αποτελεί την γεωμετρική συνεισφορά των ηλεκτροδίων στο παρατηρούμενο δυναμικό V , το 2π είναι η συνεισφορά του ημισφαιρικού στερεού στο δυναμικό V , το ρ , είναι η συνεισφορά της γεωλογικής φύσης του υλικού και I είναι η συνεισφορά της ενεργειακής πηγής (ένταση ρεύματος) που χρησιμοποιείται. Για σταθερό ρ , κάθε αλλαγή στη γεωμετρία ή στην πηγή ενέργειας (ηλεκτρική), θα οδηγήσει σε αλλαγή του δυναμικού V .

Για την διάταξη Wenner, όπου $S_1P_1 = P_1P_2 = P_2S_2 = a$ και $x_1 = X_2 = a$ και $x_2 = X_1 = 2a$.

Η σχέση 33 γίνεται:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{2}{a} - \frac{2}{2a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (34)$$

$$\text{και} \quad \rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (35)$$

Για την διάταξη Schlumberger, όπου: $S_1P_1 = L-l = P_2S_2$, $P_1P_2 = 2l$

Το γενικό σχήμα τροποποιείται ως εξής:

$$X_2 = x_1 = L-l \quad \& \quad x_2 = X_1 = L+l$$

Η σχέση 33 γίνεται:

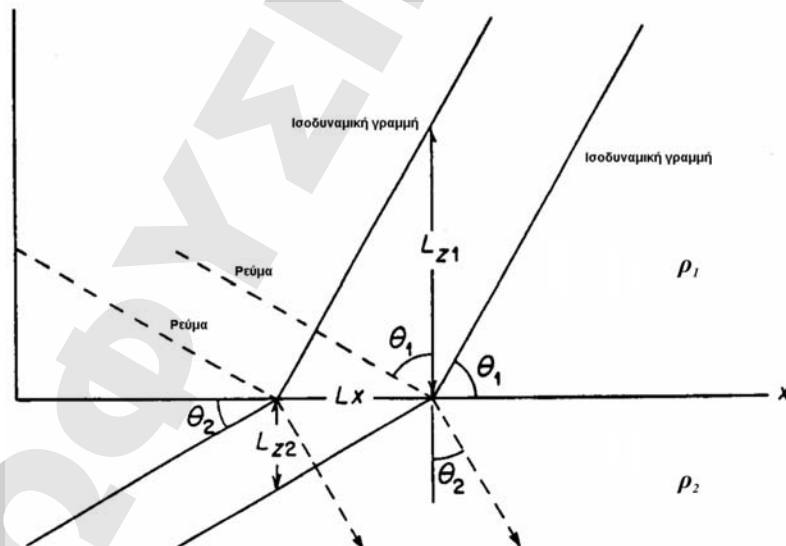
$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l} - \frac{1}{L+l} + \frac{1}{L-l} \right) = \frac{2l\rho I}{\pi(L^2 - l^2)} \quad (36)$$

$$\text{και} \quad \rho = \pi \frac{(L^2 - l^2)}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (37)$$

6.3.5 Δυναμικά σε μη ομογενή μέσα

6.3.5.α Παραμόρφωση των γραμμών ροής ρεύματος σε ασυνέχεια

Ας θεωρήσουμε δύο ομογενή μέσα ειδ. αντιστάσεων ρ_1 και ρ_2 που διαχωρίζονται από μια επίπεδη επιφάνεια (εικ. 6-12).



Εικόνα 6-12. Απόκλιση των γραμμών ρεύματος και των ισοδυναμικών επιφανειών σε ασυνέχεια δύο μέσων ειδικών αντιστάσεων ρ_1 και ρ_2 .

Ας υποθέσουμε επίσης, ότι ρεύμα έντασης I ρέει στο μέσον 1 με τέτοια διεύθυνση, ώστε να συναντά την ασυνέχεια με γωνία ϑ_1 ως προς την κατακόρυφο. Για να προσδιορισθεί η διεύθυνση του ρεύματος στο μέσον (2) από την εικόνα 6-12 προκύπτει ότι:

$$\varepsilon\varphi\vartheta_1 = \frac{L_{z1}}{L_x} \quad \text{και} \quad \varepsilon\varphi\vartheta_2 = \frac{L_{z2}}{L_x} \quad (38)$$

Αν διαιρέσουμε κατά μέλη έχουμε: $\frac{\varepsilon\varphi\vartheta_1}{\varepsilon\varphi\vartheta_2} = \frac{L_{z1}}{L_{z2}}$

Γνωρίζουμε ότι το δυναμικό V δίδεται από τη σχέση:

$$V = \rho j L \quad \text{ή} \quad L = V / \rho j \quad (39)$$

Επομένως, $L_{z1} = \frac{1}{\rho_1} \frac{V}{j}$ και $L_{z2} = \frac{1}{\rho_2} \frac{V}{j}$

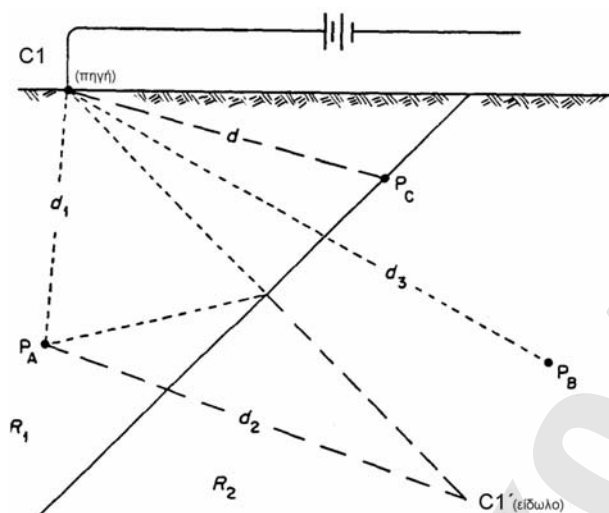
όπου V και j παραμένουν στις ίδιες τιμές λόγω των συνοριακών συνθηκών (συνέχεια ηλεκτρικού πεδίου). Έτσι,

$$\frac{L_{z1}}{L_{z2}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad \text{και κατά συνέπεια} \quad \frac{\varepsilon\varphi\vartheta_1}{\varepsilon\varphi\vartheta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (40)$$

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η γωνία ϑ_2 εξαρτάται από τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων ρ_1 και ρ_2 . Αν $\rho_2 > \rho_1$ τότε η γωνία ϑ_2 συγκλίνει προς την κατακόρυφο. Αυτό σημαίνει ότι αν το ρεύμα συναντήσει μέσον με μεγαλύτερη ειδική αντίσταση, τότε αλλάζει πορεία έτσι ώστε να ξεπεράσει το στρώμα αυτό με τη μικρότερη δυνατή τροχιά μέσα σ' αυτό, ρέοντας σχεδόν κάθετα προς τη διαχωριστική επιφάνεια. Αντίθετα, αν συναντήσει στρώμα με χαμηλή ειδική αντίσταση θα το ξεπεράσει, ρέοντας σχεδόν παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια.

6.3.5.β Παραμόρφωση των δυναμικών γραμμών σε ασυνέχεια

Καθώς οι γραμμές ροής ρεύματος παραμορφώνονται περνώντας από το ένα μέσον ειδικής αντίστασης ρ_1 , σε ένα άλλο μέσον ειδικής αντίστασης ρ_2 , και οι ισοδυναμικές γραμμές επίσης παραμορφώνονται. Χρησιμοποιώντας την τεχνική των ειδώλων, που χρησιμοποιείται συνήθως στην οπτική και θεωρώντας την αναλογία μεταξύ των ηλεκτρικών και των οπτικών ειδώλων, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί εύκολα το δυναμικό σε ένα σημείο στο χώρο, στην περίπτωση παρουσίας μιας ασυνέχειας.



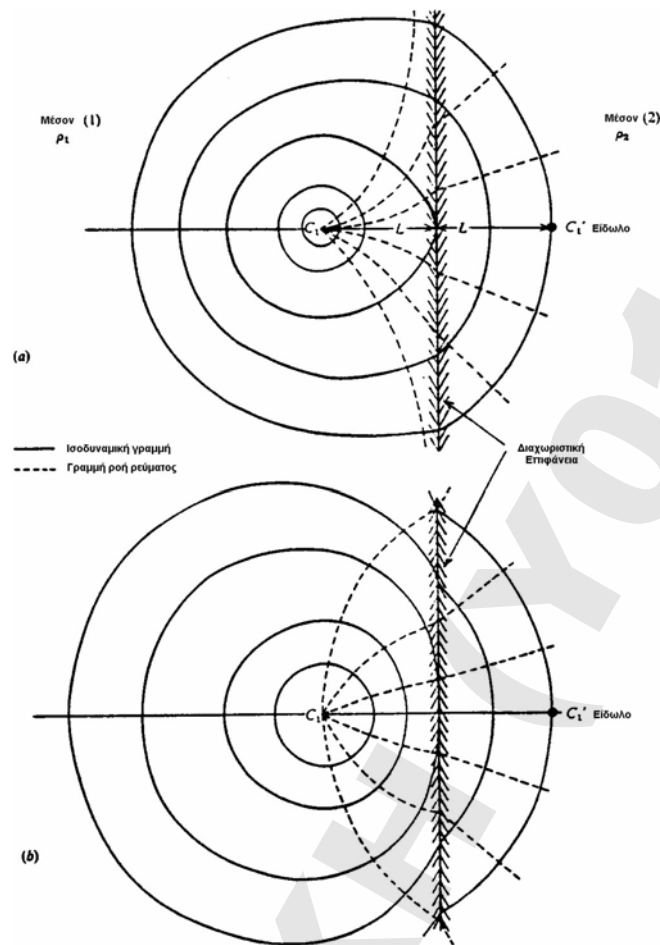
Εικόνα 6-13. Γεωμετρία των γραμμών ρεύματος κατά την ανάκλαση και διάθλαση αυτών σε ασυνέχεια δύο μέσων ειδικών αντιστάσεων ρ_1 και ρ_2 .

Η αναλογία μεταξύ των ηλεκτρικών και οπτικών ειδώλων στηρίζεται στο γεγονός ότι, τόσο η πυκνότητα του ρεύματος όσο και η ένταση της φωτεινής πηγής, ελαττώνεται με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης από το σημείο της πηγής. Έστω μία υπό κλίση επιφάνεια που διαχωρίζει δύο μέσα με ειδικές αντιστάσεις ρ_1 και ρ_2 αντίστοιχα (εικ. 6-13). Έστω επίσης ηλεκτρική πηγή έντασης I , στο σημείο C_1 . Το δυναμικό που αναπτύσσεται στο σημείο P_A οφείλεται μερικώς στην παρουσία της πηγής στο σημείο C_1 και μερικώς στο είδωλό της, C'_1 , στο δεύτερο μέσον. Εάν ορίσουμε τους συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης ως k και $1-k$ αντίστοιχα, τότε το δυναμικό στο σημείο P_A θα ισούται με:

$$V_{P_A} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{k}{r_2} \right) \quad (41)$$

Το δυναμικό στο σημείο P_B στο δεύτερο μέσον, δίδεται από τη σχέση:

$$V_{P_B} = \frac{I\rho_2(1-k)}{2\pi r_3} \quad (42)$$



Εικόνα 6-14. Παραμόρφωση των ισοδυναμικών επιφανειών και των γραμμών ρεύματος σε ασυνέχεια δύο μέσων με ειδικές αντιστάσεις, α) $\rho_2/\rho_1=3$, $\kappa=0.5$ και β) $\rho_2/\rho_1=1/3$, $\kappa=-0.5$.

Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες, τα δυναμικά αυτά πρέπει να είναι ίσα στη διαχωριστική επιφάνεια και $r_1=r_2=r_3$. Έτσι,

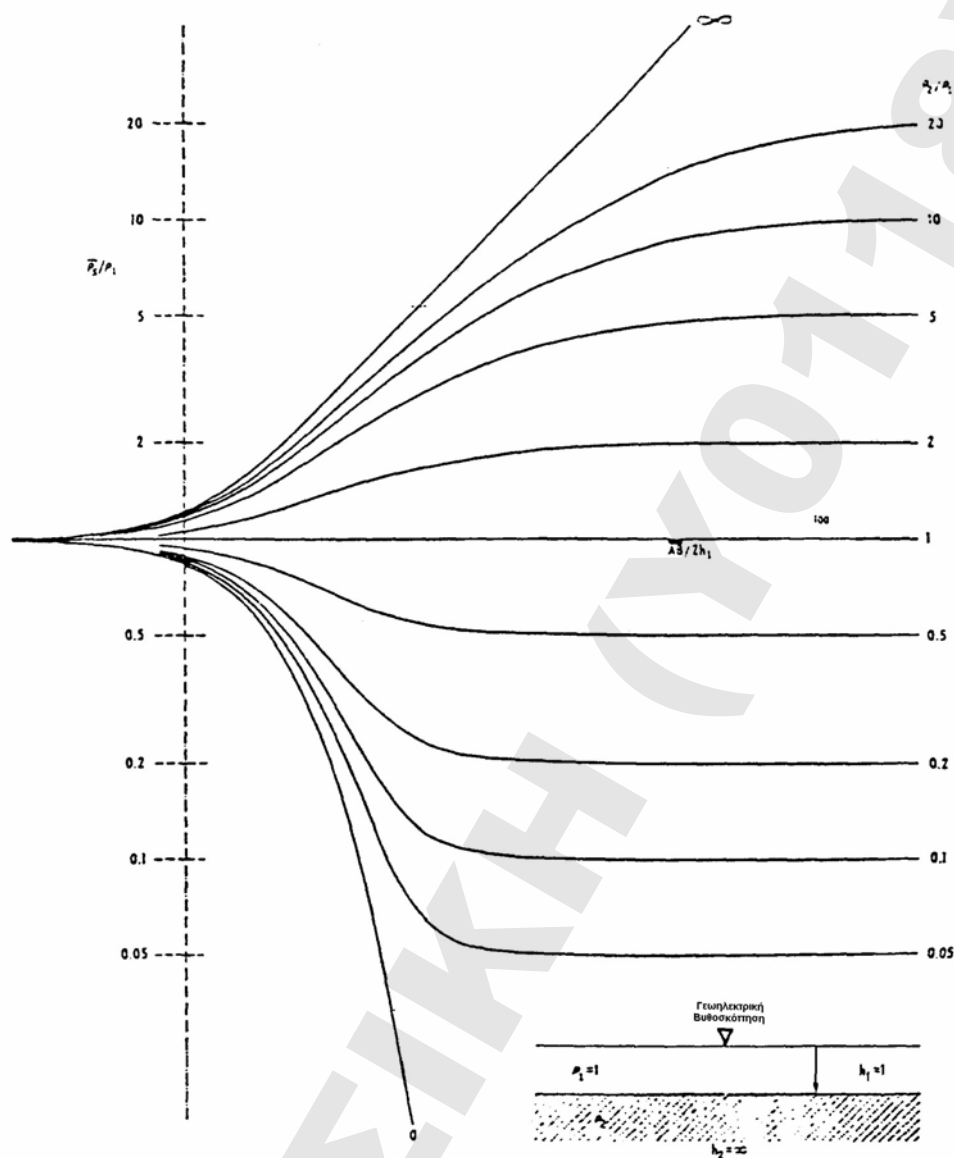
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{(1-k)}{(1+k)} \quad \text{ή} \quad k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (43)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης ή ηλεκτροποίησης κ , λαμβάνει τιμές μεταξύ ± 1 και εξαρτάται από τις σχετικές ειδικές αντιστάσεις των δύο μέσων. Στην εικόνα 6-14 φαίνονται τα ίχνη των ισοδυναμικών επιφανειών που έχουν χαραχθεί με βάση τις παραπάνω σχέσεις και για $\kappa=\pm 1/2$.

6.3.6 Τύποι γεωηλεκτρικών καμπύλων οριζοντίων στρωμάτων (Διάταξη Schlumberger)

3.6.α Περίπτωση ενός ομογενούς και ισότροπου μέσου

Σ' αυτήν την περίπτωση η φαινόμενη ειδική αντίσταση συμπίπτει με την πραγματική ειδική αντίσταση και η καμπύλη είναι μία ευθεία γραμμή παράλληλη στον οριζόντιο άξονα (εικ. 6-15, άξονας AB/2).



Εικόνα 6-15. Πρότυπες καμπύλες δύο στρωμάτων.

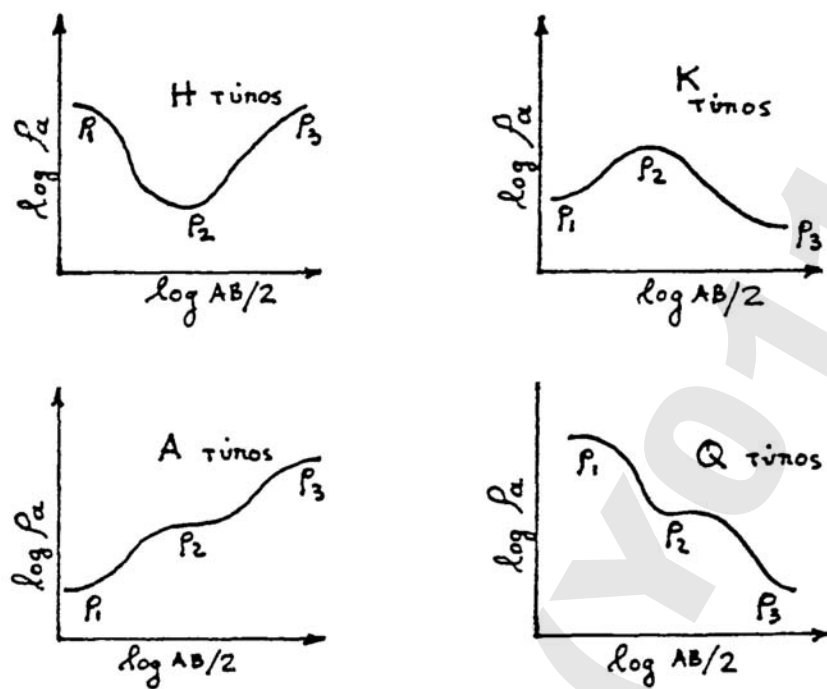
6.3.6.β Περίπτωση δύο στρωμάτων

Η καμπύλη είναι οριζόντια για μικρά ανοίγματα ηλεκτροδίων και μετά ανέρχεται εάν $\rho_2 > \rho_1$ ή κατέρχεται εάν $\rho_2 < \rho_1$. Στην περίπτωση που το άνοιγμα των ηλεκτροδίων είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος h_1 , τότε η καμπύλη ασυμπτωτικά παίρνει την τιμή του κατώτερου μέσου (ρ_2) (εικ. 6-15).

3.6.γ Περίπτωση τριών στρωμάτων

Εάν το έδαφος αποτελείται από τρία στρώματα ρ_1, ρ_2, ρ_3 και $h_1, h_2, h_3 = \infty$, τότε υπάρχουν οι εξής τέσσερις συνδυασμοί (εικ. 6-16):

$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$Η-τύπος	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$Α-τύπος
$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$Κ-τύπος	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$Q-τύπος



Εικόνα 6-16. Διάφοροι τύποι γεωμετρικών καμπύλων τριών στρωμάτων.

6.3.6.δ Περίπτωση πολλών στρωμάτων

Στην περίπτωση αυτή η γεωηλεκτρική τομή περιγράφεται σε σχέση με τις ειδικές αντιστάσεις των στρωμάτων και μάλιστα με τα γράμματα H, A, K και Q.

Στην περίπτωση τεσσάρων στρωμάτων υπάρχουν οκτώ συνδυασμοί μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων ρ_1, ρ_2, ρ_3 και ρ_4 , δηλαδή: HA, HK, AA, AK, KH, KQ, QH, QQ.

Στην περίπτωση πέντε στρωμάτων υπάρχουν δεκαέξι συνδυασμοί κ.ο.κ.

Γενικά για n-στρώματα (όπου $n \geq 3$) υπάρχουν $n-2$ συνδυασμοί γραμμών.

6.3.7 Γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και οριζόντια χαρτογράφηση

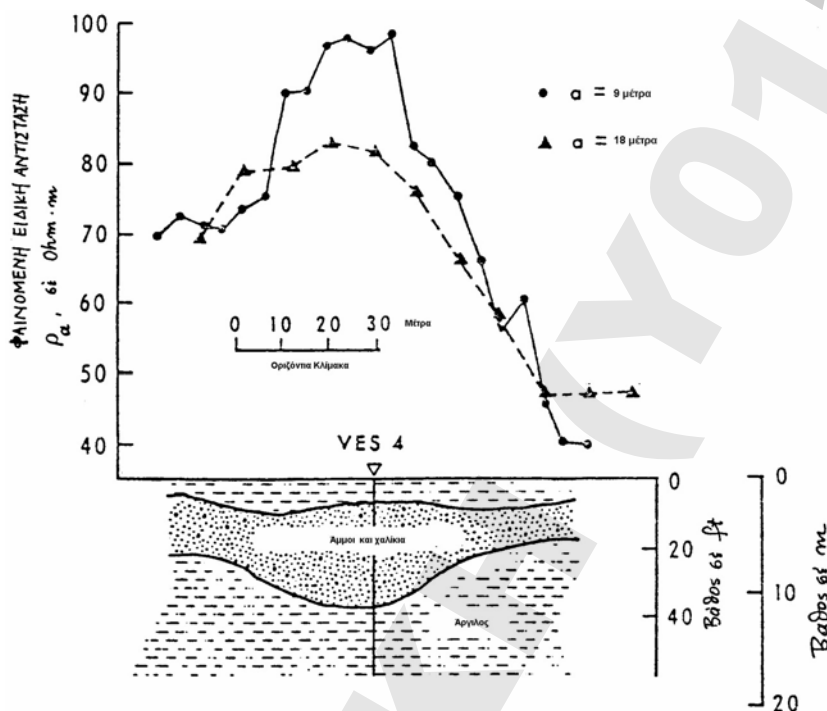
Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση είναι η διαδικασία με την οποία γίνεται ο προσδιορισμός των διαφόρων γεωηλεκτρικών ασυνεχειών στο υπέδαφος και οριζόντια χαρτογράφηση είναι η διαδικασία με την οποία ανιχνεύονται πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης. Συνήθως, τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και της οριζόντιας χαρτογράφησης συχνά επηρεάζονται και από κατακόρυφες και οριζόντιες μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Ανεξάρτητα από το ποια διάταξη θα χρησιμοποιηθεί στη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, το βάθος αυξάνει όσο γίνεται μεγαλύτερη η απόσταση μεταξύ του σημείου μέτρησης του δυναμικού (ηλεκτρόδιο δυναμικού) από το ηλεκτρόδιο ρεύματος.

Στην οριζόντια χαρτογράφηση, χρησιμοποιείται ένα σταθερό διάστημα ηλεκτροδίων (κατά προτίμηση με βάση τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων) και η όλη διάταξη κινείται κατά μήκος μιας γραμμής μετά από κάθε μέτρηση. Οι μεγαλύτερες ανωμαλίες φαινόμενης ειδικής αντίστασης λαμβάνονται κάθετα προς τη διεύθυνση της γεωλογικής δομής. Η οριζόντια χαρτογράφηση πρέπει να διεξάγεται με δύο διαφορετικά διαστήματα ηλεκτροδίων, με σκοπό το διαχωρισμό των επιφανειακών γεωλογικών επιδράσεων, από τις επιδράσεις των βαθύτερων οριζόντων (εικ. 6-17). Στην εικόνα 6-17 η επίδραση του επιφανειακού γεωλογικού σχηματισμού δεν αποκαλύπτεται με τη

χρησιμοποίηση του μεγαλύτερου διαστήματος ηλεκτροδίων, ενώ αντίθετα παρατηρείται η επίδραση της βαθύτερης ασυνέχειας.

Η ερμηνεία της οριζόντιας χαρτογράφησης είναι γενικά ποιοτική και είναι πρωταρχικής σημασίας εδώ, ο προσδιορισμός των θέσεων των γεωλογικών δομών, όπως θαμμένων κοιτών ποταμών, φλεβών κ.τ.λ. Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνονται γενικά, από το συνδυασμό της οριζόντιας χαρτογράφησης και των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων.



Εικόνα 6-17. Οριζόντια χαρτογράφηση πάνω από θαμμένη κοιτή, χρησιμοποιώντας $a=9\text{m}$ και $a=18\text{m}$. Η βυθοσκόπηση VES 4 βοήθησε στην ερμηνεία των παραπάνω γεωηλεκτρικών τομών.

6.3.8 Ερμηνεία δεδομένων γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων

Στην περίπτωση δύο ή περισσότερων στρωμάτων (μια ή περισσότερες ασυνέχειες παράλληλες προς την επιφάνεια) είναι προτιμότερο να κανονικοποιούνται όλες οι αποστάσεις ως προς το πάχος, z_1 , και όλες οι ειδικές αντιστάσεις ως προς την ειδική αντίσταση, ρ_1 του πρώτου στρώματος. Έτσι, αν η ειδική αντίσταση είναι μία φαινόμενη, ρ_a και εξαρτάται από παράγοντες όπως, οι ειδικές αντιστάσεις των στρωμάτων, τα πάχη αυτών και τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, τότε στην περίπτωση δύο στρωμάτων έχουμε:

$$\rho_a = f(\rho_1, \rho_2, z, a) \quad (44)$$

ή στην κανονικοποιημένη μορφή,

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = f\left(k_1, \frac{a}{z_1}\right) \quad (45)$$

όπου: $k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ είναι ο συντελεστής “ηλεκτροποίησης” και a το ημι-ανάπτυγμα ηλεκτροδίων ρεύματος.

Για δεδομένη τιμή ρ_1 , μια σειρά καμπύλων μπορεί να υπολογισθεί για διάφορες τιμές της ρ_2 και z_1 . Εάν το κ_1 παραμείνει σταθερό, το οποίο σημαίνει ότι οι ρ_1 και ρ_2 μπορούν να ποικίλλουν αλλά ο λόγος ρ_2/ρ_1 να παραμένει σταθερός, τότε μια καμπύλη θα ισχύει για όλο το εύρος τιμών των ρ_1 και ρ_2 . Εφόσον το κ_1 είναι σταθερό για αυτή την καμπύλη, η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a , δεν θα εξαρτάται πια από το κ_1 και η παραπάνω σχέση μπορεί να ξαναγραφεί ως μια διαφορετική συνάρτηση στο δεξί της σκέλος, δηλαδή:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = f_k\left(\frac{a}{z_1}\right) \quad (46)$$

Εάν λάβουμε τους λογάριθμους των δύο μελών της σχέσης αυτής έχουμε:

$$\log\left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right) = \log\left[f_k\left(\frac{a}{z_1}\right)\right] \quad (47)$$

και θυμίζοντας ότι a/z_1 μπορεί να γραφεί ως $10^{\log(a/z_1)}$, έχουμε:

$$\log\left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right) = \log\left[f_k\left(10^{\log(a/z_1)}\right)\right] = F_k \log\left(a/z_1\right) \quad (48)$$

$$\text{οπότε:} \quad \log \rho_a - \log \rho_1 = F_k (\log a - \log z_1) \quad (49)$$

$$\text{ή} \quad y - y_0 = F_k (x - x_0) \quad (50)$$

Για μία δεδομένη βυθοσκόπηση, οι τιμές ρ_a , και a , χαρτογραφούνται σε διπλό λογαριθμικό χαρτί και η καμπύλη που έτσι προκύπτει είναι της μορφής:

$$\log \rho_a = F(\log a) \quad (51)$$

$$\text{ή} \quad y = F(x) \quad (52)$$

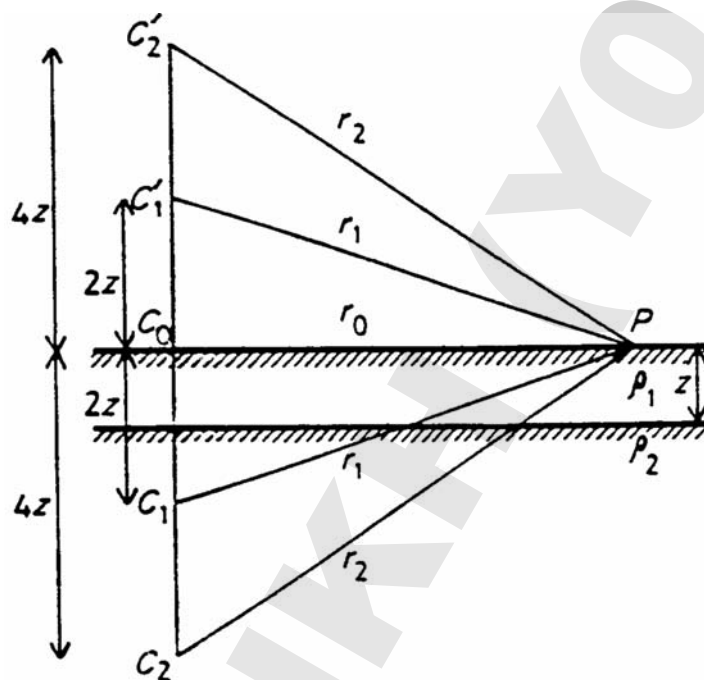
Οι σχέσεις (50) και (52) παριστούν όμοιας μορφής καμπύλες (ταυτόσημες), με μόνη τη διαφορά ότι το σημείο αναφοράς έχει μετατοπισθεί. Εάν μια οικογένεια θεωρητικών καμπύλων για διαφορετικές τιμές κ_1 ή ρ_2/ρ_1 παρασταθεί σε διλογαριθμικό χαρτί, μια από αυτές τις καμπύλες θα συμπίπτει με τη μορφή της καμπύλης υπαίθρου, με μόνη επίδραση εκείνης του σημείου αναφοράς (αρχή των αξόνων) των θεωρητικών καμπύλων.

6.3.8.1 Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης στην περίπτωση παρουσίας μιας οριζόντιας ασυνέχειας

Ο πρώτος υπολογισμός τέτοιου τύπου έγινε από τον Hummel το 1930, χρησιμοποιώντας το οπτικό ανάλογο φαινόμενο, για να υπολογίσει την φαινόμενη ειδική αντίσταση ενός μοντέλου δύο στρωμάτων. Αναφερόμενοι στην εικόνα 6-18, ρεύμα I διοχετεύεται στο έδαφος στο σημείο C_0 πάνω από μια ασυνέχεια που βρίσκεται σε βάθος z μεταξύ του ανώτερου μέσου 1, Ε.Α. ρ_1 και του κατώτερου μέσου 1, Ε.Α. ρ_2 . Οι δύο διαχωριστικές παράλληλες επιφάνειες μεταξύ του μέσου 1 και 2 και μεταξύ του μέσου 1 και του αέρα, παράγουν μια άπειρη σειρά ειδώλων της πηγής, που τοποθετούνται πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι, το C_1 είναι το είδωλο του C_0 στην διαχωριστική επιφάνεια των μέσων 1/2 και σε απόσταση $2z$, το C'_1 είναι το είδωλο του C_1 στην διαχωριστική επιφάνεια των μέσων 1/αέρα και σε ύψος $2z$, το C_2 είναι είδωλο του C'_1 και σε βάθος $4z$ κ.λ.π. Κάθε είδωλο στο μέσον 1/2 μειώνεται σε ένταση κατά τον παράγοντα κ , συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας (ή παράγοντας ηλεκτροποίησης, $\kappa = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$).

Δεν υπάρχει μείωση στην ένταση των ειδώλων στη διαχωριστική επιφάνεια των μέσων 1/αέρα καθώς ο παράγοντας κ ισούται με τη μονάδα. Η συνέπεια της διαδοχικής ελάττωσης της έντασης είναι ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο μικρός αριθμός ειδώλων για την εκτίμηση του δυναμικού σε ένα σημείο P. Το δυναμικό V_p στο σημείο P είναι το άθροισμα των συνεισφορών όλων των πηγών. Γνωρίζοντας ότι $V_r = \rho I / 2\pi r$ τότε σύμφωνα με τα παραπάνω στο σημείο P έχουμε:

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi r_0} + \frac{2\kappa I\rho_1}{2\pi r_1} + \frac{2\kappa^2 I\rho_1}{2\pi r_2} + \dots + \frac{2\kappa^i I\rho_1}{2\pi r_i} \quad (53)$$



Εικόνα 6-18. Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δυναμικού από επιφανειακή σημειακή πηγή ρεύματος, πάνω από μια οριζόντια ασυνέχεια, χρησιμοποιώντας την τεχνική των ειδώλων.

Έτσι,
$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\kappa^n}{r_n} \right) \quad (54) \quad \text{όπου} \quad r_n = [r_0^2 + (2nz)^2]^{1/2} \quad (55)$$

Ο πρώτος όρος στην παρένθεση αναφέρεται στο κανονικό δυναμικό που αποκτάται σε ομογενές μέσον, ενώ ο δεύτερος όρος αναφέρεται στο διαταραχθέν δυναμικό (παραμορφωμένο πεδίο) που προκαλείται από την ασυνέχεια. Η σειρά αυτή συγκλίνει καθώς ο παράγοντας κ είναι μικρότερος της μονάδας ($\kappa < 1$).

Η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ δύο σημείων P_1 και P_2 που οφείλεται στην παρουσία δύο ηλεκτροδίων ρεύματος C_1 και C_2 , στην περίπτωση της διάταξης Wenner, σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική των ειδώλων λαμβάνει τη μορφή:

$$\Delta V = \frac{I\rho_1}{2\pi a} (1 + 4F) \quad (56)$$

όπου

$$F = \sum_{n=1}^{\infty} \kappa^n \left[\left(1 + 4n^2 z^2 / a^2 \right)^{-1/2} - \left(4 + 4n^2 z^2 / a^2 \right)^{-1/2} \right] \quad (57)$$

$$\text{και συγκρίνοντας τη σχέση αυτή με την } \rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (58)$$

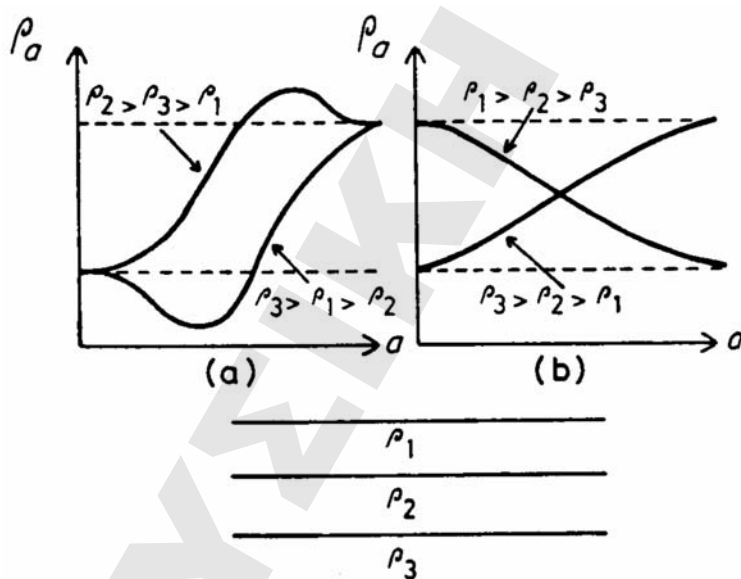
$$\text{λαμβάνουμε την σχέση,} \quad \rho_a = \rho_1(1 + 4F) \quad (59)$$

Κατά συνέπεια η Φ.Ε.Α μπορεί να υπολογισθεί για μία σειρά διαφορετικών αποστάσεων ηλεκτροδίων.

6.3.8.2 Μορφή των γεωηλεκτρικών καμπύλων στην περίπτωση παρουσίας περισσότερων της μιας οριζόντιων ασυνεχειών

Στην περίπτωση παρουσίας τριών οριζόντιων στρωμάτων, οι καμπύλες ειδικής αντίστασης είναι περισσότερο πολύπλοκες από εκείνες των δύο στρωμάτων που μέχρι τώρα έχουν εξετασθεί. Στην εικόνα 6-19, αν και η φαινόμενη ειδική αντίσταση (ΦΕΑ) τείνει σε ρ_1 και ρ_3 για μικρές και μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος αντίστοιχα, η παρουσία ενός ενδιάμεσου στρώματος προκαλεί μια απόκλιση της ΦΕΑ σε ενδιάμεσες αποστάσεις.

Εάν η ειδική αντίσταση (Ε.Α) του ενδιάμεσου στρώματος είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη του ανώτερου και κατώτερου στρώματος, τότε η καμπύλη Ε.Α έχει σχήμα είτε "καμπάνας" ή "λεκάνης". Η παρουσία τεσσάρων ή περισσότερων στρωμάτων επιτείνει την πολυπλοκότητα των καμπύλων ΦΕΑ.



Εικόνα 6-19. Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a σε συνάρτηση με την απόσταση a των ηλεκτροδίων, πάνω από ορισμένα στρώματα.

6.3.9 Εφαρμογές των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων στις υδρογεωλογικές μελέτες

Στις υδρογεωλογικές μελέτες, η μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, μπορεί να δώσει πληροφορίες για την υπόγεια γεωλογική δομή και τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Για παράδειγμα, οι ηλεκτρικές μέθοδοι είναι κατάλληλες στην παροχή πληροφοριών σχετικά με το βάθος της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ του αλμυρού και του γλυκού νερού. Επίσης, ένα παχύ αργιλικό στρώμα που διαχωρίζει δύο υδροφόρα στρώματα μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί από μια γεωηλεκτρική καμπύλη.

6.3.9.1 Χαρτογράφηση θαμμένων ποτάμιων κοιτών

Η γεωηλεκτρική μέθοδος έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία στη χαρτογράφηση θαμμένων ποτάμιων κοιτών. Έχουν ειδικότερα χρησιμοποιηθεί οι τεχνικές:

α) οριζόντιας χαρτογράφησης

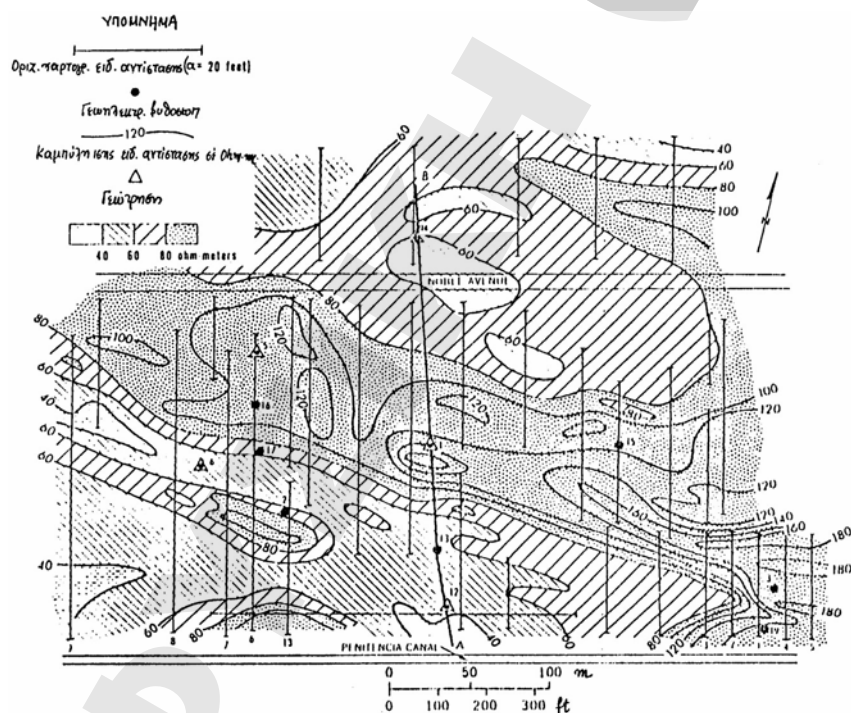
Έχουν αναφερθεί αρκετές θαμμένες ποτάμιες κοίτες με τη χρησιμοποίηση των τεχνικών της οριζόντιας χαρτογράφησης με τη διάταξη Wenner και των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων με τις διατάξεις Schlumberger και Wenner. Στο χάρτη της εικόνας 6-20 και στη τομή της εικόνας 6-21, η οποία έχει προκύψει με την τεχνική της οριζόντιας χαρτογράφησης κατά Wenner ($\alpha=6\text{m}$), φαίνεται καθαρά η παλαιοκοίτη ενός θαμμένου ποταμού.

β) γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων.

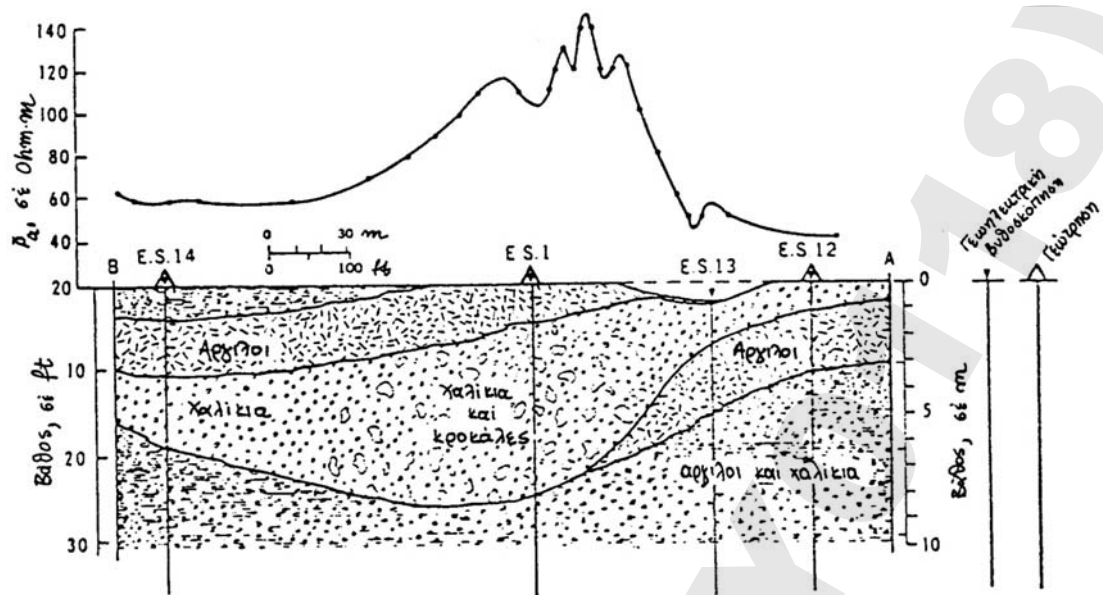
Μία γεωηλεκτρική τομή που έχει βασιστεί σε τέσσερις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, μία καμπύλη φαινόμενης ειδικής αντίστασης και τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων που έγιναν στην παραπάνω περιοχή, φαίνονται επίσης στην εικόνα 6-21.

Στο χάρτη φαινόμενης ειδικής αντίστασης της εικόνας 6-22, που έχει προκύψει με την τεχνική της οριζόντιας χαρτογράφησης κατά Wenner ($\alpha=9\text{m}$), φαίνεται η παρουσία στρωμάτων υψηλών ειδικών αντιστάσεων σε μικρά βάθη, αλλά δεν σκιαγραφείται καθαρά η παρουσία ποτάμιας κοίτης όπως και προηγουμένως.

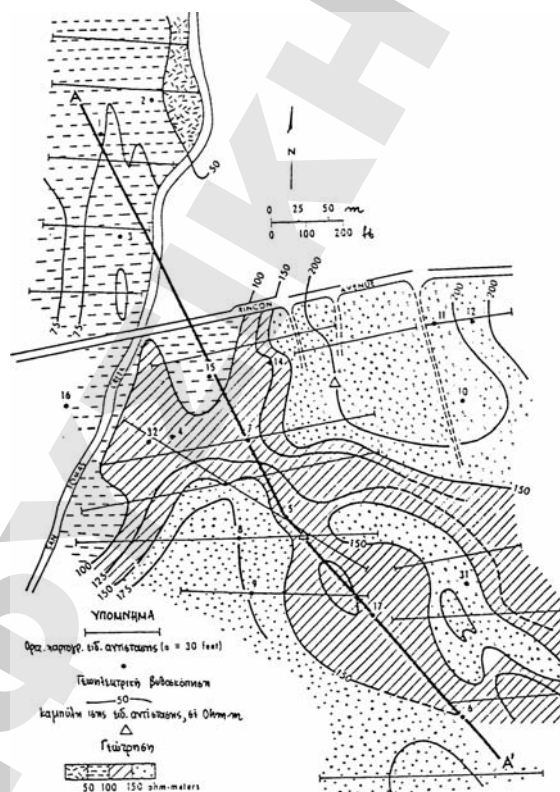
Μία γεωηλεκτρική τομή βασισμένη στην ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων φαίνεται στην εικόνα 6-23. Μία γεώτρηση που έγινε κοντά στη βυθοσκόπηση No 5, έδωσε αποτελέσματα που ήταν σε καλή συμφωνία με την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών καμπύλων.



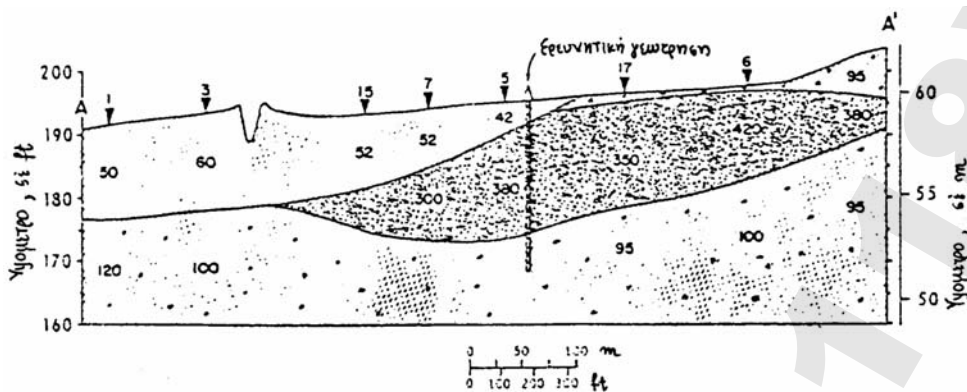
Εικόνα 6-20. Χάρτης φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που δείχνει τη θέση της τομής AB (εικ. 6-21).



Εικόνα 6-21. Καμπύλη φαινόμενης ειδικής αντίστασης και η αντίστοιχη γεωλογική τομή AB.

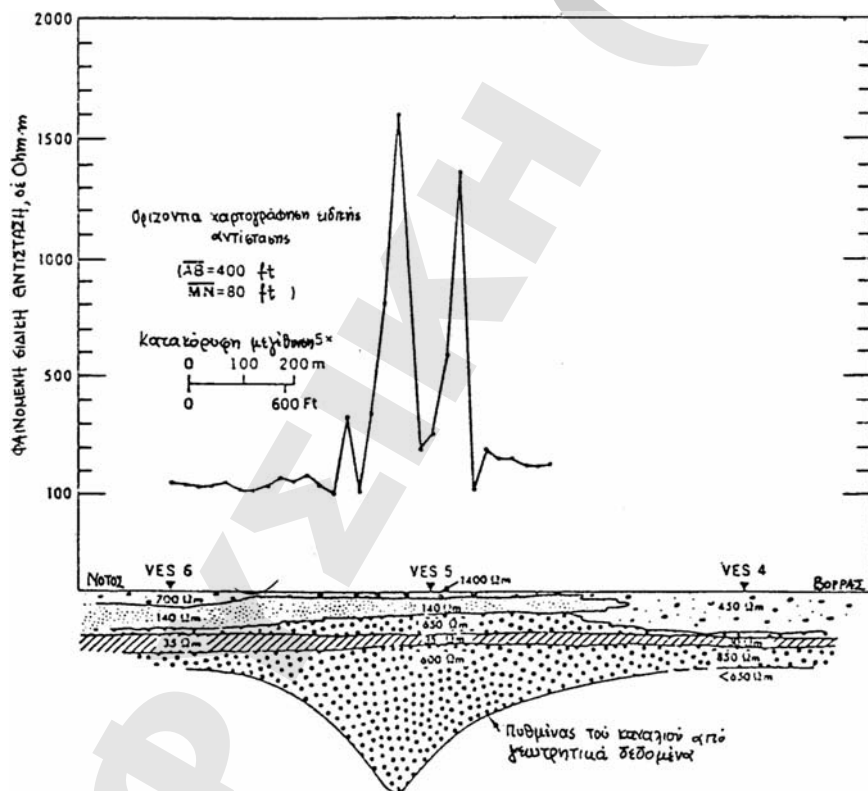


Εικόνα 6-22. Χάρτης φαινόμενης ειδικής αντίστασης με τη διάταξη Wenner και $\alpha=9$ m, που δείχνει τη γεωηλεκτρική τομή AA'.



Εικόνα 6-23. Η γεωηλεκτρική τομή AA' της εικόνας 6-22.

Στην εικόνα 6-24 φαίνεται μία θαμμένη κοίτη ποταμού, κορεσμένη με γλυκό νερό. Η γεωηλεκτρική διασκόπηση περιελάμβανε τις τεχνικές των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων κατά Schlumberger και οριζόντιας χαρτογράφησης ($AB=122$ m, $MN=24.4$ m). Μία αξιοσημείωτη ανωμαλία σκιαγραφήθηκε με την τεχνική της οριζόντιας χαρτογράφησης κάθετα στη γνωστή διεύθυνση της κοίτης (εικ. 6-24).



Εικόνα 6-24. Καμπύλη φαινόμενης ειδικής αντίστασης και η γεωλογική ερμηνεία πάνω από θαμμένη κοίτη.

Τα βάθη που προέκυψαν από τις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, ήταν γενικά σε καλή συμφωνία με τα γεωτρητικά στοιχεία.

Από τα τρία αυτά παραδείγματα, μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι σε επιφανειακές διασκοπήσεις, η τεχνική της οριζόντιας χαρτογράφησης μπορεί να δώσει πληροφορίες για την παρουσία ή απουσία ρηχών θαμμένων ποτάμιων κοιτών και ότι οι γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις πρέπει να προηγούνται των διασκοπήσεων οριζόντιας χαρτογράφησης.

6.3.9.2 Γεωθερμικές μελέτες

Οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις βοηθούν στον εντοπισμό ρηγμάτων που παρουσιάζουν ζωνρό ενδιαφέρον στις έρευνες δυναμικότητας και αξιοποίησης των γεωθερμικών πεδίων.

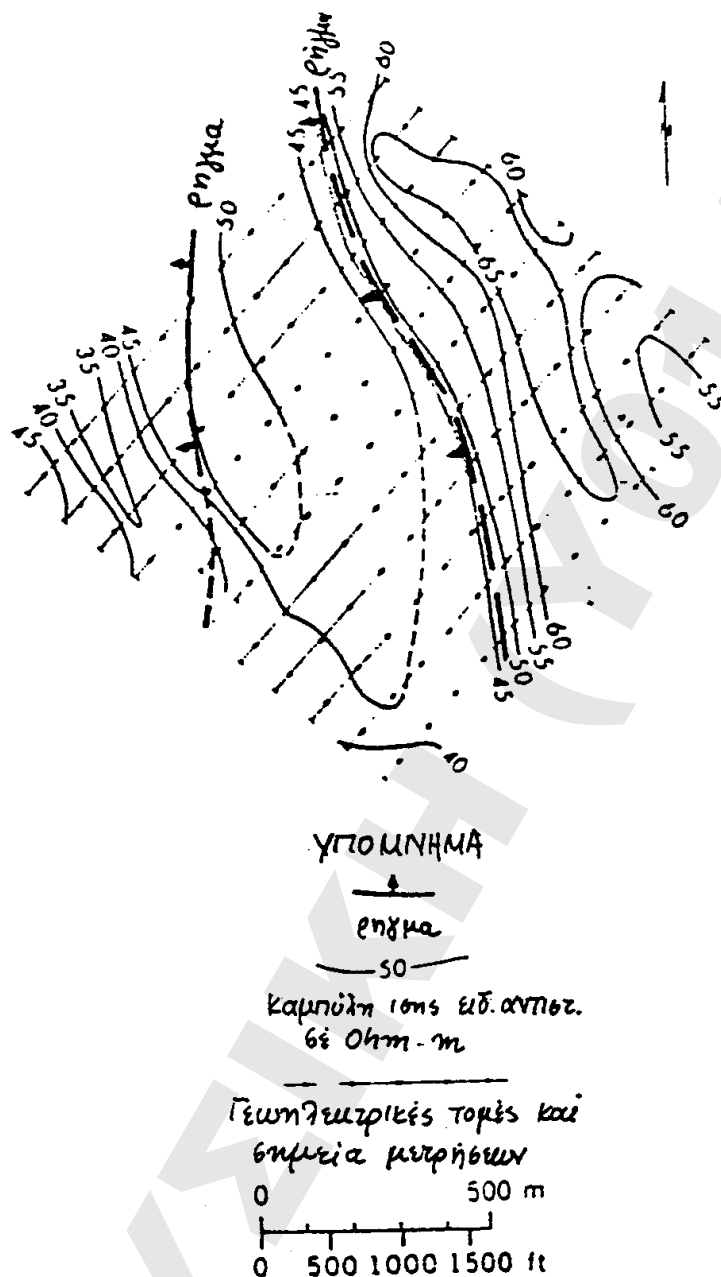
Ο χάρτης φαινόμενης ειδικής αντίστασης της εικόνας 6-25 κατασκευάστηκε για να σκιαγραφηθούν τα ίχνη των ρηγμάτων της περιοχής έρευνας. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόστηκε η τεχνική της οριζόντιας χαρτογράφησης κατά Schlumberger ($AB=4000\text{ m}$).

Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης, γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις για την σκιαγράφηση γεωθερμικών περιοχών.

Περιοχές με μικρή ειδική αντίσταση ($< 5\text{ Ohm.m}$) έχουν ερμηνευθεί ως πιο θερμές και ικανές για παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας (περιοχή Wairakei Geyser). Μία ερευνητική γεώτρηση που έγινε στην παραπάνω περιοχή έδειξε μία θερμοκρασία 220°C για ένα βάθος 256 m .

6.3.9.3 Χαρτογράφηση ασυνεχειών γλυκού-αλμυρού νερού

Αρκετές περιπτώσεις επιτυχούς εφαρμογής των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Η τεχνική των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων κατά Schlumberger έχει κυρίως χρησιμοποιηθεί. Φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις μέχρι 10 Ohm.m έχουν ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τιμές ειδικής αντίστασης του γλυκού νερού. Ειδικές αντιστάσεις μικρότερες από 10 Ohm.m αντιπροσωπεύουν τιμές ειδικής αντίστασης αλμυρού νερού.



Εικόνα 6-25. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε γεωθερμική περιοχή με τη διάταξη Schlumberger οριζόντιας χαρτογράφησης (AB=4000 m).

6.3.9.4 Χαρτογράφηση της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα

Αντίθετα από τη χαρτογράφηση της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού, ο υπολογισμός του βάθους της στάθμης του νερού είναι γενικά ένα πολύ πιο δύσκολο πρόβλημα. Οι Deppermann και Homilius (1965) ερεύνησαν τις γεωηλεκτρικές συνθήκες όπου μπορεί να ανιχνευθεί η στάθμη του νερού με βάση τις γεωηλεκτρικές καμπύλες. Οπουδήποτε η στάθμη του νερού υπέρκειται ή υπόκειται αρκετών στρωμάτων διαφορετικών ειδικών αντιστάσεων, η ανίχνευσή της στάθμης στη γεωηλεκτρική καμπύλη, είναι αδύνατη. Σε πολύ ευνοϊκές συνθήκες μπορεί η στάθμη του νερού να ανιχνευθεί από τη γεωηλεκτρική καμπύλη ως αγωγίμο στρώμα.

6.3.9.5 Χαρτογράφηση αργιλικών στρωμάτων

Η παρουσία αργιλικού στρώματος υποδηλώνεται από το μικρή ειδικής αντίστασης στρώμα που προκύπτει από την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων. Έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία τιμές ειδικής αντίστασης $< 1 \text{ Ohm.m}$ για αργιλικό υλικό. Γεωηλεκτρικό στρώμα μικρής ειδικής αντίστασης ($< 1 \text{ Ohm.m}$) και μεγάλου πάχους, μπορεί να θεωρηθεί ως υπόβαθρο και να χαρτογραφηθεί.

6.4 Η μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (SP)

6.4.1 Εισαγωγή

Φυσικά ρεύματα υπάρχουν πάντοτε στη γη και τα οποία συνδέονται με αυθόρμητα (χωρίς την παροχή ενέργειας) δυναμικά που μπορούν να μετρηθούν. Τα ρεύματα αυτά μπορεί να είναι και τεχνητά; σε γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις π.χ., το ρεύμα ρέει προς μία κατεύθυνση, αλλά μπορεί να αντιστραφεί σε ένα ή δύο δευτερόλεπτα.

Οι μετρήσεις SP κάποτε είχαν μεγάλη χρησιμότητα, ιδιαίτερα στην έρευνα κοιτασματολογικών στόχων, λόγω του χαμηλού κόστους και της απλότητας της μεθόδου. Η μέθοδος στη συνέχεια άρχισε να αμφισβητείται λόγω κυρίως του γεγονότος της αδυναμίας εμφάνισης ανωμαλιών SP πάνω από μεταλλοφόρα σώματα εμπορικής σημασίας. Επί πλέον, υπήρξαν περιπτώσεις όπου σώματα, που κατ' εξοχήν παράγουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού, δεν είχαν εντοπιστεί με τη μέθοδο αυτή. Μια συστηματική μελέτη που έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια από τον Σκιάνη κ.α., έχει δείξει ότι οι ηλεκτρικές ειδικές αντιστάσεις των μεταλλοφόρων σωμάτων και περιβαλλόντων πετρωμάτων έχουν σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση και εκδήλωση των ανωμαλιών SP. Η μέθοδος SP έχει επίσης χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην γεωθερμική έρευνα. Ρηξιγενείς ζώνες με κυκλοφορία θερμών υγρών δίδουν σημαντικές ανωμαλίες SP.

6.4.2 Προέλευση του Φυσικού Δυναμικού

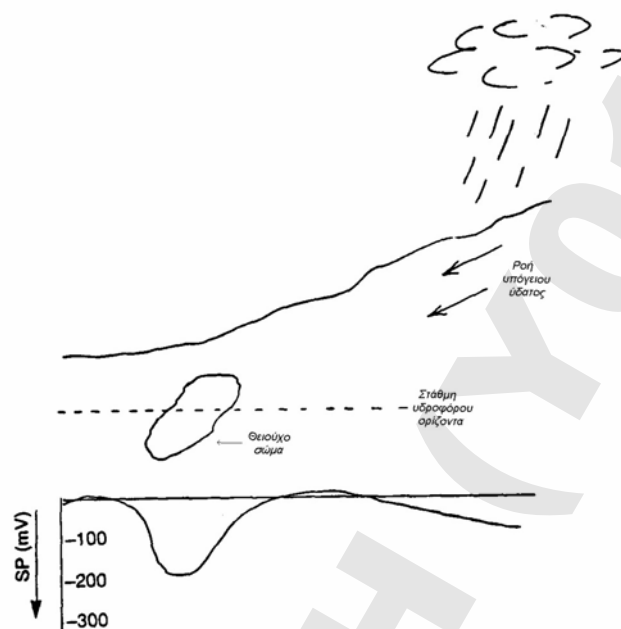
Οι τιμές του φυσικού δυναμικού ποικίλλουν από μερικά mV έως V πάνω από θειούχα κοιτάσματα που παράγουν αρνητικές ανωμαλίες. Το αγώγιμο σώμα πρέπει να εκτείνεται από τη ζώνη οξειδωσης κοντά στην επιφάνεια μέχρι το αναγωγικό περιβάλλον κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, παρέχοντας έτσι μια 'ζώνη' χαμηλής αντίστασης σε οξειδο-αναγωγικά ρεύματα (εικ. 6-26).

Μικρά δυναμικά, που σπάνια υπερβαίνουν τα 100 mV και συνήθως πολύ λιγότερα, συνοδεύουν την ροή του υπόγειου νερού. Το πρόσημο της επίδρασης εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, τις κινητικότητες και τις χημικές ιδιότητες των ιόντων των πορικών υγρών, αλλά κύρια από την περιοχή προς την οποία το υπόγειο υγρό ρέει. Το δυναμικό γίνεται πιο ηλεκτρο-θετικό προς την περιοχή που ρέει παρά στην πηγή του. Αυτά τα "τοπογραφικά" δυναμικά είναι πολλές φορές χρήσιμα στην υδρογεωλογία, αλλά θεωρούνται ως "θόρυβος" στις διασκοπήσεις SP στη μεταλλευτική έρευνα. Ιδιαίτερα πρέπει να αποφεύγονται μετρήσεις SP τουλάχιστον για μία εβδομάδα μετά από δυνατή βροχή.

Αν και οι κινήσεις θερμού ατμού ή ζεστού νερού μπορούν επίσης να εξηγήσουν τις περισσότερες ανωμαλίες SP που συνδέονται με γεωθερμικά συστήματα, εν τούτοις μικρά δυναμικά ($< 10 \text{ mV}$), τα οποία μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά παράγονται απ' ευθείας από διαφορές θερμοκρασίας. Οι γεωθερμικές ανωμαλίες SP επειδή τείνουν να γίνουν ευρείες (ίσως και αρκετών χιλιομέτρων) και έχουν πλάτη μικρότερα των 100 mV, απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Μικρά εναλλασσόμενα ρεύματα επάγονται από μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου καθώς και από ηλεκτρικές εκκενώσεις που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα. Μόνο οι μακράς

περιόδου συνιστώσες των διαφόρων πηγών δυναμικού ενδιαφέρουν, που σπάνια ανέρχονται σε 5 mV, ανιχνεύονται δε από d.c. βολτόμετρα που χρησιμοποιούνται σε διασκοπήσεις SP. Εάν τέτοια δυναμικά είναι σημαντικά, που συνήθως συμβαίνει, πρέπει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου να γίνονται επαναληπτικές μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, για να εφαρμοσθούν οι απαραίτητες διορθώσεις.

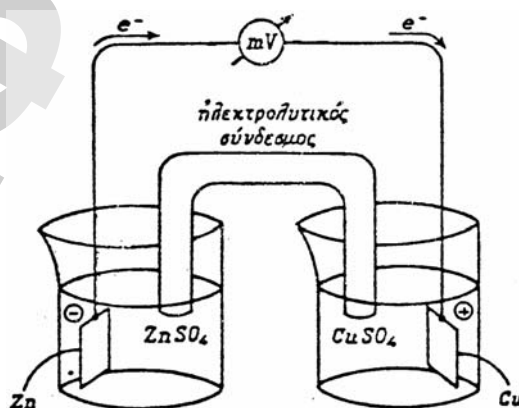


Εικόνα 6-26. Σχηματική παράσταση δημιουργίας SP. Το θιεύχο σώμα ευρισκόμενο μερικώς κάτω από το υδροφόρο ορίζοντα βοηθά στη δημιουργία οξειδο-αναγωγικών αντιδράσεων και τη ροή ρεύματος μέσα από αυτό, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μια αρνητική ανωμαλία στην επιφάνεια. Η ροή του βρόχινου νερού παράγει ένα προσωρινό SP, το οποίο γίνεται ηλεκτραρνητικότερο ανάντη του λόφου.

6.4.3 Μηχανισμός παραγωγής Φυσικού Δυναμικού πάνω σε μεταλλοφορία – Βασικές αρχές

6.4.3.1 Γαλβανικό στοιχείο

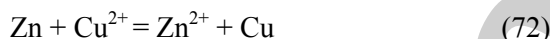
Αν η μεταφορά ηλεκτρονίων σε μια αυθόρμητη (δηλαδή χωρίς προσφορά ενέργειας απ' έξω) αντίδραση οξειδοαναγωγής δεν γίνεται απευθείας από τον αναγωγικό προς τον οξειδωτικό παράγοντα, αλλά μέσω ηλεκτρικού αγωγού, παράγεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Στην εικόνα 6-27 απεικονίζεται πειραματική διάταξη, με την οποία μπορεί να



Εικόνα 6-27. Σχηματική παράσταση γαλβανικού στοιχείου (από Κατάκη, 1972).

παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα από χημική αντίδραση. Πρόκειται για δύο δοχεία με εν γένει διάφορα ηλεκτρολυτικά υγρά, σε κάθε ένα από τα οποία βρίσκεται εμβαπτισμένο ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο. Τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με καλώδιο (αγωγό ηλεκτρονικής αγωγιμότητας) και τα δύο ηλεκτρολυτικά υγρά με κάποιον ηλεκτρολυτικό σύνδεσμο (δηλαδή σωλήνα που περιέχει ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα, συνήθως NH_4NO_3 ή KCl). Η διάταξη της εικόνας 6-27 είναι ένα γαλβανικό στοιχείο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε ένα ηλεκτρόδιο Zn μέσα σε διάλυμα Zn^{++} και ένα ηλεκτρόδιο Cu μέσα σε διάλυμα Cu^{++} . Οπότε συμβαίνει η παρακάτω αντίδραση οξειδοαναγωγής:



Ως αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης ρέουν ηλεκτρόνια από το ηλεκτρόδιο Zn προς το Cu . Αυτό εξηγείται, αν την παραπάνω αντίδραση την αναλύσουμε σε δύο ξεχωριστές αντιδράσεις, οι οποίες τελούνται στα δύο συστήματα ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη αντίστοιχα, τα οποία αποτελούν δύο ημιστοιχεία.

Έτσι, στο σύστημα (ημιστοιχείο) Zn , διαλύματος Zn^{++} έχουμε:



Ενώ στο σύστημα (ημιστοιχείο) Cu , διαλύματος Cu^{++} έχουμε:



Δηλαδή το άτομο Zn χάνει δύο ηλεκτρόνια, μετατρέπεται σε ιόν Zn^{++} , και τα δύο ηλεκτρόνια οδεύουν μέσω του καλωδίου στο σύστημα Cu - διάλυμα Cu^{++} , όπου δεσμεύονται από ένα ιόν Cu^{++} για να μετατραπεί το τελευταίο σε άτομο Cu .

Καθώς παράγονται ιόντα Zn^{2+} , στο βαθμό που ηλεκτρόνια φεύγουν από το ηλεκτρόδιο Zn , τείνει να παραχθεί ένα πλεονάζον θετικό φορτίο στο σύστημα (ημιστοιχείο) Zn - διάλυμα Zn^{++} . Ομοίως, με την άφιξη των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο Cu και την αντίδρασή τους με τα ιόντα Cu^{++} , τείνει να παραχθεί ένα πλεονάζον αρνητικό φορτίο στο σύστημα (ημιστοιχείο) Cu - διάλυμα Cu^{++} . Εδώ φαίνεται ο ρόλος του ηλεκτρολυτικού συνδέσμου, ο οποίος αποτρέπει τη συσσώρευση πλεονάζοντος φορτίου στο οποιοδήποτε σύστημα, επιτρέποντας στα αρνητικά ιόντα να φύγουν από το σύστημα Cu - διάλυμα Cu^{++} , να διαχυθούν μέσω του συνδέσμου και να φτάσουν στο σύστημα Zn - διάλυμα Zn^{++} . Συγχρόνως, θετικά ιόντα διαχέονται από το σύστημα Zn - διάλυμα Zn^{++} στο σύστημα Cu - διάλυμα Cu^{++} .

Το γαλβανικό στοιχείο λοιπόν λειτουργεί ως ένα κλειστό κύκλωμα ηλεκτρικού ρεύματος, όπου πηγή ρεύματος είναι οι αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής που γίνονται στα δύο συστήματα ηλεκτροδίου - ηλεκτρολύτη, ενώ η αγωγίμη σύνδεση είναι τόσο ηλεκτρονικής φύσης (το καλώδιο απ' όπου διέρχονται τα ηλεκτρόνια), όσο και ιοντικής (ο ηλεκτρολυτικός σύνδεσμος απ' όπου διέρχονται θετικά και αρνητικά ιόντα).

Στη διάταξη της εικόνας 6-27 έχουμε δύο διαφορετικά μεταλλικά ηλεκτρόδια, μέσα σε ιοντικά διαλύματα του αντίστοιχου μετάλλου. Όμως τα ιοντικά διαλύματα μπορούν να περιέχουν και άλλα άτομα ή ιόντα, οπότε γίνονται κι άλλες αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής, οπότε γενικά διαφοροποιείται η ένταση του παραγόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Μπορούμε επίσης να έχουμε και δύο όμοια ηλεκτρόδια σε διαφορετικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα και να εκδηλωθεί επίσης γαλβανικό φαινόμενο (ροή ρεύματος), ή ακόμα να έχουμε δύο όμοια ηλεκτρόδια σε δύο ιοντικά διαλύματα του ίδιου μετάλλου, αλλά σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Στην τελευταία αυτή περίπτωση πρόκειται για γαλβανικό

στοιχείο συγκέντρωσης (concentration cell) και έχουμε και εδώ ροή ρεύματος. Αλλά και μεταξύ δύο ομοίων ηλεκτροδίων μέσα σε δύο ίδια διαλύματα διαφορετικής θερμοκρασίας, μπορεί επίσης να κυκλοφορήσει ρεύμα (Σκουλικίδης 1978).

6.4.3.2 Δυναμικό οξειδοαναγωγής-Εξισώσεις Nernst

Η κυκλοφορία ρεύματος στο γαλβανικό στοιχείο οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο συστημάτων ηλεκτροδίου - ηλεκτρολύτη, ως συνέπεια των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που τελούνται και των πλεοναζόντων φορτίων που τείνουν να παραχθούν. Αυτή η διαφορά δυναμικού ΔΕ είναι το δυναμικό γαλβανικού στοιχείου (cell potential). Και το δυναμικό αυτό είναι ίσο με τη διαφορά δυναμικού οξειδοαναγωγής (ΔΕh) μεταξύ των δύο ημιστοιχείων, γιατί το ΔΕ παράγεται από αντιδράσεις οξείδωσης-αναγωγής. Πράγματι, κατά την επαφή μεταλλικού ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη στα δύο ημιστοιχεία που απαρτίζουν το γαλβανικό στοιχείο, εκχωρούνται θετικά ιόντα από το ηλεκτρόδιο προς το ηλεκτρολυτικό διάλυμα στο ένα ημιστοιχείο και η αντίθετη διαδικασία συμβαίνει στο άλλο, οπότε λόγω της κατανομής φορτίου που προκύπτει στο κάθε ημιστοιχείο παράγεται και το αντίστοιχο ηλεκτρικό δυναμικό, που είναι το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh, redox potential) ή δυναμικό αναγωγής (reduction potential). Ο Αλεξόπουλος (1973) χρησιμοποιεί τον όρο ηλεκτρολυτικό δυναμικό. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και ο όρος δυναμικό οξείδωσης (Sato-Mooney, 1960). Η διαφορά στο δυναμικό οξειδοαναγωγής Eh μεταξύ των δύο ημιστοιχείων δίνει τη διαφορά δυναμικού οξειδοαναγωγής ΔΕh, που είναι ίση με το δυναμικό του μετρούμενου γαλβανικού στοιχείου. Το Eh του κάθε ημιστοιχείου μετριέται, συμβατικά, σε σχέση με το κανονικό ηλεκτρόδιο υδρογόνου. **Σε ένα γαλβανικό στοιχείο έχουμε ροή ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο ημιστοιχείο με το χαμηλότερο Eh, προς αυτό που βρίσκεται στο υψηλότερο Eh.** Κατά μήκος του ηλεκτρολυτικού συνδέσμου εκδηλώνεται ροή θετικών ιόντων κατά την ίδια φορά (δηλ. από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο Eh) και ροή αρνητικών ιόντων κατά την αντίθετη φορά.

Το Δυναμικό ΔΕ (δηλαδή το ΔΕh) που αναπτύσσεται σε ένα γαλβανικό στοιχείο, στο οποίο γίνεται χημική αντίδραση της μορφής:



δίνεται από την παρακάτω σχέση (εξίσωση NERNST):

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{0,059}{n} \log \frac{[C]^c * [D]^d}{[A]^a * [B]^b} \quad (76)$$

Το ΔΕ⁰ είναι το κανονικό δυναμικό του στοιχείου, που λαμβάνεται όταν οι ενεργότητες των χημικών ουσιών που συμμετέχουν στην αντίδραση είναι ίσες με τη μονάδα, η θερμοκρασία είναι 25°C και η πίεση των αερίων 1 atm.

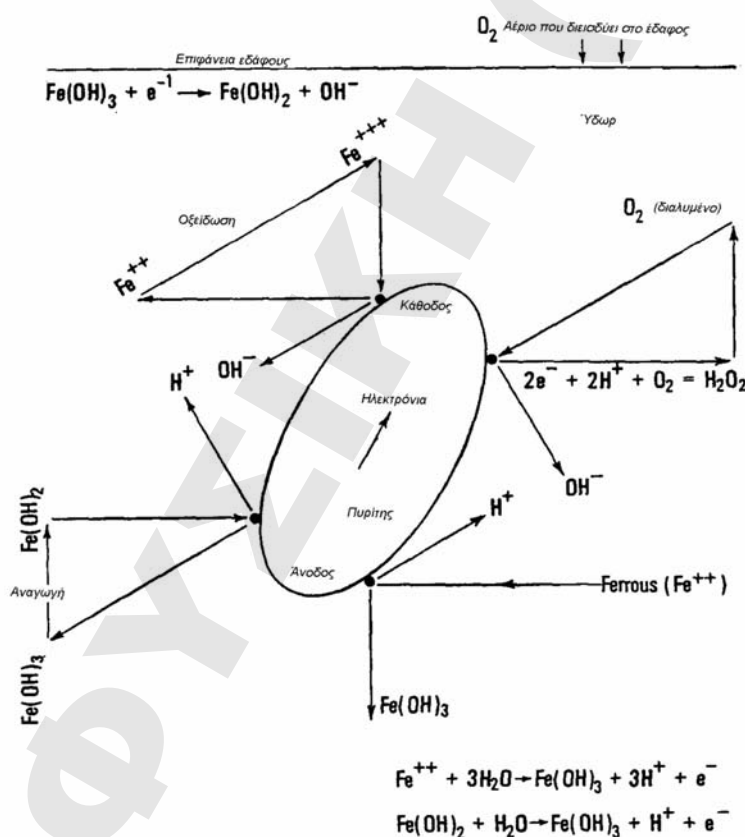
Το *n* είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται κατά τη χημική αντίδραση, όπως αυτή περιγράφεται από τη σχέση 75. Ο παράγοντας 0,059 είναι κοινός για όλα τα γαλβανικά στοιχεία που λειτουργούν σε θερμοκρασία 25°C. Σε άλλες θερμοκρασίες ο συντελεστής αυτός έχει διαφορετικές τιμές.

Η εξίσωση Nernst, όπως αυτή δίνεται από τη σχέση 76, καθώς και διάφορες παραλλαγμένες της μορφές, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού του γαλβανικού στοιχείου, καθώς και για τον προσδιορισμό της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του πάνω και κάτω άκρου του μεταλλοφόρου σώματος, στο βαθμό που θεωρούμε πως το σύστημα μεταλλοφόρο σώμα-περιβάλλον μέσο λειτουργεί σαν γαλβανικό στοιχείο.

6.4.4 Κύριες θεωρίες για το μηχανισμό παραγωγής φυσικού δυναμικού πάνω από μεταλλοφόρο σώμα

Το πρόβλημα της διερεύνησης του μηχανισμού παραγωγής φυσικού δυναμικού πάνω από μεταλλοφορία παραμένει ανοιχτό. Οι περισσότεροι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με αυτό το ζήτημα υποστηρίζουν ότι ως αποτέλεσμα μιας σειράς ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συντελούνται γύρω από το πάνω και το κάτω μέρος του μεταλλοφόρου σώματος, δημιουργείται ένα πλεόνασμα αρνητικού φορτίου στο ηλεκτρολυτικό μέσο που περιβάλλει το πάνω μέρος του σώματος και θετικού φορτίου στο κάτω μέρος (εικ. 6-28).

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό δίπολο (Γεωμπαταρία) και παράγεται ένα ηλεκτρικό πεδίο εξαιτίας του οποίου εκδηλώνεται ροή ιόντων στο περιβάλλον μέσο και ροή ηλεκτρονίων μέσα στο μεταλλοφόρο σώμα. Το πεδίο έξω από τη μάζα του σώματος περιγράφεται με βάση το νόμο των αντιστρόφων τετραγώνων. Πάνω σ' αυτό το βασικό μοντέλο στηρίζονται όλες οι εργασίες για την ποσοτική ερμηνεία ανωμαλιών φυσικού δυναμικού πάνω από μεταλλοφορία. Θεμελιώδη ρόλο στη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος παίζει η προσφορά οξυγόνου από τον αέρα, με την οποία ευνοούνται οι σχετικές ηλεκτροχημικές (οξειδοαναγωγικές) αντιδράσεις.

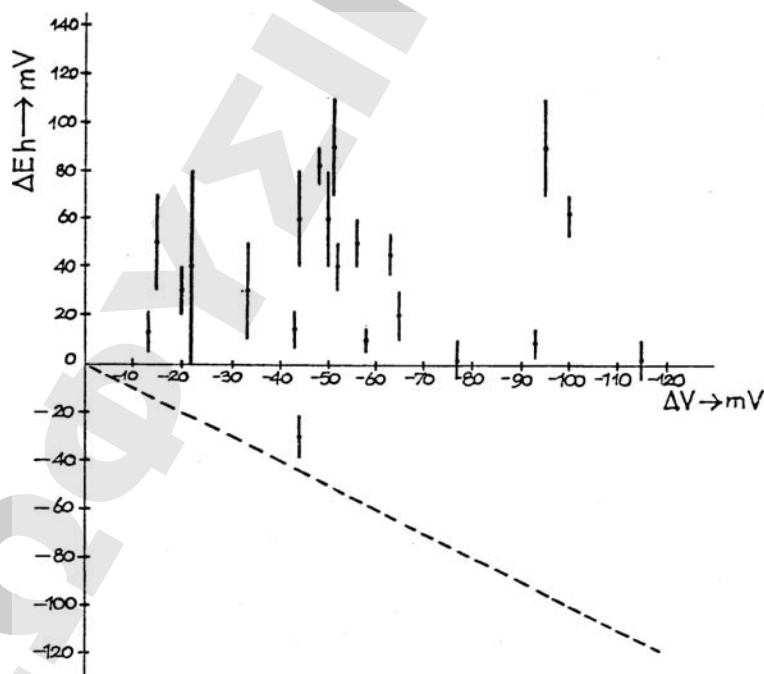


Εικόνα 6-28. Ένας λεπτομερής μηχανισμός παραγωγής φυσικού δυναμικού με βάση το μοντέλο Sato-Mooney, 1960.

Μοντέλο Sato-Mooney. Οι πρώτοι που επεξεργάστηκαν συστηματικά αυτή την αντίληψη και πρότειναν έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό διαδικασίας σχηματισμού του διπόλου ήταν οι Sato-Mooney (1960), σύμφωνα με τους οποίους το μεταλλοφόρο σώμα με το περιβάλλον ηλεκτρολυτικό μέσο συνιστά ένα γαλβανικό στοιχείο, το οποίο χωρίζεται σε δύο ημιστοιχεία (δηλαδή σε δύο συστήματα ηλεκτροδίου-ηλεκτρολυτικού μέσου στο πάνω και κάτω μέρος της μεταλλοφορίας, αντίστοιχα). Στο πάνω μέρος, λόγω της παρουσίας οξυγόνου που παρέχεται από την ατμόσφαιρα, το **Eh** του ημιστοιχείου είναι υψηλό, οπότε στο

ηλεκτρολυτικό μέσο γίνονται αντιδράσεις αναγωγής (του οξυγόνου και διαλυμένων μεταλλικών ιόντων, κυρίως τρισθενούς σιδήρου) με αποτέλεσμα να αποκτά ο ηλεκτρολύτης ένα αρνητικό φορτίο. Στο κάτω μέρος έχουμε έλλειψη οξυγόνου και **το E_h του ημιστοιχείου είναι χαμηλό**. Εδώ γίνονται αντιδράσεις οξειδωσης του δισθενούς σιδήρου και της όξινης θειούχου ρίζας, που έχουν διαλυθεί μέσα στον ηλεκτρολύτη, οπότε ο ηλεκτρολύτης αποκτά θετικό φορτίο και προσφέρει ηλεκτρόνια στο ηλεκτρόδιο (κάτω μέρος του μεταλλοφόρου σώματος). Τα ηλεκτρόνια οδεύουν από το κάτω μέρος με χαμηλό E_h προς το πάνω μέρος της μεταλλοφορίας με το υψηλό E_h , μέσω του μεταλλοφόρου σώματος που λειτουργεί σαν μεταλλικός αγωγός διέλευσης ηλεκτρονίων (ηλεκτρονική αγωγιμότητα). Όταν τα ηλεκτρόνια φτάνουν στο πάνω ημιστοιχείο, προσλαμβάνονται από τις διαλυμένες στον περιβάλλοντα ηλεκτρολύτη ουσίες, μέσω των αντιδράσεων αναγωγής που γίνονται εκεί. Στο μέσο που περιβάλλει το μεταλλοφόρο σώμα έχουμε ροή αρνητικών ιόντων από το πάνω προς το κάτω μέρος της μεταλλοφορίας και ροή θετικών ιόντων προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, σχηματίζεται μια γεωμπαταρία με τον αρνητικό πόλο στο πάνω μέρος της μεταλλοφορίας και το θετικό πόλο στο κάτω μέρος. Καθ' όλη αυτή τη διαδικασία, το μεταλλοφόρο σώμα παραμένει χημικά αδρανές, δηλαδή δεν συμμετέχει στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Μοντέλο Corry. Ο Corry (1985) δεν δέχεται ότι σχηματίζεται ηλεκτρικό δίπολο, ούτε ότι δημιουργείται ροή ρεύματος μεταξύ θειούχου μεταλλεύματος και περιβάλλοντος πετρώματος. Υποστηρίζει ότι αν τεθεί ένα ηλεκτρόδιο στη μεταλλοφόρο ζώνη και ένα άλλο έξω από αυτήν και συνδεθούν μεταξύ τους με καλώδιο και μιλιβολτόμετρο, τότε θα σημειωθεί μια διαφορά δυναμικού που θα οφείλεται στις αυθόρμητες (δηλαδή χωρίς προσφορά ενέργειας απ' έξω) ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που θα γίνουν στα δύο συστήματα ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να παραχθεί μια διαφορά δυναμικού οξειδοαναγωγής ΔE_h μεταξύ των δύο σταθμών, το μέτρο της οποίας καθορίζει την παρατηρούμενη στο μιλιβολτόμετρο ένδειξη ΔV . Αν δηλαδή δεν υπάρχουν άλλες πηγές παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, τότε, $\Delta E_h = \Delta V$ και γενικά η μετρούμενη τιμή ΔV καθορίζεται κυρίως από το ΔE_h .



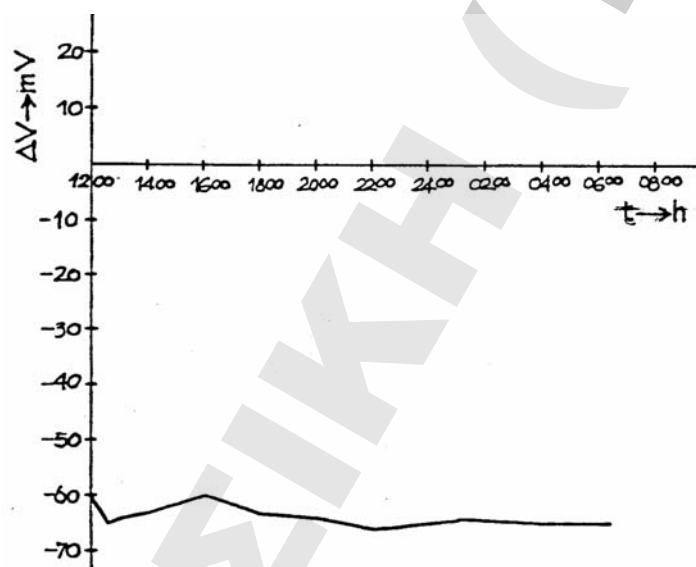
Εικόνα 6-29. Απεικόνιση των τιμών (ΔV , ΔE_h) σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Η διακεκομμένη γραμμή είναι η ευθεία $\Delta V = \Delta E_h$.

Συστηματικές μετρήσεις που έγιναν (Skianis & Papadopoulos, 1993) για τον *in situ* προσδιορισμό του Eh του άμεσου περιβάλλοντος του ηλεκτροδίου κάθε ζεύγους ηλεκτροδίων (εντός και εκτός μεταλλοφορίας), έδειξαν ότι οι προκύπτουσες διαφορές δυναμικού ΔEh δεν ήταν ίσες με τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές ΔV (εικ. 6-29).

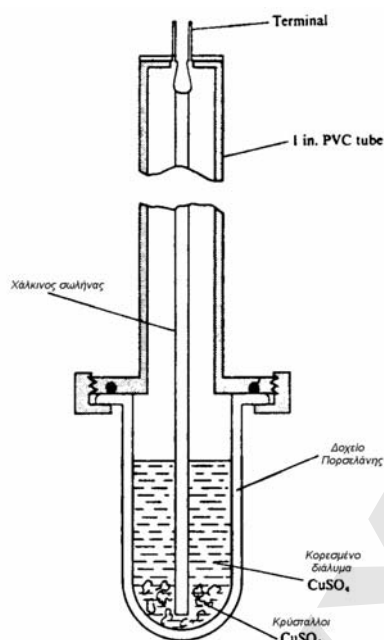
Ο Corry δέχεται επίσης τη δημιουργία γαλβανικού στοιχείου και μάλιστα ότι έχει καταγράψει την πτωτική τάση του με το χρόνο. Νεώτερες όμως μετρήσεις (Skianis & Papadopoulos, 1993) που διεξήχθησαν με το ένα ηλεκτρόδιο εκτός μεταλλοφορίας και το άλλο εντός τρανσέρας (τομής), έδειξαν ότι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού παρέμεινε σταθερή για περισσότερες των 24 ωρών και σε διαφορετικές θέσεις (εικ. 6-30).

6.4.5 Όργανα - Μετρήσεις υπαίθρου

Τα βολτόμετρα που χρησιμοποιούνται σε SP εργασίες πρέπει να παρέχουν ακρίβεια ανάγνωσης 1 mV και να έχουν πολύ μεγάλη εσωτερική αντίσταση, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά ρεύματα που λαμβάνονται από το έδαφος να είναι αμελητέα. Ηλεκτρόδια Cu-Cu, σε πορώδη δοχεία από πορσελάνη συνήθως χρησιμοποιούνται, τα οποία συνδέονται με μονωμένα χάλκινα καλώδια (εικ. 6-31).



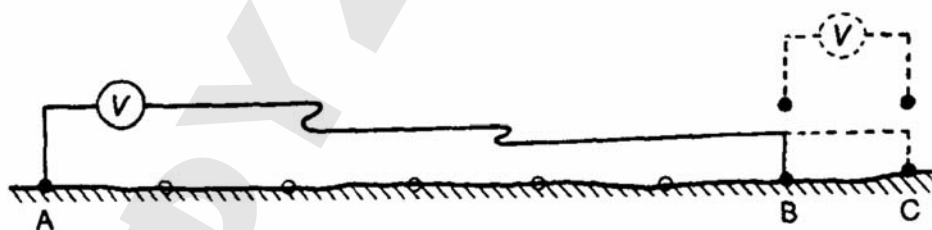
Εικόνα 6-30. Μεταβολή του ΔV (0, -35) ως προς το χρόνο. Το σημείο 0 βρίσκεται μέσα στη μεταλλοφόρο ζώνη και το -35 εκτός αυτής. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στην τρανσέρα ΤΘ/12, στις 11-18/8/1988.



Εικόνα 6-31. Τυπικό ηλεκτρόδιο SP.

Μια διασκόπηση SP πραγματοποιείται με τη διεξαγωγή μετρήσεων κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται μεταξύ τους με μια μικρή και σταθερή απόσταση, συνήθως 5 ή 10 m. Κατ' αυτό τον τρόπο μετρίεται η μέση βαθμίδα του ηλεκτρικού πεδίου. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις έλλειψης καλωδίου ή δύσκολης προσπέλασης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου, αλλά τείνει να εισαγάγει αθροιστικώς σφάλματα αφενός και να καθυστερήσει τις μετρήσεις υπαίθρου αφετέρου, εφόσον απαιτείται η μετακίνηση και των δύο ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση.

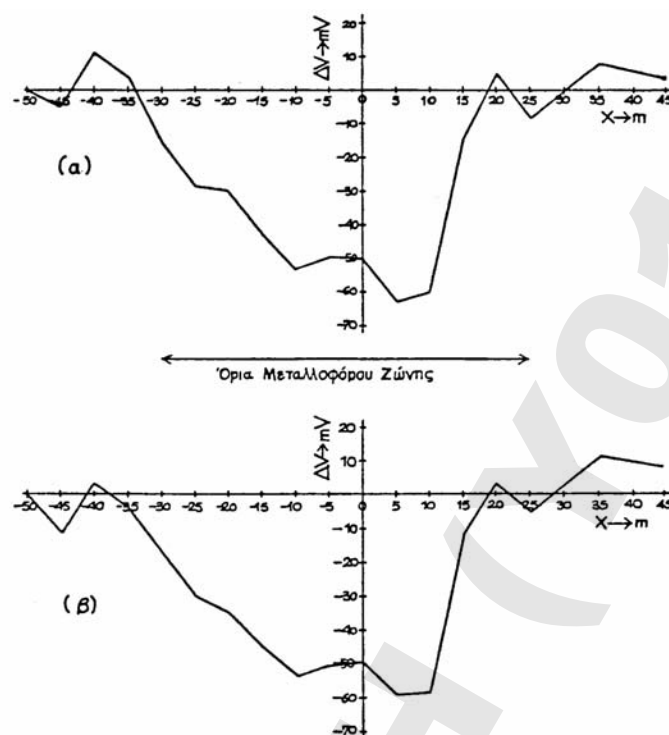
Πιο συχνά, τα δυναμικά μετριοούνται ως προς μια σταθερή βάση. Ένα ηλεκτρόδιο και το βολτόμετρο παραμένουν κοντά στη βάση και μόνο το ηλεκτρόδιο “υπαίθρου” ή ηλεκτρόδιο “φάσης” κινείται. Μια δεύτερη βάση πρέπει επίσης να δημιουργηθεί πριν το καλώδιο τελειώσει ή απομακρυνθεί σε μεγάλες αποστάσεις και δεν είναι εύκολη η επικοινωνία.



Εικόνα 6-32. Δημιουργία νέας βάσης αναφοράς SP (B). Η τιμή στη θέση B σχετικά με το A μετρίεται άμεσα αφενός και έμμεσα μέσω των μετρήσεων δυναμικού στη θέση C και από τις δύο θέσεις (A και B), αφετέρου.

Δυναμικά που μετρούνται από τις παλιές και νέες βάσεις, μπορούν να συσχετισθούν μεταξύ τους και να παρέχουν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο βάσεων με μεγάλη ακρίβεια. Στην εικόνα 6-32 φαίνεται πως μπορεί να δημιουργηθεί η δεύτερη βάση. Στο σημείο B εκεί περίπου που τελειώνει το καλώδιο, μπορεί να ληφθεί μια επιπλέον μέτρηση στο αμέσως επόμενο σημείο, C, χρησιμοποιώντας την αρχική βάση A. Μετά τη μέτρηση των διαφορών μεταξύ του A και των B και C, το ηλεκτρόδιο “φάσης” παραμένει στο C και η βάση του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο B. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των A και B υπολογίζεται

έτσι με δύο τρόπους, πρώτον με απ' ευθείας μέτρηση και δεύτερον με την αφαίρεση του δυναμικού μεταξύ B και C από το μετρούμενο δυναμικό μεταξύ A και C.



Εικόνα 6-33. (α) Τομή φυσικού δυναμικού (κάθετα στη γραμμή 146, στο σταθμό 105), στην περιοχή Θερμών, με σταθερή βάση 50. (β) Η ίδια τομή φυσικού δυναμικού, με διάταξη βαθμίδας και αναγωγή ως προς το σταθμό 50.

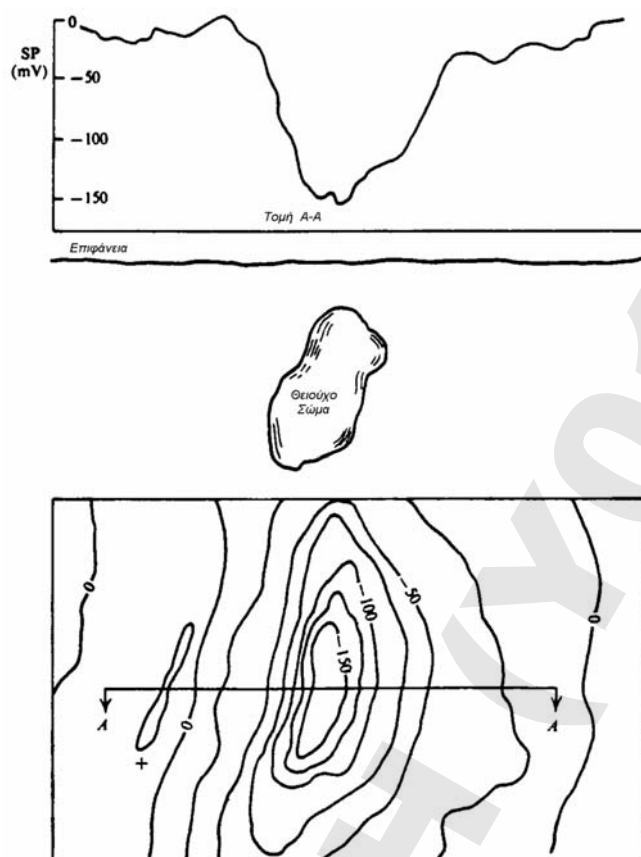
Η μέση τιμή μπορεί να προστεθεί στις τιμές που λαμβάνονται με βάση το B, για να αποκτηθούν οι τιμές σχετικά με το A. Στην εικόνα 6-33 παρουσιάζονται δεδομένα SP που έχουν ληφθεί και με τις δύο διατάξεις. Κύριο χαρακτηριστικό των καμπύλων αυτών είναι η ομοιότητα τους, πράγμα που δείχνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά ανάλογα με τη φύση των δυσκολιών που συναντώνται στις εργασίες υπαίθρου. Ένα άλλο στοιχείο που προκύπτει εδώ είναι ότι, ο Corry δεν θα ανέμενε την ίδια συμπεριφορά με τις δύο διατάξεις πάνω από μεταλλοφορία. Οι ανωμαλίες ΔE_h ή ΔV πάνω από μεταλλοφόρο σώμα με τη διάταξη της βαθμίδας, λόγω της παρουσίας παρόμοιων δυναμικών E_h στα δύο ηλεκτρόδια θα έπρεπε να ήταν περίπου μηδέν.

6.4.6 Σφάλματα

Εάν δύο μετρήσεις μεταξύ μιας βάσης και μιας δευτερεύουσας βάσης διαφέρουν περισσότερο από 1 ή 2 mV, κάποιο τυχαίο λάθος έχει επηρεάσει τις μετρήσεις και η συνέχεια της εργασίας πρέπει να σταματήσει, μέχρις ότου διευκρινιστεί το λάθος. Συνήθως μια πηγή σφάλματος προκύπτει από τη διαρροή του διαλύματος θεικού χαλκού ή το διάλυμα γίνεται ακόρεστο. Τα πορώδη δοχεία πρέπει να ελέγχονται κάθε 2-3 ώρες τοποθετώντας τα σε απόσταση λίγων εκατοστών το ένα από το άλλο· η διαφορά δυναμικού δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο των 1 ή 2 mV. Το αθροιστικό σφάλμα σε ευρείες διασκοπήσεις μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εκτελώντας τις μετρήσεις σε κλειστούς βρόχους, όπου το άθροισμα των δυναμικών πρέπει να είναι μηδέν.

6.4.7 Ερμηνεία δεδομένων SP

Το τελικό αποτέλεσμα μιας διασκοπήσης SP που περιλαμβάνει μια σειρά προφίλ είναι η χάραξη ενός χάρτη ισοδυναμικών γραμμών.



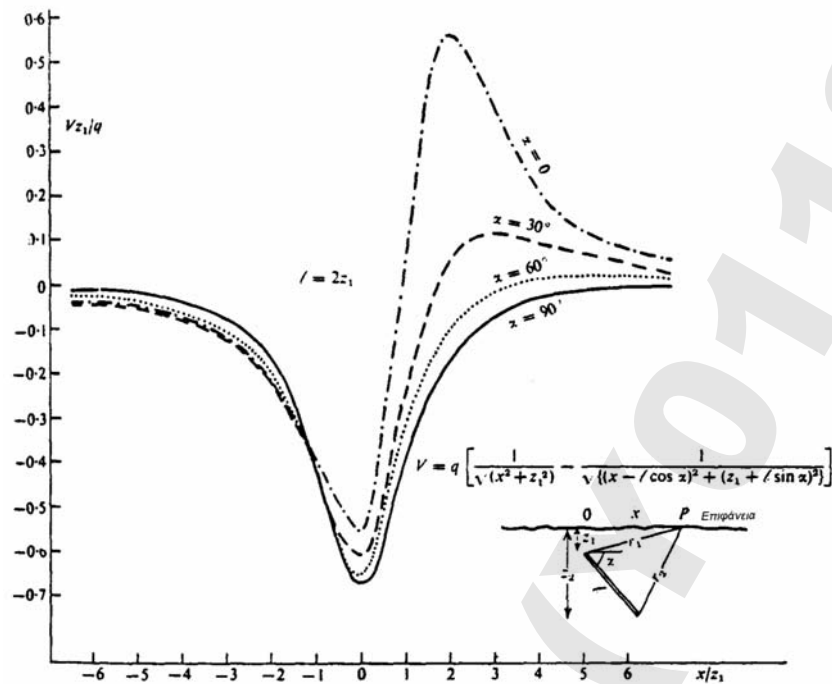
Εικόνα 6-34. Τυπικό SP προφίλ και κατανομή ισοδυναμικών γραμμών πάνω από μεταλλοφόρο θειούχο σώμα.

Ένα τυπικό προφίλ και ένας χάρτης φαίνονται στην εικόνα 6-34. Να σημειωθεί ότι το αρνητικό μέγιστο που παρατηρείται, βρίσκεται αμέσως πάνω από τη μάζα του θειούχου κοιτάσματος. Εκεί όπου η τοπογραφία είναι απότομη το κέντρο της ανωμαλίας μπορεί να μετατοπιστεί ελαφρώς.

Είναι δυνατός επίσης ο υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού γύρω από πολωμένα σώματα απλής γεωμετρικής μορφής, όπως του διπόλου, σφαίρας και ελλειψοειδούς, με απλοποιήσεις και παραδοχές σχετικά με την ανάπτυξη δυναμικών στις επιφάνειες των πηγών αυτών καθ' αυτών. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε την πολωμένη ράβδο στην εικόνα 6-35. Το δυναμικό στο σημείο P στην επιφάνεια δίδεται από τη σχέση:

$$V = q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (79)$$

όπου $\pm q$ είναι το φορτίο σε κάθε άκρο της ράβδου.



Εικόνα 6-35. Θεωρητικές καμπύλες SP πάνω από θαμμένη πολωμένη ράβδο.

Επειδή $r_1 = (x^2 + z_1^2)^{1/2}$ και $r_2 = [(x-a)^2 + z_2^2]^{1/2}$ (80)

όπου $a = l \cos \varphi$, l = μήκος ράβδου, φ = γωνία κλίσης της ράβδου, η έκφραση γίνεται:

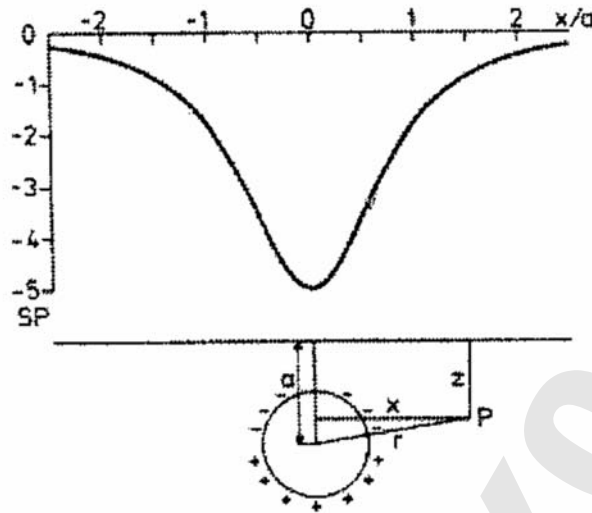
$$V = q \left[\frac{1}{(x^2 + z_1^2)^{1/2}} - \frac{1}{[(x-a)^2 + z_2^2]^{1/2}} \right] \quad (81)$$

Επειδή η διαχωριστική επιφάνεια αέρα-εδάφους έχει συντελεστή ανάκλασης τη μονάδα, η ράβδος έχει ένα ηλεκτρικό είδωλο πάνω από την επιφάνεια, το οποίο προσδίδει ένα δυναμικό διπλάσιο του αρχικού. Τυπικά προφίλ παριστάνονται στην εικόνα 6-35. Είναι εμφανές ότι η χαρακτηριστική καμπύλη SP είναι αρκετά συμμετρική εκτός εάν και η γωνία κλίσης είναι αρκετά μικρή.

Για σφαίρα κατακόρυφα πολωμένη (εικ. 6-36), που μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ηλεκτρικό δίπολο τοποθετημένο στο κέντρο της σφαίρας, το φυσικό δυναμικό U σε ένα σημείο P του εδάφους (εκτός της σφαίρας) δίδεται από τη σχέση:

$$U = C \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (82)$$

όπου r είναι η απόσταση του σημείου P από το κέντρο της σφαίρας και θ η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του διπόλου και της γραμμής που ενώνει το κέντρο με το σημείο P .



Εικόνα 6-36. Σχηματική παράσταση ανωμαλίας SP πάνω από μία κατακόρυφα πολωμένη σφαίρα.

Μπορεί ναδειχθεί ότι η σταθερά C είναι ίση με $Irb/3\pi$, όπου b είναι η ακτίνα της σφαίρας, I είναι το ρεύμα που ρέει από την θετικά φορτισμένη επιφάνεια της σφαίρας προς την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, μέσω του περιβάλλοντος μέσου, ειδ. αντίστασης ρ . Το συνολικό δυναμικό στο σημείο P , είναι το άθροισμα του δυναμικού της σφαίρας και του δυναμικού του ειδώλου της. Επειδή ο συντελεστής ανάκλασης είναι $\kappa=1$, λόγω της άπειρης ειδ. αντίστασης του αέρα, δεν ελαττώνεται το δυναμικό όταν λαμβάνεται το είδωλο της πολωμένης σφαίρας (διπόλου). Έτσι, το δυναμικό στο P δίδεται από τη σχέση :

$$U = 2C \frac{a}{r^3} \quad (83)$$

όπου, $r^2 = x^2 + a^2$, a = βάθος μέχρι το κέντρο της σφαίρας και x = η οριζόντια απόσταση του P από το κέντρο της σφαίρας.

Εύκολα μπορεί ναδειχθεί ότι για την τομή που περνά από τη σφαίρα, η απόσταση μεταξύ των σημείων στα οποία η ανωμαλία SP λαμβάνει τιμές $U_{\max}/2$, είναι:

$$w_{1/2} = 2a \left(4^{1/3} - 1 \right)^{1/2} \quad (84)$$

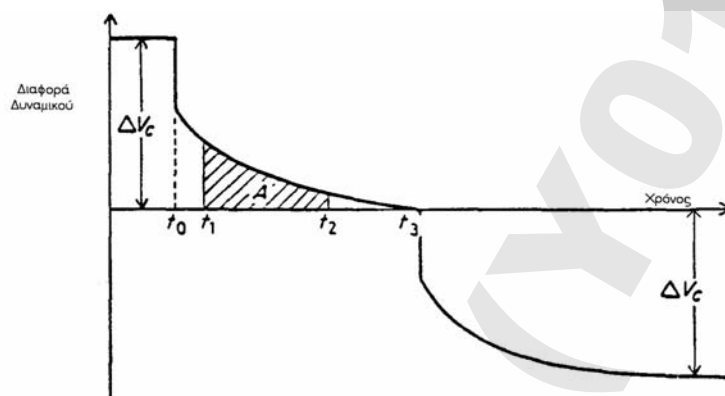
$$\text{ή} \quad a \approx 0.65 w_{1/2} \quad (85)$$

6.5 Η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης

6.5.1 Εισαγωγή

Όταν ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο έδαφος, μερικά τμήματα των πετρωμάτων πολούνται. Η διαδικασία είναι ανάλογη με εκείνη της φόρτισης ενός πυκνωτή ή της επαναφόρτισης μιας μπαταρίας και περιλαμβάνει ηλεκτροχημικές και πυκνωτικές επιδράσεις. Εάν το ρεύμα απότομα παύσει να ρέει, τότε τα πολούμενα τμήματα (cells) αποφορτίζονται μέσα σε μια χρονική περίοδο αρκετών δευτερολέπτων, παράγοντας ρεύματα, δυναμικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επαγόμενη πόλωση (IP) (εικ. 6-37). Οι διατάξεις IP είναι όμοιες με εκείνες που

χρησιμοποιούνται στις συμβατικές γεωηλεκτρικές μεθόδους. Η διάταξη βαθμίδας (για αναγνώριση) και η διάταξη dipole-dipole (για λεπτομερή εργασία) είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες διατάξεις. Τα καλώδια ρεύματος και δυναμικού πρέπει να είναι καλά διαχωρισμένα για να αποφεύγονται επαγωγικές επιδράσεις. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι συνήθως μεταλλικά, αλλά κυρίως πρέπει να χρησιμοποιούνται μη-πολούμενα ηλεκτρόδια για την ανίχνευση ολίγων mV του μη περιοδικού σήματος (transient signal). Θειούχα κοιτάσματα διάσπαρτου τύπου μπορούν να παράγουν μεγάλες πολωτικές επιδράσεις και τεχνικές IP έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και εντοπισμό βασικών μετάλλων.



Εικόνα 6-37. Το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης. Κατά την αρχική στιγμή το ρεύμα διακόπτεται και η μετρούμενη διαφορά δυναμικού, μετά από μια απότομη πτώση από μια σταθερή τιμή ΔV_c , μειώνεται βαθμιαία μέχρι το μηδέν.

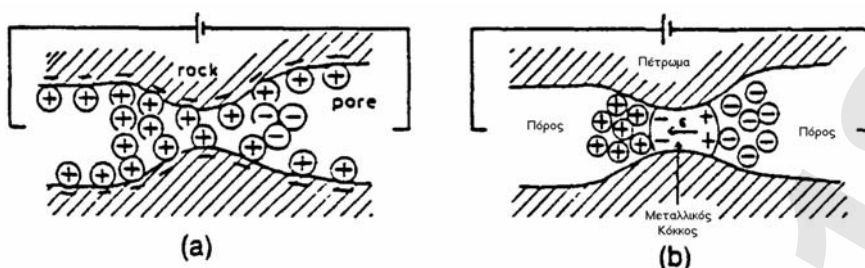
6.5.2 Βασικά στοιχεία της επαγόμενης πόλωσης

Υπάρχουν δύο κυρίως μηχανισμοί για τη δημιουργία πολωτικών επιδράσεων στα πετρώματα και δύο κυρίως τρόποι με τους οποίους οι επιδράσεις αυτές θεωρητικά παρέχουν ισοδύναμα αποτελέσματα.

6.5.2.1 Πόλωση μεμβράνης

Άργιλοι και κάποια άλλα φυλλώδη ή ινώδη ορυκτά παρουσιάζουν αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες, οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο πόλωσης μεμβράνης σε πετρώματα με μικρά πορικά διάκενα. Θετικά φορτισμένα ιόντα που βρίσκονται στο πορικό νερό τέτοιων πετρωμάτων συγκεντρώνονται κοντά στα τοιχώματα των διακένων. Ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται με ηλεκτροδιάλυση και επιτυγχάνεται με τη λεπτότητα των πόρων και των τριχοειδών μορφών. Οι άργιλοι δρουν ως πολύ λεπτό φίλτρο, οι διάμετροι των πόρων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάμετρο των ιόντων, έτσι ώστε καθώς τα αρνητικά ιόντα κινούνται, τα οποία κατά κανόνα είναι μεγαλύτερα των θετικών ιόντων, κατακρατούνται στο φίλτρο, ενώ τα θετικά ιόντα μπορούν να περάσουν και να οδηγηθούν σε μία αρνητικώς φορτισμένη επιφάνεια (εικ. 6-38α).

Αυτά τα αρνητικά φορτία ελκύουν ένα ορισμένο αριθμό θετικών φορτίων για να παραμείνουν ηλεκτρικά ουδέτερα και έτσι προκύπτει ένα ηλεκτρικό διπλό στρώμα. Εάν ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοσθεί στην περιοχή, τότε ένα ηλεκτρικό ρεύμα αναγκάζεται να περάσει μέσα από το σώμα της αργίλου και η ισορροπία του ηλεκτρικού διπλού στρώματος διαταράσσεται και μια νέα μορφή ισορροπίας επιτυγχάνεται για μια ορισμένη χρονική περίοδο (εικ. 6-38α). Όταν το εξωτερικό πεδίο παύσει να εξασκείται τα φορτία τείνουν να επαναδιευθετηθούν στην προηγούμενη κατάσταση ισορροπίας και το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης τοιουτοτρόπως παρατηρείται.



Εικόνα 6-38. Οι μηχανισμοί παραγωγής της επαγόμενης πόλωσης α) Πόλωση μεμβράνης και β) Πόλωση ηλεκτροδίου.

6.5.2.2 Πόλωση ηλεκτροδίου

Επί πλέον των στατικών “δυναμικών επαφής” μεταξύ ενός μεταλλικού αγωγού και ενός ηλεκτρολύτου, παράγονται και άλλα δυναμικά όταν ρέουν ηλεκτρικά ρεύματα. Ανεξάρτητα από το όνομα, η πόλωση ηλεκτροδίου δεν παρατηρείται μόνο σε τεχνητά ηλεκτρόδια, αλλά οποτεδήποτε κόκκοι ηλεκτρονικά αγωγίμων ορυκτών βρίσκονται σε επαφή με υπόγειο νερό. Ο βαθμός της πόλωσης προσδιορίζεται από τις περιοχές επαφής και όχι από τη μάζα των ορυκτών που περιλαμβάνεται και οι μέθοδοι πόλωσης κυρίως εφαρμόζονται στη διερεύνηση “πορφυριτικών” ορυκτών διάσπαρτου τύπου. Συμπαγή θειούχα κοιτάσματα συνήθως παράγουν ισχυρές ανωμαλίες επειδή περιβάλλονται από μία “αλω” διάσπαρτου υλικού.

Για να καταλάβουμε το φαινόμενο είναι χρήσιμο να αναφέρουμε την αναλογία του με εκείνο του ηλεκτροχημικού ημιστοιχείου. Εάν ένα μέταλλο εμβαπτισθεί σε ένα διάλυμα ιόντων ορισμένης συγκέντρωσης και σθένους, ένας διαχωρισμός φορτίου εμφανίζεται και ένα δυναμικό αναπτύσσεται μεταξύ του μετάλλου και του διαλύματος (εικ. 6-27). Εάν εξασκηθεί ένα εξωτερικό δυναμικό εγκάρσια προς τη διαχωριστική επιφάνεια, η ιοντική ισορροπία θα διαταραχθεί προκαλώντας ένα ρεύμα να κινηθεί και η διαφορά δυναμικού εγκάρσια αυτής της επιφάνειας να αλλάξει από την αρχική της τιμή. Όταν το εξωτερικό δυναμικό παύσει τότε επανέρχεται σταδιακά το αρχικό δυναμικό.

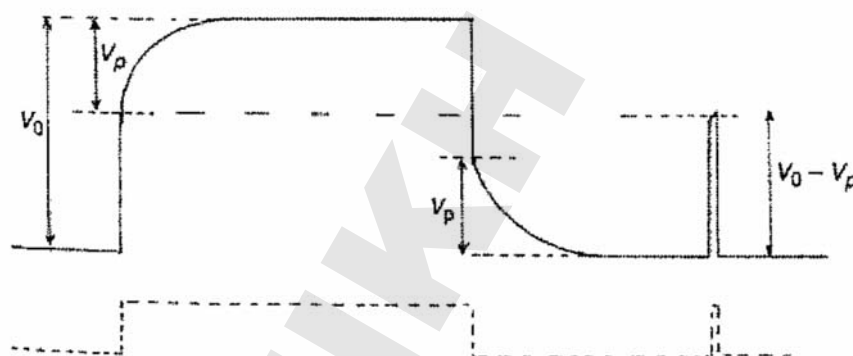
Σε γεωλογικό περιβάλλον, είναι χρήσιμο να δούμε το φαινόμενο χρησιμοποιώντας για παράδειγμα θειούχα κοιτάσματα διάσπαρτου τύπου, του πιο συνηθισμένου όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης. Μια τέτοια δομή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μεταλλικά σωματίδια που είναι διάσπαρτα στο πέτρωμα, το οποίο έχει ορισμένες ρωγμές ή πορώδες. Η αγωγιμότητα σε ένα τέτοιο μέσο θεωρείται ότι είναι ιοντική, αλλά αν υποθέσουμε ότι ένα ιόν που οδεύει μέσω των πόρων του πετρώματος εμποδίζεται από ένα μεταλλικό σωματίδιο, τότε εφόσον το μεταλλικό σωματίδιο δεν επιτρέπει τη διάδοση του ιόντος, θα αρχίσει να γίνεται συγκέντρωση των ιόντων. Μερικά από αυτά τα φορτία μπορεί να αποφορτιστούν με οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις. Όπως φαίνεται όμως στο διάγραμμα (εικ. 6-38β), ο τρόπος με τον οποίο τα φορτία συσσωρεύονται τείνει να αυξήσει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των εξωτερικών επιφανειών του σωματιδίου, γι’ αυτό το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως υπερ-δυναμικό. Τα σωματίδια επίσης μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως πολούμενα.

Όταν το εφαρμοσθέν δυναμικό παύσει, τα συσσωρευμένα ιόντα τείνουν να διαχυθούν πίσω σχετικά αργά, μέσω διαφορετικών τροχιών, έτσι ώστε το δυναμικό εγκάρσια στο σωματίδιο να τείνει προς το μηδέν σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η δομή του πετρώματος, η διαπερατότητα, η διάμετρος των πόρων, η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα των πορικών υγρών, η αγωγιμότητα των κόκκων κ.λ.π. Αν και σε ισοδύναμες περιοχές ενεργούς επιφάνειας, η πόλωση ηλεκτροδίου είναι ο ισχυρότερος μηχανισμός, εν τούτοις οι άργιοι αφθονούν στη φύση παρά τα θειούχα μεταλλεύματα και οι IP επιδράσεις οφείλονται κυρίως στην πόλωση μεμβράνης. Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει, είναι ότι οι επιδράσεις τόσο της πόλωσης ηλεκτροδίου όσο και της πόλωσης

μεμβράνης, εξαρτώνται από το φραγμό της φυσικής διέλευσης των ιόντων ενός ιοντικού αγωγού (ηλεκτρολύτη).

6.5.3 Ορισμός γεω-φόρτισης

Όταν ένα σταθερό ρεύμα ξαφνικά παύσει, το δυναμικό V_0 που παρατηρείται μεταξύ δύο γειωμένων ηλεκτροδίων ελαττώνεται απότομα μέχρι τη τιμή V_p και στη συνέχεια μειώνεται ασυμπτωτικά προς το μηδέν (εικ. 6-39). Μια όμοια επίδραση μπορεί να παρατηρηθεί όταν ρεύμα διοχετεύεται στο έδαφος. Το μετρηθέν δυναμικό ανέρχεται απότομα στην αρχή και στη συνέχεια προσεγγίζει ασυμπτωτικά την τιμή V_0 . Αν και στη θεωρία το V_0 ποτέ δεν επιτυγχάνεται, στην πράξη η διαφορά αυτή δεν είναι ανιχνεύσιμη μετά την παρέλευση μερικών δευτερολέπτων. Η γεω-φόρτιση ορίζεται θεωρητικά ως το δυναμικό πόλωσης που αναπτύσσεται εγκάρσια σε ένα μοναδιαίο κύβο, που ενεργοποιείται από τη μονάδα ρεύματος και είναι έτσι ανάλογη κατά κάποιο τρόπο με τη μαγνητική επιδεκτικότητα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6-39, η γεω-φόρτιση ορίζεται ως ο λόγος V_p προς V_0 . Αυτή η φαινόμενη γεω-φόρτιση ολόκληρης της μάζας του πετρώματος είναι ένας καθαρός αριθμός χωρίς μονάδες, αλλά για ευκολία γενικώς πολλαπλασιάζεται επί 1000 και αναφέρεται σε mV ανά V. Ο λόγος V_p/V_0 δεν μπορεί να μετρηθεί αμέσως λόγω ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων που επικρατούν στο πρώτο δέκατο του δευτερολέπτου. Έτσι, η γεω-φόρτιση στο χώρο των χρόνων ορίζεται ως η μείωση του δυναμικού εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος και η σύνδεσή της με το θεωρητικό ορισμό δεν είναι τόσο αυστηρή.



Εικόνα 6-39. Η απόκριση του εδάφους σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό τετραγωνικό παλμό και ένα ‘οξύ’ παλμό. Ο λόγος V_p προς V_0 είναι σπάνια πάνω από μερικές εκατοστιαίες μονάδες.

Όχι μόνο η χρησιμοποίηση διαφορετικών οργάνων που ορίζουν διαφορετικούς χρόνους καθυστέρησης της μέτρησης, αλλά και ο τρόπος μέτρησης του δυναμικού διαφέρει και συνήθως μετρίεται το εμβαδόν κάτω από την φθίνουσα καμπύλη του δυναμικού (χρησιμοποιώντας κύκλωμα ολοκλήρωσης), παρά η στιγμιαία τιμή του δυναμικού. Όπου χρησιμοποιείται ολοκλήρωση, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το διάστημα του χρόνου της ολοκλήρωσης και από το χρόνο καθυστέρησης και αναφέρονται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms).

6.5.4 Συχνотικές επιδράσεις της ειδικής αντίστασης

Εάν σε μια γεωηλεκτρική διασκόπηση που χρησιμοποιεί ρεύμα τετραγωνικού παλμού το πεδίο διακοπεί πριν το δυναμικό V φθάσει τη τιμή V_0 , τότε μια μικρότερη τιμή της Φ.Ε.Α θα προσδιορισθεί. Ως επίδραση της συχνότητας ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ‘υψηλής συχνότητας’ και της ‘συνεχούς-D.C.’ ειδικής αντίστασης, διαιρούμενης προς την τιμή της Ε.Α ‘υψηλής συχνότητας’. Το αποτέλεσμα αυτό πολλαπλασιάζεται επί 100 για να δώσει ένα εύκολα χρησιμοποιούμενο αριθμό, τον PFE (% Επίδραση Συχνότητας). Η θεωρητική επίδραση συχνότητας που υπολογίζεται για ένα ρεύμα που ρέει μόνο στιγμιαία και παράγει ένα δυναμικό $V_0 - V_p$, σχετίζεται με την γεω-φόρτιση με τη σχέση:

$$M = \frac{(PFE)}{100 + (PFE)} \quad (86)$$

Λόγω των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων αυτή η “στιγμιαία” Ε.Α. δεν μπορεί να μετρηθεί και πρακτικά η τιμή (PFE) εξαρτάται από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται. Για να κατασταλεί ο τελλουρικός θόρυβος και το φυσικό δυναμικό (S.P), η “D.C” μέτρηση λαμβάνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας, μεταξύ 0.05-0.2 Hz.

Στην πράξη μπορεί να βρεθεί ότι το ζεύγος χαμηλής-υψηλής συχνότητας με τιμές $f=0.05$ Hz και 10 Hz είναι πολύ μεγάλο, κυρίως διότι η χρήση μιας τέτοιας χαμηλής συχνότητας σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερος χρόνος υπαίθρου για μια απλή μέτρηση, παρά στην περίπτωση χρησιμοποίησης μικρότερης συχνότητας, π.χ. μεταξύ 0.1-0.2 Hz. Η κατάλληλη επιλογή των συχνοτήτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με σημαντικότερο το κόστος της εργασίας υπαίθρου. Έτσι, σε μερικές διασκοπήσεις που χρησιμοποιούν ζεύγος χαμηλής-υψηλής συχνότητας $f=0.05$ και $f=10$ Hz, ο χρόνος εργασίας υπαίθρου είναι 3 ή 4 φορές μεγαλύτερος από εκείνο που χρειάζεται για $f=0.3$ και 5 Hz.

6.5.5 Μεταλλικός παράγοντας

Ο παράγων (PFE) μπορεί να διαιρεθεί με την “συνεχή-D.C” Ε.Α και να πολλαπλασιασθεί επί $2\pi \times 10^5$ για να απλοποιηθεί ο υπολογισμός και να λαμβάνονται ακέραιοι αριθμοί. Το 2π προέρχεται από την υποθετική ημι-άπειρη συμμετρία και το 10^5 δίδει ακέραιους αριθμούς αντί των πολύ μικρών δεκαδικών αριθμών, π.χ. 351 αντί 0.00351. Η νέα αυτή παράμετρος ονομάζεται μεταλλικός-παράγοντας και δίδεται από τη σχέση:

$$(MF) = \frac{(PFE)}{\rho_0} * 2\pi * 10^5 = \sigma_0 (PFE) * 2\pi * 10^5 \quad (87)$$

$$\text{εάν θέσουμε} \quad (PFE) = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_\infty} \quad (88)$$

$$\text{τότε θα προκύψει ότι:} \quad (MF) = (\sigma_\infty - \sigma_0) * 2\pi * 10^5 \quad (89)$$

Από αυτή τη σχέση φαίνεται ότι ο μεταλλικός παράγοντας είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της αλλαγής της φαινόμενης αγωγιμότητας (Φ.Α) σε σχέση με την αλλαγή της συχνότητας. Εάν η αγωγιμότητα δεν αλλάζει με την συχνότητα, δηλ. εάν δεν υπάρχουν IP επιδράσεις, τότε ο μεταλλικός παράγοντας τείνει στο μηδέν, ενώ θα συμβαίνει το αντίθετο όταν παρουσιάζονται IP επιδράσεις.

6.5.6 Μετρήσεις IP στο πεδίο των χρόνων

Επειδή οι διασκοπήσεις IP στο πεδίο των χρόνων μετρούν μικρά μη περιοδικά (παλμικά) δυναμικά, τα οποία αναπτύσσονται μετά την παύση του πρωτογενούς πεδίου, απαιτούνται μεγάλα πρωτογενή δυναμικά και πρέπει οι μετρήσεις να λαμβάνονται έτσι ώστε, να ελαχιστοποιούνται οι τελλουρικές επιδράσεις και οι πολώσεις ηλεκτροδίων.

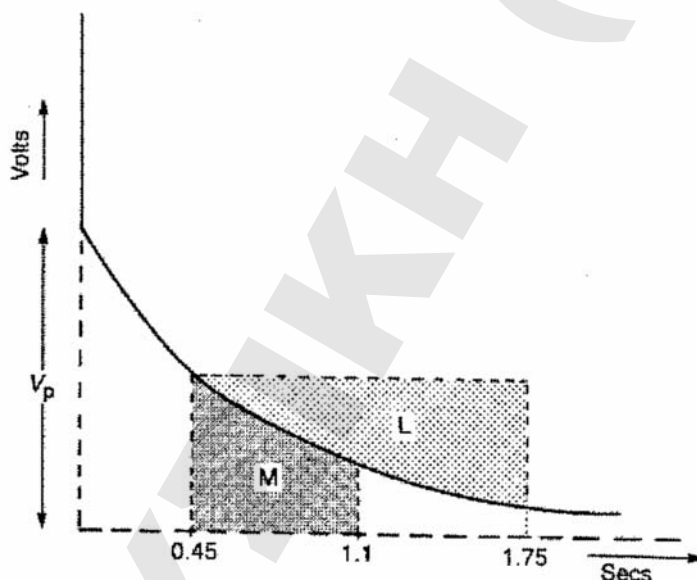
6.5.6.1 Πομποί στο πεδίο των χρόνων

Ένα πομπός αποτελείται από μια πηγή ισχύος, η οποία μπορεί να είναι μια γεννήτρια ρεύματος ή μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία που συνδέεται με ένα εξωτερικό διαμορφωτή. Το επίπεδο του δυναμικού που χρησιμοποιείται συνήθως επιλέγεται και κυμαίνεται μεταξύ 100 και 500 V. Το επίπεδο του ρεύματος το οποίο ελέγχεται αυτόματα, μπορεί να καταγραφεί εφόσον πέραν της επαγόμενης πόλωσης και οι ΦΕΑ υπολογίζονται. Η ροή του

ρεύματος αντιστρέφεται μετά από κάθε μέτρηση, για να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις των φυσικών δυναμικών, και οι κύκλοι μέτρησης μπορούν να ποικίλλουν μεταξύ 2 και 16 δευτερολέπτων. Ένα δευτερολέπτο για ενεργοποίηση και ανάγνωση δεν είναι αρκετό για αξιόπιστα αποτελέσματα, ενώ κύκλοι άνω των 8 δευτ/πτων επιμηκύνουν κατά πολύ την εργασία υπαίθρου.

6.5.6.2 Δέκτες στο πεδίο των χρόνων

Ένας δέκτης μετρά το πρωτογενές δυναμικό και ένα ή περισσότερα φθίνοντα δυναμικά ή τα ολοκληρώματα κάτω από τη φθίνουσα καμπύλη. Είναι επίσης δυνατό να καταγραφούν στον ίδιο δέκτη το SP, η γεω-φόρτιση και η ειδική αντίσταση. Οι αρχικοί δέκτες ολοκλήρωναν σε περιοχές που φαίνονται στην εικόνα 6-40. Η παράμετρος L χαρακτηρίζει τη μορφή της φθίνουσας καμπύλης και συνήθως καταγραφόταν μόνον όταν η παράμετρος M διέφερε σημαντικά. Η επίδραση του SP απαλείφεται γραφικά και το πρωτογενές δυναμικό ελάμβανε μια “κανονικοποιημένη” μορφή με τη ρύθμιση ενός ενισχυτή έτσι ώστε η βελόνα να κινείται μέσα σε ορισμένα όρια. Αυτή η αυτοματοποιημένη λήψη του λόγου V_p προς V_o για τις τιμές M καταγράφονταν από μια δεύτερη βελόνα. Με τη χρησιμοποίηση νεώτερων καθαρά ψηφιακών οργάνων η διαγνωστική πληροφορία και η “αίσθηση” που παρείχε η κινούμενη βελόνα χάθηκε.



Εικόνα 6-40. Οι παράμετροι γεω-φόρτισης για δέκτη στο χρονο-πεδίο. Μοντέρνα όργανα μετρούν άμεσα τα φθίνοντα δυναμικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε σε μια στατιστική προσέγγιση των μετρήσεων υπαίθρου και ένας ικανοποιητικός αριθμός κύκλων μέτρησης πραγματοποιείται για να γίνει αποδεκτή η προσέγγιση αυτή.

6.5.6.3 Ανάλυση της φθίνουσας καμπύλης

Ο λόγος L/M παρέχει μια ένδειξη της έντασης του φορτισμένου σώματος. Στην πράξη επιτείνει λίγο περισσότερο τη συσχέτιση των υψηλών τιμών φόρτισης με τα θειούχα σώματα και τις χαμηλές τιμές φόρτισης με τους αργίλους και δεν κάνει διαχωρισμό μεταξύ των θειούχων ορυκτών και του γραφίτη.

Όσο περισσότερες μετρήσεις στη φθίνουσα καμπύλη, τόσο λεπτομερέστερη ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί. Μια μέθοδος που έχει προταθεί για τους δέκτες Huntec υποθέτει ότι οι φθίνουσες καμπύλες είναι ο συνδυασμός δύο φθίνουσών εκθετικών καμπύλων, που

αντιστοιχούν σε πολώσεις ηλεκτροδίου και μεμβράνης, οι οποίες μπορούν μαθηματικά να απομονωθούν. Η διαδικασία αυτή είναι δύσκολο να αποδώσει σε περίπτωση παρουσίας θορύβου. Η έρευνα για τη μορφή των φθινουσών καμπύλων συνεχίζεται και οι τιμές φόρτισης πρέπει να καταγράφονται για περισσότερες κατά το δυνατό χρονικές στιγμές, ιδιαίτερα σε περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Σε μη ανώμαλες περιοχές μια μόνη τιμή γενικώς επαρκεί.

6.5.7 Μετρήσεις στο συχνοτικό πεδίο

Στο συχνοτικό πεδίο διασκόπησης εφαρμόζονται μικρά ρεύματα και δυναμικά για τις μετρήσεις ειδ. αντίστασης, με συνέπεια να χρησιμοποιούνται ελαφρείς και φορητοί πομποί. Ιδιαίτερη φροντίδα πρέπει να λαμβάνεται στην τοποθέτηση των καλωδίων για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης.

6.5.7.1 Πομποί συχνοτικού πεδίου

Κύματα τετραγωνικών παλμών συνήθως χρησιμοποιούνται τόσο στο συχνοτικό όσο και στο πεδίο των χρόνων και οι περισσότεροι πομποί IP μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα δύο. Η μέτρηση της ειδ. αντίστασης για δύο συχνότητες σε διαφορετικές στιγμές, καθυστερεί την πορεία των εργασιών υπαίθρου και δεν επιτρέπει την απαλλαγή από το τυχαίο θόρυβο. Ο θόρυβος απομακρύνεται όταν γίνονται ταυτόχρονες μετρήσεις χρησιμοποιώντας ένα τετραγωνικό παλμό (εάν ο δέκτης μπορεί να αναλύσει την προκύπτουσα κυματομορφή δυναμικού και να απομονώσει τις υψίσυχνες επιδράσεις) ή μια πολύπλοκη κυματομορφή που αποτελείται από δύο συχνότητες.

6.5.7.2 Δέκτες συχνοτικού πεδίου

Εξειδικευμένοι δέκτες απαιτούνται για την ανάλυση των κυματομορφών και την εξαγωγή των συχνοτικών επιδράσεων εκπομπών, είτε μιας απλής ή μιας διπλής συχνότητας. Για να μετρηθούν οι φασικές διαφορές πάνω από ένα εύρος συχνοτήτων, συνήθως κρατείται ένας χρόνος αναφοράς μεταξύ του πομπού και δέκτη.

Η απ' ευθείας σύνδεση είναι δυνατή, αλλά ένα καλώδιο αναφοράς μπορεί να γίνει πηγή επαγωγικής σύζευξης αφενός και να δυσχεράνει την πορεία των μετρήσεων αφετέρου. Μοντέρνοι δέκτες χρησιμοποιούν κρυσταλλικά ρολόγια, τα οποία μπορούν να συγχρονισθούν με τους πομπούς κατά την αρχή της ημέρας πριν την έναρξη των εργασιών υπαίθρου. Η μέγιστη απόκλιση που μπορεί να παρατηρηθεί είναι της τάξης του κλάσματος ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου εντός 24 ωρών.

6.6 Η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων

6.6.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η κίνηση σωματιδίων που ιονίζονται από την ηλιακή ακτινοβολία, παράγει ηλεκτρικά ρεύματα στην ιονόσφαιρα. Οι ημερήσιες μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου παράγονται από τέτοια ιονοσφαιρικά ρεύματα με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Με την ίδια αυτή διαδικασία, ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα με μία μεταβλητή συχνότητα του 1 Hz ή μικρότερης, επάγεται και ρέει οριζόντια στο επάνω τμήμα του γήινου φλοιού. Αυτό ονομάζεται τελλουρικό ρεύμα.

Σε ένα οριζόντιο στρώμα ομοιόμορφου πάχους, η πυκνότητα του τελλουρικού ρεύματος j_t , μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, επειδή η πηγή του ρεύματος βρίσκεται μακριά σε σχέση με την περιοχή που διεξάγονται οι μετρήσεις. Η σχέση που συνδέει τη διαφορά δυναμικού V , μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε απόσταση L , και του τελλουρικού ρεύματος πυκνότητας j_t , δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$j_{\tau} = V/RL \quad (90)$$

Εάν το πάχος του επιφανειακού στρώματος μεταβάλλεται πλευρικά, τότε και η πυκνότητα ρεύματος αλλάζει, καθώς θα αλλάζει και η διαφορά δυναμικού, όπως έχει δειχθεί στις ηλεκτρικές μεθόδους.

Το βάθος h , στο οποίο διεισδύει το τελλουρικό ρεύμα μέσα στη γη, εξαρτάται από την συχνότητα f και την ειδική αντίσταση R . Το βάθος διείσδυσης εκφράζεται κατά προσέγγιση από τη σχέση

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{R/f} \quad (91)$$

όπου η ειδική αντίσταση, R , δίδεται σε Ωm , f σε Hz και h σε Km.

6.6.2 Διασκόπηση τελλουρικού ρεύματος

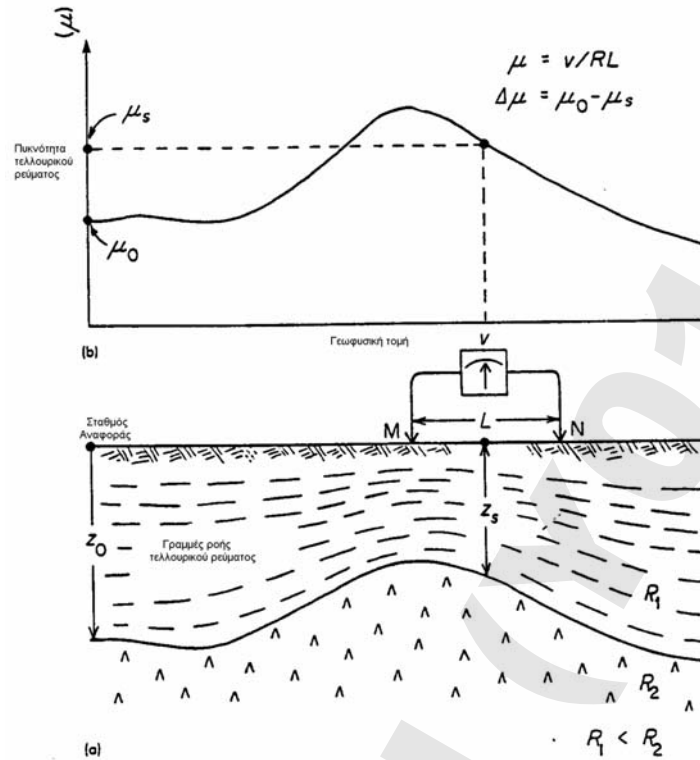
Η τελλουρική διασκόπηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναγνωριστική μέθοδος στην έρευνα της πλευρικής μεταβολής του πάχους ιζηματογενών λεκανών, μετρώντας διαφορές δυναμικού που συνδέονται με τελλουρικά ρεύματα. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στα αρχικά στάδια έρευνας πεδίων υδρογονανθράκων σε περιοχές που υπήρχε λίγη πληροφορία για το πάχος της ιζηματογενούς σειράς.

Η βασική ιδέα της τελλουρικής διασκόπησης είναι η μέτρηση διαφορών δυναμικού μεταξύ ενός σταθμού αναφοράς, όπου το πάχος Z_0 και η ειδική αντίσταση R είναι γνωστά, και άλλων δορυφορικών σταθμών. Έτσι, θεωρώντας την ίδια τιμή ειδικής αντίστασης R για όλη την περιοχή έρευνας, είναι δυνατός ο υπολογισμός της πυκνότητας ρεύματος για κάθε σταθμό με βάση τη σχέση 90 (εικ. 6-41).

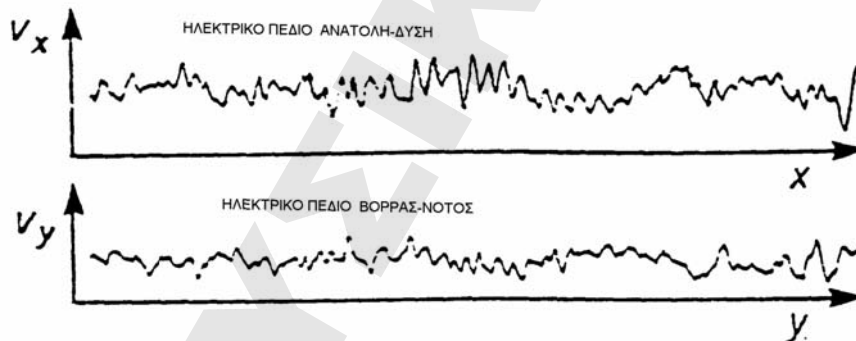
Η αλλαγή στο πάχος κατά ΔZ είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με την αλλαγή της πυκνότητας ρεύματος $\Delta\mu$ μεταξύ του σταθμού αναφοράς και ενός δορυφορικού σταθμού. Έτσι, το πάχος Z_s σε ένα δορυφορικό σταθμό μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$Z_s = Z_0 + \Delta z = Z_0 + \frac{Z_0}{\mu_0} \Delta\mu \quad (92)$$

Η διεύθυνση του τελλουρικού ρεύματος μεταβάλλεται από μέρος σε μέρος καθώς και η συχνότητα του δεν είναι κανονική. Για να ληφθούν υπόψη αυτές οι διαφορές, πρέπει να μετρούνται οι συνιστώσες του δυναμικού με ηλεκτροδία προσανατολισμένα σε δύο κάθετες διευθύνσεις, συνήθως βορρά-νότο και ανατολή-δύση. Επειδή η συχνότητα επίσης μεταβάλλεται, το δυναμικό παρουσιάζει διακυμάνσεις. Έτσι, η έξοδος των βολτομέτρων που συνδέονται με τις δύο κάθετες διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να καταγράφεται ταυτόχρονα και για κάποιο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-42.



Εικόνα 6-41. α) Γραμμές ροής τελλουρικού ρεύματος σε στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης, το οποίο υπέρκειται στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης. β) Η διαφορά δυναμικού που προκύπτει από τη ροή ρεύματος.



Εικόνα 6-42. Παραδείγματα που δείχνουν τη μεταβολή του δυναμικού με το χρόνο, μετρίεται σε ζεύγη ηλεκτροδίων σε διευθύνσεις B-N και A-Δ.

Οι συνιστώσες δυναμικού V_x και V_y που μετρούνται την ίδια στιγμή συνδέονται με τη διαφορά δυναμικού V με τη σχέση:

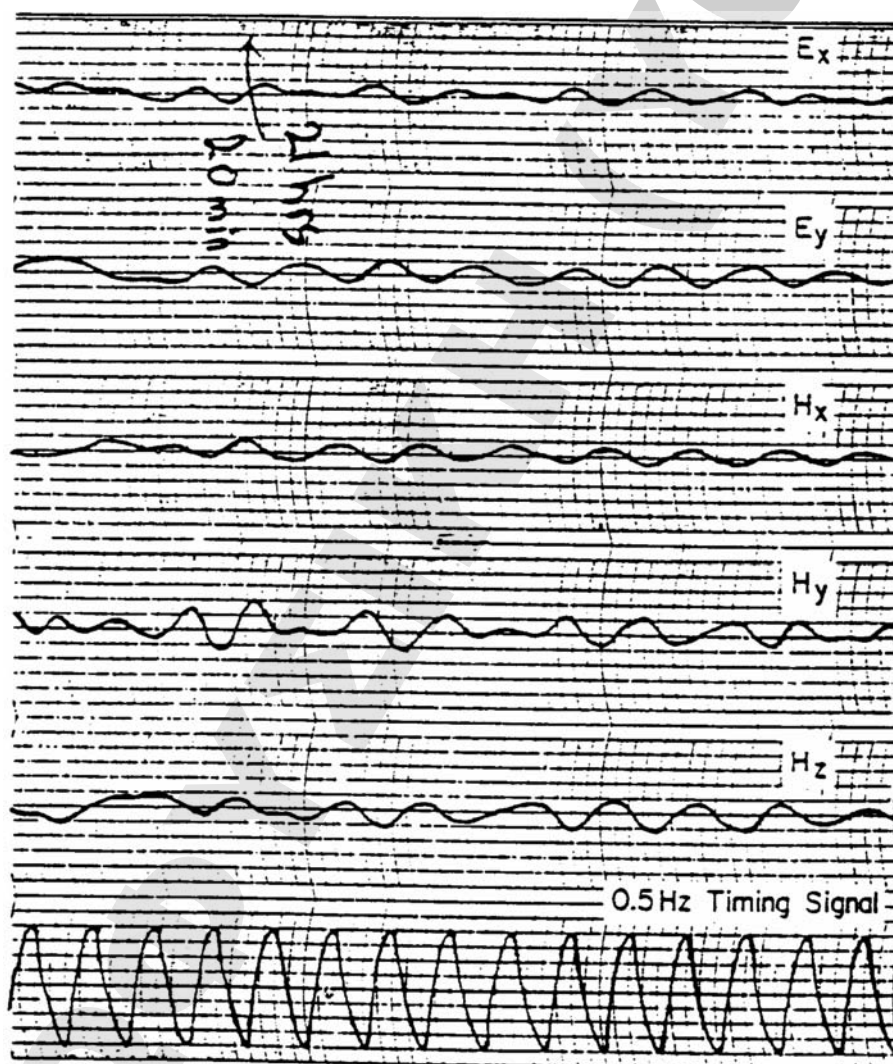
$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (93)$$

Η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζονται τα βάθη περιορίζεται από τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης από μέρος σε μέρος. Η παρουσία δομών και λιθολογικών μεταβολών σε διαφορετικές θέσεις μπορεί να εισάγει σοβαρά σφάλματα στον προσδιορισμό του βάθους. Επίσης είναι σημαντικό να εξετάζεται εάν το βάθος διείσδυσης του ρεύματος είναι ικανό να διαπεράσει την ιζηματογενή σειρά μέχρι το βάθος ενδιαφέροντος. Εάν το βάθος διείσδυσης

είναι ικανοποιητικό μπορεί να προσδιορισθεί από τη σχέση 90 και τις συχνότητες που υπολογίζονται από καταγραφές δυναμικού όπως αυτές που απεικονίζονται στην εικόνα 6-42.

6.7 Η μέθοδος της μαγνητοτελλουρικής διασκόπησης

Σύμφωνα με την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα συνδέεται με ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η μέτρηση της έντασης των συνιστωσών αυτού του πεδίου στις ίδιες διευθύνσεις, όπως και των συνιστωσών δυναμικού, παρέχει ένα άλλο μέσο προσδιορισμού του πάχους και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης της αλληλουχίας των πετρωμάτων. Η μαγνητοτελλουρική διασκόπηση συνδυάζει αυτές τις μετρήσεις.



Εικόνα 6-43. Ταυτόχρονες αναγραφές των συνιστωσών B-N και A-Δ της μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και των συνιστωσών B-N, A-Δ και z της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Σε μία ζώνη πάχους Z , η φαινόμενη ειδική αντίσταση R_a , μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$R_a \cong \frac{0,2}{f} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad (94)$$

όπου, f είναι η συχνότητα του τελλουρικού ρεύματος και H_y είναι η ένταση του συναφούς μαγνητικού πεδίου, σε διεύθυνση κάθετη προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E_x . Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται ως η μεταβολή του δυναμικού V για μία μικρή αύξηση της απόστασης x , ή $E=V/x$.

Το πάχος της ζώνης σχετίζεται με την συχνότητα και τη φαινόμενη ειδική αντίσταση με τη σχέση:

$$Z \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{5 \frac{R_a}{f}} \quad (95)$$

όπου Z είναι σε χιλιόμετρα όταν R_a και f δίδονται σε $\Omega\mu$ και Hz , αντίστοιχα.

Μία σειρά από καταγραφές που έχουν ληφθεί από μετρήσεις μαγνητοτελλουρικής βυθοσκοπησης φαίνεται στην εικόνα 6-43. Η μεγαλύτερη δυσκολία συναντάται στη μέτρηση των αδύνατων συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες έχουν εντάσεις λίγες δεκάδες mGamma. Επειδή τα συμβατικά μαγνητόμετρα δεν είναι ευαίσθητα για να μετρήσουν τόσο αδύνατα πεδία, έχουν κατασκευασθεί ειδικά όργανα για το σκοπό αυτό. Γεγονός είναι ότι ένας σοβαρός περιορισμός εφαρμογής της μαγνητοτελλουρικής διασκόπησης είναι η μεγάλη προσπάθεια που καταβάλλεται για να συλλεχθούν αξιόπιστες καταγραφές της έντασης του μαγνητικού πεδίου.