

A P Θ P A

Μέθοδοι διαγραφίας (Logging) σε γεωτρήσεις

του Βασίλη Χρηστάρα
Τμήμα Γεωλογίας - ΑΠΘ

Δημοσίευση 'Άρθρων

Η Συντακτική Επιτροπή της
Γεωτεχνικής Ενημέρωσης παρακαλεί
τους συναδέλφους Γεωτεχνικούς που
επιθυμούν να δημοσιεύσουν 'Άρθρα ή
Μελέτες στο περιοδικό να
αποστέλουν προς δημοσίευση
κείμενα η έκταση των οποίων δεν θα
υπερβαίνει τις 5 δακτυλογραφημένες
σελίδες.

Εισαγωγή

Η διαγραφία (logging) ως μέθοδος μελέτης μάς γεώτρησης, συντελεί στον προσδιορισμό φυσικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, όπως η λιθολογία, το πορώδες, η γεωμετρία των πόρων, η διαπερατότητα, η πυκνότητα και έμμεσα η μηχανική τους συμπεριφορά. Με τα δεδομένα της διασκόπησης αυτής είναι δυνατό να προσδιοριστούν το πάχος και το βάθος γεωλογικών ζωνών, να γίνει διαχωρισμός ζωνών με πετρέλαιο, φυσικό αέριο και νερό, και να υπολογιστούν τα αποθέματα υδρογονανθράκων.

Οι φυσικές ιδιότητες που είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με logging είναι το πορώδες (porosity), η διαπερατότητα (permeability), ο βαθμός κορεσμού (saturation) και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (resistivity).

Οι μέθοδοι logging για τον προσδιορισμό των παραπάνω ιδιοτήτων, χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) ηλεκτρικές (electric), β) ραδιενέργειας ακτινοβολίας (nuclear) και γ) ακουστικές (acoustic or sonic).

Πορώδες: Ορίζεται ως το ποσοστό του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο του πετρώματος.

$$\text{Πορώδες}(\Phi) = \frac{\text{όγκος πόρων}}{\text{ολικός όγκος πετρώματος}} \quad (1)$$

Διαπερατότητα: Αποδίδεται με το συντελεστή διαπερατότητας (K) που εκφράζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το υπόγειο νερό μέσα στον υπ' όψη γεωλογικό σχηματισμό, όταν η υδραυλική κλίση είναι ίση με τη μονάδα (μετριέται σε μονάδες ταχύτητας).

Βαθμός κορεσμού: Είναι το ποσοστό του όγκου των πόρων του σχηματισμού που καταλαμβάνονται από νερό (ή άλλο υγρό).

$$\text{Βαθμ. κορεσμού} (Sw) = \frac{\text{όγκος πόρων με νερό}}{\text{ολικός όγκος πόρων}} \quad (2)$$

Ειδική (ηλεκτρική) αντίσταση: Πρόκειται για την ηλεκτρική αντίσταση γεωλογικού σχηματισμού μοναδία ή μήκους και διατομής και μετριέται σε $\text{Ohm} \cdot \text{m}$. Η ειδική αντίσταση είναι αντίστροφη έννοια της

αγωγιμότητας, η οποία μετριέται σε $\text{millihm} / \text{meter}$ (αγωγιμότητα = $1000 / \text{ειδική αντίσταση}$). Οι υδρογονάνθρακες, τα σκληρά πετρώματα και το γλυκό νερό εμφανίζουν πολύ μικρή αγωγιμότητα και μεγάλη ειδική αντίσταση. Αντίθετα το θαλασσινό νερό εμφανίζει μεγάλη αγωγιμότητα και επομένως μικρή ειδική αντίσταση.

Η ειδική αντίσταση εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{I \cdot A}{L}, \frac{(\text{Ohm} \cdot \text{m}^2)}{\text{m}} \rightarrow \text{Ohm} \cdot \text{m} \quad (3)$$

'Οπου:

- R: Ειδική αντίσταση ($\text{Ohm} \cdot \text{m}$)
- r: Ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)
- A: Διατομή του σχηματισμού (m^2)
- L: Μήκος του σχηματισμού (m)

Η ειδική αντίσταση αποτελεί βασική παράμετρο για τον προσδιορισμό του βαθμού κορεσμού, του πορώδους και τύπου του γεωλογικού σχηματισμού καθώς και του είδους του υγρού με το οποίο είναι διαποτισμένος ο σχηματισμός (γλυκό νερό ή θαλασσινό, υδρογονάνθρακες κλπ.).

Παράμετροι που σχετίζονται με την ειδική αντίσταση είναι ο συντελεστής ειδικής αντίστασης του σχηματισμού (F , formation resistivity factor) και η ειδική αντίσταση υδατοκορεσμένου σχηματισμού (R_0 , resistivity of water filled formation) που συνδέονται μεταξύ τους με την ακόλουθη σχέση (Archie, 1942):

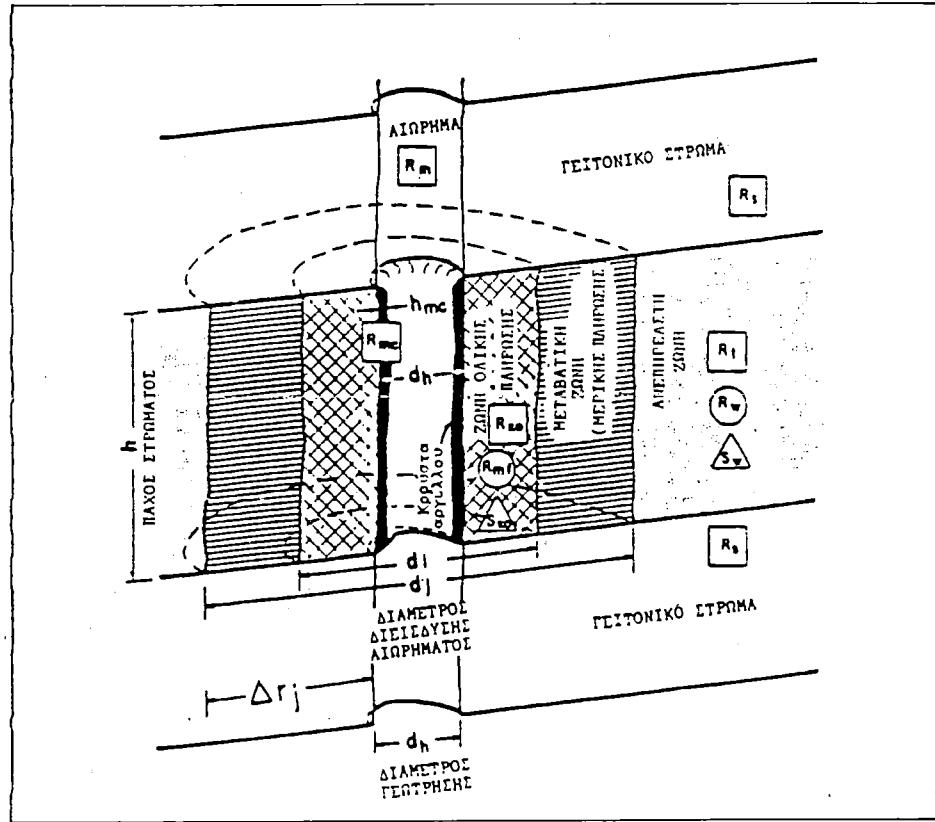
$$R_0 = F \cdot R_w \quad (4)$$

'Οπου R_w είναι η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων του σχηματισμού.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι το F ισούται με την ειδική αντίσταση υδατοκορεσμένου (100%) σχηματισμού προς την ειδική αντίσταση του νερού των πόρων του σχηματισμού.

Σύμφωνα με τον ίδιο μελετητή (Archie, 1942), ο συντελεστής F δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{1.0}{\Phi^m} \quad (5)$$



Εικ. 1. Σχηματική τομή γεώτρησης και της ζώνης διείσδυσης του αιωρήματος.

Όπου το είναι εκθέτης που εξαρτάται από την κοκκομετρία και τη συνεκτικότητα του σχηματισμού.

Σύμφωνα με τους Asquith & Charles (1982), ισχύουν οι σχέσεις $F = 1/\Phi^2$ για τα ανθρακικά πετρώματα, $F = 0,81/\Phi^2$ για συνεκτικούς φαμμίτες και $F = 0,62/\Phi^{2,15}$ για χαλαρή άμμο.

Σύμφωνα με τον Carothers (1968), ισχύουν οι σχέσεις $F = 1.45/\Phi^{1.54}$ γενικά για τις άμμους, $F = 1.65/\Phi^{1.33}$ για τις αργιλλώδεις άμμους, $F = 1.45/\Phi^{1.7}$ για τις ασβεστολιθικές άμμους και $F = 0.84/\Phi^{2.14}$ για τα ανθρακικά πετρώματα.

Η ειδική αντίσταση R_i , ενός γεωλογικού σχηματισμού συνδέεται άμεσα με το βαθμό κορεσμού S_w , με την ακόλουθη σχέση:

$$S_w = (R_0/R_i)^{1/n} = (F^* R_w/R_i)^{1/n} \quad (6)$$

Όπου « n » σταθερά η οποία παίρνει τι-

των πόρων με αιώρημα (transition zone) και στην ανεπηρέαστη ζώνη (uninvaded zone).

Ερμηνεία των συμβόλων της Εικόνας 1:

d_h : Διάμετρος γεώτρησης
 d_f : Διάμετρος ζώνης ολικής πλήρωσης με αιώρημα (flushed zone).

d_t : Διάμετρος μεταβατικής ζώνης (transition zone).
 Δr_j : Ακτίνη ζώνης διείσδυσης (invaded zone).

h_{mc} : Πάχος αργιλικής κρούστας (στερεό υπόλειμμα αιωρήματος) στα τοιχώματα της γεώτρησης (mudcake).
 R_m : Ειδική αντίσταση του αιωρήματος (resistivity of the drilling mud).

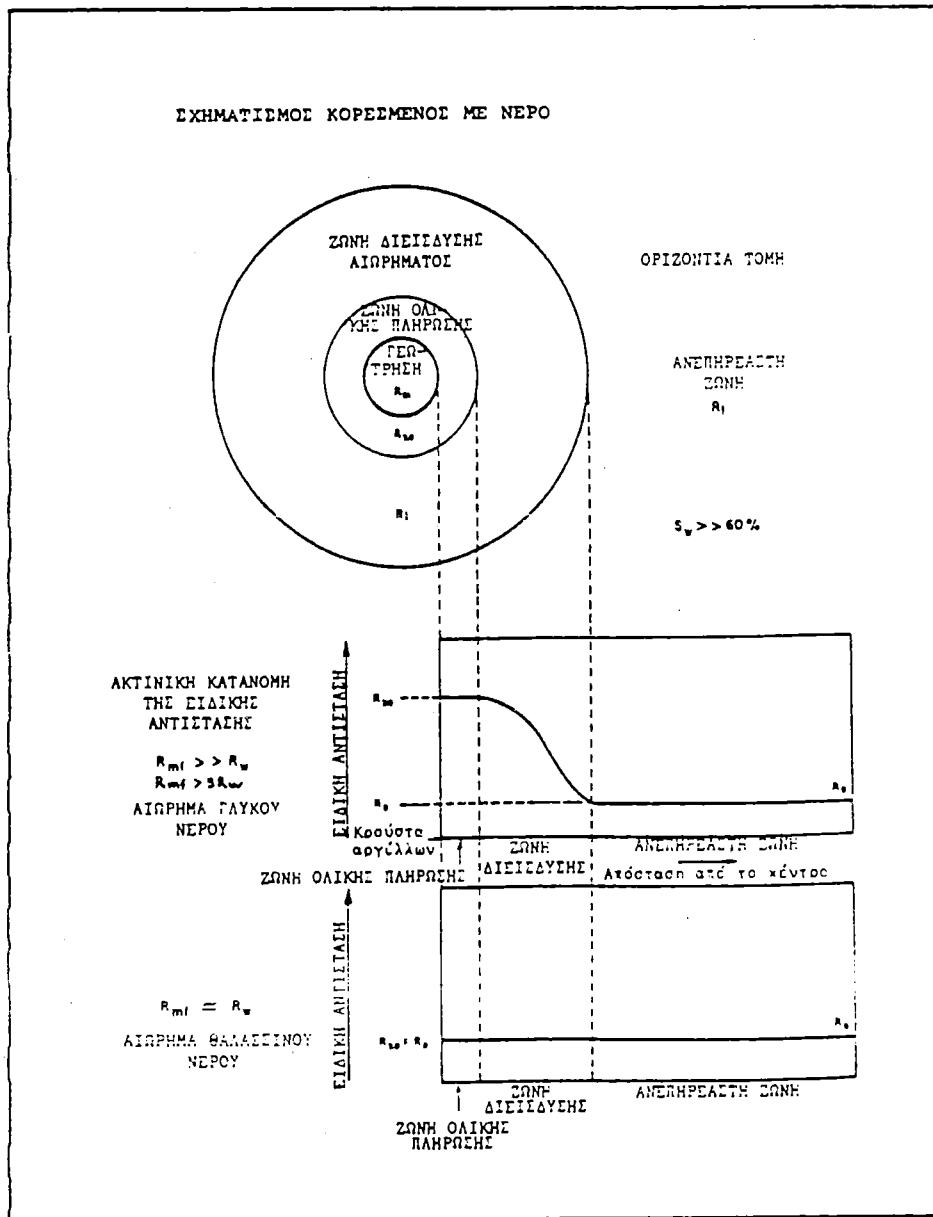
R_{mc} : Ειδική αντίσταση της αργιλικής κρούστας (resistivity of the mudcake).
 R_{ml} : Ειδική αντίσταση του αιωρήματος που διείσδυσε στο γεωλογικό σχηματισμό (resistivity of mud filtrate).

R_s : Ειδική αντίσταση αργιλικού σχηματισμού (resistivity of shale).
 R_i : Ειδική αντίσταση ανεπηρέαστης ζώνης (resistivity of uninvaded zone). Αποτελεί την πραγματική ειδ. αντιστ. του σχηματισμού.

R_w : Ειδική αντίσταση του υγρού που περιέχει ο σχηματισμός (resistivity of formation water).
 R_{xo} : Ειδική αντίσταση της ζώνης ολικής πλήρωσης με αιώρημα (resistivity of flushed zone).
 S_w : Βαθμός κορεσμού της ανεπηρέαστης ζώνης (water saturation of uninvaded zone).

S_w : Βαθμός κορεσμού της ζώνης διείσδυσης (water saturation of flushed zone).
 d_h : Διάμετρος της γεώτρησης θεωρείται η εξωτερική διάμετρος του κοπτικού άκρου. Όμως στην πράξη η διάμετρος της γεώτρησης μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη λόγω καταπτώσεων, είτε μικρότερη λόγω στεγανοποίησης των τοιχωμάτων. Συνήθως η διάμετρος μιας γεώτρησης είναι μεταξύ 7 7/8 in. και 12 in. Έτσι οι συσκευές διαγραφίας είναι προσαρμοσμένες στις διαστάσεις αυτές.

Η ακριβής διάμετρος σ' όλο της το μήκος της γεώτρησης, υπολογίζεται με τη βοήθεια του Caliper Log. Πρόκειται για ένα «διαβίτη» του οποίου τα άκρα εφα-



Εικ. 2. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης, σε σχηματισμό κορεσμένο με νερό.

πτόμενα στα τοιχώματα της γεώτρησης χαρτογραφούν τη διάμετρό της με μεγάλη ακρίβεια. Η λειτουργία της συσκευής είναι ηλεκτρομηχανική ή συνδιασμός της με ακουστική (Sonic Log).

Με βάση την παραδοχή ότι τα χαλαρώτερα στρώματα προκαλούν καταπτώσεις σε σχέση με τα συνεκτικά, μπορεί να γίνει

ένας πρόχειρος χωρισμός μεταξύ χαλαρών και συνεκτικών στρωμάτων, όπως για παράδειγμα μεταξύ άμμων και συνεκτικών αργιλλών.

To αιώρημα της γεώτρησης (με μπεντονίτη). Στην περίπτωση που δεν ενδιαφέρει η μέτρηση του υδροφόρου ορίζοντα και της υδροπερατότητας των υπεδαφι-

κών στρωμάτων, το πρόβλημα των καταπτώσεων και της στεγανοποίησης των τοιχωμάτων μιας γεώτρησης (ιδίως σε χαλαρές κροκάλες και άμμους) μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση μπεντονίτη ή άλλου αιωρήματος.

Νερό ή αιώρημα μπεντονίτη χρησιμοποιείται επίσης και για την απομάκρυνση των προϊόντων της διάτρησης. Η πυκνότητα διατηρείται σταθερή ώστε η υδροστατική πίεση στη γεώτρηση να είναι μεγαλύτερη από την πίεση του νερού των πόρων του γεωλογικού σχηματισμού. Αποτέλεσμα της διαφοράς αυτής είναι η διείσδυση του αιωρήματος στα κενά του σχηματισμού, σε βάθος d_f , απομακρύνοντας το υπάρχον υγρό ή αέριο.

Ζώνη διείσδυσης: Αποτελείται από τη ζώνη πλήρους και μερικής πλήρωσης με αιώρημα, των πόρων του σχηματισμού γύρω από τη γεώτρηση. Η ζώνη ολικής πλήρωσης βρίσκεται σε άμεση επαφή με τη γεώτρηση. Στη ζώνη αυτή το αιώρημα έχει εκτοπίσει εξ ολοκλήρου το νερό των πόρων και τους ενδεχόμενους υδρογονάνθρακες ή φυσικό αέριο. Στη ζώνη μερικής πλήρωσης το αιώρημα συνυπάρχει με ποσότητα του προϋπάρχοντος υγρού στο σχηματισμό. Το βάθος διείσδυσης του αιωρήματος εξαρτάται από το πορώδες του γεωλογικού σχηματισμού.

Τα στερεά συστατικά του αιωρήματος, κατά τη διείσδυσή τους στο σχηματισμό, δημιουργούν ένα πολύ λεπτό στεγανό αργιλικό στρώμα στα τοιχώματα της γεώτρησης. Το αιώρημα διείσδυει στο γεωλογικό σχηματισμό μέχρι τα τοιχώματα της γεώτρησης να καλυφθούν πλήρως από αυτό το αργιλικό στρώμα. Το βάθος διείσδυσης του αιωρήματος είναι μεγαλύτερο σε σχηματισμούς με σχετικά μικρότερο πορώδες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ένας σχηματισμός με μικρότερο πορώδες έχει μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα (ταχύτητα διείσδυσης είναι μεγαλύτερη) έναντι ενός σχηματισμού με μεγαλύτερο πορώδες; Η διαφορά πίεσης μεταξύ του αιωρήματος και του νερού των πόρων που προκαλεί τη διείσδυση του αιωρήματος μηδενίζεται με το βάθος, αντιστρόφως ανάλογα του πορώδους.

Γενικά η διάμετρος διείσδυσης του αιωρήματος (d_f) στο σχηματισμό παίρνει τις

παρακάτω τιμές, ως προς τη διάμετρο της γεώτρησης (d_h):

$d_j/d_h = 2$ για σχηματισμούς μεγάλου πορώδους.

$d_j/d_h = 5$ για σχηματισμούς μέσου πορώδους.

$d_j/d_h = 10$ για σχηματισμούς μικρού πορώδους.

Στην περίπτωση παρουσίας υδρογονανθράκων, ο βαθμός (υδατο)-κορεσμού (S_w) στην ανεπηρέαστη ζώνη είναι μια σημαντική παράμετρος που οδηγεί στον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (s_h), σύμφωνα με τη σχέση $S_h = 1.0 - S_w$.

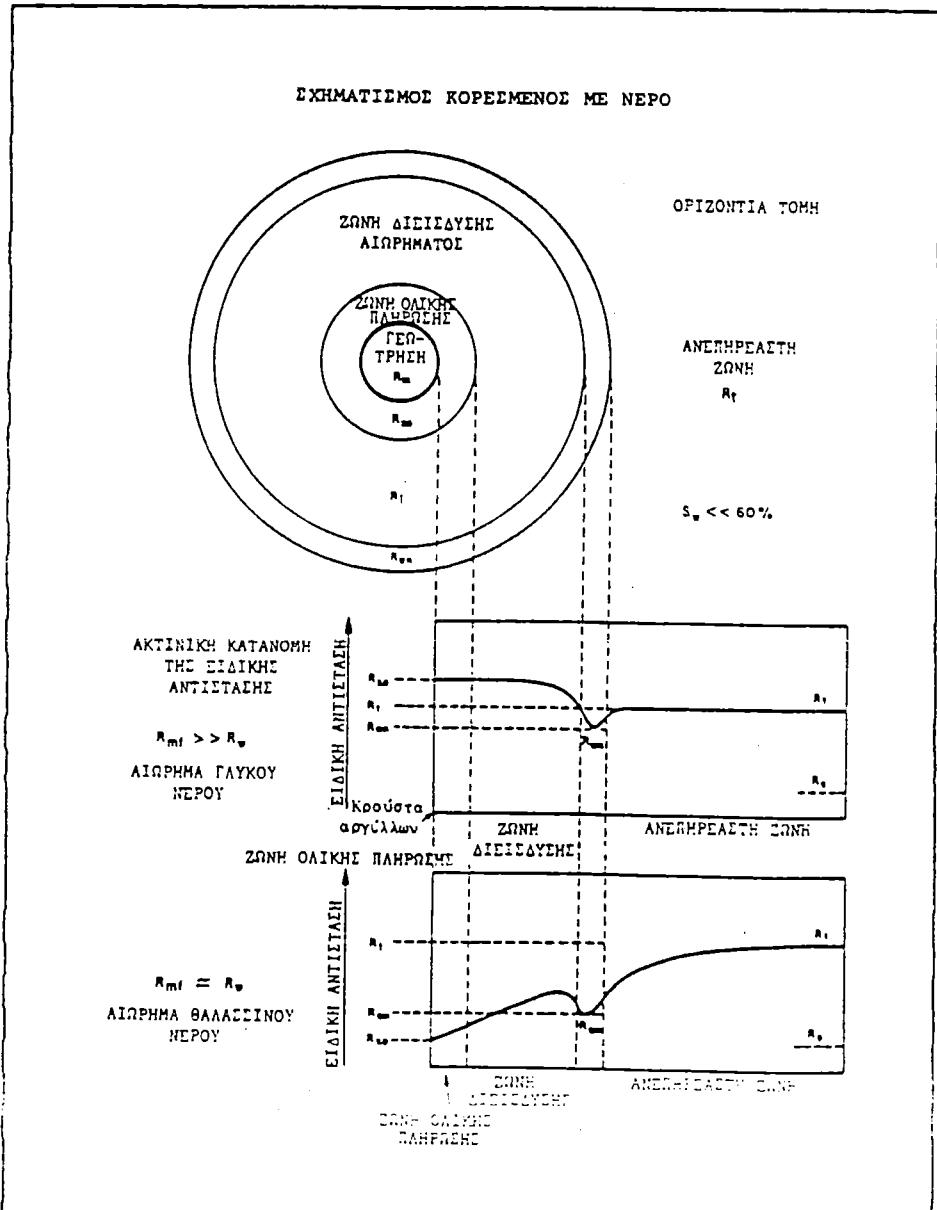
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα μεταβολής της ειδικής αντίστασης, των Εικόνων 2 και 3, για σχηματισμούς, κορεσμένους με νερό και υδρογονάνθρακες.

Θερμοκρασία του γεωλογικού σχηματισμού (T_f): Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του γεωλογικού σχηματισμού έχει μεγάλη σημασία για την ορθή επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαγραφίας, γιατί επηρρεάζει την ειδική αντίσταση του αιωρήματος, (R_m , resistivity of the drilling mud) καθώς και τις ειδικές αντιστάσεις τόσο του αιωρήματος που διείσδυσε στο σχηματισμό (R_{mf} , resistivity of the mud filtrate) όσο και του νερού του σχηματισμού (R_w , resistivity of the formation water).

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ενός γεωλογικού σχηματισμού σε συγκεκριμένο βάθος, απαραίτητη είναι η γνώση, α) του βάθους του σχηματισμού, β) της θερμοκρασίας στον πυθμένα της γεώτρησης (BHT, bottom hole temperature), γ) του ολικού βάθους της γεώτρησης (TD) και της θερμοκρασίας επιφανείας. Με βάση τα δεδομένα αυτά και υποθέτοντας γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας (σταθερή γεωθερμική βαθμίδα), η θερμοκρασία του γεωλογικού σχηματισμού είναι δυνατόν να υπολογιστεί με τη θοήθεια του νομογράμματος της Εικόνας 4 (Dresser Atlas 1975).

Η θερμοκρασία του σχηματισμού μπορεί να υπολογιστεί επίσης από την παρακάτω γραμμική σχέση (Asquith, 1980):

$$y = mx + c \quad (7)$$



Εικ. 3. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε σχηματισμό με υδρογονάνθρακες.

Όπου:

x = Βάθος

y = Θερμοκρασία

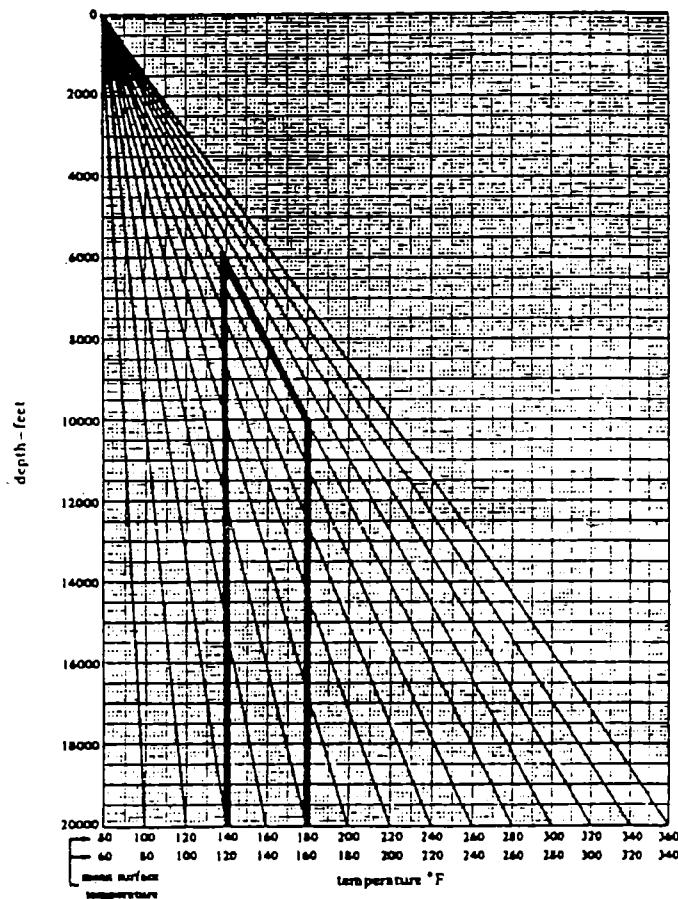
m = Γεωθερμική βαθμίδα

c = Θερμοκρασία επιφανείας

με βάση το νομόγραμμα της Εικόνας 5 (Shlumberger Well Services Inc., 1972) είτε με βάση την παρακάτω σχέση του Arp (Asquith & Charles, 1982).

Μετά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του γεωλογικού σχηματισμού, διορθώνονται οι τιμές ειδικής αντίστασης είτε

$$R_{tf} = R_{temp} * \frac{Temp + 6.77}{T_f + 6.77} \quad (8)$$



Εικ. 4. Νομόγραμμα υπολογισμού θερμοκρασίας ενός σχηματισμού με το βάθος.

Όπου:

R_T : Ειδική αντίσταση στη θερμοκρασία του σχηματισμού.

R_{Temp} : Ειδική αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς.

Temp: Θερμοκρασία αναφοράς, στην οποία μετρήθηκε η R_{Temp} .

T_f : Θερμοκρασία του σχηματισμού.

Βασικές σχέσεις

Πορώδες:

Ακουστική διαγραφία (Sonic Log):

$$\Phi_{sonic} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (9)$$

Διαγραφία πυκνότητας (Density Log):

$$\Phi_{Den} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (10)$$

Διαγραφή Νετρονίων - Πυκνότητας (Neutron - Density Log):

$$\Phi_{N-D} = \sqrt{\frac{\Phi_N^2 + \Phi_D^2}{2}} \quad (11)$$

Όπου:

ma: Matrix, γνωστή τιμή για το πέτρωμα.

f: Fluid, υγρό γεώτρησης.

Δt: Χρόνος διέλευσης ακουστικού σήματος της διαγραφίας.

ρ : πυκνότητα σχηματισμού της διαγραφίας.

Συντελεστής ειδικής αντίστασης F , του γεωλογικού σχηματισμού.

$F: 1.0/\Phi^2$ Ανθρακικά πετρώματα

$F: 0.81/\Phi^2$ Συνεκτικοί ψαμμίτες

$F: 0.62/\Phi^{2.15}$ Χαλαρή άμμος

Ειδική αντίσταση νερού των πόρων του γεωλογικού σχηματισμού.

$$SSP = -K * \log \left(\frac{R_{ml}}{R_w} \right) \quad (12)$$

$$R_w = \frac{R_0}{F} \quad (13)$$

Βαθμός κορεσμού

Βαθμός κορεσμού ανεπηρέαστης ζώνης, S_w :

$$S_w^n = F * \left(\frac{R_w}{R_l} \right) \quad (14)$$

Βαθμός κορεσμού στη ζώνη ολικής πλήρωσης με αιώρημα S_{xo} :

$$S_{xo}^n = F * \left(\frac{R_w}{R_l} \right) \quad (15)$$

Λόγος βαθμού κορεσμού:

$$S_w = \left(\frac{R_{xo}/R_l}{R_{ml}/R_w} \right)^{0.625} \quad (16)$$

Διαγραφία Φυσικού Δυναμικού (SP Log, Spontaneous Potential Log)

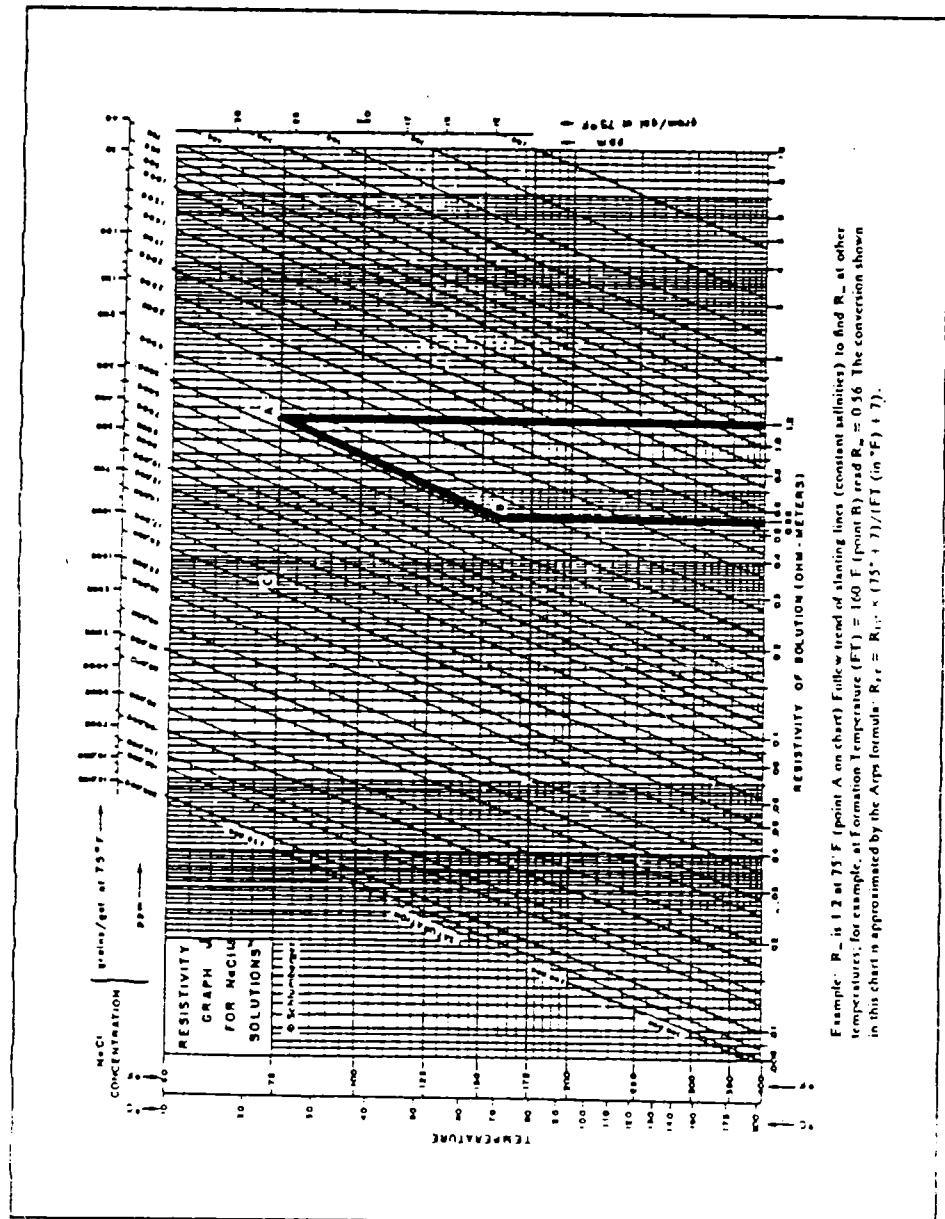
Πρόκειται για μια από τις παλαιότερες ηλεκτρικές μεθόδους Logging της έρευνας πετρελαίου. Η μέθοδος κατ' αρχήν χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό διαπερατών και μη διαπερατών στρωμάτων, όπως άμμοι και άργιλοι αντίστοιχα.

Κατά τη μέθοδο αυτή μετριέται η διαφορά δυναμικού μεταξύ του αιωρήματος που διείσδυσε στους πόρους του σχηματισμού και του νερού των πόρων του σχηματισμού. Η μέτρηση γίνεται με διέλευση συνεχούς ρεύματος μέσω δύο ηλεκτροδίων που το ένα είναι σταθερά τοποθετημένο στην επιφάνεια του εδάφους και το άλλο είναι κινητό και τοποθετείται μέσα στη γεώτρηση, στο επιθυμητό βάθος. Το αιώρημα μέσα στη γεώτρηση πρέπει να είναι αγώγιμο, γεγονός που αποκλείει τη χρήση της μεθόδου σε περιπτώσεις μη αγώγιμου υγρού.

Η διαγραφία φυσικού δυναμικού χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό α) περατών στρωμάτων, β) των ορίων μεταξύ περατών και στεγανών ζωνών, γ) της ειδικής αντίστασης του νερού των πόρων ενός γεωλογικού σχηματισμού (R_w) και δ) τον όγκο της αργιλλού εντός των περατών στρωμάτων. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως ποσοστό μείωσης της έντασης του σήματος κατά μήκος του περατού σχηματισμού. Τέλος η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην έρευνα υδρογονανθράκων.

Στην εικόνα 6 δίνεται σχηματικά η μεταβολή του SP Log σε σχέση με την περατότητα του σχηματισμού και το λόγο R_{mf}/R_w (δηλαδή τη σχέση ειδικής αντίστασης ή απλούστερα τη σχέση αγωγιμότητας μεταξύ του αιωρήματος της γεώτρησης και του υγρού του σχηματισμού).

Το σήμα SP για τις αργιλλους είναι σχετικά σταθερό (ευθεία γραμμή) και αποτελεί τη βασική γραμμή αναφοράς για τον υπολογισμό του SP σήματος στις πορώδεις περιοχές. Για παράδειγμα αν $R_{mf} > R_w$ τότε το σήμα στην πορώδη περιοχή θα είναι αρνητικό (προς τα αριστερά) ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα είναι θετικό, δηλαδή προς τα δεξιά της γραμμής αναφο-



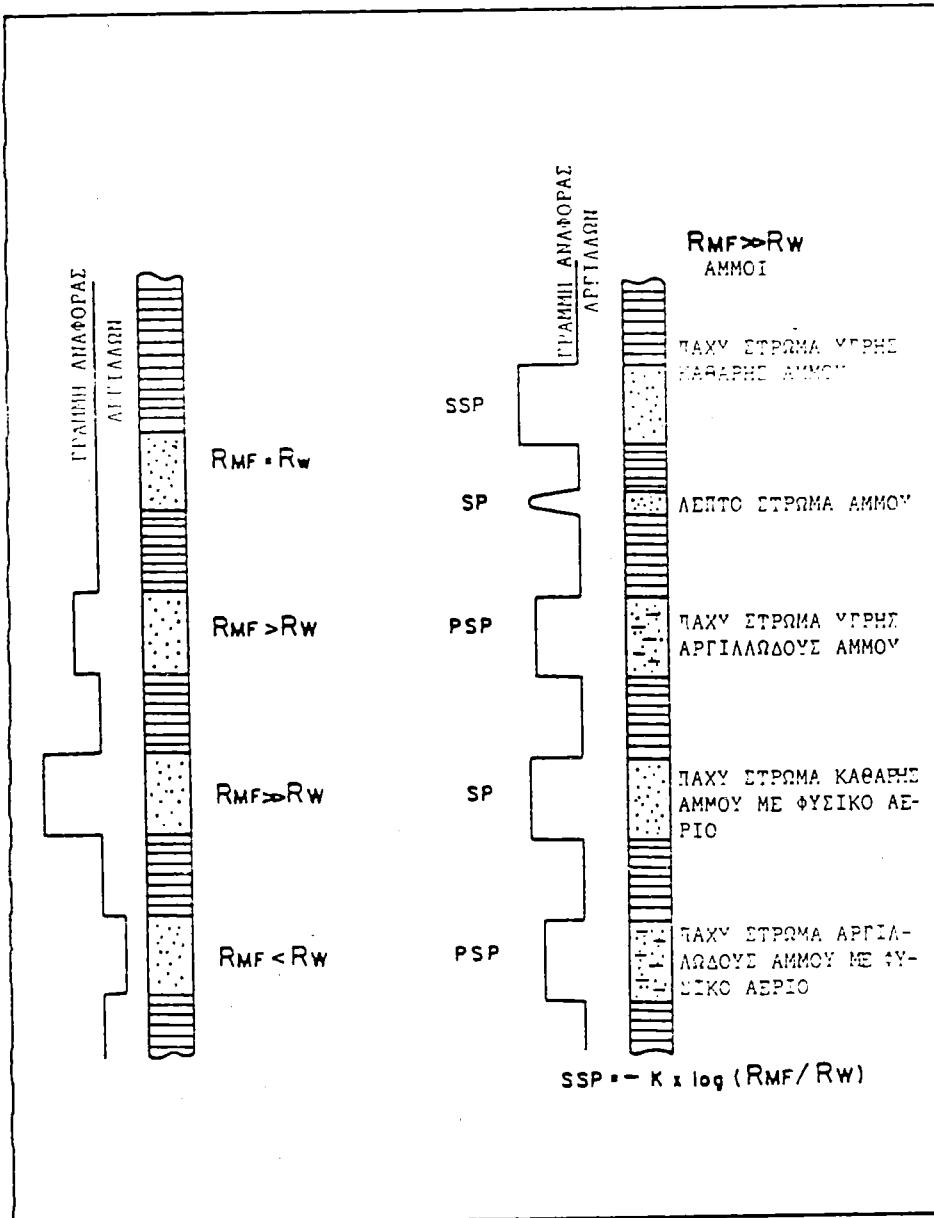
Εικ. 5. Νομόγραμμα διόρθωσης της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία.

ράς. Πρέπει να αναφερθεί ότι σε περιπτώση που $R_{mf}=R_w$ τότε το σήμα για την πορώδη περιοχή καταγράφεται ως ευθεία γραμμή χωρίς απόκλιση από τη βασική γραμμή αναφοράς.

Η τιμή του SP που μετριέται σε μιά γεώτρηση επηρεάζεται από το πάχος και την ειδική αντίσταση του στρώματος, το

βάθος διείσδυσης του αιωρήματος στον περιβάλλοντα χώρο, τη διάμετρο της γεώτρησης, την περιεκτικότητα σε άργιλο και τέλος το λόγο R_{mf}/R_w .

Ος SSP (Static spontaneous potential) ορίζεται το σήμα του πρώτου πορώδου σχηματισμού, απαλλαγμένου από αργιλικό υλικό (όριο αργιλλών με το πρώτο πο-



-52mV.

Μόλις η τιμή SSP προσδιοριστεί, υπολογίζεται ο λόγος R_{mf}/R_{we} από το νομόγραμμα της Εικόνας 9 (Dresser Atlas, 1975) και από το R_{we} η τιμή R_w από το νομόγραμμα της Εικόνας 10 (Dresser Atlas, 1975). Ως R_{we} (ισοδύναμη ειδική αντίσταση, equivalent resistivity) λαμβάνεται ο λόγος $R_{mf}/(R_{mf}/R_{we})$, με βάση την οποία υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων του σχηματισμού (R_w , Εικ. 10).

Υπολογισμός του R_w από το SSP (Batemann & Konen, 1977): Εκτός των νομογραμάτων, η R_w υπολογίζεται και υπολογιστικά, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$R_{mf75^{\circ}F} = R_{mfTemp} * \left(\frac{Temp + 6.77}{81.77} \right) \quad (17)$$

$$K = 60 + (0.133 + T_f) \quad (18)$$

$$\frac{R_{mfe}}{R_{we}} = 10^{-\frac{SSP}{K}} \quad (19)$$

$$SSP = -K \times \log \left(\frac{R_{mf}}{R_w} \right) \quad (20)$$

Όπου R_{we} : Ισοδύναμη ειδική αντίσταση. R_{mfe} : Ισοδύναμη ειδική αντίσταση του υγρού που διείσδυσε.

Εάν R_{mf} στους $75^{\circ}F < 0.1$ τότε ισχύει η σχέση (21):

$$R_{mfe} = \frac{146 R_{mf} - 5}{337 R_{mf} + 77} \quad (21)$$

Εάν R_{mf} στους $75^{\circ}F > 0.1$ τότε ισχύει η σχέση (22):

$$R_{mfe} = 0.85 R_{mf} \quad (22)$$

$$R_{we} = \frac{R_{mfe}}{(R_{mfe}/R_{we})} \quad (23)$$

Εάν $R_{we} < 0.12$ τότε ισχύει η σχέση (24):

$$R_{w75^{\circ}F} = \left(\frac{77 R_{we} + 5}{146 - 377 R_{we}} \right) \quad (24)$$

Εικ. 6. Μεταβολή του SP Log σε διάφορα στρώματα, ανάλογα με τη σχέση R_{mf}/R_w .

ρώδες / αμμώδες στρώμα) και είναι το δυνατότερο σήμα που λαμβάνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Η ακριβής τιμή του SSP προσδιορίζεται είτε με τη θοήθεια νομογράμματος (Εικ. 7, Dresser Atlas, 1975) είτε υπολογιστικά, από την τιμή SP Log πολλαπλασιαζόμενη επί ένα συντελεστή διόρθωσης (SP correction

factor), $SSP = SP * SP_{cor,fact}$. Η τιμή αυτή είναι απαραίτητη τόσο για τον υπολογισμό της R_w όσο και του ποσοστού της περιεχόμενης αργιλλού.

Στο παραδειγμα της Εικόνας 8, η τιμή SP Log μετρήθηκε $-40mV$. Από τα δεδομένα της Εικόνας 7, ο συντελεστής διόρθωσης είναι 1.3. Έτοι SSP = $-40 * 1.3 =$

Εάν $R_w > 0.12$ τότε ισχύει η σχέση (25):

$$R_{w750_F} = -[0.58 - 10^{(0.69R_w - 0.2)}] \quad (25)$$

$$R_{wT_f} = R_{w750_F} * 81.77(T_f + 6.77) \quad (26)$$

Υπολογισμός του όγκου της αργίλλου σε αμμώδη σχηματισμό:

Αναφέρθηκε ότι το SP Log μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του ποσοστού της αργίλλου που περιέχεται σ' ένα διαπερατό (αμμώδες) στρώμα, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$V_{sh}(\%) = 1.0 - \frac{PSP}{SSP} \quad (27)$$

Όπου:

V_{sh} : Όγκος αργίλλου.

PSP: Τιμή SSP αργίλλοαμμώδους σχηματισμού (Pseudo-Static Spontaneous Potential).

SSP: Το σήμα του πρώτου καθαρά αμμώδους ή ανθρακικού σχηματισμού, σημαντικού πάχους (Static Spontaneous Potential).

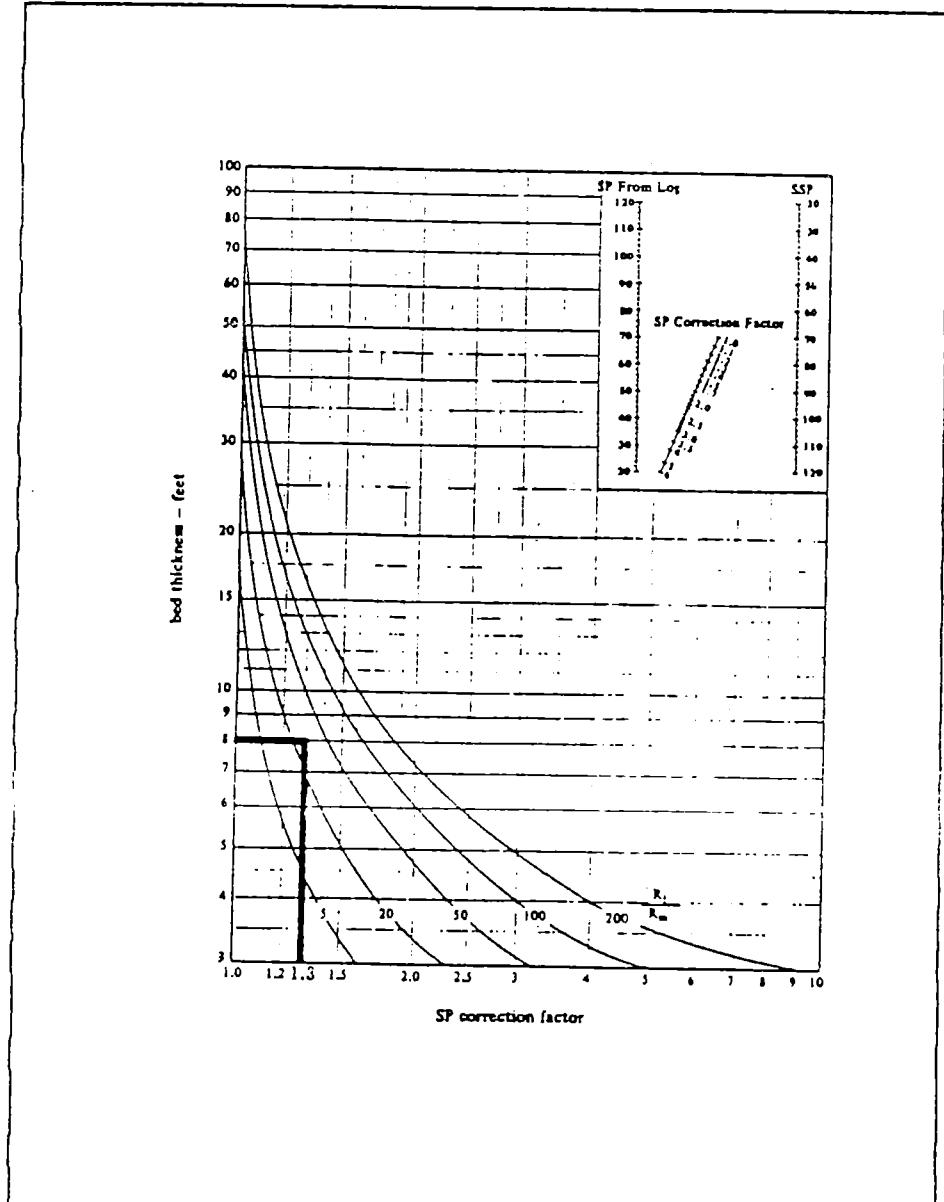
$$SSP = -K * \log(R_m/R_w).$$

$$K = 60 + (0.13 * T_f).$$

Διαγραφία Ειδικής Αντίστασης (Resistivity Log).

Πρόκειται για ηλεκτρική μέθοδο που χρησιμοποιείται α) για τον προσδιορισμό υδρογονανθράκων σε σχέση με υδροφόρους ορίζοντες, β) για τον εντοπισμό διαπερατών στρωμάτων και γ) για τον υπολογισμό του πορώδους ενός γεωλογικού σχηματισμού, με βάση την ειδική αντίσταση. Η σημαντικότερη εφαρμογή της μέθοδου αυτής είναι ο προσδιορισμός στρωμάτων εμποτισμένων με υδρογονάνθρακες σε σχέση με υπάρχοντες υδροφόρους ορίζοντες:

Επειδή τα στερεά συστατικά ενός πετρώματος δεν είναι γενικά αγώγιμα, η ικανότητα μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος σ' ένα γεωλογικό σχηματισμό είναι συνάρτηση της παρουσίας νερού μέσα σ' αυτόν. Οι υδρογονάνθρακες όπως και τα στερεά συστατικά των πετρωμάτων παρουσιάζουν επίσης πολύ μικρή αγωγιμότητα. Έτσι η αυξανόμενη περιεκτικότητα ενός πορώδους σχηματι-

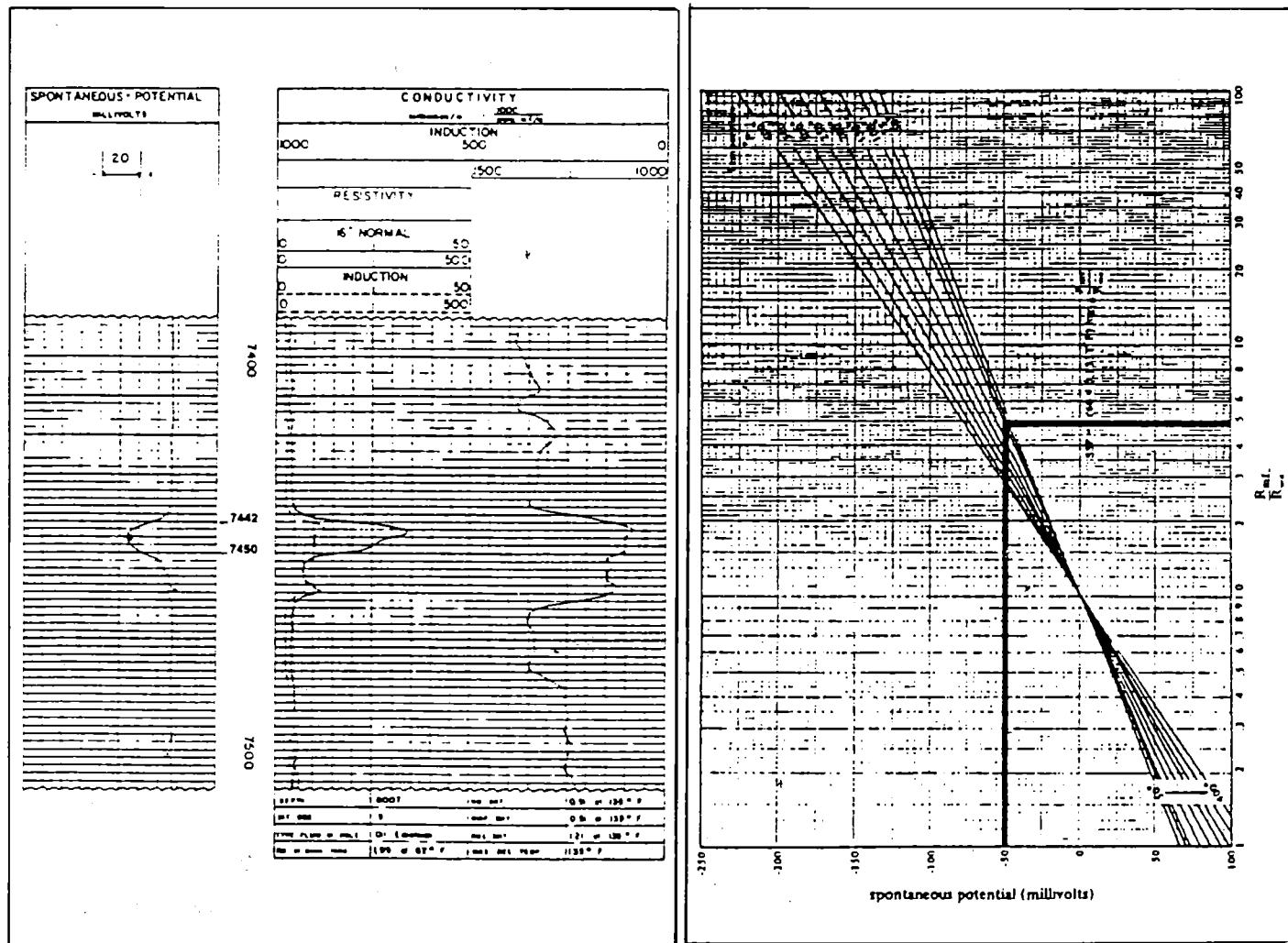


Εικ. 7. Νομόγραμμα υπολογισμού της τιμής SSP από τη μετρούμενη τιμή SP Log.

σμού σε υδρογονάνθρακες αυξάνει την ειδική αντίσταση του σχηματισμού, σε αντίθεση με ότι θα συνέβαινε αν ο σχηματισμός ήταν κορεσμένος με νερό.

Όπως ήδη έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο βαθμός κορεσμού ενός πορώδους σχηματισμού είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση τη σχέση (6).

Δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων μετρησης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται σήμερα: α) Induction Electric Log, β) Electrode Log (Laterolog, Normal, Lateral, Spherically Focused Log, Microlog, Microlaterolog, Proximity Log). Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις με $R_m > 3R_w$ και η δεύτερη σε περιπτώ-



Εικ. 8. Παράδειγμα υπολογισμού της τιμής SSP από το SP διάγραμμα, όπου $SP = -40 \text{ mV}$.

Εικ. 9. Νομόγραμμα υπολογισμού του λόγου R_{mf}/R_w , με βάση την τιμή SSP.

σεις με $R_{mf} = R_w$.

Από την παραπάνω διαδικασία, εκτός του βαθμού κορεσμού (S_w), υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

Πορώδες:

$$S_{X0} = \sqrt{F * \frac{R_{mf}}{R_{X0}}} \quad (28)$$

$$S_{X0} = 1.0$$

Άρα:

$$\begin{aligned} 1.0 &= \sqrt{\Phi * \frac{R_{mf}}{R_{X0}}} = F * \frac{R_{mf}}{R_{X0}} \\ \Rightarrow F &= \frac{R_{X0}}{R_{mf}} = \frac{a}{F^m} \Rightarrow \quad (29) \\ \Rightarrow \Phi &= \left(\frac{a * R_{mf}}{R_{X0}} \right)^{1/m} \end{aligned}$$

Όπου:

Φ = Πορώδες του σχηματισμού.

R_{mf} : Ειδική αντίσταση του αιωρήματος που διείσδυσε στο σχηματισμό.

S_{X0} : Βαθμός κορεσμού της ζώνης ολικής διείσδυσης.

R_{X0} : Ειδική αντίσταση της ζώνης ολικής διείσδυσης.

a : Σταθερά που παίρνει τις παρακάτω τιμές:

$a=1.0$, σε ανθρακικά πετρώματα.

$a=0.62$, σε μη στερεοποιημένη άμμο.

$a=0.81$, σε στερεοποιημένη άμμο.

m : Σταθερά που παίρνει τις παρακάτω τιμές:

$m=2.0$ σε στερεοποιημένη άμμο, ανθρακικά πετρώματα.

$m=2.15$ σε μη στερεοποιημένη άμμο.

Από την ίδια σχέση προκύπτει ότι:

$$\Phi = \left[\frac{a (R_{ml}/R_{xo})}{S^2_{xo}} \right]^{1/m} \quad (30)$$

Μέθοδοι υπολογισμού πορώδους

Ακουστική Διαγραφία (Sonic Log).

Το Sonic Log είναι μέθοδος μέτρησης ταχύτητας υπερήχων μέσα σ' ένα γεωλογικό σχηματισμό. Στην πραγματικότητα υπολογίζεται ο χρόνος μετάδοσης (Δt) ενός διαμήκους/συμπιεστικού υπερηχητικού κύματος που διέρχεται μοναδιαίο μήκος γεωλογικού σχηματισμού (σε ft ή m). Η ταχύτητα υπερήχων συνδέεται άμεσα τόσο με το πορώδες όσο και με την παραμορφωσιμότητα του σχηματισμού.

Μοντέρνα συστήματα της μεθόδου αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη τόσο της φυσικής και μηχανικής κατάστασης της βραχομάζας όσο και της κατάστασης της σωλήνωσης της γεώτρησης, έχοντας τη δυνατότητα μετατροπής του «ακουστικού» σήματος σε οπτικό. Στο πλαίσιο αυτό, η λεπτομερής επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να δώσει πληροφορίες για το υπάρχον πεδίο τάσεων στην περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτη της βραχομάζας ακόμη και σε σωληνωμένη γεωτρηση. Επίσης μπορεί να συνδυαστεί με ταυτόχρονη χρήση των Caliper Log και Gamma Log (Εικ. 11).

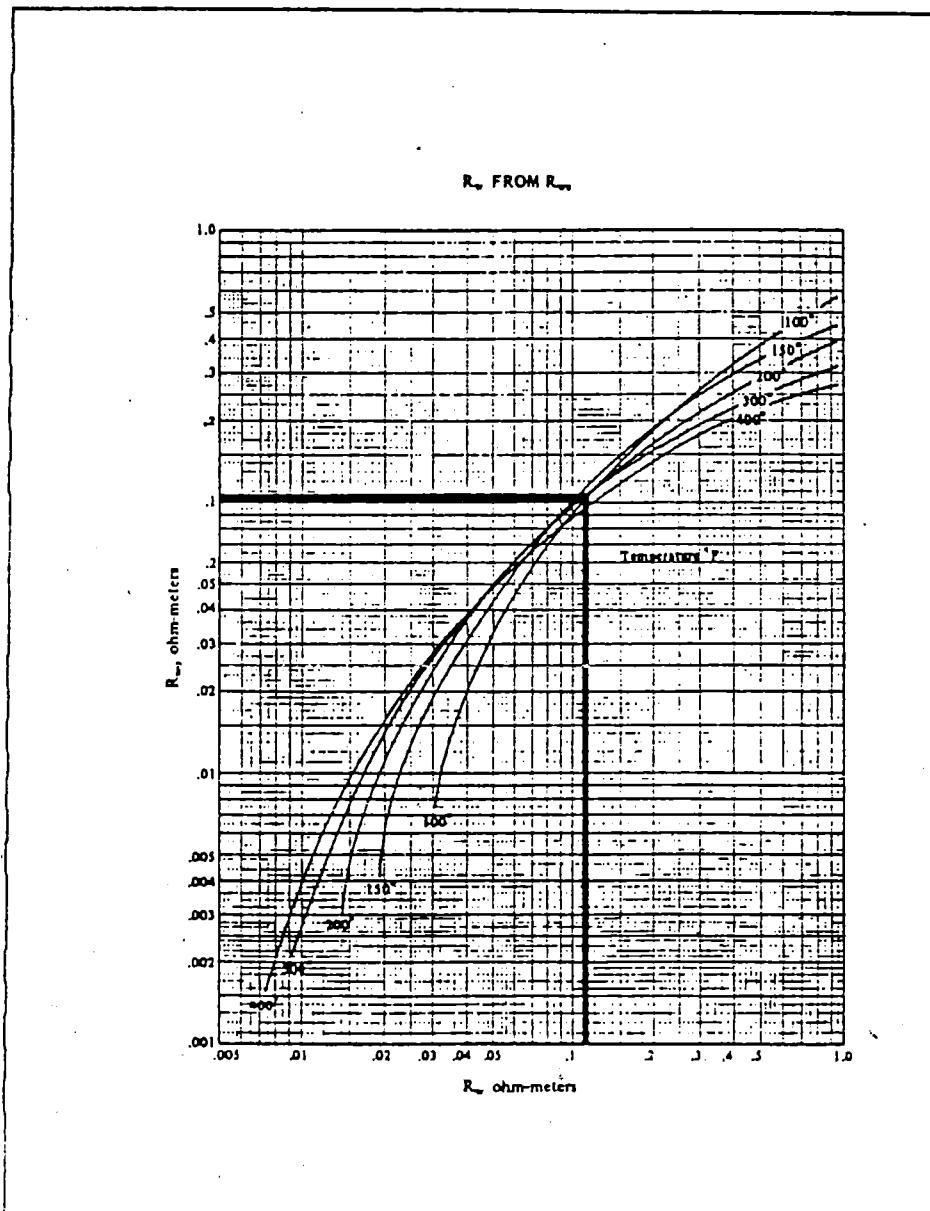
Ο χρόνος διέλευσης (Δt) των υπερήχων μέσα σ' ένα γεωλογικό σχηματισμό, εξαρτάται από τη λιθολογία και το πορώδες του σχηματισμού (Πίνακας 1).

Το πορώδες του σχηματισμού με βάση τα δεδομένα του Sonic Log, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (Wyllie et al. 1958).

$$\Phi = \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_i - \Delta t_{ma}} \right) * 1/C_p \quad (31)$$

$$C_p = \frac{\Delta t_{sh} - C}{100}$$

Όπου:
 Φ_{sonic} : Πορώδες.



Εικ. 10. Νομόγραμμα υπολογισμού της R_w με βάση τις τιμές R_{we} και T_f .

Δt_{log} : Χρόνος μετάδοσης κύματος της δοκιμής.

Δt_{ma} : Χρόνος αναφοράς μετάδοσης κύματος, για κάθε πέτρωμα (Πίνακας 1).

Δt_i : Χρόνος μετάδοσης κύματος στο υγρό της γεώτρησης (189 για αιώρημα γλυκού νερού και 185 για αιώρημα θαλασσινού νερού).

C_p : Συντελεστής συμπύκνωσης.

C : Σταθερά, ιση με 1.0 (Hilchie, 1978).

Δt_{sh} : Χρόνος μετάδοσης κύματος σε γειτονικές αργιλλούς.

Ο χρόνος Δt αυξάνει με την παρουσία υδρογονανθράκων. Έτσι σε παρουσία υδρογονανθράκων το πορώδες υπολογίζεται ως:

Πίνακας 1.

Τυπικές τιμές αναφοράς ταχύτητας (V_{ma}) και χρόνου (Δt_{ma}) διέλευσης υπερήχων μέσα στη μάζα διαφορετικών πετρωμάτων (Schlumberger Well Services Inc., 1972).

Πέτρωμα	V_{ma} (ft/sec)	Δt_{ma} (μsec/ft)	Δt_{ma} (μsec/ft) συνήθης τιμή
Ψαμμίτης	18000-19000	55.5-51.0	55.5-51.0
Ασθεντόλιθος	21000-23000	47.6-43.5	47.6
Δολομίτης	23000-26000	43.5-38.5	43.5
Ανυδρίτης	20000	50.0	50.0
Άλας	15000	66.7	67.0
Σωλήνα (σιδηρος)	17500	57.0	57.0

$$\Phi = \Phi_{sonic} * 0.7, (\text{φυσ. αέριο}) \quad (32)$$

$$\Phi = \Phi_{sonic} * 0.9, (\text{πετρέλαιο})$$

Η παραπάνω σχέση υπολογισμού του πορώδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια για στερεοοποιημένους ψαμμίτες και ανθρακικά πετρώματα, χωρίς διακλάσεις. Η παρουσία διακλάσεων προκαλεί μείωση των τιμών Sonic Log, δεδομένου ότι μετρά κυρίως το πρωτογενές πορώδες. Το ποσοστό του δευτερογενούς πορώδους υπολογίζεται στην περίπτωση αυτή ως η διαφορά ολικού πορώδους μείον το πορώδες που μετρήθηκε. Το ολικό πορώδες υπολογίζεται με κάποια από τις μεθόδους ραδιενεργού ακτινοβολίας (Density Log, Neutron Log). Στην Εικόνα 12 δίδεται νομόγραμμα υπολογισμού του πορώδους με βάση τις τιμές Δt του Sonic Log.

Διαγραφία Πύκνότητας (Density Log).

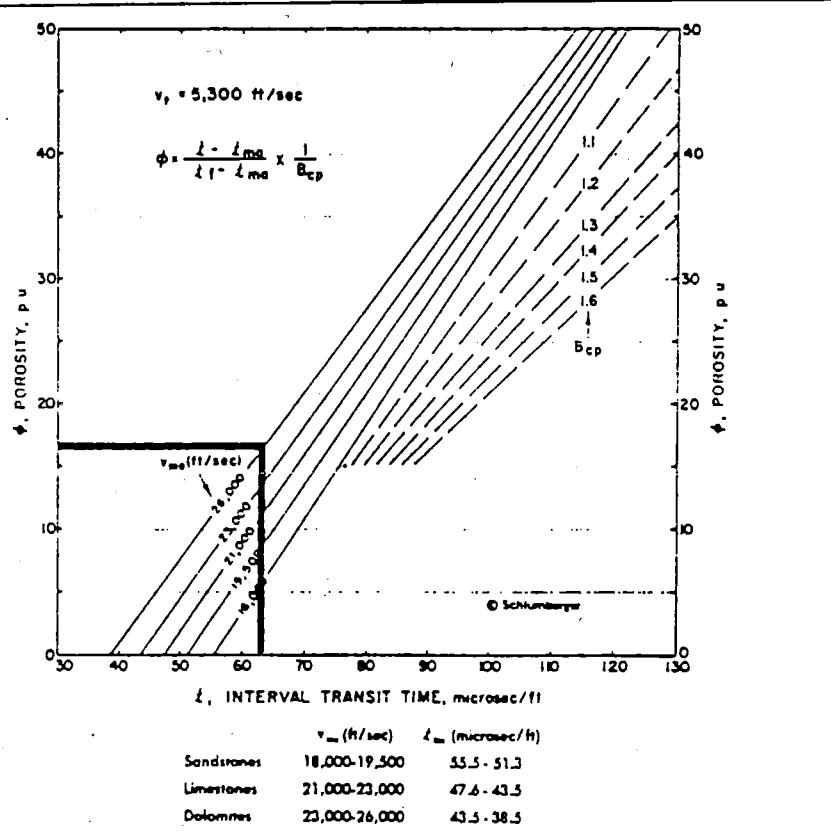
Πρόκειται για ραδιενεργό μέθοδο υπολογισμού του πορώδους, με μέτρηση της πυκνότητας ηλεκτρονίων στο σχηματισμό. Αποτελεί χρήσιμο εργαλείο έρευνας για τον εντοπισμό εβαποριτών και φυσικού αερίου, την εκτίμηση της παρουσίας αργιλλού σε αργιλλώδη ή αργιλλοααμμώδη στρώματα και τέλος τον προσδιορισμό της πυκνότητας των υδρογονανθράκων.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια πηγή ακτινοβολίας γ (γάμμα), ραδιενεργού κοβαλτίου-60 ή κεσίου-137, η οποία κινείται κατά μήκος της γεώτρησης. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη σύγκρουση των σωματιδίων των ακτίνων γ με διεγειρόμενα ηλεκτρόνια του σχηματισμού. Η σύγκρουση αυτή προκαλεί μείωση της ενέργειας των σωματιδίων της ακτινοβολίας γ (φαινόμενο Compton, Tittman & Wahl, 1965).

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής καταγράφεται ως πυκνότητα του σχηματισμού (ρ_b) σε gr/cc.

Στην Εικόνα 13 δίδεται διάγραμμα ταυτόχρονης αποτύπωσης του Density Log με Caliper Log και Gamma Ray Log.

Η πυκνότητα ενός σχηματισμού (ρ_b) είναι συνάρτηση της πυκνότητας του υλικού, του πορώδους και της πυκνότητας του περιεχόμενου νερού / υγρού των πόρων. Ο υπολογισμός του πορώδους (Φ_{DEN}) με βάση το Density Log γίνεται



Εικ. 12. Νομόγραμμα υπολογισμού του πορώδους με βάση τα δεδομένα του Sonic Log.

είτε από το νομόγραμμα της Εικόνας 14, είτε από την ακόλουθη σχέση:

Πίνακας 2.

Αντιπροσωπευτικές τιμές αναφοράς πυκνότητας μερικών πετρωμάτων (Schlumberger Well Services Inc., 1972)

Πέτρωμα	ρ_{ma} (gr/cc)
Ψαμμίτης	2.648
Ασθεντόλιθος	2.710
Δολομίτης	2.876
Ανυδρίτης	2.977
Άλας	2.032

$$\Phi_{DEN} = \frac{\rho_{ma} - \rho_{ma}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (33)$$

Όπου:

ρ_{ma} : Πυκνότητα αναφοράς για κάθε υλικό (Πίνακας 2).

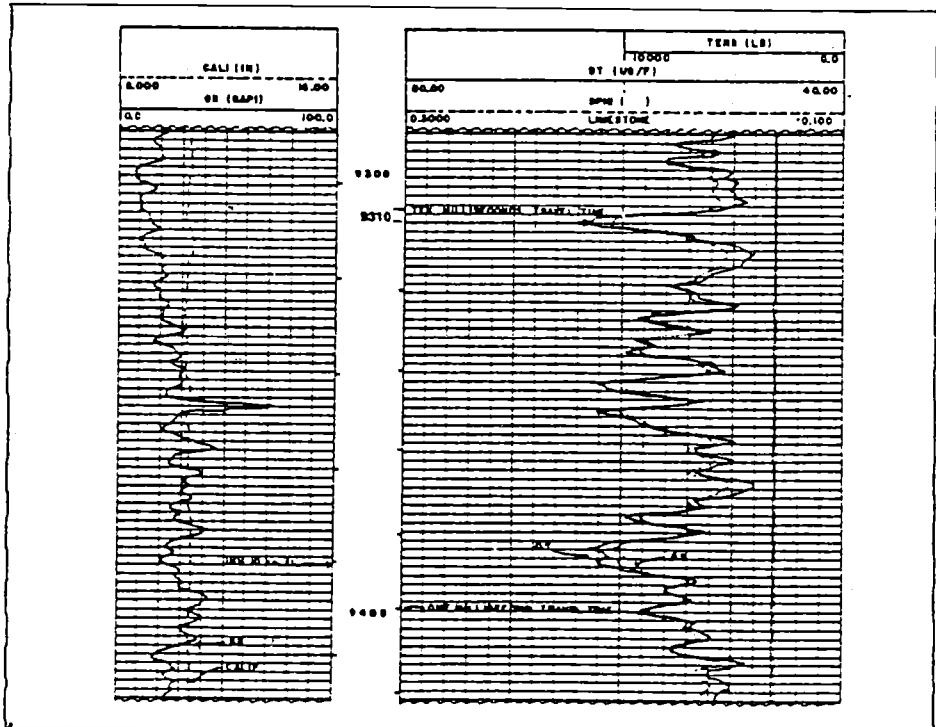
ρ_f : Πυκνότητα που μετρήθηκε.

ρ_i : Πυκνότητα του νερού των πόρων (γλυκό νερό: 1.0, θαλασσινό νερό: 1.1, φυσικό αέριο: 0.7).

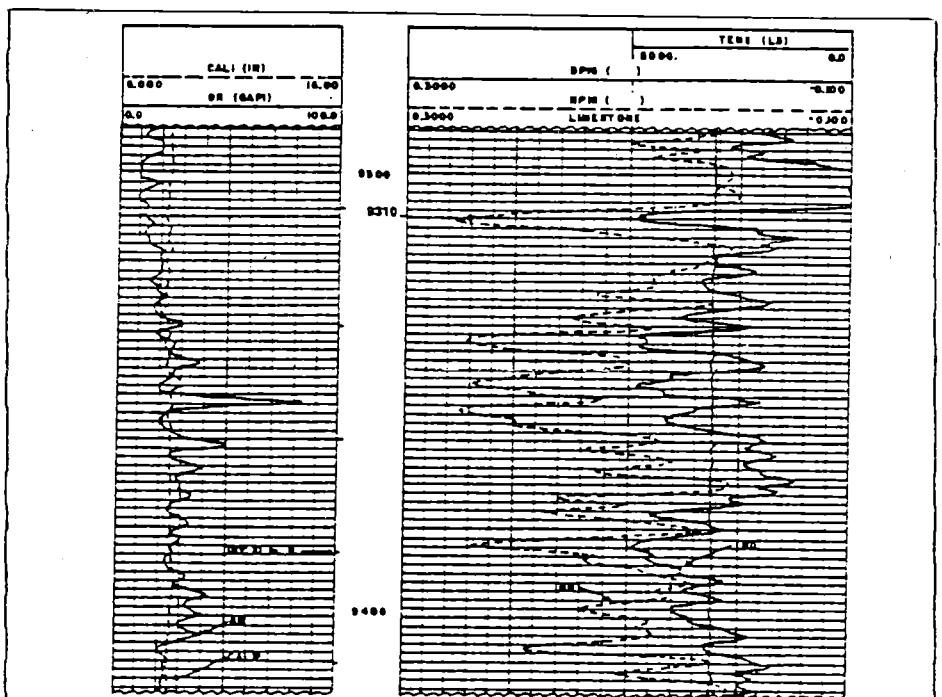
Διαγραφία Νετρονίων (Neutron Log)

Πρόκειται για ραδιενέργειο μέθοδο υπολογισμού του πορώδους ενός γεωλογικού σχηματισμού. Η μέθοδος στηρίζεται στη μέτρηση της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου στο σχηματισμό. Σε πορώδεις σχηματισμούς, απαλλαγμένους αργίλου, όπου οι πόροι γεμίζουν νερό ή πετρέλαιο, το Neutron Log μετρά ως πορώδες, το νερό των πόρων.

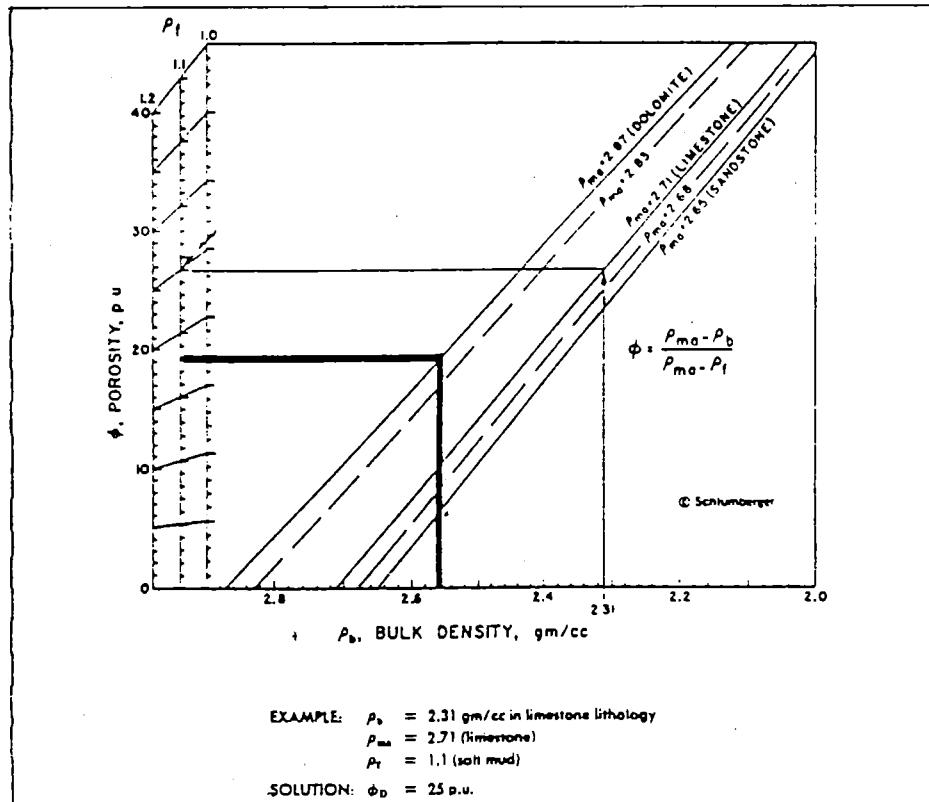
Ως πηγή νετρονίων, η μέθοδος χρησιμοποιεί ένωση αμερικιού και θηρύλου με συνεχή εκπομπή νετρονίων. Τα νετρόνια αυτά συγκρούονται με τους πυρήνες του σχηματισμού, με αποτέλεσμα την απώλεια μέρος της ενέργειας των νετρονίων. Επειδή η μάζα των ατόμων υδρογόνου είναι περίπου ίση με τη μάζα των νετρονίων, η μέγιστη απώλεια ενέργειας παρατηρείται κατά τη σύγκρουση των νετρονίων με άτομα υδρογόνου. Έτσι η μέγιστη απώλεια ενέργειας είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας του σχηματισμού σε



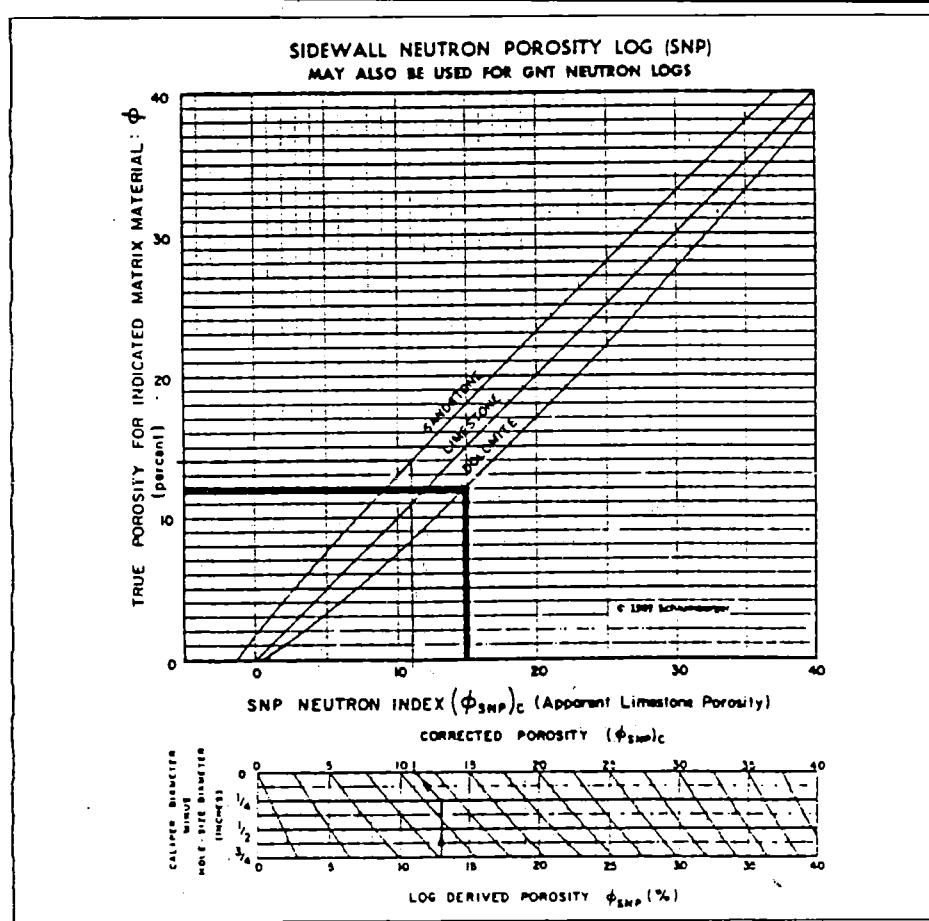
Εικ. 11. Ταυτόχρονο διάγραμμα Sonic Log, Caliper Log και Gamma Ray Log.



Εικ. 13. Διάγραμμα ταυτόχρονης αποτύπωσης των Density Log, Caliper Log και Gamma Ray Log.



Εικ. 14. Νομόγραμμα υπολογισμού του πορώδους από το Density Log (Schlumberger Well Services Inc., 1977)



Εικ. 15. Νομόγραμμα υπολογισμού πορώδους με βάση τα δεδομένα του Sidewall Neutron Log.

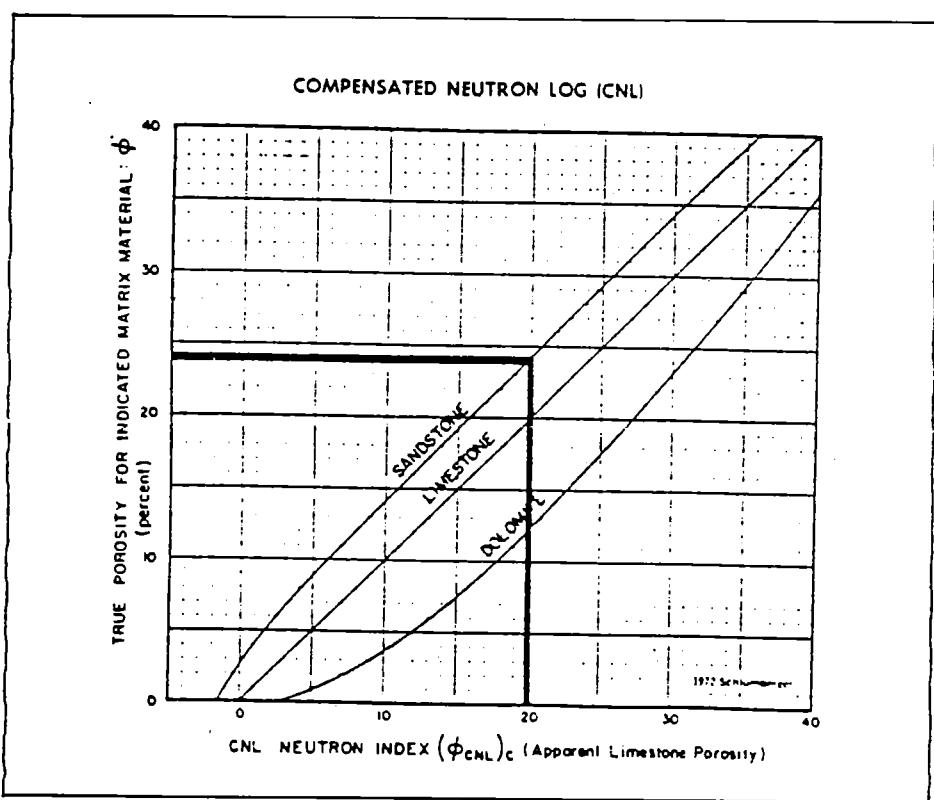
υδρογόνο.

Επειδή η περιεκτικότητα ενός πορώδους σχηματισμού σε υδρογόνο σχετίζεται με το πορώδες, συνεπάγεται ότι η μετρούμενη απώλεια ενέργειας είναι συνάρτηση του πορώδους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρουσία φυσικού αερίου στους πόρους ενός σχηματισμού προκαλεί τιμές πορώδους της μεθόδου μικρότερες σε σχέση με το νερό ή το πετρέλαιο, δεδομένου ότι η περιεκτικότητα του φυσικού αερίου σε υδρογόνο είναι σχετικά μικρότερη από το νερό ή το πετρέλαιο.

Η ευαισθησία της μεθόδου εξαρτάται: α) από τους διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών β) από την απόσταση μεταξύ πηγής και ανιχνευτή γ) από τη λιθολογία, π.χ. ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, δολομίτες.

Στις Εικόνες 15 (Schlumberger Well Services Inc., 1969) και 16 (Schlumberger Well Services Inc., 1972) δίδονται νομογράμματα υπολογισμού του πορώδους με βάση τα δεδομένα της Διαγραφίας Νε-

Εικ. 16. Νομόγραμμα υπολογισμού πορώδους με βάση τα δεδομένα του Compensated Neutron Log.



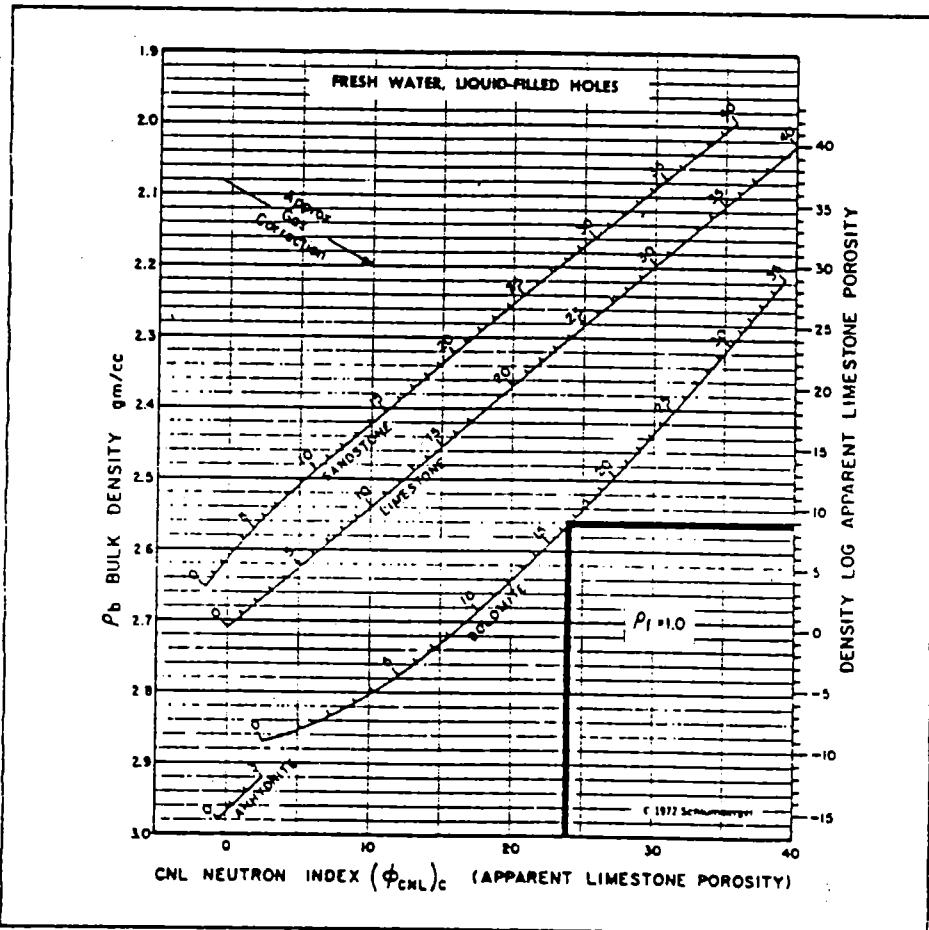
Εικ. 17. Νομόγραμμα υπολογισμού πορώδους ($\Phi_N - \Phi_D$), για $\rho_f = 1.0$.

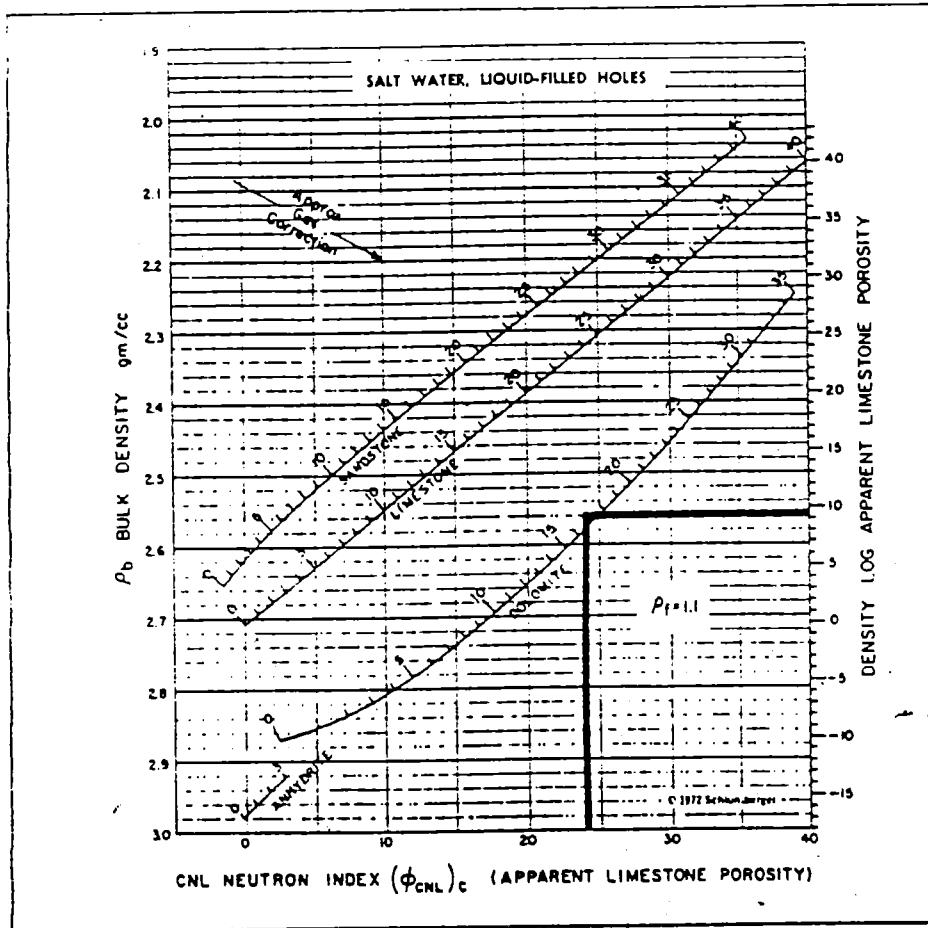
τρονίων. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, τα νομογράμματα αυτά πρέπει να είναι της ίδιας εταιρείας που κατασκευάζει τη χρησιμοποιούμενη συσκευή.

Οι συσκευές Neutron Log κυκλοφορούν σε δύο βασικούς τύπους. Στον παλαιότερο τύπο, που ονομάζεται Sidewall Neutron Log, πηγή και ανιχνευτής βρίσκονται επί ενός φορέα που μετακινείται επί του τοιχώματος της γεώτρησης. Ο νεώτερος τύπος ονομάζεται Compensated Neutron Log και φέρει δύο ανιχνευτές αντί για ένα. Έτσι επηρεάζεται λιγότερο από τις ανωμαλίες των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

Συνδυασμός Διαγραφίας Νετρονίων και Πυκνότητας (Neutron Log - Density Log)

Η δυνατότητα της σύγχρονης καταγραφής στο ίδιο διάγραμμα, αφ' ενός των Neutron Log και Density Log αφ' ετέρου δε των Gamma Ray και Caliper





Εικ. 18. Νομόγραμμα υπολογισμού πορώδους (Φ_N - Φ_D), για $\rho_f=1.1$.

Log, μπορεί να δώσει ολοκληρωμένη εικόνα για τη λιθολογία και το πορώδες του γεωλογικού σχηματισμού καθώς και για την παρουσία υδρογονανθράκων.

Από τα νομογράμματα των Εικόνων 17 και 18 (Schlumberger Well Services Inc., 1972) μπορεί να υπολογιστεί το αληθές πορώδες διαφορετικών πετρωμάτων με βάση το συνδυασμό δεδομένων των Neutron και Density Log (Φ_N και Φ_D).

Υπολογιστικά το ίδιο αποτέλεσμα προσδιορίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$\Phi_{N-D} = \sqrt{\frac{\Phi_N^2 + \Phi_D^2}{2}} \quad (34)$$

καθαρή άμμο. Υψηλές τιμές GR Log μπορούν να μετρηθούν και σε ψαμμίτες και άμμους στην περίπτωση που περιέχουν καλιούχους αστρίους, μαρμαρυγίες, ραδιενεργά νερά κλπ.

Στις Εικόνες 19 και 20 δίδεται σχηματικά η σχέση μεταβολής του GR Log σε σχέση με τα Density Log και Neutron Log, ανάλογα με τη λιθολογία.

Το ποσοστό της αργιλλού μέσα σ' ένα σχηματισμό υπολογίζεται από την εξισώση 37 (Dresser Atlas, 1979) αφού προγούμενα υπολογιστεί ο Δείκτης ακτινοβολίας γ (I_{GR} Gamma Ray Index), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Schlumberger Well Services Inc., 1974):

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (36)$$

Όπου:

GR_{min}: GR καθαρής άμμου ή ανθρακικών πετρωμάτων (π.χ. 15).

GR_{max}: GR σε καθαρή άργιλλο (π.χ. 128).

Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Dresser Atlas, 1979), ο όγκος της αργιλλού (V_{sh}) στο σχηματισμό ισούται με:

$$V_{sh} = 0.33[2^{I_{GR}} - 1.0], \text{ σε στερεοποιημένους σχηματισμούς}$$

$$V_{sh} = 0.083[2^{3.71_{GR}} - 1.0], \text{ σε τριτογενείς σχηματισμούς} \quad (37)$$

Ανακεφαλαίωση

Οι μέθοδοι Logging που περιγράφαμε χρησιμοποιούνται στον υπό σχηματισμό του πορώδους, της διαπερατότητας, του βαθμού κορεσμού και της ειδικής αντίστασης ενός γεωλογικού σχηματισμού. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας αυτές οι μέθοδοι χωρίζονται σε ηλεκτρικές, ακουστικές και ραδιενεργού ακτινοβολίας.

Βιβλιογραφία

ARCHIE, G.E. (1942). - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Petroleum Technology, 5, 54-62.

ASQUITH, G. & CHARLES, G. - Basic Well Log Analysis for Geologists: Amer. Assoc. Petrol. Geol., 216pp.

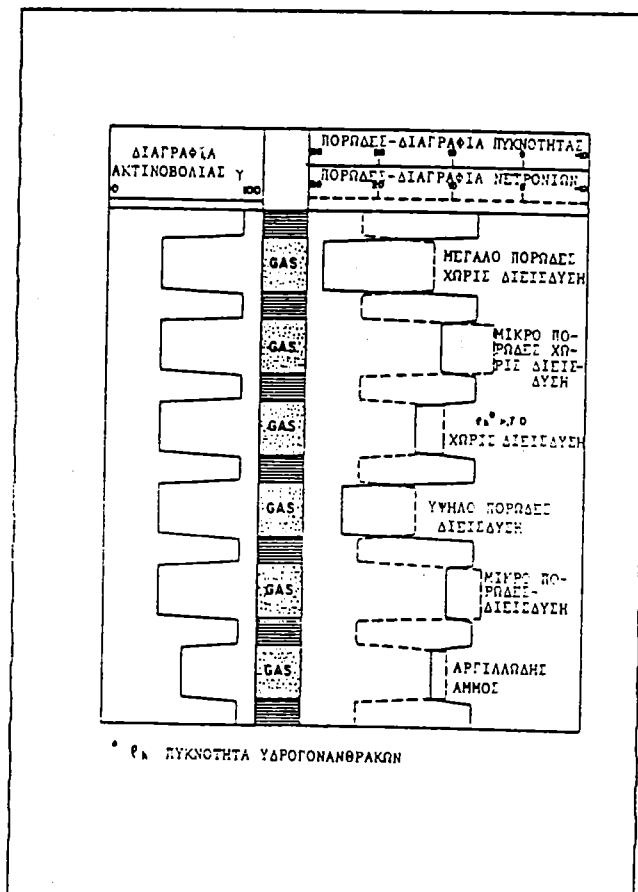
BATEMAN, R.M. & KONEN, C.E. (1977). - The Log analyst and the programmable

Διαγραφία ακτινοβολίας γ (Gamma Ray Log)

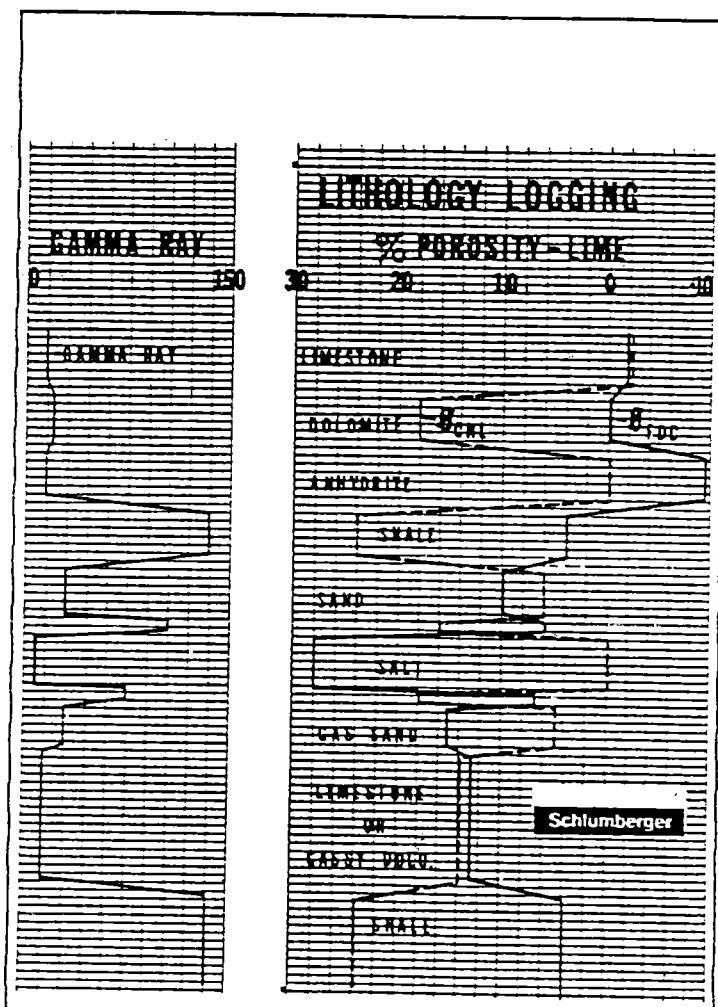
Η μέθοδος αυτή μετρά τη φυσική ραδιενέργεια στον υπό όψη σχηματισμό, γεγονός που επιτρέπει τη δυνατότητα προσδιορισμού της λιθολογίας.

Ψαμμίτες και άμμοι απαλλαγμένοι αργιλλού καθώς και ανθρακικά πετρώματα εμφανίζουν χαμηλές τιμές GR Log ενώ η παρουσία αργιλλού προκαλεί αύξηση των τιμών αυτών.

Αιτία του φαινομένου αυτού είναι η μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδιενεργών στοιχείων στην άργιλλο σε σχέση με την



Εικ. 19. Σχηματική μεταβολή του GR Log με τα Neutron και Density Log, σε πορώδεις σχηματισμούς.



Εικ. 20. Σχηματική μεταβολή του GR Log και των Neutron και Density Log, ανάλογα με τη λιθολογία.

pocket calculator: The Log Analyst, 18, 5, 3-11.

CAROTHERS, J.E. (1968). A statistical study of the formation factor relation to porosity: The Log Analyst, 9, 38-52.

DRESSER ATLAS (1974). - Log interpretation fundamentals: Houston, Dresser Industries Inc.

DRESSER ATLAS (1979). - Log interpretation charts: Houston, Dresser Industries

Inc. 107pp.

HILCHIE, D.W. (1978). - Applied openhole Log interpretation: Golden, Colorado, D.W. Hilchie Inc., 161pp.

SCHLUMBERGER WELL SERVICES INC. (1969). - Log interpretation charts: Houston.

SCHLUMBERGER WELL SERVICES INC. (1972). - Log interpretation charts: Houston.

SCHLUMBERGER WELL SERVICES INC. (1974). - Log interpretation manual / principals, vol II: Houston.

SCHLUMBERGER WELL SERVICES INC. (1977). - Log interpretation charts: Houston.

TITTMAN, J. & WAHL, J.S. (1965). - The physical foundations of formation density logging (Gamma-Gamma): Geophysics, 30, 284-294.