



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ - ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Κ. ΔΕΛΑ

Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΦΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ Κ. ΔΕΛΑ

Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΦΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Καθηγητής Ανδρέας Γεωργακόπουλος



Copyright © Αναστασία Κ. Δέλα

Copyright © Α.Π.Θ.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΦΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



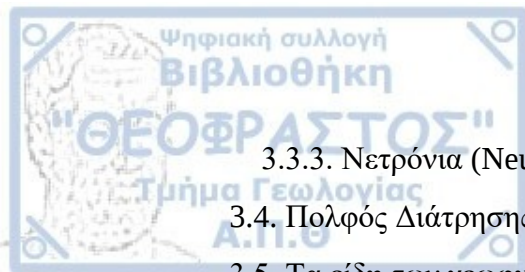
**Αφιερώνεται στην μητέρα μου,
Ερμιόνη.**





Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Ορισμοί.....	2
1.2.1. Ταμιευτήρας (Reservoir).....	2
1.2.2. Πετροφυσικές ιδιότητες	3
1.2.3. Οι ιδιότητες των ρευστών των σχηματισμών (fluids).....	7
1.2.4. Ορυκτολογική Σύσταση (Mineralogical Composition)	11
2. ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ.....	13
2.1. Ορισμός.....	13
2.2. Τρόπος εκτέλεσης	14
2.3. Οφέλη των διαγραφιών (loggings) σε σχέση με τα θρύμματα (cuttings) ή τα καρότα (cores).....	16
2.4. Το πρόγραμμα των διαγραφιών (logging program) σε σχέση με την πυρηνοληψία και την τσιμέντωση των γεωτρήσεων	19
2.4.1. Σωλήνωση επαφής (Conductor pipe).....	21
2.4.2. Σωλήνωση επιφάνειας (Surface casing).....	22
2.4.3. Ενδιάμεση σωλήνωση (Intermediate casing string).....	23
2.4.4. Σωλήνωση παραγωγής (Production casing).....	24
2.4.5. Σωλήνωση liner (Liner)	25
2.5. Μετρήσεις των γεωφυσικών διαγραφών.....	26
2.5.1. Φυσικά φαινόμενα.....	26
2.5.2. Προκλητά ή συνεπαγόμενα φαινόμενα.....	27
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (C) ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (R) (Horizontal & Vertical Resistivity)	28
3.1. Ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα.....	28
3.2. Κάθετη και οριζόντια διάτρηση	29
3.3. Κατηγορίες με παραδείγματα.....	30
3.3.1. Αντίσταση (Resistivity).....	32
3.3.2. Πυκνότητα (Density).....	32



3.3.3. Νετρόνια (Neutron).....	34
3.4. Πολφός Διάτρησης.....	36
3.5. Τα είδη των γεωφυσικών καταγραφών (Type of Logs).....	41
3.5.1. Διαγραφίες αντίστασης και φυσικού δυναμικού (Resistivity and Spontaneous (SP) Log)	41
3.5.2. Ακουστικές διαγραφίες (Acoustic Logging).....	45
3.5.3. Ραδιενεργές διαγραφίες (Nuclear Logging).....	49
3.5.4. Ακουστική καταγραφή (Sonic Logging).....	61
3.5.5. Γεωφυσικές διαγραφίες Caliper (Openhole Caliper Logs)	66
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70





Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη των διαφόρων χρήσεων των γεωφυσικών καταγραφών στην διαδικασία αναζήτησης των υδρογονανθράκων καθώς και σε άλλες εφαρμογές.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στην σημασία ενός πετρελαϊκού συστήματος φόρτισης, στις πετροφυσικές και γεωλογικές ιδιότητες καθώς και στις πληροφορίες για τα ρευστά των πετρωμάτων που αποτελούν υπόγειους ταμιευτήρες. Κυρίως όμως, γίνεται ανάλυση στην ύπαρξη του μεγάλου αριθμού διαφορετικών διαγραφιών και επεξήγηση του τρόπου εκτέλεσης του κάθε τύπου ξεχωριστά.

Τέλος, τονίζεται η μεγάλη σημασία και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των γεωφυσικών καταγραφών σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, που αποτυπώνουν τα διάφορα χαρακτηριστικά του υπεδάφους και αναζητούν των ύπαρξη ρευστών οικονομικού ενδιαφέροντος, μέσω της χρήσεως των φωρατών. Η αξία των γεωφυσικών καταγραφών ως μέσο συγκέντρωσης γεωλογικών δεδομένων κρίνεται πλέον ανεκτίμητη.



The main purpose of this thesis is the development of the various uses of geophysical records in the hydrocarbon search process as well as other applications.

Specifically, at first, reference is made to the importance of an oil charging system, to the petrophysical and geological properties, and to the fluid information of the reservoir rocks. Above all, however, there is an analysis of the existence of a large number of different loggings and an explanation of how each type of execution is performed.

Finally, the great importance and interpretation of the results of measurements of geophysical records in deep drilling, highlighting the various characteristics of the subsoil and looking for the existence of liquid economic interest through the use of logging tools, is emphasized. The value of geophysical records as a means of gathering geological data is now invaluable.



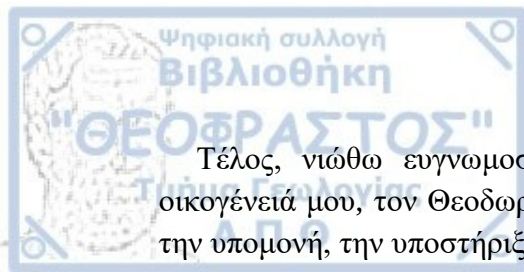
Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος «Διπλωματική εργασία» του Η' εξαμήνου, για τον Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας και αφορά την ανάπτυξη και ανάλυση της χρήσης των γεωφυσικών καταγραφών στην έρευνα των υδρογονανθράκων και σε άλλες εφαρμογές. Σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση των διαφορετικών μεθόδων και τεχνικών εφαρμογής των διαγραφιών σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, για τον εντοπισμό ρευστών οικονομικού ενδιαφέροντος.

Η ανάθεση του θέματος έγινε από τον καθηγητή κ. Ανδρέα Γεωργακόπουλο. Η διπλωματική αυτή εργασία αρχικά αναφέρεται στην επιστήμη της γεωλογίας πετρελαίου και στην αναζήτηση πιθανών θέσεων γένεσης υδρογονανθράκων. Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που επηρεάζουν και συμβάλλουν στην δημιουργία των υδρογονανθράκων. Για την αξιολόγηση και εκμετάλλευση των πιθανών θέσεων αποθήκευσης υδρογονανθράκων μέσω της γεωτρητικής έρευνας, κατά τη διάρκεια της γεώτρησης χρησιμοποιούνται τα θρύμματα, τα καρότα και οι διαγραφίες. Στα κεφάλαια παρακάτω αναφέρονται κάποιοι απαραίτητοι ορισμοί της γεωλογίας πετρελαίου (όπως ταμιευτήρας, διαπερατότητα, πορώδες κ.α.) και έπειτα αναπτύσσονται με την σειρά ο τρόπος εκτέλεσης των γεωφυσικών καταγραφών, το πρόγραμμα των διαγραφιών καθώς και τύποι αυτών και οι εφαρμογές τους για τον καθένα ξεχωριστά. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση στις ηλεκτρικές μεθόδους (ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντίσταση) που χρησιμοποιούνται στις γεωφυσικές καταγραφές παραθέτοντας και παραδείγματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των διαφορετικών τύπων των διαγραφιών καθίστανται πολύ σημαντικά και πλέον απαραίτητα για την λήψη ακριβέστερων και ορθότερων πληροφοριών για το υπέδαφος σε μεγάλα βάθη. Γι' αυτό το λόγο η εξέλιξη των γεωφυσικών διαγραφιών συνεχίζεται μέχρι και σήμερα με στόχο ακόμη πιο εξειδικευμένα αποτελέσματα μετρήσεων.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέβαλλαν στην πραγματοποίησή της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Ανδρέα Γεωργακόπουλο, καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, που μου ανέθεσε την εκπόνηση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του σε όλη τη χρονική διάρκεια της προσπάθειάς μου αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι με βοήθησαν και με στήριξαν τα χρόνια της φοίτησης μου στο τμήμα Γεωλογίας του ΑΠΘ, τους καθηγητές μου, τους συμφοιτητές μου και τους φίλους μου, με τους οποίους μοιράζομαι κάθε επιτυχία και ευτυχία και κυρίως, την Θεοδωρίδου Σοφία για την συνεισφορά της και συμβολή της στην προσπάθειά μου το τελευταίο αυτό διάστημα.



Τέλος, νιώθω ευγνωμοσύνη και θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την οικογένειά μου, τον Θεοδωρίδη Θεόφιλο και γενικά τους δικού μου ανθρώπους για την υπομονή, την υποστήριξη, την κατανόηση και την παρότρυνσή τους όλο αυτό το διάστημα των φοιτητικών μου σπουδών.

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2017

1.1. Γενικά

Στην επιστήμη της γεωλογίας πετρελαίου αναζητούνται πιθανές θέσεις γένεσης και δημιουργίας υδρογονανθράκων. Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν στη γένεση του πετρελαίου εντός των ιζηματογενών λεκανών αφορούν :

A) Την ύπαρξη Μητρικού Πετρώματος (Source Rock)

B) Την ύπαρξη Ταμιευτήρα (Reservoir)

Γ) Την ύπαρξη Μονωτήρα, Πέτρωμα – Κάλυμμα (Seal or Cap Rock)

Δ) Την ύπαρξη Παγίδων (Trap)

Ε) Την ύπαρξη Ρηγμάτων και Διακλάσεων μέσω των οποίων γίνεται η μετανάστευση (Migration)

Οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν ένα «Πετρελαϊκό Σύστημα Φόρτισης» και είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν μέσα στο γεωλογικό χρόνο με τη σωστή σειρά, με αποτέλεσμα τη γένεση και τη συγκέντρωση του πετρελαίου.

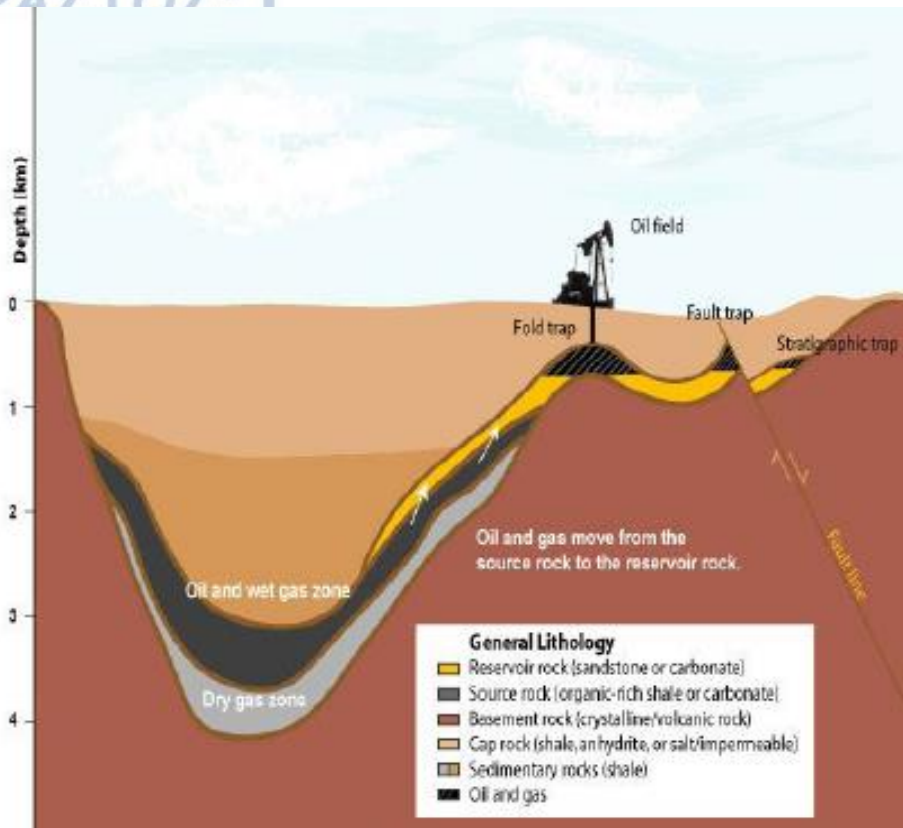
Η αξιολόγηση και εκμετάλλευση των πιθανών θέσεων γένεσης και αποθήκευσης υδρογονανθράκων παρέχεται με τη γεωτρητική έρευνα. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις επιβεβαιώνουν την ύπαρξη ή μη υδρογονανθράκων. Τα εργαλεία για την παρακολούθηση της γεωλογίας κατά τη διάρκεια της γεώτρησης είναι 3 (τρία) :

Θρύμματα (Cuttings)

Καρότα (Cores)

Διαγραφίες (Loggings) ¹

¹ Ανδρέας Γεωργακόπουλος Κοιτασματολογία Πετρελαίου.



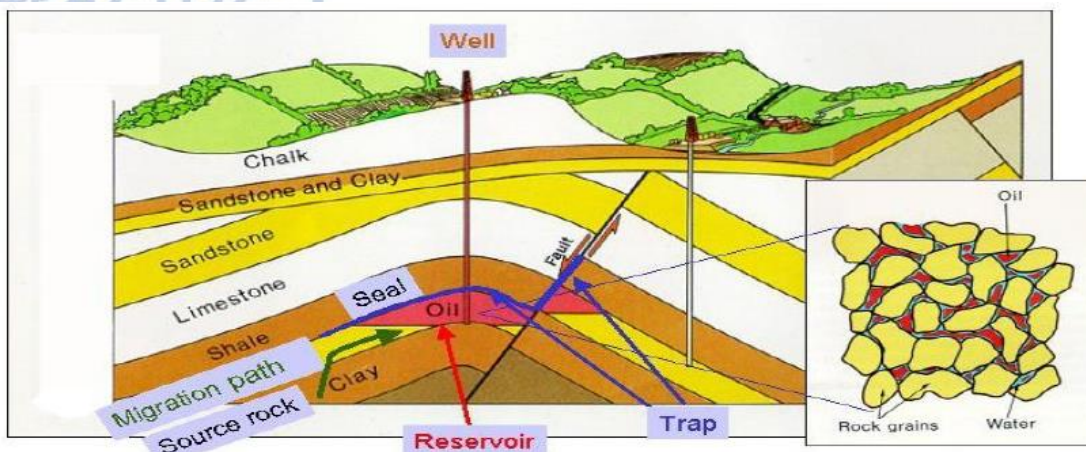
Σχήμα 1.1. : Πετρελαϊκό σύστημα φόρτισης.²

1.2. Ορισμοί

1.2.1. Ταμιευτήρας (Reservoir)

Ο πιο βασικός παράγοντας του Πετρελαϊκού συστήματος είναι ο ταμιευτήρας διότι προσφέρει την συγκέντρωση. Ο ταμιευτήρας αποτελεί συνήθως μία λιθολογική ενότητα με χαρακτηριστικά πορώδους και διαπερατότητας εντός των οποίων εντοπίζονται και αποθηκεύονται οι υδρογονάνθρακες. Μπορεί επίσης να αποτελεί και ένα σύνολο λιθολογικών ενότητων.

² http://www.geology.upatras.gr/attachments/article/314/ppt_geologia_petroleum.pdf



Σχήμα 1.2. : Πέτρωμα ταμιευτήρας.³

Στην αξιολόγηση του ταμιευτήρα απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκτίμηση των πετροφυσικών ιδιοτήτων (πορώδες και διαπερατότητα) με σκοπό τον υπολογισμό του όγκου των υδρογονανθράκων και της ροής μέσα σε αυτόν. Πρέπει να υπάρχει πέτρωμα – ταμιευτήρας με καλό πορώδες και διαπερατότητα για να επέλθει γένεση πετρελαίου. Ένα πέτρωμα μπορεί να θεωρηθεί ταμιευτήρας εφόσον χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικό πορώδες. Οι διαγενετικές αλλαγές και η αποθετική γεωμετρία των πόρων των ιζημάτων του πετρώματος ταμιευτήρα επηρεάζουν σημαντικά το πορώδες και την διαπερατότητα. Για την αξιολόγηση αυτή γίνεται χρήση διάφορων κλάδων της επιστήμης της γεωλογίας, όπως η στρωματογραφία, η ιζηματολογία, η τεκτονική και η μηχανική των ταμιευτήρων.⁴

1.2.2. Πετροφυσικές ιδιότητες

Οι ιδιότητες του Πετρώματος ταμιευτήρα ονομάζονται πετροφυσικές ιδιότητες και αφορούν κυρίως στο πορώδες και στη διαπερατότητα του πετρώματος. Ο προσδιορισμός των παραπάνω παραμέτρων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αναζήτηση των υδρογονανθράκων και την μετέπειτα εκμετάλλευσή τους. Η εκτίμησή τους γίνεται με βάση μετρήσεις που λαμβάνονται από πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις (core measurements), εντός ασωλήνωτης γεώτρησης με γεωφυσικές καταγραφές (well log measurements) και άλλες φορές με σεισμικές μετρήσεις σε συνδυασμό με τη γεωλογία και τη γεωφυσική της μελετώμενης περιοχής. Οι πετροφυσικές ιδιότητες αφορούν στη λιθολογία, τον κορεσμό σε νερό, την πυκνότητα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, την φυσική ραδιενέργεια των σχηματισμών, το φυσικό φαινόμενο NMR (Nuclear Magnetic Resonance), τη μηχανική των στερεών (solid mechanics), το πορώδες και τη διαπερατότητα.⁵

³ http://www.geology.upatras.gr/attachments/article/314/ppt_geologia_petroleum.pdf

⁴ Α.Γεωργακόπουλος : Σημειώσεις Κοιτασματολογίας Πετρελαίου

⁵ Α.Γεωργακόπουλος : Σημειώσεις Κοιτασματολογίας Πετρελαίου



Πορώδες

Με τον όρο πορώδες εννοούμε το λόγο του συνολικού όγκου των πόρων σε μία ιζηματογενή απόθεση ή ένα πέτρωμα, προς το συνολικό όγκο του πετρώματος και εκφράζεται με την σχέση :

$$P_t = (V_p / V_R) * 100 \quad \text{για το ολικό πορώδες.}$$

όπου **P_t** το ολικό πορώδες

V_p ο συνολικός όγκος των πόρων

V_R ο όγκος του ιζήματος

Στην παραπάνω περίπτωση το πορώδες ορίζεται ως ολικό πορώδες ή απόλυτο πορώδες και είναι αυτό που μετράει τους πόρους (κενά διαστήματα) σε μία απόθεση ή σε ένα ιζηματογενές πέτρωμα, είτε υπάρχει επικοινωνία, είτε όχι μεταξύ των πόρων.⁶

Εφόσον λάβουμε υπόψη μας τα κενά διαστήματα **που επικοινωνούν μεταξύ** τους, τότε αναφερόμαστε στο ενεργό πορώδες που αποτελεί το λόγο του συνολικού όγκου των πόρων που βρίσκονται σε επικοινωνία προς τον συνολικό όγκο μίας απόθεσης ή ενός ιζηματογενούς πετρώματος. Ο λόγος αυτός εκφράζεται με την παρακάτω σχέση :

$$P_e = (V_i / V_R) * 100 \quad \text{για το ενεργό πορώδες.}$$

όπου **P_e** το ενεργό πορώδες

V_i ο όγκος των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους

V_R ο όγκος του ιζήματος

Αφού έγινε ο διαχωρισμός μεταξύ του απόλυτου ή ολικού πορώδους και του ενεργού πορώδους, σημαντικό θα ήταν να τονιστεί ότι κάθε πέτρωμα το οποίο διαθέτει τις ιδιότητες του πορώδους σε συνδυασμό με τις ιδιότητες της διαπερατότητας καθίσταται ικανό να χαρακτηριστεί ως πέτρωμα ταμιευτήρας και να αποθηκεύσει πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Ωστόσο η απόδοση ενός ταμιευτήρα δεν

⁶ Αντώνιος Ψιλοβίκος, 2010, Ιζηματολογία, Εκδόσεις Τζιόλα.

εξαρτάται μόνο από το πορώδες και την διαπερατότητα αλλά και από άλλους παράγοντες της μηχανικής (engineering factors).⁷

Επίσης, υπάρχει και η ταξινόμηση των κόκκων του πορώδους του πετρώματος που αποτελεί ταμιευτήρα. Το πορώδες εξαρτάται άμεσα από αυτήν την *ταξινόμηση* η οποία είναι η εξής :

A) πολύ καλά ταξινομημένοι κόκκοι (very well sorted)

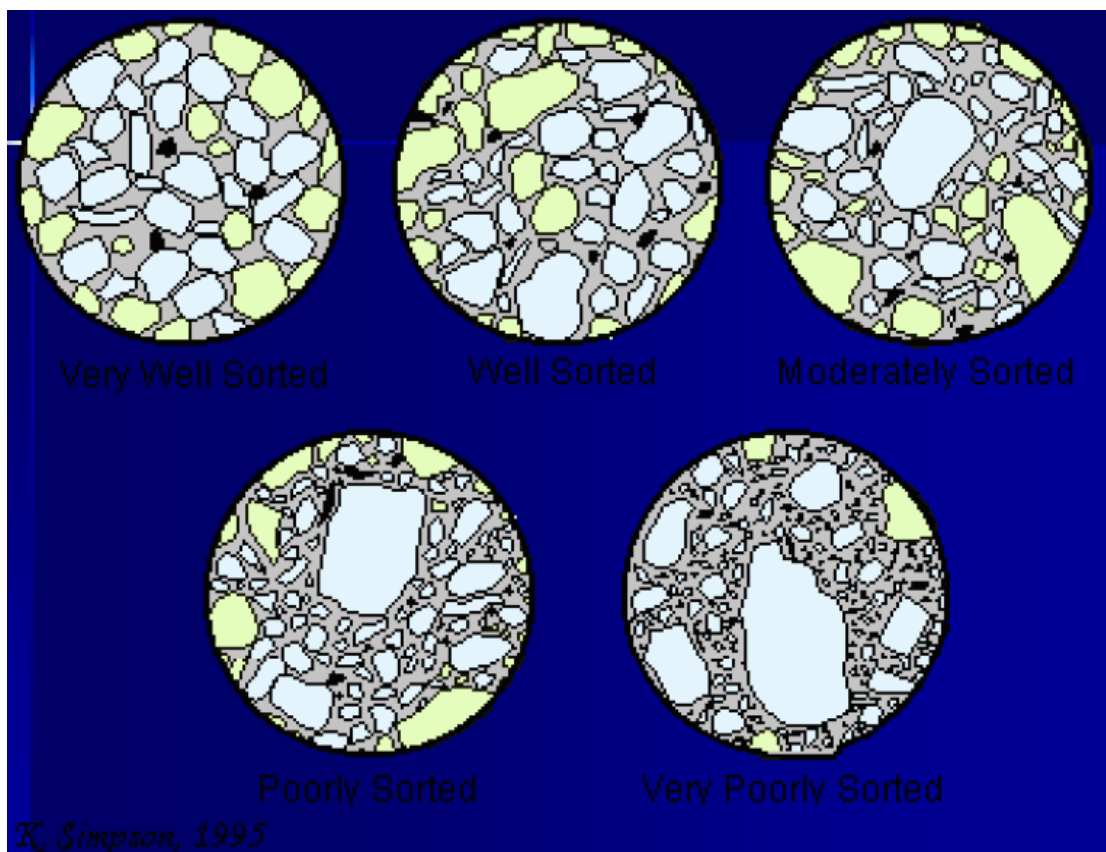
B) καλά ταξινομημένοι (well sorted)

Γ) μέτρια ταξινομημένοι (moderately sorted)

Δ) φτωχά ταξινομημένοι (poorly sorted)⁸

Υπάρχει ακόμη μία διάκριση μεταξύ του πρωτογενούς και του δευτερογενούς πορώδους. Το πρωτογενές πορώδες δημιουργείται σε ένα ίζημα κατά την απόθεση του ενώ το δευτερογενές δημιουργείται έπειτα από την απόθεση του ιζήματος εξαιτίας διαφόρων διεργασιών όπως είναι οι φυσικοχημικές και οι τεκτονικές.

Επομένως το πορώδες του πετρώματος ταμιευτήρα είναι σίγουρο πως επηρεάζει τα αποθέματα ενός πιθανού πετρελαϊκού πεδίου.



Σχήμα 1.3. : Η ταξινόμηση των κόκκων σύμφωνα με το πορώδες.⁹

⁷ Αντώνιος Ψιλοβίκος, 2010, Ιζηματολογία, Εκδόσεις Τζιόλα.

⁸ Ανδρέας Γεωργακόπουλος : Σημειώσεις Κοιτασματολογίας Πετρελαίου

⁹ <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC149/sedimentary%20rocks.pdf>

Όταν λέμε διαπερατότητα εννοούμε την ικανότητα που διαθέτει ένα πορώδες μέσο να επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα στα κενά διαστήματα (πόρους).

Επομένως η διαπερατότητα επηρεάζει τον ρυθμό κίνησης των ρευστών στον ταμιευτήρα καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής.

Η διαπερατότητα, **k**, αποτελεί μια δυναμική ιδιότητα και οι μετρήσεις της γίνονται με πειραματικές μεθόδους ροής σε δείγματα του πετρώματος ταμιευτήρα. Αντίθετα, το πορώδες αποτελεί μία στατική ιδιότητα. Κάθε πορώδες πέτρωμα που διαθέτει επικοινωνούντα κενά διαστήματα (πόρους) και επιτρέπει τη ροή των ρευστών μέσα σε αυτά είναι διαπερατό. Υπάρχουν πετρώματα τα οποία είναι περισσότερο διαπερατά από άλλα και αυτό οφείλεται σε πιθανές ρωγματώσεις που επιτρέπουν την ευκολότερη ροή στα ρευστά. Η ροή των ρευστών καθορίζεται από τον *Νόμο του Darcy*.

Η εξίσωση του Darcy εκφράζεται ως εξής :

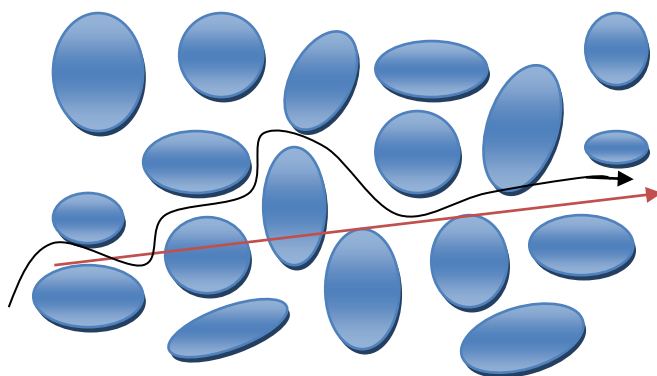
$$Q = (k / \mu) * (A * (P_1 - P_2) / B * L)$$

όπου,	Q	η παροχή σε βαρέλια ανά ημέρα (stb/day)
	k	η διαπερατότητα σε darcies
	A	η επιφάνεια μέσα στην οποία υφίσταται η ροή του ρευστού σε cm ² ή ft ² .
	L	η απόσταση ροής του ρευστού
	P₁-P₂	η διαφορά πιέσεως (πτώση)
	μ	το δυναμικό ιξώδες σε CP (centipoises)
	B	ο συντελεστής όγκου του σχηματισμού σε Bbl.

Όλες οι παραπάνω μονάδες είναι στο σύστημα SI.

Η διαπερατότητα εξαρτάται από το μέγεθος και την υφή των κόκκων (στρογγυλεμένοι, πεπλατυσμένοι, γωνιώδεις κα.), τη διάταξη των κόκκων και τη διεύθυνση μέτρησης. Πρακτικά, έχει αποδειχθεί ότι η διαπερατότητα αυξάνεται, όταν αυξάνει και το πορώδες, γεγονός το οποίο οφείλεται στον χαρακτήρα της δομής και της υφής του ιζήματος. Ωστόσο, η υφή επηρεάζει μόνο τη διαπερατότητα και όχι το πορώδες του ιζήματος.

Η διαπερατότητα αποτελεί συνάρτηση του χρόνου και της πίεσης και μετριέται με διάφορες μεθόδους. Η κυριότερη είναι οι παραγωγικές δοκιμές. Υπάρχουν και άλλες όπου μπορεί να μετρηθεί έμμεσα όπως η μέθοδος NMR (Nuclear Magnetic Resonance) και οι ηχητικές διαγραφίες.



Σχήμα 1.4. : Πραγματική (καμπύλη γραμμή) και θεωρητική (ευθεία γραμμή) ροή των ρευστών σε έναν πορώδες σχηματισμό.

1.2.3. Οι ιδιότητες των ρευστών των σχηματισμών (fluids).

Τα ρευστά που ενδιαφέρουν τους κοιτασματολόγους είναι κυρίως οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο και φυσικό αέριο), που απαντώνται στο εσωτερικό της γης και έχουν την τάση να βρίσκονται υπό μορφή μίγματος (μεγάλος αριθμός ενώσεων πετρελαίου). Η σύσταση του μίγματος των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στον ταμιευτήρα εξαρτάται από τη μετανάστευση και την παγίδευση των υδρογονανθράκων αλλά και από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν μέσα σε αυτόν. Οι ενώσεις πετρελαίου απαρτίζονται από άνθρακα (C) και υδρογόνο (H) σε διαφορετικές αναλογίες και με διαφορετικούς τρόπους (από τα δύο αυτά στοιχεία) και συνεπώς ονομάζονται υδρογονάνθρακες.

Οι ενώσεις των υδρογονανθράκων ομαδοποιούνται χημικά σε σειρές και σχηματίζουν το πετρέλαιο. Κάθε μία από αυτές τις σειρές αποτελείται από όμοιες ενώσεις ως προς τα χαρακτηριστικά τους αλλά και τη μοριακή τους δομή. Μία αποδεκτή σειρά απαρτίζεται από μία ποικιλία ενώσεων που μπορεί να αποτελείται από ιδιαίτερα ελαφρούς υδρογονάνθρακες έως ιδιαίτερα βαρείς ή από σύμπλεγμα αυτών.

Η πιο κοινή σειρά υδρογονανθράκων είναι αυτή των παραφινών. Η σειρά των παραφινών αποτελείται από το αιθάνιο, το προπάνιο, το μεθάνιο, το βουτάνιο κλπ. (Πίν. 1.1.)

Γενικά, είναι γνωστό πως κάθε ουσία μπορεί να υπάρξει σε στερεή, υγρή και αέρια κατάσταση. Οι καταστάσεις αυτές αποτελούν τις φάσεις της ύλης. Κάθε φορά που μία ουσία βρίσκεται σε στερεή, υγρή ή αέρια φάση καθορίζεται από συνθήκες

θερμοκρασίας (T) και πίεσης (P). Όταν οι ενώσεις των υδρογονανθράκων (μόνες τους ή σε μίγματα) αλλάζουν φάση σε κάθε μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας, τότε έχουμε τη «συμπεριφορά φάσης».

Η συμπεριφορά φάσης είναι δυνατόν να αποδοθεί με την συμπεριφορά των μορίων κατά τη διάρκεια δημιουργίας των μιγμάτων. Υπάρχουν τέσσερις παράγοντες που είναι σημαντικοί στην ερμηνεία αυτή και είναι οι εξής :

- Έλξη μορίων
- Απώθηση των μορίων
- Πίεση
- Κινητική ενέργεια

Όσον αφορά στην πίεση, με αύξηση αυτής, τα μόρια τείνουν να ενωθούν, με αποτέλεσμα το αέριο να συμπιεστεί και να μετατραπεί σε υγρό. Με μείωση της πίεσης, το αέριο εξαπλώνεται και έτσι το υγρό τείνει να επέλθει στην αέρια φάση. Οι παραπάνω μεταβολές, οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές της πίεσης, ονομάζονται *κανονική ή φυσιολογική συμπεριφορά φάσεων*.

Ο όγκος έχει και αυτός άμεση σχέση με τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι μεταβολές της πίεσης. Έτσι, η αύξηση του όγκου τείνει να ελαττώσει την πίεση, με αποτέλεσμα να μεγαλώσει η απόσταση των μορίων. Τα μόρια αυτά χτυπούν στα τοιχώματα του σχηματισμού.

<i>Όνομα αλκανίου</i>	<i>Συντακτικός Τύπος</i>
Μεθάνιο	CH ₄
Αιθάνιο	CH ₃ CH ₃
Βουτάνιο	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃

Πίνακας 1.1. Συντακτικοί τύποι αλκάνιων (μεθάνιο, αιθάνιο, βουτάνιο).

Η έλξη των μορίων των ρευστών και η εξωτερική πίεση δρουν με τον ίδιο τρόπο στα μόρια. Όσο η απόσταση ανάμεσα στα μόρια ελαττώνεται τόσο η δύναμη της έλξης μεταξύ τους μεγαλώνει. Ακόμη, ελαττώνεται και με την αύξηση της μάζας. Τα μικρότερα μόρια (π.χ. μεθάνιο, αιθάνιο) παρουσιάζουν μικρότερη έλξη μεταξύ τους και μεγαλύτερη τάση όταν απομακρύνονται, λόγω της κινητικής ενέργειας που διαθέτουν, με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε αέρια. Από την άλλη, τα μεγαλύτερα μόρια (π.χ. εξάνιο, επτάνιο) έχουν την τάση να έλκονται μεταξύ τους και να παραμένουν σε υγρή κατάσταση.

Όσον αφορά στην κινητική ενέργεια, παρατηρείται αύξηση της κίνησης των μορίων καθώς αυξάνεται και η θερμοκρασία. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο το υλικό τείνει να διασπαστεί και έτσι να μειωθεί η πυκνότητα του. Με τον τρόπο αυτό υφίσταται εξάπλωση αερίου ή μεταβολή του υγρού σε

αέριο. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία, η κίνηση των μορίων ελαττώνεται. Έτσι, όλα τα μόρια τείνουν να έλκονται μεταξύ τους και να μένουν στην υγρή φάση ή σε στερεή φάση (παγωμένα). Η παραπάνω συμπεριφορά ονομάζεται *κανονική συμπεριφορά*.

Η απωθητική δύναμη παρουσιάζεται όταν τα μόρια έρθουν πολύ κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται τα ηλεκτρικά τους πεδία. Αυτή η απωθητική δύναμη που αναπτύσσεται έχει την τάση να αυξήσει την αντίσταση και να προκαλέσει επιπλέον συμπίεση.

Επίσης, το υλικό μπορεί να βρεθεί και σε κατάσταση ισορροπίας. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν τα υλικά είναι σε ηρεμία. Τότε είναι που οι δυνάμεις καταβάλουν προσπάθεια να περιορίσουν την ισορροπία των μορίων έχοντας την τάση να διασπαστούν.

Μέσα στον ταμιευτήρα, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ενώ η πίεση και ο όγκος μεταβάλλονται. Ωστόσο, η πίεση και η θερμοκρασία είναι δύο κύριοι παράγοντες στο εσωτερικό αλλά και επιφανειακά.

Καθαροί υδρογονάνθρακες

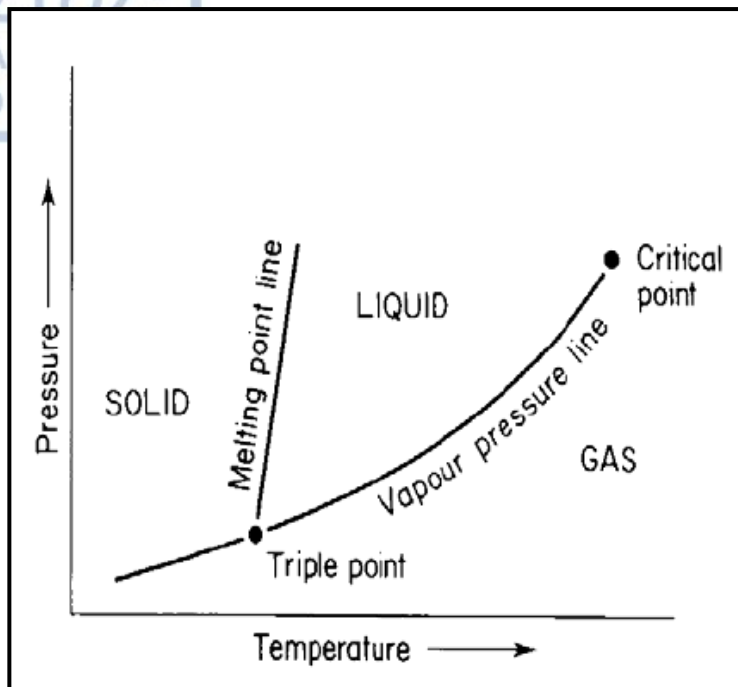
Για κάθε καθαρό υδρογονάνθρακα (π.χ. προπάνιο, βουτάνιο) αντιστοιχεί μια δεδομένη πίεση για κάθε θερμοκρασία. Σε αυτήν ο υδρογονάνθρακας είναι δυνατόν να υπάρχει σε υγρή ή σε αέρια κατάσταση.

Εφόσον η πίεση αυξηθεί δίχως να μεταβληθεί η θερμοκρασία ο υδρογονάνθρακας υφίσταται συμπίκνωση και μετατρέπεται σε υγρό. Με μείωση της πίεσης, δίχως μεταβολή της θερμοκρασίας, τα μόρια διασκορπίζονται και ο υδρογονάνθρακας μετατρέπεται σε αέριο. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση και της κινητικής ενέργειας. Μεγαλύτερη πίεση απαιτείται στις συνθήκες ισορροπίας, όπου οι δύο φάσεις είναι δυνατόν να συνυπάρχουν. Παρακάτω παριστάνεται η καμπύλη πίεσης ατμών αερίων, η οποία ορίζει την καμπύλη που διέρχεται από τα σημεία θερμοκρασίας – πίεσης, όπου και συνυπάρχουν οι δύο φάσεις (Σχ. 1.5.).

Κάτω από την καμπύλη πίεσης ατμών αερίου, η ύλη βρίσκεται σε αέρια κατάσταση, ενώ πάνω από την καμπύλη σε υγρή. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες πιέσεις και θερμοκρασίες, όπου η ύλη είναι δυνατόν να αντιστοιχεί σε υγρή ή σε αέρια φάση.

Αυτές οι περιοχές, έχουν μεγάλη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων.¹⁰

¹⁰ <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/6381/1/STEF272001.pdf>



Σχήμα 1.5. : Διάγραμμα φάσεων καθαρών ενώσεων.¹¹

Μίγματα υδρογονανθράκων

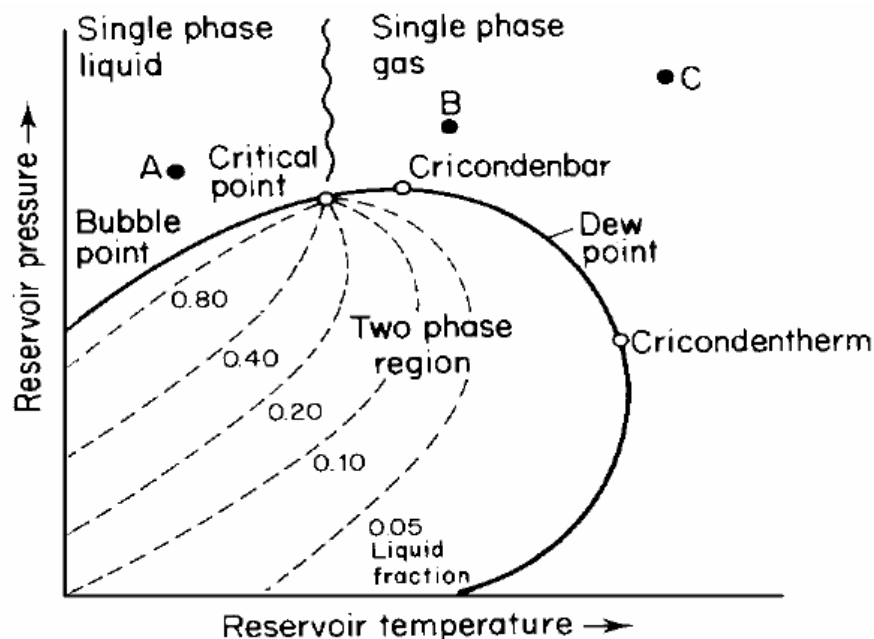
Σε ένα πολυσυστατικό σύστημα (μίγματα) υδρογονανθράκων, η συμπεριφορά του συστήματος διαφέρει από αυτήν των καθαρών ουσιών καθώς είναι πιο πολύπλοκη. Στην περίπτωση λοιπόν των μιγμάτων υδρογονανθράκων υπάρχει μία περιοχή στην οποία συνυπάρχουν η υγρή και η αέρια φάση.

Στο σχήμα 1.6. παριστάνεται η συμπεριφορά των μιγμάτων υδρογονανθράκων. Μίγματα δύο ή ακόμη και τριών συστατικών παρουσιάζουν όλα τα φαινόμενα έτσι ώστε να απαντώνται και σε πολύ πιο πολύπλοκα συστήματα. Όπως σε ένα καθαρό σύστημα ενώσεων έτσι και εδώ η εκτόνωση της υγρής φάσης έως και το σημείο φυσαλίδας (bubble point) γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία. Ωστόσο, στην περιοχή όπου επικρατούν δύο φάσεις, η εκτόνωση πραγματοποιείται με ελάττωση της πίεσης (τάση ατμών) εφόσον μεταβάλλεται η σύσταση της αέριας και της υγρής φάσης.

Το διάγραμμα πίεσης – θερμοκρασίας για ένα πολυσυστατικό σύστημα υδρογονανθράκων δεν αποτελείται από μία απλή γραμμή όπως στις καθарές ουσίες καθώς για κάθε θερμοκρασία οι πιέσεις του σημείου φυσαλίδας και δρόσου είναι διαφορετικές. Έτσι, σχηματίζεται ένα διάγραμμα φάσεων (phase envelope). Στο διάγραμμα αυτό είναι δυνατόν να συναντήσουμε μία τιμή πίεσης πάνω από την οποία δεν γίνεται να συνυπάρχουν και οι δύο φάσεις. Η πίεση αυτή καλείται *cricondenbar* και η θερμοκρασία όπου δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν ταυτόχρονα οι δύο φάσεις *cricondentherm*. Όσον αφορά στο κρίσιμο σημείο (σημείο στο οποίο

¹¹ Σ.Σταματάκη, 2017, Μηχανική Πετρελαίων, Σημειώσεις Κεφαλαίου 4, Ιδιότητες ρευστών ταμειυτήρα, Θερμοδυναμική συμπεριφορά πολυσυστατικών μιγμάτων υδρογονανθράκων – Μέθοδοι πρόρρησης των ιδιοτήτων (πυκνότητα, ιξώδες) των ρευστών ενός ταμειυτήρα, σελ. 33-34.

ταυτίζονται οι ιδιότητες και των δύο φάσεων) του μίγματος δεν ταυτίζεται με κανένα από τα δύο παραπάνω σημεία αλλά και δεν βρίσκεται απαραίτητα ανάμεσά τους.



Σχήμα 1.6. : Διάγραμμα φάσεων μίγματος υδρογονανθράκων.¹²

1.2.4. Ορυκτολογική Σύσταση (Mineralogical Composition)

Με την χρήση των γεωφυσικών καταγραφών (loggings) διερευνάται η ορυκτολογική σύσταση των σχηματισμών που μελετώνται. Επίσης, αποκαλύπτεται η αντιστοιχία των στερεών συστατικών των πετρωμάτων. Δηλαδή, παρατηρούνται το υλικό πλήρωσης (matrix), οι κόκκοι και το συγκολλητικό υλικό (cement).

Όσον αφορά στο υλικό πλήρωσης, πρόκειται για τους μικρότερους κόκκους του σχηματισμού που γεμίζουν τα κενά διαστήματα (πόροι) μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων ή των θραυσμάτων που αποτελούν το πέτρωμα. Η απόθεση του ιζήματος αυτού (χαλαρού ή συμπαγούς) είναι δυνατό να έχει πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα με τα κύρια κλαστικά συστατικά ή να έχει δημιουργηθεί από διάσπαση των ασταθών κλαστικών υλικών, επί τόπου. Η απόθεση του συγκολλητικού υλικού από την άλλη γίνεται κατά την διάρκεια της διαγένεσης. Ο ρόλος του συγκολλητικού υλικού είναι να συνδέει τους κόκκους του ιζήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ίζημα από χαλαρό να μεταβάλλεται σε συμπαγές. Το συγκολλητικό υλικό το οποίο αποτελεί την ορυκτή ύλη, που προέρχεται από χημική διεργασία, μπορεί να είναι ανθρακικό,

¹² Σ.Σταματάκη, 2017, Μηχανική Πετρελαίων, Σημειώσεις Κεφαλαίου 4, Ιδιότητες ρευστών ταμειυτήρα, Θερμοδυναμική συμπεριφορά πολυσυστατικών μιγμάτων υδρογονανθράκων – Μέθοδοι πρόρρησης των ιδιοτήτων (πυκνότητα, ιξώδες) των ρευστών ενός ταμειυτήρα, σελ. 33-34.



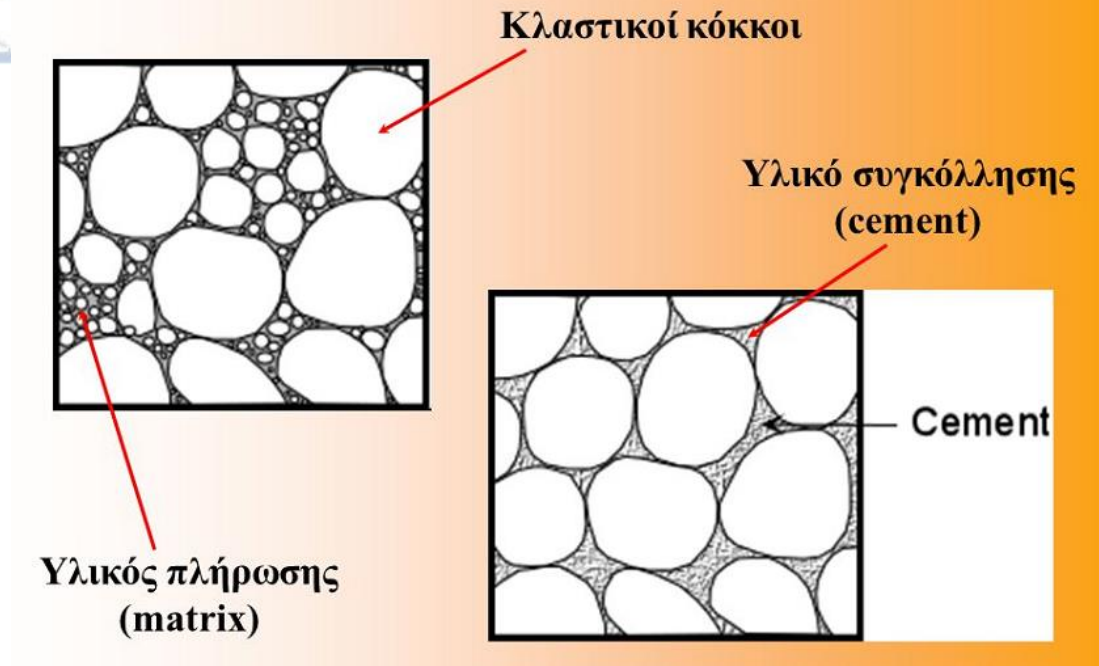
πυριτικό, ανυδρίτης, γύψος, βαρύτης, σιδηροπυρίτης ή διάφορα οξείδια του σιδήρου. Εξαιρούνται τα αργίλικα ορυκτά.

Χαρακτηριστικά ιζηματογενή πετρώματα είναι οι **πηλόλιθοι**, οι **αργιλοσχίστες** και οι **άργιλοι**.¹³

<u>ΙΖΗΜΑΤΟΓΕ ΝΗΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ</u>	<u>ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΩΝ</u>	<u>ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ</u>	<u>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣ ΤΙΚΑ</u>	<u>ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ</u>
Αργιλοσχίστες (shale)	Λεπτόκοκκο	Καολινίτης Ιλλίτης Σμεκτίτης Μικροσκοπικά θραύσματα (χαλαζίας, άστριοι, ασβεστίτης)	Λεπτοστρωμα- τώδης δομή Σχιστότητα Παράλληλη στρώση	συμπαγοποίηση
Πηλόλιθοι (siltstones)	0,063-0,004 mm	Αργίλικα ορυκτά συνδεδεμένα με χαλαζία, άστροιο, ασβεστίτη και οργανική ύλη Βαριά ορυκτά (μαρμαρυγία, ζιρκόνιο, τουρμαλίνη κλπ.)	Περιέχουν πολύ οργανική ύλη	
Άργιλοι (claystones)	<0,002 mm	Ορυκτά της αργίλου (καολινίτη, μοντοριλλονίτη, ιλλίτη) Χλωρίτης Λεπτόκοκκος χαλαζίας Άστριοι Οξείδια του Fe	Χαλαρή έως ημισυμπαγή υφή Υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο (H) και νερό (H ₂ O)	Διαγένεση της αργίλου

Πίνακας 1.2. Τα χαρακτηριστικά των ιζηματογενών σχηματισμών (αργιλοσχίστες, πηλόλιθοι, άργιλοι).

¹³ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου



Σχήμα 1.7. : Υλικό Πλήρωσης και Συγκολλητικό Υλικό.

14

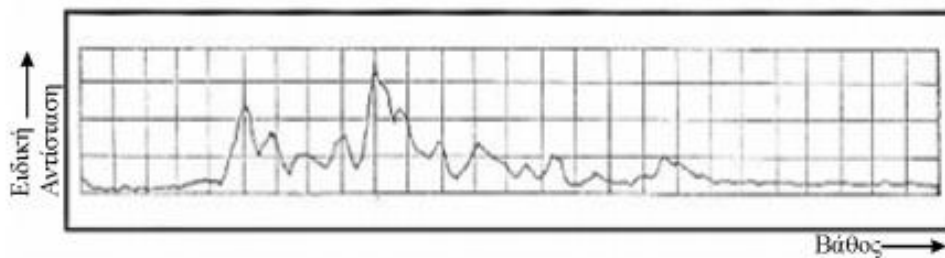
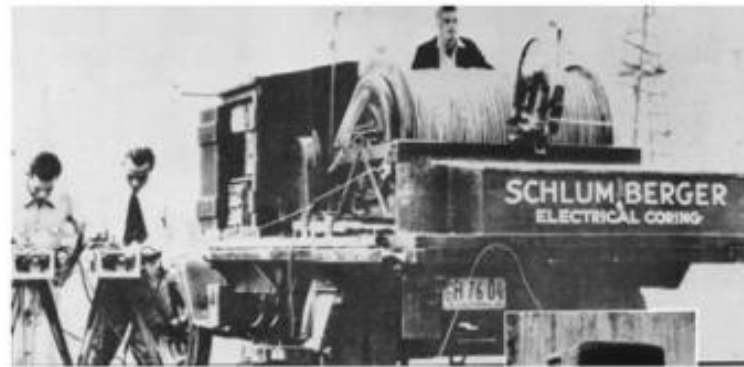
2. ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ

2.1. Ορισμός

Διαγραφία ή *γεωφυσική καταγραφή* ορίζεται η μέθοδος καταγραφής των χαρακτηριστικών των διαφόρων σχηματισμών της γεώτρησης που μελετάται, σε βάθος, με την χρήση ειδικών οργάνων μέτρησης (logging tools). Έτσι δημιουργούνται τα logs, που αφορούν την απεικόνιση σε φύλλο χάρτου ή σε οθόνη, καθώς και την μνήμη των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του προγράμματος των διαγραφιών (loggings). Οι διαγραφίες εκτελούνται σε ασωλήνωτη γεώτρηση, μέσω ευαίσθητων διατάξεων (δέκτες) και έχουν ως στόχο τη συλλογή χρήσιμων πληροφοριών.¹⁵

¹⁴ http://classzone.com/books/earth_science/terc/navigation/visualization.cfm

¹⁵ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου



Σχήμα 2.1. : (Επάνω) Η μονάδα μετρήσεων γεωφυσικών διαγραφιών των αδελφών Schlumberger. (Κάτω) Η πρώτη γεωφυσική διαγραφή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Schlumberger).¹⁶

2.2. Τρόπος εκτέλεσης

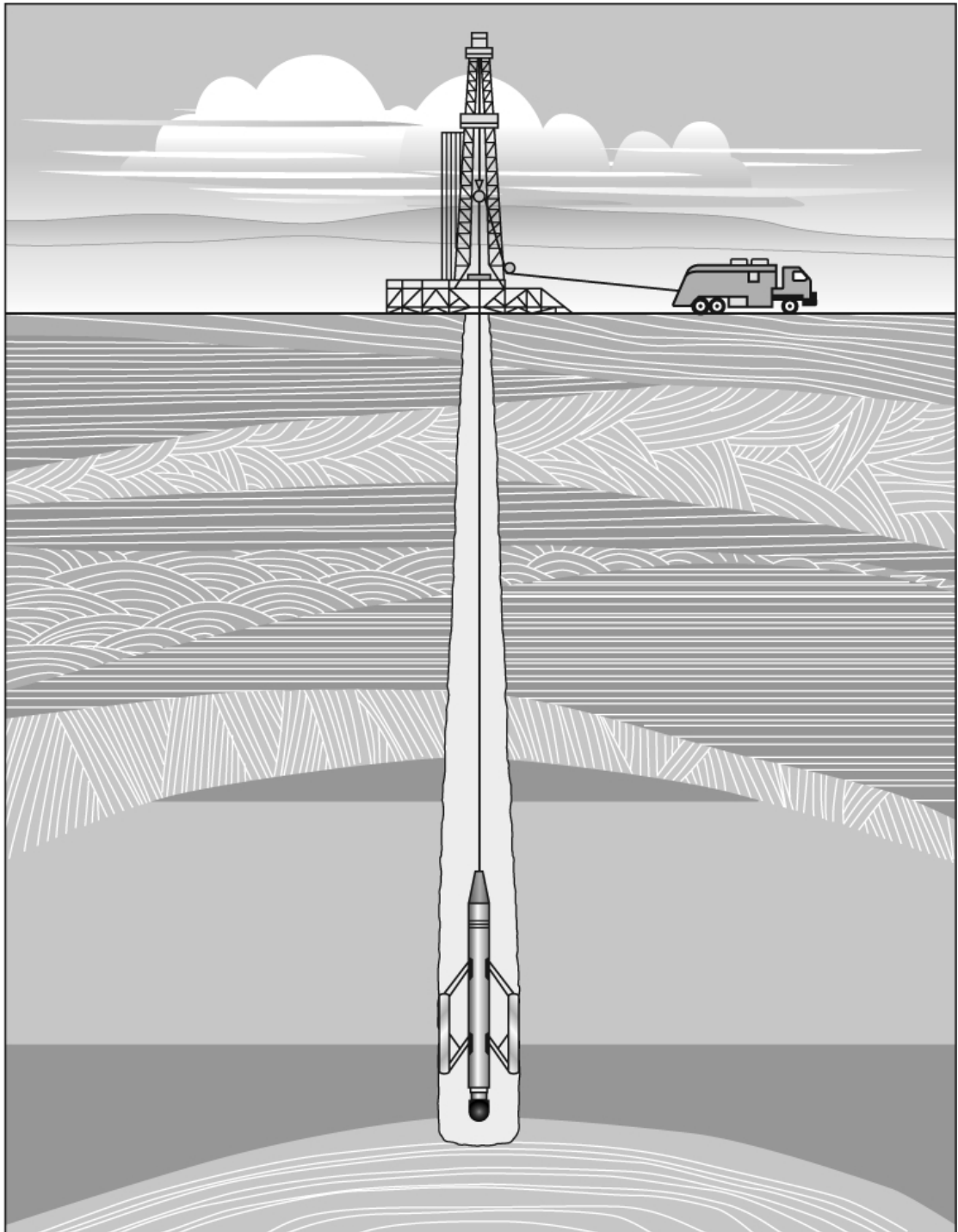
Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωφυσικές καταγραφές βασίζονται στην κάθοδο ενός εξειδικευμένου οργάνου, του φορατή (logging tool). Ο φορατής είναι προσαρμοσμένος σε ένα ειδικό καλώδιο (συρματόσχοινο), το οποίο κατεβαίνει μέσα στην γεώτρηση. Με αυτόν τον τρόπο εκτελείται η μέτρηση των φυσικών παραμέτρων των πετρωμάτων, των ιδιοτήτων των ρευστών που περιέχονται στους σχηματισμούς καθώς και των τεχνικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της γεώτρησης.

Ο εξοπλισμός των διαγραφιών φτάνει μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης και έπειτα κατευθύνεται και πάλι προς τα πάνω. Κατά την άνοδο του εξοπλισμού, έχοντας σταθερή ταχύτητα, εκτελούνται οι μετρήσεις μέσω των φορατών. Έτσι, καθώς τα όργανα ανεβαίνουν, καταγράφονται τα διάφορα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της γεώτρησης.

Τα αποτελέσματα τα οποία λαμβάνονται από τις μετρήσεις αυτές μεταφέρονται στην επιφάνεια μέσω ενός συρματινού πολυκάναλου καλωδίου, σε υπολογιστή ή στο εργαστήριο. Εκεί τα αποτελέσματα υφίστανται την κατάλληλη επεξεργασία έτσι

¹⁶ <http://seismo.geology.upatras.gr/greek/logging2012enc.pdf>

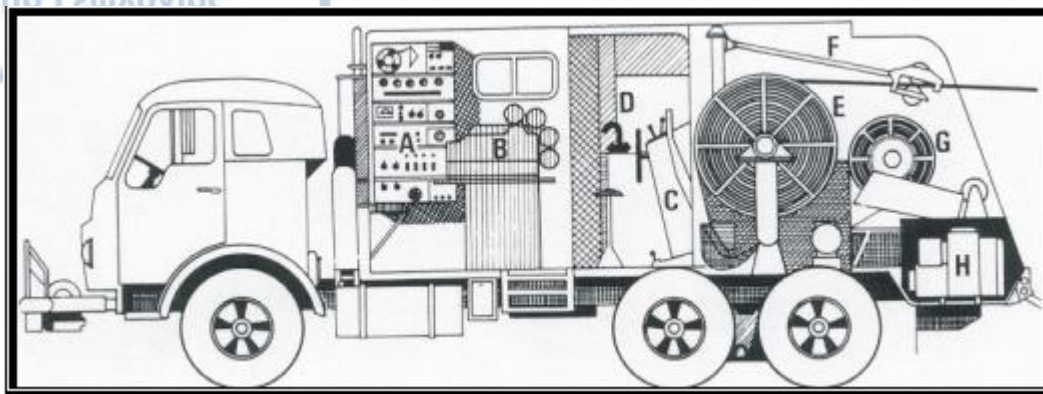
ώστε να προσδιοριστούν τα βάθη και οι ζώνες, όπου υπάρχουν και πρόκειται να εκμεταλλευτούν τα ρευστά οικονομικού ενδιαφέροντος.¹⁷



Σχήμα 2.2. : Τα στοιχεία των γεωφυσικών καταγραφών της γεώτρησης : ο δειγματολήπτης, η καλωδίωση και το κινητό εργαστήριο (Schlumberger, 1987).¹⁸

¹⁷ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

¹⁸ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 3



Σχήμα 2.3. : Ο εξοπλισμός των γεωφυσικών καταγραφών όπου επεξεργάζονται και αξιολογούν τα δεδομένα.

2.3. Οφέλη των διαγραφιών (loggings) σε σχέση με τα θρύμματα (cuttings) ή τα καρότα (cores).

Η εκτέλεση γεωφυσικών καταγραφών (loggings) εντός των γεωτρήσεων χρησιμεύει περισσότερο από ότι η μέθοδος της πυρηνοληψίας (coring) ή η μέθοδος των θρυμμάτων (cuttings). Σε ένα πετρελαϊκό σύστημα μας ενδιαφέρει να εντοπίσουμε τον ταμιευτήρα. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η συσσώρευση και ο εντοπισμός υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου) προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κατάλληλου μητρικού πετρώματος, ενός πορώδους πετρώματος που θα αποτελεί τον ταμιευτήρα, και ενός στεγανού πετρώματος που θα αποτελεί το πέτρωμα κάλυμμα. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την τεκτονική δραστηριότητα συμβάλλουν στη δημιουργία των παγίδων υδρογονανθράκων. Οι παγίδες υδρογονανθράκων αποτελούν ιζηματογενείς παγίδες (Sedimentary Traps). Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η γένεση υδρογονανθράκων εξαρτάται από ύπαρξη ιζημάτων πλούσιων σε οργανική ύλη και την έλλειψη οξυγόνου πάνω από τα ιζήματα στην υδάτινη στήλη.

Στην επιστήμη της γεωλογίας πετρελαίου αυτό που ενδιαφέρει και αναζητά περισσότερο ένας γεωλόγος είναι η ιζηματολογία καθώς οι υδρογονάνθρακες εντοπίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες.¹⁹ Όσον αφορά την ιζηματολογία αποτελεί τον κλάδο των γεωεπιστημών που ασχολείται με την υφή, τη σύσταση και τη δομή των πετρωμάτων καθώς και με το χρώμα των υλικών. Γενικά, αναλύει τις διεργασίες σχηματισμού των στερεών κόκκων και της απόθεσης τους στους πυθμένες των λεκανών σε ρευστά μέσα.²⁰ Μέσω αυτών των διεργασιών εντοπίζονται οι φυσικοχημικές και βιολογικές συνθήκες που λάμβαναν χώρα κατά τη διάρκεια απόθεσης των ιζημάτων αλλά και οι διεργασίες μεταμόρφωσης αυτών. Βάση της ιζηματολογίας λοιπόν αποκαλύπτονται οι χημικές, οι φυσικές, οι βιολογικές

¹⁹ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

²⁰ Αντώνιος Ψιλοβίκος, 2010, Ιζηματολογία, Εκδόσεις Τζιόλα.

διεργασίες και τα γεγονότα που συνέβησαν στη γη από τον χρόνο δημιουργίας τους μέχρι και σήμερα. Ακόμη, φανερώνονται η τεκτονική, η γεωμορφολογία, η στρωματογραφία (απολιθώματα), η κλιματική κατάσταση της περιοχής ενδιαφέροντος και οι συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος.²¹ Όλες οι παραπάνω πληροφορίες καθορίζονται μέσω δειγμάτων πετρωμάτων από τους γεωλόγους. Τα δείγματα αυτά μπορεί να είναι επιφανειακά ή από το υπέδαφος. Στην πρώτη περίπτωση η δειγματοληψία αποτελεί μία απλή διαδικασία, καθώς το δείγμα λαμβάνεται από το σημείο αναζήτησης που επιθυμεί ο γεωλόγος και στην ποσότητα που χρειάζεται. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της δειγματοληψίας από το υπέδαφος, η διαδικασία είναι δυσκολότερη. Τα δείγματα που λαμβάνονται κατά την όρυξη της γεώτρησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου είναι σε σχήμα κυλινδρικό (πυρήνας) ή τεμαχισμένα. Η ανάλυση και η πλήρης εξέταση των πυρήνων («καρότων») δίνει την δυνατότητα στον γεωλόγο να περιγράψει και να κατανοήσει τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν εντός της γεώτρησης. Εξαιτίας λοιπόν της συνέχειας και του μεγέθους που εμφανίζουν οι πυρήνες από τους ταμιευτήρες αποδίδεται μία πλήρης εικόνα του πορώδους, της διαπερατότητας αλλά και άλλων χρήσιμων ιδιοτήτων των σχηματισμών και των ρευστών οικονομικού ενδιαφέροντος.



Σχήμα 2.4. :Εικόνες από πυρήνες δειγματοληψίας (Αριστερά : Core Samples, Δεξιά : NMR Core Analysis).²²

Η μέθοδος της πυρηνοληψίας όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μελετάται σε δείγματα που λαμβάνονται κυρίως από τον ταμιευτήρα. Ως εκ τούτου, δεν είναι δυνατή σε όλους τους τύπους πετρωμάτων. Πέρα από τον περιορισμό της διαδικασίας της πυρηνοληψίας στους σχηματισμούς που πραγματοποιείται, δυστυχώς αποτελεί και μία αρκετά δαπανηρή μέθοδο. Αυτό οφείλεται στη διακοπή των εργασιών διάτρησης προκειμένου να πραγματοποιηθεί πυρηνοληψία. Για

²¹ Αντώνιος Ψιλοβίκος, 2010, Ιζηματολογία, Εκδόσεις Τζιόλα.

²² <http://www.intertek.com/energy/upstream/core-analysis-services/>

οικονομικούς αλλά και τεχνικούς λοιπόν λόγους, η μέθοδος των πυρήνων συνιστάται να πραγματοποιείται σε περιπτώσεις όπου χρειάζονται να ληφθούν πολύ σημαντικές πληροφορίες.

Επίσης, κατά τη διαδικασία όρυξης της γεώτρησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου εξέρχονται στην επιφάνεια τα θρύμματα (cuttings). Τα θρύμματα αυτά φτάνουν στην επιφάνεια από τα τοιχώματα της γεώτρησης και αποτελούν δείγματα του υπεδάφους. Όμως, κατά τη γεωλογική ανάλυση των δειγμάτων αυτών, εμφανίζονται πρακτικά προβλήματα καθώς προέρχονται από διαφορετικά βάθη και σε μη επαρκείς ποσότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη δίνουν την επιθυμητή, συνεχή πληροφορία. Παρόλα αυτά θεωρείται ότι πολλές φορές αντικαθιστούν τη μέθοδο της πυρηνοληψίας. Κατά τη διάτρηση τα θρύμματα που έχουν εξέρθει στην επιφάνεια μέσω του γεωτρητικού πολφού (drilling mud), έχουν υποστεί ανάμειξη, διύλιση και «μόλυνση» (contamination). Επομένως, δεν είναι δυνατόν να δώσουν σωστές και ακριβείς πληροφορίες για τη λιθολογική ακολουθία, τα υλικά και το πάχος των πετρωμάτων. Τα δείγματα των θρυμμάτων είναι σε μικρό μέγεθος και σε μικρή ποσότητα. Έτσι δυστυχώς δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση όλων των απαραίτητων εργαστηριακών δοκιμών που επιβάλλονται. Επιπρόσθετα, στο εσωτερικό της γεώτρησης συχνά υφίσταται απώλεια της κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να απουσιάζουν δείγματα από κάποιους γεωλογικούς ορίζοντες και να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη μελέτη στη διατομή του σχηματισμού ενδιαφέροντος.

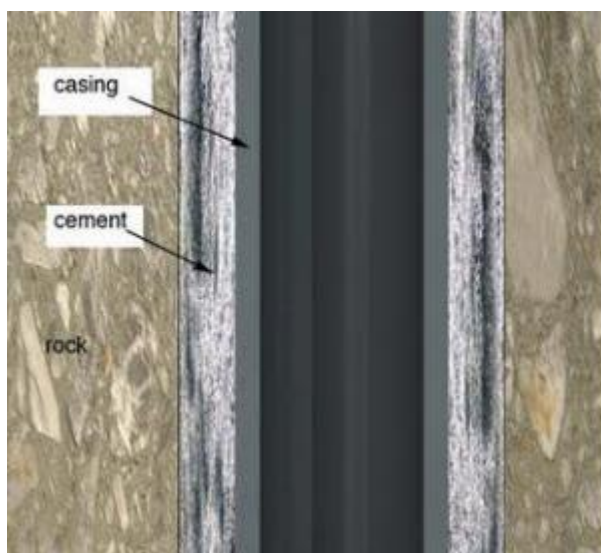
Λόγω όλων των προαναφερθέντων περιορισμών δεν παρέχονται οι σωστές και ακριβείς πληροφορίες που αναζητούνται από τον γεωλόγο για να αποφασίσει αν ο σχηματισμός που εντοπίστηκε έχει δυναμικά αποθέματα, είναι εκμεταλλεύσιμος και αν μπορούν να εντοπιστούν γειτονικά αποθέματα.²³ Γι' αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των διαγραφιών (loggings), που επιτρέπει τη λήψη πλήρους εικόνας των πετρωμάτων και των ιδιοτήτων τους (πορώδες, διαπερατότητα, λιθολογία, σύσταση κλπ.) για τον εντοπισμό των υδρογονανθράκων. Η μέθοδος των γεωφυσικών καταγραφών αποτελεί την πλέον ακριβέστερη και λεπτομερέστερη διαδικασία παροχής γνώσης όλων των απαραίτητων πετροφυσικών και γεωλογικών παραμέτρων για την αποτύπωση της πλήρους εικόνας των διαφόρων στρωμάτων του υπεδάφους. Επίσης, συλλέγονται στοιχεία για τις ιδιότητες των ρευστών που περιλαμβάνονται στο εσωτερικό των πετρωμάτων. Αυτά τα πετρώματα αποτελούν τους ταμιευτήρες (reservoirs). Ορισμένες φορές η εικόνα αυτή μπορεί να μην είναι απόλυτη και να έχει υποστεί αλλοιώσεις. Ωστόσο, πάντα χαρακτηρίζεται από συνέχεια και αντικειμενικότητα. Τέλος, η ερμηνεία των γεωφυσικών καταγραφών έχει ως κύριο σκοπό της να αποδώσει την πλησιέστερη εικόνα του υπεδάφους με αντικειμενικότητα, όπως ακριβώς θα γινόταν και στις εργαστηριακές αναλύσεις, έχοντας καλά προσδιορισμένη τη σύνδεση μεταξύ των μετρήσεων και των

²³ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

παραμέτρων. Και αυτό αποδεικνύεται από την ανίχνευση των αλλαγών που μπορεί να υφίστανται σε κάποιο γεωλογικό χαρακτηριστικό.²⁴

2.4. Το πρόγραμμα των διαγραφιών (logging program) σε σχέση με την πυρηνοληψία και την τσιμέντωση των γεωτρήσεων

Κατά τη διάρκεια της διάτρησης η γεώτρηση πραγματοποιείται σε διάφορα στάδια. Τα στάδια αυτά αφορούν στα διαφορετικά βάθη στα οποία διακόπτεται η όρυξη για την τοποθέτηση των κατάλληλων σωλήνων στο φρεάτιο (casing). Οι σωλήνες αυτοί είναι αλληλένδετοι και διαθέτουν διαφορετική διάμετρο σε κάθε περίπτωση, έχοντας τηλεσκοπικό σχήμα βλέποντας τη γεώτρηση σε τομή. Έπειτα από την «επένδυση» της γεώτρησης ακολουθεί η τσιμέντωση. Σε αυτήν πολφός τσιμέντου εισπίζεται διαμέσου της σωλήνωσης που έχει πραγματοποιηθεί, στο δακτύλιο που υπάρχει μεταξύ αυτής και του τοιχώματος της γεώτρησης. Ο πολφός του τσιμέντου στερεοποιείται και ενώνει την σωλήνωση με τον σχηματισμό όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.5. : Σύνδεση σωλήνωσης (casing) και σχηματισμού (rock) μέσω του πολφού τσιμέντου (cement).²⁵

Η γεώτρηση συνεχίζεται να πραγματοποιείται σε διαδοχικά στάδια. Έπειτα από την διάτρηση ενός νέου τμήματος διακόπτεται και τοποθετείται ξανά ο κατάλληλος τύπος σωλήνωσης και γίνεται νέα τσιμέντωση.

Καθώς προχωράει η διαδικασία της διάτρησης και επένδυσης θρύμματα εξέρχονται στην επιφάνεια. Όταν τα θρύμματα αυτά «μαρτυρήσουν» την είσοδο στο πέτρωμα ταμειυτήρα απομακρύνονται κάποια τμήματα του εξοπλισμού της γεώτρησης και πραγματοποιούνται ορισμένες απαραίτητες δοκιμές (tests). Οι δοκιμές αυτές έχουν ως στόχο την εύρεση των υδρογονανθράκων. Η σημαντικότερη

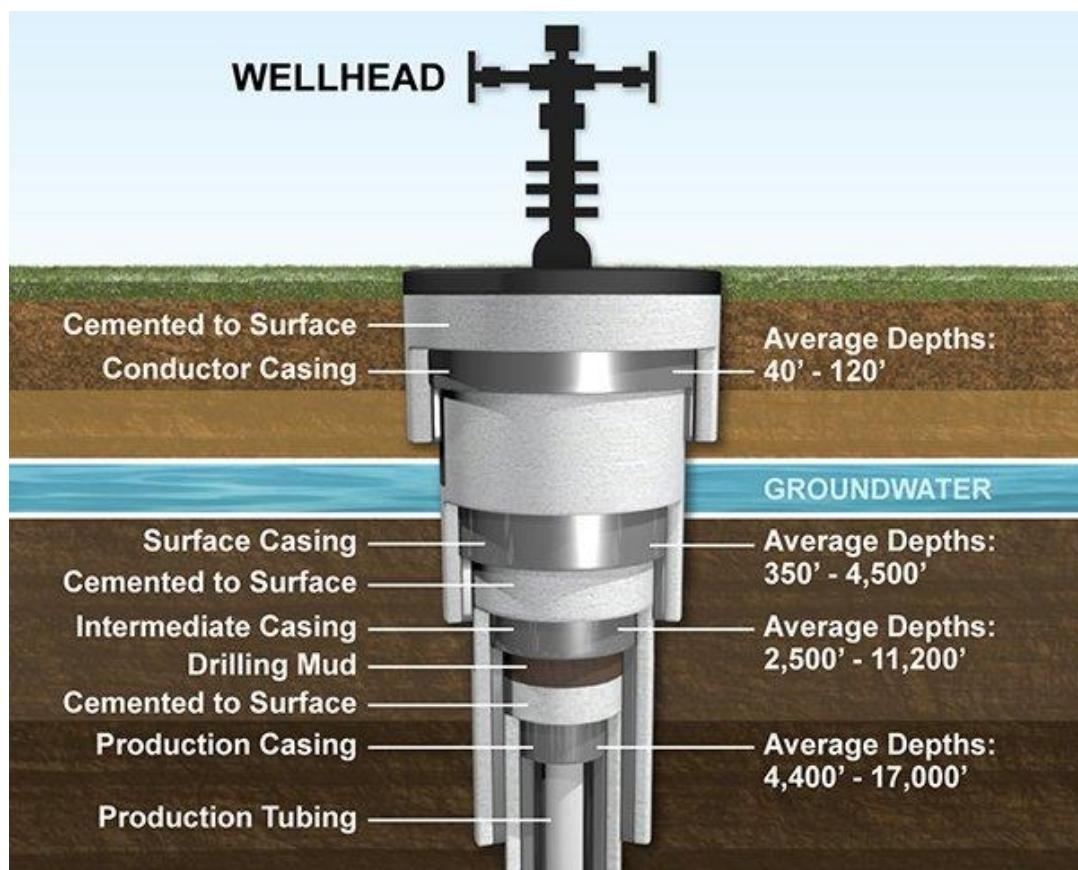
²⁴ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

²⁵ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

δοκιμή από αυτές είναι το Drill-Steam Testing (DST). Η δοκιμή αυτή εκτελείται με την κάθοδο ενός εξειδικευμένου οργάνου εντός της γεώτρησης, το οποίο μετράει την πίεση. Η πίεση είναι αυτή που θα αποκαλύψει την είσοδο στο πέτρωμα ταμιευτήρα.

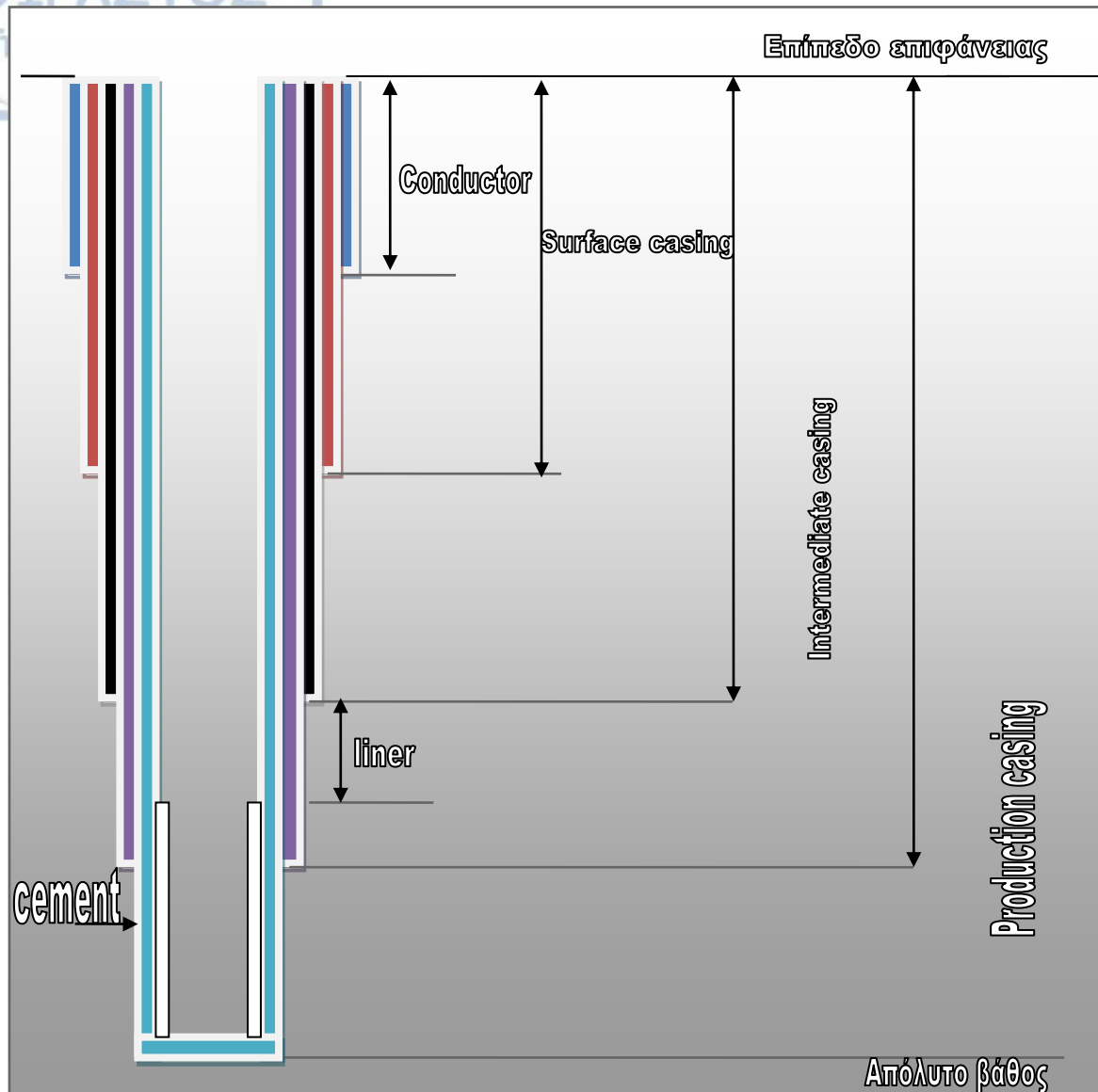
Όπως προαναφέρθηκε η διαδικασία της σωλήνωσης πραγματοποιείται κατά φάσεις. Τα στάδια εκτέλεσης διαφέρουν ανάλογα με το βάθος, το είδος των σχηματισμών και τις ανάγκες της γεώτρησης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι σωλήνωσης που ανταπεξέρχονται σε συγκεκριμένους στόχους με βάση τις δυσκολίες που παρουσιάζει κάθε τμήμα της γεώτρησης. Οι τύποι της σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση είναι :

- Σωλήνωση επαφής (Conductor pipe)
- Σωλήνωση επιφάνειας (Surface casing)
- Ενδιάμεση σωλήνωση (Intermediate casing string)
- Σωλήνωση παραγωγής (Production casing)
- Σωλήνωση liner (liner)



Σχήμα 2.6. Τύποι σωλήνωσης και τα ανάλογα βάθη.²⁶

²⁶ <http://fracfocus.ca/groundwater-protection/drilling-and-production>

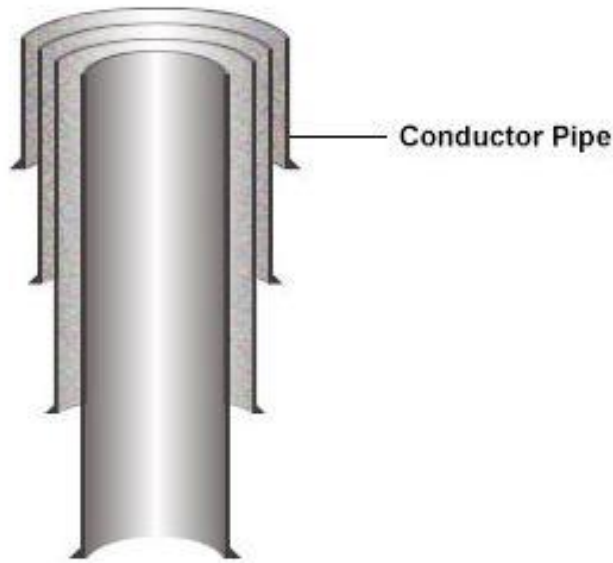


Σχήμα 2.7. : Σχεδιασμός και τύποι σωλήνωσης.

2.4.1. Σωλήνωση επαφής (Conductor pipe)

Η σωλήνωση επαφής αποτελεί συνήθως την πρώτη και συντομότερη τοποθέτηση επένδυσης στο φρεάτιο. Έχει τη μεγαλύτερη διάμετρο και το μεγαλύτερο μήκος. Επίσης, είναι σχετικά μικρή και περιβάλλει το κορυφαίο τμήμα της σωλήνωσης. Το βάθος της σωλήνωσης επαφής διαφέρει ανάλογα με τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Όσον αφορά στον στόχο της, αυτός είναι η στήριξη των σχηματισμών της επιφάνειας. Πιο αναλυτικά, προστατεύει την ρηχή άμμο από τυχόν μολύνσεις από τα υγρά της διάτρησης (drilling fluids), ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει την έκπλυση που είναι δυνατόν να συμβεί πολύ εύκολα στα σημεία κοντά στην επιφάνεια εξαιτίας των χαλαρών ιζημάτων και των μη στερεοποιημένων κοντά στην επιφάνεια εδαφών, των χαλικιών κλπ. Όταν λοιπόν συναντάται χαλαρό έδαφος η

σωλήνωση μπορεί να οδηγηθεί στην θέση της πριν ακόμη ξεκινήσει η διαδικασία της διάτρησης.²⁷



28



Σχήμα 2.8. : Απεικόνιση Conductor pipe installation (πάνω) / Conductor drive (κάτω).²⁹

2.4.2. Σωλήνωση επιφάνειας (Surface casing)

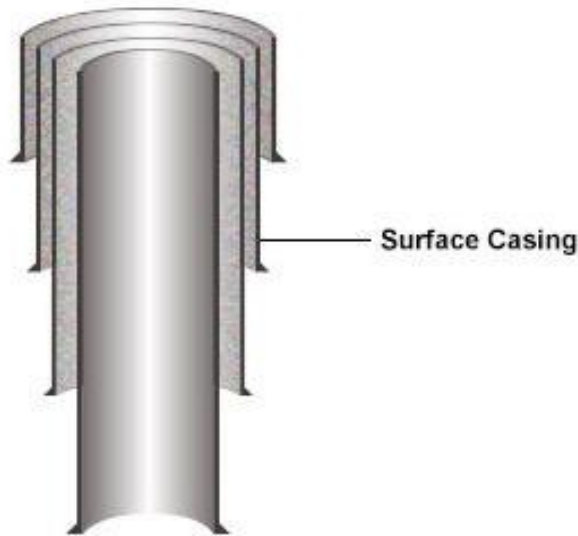
Έπειτα από την σωλήνωση επαφής ακολουθεί πάντα η επιφανειακή σωλήνωση. Στην ουσία είναι η πρώτη πραγματική σωλήνωση που τοποθετείται εντός της γεώτρησης και έχει μήκος από μερικές δωδεκάδες μέτρα έως και ορισμένες εκατοντάδες μέτρα. Έχει μεγάλη διάμετρο, τοποθετείται σε μικρού βάθους σχηματισμούς και είναι σχετικά μικρής πίεσης. Αρχικά, έχει ως στόχο την προστασία του υδροφόρου ορίζοντα που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια, έτσι ώστε να αποτρέψει τη μόλυνση από τη λάσπη της διάτρησης. Δεύτερον, η επιφανειακή σωλήνωση παρέχει ευστάθεια (integrity) και με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει την προσαρμογή ενός αποτροπέα εκρήξεων (Blow-Out-Preventer-BOP) στο ανώτερο

²⁷ http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/conductor_pipe.aspx

²⁸ <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/conductor-pipe.html>

²⁹ <http://www.offshoreenergyservices.com/conductor-pipe-drive-pipe>

σημείο της μετά την επιτυχή τσιμέντωση της σωλήνωσης στη θέση της. Τρίτον, παρέχει τη δομική αντοχή που χρειάζεται έτσι ώστε οι υπόλοιποι τύποι σωλήνωσης να συναρμολογούνται στο ανώτερο τμήμα καθώς και στο εσωτερικό της επιφανειακής σωλήνωσης.^{30 31}



Σχήμα 2.9. : Απεικόνιση σωλήνωσης επιφάνειας (Surface Casing).³²

2.4.3. Ενδιάμεση σωλήνωση (Intermediate casing string)

Η ενδιάμεση σωλήνωση ακολουθεί την επιφανειακή και στοχεύει κυρίως στην απομόνωση ορισμένων σχηματισμών που είναι δυνατόν να επιφέρουν προβλήματα κατά τη διαδικασία όρυξης της γεώτρησης, όπως άργιλοι με τάσεις αποκόλλησης, ζώνες που διακόπτουν την ομαλή κυκλοφορία της λάσπης της γεώτρησης, υψηλών πιέσεων ζώνες κ.α. Έτσι, απομονώνοντας αυτούς τους σχηματισμούς καθίσταται δυνατή η εμβάθυνση του φρεατίου.

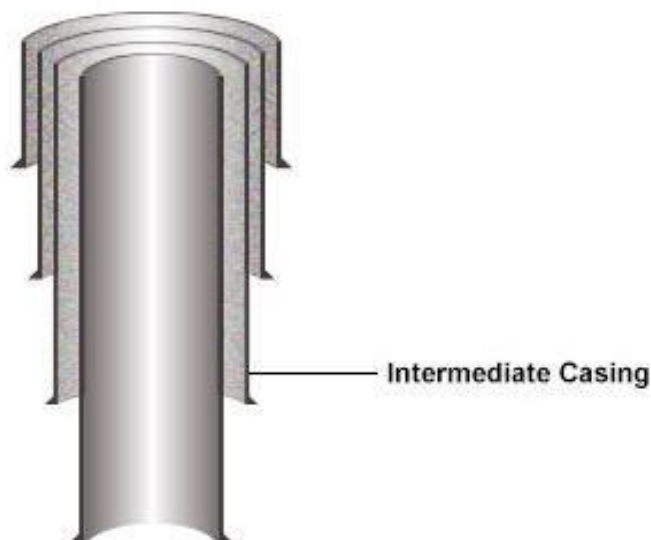
Η ενδιάμεση σωλήνωση συχνά είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί η ευστάθεια του φρεατίου καθώς η γεώτρηση προχωρά σε μεγαλύτερα βάθη. Το μήκος της, μεταξύ της επιφανειακής σωλήνωσης και του τελικού βάθους της γεώτρησης, είναι ανάλογο με τα προβλήματα που παρουσιάζονται. Συνήθως αποτελεί το μακρύτερο τμήμα σωλήνωσης του φρεατίου.

Όσον αφορά στο βάθος στο οποίο τοποθετείται η ενδιάμεση σωλήνωση, αυτό εξαρτάται από το βαθμό της ρωγμάτωσης και την πίεση των πόρων του σχηματισμού. Η πίεση των πόρων εξισορροπείται με το ειδικό βάρος της λάσπης (mud weight). Αυτό θα πρέπει να μην υπερβαίνει την αντοχή των ζωνών που βρίσκονται σε μικρά βάθη.

³⁰ http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/surface_casing.aspx

³¹ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

³² <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/surface-casing.html>



Σχήμα 2.10. : Απεικόνιση ενδιάμεσης σωλήνωσης (Intermediate Casing).³³

Η ενδιάμεση σωλήνωση κατά κύριο λόγο προσφέρει προστασία στους σχηματισμούς υπό πίεση και επιτρέπει την χρήση των ρευστών της γεώτρησης διαφορετικών πυκνοτήτων, τα οποία είναι απαραίτητα για τον έλεγχο των σχηματισμών που συναντώνται στα βαθύτερα στρώματα.

Η τσιμέντωση της ενδιάμεσης σωλήνωσης πραγματοποιείται σε ύψος που αναλογεί σε εκατοντάδες μέτρα επάνω από το σημείο εδραίωσης. Στην περίπτωση που κρίνεται αναγκαία η απομόνωση ρηχότερων σχηματισμών, εκτελείται σωλήνωση σε φάσεις, δίχως να καταστεί απαραίτητη η διαδικασία τσιμέντωσης ολόκληρου του μήκους από το σημείο έδρασης της σωλήνωσης και πάνω. ^{34 35 36}

2.4.4. Σωλήνωση παραγωγής (Production casing)

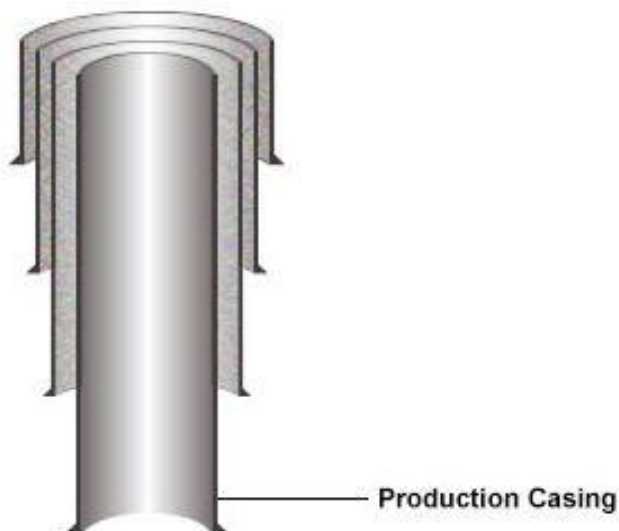
Η παραγωγική σωλήνωση τοποθετείται μετά την ενδιάμεση και είναι αναγκαία για την προσφορά απόλυτης προστασίας της ζώνης παραγωγής και την εφαρμογή του εξοπλισμού παραγωγής. Χρησιμεύει στην απομόνωση των ανεπιθύμητων ρευστών της γεώτρησης στον σχηματισμό παραγωγής και από άλλες ζώνες που διεισδύουν στο φρεάτιο.

³³ <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/intermediate-casing.html>

³⁴ <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/intermediate-casing.html>

³⁵ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

³⁶ http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/i/intermediate_casing_string.aspx



Σχήμα 2.11. : Απεικόνιση σωλήνωσης παραγωγής (Production Casing).

Το σημείο που εδράζει αφορά το ανώτερο σημείο της ζώνης αποκάλυψης ή διαπέρνα από το εσωτερικό της. Η διαδικασία τσιμέντωσης της δεν διαφέρει από αυτή της ενδιάμεσης που αναφέρθηκε παραπάνω.

Η παραγωγική και η δοκιμαστική σωλήνωση καθίστανται υπεύθυνες για την διευκόλυνση της παραγωγής σε αντίθεση με την σωλήνωση επιφάνειας και την ενδιάμεση που αποσκοπούν στην προστασία έτσι ώστε να είναι δυνατή η συνεχής διάτρηση.³⁷

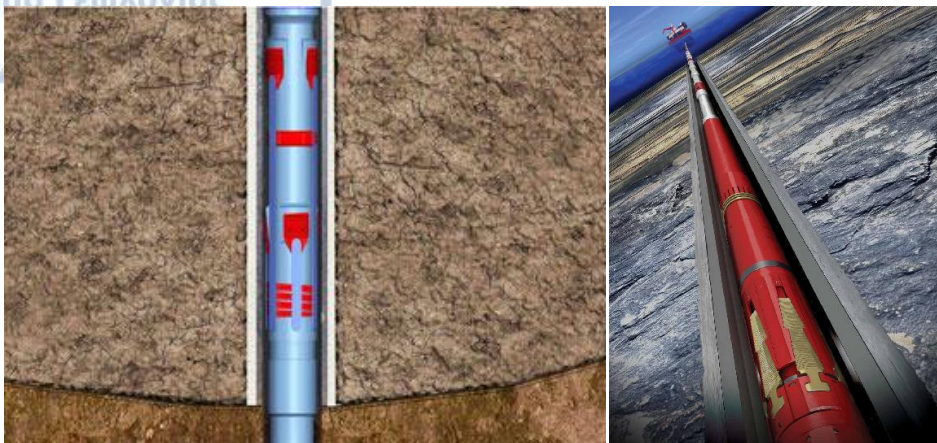
2.4.5. Σωλήνωση liner (Liner)

Το liner αποτελεί μία μικρή σωλήνωση που δεν φτάνει έως την κορυφή της γεώτρησης (επιφάνεια), αλλά αναρτάται από το εσωτερικό του πυθμένα της προηγούμενης σωλήνωσης (παραγωγική σωλήνωση). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας μηχανικής διάταξης που καλείται *Διάταξη ανάρτησης του liner* (Liner hanger).

Η σωλήνωση liner παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα που αφορούν στην εξοικονόμηση χάλυβα και έως εκ τούτου και του κόστους κεφαλαίου, το μικρότερο βάρος και την μεγαλύτερη διάμετρο ανάμεσα στην επιφάνεια και στο ανώτερο σημείο του liner. Ωστόσο, μπορεί να εγκυμονεί και κινδύνους καθώς απαιτούνται δυσκολότερες μέθοδοι σωλήνωσης και τσιμέντωσης. Είναι σημαντικό η προηγούμενη σωλήνωση να διαθέτει τις σωστές διαστάσεις έτσι ώστε να μπορεί να υποστεί ίδια πίεση διάρρηξης με το liner και την προηγούμενη σωλήνωση που θα έχουν υποβληθεί σε φθορές από την διαδικασία περιστροφής της διατρητικής στήλης.³⁸

³⁷ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

³⁸ <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/l/liner.aspx>



Σχήμα 2.12. : Απεικόνιση Σωλήνωσης Liner (Liner hanger).^{39 40}

Με αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται η σωλήνωσης και η τσιμεντώση της γεώτρησης.

2.5. Μετρήσεις των γεωφυσικών διαγραφών

Η κύρια διαδικασία μέτρησης γεωφυσικών καταγραφών ή διαγραφών βασίζεται στην τοποθέτηση κατά στάδια και με χαμηλή σχετικά ταχύτητα μίας οβίδας ανίχνευσης (geophysical probe) εντός της γεώτρησης και στη συνέχεια η καταγραφή των μετρήσεων επιφανειακά σε ένα ειδικό καταγραφικό σύστημα, το οποίο απεικονίζει τη συνεχή καταγραφή των μετρήσεων σε σχέση με το βάθος. Τα κύρια τμήματα που αποτελούν μία μονάδα λήψης των μετρήσεων γεωφυσικών διαγραφών αναπαρίστανται στο σχήμα 2.13.

Οι μετρήσεις των γεωφυσικών καταγραφών διακρίνονται σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη κατηγορία αφορά φυσικά φαινόμενα και η δεύτερη προκλητά ή συνεπαγόμενα φαινόμενα. Οι δύο αυτές κατηγορίες εξετάζονται αναλυτικότερα στα παρακάτω υποκεφάλαια.⁴¹

2.5.1. Φυσικά φαινόμενα

Στην πρώτη κατηγορία - φυσικά φαινόμενα - , υπάρχει ένας ανιχνευτής, ο οποίος είναι κατάλληλος για την πραγματοποίηση των σωστών μετρήσεων. Σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται η εφαρμογή σήματος διέγερσης για τη μέτρηση των φυσικών πεδίων και παραμέτρων.

³⁹ <http://www.tiwoiltools.com/linerhangersystems/Liner-Hangers>

⁴⁰ <http://www.weatherford.com/en/products-services/well-construction/liner-systems#>

⁴¹ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

Παραδείγματα μετρήσεων φυσικών φαινομένων :

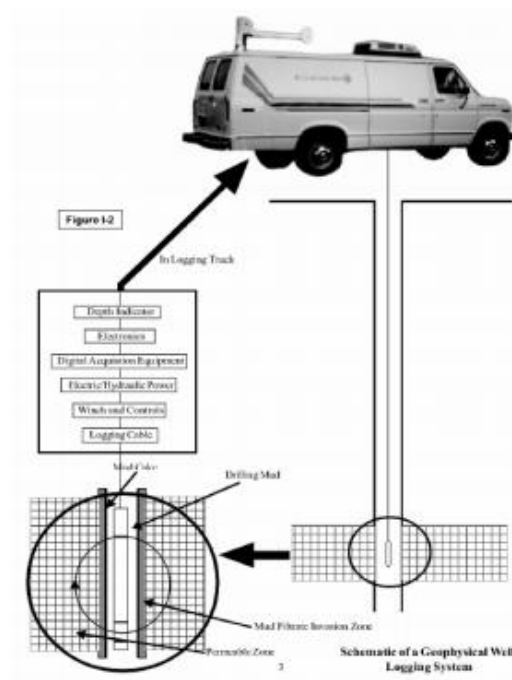
- Φυσική ραδιενέργεια σχηματισμών ή Gamma Ray Log
- Στιγμαίο δυναμικό ή Spontaneous Potential – SP logging
- Θερμοκρασία ή Tlog
- Ταχύτητα των ρευστών ή Flowmeterlog

2.5.2. Προκλητά ή συνεπαγόμενα φαινόμενα

Η κατηγορία των προκλητών φαινομένων διαθέτει έναν ειδικό τύπο εκπομπού που μπορεί να διεγείρει τον σχηματισμό και επιπλέον ένα σύστημα ανίχνευσης. Με αυτό τον τρόπο μετράται η απόκριση των σχηματισμών σε επαγόμενα πεδία.

Παραδείγματα μετρήσεων προκλητών φαινομένων :

- Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ή Resistivity Log
- Induction Log
- Neutron porosity logs
- Ακουστικές διαγραφίες ή Sonic logs



Σχήμα 2.13. : Τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν μία μονάδα μέτρησης γεωφυσικών καταγραφών. ⁴²

⁴² <http://seismo.geology.upatras.gr/greek/logging2012enc.pdf>

3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (C) ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (R) (Horizontal & Vertical Resistivity)

3.1. Ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα

Από τα προηγούμενα κεφάλαια είναι γνωστό ότι η δομή των στρωμάτων των γεωλογικών σχηματισμών διερευνάται μέσω διάφορων μεθόδων της *εφαρμοσμένης γεωφυσικής*. Σημαντικότερες μέθοδοι για τις γεωφυσικές καταγραφές καθίστανται οι **Ηλεκτρικές μέθοδοι**. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν ως στόχο τους τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των γεωλογικών στρωμάτων έτσι ώστε να ερευνηθούν ιζηματογενείς λεκάνες οικονομικού ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα η ηλεκτρική αντίσταση είναι αυτή που κρίνεται ως η σημαντικότερη μέτρηση για τις γεωφυσικές καταγραφές, καθώς είναι δυνατόν να καθορίσει το επί τοις εκατό ποσοστό του νερού που περιέχεται αλλά και το επί τοις εκατό ποσοστό των υδρογονανθράκων, εφόσον είναι γνωστό το πορώδες. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή τόσο επιφανειακά όσο και εντός των γεωτρήσεων (logging).

Όσον αφορά την *Ηλεκτρική αντίσταση (R)* ενός γεωλογικού σχηματισμού ή υλικού αποτελεί την μέτρηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος και η μονάδα μέτρησης της είναι το ohm. Επειδή όμως στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις του υλικού ορίστηκε η έννοια της *Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (ρ)*, που δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\rho = R * A / L$$

όπου **L** το μήκος του κυλινδρικού στερεού σώματος σε m

A η διατομή σε m²

R η ηλεκτρική αντίσταση σε Ω

Όλες οι παραπάνω μονάδες είναι στο σύστημα SI και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μετράται σε Ωm ή Ohm- m² / m.

Επίσης, ορίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία αποτελεί αντίστροφο μέγεθος από αυτό της ηλεκτρικής αντίστασης. Η *Ηλεκτρική αγωγιμότητα (C)* λοιπόν, αποτελεί το μέτρο της ικανότητας που διαθέτει το υλικό να μεταδίδει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω αυτού. *Ειδική αγωγιμότητα (σ)* ορίζεται η αντίστροφη έννοια της ειδικής αντίστασης και δίνεται από την σχέση :

$$\sigma = 1 / \rho = L / R * A$$

όπου L , A , R και ρ ομοίως με παραπάνω.

Η ειδική αγωγιμότητα μετράται σε mmho / m (Millimhos / m) ή mS / m (milliSiemens / m).

Επιπρόσθετα, μεταξύ της ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ορίζεται η παρακάτω σχέση :

$$C = 1000 / R$$

Όπου C η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε mmho / m

R η ηλεκτρική αντίσταση σε $\text{ohm} - \text{m}^2 / \text{m}$ ⁴³

3.2. Κάθετη και οριζόντια διάτρηση

Η θεώρηση πως μία γεώτρηση είναι κατακόρυφη και τα στρώματα του σχηματισμού είναι οριζόντια βρίσκει ισχύ, καθώς οι υποθέσεις αυτές είναι φυσικές και κυρίως ιστορικές, εφόσον μέχρι και την δεκαετία του 1980 τα αποκλίνοντα φρεάτια έγιναν κοινά και μέχρι την δεκαετία του 1990 οι οριζόντιες γεωτρήσεις που είχαν διανοιχθεί ήταν πολυάριθμες. Ωστόσο, οι σχηματισμοί μεγάλου βάθους είναι σπάνιοι και επηρεάζουν μόνο την βαθύτερη αντίσταση στην ανάγνωση από τις συσκευές.

Έχει μεγάλη σημασία λοιπόν αν μία γεώτρηση είναι κατακόρυφη ή οριζόντια. Τα μηχανήματα καταγραφής είναι σχεδιασμένα για μετρήσεις μακριά από το σώμα του εργαλείου μέτρησης και εστιάζουν στη λάσπη, τον πολφό διάτρησης και αν είναι δυνατόν την προσβεβλημένη ζώνη που περιβάλλει τον σχηματισμό.

Οι παραπάνω παράγοντες συναντώνται σε όλα τα φρεάτια. Σε έναν ομοιογενή σχηματισμό που βρίσκεται στη γεώτρηση δεν θα πρέπει να έχει σημασία η κλίση του. Ωστόσο, οι σχηματισμοί που συναντώνται δεν είναι ποτέ ομοιογενείς και υπάρχουν πάντα μεταξύ τους όρια. Αυτή η ανομοιογένεια αλλά και η ανισοτροπία που διαθέτουν επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τις κάθετες από τις οριζόντιες μετρήσεις. Επίσης, τα όρια των σχηματισμών έχουν τελείως διαφορετικό ρόλο. Οπότε συμπεραίνεται ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών καταγραφών μπορεί να είναι διαφορετική, παρά το γεγονός ότι οι βασικοί μέθοδοι που εκτελούνται οι μετρήσεις είναι οι ίδιες, ανεξαρτήτως της κλίσης που διαθέτει η γεώτρηση. Η βασική αυτή διαφορά επηρεάζεται από την χρήση των γεωφυσικών καταγραφών. Εάν δηλαδή η χρήση είναι ποιοτική ή ποσοτική.

⁴³ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

Οι πρώτες οριζόντιες γεωτρήσεις ήταν φρεάτια ανάπτυξης μέσα σε ήδη γνωστούς ταμειευτήρες. Η διάτρηση σε αυτές τις γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη γεωμετρία του ταμειευτήρα. Η γνώση της γεωμετρίας του ταμειευτήρα έγινε γνωστή με την χρήση αποτελεσμάτων σεισμικών δεδομένων και με κατακόρυφες γεωτρήσεις. Έτσι, γρήγορα συμπεράναν πως οι αλλαγές στα γεωλογικά φαινόμενα κατά μήκος της διάτρησης ήταν πολύ περισσότερες από αυτές που περίμεναν. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με την χρήση ειδικών εργαλείων (wireline tools) με σκοπό την γνώση των αποθεμάτων στον ταμειευτήρα και έτσι αποφάσισαν να εφαρμόσουν μία νέα μέθοδο καταγραφής μετρήσεων (geosteering). Στη νέα αυτή εφαρμογή οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα μέσω συσκευών LWD (Logging While Drilling) έχοντας ως στόχο την αλλαγή της πορείας της γεώτρησης κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Η τεχνική αυτή ήταν επιτυχής και είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των οριζόντιων γεωτρήσεων.

Η επιτυχία της παραπάνω τεχνικής, εκτός των άλλων, είχε ως αποτέλεσμα την διάνοιξη οριζόντιων φρεατίων όχι μόνο για ανάπτυξη αλλά και για έρευνα (exploration) και εκτίμηση. Έτσι, επιβάλλεται η απόλυτη ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μηχανισμού καταγραφής. Σε ένα φρεάτιο ανάπτυξης η ποιοτική ερμηνεία είναι αρκετή, ενώ σε ένα φρεάτιο έρευνας (exploration) ή αξιολόγησης, η πλήρης ποσοτική ερμηνεία είναι απαραίτητη.⁴⁴

3.3. Κατηγορίες με παραδείγματα

Μεταξύ των γεωτρήσεων HA (High Angle) και HZ (Horizontal Wells) υπάρχουν ορισμένες βασικές διαφορές. Σύμφωνα με τον Passey et. al. (2005) υπάρχουν οι εξής κατηγορίες :

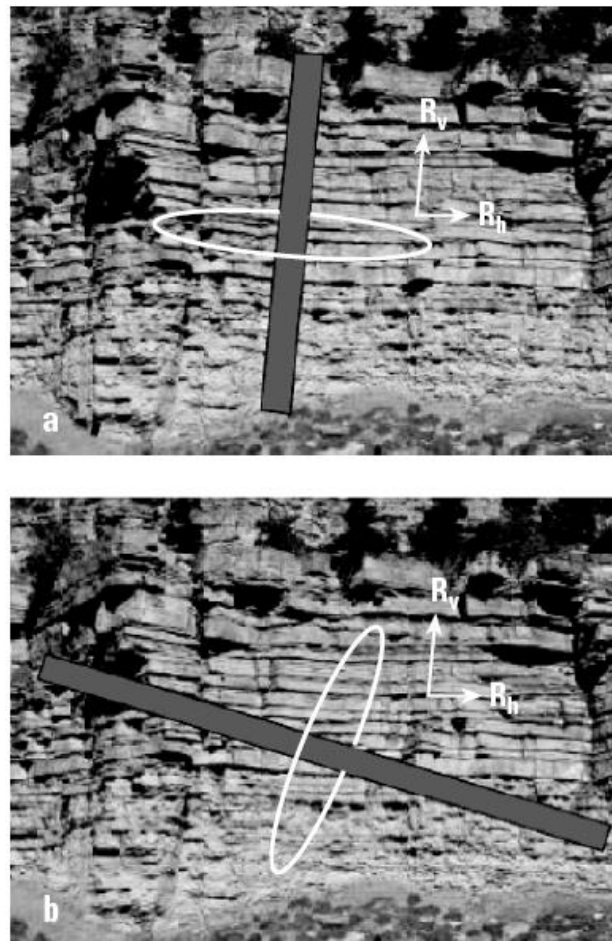
- Κατακόρυφη γεώτρηση με γωνία κλίσης μικρότερη από 30° .
- Ελαφρώς διαφορετική γεώτρηση της πρώτης με γωνία κλίσης μεταξύ 30° και 60° .
- Γεώτρηση με γωνία κλίσης μεταξύ 60° και 80° .
- Οριζόντια γεώτρηση με γωνία κλίσης μεγαλύτερη των 80° .

Αυτές οι τέσσερις κατηγορίες, πολλές φορές είναι απαραίτητο να υποστούν διορθώσεις στις καταγραφές τους ($<30^\circ$) που ορίζουν τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της γεώτρησης και του σχηματισμού. Ωστόσο η συγκεκριμένη γωνία επιφέρει προβλήματα στη μέτρηση των καταγραφών λόγω των περιβαλλόντων σχηματισμών και της ανισοτροπίας που δημιουργείται (Σχ. 3.1.).

Στην εικόνα που ακολουθεί, σύμφωνα με τον Passey et. al. (2005), παρουσιάζονται η οριζόντια αντίσταση R_h και η κατακόρυφη αντίσταση R_v . Στην πρώτη ανταποκρίνονται κυρίως οι μετρήσεις του κατακόρυφου φωρατή ενώ στη

⁴⁴ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer

δεύτερη οι μετρήσεις επηρεάζονται κυρίως από τον οριζόντιο. Στην περίπτωση της οριζόντιας αντίστασης, το ρεύμα βρίσκει μεγάλες διαφοροποιήσεις στην αντίσταση. Επίσης, είναι δυνατόν να υπάρξουν αλλαγές στους σχηματισμούς που περιβάλλουν τη γεώτρηση. Όταν αυξάνεται η γωνία, τα πιθανά ρήγματα και οι διακλάσεις που μπορεί να συναντήσει η γεώτρηση, συναντώνται συχνότερα. Εκτός από τις φυσικές παρεμβάσεις παρουσιάζονται και μηχανικοί και λειτουργικοί περιορισμοί στη διαφοροποίηση των δύο ειδών γεωτρήσεων. Δηλαδή, υπάρχει πρακτική διαφορά στην τεχνική καταγραφής τους και στην χρήση των καλωδίων LWD.



Σχήμα 3.1. : Απεικόνιση παρεμβαλλόμενων σχηματισμών (άμμοι και σχιστόλιθοι) σε μία κατακόρυφη (a.Vertical Well) και σε μία υψηλής γωνίας γεώτρηση (b.HA) (Passey et. al., 2005).⁴⁵

Σημαντικό θα ήταν να τονιστεί και η επίδραση της βαρύτητας στο mud filtrate και στη διαπερατότητα του σχηματισμού. Ωστόσο η βασική διαφορά μεταξύ των δύο γεωτρήσεων (HA & HZ) αφορά στην γεωμετρία του σχηματισμού σε συνάρτηση με αυτήν της γεώτρησης.

⁴⁵ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 575

3.3.1. Αντίσταση (Resistivity)

Η ανισοτροπία μπορεί να επηρεάσει μία γεώτρηση. Ωστόσο, στην περίπτωση της κατακόρυφης γεώτρησης είναι δυνατόν να μην ληφθεί υπόψη καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η συμβατική επαγωγή και η λειτουργία των συσκευών επηρεάζεται από την οριζόντια αντίσταση (R_h). Επίσης, στα συστήματα των ηλεκτροδίων παρατηρείται μία μικρή επιρροή από την κατακόρυφη αντίσταση (R_v).

Σύμφωνα με θεωρίες που έχουν διατυπωθεί η επίδραση της ανισοτροπίας στις μετρήσεις της αντίστασης ήταν η διαφοροποίηση στην αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, σε έναν ιζηματογενή σχηματισμό, όπως είναι ο αργιλικός σχίστης, η αγωγιμότητα ποικίλει από σ_h έως σ_v . Όπου σ_h είναι η οριζόντια αγωγιμότητα και σ_v η κάθετη αγωγιμότητα. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι όταν παράγεται οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο από το ρεύμα και είναι παράλληλο στα στρώματα, προστίθεται όγκος μέσω της αγωγιμότητας των συστατικών και έτσι δημιουργείται μία οριζόντια αγωγιμότητα που δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\sigma_h = V_{sh}\sigma_{sh} + (1 - V_{sh})\sigma_{sa}$$

όπου V_{sh} η ένταση του σχίστη

σ_{sh} η υψηλή αγωγιμότητα

σ_{sa} η μικρή αγωγιμότητα

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση των συσκευών και γι' αυτό θα πρέπει να δημιουργούνται και τα ανάλογα μοντέλα. Στη διάδοση του ρεύματος κύριος παράγοντας επίδρασης είναι η ανισοτροπία, η οποία όμως αποτελεί πλεονέκτημα καθώς συνδυάζοντας τις πληροφορίες για την εξασθένηση και τη μετατόπιση της φάσης είναι δυνατόν να εμφανιστούν και οι δύο αντιστάσεις (R_h και R_v).

Μεταξύ των κατακόρυφων και των οριζόντιων γεωτρήσεων συνήθως χρησιμοποιείται το R_h καθώς συναντάται πιο συχνά, ενώ όταν πρόκειται για αξιολόγηση χρησιμοποιούνται και οι δύο αντιστάσεις. Σημαντικό θα ήταν να τονιστεί ότι με βάση τη γωνία και την τεχνική επεξεργασίας, οι δύο αυτές αντιστάσεις είναι δυνατόν να βρίσκονται παράλληλα και κάθετα στα στρώματα και όχι κατακόρυφα και οριζόντια.⁴⁶

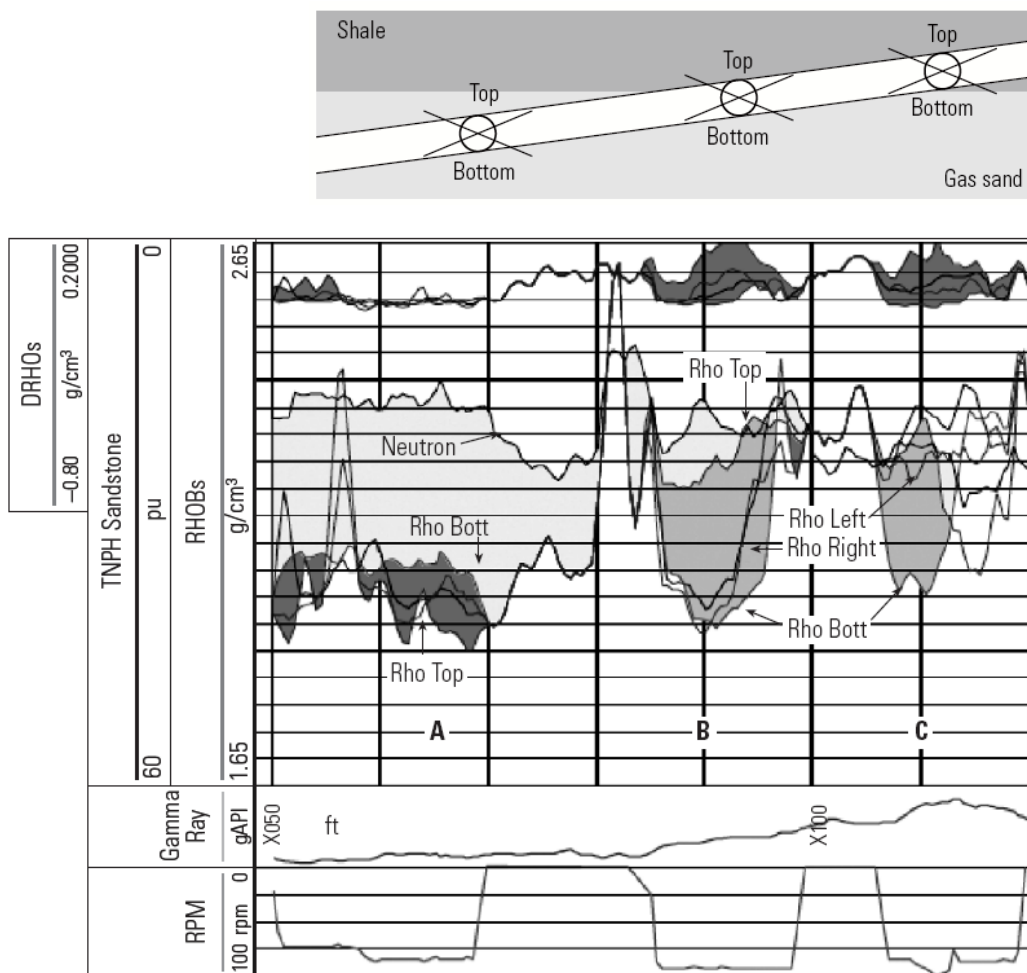
3.3.2. Πυκνότητα (Density)

Στη λειτουργία των φωρατών της πυκνότητας κατά τη διάρκεια της διάτρησης (Density - LWD) παρατηρείται ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην μέτρηση των

⁴⁶ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 577-580

δεδομένων σε γεωτρήσεις HA/HZ καθώς είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε διαφορετικά αζιμούθια. Στο σημείο επαφής με το σχηματισμό δίνονται καλύτερα αποτελέσματα. Το σημείο αυτό αποτελεί συνήθως το κάτω τεταρτημόριο της μέτρησης σε γεωτρήσεις HA/HZ. Παρόλα αυτά για την ορθότερη ανάγνωση και ερμηνεία των πληροφοριών που δίνουν οι μετρήσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες. Για παράδειγμα η παρουσία του στρώματος των θρυμμάτων στο κατώτερο σημείο μπορεί να επιφέρει προβλήματα στη μέτρηση της πυκνότητας στον πυθμένα. Κατά την περιστροφή του κοπτικού άκρου κατά τη διάρκεια της διάτρησης παράγεται μία ορισμένη τάση, η οποία δυσκολεύει και επιβραδύνει τη λειτουργία του κοπτικού άκρου όταν συναντήσει τον πυθμένα (bottom) αλλά και όταν συναντάει τα όρια των στρωμάτων αυτού.

Στην παρακάτω εικόνα, σύμφωνα με τους Holenka et al. (1995), παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της περίπτωσης που προαναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.2 : Απεικόνιση καταγραφής της πυκνότητας και των νετρονίων σε μία οριζόντια διάτρηση. Παρατηρείται η πορεία της διάτρησης καθώς διέρχεται αρχικά από άμμο (gas sand) και έπειτα περνά σε σχιστή (shale). Όπου PRM είναι οι περιστροφές ανά λεπτό και Rho οι καμπύλες (Holenka et al, 1995).⁴⁷

⁴⁷ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 581

Στο τμήμα Α παρατηρείται το αέριο μέσω του διαχωρισμού της πυκνότητας – νετρονίων σε αντίθεση με την πυκνότητα του πυθμένα που εμφανίζει υψηλότερα επίπεδα ανάγνωσης από τα υπόλοιπα. Αυτό πιθανόν σημαίνει ότι η βαρύτητα είναι αυτή που υποβοηθάει το αέριο να μετατοπίζει το διήθημα (filtrate) επάνω και δίπλα στις πλευρές της γεώτρησης, με αποτέλεσμα μόνο στο κάτω τεταρτημόριο να παρουσιάζεται το διήθημα. Επίσης, στο τμήμα ενδιάμεσα της ζώνης Α και Β παρουσιάζεται ένα κομμάτι στο οποίο δεν πραγματοποιείται περιστροφή. Στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται και στο παραπάνω παράδειγμα, οι ανιχνευτές έχουν κατεύθυνση προς το κάτω τμήμα, όταν πρόκειται για ολίσθηση. Επομένως, οι ανιχνευτές βλέπουν το διήθημα. Όσον αφορά το τμήμα Β, υπάρχει αντίθεση με τα προηγούμενα δύο τμήματα καθώς στο ανώτερο τμήμα (top) η πυκνότητα διαβάζει σε υψηλότερα επίπεδα. Με αυτό τον τρόπο δικαιολογείται η είσοδος του κοπτικού άκρου στον σχιστόλιθο. Τέλος, στα τμήματα δεξιά και αριστερά του C, παρατηρείται η είσοδος πλέον στον σχιστόλιθο, καθώς και στο κάτω τεταρτημόριο. Συμπερασματικά, το παράδειγμα αυτό θέλει να δείξει την εντοπισμό του αερίου έπειτα από τον διαχωρισμό της πυκνότητας – νετρονίων. Στην περίπτωση παρουσίας πετρελαίου, θα υπήρχε δυσκολία στην ερμηνεία παρά την μικρότερη επίδραση που θα παρατηρούταν στις μετρήσεις της πυκνότητας. Επομένως στην σχήμα 3.2. παρουσιάζονται οι διαφορετικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη HA/HZ γεωτρήσεων.⁴⁸

3.3.3. Νετρόνια (Neutron)

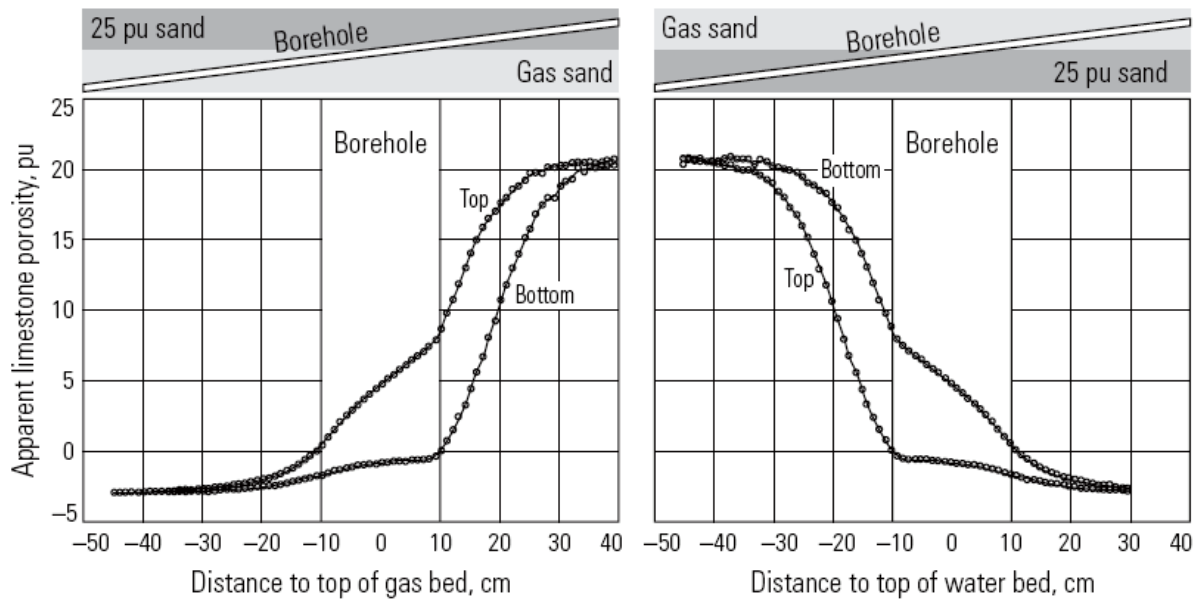
Σε μία γεώτρηση όπου εφαρμόζεται η τεχνική των νετρονίων παρατηρείται μία γενική προσέγγιση των μετρήσεων, η οποία δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο στόχο. Με τη βοήθεια των σχηματισμών που περιβάλλουν την γεώτρηση και την ίδια την γεώτρηση είναι δυνατόν η μέτρηση να πραγματοποιηθεί προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο εξηγείται αν ληφθεί υπόψη η κάθοδος ενός φωρατή με καλώδια, όπου παρατηρείται πίεση από την μία πλευρά της γεώτρησης συναντώντας πρώτα τον σχηματισμό. Η λάσπη βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά και λειτουργεί ως εμπόδιο στην άφιξη των νετρονίων στους ανιχνευτές. Όμως, με την χρήση της τεχνικής LWD (Logging While Drilling) αυτή η δυσκολία μειώνεται εξαιτίας του μεγέθους του δακτυλίου ανάμεσα στο κοπτικό άκρο και τον σχηματισμό εξερεύνησης. Κατά τη μέτρηση των νετρονίων κατά τη διάρκεια της διάτρησης (Neutron LWD) μπορεί να καταγραφούν πολλές αντιθέσεις στους περιβάλλοντες σχηματισμούς. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται ο μέσος όρος των ιδιοτήτων του αζιμούθιου. Όμως, αν στα γειτονικά πετρώματα συναντάται σχηματισμός που περιλαμβάνει φυσικό αέριο τα δεδομένα αλλάζουν και δεν ισχύουν τα παραπάνω.

⁴⁸ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 580-582

Σε αντίθεση με την παραπάνω παρατήρηση για την παρουσία του φυσικού αερίου σε μία ζώνη έρχεται η συμβολή του υδρογόνου σε έναν σχηματισμό. Τα νετρόνια διαθέτουν την ιδιότητα να κινούνται με μία ομαλή ροή χωρίς να συναντούν σχετικά εμπόδια στον σχηματισμό κατά μήκος της γεώτρησης. Σε μία οριζόντια διάτρηση, όταν ο φωρατής συναντήσει μία ζώνη φυσικού αερίου, παρατηρείται δυσκολία στη ροή των νετρονίων με αποτέλεσμα να καταφύγουν σε μία κοντινή περιοχή όπου υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο φωρατής θα βρισκόταν σε ένα σχηματισμό με υδρογόνο, ένας πιθανός σχηματισμός με φυσικό αέριο σε γειτονική τοποθεσία θα διευκόλυνε τη ροή των νετρονίων.

Τα δύο φαινόμενα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρούνται στο σχήμα 3.3. (Ellis & Chiaramonte, 2000). Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η εμφάνιση φυσικού αερίου κάτω από τα 25 p.u. κορεσμένης με νερό άμμου. Στην πραγματικότητα αυτό το γεωλογικό φαινόμενο είναι απίθανο να συμβεί. Όμως το συγκεκριμένο παράδειγμα εστιάζει στην καταγραφή του φωρατή όταν διέρχεται από μία υψηλή ζώνη ΗΙ σε μία χαμηλού υδρογόνου. Αυτό συμβαίνει κάτω από την πρώτη ζώνη. Η μπάρα που υπάρχει επάνω από το διάγραμμα βοηθά στην κατανόηση της φθίνουσας απόκλισης μίας γεώτρησης από τα δεξιά προς τα αριστερά. Αρχικά λοιπόν, στη γεώτρηση συναντάται εξολοκλήρου μόνο η 25 p.u. κορεσμένη με νερό άμμος. Στα τμήματα επάνω και κάτω από αυτόν τον σχηματισμό παρατηρείται ασβεστόλιθος, ο οποίος αποτελεί πορώδες πέτρωμα με 21 p.u. Την στιγμή που ο φωρατής πλησιάζει το στρώμα αερίου, στα πρώτα 20 cm κάτω από την οπή, οι αισθητήρες του ανιχνευτή αρχίζουν να ενεργοποιούνται. Ωστόσο, οι ανώτεροι ανιχνευτές είναι πιθανό να αντληφθούν την ύπαρξη του στρώματος λίγο αργότερα καθώς υπάρχει η λάσπη στο σωλήνα διάτρησης (10 cm). Όσο ο φωρατής εισέρχεται στον σχηματισμό αερίου, στο βάθος των 5 – 10 cm, οι ανιχνευτές είναι πλέον ικανοί να αναγνώσουν τις πραγματικές τιμές του σχηματισμού που ερευνάται. Στο διάγραμμα που βρίσκεται δεξιά στο σχήμα 3.3. παρουσιάζεται η συμπεριφορά των νετρονίων όταν συναντήσουν ένα πέτρωμα με υψηλό πορώδες, το οποίο βρίσκεται κάτω από ένα σχηματισμό με φυσικό αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση, κατά την κάθοδο του φωρατή, μόνο ο κάτω ανιχνευτής αντιλαμβάνεται την παρουσία του στρώματος υψηλού πορώδους, ενώ οι άνω ανιχνευτές μπορούν να αντληφθούν την ύπαρξη του στρώματος αυτού μόνο όταν η γεώτρηση βρίσκεται εξολοκλήρου εντός αυτού. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι κατώτεροι ανιχνευτές θα πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10 cm βυθισμένοι μέσα στο στρώμα υψηλού πορώδους για να μην μπορούν να επηρεαστούν από το ανώτερο στρώμα του φυσικού αερίου.⁴⁹

⁴⁹ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 582-584



Σχήμα 3.3. : Απεικόνιση της απόκρισης των ανιχνευτών της μεθόδου Neutron LWD. Στην αριστερή καταγραφή παρουσιάζεται ένας σχηματισμός άμμου που περιέχει φυσικό αέριο. Στην δεξιά καταγραφή ο σχηματισμός της άμμου περιλαμβάνει νερό (Ellis & Chiaramonte, 2000).⁵⁰

3.4. Πολφός Διάτρησης

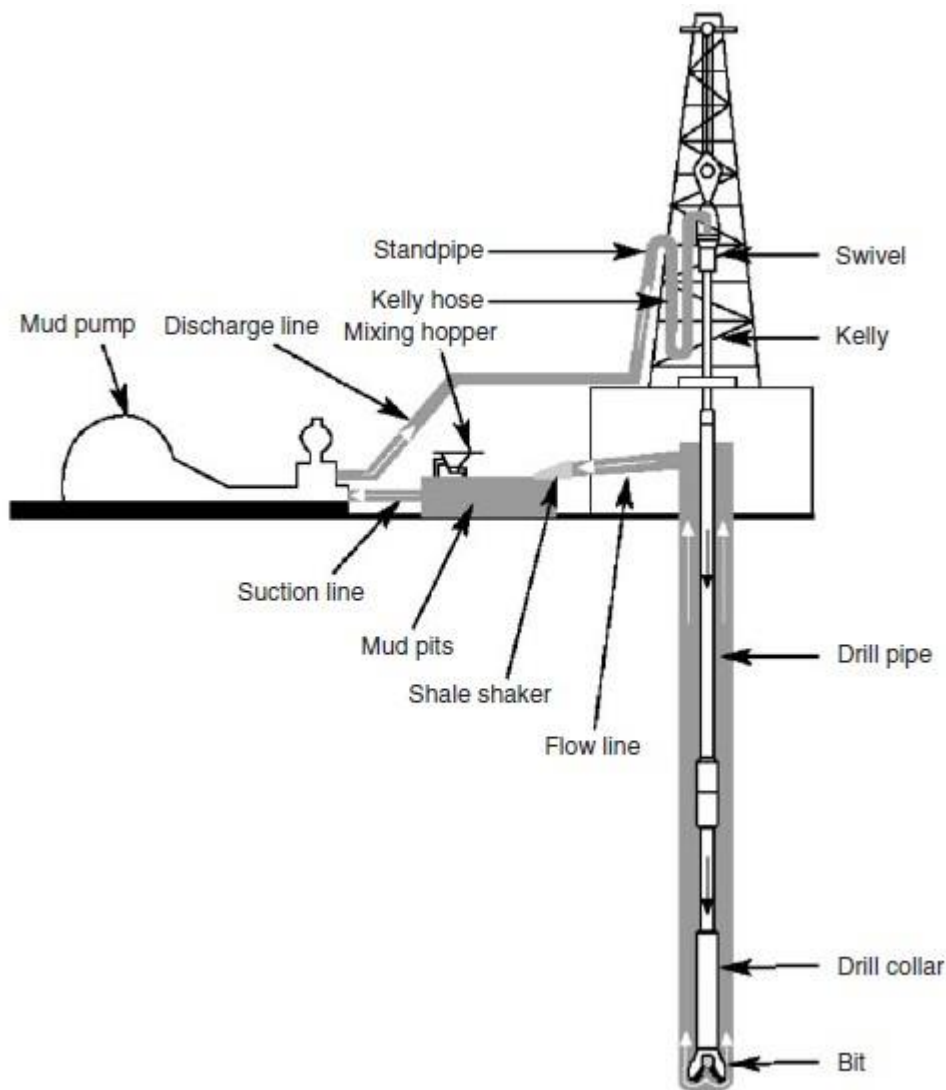
Είναι γνωστή η χρήση του διατρητικού ρευστού ή αλλιώς πολφού διάτρησης («λάσπη») κατά τη διάρκεια όρυξης μίας γεώτρησης, με σκοπό την ελάττωση ή αύξηση της θερμοκρασίας, εξαιτίας της τριβής που δημιουργείται στο σημείο όπου το κοπτικό άκρο έρχεται σε επαφή με τους σχηματισμούς, και της αφαίρεσης από τον πυθμένα της γεώτρησης των θρυμμάτων των σχηματισμών (cuttings) μεταφέροντάς τα στην επιφάνεια.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα κυκλοφορίας του πολφού (Circulating System) αποτελείται από δεξαμενές πολφού από τις οποίες λαμβάνεται το διατρητικό ρευστό, εισπύζεται εντός της διατρητικής στήλης και στη συνέχεια αφού ψεκαστεί (μέσω των ακροφύσιων του κοπτικού άκρου) στο σημείο επαφής του κοπτικού άκρου με το σχηματισμό, φτάνει και πάλι στη επιφάνεια μαζί με τα θρύμματα από τα διατρηθέντα πετρώματα. Όταν λοιπόν τα θρύμματα φτάσουν στην επιφάνεια γίνεται διαχωρισμός από την λάσπη της γεώτρησης μέσω των «δονούμενων κοσκίνων» (Shale shakers).

Στις δεξαμενές πολφού (Mud tanks) πραγματοποιείται η προετοιμασία και η ανάμειξη του πολφού. Η άντλησή του γίνεται μέσω των αντλιών πολφού (Mud

⁵⁰ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 584

pumps) και περνώντας μέσα από έναν εύκαμπτο σωλήνα φτάνουν στο swivel, μετά στο Kelly και τέλος στη διατρητική στήλη.

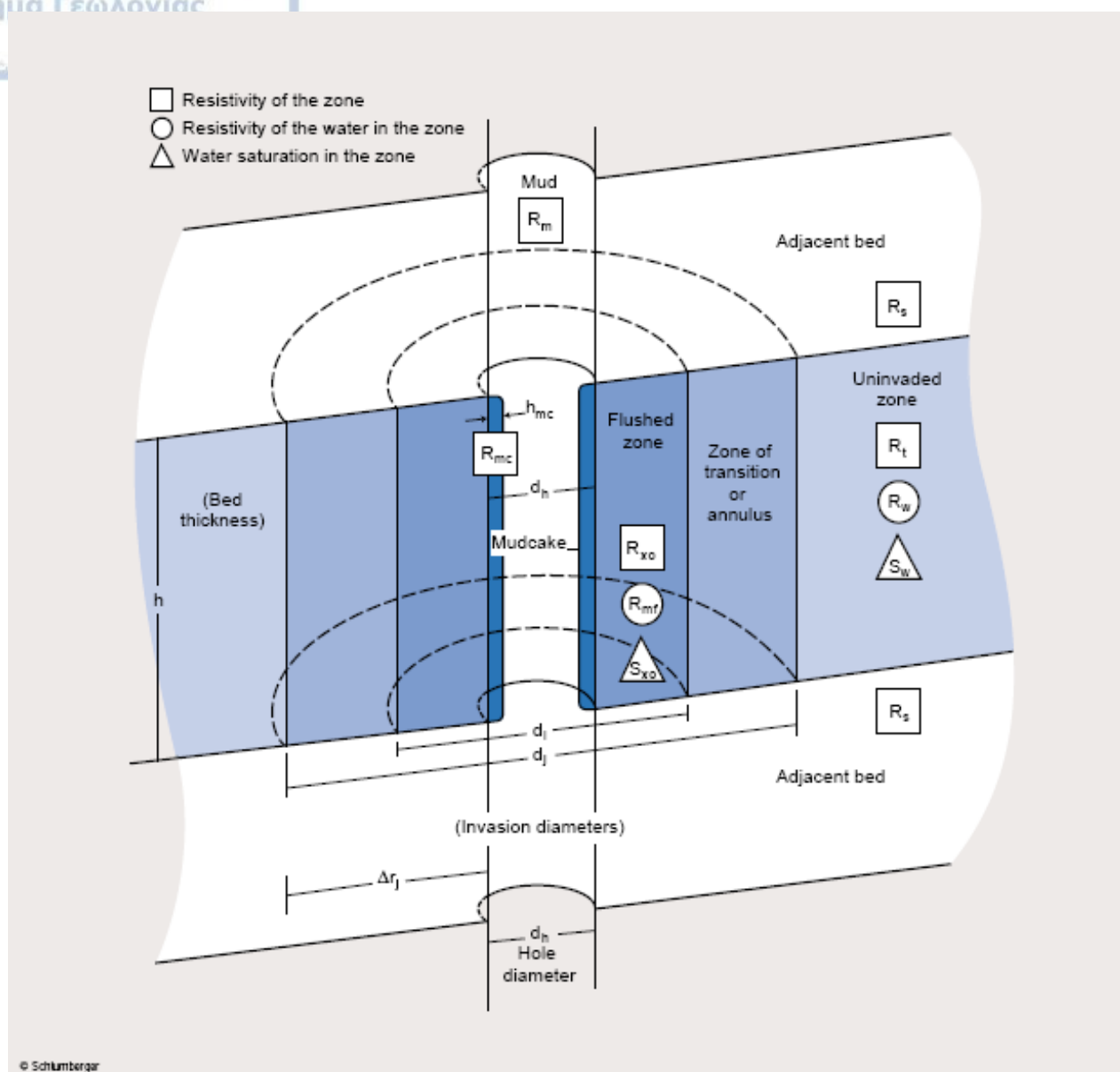


Σχήμα 3.4. : Απεικόνιση συστήματος κυκλοφορίας (Circulating System).⁵¹

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων μίας γεωφυσικής καταγραφής σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο πολφός διάτρησης καθώς η επίδρασή του εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

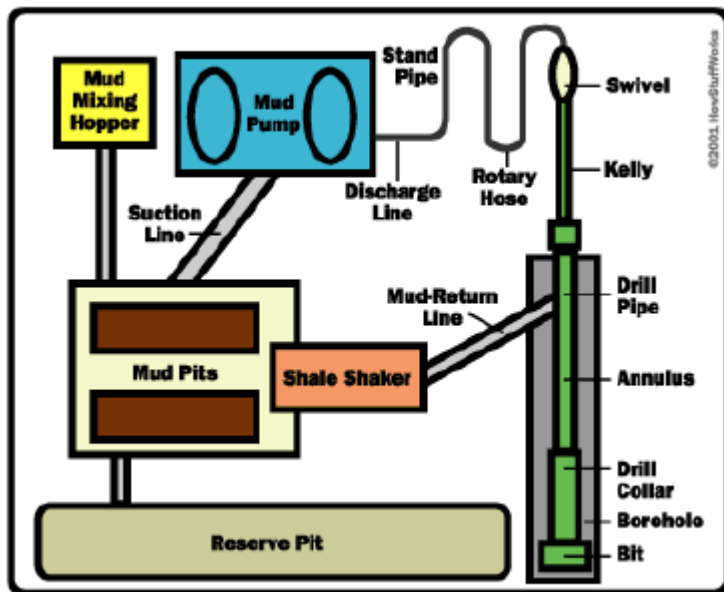
- Τη διάμετρο της σπής
- Το είδος και την πυκνότητα του διατρητικού πολφού
- Τη ζώνη εισβολής που περιβάλλει την γεώτρηση

⁵¹ <http://www.gn-decanter-centrifuge.com/mud/drilling-fluid-system>



Σχήμα 3.5. : Οι ζώνες και το περιβάλλον γύρω από μία γεώτρηση (Schlumberger, 2009).⁵²

⁵² Schlumberger, 2009, Log Interpretation Chart, Basic Material, Symbols used in Log Interpretation, pp 1.



Σχήμα 3.6. : Σύστημα κυκλοφορίας (Circulation System) (Schlumberger, 2008).⁵³

Κρίνεται απαραίτητος ο συνεχής και λεπτομερής έλεγχος της πυκνότητας του πολφού της διάτρησης, καθώς είναι αναγκαίο να διατηρείται σε πιέσεις κατά πολύ υψηλότερες από αυτές των ρευστών των πετρωμάτων. Αυτή η διαφορά της πίεσης είναι και αυτή που αναγκάζει τον πολφό να διεισδύει στο εσωτερικό των πόρων των σχηματισμών. Ωστόσο, μόνο τα ρευστά μπορούν να κινηθούν μέσω των πόρων των διαπερατών πετρωμάτων καθώς το στερεό κομμάτι του πολφού έχει συνήθως μεγαλύτερη επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο, κατά τη διάρκεια της διάτρησης, δημιουργείται μία αδιαπέρατη μεμβράνη – κρούστα (**Mud cake**) στο τοίχωμα της γεώτρησης, η οποία δεν επιτρέπει την είσοδο επιπλέον πολφού (Σχ. 3.5.).⁵⁴

Επίσης, ο πολφός καθώς διεισδύει στα διάκενα των διαπερατών πετρωμάτων, μετατοπίζει μερικώς τα ρευστά τους. Το βάθος όπου διεισδύει ο πολφός έχει άμεση σχέση με τη διαπερατότητα και το πορώδες των σχηματισμών, τη διαφορά της πίεσης της οπής με τον σχηματισμό και το βαθμό απώλειας του διατρητικού ρευστού (ποσοστό απελευθέρωσης νερού από τον πολφό).

Ο ταμειυτήρας που βρίσκεται κοντά στην οπή, περιέχει τώρα διαφορετικά ρευστά από αυτά πριν την διείσδυση του πολφού. Με αυτόν τον τρόπο τα ρευστά έχουν υποστεί αλλαγές στις αναλογίες τους αλλά και τη φύση τους. Έτσι, σχηματίζεται η πλημμυρισμένη ζώνη (Flushed zone) και η μεταβατική ζώνη (Transition zone) όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5. Όταν οι φωρατές καταγράψουν τις παραμέτρους έστω

⁵³ Schlumberger, 2008, Schlumberger Drilling & Measurements, Drilling Overview – Oilfield, Waleed Adams, Drilling Engineering (DnM) In – house for Statoil Stavanger, pp 42

⁵⁴ <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/mudcake.aspx>

και ενός μικρού τμήματος από τη ζώνη διείσδυσης, είναι αναγκαίο να συμπεριληφθούν οι αλλαγές των ρευστών στην εκτίμηση των υγρών που έχουν κορεσθεί της παρθένας ή ανεπηρέαστης ζώνης (Uninvaded zone). Η ζώνη αυτή ορίζεται ως ο μεγαλύτερος αποθηκευτικός χώρος.

Για τη σωστή και ολοκληρωμένη ερμηνεία των διαγραφιών (Σχ. 3.5.), περιλαμβάνονται τα εξής :

- Ειδική αντίσταση του πολφού μέσα στη γεώτρηση (R_m)
- Ειδική αντίσταση της αργιλικής κρούστας, Mud cake (R_{mc})
- Ειδική αντίσταση διηθήματος πολφού, Mud filtrate (R_{mf})
- Ειδική αντίσταση πλημμυρισμένης ζώνης, Invaded zone ή Flushed zone (R_{xo})
- Ειδική αντίσταση μεταβατικής ζώνης, Transition zone (R_i)
- Πραγματική ειδική αντίσταση σχηματισμού, True resistivity of the formation (R_t)
- Ειδική αντίσταση νερού του πορώδους σχηματισμού (R_w)
- Ειδική αντίσταση καθαρού νερού του σχηματισμού, Resistivity of clean water formation (R_o)
- Ειδική αντίσταση γειτονικών σχηματισμών, Adjacent beds (R_s)
- Η διάμετρος της γεώτρησης (d_h)
- Η διάμετρος της ζώνης έκπλησης (d_i)
- Η διάμετρος της μεταβατικής ζώνης (d_j)

Επιπρόσθετα λαμβάνονται υπόψη και τα παρακάτω :

- Κορεσμός σε νερό της αδιατάρακτης περιοχής, Water saturation (S_w)
- Κορεσμός της ζώνης έκπλησης (S_{xo})
- Συντελεστής ειδικής αντίστασης σχηματισμού, Formation resistivity factor (F_r)

Τελειώνοντας, πρέπει να τονιστεί η σημασία της μέτρησης της ειδικής αντίστασης της πλημμυρισμένης ζώνης (R_{xo}) και της πραγματικής ειδικής αντίστασης του σχηματισμού (R_t), όπου είναι και ο κύριος σκοπός των γεωφυσικών καταγραφών ειδικής αντίστασης, με χρήση εστιασμένων φωρατών μεγάλου βάθους έρευνας (deep reading focused services).⁵⁵

⁵⁵ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου



Σχήμα 3.7 : Fluid Holding System (Schlumberger, 2008).⁵⁶

3.5. Τα είδη των γεωφυσικών καταγραφών (Type of Logs)

3.5.1. Διαγραφίες αντίστασης και φυσικού δυναμικού (Resistivity and Spontaneous (SP) Log)

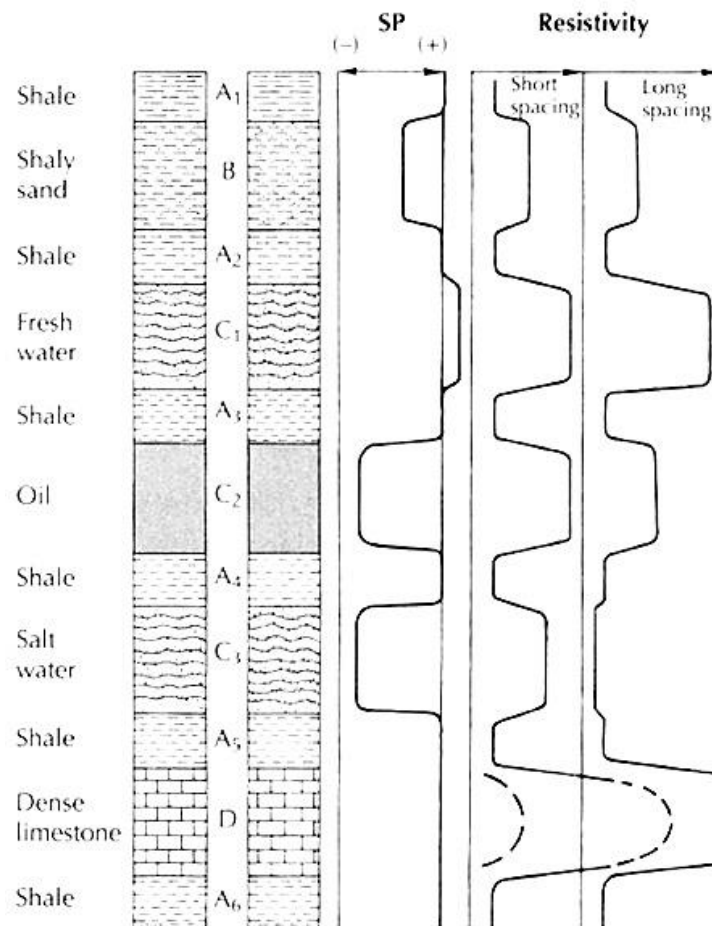
Ένας από τους σημαντικότερους κλάδους των γεωφυσικών διαγραφιών είναι η καταγραφή της αντίστασης. Η καταγραφή αυτή αφορά κυρίως μη σωληνωμένα, πρόσφατα σωληνωμένα, ή και σωληνωμένα ακόμη τμήματα γεωτρήσεων, όπου αποτυπώνονται οι μετρήσεις της αντίστασης και του φυσικού δυναμικού των υπόγειων σχηματισμών που μελετώνται. Δηλαδή, λαμβάνοντας υπόψη και τα δεδομένα των πυρηνοληψιών ανιχνεύεται και αξιολογείται η πιθανή εύρεση παραγωγικών οριζόντων για εκμετάλλευση.

Υπάρχει μία αρίθμηση διαφορετικών τύπων συστημάτων για τη μέτρηση της αντίστασης, οι οποίοι αποτυπώνουν και παρέχουν την καλύτερη δυνατή πληροφόρηση κάτω από ποικίλες συνθήκες που επικρατούν στο υπέδαφος. Τα εργαλεία (φωρατές) και οι μέθοδοι είναι οι εξής :

⁵⁶ Schlumberger, 2008, Schlumberger Drilling & Measurements, Drilling Overview – Oilfield, Waleed Adams, Drilling Engineering (DnM) In – house for Statoil Stavanger, pp 43

- Induction logging
- Electrode resistivity devices
- Microresistivity logs
- Spontaneous (SP) log ⁵⁷

Οι γεωφυσικές διαγραφίες *φυσικού δυναμικού* (Self Potential logging ή **SP**) καταγράφουν συνεχώς τις μεταβολές του φυσικού δυναμικού που παρατηρούνται κατά μήκος της γεώτρησης. Ουσιαστικά η καταγραφή αφορά στην διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο κινούμενο ηλεκτρόδιο εντός της γεώτρησης και του ηλεκτροδίου που βρίσκεται στην επιφάνεια. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται μόνο εφόσον η γεώτρηση περιέχει εξολοκλήρου το ρευστό της γεώτρησης (λάσπη, νερό κ.ο.κ.). ⁵⁸



Σχήμα 3.8. : Παράδειγμα SP logging. ⁵⁹

⁵⁷ [http://petrowiki.org/Resistivity_and_spontaneous_\(SP\)_logging](http://petrowiki.org/Resistivity_and_spontaneous_(SP)_logging)

⁵⁸ [http://petrowiki.org/Spontaneous_\(SP\)_log](http://petrowiki.org/Spontaneous_(SP)_log)

⁵⁹ <https://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol342/lectures/19.html>

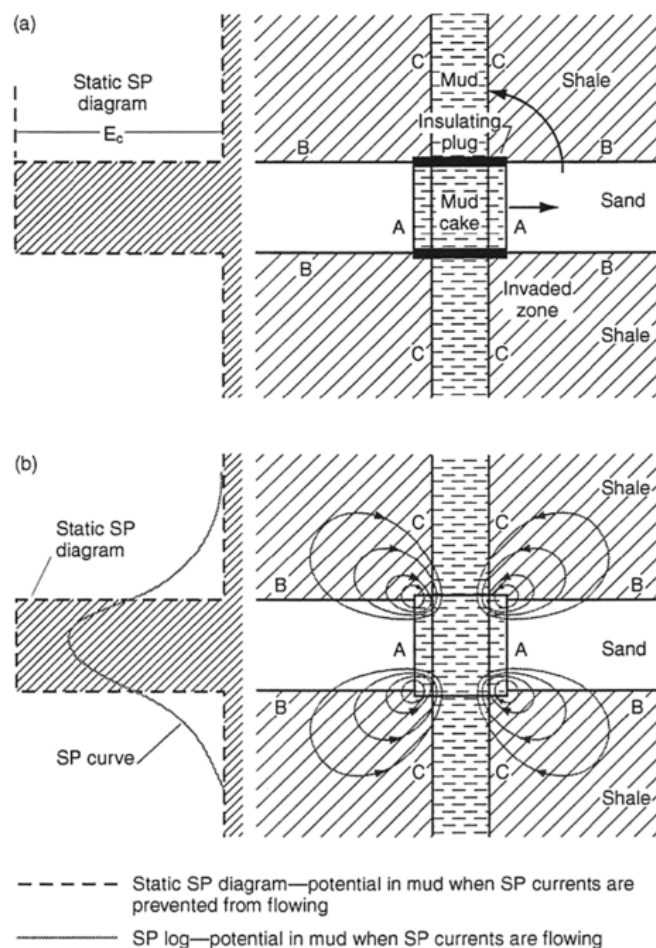
Γενικά, το φαινόμενο αυτό είναι δυνατόν να το παρομοιάσουμε ως την τάση που παράγει ένα ηλεκτρικό στοιχείο (π.χ. μία μπαταρία) και το δυναμικό (E) που μετράται σε mV και του οποίου η μέτρηση δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$E = - K \log (a_w/a_{mf})$$

Όπου a_w η αλατότητα του νερού στους πόρους

a_{mf} η αλατότητα του ρευστού εντός της γεώτρησης

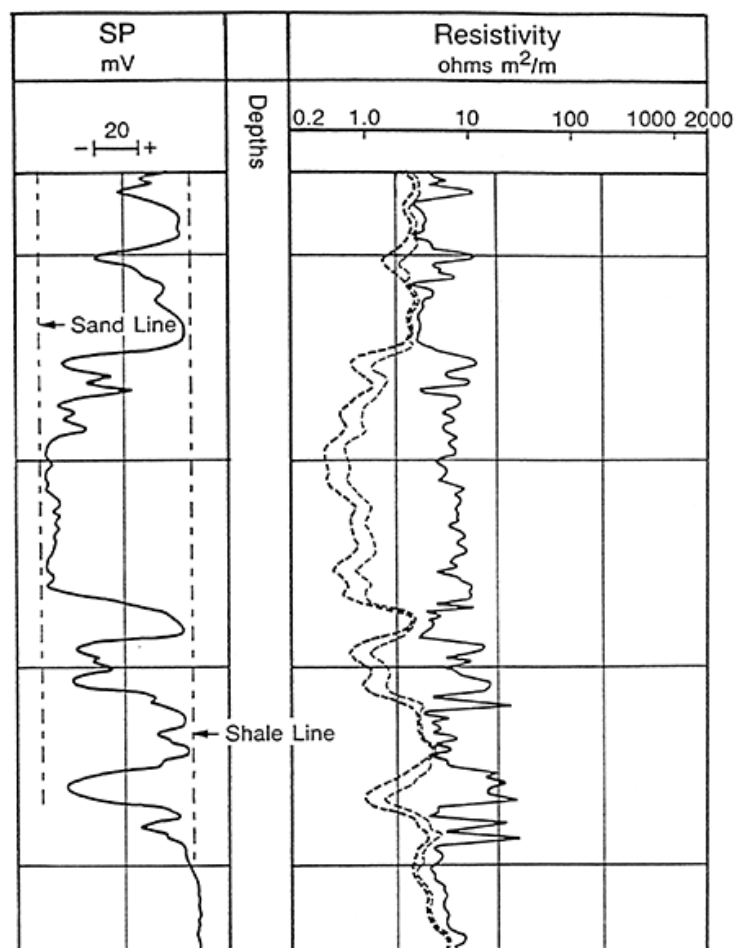
Η δημιουργία αυτής της *μπαταρίας* ευθύνεται στις διάφορες αντιθέσεις αλατότητας μεταξύ του διατρητικού πολφού και των υδάτινων σχηματισμών. Κατά τη διαδικασία της διάτρησης προκύπτουν διαφορετικές συγκεντρώσεις ιόντων με αποτέλεσμα να δημιουργείται διάχυση αυτών από το πιο συμπυκνωμένο διάλυμα προς το πιο αραιό. Τα ιόντα ρέουν ευκολότερα σε αμμώδεις ή γενικά σε περατούς σχηματισμούς.



Σχήμα 3.9. : Ο μηχανισμός με τον οποίο δημιουργούνται οι μεταβολές του φυσικού δυναμικού εντός της γεώτρησης (Schlumberger, 1987).⁶⁰

⁶⁰ http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0140_Image_0001.png

Οι μετρήσεις των μεταβολών του φυσικού δυναμικού βάσει μίας γραμμής αναφοράς. Η γραμμή αυτή ορίζεται ως η *γραμμή αργίλου* (clay line) ή *γραμμή αργιλικού σχίστη* (shale line) και δηλώνει έμμεσα το φυσικό δυναμικό που μετράται στο τμήμα όπου το ηλεκτρόδιο είναι μπροστά σε μη περατούς σχηματισμούς (Σχ. 3.10.). Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί διαθέτουν την ελάχιστη δυνατή υδραυλική αγωγιμότητα και μπορεί να είναι άργιλοι ή σχίστες.



Σχήμα 3.10. : Απεικόνιση της γραμμής αργιλοσχίστη (shale line) (R. Boeken, 1995).⁶¹

Η μορφή της καμπύλης SP ορίζεται από τους παρακάτω παράγοντες :

- Την αλατότητα των ρευστών της γεώτρησης
- Το πάχος των περατών στρωμάτων
- Την ειδική αντίσταση
- Την επίδραση της αργίλου
- Τις ζώνες που έχουν μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και

⁶¹ http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/1995/OFR95_1a/index.html

- Τις μεταβολές της γραμμής αναφοράς

Η εκτροπή της καμπύλης SP οφείλεται συχνά στις διαφορές της λάσπης, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από τα ρεύματα της SP καταγραφής και βοηθούν στον χαρακτηρισμό των σχηματισμών. Ουσιαστικά, η καταγραφή SP χρησιμεύει στην οριοθέτηση των διαπερατών και πορώδη στρωμάτων, όπως επίσης και στον προσδιορισμό της αντίστασης του νερού.

3.5.2. Ακουστικές διαγραφίες (Acoustic Logging)

Η ακουστική καταγραφή (Acoustic logging) είναι ουσιαστικά μία απεικόνιση της διαδρομής που ακολουθεί ένα ακουστικό κύμα σε συνάρτηση με το βάθος μίας γεώτρησης. Ορισμένες φορές αυτά τα ακουστικά κύματα συνοδεύονται από ταχύτητα και αναφέρονται ειδικά στην ηχητική τους ιδιότητα. Ωστόσο, υπάρχουν και μετρήσεις που αφορούν στο πλάτος, την βραδύτητα κ.α.⁶²

Στην πραγματικότητα, κατά την εφαρμογή της ακουστικής καταγραφής εντός της γεώτρησης, διαδίδονται κύματα σε ένα ελαστικό μέσο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ταλάντωση, η οποία προέρχεται από μία ηχητική πηγή, τον μετατροπέα, στο ελαστικό μέσο, ο οποίος είναι ο γεωλογικός σχηματισμός. Έτσι, το ακουστικό κύμα διαδίδεται μέσω της γεώτρησης και του σχηματισμού και επανέρχεται στους δέκτες. Η ελαστικότητα των σχηματισμών είναι αυτή που βοηθάει στην πραγματοποίηση της διάδοσης του κύματος, με το οποίο και μετρούν την ταχύτητα, την ελάττωση του πλάτους, την συχνότητα αλλά και το εύρος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ακουστικών καταγραφών βρίσκουν εφαρμογή εκτός από τον τομέα της γεωλογίας, στη γεωφυσική αλλά και την μηχανική και διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στα εξής :

- Στην αξιολόγηση των πετρωμάτων ταμιευτήρων
- Στη σωστή επιλογή της τοποθεσίας έρευνας (exploration)
- Στον ορθό προγραμματισμό της ολοκλήρωσης (completion) της γεώτρησης
- Στην ελάττωση των πιθανών κινδύνων που μπορούν να αναπτυχθούν κατά την έρευνα και την παραγωγή και τέλος
- Στην ανάκτηση των αποθεμάτων των υδρογονανθράκων⁶³

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται κάποιες από αυτές τις εφαρμογές (Πίν. 3.1.).

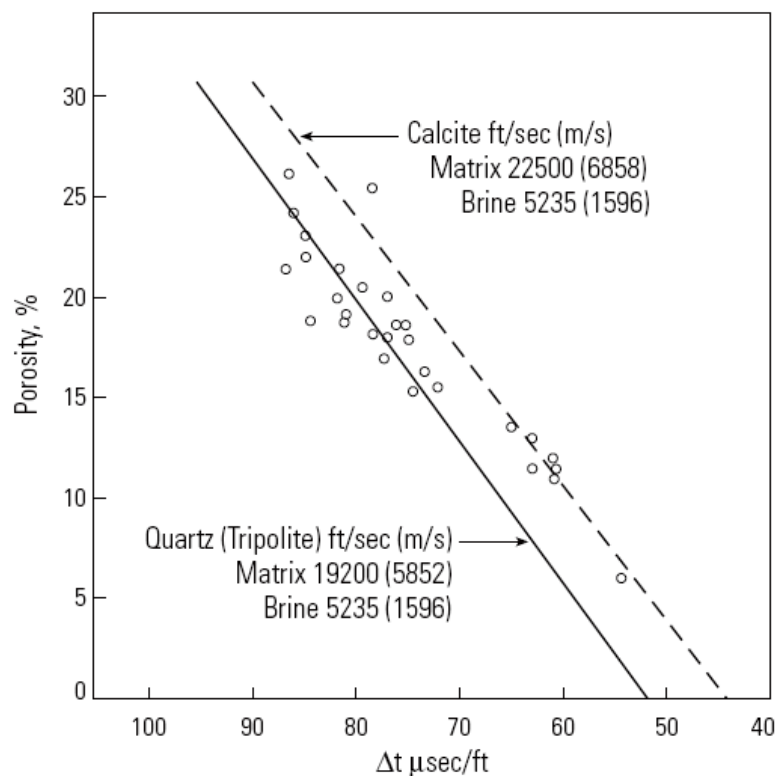
⁶² http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/a/acoustic_log.aspx

⁶³ http://petrowiki.org/Acoustic_logging

Discipline Application	Geophysics	Geology	Formation Evaluation	Production Engineering	Reservoir Engineering	Well Completion	Drilling	Enhanced Recovery
Synthetic seismogram	X	X	X					
VSP analysis	X	X	X					
AVO calibration	X	X	X		X			X
Porosity evaluation	X	X	X		X	X		X
Lithology estimate	X	X	X		X	X		X
Saturation evaluation		X	X	X	X			X
Gas detection	X	X	X	X	X	X	X	X
Hydrocarbon typing	X	X	X		X		X	X
Fracture analysis	X	X	X		X	X	X	X
Permeability index		X	X		X	X		X
Abnormal pressure		X	X	X	X	X	X	
Wellbore stability		X	X	X		X	X	
Perforation stability			X	X	X	X		X
Anisotropy	X	X	X	X	X	X	X	X
Cement evaluation			X	X	X	X		X

Πίνακας 3.1. : Ορισμένες εφαρμογές των ακουστικών διαγραφιών. ⁶⁴

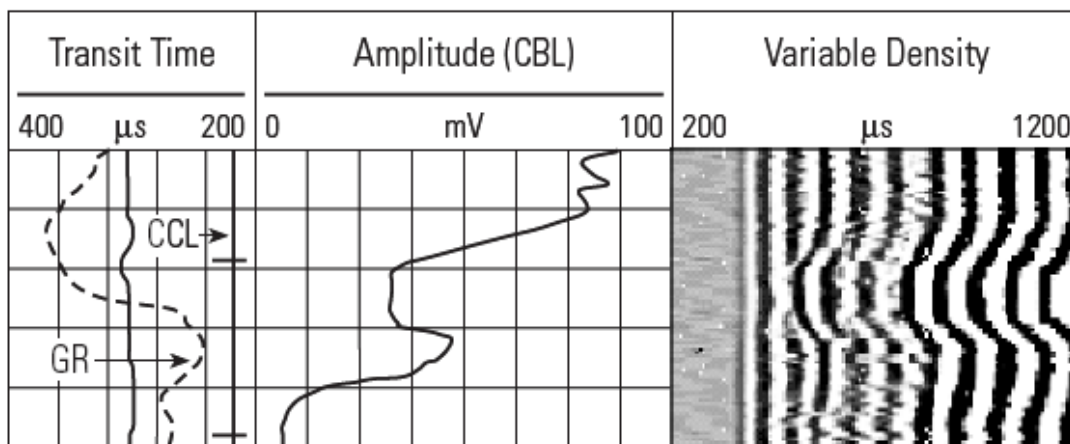
Κατά τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων μπορούν να προκύψουν ορισμένα προβλήματα. Το κυριότερο πρόβλημα αφορά στους 'αργούς σχηματισμούς' (slow formations), με αρκετά μεγάλη οπή γεώτρησης, όπου η «λάσπη» φτάνει νωρίτερα από τα υλικά από τον σχηματισμό. Η λύση δίνεται με την αύξηση της απόστασης ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη.



Σχήμα 3.11. : Διάγραμμα απεικόνισης της επίδρασης του βραχώδους σχηματισμού όσον αφορά την σχέση του πορώδους και του χρόνου διάδοσης (Timur, 1987). ⁶⁵

⁶⁴ http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0169_Image_0002.png

Επίσης πρέπει να αναφερθεί και η σημαντικότητα των CBL logs. Οι καταγραφές CBL (Cement Bond Log) πρωτοεμφανίστηκαν περίπου την δεκαετία του 1960 έχοντας ως κύριο στόχο την εφαρμογή τους σε διαφορετικές χρήσεις από αυτές του πορώδους. Πρόκειται για μία προσπάθεια προσδιορισμού των ζωνών μίας σωληνωμένης γεώτρησης όπου η τσιμέντωση παρουσιάζει ατέλειες. Η διαδικασία στηρίζεται στην χρήση ενός στοιχειώδους φωρατή, ο οποίος αποτελείται από έναν πομπό και ένα ή δύο δέκτες. Σε αυτήν την περίπτωση το πρώτο κύμα που φτάνει μέσω της σωλήνωσης ονομάζεται Lamb. Το παραπάνω κύμα δεν βρίσκεται ακριβώς κοντά με το κύμα συμπίεσης. Αυτό οφείλεται στη διαφορά του μήκους κύματος. Το μήκος κύματος του Lamb είναι μεγαλύτερο από το πάχος της σωλήνωσης της γεώτρησης και έτσι υπάρχει απώλεια ενέργειας σε σχέση με την τσιμέντωση. Όσον αφορά στο εύρος του κύματος αυτό βασίζεται στην προσκόλληση του τσιμέντου στην σωλήνωση, καθώς εάν αυτό είναι μεγάλο δεν πραγματοποιείται τσιμέντωση και έτσι υπάρχει ευκολία στην διάδοση.



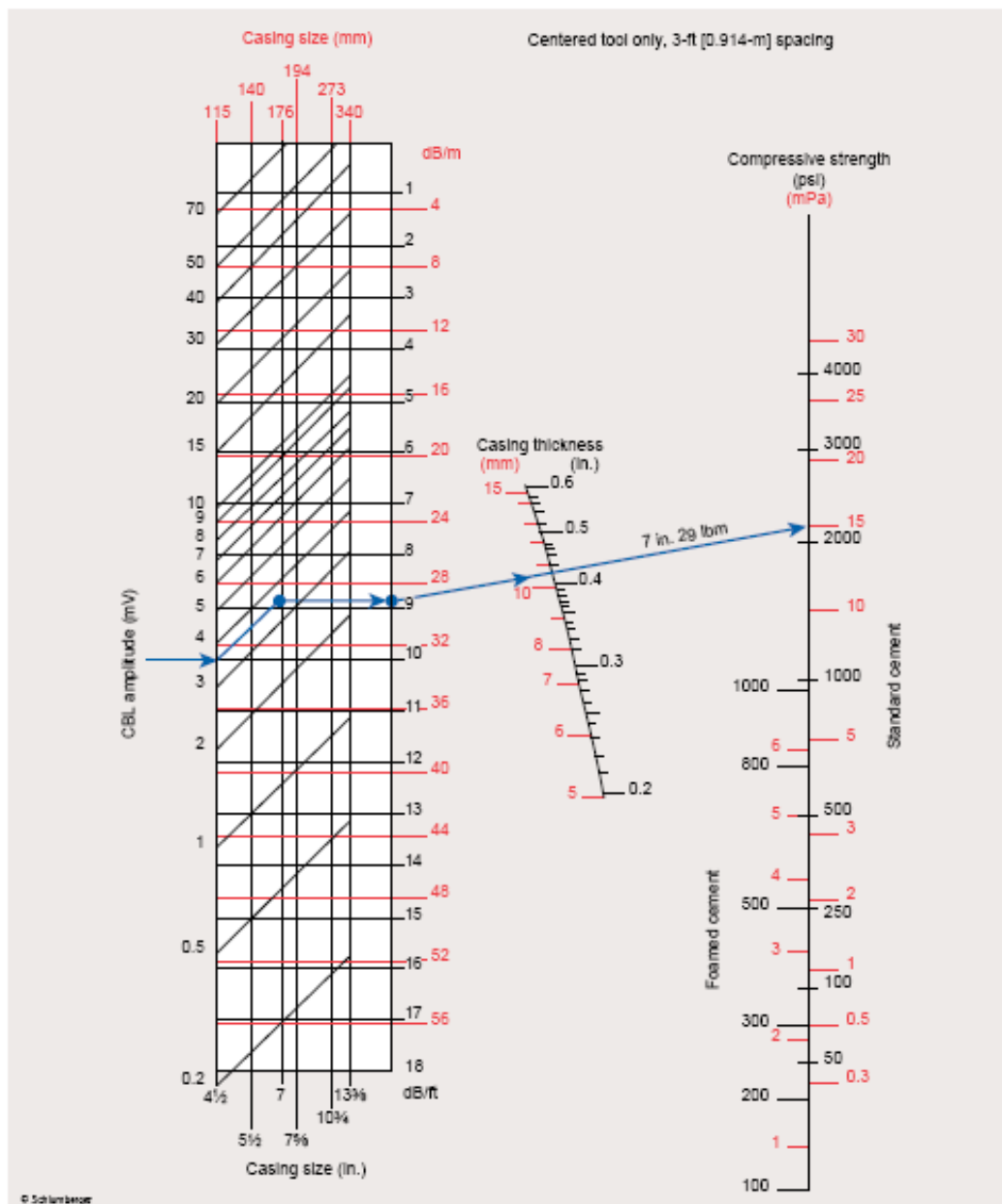
Σχήμα 3.12. : Παράδειγμα CBL log.⁶⁶

Ωστόσο, στην περίπτωση ενός γεωμετρικού μοντέλου, έπειτα από μία μη καλή και ατελή τσιμέντωση, θεωρείται ότι η χρήση της εξυπηρετεί μόνο στην απλή κάλυψη περιφερειακά της σωλήνωσης. Αυτό όμως δεν ισχύει καθώς στην οπή δεν πραγματοποιείται τσιμέντωση. Στην πραγματικότητα υπάρχει μία λογαριθμική συσχέτιση με την αναλογία εύρους της πρώτης άφιξης σωλήνωσης που έχει ανιχνευθεί σε σύγκριση με την μέτρηση του πλάτους της πρώτης άφιξης. Μία τέτοια μέτρηση πραγματοποιείται από τον ηχητικό φωρατή στα 3 πόδια (δέκτης), ενώ στα 5 πόδια στα 5 πόδια εφαρμόζεται μικροσεισμική καταγραφή (VDL) του κύματος

⁶⁵ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 502

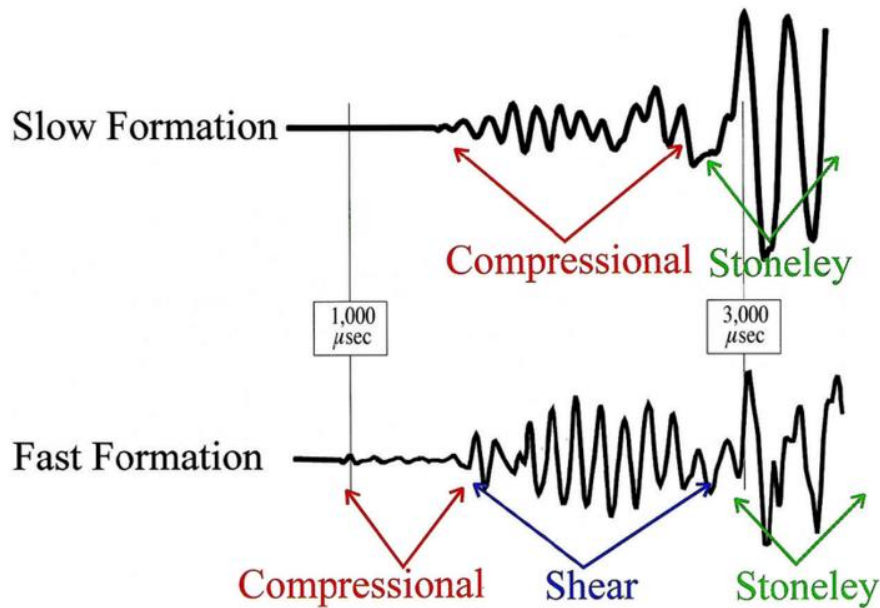
⁶⁶ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 562

διάδοσης που έχει ανιχνευτεί, αποδίδοντας έτσι μία εικόνα του σήματος του σχηματισμού εξερεύνησης και της σωλήνωσης.



Σχήμα 3.13. : Διάγραμμα ερμηνείας CBL. ⁶⁷

⁶⁷ Schlumberger, 2009, Log Interpretation Chart, Basic Material, Symbols used in Log Interpretation, pp 287



Σχήμα 3.14. : Απεικόνιση διάδοσης ακουστικών κυμάτων με διαφορετικό τρόπο ενέργειας.⁶⁸

3.5.3. Ραδιενεργές διαγραφίες (Nuclear Logging)

Οι ραδιενεργές διαγραφίες (Nuclear Logging) χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά από τα τέλη της δεκαετίας του 1920 παρέχοντας βασικές πληροφορίες για την λιθολογία αλλά και τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών μίας γεώτρησης. Με το πέρασμα των χρόνων και την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας βελτιώθηκαν οι μέθοδοι και οι τεχνικές για την ανίχνευση και ανάλυση των μετρήσεων των επαγόμενων και των φυσικών ραδιενεργών ενδείξεων, με βασικό μειονέκτημα όμως την αμεσότητα στη λήψη των μετρήσεων των ιδιοτήτων των σχηματισμών.⁶⁹ Σήμερα, οι ραδιενεργές διαγραφίες έχουν ως βασικό στόχο την ανίχνευση στοιχειωδών σωματιδίων, τα οποία εκπέμπονται από τον πυρήνα ενός ατόμου, μέσω τοποθετημένων ανιχνευτών στους φωρατές (Nuclear - logging tools) (Πίν. 3.2.). Υπάρχουν κάποιες τεχνικές γεωφυσικών διαγραφιών από τις οποίες οι πιο κύριες είναι οι εξής :

- Γεωφυσικές διαγραφίες φυσικής ακτινοβολίας γάμμα (Gamma Ray)
- Γεωφυσικές διαγραφίες πυκνότητας ή γάμμα γάμμα (Density)
- Γεωφυσικές διαγραφίες νετρονίων (Neutron)

Σημαντικό πλεονέκτημα των Nuclear logs αποτελεί η δυνατότητα εφαρμογής τους και εντός σωληνωμένων γεωτρήσεων. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι τρεις τεχνικές που προαναφέρθηκαν.

⁶⁸ http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0170_Image_0001.png

⁶⁹ http://petrowiki.org/Nuclear_logging

TABLE 3D.1—SELECTION OF COMMON NUCLEAR-LOGGING TOOLS: HOW THEY WORK AND WHAT LOG ANALYSTS REALLY WANT FROM THEM TO DESCRIBE HYDROCARBON RESERVOIRS

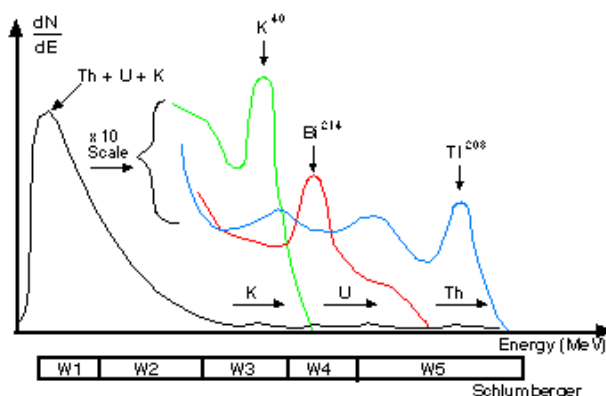
Tool	Physics Exploited	Reads	Desired Information
Gamma ray	Natural gamma rays	Gamma ray counts, K-U-Th counts	Clay type and bedding
Gamma density	Gamma ray scattering	Bulk Compton cross section	Formation density, porosity
Neutron porosity	Neutron slowing	Migration length	Porosity, lithology
Pulsed neutron	Neutron lifetime	Bulk capture cross section	S_w , porosity
Carbon/oxygen, geochemical	Neutron-induced gamma ray	Elemental count rates	S_o , lithology

Πίνακας 3.2. : Φωρατές ραδιενεργών διαγραφιών (Nuclear - Logging tools). ⁷⁰

3.5.3.1 Φυσική ακτινοβολία γάμμα (Gamma Ray)

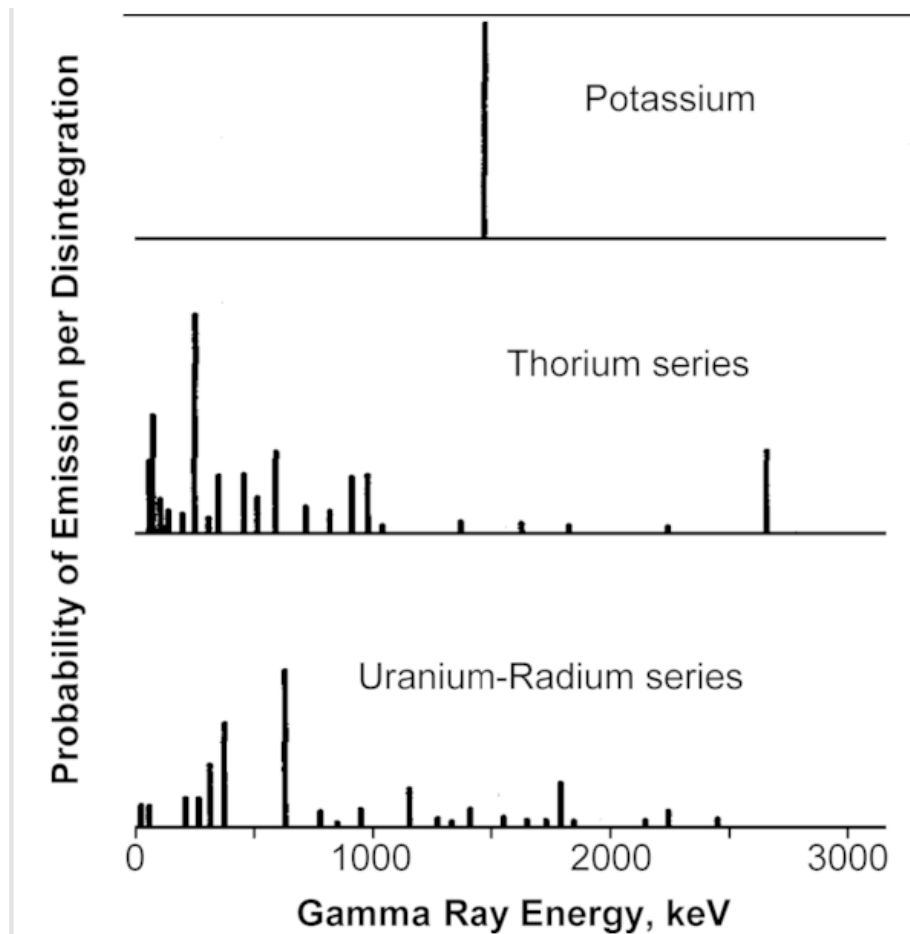
Σκοπός των διαγραφιών φυσικής ακτινοβολίας γάμμα (Gamma Ray Logs) είναι η καταγραφή της φυσικής ακτινοβολίας γάμμα των περιβαλλόντων σχηματισμών μίας γεώτρησης. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον πυρήνα ενός στοιχείου (ασταθές) την στιγμή που το ισότοπο στοιχείο καταπίπτει σε σταθερότερη κατάσταση.

Η φυσική ακτινοβολία γάμμα συνήθως οφείλεται στα εξής τρία ραδιενεργά στοιχεία : α) Ουράνιο (^{238}U), β) Κάλιο (^{40}K) και γ) Θόριο (^{232}Th) (Σχ. 3.15. & 3.16.). Από αυτά τα 3 ραδιενεργά ισότοπα το K^{40} σχηματίζει μία μοναδική ακτινοβολία γάμμα με ενέργεια τιμής 1,46 MeV (μετατροπή σε σταθερό ασβέστιο), ενώ το U^{238} και το Th^{232} υφίστανται διάσπαση με αποτέλεσμα να παράγουν μία σειρά ραδιενεργών θυγατρικών προϊόντων. Η κατανομή του ποικίλου ενεργειακού φάσματος των ασταθών ισότοπων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16. παρακάτω.



Σχήμα 3.15. : Απεικόνιση των καμπύλων απόκρισης των ραδιενεργών ισότοπων ^{238}U , ^{40}K , ^{232}Th (Schlumberger, 1987). ⁷¹

⁷⁰ http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0244_Image_0001.png



Σχήμα 3.16. : Απεικόνιση της κατανομής της ισορροπίας μεταξύ των ραδιενεργών ισοτόπων K^{40} , Th^{232} και U^{238} όσον αφορά τα ενεργειακά τους επίπεδα (Schlumberger, 1987).⁷²

Ως στοιχείο, το κάλιο συναντάται σε μεγάλη αφθονία. Άρα και το ραδιενεργό κάλιο (K^{40}) εμφανίζεται σε μία πληθώρα ορυκτών και πετρωμάτων (π.χ. συλβίτης, μικροκλινή, ορθόκλαστο, βιοτίτης, γρανίτης, γρανοδιορίτης, δολομίτης, σχιστόλιθος, μοντμοριλονίτης, δουνίτης κ.α.). Συνήθως εντοπίζεται στα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως και στους αστρίους. Επίσης, συναντάται και σε μη συμπαγείς αργίλους, που αποτελούνται από υλικά αποσάθρωσης με κύρια ορυκτά μαρμαρυγίες και αστρίους. Το χλωριούχο κάλιο ($KCl \rightarrow$ Συλβίτης) κάτω από ακραίες συνθήκες είναι δυνατό να αποτεθεί και να δημιουργήσει πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας, σε αντίθεση με το θόριο και το ουράνιο, που είναι λιγότερο

⁷¹ Schlumberger, 1987, Log Interpretation Principles/ Applications, Schlumberger Education Services, 2nd Edition, pp 25

⁷² http://petrowiki.org/File:Vol1_Page_662_Image_0001.png

συνήθη και εμφανίζονται σε αργίλους μόνο μέσω βαρέων μετάλλων ή και ηφαιστειακής τέφρας.⁷³

	Potassium (%)	Uranium (ppm)	Thorium (ppm)
Rock and mineral carbonates			
Range	0.0–2.0	0.1–9.0	0.1–7.0
Calcite, chalk, limestone, dolomite (pure)	<0.1	<1.0	<0.5
Dolomite (west Texas)	0.1–0.3	1.5–10	<2.0
Limestone (clean)			
Florida	<0.4	2.0	1.5
Cretaceous (Texas)	<0.3	1.5–15	<2.0
Hunton Lime (Oklahoma, Texas)	<0.2	<1.0	<1.5
Sandstones, range	0.7–3.8	0.2–0.6	0.7–2.0
Beach sands (Gulf Coast)	<1.2	0.84	2.8
Atlantic coast (Florida, North Carolina)	0.37	3.97	2.8
Atlantic coast (New Jersey, Massachusetts)	0.3	0.8	2.07
Shales typical range	1.6–4.2	1.5–5.5	8–18
Minerals			
Allanite		30–700	500–5000
Apatite		5–150	20–150
Epidote		20–50	
Monzanite		500–5000	(2.5–20)×10 ⁴
Sphene		100–700	100–600
Xenotime		500–3.4×10 ⁴	low
Zircon		300–3000	100–2500
Clays			
Bauxite		3–30	10–130
Glauconite		5.08–5.3	
Bentonite	<0.5	1–20	6–50
Montmorillonite	0.16	2–5	14–24
Kaolinite	0.42	1.5–3	6–19
Illite	4.5	1.5	
Mica			
Biotite	6.7–8.3		<0.01
Muscovite	7.9–3.8		<0.01
Feldspars			
Plagioclase	0.54		<0.01
Orthoclase	11.8–14.0		<0.01
Microcline	10.9		<0.01
Quartz (silica)	<0.15	<0.4	<0.2

Potassium, uranium, and thorium contents of typical rocks and minerals (after Bigelow^{73b}).

Πίνακας 3.3. : Τύποι πετρωμάτων και τα ποσοστά τους στα ραδιενεργά ισότοπα του K⁴⁰, U²³⁸ και Th²³².⁷⁴

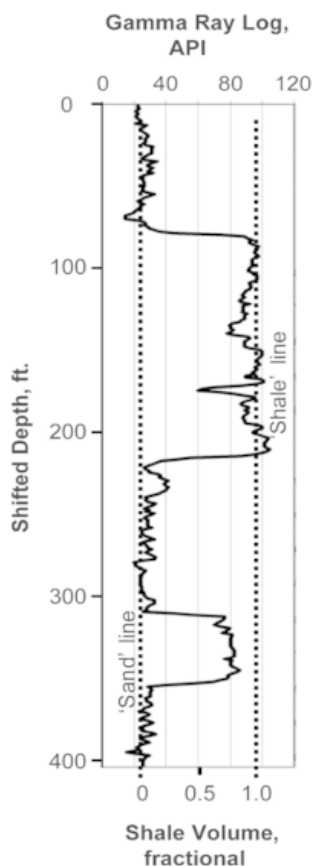
⁷³ http://petrowiki.org/Gamma_ray_logs

⁷⁴ http://petrowiki.org/File:Vol1_Page_663_Image_0001.png

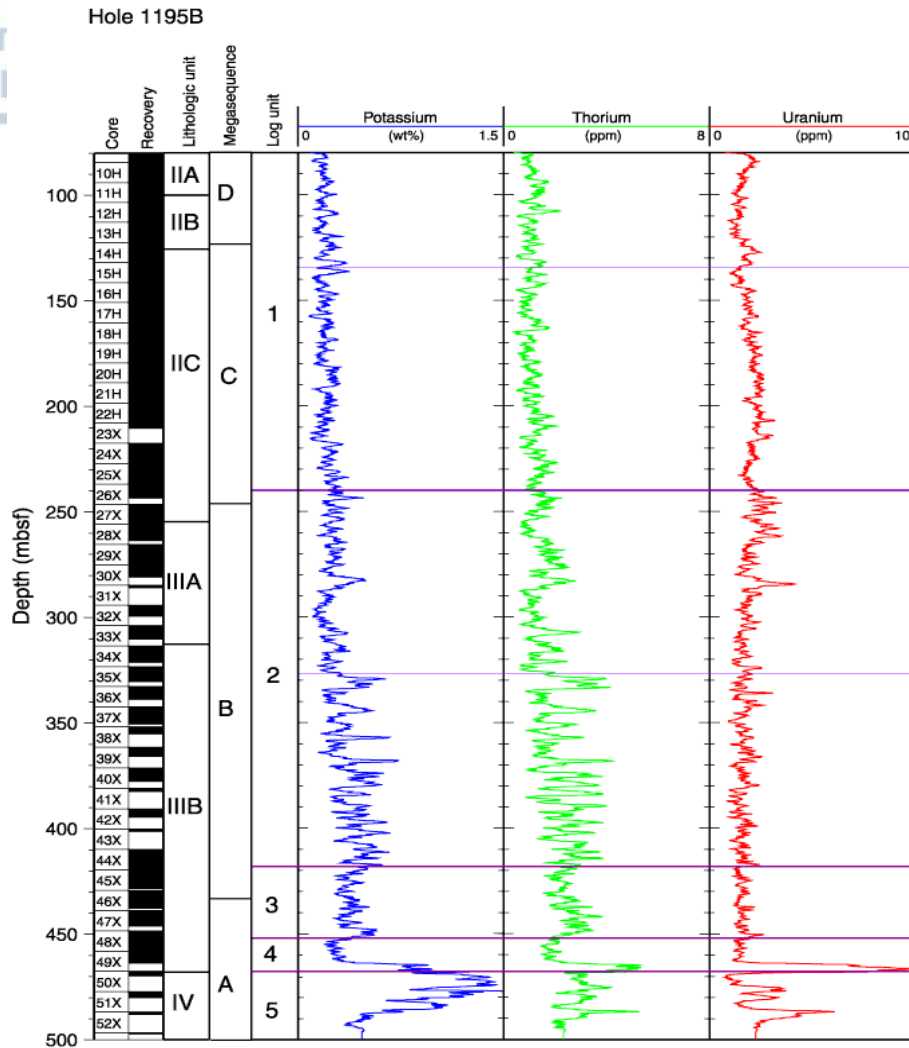
Επίσης, ο σχίστης (shale) είναι δυνατόν να θεωρηθεί ως συμπαγής άργιλος. Τόσο η άργιλος, όσο και ο σχίστης περιλαμβάνουν μεγάλα ποσοστά ραδιενεργού καλίου με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας γάμμα, καθώς το K^{40} , κατά το αρχικό στάδιο της ιζηματογένεσης του πετρώματος, εμπλουτίζεται με ανταλλαγή κατιόντων, ενώ το U^{258} είναι δυνατόν να συγκεντρωθεί στις αργίλους ιδιαίτερα στην περίπτωση που η ιζηματογένεση πραγματοποιείται σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Από την άλλη πλευρά οι άμμοι και οι ψαμμίτες χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας γάμμα καθώς αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, ο οποίος είναι μη ραδιενεργό ορυκτό.

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί η ύπαρξη μίας ειδικής μεθόδου διαγραφιών γάμμα, η οποία καλείται *φασματική διαγραφή γάμμα* (Spectral Gamma Ray logs). Οι φασματικές αυτές διαγραφίες βοηθούν στο διαχωρισμό της συμβολής κάθε ραδιενεργού στοιχείου και έχουν ως στόχο τη λήψη πληροφοριών για τη λιθολογική σύσταση του ευρύτερου περιβάλλοντος των σχηματισμών της γεώτρησης.



Σχήμα 3.17. : Παράδειγμα Gamma Ray log.

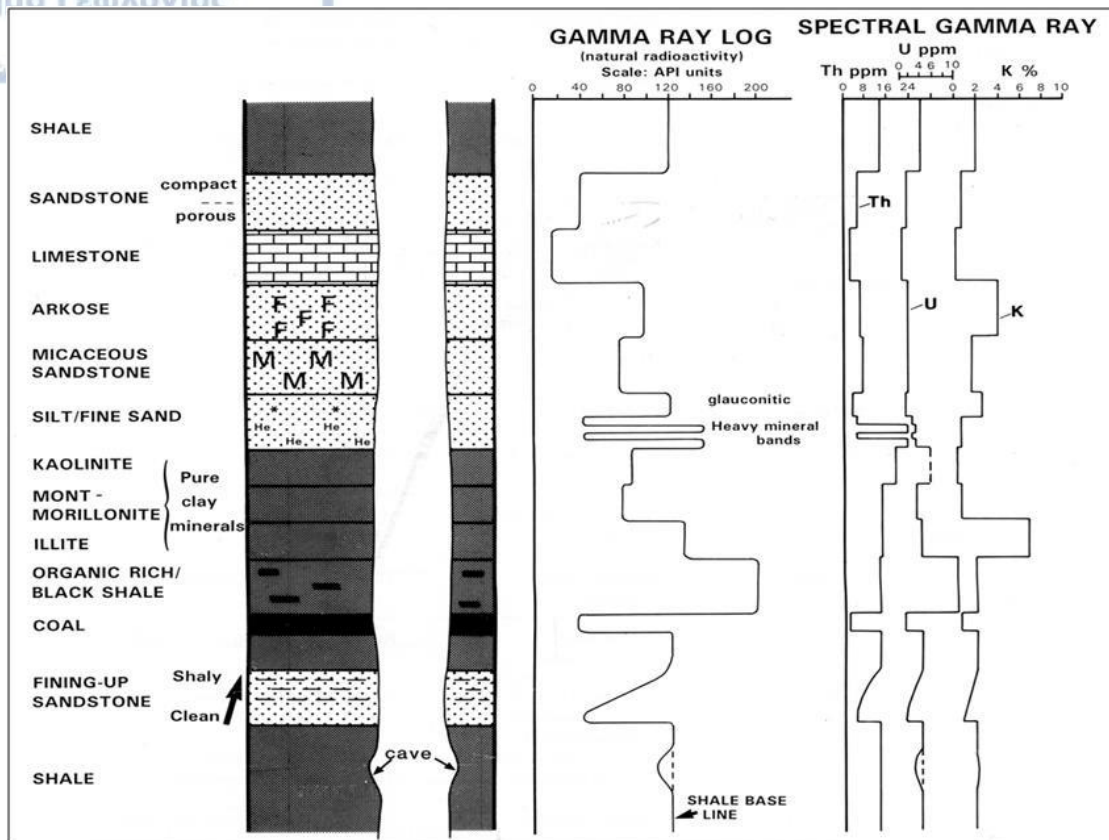


Σχήμα 3.18. : Παράδειγμα Spectral Gamma Raya log που εμφανίζει τις συγκεντρώσεις του καλίου, θορίου και ουρανίου.⁷⁵

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιείται μία οβίδα που περιλαμβάνει έναν ραδιομετρητή (scintillometer). Ο ραδιομετρητής αυτός αποτελείται με την σειρά του από έναν ενισχυτή και έναν κρύσταλλο ιωδιούχο νατρίου. Ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής αυτής γίνεται τοποθετώντας την οβίδα εντός της γεώτρησης με χαμηλή ταχύτητα για τη λήψη των ορθών μετρήσεων, καθώς οι πιθανές μεταβολές στην ταχύτητα κίνησης είναι δυνατόν να τροποποιήσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για τους ιζηματογενείς σχηματισμούς το βάθος που μπορεί να διεισδύσει η οβίδα είναι περίπου 30 cm.⁷⁶

⁷⁵ http://www-odp.tamu.edu/publications/194_IR/chap_06/c6_f30.htm

⁷⁶ <http://seismo.geology.upatras.gr/greek/logging2012enc.pdf>



Σχήμα 3.19. : Σύγκριση gamma ray και spectral gamma ray logs. ⁷⁷

3.5.3.2 Διαγραφίες πυκνότητας (Density Logs)

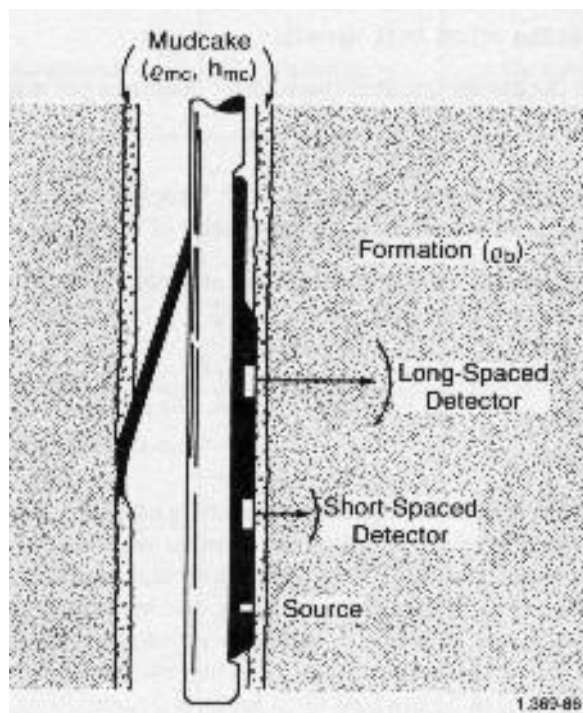
Οι διαγραφίες πυκνότητας ή αλλιώς Gamma gamma logs πρωτοεμφανίστηκαν το 1957 ως μία άλλη μέθοδος εφαρμογής της ακτινοβολίας γάμμα, με σκοπό την συλλογή πληροφοριών για τους σχηματισμούς του υπεδάφους. Η εφαρμογή αυτή βασίζεται στην φωτοηλεκτρική απορρόφηση ή στην διασπορά ακτινών γάμμα – γάμμα.

Πιο συγκεκριμένα ο φωρατής (Density – logging tool) στέλνει ακτίνες γάμμα σε ένα σχηματισμό και έπειτα ανιχνεύει εκείνες που συναντώνται διάσπαρτες. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνεται τοποθετώντας στο εσωτερικό της οβίδας των Gamma Ray logs μία ραδιενεργό πηγή κοβαλτίου (⁵⁷Co). Το ραδιενεργό κοβάλτιο με την σειρά του εκπέμπει γάμμα ακτινοβολία στους σχηματισμούς γύρω από την γεώτρηση.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Compton η ακτινοβολία σκεδάζεται μέσω των ηλεκτρονίων και ένα μέρος αυτής επιστρέφει πίσω και καταγράφεται. Το ποσοστό

⁷⁷ <https://drilleng-group9-formationevaluation.wikispaces.com/Gamma+Ray+Logging>

αυτό είναι ανάλογο των ηλεκτρονίων και κατά συνέπεια ανάλογο της πυκνότητας των σχηματισμών που περιβάλλουν τη γεώτρηση.



Σχήμα 3.20. : Απεικόνιση της οβίδας μέτρησης των διαγραφιών πυκνότητας (Density – logging tools) (Schlumberger, 1987).⁷⁸

Είναι σύνηθες στην οβίδα να υπάρχουν δύο ανιχνευτές ακτινοβολίας γάμμα. Ο ένας ανιχνευτής τοποθετείται κοντά στο σημείο της ραδιενεργού πηγής ενώ ο δεύτερος τοποθετείται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον πρώτο, όπως φαίνεται και στην σχήμα 3.20.

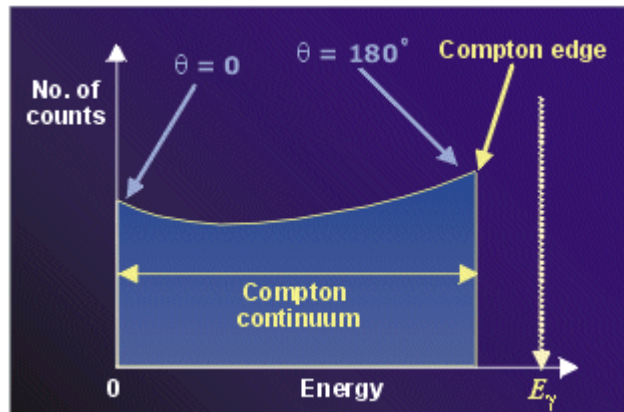
Καθώς η ακτινοβολία γάμμα αντιδρά με τα άτομα από τα οποία αποτελούνται οι σχηματισμοί, παρουσιάζονται τα εξής φαινόμενα :

- Η σκέδαση Compton (Compton Scattering)
- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect) και
- Η παραγωγή του ζεύγους (Pair production)

Όσον αφορά στο φαινόμενο Compton Scattering, αυτό παρατηρείται κατά την σύγκρουση των ακτινών γάμμα υψηλής ενέργειας (εκπομπή μέσω της ραδιενεργής πηγής) και των ηλεκτρονίων του σχηματισμού. Καθεμία τέτοια σύγκρουση συνεπάγεται ελάττωση κάποιου τμήματος της ενέργειας της ακτίνας προς το ηλεκτρόνιο. Με τον τρόπο αυτό το ηλεκτρόνιο είναι δυνατόν να διαφύγει της τροχιάς του. Η απώλεια της ενέργειας των σκεδαζόμενων ακτινών σχετίζεται με την

⁷⁸ <https://www.spec2000.net/07-densitylog.htm>

γωνία σύγκρουσης. Στην περίπτωση χρήσης της σχέσης μεταξύ των ακτινών γάμμα που καταγράφηκαν και της ενέργειας για τη δημιουργία διαγράμματος συχνότητας – ενέργειας μπορεί να σχηματιστεί φάσμα ενέργειας. Αυτό το φάσμα ενέργειας είναι γνωστό ως συνεχές φάσμα του Compton (Compton Continuum) και παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21. : Το συνεχές φάσμα του Compton (Compton continuum). ⁷⁹

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρείται όταν η ενέργεια της ακτινοβολίας γάμμα καταφέρει να φτάσει κάτω από το επίπεδο ενέργειας, που σημαίνει ότι θα ισχύει ενέργεια μικρότερη των 0,5 MeV, έπειτα από μερικές συγκρούσεις. Πραγματοποιείται αλληλεπίδραση των ακτινών γάμμα με τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων με αποτέλεσμα να ωθούνται τα ηλεκτρόνια σε υψηλότερες στοιβάδες. Εάν το ηλεκτρόνιο γυρίσει πίσω στην αρχική του στοιβάδα παρατηρείται νέα εκπομπή ακτινών γάμμα, όπου οι ενέργειες αντιστοιχούν σε αυτές του ατομικού αριθμού.

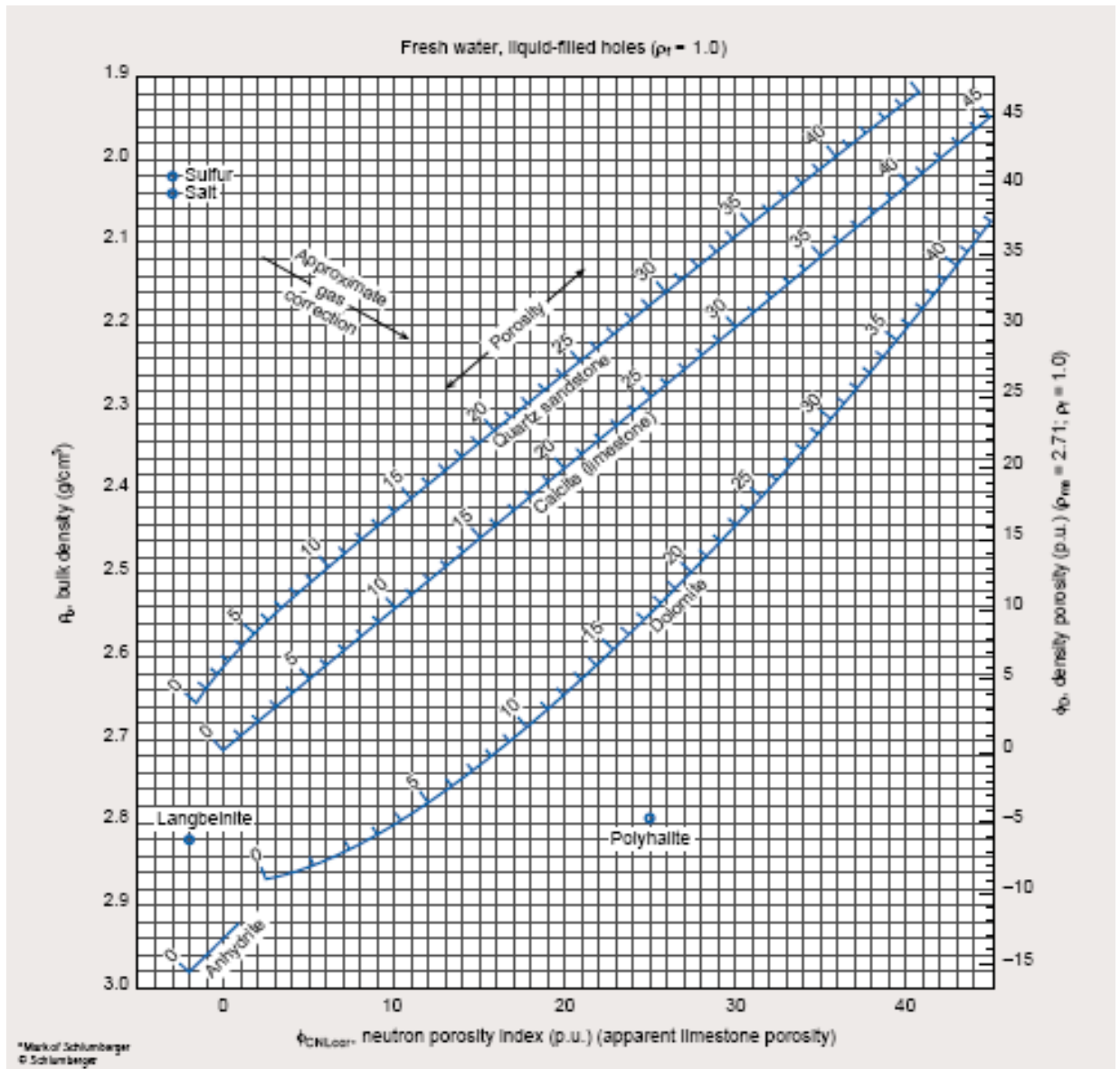
Κατά το φαινόμενο της παραγωγής ζεύγους (Pair production) ένα φωτόνιο με ενέργεια $> 2 \text{ MeV}$ χάνει εξολοκλήρου την ενέργεια του και κατά συνέπεια η ακτίνα γάμμα υφίσταται μετατροπή σε ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Από αυτά, το ποζιτρόνιο αντιδρά άμεσα με ένα διαφορετικό ηλεκτρόνιο παράγοντας δύο ακτίνες γάμμα με ενέργεια 1,04 MeV η κάθε μία ξεχωριστά και με αντίθετες κατευθύνσεις.

3.5.3.3 Διαγραφίες Νετρονίων – Πορώδους (Neutron Porosity logs)

Η τεχνική των διαγραφιών των νετρονίων – πορώδους πρωτοεμφανίστηκε την δεκαετία του 1940 αποτελούμενη από μία πηγή ισοτόπων, κυρίως βήρυλλο και πλουτόνιο, και έναν ανιχνευτή. Κατά την εφαρμογή της επιχειρήθηκαν αρκετές παραλλαγές χρησιμοποιώντας τα θερμικά και επιθερμικά νετρόνια. Αρχικά

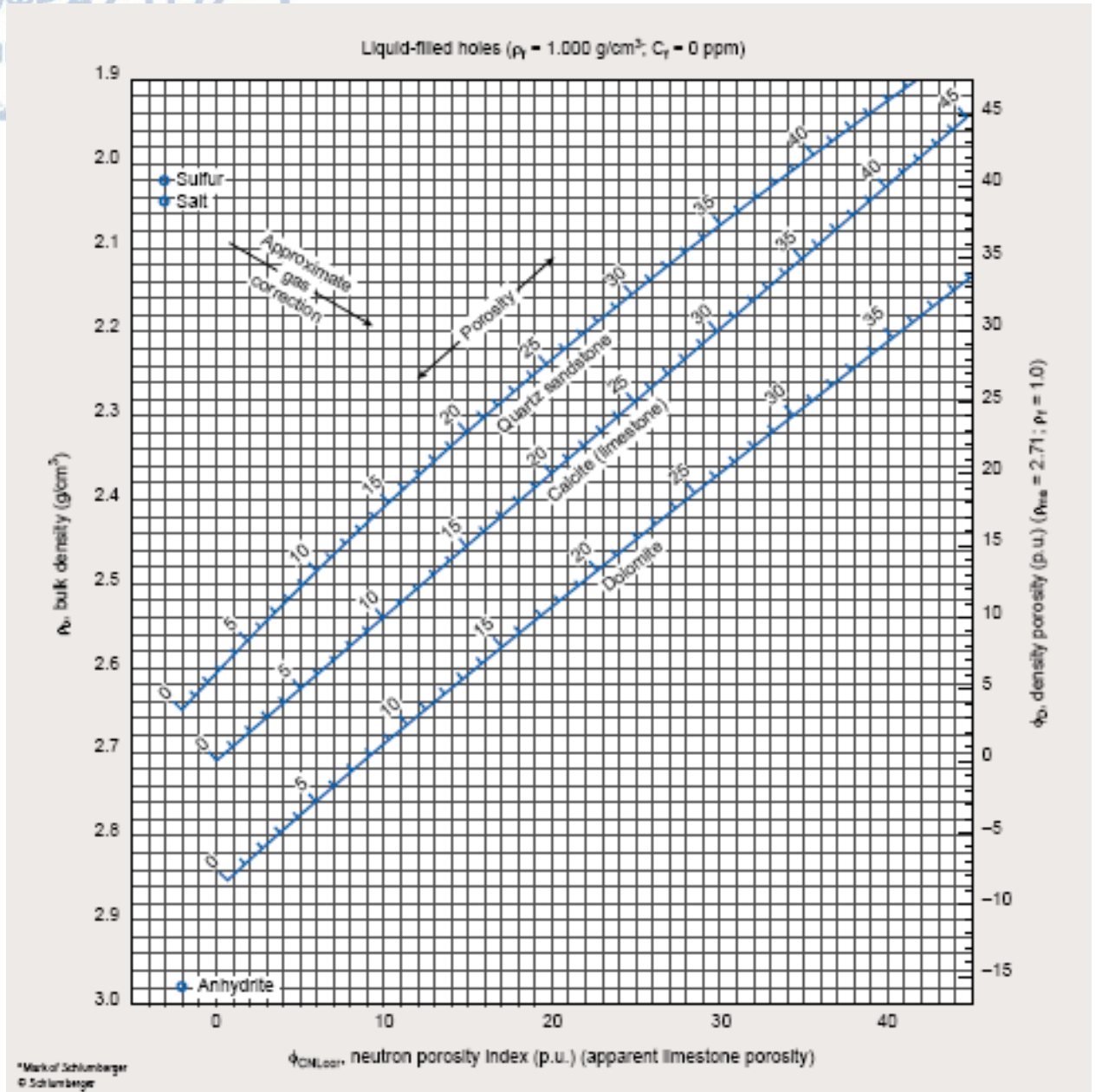
⁷⁹ http://ns.ph.liv.ac.uk/~ajb/radiometrics/glossary/compton_continuum.html

παρατηρήθηκε πρόβλημα στην αμεσότητα ανίχνευσης των νετρονίων. Η δυσκολία αυτή λύθηκε με τη λήψη μετρήσεων από τους φωρατές των εκπεμπόμενων ακτινών γάμμα την στιγμή που το χλώριο και το υδρογόνο συλλαμβάνουν τα θερμικά νετρόνια. Από τα δύο αυτά στοιχεία, το υδρογόνο είναι γνωστό για την μεγάλη επίδραση του στη μεταφορά των νετρονίων επιφέροντας συνέπειες στον φωρατή. Ο συγκεκριμένος φωρατής που καλείται CNL (Now – standard compensated neutron – porosity logging tool) αποτελείται από δύο ανιχνευτές νετρονίων και μία πηγή ισοτόπων, όπως και οι φωρατές πυκνότητας (density tools).



Σχήμα 3.22. : Παράδειγμα απεικόνισης του πορώδους και της λιθολογίας μέσω των διαγραφιών πυκνότητας και του CNL (πριν το 1986).⁸⁰

⁸⁰ Schlumberger, Porosity and Lithology Determination from Formation Density log and CNL (Compensated Neutron Log)/For CNL logs before 1986, or labeled NPHI/Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation, Schlumberger



Σχήμα 3.23. : Παράδειγμα προσδιορισμού της λιθολογίας και του πορώδους μέσω των διαγραφιών πυκνότητας και του CNL (μετά το 1986).⁸¹

Μέχρι σήμερα, το δύσκολο έργο των Neutron Porosity logs αφορά στην εκτίμηση και την ερμηνεία του πορώδους του σχηματισμού μέσω της διασποράς των νετρονίων. Κύριος στόχος τους είναι η μέτρηση της μέσης πυκνότητας του υδρογόνου, παρακολουθώντας τη μορφή του υδρογόνου (υγρό πλήρωσης → νερό ή πετρέλαιο) και συνεπώς τον δείκτη του υδρογόνου. Σήμερα υπάρχει ένα εξελιγμένο όργανο μέτρησης, που εκτιμά το μέγεθος του νέφους των νετρονίων. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικά σημεία από την πηγή. Στην

⁸¹ Schlumberger, Porosity and Lithology Determination from Litho-Density Log and CNL (Compensated Neutron Log)/ For CNL curves after 1986 labeled TNPH/ Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation, Schlumberger

πραγματικότητα παρακολουθείται η απόσταση εκείνη όπου το νετρόνιο απομακρύνεται από την πηγή πριν προλάβει να συγκρουστεί με κάποιο άτομο και συνεπώς δημιουργείται το ανάλογο νέφος νετρονίου, το μέγεθος του οποίου ρυθμίζεται ανάλογα με την επιβράδυνση της θερμικής του ενέργειας. Η απόσταση του νετρονίου από την πηγή καλείται μήκος επιβράδυνσης. Για πιο αξιόπιστες μετρήσεις καταγράφονται και τα δύο είδη νετρονίων (επιθερμικά και θερμικά νετρόνια).

Όσον αφορά στην ερμηνεία των καταγραφών του πορώδους μέσω των νετρονίων, το σύστημα στηρίζεται σε μία κλίμακα μανάδων ασβεστολίθου. Στην περίπτωση που η καταγραφή έχει υποστεί διόρθωση είναι δυνατόν να ερμηνευτεί από την παρακάτω γραμμική σχέση :

$$\Phi_{\text{CNL}} = \sum_i V_i \Phi_{\text{app}i}$$

Στην περίπτωση των δολομιτικών ασβεστολίθων ή των αργιλικών σχιστών η γραμμική σχέση είναι η εξής :

$$\Phi_{\text{CNL}} = (1 - V_{\text{sh}} - \phi_e) \phi_{\text{ma,app}} + V_{\text{sh}} \phi_{\text{sh,app}} + \phi_e I_{\text{H_pf}}, \dots \dots \dots^{82}$$

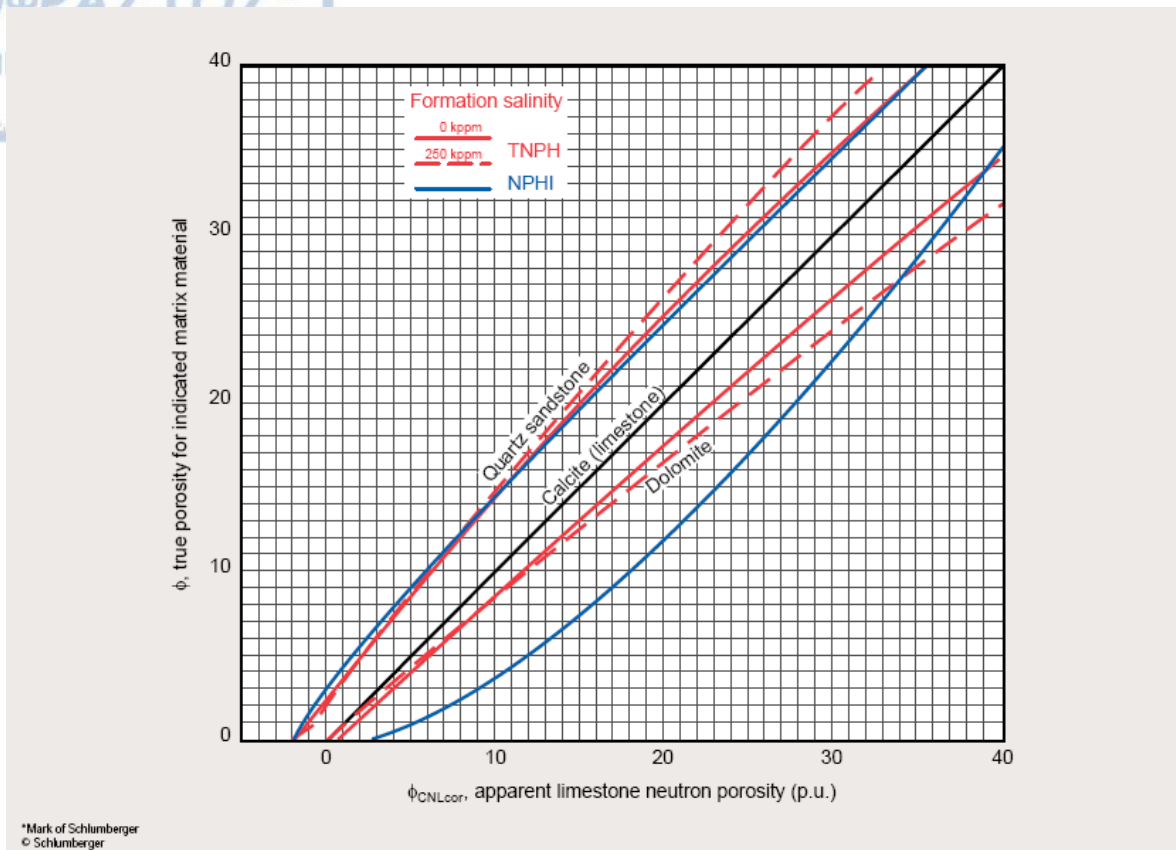
Material	Apparent ϕ_{CNL}
Quartz	-0.020
Calcite	0.000
Dolomite	0.020
Siderite	0.120
Glauconite	0.380
Coal	>0.40
Kaolinite	~0.370
Illite	~0.300
Anhydrite	-0.020
Water	1.000
Brine (200 kppm)	0.920
Gas (STP)	0.002
Gas (reservoir)	0.540
Oil	~0.900

Note: "Gas (STP)" refers to gas at standard temperature and pressure (20°F, 14.7 psia), and "Gas (reservoir)" refers to gas at the nominal reservoir conditions of 200°F and 7,000 psia.

Πίνακας 3.4. : Ορισμένες εμφανίσεις θερμικού πορώδους των νετρονίων σε υλικά ταμιευτήρων. ⁸³

⁸² http://petrowiki.org/Neutron_porosity_logs

⁸³ http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0273_Image_0001.png



Σχήμα 3.24. : Παράδειγμα καμπυλών ισοδυναμίας Thermal Neutron Porosity (Schlumberger, 2009).⁸⁴

3.5.4. Ακουστική καταγραφή (Sonic Logging)

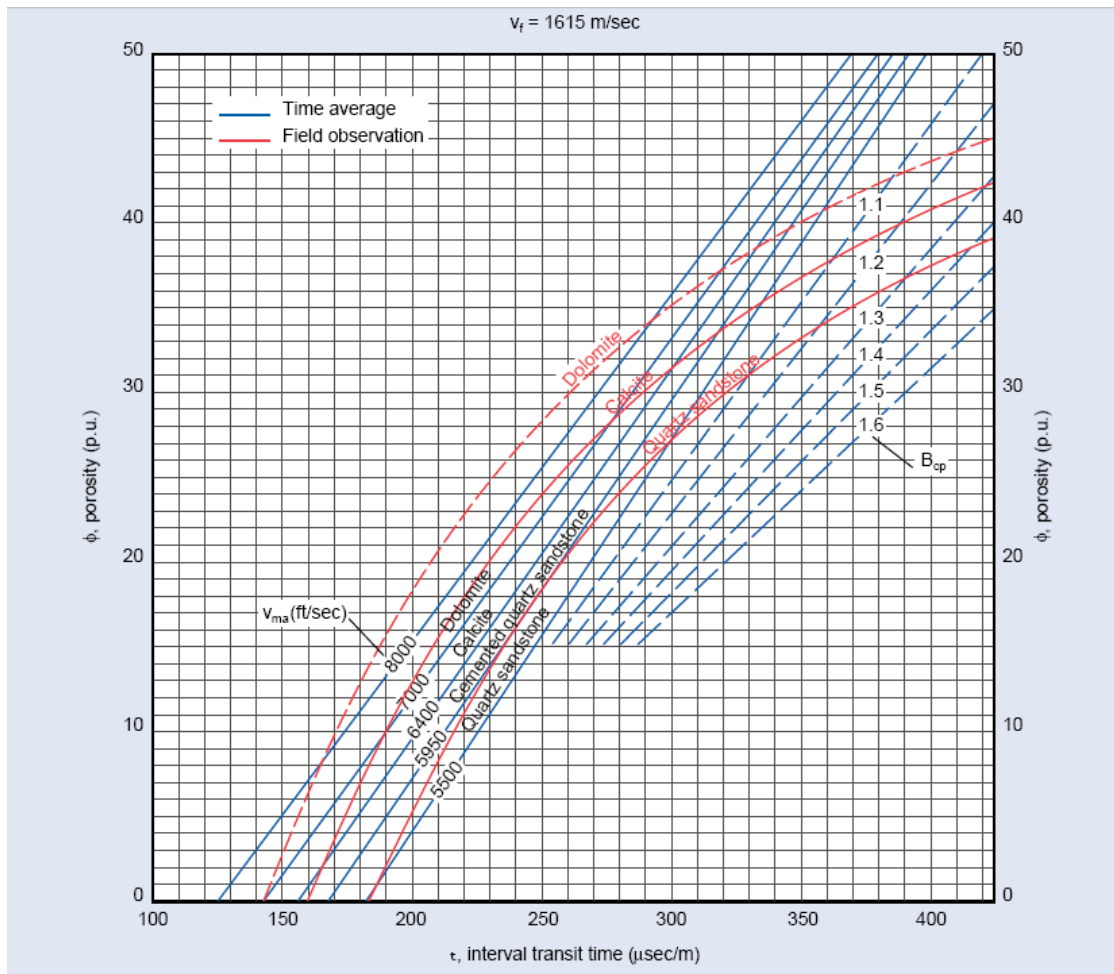
Τα *Sonic Logs* αποτελούν έναν τύπο των ακουστικών διαγραφιών (Acoustic Logging) και έχουν ως κύριο σκοπό την καταγραφή του χρόνου διάδοσης των P κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος της γεώτρησης. Ουσιαστικά, μέσω του φωρατή (Sonic tool) εκπέμπεται ένα ηχητικό κύμα από την πηγή στον σχηματισμό που έπειτα επανέρχεται στον δέκτη.⁸⁵

Σήμερα υπάρχουν ηχητικοί φωρατές οι οποίοι μετρούν ορισμένες χρήσιμες ιδιότητες των σχηματισμών, παρέχοντας πληροφορίες απαραίτητες για το έργο των μηχανικών. Οι πληροφορίες αυτές για την συμπίεση και την διάτμηση των πετρωμάτων μέχρι πρότινος πραγματοποιούνταν μετά την ολοκλήρωση της διάτμησης. Πλέον, με την εμφάνιση των σύγχρονων φωρατών ανίχνευσης είναι δυνατή η εφαρμογή τους και κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διάτμησης (LWD –

⁸⁴ Schlumberger, 2009, Log Interpretation Chart, Basic Material, Symbols used in Log Interpretation, pp 230

⁸⁵ http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/sonic_log.aspx

Logging While Drilling). Η εφαρμογή της νέας αυτής τεχνικής γίνεται σε πραγματικό χρόνο.⁸⁶



Example: $\tau = 76 \mu\text{sec/ft}$ [249 $\mu\text{sec/m}$]

$v_{ma} = 19,500 \text{ ft/sec}$ [5950 m/sec]—sandstone

Therefore, $\phi = 18\%$

(by either weighted average or empirical transform)

For more information see References 18, 19 and 20.

Lithology	v_{ma} (ft/sec)	τ_{ma} (μsec/ft)	v_{ma} (m/sec)	τ_{ma} (μsec/m)
Sandstones	18,000–19,500	55.5–51.3	5486–5944	182–168
Limestones	21,000–23,000	47.6–43.5	6400–7010	156–143
Dolomites	23,000–26,000	43.5–38.5	7010–7925	143–126

Σχήμα 3.25. : Διάγραμμα εκτίμησης του πορώδους με χρήση Sonic Logging.⁸⁷

Όσον αφορά στην χρησιμότητα των Sonic Logs βρίσκει εφαρμογή στα εξής :

- Προσδιορίζει το πορώδες των πετρωμάτων - ταμιευτήρων.
- Καλύτερη αξιολόγηση και ερμηνεία των σεισμικών καταγραφών.

⁸⁶

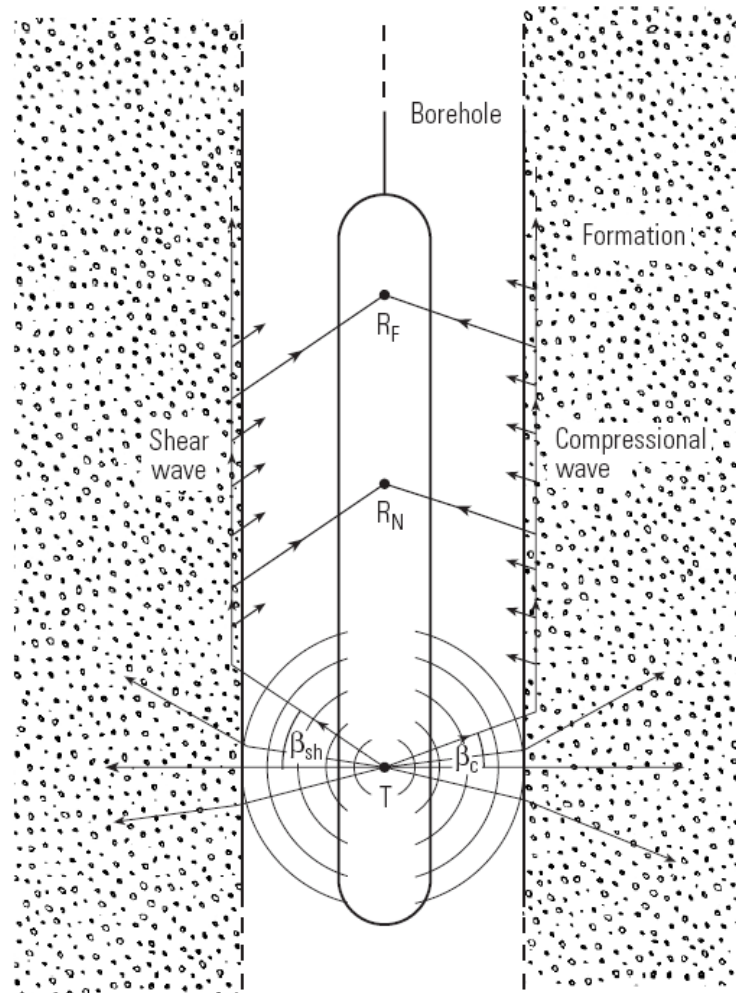
http://www.slb.com/resources/publications/industry_articles/oilfield_review/2012/or2012spr01_sonic.aspx

⁸⁷ Schlumberger, 2009, Log Interpretation Chart, Basic Material, Symbols used in Log Interpretation, pp 226

- Διαχωρισμός ζωνών με πολύ υψηλές πιέσεις.
- Συμμετέχει στην αναγνώριση της λιθολογίας.
- Εκτίμηση του δευτερεύοντος πορώδους.
- Εκτίμηση της αντοχής των πετρωμάτων-ταμιευτήρων και των περιβαλλόντων σχηματισμών σε συνάρτηση με τις πληροφορίες της πυκνότητας.
- Αξιολόγηση της διαπερατότητας των σχηματισμών.

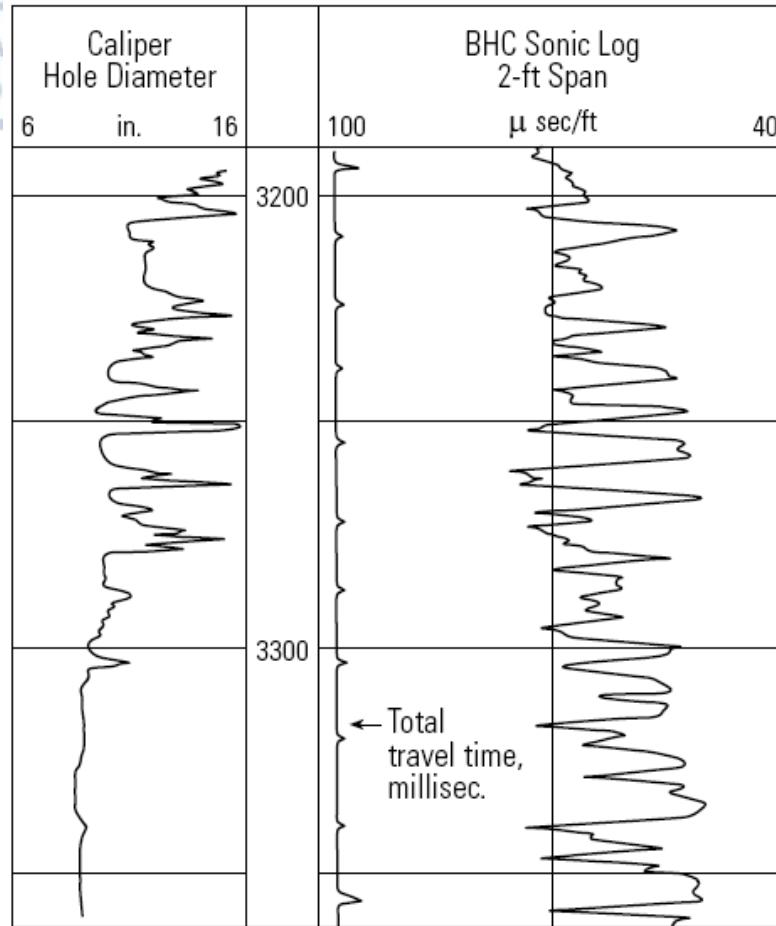
Τα Sonic Logs διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- **BHC** (Borehole compensated sonic)
- **LSS** (Long Spaced Sonic)
- **Basic Sonic**
- **Array Sonic** ή Full Waveform Sonic και
- **DSI** (Dipole Shear Imager)



Σχήμα 3.26. : Παράδειγμα Sonic Logging tool (Tittman, 1986).⁸⁸

⁸⁸ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 534



Σχήμα 3.27. : Απεικόνιση ακουστικής καταγραφής (Timur, 1987).⁸⁹

Οι αρχές των ακουστικών καταγραφών βασίζονται στον πομπό που εκπέμπει τα ηχητικά κύματα και στους δέκτες που τα παραλαμβάνουν και τα αποτυπώνουν. Κύριος στόχος είναι η μέτρηση της πρώτης άφιξης. Ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιείται η διάδοση αυτού του κύματος δίνεται από την διαφορά της άφιξης του κύματος συμπίεσης στους δέκτες και ορίζεται από την εξής σχέση :

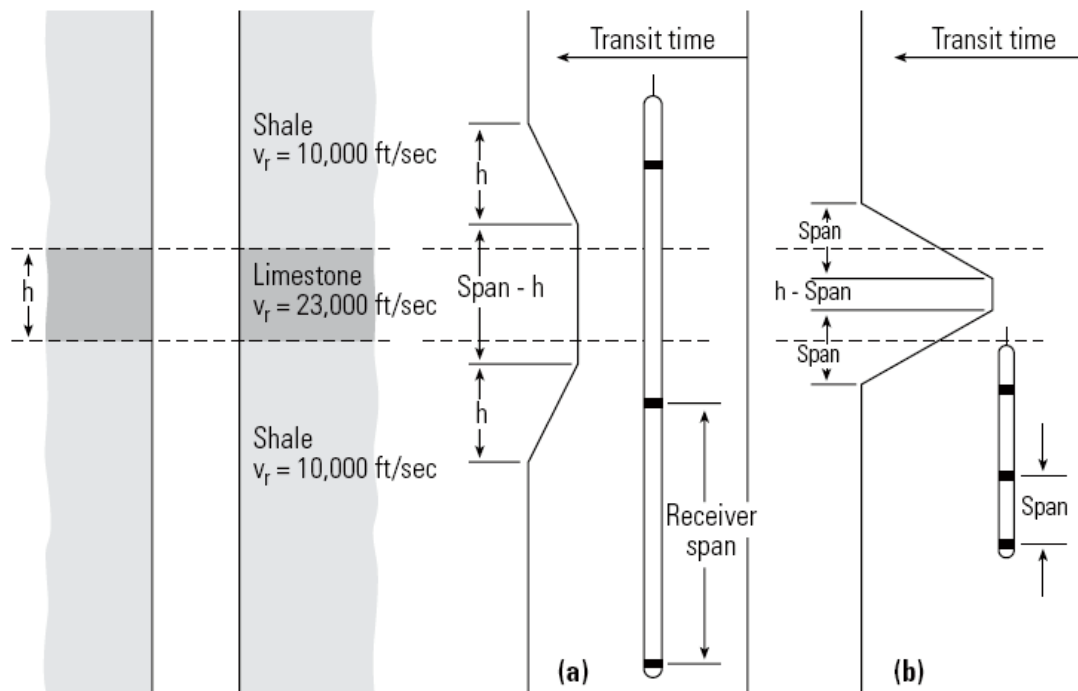
$$Dt = (t_2 - t_1) / L_s, \text{ όπου } L_s \text{ η απόσταση μεταξύ των δεκτών.}$$

Κατά την κάθετη ανάλυση της καταγραφής, συγκεκριμένη απόσταση (Span) ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στους δέκτες και ουσιαστικά καθορίζει την κατακόρυφη ανάλυση ($h \sim \text{Span}$). Ενώ κατά την πλευρική ανάλυση παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις, καθώς το βάθος της έρευνας ποικίλει σε συνάρτηση με το μήκος κύματος (λ), την ταχύτητα του σχηματισμού (V), και τη συχνότητα του φωρατή (f). Οι ποσότητες αυτές συσχετίζονται με βάση την παρακάτω εξίσωση :

$$\lambda = V / f$$

⁸⁹ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 536

Επίσης το βάθος της έρευνας (Di) συνήθως είναι περίπου 3 λ, και σύμφωνα με τον κανόνα του αντίχειρα, κυμαίνεται μεταξύ των 0,75 έως 3,75 ft (πόδια) και σχετίζεται άμεσα με το διάστημα $T - R$.



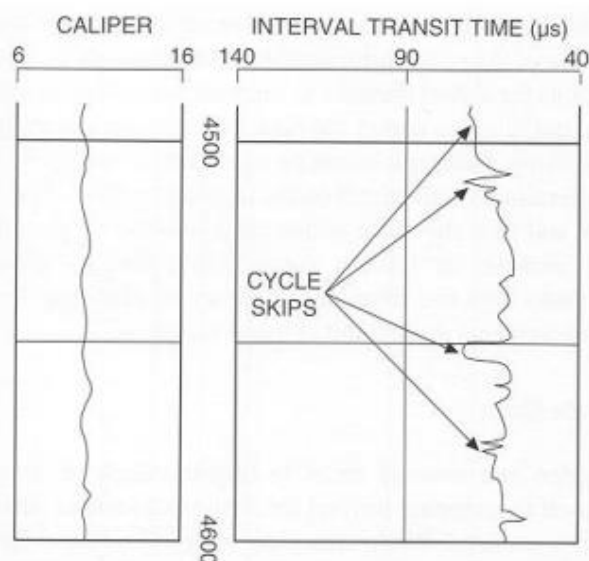
Σχήμα 3.28. : Απεικόνιση της επίδρασης που έχει η απόσταση μεταξύ των δύο δεκτών (Span) στην μέτρηση της διαδρομής του ηχητικού κύματος (Timur, 1987).⁹⁰

Το διάστημα αυτό, $T - R$ καλείται κρίσιμη απόσταση, η οποία είναι πολύ μικρή. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είναι αρκετά δύσκολο έως αδύνατο να εντοπιστεί παλμός, αλλά καθίσταται αρκετά μεγάλος ώστε να επιτραπεί η πρώτη άφιξη να αποτελείται από συμπιεσμένο κύμα.

Στην περίπτωση που η πρώτη άφιξη γίνεται μακριά από τον δέκτη, παρατηρείται μία παράκαμψη της ηχητικού κύματος ή μία απότομη αλλαγή σε ένα πιο γρήγορο δρόμο διάδοσης του κύματος. Η μετατροπή αυτή της διαδρομής της ηχητικής καμπύλης ονομάζεται κυκλική παράκαμψη (**Circle Skipping**) και συναντάται συνήθως σε μη συμπαγείς σχηματισμούς, σε σχηματισμούς με μικρή αντοχή και στην περίπτωση που υπάρχει αδύναμος πομπός ή/και χαμηλής ισχύος δέκτης (Σχ. 3.29.).⁹¹

⁹⁰ Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 538

⁹¹ <http://infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler370/fmev-chap12-soniclog.pdf>



Σχήμα 3.29. : Απεικόνιση της Κυκλικής παράκαμψης (Circle Skipping) της καμπύλης διάδοσης του κύματος.⁹²

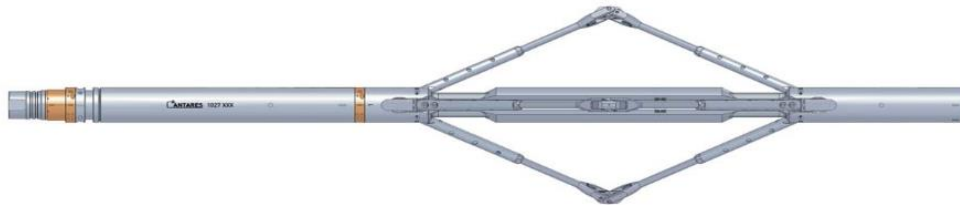
3.5.5. Γεωφυσικές διαγραφίες Caliper (Openhole Caliper Logs)

Οι γεωφυσικές διαγραφίες Caliper είναι μία μέθοδος η οποία αποτυπώνει την μεταβολή της διαμέτρου μίας γεώτρησης σε όλο το μήκος της. Οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται από τις πετροφυσικές ιδιότητες των σχηματισμών που περιβάλλουν την γεώτρηση όπως το πορώδες, η διαπερατότητα, η πιθανή ύπαρξη ζωνών ρωγμάτωσης κα. Η τεχνική αυτή παρέχει στοιχεία που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προγραμματισμό της ολοκλήρωσης (completion) και μπορεί να κάνει χρήση διαφορετικών τύπων φωρατών (logging tools). Γι' αυτό το λόγο έχει μεγάλη σημασία η ορθή κατανόηση της επιρροής που μπορεί να έχει ο κάθε φωρατής στα δεδομένα που προκύπτουν.

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει μέχρι και 6 βραχίονες (Σχ. 3.30.). Οι βραχίονες αυτοί συνδέονται με το σώμα ενός ανιχνευτή – αναλυτή και συγκρατούνται από τα τοιχώματα της γεώτρησης με τη βοήθεια ενός ελατηρίου, παρέχοντας συνεχή μέτρηση της διαμέτρου της γεώτρησης. Τη μέγιστη διάμετρο καταγράφουν οι μετρητές που φέρουν ένα – δύο βραχίονες. Σε αυτή την περίπτωση η οπή της γεώτρησης δεν είναι κυκλική. Όταν όμως υπάρχουν τέσσερις έως και έξι βραχίονες, το μέγεθος και το σχήμα της οπής ορίζεται ανάλογα. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική όταν πρόκειται για αποκλίνοντα και ελλειπτικά διαμορφωμένα φρεάτια. Παρόλα αυτά τα δεδομένα των μετρήσεων επηρεάζονται από το μέγεθος και την πίεση των βραχιόνων επαφής. Αυτό σημαίνει ότι με την χρήση της τεχνικής με καταγραφή της πυκνότητας (Density log tool) είναι δυνατόν να εμφανιστεί μεγαλύτερη διάμετρος της οπής απ' ό,τι με την χρήση με καταγραφή επαγωγής

⁹² <http://infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler370/fmev-chap12-soniclog.pdf>

(Induction log). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο φωρατής της πυκνότητας ανιχνεύει μία μεγαλύτερη διάμετρο ενώ ο φωρατής επαγωγής αποτελεί ένα μηχάνημα αζόνων. Οπότε, οι διαφορετικοί τύποι Openhole Caliper Logs δεν θα πρέπει να 'προσδοκούν' σε μία πολύ ακριβή επαναληψιμότητα.



Σχήμα 3.30. : Caliper με 6 βραχίονες.⁹³

Όσον αφορά στην κίνηση των βραχιόνων του Caliper θα πρέπει να μετατραπεί σε κάτι το οποίο να είναι μετρήσιμο στην επιφάνεια της γεώτρησης. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως κυκλώματα ποτενσιόμετρου. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί μετατροπείς και συνδέεται με τους βραχίονες του Caliper. Επίσης, υπάρχουν δύο περιπτώσεις χρήσης, η μία είναι με συνεχές ρεύμα και η δεύτερη με παλμούς. Όταν πρόκειται για συνεχές ρεύμα, η μετατόπιση των βραχιόνων του Caliper μεταφράζεται σε τάση εντός του κυκλώματος μέτρησης, ενώ στην περίπτωση των παλμών, για την παροχή της μεταβλητής τάσης, γίνεται χρήση του ποτενσιόμετρου σε ένα κύκλωμα τάσης – συχνότητας. Η συχνότητα αυτή είναι ανάλογη της επέκτασης του βραχίονα. Αυτό συνήθως αποτελεί πρόβλημα με τον οπλισμό του Caliper καθώς η μετατόπιση του μετατροπέα δεν είναι άμεσα ανάλογη με την επέκταση του βραχίονα, με αποτέλεσμα να δημιουργεί μία γραμμική απόκριση. Έτσι, με τη βοήθεια του φωρατή Caliper (caliper tool), που έχει σχεδιαστεί με σκοπό να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος διαμέτρων της οπής, ελαχιστοποιείται η μη γραμμικότητα της απόκρισης που παρατηρείται.

Για τη λήψη αποτελεσμάτων με ακρίβεια στη μέτρηση με Caliper κρίνεται απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη και οι υπόλοιπες μετρήσεις από άλλες τεχνικές Well Logging, καθώς οι μεταβολές της διαμέτρου είναι δυνατόν να επηρεάσουν την ορθότητα αυτών των αποτελεσμάτων. Με αυτό τον τρόπο πριν από κάθε ερμηνεία πραγματοποιούνται οι διορθώσεις που κρίνονται απαραίτητες.

Στη διάταξη της μέτρησης συνήθως περιλαμβάνεται μία οβίδα, η οποία είναι εφοδιασμένη με 3 βραχίονες σε σύνδεση με 3 ποτενσιόμετρα ακρίβειας. Η μεταβολή της θέσης των βραχιόνων και κατά συνέπεια η μεταβολή της διαμέτρου επιφέρει ανάλογες μεταβολές δυναμικού, οι οποίες καταγράφονται στην επιφάνεια.

Τα δεδομένα της τεχνικής Openhole Caliper Log έχουν πολλές χρήσεις. Μία από αυτές αφορά στην εκτίμηση των όγκων χαλικιών και τσιμέντου που είναι

⁹³ <http://www.antes-usa-ltd.com/6armcaliper.html>

απαραίτητα για την ολοκλήρωση του προγράμματος διάτρησης. Επίσης, χρησιμεύει στην παροχή πληροφοριών για τη συσσώρευση διατρητικών ρευστών εντός των πόρων και την ένδειξη του σημείου που πιθανόν διεισδύουν διογκωμένες άργιλοι. Γενικά, μια καταγραφή με την τεχνική Caliper, έχει ως μεγαλύτερη εφαρμογή της τις διορθώσεις σε άλλες γεωφυσικές καταγραφές όπως είναι: α) Natural Gamma Ray, β) Density και γ) Neutron Logs. Η παραπάνω εφαρμογή κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τη μέτρηση και την αντιστοίχιση του βάθους του Caliper.⁹⁴



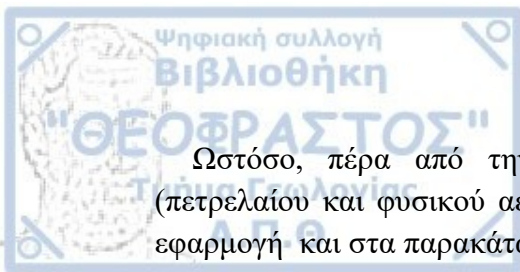
Σχήμα 3.31. : Οι οβίδες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του Caliper.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος των γεωφυσικών καταγραφών πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1930 από τους αδελφούς Schlumberger στην Γαλλία, λαμβάνοντας πληροφορίες για το υπέδαφος μέσω μετρήσεων του φυσικού δυναμικού και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Έως και το 1980 η γεωφυσική έρευνα εξελισσόταν συνεχώς μέσω της υιοθέτησης νέων τεχνικών όπως gamma logs, dipmeter logs, neutron logs, focused resistivity logs, induction logs, sonic logs, borehole televiewer κ.α.

Σήμερα, η εξέλιξη των γεωφυσικών διαγραφιών συνεχίζεται έχοντας ως στόχο την εύρεση και την εφαρμογή ακόμη πιο εξειδικευμένων μετρήσεων με αποτέλεσμα τη λήψη ακριβέστερων και ορθότερων πληροφοριών για το υπέδαφος σε μεγάλα βάθη. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι φορατές (logging tools), οι οποίοι αποτελούν εξειδικευμένα όργανα που τοποθετούνται εντός της γεώτρησης με σκοπό την λήψη πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων σχηματισμών της γεώτρησης (πετροφυσικές και γεωλογικές ιδιότητες) αλλά και τα χαρακτηριστικά της ίδιας της γεώτρησης (ποιότητα τσιμέντωσης και σωλήνωσης). Επιπρόσθετα, χρησιμεύουν στον εντοπισμό των πετρωμάτων ταμιευτήρων και την συγκέντρωση πληροφοριών για τα ρευστά που περιλαμβάνουν.

⁹⁴ http://petrowiki.org/Openhole_caliper_logs



Ωστόσο, πέρα από την συμβολή της στις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου), η τεχνική των γεωφυσικών διαγραφιών βρίσκει εφαρμογή και στα παρακάτω:

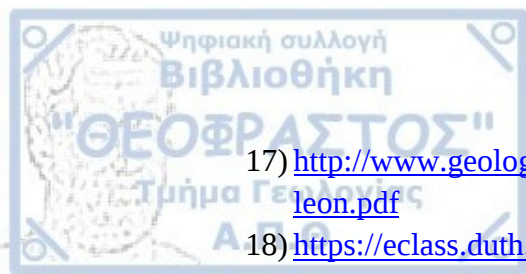
- Ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μέσω γεωτρήσεων μεγάλου βάθους, με σκοπό την εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας.
- Μεταλλευτική έρευνα.
- Έρευνα βιομηχανικών αερίων.
- Γεωτεχνική έρευνα.
- Έρευνα εντοπισμού κατάλληλων υπόγειων γεωλογικών δομών αποθήκευσης CO₂ (Carbon Capture and Storage - CCS).⁹⁵

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η αξία των γεωφυσικών καταγραφών ως μέσου συγκέντρωσης γεωλογικών στοιχείων είναι ανεκτίμητη, ως μια συνεχής και αντικειμενική παροχή της εικόνας των διατρηθέντων και των περιβαλλόντων σχηματισμών του υπεδάφους.

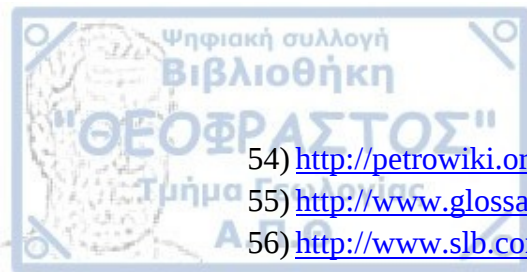
⁹⁵ Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Κοιτασματολογία Πετρελαίου
- 2) Αντώνιος Ψιλοβίκος, 2010, Ιζηματολογία, Εκδόσεις Τζιόλα
- 3) Σ.Σταματάκη, 2017, Μηχανική Πετρελαίων, Σημειώσεις Κεφαλαίου 4, Ιδιότητες ρευστών ταμειυτήρα, Θερμοδυναμική συμπεριφορά πολυσυστατικών μιγμάτων υδρογονανθράκων – Μέθοδοι πρόρρησης των ιδιοτήτων (πυκνότητα, ιξώδες) των ρευστών ενός ταμειυτήρα, σελ. 33-34
- 4) Darwin V. Ellis and Julian M. Singer, 2007, Well Logging for Earth Science, 2nd Edition, Springer, pp 3, 502-584
- 5) Ellis D.V., Chiaramonte J.M., 2000, Interpreting Neutron Logs in horizontal wells: a forward modeling tutorial, Petrophysics 41(1):23-32
- 6) Holenka J., Best D., Evans M., Kurkoski P., Sloan W., 1995, Azimuthal porosity while drilling, Trans SPWLA 36th Annual Logging Symposium, paper BB
- 7) Passey QR., Yin H., Rendeiro CN., Fitz DE., 2005, Overview of high-angle and horizontal well formation evaluation: issues, learnings, and future directions, Trans SPWLA 46th Annual Logging Symposium, paper A
- 8) Roger Boeken, 1995, Estimate of Water Quality in the Dakota Aquifer of Northwest Kansas Using Self Potential Readings of Downhole Geophysical Logs, Kansas Geological Survey, University of Kansas
- 9) Schlumberger, Porosity and Lithology Determination from Formation Density log and CNL (Compensated Neutron Log)/For CNL logs before 1986, or labeled NPHI/Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation, Schlumberger
- 10) Schlumberger, Porosity and Lithology Determination from Formation Density log and CNL (Compensated Neutron Log)/For CNL logs after 1986, or labeled NPHI/Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation, Schlumberger
- 11) Schlumberger, 1987, Log Interpretation Principles/ Applications, Schlumberger Education Services, 2nd Edition, pp 25
- 12) Schlumberger, 2008, Schlumberger Drilling & Measurements, Drilling Overview – Oilfield, Waleed Adams, Drilling Engineering (DnM) In – house for Statoil Stavanger, pp 43
- 13) Schlumberger, 2009, Log Interpretation Chart, Basic Material, Symbols used in Log Interpretation, pp 1, 226-230, 287
- 14) Timur A., 1987, Acoustic Logging, In: Bradley H. (ed) Petroleum production hand-book, SPE, Dallas, TX
- 15) Tittman J., 1986, Geophysical well logging, Academic Press, Orlando, FL
- 16) http://www.geology.upatras.gr/attachments/article/314/ppt_geologia_petreleon.pdf



- 17) http://www.geology.upatras.gr/attachments/article/314/ppt_geologia_petreleon.pdf
- 18) <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC149/sedimentary%20rocks.pdf>
- 19) <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/6381/1/STEF272001.pdf>
- 20) <http://www.intertek.com/energy/upstream/core-analysis-services/>
- 21) <http://fracfocus.ca/groundwater-protection/drilling-and-production>
- 22) http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/conductor_pipe.aspx
- 23) <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/conductor-pipe.html>
- 24) <http://www.offshoreenergyservices.com/conductor-pipe-drive-pipe>
- 25) http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/surface_casing.aspx
- 26) <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/surface-casing.html>
- 27) <http://www.pvisoftware.com/drilling-glossary/intermediate-casing.html>
- 28) http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/i/intermediate_casing_string.aspx
- 29) <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/l/liner.aspx>
- 30) <http://www.tiwoiltools.com/linershangersystems/Liner-Hangers>
- 31) <http://www.weatherford.com/en/products-services/well-construction/liner-systems#>
- 32) <http://seismo.geology.upatras.gr/greek/logging2012enc.pdf>
- 33) <http://www.gn-decanter-centrifuge.com/mud/drilling-fluid-system>
- 34) [http://petrowiki.org/Resistivity_and_spontaneous_\(SP\)_logging](http://petrowiki.org/Resistivity_and_spontaneous_(SP)_logging)
- 35) [http://petrowiki.org/Spontaneous_\(SP\)_log](http://petrowiki.org/Spontaneous_(SP)_log)
- 36) <https://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol342/lectures/19.html>
- 37) http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0140_Image_0001.png
- 38) http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/1995/OFR95_1a/index.html
- 39) http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/a/acoustic_log.aspx
- 40) http://petrowiki.org/Acoustic_logging
- 41) http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0169_Image_0002.png
- 42) http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0170_Image_0001.png
- 43) http://petrowiki.org/Nuclear_logging
- 44) http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0244_Image_0001.png
- 45) http://petrowiki.org/File:Vol1_Page_662_Image_0001.png
- 46) http://petrowiki.org/Gamma_ray_logs
- 47) http://petrowiki.org/File:Vol1_Page_663_Image_0001.png
- 48) http://www-odp.tamu.edu/publications/194_IR/chap_06/c6_f30.htm
- 49) <http://seismo.geology.upatras.gr/greek/logging2012enc.pdf>
- 50) <https://drilleng-group9-formationevaluation.wikispaces.com/Gamma+Ray+Logging>
- 51) <https://www.spec2000.net/07-densitylog.htm>
- 52) http://ns.ph.liv.ac.uk/~ajb/radiometrics/glossary/compton_continuum.html
- 53) http://petrowiki.org/Neutron_porosity_logs



- 54) http://petrowiki.org/File:Vol5_Page_0273_Image_0001.png
- 55) http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/sonic_log.aspx
- 56) http://www.slb.com/resources/publications/industry_articles/oilfield_review/2012/or2012spr01_sonic.aspx
- 57) <http://www.atares-usa-ltd.com/6armcaliper.html>
- 58) http://petrowiki.org/Openhole_caliper_logs
- 59) <http://infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler370/fmev-chap12-soniclog.pdf>



