

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ και ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΟΡΥΚΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Έλεγχος Θέσης Οριζόντιας Γεώτρησης με χρήση Γεωφυσικών Διαγραφιών Logging While Drilling

Παρασκευάς Κ. Φρόνιμος



Εξεταστική Επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος, Αν. Καθηγητής (επιβλέπων)

Μονόπωλης Διονύσιος, Αν. Καθηγητής

Παπακωνσταντίνου Κωνσταντίνος, MSc., Μηχανικός Ταμειευτήρων, North Aegean  
Petroleum Company E.P.E.

XANIA  
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1998

Αφιερώνεται στους Γονείς και  
τον Αδελφό μου

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	ii
Περίληψη .....	vi
Πρόλογος.....	vii
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Οριζόντιες Γεωτρήσεις .....</b>	<b>2</b>
2.1 Εισαγωγή .....	2
2.2 Εφαρμογές .....	4
2.2.1 Προβλήματα παραγωγής .....	4
2.2.1.1 Παραγωγή ανεπιθύμητων ρευστών .....	4
2.2.1.2 Ταμιευτήρες χαμηλής διαπερατότητας.....	6
2.2.2 Ετερογενείς ταμιευτήρες.....	7
2.3 Όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων .....	8
2.3.1 Εισαγωγή .....	8
2.3.2 Τεχνική όρυξης.....	9
2.3.3 Έλεγχος βάθους.....	10
2.3.3.1 Ορίζοντες αναφοράς .....	11
2.3.3.2 Ασυνεχείς ταμιευτήρες .....	12
2.3.4 Εξοπλισμός .....	13
2.3.4.1 Υπόγειες τουρμπίνες.....	13
2.3.4.2 Ολοκληρωμένα συστήματα διάτρησης.....	15
2.3.4.3 Αρχιτεκτονική διατρητικής στήλης.....	16
2.3.5 Μεταφορά θρυμμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις.....	17
<b>3. Γεωφυσικές διαγραφίες και αξιολόγηση σχηματισμών .....</b>	<b>20</b>
3.1 Εισαγωγή .....	20
3.2 Βασικοί τύποι διαγραφιών και αρχές λειτουργίας .....	20
3.2.1 Φυσικού ή Ιδίου Δυναμικού .....	21
3.2.2 Ακτινών Γάμα (Gamma Ray).....	22

3.2.3	Διαγραφίες Πορώδους .....	23
3.2.3.1	Ακουστικές διαγραφίες.....	23
3.2.3.2	Διαγραφή Πυκνότητας.....	24
3.2.3.3	Διαγραφή Νετρονίων.....	25
3.2.4	Διαγραφή LDL/CNL .....	26
3.2.5	Διαγραφίες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης .....	28
3.2.5.1	Σύστημα Dual Laterolog- $R_{xo}$ .....	30
3.2.6	Διαγραφίες διάδοσης (propagation) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων..	33
<b>4.</b>	<b>Γεωφυσικές διαγραφίες στις οριζόντιες γεωτρήσεις.....</b>	<b>38</b>
4.1	Απόκριση των συσκευών στις οριζόντιες γεωτρήσεις .....	41
4.1.1	Ακτίνων Γάμα (Gamma Ray).....	41
4.1.2	Πυκνότητας και Νετρονίων (Density and Neutron).....	42
4.1.3	Επαγωγής (Induction) .....	43
4.1.4	Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity) .....	45
<b>5.</b>	<b>Έλεγχος θέσης οριζοντίων γεωτρήσεων με χρήση συστημάτων MWD και LWD.....</b>	<b>46</b>
5.1	Εισαγωγή .....	46
5.2	Τα συστήματα Measurement While Drilling (MWD) .....	48
5.3	Τα συστήματα Logging While Drilling (LWD) .....	50
5.4	Έλεγχος θέσης οριζοντίων γεωτρήσεων με τα συστήματα MWD και LWD και οδήγηση της γεωτρητικής στήλης .....	54
<b>6.</b>	<b>Άλλες μέθοδοι ελέγχου θέσης.....</b>	<b>58</b>
6.1	Διαγραφίες θρυμμάτων .....	58
6.2	Διαγραφίες περιεχόμενου στον πολφό αερίου (Mud Gas Logs).....	60
<b>7.</b>	<b>Εφαρμογή σε Υποθαλάσσιο Ταμειυτήρα Υδρογονανθράκων .....</b>	<b>61</b>
7.1	Εισαγωγή .....	61
7.2	Γεωλογικό μοντέλο του ταμειυτήρα .....	61
7.3	Αξιολόγηση του ταμειυτήρα (Sand A1/2, B, C).....	63
7.3.1	Προσδιορισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού .....	63
7.3.1.1	Προσδιορισμός Θερμοκρασίας .....	65

7.3.1.2 Προσδιορισμός ηλεκτρικών αντιστάσεων .....	66
7.3.1.3 Διορθώσεις .....	67
7.3.2 Υπολογισμός του πορώδους.....	69
7.3.3 Υπολογισμός βαθμών κορεσμού σε περιεχόμενα ρευστά .....	73
7.4 Συμπεράσματα από την αξιολόγηση των σχηματισμών.....	74
7.5 Η οριζόντια γεώτρηση HW-1 .....	76
7.6 Εξοπλισμός (MWD και LWD) .....	76
7.6.1 NaviGamma <sup>TM</sup> (Baker Hughes INTEQ).....	77
7.6.2 MPR <sup>TM</sup> (FEMWD) (Baker Hughes INTEQ) .....	78
7.7 Έλεγχος θέσης της γεώτρησης HW-1 .....	80
7.7.1 Η διαγραφή LWD .....	81
7.7.1.1 Καμπύλες ηλεκτρικής αντίστασης .....	81
7.7.1.2 Καμπύλη μέτρησης Φυσικής Ραδιενέργειας (Gamma Ray).....	83
7.7.2 Αξιολόγηση.....	84
7.7.3 Ερμηνεία της διαγραφής.....	85
7.8 Συμπεράσματα από τον έλεγχο θέσης .....	88
7.9 Γεωλογική τομή .....	89
7.9.1 Γραφική απεικόνιση τροχιάς αποκλίνουσας γεώτρησης .....	90
7.9.2 Γραφική απεικόνιση της τροχιάς της οριζόντιας γεώτρησης HW1 ..	91
7.9.3 Γεωλογική τομή ταμειυτήρα.....	92
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>94</b>
<b>Παράρτημα Α: Διαγραφές LWD .....</b>	<b>96</b>
<b>Παράρτημα Β: Διαγραφές Κατακόρυφης Γεώτρησης .....</b>	<b>97</b>
<b>Παράρτημα Γ: Γεωλογικές Τομές .....</b>	<b>98</b>
<b>Παράρτημα Δ: Διαγράμματα Ερμηνείας Γεωφυσικών Διαγραφιών .....</b>	<b>109</b>
<b>Παράρτημα Ε: Τεχνικά Στοιχεία Εξοπλισμού .....</b>	<b>110</b>



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον γεωλογικό έλεγχο της θέσης της οριζόντιας γεώτρησης HW-1, που πραγματοποιήθηκε σε υποθαλάσσιο ταμιευτήρα υδρογονανθράκων στον Ελλαδικό χώρο. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με χρήση της διαγραφίας LWD που πραγματοποιήθηκε στην γεώτρηση. Σκοπός της εργασίας είναι αφενός ο έλεγχος της γεωλογικής θέσης της γεώτρησης και αφετέρου η διερεύνηση του κατά πόσο οι διαγραφίες LWD, στον συγκεκριμένο ταμιευτήρα, είναι ικανές να αποδώσουν στοιχεία για την γεωλογία του ταμιευτήρα κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου της οριζόντιας γεώτρησης.

Για την εξυπηρέτηση του ελέγχου θέσης της οριζόντιας γεώτρησης, έγινε ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των κλασσικών (wireline) διαγραφιών της κατακόρυφης πιλοτικής γεώτρησης VW-1, που ορύχτηκε προγενέστερα της οριζόντιας και ορίστηκε το γεωλογικό μοντέλο του ταμιευτήρα. Ο έλεγχος της θέσης έγινε μέσω της ποιοτικής ερμηνείας της διαγραφίας LWD σε σχέση με το γεωλογικό μοντέλο που προέκυψε από την κατακόρυφη γεώτρηση. Τέλος, τα συμπεράσματα συνοψίζονται σε γεωλογική τομή του ταμιευτήρα κατά μήκος του αζιμουθίου της οριζόντιας γεώτρησης.

## Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας εργασίας, προτάθηκε στον συγγραφέα τον Απρίλιο του 1997 από τον κ. Κ. Παπακωνσταντίνου και έγινε αποδεκτό ως θέμα διπλωματικής εργασίας από τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Α. Βαφείδη τον Μάιο του ίδιου χρόνου.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κ. Παπακωνσταντίνου, τόσο για το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και γιατί χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια του, η παρούσα εργασία δεν θα ήταν ποτέ δυνατόν να πραγματοποιηθεί. Θερμά ευχαριστώ τον κ. Α. Βαφείδη που δέχθηκε να επιβλέψει την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και για την πολύτιμη επιστημονική και προσωπική του συμπαράσταση. Θερμά επίσης ευχαριστώ τον κ. Δ. Μονόπωλη για την συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή και για τις πολύτιμες και διδακτικές υποδείξεις του και για την επιστημονική του βοήθεια.

Ευχαριστώ τον κ. Χ. Καπετάνιο, για την συμπαράσταση του και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχε. Ευχαριστώ ακόμα τους κκ. Ν. Μπελεβέγκα και Β. Σαραντινό για το ενδιαφέρον και την συμπαράσταση τους.

Θερμά ευχαριστώ τον κ. Χ. Αρμουτίδη της ΔΕΠ-ΕΚΥ για τον λίγο από τον πολύτιμο χρόνο του, που μου διέθεσε.

Η παρούσα εργασία δεν είναι παρά μια ψηλάφηση του τεράστιου θέματος του ελέγχου θέσης και των οριζοντίων γεωτρήσεων γενικότερα. Αποτελεί ευχή μου, η συγκεκριμένη εργασία, να αποτελέσει ερέθισμα για την ενασχόληση και άλλων με τις οριζόντιες γεωτρήσεις και τα συστήματα LWD και MWD που σήμερα αποτελούν την αιχμή της τεχνολογίας όρυξης και διαγράφισης.



## 1. Εισαγωγή

Οι πρώτες κατευθυνόμενες γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν πριν από περισσότερα από 50 χρόνια, στις αρχές της δεκαετίας του '50. Η συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας επέτρεψε, στις αρχές της δεκαετίας του '80, την πραγματοποίηση γεωτρήσεων στραμμένων κατά  $90^{\circ}$  (οριζόντιες γεωτρήσεις). Η εμφάνιση των οριζοντίων γεωτρήσεων είχε ως αποτέλεσμα την εξέλιξη των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων, από μια μέθοδο ελεγχόμενης μετατόπισης του πέρατος της γεώτρησης σε έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο διάτρησης και εξοπλισμού του φρέατος.

Παρέχεται πλέον η δυνατότητα της ανάπτυξης και εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα (σε οποιοδήποτε στάδιο) με γεωτρήσεις οι οποίες διαπερνούν οριζόντια τον ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη παραγωγικότητα και ταυτόχρονη μείωση του αριθμού των γεωτρήσεων που απαιτούνται για την ανάπτυξη και ανάκτηση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα.

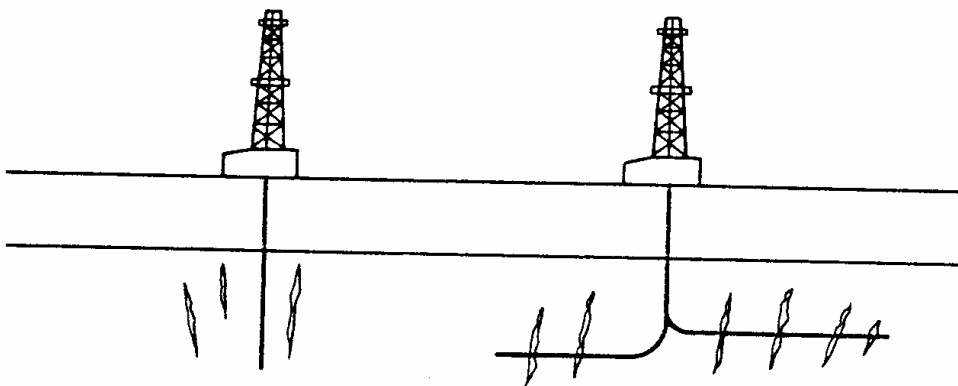
Με την καθιέρωση των οριζοντίων γεωτρήσεων στην παραγωγή πετρελαίου, διάφορα θέματα που σχετίζονται σχεδόν αποκλειστικά με αυτές έκαναν την εμφάνισή τους. Ένα τέτοιο θέμα, είναι ο έλεγχος της θέσης της γεώτρησης σε πραγματικό, κατά την διαδικασία της διάτρησης, χρόνο ή μεταγενέστερα, κατά την διαδικασία της αξιολόγησης.

## 2. Οριζόντιες Γεωτρήσεις

### 2.1 Εισαγωγή

Οριζόντιες γεωτρήσεις είναι αυτές οι οποίες προχωρούν εις βάθος με συνεχώς αυξανόμενη γωνία κλίσης και φθάνουν τις  $90^\circ$  (οριζόντια διεύθυνση) σχηματίζοντας ένα καμπύλο τμήμα το οποίο ακολουθείται από ένα οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο τμήμα μήκους από μερικά πόδια έως και 5000 ft (1666 m) (Aguilera, Artindale et al 1991). Το μήκος του οριζόντιου τμήματος αλλά και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κάθε γεώτρησης, όπως ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης, προσδιορίζονται από τις επιτόπου συνθήκες και τις απαιτήσεις του σχεδίου εκμετάλλευσης ή ανάπτυξης.

Σε κάθε ταμειευτήρα, θεωρητικά, οι οριζόντιες γεωτρήσεις αποτελούν, όχι μόνον



(Mahony 1988).

εναλλακτική οδό αλλά υπερτερούν των κατακόρυφων, προσφέροντας μεγαλύτερη παραγωγική ικανότητα λόγω του ότι διαπερνούν μεγαλύτερο τμήμα του ταμειευτήρα αλλά και άλλων χαρακτηριστικών τους που παρουσιάζονται παρακάτω (Mahony, 1988)

:

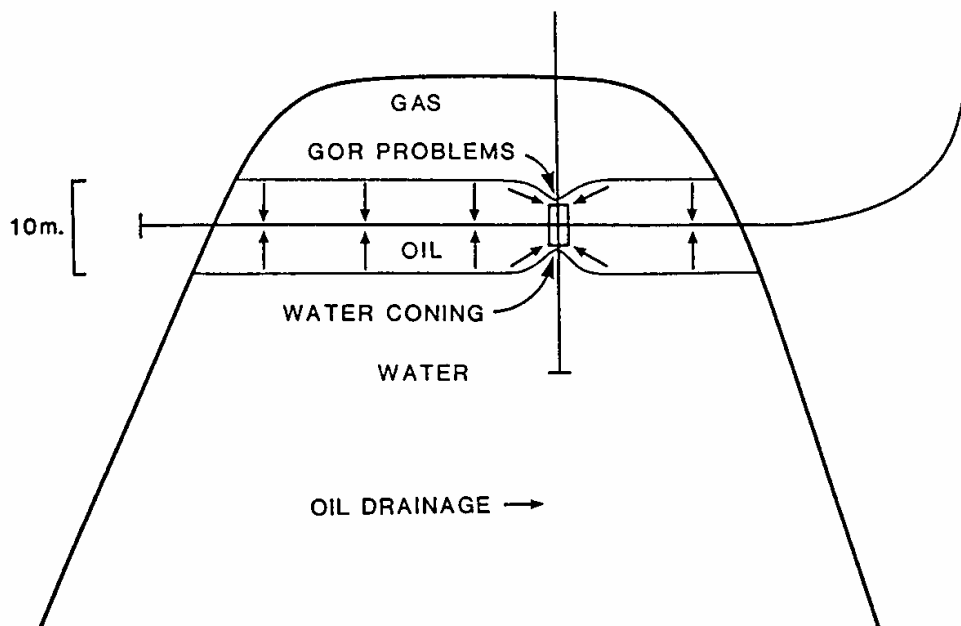
- Παρέχουν την δυνατότητα μαζικότερης διάτρησης κάθετων φυσικών ρωγμών προς αύξηση της διαπερατότητας και της παραγωγικής ικανότητας (Σχήμα 2-1).

- Αποφεύγεται η παραγωγή ανεπιθύμητων ρευστών ως αποτέλεσμα σχηματισμού κώνου πτώσης πίεσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-2**. Αυτό αναφέρεται στην περίπτωση που όλο το μήκος του οριζόντιου τμήματος είναι εκτεθειμένο, με διατρήσεις (perforations), στον ταμιευτήρα. Στην αντίθετη περίπτωση το φαινόμενο της δημιουργίας κώνου, θα είναι ανάλογο με την περίπτωση των πολλαπλών κατακόρυφων γεωτρήσεων.

- Για δεδομένο ταμιευτήρα, ο αριθμός οριζοντίων γεωτρήσεων που απαιτούνται για την εξόφληση του είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτόν που θα απαιτούνταν εάν χρησιμοποιούνταν συμβατικές κατακόρυφες γεωτρήσεις.

- Η γραμμική εισπίεση ρευστών μέσω οριζοντίων γεωτρήσεων, παρουσιάζει ενδεχομένως πλεονεκτήματα, σε σύγκριση με την ακτινική για δεδομένο ταμιευτήρα.

- Τα ποσοστά απόληψης υδρογονανθράκων με οριζόντιες γεωτρήσεις είναι



**Σχήμα 2-2 Σχηματισμός κώνου πτώσης πίεσης σε οριζόντιες και κατακόρυφες γεωτρήσεις (παραγωγή ανεπιθύμητων ρευστών, GOR problems) (Aguilera et al 1991)**

συχνά, κατά πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα με κατακόρυφες γεωτρήσεις.

Παρά τα εμφανή και σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οριζόντιες γεωτρήσεις, έναντι των κατακόρυφων, δύο πολύ σημαντικά τους μειονεκτήματα θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Το πρώτο σχετίζεται με το κατά πολύ αυξημένο κόστος τους, και το δεύτερο με τη δυσκολία επέμβασης σε αυτές μετά το πέρας της διάτρησης και του εξοπλισμού. Ο κίνδυνος καταστροφής της γεώτρησης από εργασίες εισαγωγής και εξαγωγής στελεχών είναι κατά πολύ μεγαλύτερος.

## **2.2 Εφαρμογές**

Οι οριζόντιες γεωτρήσεις είναι εφαρμόσιμες σε όλες τις φάσεις της ανάκτησης των αποθεμάτων ενός ταμιευτήρα (πρωτογενής, δευτερογενής, τριτογενής), ως γεωτρήσεις παραγωγής ή εισπίεσης και διέγερσης.

Οι εφαρμογές των οριζοντίων γεωτρήσεων μπορούν να καταταχθούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Η μία κατηγορία στοχεύει στην βελτίωση των χαρακτηριστικών παραγωγής του ρευστού του ταμιευτήρα και η δεύτερη στην υπέρβαση γεωλογικών προβλημάτων του ταμιευτήρα, όπως ετερογένεια, τεκτονισμός και χαμηλή διαπερατότητα.

### **2.2.1 Προβλήματα παραγωγής**

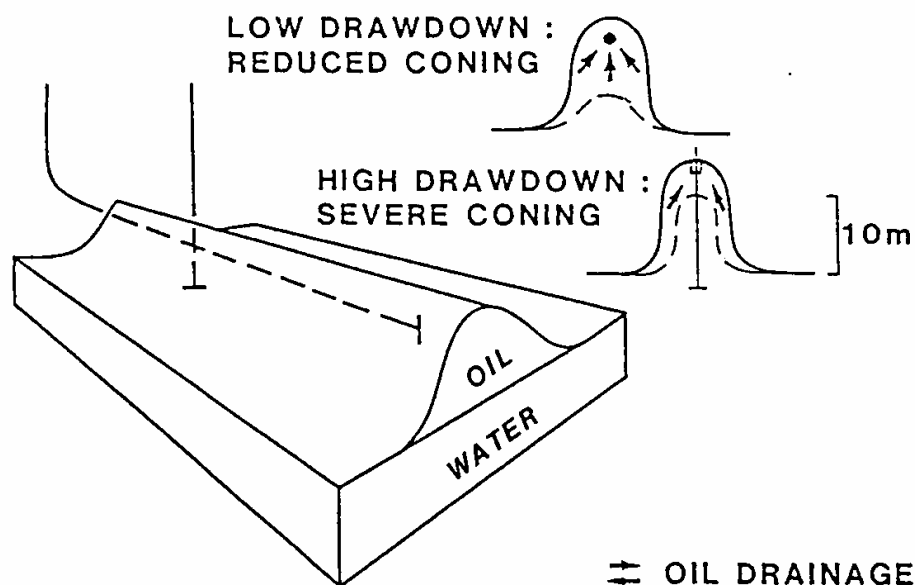
#### **2.2.1.1 Παραγωγή ανεπιθύμητων ρευστών**

Ο τυπικός ταμιευτήρας υδρογονανθράκων, περιέχει υγρούς και αέριους υδρογονάνθρακες αλλά και νερό. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ τους, τα διάφορα ρευστά διαχωρίζονται. Το αέριο ως πιο ελαφρύ, βρίσκεται στην οροφή του ταμιευτήρα, ενώ το νερό ως πιο βαρύ στο δάπεδο. Οι υγροί υδρογονάνθρακες βρίσκονται στο μέσο (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-2**). Μεταξύ των ρευστών θεωρούνται νοητές επιφάνειες (διεπιφάνειες), οι οποίες τα διαχωρίζουν. Στην πραγματικότητα, οι διεπιφάνειες αυτές δεν υπάρχουν παρά ως ζώνες μέσα στις οποίες

οι βαθμοί κορεσμού μεταβάλλονται σηματοδοτώντας την μετάβαση από το νερό στο πετρέλαιο και από το πετρέλαιο στο αέριο.

Με την παραγωγή, η πίεση του ταμιευτήρα ελαττώνεται γύρω από την γεώτρηση, με αποτέλεσμα την άνοδο της διεπιφάνειας νερού-πετρελαίου ή την κάθοδο της αντίστοιχης πετρελαίου-αερίου στην περιοχή της γεώτρησης. Το ύψος της ανόδου ή της πτώσης της διεπιφάνειας, αντικατοπτρίζει την πίεση περί την διεπιφάνεια. Η κλίση της, αντικατοπτρίζει την οριζόντια βαθμίδα πτώσης πίεσης επάνω από την διεπιφάνεια. Καθώς ο ρυθμός παραγωγής αυξάνεται, η βαθμίδα πτώσης της πίεσης αυξάνεται, με αποτέλεσμα την περαιτέρω άνοδο ή πτώση της αντίστοιχης διεπιφάνειας. Τελικά όταν επιτευχθεί η κρίσιμη παραγωγή, η υπερυψωμένη διεπιφάνεια συναντά την γεώτρηση και παράγεται νερό. Το ίδιο ισχύει και για την διεπιφάνεια αερίου-πετρελαίου με την διαφορά ότι αυτή κατεβαίνει.

Οι οριζόντιες γεωτρήσεις μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στην οροφή του



**Σχήμα 2-3 Σύγκριση κώνου πτώσης πίεσης σε κατακόρυφες (έντονος κώνος, high drawdown) και οριζόντιες γεωτρήσεις (μικρότερος κώνος, low drawdown. (Aguilera et al. 1991)**

ταμιευτήρα, αρκετά μακριά από την διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου ή στο δάπεδο, μακριά από την διεπιφάνεια πετρελαίου-αερίου. Στην περίπτωση των κατακόρυφων

γεωτρήσεων, ο όγκος του πετρελαίου που παράγεται ορίζεται από έναν κώνο γύρω από την γεώτρηση. Για τις οριζόντιες γεωτρήσεις, ο όγκος αυτός ορίζεται από ράχη (όταν ολόκληρο το οριζόντιο τμήμα είναι εκτεθειμένο στον ταμιευτήρα) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-3** και είναι πολύ μεγαλύτερος. Λόγω του ότι το μήκος της γεώτρησης που βρίσκεται μέσα στον ταμιευτήρα είναι κατά πολύ μεγαλύτερο, η πτώση πίεσης (drawdown) είναι μικρότερη, ενώ το ύψος της παραγωγής διατηρείται. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της βαθμίδας πτώσης πίεσης κατά την οριζόντια διεύθυνση και την αύξηση του πλάτους της βάσης της ράχης. Εντούτοις, προβλήματα είναι δυνατόν να εμφανιστούν όταν η διαπερατότητα του σχηματισμού κατά μήκος της γεώτρησης είναι μεταβλητή, καθώς είναι δυνατόν να παραχθεί νερό από μια περιοχή υψηλής διαπερατότητας, επηρεάζοντας αρνητικά την συνολική απόδοση της γεώτρησης.

Στην περιοχή Prudhoe Bay στην Αλάσκα, οριζόντιες γεωτρήσεις σε ταμιευτήρα βαρέως πετρελαίου έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα όσον αφορά στην αντιμετώπιση του σχηματισμού κώνου αερίου, παρέχοντας παραγωγή δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη αυτής των κατακόρυφων γεωτρήσεων, με μειωμένο περιεχόμενο αερίου (Butler, 1988 από Aguilera et al. 1991).

### **2.2.1.2 Ταμιευτήρες χαμηλής διαπερατότητας**

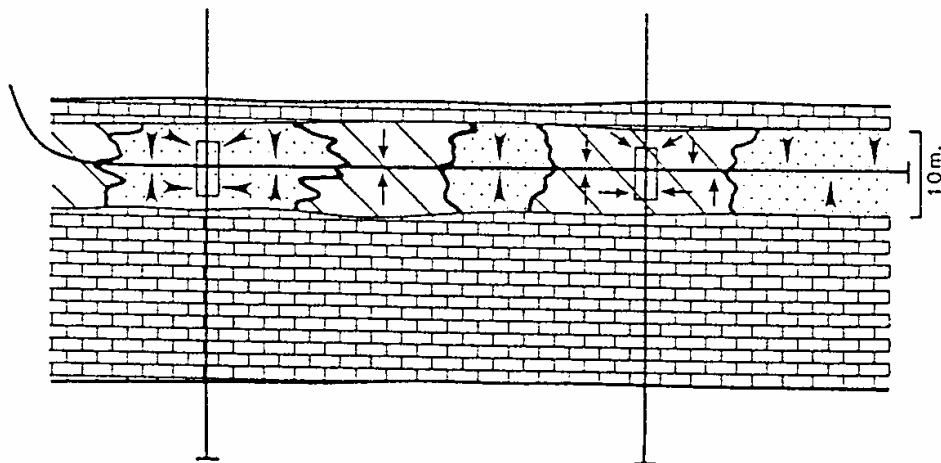
Στους ταμιευτήρες χαμηλής διαπερατότητας, κατακόρυφες γεωτρήσεις χωρίς περαιτέρω ανάπτυξη (stimulation), είναι συχνά ανίκανες να αποδώσουν οικονομικές παροχές. Μέσω της υδραυλικής θραύσης προς δημιουργία δευτερογενούς πορώδους ωστόσο, είναι δυνατόν να καταστούν οι ταμιευτήρες αυτοί οικονομικά βιώσιμοι, αρκεί η ρωγματομένη ζώνη να έχει ικανό εύρος ώστε να διεγείρει θετικά τον ταμιευτήρα.

Στην περίπτωση των ταμιευτήρων αυτών, όπου απαιτείται υδραυλική ρωγμάτωση και πολλαπλές κατακόρυφες γεωτρήσεις σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, οι οριζόντιες γεωτρήσεις παρουσιάζουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των κατακόρυφων. Μία οριζόντια γεώτρηση μπορεί να ρωγματοωθεί υδραυλικά κατά διαστήματα, αποδίδοντας το παραγωγικό αποτέλεσμα πολλαπλών κατακόρυφων γεωτρήσεων. Η ιδέα αυτή δοκιμάστηκε για πρώτη φορά το 1975 στο πεδίο Cado Pine Island της βορειοδυτικής Louisiana, όπου σε μια κεκλιμένη γεώτρηση (κλίσης 52<sup>ο</sup>) και

σε μήκος 160 ft έγιναν τέσσερις ρωγματώσεις. Η παραγωγή ήταν δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη αυτής μιας μέσης κατακόρυφης γεώτρησης (Bell and Babcock, 1986 από Aguilera et al., 1991). Αργότερα, η τεχνική αυτή δοκιμάστηκε και σε οριζόντιες γεωτρήσεις με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Η πρώτη εφαρμογή σε οριζόντια γεώτρηση έγινε στο πεδίο Cardium Sandstone της κεντρικής Alberta όπου οι αρχικοί ρυθμοί ροής ήταν τρεις με τέσσερις φορές μεγαλύτεροι αυτών των κατακόρυφων και ρωγματωμένων γεωτρήσεων.

### 2.2.2 Ετερογενείς ταμιευτήρες

Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των οριζοντίων γεωτρήσεων αποτελεί η ανάπτυξη και εκμετάλλευση ταμιευτήρων οι οποίοι παρουσιάζουν λιθολογική ανομοιογένεια και ασυνέχεια στη διαπερατότητα. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι οι έντονα



**Σχήμα 2-4** Ανθρακικός ταμιευτήρας ασυνεχής ως προς την διαπερατότητα κατά την οριζόντια διεύθυνση. Φαίνονται μία οριζόντια και δύο κατακόρυφες γεωτρήσεις. (Aguilera et al, 1991)

τεκτονισμένοι αλλά και οι καρστικής προέλευσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-4**. Είναι κατανοητό ότι η συμβατική ανάπτυξη και εκμετάλλευση τέτοιων ταμιευτήρων, θα απαιτούσε σημαντικό αριθμό κατακόρυφων γεωτρήσεων που θα διαπερνούσαν η καθεμία ένα τέτοιο τμήμα. Αντιθέτως, είναι δυνατή η αντικατάσταση αυτών από μία (στην καλύτερη περίπτωση) οριζόντια γεώτρηση, η οποία θα διαπερνούσε μια σειρά από τέτοια τμήματα στο επιθυμητό βάθος, χωρίς να αποκλείει την επιλογή της επιλεκτικής παραγωγής που οι πολλαπλές κατακόρυφες γεωτρήσεις ευθέως παρέχουν.

Αυτό είναι δυνατόν με την κατάλληλη συμπλήρωση του φρέατος με πολλαπλές μηχανικές στεγανώσεις (packers).

## 2.3 Όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων

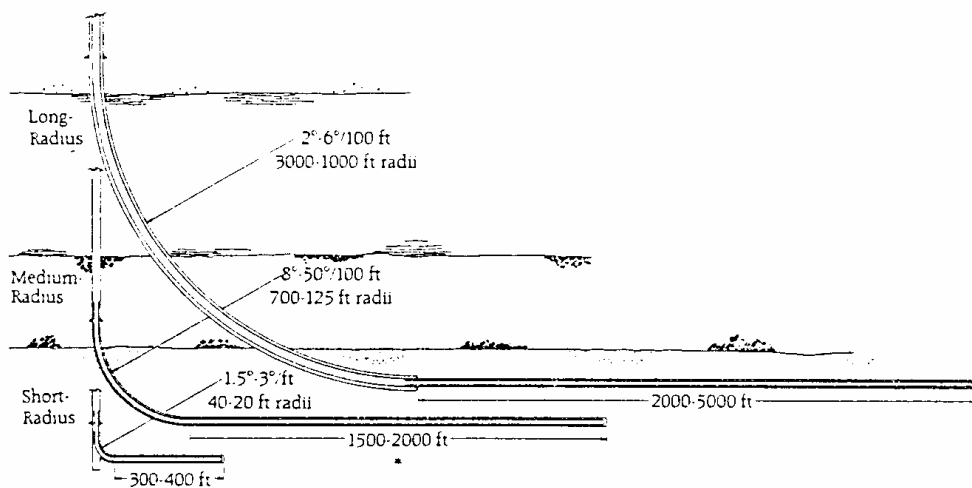
### 2.3.1 Εισαγωγή

Η τεχνική με την οποία ορύσσονται οι οριζόντιες γεωτρήσεις, καθώς και τα τελικά χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται κυρίως από τον ρυθμό αύξησης της γωνίας κλίσης της γεώτρησης (Angle BuildUp Rate, BUR), από  $0^{\circ}$  (κατακόρυφη γεώτρηση) σε  $90^{\circ}$  (οριζόντια γεώτρηση).

Οι οριζόντιες γεωτρήσεις κατατάσσονται σε 3 βασικούς τύπους, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-5**, ανάλογα με την ακτίνα του καμπύλου τμήματος της γεώτρησης που όπως είναι φανερό εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό αύξησης της γωνίας κλίσης (BUR):

**1. Οριζόντιες γεωτρήσεις μεγάλης ακτίνας** Στις οριζόντιες γεωτρήσεις αυτού του τύπου, ο ρυθμός αύξησης της κλίσης είναι 2 με  $60^{\circ}/100\text{ft}$  που ορίζει ακτίνα του καμπύλου τμήματος μεταξύ 1000 και 3000ft. Λόγω της μεγάλης ακτίνας του καμπύλου τμήματος και συνεπώς της μικρής καμπυλότητας αυτού, είναι δυνατή η όρυξη οριζοντίων τμημάτων μεγάλου μήκους (2000-5000ft). Οι γεωτρήσεις αυτές απαιτούν μεγάλη οριζόντια εξάπλωση για την στροφή τους κατά  $90^{\circ}$  και διάτρηση του στόχου με τον κατάλληλο προσανατολισμό. Σημειώνεται ότι ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι συχνά μεγαλύτερος σε ισχύ και διάμετρο από αυτόν που απαιτείται για την όρυξη κατακόρυφης γεώτρησης αντίστοιχου βάθους.

2.



\*Depends on formation type



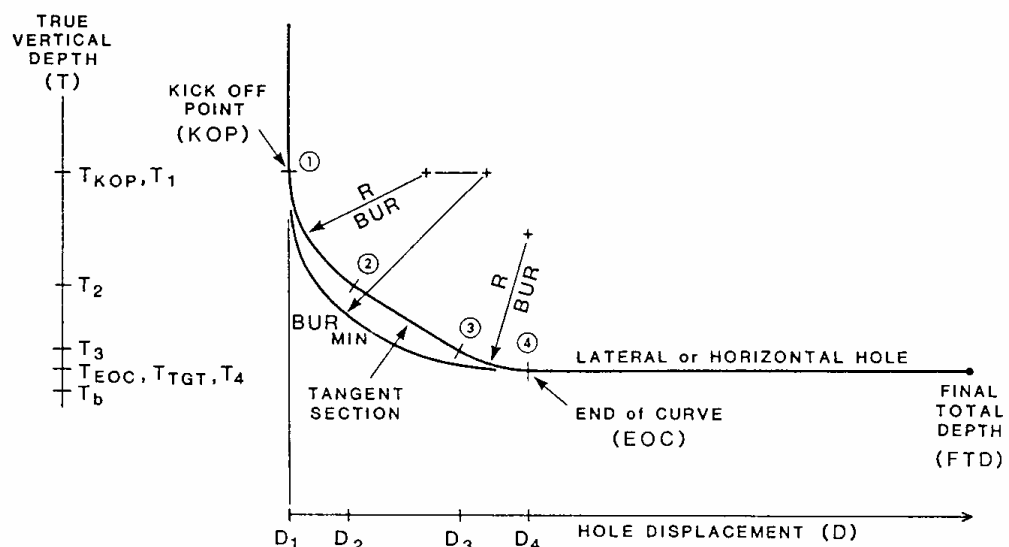
συμβατικά εργαλεία αξιολόγησης και συμπλήρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με μερικές μετατροπές, σε αυτές τις γεωτρήσεις.

**3. Οριζόντιες γεωτρήσεις μικρής ακτίνας** Στις γεωτρήσεις αυτού του τύπου, η κλίση αυξάνεται πολύ γρήγορα, με ρυθμό 1.5 με 3°/ft, που ορίζει ακτίνα του καμπύλου τμήματος 20 με 40 ft και η στροφή της γεώτρησης προς οριζόντια μπορεί να γίνει σε 20 με 60 ft. Λόγω της μεγάλης καμπυλότητας το μήκος του οριζόντιου τμήματος περιορίζεται σε 300 με 400ft, ενώ ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι ειδικός. Συμβατικές σωληνώσεις, εργαλεία αξιολόγησης και εξοπλισμού (completion), συχνά δεν είναι δυνατόν να περάσουν από τις κλειστές καμπύλες αυτών των γεωτρήσεων. Επίσης είναι αδύνατη η πραγματοποίηση γεωφυσικών διαγραφιών στις γεωτρήσεις αυτές (Mahony, 1988).

### 2.3.2 Τεχνική όρυξης

Στην παράγραφο που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί η τεχνική της όρυξης οριζόντιας γεώτρησης μέσης ακτίνας, μιας και οι ακραίες περιπτώσεις των γεωτρήσεων μεγάλης και μικρής ακτίνας παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα.

Μια τυπική οριζόντια γεώτρηση μέσης ακτίνας φαίνεται στο **Σχήμα 2-6**. Μακροσκοπικά, η όρυξη μιας τέτοιας γεώτρησης γίνεται σε τρία τμήματα. Το πρώτο είναι η όρυξη ενός κατακόρυφου τμήματος έως το σημείο από όπου θα αρχίσει το καμπύλο τμήμα της γεώτρησης (Kick Off Point, KOP) ή λίγο πιο βαθιά (Rat Hole). Τα χαρακτηριστικά αυτού του τμήματος ορίζονται από την διάμετρο και τα ειδικά



χαρακτηριστικά των εργαλείων που θα πρέπει να περάσουν από αυτό, ούτως ώστε να ορυχτεί το καμπύλο και το οριζόντιο τμήμα της γεώτρησης. Ακολουθεί το καμπύλο τμήμα της γεώτρησης, το οποίο ορύσσεται με σταθερό ρυθμό αύξησης της κλίσης που ορίζει ασίδα σταθερής ακτίνας (R). Συνήθως ορύσσεται και ευθύγραμμο τμήμα με σταθερή κλίση ούτως ώστε να γίνουν διορθώσεις στην κλίση ή στο πραγματικό βάθος της γεώτρησης. Στην περίπτωση που ο πραγματικός ρυθμός αύξησης της κλίσης και ο στόχος είναι γνωστά, είναι δυνατόν να ορυχτεί η γεώτρηση χωρίς ένα τέτοιο ευθύγραμμο τμήμα. Ένα δεύτερο καμπύλο τμήμα αυξάνει την κλίση της γεώτρησης στην απαιτούμενη τιμή και έτσι ορίζεται το σημείο που αναφέρεται ως το “τέλος της καμπύλης” (End Of Curve, EOC). Ακολούθως, ορύσσεται το οριζόντιο τμήμα το οποίο καταλήγει στο τελικό βάθος (Final Total Depth, FTD).

### 2.3.3 Έλεγχος βάθους

Η πραγματική τροχιά της γεώτρησης κατά μήκος του καμπύλου και του οριζόντιου τμήματος, επηρεάζεται από διάφορους γεωλογικούς παράγοντες τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση. Μερικοί παράγοντες είναι :

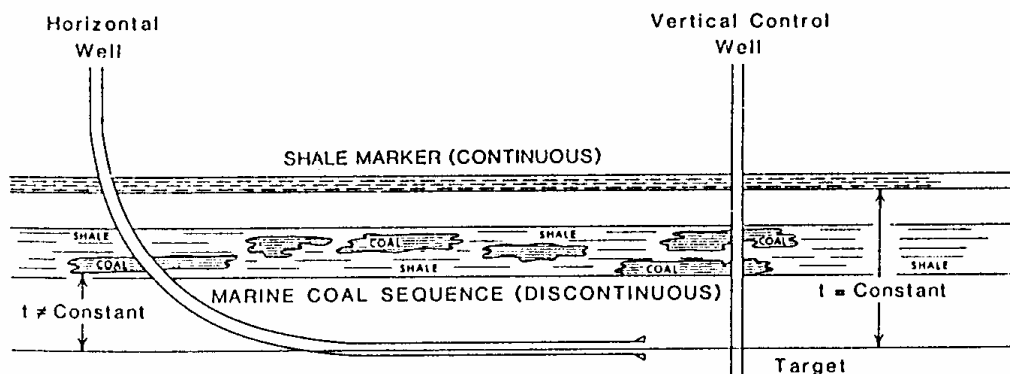
- Πραγματικό κάθετο βάθος (True Vertical Depth, TVD) και πάχος του σχηματισμού στόχου.
- Σχεδιαζόμενος προσανατολισμός και θέση της γεώτρησης μέσα στον σχηματισμό-στόχο.
- Κλίση των στρωμάτων.
- Κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις (π.χ. ρήγματα) και γενικότερα η γεωλογική ιστορία της περιοχής.

Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την διόρθωση της πορείας της γεώτρησης, λόγω κακής γνώσης της γεωλογίας, και την γεωλογική οδήγηση της στήλης προς τον σχηματισμό στόχο. Με χρήση των παρακάτω τεχνικών, είναι δυνατή η τοποθέτηση του οριζοντίου τμήματος σε λεπτές ζώνες.

### 2.3.3.1 Ορίζοντες αναφοράς

Οι ορίζοντες αναφοράς είναι ιδιαίτερης σημασίας για την όρυξη κάθε γεώτρησης και αυτό διότι εάν είναι καλή η γνώση της γεωλογίας, επιβεβαιώνουν την θέση της γεώτρησης. Ως ορίζοντας αναφοράς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε γεωλογικό στρώμα, καλά γνωστών και εύκολα αναγνωρίσιμων λιθολογικών χαρακτηριστικών, τοποθετημένος με σιγουριά στο γεωλογικό μοντέλο του ταμειυτήρα. Ιδιαίτερα χρήσιμοι είναι οι ορίζοντες αναφοράς οι οποίοι είναι συνεχείς στην περιοχή του στόχου και μάλιστα απέχουν σταθερή απόσταση από τον στόχο. Στο **Σχήμα 2-7** φαίνεται η διαφορά μεταξύ των ασυνεχών και συνεχών οριζόντων αναφοράς.

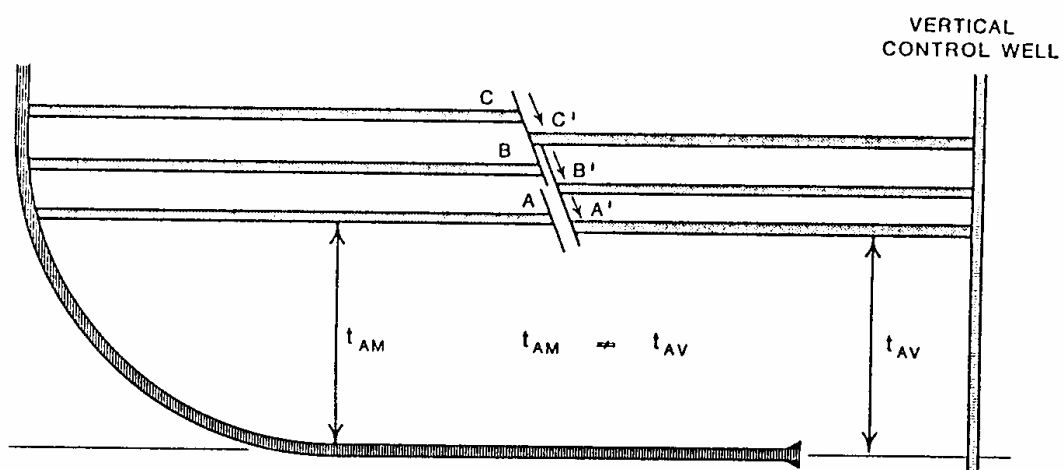
Στο **Σχήμα 2-8**, αποδίδεται γραφικά η περίπτωση κατά την οποία ο ορίζοντας



αναφοράς. (Aguilera et al, 1991)

αναφοράς είναι μεν συνεχής, αλλά η γεωλογική του κλίση διαφέρει από αυτήν του στόχου. Στην περίπτωση αυτή, η σχέση (υπό την έννοια της κατακόρυφης απόστασης) μεταξύ του οριζόντα αναφοράς και του στόχου, θα πρέπει να προσδιοριστεί και να ληφθεί υπ' όψιν για την τοποθέτηση της γεώτρησης στον στόχο.

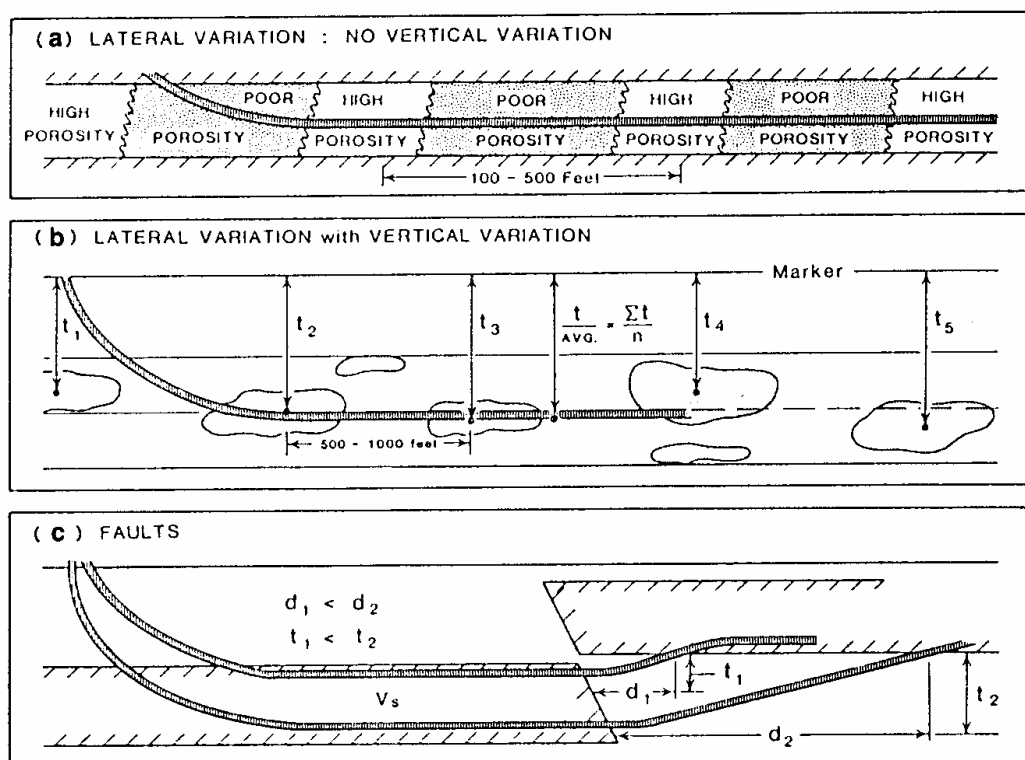
Η ύπαρξη ρήγματος, μπορεί να αλλάξει την σχέση μεταξύ του στόχου και του



ορίζοντα αναφοράς όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-9**. Για αυτόν τον λόγο, ο τύπος και η μετάπτωση των ρηγμάτων θα πρέπει να προβλεφθεί.

### 2.3.3.2 Ασυνεχείς ταμιευτήρες

Υπάρχουν τρεις γενικά τύποι ασυνεχών ταμιευτήρων. Στο **Σχήμα 2-10 (a)** φαίνεται ένας ασυνεχής κατά την οριζόντιο ταμιευτήρας, αμετάβλητος κατά την κατακόρυφο. Σε αυτή την περίπτωση, το οριζόντιο τμήμα πρέπει να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένο βάθος και η διάτρηση να συνεχισθεί έως ότου διατρυθεί ο ταμιευτήρας. Εάν ο ταμιευτήρας είναι ασυνεχής τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση, το οριζόντιο τμήμα τοποθετείται σε βάθος, το οποίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα διάτρησης του μεγίστου μήκους του ταμιευτήρα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-10 (b)**. Αυτό γίνεται με τον προσδιορισμό του κατάλληλου



**Σχήμα 2-10** Ασυνεχής κατά την οριζόντιο μόνον ταμιευτήρας (a), ασυνεχής κατά την οριζόντιο και την κατακόρυφο (b) και τεκτονισμένος ταμιευτήρας (c) (Aguilera et al, 1991).

#### **2.3.4 Εξοπλισμός**

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την διάτρηση οριζοντίων γεωτρήσεων, διαφέρει στις περισσότερες περιπτώσεις, από αυτόν που χρησιμοποιείται σε κατακόρυφες γεωτρήσεις αντίστοιχου βάθους. Οι διατρητικές στήλες για την διάτρηση οριζοντίων γεωτρήσεων φέρουν αφενός συνήθη εργαλεία διαφορετικών όμως μηχανικών ιδιοτήτων, αλλά και άλλα τα οποία είναι απαραίτητα για την όρυξη του καμπύλου και οριζόντιου τμήματος αφετέρου.

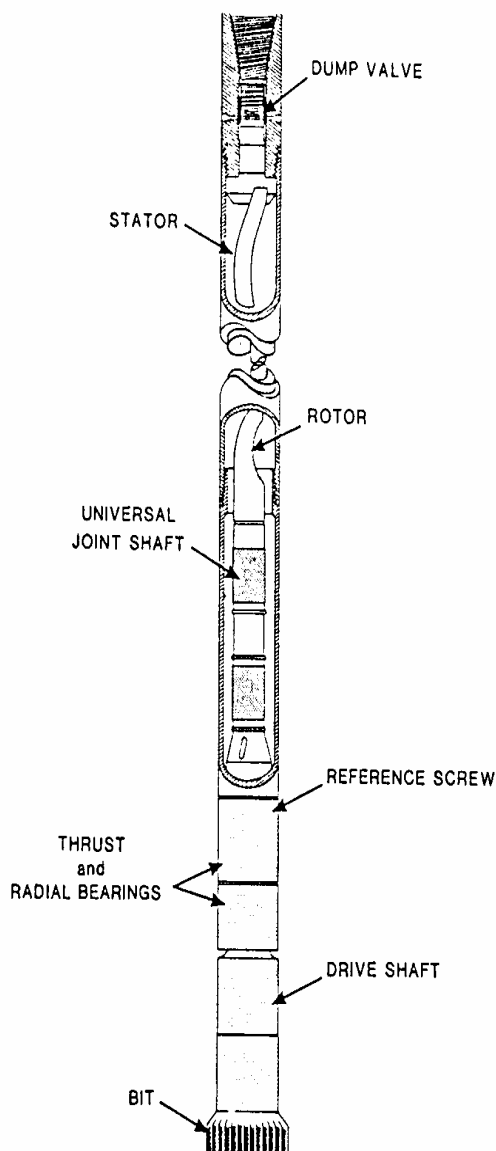
Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται είναι κατάλληλες για να αντέχουν στην καταπόνηση που υφίστανται (κάμψη και στρέψη) κατά την όρυξη. Ακόμη και σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται σωληνώσεις ειδικού τύπου (π.χ. μη μαγνητικές).

Ο εξοπλισμός ο οποίος είναι απαραίτητος για την όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων, περιλαμβάνει υπόγειες τουρμπίνες ο οποίες δίνουν κίνηση στο κοπτικό, αλλά και μηχανικά στοιχεία τα οποία προκαλούν την απόκλιση του κοπτικού και ακολούθως της γεώτρησης προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση (Adjustable Kick Off Subs, AKO).

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα παρουσιαστούν εν συντομία οι υπόγειες τουρμπίνες (Downhole Motors), τα ολοκληρωμένα συστήματα διάτρησης και πλοήγησης, καθώς και ένα παράδειγμα διατρητικής στήλης για την όρυξη οριζόντιας γεώτρησης μέσης ακτίνας.

##### **2.3.4.1 Υπόγειες τουρμπίνες**

Η περιστροφή του κοπτικού για την προχώρηση της γεώτρησης γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η περιστροφή ολόκληρης της διατρητικής στήλης από την επιφάνεια και ο δεύτερος η περιστροφή του κοπτικού μόνο. Ο δεύτερος, επιτυγχάνεται με την προσαρμογή στην στήλη μιας υπόγειας τουρμπίνας η οποία χρησιμοποιώντας την ροή του γεωτρητικού πολφού μέσα από αυτή, κινεί περιστροφικά το κοπτικό.



**Σχήμα 2-11 Σχηματική απεικόνιση συμβατικής υπόγειας τουρμπίνας. (Aguilera et al, 1991)**

Οι μοντέρνες τουρμπίνες είναι θετικής εκτόπισης (Positive Displacement Mud Motors, PDM) και λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της αντλίας Moineau. Οι αντλίες αυτές αποτελούνται από 3 τμήματα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-11**:

- Το σύστημα Ρότορα-Στάτορα (Rotor/Stator)
- Τον άξονα μετάδοσης της κίνησης (Universal Joint Shaft) και
- Το περίβλημα (Bearing Housing)

Ο στάτορας, είναι μια σπειροειδής έλικα από καουτσούκ και περιβάλλει τον ρότορα ο οποίος είναι ατσάλινος ελικοειδής άξονας. Η περιστροφική κίνηση παράγεται ως εξής : Καθώς ο γεωτρητικός πολφός αντλείται και διοχετεύεται μέσα στην τουρμπίνα (στον χώρο μεταξύ του ρότορα και του στάτορα), ο ρότορας εξαναγκάζεται σε κίνηση, έτσι ώστε να περάσει ο πολφός. Η ενέργεια που

συλλέγεται στον ρότορα είναι υδραυλική ενέργεια που δαπανάται από τον πολφό για να περάσει μέσα από την αντλία. Η περιστροφική κίνηση του ρότορα μεταφέρεται στο κοπτικό μέσω του άξονα μετάδοσης της κίνησης, ο οποίος και εξαφανίζει κάθε έκκεντρη κίνηση του ρότορα. Το κοπτικό είναι προσαρμοσμένο στο περίβλημα το οποίο φέρει τα αξονικά και τα εγκάρσια (lateral) φορτία.

Η ταχύτητα περιστροφής αλλά και η ωφέλιμη ροπή που μεταφέρεται στο κοπτικό εξαρτάται από την γεωμετρία του ρότορα και του στάτορα. Η ταχύτητα της

περιστροφής είναι ανάλογη της ροής του γεωτρητικού ρευστού και η ροπή είναι ανάλογη της πτώσης πίεσης του γεωτρητικού πολφού κατά την ροή του μέσα από την τουρμπίνα. Στον **Πίνακα 2-1** φαίνονται τα γενικά χαρακτηριστικά μερικών τουρμπινών της Baker Hughes INTEQ.

**Πίνακας 2-1 Λειτουργικά και τεχνικά στοιχεία υπόγειων τουρμπινών της σειράς Navi-Drill® Ultra της Baker Hughes INTEQ από την έκδοση « Navi Drill® Ultra Series»<sup>1</sup> της ίδιας εταιρείας.**

<b>Navi Drill® Ultra Series Specifications</b>				
<b>Type/Size</b>	<b>3 1/8"</b>	<b>4 3/8"</b>	<b>6 3/4"</b>	<b>9 1/2"</b>
<b>BUR (deg/100ft)</b>	0-40	0-25	0-19	0-10
<b>Flow Rate (Lt/m)</b>	303-606	379-1192	1006-2498	2006-4012
<b>Speed (rpm)</b>	180-365	110-325	90-220	80-165
<b>Operating Differential Pressure (psi)</b>	435	725	465	870
<b>Operating Torque (Nm)</b>	515	1844	3647	14602
<b>Maximum Differential Pressure (psi)</b>	730	1160	745	1380
<b>Maximum Torque (Nm)</b>	814	2956	5830	23361
<b>Maximum Power Output (hp)</b>	27	84	180	338
<b>Length (m)</b>	3.6	5.7	7	10.7

#### 2.3.4.2 Ολοκληρωμένα συστήματα διάτρησης

Τα ολοκληρωμένα συστήματα διάτρησης, αποτελούν ολοκληρωμένη υπηρεσία και καλύπτουν τόσο την διάτρηση της γεώτρησης όσο και την πλοήγηση (οδήγηση) της διατρητικής στήλης προς τον σχηματισμό στόχο. Τα συστήματα αυτά αποτελούν προϊόντα κατοχυρωμένα της κάθε εταιρείας παροχής τέτοιου είδους υπηρεσιών και παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους. Ακόμη, τα ίδια τα συστήματα προσαρμόζονται στις ανάγκες της κάθε περίπτωσης. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα αυτά

<sup>1</sup> Όπως παρουσιάζεται στο site της εταιρίας στο Internet. στην διεύθυνση [www.Bakerhughes.com](http://www.Bakerhughes.com)

αποτελούνται από υπόγεια τουρμπίνα η οποία δίνει κίνηση στο κοπτικό, ένα σύστημα MWD ή LWD υπεύθυνο για την πλοήγηση υπό την έννοια του έλεγχου της θέσης της γεώτρησης και ένα μηχανικό στοιχείο υπεύθυνο για τον προσανατολισμό του κοπτικού στην κατάλληλη διεύθυνση (ΑΚΟ).

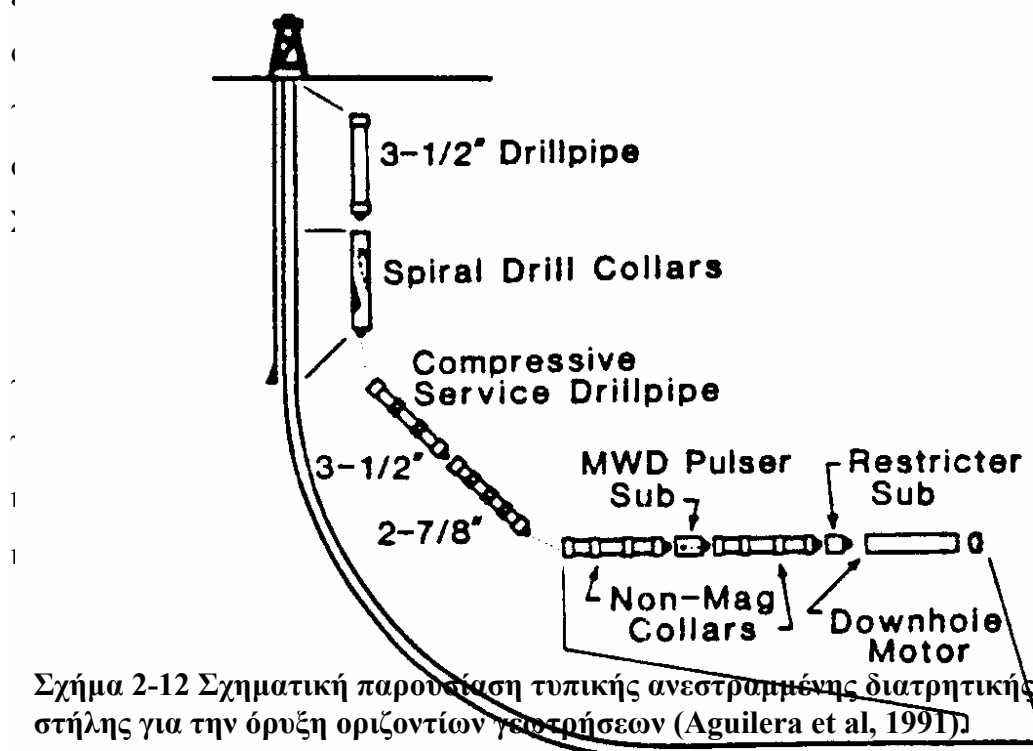
Τα συστήματα MWD ή LWD ποικίλουν από εταιρεία σε εταιρεία. Έτσι σε άλλες εταιρείες χρησιμοποιούνται μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης και σε άλλες πυκνότητας και πυκνότητας νετρονίων. Ακόμη πολλές φορές τα συστήματα αυτά συμπληρώνονται από υπηρεσίες ταυτόχρονης μοντελοποίησης της απόκρισης των σχηματισμών και υποστήριξης αποφάσεων για την πορεία της γεώτρησης.

Τα γενικότερα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων και η αρχιτεκτονική τους καθώς και τα ειδικά μηχανικά στοιχεία (εργαλεία) τα οποία προσαρμόζονται σε αυτά εξαρτώνται από τις απαιτήσεις για τον ρυθμό αύξησης της κλίσης αλλά και από τις γενικότερες συνθήκες που επικρατούν.

Στο **Παράρτημα Ε** παρουσιάζονται τα σύστημα NaviGator™ της Baker Hughes INTEQ και το StrataSteer™ της Halliburton Energy Services Inc.

#### 2.3.4.3 Αρχιτεκτονική διατρητικής στήλης

Η αρχιτεκτονική της διατρητικής στήλης για την όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων, εξαστάται σε μεγάλο βαθμό από την σχεδιαζόμενη γεωμετρία της γεώτρησης. Πρώτα



Σχήμα 2-12 Σχηματική παρουσίαση τυπικής ανεστραμμένης διατρητικής στήλης για την όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων (Aguilera et al, 1991)



με μεγάλη γωνία κλίσης (dog legs) επιδιώκεται να βρίσκονται σε θλιπτική καταπόνηση. Έτσι επιτυγχάνονται μέσοι ρυθμοί αύξησης της κλίσης,  $20^{\circ}/100\text{ ft}$  χωρίς σημαντικές ζημιές στην διατρητική στήλη (Aguilera et al, 1991). Μια τυπική ανεστραμμένη διατρητική στήλη για την όρυξη οριζοντίων γεωτρήσεων μέσης ακτίνας φαίνεται στο **Σχήμα 2-12**.

### **2.3.5 Μεταφορά θρυμμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις**

Μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες του γεωτρητικού πολφού στην διαδικασία της διάτρησης μιας γεώτρησης, είναι ο καθαρισμός του κοπτικού και η μεταφορά των θρυμμάτων του πετρώματος στην επιφάνεια. Ο έλεγχος των ιδιοτήτων του πολφού και των συνθηκών ροής είναι απαραίτητος για την επίτευξη της παραπάνω λειτουργίας. Τα προϊόντα της θραύσης του πετρώματος, έχουν ειδική πυκνότητα περίπου  $2,5\text{ g/cc}$ , ενώ ο μέσος γεωτρητικός πολφός μεταξύ  $0,9$  και  $1,5\text{ g/cc}$ . Καθώς τα θρύμματα είναι βαρύτερα του πολφού θα βυθιστούν ακολουθώντας τον άξονα της βαρύτητας. Είναι προφανές ότι σε μια κατακόρυφη γεώτρηση, ο άξονας αυτός συμπίπτει με τον άξονα της γεώτρησης και τα θρύμματα τείνουν να βυθιστούν με φορά αντίθετη προς την ροή του πολφού. Αντίθετα, σε μια οριζόντια, τα θρύμματα βυθίζονται κάθετα προς τον άξονα της γεώτρησης. Η ταχύτητα βύθισης, εξαρτάται από τις συνθήκες ροής, το μέγεθος και το σχήμα των θρυμμάτων και την διαφορά πυκνότητας.

Σε μια κατακόρυφη γεώτρηση, η ροή του πολφού έχει ίδια διεύθυνση αλλά αντίθετη φορά από την βύθιση των θρυμμάτων, με αποτέλεσμα την ανύψωση των θρυμμάτων και μεταφορά τους στην επιφάνεια, (εάν η ταχύτητα του πολφού είναι μεγαλύτερη από αυτή της βύθισης). Σε μια οριζόντια γεώτρηση, τα θρύμματα καθιζάνουν στο δάπεδο της γεώτρησης και απομακρύνονται μόνο εάν η ροή του πολφού είναι ικανή να τα ανασηκώνει συνεχώς και να τα μεταφέρει κατά μήκος του άξονα της γεώτρησης. Στην περίπτωση των κεκλιμένων γεωτρήσεων, τα θρύμματα καθιζάνουν στο δάπεδο της γεώτρησης και μπορούν να βυθίζονται συνεχώς με κύλιση κατά τον άξονα της γεώτρησης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συνήθως σε γεωτρήσεις με κλίση μεταξύ  $50^{\circ}$  και  $70^{\circ}$  (Seeberger et al., 1989 από Aguilera et al 1991).

Η ροή του γεωτρητικού πολφού κατά την όρυξη μιας οριζόντιας γεώτρησης, παρουσιάζει αναλογίες με την διφασική ροή σε οριζόντιο σωλήνα. Ένα χαρακτηριστικό της διφασικής ροής είναι ότι τόσο η υγρή όσο και η στερεή φάση, παραμένουν διακριτές μεταξύ τους. Η περίπτωση κατά την οποία τα θρύμματα είναι πολύ μικρού μεγέθους και παραμένουν αιωρούμενα στην υγρή φάση, δεν είναι επιθυμητή διότι αν και ο καθαρισμός της γεώτρησης σε αυτή την περίπτωση είναι καλός, ο έλεγχος του πολφού, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του (πυκνότητα, ιξώδες κ.α.), είναι αδύνατος. Κατά την διάτρηση, προσπάθεια γίνεται για την απομάκρυνση των θρυμμάτων ως διαφορετική (στερεή) φάση, προτού αυτά ενσωματωθούν ανεπιστρεπτί στην υγρή φάση.

Από παρατηρήσεις μεταφοράς στερεών από υγρή φάση μέσα σε οριζόντιους σωλήνες, φαίνεται ότι το μέγεθος των στερεών είναι αποφασιστικός παράγοντας για την μηχανική της μεταφοράς (Bain and Bonnington, 1970 από Aguilera et al 1991). Πράγματι, στερεά τεμάχια μικρότερα από 40  $\mu\text{m}$  σχηματίζουν κολλοειδές αιώρημα με την υγρή φάση, στερεά μεταξύ 40 και 120  $\mu\text{m}$  μπορούν να απομακρυνθούν από την υγρή φάση (συνήθως μόνο με φυγόκεντρους διαχωριστές) και στερεά μεγαλύτερα των 120  $\mu\text{m}$  καθιζάνουν λόγω της βαρύτητας.

Η μεταφορά των θρυμμάτων στις οριζόντιες γεωτρήσεις γίνεται με διατήρηση ετερογενούς αιωρήματος ή με μια πιο πολύπλοκη διαδικασία που στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως «saltation». Κατά την διαδικασία αυτή, τα στερεά καθιζάνουν για μικρό χρόνο στο δάπεδο της γεώτρησης, έως ότου ανασηκωθούν λόγω της ροής του γεωτρητικού πολφού (υγρή φάση) για να εναποθετηθούν λίγο παραπέρα κατά μήκος της γεώτρησης.

Σημαντικό ρόλο στην μεταφορά των θρυμμάτων προς την επιφάνεια, έχει η περιστροφή της διατρητικής στήλης. Αυτό διότι με την περιστροφή της στήλης, τα θρύμματα που εγκλωβίζονται ανάμεσα στα στελέχη της στήλης και τα τοιχώματα της γεώτρησης, λειοτριβούνται, με αποτέλεσμα την καλύτερη μεταφορά. Ακόμη, εργαλεία όπως οι σταθεροποιητές (stabilizers) αναμοχλεύουν το στρώμα των θρυμμάτων που δημιουργείται στο δάπεδο της γεώτρησης με ευεργετικά αποτελέσματα. Η περιστροφή της στήλης, τείνει να δημιουργεί εγκάρσια ροή (crossflow) όταν η ροή του πολφού είναι

γραμμική, με αποτέλεσμα την ανύψωση σωματιδίων που έχουν κατακαθίσει στο δάπεδο της γεώτρησης. Σημειώνεται εδώ, ότι η διάτρηση οριζοντίων γεωτρήσεων με περιστροφή της στήλης γίνεται μόνον όταν η στήλη και το κοπτικό είναι προσανατολισμένα προς την επιθυμητή διεύθυνση. Κατά τον προσανατολισμό της στήλης (οδήγηση), η διάτρηση γίνεται με περιστροφή μόνο του κοπτικού με χρήση υπόγειας τουρμπίνας.

### **3. Γεωφυσικές διαγραφίες και αξιολόγηση σχηματισμών**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Οι γεωφυσικές διαγραφίες, παρουσιάστηκαν στην βιομηχανία του πετρελαίου πριν από περισσότερο από μισό αιώνα. Η πρώτη διαγραφή ήταν ηλεκτρικής αντίστασης και πραγματοποιήθηκε το 1927 σε μια γεώτρηση στην Βορειοανατολική Γαλλία. Από τότε, μεγάλη πρόοδος έχει σημειωθεί. Πολλές και διαφορετικές διαγραφίες εμφανίστηκαν, ενώ τόσο οι συσκευές όσο και τα εργαλεία αξιολόγησης τους εξελίσσονται συνεχώς. Σήμερα, η λεπτομερής ανάλυση μιας σειράς προσεκτικά επιλεγμένων διαγραφιών, παρέχει μια μέθοδο υπολογισμού ή εκτίμησης ακριβών τιμών για βασικές παραμέτρους ενός ταμιευτήρα, όπως είναι οι βαθμοί κορεσμού σε ρευστά (υδρογονάνθρακες και νερό), το πορώδες, η διαπερατότητα και η λιθολογία.

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι γεωφυσικών διαγραφιών, οι αρχές λειτουργίας τους και οι αντίστοιχες συσκευές. Εδώ οι συσκευές παρουσιάζονται στην «κλασσική» τους μορφή (wireline) όπου η επικοινωνία με την επιφάνεια επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικού καλωδίου και οι συσκευές κατεβάζονται στην γεώτρηση με χρήση της βαρύτητας ή με χρήση διατρητικών στελεχών. Αυτό, για δύο λόγους: για την κατανόηση των διαγραφιών που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του ταμιευτήρα της Εφαρμογής (Κεφάλαιο 7) από την κατακόρυφη πιλοτική γεώτρηση και διότι σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι περισσότερο η κατανόηση των αρχών αλληλεπίδρασης του κάθε τύπου διαγραφίας με τον σχηματισμό υπό έλεγχο, παρά η λεπτομερής παρουσίαση των αντίστοιχων συσκευών.

#### **3.2 Βασικοί τύποι διαγραφιών και αρχές λειτουργίας**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι διαγραφιών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και οι αντίστοιχες συσκευές, καθώς και οι αρχές λειτουργίας τους.

### 3.2.1 Φυσικού ή Ιδίου Δυναμικού

Η διαγραφία φυσικού ή ιδίου δυναμικού (Spontaneous Potential, SP), είναι καταγραφή συναρτήσεως του βάθους, της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ ενός κινούμενου μέσα στην γεώτρηση και ενός σταθερού στην επιφάνεια, ηλεκτροδίου.

Οι χρήσεις της διαγραφίας αυτής, είναι σε γενικές γραμμές οι κάτωθι :

- Ο διαχωρισμός μεταξύ περατών (ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, δολομίτης) και αδιαπέρατων (αργίλων, αργιλικών σχιστόλιθων) σχηματισμών.
- Ο ορισμός των ορίων των διαφόρων στρωμάτων και η συσχέτιση διαφορετικών διαγραφιών μεταξύ τους.
- Η ποσοτική εκτίμηση του αργιλικού περιεχομένου των σχηματισμών.
- Η λιθολογική (ορυκτολογική) αναγνώριση των σχηματισμών (επικουρικά).
- Ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού των σχηματισμών.

Η καμπύλη φυσικού δυναμικού απέναντι σε αργιλικούς σχιστόλιθους, είναι περίπου ευθεία και ορίζει την βασική γραμμή των σχιστόλιθων (shale baseline). Αντίθετα απέναντι σε περατούς σχηματισμούς αποκλίνει προς τα δεξιά (θετική απόκλιση) ή τα αριστερά (αρνητική απόκλιση). Η φορά της απόκλισης εξαρτάται από την σχετική αλατότητα του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού και του νερού του σχηματισμού. Εάν η αλατότητα του νερού είναι μεγαλύτερη, τότε η απόκλιση είναι αρνητική ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν η αλατότητα του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού είναι μεγαλύτερη. Απέναντι σε περατούς σχηματισμούς με μεγάλο πάχος, η απόκριση τείνει να σταθεροποιείται σχηματίζοντας την γραμμή των ψαμμιτών (sand line).

Το δυναμικό το οποίο καταγράφεται από την διαγραφία φυσικού δυναμικού, οφείλεται σε ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία διατρέχουν τον γεωτρητικό πολφό και

οφείλονται σε ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που παρουσιάζονται μέσα στον σχηματισμό και είναι ηλεκτροχημικής ή ηλεκτροκινητικής προέλευσης.

Η καταγραφή του φυσικού δυναμικού, είναι δυνατή μόνον εάν ο γεωτρητικός πολφός που πληροί την γεώτρηση, είναι αγωγίμος διότι στην αντίθετη περίπτωση, δεν είναι δυνατή η ηλεκτρική επαφή των ηλεκτροδίων της συσκευής καταγραφής και του σχηματισμού.

### 3.2.2 Ακτινών Γάμα (Gamma Ray)

Η διαγραφή ακτινών γάμα είναι μέτρηση συναρτήσει του βάθους, της φυσικής ραδιενέργειας των σχηματισμών. Σε ιζηματογενείς σχηματισμούς, η διαγραφή αντικατοπτρίζει το αργλικό περιεχόμενο αυτών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ραδιενεργά στοιχεία τείνουν να συγκεντρώνονται σε πηλούς και αργίλους. Καθαροί σχηματισμοί (clean formations), με μηδενικό δηλαδή αργλικό περιεχόμενο, εκπέμπουν συνήθως ελάχιστη ραδιενέργεια, εκτός από την περίπτωση κατά την οποία περιέχουν ραδιενεργό υλικό όπως ηφαιστειακή στάχτη.

Η διαγραφή φυσικής ραδιενέργειας, χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό των διαφόρων οριζόντων και σε ορισμένες περιπτώσεις για τον ποσοτικό προσδιορισμό του αργλικού περιεχόμενου των σχηματισμών.

Οι ακτίνες γάμα, είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής ενέργειας που εκπέμπονται από ραδιενεργά στοιχεία. Σχεδόν όλη η ακτινοβολία γάμα που εκπέμπεται στην Γη οφείλεται στο ραδιενεργό ισότοπο του καλίου με ατομικό βάρος 40 ( $K^{40}$ ) και στα ραδιενεργά στοιχεία των σειρών του Ουρανίου και του Θορίου. Η ακτινοβολία γάμα του σχηματισμού υπό έλεγχο, καταγράφεται από την συσκευή της διαγραφής, η απόκριση της οποίας, μετά από τις διορθώσεις, είναι ανάλογη της κατά βάρος περιεκτικότητας του σχηματισμού σε ραδιενεργά στοιχεία.

Η συσκευή διασκόπησης ακτινών γάμα αποτελείται από ανιχνευτή ακτινοβολίας γάμα ο οποίος είναι πλέον απαριθμητής σπινθηρισμών οι οποίοι αντικατέστησαν τους μετρητές Geiger-Mueller.

Το βάθος διασκόπησης της συσκευής, σε ιζηματογενείς σχηματισμούς είναι περίπου ένα πόδι (1 ft)

### **3.2.3 Διαγραφίες Πορώδους**

#### **3.2.3.1 Ακουστικές διαγραφίες**

Η συσκευή ακουστικών διαγραφιών, στη πιο απλή της μορφή, αποτελείται από έναν πομπό ο οποίος εκπέμπει έναν ηχητικό παλμό και έναν δέκτη (γεώφωνο) ο οποίος ανιχνεύει και καταγράφει τον παλμό καθώς φθάνει σε αυτόν. Η ακουστική διαγραφή είναι μια απλή καταγραφή, συναρτήσεως του βάθους, του χρόνου  $t$  που απαιτείται για να διανύσει ένας ηχητικός παλμός την απόσταση ενός ποδιού (1ft) μέσα στον σχηματισμό. Το χρονικό διάστημα αυτό, καλείται χρόνος διαδρομής (transit time) ή βραδύτητα (slowness). Ο χρόνος διαδρομής, εξαρτάται από την λιθολογία και το πορώδες του σχηματισμού μέσα στον οποίο μεταδίδεται ο ηχητικός παλμός. Αυτή η εξάρτηση καθιστά τις ακουστικές διαγραφίες ιδιαίτερα χρήσιμες στον προσδιορισμό του πορώδους, όταν είναι γνωστή η λιθολογία. Εκτός από τον χρόνο διαδρομής, καταγράφεται και ο συνολικός χρόνος διαδρομής (Integrated Transit Time) που είναι το άθροισμα όλων των χρόνων διαδρομής, που αναφέρονται στον ίδιο σχηματισμό και είναι πολύ χρήσιμος στην ερμηνεία σεισμικών καταγραφών ανάκλασης.

Η διάδοση ακουστικών παλμών σε μια γεώτρηση, είναι ιδιαίτερα περίπλοκο φαινόμενο και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υπό μελέτη σχηματισμού, της στήλης του γεωτρητικού πολφού, αλλά και της ίδιας της συσκευής διαγράφισης. Ο ακουστικός παλμός παράγεται στην πηγή, διαδίδεται μέσα στην μάζα του γεωτρητικού πολφού ως κύμα πίεσης και προσπίπτει στα τοιχώματα του φρεατίου. Εκεί δημιουργούνται επιμήκη και εγκάρσια κύματα, που διαδίδονται μέσα στην μάζα του σχηματισμού, επιφανειακά κύματα που διαδίδονται κατά μήκος των τοιχωμάτων του φρεατίου και απευθείας κύματα που διαδίδονται μέσα στην στήλη του πολφού. Τα κύματα τα οποία καταγράφονται και χρησιμοποιούνται για την καταγραφή του χρόνου διαδρομής είναι τα επιμήκη. Τα κύματα αυτά παράγονται στον σχηματισμό υπό έλεγχο, όταν το κύμα πίεσης που παράγεται στην πηγή και φθάνει στον σχηματισμό μέσω του

γεωτρητικού πολφού, διαθλάται στα τοιχώματα του φρεατίου. Διαδίδονται μέσα στον σχηματισμό και προς τα γεώφωνα, με ταχύτητα που είναι χαρακτηριστική για κάθε σχηματισμό και είναι αυτή τη διάδοσης επιμηκών σεισμικών κυμάτων. Τα επιμήκη κύματα αποτελούν την πρώτη καταγραφή στα γεώφωνα λόγω του ότι η ταχύτητα διάδοσης των επιμηκών κυμάτων στον σχηματισμό, είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων (κύματα πίεσης) στον πολφό.

Η τυπική συσκευή ηχητικών διαγραφιών BHC<sup>1</sup> (Borehole Compensated sonic tool), χρησιμοποιεί έναν πομπό επάνω και έναν κάτω από δύο ζεύγη γεωφώνων. Οι δύο πομποί εκπέμπουν εναλλάξ και οι χρόνοι διαδρομής καταγράφονται στα γεώφωνα. Η διάταξη αυτή ελαττώνει σημαντικά τα σφάλματα που προκύπτουν από τις μεταβολές στην διάμετρο της γεώτρησης, αλλά και τα σφάλματα λόγω της απόκλισης της κλίσης της συσκευής από την κατακόρυφο.

### **3.2.3.2 Διαγραφή Πυκνότητας**

Οι διαγραφίες πυκνότητας, χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό του πορώδους. Άλλες εφαρμογές, είναι η αναγνώριση ορυκτών σε εβαποριτικές αποθέσεις, η ανίχνευση φυσικού αερίου καθώς και ο υπολογισμός της πίεσης των υπερκειμένων και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών.

Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής. Μια ραδιενεργή πηγή εφάπτεται στο τοίχωμα της γεώτρησης προς την κατεύθυνση του οποίου εκπέμπει μέσης ενέργειας ακτίνες γάμα. Αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως σωματίδια υψηλής ταχύτητας, τα οποία συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια του σχηματισμού. Σε κάθε σύγκρουση η ακτίνες γάμα χάνουν ένα ποσοστό της ενέργειας τους και σκεδάζονται (φαινόμενο Compton). Οι ακτίνες αυτές ανιχνεύονται κατόπιν από τον ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται σε σταθερή απόσταση από την πηγή, ως ένδειξη της πυκνότητας του σχηματισμού.

Ο αριθμός των συγκρούσεων και επομένως ο αριθμός των ακτινών γάμα που καταγράφονται στον ανιχνευτή, είναι ευθέως ανάλογος της πυκνότητας των ηλεκτρονίων στον σχηματισμό (αριθμός ηλεκτρονίων ανά κυβικό εκατοστό). Η



τελευταία, εξαρτάται από την μαζική πυκνότητα, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την πυκνότητα του ιστού (matrix) και το πορώδες του σχηματισμού καθώς και από την πυκνότητα των ρευστών που γεμίζουν τους πόρους.

### 3.2.3.3 Διαγραφία Νετρονίων

Οι διαγραφίες νετρονίων, χρησιμοποιούνται κυρίως για τον διαχωρισμό σχηματισμών με πορώδες και τον προσδιορισμό του πορώδους τους. Σε “καθαρούς” σχηματισμούς (με μηδενικό ή ελάχιστο περιεχόμενο αργίλων), που περιέχουν νερό ή υδρογονάνθρακες, αντικατοπτρίζουν το γεμάτο με ρευστό πορώδες, καθώς αποκρίνονται κυρίως στο περιεχόμενο στον σχηματισμό υδρογόνο. Για τον ακριβή προσδιορισμό του πορώδους και της λιθολογίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλη διαγραφία πορώδους, ενώ μπορούν να αποδώσουν και εκτίμηση για το αργλικό περιεχόμενο.

Η αρχή λειτουργίας είναι η ακόλουθη: Τα νετρόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα υποατομικά σωματίδια με μάζα σχεδόν ίση με αυτή του ατόμου του υδρογόνου. Από την ραδιενεργή πηγή (στα σύγχρονα εργαλεία χρησιμοποιούνται τα στοιχεία Αμερίκιο και Βηρύλλιο (Am-Be)) της συσκευής, εκπέμπονται συνεχώς νετρόνια υψηλής ενέργειας (ταχύτητας), τα οποία συγκρούονται με τους πυρήνες των στοιχείων του σχηματισμού, με τρόπο σχεδόν ελαστικό. Με κάθε σύγκρουση τα νετρόνια χάνουν και ένα ποσοστό της ενέργειας τους. Η ποσότητα της ενέργειας που χάνεται, εξαρτάται από την διαφορά μάζας μεταξύ του πυρήνα και του νετρονίου. Η μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν η μάζα του πυρήνα-στόχου είναι σχεδόν ίση με αυτή του νετρονίου, όπως συμβαίνει με το υδρογόνο. Αντιθέτως, μια σύγκρουση με πυρήνα μεγάλης μάζας, δεν επιβραδύνει σημαντικά το νετρόνιο. Είναι εμφανές ότι οι ενεργειακές απώλειες των νετρονίων εξαρτώνται κυρίως από την ποσότητα του στοιχείου υδρογόνου στον σχηματισμό. Μέσα σε διάστημα μερικών μικροδευτερολέπτων τα νετρόνια επιβραδύνονται λόγω των διαδοχικών συγκρούσεων σε θερμικές ταχύτητες (που αντιστοιχούν σε ενέργεια 0,025 eV περίπου) και διαχέονται χωρίς να χάνουν άλλη ενέργεια έως ότου παγιδευτούν από τον πυρήνα κάποιου

---

<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger

στοιχείου όπως το χλώριο, το υδρογόνο ή το πυρίτιο. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή από τον πυρήνα μιας ακτίνας γάμα υψηλής ενέργειας. Ανάλογα με την συσκευή από τον ανιχνευτή καταγράφονται αυτές οι ακτίνες γάμα ή τα θερμικά νετρόνια.

Όταν το περιεχόμενο του σχηματισμού σε υδρογόνου είναι μεγάλο, τότε τα νετρόνια επιβραδύνονται και απορροφούνται από πυρήνες σε μικρή απόσταση από την πηγή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου είναι μικρή. Είναι φανερό ότι οι καταγραφές στον ανιχνευτή αυξάνονται αντιστρόφως ανάλογα με την συγκέντρωση του υδρογόνου στον σχηματισμό. Σημειώνοντας ότι η διακύμανση στην περιεκτικότητα του σχηματισμού σε υδρογόνο θα οφείλεται στην παρουσία νερού ή υδρογονανθράκων ή στην απουσία αυτών, γίνεται φανερός ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη διαγραφή για τον προσδιορισμό του πορώδους.

### 3.2.4 Διαγραφή LDL/CNL

Ιδιαίτερη παράγραφος αφιερώνεται στη διαγραφή LDL/CNL για τον λόγο του ότι χρησιμοποιήθηκε στην αξιολόγηση του ταμιευτήρα της Εφαρμογής. Η μεθοδολογία αξιολόγησης της διαγραφής φαίνεται στο Κεφάλαιο 7

Η διαγραφή αυτή, προκύπτει από τον συνδυασμό των συσκευών (και αντίστοιχων διαγραφιών) Litho-Density<sup>1</sup> Log (LDL) και Compensated Neutron Log (CNL). Η πρώτη συσκευή, παράγει διαγραφή μαζικής πυκνότητας και φωτοηλεκτρικής απορρόφησης. Η φωτοηλεκτρική απορρόφηση ( $P_e$ ) ενός στοιχείου συνδέεται με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου ( $Z$ ) σύμφωνα με την σχέση :

$$P_e = \left( \frac{Z^{3.6}}{10} \right)$$

Η μέτρηση της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης μπορεί να συσχετισθεί με την λιθολογία του σχηματισμού υπό εξέταση καθώς αποκρίνεται πρωτίστως στον ιστό του

---

<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger

πετρώματος και δευτερευόντως στο πορώδες και τα περιεχόμενα ρευστά σε αντίθεση με την μέτρηση μαζικής πυκνότητας η οποία αποκρίνεται πρωτίστως στο πορώδες και τα περιεχόμενα ρευστά και δευτερευόντως στον ιστό του πετρώματος.

Η συσκευή φέρει πέλμα (pad) ή φορείο (skid) στο οποίο είναι προσαρμοσμένα, η πηγή των ακτινών γάμα και δύο ανιχνευτές, σε διαφορετική απόσταση από την πηγή ο καθένας, το οποίο και πιέζεται επάνω στο τοίχωμα της γεώτρησης με την βοήθεια ενός βραχίονα. Από την πηγή εκπέμπονται προς τον σχηματισμό ακτίνες γάμα ενέργειας 662 keV, οι οποίες και διαχέονται στην μάζα του, έως ότου απορροφηθούν μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στους ανιχνευτές καταγράφεται η ακτινοβολία γάμα που παράγεται και αναλύεται το ενεργειακό της φάσμα. Από το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων γάμα στον απομακρυσμένο ανιχνευτή υπολογίζονται η μαζική πυκνότητα και η τιμή της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης. Το φάσμα των ακτινών γάμα στον ανιχνευτή πλησίον της πηγής, χρησιμοποιείται μόνο για την διόρθωση της απόκρισης του απομακρυσμένου ανιχνευτή για τις επιδράσεις του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού (mud cake) και της τραχύτητας των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

Η δεύτερη συσκευή (CNL), παράγει διαγραφίες νετρονίων οι οποίες όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενη παράγραφο, αντικατοπτρίζουν το πληρωμένο με ρευστό (νερό ή υδρογονάνθρακες) πορώδες. Η συσκευή CNL ανιχνεύει θερμικά νετρόνια και είναι ειδικά σχεδιασμένη έτσι ώστε να συνδυάζεται με οποιαδήποτε από μια σειρά άλλων συσκευών παρέχοντας ταυτόχρονη διαγραφή νετρονίων. Η πηγή νετρονίων που χρησιμοποιείται είναι ισχύος 16 Curie και αποτελείται από τα στοιχεία Αμερίκιο (Am) και Βηρύλλιο (Be) ενώ η απόσταση μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή είναι μεγαλύτερη από άλλες, του ίδιου τύπου, συσκευές (π.χ. Sidewall Neutron Porosity, SNP) με αποτέλεσμα μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης (περίπου 10 in σε πέτρωμα υψηλού πορώδους). Γενικά το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από το πορώδες του σχηματισμού (το βάθος διασκόπησης της συσκευής σε πέτρωμα μηδενικού πορώδους είναι χονδρικά 1ft). Για υψηλότερες τιμές του πορώδους και όταν η γεώτρηση είναι γεμάτη με ρευστό, το βάθος διασκόπησης είναι μικρότερο διότι τα νετρόνια επιβραδύνονται και απορροφώνται πιο κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης.

### 3.2.5 Διαγραφίες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός σχηματισμού, είναι απαραίτητη παράμετρος για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε υδρογονάνθρακες. Αυτό οφείλεται στο ότι όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί (με ελάχιστες εξαιρέσεις όπως ο γραφίτης) είναι πολύ καλοί μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα που εμφανίζουν, οφείλεται στο περιεχόμενο νερό. Το νερό αυτό μπορεί να πληροί τους πόρους του σχηματισμού, ή να είναι προσροφημένο στους αργίλους που ενδεχομένως υπάρχουν στην μάζα των σχηματισμών. Άλλωστε, πολύ σπάνια απαντάται εντελώς ξηρός σχηματισμός. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,2 και 1000  $\Omega\text{m}$  ( $\Omega\text{m}$  μέτρα)

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης ενός σχηματισμού, γίνεται με δύο κυρίως τρόπους : με διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της μάζας του σχηματισμού και μέτρηση της ευκολίας με την οποία αυτό διαρρέει τον σχηματισμό ή με την δημιουργία ρεύματος επαγωγής στον σχηματισμό και μέτρηση του μεγέθους του. Ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού, προκύπτουν και οι διάφορες ηλεκτρικές διαγραφίες.

Αντικειμενικός σκοπός των ηλεκτρικών διαγραφιών είναι ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αντίστασης του αδιατάρακτου από τα ρευστά της γεώτρησης σχηματισμού, της πραγματικής δηλαδή ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού. Απαραίτητος για τον σκοπό αυτό είναι ο προσδιορισμός του προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού από το τοίχωμα της γεώτρησης και το επίχρισμα πολφού (mud cake) έως και τον αδιατάρακτο σχηματισμό. Αυτό διότι δεν υπάρχει μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης η οποία δεν επηρεάζεται από την ζώνη διείσδυσης αφενός αλλά και τόσο μεγάλου βάθους διασκόπησης αφετέρου. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές συσκευές μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης (και αντίστοιχες διαγραφίες) με διαφορετικό βάθος διασκόπησης. Σήμερα χρησιμοποιούνται εργαλεία τα οποία αποδίδουν πολλές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, με διαφορετικό βάθος διασκόπησης η κάθε μία και όλες μαζί αποτελούν την διαγραφή ηλεκτρικής αντίστασης. Η αξιολόγηση κατόπιν της διαγραφίας, έχει ως σκοπό την εκτίμηση του προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι δυνατή η εξάλειψη

της επίδρασης της ζώνης διείσδυσης από την μέτρηση με το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης και την εκτίμηση της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του αδιατάρακτου σχηματισμού ( $R_t$ ).

Σήμερα οι διαγραφίες ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται το περισσότερο, είναι οι διαγραφίες ηλεκτροδίων εστίασης (Focusing Electrode Logs), χρησιμοποιώντας συσκευές οι οποίες εστιάζουν το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον σχηματισμό υπό έλεγχο στον ίδιο τον σχηματισμό με σκοπό να εξαλειφθούν οι επιδράσεις των γειτονικών σχηματισμών αλλά και της γεώτρησης. Στις κλασσικές ηλεκτρικές διαγραφίες, το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει τόσο τον σχηματισμό υπό έλεγχο όσο και τους γειτονικούς σχηματισμούς, τον αγωγίμο γεωτρητικό πολφό και το επίχρισμα του γεωτρητικού πολφού με αποτέλεσμα η μέτρηση να απέχει της πραγματικής. Σημειώνουμε εδώ ότι για την χρήση των συσκευών αυτών είναι απαραίτητο να είναι αγωγίμος ο γεωτρητικός πολφός.

Στην περίπτωση όπου ο γεωτρητικός πολφός έχει ως βάση το πετρέλαιο ή χρησιμοποιείται αέρας, στις περιπτώσεις δηλαδή όπου ο πολφός δεν είναι αγωγίμος χρησιμοποιούνται οι διαγραφίες επαγωγής. Οι συσκευές επαγωγής αποτελούνται στην απλή τους μορφή από ένα πηνίο πομπό και ένα δέκτη. Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας και σταθερής έντασης διοχετεύεται στο πηνίο πομπό, γύρω από το οποίο δημιουργείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο με την σειρά του δημιουργεί επαγωγικά ρεύματα στην μάζα του σχηματισμού. Τα ρεύματα αυτά κινούνται κυκλικά γύρω από την γεώτρηση, ομοαξονικά με το πηνίο πομπό, και δημιουργούν δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί δυναμικό από επαγωγή στο πηνίο δέκτη. Το δυναμικό στα άκρα του πηνίου δέκτη είναι ανάλογο των ρευμάτων επαγωγής που διαρρέουν τον σχηματισμό και αυτά ανάλογα της αγωγιμότητας του σχηματισμού, διότι το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο πομπό είναι σταθερής συχνότητας και έντασης. Είναι εμφανές ότι το δυναμικό στον δέκτη είναι ανάλογο της αγωγιμότητας του σχηματισμού. Αν και οι συσκευές επαγωγής λειτουργούν καλύτερα όταν ο γεωτρητικός πολφός είναι μονωτής (πετρέλαιο ή αέρας) λειτουργούν εξίσου καλά και με αγωγίμους πολφούς, εκτός και εάν έχουν πολύ υψηλή αλατότητα (χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση), ή οι σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερα υψηλή αντίσταση ή, η διάμετρος της γεώτρησης είναι πολύ μεγάλη.

Στις δύο παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικότερα το σύστημα διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης Dual Laterolog- $R_{xo}$ <sup>1</sup> (DLL  $R_{xo}$ ) και η αρχή λειτουργίας των συστημάτων μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης με διάδοση (propagation) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτό διότι η συσκευή DLL- $R_{xo}$  αφενός χρησιμοποιείται ευρέως και αφετέρου χρησιμοποιήθηκε στην κάθετη πιλοτική γεώτρηση που πραγματοποιήθηκε στον ταμιευτήρα της Εφαρμογής ενώ όλα τα συστήματα LWD χρησιμοποιούν συσκευές του τύπου της διάδοσης (propagation) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η μεθοδολογία της αξιολόγησης της διαγραφίας DLL- $R_{xo}$  φαίνεται στο Κεφάλαιο 7

### 3.2.5.1 Σύστημα Dual Laterolog- $R_{xo}$

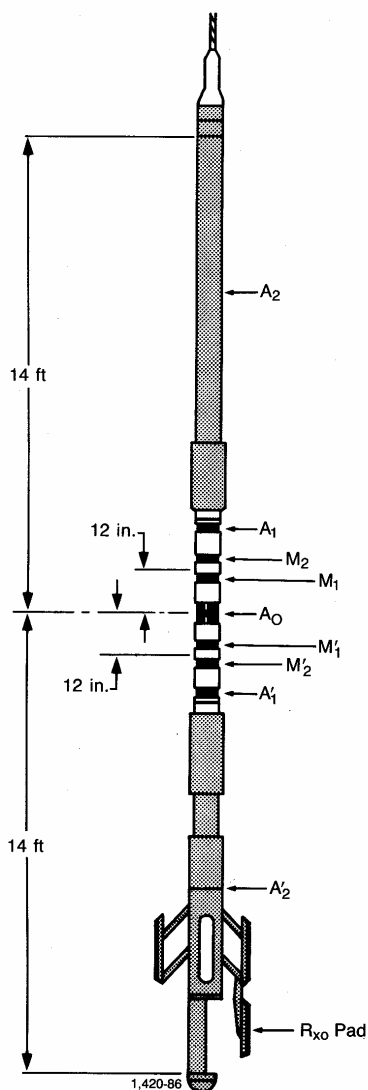
Αντικειμενικός σκοπός κάθε συσκευής διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης είναι η μέτρηση της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του αδιατάρακτου από τα γεωτρητικά ρευστά τμήματος του ταμιευτήρα. Δυστυχώς δεν υπάρχει μία μόνη μέτρηση η οποία δεν επηρεάζεται από την ζώνη διείσδυσης. Λύση αποτελεί ο προσδιορισμός του προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης από το τοίχωμα της γεώτρησης και έως τον αδιατάρακτο σχηματισμό σε τέτοιο βαθμό ώστε να υπολογίζεται με ακρίβεια η πραγματική ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού. Αυτό είναι δυνατό με την χρήση περισσότερων διατάξεων ηλεκτροδίων (συνήθως τριών) με διαφορετικό βάθος διασκόπησης η κάθε μία με αποτέλεσμα οι μετρήσεις που προκύπτουν να προσδιορίζουν επαρκώς το προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την ακρίβεια της ερμηνείας των διαγραφιών που προκύπτουν, οι συσκευές που συνδυάζονται είναι απαραίτητο να έχουν μερικά επιθυμητά στοιχεία :

- Η επίδραση της γεώτρησης στις μετρήσεις (τραχύτητα τοιχωμάτων, λόγος ηλεκτρικής αντίστασης του γεωτρητικού πολφού προς την ίδια του σχηματισμού, κ.α.) θα πρέπει να είναι μικρή ή/και διορθώσιμη.

---

<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger.



**Laterolog -R<sub>xo</sub> Device.  
(Schlumberger Log  
Interpretation Principles  
Applications 1989)**

- Η κάθετη αναλυτική ικανότητα των συσκευών θα πρέπει να είναι παρόμοια.
- Η ακτινική διασκόπηση (τα βάθη διασκόπησης δηλαδή) θα πρέπει να είναι κατανεμημένη. Δηλαδή μια μέτρηση θα πρέπει έχει βάθος διασκόπησης τόσο μεγάλο όσο είναι πρακτικώς δυνατό, μια πολύ μικρό και μια τρίτη ενδιάμεσο.

Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη του συστήματος Dual Laterolog-R<sub>xo</sub> (**Σχήμα 3-1**) το οποίο αποτελεί συνδυασμό δύο συσκευών που είχαν αναπτυχθεί ξεχωριστά και χρησιμοποιούνται και ξεχωριστά. Οι συσκευές αυτές είναι η Dual Laterolog (DLL)<sup>1</sup> και η Micro Spherically Focused Log (MicroSFL)<sup>1</sup>.

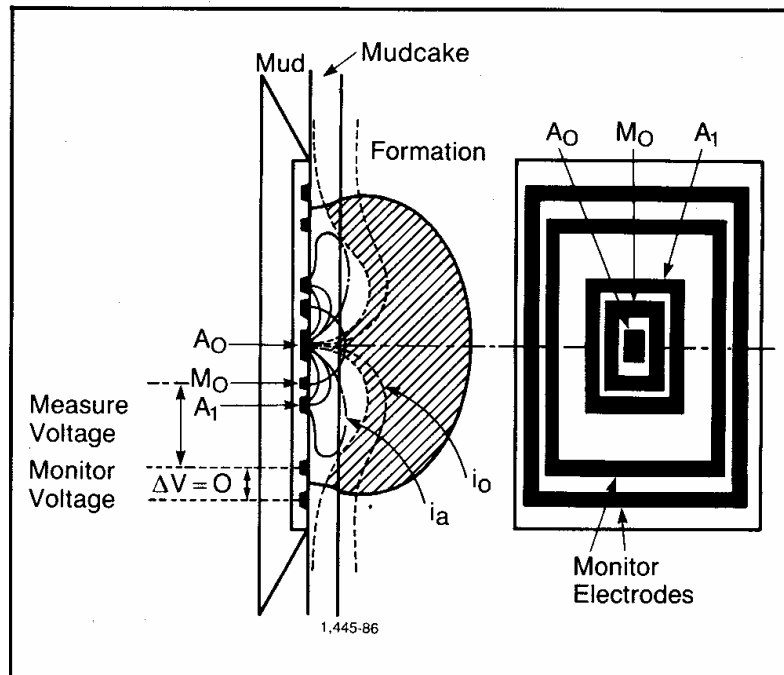
Η συσκευή Dual Laterolog (DLL) ανήκει στην κατηγορία των συσκευών ηλεκτροδίων εστίασης και παρέχει δύο μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης με διαφορετικό βάθος διασκόπησης η κάθε μία. Η βαθιά μέτρηση (LLD) έχει μεγάλο βάθος διείσδυσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια (guard electrodes) πολύ μεγάλου μήκους. Το πάχος της δέσμης του ρεύματος που διοχετεύεται στον σχηματισμό έχει ονομαστική τιμή 2 ft (περίπου 0,6 m) το οποίο και

ορίζει ίση αναλυτική ικανότητα. Σημειώνεται ότι η τιμή αυτή θεωρείται καλή. Η ρηχή μέτρηση (LLS) έχει την ίδια αναλυτική ικανότητα (2 ft) αλλά μικρότερο βάθος διασκόπησης. Η απόκρισή της περιορίζεται στο τμήμα εκείνο του σχηματισμού που συνήθως επηρεάζεται από την διείσδυση διηθήματος γεωτρητικού ρευστού. Αυτό είναι δυνατόν με την επιστροφή του εστιασμένου ηλεκτρικού ρεύματος σε ηλεκτρόδια που

<sup>1</sup> Σχήμα της Schlumberger.







**Σχήμα 3-3 Συσσκευή MicroSFL™ και μορφή δέσμης ηλεκτρικού ρεύματος (Schlumberger Log Interpretation Principles/Applications 1989).**

γεώτρησης. Παρέχει μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είναι πολύ μικρού βάθους διασκόπησης και περιορίζεται στην ζώνη διείσδυσης αμέσως πίσω από το τοίχωμα της γεώτρησης. Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής φαίνεται στο **Σχήμα 3-3**. Σημειώνεται εδώ ότι η συσκευή έχει έναν περιορισμό όσον αφορά στο πάχος του mud cake: όταν αυτό ξεπερνά τα 3/8" η μέτρηση επηρεάζεται ιδιαίτερος από ενδεχομένως μεγάλη διαφορά μεταξύ της ηλεκτρικής αντίστασης του mud cake και της ζώνης διείσδυσης. Όταν το πάχος του mud cake είναι μικρότερο από τα 3/8 της ίντσας τότε το ηλεκτρικό ρεύμα πρακτικά περιορίζεται στον σχηματισμό και αποδίδει την ηλεκτρική αντίσταση της ζώνης διείσδυσης.

### **3.2.6 Διαγραφίες διάδοσης (propagation) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων**

Οι διαγραφίες αυτού του τύπου αποτελούν εναλλακτική μέθοδο για τον προσδιορισμό του βαθμού κορεσμού σε νερό του σχηματισμού. Ιστορικά ο βαθμός κορεσμού σε νερό υπολογιζόταν με βάση την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού και ο διαχωρισμός των κορεσμένων σε νερό σχηματισμών από τους

κορεσμένους με υδρογονάνθρακες ήταν δυνατός λόγω της μεγάλης διαφοράς της ηλεκτρικής αντίστασης του νερού από τους υδρογονάνθρακες. Αυτό βασίζεται στο ότι το νερό των περισσότερων σχηματισμών είναι αλατούχο και κατά συνέπεια έχει μικρή ηλεκτρική αντίσταση. Δεν περιέχουν όμως όλοι οι σχηματισμοί αλατούχο νερό και όταν αυτό είναι «καθαρό» παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση παρόμοια με αυτή των υδρογονανθράκων ενώ πολλές φορές η αλατότητα του νερού του σχηματισμού είναι μεταβλητή. Είναι εμφανές ότι σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των βαθμών κορεσμού από τις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης.

Ο υπολογισμός της διηλεκτρικής επιδεκτικότητας (permittivity) αποτελεί εναλλακτική λύση. Με εξαίρεση το νερό, τα περισσότερα υλικά στους ιζηματογενείς σχηματισμούς έχουν μικρές τιμές διηλεκτρικής επιδεκτικότητας, οπότε η μετρούμενη διηλεκτρική επιδεκτικότητα είναι συνάρτηση κυρίως του πορώδους πληρωμένου με νερό. Αν και η διηλεκτρική επιδεκτικότητα του νερού επηρεάζεται από την αλατότητα και την θερμοκρασία του, το εύρος διακύμανσης της τιμής της είναι μικρό και κατά πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο της ηλεκτρικής αντίστασης του. Η διηλεκτρική επιδεκτικότητα εκφράζεται από την Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε ορυκτό και ρευστό (Schlumberger Log Interpretation Principles and Applications).

Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, περιγράφεται από τις εξισώσεις του Maxwell :

$$\begin{aligned}\gamma &= \alpha + j \cdot \beta, \\ \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon &= \beta^2 - \alpha^2, \\ \omega \cdot \mu \cdot C &= 2 \cdot \alpha \cdot \beta,\end{aligned}$$

όπου,

$\gamma$  η διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος (electromagnetic wave propagation)

$\alpha$  η εξασθένιση του κύματος (attenuation),

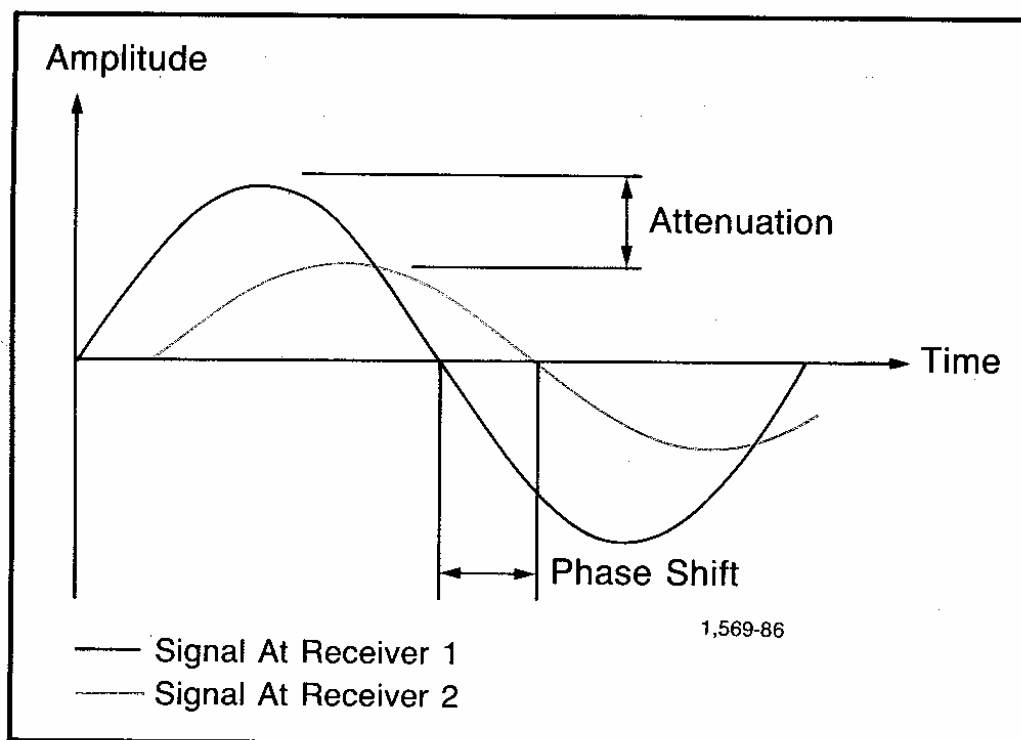
$\beta$  η μεταβολή φάσης,

$\omega$  η γωνιακή ταχύτητα του κύματος,

$\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα (magnetic permeability),

$\varepsilon$  η διηλεκτρική σταθερά και

$C$  η αγωγιμότητα του σχηματισμού υπό έλεγχο.

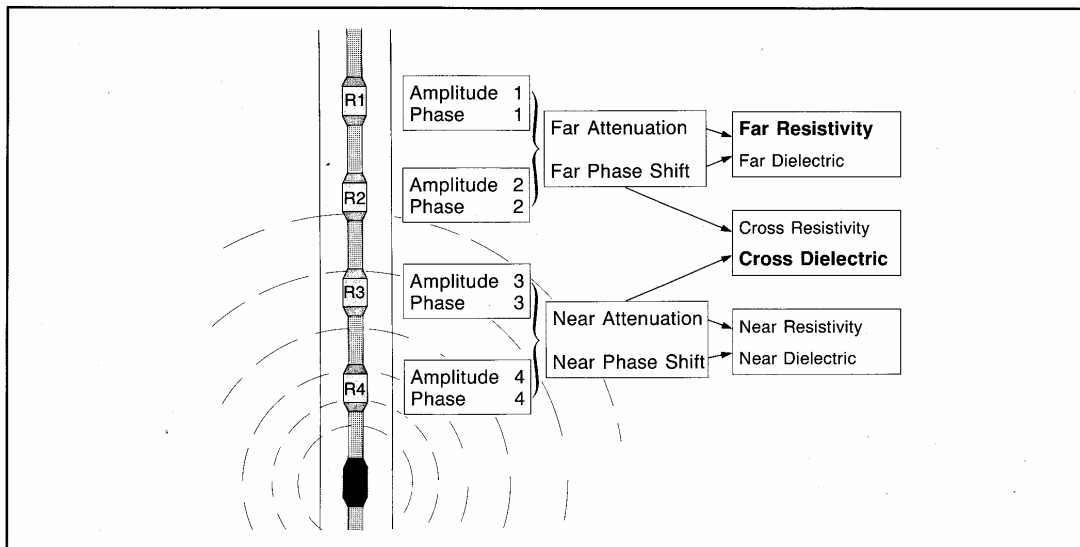


**Σχήμα 3-4 Μετρήσεις εξασθένισης (attenuation) και μεταβολής φάσης (phase shift) ταλάντωσης. (Schlumberger Log Interpretation Principles/Applications 1989)**

Από τις παραπάνω εξισώσεις είναι εμφανές ότι η μέτρηση της εξασθένισης (attenuation),  $\alpha$  και της μεταβολής της φάσης  $\beta$ , αποδίδουν την διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$  και την αγωγιμότητα  $C$ , του σχηματισμού υπό έλεγχο. Η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης οπότε μέσω των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζεται και η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού. Στο **Σχήμα 3-5** φαίνονται γραφικά οι μετρήσεις της μεταβολής πλάτους ταλάντωσης (attenuation),  $\alpha$  και της μεταβολής της φάσης,  $\beta$ .

Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των συσκευών διαγραφιών διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, (στα πλαίσια των αναγκών της συγκεκριμένης

εργασίας πάντοτε) ακολουθεί σύντομη περιγραφή<sup>1</sup> της συσκευής DPT<sup>1</sup> (Deep Propagation Tool) της Schlumberger.



**Σχήμα 3-5 Σχηματικό διάγραμμα συσκευής DPT™ μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης**

Η συσκευή αποτελείται από έναν πομπό (transmitting loop antenna) και τέσσερις δέκτες (loop antennas) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3-5**. Ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 25 MHz εκπέμπεται από τον πομπό προς τον σχηματισμό υπό έλεγχο και το επίπεδο του σήματος (signal level) καθώς και η σχετική φάση (relative phase) του μετρώνται στους δέκτες. Οι μετρήσεις αυτές μετατρέπονται κατόπιν σε μεταβολή πλάτους ταλάντωσης (attenuation) και φάσης (phase shift), για να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού υπό έλεγχο (από τις εξισώσεις Maxwell).

Οι δέκτες ομαδοποιούνται σε δύο ζεύγη : το «μακρινό» («far») και το «κοντινό» («near») ζεύγος. Οι μεταβολές του πλάτους ταλάντωσης (attenuation) και φάσης μεταξύ των δύο δεκτών του κάθε ζεύγους, καταγράφονται και μέσω των εξισώσεων Maxwell υπολογίζονται η φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά και η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού.

<sup>1</sup> Από την έκδοση Log Interpretation Principles/Applications της Schlumberger.

Ανάλογα με την προέλευση του σήματος που καταγράφεται, προκύπτουν διάφορες τιμές για την φαινόμενη διηλεκτρική σταθερά και την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού<sup>2</sup> (Σχήμα 3-5) :

•«Κοντινές» («near») μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από την χρήση της εξασθένισης και της μεταβολής φάσης που καταγράφονται στο «κοντινό» ζεύγος δεκτών.

•«Μακρινές» («far») μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από την χρήση της εξασθένισης και της μεταβολής φάσης που καταγράφονται στο «μακρινό» ζεύγος δεκτών.

•«Εγκάρσιες» («cross») μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από την χρήση της εξασθένισης που καταγράφεται στο «κοντινό», και την μεταβολή φάσης που καταγράφεται στο «μακρινό» ζεύγος δεκτών.

•«Βαθείς» («deep») μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από την χρήση ενός συνδυασμού των μεταβολών πλάτους και φάσης που καταγράφονται και στα δύο ζεύγη δεκτών.

Οι «κοντινές» μετρήσεις έχουν το μικρότερο βάθος διασκόπησης. Ακολουθούνται από τις «μακρινές» και μετά τις «εγκάρσιες» ή τις «βαθείς». Οι καμπύλες αυτές (όπως παρουσιάζονται στην διαγραφή) υποδεικνύουν ορθώς το προφίλ της διεύθυνσης του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού. Γενικά, οι «εγκάρσιες», οι «μακρινές» και οι «βαθείς» μετρήσεις είναι μάλλον όμοιες και ο διαχωρισμός τους αποτελεί ένδειξη της ακρίβειας τους. Όταν διαχωρίζονται, η ακρίβεια τους είναι μειωμένη.

---

<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger.

<sup>2</sup> Οι υπολογισμοί και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι που αναφέρονται σε αυτή την παράγραφο, αφορούν την συγκεκριμένη συσκευή. Αναφέρονται για την επίδειξη της αρχής λειτουργίας των συσκευών διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πολλαπλών αποστάσεων (Multi Spaced Electromagnetic Propagation Tools)

#### 4. Γεωφυσικές διαγραφίες στις οριζόντιες γεωτρήσεις

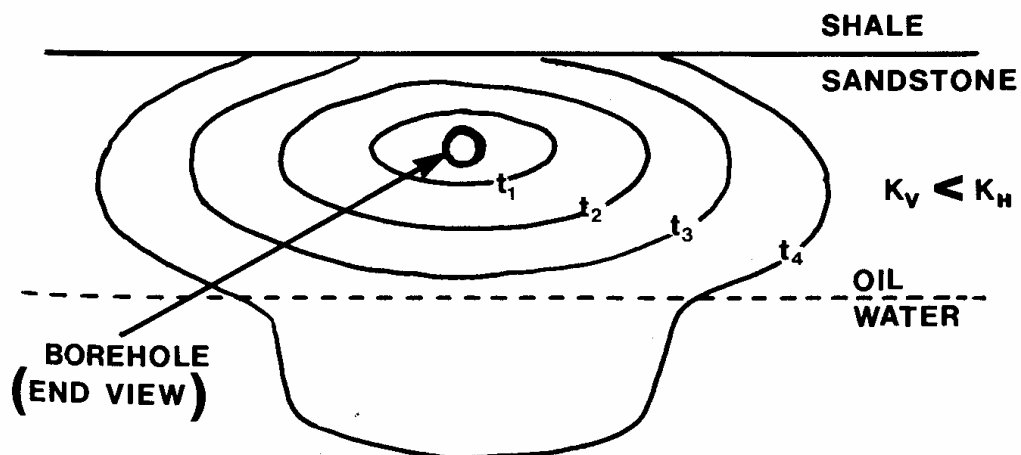
Η αξιολόγηση των οριζοντίων γεωτρήσεων, παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από αυτή των κατακόρυφων ή υπό κλίση γεωτρήσεων. Το πρόβλημα προκύπτει από τον σχεδιασμό των συμβατικών γεωφυσικών εργαλείων, καθώς θεωρείται δεδομένη η ύπαρξη κυλινδρικής συμμετρίας στον σχηματισμό γύρω από την γεώτρηση.

Η υπόθεση αυτή αποτελεί πραγματικότητα για τις περισσότερες κατακόρυφες γεωτρήσεις. Στις οριζόντιες όμως, αυτό δεν είναι κατ' ανάγκη αληθές, μιας και ο σχηματισμός πάνω, κάτω και στις πλευρές της γεώτρησης μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά και σε μικρή απόσταση από τοιχώματα του φρέατος. Έτσι δεν υπάρχει κατ' ανάγκη συμμετρία γύρω από την γεώτρηση, με αποτέλεσμα η αξιολόγηση των οριζοντίων γεωτρήσεων να απαιτεί ιδιαίτερους συλλογισμούς, όταν χρησιμοποιούνται γεωφυσικά όργανα όπως τα νετρονίου, φυσικής ραδιενέργειας (Gamma Ray), Laterolog και επαγωγής τα οποία είναι ακτινικά σταθμισμένα. Αντιθέτως προσανατολισμένες γεωφυσικές συσκευές όπως είναι η πλευρική νετρονίων, πυκνότητας και η dipmeter (συσκευή μέτρησης της κλίσης των γεωλογικών στρωμάτων) είναι πολύ χρήσιμες εάν είναι γνωστός ο προσανατολισμός των βραχιόνων μέτρησης (Struyk and Poon, 1990 από Aguilera et al., 1991).

Σύμφωνα με την κλασσική θεώρηση της απόκρισης των συσκευών γεωφυσικών διαγραφιών, η συσκευή είναι κάθετη στο επίπεδο της στρώσης και η μόνη ακτινική μεταβολή οφείλεται στη διείσδυση διηθήματος του γεωτρητικού πολφού. Σε μια οριζόντια γεώτρηση η γεωμετρία είναι διαφορετική. Ένα όριο μεταξύ σχηματισμών ή μια διεπιφάνεια μεταξύ ρευστών σε μικρή απόσταση από την γεώτρηση μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην μέτρηση της συσκευής διαγραφιών. Εάν η γεώτρηση είναι τοποθετημένη στην μέση ενός σχηματισμού μεγάλου πάχους η επίδραση αυτή είναι μικρή έως μηδενική. Ένας αυξανόμενος αριθμός οριζοντίων γεωτρήσεων ωστόσο, τοποθετείται σε σχηματισμούς πάχους μικρού έως και 10 ft (3,3 m). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι περιβάλλοντες σχηματισμοί έχουν σημαντική επίδραση και πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν (Singer, 1992).

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των οριζοντίων γεωτρήσεων τα οποία και επηρεάζουν την απόκριση των συσκευών διαγραφιών και επομένως την συλλογιστική της ερμηνείας τους, αναφέρονται πιο συγκεκριμένα παρακάτω στα πρότυπα της εργασίας των Struyk και Poon (1990) (Aguilera et al.1991):

- **Τραχύτητα των τοιχωμάτων της γεώτρησης** Σε όλες τις περιπτώσεις, η οροφή των οριζοντίων γεωτρήσεων είναι πιο ανώμαλη απ' ό τι το δάπεδο ή οι πλευρές. Επομένως, καλύτερα αποτελέσματα (μετρήσεις) μπορούν να ληφθούν εάν οι βραχίονες επαφής με τον σχηματισμό, εφάπτονται επί του δαπέδου ή προτιμότερα επί των πλευρικών τοιχωμάτων. Για τον έλεγχο της ποιότητας της επαφής μιας συσκευής με τον σχηματισμό, χρησιμοποιείται μια συσκευή μέτρησης της διαμέτρου της γεώτρησης. Εάν ο προσανατολισμός των δύο συσκευών είναι διαφορετικός ο έλεγχος δεν είναι αξιόπιστος. Ιδιαίτερα δε εάν η μια συσκευή εφάπτεται των πλευρών και η άλλη της οροφής.
- **Επίχρισμα γεωτρητικού πολφού** Τα στερεά θρύμματα που καθιζάνουν στο δάπεδο της γεώτρησης, λόγω ελλιπούς μεταφοράς, είναι πολύ εύκολο να ερμηνευθούν ως επίχρισμα πολφού κατά μήκος του δαπέδου της γεώτρησης. Σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να ληφθούν ποιοτικές ενδείξεις για την διαπερατότητα του σχηματισμού. Κατ' αρχήν, το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί με τον προσανατολισμό των βραχιόνων επαφής-μέτρησης κατά τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνουν μετρήσεις κατά μήκος των πλευρών της γεώτρησης. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται άμεσα με το θέμα της μεταφοράς των θρυμμάτων, προϊόντων της θραύσης του σχηματισμού, στην επιφάνεια.
- **Διείσδυση διηθήματος γεωτρητικού πολφού** Ιστορικά, το προφίλ της διείσδυσης του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού σε περατό σχηματισμό που περιβάλλει μια



τον άξονα της γεώτρησης, με τον μεγάλο άξονα οριζόντιο. Με τον χρόνο και καθώς η διείσδυση αυξάνεται, το προφίλ αυτής θα εξαρτηθεί από διάφορους ανταγωνιστικούς μεταξύ τους παράγοντες, όπως είναι η βαρύτητα, οι τριχοειδείς πιέσεις καθώς και η απόξεση του εναποθετημένου mud cake από την κίνηση της διατρητικής στήλης. Το προφίλ αυτό γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο εάν υπάρχουν πλησίον της γεώτρησης όρια σχηματισμών ή ρωγμές.

Η έλλειψη πληροφοριών για το ακριβές προφίλ της διείσδυσης γεωτρητικού πολφού δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για τις “πυρηνικές” συσκευές (φυσικής ραδιενέργειας, νετρονίων κ.α.) καθώς οι διαφορές μεταξύ του σχηματισμού και της ζώνης διείσδυσης είναι μικρές εκτός από την περίπτωση των ταμιευτήρων φυσικού αερίου όπου το πορώδες στη ζώνη διείσδυσης είναι πληρωμένο με υγρό ενώ στον αδιατάρακτο σχηματισμό με αέριο. Το αντίθετο συμβαίνει για τις συσκευές επαγωγής και μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης. Ακόμη και εάν το προφίλ της διείσδυσης ήταν επακριβώς γνωστό δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόκριση

**Σχήμα 4-1 Προφίλ διείσδυσης γεωτρητικού πολφού σε οριζόντια γεώτρηση σε κατάκορη τομή σε διαφορετικούς χρόνους και για την περίπτωση όπου η τιμή της οριζόντιας διαπερατότητας του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη αυτής της καθέτου (Aguilera et al. 1991).**

των συσκευών αυτών σε οριζόντια γεώτρηση λαμβάνοντας υπ’ όψιν όρια σχηματισμών και διείσδυση ταυτόχρονα. Η επίδραση ενός ελλειπτικού προφίλ διείσδυσης στην απόκριση των συσκευών είναι παρόμοια με αυτή ενός κυλινδρικού προφίλ με μεταβατική ζώνη μεταξύ ζώνης διείσδυσης και σχηματισμού. Σε εργασίες μοντελοποίησης της απόκρισης των συσκευών πάντως, η διείσδυση μπορεί να θεωρηθεί συμμετρική γύρω από την γεώτρηση, χωρίς μεταβατική ζώνη. Στο **Σχήμα 4-1** φαίνεται το προφίλ της διείσδυσης διηθήματος του γεωτρητικού πολφού σε μια οριζόντια γεώτρηση, σε κατακόρυφη τομή.



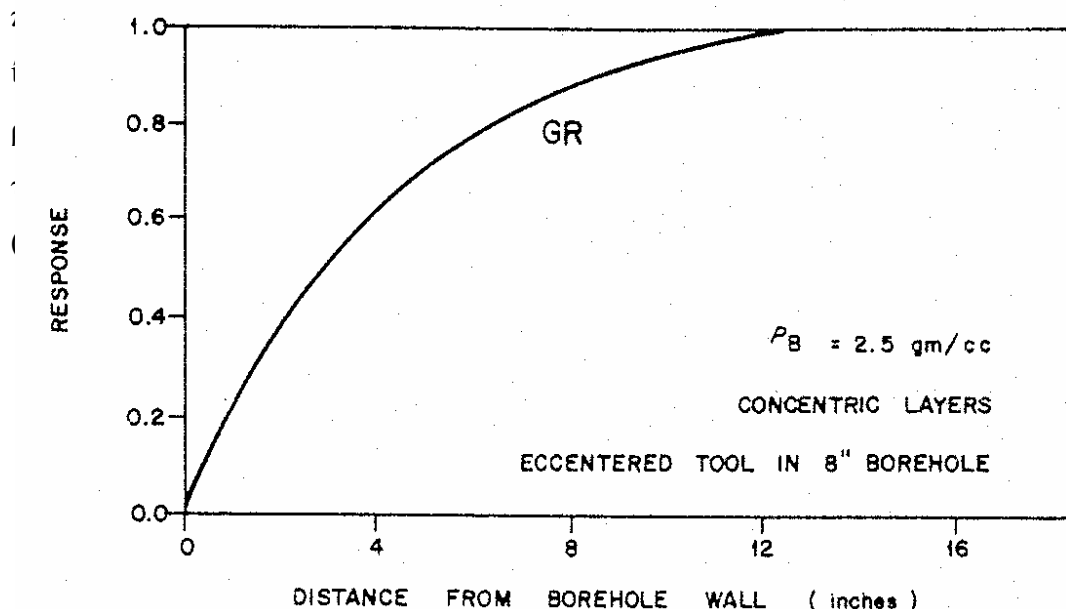
## 4.1 Απόκριση των συσκευών στις οριζόντιες γεωτρήσεις

Στις οριζόντιες γεωτρήσεις, τα δύο πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της απόκρισης των γεωφυσικών συσκευών είναι το βάθος διασκόπησης και εάν η μέτρηση είναι αξιμουθιακά εστιασμένη. Εάν δηλαδή λαμβάνει μέτρηση ακτινικά σταθμισμένη ή είναι εστιασμένη σε μια μόνο κατεύθυνση, συνήθως κάτω. Το βάθος διασκόπησης ορίζεται ως η απόσταση από το τοίχωμα της γεώτρησης και μέσα στον σχηματισμό που ορίζει τον όγκο του πετρώματος από τον οποίο λαμβάνει μέτρηση η συσκευή.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόκριση των πιο σημαντικών συσκευών σε οριζόντιες γεωτρήσεις.

### 4.1.1 Ακτίνων Γάμα (Gamma Ray)

Η συσκευή διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας δεν είναι αξιμουθιακά εστιασμένη και επομένως αποκρίνεται στο αργιλικό περιεχόμενο των σχηματισμών επάνω, κάτω και στις πλευρές της γεώτρησης. Η ακτινική απόκριση της συσκευής σε ένα τυπικό σχηματισμό φαίνεται στο **Σχήμα 4-2** (Ellis, 1987). Καθώς φαίνεται, το ενενήντα τοις εκατό του σήματος που καταγράφεται, προέρχεται από μια ζώνη εύρους 8 ιντσών από το τοίχωμα της γεώτρησης. Η συσκευή, καθώς στη συνήθη περίπτωση εφάπτεται του δαπέδου της γεώτρησης, είναι πιο ευαίσθητη στους υποκείμενους σχηματισμούς. Εάν αγνοήσουμε τα φαινόμενα που προκαλούνται από την εκκεντρότητα του οργάνου και θεωρήσουμε την μέτρηση ανεξάρτητη από άλλα



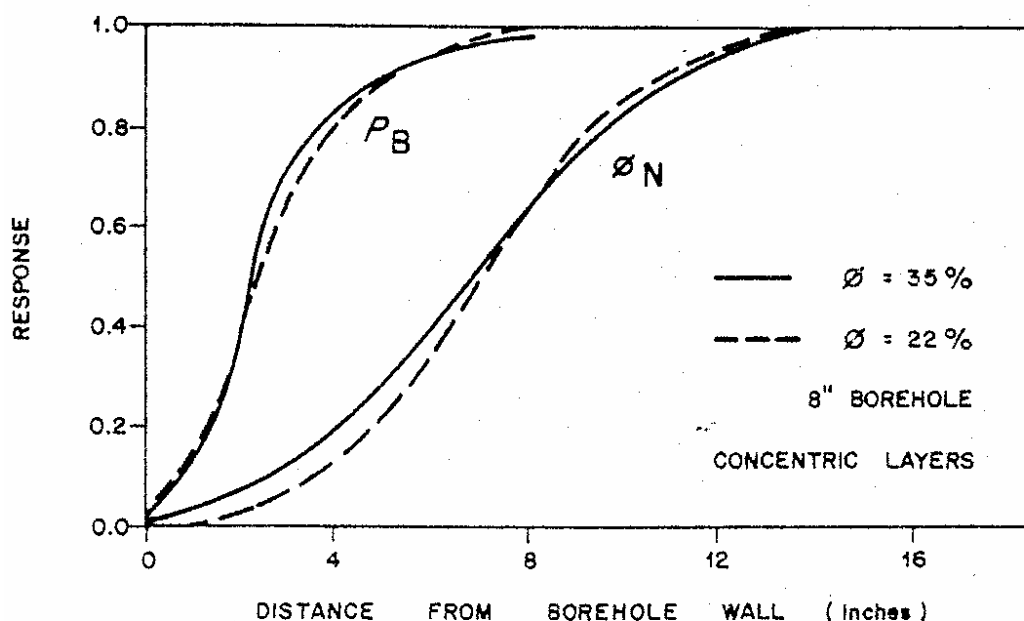
$$GR = f(GR_{sand}, GR_{shale}, r_h, d_{GR})$$

Όπου  $GR_{sand}$  και  $GR_{shale}$  είναι οι πραγματικές τιμές της απόκρισης της συσκευής σε ψαμμίτη και άργιλο αντίστοιχα,  $r_h$  είναι η ακτίνα της γεώτρησης και  $d_{GR}$  είναι η απόσταση σε ίντσες του ορίου από το κέντρο της γεώτρησης. Εάν είναι γνωστά τα  $GR_{sand}$  και  $GR_{shale}$ , η παραπάνω συνάρτηση μπορεί να επιλυθεί ως προς  $d_{GR}$  και εναλλακτικά εάν είναι γνωστό το  $d_{GR}$ , ως προς  $GR_{sand}$  ή  $GR_{shale}$ . Είναι εμφανές ότι η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνον όταν το όριο ψαμμίτη-αργίλου βρίσκεται σε απόσταση 8 ιντσών περίπου ή μικρότερη από το τοίχωμα της γεώτρησης, μιας και τόσο είναι το βάθος διασκόπησης της συσκευής.

#### 4.1.2 Πυκνότητας και Νετρονίων (Density and Neutron)

Η συσκευή μέτρησης της πυκνότητας έχει από σχεδίασης, ισχυρή αξιμουθιακή

**Σχήμα 4-2 Απόκριση μέτρησης Φυσικής Ραδιενέργειας (GR) για έκκεντρη συσκευή σε σχηματισμό μαζικής πυκνότητας 2,5  $^{gr}/cc$  (Singer 1992)**



**Σχήμα 4-3 Απόκριση μετρήσεων πυκνότητας  $P_B$  και νετρονίων  $\Phi_N$  συναρτήσει της απόστασης από το τοίχωμα της γεώτρησης (8") (Singer, 1992)**

εστίαση. Σε μια οριζόντια γεώτρηση, ένα μηχανικό σύστημα στρέφει συνήθως την συσκευή έτσι ώστε να μετρά προς τα κάτω, με αποτέλεσμα η συσκευή να “διαβάζει” τον σχηματισμό κάτω από την γεώτρηση. Η συσκευή νετρονίων αντιθέτως δεν αποδίδει απαραίτητα εστιασμένη μέτρηση. Παρ’ όλα αυτά βρίσκεται συνήθως σε έκκεντρη θέση και εφάπτεται επί του δαπέδου της γεώτρησης. Ο όγκος του γεωτρητικού πολφού που βρίσκεται μεταξύ της συσκευής και της οροφής της γεώτρησης λειτουργεί ως ασπίδα επιβραδύνοντας και απορροφώντας νετρόνια με αποτέλεσμα πολύ λίγα νετρόνια από τον σχηματισμό επάνω από την γεώτρηση, να φθάνουν στους ανιχνευτές της συσκευής. Είναι εμφανές ότι πρακτικά η συσκευή νετρονίων είναι στραμμένη προς τα κάτω λαμβάνοντας μέτρηση από τον σχηματισμό που βρίσκεται κάτω από την γεώτρηση.

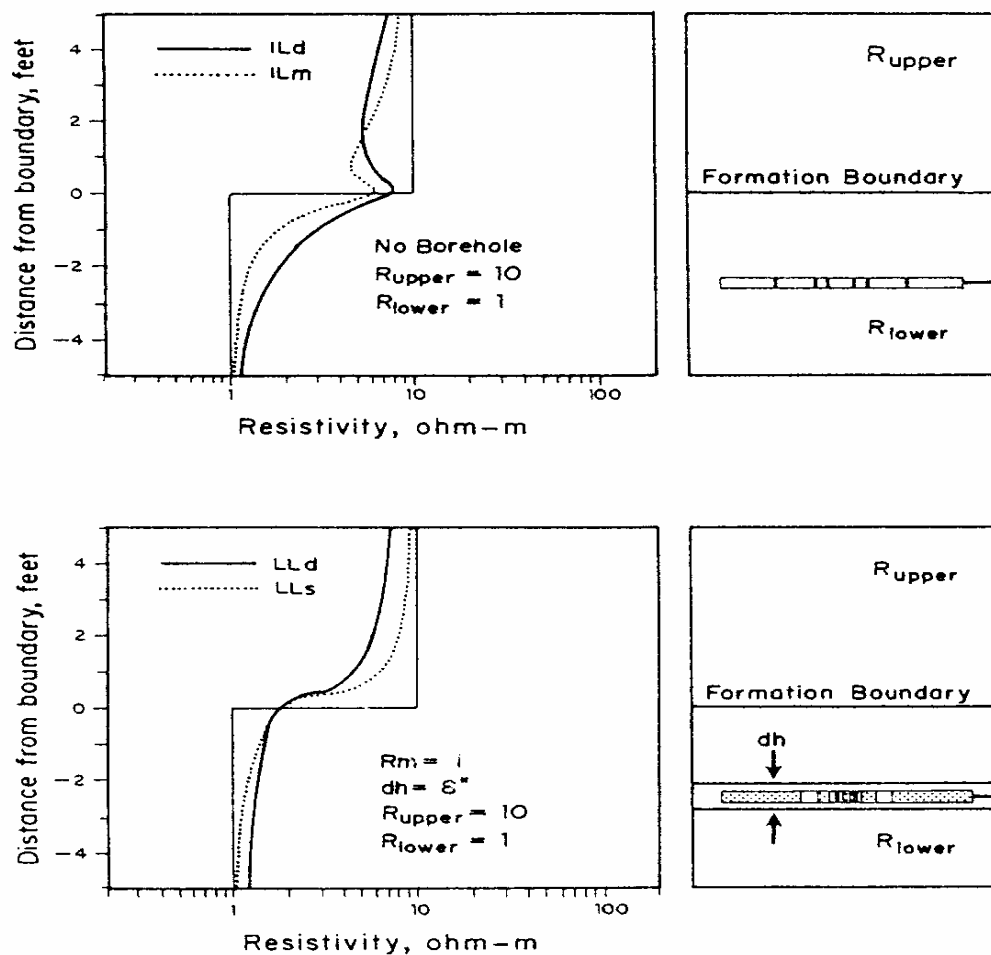
Στο **Σχήμα 4-3** φαίνεται η τυπική απόκριση των δύο συσκευών για δύο διαφορετικές τιμές του πορώδους (Sherman και Locke, 1975 από Aguilera et al., 1991). Καθώς φαίνεται το βάθος διασκόπησης της διαγραφίας νετρονίων είναι μεγαλύτερο αυτού της διαγραφίας ακτινών γάμα, ενώ της πυκνότητας μικρότερο. Το ενενήντα τοις εκατό της απόκρισης της συσκευής νετρονίων προκύπτει από μια ζώνη γύρω από την γεώτρηση πάχους 12 ιντσών, ενώ της πυκνότητας από μια ζώνη πάχους έξι ιντσών. Συναρτήσεις όμοιες με αυτή που παρουσιάστηκε για την συσκευή ακτινών γάμα είναι δυνατόν να γραφτούν και για τις συσκευές νετρονίων και πυκνότητας, συναρτήσει της απόστασης από το όριο  $d_N$  για την νετρονίων και  $d_D$  για την πυκνότητας.

#### **4.1.3 Επαγωγής (Induction)**

Η συσκευή μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης επαγωγής, αποδίδει δύο μετρήσεις: την “μέση” (ILm) και τη “βαθιά” (ILd) ανάλογα με το βάθος διασκόπησης της κάθε μίας. Το τελευταίο, εξαρτάται από την τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού καθώς και την διαφορά της από αυτή των περιβαλλόντων σχηματισμών. Σε περιπτώσεις όπου η διαφορά αυτή είναι μεγάλη η ILd είναι πιθανό να επηρεαστεί από σχηματισμούς που βρίσκονται ακόμα και 50ft μακριά από το τοίχωμα της γεώτρησης. Οι αποκρίσεις των μετρήσεων φαίνονται στο **Σχήμα 4-4** (Gianzero et al., 1989). Η απόσταση που απαιτείται ούτως ώστε η μέτρηση να φτάσει την πραγματική τιμή σε έναν μη αγωγίμο σχηματισμό είναι μεγαλύτερη από την ίδια για έναν αγωγίμο. Έτσι, η ILm μετρά έως το 10% της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού όταν

βρίσκεται 3ft μέσα στον σχηματισμό όταν αυτός είναι αγωγίμος, ενώ όταν ο σχηματισμός είναι μη αγωγίμος, 5ft. Οι αντίστοιχες αποστάσεις για την ILd είναι 5 και 7 πόδια. Αμφότερες οι μετρήσεις δίνουν μια αρνητική κορυφή, όταν η συσκευή διαπερνά ένα όριο μεταξύ σχηματισμών.

Η μέτρηση ILd προκύπτει από την εφαρμογή μιας ελαφριάς αποσυνέλιξης (weak deconvolution) στην καταγεγραμμένη μέτρηση βαθιάς επαγωγής (Shen, 1988). Αυτή, εφαρμόζεται σε κατακόρυφες γεωτρήσεις που διαπερνούν σχηματισμούς με επίπεδη στρώση, ενώ στις οριζόντιες γεωτρήσεις δεν έχει ισχύ. Το σφάλμα ωστόσο, είναι σημαντικό μόνο κοντά σε όρια μεταξύ σχηματισμών και όταν η διαφορά στις



**Σχήμα 4-4** Απόκριση συσκευών μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης επαγωγής. Φαίνεται η διαφορά στην υπολογισμένη απόκριση εάν ληφθεί υπ' όψιν η γεώτρησή όχι. (Singer, 1992)

τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης είναι σημαντική.

#### **4.1.4 Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity)**

Η βαθιά (LLd) και η ρηχή (LLs) μετρήσεις της συσκευής Laterolog καθώς και της Spherically Focused Resistivity (SFL<sup>(TM)</sup>) είναι ακτινικά σταθμισμένες. Όπως συμβαίνει και με τις διαγραφίες επαγωγής, το βάθος διασκόπησης είναι μεγαλύτερο σε μη αγωγίμους σχηματισμούς. Η LLd έχει βάθος διασκόπησης παρόμοιο με αυτό της ILd και η LLs παρόμοιο με αυτό της ILs. Η MSFL μπορεί να θεωρηθεί πως έχει βάθος διασκόπησης ίδιο με την LLs. Γενικά οι συσκευές μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης δεν αποκρίνονται σε σχηματισμούς με μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, παρά εάν βρίσκονται 1ft μέσα στον σχηματισμό.

## 5. Έλεγχος θέσης οριζοντίων γεωτρήσεων με χρήση συστημάτων MWD και LWD

### 5.1 Εισαγωγή

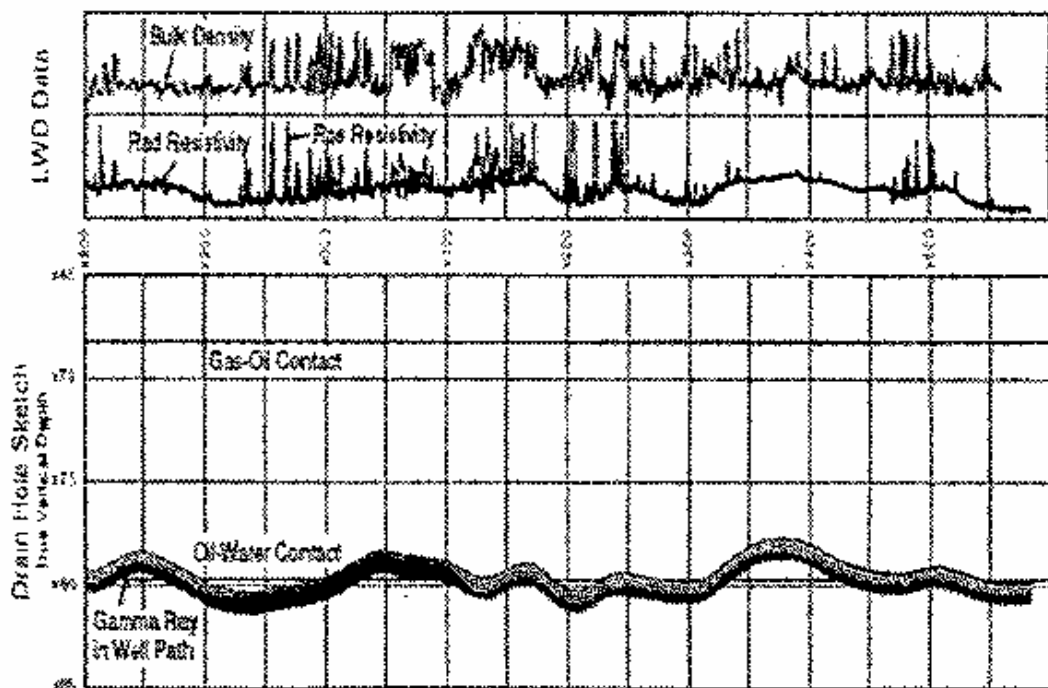
Ο έλεγχος της θέσης μιας οριζόντιας και κατά προέκταση, κάθε κεκλιμένης γεώτρησης εμφανίζεται στην διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία με διάφορες παρεμφερείς μεταξύ τους ορολογίες, όπως PayZone™<sup>1</sup> Steering (PZS) και Geosteering. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ονομασιών-ορολογιών είναι το συνθετικό «οδήγηση» (steering). Πράγματι, το ζητούμενο στην όλη διαδικασία του ελέγχου της θέσης, είναι η «οδήγηση» της διατρητικής στήλης προς τον σχηματισμό στόχο και η διάτρηση του όχι μόνον με την επιθυμητή διεύθυνση και κλίση, αλλά και η τοποθέτηση του σε κατάλληλη θέση μέσα σε αυτόν. Η τεχνολογική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων παροχής διαγραφιών (LWD) και πληροφοριών για την γεωμετρική θέση της γεώτρησης (MWD), σε συνδυασμό με την καθιέρωση των οριζοντίων γεωτρήσεων και την ανάπτυξη της τεχνικής, επιτρέπει πλέον την τοποθέτηση των φρεάτων στο επιθυμητό βάθος με ακρίβεια της τάξης των μερικών ποδιών. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα οριζόντιας γεώτρησης που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο «West Troll» στην θαλάσσια περιοχή της Νορβηγίας και τοποθετήθηκε ακριβώς επάνω στην διεπιφάνεια πετρελαίου-νερού με σκοπό την παραγωγή λεπτού στρώματος υδρογονανθράκων μεταξύ του νερού και ενός μεγάλου υπερκείμενου Gas Cap (**Σχήμα 5-1**) (Decker, Burgess, Exploration & Technology International). Παρέχεται πλέον η δυνατότητα της οδήγησης της διατρητικής στήλης, καθώς πέραν της αναγνώρισης του σχηματισμού που διατρυπάται, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης της στήλης και του φρέατος από κάποιο όριο μεταξύ σχηματισμών ή κάποια διεπιφάνεια με βάση την απόκριση των συσκευών LWD. Ακόμη, μέσω μοντελοποίησης και πρόβλεψης της απόκρισης των σχηματισμών που πρόκειται να διατρυπηθούν, ελέγχεται άμεσα η θέση της γεώτρησης, αλλά και το γεωλογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι ιδιαίτερα επιζήμιες διορθώσεις πορείας της γεώτρησης, καθώς σε

---

<sup>1</sup> Σήμα της Halliburton Energy Services Inc.

πολλές περιπτώσεις ένα όριο που πλησιάζει μπορεί να αναγνωρισθεί πριν καν το κοπτικό το διατρήσει.

Στον αιώνα της πληροφορίας, η τεχνική όρυξης φρεατίων πετρελαίου δεν μπορεί να αποτελέσει την εξαίρεση. Τα συστήματα αυτά αποτελούν ίσως την επανάσταση της πληροφορίας στις γεωτρήσεις.



Σχήμα 5-1 Οδήγηση διατρητικής στήλης. Σκοπός η παραμονή της γεώτρησης πάνω στην διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου. (Decker and Burgess 1998)

## 5.2 Τα συστήματα Measurement While Drilling (MWD)<sup>1</sup>

Το πρώτο σύστημα MWD παρουσιάστηκε το 1978 από την Teleco®. Σήμερα, τα συστήματα αυτά έχουν βελτιωθεί κατά πολύ και πλέον καλύπτουν τις ανάγκες σχεδόν κάθε γεώτρησης και τις απαιτήσεις κάθε εταιρείας εκμετάλλευσης. Η κάθε εταιρεία που παρέχει υπηρεσίες MWD παρουσιάζει τα δικά της συστήματα με ιδιαίτερα κάθε φορά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές ορίζονται πλέον από τον ανταγωνισμό.

Τα συστήματα MWD παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την γεωμετρική θέση της διατρητικής στήλης και την διεύθυνση της, οι οποίες συνήθως συμπληρώνονται από μέτρηση φυσικής ραδιενέργειας και μετρήσεις μηχανικών στοιχείων της στήλης όπως βάρος στο κοπτικό και ροπή στρέψης και μετρήσεις θερμοκρασίας. Αν και μια τυπική υπηρεσία MWD συνήθως δεν ξεφεύγει από αυτά τα πλαίσια, πολλές εταιρείες προσφέρουν «αναβαθμισμένες» υπηρεσίες παρέχοντας πολλαπλές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, πυκνότητας και πυκνότητας νετρονίων. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί εδώ, ότι οι μετρήσεις αυτές δεν είναι συχνότητας και ποιότητας τέτοιας ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των σχηματισμών και ότι αυτό είναι το στοιχείο που διαφοροποιεί τις υπηρεσίες MWD από τις υπηρεσίες LWD.

Οι τυπικές μετρήσεις που αφορούν στην γεωμετρική θέση της στήλης και δη του κοπτικού, είναι κλίσης, αζιμουθίου, προσανατολισμού της συσκευής (μαγνητικού και βαρυτικού) και πραγματικού κάθετου βάθους. Για τις μετρήσεις αυτές τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα και μαγνητόμετρα. Οι υπηρεσίες MWD συνήθως συμπληρώνονται από μέτρηση της φυσικής ραδιενέργειας για την οποία υπεύθυνος είναι συνήθως ένας απεριθμητός σπινθηρισμών. Οι μετρήσεις γίνονται με συχνότητα η οποία παίρνει συνήθως τιμές : μία ανά 12, 18 ή 24 δευτερόλεπτα ενώ η μετάδοση των μετρήσεων στην επιφάνεια γίνεται ανά 120 ή 180 δευτερόλεπτα ανάλογα με την λειτουργία της συσκευής (πλήρους ή χονδρικής διασκόπησης)

---

<sup>1</sup> Τα χαρακτηριστικά τα οποία αναφέρονται ως τυπικά, είναι αυτά των συσκευών NaviTrak/NaviGamma<sup>TM</sup> της Baker Hughes INTEQ και προέρχονται από τα τεχνικά δελτία των συσκευών, όπως παρουσιάζονται στο site της Baker Hughes INTEQ στο Internet, στην διεύθυνση : <http://www.Bakerhughes.com>



Η πλειοψηφία των συστημάτων MWD είναι τμηματικά και αποτελούνται από τα εξής τμήματα :

- Διάταξη πομπού παλμών
- Μπαταρίες
- Ηλεκτρονικά διευθυντικών αισθητήρων
- Ηλεκτρονικά απαριθμητή σπινθηρισμών (Αισθητήρας ακτινών γάμα)

Η διάταξη του πομπού παλμών, είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία της συσκευής με την επιφάνεια και την μετάδοση των δεδομένων. Η μετάδοση γίνεται με την κωδικοποίηση των δεδομένων σύμφωνα με κώδικα μετατόπισης της φάσης ενός σταθερού φέροντος κύματος πίεσης, το οποίο μεταφέρεται από τον πομπό στην επιφάνεια μέσω της στήλης του γεωτρητικού πολφού μέσα από τα διατρητικά στελέχη. Το κωδικοποιημένο σήμα λαμβάνεται στην επιφάνεια όπου και αποκωδικοποιείται και τα δεδομένα καταγράφονται. Το σύστημα αυτό αποτελεί την μετεξέλιξη ενός παλαιότερου το οποίο απαιτούσε την διακοπή της άντλησης γεωτρητικού πολφού ή την εκτροπή μέρους του πολφού προς τον χώρο μεταξύ των στελεχών και του τοιχώματος της γεώτρησης (annulus) για την εκπομπή ενός bit ψηφιακού κώδικα. Σημειώνουμε ότι οι συσκευές είναι εφοδιασμένες και με ψηφιακή μνήμη όπου καταγράφονται οι μετρήσεις και μπορούν να ανακτηθούν μετά την άνοδο της συσκευής στην επιφάνεια.

Για την προστασία τους, οι συσκευές MWD τοποθετούνται στο εσωτερικό διατρητικών στελεχών τα οποία έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία έτσι ώστε να είναι μη μαγνητικά και να μην επηρεάζουν τους αισθητήρες διεύθυνσης. Η τοποθέτησή τους γίνεται ανάλογα με την αρχιτεκτονική της διατρητικής στήλης, συνήθως όμως μετά την τουρμπίνα η οποία δίνει κίνηση στο κοπτικό και πριν από το AKO (Adjustable Kick Off Sub). Το AKO είναι εξάρτημα της διατρητικής στήλης με μόνιμη ρυθμιζόμενη απόκλιση από την κατακόρυφο της τάξης των λίγων μοιρών και οδηγεί το κοπτικό προς συγκεκριμένη πορεία. Γενικά η σύγχρονη τάση στις συσκευές και διατάξεις MWD και LWD είναι να τοποθετούνται σε αυτή την θέση, σε απόσταση δηλαδή από το κοπτικό

περί τα 5,5 μέτρα<sup>1,1</sup>. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε τέτοια απόσταση από το κοπτικό καλούνται στη διεθνή βιβλιογραφία «στο κοπτικό» (at the bit) και αφορούν στον σχηματισμό που διατηρείται σε αντίθεση με την περίπτωση όπου το MWD τοποθετείται πίσω από την τουρμπίνα και οι μετρήσεις αφορούν την στήλη και όχι το κοπτικό και σχηματισμούς που έχουν ήδη διατρυθεί.

Η τοποθέτηση των συσκευών MWD είναι σημαντική μιας και η απόσταση από το κοπτικό ορίζει και τον χρόνο που μεσολαβεί μέχρι η συσκευή να καταγράψει κάποια μεταβολή στην διεύθυνση. Σε ορισμένες περιπτώσεις η συσκευή μπορεί να βρίσκεται μέχρι και 100 ft πίσω από το κοπτικό με αποτέλεσμα να έχει ήδη φύγει η γεώτρηση εκτός πορείας μέχρι να το καταγράψει η συσκευή. Σημειώνουμε ότι οι διορθώσεις αυτές εκτός από πολύ ακριβές και επικίνδυνες για το φρεάτιο είναι και ιδιαίτερα δυσμενείς για την συνέχεια της όρυξης μιας και συνήθως προκαλούν απότομες γωνίες (doglegs). Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται συχνά από μηχανικούς αποκλινουσών γεωτρήσεων σαν «να οδηγείς λεωφορείο από το πίσω μέρος του» («driving from the back of the bus») (Prilliman, Allen και Lehtonen, 1995). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος MWD παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Ε**.

### 5.3 Τα συστήματα Logging While Drilling (LWD)

Τα συστήματα LWD παρέχουν γεωφυσικές διαγραφίες του σχηματισμού που διατηρείται, ταυτόχρονα με την όρυξη. Οι διαγραφίες αυτές καλύπτουν όλο σχεδόν το φάσμα των διαγραφιών που πραγματοποιούνται στις κατακόρυφες γεωτρήσεις όπως ηλεκτρικής αντίστασης, πορώδους (πυκνότητας και πυκνότητας νετρονίων), φυσικής ραδιενέργειας και φωτοηλεκτρικής απορρόφησης σε αξιμουθιακά τεταρτημόρια γύρω από την γεώτρηση, ενώ επιτρέπουν την καταγραφή πολλών παραμέτρων όπως το χρονικό διάστημα μεταξύ της όρυξης και διαγράφισης του συγκεκριμένου σημείου, του ρυθμού διάτρησης της κατάστασης της συσκευής κ.α. Λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα συστήματα MWD με την διαφορά ότι υπερκαλύπτουν τα τελευταία τόσο στην

---

<sup>1</sup> Αναφέρεται στην περίπτωση όπου η διάτρηση γίνεται με χρήση ολοκληρωμένου εργαλείου οδήγησης και διάτρησης που περιλαμβάνει τουρμπίνα και MWD ή LWD και συγκεκριμένα στο NaviGator™ της Baker Hughes INTEQ.

ποιότητα και συχνότητα των μετρήσεων (οι μετρήσεις και εκπομπή τους είναι συνεχής με ρυθμό έως και 10 bit πληροφορίας ανά δευτερόλεπτο (bit per second, bps) όσο και στο ότι παρέχουν διαγραφίες πετροφυσικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών απαραίτητων στην αξιολόγηση των σχηματισμών.

Έως την εμφάνιση των συστημάτων LWD, οι διαγραφίες πραγματοποιούνταν με το κατέβασμα στην γεώτρηση με χρήση της βαρύτητας ή διατρητικών στελεχών, συσκευών οι οποίες επικοινωνούσαν με την επιφάνεια με συρματόσχοινο που εμπεριέχει ηλεκτρικό καλώδιο. Οι διαγραφίες του τύπου αυτού ονομάζονται διεθνώς Wireline Logs. Τα συστήματα αυτά, αν και αποδίδουν διαγραφίες υψηλής ποιότητας εμφανίζουν περιορισμούς που συνδέονται τόσο με την γεωμετρία της γεώτρησης όσο και με τον χρόνο πραγματοποίησής τους. Για παράδειγμα, η πλειοψηφία των συσκευών Wireline δεν μπορεί να περάσει από τις κλειστές σχετικά καμπύλες πολύ κεκλιμένων ή οριζοντίων γεωτρήσεων, ενώ πάντα πραγματοποιούνται μετά το πέρας της γεώτρησης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αυξημένο χρόνο παραμονής του γεωτρώπανου στο πεδίο, για την πραγματοποίηση των διαγραφιών και την ανάλυση, αλλά και την αδυναμία πραγματοποίησής τους σε γεωτρήσεις όπου οι εργασίες επανειλημμένης εισαγωγής και εξαγωγής διατρητικών στελεχών θεωρούνται επισφαλείς (οριζόντιες γεωτρήσεις).

Εναλλακτική λύση σε αυτά και άλλα προβλήματα, παρουσίασαν τα συστήματα LWD τα οποία με την πρόοδο της τεχνολογίας όχι μόνον αποδίδουν διαγραφίες ίδιας ποιότητας, αλλά και αποτελούν ανεκτίμητο εργαλείο για την οδήγηση της στήλης στον στόχο και την αξιολόγηση των οριζοντίων γεωτρήσεων η οποία παραμένει και σήμερα πρόκληση για την βιομηχανία της παραγωγής του πετρελαίου. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί εδώ ότι λόγω σχεδιασμού και κατασκευής δεν αποδίδουν όλα τα συστήματα LWD την ίδια ακρίβεια, αλλά είναι γενικώς αποδεκτό ότι η τυπική διάταξη που παρέχει ηλεκτρικές και φυσικής ραδιενέργειας διαγραφίες έχει ακρίβεια συγκρίσιμη με αυτή των Wireline (Jackson, Fredericks 1995).

Γενικά, η αξιολόγηση του ταμιευτήρα με διαγραφίες LWD παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα (Jackson, Fredericks 1995):

---

<sup>1</sup> Από το τεχνικό δελτίο του εργαλείου NaviGator™ της Baker Hughes INTEQ όπως παρουσιάζεται στο site της Baker Hughes INTEQ στο Internet, στην διεύθυνση : <http://www.Bakerhughes.com>

- **Μειωμένο κόστος γεωτρύπανου.** Για την αξιολόγηση του ταμιευτήρα με διαγραφίες Wireline απαιτείται επιπλέον χρόνος παραμονής του γεωτρύπανου στο πεδίο, μετά το πέρας της γεώτρησης, για την πραγματοποίηση των διαγραφιών. Με χρήση συστημάτων LWD ο χρόνος αυτός καταργείται μιας και η διαγράφιση γίνεται ταυτόχρονα με την όρυξη.
- **Βελτιωμένη αξιολόγηση.** Καθώς το χρονικό διάστημα μεταξύ της όρυξης και της διαγράφισης μειώνεται δραστικά, ελαττώνονται τα φαινόμενα διείσδυσης διηθήματος γεωτρητικού πολφού στον ταμιευτήρα, που επηρεάζουν την απόκριση των συσκευών διαγραφιών, καθώς και η καταστροφή του ταμιευτήρα από τα ρευστά αυτά.
- **Μειωμένο ρίσκο για την γεώτρηση.** Πολλές γεωτρήσεις, ιδιαίτερα οι οριζόντιες, δεν επιτρέπουν τις πολλαπλές εργασίες με εισαγωγή και εξαγωγή εργαλείων και διατρητικών στελεχών μιας και ένα ατύχημα, όπως η απόλεση αντικειμένου μέσα στην γεώτρηση, σημαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων καταστροφή και εγκατάλειψη της γεώτρησης.
- **Ταχύτητα διαγράφισης.** Στις διαγραφίες Wireline η ταχύτητα της διαγράφισης, η ταχύτητα δηλαδή μετακίνησης της συσκευής, ορίζεται από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της συσκευής ενώ στις διαγραφίες LWD, από την ταχύτητα της διάτρησης. Αυτό έχει συχνά ως αποτέλεσμα καλύτερη στατιστική πυρηνική απόκριση για διαγραφίες πυκνότητας και νετρονίων (Decker, Burgess Exploration & technology International)

Αντιθέτως παρουσιάζουν και μειονεκτήματα :

- **Αυξημένο κόστος υπηρεσιών.** Οι διαγραφίες με συσκευές LWD έχουν αυξημένο κόστος σε σχέση με τις αντίστοιχες Wireline κυρίως λόγω της αυξημένης έρευνας και εξέλιξης που τις υποστηρίζει.
- **Ειδική αξιολόγηση.** Η ποσοτική αξιολόγηση του ταμιευτήρα από διαγραφίες LWD γίνεται κυρίως μέσω υπολογιστή και εξελιγμένου λογισμικού ιδίως στις οριζόντιες

γεωτρήσεις. Το ίδιο ισχύει και για την χρήση τους για την οδήγηση της διατρητικής στήλης.

Το πεδίο στο οποίο έφεραν τα συστήματα LWD την επανάσταση είναι αυτό της οδήγησης της διατρητικής στήλης. Πράγματι, οι διαγραφίες LWD συμπλήρωσαν τις κατευθυντικές μετρήσεις των συστημάτων MWD με διαγραφίες λιθολογικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού που διατρήεται, με αποτέλεσμα μια αλλαγή στην φιλοσοφία των κεκλιμένων και οριζοντίων γεωτρήσεων. Ο σχηματισμός στόχος δεν είναι πλέον ένα καλά ορισμένο στον τρισδιάστατο χώρο γεωμετρικό σχήμα που η γεωλογική ομάδα υπέδειξε στους μηχανικούς της γεώτρησης, αλλά ένας συγκεκριμένος γεωλογικός σχηματισμός του οποίου η θέση είναι μόνο κατά προσέγγιση γνωστή πριν την έναρξη της γεώτρησης. Η αναμενόμενη θέση του στόχου αναθεωρείται συνεχώς με τα καινούργια στοιχεία από τα συστήματα MWD και LWD (Decker, Burgess, Exploration & Production International ).

Είναι εμφανές ότι οι υπηρεσίες και τα εργαλεία LWD, όπως άλλωστε κάθε υπηρεσία στον χώρο του πετρελαίου έχουν την δυνατότητα τις προσαρμογής, μέσα σε κάποια πλαίσια πάντοτε, στις απαιτήσεις του πελάτη. Σημειώνουμε εδώ ότι όλες σχεδόν οι εταιρίες εκμετάλλευσης αγοράζουν από άλλες εταιρίες (Service Companies) τέτοιου είδους υπηρεσίες όπως άλλωστε κάνουν και για τα γεωτρητικά ρευστά ή και για την ίδια την διάτρηση. Είναι ελάχιστες οι εταιρείες οι οποίες καλύπτουν για τον εαυτό τους όλο το φάσμα της έρευνας, ανάπτυξης και εκμετάλλευσης των υδρογονανθράκων. Έτσι ένα σύστημα LWD για εφαρμογή οδήγησης διατρητικής στήλης περιορίζεται σε διαγραφίες πολλαπλής ηλεκτρικής αντίστασης και φυσικής ραδιενέργειας που συμπληρώνονται από διευθυντικές μετρήσεις. Αντίθετα ένα σύστημα για την οδήγηση και αξιολόγηση της γεώτρησης συμπληρώνεται από μια διαγραφή πορώδους όπως πυκνότητας και νετρονίων.

Οι διαγραφίες ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα LWD για την οδήγηση της στήλης, είναι διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και εμπεριέχουν πολλαπλές μετρήσεις διαφορετικού βάθους διασκόπησης (Multi Spaced Propagation Tools). Η χρήση των διαγραφιών αυτών στις κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι ο προσδιορισμός του προφίλ της διεξόδου του γεωτρητικού πολφού στον

ταμιευτήρα. Στις οριζόντιες γεωτρήσεις άλλοι είναι οι παράγοντες που προκαλούν μεταβολές στο προφίλ της ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού, όπως είναι τα όρια μεταξύ σχηματισμών ή οι διεπιφάνειες μεταξύ ρευστών όταν αυτά βρίσκονται πλησίον του τοιχώματος της γεώτρησης. Αυτό είναι και το πλεονέκτημα της χρήσης διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης έναντι των λιθολογικών διαγραφιών σε εφαρμογές ελέγχου θέσης ή οδήγησης της διατρητικής στήλης. Αυτού του τύπου οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, έχουν βάθος διασκόπησης κατά πολύ μεγαλύτερο από αυτό των λιθολογικών διαγραφιών με αποτέλεσμα την ανίχνευση ορίων που πλησιάζουν, πολλές φορές προτού η γεώτρηση τα συναντήσει (Jackson, Fredericks 1995).

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σε συστήματα LWD είναι συνήθως διάδοσης (Propagation) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πολλαπλών αποστάσεων (Multi-spaced Propagation Tools) τα οποία λειτουργούν στην συχνότητα των 2MHz. Οι συσκευές αυτές διαθέτουν δύο πομπούς και δύο δέκτες συμμετρικά τοποθετημένους μεταξύ τους αποδίδοντας πολλαπλές μετρήσεις διαφορετικού βάθους διασκόπησης η κάθε μία. Η συχνότητα λειτουργίας των 2MHz είναι ευρέως καθιερωμένη και αυτό διότι εκτενής εργασία έχει γίνει και παρουσιαστεί στην διεθνή βιβλιογραφία, επάνω στην μοντελοποίηση της απόκρισης των συσκευών που λειτουργούν σε αυτή την συχνότητα. Σημειώνουμε εδώ η μοντελοποίηση της απόκρισης των συσκευών είναι ιδιαίτερης σημασίας τόσο για εφαρμογές οδήγησης της διατρητικής στήλης υπό την έννοια του υπολογισμού της θέσης της γεώτρησης όσο και για την αξιολόγηση του σχηματισμού (υπολογισμός πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού και βαθμών κορεσμού σε ρευστά). Μερικές συσκευές<sup>1</sup> λειτουργούν και σε δεύτερη συχνότητα ταυτόχρονα αυτή των 400KHz η οποία αποδίδει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης.

#### **5.4 Έλεγχος θέσης οριζοντίων γεωτρήσεων με τα συστήματα MWD και LWD και οδήγηση της γεωτρητικής στήλης**

Ο έλεγχος της θέσης της γεώτρησης και η οδήγηση της στήλης γίνεται βασικά με δύο τρόπους. Με τον ένα τρόπο που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία με τον όρο

---

<sup>1</sup> Όπως η MPR™ της Baker Hughes INTEQ

**Γεωλογική Οδήγηση (Geosteering)** αναγνωρίζεται σε πραγματικό χρόνο ο σχηματισμός ή ορίζοντας που διατηρείται και γίνονται οι κατάλληλες αλλαγές στην πορεία της γεώτρησης. Η δεύτερη τεχνική που αναφέρεται στη διεθνή αρθρογραφία είναι η **PayZone™ Steering (PZS)**<sup>1</sup> (Jackson, Ilfelder και Porche, 1995,1996) η οποία προϋποθέτει την μοντελοποίηση της απόκρισης των συσκευών επάνω στην σχεδιαζόμενη τροχιά της γεώτρησης και σύγκριση των διαγραφιών που προκύπτουν με τις πραγματικές σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται παρέχει την δυνατότητα της συνεχούς βελτίωσης του γεωλογικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, με την προσθήκη πληροφοριών καθώς αυτές λαμβάνονται από τις συσκευές LWD και ακόμη τον υπολογισμό της θέσης της γεώτρησης σε σχέση με την γεωλογία, αλλά και της απόστασης από κάποιο όριο μεταξύ σχηματισμών ή κάποια διεπιφάνεια μεταξύ ρευστών. Πέραν των δυνατοτήτων «οδήγησης» της διατρητικής στήλης, η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της γεώτρησης σε σχέση με την γεωλογία μετά το πέρας της γεώτρησης και την επιβεβαίωση του γεωλογικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό με το παράδειγμα που ακολουθεί από ταμειυτήρα αερίου στον Κόλπο του Μεξικού.

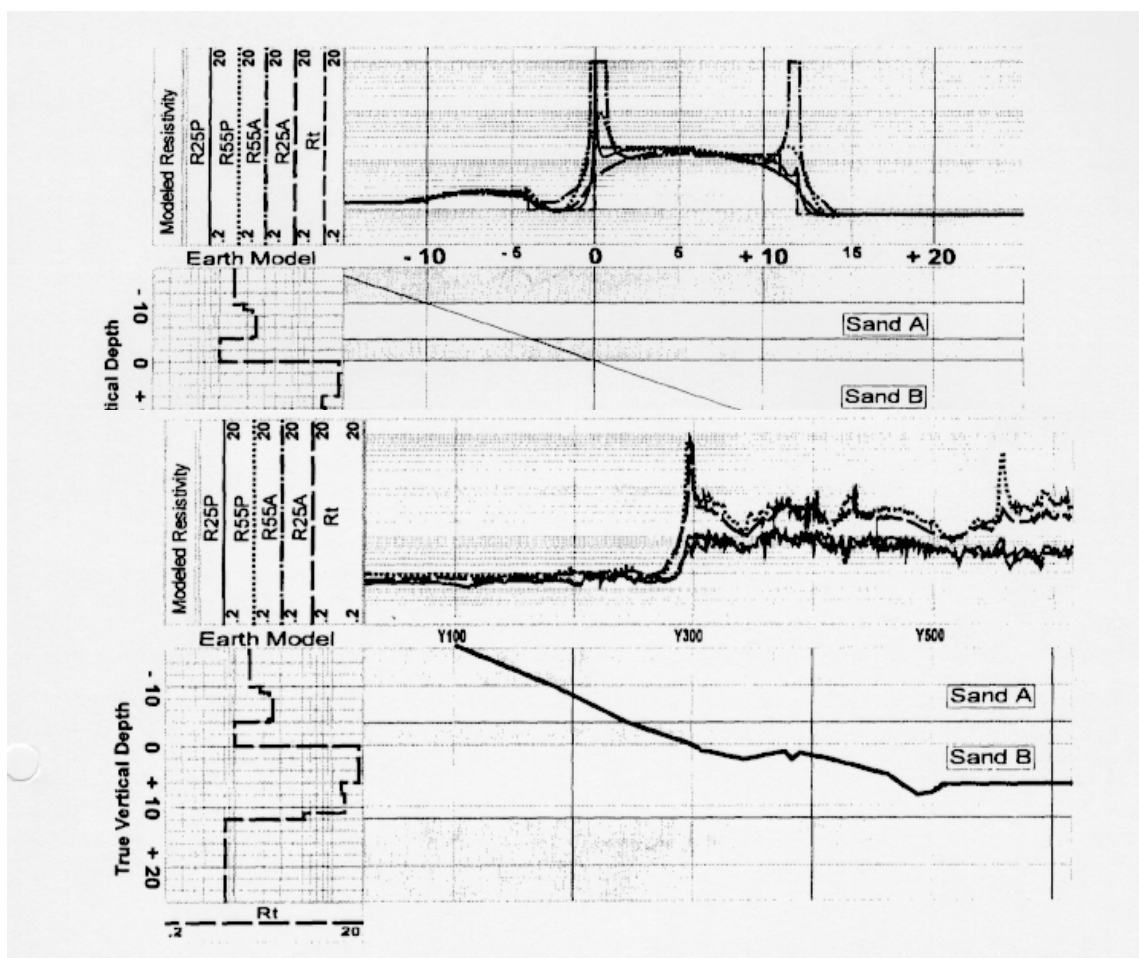
Στο **Σχήμα 5-1** φαίνεται το γεωλογικό μοντέλο όπως προκύπτει από την πιλοτική γεώτρηση. Φαίνονται δύο ομογενείς ψαμμιτικοί σχηματισμοί με καλά ορισμένα όρια, διαχωριζόμενοι από έναν αργιλικό σχηματισμό ανάμεσά τους. Στόχο αποτελεί ο Sand B. Ακριβώς επάνω από το γεωλογικό μοντέλο φαίνεται η διαγραφή αποτέλεσμα της μοντελοποίησης από τα δεδομένα της πιλοτικής γεώτρησης κατά μήκος της τροχιάς της σχεδιαζόμενης γεώτρησης. Στο **Σχήμα 5-2** φαίνονται η πραγματική διαγραφή και η φαινόμενη τροχιά της γεώτρησης όπως προκύπτει από την εργασία μοντελοποίησης. Είναι αμέσως εμφανές ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ του μοντέλου και της πραγματικής διαγραφίας. Αντιθέτως υπάρχουν χαρακτηριστικά τα οποία αναγνωρίζονται εύκολα όπως η κορυφή πόλωσης στα Y300 που σηματοδοτεί την είσοδο της γεώτρησης στην Sand B. Η αλλαγή στην ρηχή ηλεκτρική αντίσταση στα Y500 υποδηλώνει ότι η γεώτρηση παρασύρνεται προς το κατώτερο μέρος του Sand B. Συγκρίνοντας τώρα την πραγματική τροχιά της γεώτρησης με το φαινόμενο γεωλογικό μοντέλο, (**Σχήμα 5-3**) είναι εμφανές ότι το δεύτερο δεν μπορεί να είναι σωστό. Για παράδειγμα, η γεώτρηση δεν εξέρχεται της Sand B στα Y500 όπως αναμενόταν από την

---

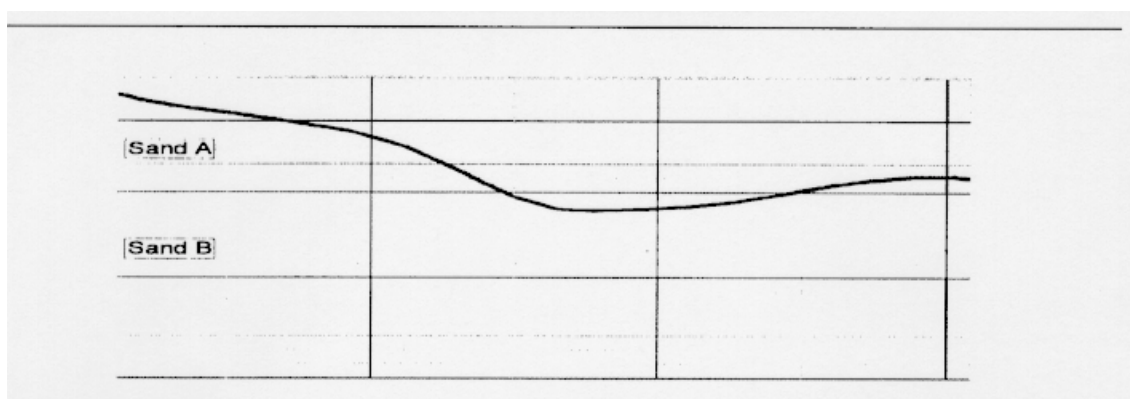
<sup>1</sup> Εμπορικό σήμα της Halliburton Energy Services Inc.

διαγραφή μοντέλο. Υπολογίζοντας τώρα τις αποστάσεις της γεώτρησης από τα διάφορα όρια, σύμφωνα με το μοντέλο της απόκρισης, προκύπτει το πραγματικό (σύμφωνα με την διαγραφή) γεωλογικό μοντέλο που φαίνεται στο **Σχήμα 5-4**. Αυτό έγινε διατηρώντας σταθερά τα πάχη των στρωμάτων και μεταβάλλοντας την θέση των ορίων ώστε να επαληθεύονται οι υπολογισμένες αποστάσεις.

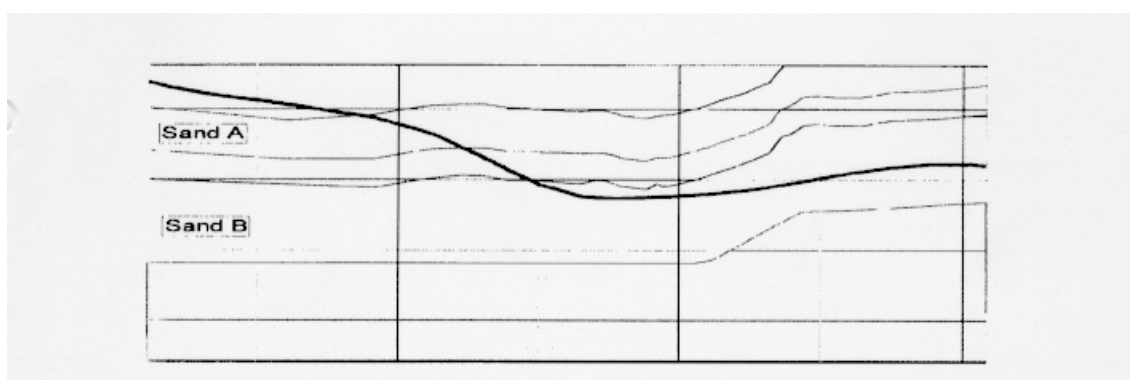
Η παραπάνω μέθοδος, έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις οι οποίες προκύπτουν από την μοντελοποίηση και τον υπολογισμό των αποστάσεων της γεώτρησης από διεπιφάνειες. Παρόμοια διαδικασία μπορεί να γίνει με ποιοτικά και όχι ποσοτικά όμως αποτελέσματα, με την ερμηνεία της διαγραφίας, υπό την έννοια της αναγνώρισης από λιθολογικά στοιχεία, του σχηματισμού που διατρέχεται. Αυτή η μέθοδος αδυνατεί όμως να προσδιορίσει με ακρίβεια το σημείο εισόδου στον συγκεκριμένο σχηματισμό κυρίως λόγω της πολύ μικρής σχετικής κλίσης του άξονα της γεώτρησης με την στρώση του σχηματισμού (οριζόντιες γεωτρήσεις, σχεδόν οριζόντια στρώση) και την θέση της γεώτρησης μέσα στον σχηματισμό. Εκτός και εάν αναγνωρισθεί κάποιος ορίζοντας μέσα στην μάζα του σχηματισμού ο οποίος παρουσιάζει ιδιαίτερα λιθολογικά χαρακτηριστικά.







**Σχήμα 5-3 Πραγματική πορεία της γεώτρησης και φαινόμενο γεωλογικό μοντέλο (Jackson et al., 1996).**



**Σχήμα 5-4 Εκτίμηση γεωλογίας σύμφωνα με την πραγματική διαγραφή LWD (Jackson et al., 1996).**

## 6. Άλλες μέθοδοι ελέγχου θέσης

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται μέθοδοι ελέγχου θέσης μιας οριζόντιας γεώτρησης χωρίς την χρήση υπηρεσιών MWD ή LWD. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε κατακόρυφες γεωτρήσεις και όπου οι συνθήκες δεν απαιτούν ιδιαίτερη ακρίβεια όσον αφορά στην γνώση της θέσης της γεώτρησης και σίγουρα όχι την οδήγηση της γεώτρησης προς τον στόχο.

Η κυριότερη από αυτές είναι ο γεωλογικός έλεγχος των θρυμμάτων που ανέρχονται στην επιφάνεια με την κυκλοφορία του γεωτρητικού πολφού. Άλλη μέθοδος είναι οι διαγραφίες του περιεχόμενου στον πολφό αερίου οι οποίες αφενός προσδιορίζουν την είσοδο στον ταμιευτήρα και αφετέρου υποδηλώνουν ζώνες αυξημένης παραγωγικότητας ή/και φυσικές ρωγμές.

### 6.1 Διαγραφίες θρυμμάτων

Μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες του γεωτρητικού πολφού σε μια γεώτρηση είναι ο καθαρισμός του κοπτικού και η μεταφορά των θρυμμάτων στην επιφάνεια. Τα θρύμματα μεταφέρονται αιωρούμενα στον πολφό και είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν από αυτόν ούτως ώστε ο πολφός να χρησιμοποιηθεί ξανά ανακυκλωμένος. Για τον σκοπό αυτό ο πολφός οδηγείται σε συγκροτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν διαβαμισμένα κόσκινα έως και φυγόκεντρους διαχωριστές, τα οποία αναλαμβάνουν τον καθαρισμό του πολφού από ξένα σώματα. Σημειώνεται εδώ ότι ξένα σώματα δε νοούνται μόνο τα στερεά θρύμματα αλλά και υδρογονάνθρακες ή νερό.

Η διαδικασία αυτή δεν έχει ως αυτοσκοπό τον καθαρισμό και ανακύκλωση του γεωτρητικού πολφού, αλλά εξυπηρετεί ταυτόχρονα τον γεωλογικό έλεγχο της θέσης της γεώτρησης. Τα θρύμματα μετά την απομάκρυνση τους από τον πολφό εξετάζονται από γεωλόγο αποδίδοντας σημαντικές πληροφορίες. Οι πληροφορίες που συλλέγονται εμπεριέχουν προφανώς την λιθολογία του σχηματισμού που διατρήθηκε και υποδεικνύουν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά αλλά και τεχνικά στοιχεία που αφορούν

στις μηχανικές παραμέτρους της διατρητικής στήλης και της στήλης του πολφού. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το μέγεθος και το σχήμα των θρυμμάτων συνδέεται άμεσα τόσο με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού όσο και με την πίεση που ασκείται στο κοπτικό και στον σχηματισμό από την στήλη του γεωτρητικού πολφού αλλά και τον ρυθμό περιστροφής της στήλης ή του κοπτικού και τις συνθήκες ροής του πολφού μέσα στην γεώτρηση.

Η σπουδαιότητα των διαγραφιών θρυμμάτων για τον έλεγχο της θέσης μιας γεώτρησης έγκειται στο ότι όλοι οι ταμιευτήρες παρουσιάζουν μεταβολές τόσο στην λιθολογία όσο και στο μέγεθος κόκκου. Από παρατηρήσεις δειγμάτων από θρύμματα, είναι δυνατόν να γίνει προσέγγιση της θέσης της γεώτρησης ως προς την κατακόρυφο. Εάν για παράδειγμα ξεφύγει μια οριζόντια γεώτρηση από την μάζα του ταμιευτήρα, οι παρατηρήσεις θρυμμάτων θα είναι πολύ σημαντικές στο να υποδείξουν εάν η γεώτρηση βρίσκεται πάνω ή κάτω από τον ταμιευτήρα ή εάν εντοπίστηκε το όριο του ταμιευτήρα. Μια τέτοια απόφαση είναι πολύ σημαντική, μιας και σηματοδοτεί την συνέχιση ή διακοπή της διάτρησης. Επιπροσθέτως, με χρήση παρατηρήσεων των θρυμμάτων γίνεται η πρώτη εκτίμηση του πορώδους και της παραγωγικής ικανότητας.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η ποιότητα των θρυμμάτων είναι άριστη μέχρι την κλίση των  $60^\circ$  εάν δεν γίνεται περιστροφή της διατρητικής στήλης και χρησιμοποιείται υπόγεια τουρμπίνα χαμηλής ταχύτητας. Σε μεγαλύτερες κλίσεις παρατηρούνται έντονα φαινόμενα λειοτρίβισης των θρυμμάτων από την διατρητική στήλη αλλά και έντονες συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων (θρυμμάτων), φαινόμενα τα οποία τείνουν να μειώσουν το μέγεθος των θρυμμάτων που μεταφέρονται στην επιφάνεια. Η ποιότητα των δειγμάτων παραμένει όμως άριστη (Aguilera et al, 1991).

Για την παραγωγή διαγραφιών θρυμμάτων, είναι απαραίτητη η αντιστοίχιση των παρατηρήσεων για τα θρύμματα με το βάθος από το οποίο προέκυψαν. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ της παραγωγής των θρυμμάτων στο μέτωπο της γεώτρησης και της εμφάνισής τους στην επιφάνεια. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δείκτες, οι οποίοι ελευθερώνονται στο μέτωπο της γεώτρησης και μετράται ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την εμφάνισή τους στην επιφάνεια. Οι δείκτες αυτοί είναι υγρά χημικά

ή στερεά όπως άμμος συγκεκριμένης κοκκομετρίας. Οι στερεοί δείκτες είναι οι πλέον αξιόπιστοι μιας και υποδεικνύουν την ταχύτητα της στερεής φάσης (θρύμματα).

## **6.2 Διαγραφίες περιεχόμενου στον πολφό αερίου (Mud Gas Logs)**

Οι διαγραφίες αυτές καταγράφουν την ποσότητα του αερίου που παράγεται όταν διατρήεται παραγωγικός σχηματισμός και μεταφέρεται στην επιφάνεια με την κυκλοφορία του γεωτρητικού πολφού, σε αντιστοιχία με το βάθος.

Το αέριο αυτό παράγεται λόγω της πτώσης πίεσης που λαμβάνει χώρα όταν διατρήεται ο σχηματισμός που περιέχει υδρογονάνθρακες. Σημειώνεται ότι οι ποσότητες αυτές είναι μικρές, καθώς πάντοτε λαμβάνεται πρόνοια έτσι ώστε η υδροστατική πίεση της στήλης του γεωτρητικού πολφού, να είναι στο βάθος που αναμένεται ο ταμιευτήρας, περίπου ίση με την πίεση που αναμένεται να έχουν τα ρευστά του ταμιευτήρα, έτσι ώστε η απότομη εκτόνωση των παγιδευμένων υδρογονανθράκων, να μην θέσει σε κίνδυνο την γεώτρηση αλλά και τον εξοπλισμό επιφανείας (blow out).

Οι διαγραφίες περιεχομένου αερίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό με ακρίβεια της στιγμής εισόδου στον ταμιευτήρα αλλά και για την εκτίμηση της παραγωγικής ικανότητας του. Ακόμη, με χρήση των διαγραφιών αυτών, ζώνες αυξημένης συγκριτικά παραγωγικής ικανότητας, όπως φυσικές ρωγμές, μπορούν να εντοπισθούν. Τα παραπάνω, με προϋπόθεση την καλή γνώση της γεωλογίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της θέσης της γεώτρησης.

Στις οριζόντιες γεωτρήσεις η ποσότητα του αερίου που απελευθερώνεται από τον ταμιευτήρα και καταγράφεται στην επιφάνεια, είναι συνάρτηση του πορώδους, του μεγέθους του κοπτικού, του ρυθμού διάτρησης αλλά της ακρίβειας του εξοπλισμού που ανιχνεύει και καταγράφει τα αέρια στην επιφάνεια.

## 7. Εφαρμογή σε Υποθαλάσσιο Ταμιευτήρα Υδρογονανθράκων

### 7.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος της θέσης της οριζόντιας γεώτρησης HW-1, έγινε με βάση την ακολουθία των σχηματισμών που απαρτίζουν την μάζα του ταμιευτήρα, όπως αυτή εμφανίζεται στις κλασικές διαγραφίες (wireline) που πραγματοποιήθηκαν στην κατακόρυφη-πilotική γεώτρηση VW-1. Καθώς οι διαγραφίες αυτές ήταν η κύρια πηγή πληροφοριών για την γεωλογία του ταμιευτήρα, οι σχηματισμοί-ορίζοντες που απαρτίζουν το γεωλογικό μοντέλο του ταμιευτήρα προσδιορίστηκαν σύμφωνα με την απόκριση τους στις διαγραφίες.

Μετά τον προσδιορισμό των οριζόντων του ταμιευτήρα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, και των βασικών πετροφυσικών τους χαρακτηριστικών (τιμή φυσικής ραδιενέργειας, πορώδες, πυκνότητα και βαθμοί κορεσμού σε ρευστά) έγινε μελέτη της διαγραφίας της οριζόντιας γεώτρησης HW-1 και προσπάθεια να αναγνωριστούν οι σχηματισμοί που αυτή διατρύει με σκοπό να ελεγχθεί η θέση της.

Υπήρχε η μεμονωμένη πληροφορία ότι μέσα στη τροχιά της γεώτρησης υπάρχει κανονικό ρήγμα, η οποία προέκυψε από τα σεισμικά ανάκλασης που έγιναν στην περιοχή. Έγινε προσπάθεια επιβεβαίωσης της ύπαρξης του ρήγματος και χωροθέτησης αυτού.

### 7.2 Γεωλογικό μοντέλο του ταμιευτήρα

Από την μελέτη των διαγραφιών της κατακόρυφης γεώτρησης προέκυψε το μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω.

1. **Cap-Rock** (178,5-151,5 m TVD RT) Αναγνωρίζεται από την δραματική άνοδο της ηλεκτρικής αντίστασης, όπως καταγράφεται από την μεγάλου βάθους διασκόπησης μέτρηση της DLL (LLD), από 7 έως 18 Ohmm και την ασταθή απόκριση της MSFL

έως και 1000 Ohmm. Η απόκριση της MSFL αποτελεί ένδειξη ότι ο συγκεκριμένος ορίζοντας δεν είναι ομογενής παρά αποτελείται από ενστρώσεις, μία εκ των οποίων πιθανότατα ψαμμιτική. Παρουσιάζει, τιμή φυσικής ραδιενέργειας της τάξης των 50° API και μαζική πυκνότητα 2,65 gr/cc.

2. **Sand A1** (151,5-154,5 m TVD RT) Πρόκειται περί του ανώτερου τμήματος του ταμιευτήρα με τιμή ηλεκτρικής αντίστασης 3,1 Ohmm, στο ανώτερο σημείο, έως 6,0 Ohmm στο κατώτερο. Η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 69 και 75° API και η μαζική πυκνότητα μεταξύ 2,65 και 2,43 gr/cc. Η καμπύλη της MSFL παρουσιάζεται ασταθής, με μεγάλες κορυφές και κοιλάδες κυμαινόμενη μεταξύ 1,0 και 7,0 Ohmm, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο συγκεκριμένος ορίζοντας είναι ανομοιογενής, με ενστρώσεις ενδεχομένως ανυδριτικές και αποτελεί μεταβατικό σχηματισμό μεταξύ του Cap-Rock και του ταμιευτήρα.
3. **Sand A2** (154,5-159,0 m TVD RT) Πρόκειται περί ομογενούς τμήματος του ταμιευτήρα που παρουσιάζει καλό διαχωρισμό μεταξύ των καμπυλών ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ 4,0 και 5,0 Ohmm, η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας μεταξύ 68 και 52° API και η μαζική πυκνότητα μεταξύ 2,33 και 2,42 gr/cc
4. **Αδιαπέρατος ορίζοντας** (159,0-162,0 m TVD RT) Αδιαπέρατη ένστρωση μέσα στην μάζα του ταμιευτήρα που χαρακτηρίζεται από ασταθή καμπύλη MSFL (0,8-5,0 Ohmm) και ηλεκτρική αντίσταση (2,2-6,0 Ohmm). Χαρακτηριστική είναι η μορφή των καμπυλών που παρουσιάζουν δύο κορυφές και μία κοιλάδα. Η μαζική πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 2,35 και 2,40 gr/cc, ενώ η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας μεταξύ 65 και 75° API.
5. **Sand B** (162,0-166,0 m TVD RT) Πρόκειται περί ομογενούς τμήματος του ταμιευτήρα με καλό διαχωρισμό των καμπυλών, χαμηλή και σχετικά ομαλή καμπύλη MSFL. Η ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ 2,2 και 4,2 Ohmm και η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας παρουσιάζει μέσο όρο 75° API ενώ η μαζική πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 2,25 και 2,35 gr/cc.

6. **Ανυδριτική ένσטרωση** (166,0-168,0 m TVD RT) Ένσטרωση με πολύ χαμηλή τιμή φυσικής ραδιενέργειας (30° API) και μαζική πυκνότητα 2,85 gr/cc. Χαρακτηρίζεται από ασταθή καμπύλη MSFL που κυμαίνεται μεταξύ 7,5 και 34 Ohmm.

7. **Sand C** (168,0-174,0 m TVD RT) Πρόκειται περί του κατώτερου πετρελαιοφόρου τμήματος του ταμιευτήρα. Χαρακτηρίζεται από καλό διαχωρισμό μεταξύ των καμπυλών και σχετικά ομαλή καμπύλη MSFL. Η ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4,5 Ohmm, η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας μεταξύ 68 και 80° API και η μαζική πυκνότητα μεταξύ 2,28 και 2,31 gr/cc.

### 7.3 Αξιολόγηση του ταμιευτήρα (Sand A1/2, B, C)

Οι ορίζοντες Sand A1/ 2, B, C αποτελούν τις παραγωγικές ζώνες του ταμιευτήρα. Έγινε αξιολόγηση των διαγραφιών με σκοπό να προσδιοριστούν, το πορώδες και οι βαθμοί κορεσμού σε περιεχόμενα ρευστά. Κατ' αρχήν προσδιορίστηκε η πραγματική ηλεκτρική αντίσταση του κάθε σχηματισμού, κατόπιν το πορώδες και τέλος υπολογιστικά, οι βαθμοί κορεσμού σε περιεχόμενα ρευστά (νερό και υδρογονάνθρακες).

#### 7.3.1 Προσδιορισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού

Η τιμή της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού, προκύπτει γραφικά από τις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης της διαγραφίας Dual Laterolog -R<sub>xo</sub> System.

Οι μετρήσεις φαίνονται στον **Πίνακα 7-1**<sup>1</sup>

**Πίνακας 7-1 Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης από την διαγραφία DLL/MSFL/GR**

Ορίζοντας	TVD (m)	R <sub>LLD</sub> (Ohmm)	R <sub>LLS</sub> (Ohmm)	R <sub>MSFL</sub> (Ohmm)
Sand A1	151,5	4,0	6,0 (X)	5,0 (X)
	152,0	3,2	2,5	1,0

<sup>1</sup> Οι τιμές που είναι σημειωμένες με (X) απορρίπτονται

Sand A2	153,0	4,0	3,5	3,0
	154,0	6,0	3,8	3,0
	154,5	5,0	3,2	2,0
	154,5	5,0	3,2	2,0
	155,0	4,8	3,0	1,2
	156,0	5,0	3,0	1,2
	157,0	4,0	2,5	1,4
	158,0	3,8	2,5	1,0
	159,0	4,0	2,5	1,0
Sand B	162,0	3,2	2,2	2,2
	163,0	4,0	2,8	2,0
	164,0	3,0	2,3	1,2
	165,0	3,5	2,5	0,9
	166,0	3,5	2,5	1,0
Sand C	168,0	4,0	3,0	3,0 (X)
	169,0	3,0	2,4	1,0
	170,0	4,0	3,0	1,0
	171,0	3,0	2,5	1,0
	172,0	3,0	2,5	1,0
	173,0	3,5	2,5	1,0
	174,0	2,5	2,0	0,9

Οι μέσες τιμές, βάση για τους υπολογισμούς, φαίνονται στον **Πίνακα 7-2**.



**Πίνακας 7-2 Μέσες τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων**

Ορίζοντας	$R_{LLD}$ (Ohmm)	$R_{LLS}$ (Ohmm)	$R_{MSFL}$ (Ohmm)
Sand A1	4,4	3,3	2,3
Sand A2	4,5	2,5	1,3
Sand B	3,4	2,5	1,5
Sand C	3,3	2,6	1,0

Οι παραπάνω τιμές διορθώθηκαν για την επίδραση της γεώτρησης, των περιβαλλόντων στρωμάτων και του mud-cake. Οι διορθώσεις έγιναν γραφικά με χρήση διαγραμμάτων.

Για την πραγματοποίηση των διορθώσεων είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν:

1. Η θερμοκρασία στο βάθος των σχηματισμών υπό έλεγχο.
2. Η ηλεκτρική αντίσταση του νερού των σχηματισμών στην θερμοκρασία των σχηματισμών.
3. Η ηλεκτρική αντίσταση του γεωτρητικού πολφού στην θερμοκρασία των σχηματισμών.
4. Η ηλεκτρική αντίσταση του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού (mud-cake) στην θερμοκρασία των σχηματισμών

### **7.3.1.1 Προσδιορισμός Θερμοκρασίας**

Από την επικεφαλίδα της διαγραφίας, όπου αναγράφονται όλες οι παράμετροι της διαγραφίας αλλά και βασικές μετρήσεις που γίνονται στο εργαστήριο, όπως οι ηλεκτρικές αντιστάσεις του γεωτρητικού πολφού και του επιχρίσματος του, προκύπτει ότι η θερμοκρασία στο πέρας της γεώτρησης (434,0 m) είναι 192,0 °F. Από τα στοιχεία αυτά (υποθέτοντας γραμμική Γεωθερμική Βαθμίδα) και τον τύπο :

$$GG = \frac{FTD}{BHT}$$

όπου :

$GG$ , η Γεωθερμική Βαθμίδα (Geothermal Gradient)

$FTD$ , το Τελικό Βάθος (Final Total Depth) και

$BHT$  η Θερμοκρασία στο πέρας της γεώτρησης (Bottom Hole Temperature)

Προκύπτει ότι η Γεωθερμική Βαθμίδα είναι  $0,079\text{ }^{\circ}\text{F/m}$ . Πολλαπλασιάζοντας την Γεωθερμική Βαθμίδα με το βάθος των σχηματισμών υπό έλεγχο προκύπτει ότι η θερμοκρασία των σχηματισμών κυμαίνεται μεταξύ  $170,1$  και  $171,3\text{ }^{\circ}\text{F}$ .

### 7.3.1.2 Προσδιορισμός ηλεκτρικών αντιστάσεων

Η ηλεκτρική αντίσταση του νερού των σχηματισμών προσδιορίστηκε γραφικά ως ηλεκτρική αντίσταση αλατούχου ( $\text{NaCl}$ ) διαλύματος με χρήση του διαγράμματος **Gen-9 (Παράρτημα Δ)**. Απαραίτητη παράμετρος είναι η αλατότητα του νερού η οποία είναι  $200\text{ Kppm}$ . Η αλατότητα είναι η συγκέντρωση του διασταμένου άλατος του Χλωριούχου Νατρίου στο νερό. Με χρήση του διαγράμματος **Gen-9 (Παράρτημα Δ)** η ηλεκτρική αντίσταση του νερού ( $R_w$ ) στην θερμοκρασία των σχηματισμών βρέθηκε :  **$R_w=0,02\text{ Ohmm}$** .

Από την επικεφαλίδα της διαγραφίας προκύπτει ότι η ηλεκτρική αντίσταση του γεωτρητικού πολφού είναι:  $R_m=0,083\text{ Ohmm}$  στην θερμοκρασία των  $85,0\text{ }^{\circ}\text{F}$  και του επιχρίσματος του, :  $R_{mc}=0.140\text{ Ohmm}$  στην ίδια θερμοκρασία. Από τον τύπο :

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{T_1 + 6.77}{T_2 + 6.77}$$

όπου :

$R_1$  η ηλεκτρική αντίσταση στην θερμοκρασία  $T_1$  και

$R_2$  η ηλεκτρική αντίσταση στην θερμοκρασία  $T_2$

Προκύπτει ότι η ηλεκτρική αντίσταση του γεωτρητικού πολφού στην θερμοκρασία των σχηματισμών είναι :  $R_m=0.043 \text{ Ohmm}$  και η ηλεκτρική αντίσταση του επιχρίσματος του στην ίδια θερμοκρασία είναι :  $R_{mc}=0.06 \text{ Ohmm}$ . Σημειώνεται εδώ ότι η διαφορά βάθους μεταξύ των σχηματισμών είναι αφενός μικρή και αφετέρου αμελητέα για την ακρίβεια που απαιτείται για την χρήση του παραπάνω τύπου.

### 7.3.1.3 Διορθώσεις

Για την χρήση των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης για την αξιολόγηση των παραγωγικών σχηματισμών είναι απαραίτητο αυτές να διορθωθούν για την επίδραση της γεώτρησης (διάμετρος και γεωτρητικός πολφός), του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού στα τοιχώματα της γεώτρησης και για την επίδραση των περιβαλλόντων τον σχηματισμό υπό έλεγχο, στρωμάτων (το αμέσως από επάνω).

Η γεώτρηση έχει διάμετρο 8 in και η ηλεκτρική αντίσταση του γεωτρητικού πολφού ( $R_m$ ) είναι 0,043 Ohmm στην θερμοκρασία των σχηματισμών. Η διόρθωση για την επίδραση της γεώτρησης στις μετρήσεις LLD και LLS, έγινε γραφικά με χρήση των διαγραμμάτων **Rcor-2c (Παράρτημα Δ)**. Οι διορθώσεις φαίνονται στον **Πίνακα 7-3**.

**Πίνακας 7-3 Διορθώσεις για την επίδραση της γεώτρησης (διάμετρος και γεωτρητικός πολφός) στα δεδομένα της διαγραφίας Laterolog**

Ορίζοντας	$R_{LLD}$ (Ohmm)	$R_{LLS}$ (Ohmm)	$R_{LLD}/R_m$	$R_{LLS}/R_m$	$R_{LLDcorr}$ (Ohmm)	$R_{LLScorr}$ (Ohmm)
Sand A1	4,4	3,3	102,3	76,7	4,4	3,3
Sand A2	4,5	2,5	104,7	58,1	4,5	2,5
Sand B	3,4	2,5	79,1	58,1	3,4	2,5
Sand C	3,3	2,6	76,7	60,5	3,3	2,6

Η διόρθωση για τη επίδραση του πάχους των στρωμάτων έγινε και εδώ γραφικά με χρήση του διαγράμματος **Rcor-10 (Παράρτημα Δ)**. Απαραίτητη παράμετρος (πέραν από το πάχος του σχηματισμού υπό έλεγχο) είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του γεωλογικού στρώματος επάνω από τον σχηματισμό υπό έλεγχο ( $R_s$ ). Η τιμή της εκτιμήθηκε από την ίδια διαγραφή. Οι διορθώσεις φαίνονται στον **Πίνακα 7-4**

**Πίνακας 7-4 Διορθώσεις για την επίδραση του πάχους των στρωμάτων στις μετρήσεις της διαγραφίας Laterolog**

Ζώνη	πάχος	$R_{LLD}$	$R_{LLS}$	$R_s$	$R_{LLD}/R_s$	$R_{LLS}/R_s$	$R_{LLDcorr}$	$R_{LLScorr}$
Sand A1	3	4,4	3,3	16,0	0,3	0,2	4,0	3,3
Sand A2	4,5	4,5	2,5	5,0	0,9	2,8	3,6	2,5
Sand B	3	3,4	2,5	6,0	0,6	0,4	3,1	2,5
Sand C	6	3,3	2,6	6,0	0,6	0,4	3,0	2,6

Η διόρθωση για την επίδραση του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού, έγινε γραφικά, με χρήση του διαγράμματος **Rxo-3 (Παράρτημα Δ)** και για πάχος mud-cake 1/8 in (3,2 mm). Η ηλεκτρική αντίσταση του mud-cake είναι 0,06 Ohmm. Στον **Πίνακα 7-5** φαίνονται οι διορθώσεις και τα αποτελέσματα συνολικά για κάθε ορίζοντα στον **Πίνακα 7-6**.

**Πίνακας 7-5 Διορθώσεις για την επίδραση του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού στις μετρήσεις της διαγραφίας Laterolog**

Ορίζοντας	$R_{MSFL}$ (Ohmm)	$R_{MSFL}/R_{mc}$	$CF^1_{MSFL}$	$R_{MSFLcorr}$ (Ohmm)
Sand A1	2,3	16,4	0,8	1,8

<sup>1</sup> Συντελεστής διόρθωσης (Correction Factor) ίσος με  $R_{MSFLcorr}/R_{MSFL}$

Sand A2	1,3	9,3	0,8	1,0
Sand B	1,5	25,0	0,9	1,4
Sand C	1,0	16,7	0,9	0,9

**Πίνακας 7-6 Διορθωμένες τιμές για τις μετρήσεις της διαγραφίας Laterolog**

Ορίζοντας	$R_{LLDcorr}$ (Ohmm)	$R_{LLScorr}$ (Ohmm)	$R_{MSFLcorr}$ (Ohmm)
Sand A1	4,0	3,3	1,8
Sand A2	3,6	2,5	1,0
Sand B	3,1	2,5	1,4
Sand C	3,0	2,6	0,9

Από τα παραπάνω και με χρήση του διαγράμματος **Rint-9b (Παράρτημα Δ)** προσδιορίζεται η πραγματική ηλεκτρική αντίσταση του κάθε ορίζοντα ( $R_t$ ) καθώς και η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης ( $di$ ). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 7-7**.

**Πίνακας 7-7 Αποτελέσματα για την πραγματική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ( $R_t$ ) με χρήση του διαγράμματος Rint-9b**

Ορίζοντας	$R_{LLD}/R_{LLS}$	$R_{LLD}/R_{XO}$	$R_t/R_{XO}$	$di$ (in)	$R_t$ (Ohmm)
Sand A1	1,2	2,2	2,0	50	3,6
Sand A2	1,4	3,6	4,5	35	4,5
Sand B	1,2	2,2	2,5	30	3,5
Sand C	1,2	3,3	4,0	25	3,6

### 7.3.2 Υπολογισμός του πορώδους

Ο προσδιορισμός του πορώδους έγινε γραφικά από την διαγραφή LDL/CNL (πυκνότητας και νετρονίων). Όπως έγινε και για τον προσδιορισμό της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών, καταγράφηκαν οι τιμές της πυκνότητας νετρονίων (NPHI) και της μαζικής πυκνότητας (RHOB) όπως εμφανίζονται στην διαγραφή, ανά ένα μέτρο και κατόπιν η αξιολόγηση έγινε με βάση τους μέσους όρους για κάθε ορίζοντα. Τα δεδομένα συνοψίζονται στον **Πίνακα 7-8**.

**Πίνακας 7-8 Δεδομένα από την διαγραφή LDL/CNL**

Ορίζοντας	TVD RT (m)	NPHI (Nφ) (v/v)	RHOB (gr/cc)
Sand A1	151,5	0,15	2,45
	152,0	0,135	2,35
	153,0	0,135	2,42
	154,0	0,135	2,40
	154,5	0,18	2,35
Sand A2	154,5	0,18	2,35
	155,0	0,17	2,33
	156,0	0,18	2,34
	157,0	0,165	2,35
	158,0	0,20	2,33
	159,0	0,165	2,35
Sand B	162,0	0,17	2,37
	163,0	0,18	2,33
	164,0	0,20	2,33
	165,0	0,23	2,24
	166,0	0,18	2,35
Sand C	168,0	0,18	(X)
	169,0	0,17	2,30
	170,0	0,20	2,27
	171,0	0,19	2,30
	172,0	0,20	2,28
	173,0	0,20	2,28
	174,0	0,19	2,27

Στον **Πίνακα 7-9** φαίνονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων για κάθε ορίζοντα, βάση για τον υπολογισμό του πορώδους.

**Πίνακας 7-9 Μέσοι όροι των δεδομένων από την διαγραφή LDL/CNL**

Ορίζοντας	NPHI (Nφ) (v/v)	RHOB (gr/cc)
Sand A1	14,7	2,40
Sand A2	14,7	2,34
Sand B	19,8	2,31
Sand C	19,0	2,28

Οι παραπάνω τιμές επεξεργάστηκαν ως εξής:

Οι ενδείξεις NPHI όπως καταγράφονται στην διαγραφή, μετατρέπονται σε μη διορθωμένο πορώδες νετρονίων (TNPHI), με χρήση του διαγράμματος **Por-14e** (**Παράρτημα Δ**). Οι διορθωμένες τιμές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7-10**:

**Πίνακας 7-10 Μετατροπή διορθωμένων τιμών πορώδους νετρονίων (NPHI) σε μη διορθωμένο (TNPHI)**

Ορίζοντας	NPHI (Nφ) (v/v)	TNPHI
Sand A1	14,7	14
Sand A2	14,7	14
Sand B	19,8	19
Sand C	19,0	19

Κατόπιν η ένδειξη TNPHI, διορθώθηκε για την επίδραση της γεώτρησης, διαμέτρου 8 1/2'', του ειδικού βάρους της λάσπης (13,52 lbs/U.S. gal), της θερμοκρασίας ( 170°F) και της αλατότητας του σχηματισμού (200 Kppm) με χρήση του νομογράμματος **Por-14c (Παράρτημα Δ)**. Οι παραπάνω τιμές όπως εμφανίζονται στην επικεφαλίδα της διαγραφίας. Οι διορθώσεις για κάθε φαινόμενο αθροίζονται αλγεβρικά και συμψηφίζονται με το TNPHI με αποτέλεσμα το διορθωμένο πορώδες νετρονίων (NPHI<sub>corr</sub>). Στον **Πίνακα 7-11** φαίνονται οι διορθώσεις για κάθε φαινόμενο .

**Πίνακας 7-11 Αλγεβρικές διορθώσεις για περιβαλλοντικά φαινόμενα στην ένδειξη μη διορθωμένου πορώδους νετρονίων (TNPHI)**

Περιβαλλοντικό φαινόμενο	Sand A1	Sand A2	Sand B	Sand C
Γεώτρηση	0	0	0	0
Βάρος πολφού	+1	+1	+0,5	+0,5
Θερμοκρασία	+2	+2	+3	+3
Αλατότητα	-4	-4	-4	-4
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	-1	-1	-0,5	-0,5

Οι διορθωμένες τιμές φαίνονται στον **Πίνακα 7-12**.

**Πίνακας 7-12 Διορθωμένες τιμές πορώδους νετρονίων (NPHI<sub>corr</sub>) και μαζικής πυκνότητας (RHOB) από την διαγραφή LDL/CNL**

Ορίζοντας	NPHI <sub>corr</sub> (v/v)	RHOB (gr/cc)
Sand A1	13,0	2,40
Sand A2	13,0	2,34
Sand B	18,5	2,31
Sand C	18,5	2,28

Τέλος, με χρήση του διαγράμματος **CP-1f (Παράρτημα Δ)** προσδιορίζεται το πορώδες (Φ) του κάθε ορίζοντα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 7-13**.

**Πίνακας 7-13 Αποτελέσματα για το πορώδες των σχηματισμών από την διαγραφή LDL/CNL**

Ορίζοντας	NPHI <sub>corr</sub> (v/v)	RHOB (gr/cc)	Φ (%)
Sand A1	13,0	2,40	17,0
Sand A2	13,0	2,34	19,5
Sand B	18,5	2,31	18,0
Sand C	18,5	2,28	19,5



### 7.3.3 Υπολογισμός βαθμών κορεσμού σε περιεχόμενα ρευστά

Υπολογίστηκαν οι βαθμοί κορεσμού της κάθε ζώνης σε νερό και υδρογονάνθρακες τόσο στην ζώνη διείσδυσης όσο και στο αδιατάρακτο ταμιευτήρα.

Ο υπολογισμός έγινε με βάση την αλγεβρική σχέση του Archie η οποία στην μορφή της για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε νερό στο αδιατάρακτο τμήμα του ταμιευτήρα είναι:

$$S_w = \sqrt{F \cdot \frac{R_w}{R_t}}$$

όπου,  $S_w$  ο βαθμός κορεσμού σε νερό στο αδιατάρακτο σχηματισμό

$R_w$  η ηλεκτρική αντίσταση του νερού του σχηματισμού

$R_t$  η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού και

$F$  ο συντελεστής του σχηματισμού που υπολογίζεται από την αλγεβρική σχέση του Humble :

$$F = 0,62 \cdot \phi^{-2,15}$$

όπου  $\phi$  το πορώδες του σχηματισμού.

Για τον υπολογισμό του αντίστοιχου βαθμού κορεσμού στην ζώνη διείσδυσης η εξίσωση παίρνει την μορφή :

$$S_{xo} = \sqrt{F \cdot \frac{R_{mf}}{R_{xo}}}$$

όπου,  $S_{xo}$  ο βαθμός κορεσμού σε νερό στην ζώνη διείσδυσης

$R_{mf}$  η ηλεκτρική αντίσταση του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού

$R_{xo}$  η ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού στην ζώνη διείσδυσης και

$F$  ο συντελεστής του σχηματισμού όπως ορίστηκε παραπάνω

Από τους παραπάνω βαθμούς κορεσμού για το νερό υπολογίζονται και οι αντίστοιχοι για τους υδρογονάνθρακες ως η διαφορά τους από το εκατό (100%)

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον **Πίνακα 7-14**.

**Πίνακας 7-14 Σύνοψη αξιολόγησης των παραγωγικών σχηματισμών**

Ορίζοντας	Rt	Rxo	Φ(%)	F	Sw(%)	So(%)	Sxo(%)	Sor(%)	di
Sand A1	3,6	1,8	17,0	28,0	39,4	60,6	59,8	40,2	50
Sand A2	4,5	1,0	19,5	20,8	30,4	69,6	69,2	30,7	35
Sand B	3,5	1,4	18,0	24,7	37,6	62,4	63,7	36,3	30
Sand C	3,6	0,9	19,5	20,8	34,0	66,0	72,9	27,1	25

#### 7.4 Συμπεράσματα από την αξιολόγηση των σχηματισμών

##### Sand A1

Παρουσιάζει την μικρότερη τιμή πορώδους και τον μικρότερο βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (μεταξύ των παραγωγικών σχηματισμών), αντίστοιχα 17,0% και 60,6%. Ταυτόχρονα, παρουσιάζει και την μικρότερη κινητικότητα υδρογονανθράκων (μεγάλος υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες, μέσα στην ζώνη διείσδυσης) που αποτελεί ένδειξη κακής διαπερατότητας του σχηματισμού. Τέλος παρουσιάζει και την μεγαλύτερη σε διάμετρο ζώνη διείσδυσης.

Τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι συμβατά με την αρχική διαπίστωση (βασισμένη στην απόκριση της MSFL απέναντι στον ορίζοντα αυτό) ότι πρόκειται περί ενός ανομοιογενούς μεταβατικού από το Cap-Rock προς στον ταμιευτήρα σχηματισμού. Έτσι εξηγείται η μειωμένη κινητικότητα των υδρογονανθράκων, το μικρό πορώδες και η μεγάλη ζώνη διείσδυσης.

### **Sand A2**

Παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή πορώδους (19,5%) και ταυτόχρονα τον μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (69,65%), μεταξύ των παραγωγικών σχηματισμών. Η κινητικότητα των υδρογονανθράκων είναι καλή (βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στη ζώνη διείσδυσης 30,7%) και η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης η μεγαλύτερη μεταξύ των παραγωγικών ζωνών. Ας σημειωθεί ότι παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού μεταξύ όλων των οριζόντων με διαφορά που κυμαίνεται μεταξύ 0,9 και 1,0 Ohmm.

### **Sand B**

Η τιμή του πορώδους είναι μέση (18,0%) και ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (62,4%) είναι ο μικρότερος μεταξύ των ομογενών παραγωγικών οριζόντων του ταμιευτήρα. Η κινητικότητα των υδρογονανθράκων είναι η χειρότερη μεταξύ των παραγωγικών οριζόντων (ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στην ζώνη διείσδυσης είναι ο μεγαλύτερος με τιμή 36,3%) ενώ η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης είναι μέση (30 in). Τα στοιχεία αυτά συγκλίνουν στο ότι ο ορίζοντας αυτός είναι ελαφρά πιο συμπυκνωμένος σε σχέση με τον **Sand A2**, με την διαφορά να γίνεται πιο αισθητή στη σύγκριση με τον **Sand C**.

### **Sand C**

Εμφανίζει την ίδια τιμή πορώδους με τον **Sand A2** (19,5%) και βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες ελαφρά μικρότερο (66,0% έναντι 69,6%). Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιείται έντονα σε σχέση με τους άλλους παραγωγικούς ορίζοντες είναι η πολύ καλή διαπερατότητα και κινητικότητα των υδρογονανθράκων: ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στην ζώνη διείσδυσης είναι ο μικρότερος (27,1%) ενώ μικρότερη είναι και η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης (25 in).

## 7.5 Η οριζόντια γεώτρηση HW-1

Η εργασία αυτή πραγματεύεται το οριζόντιο τμήμα διαμέτρου 6’’ της συγκεκριμένης γεώτρησης από το βάθος των 3719,0 m MD μέχρι το πέρας της στα 3999,0 m MD. Η οριζόντια εξάπλωση του τμήματος αυτού (κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου) είναι περίπου 226 μέτρα και η κλίση της γεώτρησης μεταβάλλεται γύρω από τις 90<sup>0</sup>.

Το τμήμα έως τα 3719,0 m MD είναι διαμέτρου 8 1/2’’ και σωληνωμένο με liner 7’’.

Από τα 3719,0 m MD και έως τα 3755,0 m MD η γεώτρηση πραγματοποιήθηκε χωρίς MWD ενώ από τα 3755,0 μέχρι τα 3880,0 m MD πραγματοποιήθηκε με χρήση του εργαλείου MWD Navigamma<sup>TM</sup> της Baker Hughes INTEQ το οποίο περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Στο τμήμα από τα 3850,0 έως τα 3880,0 m MD χρησιμοποιήθηκε το σύστημα LWD, MPR<sup>TM</sup>(FEMWD) της Baker Hughes INTEQ το οποίο περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Η γεώτρηση συνεχίστηκε έως το πέρας της στα 3999,0 m MD με χρήση του ίδιου εργαλείου (MPR<sup>TM</sup>(FEMWD)), ενώ στο τμήμα από τα 3719,0 μέχρι τα 3850 m MD πραγματοποιήθηκε διαγραφία με χρήση του ίδιου εργαλείου κατά τη διάρκεια ενός wiper trip πριν τη τοποθέτηση liner στην γεώτρηση.

## 7.6 Εξοπλισμός (MWD και LWD)

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα χρησιμοποιήθηκαν συσκευές της Baker Hughes INTEQ για τον έλεγχο της τροχιάς της γεώτρησης και της θέσης της σε σχέση με την γεωλογία του ταμειυτήρα. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι συσκευές αυτές.

### 7.6.1 NaviGamma <sup>TM</sup> (Baker Hughes INTEQ)

Η συσκευή MWD Navigamma <sup>TM</sup> της Baker Hughes INTEQ παρέχει μετρήσεις διεύθυνσης και φυσικής ραδιενέργειας πραγματικού χρόνου κατά την διάρκεια της όρυξης. Είναι διαμέτρου 4” και μήκους 29,0 ft (8,84 m) ενώ ζυγίζει 90,7 kg. Από κατασκευής η θέση του ανιχνευτή ακτινών γάμα και των οργάνων υπολογισμού της διεύθυνσης είναι σε απόσταση 0,33 και 1,4 μέτρων αντίστοιχα από το άκρο της συσκευής, πολύ κοντά δηλαδή στο κοπτικό. Το σύστημα επιτρέπει την προσαρμογή και αισθητήρα κλίσης κοντά στο κοπτικό (Near Bit Inclinator) και σε απόσταση 0,9 μέτρων. Ο ανιχνευτής ακτινών γάμα είναι απαριθμητής σπινθηρισμών Νατρίου ενώ για τον υπολογισμό της διεύθυνσης χρησιμοποιούνται τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα και μαγνητόμετρα. Οι μετρήσεις της διεύθυνσης περιλαμβάνουν κλίση και αζιμούθιο της στήλης αλλά και κλίση και προσανατολισμό (μαγνητικό και βαρυτικό) της συσκευής. Ακόμη υπάρχει αισθητήρας ο οποίος λαμβάνει μετρήσεις της θερμοκρασίας του οργάνου.

Η συσκευή αποτελείται από τα εξής τμήματα :

- **Διάταξη πομπού παλμών** Η διάταξη αυτή βρίσκεται στην κορυφή της συσκευής και είναι αυτή η οποία εξασφαλίζει την αποστολή των δεδομένων στην επιφάνεια μέσω ενός σταθερού παλμικού κύματος φορέα στο οποίο κωδικοποιούνται τα δεδομένα. Το κύμα αποκωδικοποιείται στην επιφάνεια και οι μετρήσεις καταγράφονται. Η απαραίτητα ενέργεια για την λειτουργία του πομπού παρέχεται από μια τουρμπίνα η οποία είναι τοποθετημένη ακριβώς κάτω από την διάταξη του πομπού και κινείται με την διέλευση του γεωτρητικού πολφού από αυτήν.
- **Μπαταρίες** Οι μπαταρίες αυτές αποτελούν την πηγή ενέργειας για τα ηλεκτρονικά μέτρησης διεύθυνσης και φυσικής ραδιενέργειας.
- **Ηλεκτρονικά διευθυντικών μετρήσεων** Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει τα όργανα μέτρησης της κλίσης και διεύθυνσης της στήλης αλλά και τον προσανατολισμό της όψης του κοπτικού εργαλείου.

- **Ανιχνευτής ακτινών γάμα** Είναι η συσκευή μέτρησης φυσικής ραδιενέργειας και αποτελείται όπως αναφέρθηκε από έναν απαριθμητή σπινθηρισμών Νατρίου.

Οι μετρήσεις καταγράφονται στην επιφάνεια όπου φθάνουν κωδικοποιημένες με παλμούς πίεσης μέσα από την στήλη του γεωτρητικού πολφού, ενώ αποθηκεύονται και στη μνήμη της συσκευής από όπου μπορούν να ληφθούν στη επιφάνεια.

Η συχνότητα με την οποία λαμβάνονται μετρήσεις μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και μπορεί να είναι ανά 80, 120 ή 160 δευτερόλεπτα σε λειτουργία πλήρους διασκόπησης (Full Survey Transmission) και ανά 120, 180, ή 240 δευτερόλεπτα σε λειτουργία χονδρικής διασκόπησης (Raw Data Transmission)

Η συσκευή βρίσκεται προστατευμένη μέσα σε βαριά διατρητικά στελέχη (drill collars). Οι σωλήνες αυτοί θα πρέπει να είναι μη μαγνητικοί, ούτως ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις διεύθυνσης και προσανατολισμού από την σωλήνωση. Ακόμη μη μαγνητική θα πρέπει να είναι και η σωλήνωση προ και μετά της συσκευής στην διατρητική στήλη. Υπάρχει όμως η δυνατότητα προσαρμογής μιας συσκευής στο όλο σύστημα η οποία και αναλαμβάνει την εξάλειψη της επίδρασης της σωλήνωσης στις μετρήσεις με αποτέλεσμα την τοποθέτηση της συσκευής πιο κοντά στο κοπτικό.

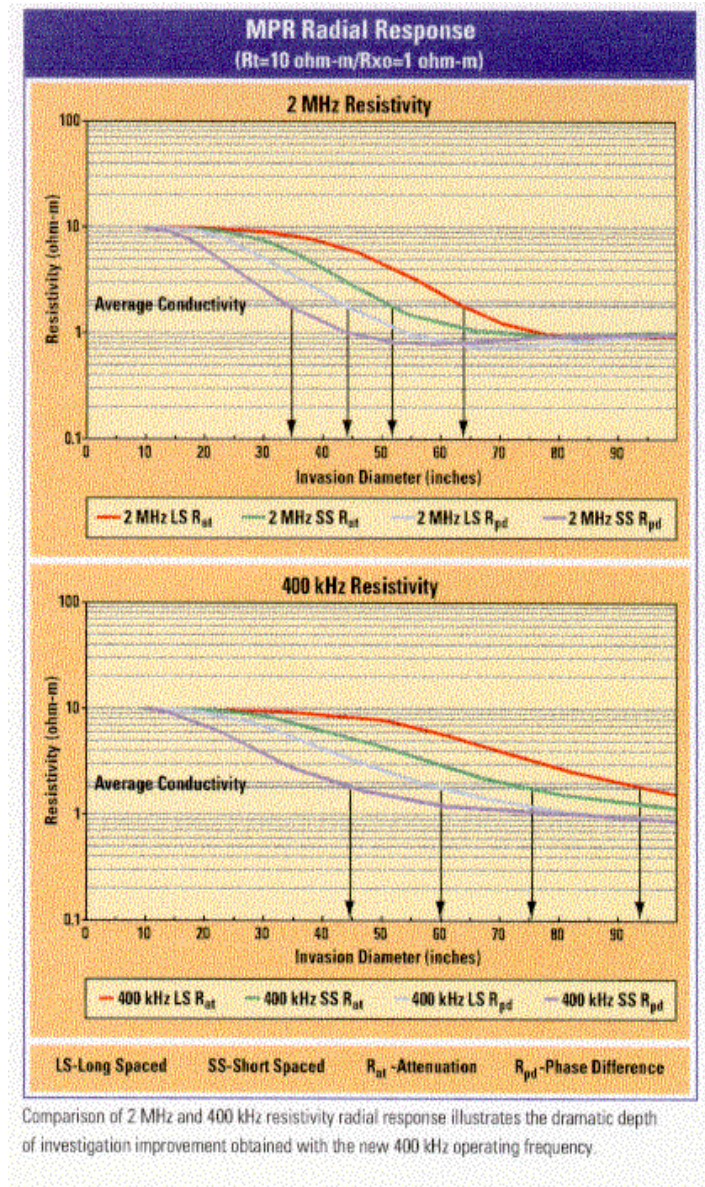
Τα τεχνικά στοιχεία του συστήματος παρουσιάζεται στο **Παράρτημα Ε**.

### 7.6.2 MPR<sup>TM</sup> (FEMWD) (Baker Hughes INTEQ)

Η συσκευή MPR<sup>TM</sup> (FEMWD) της Baker Hughes INTEQ ανήκει στην κατηγορία των εργαλείων LWD, τα οποία παρέχουν διαγραφίες ηλεκτρικής αντίστασης, φυσικής ραδιενέργειας και διεύθυνσης ταυτόχρονα με την όρυξη, τέτοιας ποιότητας που επιτρέπουν την αξιολόγηση του σχηματισμού αλλά και την ακριβή “οδήγηση” της διατρητικής στήλης προς τον σχηματισμό στόχο. Πέραν των διαγραφιών που αναφέρθηκαν το σύστημα παρέχει, με την προσαρμογή άλλων τμηματικών (modular) συσκευών διαγραφίες πυκνότητας και νετρονίων αλλά και πίεσης.

Το MPR™ (FEMWD) είναι διαμέτρου 6 3/4“, συνολικού μήκους 16,8 μέτρων και βάρους 1905 κιλών. Αποτελείται από δύο τμήματα εκ των οποίων το πρώτο περιλαμβάνει την συσκευή μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης και φυσικής ραδιενέργειας (ακτινών γάμα) και το δεύτερο την συσκευή διευθυντικών μετρήσεων. Το σημείο μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκεται 2,8, της κλίσης 1,3 και της φυσικής ραδιενέργειας 0,8 μέτρα πίσω από το πέρας της συσκευής. Η ίδια απόσταση για το σημείο μέτρησης της διεύθυνσης είναι 8,1 μέτρα. Οι αποστάσεις αυτές είναι ενδεικτικές και για την απόσταση των σημείων μέτρησης από το κοπτικό, η οποία εξαρτάται από την όλη αρχιτεκτονική της διατρητικής στήλης.

Η συσκευή μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης είναι διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και παρέχει 8 ποσοτικές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης σε 2 συχνότητες (400 kHz και 2MHz) με μέτρηση της διαφοράς φάσης και της εξασθένισης του λαμβανομένου κύματος. Η συσκευή χρησιμοποιεί δύο πομπούς ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκατέρωθεν ενός ζεύγους δεκτών. Οι πομποί λειτουργούν στην κλασσική (για εργαλεία LWD) συχνότητα των 2 MHz αποδίδοντας τέσσερις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, δύο με μέτρηση διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου κύματος και δύο με μέτρηση εξασθένισης (attenuation). Κάθε μία από τις μετρήσεις αυτές έχει και διαφορετικό βάθος διασκόπησης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7-1**. Η δεύτερη συχνότητα λειτουργίας της συσκευής είναι τα 400 kHz η οποία αποδίδει με όμοιο τρόπο τέσσερις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης με μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης από τις



αντίστοιχες μετρήσεις στα 2 MHz. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το βάθος διασκόπησης της 400 kHz LS R<sub>at</sub> είναι περίπου 2,4 μέτρα (95”) ενώ της αντίστοιχης 2 MHz LS R<sub>at</sub> είναι περίπου 1,6 μέτρα (65”). Το πλεονέκτημα των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης στα 400 kHz για εφαρμογές ελέγχου θέσης είναι εμφανές και αυτό λόγω του μεγάλου βάθους διασκόπησης που επιτρέπει την αναγνώριση σχηματισμών και ορίων που βρίσκονται πλησίον της γεώτρησης. Αντιθέτως οι μετρήσεις στην συχνότητα των 2 MHz παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της κατακόρυφης αναλυτικής ικανότητας, η οποία είναι περίπου 20cm για το 90% της απόκρισης σε αγωγίμους σχηματισμούς έναντι 30 cm για την συχνότητα των 400 kHz. Αυτό σημαίνει ότι στα 2 MHz η συσκευή αναγνωρίζει ως διαφορετικούς ορίζοντες πάχους έως και 20cm. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης του  $\pm 2\%$  και εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας και τον τρόπο υπολογισμού (διαφορά φάσης ή εξασθένισης).

Τα τεχνικά στοιχεία του συστήματος παρουσιάζεται στο **Παράρτημα Ε**.

## 7.7 Έλεγχος θέσης της γεώτρησης HW-1

Εάν θεωρήσουμε την γεωλογία του ταμιευτήρα γνωστή και σταθερή κατά μήκος της γεώτρησης, αν δεν εμφανίζονταν δηλαδή άγνωστα γεωλογικά φαινόμενα, ο έλεγχος θέσης της γεώτρησης θα ήταν απλή υπόθεση. Θα αρκούσε ο έλεγχος του πραγματικού βάθους και της διεύθυνσης του άξονα της γεώτρησης για τη εξακρίβωση της θέσης της τελευταίας. Ένα απλό δηλαδή σύστημα MWD θα ήταν αρκετό. Η αρχική όμως υπόθεση δεν ισχύει ούτε γενικά αλλά ούτε και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Πράγματι, στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι γνωστό εάν η γεώτρηση διαπερνά ή όχι κανονικό ρήγμα το οποίο εμφανίστηκε στα σεισμικά τριών διαστάσεων που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή. Ακόμη δεν είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του ενώ γενικά η γεωλογία του ταμιευτήρα στην τροχιά της γεώτρησης παρουσιάζει ασάφειες. Τα στοιχεία αυτά, αποδεικνύουν την ανάγκη που καλύπτουν τα συστήματα LWD τα οποία καλούνται να δώσουν στοιχεία σχετικά με την θέση της γεώτρησης, την γεωλογία του ταμιευτήρα και να καταστήσουν την αξιολόγηση του ταμιευτήρα δυνατή.



Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται, η διαγραφή προϊόν του MPR™(FEMWD) της Baker Hughes INTEQ καθώς και η ερμηνεία της, όσον αφορά στην θέση της γεώτρησης και στην γεωλογία του ταμιευτήρα κατά μήκος της γεώτρησης.

### **7.7.1 Η διαγραφή LWD**

Ο έλεγχος της θέσης της γεώτρησης έγινε με βάση την διαγραφή που προέκυψε από την συνένωση των διαγραφών των διαφόρων τμημάτων (όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 7.5) σαν να είχε πραγματοποιηθεί ολόκληρη η γεώτρηση με το σύστημα MPR™(FEMWD).

#### **7.7.1.1 Καμπύλες ηλεκτρικής αντίστασης**

Η διαγραφή που προέκυψε, αποτελείται από 3 καμπύλες ηλεκτρικής αντίστασης. Αναλυτικότερα :

1. **400 kHz (AT) (LS)** Προκύπτει από την μέτρηση της εξασθένισης μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου στον απομακρυσμένο δέκτη ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας 400 kHz. Έχει το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης (περίπου 2,35 μέτρα) αλλά και την μικρότερη αναλυτική ικανότητα. Τα χαρακτηριστικά της παραπάνω μέτρησης φαίνονται στον **Πίνακα 7-15**

**Πίνακας 7-15 Χαρακτηριστικά της 400 KHz (AT) (LS) μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης**

<i>400 KHz Attenuation Long Spaced Resistivity</i>	
<i>Εύρος</i>	0,1–200 Ohmm
<i>Ακρίβεια</i>	±5% [0,1–10 Ohmm] ±5.0 mmho/m [>10 Ohmm]
<i>Κατακόρυφη Διακριτική Ικανότητα</i>	12' (30 cm) για το 90% της απόκρισης, σε αγώγιμους σχηματισμούς
<i>Απόσταση σημείου μέτρησης από το κάτω άκρο της συσκευής</i>	9,3 ft (2.8 m)

2. **400 kHz (PD) (LS)** Προκύπτει από την μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου στον απομακρυσμένο δέκτη, ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας 400 kHz. Έχει μέσο βάθος διασκόπησης (περίπου 1,5 μέτρα). Τα χαρακτηριστικά της μέτρησης αυτής φαίνονται στον **Πίνακα 7-16**.

**Πίνακας 7-16 Χαρακτηριστικά 400 kHz (PD) (LS) μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης**

<i>400 kHz Phase Difference Long Spaced Resistivity</i>	
<i>Εύρος</i>	0.1-1000 Ohmm
<i>Ακρίβεια</i>	±1% [0.1-25 Ohmm] ±1.0 mmho/m [>25 Ohmm]
<i>Κατακόρυφη Διακριτική Ικανότητα</i>	12' (30 cm) για το 90% της απόκρισης, σε αγώγιμους σχηματισμούς
<i>Απόσταση σημείου μέτρησης από το κάτω άκρο της συσκευής</i>	9,3 ft (2.8 m)

3. **2 MHz (PD) (SS)** Προκύπτει από την μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου στον δέκτη πλησίον της πηγής ηλεκτρομαγνητικού

κύματος συχνότητας 2 MHz. Το βάθος διασκόπησης της μέτρησης είναι περίπου 90 cm (35in) Τα χαρακτηριστικά της μέτρησης αυτής φαίνονται στον **Πίνακα 7-17**.

**Πίνακας 7-17 Χαρακτηριστικά 2 MHz (PD) (SS) μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης**

<i>2 MHz Phase Difference Short Spaced Resistivity</i>	
<i>Εύρος</i>	0.1-3000 Ohmm
<i>Ακρίβεια</i>	±1% [0.1-50 Ohmm] ±0.5 mmho/m [>50 Ohmm]
<i>Κατακόρυφη Διακριτική Ικανότητα</i>	<8'' (20 cm) για το 90% της απόκρισης, σε αγωγίμους σχηματισμούς
<i>Απόσταση σημείου μέτρησης από το κάτω άκρο της συσκευής</i>	9,3 ft (2.8 m)

#### 7.7.1.2 Καμπύλη μέτρησης Φυσικής Ραδιενέργειας (Gamma Ray)

Η μέτρηση φυσικής ραδιενέργειας (ακτινών γάμα) ακολουθεί τις βασικές αρχές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.2. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μέτρησης φαίνονται στον **Πίνακα 7-18**.

**Πίνακας 7-18 Χαρακτηριστικά μέτρησης φυσικής ραδιενέργειας (ακτινών γάμα)**

<i>Gamma Ray Specifications</i>	
<i>Τύπος Ανιχνευτή</i>	Σπινθηρισμών
<i>Μέτρηση</i>	Βαθμοί API GR
<i>Πραγματικού Χρόνου</i>	NAI
<i>Καταγραφή (μνήμη)</i>	NAI
<i>Εύρος</i>	0-250 API
<i>Ακρίβεια</i>	±3% πλήρους κλίμακας
<i>Στατιστική Επαναληψιμότητα</i>	±3 API στα 100 API με ρυθμό διάτρησης 60 ft/hr (18,3 m/hr)
<i>Κατακόρυφη Διακριτική Ικανότητα</i>	6'' (15,3 cm)

### 7.7.2 Αξιολόγηση

Είναι χαρακτηριστική η μετατόπιση των καμπυλών στο τμήμα μεταξύ 3719,0 και 3880,0 m MD η οποία είναι και πιο έντονη στο τμήμα από τα 3719,0 έως τα 3813,0 m MD. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαγραφία στο τμήμα αυτό της γεώτρησης πραγματοποιήθηκε μετά την όρυξη και όχι με το σύστημα LWD, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εντόνων φαινομένων διείσδυσης διηθήματος γεωτρητικού πολφού. Τα τελευταία είναι υπεύθυνα για την μετατόπιση μεταξύ των καμπυλών μιας και οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης έχουν και διαφορετική διεισδυτική ικανότητα. Στο τμήμα από τα 3754,0 έως τα 3762,0 m MD η μετατόπιση αυτή είναι μικρή ενώ εκατέρωθεν είναι μεγάλη. Αυτό υποδηλώνει την μικρή περατότητα του συγκεκριμένου τμήματος γεγονός που είναι συμβατό και με την αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης που σημειώνεται.

Από την αρχή του οριζοντίου τμήματος της γεώτρησης και μέχρι τα 3832,0 m MD είναι χαρακτηριστική η αστάθεια της καμπύλης της 2MHz (PD) (SS) μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης, που έχει την μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα και την μικρότερη διείσδυση στον σχηματισμό, η οποία και υποδηλώνει ανομοιογένεια στον σχηματισμό.

Στα 3850,0 m MD εμφανίζεται μια μεγάλη πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης και μεγάλη αύξηση της τιμής της φυσικής ραδιενέργειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι προ και μετά του φαινομένου αυτού η ηλεκτρική αντίσταση παραμένει στα ίδια επίπεδα ενώ η τιμή της φυσικής ραδιενέργειας παρουσιάζει μια μικρή μόνο αύξηση.

Στο τμήμα από τα 3880,0 έως τα 3955,0 m MD οι καμπύλες των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται ομαλές και σχεδόν σταθερές περί τα 7 Ohmm. Η καμπύλη της φυσικής ραδιενέργειας παρουσιάζει κάποιες εξάρσεις στα 3879,0 και 3919,0 m MD. Η δεύτερη κορυφή αντικατοπτρίζεται και στις καμπύλες των ηλεκτρικών οι οποίες εμφανίζονται μετατοπισμένες μεταξύ τους. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται σε φαινόμενα διείσδυσης.

Από το βάθος των 3955,0 m MD και μέχρι το πέρας της γεώτρησης η 2MHz (PD) (SS) μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζεται ξανά ασταθής ενώ ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και η καμπύλη της μέτρησης φυσικής ραδιενέργειας, ιδιαίτερα μετά τα 3792,0 m MD. Η γεώτρηση εμφανίζεται να διατρύει και πάλι ανομοιογενή σχηματισμό.

### 7.7.3 Ερμηνεία της διαγραφίας

Η ερμηνεία της διαγραφίας της γεώτρησης HW-1 δεν είναι μονοσήμαντη για τον λόγο του ότι δεν είναι μονοσήμαντη η ερμηνεία του φαινομένου που παρουσιάζεται στα 3860 m MD. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να είναι το αναμενόμενο ρήγμα αλλά κάλλιστα και ένα ιζηματολογικό φαινόμενο μικρής εξάπλωσης όπως πηλώδες channel fill. Ακόμη, δεν παρουσιάζονται ισχυρές ενδείξεις οι οποίες θα υπεδείκνυν την μία ή την άλλη ερμηνεία. Η δυσκολία του προσδιορισμού του αναμενόμενου ρήγματος έγκειται στο ότι το πέρας της γεώτρησης δεν βρίσκεται μέσα στο Cap Rock παρά στην μάζα του ταμιευτήρα. Εάν η γεώτρηση σταματούσε στο Cap Rock ή σε άλλο σταθερό επίπεδο αναφοράς θα ήταν εύκολος ο προσδιορισμός του ρήγματος καθώς και των χαρακτηριστικών του.

Λόγω των παραπάνω προκύπτουν δύο ακραία σενάρια για την θέση της γεώτρησης και την γεωλογία του ταμιευτήρα κατά μήκος της. Το Σενάριο Α το οποίο δεν περιλαμβάνει ρήγμα και το Σενάριο Β το οποίο θεωρεί την ύπαρξη κανονικού ρήγματος μετάπτωσης 17 μέτρων κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης. Τα στοιχεία για το ρήγμα στο Σενάριο Β είναι αυτά που προέκυψαν από την ερμηνεία των σεισμικών τριών διαστάσεων<sup>1</sup>.

Τα δύο σενάρια, παρουσιάζονται παρακάτω :

---

<sup>1</sup> Τα σεισμικά τριών διαστάσεων και την ανάλυση και ερμηνεία, πραγματοποίησε η Wintershall η οποία απέδωσε στο ρήγμα τα εξής χαρακτηριστικά : Βορειοδυτική διεύθυνση, κανονική μορφή και μετάπτωση 15-17 μέτρα. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής η μετάπτωση θεωρήθηκε ίση με 17 μέτρα.

### Σενάριο Α : Χωρίς Ρήγμα

Η γεώτρηση από 3719,0 m MD έως και τα 3832,0 m MD διατρύει το ανώτερο ανομοιογενές τμήμα του ταμιευτήρα, **Sand A1** οπότε και εισέρχεται στον **Sand A2** τον οποίο και διατρύει έως τα 3955,0 m MD όπου και επανέρχεται στον **Sand A1**.

Αυτό δικαιολογείται ως εξής : Από τα 3719,0 έως τα 3832,0 m MD είναι χαρακτηριστική η αστάθεια της 2MHz μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης αντικατοπτρίζοντας ανομοιογένεια στον σχηματισμό. Το ίδιο ισχύει και για την μέτρηση φυσικής ραδιενέργειας. Ακόμη σε αυτό το τμήμα παρουσιάζεται μεγάλη ζώνη διείδυσης (τουλάχιστον 60'', όση και η διεισδυτική ικανότητα της 2MHz μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης). Υπενθυμίζουμε ότι ο **Sand A1** παρουσίασε την μεγαλύτερη μεταξύ των παραγωγικών σχηματισμών ίση με 50''. Τα στοιχεία αυτά υποδηλώνουν ότι η γεώτρηση βρίσκεται στον σχηματισμό **Sand A1**. Άλλωστε το ίδιο προκύπτει και από τον έλεγχο του πραγματικού κάθετου βάθους σύμφωνα με το γεωλογικό μοντέλο του ταμιευτήρα.

Στα 3833,0 m MD παύουν τα φαινόμενα ανομοιογένειας και η γεώτρηση εισέρχεται σε ομογενή ορίζοντα που αν λάβουμε υπ' όψιν και την κλίση της γεώτρησης στο σημείο αυτό ( $88.3^{\circ}$ ), είναι αναπόφευκτα ο **Sand A2**.

Η πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης και η άνοδος της τιμής της φυσικής ραδιενέργειας στα 3860,0 m MD είναι πιθανότατα περιορισμένο ιζηματολογικό φαινόμενο όπως πηλώδες channel fill ενδεχομένως όμοιο με αυτά που παρουσιάστηκαν ως πτώσεις της ηλεκτρικής αντίστασης στα 3776,0 και 3822,0 m MD. Σημαντική ένδειξη προς την κατεύθυνση αυτή είναι το γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη μετά το φαινόμενο σε σύγκριση με προ αυτού.

Στα 3955,0 m MD επανεμφανίζονται τα φαινόμενα αστάθειας στην 2MHz μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης που σηματοδοτούν την από κάτω είσοδο της γεώτρησης στον **Sand A1**, εξ' ου και η ανομοιογένεια που αντικατοπτρίζεται στην διαγραφή.

Το πέρας της γεώτρησης βρίσκεται σε πραγματικό κάθετο βάθος 150,4 m TVD μέσα στη μάζα του **Sand A1** καθώς δεν υπάρχουν ενδείξεις για την έξοδο της γεώτρησης στο Cap Rock. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πάχυνση των στρωμάτων κατά την διεύθυνση του πέρατος της γεώτρησης.

### **Σενάριο B: Ρήγμα Κανονικό Μετάπτωσης 17m**

Το διαφορετικό του σεναρίου B έγκειται στην ερμηνεία του φαινομένου στα 3860,0 m MD. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως ρήγμα μιας και τόσο η δραματική πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης όσο και η εξίσου δραματική αύξηση της τιμής της φυσικής ραδιενέργειας μπορούν να δικαιολογηθούν από την μυλονιτίωση και την αυξημένη παρουσία νερού. Η ερμηνεία αυτή αφενός είναι τεκμηριωμένη και αφετέρου συνάδει με το ότι η διάτρηση του ρήγματος από την γεώτρηση αναμενόταν από την ανάλυση των τρισδιάστατων σεισμικών που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή. Το Σενάριο B δέχεται την ανάλυση των σεισμικών που πραγματοποιήθηκε και απέδωσε στο ρήγμα μετάπτωση 15 με 17 μέτρα και κανονική μορφή.

Η γεώτρηση διατρύει τους σχηματισμούς **Sand A1** και **Sand A2** όπως περιγράφηκε στο Σενάριο A και στα 860 m MD διαπερνά ρήγμα κανονικό μετάπτωσης 17 μέτρων. Μετά το ρήγμα η γεώτρηση διατρύει τον ομοιογενή σχηματισμό **Sand C** γεγονός το οποίο γίνεται εμφανές και από την διαγραφία λόγω της ομαλότητας των καμπυλών.

Στα 3955,0 m MD η γεώτρηση βρίσκεται στο μέσο τμήμα του **Sand C** το οποίο και εμφανίζεται ανομοιογενές στην διαγραφία της κατακόρυφης πιλοτικής γεώτρησης. Πράγματι στην διαγραφία LWD εμφανίζονται δείγματα ανομοιογένειας με την αστάθεια των καμπυλών. Το στοιχείο αυτό, αλλά και η ομοιογένεια του σχηματισμού που διατρήεται από την οριζόντια γεώτρηση αποτελούν ισχυρές ενδείξεις ότι ο σχηματισμός πέραν του πιθανού ρήγματος είναι ο **Sand C**.

## 7.8 Συμπεράσματα από τον έλεγχο θέσης

- Η οριζόντια γεώτρηση HW-1, όσον αφορά στο τμήμα των 6'' παρέμεινε σε όλο της το μήκος μέσα στην μάζα του ταμιευτήρα.
- Από το πόδι του liner 7'' στα 3719,0 m MD και μέχρι τα 3832,0 m MD η γεώτρηση διαπερνά το ανώτερο ανομοιογενές τμήμα του ταμιευτήρα, **Sand A1**.
- Από τα 3832,0 m MD και μέχρι το βάθος των 3860,0 m MD η γεώτρηση διατρύει το άνω ομοιογενές τμήμα του ταμιευτήρα, **Sand A2**.
- Με την διαγραφή ως πηγή πληροφοριών και μόνο δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του πιθανολογούμενου ρήγματος και η εύρεση με βεβαιότητα εάν η γεώτρηση το διατρύει ή όχι. Δύο ισοδύναμα σενάρια παρουσιάστηκαν το κάθε ένα με ενδείξεις υπέρ και κατά\_
- Σύμφωνα με το **Σενάριο A**, στα 3860,0 m MD εμφανίζεται channel fill μέσα στην μάζα του άνω ομοιογενούς τμήματος του ταμιευτήρα, Sand A2, τον οποίο και η γεώτρηση διατρέχει έως το βάθος των 3955,0 m MD. Στο βάθος των 3955,0 m MD η γεώτρηση εισέρχεται από κάτω προς τα πάνω με κλίση  $91.0^{\circ}$  στο ανώτερο ανομοιογενές τμήμα του ταμιευτήρα **Sand A1**. Το πέρας της γεώτρησης βρίσκεται μέσα στην μάζα του **Sand A1** σε πραγματικό βάθος 149.9 μέτρων, 33.1 μέτρα πάνω από την διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου. Ενδείξεις υπέρ του **Σεναρίου A** αποτελούν τα εξής :
  - ◊ Αντίστοιχες πτώσεις της ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται και σε άλλα σημεία (3776 και 3822 m MD).
  - ◊ Η ηλεκτρική αντίσταση προ και μετά του φαινομένου παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη.
- Σύμφωνα με το Σενάριο B, η γεώτρηση συναντά το αναμενόμενο, κανονικό ρήγμα με μετάπτωση 17 μέτρων σε βάθος 3860,0 m MD και εισέρχεται στο κατώτερο



ομοιογενές τμήμα του ταμιευτήρα **Sand C** τον οποίο και διατρέχει έως το πέρας της. Ενδείξεις υπέρ του **Σεναρίου B** αποτελούν τα εξής :

- ◇ Η διάτρηση του ρήγματος αναμενόταν σύμφωνα με την χωροθέτηση του από την ανάλυση των σεισμικών τριών διαστάσεων.
- ◇ Αναγνωρίστηκαν (χωρίς μεγάλη βεβαιότητα ωστόσο) πετροφυσικά χαρακτηριστικά του ορίζοντα **Sand C** πέραν του πιθανολογούμενου ρήγματος.
- Ενδείξεις για την συνέχεια του ανυδρικού στρώματος, που εμφανίστηκε στην πιλοτική κατακόρυφη γεώτρηση στο πραγματικό βάθος των 166,0 m, κατά μήκος της γεώτρησης και στην μάζα του ταμιευτήρα, δεν υπάρχουν.

## 7.9 Γεωλογική τομή

Όταν χρησιμοποιούνται υπηρεσίες LWD για την όρυξη γεωτρήσεων, καταγράφονται με μεγάλη ακρίβεια οι κατευθυντικές παράμετροι της γεώτρησης, όπως το πραγματικό κάθετο βάθος της γεώτρησης και ο προσανατολισμός της. Με χρήση των παραπάνω παραμέτρων, είναι δυνατόν να τοποθετηθεί η γεώτρηση στον τρισδιάστατο χώρο με ακρίβεια.

Από τις παραπάνω παραμέτρους μόνον το πραγματικό κατακόρυφο βάθος ήταν διαθέσιμο για την παρούσα εργασία. Είναι προφανές ότι η τοποθέτηση της γεώτρησης στον τρισδιάστατο χώρο είναι αδύνατη. Είναι δυνατή όμως η παραγωγή μιας κατακόρυφης τομής κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης και τοποθέτηση της σε δισδιάστατο χώρο. Είναι ακόμη δυνατή η παρουσίαση των γεωφυσικών διαγραφιών LWD κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης συναρτήσει της οριζόντιας εξάπλωσης της γεώτρησης, αντί του μετρούμενου βάθους (Measured Depth, MD) ή του πραγματικού κατακόρυφου βάθους (True Vertical Depth, TVD). Είναι ακόμη δυνατή η γραφική παρουσίαση της γεωφυσικής διαγραφίας κατά μήκος του ίχνους της γεώτρησης και κάθετα σε αυτό (Grant και Sloan, 1994).

Μια τέτοια απεικόνιση παρουσιάζει μερικά πλεονεκτήματα :

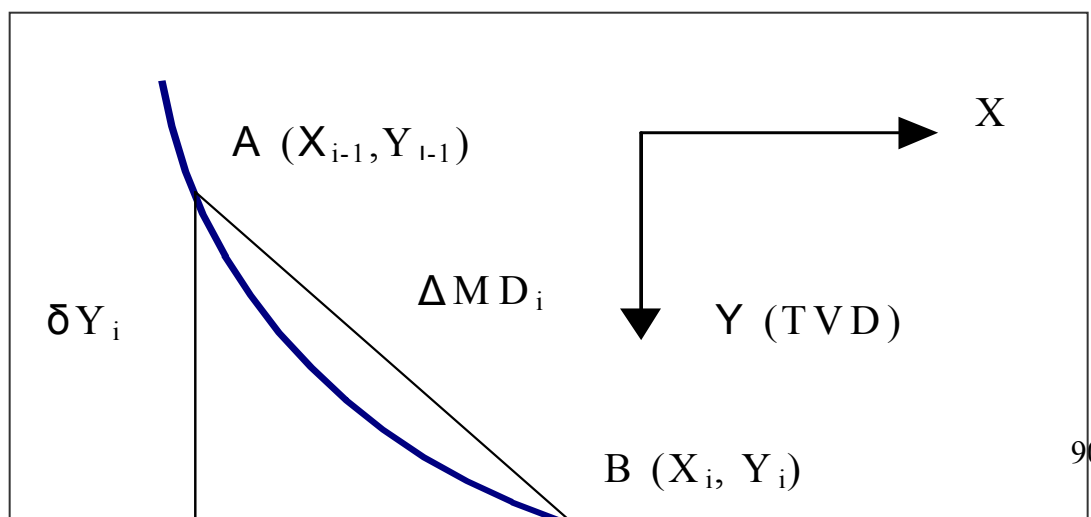
- Επιτρέπει την χωροθέτηση, κατά την οριζόντια διάσταση τουλάχιστον (κατά μήκος του αζιμουθίου της γεώτρησης), γεωλογικών φαινομένων που παρουσιάζονται και αναγνωρίζονται στη διαγραφία.
- Επιτρέπει την προσέγγιση και εποπτική παρουσίαση της γεωλογίας κατά μήκος της γεώτρησης. Η ακρίβεια της προσέγγισης, εξαρτάται από την ακρίβεια και βεβαιότητα της γεωλογικής ερμηνείας της γεωφυσικής διαγραφίας.
- Επιτρέπει τον συσχετισμό διαγραφιών από διαφορετικές γεωτρήσεις μεταξύ τους.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται ο αλγόριθμος με χρήση του οποίου παράγεται κατακόρυφη τομή κατά μήκος της γεώτρησης και η γεωλογική τομή του υπό μελέτη ταμιευτήρα.

### 7.9.1 Γραφική απεικόνιση τροχιάς αποκλίνουσας γεώτρησης

Η τροχιά της γεώτρησης απεικονίζεται σε καρτεσιανό σύστημα όπου ο κατακόρυφος άξονας είναι το πραγματικό βάθος (TVD) και ο οριζόντιος η οριζόντια εξάπλωση της γεώτρησης. Η οριζόντια εξάπλωση είναι η οριζόντια απομάκρυνση της γεώτρησης από το σημείο εισόδου στην επιφάνεια, μετρούμενη κατά μήκος του αζιμουθίου της.

Το πραγματικό βάθος καταγράφεται και λαμβάνεται σε ηλεκτρονική μορφή ή



Σχήμα 7-2 Γραφική απεικόνιση του Πυθαγόρειου Θεωρήματος για τον υπολογισμό της οριζόντιας μετατόπισης αποκλίνουσας γεώτρησης.

γραφικά από τις συσκευές MWD ενώ η οριζόντια εξάπλωση πρέπει να υπολογιστεί. Αυτό γίνεται με χρήση του Πυθαγόρειου Θεωρήματος όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7-1**. Οι μετρήσεις των διαγραφιών, και το πραγματικό βάθος δηλαδή, καταγράφονται συνήθως ανά μισό πόδι (0,5 ft, 0,15 m περίπου). Για κάθε τέτοιο διάστημα, μια στοιχειώδη οριζόντια μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί, το άθροισμα των οποίων αποδίδει την συνολική οριζόντια μετατόπιση.

Από το **Σχήμα 7-2**, φαίνεται ότι ισχύει :

$$X = \sum \delta X_i$$

$$\delta X_i = \sqrt{(\delta MD)^2 - \delta Y_i^2}$$

όπου

$X$ , η συνολική οριζόντια μετατόπιση

$\delta X_i$ , η στοιχειώδης οριζόντια μετατόπιση

$\delta MD$ , το στοιχειώδες βήμα του μετρούμενου βάθους (Measured Depth Increment) και

$Y_i$ , η στοιχειώδης μεταβολή του πραγματικού κάθετου βάθους

### 7.9.2 Γραφική απεικόνιση της τροχιάς της οριζόντιας γεώτρησης HW1

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο και με χρήση του λογισμικού πακέτου Excel™ της Microsoft δημιουργήθηκε κατακόρυφη τομή η οποία απεικονίζει την τροχιά της οριζόντιας γεώτρησης HW-1. Σημειώνεται ότι, το σχήμα απεικονίζει το υπό μελέτη τμήμα μόνον. Η τομή φαίνεται στο **Παράρτημα Γ**.

Η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα (πραγματικό βάθος) ορίστηκε έτσι ώστε να απεικονίζονται με ευκρίνεια οι αλλαγές στην πορεία της γεώτρησης, έτσι ώστε να αποτελεί βοήθημα για τον έλεγχο της θέσης της γεώτρησης.

Στο **Παράρτημα Α** φαίνεται και η διαγραφή LWD συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης (Lateral Displacement Log). Αυτό έγινε ως εξής :

Στην αρχική μορφή της διαγραφίας οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης και φυσικής ραδιενέργειας αντιστοιχίζονταν σε μια τιμή πραγματικού και μετρούμενου βάθους. Για κάθε βήμα του μετρούμενου βάθους (0,1 m) υπολογίστηκε, σύμφωνα με την μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου, η οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης. Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές των μετρήσεων συνδέθηκαν με την τιμή της οριζόντιας μετατόπισης έως το συγκεκριμένο μετρούμενο βάθος. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στον **Πίνακα 7-19**. Με τον τρόπο αυτό παράγεται η αντίστοιχη διαγραφή συναρτήσει της οριζόντιας εξάπλωσης αντί του μετρούμενου ή πραγματικού βάθους. Με την ερμηνεία της διαγραφίας αυτής παράγεται η γεωλογική τομή κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης.

**Πίνακας 7-19 Γραφική απεικόνιση αλγορίθμου αντιστοίχισης μετρήσεων διαγραφίας στην τιμή της οριζόντιας μετατόπισης της γεώτρησης**

Μετρούμενο Βάθος (MD)	Κατακόρυφο Βάθος (TVD)	Οριζόντια Μετατόπιση	Ηλ. Αντίσταση (Resistivity)
$MD_{i-1}$	$TVD_{i-1}$	$X_{i-1} (MD_{i-2}, MD_{i-1})$	$R_{i-1} (MD_{i-1})$
$MD_i$	$TVD_i$	$X_i (MD_{i-1}, MD_i)$	$R_i (MD_i)$
$MD_{i+1}$	$TVD_{i+1}$	$X_{i+1} (MD_i, MD_{i+1})$	$R_{i+1} (MD_{i+1})$

### 7.9.3 Γεωλογική τομή ταμιευτήρα

Τα γεωλογικά φαινόμενα και όρια τα οποία προσδιορίστηκαν με την μελέτη της διαγραφίας LWD συναρτήσει του μετρούμενου βάθους, είναι αμετάβλητα στην διαγραφή συναρτήσει της οριζόντιας εξάπλωσης. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η χωροθέτηση τους που πλέον είναι στον δισδιάστατο χώρο. Στο **Παράρτημα Γ** φαίνονται οι γεωλογικές τομές κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης, μία για κάθε σενάριο.

Για την παραγωγή των γεωλογικών τομών του ταμιευτήρα έγιναν κάποιες παραδοχές :

- Η στρωματογραφία του κοιτάσματος θεωρήθηκε ότι είναι αυτή που εμφανίζεται στην κατακόρυφη γεώτρηση VW-1. Προσαρμογές έγιναν ωστόσο τόσο στην κλίση (δεν παρουσιάζονται οριζόντια) όσο και στο πάχος των γεωλογικών στρωμάτων όπως υποδεικνύεται από την ποιοτική ερμηνεία της διαγραφίας LWD.

- Τα όρια μεταξύ των οριζόντων και των στρωμάτων, αν και δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν επακριβώς θεωρήθηκαν καλώς ορισμένα και ως τέτοια παρουσιάζονται.

- Είναι πρακτικώς αδύνατο, στα πλαίσια της εργασίας αυτής τουλάχιστον, να αποδοθεί ορθώς η γεωλογική πραγματικότητα του ταμιευτήρα. Οι γεωλογικές τομές, παρουσιάζουν δύο πιθανές ερμηνείες της γεωλογικής πραγματικότητας του ταμιευτήρα, βασισμένες σε περιορισμένα δεδομένα που ήταν οι διαγραφίες της κατακόρυφης πιλοτικής γεώτρησης, η διαγραφή LWD ενός τμήματος μόνον της γεώτρησης και η μεμονωμένη πληροφορία για το ρήγμα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα δύο διαφορετικά γεωλογικά σενάρια διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και ότι μόνον το ένα είναι αληθινό. Το γεγονός ότι η ανάλυση των σεισμικών ανάκλασης εμφανίζει ρήγμα στην μάζα του ταμιευτήρα αποτελεί ισχυρότατη ένδειξη για το αληθές του Σεναρίου Β όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο και στην αντίστοιχη γεωλογική τομή. Με χρήση όμως της διαγραφίας LWD και μόνον ήταν αδύνατη η βέβαιη αναγνώριση και τοποθέτηση του ρήγματος κατά μήκος της τροχιάς της γεώτρησης. Άλλωστε η διερεύνηση της ικανότητας της συγκεκριμένης διαγραφίας να αποδώσει την γεωλογία του ταμιευτήρα ήταν ένας στόχος της εργασίας αυτής.

## Βιβλιογραφία

1. Aguilera R. et al. (1991) Contributions in Petroleum and Engineering Volume 9 "Horizontal Wells". Gulf Publishing Company, Houston Texas.
2. Anderson B. et al "ELMOD Putting Electromagnetic Modeling to Work to Improve Resistivity Log Interpretation" SPWLA Thirtieth Annual Logging Symposium, June 11-14, 1989. Paper M.
3. Βαφείδης Α. (1994) «Αξιολόγηση Σχηματισμών με Γεωφυσικές Μεθόδους» Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.
4. Bergt D., "An open window" Exploration and Production International 1998 p. 55
5. Burgess T. "An Underground Revolution" Exploration and Production International 1998 p. 107
6. Decker D., Burgess T., "Knowing where you' re at" Exploration and Production International 1998 pp. 105-106
7. Dellinger T. B. "Directional technology will extend drilling reach" Oil and Gas Journal, September 15, 1980 pp. 153-169
8. Gianzero S. et al "A new Resistivity Toll for Measurement-While-Drilling" SPWLA Twenty-sixth Annual Logging Symposium, June 17-20, 1985. Paper A
9. Grant N. T. , Sloan H. "Plotting log data from deviated and horizontal wells: a spreadsheet-based method". First Break VOL 12, No 12 December 1994/597
10. Jackson C. E. , Fredericks P. D. (1995) "Proactive Use of Logging While Drilling (LWD) Measurements Improve Horizontal Well Drilling and Subsequent Evaluation" IADC/SPE Paper 37157
11. Jogi P. N. et al. "Three Dimensional Bottomhole Assembly Model Improves Directional Drilling" IADC/SPE Paper 14768
12. Mahony B. J. "Horizontal drilling use on the rise: Why and How". World Oil October 1988 pp. 45-57
13. Montigny O. "Horizontal-well drilling data enhance reservoir appraisal" Oil & Gas Journal, July 4, 1988 pp. 40-48
14. Murphy P. D. "What's new in MWD and formation Evaluation" World Oil /March 1998 pp. 41-45.
15. Najia W. K.(1991) "Formation Evaluation of a Horizontal Well" SPE Paper 21315
16. Prilliman J. D. et al. (1995) "Horizontal Well Placement and Petrophysical Evaluation Using LWD" SPE Paper 30549
17. Schlumberger Educational Services (1991) "Log Interpretation Charts".
18. Schlumberger Educational Services (1991) "Log Interpretation Principles/Applications".
19. Singer J. M. "An Example of Log Interpretation in Horizontal Wells". The Log Analyst March-April, 1992 pp. 85-95

20. Tanguy D. R. , Zoeller W. A. “Applications of measurements while drilling” SPE Paper 10324
21. White J. (1991) “Recent North Sea experience in formation evaluation of horizontal wells”. SPE Paper 23114

## **Παράρτημα Α: Διαγραφίες LWD**

- Διαγραφή Μετρούμενου Βάθους (Measured Depth Log)
- Διαγραφή Οριζόντιας Εξάπλωσης (Lateral Displacement Log)



## Παράρτημα Β: Διαγραφίες Κατακόρυφης Γεώτρησης

- **LDL<sup>1</sup> / CNL<sup>1</sup> / GR** Διαγραφίες **Litho Density<sup>1</sup> Log** (Πυκνότητας), **Compensated Neutron<sup>1</sup> Log** (Νετρονίων) και **Gamma Ray** (Φυσικής Ραδιενέργειας)
- **DLL / MSFL<sup>1</sup> / GR** Διαγραφίες **Dual Laterolog** (Ηλεκτρικής Αντίστασης), **MicroSFL<sup>1</sup>** (Ηλεκτρικής Αντίστασης) και **Gamma Ray** (Φυσικής Ραδιενέργειας)

---

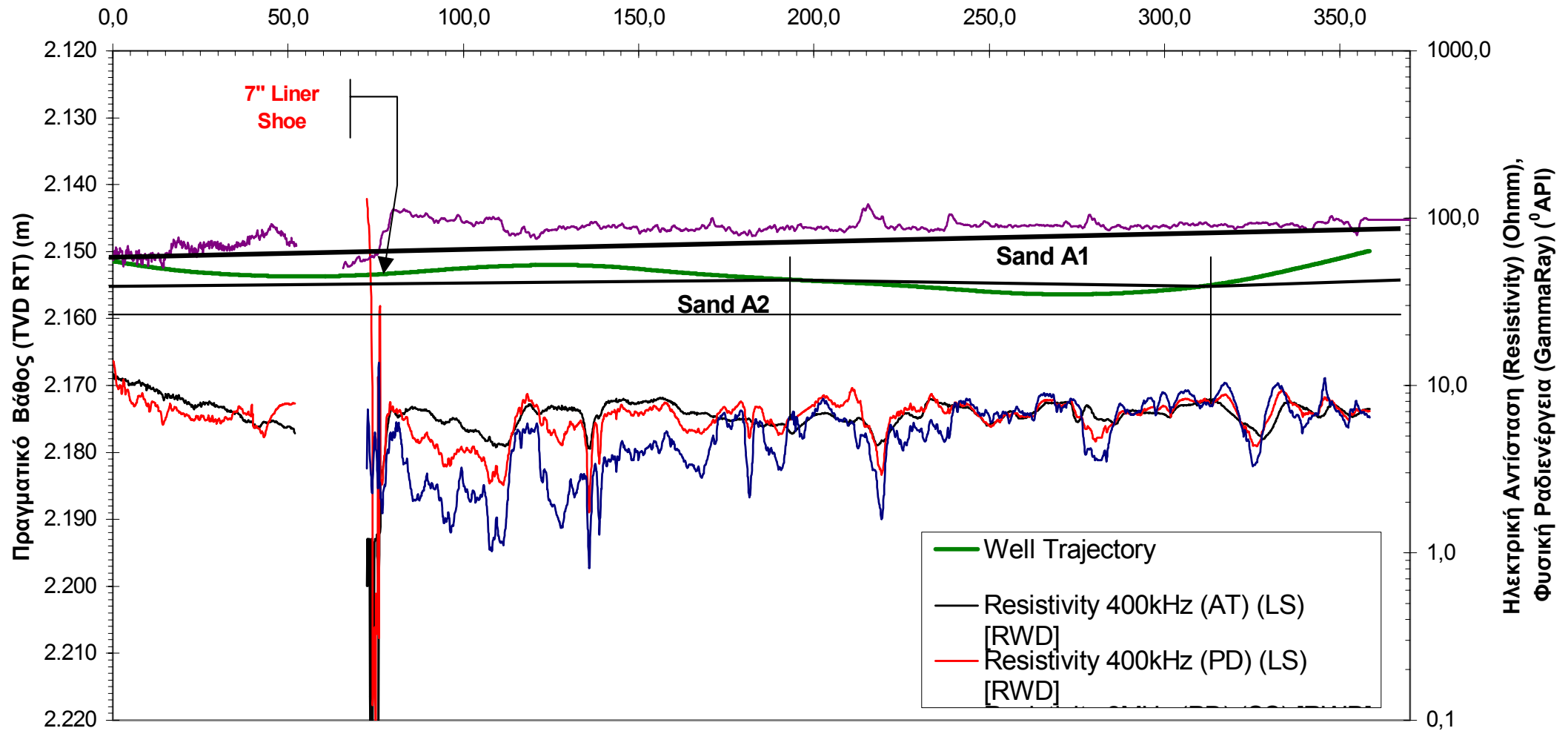
<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger

## **Παράρτημα Γ: Γεωλογικές Τομές**

- Σενάριο Α (Χωρίς Ρήγμα)
- Σενάριο Β (Ρήγμα κανονικό μετάπτωσης 17m)

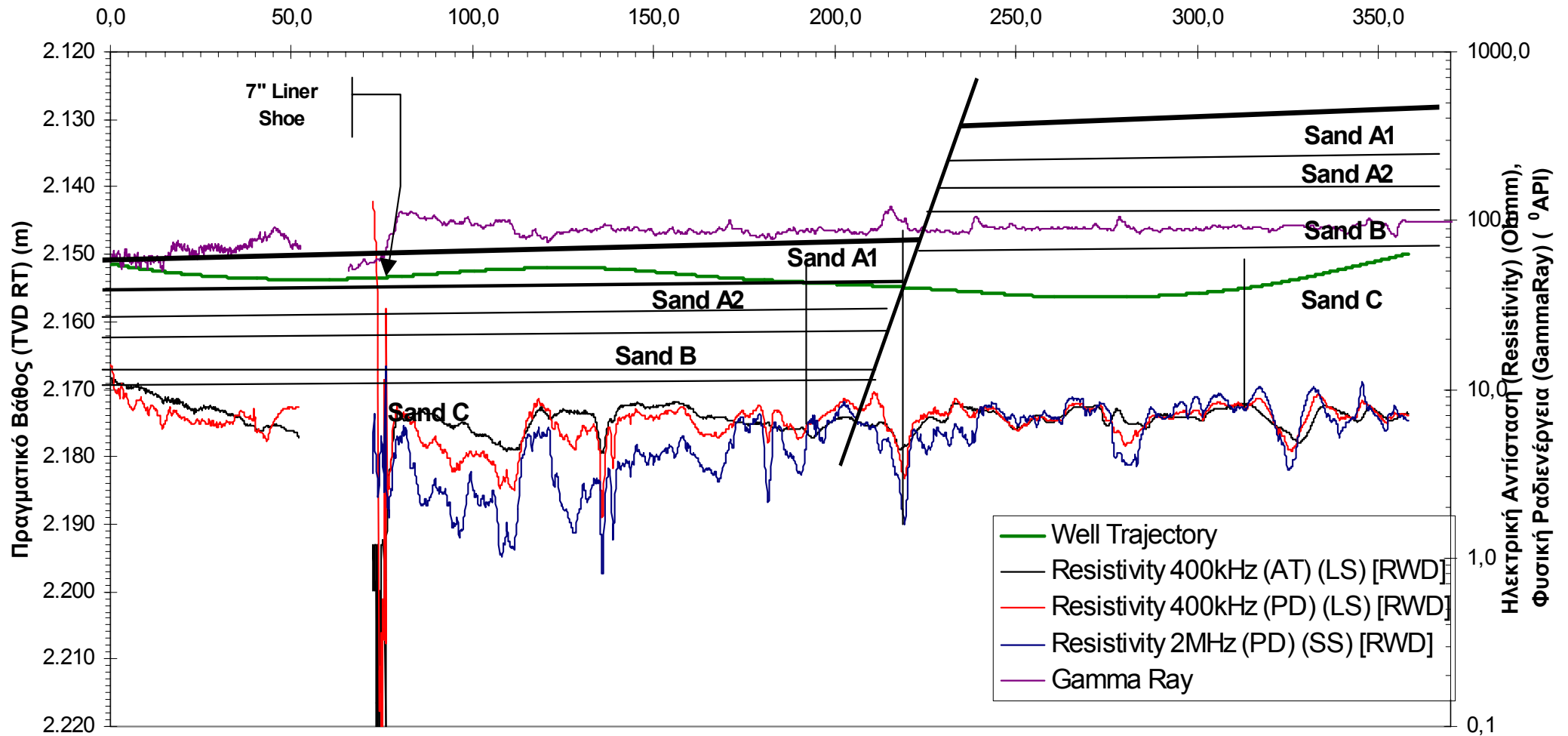
## Γεωλογικό Σενάριο A (Χωρίς Ρήγμα)

Οριζόντια Μετατόπιση (Lateral Displacement) (m)



## Γεωλογικό Σενάριο Β (Κανονικό ρήγμα μετάπτωσης 17 m)

Οριζόντια Μετατόπιση (Lateral Displacement) (m)





## Παράρτημα Δ: Διαγράμματα Ερμηνείας Γεωφυσικών

### Διαγραφιών (Schlumberger Log Interpretation Charts)

- **Gen-9** Ηλεκτρική Αντίσταση διαλύματος Χλωριούχου Νατρίου (NaCl).
- **Rcor-2c** Διορθώσεις για την επίδραση της γεώτρησης στην «βαθιά» (LLD) μέτρηση της διαγραφίας Laterolog.
- **Rcor-10** Διορθώσεις για την επίδραση του πάχους του σχηματισμού υπό έλεγχο στις μετρήσεις της διαγραφίας Dual Laterolog.
- **Rxo-3** Διόρθωση για την επίδραση του επιχρίσματος του γεωτρητικού πολφού στην διαγραφή MicroSFL<sup>1</sup>.
- **Rint-9b** Ερμηνεία διορθωμένων τιμών της διαγραφίας Dual Laterolog – Rxo Device.
- **Por 14e** Νομόγραμμα μετατροπής NPHI – TNPHI, διαγραφίας Dual Spacing Neutron Log (CNL<sup>1</sup>) σε μη σωληνωμένες γεωτρήσεις.
- **Por-14 c** Διορθώσεις για περιβαλλοντικά φαινόμενα στις μετρήσεις της διαγραφίας Dual Spacing Neutron Log (CNL<sup>1</sup>) σε μη σωληνωμένες γεωτρήσεις.
- **CP-1f** Προσδιορισμός πορώδους και λιθολογίας από τις διαγραφίες Litho-Density<sup>1</sup> Log και Compensated Neutron Log (CNL<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup> Σήμα της Schlumberger

## **Παράρτημα Ε: Τεχνικά Στοιχεία Εξοπλισμού**

### **Baker Hughes INTEQ**

- MPR™ (FEMWD) System (LWD)
- NaviTrak/NaviGamma MWD
- NaviGator Tool (Ολοκληρωμένο σύστημα διάτρησης)

### **Halliburton Energy Services Inc.**

- StrataTracker™ Tool (Ολοκληρωμένο σύστημα διάτρησης)