

ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΡΕΥΣΤΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ &  
ΡΕΥΣΤΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ  
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΣΤΗΝ ΟΡΥΞΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ,  
ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ «ΠΡΙΝΟΣ»

---

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΛΕΤΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:  
ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΑΘΗΝΑ, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ  
ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ & ΡΕΥΣΤΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ  
ΣΤΗΝ ΟΡΥΞΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ, ΣΤΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ «ΠΡΙΝΟΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
**Γεώργιου Κολέτση**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 15/03/2016

**Σοφία Σταματάκη**  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπουσα)

**Γεώργιος Αποστολόπουλος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Μαρία Μενεγάκη**  
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2016

# Πρόλογος

---

Η παρούσα Διπλωματική εργασία αποτελεί τη συνέχεια της συνεργασίας μου με την Energean Oil & Gas, όπου πραγματοποίησα την Πρακτική μου άσκηση, τον Αύγουστο του 2013. Ήταν μία γεμάτη περίοδος από την οποία αποκόμισα πολλές γνώσεις και συνεργάστηκα με αξιόλογους ανθρώπους. Αυτή ήταν και η αφορμή για να γνωρίσω το Γεωλόγο της εν λόγω εταιρείας, κύριο Κωνσταντίνο Τζημέα, ο οποίος με βοήθησε και μετά το πέρας της Πρακτικής μου ώστε να βρω θέμα για τη Διπλωματική μου εργασία. Έτσι, με έφερε σε επαφή με το Μηχανικό Γεωτρήσεων, κύριο Παύλο Αφέντρα, ο οποίος μου συνέστησε το παρόν θέμα και μου παρείχε ό,τι στοιχείο ήταν διαθέσιμο για την ολοκλήρωση της εργασίας. Τους ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν.

Ευχαριστώ επίσης την κυρία Σοφία Σταματάκη που δέχτηκε να είναι υπεύθυνη για τη Διπλωματική μου εργασία, σε μια περίοδο που είχε ιδιαίτερα βεβαρυσμένο πρόγραμμα, αλλά και για τη συμβολή της στη διαμόρφωση του παρόντος θέματος. Οι οδηγίες και οι συμβουλές της, με βοήθησαν ώστε να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα κατά τη συγγραφή της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Αποστολόπουλο για την όμορφη συνεργασία που είχαμε τα τελευταία χρόνια των σπουδών μου. Ο ιδιαίτερος τρόπος διδασκαλίας του και η αμεσότητά του, στάθηκαν αφορμή ώστε να αγαπήσω την επιστήμη της Γεωφυσικής. Δε θα ξεχάσω την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, προτείνοντάς μου ένα διαφορετικό θέμα προς εκπόνηση, το οποίο όμως λόγω διάφορων δυσκολιών, δεν καταφέραμε να το πραγματοποιήσουμε μαζί.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Μαρία Μενεγάκη για την άψογη συνεργασία μας στα χρόνια φοίτησής μου. Είναι ιδιαίτερη τιμή για μένα που συμμετέχει στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω προς την κυρία Ειρήνη Δημητρέλλου, μέλος του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για τη συνεχή, ουσιαστική και άρτια επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε όλον αυτό τον καιρό, μέχρι να ολοκληρωθεί η εργασία.

# Περίληψη

---

Η ολοένα αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια, σε συνδυασμό με τη μειωμένη παραγωγή υδρογονανθράκων, λόγω εξάντλησης των εύκολα αντλούμενων κοιτασμάτων, αναμένεται να οδηγήσει στη βελτίωση και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών προκειμένου να προσεγγίσουμε ακόμα περισσότερα και πιο δυσπρόσιτα κοιτάσματα. Όμως, για να ανταποκριθεί στις προκλήσεις του μέλλοντος η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, θα πρέπει να αναπτύξει και να εφαρμόσει σύγχρονες τεχνολογίες σε όλους τους τομείς της.

Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχή όρυξη μιας γεώτρησης είναι οι πολφικοί διάτρησις. Η επαρκής κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας των διατρητικών πολφών, θα οδηγήσει αφενός στην κατάλληλη επιλογή πολφού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί και αφετέρου θα κάνει οικονομικότερο το γεωτρητικό έργο σε βάθος χρόνου.

Στην Ελλάδα, η μόνη περιοχή που παράγεται μέχρι και σήμερα πετρέλαιο είναι το Θρακικό Πέλαγος και συγκεκριμένα τα κοιτάσματα του Πρίνου και της Νότιας Καβάλας.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας ήταν η τεχνικο-οικονομική αξιολόγηση της χρήσης δύο τύπων πολφών διάτρησις, σε δύο γεωτρήσεις στο κοιτάσμα «Πρίνος». Στη μεν μία γεώτρηση έχει χρησιμοποιηθεί πολφός με βάση το νερό (water based mud), ενώ στη δεύτερη έχει χρησιμοποιηθεί πολφός με βάση το πετρέλαιο (oil based mud). Καθώς στις δύο αυτές γεωτρήσεις έχουν διατρηθεί όμοιοι γεωλογικοί σχηματισμοί σε αντίστοιχα βάθη και με τη χρήση ανάλογων κοπτικών άκρων, επιχειρείται η συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης των δύο διαφορετικών πολφών διάτρησις, επί της διατρησιμότητας των σχηματισμών, στη βάση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Ειδική ενέργεια κοπτικών άκρων.
- Ταχύτητα προχώρησης.
- Χρόνος διάτρησις.

Με την οικονομική ανάλυση που ακολουθεί, διερευνάται και το κόστος των πολφών διάτρησις στις υπό μελέτη γεωτρήσεις.

Η παρούσα Διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια:

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει εκτενή αναφορά στα ρευστά διάτρησις (ιστορική εξέλιξη, κύριοι τύποι ρευστών που χρησιμοποιούνται σήμερα, λειτουργίες και ιδιότητες).

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωλογική ιστορία της περιοχής όπου ορύχθηκαν οι υπό μελέτη γεωτρήσεις, καθώς επίσης και ο τρόπος σχηματισμού της



Λεκάνης «Πρίνου-Καβάλας». Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην ιστορία εκμετάλλευσης του εν λόγω κοιτάσματος.

Το τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται τα ειδικότερα προβλήματα κατά την όρυξη γεωτρήσεων εντός αλατούχων και αργιλικών σχηματισμών, αντίστοιχα, και τις δυνατότητες αντιμετώπισής τους με τη χρήση διαφορετικών τύπων πολφών διάτρησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των δύο γεωτρήσεων που μελετήθηκαν, αναφορά στους διατηρηθέντες γεωλογικούς σχηματισμούς και παρατίθενται τα γεωτρητικά δεδομένα (drilling data) για κάθε μια γεώτρηση.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία των γεωτρητικών δεδομένων και προκύπτουν τα πρώτα αποτελέσματα της τεχνικής ανάλυσης των μελετούμενων παραμέτρων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για την οικονομική ανάλυση και τον προσδιορισμό του κόστους των ρευστών διάτρησης των δύο γεωτρήσεων, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αυτής.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# Abstract

---

The increasing global demand for energy, coupled with the reduced production of hydrocarbons, due to the exhaustion of easily exploitable oil and gas fields, is expected to lead to the improvement of existing and to the development of new technologies that can contribute to a more economical and technically efficient exploration and exploitation of inaccessible deposits. To meet the challenges of the future, oil and gas industry should develop and implement modern techniques in all sectors.

Drilling fluids is a crucial factor for a successful well drilling. Adequate understanding of their operating mechanisms can lead both to the appropriate choice of the most suitable fluid to be used and also to a more economical drilling work over time.

In Greece, the only region where oil is currently being produced is the Thracian Sea, more specifically "Prinos" and "South Kavala" oil fields.

The aim of this Thesis was the technical-economic evaluation of the use of two different drilling fluids in two wells drilled in "Prinos" oil field. Water based mud was used in the first well, whereas oil based mud in the second one. As these two boreholes drilled similar geological formations at corresponding depths with the use of similar drilling bids, a comparative evaluation of the effect of the two drilling fluids on the geological formations drillability is attempted based on the following parameters:

- Specific energy of the drill bits.
- Penetration rate.
- Drilling time.

An economic analysis follows, where the cost of the drilling fluids in the two well under consideration is investigated.

This Thesis is divided into eight chapters:

The first chapter includes an extensive reference on drilling fluids (evolution of drilling fluids over time, main types of drilling fluids used today, properties and functions).

The second chapter presents the geological background of the area where the drilled wells under study are located, as well as the formation process of the "Prinos - Kavala" basin. Furthermore, reference is made to the exploitation history of the Prinos field.

The third and the fourth chapter deals with the particular problems arising during well drilling through saline and clay formations, respectively, as well as the ability to overcome these problems by the use of different types of drilling fluids.

The fifth chapter presents a detailed description of the two wells under study as well as of the drilled geological formations, and the drilling data for each well.

The sixth chapter presents the processing of the drilling data and the first results of the technical analysis of the examined parameters.

The seventh chapter presents the methodology used for the economic analysis, and the determination of the drilling fluids costs for each one of the two wells, and the results thereof.

Finally, the eighth chapter sums up the final results and offers suggestions for further investigation.

Copyright © Γεώργιος Κολέτσης, 2016  
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ή της Energean Oil & Gas.



# Περιεχόμενα

---

Αρκτικόλεξα .....	11
-------------------	----

## **Κεφάλαιο 1°**

<b>Ρευστά Διάτρησης .....</b>	<b>12</b>
-------------------------------	-----------

1.1 Εισαγωγή .....	12
1.2 Ιστορική εξέλιξη των ρευστών διάτρησης .....	12
1.3 Λειτουργίες και χαρακτηριστικά των ρευστών διάτρησης .....	15
1.3.1 Μεταφορά των προϊόντων της διάτρησης (drill solids) στην επιφάνεια .....	15
1.3.2 Έλεγχος πιέσεων σχηματισμού .....	16
1.3.3 Ψύξη, λίπανση και υποστήριξη του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης .....	17
1.3.4 Σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης .....	18
1.3.5 Μετάδοση ενέργειας στο κοπτικό άκρο .....	18
1.3.6 Παροχή χρήσιμων γεωλογικών πληροφοριών .....	19
1.4 Σύστημα κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης (circulating system) .....	20
1.5 Τύποι ρευστών διάτρησης .....	21
1.5.1 Πολφοί με βάση το νερό (Water based muds / WBM) .....	23
1.5.2 Πολφοί με βάση το πετρέλαιο (Oil based muds / OBM) .....	29

## **Κεφάλαιο 2°**

<b>Η Λεκάνη «Πρίνου-Καβάλας» .....</b>	<b>32</b>
--	-----------

2.1 Εισαγωγή .....	32
2.2 Η γεωλογική ιστορία της περιοχής .....	32
2.3 Λιθολογική και στρωματογραφική περιγραφή .....	34
2.4 Ο σχηματισμός των εβαποριτών στη λεκάνη του Πρίνου .....	38
2.5 Συνθήκες γένεσης των εβαποριτών στη λεκάνη του Πρίνου .....	39
2.6 Η ιστορία εκμετάλλευσης του κοιτάσματος στη λεκάνη του Πρίνου .....	39
2.6.1 Μελλοντικός σχεδιασμός .....	42

## **Κεφάλαιο 3°**

### **Διάτρηση σε Δόμους Άλατος ..... 44**

- 3.1 Εισαγωγή ..... 44
- 3.2 Η δημιουργία του άλατος και ο ρόλος του στην παγίδευση υδρογονανθράκων ..... 44
- 3.3 Η συμπεριφορά του άλατος κατά τη διάτρηση ..... 46
- 3.4 Ο μηχανισμός της διαλυτοποίησης του άλατος ..... 46
- 3.5 Το πρόβλημα της διαλυτοποίησης κατά τη διάτρηση σε σχηματισμούς άλατος..... 47

## **Κεφάλαιο 4°**

### **Προβλήματα Όρυξης Γεωτρήσεων Εντός Αργιλικών Σχηματισμών ..... 50**

- 4.1 Εισαγωγή ..... 50
- 4.2 Το πρόβλημα της αστάθειας των αργιλικών σχηματισμών (shale instability) ..... 50
- 4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης εντός αργιλικών σχηματισμών ..... 54
- 4.4 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ αργιλικών σχηματισμών και ρευστού διάτρησης ..... 58
- 4.5 Βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών..... 59
- 4.6 Συμπεράσματα ..... 63

## **Κεφάλαιο 5°**

### **Περιγραφή των Γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A..... 65**

- 5.1 Εισαγωγή ..... 65
- 5.2 Πρόγραμμα γεώτρησης PA-35 & γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν ..... 65
  - 5.2.1 Γεωλογία & στρωματογραφία διατρηθέντος τμήματος ..... 66
- 5.3 Πρόγραμμα γεώτρησης PB-23A & γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν ..... 71
  - 5.3.1 Γεωλογία & στρωματογραφία διατρηθέντος τμήματος ..... 71
- 5.4 Γεωτρητικά δεδομένα και δεδομένα χρήσης κοπτικών άκρων ..... 76

## **Κεφάλαιο 6°**

### **Επεξεργασία, Ανάλυση & Ερμηνεία των Γεωτρητικών Δεδομένων ..... 79**

- 6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο – Η ειδική ενέργεια (SE) ..... 79
- 6.2 Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A..... 81
  - 6.2.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων ειδικής ενέργειας και ταχύτητας διάτρησης ..... 87
- 6.3 Οι χρόνοι διάτρησης των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A ..... 89
  - 6.3.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων των χρόνων διάτρησης ..... 90

## **Κεφάλαιο 7°**

### **Οικονομική Ανάλυση και Προσδιορισμός του Κόστους των Ρευστών**

### **Διάτρησης για τις Γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A ..... 91**

- 7.1 Εισαγωγή ..... 91
- 7.2 Ανάλυση κόστους συστήματος (system cost analysis) για τα ρευστά διάτρησης ..... 92
- 7.3 Τα οφέλη μιας ανάλυσης κόστους συστήματος στο γεωτρητικό έργο..... 92
- 7.4 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος για ρευστά διάτρησης - Γενικά ..... 94
  - 7.4.1 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος – Σύνθετη μορφή..... 96
- 7.5 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος για τα ρευστά διάτρησης στις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A ..... 96
- 7.6 Τιμές παραμέτρων κόστους για τα ρευστά διάτρησης στις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A ..... 97
- 7.7 Υπολογισμός του συνολικού κόστους του πολφού διάτρησης για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A ..... 99
- 7.8 Σύνοψη και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για το κόστος των ρευστών διάτρησης των PA-35 & PB-23A ..... 100

## **Κεφάλαιο 8°**

### **Σύνοψη Συμπερασμάτων & Προτάσεις ..... 102**

- 8.1 Συμπεράσματα ..... 102
- 8.2 Προτάσεις ..... 103

### **Βιβλιογραφία ..... 105**

# ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

Όρος	Ελληνική απόδοση	Σχόλια
<b>WBM</b> (Water Based Mud)	Ρευστό διάτρησης με βάση το νερό	
<b>OBM</b> (Oil Based Mud)	Ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο	
<b>TVD</b> (True Vertical Depth)	Πραγματικό κατακόρυφο βάθος	Το μήκος της κατακόρυφης προβολής της τροχιάς της γεώτρησης σε άξονες x,y,z.
<b>MD</b> (Measured Depth)	Μετρούμενο βάθος	Το μήκος της γεώτρησης όπως αυτό μετράται κατά την όρυξη της και με βάση τα μήκη των στελεχών που χρησιμοποιήθηκαν.
<b>ROP</b> (Rate of Penetration)	Ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης	
<b>RPM</b> (Revolution per Minutes)	Περιστροφές ανά λεπτό	
<b>WOB</b> (Weight on Bit)	Βάρος επί του κοπτικού	
<b>SG</b> (Specific Gravity)	Ειδικό βάρος	
<b>PDC</b> (Polycrystalline Diamond Compact bit)	Πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά άκρα	Αποτελούν εξέλιξη του κοπτικού με ελάσματα (drag ή fishtail bit) και δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη.
<b>UMS</b> (Upper Main Salt)	Ανώτερο στρώμα άλατος	
<b>LMS</b> (Lower Main Salt)	Κατώτερο στρώμα άλατος	
<b>OPC</b> (Over-Pressured Clays)	Ζώνη υπερσυμπιεσμένων αργίλων	
<b>BOP</b> (Blow Out Preventer)	Αποτροπέας εκτινάξεων και εκρήξεων	
<b>LWD</b> (Logging While Drilling)	Διαγραφίες κατά τη διάτρηση	
<b>MWD</b> (Measurements While Drilling)	Μετρήσεις κατά τη διάτρηση	
<b>N/A</b> (Not Available)	Μη διαθέσιμο	Αναφέρεται σε ορισμένα κελιά πινάκων όπου τα δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Ρευστά Διάτρησης

---

### 1.1 Εισαγωγή

Τα ρευστά διάτρησης αποτελούν έναν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση μιας γεώτρησης, ιδιαίτερα όταν αυτή πραγματοποιείται μέσα σε σχηματισμούς εντός των οποίων η όρυξη παρουσιάζει συχνά προβλήματα. Η κύρια λειτουργία τους είναι να διατηρούν τη γεώτρηση καθαρή, απομακρύνοντας τα θρύμματα που παράγονται κατά την όρυξη, αλλά συμμετέχουν και στην εκτέλεση άλλων εργασιών που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Στο παρόν Κεφάλαιο επιχειρείται μια παρουσίαση της ιστορικής εξέλιξης των ρευστών διάτρησης, των κύριων τύπων, λειτουργιών και ιδιοτήτων τους. Επίσης, παρουσιάζονται συνοπτικά τα προβλήματα που τυχόν εμφανίζονται κατά την όρυξη και σχετίζονται με τα ρευστά διάτρησης, αλλά και οι λύσεις που δίνονται σε αυτά, σύμφωνα με τις συνήθειες πρακτικές που ακολουθούνται από την πετρελαϊκή βιομηχανία.

### 1.2 Ιστορική εξέλιξη των ρευστών διάτρησης

Με την πάροδο του χρόνου, η διαχείριση των στερεών προϊόντων της διάτρησης (drill solids) καθίσταται ολοένα και πιο δύσκολη, λόγω των όλο και πιο αυστηρών περιβαλλοντικών όρων που θεσπίζονται. Ο μηχανολογικός εξοπλισμός βελτιώνεται ή αντικαθίσταται προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Παρακάτω παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των διατρητικών πολφών, όπως διαμορφώθηκε λόγω των εξελίξεων στη σχετική τεχνολογία, αλλά και της αυστηροποίησης των περιβαλλοντικών κανονισμών.

Το νερό ήταν το πρώτο ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε ποτέ. Από ιστορικές μελέτες γνωρίζουμε πως την τρίτη χιλιετία π.Χ. στην αρχαία Αίγυπτο, χρησιμοποιούσαν το νερό για να απομακρύνουν τα θρύμματα από τα πηγάδια που άνοιγαν με περιστροφικά γεωτρήματα χειρός. Ακόμα, γύρω στο 600 π.Χ. στην Κίνα, οι κάτοικοι όρυσαν γεωτρήσεις για την άντληση αλμυρού και γλυκού νερού και για να εκμεταλλευτούν τα υπόγεια κοιτάσματα φυσικού αερίου, όπου χρησιμοποιούσαν το νερό για να μαλακώνουν το πέτρωμα κατά την όρυξή του (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012).

Όλα αυτά τα χρόνια, από τους αρχαίους Αιγύπτιους και Κινέζους μέχρι και σήμερα, είναι γνωστό πως τα ρευστά διάτρησης είναι απαραίτητα για την επιτυχή όρυξη μιας

γεώτρησης. Όμως από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα και ύστερα άρχισαν να γίνονται οι πρώτες μελέτες για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη λειτουργία των ρευστών διάτρησης. Συγκεκριμένα ο Robert Beart, το 1844 με ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, κατοχύρωσε την απομάκρυνση των θρυμμάτων από μια γεώτρηση με την εισπίεση νερού μέσω μίας αντλίας. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1887, με ένα άλλο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατατέθηκε στις ΗΠΑ, προτάθηκε ένα μίγμα νερού με ορισμένη ποσότητα πλαστικού υλικού (water based mud) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για να απομακρύνει τα θρύμματα από το εσωτερικό της γεώτρησης, αλλά ταυτόχρονα να σχηματίζει και ένα αδιαπέρατο στρώμα πάνω στα πλευρικά τοιχώματα της γεώτρησης αποτρέποντας τυχόν καταπτώσεις τους (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012).

Η προσθήκη λάσπης στο νερό ως μέσο σταθεροποίησης των τοιχωμάτων των γεωτρήσεων εντός μη συνεκτικών σχηματισμών, έγινε το 1901 στο Τέξας και τη Λουιζιάνα των ΗΠΑ. Σύμφωνα με αναφορές εκείνης της εποχής, η λάσπη που χρησιμοποιήθηκε περιείχε μεγάλη ποσότητα αργίλου. Ωστόσο, την ίδια περίοδο στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, χρησιμοποιούσαν μίγματα νερού με αργίλους από επιφανειακές εμφανίσεις, δίνοντας μεγάλη σημασία στις ιδιότητες που ήθελαν να πετύχουν κάθε φορά (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012).

Η αυξημένη δραστηριότητα στη διάνοιξη γεωτρήσεων και ως εκ τούτου η ζήτηση για λάσπη διάτρησης τα χρόνια που ακολούθησαν, επέφερε την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα όσον αφορά την πυκνότητα του πολφού. Έτσι, ξεκίνησε η χρήση βαρέων μετάλλων σαν πρόσθετο στα ρευστά διάτρησης, πετυχαίνοντας μεγαλύτερες πυκνότητες. Το 1922 στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ έγινε η πρώτη εμπορική διάθεση πολφού με πρόσθετο το ορυκτό βαρύτη για χρήση του σε γεωτρήσεις πετρελαίου, υπό την επωνυμία BaroilR, από την εταιρία National Pigments and Chemicals. Στη συνέχεια και άλλες εταιρίες δραστηριοποιήθηκαν στον κλάδο, όπως η George F. Merham Corporation στο Μισούρι, η οποία διέθετε στην αγορά ορυκτά του σιδήρου ως πρόσθετο συστατικό για τη λάσπη διάτρησης. Αντίστοιχα, η California Talc διέθεσε στην αγορά διάφορους τύπους αργίλων, όπως και το AquageIR, έναν τύπο μπεντονίτη που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο σε πολφούς τσιμέντου, το 1928 (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012)

Ωστόσο, με τη χρήση βαρέων μετάλλων σαν πρόσθετο στα ρευστά διάτρησης, σύντομα εμφανίστηκε το πρόβλημα της καθίζησης αυτών των συστατικών και της μη ομοιόμορφης κυκλοφορίας τους στο μίγμα του πολφού. Έτσι, έπρεπε να βρεθεί κάποιο χημικό πρόσθετο που θα αντιμετώπιζε αυτό το φαινόμενο. Το πρώτο χημικό πρόσθετο που δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό, κυκλοφόρησε με την επωνυμία StabilliteR, το 1938 από τον T.B. Wayne και είχε την ιδιότητα να ρυθμίζει την αύξηση του ειδικού βάρους του πολφού, χωρίς να μειώνει την πυκνότητά του (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012). Στα χρόνια που ακολούθησαν, δημιουργήθηκαν διάφορες χημικές ουσίες που στόχο είχαν να προσδώσουν στους πολφούς με βάση το νερό συγκεκριμένες ιδιότητες, ανάλογα με τους σχηματισμούς που συναντιούνταν κατά τη διάτρηση.

Το νερό μπορεί να ήταν το πρώτο ρευστό διάτρησης, αλλά όχι το μόνο! Υπάρχουν αναφορές για χρήση ελαίων ως συστατικό σε διατρητικούς πολφούς από το 1923, χωρίς ωστόσο να γνωρίζουμε αν γινόταν και χρήση τους παλαιότερα. Τα πιο κοινά έλαια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου «diesel», ορυκτά έλαια και ακατέργαστο (αργό) πετρέλαιο. Οι λάσπες με βάση διάφορους τύπους ελαίων (oil based muds) δημιουργήθηκαν προκειμένου να ξεπεραστούν διάφορα προβλήματα που παρουσίαζαν οι πολφοί με βάση το νερό. Το 1935 η εταιρία Humble Oil & Refining (η σημερινή Exxon) χρησιμοποίησε πολφό με βάση το πετρέλαιο, που περιείχε πετρέλαιο τύπου diesel (gas oil) και άργιλο που παράγεται ως απόβλητο (spent clay) από τη βιομηχανία βρώσιμων ελαίων, για να διατρήσει ζώνη παραμορφούμενων σχιστόλιθων (heaving shale) στην περιοχή Creek Field του Τέξας. Κατά τη διάρκεια των δύο επόμενων ετών πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις πυρήνων γεωτρήσεων που ελήφθησαν με χρήση αυτού του τύπου λάσπης διάτρησης με σκοπό τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε συμφύες νερό (connate water) των ψαμμιτών του ταμιευτήρα, έτσι ώστε να βελτιωθεί κατάλληλα η σύνθεση της λάσπης διάτρησης με βάση το πετρέλαιο. Όμως, καθώς η χρήση πετρελαίου συνδυάζονταν και με την προσθήκη νερού στο μίγμα του ρευστού διάτρησης, ήταν ανάγκη να δημιουργηθούν κάποια χημικά πρόσθετα που θα επέτρεπαν τη ομαλή κυκλοφορία του εντός της γεώτρησης. Τέτοια χημικά πρόσθετα ήταν οι γαλακτωματοποιητές και διάφορα χημικά αραιώσης και διασποράς του πολφού (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012).

Η εμπορική εκμετάλλευση των πολφών με βάση το πετρέλαιο, άρχισε από την εταιρία που ίδρυσε ο George L. Miller στο Λος Άντζελες, το 1942. Η εταιρία αυτή παρήγαγε ένα τύπο σκόνης από άσφαλτο, την Black MagicR η οποία αναμιγνύονταν με το κατάλληλο έλαιο ώστε ο πολφός της να χρησιμοποιηθεί εντός της γεώτρησης. Αργότερα, όπως συνέβη και με τους πολφούς με βάση το νερό, δημιουργήθηκαν διάφορες χημικές ουσίες που βελτίωναν τις ιδιότητές του (Araleke, Al-Majed, & Hossain, 2012).

Άλλο ένα ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι η αεριούχα λάσπη (gas aerated mud). Η πρώτη εισπίεση τέτοιας λάσπης συνέβη το 1932 στη περιοχή Big Lake Field του Τέξας, για την απομάκρυνση (flush) του νερού του σχηματισμού (formation water) από την παραγωγική ζώνη. Την ίδια εποχή στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ χρησιμοποιήθηκε λάσπη με βάση το νερό, αναμεμιγμένη με πεπιεσμένο αέρα σε αναλογία όγκου 143:1. Παρατηρήθηκε ότι η παραγωγικότητα ήταν σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με γεωτρήσεις που είχε χρησιμοποιηθεί άλλος τύπος διατρητικού πολφού. Χρήση αεριούχας λάσπης έγινε και σε περιοχή του Καναδά το 1950 όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά και η έλλειψη νερού, δεν άφηναν περιθώρια για διαφορετικό τρόπο διάτρησης (Amani, Al-Jubouri, & Shadravan, 2012).



## 1.3 Λειτουργίες και χαρακτηριστικά των ρευστών διάτρησης

Ο μηχανικός γεωτρήσεων είναι επιφορτισμένος με το καθήκον να επιλέγει τον κατάλληλο πολφό διάτρησης προκειμένου μια γεώτρηση να προχωρεί απρόσκοπτα εντός των υπό όρυξη σχηματισμών. Οι σημαντικότερες εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν από τα ρευστά διάτρησης σε μία γεώτρηση είναι η μεταφορά των παραγόμενων θρυμμάτων στην επιφάνεια και ο έλεγχος των πιέσεων στο εσωτερικό του πηγαδιού. Εκτός όμως αυτών, η γεώτρηση θα είναι επιτυχής μόνο αν εξασφαλιστούν, επίσης, η ψύξη του κοπτικού άκρου και η σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

### 1.3.1 Μεταφορά των προϊόντων της διάτρησης (drill solids) στην επιφάνεια

Με την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στη γεώτρηση και την ανύψωσή του μέσα στο δακτύλιο μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και των διατρητικών στελεχών, τα προϊόντα της διάτρησης (θρύμματα) μεταφέρονται από το μέτωπο της διάτρησης στην επιφάνεια (Σταματάκη, 2003). Εάν τα παραγόμενα θρύμματα δεν απομακρυνθούν από το μέτωπο της γεώτρησης, τότε η απόδοση της διάτρησης θα μειωθεί σημαντικά προκαλώντας προβλήματα στη γεώτρηση, όπως η παγίδευση των διατρητικών στελεχών (Heriot-Watt University, 2015). Οι ρεολογικές ιδιότητες της λάσπης πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά ώστε να διασφαλίζεται:

- η σωστή κυκλοφορία και μεταφορά των θρυμμάτων στην επιφάνεια, και
- η σταθερότητα των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

Το μέγεθος, το σχήμα και η πυκνότητα των θρυμμάτων εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες: το ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης (ROP), την ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης, το ιξώδες του πολφού, καθώς επίσης και από την ταχύτητα του ρευστού μέσα στο δακτύλιο της γεώτρησης (M I Swaco, 2005).

- **Ιξώδες.** Το ιξώδες και οι ρεολογικές ιδιότητες των πολφών, επηρεάζουν σημαντικά τον καθαρισμό του πηγαδιού από τα προϊόντα της διάτρησης. Τα θρύμματα σε πολφούς με χαμηλό ιξώδες κάνουν την κυκλοφορία του ρευστού πολύ δύσκολη, σε αντίθεση με τους πολφούς μεγαλύτερου ιξώδους. Ωστόσο, οι περισσότεροι διατρητικοί πολφοί είναι θιξοτροπικοί. Αυτό σημαίνει πως όταν για οποιονδήποτε λόγο σταματήσει η κυκλοφορία της λάσπης στη γεώτρηση (π.χ. κατά τη διάρκεια προσθήκης νέων διατρητικών στελεχών) αυτή πήζει παροδικά και έτσι συγκρατεί τα τοιχώματα (M I Swaco, 2005). Η θιξοτροπική αυτή ιδιότητα του ρευστού συμβάλλει στη διατήρηση των τεμαχιδίων εν αιωρήσει (αποφεύγοντας έτσι την καθίζησή τους στο πυθμένα της γεώτρησης). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην παρουσία ηλεκτροχημικά φορτισμένων αργιλικών κυρίως σωματιδίων, τα οποία όταν

βρίσκονται σε ηρεμία, συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τη ζελατινώδη φάση (Σταματάκη, 2003).

- **Ταχύτητα.** Η ταχύτητα κυκλοφορίας της λάσπης ή αλλιώς ταχύτητα του ρευστού στο δακτύλιο της γεώτρησης (annular velocity), παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση των θρυμμάτων. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού στο δακτύλιο της γεώτρησης, τόσο αποδοτικότερη είναι και η απομάκρυνση των θρυμμάτων. Εξαιρεση αποτελούν οι λεπτόρρευστοι πολφού γεωτρήσεων, δηλαδή με μεγάλο ιξώδες, καθώς μπορεί να προκαλέσουν τυρβώδη ροή, η οποία μπορεί να βοηθά στον καθαρισμό της γεώτρησης, αλλά προκαλεί προβλήματα κατά τη διάτρηση. Ο ρυθμός σύμφωνα με τον οποίο τα θρύμματα καταβυθίζονται εντός του ρευστού διάτρησης ονομάζεται ταχύτητα καθίζησης (cuttings slip velocity). Η ταχύτητα καθίζησης των θρυμμάτων είναι συνάρτηση της πυκνότητας, του μεγέθους και του σχήματος των, καθώς και του ιξώδους, της πυκνότητας και της ταχύτητας ανόδου του ρευστού διάτρησης εντός του δακτυλίου της γεώτρησης. Αν η ανοδική ταχύτητα του ρευστού διάτρησης εντός του δακτυλίου της γεώτρησης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα καθίζησης των θρυμμάτων, τα θρύμματα μεταφέρονται στην επιφάνεια (M I Swaco, 2005).
- **Πυκνότητα.** Ένας πολφός υψηλής πυκνότητας, βοηθά τα προϊόντα της διάτρησης να ανέλθουν στην επιφάνεια, λόγω της άνωσης που δημιουργεί μέσα στη γεώτρηση. Σε σύγκριση με τους πολφούς χαμηλής πυκνότητας, οι πολφού υψηλής πυκνότητας καθαρίζουν τη γεώτρηση ακόμα και με μικρές ταχύτητες ρευστού στο δακτύλιο της γεώτρησης. Ωστόσο, όταν το βάρος της λάσπης υπερβαίνει τις πιέσεις του σχηματισμού, τότε επηρεάζεται η ομαλή λειτουργία της γεώτρησης. Ως εκ τούτου, δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη η πυκνότητα των πολφών διάτρησης (M I Swaco, 2005).
- **Περιστροφή διατρητικής στήλης.** Οι μεγάλες ταχύτητες περιστροφής βοηθούν επίσης στην άνοδο των θρυμμάτων στην επιφάνεια. Αυτή η ελικοειδής ροή που προκαλείται γύρω από τα διατρητικά στελέχη, ωθεί τα θρύμματα που βρίσκονται στα τοιχώματα να μετακινηθούν σε περιοχές που η μεταφορά τους γίνεται πιο αποτελεσματικά (M I Swaco, 2005).

### 1.3.2 Έλεγχος πιέσεων σχηματισμού

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μία βασική λειτουργία των ρευστών διάτρησης είναι ο έλεγχος των πιέσεων των σχηματισμών, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της γεώτρησης. Όταν οι πιέσεις σχηματισμού αυξάνονται, τότε προστίθεται ποσότητα βαρύτη στον πολφού προκειμένου να αυξηθεί ανάλογα και το ειδικό βάρος της λάσπης και να εξισορροπηθούν οι πιέσεις στο εσωτερικό του πηγαδιού, συμβάλλοντας στη διατήρηση της σταθερότητας των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Επίσης, με αυτό τον τρόπο εμποδίζεται και η εισροή ρευστών του

σχηματισμού (formation fluids) μέσα στο δακτύλιο της γεώτρησης, φαινόμενο που θα μπορούσε να προκαλέσει βίαιη εκτόνωση της λάσπης προς την επιφάνεια (blowout) (M I Swaco, 2005).

Η πίεση που ασκείται στη διατρητική στήλη από τον πολφό, όταν αυτός δεν βρίσκεται σε κυκλοφορία, ονομάζεται υδροστατική πίεση και είναι συνάρτηση του ειδικού βάρους της λάσπης και του κατακόρυφου βάθους της γεώτρησης (M I Swaco, 2005). Μόνο όταν η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη του ρευστού διάτρησης μέσα στη γεώτρηση παραμένει μεγαλύτερη από την πίεση των ρευστών που μπορεί να περιέχουν οι διατρυόμενοι σχηματισμοί (νερό, αέριο ή πετρέλαιο), μπορεί να παρεμποδίσει την εισροή αυτών των ρευστών μέσα στη γεώτρηση (Σταματάκη, 2003). Ωστόσο, η πίεση εντός της γεώτρησης δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλή, γιατί μπορεί να προκληθεί θραύση του περιβάλλοντος σχηματισμού, με αποτέλεσμα την απώλεια λάσπης εντός του σχηματισμού (Heriot-Watt University, 2015). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απώλεια κυκλοφορίας της λάσπης (lost circulation) και συμβαίνει επειδή ένα ποσοστό της λάσπης που εισπνέζεται αρχικά στη γεώτρηση, δεν επιστρέφει στην επιφάνεια, αλλά ρέει εντός του σχηματισμού (Heriot-Watt University, 2015). Η υδροστατική πίεση βοηθάει επίσης στον έλεγχο και ορισμένων γεωλογικών φαινομένων, όπως πιθανές τεκτονικές δυνάμεις σε γεωλογικά ενεργές περιοχές (M I Swaco, 2005).

### **1.3.3 Ψύξη, λίπανση και υποστήριξη του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης**

Κατά την όρυξη, λόγω των υδραυλικών και των μηχανικών δυνάμεων που αναπτύσσονται πάνω στο κοπτικό άκρο, αλλά και όπου η περιστρεφόμενη διατρητική στήλη έρχεται τυχόν σε επαφή με τη σωλήνωση και τα τοιχώματα της γεώτρησης, παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας (M I Swaco, 2005). Πιο έντονα όμως επηρεάζεται η κατώτερη συνδεσμολογία της διατρητικής στήλης και το κοπτικό άκρο τα οποία θερμαίνονται σημαντικά, όχι μόνο λόγω των θερμοκρασιών που επικρατούν στο υπέδαφος (γεωθερμική βαθμίδα), αλλά κυρίως λόγω της αναπτυσσόμενης μηχανικής τριβής (Σταματάκη, 2003). Η κυκλοφορία της λάσπης ανάμεσα στη διατρητική στήλη και τα τοιχώματα της γεώτρησης, ψύχει τα διάφορα τμήματά της και μεταφέρει τη θερμότητα στην επιφάνεια απ' όπου απάγεται. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται πιθανά προβλήματα που θα δημιουργούσε η υψηλή θερμοκρασία στη γεώτρηση (υπερθέρμανση κινητήρων, κοπτικού άκρου, διατρητικών στελεχών). Η λειτουργία αυτή μπορεί να ενισχυθεί και με την προσθήκη επιπλέον ψυκτικών πρόσθετων στον πολφό της γεώτρησης.

Ο πολφός διάτρησης εκτός από ψύξη, παρέχει και την απαραίτητη λίπανση στη διατρητική στήλη, μειώνοντας τις τριβές με τα τοιχώματα του πηγαδιού. Η λιπαντική ικανότητα ενός πολφού έχει άμεση σχέση με τα συστατικά που τον απαρτίζουν. Για παράδειγμα, οι πολφοί με βάση το πετρέλαιο λιπαίνουν καλύτερα από τους πολφούς

με βάση το νερό. Αντίθετα, οι υδατικοί πολφθοί παρέχουν καλύτερη λίπανση και ψύξη από ό,τι οι αεριούχοι πολφθοί (M I Swaco, 2005).

Η λίπανση που παρέχει ένα ρευστό διάτρησης ποικίλει έντονα και εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα των θρυμμάτων και του υλικού που προστίθεται στη λάσπη για τη ρύθμιση του ειδικού της βάρους, όπως επίσης και από τη συνολική χημική σύνθεσή της (pH, αλατότητα, σκληρότητα) (M I Swaco, 2005).

### **1.3.4 Σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης**

Η στατικότητα της γεώτρησης είναι μία πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από μία σειρά μηχανικών και χημικών παραγόντων. Η σύνθεση ενός πολφθού πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξισορροπεί τις πιέσεις των σχηματισμών και τις τάσεις που αναπτύσσονται πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης λόγω του προσανατολισμού της τροχιάς της και της τεκτονικής της περιοχής, προκειμένου να διατηρείται η γεώτρηση «ανοιχτή» μέχρι να γίνουν οι εργασίες τσιμέντωσης (M I Swaco, 2005).

Όταν για οποιονδήποτε λόγο κάποιο μέρος του πηγαδιού αρχίζει να διαβρώνεται ή να διευρύνεται η διατομή του, τότε η σταθερότητα της γεώτρησης μειώνεται προκαλώντας ταυτόχρονα μία σειρά από προβλήματα, όπως η χαμηλή ταχύτητα κυκλοφορίας της λάσπης και ο ανεπαρκής καθαρισμός του πηγαδιού από τα θρύμματα και συσσώρευσή τους στον πυθμένα. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων ανεβάζει σημαντικά το κόστος των εργασιών. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα θα πρέπει ο μηχανικός να γνωρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τους σχηματισμούς που διατρύονται κάθε στιγμή, ώστε να επεμβαίνει με προσθήκη κατάλληλων χημικών πρόσθετων στον πολφό διάτρησης (M I Swaco, 2005).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάτρηση σχιστόλιθων. Πολλές φορές όταν χρησιμοποιούνται λάσπες με βάση το νερό, προκαλούνται αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πολφθού διάτρησης και του σχιστόλιθου (είτε γενικά, είτε με συγκεκριμένα ορυκτά) με αποτέλεσμα τη διόγκωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης και το φράξιμο της οπής. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου προστίθενται χημικοί αναστολείς που περιορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση. Άλατα, πολυμερή υλικά, γλυκόλες και έλαια είναι κάποια από τα πρόσθετα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αναστείλουν τη διόγκωση των σχιστόλιθων (M I Swaco, 2005).

### **1.3.5 Μετάδοση ενέργειας στο κοπτικό άκρο**

Κατά την όρυξη κατευθυνόμενων και οριζόντιων γεωτρήσεων ή κατά την όρυξη με χρήση αδαμαντοκορωνών, ενίοτε χρησιμοποιείται ενδογεωτρητικός κινητήρας, ο οποίος προσαρμόζεται στο κάτω μέρος της διατρητικής στήλης (ακριβώς πριν από το κοπτικό άκρο), έτσι ώστε να περιστρέφεται μόνο το κοπτικό άκρο. Η ταχύτητα ροής της λάσπης εξασφαλίζει την περιστροφή και του κινητήρα. Η πτώση πίεσης, λόγω

της λειτουργίας του κινητήρα προστίθεται στις απώλειες πιέσεων από τη κυκλοφορία του ρευστού σε όλο το σύστημα του πηγαδιού (Σταματάκη, 2003).

### **1.3.6 Παροχή χρήσιμων γεωλογικών πληροφοριών**

Η συνεχής κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης παρέχει χρήσιμες γεωλογικές πληροφορίες. Για παράδειγμα, τα θρύμματα τα οποία ανέρχονται στην επιφάνεια αναλύονται και αξιολογούνται. Τυχόν εισροές ρευστών ή αερίων από τους διατρυόμενους σχηματισμούς ανιχνεύονται από εγκατεστημένους αισθητήρες στην επιφάνεια. Οι φυσικοχημικές αλλαγές στο ρευστό επιστροφής (θερμοκρασία, pH, περιεκτικότητα σε χλώριο κ.λπ.), σε συνδυασμό με τις ενδοσκοπικές καταγραφές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της διάτρησης, παρέχουν συστηματικές πληροφορίες για την εξέλιξη των εργασιών (Σταματάκη, 2003).



ασφαλείας (BOP). Μέσω αυτής της γραμμής ροής η λάσπη διάτρησης που εξέρχεται από τη γεώτρηση τροφοδοτείται στο σύστημα καθαρισμού της που περιλαμβάνει κόσκινα καθαρισμού των θρυμμάτων, δεξαμενή καθίζησης και διατάξεις απομάκρυνσης άμμου και ιλύος (de-sander, de-silter). Μετά τον καθαρισμό της το σύστημα κυκλοφορίας κλείνει με την επιστροφή της καθαρής πλέον λάσπης στη δεξαμενή λάσπης προς επανάχρηση.

Σε ένα γεωτρύπανο λειτουργούν δύο τουλάχιστον αντλίες λάσπης. Σε μικρά βάθη προχώρησης της γεώτρησης, οι αντλίες είναι συνήθως συνδεδεμένες παράλληλα για την εξασφάλιση υψηλής παροχής. Όσο η γεώτρηση προχωράει βαθύτερα, οι αντλίες λειτουργούν σε σειρά για την εξασφάλιση μεγαλύτερης πίεσης και μικρότερης παροχής.

## 1.5 Τύποι ρευστών διάτρησης

Τα ρευστά διάτρησης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά την όρυξη μιας γεώτρησης είναι μοναδικά και συγκεκριμένα, γεγονός που καθιστά την ταξινόμησή τους πολύ δύσκολη. Αυτό συμβαίνει γιατί ακόμα και τα ρευστά γεώτρησης που έχουν γίνει με τα ίδια συστατικά, μετά από λίγο χρόνο χρήσης, ανάλογα με τα πετρώματα που θα διατρώουν, θα αποκτήσουν διαφορετικές ιδιότητες λόγω των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων που θα υποστούν (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Τα ρευστά διάτρησης χρησιμοποιούνται στις περιστροφικές γεωτρήσεις για:

- Να καθαρίζουν τα θραύσματα των πετρωμάτων κάτω από το κοπτικό άκρο και να τα μεταφέρουν στην επιφάνεια.
- Να ασκούν υδροστατική πίεση στα τοιχώματα της γεώτρησης ώστε να αποτρέπουν την εισροή ρευστών πετρωμάτων εντός αυτής.
- Να διατηρούν το φρέαρ καθαρό έως ότου γίνει η επένδυση με σωλήνα.
- Να ψύχουν και να λιπαίνουν τη διατρητική στήλη και το κοπτικό άκρο.

Επιπρόσθετα, το ρευστό διάτρησης πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Να μην έχει ιδιότητες που να αποτρέπουν/δυσκολεύουν την εφαρμογή τεχνικών για την αποτίμηση των πετρωμάτων.
- Να μην προκαλούν προβλήματα μη αναστρέψιμα στα πετρώματα που έρχονται σε επαφή.
- Να μην προκαλούν διάβρωση της διατρητικής στήλης.

Ο μηχανικός γεωτρήσεων είναι υπεύθυνος για την επιλογή και τη συντήρηση του καλύτερου δυνατού ρευστού διάτρησης. Τα περισσότερα προβλήματα στις γεωτρήσεις είναι συνυφασμένα με το ρευστό διάτρησης. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αυτών των ρευστών, έχουν σημαντικό κόστος και ειδικά σε αρκετά βαθιές γεωτρήσεις το κόστος τους, μπορεί να υπερβεί το 1 εκ. δολάρια. Σχεδόν πάντοτε είναι σε υπηρεσία στο γεωτρύπανο μηχανικός ρευστών διάτρησης (mud engineer) που είναι επιφορτισμένος να διατηρεί το ρευστό

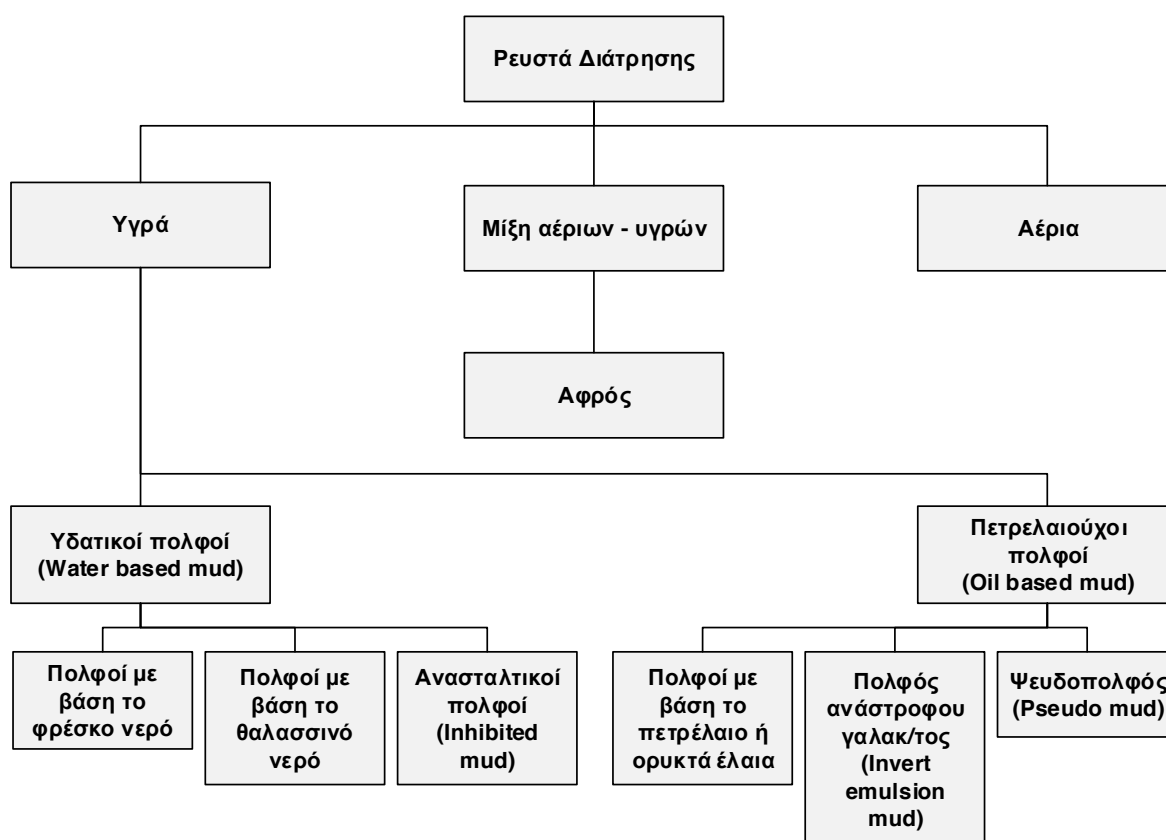


διάτρησης στη καλύτερη δυνατή κατάσταση και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Οι κυριότεροι παράγοντες που προσδιορίζουν την επιλογή του ρευστού διάτρησης είναι:

- Τα είδη των πετρωμάτων που θα απαντηθούν κατά την όρυξη της γεώτρησης.
- Το εύρος των αναμενόμενων θερμοκρασιών, διαπερατότητας, πιέσεων ρευστών πετρωμάτων, σκληρότητας πετρωμάτων.
- Η μεθοδολογία αποτίμησης των πετρωμάτων (διαγραφίες - logs).
- Η ποιότητα του διαθέσιμου νερού.
- Οικολογικοί και περιβαλλοντικοί λόγοι.

Σε γενικές γραμμές, τα ρευστά διάτρησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες (Σχήμα 1.1): πολφοί με βάση το νερό (WBM), πολφοί με βάση το πετρέλαιο (OBM) και πολφοί με βάση τον αέρα/φυσικό αέριο (gas-based muds). Ωστόσο, οι δύο πιο κοινί τύποι ρευστών είναι οι υδατικοί και οι πετρελαιοί πολφοί. Τα μίγματα αερίων ή υγρών-αερίων χρησιμοποιούνται σπανιότερα και σε ιδιαίτερους εδαφικούς σχηματισμούς. Η χρήση του αέρα ως ρευστού διάτρησης περιορίζεται σε περιοχές όπου οι σχηματισμοί είναι αδιαπέρατοι, όπως για παράδειγμα στη Δυτική Βιρτζίνια, ενώ τα μίγματα αερίων-υγρών (αφρός), χρησιμοποιούνται σε σχηματισμούς των οποίων οι πιέσεις των πόρων είναι πολύ χαμηλές (Heriot-Watt University, 2015).



Σχήμα 1.1: Είδη διατρητικών ρευστών

### 1.5.1 Πολφοί με βάση το νερό (water based muds / WBM)

Οι λάσπες διάτρησης συνίστανται από μια υγρή φάση και στερεά εν αιωρήσει. Η υγρή φάση μπορεί να είναι απλώς φρέσκο ή θαλασσινό νερό ή μπορεί να είναι μίγμα υγρών. Τα στερεά ποικίλουν και συνήθως εισάγονται και χημικά πρόσθετα. Το θαλασσινό νερό είναι η βάση στις περισσότερες λάσπες. Είναι προσβάσιμο, φθηνό, εύκολα ελεγχόμενο κατά την προσθήκη στερεών και αποτελεί το καλύτερο μέσο για την αξιολόγηση των σχηματισμών. Επιπλέον, το θαλασσινό νερό είναι ευκολότερα διαθέσιμο στις περιπτώσεις υποθαλάσσιων ερευνητικών ή παραγωγικών εργασιών (Σταματάκη, 2003). Τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό αποτελούνται από τρία μέρη:

- i. Νερό, το οποίο είναι η συνεχής φάση και παρέχει το αρχικό ιξώδες (φρέσκο ή θαλασσινό).
- ii. Ενεργά στερεά για την ενίσχυση του ιξώδους και του σημείου διαρροής.
- iii. Αδρανή στερεά για την επίτευξη της απαιτούμενης πυκνότητας (βαρύτης, θειούχος μόλυβδος, σιδηρομεταλλεύματα ή χαλαζιακά υλικά).

Τα (ii) και (iii) αντιπροσωπεύουν το συνολικό κλάσμα των στερεών στο σύστημα της λάσπης και μπορούν να χωριστούν σε 18 κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητές τους (Πίνακας 1.1):

**Πίνακας 1.1: Ομαδοποίηση πρόσθετων λάσπης ανάλογα με τις ιδιότητές τους**

1. Υλικά ρύθμισης ειδικού βάρους (weighting materials)	2. Υλικά ανάσχεσης διήθησης (filtrate reducers)
3. Υλικά ρύθμισης ιξώδους (viscosifiers)	4. Υλικά απομάκρυνσης ασβεστίου (calcium reducers)
5. Υλικά αραιώσης/διασποράς (thinners, dispersants)	6. Αναστολείς διάβρωσης (corrosion inhibitors)
7. Πρόσθετα ρύθμισης pH (pH control additives)	8. Αντιαφριστικά (defoamers)
9. Βακτηριοκτόνα (bactericides)	10. Γαλακτωματοποιητές (emulsifiers)
11. Κροκιδωτικά (flocclulants)	12. Αναστολείς διάβρωσης σχιστόλιθων (shale control inhibitors)
13. Παράγοντες αφρισμού (foaming agents)	14. Επιφανειοδραστικοί παράγοντες (surface-active agents)
15. Υλικά ανάσχεσης απώλειας κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης (lost circulation materials)	16. Λιπαντικοί παράγοντες (lubricants)
17. Υλικά απελευθέρωσης παγιδευμένων διατρητικών στελεχών (pipe-freeing agents)	18. Παράγοντες ελέγχου θερμοκρασίας (temperature stability agents)

Κάθε μία από τις παραπάνω 18 ομάδες πρόσθετων συστατικών, περιέχει υλικά με διαφορετικές ιδιότητες (Πίνακας 1.1 & 1.3). Αν και στην αγορά κυκλοφορούν

περισσότερα από 1000 διαφορετικά υλικά με διαφορετική εμπορική ονομασία το καθένα, οι υδατικοί πολφού δεν περιέχουν πάνω από 20 πρόσθετα συστατικά. Μια μικρή ποσότητα αυτών των υλικών αρκεί ώστε να αλλάξει τις ιδιότητες της λάσπης και να επιλυθούν διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με την κυκλοφορία της μέσα στη γεώτρηση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες στους πολφούς με βάση το νερό είναι βαρύτης για τη ρύθμιση του ειδικού βάρους του πολφού, άλατα με διαφορετικές λειτουργίες εντός του πολφού, και μπεντονίτης για τη ρύθμιση του ιξώδους του πολφού (Neff, 2005).

**Πίνακας 1.2: Τυπική σύσταση πολφού με βάση το νερό (πυκνότητας 11lb/gal [ppg] ή 1,32g/cm<sup>3</sup>)**

Σύσταση	Ποσοστό κ.ό. (%)
Νερό (σε διάφορες περιεκτικότητες σε άλατα)	80
Γαλακτοποιημένο ντίζελ ή αργό πετρέλαιο για ρύθμιση λίπανσης και φιλτραρίσματος	6
Ενεργά στερεά χαμηλού ειδικού βάρους, για ρύθμιση ιξώδους	3
Ανενεργά στερεά χαμηλού ειδικού βάρους - θραύσματα πετρωμάτων	5
Στερεά υψηλού ειδικού βάρους για ρύθμιση της πυκνότητας	6
	100

**Πίνακας 1.3: Λειτουργίες των ομαδοποιημένων προσθέτων της λάσπης διάτρησης**

Ιδιότητα	Λειτουργία	Συνήθη Χημικά Πρόσθετα
Υλικά ρύθμισης ειδικού βάρους (weighting materials)	Αυξάνουν την πυκνότητα της λάσπης, ισορροπούν τις πιέσεις του σχηματισμού, αποτρέπουν τις εκρήξεις	Βαρύτης, αιματίτης, ασβεστίτης, ιλμενίτης
Υλικά ρύθμισης ιξώδους (viscosifiers)	Αυξάνουν το ιξώδες της λάσπης αποτρέποντας την αποκόλληση περιμετρικών τεμαχιδίων και ελέγχουν τη ροή μέσα στη γεώτρηση	Μπεντονίτης, καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη, και άλλα πολυμερή
Υλικά αραιώσης/διασποράς (thinners, dispersants)	Αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των αργίλων ώστε να διατηρείται το επιθυμητό ιξώδες στη λάσπη	Τανίνες, πολυφωσφορικά, λιγνίτης
Πρόσθετα ρύθμισης pH (pH control additives)	Ρυθμίζουν την οξύτητα ή την αλκαλικότητα της λάσπης	Άσβεστος (CaO), καυστική σόδα (NaOH), ανθρακικό νάτριο (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ), διττανθρακικό νάτριο (NaHCO <sub>3</sub> )
Βακτηριοκτόνα (bactericides)	Χρησιμοποιούνται συνήθως σε λάσπες με βάση το νερό οι οποίες περιέχουν φυσικό	Γλουταραλδεΰδη και άλλες αλδεΰδες

Ιδιότητα	Λειτουργία	Συνήθη Χημικά Πρόσθετα
	άμυλο (starch) και ελαστικό κόμμι (gum), συστατικά που είναι ευάλωτα σε επιθέσεις βακτηριδίων	
Κροκιδωτικά (flocclulants)	Αυξάνουν το ιξώδες της λάσπης	Πολυμερή ανόργανα άλατα, ένυδρη άσβεστος, γύψος, κ.ά.
Υλικά ανάσχεσης της διήθησης (filtrate reducers)	Μειώνουν την απώλεια λάσπης λόγω του σχηματισμού "filter cake" (υπόλειμμα διήθησης) στα τοιχώματα της γεώτρησης	Μπεντονίτης, λιγνίτης, νατριούχα καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη, προζελατινοποιημένο άμυλο
Υλικά ανάσχεσης της απώλειας κυκλοφορίας της λάσπης (lost circulation materials)	Αποτρέπουν τη διαρροή λάσπης διάτρησης εντός των διατρυόμενων σχηματισμών	Φυσικά ινώδη υλικά, ανόργανα στερεά, και άλλα αδρανή αδιάλυτα στερεά
Παράγοντες απελευθέρωσης παγιδευμένων διατρητικών στελεχών (pipe-freeing agents)	Αποτρέπουν την παγίδευση των διατρητικών στελεχών στη γεώτρηση	Διάφορα έλαια, σαπωνοειδή υλικά
Υλικά απομάκρυνσης ασβεστίου (calcium reducers)	Καταπολεμούν την επίδραση του ασβεστίου από το θαλασσινό νερό, το τσιμέντο, τη γύψο, στις ιδιότητες της λάσπης	Ανθρακικό νάτριο, όξινο ανθρακικό νάτριο, υδροξειδίο του νατρίου, πολυφωσφορικά
Αναστολείς διάβρωσης (corrosion inhibitors)	Αποτρέπουν τη διάβρωση των διατρητικών στελεχών από τα διάφορα οξέα των σχηματισμών ή τα όξινα αέρια	Αμίνες, φωσφορικά άλατα
Αντιαφριστικοί παράγοντες (defoamers)	Μειώνουν τον αφρισμό της λάσπης διάτρησης	Αλκοόλες, στεατικό αργίλιο ( $C_{54}H_{105}AlO_6$ ), σιλικονούχες ουσίες
Γαλακτωματοποιητές (emulsifiers)	Διευκολύνουν το σχηματισμό σταθερών ουσιών σε αδιάλυτα υγρά στις λάσπες με βάση το νερό	Ανιονικές – κατιονικές ή μη ιοντικές ουσίες, οργανικά οξέα
Αναστολείς διάβρωσης σχιστόλιθων (shale control inhibitors)	Ελέγχουν την ενυδάτωση των σχιστόλιθων ώστε να μη διογκώνονται	Διαλυτά άλατα ασβεστίου και καλίου, ανόργανα άλατα, γλυκόλες

Ιδιότητα	Λειτουργία	Συνήθη Χημικά Πρόσθετα
Παράγοντες ελέγχου θερμοκρασίας (temperature stability agents)	Βελτιώνουν τη συμπεριφορά της λάσπης (ρεολογία, γαλακτώματα) σε υψηλές θερμοκρασίες	Λιγνίτης, τανίνες, ακρυλικά ή σουλφονωμένα πολυμερή
Λιπαντικά (lubricants)	Μειώνουν την απαιτούμενη ροπή διάτρησης	Διάφορα ορυκτά έλαια, γραφίτης, γλυκερίνη

### 1.5.1.1 Υλικά ρύθμισης ειδικού βάρους (Weighting materials)

Τα υλικά αυτά είτε διαλύονται, είτε αιωρούνται μέσα στο ρευστό διάτρησης. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υλικό που έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος από το νερό (ή το πετρέλαιο για ΟΒΜ) και δεν επιδρά αρνητικά στις άλλες ιδιότητες του πολφού. Φυσικά, το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας για την τελική επιλογή του υλικού, ωστόσο υπάρχουν και άλλες παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη πέραν του κόστους. Για παράδειγμα, η διαλυτότητα των αλάτων περιορίζει την εφαρμογή τους (Κελεσίδης Β. Χ., 2009). Παρακάτω αναφέρονται τα κυριότερα υλικά ρύθμισης του ειδικού βάρους της λάσπης διάτρησης:

- Ο βαρύτης ( $\text{BaSO}_4$ ) είναι ένα μαλακό, υψηλής πυκνότητας ( $4.1-4.5 \text{ g/cm}^3$ ) φυσικό μέταλλευμα που χρησιμοποιείται ως παράγοντας αύξησης του ειδικού βάρους της λάσπης διάτρησης για την αντιμετώπιση των πιέσεων του υπεδάφους (Κελεσίδης Β. Χ., 2009). Συνήθως, η κοκκομετρία για το 85 έως 90% του συνολικού βαρύτη που θα χρησιμοποιηθεί στον πολφό δεν πρέπει να υπερβαίνει το κόσκινο των 325 mesh (Halliburton, 2015). Επίσης, η χρήση του ενδείκνυται για μεγάλα βάθη και για θερμοκρασίες έως και  $260^\circ\text{C}$  (Halliburton, 2015). Αξίζει να σημειωθεί πως δε θεωρείται τοξικός σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ (Halliburton, 2015).
- Ο αιματίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) είναι κοκκινωπό μέταλλευμα, πυκνότητας  $4.8-5.3 \text{ g/cm}^3$  και χρησιμοποιείται (πιο σπάνια) για να αντικαταστήσει το βαρύτη (Neff, 2005). Λόγω του ότι έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το βαρύτη, σε έναν πολφό, παρουσιάζει και χαμηλότερη συγκέντρωση στερεών κατ' όγκο. Έτσι, συμβάλει στη βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων της λάσπης, μειώνοντας το συνολικό της κόστος.
- Ο ιλμενίτης ( $\text{FeTiO}_3$ ) έχει πυκνότητα  $4.5-5.0 \text{ g/cm}^3$  και μπορεί να περιέχει μία ευρεία ποικιλία ορυκτών, συμπεριλαμβανομένων: ζιρκόνιο, αιματίτη, μαγνητίτη, ρουτίλιο, σπινέλιο. Ωστόσο, περιέχει λιγότερες συγκεντρώσεις μετάλλων απ' ό,τι ο βαρύτης. Σύμφωνα με την Ospar Commission, ο ιλμενίτης θεωρείται ότι έχει πολύ μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και γι' αυτό γίνεται προσπάθεια ενθάρρυνσης της χρήσης του ως αντικαταστάτη του βαρύτη

στους πολφούς διάτρησης στις γεωτρήσεις της Βόρειας Θάλασσας (Neff, 2005).

### **1.5.1.2 Παράγοντες ρύθμισης του ιξώδους και υλικά αραιώσης / διασποράς**

Η διατήρηση σταθερού ιξώδους στα ρευστά διάτρησης είναι πολύ σημαντική και επιτυγχάνεται με την προσθήκη διάφορων πρόσθετων ενός των πολφών. Προστίθενται για καλύτερο καθαρισμό του φρέατος της γεώτρησης από τα θρύμματα και για τη διατήρηση των θρυμμάτων, αλλά και των προστιθέμενων στερεών εν αιωρήσει όταν σταματά η κυκλοφορία του ρευστού (π.χ. όταν γίνεται η σύνδεση νέου διατρητικού στελέχους). Τα πλέον διαδεδομένα είναι άργιλοι και φυσικά ή συνθετικά πολυμερή (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Ο μπεντονίτης, ο οποίος πήρε το όνομά του από την περιοχή που εντοπίστηκε το πρώτο εμπορικά εκμεταλλεύσιμο κοιτάσμα (Fort Benton, Wyoming, USA), είναι το δεύτερο σε περιεκτικότητα συστατικό σε ένα διατρητικό πολφό με βάση το νερό (Κελεσίδης Β. Χ., 2009). Η προσθήκη του αυξάνει το ιξώδες του πολφού, βοηθώντας να ανέλθουν στην επιφάνεια τα παραγόμενα θρύμματα από την όρυξη της γεώτρησης (Neff, 2005).

Ο μπεντονίτης είναι μίγμα ένυδρων αργιλοπυριτικών ορυκτών που ανήκουν κυρίως στην ομάδα του μαντιμοριλλονίτη. Η δομική του μονάδα αποτελείται από ένα φύλλο αλλούμινας [Al (ή Mg)-O-OH] τοποθετημένου μεταξύ δύο φύλλων πυριτίου. Μεταξύ των δομικών μονάδων και των πλατειών επιφανειών αυτών, συγκρατούνται διάφορα κατιόντα όπως  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ . Επειδή τα κατιόντα αυτά μπορούν να αντικατασταθούν, ονομάζονται και ανταλλάξιμα κατιόντα. Ανάλογα με τον τύπο των κατιόντων διαφοροποιούνται και οι ιδιότητες, ιδιαίτερα ο βαθμός διόγκωσης του μπεντονίτη (Σταματάκη, 2003).

Γενικά, οι πλατιές επιφάνειες των αργιλικών σωματιδίων είναι υδρόφιλες, προσροφούν δηλαδή μόρια νερού με ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις έναντι αυτών που συγκρατούν τα μόρια νερού. Όταν κόκκοι μπεντονίτη έλθουν σε επαφή με το νερό, μόρια νερού προσροφώνται, εισχωρούν στο κενό που υπάρχει μεταξύ των πλατιών επιφανειών των δομικών μονάδων, με αποτέλεσμα τη διόγκωση των αργιλικών σωματιδίων. Με τη διόγκωση εξασθενούν σημαντικά οι ελκτικές δυνάμεις που συγκρατούν τις δομικές μονάδες, γεγονός που οδηγεί στην αποσύνθεση και το διασκορπισμό των αργιλικών σωματιδίων στην υδάτινη φάση, καθώς και το σχηματισμό πολύ λεπτομερών σωματιδίων κολλοειδών διαστάσεων (Σταματάκη, 2003).

Η κύρια αιτία καταστροφής ενός σταθερού κολλοειδούς συστήματος νερού-μπεντονίτη είναι η εισαγωγή σε αυτό κάποιου ηλεκτρολύτη. Η εισαγωγή, για παράδειγμα, κατιόντων νατρίου  $\text{Na}^+$  ή  $\text{Ca}^{++}$  στο σύστημα νερού-μπεντονίτη προκαλεί τα παρακάτω φαινόμενα: Οι ηλεκτρολύτες απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού και απομακρύνουν από τα αργιλικά σωματίδια τα μόρια νερού που έχουν προσροφηθεί

επ' αυτών, προκαλώντας ένα είδος εξαλάτωσης. Εξουδετερώνουν τα αρνητικά φορτία επί των πλατιών επιφανειών των αργιλικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα να ενισχύονται οι τάσεις προσέγγισης των σωματιδίων, να επικρατούν οι δυνάμεις συνοχής της ύλης και να επέρχεται συσσωμάτωση (Σταματάκη, 2003).

Όμως, καθώς αυξάνει το βάθος της γεώτρησης, πρέπει να προστεθούν επιπλέον υλικά στον πολφό για να εξισορροπηθούν οι νέες μεγαλύτερες πιέσεις των σχηματισμών που απαντώνται. Ο επιπλέον μπεντονίτης που προστίθεται για τον επιπλέον βαρύτη, μπορεί από τη μία μεριά να συμβάλει στην απομάκρυνση των θρυμμάτων από τον πυθμένα της γεώτρησης. Από την άλλη, όμως, αυξάνεται πολύ το ιξώδες της λάσπης, με αποτέλεσμα να μεγαλώνουν και οι απαιτήσεις της αντλίας λάσπης για λειτουργία σε υψηλότερες πιέσεις. Αυτό το περιβάλλον λειτουργίας αυξάνει τον κίνδυνο για κάποια βλάβη στον εξοπλισμό (π.χ. κροκίδωση εντός των σωληνώσεων) και απώλεια της κυκλοφορίας λάσπης (Neff, 2005).

Για την αποφυγή της κροκίδωσης εισάγονται στο σύστημα της λάσπης χημικά πρόσθετα που έχουν την τάση να αποσυντίθενται και να παράγουν μεγάλο αριθμό ανιόντων που επικάθονται επί των αργιλικών σωματιδίων ενισχύοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τις απωστικές δυνάμεις μεταξύ τους. Τέτοια αντικροκιδωτικά είναι διάφορα πολυφωσφορικά άλατα (σε χαμηλές συγκεντρώσεις), λιγνίτες (χουμικά οξέα), φυσικές τανίνες (ενδιάμεση σύσταση λιγνιτών και κυτταρίνης), καθώς και λιγνοσουλφόνες (Σταματάκη, 2003).

Η απ' ευθείας ανάμιξη μπεντονίτη σε νερό που περιέχει μεγάλες ποσότητες NaCl δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στη διόγκωσή του, η οποία, στο θαλασσινό νερό για παράδειγμα περιορίζεται σημαντικά. Στην περίπτωση αυτή αντί του μπεντονίτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ατταπουλιγίτης, ο οποίος, κατά τη διάλυσή του υπό παρουσία NaCl αναπτύσσει ρεολογικές ιδιότητες ανάλογες αυτών του μπεντονίτη σε καθαρό νερό. Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης λάσπών διατήρησης που έχουν ως βάση το θαλασσινό νερό εντοπίζονται στη σημαντική μείωση της διόγκωσης των αργιλικής σύστασης διατρυόμενων σχηματισμών, με την αύξηση της αναλογίας σε αλάτι. Κατά συνέπεια, αργιλούχοι σχηματισμοί θα επιβαρύνονται λιγότερο κατά την εισχώρηση καθαρού νερού. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της προενυδάτωσης του μπεντονίτη σε καθαρό νερό πριν τη διάλυσή του στο θαλασσινό νερό (Σταματάκη, 2003).

Η προσθήκη ασβεστίου στο σύστημα νερού-μπεντονίτη συνιστάται κατά τη διατήρηση ευαίσθητων σχηματισμών με αργιλικές ενστρώσεις, λόγω της ανταλλαγής κατιόντων που λαμβάνει χώρα στο σύστημα λάσπης-σχηματισμού. Κατιόντα Na<sup>+</sup> των αργίλων αντικαθίστανται από κατιόντα Ca<sup>++</sup> της λάσπης, τα οποία αναπτύσσουν ισχυρότερους δεσμούς μεταξύ των πλατιών επιφανειών και των δομικών μονάδων των αργιλικών σωματιδίων των σχηματισμών, μειώνοντας δραστικά το φαινόμενο της διόγκωσής των (εκτιμάται ότι η μείωση της διόγκωσης μπορεί να είναι της τάξης του 50%, όταν η συγκέντρωση ασβεστίου στο σύστημα είναι 150 ppm). Ρευστά τέτοιου τύπου είναι πολύ αποτελεσματικά στη διατήρηση εκτεταμένων τμημάτων γύψου ή ανυδριτών (Σταματάκη, 2003).



Σε ιδιαίτερα προβληματικές περιπτώσεις αργιλικών σχηματισμών, η πρόσθεση KCl στο σύστημα νερού-μπεντονίτη είναι περισσότερο αποτελεσματική, δεδομένου ότι η δράση των κατιόντων καλίου είναι ακόμα ισχυρότερη στη μείωση της διόγκωσης των σχηματισμών αυτών. Η χρήση αυτού του τύπου των ρευστών συνιστάται και κατά τη διάτρηση παραγωγικών ζωνών οι οποίες εύκολα υπόκεινται σε φθορά της διαπερατότητας από τα ρευστά διάτρησης (Σταματάκη, 2003).

### **1.5.1.3 Λοιπά χημικά πρόσθετα**

Στους πολφούς διάτρησης, εκτός των προαναφερθέντων και πολύ συνήθων συστατικών, χρησιμοποιούνται και διάφορα άλλα χημικά πρόσθετα ώστε να μεταβάλλονται οι ιδιότητες της λάσπης σύμφωνα με τη ρεολογία που θέλουμε να πετύχουμε κάθε φορά, αλλά και τις συνθήκες εντός της γεώτρησης. Τα περισσότερα από αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες και δε θεωρούνται τοξικά για το περιβάλλον (Neff, 2005). Για παράδειγμα:

- Για τη μείωση του ιξώδους προστίθενται υλικά διασποράς (dispersants) ή αιωρηματικές ουσίες (deflocclulants) για την ελάττωση των αναπτυσσόμενων πιέσεων λόγω τριβών.
- Για την ελάττωση του ρυθμού διήθησης των ρευστών στα πετρώματα προστίθενται άργιλοι, πολυμερή, αμυλώδεις ουσίες, ασφαλικές ουσίες.
- Προστίθενται άλατα για προστασία των πετρωμάτων του υπεδάφους, για προστασία του ρευστού από μελλοντική επίδραση αλάτων που προέρχονται από τα ρευστά των πετρωμάτων (Κελεσιδης Β. Χ., 2009).

Άλλα πρόσθετα περιλαμβάνουν λιπαντικά, αντιδιαβρωτικά, χημικά για τη δέσμευση κατιόντων Ca και κροκιδωτικά μέσα (flocclulants) που βοηθούν στη συσσωμάτωση των μικρών θρυμμάτων πετρωμάτων για την καλύτερη απομάκρυνση των στερεών στην επιφάνεια. Πολλές φορές προστίθεται καυστικό νάτριο για την αύξηση του pH που βοηθά στην καλύτερη λειτουργία των υλικών διασποράς και ελαττώνει τη διάβρωση. Επίσης προστίθενται, κατά περίπτωση, και άλλα υλικά που βοηθούν τα ανωτέρω αναφερόμενα πρόσθετα στο να είναι πιο αποδοτικά (Κελεσιδης Β. Χ., 2009).

Ακόμα, μπορεί να γίνει χρήση διαφόρων χημικών προκειμένου να αντιμετωπιστούν έκτακτες καταστάσεις κατά τη διάτρηση. Τέτοια περίπτωση θεωρείται και η παγίδευση της διατρητικής στήλης εντός της γεώτρησης, όπου προστίθενται «κάψουλες» με χημικά πρόσθετα (λιπαντικά) που δρουν στοχευμένα στην περιοχή που υπάρχει το πρόβλημα για την απελευθέρωση των διατρητικών στελεχών.

### **1.5.2 Πολφοί με βάση το πετρέλαιο (oil based muds / OBM)**

Τα ρευστά αυτά είναι συστήματα όπου η υδάτινη φάση έχει σχεδόν αντικατασταθεί από πετρέλαιο ή ραφινάρισμένα πετρελαιοειδή (Σταματάκη, 2003). Η χρήση των πολφών με βάση το πετρέλαιο γίνεται από το 1930, καθώς είχε παρατηρηθεί ότι

επιτυγχάνεται καλύτερη παραγωγικότητα από τους ταμειυτήρες σε σχέση με τη χρήση πολφών με βάση το νερό (Heriot-Watt University, 2015). Αυτό συμβαίνει γιατί το πετρέλαιο δεν προκαλεί διόγκωση στις αργίλους, ούτε επηρεάζει τη διαβρεξιμότητα των σχηματισμών (Heriot-Watt University, 2015). Ως πρώτη βάση για αυτή τη λάσπη χρησιμοποιήθηκε το αργό πετρέλαιο, ωστόσο, τα μειονεκτήματά του (περιορισμένο ιξώδες, κίνδυνος ανάφλεξης, τοξικότητα) γρήγορα το περιόρισαν και το αντικατέστησαν με νέας τεχνολογίας πολφούς με βάση το πετρέλαιο (Heriot-Watt University, 2015). Η χρήση OBM στη διάνοιξη γεωτρήσεων έχει και κάποια αρνητικά, όπως:

- Υψηλότερο αρχικό κόστος.
- Απαιτεί περισσότερο αυστηρές διαδικασίες για την προστασία του περιβάλλοντος, ειδικότερα σε υποθαλάσσιες γεωτρήσεις (απόρριψη θρυμμάτων).
- Ελάττωση απόδοσης ορισμένων εργαλείων εκτέλεσης διαγραφιών εντός γεωτρήσεων.
- Η ανίχνευση "kicks" αερίου είναι πιο δύσκολη λόγω της διαλυτότητας του αερίου στο ντίζελ.
- Πιθανότητα ανάφλεξης.

Ωστόσο, σε κάποιες εφαρμογές, οι πολφοί με βάση το πετρέλαιο είναι πολύ αποδοτικοί. Σε αυτές περιλαμβάνονται:

- Διάτρηση και πυρηνοληψία των παραγωγικών ζωνών.
- Προκαλούν μικρότερη φθορά στη διαπερατότητα της παραγωγικής ζώνης.
- Δημιουργούν πολύ καλό επίστρωμα στα τοιχώματα της γεώτρησης, χωρίς να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την πίεση σε βαθιές γεωτρήσεις.
- Μειώνουν την τριβή της διατρητικής στήλης μέσα στη γεώτρηση και επομένως μειώνεται η φθορά της.
- Ο χρόνος ζωής των κοπτικών άκρων αυξάνει λόγω της ενισχυμένης λιπαντικής λειτουργίας των.
- Δεν είναι ευαίσθητοι σε ρυπαντές που συναντώνται στις λάσπες διάτρησης με βάση το νερό ( NaCl, CaSO<sub>4</sub>, άργιλοι, τσιμέντο).
- Τα χαρακτηριστικά τους ελέγχονται εύκολα, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει εισροή νερού ή πετρελαίου από τους διατρυόμενους σχηματισμούς.

Οι πολφοί με βάση το πετρέλαιο χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη σύστασή τους:

- Πολφοί με βάση το πετρέλαιο (περιεκτικότητα νερού <5%).
- Πολφοί γαλακτώματος νερού-πετρελαίου (water-in-oil emulsion) (περιεκτικότητα νερού 5-50%).
- Συνθετικοί πολφοί ή ψευδοπολφοί, με βάση το πετρέλαιο.

Τα OBM έχουν παρόμοια σύσταση με τα WBM, με τη διαφορά ότι η συνεχής φάση είναι το ντίζελ και το νερό είναι ως γαλάκτωμα υπό μορφή σταγόνων στη συνεχή φάση. Τέτοια μίγματα αναφέρονται ως γαλάκτωμα νερού σε πετρέλαιο (water-in-oil

emulsion). Μία ακόμη διαφορά είναι ότι όλα τα στερεά θεωρούνται ως ανενεργά διότι δεν αντιδρούν με το πετρέλαιο (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.4, το νερό είναι το δεύτερο σε αφθονία συστατικό μέσα στον πολφό. Αυτό συμβαίνει για τους κάτωθι λόγους (Κελεσίδης Β. Χ., 2009):

- Οικονομία (το νερό είναι φθηνότερο από το πετρέλαιο).
- Ιξώδες και ζελατινοποίηση. Επειδή το νερό συμπεριφέρεται ως στερεό, αυξάνει το ιξώδες. Επίσης βοηθά στη διασπορά των αργιλούχων ουσιών που χρησιμοποιούνται για αύξηση του ιξώδους και τις ιδιότητες ζελατινοποίησης.
- Ρύθμιση διήθησης.
- Σταθεροποίηση, με τη δυνατότητα διαλυτοποίησης αλάτων που σταθεροποιούν τα κολλοειδή.
- Ασφάλεια (από τον κίνδυνο ανάφλεξης κατά τη διάτρηση).

**Πίνακας 1.4: Συστατικά τυπικού πολφού με βάση το πετρέλαιο (πυκνότητας 11lb/gal [ppg] ή 1,32g/cm<sup>3</sup>)**

Σύσταση	Ποσοστό κ.ό. (%)
Ντίζελ	54
Χλωριούχο ασβέστιο ή νάτριο	4
Νερό	30
Στερεά χαμηλού ειδικού βάρους (άργιλος, άμμος, ασβεστόλιθος, χαλαζιακό πέτρωμα)	3
Στερεά υψηλού ειδικού βάρους για ρύθμιση της πυκνότητας	9
	100

Λόγω του υψηλότερου αρχικού κόστους και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προξενούν οι OBM χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά από WBM. Οι περιοχές εφαρμογής τους περιλαμβάνουν (Κελεσίδης Β. Χ., 2009):

- Γεωτρήσεις σε υψηλό βάθος με πετρώματα σε υψηλή θερμοκρασία.
- Γεωτρήσεις σε πετρώματα που περιέχουν ανυδρίτες, αλάτι ή ενεργούς σχιστόλιθους ή πετρώματα που περιέχουν H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>.
- Γεωτρήσεις σε κοιτάσματα που ήδη παράγουν, αλλά περιέχουν πετρώματα ευαίσθητα σε WBM.
- Προβλήματα διάβρωσης.
- Κεκλιμένες γεωτρήσεις ή γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου (slim holes) όπου οι αναπτυσσόμενες υψηλές ροπές αποτελούν πρόβλημα.
- Αποτροπή παγίδευσης της διατρητικής στήλης ή αποκόλλησή της.
- Γεωτρήσεις σε ασθενή πετρώματα με χαμηλότερες του κανονικού πιέσεις ρευστών πετρωμάτων.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

# Η Λεκάνη «Πρίνου-Καβάλας»

---

### 2.1 Εισαγωγή

Η ιζηματογενής λεκάνη Πρίνου-Καβάλας είναι ένα ταφρογενετικό βύθισμα, που εξελίχθηκε με ασυνήθη μεγάλη ταχύτητα κατά τη Μεταλπική περίοδο στην περιοχή του σημερινού Βορείου Αιγαίου. Παραμένει ο μοναδικός μορφοτεκτονικός σχηματισμός στον Ελληνικό χώρο, στις Νεογενούς ηλικίας κλαστικές αποθέσεις του οποίου έχουν σχηματιστεί εκμεταλλεύσιμοι ταμιευτήρες πετρελαίου. Ο ταμιευτήρας του Πρίνου είναι ένας Μειοκαινικός ψαμμίτης που περιλαμβάνει εννέα παραγωγικές ζώνες, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται αργιλικοί σχηματισμοί που αποτελούν τα καλύμματα των πετρελαιοφόρων ψαμμιτών, ενώ ορισμένοι από τους σχηματισμούς αυτούς αποτέλεσαν το μητρικό πέτρωμα για τη γένεση των υδρογονανθράκων. Το κοίτασμα του Πρίνου είναι προς το παρόν το μόνο παραγωγικό κοίτασμα πετρελαίου στην Ελλάδα (Γεωργακόπουλος, 1998).

Οι σχέσεις έντονων και συνδυαστικών τεκτονικών κινήσεων, ταχύτητας κλαστικής ιζηματογένεσης και παλαιοκλιματικών συνθηκών, πριν και μετά το «Μεσσήνιο Συμβάν<sup>1</sup>», οδήγησαν όχι μόνο στη δημιουργία, αλλά και στην ωρίμανση και παγίδευση υδρογονανθράκων σε εκμεταλλεύσιμες ποσότητες. Η ύπαρξη τουρβιδιτικών ακολουθιών στρωματογραφικά πάνω και κάτω από τη «Μεσσήνια» εβαποριτική ακολουθία, πιθανώς να συνδέεται με μια ουσιαστική αλλαγή στην τροφοδοσία της χερσοτρόφου συμπαρασυρόμενης μητρικής οργανικής ύλης. Το υλικό των τουρβιδιτικών ρευμάτων κάλυψε τις διάφορες υπολεκάνες κατά τη διάρκεια του Νεογενούς, μεταφέροντας πιθανώς κατ' επανάληψη παραπλήσιο «οργανικό σήμα<sup>2</sup>» που αποτέθηκε σαν υπερκείμενο και υποκείμενο των εβαποριτικών ακολουθιών.

### 2.2 Η γεωλογική ιστορία της περιοχής

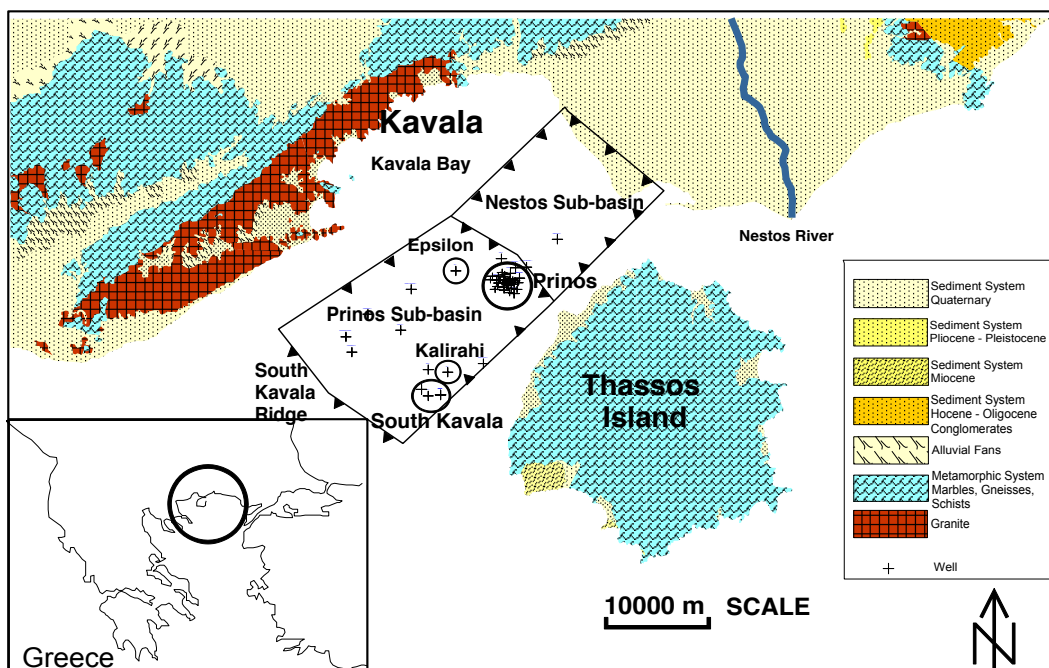
Στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, κατά την περίοδο του Παλαιογενούς, οι μεταλπικές ορογενετικές κινήσεις, οδήγησαν στη δημιουργία μιας σειράς ταφρογενετικών λεκανών. Η λεκάνη Πρίνου-Καβάλας δημιουργήθηκε στο νότιο άκρο της «Μάζας της Ροδόπης», μεταξύ των νήσων Θάσου-Θασοπούλας και της ηπειρωτικής χώρας (Εικόνα 2.1), στη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, έχοντας μήκος 38.0 km και

---

<sup>1</sup> «Μεσσήνιο Συμβάν»: Γεωλογική διεργασία κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η εξάτμιση της Μεσογείου με ταυτόχρονη εναπόθεση εβαποριτικών ακολουθιών (γύψος, άλατα, κ.λπ.)

<sup>2</sup> «Οργανικό σήμα»: Οργανική ύλη παραπλήσιας χημικής σύστασης με την προαναφερθείσα μητρική οργανική ύλη.

πλάτος περίπου 20.0 km. Η περιοχή παρέμεινε πάνω από τη στάθμη της θάλασσας κατά τη διάρκεια του κύκλου της Τηθύος και η ανάπτυξη της λεκάνης άρχισε στην αρχή του Μέσου Μειοκαινού. Η τεκτονική που προέκυψε από την πλαγιολίσθηση του νότιου τμήματος του ρήγματος της «Ανατολίας» άφησε άθικτη τη λεκάνη του Πρίνου και τις παρακείμενες μειοκαινικής ηλικίας λεκάνες. Η λεκάνη του Πρίνου οριοθετείται από κανονικά ρήγματα με παρατάξεις ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ και διαιρέθηκε σε δύο υπολεκάνες, τη βόρεια και τη νότια, που διαχωρίζονται από ένα ύβωμα. Η νότια υπολεκάνη, που ονομάστηκε υπολεκάνη του Πρίνου, είναι μια μεγάλου βάθους αποθετική λεκάνη, ενώ η βόρεια υπολεκάνη του Νέστου, στο τελικό της εξελικτικό στάδιο εμφανίζει μικρότερα βάθη (Πασαδάκης, et al., 2005).



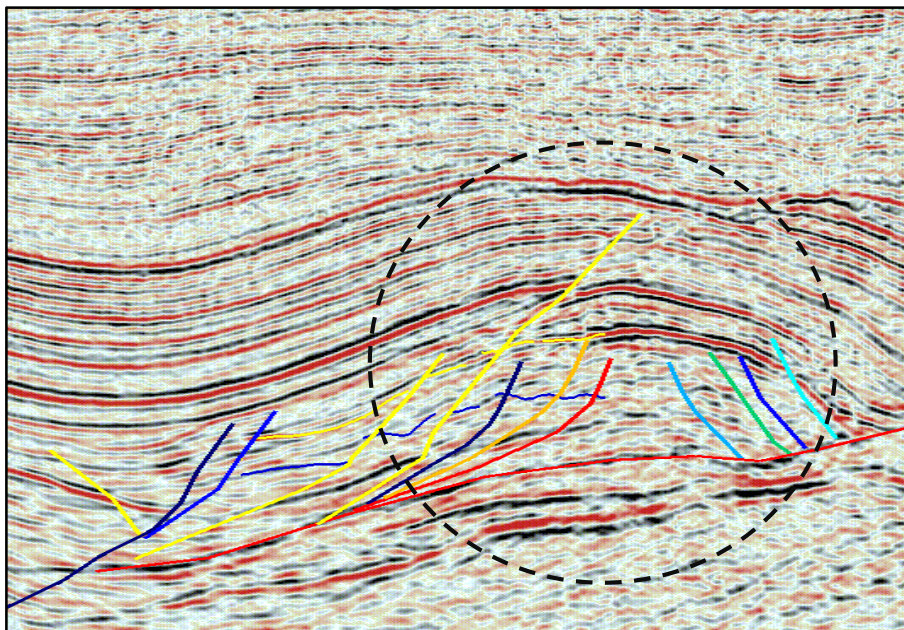
**Εικόνα 2.1: Γεωλογικός χάρτης της Λεκάνης Πρίνου-Καβάλας και γειτονικών περιοχών (Kiomourtzi, Pasadakis, & Zeligidis, 2007)**

Η ιζηματογένεση στην περιοχή του Πρίνου ξεκίνησε με χερσαίες αποθέσεις του Μέσου Μειοκαινού και συνεχίστηκε με λιμνοθαλάσσια και θαλάσσια ιζήματα. Η παρακείμενη υπολεκάνη του Νέστου καλύφθηκε με θαλάσσια ιζήματα και δημιούργησε μια μεγάλη σε έκταση ηπειρωτική κατωφέρεια μικρής γωνίας κλίσης. Στην υπολεκάνη του Πρίνου, η ιζηματογένεση ακολουθούσε το ενεργό τοπογραφικό ανάγλυφο του πυθμένα της λεκάνης, που διαμορφωνόταν από ένα σύστημα ενεργών συζυγών ρηγμάτων με παράταξη ΒΔ-ΝΑ, τα οποία εξελίσσονταν στο νότιο τμήμα του τεκτονικού κέρατος με φορά κίνησης προοδευτικά νοτιοδυτικά προς το κέντρο της λεκάνης.

Λόγω της ύπαρξης ενεργών πρσανών μεγάλης γωνίας κλίσης, έλαβαν χώρα φαινόμενα βαρυτικών ρωών και ανάπτυξη τουρβιδιτών. Ο συνδυασμός της δράσης λιστρικών ρηγμάτων με την ύπαρξη εβαποριτικής ακολουθίας οδήγησε στην περαιτέρω μετακίνηση ιζημάτων προς το νοτιότερο και βαθύτερο τμήμα της λεκάνης. Ένα παρόμοιο λιστρικό ρήγμα διέρχεται κάτω από το πεδίο του Πρίνου και κινούμενο

στην πρωταρχική εβαποριτική ακολουθία, μετατόπισε τους υπερκείμενους σχηματισμούς προς τα νότια και δημιούργησε το μεγάλο αντίκλινο του Νότιου Πρίνου. Η πλειοψηφία των παγίδων του Πρίνου είναι συνδεδεμένη ως δομές αντικλίνων rollover στο μέτωπο των συγγενετικών ρηγμάτων (Εικόνα 2.2). Η σταθερή παροχή ιζημάτων υποβοηθούμενη από την ενεργό τεκτονική οδήγησε στη δημιουργία ιζηματογενούς ακολουθίας πάχους 5,800.0 m (Πασαδάκης, et al., 2005).

Στα πρώτα στάδια της ιζηματογένεσης η λεκάνη Πρίνου-Καβάλας ήταν ανοικτή στο νότο προς τη θάλασσα. Βαθμιαία άρχισε να δημιουργείται μεταξύ της Θάσου και της ηπειρωτικής χώρας μια υποθαλάσσια ράχη, η ράχη της νότιας Καβάλας, δημιουργώντας έναν περιορισμό στην ανοικτή θάλασσα και μετασχηματίζοντας τη λεκάνη σε λιμνοθάλασσα κατά το Μεσσηνίο. Η ράχη, στην βορειοανατολική πλευρά της οποίας βρίσκεται το μικρό νησί της Θασοπούλας, συμμετείχε περιοδικά στην πλήρη απομόνωση της λεκάνης από τη θάλασσα. Την ίδια χρονική περίοδο ένα σύστημα περιβαλλόμενων από ξηρά λεκανών αναπτύχθηκε στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου. Στην υπολεκάνη του Πρίνου κατά τη διάρκεια του Μεσσηνίου αποτέθηκαν μεταξύ των κλαστικών ακολουθιών έξι κύριοι εβαποριτικοί ορίζοντες, ενώ στην υπολεκάνη του Νέστου αποτέθηκαν ανυδρίτες και ασβεστόλιθοι. Η ιζηματογένεση συνεχίστηκε με θαλάσσια πλειοκαινικά ιζήματα (Πασαδάκης, et al., 2005).

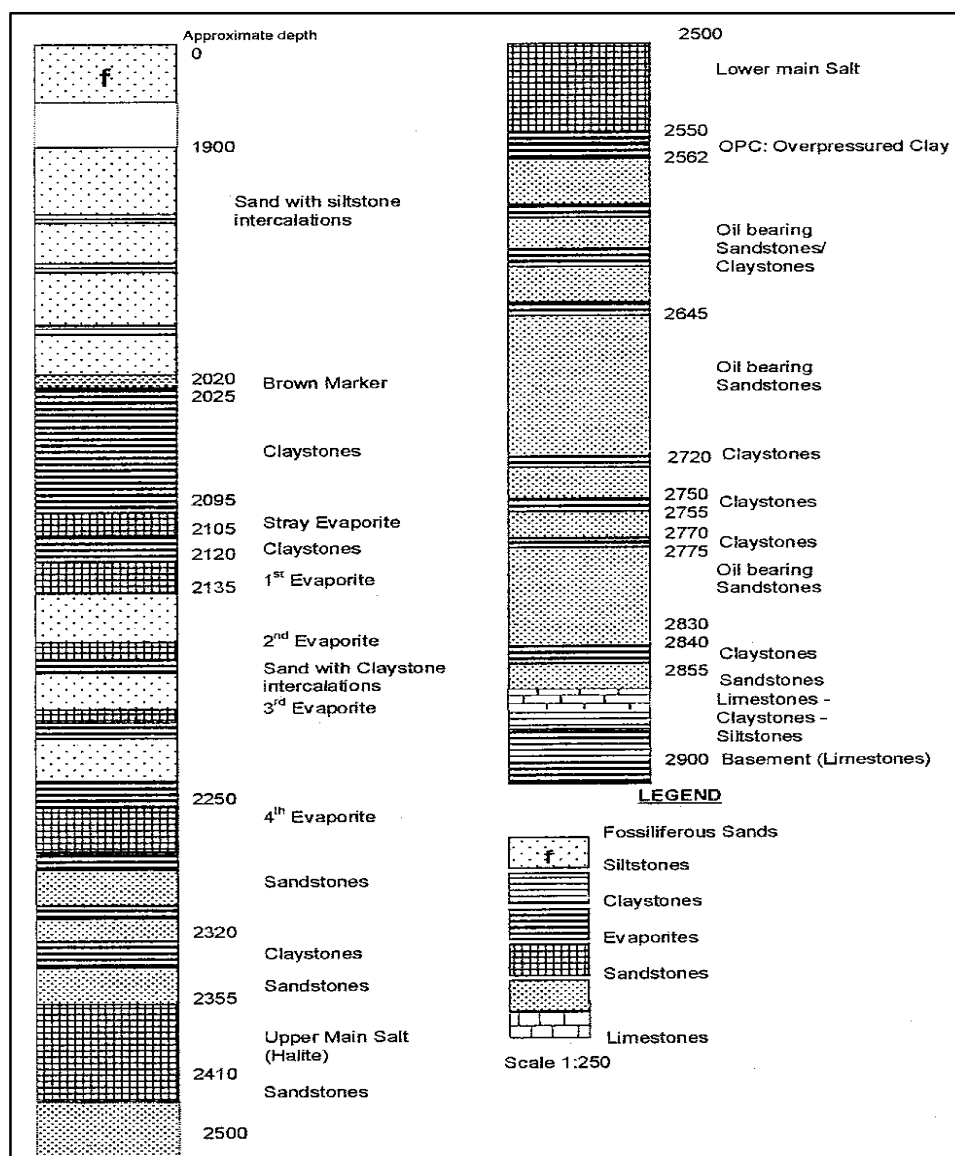


Εικόνα 2.2: Σχηματισμός αντίκλινο στη περιοχή του Πρίνου (Kiomourtzi, Pasadakis, & Zeligidis, 2007)

### 2.3 Λιθολογική και στρωματογραφική περιγραφή

Η λεκάνη Πρίνου - Καβάλας περιέχει σειρά ιζημάτων (Εικόνα 2.3) που φτάνει τα 5,800.0 m, τα οποία και κατανέμονται ηλικιακά από το κατώτερο Μειόκαινο έως και το Πλειστόκαινο. Αυτά τα ιζήματα μπορούν να χωριστούν στις τρεις παρακάτω ενότητες

(Georgakopoulos, Lithology and stratigraphy of the Neogene Prinos-Kavala basin, Northern Greece, 2000):



Εικόνα 2.3: Στρωματογραφική στήλη της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας (Georgakopoulos, Lithology and stratigraphy of the Neogene Prinos-Kavala basin, Northern Greece, 2000)

▪ **Κλαστικά ιζήματα που αποτέθηκαν μετά τους εβαποριτες (μετα-εβαποριτική ακολουθία)**

Κατά τη διάρκεια των περιόδων Πλειόκαινου – Πλειστόκαινου, μια συσσωρευμένη κλαστική ακολουθία αποτελούμενη από αμμόλιθους και άργιλο, φτάνει στο μέγιστο πάχος της τα 2,700.0 m. Η ακολουθία της απόθεσης, αποτελείται από λευκή γαλακτώδη άμμο, μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους κόκκων, όχι πάντα γωνιακή, σε ορισμένες περιπτώσεις περιέχοντας απολιθώματα και ίχνη μίκας (μοσχοβίτης). Αυτή η άμμος υπερτίθεται ενός διαφορετικού στρώματος άμμου, σφαιρικού, που περιέχει ίχνη γλαυκωνίτη και λεπτές ενδιάμεσες στρώσεις αργίλων, χρώματος ανοικτού έως



σκούρου τεφρού, ελαφρώς ασβεστιτική με πυριτικά εγκλείσματα. Οι προαναφερθείσες άμμοι έχουν συνολικό πάχος 1,370.0 m και βρίσκονται κάτω από μία λευκή γαλακτώδη άμμο, μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους κόκκων, παρουσιάζοντας σε ορισμένες περιπτώσεις μεγαλύτερα τεμάχια, διαχωριζόμενη από ιλύλιθους (siltstone), με αργιλική δομή. Αυτή η άμμος περιέχει ίχνη ασβεστόλιθου, χρώματος ανοικτού τεφρού, ενίοτε χρώματος ωχρού, λευκού έως κιτρινέρυθρου, σκληρού και ελαφρά δολομιτικού κατά μέρη. Στη βάση της μετα-εβαποριτικής ακολουθίας και στην κορυφή των εβαποριτών υπάρχει ένα στρώμα που χρησιμεύει ως δείκτης και ονομάζεται «Brown Marker». Πρόκειται για μία μάργα, ανοικτή έως μέτρια τεφρή, λεπτή, μεγάλης υγρασίας, ασβεστιτική έως πολύ ασβεστιτική, ενίοτε στερεή έως πολύ σκληρή με σειρά σκούρων αργιλικών στρώσεων.

#### ▪ Η εβαποριτική ακολουθία

Οι εβαπορίτες αποτελούν το δεύτερο δυσκολότερο εμπόδιο προς τη μετανάστευση των υδρογονανθράκων που υπάρχει στις ιζηματογενείς λεκάνες. Οι εβαπορίτες δρουν σαν μία άριστη σφραγίδα που παγιδεύει αποτελεσματικά τους περισσότερους από τους υδρογονάνθρακες που δημιουργούνται στα προ-εβαποριτικά ιζήματα. Η λεκάνη Πρίνου-Καβάλας πληρώθηκε από μία εβαποριτική και κλαστική ακολουθία πάχους 800.0 m κατά τη διάρκεια του Μειόκαινου. Εδώ επτά εβαποριτικοί κύκλοι πιθανόν συνέβησαν την εποχή του Μεσσήνιου συμβάντος. Η εβαποριτική ακολουθία ξεκινάει με τον «stray enaorite» (εβαπορίτης που δεν είναι και τόσο συνεκτικός), δηλαδή ένα υπόστρωμα πάχους 10.0 m από ανυδρίτη, λευκό, μαλακό έως μέτριας σκληρότητας, που συνδέεται με ένα στρώμα άμμου κόκκων μεσαίου μεγέθους.

Το «stray enaorite» υπέρκειται ενός αργιλικού στρώματος, χρώματος ανοικτού τεφρού, ενίοτε τεφρού ή σκουρότεφρου, απαλού, άμορφου και εξαιρετικά ασβεστιτικό. Ο υποκείμενος σχηματισμός είναι ο «πρώτος εβαπορίτης» που αποτελείται από διαυγή αλίτη, σκληρό, ενίοτε πολύ σκληρό με κογχοειδή θραυσμό. Κάτωθεν του «πρώτου εβαπορίτη», παρατηρείται μία εναλλαγή αργιλικών στρωμάτων, άμμων και εβαποριτών, με συνολικό πάχος περίπου 240.0 m. Οι άργιλοι είναι τεφροί έως σκούροι τεφροί, σκληροί, έως πολύ σκληροί, ενίοτε όμως και μαλακοί που εξελίσσονται σε πιο ασβεστιτικούς καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα, ενώ παρεμβάλλονται στρώσεις άμμου, διαυγείς - ημιδιαυγείς, ενίοτε λευκές έως γαλακτώδεις, μεσαίου έως πολύ μεγάλου μεγέθους κόκκων.

Εντός αυτής της ακολουθίας ευρίσκεται το δεύτερο, το τρίτο και το τέταρτο εβαποριτικό στρώμα, αποτελούμενα κυρίως από αλίτη και ίχνη ανυδρίτη. Το τέταρτο εβαποριτικό στρώμα αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από αλίτη, διαυγή ενίοτε ημιδιαυγή και λευκό, στερεό έως σκληρό, παρεμβαλλόμενο από αργιλικά στρώματα, χρώματος ανοικτού τεφρού έως τεφρού, ενίοτε καστανότεφρου, και εξαιρετικά ασβεστιτικά, ενίοτε με ιλύ. Ένα αργιλικό στρώμα, τεφρό, με ελάχιστη άμμο, υπόκειται της ακολουθίας. Ο υποκείμενος σχηματισμός είναι ένα παχύ κι εξαιρετικά ανεπτυγμένο στρώμα αλάτων, που ονομάζεται «Ανώτερο κύριο άλας». Αποτελείται αποκλειστικά από αλίτη, γαλακτώδη λευκό, που σχηματίζει μεγάλους έως πολύ μεγάλους κρυστάλλους. Η μορφολογία των κρυστάλλων του αλίτη μελετήθηκε

διεξοδικά σε μικροσκόπιο υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιώντας δείγματα καλυμμένα με άνθρακα.

Ανάμεσα στο «Ανώτερο κύριο άλας» (UMS) και στο «Κατώτερο κύριο άλας» (LMS), βρίσκεται μια ακολουθία αποτελούμενη από αργίλους, τεφρούς έως τεφροκάστανους και ημιδιαφανή άμμο, λευκή γαλακτώδη, μεσαίου έως πολύ μεγάλου μεγέθους κόκκων με ίχνη πυρίτη και σπανιότερα ίχνη γλαυκονίτη. Το κατώτερο κύριο άλας που υπόκειται της παραπάνω ακολουθίας, αποτελεί το πλέον μεγάλο και καλύτερα ανεπτυγμένο στρώμα αλάτων στη λεκάνη Πρίνου – Καβάλας. Το πάχος αυτού του στρώματος μπορεί να φτάσει τα 75.0 m σε ορισμένα σημεία. Επίσης σε αυτό το στρώμα βρέθηκαν κρύσταλλοι αλίτη και βαρύτη. Στη βάση του «Κατώτερου κύριου άλατος», βρίσκεται ένας διαχωριστικός σχιστόλιθος, με πάχος περίπου 10.0 m. Αυτό το στρώμα, που βρίσκεται δίπλα στις διαπερατές άμμους, αποτελείται από «υπερσυμπιεσμένη άργιλο» (OPC). Άργιλοι δίπλα σε διαπερατές άμμους μπορεί να περιέχουν ρευστά σε υψηλή πίεση. Ωστόσο οι άμμοι μπορεί να εμφανίζουν μεγαλύτερο πορώδες από τους αργίλους σε συγκρίσιμα βάθη. Αυτοί οι άργιλοι με την ασυνήθιστα υψηλή πίεση στους ταμιευτήρες χαρακτηρίζονται “υπερσυμπιεσμένοι” (Zimmerle, 1995). Η υπερσυμπιεσμένη άργιλος σχηματίζει ένα αργιλικό στρώμα, καστανότεφρο έως σκούρο καστανότεφρο, υγρό, κολλώδες, άμορφο με μικροσκοπικά εγκλείσματα αλίτη, σηματοδοτώντας έτσι την αρχή της προ-εβαποριτικής ακολουθίας.

#### ▪ Κλαστικά (προ-εβαποριτική ακολουθία)

Κάτω από το «Κατώτερο κυρίως άλας», μια κλαστική ακολουθία με πάχος περίπου 2100 μέτρων, αποτέθηκε κατά το μέσο Μειόκαινο στην περιοχή. Εντός αυτής της ακολουθίας βρίσκονται οι πετρελαιοφόροι ψαμμίτες.

Οι ψαμμίτες της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας είναι κατά κανόνα συμπαγείς και πολυστρωματικοί πράγμα που χαρακτηρίζει έναν τουρβιδίτη. Τα ψαμμιτικά στρώματα επίσης υποδεικνύουν έντονα βασικές επαφές στους υποκείμενους σχιστόλιθους και γενικότερα έντονα βασικά χαρακτηριστικά, που αποτελούν άλλο ένα κοινό χαρακτηριστικό των τουρβιδιτών.

Ο ταμιευτήρας περιέχει ποσότητες διαστρωματικού σχιστόλιθου, που μαζί με το πάχος των στρωμάτων, δηλώνουν διαφορές στη θέση εντός του αποθηκευτικού καναλιού. Αυτές οι διαφορές αντανακλώνται στις διαγραφίες των ακτινών γ. Η συνολική ενότητα έχει διαιρεθεί σε υποκειμενικά σε τέσσερα μέρη για χαρτογράφηση ταμιευτήρων. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη περιορίζεται από συνεχή στρώματα σχιστόλιθων που μπορούν να συσχετιστούν στον ταμιευτήρα, με κάθε μέρος να παρουσιάζει πλευρικές αλλαγές. Το μέγεθος των κόκκων των ψαμμιτών του ταμιευτήρα διαφοροποιείται από πολύ μικρό έως πάρα πολύ μεγάλο.

Η πλήρωση της δομής μπορεί να φθάσει το 20% σε ορισμένες περιπτώσεις και αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από αυθηγενή καολινίτη. Το χρώμα ποικίλλει από γαλακτώδες λευκό-ωχρό, τεφρό έως τεφρό καστανό. Οι σχήμα των κόκκων δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται, άλλοτε περισσότερο γωνιώδες, άλλοτε περισσότερο

σφαιρικό, με κατανομή μέτρια έως καλή. Η άργιλος είναι χρώματος τεφρού, μαλακή, με μεγάλο ποσοστό υγρασίας, ενίοτε μετατρεπόμενη σε ιλύ, κατά τόπους. Στο κατώτερο μέρος της προ-εβαποριτικής κλαστικής ακολουθίας, βρίσκεται ασβεστολιθικό υπόστρωμα, τεφρό έως σκούρο τεφρό, μεγάλης σκληρότητας. Ο ασβεστόλιθος σχετίζεται με άργιλο σε ποσοστό 10% και ψαμμίτη σε ποσοστό 20%.

#### ▪ Συμπεράσματα

Η ιζηματογενής ακολουθία της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας είναι μια διαβαθμισμένη ακολουθία που δημιουργήθηκε από ποτάμιες αποθέσεις σε μεγάλο βάθος, όχι μακριά από την ακτή. Η διατήρηση της οργανικής ύλης ευνοήθηκε από τη γρήγορη ιζηματογένεση και τη δημιουργία τουρβιδίτη. Δημιουργήθηκαν συνθήκες ευνοϊκές για τη διατήρηση της θαλάσσιας οργανικής ύλης, εξαιτίας του γρήγορου σχηματισμού, του εβαποριτικού περιβάλλοντος κατά την περίοδο του Μεσσήνιου Συμβάντος.

## 2.4 Ο σχηματισμός των εβαποριτών στη λεκάνη του Πρίνου

Όπως προαναφέρθηκε, οι εβαπορίτες της λεκάνης του Πρίνου σχηματίστηκαν στο ανώτερο Μειόκαινο και χρονολογούνται στην ίδια περίοδο με όλους τους μεγάλους εβαποριτικούς σχηματισμούς που υπάρχουν στην περιφέρεια της λεκάνης της Μεσογείου.

Η δημιουργία της λεκάνης χρονολογείται στο κατώτερο Μειόκαινο. Μπορεί ωστόσο να διαιρεθεί σε δύο υπολεκάνες, καθώς μετά τις πρώτες ηπειρωτικές αποθέσεις η ιζηματογένεση που έλαβε χώρα, άλλαξε τη μορφολογία της. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας νέας υπολεκάνης στη νότια πλευρά της αρχικής λεκάνης, με επίπεδη κλίση προς το Βορρά. Με την πάροδο του χρόνου, αυτή η νέα υπολεκάνη αποκόπηκε από την ανοικτή θάλασσα κατά την περίοδο του ανώτερου Μειόκαινου, με συνέπεια το σχηματισμό των εβαποριτών από την απόθεση ασβεστόλιθου και ανυδρίτη. Στα βαθύτερα τμήματα αυτής της λεκάνης, καθιζάναν άλατα με αποτέλεσμα αργότερα τη δημιουργία δόμων άλατος.

Έξι στρώματα αλάτων, με μεγάλες κλαστικές δομές στο εσωτερικό τους, αποτέλεσαν την ύστερη φάση της ιζηματογένεσης, συνθέτοντας την εβαποριτική ζώνη. Απομονωμένες εμφανίσεις ανυδρίτη είχαν από καιρό εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή της Απολλωνίας, νοτιοδυτικά της Καβάλας. Η εκτεταμένη γεωτρητική έρευνα τα τελευταία χρόνια στον κόλπο της Καβάλας και στο γειτονικό πεδίο του Νέστου, από ένα πλήθος εταιριών και της Ελλάδας και του εξωτερικού, συνέβαλαν ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο για τη γεωλογία της περιοχής που δείχνει ότι τα μεγάλα εβαποριτικά κοιτάσματα, δημιουργήθηκαν στη Μεσόγειο κατά το ανώτερο Μειόκαινο.

Όσον αφορά τη λιθολογία αυτών των αλάτων, συναντάται ανυδρίτης και ασβεστόλιθος σε λεπτά στρώματα πάχους 3.0-5.0 m, τα οποία εναλλάσσονται μεταξύ τους με ψαμμίτη, κροκαλοπαγή και μάργες. Ο ανυδρίτης είναι λευκός,

μικροκρυσταλλικός, συμπαγής, ενώ ο ασβεστόλιθος είναι καστανόχρωμος έως τεφρός και επίσης εμφανίζει μικροκρυσταλλική δομή. Το ολικό πάχος αυτής της ζώνης κυμαίνεται από 500.0 m και μειώνεται έως τα 300.0 m προς τις άκρες της λεκάνης (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010).

## **2.5 Συνθήκες γένεσης των εβαποριτών στη λεκάνη του Πρίνου**

Στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ Νέστου και Πρίνου, πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις για τη γένεση εβαποριτικών κοιτασμάτων. Μετά τις αλλαγές που συνέβησαν στην περιοχή κατά το ανώτερο Μειόκαινο, που είναι ορατές σε πολλά μέρη γύρω στη λεκάνη της Μεσογείου, προέκυψε μετά από έρευνες το ακόλουθο μοντέλο: Η κοντινή (στην Καβάλα) θαλάσσια λεκάνη απομονώθηκε από την ανοικτή θάλασσα και μετατράπηκε σε λιμνοθάλασσα. Το εναπομείναν θαλασσινό νερό άρχισε να εξατμίζεται από μία περίοδο ξηρού κλίματος, με θερμοκρασίες ανώτερες των 30 °C και έτσι ευνοήθηκε η δημιουργία κοιτασμάτων ανυδρίτη αντί κοιτασμάτων γύψου. Η υπολεκάνη πρέπει να εφοδιάζονταν περιοδικά με θαλασσινό νερό, που εισέρρεε ξαφνικά κατά περιόδους από ένα κανάλι ΒΑ της λεκάνης (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010).

Σύμφωνα με το μοντέλο γένεσης εβαποριτών που προτάθηκε από τον Briggs το 1958 και τροποποιήθηκε από τον Weller το 1960, η πυκνότητα του νερού παρουσιάζει μεταβολές κατά καιρούς και αυτό εξηγεί τον παράλληλο διαχωρισμό των διαφορετικών στρωμάτων, τα οποία προφανώς διαμορφώθηκαν από ύδατα διαφορετικών διαλυτοτήτων. Το μεγαλύτερο μέρος των αλάτων καθιζάνει προς το βαθύτερο τμήμα της λεκάνης. Η αντίθετη κίνηση των βαρέων αλάτων στο βαθύτερο τμήμα της λεκάνης, σε σχέση με αυτό που συνέβαινε έξω από τα όρια της, έδωσε ως αποτέλεσμα τις μεγάλες σε πάχος συγκεντρώσεις άλατος στο νοτιότερο βαθύ τμήμα της λεκάνης (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010).

Στο βορειότερο τμήμα, το οποίο παρουσιάζει κλίση με τις μικρότερες πυκνότητες και πολύ ρηχότερα νερά, ο ασβεστόλιθος και ο ανυδρίτης σχηματίστηκαν ταυτόχρονα. Η απόθεση άρχισε με ασβεστόλιθο και καθώς αυξάνονταν οι ρυθμοί εξάτμισης, σχηματίστηκε και ο ανυδρίτης.

## **2.6 Η ιστορία εκμετάλλευσης του κοιτάσματος στη λεκάνη του Πρίνου**

Η εξερεύνηση της περιοχής ξεκίνησε με εκτεταμένες δραστηριότητες γεωφυσικών διασκοπήσεων (σεισμικών ερευνών), ανατολικά και δυτικά της Θάσου στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι εταιρίες που συμμετείχαν στις δραστηριότητες ήταν η κοινοπραξία της Oceanic Exploration Company of Greece και της Hellenic Oil Company Inc., και οι έρευνες συνεχίστηκαν από τις White Shield Oil Corporation και Colorado Greece Oil Corporation.

Η αρχική συμφωνία που σύναψε το Ελληνικό Κράτος το 1969 ώστε να παραχωρηθούν στις προαναφερόμενες εταιρίες άδεια εξερεύνησης, περιλάμβανε την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, δηλαδή τη θάλασσα της Θράκης από τη δυτική χερσόνησο του Άθου μέχρι τα ανατολικά ελληνοτουρκικά σύνορα. Αργότερες εκχωρήσεις, μείωσαν την περιοχή παραχώρησης στο σημερινό της μέγεθος 1,700.0 km<sup>2</sup>.

Η πρώτη γεώτρηση, με ονομασία «East Thassos 1», ορύχθηκε 20.0 km ανατολικά της Θάσου σε ένα μεγάλο αντίκλινο το 1971. Οι επόμενες δύο γεωτρήσεις, ορύχθηκαν δυτικά του νησιού τα έτη 1972 και 1973 σε ένα ρωγματομένο αντίκλινο. Αυτό οδήγησε στην ανακάλυψη του κοιτάσματος αερίου της Νότιας Καβάλας. Οι έλεγχοι που επακολούθησαν, έδειξαν ότι το πεδίο ήταν πολύ μικρό και όχι εκμεταλλεύσιμο για εκείνη την εποχή, ωστόσο η ύπαρξη υδρογονανθράκων στην περιοχή, ενθάρρυνε περαιτέρω τη γεωτρητική δραστηριότητα. Η τέταρτη γεώτρηση, «Πρίνος 1», διανοίχθηκε κοντά στο ανώτατο σημείο της δομής του Πρίνου, στα τέλη του 1973 και ολοκληρώθηκε το Φεβρουάριο του 1974. Με αυτή τη γεώτρηση, ανακαλύφθηκε το κοιτάσμα του Πρίνου, ενώ με τη γεώτρηση «Πρίνος 2», που ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 1974, επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη του κοιτάσματος (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010).

Από αυτά τα δύο κοιτάσματα, του Πρίνου και της Νότιας Καβάλας, πιο σπουδαίο από οικονομικής άποψης θεωρείται το πρώτο. Το πετρέλαιο στο κοιτάσμα του Πρίνου είναι εγκλωβισμένο στη δομή ενός θολοειδούς αντικλίνου έκτασης 4.5 km<sup>2</sup>, και σε βάθος 2,500.0 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πετρέλαιο το οποίο βρίσκεται μέσα σε στρώματα ψαμμιτών, περιέχει μεγάλες ποσότητες αερίου και χαρακτηρίζεται ως «ελαφρύ» όσον αφορά στα συστατικά του μίγματος υδρογονανθράκων που περιέχει. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτού του κοιτάσματος είναι τα υψηλά ποσοστά υδρόθειου που περιέχει. Αντίθετα, το κοιτάσμα φυσικού αερίου της Νότιας Καβάλας δεν περιέχει υδρόθειο. Το κοιτάσμα αυτό είναι εξίσου πλούσιο σε ελαφρούς υδρογονάνθρακες και βρίσκεται εγκλωβισμένο σε αντίκλινο 4 km<sup>2</sup> και σε βάθος 1,700.0 m, το οποίο περιβάλλεται από ψαμμίτες (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010).

Κατά τη διάρκεια των ετών 1975 – 1977, ορύχθηκαν τέσσερις επιπλέον γεωτρήσεις. Στο μεταξύ, το 1976 η Oceanic αντικαταστάθηκε από την καναδική Denison Mines και η κοινοπραξία νομιμοποιήθηκε με την ονομασία (NAPC) – North Aegean Petroleum Company. Η γεώτρηση με την ονομασία «Πρίνος 4», απέδειξε ότι το ΒΑ ύψωμα, που αργότερα ονομάστηκε Βόρειος Πρίνος, είναι πλήρως απομονωμένο από την υπόλοιπη δομή του κοιτάσματος του Πρίνου, με ένα ρήγμα με νοτιοδυτική κατεύθυνση. Αυτό μείωσε την αναμενόμενη περιοχή του πεδίου του Πρίνου, σχεδόν στο μισό. Επιπροσθέτως, ο ταμιευτήρας του Βόρειου Πρίνου, απεδείχθη πως είναι περιορισμένης έκτασης με λεπτότερο πέτρωμα κάλυψης ταμιευτήρα (cap rock) και με διαφορετική ποιότητα υδρογονανθράκων.

Τον Ιούλιο του 1981 τα κοιτάσματα «Πρίνου» και «Νοτίου Καβάλας» αρχίζουν να παράγουν. Τα πρώτα χρόνια η παραγωγή έφτασε στο μέγιστο των 26,000 βαρελιών

πετρελαίου ανά ημέρα και έκτοτε ακολούθησε φθίνουσα πορεία με αποτέλεσμα να πέσει η παραγωγή στα 4,000 βαρέλια την ημέρα. Τα περιθώρια βελτίωσης της παραγωγής ήταν περιορισμένα λόγω της μεγάλης συμπαραγωγής νερού μαζί με το πετρέλαιο. Υπολογίζεται πως μέχρι σήμερα, το κοιτάσμα του Πρίνου έχει δώσει περισσότερα από 106 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου, ενώ το κοιτάσμα της Νότιας Καβάλας περισσότερα από 650 εκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Το 1985 αναθεωρήθηκε η σύμβαση προς όφελος του Ελληνικού Δημοσίου, όπου δόθηκε η δυνατότητα συμμετοχής του Δημοσίου στις περιοχές έρευνας της παραχώρησης, όχι όμως και στην παραγωγή των ήδη ανακαλυφθέντων και υπό άντληση κοιτασμάτων του Πρίνου και της Νοτίου Καβάλας.

Παράλληλα με την εκμετάλλευση των δύο προαναφερθέντων κοιτασμάτων, οι προσπάθειες για τον εντοπισμό νέων κοιτασμάτων, ήταν διαρκείς από το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1970 έως και σήμερα. Στις αρχές του 1996 τέθηκε σε παραγωγή το κοιτάσμα του «Βόρειου Πρίνου», το οποίο βρίσκεται 2,5 km βόρεια του Πρίνου. Η ΔΕΠ ΕΚΥ συμμετείχε με 35% στην ανάπτυξη και εκμετάλλευση αυτού του κοιτάσματος και ήταν η πρώτη φορά που μία δημόσια επιχείρηση πετρελαίου, ως μέτοχος της κοινοπραξίας του Βορείου Αιγαίου, συμμετέχει στην παραγωγική διαδικασία υδρογονανθράκων.

Η σημαντική μείωση της παραγωγής από τα κοιτάσματα Πρίνου και Βόρειου Πρίνου, καθώς και η αδυναμία της NAPC να εντοπίσει νέα κοιτάσματα, παράλληλα με την πτώση των τιμών του πετρελαίου στη διεθνή αγορά, οδήγησαν στη διακοπή της παραγωγής και στην εγκατάλειψη των κοιτασμάτων από την ανάδοχο εταιρεία στα τέλη του 1998. Τα συνολικά έσοδα του Δημοσίου από την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της περιοχής του Πρίνου, εκτιμώνται ότι προσεγγίζουν τα 550 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, έως και τη διακοπή των εργασιών (Κελεσίδης Β. Χ., 2009).

Το 1999, με πολιτική παρέμβαση τη διαχείριση ανέλαβε μια νέα κοινοπραξία, η Καναλα Oil, στην οποία κατά 67% συμμετείχε η τοπική εταιρεία Ευρωτεχνική και κατά 33% ο συνεταιρισμός των εργαζομένων της NAPC (Μιχελάκη & Μανούτσογλου, 2010). Η αύξηση των τιμών του πετρελαίου κατέστησε την επιχείρηση κατ' αρχάς κερδοφόρα, μολονότι η παραγωγή περιορίστηκε περίπου στα 5,000 βαρέλια την ημέρα.

Η νέα εταιρεία παράλληλα με την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων του Πρίνου, ανέλαβε και την υποχρέωση να εκτελέσει δύο ερευνητικές γεωτρήσεις στα όρια της παραχώρησής της, που προσδιορίζονται σε μια περιοχή δυτικά των ακτών της Θάσου. Η πρώτη εξ' αυτών στέφθηκε με επιτυχία με την ανακάλυψη ενός μικρού σχετικά κοιτάσματος, που ονομάστηκε «κοιτάσμα Έψιλον», και βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το κοιτάσμα του Πρίνου.

Από το 1999 έως το 2009, οι εξελίξεις για το κοιτάσμα του Πρίνου δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η παραγωγή διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, και ενώ τα οικονομικά προβλήματα για τη βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης αυξάνονται, αυτή συνεχίζει να λειτουργεί για δύο κυρίως λόγους. Αφενός μεν αποτελεί το μοναδικό εκμεταλλεύσιμο

κοίτασμα στην Ελλάδα, αφετέρου εάν η εκμετάλλευση σταματήσει τότε δε θα είναι εύκολο να ξαναρχίσει. Τα κέρδη μπορεί να είναι μικρά, ωστόσο, με την πετρελαϊκή κρίση εκείνης της περιόδου οι τιμές ανέβηκαν, πράγμα που αύξησε την κερδοφορία, ενώ ελήφθησαν αποφάσεις ώστε η επιχείρηση να επεκταθεί.

Το 2009, άρχισε μια καλύτερη εποχή για τα πετρέλαια στο Βόρειο Αιγαίο, με τον εντοπισμό μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου στο Βόρειο Πρίνο. Εντούτοις, η προοπτική της άντλησης 10,000 βαρελιών ημερησίως, από τον εντοπισμό αρχικά και την εκμετάλλευση στη συνέχεια των νέων κοιτασμάτων πετρελαίου στην περιοχή του Πρίνου, δε συνέβη στην πράξη. Η παραγωγή τον Ιανουάριο του 2009, με επίσημα στοιχεία δεν ξεπέρασε τα 1,400 βαρέλια ημερησίως, όμως λόγω των υψηλών τιμών η επιχείρηση καθίστατο οριακά κερδοφόρα. Αξίζει, να σημειωθεί πως από όταν η Energean Oil & Gas εξαγόρασε το 95%, της Kanala Oil, η παραγωγή αυξήθηκε σημαντικά, τη στιγμή που πριν αναλάβει, η παραγωγή δεν ξεπερνούσε τα 900 βαρέλια ημερησίως.

Οι γεωτρήσεις που έγιναν το Μάρτιο του 2009, έδωσαν θετικά αποτελέσματα και πρόσθεσαν στην παραγωγή μερικές εκατοντάδες βαρέλια ημερησίως, ενώ η γεώτρηση PB-14 στον Πρίνο προσέφερε επιπλέον 800 – 1,000 βαρέλια ημερησίως. Την ίδια χρονιά, η Energean Oil & Gas, επέκτεινε τις έρευνές τις σε νέες περιοχές, καθώς συμφώνησε να αποκτήσει από την πρώην Dennison το 75% των δικαιωμάτων στον Άθω και στον Αμμόδη, μεταξύ Πρίνου και Καβάλας.

Μετά το Βόρειο Πρίνο, το βάρος αναμένεται να πέσει στο κοίτασμα «Έψιλον», όπου τα δεδομένα δείχνουν την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου. Όσον αφορά το κοίτασμα Έψιλον, έγινε μία γεώτρηση βάθους 5,500.0 m, σε μία περιοχή που οι ενδείξεις δείχνουν απολήψιμο κοίτασμα μεταξύ 4 – 10 εκατομμυρίων βαρελιών και παραγωγή της τάξεως των 3,000 βαρελιών ημερησίως.

### **2.6.1 Μελλοντικός σχεδιασμός**

Το 2010, η Energean Oil & Gas, στα πλαίσια του σχεδίου «Πρίνος 5,000», πραγματοποίησε στον Πρίνο την όρυξη της πρώτης γεώτρησης (PA-35) από μια σειρά τεσσάρων γεωτρήσεων, που είχε ως φιλόδοξο στόχο την αύξηση της ημερήσιας παραγωγής πετρελαίου στα 5,000 βαρέλια εντός της τρέχουσας χρονιάς. Με την ολοκλήρωση των εργασιών της γεώτρησης PA-35, η παραγωγή αυξήθηκε κατά 1,000 βαρέλια την ημέρα, ενώ συνέβαλε στη συνολική ημερήσια παραγωγή των 3,000 βαρελιών, με την προοπτική της περαιτέρω αύξησης της παραγωγής.

Παρόλη την κρίση και την αβεβαιότητα που επικρατεί στην αγορά την παρούσα χρονική περίοδο στην Ελλάδα, η Energean Oil & Gas, ξεκίνησε ήδη από το 2014 να υλοποιεί ένα επενδυτικό πρόγραμμα για τα κοιτάσματα του Πρίνου, ύψους 225 εκατομμυρίων. Στόχος είναι μέχρι και το 2016, η περαιτέρω αύξηση της παραγωγής αργού πετρελαίου από τον κόλπο της Καβάλας (Energean Oil & Gas, 2014).

Η επένδυση αυτή περιλαμβάνει την πραγματοποίηση 15 νέων γεωτρήσεων, εκ των οποίων οι επτά (7) θα ορυχθούν στο κοίτασμα του Πρίνου, μία (1) στο κοίτασμα του Βόρειου Πρίνου και οι υπόλοιπες επτά (7) στο κοίτασμα Έψιλον. Οι γεωτρήσεις αυτές θα πραγματοποιηθούν με το νέο ιδιόκτητο πλωτό γεωτρύπανο «Energean Force». Επιπλέον, πρόκειται να κατασκευαστούν δύο νέες εξέδρες στα κοιτάσματα του Βόρειου Πρίνου και Έψιλον, όπως επίσης και αγωγοί σύνδεσης των νέων εξεδρών με την κεντρική (Energean Oil & Gas, 2014). Με την ολοκλήρωση αυτών των επενδύσεων, διασφαλίζεται η συνέχεια της πετρελαϊκής παραγωγής, αλλά και οι θέσεις απασχόλησης για τουλάχιστον 15 χρόνια.



**Εικόνα 2.4: Οι εξέδρες άντλησης πετρελαίου στο κοίτασμα του Πρίνου**



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

# Διάτρηση σε Δόμους Άλατος

---

### 3.1 Εισαγωγή

Μέχρι και το 1980, ήταν συνηθισμένο για την πετρελαϊκή βιομηχανία να μην επιχειρεί όρυξη γεωτρήσεων μέσα από δόμους άλατος, καθώς θεωρούσαν πως κάτω από αυτά τα στρώματα δεν υπήρχαν καλής ποιότητας ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Αυτό συνέβαινε γιατί δεν υπήρχε σαφής απεικόνιση του υπεδάφους, κάτω από τους δόμους άλατος, λόγω της περιορισμένης διακριτικής ικανότητας που διέθεταν οι γεωφυσικές τεχνικές διασκόπησης του υπεδάφους της εποχής εκείνης (Haquet, 2013).

Τα τελευταία χρόνια, όμως, βελτιώθηκε η δυνατότητα διασκόπησης κάτω από τέτοιους γεωλογικούς σχηματισμούς και, εξ αυτού, εντοπίστηκαν και υποκείμενα αυτών κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Μέσα σε λιγότερο από δύο δεκαετίες η όρυξη γεωτρήσεων εντός τέτοιων σχηματισμών έχει σημειώσει σημαντική εξέλιξη. Ωστόσο τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάτρησή τους δεν έχουν εξαλειφθεί εντελώς. Η πρόοδος σε αυτό τον τομέα είναι βέβαιο πως θα συνεχιστεί και θα οδηγήσει σε νέα εργαλεία και τεχνικές. Προς το παρόν, όμως, η διάτρηση δόμων άλατος παραμένει μια σχετικά νέα πρακτική, με αρκετές προκλήσεις και προβλήματα.

Οι δόμοι άλατος συναντώνται σε πολλές περιοχές παραγωγής πετρελαίου ανά τον κόσμο, όπως στον Κόλπο του Μεξικού, τη Λεκάνη Williston (Βόρειος Αμερική), το Ιράν, τη Βραζιλία, το Καζακστάν (Dusseault, Maury, Sanfilippo, & Santarelli, 2004). Μία από αυτές τις περιοχές είναι και ο Πρίνος στην παράκτια περιοχή της Καβάλας, στη Βόρειο Ελλάδα.

### 3.2 Η δημιουργία του άλατος και ο ρόλος του στην παγίδευση υδρογονανθράκων

Το ορυκτό αλάτι είναι αποτέλεσμα των εβαποριτικών ιζημάτων, που σχηματίστηκαν σε κλειστές θαλάσσιες λεκάνες με εξάτμιση, υποδηλώνοντας μια μακρόχρονη περίοδο ξηρού και ζεστού κλίματος. Εκτός του ορυκτού άλατος, χαρακτηριστικά πετρώματα των εβαποριτών είναι η γύψος και ο ανυδρίτης.

Η παρουσία εβαποριτών σε μία περιοχή αυξάνει τις πιθανότητες για την εύρεση υδρογονανθράκων, καθώς το αλάτι που περιέχουν είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς σχηματισμούς όσον αφορά στην παγίδευση πετρελαίου και φυσικού αερίου (Nascimento, Horta, & Prohaska, 2009). Ως όλκιμο/εύπλαστο υλικό

μπορεί να κινηθεί με ευκολία γύρω από τα ιζήματα, δημιουργώντας αδιαπέρατες από τους υδρογονάνθρακες παγίδες (Haquet, 2013).

Οι σχηματισμοί άλατος που συναντώνται στις περισσότερες περιοχές παραγωγής πετρελαίου, μπορεί να έχουν τη μορφή είτε στρώματος, είτε δόμου ή ακόμα να είναι φακοειδούς τύπου. Ωστόσο, μέσα σε ένα σχηματισμό άλατος, οποιασδήποτε μορφής, μπορούν να απαντηθούν άλατα με διαφορετική χημική σύσταση. Οι κύριοι τύποι αλάτων είναι:

- Αλίτης (halite) ( $\text{NaCl}$ )
- Συλβίτης (sylvite) ( $\text{KCl}$ )
- Μπισσοφίτης (bischofite) ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
- Καρναλίτης (carnalite) ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
- Πολυαλίτης (polyhalite) ( $\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Ταχυδρίτης (tachydrite) ( $\text{CaCl}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )

Ανάλογα με τη χημική σύσταση των αλάτων, καθορίζεται και η μηχανική αντοχή του σχηματισμού που περιέχονται, χωρίς όμως να είναι αυτή η μοναδική παράμετρος. Ιδιαίτερα σε σχηματισμούς με τη μορφή δόμων ή και σε μικρά/λεπτά στρώματα, το αλάτι μπορεί εύκολα να παραμορφώνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία που επικρατεί αλλά και την πίεση των υπερκείμενων στρωμάτων. Επιπλέον, οι διάφορες προσμίξεις μετάλλων όπως ανυδρίτης, γύψος, ασβεστόλιθος, δολομίτης μπορούν να επηρεάσουν τη μηχανική συμπεριφορά του σχηματισμού.

Οι δόμοι άλατος μπορεί να βοηθήσουν στη συγκέντρωση πετρελαίου με τους ακόλουθους τρόπους:

- Οι μάζες άλατος μπορεί να απομονώσουν πλευρικά έναν ορίζοντα, κατά μήκος του οποίου λαμβάνει χώρα μετανάστευση πετρελαίου.
- Η διείσδυση του άλατος μέσα στα στρώματα (διαπυρισμός) μπορεί να προκαλέσει την παραμόρφωση των υπερκείμενων ιζημάτων, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός δευτερογενούς αντικλίνου, στον αυχένα του οποίου θα λάβει χώρα συγκέντρωση πετρελαίου κατά τη μετανάστευση.
- Τα στρώματα που βρίσκονται στις πλευρές της στήλης του άλατος είναι διαταραγμένα και διερρηγμένα, αυτά δε τα ρήγματα μπορούν να χρησιμεύουν ως δίοδοι για τη μετανάστευση του πετρελαίου από βαθύτερα στρώματα προς αβαθή στρώματα αποθήκευσης.
- Τα στρώματα αποθήκευσης μπορεί να αποσφηνωθούν, εξαιτίας της ανοδικής κινήσεως των μαζών του άλατος, και γι' αυτό το λόγο να αποτελέσουν παγίδες.
- Τα πορώδη και διαπερατά πετρώματα που αποτελούν τις οροφές των δόμων μπορεί να αποθηκεύσουν πετρέλαιο (Μιχελάκη & Μανούσογλου, 2010).

### 3.3 Η συμπεριφορά του άλατος κατά τη διάτρηση

Κοινή συμπεριφορά των σχηματισμών άλατος είναι ότι επηρεάζονται, ανάλογα με το πάχος του στρώματός τους, από τις πιέσεις που ασκούνται, τη θερμοκρασία, την ορυκτολογική σύστασή τους και από την περιεκτικότητά τους σε νερό (Nascimento, Horta, & Prohaska, 2009).

Πολλά από τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε αλατούχους σχηματισμούς κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης, είναι και λόγω της χρήσης ακατάλληλου γεωτρητικού πολφού. Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι:

- Η διαλυτοποίηση του άλατος και διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης λόγω:
  - χρήσης ακόρεστου πολφού (σε αλάτι),
  - διακυμάνσεων στη θερμοκρασία,
  - διάφορων χημικών μεταβολών από την αλληλεπίδραση πολφού και διατρυόμενου σχηματισμού.
- Η απώλεια των διατρητικών ρευστών λόγω ρωγματώσεων του σχηματισμού.
- Η παγίδευση της διατρητικής στήλης εντός της γεώτρησης.

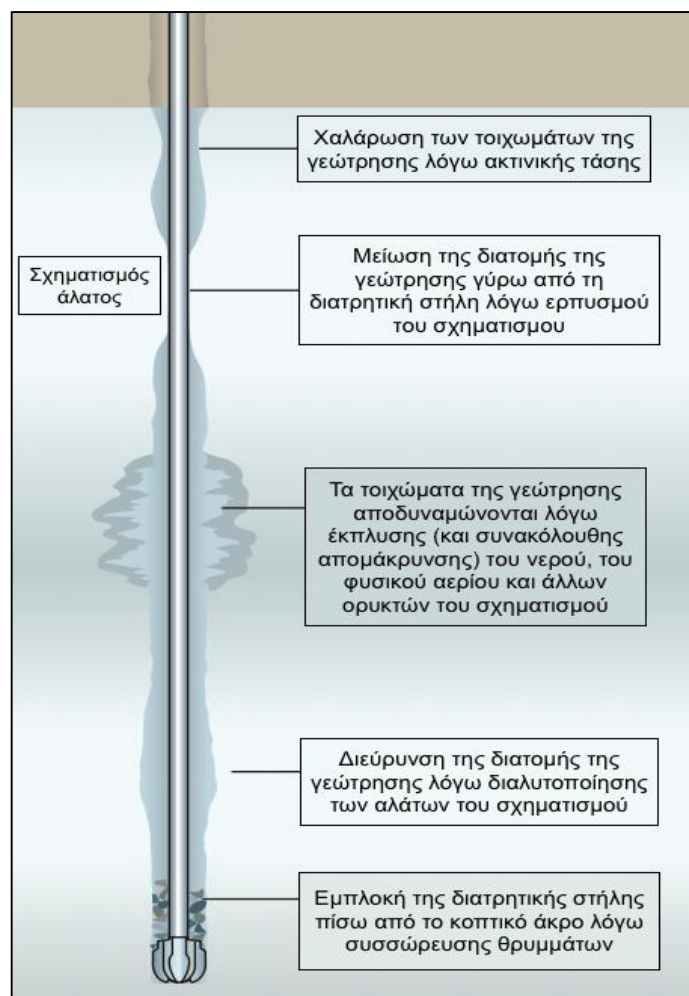
Προκειμένου, λοιπόν, να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προστίθενται στη λάσπη διάτρησης διάφορα συστατικά που της προσδίδουν τις επιθυμητές ιδιότητες. Επιπλέον, είναι πιθανό κατά τη διάρκεια της όρυξης, να χρειαστεί αντικατάσταση όλου του πολφού, ανάλογα με τις πιέσεις και τα γενικότερα προβλήματα που συναντώνται. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως η σωστή επιλογή πολφού από την αρχή της όρυξης είναι μια καίρια απόφαση που θα καθορίσει την επιτυχία ή μη μιας γεώτρησης. (Nascimento, Horta, & Prohaska, 2009)

### 3.4 Ο μηχανισμός της διαλυτοποίησης του άλατος

Η διαλυτότητα των διαφόρων αλάτων σε ένα δεδομένο πολφό με βάση το νερό, καθορίζει την ποσότητα άλατος που πρόκειται να διαλυτοποιηθεί από το σχηματισμό. Όταν αναμιγνύονται άλατα διαφορετικών χημικών συστάσεων και διαφορετικής διαλυτότητας, τότε το αλάτι με τη μικρότερη διαλυτότητα θα καθιζάνει πάντα πρώτο καθώς ο πολφός θα έχει ήδη κορεστεί από το αλάτι με τη μεγαλύτερη διαλυτότητα. Ως εκ τούτου, εάν ένας κορεσμένος σε αλάτι πολφός με βάση το νερό μικρής διαλυτότητας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση ενός σχηματισμού άλατος με μεγάλη διαλυτότητα, τότε το αλάτι του πολφού με βάση το νερό θα καθιζάνει με αποτέλεσμα να διαλυτοποιηθεί το αλάτι του σχηματισμού ώστε να επιτευχθεί μια ισορροπία στον κορεσμό. Αυτό οδηγεί στη διεύρυνση της οπής της γεώτρησης και στη δυσκολία ελέγχου της.

### 3.5 Το πρόβλημα της διαλυτοποίησης κατά τη διάτρηση σε σχηματισμούς άλατος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τέτοιοι γεωλογικοί σχηματισμοί αντιμετωπίζονται με μεγάλη προσοχή από την πετρελαϊκή βιομηχανία, λόγω των δυσκολιών που παρουσιάζουν κατά την όρυξή τους. Ο μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας όσον αφορά την πρόβλεψη της λιθολογίας τους, αλλά και των πιέσεων που επικρατούν, καθιστούν το σχεδιασμό αυτών των γεωτρήσεων υψηλού ρίσκου, αλλά και μεγάλου κόστους. Τα πιο σημαντικά προβλήματα παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 3.1) και η επιλογή του κατάλληλου πολφού διάτρησης παίζει καθοριστικό ρόλο είτε στην εμφάνιση τέτοιων προβλημάτων, είτε στην αντιμετώπισή τους.



Εικόνα 3.1: Πιθανά προβλήματα κατά τη διάτρηση δομών άλατος (Marco Aburto Perez, 2008 – ίδια επεξεργασία).

Ένα σύνηθες πρόβλημα σε τέτοιους σχηματισμούς είναι η διάλυση του αλατιού και η διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης. Κατά τη διάτρηση τμημάτων που περιέχουν αλάτι, χρησιμοποιούνται είτε OBM, είτε WBM. Υπάρχουν δύο τύποι WBM που ενδείκνυται για τέτοιες περιπτώσεις, ο ένας τύπος περιέχει υψηλή συγκέντρωση άλατος και ο άλλος χαμηλή. Αν θα χρησιμοποιηθεί ο ένας ή ο άλλος τύπος WBM, εξαρτάται από το πάχος του στρώματος που πρέπει να ορυχθεί. Επιπλέον, η χημική σύνθεση του πολφού με βάση το νερό, θα καθοριστεί και από την ορυκτολογία της περιοχής (Dusseault, Maury, Sanfilippo, & Santarelli, 2004).

Σε μεγάλα στρώματα άλατος, εκτός από τις OBM, ενδείκνυται και η χρήση WBM με μεγάλη αλατότητα γιατί μπορεί να διαχειριστεί εξίσου ικανοποιητικά τα προβλήματα διάλυσης και διάβρωσης του σχηματισμού. (Harnes, 2014)

Προκειμένου να διατηρείται συνεχώς ο έλεγχος της γεώτρησης σε δόμους άλατος, ο μηχανικός γεωτρήσεων θα πρέπει να επιλέγει κάθε φορά την κατάλληλη σύνθεση του πολφού διάτρησης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα ρευστά διάτρησης που έχουν ως βάση το νερό θα πρέπει να είναι όσο γίνεται περισσότερο κορεσμένα σε αλάτι ως προς τη σύστασή τους πριν την εισαγωγή τους στη γεώτρηση. Έτσι, όταν έρθουν σε επαφή με τον αλατούχο σχηματισμό, η ποσότητα του σχηματισμού που θα διαλυτοποιηθεί από τον πολφό διάτρησης θα είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι πιθανότητες παραμόρφωσης και διεύρυνσης της διατομής της γεώτρησης. Αντίθετα, στα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο θα πρέπει να γίνεται προσεκτικός σχεδιασμός στην εφαρμογή τους, γιατί μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα κατά την εκτέλεση διάφορων εργασιών διεύρυνσης της διατομής της γεώτρησης (reaming) και να οδηγήσουν σε παγίδευση της διατρητικής στήλης (stuck pipe) (Harnes, 2014).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη διαλυτοποίηση του αλατιού του σχηματισμού, είναι η θερμοκρασία του πολφού. Στον πυθμένα η γεώτρηση έχει πάντα υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα ανώτερα τμήματά της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αλάτι που βρίσκεται στον πυθμένα να διαλυτοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της γεώτρησης. Όμως, καθώς ο πολφός με βάση το νερό ρέει από τον πυθμένα και σε όλο το μήκος του πηγαδιού φτάνοντας στην επιφάνεια, η θερμοκρασία του μειώνεται, το ιξώδες μεγαλώνει, με αποτέλεσμα το διαλυτοποιημένο αλάτι εντός της λάσπης να κρυσταλλώνεται και ο πολφός να γίνεται δυσκίνητος. Το κρυσταλλωμένο αλάτι θα πρέπει να αφαιρεθεί προκειμένου να μη δημιουργήσει προβλήματα στην κυκλοφορία της λάσπης, αλλά και στον εξοπλισμό καθαρισμού της. Αυτός ο κύκλος θέρμανσης-ψύξης της λάσπης επαναλαμβάνεται σε όλη τη διάρκεια της διάτρησης οδηγώντας σε μεγαλύτερη διαλυτοποίηση αλατιού του σχηματισμού και περαιτέρω διεύρυνση της διατομής. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικοί αναστολείς κρυστάλλωσης του αλατιού και θέρμανση του πολφού, πριν εισαχθεί στη γεώτρηση, ώστε να διατηρούνται οι επιθυμητές συνθήκες εντός της γεώτρησης. Πρέπει να σημειωθεί πως ένα ποσοστό κρυστάλλων άλατος θα πρέπει να είναι παρόν σε όλη τη διάρκεια της διάτρησης μέσα στον πολφό, σε αντίθετη περίπτωση ο πολφός στον πυθμένα θα μένει ακόρεστος.

Ένα επίσης πρόβλημα που παρουσιάζεται συχνά όταν ορύσσονται γεωτρήσεις εντός σχηματισμών αλατιού είναι οι δονήσεις της διατρητικής στήλης λόγω συντονισμού, σε συνδυασμό με την αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού. Τα πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά (PDC) είναι τα ιδανικότερα για τέτοιες διατρήσεις, καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε με τον κατάλληλο πολφό να απαιτούν λιγότερο βάρος επί του κοπτικού (WOB) για αποδοτικότερη διάτρηση (Marco Aburto Perez, 2008).

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

# Προβλήματα Όρυξης Γεωτρήσεων Εντός Αργιλικών Σχηματισμών

---

### 4.1 Εισαγωγή

Οι αργιλικοί σχηματισμοί αποτελούν τουλάχιστον το 75% των γεωλογικών σχηματισμών εντός των οποίων ορύσσονται οι γεωτρήσεις υδρογονανθράκων. Αντίστοιχο είναι και το ποσοστό (>70%) κατά το οποίο τα προβλήματα όρυξης μιας γεώτρησης αποδίδονται στην αστάθεια αυτών των σχηματισμών (Lal, 1999). Αυτά τα προβλήματα περιλαμβάνουν κατάρρευση των τοιχωμάτων της γεώτρησης (hole collapse), τμήματα γεωτρήσεων περιορισμένης βατότητας ("tight holes" <sup>3</sup>), παγίδευση διατρητικών στελεχών (stuck pipe), ελλιπή απομάκρυνση των θρυμμάτων διάτρησης (poor hole cleaning), διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης (hole enlargement), πλαστική ροή των ρευστών διάτρησης (plastic flow), ρωγμάτωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης (fracturing), απώλεια των κυκλοφορούντων ρευστών διάτρησης από αστοχία του σχηματισμού (lost circulation) και προβλήματα στον έλεγχο της γεώτρησης (well control).

Γενικά, τα περισσότερα προβλήματα κατά την όρυξη μιας γεώτρησης τα οποία οδηγούν σε αύξηση του κόστους όρυξης, σχετίζονται με την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης (wellbore stability). Η εμφάνιση αυτών των προβλημάτων οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στην ανισορροπία που προκαλείται μεταξύ των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα σχηματισμό και της αντοχής αυτού κατά την όρυξη μιας γεώτρησης. Αυτή η ανισορροπία τάσεων-αντοχής επισυμβαίνει όταν το πέτρωμα απομακρύνεται από την αρχική του θέση, κατά την όρυξη, και αντικαθίσταται από ρευστό διάτρησης, ενώ, παράλληλα, οι διατρυόμενοι σχηματισμοί «εκτίθενται» στην επίδραση των ρευστών διάτρησης.

### 4.2 Το πρόβλημα της αστάθειας των αργιλικών σχηματισμών (shale instability)

Κατά την όρυξη, οι αργιλικοί σχηματισμοί καθίστανται ασταθείς όταν οι ενεργές τάσεις γύρω από την οπή της γεώτρησης υπερβαίνουν την αντοχή των τοιχωμάτων της. Ένας παράγοντας που περιπλέκει το φαινόμενο και διακρίνει τους αργιλικούς

---

<sup>3</sup> Ο όρος "tight hole" αφορά τμήμα μιας γεώτρησης, συνήθως μη σωληνωμένο, από το οποίο τα μεγαλύτερης διαμέτρου τμήματα μιας διατρητικής στήλης (π.χ. σύνδεσμοι διατρητικών στελεχών, αντίβαρα, σταθεροποιητές και το κοπτικό) διέρχονται με μεγάλη δυσκολία κατά τη διαδικασία ανέλκυσης της διατρητικής στήλης.

σχηματισμούς έναντι άλλων πετρωμάτων είναι η ευαισθησία τους σε ορισμένα συστατικά των ρευστών διάτρησης και ιδιαίτερα στο νερό. Η ευστάθεια των αργιλικών σχηματισμών επηρεάζεται από τις ιδιότητες τόσο του ίδιου του πετρώματος (ορυκτολογική σύσταση, πορώδες), όσο και από τις ιδιότητες του ρευστού διάτρησης με το οποίο έρχονται σε επαφή (διαβρεκτικότητα, πυκνότητα, αλατότητα και ιοντική συγκέντρωση). Η ύπαρξη και η δημιουργία διακλάσεων (fissures), ρωγμών (fractures) και ασθενών (ως προς την αντοχή τους) στρώσεων (weak bedding planes) μπορεί επίσης να επιφέρει αστάθεια των αργιλικών σχηματισμών, καθώς τα ρευστά διάτρησης διέρχονται μέσω αυτών. Τα ρευστά διάτρησης μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια των αργιλικών σχηματισμών μέσω της αλλαγής της πίεσης των πόρων ή των ενεργών τάσεων (effective stress-state) των σχηματισμών, αλλά και της αντοχής αυτών, μέσω της αλληλεπίδρασης πετρώματος/ρευστού διάτρησης. Η ευστάθεια των αργιλικών σχηματισμών είναι επίσης ένα πρόβλημα που εξαρτάται από το χρόνο (time-dependent problem), υπό την έννοια ότι οι αλλαγές στην εντατική κατάσταση και την αντοχή ενός σχηματισμού λαμβάνουν χώρα εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος (Lal, 1999).

Το βασικό πρόβλημα ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Οι αργιλικοί σχηματισμοί με τα εκάστοτε χαρακτηριστικά τους (περιλαμβανομένης της αντοχής τους) συνήθως βρίσκονται σε ορισμένο βάθος. Σε αυτό το βάθος οι επί τόπου τάσεις (in situ stresses) και η πίεση των πόρων (pore pressure) που ασκούνται σε αυτούς βρίσκονται σε ισορροπία με την αντοχή τους. Κατά την όρυξη, οι γηγενείς αργιλικοί σχηματισμοί εκτίθενται αιφνιδίως σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο εντατικό πεδίο (altered stress environment) και σε επείσακτα ρευστά διάτρησης (foreign drilling fluid). Η ισορροπία μεταξύ των τάσεων και της αντοχής του σχηματισμού διαταράσσεται για τους εξής λόγους:

- Οι τάσεις μεταβάλλονται πάνω και γύρω από τα τοιχώματα της γεώτρησης καθώς οι άργιλοι αντικαθίστανται από ρευστό διάτρησης (ορισμένης πυκνότητας) εντός της διανοιγόμενης γεώτρησης.
- Η αλληλεπίδραση του ρευστού διάτρησης με τον αργιλικό σχηματισμό μεταβάλλει την αντοχή του σχηματισμού, όπως και την πίεση των πόρων στην περιοχή γύρω από τα τοιχώματα της γεώτρησης. Η αντοχή του σχηματισμού συνήθως μειώνεται και η πίεση των πόρων αυξάνει, καθώς το ρευστό διάτρησης εισχωρεί εντός του αργιλικού σχηματισμού.

Έτσι, όταν οι μεταβαλλόμενες τάσεις υπερβούν την αντοχή του σχηματισμού, ο αργιλικός σχηματισμός καθίσταται ασταθής, προκαλώντας διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Συνεπώς, για να αποτραπεί η πρόκληση αστάθειας στους αργιλικούς σχηματισμούς, πρέπει να διατηρείται διαρκώς η ισορροπία μεταξύ των νέων τάσεων και της μεταβαλλόμενης αντοχής των σχηματισμών (Lal, 1999).

Η αστάθεια των τοιχωμάτων μιας γεώτρησης που παρατηρείται κατά τη διαδικασία της όρυξής της, μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες μορφές οι οποίες ομαδοποιούνται στις εξής πέντε κατηγορίες (Tare & Mody, 2002):



- Έκπλυση των τοιχωμάτων (washout) ή διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης (hole enlargement).
- Περιορισμός της βατότητας της γεώτρησης (tight hole) ή ερπυσμός των τοιχωμάτων της (creep).
- Δημιουργία ζώνης αλλοίωσης, βλάβης ή με πλαστική συμπεριφορά (altered, damaged or plastic zone).
- Απώλεια της κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης (lost circulation).
- Αστάθεια τοιχωμάτων τύπου «μπαλονιού» (wellbore breathing or well ballooning or micro fracture). Πρόκειται για ένα φαινόμενο κατά το οποίο ο σχηματισμός στα τοιχώματα της γεώτρησης απορροφά ρευστό διάτρησης, κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αντλιών, και το αποδίδει πίσω όταν παύσει η λειτουργία των αντλιών. Αυτό συμβαίνει εντός ασθενών (ως προς την αντοχή τους) σχηματισμών, όταν, κατά τη λειτουργία των αντλιών, η ισοδύναμη πυκνότητα του κυκλοφορούντος ρευστού (Equivalent Circulating Density - ECD) υπερβαίνει τη βαθμίδα ρωγμάτωσης του σχηματισμού, οπότε δημιουργούνται μικρο-ρωγμές (micro fractures) στο σχηματισμό, εντός των οποίων εισέρχονται μικρές ποσότητες λάσπης διάτρησης. Όταν οι αντλίες σταματούν, η ECD μειώνεται, καθώς μηδενίζεται η απώλεια δακτυλιοειδούς πίεσης (annular pressure loss becomes zero), οπότε οι μικρο-ρωγμές κλείνουν ωθώντας πίσω στη γεώτρηση τυχόν λάσπη διάτρησης που είχε εισχωρήσει σε αυτές.

Οι πρώτοι τρεις τύποι αστάθειας των αργιλικών σχηματισμών συσχετίζονται με την περιοχή γύρω από τα τοιχώματα της γεώτρησης και για το λόγο αυτό συχνά αναφέρονται συλλογικά ως αστοχία των τοιχωμάτων της γεώτρησης (near wellbore collapse). Αντίθετα, η απώλεια της κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης και η αστάθεια τύπου «μπαλονιού», αποδίδονται στη λάσπη διάτρησης που εισχωρεί βαθύτερα εντός του σχηματισμού, είτε ως αποτέλεσμα ρωγματώσεων λόγω υδραυλικής δράσης (hydraulically induced tensile fractures), είτε απωλειών εντός περατών σχηματισμών (Tare & Mody, 2002). Αυτοί οι δύο τελευταίοι τύποι αστάθειας των αργιλικών σχηματισμών καλούνται συλλογικά «προσβολή του σχηματισμού» (formation invasion).

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι πολλά από τα προβλήματα της όρυξης συσχετίζονται με την αστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Είναι, συνεπώς, αναγκαίο, αφενός να αναγνωρίζεται έγκαιρα το πρόβλημα και αφετέρου να λαμβάνονται τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα. Πιο συγκεκριμένα:

- **Έκπλυση των τοιχωμάτων (washout) ή διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης (hole enlargement)**

Κατά τη διάτρηση αργιλικών σχηματισμών η τυχόν έκπλυση των τοιχωμάτων της γεώτρησης ή διεύρυνση της διατομής της γεώτρησης μπορεί να γίνει αντιληπτή από διάφορες ενδείξεις, όπως: η μεγάλη ποσότητα θρυμμάτων που ανέρχονται στην επιφάνεια, η απαίτηση για άντληση παραπάνω όγκου ρευστού προκειμένου η γεώτρηση να πληρωθεί με ρευστό μετά την καθέλκυση της διατρητικής στήλης (tripping), γενικά απαιτήσεις εισπίεσης όγκου λάσπης που υπερβαίνουν τους

υπολογιζόμενους, διεύρυνση της διατομής που καταγράφεται κατά την εκτέλεση διαγραφιών εντός της γεώτρησης (logging while drilling – LWD). Η έκπλυση των τοιχωμάτων της γεώτρησης μπορεί να αποδοθεί σε δύο μηχανισμούς: λόγω κατάρρευσης ενός τμήματος των τοιχωμάτων της γεώτρησης εξαιτίας ανεπαρκούς ειδικού βάρους της λάσπης διάτρησης (που αδυνατεί να εξισορροπήσει τις πιέσεις που δέχεται η γεώτρηση), ή/και λόγω διάβρωσης των τοιχωμάτων της γεώτρησης που προκαλείται από ακατάλληλη χημική σύνθεση της λάσπης διάτρησης.

- **Σύγκλιση των τοιχωμάτων της γεώτρησης (hole convergence) ή περιορισμός της βατότητάς της (tight hole)**

Κατά την εμφάνιση αυτού του φαινομένου μειώνεται το διάκενο στο δακτύλιο της γεώτρησης (annular clearance). Ένδειξη για την ύπαρξη αυτού του φαινομένου λαμβάνεται κατά την εκτέλεση διαγραφιών εντός της γεώτρησης (LWD) ως μειωμένη διατομή (undergauge hole). Άλλες έμμεσες ενδείξεις, κατά την όρυξη, είναι οι αυξημένες τιμές αντίστασης σε περιστροφή και ολίσθηση (torque and drag), αυξημένες τιμές πιέσεων swab and surge<sup>4</sup>, η παγίδευση της διατρητικής στήλης και μια μικρή αύξηση στο βάρος (overpull) που μετράται στο γάντζο (hook load) κατά τη διάρκεια ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης (tripping operations). Ο περιορισμός της βατότητας μιας γεώτρησης (tight hole) αναμένεται να παρουσιάζει εξάρτηση από το χρόνο (time-dependency) σε σχηματισμούς που είναι ευεπίφοροι σε ερπυσμό (π.χ. αλατούχοι).

- **Δημιουργία ζώνης αλλοίωσης, βλάβης ή με πλαστική συμπεριφορά (altered, damaged or plastic zone)**

Αναφέρεται στη ζώνη του αργιλικού σχηματισμού γύρω από τα τοιχώματα της γεώτρησης που παρουσιάζει αλλοιώσεις ως αποτέλεσμα ενυδάτωσης (hydration) ή διόγκωσης (swelling), ως αποτέλεσμα ρευστών διάτρησης με βάση το νερό, ακατάλληλης χημικής σύνθεσης. Τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό είναι οι αυξημένες τιμές αντίστασης σε περιστροφή και ολίσθηση (torque and drag) και η εμφάνιση σφηναύλακων (key seats), ειδικά σε γεωτρήσεις μεγάλης κλίσης.

- **Απώλεια κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης (mud losses)**

Μια τέτοια απώλεια μπορεί να είναι είτε ολική, είτε μερική, είτε να παρουσιάζει αυξομείωση (λόγω του φαινομένου του «μπαλονιού»). Σε έναν αδιατάρακτο σχηματισμό μια υδραυλική ρωγμή (hydraulic fracture) ξεκινά λόγω του πολύ υψηλού ειδικού βάρους του ρευστού διάτρησης. Η συνεπακόλουθη υψηλή πίεση της λάσπης διάτρησης προκαλεί αστοχία σε εφελκυσμό (tensile failure). Μετά την έναρξη της ρωγμής, η ρωγμή μπορεί να προχωρήσει ανάλογα με τη μέγιστη πίεση που ασκείται

---

<sup>4</sup> Κατά την ανέλκυση της διατρητικής στήλης, η ανοδική κίνησή της μπορεί να προκαλέσει μείωση της πίεσης που ασκείται από το ρευστό διάτρησης πάνω στον πυθμένα της γεώτρησης. Αυτό προκαλείται λόγω της τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στην κινούμενη διατρητική στήλη και στο στατικό ρευστό διάτρησης. Αυτή η μείωση της πίεσης αναφέρεται ως swab pressure. Αντίθετα, κατά την καθέλκυση της διατρητικής στήλης, η πίεση που ασκεί το ρευστό διάτρησης αυξάνει, για τον ίδιο λόγο. Αυτή η αύξηση της πίεσης αναφέρεται ως surge pressure.

στα τοιχώματα της γεώτρησης και εντός αυτής να εισχωρήσει ρευστό διάτρησης. Όταν η πίεση πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης μειώνεται οι προηγουμένως προκληθείσες ρωγμές μπορεί να κλείσουν και να ωθήσουν την εισχωρηθείσα λάσπη διάτρησης πίσω στη γεώτρηση (Tare & Mody, 2002).

### 4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης εντός αργιλικών σχηματισμών

Κατά τη όρυξη μιας γεώτρησης τα προβλήματα αστάθειας των τοιχωμάτων της μπορούν να οφείλονται αποκλειστικά στο ανεπαρκές ή υπερβολικά υψηλό ειδικό βάρος της λάσπης διάτρησης (**πρόβλημα μηχανικής ευστάθειας**). Σε συνάρτηση με την έκθεση των τοιχωμάτων της γεώτρησης στο ρευστό διάτρησης κατά τη διαδικασία της όρυξης μπορούν να παρουσιαστούν μεταβολές στο πεδίο των τάσεων γύρω από τα τοιχώματα της γεώτρησης, στις ιδιότητες του σχηματισμού και στην αντοχή του πετρώματος, που οδηγούν σε αστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης συναρτήσεις του χρόνου (**πρόβλημα φυσικο-χημικής ευστάθειας**). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης εντός αργιλικών σχηματισμών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1 (Tare & Mody, 2002).

**Πίνακας 4.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης εντός αργιλικών σχηματισμών (Tare & Mody, 2002 – ίδια επεξεργασία)**

<b>Ρευστό διάτρησης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Σύνθεση</li> <li>- Πίεση</li> <li>- Ρυθμός ροής (flow rate) και ρεολογία</li> <li>- Θερμοκρασία</li> </ul>
<b>Ιδιότητες πετρώματος</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αντοχή</li> <li>- Διαπερατότητα &amp; Πορώδες</li> <li>- Αλληλεπίδραση ρευστού διάτρησης / πετρώματος</li> </ul>
<b>Διαδικασίες όρυξης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Προσανατολισμός γεώτρησης</li> <li>- Χρόνος μέχρι τη σωλήνωση του νεορυχθέντος τμήματος (open hole time)</li> <li>- Ανέλκυση &amp; καθέλκυση της διατρητικής στήλης (tripping)</li> </ul>
<b>Επί-τόπου τάσεις (in-situ stresses)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Υπερκείμενα &amp; Οριζόντιες τάσεις (horizontal stresses)</li> <li>- Πίεση πόρων</li> </ul>
<b>Διατρητική στήλη</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Κατώτερη συνδεσμολογία (bottom hole assembly)</li> <li>- Δονήσεις</li> </ul>

#### ▪ Το πρόβλημα μηχανικής ευστάθειας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργή τάση (effective stress) γύρω από μια γεώτρηση είναι η πίεση εντός της γεώτρησης (wellbore pressure), η πίεση πόρων του αργιλικού σχηματισμού (shale pore pressure), οι επί τόπου τάσεις (in situ stresses) μακριά από τη γεώτρηση, η τροχιά και η κλίση της γεώτρησης (trajectory and hole angle) κ.ά. Η ενεργή τάση σε οποιοδήποτε σημείο πάνω ή κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης χαρακτηρίζεται γενικά από τέσσερις βασικές συνιστώσες: ακτινική τάση

(radial stress) η οποία ενεργεί κατά μήκος της ακτίνας της γεώτρησης, δακτυλιοειδής τάση (hoop stress) που ενεργεί γύρω από την περιφέρεια της γεώτρησης (εφαπτομενική τάση), αξονική τάση (axial stress) που ενεργεί κατά μήκος του άξονα της γεώτρησης (παράλληλα προς την τροχιά) και διατμητική τάση (shear stress) (Lal, 1999).

Για την αποφυγή διατμητικής αστοχίας του σχηματισμού, η διατμητική τάση, η οποία προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της δακτυλιοειδούς τάσης (συνήθως μεγαλύτερη) και της αξονικής τάσης (συνήθως μικρότερη), δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του σε διάτμηση. Για την αποφυγή αστοχίας λόγω εφελκυσμού (tensile failure), η οποία προκαλεί ρωγματώσεις (fracturing), η δακτυλιοειδής τάση δεν πρέπει να μειώνεται σε βαθμό ώστε να καθίσταται εφελκυστική η οποία υπερβαίνει την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος (Lal, 1999).

Οι παράμετροι οι οποίες μπορούν να ελέγχονται κατά την όρυξη και οι οποίες επηρεάζουν το πεδίο τάσεων στη γεώτρηση είναι: ο τύπος του ρευστού διάτρησης, το ειδικό βάρος αυτού, η τροχιά της γεώτρησης και οι πρακτικές που ακολουθούνται κατά την όρυξη και την ανέλκυση/καθέλκυση της διατρητικής στήλης (drilling/tripping practices). Για παράδειγμα, η ακτινική τάση αυξάνει όσο αυξάνει το ειδικό βάρος της λάσπης (καθώς αυξάνει η πίεση μέσα στη γεώτρηση – wellbore pressure), ενώ η δακτυλιοειδής τάση μειώνεται όσο αυξάνει το ειδικό βάρος της λάσπης προκαλώντας πρόβλημα μηχανικής ευστάθειας (mechanical stability problem) (Lal, 1999).

Το πρόβλημα της μηχανικής ευστάθειας μπορεί να προληφθεί με τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ ασκούμενων τάσεων και αντοχής του σχηματισμού (stress-strength balance), μέσω κατάλληλης ρύθμισης του ειδικού βάρους της λάσπης διάτρησης και της ισοδύναμης πυκνότητας του κυκλοφορούντος ρευστού (Equivalent Circulating Density - ECD), καθ' όλη τη διάρκεια της όρυξης και της ανέλκυσης/καθέλκυσης της διατρητικής στήλης, αλλά και μέσω ελέγχου της τροχιάς της γεώτρησης (Lal, 1999).

Το ειδικό βάρος της λάσπης διάτρησης που απαιτείται για τη διατήρηση της μηχανικής ευστάθειας των τοιχωμάτων της γεώτρησης εξαρτάται, συνεπώς, από παράγοντες όπως οι επί τόπου τάσεις, η πίεση των πόρων και η αντοχή του σχηματισμού, η τροχιά και η κλίση της γεώτρησης κ.λπ. Ωστόσο, κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης η πίεση των πόρων, οι ενεργές τάσεις και η αντοχή του σχηματισμού αλλάζουν λόγω της έκθεσης του σχηματισμού στο ρευστό διάτρησης. Οι παράμετροι αυτές που σχετίζονται με το πρόβλημα της μηχανικής ευστάθειας του σχηματισμού εξετάζονται συνοπτικά στη συνέχεια (Tare & Mody, 2002):

**Επί τόπου τάσεις (in-situ stresses).** Τα φορτία που ασκούνται στην περιοχή των τοιχωμάτων της γεώτρησης περιλαμβάνουν τις επί τόπου τάσεις μακριά από τη γεώτρηση, την πίεση της λάσπης μέσα στη γεώτρηση (wellbore mud pressure) και την πίεση των πόρων του σχηματισμού (formation pore pressure). Η έναρξη και η σοβαρότητα της αστοχίας των τοιχωμάτων της γεώτρησης καθορίζεται από το μέγεθος των επί τόπου ενεργών τάσεων (ήτοι, ολική τάση – πίεση πόρων) και από

την υπεραντιστάθμιση της πίεσης του ρευστού διάτρησης (mud overbalance) σε σχέση με την αντοχή του πετρώματος (rock strength). Η αστοχία των τοιχωμάτων της γεώτρησης αυξάνεται όσο αυξάνει η ενεργή τάση. Η ρωγμάτωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης καθίσταται λιγότερο πιθανή όσο αυξάνεται η ελάχιστη επί τόπου τάση (minimum in-situ stress). Αντίθετα, η ρωγμάτωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης αυξάνεται όσο μειώνεται η ολική ελάχιστη επί τόπου τάση (total minimum in-situ stress) ή/και το ειδικό βάρος της λάσπης διάτρησης υπερβαίνει την πίεση ρωγμάτωσης (breakdown pressure) του αδιατάρακτου πετρώματος ή το ειδικό βάρος της λάσπης διάτρησης υπερβαίνει την πίεση διάδοσης της ρωγμάτωσης (fracture extension pressure) για ρωγματωμένα πετρώματα.

**Αντοχή του πετρώματος (rock strength) και ολκιμότητα (ductility).** Η αντοχή του πετρώματος περιγράφεται από παραμέτρους όπως η θλιπτική (μονοαξονική) αντοχή (unconfined compressive strength) ή /και η τριαξονική θλιπτική αντοχή (triaxial compressive strength). Ωστόσο, η αντοχή δεν είναι η μόνη ιδιότητα του πετρώματος που ελέγχει την ευστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Καταρχήν, το υψηλής αντοχής αδιατάρακτο πέτρωμα μπορεί να συμπεριφέρεται ως ασθενές από τη στιγμή που θα ρωγματοωθεί. Σε αυτή την περίπτωση οι (ασθενείς/χαμηλής αντοχής) ρωγματώσεις και όχι το υψηλής αντοχής αδιατάρακτο τμήμα του πετρώματος καθορίζουν την αντοχή του σχηματισμού. Κατά δεύτερον, η ευστάθεια των τοιχωμάτων εξαρτάται επίσης από την ολκιμότητα του σχηματισμού, ήτοι από το βαθμό μέχρι του οποίου μπορεί να παρουσιάζει πλαστική παραμόρφωση, χωρίς να χάνει τη φέρουσα ικανότητά του (loadbearing capacity). Η πλαστική παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της αστοχίας λόγω μετάδοσης του υπερβάλλοντος φορτίου σε περιοχές του πετρώματος μακριά από τα τοιχώματα της γεώτρησης. Ένα όλκιμο πέτρωμα παραμένει αδιατάρακτο υπό δυσχερείς συνθήκες φόρτισης συγκριτικά με ένα ψαθυρό πέτρωμα παρόμοιας αντοχής. Η αντοχή και η ολκιμότητα των πετρωμάτων εξαρτάται από τη λιθολογία του. Οι πιο σημαντικές λιθολογικές παράμετροι είναι η ορυκτολογική σύσταση και το πορώδες. Στους αργιλικούς σχηματισμούς η αντοχή και η ολκιμότητά τους επηρεάζεται από το περιεκτικότητά τους σε νερό.

#### ▪ Το πρόβλημα φυσικο-χημικής ευστάθειας

Η πίεση των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης και η αντοχή του σχηματισμού επηρεάζονται δυσμενώς από την αλληλεπίδραση ρευστού διάτρησης/αργιλικού σχηματισμού, όσο ο σχηματισμός «εκτίθεται» στο ρευστό διάτρησης (πρόβλημα χημικής ευστάθειας - chemical stability problem) (Lal, 1999).

Σε αντίθεση με το πρόβλημα της μηχανικής ευστάθειας, το οποίο εμφανίζεται αμέσως μόλις η όρυξη προχωρεί σε νέους σχηματισμούς, το πρόβλημα της χημικής ευστάθειας συναρτάται από το χρόνο (time dependent). Το πρόβλημα της χημικής ευστάθειας μπορεί να προληφθεί μέσω επιλογής του κατάλληλου ρευστού διάτρησης, των κατάλληλων πρόσθετων στο ρευστό διάτρησης που θα ελαχιστοποιούν/καθυστερούν την αλληλεπίδραση ρευστού/αργιλικού σχηματισμού, και μέσω μείωσης του χρόνου έκθεσης του αργιλικού σχηματισμού στο ρευστό

διάτρησης. Η επιλογή της κατάλληλης λάσπης διάτρησης με τα ανάλογα πρόσθετα μπορεί ακόμα και να προκαλέσει ροή ρευστών από τον αργιλικό σχηματισμό προς τη γεώτρηση, μειώνοντας έτσι την πίεση των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης και προλαμβάνοντας τη μείωση της αντοχής του σχηματισμού (Lal, 1999).

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό του αργιλικού σχηματισμού, λόγω έκθεσής του στο ρευστό διάτρησης, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της πίεσης των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης και σε συνακόλουθες αλλαγές στην ενεργή εντατική κατάσταση. Σε πολλές περιπτώσεις η αστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης προκύπτει από ανεπαρκή στήριξη των τοιχωμάτων από τη στήλη της λάσπης διάτρησης, λόγω ακατάλληλου ειδικού βάρους της λάσπης ή συναρτώμενη με το χρόνο αύξησης της πίεσης των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης (πρόβλημα φυσικο-χημικής ευστάθειας) (Tare & Mody, 2002).

Στην περίπτωση ενός ρευστού διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, η συνεχής ροή πετρελαίου ασκεί σταθερή πίεση συγκράτησης (confining pressure) πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση της στήλης της λάσπης στις περισσότερες περιπτώσεις υπερβαίνει την πίεση του σχηματισμού και δεν υπερβαίνει το όριο της τριχοειδούς πίεσης εισόδου (threshold capillary entry pressure). Ενώ, στην περίπτωση του ρευστού διάτρησης με βάση το νερό η ωφέλιμη πίεση συγκράτησης (ακτινική τάση) (net radial support) από τη συνεχή ροή του νερού μπορεί να αλλάξει συναρτήσει του χρόνου λόγω διείσδυσης της λάσπης εντός του σχηματισμού. Επιπροσθέτως, η διαφορά της μοριακής ελεύθερης ενέργειας του νερού που βρίσκεται στη λάσπη με βάση το πετρέλαιο σε σχέση με του νερού που βρίσκεται στον αργιλικό σχηματισμό παρέχει το μηχανισμό για την ενυδάτωση ή την αφυδάτωση του σχηματισμού. Στην περίπτωση λάσπης με βάση το νερό, ωστόσο, οι μοριακές ελεύθερες ενέργειες όλων των συστατικών εντός του αργιλικού σχηματισμού και της λάσπης με βάση το νερό παρέχουν την κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά ιόντων και νερού εντός και εκτός του σχηματισμού (Tare & Mody, 2002).

Η διαδικασία αλληλεπίδρασης και ο μηχανισμός μεταφοράς νερού μεταξύ της λάσπης διάτρησης με βάση το πετρέλαιο και του σχηματισμού και αντιστρόφως μπορεί να είναι περίπλοκοι. Οι διαφορές μεταξύ του αργιλικού σχηματισμού και του ρευστού διάτρησης ως προς την υδραυλική πίεση, το χημικό δυναμικό, το ηλεκτρικό δυναμικό και τη θερμοκρασία επηρεάζουν τη μεταφορά ρευστού (νερού) μεταξύ τους (Tare & Mody, 2002).

Ως προς την επίδραση του ρευστού διάτρησης στην αντοχή του αργιλικού σχηματισμού, εργαστηριακά δεδομένα και παρατηρήσεις πεδίου (field observations) καταδεικνύουν σαφώς ότι η αντοχή του σχηματισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη με την περιεκτικότητά του σε νερό, ως εξής: όταν μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό, η αντοχή του σχηματισμού αυξάνεται και το αντίστροφο, συγκριτικά πάντα με έναν αδιατάρακτο σχηματισμό (Tare & Mody, 2002).

Υπάρχουν αρκετοί μηχανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν την επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στην αντοχή των αργιλικών σχηματισμών,

ορισμένοι εκ των οποίων παρατίθενται ακολούθως. Κανένας από αυτούς τους μηχανισμούς δε μπορεί να αποκλειστεί παντελώς, αλλά ορισμένοι είναι πιο πιθανοί για ορισμένους τύπους αργιλικών σχηματισμών, φορτίων και γεωλογικών συνθηκών (Tare & Mody, 2002):

- Αλλαγή στην πίεση των πόρων, με βάση το νόμο της ενεργούς τάσης (effective stress law).
- Αλλαγή στα μηχανικά χαρακτηριστικά (frictional characteristics) του πετρώματος.
- Χημικά φαινόμενα και φαινόμενα διάβρωσης με βάση τα συγκολλητικά ορυκτά (cementing minerals) του αργιλικού σχηματισμού.
- Αλλαγή στην επιφανειακή τάση (capillary tension).
- Μεταβολή της ενέργειας θραύσης (fracture energy alteration) σύμφωνα με το κριτήριο θραύσης του Griffith (Griffith fracture criterion).

#### 4.4 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ αργιλικών σχηματισμών και ρευστού διάτρησης

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων σε δημοσιευμένες εργασίες διαφαίνεται καθαρά ότι η αντοχή των αργιλικών σχηματισμών και η πίεση των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης επηρεάζονται από την αλληλεπίδραση ρευστού διάτρησης/αργιλικού σχηματισμού. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ρευστού διάτρησης/αργιλικού σχηματισμού και τα συνακόλουθα προβλήματα ευστάθειας των τοιχωμάτων της γεώτρησης τα οποία λαμβάνουν χώρα καθώς το ρευστό διάτρησης έρχεται σε επαφή με τον αργιλικό σχηματισμό συνοψίζονται ως ακολούθως (Lal, 1999):

- **Αλλαγές στο εντατικό πεδίο (μηχανικές τάσεις)**, καθώς το ρευστό διάτρησης με ορισμένο ειδικό βάρος αντικαθιστά τον αργιλικό σχηματισμό κατά την όρυξη. Το συνακόλουθο πρόβλημα της μηχανικής ευστάθειας έχει μελετηθεί εκτενώς, είναι πλέον αρκετά καλά κατανοητό και υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία ανάλυσης της μηχανικής ευστάθειας.
- **Δημιουργία ρωγματώσεων στον αργιλικό σχηματισμό (fractured shale)** – Εισροή ρευστού διάτρησης εντός των διακλάσεων, των ρωγμών και των ασθενών (ως προς την αντοχή τους) στρώσεων.
- **Ανάπτυξη τριχοειδούς πίεσης**, καθώς το ρευστό διάτρησης έρχεται σε επαφή με τα γηγενή ρευστά των πόρων του σχηματισμού, σε διεπιφάνειες μεταξύ πόρων με μικρό διάκενο (narrow pore throat interface).
- **Όσμωση (και ιοντική διάχυση)** που λαμβάνει χώρα μεταξύ του ρευστού διάτρησης και των γηγενών ρευστών των πόρων του σχηματισμού (τα οποία φέρουν διαφορετικές ενεργότητες νερού/ιοντικές συγκεντρώσεις) δια μέσω μιας ημιπερατής μεμβράνης (η οποία διαθέτει συγκεκριμένη ικανότητα), λόγω της οσμωτικής πίεσης ή του χημικού δυναμικού που αναπτύσσεται.

- **Υδραυλικός μηχανισμός μεταφοράς (οριζόντια μεταφορά - advection)** που προκαλεί μεταφορά ρευστού ανάλογα με την καθαρή βαθμίδα υδραυλικής πίεσης (net hydraulic pressure gradient).
- **Διόγκωση/Ενυδάτωση (swelling/hydration)** η οποία προκαλείται από την αλληλεπίδραση της υγρασίας με τα φορτισμένα σωματίδια μεγέθους αργίλου (clay-size charged particles)<sup>5</sup>.
- **Διάχυση πίεσης (pressure diffusion)** και αλλαγές στην πίεση κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης (με την πάροδο του χρόνου), καθώς το ρευστό διάτρησης συμπιέζει τα ρευστά των πόρων και διαχέει ένα μέτωπο πίεσης (pressure front) εντός του σχηματισμού.
- **Η εισχώρηση ρευστού εντός του ρωγματισμένου αργιλικού σχηματισμού** και των ασθενών στρώσεων αυτού μπορεί να έχει κυρίαρχο ρόλο στην ευστάθεια του σχηματισμού, καθώς μεγάλα κομμάτια του ρωγματισμένου σχηματισμού καταπίπτουν εντός της γεώτρησης. Στη Νορβηγία, στο κοίτασμα Valhall, αυτό το φαινόμενο είναι ύποπτο ως μια από τις κύριες αιτίες που προκαλούν αστάθεια των αργιλικών σχηματισμών. Στα προληπτικά μέτρα που λαμβάνονται έναντι αυτού του φαινομένου, περιλαμβάνεται η χρήση αποτελεσματικών μέσων στεγανοποίησης/σφράγισης (sealing agents) των ρωγματώσεων, όπως π.χ. CaCO<sub>3</sub> διαβαθμισμένης κοκκομετρίας (graded CaCO<sub>3</sub>), υψηλή τιμή ιξώδους για χαμηλές τιμές του βαθμού διάτμησης (shear rate) και χαμηλότερες τιμές ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορούντος ρευστού (ECD).

#### 4.5 Βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι είτε προκαλούν, είτε επηρεάζουν την αλληλεπίδραση αργιλικού σχηματισμού/ρευστού διάτρησης. Στην πετρελαϊκή βιομηχανία βρίσκεται σήμερα υπό εξέλιξη η εντατική προσπάθεια για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αυτών. Το διακύβευμα είναι σημαντικό, καθώς η κατανόηση και η ποσοτικοποίηση καθενός από τα φαινόμενα αυτά είναι κρίσιμα για το σχεδιασμό κατάλληλων ρευστών διάτρησης τα οποία θα επιτυγχάνουν σταθεροποίηση των αργιλικών σχηματισμών (Lal, 1999).

Με βάση το υφιστάμενο επίπεδο κατανόησης των διαφόρων μηχανισμών αλληλεπίδρασης αργιλικού σχηματισμού/ρευστού διάτρησης, βρίσκονται υπό συζήτηση ορισμένες γενικές αρχές για τη βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών. Ο κύριος στόχος για τη βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών είναι η πρόληψη, η καθυστέρηση ή ακόμα και η αξιοποίηση προς ίδιον όφελος της αλληλεπίδρασης του ρευστού διάτρησης με τον αργιλικό σχηματισμό. Όσο βελτιώνεται η κατανόηση των διαφόρων μηχανισμών αλληλεπίδρασης, τόσο θα βελτιώνεται και ο σχεδιασμός των ρευστών διάτρησης ως προς τη βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών (Lal, 1999).

<sup>5</sup> Σωματίδια μεγέθους αργίλου: < 0,002 mm.



Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά διάφοροι τρόποι και μέσα για τη βελτίωση της ευστάθειας των αργιλικών σχηματισμών σχετικά με τους διάφορους μηχανισμούς που συμβάλλουν στην αλληλεπίδραση αργιλικού σχηματισμού/ρευστού διάτρησης (Lal, 1999):

- Για τη βελτίωση της ευστάθειας των ρωγματισμένων αργιλικών σχηματισμών χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά μέσα στεγανοποίησης/σφράγισης (sealing agents), θιξοτροπικά ρευστά διάτρησης (υψηλή τιμή ιξώδους για χαμηλές τιμές του βαθμού διάτρησης) και χαμηλότερες τιμές ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορούντος ρευστού (ECD), με στόχο την ελαχιστοποίηση της εισχώρησης ρευστού διάτρησης εντός του σχηματισμού.
- Αύξηση της τριχοειδούς πίεσης (capillary pressure),  $p_c$ , ώστε να υπερβαίνει την καθαρή υδροστατική πίεση (net hydraulic pressure),  $p_h$ <sup>6</sup>, ( $p_c > p_h$ ) με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η εισχώρηση του ρευστού διάτρησης στα διάκενα (pore throats) των πόρων του σχηματισμού.  
Η τριχοειδής πίεση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p_c = 2\gamma \cos \theta / r \quad (4.1)$$

Όπου,

- $\gamma$ : η διεπιφανειακή τάση (interfacial tension),
- $\theta$ : η γωνία επαφής της διεπιφάνειας μεταξύ του ρευστού διάτρησης και των γηγενών ρευστών των πόρων.

Από την εξίσωση 4.1 προκύπτει ότι η αύξηση της διεπιφανειακής τάσης και της γωνίας επαφής  $\theta$ , μπορεί να αυξήσει την τριχοειδή πίεση για δεδομένη ακτίνα διάκενου πόρων του σχηματισμού. Η αύξηση της τριχοειδούς πίεσης μέσω της αύξησης της διεπιφανειακής τάσης και της γωνίας επαφής, για σχηματισμούς που παρουσιάζουν προτίμηση διαβροχής από νερό (water-wet shales), επιτυγχάνεται με τη χρήση ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο ή συνθετικών ρευστών διάτρησης που περιέχουν εστέρες, πολυ-αλφα-ολεφίνη και άλλα οργανικά ρευστά χαμηλής πολικότητας (organic low-polar fluids).

- Μείωση της ολικής καθαρής ωθούσας δύναμης (πίεσης) [total net driving force (pressure)],  $p_h$ , για την αλληλεπίδραση αργιλικού σχηματισμού/ρευστού διάτρησης. Η ολική καθαρή ωθούσα δύναμη (πίεση),  $p_h$ , κατά τη χρονική στιγμή  $t=0+$ , για τριχοειδή πίεση,  $p_c$ , μικρότερη της υδραυλικής πίεσης (hydraulic pressure),  $p_h$ , ( $p_c < p_h$ ), δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$p'_c = p_h - p_c + P_M \quad (4.2)$$

Όπου,  $P_M$  είναι η παρατηρούμενη οσμωτική πίεση (observed osmotic pressure).

<sup>6</sup> Ως καθαρή υδροστατική πίεση ορίζεται η πίεση εντός των ρωγματώσεων – η επί τόπου πίεση (in situ stress).

Η υδραυλική πίεση (hydraulic pressure),  $p_h$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$p_h = P_w - p_o \quad (4.3)$$

Όπου,

- $P_w$ : η πίεση πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης (wellbore pressure),
- $p_o$ : η αρχική αδιατάρακτη πίεση των πόρων του σχηματισμού (original virgin pore pressure).

Έτσι η εξίσωση 4.2 διαμορφώνεται ως εξής:

$$p'_h = P_w - p_o - p_c + P_M \quad (4.4)$$

Η ολική καθαρή ωθούσα δύναμη (πίεση),  $p'_h$ , προκαλεί τις αλλαγές συναρτήσεως του χρόνου στην πίεση των πόρων του σχηματισμού κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης μέσω διάχυσης της πίεσης (pressure diffusion) ή μεταβίβασης (transmittal) και μεταφοράς ρευστών προς (ή από) το σχηματισμό. Η πίεση των πόρων κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης,  $p_n$ , μπορεί να εκφραστεί συναρτήσεως της αρχικής αδιατάρακτης πίεσης πόρων (original virgin pore pressure),  $p_o$ , και τις αλλαγές σε αυτή συναρτήσεως του χρόνου,  $\delta p(t)$ :

$$P_n = p_o + \delta p(t) \quad (4.5)$$

Για να ελαχιστοποιηθούν οι αλλαγές στην πίεση των πόρων (κοντά στα τοιχώματα της γεώτρησης) συναρτήσεως του χρόνου [ $\delta p(t)$ ], πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η καθαρή υδραυλική πίεση,  $p'_h$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με αύξηση της τριχοειδούς πίεσης,  $p_c$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είτε καθιστώντας την οσμωτική πίεση,  $P_M$ , ίση ή μικρότερη από το μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται καθιστώντας την ενεργότητα του νερού του ρευστού διάτρησης ίση ή μικρότερη από την ενεργότητα του νερού του σχηματισμού<sup>7</sup>. Αν η ενεργότητα του νερού του ρευστού διάτρησης είναι μεγαλύτερη από αυτήν του σχηματισμού, πρέπει να μειωθεί κατά το δυνατό η αποδοτικότητα της μεμβράνης (membrane efficiency). Ωστόσο, όταν η ενεργότητα του νερού του ρευστού διάτρησης καταστεί μικρότερη από αυτήν του σχηματισμού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικής οσμωτικής πίεσης και τη συνακόλουθη ροή ρευστών από τους πόρους του σχηματισμού προς τη γεώτρηση, η αποδοτικότητα της μεμβράνης πρέπει να αυξηθεί.

Η μείωση της ενεργότητας του νερού του ρευστού διάτρησης επιτυγχάνεται με την προσθήκη ηλεκτρολυτών, όπως: λάσπες διάτρησης με θαλασσινό νερό και μπεντονίτη (seawater bentonite muds), κορεσμένα σε αλάτι πολυμερή (ξανθάνη-xanthan, κόμμι-guar), πολυμερή με KCl ή NaCl (PHPA<sup>8</sup>, ξανθάνη-xanthan),

<sup>7</sup> Η οσμωτική πίεση,  $P_M$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$P_M = \eta (RT/V) \ln(A_{sh}/A_m)$$

όπου  $\eta$  η αποδοτικότητα της μεμβράνης (membrane efficiency),  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων (gas constant),  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $V$  ο γραμμομοριακός όγκος του υγρού και  $A_m$ ,  $A_{sh}$  είναι οι ενεργότητες του νερού για το ρευστό διάτρησης και τα ρευστά των πόρων του σχηματισμού, αντίστοιχα.

<sup>8</sup> PHPA: Partially-Hydrolyzed PolyAcrylamide (μερικώς υδρολυμένο πολυακρυλαμίδιο).

ρευστά διάτρησης με βάση το νερό και προσθήκη ασβεστίου (ασβεστόλιθος-lime, γύψος-gypsum) (fresh water calcium treated muds). Ένας νέος τύπος ρευστού διάτρησης βρίσκεται υπό διερεύνηση, ο οποίος βασίζεται σε ένα υποκατάστατο της ζάχαρης (based on a substituted sugar), ένα μεθυλ-γλυκοσίδιο (methyl gluocide), λόγω της ικανότητας του να σχηματίζει χαμηλής ενεργότητας ρευστά διάτρησης με υψηλή αποδοτικότητα μεμβράνης. Η ενεργότητα της διάχυτης υδατικής φάσης (dispersed water phase) σε ένα ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο ρυθμίζεται με προσθήκη συνήθως  $\text{CaCl}_2$ , ώστε να καταστεί μικρότερη από αυτήν του σχηματισμού.

- **Επιβράδυνση του ρυθμού μεταφοράς ρευστού (rate of fluid transport) και του ρυθμού διάχυσης πίεσης (pressure diffusion rate).** Είναι δύσκολο να εξισορροπηθεί η ενεργότητα του νερού των πόρων ενός αργιλικού σχηματισμού με αυτήν του ρευστού διάτρησης σε ολόκληρη τη γεώτρηση, επειδή η ενεργότητα του νερού των πόρων του σχηματισμού δεν είναι γνωστή και διαφέρει ανάλογα με το βάθος και την ορυκτολογία. Είναι, ωστόσο, εφικτό να ελέγχονται παράμετροι που επιτρέπουν τη μείωση του ρυθμού μεταφοράς ρευστών και διάχυσης της πίεσης, μέσω αύξησης του ιξώδους του ρευστού διάτρησης και μείωσης της διαπερατότητας του αργιλικού σχηματισμού. Όσον αφορά στην αύξηση του ιξώδους, το πρόβλημα εντοπίζεται στην ανεύρεση διαλυμένων ουσιών (solutes) που αυξάνουν σημαντικά το ιξώδες του ρευστού διάτρησης και παρόλα αυτά μπορούν να διέλθουν από τα πολύ περιορισμένα διάκενα των πόρων του σχηματισμού (ώστε να συνεχίζουν να διατηρούν υψηλό το ιξώδες του ρευστού διάτρησης). Τα περισσότερα πολυμερή που προστίθενται στα ρευστά διάτρησης δε μπορούν (λόγω μεγέθους) να εισέλθουν στους πόρους των αργίλων, αλλά ορισμένα πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους μπορούν να επιτύχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Όσον αφορά στη μείωση της διαπερατότητας, μια λύση είναι η δημιουργία φραγμού διαπερατότητας (permeability barrier) στην επιφάνεια του αργιλικού σχηματισμού ή εντός των μικρο-ρωγμών του. Τα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο το επιτυγχάνουν αυτό καθώς το νερό διαχέεται μέσω της πετρελαϊκής φάσης. Τα ρευστά διάτρησης που περιέχουν πυριτικά άλατα και ALPLEX<sup>9</sup> (silicate and ALPLEX muds), για παράδειγμα, προσπαθούν να μειώσουν τη διαπερατότητα. Τα κατιονικά πολυμερή (cationic polymers), τα οποία είναι πολύ προσροφητικά (strongly adsorbing), μπορούν να ενεργούν επίσης με τον ίδιο τρόπο. Σε ακραία περίπτωση, ο αργιλικός σχηματισμός μπορεί να απομονωθεί πλήρως μέσω της δημιουργίας ενός αδιαπέρατου υδροφοβικού στεγανού καλύμματος (impermeable hydrophobic seal), με χρήση παραγώγων ασφαλτενίου (asphaltine derivatives) όπως η φυσική άσφαλτος (gislonite). Η χρήση φορτισμένων γαλακτωματοποιητών (charged emulsifiers) για τη σύνδεση των σταγονιδίων του πετρελαίου (σε γαλακτώματα πετρελαίου σε νερό) πάνω στην επιφάνεια της αργίλου, καθώς και η χρήση οργανόφιλων αργίλων

---

<sup>9</sup> ALPLEX: εμπορική ονομασία ουσίας ανάσχεσης των αργίλων με βάση το αλουμίνιο (aluminum based shale inhibitor)

(organophilic clays) σε ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο μπορεί να επιτύχει τα ίδια αποτελέσματα.

Αν και η αλλαγή των κατιόντων της αργίλου (clay cation) με περισσότερο ενυδατώσιμα (hydratable) κατιόντα, όπως  $K^+$  ή  $Ca^{2+}$ , μπορεί να μειώσει την εγγενή διόγκωση (intrinsic swelling), αυτά τα ιόντα οδηγούν σε περισσότερο ανοιχτή δομή (open structure) και, ως εκ τούτου, αυξάνουν τη διαπερατότητα. Σήμερα εξελίσσεται η διερεύνηση για τη σύνθεση ρευστών διάτρησης που περιέχουν κάισιο,  $Ce^+$ , για τη σταθεροποίηση των αργίλων. Αν και ένα τέτοιο ρευστό διάτρησης θα ήταν πολύ ακριβό, η επιτυγχανόμενη σταθεροποίηση των αργιλικών σχηματισμών και η βελτίωση του ρυθμού προχώρησης της γεώτρησης ίσως θα μπορούσαν να το αντισταθμίσουν.

- **Διατήρηση της μηχανικής ακεραιότητας των θρυμμάτων του αργιλικού σχηματισμού σε περίπτωση διάβρωσης ή αστοχίας του.** Για τον έλεγχο των ζημιών (damage control), σε περίπτωση εκκίνησης αστοχίας ή διάβρωσης του αργιλικού σχηματισμού, απαιτείται η λήψη ορισμένων μέτρων για τον περιορισμό της διασποράς των παραγόμενων θρυμμάτων ή τεμαχιδίων (cuttings or spallings) μέσω συνένωσής τους. Τα πολυμερή τα οποία μπορούν να περιορίσουν την αποσάθρωση (θρυμματισμό) του αργιλικού σχηματισμού, πρέπει να προσροφώνται πάνω στην επιφάνεια των τεμαχιδίων της αργίλου και να διαθέτουν επαρκώς υψηλή ενέργεια ώστε να ανθίστανται στις μηχανικές και υδραυλικές δυνάμεις που τείνουν να τα διαχωρίσουν. Το PHPA και τα έντονα προσροφητικά κατιονικά πολυμερή (strongly adsorbing cationic polymers), καθώς και τα συστατικά όπως η πολυγλυκερόλη (polyglycerol) μπορούν να περιορίσουν τη διασπορά των θρυμμάτων ή τεμαχιδίων της αργίλου μέσα στη γεώτρηση. Για την επίτευξη παρόμοιων αποτελεσμάτων εντός του αργιλικού σχηματισμού, τα πολυμερή πρέπει να έχουν την ικανότητα να διαχέονται εντός του σχηματισμού, σχηματίζοντας μικρές ευέλικτες αλυσίδες.

## 4.6 Συμπεράσματα

Στο μέλλον η έρευνα για την ευστάθεια των αργιλικών σχηματισμών και την κατανόηση της αλληλεπίδρασής τους με τα ρευστά διάτρησης είναι βέβαιο ότι θα οδηγήσει σε καλύτερους τρόπους σταθεροποίησης των αργιλικών σχηματισμών και στο σχεδιασμό φιλικών προς το περιβάλλον και αποτελεσματικών ρευστών διάτρησης. Καθώς μελετώνται νέα πρόσθετα για τα ρευστά διάτρησης προκειμένου για τη σταθεροποίηση των αργιλικών σχηματισμών, η μεγάλη πρόκληση είναι αυτά να είναι συμβατά με τη διατήρηση άλλων επιθυμητών ιδιοτήτων των ρευστών διάτρησης, όπως είναι η ρεολογία, η συμβατότητα με τα παραγόμενα θρύμματα και ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης.

Ακόμα κι αν ήταν εφικτό να σχεδιαστεί το βέλτιστο ρευστό διάτρησης για αργιλικούς σχηματισμούς, η συνεχής παρακολούθηση και ο έλεγχος του ρευστού διάτρησης

κατά την όρυξη είναι κρίσιμοι παράγοντες για την επιτυχία της γεώτρησης. Η σύνθεση της λάσπης αλλάζει διαρκώς καθώς αυτή κυκλοφορεί και αλληλεπιδρά με το σχηματισμό και τα παραγόμενα θρύμματα. Τα επιθυμητά αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν μόνο όταν οι συγκεντρώσεις των διαφόρων προσθέτων στο ρευστό διάτρησης παρακολουθούνται συνεχώς, σε αντίθεση με τη σημερινή πρακτική της περιοδικής παρακολούθησης ορισμένων ρεολογικών και φυσικών ιδιοτήτων της λάσπης διάτρησης. Η ανάπτυξη και η εισαγωγή βελτιωμένων τεχνικών παρακολούθησης για τη λήψη χημικών μετρήσεων (chemical measurements) πρέπει να προχωρήσει ταυτόχρονα με την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών ρευστών διάτρησης για την ευστάθεια των αργιλικών σχηματισμών, με βάση τη βελτιωμένη κατανόηση της αλληλεπίδρασης του ρευστού διάτρησης με τον αργιλικό σχηματισμό.

Τέλος, για την καλύτερη διαχείριση των προβλημάτων ευστάθειας των τοιχωμάτων μιας γεώτρησης εντός αργιλικού σχηματισμού είναι κρίσιμης σημασίας η σε βάθος κατανόηση των βασικών φυσικών και χημικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα εντός της γεώτρησης κατά την όρυξη. Το ίδιο ισχύει και για το σχεδιασμό αποδοτικών ρευστών διάτρησης. Το πιο σημαντικό είναι ότι τα ευρήματα των σχετικών ερευνών πρέπει να μεταφραστούν σε τεχνολογία με απλή πρακτική εφαρμογή, έτσι ώστε το προσωπικό του γεωτρήσανου να μπορεί να την εφαρμόσει προκειμένου να επιλύσει πρακτικά προβλήματα.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

# Περιγραφή των Γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A

---

### 5.1 Εισαγωγή

Οι γεωτρήσεις που επιλέξαμε για τη συγκριτική αξιολόγηση, βρίσκονται στη θαλάσσια περιοχή του Πρίνου, νότια της Καβάλας. Όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, η λεκάνη Πρίνου-Καβάλας χαρακτηρίζεται από όμοια στρωματογραφία, συνεπώς θα είχε νόημα να μελετήσουμε πως δύο διαφορετικής σύστασης ρευστά διάτρησης, επηρεάζουν την όρυξη μιας γεώτρησης. Για το σκοπό αυτό, επιλέξαμε τη γεώτρηση PA-35 που έχει διατρηθεί αποκλειστικά με βάση το νερό (WBM) και τη γειτονική της γεώτρηση, PB-23A που έχει διατρηθεί με χρήση ρευστών διάτρησης και με βάση το νερό, αλλά και με βάση το πετρέλαιο (OBM) σε συγκεκριμένα βάθη.

Παρακάτω θα γίνει περιγραφή του προγράμματος της κάθε γεώτρησης και των γεωλογικών σχηματισμών που απαντήθηκαν, σύμφωνα με τις τεχνικές μελέτες που μας παρείχε η Energean Oil & Gas. Στη συλλογή των δεδομένων συμμετείχαν από κοινού οι εταιρείες Energean Oil & Gas, Kavala Oil S.A και M I Swaco. Τα δεδομένα όρυξης (drilling data) και κατανάλωσης των κοπτικών (bit records) για κάθε γεώτρηση, επισυνάπτονται με τη μορφή πινάκων στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας σχετικών δεδομένων, το τμήμα των γεωτρήσεων που μπορεί να μελετηθεί για τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο τύπων ρευστών διάτρησης, αντιστοιχεί σε μόλις 190.0 m.

### 5.2 Πρόγραμμα γεώτρησης PA-35 & γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν

Η γεώτρηση PA-35 πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο από 27 Δεκεμβρίου 2010 έως και 30 Ιανουαρίου 2011 (συνολική διάρκεια 35 ημέρες). Ήταν η πρώτη γεώτρηση του προγράμματος «Πρίνος 5,000» και αφορούσε στην αύξηση παραγωγής πετρελαίου στα 5,000 βαρέλια ημερησίως εντός της τρέχουσας χρονιάς. Το εν λόγω πρόγραμμα αφορά σε επενδύσεις ύψους 20 εκατομμυρίων δολαρίων κατά το έτος 2011. Ο πρωταρχικός στόχος της γεώτρησης PA-35 ήταν η παραγωγή πετρελαίου από τους μέχρι σήμερα ανεκμετάλλευτους ορίζοντες του κοιτάσματος του Πρίνου, οι οποίοι προέκυψαν κατόπιν μακρόχρονης μελέτης της Energean Oil & Gas και της θυγατρικής της Kavala Oil S.A.

Η γεώτρηση PA-35 έφτασε μέχρι το βάθος των 2,976.0 m MD και σχεδιάστηκε ώστε να ορυχθεί από την Εξέδρα Α' (Prinos Alpha Platform), ξεκινώντας από την παλιά γεώτρηση PA-28, σαν νέο πλευρικό τμήμα αυτής («sidetrack»). Το νέο αυτό τμήμα («sidetrack») που ορύχθηκε, κατέληξε σε στόχο εντός του ταμειυτήρα ο οποίος βρισκόταν 163.0 m βορειότερα από τον αρχικό στόχο της PA-28. Αιτία αυτής της αλλαγής κλίσης ήταν η αποφυγή της όρυξης των εβαποριτών που βρίσκονταν σε εκείνο το βάθος. Τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν στην όρυξη ήταν τύπου PDC του οίκου Smith. Το αρχικό τμήμα, από τα 2,326.0 m MD έως και 2,624.0 m MD, ορύχθηκε από το κοπτικό MDSi716 με διάμετρο 8<sup>3</sup>/<sub>8</sub> in, ενώ το επόμενο τμήμα από τα 2,624.0 m MD έως και 2,953.0 m MD ορύχθηκε από το κοπτικό MDSi613 με διάμετρο 6 in.

Ο αρχικός σχεδιασμός της γεώτρησης PA-35 προέβλεπε ότι η γεώτρηση θα ξεκινούσε με τη βοήθεια σφήνας παρέκκλισης (whipstock) από το βάθος των 2,642.0 m MD εντός της υφιστάμενης γεώτρησης PA-28. Ωστόσο, λόγω σοβαρών δυσχερειών κατά την ανάκτηση της παλαιάς σωλήνωσης παραγωγής, ελήφθη η απόφαση η σφήνα να τοποθετηθεί στα 2,327.0 m MD, αλλάζοντας τον αρχικό προγραμματισμό της γεώτρησης. Αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής ήταν ότι η PA-35 θα έπρεπε να διέλθει από τα δύο τελευταία στρώματα του 4<sup>ου</sup> εβαπορίτη, δηλαδή τα UMS και LMS που περιλαμβάνουν και τη ζώνη OPC.

Το τμήμα της γεώτρησης που επιλέξαμε για περαιτέρω μελέτη αφορά το μήκος από τα **2,379.0 m MD έως και 2,569.0 m MD** που ορύχθηκε με κοπτικό διαμέτρου 8<sup>3</sup>/<sub>8</sub> in. Το ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο τμήμα, ήταν πολφός με βάση το νερό, της εταιρίας M I Swaco με την εμπορική ονομασία Flo-Thru και ειδικό βάρος (SG) 1.75 g/cc. Σύμφωνα με την τεχνική μελέτη, ο πολφός αυτός περιέχει νερό, NaCl, KCl και ένα χημικό μίγμα με την εμπορική ονομασία Glydril. Τα συστατικά αυτά παρέχουν προστασία των τοιχωμάτων της γεώτρησης, κατάλληλη λίπανση του κοπτικού άκρου, επαρκή έλεγχο της γεώτρησης σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι ιδανικά για εφαρμογή σε σχηματισμούς με υψηλή αλατότητα. Η όρυξη με το συγκεκριμένο ρευστό δεν παρουσίασε προβλήματα στον έλεγχο της γεώτρησης, σύμφωνα με την τεχνική μελέτη.

### **5.2.1 Γεωλογία & στρωματογραφία διατρηθέντος τμήματος**

Ταυτόχρονα με την όρυξη της γεώτρησης PA-35, μέσω ειδικών καταγραφών εντός της γεώτρησης (LWD, gamma ray, resistivity open hole sensors), παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στη γεωλογία των διατρυόμενων σχηματισμών. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι σχηματισμοί από τους οποίους διήλθε η γεώτρηση PA-35, συνολικά, μέχρι και το πέτρωμα – κάλυμμα (cap rock) του ταμειυτήρα, σε κάθε βάθος.

**Πίνακας 5.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν κατά την όρυξη της PA-35 (Energean Oil & Gas, 2011 – ίδια επεξεργασία)**

Γεωλογικός Σχηματισμός	Βάθος	
	(m) MD	(m) TVD
Εβαποριτική Ακολουθία (Έναρξη όρυξης πλευρικού τμήματος γεώτρησης – Sidetrack)	2,327.0	2,245.0
UMS – Οροφή	2,381.5	2,295.19
OPC – Οροφή	2,432.0	N/A
OPC – Δάπεδο	2,440.0	N/A
UMS – Δάπεδο	2,455.0	2,360.81
Ψαμμίτες & άργιλοι – Οροφή	2,455.0	N/A
Ψαμμίτες & άργιλοι – Δάπεδο	2,557.0	N/A
LMS – Οροφή	2,557.0	2,452.64
OPC – Οροφή	2,596.0	N/A
OPC – Δάπεδο	2,597.0	N/A
LMS – Δάπεδο	2,610.52	2,501.05
Πέτρωμα - κάλυμμα – Οροφή	2,610.52	2,501.05

Στον Πίνακα 5.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία της στρωματογραφίας των σχηματισμών από τους οποίους διήλθε η γεώτρηση PA-35, από τη θέση έναρξης της πλευρικής όρυξης μέχρι και το πέτρωμα – κάλυμμα (cap rock) του ταμιευτήρα, όπως προέκυψαν από την ανάλυση των θρυμμάτων.

**Πίνακας 5.2: Λιθολογική περιγραφή που απαντήθηκε κατά την όρυξη της PA-35 (Energean Oil & Gas, 2011 – ίδια επεξεργασία)**

Βάθος (m), MD	Λιθολογία
<p><b>2,327.0 – 2,360.0</b> Εβαποριτική Ακολουθία / Ανώτερο Μειόκαινο – Μεσσηνιακή Εποχή</p>	<p><u>Ψαμμίτης (Sandstone):</u> Χαλαζιακής προέλευσης, ημιδιαφανής έως λευκός με πολύ λεπτή υφή, σπάνια χονδρόκοκκη, ομαλά ταξινομημένη.</p> <p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα, τοπικά λασπώδης και άμορφη.</p> <p><u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> Μικροκρυσταλλικός, λευκός έως ελαφρώς ημιδιαφανής, μαλακός και περιστασιακά σκληρός.</p>

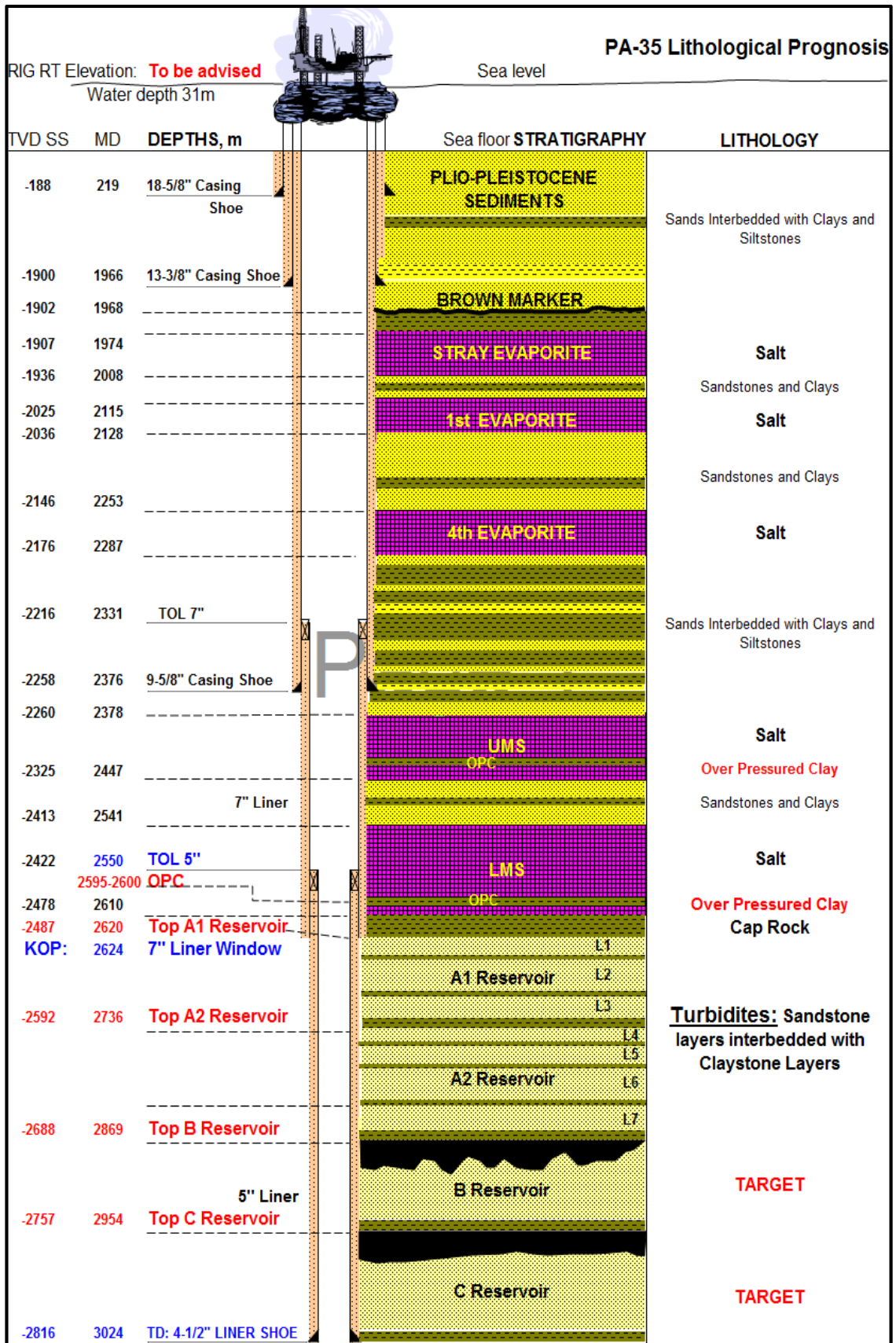


Βάθος (m), MD	Λιθολογία
<p style="text-align: center;"><b>2,360.0 – 2,381.5</b> Εβαπτοριτική Ακολουθία / Ανώτερο Μειόκαινο – Μεσσηνιακή Εποχή</p>	<p><u>Ψαμμίτης (Sandstone):</u> Περισσότερο από 50%, χαλαζιακής προέλευσης, ημιδιαφανής έως λευκός με πολύ λεπτή υφή, σπάνια χονδρόκοκκη, ομαλά ταξινομημένη.</p> <p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Ίχνη μέχρι 30%, σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα, τοπικά λασπώδης και άμορφη.</p> <p><u>Αλάτι (Salt):</u> Αλίτης διαφανής έως ημιδιαφανής, λευκός, εύθραυστος, μακροκρυσταλλικός.</p> <p><u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> Ανemiγμένος με το αλάτι, μικροκρυσταλλικός, λευκός έως ελαφρώς ημιδιαφανής, μαλακός και περιστασιακά σκληρός.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2,381.5 – 2,455.0</b> Ανώτερο κύριο στρώμα αλάτων - UMS</p>	<p><u>Αλάτι (Salt):</u> Αλίτης έως 80%, διαφανής έως ημιδιαφανής, λευκός, εύθραυστος, μακροκρυσταλλικός.</p> <p><u>Ψαμμίτης (Sandstone):</u> Χαλαζιακής προέλευσης, ημιδιαφανής έως λευκός με πολύ λεπτή υφή, σπάνια χονδρόκοκκη, ομαλά ταξινομημένη.</p> <p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Ίχνη μέχρι 20%, σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα.</p> <p><u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> Ίχνη μέχρι 10%, λευκός κατά βάση και κιτρινωπός εν μέρει, μαλακός, σχετικά ασυμπίεστος.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2,432.0 – 2,440.0</b> Ζώνη υπερπυκνωμένων αργίλων – OPC (<b>Εντός του στρώματος UMS</b>)</p>	<p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Ίχνη μέχρι 20%, σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2,455.0 – 2,557.0</b> Ψαμμίτες &amp; άργιλοι</p>	

Βάθος (m), MD	Λιθολογία
<p style="text-align: center;"><b>2,557.0 – 2,610.5</b> Κατώτερο κύριο στρώμα αλάτων - LMS</p>	<p><u>Αλάτι (Salt):</u> Αλίτης έως 80%, διαφανής έως ημιδιαφανής, λευκός, εύθραυστος, μακροκρυσταλλικός.</p> <p><u>Ψαμμίτης (Sandstone):</u> Περισσότερο από 50%, χαλαζιακής προέλευσης, ημιδιαφανής έως λευκός με πολύ λεπτή υφή, σπάνια χονδροκόκκη, ομαλά ταξινομημένη.</p> <p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Ίχνη μέχρι 20%, σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα.</p> <p><u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> Ίχνη μέχρι 10%, λευκός κατά βάση και κιτρινωπός εν μέρει, μαλακός, σχετικά ασυμπίεστος.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2,596.0 – 2,597.5</b> Ζώνη υπερπυκνωμένων αργίλων - OPC</p>	<p><u>Άργιλος (Claystone):</u> Μέχρι 60%, σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2,610.5 – 2,624.0</b> Πέτρωμα - κάλυμμα</p>	<p><u>Άργιλος (Claystone):</u> 100% σκουρόχρωμη γκρι, σπάνια ανοιχτόχρωμη, συμπαγής, μαλακή με μέτρια σκληρότητα.</p>

Η σχηματική απόδοση του προγράμματος όρυξης της γεώτρησης PA-35 σε συνδυασμό με την αντίστοιχη γεωλογική στήλη παρατίθεται στην ακόλουθη Εικόνα 5.1.

Ο πίνακας των γεωτρητικών δεδομένων (drilling data) και των χρησιμοποιούμενων κοπτικών (bit records) για τη γεώτρηση PA-35 παρατίθεται στην Ενότητα 5.4.



Εικόνα 5.1: Σχηματική απόδοση του προγράμματος όρυξης της PA-35 σε συνδυασμό με τη γεωλογία που συναντήθηκε (Energean Oil & Gas, 2011)

### 5.3 Πρόγραμμα γεώτρησης PB-23A & γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν

Η γεώτρηση PB-23A πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο από 29 Ιουλίου 2013 έως και 25 Αυγούστου 2013 και σχεδιάστηκε ώστε να ορυχθεί από την Εξέδρα Β' (Prinos Beta Platform), σαν νέο πλευρικό τμήμα («sidetrack») της παλαιάς γεώτρησης PB-23. Ο αρχικός σχεδιασμός της PB-23A προέβλεπε ότι η γεώτρηση θα ξεκινούσε από το βάθος των 2,166.0 m MD, με τη χρήση κοπτικού τύπου μύλου διαμέτρου 8½ , ώστε να διανοιχθεί ένα «παραθύρο» στην παλιά γεώτρηση PB-23, από το οποίο θα ξεκινούσε η πλευρική όρυξη του νέου τμήματος. Ωστόσο, λόγω σοβαρών δυσχερειών κατά την ανάκτηση της παλαιάς σωλήνωσης, έγιναν πολλαπλές προσπάθειες με διατρητικό μύλο μικρότερης διαμέτρου 8³/₈ μέχρι και το μήκος των 2,408.5 m MD, όπου και επετεύχθη η διάνοιξη του παραθύρου για το sidetrack. Τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν στην όρυξη ήταν τύπου PDC της εταιρίας Smith. Το αρχικό τμήμα, μετά τη διάνοιξη του παραθύρου, ορύχθηκε με κοπτικό MDi616, διαμέτρου 8³/₈ in, για το μήκος από 2,409.0 m MD έως 2,592.0 m MD, ενώ το επόμενο τμήμα από τα 2,597.0 m MD έως και τα 2,950.0 m MD ορύχθηκε με κοπτικό MSi713 διαμέτρου 6 in.

Το τμήμα της γεώτρησης που επιλέχθηκε προς μελέτη, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αφορά το μήκος από τα **2,408.0 m MD έως και 2,592.0 m MD** το οποίο ορύχθηκε με κοπτικό διαμέτρου 8³/₈ in. Το ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο τμήμα, είχε ως βάση το πετρέλαιο της εταιρίας M I Swaco με την εμπορική ονομασία Versa Vert και ειδικό βάρος (SG) 1.7 g/cc.

#### 5.3.1 Γεωλογία & στρωματογραφία διατρηθέντος τμήματος

Όπως και στην προηγούμενη γεώτρηση, έτσι και στην PB-23A, μέσω ειδικών καταγραφών εντός της γεώτρησης (LWD, gamma ray, resistivity open hole sensors), παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στη γεωλογία των διατρυόμενων σχηματισμών. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι σχηματισμοί από τους οποίους διήλθε η γεώτρηση PB-23A, συνολικά, μέχρι και το πέτρωμα – κάλυμμα (cap rock) του ταμειυτήρα, σε κάθε βάθος.

**Πίνακας 5.3: Γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντήθηκαν κατά την όρυξη της γεώτρησης PB-23A (Energean Oil & Gas, 2013 – ίδια επεξεργασία)**

Γεωλογικός Σχηματισμός	Βάθος	
	(m) MD	(m) TVD
UMS – Οροφή	2,402.2	N/A
OPC – Οροφή	2,425.0	
OPC – Δάπεδο	2,431.0	
UMS – Δάπεδο	2,444.0	
Ψαμμίτες & άργιλοι – Οροφή	2,444.0	

Γεωλογικός Σχηματισμός	Βάθος	
	(m) MD	(m) TVD
Ψαμμίτες & άργιλοι – Δάπεδο	2,523.0	
LMS – Οροφή	2,523.0	
OPC – Οροφή	2,570.0	
OPC – Δάπεδο	2,578.0	
LMS – Δάπεδο	2,590.0	
Πέτρωμα - κάλυμμα – Οροφή	2,590.0	

Στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία της στρωματογραφίας των σχηματισμών από τους οποίους διήλθε η γεώτρηση PB-23A, από τη θέση έναρξη της πλευρικής όρυξης μέχρι και το πέτρωμα – κάλυμμα (cap rock) του ταμιευτήρα, όπως προέκυψαν από την ανάλυση των θρυμμάτων.

**Πίνακας 5.4: Λιθολογική περιγραφή που απαντήθηκε κατά την όρυξη της PB-23A (Energean Oil & Gas, 2013 – ίδια επεξεργασία)**

Βάθος (m), MD		Λιθολογία
<b>2,402.0 – 2,425.0</b> Ανώτερο κύριο στρώμα αλάτων - UMS	<b>2,407.0 – 2,410.0</b>	<u>Αλάτι (Salt):</u> 60%, υπόλευκο, κιτρινωπό, σπάνια ημιδιαφανές, μικροκρυσταλλικό, τεμαχίδια μεγέθους 3 mm.  <u>Άργιλος (Claystone):</u> 40%, γκρι, κυρίως μαλακή, σπάνια σκληρή, ελαφρά ασβεστολιθική με λευκά ίχνη ανυδρίτη.
	<b>2,410.0 – 2,420.0</b>	<u>Αλάτι (Salt):</u> 30%, υπόλευκο, κιτρινωπό, σπάνια ημιδιαφανές, μικροκρυσταλλικό, τεμαχίδια μεγέθους 3 mm με σημαντικά ίχνη ανυδρίτη.  <u>Άργιλος (Claystone):</u> 60%, γκρι, κυρίως μαλακή, σπάνια σκληρή, ελαφρά ασβεστολιθική με λευκά ίχνη ανυδρίτη.  <u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> 10%, είτε με ανοιχτό γκρι, είτε με μαύρες ραβδώσεις.
<b>2,425.0 – 2,431.0</b> Ζώνη υπερπυκνωμένων αργίλων - OPC	<b>2,427.0 – 2,428.0</b>	<u>Άργιλος (Claystone):</u> 100%, μέχρι σκούρο γκρι, κυρίως μαλακή, σπάνια σκληρή, ελάχιστα θρύμματα από το κοπτικό PDC.
	<b>2,428.0 – 2,430.0</b>	<u>Αλάτι (Salt):</u> 100%, ανοιχτό προς σκούρο γκρι, τοπικά λευκά μέρη, μικροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.

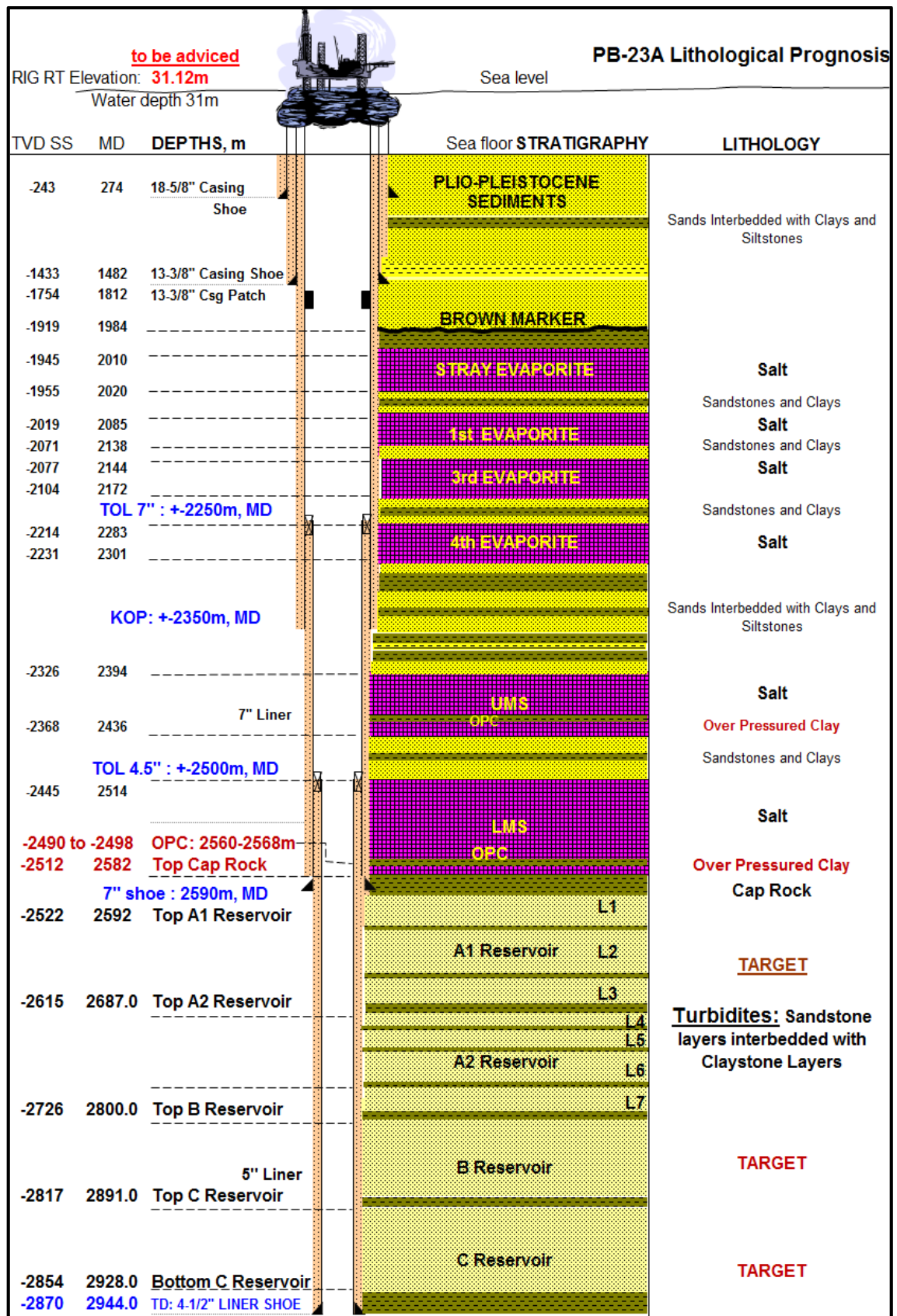
Βάθος (m), MD		Λιθολογία
2,431.0 – 2,444.0 Ανώτερο κύριο στρώμα αλάτων - UMS	2,430.0 – 2,445.0	<u>Αλάτι (Salt):</u> 100%, ανοιχτό προς σκούρο γκρι, τοπικά λευκά μέρη, κυρίως διάφανο, μικροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.
		<u>Ανυδρίτης (Anhydrite):</u> 5%, είτε με ανοιχτό γκρι, είτε με μαύρες ραβδώσεις.
2,444.0 – 2,523.0 Ψαμμίτες & άργιλοι		<u>Αλάτι (Salt), Άργιλος (Claystone), Αμμόλιθος (Sand), Ανυδρίτης (Anhydrite):</u>  Σε διάφορες περιεκτικότητες που εναλλάσσονται ανά 5 μέτρα και με σύσταση όμοια των προηγούμενων.
2,570.0 – 2,578.0 Ζώνη υπερπιεσμένων αργίλων - OPC	2,568.0 – 2,575.0	<u>Άργιλος (Claystone):</u> 90%, μέχρι σκούρο γκρι, τοπικά καφέ μέρη, σφικτή, μη ασβεστολιθική, ελάχιστα θρύμματα από το κοπτικό PDC.
	Spot 2,577.0	<u>Αλάτι (Salt):</u> 10%, υπόλευκο, ημιδιαφανές, καφέ ή ανά τμήματα, μακροκρυσταλλικό, ελάχιστα θρύμματα από το κοπτικό PDC.
2,578.0 – 2,590.0 Κατώτερο κύριο στρώμα αλάτων - LMS	2,577.0 – 2,580.0	<u>Άργιλος (Claystone):</u> 80%, μέχρι σκούρο γκρι, τοπικά καφέ μέρη, σφικτή, ίχνη ανυδρίτη.
		<u>Αλάτι (Salt):</u> 20%, ανοιχτό προς σκούρο γκρι, τοπικά λευκά μέρη, μικροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.
	2,580.0 – 2,585.0	<u>Αλάτι (Salt):</u> 90%, τοπικά λευκά μέρη, μακροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.
		<u>Άργιλος (Claystone):</u> 10%, μέχρι σκούρο γκρι, τοπικά καφέ μέρη, σφικτή, ίχνη ανυδρίτη.
2,580.0 – 2,585.0	2,580.0 – 2,585.0	<u>Αλάτι (Salt):</u> 70%, τοπικά λευκά μέρη, μακροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.
		<u>Άργιλος (Claystone):</u> 30%, μέχρι σκούρο γκρι, τοπικά καφέ μέρη, σφικτή, ίχνη ανυδρίτη.

Βάθος (m), MD		Λιθολογία
	<b>2,585.0 – 2,590.0</b>	<p><u>Αργίλος (Claystone):</u> 90%, μέχρι σκούρο γκρι, τοπικά καφέ μέρη, σφικτή, μη ασβεστολιθική, θρύμματα από το κοπτικό PDC, οσμή υδρογονανθράκων.</p> <p><u>Αλάτι (Salt):</u> 10%, τοπικά λευκά μέρη, μακροκρυσταλλικό, ίχνη ανυδρίτη και αργίλου.</p>
	<b>2,590.0 – 2,603.0</b> Πέτρωμα - κάλυμμα	<p><u>Αλάτι (Salt), Αργίλος (Claystone), Αμμόλιθος (Sand), Ανυδρίτης (Anhydrite), Ιλυόλιθος (Siltstone), Τσιμέντο (cement), Ίχνη Γύψου (Gypsum) και Ασβεστίτη (Calcite):</u></p> <p>Σε διάφορες περιεκτικότητες που εναλλάσσονται και με σύσταση όμοια των προηγούμενων.</p>

Η σχηματική απόδοση του προγράμματος όρυξης της γεώτρησης PA-35 σε συνδυασμό με την αντίστοιχη γεωλογική στήλη παρατίθεται στην ακόλουθη Εικόνα 5.2.

Ο πίνακας των γεωτρητικών δεδομένων (drilling data) και των χρησιμοποιούμενων κοπτικών (bit records) για τη γεώτρηση PB-23A παρατίθεται στην Ενότητα 5.4.





Εικόνα 5.2: Σχηματική απόδοση του προγράμματος όρυξης της PB-23A σε συνδυασμό με τη γεωλογία που συναντήθηκε (Schlumberger, 2013)



## 5.4 Γεωτρητικά δεδομένα και δεδομένα χρήσης κοπτικών άκρων

Στους παρακάτω Πίνακες 5.5 & 5.6, παρουσιάζονται τα γεωτρητικά δεδομένα των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A αντίστοιχα, τα οποία είναι απαραίτητα ώστε να γίνει η επεξεργασία για τη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των διατρητικών πολφών στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Πιο αναλυτικά:

- Οι τρεις πρώτες στήλες αναφέρονται στην «Ημερομηνία» και «Ωρα έναρξης και λήξης» της όρυξης. Μας υποδηλώνουν τη χρονική στιγμή που ορύχθηκε η κάθε γεώτρηση αλλά και την ακριβή ώρα που διήρκησαν οι εργασίες ώστε να παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα και να διακοπούν.
- Η στήλη με τίτλο «Βάθος MD» αναφέρεται στο μετρούμενο βάθος (Measured Depth) ή φαινόμενο βάθος που βρίσκεται η γεώτρηση. Αφορά στο μήκος που έχει διανύσει η γεώτρηση. Δεν είναι το πραγματικό βάθος (True Vertical Depth) της γεώτρησης.
- Η στήλη με τίτλο «Διάμετρος κοπτικού, D» περιέχει τις τιμές της διαμέτρου σε ίντσες των κοπτικών άκρων που χρησιμοποιήθηκαν στο κάθε τμήμα προχώρησης.
- Η στήλη με τίτλο «Βάρος επί του κοπτικού, WOB» περιέχει τις τιμές των βαρών που ασκήθηκαν επί του κοπτικού, σε λίβρες, στο εκάστοτε τμήμα προχώρησης.
- Η στήλη με τίτλο «Ταχύτητα περιστροφής, N» περιέχει τις τιμές της ταχύτητας περιστροφής που εφαρμόστηκε στο κοπτικό, σε rpm – στροφές ανά λεπτό, στην εκάστοτε προχώρηση.
- Η στήλη «Ταχύτητα διάτρησης, R» περιέχει τις τιμές της ταχύτητας προχώρησης σε ft/hr που επιτεύχθηκαν στο κάθε τμήμα της γεώτρησης.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.7, παρουσιάζονται οι τεχνικές λεπτομέρειες των κοπτικών άκρων που χρησιμοποιήθηκαν για τα μελετούμενα βάθη των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A.

**Πίνακας 5.5: Γεωτρητικά δεδομένα (drilling data) για τη γεώτρηση PA-35 (Energean Oil & Gas, 2011 - ίδια επεξεργασία)**

PA-35							
Ημερ/νία	Ωρα έναρξης	Ωρα λήξης	Βάθος MD (m)	Διάμετρος κοπτικού, D (in)	Βάρος επί του κοπτικού, WOB (lb)	Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)	Ταχύτητα διάτρησης, R (ft/hr)
22/1	02:30	03:31	2,379.0	8.38	8,818.0	110.0	34.74
	04:09	04:26	2,390.0	8.38	8,818.0	130.0	38.09
	04:37	06:10	2,393.0	8.38	8,818.0	130.0	41.01
	06:10	06:34	2,411.0	8.38	8,818.0	130.0	28.12
	07:06	07:13	2,416.0	8.38	8,818.0	130.0	43.41
	07:45	09:52	2,417.0	8.38	7,716.0	130.0	59.91

PA-35							
Ημερ/νία	Ώρα έναρξης	Ώρα λήξης	Βάθος MD (m)	Διάμετρος κοπτικού, D (in)	Βάρος επί του κοπτικού, WOB (lb)	Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)	Ταχύτητα διάτρησης, R (ft/hr)
	10:20	10:43	2,445.0	8.38	7,716.0	130.0	50.46
	11:00	12:18	2,452.0	8.38	7,716.0	130.0	62.63
	12:55	14:23	2,472.0	8.38	7,716.0	130.0	35.66
	14:23	16:52	2,500.0	8.38	7,716.0	130.0	57.42
	17:32	19:08	2,527.0	8.38	7,716.0	130.0	51.05
	20:16	21:10	2,555.0	8.38	7,716.0	130.0	62.63
	21:28	22:12	2,569.0	8.38	7,716.0	130.0	54.69

Πίνακας 5.6: Γεωτρητικά δεδομένα (drilling data) για τη γεώτρηση PB-23A (Schlumberger, 2013 - ίδια επεξεργασία)

PB-23A							
Ημερ/νία	Ώρα έναρξης	Ώρα λήξης	Βάθος MD (m)	Διάμετρος κοπτικού, D (in)	Βάρος επί του κοπτικού, WOB (lb)	Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)	Ταχύτητα διάτρησης, R (ft/hr)
3/8	06:20	06:42	2,408.0	8.38	6,001.0	65.0	8.66
4/8	06:35	07:50	2,409.0	8.38	10,000.0	70.0	47.24
	15:50	17:40	2,427.0	8.38	17,500.0	90.0	65.62
	18:05	18:50	2,455.0	8.38	15,999.0	90.0	43.64
	19:00	20:15	2,465.0	8.38	15,000.0	120.0	44.62
	21:15	23:10	2,482.0	8.38	10,000.0	120.0	46.26
5/8	00:00	00:30	2,509.0	8.38	8,500.0	120.0	39.37
	06:30	07:30	2,523.0	8.38	8,510.0	120.0	45.93
	08:00	10:30	2,537.0	8.38	8,510.0	120.0	36.75
	13:00	15:20	2,565.0	8.38	9,000.0	120.0	38.06
	15:45	16:00	2,592.0	8.38	12,500.0	120.0	26.25

Πίνακας 5.7: Τεχνικές λεπτομέρειες κοπτικών άκρων 8<sup>3</sup>/<sub>8</sub> in (Schlumberger, 2015 – ίδια επεξεργασία)

	Γεώτρηση PA-35	Γεώτρηση PB-23A
Κατασκευαστής	SMITH (SCHLUMBERGER)	
S/N	JY8107	JE0724
Τύπος	PDC – MDSi716 – 8 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in	PDC – MDi616 – 8 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in
Ακροφύσια	3x12, 4x11	8x12



Εικόνα 5.2: Αριστερά, κάτοψη κοπτικού MDSi716 & δεξιά, κάτοψη κοπτικού MDi616 (Schlumberger, 2015 – ίδια επεξεργασία)

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

# Επεξεργασία, Ανάλυση & Ερμηνεία των Γεωτρητικών Δεδομένων

---

### 6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο – Η ειδική ενέργεια (SE)

Η ειδική ενέργεια (ή μηχανική ειδική ενέργεια) είναι μία παράμετρος που προτάθηκε αρχικά από τον Teale (1965) και αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της διατρησιμότητας των πετρωμάτων, τόσο για μεταλλευτικές γεωτρήσεις, όσο και για γεωτρήσεις υδρογονανθράκων.

Ως ειδική ενέργεια (specific energy - SE) ορίζεται η ενέργεια που δαπανάται για να θρυμματιστεί και να αποσυντεθεί συγκεκριμένος όγκος πετρώματος κατά τη διάρκεια της διάτρησης (Κελεσίδης Β. Χ., 2010).

Η εξίσωση της ειδικής ενέργειας προκύπτει από τη θεώρηση της μηχανικής ενέργειας,  $E$ , η οποία καταναλώνεται επί του κοπτικού άκρου σε ένα λεπτό και η οποία εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = \text{WOB} \times 2\pi R \times N \quad (6.1)$$

όπου:

- **WOB**, το βάρος επί του κοπτικού (lb),
- **R**, η ακτίνα του κοπτικού (in),
- **N**, η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού (rpm – rotations per minute).

Αντίστοιχα, ο όγκος του πετρώματος,  $V$ , που απομακρύνεται σε ένα λεπτό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V = (\pi R^2) \times \text{ROP} \quad (6.2)$$

όπου:

- **ROP**, ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης (ft/h).

Η εξίσωση της ειδικής ενέργειας, SE, προκύπτει από το λόγο της μηχανικής ενέργειας ( $E$ ) που καταναλώνεται επί του κοπτικού άκρου σε ένα λεπτό (εξίσωση 6.1), προς τον όγκο του πετρώματος που εξορύσσεται σε ένα λεπτό,  $V$  (εξίσωση 6.2):

$$\begin{aligned} SE = \frac{E}{V} &= \frac{\text{WOB} \times 2\pi R \times N}{\pi R^2 \times \text{ROP}} \frac{\text{lb} \times \text{in} \times \frac{1}{\text{min}}}{\text{in}^2 \times \frac{\text{ft}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{60 \text{ min}} \times \frac{12 \text{ in}}{\text{ft}}} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow SE = 10 \frac{\text{WOB} \times N \text{ lb} \times \text{in}}{R \times \text{ROP} \text{ in}^3} \quad (6.3) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας την ακτίνα, R, με D/2, όπου D η διάμετρος του κοπτικού, η εξίσωση 6.3 γίνεται:

$$SE = 20 \frac{WOB \times N}{D \times ROP}, \text{ σε in}\cdot\text{lb/in}^3 \quad (6.4)$$

όπου το βάρος WOB δίνεται σε lb, η διάμετρος D σε in και ο ρυθμός προχώρησης ROP σε ft/h. Σημειώνεται ότι ο όρος WOB/D εκφράζει πρακτικά το βάρος ανά μονάδα διαμέτρου του κοπτικού άκρου (lb/in ή kg/mm).

Η μορφή του τύπου της ειδικής ενέργειας (SE) είναι τέτοια ώστε να δίνει περισσότερο βάρος στην επίδραση του κοπτικού και όχι στον τύπο του πετρώματος. Η ειδική ενέργεια δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του πετρώματος, αλλά και από τον τύπο και το σχεδιασμό του κοπτικού. Αυτό σημαίνει πως η ειδική ενέργεια επηρεάζεται σε ένα βαθμό και από τις υδραυλικές παραμέτρους που σχετίζονται και με την απόδοση ενός κοπτικού, δηλαδή τα ρευστά διάτρησης. Ανάλογα με τη σύσταση του πολφού που χρησιμοποιείται κάθε φορά, για δεδομένο τύπο κοπτικού και διατρυόμενου γεωλογικού σχηματισμού, η απόδοση του κοπτικού θα είναι είτε μεγαλύτερη, είτε μικρότερη. Ως εκ τούτου, **η επιλογή του διατρητικού πολφού επηρεάζει και την ειδική ενέργεια που δαπανάται για την όρυξη ενός πετρώματος.** Όσο μικρότερη είναι η ειδική ενέργεια που καταναλώνεται για τη διάτρηση, τόσο μικρότερη είναι και η δαπάνη για το γεωτρητικό έργο.

Η εξίσωση 6.4 δείχνει, επίσης, ότι για ένα δεδομένο τύπο κοπτικού που χρησιμοποιείται σε ένα σχηματισμό με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, η ειδική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για οποιοδήποτε συνδυασμό των τιμών WOB, N (βάρος επί του κοπτικού - ταχύτητα περιστροφής). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αλλαγές στο γινόμενο WOB×N οδηγούν συνήθως σε αυξημένες τιμές του ρυθμού προχώρησης (ROP) (υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζεται το κατάλληλο υδραυλικό πρόγραμμα όρυξης της γεώτρησης). Υπό αυτές τις συνθήκες, ο λόγος WN/PR διατηρείται περίπου σταθερός. Ωστόσο, ο ρυθμός προχώρησης (ROP) επηρεάζεται σημαντικά από τις αλλαγές στη τιμή του γινομένου WN και για ένα δεδομένο τύπο κοπτικού υπάρχει θεωρητικά ένας άπειρος αριθμός τιμών του ROP για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών WN. Συνεπώς, η ειδική ενέργεια μετράει άμεσα την απόδοση του κοπτικού σε ένα συγκεκριμένο σχηματισμό και αποτελεί ένδειξη της αλληλενέργειας μεταξύ κοπτικού και πετρώματος. Το γεγονός ότι η ειδική ενέργεια, συγκρινόμενη με το ρυθμό προχώρησης, είναι λιγότερο ευαίσθητη στις αλλαγές του WN, την καθιστά ένα πρακτικό εργαλείο για την επιλογή κοπτικού.

## 6.2 Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A

Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (SE), σύμφωνα με την εξίσωση 6.4, απαιτεί τη γνώση των μεγεθών: βάρος επί του κοπτικού (W), διάμετρος κοπτικού (D), ταχύτητα περιστροφής (N), ρυθμός προχώρησης (ROP). Τα μεγέθη αυτά έχουν απομονωθεί από τους πίνακες των γεωτρητικών δεδομένων (drilling data) και των δεδομένων χρήσης των κοπτικών άκρων (bit records) για τις υπό εξέταση γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A (Πίνακες 5.5 & 5.6, αντίστοιχα). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι μονάδες στο αγγλικό σύστημα. Οι τιμές της ειδικής ενέργειας (SE) που αντιστοιχείται (στους πίνακες) σε ένα βάθος, αφορούν ουσιαστικά στην ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε από το βάθος που σταμάτησε η αμέσως προηγούμενη προχώρηση μέχρι το βάθος που αντιστοιχίζεται στην εν λόγω SE.

Οι πίνακες υπολογισμού της ειδικής ενέργειας (SE) για τις γεωτρήσεις PA-35 και PB-23A είναι οι ακόλουθοι (Πίνακας 6.1 & 6.2). Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός των παρακάτω μεγεθών έγινε σύμφωνα με την εξίσωση 6.4 που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.1.

**Πίνακας 6.1: Γεωτρητικά δεδομένα της γεώτρησης PA-35 και υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (Energean Oil & Gas, 2011 – ίδια επεξεργασία)**

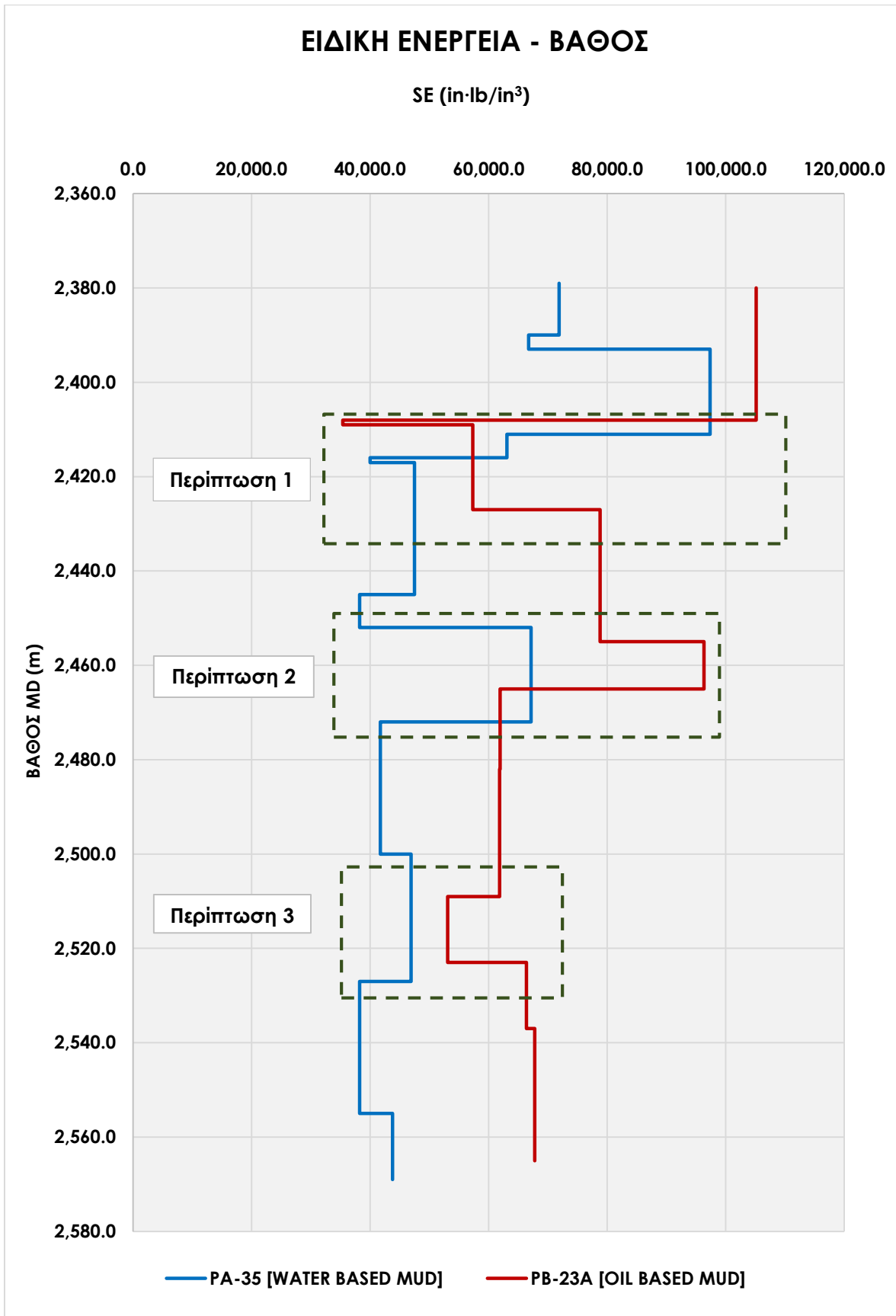
Γεώτρηση PA-35					
Βάθος MD (m)	Διάμετρος κοπτικού, D (in)	Βάρος επί του κοπτικού, WOB (lb)	Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)	Ταχύτητα διάτρησης, R (ft/hr)	Ειδική Ενέργεια, SE (in×lb/in <sup>3</sup> )
2,379.0	8.38	8,818.0	110.0	34.74	<b>66,672.0</b>
2,390.0	8.38	8,818.0	130.0	38.09	<b>71,872.0</b>
2,393.0	8.38	8,818.0	130.0	41.01	<b>66,754.0</b>
2,411.0	8.38	8,818.0	130.0	28.12	<b>97,366.0</b>
2,416.0	8.38	8,818.0	130.0	43.41	<b>63,071.0</b>
2,417.0	8.38	7,716.0	130.0	59.91	<b>39,985.0</b>
2,445.0	8.38	7,716.0	130.0	50.46	<b>47,472.0</b>
2,452.0	8.38	7,716.0	130.0	62.63	<b>38,246.0</b>
2,472.0	8.38	7,716.0	130.0	35.66	<b>67,169.0</b>
2,500.0	8.38	7,716.0	130.0	57.42	<b>41,721.0</b>
2,527.0	8.38	7,716.0	130.0	51.05	<b>46,923.0</b>
2,555.0	8.38	7,716.0	130.0	62.63	<b>38,246.0</b>
2,569.0	8.38	7,716.0	130.0	54.69	<b>43,799.0</b>

**Πίνακας 6.2: Γεωτρητικά δεδομένα της γεώτρησης PB-23A και υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (Schlumberger, 2013 – ίδια επεξεργασία)**

<b>Γεώτρηση PB-23A</b>					
<b>Βάθος MD (m)</b>	<b>Διάμετρος κοπτικού, D (in)</b>	<b>Βάρος επί του κοπτικού, WOB (lb)</b>	<b>Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)</b>	<b>Ταχύτητα προχώρησης, ROP (ft/hr)</b>	<b>Ειδική Ενέργεια, SE (in×lb/in<sup>3</sup>)</b>
2,408.0	8.38	6,001.0	65.0	8.66	<b>10,5150.0</b>
2,409.0	8.38	10,000.0	70.0	47.24	<b>35,383.0</b>
2,427.0	8.38	17,500.0	90.0	65.62	<b>57,320.0</b>
2,455.0	8.38	15,999.0	90.0	43.64	<b>78,801.0</b>
2,465.0	8.38	15,000.0	120.0	44.62	<b>96,337.0</b>
2,482.0	8.38	10,000.0	120.0	46.26	<b>61,947.0</b>
2,509.0	8.38	8,500.0	120.0	39.37	<b>61,870.0</b>
2,523.0	8.38	8,510.0	120.0	45.93	<b>53,092.0</b>
2,537.0	8.38	8,510.0	120.0	36.75	<b>66,365.0</b>
2,565.0	8.38	9,000.0	120.0	38.06	<b>67,768.0</b>
2,592.0	8.38	12,500.0	120.0	26.25	<b>136,477.0</b>

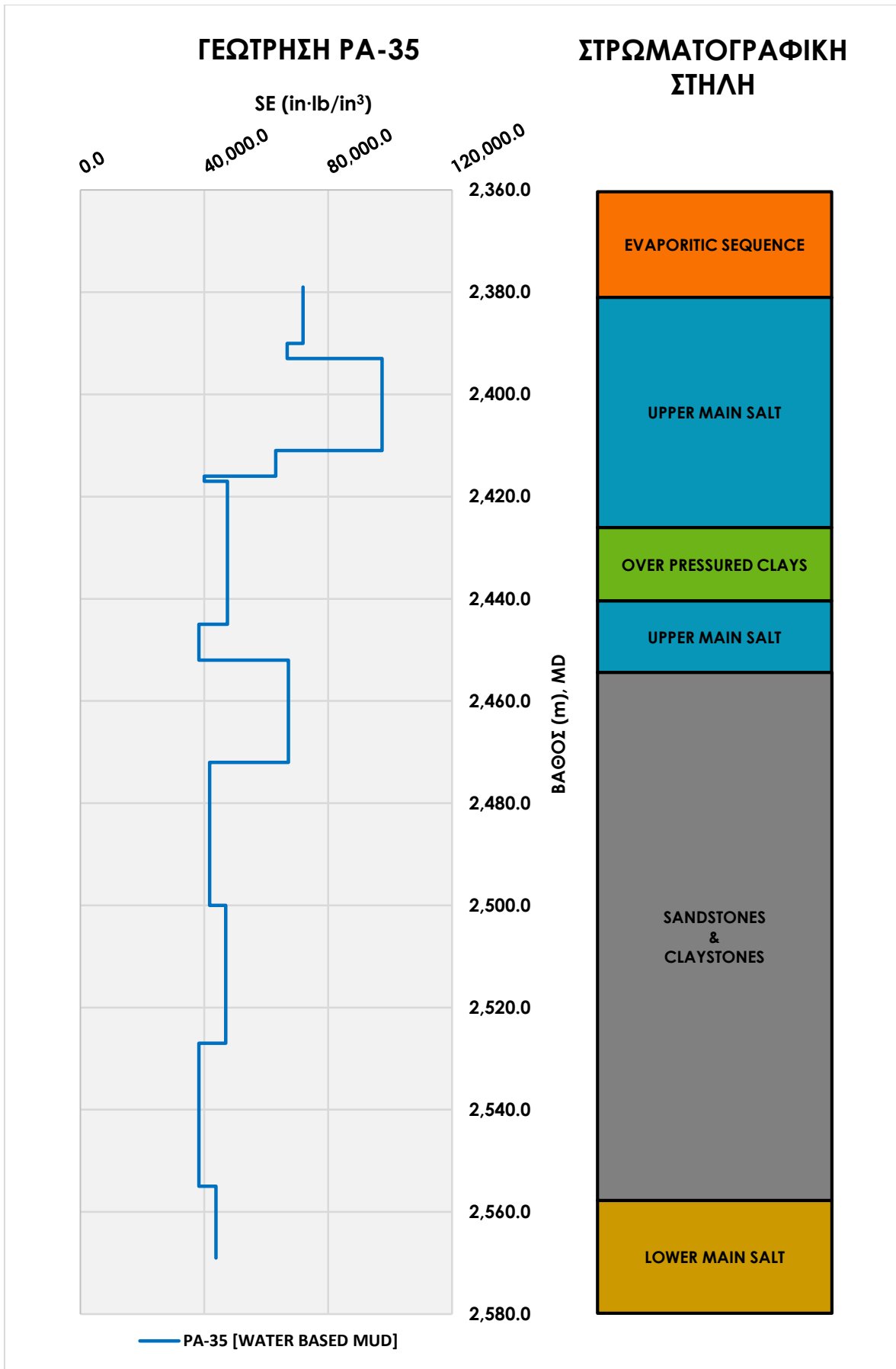
Από τους παραπάνω πίνακες, προκύπτει το διάγραμμα της ειδικής ενέργειας συναρτήσει του βάθους, που παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.1, και για τις δύο γεωτρήσεις PA-35 και PA-23A.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ειδικής ενέργειας συναρτήσει του βάθους, σε αντιπαραβολή με τη στρωματογραφική στήλη (Σχήματα 6.2 & 6.3) και το συνδυαστικό διάγραμμα της ταχύτητας διάτρησης συναρτήσει του βάθους και για τις δύο γεωτρήσεις PA-35 και PB-23A (Σχήμα 6.4).

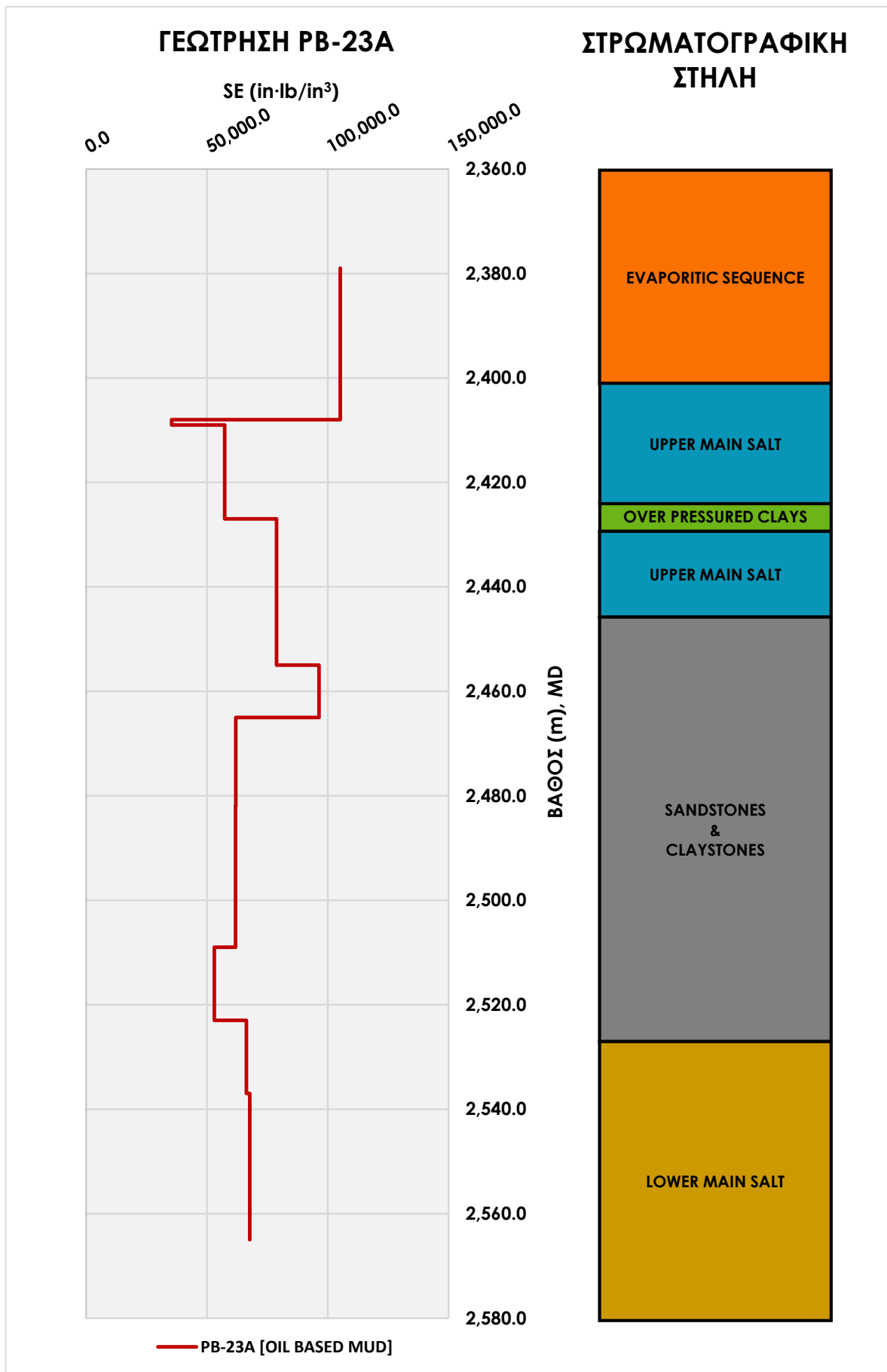


Σχήμα 6.1: Διάγραμμα της ειδικής ενέργειας συναρτήσει του βάθους, για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A.

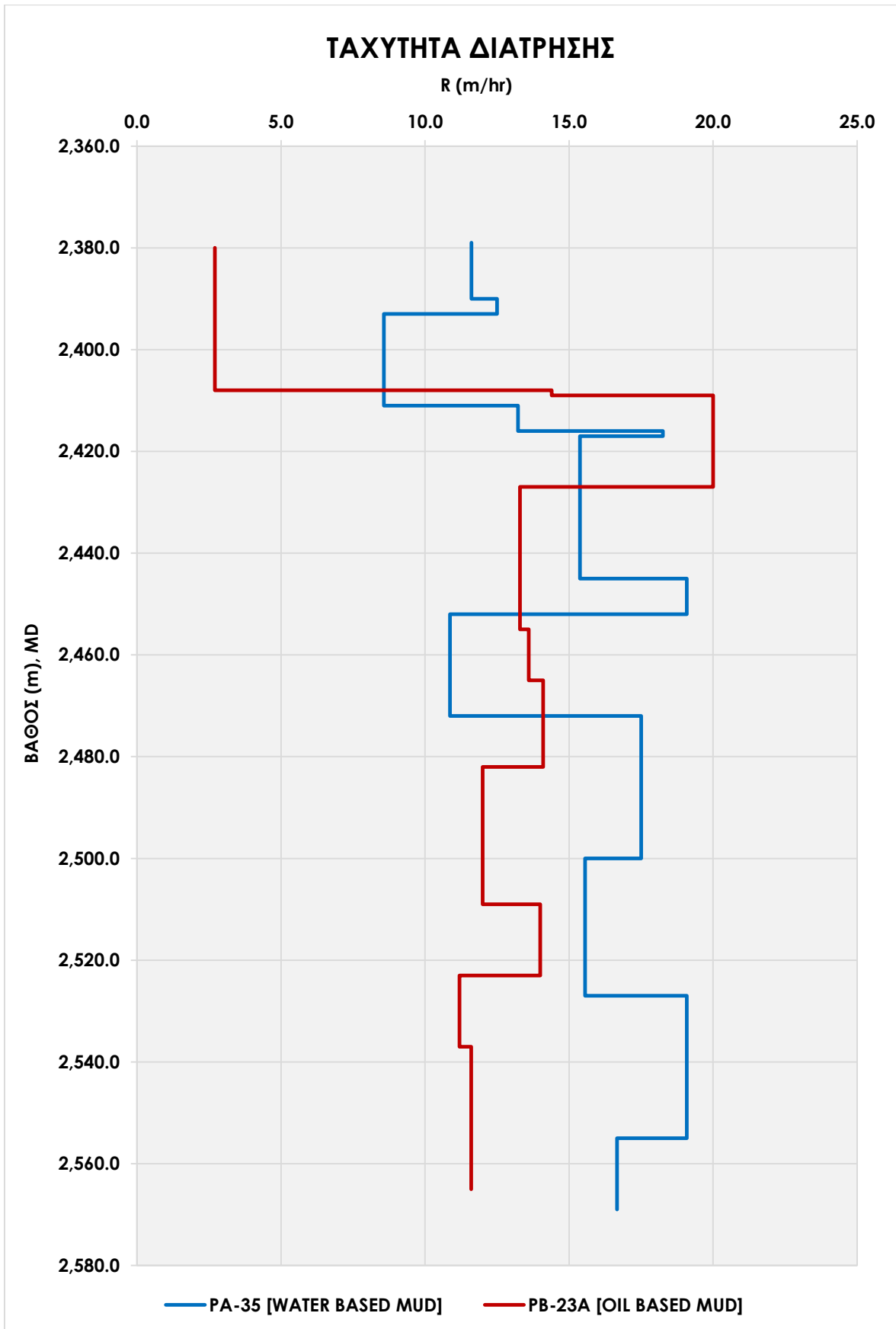




Σχήμα 6.2: Η ειδική ενέργεια σε αντιστοιχία με τους διατρυόμενους σχηματισμούς για την ΡΑ-35



Σχήμα 6.3: Η ειδική ενέργεια σε αντιστοιχία με τους διατρυόμενους σχηματισμούς για την PB-23A



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα ταχύτητας προχώρησης της γεώτρησης συναρτήσει του βάθους, για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A.

### 6.2.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων ειδικής ενέργειας και ταχύτητας διάτρησης

Οι δύο μελετώμενες γεωτρήσεις, έχουν ορυχθεί στην ίδια περιοχή του Πρίνου, και σύμφωνα με τις γεωφυσικές διαγραφίες, διέτρησαν με μικρές αποκλίσεις, τους ίδιους σχηματισμούς. Στην πρώτη γεώτρηση PA-35 το ρευστό διάτρησης ήταν με βάση το νερό (WBM), ενώ στη δεύτερη γεώτρηση PB-23A, χρησιμοποιήθηκε ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (OBM). Σχετικά με τις λοιπές παραμέτρους της διάτρησης σημειώνονται τα εξής:

- Τα κοπτικά MDSi716 και MDi616 που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεώτρηση PA-35 και τη PB-23A, αντίστοιχα, είναι και τα δύο ίδιου τύπου PDC, με παρόμοια διατρητική ικανότητα και όμοια διάμετρο D, δηλαδή 8<sup>3</sup>/<sub>8</sub> in.
- Η ταχύτητα προχώρησης ROP, κυμαίνεται στο ίδιο εύρος τιμών και για τις δύο γεωτρήσεις.
- Όσον αφορά, το βάρος επί του κοπτικού, WOB, δεν ήταν διαθέσιμα τα ακριβή δεδομένα και για τις δύο γεωτρήσεις. Οι τιμές που ελήφθησαν υπόψη στους υπολογισμούς είναι οι μέσοι όροι και δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.
- Η ταχύτητα περιστροφής, N, κυμάνθηκε στις ίδιες τιμές και για τις δύο γεωτρήσεις.
- Και οι δύο πολφοί διάτρησης που χρησιμοποιήθηκαν (WBM και OBM), είχαν όμοιο ειδικό βάρος 1.7 g/cc – 1.75 g/cc.

Από το Σχήμα 6.1, παρατηρούμε ότι η ενέργεια που δαπανήθηκε και για τις δύο γεωτρήσεις, δε διαφέρει σημαντικά, είτε όταν χρησιμοποιήθηκε WBM, είτε όταν χρησιμοποιήθηκε OBM. Συνεπώς, με μία πρώτη μελέτη της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας και με δεδομένο ότι και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και οι παράμετροι διάτρησης, ήταν πρακτικά ίδιες, δε μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για το ποιος τύπος λάσπης είναι αποδοτικότερος. Ωστόσο, αν παρατηρήσουμε τα επιμέρους διαγράμματα της ειδικής ενέργειας σε αντιπαραβολή με την εκάστοτε στρωματογραφία (Σχήματα 6.2 & 6.3), διακρίνουμε ότι σε συγκεκριμένους σχηματισμούς και αντίστοιχο βάθος, η ειδική ενέργεια φαίνεται να διαφοροποιείται μεταξύ των δύο γεωτρήσεων, δηλαδή με τη χρήση WBM ή OBM. Πιο συγκεκριμένα:

- Όταν ορύσσεται το ανώτερο κύριο στρώμα αλάτων (Upper Main Salt – UMS) με χρήση WBM (γεώτρηση PA-35), παρατηρούμε αύξηση της ειδικής ενέργειας (σε βάθος: 2,390.0 – 2,410.0 m MD), σε αντίθεση με τη χρήση OBM (γεώτρηση PB-23A) (σε βάθος: 2,405.0 – 2,420.0 m MD), όπου η ειδική ενέργεια παρουσιάζει αρκετά μικρότερες τιμές (**Περίπτωση 1, Σχήμα 6.1**).

- Εντός του ανώτερου κύριου στρώματος αλάτων, παρεμβάλλεται ένα μικρότερο στρώμα υπερπιεσμένων αργίλων (Over-Pressured Clays – OPC). Κατά την είσοδο της PA-35 εντός αυτού του σχηματισμού και κάποια μέτρα πριν (σε βάθος: 2,420.0 – 2,440.0 m MD), η ειδική ενέργεια μειώνεται και μάλιστα σημαντικά σε σχέση με το προηγούμενο στρώμα UMS. Όταν η PB-23A εισέρχεται σε αυτό το σχηματισμό με χρήση OBM (σε βάθος 2,425.0 – 2,430.0 m MD), παρατηρούμε αύξηση της ειδικής ενέργειας (**Περίπτωση 1&2, Σχήμα 6.1**).
- Αξιοσημείωτη είναι και η συμπεριφορά των δύο ρευστών διάτρησης στο ακόλουθο στρώμα των ψαμμιτών και αργίλων (Sandstones & Claystones). Παρόλο που στην οροφή του στρώματος, στην PA-35 παρατηρείται παροδική αύξηση της ειδικής ενέργειας (σε βάθος 2,557.0 – 2,565.0 m MD), κατά τη διάτρηση του στρώματος η τιμή της ειδικής ενέργειας μειώνεται και πάλι. Αντίστοιχη είναι και η εξέλιξη των τιμών της ειδικής ενέργειας για τη γεώτρηση PB-23A στο ίδιο βάθος, με χρήση OBM, με τη διαφορά ότι η παροδική αύξηση της ειδικής ενέργειας είναι εδώ αρκετά μεγαλύτερη (**Περίπτωση 3, Σχήμα 6.1**).

Στη συνέχεια, από το διάγραμμα της ταχύτητας προχώρησης της γεώτρησης συναρτήσει του βάθους (Σχήμα 6.4), παρατηρείται ότι η ταχύτητα προχώρησης της PA-35 είναι γενικά ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή της PB-23A. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει γιατί η ταχύτητα προχώρησης είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής ενέργειας. Έτσι, όλες οι μεταβολές της ειδικής ενέργειας και οι παράγοντες που την επηρεάζουν, στην πράξη αποτυπώνονται μέσω του ρυθμού προχώρησης του κοπτικού και δίνουν μία πρώτη εικόνα για τη διατρησιμότητα του σχηματισμού. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, αυτές οι μικρές διαφορές, είτε της ειδικής ενέργειας, είτε της ταχύτητας προχώρησης, δε μπορούν να μας υποδείξουν ποιος τύπος λάσπης είναι αποδοτικότερος για τη συγκεκριμένη περιοχή.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, μπορούμε να διακρίνουμε αρκετές αυξομειώσεις στις τιμές της παραμέτρου που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση. Αυτή η παράμετρος μπορεί να είναι είτε η ειδική ενέργεια (Σχήμα 6.1), είτε η ταχύτητα προχώρησης (Σχήμα 6.4). Αυτές οι συχνές μεταβολές των τιμών υποδεικνύουν πως οι γεωτρήσεις στα συγκεκριμένα βάρη αντιμετώπισαν αλληλουχία προβλημάτων και επομένως παύση των εργασιών έως ότου βρεθεί λύση. Για να διερευνηθεί περαιτέρω το ζήτημα αυτό, αξίζει να εξεταστούν οι χρόνοι διάτρησης για κάθε γεώτρηση.

### 6.3 Οι χρόνοι διάτρησης των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τους χρόνους διάτρησης των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A, στα αντίστοιχα βάθη.

Πίνακας 6.3: Χρόνοι διάτρησης της γεώτρησης PA-35 (Energean Oil & Gas, 2011 - ίδια επεξεργασία)

Γεώτρηση PA-35							
Ημ/μία	Βάθος (m), MD		Μήκος διάτρησης (m)	Ώρα		Χρόνος διάτρησης (h:m:s)	Νεκρός χρόνος (h:m:s)
	Από	Μέχρι		Από	Μέχρι		
22/1	2,393.0	2,411.0	18.0	4:37 AM	6:10 AM	01:33:00	-
	2,411.0	2,416.0	5.0	6:10 AM	6:34 AM	00:24:00	00:00:00
	2,416.0	2,417.0	1.0	7:06 AM	7:13 AM	00:07:00	00:32.00
	2,417.0	2,445.0	28.0	7:45 AM	9:52 AM	02:07:00	00:32.00
	2,445.0	2,452.0	7.0	10:20 AM	10:43 AM	00:23:00	00:28.00
	2,452.0	2,472.0	20.0	11:00 AM	12:18 PM	01:18:00	00:17.00
	2,472.0	2,500.0	28.0	12:55 PM	2:23 PM	01:28:00	00:37.00
	2,500.0	2,527.0	27.0	2:23 PM	4:52 PM	02:29:00	00:00:00
	2,527.0	2,555.0	28.0	5:32 PM	7:08 PM	01:35:00	00:40.00
	2,555.0	2,569.0	14.0	8:16 PM	9:10 PM	00:54:00	01:08.00
	2,569.0	2,583.0	14.0	9:28 PM	10:12 PM	00:44:00	00:18.00
	2,583.0	2,603.0	20.0	10:48 PM	12:00 AM	01:12:00	00:36.00
<b>Σύνολο:</b>			<b>210.0</b>			<b>14:14:00 (14.23 hrs)</b>	<b>05:08:00 (5.13 hrs)</b>

Πίνακας 6.4: Χρόνοι διάτρησης της γεώτρησης PA-23A (Schlumberger, 2013 - ίδια επεξεργασία)

Γεώτρηση PB-23A							
Ημ/μία	Βάθος (m), MD		Μήκος διάτρησης (m)	Ώρα		Χρόνος διάτρησης (h:m:s)	Νεκρός χρόνος (h:m:s)
	Από	Μέχρι		Από	Μέχρι		
4/8	2,409.0	2,427.0	18.0	6:35 AM	7:50 AM	01:15:00	-
	2,427.0	2,455.0	28.0	3:50 PM	5:40 PM	01:50:00	8:00:00
	2,455.0	2,465.0	10.0	6:05 PM	6:50 PM	00:45:00	0:25:00
	2,465.0	2,482.0	17.0	7:00 PM	8:15 PM	01:15:00	0:10:00
	2,482.0	2,509.0	27.0	9:15 PM	11:10 PM	01:55:00	1:00:00
5/8	2,509.0	2,515.0	6.0	12:00 AM	12:30 AM	00:30:00	00:00:00
	2,515.0	2,515.0	0.0	12:30 AM	3:30 AM	00:00:00	00:00:00
	2,515.0	2,523.0	8.0	5:25 AM	6:10 AM	00:45:00	2:25:00
	2,523.0	2,537.0	14.0	6:30 AM	7:30 AM	01:00:00	0:20:00

Γεώτρηση PB-23A							
Ημ/νία	Βάθος (m), MD		Μήκος διάτρησης (m)	Ώρα		Χρόνος διάτρησης (h:m:s)	Νεκρός χρόνος (h:m:s)
	Από	Μέχρι		Από	Μέχρι		
	2,537.0	2,565.0	28.0	8:30 AM	10:30 AM	02:30:00	1:00:00
	2,565.0	2,592.0	27.0	1:00 PM	3:20 PM	02:20:00	2:30:00
	2,592.0	2,594.0	2.0	3:45 PM	4:00 PM	00:15:00	0:25:00
<b>Σύνολο:</b>			<b>185.0</b>			<b>14:20:00 (14.33 hrs)</b>	<b>16:15:00 (16.25 hrs)</b>

### 6.3.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων των χρόνων διάτρησης

Η πρώτη εικόνα από τους χρόνους διάτρησης είναι ότι και για τις δύο γεωτρήσεις απαιτήθηκαν οι ίδιες ώρες λειτουργίας του γεωτρήσανου, δηλαδή 14 ώρες και 14 λεπτά για τη γεώτρηση PA-35 και 14 ώρες και 20 λεπτά για τη γεώτρηση PB-23A. Όμως, εκεί που παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση, σύμφωνα με τους Πίνακες 6.3 & 6.4, είναι οι νεκροί χρόνοι κατά τη διάτρηση. Για τη γεώτρηση PA-35, οι νεκροί χρόνοι διάτρησης αντιστοιχούν σε 5 ώρες & 8 λεπτά, ενώ για τη γεώτρηση PB-23A ο αντίστοιχος χρόνος είναι 16 ώρες & 15 λεπτά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διάτρηση της γεώτρησης PB-23A να απαιτεί το διπλάσιο χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών της (2 ημέρες) σε σχέση με την PA-35.

Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση της Energean Oil & Gas, οι νεκροί χρόνοι κατά τη διάτρηση της PB-23A, οφείλονται σε δυσλειτουργίες του μηχανολογικού εξοπλισμού (βλάβη αντλιών εισπίεσης του πολφού, υπερθέρμανση των κινητήρων, βλάβη στα κόσκινα καθαρισμού του πολφού), χωρίς ωστόσο να γίνεται σαφής η αιτία που τις προκάλεσε. Ως εκ τούτου, το μόνο ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι πιθανώς να συσχετίζονται με τη χρήση πολφού με βάση το πετρέλαιο, καθώς μόνο με τη χρήση του εμφανίστηκαν αυτές οι δυσλειτουργίες. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι γνωστό αν ο μηχανολογικός εξοπλισμός ήταν παλαιός ώστε οι βλάβες να αποδοθούν σε φθορά του λόγω κόπωσης ή ακόμα και σε συνδυασμό όλων των παραπάνω.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

# Οικονομική Ανάλυση και Προσδιορισμός του Κόστους των Ρευστών Διάτρησης για τις Γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A

---

### 7.1 Εισαγωγή

Τα ρευστά διάτρησης αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του κόστους μιας γεώτρησης. Το κόστος τους εξαρτάται από τον τύπο του ρευστού, τις ιδιότητες που πρέπει να έχει, αλλά και τις ποσότητες (όγκο) που απαιτούνται, ανάλογα με τα γεωμετρικά στοιχεία της γεώτρησης. Είναι σαφές ότι και οι ποσότητες των πρόσθετων συστατικών που απαιτεί ένας πολφός ώστε να έχει τις επιθυμητές ιδιότητες, είναι μια σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Τα ρευστά με βάση το πετρέλαιο είναι γενικώς ακριβότερα αυτών με βάση το νερό.

Η οικονομική ανάλυση των ρευστών διάτρησης, είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους τους. Ο παραδοσιακός τρόπος υπολογισμού του κόστους των ρευστών διάτρησης, από τους προμηθευτές, σχετίζεται μόνο με την αξία των συστατικών και το κόστος μεταφοράς τους (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, έπειτα από την ανάλυση των χρόνων διάτρησης των γεωτρήσεων PA-35 και PB-23A, παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους νεκρούς (μη παραγωγικούς) χρόνους διάτρησης καθεμιάς γεώτρησης. Οι αιτίες αυτών των καθυστερήσεων, όπως αναφέρθηκε, μπορεί να οφείλεται είτε σε αστοχία επιλογής κατάλληλου διατρητικού πολφού, είτε σε βλάβη του μηχανολογικού εξοπλισμού λόγω κόπωσης, ή ακόμα σε συνδυασμό και των δύο. Το μόνο βέβαιο είναι πως όταν παρουσιάζονται μεγάλοι νεκροί χρόνοι κατά την όρυξη μιας γεώτρησης, το κόστος για τις εταιρείες παραγωγής είναι τεράστιο όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

Στόχος της παρούσας οικονομικής ανάλυσης, είναι να επιχειρηθεί ένας συνολικός υπολογισμός του κόστους των ρευστών διάτρησης, μετατρέποντας την παράμετρο «χρόνος» σε οικονομικό μέγεθος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία που ονομάζεται Ανάλυση Κόστους Συστήματος (System Cost Analysis), η οποία και παρουσιάζεται στη συνέχεια.



## **7.2 Ανάλυση κόστους συστήματος (system cost analysis) για τα ρευστά διάτρησης**

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη ποσοτικοποίησης των παραμέτρων κόστους για την όρυξη μιας γεώτρησης έχει αυξηθεί δραματικά, ιδιαίτερα όταν η γεώτρηση ορύσσεται στη θάλασσα ή σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημοσίευση αρκετών μελετών που επικεντρώνουν στην ποσοτικοποίηση του κόστους της όρυξης προκειμένου τόσο για να γίνει αντιληπτό ποιες παράμετροι έχουν βαρύνοντα ρόλο, αλλά και για να διερευνηθεί που υπάρχει περιθώριο εξοικονόμησης (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

Ενώ τα ρευστά διάτρησης αυτά καθαυτά υπό κανονικές συνθήκες αφορούν σε πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους όρυξης μιας γεώτρησης (< 10%), ωστόσο συνδέονται άμεσα με ένα μεγάλο αριθμό λοιπών παραμέτρων κόστους μιας γεώτρησης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις όπου παρατηρείται αστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης και όπου η επιλογή του κατάλληλου ρευστού διάτρησης μπορεί να εξαλείψει σχετικά προβλήματα ή, αντίθετα, να οδηγήσει σε μεγάλες υπερβάσεις κόστους. Ομοίως, ακατάλληλος χειρισμός του εξοπλισμού διαχείρισης θρυμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα κατά την όρυξη και άσκοπα υψηλό σχετικό κόστος (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

Η ανάλυση κόστους συστήματος που ακολουθείται εδώ, εκτός από το κόστος των υλικών που συνιστούν τη λάσπη διάτρησης, περιλαμβάνει επίσης τη θεώρηση των προβλημάτων που σχετίζονται με τυχόν κακή απόδοση των ρευστών διάτρησης, αλλά και των ωφελειών που απορρέουν από τα κατάλληλα ρευστά διάτρησης στην ταχύτερη όρυξη μιας γεώτρησης (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

## **7.3 Τα οφέλη μιας ανάλυσης κόστους συστήματος στο γεωτρητικό έργο**

Οι αναλύσεις κόστους συστήματος μπορούν να γίνουν για οποιαδήποτε γεώτρηση, αλλά χρησιμοποιούνται καλύτερα στις περιπτώσεις όπου παρουσιάζονται προβλήματα κατά τη διάτρηση και όπου έχει προηγηθεί η όρυξη άλλων γεωτρήσεων στην ίδια περιοχή. Προκειμένου η ανάλυση να είναι αξιόπιστη, τα στοιχεία που περιλαμβάνει πρέπει να είναι επίκαιρα (το πολύ 2 ετών), καθώς τα τεχνολογικά μέσα εξελίσσονται συνεχώς, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος της γεώτρησης (νέα κοπτικά άκρα, MWD, αποδοτικότεροι πολφοί διάτρησης) (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001). Επιπλέον, τα στοιχεία πρέπει να προέρχονται από γεωτρήσεις με παρόμοια τροχιά, που έχουν διατηρήσει παρόμοιους γεωλογικούς σχηματισμούς, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ διάφορων μεταβλητών παραγόντων (είτε μηχανικών, είτε υδραυλικών), καθώς η τροχιά έχει βαρύνουσα σημασία για το κόστος της γεώτρησης.

Η ανάλυση κόστους συστήματος για τα ρευστά διάτρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρωτίστως στις ακόλουθες εφαρμογές:

- **Συγκριτική προτυποποίηση (benchmarking):** Κατά την όρυξη εντός ασταθών σχηματισμών συχνά παρουσιάζονται προβλήματα ευστάθειας των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούνται διάφοροι πολφοί που, ανάλογα με τη σύστασή τους, παρέχουν διαφορετικό βαθμό απόδοσης. Η ανάλυση κόστους συστήματος παρέχει τα μέσα ώστε να προσδιοριστεί ποιο ρευστό διάτρησης, σχεδιασμός σωλήνωσης κ.λπ. είναι πιο αποδοτικό στη χρήση του. Επιπλέον, η συγκριτική προτυποποίηση παρέχει τιμή κόστους για προβλήματα που παρουσιάζονται με ιδιαίτερη οξύτητα κατά την όρυξη. Σε αυτό το στάδιο η ανάλυση κόστους-κινδύνου (risk-cost analysis) παρέχει ένα εξαιρετικό εργαλείο για την επιλογή του πολφού διάτρησης και του σχεδιασμού της σωλήνωσης με την καλύτερη σχέση απόδοσης-κόστους για την όρυξη δύσκολων γεωτρήσεων, υψηλού κόστους (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).
- **Αποτίμηση των αλλαγών (measuring change):** Η συγκριτική προτυποποίηση αποτελεί από μόνη της ένα καλό εργαλείο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης μεθόδου σύμφωνα με την οποία θα ορυχθεί μια γεώτρηση σε μια περιοχή σήμερα. Τις περισσότερες φορές σε «δύσκολες» περιοχές, η συγκριτική προτυποποίηση παρέχει επίσης ένα εργαλείο για να καταδειχτεί που πρέπει να γίνουν βελτιώσεις και, στη συνέχεια, παρέχει μια μέθοδο για την αποτίμηση αυτών των αλλαγών. Η επιπρόσθετη αυτή χρησιμότητα μιας εξειδικευμένης ανάλυσης κόστους συστήματος αναδεικνύεται όταν εκτελείται σε συνεργασία με τον πάροχο του ρευστού διάτρησης προκειμένου να μειωθεί το συνολικό κόστος της γεώτρησης, μέσω χρήσης αποδοτικών τεχνολογιών ρευστών διάτρησης και αντίστοιχων πρακτικών. Η αποτίμηση των αλλαγών παρέχει μια μέθοδο για την επίτευξη αυτού του στόχου με ποσοτικά οργανωμένο τρόπο.
- **Αποτίμηση της παραγωγής (production measurement):** Τα ρευστά διάτρησης είναι τα πρώτα ρευστά που έρχονται σε επαφή με το αδιατάρακτο πέτρωμα του ταμιευτήρα και συχνά έχουν έντονη επίπτωση στην υποβάθμιση/απομείωση του σχηματισμού παραγωγής (formation impairment) σε μια γεώτρηση/κοίτασμα. Η ανάλυση κόστους συστήματος μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει, εκτός από το κόστος των ρευστών διάτρησης, δεδομένα παραγωγής του κοιτάσματος. Αυτός ο τύπος ανάλυσης είναι ιδανικός για κοιτάσματα όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη ρευστών διάτρησης ή/και έχουν ορυχθεί ή πρόκειται να ορυχθούν και κατακόρυφες και οριζόντιες γεωτρήσεις (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

## 7.4 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος για ρευστά διάτρησης - Γενικά

Σε γενικές γραμμές, μια Ανάλυση Κόστους Συστήματος (ΑΚΣ) (System Cost Analysis - SCA) αποδίδει μια βασική τιμή (fundamental value), η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο οικονομικό κόστος, σε όλα τα γεγονότα (incidences) σε μια γεώτρηση που συσχετίζονται με τις επιπτώσεις των ρευστών διάτρησης. Η ανάλυση προσπαθεί να αφαιρέσει τις «ασαφείς» ποιοτικές εκτιμήσεις που συχνά διατυπώνονται κατά την όρυξη μιας γεώτρησης. Εκτιμήσεις όπως: «παρά τη σκληρή προσπάθεια, απρόβλεπτες καταστάσεις, κακή τύχη κ.λπ.». Αν και θα υπάρχει πάντα ανάγκη για ορισμένες ποιοτικές εκτιμήσεις (qualitative measurement), οι οποίες αντικατοπτρίζουν την εμπιστοσύνη και την ειλικρίνεια που πρέπει να επιδεικνύεται κατά την άσκηση του πολυεπιστημονικού έργου της όρυξης μιας γεώτρησης, η ΑΚΣ παρέχει ένα εργαλείο ποσοτικών μετρήσεων (quantitative measurement). Αυτό το εργαλείο μπορεί να μετράει πόσο καλά ένας διαχειριστής ενός πετρελαϊκού πεδίου κι ένας εργολάβος όρυξης γεωτρήσεων επιτελούν το έργο τους (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

Η γενική μορφή της εξίσωσης ΑΚΣ για ρευστά διάτρησης είναι η ακόλουθη:

$$\text{ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ} = \text{ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΩΝ} + \text{ΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ} \quad (7.1)$$

Το κόστος των υλικών προσδιορίζεται εύκολα και περιλαμβάνει τα κόστη όλων των υλικών που συναρτηρίζουν τα ρευστά διάτρησης για μια γεώτρηση, συν τα συναφή αυτών κόστη για τη φόρτωση, τη μεταφορά, τις υπηρεσίες μηχανικού κ.λπ. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται από τις εταιρείες ρευστών διάτρησης κατά την εκτίμηση του κόστους για ένα ρευστό διάτρησης περιορίζονται σε αυτό το κόστος των υλικών και μόνο.

Ο μη παραγωγικός χρόνος (unproductive or problem time) για τα ρευστά διάτρησης περιλαμβάνει οποιαδήποτε διακοπή κατά την όρυξη μιας γεώτρησης που έχει να κάνει με τα ρευστά διάτρησης. Ένας κατάλογος τέτοιων εργασιών ή/και συμβάντων παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα 7.1. Η διεύρυνση και ο καθαρισμός της διατομής της γεώτρησης (reaming and cleaning), η απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης (lost circulation), η παγίδευση της διατρητικής στήλης (stuck pipe) και τα συσσωματώματα λάσπης και θρυμμάτων (mud rings) είναι ορισμένες μόνο από τις εργασίες/συμβάντα που συσχετίζονται με το μη παραγωγικό χρόνο. Η οικονομική τιμή για το μη παραγωγικό χρόνο καθορίζεται από το κόστος του γεωτρώπανου (rig cost), το οποίο συνήθως υπολογίζεται σε ωριαία βάση.

Στην πράξη, το κόστος του γεωτρώπανου συνήθως συμφωνείται μεταξύ του διαχειριστή της γεώτρησης και της εταιρείας προμήθειας των ρευστών διάτρησης πριν από την έναρξη της ανάλυσης. Οποιοσδήποτε επιπρόσθετες εργασίες οι οποίες θα περιληφθούν στο κόστος του μη παραγωγικού χρόνου επίσης συμφωνούνται προκαταβολικά από τα ενδιαφερόμενα μέρη.

**Πίνακας 7.1: Εργασίες και συμβάντα κατά την όρυξη μιας γεώτρησης που λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση κόστους συστήματος ρευστών διάτρησης (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001 – ίδια επεξεργασία)**

<b>Εργασία/Συμβάν</b>	<b>Περιγραφή</b>
Απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης (lost circulation)	Κόστη υλικών και σχετικοί χρόνοι (για το γεωτρύπανο και άλλα μέρη του εξοπλισμού, όπως, π.χ., μεταφορά νερού)
Διεύρυνση διατομής γεώτρησης και καθαρισμός (reaming and cleaning)	Διεύρυνση ή/και καθαρισμός γεώτρησης κατά την καθέλκυση της διατρητικής στήλης εντός της γεώτρησης (run in hole - rih) ή ανέλκυση αυτής σε μη σωληνωμένο τμήμα (pulling out open hole – pooh) λόγω κακών συνθηκών εντός της γεώτρησης. Δεν περιλαμβάνει συνήθως διεύρυνση λόγω περιορισμένης διατομής ως αποτέλεσμα χρήσης ενδογεωτρητικού κινητήρα
Προβλήματα κατά την εκτέλεση διαγραφιών εντός της γεώτρησης (logs bridging)	Λόγω κακών συνθηκών εντός της γεώτρησης. Περιλαμβάνει το χρόνο διεύρυνσης της γεώτρησης ώστε ο εξοπλισμός των διαγραφιών να φτάσει ως τον πυθμένα της γεώτρησης, το νεκρό χρόνο χειρισμού του εξοπλισμού των διαγραφιών, τον καθαρισμό της γεώτρησης και την επανεισαγωγή του εξοπλισμού των διαγραφιών εντός της γεώτρησης
Σωλήνωση	Ισχύει ότι αναφέρθηκε παραπάνω σε σχέση με τις διαγραφίες
Πλευρική όρυξη/Επανόρυξη (sidetrack/redrill)	Περιλαμβάνει τους χρόνους και τα κόστη που παρουσιάζονται από τη στιγμή που τοποθετούνται τα πώματα τσιμέντωσης (running cement plugs) μέχρι την όρυξη της γεώτρησης ως το βάθος-στόχο. Δεν περιλαμβάνεται πλευρική όρυξη λόγω γεωλογίας.
Παγίδευση διατρητικής στήλης (stuck pipe)	Περιλαμβάνει τα υλικά/χρόνους λόγω μηχανικής παγίδευσης της διατρητικής στήλης. Μπορεί να περιλαμβάνει ή να μην περιλαμβάνει προβλήματα λόγω διαφορικής παγίδευσης της διατρητικής στήλης (differentially stuck pipe)
Λατύπες/κροκάλες (gravel/boulders)	Κόστη υλικών και χρόνος
Συσσωματώματα λάσπης & θρυμμάτων (mud rings)	Κόστη υλικών και χρόνος
Αιφνίδιες εισροές ρευστών από το σχηματισμό στη γεώτρηση (kicks)	Κόστη υλικών και χρόνος
Επιπρόσθετα κόστη	Περιλαμβάνει εργασίες όπως τσιμέντωση, διάθεση ρευστών διάτρησης και θρυμμάτων όρυξης, μεταφορά, εργασίες μηχανικού (engineering) κ.λπ.
Ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης (rate of penetration)	Ώρες διάτρησης με ένα κοπτικό άκρο συγκεκριμένου μήκους γεώτρησης. Μπορεί να περιλαμβάνει και τους νεκρούς χρόνους
Συγκρίσεις παραγωγής (production comparisons)	Ενσωματώνει τα θέματα υποβάθμισης του ταμιευτήρα (formation damage). Αποδίδει καλύτερα στις περιπτώσεις απλής στρωματογραφίας (large sample sets) και σχετικά ομοιογενών ταμιευτήρων (fairly homogenous reservoirs)

### 7.4.1 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος – Σύνθετη μορφή

Η ποσοτική μέτρηση της απόδοσης ενός ρευστού διάτρησης είναι μόνο ένα βήμα κατά τη διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων του ρευστού διάτρησης στην απόδοση και το συνολικό κόστος της γεώτρησης. Στην παραπάνω απλή εξίσωση 7.1 Ανάλυσης Κόστους Συστήματος μπορούν να περιληφθούν τρεις επιπλέον όροι, ως εξής: Πρώτον, τα ρευστά διάτρησης έχουν σαφή επίπτωση στο χρόνο που απαιτείται για την όρυξη ενός τμήματος μιας γεώτρησης, έτσι όπως καταγράφεται στο ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης (ROP). Ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την πυκνότητα, το ιξώδες και τις ιδιότητες ελέγχου της διήθησης (filtration control properties). Δεύτερον, το κόστος διαχείρισης των θρυμμάτων, αλλά και το κόστος απόθεσής τους (solids control and disposal costs) συσχετίζονται άμεσα με τον τύπο του ρευστού διάτρησης, ειδικά σε θαλάσσιες γεωτρήσεις ή σε γεωτρήσεις σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Τρίτον, η παραγωγή υδρογονανθράκων από γεωτρήσεις και κοιτάσματα μπορεί επίσης να περιληφθεί στην περίπτωση που η υποβάθμιση/απομείωση του ταμιευτήρα (από τα ρευστά διάτρησης (formation impairment) είναι πιθανή (Warren, Baltoiu, & Q' Max Solutions Inc, 2001).

Έτσι, η εξίσωση 7.1 Ανάλυσης Κόστους Συστήματος λαμβάνει την εξής σύνθετη μορφή:

$$\begin{aligned} \text{ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ} &= \\ &= \text{ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΩΝ} \\ &+ (\text{ΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ} \times \text{ΩΡΙΑΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟΥ}) \\ &+ \text{ΡΥΘΜΟΣ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ} \\ &+ \text{ΚΟΣΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΘΡΥΜΜΑΤΩΝ} \\ &+ \text{ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ} \quad (7.2) \end{aligned}$$

Για παράδειγμα, η σύγκριση ρευστών διάτρησης με βάση το νερό και με βάση το πετρέλαιο, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος των υλικών, θα δείχνει σε κάθε περίπτωση ότι τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό κοστίζουν λιγότερο. Η ΑΚΣ μπορεί ωστόσο να δώσει διαφορετική απάντηση, εφόσον συνυπολογιστούν ο μη παραγωγικός χρόνος, ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης, τα κόστη διαχείρισης/διάθεσης θρυμμάτων και τα δεδομένα παραγωγής της γεώτρησης (ή του κοιτάσματος).

### 7.5 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους συστήματος για τα ρευστά διάτρησης στις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A

Μια αρκετά αντιπροσωπευτική εκτίμηση των όσων αναφέρθηκαν πιο πάνω, δίνεται από την ακόλουθη απλή σχέση:

$$\text{ΣΚΠ} = \text{ΚΥ} + \text{ΚΜ} + \text{ΩΚΓ} \times (\text{ΝΧΔ} + \text{ΩΧΔ}) \quad (7.3)$$

Όπου:

- **ΣΚΠ**, το συνολικό κόστος του πολφού διάτρησης (σε €),
- **ΚΥ**, το κόστος των υλικών για τη σύσταση του πολφού (σε €),
- **ΚΜ**, το κόστος της μεταφοράς των υλικών (σε €),
- **ΩΚΓ**, το ωριαίο κόστος λειτουργίας του γεωτρύπανου (σε €/hrs).
- **ΝΧΔ**, οι νεκροί (μη παραγωγικοί) χρόνοι διάτρησης (σε hrs),
- **ΩΧΔ**, οι ωφέλιμοι χρόνοι διάτρησης (πραγματικοί χρόνοι προχώρησης της γεώτρησης, σε hrs).

## 7.6 Τιμές παραμέτρων κόστους για τα ρευστά διάτρησης στις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A

Ο χρόνος που απαιτείται για την όρυξη μιας γεώτρησης, έχει σημαντική επίδραση σε πολλές από τις παραμέτρους που διαμορφώνουν το κόστος όπως: στο μηχανολογικό εξοπλισμό και την εγκατάσταση του γεωτρύπανου, το μίσθωμα, τις υποστηρικτικές υπηρεσίες κ.λπ. Η επίδραση στο συνολικό κόστος, εξαρτάται από το ημερήσιο κόστος του γεωτρύπανου, που **στην περίπτωση του Πρίνου, σύμφωνα με τις ημερήσιες αναφορές διάτρησης (daily drilling reports) εκτιμάται περίπου σε 230,000.0 €/ημέρα.**

Στους Πίνακες 7.2 & 7.3 παρουσιάζονται τα κόστη των ρευστών διάτρησης για τις γεωτρήσεις PA-35 και PB-23A, αντίστοιχα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας σχετικών δεδομένων, έγιναν κάποιες παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα συστατικά του πολφού διάτρησης (WBM) της γεώτρησης PA-35 έχουν υπολογιστεί με βάση τα συστατικά του πολφού διάτρησης της γεώτρησης PB-37, για το αντίστοιχο τμήμα σωλήνωσης των 8.5 in. Αυτό συνέβη γιατί οι δύο αυτές γεωτρήσεις, ορύχθηκαν με παρόμοιο πολφό διάτρησης, μέσα σε παρόμοιους γεωλογικούς σχηματισμούς.
- Ενώ ήταν διαθέσιμα τα συστατικά του πολφού διάτρησης (OBM) για τη γεώτρηση PB-23A, δεν ήταν διαθέσιμα τα αντίστοιχα κόστη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεσή του. Γι' αυτό το λόγο, όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί έγιναν με βάση το κοστολόγιο του πολφού με βάση το πετρέλαιο της γεώτρησης PB-37, για το αντίστοιχο τμήμα σωλήνωσης των 8.5 in.

**Όλες οι ποσότητες των υλικών προσαρμόστηκαν ώστε να υπολογιστεί το κόστος για το μελετούμενο μήκος της κάθε γεώτρησης και όχι για το συνολικό μήκος της.**

Πίνακας 7.2\*: Κόστος υλικών ρευστού διάτρησης για τη γεώτρηση PA-35 (Energean Oil & Gas, 2011 – ίδια επεξεργασία)

PA-35					
Βάθος: 2379.0 m – 2569.0 m MD (Interval 8.5 in)					
Όγκος τμήματος: 6.95 m <sup>3</sup>					
Πολφός με βάση το νερό (FLO-PRO)					
Προϊόν	Συσκευασία	Συγκέντρωση Kg/m <sup>3</sup>	Ποσότητα	€/τεμάχιο	Κόστος (€)
[REDACTED]	25.0 kg	20.0	6	83,95	503,70
[REDACTED]	25.0 kg	2.0	1	12,72	12,72
[REDACTED]	25.0 kg	4.0	2	424.94	849.88
[REDACTED]	208.0 kg	10.0	1	717.59	717.59
[REDACTED]	1,000.0 kg	70.0	1	747.69	747.69
[REDACTED]	1,000.0 kg	40.0	1	747.69	747.69
[REDACTED]	1,000.0 kg	185.0	20	0.00	-
[REDACTED]	208.0 kg	10.0	1	754.48	754.48
[REDACTED]	25.0 kg	2.0	1	23.74	23.74
[REDACTED]	22.0 mt	-	1.67	1,397.25	2,341.30
<b>Σύνολο</b>					<b>6,698.79 €</b>

Πίνακας 7.3\*: Κοστολόγιο υλικών ρευστού διάτρησης για τη γεώτρηση PB-23A 35 (Energean Oil & Gas, 2013 – ίδια επεξεργασία)

PB-23A					
Βάθος: 2408,0 m – 2592,0 m MD (Interval 8,5 in)					
Όγκος τμήματος: 6,73 m <sup>3</sup>					
Πολφός με βάση το πετρέλαιο (VERSAVERT)					
Προϊόν	Συσκευασία	Συγκέντρωση Kg/m <sup>3</sup>	Ποσότητα	€/τεμάχιο	Κόστος (€)
[REDACTED]	25.0 kg	14.0	4	16.46	65.84
[REDACTED]	208.0 kg	12.0	1	1,054.11	1,054.11
[REDACTED]	208.0 kg	8.0	1	1,033.20	1,033.20
[REDACTED]	22.5 kg	8.0	3	79.13	237.39
[REDACTED]	25.0 kg	5.0	2	112.37	224.74
[REDACTED]	25.0 kg	15.0	5	30.67	153.35
[REDACTED]	25.0 kg	5.0	2	71.86	143.72
[REDACTED]	1,500.0 kg	827.0	4	555.00	2,220.0
[REDACTED]	1,500.0 kg	395.0	2	555.00	1,110.0

PB-23A					
Βάθος: 2408,0 m –2592,0 m MD (Interval 8,5 in)					
Όγκος τμήματος: 6,73 m <sup>3</sup>					
Πολφός με βάση το πετρέλαιο (VERSAVERT)					
Προϊόν	Συσκευασία	Συγκέντρωση Kg/m <sup>3</sup>	Ποσότητα	€/τεμάχιο	Κόστος (€)
	1.0 t	-	6	296.70	1,780.2
	22.0 mt	-	0.12	1,397.25	167.67
<b>Σύνολο</b>					<b>8,190.22 €</b>

(\*) Στους Πίνακες 7.2 & 7.3, οι στήλες με τα προϊόντα αποκρύπτονται για λόγους εμπιστευτικότητας. Ωστόσο, είναι στη διάθεση της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

## 7.7 Υπολογισμός του συνολικού κόστους του πολφού διάτρησης για τις γεωτρήσεις PA-35 & PB-23A

Σύμφωνα με την εξίσωση 7.3, για να υπολογιστεί το συνολικό κόστος του πολφού για καθεμιά γεώτρηση, θα πρέπει να είναι γνωστό το κόστος των υλικών, το κόστος μεταφοράς, όπως επίσης και τα χρονικά διαστήματα είτε παράχθηκε έργο στη γεώτρηση είτε υπήρχαν νεκροί χρόνοι. Τα δεδομένα κόστους, δίνονται από τους Πίνακες 7.2 & 7.3, ενώ οι χρόνοι διάτρησης για κάθε γεώτρηση δίνεται στους Πίνακες 6.3 & 6.4 του 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

Για κάθε γεώτρηση θα εφαρμοστεί η σχέση 7.3. Η λειτουργία του γεωτρήσανου λαμβάνεται σε 24ωρη βάση, συνεπώς, το ωριαίο κόστος θα είναι:

$$\Omega\text{ΚΓ} = 230,000.0 \frac{\text{€}}{\text{day}} \Rightarrow \Omega\text{ΚΓ} \cong 9,600.0 \frac{\text{€}}{\text{hr}}$$

Οπότε, για τη γεώτρηση PA-35 προκύπτει:

$$\Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PA-35}} = \text{ΚΥ}_{\text{PA-35}} + \text{ΚΜ}_{\text{PA-35}} + \Omega\text{ΚΓ}_{\text{PA-35}} \times (\text{ΝΧΔ} + \Omega\text{ΧΔ})_{\text{PA-35}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PA-35}} = 4,357.49 \text{ €} + 2,341.30 + 9,600.0 \frac{\text{€}}{\text{hr}} \times (5.13 \text{ hrs} + 14.23 \text{ hrs}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PA-35}} = 6,698.79 \text{ €} + 185,856.0 \text{ €}$$

$$\Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PA-35}} = \mathbf{192,554.79 \text{ €}}$$



Αντίστοιχα, για τη γεώτρηση PB-23A προκύπτει:

$$\begin{aligned} \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PB-23A}} &= \text{ΚΥ}_{\text{PB-23A}} + \text{ΚΜ}_{\text{PB-23A}} + \Omega\text{ΚΓ}_{\text{PB-23A}} \times (\text{ΝΧΔ} + \Omega\text{ΧΔ})_{\text{PB-23A}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PB-23A}} &= 6,242.35 \text{ €} + 1,947.87 \text{ €} + 9,600.0 \frac{\text{€}}{\text{hr}} \times (16.25 \text{ hrs} + 14.33 \text{ hrs}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PB-23A}} &= 8,190.22 \text{ €} + 293,568.0 \text{ €} \\ \Leftrightarrow \Sigma\text{ΚΠ}_{\text{PB-23A}} &= \mathbf{301,758.22 \text{ €}} \end{aligned}$$

## 7.8 Σύνοψη και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για το κόστος των ρευστών διάτρησης των PA-35 & PB-23A

Με βάση τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν και συνοψίζονται στον Πίνακα 7.4, συμπεραίνουμε πως το συνολικό κόστος του πολφού με βάση το νερό της γεώτρησης PA-35, είναι αρκετά μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος του πολφού με βάση το πετρέλαιο που χρησιμοποιήθηκε στη γεώτρηση PB-23A. Πιο συγκεκριμένα, **η διαφορά κόστους είναι 109,203.43 €**. Αυτό σημαίνει πως **η όρυξη με WBM, είναι κατά 36.19% οικονομικότερη σε σχέση με OBM**. Να σημειωθεί πως οι υπολογισμοί αυτοί αναφέρονται σε πρακτικά ίδιο μήκος διάτρησης, αφού η διαφορά μήκους των υπό μελέτη τμημάτων είναι μόλις 6.0 m.

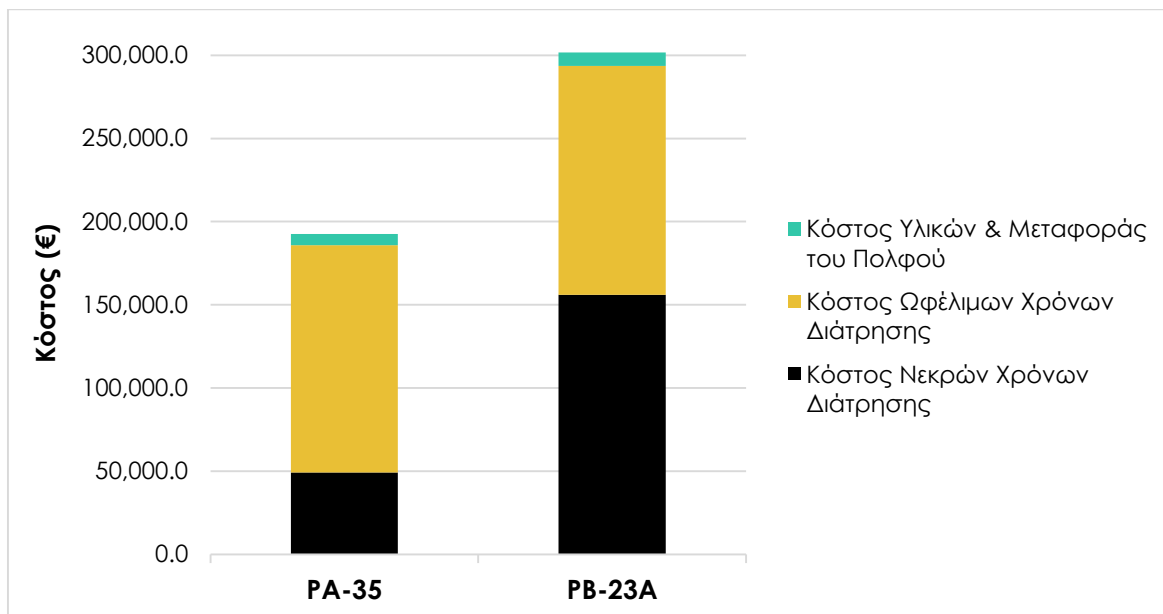
Πίνακας 7.4: Συγκεντρωτικός πίνακας οικονομικών αποτελεσμάτων

	PA-35		PB-23A	
Κόστος υλικών πολφού	4,357.49 €	⇒6,698.79 €	6,242.35 €	⇒8,190.22 €
Κόστος μεταφοράς πολφού	2,341.30 €		1,947.87 €	
Κόστος ωφέλιμου χρόνου διάτρησης	136,608.0 €	⇒185,856.0 €	137,568.0 €	⇒293,568.0 €
Κόστος νεκρού χρόνου διάτρησης	49,248.0 €		156,000.0 €	
<b>Σύνολο</b>	192,554.79 €		301,758.22 €	
<b>Διαφορά: 109,203.43 €</b>				

Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς από τους Πίνακες 7.2 & 7.3, το κόστος (υλικών και μεταφοράς) για τον πολφό με βάση το νερό προέκυψε μικρότερο σε σχέση με τον πολφό με βάση το πετρέλαιο. Το γεγονός που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση του συνολικού κόστους και για τις δύο γεωτρήσεις, ήταν οι χρόνοι διάτρησης και συγκεκριμένα, οι νεκροί χρόνοι διάτρησης. Αυτό συνέβη γιατί το ημερήσιο κόστος μίσθωσης του εξοπλισμού για παράκτιες γεωτρήσεις είναι πολύ υψηλό. Έτσι **κάθε χρονική καθυστέρηση κατά τη διάτρηση, συμπαρασύρει και ανεβάζει το συνολικό κόστος του πολφού διάτρησης**.

Στο Γράφημα 7.1, παρουσιάζονται κατ' αντιστοιχία τα κόστη για κάθε μια παράμετρο που μελετήθηκε παραπάνω, επιβεβαιώνοντας τα όσα αναφέρθηκαν.

**Γράφημα 7. 1: Σχηματική αναπαράσταση του κόστους των γεωτρήσεων PA-35 & PB-23A**



Όπως προκύπτει από το παραπάνω Γράφημα 7.1, οι νεκροί χρόνοι στην περίπτωση της γεώτρησης PB-23A, καθορίζουν την αύξηση του κόστους του ρευστού διάτρησης, το οποίο για τη συγκεκριμένη περίπτωση είχε ως βάση το πετρέλαιο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αίτια αυτών των καθυστερήσεων δεν ήταν δυνατόν να αποσαφηνιστούν από τα τεχνικά δελτία της γεώτρησης PB-23A. **Συνεπώς, με βάση την ΑΚΣ, καθίσταται σαφές ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, η όρυξη με πολφό με βάση το νερό (γεώτρηση PA-35) είναι σαφώς πιο αποδοτική έναντι της όρυξης με πολφό με βάση το πετρέλαιο (τουλάχιστον, όσον αφορά τους διατρυόμενους σχηματισμούς της περιοχής του Πρίνου).**

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

# Σύνοψη Συμπερασμάτων & Προτάσεις

---

### 8.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα κύρια σημεία αφενός του θεωρητικού και αφετέρου του τεχνικού μέρους της παρούσης Διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα για τα θέματα που μελετήθηκαν:

- Η ειδική ενέργεια κατανάλωσης του κοπτικού άκρου, ήταν η πρώτη παράμετρος που κρίθηκε απαραίτητο να μελετηθεί προκειμένου να γίνει μια πρώτη σύγκριση της απόδοσης ανάμεσα στον πολφό με βάση το νερό της γεώτρησης PA-35 και στον πολφό με βάση το πετρέλαιο της γεώτρησης PB-23A. Εφόσον ο διατρυόμενος σχηματισμός και τα κοπτικά άκρα των γεωτρήσεων ήταν πρακτικά όμοια, εκείνο που θα επηρέαζε τη διατρησιμότητα του σχηματισμού θα ήταν η σύσταση του πολφού διάτρησης. Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας έδειξε ότι στη γεώτρηση PA-35 που χρησιμοποιήθηκε πολφός με βάση το νερό, η ειδική ενέργεια που απαιτήθηκε ήταν σχετικά μικρότερη της αντίστοιχης που καταναλώθηκε με τη χρήση πολφού με βάση το πετρέλαιο για τη γεώτρηση PB-23A. Έτσι, με τη χρήση πολφού με βάση το νερό, η απαιτούμενη ειδική ενέργεια είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ειδική ενέργεια που απαιτείται με πολφό που έχει βάση το πετρέλαιο, για την όρυξη του συγκεκριμένου τμήματος. Ωστόσο, επειδή το μελετούμενο τμήμα είναι αρκετά μικρό σε σύγκριση με το συνολικό μήκος των γεωτρήσεων και επειδή δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις τιμές τις ειδικής ενέργειας των δύο γεωτρήσεων, δε μπορεί να προκύψει ένα ασφαλές συμπέρασμα για το ποιος πολφός θεωρείται αποδοτικότερος.
- Αντίστοιχα με την ειδική ενέργεια, το ίδιο μη ασφαλή είναι και τα συμπεράσματα για την ταχύτητα προχώρησης που μελετήθηκε στη συνέχεια. Επειδή η ταχύτητα προχώρησης είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής ενέργειας, η ταχύτητα προχώρησης της PA-35 προκύπτει ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή της PB-23A. Αυτή η μικρή διαφορά στις τιμές, δε μπορεί να θεωρηθεί ικανή ώστε να υποδείξει ποιος πολφός από τους δύο είναι ιδανικότερος.
- Στη συνέχεια και λόγω των πολλών αυξομειώσεων στις τιμές που υπολογίστηκαν, είτε τις ειδικής ενέργειας, είτε της ταχύτητας προχώρησης, αποφασίστηκε να μελετηθούν οι χρόνοι διάτρησης κάθε γεώτρησης. Από την καταγραφή των χρόνων, προέκυψε ότι κατά την όρυξη της γεώτρησης PB-

23A με πολφό με βάση το πετρέλαιο, παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα που είχαν ως αποτέλεσμα την παύση των εργασιών για τουλάχιστον 16 ώρες. Αντίθετα, οι αντίστοιχοι νεκροί χρόνοι για τη γεώτρηση PA-35 ήταν μόλις 5 ώρες. Σύμφωνα με την Energean Oil & Gas, αυτές οι καθυστερήσεις οφείλονταν σε βλάβες του μηχανολογικού εξοπλισμού, χωρίς ωστόσο να γίνεται σαφής η αιτία που τις προκάλεσε. Ως εκ τούτου, το μόνο ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι πιθανώς αυτές οι βλάβες να συσχετίζονται με τη χρήση πολφού διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, καθώς μόνο με τη χρήση του εμφανίστηκαν αυτές οι δυσλειτουργίες.

Ως εκ τούτων, για τη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης και σύμφωνα με τις πληροφορίες που ήταν διαθέσιμες, **ιδανικότερος πολφός διάτρησης, φαίνεται να είναι αυτός που έχει ως βάση το νερό.**

Ακολούθησε η ανάλυση κόστους, στόχος της οποίας ήταν:

- Να γίνει ποσοτικοποίηση των χρόνων διάτρησης και ιδιαίτερα των νεκρών χρόνων, ώστε να φανεί πως επηρεάζουν το κόστος των ρευστών διάτρησης και πως συμπαρασύρουν το συνολικό κόστος του γεωτρητικού έργου.

Με βάση την ανάλυση κόστους προκύπτει ότι:

- Η όρυξη της PA-35 με πολφό με βάση το νερό, είναι κατά 36,19% οικονομικότερη σε σχέση με την όρυξη της PB-23A όπου χρησιμοποιήθηκε πολφός με βάση το πετρέλαιο. Καθοριστικό παράγοντα έπαιξε ο νεκρός χρόνος διάτρησης της γεώτρησης PB-23A, που ήταν σχεδόν 3πλάσιος της γεώτρησης PA-35. Αυτές οι καθυστερήσεις στην όρυξη, είχαν σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί το συνολικό κόστος διάτρησης.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως **ο πολφός με βάση το νερό ήταν ταυτόχρονα και αποδοτικότερος (όσον αφορά την αλληλεπίδρασή του με το μηχανολογικό εξοπλισμό) αλλά και οικονομικότερος σε σχέση με τον πολφό με βάση το πετρέλαιο.**

## 8.2 Προτάσεις

Στη συγκεκριμένη Διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν δύο γεωτρήσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ρευστά διάτρησης. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούσαν ένα μικρό τμήμα της κάθε γεώτρησης, δεν κατέστη δυνατή η μελέτη όλων των παραμέτρων που συνδέονται με τα ρευστά διάτρησης (μέγεθος παραγόμενων θρυμμάτων, φθορά κοπτικών άκρων, κόπωση μηχανολογικού εξοπλισμού κ.λπ.) και πως αυτά τυχόν επηρεάζουν το συνολικό κόστος της διάτρησης. Προκειμένου να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα, απαιτείται η

διερεύνηση του ίδιου θέματος αλλά με πληρέστερες πληροφορίες/στοιχεία, έτσι ώστε να προκύψουν πλέον αξιόπιστα και γενικότερης ισχύος συμπεράσματα.

# Βιβλιογραφία

---

- Amani, M., Al-Jubouri, M., & Shadravan, A. (2012). *Comparative Study of Using Oil-Based Mud Versus Water-Based Mud in HPHT Fields*. Texas A&M University, Petroleum Engineering Department. CSCanada.
- Apaleke, A. S., Al-Majed, A., & Hossain, M. E. (2012). Drilling Fluid: State of The Art and Future Trend. In A. S. Apaleke, A. Al-Majed, & M. E. Hossain (Ed.), *North Africa Technical Conference and Exhibition* (p. 13). Cairo: Society of Petroleum Engineers.
- ASME. (2005). *Drilling Fluids Processing Handbook* (Vol. 1). United States of America: Elsevier.
- Dusseault, M. B., Maury, V., Sanfilippo, F., & Santarelli, F. J. (2004). *Drilling Through Salt: Constitutive Behavior and Drilling Strategies*.
- Energiean Oil & Gas. (2011). *End of Well Report PA-35*. Athens: Energiean Oil & Gas, Kavala Oil S.A.
- Energiean Oil & Gas. (2014). Το άνοιγμα της αγοράς υδρογονανθράκων στην Ελλάδα και οι προκλήσεις για τους επενδυτές. *IENE, 19<sup>ο</sup> Συνέδριο "Ενέργεια και Ανάπτυξη"*. Αθήνα.
- Georgakopoulos, A. (1998). Organic Geochemical Study of Greek Oil Source Rocks. *Proceedings of the 2nd International Conference and Technical Exhibition: Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods*, (σσ. 208-213). Krakow, Poland.
- Georgakopoulos, A. (2000). Lithology and stratigraphy of the Neogene Prinos-Kavala basin, Northern Greece. *Proceedings Interim Colloquim RCMNS. No 9*, (σσ. 79-84). Patras: Geological Society of Greece.
- Hapnes, M. (2014). *Drilling in Salt Formations and Rate of Penetration Modelling*. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Trondheim.
- Haquet, C. (2013). *Drilling Through Salt*. Paris: SCOR Global P&C.
- Heriot-Watt University. (2015). (n.d.) J. T. Ford. Edinburgh, Scotland: Heriot-Watt University.
- Kiomourtzi, P., Pasadakis, N., & Zelilidis, A. (2007). Geochemical Caractirization of Satellite Hydrocarbon Formations in Prinos-Kavala Basin, North Greece. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress*. Athens: Geological Society of Greece.
- Lal, M. (1999). Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength. *Society of Petroleum Engineers*.
- M I Swaco. (2005). *Engineering Drilling Fluid Manual*. Houston, Texas, United State of America: M I Swaco.
- Marco Aburto Perez, R. C. (2008). *Meeting the Subsalt Challenge*. Schlumberger.

- Mitchell, R. F. (2006). *Drilling Engineering* (Vol. 2). USA: Society of Petroleum Engineers.
- Nascimento, A., Horta, A. L., & Prohaska, M. (2009). Technical Analysis of Main Problems in Salt Drilling. *5<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*. Brazil.
- Neff, J. M. (2005). *Composition, Environmental Fates, and Biological Effect of Water Based Drilling Muds and Cuttings Discharged to the Marine Environment: A Synthesis and Annotated Bibliography*. American Petroleum Institute; Petroleum Environmental Research Forum (PERF). Duxbury, MA: Battelle.
- Proedrou, P., & Papaconstantinou, C. (2004). Prinos Basin - A Model for Oil Exploration. *Proceedings of the 10th International Congress - Bulletin of the Geological Society of Greece*. Thessaloniki.
- Schlumberger. (2013). *End of Well Report PB-23A*. Athens: Schlumberger.
- Tare, U.A., Mody, F. K. (2002). Managing Borehole Stability Problems: On the Learning, Unlearning and Relearning Curve. *Drilling & Completion Fluids and Waste Management*. Houston, Texas: American Association of Drilling Engineers (AADE).
- Warren, B., & Baltoiu, L. (2001). *Using a System Cost Analysis to Quantify Drilling Fluids and Solids Costs*. Houston, Texas: American Association of Drilling Engineers (AADE).
- Γεωργακόπουλος, Α. (1998). Μελέτη Μητρικών Πετρωμάτων της Πετρελαιοφόρου Λεκάνης Πρίνου-Καβάλας με Μεθόδους Οργανικής Γεωχημείας. *8<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας με Έμφαση στην Περιβαλλοντική Γεωλογία*. XXXII, (σσ. 325-333). Πάτρα: Ελληνική Γεωλογική Εταιρία.
- Κελεσιδης, Β. Χ. (2009). *Τεχνική Γεωτρήσεων*. Χανιά, Κρήτη: Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κελεσιδης, Β. Χ. (2010). Πρόβλεψη Διατηρησιμότητας Πετρωμάτων στις Γεωτρήσεις Έρευνας Ορυκτών και Υδρογονανθράκων. Πόσο κοντά είμαστε;. *Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ*, 18.
- Μιχελάκη, Μ., & Μανούτσογλου, Ε. (2010). *Τρισδιάστατη Λιθοστρωματική Προσομοίωση του Κοιτάσματος Υδρογονανθράκων του Πρίνου*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων - Ερευνητική Μονάδα Γεωλογίας. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πασαδάκης, Ν., Κουτσοθεοδώρου, Ε., Μανούτσογλου, Ε., Παπακωνσταντίνου, Κ., Κιομουρτζή, Π., & Ζεληλίδης, Α. (2005). Συγκριτική Αξιολόγηση Πετρελαίων της Λεκάνης Πρίνου-Καβάλας με Χρήση Βιοδεικτών. *2<sup>ο</sup> Συνέδριο της Επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας και Γεωχημείας*, (σσ. 309-317). Θεσσαλονίκη.
- Σταματάκη, Σ. (2003). *Τεχνολογία Γεωτρήσεων* (Τόμ. 1). Αθήνα, Ελλάδα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών.