



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

# Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

---

*ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

*του*

*Θεοδωρακόπουλου Μάριου*

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, 2018**





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

# Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

---

*ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

*του*

*Θεοδωρακόπουλου Μάριου*

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ...../2018

Σταματάκη Σοφία

Αποστολόπουλος Γεώργιος

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος

Καθηγήτρια

Αναπλ. Καθηγητής

Αναπλ. Καθηγητής

**Αθήνα, 2018**



## Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την επιστημονική καθοδήγηση και το ενδιαφέρον της καθηγήτριας μου Σοφίας Σταματάκη, καθώς και των κυριών Ειρήνης Δημητρέλλου και Ευαγγελίας Κόφφα και του κυρίου Βασίλη Γαγάνη, οι οποίοι αποτέλεσαν εφαλτήριο στην συγγραφή της εργασίας και κινητήρια δύναμη για να ασχοληθώ με τον κλάδο των πετρελαίων. Τους ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, για το χρόνο που μου διέθεσαν και για τις καίριες παρατηρήσεις και επισημάνσεις τους που συνέβαλλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

**Αφιερώνω την παρούσα Διπλωματική Εργασία στην Οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και συνεχή ενθάρρυνση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου !!!**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (HP/HT). Η εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και δομείται ως ακολούθως:

Αρχικά, στην εισαγωγή παρουσιάζεται το θέμα και ο σκοπός της εργασίας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, στο οποίο ορίζονται οι γεωτρήσεις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, πραγματοποιείται σύντομη ιστορική επισκόπηση και γίνεται αναφορά στη σύγχρονη πραγματικότητα, όσον αφορά την εξέλιξη της γεωτρητικής δραστηριότητας σε συνθήκες HP/HT τα τελευταία χρόνια.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εξετάζονται τα τεχνικά θέματα με τις οποία έρχεται αντιμέτωπη η πετρελαϊκή βιομηχανία, κυρίως κατά τη φάση όρυξης των γεωτρήσεων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (ρευστά διάτρησης, σωλήνωση, τσιμέντωση και λοιπός εξοπλισμός όρυξης). Γίνεται επίσης αναφορά στις τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζει η ολοκλήρωση αυτών των γεωτρήσεων και η παραγωγή, καθώς και στα ειδικά προβλήματα που οφείλονται στην παρουσία όξινου αερίου και τις τεχνικές προκλήσεις που παραμένουν υπό έρευνα. Τέλος, επιχειρείται μια σύγκριση των γεωτρήσεων HP/HT με τις γεωτρήσεις γεωθερμίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, αναδεικνύονται τα σημαντικότερα σημεία σχεδιασμού των γεωτρήσεων HP/HT που σχετίζονται με την ασφάλεια των γεωτρήσεων αυτού του τύπου (ανίχνευση και αποτροπή αιφνίδιων εισροών, ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης). Αναπόσπαστο κομμάτι αυτού του κεφαλαίου είναι και η παρουσίαση συμβάντων σε γεωτρήσεις στη Β. Θάλασσα που αναδεικνύουν τις κύριες αιτίες προβλημάτων ασφάλειας σε αυτές τις γεωτρήσεις. Τέλος, γίνεται σύντομη αναφορά στο κανονιστικό πλαίσιο που ισχύει στην Ευρώπη και διεθνώς για την ασφαλή εκτέλεση των εργασιών στις γεωτρήσεις HP/HT, καθώς στις κατευθυντήριες οδηγίες και τα πρότυπα που έχουν εκδώσει διάφοροι οργανισμοί σχετικά με την εκτέλεση ορισμένων διαδικασιών στις γεωτρήσεις αυτού του τύπου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρατίθενται πέντε μελέτες περίπτωσης, προερχόμενες από τα μεγαλύτερα, μέχρι στιγμής, πεδία ΗΡ/ΗΤ ανά τον κόσμο (Βόρεια Θάλασσα, Δυτική Κίνα, θαλάσσιος χώρος της Ταϊλάνδης, γεωτρήσεις ultra ΗΡ/ΗΤ στον Κόλπο του Μεξικού). Η πέμπτη αναφέρεται στο δυστύχημα της γεώτρησης Macondo.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα όπου διατυπώνονται οι κύριες διαπιστώσεις που απορρέουν από την διπλωματική εργασία.



## ABSTRACT

The subject of the present thesis is well drilling aspects in high-pressure, high-temperature (HP/HT) environment. The thesis was elaborated in the Laboratory of Applied Geophysics of the School of Mining and Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens and it is structured as follows:

To begin with, the subject and the scope of the thesis are presented in the introduction.

The second chapter follows, where high-pressure, high-temperature (HP/HT) wells are defined and a brief historical review is provided regarding this type of wells. Also, the current status regarding HP/HT drilling activity is shortly presented.

In the third chapter, the technical issues facing the oil industry faces are examined, especially during the drilling operations in HP/HT wells (drilling fluids, casing, cementing and other drilling equipment). A reference is also made to the difficulties posed during the completion of an HP/HT well, as well as to the specific problems due to the presence of acid gas, and the technical challenges that remain under investigation. Finally, a comparison between HP/HT and geothermal wells is attempted.

In the fourth chapter of the thesis, the most important aspects of an HP/HT well design are highlighted, related to the safety of this type of wells (kick detection and prevention, regaining of well control). An integral part of this chapter is the presentation of incidents in North Sea wells, which designates the main causes of safety issues in this type of wells. Finally, a brief reference is made to regulatory framework in Europe and internationally regarding the safe execution of operations in HP/HT wells, as well as to the guidelines and standards issued by various organizations regarding specific procedures in drilling and completion of HP/HT wells.

In the fifth chapter, five case studies are presented, from the largest HP/HT fields worldwide (North Sea, Western China, offshore Thailand, ultra HP/HT wells in the Gulf of Mexico). The last refers to the Macondo well accident.

Finally, the thesis concludes with the main findings of the dissertation.



## Κατάλογος περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°. Εισαγωγή .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°. Γενικά στοιχεία για τις γεωτρήσεις σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας .....	3
2.1. Ορισμοί.....	3
2.2. Ιστορική επισκόπηση.....	8
2.3. Σύγχρονη πραγματικότητα .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°. Τεχνικά θέματα στην όρυξη και ολοκλήρωση γεωτρήσεων HP/HT .....	21
3.1. Εισαγωγή .....	21
3.2. Ρευστά διάτρησης.....	22
3.2.1. Επιλογή ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο ή το νερό .....	24
3.2.2. Επιπτώσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας στα ρευστά διάτρησης... ..	26
3.2.3. Υπολογισμός της πίεσης των ρευστών διάτρησης εντός της γεώτρησης.....	33
3.2.4. Έλεγχος πιέσεων μέσα στη γεώτρηση.....	38
3.2.5. Βελτιστοποίηση των ρευστών διάτρησης σε συνθήκες HP/HT .....	42
3.3. Σχεδιασμός Σωλήνωσης και Τσιμέντωσης.....	43
3.3.1. Σωλήνωση.....	44
3.3.2. Τσιμέντωση .....	54
3.4. Διατρητικός εξοπλισμός .....	61
3.4.1. Διατρητική στήλη .....	62
3.4.2. Κοπτικά άκρα .....	64
3.4.3. Στεγανωτικά (seals) .....	66
3.5. Διέγερση του ταμιευτήρα και παραγωγή (reservoir stimulation & production) .....	68
3.5.1. Διέγερση του ταμιευτήρα .....	68
3.5.2. Εξοπλισμός αξιολόγησης σχηματισμών .....	78
3.5.3. Εκτέλεση δοκιμών παραγωγής (well testing).....	82
3.6. Ειδικά προβλήματα των γεωτρήσεων HP/HT που σχετίζονται με την παρουσία όξινου αερίου (sour gas).....	92
3.6.1. Σωλήνωση.....	92
3.6.2. Σύνδεσμοι σωληνώσεων – Παρεμβύσματα.....	93
3.7. Τεχνικές προκλήσεις που παραμένουν υπό έρευνα.....	94
3.8. Σύγκριση γεωτρήσεων HP/HT με γεωθερμικές γεωτρήσεις.....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°. Ασφάλεια.....	99
4.1. Γενικά .....	99
4.1.1. Αποτροπή των αιφνίδιων εισροών .....	104
4.1.2. Ανίχνευση των αιφνίδιων εισροών.....	106
4.1.3. Ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης .....	108
4.1.4. Ασφάλεια - Σύγχρονη πραγματικότητα.....	115
4.2. Περιστατικά στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (United Kingdom Continental Shelf – UKCS).....	115
4.2.1. Έλεγχος αιφνίδιων εισροών.....	116
4.2.2. Αποτυχία στο σύστημα του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και στον σχετικό εξοπλισμό.....	118
4.2.3. Ανίχνευση H <sub>2</sub> S.....	119
4.2.4. Μηχανική βλάβη.....	120
4.2.5. Ανεξέλεγκτη ροή .....	121
4.3. Κανονιστικό πλαίσιο .....	122
4.4. Κατευθυντήριες γραμμές & πρότυπα .....	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°. Μελέτες περίπτωσης.....	129
5.1. Εισαγωγή .....	129
5.2. Πεδίο Erskine.....	129
5.2.1. Γενικά στοιχεία.....	129
5.2.2. Εγκατάσταση που απαιτεί ελάχιστο απαιτούμενο προσωπικό (minimum attendance installation).....	131
5.2.3. Σύστημα προστασίας της εξέδρας έναντι πιέσεων (platform pressure protection system-PPPS) .....	132
5.2.4. Στρατηγική ελέγχου δημιουργίας κεριού (wax control strategy).....	133
5.2.5. Επιλογή υλικών (material selection) και έλεγχος της διάβρωσης (corrosion control).....	134
5.2.6. Διευθέτηση μονάδας διεργασίας σε περιορισμένο χώρο (minimum space process module).....	135
5.3. Κίνα - Πεδία Keshen-Dabei.....	136
5.3.1. Τεχνικές δυσκολίες κατά την όρυξη των γεωτρήσεων.....	137
5.3.2. Τεχνικές λύσεις - επιτεύγματα.....	140
5.4. Κόλπος της Ταϊλάνδης – Πεδίο Bongkot .....	144
5.4.1. Γενικά στοιχεία.....	144
5.4.2. Επισκόπηση της θερμοκρασίας .....	145
5.4.3. Προτεινόμενες λύσεις – Συμπεράσματα.....	148

5.5.	Κόλπος του Μεξικό - Σχεδιασμός & όρυξη γεωτρήσεων ultra HP/HT .....	149
5.5.1.	Γενικά στοιχεία.....	149
5.5.2.	Ρευστά διάτρησης.....	151
5.5.3.	Γεωτρύπανο – Εξοπλισμός όρυξης.....	152
5.5.4.	Διαγραφίες εντός της γεώτρησης με χρήση συρματόσχοινου (wireline logging) .....	153
5.6.	Η περίπτωση του Macondo .....	154
5.6.1.	Αιτίες εκδήλωσης του δυστυχήματος.....	154
5.6.2.	Η απόκριση της πετρελαϊκής βιομηχανίας στο δυστύχημα.....	160
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°.	Συμπεράσματα.....	165
Γλωσσάρι τεχνικών όρων .....		169
Βιβλιογραφία .....		171



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Schlumberger (2008) (Shadravan & Amani, 2012) .....	5
Εικόνα 2-2. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Baker Hughes (2005) (Shadravan & Amani, 2012) .....	5
Εικόνα 2-3. Όρια πίεσης και θερμοκρασίας για χαρακτηρισμό θαλάσσιων και χερσαίων γεωτρήσεων ως υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (θαλάσσιες γεωτρήσεις HP/HT: 10.000-15.000 psi / 250-350 °F, χερσαίες γεωτρήσεις HP/HT: 10.000-20.000 psi / 250-350 °F) (Shadravan & Amani, 2012).....	6
Εικόνα 2-4. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Total (Shadravan & Amani, 2012) .....	7
Εικόνα 2-5. Παρέμβυσμα απομόνωσης (Lehr & Collins, 2014) .....	9
Εικόνα 2-6. Εξοπλισμός κεφαλής (Daum - 블로그, 2013) .....	10
Εικόνα 2-7. Αύξηση του βάθους των γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικού. Τα επόμενα χρόνια αναμένονται πρωτόγνωρες συνθήκες στον πυθμένα των γεωτρήσεων, με τη θερμοκρασία στον πυθμένα να υπερβαίνει τους 260 °C και την πίεση να προσεγγίζει τα 241 MPa (DeBryijin, et al., 2008).....	11
Εικόνα 2-8. Γεωτρητική δραστηριότητα σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ανά τον κόσμο (Shadravan & Amani, 2012) .....	13
Εικόνα 2-9. Δεδομένα πίεσης και θερμοκρασία για γεωτρήσεις HP/HT που διανοίχθηκαν παγκοσμίως κατά την περίοδο 2007-2010 (Avant, et al., 2012) .....	15
Εικόνα 2-10. Περιοχές όπου εξελίσσεται γεωτρητική δραστηριότητα σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας σε διεθνές επίπεδο (Avant, και συν., 2012) .....	16
Εικόνα 2-11. Θαλάσσιες γεωτρήσεις HP/HT που ορύχθηκαν από το 1982 έως το 2011 και αναμενόταν να ορυχθούν ως το 2020 (Avant, et al., 2012).....	17
Εικόνα 2-12. Εκτιμώμενο ποσοστό ανάπτυξης έργων HP/HT παγκοσμίως μέχρι το 2020 (Oil and Gas IQ, 2015).....	18
Εικόνα 3-1. Μεταφορά θερμότητας στη γεώτρηση (Adamson, και συν., 1998).....	28
Εικόνα 3-2. Θερμοκρασιακό προφίλ ρευστών διάτρησης (Adamson, et al., 1998) .....	30

Εικόνα 3-3. Θερμοκρασιακή συμπεριφορά των ρευστών διάτρησης, μετά την εκκίνηση της κυκλοφορίας (Adamson, et al., 1998) .....	31
Εικόνα 3-4. Ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD) (Adamson, et al., 1998).....	33
Εικόνα 3-5. Δεδομένα βασικών ρευστών του ULTIDRILL (Adamson, και συν., 1998)..	34
Εικόνα 3-6. Διαφορά πίεσης που προκύπτει απο την παρουσία θιξοτροπικής γέλης (Adamson, και συν., 1998) .....	35
Εικόνα 3-7. Φαινόμενο swab and surge (Adamson, και συν., 1998) .....	36
Εικόνα 3-8. Καταβύθιση βαρύτη (sagging) στη γεώτρηση G-10 της Total στη Β. Θάλασσα (Gregoire, Hodder, Peng, & Massam, 2009).....	40
Εικόνα 3-9. Διάγραμμα ελέγχου και βελτιστοποίησης των ιδιοτήτων των ρευστών διάτρησης (Adamson, και συν., 1998).....	43
Εικόνα 3-10. Βάθος έδρασης σωλήνωσης (Cumana-Marval, 1991).....	45
Εικόνα 3-11. Εντοπισμός κατάλληλου βάθους έδρασης σωλήνωσης σε γεώτρηση HP/HT στην περιοχή Central Graben της Βόρειας Θάλασσας (MacAndrew, et al., 1993).....	48
Εικόνα 3-12. Παράδειγμα σωλήνωσης σε γεώτρηση HP/HT (Craig, 2008).....	51
Εικόνα 3-13. Αναρτήρας σωλήνωσης τύπου liner της Schlumberger για περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε για εφαρμογές εισπίεσης ατμού (DeBryjijn, et al., 2008) .....	54
Εικόνα 3-14. Πολφός τσιμέντου υψηλής πυκνότητας (Adamson, και συν., 1998).....	58
Εικόνα 3-15. Δείκτες ασφαλείας του περιβλήματος τσιμέντου στη διεπιφάνεια της σωλήνωσης με την τσιμέντωση για διαφορετικές τιμές της πίεσης WHCP (Honglin, 2014).....	61
Εικόνα 3-16. Τύποι σπειρωμάτων συνδέσμων διατρητικών στελεχών (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).....	63
Εικόνα 3-17. TSP κοπτικά για όρυξη (αριστερό κοπτικό) (Σταματάκη, Τεχνολογία γεωτρήσεων, 2003) και για δειγματοληψία (δεξί κοπτικό) (F.L.R.T., n.d.).....	66
Εικόνα 3-18. Δείγματα πυρήνων από σχηματισμούς ενδιαφέροντος που εντοπίζονται σε διαφορετικά βάθη, σε γεώτρηση που έχει ορυχθεί στο Κουβέιτ (Al-Omair, 2008).....	69



Εικόνα 3-19. Διαδικασία εφαρμογής της διέγερσης του ταμιευτήρα με χρήση οξέων (matrix acidizing) (Dubai Petroleum, 2018).....	71
Εικόνα 3-20. Σχηματισμός διόδων (wormholes) σε δείγμα ανθρακικού σχηματισμού κατά την εισπίεση οξέων για την αύξηση της διαπερατότητάς του, σε εργαστηριακή κλίμακα. Το μήκος, η διεύθυνση και ο αριθμός των διόδων εξαρτάται από την αντιδραστικότητα του σχηματισμού και τον ρυθμό εισπίεσης, με τον οποίο τα οξέα διεισδύουν στον σχηματισμό. Όταν σχηματιστούν τέτοιες δίοδοι, μέσω αυτών ρέουν πρακτικά όλοι οι υδρογονάνθρακες προς την γεώτρηση και από εκεί στην επιφάνεια (DeBryjijn, και συν., 2008) .....	72
Εικόνα 3-21. Διαδικασία εφαρμογής υδραυλικής ρωγμάτωσης (hydraulic fracturing) (Infographic by Jake Newton: <a href="http://ouwaterproject.org/issues/industry/">http://ouwaterproject.org/issues/industry/</a> ) .....	74
Εικόνα 3-22. Εισαγωγή κόκκων στις ρωγμές κατά τη διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης (Shale Gas- Hydraulic Fracturing, 2012) .....	75
Εικόνα 3-23. Σύστημα τεχνικής ανύψωσης ρευστών ταμιευτήρα με ηλεκτρική υποβρύχια αντλία (DeBryjijn, et al., 2008) .....	77
Εικόνα 3-24. Εξοπλισμός και λογισμικό για εκτέλεση διαγραφιών και δειγματοληψίας σε γεωτρήσεις HP/HT (DeBryjijn, et al., 2008) .....	81
Εικόνα 3-25. Μέθοδοι διατρύπησης του σχηματισμού (Cosad, 1992).....	85
Εικόνα 3-26. Συνθήκες μετά την διατρύπηση του σχηματισμού, υπό συνθήκες υπερπίεσης (overbalance) και υποπίεσης (underbalance) (Cosad, 1992).....	86
Εικόνα 3-27. Στήλη εκτέλεσης δοκιμής παραγωγής στον πυθμένα της γεώτρησης (MacAndrew, et al., 1993) .....	88
Εικόνα 3-28. Σύγκριση υποθαλάσσιων και επιφανειακών συστημάτων για αυτοανυψούμενες (jackup) και ημιβυθιζόμενες εξέδρες (semi-submercible) (MacAndrew, et al., 1993) .....	90
Εικόνα 3-29. Διαφοροποίηση στις τεχνικές δυσκολίες που παρουσίασαν οι γεωτρήσεις HP/HT κατά τα έτη 2013 & 2015 (Oil and Gas IQ, 2015) .....	94
Εικόνα 3-30. Ελλείψεις γνώσεων για την αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων στις γεωτρήσεις HP/HT (Oil and Gas IQ, 2015).....	95
Εικόνα 4-1. UK Central Graben (MacAndrew, και συν., 1993).....	100

Εικόνα 4-2. Λιθολογία έναντι πίεσης στο Central Graben (Ross I., September 1990) ...	100
Εικόνα 4-3. Προσομοιωτής εισροής ρευστών του ταμιευτήρα με τη βοήθεια του λογισμικού SideKick (Leach, 1992) .....	102
Εικόνα 4-4. Γενικευμένο διάγραμμα αντιμετώπισης και αποκατάστασης ελέγχου σε περίπτωση αιφνίδιων εισροών αερίου ή ρευστών ταμιευτήρα (MacAndrew, και συν., 1993) .....	103
Εικόνα 4-5. Τσιμέντωση της ζώνης ενδιαφέροντος (spotting the plug) (MacAndrew, et al., 1993) .....	106
Εικόνα 4-6. Αλλαγή στο μέγεθος των θρυμμάτων σχιστόλιθου κατά την εμφάνιση αιφνίδιας εισροής ρευστών (Σταματάκη, WELL CONTROL, 2017-2018) .....	108
Εικόνα 4-7. Διάταξη ελέγχου γεώτρησης (MacAndrew, et al., 1993).....	109
Εικόνα 4-8. Απλοποιημένη μορφή διάταξης ελέγχου της γεώτρησης (Hossain, 2015)..	110
Εικόνα 4-9. Προσθήκη διατρητικών στελεχών στη διατρητική στήλη, κατά τη διαδικασία ελέγχου μιας αιφνίδιας εισροής (stripping) (MacAndrew, et al., 1993) .....	113
Εικόνα 4-10. Δυσκολίες στην ασφάλεια και υγιεινή (Oil and Gas IQ, 2015) .....	115
Εικόνα 4-11. Περιστατικά σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004) .....	116
Εικόνα 4-12. Αριθμός αιφνίδιων εισροών σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004) .....	117
Εικόνα 4-13. Σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αιφνίδιων εισροών σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004) .....	118
Εικόνα 4-14. Σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αποτυχίας του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004) .....	119
Εικόνα 4-15. Αριθμός περιστατικών ανίχνευσης H <sub>2</sub> S σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004) .....	120
Εικόνα 4-16. Αριθμός μηχανικών βλαβών στον εξοπλισμό εκτός του BOP σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004).....	121

Εικόνα 4-17. Εγκαθίδρυση κατευθυντήριων γραμμών για τον εντοπισμό αιφνίδιας εισροής αερίου (Adamson, et al., 1998) .....	126
Εικόνα 5-1. Διάταξη πεδίου Erskine (Brubaker, 1996) .....	130
Εικόνα 5-2. Πλατφόρμα πεδίου Erskine 1997 (Technnology, 2018) .....	130
Εικόνα 5-3. Πλατφόρμα Erskine 2018 (Chevron, 2017) .....	135
Εικόνα 5-4. Δομές μεγάλης κλίσης της ζώνης πτυχών και επωθήσεων Kuche (Teng, 2015) .....	138
Εικόνα 5-5. Πίεση των σχηματισμών στο πεδίο Keshen (Teng, 2015).....	139
Εικόνα 5-6. Εξελίξεις που σημειώθηκαν στην εφαρμογή του συστήματος VDS στη ζώνη Kuche από το 2004 και μετά (Teng, 2015).....	141
Εικόνα 5-7. Υβριδικό κοπτικό άκρο (Teng, 2015) .....	143
Εικόνα 5-8. Ατυχήματα και επιπλοκές κατά την όρυξη των γεωτρήσεων στα Πεδία Keshen-Dabei (Teng, 2015).....	143
Εικόνα 5-9. Πραγματική μέτρηση της θερμοκρασίας κατά την διάτρηση του τμήματος των 8-½-in (Habil Akram Rosland, 2013) .....	146
Εικόνα 5-10. Προβλεπόμενη θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης (Habil Akram Rosland, 2013) .....	147
Εικόνα 5-11. BHST και BHCT. Παρατηρούμενη θερμοκρασία έναντι πρόβλεψης, με και χωρίς τη χρήση συστήματος ψύξης των ρευστών διάτρησης (Habil Akram Rosland, 2013) .....	148
Εικόνα 5-12. Θερμοκρασιακή βαθμίδα & διακύμανση θερμοκρασίας με το βάθος προχώρησης των ερευνητικών γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικό (Ruiz, 2016) .....	150
Εικόνα 5-13. Κύκλος αποδοτικότητας σχεδιασμού (Ruiz, 2016) .....	151
Εικόνα 5-14. . Πραγματική συμπεριφορά των ρεολογικών ιδιοτήτων σε γεωτρήσεις ultra HP/HT στον Κόλπο του Μεξικό (Ruiz, 2016).....	152
Εικόνα 5-15. Διάγραμμα πίεσης-βάθους για την γεώτρηση Macondo (National Academy of Engineering and National Research Council, 2012) .....	155
Εικόνα 5-16. Float collar και shoe track στην παραγωγική σωλήνωση της γεώτρησης Macondo (Drake, 2010) .....	157

Εικόνα 5-17. Καταγραφή πίεσης εντός της διατρητικής στήλης (Solorzano, 2012).....	158
Εικόνα 5-18. Οι φραγμοί που δεν λειτούργησαν και η σχέση τους με τους κρίσιμους παράγοντες που συντέλεσαν στο δυστύχημα του Macondo (BP, 2010) .....	160
Εικόνα 5-19. Αναμόρφωση του νομοθετικού πλαισίου στις Η.Π.Α. μετά το δυστύχημα του Macondo το 2010 (BOEM, 2010) .....	164

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Γενική κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (Shadravan & Amani, 2012) .....	5
Πίνακας 2-2. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων HP/HT κατά Halliburton (HALLIBURTON, 2011) .....	6
Πίνακας 2-3. Περιπτώσεις γεωτρήσεων για εξόρυξη φυσικού αερίου από μεγάλα βάθη στον Κόλπο του Μεξικού (Shadravan & Amani, 2012).....	12
Πίνακας 3-1. Βασικές τεχνικές απαιτήσεις για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης σε συνθήκες αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας, παρουσία διαβρωτικών ρευστών και τοξικών αερίων & περαιτέρω δυσχέρειες στις γεωτρήσεις HP/HT (Glass, A.W./Highoose Limited, 2005).....	46
Πίνακας 3-2. Δυσκολίες τσιμέντωσης γεωτρήσεων HP/HT .....	59



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. Εισαγωγή

**Η** συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση που παρατηρείται για ενέργεια και συνεπώς για Εξόρυξη υδρογονανθράκων, ανάγκασε τις πετρελαϊκές εταιρίες να προσανατολιστούν στην εξερεύνηση και αξιοποίηση νέων κοιτασμάτων σε δυσκολότερα περιβάλλοντα. Για την αναζήτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου έγινε επιτακτική η ανάγκη για επέκταση της έρευνας σε περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από δυσμενείς συνθήκες. Οι δυσμενείς αυτές συνθήκες αναφέρονται κυρίως στις μεγάλες πιέσεις, στις μεγάλες θερμοκρασίες και στο μεγάλο βάθος που συναντώνται κατά την όρυξη των γεωτρήσεων.

Συνεπώς, ο εντοπισμός και η παραγωγή τέτοιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων απαιτεί από τις διάφορες εταιρείες να προσαρμοστούν και να συμμορφωθούν στην ιδέα αφιλόξενων συνθηκών στο εσωτερικό της γεώτρησης. Μπορεί μεν γεωτρήσεις HP/HT να έχουν ορυχθεί, να παράγουν και να ελέγχονται με τρόπο ανάλογο αυτού των συμβατικών γεωτρήσεων, το δυσμενές όμως περιβάλλον απαιτεί τη χρήση ποιοτικά ανώτερων υλικών και πρωτοποριακών τεχνολογιών.

Ποικίλες καινοτομίες που αφορούν στα ρευστά διάτρησης, στην σωλήνωση, στην τσιμέντωση, στον εξοπλισμό και στα υλικά, που χρησιμοποιούνται εν γένει κατά την όρυξη γεωτρήσεων (π.χ. ελαστομερή παρεμβύσματα), ώστε να καλυφθεί το κενό που υπάρχει και να καταστεί δυνατή η ασφαλής όρυξη των γεωτρήσεων και εν τέλει η παραγωγή από τέτοιου είδους ταμειυτήρες. Ωστόσο, όσον αφορά την ανάγκη μεγάλης επένδυσης σε νέα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, η βιομηχανία έχει καταλήξει στη συμφωνία ότι: τα αρκετά δύσκολα και κοστοβόρα πεδία θα παραμείνουν ανεκμετάλλευτα, κυρίως στα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση και η παρουσίαση των προβλημάτων και των δυσκολιών που συναντώνται σε περιβάλλοντα υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, καθώς και η ανάδειξη των λύσεων που εφαρμόζονται ή που τυχόν βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο ώστε να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις.

Τα πεδία υδρογονανθράκων σε περιοχές όπως ο Κόλπος του Μεξικού και η Βόρεια Θάλασσα ήταν εκείνα που διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην γενικότερη αξιοποίηση κοιτασμάτων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Με καινοτόμες τεχνολογίες και με την εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτά τα πεδία, οι πετρελαϊκές εταιρείες προχώρησαν στην εκμετάλλευση και άλλων κοιτασμάτων ανά τον κόσμο με ακόμα μεγαλύτερες τεχνικές προκλήσεις.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°. Γενικά στοιχεία για τις γεωτρήσεις σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

### 2.1. Ορισμοί

Το θέμα του καθορισμού των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που χαρακτηρίζουν μια γεώτρηση ως HT/HP τελεί υπό συζήτηση, διότι πολλαπλοί ορισμοί έχουν δοθεί από τότε που τέτοιου τύπου γεωτρήσεις αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστή κατηγορία. Ακόμα και σήμερα δεν υπάρχει κάποιο ευρέως αποδεκτό πρότυπο (industry-wide standard) που να ορίζει με σαφήνεια τις συνθήκες HP/HT και τις σχετικές συσχετίσεις (associated interrelationships) μεταξύ θερμοκρασίας και πίεσης.

Ο πρώτος ορισμός δόθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου (UK Department of Energy) στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Μπορεί, λοιπόν, κανείς με ασφάλεια να υποθέσει ότι είναι ίσως ο πρώτος «επίσημος» ορισμός που επινοήθηκε για να περιγράψει τις συνθήκες HPHT και συνοπτικά αναφέρει ότι:

*«Οι γεωτρήσεις στις οποίες η κανονική θερμοκρασία πυθμένα (undisturbed bottomhole temperature) στο αναμενόμενο βάθος του ταμιευτήρα (prospective reservoir depth) ή στο τελικό βάθος της γεώτρησης (total depth) είναι μεγαλύτερη από 300 °F (150 °C) και είτε η μέγιστη εκτιμώμενη πίεση πόρων (maximum anticipated pore pressure), οποιοδήποτε σχηματισμού που πρόκειται να ορυχθεί υπερβαίνει την ανηγμένη υδροστατική πίεση (hydrostatic gradient) των 0,8 psi/ft, είτε απαιτείται η χρήση εξοπλισμού ελέγχου των πιέσεων (pressure control equipment) με μέγιστη πίεση λειτουργίας (rated working pressure) που υπερβαίνει τα 10.000 psi, χαρακτηρίζονται ως γεωτρήσεις HP/HT».*

Με την πάροδο του χρόνου και μεταξύ των πετρελαϊκών εταιριών δόθηκαν και άλλοι σχετικοί ορισμοί. Το 2012 το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο (American Petroleum Institute – API) προσπάθησε να εναρμονίσει τις αποδεκτές τεχνολογίες και τους διάφορους ορισμούς και σχετικές ταξινομήσεις εκδίδοντας κατευθυντήριες οδηγίες (guidelines) σχετικά με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε συνθήκες HPHT. Έτσι στην σχετική Τεχνική Αναφορά του API (API Technical Report 1PER15K-1: Protocol for Verification and Validation of High-Pressure High-Temperature Equipment) ως γεωτρήσεις υψηλής πίεσης ορίζονται οι γεωτρήσεις στις οποίες η πίεση υπερβαίνει τα 15.000 psi [103 MPa], ενώ ως υψηλής θερμοκρασίας ορίζονται οι γεωτρήσεις στις οποίες η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 350 °F (177 °C). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρότυπα λειτουργίας (operating standards) του API αφορούν στις σχεδιαστικές προδιαγραφές (design

specifications) του εξοπλισμού (equipment) και των αποδεκτών υλικών (acceptable materials) που χρησιμοποιούνται σε συνθήκες HPHT, καθώς και τον δοκιμαστικό έλεγχο (testing) του εξοπλισμού ελέγχου και ολοκλήρωσης της γεώτρησης (well control and completion hardware), για την εγγύηση της ασφάλειας, της καταλληλότητας και της ακεραιότητας της γεώτρησης και του εξοπλισμού. Σύμφωνα με την ως άνω Τεχνική Αναφορά του API, υπάρχουν ακόμα τρία κριτήρια που πρέπει να πληρούνται ώστε μια γεώτρηση να χαρακτηρίζεται ως HPHT:

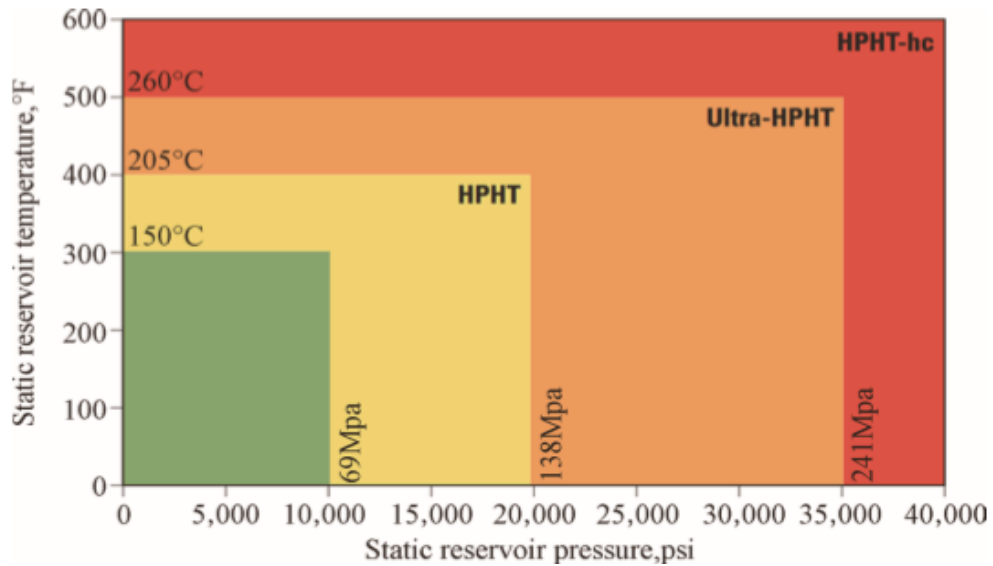
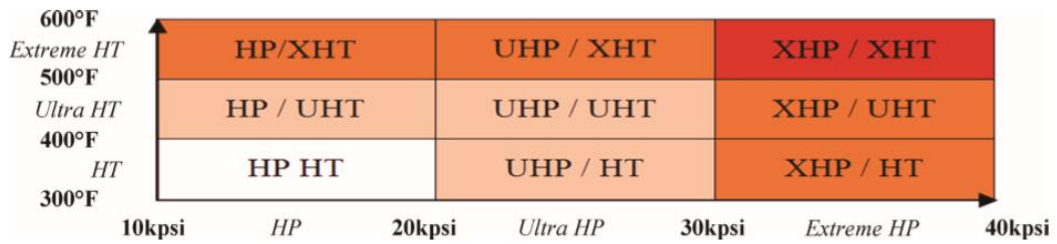
- Εκτιμώμενες συνθήκες στην επιφάνεια (anticipated surface conditions) που υπαγορεύουν τη χρήση εξοπλισμού ολοκλήρωσης και ελέγχου της γεώτρησης (completion and well control equipment) με πίεση λειτουργίας μεγαλύτερη των 15.000 psi.
- Εκτιμώμενη πίεση κλεισίματος (σφραγίσματος) της γεώτρησης στην επιφάνεια (anticipated shut-in surface pressure) μεγαλύτερη των 15.000 psi.
- Θερμοκρασία ρευστού που εξέρχεται από τη γεώτρησης (flowing temperature) μεγαλύτερη των 350 °F. (Smithson, 2016)

Στην συνέχεια και άλλοι οργανισμοί και εταιρείες προσέγγισαν το ζήτημα των γεωτρήσεων HP/HT και πρότειναν τους δικούς τους ορισμούς με βάση την εμπειρία και τις γνώσεις που υπήρχαν έως τότε. Ανάλογο ορισμό με αυτόν του Υπουργείου Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου δημοσίευσε και η εταιρεία Schlumberger, το 2008 (DeBryjijn, και συν., 2008), σημειώνοντας ότι πολλές γεωτρήσεις που έχουν ορυχθεί, αρκετό καιρό πριν δοθεί ο παραπάνω ορισμός, πληρούσαν τα κριτήρια ώστε να χαρακτηριστούν ως HP/HT.

Η εταιρεία Schlumberger ορίζει και ταξινομεί τα κριτήρια για τις HP/HT έτι περαιτέρω (Εικόνα 2-1), βάσει ενός συστήματος που λαμβάνει υπόψη και τη θερμική σταθερότητα (thermal stability) των μηχανικών εξαρτημάτων (όπως π.χ. τα ελαστομερή παρεμβύσματα – elastomeric seals), την καταλληλότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων (suitability of electronics) και την μέγιστη πίεση λειτουργίας (pressure ratings) του εξοπλισμού.

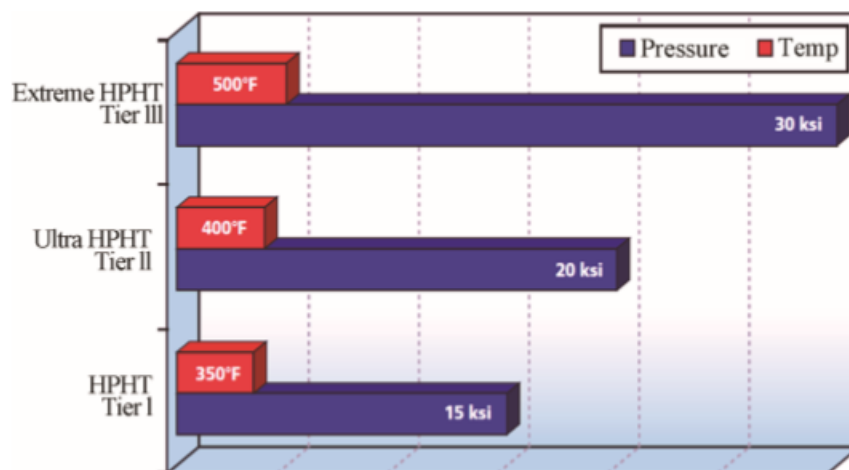
Για να υπάρξει όμως η σωστή αναγνώριση των συνθηκών HP/HT, ώστε να επιτευχθεί η ασφάλεια σε κάθε περίπτωση και να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν, έχει γίνει προσπάθεια ταξινόμησης των γεωτρήσεων υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, κατά την οποία, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1 συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας χαρακτηρίζονται αυτές για τις οποίες ισχύει ότι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης κυμαίνεται μεταξύ 10.000 - 20.000 psi και η θερμοκρασία μεταξύ 300 °F - 400 °F. Όποια εκ των συνθηκών αυτών υπερβαίνει τα προαναφερθέντα ανώτατα όρια, χαρακτηρίζεται ως υπερύψηλη (Ultra High) ή εξαιρετικά υψηλή (Extreme High) κατάσταση. Ομοίως έχει κατηγοριοποιήσει και η Schlumberger τις γεωτρήσεις υψηλής κατάστασης, ωστόσο διαφοροποιεί τις συνθήκες υπερύψηλης και εξαιρετικά υψηλής κατάστασης (Εικόνα 2-1).

Πίνακας 2-1. Γενική κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (Shadravan & Amani, 2012)



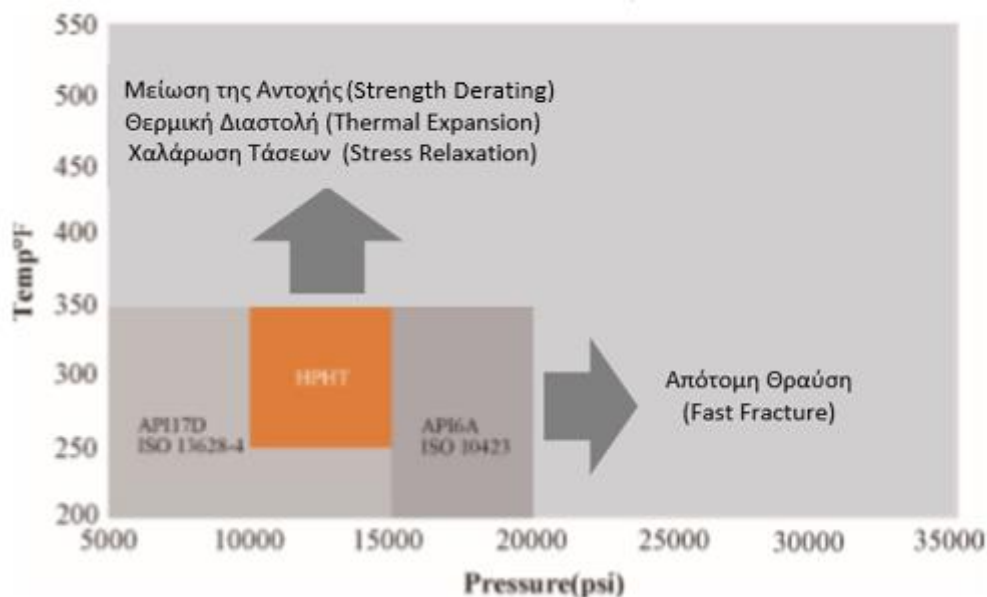
Εικόνα 2-1. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Schlumberger (2008) (Shadravan & Amani, 2012)

Πέραν της παραπάνω κατηγοριοποίησης, έχουν δοθεί κατά καιρούς και άλλες διαβαθμίσεις τιμών των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας, οι οποίες κατηγοριοποιούν τις γεωτρήσεις με σχετικά διαφορετικό τρόπο ως προς τα όρια των τιμών αυτών (Εικόνες 2-2, 2-3).



Εικόνα 2-2. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Baker Hughes (2005) (Shadravan & Amani, 2012)

Στην Εικόνα 2-2, ως συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ορίζονται αυτές για τις οποίες επικρατεί πίεση από 15.000 έως 20.000 psi και η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 350 °F και 400 °F. Παρατηρείται ότι η κατηγοριοποίηση της Baker Hughes είναι λιγότερο συντηρητική από αυτή της Schlumberger, καθώς το κατώτερο όριο ορισμού των HP/HT γεωτρήσεων της πρώτης είναι μεγαλύτερο από αυτό της δεύτερης εταιρείας. Ωστόσο, στην κατηγοριοποίηση των εξαιρετικά υψηλών HP/HT παρατηρείται το αντίθετο, καθώς η Baker Hughes θέτει το κατώτερο όριο στα 30.000 psi, ενώ η Schlumberger στα 35.000 psi.



Εικόνα 2-3. Όρια πίεσης και θερμοκρασίας για χαρακτηρισμό θαλάσσιων και χερσαίων γεωτρήσεων ως υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (θαλάσσιες γεωτρήσεις HP/HT: 10.000-15.000 psi / 250-350 °F, χερσαίες γεωτρήσεις HP/HT: 10.000-20.000 psi / 250-350 °F) (Shadravan & Amani, 2012)

Όσον αφορά στην Εικόνα 2-3, ως HP/HT συνθήκες ορίζονται αυτές για τις οποίες επικρατεί πίεση μεταξύ 10.000 - 15.000 psi και θερμοκρασία μεταξύ 250 °F και 400 °F. Η κατηγοριοποίηση, σε αυτή την περίπτωση, πραγματοποιήθηκε με βάση τις επιπτώσεις των συνθηκών HP/HT στον υποθαλάσσιο εξοπλισμό, καθώς σε πιέσεις μεγαλύτερες των 20.000 psi ο εξοπλισμός κινδυνεύει να αστοχήσει και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350 °F προκαλείται μείωση της αντοχής του, θερμική διαστολή και χαλάρωση των τάσεων.

Επίσης η εταιρεία Halliburton έχει παρουσιάσει ένα δικό της πίνακα, κατατάσσοντας τις γεωτρήσεις HP/HT με διαφορετικό τρόπο (Πίνακας 2-2).

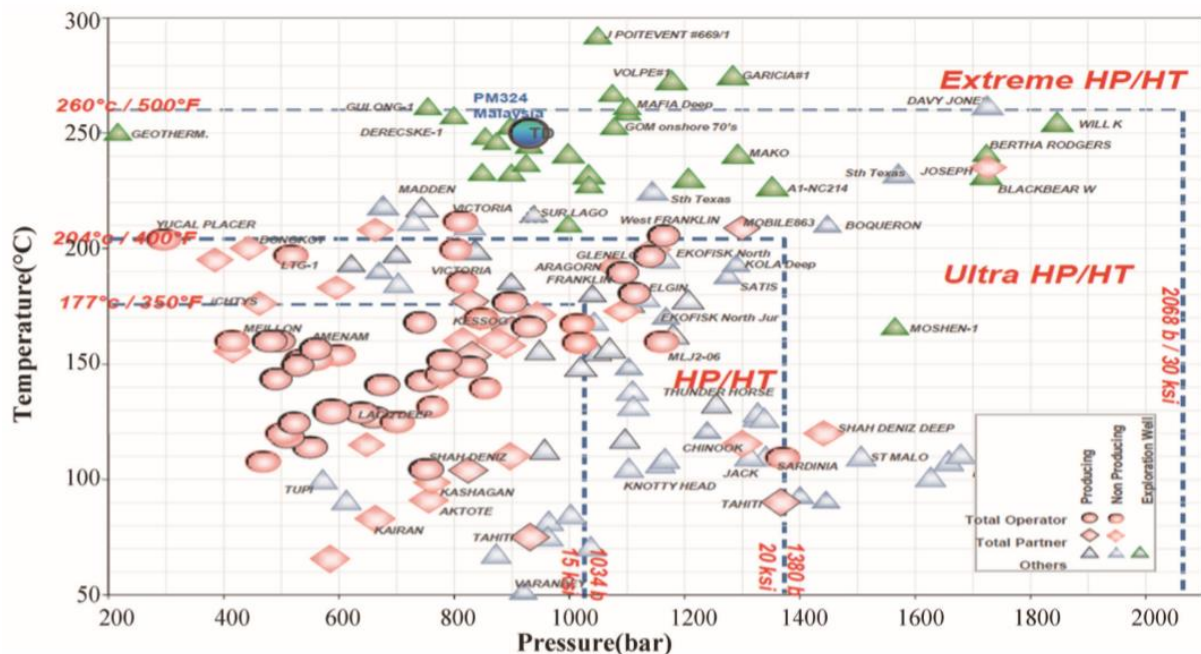
Πίνακας 2-2. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων HP/HT κατά Halliburton (HALLIBURTON, 2011)

	Πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (Bottom hole pressure)	Θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης (Bottom hole temperature)
<b>HP/HT</b>	>10.000 psi (69 MPa) - 15.000 psi (103 Mpa)	>300°F (150°C) - 350°F (175°C)
<b>Extreme HP/HT</b>	>15.000 psi (103 MPa) - 20.000 psi (138 Mpa)	>350°F (175°C) - 400°F (200°C)
<b>Ultra HP/HT</b>	>20.000 psi (138 MPa)	>400°F (200°C)

Στον Πίνακα 2-2 παρατηρείται ότι η προσέγγιση της Halliburton είναι η περισσότερο συντηρητική, καθώς κατηγοριοποιεί όλες τις γεωτρήσεις, για τις οποίες επικρατεί πίεση

μεγαλύτερη των 20.000 psi και θερμοκρασία υψηλότερη 400 °F, στην κατάσταση των υπερυψηλών (Ultra High) συνθηκών. Επιπλέον, η Halliburton κατατάσσει τις Ultra High συνθήκες παραπάνω από τις Extreme High, σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες κατατάξεις, όπου συμβαίνει το αντίθετο.

Συνεπώς, μπορεί μεν η διαφοροποίηση να είναι μικρή, αλλά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διάφορες λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα, ώστε να διανοιχθεί οικονομικά και με ασφάλεια μία γεώτρηση. Σε κάθε περίπτωση όμως, εάν πληρείται έστω και ένα από τα δύο κριτήρια, δηλαδή εάν η πίεση ή η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερα από τα όρια που ορίζει ο κάθε οργανισμός ή η κάθε εταιρία, τότε η υπό εξόρυξη γεώτρηση κατατάσσεται στην κατηγορία HP/HT (Εικόνα 2-4). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο Ηνωμένο Βασίλειο οι γεωτρήσεις για τις οποίες ισχύει ότι η θερμοκρασία στον πυθμένα ξεπερνά τους 149 °C (300 °F), η ελάχιστη βαθμίδα πίεσης των πόρων είναι 0,8 psi/ft ( $\approx 15,3$  lbm/gal) και απαιτείται αντιακρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας (Blow Out Preventer – BOP) ικανός να παραλάβει πιέσεις μεγαλύτερες των 10.000 psi, χαρακτηρίζονται ως HP/HT. Στη Βόρεια Θάλασσα δε, οι γεωτρήσεις που εμφανίζουν θερμοκρασίες ίσες με 250 °F μπορούν να χαρακτηριστούν ως HP/HT.



Εικόνα 2-4. Κατηγοριοποίηση γεωτρήσεων υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κατά Total (Shadravan & Amani, 2012)

Στην Εικόνα 2-4 παρουσιάζονται ορισμένες γεωτρήσεις οι οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί από την εταιρεία Total. Η κατηγοριοποίηση της Total ακολουθεί τη γενική κατηγοριοποίηση και παρατηρείται ότι εάν έστω και ένα από τα δύο κριτήρια να πληρείται (πίεσης ή θερμοκρασίας), η γεώτρηση χαρακτηρίζεται ως HP/HT.

Εν κατακλείδι, οι γεωτρήσεις που παρουσιάζουν τις ακόλουθες συνθήκες στον πυθμένα της γεώτρησης, θα χαρακτηριστούν ως υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (HP/HT wells), εάν ισχύει έστω και ένα από τα παρακάτω κριτήρια:

- ❖ πίεση που υπερβαίνει τα 10.000 psi και
- ❖ θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 300 °F
- ❖ ελάχιστη βαθμίδα πίεσης των πόρων 0,8 psi/f

Τέλος, οι υψηλές πιέσεις και οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν άμεσα την αντοχή, τη λειτουργία και τη μόνωση του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, γεγονός που έχει άμεσο αντίκτυπο στην ασφάλεια και στην οικονομικότητα της γεώτρησης. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων που συναντώνται σε τέτοιες συνθήκες, καθώς και η διεύρυνση των υποδομών μεταφοράς παραγόμενων προϊόντων, βοήθησαν ώστε οι πετρελαϊκές εταιρίες να έχουν πλέον τη δυνατότητα να ερευνήσουν, αλλά και να εκμεταλλευτούν κοιτάσματα σε συνθήκες HT/HP.

## 2.2. Ιστορική επισκόπηση

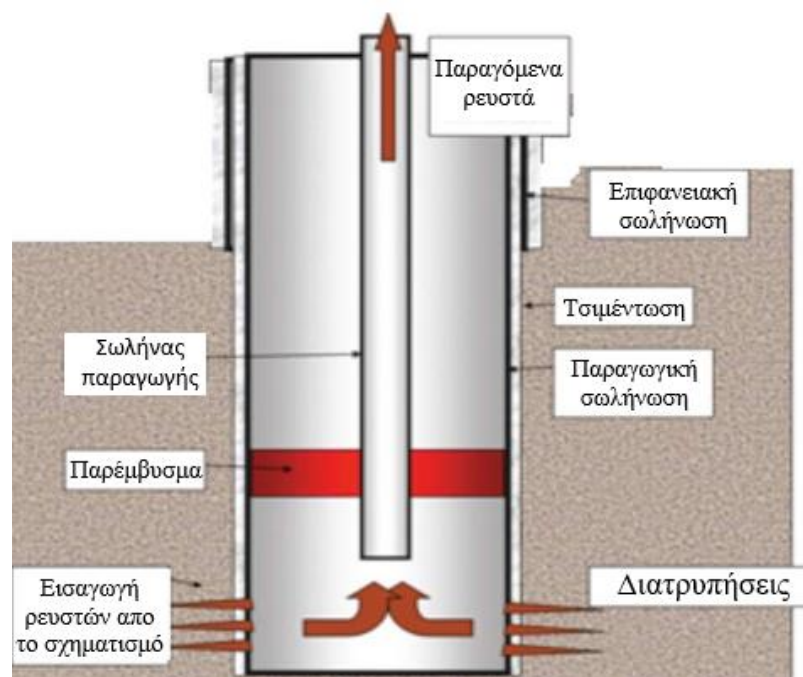
Η όρυξη γεωτρήσεων σε περιβάλλοντα HP/HT δεν είναι κάτι καινούργιο. Η πρώτη δοκιμή σε γεώτρηση HP/HT (HP/HT well test) διεξήχθη το 1965 από την εταιρεία Philips Petroleum Company στη γεώτρηση Josephine “A” No. 1, στην περιοχή Perry County, της πολιτείας Μισισιπή στις Η.Π.Α. Τα ρευστά που παρήχθησαν αποτελούνταν κατά 45-65% από μεθάνιο μαζί με 8-10 bbbls νερού/MMcf. Η περιεκτικότητά τους σε H<sub>2</sub>S κυμαινόταν μεταξύ 27% και 46% και σε CO<sub>2</sub> μεταξύ 3% και 9%. Ο σχηματισμός Smackover, όπου διανοιχθήκε η συγκεκριμένη γεώτρηση, εντοπίστηκε σε βάθη 19.700-22.250 ft και παρουσίαζε πιέσεις μεταξύ 17.500 και 22.000 psi, και θερμοκρασίες στον πυθμένα της γεώτρησης μεταξύ 365 °F και 385 °F.

Η πρώτη ολοκλήρωση σε γεώτρηση HP/HT (HP/HT well completion) εκτελέστηκε από την εταιρεία Shell Oil Company το 1969 στο πεδίο Thomasville, και πάλι στο Μισισιπή των Η.Π.Α., αλλά η γεώτρηση εγκαταλείφθηκε λόγω αστοχίας του εξοπλισμού ολοκλήρωσης, αν και χρησιμοποιήθηκαν υψηλής αντοχής σωλήνες και σύνδεσμοι (high-strength tubulars and connections), packers (παρέμβυσμα απομόνωσης) και ελαστομερή παρεμβύσματα (elastomer seals). Στο ίδιο πεδίο η δεύτερη προσπάθεια ολοκλήρωσης γεώτρησης υπήρξε επιτυχής, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε packer. Τα δεδομένα από αυτές τις γεωτρήσεις κατέδειξαν ότι σε περιβάλλοντα με έντονη παρουσία H<sub>2</sub>S, απαιτείται εξοπλισμός (tubulars and connectors) από υλικό ανθεκτικό σε διάβρωση υπό συνθήκες εντατικού πεδίου..

Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές της δεκαετίας του 1980 πολλές γεωτρήσεις φυσικού αερίου που ορύχθηκαν στον σχηματισμό Tuscaloosa, στη Λουιζιάνα των Η.Π.Α., αλλά και σε άλλες νότιες πολιτείες της ίδιας χώρας, συνάντησαν θερμοκρασίες πάνω από το 350 °F (177 °C) και πιέσεις πάνω από 16.000 psi. Σε πολλές δε περιπτώσεις συνάντησαν και έντονα διαβρωτικό περιβάλλον (MacAndrew, και συν., 1993). Ο σχηματισμός Tuscaloosa ανακαλύφθηκε από την εταιρεία Chevron το 1975 και εντοπίστηκε σε βάθος 16.000-21.000 ft. Η πίεση στον ταμιευτήρα ήταν μεταξύ 8.000 και 21.000 psi και

η θερμοκρασία μεταξύ 325 °F και 380 °F. Η περιεκτικότητα των ρευστών του ταμιευτήρα σε H<sub>2</sub>S έφτανε τα 20 ppm και σε CO<sub>2</sub> έως 8%. Η ολοκλήρωση των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε με διπλή μόνιμη στήλη (μια στήλη για τις εργασίες κλεισίματος της γεώτρησης και εισπίεσης αναστολέων διάβρωσης και μια δεύτερη για παραγωγή). Σε αυτό το πεδίο διαπιστώθηκε ότι η τεχνολογία στεγανοποίησης των σωλήνων παραγωγής απαιτούσε βελτίωση. Για να επιτευχθεί αυτό ήταν απαραίτητο να γίνουν βελτιώσεις στα μη μεταλλικά υλικά στεγανοποίησης και έτσι κατά την περίοδο αυτή μεταξύ των βελτιώσεων που επιτεύχθηκαν ήταν και η υιοθέτηση ειδικών ελαστομερών FFKM (perfluoroelastomer - υπερφθοροελαστομερή) και των θερμοπλαστικών στα συστήματα στεγανοποίησης των σωλήνων παραγωγής.

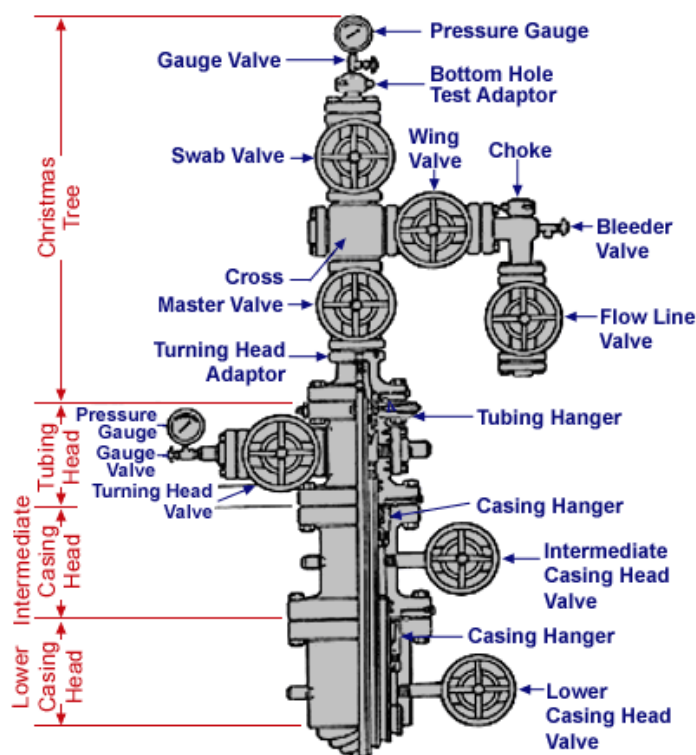
Το πρώτο θαλάσσιο πεδίο, που αργότερα χαρακτηρίστηκε ως HP/HT, ήταν το Mobile Bay που ανακαλύφθηκε από την εταιρεία Mobil Oil Corporation το 1981, στα ανοιχτά της Αλαμπάμα, στις Η.Π.Α. Ο σχηματισμός ενδιαφέροντος ήταν ο Norphlet, ο οποίος βρισκόταν σε βάθος περίπου 20.000 ft και παρουσίαζε πιέσεις στον ταμιευτήρα από 10.000 ως 20.000 psi και θερμοκρασίες πάνω από 400 °F. Τα παραγόμενα ρευστά περιείχαν τυπικά ως 10% H<sub>2</sub>S και ως 4% CO<sub>2</sub>. Επιπρόσθετο πρόβλημα αποτελούσε η παραγωγή στοιχειακού θείου που εξανάγκασε στην κατασκευή τοπικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας των παραγόμενων ρευστών. Και σε αυτή την περίπτωση τα προβλήματα εντοπίστηκαν στην αντοχή των παρεμβυσμάτων απομόνωσης (Lehr & Collins, 2014) (Εικόνα 2-5).



Εικόνα 2-5. Παρέμβυσμα απομόνωσης (Lehr & Collins, 2014)

Ο όρος HP/HT παρουσιάστηκε για πρώτη φορά και εξηγήθηκε το 1990 στην έκθεση Cullen Report, η οποία εκδόθηκε ύστερα από το δυστύχημα στην πλατφόρμα Piper Alpha στον τομέα Δανίας, Νορβηγίας, Βρετανίας στη Β. Θάλασσα (Oil and Gas IQ, 2014). Ωστόσο, ο πρώτος εξοπλισμός κεφαλής γεώτρησης (wellhead) ικανός να αντέχει πιέσεις έως και 20.000 psi κατασκευάστηκε το 1972 και βελτιώθηκε περαιτέρω το 1974, ώστε να αντέχει πιέσεις μέχρι και 30.000 psi (Εικόνα 2-6). Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις

οφείλονται στην ανακάλυψη του πεδίου Thomasville στην Πολιτεία του Μισισιπή των ΗΠΑ. Παράλληλα με την ανακάλυψη του πεδίου Thomasville, εντοπίστηκε και το πεδίο Piney Woods, στην ίδια Πολιτεία.



Εικόνα 2-6. Εξοπλισμός κεφαλής (Daum - 블로그, 2013)

Στη Βόρεια Θάλασσα η πρώτη εμπειρία σε συνθήκες HP/HT ξεκίνησε με την ανακάλυψη από την Texaco του πεδίου Erskine το 1981. Εδώ παρατηρήθηκαν πιέσεις στον ταμιευτήρα που έφταναν τα 14.000 psi και θερμοκρασίες 370 °F, ενώ τα παραγόμενα ρευστά περιείχαν 16 ppm H<sub>2</sub>S και 4,1% CO<sub>2</sub>. Η παραγωγή στο πεδίο Erskine ξεκίνησε, ωστόσο, πολύ αργότερα, το 1997. Στη συνέχεια ανακαλύφθηκαν και άλλα πεδία στη Βόρεια Θάλασσα που παρουσιάζουν συνθήκες HP/HT, όπως τα πεδία Franklin, Elgin και West Franklin που ανακαλύφθηκαν από τις εταιρείες Elf/Total το 1986, το 1991 και το 2003, αντίστοιχα. Οι ταμιευτήρες εντοπίστηκαν σε βάθος 17.400 ως 19.000 ft και εμφάνισαν πιέσεις ως 16.700 psi, και θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 370 °F και 423 °F. Τα πεδία αυτά εξακολουθούσαν να αποτελούν ως το 2014 την πιο εκτεταμένη εκμετάλλευση κοιτασμάτων HP/HT στον κόσμο.

Άλλα πεδία που ανακαλύφθηκαν σχετικά πιο πρόσφατα στη Βόρεια Θάλασσα είναι το πεδίο Jade, που εντοπίστηκε από την ConocoPhillips το 1995 και ξεκίνησε την παραγωγή το 2002 και το Shearwater, που εντοπίστηκε από την Shell το 1991 και ξεκίνησε την παραγωγή το 2000. Σε αυτά τα πεδία η θερμοκρασία στον ταμιευτήρα κυμαίνεται μεταξύ 350 °F και 396 °F και η πίεση από 12.100 psi (Jade) έως 15.000 psi (Shearwater). Η περιεκτικότητα των παραγόμενων ρευστών, ωστόσο, σε H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> είναι σχετικά μικρή (ως 50 ppm και 3%, αντίστοιχα), συγκριτικά με άλλα κοιτάσματα HP/HT.

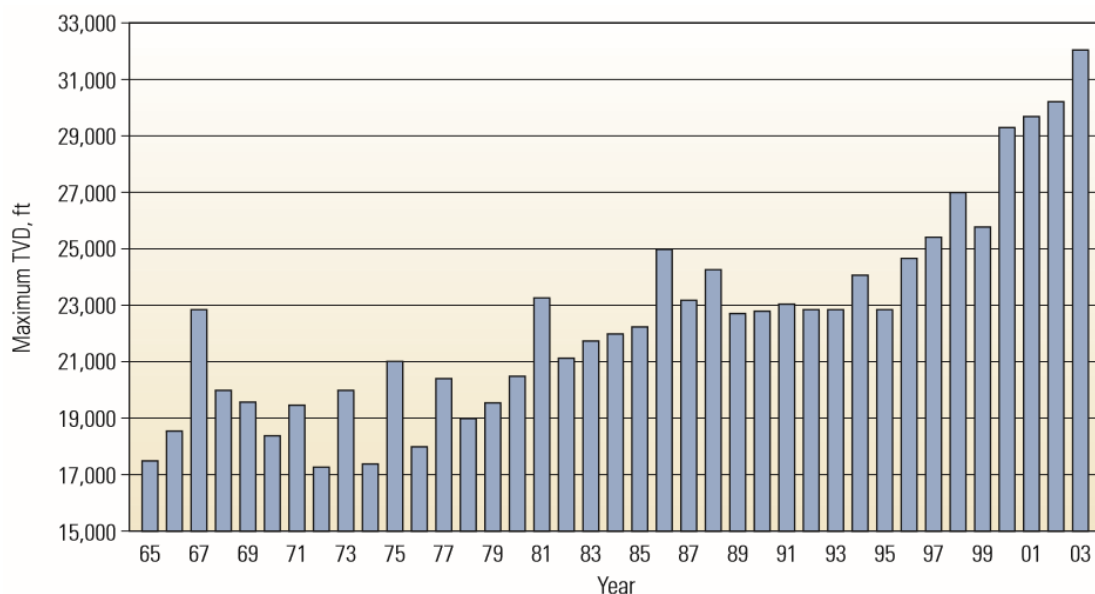


Το 2005 ξεκίνησε επίσης η παραγωγή σε δύο ακόμα πεδία HP/HT στη Βόρεια Θάλασσα. Πρόκειται για το πεδίο Kristin που διαχειρίζεται η Statoil και ανακαλύφθηκε το 1995 και το πεδίο Rhum που διαχειρίζεται η BP και ανακαλύφθηκε το 1977 (με πίεση ταμιευτήρα 12.500 psi και θερμοκρασία 350 °F).

Στη συνέχεια η σκυτάλη στην ανάπτυξη υποθαλάσσιων κοιτασμάτων HP/HT πέρασε στον Κόλπο του Μεξικού. Εδώ το πεδίο Thunderhorse (της BP), που παρουσιάζει πιέσεις ταμιευτήρα ως 18.000 psi και θερμοκρασίες ως 270 °F, ανακαλύφθηκε το 1999 και ξεκίνησε την παραγωγή το 2008. Τα Cascade και Chinook (της Petrobras) παρουσιάζουν πιέσεις στον ταμιευτήρα έως 19.500 psi και θερμοκρασίες ως 250 °F. Τα πεδία αυτά ανακαλύφθηκαν το 2002-2003 και η παραγωγή ξεκίνησε το 2012. Τα πεδία Tahiti και Jack/St. Malo ανακαλύφθηκαν από την Chevron το 2002 και παρουσιάζουν πιέσεις ταμιευτήρα έως 19.500 psi και θερμοκρασίες ως 265 °F. Το Tahiti ξεκίνησε παραγωγή το 2009 (Lehr & Collins, 2014).

Όσον αφορά στα υποθαλάσσια κοιτάσματα, ο διαθέσιμος εξοπλισμός στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ήταν ικανός να ανταπεξέλθει σε πιέσεις έως 20.000 psi. Συγκεκριμένα, στην υφαλοκρηπίδα των ΗΠΑ (OCS – Outer Continental Shelf), τα κοιτάσματα φυσικού αερίου που εντοπίστηκαν στην πλειοψηφία τους εμφάνιζαν πιέσεις γύρω στα 15.000 psi, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση κεφαλών γεώτρησης (wellheads) και εξοπλισμού επιφάνειας (Christmas Trees) ικανών να αντέξουν πιέσεις έως και 20.000 psi, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στον Μισισιπή και τη Λουϊζιάνα.

Από τα μέσα του 1990, τα βάθη των γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικού αυξάνονται διαρκώς και αυξάνεται αντίστοιχα και η πίεση και η θερμοκρασία στον πυθμένα τους (Εικόνα 2-7). Επειδή οι γεωτρήσεις HT/HP είναι γενικά μεγάλου βάθους, η εξαιρετικά μικρή τελική διάμετρος της γεώτρησης εντός του ταμιευτήρα καθιστά την εκτέλεση διαγραφιών και δειγματοληψίας αρκετά δύσκολη.



Εικόνα 2-7. Αύξηση του βάθους των γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικού. Τα επόμενα χρόνια αναμένονται πρωτόγνωρες συνθήκες στον πυθμένα των γεωτρήσεων, με τη θερμοκρασία στον πυθμένα να υπερβαίνει τους 260 °C και την πίεση να προσεγγίζει τα 241 MPa (DeBryjijn, et al., 2008)

Συζητήσεις λαμβάνουν χώρα από το 2010 για την χρήση εξοπλισμού ικανού να αντέξει πιέσεις έως και 25.000 psi, σε γεωτρήσεις στην υφαλοκρηπίδα των ΗΠΑ (Payne, 2010). Αυτό διότι, με την πάροδο των χρόνων, η ανάγκη για ανθεκτικότερες κεφαλές γεώτρησης και εξοπλισμού επιφάνειας (Christmas Trees) είναι επιτακτική.

Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις εξόρυξης φυσικού αερίου από γεωτρήσεις HP/HT σε μεγάλα βάθη στον Κόλπο του Μεξικού. Συγκεκριμένα, στον πίνακα αναγράφεται το έτος που ξεκίνησε η όρυξη της κάθε γεώτρησης, η εταιρεία στην οποία ανήκει, το μέγιστο βάθος της γεώτρησης και η τοποθεσία της.

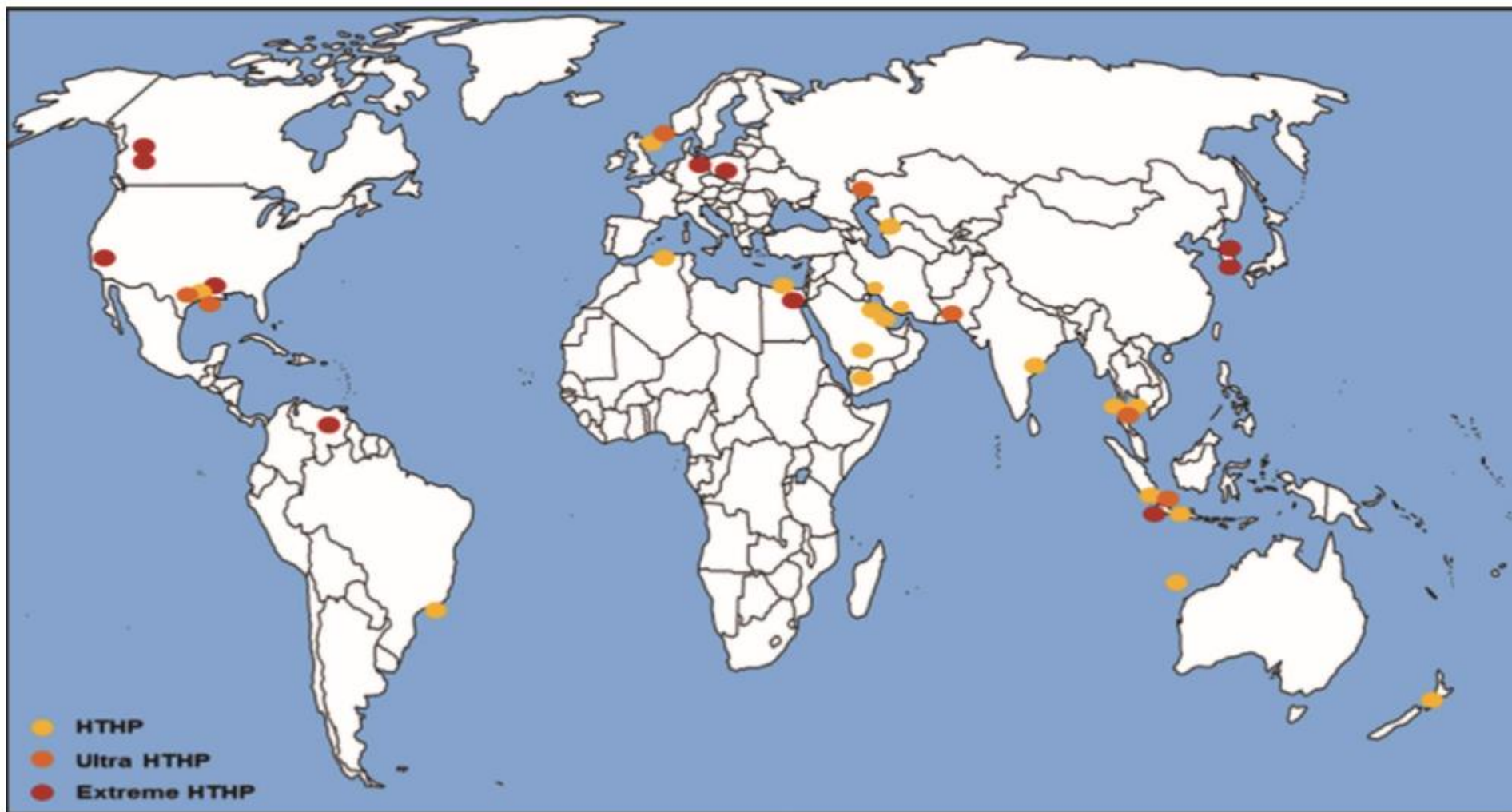
Πίνακας 2-3. Περιπτώσεις γεωτρήσεων για εξόρυξη φυσικού αερίου από μεγάλα βάθη στον Κόλπο του Μεξικού (Shadravan & Amani, 2012)

Year	Operator	Well Name	TVD (ft)	Location
2003	Shell	Shark	25,745	South Timbalier
2005	Chevron	Cadillac	24,795	Viosca Knoll
2005	Shell	Joseph	25,537	High Island 10
2006	ExxonMobil	Blackbeard	30,067	South Timbalier
2008	McMoran	Blackbeard RE	32,997	South Timbalier
2009	BP	Will K	28,404	High Island
2009	McMoran	Ammazzo	25,488	South Marsh Island
2009	McMoran	Davy Jones	29,300	South Marsh Island
2010	Armstrong O&G	BP Fee	15,800<	Cameron Parish
2010	McMoran	Blackbeard East	32,000<	South Timbalier
2011	McMoran	Davy Jones Offset	30,700<	South Marsh Island
2011	McMoran	Lafitte Project	23,000<	Eugene Island

Όπως γίνεται κατανοητό και από τον Πίνακα 2-3, με την πάροδο των χρόνων, παρατηρείται αύξηση του συνολικού βάθους των γεωτρήσεων κάτι που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σημαίνει και δυσμενέστερες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Παράδειγμα αποτελεί η γεώτρηση Joseph, η οποία ορύχθηκε το 2005 και εμφανίζει μέγιστη πίεση 25.000 psi και μέγιστη θερμοκρασία 470 °F και στη συνέχεια η γεώτρηση Blackbeard, που ορύχθηκε το 2006 και εμφανίζει μέγιστη πίεση 30.000 psi και μέγιστη θερμοκρασία 460 °F. Μετά ακολουθούν και άλλες γεωτρήσεις, όπως η Blackbeard East που εμφανίζει ακόμα μεγαλύτερη πίεση (Oil and Gas IQ, 2013).

## 2.3. Σύγχρονη πραγματικότητα

Παρά τις τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζουν οι γεωτρήσεις σε συνθήκες HP/HT, το ενδιαφέρον των πετρελαϊκών εταιρειών παραμένει υψηλό και ο αριθμός αυτών των γεωτρήσεων συνεχώς αυξάνει. Έως το 2000 έγινε εκμετάλλευση κοιτασμάτων που παρουσιάζουν πιέσεις μεγαλύτερες των 10.000 psi (68,9 MPa) σε πολλές περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα για την παραγωγή φυσικού αερίου. Γεωτρήσεις με υψηλή θερμοκρασία πυθμένα, που υπερβαίνει τους 300 °F (149 °C) έχουν ορυχθεί στο Κατάρ, στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (Ras al Khaimah), στο Σουδάν και αλλού. Στην Κίνα έχει προχωρήσει η ανάπτυξη πεδίων με θερμοκρασίες άνω των 500 °F (Εικόνα 2-8).



Εικόνα 2-8. Γεωτρητική δραστηριότητα σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ανά τον κόσμο (Shadravan & Amani, 2012)

Οι συνθήκες είναι ακόμα πιο δύσκολες εκεί όπου οι υψηλές πιέσεις συνυπάρχουν με υψηλές θερμοκρασίες, όπως στην Αγκόλα, στις Η.Π.Α., την Υεμένη και τη Βόρεια Θάλασσα (Εικόνα 2-8). Σε αυτές τις περιοχές δεν είναι ασυνήθιστες θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 350 °F (177 °C) να συνυπάρχουν με βαθμίδες πίεσης που απαιτούν τη χρήση ρευστού διάτρησης ανηγμένης ειδικής πυκνότητας 0,84 psi/ft . Το 1998, οι πιο ακραίες συνθήκες που είχαν καταγραφεί ως τότε εντοπίζονταν στη Βόρεια Θάλασσα (γεώτρηση Ranger 29/5B-4), στην Υεμένη (γεώτρηση της Shell Abbass 1) και στις Η.Π.Α. (γεώτρηση Sohio M.E. Coward) με θερμοκρασίες άνω των 400 °F και απαιτούμενο ρευστό διάτρησης ανηγμένης ειδικής πυκνότητας 0,96 psi/ft (2,22 g/cm<sup>3</sup>) (Adamson, και συν., 1998).

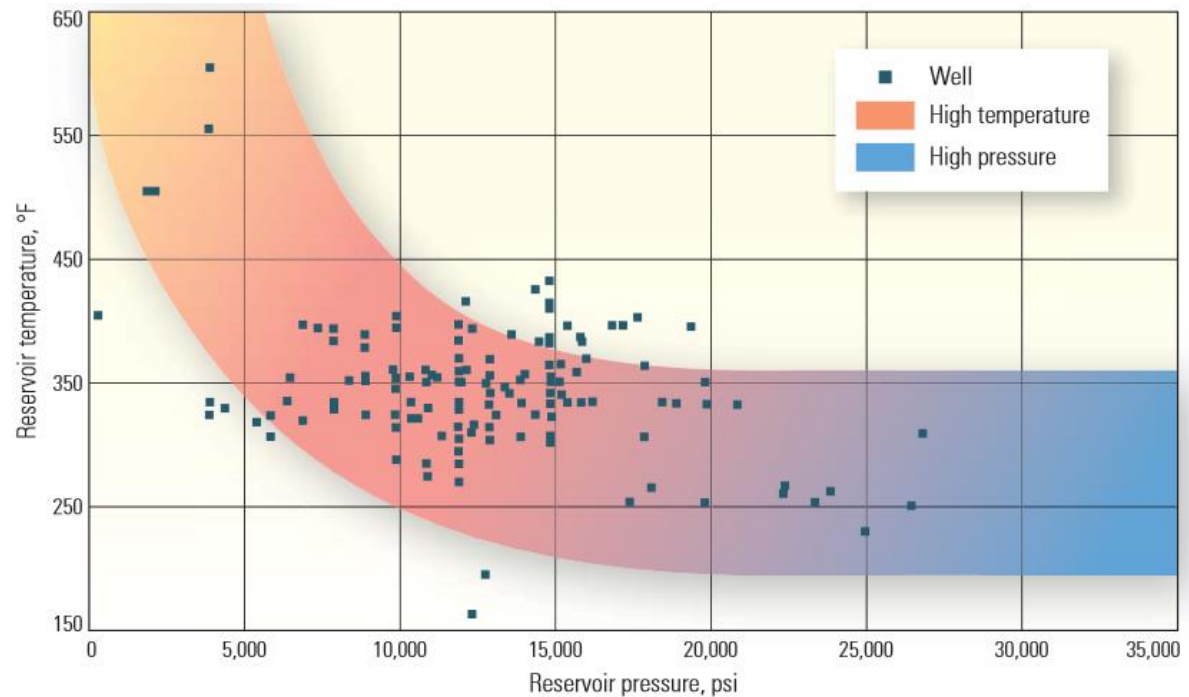
Σήμερα, προχωράει με γοργό ρυθμό η όρυξη γεωτρήσεων HP/HT για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων φυσικού αερίου μεγάλου βάθους στην υφαλοκρηπίδα των Η.Π.Α. στον Κόλπο του Μεξικού. Μεγάλες, αλλά και μικρότερες ανεξάρτητες εταιρείες ορύσσουν σε χερσαίο περιβάλλον ή σε μικρά βάθη θάλασσας γεωτρήσεις που φτάνουν σε βάθος τα 30.000 ft, στις οποίες η πίεση στον ταμιευτήρα είναι μεγαλύτερη από 25.000 psi και η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 450 °F. Αυτές οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας κατατάσσουν τις γεωτρήσεις αυτές στην κατηγορία ultra HP/HT. Οι εταιρείες αυτές στοχεύουν συλλογικά στην εκμετάλλευση κοιτασμάτων φυσικού αερίου με αποθέματα που εκτιμώνται ως άνω των 20 Tcf – περίπου στο ύψος της ετήσιας κατανάλωσης φυσικού αερίου από τις Η.Π.Α. (Lehr & Collins, 2014).

Όσον αφορά στις Ηνωμένες Πολιτείες, σύμφωνα με το SEAB (Secretary of Energy Advisory Board), αναμένεται η παραγωγή φυσικού αερίου να αυξηθεί από τα 21 Tcf το 2009 στα 26,3 Tcf το 2035 (Shadravan & Amani, 2012). Ειδικότερα, στις περιοχές Haynesville και στο Νότιο Ντάλας, έχει καταγραφεί η διάνοιξη περισσότερων από 300 γεωτρήσεων οι οποίες έχουν θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης μεταξύ των 350 °F και των 380 °F και η πίεσή τους ξεπερνά τα 10.000 psi. Η μεγάλη αυτή πίεση επιτρέπει στα κοιτάσματα να παράγουν με μεγαλύτερους ρυθμούς σε σχέση με τις συμβατικές γεωτρήσεις και η πλειοψηφία αυτών των γεωτρήσεων έχει κατακόρυφο βάθος το οποίο κυμαίνεται από 12.000 ft έως 19.000 ft (Shadravan & Amani, 2012)..

Το 2011, στο 7<sup>ο</sup> Ετήσιο Συνέδριο για γεωτρήσεις HP/HT (7<sup>th</sup> Annual HPHT Wells Summit) οι πετρελαϊκές εταιρείες που συμμετείχαν ερωτήθηκαν εάν κάποια από τις δραστηριότητές τους σχετίζεται με τις γεωτρήσεις HP/HT, με το 87,1% να απαντάει θετικά. Από αυτό το ποσοστό, το 60% απάντησε ότι σκοπεύει να επενδύσει σε πρόγραμμα το οποίο περιλαμβάνει την όρυξη γεωτρήσεων HP/HT εντός των επόμενων δύο χρόνων. Το ποσό τέτοιων επενδύσεων, μέχρι το 2015, ανερχόταν σε περίπου 200 δις δολάρια (Haïdar, 2011).

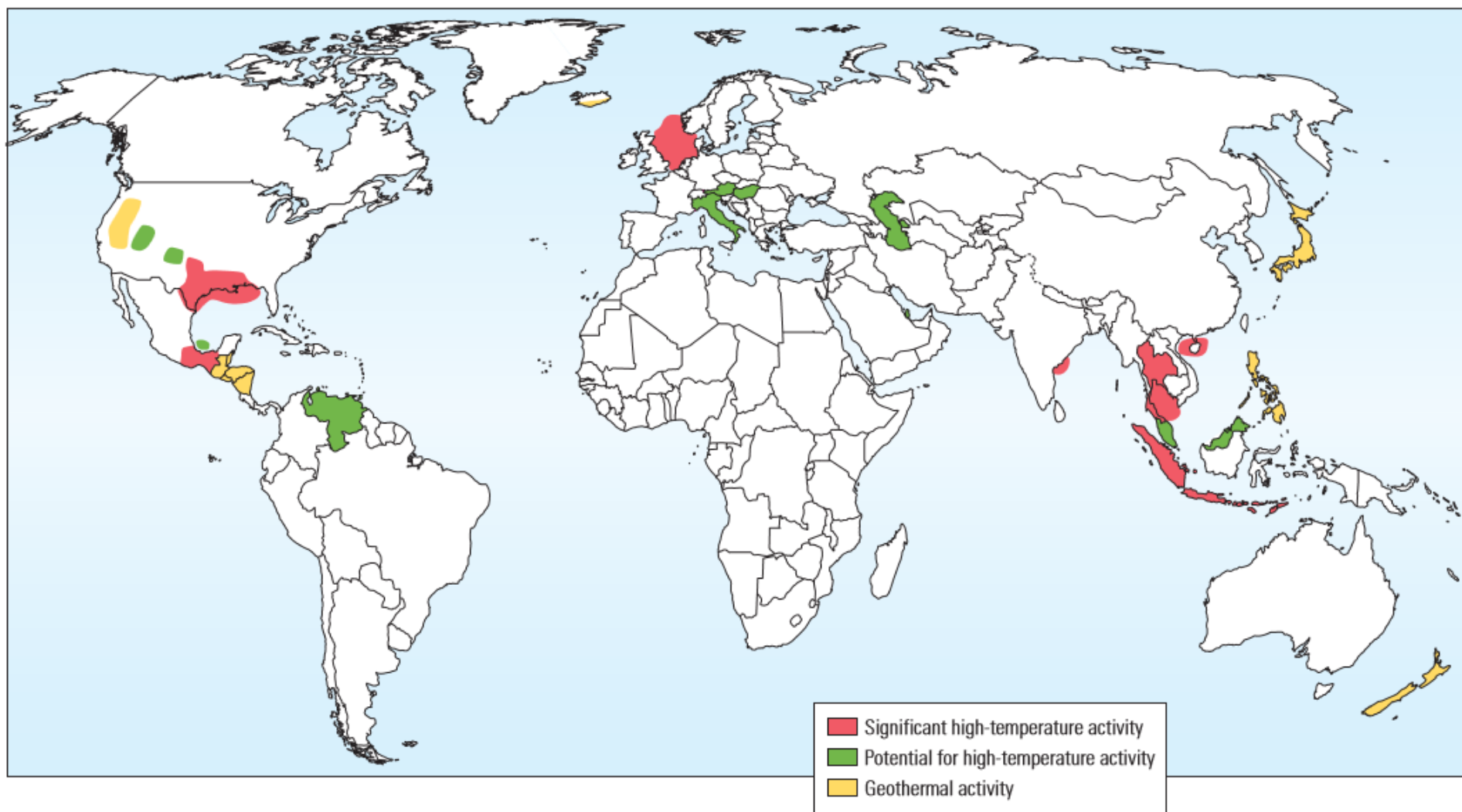
Με βάση την Εικόνα 2-9, από το σύνολο των γεωτρήσεων που ορύχθηκαν διεθνώς την περίοδο 2007-2010 και χαρακτηρίστηκαν ως HP/HT, η πλειοψηφία εξ αυτών χαρακτηριζόταν από υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μόνο ορισμένες εξ' αυτών παρουσίασαν εξαιρετικά υψηλή πίεση (> 20.000 psi). Ελάχιστες εξ' αυτών παρουσίασαν συνδυαστικά υψηλή τιμή και στην πίεση και στη θερμοκρασία. Όσον αφορά στη μεγάλη θερμοκρασία και στη μικρή πίεση μπορεί η θερμοκρασία να αυξάνεται απότομα επειδή, ενδεχομένως, οι γεωτρήσεις να βρίσκονται κοντά σε κάποιο γεωθερμικό πεδίο. Σχετικά με την κόκκινη-

μπλε γραμμή, επισημαίνεται ότι δεν είναι απαραίτητο να ισχύουν και τα δύο κριτήρια, της πίεσης και της θερμοκρασίας, ώστε να χαρακτηριστεί μία γεώτρηση ως HP/HT.



Εικόνα 2-9. Δεδομένα πίεσης και θερμοκρασία για γεωτρήσεις HP/HT που διανοίχθηκαν παγκοσμίως κατά την περίοδο 2007-2010 (Avant, et al., 2012)

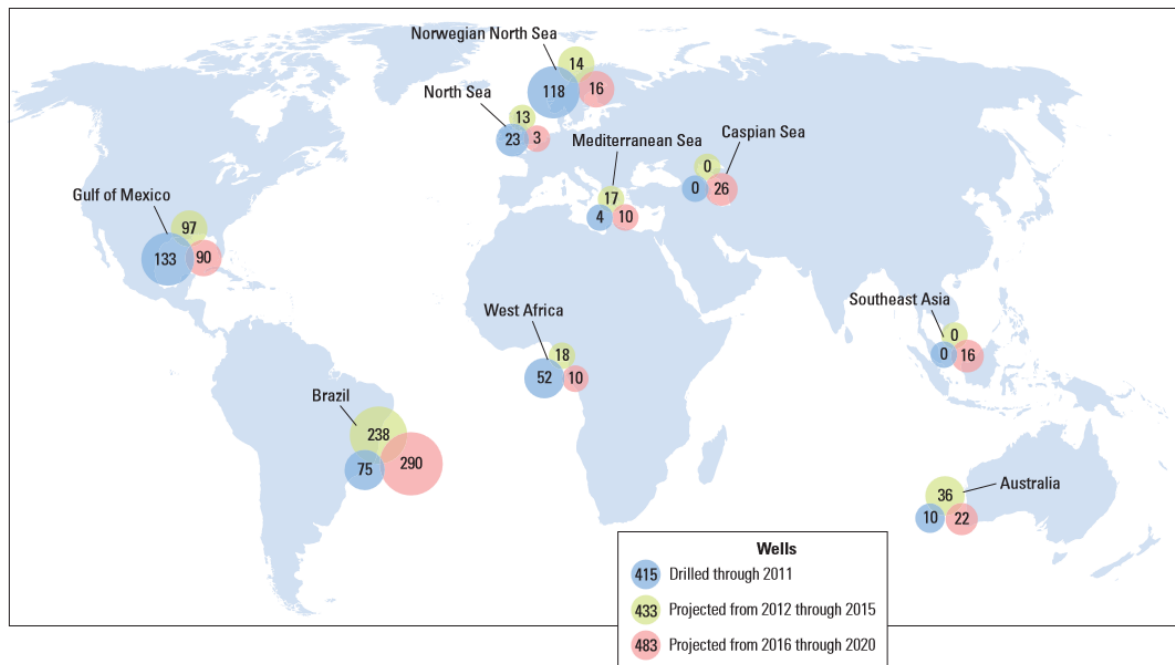
Σύμφωνα με τις ίδιες εκτιμήσεις του World Oil (World Oil, 2012) στον τομέα των γεωτρήσεων HP/HT, κατά το έτος 2012 δύο χώρες θα είχαν κυρίαρχο ρόλο: οι Η.Π.Α., όπου αναμενόταν να εξελιχθεί περίπου το 60% της παγκόσμιας γεωτρητικής δραστηριότητας σε συνθήκες HP/HT, και η Ταϊλάνδη με 20%. Στην Εικόνα 2-10 παρουσιάζεται η γεωτρητική δραστηριότητα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας παγκοσμίως. Οι γεωτρήσεις έρευνας και ανάπτυξης σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία φαίνεται να είναι τοπικά περιορισμένες. Η πλειοψηφία αυτού του τύπου των γεωτρήσεων εντοπίζονται κυρίως στην ξηρά (Β. Αμερική, Μέση Ανατολή και Νοτιοδυτική Ασία), αν και έντονη σχετική δραστηριότητα εντοπίζεται στον Κόλπο του Μεξικού, στη Βόρεια Θάλασσα, στην ανατολική ακτή της Ινδίας και στη Νοτιοανατολική Ασία (Avant, και συν., 2012).



Εικόνα 2-10. Περιοχές όπου εξελίσσεται γεωτρητική δραστηριότητα σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας σε διεθνές επίπεδο (Avant, και συν., 2012)

Επισημαίνεται ότι στις εκτιμήσεις του World Oil, οι γεωθερμικές γεωτρήσεις δεν περιλαμβάνονται στους αριθμούς που προαναφέρθηκαν, αν και η σχετική δραστηριότητα αποτυπώνεται στην Εικόνα 2-10. Εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας στον πυθμένα, οι γεωθερμικές γεωτρήσεις παρουσιάζουν λειτουργικές πολυπλοκότητες (operational complexities) που σπάνια απαντώνται στις ερευνητικές γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου (Avant, και συν., 2012). Περαιτέρω, ο αριθμός των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι μικρός συγκριτικά με τον αριθμό των γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου.<sup>1</sup>

Σύμφωνα με έρευνα αναφορικά με θαλάσσιες γεωτρήσεις που ορύχθηκαν σε ακραία περιβάλλοντα, κατά την περίοδο από το 1982 έως το 2011, εκτελέστηκαν διεθνώς συνολικά 415 θαλάσσιες γεωτρήσεις HP/HT (Εικόνα 2-11) (Avant, και συν., 2012). Για την περίοδο 2012 έως 2015 η πρόβλεψη ήταν ότι αυτός ο αριθμός θα διπλασιαστεί, ενώ έως το 2020 ο συνολικός αριθμός γεωτρήσεων HP/HT αναμενόταν να υπερβεί τις 1200 (Εικόνα 2-11).



Εικόνα 2-11. Θαλάσσιες γεωτρήσεις HP/HT που ορύχθηκαν από το 1982 έως το 2011 και αναμενόταν να ορυχθούν ως το 2020 (Avant, et al., 2012)

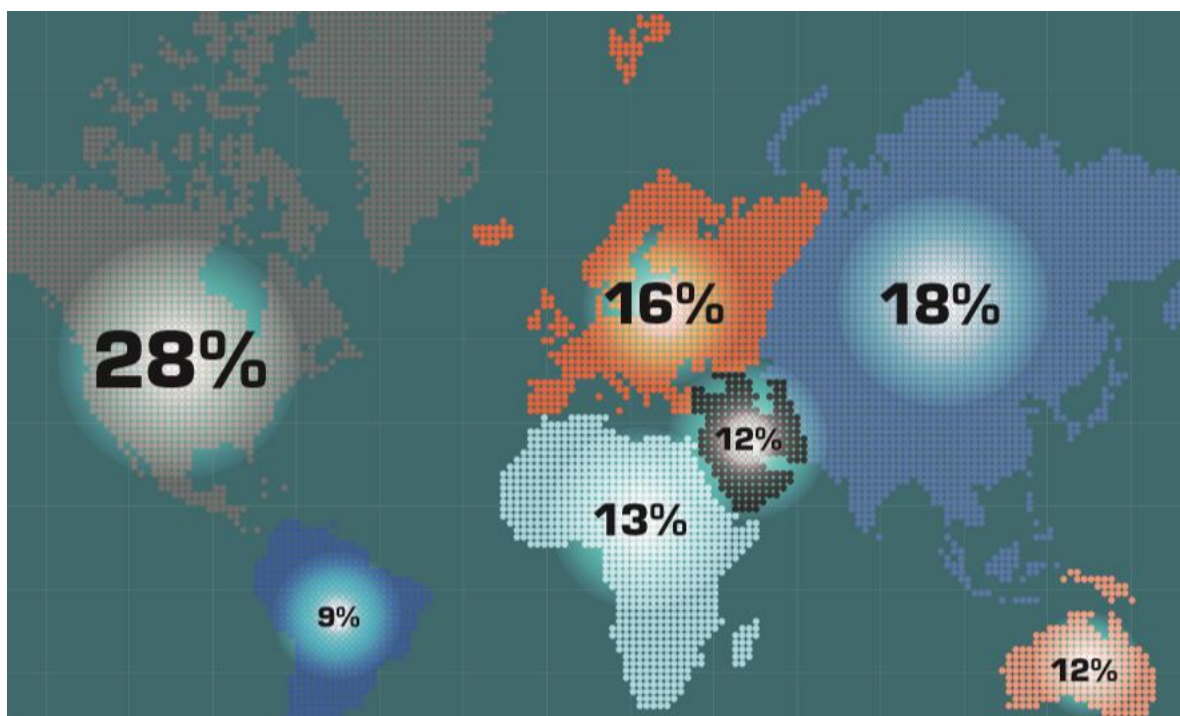
Από την Εικόνα 2-11 προκύπτει ότι μέχρι το 2020 ο αριθμός των θαλάσσιων γεωτρήσεων σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας θα έχει τριπλασιαστεί σε σχέση με αυτόν που υπήρχε έως το 2011, μέσα σε μόλις μια δεκαετία. Μόνο στη Βραζιλία, πέραν από τις ήδη διανοιχθείσες 240 γεωτρήσεις περίπου, προβλεπόταν η όρυξη περισσότερων από 300 βαθιών θαλάσσιων γεωτρήσεων έως το 2020<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Έρευνα του 2012 αναφέρει ότι μέχρι το 2011 είχαν διανοιχθεί παγκοσμίως περί τις 4.000 γεωθερμικές γεωτρήσεις (Sanyal & Morrow, 2012).

<sup>2</sup> Οι διαπιστώσεις αυτές έγιναν από την Simmons & Company International Limited 2012, η οποία εκτέλεσε την έρευνα για την Quest Energy. Στο πλαίσιο αυτής της έρευνας οι γεωτρήσεις που χαρακτηρίζονται ως HP/HT εμπίπτουν στο πλαίσιο του ορισμού, δηλαδή παρουσιάζουν θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 300 °F (150 °C) και η πίεση μεγαλύτερη από 10.000 psi (69 MPa). Ο αριθμός των χερσαίων γεωτρήσεων που

Μετά την πτώση της τιμής του πετρελαίου το 2014 η πετρελαϊκή βιομηχανία έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό. Σύνθετα έργα μεγάλου κόστους και ρίσκου, όπως είναι αυτά σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών, υφίστανται μεγαλύτερες επιπτώσεις έναντι εκείνων που αφορούν σε συμβατικές γεωτρήσεις. Ειδικότερα, σε έρευνα η οποία πραγματοποιήθηκε το 2015 (Oil and Gas IQ, 2015), οι συμμετέχουσες εταιρίες σε ερώτημα που αφορούσε τις κινήσεις τους σχετικά με τις γεωτρήσεις HP/HT, το 85% από αυτές απάντησε ότι έχουν επηρεαστεί από την πτώση της τιμής του πετρελαίου. Από το ποσοστό αυτό, το 41% δήλωσε ότι θα μειώσει την παραγωγή, το 38% ότι θα την αναβάλλει προς το παρόν και το υπόλοιπο 21% ότι θα ακυρώσει οποιαδήποτε ενέργεια σχετικά με την όρυξη γεωτρήσεων σε συνθήκες HP/HT (Oil and Gas IQ, 2015). Τέλος, η έρευνα καταλήγει ότι οι εταιρίες θέτουν σε προτεραιότητα, με ποσοστό 59%, την ολοκλήρωση των υφιστάμενων γεωτρήσεων έναντι της όρυξης νέων.

Παρ' όλα αυτά, το ενδιαφέρον μπορεί να έχει μειωθεί αλλά δεν έχει χαθεί, με ορισμένες εταιρίες να συνεχίζουν τον σχεδιασμό για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων HP/HT. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα, στην Εικόνα 2-12 εμφανίζεται σε ποιες ηπείρους εκτιμάται ότι θα υπάρξει εξέλιξη στις γεωτρήσεις HP/HT μέχρι το 2020. Από την Εικόνα 2-12 συμπεραίνεται ότι στη Βόρεια Αμερική θα υπάρξει η μεγαλύτερη αύξηση στη σχετική δραστηριότητα, με την Ασία να ακολουθεί στη δεύτερη θέση. Τόσο στην Εικόνα 2-8, όπου παρουσιάζεται η γεωτρητική δραστηριότητα σε συνθήκες HP/HT έως το 2012, όσο και στην Εικόνα 2-12, όπου παρουσιάζεται η εκτιμώμενη, περαιτέρω, ανάπτυξη της γεωτρητικής δραστηριότητας από το επίπεδο του 2015 και έως το 2020, κυριαρχούν οι Η.Π.Α..



Εικόνα 2-12. Εκτιμώμενο ποσοστό ανάπτυξης έργων HP/HT παγκοσμίως μέχρι το 2020 (Oil and Gas IQ, 2015)

ορύχθηκαν κατά την ίδια περίοδο (1982-2011) δεν έχει συμπεριληφθεί παρότι είναι αρκετά μεγαλύτερος έναντι του αριθμού των θαλάσσιων γεωτρήσεων.



Στη σημερινή ασταθή κατάσταση, η οποία οφείλεται στις διακυμάνσεις της τιμής του πετρελαίου, οι γεωτρήσεις HP/HT θεωρούνται ως μια υπερβολή στις πρόγραμμα επενδύσεων στη βιομηχανία των υδρογονανθράκων. Η κατάσταση έχει εξελιχθεί σε σημείο που οι εταιρείες προσανατολίζονται προς την όρυξη περισσότερων, φθηνότερων και λιγότερο ριψοκίνδυνων γεωτρήσεων αντί μίας περισσότερο κερδοφόρας αλλά παράτολμης γεώτρησης, σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Με την πτώση της τιμής του πετρελαίου, που σημειώθηκε το 2014, οι εταιρείες έχουν θέσει ως κατώτατο όριο τα 80\$ το βαρέλι, ώστε να επενδύσουν σε τέτοιου τύπου γεωτρήσεις (SPE, 2018).

Ωστόσο, με τις συμβατικές γεωτρήσεις να βρίσκονται στο όριο της παραγωγής τους, οι εταιρείες αναγκαστικά θα πρέπει να ρισκάρουν και να επενδύσουν σε αυτού του είδους τις γεωτρήσεις, ώστε να καλυφθεί η παγκόσμια ανάγκη για ενέργεια. Η αντιμετώπιση του προβλήματος του κόστους των γεωτρήσεων HP/HT είναι επιτακτική ανάγκη και απαιτεί βελτιστοποίηση της συνεργασίας (collaborative optimization) και της αποδοτικότητας του κόστους (cost effectiveness) (SPE, 2018).

Σε γενικές γραμμές το κόστος των γεωτρήσεων HP/HT είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών γεωτρήσεων, διότι:

- ✓ Οι μη παραγωγικοί χρόνοι είναι μεγαλύτεροι (για παράδειγμα ο χρόνος που δαπανάται στην ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης είναι μεγαλύτερος, καθώς οι γεωτρήσεις HP/HT είναι μεγαλύτερου βάθους).
- ✓ Οι απαιτήσεις σε ανθεκτικότερο και υψηλής ποιότητας εξοπλισμού είναι αναγκαίες για την αντιμετώπιση των συνθηκών που επικρατούν.
- ✓ Επειδή οι γεωτρήσεις HP/HT αφορούν στην πλειοψηφία τους βαθείς ταμιευτήρες, η εκτέλεση σεισμικών και στη συνέχεια δοκιμών και ελέγχων είναι αρκετά χρονοβόρες διαδικασίες.
- ✓ Το κόστος ενοικίασης του γεωτρήσανου αντιστοιχεί στο 70% των συνολικών εξόδων και ο χρόνος παρουσίας του στις HP/HT γεωτρήσεις είναι μεγαλύτερος, μιας και αφορούν στην πλειοψηφία τους βαθείς ταμιευτήρες (Shadravan & Amani, 2012).

Μερική λύση στα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσε να είναι η χρήση κοπτικών άκρων ικανών να διατρύουν για μεγάλο χρονικό διάστημα και συνεχόμενα, ώστε να μειωθούν οι νεκροί χρόνοι. Επιπλέον, για τη λήψη δεδομένων του ταμιευτήρα, συνίσταται η χρήση δεδομένων από προϋπάρχουσες γεωτρήσεις της ευρύτερης περιοχής, κάτι που συνδράμει σημαντικά στο σχεδιασμό των γεωτρήσεων και στην πρόβλεψη τυχόν προβλημάτων που ενέχει η όρυξή τους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°. Τεχνικά θέματα στην όρυξη και ολοκλήρωση γεωτρήσεων HP/HT

### 3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα τεχνικά θέματα που συναντώνται στα στάδια της όρυξης και ολοκλήρωσης, καθώς και εκτέλεσης δοκιμών σε γεωτρήσεις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, τα οποία χρήζουν ειδικής προσέγγισης.

Σε επίπεδο όρυξης, οι τεχνικές προκλήσεις αφορούν κυρίως στα παρακάτω:

- Σημαντικά μεγαλύτεροι μη παραγωγικοί χρόνοι.
- Άμβλυση ιδιοτήτων και λειτουργιών των ρευστών διάτρησης σε υψηλές και υπερυψηλές θερμοκρασίες.
- Ακαταλληλότητα συμβατικής σωλήνωσης.
- Μειωμένη απόδοση κοπτικών άκρων.
- Όρια της τεχνολογίας τσιμέντωσης, επιπτώσεις στην ακεραιότητα της γεώτρησης.

Στο επίπεδο της ολοκλήρωσης των γεωτρήσεων:

- Όρια αντοχής των στεγανωτικών εξαρτημάτων λόγω θερμοκρασίας.
- Περιορισμένη ποικιλία παρεμβυσμάτων απομόνωσης (packers).

Όσον αφορά στη διέγερση του παραγωγικού σχηματισμού και στην εκτέλεση δοκιμών:

- Όρια στην αποτελεσματικότητα των υλικών διατήρησης των ρωγματώσεων στην περίπτωση εφαρμογής υδραυλικής ρωγμάτωσης.
- Περιορισμός του εξοπλισμού εκτέλεσης δοκιμών παραγωγής στα 20.000 psi.
- Συχνές βλάβες στα συστήματα άντλησης, που σχετίζονται με φθορά των ελαστομερών (λόγω υψηλών θερμοκρασιών ή/και παρουσίας όξινων ρευστών).
- Ευαισθησία των ελαστομερών στη θερμοκρασία.
- Συχνή αστοχία των μετρητών (gauges) εξ' αιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας.

Τέλος, σχετικά με τη συλλογή δεδομένων υπό συνθήκες HP/HT:

- Πρόσκτηση σεισμικών καταγραφών μικρής διακριτικής ικανότητας λόγω του πολύ μεγάλου βάθους των ταμιευτήρων.
- Περιορισμοί στη λειτουργία των οργάνων συνεχούς καταγραφής μετρήσεων κατά τη διάτρηση (Measurement While Drilling-MWD) και διασκοπήσεων κατά τη διάτρηση (Logging While Drilling-LWD), λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Στις γεωτρήσεις ultra και extreme HP/HT, οι συνθήκες είναι εμφανώς δυσμενέστερες από αυτές των τυπικών γεωτρήσεων. Τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτές τις περιπτώσεις αφορούν στη δυσκολία του εξοπλισμού να ανταπεξέλθει στις δυσμενείς αυτές συνθήκες και να λειτουργήσει οικονομικά με τη μέγιστη ασφάλεια και την προστασία τόσο των εργαζομένων όσο και του περιβάλλοντος. Το μικρότερο περιθώριο μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού καθιστά την όρυξη των γεωτρήσεων ultra και extreme HP/HT σε πολλές περιπτώσεις αδύνατη, διότι απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την παρακολούθηση των συνθηκών στο εσωτερικό της γεώτρησης. Επιπλέον, απαιτείται ο σχεδιασμός ειδικών ρευστών διάτρησης, που θα εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά στις διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Απαραίτητη είναι και η ανάπτυξη ειδικών μοντέλων που θα προσομοιώνουν τις συνθήκες εντός της γεώτρησης και θα προσδιορίζονται σχέσεις που θα συσχετίζουν τη θερμοκρασία, την πίεση και το ιζώδες, ώστε να καταστεί καλύτερος και ακριβέστερος ο υπολογισμός των παραμέτρων. Επίσης, υψηλής σημασίας είναι ο έλεγχος των χαρακτηριστικών διαφορετικών υλικών και μηχανημάτων, διότι υπό τέτοιες συνθήκες, η καταστροφή τους επέρχεται γρηγορότερα, καθυστερώντας την όρυξη και αυξάνοντας δραματικά το κόστος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα ζητήματα που σχετίζονται με:

1. Τα ρευστά διάτρησης.
2. Τη σωλήνωση και την τσιμέντωση.
3. Τον εξοπλισμό για την όρυξη γεωτρήσεων.
4. Τη διέγερση του ταμιευτήρα και τις δοκιμές παραγωγής.
5. Ειδικά προβλήματα που σχετίζονται με την παρουσία όξινου περιβάλλοντος (αερίου).

Στην τελευταία ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, εντοπίζονται και καταγράφονται συνοπτικά τα κενά στην τεχνολογία και οι τεχνικές προκλήσεις που παραμένουν ανοιχτές προς διερεύνηση στο μέλλον.

### 3.2. Ρευστά διάτρησης

Τα ρευστά διάτρησης αποτελούν γενικά ένα ετερογενές μείγμα διαφορετικών χημικών συστατικών το οποίο πρέπει να διατηρεί τις ιδιότητες του σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Για τον σωστό σχεδιασμό της γεώτρησης και για την αποφυγή διαρροής των ρευστών διάτρησης μέσα σε έναν περατό σχηματισμό, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού ώστε να υπολογιστεί η κατάλληλη πυκνότητα των ρευστών διάτρησης.

Οι βασικοί σκοποί που εξυπηρετούν τα ρευστά διάτρησης είναι:

- Μεταφορά των προϊόντων διάτρησης στην επιφάνεια.

- Ψύξη του κοπτικού και μείωση της τριβής της διατρητικής στήλης.
- Σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Αποτροπή τυχόν εισροής ρευστών από τους διατρυόμενους σχηματισμούς στη γεώτρηση.
- Μετάδοση ενέργειας στον κινητήρα πυθμένα.
- Παροχή χρήσιμων γεωλογικών πληροφοριών.

Στις συμβατικές γεωτρήσεις ο προσδιορισμός των πιέσεων των ρευστών διάτρησης μέσα στη γεώτρηση βασίζεται συνήθως στην υπόθεση ότι οι ιδιότητες τους είναι σταθερές, διευκολύνοντας έτσι τους υπολογισμούς ρουτίνας και παρέχοντας αποδεκτή ακρίβεια στα αποτελέσματά τους. Η υδροστατική πίεση υπολογίζεται εύκολα λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα του ρευστού διάτρησης που μετράται στην επιφάνεια, ενώ οι λοιπές πιέσεις λόγω της κυκλοφορίας και της ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης υπολογίζονται μέσω καθιερωμένων σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη την παροχή των αντλιών και τις ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών διάτρησης.

Τυχόν λάθη που προκύπτουν από την αγνόηση της διαφοροποίησης των ιδιοτήτων των ρευστών εντός της γεώτρησης είναι μικρά στις γεωτρήσεις σχετικά μικρού βάθους. Οπότε οι μηχανικοί των ρευστών διάτρησης μπορούν να εστιάζουν την προσοχή τους στη σύνθεση ρευστών με κατάλληλες ιδιότητες που αυξάνουν τον ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης και βελτιστοποιούν την απομάκρυνση των θρυμμάτων. Παράλληλα, οι διατρυόμενοι σχηματισμοί συνήθως επιτρέπουν ένα άνετο περιθώριο ασφάλειας ως προς την πυκνότητα του πολφού διάτρησης, χωρίς να ρωγματώνονται.

Ωστόσο, οι ιδιότητες των ρευστών διάτρησης πραγματικά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, επηρεάζοντας την ακρίβεια τόσο των μετρήσεων που γίνονται στην επιφάνεια, όσο και των υπολογισμών που αφορούν στην πυκνότητα και το ιξώδες των ρευστών μέσα στη γεώτρηση. Στις γεωτρήσεις HP/HT αυτή η διαφοροποίηση είναι σημαντική και καθώς οι γεωτρήσεις αυτές είναι συνήθως πολύ μεγάλου βάθους και το περιθώριο ασφάλειας ως προς την πυκνότητα του πολφού διάτρησης περιορίζεται σημαντικά.

Είναι σαφές πως η σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών διάτρησης σε τέτοια περιβάλλοντα είναι καίριας σημασίας για την επιτυχή διάνοιξη μίας γεώτρησης HP/HT. Ακόμα και μικρά λάθη στον υπολογισμό της πίεσης των ρευστών διάτρησης σε συνθήκες ταμιευτήρα μπορούν να αποβούν μοιραία. Συνεπώς, η προσομοίωση των συνθηκών στον πυθμένα της γεώτρησης είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της πίεσης, της θερμοκρασίας και της συμπεριφοράς των ρευστών διάτρησης σε αυτό το περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα ακόλουθα τεχνικά θέματα που σχετίζονται με τα ρευστά διάτρησης κατά την όρυξη γεωτρήσεων HP/HT:

- Επιλογή ρευστών με βάση το πετρέλαιο ή το νερό.

- Επιπτώσεις της πίεσης και θερμοκρασίας στα ρευστά διάτρησης.
- Υπολογισμός πίεσης των ρευστών διάτρησης μέσα στη γεώτρηση.
- Έλεγχος των πιέσεων μέσα στη γεώτρηση.

### 3.2.1. Επιλογή ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο ή το νερό

Η επιλογή διάνοιξης της γεώτρησης με χρήση ρευστών που έχουν ως κύριο συστατικό το πετρέλαιο ή το νερό, είναι πολύ πιθανό να γίνει προτού πραγματοποιηθεί ενδεδειγμένη ανάλυση των ιδιοτήτων τους, δηλαδή του προσδιορισμού του πλαστικού ιξώδους τους, της ρεολογίας τους, της συμπιεστότητάς τους, κ.τ.λ. Σε πολλές περιπτώσεις πρώτα επιλέγεται το κύριο συστατικό (νερό ή πετρέλαιο) και στη συνέχεια προσαρμόζονται οι ιδιότητες του στις απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης.

Από τη μία τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό (Water Based Muds - WBM) περιλαμβάνουν μπεντονίτη και συστήματα πολυμερών, από την άλλη τα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (Oil Based Muds - OBM) μπορεί να είναι τύπου ανάστροφου γαλακτώματος (invert emulsion), αποκλειστικά πετρελαϊκής φάσης (all-oil system), ή να βασίζονται σε συνθετικό πετρέλαιο (synthetic oil-base). Η καθεμία επιλογή προσφέρει πλεονεκτήματα και παρουσιάζει μειονεκτήματα ως προς το κόστος, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και την απόδοση (Adamson, και συν., 1998).

#### 3.2.1.1. Ρευστό διάτρησης με βάση το νερό (water-base mud - WBM)

Τα ρευστά διάτρησης συνίστανται από μια υγρή φάση και στερεά εν αιωρήσει. Η υγρή φάση μπορεί να αποτελείται από φρέσκο ή αλμυρό νερό ή από μίγμα υγρών. Τα στερεά ποικίλουν και συνήθως εισάγονται και χημικά πρόσθετα. Το φρέσκο νερό αποτελεί τη βάση για τα περισσότερα ρευστά διάτρησης, καθώς είναι προσβάσιμο, φθινό, εύκολα ελεγχόμενο κατά την προσθήκη στερεών και αποτελεί το καλύτερο μέσο για την αξιολόγηση των σχηματισμών. Το αλμυρό νερό είναι βεβαίως ευκολότερα διαθέσιμο στις περιπτώσεις υποθαλάσσιων ερευνητικών ή παραγωγικών εργασιών.

Τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό αποτελούνται από 3 μέρη:

1. νερό, το οποίο είναι η συνεχής φάση και παρέχει το αρχικό ιξώδες (φρέσκο ή αλμυρό),
2. ενεργά στερεά για την ενίσχυση του ιξώδους και του σημείου διαρροής (μπεντονίτης, που συνιστάται στην περίπτωση του φρέσκου νερού και ατταπουλγίτης, αμιάντος ή σηπιδίλιθος, που συνίστανται στην περίπτωση του αλμυρού νερού),
3. αδρανή στερεά για την επίτευξη της απαιτούμενης πυκνότητας (βαρύτης, θειούχος μόλυβδος, σιδηρομεταλλεύματα ή χαλαζιακά υλικά).

Τα (2) και (3) αντιπροσωπεύουν το συνολικό κλάσμα των στερεών στο σύστημα των ρευστών διάτρησης (Σταματάκη, 2003).

Σε γενικές γραμμές στις γεωτρήσεις HP/HT η χρήση των ρευστών διάτρησης με βάση το νερό αποφεύγεται, ωστόσο χρησιμοποιούνται σε κάποιες περιπτώσεις για την αντιμετώπιση αιφνίδιων εισροών αερίου ή/και σε περιπτώσεις που τίθενται περιβαλλοντικοί περιορισμοί (Cumana-Marval, 1991). Η μεγαλύτερη δυσκολία που παρουσιάζουν είναι να ανταπεξέλθουν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200 °C. Παρ' όλα αυτά, με την προσθήκη κατάλληλων πρόσθετων ο έλεγχος των ιδιοτήτων των ρευστών διάτρησης καθίσταται δυνατός σε γεωτρήσεις HP/HT.

### 3.2.1.2. Ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (oil-base mud – OBM)

Στα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο η υδάτινη φάση έχει σχεδόν αντικατασταθεί από πετρέλαιο ή ραφινάρισμένα πετρελαιοειδή. Αποτελούνται κατ' όγκον από 95-98% πετρέλαιο και 2-5% νερό, βαρύτη ή θειούχο μόλυβδο για τη ρύθμιση της πυκνότητας, καθώς και πρόσθετα για τη ρύθμιση των ρεολογικών ιδιοτήτων (Σταματάκη, 2003).

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο είναι η σταθερότητα – όπως αυτή καθορίζεται από τη ρεολογία και τον έλεγχο σε περίπτωση απώλειας ρευστών – που εμφανίζουν στις υψηλές θερμοκρασίες των γεωτρήσεων HT/HP. Στην πλειοψηφία τους τα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο εμφάνισαν σταθερή συμπεριφορά σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 450 °F (230 °C) σε πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο για 16 ώρες συνεχόμενα (Adamson, και συν., 1998).

Επιπλέον, επειδή αυτά τα ρευστά διάτρησης είναι συμβατά με τον παραγωγικό σχηματισμό, προκαλούν μικρότερης κλίμακας επιδράσεις σε αυτόν σε αντίθεση με τα ρευστά διάτρησης που έχουν ως βάση το νερό. Ωστόσο, στα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, σε ενδεχόμενη αιφνίδια εισροή αερίου, το αέριο διαλυτοποιείται με αποτέλεσμα να γίνει αντιληπτό από τους εργαζόμενους στο γεωτρήσιμο μόνο όταν είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια, όπου ο όγκος του έχει μεγαλώσει αισθητά. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η θερμική διόγκωση που προκαλείται σε τέτοιου είδους ρευστά διάτρησης, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης στο δακτύλιο της γεώτρησης.

Τέλος, το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό των ρευστών διάτρησης με βάση το νερό και απαιτείται ειδική διαχείριση στα θρύμματα, διότι φέρουν πετρέλαιο και η απόθεσή τους καθίσταται δύσκολη (Cumana-Marval, 1991).

Σε κεκλιμένες γεωτρήσεις και σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται περισσότερο ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, εξαιτίας της σταθερότητας των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν, όπως προαναφέρθηκε.

### 3.2.1.3. Ρευστό διάτρησης συνθετικής βάσης (synthetic-base mud – SBM)

Τα ρευστά διάτρησης συνθετικής βάσης είναι μη υδατικά (non-aqueous) γαλακτώματα νερού (water-internal (invert) emulsion) στα οποία η συνεχής υγρή φάση (external phase) είναι συνθετική οργανική ένωση και όχι πετρέλαιο.

Αναπτύχθηκαν προκειμένου να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα των ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο με την μεγαλύτερη περιβαλλοντική συμβατότητα που παρουσιάζουν τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό. Ένα αλατούχο άλας διασπείρεται συνήθως στη συνθετική φάση για να σχηματιστεί ένα γαλακτωμα. Τα άλλα συστατικά ενός ρευστού συνθετικής βάσης περιλαμβάνουν γαλακτωματοποιητές, βαρύτη, αργίλους, λιγνίτη και άσβεστο. Τα ρευστά διάτρησης συνθετικής βάσης περιέχουν τα ίδια μέταλλα με τα ρευστά που έχουν ως βάση το νερό, τα οποία είναι καλά συμπλεγμένα με τον βαρύτη και την άργιλο και έχουν χαμηλή βιοδιαθεσιμότητα και τοξικότητα (Neff, McKelvie, & Ayers, 2000).

Το γεγονός αυτό, αλλά και άλλες μικρές βελτιώσεις στη σύνθεσή τους τα κατέστησαν περισσότερο περιβαλλοντικά αποδεκτά για χρήση σε θαλάσσιες γεωτρήσεις. Έχουν επίσης εφαρμογή σε βαθιές και κεκλιμένες γεωτρήσεις. Τα ρευστά διάτρησης συνθετικής βάσης είναι ιδιαίτερος δημοφιλή στις περισσότερες θαλάσσιες γεωτρήσεις, παρά το υψηλό αρχικό τους κόστος, κυρίως λόγω της περιβαλλοντικής συμβατότητας που παρουσιάζουν, αλλά και της δυνατότητας έγκρισης για διάθεση των απαγόμενων θρυμμάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

Στις γεωτρήσεις HP/HT έχουν χρησιμοποιηθεί ρευστά συνθετικής βάσης επιτυχώς σε θερμοκρασία μέχρι και 395 °F (202 °C) (Adamson, et al., 1998).

### 3.2.2. Επιπτώσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας στα ρευστά διάτρησης

Όπως είναι γνωστό τα ρευστά υφίστανται σχετική διόγκωση όταν βρίσκονται σε περιβάλλον μεγάλης θερμοκρασίας και συμπιέζονται όταν βρίσκονται υπό υψηλή πίεση. Συνεπώς, η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης. Οπότε η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης μεταβάλλεται ενώ αυτά εισπνέονται εντός της γεώτρησης και λαμβάνει διαφορετική τιμή από την αρχική.

Η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης εντός της γεώτρησης, εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία και είναι ανεξάρτητη της αρχικής πυκνότητας σε συνθήκες επιφανείας. Ειδικότερα, για δύο διαφορετικά ρευστά διάτρησης, το ένα με βάση το πετρέλαιο και το άλλο με βάση το νερό, συμπεραίνεται ότι αυτό με βάση το πετρέλαιο εμφανίζει μεγαλύτερη πυκνότητα όταν βρίσκεται σε περιβάλλον υψηλών πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών, παρόλο που σε συνθήκες επιφανείας είχαν την ίδια πυκνότητα (McMordie Jr., 1982). Αυτή η διαφορά της πυκνότητας, οφείλεται στο γεγονός ότι τα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο εμφανίζουν αυξημένη συμπίεστικότητα, σε σχέση με αυτών που έχουν ως βάση το νερό (Richard Leaper, 2006).

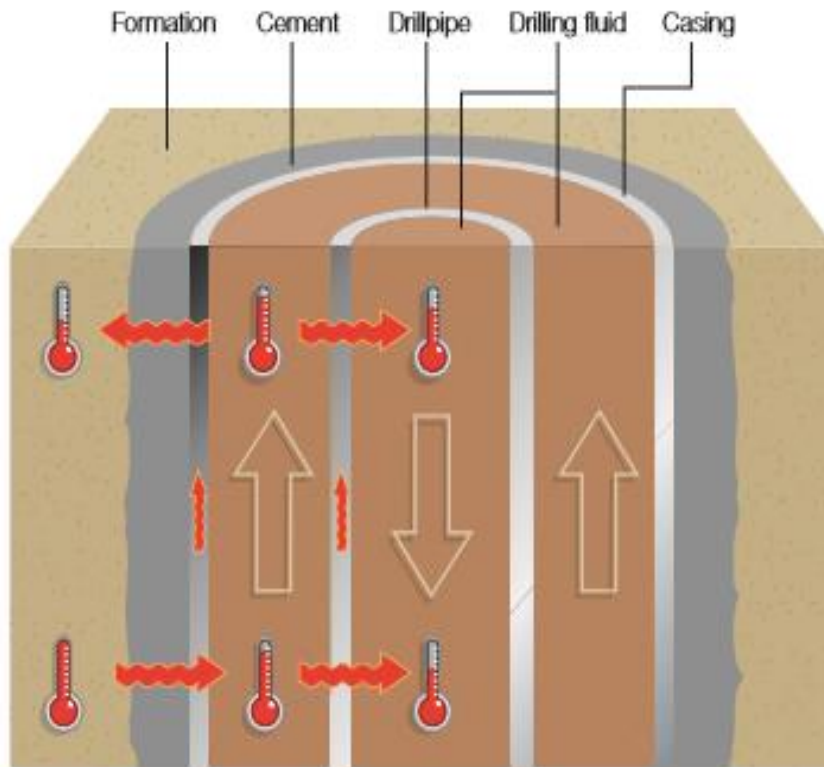


Πρόσθετη επίπτωση της υψηλής θερμοκρασίας στα ρευστά διάτρησης είναι η μείωση του pH τους. Με τη μείωση της τιμής του pH μειώνεται και η απόδοση των ρευστών διάτρησης καθώς επηρεάζεται η θερμική σταθερότητά τους. Τέλος, η θερμοκρασία και η πίεση επηρεάζουν τα πρόσθετα συστατικά (additives), τα οποία μετά από συνεχόμενη έκθεση σε τέτοιες συνθήκες αποτυγχάνουν στο σκοπό τους. Εξαιτίας της αποτυχίας τους, για να διατηρηθούν οι ιδιότητες των ρευστών διάτρησης, προστίθενται χημικοί παράγοντες (agents) ικανοί να ανταπεξέλθουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στις συνθήκες HP/HT και να βελτιώσουν την απόδοση των ρευστών διάτρησης (Hu, 2015).

Για να διερευνηθούν και να αντιμετωπιστούν σε ένα βαθμό τα θέματα της επίδρασης της πίεσης και της θερμοκρασίας στο περιβάλλον της γεώτρησης HP/HT και για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών διάτρησης σε αυτό το περιβάλλον, πραγματοποιείται προσομοίωση με κατάλληλους προσομοιωτές, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

#### *3.2.2.1. Προσομοιωτές ρευστών (fluid simulators)*

Η προσομοίωση βασίζεται σε ένα μοντέλο της γεώτρησης που περιλαμβάνει διαφορετικές θερμοκρασίες καθ' όλο μήκος της (θερμοκρασιακό προφίλ) και θεωρεί ανταλλαγή θερμότητας ανάλογα με την συνθήκες ροής των ρευστών διάτρησης εντός αυτής. Η Εικόνα 3-1 προσομοιάζει τη γεώτρηση με έναν εναλλάκτη θερμότητας κατ' αντιρροή (countercurrent heat exchanger). Ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των ρευστών διάτρησης και του περιβάλλοντος της γεώτρησης (τσιμέντωσης, σωλήνωσης, διατρητικής στήλης) εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα των υλικών, καθώς και από την ταχύτητα ροής των ρευστών διάτρησης.



Εικόνα 3-1. Μεταφορά θερμότητας στη γεώτρηση (Adamson, και συν., 1998)

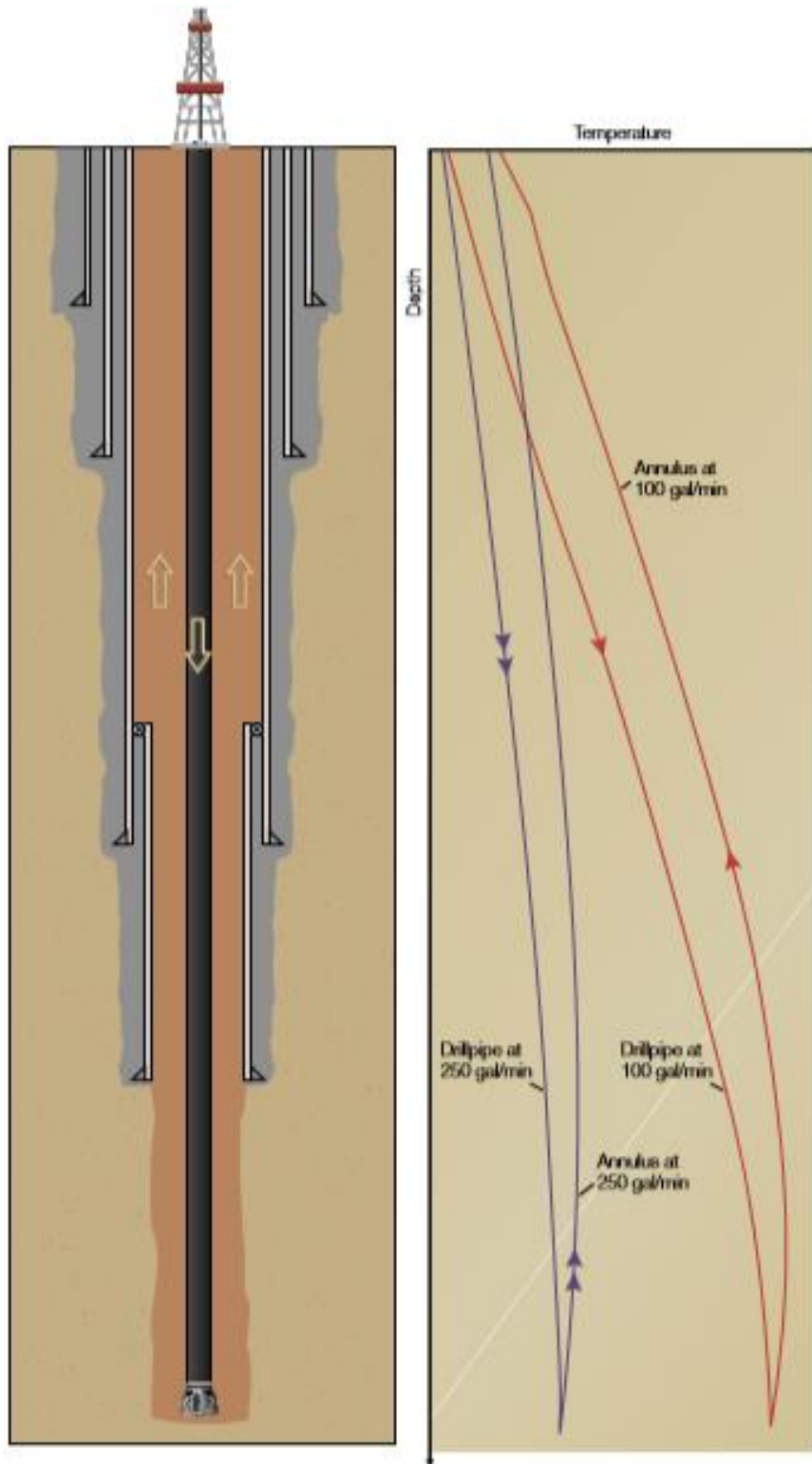
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-1, τα κυκλοφορούντα ρευστά διάτρησης είτε απορροφούν θερμότητα, είτε απάγουν. Ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του περιβάλλοντος και των ρευστών διάτρησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα ροής των ρευστών διάτρησης, τη θερμική αγωγιμότητα του σχηματισμού, τη θερμική βαθμίδα στον αδιατάρακτο ταμιευτήρα και τη θερμοχωρητικότητα των ρευστών διάτρησης. Κατά την παρουσία σωλήνωσης εντός της γεώτρησης η μετάδοση θερμότητας κατά την κάθετη διάσταση περιπλέκει περαιτέρω την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στη γεώτρηση (θερμοκρασιακό προφίλ).

Καθώς τα ρευστά διάτρησης κατέρχονται εντός της διατρητικής στήλης, παρουσιάζεται καθαρή μεταφορά θερμότητας από τον σχηματισμό προς αυτά. Ωστόσο, όταν φτάσουν στο κοπτικό άκρο, τα ρευστά διάτρησης εξακολουθούν να είναι ψυχρότερα από τον σχηματισμό. Η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης βαίνει αυξανόμενη, καθώς επιστρέφουν από τον πυθμένα της γεώτρησης στην επιφάνεια, μέχρις ότου, σε ορισμένο βάθος, η θερμοκρασία τους εξισωθεί με την θερμοκρασία του σχηματισμού. Από αυτό το βάθος και μετά η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης αρχίζει και πάλι να μειώνεται μέχρι την επιφάνεια.

Η ανάπτυξη ενός ικανοποιητικού μοντέλου είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του προφίλ της θερμοκρασίας σε σταθερή κατάσταση ως προς το χρόνο (steady state temperature profiles), δηλαδή όταν έχει επέλθει θερμική ισορροπία, είτε επειδή έχει παύσει η κυκλοφορία είτε οι συνθήκες κυκλοφορίας έχουν σταθεροποιηθεί (steady state profile). Στην πρώτη περίπτωση, το προφίλ της θερμοκρασίας σε στατικές συνθήκες, όπου ο πολφός δεν ρέει προσεγγίζει τη γεωθερμική βαθμίδα, ενώ το

θερμοκρασιακό προφίλ σταθερής κατάστασης σε συνθήκες κυκλοφορίας (circulating temperature profile) σχετίζεται με τους ρυθμούς άντλησης των ρευστών διάτρησης.

Η εταιρεία Dowell έχει αναπτύξει ένα σχετικό λογισμικό (MudCADE) που προσδιορίζει το κατακόρυφο θερμοκρασιακό προφίλ εντός της γεώτρησης υπό διαφορετικές συνθήκες, και το οποίο ελέγχθηκε και τεκμηριώθηκε η αξιοπιστία του με δεδομένα προερχόμενα από πολλές γεωτρήσεις HP/HT. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να καταχωρηθούν είναι η ακριβής θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα του κάθε υλικού που βρίσκεται εντός της γεώτρησης και τα βασικά αποτελέσματα του είναι η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης εντός της διατρητικής στήλης και εντός του δακτυλίου συναρτήσει του βάθους. Στην Εικόνα 3-2 αποτυπώνεται το θερμοκρασιακό προφίλ των ρευστών διάτρησης εντός της διατρητικής στήλης και στο δακτύλιο της γεώτρησης υπό διαφορετικές παροχές.

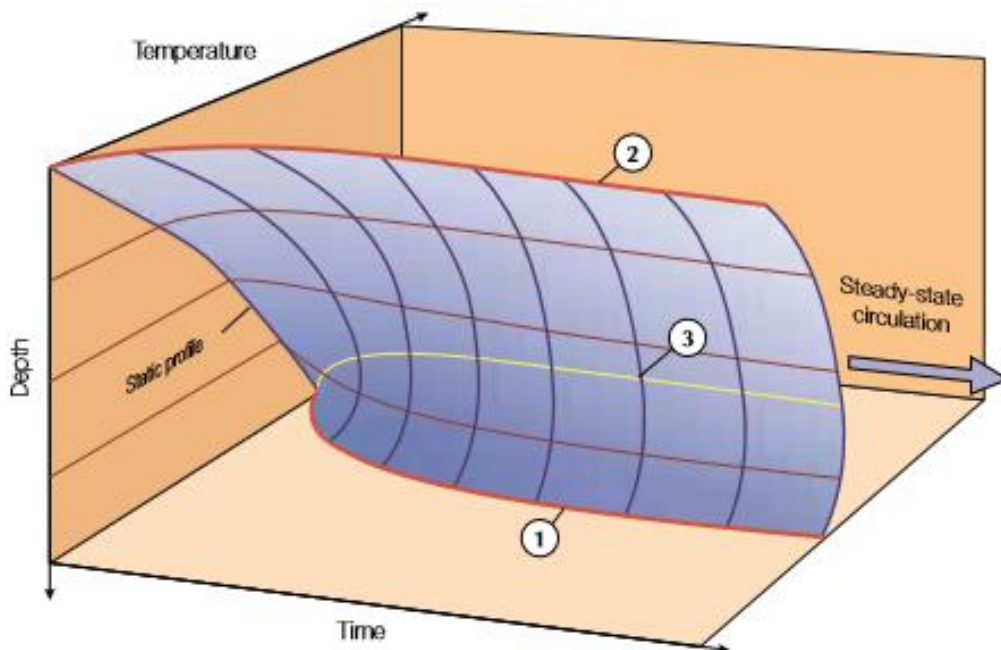


Εικόνα 3-2. Θερμοκρασιακό προφίλ ρευστών διάτρησης (Adamson, et al., 1998)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2, οι θερμοκρασίες των ρευστών διάτρησης στο δακτύλιο της γεώτρησης είναι μεγαλύτερες από αυτές εντός της διατρητικής στήλης, γεγονός που οφείλεται στην άμεση επαφή των ρευστών διάτρησης με τα θερμά τοιχώματα της γεώτρησης και στην παρουσία τους εντός της γεώτρησης για μεγαλύτερο χρόνο. Πρακτικά, η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης αυξάνει όσο

αυτά κινούνται προς το κοπτικό άκρο. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία τους εξακολουθεί να αυξάνει μέχρις ότου, σε ένα βάθος, η θερμοκρασία του σχηματισμού και των ρευστών διάτρησης ταυτιστούν. Από εκείνο το βάθος, ενώ ανέρχονται, αν και απάγουν θερμότητα, η θερμοκρασία τους είναι μεγαλύτερη στο δακτύλιο από εκείνη που έχουν μέσα στη στήλη στο ίδιο. Επίσης το φαινόμενο αυτό περιορίζεται όσο αυξάνει η παροχή.

Ανάμεσα στις δύο καταστάσεις, αυτή της κυκλοφορίας του πολφού σε σταθερή κατάσταση (steady state circulation) και αυτής των στατικών συνθηκών όπου ο πολφός δεν ρέει (static condition) τα θερμοκρασιακά προφίλ αλλάζουν με το χρόνο (Εικόνα 3-3). Θεωρητικά, μετά την παύση της κυκλοφορίας, απαιτούνται περίπου 16 ώρες έως ότου η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης προσεγγίσει την γεωθερμική βαθμίδα με ένα σφάλμα της τάξεως του 10%, ενώ κατά την κυκλοφορία η θερμοκρασία μπορεί να χρειαστεί έως και 6 ώρες για να εξισορροπηθεί. Μετά τη διαδικασία ανέλκυσης/καθέλκυσης της διατρητικής στήλης (tripping), η κυκλοφορία μειώνει ραγδαία τη θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης στον πυθμένα της γεώτρησης (γραμμή 1), ενώ η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης που επιστρέφουν στην επιφάνεια από τον πυθμένα συνεχίζει να αυξάνεται (γραμμή 2). Το βάθος στο οποίο τα ρευστά διάτρησης αρχίζουν να ψύχονται μειώνεται σε σχέση με το χρόνο, έως ότου φτάσει στο 1/3 του συνολικού βάθους της γεώτρησης από τον πυθμένα (γραμμή 3). Μετά από περίπου 6 ώρες, τα ρευστά διάτρησης που κυκλοφορούν θα έχουν φτάσει σε ένα δυναμικό ισοζύγιο, στο οποίο το θερμοκρασιακό προφίλ παραμένει σταθερό. Η προσωρινή θερμοκρασιακή συμπεριφορά πρέπει να προσομοιωθεί ώστε να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη της πίεσης εντός της γεώτρησης μετά την έναρξη της όρυξής της.

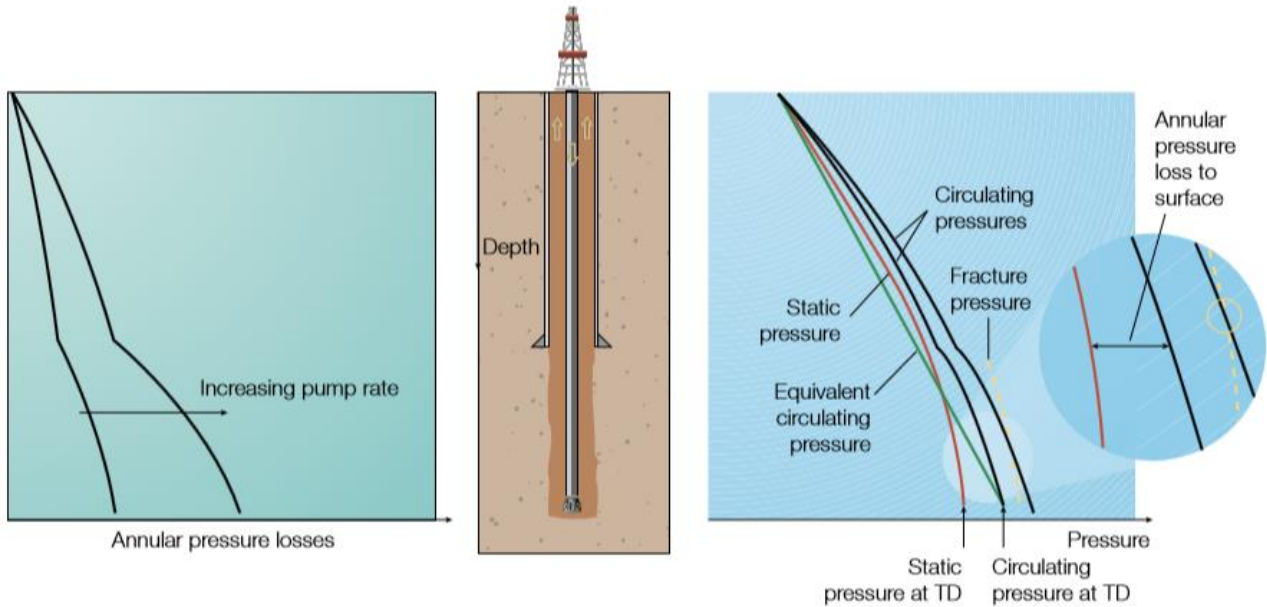


Εικόνα 3-3. Θερμοκρασιακή συμπεριφορά των ρευστών διάτρησης, μετά την εκκίνηση της κυκλοφορίας (Adamson, et al., 1998)

Ο προσομοιωτής θερμοκρασίας πρέπει να προβλέπει τις θερμοκρασίες που προκύπτουν, κατά τη μεταβολή αλλά και μετά την ολοκλήρωση της μεταβολής του ρυθμού άντλησης των ρευστών διάτρησης, έτσι ώστε να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της πίεσης. Στις περιπτώσεις όπου τα όρια ασφαλείας πάνω από την πίεση των πόρων είναι μικρά, ενδεχόμενη μείωση της στατικής πίεσης μετά την κυκλοφορία μπορεί να ληφθεί υπόψη.

Η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (equivalent circulation density – ECD) είναι η πυκνότητα του πολφού, η οποία προκύπτει σε οποιοδήποτε σημείο της γεώτρησης κατά την κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης. Υπολογίζεται από το άθροισμα της πυκνότητας των ρευστών διάτρησης και της απώλειας πίεσης λόγω τριβών εντός του δακτυλίου, εκφρασμένη σε πυκνότητα (Talkoilandgas, 2018). Η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD) εξαρτάται από τις διαστάσεις του διάκενου και, για συγκεκριμένο ιξώδες, αυξάνεται με τον ρυθμό κυκλοφορίας (Εικόνα 3-4). Ο υπολογισμός της ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας γίνεται εξαιρετικά δύσκολος όταν ληφθούν υπόψη οι αλλαγές στην θερμοκρασία και στο ιξώδες του πολφού.

Κατά την κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης, η αυξημένη πίεση που απαιτείται έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί η τριβή στον δακτύλιο και να επιστρέψουν στην επιφάνεια τα ρευστά διάτρησης από κάποιο βάθος, εκφράζεται με την απώλεια πίεσης λόγω τριβών εντός του δακτυλίου (annular pressure loss – APL). Η APL αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης των ρευστών διάτρησης (διάγραμμα αριστερά) και με την αύξηση του ιξώδους τους, και προστίθεται στην υδροστατική πίεση, με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής πίεσης στο τελικό βάθος κατά την κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης. Για κάθε συγκεκριμένο ρυθμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης μπορεί να υπολογιστεί μία ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας, η οποία θα είχε το ίδιο αποτέλεσμα με τη συνολική πίεση στο τελικό βάθος. Η συνολική πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης σε δεδομένο βάθος μπορεί να διατηρηθεί σταθερή για διαφορετικό ζεύγος τιμών των παραμέτρων «παροχή αντλίας» και «ECD», από τις οποίες καθορίζεται.



Εικόνα 3-4. Ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD) (Adamson, et al., 1998)

### 3.2.3. Υπολογισμός της πίεσης των ρευστών διάτρησης εντός της γεώτρησης

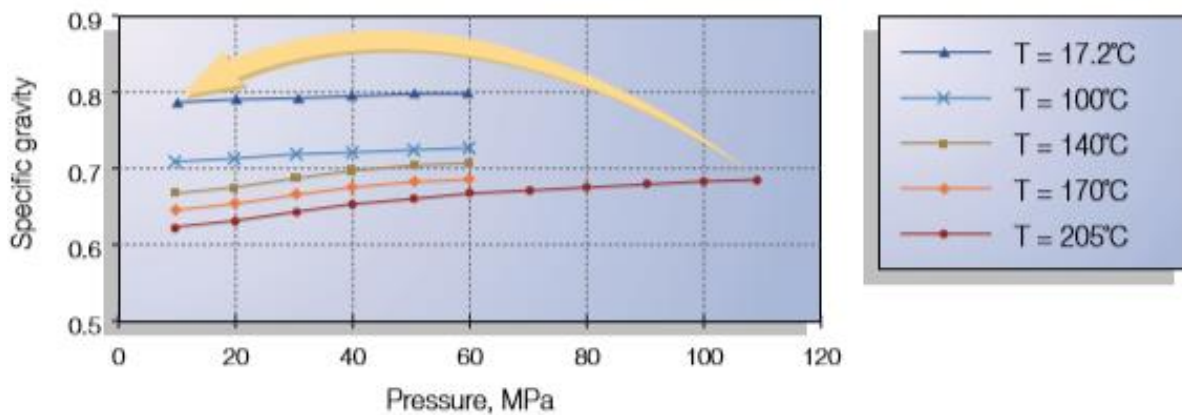
Αντί να γίνεται χρήση της ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας (ECD) για τον υπολογισμό της πίεσης εντός των γεωτρήσεων HP/HT, αποτελεί πιο ακριβή λύση η χρήση της στατικής πίεσης, της δυναμικής πίεσης και της πίεσης των θρυμμάτων ως συστατικά μέρη της συνολικής πίεσης εντός της γεώτρησης.

#### 3.2.3.1. Στατική πίεση (static pressure)

Η στατική πίεση υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της υδροστατικής βαθμίδας σε κάθε βάθος. Για να καταστεί αυτό εφικτό, εκτελείται ανάλυση πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας (PVT analysis) στο ρευστό διάτρησης ή στο βασικό του ρευστό (base fluid) (Εικόνα 3-5). Η συμπεστικότητα των ρευστών διάτρησης εξαρτάται από το βασικό ρευστό που χρησιμοποιείται. Αρκετά ρευστά διάτρησης που έχουν ως βάση το πετρέλαιο, εμφανίζουν υψηλότερη συμπεστικότητα από τα ρευστά διάτρησης που έχουν ως βάση το νερό. Επίσης, για τον υπολογισμό της υδροστατικής πίεσης απαιτείται και ακριβής προσομοίωση του θερμοκρασιακού προφίλ εντός της γεώτρησης.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα βιοδιασπώμενου οργανικού βασικού ρευστού χαμηλής οξύτητας, του συστήματος ULTIDRILL, που χρησιμοποιείται σε θερμοκρασία 395 °F και σε πυκνότητες έως και 19 ppg. Το ειδικό βάρος του βασικού ρευστού σε αυτές τις συνθήκες και σε βάθος 16.000 ft είναι ίσο με 0,68. Το ίδιο ρευστό (χρυσό βέλος) σε συνθήκες επιφανείας έχει ειδικό βάρος 0,79,

μία μείωση της τάξεως του 14% στο ειδικό βάρος του βασικού ρευστού στο τελικό βάθος της γεώτρησης, που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της στατικής πίεσης.



Εικόνα 3-5. Δεδομένα βασικών ρευστών του ULTIDRILL (Adamson, και συν., 1998)

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η ειδική πυκνότητα μειώνεται και με την αύξηση της πίεσης η ειδική πυκνότητα αυξάνεται. Συνεπώς, η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης εντός της γεώτρησης διαφοροποιείται από την πυκνότητά τους σε συνθήκες επιφανείας και η υδροστατική πίεση που θα ασκούν θα είναι μικρότερη από αυτήν που πιθανόν έχει εκτιμηθεί αρχικά. Ο ακριβής υπολογισμός της πυκνότητας είναι καίριας σημασίας για την ασφαλή διάνοιξη γεωτρήσεων, ιδίως σε περιβάλλοντα HP/HT όπου οι συνθήκες είναι πιο απαιτητικές και τα περιθώρια λάθους μικρότερα.

Με σημείο εκκίνησης την επιφάνεια, όπου η πίεση και η θερμοκρασία είναι γνωστές, η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης μπορεί να υπολογιστεί. Η αναμενόμενη υδροστατική πίεση και θερμοκρασία (predicted hydrostatic pressure and temperature) σε ένα σημείο της γεώτρησης, επιτρέπουν τον υπολογισμό της πυκνότητας στο επόμενο βαθύτερο επίπεδο. Στο εργοτάξιο, η πυκνότητα του ρευστού διάτρησης που μετράται πριν την είσοδό του στη γεώτρηση χρησιμοποιείται στο σημείο εκκίνησης των υπολογισμών, αυξάνοντας την ακρίβεια προσέγγισης των αρχικών συνθηκών. Με τα δεδομένα πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της στατικής πίεσης σε κάθε βάθος με διάφορα λογισμικά (π.χ. MudCADE και DSHyd).

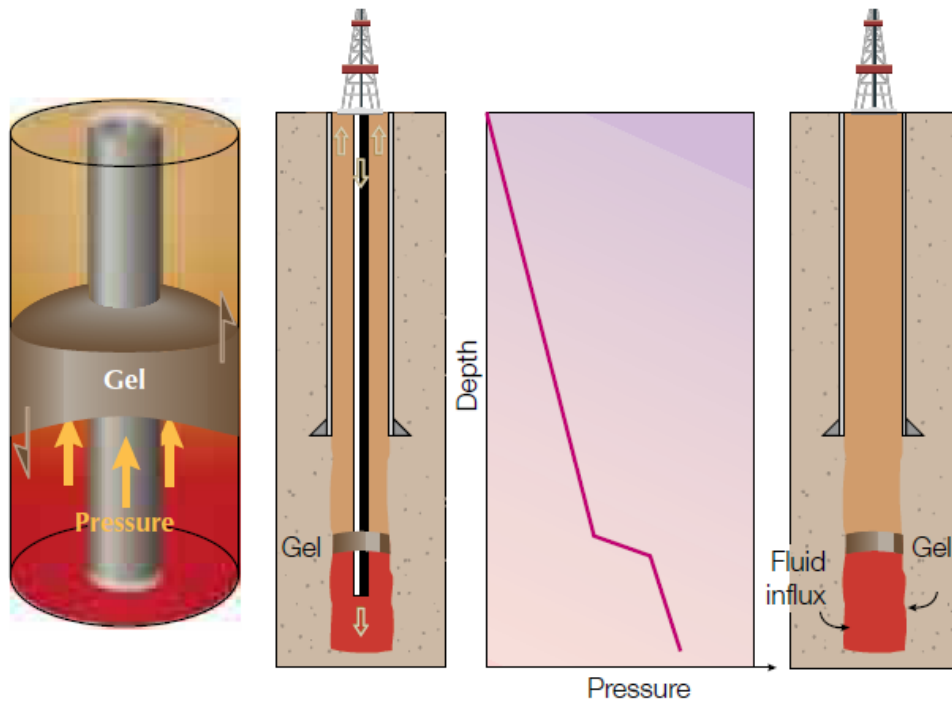
### 3.2.3.2. Δυναμική πίεση (dynamic pressure)

Ο όρος «δυναμική πίεση» μπορεί να είναι πιο περιεκτικός και πλήρης από την έννοια της ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας (ECD). Κι αυτό γιατί λαμβάνει υπόψη:

- την απώλεια πίεσης λόγω τριβών εντός του δακτυλίου (APL), που προκαλείται από την κίνηση των ρευστών, την ταχύτητα ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης (φαινόμενο swab and surge) και



- την υπερβάλλουσα πίεση που απαιτείται για το σπάσιμο τυχόν θιξοτροπικής γέλης (thixotropic gel) που μπορεί να έχουν σχηματίσει τα ρευστά διάτρησης μέσα στη γεώτρηση (Εικόνα 3-6).

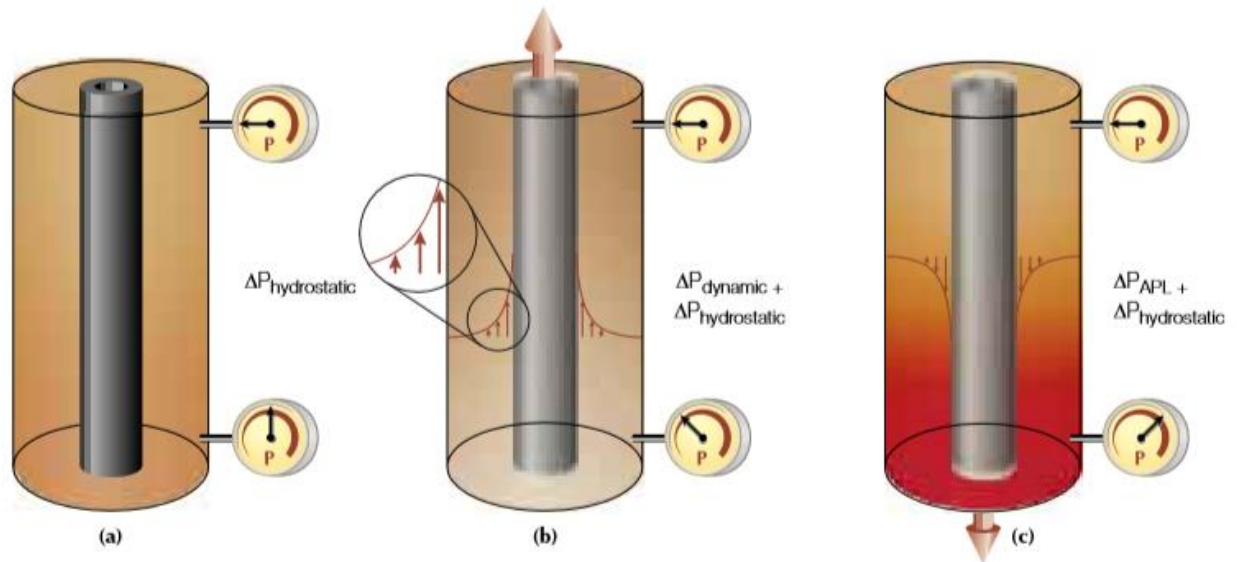


Εικόνα 3-6. Διαφορά πίεσης που προκύπτει από την παρουσία θιξοτροπικής γέλης (Adamson, και συν., 1998)

Η διακοπή ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία γέλης σε διάφορα σημεία εντός της γεώτρησης, η οποία λειτουργεί σαν ελαστικό στερεό. Εάν ξεκινήσει η κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης και δεν επιτευχθεί το σπάσιμο της θιξοτροπικής γέλης, παρατηρείται αύξηση της πίεσης κάτω από αυτή με πιθανό αποτέλεσμα τη ρωγμάτωση του σχηματισμού (αριστερή εικόνα). Ένα άλλο αρνητικό δημιουργίας θιξοτροπικής γέλης είναι η μη ανίχνευση αιφνίδιας εισροής ρευστών του ταμιευτήρα, καθώς η γέλη λαμβάνει όλη την πίεση από την εισροή (δεξιά εικόνα).

Η κίνηση της διατρητικής στήλης εντός ενός ρευστού με συγκεκριμένο ιξώδες, προκαλεί διάτμηση στην οριακή στοιβάδα του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με το τοίχωμα της διατρητικής στήλης, σε συνδυασμό με διατμητική παραμόρφωση του ρευστού (Εικόνα 3-7). Η διατμητική παραμόρφωση μεταφράζεται ως αλλαγή της πίεσης,  $\Delta P$ , στο ρευστό, η οποία προστίθεται στην υδροστατική πίεση (a). Η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης μειώνεται καθώς η διατρητική στήλη ανελκύεται (swabbing) (b), και αυξάνεται καθώς η διατρητική στήλη καθελκύεται (surging) (c). Οι αλλαγές της πίεσης είναι συνάρτηση του ιξώδους του ρευστού, της γεωμετρίας της γεώτρησης και της ταχύτητας με την οποία ανελκύεται ή καθελκύεται η διατρητική στήλη. Η ταχεία ανέλκυση της διατρητικής στήλης από τη γεώτρηση, μπορεί να οδηγήσει σε τέτοια μείωση της πίεσης έτσι ώστε η πίεση εντός του δακτυλίου να γίνει

μικρότερη από την πίεση των πόρων των πλευρικών σχηματισμών, με αποτέλεσμα να εγκυμονείται ο κίνδυνος εισροής ρευστών από τους πλευρικούς σχηματισμούς εντός της γεώτρησης. Αντιθέτως, η ταχεία καθέλκυση της διατρητικής στήλης μπορεί να αυξήσει την πίεση σε επίπεδο μεγαλύτερο από την πίεση ρωγμάτωσης των πλευρικών σχηματισμών. Με τη μοντελοποίηση της δυναμικής πίεσης που δημιουργείται κατά το φαινόμενο του swab and surge, ο μηχανικός των ρευστών διάτρησης καθίσταται ικανός να προσδιορίσει τις ασφαλείς ταχύτητες ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης (tripping speeds).



Εικόνα 3-7. Φαινόμενο swab and surge (Adamson, και συν., 1998)

Η πρόβλεψη της συμμετοχής της δυναμικής πίεσης στην ολική πίεση, απαιτεί ακριβή μοντελοποίηση της ρεολογίας των ρευστών διάτρησης (mud rheology). Αρκετές διαφορετικές σχέσεις είναι διαθέσιμες που συσχετίζουν την διατμητική τάση (shear stress) με τον βαθμό διάτμησης (shear rate) και προσδιορίζουν το δυναμικό ιξώδες σε δεδομένη θερμοκρασία και βαθμό διάτμησης.

Αναλόγως το ρευστό, ο μηχανικός ρευστών διάτρησης επιλέγει το κατάλληλο ρεολογικό μοντέλο, με βάση την προσαρμογή του στα δεδομένα που προκύπτουν από τις δοκιμές ιξώδους (viscometer tests) για τις γεωτρήσεις HP/HT. Εναλλακτικά, οι ιδιότητες του ρευστού μπορεί να συμμορφώνονται με καθιερωμένες συσχετίσεις, όπως το μοντέλο πλαστικών ρευστών κατά Bingham (Bingham plastic model) ή ένα εμπειρικό μοντέλο εκθετικών ρευστών (empirical power law model), με παραμέτρους που επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου ρευστού διάτρησης.

Υπάρχουν επίσης ορισμένα εμπορικά λογισμικά μοντελοποίησης (modeling software) που περιλαμβάνουν αλγόριθμους για τον υπολογισμό της δυναμικής πίεσης για διαφορετικά μοντέλα ρευστών (Bingham plastic or power law models). Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων (έναντι άλλων περισσότερο πολύπλοκων) είναι το γεγονός ότι οι ρεολογικές παράμετροι που υπολογίζουν μπορούν εύκολα να συγκριθούν με τις μετρήσεις που εκτελούνται στο εργοτάξιο με χρήση ιξωδομέτρων.

### 3.2.3.3. Πίεση λόγω θρυμμάτων (*cuttings pressure*)

Ένα επιπλέον μέρος της ολικής πίεσης οφείλεται στη συγκέντρωση των θρυμμάτων και ονομάζεται πίεση λόγω θρυμμάτων. Ενώ, τα ρευστά διάτρησης υψηλής πυκνότητας σε γεωτρήσεις HP/HT συμβάλλουν στη μείωση της συγκέντρωσης των θρυμμάτων, η συνεισφορά τους στην ολική πίεση δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Μιας και τα θρύμματα είναι πιο πυκνά από τα ρευστά διάτρησης, οποιαδήποτε συγκέντρωση στο δακτύλιο της γεώτρησης οδηγεί στην αύξηση της πίεσης των ρευστών διάτρησης. Η επιπρόσθετη πίεση που οφείλεται στα θρύμματα εξαρτάται από τον ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης (*rate of penetration – ROP*), τον ρυθμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, το μέγεθος των θρυμμάτων και την κατανομή τους.

Ο υψηλός ρυθμός προχώρησης αυξάνει την συγκέντρωση των θρυμμάτων, αλλά και τον όγκο τους, με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα καθίζησης. Μπορεί μεν τα δύο παραπάνω φαινόμενα να υπερνικηθούν από την αύξηση στο ρυθμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, ωστόσο αυτή η λύση θα προκαλέσει αύξηση της δυναμικής πίεσης κυκλοφορίας στο κοπτικό άκρο. Γι' αυτό το λόγο, κατά τη διαδικασία διάνοιξης μίας γεώτρησης υπάρχει όριο στη μείωση της δυναμικής πίεσης, καθώς το σχετικό όφελος μπορεί να εξαλειφθεί από την αύξηση της πίεσης των θρυμμάτων. Όταν η πίεση που οφείλεται στη συγκέντρωση των θρυμμάτων λάβει υψηλή τιμή, σε μεγάλους ρυθμούς εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, λύση αποτελεί η μείωση του ρυθμού προχώρησης.

### 3.2.3.4. Ολική πίεση (*total pressure*)

Η ολική πίεση είναι το άθροισμα της στατικής πίεσης (*static pressure*), της δυναμικής πίεσης (*dynamic pressure*) και της πίεσης λόγω θρυμμάτων (*cuttings pressure*). Στην έκφραση της ολικής πίεσης εντός της γεώτρησης, συμπεριλαμβάνονται όλες οι φάσεις της λειτουργίας. Η μικρότερη τιμή της ολικής πίεσης επιτυγχάνεται κατά την ανέλκυση της διατρητικής στήλης από τη γεώτρηση (*swabbing*), μετά την διακοπή της κυκλοφορίας για μεγάλο χρονικό διαστήμα με την παρουσία της διατρητικής στήλης εντός της γεώτρησης. αφού πρώτα κυκλοφορήσουν τα ρευστά διάτρησης στην επιφάνεια (*bottoms up*). Αντίθετα, η μέγιστη πίεση επιτυγχάνεται όταν η διάνοιξη γίνεται με μεγάλο ρυθμό προχώρησης και μεγάλο ρυθμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, όταν διακοπεί η κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης και όταν επιταχυνθεί η κίνηση της διατρητικής στήλης ενώ βρίσκεται σε ρευστό με μεγάλο ιξώδες.

Κατά την όρυξη, οι ιδιότητες των ρευστών διάτρησης ενδέχεται να ποικίλουν με αποτέλεσμα να απαιτείται αναπροσαρμογή του ρεολογικού μοντέλου. Προσωρινές αλλαγές στις ιδιότητες των ρευστών διάτρησης μπορούν να προκαλέσουν το ίδιο ρευστό να συμπεριφέρεται ως μη Νευτώνειο ρευστό. Συγκεκριμένα, το ίδιο ρευστό ενδέχεται να συμπεριφερθεί τη μία στιγμή ως ψευδοπλαστικό (*pseudoplastic fluid*), όπου το ιξώδες μειώνεται με το ρυθμό διάτμησης, ή ως διαστελλόμενο (*dilatant fluid*), όπου το ιξώδες αυξάνεται με το ρυθμό διάτμησης, και την άλλη στιγμή ως πλαστικό ρευστό κατά Bingham, όπου απαιτείται να ξεπεραστεί μια οριακά ελάχιστη

διατμητική τάση, και, στη συνέχεια, συμπεριφέρεται ως ιδανικό Νευτώνειο ρευστό, ακόμα και εντός του ίδιου τμήματος της γεώτρησης. Η δυνατότητα να συγκρίνεται η πραγματική συμπεριφορά των δύο μοντέλων στο εργοτάξιο και να επιλέγεται το καταλληλότερο είναι ιδιαίτερα επωφελής για την ακριβή πρόβλεψη της πτώσης πίεσης του δακτυλίου (APL), η οποία μεν είναι μικρότερη από την πτώση πίεσης που προκύπτει από την τυρβώδη ροή στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης και από την πτώση πίεσης που προκύπτει με την έξοδο των ρευστών διάτρησης από τα ακροφύσια του κοπτικού άκρου.

### 3.2.4. Έλεγχος πιέσεων μέσα στη γεώτρηση

Κατά τη διαδικασία της όρυξης γεωτρήσεων HP/HT βασικός στόχος είναι η αποφυγή της ρωγμάτωσης του σχηματισμού. Ωστόσο, σε μεγάλα βάθη, η διαφορά μεταξύ της πίεσης των πόρων και της ρωγμάτωσης του σχηματισμού – όριο πίεσης ρευστών διάτρησης – είναι πολύ μικρή, έως και 500 psi (3,4 MPa). Εάν η ολική πίεση φτάνει τις τιμές της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού, η πρώτη επιλογή για την αντιμετώπιση του προβλήματος, είναι η μείωση της δυναμικής πίεσης.

Ο έλεγχος εντός της γεώτρησης, όταν υπάρχει τόσο μικρό όριο μεταξύ της πίεσης των πόρων και της ρωγμάτωσης του σχηματισμού, μπορεί να επιτευχθεί και με άλλους τρόπους. Το ιξώδες, το ειδικό βάρος των ρευστών διάτρησης, η περιεκτικότητα σε στερεά στα ρευστά διάτρησης, ο ρυθμός προχώρησης και ο ρυθμός εισπίεσης των ρευστών διάτρησης είναι κάποιες από τις παραμέτρους που μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της ολικής πίεσης.

Επικαιροποιημένες προβλέψεις πίεσης, βασισμένες σε μετρήσεις στο χώρο του γεωτρήσανου, μπορούν να συνεισφέρουν στην απόφαση για το ποιες παράμετροι πρέπει να αλλάξουν ώστε τα ρευστά διάτρησης να διατηρήσουν τις ιδιότητές τους εντός της γεώτρησης. Μειώνοντας το ιξώδες των ρευστών διάτρησης ή τον ρυθμό εισπίεσής τους, διατηρώντας τον όμως αρκετά υψηλό ώστε να καθαρίζεται η γεώτρηση από τα θρύμματα και να αποφεύγεται η δημιουργία πίεσης λόγω θρυμμάτων, αποτελεί μία επιλογή. Αντικειμενικός στόχος είναι η εύρεση ενός ρυθμού εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, ο οποίος θα ελαττώνει τη συνεισφορά της δυναμικής πίεσης και της πίεσης λόγω θρυμμάτων στην ολική πίεση.

#### 3.2.4.1. Φαινόμενο sagging

Ενώ η δυναμική πίεση ελέγχεται από τη μείωση του ιξώδους, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε τα αδρανή υλικά που αυξάνουν το ειδικό βάρος του ρευστού διάτρησης να διατηρούνται εν αιωρήσει. Τα αιωρούμενα στερεά που δεν διατηρούνται εν αιωρήσει και καταβυθίζονται προκαλούν διαφορισμό στην πυκνότητα του ρευστού (density segregation), φαινόμενο που ονομάζεται sagging.

Στην πλειοψηφία των γεωτρήσεων HP/HT που έχουν ορυχθεί, έχει γίνει χρήση ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο αναμειγμένο με αλμυρό νερό (brine), γαλακτωματοποιητές (emulsifiers) και αδρανή υλικά που αυξάνουν το ειδικό τους βάρος (weighted materials). Τα υλικά αυτά που χρησιμοποιούνται για την αύξηση του ειδικού βάρους των ρευστών διάτρησης, στις περιπτώσεις όπου η κυκλοφορία έχει σταματήσει και δεν ανανεώνονται τα ρευστά διάτρησης εντός της γεώτρησης, καθιζάνουν στο δακτύλιο (φαινόμενο sagging-φαινόμενο χαλάρωσης του ρευστού από την καταβύθιση των θρυμμάτων λόγω βαρύτητας σε συνθήκες μη κυκλοφορίας της λάσπης). Εάν αυτή η διαδικασία συνεχιστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, το ειδικό βάρος στο ανώτερο κομμάτι της γεώτρησης θα μειωθεί ενώ στο κατώτερο θα αυξηθεί (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018). Το φαινόμενο sagging γίνεται περισσότερο έντονα και απαιτεί ειδικότερη διαχείριση (Gregoire, Hodder, Peng, & Massam, 2009) στις παρακάτω περιπτώσεις και συνθήκες:

- Σε κεκλιμένες γεωτρήσεις με κλίση μεγαλύτερη των 30°.
- Σε γεωτρήσεις με θερμοκρασία πυθμένα (bottom hole temperature – BHST) μεγαλύτερη των 170 °C.
- Σε περιόδους παρατεταμένης κυκλοφορίας ρευστών διάτρησης υπό χαμηλή ταχύτητα ή σε συνθήκες μη κυκλοφορίας.

Ωστόσο, με τη βοήθεια πειραματικών ελέγχων και αξιολόγησης του φαινομένου στο χώρο του γεωτρύπανου έχουν προκύψει ορισμένες λύσεις για την άμβλυση του προβλήματος. Αρχικά, έχουν βρεθεί ειδικοί εξισορροπητές των ρευστών διάτρησης που αποτρέπουν σε ένα βαθμό την εμφάνιση του φαινομένου του sagging. Οι εξισορροπητές αυτοί είναι οργανικές άργιλοι (organoclays), που σκοπός τους είναι να αυξήσουν το ιξώδες των ρευστών διάτρησης, με τη διόγκωσή τους. Καθώς αυξάνεται το ιξώδες, επιτυγχάνεται βελτιωμένη αιώρηση των αδρανών υλικών που αυξάνουν το ειδικό βάρος των ρευστών διάτρησης και, συνεπώς, ελάττωση του φαινομένου του sagging (Temple, Forbes, Paterson, & Leith, 2005). Ωστόσο, η υπερβάλλουσα αύξηση του ιξώδους έχει τα αντίθετα αποτελέσματα, διότι αυξάνεται έτσι και η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD) και κινδυνεύει να ρωγματωθεί ο σχηματισμός.

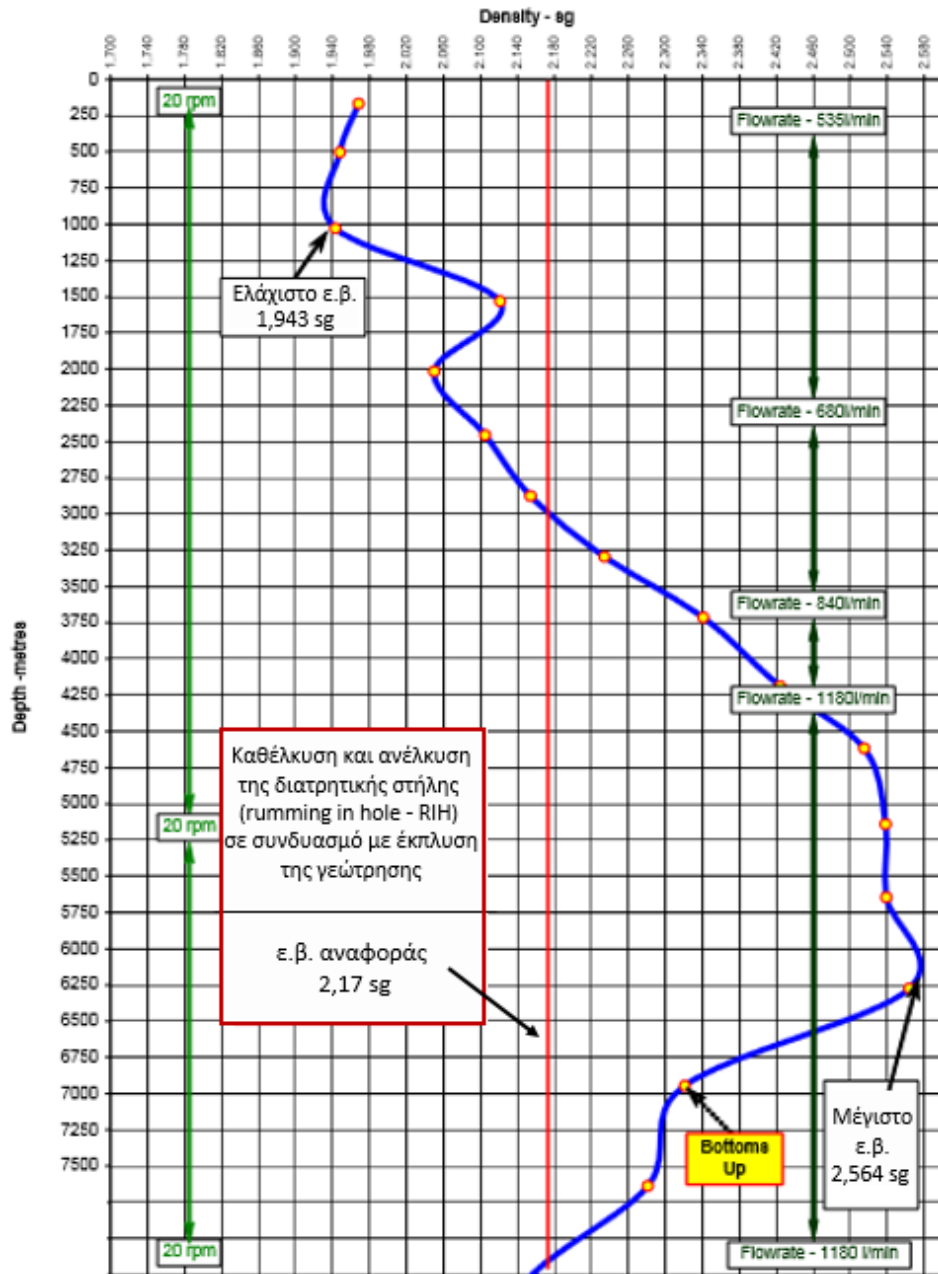
Επιπλέον, με τον συχνό έλεγχο του ειδικού βάρους και του ιξώδους των ρευστών διάτρησης, αλλά και την ελεγχόμενη ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης το φαινόμενο μπορεί να εντοπιστεί νωρίτερα και να αντιμετωπιστεί. Τέλος, η γραμμική διάτμηση (laminar shear<sup>3</sup>) πρέπει να αποφεύγεται διότι προωθεί το φαινόμενο του sagging (Adamson, et al., 1998).

Παράδειγμα εμφάνισης του φαινομένου sagging αποτελεί η γεώτρηση G10 της Total στην Βόρεια Θάλασσα, η οποία συγκαταλέγεται στην κατηγορία γεωτρήσεων

---

<sup>3</sup> Η γραμμική ροή και συνεπώς η γραμμική διάτμηση προκύπτουν όταν ο ρυθμός κυκλοφορίας είναι μικρός ή μηδενικός. Η ταχύτητα των ρευστών διάτρησης εσωτερικά είναι η μεγαλύτερη δυνατή και περιμετρικά μειώνεται, μέχρι την μικρότερη τιμή της που σημειώνεται κατά την επαφή με τη σωλήνωση. Η γραμμική ροή είναι προβλέψιμη και ο βαθμός διάτμησης εξαρτάται από τη διατμητική τάση (Drilling Formulas, 2016).

ΗΡ/ΗΤ. Στη συγκεκριμένη γεώτρηση χρησιμοποιήθηκαν ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο με προσθήκη βαρύτη για ρύθμιση του ειδικού βάρους. Για περίοδο μίας εβδομάδας εκτελούνταν στη γεώτρηση διαγραφίες, χωρίς κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης. Στη συνέχεια για να επανέλθει η γεώτρηση και τα ρευστά διάτρησης στην προ διακοπής κατάσταση, απαιτήθηκαν 14 μέρες. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-8) φαίνεται η κατανομή του ειδικού βάρους των ρευστών διάτρησης σε σχέση με το βάθος.



Εικόνα 3-8. Καταβύθιση βαρύτη (sagging) στη γεώτρηση G-10 της Total στη Β. Θάλασσα (Gregoire, Hodder, Peng, & Massam, 2009)

Από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνεται ότι κατά τη διάρκεια της έκπλυσης της γεώτρησης ο βαρύτης καταβυθίστηκε και δεν κατάφερε να διαλυθεί επαρκώς στο ρευστό διάτρησης. Το ειδικό βάρος αναφοράς είναι τα 2,17 sg (1sg = 1 g/cm<sup>3</sup>),

ωστόσο μέχρι και τα πρώτα 3.000 m της γεώτρησης η τιμή του ειδικού βάρους είναι χαμηλότερη. Αντίθετα από τα 3.000 m μέχρι και τα 6.250 m το ειδικό βάρος παρουσιάζει μεγάλη αύξηση, και ειδικά στο βάθος 4.600 m έως αυτό των 6.250 m, εξαιτίας της συσσώρευσης του καταβυθισμένου βαρύτη. Από το βάθος των 6.250 m και μετά παρουσιάζεται μία έντονη μείωση που οφείλεται στην κινητική ενέργεια που προκαλείται από την εκτόξευση των ρευστών διάτρησης από τα ακροφύσια του κοπτικού άκρου.

Από το παραπάνω φαινόμενο συμπεραίνεται η σημαντικότητα του ακριβούς προσδιορισμού της πυκνότητας των ρευστών διάτρησης και της επαρκούς ανάμιξής τους. Η πιθανότητα εκδήλωσης αιφνίδιας εισροής, όταν δεν πραγματοποιείται κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης, είναι μεγάλη εξαιτίας του φαινομένου του sagging και η αντιμετώπιση της αρκετά δυσκολότερη στις γεωτρήσεις HP/HT. Τέλος, η ανάγκη για ρευστά διάτρησης μεγαλύτερης πυκνότητας είναι προφανής, ώστε να αντιμετωπιστούν οι υψηλές πιέσεις, κάτι που οξύνει ακόμα περισσότερο το φαινόμενο του sagging. Γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικά ρευστά διάτρησης, τα οποία επιτυγχάνουν υψηλές πυκνότητες και ταυτόχρονα δεν προκαλούν το φαινόμενο του sagging, όπως το μυρμηκικό καίσιο.

#### 3.2.4.2. Μυρμηκικό καίσιο (*cesium formate*)

Το μυρμηκικό καίσιο είναι ένα ουδέτερο έως ελαφρά αλκαλικό άλας που σχηματίζεται από το υδροξείδιο του κασίου (*cesium hydroxide*) και το μυρμηκικό οξύ (*formic acid*), με χημικό τύπο  $\text{HCOO-Cs}^+$ , ιδιαίτερα διαλυτό στο νερό. Με αυτό διαμορφώνεται ρευστό διάτρησης με βάση το αλμυρό νερό (*brine*) και δεν περιλαμβάνει στερεά σωματίδια. Ένα διάλυμα περιεκτικότητας σε μυρμηκικό καίσιο 82% κατά βάρος έχει πυκνότητα  $2,4 \text{ g/cm}^3$  ( $19,9 \text{ lbm/gal}$ ), κάτι που το καθιστά ικανό να αντιμετωπίσει επιτυχώς τις υψηλές πιέσεις. Επιπρόσθετα, έχει εμφανίσει εξαιρετικά χαρακτηριστικά υγιεινής, ασφάλειας και περιβάλλοντος (*health, safety, environmental – HSE characteristics*) σε εργαστηριακές δοκιμές και ενδείκνυται ως ρευστό για χρήση κατά τη διάτρηση, την ολοκλήρωση, αλλά και τη συντήρηση (*workover*) της γεώτρησης.

Τα βασικά προτερήματα αυτού του ρευστού διάτρησης είναι οι χαμηλές τιμές ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας που επιτυγχάνει, σε συνδυασμό με τον άμεσο εντοπισμό αιφνίδιας εισροής, μιας και ανήκει στην κατηγορία των WBM. Ωστόσο, η απώλεια του εντός του σχηματισμού που εμφανίζει – έως και 10 φορές περισσότερο από ένα τυπικό ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο – μαζί με την υπέρογκη τιμή του στην αγορά το καθιστούν δύσκολο στη χρήση (*Shadravan & Amani, 2012*).

Για να γίνει οικονομικότερα προσιτό αναμιγνύεται με μυρμηκικό κάλιο (*potassium formate*) ώστε να συνθέσει ρευστά διάτρησης με βάση το αλμυρό νερό, με πυκνότητα από  $1,8$  έως  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Τέλος, εμφανίζει καλή συμπεριφορά σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας – στην κλίμακα των  $375 \text{ }^\circ\text{F}$  ( $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – ανάλογα με το χρόνο παραμονής του σε αυτά (*Schlumberger Oilfield Glossary, 2018*).

### 3.2.5. Βελτιστοποίηση των ρευστών διάτρησης σε συνθήκες HP/HT

Εν κατακλείδι, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και παρακολούθηση των ρευστών διάτρησης, ώστε να «συμβιβαστούν» οι διαφορετικές απαιτήσεις για τη βέλτιστη απόδοσή τους σε γεωτρήσεις HP/HT (Πίνακας 3-1). Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζεται η επίδραση των διαφορετικών βασικών ιδιοτήτων της λάσπης διάτρησης στην απόδοσή της μέσα σε μια γεώτρηση HP/HT.

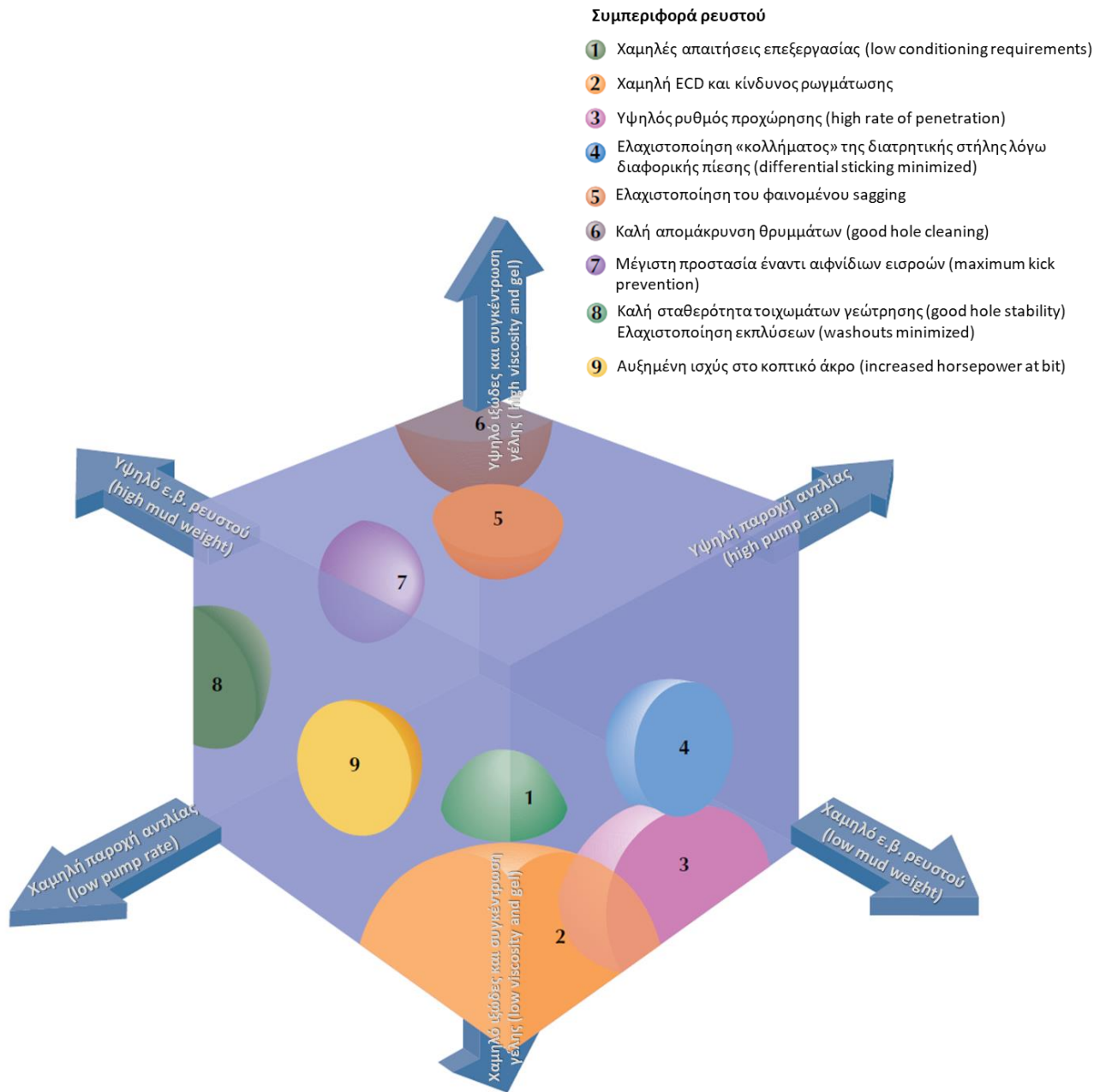
Πίνακας 3-1. Βασικές ιδιότητες των ρευστών διάτρησης για βέλτιστη απόδοσή τους σε γεωτρήσεις HP/HT (Adamson, και συν., 1998)

Ιδιότητες ρευστού διάτρησης	Επίδραση στην απόδοση του ρευστού σε γεωτρήσεις HP/HT
Πλαστικό ιξώδες (plastic viscosity)	Όσο το δυνατόν μικρότερο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD)
Τάση διαρροής και πυκνωματοποίηση (yield stress and gels)	Επαρκώς υψηλό ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του sagging, αλλά όχι τόσο υψηλό ώστε να προκληθεί πυκνωματοποίηση ή υψηλές πιέσεις surge and swab (κατά το tripping της διατρητικής στήλης)
Απώλεια ρευστών διάτρησης (HP/HT fluid loss)	Όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ρωγμάτωση του σχηματισμού
Ρεολογία HP/HT (HP/HT rheology)	Σταθερή και προβλέψιμη ώστε να ελέγχεται το φαινόμενο του sagging, η πυκνωματοποίηση και η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD)
Συμπιεστότητα (compressibility)	Πρέπει να είναι γνωστή ώστε να μπορεί να προβλεφθεί η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης και η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (ECD)
Σταθερότητα κατά την παρουσία επιμολυντών (stability to ccontaminants)	Σταθερή συμπεριφορά υπό την παρουσία αερίου, αλμυρού νερού και τσιμέντου
Διαλυτότητα αερίου (gas solubility)	Απαραίτητη για τον πρόωρο εντοπισμό και αντιμετώπιση αιφνίδιας εισροής αερίου
Σταθερότητα στο χρόνο (stability to aging)	Οι ιδιότητες δεν θα πρέπει να μεταβάλλονται με τον χρόνο, υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες
Ανεκτικότητα στην παρουσία στερεών (solid tolerance)	Οι ιδιότητες των ρευστών διάτρησης να μην επηρεάζονται από την παρουσία στερεών
Αύξηση ειδικού βάρους ρευστού (weighting)	Να υπάρχει η δυνατότητα γρήγορης αύξησης του ειδικού βάρους, σε περίπτωση αιφνίδιας εισροής

Ιδιαίτερη σημασία στις συνθήκες HP/HT έχει και η διατήρηση των ιδιοτήτων του ρευστού διάτρησης μέσω επαρκούς ελέγχου των περιεχόμενων στερεών, ελαχιστοποίησης των απαιτήσεων αραιώσης και μείωσης του ρευστού που απομακρύνεται με τα θρύμματα. Στην Εικόνα 3-9 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ελέγχου και βελτιστοποίησης των ρευστών διάτρησης. Τρεις είναι οι βασικές παράμετροι που ελέγχουν την απόδοση των ρευστών διάτρησης: το ιξώδες, το ειδικό βάρος και η παροχή της αντλίας. Το διάγραμμα παρουσιάζει πως οι διαφορετικές ρυθμίσεις των παραπάνω παραμέτρων οδηγούν σε ρευστό με διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Για παράδειγμα, ένα ρευστό με χαμηλό κίνδυνο πρόκλησης ρωγμάτωσης στον σχηματισμό (χαμηλή ECD) επιτυγχάνεται μέσω χαμηλού ειδικού



βάρους, χαμηλού ιξώδους και χαμηλής συγκέντρωσης γέλης (gel concentration) και με χαμηλή παροχή αντλίας.



Εικόνα 3-9. Διάγραμμα ελέγχου και βελτιστοποίησης των ιδιοτήτων των ρευστών διάτρησης (Adamson, και συν., 1998)

### 3.3. Σχεδιασμός Σωλήνωσης και Τσιμέντωσης

Τόσο ο σχεδιασμός της σωλήνωσης όσο και της τσιμέντωσης παρουσιάζουν επίσης σοβαρές δυσκολίες στις γεωτρήσεις HP/HT. Οι μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες που επικρατούν έχουν επίδραση στην αντοχή της σωλήνωσης, αλλά και στις φυσικές

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

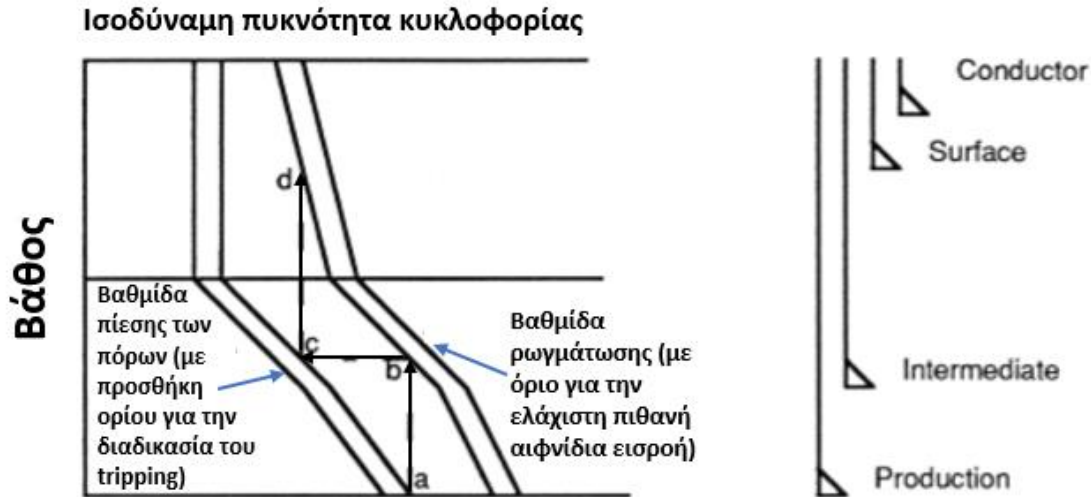
και χημικές ιδιότητες των υλικών του τσιμέντου που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, το μικρό περιθώριο μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης, καθιστά αναγκαία τη χρήση εξοπλισμού άριστης ποιότητας και ενδεδειγμένη σχεδίαση της σωλήνωσης και της τσιμεντώσεως.

### 3.3.1. Σωλήνωση

Στη σωλήνωση κάθε ομάδα στελεχών πρέπει να είναι προσεκτικά σχεδιασμένη ώστε να μπορεί να παραλάβει τα συνδυασμένα φορτία της διάρρηξης (burst), του εφελκυσμού (tension) και της θλίψης (collapse). Επιπλέον, απαραίτητη είναι η γνώση του θερμοκρασιακού προφίλ και της διαφοράς μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης, καθώς για κάθε αλλαγή στις παραπάνω παραμέτρους πρέπει να τοποθετηθεί ομάδα σωληνοειδών διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικών ιδιοτήτων.

Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα των γεωτρήσεων HP/HT είναι η ορθή επιλογή των στελεχών της σωλήνωσης, με βάση το βάρος τους, το βαθμό φθοράς τους και τον τύπο των συνδέσμων για δεδομένη διάμετρο. Η επιλογή του μεγέθους και του πάχους της σωλήνωσης γίνονται με βάση τα φορτία που μπορούν να αναλάβουν – ομοίως και για τους συνδέσμους της σωλήνωσης. Σκοπός των στελεχών της σωλήνωσης και των συνδέσμων της είναι να συγκρατήσουν τις δυνάμεις που προκαλούνται από την παρουσία υπερβάλλουσας εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης, καθώς και να επενδύσουν τη γεώτρηση. Ωστόσο, σε γεωτρήσεις όπου παρουσιάζονται πολύ μεγάλες τιμές διαφοράς εσωτερικής-εξωτερικής πίεσης, ενδέχεται να μη διατίθεται στην αγορά κατάλληλος σύνδεσμος, με αποτέλεσμα τον κατά παραγγελία σχεδιασμό του (Cumana-Marval, 1991).

Βασική πρόκληση στη σωλήνωση είναι η απόφαση που θα καθορίσει σε ποιο βάθος θα εδραστεί η κάθε στήλη σωλήνωσης. Κατά την προετοιμασία του προγράμματος μιας γεώτρησης, η πρώτη φάση αφορά τον προσδιορισμό του βάθους μέχρι του οποίου θα φτάσει κάθε στήλη σωλήνωσης και θα τσιμεντωθεί. Για την εκτίμηση του βάθους έδρασης μιας στήλης σωλήνωσης θα πρέπει να εξεταστούν οι γεωλογικές συνθήκες, με έμφαση στις πιέσεις των σχηματισμών και τις βαθμίδες ρωγμάτωσης, αλλά και τα ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την όρυξη (Εικόνα 3-10). Η εκτίμηση του βάθους έδρασης της σωλήνωσης ξεκινάει για την κατώτερη σωλήνωση που θα τοποθετηθεί μέσα στη γεώτρηση και προχωράει προς την επιφάνεια. Κατά την αρχική, δηλαδή, φάση ο σχεδιασμός της σωλήνωσης γίνεται από κάτω προς τα επάνω (bottom-up approach).



Εικόνα 3-10. Βάθος έδρασης σωλήνωσης (Cumana-Marval, 1991)

Η πυκνότητα των ρευστών διάτρησης θα πρέπει να βρίσκεται εντός του «παραθύρου» μεταξύ των δύο αυτών καμπυλών ώστε να είναι ασφαλής η διάνοιξη της γεώτρησης. Συγκεκριμένα, η υδροστατική πίεση που θα ασκούν τα εκάστοτε χρησιμοποιούμενα ρευστά διάτρησης, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον, ίση με την πίεση των σχηματισμών στα αντίστοιχα βάθη, για να εξασφαλίζεται εξισορρόπηση. Προτείνεται όμως ως συντελεστής ασφαλείας αυξημένη πίεση των ρευστών διάτρησης κατά 200 psi. Συνεπώς, το βασικό κριτήριο που καθορίζει την έδραση της κάθε στήλης σωλήνωσης είναι «η πίεση που θα ασκούν τα ρευστά διάτρησης σε κάθε θεωρούμενο βάθος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του σχηματισμού» (Σταματάκη, 2003).

Επιπλέον, στην Εικόνα 3-10 έχει προστεθεί και συντελεστής ασφαλείας για την αυξομείωση της πίεσης που προκύπτει κατά την διαδικασία της ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης, εξαιτίας του φαινομένου swab and surge, μειώνοντας κι άλλο το «παραθύρο» μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης.

Σημαντική συνέπεια του περιορισμένου «παραθύρου» μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης είναι η απαίτηση επιπρόσθετων στηλών σωλήνωσης σε ενδιάμεσα βάθη (additional casing points), μεταξύ αυτών που προβλέπει ο αρχικός σχεδιασμός της γεώτρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία επίτευξης της προβλεπόμενης διαμέτρου της γεώτρησης εντός του ταμιευτήρα.

### 3.3.1.1. Επίδραση της πίεσης επί της σωλήνωσης

Όπως είναι προφανές η αυξημένη πίεση έχει σημαντική επίδραση στην ακεραιότητα της σωλήνωσης. Συγκεκριμένα, οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσει η βιομηχανία, όσον αφορά στη σωλήνωση, συνοψίζονται παρακάτω:

- Ανάγκη χρήσης στελεχών σωλήνωσης μεγαλύτερου πάχους.
- Ακαταλληλότητα συμβατικών στελεχών σωλήνωσης.

3.3.1.2. Επίδραση της θερμοκρασίας επί της σωλήνωσης

Όπως και η πίεση, έτσι και η αυξημένη θερμοκρασία, που συναντάται σε γεωτρήσεις HP/HT δυσκολεύει την τοποθέτηση ποιοτικής σωλήνωσης. Ειδικότερα, οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσει η βιομηχανία, όσον αφορά στη σωλήνωση σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, είναι οι εξής:

- Μείωση της αντοχής της σωλήνωσης.
- Διαστολή της σωλήνωσης.
- Κάμψη της σωλήνωσης σε μη υποστηριγμένα σημεία, καθώς η υψηλή θερμοκρασία τα καθιστά περισσότερο όλκιμα.
- Ευκολότερη θραύση της σωλήνωσης, που προκύπτει σε συνδυασμό με την αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό της γεώτρησης και την εκτεταμένη διάβρωση της.

Στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί συνοψίζονται οι βασικές τεχνικές απαιτήσεις σχετικά με τον σχεδιασμό της σωλήνωσης στις γεωτρήσεις υπό συνθήκες αυξημένης πίεσης, θερμοκρασίας, καθώς και παρουσία διαβρωτικών ρευστών και τοξικών αερίων και επισημαίνονται οι επιβαρυντικοί παράγοντες που δυσχεραίνουν περαιτέρω τον σχεδιασμό στις γεωτρήσεις HP/HT (Glass, A.W./Highoose Limited, 2005).

Πίνακας 3-1. Βασικές τεχνικές απαιτήσεις για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης σε συνθήκες αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας, παρουσία διαβρωτικών ρευστών και τοξικών αερίων & περαιτέρω δυσχέρειες στις γεωτρήσεις HP/HT (Glass, A.W./Highoose Limited, 2005)

<b>Συνθήκες εντός της γεώτρησης</b>	<b>Βασικές τεχνικές απαιτήσεις</b>	<b>Επιβαρυντικοί παράγοντες στις γεωτρήσεις HP/HT</b>
Υψηλές πιέσεις	<p>Το κυρίως σώμα των σωληνοειδών εντός της γεώτρησης (well tubular bodies) να αντέχει τα ακτινικά (radial) και τα αξονικά φορτία (axial loads).</p> <p>Οι σύνδεσμοι των σωληνοειδών (pipe connections) να αντέχουν τα ακτινικά και τα αξονικά φορτία.</p> <p>Οι διατάξεις στεγάνωσης (seals) να αντέχουν τις διαφοροποιήσεις της πίεσης (pressure differentials) συχνά και στις δύο κατευθύνσεις (οριζόντια και κάθετα).</p> <p>Οι γεωτρήσεις σχεδιάζονται με δύο μόνιμους φραγμούς πίεσης (two permanent pressure barriers) μεταξύ της γεώτρησης και του περιβάλλοντός της.</p>	<p>Το απαραίτητο επιπρόσθετο πάχος τοιχωμάτων έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερων αξονικών φορτίων.</p> <p>Η κατασκευή (manufacturing) υλικών υψηλής αντοχής είναι περίπλοκη.</p> <p>Η εγκατάσταση των σωληνοειδών, των διατάξεων στεγάνωσης και του λοιπού εξοπλισμού εντός της γεώτρησης είναι εν μέρει τηλεχειριζόμενη, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα λόγω κακής ερμηνείας (misinterpretation) των δεδομένων στην επιφάνεια (surface data).</p>
Υψηλές θερμοκρασίες	<p>Το υλικό κατασκευής των σωληνοειδών θα πρέπει να διατηρεί επαρκή μηχανική αντοχή (mechanical strength) μετά τυχόν υποβάθμιση λόγω επίδρασης της θερμοκρασίας.</p> <p>Οι διατάξεις στεγάνωσης πρέπει να διατηρούν το σχήμα και την αποτελεσματικότητά τους σε υψηλές</p>	<p>Αβεβαιότητα σχετικά με την σταθερότητα έδρασης (fixidity) και υποστήριξης (support) που παρέχει το περίβλημα του τσιμέντου γύρω από τη σωλήνωση.</p> <p>Αβεβαιότητα σχετικά με τις διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας (temperature differentials) στο κρίσιμο</p>

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

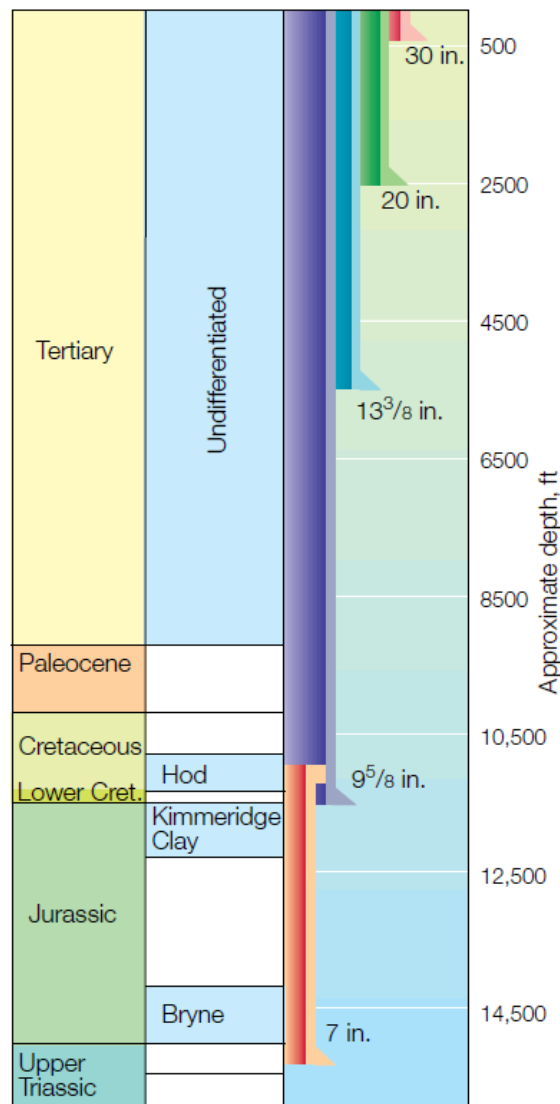
Συνθήκες εντός της γεώτρησης	Βασικές τεχνικές απαιτήσεις	Επιβαρυντικοί παράγοντες στις γεωτρήσεις HP/HT
	<p>θερμοκρασίες.</p> <p>Τα σωληνοειδή και οι σύνδεσμοί τους, θα πρέπει να αντέχουν τα αξονικά φορτία και τα φορτία λυγισμού (buckling loads) που προκαλούνται λόγω θερμικής διαστολής και συστολής.</p>	<p>βάθος κατά τη διάρκεια των φάσεων θέρμανσης και ψύξης (heating up and cooling down phases).</p> <p>Η χημική επίδραση των ρευστών της γεώτρησης μπορεί να αυξάνει.</p>
<p>Διαβρωτικά ρευστά</p>	<p>Το υλικό κατασκευής των σωληνοειδών και του λοιπού εξοπλισμού μέσα στη γεώτρηση θα πρέπει να αντέχει κάθε πιθανή διαβρωτική προσβολή (all possible corrosive attacks).</p> <p>Η έκθεση των σωληνοειδών και του λοιπού εξοπλισμού μέσα στη γεώτρηση σε διαβρωτικά ρευστά θα πρέπει να παρεμποδίζεται.</p>	<p>Η κατασκευή μετάλλων υψηλής αντοχής ανθεκτικών και σε διάβρωση απαιτεί ειδική κατεργασία.</p> <p>Η μεταλλουργική κατεργασία των μετάλλων υψηλής αντοχής για να καταστούν ανθεκτικά σε διάβρωση είναι πολύπλοκη.</p> <p>Η διαμόρφωση μετάλλων υψηλής αντοχής ανθεκτικών σε διάβρωση σε σωληνοειδή με παχιά τοιχώματα είναι νέο πεδίο (new territory).</p> <p>Ο απρόσεκτος χειρισμός των σωληνοειδών και του λοιπού εξοπλισμού κατά τη μεταφορά και εγκατάσταση μπορεί να προκαλέσει ελαττώματα στην επιφάνειά τους (surface defects) που διευκολύνουν τη διάβρωση.</p> <p>Τα χημικά στοιχεία των σπειρωμάτων (thread compounds) μπορούν να παράξουν αέριο υδρογόνο.</p> <p>Σε διαφορετικές θερμοκρασίες παρουσιάζονται διαφορετικοί μηχανισμοί διάβρωσης.</p> <p>Τα ρευστά ολοκλήρωσης (completion fluids) μπορεί να είναι/καταστούν διαβρωτικά.</p>
<p>Τοξικά αέρια</p>	<p>Οι γεωτρήσεις σχεδιάζονται με δύο στεγανούς φραγμούς (two leakproof barriers) μεταξύ του ταμιευτήρα και του περιβάλλοντος.</p>	<p>Τυχόν συνέπειες αποτυχίας συγκράτησης (containment failures) ενισχύονται σημαντικά.</p>

### 3.3.1.3. Η περίπτωση της Βόρειας Θάλασσας

Στην περίπτωση της Βόρειας Θάλασσας, στις γεωτρήσεις που ορύσσονται στο Central Graben, ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζεται στον εντοπισμό του ακριβούς βάθους της ενδιάμεσης σωλήνωσης, που συνήθως έχει διάμετρο 9<sup>5</sup>/<sub>8</sub> in. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-11, που δείχνει μια τυπική τομή γεώτρησης και του γεωλογικού της περιβάλλοντος στην περιοχή του Central Graben, ιδανικά η ενδιάμεση σωλήνωση θα πρέπει να εδραστεί πάνω από τον ταμιευτήρα με τις υψηλές πιέσεις, αλλά ακριβώς κάτω από την ασθενή ανθρακική ζώνη (chalk) Hod. Αν

εδραστεί πολύ ψηλά, ο ασθενής σχηματισμός θα βρεθεί εκτεθειμένος σε υψηλές πιέσεις κατά τη διάνοιξη του αμέσως επόμενου τμήματος της γεώτρησης. Σε μια τέτοια περίπτωση η μόνη λύση είναι η τοποθέτηση ενός liner διάτρησης (drilling liner), που έχει ωστόσο ως επίπτωση την ανεπιθύμητη μείωση της διαμέτρου προχώρησης της γεώτρησης.

Συνεπώς, η έδραση της ενδιάμεσης σωλήνωσης θα πρέπει ιδανικά να τοποθετηθεί στο δάπεδο του σχηματισμού Hod ή εντός της στρώσης αργίλου (clay) Kimmeridge, ακριβώς πάνω από τον ταμιευτήρα, η οποία ωστόσο, έχει πολύ μικρό πάχος που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι μόλις 50 ft (15 m). Ο εντοπισμός του κατάλληλου βάθους έδρασης δεν είναι καθόλου εύκολος και απαιτείται έρευνα με κάθετες σεισμικές τομές (vertical seismic profiles survey). Επιπροσθέτως, όταν η όρυξη προσεγγίζει το πιθανό βάθος έδρασης θα πρέπει να σταματάει περιοδικά, να κυκλοφορήσουν τα ρευστά διάτρησης στην επιφάνεια (bottoms up) και να εξεταστούν τα θρύμματα από γεωλόγο ή μικροπαλαιοντολόγο.



Εικόνα 3-11. Εντοπισμός κατάλληλου βάθους έδρασης σωλήνωσης σε γεώτρηση HP/HT στην περιοχή Central Graben της Βόρειας Θάλασσας (MacAndrew, et al., 1993)

Καθώς η πίεση αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού της σωλήνωσης, στην περίπτωση της Βόρειας Θάλασσας, η ενδιάμεση σωλήνωση συχνά σχεδιάζεται ώστε να αντέχει σε ενδεχόμενο πλήρους εκκένωσής της από πολφό διάτρησης (η πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης θεωρείται ίση με την ατμοσφαιρική), ενώ η εξωτερική πίεση, στον δακτύλιο μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης θεωρείται ίση με την πίεση των πόρων των ταμιευτήρα. Λόγω των υψηλών τιμών της πίεσης αυτής, επιλέγεται σωλήνωση με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων, καθ' όλο το μήκος της στήλης.

Εξετάζεται επίσης η παρουσία  $H_2S$ . Σε υψηλές θερμοκρασίες το διαβρωτικό αέριο δεν επηρεάζει τον χάλυβα. Αλλά όταν η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 185 °F (85 °C) στα ανώτερα τμήματα της γεώτρησης, η σωλήνωση κινδυνεύει από διαβρωτική προσβολή (corrosive attack). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ειδική κατηγορία χάλυβα. Η επιλογή αυτή μπορεί ωστόσο να μειώσει την εσωτερική διάμετρο, παρεμποδίζοντας τη διέλευση κοπτικού διαμέτρου 8½ in. Η λύση που προτιμούν πολλοί διαχειριστές στη Βόρεια Θάλασσα είναι η χρήση σωλήνωσης διαμέτρου 9<sup>7</sup>/<sub>8</sub> in με παχιά τοιχώματα, από ειδική κατηγορία χάλυβα ή ακόμα διαμέτρου 10<sup>3</sup>/<sub>4</sub> in, στο ανώτερο τμήμα της γεώτρησης, που μειώνεται στις 9<sup>5</sup>/<sub>8</sub> in όσο η θερμοκρασία αυξάνεται και η προσβολή από  $H_2S$  πάει να αποτελεί κίνδυνο. Ωστόσο, αν ο σχεδιασμός είναι πολύ συντηρητικός, το βάρος της στήλης σωλήνωσης μπορεί να αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να μην μπορεί να το διαχειριστεί το άγκιστρο του γεωτρυπάνου κατά τη διαδικασία τοποθέτησής της. (MacAndrew, et al., 1993).

#### *3.3.1.4. Η περίπτωση του Κόλπου του Μεξικού*

Στον Κόλπο του Μεξικού, ειδικά στις περιοχές με μεγάλο βάθος θάλασσας, τα τυπικά προφίλ εξέλιξης της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης διαμορφώνουν και εδώ ένα στενό «παράθυρο», το οποίο στην περίπτωση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε επτά έως εννιά στήλες σωλήνωσης για μια γεώτρηση HP/HT. Το υψηλό κόστος αυτών των γεωτρήσεων επιβάλλει ολοκλήρωση που θα διασφαλίζει μεγάλη ημερήσια παραγωγή, για την απόσβεση της επένδυσης. Αυτό, καθορίζει με τη σειρά του, τη διάμετρο της παραγωγικής σωλήνωσης και των liners.

Παράλληλα, η διάμετροι των επάλληλων στηλών σωλήνωσης περιορίζονται από την τυποποιημένη εσωτερική διάμετρο των 18<sup>3</sup>/<sub>4</sub> in που θα πρέπει να έχει η επιφανειακή στήλη σωλήνωσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κατάλληλης για υψηλές θερμοκρασίες κεφαλής της γεώτρησης, του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας, και του riser. Παραπέρα, οι υψηλές πιέσεις απαιτούν παχιά τοιχώματα της σωλήνωσης, ιδιαίτερα υπό την παρουσία διαβρωτικών ρευστών. Η ικανοποίηση όλων των παραπάνω περιορισμών που επιβάλλονται λόγω πιέσεων και γεωμετρίας της γεώτρησης απαιτούν την εφαρμογή μη συμβατικών πρακτικών.

Οι τρέχουσες και οι αναδυόμενες τεχνολογίες προσφέρουν λύσεις στον παραπάνω σχεδιαστικό γρίφο. Στην όρυξη χωρίς ανύψωση (riserless drilling) ή αλλιώς όρυξη με ρευστά διπλής βαθμίδας (dual gradient drilling), οι εργασίες διάτρησης οδηγούν στην απόρριψη θαλάσσιου ύδατος, ρευστού διάτρησης και θρυμμάτων απευθείας στο

θαλάσσιο πυθμένα (κατά την αρχική φάση όρυξης μιας υποθαλάσσιας γεώτρησης) και μπορεί να αποτελέσει έναν αποτελεσματικό τρόπο για την καθυστέρηση εγκατάστασης της κεφαλής της γεώτρησης υψηλών πιέσεων, επιτρέποντας έτσι να τοποθετηθούν πρόσθετες στήλες σωλήνωσης μεγάλης διαμέτρου. Επιπλέον, το riser είναι πληρωμένο με ρευστό πυκνότητας 8,6 ppg (ισοδύναμο του θαλασσινού νερού), ενώ η γεώτρηση είναι γεμάτη με το συμβατικό ρευστό διάτρησης, με αποτέλεσμα να μειώνει τον απαιτούμενο αριθμό στηλών σωλήνωσης, καθώς και να επιτρέπει την ύπαρξη μεγαλύτερου «παραθύρου» μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης. Η όρυξη με χρήση συμπαγών διογκούμενων liners (solid expandable liners) προσφέρει τη δυνατότητα να προστεθούν στήλες σωλήνωσης χωρίς τις σοβαρές επιπτώσεις στη γεωμετρία της γεώτρησης που έχουν οι συμβατικές. Η όρυξη υπό διαχειριζόμενη πίεση (managed pressure drilling - MPD) δείχνει πολλά υποσχόμενη ως προς τον περιορισμό των στηλών σωλήνωσης, καθώς ορύσσει με υποπίεση (underbalance) ή με περιορισμένη πίεση στο διάκενο (limiting annular pressure) και επιτρέπει την όρυξη μεγαλύτερου μήκους με την ίδια διάμετρο. Ωστόσο, η ισχυρή εξάρτηση από αυτές τις νέες τεχνολογίες μπορεί να έρχεται σε αντίθεση με τη βασική αρχή της διατήρησης των γεωτρήσεων HP/HT όσο το δυνατό πιο απλή και, ως εκ τούτου, πιο αξιόπιστη.

Η χρήση συμβατικών σωληνοειδών (conventional oil country tubular goods – OCTG), σε μη συμβατικές διαστάσεις είναι η λύση που προκρίνεται συνήθως στην περιοχή του Κόλπου του Μεξικού, προκειμένου να αυξηθούν οι στήλες σωλήνωσης σύμφωνα με τις τεχνικές απαιτήσεις των γεωτρήσεων HP/HT βαθιάς θάλασσας. Η λύση αυτή πλεονεκτεί σημαντικά ως προς την απόδοση και την αξιοπιστία, έναντι των νέων τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν παραπάνω, καθώς σωληνοειδή με ειδικές διαστάσεις και κατηγορίες χάλυβα κατασκευάζονται επί δεκαετίες. Η μακρόχρονη εμπειρία της πετρελαϊκής βιομηχανίας χρήσης συμβατικών σωληνοειδών, την καθιστούν ως την πλέον ελκυστική για τον έλεγχο των υψηλών πιέσεων και την απομόνωση των προβληματικών σχηματισμών (Miller, Payne, & Egpelding, 2005):

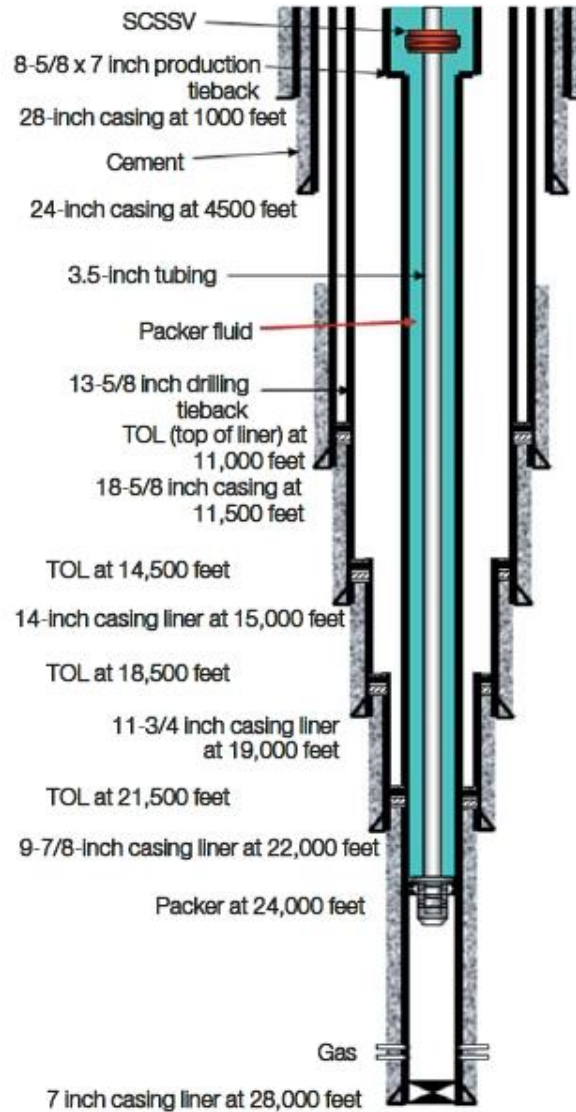
#### *3.3.1.5. Υλικά κατασκευής σωλήνωσης κατάλληλης για γεωτρήσεις HP/HT*

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι οι γεωτρήσεις HP/HT παρουσιάζουν τεχνικές προκλήσεις τόσο ως προς τα υλικά αυτά καθαυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτές όσο και για την επιστήμη και τους μηχανικών των υλικών (materials engineers). Η όρυξη αυτών των γεωτρήσεων απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και ειδικές μεθόδους και τεχνολογίες, αλλά και υλικά ειδικών απαιτήσεων, εκεί που ο χάλυβας και τα κράματά του παραμένουν ακόμα το βασικό υλικό κατασκευής των σωληνοειδών, αν και έχουν αρχίσει να εξετάζονται και κράματα και άλλων μετάλλων, όπως του τιτανίου.

Όσον αφορά στη σωλήνωση, η προσοχή εστιάζεται εκεί που οι τυποποιημένες κατηγορίες χάλυβα δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις συνθήκες μέσα στη γεώτρηση (Εικόνα 3-12) και είναι κυρίως τα liner, η παραγωγική σωλήνωση και οι σωλήνες παραγωγής (tubing). Ανάλογα με τη θερμοκρασία, την πίεση, το ρυθμό



προχώρησης της γεώτρησης και τη σύνθεση των ρευστών που προκαλούν διάβρωση ( $H_2S$  και  $CO_2$ ), τα υλικά κατασκευής της σωλήνωσης μπορεί να είναι από συνήθη ανθρακούχο χάλυβα (carbon steel) και χαλυβδοκράματα χαμηλών προσθέτων (low-alloy steel) μέχρι ανοξείδωτο χάλυβα (stainless steel), νικελιούχα κράματα (nickel-base alloys) και κράματα τιτανίου (titanium alloys).



Εικόνα 3-12. Παράδειγμα σωλήνωσης σε γεώτρηση HP/HT (Craig, 2008)

Οι τεχνικές προκλήσεις ως προς τα υλικά στις γεωτρήσεις HP/HT εμπίπτουν στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

- Μηχανική συμπεριφορά των υλικών.
- Μεταλλουργία των υλικών.
- Αντοχή σε διάβρωση των υλικών.
- Δυνατότητες κατασκευής των υλικών.

Η μηχανική συμπεριφορά της σωλήνωσης αφορά στο κατά πόσο μπορεί να αντέξει τα αξονικά (ίδιο βάρος) και ακτινικά φορτία (πιέσεις διάρρηξης και θλίψης) που ασκούνται πάνω της. Το μέγεθος αυτών των φορτίων καθορίζει την απαιτούμενη αντοχή και το πάχος του τοιχώματος της σωλήνωσης σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, η αύξηση της αντοχής, του πάχους των τοιχωμάτων, καθώς και η μέθοδος κυλίνδρισης (rolling practice) τείνουν να αυξάνουν την ανισοτροπία του υλικού, περιπλέκοντας τον σχεδιασμό της σωλήνωσης.

Επιπροσθέτως, όσο η θερμοκρασία αυξάνει μέσα στη γεώτρηση, παρατηρείται αντίστοιχη απώλεια αντοχής της σωλήνωσης, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό. Δεν είναι αποδεκτή η παρέκταση δεδομένων (data extrapolation) μείωσης της αντοχής μεταξύ θερμοκρασιών που κυμαίνονται από 300 ως 500 °F (149 ως 288 °C), ελπίζοντας ότι αυτή η προσέγγιση θα είναι επαρκής. Σε αυτές τις συνθήκες η συνήθης επιλογή είναι το ανοξειδωτο κράμα χάλυβα 625 (Alloy 625 clad steel), το οποίο, ωστόσο, σε συνθήκες εξαιρετικά υψηλών πιέσεων (30.000 psi / 207 MPa) και θερμοκρασιών (300-500 °F / 260-315 °C) δεν είναι αποδεκτή επιλογή, καθώς η μάζα του χάλυβα που απαιτείται για τη συγκράτηση αυτών των πιέσεων είναι τόσο μεγάλη, που υπερβαίνει τις δυνατότητες διαχείρισής της σε μια θαλάσσια εξέδρα.

Η μεταλλουργία των υλικών «δουλεύει» και αυτή προς την κατεύθυνση ικανοποίησης της απαιτούμενης μηχανικής συμπεριφοράς. Το τυπικό κράμα χάλυβα που χρησιμοποιείται για τη σωλήνωση και τους σωλήνες παραγωγής θα πρέπει επίσης να αντέχει στη διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση σε θειούχο περιβάλλον (sulfide stress cracking – SSC) είναι ο χάλυβας τύπου AISI 4130 και οι παραλλαγές του (υψηλότερη περιεκτικότητα σε χρώμιο και μολυβδένιο, όπως επίσης και προσθήκη τιτανίου, νιόβιου και βόριου).

Σε βαθύτερες γεωτρήσεις, με υψηλότερες πιέσεις καθίσταται αναγκαία η αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων των σωληνοειδών, προκειμένου να αυξηθεί η αντοχής τους. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση έχει επίσης περιορισμούς λόγω των περιορισμών σκληρυνσιμότητας (hardenability) των κραμάτων όπως το 4130. Αν το πάχος του τοιχώματος ξεπεράσει την μια ίντσα (25,4 mm), δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρης σκλήρυνση του χάλυβα των σωληνοειδών με αποτέλεσμα χαμηλή αντοχή σε SSC, η οποία είναι μη αποδεκτή σε γεωτρήσεις με μεγάλες πιέσεις.

Εξαιτίας του διλήμματος αντοχή έναντι σκληρότητας, σε πολλές γεωτρήσεις επιλέγονται συμβατικές στήλες σωληνώσεις από κράματα ψυχρής έλασης (cold-worked), ανθεκτικά σε διάβρωση (corrosion-resistant alloys – CRAs), τα οποία ωστόσο παρουσιάζουν πολύ υψηλότερο κόστος από τα κράματα χάλυβα χαμηλών προσθέτων.

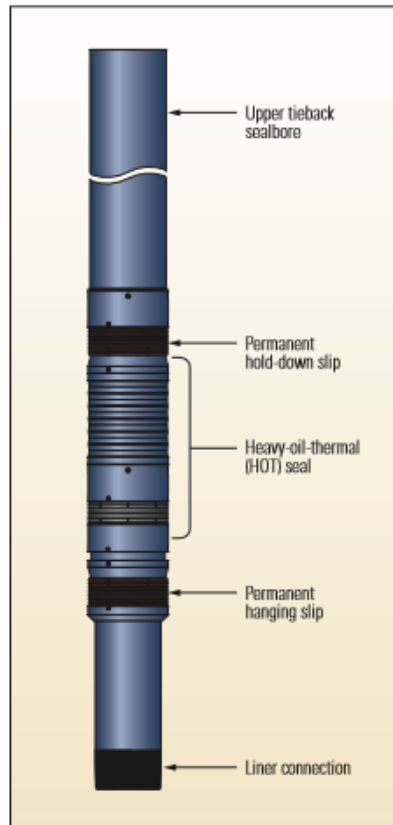
Από την άλλη πλευρά οι κατασκευαστές διαθέτουν περιορισμένη παραγωγή σωληνώσεις CRA μεγάλης διαμέτρου με υψηλή αντοχή (από ανοξειδωτο χάλυβα και νικελιούχα κράματα), τα οποία καταργάζονται εν ψυχρώ για να επιτύχουν τις απαιτήσεις αντοχής για βαθιές γεωτρήσεις (Craig, 2008).

### 3.3.1.6. Ελαστομερή παρεμβύσματα (packers) τελικής σωλήνωσης (liner)

Τα περιβάλλοντα στα οποία επικρατούν υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας απαιτούν συστήματα ολοκλήρωσης της γεώτρησης υψηλής απόδοσης. Ο ρόλος των σωληνώσεων τύπου liner είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση και την οικονομικότητα της γεώτρησης. Η τοποθέτηση σωλήνωσης liner μειώνει το κόστος της τσιμέντωσης και της σωλήνωσης, καθώς και τους χρόνους που απαιτούνται για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω διαδικασίες. Επιπρόσθετα, η χρήση liner καθιστά ευκολότερη την όρυξη βαθύτερων γεωτρήσεων με μικρότερου μεγέθους γεωτρώπανα, τα οποία διαθέτουν περιορισμένες δυνατότητες διαχείρισης στηλών σωλήνωσης μεγάλου βάρους, και εξασφαλίζει ποιοτικότερη απομόνωση των επιμέρους ζωνών (zonal isolation) (Yakeley, 2015).

Τα κοινά ελαστομερή παρεμβύσματα (packers) σε τέτοιες συνθήκες θα είχαν αποτύχει, με αποτέλεσμα τη διαφυγή αερίου και ρευστών διαμέσου της σωλήνωσης, τη μη αποδοτική εισπίεση ατμού (steam injection) και την αύξηση της πιθανότητας διάβρωσης της σωλήνωσης. Στις δύσκολες συνθήκες που επικρατούν στις HP/HT γεωτρήσεις είναι απαραίτητη η χρήση αξιόπιστων ελαστομερών παρεμβυσμάτων, τα οποία θα αποτρέψουν την εισροή αερίου και θα ελαττώσουν τις επιπτώσεις της μακροχρόνιας έκθεσης σε υδρόθειο και διοξείδιο του άνθρακα.

Μία λύση την οποία πρότεινε και χρησιμοποιεί η Schlumberger στην κατασκευή liner, είναι η χρήση ανθρακονημάτων για την κατασκευή ελαστομερών παρεμβυσμάτων (Εικόνα 3-13). Με τη χρήση τέτοιου τύπου παρεμβυσμάτων καθίσταται ασφαλής η διάνοιξη γεωτρήσεων σε θερμοκρασίες μέχρι και τους 340 °C (644 °F) και σε πιέσεις μέχρι τα 3.000 psi (21 MPa). Στην εικόνα φαίνεται μια τέτοια διάταξη η οποία περιλαμβάνει ολισθητήρες (slips) και ένα ενιαίο κυλινδρικό βύσμα προσαρμογής (mandrel), ώστε να ελαττώνονται οι πιθανοί δίοδοι διαρροής και να περιστρέφεται ελεύθερα καθώς κατελκύεται στη γεώτρηση. Έως το 2008 η Schlumberger είχε τοποθετήσει 150 τέτοιες διατάξεις στον Καναδά, χωρίς την εμφάνιση κάποιου προβλήματος.



Εικόνα 3-13. Αναρτήρας σωλήνωσης τύπου liner της Schlumberger για περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε για εφαρμογές εισπίεσης ατμού (DeBryijin, et al., 2008)

### 3.3.2. Τσιμέντωση

Η διαδικασία της τσιμέντωσης είναι περίπλοκη και εξαρτάται από το περιβάλλον και τους σχηματισμούς οι οποίοι διατρύονται. Η τσιμέντωση των γεωτρήσεων σε περιβάλλοντα HP/HT παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία, όσον αφορά στην πρόβλεψη της φυσικής και χημικής συμπεριφοράς των συστατικών του τσιμέντου και στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων που προκαλούν οι μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες. Οι δυσμενείς αυτές συνθήκες δημιουργούν προβλήματα τόσο κατά τη διαδικασία της τσιμέντωσης, όσο και αργότερα στην πήξη του τσιμέντου και στην ικανότητά του για την προστασία της γεώτρησης (Wray, 2009).

Για παράδειγμα, στο Νότιο Τέξας, οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις στις οποίες πρέπει να τοποθετηθεί το τσιμέντο είναι αρκετά μεγάλες – στον πυθμένα της γεώτρησης η θερμοκρασία ενδέχεται να ξεπερνά τους 420 °F και με τη δεδομένη πίεση των πόρων να απαιτούνται ρευστά διάτρησης με πυκνότητες έως και 18 rpg – με αποτέλεσμα ο προσεκτικός και ακριβής σχεδιασμός της τσιμέντωσης να είναι καίριας σημασίας για την ασφάλεια της γεώτρησης.

Αρχικά σκοπός της τσιμέντωσης είναι:

- ο αποτελεσματικός διαχωρισμός των ζωνών,
- η σύνδεση της σωλήνωσης με τον σχηματισμό,
- η προστασία της ίδιας της σωλήνωσης,
- η προστασία των παραγωγικών στρωμάτων,
- η ελαχιστοποίηση του κινδύνου εκρήξεων εξαιτίας ζωνών υψηλής πίεσης, και
- η απομόνωση (σφράγιση) των ζωνών όπου έχει σημειωθεί απώλεια κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης ή σχηματισμών με προβλήματα κατά τη διάτρηση σε μεγάλα βάθη (Σταματάκη, 2003).

Η σταθερότητα του περιβλήματος τσιμέντου στη γεώτρηση αποτελεί τη μόνη λύση για επίτευξη απομόνωσης επιμέρους ζωνών (zonal isolation) της γεώτρησης. Για επιτυχή επίτευξη απομόνωσης επιμέρους ζωνών (zonal isolation) είναι απαραίτητες οι καλές ιδιότητες πρόσφυσης του τσιμέντου με τη σωλήνωση και τον σχηματισμό. Ωστόσο, η καλή πρόσφυση του τσιμέντου με τους πλευρικούς σχηματισμούς και τη σωλήνωση επηρεάζεται από τη συμπίεση του τσιμέντου και τις αλλαγές στις τάσεις, συμπεριλαμβανομένων των διακυμάνσεων στη θερμοκρασία και την πίεση. Στους σχηματισμούς στους οποίους επικρατούν υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, με έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας κατά μήκος της γεώτρησης, η σωλήνωση υφίσταται παραμορφώσεις (διαστολή ή/και συστολή) με αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών στην τσιμέντωση.

Επίσης, η πήξη του γαλακτώματος τσιμέντου εξαρτάται από την αντίδραση μεταξύ νερού και τσιμέντου, που αποτελούν κατά βάση το γαλάκτωμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενυδάτωση του τσιμέντου (hydration) και αν είναι συνεχής, η πίεση των πόρων στο γαλάκτωμα που σταδιακά πήζει, μειώνεται, καθώς μειώνονται τα κενά μεταξύ των πόρων του. Το τσιμέντο μετά την πήξη του περιλαμβάνει έναν ελάχιστο αριθμό κενών μεταξύ των πόρων του. Όταν υπόκειται σε μεγάλα φορτία, σε βαθιές γεωτρήσεις, προκαλείται συμπίεση (compression) με αποτέλεσμα την καταστροφή του ομοιογενούς περιβλήματος του τσιμέντου (cement sheath), λόγω συμύκνωσης (compaction) του πορώδους της μήτρας του τσιμέντου (matrix porosity). Αυτή η καταστροφή της μήτρας του τσιμέντου, ενδέχεται να προκαλέσει τη δημιουργία ρωγμών στο τσιμέντο. Σε περίπτωση παρουσίας αερίου, οι ρωγμές αυτές μπορούν να αποτελέσουν δίοδο για το αέριο του σχηματισμού, ώστε αυτό να διαφύγει/μεταναστεύσει προς την επιφάνεια, με συνέπειες στην ακεραιότητα της τσιμέντωσης και της γεώτρησης στο σύνολό της (Yetunde, 2011). Το παραπάνω πρόβλημα βέβαια δεν αποτελεί χαρακτηριστικό μόνο των HT/HP γεωτρήσεων αλλά και των συμβατικών γεωτρήσεων μεγάλου βάθους.

Ειδικότερα, για τις γεωτρήσεις HT/HP θα πρέπει να επισημανθεί ότι για μεγάλο χρονικό διάστημα από την ολοκλήρωση της τσιμέντωσης το τσιμέντο εξακολουθεί να απορροφά νερό και να βελτιώνεται η αντοχή του. Το τσιμέντο θα αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή του εντός δεκαπέντε ημερών εκτός εάν αυτό εκτεθεί σε θερμοκρασίες ανώτερες των 110 °C (230 °F), οπότε, μετά το πέρας δύο εβδομάδων, η αντοχή του τσιμέντου εμφανίζει μείωση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται υποβάθμιση αντοχής (strength retrogression) και εμφανίζεται σε όλα τα τσιμέντα τύπου Portland σε

θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 120 °C (250 °F), ενώ συνήθως συνοδεύεται και από έλλειψη στεγανότητας (L. H. Eilers, 1974).

Η κύρια αιτία εμφάνισης αυτού του φαινομένου είναι ο σχηματισμός μεγάλων κρυστάλλων ένυδρου πυριτίου (α-dicalcium silica hydrate) και το φαινόμενο εν μέρει αντιμετωπίζεται με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε διοξείδιο του πυριτίου έως και 40%. Ο ρυθμός με τον οποίο εμφανίζονται οι αλλαγές που οφείλονται στο φαινόμενο της υποβάθμισης της αντοχής, εξαρτάται από την θερμοκρασία (Ogbonna, 2009).

Η διαφυγή αερίου μέσω της τσιμέντωσης αποτελεί ένα από τα σοβαρά προβλήματα της πετρελαϊκής βιομηχανίας. Ορισμένες μελέτες έδειξαν ότι στο 80% των γεωτρήσεων, που βρίσκονται στον Κόλπο του Μεξικού, έχει παρατηρηθεί διαφυγή αερίου από το σχηματισμό μέσω της τσιμέντωσης προς την επιφάνεια. Ειδικότερα στη τσιμέντωση επάλληλων και διαφορετικών ζωνών παραγωγής, το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι ακόμα εντονότερο. Η αποσόβησή του προϋποθέτει ότι η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη τσιμέντου ή η σύνθετη στήλη τσιμέντου και λάσπης στο διάκενο μεταξύ σωλήνωσης και πλευρικών σχηματισμών, να είναι να είναι μεγαλύτερη από την πίεση πόρων των σχηματισμών.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι, κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης, δεδομένου ότι σε αλληλουχία εκτοπίζονται ρευστά διάτρησης και γαλακτώμα τσιμέντου, για την αποτελεσματική εκτόπιση, αλλά και για την αποφυγή επιμόλυνσης μεταξύ των δύο ρευστών (ρευστών διάτρησης και γαλακτώματος) παρεμβάλλεται ενδιάμεσο διαχωριστικό ρευστό γνωστό με τον όρο spacer. Το ενδιάμεσο ρευστό εκτοπίζει το ρευστό διάτρησης και στη συνέχεια με την εισπίεση τσιμέντου εκτοπίζεται και αυτό, χωρίς να αφήσει κάποια δίοδο μεταξύ τους. Το ενδιάμεσο ρευστό πρέπει να έχει μεγαλύτερο ιξώδες και μεγαλύτερη πυκνότητα από τα ρευστά διάτρησης, ώστε να τα εκτοπίσει, και ο πολφός του τσιμέντου να είναι πυκνότερος και πιο παχύρρευστος από το ενδιάμεσο ρευστό. Η επίτευξη συνθηκών τυρβώδους ροής θα βοηθούσε στην αποτελεσματική κίνηση/εκτόπιση των ρευστών. Στις περιπτώσεις HT/HP γεωτρήσεων, λόγω των μεγάλων τιμών πυκνότητας και ιξώδους, τόσο του ενδιάμεσου ρευστού, όσο και του γαλακτώματος τσιμέντου, για να επιτευχθεί τυρβώδης ροή θα πρέπει η παροχή να υπερβαίνει τα 20 bbl/min (3,2 m<sup>3</sup>/min), κάτι που πρακτικά είναι αδύνατον. Η επιτεύξιμη παροχή είναι της τάξης των 3 – 5 bbl/min (0,5 – 0,8 m<sup>3</sup>/min), διότι μεγαλύτερες τιμές αυξάνουν τη δυναμική πίεση με αποτέλεσμα η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης να μπορεί να υπερβεί την πίεση ρωγμάτωσης.

#### *3.3.2.1. Σχεδιασμός του γαλακτώματος (πολφού) τσιμέντου*

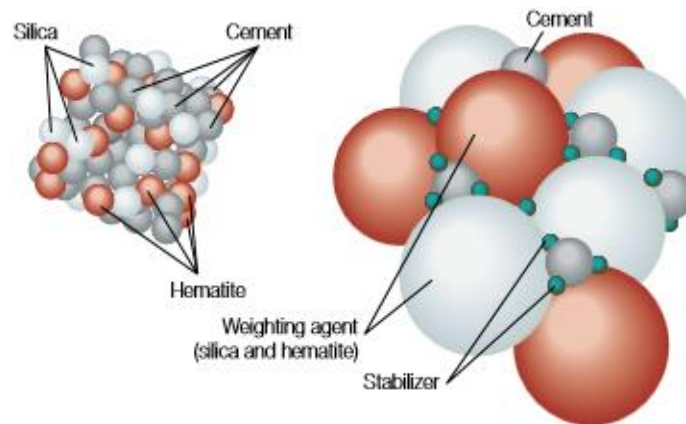
Ο πολφός του τσιμέντου αποτελείται από διάφορα πρόσθετα, τα οποία επιτυγχάνουν την επιθυμητή πυκνότητα, ιξώδες, ρεολογία κατά την εισπίεση, έλεγχο σε περίπτωση διαφυγής, χρόνο πήξης και εν τέλει την απαραίτητη αντοχή ώστε να ανθίσταται στις μεγάλες πιέσεις. Στις γεωτρήσεις HP/HT, ο πολφός γίνεται ιδιαίτερα ευαίσθητος στις υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα ο χρόνος πήξης του να μειώνεται αισθητά και

το τσιμέντο να σταθεροποιείται γρηγορότερα από ό,τι στις συμβατικές γεωτρήσεις. Η θερμοκρασία επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες του πολφού. Το πλαστικό ιξώδες (plastic viscosity – PV) και το όριο διαρροής του ιξώδους (yield viscosity) μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ακριβής πρόβλεψη της θερμοκρασίας κυκλοφορίας στον πυθμένα (bottom hole circulating temperature – BHCT) διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τσιμέντωση, διότι ακόμα και μία μικρή μεταβολή της τάξης των 5 °C είναι ικανή να προκαλέσει σημαντική αλλαγή στον χρόνο πήξης. Για την επιρροή της θερμοκρασίας στην τσιμέντωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πάντα δύο θερμοκρασίες:

- ❖ Η θερμοκρασία κυκλοφορίας στον πυθμένα (bottom hole circulating temperature – BHCT). Αυτή είναι η θερμοκρασία με την οποία ο πολφός έρχεται αντιμέτωπος καθώς εισπνέζεται στη γεώτρηση και είναι υπεύθυνη για την πήξη του τσιμέντου.
- ❖ Η στατική θερμοκρασία στον πυθμένα (bottom hole static temperature). Αυτή είναι η θερμοκρασία του σχηματισμού και αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία την οποία θα λάβει ο πολφός του τσιμέντου όταν σταματήσει η κυκλοφορία του εντός της γεώτρησης.

Παρ' όλη όμως, την καθυστέρηση πήξης, από πειράματα που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο, για συγκεκριμένους τύπους τσιμέντου (class G cement), συμπεραίνεται ότι η αντοχή σε θλίψη του τσιμέντου αυξάνεται με τη θερμοκρασία σκλήρυνσης (curing temperature) (Mazero, 2012). Στις γεωτρήσεις HP/HT διαφορετικών τύπων τσιμέντα εμφανίζουν διαφορετική εξέλιξη της τάσης σε σχέση με το χρόνο. Ακόμα, στις βαθιές παράκτιες γεωτρήσεις η τσιμέντωση είναι αρκετά δυσκολότερη από ό,τι στην υφαλοκρηπίδα ή στη στεριά.

Στις γεωτρήσεις HP/HT απαιτείται η χρήση ειδικού πολφού τσιμέντου. Ειδικότερα, ο συμβατικός πολφός τσιμέντου χωρίς κατάλληλα πρόσθετα, είναι επιδεκτικός στην απώλεια της αντοχής του και στην αύξηση της περατότητάς του, εξαιτίας της συρρίκνωσης στην οποία υπόκειται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 110 °C (230 °F). Για να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα, συνήθως, το 25% του τσιμέντου αντικαθίσταται από πούδρα διοξειδίου του πυριτίου (silica flour), με μέγεθος κόκκων 40 έως 50 μm. Με αυτή την αλλαγή στη σύσταση μπορεί να επιτευχθούν πυκνότητες πολφού κατά μέγιστο 17,5 ppq (2,1 g/cm<sup>3</sup>). Ωστόσο, δεδομένου ότι στις γεωτρήσεις HP/HT ο πολφός του τσιμέντου απαιτείται να έχει ακόμα μεγαλύτερη πυκνότητα, απαιτείται η επιπλέον προσθήκη αιματίτη (Εικόνα 3-14) αντικαθιστώντας ένα μέρος του τσιμέντου και του διοξειδίου του πυριτίου, αυξάνοντας την πυκνότητα και διατηρώντας σταθερό το πορώδες (αριστερή πλευρά της εικόνας).



Εικόνα 3-14. Πολφός τσιμέντου υψηλής πυκνότητας (Adamson, και συν., 1998)

Στην περίπτωση που απαιτούνται ακόμα μεγαλύτερες πυκνότητες από αυτές των 19,4 ppg (2,3 g/cm<sup>3</sup>), η προσέγγιση είναι να μειωθεί το πορώδες του πολφού (δεξιά εικόνα) με τη χρήση υλικών διαφορετικού μεγέθους. Το μέγεθος των κόκκων της πούδρας του διοξειδίου του πυριτίου και του αιματίτη είναι περίπου 15 μm, ενώ το μέγεθος των επιπρόσθετων σταθεροποιητικών υλικών (stabilizers) δεν ξεπερνά τα 16 μm (Pikłowska, 2017). Το μεγάλο μέγεθος των κόκκων της πούδρας του διοξειδίου του πυριτίου, κάνει τον πολφό του τσιμέντου ανθεκτικότερο στις μεγάλες θερμοκρασίες.

Άλλα πρόσθετα υλικά που η χρήση τους καθίσταται απαραίτητη σε περιβάλλοντα υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, κυρίως για την αποφυγή δημιουργίας διόδων διαφυγής αερίου από το σχηματισμό προς τη σωλήνωση, είναι οι τροποποιητές (modifiers) (Pikłowska, 2017). Αυτοί περιλαμβάνουν:

- ✓ Μέσα αφύγρανσης (dehumidifiers), τα οποία μειώνουν την ποσότητα του αέρα στον πολφό.
- ✓ Μέσα υγροποίησης (liquefying agents), τα οποία μειώνουν το ιξώδες του πολφού και βοηθούν στο να αποκτήσει τις απαιτούμενες ρεολογικές ιδιότητες.
- ✓ Μέσα αποφυγής αφύγρανσης και διήθησης (de-watering agents και filtration lowering agents), τα οποία προστατεύουν τον πολφό από την απώλεια νερού.
- ✓ Αντιπηκτικά μέσα, τα οποία καθυστερούν την προσκόλληση των κόκκων και συνεπώς την πήξη του πολφού.

Επιπλέον, η προσθήκη latex, βοηθάει στη μείωση της περατότητας του πολφού, στη συρρίκνωσή του και αυξάνει την ευκαμψία του πηγμένου τσιμέντου. Τέλος, αντιδραστήρια ενισχυμένου ειδικού βάρους (weighting agents) χρησιμοποιούνται ώστε να διαμορφώσουν την απαιτούμενη ελάχιστη πυκνότητα πολφού τσιμέντου (minimum overbalance), ώστε να μην εμφανιστεί αιφνίδια εισροή κατά την εκτόπιση των ρευστών διάτρησης, και παράλληλα μειώνουν την ταχύτητα εισπίεσής του (cement pumpability).

Η ελαχιστοποίηση φαινομένων που οδηγούν σε επιβάρυνση της συμπεριφοράς του πολφού του τσιμέντου αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα κατά την τσιμέντωση γεωτρήσεων HP/HT. Για παράδειγμα, μεγάλοι χρόνοι εκτόπισης αναμένονται



εξαιτίας του μεγάλου βάθους και των χαμηλών ρυθμών εισπίεσης του πολφού. Όταν οι παραπάνω παράγοντες συνδυαστούν με τη μεγάλη θερμοκρασία που επικρατεί, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πήξης του τσιμέντου νωρίτερα από το αναμενόμενο. Γι' αυτό το λόγο γίνεται προσθήκη χημικών μέσων διασποράς (dispersants) και επιβραδυντών σε μορφή σκόνης ώστε να ρυθμίζεται ο χρόνος πήξης.

Εν κατακλείδι οι ιδιότητες και οι επιπτώσεις του υψηλής πυκνότητας πολφού τσιμέντου και της τοποθέτησής του σε γεωτρήσεις HP/HT συνοψίζονται παρακάτω (Diaz, 2017):

- ❖ Ο πολφός του τσιμέντου πρέπει να είναι σταθερός και ικανός να εισπιαστεί σε μεγάλες θερμοκρασίες κυκλοφορίας.
- ❖ Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του πολφού του τσιμέντου ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται στις ποικίλες θερμοκρασίες που θα συναντήσει στη γεώτρηση.
- ❖ Οι υψηλής πυκνότητας πολφοί τσιμέντου καθίστανται δυσκολότερο να αναμειχθούν στην επιφάνεια, καθότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα στερεών, η οποία εγείρει τον κίνδυνο εμφάνισης του φαινομένου του sagging.
- ❖ Ανάγκη για χαμηλό ρυθμό εισπίεσης του πολφού του τσιμέντου, εξαιτίας της ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας (equivalent circulation density – ECD), ώστε να μην ρωγματοωθεί ο σχηματισμός.
- ❖ Οι χαμηλοί ρυθμοί εισπίεσης του πολφού δημιουργούν προβλήματα διαβάθμισης πυκνότητας και ρεολογίας των ρευστών που εισπιάζονται ώστε να μην εκτοπίζονται επαρκώς τα ρευστά διάτρησης.
- ❖ Οι χαμηλοί ρυθμοί εισπίεσης απαιτούν μεγαλύτερη συγκέντρωση χημικών στον πολφό του τσιμέντου, τα οποία καθυστερούν την πήξη του.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται όλες οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στις γεωτρήσεις HP/HT κατά την τσιμέντωση.

Πίνακας 3-2. Δυσκολίες τσιμέντωσης γεωτρήσεων HP/HT

Περιορισμένος δακτύλιος σε γεώτρηση μεγάλου βάθους	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δυσκολία στον εκτοπισμό των ρευστών διάτρησης με μεγάλη ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας</li> <li>• Μικρό πάχος τσιμέντωσης και μόνωσης της γεώτρησης με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων επιμόλυνσης</li> </ul>
Μεγάλη πίεση και μεγάλη θερμοκρασία	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάγκη για ακριβή προσδιορισμό της θερμοκρασίας</li> <li>• Μεγάλοι χρόνοι τοποθέτησης και πήξης του πολφού του τσιμέντου</li> <li>• Υποβάθμιση της αντοχής του τσιμέντου (cement retrogression) και έλλειψη σταθερότητας σε μεγάλες θερμοκρασίες</li> </ul>
Έκθεση σε περιβάλλοντα HP/HT με παρουσία H <sub>2</sub> S και CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προβλήματα διάβρωσης</li> <li>• Ανάγκη για υλικά ειδικής αντοχής</li> </ul>

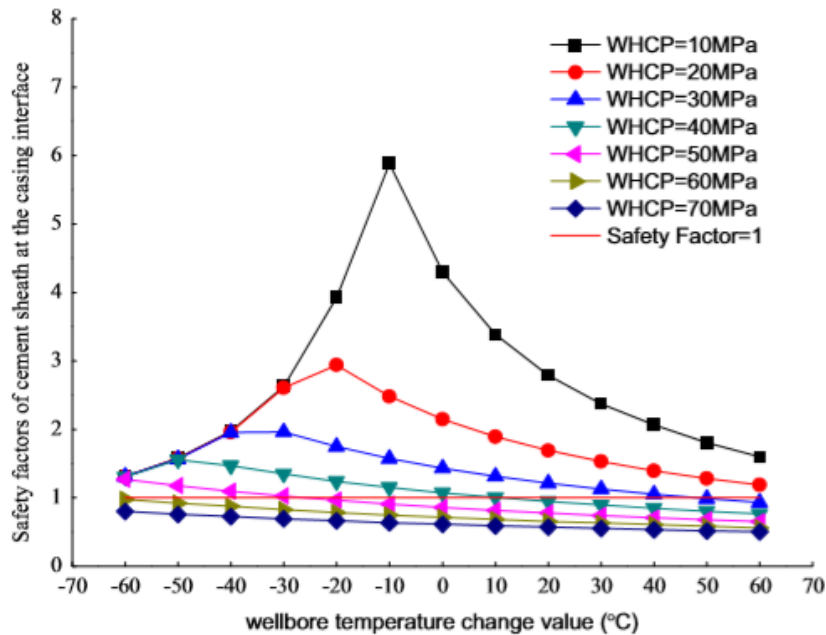
Εναρμόνιση πολλαπλών παραμέτρων	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρή διαφορά στην πίεση των πόρων και στην πίεση ρωγμάτωσης</li> <li>• Ενδεχόμενη διαφυγή ρευστών στο σχηματισμό</li> <li>• Γεώτρηση μικρής διαμέτρου, άρα δακτύλιος μικρού πάχους</li> <li>• Αστάθεια τοιχωμάτων γεώτρησης</li> </ul>
Παρουσία άλατος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάγκη για βέλτιστη τοποθέτηση τσιμέντωσης σε περιβάλλον με παρουσία άλατος</li> <li>• Προβλήματα ακεραιότητας του πολφού του τσιμέντου</li> <li>• Μελλοντική διαλυτοποίηση άλατος</li> </ul>

### 3.3.2.2. Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ακεραιότητα της τσιμέντωσης

Στις γεωτρήσεις φυσικού αερίου υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας είναι συχνό φαινόμενο η ανάπτυξη πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης ως αποτέλεσμα διαρροών που παρατηρούνται κατά την παραγωγή του φυσικού αερίου και κατά την εκτέλεση εργασιών εντός της γεώτρησης, μέσω της σωλήνωσης, των σωλήνων παραγωγής (tubing) ή των παρεμβυσμάτων απομόνωσης (packers). Η πίεση αυτή ονομάζεται *wellhead casing pressure – WHCP* και θέτει σε κίνδυνο την μηχανική ακεραιότητα του περιβλήματος τσιμέντου.

Τέτοιου τύπου διαρροές μπορούν να παρατηρηθούν, επίσης, κατά την εκτέλεση δοκιμών πίεσης (pressure testing) και κατά τη ρωγμάτωση του σχηματισμού, οπότε στον δακτύλιο της γεώτρησης αναπτύσσεται πίεση WHCP, με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων ασφαλείας. Αποτυχίες στη στεγανοποίηση, δημιουργία ρωγμών στην τσιμέντωση, οξείδωση της σωλήνωσης και διαφυγή αερίου είναι κάποια από τα προβλήματα που προκαλεί η εμφάνιση αυτής της πίεσης (NORSOK Standards D-010, 2013).

Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες τάσεις (tangential & radial stresses) στην τσιμέντωση παρατηρούνται στη διεπιφάνεια σωλήνωσης-τσιμέντωσης (interface) και σταδιακά μειώνονται όσο προχωρούμε προς τη διεπιφάνεια τσιμέντωσης-σχηματισμού. Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνητικές τιμές WHCP και τη διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα σε μια γεώτρηση HP/HT, θα πρέπει να ελέγχεται ο συντελεστής ασφαλείας της τσιμέντωσης (safety factor of cement sheath) στη διεπιφάνεια σωλήνωσης-τσιμέντωσης. Παρακάτω ακολουθεί μία εικόνα (Εικόνα 3-145) στην οποία παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας για την τσιμέντωση, στη διεπιφάνεια σωλήνωσης-τσιμέντωσης σε σχέση με την αυξομείωση της θερμοκρασίας και τις δυνητικές τιμές της πίεσης WHCP.



Εικόνα 3-15. Δείκτες ασφαλείας του περιβλήματος τσιμέντου στη διεπιφάνεια της σωλήνωσης με την τσιμεντώση για διαφορετικές τιμές της πίεσης WHCP (Honglin, 2014)

Από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση WHCP τόσο μειώνεται ο δείκτης ασφαλείας για την τσιμεντώση και τόσο μικρότερη είναι η επιρροή της θερμοκρασίας. Για τιμές WHCP μικρότερες των 40 MPa, η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη ασφαλείας της τσιμεντώσης. Επιπλέον, με την αύξηση της διαφοράς της θερμοκρασίας ο δείκτης μειώνεται, υποδεικνύοντας ότι ακόμα και μικρές μεταβολές επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την ασφάλεια της τσιμεντώσης. Συνεπώς, από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να προσδιοριστεί η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της πίεσης WHCP (Honglin, 2014).

### 3.4. Διατρητικός εξοπλισμός

Σε ένα τεχνικά δύσκολο και απαιτητικό περιβάλλον όπως είναι αυτό των γεωτρήσεων HP/HT, η προσεκτική επιλογή του εξοπλισμού όρυξης και ολοκλήρωσης μίας γεώτρησης είναι καίριας σημασίας. Από την εκτέλεση διαγραφιών και δειγματοληψίας μέχρι και τη χρήση ειδικών κοπτικών άκρων και διατρητικών στελεχών, ο εξοπλισμός των γεωτρήσεων HP/HT διαφέρει αρκετά από αυτόν των συμβατικών γεωτρήσεων. Η μεγάλη πίεση, η μεγάλη θερμοκρασία, το μεγάλο βάθος και η μικρή διάμετρος της γεώτρησης απαιτούν ειδικό εξοπλισμό που θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της κάθε γεώτρησης.

Σύμφωνα με τον Steve Cassidy, υπεύθυνο συστημάτων γεώτρησης της Chevron, η μεγαλύτερη πίεση απαιτεί αύξηση του μεγέθους των αντiekρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας και αύξηση του βάρους της κεφαλής της γεώτρησης, ενώ η μεγαλύτερη θερμοκρασία δημιουργεί προβλήματα στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, στα κυκλώματα

και τα ελαστομερή (Poron, 2007). Σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη, η παρουσία διαβρωτικών περιβαλλόντων καθιστά αναγκαία τη χρήση προϊόντων με βάση το χάλυβα. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία παρουσίαση του ειδικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια διάνοιξης και ολοκλήρωσης μίας HP/HT γεώτρησης.

### 3.4.1. Διατρητική στήλη

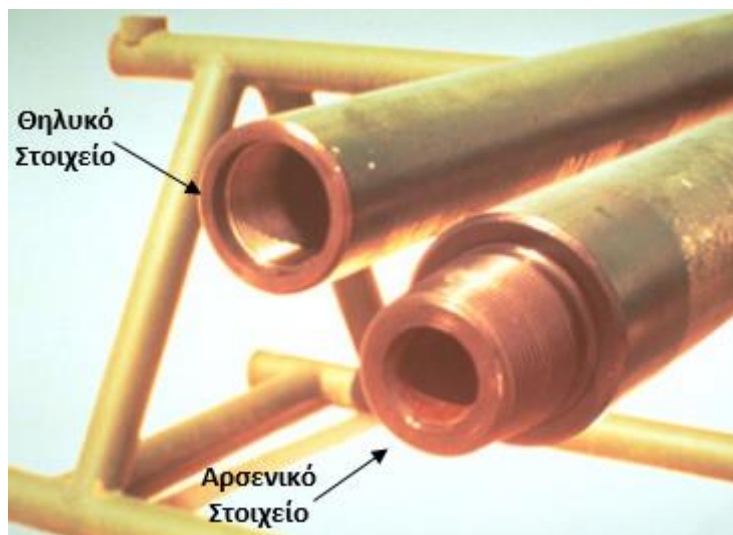
Η διάνοιξη γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη επιφέρει την ανάπτυξη υψηλών φορτίων στα διάφορα εξαρτήματα της διατρητικής στήλης. Κατά μέσο όρο 40% του χρόνου που δαπανάται σε μία γεώτρηση καταναλώνεται στη διάτρηση του σχηματισμού και στην ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης (Cumana-Marval, 1991). Συνεπώς, η διατρητική στήλη και τα εξαρτήματα της πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις επικρατούσες συνθήκες. Παρ' όλα αυτά βασικό μέλημα στο σχεδιασμό είναι η αντοχή στα μεγάλα φορτία και δευτερευόντως η κόπωση που προκύπτει από την συνεχόμενη έκθεση σε δυσμενείς συνθήκες.

Η διατρητική στήλη διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της γεώτρησης και πρέπει να είναι ικανή να αντέξει τα συνδυασμένα φορτία της θλιπτικής αστοχίας (collapse) και της διάρρηξης (burst), τα οποία εμφανίζονται στην περίπτωση αιφνίδιας εισροής αερίου, όπου τα ρευστά διάτρησης έχουν αντικατασταθεί από το εισερχόμενο. Η δυσμενέστερη περίπτωση στην οποία η διατρητική στήλη υπόκειται σε μέγιστη πίεση θλίψης (collapse pressure) είναι όταν εκτελείται τεστ παραγωγής (drillstem test – DST) με τη διατρητική στήλη εντός της γεώτρησης ή όταν υπάρξει ολική απώλεια των ρευστών διάτρησης εντός του σχηματισμού. Δύο επιπλέον παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό της διατρητικής στήλης για γεωτρήσεις HP/HT: η αντοχή σε στρέψη (torsion) και η αντοχή σε διάρρηξη (burst). Όσον αφορά στη στρέψη, σε πρακτικό επίπεδο, μπορεί και να παραλειφθεί, καθώς η μέγιστη ροπή στρέψης εμφανίζεται στο κοπτικό άκρο και γενικά λαμβάνει τιμές αρκετά μικρότερες από αυτήν της ροπής που απαιτείται για τη σύνδεση των στελεχών με συνδέσμους (make-up torque). Σχετικά με την πίεση διάρρηξης, η μέγιστη τιμή της παρατηρείται όταν έχει προκληθεί έμφραξη του κοπτικού άκρου, με αποτέλεσμα να συσσωρευθούν ρευστά διάτρησης με μεγάλη πίεση εντός των στελεχών, ωστόσο και πάλι η πιθανότητα αστοχίας τους είναι πολύ μικρή.

Αφού ο σχεδιασμός της διατρητικής στήλης είναι μεγάλης σημασίας το API (American Petroleum Institute) εξέδωσε συνιστώμενη πρακτική που μπορεί να ακολουθηθεί. Αυτή η συνιστώμενη πρακτική είναι η API RP7G. Σε αυτήν τα διατρητικά στελέχη χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο του χάλυβα από τον οποίο είναι κατασκευασμένα, και σε τέσσερις κλάσεις ανάλογα με την φθορά τους. Η κλάση 1 (class 1) θεωρείται η καλύτερη ποιοτικά και η κλάση 4 (class 4) η χειρότερη (καθώς φέρει τον μεγαλύτερο αποδεκτό βαθμό φθοράς – περισσότερο φθαρμένα στελέχη ταξινομούνται ως scrap). Στις γεωτρήσεις HP/HT η ελάχιστη αποδεκτή χρησιμοποιούμενη κλάση είναι η κλάση 2 ή αλλιώς premium.

Στην κλάση 1 κατατάσσονται τα εντελώς καινούρια διατρητικά στελέχη που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ποτέ πριν. Στην κλάση Premium, κατατάσσονται τα διατρητικά στελέχη, των οποίων το πάχος των τοιχωμάτων τους δεν έχει μειωθεί κάτω από το 80%. Στην πράξη από τη στιγμή που ένα καινούργιο διατρητικό στέλεχος εισέλθει σε μία γεώτρηση αυτομάτως κατατάσσεται στην κλάση Premium. Σε κάθε περίπτωση η επιθεώρηση των στελεχών είναι απαραίτητη από μηχάνημα μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic Particle Inspection – MPI) στις γεωτρήσεις HP/HT.

Οι σύνδεσμοι των διατρητικών στελεχών (tool joints) διακρίνονται επίσης σε τύπους, καθένας εκ των οποίων έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, οι οποίες δεν εξαρτώνται από την ποιότητα του διατρητικού στελέχους στο οποίο προσαρμόζονται. Διαφέρουν επίσης ως προς το μέγεθος, όπως και τα διατρητικά στελέχη. Η κάμψη των διατρητικών στελεχών επιφέρει την ανάπτυξη τάσεων και στα σημεία σύνδεσης μεταξύ τους [Εικόνα 3-16: αρσενικό στοιχείο (pin member) & θηλυκό στοιχείο (box member)].



Εικόνα 3-16. Τύποι σπειρωμάτων συνδέσμων διατρητικών στελεχών (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018)

Κατά τη διάρκεια όρυξης της γεώτρησης ο σύνδεσμος φθείρεται, με αποτέλεσμα το πάχος του θηλυκού στοιχείου να μειώνεται, ενώ του αρσενικού παραμένει σχετικά σταθερό. Σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες η φθορά αυτή επιταχύνεται, με αποτέλεσμα να απαιτούνται συχνοί έλεγχοι στον εξοπλισμό, από τους εργαζομένους του γεωτρήσανου ώστε να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα.

Όσον αφορά στην κατώτερη συνδεσμολογία (bottomhole assembly – BHA), πέραν της απαίτησης για αποτελεσματική φόρτιση του κοπτικού με το βάρος των αντιβάρων (βάρος επί του κοπτικού), εξυπηρετεί και άλλες ανάγκες, ανάλογα με τον σχεδιασμό της:

- Να εμποδίζει τη δημιουργία κεκαμμένων τμημάτων (dog legs) και τμημάτων μειούμενης διαμέτρου (keyseats)

- Να εξασφαλίζει μία ομαλή κατά το δυνατό διατομή, προβλεπόμενης διαμέτρου, σε όλο το μήκος της γεώτρησης
- Να βελτιώνει την απόδοση του κοπτικού
- Να ελαχιστοποιεί τα προβλήματα διάτρησης
- Να ελαχιστοποιεί τους κραδασμούς
- Να ελαχιστοποιεί το διαφορικό κόλλημα (differential sticking) της διατρητικής στήλης με τα τοιχώματα της γεώτρησης.

Απαραίτητη είναι η παρουσία εργαλείων MWD (Measuring While Drilling)/LWD (Logging While Drilling) στην διατρητική στήλη σε γεωτρήσεις HP/HT, ώστε να μην δαπανάται χρόνος στην ανέλκυση και καθέλκυση της για να εκτελεστούν μετρήσεις. Ωστόσο, το μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν αυτά τα μηχανήματα είναι η καταστροφή των ηλεκτρονικών και η συλλογή μη ποιοτικών μετρήσεων εξαιτίας της υπερβάλλουσας θερμοκρασίας.

### 3.4.2. Κοπτικά άκρα

Σε ένα τεχνικά δύσκολο και ακριβό περιβάλλον, όπως είναι αυτό των γεωτρήσεων HP/HT, η προσεκτική επιλογή και υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην επιτυχή ολοκλήρωση της γεώτρησης. Τα κοπτικά άκρα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους γεωτρήσεις πρέπει να είναι ικανά να ανταπεξέλθουν στις δύσκολες συνθήκες και να παραμείνουν όσο το δυνατόν περισσότερο εντός της γεώτρησης, διατρώοντας το σχηματισμό, ώστε να μη δαπανάται χρόνος στην ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης. Κατά συνέπεια, για την επιτυχία ενός προγράμματος όρυξης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Εφόσον η βασική λειτουργία κάθε κοπτικού είναι η θραύση (ή η κοπή) του πετρώματος, θα πρέπει να επιλέγεται το κοπτικό που θα εκμεταλλεύεται καλύτερα τα φυσικά χαρακτηριστικά, τις αδυναμίες και τη δομή του πετρώματος, και θα επιτυγχάνει έτσι αποτελεσματικότερη όρυξη.
- Τα θρύμματα που παράγονται από τη δράση του κοπτικού θα πρέπει να απομακρύνονται όσο το δυνατό πιο άμεσα από τον πυθμένα της γεώτρησης και να μεταφέρονται στην επιφάνεια.
- Καθώς η αντικατάσταση ενός κοπτικού επισύρει μανούβρες (μη παραγωγικός χρόνος – αύξηση του κόστους), θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά η διάρκεια ζωής του κοπτικού που επιλέγεται κάθε φορά.

Στις γεωτρήσεις HP/HT, εξαιτίας των δύσκολων συνθηκών και του μεγάλου βάθους, οι μη παραγωγικοί χρόνοι (non-productive time) είναι αρκετά μεγαλύτεροι από αυτούς των συμβατικών γεωτρήσεων. Σύμφωνα με διεθνείς μελέτες, έως και 32% του χρόνου στον οποίο γίνεται διάτρηση (drilling), δαπανάται σε μη παραγωγικές εργασίες (π.χ. χρόνοι μανούβρας, διαδικασία bottoms-up κ.τ.λ.) (Halliburton, 2018). Κριτήρια όπως η ικανότητα καθοδήγησης του κοπτικού άκρου, ο βελτιωμένος

ρυθμός προχώρησης και η σταθερότητα στη διάτρηση πρέπει να διέπουν την επιλογή του κοπτικού άκρου. Οι βασικοί τύποι κοπτικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στην περιστροφική όρυξη βαθιών γεωτρήσεων και σε ενδογεωτρητικές εργασίες (down-the-hole operations – DHT operations) είναι:

- ✓ Κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους (Roller Cone Bits-RCB ή Rolling Cutter Bits ή rock bits).
- ✓ Αδαμαντοκορώνες (Diamond bits).
- ✓ Πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά (Polycrystalline Diamond Compact bits-PDC).

Τα τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με την τεχνολογία των κοπτικών άκρων στις γεωτρήσεις HP/HT αφορούν κυρίως στον μειωμένο ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης εντός του παραγωγικού σχηματισμού. Σχετικές μελέτες που έγιναν σε γεωτρήσεις HP/HT στον Κόλπο του Μεξικού (Shadravan & Amani, 2012), έδειξαν ότι σε αυτές τις γεωτρήσεις τα κοπτικά άκρα απομακρύνουν ανά περιστροφή του κοπτικού άκρου μόλις το 10% του πετρώματος, σε σχέση με τις συμβατικές γεωτρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αντίστοιχα μειωμένο ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης (rate of penetration – ROP). Παράλληλα, τα κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους έχουν χαρακτηριστεί ως ακατάλληλα σε τέτοιο περιβάλλον και συνεπώς δεν προτιμώνται. Ομοίως, αλλά σε μικρότερο βαθμό, δεν προτιμώνται και τα απλά πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά (Polycrystalline Diamond Compact bits - PDC), διότι παρατηρούνται προβλήματα στην κρυσταλλική τους δομή, με την έκθεσή τους σε υψηλή θερμοκρασία.

Τα θερμικά σταθερά πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά (thermally stable polycrystalline diamond bits – TSP bits) αποτελούν εξέλιξη των αδαμαντοκοπτικών. Σε αντίθεση με τα πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά, τα αδαμαντοκοπτικά TSP έχουν υποστεί κατεργασία που εξαλείφει τα μη συμβατά στοιχεία (καταλύτης κοβαλτίου) από την άποψη της θερμικής διαστολής και γι' αυτό μπορούν να αντέχουν στις θερμοκρασίες που απαιτούνται για την κατασκευή μιας μήτρας καρβιδίου (Σταματάκη, 2003). Δηλαδή, το στάδιο που λαμβάνει χώρα στην κατασκευή PDC αδαμαντοκοπτικών, στο οποίο χρησιμοποιείται το κοβάλτιο για την ένωση των διαμαντιών στο υπόστρωμα του καρβιδίου του βολφραμίου, παραβλέπεται με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της θερμικής διαστολής και να επιτρέπει στο κοπτικό να δεχθεί θερμοκρασίες μέχρι και 1200 °C (2.192 °F), ενώ πριν περιοριζόταν μέχρι τους 750 °C (1.382 °F) (SPE International, 2016).

Η ένωση των διαμαντιών στο υπόστρωμα του καρβιδίου του βολφραμίου αποτελεί μία πολύ δύσκολη διαδικασία η οποία πραγματοποιείται σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Έτσι παρέχεται στο κοπτικό συνεκτικότητα και αντοχή ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει στις HP/HT συνθήκες (Element Six / a De Beers Group Company, 2017). Τα διαμάντια TSP χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με τα φυσικά διαμάντια (Εικόνα 3-17).



Εικόνα 3-17. TSP κοπτικά για όρυξη (αριστερό κοπτικό) (Σταματάκη, Τεχνολογία γεωτρήσεων, 2003) και για δειγματοληψία (δεξί κοπτικό) (F.L.R.T., n.d.)

Η βελτίωση στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των ενδογεωτρητικών κινητήρων, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος του κοπτικού, έχει επιφέρει βελτίωση και στον ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης, κυρίως λόγω αύξησης των περιστροφών ανά λεπτό (rotations per minute – rpm). Η συνολική βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς του κοπτικού, του ενδογεωτρητικού κινητήρα, του ρευστού διάτρησης και της διατρητικής στήλης παρουσιάζει πολλές δυνατότητες βελτίωσης της αξιοπιστίας και του ρυθμού προχώρησης των γεωτρήσεων HP/HT.

### 3.4.3. Στεγανωτικά (seals)

Όσον αφορά ειδικά στα στεγανωτικά, διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ένωση των διάφορων μηχανολογικών τμημάτων του εξοπλισμού (parts) της γεώτρησης. Για την επιλογή του σωστού στεγανωτικού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη:

- η γεωμετρία του,
- οι ιδιότητές του,
- η ευκαμψία κατά την τοποθέτηση και αφαίρεσή του,
- η ανθεκτικότητά του στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες και
- η ικανότητά του να ανταπεξέρχεται και να προσαρμόζεται στη συστολή και διαστολή των άλλων υλικών.

Επιπλέον, η έλλειψη ευκαμψίας των στεγανωτικών δυσκολεύει την τοποθέτηση και συντήρησή τους και ενδέχεται να απαιτείται η διαφορετική διάταξή τους ώστε να λειτουργήσουν ορθά. Όσο λιγότερο εύκαμπτα είναι τα στεγανωτικά τόσο μικρότερο είναι το περιθώριο ανοχής που αφήνουν στα μέρη που στεγανώνουν, δηλαδή είναι λιγότερο ικανά να προσαρμοστούν στις συνθήκες με αποτέλεσμα την εμφάνιση πιθανής εισροής. Τέλος, εάν οι τιμές της θερμοκρασίας είναι σχετικά σταθερές χωρίς

---

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας



μεγάλες διακυμάνσεις, ενδείκνυται η χρήση μη εύκαμπτων στεγανωτικών, καθώς τα μέρη που στεγανώνουν δεν διαστέλλονται και συστέλλονται αρκετά. Σε αντίθετη περίπτωση η χρήση εύκαμπτων στεγανωτικών συνίσταται για την αποφυγή εισροής (API, 2015).

Τα σύγχρονα ελαστομερή συνήθως είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε θερμοκρασίες έως 138 °C (280 °F), ενώ τα θερμοπλαστικά αντέχουν έως τους 204 °C (400 °F). Σε κάθε περίπτωση μπορούν να ανταπεξέλθουν και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ωστόσο μειώνεται αρκετά η λειτουργική τους ζωή. Σε τέτοιες περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση μεταλλικών στεγανωτικών, καθώς είναι ικανά να λειτουργήσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αντίξοες συνθήκες. Η χρήση μη μεταλλικών στεγανωτικών προσθέτει επιπλέον ανησυχία στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας, καθώς επηρεάζονται οι μοριακοί δεσμοί των υλικών και συνεπώς οι ιδιότητές τους. Ειδικότερα, σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μη μεταλλικά στεγανωτικά, σύμφωνα με την κατευθυντήρια οδηγία API 17TR8, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή:

- Στη γήρανση (aging). Η γήρανση των μη μεταλλικών στεγανωτικών προκύπτει από την έκθεση στη μεγάλη θερμοκρασία και στα ρευστά διάτρησης. Συνεπώς, απαιτείται να εκτελεστούν δοκιμές για την διάρκεια ζωής των στεγανωτικών.
- Στη θερμική διαστολή (differential thermal expansion). Η θερμική διαστολή, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών, επηρεάζει τα στεγανωτικά ως προς το μέγεθός τους, τη μετακίνησή τους και την πιθανή εξώθησή τους.
- Στη χαλάρωση των τάσεων (stress relaxation). Στο σχεδιασμό πρέπει να ληφθεί υπόψη η περίπτωση κατά την οποία δεν ενεργεί κάποιος μηχανισμός, ο οποίος θα επιβάλλει τάσεις στα στεγανωτικά. Επιπρόσθετη καθοδήγηση για την χαλάρωση των τάσεων παρέχεται στα ASTM D6147, ISO 3384-1 ή ISO 6914.
- Στη θερμική επίδραση των λιπαντικών στα στεγανωτικά (thermal effects of lubricants on seal materials). Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο λιπαντικό το οποίο θα είναι συμβατό με τα μη μεταλλικά στεγανωτικά και τις συνθήκες.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μεταλλικά στεγανωτικά, σύμφωνα με την κατευθυντήρια οδηγία API 17TR8, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή:

- Στη διάβρωση (corrosion). Η διάβρωση των μεταλλικών στεγανωτικών επιταχύνεται ραγδαία με την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Στη θερμική διαστολή (differential thermal expansion). Τα μεταλλικά στεγανωτικά, τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στις συμβατικές γεωτρήσεις θα πρέπει να εξεταστούν και να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η θερμική διαστολή τους. Μόνο τότε και μετά από εργαστηριακές δοκιμές στις προβλεπόμενες θερμοκρασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Στο γδάρισμα λόγω τριβής (galling). Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα μικρών κινήσεων, εξαιτίας της παλινδρομικής κάμψης και της θερμικής

συστολής και διαστολής και προκαλείται από την έκθεση στους θερμικούς κύκλους.

Συμπερασματικά, τόσο στην περίπτωση των μη μεταλλικών όσο και των μεταλλικών στεγανωτικών, το API συμβουλεύει την δοκιμή τους σε εργαστήρια, προσομοιάζοντας τις συνθήκες στις οποίες πρόκειται να αντιμετωπίσουν, ώστε να διαπιστωθεί εάν μπορούν να ανταπεξέλθουν επαρκώς.

### 3.5. Διέγερση του ταμιευτήρα και παραγωγή (reservoir stimulation & production)

Ακόμα και μετά την επιτυχή όρυξη μιας γεώτρησης HP/HT και την ασφαλή εκτέλεση των απαραίτητων δοκιμών παραγωγής, ενίοτε καθίσταται απαραίτητη η διέγερση του ταμιευτήρα για τη βελτίωση της παραγωγής. Η διέγερση του ταμιευτήρα αποτελεί μία επεμβατική μέθοδο κατά την οποία αυξάνεται η παραγωγικότητα της γεώτρησης, μέσω της βελτίωσης της ροής των υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι επιπρόσθετες τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζουν οι γεωτρήσεις HP/HT, κατά τη φάση της διέγερσης του ταμιευτήρα και της παραγωγής.

#### 3.5.1. Διέγερση του ταμιευτήρα

Η διέγερση του ταμιευτήρα σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες τρεις μεθόδους:

- Αύξηση της διαπερατότητας με χρήση οξέων (matrix acidizing).
- Αύξηση της διαπερατότητας με υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracturing).
- Εισπίεση ατμού (steam injection).

Και οι τρεις μέθοδοι θεραπεύουν τις αλλοιώσεις που έχει υποστεί ο σχηματισμός (formation damage) κατά τις διαδικασίες όρυξης, τσιμέντωσης και ολοκλήρωσης (διάτρησης του σχηματισμού) της γεώτρησης, και παρέχουν βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ του σχηματισμού και της γεώτρησης. Ο στόχος είναι η αύξηση της παραγωγής υδρογονανθράκων, σε επίπεδα αρκετά μεγαλύτερα από αυτά που επιτυγχάνονται υπό συνθήκες φυσιολογικής ροής (natural flow conditions) (Economides, 2003).

Ωστόσο, πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε από τις παραπάνω μεθόδους είναι απαραίτητη αρχικά η κατανόηση της λιθολογίας του ταμιευτήρα.

3.5.1.1. Λιθολογία του ταμιευτήρα

Η όρυξη γεωτρήσεων σε ταμιευτήρες μεγάλου βάθους ανέκαθεν αποτελούσε πρόκληση, ιδίως όσον αφορά στην επιλογή του εξοπλισμού και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν. Εάν η ποιότητα του ταμιευτήρα είναι χαμηλή, τότε στις προκλήσεις προστίθεται και η δυσκολία της διέγερσης του ταμιευτήρα, ώστε να υπάρξει ροή των υδρογονανθράκων προς την επιφάνεια. Η υψηλή παραγωγή από ταμιευτήρες που χαρακτηρίζονται από χαμηλό πορώδες και χαμηλή διαπερατότητα, είναι εφικτή μόνο όταν οι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται παγιδευμένοι στους πόρους και τις ρωγμές του ταμιευτήρα βρουν δίοδο προς τη γεώτρηση. Σε περίπτωση χαμηλής παραγωγής πραγματοποιούνται, συνήθως, διαγραφίες και εκτελείται εργαστηριακή μελέτη σε δείγματα τα οποία έχουν ληφθεί από τον ταμιευτήρα (Εικόνα 3-18). Αυτά τα δεδομένα, σε συνδυασμό με τα δεδομένα από κοντινές γεωτρήσεις, θα καθορίσουν τη μέθοδο διέγερσης του σχηματισμού και την εκτέλεση ή όχι υδραυλικής ρωγμάτωσης (Al-Omair, 2008).



Εικόνα 3-18. Δείγματα πυρήνων από σχηματισμούς ενδιαφέροντος που εντοπίζονται σε διαφορετικά βάθη, σε γεώτρηση που έχει ορυχθεί στο Κουβέιτ (Al-Omair, 2008)

Βαθείς και συμπαγείς ταμιευτήρες υψηλής θερμοκρασίας, συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα (<1 md) και εμφανίζουν αρκετές ρωγμές (Nnanna, 2005). Συγκεκριμένα, στους βαθείς ανθρακικούς ταμιευτήρες (carbonate reservoirs), επειδή χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα, δεν είναι εφικτή η ροή των ρευστών τους προς τη γεώτρηση και από εκεί στην επιφάνεια. Ωστόσο, αυτοί οι σχηματισμοί εμφανίζουν αρκετές φυσικές ρωγμές, που εν τέλει επιτρέπουν τη ροή προς την γεώτρηση, αρκεί όμως να βρεθούν οι δίοδοι προς αυτή (Abass, 2006; Nnanna, 2005; Jahediesfanjani, 2006). Εάν η πυκνότητα των ρωγμών, σε τέτοιου είδους ταμιευτήρες,

είναι μικρή, τότε και η ροή των υδρογονανθράκων προς τη γεώτρηση είναι ανάλογη. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα και να βελτιωθεί η παραγωγικότητα, δημιουργείται στον ταμιευτήρα μία αγωγίμη δίοδος – ρωγμές – που επιτρέπει την συνεχή ροή υδρογονανθράκων προς την επιφάνεια, μέσω ειδικών τεχνικών (Nnanna, 2005). Οι ρωγμές συνήθως δημιουργούνται με την εισπίεση ρευστών ρωγμάτωσης του ταμιευτήρα, σε μεγάλους ρυθμούς.

Δυσμενέστερη είναι η κατάσταση σε ταμιευτήρες χαλαρών ψαμμιτικών σχηματισμών (unconsolidated sand reservoirs), όπου οι φυσικές ρωγμές τείνουν να κλείσουν εξαιτίας των πιέσεων που δέχεται ο σχηματισμός. Σε τέτοιες περιπτώσεις η βελτίωση της παραγωγής των υδρογονανθράκων, μέσω της υδραυλικής ρωγμάτωσης, πρέπει να συνεχιστεί καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης.

Η διέγερση ανθρακικών ταμιευτήρων με οξέα (acid stimulation), πραγματοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, με τη χρήση ακατέργαστων γαλακτωματοποιημένων οξέων (raw, emulsified acids). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ώστε να βελτιωθεί η παραγωγικότητα της γεώτρησης μέσω του περιορισμού του επιδερμικού φαινομένου (skin)<sup>4</sup> το οποίο εμποδίζει τη ροή των υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα στη γεώτρηση. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις η διέγερση συνδετικής μάζας πετρώματος (matrix stimulation) δεν εκπληρώνει το σκοπό του, ιδίως σε συμπαγείς ανθρακικούς σχηματισμούς (Muecke, 1982). Εάν η μειωμένη παραγωγή οφείλεται στις αλλοιώσεις που έχει υποστεί ο σχηματισμός στην περιοχή γύρω από τη γεώτρηση, τότε η χρήση οξέων βοηθάει καλύτερα στη βελτίωση της παραγωγικότητας της γεώτρησης. Σε αντίθετη περίπτωση, εάν η χαμηλή παραγωγή οφείλεται στη μικρή διαπερατότητα του σχηματισμού και την έλλειψη διόδων για να κινηθούν οι υδρογονάνθρακες, τότε είναι απαραίτητη η υδραυλική ρωγμάτωση. Συνεπώς, στην περίπτωση που δεν είναι αποτελεσματική η εισπίεση οξέων, πρέπει να πραγματοποιηθεί υδραυλική ρωγμάτωση.

Σε όλες τις γεωτρήσεις και κυρίως στις γεωτρήσεις HP/HT, είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί η παραπάνω ιεράρχηση των μεθόδων για τη διέγερση του σχηματισμού, δηλαδή πρώτα η εισπίεση οξέων και μετά η υδραυλική ρωγμάτωση (Al-Omair, 2008).

Τέλος, παρ' όλα τα θετικά που έχουν να προσφέρουν οι προϋπάρχουσες ρωγμές κατά την παραγωγή, στο στάδιο της όρυξης περισσότερο προβληματικές είναι παρά επικερδείς. Η τάση απώλειας των ρευστών διάτρησης κατά την όρυξη της γεώτρησης, υποδεικνύει την παρουσία καλής ποιότητας ρωγμών. Γι' αυτό τον λόγο η χρήση ρευστών διάτρησης με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά αποφεύγεται και αντί αυτού ενδείκνυται η χρήση ρευστών διάτρησης με προσθήκη βαρύτη για την επίτευξη της

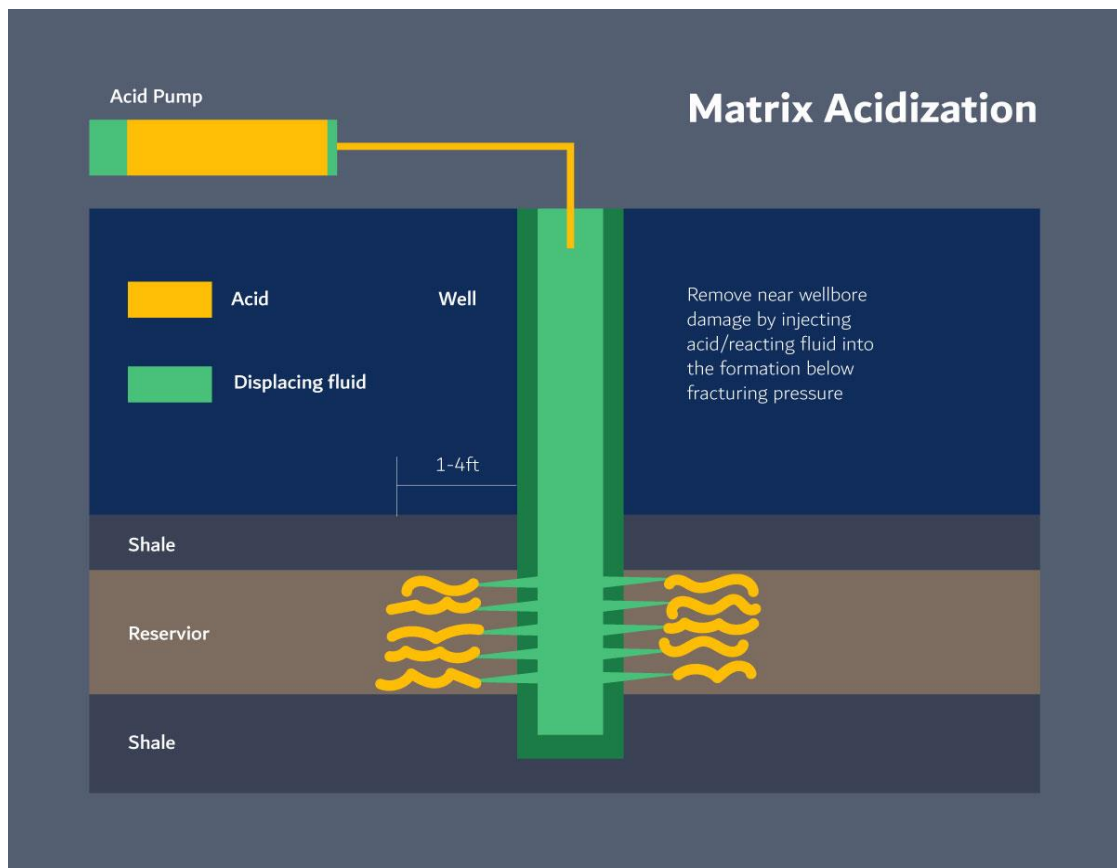
---

<sup>4</sup> Ένας αδιάστατος παράγοντας που υπολογίζεται ώστε να προσδιοριστεί η αποδοτικότητα της παραγωγής μίας γεώτρησης, μέσω της σύγκρισης των πραγματικών συνθηκών με τις θεωρητικές ή με τις ιδανικές συνθήκες. Θετική τιμή του επιδερμικού φαινομένου υποδεικνύει την παρουσία καταστροφής ή κάποιας επιρροής που έχει αντίκτυπο στην παραγωγικότητα της γεώτρησης. Αντίθετα, η αρνητική τιμή υποδεικνύει βελτιωμένη παραγωγικότητα, που συνήθως προκύπτει από την διέγερση του ταμιευτήρα (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

ζητούμενης πυκνότητας. Αυτό διότι η επίτευξη υψηλής πυκνότητας ρευστών διάτρησης σε συνδυασμό με χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά, απαιτεί τη χρήση ειδικών επιπρόσθετων υλικών, τα οποία έχουν μεγάλο κόστος και καθιστούν την όρυξη γεώτρησης αρκετά ακριβή από τη στιγμή που συχνά διαφεύγουν στο ρωγματωμένο σχηματισμό.

### 3.5.1.2. Αύξηση της διαπερατότητας του ταμιευτήρα με χρήση οξέων (matrix acidizing)

Η αύξηση της διαπερατότητας του ταμιευτήρα με χρήση οξέων επιτυγχάνεται με την εισπίεση ρευστού χαμηλού pH, μέσω φυσικών ρωγμών που ενυπάρχουν στον σχηματισμό, σε χαμηλούς ρυθμούς ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω ρωγμάτωσή του (Εικόνα 3-19). Το οξύ διαλυτοποιεί ευδιάλυτα συστατικά του σχηματισμού πέριξ της γεώτρησης, καθώς και τυχόν βλαπτικές επικαθήσεις από τη χρήση ρευστών σε προηγούμενες εργασίες συντήρησης της γεώτρησης (well-service fluids), τα οποία και αποτρέπουν την ανεμπόδιση ροή των υδρογονανθράκων προς την επιφάνεια. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το όξινα ρευστά χρησιμοποιούνται για την διέγερση ανθρακικών και ψαμμιτικών σχηματισμών.



Εικόνα 3-19. Διαδικασία εφαρμογής της διέγερσης του ταμιευτήρα με χρήση οξέων (matrix acidizing) (Dubai Petroleum, 2018)

Στις περισσότερες περιπτώσεις για τη διέγερση ανθρακικών ταμιευτήρων το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι το υδροχλωρικό οξύ (HCl), το οποίο αντιδρά με

σχηματισμούς που αποτελούνται από ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης) ή/και μίγμα ανθρακικού ασβεστίου και ανθρακικού μαγνησίου (δολομίτης). Καθώς το οξύ διεισδύει στον σχηματισμό από τις οπές που έχουν διανοιχθεί σε αυτόν (perforations) και διαλυτοποιεί το ανθρακικό πέτρωμα, δημιουργεί εντός του σχηματισμού διόδους διαφυγής (wormholes) των υδρογονανθράκων προς την γεώτρηση. Οι δίοδοι αυτές διαδίδονται στον σχηματισμό από το σημείο εισπίεσης του οξέος και μέσω αυτών γίνεται όλη η ροή των υδρογονανθράκων προς τη γεώτρηση (Εικόνα 3-20). Για την πιο αποτελεσματική διέγερση, οι δίοδοι θα πρέπει να εισέλθουν βαθιά και ομοιόμορφα μέσα στον παραγωγικό σχηματισμό (DeBryjijn, και συν., 2008).



Εικόνα 3-20. Σχηματισμός διόδων (wormholes) σε δείγμα ανθρακικού σχηματισμού κατά την εισπίεση οξέων για την αύξηση της διαπερατότητάς του, σε εργαστηριακή κλίμακα. Το μήκος, η διεύθυνση και ο αριθμός των διόδων εξαρτάται από την αντιδραστικότητα του σχηματισμού και τον ρυθμό εισπίεσης, με τον οποίο τα οξέα διεισδύουν στον σχηματισμό. Όταν σχηματιστούν τέτοιες δίοδοι, μέσω αυτών ρέουν πρακτικά όλοι οι υδρογονάνθρακες προς την γεώτρηση και από εκεί στην επιφάνεια (DeBryjijn, και συν., 2008)

Το υδροχλώριο είναι αποτελεσματικό για την διέγερση ταμιευτήρων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, γίνεται ιδιαίτερος προβληματικό σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 93 °C (200 °F). Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, αυτό το ανόργανο οξύ διεισδύει πολύ γρήγορα στον σχηματισμό, ελαττώνοντας το βάθος και την ομοιομορφία των διόδων. Επιπλέον, αυτές οι συνθήκες επιφέρουν τη διάβρωση των

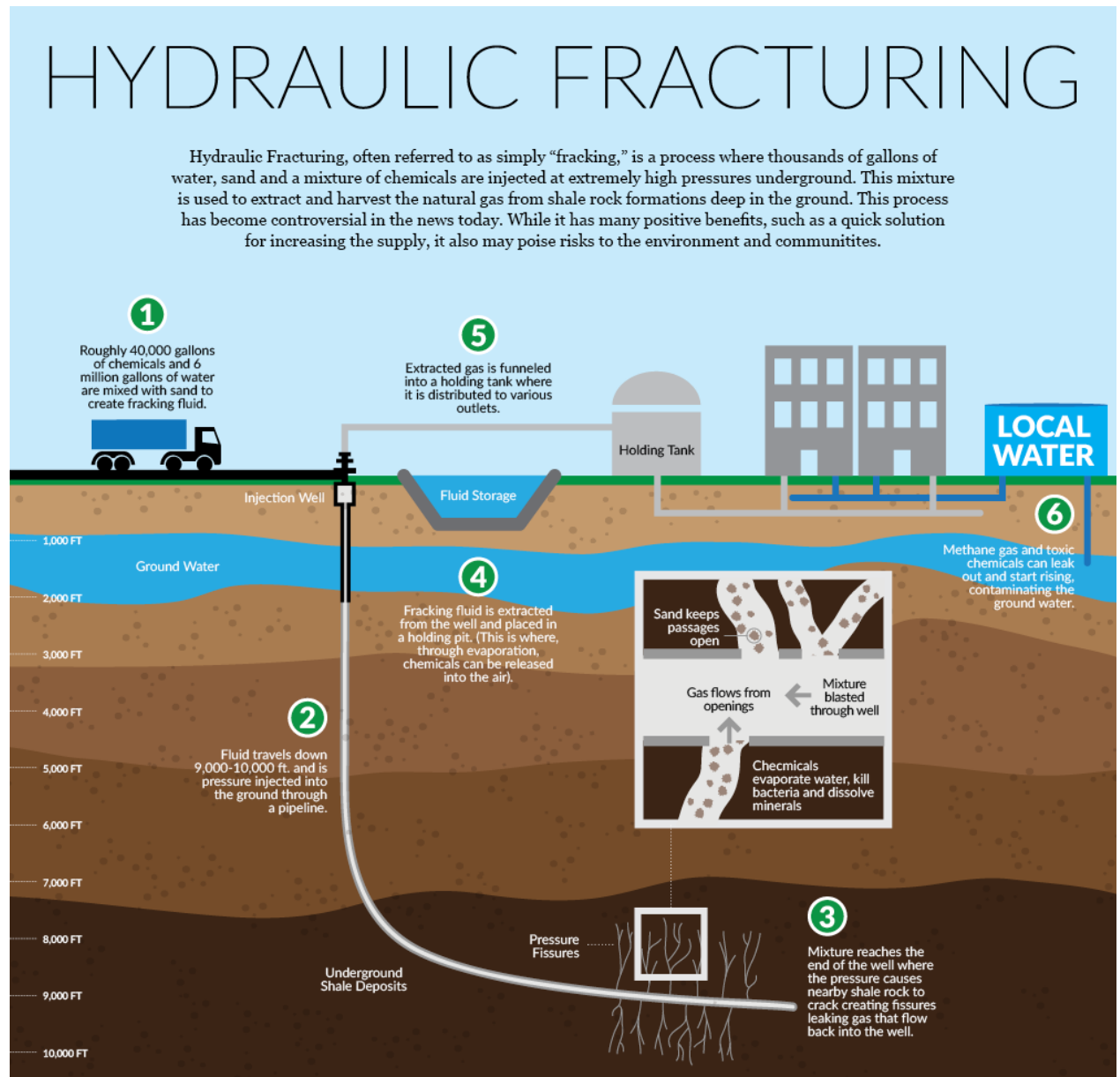
σωλήνων παραγωγής και της σωλήνωσης, με αποτέλεσμα να καθίσταται επιτακτική η ανάγκη προσθήκης τοξικών αντιδιαβρωτικών σε υψηλές συγκεντρώσεις. Πριν περίπου από μια δεκαετία ωστόσο, οι χημικοί της Schlumberger συνέβαλαν στη λύση των παραπάνω προβλημάτων καθώς δημιούργησαν όξινα ρευστά με βάση χηλικές ενώσεις (chelating agents) του υδροξυ-αιθυλαμινο-καρβοξυλικού οξέος (hydroxyethylaminocarboxylic-acid – HACA). Συνηθισμένα εμπορικές ενώσεις με βάση το HACA (tetrasodium EDTA & trisodium HEDTA) χρησιμοποιούνται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία εδώ και δεκαετίες, κυρίως για την απομάκρυνση καθυστερήσεων (scale removal) και ως αντικαθαλατωτικά (scale inhibitors)<sup>5</sup> (CORRECTED).

### *3.5.1.3. Αύξηση της διαπερατότητας του ταμιευτήρα με υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracturing)*

Η διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης περιλαμβάνει την εισπίεση μεγάλου όγκου ρευστού, μέσω των οπών που έχουν διανοιχθεί (perforations) όσο το δυνατό βαθύτερα μέσα στον σχηματισμό, σε τέτοιους ρυθμούς και πιέσεις ικανούς όχι μόνο να δημιουργήσουν ρωγμές, αλλά και να τις μεταδώσουν αρκετά μακριά από τα περίχωρα της γεώτρησης (Εικόνα 3-21). Στο τελικό στάδιο εισπίεσης, προστίθεται στο ρευστό ένα μείγμα πυριτικών, κεραμικών ή βωξιτικών κόκκων υψηλής σφαιρικότητας, ώστε να γεμίσουν τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί (Εικόνα 3-22), να τις διατηρηθούν ανοιχτές (σαν ένα σύστημα αγωγών υψηλής διαπερατότητας) και να διατηρήσουν τη ροή των υδρογονανθράκων προς τη γεώτρηση (DeBryjijn, και συν., 2008).

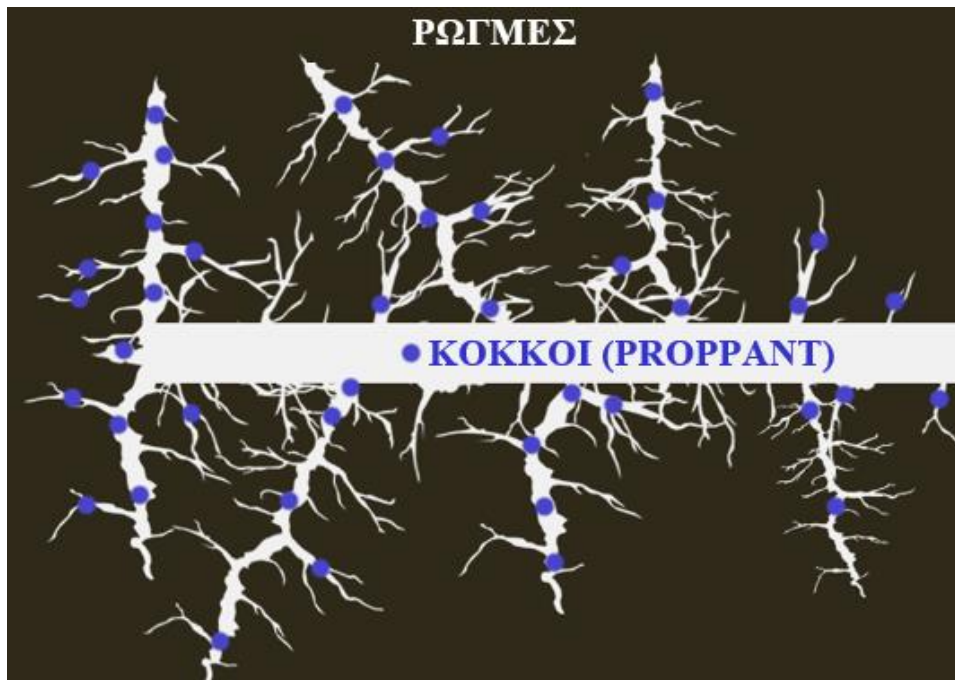
---

<sup>5</sup> Οι χηλικές ενώσεις (chelating agents), γνωστά και ως ενώσεις συμπλοκοποίησης (sequestering agents), είναι ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ανεπιθύμητων αντιδράσεων των μεταλλικών ιόντων (π.χ. Ca, Mg, Fe). Για παράδειγμα, σχηματίζουν χημικά σύμπλοκα τα οποία δεν καθιζάνουν κατά τη διαδικασία εισπίεσης οξέων (acidizing treatment), με αποτέλεσμα να αποτρέπουν τις αλλοιώσεις του σχηματισμού (formation damage).



Εικόνα 3-21. Διαδικασία εφαρμογής υδραυλικής ρωγμάτωσης (hydraulic fracturing) (Infographic by Jake Newton: <http://ouwaterproject.org/issues/industry/>)





Εικόνα 3-22. Εισαγωγή κόκκων στις ρωγμές κατά τη διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης (Shale Gas- Hydraulic Fracturing, 2012)

Πριν την εισπίεση του ρευστού ρωγμάτωσης, εκτελείται στον σχηματισμό ειδική δοκιμή εισπίεσης σταδιακά αυξανόμενων όγκων ρευστού (step rate test), για να προσδιοριστούν οι παράμετροι του ταμιευτήρα, όπως η πίεση ρωγμάτωσης και η πίεση κλεισίματος των ρωγμών. Σε ταμιευτήρες με χαμηλή διαπερατότητα η δοκιμή εκτελείται με επεξεργασμένο νερό, ενώ σε ταμιευτήρες υψηλής διαπερατότητας χρησιμοποιούνται πολυμερή υψηλού ιξώδους ώστε να μην υπάρξει απώλειά τους μέσα στον σχηματισμό (Al-Omair, 2008).

Το ιξώδες του ρευστού ρωγμάτωσης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο και ελέγχει την εκκίνηση της ρωγμάτωσης και τη διάδοσή της, καθώς και τη μεταφορά των πρόσθετων συγκράτησης ανοικτών ρωγμών (proppants) μέσα από τη γεώτρηση και μέσα από τις οπές που έχουν διανοιχθεί (perforations) μέχρι μέσα στις ρωγμές που έχουν διαμορφωθεί στον ταμιευτήρα. Σε συνθήκες HP/HT, το επιθυμητό ιξώδες επιτυγχάνεται συνήθως με διαλύματα μετάλλων και πολυμερών με βάση το κόμμι (metal crosslinked solutions of guar-based polymers). Τα πιο συνήθη μέταλλα που χρησιμοποιούνται γι' αυτό τον σκοπό είναι το βόριο και το ζirkόνιο<sup>6</sup>. Ωστόσο, η επίτευξη επαρκούς ιξώδους δεν είναι αρκεί από μόνη της για την αποτελεσματική ρωγμάτωση σχηματισμών σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Για την μείωση των τριβών που δημιουργούνται μεταξύ του ρευστού και της σωλήνωσης, καθώς αυτό εισπίζεται στον πυθμένα της γεώτρησης, οι αντιδράσεις των μετάλλων με τα μόρια των πολυμερών θα πρέπει να καθυστερήσουν μέχρι λίγο πριν το ρευστό

<sup>6</sup> Οι σταυροειδείς δεσμοί (cross-links) είναι δεσμοί μεταξύ αλυσίδων πολυμερών. Μέταλλα όπως το βόριο και το ζirkόνιο αλληλεπιδρούν με πολυμερή με βάση το κόμμι, σχηματίζονται δεσμούς που αυξάνουν το ενεργό μοριακό βάρος (effective molecular weight) του πολυμερούς κατά αρκετές τάξεις μεγέθους και αυξάνουν επίσης δραματικά το ιξώδες των ρευστών ρωγμάτωσης.

ρωγμάτωσης εισέλθει στις διανοιχθείσες οπές. Επιπλέον, το ιξώδες δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερος ευαίσθητο στο περιβάλλον όπου επικρατεί υψηλός λόγος ταχύτητας απόχυσης και κλίσης (high-shear-rate environment), όπως αυτό στο εσωτερικό της γεώτρησης και των οπών. Σε τέτοια περίπτωση το ρευστό δεν θα είναι επαρκές για τη διάδοση των ρωγματώσεων στον σχηματισμό και τη μεταφορά των πρόσθετων συγκράτησης ανοικτών ρωγμών, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα πρόωρης εμφάνισης του φαινομένου της γεφύρωσης (screen out)<sup>7</sup>.

Στις γεωτρήσεις HP/HT χρησιμοποιούνται, σχεδόν αποκλειστικά, ρευστά ρωγμάτωσης με ζirkόνιο, κυρίως γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα στην μεταβολή της θερμοκρασίας, έναντι των ρευστών με βόριο. Ωστόσο, παρά τις προόδους που έχουν σημειωθεί στον σχεδιασμό των ρευστών, η επίτευξη πλήρους ελέγχου των δεσμών μεταξύ του μετάλλου και του πολυμερούς (crosslink control) έχει αποβεί άκαρπη. Οι αντιδράσεις για τη δημιουργία αυτών των δεσμών είναι ευαίσθητες στη θερμοκρασία και η πρόβλεψη της θερμοκρασίας εντός της γεώτρησης, κατά την κυκλοφορία των ρευστών ρωγμάτωσης, αποτελεί αρκετά δύσκολη διαδικασία σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Τα ρευστά που χρησιμοποιούνται για τη ρωγμάτωση δημιουργούνται με τη μίξη νερού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ωστόσο, η εισπίεση ρευστών ρωγμάτωσης που βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος διαμέσω μιας ολοκληρωμένης γεώτρησης, θα προκαλέσει επαρκή συστολή στην σωλήνωση και τους σωλήνες παραγωγής μέσα στη γεώτρηση με αποτέλεσμα να ασκηθούν υψηλές τάσεις πάνω στα παρεμβύσματα (packers) και να τεθεί σε κίνδυνο η απομόνωση της ζώνης ενδιαφέροντος. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η θέρμανση του νερού πριν τη μίξη σε θερμοκρασία τουλάχιστον 50 °C (122 °F) (DeBryijin, et al., 2008).

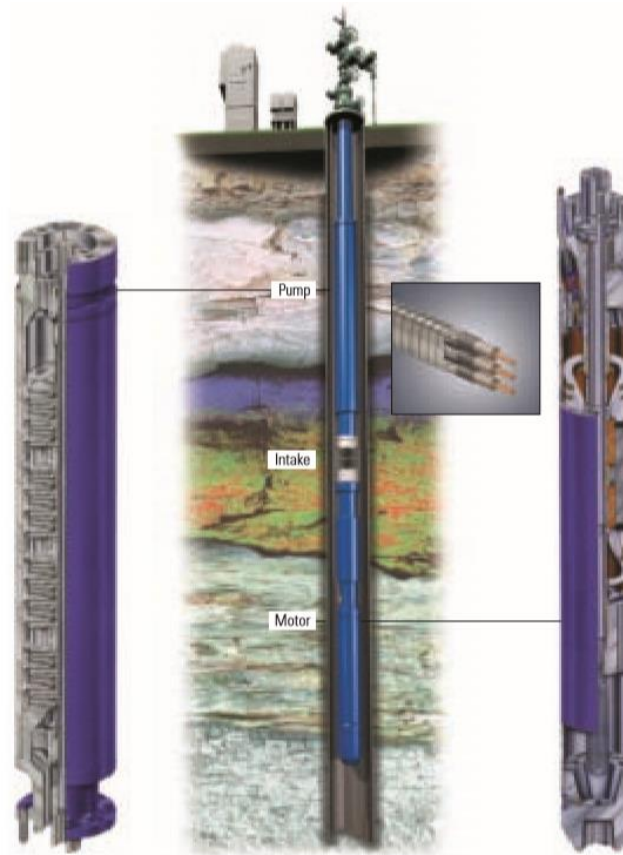
#### 3.5.1.4. Εισπίεση ατμού (steam injection)

Σε περιπτώσεις ταμιευτήρων που περιέχουν βαρύ πετρέλαιο η βέλτιστη λύση για την διέγερση του ταμιευτήρα είναι η μείωση του ιξώδους των ρευστών του μέσω της εισπίεσης ατμού. Το κόστος παραγωγής του ατμού ανέρχεται στο 75% των συνολικών εξόδων της διαδικασίας εισπίεσης ατμού (steam-assisted gravity drainage – SAGD). Η μείωση του λόγου ατμού/πετρελαίου (steam/oil ratio – SOR) και η διατήρηση του βέλτιστου ρυθμού παραγωγής, είναι παράγοντες καίριας σημασίας για την αποδοτικότητα της μεθόδου. Ακόμα, η μείωση του όγκου του ατμού που θα εισπυεστεί επιφέρει εξοικονόμηση στο ενεργειακό κόστος (energy costs), μειώνει την παραγωγή νερού και το κόστος επεξεργασίας του, ενώ περικλύπτει σημαντικά και τις σχετικές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Μείωση της τάξης του 10-25% μπορεί να επιτευχθεί στον λόγο ατμού/πετρελαίου με τη χρήση συστήματος ηλεκτρικής υποβρύχιας αντλίας

---

<sup>7</sup> Το φαινόμενο της γεφύρωσης εμφανίζεται όταν τα σωματίδια που περιέχονται στα πρόσθετα συγκράτησης ανοικτών ρωγμών ενωθούν μεταξύ τους σχηματίζοντας μια «γέφυρα» μεταξύ των οπών με αποτέλεσμα να την φράξουν. Φυσικό επόμενο είναι η παύση της ροής των ρευστών ρωγμάτωσης προς το σχηματισμό αλλά και η καταγραφή αυξημένης πίεσης στην επιφάνεια (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται πρόωρα όταν ο όγκος των ρωγματώσεων δεν είναι επαρκής ή/και όταν επικάθεται εντός της ρωγμής μικρότερη από την επιθυμητή ποσότητα πρόσθετων.

(electric submersible pump – ESP)<sup>8</sup> (Εικόνα 3-23), η οποία είναι μια επιμήκης στήλη (tool string) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωτρήσεις με θερμοκρασία έως 218 °C. Η καρδιά του συστήματος είναι η φυγόκεντρη αντλία που είναι εξοπλισμένη με τριβείς από σιλικόνη ή καρβίδιο του βολφραμίου για ενισχυμένη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες (αριστερά). Ο αριθμός των κύκλων της αντλίας ρυθμίζεται ανάλογα με τις προδιαγραφές ολοκλήρωσης της γεώτρησης. Ο κινητήρας φέρει συνδέσμους ξηράς φραγής (metal-to-metal-seals), τα οποία παρέχουν έναν ανθεκτικό στη θερμοκρασία μηχανικό φραγμό (mechanical barrier) στην είσοδο ρευστών (δεξιά) (DeBryijin, et al., 2008).



Εικόνα 3-23. Σύστημα τεχνικής ανύψωσης ρευστών ταμειυτήρα με ηλεκτρική υποβρύχια αντλία (DeBryijin, et al., 2008)

Οι αντλίες ESP επιτρέπουν την παραγωγή από τον ταμειυτήρα σε πιέσεις ανεξάρτητες από αυτές της κεφαλής ή του διαχωριστή, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αποδοτικότητας της εισπίεσης ατμού και στη μείωση του κόστους παραγωγής κατά τουλάχιστον 1,00 USD ανά βαρέλι παραγόμενου πετρελαίου (DeBryijin, et al., 2008).

<sup>8</sup> Οι ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (electrical submersible pumps – ESPs) αποτελούν ένα αποδοτικό και αξιόπιστο σύστημα για τη μέθοδο της τεχνικής ανύψωσης των ρευστών του ταμειυτήρα που είναι κατάλληλο για την ανύψωση μέτριων έως υψηλών όγκων ρευστών από τις γεωτρήσεις παραγωγής. ([http://petrowiki.org/Electrical\\_submersible\\_pumps](http://petrowiki.org/Electrical_submersible_pumps))

### 3.5.2. Εξοπλισμός αξιολόγησης σχηματισμών

Η αξιολόγηση του σχηματισμού αφορά στη μέτρηση και ανάλυση των ιδιοτήτων του σχηματισμού και των ρευστών που περιέχει και γίνεται είτε μέσω εξέτασης των θρυμμάτων που απομακρύνονται από τον σχηματισμό, είτε μέσω χρήσης ειδικών εργαλείων που είτε προσαρμόζονται πάνω στην κατώτερη συνδεσμολογία κατά την όρυξη (πυρηνοληψία, Measurement-While-Drilling/MWD, Logging-While-Drilling/LWD), είτε μεταφέρονται μέσα στη γεώτρηση με χρήση συρματοσχοινου (wireline logging), είτε με τη διατρητική στήλη, μετά την όρυξη της γεώτρησης. Η αξιολόγηση του σχηματισμού δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των αποθεμάτων και της παραγωγικότητας των ρευστών (producibility of fluids) του ταμιευτήρα (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

Η εκτέλεση γεωφυσικών διαγραφιών εντός γεωτρήσεων (well logging), παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πάχος των σχηματισμών και τη λιθολογία τους, το πορώδες, τη διαπερατότητα και τον βαθμό κορεσμού σε νερό ή/και υδρογονάνθρακες του ταμιευτήρα, την κλίση των στρωμάτων και τη θερμοκρασία. Το πάχος των σχηματισμών και η λιθολογία καθορίζονται κανονικά με τη συσχέτιση των γεωφυσικών διαγραφιών με δεδομένα πυρηνοληψίας (coring) της γεώτρησης. Οι πιο χρήσιμες διαγραφίες είναι εκείνες που βασίζονται στις γεωηλεκτρικές μεθόδους (electric logs) της ειδικής αντίστασης (resistivity logging), του φυσικού δυναμικού (spontaneous potential-SP logging), της μέτρησης της ραδιενέργειας και της ακουστικής ταχύτητας (sonic logging), οι οποίες χρησιμοποιούνται συνδυασμένα. Η διαγραφή caliper, η οποία μετρά αλλαγές της διαμέτρου της γεώτρησης, επίσης παρέχει έμμεση πληροφορία για τη λιθολογία. Γενικά, οι μεγαλύτερες διάμετροι σε μια γεώτρηση φανερώνουν την παρουσία λιγότερο συνεκτικών τοιχωμάτων αυτής, τα οποία εύκολα μπορούν να διαβρωθούν κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της (Αλεξόπουλος).

Ο προσδιορισμός του πορώδους βασίζεται σε μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, της ακουστικής ταχύτητας και της ραδιενέργειας. Επιπροσθέτως, ο προσδιορισμός του πορώδους μπορεί να αποκτηθεί από τη διαγραφή πυκνότητας ακτίνων γ (gamma ray logging), διαγραφίας νετρονίου-ακτίνων γ (neutron logging) και διαγραφίας πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (Nuclear Magnetic Resonance-NMR logging). Η διαπερατότητα και ο βαθμός κορεσμού σε νερό και υδρογονάνθρακες παράγονται από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Η κλίση των στρωμάτων και η θερμοκρασία υπολογίζονται από ειδικές αυτόνομες καταγραφές.

Οι συνθήκες που επικρατούν στις γεωτρήσεις HP/HT δυσκολεύουν αρκετά τους επιστήμονες και τους μηχανικούς που σχεδιάζουν και χρησιμοποιούν τον εξοπλισμό που απαιτείται για την αξιολόγηση των σχηματισμών (formation evaluation). Τα πιο ευάλωτα στοιχεία του εξοπλισμού αυτού είναι τα στεγανωτικά και τα ηλεκτρονικά μέρη. Η ανάγκη για τη λήψη πληροφοριών από τον σχηματισμό, προκαλεί την άμεση έκθεση του εξοπλισμού που εκτελεί τις διαγραφίες, στις συνθήκες της γεώτρησης. Ορισμένοι σύγχρονοι αισθητήρες δύνανται να λειτουργήσουν σε πιέσεις έως και 207

MPa (30.000 psi), παρ' όλα αυτά είναι αρκετά ακριβοί και μπορούν να λειτουργήσουν για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Τα ηλεκτρονικά μέρη τοποθετούνται σε ιδιαίτερο και προστατευμένο φυσιγγίο ή περίβλημα (cartridge)<sup>9</sup>. Σε αντίθεση με τη συμβατική ραδιοβολίδα (sonde), το εσωτερικό μέρος των φυσιγγίων δεν εκτίθεται στην εξωτερική πίεση, διότι οι μεγάλες πιέσεις που επικρατούν θα κατέστρεφαν τον εξοπλισμό. Κατά την εκτέλεση διαγραφιών ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός παραμένει σε ατμοσφαιρική πίεση, εντός των φυσιγγίων, η κατασκευή των οποίων πρέπει να ανταπεξέλθει στην αυξημένη πίεση. Σε περίπτωση αστοχίας του φυσιγγίου, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων, τα ηλεκτρονικά θα καταστρέφονταν και το φυσιγγίο θα αλλοιωνόταν σε τέτοιο βαθμό που θα έπρεπε να γίνει αλίευση του (fishing). Η προστασία των ηλεκτρονικών κατά της πίεσης εντός του φυσιγγίου οφείλεται στην κατασκευή του από κράμα τιτανίου.

Σημαντικό ρόλο επίσης διαδραματίζουν και τα στεγανωτικά του φυσιγγίου που πρέπει να είναι ικανά να ανταπεξέλθουν στην μεγάλη πίεση για την προστασία των ηλεκτρονικών μερών. Γι' αυτό το λόγο τοποθετούνται στεγανωτικοί δακτύλιοι (o-rings), σε σημεία ένωσης του φυσιγγίου που καταφέρνουν να απομονώσουν και να προστατέψουν τον εξοπλισμό στο εσωτερικό του. Για να αποφευχθεί η καταστροφή ολόκληρης της στήλης που φέρει τον εξοπλισμό, ο οποίος εκτελεί τις διαγραφίες, στεγανωτικά διαφράγματα τοποθετούνται μεταξύ ανεξάρτητων εργαλείων και μηχανημάτων. Συγκεκριμένα, για να αποφευχθεί η διάρρηξη της διάταξης, ειδικά διαφράγματα που απομονώνουν την πίεση, τοποθετούνται περιμετρικά των διάφορων εργαλείων που δεν είναι ικανά από μόνα τους να αντέξουν τις συνθήκες των γεωτρήσεων HP/HT. Για αυτές τις συνθήκες οι στεγανωτικοί δακτύλιοι κατασκευάζονται από ελαστομερή βιτόν<sup>10</sup> (viton elastomers) που είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε θερμοκρασίες έως και τους 204 °C (400 °F). Σε περίπτωση που η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη τα ελαστομερή αρχίζουν να καταστρέφονται και να χάνουν την ελαστικότητά τους.

Ήδη από το 2008 διατίθενται ηλεκτρονικά συστήματα για τις γεωτρήσεις HP/HT που επιτρέπουν τη συνεχή εκτέλεση διαγραφιών σε θερμοκρασίες μέχρι και τους 177 °C. Η θερμοκρασία εντός του φυσιγγίου είναι το αποτέλεσμα του αθροίσματος της θερμοκρασίας της γεώτρησης και της θερμοκρασίας που παράγεται από τα ηλεκτρονικά συστήματα. Στις περιπτώσεις που αναμένεται μεγάλη θερμοκρασία εντός της γεώτρησης τοποθετείται ειδικό θερμομονωτικό. Αυτό το θερμομονωτικό, ανάλογα με το χρόνο παραμονής της διάταξης εντός της γεώτρησης, μπορεί να παραλάβει θερμοκρασίες έως και τους 260° C. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί ειδικά ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και συνεπώς παράγουν λιγότερη θερμότητα.

---

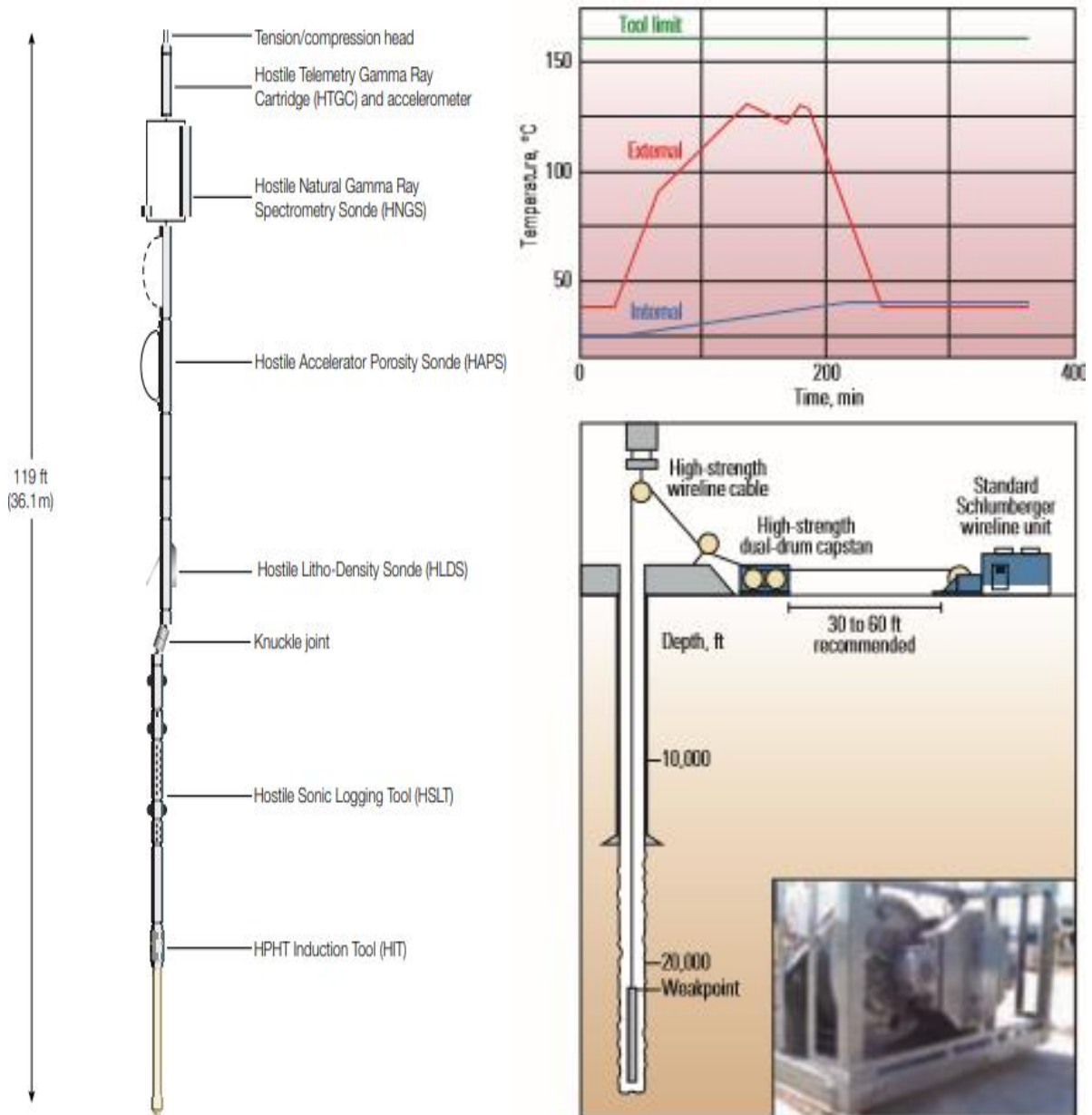
<sup>9</sup> Στη ραδιοβολίδα περιέχονται οι αισθητήρες που εκτελούν τις διαγραφίες, ενώ στο φυσιγγίο περιέχονται τα ηλεκτρονικά μέρη και οι πηγές τροφοδοσίας τους (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

<sup>10</sup> Το βιτόν αποτελεί έναν συνδυασμό συνθετικού καουτσούκ και φθοριούχου πολυμερούς, που συχνά χρησιμοποιείται στην κατασκευή o-rings, της εταιρείας FMK (WIKIPEDIA, 2018).

Στην περίπτωση που οι διατάξεις εκτέλεσης των διαγραφιών είναι προσαρμοσμένες πάνω στη διατρητική, είναι απαραίτητες πολλαπλές ανελκύνσεις και καθέλκυνσεις της ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις, στην περίπτωση που η διάμετρος της γεώτρησης είναι αρκετά μικρή. Στην περίπτωση που οι διαγραφίες εκτελούνται με χρήση συρματόσχοινο, απαιτούνται μεγάλου μήκους και υψηλής αντοχής συρματόσχοινο για την καθέλκυση του σχετικού εξοπλισμού, με τον κίνδυνο όμως το συρματόσχοινο να μπλεχτεί και ο εξοπλισμός να εγκλωβιστεί μέσα στη γεώτρηση. Η διαδικασία αλίευσης σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι αρκετά ακριβή, δύσκολη και χρονοβόρα.

Οι μηχανικοί της Schlumberger δημιούργησαν μία διάταξη, την SlimXtreme (Εικόνα 3-24), η οποία αποτελεί σύστημα εκτέλεσης διαγραφιών και δειγματοληψίας σε γεωτρήσεις HP/HT. Η διάταξη αυτή είναι ικανή να λειτουργήσει μέχρι και σε διαμέτρους 3 ιντσών και σε πιέσεις έως 207 MPa. Επιπλέον, για να αποφευχθεί το πρόβλημα του εγκλωβισμού της, η Schlumberger ανέπτυξε βελτιωμένες τεχνικές καθέλκυσης της διάταξης με τεντωμένα καλώδια και τροχούς ανύψωσης. Το σύστημα επιτρέπει ταχεία καθέλκυση της διάταξης που εκτελεί διαγραφίες, με μεγαλύτερη ικανότητα ανύψωσης, με αποτέλεσμα τη αποφυγή πιθανού εγκλωβισμού. Η διάταξη μπορεί να καθελκυσθεί με ταχύτητες έως και 1.097 m/h (3.600 ft/h) και να μεταδώσει δεδομένα στην επιφάνεια με τη χρήση καλωδίων μήκους έως και 10.970 m (36.000 ft).

Με τη χρήση ειδικού λογισμικού γίνεται η πρόβλεψη της εσωτερικής (μπλε γραμμή) βάσει της μετρούμενης εξωτερικής θερμοκρασίας (κόκκινη γραμμή) (πάνω δεξιά εικόνα). Στη συνέχεια η διάταξη ανελκύεται στην επιφάνεια, γι' αυτό το λόγο παρατηρείται και μείωση της θερμοκρασίας. Σε κάθε περίπτωση η εσωτερική θερμοκρασία της διάταξης παραμένει κάτω από το όριο των 160 °C (πράσινη γραμμή). Αυτές οι προσομοιώσεις είναι απαραίτητες και αρκετά χρήσιμες ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία και να επιβεβαιωθεί η ορθολογική και μη καταστροφική χρήση του εξοπλισμού. Ο κίνδυνος ενσφήνωσης/παγίδευσης της διάταξης αυξάνεται όταν λαμβάνονται δεδομένα από μικρής διαμέτρου και μεγάλου βάθους γεωτρήσεις. Ένα σύστημα ανύψωσης υψηλής αντοχής απεικονίζεται στην κάτω δεξιά εικόνα. Οι τροχοί ανύψωσης αυξάνουν τη δύναμη έλξης που μπορεί να ασκηθεί στα καλώδια, επιτρέποντας την ανέλκυση μεγαλύτερου βάρους και μειώνοντας το ρίσκο εγκλωβισμού της διάταξης στη γεώτρηση.



Εικόνα 3-24. Εξοπλισμός και λογισμικό για εκτέλεση διαγραφιών και δειγματοληψίας σε γεωτρήσεις HP/HT (DeBryjijn, et al., 2008)

Μια ακόμα πολύ σημαντική εργασία με τη χρήση συρματόσχοινων είναι η λήψη δειγμάτων ρευστών από το σχηματισμό. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τη δειγματοληψία, που αφορούν τα ρευστά του ταμειυτήρα, είναι καίριας σημασίας, διότι από αυτές κρίνει η κάθε πετρελαϊκή εταιρία αν θα ολοκληρώσει ή όχι την γεώτρηση, πώς θα τη συνεχίσει, τι εξοπλισμό χρειάζεται και γενικότερα τι βήματα θα ακολουθήσει για την επικερδέστερη εκμετάλλευση (Akkurt, 2007) (Betancourt, 2007). Οι συνθήκες που επικρατούν στις γεωτρήσεις HP/HT δυσκολεύουν τη διαδικασία της δειγματοληψίας, διότι απαιτούνται πολλαπλές ανελκύσεις και καθελκύσεις της διάταξης σε μικρής διαμέτρου γεώτρηση, που σε συνδυασμό με το μεγάλο μήκος των καλωδίων και το αυξημένο βάρος της διάταξης ενισχύουν την πιθανότητα αυτή να κολλήσει. Επιπλέον, τα δείγματα ρευστών του ταμειυτήρα πρέπει

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

να ληφθούν υπό συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν εντός του ταμιευτήρα, ώστε να είναι απολύτως αντιπροσωπευτικά των ρευστών που εμπεριέχονται στο πέτρωμα για να εκτελεστούν στη συνέχεια όλα τα απαραίτητα πειράματα σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά τους.

Οι διαδικασίες της εκτέλεσης διαγραφιών και δειγματοληψίας εμφανίζουν αρκετά υψηλότερο κόστος στις HP/HT γεωτρήσεις από ό,τι στις συμβατικές.

### 3.5.3. Εκτέλεση δοκιμών παραγωγής (well testing)

Τόσο η πυρηνοληψία από τον σχηματισμό, όσο και η εκτέλεση διαγραφιών πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα και όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες, ώστε να αποφασιστεί που τελικά θα εκτελεστούν οι ενδεδειγμένες δοκιμές. Η λήψη πυρήνων από τον σχηματισμό δεν εκτελείται συχνά καθώς κατά τη διαδικασία αυτή ελλοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης αιφνίδιας εισροής των ρευστών του ταμιευτήρα, εξαιτίας της ανάπτυξης των πιέσεων swab and surge. Όσον αφορά στις διαγραφίες, η αντοχή του κοινού συρματόσχοινου και γενικότερα του βασικού εξοπλισμού στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση θερμομόνωσης. Η επιλογή του υλικού μόνωσης και θωράκισης του εξοπλισμού εξαρτάται από το βάθος, την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης, την πίεση και τη θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης, την παρουσία H<sub>2</sub>S και το χρόνο που απαιτείται για να εκτελεστούν οι μετρήσεις.

Όταν ολοκληρωθούν οι διαδικασίες της πυρηνοληψίας και των διαγραφιών και έχει εντοπιστεί η παρουσία υδρογονανθράκων, απαιτούνται ειδικές δοκιμές παραγωγής (well tests) ώστε να προσδιοριστούν παράμετροι, όπως το μέγεθος του ταμιευτήρα και η διαπερατότητά του και να ληφθεί δείγμα των ρευστών του. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιείται δοκιμή παραγωγής (drill stem test – DST) (Vella, 1992). Μέσω της δοκιμής παραγωγής λαμβάνονται δεδομένα σχετικά με την πίεση, την διαπερατότητα και την ικανότητα παραγωγής του ταμιευτήρα. Η δοκιμή παραγωγής DST γίνεται μόνο στην αρχή, αμέσως μετά την άφιξη στο βάθος ταμιευτήρα και αποτελεί ένα από τα βασικά εργαλεία αξιολόγησης του σχηματισμού και το αποτέλεσμα της θα καθορίσει εάν το κοίτασμα είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής παραγωγής DST, η γεώτρηση, υπό φυσιολογικές συνθήκες είναι κλειστή, με τη χρήση κατάντη βαλβίδας (downhole valve) και η ροή ελέγχεται στην επιφάνεια με τη χρήση βαλβίδας στραγγαλισμού. Περίοδοι κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης και κλεισίματος της γεώτρησης επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων, όπως ο ρυθμός ροής των ρευστών (flow rate) και οι μεταβολές της πίεσης.

Ο εξοπλισμός ελέγχου της γεώτρησης που χρησιμοποιείται κατά την όρυξη, έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ικανός να διαχειριστεί τα ρευστά του ταμιευτήρα για μικρό χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μιας δοκιμής ο εξοπλισμός στην επιφάνεια πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει σε μεγαλύτερες περιόδους ροής. Όπου



είναι δυνατό, τα ελαστομερή στεγανωτικά αντικαθίστανται από μεταλλικά, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να μην αποτελεί πλέον περιορισμό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Τόσο ο επιφανειακός όσο και ο υποθαλάσσιος εξοπλισμός παρακολουθούνται με τη χρήση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας, οι οποίοι στη συνέχεια αναφέρουν σε σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, ποιος αισθητήρας θέτει σε λειτουργία το κλείσιμο έκτακτου κινδύνου (emergency shutdown – ESD) εάν ξεπεραστούν τα όρια.

Επιπλέον, ο αριθμός των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των δοκιμών εντός της γεώτρησης, αλλά και οι εργασίες που εκτελούνται στο χώρο του γεωτρύπανου, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένος.

Εξαιτίας των ακραίων συνθηκών που επικρατούν, ο σχεδιασμός εκτέλεσης μιας δοκιμής παραγωγής σε γεωτρήσεις HP/HT και η επιλογή του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να γίνουν λεπτομερώς και το προσωπικό που θα την εκτελέσει να είναι άρτια εκπαιδευμένο. Με πληροφορίες που προέρχονται από υφιστάμενες γεωτρήσεις (offsets), η πρώτη αναμενόμενη διαδικασία είναι η εύρεση των μέγιστων τιμών σε κάποιες από τις παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία στην κεφαλή της γεώτρησης, οι πιέσεις και θερμοκρασίες στον πυθμένα της γεώτρησης και ο ρυθμός ροής. Οι μέγιστες αυτές τιμές χρησιμοποιούνται για την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού με τις απαραίτητες λειτουργικές ικανότητες. Εάν κατά τη διάρκεια της δοκιμής ξεπεραστούν αυτές οι μέγιστες τιμές σχεδιασμού, τότε η δοκιμή θα πρέπει να διακοπεί ή ο σχεδιασμός να επαναπροσδιοριστεί. Με τον προσδιορισμό των μέγιστων τιμών, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να υπάρξει για τη συλλογή δεδομένων κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Για παράδειγμα, η δοκιμή θα έχει μία ελάχιστη περίοδο ροής, και η διάρκεια αυτής της περιόδου θα επηρεάσει με τη σειρά της τη θερμοκρασία του εξοπλισμού στον θαλάσσιο πυθμένα.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι απαιτήσεις ασφαλείας για κάθε τμήμα του εξοπλισμού – για παράδειγμα, οι βαλβίδες εκτόνωσης της πίεσης (pressure relief valves) και οι αισθητήρες παρακολούθησης θερμοκρασίας (temperature monitors). Επειδή όμως όλα αυτά τα εξαρτήματα θεωρούνται μέρος του συστήματος εκτέλεσης των δοκιμών, καθίσταται δυνατός ο αποκλεισμός οποιασδήποτε πλεονάζουσας συσκευής ελέγχου ασφαλείας.

Όταν, εν τέλει, προσδιοριστεί το σύνολο του κατάλληλου εξοπλισμού, σχεδιάζεται ένα διάγραμμα όλων των σωληνώσεων και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ripping and instrumentation diagram), στο οποίο προσδιορίζονται όλες οι θέσεις που καταλαμβάνει ο βασικός εξοπλισμός, οι σωληνώσεις και οι διατάξεις ασφαλείας, καθώς επίσης και οι παράμετροι λειτουργίας τους. Παράλληλα, στο γενικό διάγραμμα διάταξης του γεωτρύπανου (rig layout diagram) επισημαίνονται οι θέσεις του βασικού εξοπλισμού για την εκτέλεση δοκιμών (key well test equipment), διασφαλίζοντας έτσι ότι διασυνδέεται κατάλληλα με τα υφιστάμενα συστήματα έκτακτου ανάγκης του γεωτρύπανου και ότι και ότι προσαρμόζονται στον διαθέσιμο χώρο. Εκτελούνται επίσης έλεγχοι ασφαλείας και αναλύσεις, σύμφωνα με τις σχετικές συστάσεις του API (API PR 14C, 2007). Σκοπός αυτών των συστάσεων είναι η προστασία του προσωπικού στον χώρο του γεωτρύπανου, καθώς και η

προστασία του περιβάλλοντος και των εγκαταστάσεων από τυχόν κινδύνους που ενδέχεται να υπάρξουν κατά τη διαδικασία όρυξης της γεώτρησης και παραγωγής. Ειδικότερα, η ανάλυση ασφαλείας (safety analysis) στοχεύει στην έγκαιρη αναγνώριση ανεπιθύμητων συμβάντων και στην άμεση αντιμετώπισή τους, μέσω προτεινόμενων διαδικασιών.

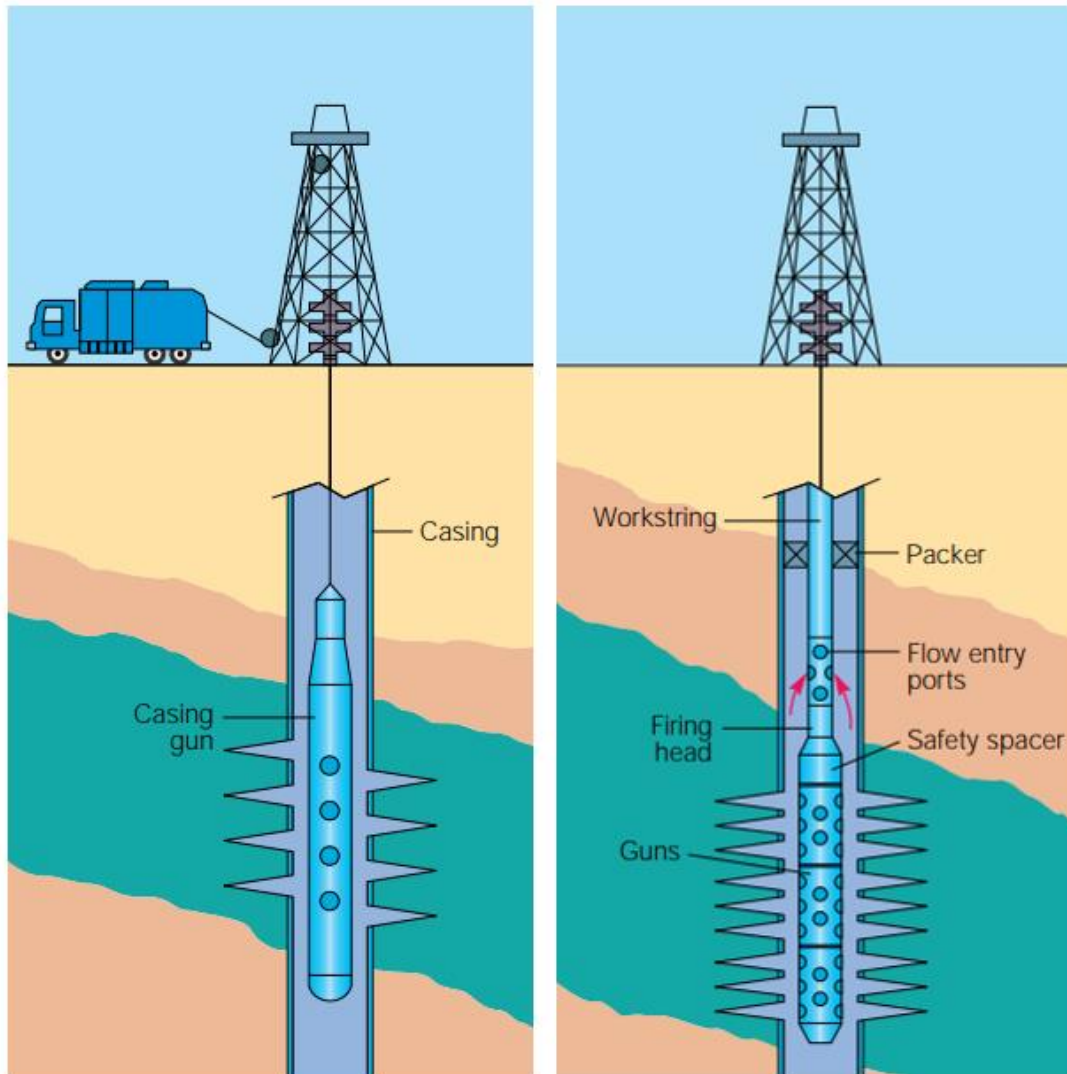
Βασικές λειτουργίες της εκτέλεσης δοκιμών όπως, η περιμετρική διατρύπη ση της γεώτρησης (perforating the well), η αλλαγή των διατάξεων στραγγαλισμού (changing chokes) και ο έλεγχος της πίεσης όλου του εξοπλισμού, συμπεριλαμβάνονται στο API PR 14C και αναφέρονται ως παγιωμένες διαδικασίες (established procedures). Εκπονούνται επίσης σχέδια έκτακτης ανάγκης (contingency plans), για την έγκαιρη αντιμετώπιση μίας γκάμας πιθανών ατυχημάτων, όπως: διαρροές ή αστοχίες στον πυθμένα της γεώτρησης (downhole leaks or failures), διαρροές στην επιφάνεια (surface leaks), επιδείνωση του καιρού ή των συνθηκών της θάλασσας και εμφάνιση υδριτών στην επιφάνεια (Davidson, Prise, & French, 1993).

Ο εξοπλισμός εκτέλεσης δοκιμών και οι διαδικασίες που εκτελούνται μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

### **1. Εξοπλισμός στον πυθμένα της γεώτρησης (downhole equipment)**

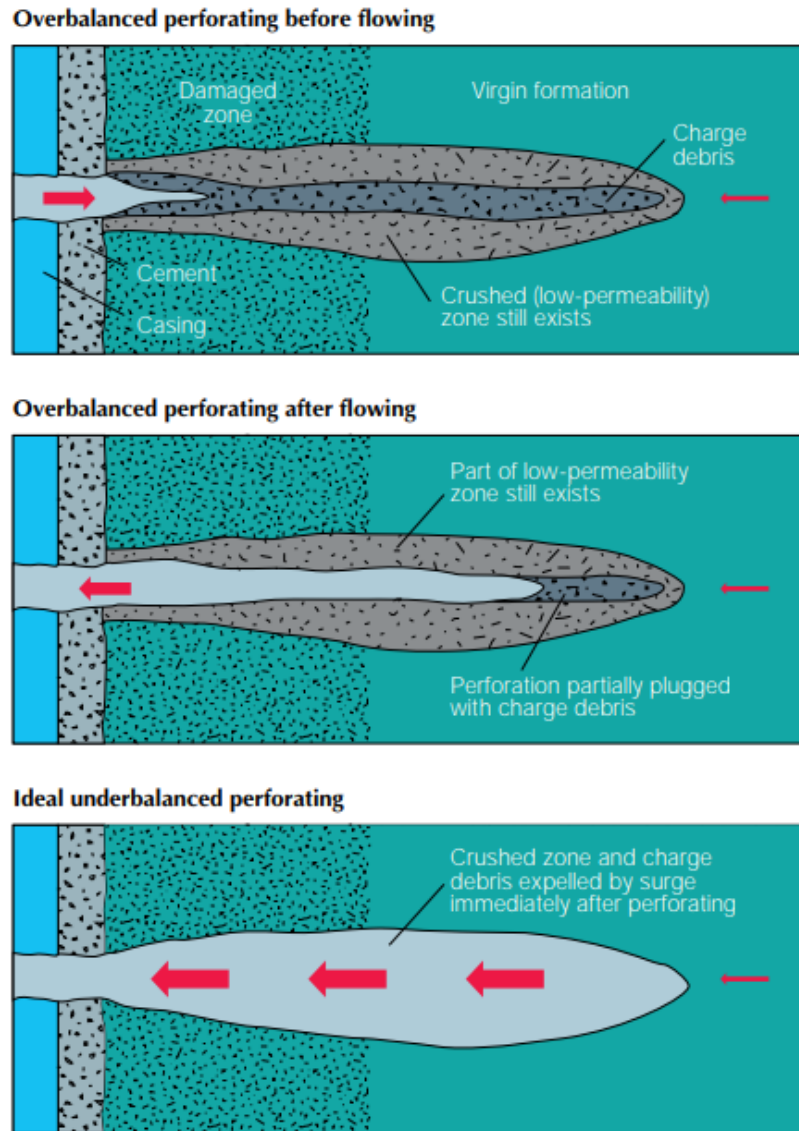
Η απομόνωση του σχηματισμού ενδιαφέροντος απαιτεί τη χρήση ειδικού διαχωριστικού παρεμβύσματος (packer). Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μίας δοκιμής παραγωγής σε μια γεώτρηση HP/HT, οι διαφορικές πιέσεις που ασκούνται στο packer ενδέχεται να υπερβούν τα 10.000 psi. Γι' αυτό το λόγο, επιλέγονται μόνιμα (permanent) packers, έναντι των ανακτήσιμων (retrievable) που επιλέγονται συνήθως στις περιπτώσεις εκτέλεσης δοκιμών σε χαμηλότερη πίεση. Με τη χρήση συρματοσχοίνου (wireline) ή - σε μερικές περιπτώσεις - με τη χρήση της διατρητικής στήλης, το packer κατέρχεται και τοποθετείται μαζί με ειδική διάταξη στεγανοποίησης (seal bore and seal assembly) εντός της γεώτρησης. Το μήκος της διάταξης στεγανοποίησης είναι περίπου 40 ft ώστε να επιτρέπει τη θερμική διαστολή της στήλης δοκιμής (test string), κατά την κυκλοφορία των θερμών ρευστών του ταμειυτήρα.

Η διατρύπηση του σχηματισμού με μηχανισμούς πυροδότησης που αναρτώνται σε συρματοσχοίνο (wireline perforating guns), αποφεύγεται στις γεωτρήσεις HP/HT κατά την εκτέλεση δοκιμών, και προτιμάται η μέθοδος tubing-conveyed perforating (TCP) (Εικόνα 3-24). Η μέθοδος TCP επιτρέπει τη διατρύπηση του ταμειυτήρα υπό συνθήκες υποπίεσης πυθμένα (underbalanced) και τη ροή των ρευστών του στη διάταξη εκτέλεσης της δοκιμής (Cosad, 1992). Ο λόγος που προτιμάται η έναυση των όπλων (guns) σε συνθήκες υποπίεσης είναι ότι επιτυγχάνεται δημιουργία καθαρότερων διατρυπήσεων στο σχηματισμό και συνεπώς μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι με την επίτευξη επαρκούς υποπίεσης, τα θραύσματα από την έκρηξη βιαίως απωθούνται από το διατρυπημένο σχηματισμό προς τη γεώτρηση, επιτρέποντας έτσι την ελεύθερη και ανεμπόδιση ροή των υδρογονανθράκων (Εικόνα 3-25).



Εικόνα 3-25. Μέθοδοι διατρύπησης του σχηματισμού (Cosad, 1992)

Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η συμβατική μέθοδος through-casing perforation, όπου οι μηχανισμοί πυροδότησης αναρτώνται σε συρματόσχοινο, ενώ στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η μέθοδος TCP.



Εικόνα 3-26. Συνθήκες μετά την διατρύπηση του σχηματισμού, υπό συνθήκες υπερπίεσης (overbalance) και υποπίεσης (underbalance) (Cosad, 1992)

Στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατάσταση αμέσως μετά την έναυση των εκρηκτικών, υπό συνθήκες υπερπίεσης, όπου παρατηρείται πληθώρα θραυσμάτων, αλλά και μία ζώνη χαμηλής διαπερατότητας, γύρω από την οπή. Στην μεσαία εικόνα, πάλι σε συνθήκες υπερπίεσης, έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας και καθαρισμού των διατρυπήσεων, ωστόσο εξακολουθεί να παραμένει η ζώνη χαμηλής διαπερατότητας και ένα μέρος των θραυσμάτων τα οποία εμποδίζουν την ροή από τον ταμιευτήρα. Στην κάτω εικόνα, σε συνθήκες υποπίεσης, παρατηρείται ότι υπάρχει ανεμπόδιστη ροή των υδρογονανθράκων, χωρίς να απαιτείται ο καθαρισμός των διατρυπήσεων, αφού λόγω της υποπίεσης έχουν απομακρυνθεί τα θραύσματα και δεν υπάρχει ζώνη χαμηλής περατότητας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μηχανισμοί διατρύπησης στη μέθοδο TCP κατέρχονται μαζί με τη διάταξη εκτέλεσης της δοκιμής ως τμήμα αυτής, και δεν

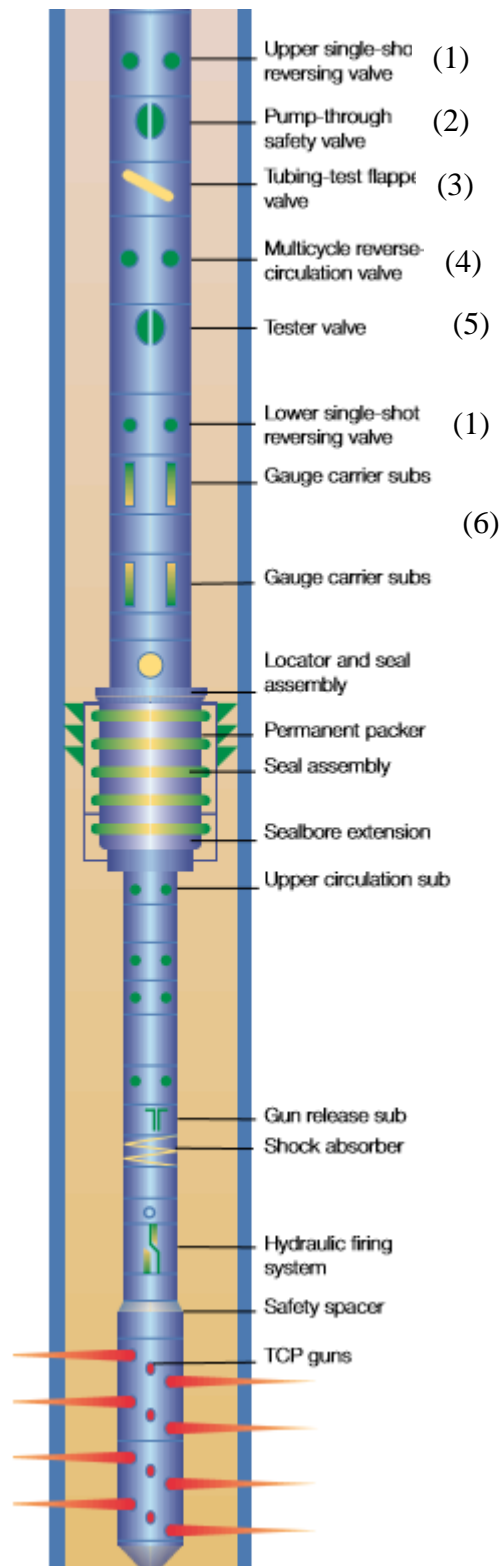
αναρτάται κάτω από το packer. Έτσι, αφενός τα εκρηκτικά παραμένουν όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο στις συνθήκες του πυθμένα και αφετέρου οι μηχανισμοί πυροδότησης μπορούν να ανακτηθούν σε περίπτωση αποτυχίας. Η χρήση τους ενδείκνυται στις κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις.

Επειδή ο μηχανισμός διατρύπησης (gun) ενδέχεται να παραμείνει αρκετή ώρα εντός της γεώτρησης, πριν πυροδοτηθεί, χρησιμοποιούνται εκρηκτικά υψηλής θερμοκρασίας. Τα πιο συχνώς χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας είναι τα HNS και τα PYX, τα οποία μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι και τους 238 °C (460 °F). Ωστόσο, με την έκθεσή τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε υψηλές θερμοκρασίες η αντοχή τους μειώνεται. Στην πλειοψηφία των γεωτρήσεων HP/HT, οι μηχανισμοί διατρύπησης της μεθόδου TCP πυροδοτούνται με χρονική καθυστέρηση μέσω ειδικού πυροκροτητή (tubing-pressure firing mechanism). Στη διάταξη περιλαμβάνεται συνήθως κι ένα δευτερεύον σύστημα πυροδότησης, σε περίπτωση που το πρωτεύον σύστημα αποτύχει. Τέλος, πρόβλημα στα εκρηκτικά μπορεί να προκαλέσει η μεγάλη πίεση, καθώς ενδέχεται επιτρέψει την εισροή ρευστών στο εσωτερικό τους και εν τέλει την καταστροφή τους.

Μπορεί μεν ο αριθμός των εργαλείων που απαιτούνται στον πυθμένα της γεώτρησης να έχει ελαχιστοποιηθεί, ωστόσο η εκτέλεση μιας δοκιμής παραγωγής σε μια γεώτρηση HP/HT απαιτεί κάποια εξαρτήματα (βαλβίδες αναστροφής, βαλβίδα ασφαλείας, κ.τ.λ.) ώστε να απομονωθεί ο σχηματισμός ενδιαφέροντος, να κλείσει η γεώτρηση κοντά στον πυθμένα (downhole shut-in), να γίνει έλεγχος πίεσης στη στήλη δοκιμής (pressure testing of the string), να γίνει ανάστροφη κυκλοφορία των ρευστών για την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων από τη στήλη πριν την ανέλκυσή της και να καταγραφούν οι αλλαγές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης (downhole measurement of pressure changes) (Εικόνα 3-27). Σε κάποιες περιπτώσεις, για να απλοποιηθεί η διαδικασία της δοκιμής, η γεώτρηση κλείνει στην επιφάνεια και όχι στον πυθμένα.

Στην Εικόνα 3-27 η διάταξη περιλαμβάνει:

1. Δύο μονοσταθείς βαλβίδες αναστροφής (ανώτερη και κατώτερη) (upper and lower single-shot reversing valve) (1), οι οποίες ανοίγουν με τη χρήση της πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης (annular pressure), ώστε να υπάρξει επικοινωνία του δακτυλίου με τους σωλήνες παραγωγής και να επιτραπεί η ανάστροφη κυκλοφορία. Όταν ανοίξουν, δεν μπορούν να κλείσουν.
2. Βαλβίδα ασφαλείας για άντληση (pump-through safety valve) (2), η οποία κλείνει όταν η πίεση στον δακτύλιο έχει προσεγγίσει μια προκαθορισμένη τιμή. Είναι μονοσταθής (single-shot) και χρησιμοποιείται μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις.
3. Βαλβίδα με περύγιο για τη δοκιμή πίεσης του σωλήνα παραγωγής (tubing-test flapper valve) (3), η οποία παράλληλα με τη δοκιμή σε πίεση του σωλήνα παραγωγής και του λοιπού εξοπλισμού επιτρέπει τη ανοδική ροή των ρευστών. Το περύγιό της παραμένει μόνιμα ανοικτό κατά τη διάρκεια της δοκιμής παραγωγής με τη χρήση της πίεσης του δακτυλίου.



Εικόνα 3-27. Στήλη εκτέλεσης δοκιμής παραγωγής στον πυθμένα της γεώτρησης (MacAndrew, et al., 1993)

4. Βαλβίδα ανάστροφης κυκλοφορίας πολλαπλών κύκλων (multicycle reverse-circulation valve) (4). Σε ορισμένες περιπτώσεις περιλαμβάνεται στη στήλη μια επανακλειόμενη (recloseable) βαλβίδα ανακυκλοφορίας (recirculating), η οποία ανοίγει με την περιοδική επανάληψη της πίεσης στον σωλήνα παραγωγής (cycling

- tubing pressure) κατά ένα προκαθορισμένο αριθμό κύκλων και κλείνει με την κυκλοφορία μέσω αυτής με μια προκαθορισμένη παροχή (preset rate).
5. Βαλβίδα δοκιμής (tester valve) (5). Η πίεση στον δακτύλιο ανοίγει και κλείνει αυτήν τη σφαιρική βαλβίδα (ball valve), επιτρέποντας τη ροή και την αύξηση της πίεσης κατά κύκλους κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η βαλβίδα αυτή λειτουργεί επίσης και ως ένας επιπρόσθετος μηχανισμός έκτακτης ανάγκης για την ανασχεση της ροής.
  6. Πιεσόμετρα εγκατεστημένα πάνω σε κατάλληλες μούφες σύνδεσης (pressure gauges in carrier subs) (6), η αξιοπιστία των οποίων σε υψηλές θερμοκρασίες εγείρει ανησυχίες, καθώς στους 350 °F ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λειτουργεί στα όρια των αντοχών του. Για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός ηλεκτρονικού εξοπλισμού υψηλής ακρίβειας και μηχανικών μετρητών χαμηλότερης ακρίβειας που αντέχει ως τους 500 °F.

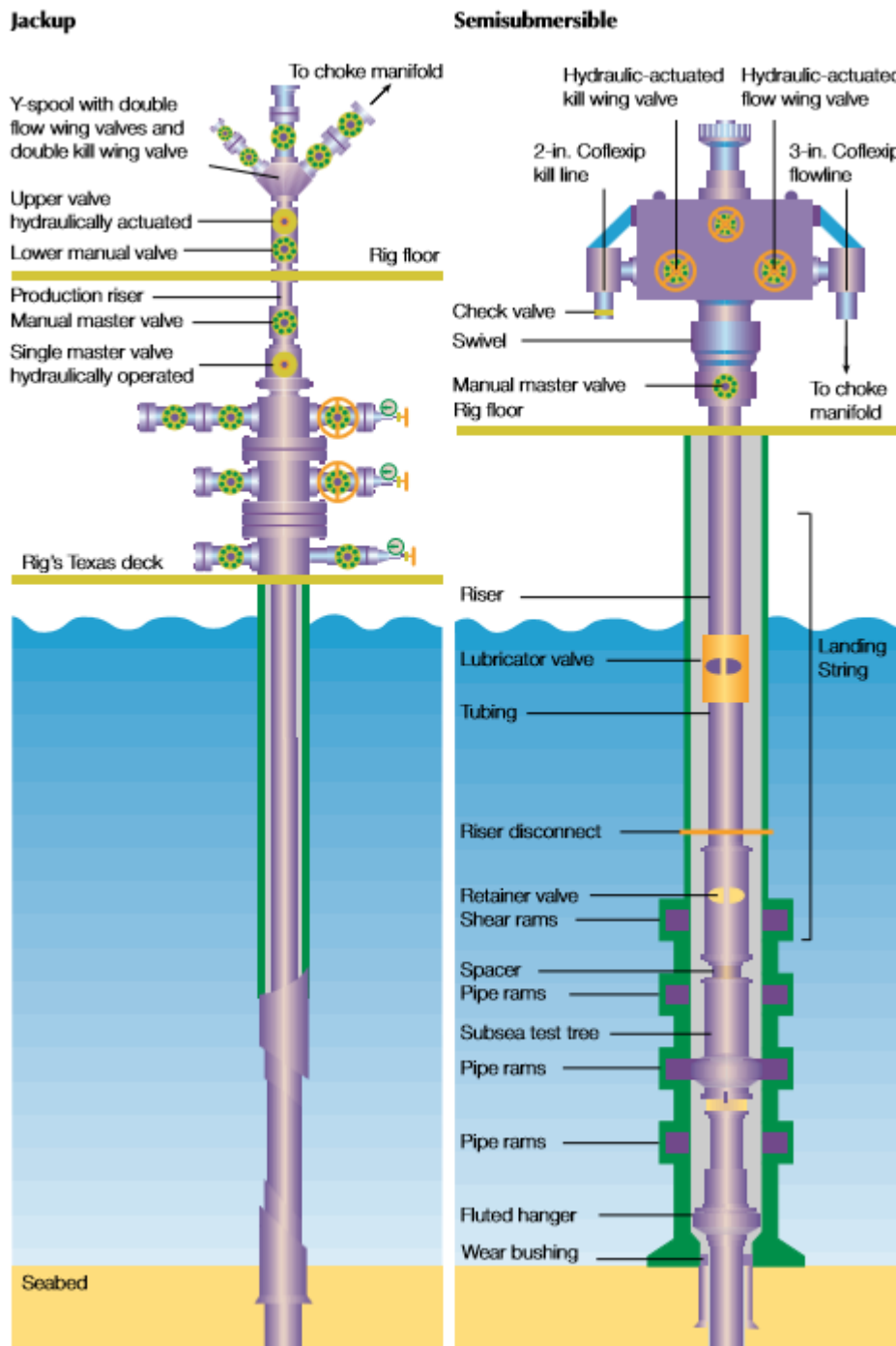
Ακολουθούν το μόνιμο διαχωριστικό παρέμβυσμα (permanent packer), η διάταξη στεγανοποίησης (seal assembly) και στο κάτω μέρος της στήλης βρίσκονται οι μηχανισμοί διατρύπησης (guns) TCP.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα εργαλεία που εκτελούν τις δοκιμές λειτουργούν με τη χρήση της πίεσης του δακτυλίου, συνεπώς η κατάσταση του ρευστού στον δακτύλιο, συνήθως ρευστά διάτρησης, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Ρευστά μεγάλης πυκνότητας και αυξημένης περιεκτικότητας σε στερεά σωματίδια ενδέχεται να φράξουν τις διόδους των εργαλείων, με αποτέλεσμα την μείωση της αξιοπιστίας τους. Τα στερεά σωματίδια μπορούν επίσης να καταβυθιστούν προκαλώντας, ενδεχομένως, την παγίδευση (sticking) της στήλης δοκιμής, παρά τις επανειλημμένες ανακυκλοφορίες που προηγούνται. Οι επιπτώσεις των ρευστών διάτρησης μεγάλης πυκνότητας, με βάση το νερό, υπό στατικές συνθήκες σε γεωτρήσεις με υψηλή θερμοκρασία έχουν εξεταστεί εκτεταμένα στο εργαστήριο, όπου αναπαρίστανται οι συνθήκες που επικρατούν εντός της γεώτρησης και ελέγχεται η απόδοση και η αντοχή των εργαλείων της δοκιμής. Αυτό επέφερε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση του εξοπλισμού δοκιμών και μείωση των αστοχιών τους στον πυθμένα της γεώτρησης. Σε κάποιες περιπτώσεις τα ρευστά που κυκλοφορούν στον δακτύλιο αντικαθίστανται από υψηλής πυκνότητας αλμυρό νερό (brine) χωρίς την παρουσία στερεών, κάτι που ωστόσο αυξάνει αρκετά το κόστος εκτέλεσης της δοκιμής (MacAndrew, et al., 1993).

## **2. Υποθαλάσσια συστήματα (subsea systems)**

Όπως η όρυξη, έτσι και η εκτέλεση δοκιμών είναι γενικά ευκολότερη στις αυτο-ανυψούμενες θαλάσσιες εξέδρες (jackup) από ό,τι στις ημιβυθιζόμενες εξέδρες (semisubmersible). Σε μια εξέδρα jackup, οι σωληνώσεις που οδηγούν στην επιφάνεια (piping to surface) είναι μόνιμες και οι βαλβίδες ελέγχου (control valves) είναι τοποθετημένες στην πλατφόρμα. Σε μια ημιπλωτή εξέδρα, η συνδεσμολογία εκτέλεσης των δοκιμών (test tree) είναι υποθαλάσσια και τοποθετείται πάνω στον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας στον πυθμένα της θάλασσας, ώστε να επιτρέπει την άμεση αποσύνδεση των σωλήνων των δοκιμών (test tubing) κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Πάνω από τη συνδεσμολογία, βρίσκεται το riser που καταλήγει στην

εξέδρα και ένας συμβατικός μηχανισμός αποσύνδεσης του riser (conventional riser disconnect mechanism). Οι αγωγοί στραγγαλισμού και υψηλής πίεσης (choke and kill lines) είναι εύκαμπτοι ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν στον κυματισμό της θάλασσας (Εικόνα 3-28).



Εικόνα 3-28. Σύγκριση υποθαλάσσιων και επιφανειακών συστημάτων για αυτοανυψούμενες (jackup) και ημιβυθιζόμενες εξέδρες (semi-submersible) (MacAndrew, et al., 1993)

Στις εξέδρες jackup η συνδεσμολογία εκτέλεσης δοκιμών (test tree) βρίσκεται στο επίπεδο του καταστρώματος. Αντί για μια προσωρινή συνδεσμολογία εκτέλεσης δοκιμών, χρησιμοποιείται κατά προτίμηση μόνιμου τύπου. Ο αντικρηκτικός



μηχανισμός παλαιότερα αφαιρούνταν για την εκτέλεση μιας δοκιμής, ωστόσο με την τρέχουσα τεχνολογία μπορεί να παραμείνει στη θέση του και να τοποθετηθεί κάτω από αυτόν μία βαλβίδα ασφαλείας (sub surface safety valve, SSSV).

Όσον αφορά στις ημιβυθιζόμενες εξέδρες, η υποθαλάσσια συνδεσμολογία εκτέλεσης δοκιμών (subsea test tree – SSTT) περιλαμβάνει δύο βαλβίδες ελέγχους (a flapper valve and a control valve) που λειτουργούν μαζί. Εάν το γεωτρήσιμο πρέπει να μετακινηθεί οι βαλβίδες αυτές μπορούν να κλείσουν με υδραυλικό χειρισμό (hydraulic control) από την εξέδρα και ένα υδραυλικό κλείστρο (hydraulic latch) πάνω από τις βαλβίδες ανοίγει για την αποσύνδεση της υπερκείμενης στήλης. Το βάρος του τμήματος της στήλης που παραμένει μέσα στη γεώτρηση φέρεται από κατάλληλο αναρτήρα (fluted hanger) κάτω από τις βαλβίδες ελέγχου. Τότε μπορεί να γίνει η αποσύνδεση του riser με το ανώτερο τμήμα της στήλης δοκιμής να παραμείνει εντός του.

Σε όλες τις δοκιμές που γίνονται σε γεωτρήσεις HP/HT η στήλη δοκιμών (landing string) περιλαμβάνει ειδική βαλβίδα συγκράτησης (retainer valve), η οποία δεν επιτρέπει τη διαφυγή υδρογονανθράκων που βρίσκονται στο άνω τμήμα της στήλης και τη ρύπανση της θάλασσας (MacAndrew, και συν., 1993).

### **3. Εξοπλισμός επιφανείας (surface equipment)**

Σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής, πρέπει να είναι εφικτό το κλείσιμο της γεώτρησης (well shut in). Παραδοσιακά, αυτό γίνεται μέσω της βαλβίδας στραγγαλισμού πολλαπλών διόδων (choke manifold valve). Επίσης, πάνω στη βαλβίδα του αγωγού ροής (flowline valve) (στην κεφαλή της γεώτρησης ή το Christmas tree) προσαρμόζεται ένας υδραυλικός ενεργοποιητής (hydraulic actuator) και μεταξύ της κεφαλής (flowhead) και του κατανεμητήρα στραγγαλισμού (choke manifold) εγκαθίσταται μια υδραυλική βαλβίδα απομόνωσης (hydraulic isolation valve). Επιπροσθέτως, μια βαλβίδα κλεισίματος (shut-in valve) που βρίσκεται εγκατεστημένη στην υποθαλάσσια συνδεσμολογία ασφαλείας (subsea safety tree) συνδέεται με τον πίνακα ελέγχου του συστήματος έκτακτης διακοπής (emergency shutdown – ESD panel).

Στην καρδιά του συστήματος ελέγχου των πιέσεων βρίσκεται ο κατανεμητήρας στραγγαλισμού (choke manifold). Αν και είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο κατανεμητήρα στραγγαλισμού του συστήματος όρυξης (drilling choke), έχουν την ίδια λειτουργία που είναι να μειώνουν την πίεση των ρευστών, σε περίπτωση αιφνίδιας εισροής, συνήθως κάτω από τα 1.000 psi.

Ο σχηματισμός υδριτών είναι ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που εμφανίζεται κατά την εκτέλεση δοκιμών, ιδιαίτερα κατά την πρώτη φάση εκτέλεσης της δοκιμής, όταν ακόμα η γεώτρηση δεν έχει θερμανθεί επαρκώς από την ροή των ρευστών του σχηματισμού. Για να αποφευχθεί το φράξιμο της γραμμής στραγγαλισμού, στα ρευστά, προτού φτάσουν στη βαλβίδα στραγγαλισμού, εισπιέζεται μεθανόλη ή γλυκόλη. Επιπροσθέτως, ένας εναλλάκτης θερμότητας θερμαίνει το ρευστό κατάντη της βαλβίδας στραγγαλισμού, ώστε να αποτραπεί η πτώση θερμοκρασίας και η δημιουργία του κατάλληλου περιβάλλοντος για την εμφάνιση υδριτών. Η θέρμανση

των ρευστών του ταμιευτήρα βοηθάει επίσης και στο διαχωρισμό τους. Συνεπώς, στις γεωτρήσεις HP/HT, οι συμβατικές τεχνικές διαχωρισμού και δειγματοληψίας των ρευστών είναι επαρκείς (MacAndrew, και συν., 1993).

### 3.6. Ειδικά προβλήματα των γεωτρήσεων HP/HT που σχετίζονται με την παρουσία όξινου αερίου (sour gas)

Η εποχή των επιφανειακών και εύκολα εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων αερίου είναι στο τέλος της και πλέον η έρευνα και η παραγωγή προχωράει σε πιο βαθιά και όξινα κοιτάσματα. Η παρουσία υδρόθειου ( $H_2S$ ) και διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) λειτουργεί οξειδωτικά και καταστροφικά στον εξοπλισμό. Η οξείδωση που προκαλείται από το υδρόθειο έχει ως αποτέλεσμα ο εξοπλισμός να καθίσταται περισσότερο εύθραυστος εξαιτίας της παρουσίας υδρογόνου (hydrogen embrittlement). Τα σχετικά φαινόμενα είναι γνωστά και ως sulphide stress cracking (SSC) (ρωγμές λόγω θείου χωρίς προειδοποίηση). Το φαινόμενο SSC συνήθως καθυστερεί, αλλά εκδηλώνεται απότομα χωρίς προειδοποίηση. Παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνισή του είναι: η πίεση που προκαλείται από την παρουσία υδρόθειου, η υψηλή θερμοκρασία, το pH, η παρουσία διοξειδίου του άνθρακα, η παρουσία χλωριούχων ουσιών κ.ά. (Skeels, 2014).

Σε συνδυασμό με τις συνθήκες HP/HT, είναι απαραίτητη η προσεκτική επιλογή των μηχανημάτων κατά τον σχεδιασμό της γεώτρησης, ώστε να εξασφαλιστεί η αποφυγή του φαινομένου SSC και η ασφάλεια και η αποδοτικότητα της γεώτρησης. Ο σχεδιασμός αυτός πρέπει να περιλαμβάνει ειδικά μηχανήματα και εργαλεία που συμβάλλουν στην όρυξη και ολοκλήρωση της γεώτρησης, όπως είναι η κεφαλή, η σωλήνωση, τα παρεμβύσματα και οι σύνδεσμοι των σωληνώσεων, καθώς και ειδικά συστήματα που εκτελούν τις διαγραφές και την πυρηνοληψία, ικανά να αντέξουν σε μακροχρόνια έκθεση σε όξινο περιβάλλον (Mubashir, et al., 2017).

#### 3.6.1. Σωλήνωση

Εργαστηριακές δοκιμές συμπέραναν ότι η συμβατική σωλήνωση μίας γεώτρησης είναι ανεπαρκής, ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει σε περιβάλλοντα υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών με παρουσία όξινου αερίου. Ειδικότερα, απαιτείται ειδικού τύπου σωλήνωση, ικανή να αντέξει την παρουσία υδρόθειου και να μην ρωγματοωθεί εξαιτίας της διάβρωσής της.

Για την κατασκευή τέτοιου τύπου σωληνώσεων, απαιτείται ειδική θερμική επεξεργασία και συγκεκριμένου τύπου κράματα, τα οποία καθιστούν την σωλήνωση ανθεκτική στην πίεση, τη θερμοκρασία και την οξείδωση. Σύμφωνα με τους

κανονισμούς API σε τέτοια περιβάλλοντα πρέπει να χρησιμοποιούνται σωληνώσεις τύπου T95 ή L80 με χημική σύνθεση AISI 4130. Αυτή η χημική σύνθεση αφορά κράματα χάλυβα με προσθήκη χρωμίου και μαγνησίου για αυξημένη ανθεκτικότητα (AZoM, 2012). Ωστόσο, η θερμική επεξεργασία περιορίζει το πάχος της σωλήνωσης, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο λιγότερο αποδοτικό θα είναι το αποτέλεσμα της επεξεργασίας (Tuttle, 1975).

### 3.6.2. Σύνδεσμοι σωληνώσεων – Παρεμβύσματα

Ομοίως με τα στελέχη της σωλήνωσης οι ίδιες συνθήκες εφαρμόζονται και για τους συνδέσμους των σωληνώσεων. Συγκεκριμένα, για να μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στις μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες, το πάχος των τοιχωμάτων τους πρέπει να αυξηθεί και πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες κατηγορίες χάλυβα. Ωστόσο, οι ορισμένες από τις πιο ανθεκτικές κατηγορίες χάλυβα δεν είναι επίσης ανθεκτικές στην οξείδωση. Η πιο συχνά χρησιμοποιημένη κατηγορία χάλυβα στις σωληνώσεις και τους συνδέσμους στις γεωτρήσεις HP/HT είναι η T95, η C110 και η L80. Η κατηγορία C110 είναι ανθεκτικότερη στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, η L80 είναι ανθεκτικότερη σε αρκετά όξινα περιβάλλοντα και η T95 αποτελεί μία μέση λύση (Continental Alloys & Services, 2018).

Όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή υλικών που είναι ανθεκτικά στην οξείδωση απαιτούν ειδικού τύπου θερμική κατεργασία, κάτι που περιορίζει το πάχος τους. Συνεπώς, η βέλτιστη λύση είναι η ακριβής εύρεση του πάχους των εξαρτημάτων ώστε να μπορούν να υποστούν την θερμική επεξεργασία που θα τους προσδώσει επαρκή αντίσταση στο όξινο περιβάλλον.

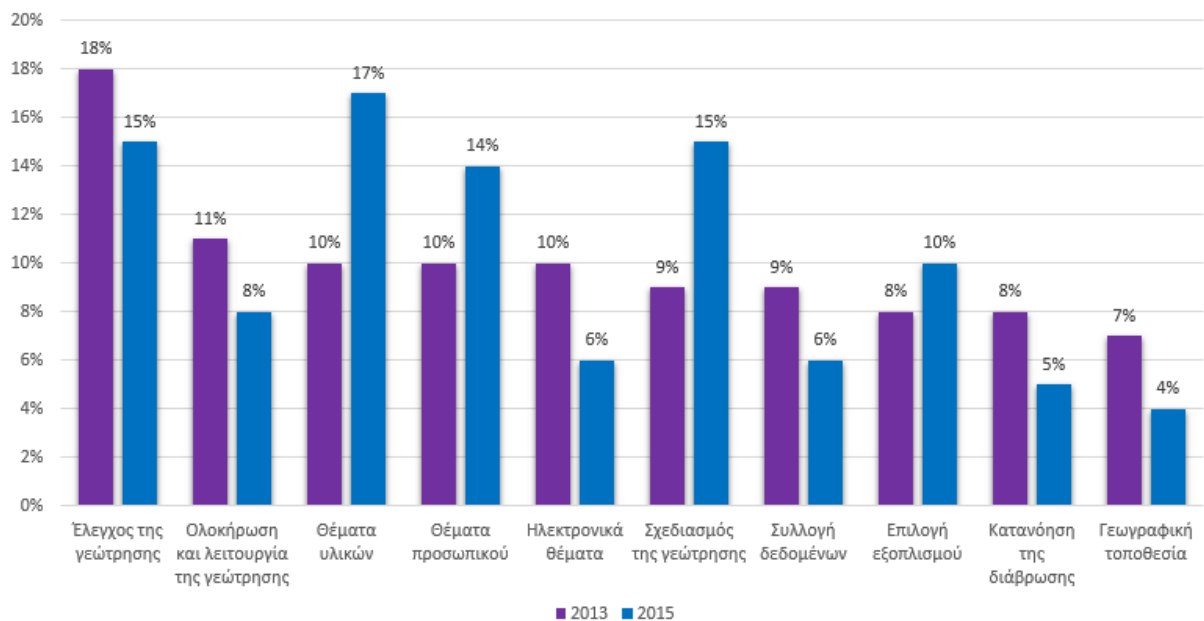
Σχετικά με τα παρεμβύσματα, τα κοινού τύπου αποτυγχάνουν διότι διαβρώνονται και απαιτούνται να χρησιμοποιηθούν ανθεκτικότερα μεταλλικά παρεμβύσματα για να ανταπεξέλθουν επιτυχώς στο όξινο περιβάλλον. Ιδανικά τα παρεμβύσματα θα πρέπει να κατασκευαστούν από υλικό το οποίο θα εγγυάται την αποδοτικότητα τους καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης. Ακόμα, στην περίπτωση ανακτήσιμων παρεμβυσμάτων, η πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν ξανά μετά την παρουσία του σε όξινο περιβάλλον, είναι αρκετά μικρή εξαιτίας της οξείδωσης και της καταστροφής που θα έχουν υποστεί. Τα όξινα περιβάλλοντα σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία αυξάνουν αρκετά την πιθανότητα εμφάνισης διαρροής των παρεμβυσμάτων και η ανάκτησή τους καθίσταται αρκετά δύσκολη.

Γι' αυτό το λόγο τα μεταλλικά παρεμβύσματα κατασκευάζονται από κράματα που εγγυώνται την ανθεκτικότητά τους στην οξείδωση. Σε γενικές γραμμές, εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας των παρεμβυσμάτων, η επιλογή του κατάλληλου παρεμβύσματος θα πρέπει να γίνεται σε συνεννόηση με την κατασκευαστική εταιρεία, ώστε να βρεθεί το κατάλληλο που θα μπορεί να ανταπεξέλθει στις συνθήκες. Η NACE International (National Association of Corrosion Engineers) έχει εκδώσει κάποια standards και κάποια κριτήρια για την επιλογή του κατάντη εξοπλισμού σε όξινα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων και των παρεμβυσμάτων (Standard MR-01-75). Σε αυτήν την

οδηγία η NACE International καθοδηγεί τις εταιρείες στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού, με βάση τις επικρατούσες, σε κάθε περίπτωση, συνθήκες (Petrowiki, 2015) (Baker Oil Tools, 1995). Όσον αφορά την απόδοση στον σχεδιασμό των εξαρτημάτων, βασίζεται στη χρήση ελαστο-πλαστικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (elastic-plastic finite element analysis – FEA) και ακολουθεί τα πρωτόκολλα ISO 13679 / API 5C5 (Carcango, 2005).

### 3.7. Τεχνικές προκλήσεις που παραμένουν υπό έρευνα

Πολλά από τα προβλήματα και τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν σε ένα βαθμό διευθετηθεί, ωστόσο όσο οι γεωτρήσεις γίνονται πιο πολύπλοκες θα προκύπτουν συνεχώς νέες δυσκολίες. Στην Εικόνα 3-29 παρουσιάζονται οι τεχνικές δυσκολίες οι οποίες συναντήθηκαν το 2013 και πώς αυτές διαφοροποιήθηκαν μέχρι το 2015.

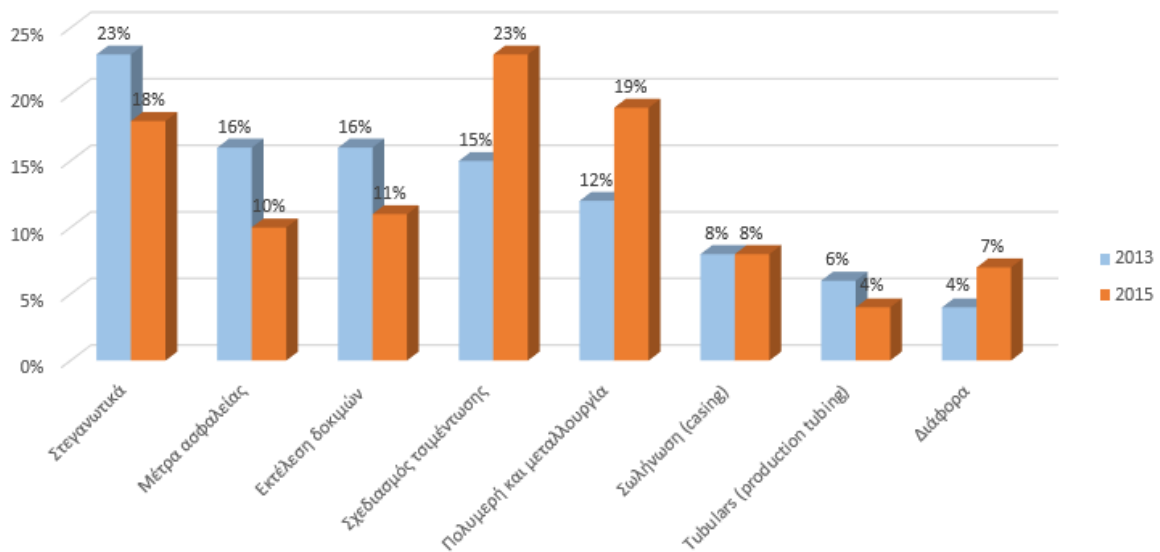


Εικόνα 3-29. Διαφοροποίηση στις τεχνικές δυσκολίες που παρουσίασαν οι γεωτρήσεις HP/HT κατά τα έτη 2013 & 2015. (Oil and Gas IQ, 2015)

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα προβλήματα επιλύονται, εκτός από τα θέματα που σχετίζονται με τα υλικά, το προσωπικό, τον σχεδιασμό της γεώτρησης και την επιλογή του εξοπλισμού. Στη παρούσα φάση, η βιομηχανία πρέπει να συγκεντρωθεί σε αυτά τα ζητήματα ώστε να τα αντιμετωπίσει και να τα επιλύσει.

Τα προβλήματα που δεν έχουν επιλυθεί οφείλονται στην έλλειψη γνώσεων που πρέπει η βιομηχανία να καλύψει τα κενά. Συγκεκριμένα, τα κενά στις γνώσεις που

υπήρχαν το 2015 παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-30 και συγκρίνονται με αυτά που υπήρχαν δύο χρόνια πριν εκτελεστεί η έρευνα (2013).



Εικόνα 3-30. Ελλείψεις γνώσεων για την αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων στις γεωτρήσεις HP/HT (Oil and Gas IQ, 2015)

Η μεγαλύτερη έλλειψη γνώσεων, το 2015, παρατηρείται στον σχεδιασμό της τσιμέντωσης, στα στεγανωτικά και τα πολυμερή, καθώς και την κατασκευή και διαμόρφωση ανθεκτικότερων κραμάτων (μεταλλουργία). Συνεπώς, η εύρεση κατάλληλου και έμπειρου προσωπικού που θα διευθετήσει και θα καλύψει τα κενά γνώσεων είναι καίριας σημασίας για την ασφαλή και οικονομική όρυξη γεωτρήσεων HP/HT.

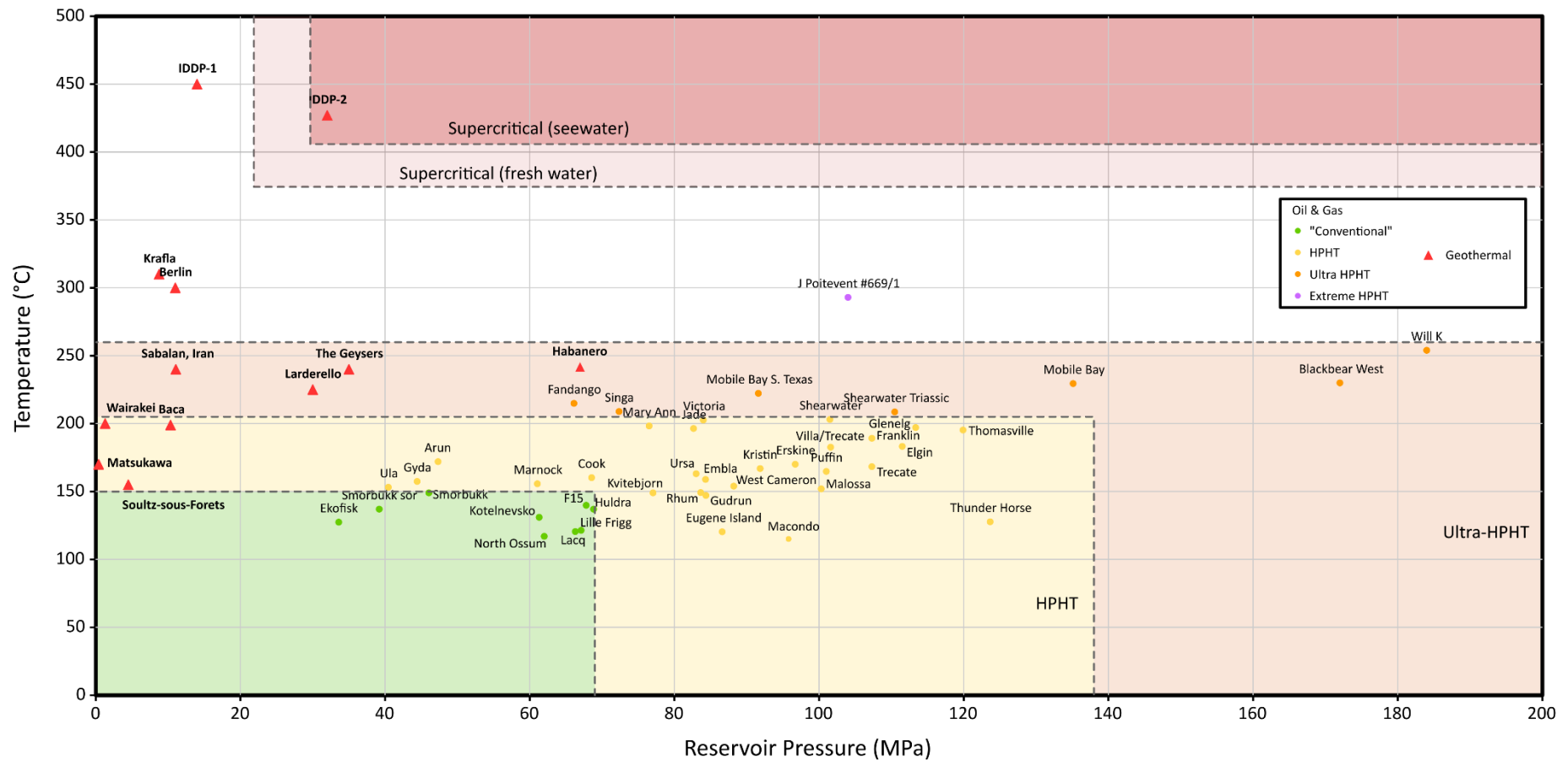
### 3.8. Σύγκριση γεωτρήσεων HP/HT με γεωθερμικές γεωτρήσεις

Καθώς οι γεωτρήσεις γεωθερμίας ορύσσονται επίσης υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση των συνθηκών που επικρατούν σε αυτές με τις συνθήκες που απαντώνται στις γεωτρήσεις HP/HT. Στην Εικόνα 3-30 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σε γεωθερμικές γεωτρήσεις και γεωτρήσεις HP/HT. Εύκολα διαπιστώνεται ότι οι γεωθερμικές γεωτρήσεις παρουσιάζουν γενικά πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από τις γεωτρήσεις HP/HT. Η γεωθερμική γεώτρηση Soultz-sous-Forets με τη χαμηλότερη θερμοκρασία εμπίπτει εντός του πεδίου ορισμού των γεωτρήσεων HT, ενώ οι γεωτρήσεις στο γεωθερμικό πεδίο The Geysers (το μεγαλύτερο γεωθερμικό πεδίο του κόσμου) εμπίπτει εντός του πεδίου ορισμού των γεωτρήσεων ultra HT. Ωστόσο, οι γεωτρήσεις IDDP στην Ισλανδία παρουσιάζουν θερμοκρασία ως 150°C μεγαλύτερη από τη «θερμότερη» γεώτρηση HP/HT (extreme HP/HT).

Αντίθετα, η πίεση των πόρων του σχηματισμού δε φαίνεται να αποτελεί ζήτημα για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, καθώς δε φαίνεται να ξεπερνά σε καμιά περίπτωση τα 40 MPa (περίπου η αναμενόμενη υδροστατική πίεση σε βάθος 4km σε μια ιζηματογενή λεκάνη) (Castilla, 2017).

Με βάση τις παραπάνω διαπιστώσεις, θα περίμενε κανείς να υπάρχει κάποια μεταφορά τεχνολογίας και γνώσεων μεταξύ των δύο αυτών κλάδων γεωτρήσεων, τουλάχιστον ως προς το θέμα αντιμετώπισης των υψηλών θερμοκρασιών. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, συναντάται μόνο σποραδικά στη βιβλιογραφία.

Μεταφορά και χρήση εξοπλισμού ή/και προσωπικού που εργάστηκε επιτυχώς σε γεωθερμικές γεωτρήσεις σε γεωτρήσεις HP/HT σημειώθηκε την δεκαετία του 1990 (Drill Cool Team, 2017). Ειδικότερα, για πρώτη φορά σε γεωτρήσεις HP/HT χρησιμοποιήθηκε σύστημα μείωσης της θερμοκρασίας των ρευστών διάτρησης. Η χρήση ψυκτικών μηχανημάτων των ρευστών διάτρησης στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, χρονολογείται το 1977, όπου ξεκίνησε να χρησιμοποιείται ευρέως στα γεωθερμικά πεδία της Καλιφόρνιας. Στην συνέχεια, οι εταιρείες εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων χρησιμοποίησαν ακριβώς τα ίδια μηχανήματα, ώστε να αντιμετωπίσουν τις υψηλές θερμοκρασίες, στις δικές τους γεωτρήσεις.



Εικόνα 3-31. Συγκριτική παράθεση συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας σε γεωθερμικές γεωτρήσεις και γεωτρήσεις HP/HT ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HPHT-O%26G\\_and\\_Geothermal\\_wells.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HPHT-O%26G_and_Geothermal_wells.png)) (Castilla, 2017)

Η ανάγκη για τέτοιου είδους μηχανήματα στις γεωτρήσεις HP/HT έγινε ακόμα μεγαλύτερη, υποχρεώνοντας τις πετρελαϊκές εταιρείες να επενδύσουν στην εξέλιξη της σχετικής τεχνολογίας. Τα νέου τύπου μηχανήματα ψύξης των ρευστών διάτρησης, που αναπτύχθηκαν για τις γεωτρήσεις HP/HT, χρησιμοποιούνται πλέον και στις γεωθερμικές γεωτρήσεις.

Παράλληλα με την χρήση συστημάτων ψύξης των ρευστών διάτρησης, στις γεωτρήσεις HP/HT, άρχισε να εργάζεται το προσωπικό που μέχρι τότε εργαζόταν στα γεωθερμικά πεδία. Η επαφή τους με τις γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας, βοήθησε αρκετά στην απόκτηση γνώσεων, για την αντιμετώπιση ακραίων καταστάσεων, μετατρέποντάς τους στους πλέον κατάλληλους υποψήφιους για την όρυξη και ολοκλήρωση γεωτρήσεων HP/HT (Kate Denninger, 2015).

Ωστόσο, μπορεί μεν αρχικά οι γεωτρήσεις HP/HT, να δανείστηκαν εξοπλισμό και προσωπικό από τις γεωθερμικές γεωτρήσεις (στις Η.Π.Α.), στη συνέχεια, ωστόσο η πετρελαϊκή βιομηχανία είναι αυτή η οποία προσέφερε περισσότερα στην γεωθερμία. Συγκεκριμένα, λόγω του μεγέθους αυτής της βιομηχανίας, της ζήτησης που υπάρχει στην αγορά για υδρογονάνθρακες και των μεγαλύτερων επενδύσεων σε πρωτοποριακή τεχνολογία που παρουσιάζει, η πετρελαϊκή βιομηχανία προχώρησε στην εύρεση λύσεων για την αντιμετώπιση των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Από την δημιουργία κατάλληλων ρευστών διάτρησης και πολφού τσιμέντου, στην προσεκτική επιλογή υλικών για τη σωλήνωση και τα ανθεκτικά ελαστομερή, οι γεωτρήσεις HP/HT έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο και στην εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων (Catalin Teodoriu, 2008) (Castilla, 2017).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>. Ασφάλεια

### 4.1. Γενικά

Η αποτροπή και ο έλεγχος της εισροής ρευστών ή αερίου εντός της γεώτρησης (kick) αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ασφάλειας κατά τη διάνοιξη γεωτρήσεων, με τον κίνδυνο που ελλοχεύει, σε τέτοιες περιπτώσεις, να είναι ακόμη μεγαλύτερος σε περιβάλλοντα που επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, ο όρος «έλεγχος της γεώτρησης» (well control), αναφέρεται στο μηχανισμό ασφαλείας που δεν επιτρέπει την ανεξέλεγκτη ροή ρευστών του σχηματισμού (πετρελαίου, αερίου και νερού) στη γεώτρηση και από εκεί στην επιφάνεια (Hossain, 2015). Το σύστημα ελέγχου της γεώτρησης περιλαμβάνει όλον τον εξοπλισμό, ο οποίος χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η εισροή και να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της πίεσης ρωγμάτωσης και της πίεσης των πόρων. Σκοπός, του συστήματος ελέγχου είναι να:

- ✓ εντοπίσει την αιφνίδια εισροή
- ✓ κλείσει την γεώτρηση στην επιφάνεια
- ✓ απομακρύνει τα ρευστά του ταμιευτήρα
- ✓ διασφαλίσει την ασφάλεια της γεώτρησης.

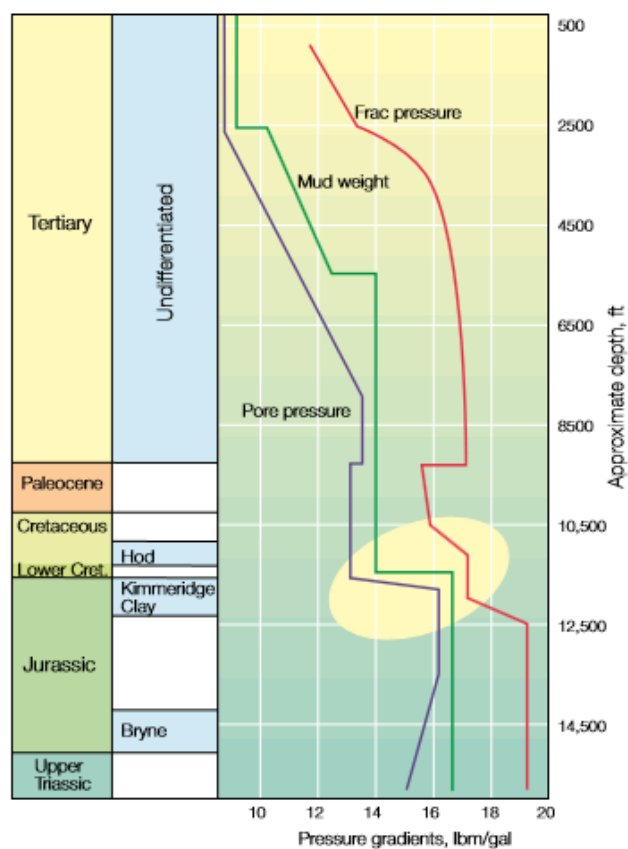
Ειδικότερα, με την ταχεία αύξηση του όγκου των ρευστών του ταμιευτήρα, τα ρευστά διάτρησης ωθούνται εκτός της γεώτρησης (unloading), μειώνοντας έτσι την υδροστατική πίεση που ασκούν στον σχηματισμό και συνεπώς επιτρέποντας την ακατάπαυστη και ανεξέλεγκτη ροή των ρευστών του ταμιευτήρα εντός της γεώτρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία έκρηξης (blowout).

Για παράδειγμα, στις γεωτρήσεις που ορύσσονται στο πεδίο του Central Graben στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Εικόνα 4-1), παρατηρείται και μία άλλη επιπλοκή – μία απότομη αύξηση στη πίεση των πόρων, σε ένα μικρό κατακόρυφο διάστημα με πάχος, μερικές φορές, μικρότερο από 100 ft (30 m).

Και ενώ από τη μία η πίεση των πόρων αυξάνεται κατακόρυφα, η πίεση ρωγμάτωσης παραμένει σταθερή. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι δύο παραπάνω πιέσεις συγκλίνουν, με αποτέλεσμα η παραμικρή μείωση του βάρους της λάσπης, ακόμη και κατά 0,5 lb/gal ή και λιγότερο, να προκαλέσουν διατάραξη της κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης και επομένως την εμφάνιση αιφνίδιας εισροής αερίου (Εικόνα 4-2). Στην κυκλωμένη περιοχή παρατηρείται αύξηση της πίεσης των πόρων από 13,5 σε 17,5 lbm/gal σε προχώρηση μικρότερη των 100 ft. Ωστόσο, η βαθμίδα ρωγμάτωσης του σχηματισμού παραμένει μικρότερη των 18,5 lbm/gal. Η αύξηση αυτή συνήθως παρατηρείται στο Κατώτερο Κρητιδικό, στην άργιλο του Kimmeridge ή στο ανώτερο τμήμα των άμμων του ταμιευτήρα, αλλά το ακριβές σημείο και το υψόμετρο καθίστανται δύσκολο να προβλεφθούν.



Εικόνα 4-1. UK Central Graben (MacAndrew, και συν., 1993)



Εικόνα 4-2. Λιθολογία έναντι πίεσης στο Central Graben (Ross I., September 1990)

Οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά τη διάτρηση στο πεδίο του Central Graben, επισημάνθηκαν το Σεπτέμβριο του 1998 όταν στην ημιβυθιζόμενη πλατφόρμα Ocean Odyssey σημειώθηκε έκρηξη (blowout), με αποτέλεσμα την πρόκληση πυρκαγιάς και την απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής (Offshore Engineering , October 1998). Ως συνέπεια, του παραπάνω ατυχήματος, το Υπουργείο Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου (UK Department of Energy) απαγόρευσε τη διάνοιξη και τη διενέργεια εργασιών σε γεωτρήσεις που προβλέπεται να εμφανίσουν πιέσεις στον ταμιευτήρα μεγαλύτερες των 10.000 psi.

Ο Οργανισμός Παράκτιων Δραστηριοτήτων του Ηνωμένου Βασιλείου (UK Offshore Operation Association – UKOOA) συνέλεξε τις εμπειρίες όσων εμπλέκονται με την όρυξη γεωτρήσεων HP/HT και συνέγραψε κατευθυντήριες γραμμές που συνίσταται να ακολουθηθούν σε περίπτωση προβλήματος (UK Offshore Operators Association Drilling Practices Committee, no.2, January 1990). Επιπλέον, το 1992 εκδόθηκε από το αγγλικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (Institute of Petroleum – IP), ένα αναλυτικό έγγραφο που περιλαμβάνει προτεινόμενες πρακτικές για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν για τον έλεγχο των γεωτρήσεων HP/HT (Well Control During the Drilling and Testing of High Pressure Offshore Wells, Model Code of Safe Practice, Part 17).

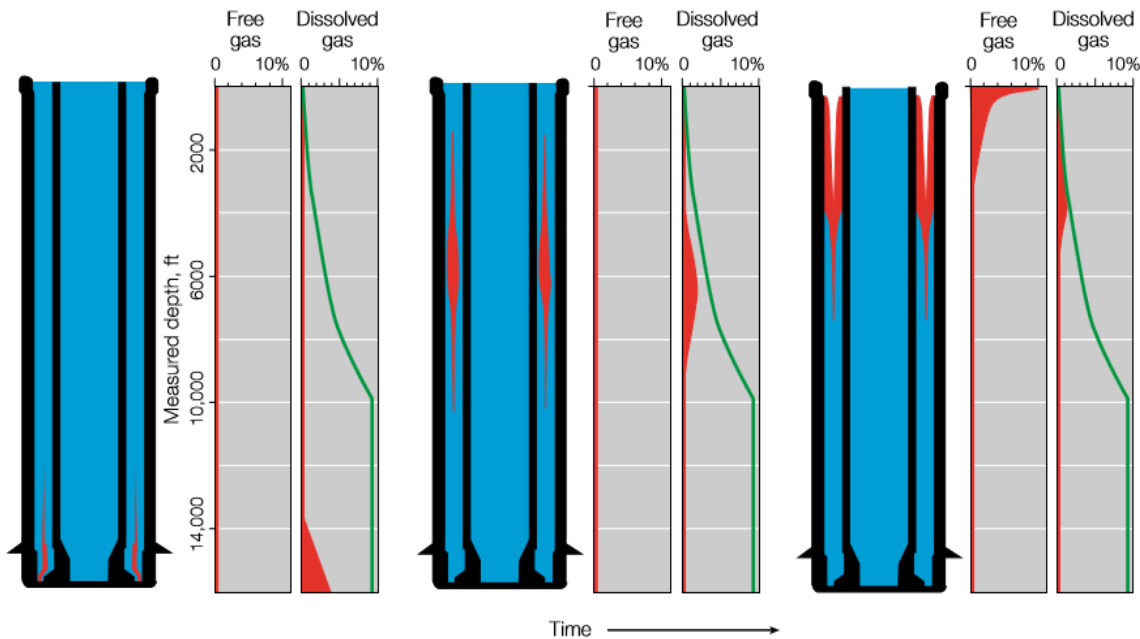
Πριν τη διάνοιξη μιας γεώτρησης HP/HT η υπεύθυνη εταιρεία συγγράφει πιθανά σενάρια για οτιδήποτε απρόοπτο μπορεί να συμβεί. Σε αυτά τα πιθανά σενάρια δυνητικών αστοχιών περιλαμβάνονται όροι όπως ‘μέγιστος όγκος και ρυθμός ροής ρευστών ταμιευτήρα’ και ‘σχετικές μέγιστες πιέσεις και θερμοκρασίες’, διότι αυτοί οι παράγοντες είναι που συνήθως σχετίζονται με ατυχήματα. Γι’ αυτό το λόγο, δημιουργείται λογισμικό το οποίο θα αναλαμβάνει τον έλεγχο της γεώτρησης, σε περίπτωση ατυχήματος, για τουλάχιστον μία ώρα, ώστε να εκκενωθεί η πλατφόρμα εγκαίρως.

Επειδή στις γεωτρήσεις HP/HT το μέγεθος του ενδεχομένου ατυχήματος έχει σημαντικότερες επιπτώσεις, τα πιθανά σενάρια αστοχίας είναι πιο συντηρητικά από τις κανονικές γεωτρήσεις. Συνήθως, ο μέγιστος αναμενόμενος όγκος αιφνίδιας εισροής αερίου ή ρευστού ταμιευτήρα, σε μία συμβατική γεώτρηση, είναι από 10 bbl έως 20 bbl. Ωστόσο, στις γεωτρήσεις HP/HT αρκετά από τα σενάρια ενδεχομένου ατυχήματος βασίζονται στη χειρότερη περίπτωση, κατά την οποία η εισροή έχει αυξήσει την τιμή της πίεσης εντός της γεώτρησης σε αυτή της πίεσης του ταμιευτήρα (JM, September 5-8, 1989).

Κατά τη διάτρηση με ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (oil based mud – OBM), υπάρχει το ενδεχόμενο το αέριο που έχει εισρεύσει να διαλυθεί στη φάση του πετρελαίου<sup>11</sup>. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζει την μεταφορά του αερίου προς την επιφάνεια με αποτέλεσμα να μην γίνει αντιληπτό. Από το 1986, επιστήμονες της Schlumberger Cambridge Research

<sup>11</sup> Η πλειοψηφία των γεωτρήσεων HP/HT έχουν διανοιχθεί με τη χρήση ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (OBM), που θεωρείται η ευκολότερη λύση για τέτοιου είδους γεωτρήσεις. Σήμερα, χρησιμοποιούνται περιβαλλοντικά ασφαλέστερα ρευστά διάτρησης με βάση νερό (WBM). Ωστόσο, η χρήση αυτών των ρευστών διάτρησης καθίσταται δυσκολότερη σε HP/HT περιβάλλοντα, διότι μετατρέπονται σε γέλη ή αραιώνουν. Τα ρευστά διάτρησης με βάση το νερό αποδεικνύονται πολλές φορές προβληματικά, καθώς δυσκολεύονται να διατηρήσουν τις ιδιότητες των ρευστών (Well Control Drilling With Oil-Based Mud, 1990).

(SCR), Cambridge, England, μελετούν την συμπεριφορά των αιφνίδιων εισροών αερίου, ειδικά για ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο. Μέσω αυτής της ενδεδειγμένης μελέτης δημιουργήθηκε το λογισμικό Anadrill's SideKick που προσομοιώνει αιφνίδιες εισροές αερίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό και τον έλεγχο γεωτρήσεων HP/HT (Εικόνα 4-3). Παρουσιάζεται η περίπτωση αιφνίδιας εισροής αερίου, με όγκο περίπου ίσο με 10 bbl και με βάθος γεώτρησης τα 14.000 ft και η κυκλοφορία του προς την επιφάνεια. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στα ρευστά διάτρησης, το κόκκινο στο διαλελυμένο αέριο, το άσπρο στο ελεύθερο αέριο και το πράσινο στην περιεκτικότητα του διαλελυμένου αερίου σε σχέση με την μείωση του βάθους.



Εικόνα 4-3. Προσομοιωτής εισροής ρευστών του ταμιευτήρα με τη βοήθεια του λογισμικού SideKick (Leach, 1992)

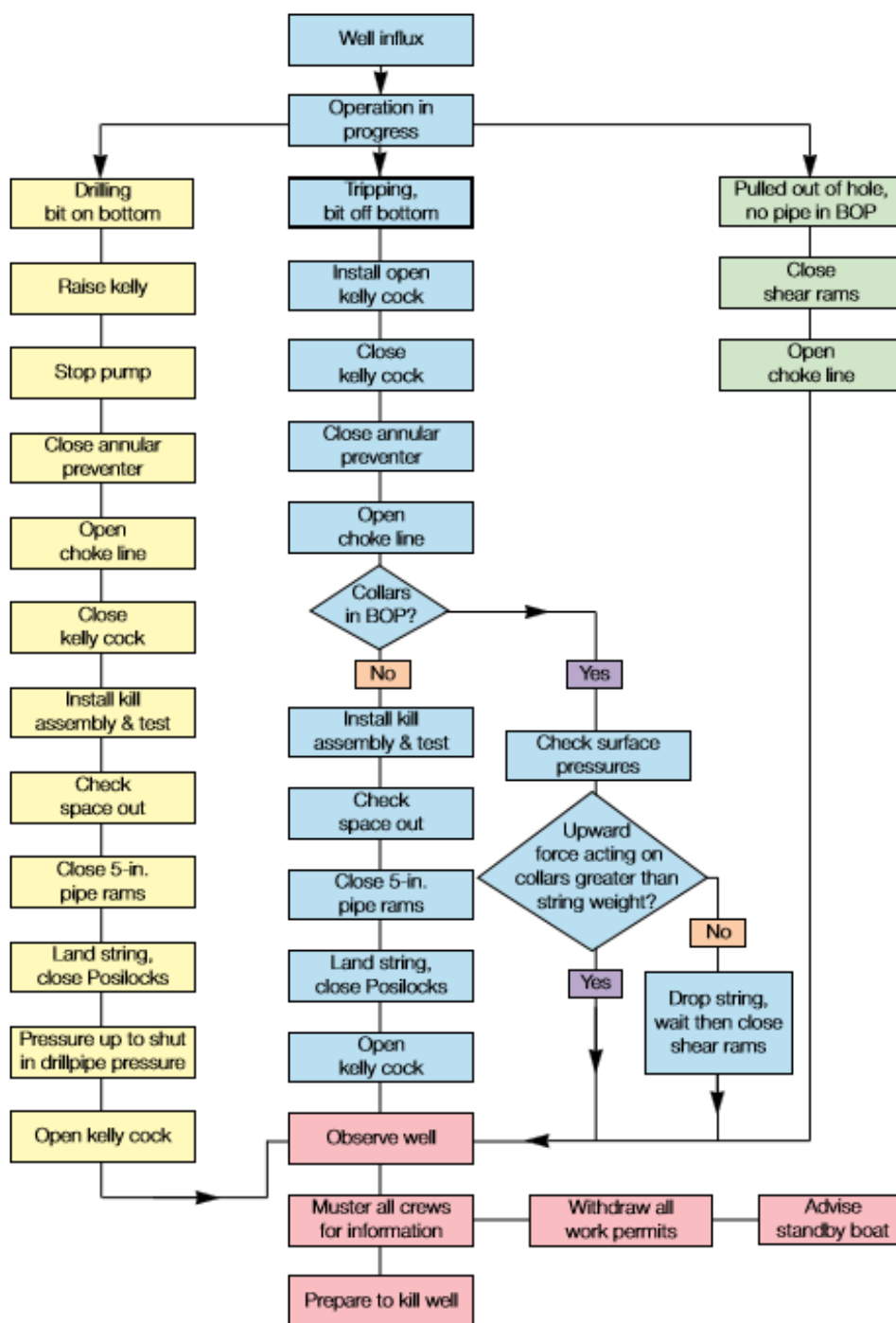
Η πρόβλεψη της εξέλιξης της εισροής αερίου σε γεωτρήσεις HP/HT απαιτεί τα ακόλουθα πραγματικά δεδομένα:

- ✓ Το θερμοκρασιακό προφίλ της γεώτρησης
- ✓ Την προβλεπόμενη κατάσταση των ρευστών εντός του ταμιευτήρα
- ✓ Την αναμενόμενη μέγιστη πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης
- ✓ Τη βαθμίδα πίεσης
- ✓ Την αντοχή του πετρώματος και την διαπερατότητα του.

Οι παραπάνω εκτιμήσεις γίνονται με τη χρήση, σταθμισμένων στις συνθήκες της κάθε περίπτωσης, δεδομένων που είναι σε σχετική πληθώρα στην περίπτωση της Βόρειας Θάλασσας. Ωστόσο, στις περιπτώσεις που οι συνθήκες είναι περίπλοκες και τα δεδομένα δεν επαρκούν, χρησιμοποιείται μοντέλο πρόβλεψης. Η Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium (KSELP), στο Rijswijk της Ολλανδίας, έχει αναπτύξει ένα μοντέλο ικανό να προβλέψει την αντοχή των πετρωμάτων και την πίεση των πόρων σε αρκετά πεδία της Βόρειας Θάλασσας. Ακόμα, η KSELP έχει καταφέρει να τροποποιήσει ένα μοντέλο, σχεδιασμένο να προβλέπει τις θερμοκρασίες στην κεφαλή της γεώτρησης σε παράκτιες

γεωτρήσεις, ώστε να εκτιμώνται οι θερμοκρασίες στις οποίες θα εκτεθεί ο εξοπλισμός σε περίπτωση αιφνίδιας εισροής αερίου ή ρευστών του ταμιευτήρα.

Τα σενάρια αστοχίας χρησιμοποιούνται όχι μόνο για την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού, αλλά και για να σχεδιαστούν συγκεκριμένες λειτουργικές διαδικασίες. Παραδείγματος χάρη, η αναλυτική αντιμετώπιση και τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση που υπάρξει αιφνίδια εισροή αερίου ή ρευστών ταμιευτήρα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4-4).



Εικόνα 4-4. Γενικευμένο διάγραμμα αντιμετώπισης και αποκατάστασης ελέγχου σε περίπτωση αιφνίδιας εισροών αερίου ή ρευστών ταμιευτήρα (MacAndrew, και συν., 1993)

Μέσω της εκπαίδευσης οι υπεύθυνες εργολαβικές εταιρείες, ενημερώνουν τους εργαζόμενους για τις απαραίτητες διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση αιφνίδιων εισροών αερίου ή ρευστών ταμειωτήρα. Η εκπαίδευση αυτή ξεκινά αρκετό καιρό πριν ξεκινήσει η διάνοιξη της HP/HT γεώτρησης. Με την παρουσία του προσωπικού στην εξέδρα, πραγματοποιούνται συχνές συνεδριάσεις και ενημερώσεις, πριν από οποιοδήποτε σημαντικό εγχείρημα που αφορούν στη διάνοιξη της γεώτρησης. Αναπόσπαστο κομμάτι αυτών των συναντήσεων είναι η ανάλυση της παρούσας κατάστασης της γεώτρησης και του εξοπλισμού και η ενημέρωση σχετικά με σημαντικές τεχνικές που προκύπτουν στο πεδίο, όπως το κλείσιμο του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (Blow Out Preventer – BOP) (Lindsay, 1993).

Τα τρία σημαντικότερα σημεία για την ασφαλή διάνοιξη γεωτρήσεων HP/HT είναι:

1. Η αποτροπή των αιφνίδιων εισροών
2. Η ανίχνευση των αιφνίδιων εισροών
3. Η ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης

#### 4.1.1. Αποτροπή των αιφνίδιων εισροών

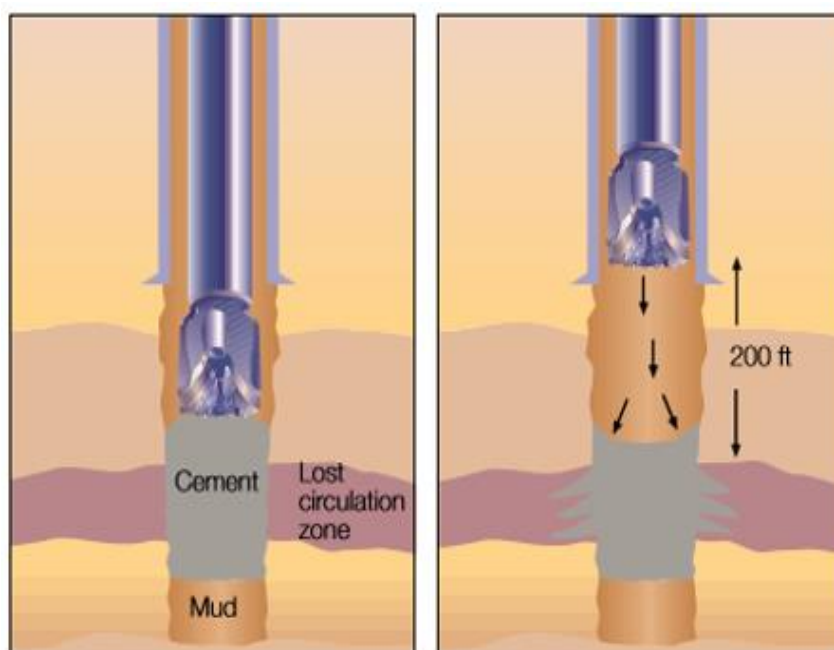
Ο βέλτιστος τρόπος για την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με τον έλεγχο της γεώτρησης είναι η ανίχνευση και αντιμετώπιση καταστάσεων, οι οποίες οδηγούν σε αιφνίδιες εισροές. Παρακάτω ακολουθούν μερικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων:

- i. Στις περιπτώσεις όπου διατρύονται γεωτρήσεις σε σχηματισμούς υψηλών πιέσεων, είναι συχνό φαινόμενο η εμφάνιση αιφνίδιων εισροών όταν η διατρητική στήλη ανελκύεται στην επιφάνεια. Για τον εντοπισμό αυτού του φαινομένου και για το αν θα προκαλέσει αιφνίδια εισροή, ακολουθείται μία χρονοβόρα διαδικασία. Ακριβώς πριν η διατρητική στήλη ανασυρθεί από τον πυθμένα της γεώτρησης, το ρευστό διάτρησης ωθείται να κυκλοφορήσει προς την επιφάνεια – μία διαδικασία που ονομάζεται bottoms up. Αν το κυκλοφορούμενο ρευστό δεν περιέχει αέριο, ανελκύονται στην επιφάνεια έως δέκα διπλές ή τριπλές συνδεσμολογίες διατρητικών στελεχών (stands of drill pipes). Η διατρητική στήλη στη συνέχεια καθελκύεται εκ νέου στο τελικό βάθος (total depth-TD) και επανακυκλοφορείται στην επιφάνεια το ρευστό διάτρησης. Το αέριο εντός αυτού μετράται ξανά. Αν κατά τη δεύτερη μέτρηση έχει αυξηθεί το περιεχόμενο αέριο αυτό αποτελεί ένδειξη ότι εμφανίστηκε swabbing.

Αν προκληθεί εισροή ρευστών εξ' αιτίας του swabbing, τότε προτείνεται η διατρητική στήλη να ανελκυθεί με πιο αργό ρυθμό ή να αυξηθεί ελάχιστα το βάρος του ρευστού διάτρησης. Επιπλέον, εάν γίνεται κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης κατά την ανέλκυση, αποτρέπεται η εμφάνιση του swabbing – μια διαδικασία που εκτελείται ευκολότερα από το top drive. Αν η ημιπλωτή εξέδρα παρουσιάζει μεγάλη κατακόρυφη μετατόπιση (severe vessel heave) μπορεί στην γεώτρηση να παρουσιαστεί φαινόμενο swab. Εάν η κατακόρυφη μετατόπιση είναι τόσο μεγάλη, τότε η όρυξη θα πρέπει να σταματήσει μέχρι να βελτιωθούν οι συνθήκες.

- ii. Η χρήση ρευστών διάτρησης με σχετικά μεγάλο ιξώδες, σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους και μικρής διαμέτρου οδηγεί σε μεγάλες τιμές τριβής των ρευστών διάτρησης κατά την κυκλοφορία. Στο σχηματισμό, η υδροστατική πίεση των ρευστών διάτρησης και η πίεση που προκαλείται από την τριβή, συνδυάζονται και δίνουν την ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας (equivalent circulation density – ECD). Η ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας σχεδιάζεται για να εξισορροπήσει την πίεση που προκαλούν τα ρευστά του ταμιευτήρα. Ωστόσο, κατά την προσθήκη νέων διατρητικών στελεχών στη διατρητική στήλη, μικρές ποσότητες αερίου, που ονομάζεται αέριο ένωσης (connection gas), μπορεί να διαφύγει από το σχηματισμό. Αν ο χρόνος που απαιτείται για την κυκλοφορία της λάσπης από τον πυθμένα στην επιφάνεια (bottoms up) υπερβαίνει το χρόνο που απαιτείται για την όρυξη μέχρι την επόμενη προσθήκη διατρητικών στελεχών, το αέριο που εισήλθε από τον σχηματισμό κατά την προηγούμενη προσθήκη μπορεί να παραμείνει μη ανιχνεύσιμο. Επιπλέον αέριο ενδέχεται να εισέλθει καθώς γίνεται η προσθήκη νέων διατρητικών στελεχών, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα σημαντικής εισροής. Η ασφαλής διαδικασία περιλαμβάνει τον έλεγχο ότι έχει πραγματοποιηθεί κυκλοφορία της λάσπης από τον πυθμένα στην επιφάνεια (bottoms up) προτού γίνει οποιαδήποτε προσθήκη νέων διατρητικών στελεχών.
- iii. Οι εισροές δεν προκαλούνται μόνο κατά τη διαδικασία της όρυξης των γεωτρήσεων, αλλά και κατά τη διαδικασία εκτέλεσης δειγματοληψίας (coring). Το σχετικά μικρό διάκενο μεταξύ του δειγματοσυλλέκτη (core barrel) και της ανοιχτής γεώτρησης αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης swabbing κατά την ανέλκυσή του στην επιφάνεια. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη μείωση του μεγέθους του δείγματος που συλλέγεται κάθε φορά – συνήθως το δείγμα έχει μήκος 30 ft (10m) – καθώς με την αργή ανέλκυσή του στην επιφάνεια, ελέγχοντας όμως συνεχώς την κυκλοφορία και την παρουσία αερίου στο ρευστό διάτρησης.
- iv. Τα μικρά όρια που εμφανίζονται μεταξύ της πίεσης των πόρων και της αντοχής του σχηματισμού, όπως στο Central Graben, αμβλύνουν το φαινόμενο της διαφυγής του ρευστού διάτρησης κατά την κυκλοφορία, με αποτέλεσμα ο έλεγχος της γεώτρησης να γίνεται περίπλοκος. Η πιο συχνή ακολουθούμενη τακτική είναι η προσθήκη ειδικού υλικού που παρεμποδίζει τις απώλειες των ρευστών διάτρησης (Lost Circulation Material – LCM). Εάν το πρόβλημα εξακολουθεί και το LCM αποτύχει στο σκοπό του, τότε η στρατηγική που ακολουθείται είναι να ανελκυσθεί η διατρητική στήλη στην επιφάνεια και να κατέλθει διάτρητος σωλήνας που θα εγχύσει τσιμέντο στην ζώνη διαφυγής του ρευστού διάτρησης. Ειδικότερα, ένα υδαρές τσιμέντο εισπιέζεται στο σχηματισμό και μετά την πήξη του, το υπολειπόμενο διατρεύεται από τη διατρητική στήλη. Ωστόσο, στις γεωτρήσεις HP/HT εμφανίζεται το φαινόμενο του swabbing, όταν ανελκύεται η κατώτερη συνδεσμολογία (bottom hole assembly) πριν στερεοποιηθεί το τσιμέντο στη ζώνη ενδιαφέροντος (spotting the plug), με αποτέλεσμα την εμφάνιση αιφνιδίων εισροών σε κάποιο άλλο ανώτερο σημείο της γεώτρησης. Στην περίπτωση αυτή, η μόνη λύση είναι η εισπίεση του τσιμέντου μέσω του κοπτικού άκρου (Εικόνα 4-5). Με το κοπτικό άκρο να βρίσκεται σε απόσταση 100 ft έως 200 ft πάνω από το σημείο απώλειας, κατά προτίμηση εντός του σωληνωμένου τμήματος, 5 βαρέλια ρευστών

διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, 20 βαρέλια ενδιάμεσου ρευστού, 50 έως 100 βαρέλια τσιμέντου και τέλος ακόμα 20 βαρέλια ενδιάμεσου ρευστού απαιτείται συνήθως να εισπιαστούν εντός της γεώτρησης, έως ότου τα ρευστά διάτρησης φτάσουν στο κοπτικό άκρο. Ο αντιακρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας του δακτυλίου της γεώτρησης είναι κλειστός (annular BOP), ενώ τα παραπάνω ρευστά εισπιάζονται εντός της γεώτρησης, έως ότου το τσιμέντο να φτάσει 50 ft πάνω από το σημείο απώλειας. Τα τελευταία 10 βαρέλια του ενδιάμεσου ρευστού χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της κοπτικής κεφαλής από το τσιμέντο. Για να αποφευχθεί η έμφραξη της κατώτερης συνδεσμολογίας, εξαιτίας της πυκνωματοποίησης (gelation), της καθίζησης ή της πρόωμης πήξης απαιτούνται ενδεδειγμένοι έλεγχοι για να επιβεβαιωθεί ότι το υδαρές διάλυμα (slurry) έχει πήξει ομοιόμορφα και εμφανίζει προβλέψιμες ιδιότητες σε αυτές τις συνθήκες.



Εικόνα 4-5. Τσιμεντώση της ζώνης ενδιαφέροντος (spotting the plug) (MacAndrew, et al., 1993)

#### 4.1.2. Ανίχνευση των αιφνίδιων εισροών

Επειδή καμία τεχνική δεν μπορεί να εξασφαλίσει την όρυξη γεωτρήσεων χωρίς την παρουσία αιφνίδιων εισροών, η συνεχής παρακολούθηση και ανίχνευση των εισροών καθίσταται κύριο ζήτημα. Η παραδοσιακή ανίχνευση εισροών βασίζεται στην παρατήρηση του επιπέδου των ρευστών διάτρησης στους χώρους συλλογής των επιστρεφόμενων ρευστών διάτρησης (mud pits) ή στην εκτέλεση ελέγχου της ροής (mud flow check) – διακοπή της όρυξης και έλεγχος εάν τα ρευστά διάτρησης ρέουν. Η σύγκριση της ροής των εισερχόμενων με τη ροή των εξερχόμενων ρευστών διάτρησης αποτελεί ακόμα μία μέθοδο που χρησιμοποιείται συχνά. Για πιο αξιόπιστη ανίχνευση, η μεταφορά των ρευστών

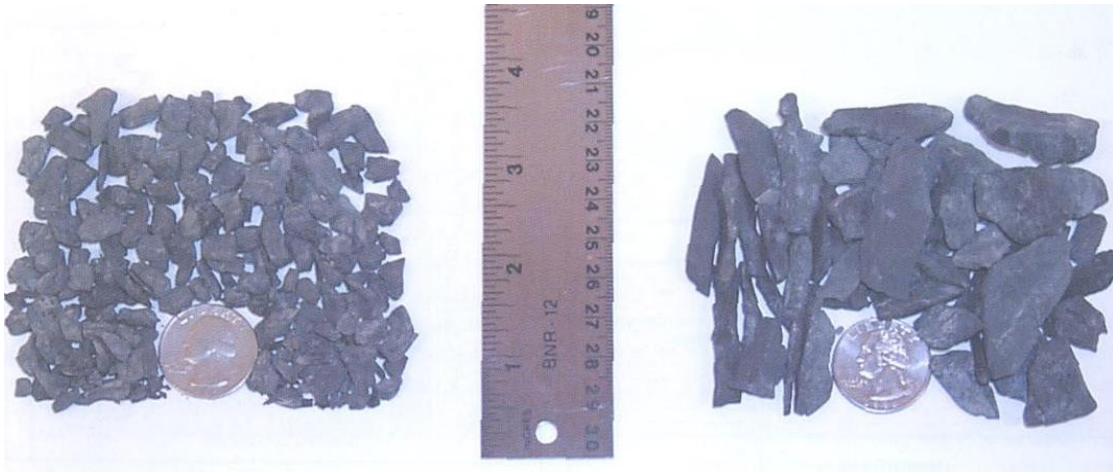


διάτρησης στο σύστημα γίνεται ελεγχόμενα και με μεγάλη προσοχή, χωρίς όμως να επιτρέπεται αυτή η διαδικασία κατά την όρυξη της γεώτρησης.

Το 1993 η εταιρεία Anadrill εισήγαγε ένα σύστημα ανίχνευσης αιφνίδιας εισροής αερίου, το KickAlert, που βασίζεται στην αρχή η οποία υποστηρίζει ότι οι ακουστικοί παλμοί που δημιουργούνται από την φυσιολογική λειτουργία των αντλιών των ρευστών διάτρησης, διαδίδονται πιο γρήγορα στα ρευστά διάτρησης που περιέχουν αέριο από ότι στα αγνά ρευστά διάτρησης. Οι παλμοί μετρώνται ως αλλαγές στην πίεση στον αγωγό μεταφοράς των ρευστών διάτρησης (standpipe), καθώς τα ρευστά διάτρησης εισέρχονται στη γεώτρηση, και στο δακτύλιο μεταξύ του σχηματισμού και της σωλήνωσης (annulus), καθώς τα ρευστά διάτρησης εξέρχονται της γεώτρησης. Εάν η γεώτρηση είναι σταθερή και δεν έχει εισέλθει καθόλου αέριο, η σχέση φάσης των παλμών μεταξύ της πίεσης του αγωγού και της πίεσης του δακτυλίου είναι σταθερή, ή αλλάζει σταδιακά καθώς ορύσσεται η γεώτρηση σε μεγαλύτερο βάθος. Όταν εισρέει αέριο οι παλμοί διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα μέσα από το δακτύλιο και προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα την έντονη αλλαγή της φάσης και την ενεργοποίηση του συναγερμού του γεωτρώπανου.

Η παρουσία αερίου μεγάλης πίεσης μπορεί να προδοθεί από αλλαγές στις συνθήκες όρυξης της γεώτρησης. Αύξηση στο ρυθμό διάτρησης, στην ροπή ή στη θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης καθώς κυκλοφορούνται προς την επιφάνεια ενέχουν όλα τον κίνδυνο εμφάνισης αιφνίδιας εισροής. Υπολογιστικά συστήματα παρακολούθησης, όπως το πληροφοριακό σύστημα γεωτρώπανου MDS της Sedco Forex και το σύστημα IDEAL (Integrated Drilling Evaluation and Logging) της Anadrill, βοηθούν το προσωπικό να παρακολουθεί τις τάσεις και τις διαδικασίες και να εντοπίζει ασυνήθιστες καταστάσεις με τη χρήση γρήγορης ερμηνείας σε οθόνη τοποθετημένη στο επίπεδο του γεωτρώπανου (Weishaupt MA., September 3-6, 1991). Εν κατακλείδι, η αιφνίδια εισροή ρευστών δεν αποτελεί ένα στιγμιαίο γεγονός, που ξαφνικά εμφανίζεται στην επιφάνεια. Ποικίλα σημάδια που προηγούνται και μπορούν να παρατηρηθούν από το προσωπικό υπάρχουν τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αύξηση της στάθμης των ρευστών διάτρησης στους χώρους συλλογής των επιστρεφόμενων ρευστών διάτρησης (mud pits).
- Η αύξηση του ρυθμού διάτρησης.
- Η αλλαγή στο μέγεθος και το σχήμα των θρυμμάτων (Εικόνα 4-6).



Εικόνα 4-6. Αλλαγή στο μέγεθος των θρυμμάτων σχιστόλιθου κατά την εμφάνιση αιφνίδιας εισροής ρευστών (Σταματάκη, WELL CONTROL, 2017-2018)

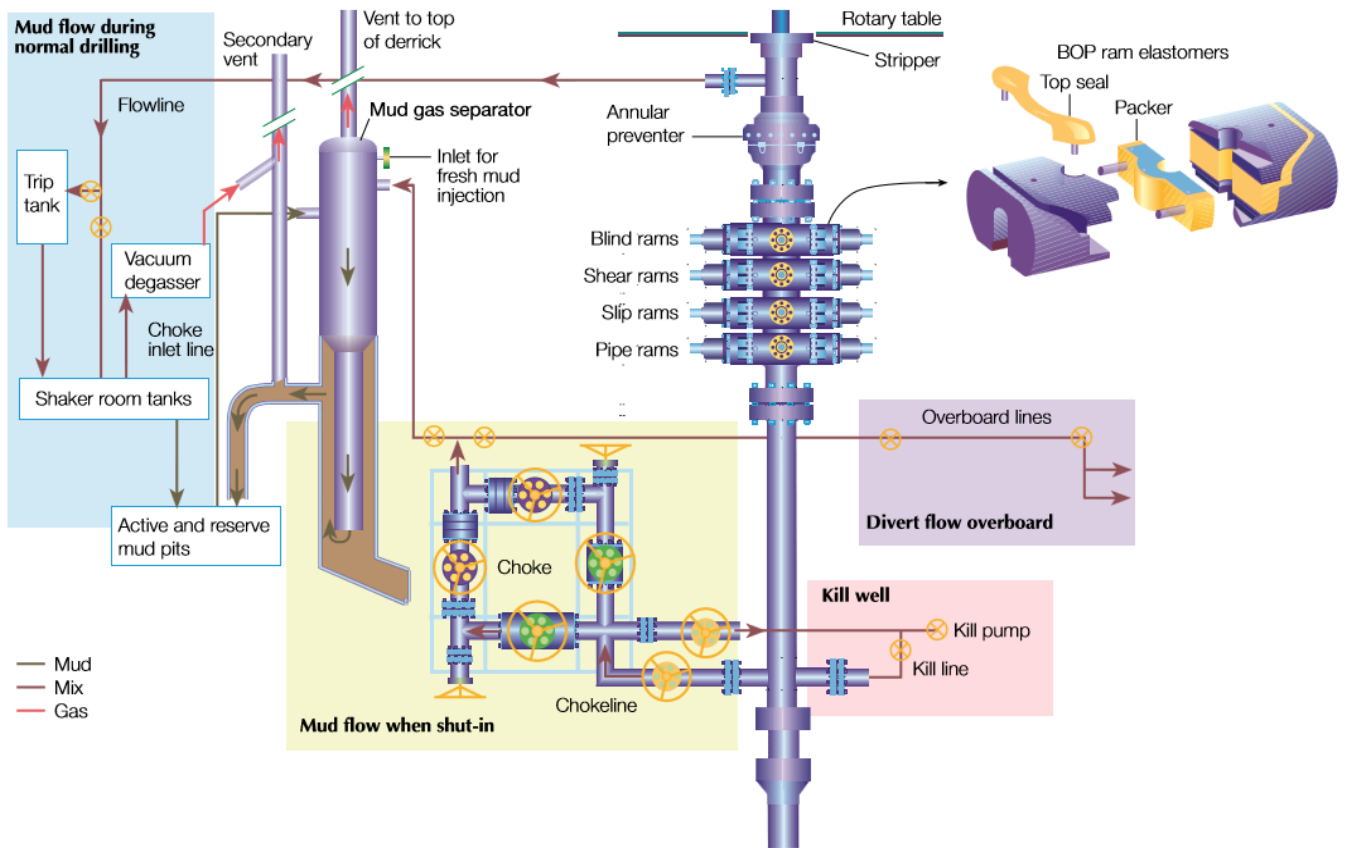
Στην αριστερή εικόνα παρατηρούνται τα θρύμματα, τα οποία έχουν προκύψει από σχιστόλιθο στον οποίο επικρατούν φυσιολογικές συνθήκες πίεσης. Αντίθετα, στην δεξιά εικόνα οι συνθήκες πίεσης είναι μη φυσιολογικές και αυτό φαίνεται από τα μακρόστενα και γωνιώδη θρύμματα.

- Μείωση της πυκνότητας.
- Αλλαγές στη θερμοκρασία.
- Μείωση της πίεσης κυκλοφορίας.
- Αλλαγή στη σύσταση των ρευστών διάτρησης.
- Αύξηση των χλωριούχων στα ρευστά διάτρησης.
- Ροή ρευστών διάτρησης από την γεώτρηση, ενώ οι αντλίες είναι εκτός λειτουργίας.
- Έλλειψη ανάγκης για γέμισμα της γεώτρησης μετά την καθέλκυση και ανέλκυση της διατρητικής στήλης. Από τη στιγμή που καθελκύεται η διατρητική στήλη εκτοπίζει μία ποσότητα των ρευστών διάτρησης. Στην περίπτωση που ανελκυθεί και παρατηρηθεί ότι τα ρευστά διάτρησης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την πρό καθέλκυσης κατάσταση είναι υπόδειξη ότι πιθανόν να υπάρχει αιφνίδια εισροή.
- Μείωση του βάρους της διατρητικής στήλης. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε περιπτώσεις μεγάλης εισροής ρευστών.

#### 4.1.3. Ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης

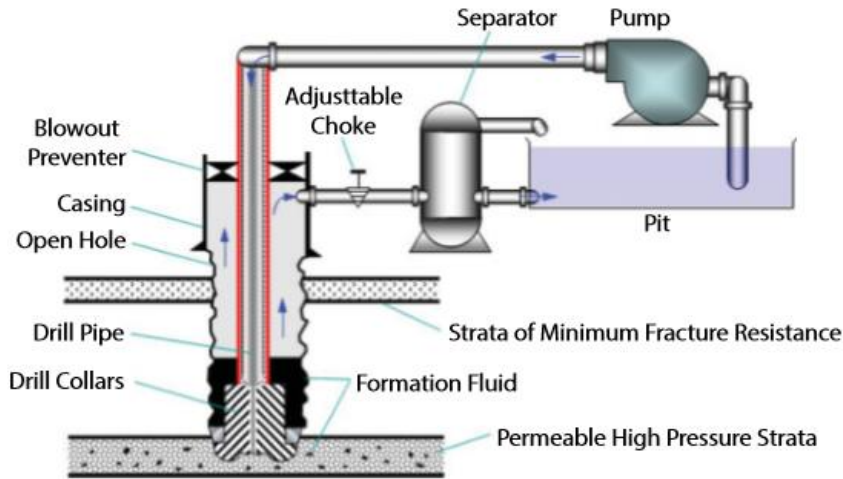
Με το που εντοπίζεται μία εισροή, η διαδικασία της όρυξης διακόπτεται και η γεώτρηση απομονώνεται - κλείνει. Η εισροή στη συνέχεια πρέπει να κυκλοφορήσει προς την επιφάνεια και έξω από το σύστημα, με την πίεση να παραμένει ελεγχόμενη (Εικόνα 4-7). Υπό φυσιολογικές συνθήκες τα ρευστά διάτρησης επιστρέφουν στις δεξαμενές λάσπης (mud pits) μέσω του σωλήνα ροής των ρευστών διάτρησης από τη γεώτρηση (flowline), αφού πρώτα προηγηθεί ο διαχωρισμός των θρυμμάτων από τους διαχωριστές (shale shakers). Εάν στη γεώτρηση εμφανιστεί αιφνίδια εισροή, τότε ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας θα διακόψει τη ροή προς την επιφάνεια κατευθύνοντάς την, μέσω

της γραμμής στραγγαλισμού, στη διάταξη στραγγαλισμού και στη συνέχεια στο διαχωριστή ρευστών διάτρησης-αερίου (mud-gas separator – MGS). Εντός του διαχωριστή το αέριο εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα και τα ρευστά διάτρησης επιστρέφουν στο σύστημα. Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας αποτελείται από ένα συνδυασμό κατακόρυφων εμβόλων (annular preventer) και σιαγόνων (rams) – η ακριβής επιλογή του αριθμού των στοιχείων ποικίλει.



Εικόνα 4-7. Διάταξη ελέγχου γεώτρησης (MacAndrew, et al., 1993)

Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας αποτελεί το βασικό μέσο κλεισίματος της γεώτρησης. Στην περίπτωση που εντοπιστεί αιφνίδια εισροή ο πρώτος αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας που κλείνει είναι αυτός του διάκενου (annular blowout preventer). Ένα ελαστικό στοιχείο διογκώνεται με τη χρήση υδραυλικής πίεσης, και είναι τόσο ευλύγιστο ώστε να στεγανοποιήσει περιμετρικά τον κατάντη εξοπλισμό. Όταν επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν σύνδεσμοι διατρητικών στελεχών (tool joints) που να εμποδίζουν, τα οριζόντια έμβολα απομόνωσης της διατρητικής στήλης (pipe rams) κλείνουν και απομονώνουν περιμετρικά την διατρητική στήλη (drill pipes). Με την παραπάνω διαδικασία διακόπτεται η κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης προς τους διαχωριστές των θρυμμάτων (shale shakers) και προς τον χώρο απόθεσης των ρευστών διάτρησης (mud pits). Αντί αυτού θα πρέπει να κυκλοφορήσει από τη γραμμή στραγγαλισμού (choke line) στη βαλβίδα στραγγαλισμού (choke manifold), που χρησιμοποιείται για να ελαττώσει την πίεση των ρευστών διάτρησης στην επιφάνεια. Στην Εικόνα 4-8 παρουσιάζεται το παραπάνω διάγραμμα σε πιο απλοποιημένη μορφή.



Εικόνα 4-8. Απλοποιημένη μορφή διάταξης ελέγχου της γεώτρησης (Hossain, 2015)

Αξιόλογη συζήτηση έχει προκληθεί για τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η “hard shut-in” διαδικασία έναντι της “soft shut-in”. Κατά την “hard shut-in” διαδικασία τα κατακόρυφα έμβολα κλείνουν απευθείας μετά τη διακοπή των αντλιών. Κατά την “soft shut-in” διαδικασία, η διάταξη στραγγαλισμού ανοίγεται προτού κλείσουν τα κατακόρυφα έμβολα και όταν εντέλει κλείσουν τότε κλείνει και η διάταξη στραγγαλισμού. Ένα επιχείρημα υπέρ της “soft shut-in” διαδικασίας είναι ότι αποφεύγεται το φαινόμενο της κρούσης του ύδατος (water-hammer effect) που οφείλεται στην απότομη διακοπή της ροής των ρευστών διάτρησης και προτείνεται μία εναλλακτική μέθοδος (π.χ. η μέθοδος της χαμηλής πίεσης στη διάταξη στραγγαλισμού – low-choke-pressure method) εάν η πίεση της σωλήνωσης είναι αρκετά μεγάλη. Ωστόσο το φαινόμενο της κρούσης του ύδατος δεν έχει επιβεβαιωθεί στην πράξη και η μέθοδος της χαμηλής πίεσης στη διάταξη στραγγαλισμού είναι μία αναξιόπιστη διαδικασία. Το βασικό μειονέκτημα της “soft shut-in” διαδικασίας είναι ότι επιτρέπεται η συνεχόμενη αιφνίδια εισροή ρευστών του σχηματισμού στη γεώτρηση ενώ πραγματοποιούνται εργασίες διάνοιξης της (PetroWiki, 2015). Ακόμα από κάποιους επικρατεί η πεποίθηση ότι με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται το υδροστατικό σοκ του σχηματισμού. Τέλος, αποτελεί περισσότερο περίπλοκη διαδικασία, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα λάθους (Jardine SI., February 23-25, 1993).

Η ικανότητα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας να αντιμετωπίσει τέτοιες πιέσεις εξαρτάται από τα ελαστομερή παρεμβύσματα (elastomeric seals) που βρίσκονται εντός των σιαγόνων (rams) και την πιθανότητα εξώθησής τους. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα εξώθησής τους. Τα παρεμβύσματα αυτά ενδέχεται να εκτεθούν παρατεταμένα σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 205 °C (400 °F) – τιμή που ξεπερνά τα όρια των συνηθισμένων εξαρτημάτων. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis) χρησιμοποιήθηκε για να εντοπιστούν ποια σημεία του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας επηρεάζονται περισσότερο από τη θερμοκρασία και ποια παρεμβύσματα χρειάζονται ειδικά ελαστομερή στοιχεία για να αντέξουν θερμοκρασίες 350 °F (Jardine, 1993). Μερικές φορές, χρησιμοποιούνται ειδικές οθόνες ελέγχου θερμοκρασίας του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν θα παραβιαστούν αυτά τα θερμοκρασιακά όρια. Ωστόσο, τα ελαστομερή παρεμβύσματα που είναι ικανά να

αντέξουν σε μεγάλες θερμοκρασίες είναι πιο σκληρά από τα συνήθη, με αποτέλεσμα να μην στεγανοποιούν επαρκώς σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δυσκολεύοντας έτσι την εκτέλεση ελέγχων της πίεσης της γεώτρησης κοντά στη επιφάνεια (surface pressure tests).

Όταν ο αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας και η βαλβίδα στραγγαλισμού είναι κλειστά, η πίεση στο δακτύλιο της γεώτρησης και στη διατρητική στήλη αυξάνει. Η μέγιστη πίεση της διατρητικής στήλης χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της πίεσης του πυθμένα, που στη συνέχεια χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του κλεισίματος της γεώτρησης. Η στρατηγική κλεισίματος της γεώτρησης λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες που έγιναν στην όρυξη της γεώτρησης, κατά την αιφνίδια εισροή (Jardine, 1993).

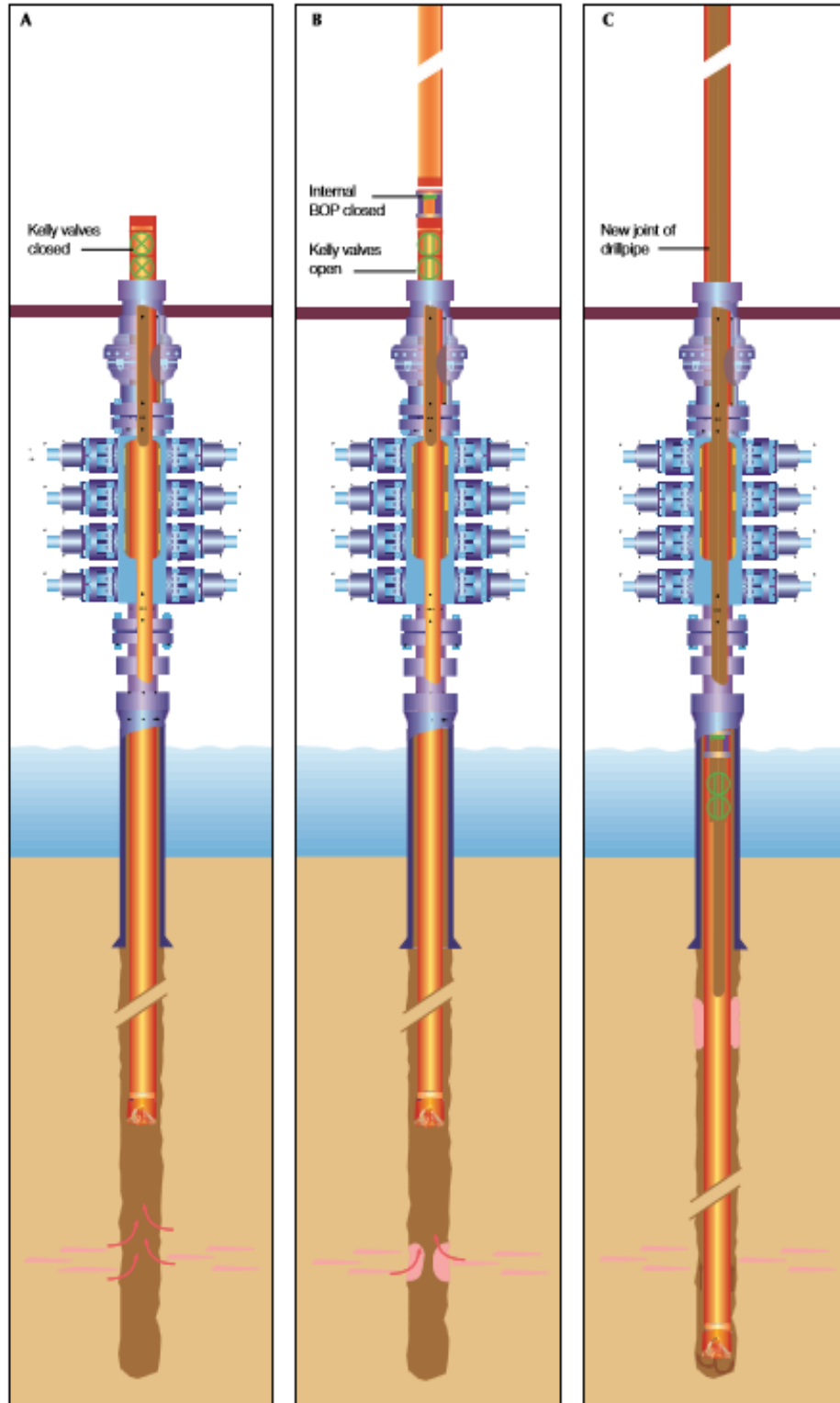
Εάν η αιφνίδια εισροή προκύψει κατά τη διάρκεια της όρυξης της γεώτρησης, ρευστά διάτρησης ενισχυμένου ειδικού βάρους (weighted mud) – είτε από προηγούμενη μίξη, είτε από έτοιμο απόθεμα – εισπνέζονται στο σύστημα κυκλοφορίας. Τα ρευστά του σχηματισμού που έχουν εισέλθει εκτοπίζονται αργά προς την επιφάνεια, μέσα από το δακτύλιο της γεώτρησης, ενώ ταυτόχρονα διογκώνονται καθώς η υδροστατική πίεση μειώνεται. Στην επιφάνεια, το μείγμα των ρευστών διάτρησης κατευθύνεται στη βαλβίδα στραγγαλισμού, μέσω της γραμμής στραγγαλισμού, με την πίεσή του να μειώνεται από τη διάταξη στραγγαλισμού. Στη γεώτρηση ανακτάται σταδιακά ο έλεγχος με προσεκτική επιλογή του κατάλληλου ειδικού βάρους λάσπης διάτρησης και ανοίγματος της βαλβίδας στραγγαλισμού (choke opening).

Επιπλέον είναι ζωτικής σημασίας ο εξοπλισμός του γεωτρύπανου να μπορεί να αντέξει τις πιέσεις που εμφανίζονται κατά το κλείσιμο της γεώτρησης – για παράδειγμα το Kelly ή το top drive κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορέσουν να αντέξουν πιέσεις μέχρι 5.000 psi. Η πίεση της γεώτρησης στην επιφάνεια (surface pressure) υπολογίζεται ως το άθροισμα της πίεσης κλεισίματος της διατρητικής στήλης (shut-in drillpipe pressure) και της πίεσης τριβής (friction pressure) των ρευστών, καθώς αυτά εισπνέζονται στην γεώτρηση. Η πίεση τριβής (friction pressure) των ρευστών μετριέται σε σταθερή βάση από το προσωπικό του γεωτρύπανου στην έναρξη της κάθε δωδεκάωρης βάρδιας. Εάν οι υπολογισμοί δείξουν ότι οι τιμές προσεγγίζουν στις οριακά επιτρεπόμενες, πρέπει να τοποθετηθεί προσωρινά συνδεσμολογία κλεισίματος της γεώτρησης (kill assembly), ικανή να αντέξει μέχρι και τα 15.000 psi.

Δύο βαλβίδες στην διατρητική στήλη κάτω από το Kelly ή το top drive – που ονομάζονται βαλβίδες επιφάνειας (surface valves) ή Kelly cocks – είναι κλειστές ώστε να στεγανοποιούν εσωτερικά την διατρητική στήλη, επιτρέποντας έτσι την αφαίρεση του Kelly ή το top drive για την εγκατάσταση του ως άνω προσωρινού μηχανισμού κλεισίματος της γεώτρησης.

Η ανάκτηση του ελέγχου μίας αιφνίδιας εισροής, καθώς η διατρητική στήλη ανελκύεται από τη γεώτρηση δεν είναι απλή διαδικασία. Ρευστά προερχόμενα από τον ταμιευτήρα εισέρχονται κάτω από την διατρητική στήλη και δεν μπορούν να κυκλοφορήσουν έξω από τη γεώτρηση, έως ότου η διατρητική στήλη προωθηθεί κάτω από το σημείο της εισροής (Εικόνα 4-9). Η προσθήκη νέων διατρητικών στελεχών και η προώθηση της διατρητικής στήλης μέσω του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας ονομάζεται stripping και απαιτεί άψογο συγχρονισμό των διάφορων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο γεωτρύπανο. Όταν κλείσει το κατακόρυφο έμβολο (annular preventer) περιμετρικά της διατρητικής

στήλης, στον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας, νέα διατρητικά στελέχη προστίθενται και ωθούνται από τον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας εντός της γεώτρησης. Ενώ πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία, ελέγχεται η πίεση των διατρητικών στελεχών. Δύο βαλβίδες kelly cock valves ή βαλβίδες επιφανείας (surface valves) συμπεριλαμβάνονται στον εξοπλισμό της διατρητικής στήλης, ακριβώς κάτω από το top drive ή το Kelly. Ο ρόλος τους είναι να επιτρέπουν τη ροή μόνο προς μία κατεύθυνση, συγκρατώντας την πίεση που έρχεται από τη γεώτρηση και επιτρέποντας τη ροή προς τη γεώτρηση (A). Με αυτόν τον τρόπο οι βαλβίδες του kelly μπορούν να ανοιχτούν και νέα στελέχη να προστεθούν στη διατρητική στήλη χωρίς να εκτίθεται το γεωτρύπανο στην πίεση της γεώτρησης (B). Προστίθενται τόσα στελέχη ώστε το κοπτικό άκρο να βρεθεί κάτω από το σημείο εισροής, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να κυκλοφορήσει στην επιφάνεια (C). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας πρέπει να ληφθούν υπόψη ο συνεχώς αυξανόμενος όγκος της διατρητικής στήλης, καθώς προστίθενται σε αυτήν νέα στελέχη και η διόγκωση που υφίστανται τα ρευστά του ταμιευτήρα, καθώς ανέρχονται στη γεώτρηση. Απαιτείται προσεκτικός έλεγχος της διάταξης στραγγαλισμού, ώστε να εκτονώνονται σταδιακά οι παραπάνω όγκοι και να διατηρείται σταθερή η πίεση των ρευστών διάτρησης.



Εικόνα 4-9. Προσθήκη διατρητικών στελεγών στη διατρητική στήλη, κατά τη διαδικασία ελέγχου μιας αιφνίδιας εισροής (stripping) (MacAndrew, et al., 1993)

Όταν η διατρητική στήλη εισέλθει ολοκληρωτικά στη γεώτρηση, ακολουθείται ο συμβατικός τρόπος ανάκτησης ελέγχου της γεώτρησης της γεώτρησης με τα προϊόντα της αιφνίδιας εισροής να κυκλοφορούν στον αγωγό στραγγαλισμού (choke manifold).

Για τις γεωτρήσεις HP/HT ο τυπικός αγωγός στραγγαλισμού είναι ικανός να αντέξει πιέσεις έως 15.000 psi, ενώ ο εξοπλισμός κατάντη της διάταξης στραγγαλισμού κατασκευάζεται ώστε να αντέχει τα 5.000 psi και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και τα 10.000 psi. Για λόγους ασφαλείας απαιτούνται τουλάχιστον δύο διαδρομές ροής (η μία εφεδρική), με αποτέλεσμα ο αγωγός στραγγαλισμού να αποτελείται από δύο βαλβίδες στραγγαλισμού. Σε περίπτωση που υπάρξει μεγάλη πτώση πίεσης στη διάταξη στραγγαλισμού (choke) ενδέχεται το ρευστό να υποστεί αδιαβατική ψύξη και να εμφανίσει υδρίτες ή να φράξει τους. Για να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο γλυκόλη ή αιθανόλη πρέπει να εισπνεστούν ανάντη της διάταξης στραγγαλισμού. Με την παρουσία αισθητήρων ανάντη και κατάντη της διάταξης στραγγαλισμού επιτυγχάνεται ο ακριβής προσδιορισμός της πίεσης και της θερμοκρασίας και η παρακαλούθηση πιθανής εμφάνισης υδριτών.

Όταν η πίεση των ρευστών έχει μειωθεί από τη διάταξη στραγγαλισμού τότε αυτά οδηγούνται προς δύο κατευθύνσεις:

- Σε περίπτωση ανάγκης και μόνο εγχύονται στη θάλασσα, παραδείγματος χάρη όταν ο αγωγός έχει μπλοκάρει.
- Προς τον διαχωριστή αερίου-ρευστών (MGS) – γνωστό και ως poor-boy separator.

Ο διαχωριστής ανέκαθεν χρησιμοποιείται για να εκτονώνει μικρές ποσότητες ελεύθερου αερίου από τα ρευστά διάτρησης, αποτρέποντας έτσι τη δημιουργία αφρού και μειώνοντας τον όγκο του αερίου που εισέρχεται στην επόμενη διάταξη εξαερισμού (vacuum degasser). Εντός του διαχωριστή υπάρχει περιορισμένη πίεση, που σε περίπτωση αιφνίδιας εισροής, αποτρέπει το αέριο να κινηθεί προς τις δεξαμενές των ρευστών διάτρησης. Στις γεωτρήσεις HP/HT, αισθητήρες πίεσης ενημερώνουν τότε η πίεση του αερίου απειλεί να υπερκεράσει την υδροστατική πίεση, ώστε σε τέτοια περίπτωση να κλείσει η γεώτρηση και να ελεγχθεί το ρευστό που είναι υπεύθυνο να απομονώνει τις δεξαμενές από το αέριο (Low, 1991).

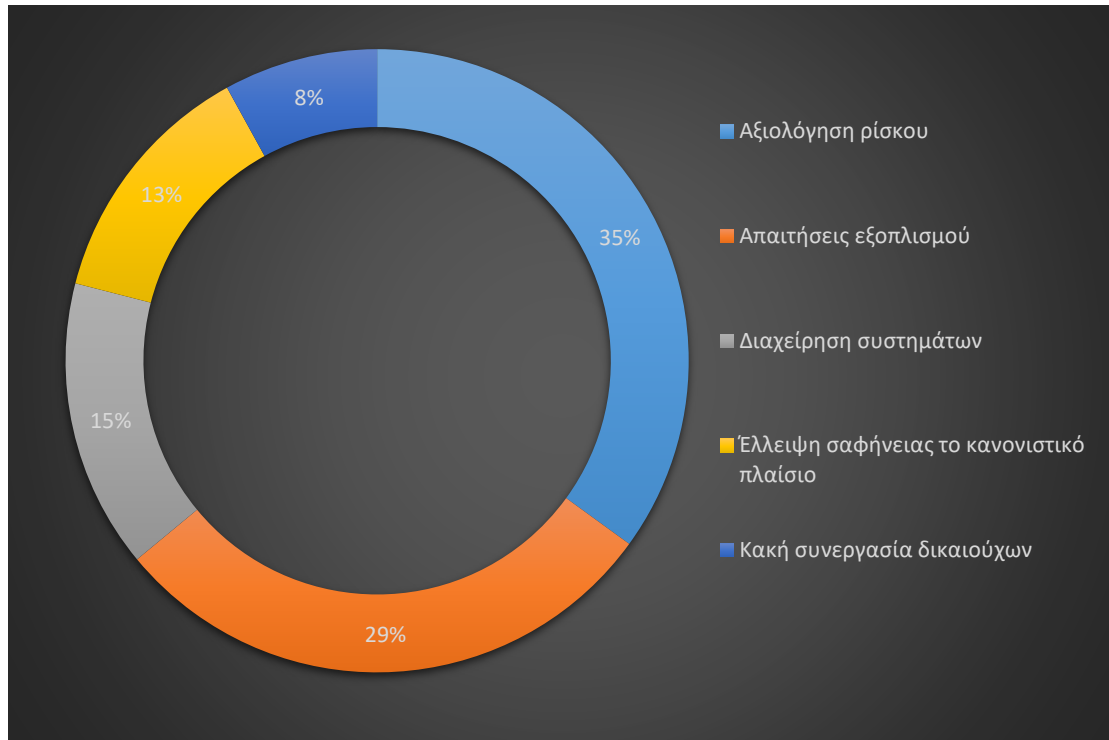
Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εισροή ενδέχεται να είναι τόσο μεγάλη, ώστε η αναμενόμενη πίεση να φτάνει το επιτρεπόμενο όριο ή η συγκέντρωση του υδρόθειου ( $H_2S$ ) να είναι τόσο σπουδαία, ώστε η κυκλοφορία των ρευστών του ταμιευτήρα στην επιφάνεια να καθίσταται επικίνδυνη. Σε αυτές τις σπάνιες περιπτώσεις, η μόνη εναλλακτική είναι να εισπνεστούν τα εισερχόμενα ρευστά μέσα στο σχηματισμό – μία διαδικασία που ονομάζεται bull heading.

Η διαδικασία bull heading παρουσιάζει επιπλέον δυσκολίες. Ειδικότερα, ενδέχεται να απαιτεί μεγαλύτερες πιέσεις στην επιφάνεια και γρηγορότερους ρυθμούς εισπίεσης των ρευστών μέσα στο σχηματισμό, από αυτούς που απαιτούνται για την κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πίεση του σχηματισμού ή ακόμα και να τον ρωγματώσει. Επιπλέον, ο ρωγματωμένος σχηματισμός μπορεί να μην είναι η αιτία της αιφνίδιας εισροής και αν ακολουθηθεί η παραπάνω διαδικασία να προκύψει υπόγεια έκρηξη – ρευστά του ταμιευτήρα να εισέλθουν σε άλλο σχηματισμό. Άπαξ και ξεκινήσει η διαδικασία του bull heading, ο έλεγχος για το που βρίσκονται τα ρευστά είναι αρκετά δύσκολος. Τέλος, με την εισπίεση των ρευστών μέσα στη γεώτρηση ενδέχεται να ρωγματωθεί η τσιμέντωση, η οποία έχει ήδη αποδυναμωθεί με τη διάνοιξη της γεώτρησης.



#### 4.1.4. Ασφάλεια - Σύγχρονη πραγματικότητα

Μπορεί μεν σήμερα πολλά από τα παραπάνω προβλήματα να έχουν επιλυθεί σε ένα βαθμό, ωστόσο σύμφωνα με έρευνα που εκτελέστηκε το 2015, οι ιδιοκτήτριες εταιρίες των γεωτρήσεων ΗΡ/ΗΤ έχουν να αντιμετωπίσουν αρκετές δυσκολίες που σχετίζονται με την ασφάλεια. Οι δυσκολίες αυτές συνοψίζονται στην ακόλουθη Εικόνα 4-10.



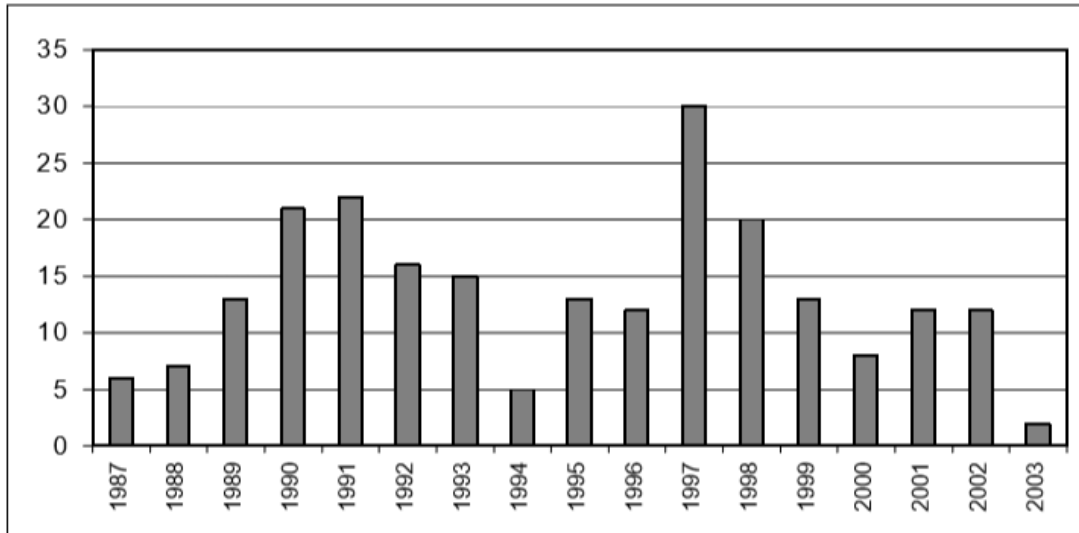
Εικόνα 4-10. Δυσκολίες στην ασφάλεια και υγιεινή (Oil and Gas IQ, 2015)

Όπως παρατηρείται από το γράφημα, με την ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων με μεγαλύτερη πίεση, θερμοκρασία και σε μεγαλύτερο βάθος δημιουργούνται συνεχώς νέες δυσκολίες. Συνεπώς, νέες τεχνολογίες, καλύτερη συνεργασία και οργάνωση απαιτείται για να καταστεί ασφαλής η όρυξη γεωτρήσεων σε ΗΡ/ΗΤ περιβάλλοντα.

## 4.2. Περιστατικά στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (United Kingdom Continental Shelf – UKCS)

Το 2004 η Εκτελεστική Αρχή Ασφάλειας και Υγιεινής του Ηνωμένου Βασιλείου (UK Health and Safety Executive – HSE) διεξήγαγε έρευνα σχετικά με τις γεωτρήσεις ανάπτυξης (development wells) σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον

ορισμό του DTI (Department of Trade and Industry - Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας) για τις γεωτρήσεις HP/HT – πίεση ταμειυτήρα μεγαλύτερη από 10.000 psi (69 MPa) και θερμοκρασία μεγαλύτερη των 150 °C (300 °F) – στην χρονική περίοδο από το 1987 έως το 2003 στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου ορύχθηκαν 227 γεωτρήσεις. Οι περιπτώσεις στις οποίες σημειώθηκε κάποιο περιστατικό ποικίλουν και κυμαίνονται από 2 έως 30 σε ετήσια βάση (Εικόνα 4-11).



Εικόνα 4-11. Περιστατικά σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (*Highoose Limited, 2004*)

Συνολικά στην παραπάνω χρονική περίοδο εντοπίστηκαν 130 περιστατικά σε γεωτρήσεις HP/HT. Στη συνέχεια τα περιστατικά που εντοπίστηκαν κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με την παρακάτω κατάταξη:

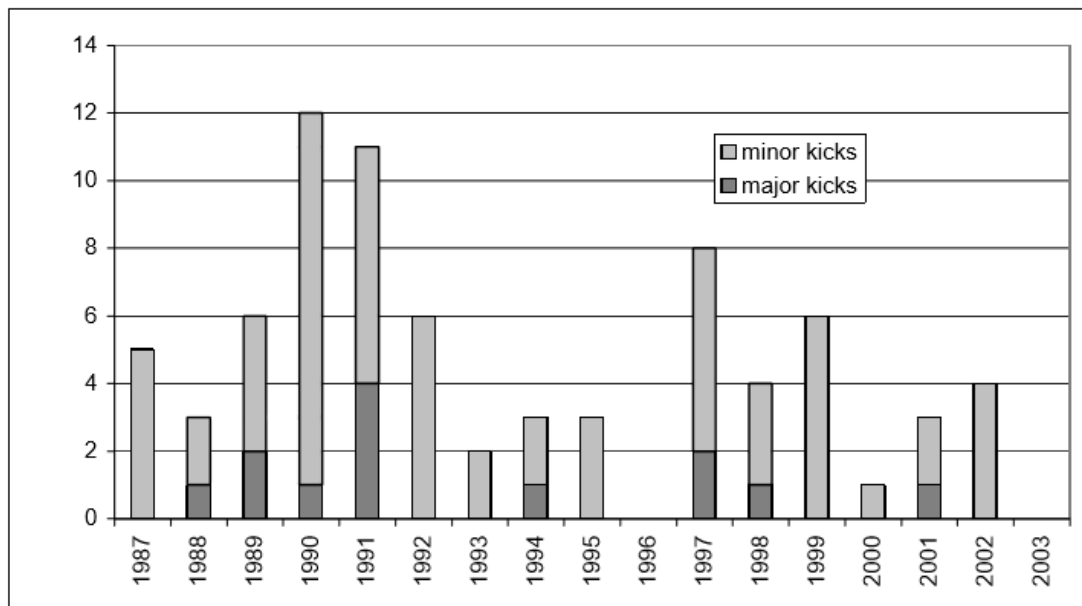
- Έλεγχος αιφνίδιων εισροών (kicks).
- Αποτυχία στο σύστημα του αντεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και στον σχετικό εξοπλισμό.
- Ανίχνευση H<sub>2</sub>S κατά τη διάρκεια της όρυξης ή σε δείγματα των ρευστών διάτρησης.
- Μηχανική βλάβη σε κάποιο εξάρτημα καθοριστικής σημασίας για την ασφάλεια του γεωτρύπανου.
- Ανεξέλεγκτη ροή από τη γεώτρηση.

#### 4.2.1. Έλεγχος αιφνίδιων εισροών

Ως αιφνίδιες εισροές χαρακτηρίζονται τα περιστατικά κατά τα οποία γίνεται χρήση του αντεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας ή κάποιου άλλου μέσου ώστε να ελεγχθεί η ροή της γεώτρησης. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση γίνεται για τις αιφνίδιες εισροές ανάλογα με τον όγκο της εισροής. Αν ο όγκος αυτός ξεπερνά τα 3,2 m<sup>3</sup> (20 bbl), κατά τη διάνοιξη γεώτρησης διαμέτρου μικρότερης/ίσης των 216 mm (8½ ”), η εισροή χαρακτηρίζεται ως

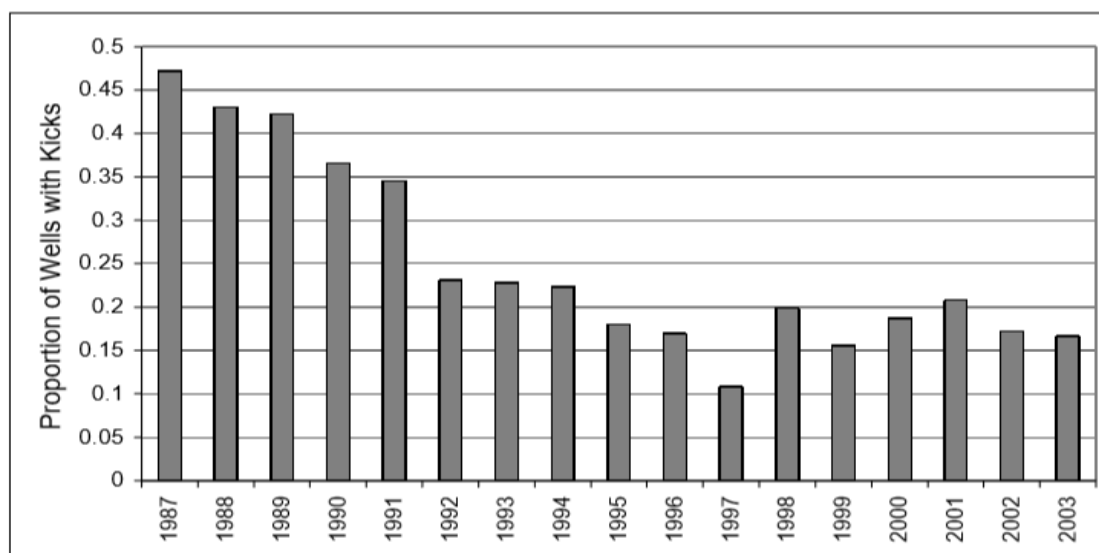
ευρεία (major), αλλιώς ως περιορισμένη (minor). Για άλλες διαμέτρους γεώτρησης ο όγκος προσαρμόζεται στο μήκος του κενού που γεμίζεται με εισρεόμενο ρευστό.

Συνολικά εντοπίστηκαν 77 περιστατικά σχετικά με αιφνίδιες εισροές και η κατάταξή τους φαίνεται στην κάτω εικόνα (Εικόνα 4-12).



Εικόνα 4-12. Αριθμός αιφνίδιων εισροών σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004)

Για να προσδιοριστεί ο σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αιφνίδιων εισροών (relative incident rate for kicks) τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-12 σε ετήσια βάση συγκρίνονται με τον αντίστοιχο αριθμό των γεωτρήσεων HP/HT που ορύχθηκαν κατά το ίδιο έτος. Περαιτέρω, για την ορθότερη εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης περιστατικών αιφνίδιων εισροών, ελήφθη επίσης υπόψη, όχι ο συνολικός αριθμός αιφνίδιων εισροών που καταγράφηκαν (77) (Εικόνα 4-12), αλλά ο αριθμός των γεωτρήσεων στις οποίες συνέβη αιφνίδια εισροή (56) (Εικόνα 4-13).



Εικόνα 4-13. Σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αιφνίδιων εισροών σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004)

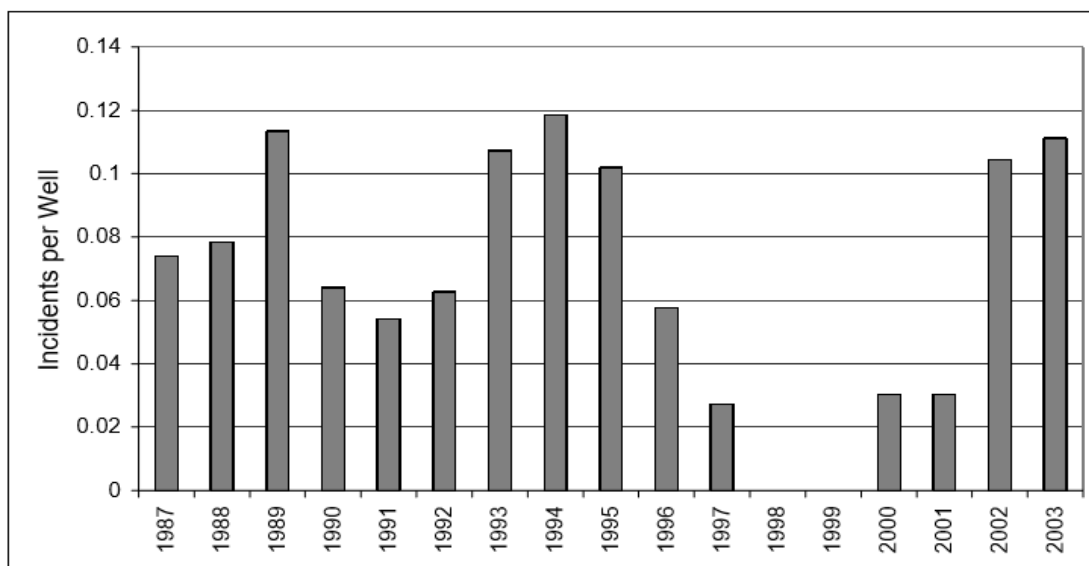
Ο Hinton (Hinton, 1999) αναφέρει ότι κατά την περίοδο 1989-1998 περιστατικά αιφνίδιων εισροών καταγράφηκαν στο 22% των γεωτρήσεων HP/HT χωρίς ευδιάκριτη τάση αύξησης ή μείωσή τους, ποσοστό, ωστόσο, αρκετά υψηλότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο (11%) που αφορά στα περιστατικά αιφνίδιων εισροών στο σύνολο των γεωτρήσεων που ορύχθησαν αυτήν την περίοδο στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου. Στην Εικόνα 4-13 καθίσταται, ωστόσο, εμφανές ότι ο ρυθμός εμφάνισης τέτοιων περιστατικών σε γεωτρήσεις HP/HT βαίνει μειούμενος, κάτι που κυρίως οφείλεται στις βελτιωμένες διαδικασίες και στην εκπαίδευση του προσωπικού που κατέστη αναγκαία μετά το ατύχημα του Ocean Odyssey το 1988.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα περιστατικά που αναφέρθηκαν αφορούν μη αναμενόμενες εισροές που συνδυάζονται με διαφυγή των ρευστών διάτρησης εντός περατών σχηματισμών.

#### 4.2.2. Αποτυχία στο σύστημα του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και στον σχετικό εξοπλισμό

Κατά τη χρονική περίοδο 1987-2003 στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου αναφέρθηκαν συνολικά 12 περιστατικά σχετικά με αποτυχία στο σύστημα του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και στον βοηθητικό εξοπλισμό. Οι αποτυχίες του εξοπλισμού περιλαμβάνουν τον σφαιροειδή ή κυκλικό μηχανισμό (annular element), την γραμμή ελέγχου (control line), τη γραμμή στραγγαλισμού (choke line), τη γραμμή κλεισίματος (kill line) και τα παρεμβύσματα του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP seals). Δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση μεταξύ των περιστατικών η οποία να αναδεικνύει κάποιο τμήμα του εξοπλισμού ως περισσότερο ευάλωτο.

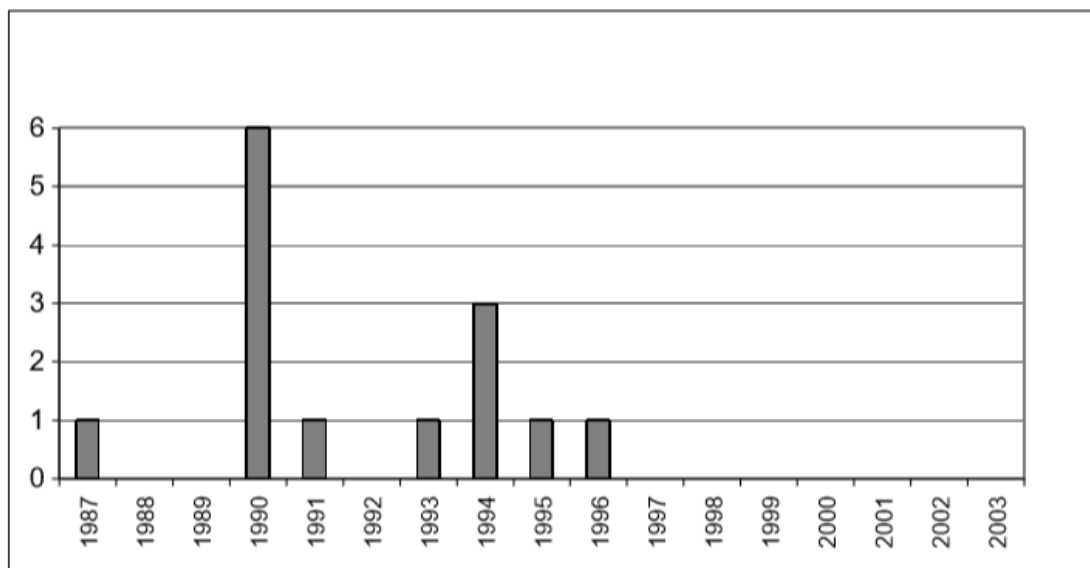
Ο σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αποτυχίας του BOP και του σχετικού εξοπλισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 4-14. Δεν υπάρχει σαφής ένδειξη αύξησης ή μείωσης αυτού του τύπου των περιστατικών με την πάροδο του χρόνου – εξαιτίας κυρίως του περιορισμένου αριθμού του.



Εικόνα 4-14. Σχετικός ρυθμός εμφάνισης περιστατικών αποτυχίας του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004)

#### 4.2.3. Ανίχνευση H<sub>2</sub>S

Αναφορές που αφορούν σε περιστατικά ανίχνευσης H<sub>2</sub>S σε γεωτρήσεις HP/HT υποβλήθηκαν μόνο κατά τα 10 πρώτα χρόνια του χρονικού διαστήματος που εξετάστηκε (1987-1996), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-15. Μετά το 1995 οι νέοι κανονισμοί σχετικά με την αναφορά ατυχημάτων (new reporting Regulations – RIDDOR (HSE L73, 1995)) προέβλεπαν την υποβολή έκθεσης ατυχημάτων μόνο στις περιπτώσεις που η παρατηρούμενη συγκέντρωση H<sub>2</sub>S είναι μεγαλύτερη από την αναμενομένη.

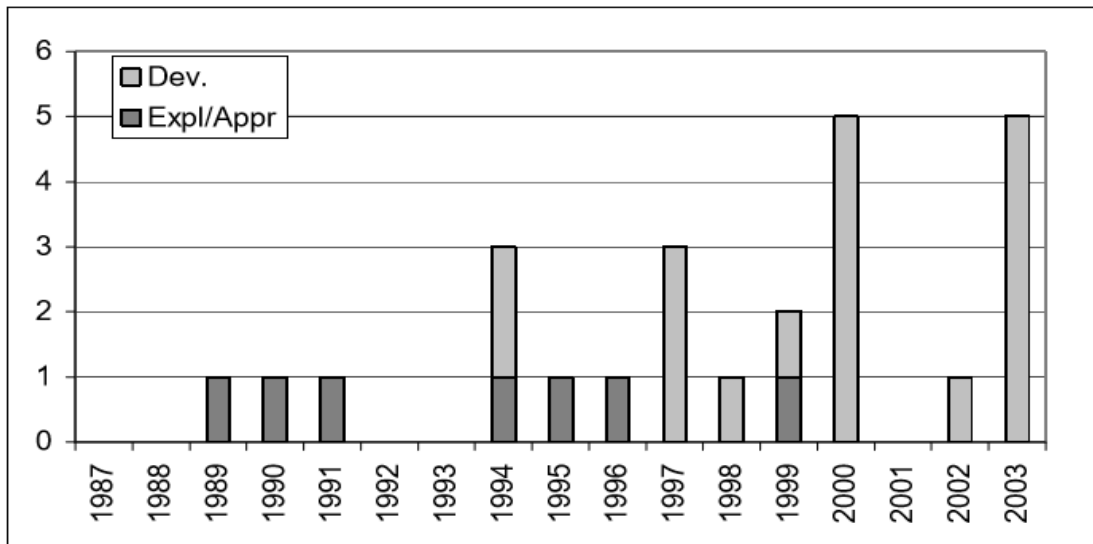


Εικόνα 4-15. Αριθμός περιστατικών ανίχνευσης H<sub>2</sub>S σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004)

#### 4.2.4. Μηχανική βλάβη

Αυτή η κατηγορία περιστατικών περιλαμβάνει όλες τις αποτυχίες που καταγράφηκαν στον λοιπό εξοπλισμό πέραν του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας. Συγκεκριμένα, ο αριθμός αυτών των περιστατικών καταγράφεται ξεχωριστά για τις ερευνητικές γεωτρήσεις και τις γεωτρήσεις εκτίμησης αποθεμάτων (exploration/appraisal wells – Expl/Appr) και ξεχωριστά για τις γεωτρήσεις ανάπτυξης (development wells - Dev). Συνολικά, κατά το διάστημα 1987-2003 καταγράφηκαν 25 τέτοια περιστατικά, τα οποία αρχικά αφορούσαν μόνο ερευνητικές γεωτρήσεις και στη συνέχεια και γεωτρήσεις ανάπτυξης (Εικόνα 4-16).

Οι κύριες αιτίες αποτυχίας αποδόθηκαν σε ελαττωματικά στεγανωτικά και αστοχίες στον μηχανισμό στεγανοποίησης (seal assembly). Επιπλέον, οι πρώτες γεωτρήσεις ανάπτυξης εμφάνισαν προβλήματα στη γραμμή ροής διαμέσου του αναρτήρα της σωλήνωσης (mudline casing hanger installation), διαρροές κατά την παραγωγή (leaking production) στα παρεμβύσματα των liner (liner packers), καταστροφή της σωλήνωσης και διαρροή από την κεφαλή της γεώτρησης (wellhead) και από τον εξοπλισμό της γραμμής ροής (flowline equipment).



Εικόνα 4-16. Αριθμός μηχανικών βλαβών στον εξοπλισμό εκτός του BOP σε γεωτρήσεις HP/HT στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Highoose Limited, 2004)

Κοινός παρονομαστής σε πολλά από τα παραπάνω περιστατικά είναι η αστοχία των σωλήνων παραγωγής (production tubulars), εξαιτίας αξονικής φόρτισης. Από τους ελέγχους που έγιναν μετέπειτα δεν βρέθηκε κανένα στοιχείο που να αποδεικνύει ότι ξεπεράστηκε το όριο αντοχής αυτού του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα η ολική καταστροφή του να αποδίδεται σε ρωγμές λόγω της λειτουργίας του σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και κατασκευαστικές ατέλειες. Αυξημένοι έλεγχοι ποιότητας μπορούν να περιορίσουν την εμφάνιση τέτοιων περιστατικών.

#### 4.2.5. Ανεξέλεγκτη ροή

Μόνο δύο περιστατικά ανεξέλεγκτης ροής σημειώθηκαν από το 1987 έως το 2003. Το πρώτο αφορά στο ατύχημα Ocean Odyssey όπου ο εξοπλισμός στον πυθμένα τελικά απέτυχε στο σκοπό του, ύστερα από μεγάλη περίοδο προσπάθειας ελέγχου μιας αιφνίδιας εισροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι κανένα εκ των δύο περιστατικών δεν ήταν θανατηφόρο.

Βάσει του παραπάνω σοβαρού ατυχήματος που κατέληξε σε έκρηξη, η εταιρεία Blowfam system, τον Φεβρουάριο του 2004, εκτίμησε τη συχνότητα πρόκλησης ενός σοβαρού ατυχήματος (κατά την περίοδο 1987-2003), λαμβάνοντας υπόψη τα 77 περιστατικά ελέγχου αιφνίδιας εισροής σε 56 γεωτρήσεις HP/HT, καθώς και το σύνολο των γεωτρήσεων στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (227 γεωτρήσεις – κυρίως ερευνητικές) ως εξής:

Ερευνητικές γεωτρήσεις HP/HT → 0.43% (ή 1 στις 233)

Γεωτρήσεις ανάπτυξης HP/HT → 0.17% (ή 1 στις 588)

Το δεύτερο περιστατικό αφορά στη διαφυγή όξινου αερίου (sour gas) κατά τις διαδικασίες εγκατάλειψης της γεώτρησης.

Όπως είναι προφανές από την παραπάνω έρευνα η εκδήλωση ατυχημάτων, από το λιγότερο στο περισσότερο σοβαρό, είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο στην όρυξη γεωτρήσεων HP/HT. Τα περισσότερα περιστατικά αφορούν στην εμφάνιση αιφνίδιας εισροής και στη συνέχεια στις μηχανικές βλάβες του λοιπού εξοπλισμό πέραν του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, στην ανίχνευση H<sub>2</sub>S, στην αποτυχία στο σύστημα του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και στον σχετικό εξοπλισμό και τέλος στην ανεξέλεγκτη ροή αιφνίδιας εισροής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, με την πάροδο των χρόνων, τα περιστατικά μειώνονται, κάτι που οφείλεται στην απόκτηση μεγαλύτερης εμπειρίας των εργαζομένων σχετικά με αυτού του είδους τις γεωτρήσεις. Παρ' όλα αυτά οι εργαζόμενοι πρέπει να παραμείνουν σε εγρήγορση και να είναι έτοιμοι να ανταπεξέλθουν σε όλες τις συνθήκες και σε οποιοδήποτε περιστατικό.

### 4.3. Κανονιστικό πλαίσιο

Κατά τον σχεδιασμό της διάνοιξης γεωτρήσεων σε περιβάλλοντα υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών στη Βόρεια Θάλασσα η ακεραιότητα της γεώτρησης εξαρτάται από τις προϋποθέσεις για ασφάλεια και οικονομικότητα που έχει θέσει η ιδιοκτήτρια εταιρία. Οι προϋποθέσεις αυτές προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του Υπουργείου Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου (Department of Energy, D.En.), ώστε οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στη Βόρεια Θάλασσα να λάβουν την απαραίτητη άδεια για διάνοιξη και λειτουργία της γεώτρησης. Παρακάτω ακολουθούν κάποιες από τις απαιτήσεις του Υπουργείου Ενέργειας που εγκαθιδρύθηκαν εκείνη τη χρονική περίοδο (Οκτώβριος 1990) για την παραχώρηση της άδειας εκμετάλλευσης:

1. Πρόβλεψη της μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης, στην επιφάνεια, στην περίπτωση όπου ο έλεγχος της γεώτρησης καθίσταται δύσκολος, με τα ρευστά διάτρησης να διαπερνούν την βαλβίδα στραγγαλισμού.
2. Πρόβλεψη της ελάχιστης θερμοκρασίας, κατάντη της βαλβίδα στραγγαλισμού, όταν κυκλοφορείται με αργό ρυθμό προς την επιφάνεια σημαντικός όγκος αερίου εισροής το οποίο έχει ψυχθεί εντός του marine riser στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (κατά την άνοδό του σε αυτόν). Αυτές οι προβλέψεις χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο δυνητικών προβλημάτων που σχετίζονται με σχηματισμό υδριτών και εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (cryogenic temperatures) κατάντη της βαλβίδας στραγγαλισμού.
3. Πρόβλεψη της μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης, στην επιφάνεια, κατά τη διάρκεια που πραγματοποιείται τεστ παραγωγής (production test).

Ταυτόχρονα με τις παραπάνω προβλέψεις, μία προκαταρκτική μελέτη πρέπει να συνταχθεί, για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ολοκλήρωσης των γεωτρήσεων στα πεδία ενδιαφέροντος.



Ένας τρόπος για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των ρευστών διάτρησης και των παραμέτρων μεταφοράς της θερμότητας, είναι μέσω ενός EOS (Equation-of-state) μοντέλου, το οποίο προσομοιάζει τις ιδιότητες των ρευστών του ταμειυτήρα και υπολογίζει τις ζητούμενες πιέσεις και θερμοκρασίες. Οι προβλέψεις που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία συγκρίνονται στη συνέχεια με τα αποτελέσματα που έδωσαν τα τεστ του εργαστηρίου, με τις τιμές των παραμέτρων να προσαρμόζονται ώστε να εγγυώνται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

#### 4.4. Κατευθυντήριες γραμμές & πρότυπα

Η όρυξη και η ολοκλήρωση μίας γεώτρησης σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, είναι δύσκολη και επικίνδυνη. Ωστόσο, όσο υπάρχει κινητικότητα σε αυτόν τον τομέα όλο και περισσότερες εταιρίες ορύσσουν γεωτρήσεις σε τέτοια περιβάλλοντα είναι αναμενόμενη η απόκτηση εμπειρίας, τεχνογνωσίας και εξειδίκευσης. Απώτερος σκοπός σε κάθε περίπτωση είναι να βρεθούν τεχνικές ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος, να αυξηθεί η ασφάλεια και η παραγωγικότητα και να βελτιωθεί η οικονομικότητα.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω είναι απαραίτητος ο λεπτομερής σχεδιασμός πριν την έναρξη οποιασδήποτε διαδικασίας. Ειδικότερα, κάποιες χώρες έχουν θεσμοθετήσει διαδικασίες και κατευθυντήριες γραμμές που έχουν προκύψει από την εμπειρία και την τεχνογνωσία, δημιουργώντας ένα πλαίσιο το οποίο υποχρεούνται να ακολουθήσουν οι εταιρίες που θα προχωρήσουν στη διάνοιξη γεωτρήσεων HP/HT. Ένα παράδειγμα, αποτελεί στο Ηνωμένο Βασίλειο το Πετρελαϊκό Ινστιτούτο (Institute of Petroleum) με το «Πρότυπο Ασφαλούς Πρακτικής» (Model Code of Safe Practice) σχετικά με τις γεωτρήσεις HP/HT (The Institute of Petroleum, May 1992), το οποίο αναφέρει τις απαραίτητες διαδικασίες και βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν. Στη Βόρεια Θάλασσα, οι διαχειριστές επιζητούν βοήθεια για την ασφαλή και οικονομική διάνοιξη γεωτρήσεων από τους ανάδοχους του έργου, λόγω της μεγαλύτερης εμπειρίας τους σε τέτοια περιβάλλοντα.

Η Shell Expro σε συνεργασία με την εργολαβική της εταιρεία, Sedco Forex, υιοθέτησαν την τακτική να προσλαμβάνουν εργαζόμενους με εμπειρία, πριν ξεκινήσουν οποιοδήποτε απαιτητικό εγχείρημα σε δύσκολα περιβάλλοντα, όπως έπραξαν στα πεδία Mallard και Hejon της Βόρειας Θάλασσας. Αυτή η τεχνική προϋποθέτει την άρτια συνεργασία μεταξύ των εργαζομένων, ως ομάδα, σε προηγούμενες λιγότερο δύσκολες γεωτρήσεις, ώστε να μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στις προκλήσεις των γεωτρήσεων HP/HT. Για τον αναλυτικό σχεδιασμό του προγράμματος των γεωτρήσεων στο πεδίο του Mallard, η Shell Expro, η Sedco Forex και άλλες υπεργολαβικές εταιρίες συνεργάστηκαν ώστε να δημιουργήσουν ένα πρακτικό και κατανοητό εγχειρίδιο που να καλύπτει όλα τα κρίσιμα ενδεχόμενα σε περιβάλλοντα HP/HT<sup>12</sup>. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία του εγχειριδίου αποτέλεσε η καλή συνεργασία και επικοινωνία των μελών της κάθε εταιρίας. Σε

<sup>12</sup> SEDCO 704 HP/HT Manual, Mallard Development. Sedco Forex, November 1997.

συνδυασμό με μονοήμερη ή διήμερη εκπαίδευση των εργαζομένων οι εταιρίες κατάφεραν να εξοικειώσουν το προσωπικό, με τις απαραίτητες διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την ασφαλή λειτουργία της πλατφόρμας σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Καθ' όλη τη διάρκεια της εκπαίδευσης σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η διαδικασία την επαναπληροφόρησης, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν οι οποιοσδήποτε ελλείψεις που παρουσιάζονται στην επικοινωνία των εργαζομένων και στις διάφορες διαδικασίες που ακολουθούνται.

Ειδικότερα, το εγχειρίδιο που προέκυψε από το πεδίο Mallard αποτελείται από διαδικασίες που αφορούν:

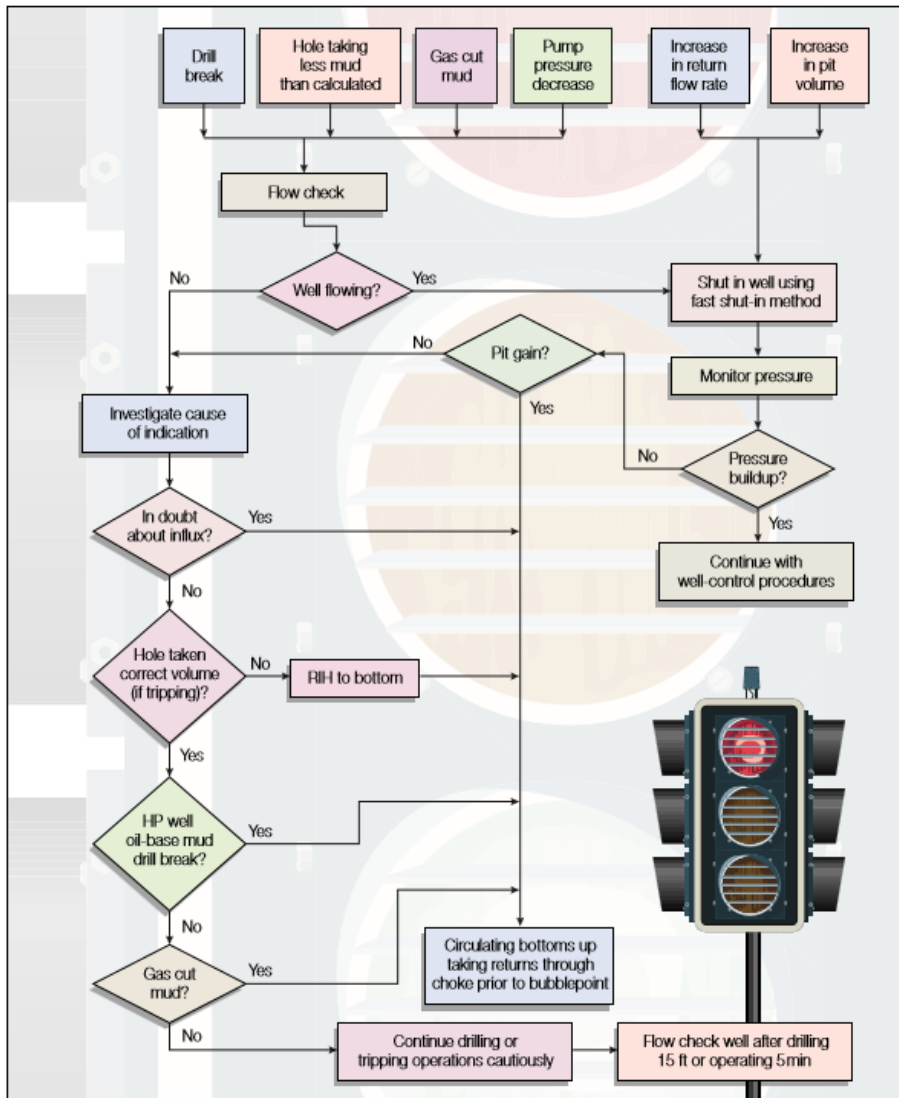
- Στην όρυξη της γεώτρησης
- Στον έλεγχο της γεώτρησης
- Στην ακύρωση (suspension) της όρυξης και την εγκατάλειψη της γεώτρησης
- Στον σχεδιασμό των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, σε συνδυασμό με τις υποχρεώσεις του προσωπικού.

Για παράδειγμα, το εγχειρίδιο αναφέρει ρητά την ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό σε περιπτώσεις γεωτρήσεων HP/HT, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η συνεχής και επιμελής παρακολούθηση όλων των σημαντικών παραμέτρων, κατά τη διάρκεια της διάτρησης εντός του ταμιευτήρα. Ακόμα μία σημαντική προϋπόθεση, για την ασφάλεια των εργαζομένων, είναι η παρουσία του ελάχιστου δυνατού προσωπικού στο δάπεδο του γεωτρυπάνου, κατά τη διάρκεια των εργασιών. Τέλος, απαραίτητες είναι οι συχνές συναντήσεις του προσωπικού, για να συζητηθούν τυχόν προβλήματα και αλλαγές στον σχεδιασμό, έτσι ώστε όλοι οι εργαζόμενοι να είναι ενήμεροι για το πρόγραμμα και τις υποχρεώσεις τους. Σκοπός, αυτών των συναντήσεων είναι:

- Να γίνεται κατά τη διαδικασία της διάτρησης, η παράδοση των μηχανημάτων μεταξύ των εργαζομένων διαφορετικών βαρδιών, με άψογη συνεννόηση, διότι ακόμα και η παραμικρή αλλαγή που μπορεί να παρατηρηθεί, ενδέχεται να ενέχει πιθανό πρόβλημα στις παραμέτρους διάτρησης.
- Να ενημερώνεται το προσωπικό σχετικά με οποιαδήποτε καινοτομία προκύπτει στον τομέα των HP/HT γεωτρήσεων.
- Να ελέγχεται αν ακολουθήθηκαν όλα τα βήματα που είναι καταγεγραμμένα σε λίστες, τις οποίες προτείνει το εγχειρίδιο HP/HT.

Παράδειγμα τέτοιας λίστας αποτελεί το 'Tour Checklist', στην οποία αναγράφονται οι φυσικοί έλεγχοι που πρέπει να εκτελεστούν από τον υπεύθυνο της όρυξης και περιλαμβάνουν ελέγχους στην πυκνότητα, το ιξώδες και τη θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης κάθε δεκαπέντε λεπτά. Στη συνέχεια, ο υπεύθυνος της όρυξης οφείλει να ενημερώσει για τις παραπάνω παραμέτρους, τον μηχανικό των ρευστών διάτρησης και το υπόλοιπο πλήρωμα, ώστε να γνωρίζουν πώς να κινηθούν. Οι συχνοί έλεγχοι αυτών των κρίσιμων παραμέτρων μπορεί να αποκαλύψουν πρόωρα σημάδια ενδεχόμενου προβλήματος.

Ο εντοπισμός αιφνίδιας εισροής αερίου (gas kick), που ίσως αποτελεί και την πιο σημαντική διαδικασία, προϋποθέτει την επίγνωση όλων των πιθανών ρίσκων που ενδέχεται να υπάρξουν σε κάθε φάση της διάτρησης. Η Sedco Forex χρησιμοποιεί ένα σύστημα με τρία σημεία ελέγχου για τον εντοπισμό αιφνίδιας εισροής αερίου ('Kick Alert Status'), επικεντρώνοντας την προσοχή του προσωπικού σε συγκεκριμένα βήματα που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4-17). Η Sedco Forex ως επικεφαλής εργολάβος της Shell στο πεδίο Mallard, σε συνεργασία με τις υπόλοιπες υπεργολαβικές εταιρίες και του χειριστές, κατάφερε να συγκεντρώσει την απαραίτητη εμπειρία που απαιτείται για να αναπτύξει δραστηριότητες σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Για να καταφέρει να εστιάσει την προσοχή του προσωπικού σε συγκεκριμένα προβλήματα που προκύπτουν σε HP/HT περιβάλλοντα, εφαρμόστηκε ένα σύστημα τριών σταδίων για τον εντοπισμό αιφνίδιας εισροής αερίου. Το προσωπικό ενημερώνεται για το επίπεδο επικινδυνότητας, από ειδοποιήσεις μέσω ηχείων, που είναι τοποθετημένα πάνω στην πλατφόρμα και στην πρωινή ενημέρωση. Η εικόνα περιγράφει πώς πρέπει να αντιμετωπιστούν οι αιφνίδιες εισροές αερίου, μέσω της παρατήρησης ενός ή περισσότερων ενδείξεων, που αναγράφονται στην πρώτη σειρά.



Εικόνα 4-17. Εγκαθίδρυση κατευθυντήριων γραμμών για τον εντοπισμό αιφνίδιας εισροής αερίου (Adamson, et al., 1998)

Σε κάθε περίπτωση η πρόληψη αποτελεί την καλύτερη τακτική, σε σχέση με την αντιμετώπιση αιφνίδιας εισροής αερίου, με τις μετρήσεις των μηχανικών, σχετικά με τον ρυθμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης, ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης (tripping) και το εύρος ανοχής των παραμέτρων (tolerances of parameters) να περιλαμβάνονται στις διαδικασίες που πραγματοποιούνται για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ο επόπτης της πλατφόρμας είναι υπεύθυνος να ελέγχει, σε καθημερινή βάση, τις μετρήσεις, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα εμφάνισης αιφνίδιας εισροής αερίου και ρωγμάτωσης του σχηματισμού.

Παρόμοιες διαδικασίες ακολουθήθηκαν και στη διάνοιξη των τριών γεωτρήσεων στο πεδίο Heron της Shell Expro και ο συχνός έλεγχος των παραμέτρων και κυρίως των ταχυτήτων ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης συνέβαλλαν στην επιτυχή διάνοιξη των γεωτρήσεων, δίχως να υπάρξει ούτε μια αιφνίδια εισροή αερίου. Η μοναδική περίπτωση στην οποία προέκυψε αιφνίδια εισροή αερίου, αφορά το πεδίο Mallard, όπου συνέβη όταν η κοπτική κεφαλή βρισκόταν πάνω από τον ταμιευτήρα και ανιχνεύτηκε να έχουν εισρεύσει

μόνο 8 bbl (1,3 m<sup>3</sup>), αλλά με την άμεση αντίδραση του πληρώματος η κατάσταση αντιμετωπίστηκε επιτυχώς.

Σε κάποιες περιπτώσεις, οι συγκρουόμενες ανάγκες μεταξύ της πίεσης των πόρων με την πίεση ρωγμάτωσης είναι δύσκολο να συνυπάρξουν, με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί ανάλυση ρίσκου για να καθοριστεί ποια από τις δύο πιέσεις είναι πιο σημαντική. Το σύνηθες είναι να επιλέγεται να ρωγματωθεί ο σχηματισμός, διότι το πρόβλημα που προκύπτει, επιλύεται τσιμεντώνοντας τη ρωγμή, κάτι που είναι αρκετά ευκολότερο από την διαχείριση αιφνίδιας εισροής αερίου.

Εν κατακλείδι, τα παρόντα πρότυπα συνοψίζονται παρακάτω (Barshettiwar N. G., 2017):

1. Protocol for verification and validation of High Pressure High Temperature equipment (Πρωτόκολλο επαλήθευσης και επικύρωσης εξοπλισμού για υψηλή πίεση, υψηλή θερμοκρασία) (API TR 1PER 15K), Μάρτιος 2013.
2. High pressure high temperature guidelines (Κατευθυντήριες οδηγίες για υψηλή πίεση και υψηλή θερμοκρασία) (API 17TR), Φεβρουάριος 2015.
3. Specification for subsurface safety valve equipment (Προδιαγραφές εξοπλισμού για τις υπεδιαφικές βαλβίδες ασφάλειας) (API 14A), Ιανουάριος 2015.
4. Packers and bridge plug (Παρεμβύσματα και διατάξεις απομόνωσης ταμειυτήρα) (API 11D1), Απρίλιος 2015.
5. Riser system for floating production facilities (Συστήματα riser για πλωτές εγκαταστάσεις παραγωγής) (APT STD 2RD), 2013.
6. Christmas tree and wellheads (Χριστουγεννιάτικο δέντρο και κεφαλές γεώτρησης) (API 6A/6X), 2014.
7. Subsea wellheads and trees (Υποθαλάσσιες κεφαλές γεώτρησης και χριστουγεννιάτικα δέντρα) (API Spec 17D), 2011.
8. Drill-through equipment (Εξοπλισμός drill-through) (API Spec 16A), 2015.
9. Subsea completion & work-over intervention (Ολοκλήρωση υποθαλάσσιων γεωτρήσεων & παρεμβάσεις συντήρησης/επιδιόρθωσης) (API 17G).
10. Tubular threaded connectors (Κοχλιωτοί σύνδεσμοι σωληνοειδών) (API 5C2), 2015.

Τέλος, μία από τις σημαντικότερες κατευθυντήριες γραμμές είναι αυτή που έχει εκδώσει ο σύνδεσμος εταιρειών Oil and Gas UK, η οποία είναι:

Guidelines for High-Pressure, High-Temperature Wells (Κατευθυντήριες οδηγίες για γεωτρήσεις υψηλής πίεσης, υψηλής θερμοκρασίας), Οκτώβριος 2016.

Η Oil and Gas UK αποτελεί τη βασική και πρωτοπόρα αντιπρόσωπο των εταιριών που εκτελούν θαλάσσιες εξορύξεις στο Ηνωμένο Βασίλειο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°. Μελέτες περίπτωσης

### 5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν ορισμένες ενδεικτικές μελέτες περίπτωσης. Ειδικότερα, θα γίνει αναφορά σε περιπτώσεις προερχόμενες από τα σημαντικότερα, μέχρι στιγμής, πεδία ΗΡ/ΗΤ ανά τον κόσμο όπως:

- Βόρεια Θάλασσα – Πεδίο Erskine
- Κίνα – Πεδία Keshen - Dabei
- Κόλπος του Μεξικό – Ερευνητική γεώτρηση σε συνθήκες ultra ΗΡΗΤ
- Ταϊλάνδη – Πεδίο Bongkot
- Κόλπος του Μεξικό – Η περίπτωση του Macondo

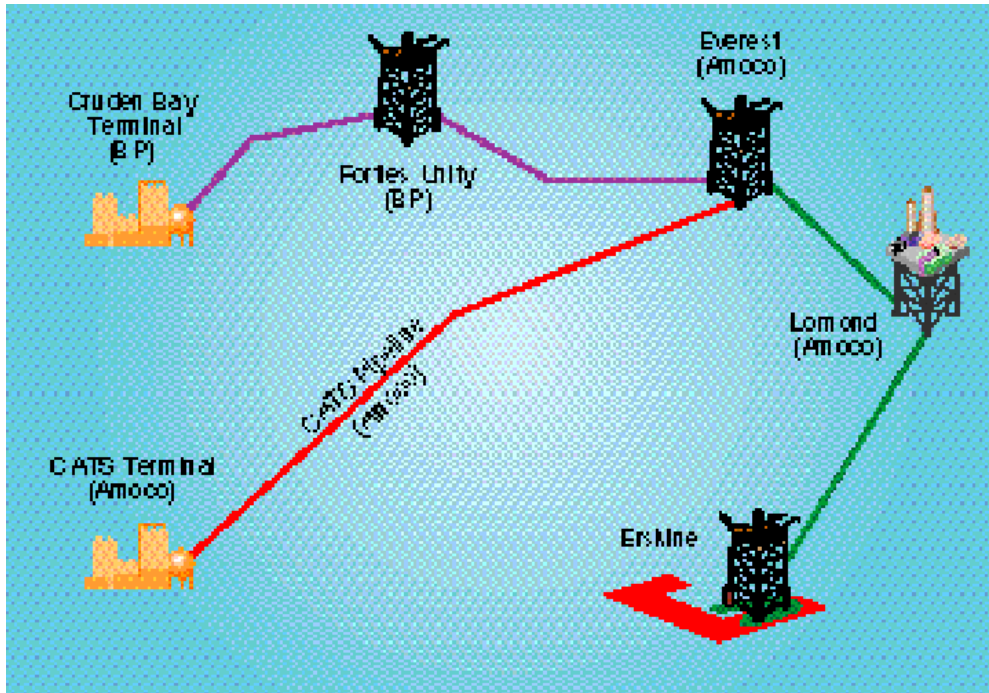
Ιδιαίτερη σημασία θα δοθεί στα προβλήματα αυτών των πεδίων αλλά και στις λύσεις και στον πρωτοποριακό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για να αντιμετωπιστούν.

### 5.2. Πεδίο Erskine

#### 5.2.1. Γενικά στοιχεία

Το πεδίο Erskine είναι το πρώτο πεδίο με συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε στη Βόρεια Θάλασσα. Ο ταμιευτήρας περιέχει, κατά κύριο λόγο, αέριο συμπύκνωμα (gas condensate) και βρίσκεται 150 μίλια ανατολικά του Aberdeen στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (United Kingdom Continental Shelf – UKCS) (Εικόνα 5-1), σε βάθος θάλασσας 296 ft (90 m). Τα απολήψιμα αποθέματα (recoverable reserves) εκτιμώνται σε 355 Bcf αερίου και 75 MMbbl ρευστών και οι προβλεπόμενοι ρυθμοί σχεδιασμού (field design production rates) προέβλεπαν παραγωγή 117 MMscf/ημέρα αερίου και 30.650 bbl/ημέρα (Brubaker, 1996).

Το πεδίο ανακαλύφθηκε το 1981 και οι πωλήσεις του παραγόμενου αερίου (plateau gas sales) άρχισαν τον Οκτώβριο του 1997. Η εκμετάλλευση γίνεται εξ αποστάσεως, μέσω της πλατφόρμας Lomond, η οποία ενώνεται με την πλατφόρμα Erskine (Εικόνα 5-2) με αγωγή (Chevron, 2017).



Εικόνα 5-1. Διάταξη πεδίου Erskine (Brubaker, 1996)



Εικόνα 5-2. Πλατφόρμα πεδίου Erskine 1997 (Technology, 2018)



Στο πεδίο Erskine παρουσιάζονται ποικίλες τεχνικές δυσκολίες που σχετίζονται με την έλλειψη χώρου, την παρουσία υδροθείου και κεριού (wax), αλλά η βασική τεχνική πρόκληση είναι η ασφάλεια στις συνθήκες HP/HT. Συνοπτικά, κατά τον σχεδιασμό ανάπτυξης του πεδίου έπρεπε να αντιμετωπιστούν οι παρακάτω τεχνικές δυσκολίες (Brubaker, 1996):

- Ο ταμειντήρας εμφανίζει αρχικές συνθήκες με πίεση πυθμένα 14.000 psi και θερμοκρασία πυθμένα 350 °F. Επιπλέον, η μέγιστη πίεση κλεισίματος της κεφαλής γεώτρησης (wellhead shut-in pressure – WHSIP) έχει υπολογιστεί στα 10.600 psi και η θερμοκρασία των ρευστών στην επιφάνεια στους 300 °F.
- Τα παραγόμενα ρευστά περιέχουν έως και 33 ppmv H<sub>2</sub>S, 5,5 mole % CO<sub>2</sub> και 90.000 ppm Cl<sup>-</sup>.
- Τα αποθέματα, κατά την περίοδο ανακάλυψης του πεδίου κρίθηκαν ως οριακώς εκμεταλλεύσιμα για την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (marginal for North Sea development).
- Το συμπύκνωμα αερίου περιέχει περίπου 10 wt % συστατικά που σχηματίζουν κεριά.
- Η εξέδρα υποδοχής (host platform) βρίσκεται σε απόσταση 19 μιλίων από το πεδίο.
- Ο διαθέσιμος χώρος που διατίθεται στην εξέδρα υποδοχής είναι πολύ περιορισμένος (30 x 61 ft).

Παρακάτω ακολουθούν οι λύσεις που προτάθηκαν και ακολουθήθηκαν για την επιτυχή, οικονομική και κυρίως ασφαλή εκμετάλλευση του πεδίου (Brubaker, 1996).

### 5.2.2. Εγκατάσταση που απαιτεί ελάχιστο απαιτούμενο προσωπικό (minimum attendance installation)

Ο βασικός παράγοντας για την ελαχιστοποίηση εμφάνισης προβλημάτων σχετικών με την ασφάλεια είναι η όσο το δυνατό μικρότερη έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους HP/HT. Όλες οι εγκαταστάσεις στην εξέδρα Erskine σχεδιάστηκαν με στόχο να ελαχιστοποιηθεί η ανθρώπινη παρέμβαση (manned intervention). Πολλές εγκαταστάσεις τύπου NUI (Normally Unattended Installation – Εξ αποστάσεως εποπτευόμενη εγκατάσταση) απαιτούν την παρουσία προσωπικού μια ή δυο φορές την εβδομάδα. Για την εξέδρα Erskine η μέγιστη προβλεπόμενη συχνότητα επισκέψεων (maximum planned visit frequency) είναι μια επίσκεψη κάθε 4-6 εβδομάδες.

Αυτός ο στόχος επιτεύχθηκε μέσω της ελαχιστοποίησης των ωρών που απαιτούνται για υπεράκτιες εργασίες (offshore tasks). Έτσι, κατά τον σχεδιασμό επιδιώχθηκε ο περιορισμός του εξοπλισμού πάνω στην εξέδρα (onboard equipment), η μείωση των ωρών συντήρησης στη θάλασσα (offshore maintenance), η βελτίωση της ταχύτητας διεκπεραίωσης της συντήρησης (maintenance task speed) και ο περιορισμός των απαιτήσεων ανεφοδιασμού σε αναλώσιμα (consumable replenishment).

---

Ορυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

Ο επιφανειακός εξοπλισμός στην εξέδρα Erskine, έχει κατασκευαστεί και τοποθετηθεί έτσι ώστε να ακολουθείτε πιστά η αρχή «λιγότερος εξοπλισμός - μικρότερη παρέμβαση από εργαζόμενους». Οποιαδήποτε προσθήκη στον επιφανειακό εξοπλισμό πρέπει να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν τον περιορισμό των κινδύνων ασφάλειας κατά το πρακτικά δυνατό (as low as reasonably practical – ALARP), τη χρήση αξιόπιστης τεχνολογίας (field-proven technologies) και σχεδιασμού συμβατού με αναγνωρισμένες πρακτικές σε συνθήκες HP/HT (proven HPHT operating practices), γεωτρήσεων, τη διασφάλιση υψηλής διαθεσιμότητας (high availability) και τη μείωση του κόστους καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (full life costs).

Επιπρόσθετα, ο σχεδιασμός της διεργασίας που λαμβάνει χώρα στην εξέδρα του πεδίου Erskine βασίζεται στην άντληση υψηλής θερμοκρασίας, πολυφασικών ρευστών από τον ταμιευτήρα και στην άμεση εισαγωγή τους σε αγωγό. Συνεπώς, ο σχετικός εξοπλισμός δεν χρειάζεται να περιλαμβάνει πολύπλοκα συστήματα, παρά μόνο τις απαραίτητες βαλβίδες παραγωγής (production manifold), τους σωλήνες ροής των ρευστών (flowlines), τη διάταξη καθαρισμού των αγωγών (pig launcher) και τη βαλβίδα διακοπής ροής στον αγωγό εξαγωγής (export pipeline shutdown valve). Άρα το ενδεχόμενο εμφάνισης ατυχήματος περιορίζεται σημαντικά και διευκολύνεται η αντιμετώπισή του, σε περίπτωση συμβάντος (Brubaker, 1996).

### 5.2.3. Σύστημα προστασίας της εξέδρας έναντι πιέσεων (platform pressure protection system-PPPS)

Σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό του επιφανειακού τμήματος της εξέδρας διαδραμάτισε και η στρατηγική αντιμετώπισης εμφάνισης υπερβάλλουσας πίεσης. Για την αντιμετώπιση τέτοιων περιστατικών σχεδιάστηκε κατάλληλο σύστημα προστασίας της εξέδρας έναντι πιέσεων (Platform Pressure Protection System - PPPS). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει διαφορετικά επίπεδα προστασίας (protection levels), ανάλογα με τους αναμενόμενους κινδύνους. Τα επίπεδα του PPPS σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν μέσω στη προσέγγισης ALARP ώστε να παρέχουν προστασία έναντι δυνητικών αρχικών συμβάντων (initiating events).

Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά τα επίπεδα προστασίας του PPPS στην εξέδρα Erskine, με βάση το μέγεθος της υπερβάλλουσας πίεσης:

1. Επίπεδο 1 - Σχεδιασμός περιορισμού πίεσης (Level 1 - Pressure Containment Design).  
Αποσκοπεί στον περιορισμό της πίεσης μέσω κατάλληλων βαλβίδων τοποθετημένων σε στρατηγικά επιλεγμένες θέσεις της γραμμής ροής.
2. Επίπεδο 2 - Μονάδες ελέγχου και συναγερμοί (Level 2 - Controls and Alarms).  
Η εξέδρα Erskine βασίζεται στο σχεδιασμό της σε ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Ελέγχου και Ασφάλειας (Integrated Control and Safety

System – ICSS) που συνδυάζει τις λειτουργίες του άμεσου κλεισίματος της γεώτρησης, την αντιμετώπιση πυρκαγιάς, τον περιορισμό διαφυγής αερίου και την ακεραιότητα του συστήματος που σφραγίζει τη γεώτρηση. Το επίπεδο αυτό επιτρέπει στον χειριστή (στην εξέδρα υποδοχής) να λάβει δραστικά μέτρα σε περίπτωση εμφάνισης υπερβάλλουσας πίεσης ή αποτυχίας του εξοπλισμού.

3. Επίπεδο 3 - Κλείσιμο της γεώτρησης κατά την εμφάνιση υψηλής πίεσης (Level 3- High Pressure Shutdown).

Εάν κατά το προηγούμενο επίπεδο υπάρξει αποτυχία στον εντοπισμό τυχόν υπερβάλλουσας πίεσης, τότε ένας εξειδικευμένος μεταβιβαστής μέτρησης πίεσης (pressure transmitter\_ κλείνει αυτόματα την γεώτρηση (κλείνουν οι πλευρικές βαλβίδες – wing valves και η βαλβίδα στραγγαλισμού – choke valve).

4. Επίπεδο 4 - Κλείσιμο της γεώτρησης κατά την εμφάνιση πολύ υψηλής πίεσης (Level 4 - High - High Pressure Shutdown).

Στην περίπτωση που η πίεση συνεχίζει να αυξάνεται, παρά τις προβλεπόμενες ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν στο επίπεδο τρία, τρεις επιπρόσθετοι ειδικοί μεταβιβαστές πίεσης εκκινούν νέα διαδικασία κλεισίματος της γεώτρησης μέσω ενός αυτόνομου τριπλού ψηφιακού συστήματος (triplicated hard-wire logic system). Σε αυτό το επίπεδο κλείνουν η άνω κύρια βαλβίδα στο χριστουγεννιάτικο δέντρο (tree's upper master valve), οι βαλβίδες ESDV (emergency shutdown valves) στη γραμμή ροής και η πλευρική βαλβίδα (wing valve), μέσω διαφορετικού συστήματος ενεργοποίησης (actuation path) από ό,τι στο επίπεδο 3.

5. Επίπεδο 5- Εγκατάλειψη εξέδρας (Level 5 – Platform Abandonment).

Εάν αποτύχουν όλα τα προηγούμενα στάδια και παρατηρηθεί αστοχία σε κάποιον σωλήνα ή διαφυγή αερίου ή εμφάνιση ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς τίθεται σε εκκίνηση το σύστημα εγκατάλειψης της εξέδρας. Στο επίπεδο αυτό, το σύστημα ICSS κλείνει τις υπόγειες βαλβίδες ασφάλειας που ελέγχονται από την επιφάνεια (surface controlled subsurface safety valves) σε κάθε γεώτρησης και καλεί το προσωπικό να συγκεντρωθεί στο προσωρινό καταφύγιο (temporary refuge - TR) της εξέδρας, το οποίο παρέχει προστασία για 20' προκειμένου το προσωπικό να επιβιβαστεί με ασφάλεια στο σωστικό σκάφος (Brubaker, 1996).

#### 5.2.4. Στρατηγική ελέγχου δημιουργίας κεριού (wax control strategy)

Αρχικά, η παραγωγή του αερίου συμπυκνώματος από το πεδίο Erskine δεν θεωρούνταν εφικτή διότι περιέχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε συστατικά που σχηματίζουν κεριό. Ωστόσο, η εκτεταμένη διεθνής εμπειρία του διαχειριστή του πεδίου (Texaco) και η χρήση τελευταίας τεχνολογίας εργαστηριακού εξοπλισμού

βοήθησε στην ανάπτυξη μιας στρατηγικής ελέγχου δημιουργίας κεριού, χάρη στην οποία κατέστη εφικτή η παραγωγή από το Erskine. Αυτή η στρατηγική ελέγχου καλύπτει ουσιαστικά όλες τις λειτουργίες στον αγωγό (pipeline operations), την επιλογή του εξοπλισμού (equipment selection), τις μεθόδους συντήρησης (intervention methods) και τις παραμέτρους λειτουργίας της διεργασίας (process operating parameters).

Τα αέρια συμπυκνώματα στο Erskine παρουσιάζουν υψηλά σημεία θόλωσης (cloud points) (124 °F) σε στάνταρ συνθήκες (stock tank conditions)<sup>13</sup>. Περιέχουν επίσης μεγάλη περιεκτικότητα σε συστατικά που σχηματίζουν κεριό εντός των σωληνώσεων, από 10 έως 12,5 wt % στο αέριο, τα οποία καλύπτουν το κλάσμα από το C<sub>20+</sub> των κανονικών παραφινών. Η ποσότητα του παραφινικού κεριού που σχηματίζουν, σύμφωνα με εργαστηριακούς ελέγχους, αυξάνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 80 °F.

Περαιτέρω εργαστηριακές δοκιμές κατέδειξαν ότι η δημιουργία κεριού σε θερμοκρασίας κάτω από 80 °F μπορεί να περιοριστεί μέσω: (1) αύξησης του σημείου φυσαλίδας του ρευστού (fluid bubble point), (2) ενίσχυσης της τυρβώδους ροής (turbulent flow), (3) χρήσης ειδικών χημικών αναστολέων κεριού (chemical wax inhibitors), (4) διατήρησης της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων των σωληνώσεων σε ίση ή μεγαλύτερη τιμή από αυτή των ρευστών που ρέουν εντός τους (η εναπόθεση κεριού είναι ελάχιστη όταν η θερμική βαθμίδα είναι μηδέν ή όταν τα τοιχώματα του σωλήνα είναι θερμότερα από το ρευστό), (5) αύξησης της περιεκτικότητας σε νερό στο ρευστό και (6) ανάμειξης του ρευστού με υδρογονάνθρακες με συστατικά ελαφρύτερα από τα C<sub>20+</sub>.

### 5.2.5. Επιλογή υλικών (material selection) και έλεγχος της διάβρωσης (corrosion control)

Η οικονομικά αποδοτική επιλογή των υλικών για το Erskine ήταν αποτέλεσμα εκτεταμένων αναλύσεων, δοκιμών και συγκρίσεων με ανάλογες περιπτώσεις εκμετάλλευσης και βιβλιογραφικής αναζήτησης. Έτσι για τις επιφανειακές σωληνώσεις (topsides piping) επιλέχθηκε χάλυβας με περιεκτικότητα σε χρώμιο 25% και 22%, αγωγός από ανθρακούχο χάλυβα (carbon steel pipeline), ανοξειδωτος χάλυβας με κατάλληλη επίστρωση (904L clad carbon steel) για τα risers και τα έλικτρα του αγωγού (pipeline spool pieces), ενώ όλες οι εξωτερικές επιφάνειες του αγωγού και του δομικού χάλυβα (structural steel) έχουν επίστρωση TSA (thermally sprayed aluminium) (Brubaker, 1996).

Τα ρευστά του πεδίου Erskine εμφανίζουν αρκετά προβλήματα όσον αφορά στον έλεγχο της διάβρωσης. Τα ρευστά αντλούνται και μεταφέρονται υπό συνθήκες

---

<sup>13</sup> Stock tank conditions: T=60 °F, P=1 atm ή 14,7 psi.

υψηλής θερμοκρασίας, πολυφασικών μιγμάτων και με παρουσία H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub>, ελεύθερου νερού και ιόντων χλωρίου. Τα δεδομένα αυτά καθιστούν την επιλογή ανθεκτικών υλικών εξαιρετικά δύσκολη. Η ικανότητά των υλικών που θα επιλεγούν να ανταπεξέλθουν σε τέτοιο περιβάλλον έρχεται σε σύγκρουση με την οικονομικότητα του όλου εγχειρήματος, διότι τα ανθεκτικά υλικά είναι ιδιαίτεως ακριβά. Τελικά, ακολουθήθηκε η λύση σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιήθηκαν αναστολείς διάβρωσης (corrosion inhibitors), ώστε ο εξοπλισμός να ανταπεξέλθει στις συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και οι σωληνώσεις και ο αγωγός να προστατευτούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τέλος, εφαρμόστηκε ειδικό πρόγραμμα παρακολούθησης της διάβρωσης, ώστε να επαληθεύσει την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης και να επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα των αναστολέων.

Το 2017 το πεδίο Erskine παρήγαγε 5.147 bbl αερίου συμπυκνώματος και  $34,8 \cdot 10^6$  scf φυσικού αερίου. Σήμερα, η εξέδρα έχει σταματήσει να παράγει από τον Ιανουάριο του 2018, διότι ο αγωγός που συνδέει την εξέδρα υποδοχής Lomond με το σύστημα αγωγών για τη μεταφορά του αερίου συμπυκνώματος στη στεριά έχει διακόψει τη λειτουργία του, εξαιτίας έμφραξης που εντοπίστηκε κατά τη αναμενόμενη διαδικασία καθαρισμού του. Η έμφραξη αυτή, σύμφωνα με ανακοίνωση της εταιρείας που εκμεταλλεύεται το πεδίο οφείλεται στην παρουσία κεριού στο εσωτερικό του σωλήνα. Η σημερινή εικόνα της εξέδρας Erskine παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-3 και η παραγωγή αναμένεται να ξεκινήσει ξανά τον Σεπτέμβριο του 2018, όταν ολοκληρωθούν οι διαδικασίες καθαρισμού του αγωγού (News, 2018).



Εικόνα 5-3. Πλατφόρμα Erskine 2018 (Chevron, 2017)

#### 5.2.6. Διευθέτηση μονάδας διεργασίας σε περιορισμένο χώρο (minimum space process module)

Η εξέδρα Lomond σχεδιάστηκε για την εκμετάλλευση του ομώνυμου πεδίου και κατασκευάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 χωρίς καμία πρόβλεψη για πρόσθετη παραγωγική ικανότητα (no extra production capacity) ή περιθώριο χρήσης από τρίτους (third party allowances). Παράλληλα, κατά το χρόνο σχεδιασμού της εκμετάλλευσης του πεδίου Erskine η παραγωγή από το πεδίο Lomond γινόταν

---

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

σύμφωνα με τον ρυθμό σχεδιασμού (design production rate) και θα διατηρούνταν έτσι ως το 2000. Για τους λόγους αυτούς αρχικά απορρίφθηκε η χρήση της για την εκμετάλλευση του πεδίου Erskine. Ωστόσο, ελλείπει άλλων εφικτών επιλογών επανεξετάστηκε τελικά η χρήση της.

Η έλλειψη παραγωγικής ικανότητας στην υφιστάμενη εξέδρα απαιτούσε πρόσθετες εγκαταστάσεις για τη συγκέντρωση και τον διαχωρισμό των παραγόμενων ρευστών από το Erskine (slug catching and separation), την αφυδάτωση του συμπυκνώματος, (condensate and water dehydration), τη μέτρηση των ρευστών μετά την επεξεργασία (fiscal metering) και τη συμπίεση και άντληση των ρευστών που εξέρχονται από την εξέδρα (export compression and pumping). Επιπλέον, οι νέες μονάδες έπρεπε να εγκατασταθούν οικονομικά και με ελάχιστο αντίκτυπο στις υφιστάμενες παραγωγικές δραστηριότητες. Αυτή η απαίτηση επέβαλλε οι πρόσθετες διατάξεις να εγκατασταθούν ως μία ενιαία μονάδα ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εργασίες συναρμολόγησης, εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας (hook-up and commissioning – HUC activities).

Τελικά σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε στην εξέδρα Lomond μια μονάδα υποδοχής και επεξεργασίας των παραγόμενων ρευστών από το Erskine δυναμικότητας 117 MMscf/ημέρα και 30.650 bopd με τρόπο ώστε να «χωρέσει» σε ένα χώρο διαστάσεων 30 x 61 ft. Αυτό επέτρεψε την εκμετάλλευση του οριακού πεδίου Erskine, αξιοποιώντας υφιστάμενες εγκαταστάσεις στην υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου (Brubaker, 1996).

### 5.3. Κίνα - Πεδία Keshen-Dabei

Τα πεδία Keshen-Dabei βρίσκονται στη λεκάνη Tarim η οποία αποτελεί την πλέον απαιτητική γεωλογική δομή στη δυτική Κίνα. Η λεκάνη Tarim είναι η μεγαλύτερη χερσαία λεκάνη στη Δ. Κίνα και παρουσιάζει στρατηγική σημασία για την αξιοποίηση των χερσαίων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων της χώρας, ιδιαίτερα φυσικού αερίου.

Η ζώνη ενδιαφέροντος (Kuche Fold-Thrust Belt – Ζώνη πτυχών και επωθήσεων Kuche) καταλαμβάνει έκταση περίπου 4400 km<sup>2</sup>. Καθώς η ερευνητική δραστηριότητα που ξεκίνησε το 2007 προχωράει με γεωτρήσεις που ορύσσονται σε ολοένα και μεγαλύτερα βάθη, εντοπίστηκε μια σειρά κοιτασμάτων φυσικού αερίου (DB3, KS1, KS2, KS5 κ.ά.). Εξαιτίας της σοβαρής πολυπλοκότητας του γεωλογικού υποβάθρου, που περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, ορίζοντες έντονα πτυχωμένους (strongly folded strata), δομές πολύ μεγάλης κλίσης (high-steep structure), μεγάλη διακύμανση στην κατανομή και των βάθους των στρώσεων (highly differed strata distribution and depth), εξαιρετικά εκτεταμένη ζώνη γύψου-αλατιού με απρόβλεπτο πάχος και δύσκολα προσδιοριζόμενο βάθος, παρουσιάζονται ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις στις ορυσσόμενες γεωτρήσεις και η περιοχή χαρακτηρίζεται ως η πιο

απαιτητική χερσαία αναπτυξιακή δραστηριότητα για εκμετάλλευση υδρογονανθράκων στην Κίνα και πιθανότατα σε όλο τον κόσμο.

Το μέσο βάθος των γεωτρήσεων που έχουν διανοιχθεί στην περιοχή φτάνει τα 7.000 m, με μέση διάρκεια όρυξης μιας τέτοιας γεώτρησης τις 450 ημέρες. Στο πεδίο Dabei είχαν διανοιχθεί ως το 2011 16 γεωτρήσεις, με μέσο βάθος 6.338 m και 4 από αυτές να ξεπερνούν τα 7.000 m, μέσο ρυθμό προχώρησης της γεώτρησης 1,37 m/h και μέσο χρόνο όρυξης 474 ημέρες. Αντίστοιχα, στο πεδίο Keshen είχαν ολοκληρωθεί 7 γεωτρήσεις, με μέσο βάθος 6.721 m (2 από αυτές προχώρησαν σε βάθος πάνω από 7.000 m), μέσο ρυθμό προχώρησης 1,70 m/h και μέσο χρόνο όρυξης 463 ημέρες.

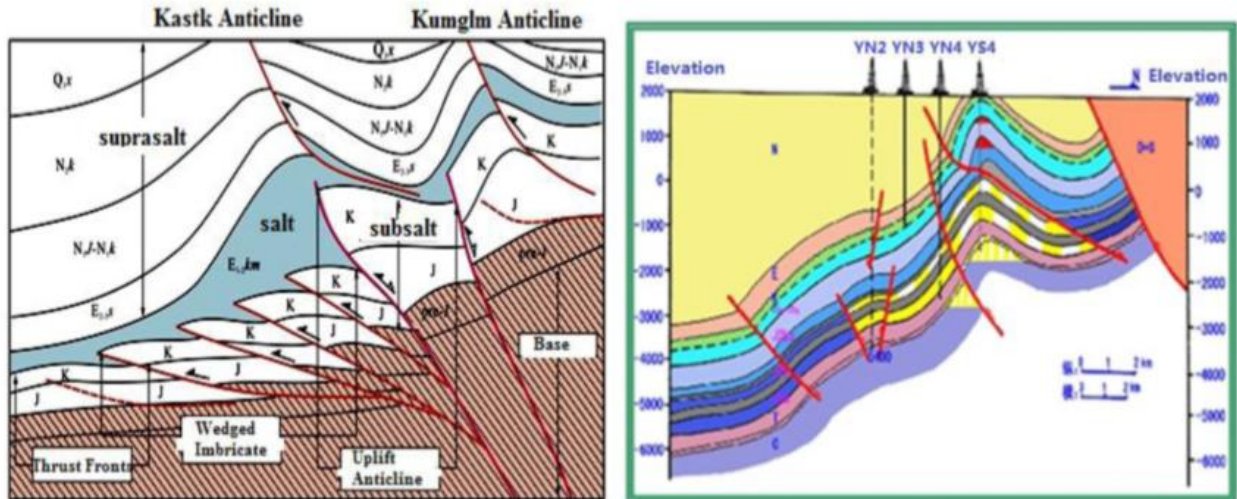
Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις πλέον σοβαρές τεχνικές δυσκολίες με τις οποίες ήρθαν αντιμέτωποι οι εργαζόμενοι σε αυτά τα πεδία, κατά τη διαδικασία της όρυξης των γεωτρήσεων, καθώς και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων (Teng, 2015).

### 5.3.1. Τεχνικές δυσκολίες κατά την όρυξη των γεωτρήσεων

Οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά τη όρυξη των γεωτρήσεων σε αυτήν την περιοχή της Κίνας οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στους σύνθετους και πολύπλοκους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι συναντήθηκαν, καθώς και στις μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες της ζώνης ενδιαφέροντος.

#### 5.3.1.1. Νεότερες (ανώτερες) στρώσεις άλατος (*supra-salt layers*)

Το σύνολο της ανώτερης ζώνης άλατος αποτελεί μια δομή πολύ μεγάλης κλίσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-4, η οποία κυμαίνεται από 30° έως 70° και κατά προσεγγίζει κατά το μέγιστο τις 80°. Η μεγάλη αυτή κλίση δημιουργεί προβλήματα τόσο στον έλεγχο της απόκλισης της γεώτρησης (*well inclination*) όσο και στην ταχύτητα όρυξής της (*drilling speed*). Η μεγάλη ανισοτροπία και η εναλλαγή σκληρών και μαλακών οριζόντων που χαρακτηρίζουν αυτά τα στρώματα, σε συνδυασμό με την τάση να προκαλούν αύξηση της κλίσης της γεώτρησης (*high natural build-up capability*) έχουν ως αποτέλεσμα τη δυσκολία ελέγχου της απόκλισης της γεώτρησης και για τον μη αποδεκτά χαμηλό ρυθμό προχώρησης (λιγότερος από 1m/h).



Εικόνα 5-4. Δομές μεγάλης κλίσης της ζώνης πτυχών και επωθήσεων Kuche (Teng, 2015)

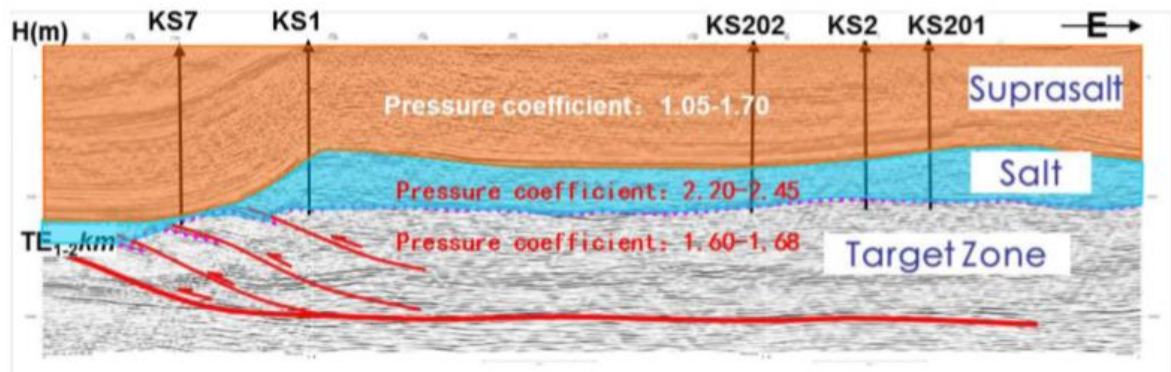
Εντός της ανώτερης ζώνης άλατος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρεμβάλλονται στρώσεις διαφορετικής σκληρότητας. Η εξαιρετικά εκτεταμένη στρώση κροκαλοπαγών παρουσιάζει πολύ μικρή διατρησιμότητα και αποτελεί την κύρια αιτία για τον μειωμένο ρυθμό προχώρησης. Το μέσο πάχος της ζώνης κυμαίνεται μεταξύ 1.000 m και 3.000 m (μέγιστη τιμή 5.900 m), η διάμετρος των κροκάλων είναι αρκετά μεγάλη (45 mm κατά το μέγιστο, 1 mm κατά το ελάχιστο, συνήθως 1-10 mm). Ως προς της σύσταση, η στρώση αποτελείται κατά βάση από χαλαζία, μεταμορφωμένα και πυριγενή ορυκτά. Οι στενά συγκολλημένοι μεταξύ τους κόκκοι του πετρώματος (tight cementation) και η μεγάλη αντοχή σε θλίψη (high compressive strength) που παρουσιάζει, αποτελούν το κρίσιμο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός προχώρησης εντός του συνόλου της ζώνης πτυχών και επωθήσεων Kuche (Teng, 2015).

### 5.3.1.2. *Σύνθετα στρώματα γύψου-άλατος (composite gypsum-salt layers)*

Σε όλο της το μήκος της η ζώνη πτυχών και επωθήσεων Kuche αποτελείται από στρώματα γύψου-άλατος σε βάθος που κυμαίνεται από 3.000 έως 7.000 m (μέγιστο βάθος πυθμένα άλατος 7.947,5 m). Στο πεδίο Dabeí το πάχος των στρωμάτων αυτών ποικίλει δραματικά, φθάνοντας κατά το μέγιστο τα 1.397 m. Στο πεδίο Keshen το πάχος των στρωμάτων αυτών είναι ακόμα μεγαλύτερο, φθάνοντας κατά το μέγιστο τα 1.856 m. Επιπροσθέτως, σε αυτά τα στρώματα άλατος δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός του πυθμένα τους, καθώς παρουσιάζουν εξαλλοιώσεις και ακανόνιστη μορφολογία. Λόγω του σύνθετου συστήματος πιέσεων κατά μήκος όλου αυτού του στρώματος, είναι δύσκολο να απομονωθεί πλήρως το τμήμα εντός του άλατος. Όταν δεν επιτυγχάνεται ο ακριβής προσδιορισμός και η απομόνωση του πυθμένα του άλατος, προκαλούνται συχνά προβλήματα όπως απώλειες στην κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης (lost circulation) και «κόλλημα» της διατρητικής στήλης (pipe sticking). Παράδειγμα αποτελεί η γεώτρηση DB-201, όπου συνολικά υπήρξε μαζική διαρροή των ρευστών διάτρησης εντός του σχηματισμού, της τάξης των 1.312 m<sup>3</sup> και



προκλήθηκε καθυστέρηση της όρυξης κατά 65 μέρες, καθώς η διατρητική στήλη παρουσίασε σοβαρό «κόλλημα» εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς πίεσης με την πίεση του σχηματισμού (Εικόνα 5-5).



Εικόνα 5-5. Πίεση των σχηματισμών στο πεδίο Keshen (Teng, 2015)

Επιπλέον, μεταξύ των στρωμάτων άλατος υπάρχει και ανομοιόμορφα κατανεμημένο αλμυρό νερό, το οποίο βρίσκεται υπό υψηλή πίεση. Δεν υπάρχει επίσης κάποια ενδεικτική στρώση (marker bed) πριν τη στρώση του αλμυρού νερού κι έτσι είναι δύσκολο να προβλεφθεί η θέση του. Όταν το υψηλής πίεσης αλμυρό νερό εισέρχεται στη γεώτρηση και μολύνει τα ρευστά διάτρησης, μειώνεται η απόδοσή τους, αυξάνεται το πάχος των στερεών που επικαθώνται στα τοιχώματα της γεώτρησης (mud cake), καθιστώντας έτσι την γεώτρηση πιο ασταθή. Η εισροή αλμυρού νερού μεγάλης πίεσης πάντα οδηγεί σε ταυτόχρονη εμφάνιση απώλειας των ρευστών διάτρησης, λόγω αλλαγής στην πυκνότητά τους (Teng, 2015). Εξαιτίας των εργασιών κλεισίματος της γεώτρησης, για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων, πολύ εύκολα προκαλείται και «κόλλημα» της διατρητικής στήλης.

### 5.3.1.3. Στρώματα-στόχος κάτω από τη ζώνη των αλάτων (sub-salt target layer)

Τα ιδιαίτερος βαθιά και συμπιεσμένα ψαμμιτικά στρώματα εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη, ισχυρή λειαντική δράση και χαμηλή διατρησιμότητα και, κατά συνέπεια, χαμηλό ρυθμό προχώρησης. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι πριν το 2011, για την όρυξη αυτής της ζώνης απαιτήθηκαν κατά μέσο όρο 12,5 κοπτικές κεφαλές ανά γεώτρηση στο πεδίο Keshen, με μέσο ρυθμό προχώρησης μόλις 0,46 m/h και μόλις 26,6 m διατρυθέντα από κάθε κοπτικό.

Η ζώνη-στόχος παρουσιάζει επίσης υψηλές τάσεις του γήινου φλοιού (crustal stresses), καλά αναπτυγμένο σύστημα ρωγματώσεων, σε συνδυασμό με συμπαγή λιθολογία και μεγάλη σκληρότητα. Ο σχηματισμός αυτός με το ρωγμάδες πορώδες (fracture-pore type formation) παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία (40-58%) και εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα την εύκολη κατάρρευση των τοιχωμάτων της γεώτρησης κατά την όρυξη και συνεπώς τον εγκλωβισμό της διατρητικής στήλης (Teng, 2015).

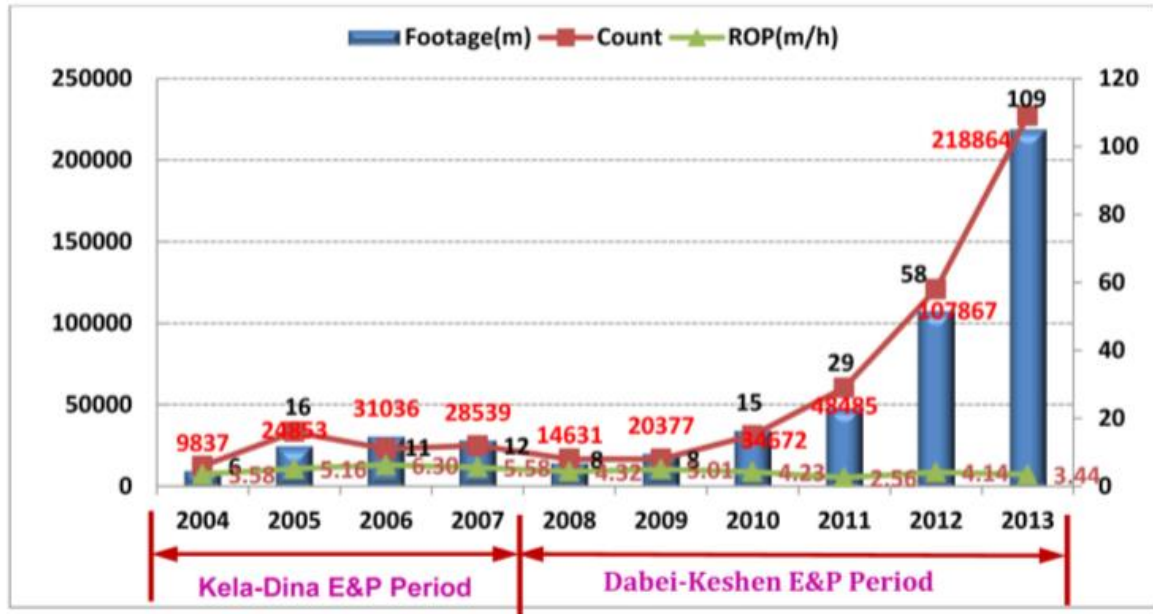
### 5.3.2. Τεχνικές λύσεις - επιτεύγματα

Με στόχο την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν κάποιες λύσεις, οι οποίες προέκυψαν ως αποτέλεσμα επισταμένης προσπάθειας για την ενσωμάτωση ώριμων τεχνολογιών (mature technology integration), την εισαγωγή νέων (new technology introduction), τις δοκιμές στο πεδίο (field test) και την τεχνική βελτιστοποίηση (technical optimization). Οι παρακάτω πέντε τεχνικές λύσεις αποτελούν πρωτοποριακή τεχνολογία στην όρυξη γεωτρήσεων και στοχεύουν στην ασφαλέστερη όρυξη γεωτρήσεων εξαιρετικά μεγάλου βάθους (ultra-deep wells) και αυξημένης πολυπλοκότητας (Teng, 2015).

- Αυτόματη κατακόρυφη όρυξη για σχηματισμούς με μεγάλη κλίσης (automatic vertical drilling for high-dip formations)
- Κατοχυρωμένο μη συμβατικό πρόγραμμα σωλήνωσης σύμφωνα με το πρότυπο Tarim για ασφαλή απομόνωση σύνθετων σχηματισμών (proprietary unconventional casing program under Tarim-standard for secure isolation of complicated layers)
- Ρευστό διάτρησης με βάση το πετρέλαιο, υψηλής πίεσης και πυκνότητας για τη διάτρηση του σύνθετου ορίζοντα γύψου-άλατος και της ζώνης στόχου (high-pressure, high-density oil-based drilling fluid for complicated gypsum-salt stratum and target zone)
- Εισαγωγή και βελτιστοποίηση πολυκρυσταλλικών αδαμαντοκοπτικών μικρής διαμέτρου για την όρυξη της ζώνης στόχου (introduction and optimization of small diameter PDC bits for target zone)
- Εισαγωγή και πιλοτική εφαρμογή διατρητικού εξοπλισμού προηγμένης τεχνολογίας (introduction and pilot test of leading-edge drilling tools)

#### 5.3.2.1. Κατακόρυφη όρυξη σε συνδυασμό με συμβατό πολυκρυσταλλικό αδαμαντοκοπτικό (vertical drilling & matching PDC bit)

Μετά από πολλές δοκιμές με κοινά κοπτικά που αποτύγχαναν να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω προβλήματα, αποφασίστηκε η χρήση του συστήματος κατακόρυφης όρυξης σε συνδυασμό με συμβατό πολυκρυσταλλικό αδαμαντοκοπτικό. Το αυτόματο σύστημα κατακόρυφης όρυξης (vertical drilling system – VDS) γεωτρήσεων προτιμάται ώστε να για να αντιμετωπίσει προβλήματα που αφορούν στις κεκλιμένες γεωτρήσεις και σε χαμηλούς ρυθμούς προχώρησης, σε στρώματα μεγάλης κλίσης. Προβλήματα, όπως η μη συμβατότητα των κοπτικών, η έλλειψη συγκεκριμένων ιδιοτήτων του εξοπλισμού όρυξης και ο ελλιπής έλεγχος της κεκλιμένης γεώτρησης με το αυτόματο σύστημα κατακόρυφης όρυξης και το πολυκρυσταλλικό αδαμαντοκοπτικό επιλύθηκαν. Στην Εικόνα 5-6 μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση που σημειώθηκε στη χρήση αυτών των συστημάτων για τη χρονική περίοδο 2004 έως 2013, καθώς και το συνολικό μήκος που διατρήθηκε (footage) για 109 διαφορετικές γεωτρήσεις (Teng, 2015).



Εικόνα 5-6. Εξελίξεις που σημειώθηκαν στην εφαρμογή του συστήματος VDS στη ζώνη Kuche από το 2004 και μετά (Teng, 2015)

### 5.3.2.2. Μη συμβατικό πρόγραμμα σωλήνωσης κατά το πρότυπο Tarim (Tarim-standard unconventional casing program)

Για την επαρκή απομόνωση της ζώνης γύψου-άλατος και την προστασία της γεώτρησης από καταπτώσεις των τοιχωμάτων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη ενδιάμεση σωλήνωση (intermediate casing) μεγάλους πάχους τοιχωμάτων, ικανή να αναλαμβάνει υψηλές πιέσεις. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο σχετικά πρότυπα για την περιοχή (Tarim Standard I and II) τα οποία τελούσαν υπό συνεχή βελτίωσης. Μάλιστα, αναπτύχθηκε και ειδικό πρότυπο (Tarim Standard II-B) προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα σε δύο διακριτά στρώματα άλατος. Με τη χρήση ενδιάμεσης σωλήνωσης επετεύχθη μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την όρυξη και βελτιωμένη αποδοτικότητα στην παραγωγή από σύνθετα και μεγάλο βάθους κοιτάσματα αερίου. Κατά κύριο λόγο η χρήση της ενδιάμεσης σωλήνωσης γίνεται σε γεωτρήσεις ανάπτυξης και λιγότερο σε ερευνητικές (Teng, 2015).

### 5.3.2.3. Ρευστά διάτρησης υψηλής πίεσης και υψηλής πυκνότητας με βάση το πετρέλαιο

Για να ανταποκριθεί η εταιρεία στις απαιτήσεις όρυξης της γεώτρησης απαιτήθηκε η δημιουργία νέων ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο. Οι βασικές ιδιότητες των συγκεκριμένων ρευστών διάτρησης είναι η αντοχή τους σε μεγάλες θερμοκρασίες (μέχρι τους 200 °C) και η ικανότητά τους να ανταπεξέλθουν σε περιβάλλον με παρουσία άλατος. Η μέγιστη δυνατή πυκνότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι 2,6 g/cm<sup>3</sup> και σε σύγκριση με ρευστά διάτρησης που έχουν ως βάση το νερό, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη συγκράτηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

(anti-sloughing), βελτιωμένη λιπαντική ικανότητα και δεν μολύνονται τόσο εύκολα από το αλμυρό νερό. Επιπλέον, παρουσιάζουν καλή ρεολογία, εξαιρετική σταθερότητα στη διατήρηση των στερεών εν αιωρήσει (excellent suspension stability), επαρκή ικανότητα ελέγχου της επικάθησης στερεών στα τοιχώματα της γεώτρησης (good mud filtrate control capacity) και η σύνθεσή τους μπορεί να βελτιωθεί προσαρμόζοντας κατάλληλα την αναλογία νερού-πετρελαίου (κυρίως 80:20 για το στρώμα γύψου-άλατος, 90:10 για τους σχηματισμούς με αλμυρό νερό υψηλής πίεσης).

Για να μειωθεί το κόστος των ρευστών διάτρησης κατασκευάστηκαν δύο σταθμοί ανακύκλωσης και χρησιμοποιήθηκαν πρωτοποριακές τεχνολογίες για το σωστό φίλτράρισμα και την έκπλυση των ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο. Μέχρι στιγμής τα συγκεκριμένα ρευστά διάτρησης έχουν χρησιμοποιηθεί σε 44 γεωτρήσεις και συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός προχώρησης έχει αυξηθεί αισθητά, με τη μέση διάρκεια όρυξης μιας γεώτρησης να έχει μειωθεί κατά 112 μέρες. Ταυτόχρονα, η μέση ημερήσια προχώρηση έχει αυξηθεί κατά 33,3% και ο μέσος χρόνος ατυχημάτων και επιπλοκών έχει μειωθεί κατά 78,4% (Teng, 2015).

#### *5.3.2.4. Εξοπλισμός διάτρησης και κοπτικά άκρα προηγμένης τεχνολογίας*

Οι πιο πρωτοποριακές τεχνολογίες παρατηρούνται στα κοπτικά άκρα, στον εξοπλισμό διάτρησης και τη διατρητική στήλη. Σχετικά με αυτά απαιτείται και πραγματοποιήθηκε τα τελευταία χρόνια προσπάθεια για την βελτίωσή τους, καθώς συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση του συνολικού κόστους της γεώτρησης.

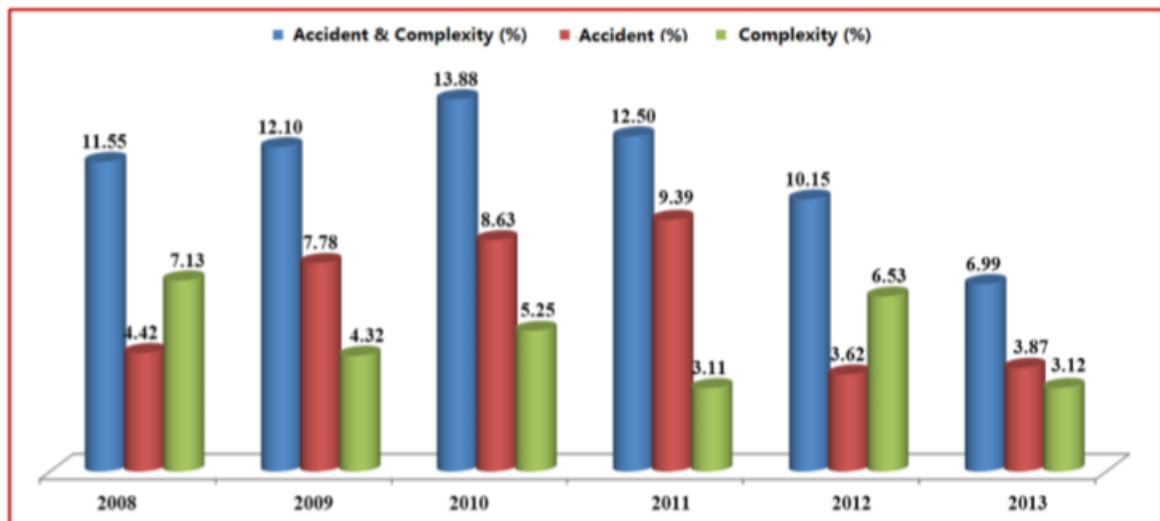
Κοπτικό με ενδογεωτρητικό κινητήρα (turbine) και ένθετους οδόντες ή κοπτικές ακμές (impregnated bit) χρησιμοποιήθηκαν πολλές φορές στη ζώνη των κροκαλοπαγών και στη ζώνη ενδιαφέροντος με εμφανή βελτίωση του ρυθμού προχώρησης. Σε σύγκριση με προηγούμενες γεωτρήσεις, ο μέσος ρυθμός προχώρησης αυξήθηκε στα 1,72 m/h και μέσο διατρυθέν μήκος ανά κοπτικό 352 m, μειώνοντας το συνολικό χρόνο για την όρυξη μιας γεώτρησης κατά 19 μέρες.

Το υβριδικό κοπτικό συνδυάζει κοπτικά ελάσματα (fixed-cutter) με περιστρεφόμενους κώνους (roller-cone elements) (Εικόνα 5-7) και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε κροκαλοπαγές, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται το κοπτικό προτού εισέλθει στην γεώτρηση και δεξιά αφότου εξήλθε.



Εικόνα 5-7. Υβριδικό κοπτικό άκρο (Teng, 2015)

Εν κατακλείδι με την χρήση πρωτοποριακών τεχνολογιών έγινε δυνατή η επιτυχής και ασφαλής όρυξη γεωτρήσεων στην ζώνη Kuche. Η αύξηση του ρυθμού προχώρησης και συνεπώς η μείωση του κόστους, των ατυχημάτων και των επιπλοκών είναι εμφανής (Εικόνα 5-8). Η διάρκεια όρυξης των γεωτρήσεων είναι αισθητά μικρότερη και η αντιμετώπιση τόσο των αλατούχων ζωνών, όσο και των κροκαλοπαγών ήταν ικανοποιητική.



Εικόνα 5-8. Ατυχήματα και επιπλοκές κατά την όρυξη των γεωτρήσεων στα Πεδία Keshen-Dabei (Teng, 2015)

Ωστόσο, αρκετά σημεία χρήζουν βελτίωσης για την περαιτέρω αύξηση της ασφάλειας της γεώτρησης και τη βελτίωση του ρυθμού προχώρησης. Η χρήση αέρα για την όρυξη της γεώτρησης χρήζει βελτίωσης, καθώς μπορεί μεν αποδεδειγμένα να είναι αποδοτικότερη σε κροκαλοπαγή περιβάλλοντα, από την άλλη δε για να εκτελεστεί απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος θα πρέπει να συμβαδίζει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωτρήσανου. Επιπλέον, απαιτείται ο σχεδιασμός ειδικής σωλήνωσης και η προσαρμογή της όρυξης γεωτρήσεων με αέρα στην κάθε περίπτωση.

Όσον αφορά στη σωλήνωση, το παρόν πρόγραμμα μπορεί μόνο να ανταπεξέλθει σε δύο ζώνες γύψου-άλατος και δεν ανταπεξέρχεται στις τεχνικές απαιτήσεις εάν συναντηθεί περισσότερα στρώματα ή ρήγματα.

Τέλος, η χρήση ρευστών διάτρησης μεγάλης πυκνότητας με βάση το πετρέλαιο και υψηλής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι καίριας σημασίας για την όρυξη γεωτρήσεων σε ζώνες γύψου-άλατος. Αλλά η συχνή απώλεια των ρευστών διάτρησης στις ρωγμές των σχηματισμών αυξάνει σημαντικά το κόστος του όλου εγχειρήματος (Teng, 2015).

## 5.4. Κόλπος της Ταϊλάνδης – Πεδίο Bongkot

### 5.4.1. Γενικά στοιχεία

Το 2011 μία μεγάλη πετρελαϊκή εταιρεία όρυξε και εκτέλεσε δοκιμές στη γεώτρηση Tong Rang 3, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή πίεση και θερμοκρασία, στη θαλάσσια περιοχή του Κόλπου της Ταϊλάνδης, περίπου 722 km από την Μπανγκόκ. Η επισκόπηση των δεδομένων μετά τη διάτρηση της συγκεκριμένης γεώτρησης (post-drilling review) συνέθεσαν μια ενδεικτική μελέτη περίπτωσης για την εταιρία, ως προς τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό όρυξης της γεώτρησης και τα βήματα για τη λήψη αποφάσεων ώστε να βελτιστοποιηθούν οι γεωτρήσεις ανάπτυξης σε συνθήκες HP/HT που θα ορύξει η εταιρεία στο μέλλον στο δύσκολο περιβάλλον του Κόλπου της Ταϊλάνδης.

Εκτός των προφίλ πίεσης και τάσεων, σημαντική πτυχή της διαδικασίας σχεδιασμού της γεώτρησης είναι και η κατανόηση των θερμοκρασιακών συνθηκών και της μεταφοράς θερμότητας. Οι διαγραφίες και οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στη γεώτρηση Tong Rang 3, επιβεβαίωσαν ότι οι παραγόμενοι υδρογονάνθρακες περιέχουν αέριο συμπύκνωμα (gas condensate) με περιεκτικότητα 31,5% σε CO<sub>2</sub>. Η μέγιστη θερμοκρασία κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης που διαπιστώθηκε ήταν 207 °C, κατά την όρυξη στο μέγιστο βάθος και με τη χρήση συστήματος ψύξης των ρευστών διάτρησης (mud-cooling system), ενώ κατά την εκτέλεση δοκιμών χωρίς κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης η μέγιστη θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης ήταν πάνω από 227 °C και η θερμοκρασία στην κεφαλή του σωλήνα παραγωγής 60 °C.

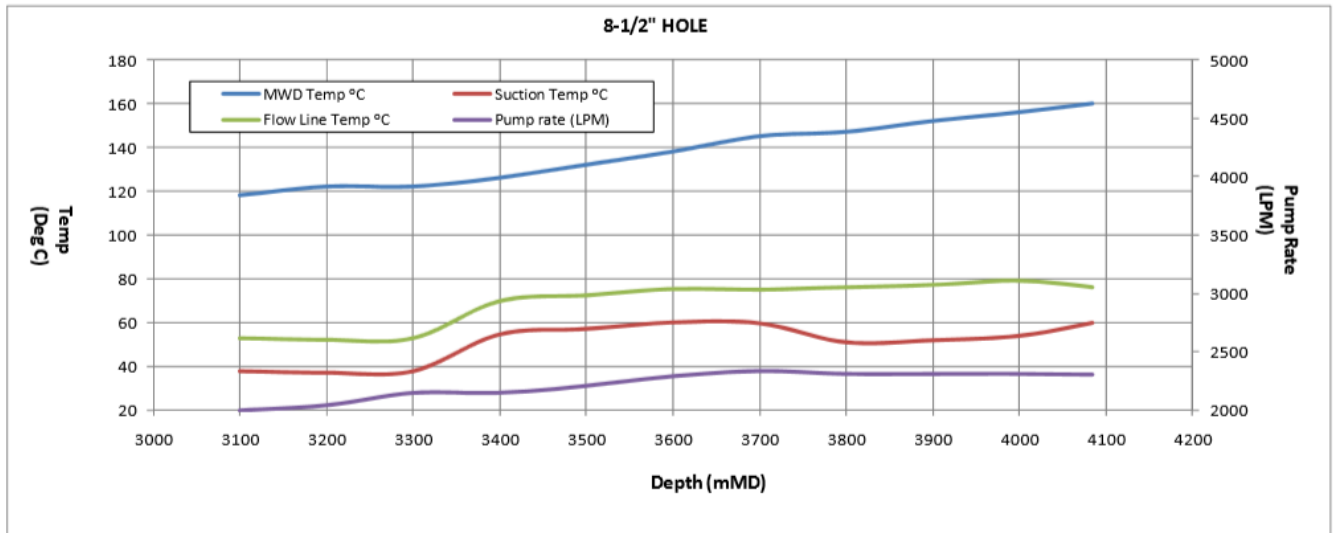
Η διαδικασία σχεδιασμού της σωλήνωσης, συμπεριλαμβανομένου και του σωλήνα παραγωγής (production tubing string), εκτελείται από ειδικευμένο προσωπικό, με βασικό γνώμονα την αντοχή τους στις συνθήκες HP/HT και την ακεραιότητά τους καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Συνήθως χρησιμοποιούνται πρότυπα λογισμικά της βιομηχανίας για τον σχεδιασμό της επιφανειακής, ενδιάμεσης και παραγωγικής σωλήνωσης, επικεντρώνοντας στην εκτέλεση σύνθετων λειτουργιών. Στην παρούσα περίπτωση, ο σχεδιασμός έγινε τόσο για βασικά φορτία λειτουργίας, όσο και για

ακραίες συνθήκες φόρτισης, ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ακεραιότητα της σωλήνωσης κατά τις φάσεις όρυξης και εκτέλεσης δοκιμών εντός της γεώτρησης.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις αλλαγές της θερμοκρασίας και στην επίδρασή τους πάνω στη σωλήνωση, λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη αύξηση της πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης (annular pressure buildup - APB) και τις μετατοπίσεις της κεφαλής (wellhead movement - WHM), κυρίως λόγω θερμικής διαστολής. Η χρήση ενός σύγχρονου προσομοιωτή θερμικών συστημάτων (thermal simulator) με δυνατότητα ανάλυσης τάσεων (stress modelling analyses), έχει ιδιαίτερα σημαντική κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μιας γεώτρησης HP/HT (Hahn D. P., 2000) (Hahn D. B., 2003). Η προσομοίωση αρχικά αφορά στη διερεύνηση της επιρροής που ασκούν οι αλλαγές στην πίεση ή/και τη θερμοκρασία, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της γεώτρησης και μετέπειτα μπορεί να προχωρήσει στο πως οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν τις τάσεις που ασκούνται πάνω στη σωλήνωση (casing stresses), την κάμψη της σωλήνωσης (casing buckling), την μετακίνηση και την κάμψη των σωλήνων παραγωγής (tubing movement, tubing buckling) κ.ά. Σύμφωνα με τον Mitchell (Mitchell, 1989), η χρήση προσομοιωτή για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας μέσα στη γεώτρηση είναι απαραίτητη για το βέλτιστο σχεδιασμό της σωλήνωσης. Η χρήση του είναι ευρέως διαδεδομένη στην πετρελαϊκή βιομηχανία και απαραίτητη στις δύσκολες γεωτρήσεις όπως είναι η Tong Rang 3, η οποία εμφανίζει θερμοκρασία πυθμένα έως και 230 °C.

#### 5.4.2. Επισκόπηση της θερμοκρασίας

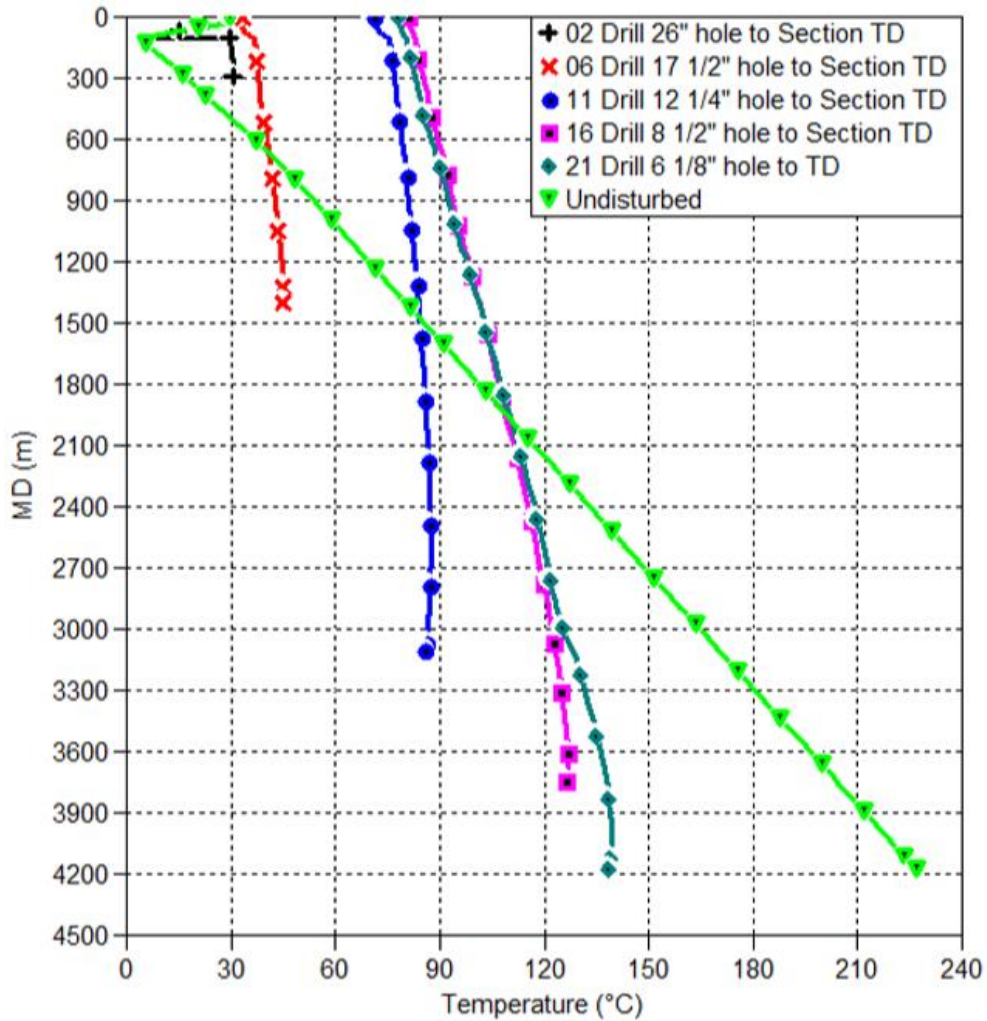
Η γνώση των συνθηκών θερμοκρασίας και της μεταφοράς θερμότητας εντός της γεώτρησης είναι απαραίτητη στη διαδικασία σχεδιασμού μίας γεώτρησης HP/HT, διότι η αναμενόμενη θερμοκρασία θα χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της ποιότητας του εξοπλισμού και του εξοπλισμού εκτέλεσης δοκιμών. Ο προσδιορισμός των κατάλληλων εργαλείων MWD (Measuring While Drilling)/LWD (Logging While Drilling), όπως και του κατάλληλου συστήματος ψύξης είναι κρίσιμος, καθώς κάθε τμήμα του εξοπλισμού έχει διακριτούς θερμοκρασιακούς περιορισμούς. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 5-9) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα εκτέλεσης MWD στη γεώτρηση Tong Rang 3, κατά την όρυξη του τμήματος των 8-1/2-in.



Εικόνα 5-9. Πραγματική μέτρηση της θερμοκρασίας κατά την διάτρηση του τμήματος των 8-1/2-in (Habil Akram Rosland, 2013)

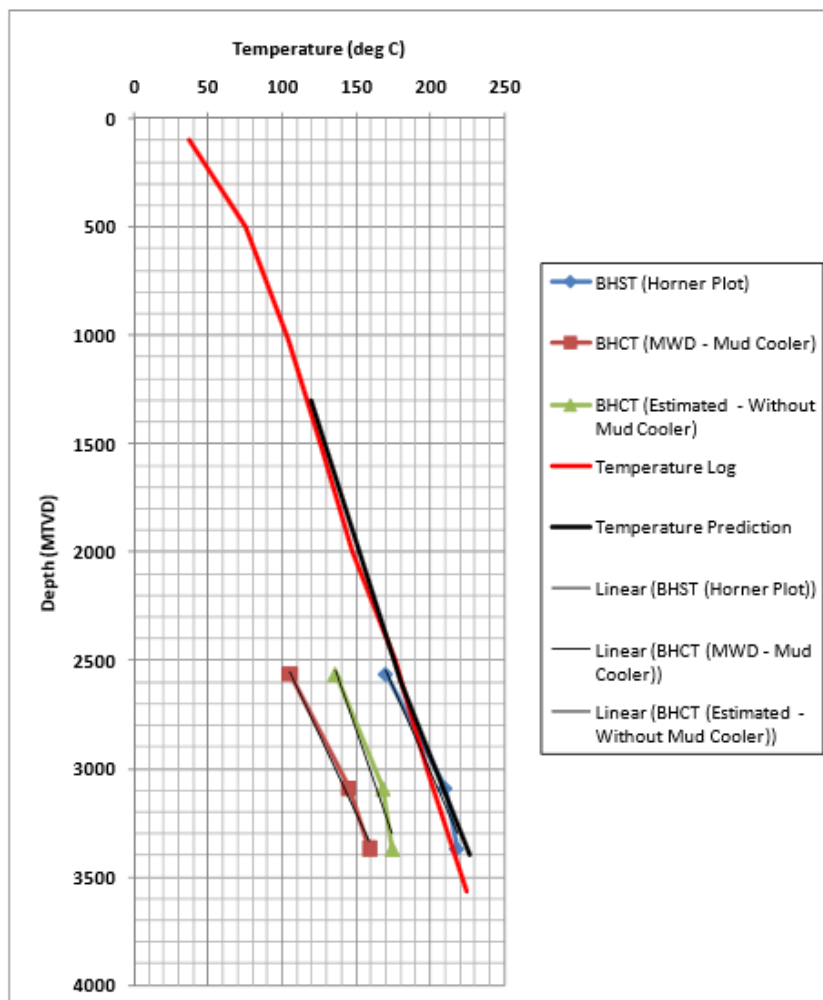
Από το διάγραμμα, που προέκυψε μετά την εκτέλεση MWD & LWD, συμπεραίνεται ότι στο τμήμα των 8-1/2-in η μέγιστη θερμοκρασία είναι 169 °C, η οποία βαίνει μειούμενη μετά την κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης στη γεώτρηση. Η εκτιμώμενη από τον προσομοιωτή μέγιστη θερμοκρασία πυθμένα έφτανε τους 140 °C (Εικόνα 5-10), κάτι που στην πραγματικότητα απεδείχθη λάθος. Αυτή η λανθασμένη πρόβλεψη είχε ως αποτέλεσμα την παρατηρηθείσα αστοχία του εξοπλισμού LWD. Μία άλλη αιτία για το γεγονός ότι η καταγραφείσα θερμοκρασία υπερβαίνει την εκτιμώμενη, είναι η στασιμότητα των ρευστών διάτρησης κατά την εκτέλεση των μετρήσεων και η έλλειψη κυκλοφορίας τους, με αποτέλεσμα την ανεπαρκή ψύξη της γεώτρησης.





Εικόνα 5-10. Προβλεπόμενη θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης (Habil Akram Rosland, 2013)

Η χρήση συστήματος ψύξης των ρευστών διάτρησης αποτελεί πρακτική λύση στο ζήτημα του ελέγχου της θερμοκρασίας τους στην επιφάνεια, στις περιπτώσεις μεγάλων θερμοκρασιών (Mauray, 1993). Δεδομένα που έχουν προκύψει από διάφορα τμήματα της γεώτρησης έχουν δείξει ότι το σύστημα ψύξης έχει επιτύχει πτώση στη θερμοκρασία κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης της τάξης των 15–31 °C (Εικόνα 5-11).



Εικόνα 5-11. BHST και BHCT. Παρατηρούμενη θερμοκρασία έναντι πρόβλεψης, με και χωρίς τη χρήση συστήματος ψύξης των ρευστών διάτρησης (Habil Akram Rosland, 2013)

Η επιρροή της θερμοκρασίας δείχνει ότι ο βασικός παράγοντας αύξησης της θερμοκρασίας και διαφοράς μεταξύ της εκτιμώμενης τιμής και της πραγματικής είναι η διακοπή κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή η διακοπή οφείλεται στην εκτέλεση δοκιμών και στην ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης. Ωστόσο, η ψύξη της γεώτρησης μπορεί να εμφανίσει προβλήματα όπως ρωγμές στην σωλήνωση και αστοχία των συνδέσμων (Maury, 1993). Τέλος, αλλαγές στη θερμοκρασία έχουν σημαντική επιρροή στις τάσεις κατά την ολοκλήρωση της γεώτρησης, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε αστοχία της σωλήνωσης.

#### 5.4.3. Προτεινόμενες λύσεις – Συμπεράσματα

Ως λύση στο πρόβλημα της αντοχής του εξοπλισμού και του εξοπλισμού θα μπορούσε να είναι η χρήση καλύτερης ποιότητας σωληνώσεων, συνδέσμων και εργαλείων (κατηγορία χάλυβα L80 ή T95 ή C110). Επιπλέον, για τον ακριβή

προσδιορισμό των θερμοκρασιακών αλλαγών, απαραίτητη είναι η γνώση της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών (χαλύβδινα μέρη, ρευστά, τσιμέντο) που χρησιμοποιούνται κατά την όρυξη της γεώτρησης, καθώς και του σχηματισμού. Για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης στον πυθμένα της γεώτρησης (BHCT), αυτή αυξάνεται σημαντικά όταν ξεκινά η όρυξη και σταματά η κυκλοφορία τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της σωλήνωσης από 8% έως και 10% απαιτώντας πιο συντηρητικό σχεδιασμό για τη σωλήνωση.

Ο σχεδιασμός μίας γεώτρησης HP/HT μπορεί να γίνει με αυστηρότητα, αλλά σε κάθε περίπτωση, και ειδικά στη συγκεκριμένη, είναι σημαντική η ύπαρξη μίας δικλείδας ασφαλείας ώστε να αντιμετωπιστεί οποιαδήποτε αυξημένη τιμή θερμοκρασίας ή πίεσης.

## 5.5. Κόλπος του Μεξικό - Σχεδιασμός & όρυξη γεωτρήσεων ultra HP/HT

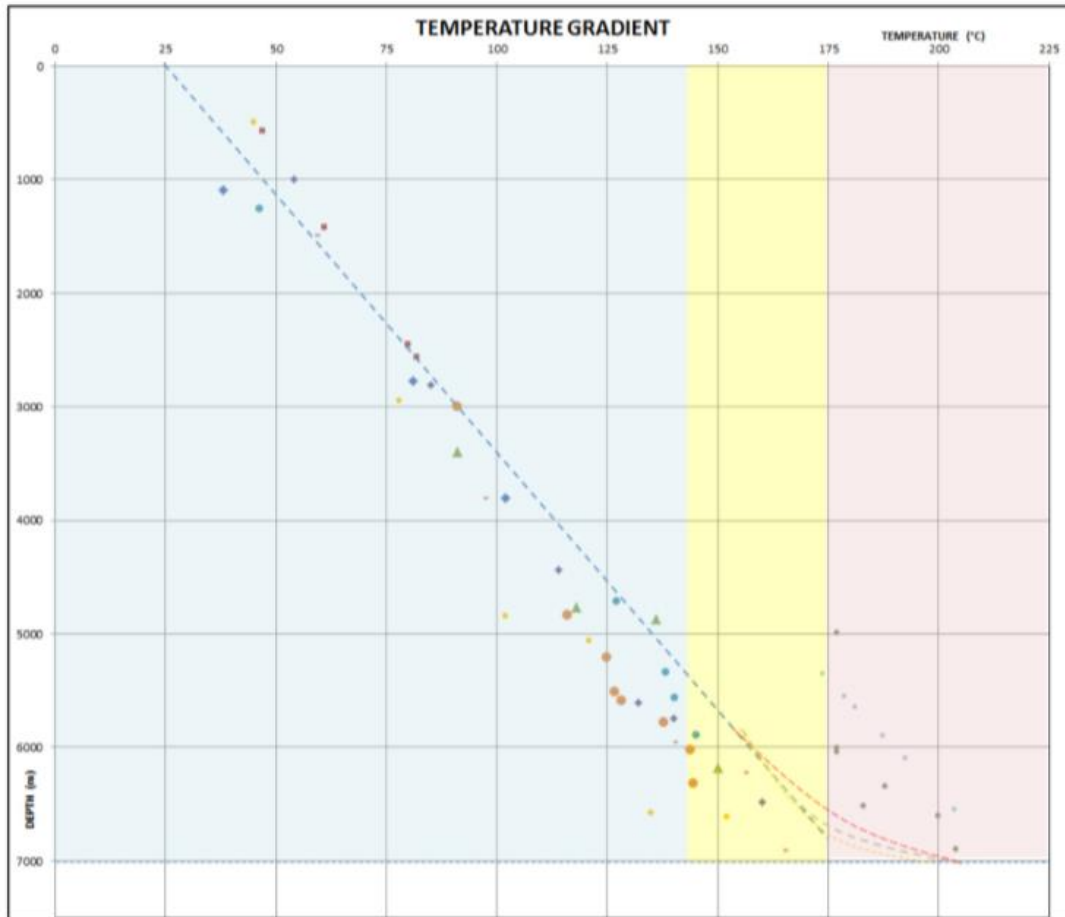
### 5.5.1. Γενικά στοιχεία

Η όρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικό αποτελεί μεγάλη πρόκληση για την τρέχουσα, αλλά και τη μελλοντική ανάπτυξη των τεχνικών και επιχειρησιακών ικανοτήτων των εταιριών που δραστηριοποιούνται στην περιοχή. Εξ' αιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το γεωλογικό περιβάλλον απαιτείται υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας και εξειδίκευσης του προσωπικού, γεγονός που καθιστά τον σχεδιασμό και την όρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων HP/HT στην περιοχή ως μία μη συμβατική δραστηριότητα.

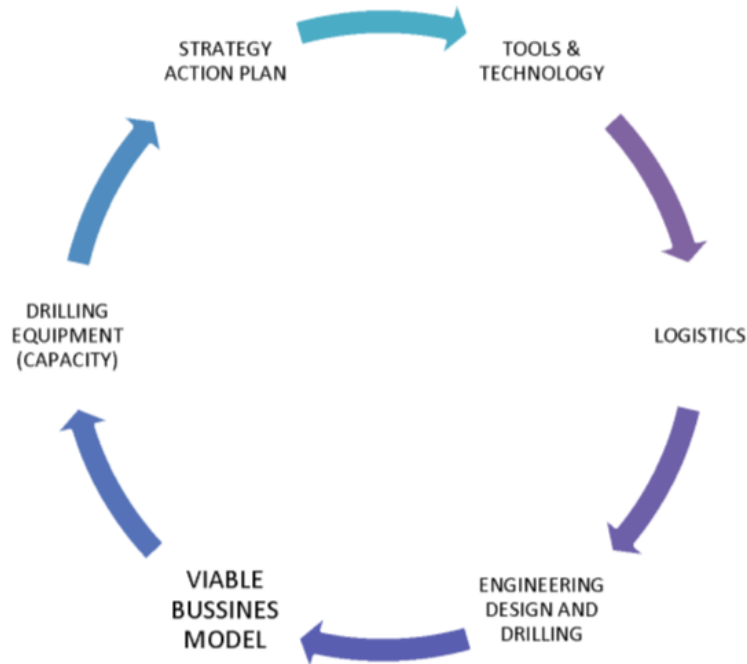
Οι προκλήσεις είναι ποικίλες: Άλλες γεωτρήσεις πρέπει να προσεγγίσουν σε βάθος τα 4.000 m, σε πιέσεις μεγαλύτερες των 19.200 psi και άλλες να φτάσουν σε βάθος τα 7.000 m, σε θερμοκρασίες έως και 205 °C.

Σύμφωνα με την πρόσφατη εμπειρία, οι ζώνες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας βρίσκονται κάτω από το βάθος μέχρι το οποίο έφταναν παλαιότερα οι ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή (Εικόνα 5-12), αυξάνοντας τις τεχνικές προκλήσεις και τις δυσκολίες σχεδιασμού. Από την εμπειρία που αποκτήθηκε από την όρυξη τέτοιων γεωτρήσεων, διαπιστώθηκε ότι οι συνθήκες HP/HT κατά την όρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων καθιστούν τον σχεδιασμό (planning) και τον εφοδιασμό στο θαλάσσιο περιβάλλον (offshore logistics) είτε συγκριτικό πλεονέκτημα, είτε κοστοβόρο μειονέκτημα, εξαιτίας του μεγάλου όγκου πόρων και χρόνου που απαιτούνται, αλλά και του πολυσύνθετου προγραμματισμού. Συνεπώς, η

ανάγκη για οργάνωση είναι ακόμα μεγαλύτερη και συνοψίζεται σε έξι σημαντικές κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται στον κύκλο αποδοτικότητας σχεδιασμού (Εικόνα 5-13). Ο κύκλος αποδοτικότητας σχεδιασμού βασίζεται στη λήψη αποφάσεων και στην επίτευξη του βέλτιστου τεχνικοοικονομικού αποτελέσματος.



Εικόνα 5-12. Θερμοκρασιακή βαθμίδα & διακύμανση θερμοκρασίας με το βάθος προχώρησης των ερευνητικών γεωτρήσεων στον Κόλπο του Μεξικό (Ruiz, 2016)

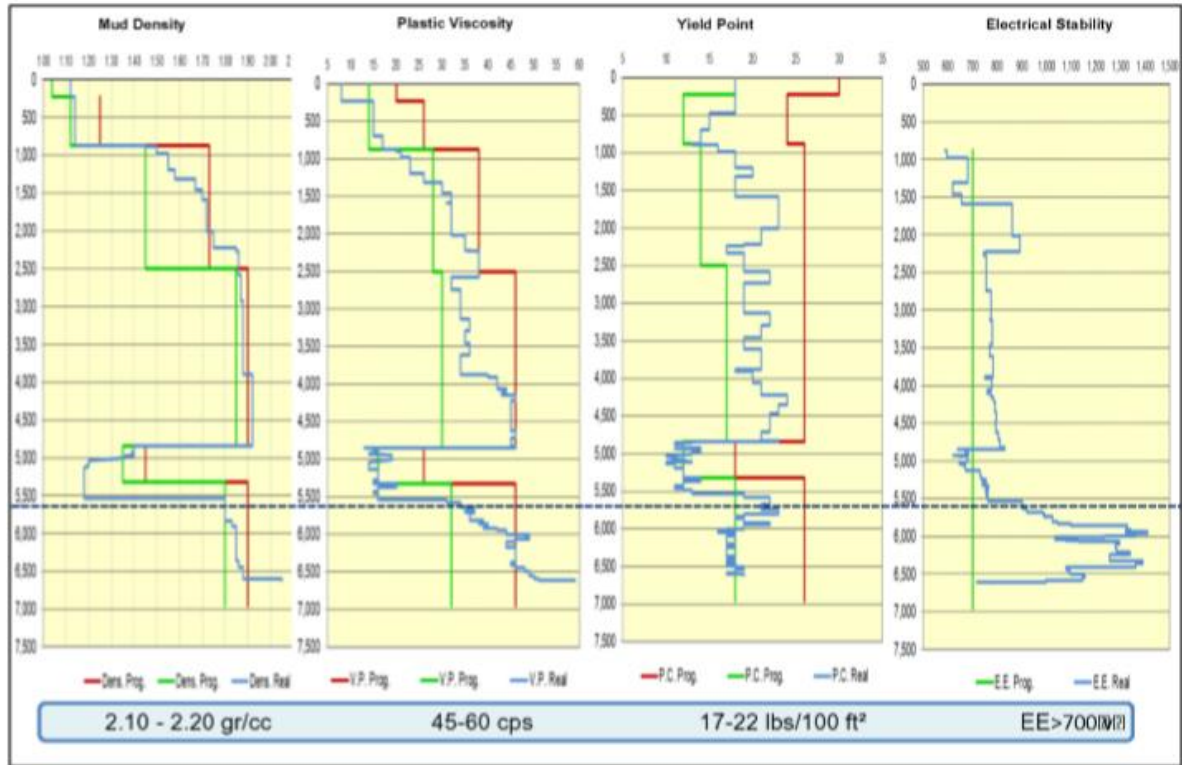


Εικόνα 5-13. Κύκλος αποδοτικότητας σχεδιασμού (Ruiz, 2016)

Επιπλέον, ο κύκλος αποδοτικότητας σχεδιασμού παρουσιάζει κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία ώστε να ορυχθεί επιτυχώς μία ερευνητική γεώτρηση και συμπεριλαμβάνει και την εκτίμηση των αποθεμάτων. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν τους βασικούς κανόνες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ερευνητικών γεωτρήσεων υψηλού ρίσκου. Παρακάτω, ακολουθούν ορισμένες παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον ορθό σχεδιασμό μίας θαλάσσιας ερευνητικής γεώτρησης σε συνθήκες HP/HT στον Κόλπο του Μεξικού.

### 5.5.2. Ρευστά διάτρησης

Όταν τα ρευστά διάτρησης εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, ανεξάρτητα από τη σύνθεση τους, απαιτείται να περιέχουν πάνω από 40 % στερεά στη σύνθεσή τους. Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν επίσης τις ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών διάτρησης και οδηγούν σε προβλήματα αστάθειας της γεώτρησης και σε εύκολη επίδραση σε αυτή από ζώνες ανωμάλων πιέσεων (Εικόνα 5-14).



Εικόνα 5-14. . Πραγματική συμπεριφορά των ρεολογικών ιδιοτήτων σε γεωτρήσεις ultra HP/HT στον Κόλπο του Μεξικό (Ruiz, 2016)

Σύμφωνα με πρόσφατες εργαστηριακές αναλύσεις, όταν η θερμοκρασία των ρευστών διάτρησης αυξάνεται μέχρι τους 200 °C, αυξάνεται και το ιξώδες, κάτι που οφείλεται στην ενεργοποίηση των πρόσθετων τύπου γαλακτωματοποιητών (emulsifiers), τα οποία προστίθενται για να βελτιώσουν τις ρεολογικές συνθήκες. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 210 °C (με τις πιέσεις να κυμαίνονται μεταξύ 15.000 psi και 18.000 psi) παρατηρείται ότι οι ιδιότητες μειώνονται, υποδεικνύοντας ότι σε αυτή τη θερμοκρασία οι γαλακτωματοποιητές αρχίζουν και χάνουν την αποδοτικότητά τους.

Ένα ακόμη ζήτημα που απαιτεί οργάνωση και πρέπει να συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό είναι η συνεχόμενη και άμεση παροχή υλικών για την κατασκευή των ρευστών διάτρησης στο χώρο του γεωτρήπανου. Η βέλτιστη λύση που ακολουθείται ευρέως είναι η ύπαρξη ενός πλοίου κοντά στο γεωτρήπανο, το οποίο θα προμηθεύει τα απαραίτητα συστατικά.

### 5.5.3. Γεωτρήπανο – Εξοπλισμός όρυξης

Με την πάροδο των χρόνων η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων στον Κόλπο του Μεξικού πραγματοποιείται με γεωτρήπανα που έχουν κατασκευαστεί τις δεκαετίες του 1970 και του 1980 και έχουν ανακαινιστεί τις δεκαετίες του 1990 και του 2000. Από αυτό συμπεραίνεται ότι τα γεωτρήπανα και ο εξοπλισμός που φέρουν είναι

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

μεγάλης ηλικίας και έχει υποστεί σημαντική φθορά κάτι που τα καθιστά λιγότερο ικανά να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες HP/HT (Ruiz, 2016). Συνεπώς, στο γεωτρύπανο, η χρήση καινοτόμου εξοπλισμού έχει καταστεί αναγκαία, όπως:

- Η χρήση αυτόματου συστήματος ελέγχου των διατάξεων ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης (hoisting control system).
- Η χρήση συστημάτων ελέγχου, συστημάτων μετάδοσης δεδομένων και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, το γεωτρύπανο πρέπει να περιλαμβάνει κατ' ελάχιστο ορισμένους αποθηκευτικούς χώρους:

- Δεξαμενές των ρευστών διάτρησης 200 m<sup>3</sup> και για ταυτόχρονη σύνθεση νέων ρευστών.
- Αποθηκευτικοί χώροι, για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι οποίοι θα πρέπει να υπερβαίνουν το ανώτατο προτεινόμενο όριο από το API.

Το γεωτρύπανο θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει:

- Ανυψωτήρα τελευταίας τεχνολογίας ικανό να σηκώνει περισσότερες συνδεσμολογίες διατρητικών στελεχών.
- Συστήματα περιστροφής και κυκλοφορίας ώστε να μπορεί να ορύξει σε βάθος 8.000 m.
- Επιφανειακό αντiekρηκτικό μηχανισμό μεγέθους μεγαλύτερου των 15.000 psi.

Η μέχρι στιγμής εμπειρία που έχει αποκτηθεί έχει επιτρέψει στη βιομηχανία να βρει μία οικονομική ισορροπία (κόστος εργαλείων/εξοπλισμού και χρόνος δραστηριοτήτων) με μία διαδικασία που επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμών και λήψη δεδομένων από τον ταμιευτήρα ενώ πραγματοποιείται διάτρηση (LWD/MWD).

#### 5.5.4. Διαγραφίες εντός της γεώτρησης με χρήση συρματόσχοινου (wireline logging)

Τα εργαλεία που λαμβάνουν δεδομένα από τη γεώτρηση έχουν επιτρέψει τον ακριβή προσδιορισμό της γεωθερμικής βαθμίδας της γεώτρησης. Επιπλέον, εκτελούν μετρήσεις στον πυθμένα της γεώτρησης και λαμβάνουν δείγματα από αυτή. Παρ' όλο που αυτά τα μηχανήματα αντέχουν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 250 °C, εξ' αιτίας της μόνωσης που έχουν, η βαθμονόμηση και η ανέλκυση και καθέλκυσή τους τα καταστρέφει, σε γεωτρήσεις βάθους μεγαλύτερου των 6.500 m. Ωστόσο, η χρήση αυτών των εργαλείων είναι στρατηγικής σημασίας για τη λήψη πληροφοριών και την πρόβλεψη των αποθεμάτων. Γι' αυτό το λόγο αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού μιας γεώτρησης, καθώς αποτελούν το μόνο μέσο για τη λήψη δεδομένων από γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας.

## 5.6. Η περίπτωση του Macondo

Στην παγκόσμια αγορά υδρογονανθράκων, οι εταιρείες είναι υποχρεωμένες να τηρούν το νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο που ισχύει στη χώρα όπου δραστηριοποιούνται, αλλά και τα διεθνή πρότυπα και τις κατευθυντήριες οδηγίες που σχετίζονται με την ασφάλεια των εργαζομένων, του περιβάλλοντος και των εγκαταστάσεων. Μία περίπτωση αποτυχίας διασφάλισης της ασφάλειας των εργαζομένων και του περιβάλλοντος αποτελεί η γεώτρηση Macondo της BP. Η μεγάλου μεγέθους έκρηξη που έλαβε χώρα στην εξέδρα Deepwater Horizon, στον Κόλπο του Μεξικού, τον Απρίλιο του 2010, έφερε στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τις δυσκολίες και τους κινδύνους κατά την όρυξη μίας γεώτρησης σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας.

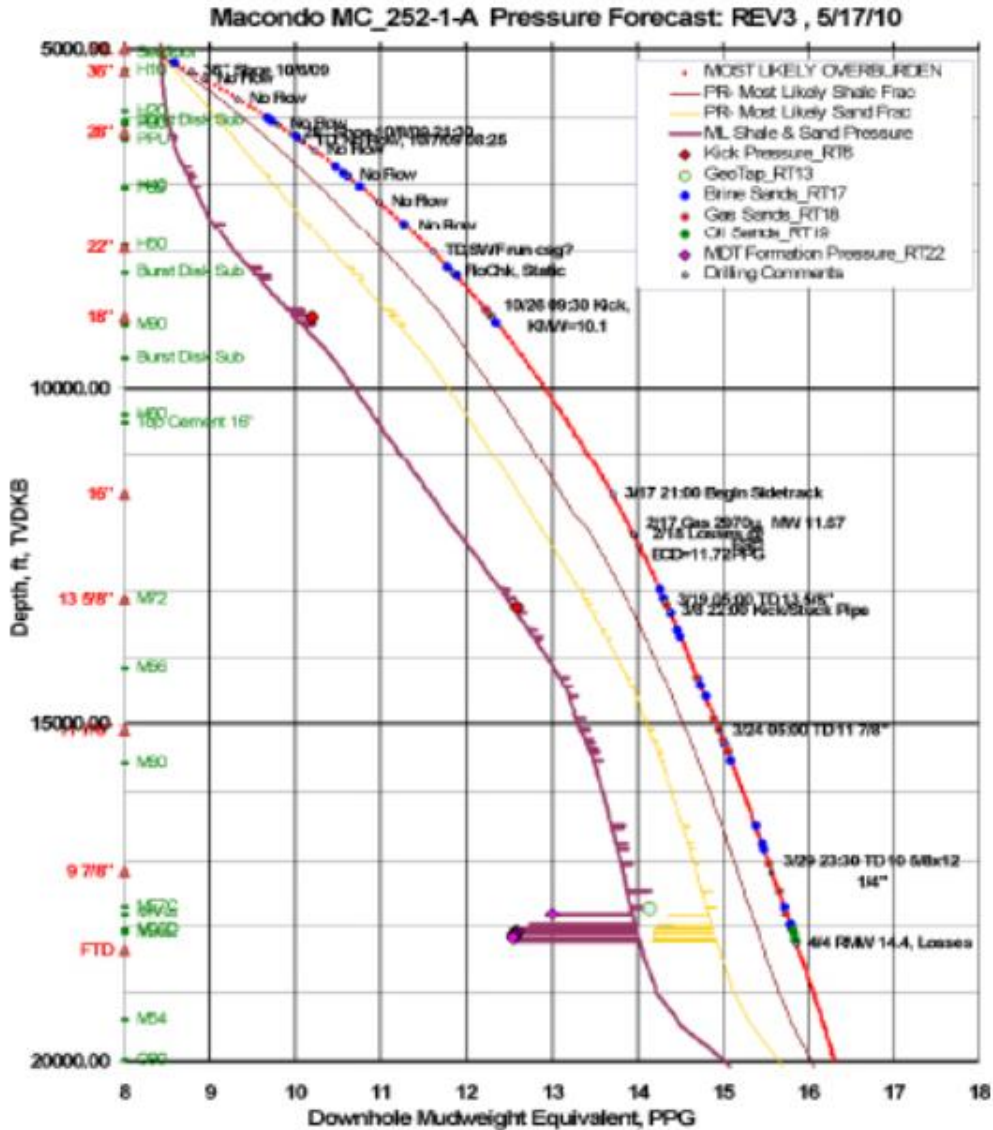
Ειδικότερα, η γεώτρηση Macondo, βρισκόταν στο οικόπεδο Block 252 του Κόλπου του Μεξικού, απέχοντας 40 μίλια (64 km) από την στεριά και παρουσίαζε στον πυθμένα της γεώτρησης πίεση περίπου 15.000 psi και θερμοκρασία 300 °F. Το βάθος της θάλασσας σε εκείνη την περιοχή είναι 5.000 ft και η γεώτρηση, αρχικά, αποσκοπούσε να φτάσει σε τελικό βάθος 20.200 ft. Αποτέλεσμα του δυστυχήματος αυτού ήταν ο θάνατος 11 ανθρώπων, αφήνοντας πίσω και άλλους 17 σοβαρά τραυματισμένους. Κύριος ανάδοχος του έργου ήταν η BP, συμμετέχοντας με ποσοστό 65%, ενώ τα υπόλοιπα δύο συμβαλλόμενα μέρη της κοινοπραξίας ήταν η Mitsui Oil Company Exploration και η Anadarko Petroleum Corporation συμμετέχοντας με ποσοστά 10% και 25%, αντίστοιχα (Wikipedia, 2018).

Η κοινοπραξία εκμετάλλευσης είχε αναθέσει σε εξωτερικούς συνεργάτες ορισμένες σημαντικές εργασίες. Ενδεικτικά, η Halliburton είχε αναλάβει το έργο της τσιμέντωσης της γεώτρησης, η Sperry Sun το σύστημα παρακολούθησης της γεώτρησης, η Schlumberger είχε αναλάβει την εκτέλεση διαγραφιών για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της τσιμέντωσης και, τέλος, η Transocean είχε εκμισθώσει την εξέδρα Deepwater Horizon και το απαραίτητο για τη λειτουργία της προσωπικό.

### 5.6.1. Αιτίες εκδήλωσης του δυστυχήματος

Το δυστύχημα που έλαβε χώρα στη γεώτρηση Macondo οφείλεται σε αιφνίδια εισροή υδρογονανθράκων εντός της γεώτρησης και στην αποτυχία ανάκτησης του ελέγχου. Το προσωπικό της BP απέτυχε να αναγνωρίσει τα σημάδια της εισροής έγκαιρα, με αποτέλεσμα την καθυστερημένη διακοπή της ροής από την γεώτρηση. Επιπλέον, μεγάλο πρόβλημα στην γεώτρηση Macondo, όπως και σε όλες τις γεωτρήσεις HP/HT, είναι το μικρό περιθώριο μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού (Εικόνα 5-15).





Εικόνα 5-15. Διάγραμμα πίεσης-βάθους για την γεώτρηση Macondo (National Academy of Engineering and National Research Council, 2012)

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται 4 καμπύλες οι οποίες αναπαριστούν: την πίεση των πόρων για το σχιστόλιθο και τον ψαμμίτη (μωβ αριστερή καμπύλη), την πίεση ρωγμάτωσης του ψαμμίτη (κίτρινη καμπύλη), την πίεση ρωγμάτωσης του σχιστόλιθου (καφέ δεξιά καμπύλη) και την πίεση των υπερκειμένων (overburden pressure) (κόκκινη δεξιά καμπύλη), σε σχέση με το βάθος όρυξης. Ο άξονας x είναι το ισοδύναμο βάρος των ρευστών διάτρησης στον πυθμένα της γεώτρησης (EMW - equivalent mud weight) και εκφράζεται σε pounds per gallon (ppg). Η τιμή του ισοδύναμου βάρους των ρευστών διάτρησης πρέπει να είναι εντός των ορίων μεταξύ της αριστερής μωβ και της κίτρινης καμπύλης, ώστε να μην προκληθεί αιφνίδια εισροή, εάν είναι μικρότερο, ή ρωγμάτωση του σχηματισμού, εάν είναι μεγαλύτερο.

Η διατήρηση της ισοδύναμης πυκνότητας κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης κατέστη δύσκολη και αρκετές φορές το προσωπικό του γεωτροπάνου αντιμετώπισε

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

αιφνίδιες εισροές. Καθώς αυξανόταν το βάθος της γεώτρησης, το περιθώριο για ασφαλή διάτρηση μειωνόταν, με αποτέλεσμα η BP να προχωρήσει σε κάποιες αλλαγές του αρχικού σχεδιασμού (Transocean, 2011). Αυτές οι αλλαγές περιλάμβαναν:

- ✓ Μείωση του τελικού βάθους της γεώτρησης.
- ✓ Αλλαγές στο πρόγραμμα σωλήνωσης του τελευταίου τμήματος της γεώτρησης.
- ✓ Εισπίεση του πολφού του τσιμέντου με μικρότερο ρυθμό, επηρεάζοντας έτσι το κλείσιμο των βαλβίδων του float collar<sup>14</sup>.
- ✓ Μείωση της πυκνότητας του πολφού του τσιμέντου στο δακτύλιο, χρησιμοποιώντας αφρό με προσμίξεις αζώτου (nitrogen foam).
- ✓ Εισπίεση μικρότερης ποσότητας πολφού τσιμέντου από την αρχικά υπολογισμένη.
- ✓ Ακύρωση ολοκληρωτικής κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης από τον πυθμένα στην επιφάνεια (bottoms up), προτού αρχίσει η διαδικασία της τσιμεντώσης, με αποτέλεσμα τον ελλιπή καθαρισμό της γεώτρησης.

Οι παραπάνω αλλαγές συνέβαλλαν αρνητικά στην ασφαλή εκτέλεση της τσιμεντώσης και στην προσπάθεια ελέγχου της γεώτρησης. Η έρευνα που ακολούθησε από την BP κατέληξε σε 4 κύριους παράγοντες, οι οποίοι συντέλεσαν στο δυστύχημα:

- Η ακεραιότητα της γεώτρησης ήταν ανεπαρκής ή απέτυχε στον σκοπό της.
- Η εισροή υδρογονανθράκων στη γεώτρηση παρέμεινε μη ανιχνεύσιμη και δεν κατέστη δυνατός ο έλεγχός της.
- Η εξέδρα Deerwater Horizon πήρε φωτιά με την παρουσία υδρογονανθράκων.
- Ο αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας απέτυχε να απομονώσει την γεώτρηση.

Με την ανάλυση των τεσσάρων παραπάνω παραγόντων και την εκτέλεση ενδεδειγμένης έρευνας, η BP (BP, 2010) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι βασικοί συντελεστές, που ανήκουν στις παραπάνω 4 κατηγορίες και συνέβαλλαν στο ατύχημα, είναι οι εξής:

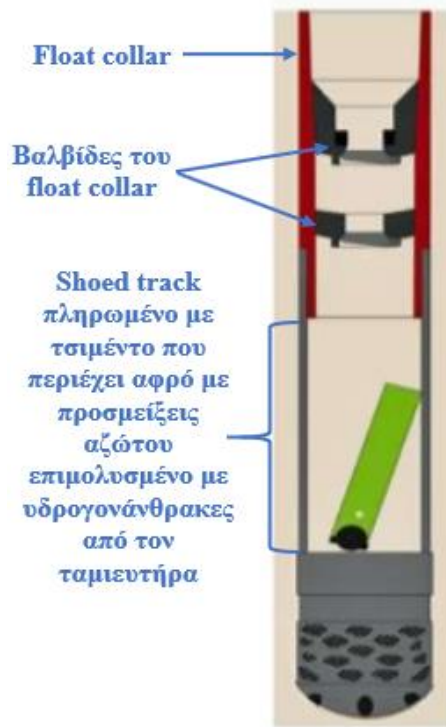
- Η τσιμεντώση, απέτυχε να απομονώσει τη γεώτρηση και να αποτρέψει την εισροή υδρογονανθράκων. Η αποτυχία αυτή οφείλεται σε μία σειρά από λάθος αποφάσεις που σχετίζονται με την σωλήνωση και την τσιμεντώση. Αρχικά, έγινε η επιλογή μεγάλου μήκους συμβατικής παραγωγικής σωλήνωσης (long-string production casing) έναντι σωλήνωσης liner. Η συμβατική παραγωγική σωλήνωση, για να τσιμεντωθεί απαιτεί εισπίεση ειδικού τύπου πολφού τσιμέντου με συγκεκριμένο ρυθμό, ώστε να μην προκληθούν ρωγματώσεις

---

<sup>14</sup> Το float collar είναι ένα εξάρτημα που εγκαθίσταται στο κάτω μέρος της στήλης σωλήνωσης πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα παρεμβύσματα της τσιμεντώσης. Τυπικά, περιλαμβάνει ένα στέλεχος σωλήνωσης μικρού μήκους το οποίο φέρει μια βαλβίδα ελέγχου (check valve), η οποία παρεμποδίζει την αναρροή (flowback) του πολφού του τσιμέντου, όταν σταματήσει η εισπίεσή του (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

στον σχηματισμό. Ως εκ τούτου, προστέθηκε στον πολφό τσιμέντου αφρός με προσμίξεις αζώτου, αφήνοντας πολύ μικρό περιθώριο λάθους στη διαδικασία της τσιμεντώσης, διότι η χρήση αφρού με προσμίξεις αζώτου απαιτεί ακριβή υπολογισμό του όγκου του δακτυλίου και προσεκτική τοποθέτησή του.

- Ο φραγμός ανακοπής εισόδου ρευστών στο εσωτερικό της γεώτρησης (shoe track barrier) απέτυχε να την απομονώσει. Το κατώτερο στέλεχος της σωλήνωσης (shoe track)<sup>15</sup> τσιμεντώνεται εξ ολοκλήρου, ώστε να αποφευχθεί η εισροή υδρογονανθράκων. Ωστόσο, στην παρούσα περίπτωση, εξαιτίας της προσθήκης αφρού με προσμίξεις αζώτου στον πολφό του τσιμέντου για την τσιμεντώση του δακτυλίου, το τσιμέντο στο κατώτερο μέρος της σωλήνωσης επιμολύνθηκε από ρευστά του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εισροή υδρογονανθράκων στη γεώτρηση. Πέραν, όμως του πολφού του τσιμέντου, υπάρχουν και οι βαλβίδες του float collar (float collar valves), οι οποίες απέτυχαν να παρεμποδίσουν την αναρροή ρευστών στο εσωτερικό της σωλήνωσης, καθώς δεν λειτούργησαν ποτέ (Solorzano, 2012) (Εικόνα 5-16).



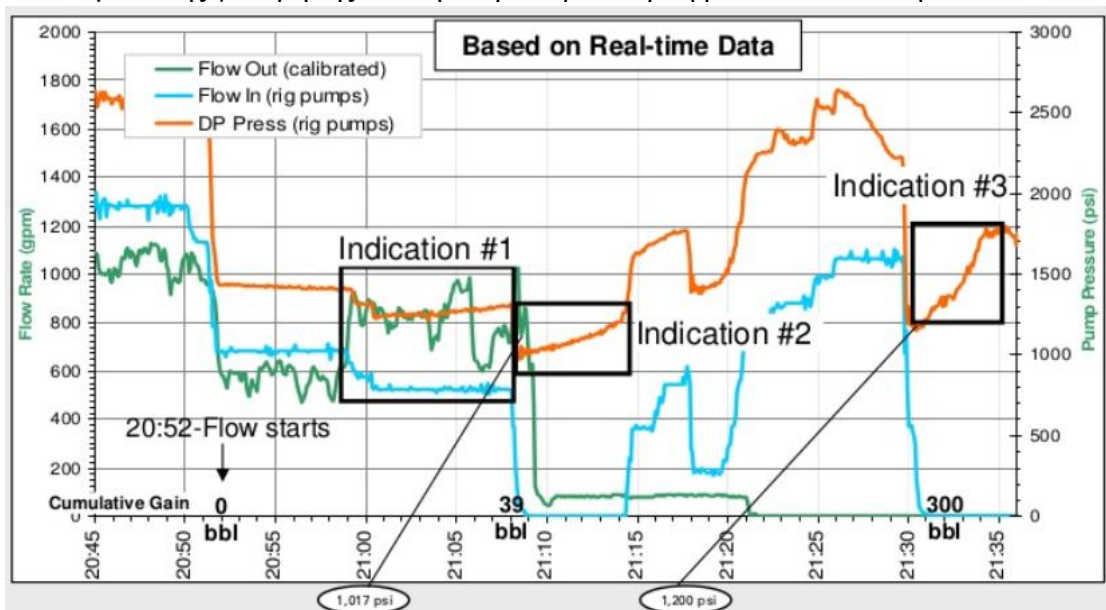
Εικόνα 5-16. Float collar και shoe track στην παραγωγική σωλήνωση της γεώτρησης Macondo (Drake, 2010)

Επιπλέον, βλαπτικά ως προς την ποιότητα της τσιμεντώσης έδρασε και η απόφαση της κοινοπραξίας να προχωρήσει στην εγκατάσταση 6, αντί για των

<sup>15</sup> Ο όρος “shoe track” (αλλιώς float joint) περιγράφει ένα κανονικού μήκους στέλεχος σωλήνωσης που τοποθετείται στο κάτω μέρος της στήλης σωλήνωσης, το οποίο παραμένει πληρωμένο με τσιμέντο στο εσωτερικό του για να διασφαλιστεί ότι το τσιμέντο εξωτερικά της σωλήνωσης είναι καλής ποιότητας. Στην κορυφή του shoe track τοποθετείται ένα float collar και στο κάτω μέρος του ένα float shoe, για να παρεμποδιστεί η αναρροή του τσιμέντου μετά την τοποθέτησή του (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018).

προτεινόμενων 21 κεντρωτήρων στην παραγωγική σωλήνωση (centralizers), που όλες οι μελέτες πρότειναν ως αναγκαίο αριθμό για την ασφαλή εγκατάσταση της σωλήνωσης και τη συνακόλουθη τσιμέντωσή της.

- Η δοκιμή αρνητικής πίεσης (negative pressure test)<sup>16</sup> θεωρήθηκε έγκυρη από το προσωπικό, παρά την μην εγκαθίδρυση της ακεραιότητας της γεώτρησης. Στόχος της δοκιμής αρνητικής πίεσης είναι και ο έλεγχος της ικανότητας των μηχανικών φραγμών (shoe track, παρεμβύσματα του αναρτήρα της σωλήνωσης και της παραγωγικής σωλήνωσης) να ανταπεξέλθουν στις εναλλαγές της πίεσης που μπορεί να προκύψουν από τις επερχόμενες διαδικασίες.
- Η αιφνίδια εισροή δεν είχε εντοπιστεί, έως ότου έφτασε στο riser. Στην περίπτωση της γεώτρησης Macondo, οι εργαζόμενοι στην εξέδρα δεν παρατήρησαν καμία από τις ενδείξεις (Εικόνα 5-17) που υποδείκνυαν αιφνίδια εισροή, με αποτέλεσμα την μετέπειτα εκδήλωση του δυστυχήματος. Συγκεκριμένα, μετά την εκτέλεση της δοκιμής αρνητικής πίεσης, οι εργαζόμενοι του γεωτρυπάνου άρχισαν να απομακρύνουν τα ρευστά διάτρησης από το riser, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υποπίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης και την περαιτέρω εισροή ρευστών σε αυτή.



Εικόνα 5-17. Καταγραφή πίεσης εντός της διατρητικής στήλης (Solorzano, 2012)

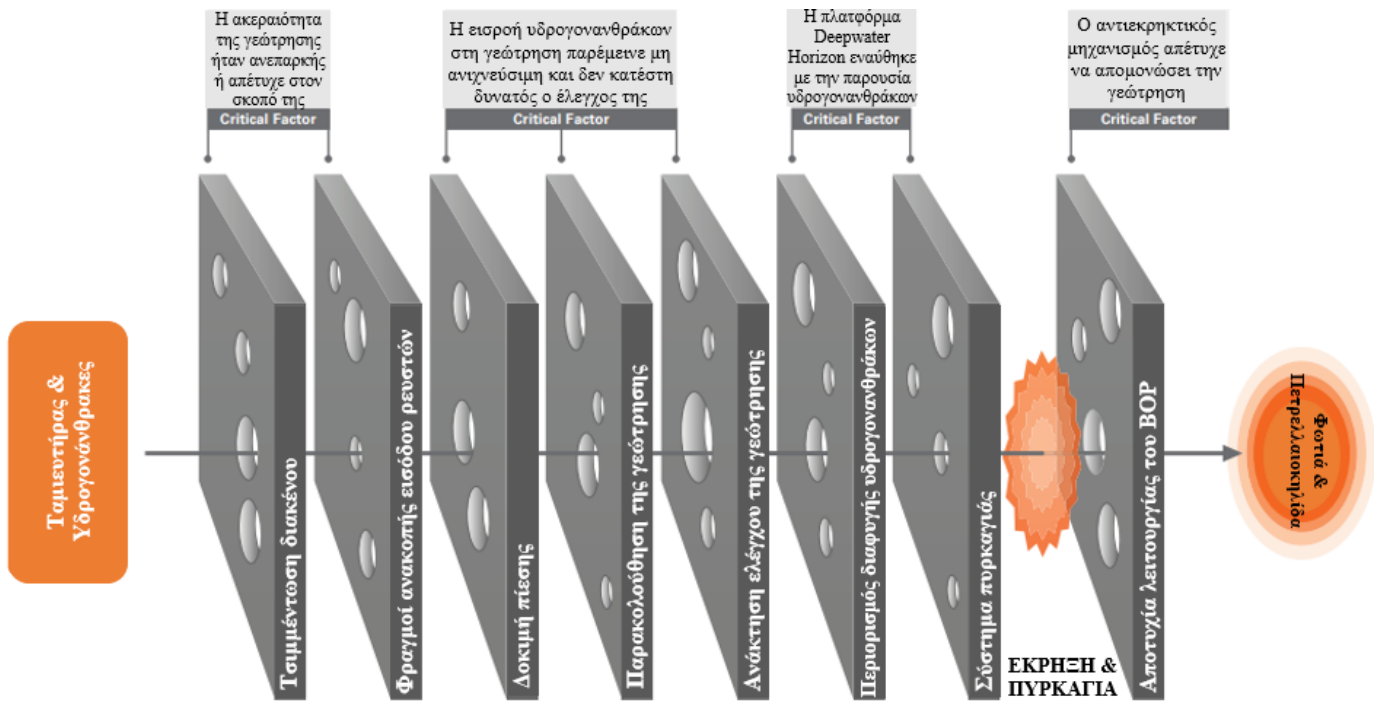
Όπως είναι εμφανές από την Εικόνα 5-17, η πρώτη ένδειξη παρατηρείται λίγο μετά τις 21:00, 8 λεπτά μετά την έναρξη της εισροής υδρογονανθράκων. Η απότομη αύξηση της ροής εξερχόμενων όγκων ρευστών διάτρησης είναι εμφανής (πράσινη γραμμή), παρότι οι αντλίες ήταν κλειστές. Οι άλλες δύο ενδείξεις αφορούν καταγραφή απότομων αυξήσεων της πίεσης εντός της

<sup>16</sup> Κατά τη δοκιμή αρνητικής πίεσης, η πίεση των ρευστών μέσα στη γεώτρηση μειώνεται και η γεώτρηση παρακολουθείται για ορισμένο χρόνο για να διαπιστωθεί αν υπάρξει τυχόν εισροή αερίων από τον σχηματισμό εντός της τσιμέντωσης ή της σωλήνωσης.

διατρητικής στήλης (πορτοκαλί γραμμή). Μεταξύ του χρονικού διαστήματος 20:52 έως 21:30 είχαν επιστρέψει στην επιφάνεια περίπου 300 βαρέλια ρευστών διάτρησης. Οι εργαζόμενοι αντελήφθησαν την αιφνίδια εισροή υδρογονανθράκων λίγο μετά τις 21:30, οπότε και ακολούθησαν την προβλεπόμενη διαδικασία.

- Οι ενέργειες των εργαζόμενων για ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης απέτυχαν στο σκοπό τους. Στην πιθανότητα εκδήλωσης αιφνίδιας εισροής τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνει το πλήρωμα του γεωτρύπανου πρέπει να είναι άμεσα και αποδοτικά. Σημαντικό ρόλο στην ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης διαδραματίζει η κατάρτιση του προσωπικού και η εκπαίδευσή του από την ανάδοχο εταιρεία. Οι εργαζόμενοι της Transocean με την άνοδο των υδρογονανθράκων από το riser στην εξέδρα, κατεύθυναν την εισροή προς τον διαχωριστή ρευστών-αερίου (MGS), ο οποίος γρήγορα υπερχείλισε και αστόχησε, εξαιτίας του μεγάλου όγκου εισροής. Από την έρευνα που έγινε μετά προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι εργαζόμενοι δεν είχαν επαρκείς γνώσεις ώστε να αντιμετωπίσουν μία τόσο κρίσιμη κατάσταση, καθώς η υπεύθυνη εταιρεία δεν τους παρείχε την απαραίτητη εκπαίδευση.
- Η εκτροπή των υδρογονανθράκων στον διαχωριστή ρευστών-αερίου είχε ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση αερίου στην εξέδρα. Στόχος του διαχωριστή ρευστών-αερίου είναι να απομονώσει το αέριο και να το αποβάλλει στην ατμόσφαιρα με ασφαλή τρόπο. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη περίπτωση, εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας των υδρογονανθράκων που κατευθύνονταν στο διαχωριστή, η αποβολή του αερίου έγινε στο χώρο του γεωτρύπανου.
- Το σύστημα πυρκαγιάς δεν κατάφερε να αποτρέψει την έναυση του αερίου. Σε όλα τα γεωτρύπανα υπάρχουν συστήματα ασφαλείας διαφόρων επιπέδων. Έτσι και στο Deepwater Horizon ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, ο οποίος καταλαμβάνει συγκεκριμένο χώρο στην εξέδρα, απενεργοποιείται από το προσωπικό στην περίπτωση που γίνει αισθητή η παρουσία υδρογονανθράκων. Ωστόσο, ο εξοπλισμός αυτός δεν απενεργοποιήθηκε και το αέριο κατάφερε και έφτασε στο μηχανοστάσιο, όπου και πραγματοποιήθηκε η έναυσή του.
- Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας (BOP) δεν κατάφερε να απομονώσει την γεώτρηση. Ειδικότερα, κανένας από τους μηχανισμούς κλεισίματος του BOP δεν κατάφερε να αποτρέψει την εισροή των υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα και να απομονώσει επιτυχώς την γεώτρηση. Ακόμα και οι σιαγόνες (shear rams) που κόβουν την διατρητική στήλη, απέτυχαν καθώς αυτή είχε μετακινηθεί, εξαιτίας της υπερβάλλουσας πίεσης στο εσωτερικό της.

Εν κατακλείδι, όλοι οι παράγοντες που συντέλεσαν στο δυστύχημα του Macondo παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 5-18.



Εικόνα 5-18. Οι φραγμοί που δεν λειτούργησαν και η σχέση τους με τους κρίσιμους παράγοντες που συντέλεσαν στο δυστύχημα του Macondo (BP, 2010)

Στην Εικόνα 5-18, οι γκρίζες επιφάνειες αναπαριστούν τους κύριους παράγοντες του δυστυχήματος του Macondo και οι οπές σε αυτές αναπαριστούν τις αποτυχίες των σχετικών συστημάτων ή τα σημεία στα οποία είναι ευάλωτοι. Έστω, και ένας από τους κρίσιμους παράγοντες να είχε αντιμετωπιστεί, το δυστύχημα στην γεώτρηση Macondo θα είχε αποτραπεί.

## 5.6.2. Η απόκριση της πετρελαϊκής βιομηχανίας στο δυστύχημα

Το δυστύχημα στη γεώτρηση Macondo, επηρέασε την πετρελαϊκή βιομηχανία σε θέματα που αφορούν την τεχνολογία και το νομοθετικό πλαίσιο για την ασφάλεια των ανθρώπων, του περιβάλλοντος και των εγκαταστάσεων, καθώς και την έγκαιρη αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων.

### 5.6.2.1. Τεχνολογία

Όσον αφορά στην τεχνολογία, η προσπάθεια επικεντρώθηκε στον επανασχεδιασμό των εξαρτημάτων ελέγχου της πίεσης του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας και στην αναθεώρηση των διαδικασιών επιθεώρησής του. Ειδικότερα, τον Οκτώβριο του 2010, το Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE), εξέδωσε ένα προσωρινό πρότυπο σχετικά με την ασφάλεια κατά την όρυξη γεωτρήσεων (Oil & Gas Investor, 2015). Σε αυτό το πρότυπο γίνεται αναφορά στους καινούριους κανόνες που αφορούν την σωλήνωση, την τσιμεντώση και την εκτέλεση δοκιμών ελέγχου ακεραιότητας της γεώτρησης, αναφέροντας ρητά:

Όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

- Ο έλεγχος και η επαλήθευση της σωστής λειτουργίας των σιαγόνων (rams) και η συμβατότητα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας θα πρέπει να εκτελείται από τρίτους.
- Ορίστηκαν νέες προδιαγραφές για τον έλεγχο λειτουργίας και τις διαδικασίες της δευτερογενούς απόκρισης του υποθαλάσσιου αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (subsea secondary BOP intervention).
- Απαίτηση για καταγραφή των ελέγχων και της συντήρησης που πραγματοποιούνται στον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας, πιστοποίηση για την σωλήνωση, την τσιμέντωση και την εκπαίδευση των εργαζόμενων στην ανάκτηση ελέγχου της γεώτρησης, περιλαμβανομένων των εργασιών σε γεωτρήσεις βαθιάς θάλασσας (deepwater operations).

Στην συνέχεια, το 2012, ακολούθησε το ολοκληρωμένο πρότυπο με ορισμένες προσθήκες που αφορούν:

- στην βελτιωμένη περιγραφή και κατάταξη των φραγμών ελέγχου της γεώτρησης,
- στον καθορισμό των απαιτήσεων για τον έλεγχο της τσιμέντωσης,
- στην ανάγκη για εκτέλεση δοκιμής αρνητικής πίεσης (negative pressure test), στις γεωτρήσεις που χρησιμοποιούν υποθαλάσσιο αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας ή σύστημα ανάρτησης της γραμμής ροής των ρευστών διάτρησης (mudline suspension system),
- στις σαφείς απαιτήσεις για την εγκατάσταση διπλού μηχανικού φραγμού (τσιμέντωση και ένας ακόμα μηχανικός φραγμός),
- στις εκτεταμένες απαιτήσεις σχετικά με τον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας, τα ρευστά για την ολοκλήρωση, την συντήρηση και το οριστικό κλείσιμο της γεώτρησης.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας και στις σιαγόνες, οι οποίες απέτυχαν να κόψουν τη διατρητική στήλη, καθώς αυτή είχε λυγίσει, εξαιτίας της υπερβάλλουσας πίεσης που αναπτύχθηκε στο εσωτερικό της γεώτρησης. Γι' αυτό το λόγο, η προτεινόμενη πρακτική API RP 53, που αφορούσε τον έλεγχο της πίεσης και ίσχυε τότε, αναθεωρήθηκε και αναβαθμίστηκε σε πρότυπο (Standard 53) με την ονομασία «Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells». Σε αυτό το πρότυπο γίνεται σαφής αναφορά στην ανάγκη εγκατάστασης υποθαλάσσιων συστημάτων αντiekρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας (subsea BOP stack) τουλάχιστον κατηγορίας 5, που θα πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον:

- ✓ ένα κατακόρυφο έμβολο (annular preventer)
- ✓ δύο σετ shear rams (τουλάχιστον η μία να είναι δεδομένο ότι απομονώνει την γεώτρηση)
- ✓ δύο pipe rams

Όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί έκτακτης ανάγκης πρέπει να έχουν δοκιμαστεί κατά την σύνδεσή τους με τον υπόλοιπο εξοπλισμό και κατά τη διαδικασία όρυξης της γεώτρησης.

Το 2012, η GE Oil & Gas εισήγαγε στην αγορά νέα συστήματα αντιακρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας, ικανά να ανταπεξέλθουν επιτυχώς σε πιέσεις μέχρι 15.000 psi, με καινούριες σιαγόνες ικανές να κόψουν διατρητικά στελέχη 6<sup>5</sup>/<sub>8</sub>-in. και να απομονώσουν την γεώτρηση. Στην συνέχεια, το 2014 η GE Oil & Gas προχώρησε στην αναβάθμιση των συστημάτων αντιακρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας με ικανότητα λειτουργίας σε πιέσεις μέχρι και 20.000 psi. Ειδικότερα, τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των αντιακρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας είναι:

- ✓ Αναβάθμιση των σιαγόνων και των κατακόρυφων εμβόλων για λειτουργία σε συνθήκες HP/HT.
- ✓ Χρήση λογισμικού που παρέχει δεδομένα επίδοσης και συντήρησης των αντιακρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας σε πραγματικό χρόνο, ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις μη προγραμματισμένης συντήρησής του.

#### *5.6.2.2. Ανίχνευση αιφνίδιας εισροής υδρογονανθράκων κοντά στο κοπτικό άκρο*

Μέχρι το ατύχημα στη γεώτρηση Macondo, ο συνήθης τρόπος ανίχνευσης αιφνίδιας εισροής υδρογονανθράκων, βασιζόταν στην επιστροφή των ρευστών διάτρησης για να καταστεί αντιληπτό ότι έχει προηγηθεί εισροή. Συγκεκριμένα, μέχρι να επιστρέψουν τα ρευστά διάτρησης και να μεταφέρουν και την αιφνίδια εισροή, ο χρόνος αντίδρασης των χειριστών είναι πολύ περιορισμένος. Γι' αυτό το λόγο, οι επιστήμονες του Εθνικού Εργαστηρίου Ενέργειας του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. [U.S. Department of Energy's National Energy Technology Laboratory (NETL)], έχουν προτείνει τη χρήση ένα συστήματος πρόωρης ανίχνευσης αιφνίδιας εισροής υδρογονανθράκων.

Αυτό το σύστημα βασίζεται σε δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από όργανα LWD και MWD και είναι ικανό να ανιχνεύσει αιφνίδιες εισροές κοντά στο κοπτικό άκρο. Τα δεδομένα που λαμβάνονται επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο και με τη βοήθεια αλγορίθμων αποκρυπτογραφούνται. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας έχει βοηθήσει στην άμεση αναγνώριση και αντιμετώπιση εισροών και αποτελεί ένα μέσο για βελτιωμένη ασφάλεια στο γεωτρήσιμο, επίτευξη χαμηλότερου κόστους και μείωση της πιθανότητας απώλειας ελέγχου της γεώτρησης.

Από το 2014 επιστήμονες, με βασική ερευνήτρια την Kelly K. Rose, εργάζονται στην βελτίωση τέτοιων συστημάτων με θέμα την «Ανίχνευση αιφνίδιας εισροής υδρογονανθράκων στο κοπτικό άκρο με χρήση γεωφυσικής» («Kick Detection at the Bit Using Wellbore Geophysics»).

#### *5.6.2.3. Νομοθετικό πλαίσιο*

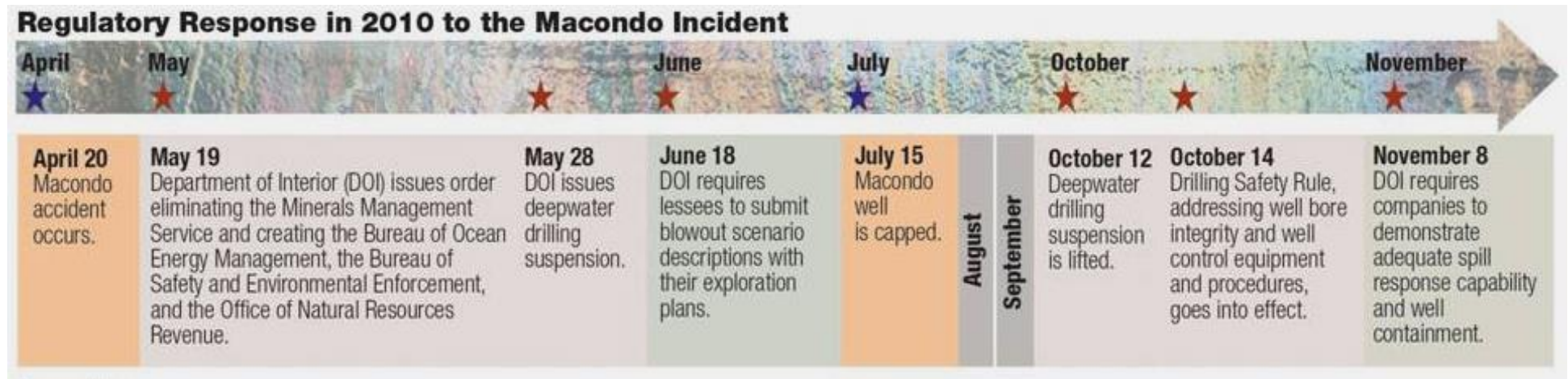
Μετά το δυστύχημα στη γεώτρηση Macondo προέκυψαν πολλές αλλαγές στο ίδιο το νομοθετικό πλαίσιο καθώς και στον τρόπο που λειτουργεί στις Η.Π.Α. Εντός ενός μήνα από το δυστύχημα ο Υπουργός Εσωτερικών των Η.Π.Α., χώρισε το Υπουργείο Διαχείρισης Μεταλλευμάτων [U.S. Minerals Management Service (MMS)] σε υποκατηγορίες για την καλύτερη διαχείρισή του. Στην Εικόνα 5-19 παρουσιάζεται



αναλυτικά η ακολουθία των γεγονότων που έλαβαν χώρα στις Η.Π.Α. σχετικά με το νομοθετικό πλαίσιο μετά το δυστύχημα του Macondo.

Όσον αφορά στο Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο, το 2013 εκδόθηκε η Οδηγία 2013/30/ΕΕ, του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, για την ασφάλεια των υπεράκτιων εργασιών πετρελαίου και φυσικού αερίου και την τροποποίηση της οδηγίας 2004/35/ΕΚ (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2013). Η παρούσα οδηγία θεσπίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την πρόληψη σοβαρών ατυχημάτων κατά τη διάρκεια υπεράκτιων εργασιών πετρελαίου και φυσικού αερίου για τον περιορισμό των συνεπειών τέτοιων ατυχημάτων. Επιπλέον, αναφέρει τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούν οι εταιρείες, για την προετοιμασία και εκτέλεση υπεράκτιων εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων, καθώς και τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την αντιμετώπιση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης.

Εν κατακλείδι, το νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τις γεωτρήσεις ΗΡ/ΗΤ, τόσο στην Β. Αμερική, όσο και στην Ευρώπη, και ακολούθως στον υπόλοιπο κόσμο, μετά το δυστύχημα στη γεώτρηση Macondo, αυστηροποιήθηκε για την διασφάλιση της ασφάλειας των εργαζομένων, του περιβάλλοντος και των εγκαταστάσεων.



Εικόνα 5-19. Αναμόρφωση του νομοθετικού πλαισίου στις Η.Π.Α. μετά το δυστύχημα του Macondo το 2010 (BOEM, 2010)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°. Συμπεράσματα

Με την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης για ενέργεια και την εξάντληση των ευκόλως εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων, η βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου έχει στραφεί στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Η εκμετάλλευση τέτοιου τύπου κοιτασμάτων πραγματοποιείται ήδη εδώ και αρκετά χρόνια, ωστόσο σχετικά πρόσφατα έγινε η διάκριση τους ως ξεχωριστή κατηγορία. Ο κάθε οργανισμός και εταιρία ορίζουν τις γεωτρήσεις HP/HT κατά τα δικά τους δεδομένα, αλλά στην πλειοψηφία των περιπτώσεων λαμβάνονται ως τέτοιες οι γεωτρήσεις όπου η πίεση υπερβαίνει τα 10.000 psi και η θερμοκρασία τους 300 °F.

Τα πρώτα πεδία γεωτρήσεων HP/HT απαντήθηκαν στη Βόρεια Θάλασσα και στον Κόλπο του Μεξικό, περιοχές όπου μέχρι και σήμερα συγκεντρώνεται ο μεγαλύτερος αριθμός τέτοιων γεωτρήσεων. Περιοχές όπως η Κίνα, η Ταϊλάνδη και οι χώρες της Μέσης Ανατολής, ακολουθούν και επίσης ορύσσουν γεωτρήσεις HP/HT.

Η πτώση της τιμής του πετρελαίου το 2014, θορύβησε την αγορά των γεωτρήσεων HP/HT και πολλές από τις εταιρείες εμφανίζονται διστακτικές σε τόσο μεγάλες επενδύσεις. Παρ' όλα αυτά, η τάση εκμετάλλευσης κοιτασμάτων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας παραμένει αυξητική. Η βιομηχανία έχει θέσει ως κατώτατο όριο τα 80\$ το βαρέλι, για να εκκινήσει οποιαδήποτε διαδικασία όρυξης γεωτρήσεων και έχει καταλήξει στη συμφωνία ότι τα δυσκόλως εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα θα παραμείνουν ανεκμετάλλευτα.

Οι γεωτρήσεις HP/HT απαιτούν μεγαλύτερη εμπειρία του προσωπικού και ποιοτικότερο και ανθεκτικότερο εξοπλισμό σε σύγκριση με τις κοινές γεωτρήσεις. Παράγοντες όπως τα ρευστά διάτρησης, η σωλήνωση, η τσιμέντωση, η εκτέλεση δοκιμών, η διέγερση του ταμιευτήρα και η παρουσία όξινου αερίου απαιτούν την αμέριστη προσοχή των εταιρειών για την όρυξη γεωτρήσεων HP/HT.

Στις γεωτρήσεις HP/HT προτιμώνται τα ρευστά διάτρησης με βάση το πετρέλαιο (OBM), λόγω των προτερημάτων που παρουσιάζουν κυρίως στη ρεολογία τους και στη σταθερότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η χρήση ρευστών διάτρησης με βάση το νερό επιλέγεται σε ορισμένες περιπτώσεις, διότι γίνονται ευκολότερα αντιληπτές οι αιφνίδιες εισροές αερίου και γιατί είναι φιλικότερα στο περιβάλλον. Γαλακτοματοποιητές και πρόσθετα είναι απαραίτητα για την επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας και ρεολογίας των ρευστών διάτρησης. Αντίθετα, η παρουσία θαλασσινού νερού μολύνει τα ρευστά διάτρησης και μειώνει την απόδοσή τους.

Η χρήση συστημάτων προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ρευστών διάτρησης στις συνθήκες εντός της γεώτρησης και στις αλλαγές της πίεσης και της θερμοκρασίας, αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο για τους μηχανικούς.

Η ανάγκη για καλύτερης ποιότητας σωλήνωση είναι μεγάλη λόγω της υπερβάλλουσας πίεσης. Η παρουσία υδρόθειου απαιτεί ειδικού τύπου σωλήνωση, η οποία προκύπτει έπειτα από θερμική επεξεργασία, για την επίτευξη μεγαλύτερης αντοχής.

Η υψηλή πίεση και θερμοκρασία επηρεάζουν τη συμπεριφορά του πολφού του τσιμέντου. Ανεπαρκής εκτοπισμός των ρευστών διάτρησης από το ενδιάμεσο ρευστό και συνέχεια εκτοπισμός του ενδιάμεσου ρευστού από τον πολφό του τσιμέντου οδηγούν σε προβλήματα διάβρωσης της σωλήνωσης. Το τσιμέντο αποκτά την μέγιστη αντοχή του μετά την πάροδο δύο εβδομάδων και απαιτεί καλή ανάμειξη για τον επαρκή καταμερισμό των στερεών και την ομοιόμορφη πήξη του στο δακτύλιο της γεώτρησης.

Η εύρεση οικονομικού αλλά ταυτόχρονα αποδοτικού και ποιοτικού εξοπλισμού, που απαιτείται για την όρυξη γεωτρήσεων HP/HT, έχει προβληματίσει ιδιαίτερα τη βιομηχανία. Η χρήση καινοτόμων τεχνολογιών είναι απαραίτητη για την προσαρμογή στο αφιλόξενο περιβάλλον των HP/HT γεωτρήσεων. Από τη σωλήνωση μέχρι τα κοπτικά άκρα, τη διατρητική στήλη, τα στεγανωτικά, τα όπλα διατρύπησης του σχηματισμού, το όργανα εκτέλεσης δοκιμών και τα ηλεκτρονικά μέρη απαιτείται η βέλτιστη συνεργασία και συνεννόηση μεταξύ διαφορετικών τύπων μηχανικών για τη βελτίωση τους. Το API προτείνει τη χρήση ποιότητας σωληνώσεων, συνδέσμων και εργαλείων, κατηγορίας χάλυβα L80 ή T95 ή C110, καθώς αυτές οι κατηγορίες είναι ικανές να ανταπεξέλθουν στις υψηλές πιέσεις, υψηλές θερμοκρασίες και στο όξινο περιβάλλον. Γνώσεις μεταλλουργίας, υλικών και ηλεκτρολογίας είναι απαραίτητες για την ασφαλή όρυξη γεωτρήσεων σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Στις γεωτρήσεις HP/HT ενδείκνυται η χρήση μεταλλικών στεγανωτικών έναντι ελαστομερών, διότι είναι ανθεκτικότερα στις υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η εκτέλεση δοκιμών πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και με όσο το δυνατόν λιγότερες παρουσίες ανθρώπων στο χώρο του γεωτρήσανου για επίτευξη μέγιστης ασφάλειας. Σε αντίθεση με τις κοινές γεωτρήσεις η χρήση μόνιμων packer είναι απαραίτητη και ο εξοπλισμός που θα εκτελέσει τη δοκιμή διαφέρει στην ανθεκτικότητά του.

Για τη διέγερση του ταμιευτήρα, η χρήση του υδροχλωρίου αποφεύγεται, διότι επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση του από τις υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, ενδείκνυται η χρήση ρευστών με βάση τις χειλικές ενώσεις και κυρίως το ζirkόνιο, το οποίο παρουσιάζει σταθερότητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα ρευστά προτού εισπνεστούν θερμαίνονται με εναλλάκτη θερμότητας για την αποφυγή απότομης διόγκωσης στον πυθμένα της γεώτρησης.

Στις αρχές του 1990, οι εταιρείες που άρχισαν να ορύσσουν γεωτρήσεις σε περιβάλλοντα υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, χρησιμοποίησαν το προσωπικό,

την τεχνολογία και ορισμένα μηχανήματα που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούντο στην γεωθερμική βιομηχανία. Με την πάροδο, όμως, των χρόνων η πετρελαϊκή βιομηχανία επένδυσε σε εξοπλισμό και προσωπικό με αποτέλεσμα να αποτελέσει την κινητήριο δύναμη για την εξέλιξη της γεωθερμίας.

Το μικρό περιθώριο μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό της όρυξης. Σε γενικές γραμμές, όταν το περιθώριο είναι πολύ μικρό, προτιμάται η πίεση να βρίσκεται στο όριο ρωγμάτωσης του σχηματισμού, διότι η ρωγμάτωση του σχηματισμού αντιμετωπίζεται ευκολότερα από την παρουσία υποπίεσης και την αιφνίδια εισροή ρευστών ή αερίου. Εξαιτίας του μικρού περιθωρίου μεταξύ της πίεσης των πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού, απαιτούνται ποικίλες σωληνώσεις, κάτι που αυξάνει το χρόνο εκτέλεσης του έργου και συνεπώς το κόστος. Για την αντιμετώπιση αιφνίδιας εισροής ακολουθούνται προκαθορισμένες διαδικασίες (εισπιέζονται στη γεώτρηση ρευστά διάτρησης μεγαλύτερου ειδικού βάρους, ώστε να ανακτηθεί ο έλεγχος) που εκτελούνται από ειδικευμένο προσωπικό. Για την πλειοψηφία των διαδικασιών που σχετίζονται με την όρυξη και ολοκλήρωση της γεώτρησης, υπάρχουν προκαθορισμένες κατευθυντήριες οδηγίες, οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται και έχουν εκδοθεί από οργανισμούς ή τις υπεύθυνες εταιρίες.

Από δεδομένα προερχόμενα από περιστατικά στην (ηπειρωτική) υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου, η πλειοψηφία τους αφορά αιφνίδιες εισροές αερίου και η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη αντιμετώπιση των αιφνίδιων εισροών είναι η πρόληψη.

Από τις μελέτες περίπτωσης συμπεραίνεται ότι σχηματισμοί μεγάλης κλίσης δημιουργούν προβλήματα τόσο στον έλεγχο της απόκλισης της γεώτρησης (well inclination) όσο και στην ταχύτητα όρυξης της (drilling speed). Ακόμα, η παρουσία σκληρών σχηματισμών ή κροκαλοπαγών που μειώνουν αρκετά το ρυθμό προχώρησης αντιμετωπίζονται με τη χρήση υβριδικού κοπτικού άκρου με ενδογεωτρητικό κινητήρα. Η υψηλή θερμοκρασία των συναντώμενων κατά τη διάτρηση σχηματισμών, που ωθούν τον κατάντη εξοπλισμό στα όρια του, μπορεί να αντιμετωπιστεί με σύστημα ψύξης των ρευστών διάτρησης. Επιπλέον, μπορεί μεν οι εταιρείες που εκμεταλλεύονται γεωτρήσεις HP/HT να αναζητούν κοιτάσματα με μεγάλη πίεση για επίτευξη αυξημένης παραγωγικότητας, ωστόσο το πρόβλημα της υπερβάλλουσας πίεσης είναι το δύσκολως αντιμετωπίσιμο, σε σχέση με την αυξημένη θερμοκρασία. Αυτό διότι η υψηλή θερμοκρασία εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή βαθμίδα και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα την χρονική περίοδο δημιουργήθηκε, καθώς και από όλες τις διαδικασίες ιζηματογένεσης που ακολούθησαν. Ενώ, η υψηλή πίεση είναι αυτή η οποία απαιτεί συνεχή παρακολούθηση, κατάλληλο σχεδιασμό προγράμματος ρευστών διάτρησης και την παρουσία μηχανικών ρευστών διάτρησης στο πεδίο για τον επαρκή έλεγχο της γεώτρησης και την αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος.

Αναπόσπαστο κομμάτι της εργασίας είναι η αναφορά στο δυστύχημα της γεώτρησης του Macondo, η οποία ανήκει στην κατηγορία των HP/HT και αποτέλεσε τον

παράγοντα για πληθώρα αλλαγών στον εξοπλισμό και στην αυστηροποίηση του νομοθετικού πλαισίου, σχετικά με την όρυξη γεωτρήσεων, σε παγκόσμιο επίπεδο.

Εν κατακλείδι, συμπεραίνεται ότι σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα των γεωτρήσεων ΗΡ/ΗΤ δεν διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτά των κοινών γεωτρήσεων, ωστόσο εντείνονται και απαιτούν ανθεκτικότερο εξοπλισμό, καλύτερη οργάνωση, έμπειρο προσωπικό και μεγάλο κεφάλαιο επένδυσης. Σε σύγκριση με τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, οι γεωτρήσεις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας έχουν προσφέρει περισσότερο εξοπλισμό και τεχνογνωσία, απ' ό,τι έχουν λάβει. Τέλος, σε περίπτωση ατυχήματος τα προβλήματα που εγείρονται είναι δυσκόλως αντιμετωπίσιμα, μεγαλύτερης κλίμακας και οι επιπτώσεις δυσμενέστερες.

## Γλωσσάρι τεχνικών όρων

Choke	Διάταξη στραγγαλισμού
Choke line	Γραμμή στραγγαλισμού
Choke manifold	Βαλβίδα στραγγαλισμού/κατανεμητήρας στραγγαλισμού
Shale shakers	Διαχωριστές των θρυμμάτων
Annular blowout preventer	Αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας του διάκενου
Annular preventer	Κατακόρυφα έμβολα
Rams	Σιαγόνες
Water-hammer effect	Φαινόμενο της κρούσης του ύδατος
Elastomeric seals	Ελαστομερή παρεμβύσματα
Kill line	Γραμμή σκοτώματος
Annular BOP	Σφαιροειδή ή κυκλικό μηχανισμό
Mudline casing hanger installation	Γραμμή ροής διαμέσου του αναρτήρα της σωλήνωσης
Liner packers	Παρεμβύσματα των liner
ECD	Ισοδύναμη πυκνότητα κυκλοφορίας
APL	Πτώση πίεσης του δακτυλίου
Pipe	Διατρητική στήλη
Shear strain	Διατμητική παραμόρφωση
String	Ομάδα στελεχών
Spacer	Ειδικό διαχωριστικό ρευστού/ενδιάμεσο ρευστό
Logging	Διαγραφίες
Agents	Αντιδραστήρια
Sonde	Καταγραφικό
O-rings	Περιμετρικά δαχτυλίδια
DST	Τεστ παραγωγής
RIH (Running in hole)	Καθέλκυση και ανέλκυση της διατρητικής στήλης
Brine	Αλμυρό νερό
Packer	Παρέμβυμα απομόνωσης/διαχωριστικό παρεμβύσματος
Tubing	Σωλήνες παραγωγής
WHCP	Πίεση σωλήνωσης στην κεφαλή της γεώτρησης
Offset	Υφιστάμενες γεωτρήσεις
SSC	Sulphide stress cracking - Ρωγμές λόγω θειούχου περιβάλλοντος
KSELP	Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium
LCM	Lost Circulation Material - Υλικό που παρεμποδίζει τις απώλειες των ρευστών διάτρησης
ALARP	As low as reasonably practical





## Βιβλιογραφία

- Abass, H. A. (2006). *Acid Fracturing or Proppant Fracturing in Carbonate Formation*. Louisiana: SPE.
- Adamson, K., Birch, G., Gao, E., Hand, S., Macdonald, C., Mack, D., & Quadri, A. (1998). *High Pressure, High Temperature Well Construction*. Aberdeen, Scotland, UK.
- Akkurt, R. B. (2007). *Focusing on Downhole Fluid Sampling and Analysis*. Oilfield Review.
- Al-Omair, F. S. (2008). *Fracture Acidizing of a HTHP Exploratory Well in Deep Carbonate Reservoir*. Rome, Italy: SPE.
- API. (2015). *High Pressure, High Temperature Design Guidelines*. API.
- API PR 14C. (2007). *Recommended Practice for Analysis, Design, Installation and Testing of Basic Surface Safety Systems for Offshore Production Platforms*. Washington DC, USA.
- Avant, C., Daungkaew, S., Behera, B. K., Danpanich, S., Laprabang, W. D., Heth, G., . . . Tavis, C. (2012, Autumn). Testing the Limits of Extreme Well Conditions. *Oilfield Review*.
- AZoM. (2012, Nov 12). *AISI 4130 Alloy Steel (UNS G41300)*. Ανάκτηση από AZO materials: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6742>
- Baker Oil Tools. (1995). *Factors and Conditions Which Cause Seal Assemblies Used in Downhole Environments to Get Stuck*. Engineering Tech Data Paper No. CS007.
- Barshettiwar, N. G. (2017, January 31). *To Study Well Design Aspects in HPHT Environment*. Ανάκτηση από SlideShare: <https://www.slideshare.net/NikhilBarshettiwar/to-study-well-design-aspects-in-hpht-environment>
- Barshettiwar, N. G. (χ.χ.). *To Study Well Design Aspects in HPHT Environment*.
- Betancourt, S. D. (2007). *Advancing Fluid-Property Measurements*. Oilfield Review 19.
- BOEM. (2010).
- Bonnet, A. a. (1996). *Getting to the Root of Gas Migration*.
- BP. (2010). *Deepwater Horizon Accident Investigation Report Vol.1*. BP.

- Brubaker, J. P. (1996). *Design Considerations in the First UKCS High Pressure / High Temperature Field*. Houston, Texas: Texaco Inc.
- Carcango, G. (2005). *The Design of Tubing and Casing Premium Connections for HTHP Wells*. Woodlands, TX, USA: SPE.
- Castilla, R. (2017). *Geothermal Wells vs HPHT in Oil and Gas*.
- Catalin Teodoriu, G. F. (2008). *COMPARISON OF WELL COMPLETIONS USED IN OIL/GAS PRODUCTION AND GEOTHERMAL OPERATIONS: A NEW APPROACH TO TECHNOLOGY*. Ανάκτηση από [https://www.researchgate.net/publication/228456865\\_COMPARISON\\_OF\\_WELL\\_COMPLETIONS\\_USED\\_IN\\_OILGAS\\_PRODUCTION\\_AND\\_GEOTHERMAL\\_OPERATIONS\\_A\\_NEW\\_APPROACH\\_TO\\_TECHNOLOGY](https://www.researchgate.net/publication/228456865_COMPARISON_OF_WELL_COMPLETIONS_USED_IN_OILGAS_PRODUCTION_AND_GEOTHERMAL_OPERATIONS_A_NEW_APPROACH_TO_TECHNOLOGY)
- Chevron. (2017). *The Erskine Field*. Ανάκτηση από United Kingdom Chevron: <https://unitedkingdom.chevron.com/our-businesses/operated-assets/erskine>
- Continental Alloys & Services. (2018). *Alloy Chemical Composition*. Ανάκτηση από Continental Alloys & Services: <https://www.contalloy.com/products/grade/q125>
- CORRECTED, D.-T. B. (χ.χ.).
- Cosad, C. (1992). *Choosing a Perforation Strategy*.
- Craig, B. (2008, May). Materials for Deep Oil and Gas Well Construction. *Advanced Materials & Processes*, σσ. 33-35.
- Cumana-Marval, J. C. (1991). *A Review on Drilling Deep, High Pressure High Temperature Wells*. Edinburg, Scotland.
- Daum - 블로그. (2013). *Christmas Tree*. Ανάκτηση από <http://m.blog.daum.net>: [http://m.blog.daum.net/offshore-process/70?tp\\_nil\\_a=1](http://m.blog.daum.net/offshore-process/70?tp_nil_a=1)
- Davidson, A., Prise, G., & French, C. (1993). *Succesfull High Temperature/High Pressure Well Testing from a Semisubmersible Drilling Rig*. SPE.
- DeBryijin, G., Greenway, R., Harrison, D., Parris, M., James, S., Mueller, F., . . . Wutherick, K. (2008, Autumn). High-Pressure, High-Temperature Technologies. *Oilfield Review*.
- Diaz, L. (2017, January 11th). *Rig Integrity*. Ανάκτηση από [drillers.com](http://drillers.com): <https://drillers.com/hpht-well-cementing-challenges/>
- Drake, J. (2010). *Deep Water Horizon Lessons Learned*. BP.
- Drill Cool Team. (2017). *HIGH TEMPERATURE DRILLING SAFETY*.
- Drilling Formulas. (2016, February 14). *drillingformulas*. Ανάκτηση από <http://www.drillingformulas.com/types-of-flow-and-rheology-models-of-drilling-mud/>

- Dubai Petroleum. (2018). Matrix Acid Stimulation. Ανάκτηση από <https://www.dubaipetroleum.ae/innovation-technology/technology-now/matrix-acid-stimulation/>
- Economides, M. a. (2003). *Reservoir Stimulation, 3rd Edition*. New York City: Wiley.
- Element Six / a De Beers Group Company. (2017). *Polycrystalline Diamond Compact (PDC)*. Ανάκτηση από Element Six Supermaterials: <http://www.e6.com/en/Home/Materials+and+products/Synthetic+Polycrystalline+Diamond+%28PCD%29/PDC+polycrystalline+diamond+compact+cutters+for+oil+and+gas>
- F.L.R.T. (χ.χ.). *F.L.R.T.* Ανάκτηση από <http://www.flrtbit.cn>: <http://www.flrtbit.cn/cpzx/pmcId=53.html>
- Glass, A.W./Highose Limited. (2005). *High pressure, high temperature developments in the United Kindom Continental Shelf*. Sudbury, Suffolk: HSE Books.
- Gregoire, M., Hodder, M., Peng, S., & Massam, J. (2009). Successful Drilling of a Deviated, Ultra-HTHP Well Using a Micronised Barite Fluid. Amsterdam, The Netherlands, March: SPE/IADC 119567.
- H.F., M. R. (1989). *Prediction of Downhole Temperatures Can Be Key for Optimal Wellbore Design*. Oklahoma City, Oklahoma: SPE.
- Habil Akram Rosland, E. E. (2013). *HPHT Well Basis of Design Case Study: Offshore Thailand Advanced Tubular Analyses Experience*. Beijing, China: IPTC.
- Hahn, D. B. (2003). *Completion Design and Implementation in Challenging HP/HT Wells in California*. SPE.
- Hahn, D. P. (2000). *Importance of Completion Design Considerations for Complex, Hostile and HPHT Wells in Frontier Areas*. Calgary, Canada: SPE.
- Haïdar, T. (2011, June 9). *The Results Are In: 60% Of Operators Set To Tackle HPHT Wells In The Next 2 Years*. Ανάκτηση από Oil and Gas IQ: <https://www.oilandgasiq.com/drilling-and-development/articles/60-per-cent-of-companies-will-be-undertaking-hpht>
- HALLIBURTON. (2011). *Delivering success in HP/HT reservoirs through experience, innovation and reliable technologies*. Ανάκτηση από HIGH PRESSURE/HIGH TEMPERATURE (HP/HT): [http://www.halliburton.com/public/solutions/contents/HPHT/related\\_docs/HPHT\\_Global\\_Client\\_Brochure.pdf](http://www.halliburton.com/public/solutions/contents/HPHT/related_docs/HPHT_Global_Client_Brochure.pdf)
- Halliburton. (2018, April). *Reduce Non-Productive Time (NPT)*. Ανάκτηση από Halliburton: <http://www.halliburton.com/en>

- US/ps/solutions/deepwater/challenges-solutions/reduce-non-productive-time.page?node-id=hgjd452&Topic=DeepwaterWestAfrica
- High Pressure/High Temperature - Delivering Cost Effective and Optimised Wells . (2018). KUALA LUMPUR, MALAYSIA: SPE.
- Higheose Limited. (2004). *High Pressure, high temperature developments in the United Kingdom Continental Shelf*. Aberdeen AB15 9LJ.
- Hinton, A. (1999). *An Analysis of OSD' s Well Incident Data Base; Results can Improve Well Design and Target Well Control Training*. SPE 56921.
- Honglin, X. Z. (2014). *Influence of the WHCP on cement sheath stress and integrity in HTHP gas well*. Chengdu, Sichuan 610500, China.
- Hossain. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*.
- HSE L73. (1995). *A guide to the Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations*.
- Hu, J. (2015, July). *Effect of high temperature on the performance of drilling fluid*. Ανάκτηση από <https://www.linkedin.com/pulse/effect-high-temperature-performance-drilling-fluid-james-hu>
- Jahediesfanjani, H. a. (2006). *Performance of the Naturally Fractured Carbonate Reservoirs by Means of Various Simulation and Completion Techniques*. Cancun, Mexico: SPE.
- Jardine SI., J. A. (February 23-25, 1993). *Hard or Soft Shut-in: Which is the Best Approach*. Amsterdam, The Netherlands: SPE/IADC 25712.
- Jardine, S. W. (1993). *Computer-Aided Real-Time Kick Analysis and Control*. Amsterdam, The Netherlands: SPE/IADC 25711.
- JM, P. (September 5-8, 1989). *Control Aspects of Drilling High Pressure Wells*. Aberdeen, Scotland: SPE 19245.
- Kate Denninger, A. E. (2015). *Optimizing Geothermal Drilling: Oil and Gas Technology Transfer*. Colorado School of Mines, National Renewable Energy Laboratory .
- L. H. Eilers, R. L. (1974). *Long Term Effects of HT on Strength Retrogression of Cements*. Tulsa, Oklahoma: Dowell Division of The Dow Chemical Company.
- Leach, C. a. (1992). *Use of a Kick Simulator as a Well Planning Tool*. 67th Annual Technical Conference and Exhibition. Washington, DC, USA.
- Lehr, D. J., & Collins, S. D. (2014). *The HPHT Completion Landscape - Yesterday, Today, and Tomorrow*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands, 27-29 October: Society of Petroleum Engineers.
- Lindsay, G. a. (1993). *The Use of a Gas Kick Simulator to Produce an Oil Based Mud Training Package*. IADC European Well Control Conference. Paris, France.

- Liu Zhankui, X. D. (2010). *Drilling Technology of HTHP Ultradeep Well and the Crucial Technique Application*. Beijing, China.
- Low, E. a. (1991). A Method for Handling Gas Kicks Safely in High-Pressure Wells. *SPE/IADC 21964*. Amsterdam. The Netherlands.
- MacAndrew, R., Parry, N., Prieur, J.-M., Wiggelman, J., Diggins, E., Guicheney, P., & Cameron, D. (1993, April/July). Drilling and Testing Hot, High-Pressure Wells. *Oilfield Review*.
- Maury, V. a. (1993). *Practical Advantages of Mud Cooling System For Drilling*. Amsterdam: SPE.
- Mazero. (2012).
- McMordie Jr., R. B. (1982). *Effect of Temperature and Pressure on the Density*. New Orleans, LA: SPE 11114.
- Michael Gregoire, M. H. (March 2009 ). *Successful Drilling of a Deviated, Ultra-HTHP Well Using a Micronised Barite Fluid*. Amsterdam, The Netherlands: SPE/IADC 119567.
- Miller, R. A., Payne, M. L., & Erpelding, P. (2005). Designer Casing for Deepwater HPHT Wells. *SPE High Pressure/High Temperature Sour Well Design Applied Technology Workshop, 17-19 May*. The Woodlands, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Mitchell, H. a. (1989). *Prediction of Downhole Temperatures Can Be Key for Optimal Wellbore Design*. Oklahoma City, Oklahoma: SPE.
- Mubashir, A., Iham Nabil, M., Fawad Zain, Y., Zaher Hilal, H., Saleem Salman, A., Alaa, M., . . . Hasan Al-Ahmed, M. (2017). *HPHT Sour Gas Production-Case study*. Abu Dhabi, UAE.
- National Academy of Engineering and National Research Council. (2012). *Macondo Well Deepwater Horizon Blowout: Lessons for Improving Offshore Drilling Safety*. National Academies Press.
- NationalEnergyTechnologyLaboratory. (2013). *Modern Shale Gas Development in the United States: An Update*. U.S. Departement of Energy.
- Neff, J., McKelvie, S., & Ayers, R. J. (2000). *Environmental impacts of synthetic based drilling fluids*. New Orleans, LA.: MMS by Robert Ayers & Associates, Inc. for U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, OCS Study MMS 2000-064.
- News, S. W. (2018, Απρίλιος). *Erskine Field to Remain Shut While Chrysaor Tries to Resolve Pipe Issue*. Ανάκτηση από Subsea World News: <https://subseaworldnews.com/2018/04/24/erskine-field-to-remain-shut-while-chrysaor-tries-to-resolve-pipe-issue/>

- Nnanna, E. a. (2005). *Critical Success Factors for Well Stimulation*. Abuja, Nigeria: SPE.
- NORSOK Standards D-010. (2013). *Well Integrity in Drilling and Well Operations*. NORSOK, Norway.
- Offshore Engineering . (October 1998). Ocean Odyssey Blowout Fuels UK Sector Safety Debate.
- Ogbonna, F. &. (2009). *Research and Development: Utilization of Local Additive in the Cementation of HPHT Wells in Nigeria*. Abuja, Nigeria: SPE128608-MS.
- Oil & Gas Investor. (2015). *Moving forward: Macondo five years later*.
- Oil and Gas IQ. (2013, December 8). *HPHT Hotspots World Map & Developments 2014 (Infographic)*. Ανάκτηση από Oil and Gas IQ:  
<https://www.oilandgasiq.com/drilling-and-development/whitepapers/infographic-hpht-hotspots-world-map-developments>
- Oil and Gas IQ. (2014). *HPHT WORLD MAP AND DEVELOPMENTS 2014*. Ανάκτηση από Oil and Gas IQPC: WWW.HPHTWELLS.COM
- Oil and Gas IQ. (2015, August 13). *High Pressure High Temperate, High Costs, High Stakes? (nfographic)*. Ανάκτηση από Oil and Gas IQ:  
<https://www.oilandgasiq.com/drilling-and-development/whitepapers/infogrphic-high-pressure-high-temperate-high-cos>
- Perales, S. A., & Kaculi, J. T. (2015). *Subsea Wellhead System Verification Analysis Methodology for HPHT Applications per API TR 1PER15K-1 and API 17TR8*. Houston, Texas.
- Petrowiki. (2015). *Metallurgy for downhole equipment*. Ανάκτηση από  
<https://petrowiki.org/>:  
[https://petrowiki.org/Metallurgy\\_for\\_downhole\\_equipment](https://petrowiki.org/Metallurgy_for_downhole_equipment)
- PetroWiki. (2015, June). *Shut-in\_procedures\_for\_well\_control* . Ανάκτηση από  
[http://petrowiki.org/Shut-in\\_procedures\\_for\\_well\\_control](http://petrowiki.org/Shut-in_procedures_for_well_control)
- Pikłowska, A. (2017). Cement slurries used in drilling – types, properties, application. *World Scientific News*, σσ. 149-165.
- Popov, S. (2007). *HPHT operations pose escalating*.
- Richard Leaper, N. H. (2006). *Meeting Deepwater Challenges with High Performance Water Based Mud*. Houston, Texas: Baker Hughes.
- Ross I., S. K. (September 1990). The Role of Jack-ups and Permanent Completions in Central Graben Exploration Drilling. Edinburgh, Scotland.
- Ruiz, M. L. (2016). Design and Drilling of an Ultra HP/HT Exploratory Well on the Gulf of Mexico. Texas, USA: SPE.

- Sanyal, S., & Morrow, J. (2012). Success and the Learning Curve Effect in Geothermal Well Drilling - A Worldwide Survey". *37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California, USA, January 30-February 1.
- Schlumberger Oilfield Glossary. (2018). *float collar*. Ανάκτηση από <https://www.glossary.oilfield.slb.com>:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/float\\_collar.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/float_collar.aspx)
- Schlumberger Oilfield Glossary. (2018). *Formation evaluation*. Ανάκτηση από Schlumberger:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/formation\\_evaluation.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/formation_evaluation.aspx)
- Schlumberger Oilfield Glossary. (2018). *Sag*. Ανάκτηση από Schlumberger Oilfield Glossary: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/sag.aspx>
- Schlumberger Oilfield Glossary. (2018). *shoe track*. Ανάκτηση από <https://www.glossary.oilfield.slb.com>:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/shoe\\_track.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/shoe_track.aspx)
- Schlumberger Oilfield Glossary. (2018). *Synthetic base mud*. Ανάκτηση από Schlumberger Oilfield Glossary:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/synthetic\\_base\\_mud.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/synthetic_base_mud.aspx)
- Shadravan, A., & Amani, M. (2012). HPHT 101-What Petroleum Engineers and Geoscientists Should Know About High Pressure High Temperature Wells Environment. (C. R. Cultures, Επιμ.) *Energy Science and Technology*, Vol. 4(No. 2), σσ. 36-60.
- Shale Gas- Hydraulic Fracturing* (2012). [Ταινία].
- Skeels, H. B. (2014). *HRHT Design Guideline for Subsea Equipment*. Houston, Texas, USA.
- Smithson, T. (2016). HPHT Wells. *Oilfield Review*.
- Solorzano, G. (2012). *Deepwater horizon accident\_investigation*. Ανάκτηση από <https://www.slideshare.net>:  
<https://www.slideshare.net/GustavoSolorzano/deepwater-horizon-accidentinvestigationstaticpresentation>
- SPE. (2018, July 31). *High Pressure/High Temperature - Delivering Cost Effective and Optimised Wells*. Ανάκτηση από SPE Workshops:  
<https://www.spe.org/events/en/2018/workshop/19wm03/high-pressure-high-temperature.html>
- SPE International. (2016). *PDC bit design*. Ανάκτηση από Petrowiki:  
[https://petrowiki.org/PDC\\_bit\\_design](https://petrowiki.org/PDC_bit_design)
- Talkoilandgas. (2018). *Equivalent circulating density (ECD) (Drilling fluids)*. Ανάκτηση από Talkoilandgas: <https://talkoilandgas.com/equivalent-circulating-density/>

- Technnology, O. (2018). *Erskine oil and gas field project*. Ανάκτηση από Offshore Technology: <https://www.offshore-technology.com/projects/erskine/>
- Temple, C., Forbes, A., Paterson, C., & Leith, D. (2005). *Method for reducing sag in drilling, completion and workover fluids*. Halliburton Energy Services Inc. Ανάκτηση από <https://patents.google.com/patent/US6861393>
- Teng, X. Y. (2015). Successful HPHT Drilling Through Innovative Practices: Sharing the Subsalt HPHT Well Drilling Case in Tarim Basin. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 8-11 March, Manama, Bahrain*. Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers (SPE).
- The Institute of Petroleum. ( May 1992). *Well Control During the Drilling and Testing of High Pressure Offshore Wells, ' (Part 17 of the Institute of Petroleum Model Code of Safe Practice in the Petroleum Industry*. London, England: John Wiley and Sons.
- Transocean. (2011). *MACONDO WELL INCIDENT vol.1*.
- Tuttle, T. W. (1975). *DEEP, HIGH-PRESSURE SOUR GAS WELLS--AN INDUSTRY CHALLENGE* . New Orleans, Louisiana: API.
- UK Offshore Operators Association Drilling Practices Committee, no.2. (January 1990). *Procedures for High-Pressure Drilling*. London, England.
- Vazquez, G. B. (2005). *A Methodology to Evaluate the Gas Migration in Cement Slurries*. Rio de Janeiro, Brazil: SPE .
- Vella, M. V. (1992). *The Nuts and BOLts of Well Testing*.
- Weatherford. (2015). *Tubing-Conveyed Perforating Systems*. Weatherford.
- Weishaupt MA., O. N. (September 3-6, 1991). *Rig Computer System Improves Safety for Deep HP/HT Wells by Kick Detection and Well Control Monitoring*. Aberdeen, Scotland: SPE 23053.
- (1990). *Well Control Drilling With Oil-Based Mud*. London, England: UK Department of Energy.
- (χ.χ.). *Well Control During the Drilling and Testing of High Pressure Offshore Wells, Model Code of Safe Practice, Part 17*. London, England: Institute of Petroleum, 1992.
- Wikipedia . (2018, February). *Macondo Prospect*. Ανάκτηση από [https://en.wikipedia.org/wiki/Macondo\\_Prospect](https://en.wikipedia.org/wiki/Macondo_Prospect)
- WIKIPEDIA. (2018). <https://en.wikipedia.org/wiki/Viton>. Ανάκτηση από <https://en.wikipedia.org/wiki/Viton>
- World Oil. (2012, February). 2012 Forecast-International Drilling and Production. *Special Focus*.



- Wray, B. B. (2009). *High Density Elastic Cements Applied to Solve HPHT Challenges in South Texas*.
- Yakeley, S. W. (2015, July-August). *Liner system designed to provide effective isolation in high-risk, high-cost HPHT wells*. Ανάκτηση από drillingcontractor: <http://www.drillingcontractor.org/liner-system-designed-to-provide-effective-isolation-in-high-risk-high-cost-hpht-wells-35970>
- Yetunde, S. &. (2011). *Challenges and Remedy for Cementing of HPHT Wells in Nigerian Operation*. Abuja, Nigeria: SPE-150751-MS.
- Αλεξόπουλος, (χ.χ.). *Γεωφυσικές μέθοδοι μέσα σε γεώτρηση (διαγραφίες-logging)*.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2013). *ΟΔΗΓΙΑ 2013/30/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΨ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ*. Στρασβούργο.
- Muecke, T. (1982). *Principles of Acid Stimulation*. Beijing, China: SPE.
- Σταματάκη, Σ. (2003). *Τεχνολογία γεωτρήσεων*. Αθήνα.
- Σταματάκη, Σ. (2017-2018). WELL CONTROL. *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΡΥΞΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ*.