



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

***ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗΝ***  
***ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ***  
***ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ***



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ***

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





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

***ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗΝ***  
***ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ***  
***ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ***

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ***

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 10/10/2016

Σοφία Σταματάκη, καθηγήτρια, \_\_\_\_\_(Υπογραφή)

Γιώργος Αποστολόπουλος, αναπληρωτής καθηγητής, \_\_\_\_\_(Υπογραφή)

Γιώργος Ν. Παναγιώτου, καθηγητής, \_\_\_\_\_(Υπογραφή)

**Αθήνα, Οκτώβριος 2016**







## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα πλέον απρόβλεπτα προβλήματα απαιτούν απρόβλεπτες και ευφάνταστες λύσεις. Ο χώρος της πετρελαϊκής βιομηχανίας κατέχει τα ηνία στην εφαρμογή πρωτότυπων και καινοτόμων λύσεων σε προβλήματα που η ύπαρξή τους ήταν άγνωστη. Η πρόκληση αυτή ήταν που με οδήγησε με βήματα αργά αλλά σταθερά στο να θέσω ως στόχο ζωής να καταφέρω, σε κάποια χρόνια, να γίνω μέλος του χώρου αυτού. Προς το παρόν, μπορώ να θαυμάσω όσους γνωρίζω και το έχουν ήδη καταφέρει, και να προσπαθήσω να πάρω όσο το δυνατόν περισσότερα εφόδια για τη δική μου συνέχεια από τη σχέση μου μαζί τους.

Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω την πρώτη μηχανικό πετρελαίων που γνώρισα στη ζωή μου, την καθηγήτρια που με ενέπνευσε όσο κανένας άλλος να ασχοληθώ και να αγαπήσω το αντικείμενό της, και που μου έδωσε τη δυνατότητα να καταπιαστώ με ένα θέμα που το ήθελα πολύ, την κυρία Σοφία Σταματάκη, καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την καθοδήγηση και την αμέριστη στήριξή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τις κυρίες Δημητρέλλου Ειρήνη και Κόφφα Ευαγγελία, από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, οι οποίες μου παρείχαν υπερπολύτιμη βοήθεια κατά τη συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας, εβρισκόμενες συνεχώς στη διάθεσή μου για οποιαδήποτε απορία ή διόρθωση. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο μου, και ελπίζω μέλλοντα συνάδελφο, Κώστα Μακρή, μηχανικό coiled tuber, για τις χρήσιμες συμβουλές και τις απαντήσεις σε ζητήματα σχετικά με την τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους που με στήριξαν όλα τα χρόνια της φοίτησής μου, αλλά και τους καθηγητές – φίλους, όπως ο Δρ. Γιώργος Αποστολόπουλος, και που ήταν πάντα εκεί για μένα.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το τελευταίο (5<sup>ο</sup>) έτος φοίτησής μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.









## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι οι εφαρμογές της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα (coiled tubing) στην αποκατάσταση και τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων.

Στην εργασία, αρχικά, γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των προπομπών και της ιστορικής εξέλιξης της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα από το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου έως τη σύγχρονη εποχή. Στη συνέχεια, και συγκεκριμένα στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά ο βασικός εξοπλισμός όλων των τυπικών μονάδων περιελιγμένου σωλήνα, ανεξαρτήτως της εργασίας που επιτελούν. Πολλά επιμέρους τμήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού παραλείπονται, κυρίως λόγω της χρήσης τους ανάλογα με την εφαρμογή της τεχνικής. Ακολουθώντας, στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται ειδική αναφορά στην κόπωση του περιελιγμένου σωλήνα. Το θέμα αυτό είναι άκρως σημαντικό, αποτελεί πεδίο συνεχούς έρευνας και πραγματοποιούνται νέες βελτιώσεις τόσο στα μοντέλα υπολογισμού της κόπωσης, όσο και στον εξοπλισμό μέτρησης των αποτελεσμάτων που αυτή επιφέρει στο περιελιγμένο σωλήνα. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας η επεξεργασία του θέματος αυτού επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο ο σωλήνας υπόκειται σε κόπωση και στα αποτελέσματα που αυτή επιφέρει.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα. Όλες οι εφαρμογές παρουσιάζονται με όσο το δυνατόν απλούστερο και πιο κατανοητό τρόπο, ενώ γίνεται μια σύντομη αναφορά σε τρεις από αυτές, και συγκεκριμένα στην Ολοκλήρωση Γεωτρήσεων, στον Καθαρισμό Παραγωγικών Γεωτρήσεων και στη Βελτίωση της Απόδοσης Παραγωγικών Γεωτρήσεων με χρήση περιελιγμένου σωλήνα, καθώς αναλύονται με λεπτομέρειες στα επόμενα κεφάλαια.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες ολοκλήρωσης μιας παραγωγικής γεώτρησης, και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια ολοκλήρωσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε μια παραγωγική γεώτρηση, και ακολουθώντας γίνεται ειδική αναφορά στους τρόπους αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. Η αντιμετώπιση των προβλημάτων παραγωγικότητας μιας γεώτρησης συνεισφέρει στην αποκατάσταση της παραγωγικότητας μιας γεώτρησης, μπορεί, όμως, να θεωρηθεί και ως μέθοδος βελτίωσης της απόδοσής της. Με την ακριβή έννοια του όρου “βελτίωση”, ωστόσο, οι μέθοδοι βελτίωσης της παραγωγικότητας πραγματοποιούνται για την επαύξηση και όχι για την αποκατάσταση της παραγωγικότητας μιας γεώτρησης.

Οι μέθοδοι αυτές, που μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα παρουσιάζονται στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Στο 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σχολιασμοί και τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας ως προς τη χρήση της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα στην ανάκτηση και τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων.

## ABSTRACT

The issue addressed by this diploma thesis is the production recovery and enhancement techniques, performed by a Coiled Tubing unit.

At first, there is a detailed presentation of the early applications that inspired the conception of coiled tubing, and of its evolution, from the late years of World War II, to the present days. This is followed by a thorough description of the basic equipment of all coiled tubing units, regardless of their application field, in Chapter 3. Many miscellaneous parts of the equipment are omitted, mainly because of their specialized use. After that, there is a specific reference to tubing fatigue. This subject is of great importance as tubing life models and real – time measurement equipment are constantly improved. This thesis is more interested in the causes and the results of the tubing fatigue.

The most important applications of coiled tubing are presented in the 5<sup>th</sup> Chapter of this diploma thesis. All applications are thoroughly described in a simple and comprehensive way, whereas three of them are simply mentioned, namely Well Completion, Well Production Problems and Production Enhancement with coiled tubing, since they are presented in detail in the following chapters.

Chapter 6 describes the completion procedures of a production well, followed by the application of coiled tubing in most of them.

In the 7<sup>th</sup> Chapter, there is a description of the most important production problems that is followed by the confrontation of these problems using coiled tubing. Dealing with the problems of a production well contributes to the recovery of its production, but it can also be seen as a mean of enhancing production. The precise meaning of production enhancement, though, includes all those methods applied to increase, and not simply restore to its previous rates, the production of a well.

Therefore, all those methods that can be applied for the production enhancement of a well using coiled tubing, are presented in the 8<sup>th</sup> Chapter of this thesis.

The comments and the conclusions regarding the production recovery and enhancement techniques performed by coiled tubing, are presented in the 9<sup>th</sup> Chapter.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
<b>2. ΑΠΟ ΤΟΝ “ΠΛΟΥΤΩΝΑ” ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)</b>	<b>3</b>
2.1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ PLUTO – Ο ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)	3
2.2 Η ΑΡΧΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)	6
2.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING) ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	9
<b>3. Ο ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING EQUIPMENT)</b>	<b>13</b>
3.1 ΚΕΦΑΛΗ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ (TUBING INJECTOR HEAD)	15
3.2 ΤΥΜΠΑΝΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ (COILED TUBING REEL)	17
3.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΥΜΠΑΝΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ	18
3.3 ΤΟΞΟ ΟΔΗΓΗΣΗΣ (GOOSE NECK)	19
3.4 ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (POWER PACK)	20
3.5 ΘΑΛΑΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL CABIN)	21
3.6 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΕΩΝ (PRESSURE CONTROL EQUIPMENT, PCE)	24
3.6.1 ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΣΦΡΑΓΙΣΗΣ (STRIPPER)	25
3.6.2 ΑΝΤΙΕΚΡΗΚΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (BLOW OUT PREVENTER – BOP)	27
3.7 ΣΩΛΗΝΑΣ (TUBING)	30
3.8 ΤΥΠΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ	32
<b>4. ΚΟΠΩΣΗ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING FATIGUE)</b>	<b>35</b>
<b>5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING APPLICATIONS)</b>	<b>41</b>
5.1 ΟΡΥΞΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (COILED TUBING DRILLING – CTD)	41
5.2 ΑΠΟΦΡΑΞΗ ΓΩΤΡΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ (MILLING)	50
5.3 ΑΛΙΕΥΣΗ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ Ή ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ (FISHING)	52
5.4 ΤΣΙΜΕΝΤΩΣΗ (CEMENTING)	54
5.5 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (COMPLETION)	57

<b>5.6 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>57</b>
<b>5.7 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (PRODUCTION ENHANCEMENT)</b>	<b>57</b>
<b>6. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL COMPLETION)</b>	<b>59</b>
<b>6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ</b>	<b>59</b>
<b>6.2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>59</b>
<b>6.3 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ (PERFORATION)</b>	<b>61</b>
6.3.1 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΣΦΑΙΡΕΣ (BULLET PERFORATING)	61
6.3.2 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ (ABRASIVE PERFORATING)	62
6.3.3 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΕΚΠΥΡΣΟΚΡΟΤΗΣΗ (JET PERFORATING)	63
<b>6.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (SWABBING)</b>	<b>65</b>
<b>6.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ (COMPLETION SYSTEMS)</b>	<b>68</b>
6.5.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (SINGLE STRING WELL COMPLETION)	69
6.5.2 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΖΩΝΩΝ (MULTIPLE-ZONE SINGLE STRING SELECTIVE COMPLETION)	73
6.5.3 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ (DUAL-ZONE COMPLETION USING PARALLEL TUBING STRING)	74
<b>6.6 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ</b>	<b>76</b>
6.6.1 ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	76
6.6.2 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΩΣ ΣΩΛΗΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	76
6.6.3 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	77
6.6.4 ΕΝΑΡΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΑΖΩΤΟΥ (NITROGEN LIFT/KICK OFF)	78
6.6.5 ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΖΩΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (ZONAL ISOLATION)	79
<b>6.7 ΜΟΝΑΔΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (HYDRAULIC WORKOVER/SNUBBING UNITS)</b>	<b>81</b>
<b>7. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL PRODUCTION PROBLEMS)</b>	<b>85</b>
<b>7.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΜΜΟΥ</b>	<b>85</b>
<b>7.2 ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΩΝ (ASPHALTENES PRECIPITATION)</b>	<b>87</b>
<b>7.3 ΑΠΟΘΕΣΗ ΚΗΡΩΝ (WAXES)</b>	<b>90</b>
<b>7.4 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΙΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (NATURAL GAS HYDRATES)</b>	<b>92</b>
<b>7.5 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ (INORGANIC SCALES)</b>	<b>93</b>



<b>7.7 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ</b>	<b>95</b>
7.7.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΜΜΟΥ (SAND CONTROL)	95
7.7.2 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΑΜΜΟΥ (SAND CLEANOUT)	99
7.7.3 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΑ (ASPHALTENE REMOVAL)	102
7.7.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΗΡΟΥΣ (WAX REMOVAL)	104
7.7.5 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΔΡΙΤΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (NATURAL GAS HYDRATES REMOVAL)	106
7.7.6 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ (INORGANIC SCALE REMEDIATION)	108
7.7.8 ΜΟΝΙΜΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΕΝΤΟΣ ΣΩΛΗΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΓΗΡΑΣΜΕΝΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (VELOCITY STRINGS)	110
<b>8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (PRODUCTION ENHANCEMENT WITH COILED TUBING)</b>	<b>113</b>
<b>8.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟ ΑΤΜΟ</b>	<b>113</b>
<b>8.2 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL STIMULATION)</b>	<b>118</b>
8.2.1 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ (HYDRAULIC FRACTURING)	118
8.2.2 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΟΞΕΩΝ (ACIDIZING)	125
<b>9. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>133</b>
<b>10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>139</b>







## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Χάρτης αγωγών μεταφοράς καυσίμων στα Συμμαχικά στρατεύματα στη Γαλλία (2) .....	4
Εικόνα 2.2 : Τηλεσκοπική όψη σωλήνα τύπου HAIS που χρησιμοποιήθηκε στη επιχείρηση PLUTO(2) .....	5
Εικόνα 2.3 : Η συσκευή που εμπνεύστηκαν οι George D. Priestman και Gerald Priestman με τις δύο επιλογές: α) (Figure 1) συνεχής, περιελιγμένος σωλήνας β) (Figure 2) ευθύγραμμο διακριτά μέρη που συγκολλούνται σχηματίζοντας συνεχή τμήματα τύπου χορδής. (7) .....	7
Εικόνα 2.4 : Η συσκευή των Calhoun και Allen για εισαγωγή σωλήνων ή συρμάτων σε πηγάδια υψηλής πίεσης. (8) .....	8
Εικόνα 2.5 : Η κεφαλή προώθησης της Bowen Tools Inc. “Unit No.1” (6) (9) .....	10
Εικόνα 3.1 : Διάταξη μονάδας coiled tubing. (10).....	14
Εικόνα 3.2 : Τυπική κεφαλή προώθησης (injector head). (11) .....	15
Εικόνα 3.3 : Gripper blocks της εταιρίας Power Hydraulics (12).....	16
Εικόνα 3.5 : Υπολογισμός μέγιστου μήκους σωλήνα που μπορεί να φέρει το τύμπανο περιέλιξης σε μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα. Η μεταβλητή K λαμβάνει τιμές ανάλογα με την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα. (14) .....	19
Εικόνα 3.8 : Τυπική υδραυλική μονάδα παροχής ισχύος με κινητήρα ντίζελ (hydraulic power-drive unit) (18) .....	21
Εικόνα 3.9 : Θάλαμος ελέγχου μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (19) .....	22
Εικόνα 3.10 : Τυπική κονσόλα ελέγχου (21) .....	23
Εικόνα 3.11 : Απλοποιημένη διάταξη κονσόλας ελέγχου μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (20).....	24
Εικόνα 3.12 : Τυπική διάταξη εξοπλισμού ελέγχου πιέσεων κάτω από κεφαλή προώθησης(22) .....	25
Εικόνα 3.13 : Τυπικά παραδείγματα διαφόρων τύπων κυλίνδρων σφράγισης (23).....	26
Εικόνα 3.14 : Ελαστομερή - γόμες (stripper rubbers) διαφόρων μεγεθών από το εσωτερικό κυλίνδρων σφράγισης (24) .....	27
Εικόνα 3.15 : Τυπική διάταξη αντικρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (Quad Ram BOP) (25).....	28
Εικόνα 3.16 : Έμβολο σφράγισης (blind ram) με ελαστομερές στοιχείο στο άκρο του. (26).....	28
Εικόνα 3.17 : Έμβολο κοπής (shear ram). (26) .....	29
Εικόνα 3.18 : Έμβολο συγκράτησης (slip ram) με συνεχείς οδόντες μονής κατεύθυνσης. (26).....	29
Εικόνα 3.19 : Έμβολο απομόνωσης πίεσης (pipe ram). (26).....	30
Εικόνα 3.20 : Το αυλάκι (groove) που δημιουργείται στην επαφή δύο σωλήνων μετά τη συγκόλλησή τους με τη μέθοδο butt weld. (27).....	31

Εικόνα 3.21 : Διαγώνια συγκόλληση (bias weld) πριν και μετά το σχηματισμό του σωλήνα. (30).....	32
Εικόνα 3.22 : Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων μεγεθών σωλήνων μονάδας Coiled Tubing. (22).....	33
Εικόνα 4.1 : Τα τρία σημεία πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα κατά τη λειτουργία μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (coiled tubing) (31).....	36
Εικόνα 4.2 :Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σωλήνα μονάδας Coiled Tubing κατά την περιέλιξή του εντός και εκτός της γεώτρησης (σε έντονα κεκλιμένες γεωτρήσεις οι τάσεις που δέχεται ο σωλήνας μπορεί να είναι και θλιπτικές). (22) .....	37
Εικόνα 4.3 : Μεταβολή της γεωμετρίας του σωλήνα εξαιτίας των τάσεων σε κάθε κύκλο φόρτισης. (31) .....	39
Εικόνα 5.1 : Ειδικά κατασκευασμένη εξέδρα όρυξης γεωτρήσεων με χρήση περιελιγμένου σωλήνα στο Ομάν. (34) .....	43
Εικόνα 5.2 : Διάταξη κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα κατευθυνόμενης όρυξης (directional drilling) για τηλεμετρία με παλμό λάσπης (mud-pulse telemetry) (Μέθοδος μετάδοσης δεδομένων τύπου LWD, δηλαδή διαγραφιών που αποκτούνται κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της διάτρησης (Loggings While Drilling) και αφορούν τις ιδιότητες του διατρυόμενου σχηματισμού, δημιουργώντας παλμούς πίεσης στο σύστημα της λάσπης διάτρησης). (34) .....	46
Εικόνα 5.3 : Η “ημιτονοειδής” και “ελικοειδής” μορφή που λαμβάνει ο σωλήνας εντός οριζόντιων γεωτρήσεων κατά την άσκηση μεγάλης πίεσης σε αυτόν. (22) .....	47
Εικόνα 5.4 : Καμπύλη μέγιστης θλιπτικής φόρτισης – μετρούμενου βάθους, σε περιελιγμένο σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε σε γεώτρηση αρχικής κλίσης 40 μοιρών για 6.500 ft και εν συνεχεία οριζόντιας για 2.500 ft. (22) .....	48
Εικόνα 5.5 : Ειδικά κοπτικά άκρα (φρέζες) (mills) για την απόφραξη γεωτρήσεων. (38) .....	50
Εικόνα 5.6 : Εργαλείο αλίευσης (fishing tool) για την εκ των έσω σύλληψη κυλινδρικών στοιχείων. (41).....	54
Εικόνα 5.7 : Τοποθέτηση υδραυλικών πωμάτων (inflatable packers) της εταιρίας Schlumberger για απομόνωση ζωνών προς τσιμέντωση, εισπίεση οξέων κ.α.) σε ανοιχτές (openhole) και σωληνωμένες (cased hole) γεωτρήσεις. (44).....	55
Εικόνα 6.1 : Ειδική συσκευή εκपुरσοκρότησης (jet gun) για τη διάνοιξη σπών στην παραγωγική σωλήνωση. (49).....	60
Εικόνα 6.2 : Η συσκευή (bazookas) από όπου εκτοξεύονταν οι σφαίρες διατρύπησης (1938). (51) Εικόνα 6.3 : Οπές στη σωλήνωση από διατρύπηση με τη μέθοδο bullet perforating. (50).....	62
Εικόνα 6.4 : Περιστροφική διατρύπηση σωλήνωσης με τη χρήση ειδικής συσκευής (DynaSlot) με τετραγωνικά στόμια της Dyna Energetics. (52).....	63
Εικόνα 6.5 : Γραφική (αριστερά) και πραγματική απεικόνιση με ακτίνες Χ (δεξιά) στομίου (case) που φέρουν οι συσκευές εκपुरσοκρότησης (jet guns). (50).....	64

Εικόνα 6.6 : Εκπυρσοκρότηση ειδικής συσκευής (jet gun) για τη δημιουργία οπών στη παραγωγική σωλήνωση και διόδων στο σχηματισμό (perforations), για τη διευκόλυνση της διέλευσης των περιεχόμενων σε αυτόν ρευστών . (53).....	65
Εικόνα 6.7 : Συσσώρευση παραγόμενων από τον ταμιευτήρα υγρών σε γεώτρηση αερίου. Αρχικά (πάνω αριστερά) η στήλη των υγρών δεν επηρεάζει την παραγωγή, ωστόσο στη συνέχεια αυξάνεται (πάνω δεξιά), διακόπτοντάς την πλήρως. Για την απομάκρυνση των υγρών ειδικό εργαλείο – κουβάς (swabbing cup) εισέρχεται στη γεώτρηση εντός της στήλης (κάτω αριστερά) και απομακρύνει την, απαραίτητη για την επανεκκίνηση της παραγωγής αερίου, ποσότητα υγρών (κάτω δεξιά). (55) .....	67
Εικόνα 6.8 : Ολοκλήρωση γεώτρησης χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας (LP/LT completion). (58) .....	70
Εικόνα 6.9 : Ολοκλήρωση γεώτρησης μεσαίας πίεσης και θερμοκρασίας (MP/MT). (58) .....	71
Εικόνα 6.10 : Ολοκλήρωση γεώτρησης υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (HP/HT). (58) .....	72
Εικόνα 6.11 : Ολοκλήρωση γεώτρησης με παραγωγή από πολλαπλές ζώνες σε μια σωλήνωση. (58) .....	74
Εικόνα 6.12 : Ολοκλήρωση γεώτρησης με απομόνωση παραγωγικών ζωνών και παραγωγή από δύο σωλήνες παραγωγής. (58) .....	75
Εικόνα 6.13 : Εισπίεση αζώτου για τη μείωση της πυκνότητας της στήλης των ρευστών που εμποδίζουν την έναρξη της παραγωγής υδρογονανθράκων. (47).....	78
Εικόνα 6.14 : Απομόνωση τμήματος παραγωγικής ζώνης με υδραυλικό πώμα (inflatable CoilFLATE packer) της εταιρίας Schlumberger. (61) .....	80
Εικόνα 6.15 : Εξέδρα μονάδας υδραυλικής συντήρησης (hydraulic workover/snubbing unit rig) της εταιρίας Halliburton. (64).....	82
Εικόνα 6.16 : Τα τμήματα μιας μονάδας υδραυλικής συντήρησης (hydraulic workover/snubbing unit). (63).....	83
Εικόνα 7.1 : Αποκόλληση κόκκων άμμου από το σχηματισμό, και μεταφορά τους εντός του σωλήνα παραγωγής λόγω της ροής των υδρογονανθράκων. (66).....	86
Εικόνα 7.2 : Συσσώρευση ασφατενίων σε σωλήνα παραγωγής. (70).....	88
Εικόνα 7.3 : Η σχέση μεταξύ πίεσης ταμιευτήρα και κατά βάρος κατακρημνισμένων ασφατενίων υπο σταθερή θερμοκρασία 100 °C. Διακρίνονται οι δύο οριακές πιέσεις, η πίεση εκκίνησης (onset pressure) στα 4.500 psi, και το σημείο φυσαλίδας (bubble point) στα 2.000 psi. (69).....	89
Εικόνα 7.4 : Φάκελος κατακρήμνισης ασφατενίων και προτεινόμενη πορεία παραγωγής για την αποφυγή δημιουργίας στερεών αποθέσεων. (69).....	90
Εικόνα 7.5 : Απόθεση κηρών σε σωλήνα παραγωγής. (72).....	91
Εικόνα 7.6 : Φθορές σε επιφανειακές σωληνώσεις που μπορεί να προκαλέσουν αποκολλημένα κομμάτια υδριτών. (73) .....	93

Εικόνα 7.7 : Ρωγμάτωση σωλήνα παραγωγής λόγω διάσπασης υδριτών και απότομης αύξησης της τοπικής πίεσης. (73).....	93
Εικόνα 7.8 : Απόθεση ανόργανων επιφανειακών επιστρωμάτων (inorganic scales) σε παραγωγική γεώτρηση πετρελαίου. (74) .....	94
Εικόνα 7.9 : Πίνακας χημικής σύστασης και ονομασίας των πιο κοινών ανόργανων επιφανειακών επιστρωμάτων (inorganic scales). (69) .....	95
Εικόνα 7.10: Εγκατάσταση χαλικόφιλτρου (gravel pack) με τη μέθοδο gravel-pack washdown. (47) .....	97
Εικόνα 7.11 : Καθαρισμός οριζόντιων γεωτρήσεων από υλικά απόθεσης (fills) με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. (80) .....	101
Εικόνα 7.12 : Ασφαλτένια σε τμήμα του κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από τη χημική απομάκρυνσή τους. (82).....	104
Εικόνα 7.13 : Μετακίνηση προς χαμηλότερες θερμοκρασίες της οριακής καμπύλης σχηματισμού των υδριτών, μετά την εισπίεση αναστολέων, και συγκεκριμένα αλκοολών ή γλυκολών. (69).....	107
Εικόνα 7.14 : Απόξεση (μηχανικά και με εκτόξευση νερού) (jetting) επιφανειακών επιστρωμάτων (scales) από γεώτρηση εισπίεσης αλμυρού νερού. (5).....	109
Εικόνα 7.15 : Σφαιρίδια από ειδικό αποξεστικό υλικό “Sterling Beads abrasive”. (87).....	110
Εικόνα 8.1 : Γραφική απεικόνιση λειτουργίας της μεθόδου “Steam assisted gravity drainage” για την παραγωγή πετρελαίου από βαριά κοιτάσματα και κοιτάσματα πίσσας. Καθώς ο ατμός θερμαίνει τη “θαλαμωτή” περιοχή πάνω από τη γεώτρηση εισπίεσης, θερμό πετρέλαιο ρέει στα όριά του και παράγεται από την παραγωγική γεώτρηση. (91) .....	115
Εικόνα 8.2 : Γραφική αναπαράσταση της τεχνικής Single Well – SAGD, με τη χρήση διπλού, ομόκεντρου περιελιγμένου σωλήνα υψηλής μόνωσης (ICCT). (93) .....	117
Εικόνα 8.3 : Κατηγορίες ρευστών υδραυλικής ρωγμάτωσης (hydraulic fracturing fluids) και πεδίο εφαρμογής τους. (97).....	121
Εικόνα 8.4 : Εφαρμογή της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα για την υδραυλική ρωγμάτωση πολλαπλών σχηματισμών σε μια γεώτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα από τις συμβατικές μεθόδους. (99).....	123
Εικόνα 8.5 : Υδραυλική ρωγμάτωση για ανάκτηση υδρογονανθράκων από ζώνη χαμηλού ενδιαφέροντος (bypassed zone), χωρίς να επηρεάζονται άλλες ευαίσθητες ζώνες εντός της γεώτρησης. (99).....	124
Εικόνα 8.6 : Διάγραμμα διαχωρισμού των κατηγοριών εισπίεσης διαλυμάτων οξέων (acid treatment), οξείδωση του σχηματισμού (matrix acidizing) και ρωγμάτωση με οξέα (fracture acidizing), με βάση την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού. (101) .....	126
Εικόνα 8.7 : Εργαστηριακό καλούπι από κανάλια που δημιουργήθηκαν σε ασβεστολιθικό παραγωγικό σχηματισμό με την εισπίεση διαλύματος υδροχλωρικού οξέος από ένα κεντρικό μέσο (central conduit). (102).....	127



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περίοδος την οποία διανύουμε είναι από τις δυσκολότερες που έχει βιώσει ποτέ η πετρελαϊκή βιομηχανία. Η τιμή του πετρελαίου βρίσκεται εδώ και πολύ καιρό σε τιμές που κάνουν την εκμετάλλευση μικρών ή γηρασμένων κοιτασμάτων οικονομικά ασύμφορη. Για πολλές εταιρίες εκμετάλλευσης κοιτασμάτων υδρογονανθράκων η αύξηση της απόδοσης, και κατά συνέπεια του συντελεστή απόληψης, των παραγωγικών τους γεωτρήσεων είναι η μόνη επιλογή για την αποφυγή της μόνιμης εγκατάλειψης.

Όσο τα μεγάλα και εύκολα προσβάσιμα κοιτάσματα εξαντλούνται, τόσο περισσότερο στρέφεται το ενδιαφέρον της πετρελαϊκής βιομηχανίας σε νέα, μικρότερα ή πιο βαθιά κοιτάσματα, ή σε παλαιά, σχεδόν εξαντλημένα ή εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα, τα οποία λόγω του υψηλού κόστους εκμετάλλευσης, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αποδοτικά. Ωστόσο, ακόμα και για την ανάκτηση 1% περισσότερων υδρογονανθράκων, απαιτούνται πολύπλοκες και μεγάλου κόστους εργασίες, οι οποίες απαιτούν χρόνο και μεγάλη εξειδίκευση για να πραγματοποιηθούν. Επομένως, η αποτελεσματικότητα και το κόστος των εργασιών αυτών είναι καθοριστικά για την οικονομικότητα των σύγχρονων εκμεταλλεύσεων, και κατ' επέκταση για το μέλλον της πετρελαϊκής βιομηχανίας.

Ανάμεσα στις πιο διαδεδομένες τεχνικές για την πραγματοποίηση εργασιών με σκοπό την αποκατάσταση και τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων είναι η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα, ή η τεχνική coiled tubing. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την προώθηση ενός χαλύβδινου σωλήνα εντός μιας γεώτρησης για την πραγματοποίηση διάφορων εργασιών επισκευαστικού χαρακτήρα, και όχι μόνο. Ο σωλήνας που περιλαμβάνεται σε μια μονάδα coiled tubing, αν και είναι υψηλής αντοχής, έχει την ικανότητα να περιελίσσεται γύρω από μεταλλικά τύμπανα περιέλιξης, διευκολύνοντας τη μεταφορά και εγκατάστασή του. Εξερχόμενος από το τύμπανο, ο σωλήνας, μέσω ενός τόξου οδήγησης, εισέρχεται στην κεφαλή προώθησης η οποία δίνει την απαραίτητη κινητική δύναμη στο σωλήνα για την προώθησή του εντός της γεώτρησης. Όταν ολοκληρωθούν οι εργασίες, η κεφαλή θα αντιστρέψει την κίνηση του σωλήνα, ανακτώντας τον στην επιφάνεια όπου περιελίσσεται και μεταφέρεται σε επόμενη εξέδρα. Όλες οι εργασίες που επιτελεί μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα ελέγχονται διεξοδικά από το χειριστή και το μηχανικό της μονάδας από το φορητό θάλαμο ελέγχου.

Η ευελιξία, η ταχύτητα εκτέλεσης των εργασιών και πάνω απ όλα η αποδοτικότητά της, καθιστούν την τεχνική αυτή αναπόσπαστο κομμάτι της πετρελαϊκής βιομηχανίας. Το εύρος των εφαρμογών της δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση της παραγωγικότητας των γεωτρήσεων. Ο καθαρισμός, η ολοκλήρωση,

η συντήρηση, η σφράγιση και η όρυξη γεωτρήσεων είναι μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα.

Στόχος της εργασίας είναι η όσο το δυνατόν σφαιρική κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και των αρχών επί των οποίων βασίζεται η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα, με έμφαση στις εργασίες αποκατάστασης και βελτίωσης της παραγωγικότητας των γεωτρήσεων. Ο στόχος αυτός συμβαδίζει με τις ανάγκες της εποχής για την εύρεση των βέλτιστων και οικονομικά αποδοτικότερων τεχνικών με σκοπό την αποκατάσταση και βελτίωση της παραγωγικής συμπεριφοράς υφιστάμενων παραγωγικών γεωτρήσεων.

Η μελέτη της διπλωματικής αυτής εργασίας ανοίγει νέους ορίζοντες στην αντιμετώπιση του προβλήματος της οικονομικότητας των μικρών ή γηρασμένων κοιτασμάτων κάνοντας γνωστή στο ευρύ κοινό μια τεχνική “παρεξηγημένη” και πολλές φορές παραγκωνισμένη λόγω της άγνοιας. Η κατανόηση της τεχνικής αυτής από ανθρώπους με σφαιρική γνώση μπορεί να οδηγήσει στην εύρεση τρόπων βελτίωσής της, κάτι που είναι καταλυτικής σημασίας την εποχή αυτή.

## 2. ΑΠΟ ΤΟΝ “ΠΛΟΥΤΩΝΑ” ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)

Τα θεμέλια για την ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας του Περιελιγμένου Σωλήνα (Coiled Tubing) τέθηκαν πριν από σχεδόν 75 χρόνια, όταν οι ανάγκες σε συνδυασμό με την ανθρώπινη εφευρετικότητα και θέληση οδήγησαν, εν καιρώ πολέμου, στην εφαρμογή ενός άκρως φιλόδοξου και ευφάνταστου σχεδίου, τη μεταφορά, δηλαδή, πετρελαίου μέσω ενός εύκαμπτου υποθαλάσσιου σωλήνα. Το σχέδιο αυτό με την ονομασία “Πλούτωνας” - “PLUTO” έθεσε τις βάσεις για την περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξή του, η οποία οδήγησε πρακτικά στην τεχνολογία του Coiled Tubing που χρησιμοποιείται σήμερα διεθνώς.

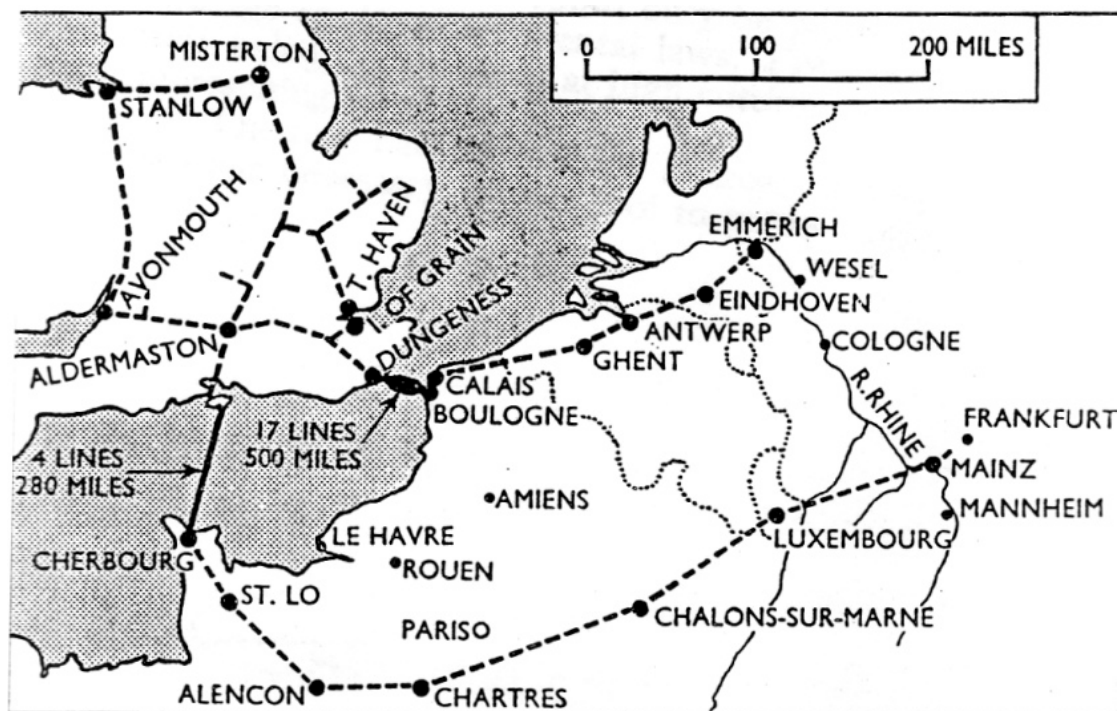
### 2.1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ PLUTO – Ο ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)

Η επιχείρηση PLUTO, PipeLine Under The Ocean, σχεδιάστηκε ώστε να τροφοδοτηθεί με πετρέλαιο από τις δεξαμενές της νότιας Αγγλίας ο στρατός των Συμμάχων που προέλαυνε στο εσωτερικό της Γαλλίας, μετά την επιτυχημένη απόβαση στις ακτές της Νορμανδίας τον Ιούνιο του 1944.

Η τροφοδοσία των στρατευμάτων έπρεπε να είναι συνεχής και να μην κινδυνεύει να διαταραχθεί από τις επιθέσεις της Luftwaffe. Συμβατικά δεξαμενόπλοια και αγωγοί μικρού μήκους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να συνέδεαν τα πλοία με τις ακτές, ήταν δυνατόν να δημιουργήσουν προβλήματα στα παράλια, παρεμποδίζοντας τη διέλευση στρατιωτών και οχημάτων. Παράλληλα, θα ήταν ευάλωτα τόσο στις ακραίες καιρικές συνθήκες της θάλασσας τη Μάγχης, όσο και στις επιδρομές της πολεμικής αεροπορίας του Άξονα. Η ιδέα ενός υποθαλάσσιου, συνεχούς και ελαστικού αγωγού που θα διέσχιζε το στενό της Μάγχης, κρίθηκε ότι θα μπορούσε να αποτελέσει μια άκρως καινοτόμο λύση.

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης πετρελαίου στα παράλια της νότιας Αγγλίας βρίσκονταν πολύ κοντά στις γραμμές των δυνάμεων του Άξονα και, επομένως, δεν θεωρούνταν ασφαλείς. Εξαιτίας του φανερού κινδύνου απωλειών σε περίπτωση χρήσης των εγκαταστάσεων αυτών, κατά τη διάρκεια των συζητήσεων σχεδίασης της επιχείρησης “PLUTO”, βρισκόταν ήδη υπό κατασκευή ένα δίκτυο αγωγών το οποίο θα μετέφερε καύσιμα στη Μάγχη από λιγότερο ευάλωτες εγκαταστάσεις που βρίσκονταν κοντά στο Μπρίστολ και το Λίβερπουλ (Εικόνα 2.1). Οι τερματικοί σταθμοί αποθήκευσης και οι σταθμοί άντλησης “μεταμφιέστηκαν” σε μικρούς αμμόλοφους, γκαράζ, ακόμα και μικρά παγωτατζίδικα ώστε να περνούν

απαρατήρητοι από τα εχθρικά αεροσκάφη. Το δίκτυο αυτό θα συνδεόταν αργότερα με τον υπό σχεδίαση αγωγό (1).



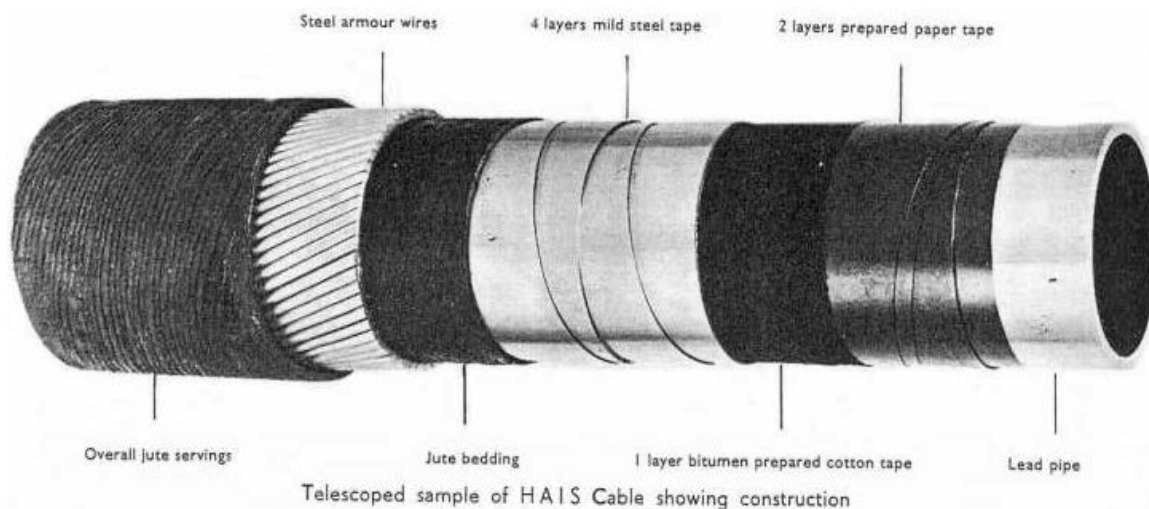
Εικόνα 2.1: Χάρτης αγωγών μεταφοράς καυσίμων στα Συμμαχικά στρατεύματα στη Γαλλία (2)

Ο σχεδιασμός και η εκτέλεση της επιχείρησης ανατέθηκε στον οργανισμό Combined Operations Experimental Establishment (COXE), ο οποίος συμμετείχε σε πολλά απόρρητα προγράμματα, όπως η κατασκευή υδατοστεγανών οχημάτων και ο καθαρισμός-διαμόρφωση του πυθμένα των ακτών απόβρασης ώστε να είναι ασφαλής η προσέγγιση των πλοίων και να μην κινδυνεύουν να συγκρουστούν στα βράχια. Όταν ο επικεφαλής του COXE συναντήθηκε με τον υπεύθυνο πολιτικής καυσίμων του Ηνωμένου Βασιλείου, Geoffrey Lloyd, το 1942, κατέφυγαν στον Sir William Fraser, επικεφαλής της Αγγλο-Ιρανικής Εταιρίας Πετρελαίου. Η ιδέα του υπεύθυνου μηχανικού της εταιρίας περιελάμβανε τη χρήση της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας υποθαλάσσιων καλωδίων ως το βασικό δομικό στοιχείο των αγωγών μεταφοράς πετρελαίου. Οι αγωγοί θα ήταν ανθεκτικοί σε υψηλές πιέσεις και εύκαμπτοι ώστε να πραγματοποιηθεί γρήγορα και εύκολα η μεταφορά και η εγκατάστασή τους. Εταιρίες όπως η Siemens Brothers & Co Ltd. του Λονδίνου, η Pirelli και η Johnson & Phillips ανέλαβαν το σχεδιασμό και την κατασκευή των αγωγών αυτών, ενώ στις εργασίες συμμετείχαν και τα Βρετανικά Ταχυδρομεία (2).

Τα αρχικά σχέδια για τους αγωγούς περιελάμβαναν σωλήνες διαμέτρου 2 in από σκληρό μόλυβδο, με δύο ενστρώσεις λωρίδων χάλυβα των 2 mm, ενισχυμένους με γαλβανισμένο χαλύβδινο σύρμα. Ύστερα από επιτυχημένες εργαστηριακές δοκιμές, οι σωλήνες αυτοί τέθηκαν σε παραγωγή ώστε να

δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες. Το Μάιο του '42 πραγματοποιήθηκε με επιτυχία, στην ξηρά, μεταφορά πετρελαίου μέσω των σωλήνων σε πίεση 41,37 bar, ενώ τον Ιούνιο του ίδιου έτους, και ύστερα από πολλές διορθώσεις στο σχεδιασμό, όλα ήταν έτοιμα για την πρώτη υποθαλάσσια δοκιμή. Το ειδικό πλοίο των Βρετανικών Ταχυδρομείων μετέφερε και τοποθέτησε τους σωλήνες κοντά στις εκβολές του ποταμού Clyde, όπου και πάλι οι δοκιμές στέφθηκαν με επιτυχία. Αυτή ήταν η αρχή για την εφαρμογή της επιχείρησης PLUTO (3).

Εξαιτίας των τεράστιων απαιτήσεων σε μόλυβδο ήταν φανερή η πιθανότητα καθυστέρησης στην προμήθεια, αλλά και στην κατασκευή των σωλήνων. Τη λύση ήρθαν να δώσουν δύο μηχανικοί που εργάζονταν στην επιχείρηση PLUTO, οι Hammick και Ellis, όταν πρότειναν τη χρήση χαλύβδινων σωλήνων. Το δεύτερο εναλλακτικό σχέδιο προχωρούσε παράλληλα με το πρώτο, με αποτέλεσμα την κατασκευή δύο διαφορετικών σωλήνων με το ίδιο όμως χαρακτηριστικό· την υψηλή αντοχή και ελαστικότητα που απαιτούσαν οι ειδικές συνθήκες του έργου. Οι σωλήνες μολύβδινου πυρήνα πήραν την κωδική ονομασία H AIS (Εικόνα 2.2), ενώ οι χαλύβδινι ονομάστηκαν HAMEL. Οι H AIS τυλίγονταν πάνω στο πλοίο και στη συνέχεια εναποτίθεντο στον πυθμένα της Μάγχης, ενώ οι σωλήνες τύπου HAMEL ήταν περιελιγμένοι γύρω από τεράστια τύμπανα, συρόμενα από ρυμουλκά, τα οποία ζετυλίγονταν με την κίνηση του πλοίου (2).



**Εικόνα 2.2 : Τηλεσκοπική όψη σωλήνα τύπου H AIS που χρησιμοποιήθηκε στη επιχείρηση PLUTO (2)**

Στην τελική τους μορφή, οι σωλήνες τύπου H AIS αποτελούνταν κατά σειρά από έναν εσωτερικό σωλήνα από μόλυβδο διαμέτρου 3 in, δύο στρώματα χαρτοταινίας, ένα στρώμα βαμβακερής ταινίας με πίσσα, τέσσερα στρώματα μαλακής χαλύβδινης ταινίας, ένα υπόστρωμα από γιούτα (jute, ειδικό ύφασμα από λεπτές, μαλακές ίνες), ένα στρώμα χαλύβδινων συρμάτων και από ένα δεύτερο εξωτερικό στρώμα από γιούτα. Από την άλλη, οι σωλήνες τύπου HAMEL είχαν απλούστερη μορφή, καθώς στην ουσία ήταν χαλύβδινι σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 3 in και πάχους τοιχωμάτων 0,212 in. (4) Τόσο οι H AIS όσο και οι HAMEL κατασκευάζονταν σε τμήματα των 40 ft τα οποία, αφού λειαινόνταν,

τοποθετούνταν σε επαφή μεταξύ τους και συγκολλούνταν (μέθοδος “butt-welding”, θα γίνει λεπτομερής αναφορά της μεθόδου αυτής στο Κεφάλαιο 3) σε τμήματα των 4.000 ft, τα οποία με τη σειρά τους συγκολλούνταν με τον ίδιο τρόπο για να σχηματίσουν ένα συνεχή εύκαμπτο σωλήνα (5).

Η πρωτοποριακή μέθοδος εγκατάστασης των σωλήνων με τη χρήση πλοίων και πλωτών τυμπάνων είχε ως αποτέλεσμα οι εργασίες να έχουν ολοκληρωθεί σε μερικές μέρες, έναντι πολλών μηνών που απαιτούνταν για την εφαρμογή των τότε συμβατικών μεθόδων. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αρκετών μηνών, αρχής γενομένης στις 14 Αυγούστου 1944, εγκαταστάθηκαν συνολικά 23 αγωγοί, εκ των οποίων 17 ήταν μήκους 30 μιλίων, ενώ 6 (τύπου HAMEL) είχαν μήκος 70 μίλια (6).

Μέχρι τον Ιανουάριο του 1945 το σύστημα των αγωγών είχε μεταφέρει συνολικά μόλις 300 τόνους καυσίμου. Έως το Μάρτη, όμως, του ίδιου έτους ο αριθμός είχε ανέλθει στους 3.000 τόνους. Τελικά, η ποσότητα που μετέφεραν οι αγωγοί ανήλθε σε περισσότερα από 1.000.000 γαλόνια πετρελαίου τη μέρα, με το σύστημα να έχει παραδώσει ως το τέλος των εχθροπραξιών συνολικά 172.000.000 γαλόνια (1).

Αυτό που απέδειξε η επιχείρηση PLUTO, ήταν πως ο ανθρώπινος νους είναι ικανός για τις πλέον απίθανες απαντήσεις στα πλέον απαιτητικά προβλήματα. Εκείνο, δε, που κληροδότησε στις επόμενες γενιές επιστημόνων και μηχανικών ήταν γνώση. Το να τυλιχθεί ένας συνεχής χαλύβδινος σωλήνας μήκους αρκετών δεκάδων μιλίων γύρω από ένα τύμπανο ήταν εφικτό. Η χαρακτηριστική αντοχή, μάλιστα, του σωλήνα αυτού αλλά και η επιτυχημένη εφαρμογή του στη μεταφορά πετρελαίου έθεσαν τα θεμέλια ώστε πρωτοπόροι μηχανικοί να οραματιστούν, τα επόμενα χρόνια, την εφαρμογή του σωλήνα αυτού στην ακμάζουσα, τότε, πετρελαϊκή βιομηχανία. Να οραματιστούν το Coiled Tubing.

## **2.2 Η ΑΡΧΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING)**

Οι σωλήνες τύπου HAMEL που χρησιμοποιήθηκαν στη επιχείρηση PLUTO, ενέπνευσαν τους George D. Priestman και Gerald Priestman να προτείνουν στις 2 Φεβρουαρίου του 1948 το πρώτο καταγεγραμμένο σχέδιο (Εικόνα 2.3) για χρήση συνεχούς χαλύβδινου σωλήνα σε εργασίες γεωτρήσεων, τόσο στη διάνοιξη όσο και στην επένδυσή τους. Η ευρεσιτεχνία U.S. 2,548,616, με τίτλο "Well Drilling", τους απονεμήθηκε στις 10 Απριλίου 1951 και έθεσε τις βάσεις σχεδιασμού των μονάδων της τεχνικής Coiled Tubing. Η καινοτομία του σχεδίου των George και Gerald Priestman έγκειται στο μικρό μέγεθος της συσκευής και στην ευκολία μεταφοράς της, σε αντίθεση με το συνήθη βαρύ εξοπλισμό γεωτρήσεων που περιελάμβανε, μεταξύ άλλων, ψηλούς και μεγάλους γεραμούς. Η συμβολή της επιχείρησης PLUTO στο σχέδιο αυτό συναντάται στη χρήση τυμπάνων για την

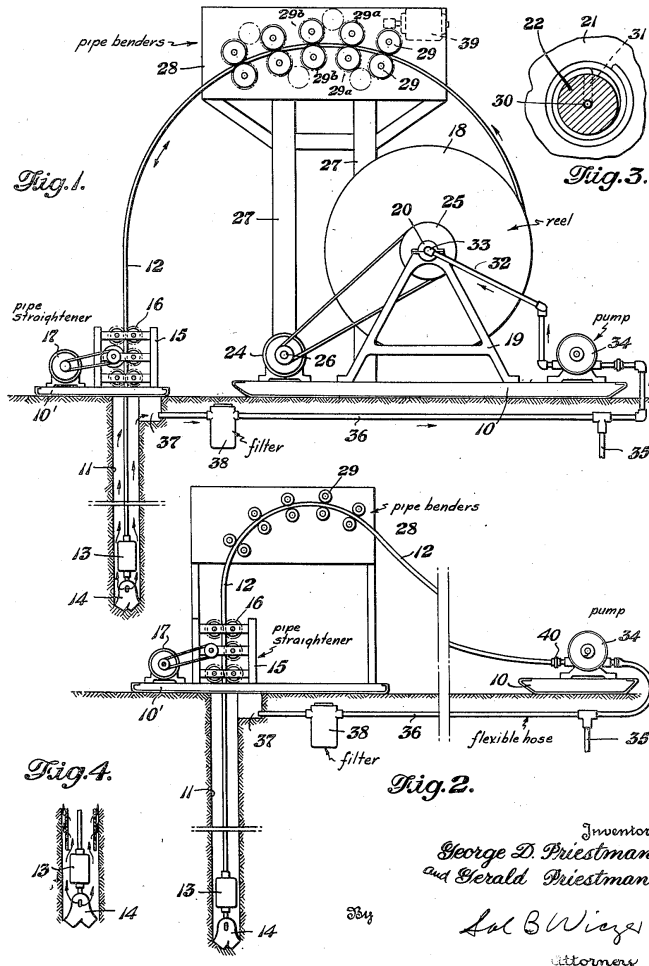
αποθήκευση και μεταφορά του χαλύβδινου σωλήνα, ως μια εκ των δύο εναλλακτικών επιλογών που προτείνονταν στην ευρεσιτεχνία αυτή.

April 10, 1951

G. D. PRIESTMAN ET AL  
WELL DRILLING

2,548,616

Filed Feb. 2, 1948



Εικόνα 2.3 : Η συσκευή που εμπνεύστηκαν οι George D. Priestman και Gerald Priestman με τις δύο επιλογές: α) (Figure 1) συνεχής, περιελιγμένος σωλήνας β) (Figure 2) ευθύγραμμο διακριτά μέρη που συγκολλούνται σχηματίζοντας συνεχή τμήματα τύπου χορδής. (7)

Μπορεί οι George και Gerald Priestman να έθεσαν τις σχεδιαστικές βάσεις του σύγχρονου Coiled Tubing, όμως η συσκευή τους χρειαζόταν σοβαρές βελτιώσεις για να λειτουργήσει στην πράξη. Μια από αυτές ήταν το λεγόμενο “pipe straightener”, μια διάταξη ευθυγράμμισης του σωλήνα. Τη λύση ήρθαν να δώσουν λίγους μήνες μετά οι Calhoun και Allen.

Συγκεκριμένα, στις 4 Σεπτεμβρίου 1951 απονεμήθηκε στους George H. Calhoun και Herbert Allen η ευρεσιτεχνία U.S. 2,567,009 A, “Equipment for Inserting Small Flexible Tubing into High Pressure Wells”, δηλαδή “Εξοπλισμός για την Εισαγωγή Μικρού Εύκαμπτου Σωλήνα σε Γεωτρήσεις Υψηλής Πίεσης”. Η διάταξη αυτή (Εικόνα 2.4) παρείχε τη δυνατότητα εισαγωγής, αναστολής και ανάκτησης χορδών επιμηκυμένων, κυλινδρικών στοιχείων, όπως για παράδειγμα

χαλύβδινων σωλήνων, για εργασίες επέμβασης εντός γεωτρήσεων με υψηλή πίεση. (4).

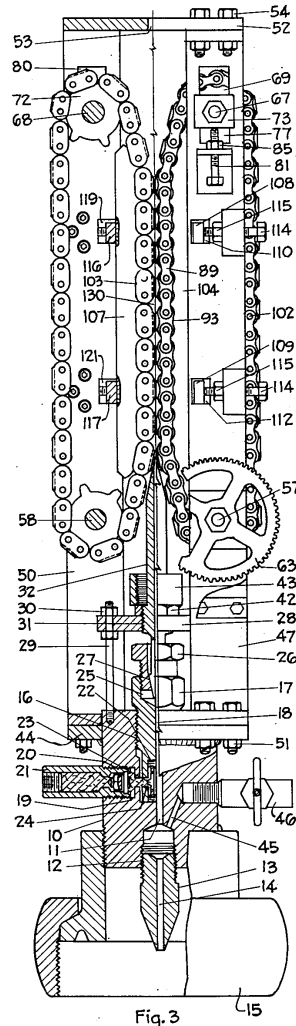
Sept. 4, 1951

G. H. CALHOUN ET AL  
EQUIPMENT FOR INSERTING SMALL FLEXIBLE  
TUBING INTO HIGH-PRESSURE WELLS

2,567,009

Filed June 24, 1948

5 Sheets-Sheet 3



Inventors: George H. Calhoun  
Herbert Allen

By their Attorney: *W. Allen*

Fig. 3

**Εικόνα 2.4 : Η συσκευή των Calhoun και Allen για εισαγωγή σωλήνων ή συρμάτων σε πηγάδια υψηλής πίεσης. (8)**

Χρησιμοποιώντας την ιδέα των Calhoun και Allen, η Bowen Tools Inc. ανέπτυξε στις αρχές της δεκαετίας του '60 μια διάταξη που επέτρεπε στα υποβρύχια να παρατάσσουν κεραίες επικοινωνίας στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ βρίσκονταν βυθισμένα κάτω από αυτήν. Η διάταξη ονομάστηκε "A/N Bra-18 Antenna Transfer System", και στην ουσία ήταν μια παραλλαγή της διάταξης των Calhoun & Allen σε κατακόρυφη θέση, αντίθετης περιστροφής, κινούμενη από ελκυστήρα με αλυσίδα (chain tractor). Ήταν σχεδιασμένη να παρατάσει ορειχάλκινες κεραίες, εγκιβωτισμένες σε πολυαιθυλένιο (polyethylene encapsulated), εξωτερικής διαμέτρου 5/8 in, από βάθος θάλασσας έως και 600 ft. Η κεραία αποθηκευόταν σε ένα καρούλι (τύμπανο περιέλιξης) που βρισκόταν κάτω από το σύστημα μεταφοράς για την εύκολη ανάπτυξη και ανάκτηση της κεραίας, κατά τρόπο παρόμοιο με τους σωλήνες τύπου HAMEL αλλά και του σχεδίου των George & Gerald Priestman. Οι βασικές αρχές του σχεδίου αυτού συνέβαλλαν



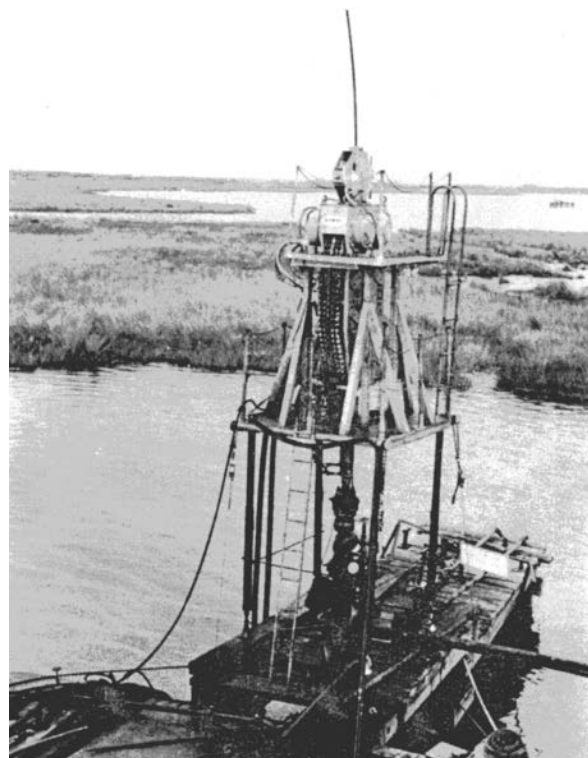
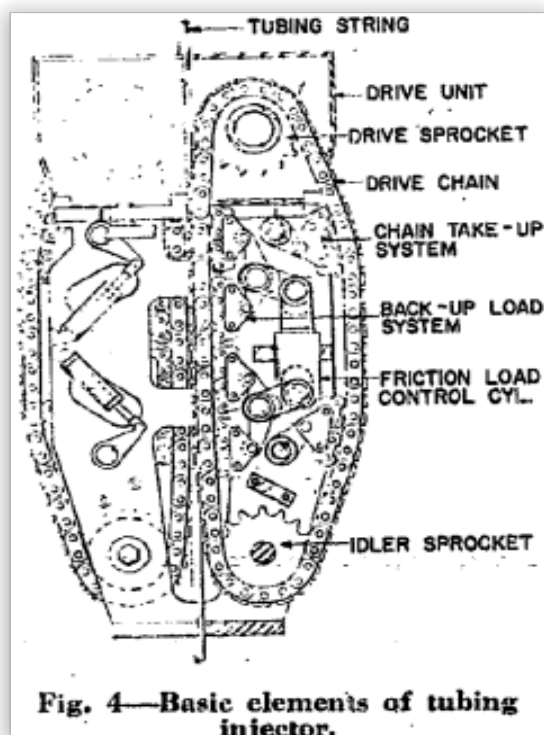
στην ανάπτυξη, μερικά χρόνια αργότερα, από την Bowen Tools Inc. της πρώτης κεφαλής προώθησης περιελιγμένου σωλήνα, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για τη δημιουργία της πρώτης, πλήρως λειτουργικής, μονάδας Coiled Tubing. (9).

### 2.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING) ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Την ίδια εποχή, ο R.V. Cross, μηχανικός της California Oil Company (γνωστής και ως The California Co.), υπεύθυνος για την αναζήτηση νέων τεχνικών για τη βελτίωση των μεθόδων παραγωγής και τη μείωση του κόστους, συνέλαβε την ιδέα για τη χρήση συνεχούς σωλήνα περιελιγμένου σε τύμπανα, σε μικρές εργασίες συντήρησης παραγωγικών γεωτρήσεων πετρελαίου ή και φυσικού αερίου. Σε συνεργασία με την Bowen Tools Inc., δημιουργήθηκε, το 1962, η πρώτη μονάδα ("Unit No. 1") για την απομάκρυνση συσσωματωμάτων άμμου (sand bridges) με έκπλυση (wash out) από παραγωγικές γεωτρήσεις, καθώς και για άλλες εργασίες, η οποία έφερε τον τίτλο "Continuous-String Light Workover Unit" («Ελαφρού Τύπου Μονάδα Συντήρησης Γεωτρήσεων με Ενιαίο-Συνεχή Σωλήνα»). Ήταν η πρώτη πλήρως λειτουργική μονάδα Coiled Tubing.

Η μονάδα χρησιμοποιούσε ως κεφαλή προώθησης (injector head) μια τροποποιημένη εκδοχή της συσκευής για τα υποβρύχια της Bowen Tools Inc. (Εικόνα 2.5). Η κεφαλή αυτή μπορούσε να προωθήσει ένα συνεχή σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 1,315 in, με ελάχιστο πάχος τοιχωμάτων 0,125 in, σε μέγιστο βάθος 15.000 ft, με μέγιστο βάρος σωλήνα εντός της γεώτρησης (subsurface loads) τις 30.000 lb. (6).

Η πρώτη εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στη Νότια Λουϊζιάνα από την εταιρία The California Co. για την απομάκρυνση συσσωματωμάτων άμμου (sand bridges) από τους σωλήνες παραγωγής με έκπλυση (wash outs) σε γεώτρηση πετρελαίου (σε βάθος μεταξύ 5.510 και 8.628 ft) (6). Από τα μέσα του 1963 έως το 1964 πραγματοποιήθηκαν, στην ίδια περιοχή, πολλές εργασίες έκπλυσης και ανάκτησης βαλβίδων ελέγχου παραγωγής (storm chokes), τόσο σε χερσαίες όσο και σε θαλάσσιες γεωτρήσεις. Το 1967 η Bowen Tools κατασκεύασε μια μικρότερη έκδοση της πρωτότυπης κεφαλής προώθησης, κατάλληλη για σωλήνες διαμέτρου ½ in, η οποία χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από τη NOWSCO για τον καθαρισμό γεωτρήσεων από αποθέσεις αλάτων θαλασσινού νερού με ανάστροφη έκπλυση με χρήση υδρογόνου (backwashing using nitrogen). (9).



Εικόνα 2.5 : Η κεφαλή προώθησης της Bowen Tools Inc. “Unit No.1” (6) (9)

Ωστόσο, οι χαμηλού ορίου διαρροής χάλυβες καθώς και οι πολλές συγκολλήσεις (end-to-end ή butt-welds) που απαιτούνταν για την κατασκευή των συνεχών σωλήνων, αδυνατούσαν να ανταπεξέλθουν στους συνεχείς κύκλους φόρτισης και στα μεγάλα εφελκυστικά φορτία. Οι συχνές αστοχίες στα σημεία συγκόλλησης (weld failures) ήταν αναπόφευκτες. Τα προβλήματα αυτά καθώς και οι βλάβες στον εξοπλισμό και οι πολύωρες εργασίες ανάκτησης παγιδευμένων, εντός της γεώτρησης, τμημάτων του περιελιγμένου σωλήνα (fishing operations), οδήγησε στην αμφισβήτηση της τεχνικής από τους μηχανικούς και τους χειριστές της εποχής.

Από τη δεκαετία του '60 έως τη δεκαετία του '70, κατασκευαστικές εταιρίες όπως οι Bowen Tools, Brown Oil Tools, Uni-Flex Inc., Hydra Rig Inc. και Otis Engineering, συνέχισαν τις προσπάθειες βελτίωσης του εξοπλισμού των μονάδων Coiled Tubing και κυρίως των κεφαλών προώθησης (injector heads). Όμως, παρότι οι προσπάθειες αυτές οδήγησαν τόσο στην αύξηση των διαστάσεων των σωλήνων, ώστε πλέον να μπορούν να λειτουργούν σε μεγαλύτερα βάθη, όσο και στη συνολικά καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία του εξοπλισμού, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα εξακολουθούσε να αμφισβητείται στην πράξη. (5).

Ως τις αρχές της δεκαετίας του '80 πραγματοποιήθηκαν νέες βελτιώσεις στο σχεδιασμό του εξοπλισμού των μονάδων, καθώς και στα χρονοδιαγράμματα συντήρησής του από τις εταιρίες που δραστηριοποιούνταν στο χώρο, όπως η Bowen Tools και η Hydra Rig Inc., με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού στην επιφάνεια, αλλά και τη σημαντική μείωση των αστοχιών του περιελιγμένου σωλήνα. (9).

Η μεγάλη καινοτομία στην κατασκευή των χαλύβδινων σωλήνων που άλλαξε την πορεία της τεχνικής του Coiled Tubing, εισήχθη από την Quality Tubing Inc. στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Αρχικά, το 1983 η εταιρία ξεκίνησε να χρησιμοποιεί φύλλα χάλυβα από την Ιαπωνία, μήκους 3.000 ft, ώστε να μειώσει τον αριθμό των απαιτούμενων συγκολλήσεων στο 50%, ενώ λίγα χρόνια αργότερα εισήγαγε την πρωτότυπη μέθοδο της διαγώνιας συγκόλλησης (bias welding) (η μέθοδος αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3). Με τη μέθοδο αυτή αυξήθηκε κατά πολύ η αντοχή των συγκολλημένων τμημάτων βελτιώνοντας, έτσι, την αξιοπιστία της τεχνικής. (5).

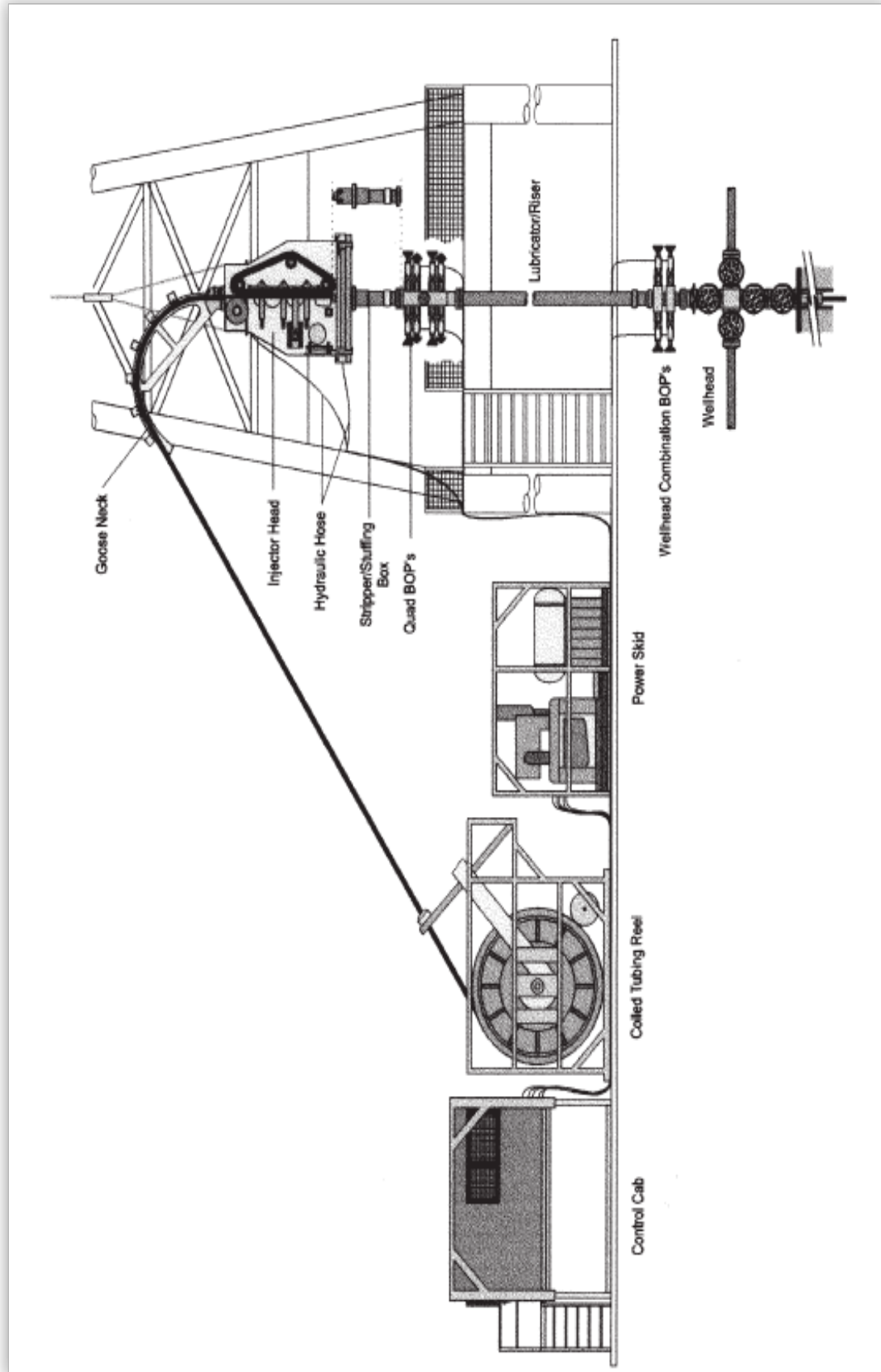
Η δεκαετία του '90 χαρακτηρίζεται από την τάση των εταιριών να προμηθεύουν την αγορά με σωλήνες όλο και μεγαλύτερης διαμέτρου, φτάνοντας από τις 2 in στις 4½ in, ενώ από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αι. οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται έχουν αυξημένο όριο διαρροής, 90, 100, 110 και 120 ksi ( $10^3$  rounds/in<sup>3</sup>) (620, 689, 758, 827 MPa) και κατασκευάζονται από κράματα ανθεκτικά στη διάβρωση. (5) Η βελτιωμένη αντοχή των χαλύβων, οι αυξημένες διάμετροι σωλήνων, η προσπάθεια για ελαχιστοποίηση του κόστους καθώς και η εισαγωγή της έννοιας του ποιοτικού ελέγχου ήταν καταλυτικοί παράγοντες στην εξέλιξη της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα, καθιερώνοντάς την ως μια από τις πλέον αξιόπιστες και οικονομικά συμφέρουσες τεχνικές συντήρησης και διάνωσης γεωτρήσεων.



### 3. Ο ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING EQUIPMENT)

Όταν κάποιος χρησιμοποιεί τον όρο «μονάδα τεχνικής περιελιγμένου σωλήνα» (coiled tubing unit), αναφέρεται σε μια κινητή διάταξη, κινούμενη υδραυλικά (hydraulically powered), σχεδιασμένη να ωθεί και να ανακτά ένα συνεχή μεταλλικό σωλήνα εντός ενός ομόκεντρου, μεγαλύτερης διαμέτρου, σωλήνα παραγωγής (production pipe) ή μιας στήλης σωλήνωσης (casing string). Στο βασικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σήμερα περιλαμβάνεται η κεφαλή προώθησης (injector head) η οποία βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση, είναι αντίθετης περιστροφής (contra-rotating), δηλαδή κινούμενη από δύο ελκυστήρες με αλυσίδα οι οποίοι περιστρέφονται με αντίστροφη φορά, και ο περιελιγμένος σωλήνας με εσωτερική διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ  $\frac{3}{4}$  και 2 in (work strings) και 2 έως 4 in (siphon strings) (10). Τα βασικά εξαρτήματα μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (Εικόνα 3.1) είναι τα ακόλουθα:

- Κεφαλή προώθησης σωλήνα (Tubing injector head).
- Τύμπανο περιέλιξης (Coiled tubing reel).
- Τόξο οδήγησης (Tubing guide/guider/guide arch or goose neck).
- Μονάδα παροχής ισχύος (Hydraulic power-drive unit or power pack).
- Θάλαμος ελέγχου (Control cabin).
- Εξοπλισμός ελέγχου πιέσεων (Pressure control equipment, PCE).
- Σωλήνας (Tubing).

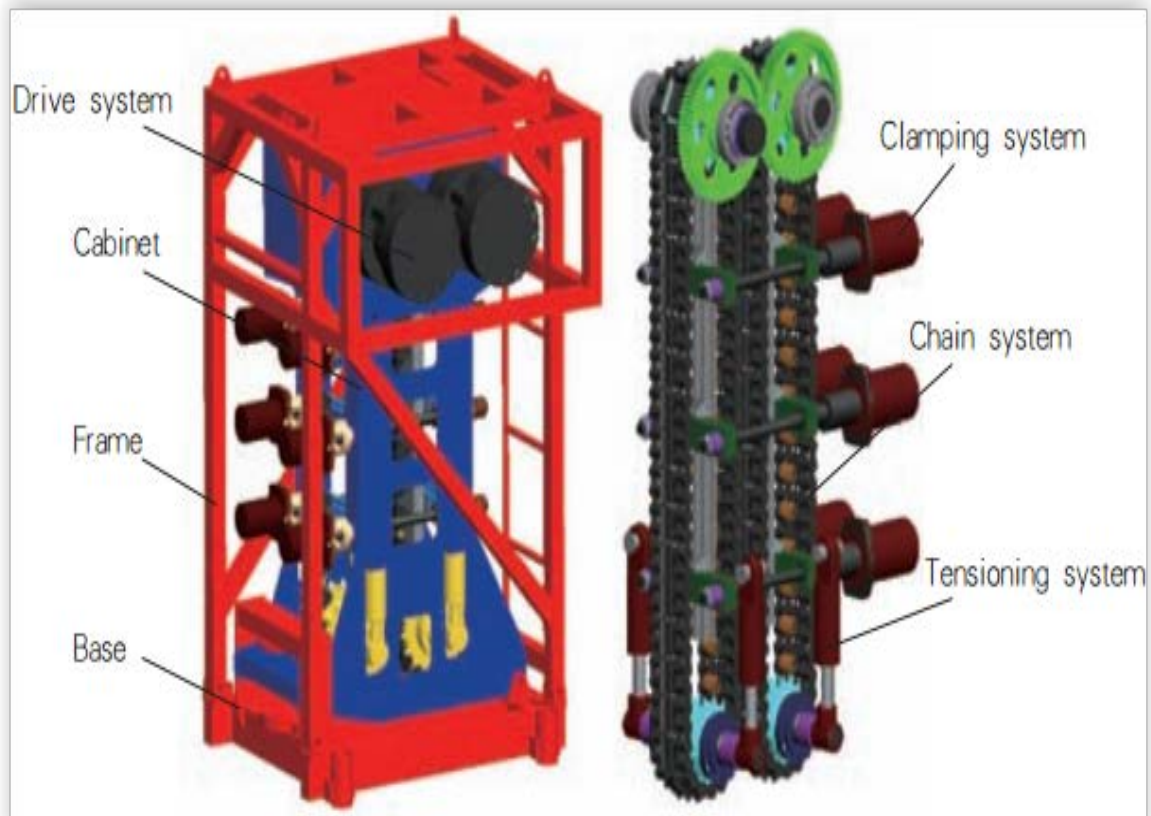


Εικόνα 3.1 : Διάταξη μονάδας coiled tubing. (10)

### 3.1 ΚΕΦΑΛΗ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ (TUBING INJECTOR HEAD)

Η κεφαλή προώθησης (Εικόνα 3.2) είναι η διάταξη προώθησης που εξασφαλίζει την ανοδική και καθοδική κίνηση του σωλήνα εντός της γεώτρησης. Εγκαθίσταται πάνω από τη διάταξη του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας (BOP) στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead).

Καθώς η σύνδεσή της με τον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφάλειας δεν είναι σχεδιασμένη να υποστηρίζει το εφελκυστικό φορτίο (βάρος του σωλήνα) και τις πλευρικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω εφελκυσμού (τάνυσης) του περιελιγμένου σωλήνα από το τύμπανο, στις χερσαίες γεωτρήσεις η διάταξη υποστηρίζεται πάντα από γερανό κατάλληλης δυναμικότητας. Στις θαλάσσιες γεωτρήσεις η σύνδεση υποστηρίζεται από τον πύργο του γεωτρυπάνου. Η κίνηση μεταδίδεται στο σωλήνα από υδραυλικά κινούμενες αλυσίδες (chain tractors) εξοπλισμένες με άρπαγες συγκράτησης (gripper/fixture blocks) (Εικόνα 3.3). Οι άρπαγες συγκράτησης συγκρατούν το σωλήνα μέσω άσκησης τριβής, η οποία ρυθμίζεται με τη χρήση υδραυλικών πιστονιών/κυλίνδρων που ασκούν πίεση κατά μήκος της αλυσίδας. Για να αποφευχθεί πιθανή ολίσθηση μεταξύ των αρπάγων συγκράτησης και του σωλήνα, απαιτείται η πίεση που ασκείται από το πιστόνι να είναι σχετικά υψηλή· όχι όμως τόσο ώστε να τον παραμορφώσει. (10).



Εικόνα 3.2 : Τυπική κεφαλή προώθησης (injector head). (11)

Τρεις είναι οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιεί η κεφαλή προώθησης :

- Παρέχει την απαραίτητη ώθηση για την εισχώρηση του σωλήνα εντός της γεώτρησης, υπερνικώντας την πίεση και την τριβή εντός της, αλλά και για την εξαγωγή του σωλήνα από αυτή.
- Ελέγχει το ρυθμό προχώρησης του σωλήνα εντός της γεώτρησης ώστε να προσαρμόζεται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.
- Συγκρατεί το βάρος του σωλήνα όταν η κίνησή του ανακόπτεται.



**Εικόνα 3.3 : Gripper blocks της εταιρίας Power Hydraulics (12)**

Η κεφαλή προώθησης σταθεροποιείται πάνω από την κεφαλή της γεώτρησης (wellhead) με δύο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει έναν υδραυλικά ανυψούμενο μεταλλικό σκελετό, γνωστό ως “jack stand”, και εφαρμόζεται κυρίως σε θαλάσσιες εξέδρες όπου είναι διαθέσιμες ελεύθερες επιφάνειες χωρίς εμπόδια εγκατάστασης. Μόλις επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος, τα 4 πόδια του μεταλλικού σκελετού στερεώνονται και ασφαλίζονται στη θέση αυτή παρέχοντας σωστή κατανομή του βάρους της κεφαλής προώθησης στην επιφάνεια στήριξης, καθώς και μέγιστη σταθερότητα της διάταξης.



Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει τηλεσκοπικά πόδια και χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο όπου η χρήση jack stand είναι αδύνατη λόγω του ύψους της κεφαλής προώθησης ή του σχεδιασμού της κεφαλής της γεώτρησης (wellhead). Το ανώτερο τμήμα των τεσσάρων ποδιών εισχωρεί σε ειδικές εσοχές που βρίσκονται περιμετρικά του πλαισίου της κεφαλής προώθησης και ασφαρίζονται με ειδικούς πύλους στο επιθυμητό ύψος. Στο κατώτερο τμήμα των ποδιών τοποθετούνται ειδικές βάσεις ώστε να κατανέμουν το βάρος της κεφαλής στην επιφάνεια στήριξης.

Η μέθοδος jack stand προτιμάται για την ασφάλεια που παρέχει, τόσο λόγω της υψηλής σταθερότητας που εξασφαλίζει για την κεφαλή προώθησης, όσο και για την ευκολία εγκατάστασης και την αξιοπιστία του εξοπλισμού της. (9).

### 3.2 ΤΥΜΠΑΝΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ (COILED TUBING REEL)

Το τύμπανο περιέλιξης σε μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα (coiled tubing reel) (Εικόνα 3.4) είναι μια μεταλλική κυλινδρική κατασκευή, γύρω από τον πυρήνα της οποίας περιελίσσεται ο σωλήνας. Από τη μια πλευρά ο πυρήνας αυτός θα πρέπει να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη διάμετρο, ώστε να αποφεύγεται η έντονη κάμψη του σωλήνα, αλλά ταυτοχρόνως πρέπει να διαθέτει διαχειρίσιμες διαστάσεις ώστε να μεταφέρεται εύκολα. Η διάμετρος του πυρήνα του τυμπάνου περιέλιξης είναι συνήθως μεταξύ 60 και 72 in (για σωλήνα 1 ¼ in).

Η βασική λειτουργία που επιτελεί είναι η αποθήκευση και μεταφορά του σωλήνα. Παράλληλα επιτρέπει την είσοδο ρευστών εντός του σωλήνα, καθώς αυτό περιστρέφεται, τόσο κατά την προώθηση του σωλήνα εντός της γεώτρησης, όσο και κατά την ανάκτησή του από αυτή.

Αυτό επιτυγχάνεται καθώς το άκρο του σωλήνα που βρίσκεται στην επιφάνεια, είναι συνδεδεμένο, μέσω μιας κοιλότητας στο τύμπανο, με έναν υψηλής πίεσης στρεπτό σύνδεσμο (high pressure rotating joint/reel swivel) ο οποίος είναι τοποθετημένος στον άξονα του τυμπάνου περιέλιξης. Ο σύνδεσμος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με ένα σταθερό σύστημα σωληνώσεων το οποίο τροφοδοτείται από αντλία ρευστών (pumping system).

Η κίνηση στο τύμπανο περιέλιξης μεταδίδεται μέσω υδραυλικού κινητήρα (hydraulic motor) τοποθετημένου στον άξονα του τυμπάνου, ο οποίος ελέγχεται από το θάλαμο ελέγχου (control cabin). Ο κινητήρας χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της απαιτούμενης συνεχούς τάνυσης του σωλήνα, σε όλο το τμήμα που ορίζεται από την κεφαλή προώθησης έως το τύμπανο για λόγους ασφαλείας και σταθερότητας ολόκληρης της μονάδας περιελιγμένου σωλήνα. Κατά την προώθηση του σωλήνα μέσα στη γεώτρηση, για την εξασφάλιση της τάνυσης αυτής, είναι απαραίτητη η άσκηση μικρής αντίθετης δύναμης (back pressure), ενώ κατά την ανάκτηση του σωλήνα η δύναμη αυτή αυξάνεται ώστε να συγχρονιστεί η

περιστροφή του τυμπάνου περιέλιξης με τον ρυθμό ανάκτησης της κεφαλής προώθησης (injector head).



**Εικόνα 3.4 : Τύμπανο περιέλιξης (Coiled Tubing Reel) (13)**

Για τη βελτίωση της ασφάλειας της μονάδας περιελιγμένου σωλήνα κάθε τύμπανο περιέλιξης είναι εξοπλισμένο με υδραυλικά φρένα. Ο πρωταρχικός τους σκοπός είναι να επιβραδύνουν την περιστροφή του τυμπάνου περιέλιξης σε περίπτωση ατυχήματος, όταν ο σωλήνας κοπεί στο τμήμα μεταξύ κεφαλής προώθησης και τυμπάνου, και όχι να το σταματήσουν ακαριαία. (9).

### **3.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΥΜΠΑΝΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ**

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του τυμπάνου περιέλιξης μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα εκφράζεται συνήθως σε συνολικό μήκος σε πόδια (ft) σωλήνα που μπορεί να περιελιχθεί γύρω από αυτό. Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος αυτό, ενώ εξ ίσου σημαντικά είναι διάφορα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του τυμπάνου περιέλιξης. Συγκεκριμένα, για τον πρόχειρο υπολογισμό του μέγιστου μήκους (L) χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι στον τύπο της Εικόνας 3.5 :

- Η απόσταση μεταξύ των πλευρικών επιφανειών του μεταλλικού σκελετού που εγκλείουν τον περιελιγμένο σωλήνα (B).

- Η διάμετρος του πυρήνα (core) του τύμπανου περιέλιξης πάνω στον οποίο περιελίσσεται ο σωλήνας (C).
- Το ύψος μεταξύ της επιφάνειας του πυρήνα και του επιπέδου που ορίζουν τα πλευρικά μεταλλικά όρια του σκελετού (A).
- Η μεταβλητή K που εξαρτάται από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα (K).

$$L = (A+C) \times A \times B \times K$$

L = tubing capacity (ft)

A = tubing stack height (in.)

B = width between flanges (in.)

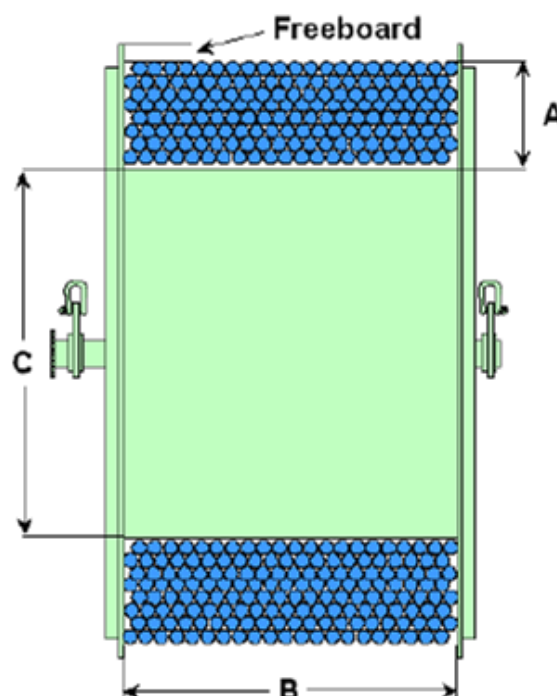
C = reel drum core diameter (in.)

K = K value for different tubing sizes (ft/in<sup>3</sup>) (see below)

K values for different tubing sizes are:

Tubing OD (in.)	K value (ft/in <sup>3</sup> )
1	0.262
1¼	0.168
1½	0.116
1¾	0.086
2	0.066
2¼	0.050
2½	0.032
3½	0.021

**CT Power Pack**



Εικόνα 3.5 : Υπολογισμός μέγιστου μήκους σωλήνα που μπορεί να φέρει το τύμπανο περιέλιξης σε μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα. Η μεταβλητή K λαμβάνει τιμές ανάλογα με την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα. (14)

### 3.3 ΤΟΞΟ ΟΔΗΓΗΣΗΣ (GOOSE NECK)

Το τόξο οδήγησης (Εικόνα 3.6) είναι ένα μεταλλικό σύστημα οδήγησης του σωλήνα από το τύμπανο περιέλιξης στην κεφαλή προώθησης, εξοπλισμένο με μικρούς κυλίνδρους (rollers) οι οποίοι επιτρέπουν την ελεγχόμενη και ανεμπόδιση κίνηση του σωλήνα πάνω σε αυτό. Η παρουσία του τόξου είναι απαραίτητη καθώς είναι ο συνδετικός κρίκος του εξοπλισμού ο οποίος επιτρέπει στον περιελιγμένο σωλήνα να εισέλθει στην κεφαλή προώθησης με την κατάλληλη κλίση, ώστε να προωθηθεί, εν συνεχεία, από αυτήν κατακόρυφα στη γεώτρηση.

Το κύριο τεχνικό χαρακτηριστικό του τόξου οδήγησης είναι η ακτίνα κάμψης (bend radius) του σωλήνα, η οποία είναι συνήθως όμοια με την αντίστοιχη του τυμπάνου περιέλιξης, δηλαδή για σωλήνα 1 ¼ in, η ακτίνα κάμψης θα είναι 60 – 72 in. (9) Όπως και στο τύμπανο περιέλιξης, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα κάμψης, τόσο λιγότερη η κόπωση που υπόκειται ο σωλήνας, άρα προτιμούνται τόξα με μεγάλες διαστάσεις, τα οποία είναι αναδιπλούμενα ώστε να μεταφέρονται εύκολα (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.6 : Τόξο οδήγησης εγκατεστημένο πάνω από κεφαλή προώθησης (αριστερά). (15)  
Εικόνα 3.7 : Τόξο οδήγησης σε θέση αναδίπλωσης (δεξιά). (16)

### 3.4 ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (POWER PACK)

Οι μονάδες παροχής ισχύος (Εικόνα 3.8) παρέχουν το σύνολο της υδραυλικής ισχύος που απαιτείται στις μονάδες περιελιγμένου σωλήνα και είναι διαμορφωμένες ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των συνθηκών λειτουργίας. Κατά κύριο λόγο, είναι συστήματα με αντλίες υδραυλικής πίεσης (hydraulic-pressure pump systems), εξοπλισμένα κατά κανόνα με κινητήρα ντίζελ, με ελάχιστες εξαιρέσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται ηλεκτροκινητήρες.

Τα υδραυλικά συστήματα αυτά είναι κυκλώματα "ανοικτού βρόχου", στα οποία το υγρό εκτονώνεται από τον καθορισμένο κινητήρα και επιστρέφει στο δοχείο υδραυλικού λαδιού σε ατμοσφαιρική πίεση (the fluid is discharged from the prescribed motor and returned to the hydraulic oil reservoir at atmospheric pressure). Γενικά, οι μονάδες παροχής ισχύος ανοικτού βρόχου είναι εξοπλισμένες με υδραυλικές αντλίες τύπου "πτερυγίων" (vane-type hydraulic pumps) και είναι κατάλληλες για έως 3.000 psig μέγιστη πίεση λειτουργίας στο υδραυλικό κύκλωμα. Οι αντλίες σε αυτές τις μονάδες παρέχουν (17) :

- Μεγάλου όγκου – χαμηλής πίεσης υδραυλικό υγρό για το δυναμικό εξοπλισμό.
  - Κεφαλή προώθησης.
  - Τύμπανο περιέλιξης.
- Μικρού όγκου – υψηλής πίεσης υδραυλικό υγρό για το στατικό εξοπλισμό.
  - Στήλη συσσωρευτών εξοπλισμού ελέγχου πηγαδιού (well-control stack accumulators) στις διατάξεις αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP's).
  - Θάλαμος ελέγχου (Control cabin) (10).



Εικόνα 3.8 : Τυπική υδραυλική μονάδα παροχής ισχύος με κινητήρα ντίζελ (hydraulic power-drive unit) (18)

### 3.5 ΘΑΛΑΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL CABIN)

Ο θάλαμος ελέγχου (Εικόνα 3.9) στεγάζει το χειριστή (operator) και την κεντρική κονσόλα (control console) (Εικόνες 3.10, 3.11) που περιλαμβάνει όλα τα συστήματα ελέγχου της κεφαλής προώθησης, του τυμπάνου περιέλιξης καθώς και διάφορους μετρητές (gauges) ελέγχου πίεσης, βάθους κ.α. Κατά κανόνα είναι τοποθετημένη ακριβώς πίσω από το τύμπανο περιέλιξης και σε ύψος, για καλύτερο οπτικό έλεγχο όλων των διεργασιών από το χειριστή, κυρίως της περιέλιξης του σωλήνα γύρω από το τύμπανο. (10).



Εικόνα 3.9 : Θάλαμος ελέγχου μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (19)

Ο σχεδιασμός της κονσόλας ελέγχου διαφέρει, όπως είναι αναμενόμενο, ανάλογα με τον κατασκευαστή, ωστόσο όλα τα συστήματα ελέγχου και οι μετρητές είναι τοποθετημένα σε ένα αποσπώμενο πλαίσιο-κονσόλα (remote console panel). Το τύμπανο περιέλιξης και οι κινητήρες της κεφαλής προώθησης (υδραυλικά κινούμενες αλυσίδες, υδραυλικά πιστόνια) ενεργοποιούνται από τον πίνακα ελέγχου μέσω βαλβίδων που καθορίζουν την κατεύθυνση της κίνησης του σωλήνα και την ταχύτητα λειτουργίας. Επίσης, στην κονσόλα είναι εγκατεστημένα συστήματα ελέγχου που ρυθμίζουν την πίεση στον κινητήρα του τυμπάνου περιέλιξης, την υδραυλική πίεση στη διάταξη του κυλίνδρου σφράγισης (stripper), την πίεση του κινητήρα της κεφαλής προώθησης, καθώς και μετρητές (gauges) πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead pressure) και του κυκλοφορούντος ρευστού (circulating pressure). (20).

Η ένδειξη του φορτίου στην κονσόλα ελέγχου είναι από τους σημαντικότερους δείκτες που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα. Ως φορτίο (load) ορίζεται ως η εφελκυστική ή θλιπτική δύναμη στο σωλήνα, ακριβώς πάνω από τη διάταξη του stripper, το οποίο εκτός από το ίδιο βάρος του αναρτώμενου σωλήνα (hang weight) επηρεάζεται και από τους εξής παράγοντες :

- Πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης.
- Τριβή στη διάταξη του κυλίνδρου σφράγισης (stripper).

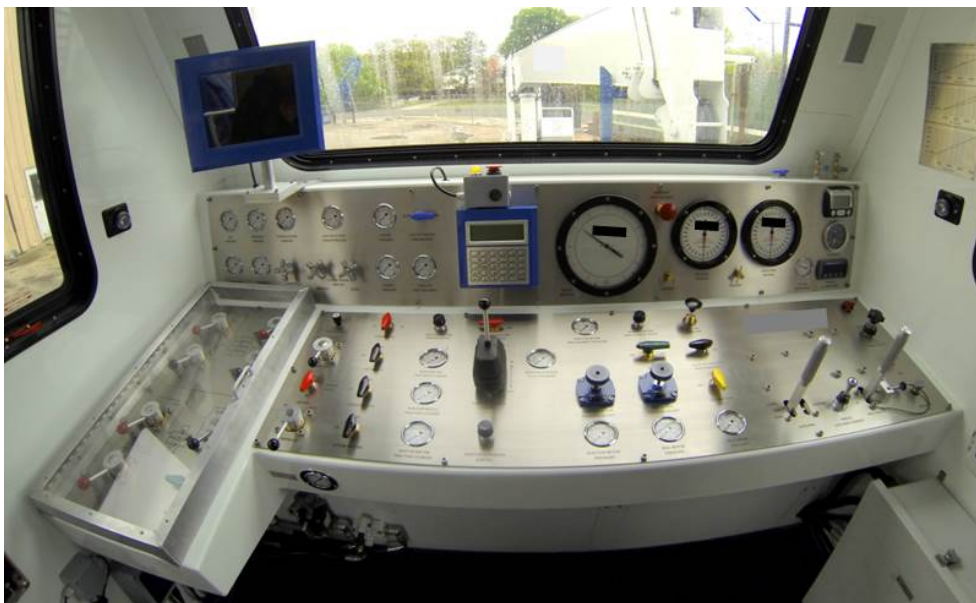
- Αντίθετη δύναμη που ασκεί το τύμπανο περιέλιξης (reel back tension).
- Πυκνότητα ρευστών εντός και εκτός της σωλήνωσης.

Το φορτίο θα πρέπει να μετράται απευθείας χρησιμοποιώντας ένα κελί φορτίου (load cell) το οποίο μετρά τις εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις που ασκεί στο σωλήνα η κεφαλή προώθησης, ενώ μπορεί να υπολογιστεί και εμμέσως μετρώντας την υδραυλική πίεση στους κινητήρες της κεφαλής προώθησης, όπου η καθορισμένη αναλογία υδραυλικής πίεσης προς φορτίο είναι γνωστή. (20).

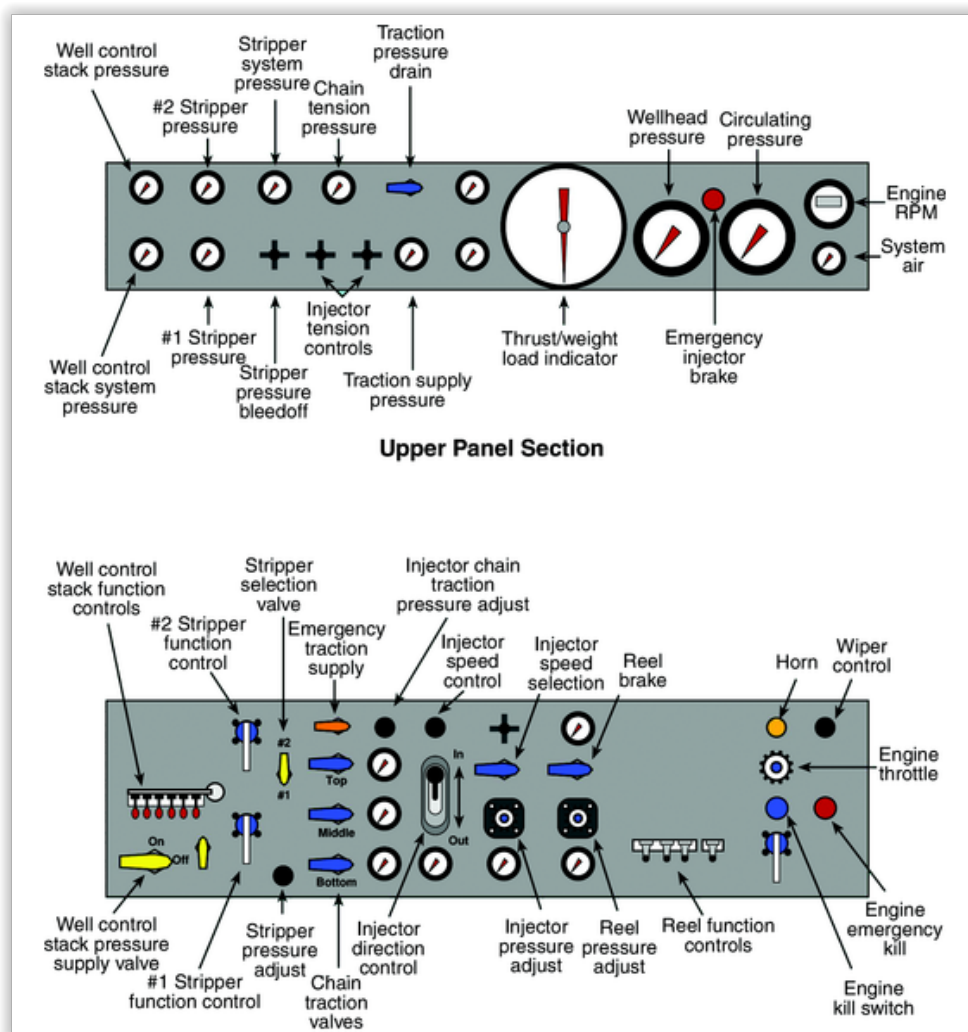
Μια ακόμη σημαντική ένδειξη είναι το μετρούμενο βάθος, δηλαδή το μήκος του σωλήνα που έχει διέλθει μέσα από την κεφαλή προώθησης. Ωστόσο, το μετρούμενο βάθος μπορεί να διαφέρει σημαντικά σε σχέση με το πραγματικό βάθος στο οποίο βρίσκεται ο σωλήνα εντός της γεώτρησης λόγω :

- “Τεντώματος” (stretch).
- Θερμικής διαστολής (thermal expansion).
- Μηχανικής επιμήκυνσης (mechanical elongation).

Το μετρούμενο βάθος ως ένδειξη είναι συνήθως εμφανές σε διάφορα σημεία μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα, χρησιμοποιώντας έναν απλό μηχανισμό που περιλαμβάνει ένα τροχό ο οποίος βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το σωλήνα, ενώ μπορεί να υπολογιστεί και έμμεσα μετρώντας τον αριθμό των περιστροφών των αλυσίδων της κεφαλής προώθησης. Η ένδειξη του βάθους πρέπει να είναι συνεχώς εμφανής στο χειριστή της μονάδας, ενώ είναι απαραίτητη και η καταγραφή της ως συνάρτηση του χρόνου και σε σχέση με την πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα για τον υπολογισμό των κύκλων κόπωσης σε κάμψη. (20).



Εικόνα 3.10 : Τυπική κονσόλα ελέγχου (21)



Εικόνα 3.11 : Απλοποιημένη διάταξη κονσόλας ελέγχου μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (20)

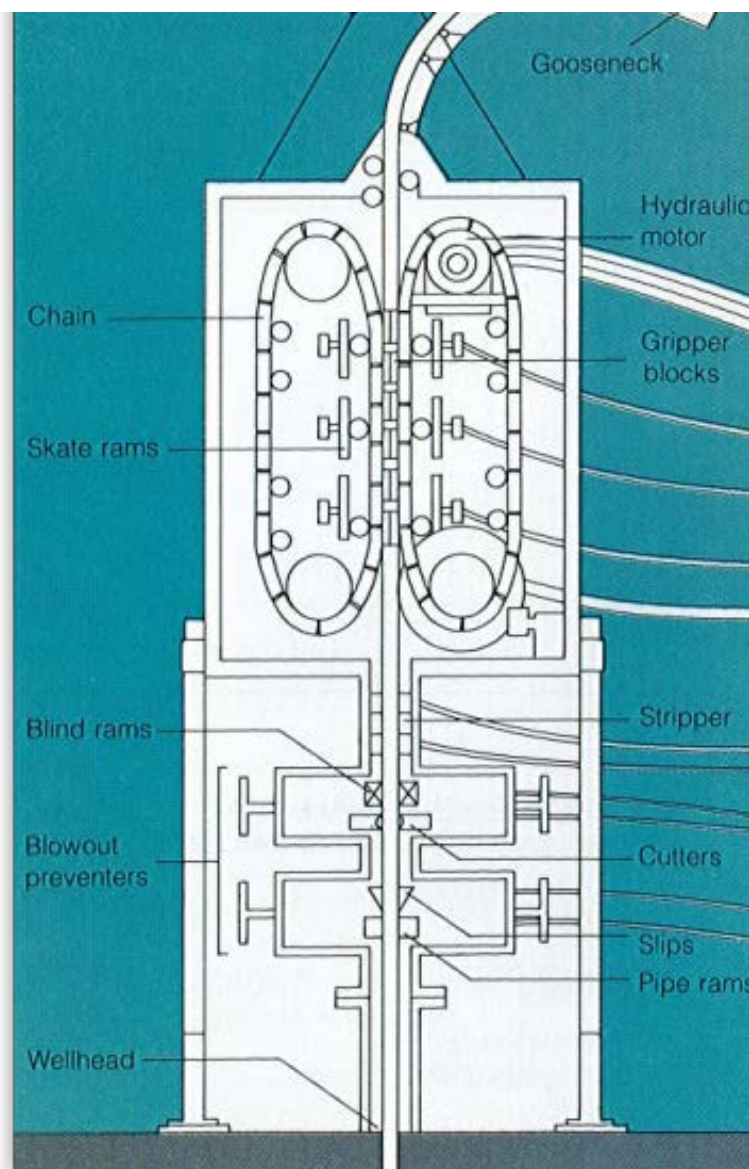
### 3.6 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΕΩΝ (PRESSURE CONTROL EQUIPMENT, PCE)

Η πλειοψηφία των εφαρμογών του περιελιγμένου σωλήνα πραγματοποιούνται παρουσία των επιτόπου συνθηκών (πίεση) που επικρατούν εντός της γεώτρησης (live well operation). Αυτό σημαίνει πως δεν είναι αναγκαία η παρουσία κυκλοφορούσας λάσπης εξισορρόπηση πίεσης (kill – weight mud / kill fluids) προκαλώντας, έτσι, την παρουσία υψηλής πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης (surface wellhead pressure). Οι λόγοι που οι εταιρίες Coiled Tubing προτιμούν τις εφαρμογές παρουσία επιτόπου συνθηκών (πίεση) που επικρατούν εντός της γεώτρησης είναι κυρίως οικονομικοί, καθώς το κόστος των ρευστών εξισορρόπησης είναι πολύ υψηλό, ενώ επιπλέον έχει αποδειχθεί στην πράξη πως τα ρευστά αυτά λειτουργούν κατασταλτικά στην αύξηση της παραγωγής των γεωτρήσεων και ταυτόχρονα είναι βλαβερά για το σχηματισμό. Το τμήμα, εκείνο, του εξοπλισμού που κάνει δυνατή την πραγματοποίηση εργασιών σε “ζωντανές”



γεωτρήσεις, και κάνει την τεχνική να διαφέρει από άλλες τεχνικές επισκευαστικών εργασιών (workover units), είναι ο εξοπλισμός ελέγχου πιέσεων.

Ένας τυπικός εξοπλισμός ελέγχου πιέσεων (Εικόνα 3.12) αποτελείται από ένα τετραπλό (Quad Ram) BOP οκτώ εμβόλων και από ένα κύλινδρο σφράγισης (stripper / stuffing box / packer), ενώ για μονάδες Coiled Tubing υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται, συνήθως, δύο strippers, και BOP's με περισσότερα έμβολα.

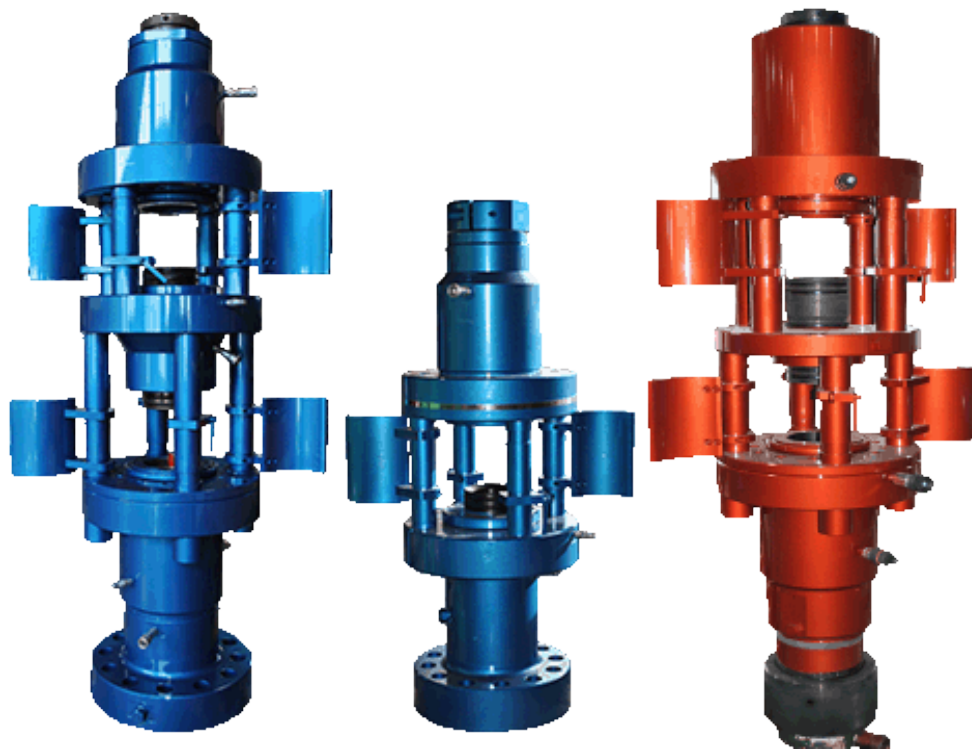


Εικόνα 3.12 : Τυπική διάταξη εξοπλισμού ελέγχου πιέσεων κάτω από κεφαλή προώθησης (22)

### 3.6.1 ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΣΦΡΑΓΙΣΗΣ (STRIPPER)

Ο κύλινδρος σφράγισης (Εικόνα 3.13) είναι ένας μεταλλικός μηχανισμός, τοποθετημένος ακριβώς κάτω από την κεφαλή προώθησης, ο ρόλος του οποίου είναι η στεγανοποίηση-σφράγιση (sealing) της γεώτρησης, δηλαδή η απομόνωση των υπό πίεση ρευστών της από την ατμόσφαιρα, είτε ο σωλήνας κινείται εντός

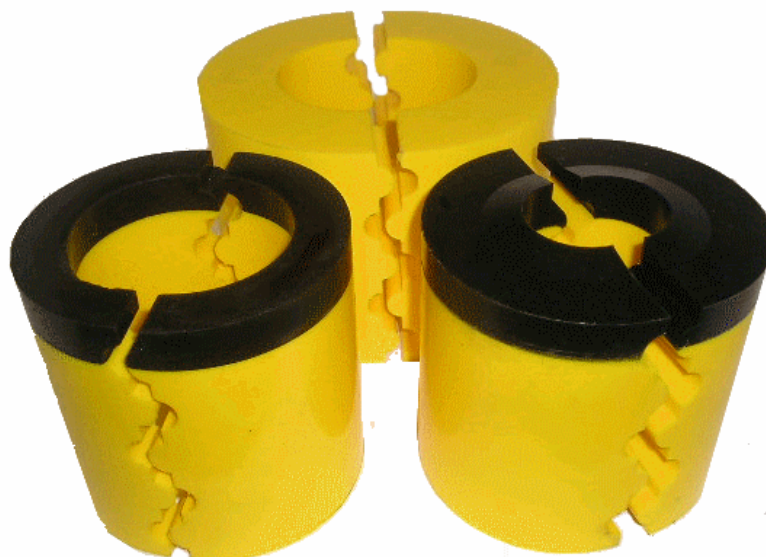
της γεώτρησης είτε είναι στάσιμος. Το εύρος λειτουργίας του μηχανισμού κυμαίνεται μεταξύ 5.000 και 15.000 psi.



**Εικόνα 3.13 : Τυπικά παραδείγματα διαφόρων τύπων κυλίνδρων σφράγισης (23)**

Στο εσωτερικό του κυλίνδρου, δύο κοίλα μπρούτζινα στοιχεία, στο άνω και το κάτω μέρος του, συγκρατούν ένα κυλινδρικό ελαστομερές (γόμα). Ο σωλήνας περνά διαμέσου των μπρούτζινων στοιχείων και της γόμας για να καταλήξει στη διάταξη του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (BOP) και από κει στο εσωτερικό της γεώτρησης. Η αντικατάσταση των μεταλλικών στοιχείων αυτών είναι απαραίτητη τόσο όταν χρησιμοποιείται νέος σωλήνας διαφορετικής διαμέτρου, όσο και ύστερα από εκτεταμένη χρήση, καθώς με την επαφή τους με το σωλήνα φθείρονται, χωρίς ωστόσο να φθείρουν τον ίδιο το σωλήνα.

Στο μέσο του κυλίνδρου βρίσκεται το ελαστομερές (stripper rubber) (Εικόνα 3.14) το οποίο πιέζεται υδραυλικά γύρω από το σωλήνα, δημιουργώντας έτσι την απαιτούμενη σφράγιση του (seal). Η υδραυλική αυτή δύναμη προέρχεται από τη μονάδα παροχής ισχύος (power rack), ωστόσο οι μονάδες coiled tubing είναι πάντοτε εξοπλισμένες με συστήματα εκτάκτου ανάγκης για την εξασφάλιση συνεχούς ελέγχου του μηχανισμού σφράγισης ακόμα και σε περίπτωση βλάβης. Όπως και το μπρούτζινο στοιχείο του κυλίνδρου σφράγισης, έτσι και κάθε γόμα είναι κατάλληλη για συγκεκριμένη διάμετρο σωλήνα και πρέπει να αντικαθίσταται καθώς φθείρεται από τη συνεχή τριβή της με το σωλήνα. Η αντικατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα ακόμα και όταν ο σωλήνας βρίσκεται εντός της γεώτρησης, απλώς κλείνοντας το BOP και αφαιρώντας έτσι την πίεση της γεώτρησης.



**Εικόνα 3.14 : Ελαστομερή - γόμες (stripper rubbers) διαφόρων μεγεθών από το εσωτερικό κυλίνδρων σφράγισης (24)**

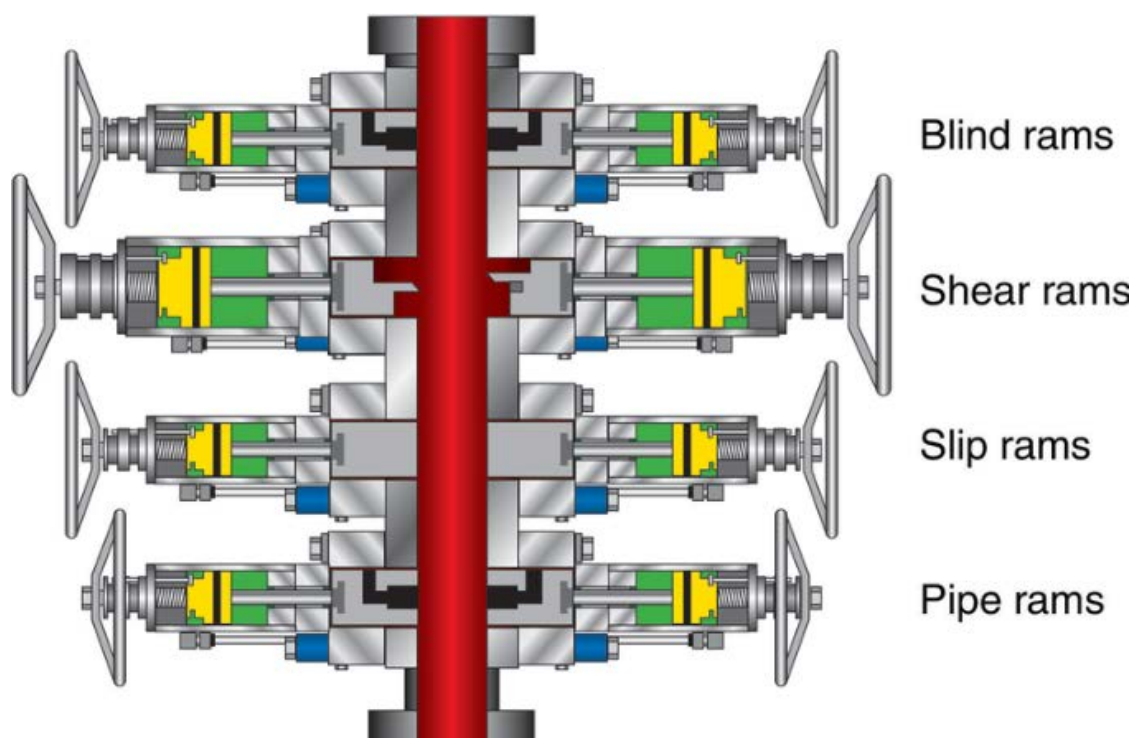
Ο κύλινδρος σφράγισης βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στους άρπαγες συγκράτησης (gripper blocks), καθώς με τον τρόπο αυτό ευθυγραμμίζεται η κεφαλή προώθησης με τη διάταξη του BOP και ταυτόχρονα εμποδίζεται ο λυγισμός του σωλήνα από τις θλιπτικές δυνάμεις στο σημείο αυτό. (10).

### **3.6.2 ΑΝΤΙΕΚΡΗΚΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (BLOW OUT PREVENTER – BOP)**

Τα BOP's που χρησιμοποιούνται στις μονάδες περιελιγμένου σωλήνα είναι κατάλληλα σχεδιασμένα για τις εργασίες που επιτελούν και, τυπικά, απαρτίζονται από 4 σετ υδραυλικών εμβόλων, με τις ελάχιστες απαιτήσεις πίεσης λειτουργίας να ξεκινούν από τα 10.000 psi. Η διάταξη του BOP (Εικόνα 3.15) βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον κύλινδρο σφράγισης, και μαζί συνθέτουν τον εξοπλισμό ελέγχου πιέσεων μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα. (9).

Κατά σειρά, από πάνω προς τα κάτω, σε μια διάταξη BOP εντοπίζουμε τα:

- έμβολα σφράγισης (blind rams),
- έμβολα κοπής (tubing shear rams),
- έμβολα συγκράτησης (slip rams),
- έμβολα απομόνωσης πίεσης (pipe rams).



**Εικόνα 3.15 : Τυπική διάταξη αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (Quad Ram BOP) (25)**

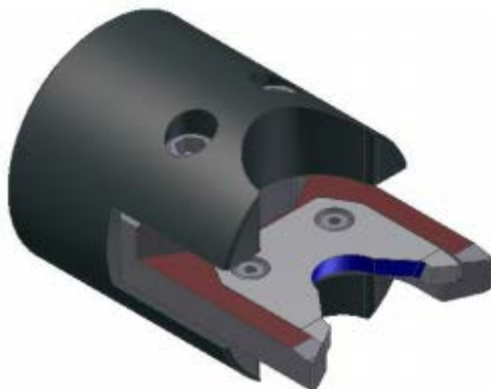
Τα έμβολα σφράγισης (Εικόνα 3.16) χρησιμοποιούνται για να σφραγίσουν τη γεώτρηση στην επιφάνεια όταν ο έλεγχος των πιέσεων στο εσωτερικό της έχει χαθεί. Η σφράγιση πραγματοποιείται όταν τα ελαστομερή (ελαστικά) στοιχεία στα άκρα των εμβόλων συμπιέζονται μεταξύ τους, αφού πρώτα ο σωλήνας ή οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο μεταξύ των εμβόλων έχει αφαιρεθεί. (9).



**Εικόνα 3.16 : Έμβολο σφράγισης (blind ram) με ελαστομερές στοιχείο στο άκρο του. (26)**

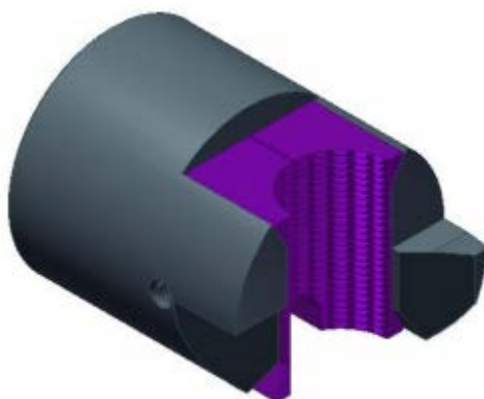
Τα έμβολα κοπής (Εικόνα 3.17) χρησιμοποιούνται για τον τεμαχισμό του σωλήνα σε δύο μέρη σε περίπτωση εγκλωβισμού του εντός της γεώτρησης ή όταν υπάρξει ανάγκη για γρήγορη απομάκρυνση του επιφανειακού εξοπλισμού της μονάδας. Ο τεμαχισμός αυτός πραγματοποιείται όχι με την κοπή αλλά με τη μηχανική παραμόρφωση του σωλήνα έως την αστοχία του. Για το λόγο αυτό ο όρος «κοπή» (cutting), αν και χρησιμοποιείται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία, είναι αδόκιμος. Οι κατασκευαστές των εμβόλων κοπής εγγυούνται

μόνο μια κοπή, ωστόσο είναι αποδεδειγμένη η έως και 30 φορές επιτυχής κοπή με το ίδιο σετ εμβόλων.



**Εικόνα 3.17 :** Έμβολο κοπής (shear ram). (26)

Τα έμβολα συγκράτησης (Εικόνα 3.18) είναι εξοπλισμένα με οδόντες μονής κατεύθυνσης ώστε, όταν ενεργοποιούνται, να συγκρατούν όλο το βάρος του σωλήνα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη συγκράτηση του σωλήνα σε περίπτωση πολύ υψηλής πίεσης γεώτρησης, η οποία είναι δυνατόν να παρασύρει το σωλήνα έξω από αυτήν.



**Εικόνα 3.18 :** Έμβολο συγκράτησης (slip ram) με συνεχείς οδόντες μονής κατεύθυνσης. (26)

Τα έμβολα απομόνωσης πίεσης (Εικόνα 3.19) διαφέρουν από τα έμβολα σφράγισης καθώς, σφραγίζουν μόνο το δακτύλιο μεταξύ της παραγωγικής σωλήνωσης (production casing) ή των τοιχωμάτων της γεώτρησης και του σωλήνα της μονάδας Coiled Tubing, και όχι ολόκληρη τη γεώτρηση. (22).

Όπως και τα έμβολα σφράγισης, διαθέτουν ελαστομερή στοιχεία τα οποία, όμως, δεν συμπιέζονται μεταξύ τους, αλλά εφαρμόζουν γύρω από το σωλήνα. Για την πλήρη και σωστή σφράγιση του δακτυλίου απαιτείται οι υποδοχές στα έμβολα απομόνωσης πίεσης να είναι οι κατάλληλες για τη συγκεκριμένη εξωτερική διάμετρο του σωλήνα που χρησιμοποιείται. (9).



Εικόνα 3.19 : Έμβολο απομόνωσης πίεσης (pipe ram). (26)

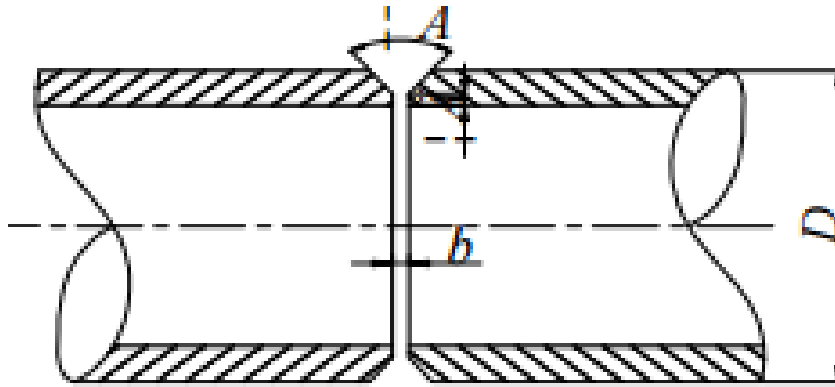
### 3.7 ΣΩΛΗΝΑΣ (TUBING)

Το σημαντικότερο και αναπόσπαστο τμήμα του εξοπλισμού μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα, είναι ο ίδιος ο σωλήνας. Πρόκειται για έναν χαλύβδινο, συνεχή σωλήνα, μικρού σχετικά πάχους τοιχωμάτων ο οποίος δεν περιστρέφεται σε κανένα στάδιο λειτουργίας της μονάδας.

Με την πάροδο των χρόνων, τόσο τα υλικά όσο και ο τρόπος κατασκευής του σωλήνα έχουν αλλάξει ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις υψηλές απαιτήσεις λειτουργίας που περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, υψηλές πιέσεις, διαβρωτικά ρευστά και συνεχείς κύκλους φόρτισης. Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών άλλαξε τον περιελιγμένο σωλήνα, από τους μικρού μήκους σωλήνες από συμβατικό κοινό ανθρακούχο χάλυβα, οι οποίοι συγκολλούνταν μεταξύ τους με τη μέθοδο “butt-welding” για να συνθέσουν ένα μεγαλύτερο σωλήνα, στους σύγχρονους υψηλής αντοχής (έως και 770 MPa) χαμηλής κραμάτωσης χαμηλού άνθρακα σωλήνες (high strength – low alloy / HSLA), μήκους αρκετών εκατοντάδων μέτρων. (27).

Τα σύγχρονα κράματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σωλήνων έχουν πολύ μικρή περιεκτικότητα σε θείο, καθιστώντας τους, έτσι, λιγότερο ευαίσθητους στο υδρόθειο ( $H_2S$ ), ενώ για την επίτευξη μεγαλύτερης ευλυγισίας προστίθενται χρώμιο, χαλκός και νικέλιο. (22).

Σύμφωνα με το Λεξικό της Schlumberger, ο όρος “butt weld” (Εικόνα 3.20) αναφέρεται στην τεχνική συγκόλλησης κατά την οποία τα κομμένα κάθετα και λειασμένα άκρα δύο σωλήνων τοποθετούνται σε επαφή το ένα με το άλλο ώστε να συγκολληθούν. Η προκύπτουσα περιμετρική συγκόλληση διαθέτει σχετικά καλά χαρακτηριστικά αντοχής αλλά έχει περιορισμούς εκεί όπου ο σωλήνας πρόκειται να παραμορφωθεί πλαστικά ή να λυγίσει. (28).



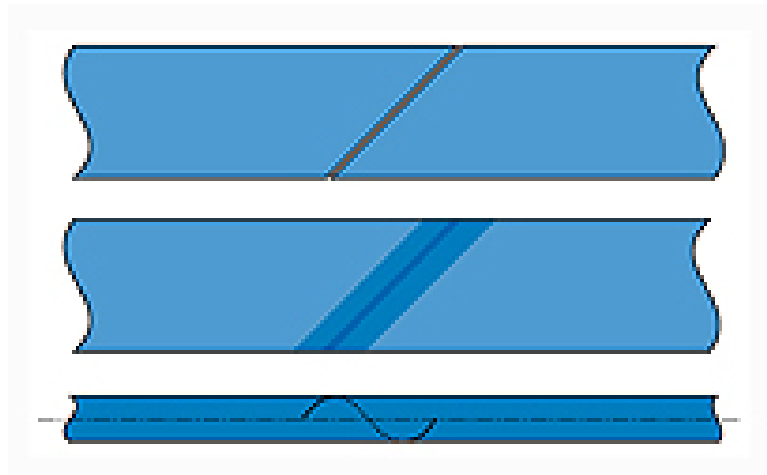
## Fig.1 Butt welding groove

Εικόνα 3.20 : Το αυλάκι (groove) που δημιουργείται στην επαφή δύο σωλήνων μετά τη συγκόλλησή τους με τη μέθοδο butt weld. (27)

Η μειωμένη διάρκεια ζωής των σωλήνων λόγω των αδύναμων συγκολλήσεων οδήγησε στην αντικατάσταση της μεθόδου αυτής από τη λεγόμενη “διαγώνια συγκόλληση” (bias weld).

Προτού σχηματιστούν, οι σωλήνες έχουν τη μορφή λεπτών επιμηκών φυλλαρίων. Το πλάτος τους μπορεί να φτάνει τις 55 in και το βάρος τους να ξεπερνά τους 24 tn, ενώ το μήκος τους εξαρτάται από το πάχος και κυμαίνεται μεταξύ 3.500 ft για 0,087 in έως 1.000 ft για 0,250 in. (15).

Η διαφορά της μεθόδου bias weld σε σχέση με τη μέθοδο butt weld έγκειται στο ότι η συγκόλληση πραγματοποιείται στο πρωταρχικό αυτό στάδιο, και όχι αφού έχουν σχηματιστεί (milled) οι σωλήνες. Τα χαλύβδινα φύλλα, αφού πρώτα έχουν κοπεί κατάλληλα, δηλαδή υπό γωνία (“bias”)  $45^\circ$ , συγκολλούνται μεταξύ τους (Εικόνα 3.21). Για το λόγο αυτό οι συγκολλήσεις αυτές ονομάζονται “bias” ή αλλιώς “CM”, δηλαδή Continuously Milled. Η διαγώνια αυτή κοπή οδηγεί στο να κατανέμεται η συγκόλληση ελικοειδώς κατά μήκος του άξονα του σωλήνα, αυξάνοντας έτσι την αξονική αντοχή της. (29).



Εικόνα 3.21 : Διαγώνια συγκόλληση (bias weld) πριν και μετά το σχηματισμό του σωλήνα. (30)

Ειδικές συνθήκες, ωστόσο, μπορεί να απαιτούν την ένωση δύο σωλήνων, και επομένως πρέπει να χρησιμοποιηθούν συγκολλήσεις τύπου butt weld, οι οποίες θα καθορίζουν, πλέον, την αναμενόμενη διάρκεια ζωής όλου του σωλήνα.

### 3.8 ΤΥΠΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

Τα πιο κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά του σωλήνα και οι ορθές/συνήθεις πρακτικές λειτουργίας των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα παρουσιάζονται στο πίνακα της Εικόνας 3.22) (22) :

- Συνήθη μεγέθη σωλήνα (εξωτερική διάμετρος – OD) :
  - 1 ¼ in (31,8mm),
  - 1 ½ in (38,1mm),
  - 1 in (25,4mm).
- Μέγιστο μήκος σωλήνα στο τύμπανο περιέλιξης :
  - 19.000ft (5.800m) για σωλήνα 1 ¼ in (OD),
  - 13.000ft (4.000m) για σωλήνα 1 ½ in (OD).
- Ταχύτητα εισόδου – εξόδου σωλήνα από τη γεώτρηση :
  - 60-100 ft/min (18-30 m/min),
  - Μέγιστη δυνατή ταχύτητα 240 ft/min (73 m/min).
- Εμπειρικό όριο ζωής σωλήνα :
  - 300.000ft (91.000m) συνολικό μήκος λειτουργίας,
  - 200.000ft (61.000m) συνολικό μήκος λειτουργίας που περιλαμβάνει εισπίεση διαβρωτικών ενεργοποιητικών ρευστών.
- Μέγιστος ρυθμός εισπίεσης ρευστών στη γεώτρηση :
  - 0,16 m<sup>3</sup>/min για σωλήνα 1 ¼ in (OD),
  - 0,32 m<sup>3</sup>/min για σωλήνα 1 ½ in (OD).



Coiled Tubing Specifications											
Dimensions (in)			Weight (lb/ft)	Load Capacity (lb)		Pressure Capacity (PSI)		Internal Capacity (per 1,000 ft)		Ext. Displacement (per 1,000 ft)	
OD	Wall	ID		Yield <sup>1</sup>	Ultimate <sup>1</sup>	Burst <sup>1</sup>	Collapse <sup>1</sup>	gal	bbls	gal	bbls
1 1/4	.067	1.116	.840	17,290	19,760	9,020	5,410	50.21	1.212	63.75	1.518
1 1/4	.075	1.100	.941	19,390	22,180	10,130	6,770	49.35	1.175	63.75	1.518
1 1/4	.087	1.076	1.081	22,260	25,440	11,900	8,810	47.22	1.124	63.75	1.518
1 1/4	.095	1.060	1.172	24,150	27,600	13,050	9,830	45.62	1.094	63.75	1.518
1 1/4	.109	1.032	1.328	27,370	31,280	15,180	11,140	43.48	1.035	63.75	1.518
1 1/2	.095	1.310	1.425	29,350	33,540	10,750	7,490	70.03	1.667	91.806	2.186
1 1/2	.109	1.282	1.619	33,340	38,100	12,430	9,430	67.06	1.597	91.806	2.186
1 1/2	.125	1.250	1.836	37,600	43,200	14,390	10,690	63.74	1.518	91.806	2.186
1 1/2	.134	1.232	1.955	40,250	46,000	15,500	11,390	61.92	1.474	91.806	2.186

1. Minimum values. Actual capacities will be somewhat greater.

Εικόνα 3.22 : Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων μεγεθών σωλήνων μονάδας Coiled Tubing. (22)



## 4. ΚΟΠΩΣΗ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING FATIGUE)

Σε μια τυπική λειτουργία μονάδας περιελιγμένου σωλήνα, ο σωλήνας υπόκειται σε συνεχείς κύκλους ανάπτυξης και ανάκτησης (deployment and retrieval), δηλαδή συνεχώς τυλίγεται και ξετυλίγεται γύρω από το τύμπανο περιέλιξης. Η συνεχής αυτή κυκλική παραμόρφωση του σωλήνα σε συνδυασμό, τόσο με τα φορτία που ασκούν τα υπό πίεση ρευστά που ρέουν στο εσωτερικό του, αλλά και η χημική διάβρωση που αυτά προκαλούν στα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα, όσο και η αξονική φόρτιση που ασκείται στο σωλήνα κατά την προώθησή του εντός της γεώτρησης, καθορίζουν την πραγματική διάρκεια ζωής του.

Για τη διασφάλιση αξιόπιστης και ασφαλούς λειτουργίας ενός σωλήνα κατά την επέμβαση σε μια γεώτρηση ή κατά την όρυξη μιας νέας, πρέπει να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο κάθε ένας από τους παραπάνω παράγοντες συμβάλλει στη διαμόρφωση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του σωλήνα μιας μονάδας Coiled Tubing.

Εντός της γεώτρησης, ο σωλήνας υπόκειται αποκλειστικά σε τάσεις που του προκαλούν ελαστική παραμόρφωση. Αυτό συμβαίνει, καθώς, για λόγους ασφαλείας, οι επεμβάσεις σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι τάσεις που θα δεχθεί ο σωλήνας να μην υπερβαίνουν το 80% του ορίου διαρροής του.

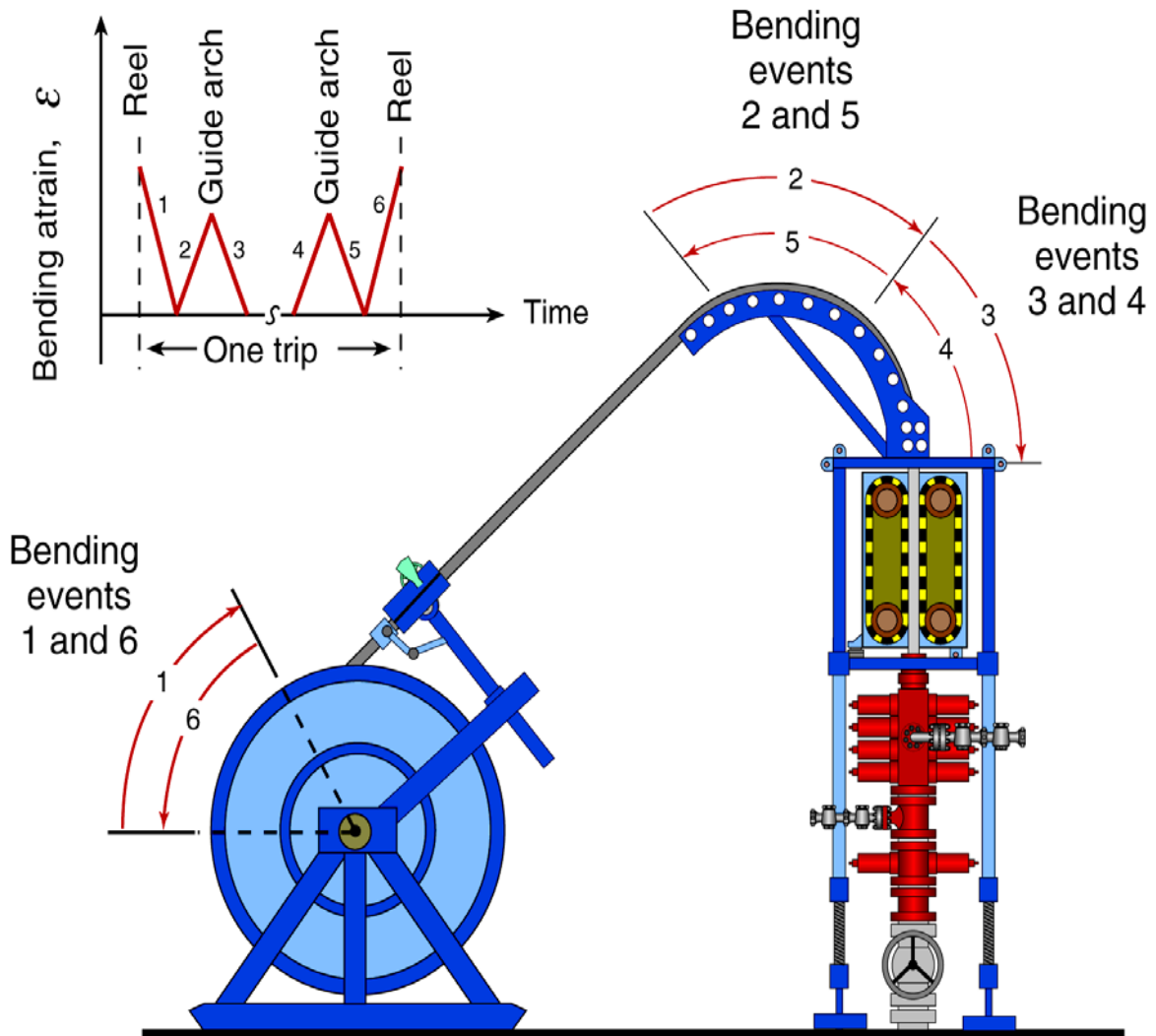
Ωστόσο, οι ισχυρότερες τάσεις στις οποίες υποβάλλεται ο σωλήνας δεν εντοπίζονται εντός της γεώτρησης, αλλά στο τύμπανο περιέλιξης και στο τόξο οδήγησης. Ερχόμενος από το τύμπανο, ο σωλήνας παραμορφώνεται πλαστικά, ξεπερνώντας το όριο διαρροής του, καθώς ευθυγραμμίζεται, (1 και 6 της Εικόνας 4.1), ενώ στη συνέχεια, καθώς κινείται πάνω στο τόξο οδήγησης (2 και 5), κάμπτεται, για να ευθυγραμμιστεί και πάλι καθώς οδεύει προς την κεφαλή προώθησης (3 και 4). Κατά τη διάρκεια εξόδου από το πηγάδι, ο σωλήνας παραμορφώνεται πλαστικά στα ίδια τρία σημεία. (15).

Το παραπάνω φαινόμενο αναφέρεται ως κυκλική κόπωση (bend-cycle fatigue), και θεωρείται από πολλούς ως ο κύριος παράγοντας για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής του σωλήνα. Ως κύκλος φόρτισης ορίζεται η ακολουθία δύο κάμψεων ίσου φορτίου. Επομένως, δεδομένου πως συνήθως η ακτίνα κάμψης στο τύμπανο περιέλιξης είναι σχετικά μικρότερη από την αντίστοιχη ακτίνα στο τόξο οδήγησης, σε κάθε πλήρη ανάπτυξη και ανάκτηση του σωλήνα λαμβάνουν χώρα δύο κύκλοι χαμηλής φόρτισης (γύρω από το τόξο οδήγησης) και ένας κύκλος υψηλής (στο τύμπανο περιέλιξης). (31).

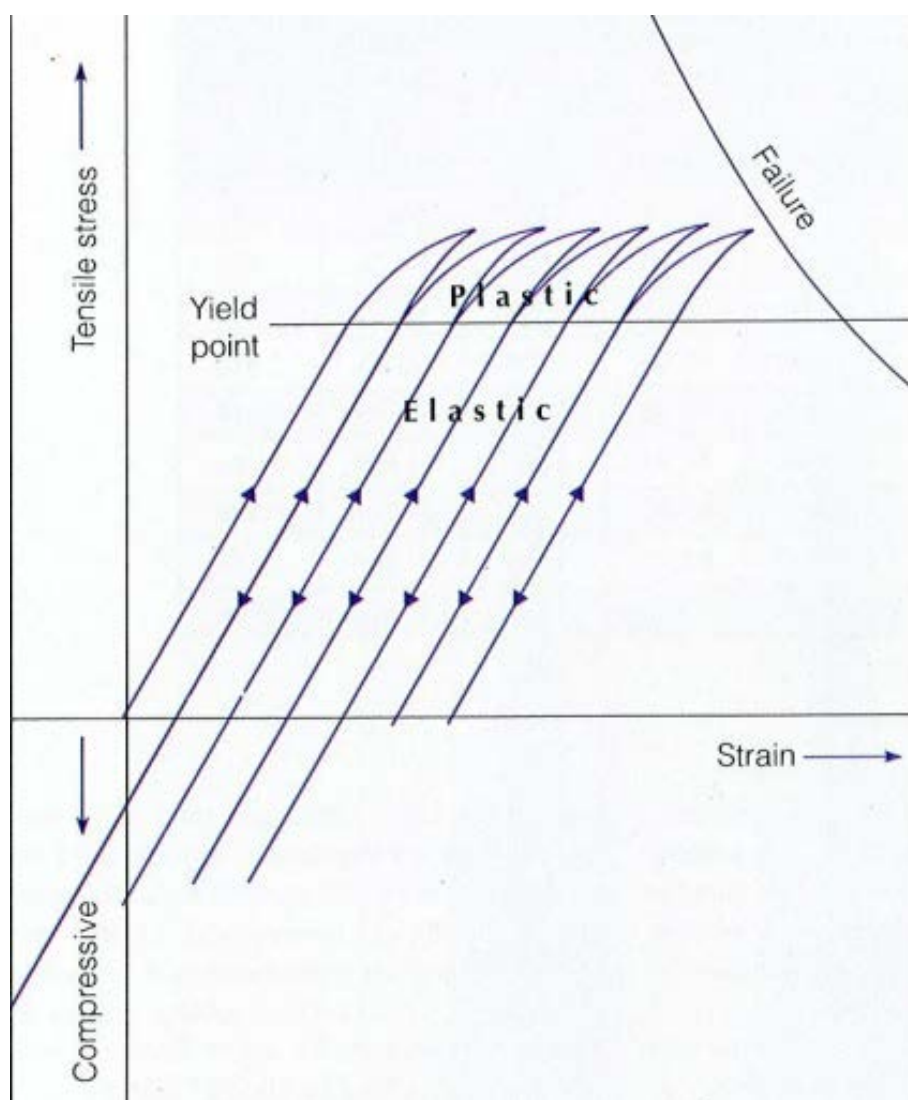
Οι τάσεις που δέχεται ο σωλήνας, αυξάνονται κατά πολύ όταν λάβει κανείς υπ' όψη και τα υπό πίεση ρευστά που ρέουν εντός του σωλήνα, μειώνοντας, έτσι,

ακόμα περισσότερο την αναμενόμενη διάρκεια λειτουργίας έως την αστοχία του. (22).

Η σχέση τάσης – παραμόρφωσης του σωλήνα κατά τη διάρκεια εισόδου και εξόδου του από μια γεώτρηση, και η εξέλιξη της πιθανής αστοχίας φαίνονται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα της Εικόνας 4.2.



Εικόνα 4.1 : Τα τρία σημεία πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα κατά τη λειτουργία μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα (coiled tubing) (31)



Εικόνα 4.2 :Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σωλήνα μονάδας Coiled Tubing κατά την περιέλιξή του εντός και εκτός της γεώτρησης (σε έντονα κεκλιμένες γεωτρήσεις οι τάσεις που δέχεται ο σωλήνας μπορεί να είναι και θλιπτικές). (22)

Κατά κανόνα, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης δεν είναι ίδιος για το σύνολο του σωλήνα. Αυτό συμβαίνει όταν, για διάφορους λόγους, ένα συγκεκριμένο τμήμα του σωλήνα κινηθεί αρκετές φορές γύρω από κάποιο εκ των τριών σημείων πλαστικής παραμόρφωσης. Μια τέτοια περίπτωση εντοπίζεται συχνά σε επεμβάσεις ρουτίνας, όπου είναι σύνηθες να διακόπτεται περιοδικά η ανάπτυξη του σωλήνα και να αντιστρέφεται η κίνησή του, ώστε να ανακτηθεί ένα τμήμα του προκειμένου να ελεγχθούν το βάρος και το μήκος του. Τα τμήματα εκείνα του σωλήνα, που κατά τη διάρκεια του ελέγχου αυτού βρίσκονταν σε κάποια από τις θέσεις πλαστικής παραμόρφωσης, είναι επόμενο πως με το πέρας της επέμβασης θα έχουν περισσότερους κύκλους φόρτισης από τα υπόλοιπα τμήματα.

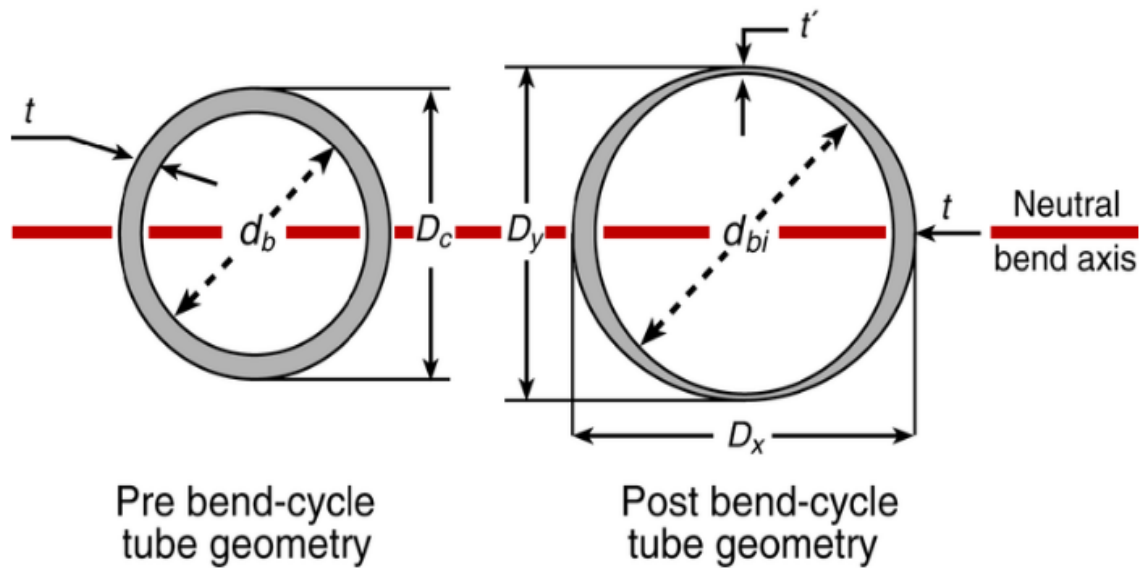
Καθώς κάποιο τμήμα του σωλήνα έχει υποστεί μεγάλη κόπωση και πλησιάζει προς την αστοχία του, μικρές ρωγμές, ή κάποιες φορές μικρές τρύπες, κάνουν την εμφάνισή τους στην περιοχή αυτή. Ξεκινώντας από τη μια πλευρά των τοιχωμάτων, και καθώς συνεχίζονται οι κύκλοι κόπωσης, οι ρωγμές θα διαπεράσουν πλήρως το σωλήνα, έως ότου εμφανιστούν στην άλλη πλευρά των

τοιχωμάτων του. Το μικρό μέγεθος και η τάση των ρωγμών να ξεκινούν από την εσωτερική πλευρά του σωλήνα, παρά το γεγονός πως οι τάσεις είναι ισχυρότερες στο εξωτερικό των τοιχωμάτων, δυσχεραίνουν κατά πολύ τον εντοπισμό τους. Ο χρόνος μεταξύ εμφάνισης μιας ρωγμής και της αστοχίας του τμήματος του σωλήνα στο οποίο αναπτύχθηκε, ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του. Είναι συχνό φαινόμενο, σε συνθήκες υψηλής εσωτερικής πίεσης στο σωλήνα, η περιφερειακή τάση (hoop stress) να προκαλεί ακαριαία διάδοση της ρωγμής κατά μήκος της περιφέρειας του σωλήνα, δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη εγκάρσια ρωγμή που μπορεί να οδηγήσει στη μηχανική θραύση του σωλήνα. Για το λόγο αυτό, η έναρξη μιας ρωγμής χρησιμοποιείται συνήθως ως κριτήριο αστοχίας ενός τμήματος του σωλήνα. (31).

Στην περίπτωση που δεν εντοπίζονται ρωγμές στο σωλήνα, αλλά μικρές τρύπες, αυτές συχνά παρερμηνεύονται ως αποτέλεσμα διάβρωσης από ισχυρά οξέα ή από υδρόθειο. Ωστόσο, αν και η διάβρωση επιταχύνει την αστοχία, η εμφάνισή τους θα συμβεί ανεξαρτήτως της παρουσίας διαβρωτικών ρευστών. Η ύπαρξη τέτοιων κενών στο σωλήνα είναι ένδειξη έντονης καταπόνησης μιας περιοχής γύρω από αυτά, και όχι ολόκληρου του σωλήνα. Επομένως, όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, ένα τέτοιο καταπονημένο τμήμα μπορεί να αφαιρεθεί από το σωλήνα και τα δύο εναπομείναντα τμήματα να συγκολληθούν ξανά και να καταστούν έτοιμα προς χρήση ως ένας ενιαίος σωλήνας. (22).

Εκτός από τις ρωγμές και τα κενά, η κυκλική κόπωση του σωλήνα τον παραμορφώνει πλαστικά, όπως προαναφέρθηκε, προκαλώντας μόνιμες μεταβολές στη γεωμετρία του. Ακόμα και όταν τα φορτία στο εσωτερικό του είναι μικρότερα από το όριο διαρροής του, ο σωλήνας υποβάλλεται διαρκώς σε δακτυλιοειδείς (hoop) και ακτινικές (radial) τάσεις που προκαλούν μακροσκοπική αύξηση της διαμέτρου και ταυτόχρονη μείωση του πάχους των τοιχωμάτων του (Εικόνα 4.3). Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμετρική ανάπτυξη του σωλήνα είναι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής, η ακτίνα κάμψης, η πίεση που ασκούν τα ρευστά στο εσωτερικό του, η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα και το πάχος των τοιχωμάτων του.

Η αύξηση της διαμέτρου προκαλεί και έμμεσες φθορές στο σωλήνα κατά την αλληλεπίδρασή του με τον επιφανειακό εξοπλισμό της μονάδας, δηλαδή με την κεφαλή προώθησης και με τον εξοπλισμό ελέγχου πιέσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς, τόσο οι άρπαγες συγκράτησης (gripper blocks) της κεφαλής προώθησης, όσο και τα χαλύβδινα στοιχεία του κυλίνδρου σφράγισης (stripper), είναι σχεδιασμένα για συγκεκριμένες διαστάσεις σωλήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φθείρονται πολύ πιο σύντομα τα στοιχεία του κυλίνδρου σφράγισης, ενώ στην κεφαλή προώθησης δημιουργείται μια μη συμμετρική κατάσταση φόρτισης, όπου το φορτίο που ασκούν οι άρπαγες συγκράτησης συγκεντρώνεται εξ ολοκλήρου στα σημεία επαφής στις άκρες των διατάξεων, με αποτέλεσμα την επιπλέον φθορά και παραμόρφωση του σωλήνα. (31).



Εικόνα 4.3 : Μεταβολή της γεωμετρίας του σωλήνα εξαιτίας των τάσεων σε κάθε κύκλο φόρτισης. (31)

Προκειμένου να μειωθούν οι φθορές στο σωλήνα αλλά και στον υπόλοιπο εξοπλισμό που προκαλεί η πλαστική παραμόρφωση στα σημεία κάμψης, χρησιμοποιούνται πλέον οι λεγόμενοι “ευθυγραμμιστές” σωλήνα (pipe straighteners). Πρόκειται για συστήματα κυλίνδρων που τοποθετούνται ακριβώς πάνω από την κεφαλή προώθησης ώστε να ασκήσουν κάμψη προς την αντίθετη κατεύθυνση από την παραμένουσα παραμόρφωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο σωλήνας να εισέρχεται στην κεφαλή προώθησης με βελτιωμένη ευθυγράμμιση, μετριάζοντας έτσι τη φθορά που του ασκείται από τους άρπαγες συγκράτησης, αλλά και τη φθορά που προκαλεί στον κύλινδρο σφράγισης. Ωστόσο, η αντίθετη κάμψη που επιβάλλουν οι ευθυγραμμιστές στο σωλήνα αυξάνει τις συνολικές τάσεις που του ασκούνται, με αποτέλεσμα το προσδόκιμο ζωής του να μειώνεται αισθητά. (32).





## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (COILED TUBING APPLICATIONS)

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα χρησιμοποιείται, κυρίως, ως μια γρήγορη και οικονομικώς αποδοτική λύση για την πραγματοποίηση εργασιών που απαιτούνται στα διάφορα στάδια ζωής μιας γεώτρησης. Η δυνατότητα λειτουργίας που παρέχει στις επιτόπου συνθήκες (πίεση) που επικρατούν εντός της γεώτρησης (live well) (όπως αναλύθηκε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο), καθώς και η σχετική ακαμψία του σωλήνα που επιτρέπει την πρόσβαση ακόμα και σε οριζόντιες γεωτρήσεις και την άσκηση ισχυρών εφελκυστικών ή θλιπτικών δυνάμεων στον πυθμένα τους, καθιστούν την τεχνική κατάλληλη για :

- Την όρυξη γεωτρήσεων(drilling).
- Την πραγματοποίηση εργασιών με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων, αλλά και την αποκατάσταση και τη βελτίωση της απόδοσης μιας παραγωγικής γεώτρησης (production enhancement).

### 5.1 ΟΡΥΞΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (COILED TUBING DRILLING – CTD)

Οι πρώτες μονάδες όρυξης γεωτρήσεων που χρησιμοποιούσαν περιελιγμένο σωλήνα σχεδιάστηκαν το 1964 από το Ινστιτούτο Ερευνών Cullen (Cullen Research Institute), ωστόσο η πρώτη λειτουργική μονάδα αναπτύχθηκε το 1976 από την Καναδική εταιρία Flextube. (33).

Η τεχνική της όρυξης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα, όπως πραγματοποιείται στις μέρες μας, θεωρείται ότι ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '90, και συγκεκριμένα το 1991 με μια οριζόντια, πλευρικής επέκτασης γεώτρηση επανεισόδου (horizontal sidetrack re-entry well) που πραγματοποιήθηκε από την Oryx Energy στο Τέξας των Ηνωμένων Πολιτειών. Η τεχνολογία από τότε έχει βελτιωθεί δραματικά με περισσότερες από 900 γεωτρήσεις το χρόνο να πραγματοποιούνται με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα (στοιχεία 2001). (14).

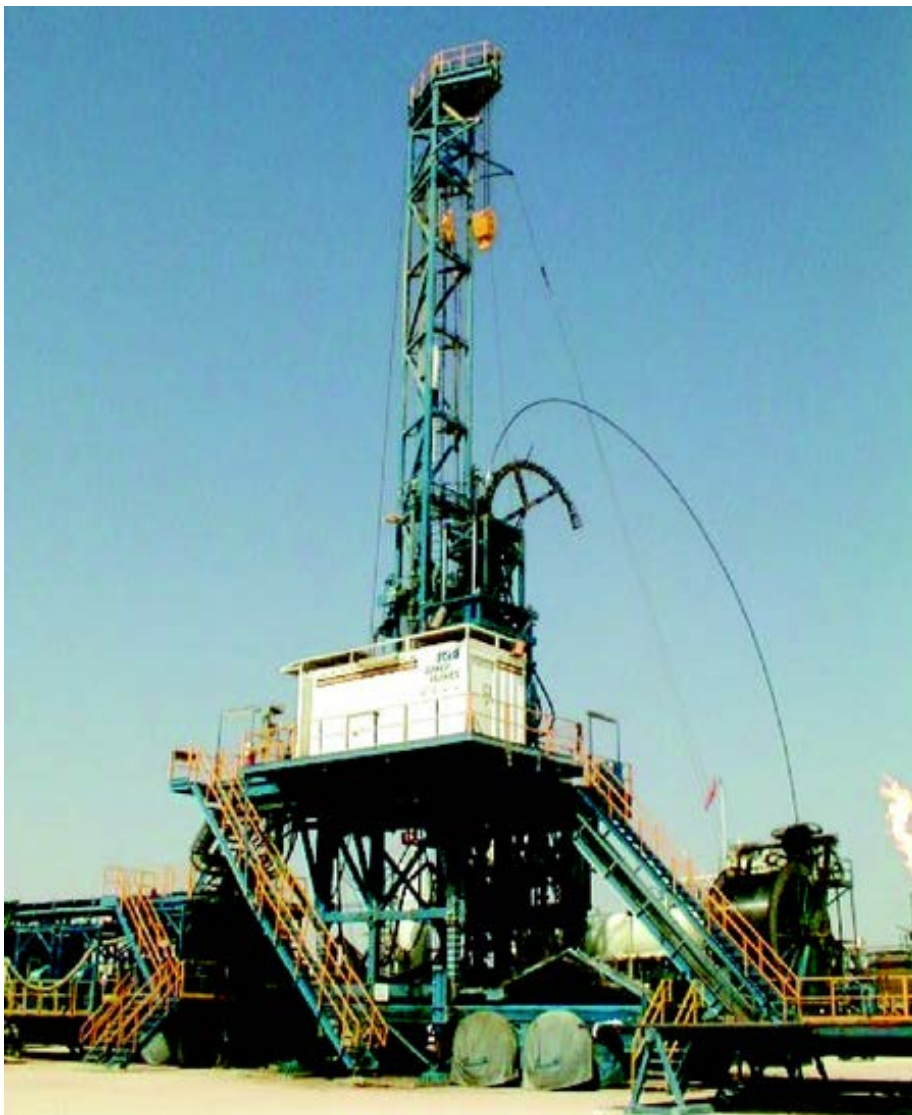
Η κύρια διαφορά της όρυξης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο όρυξης με περιστροφικό γεωτρώπανο είναι ο τρόπος διάτρησης. Κατά την κοινή όρυξη με γεωτρώπανο, ολόκληρη η διατρητική στήλη περιστρέφεται μηχανικά από ειδικό εξοπλισμό στην εξέδρα διάτρησης (drilling rig), με το ίδιο βάρος της στήλης να ασκεί την, απαιτούμενη για την προχώρηση, πίεση στο κοπτικό άκρο. Αντιθέτως, κατά την όρυξη με περιελιγμένο σωλήνα, το μόνο τμήμα της στήλης που περιστρέφεται είναι το κοπτικό άκρο, καθώς η περιστροφή του σωλήνα είναι αδύνατη εξ αιτίας των τεχνικών χαρακτηριστικών της μονάδας που το φέρει. Η περιστροφή του κοπτικού άκρου επιτυγχάνεται χάρη σε έναν

κινητήρα πυθμένα (downhole mud motor), ο οποίος περιστρέφεται μέσω της κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης εντός της γεώτρησης. Επιπλέον, καθώς το βάρος του σωλήνα σε σύγκριση με το αντίστοιχο βάρος μιας συμβατικής διατρητικής στήλης που περιλαμβάνει πολλά βαριά διατρητικά στελέχη, είναι πολύ μικρότερο, η απαιτούμενη πίεση στο κοπτικό άκρο δεν ασκείται από το ίδιο βάρος του σωλήνα, αλλά από την κεφαλή προώθησης που ωθεί με σταθερή δύναμη το σωλήνα εντός της γεώτρησης. Ωστόσο, ο αριθμός και το μέγεθος του βοηθητικού εξοπλισμού που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας γεώτρησης με περιελιγμένο σωλήνα καθιστά τη μονάδα σημαντικά μεγαλύτερη και πολύ πιο δύσκολη στη μεταφορά και την εγκατάστασή της σε σχέση με τις τυπικές μονάδες συντήρησης coiled tubing. Στην πραγματικότητα, τα κοινά χαρακτηριστικά με μια τυπική μονάδα όρυξης με περιστροφικό γεωτρήσιμο είναι πολύ περισσότερα σε σχέση με τις διαφορές τους.

Τα πρώτα χρόνια εφαρμογής της τεχνικής συνοδεύτηκαν από πλήθος αποτυχιών, κυρίως εξ αιτίας της έλλειψης πλήρους κατανόησης της τεχνικής και των περιπτώσεων στις οποίες αυτή μπορεί να αποδώσει. Οι υψηλές απαιτήσεις που είχαν δημιουργηθεί βασίστηκαν στα πλεονεκτήματα που προσέφερε μέχρι τότε η εφαρμογή περιελιγμένου σωλήνα σε διάφορες τεχνικές εργασίες συντήρησης σε γεωτρήσεις, δηλαδή στο μικρό “αποτύπωμα” (footprint) που άφηνε μετά την εφαρμογή της και κυρίως στην ευκολία εγκατάστασης της μονάδας και στην ταχύτητα ολοκλήρωσης μιας επέμβασης. Τα πλεονεκτήματα αυτά, ωστόσο, ίσχυαν μόνο σε απλές, μικρές εφαρμογές όρυξης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα, όπου δεν απαιτούνταν εξοπλισμός για κατευθυνόμενη διάτρηση και όπου η γεώτρηση μπορούσε να αφηθεί χωρίς σωλήνωση. Σε πολύπλοκες και απαιτητικές εφαρμογές, όμως, όπου, για παράδειγμα, απαιτούνταν πλήρης έλεγχος της κατεύθυνσης της διάτρησης και ολοκλήρωση (completion) της γεώτρησης, ή σε περιπτώσεις όρυξης σε συνθήκες υπο-πίεσης που απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός (διαχωριστές, εξοπλισμός εισπίεσης αζώτου κ.α.), το αποτύπωμα είναι σημαντικά μεγαλύτερο και η εγκατάσταση της μονάδας είναι αρκετά πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα. (34).

Φαινομενικά, ο εξοπλισμός μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα για την όρυξη μιας γεώτρησης δεν διαφέρει δραματικά από τον αντίστοιχο μιας τυπικής μονάδας συντήρησης με περιελιγμένο σωλήνα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την πραγματοποίηση κάποιων εφαρμογών όρυξης (CTD applications) χρησιμοποιώντας κοινό εξοπλισμό. Ωστόσο, καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών και η εμπειρία που αποκτάται από αυτές αυξάνονται, κυριαρχεί, πλέον, η τάση να χρησιμοποιείται εξοπλισμός ειδικά σχεδιασμένος για όρυξη με περιελιγμένο σωλήνα (Εικόνα 5.1). Η χρήση κοινού εξοπλισμού περιορίζεται κυρίως από την απαίτηση για μεγάλης διαμέτρου σωλήνα στην όρυξη μιας γεώτρησης. Οι σωλήνες διαμέτρου 2, 2<sup>3</sup>/<sub>8</sub> και 2<sup>7</sup>/<sub>8</sub> in που χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά στις μονάδες όρυξης με περιελιγμένο σωλήνα δεν είναι διαδεδομένες στις αντίστοιχες μονάδες τυπικών εργασιών συντήρησης, με

αποτέλεσμα τμήματα του εξοπλισμού όπως το τόξο οδήγησης, η κεφαλή προώθησης και ο κύλινδρος σφράγισης να μην είναι συμβατά με το σωλήνα και επομένως να απαιτείται η αντικατάστασή τους.



Εικόνα 5.1 : Ειδικά κατασκευασμένη εξέδρα όρυξης γεωτρήσεων με χρήση περιελιγμένου σωλήνα στο Ομάν. (34)

Τα ειδικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού καθορίζονται από τις συνθήκες στις οποίες καλείται να ανταπεξέλθει και από το είδος της επέμβασης (όρυξη εξ ολοκλήρου νέας γεώτρησης, επέκταση προϋπάρχουσας γεώτρησης, κατευθυνόμενη διάτρηση κ.α.), έχοντας πάντα ως βάση τον κοινό επιφανειακό εξοπλισμό μιας μονάδας συντήρησης Coiled Tubing (Κεφάλαιο 3) και επιπλέον τα εξής :

- Εξοπλισμό εισπίεσης των ρευστών διάτρησης.
- Ειδικούς χώρους ανάδευσης, αποθήκευσης και καθαρισμού των ρευστών διάτρησης.
- Εξοπλισμό παρακολούθησης (monitoring) και καταγραφής (recording).

- Κατώτερο εξοπλισμό στο πυθμένα (BottomHole Assembly - BHA) (συσκευή προσανατολισμού, κινητήρας πυθμένα, κοπτικό άκρο κ.α.).

Τα τελευταία χρόνια, το αρνητικό κλίμα γύρω από τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα για την όρυξη μιας γεώτρησης έχει σχεδόν ανατραπεί. Η τεχνική έχει πλέον ωριμάσει και η όλο και αυξανόμενη αξιοπιστία και αποδοτικότητα του εξοπλισμού, αλλά και τα δεδομένα τεχνικά πλεονεκτήματα της τεχνικής σε εφαρμογές όρυξης οριζόντιων και κατευθυνόμενων γεωτρήσεων, καθώς και γεωτρήσεων σε συνθήκες υπο-πίεσης (underbalanced), την καθιστούν όλο και πιο δημοφιλή στην πετρελαϊκή βιομηχανία. (14) Επιπλέον, όταν εφαρμόζεται στις κατάλληλες περιπτώσεις, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους όρυξης. Τόσο ο μικρότερος αριθμός προσωπικού που απαιτείται για τη λειτουργία μιας μονάδας Coiled Tubing Drilling, όσο και ο συνολικά μικρότερος χρόνος ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης σε σχέση με μια συμβατική μονάδα όρυξης με περιστροφικό γεωτρήσιμο είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που κάνουν την τεχνική ελκυστική.

Γενικά, οι εφαρμογές της τεχνικής όρυξης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες (15) :

- Στις μη κατευθυνόμενες γεωτρήσεις (non-directional wells), και
- Στις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις (directional wells).

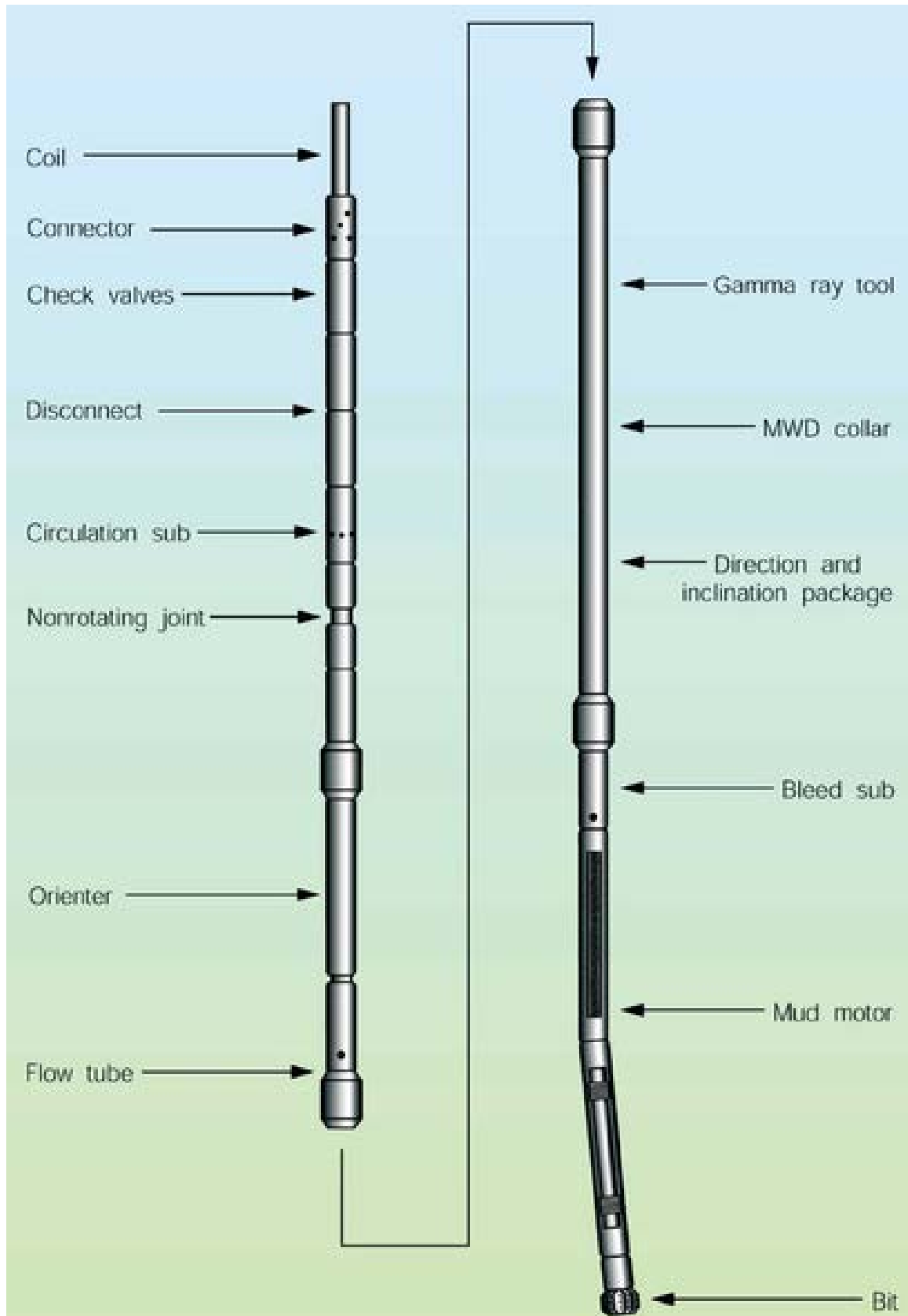
και σε δύο υποκατηγορίες :

- Στην όρυξη σε συνθήκες υποπίεσης (underbalanced wells), και
- Στην όρυξη σε συνθήκες υπερπίεσης (overbalanced wells).

Ως μη κατευθυνόμενες ορίζονται οι γεωτρήσεις που πραγματοποιούνται απουσία εξοπλισμού πυθμένα (downhole tools) για τον έλεγχο της κατεύθυνσης, της κλίσης ή/και του αζιμούθιου (δηλαδή, της γωνίας διεύθυνσης). Αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών όρυξης με χρήση περιελιγμένου σωλήνα και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στην όρυξη ρηχών γεωτρήσεων αερίου (κυρίως στον Καναδά) και στην όρυξη ρηχών γεωτρήσεων εισπίεσης (injection wells). Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταχεία εγκατάσταση / απεγκατάσταση του εξοπλισμού (rig up / rig down) και η συνεχής διάτρηση, χωρίς διακοπές για προσθήκη νέων στελεχών όπως σε μια κοινή όρυξη με περιστροφικό γεωτρήσιμο. Η πλειοψηφία των εφαρμογών πραγματοποιείται με διάμετρο όρυξης μικρότερη των 7 in, ωστόσο έχουν καταγραφεί και επιτυχημένες εφαρμογές όπου ορύχθηκε γεώτρηση διαμέτρου 13 ¾ in. Ομοίως με τις συμβατικές ορύξεις, συχνά χρησιμοποιούνται στελέχη (drilling collars) σε γεωτρήσεις με μικρή κλίση για την επαύξηση του βάρους επί του κοπτικού άκρου (weight on bit) και για τον έλεγχο της φυσικής παρέκκλισης (inclination build-up). (15).

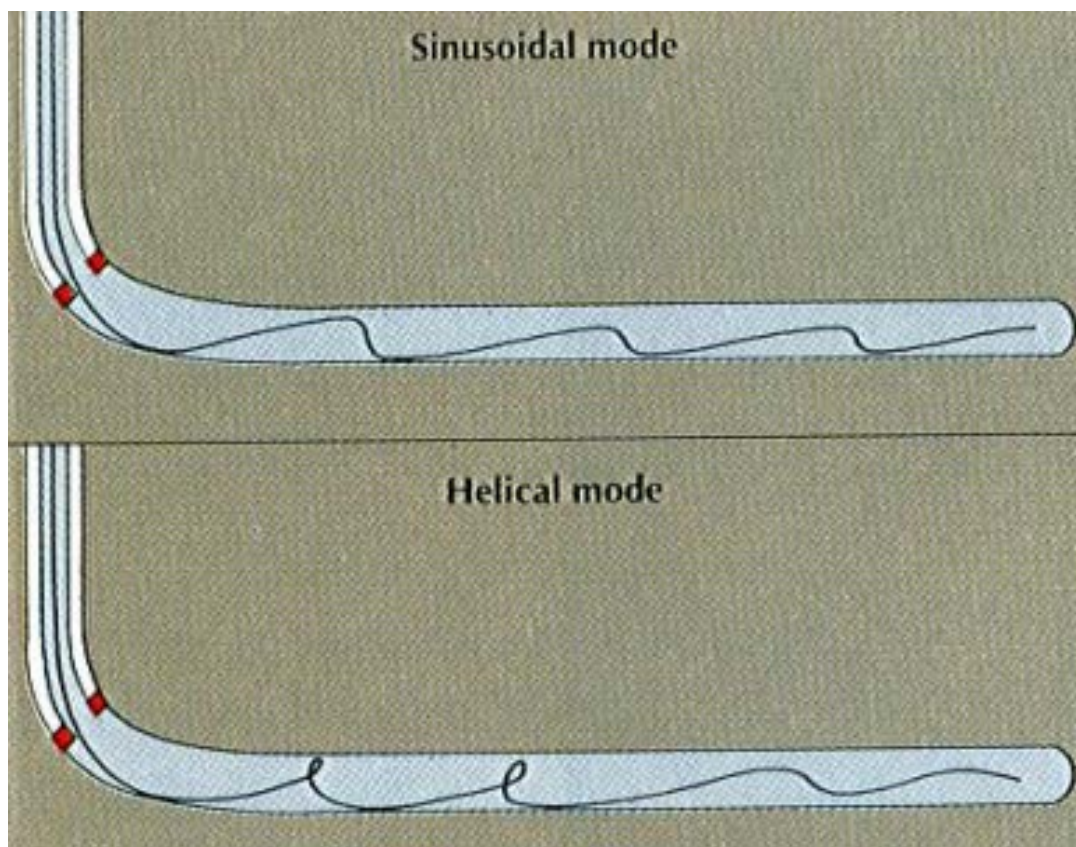
Ως κατευθυνόμενη διάτρηση (directional drilling), χαρακτηρίζεται η τεχνική όρυξης υπό συνθήκες προγραμματισμένης και ελεγχόμενης παρέκκλισης από την κατακόρυφη διεύθυνση (35), και για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας διάτρησης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα απαιτείται η εγκατάσταση ειδικής συσκευής προσανατολισμού (orientation device / orienter) στον κατώτερο εξοπλισμό στο πυθμένα (BHA) (Εικόνα 5.2). Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου είναι η διάτρηση προς νέους στόχους ταμειυτήρων από ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις. Άλλες εφαρμογές κατευθυνόμενων διατρήσεων με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα περιλαμβάνουν επανεισόδου στον ταμειυτήρα (για τεχνικούς λόγους π.χ. κατάρρευση τμήματος της υπάρχουσας γεώτρηση) (re-entering drilling) από υπάρχουσες γεωτρήσεις, και γεωτρήσεις σε συνθήκες υποπίεσης (underbalanced), ελεγχόμενης πίεσης (managed-pressure drilling) αλλά και χαμηλής πίεσης πυθμένα (low-bottomhole pressure drilling). (34).

Η διάτρηση οριζόντιων τμημάτων με περιελιγμένο σωλήνα κατά τη όρυξη μιας γεώτρησης, αποτελεί πλέον μια συνηθισμένη πρακτική στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Ωστόσο, πριν μερικές δεκαετίες κάτι τέτοιο φάνταζε αδύνατο κυρίως για λόγους ασφαλείας. Αποτελούσε γενική πεποίθηση πως η μεγάλη πίεση που έπρεπε να ασκηθεί στο σωλήνα για την όρυξη ενός οριζόντιου τμήματος, θα οδηγούσε στην αναδίπλωσή του και τελικά στην αστοχία του βαθιά εντός της γεώτρησης, με όλα τα καταστροφικά αποτελέσματα που αυτό συνεπάγεται για την πορεία της όρυξης. Στην πραγματικότητα, τα όρια στα οποία μπορεί να ασκηθεί πίεση στο σωλήνα χωρίς αυτός να αστοχήσει ξεπερνούν κατά πολύ τις, μέχρι πρόσφατα, συντηρητικές εκτιμήσεις.

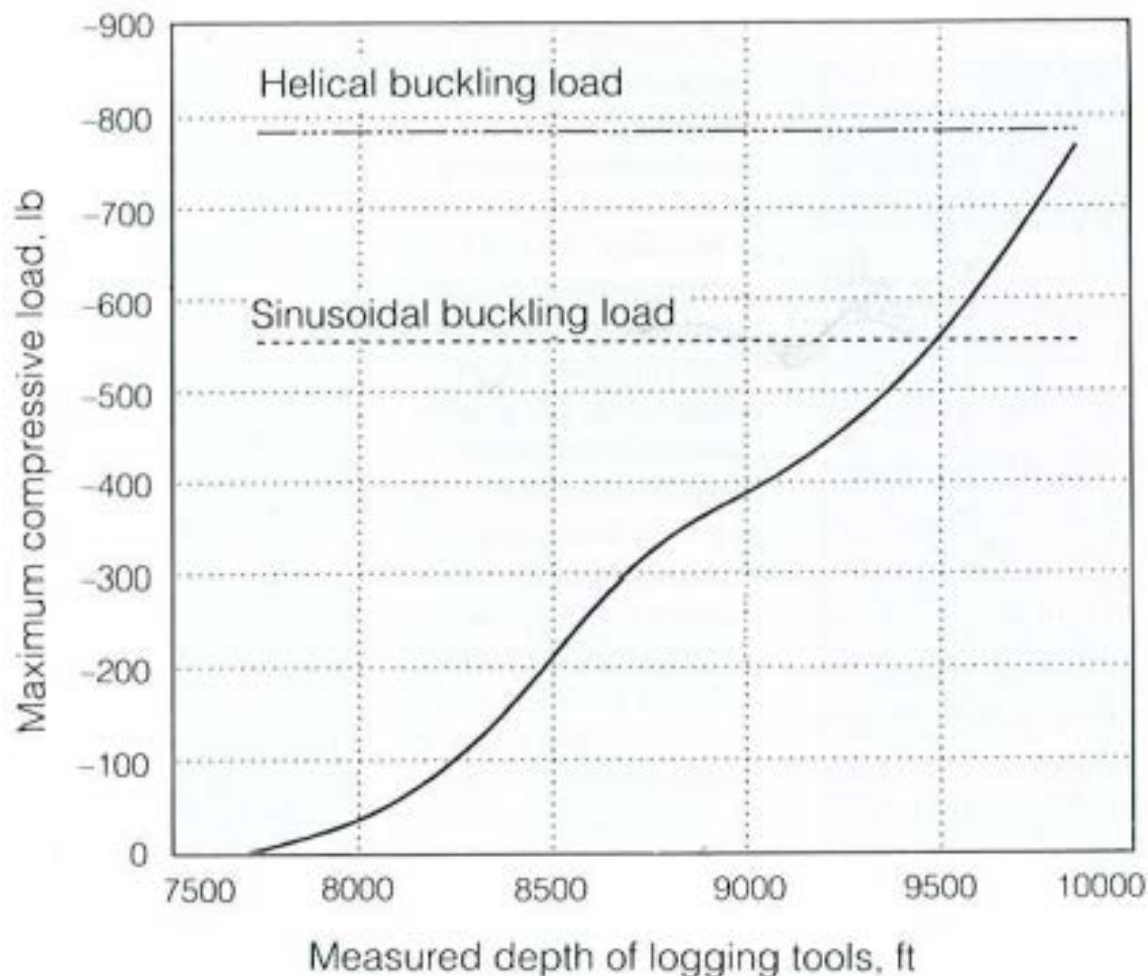


Εικόνα 5.2 : Διάταξη κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα κατευθυνόμενης όρυξης (directional drilling) για τηλεμετρία με παλμό λάσπης (mud-pulse telemetry) (Μέθοδος μετάδοσης δεδομένων τύπου LWD, δηλαδή διαγραφιών που αποκτούνται κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της διάτρησης (Loggings While Drilling) και αφορούν τις ιδιότητες του διατρυόμενου σχηματισμού, δημιουργώντας παλμούς πίεσης στο σύστημα της λάσπης διάτρησης). (34)

Τα πρώτα όρια για τον υπολογισμό του ορίου πίεσης του σωλήνα (limit on pushing coiled tubing) πριν την αναδίπλωσή του σε μια οριζόντια γεώτρηση τέθηκαν από θεωρητικές εκτιμήσεις της Exxon Production Research Co. το 1984. Ωστόσο λίγα χρόνια αργότερα, και συγκεκριμένα το 1987, σε μια γεώτρηση στην Ολλανδία, τα όρια αυτά ξεπεράστηκαν κατά πολύ χωρίς την αστοχία του σωλήνα, ως αποτέλεσμα λανθασμένων εκτιμήσεων. Η εξήγηση για την παραπάνω επιτυχημένη όρυξη δόθηκε λίγο καιρό αργότερα από ερευνητές του Πανεπιστημίου Rice στο Texas των Ηνωμένων Πολιτειών. Ανακάλυψαν πως, κατά το όριο αναδίπλωσης που είχε θέσει η Exxon, ο σωλήνας έπαιρνε μια “ημιτονοειδή” μορφή (sinusoidal mode) μέσα στη γεώτρηση και δεν κινδύνευε σε καμία περίπτωση με αστοχία. Μάλιστα, πιστοποίησαν πως με περαιτέρω πίεση του σωλήνα η προχώρηση συνεχιζόταν κανονικά, και μετά από κάποιο νέο όριο η μορφή του άλλαζε από ημιτονοειδής σε “ελικοειδή” (helical mode) (Εικόνα 5.3). Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί πολλές περιπτώσεις στις οποίες το όριο ημιτονοειδούς μορφής ξεπεράστηκε κατά πολύ, καλύπτοντας σε μερικές περιπτώσεις περισσότερα από 700 m οριζόντιας διάτρησης (Εικόνα 5.4). (22).



Εικόνα 5.3 : Η “ημιτονοειδής” και “ελικοειδής” μορφή που λαμβάνει ο σωλήνας εντός οριζόντιων γεωτρήσεων κατά την άσκηση μεγάλης πίεσης σε αυτόν. (22)



Εικόνα 5.4 : Καμπύλη μέγιστης θλιπτικής φόρτισης – μετρούμενου βάθους, σε περιελγμένο σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε σε γεώτρηση αρχικής κλίσης 40 μοιρών για 6.500 ft και εν συνεχεία οριζόντιας για 2.500 ft. (22)

Κατά το στάδιο σχεδιασμού μιας γεώτρησης σε ένα ήδη εντοπισμένο παραγωγικό ορίζοντα μπορεί να επιλεγθεί η διατήρηση υπο συνθήκες υποπίεσης (underbalanced drilling), δηλαδή η διατήρηση της υδροστατικής πίεσης που ασκείται στα τοιχώματα της γεώτρησης σε χαμηλότερα επίπεδα από την εσωτερική πίεση του σχηματισμού που ορύσσεται, και η ταυτόχρονη ελεγχόμενη παραγωγή υδρογονανθράκων. Αν και η επίτευξη τέτοιων συνθηκών είναι πολύ δύσκολη, τα πλεονεκτήματα είναι άκρως σημαντικά. Η χαμηλή υδροστατική πίεση που ασκούν τα ρευστά διάτρησης μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα σοβαρής αλλοίωσης του σχηματισμού (formation damage), κυρίως όταν πρόκειται για διάτρηση ευαίσθητων ταμιευτήρων, και ταυτόχρονα επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς διάτρησης. Επιπλέον, εξ αιτίας της διαφοράς αυτής μεταξύ της πίεσης των ρευστών του σχηματισμού και των ρευστών διάτρησης, παρατηρείται εισροή των ρευστών του σχηματισμού εντός της γεώτρησης με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης των περιεχόμενων υδρογονανθράκων μετά την ολοκλήρωσή της. (36). Η δυνατότητα λειτουργίας των μονάδων όρυξης με περιελγμένο σωλήνα με συνθήκες επιφανειακής πίεσης, ενώ τα παραγόμενα ρευστά από τον ορυσσόμενο σχηματισμό ρέουν εντός της γεώτρησης, αλλά και η δυνατότητα συνεχούς



άντλησης των ρευστών αυτών τόσο κατά την προώθηση του σωλήνα εντός του σχηματισμού όσο και κατά την ανάκτησή του αποτελούν ίσως τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής, τα οποία ταυτόχρονα την καθιστούν κατάλληλη για την όρυξη σχηματισμών υπό τις συνθήκες αυτές, αυξάνοντας την οικονομικότητα και τις πιθανότητες επιτυχίας της όρυξης. (34).

Μια εξ ίσου ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή της τεχνικής όρυξης με χρήση περιελιγμένου σωλήνα είναι ο συνδυασμός της με συμβατικά, χαμηλού κόστους περιστροφικά γεωτρήματα. Κατά την εφαρμογή αυτή, η εξέδρα με το περιστροφικό γεωτρήμα χρησιμοποιείται για την ταχεία όρυξη ενός απλού φρέατος και τη σωλήνωσή του, ακριβώς πάνω από την επιθυμητή ζώνη. Ακολούθως, ο περιελιγμένος σωλήνας εισέρχεται στη γεώτρηση και ορύσσει ένα μικρό, “καθαρό” τμήμα (clean penetration) μέσα στη ζώνη ενδιαφέροντος και στη συνέχεια πραγματοποιεί όλες τις εργασίες ολοκλήρωσης. (34).

Το πεδίο εφαρμογών και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου όρυξης με περιελιγμένο σωλήνα είναι αδιαμφισβήτητα βελτιωμένα σε σχέση με το παρελθόν, και τα πλεονεκτήματά της είναι μοναδικά σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ωστόσο δεν λείπουν και κάποια μειονεκτήματα, ανάμεσα στα οποία είναι το υψηλό σχετικά κόστος των αναλώσιμων υλικών και το περιορισμένο εύρος διαθέσιμου εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού. Εκείνο, όμως που αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημα μιας μονάδας όρυξης με περιελιγμένο σωλήνα, είναι η ανικανότητα του σωλήνα να περιστρέφεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα :

- Το σχηματισμό συσσωματωμάτων από τα εξορυσσόμενα θρύμματα στο δακτύλιο μεταξύ σωλήνα και τοιχωμάτων της γεώτρησης, κυρίως πάνω από τον κατώτερο εξοπλισμό στο πυθμένα.
- Τον περιορισμό του βάθους διάτρησης που μπορεί να επιτευχθεί.

Ο σχηματισμός των συσσωματωμάτων προκαλεί πολλά προβλήματα, τόσο στη γεώτρηση όσο και στο σωλήνα καθώς εμποδίζουν την ομαλή κυκλοφορία των ρευστών διάτρησης και προκαλούν φθορές στα τοιχώματα του σωλήνα. Η διάσπασή τους, επομένως, είναι απαραίτητη, ωστόσο προκειμένου να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η πραγματοποίηση πολλών χρονοβόρων, μικρών μανουβρών (short trips), Αν και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για το σχεδιασμό του εξοπλισμού μιας μονάδας περιελιγμένου σωλήνα με τέτοιο τρόπο ώστε να επέτρεπε την περιστροφή του σωλήνα, στην πραγματικότητα ο σωλήνας, λόγω των τεχνικών και μηχανικών του χαρακτηριστικών (μικρό πάχος τοιχωμάτων κ.α.), δεν θα μπορούσε να ανταπεξέλθει στις ισχυρές δυνάμεις (ροπή, στρέψη) που αναπτύσσονται σε μια περιστροφική διάτρηση.

Το μέγιστο βάθος προχώρησης σε γεωτρήσεις με μεγάλη κλίση είναι μειωμένο σε μεγάλο βαθμό εξαιτίας της αυξημένης τριβής λόγω της όρυξης της γεώτρησης με τρόπο, ουσιαστικά, στατικό, σε αντίθεση με το δυναμικό τρόπο μιας περιστροφικής διάτρησης. (34).

## 5.2 ΑΠΟΦΡΑΞΗ ΓΩΤΡΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ (MILLING)

Κατά τη διάρκεια όρυξης, τσιμεντώσης ή και μετά την ολοκλήρωση μιας γεώτρησης συμβαίνει για διάφορους λόγους κάποιο τμήμα της να φράσσεται. Η απόφραξη της γεώτρησης απαιτεί τη χρήση ειδικού αλεστικού άκρου, γνωστού και ως φρέζα (mill), το οποίο είναι κατάλληλο για το “άλεσμα” ακόμα και μεταλλικών στοιχείων. Η συνήθης πρακτική για την πραγματοποίηση τέτοιων εργασιών περιελάμβανε την αντικατάσταση του κοπτικού άκρου ενός κοινού περιστροφικού γεωτρυπάνου με ένα κατάλληλο για φρεζάρισμα, ωστόσο, πλέον, όλο και πιο συχνά, τέτοιες εργασίες πραγματοποιούνται από ειδικά διαμορφωμένες μονάδες όρυξης με περιελιγμένο σωλήνα.

Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, το είδος της φρέζας που θα χρησιμοποιηθεί διαφέρει (Εικόνα 5.5). Όταν επιχειρείται η αφαίρεση κάποιου μεταλλικού στοιχείου (junk) το οποίο φράσσει τη γεώτρηση, τότε η φρέζα θα πρέπει να μπορεί να το κερματίσει σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία στη συνέχεια θα παρασυρθούν από τη λάσπη ώστε να μπορέσει να συνεχιστεί ανεμπόδιστα η διάτρηση. Για την απομάκρυνση του τσιμεντένιου υπολείμματος στον πυθμένα μιας γεώτρησης μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τσιμεντώσης κάποιοι τμήματός της, στόχος του φρεζαρίσματος είναι η διάτρηση του υπολείμματος αυτού και επομένως απαιτείται ειδικό κοπτικό. Αντιθέτως, όταν πρέπει να διατρηθεί η μεταλλική σωλήνωση ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης και να δημιουργεί ένα λεγόμενο “παράθυρο” (window milling) για την όρυξη γεώτρησης πλευρικής επέκτασης από αυτήν (sidetracking), τότε τα παραπάνω κοπτικά είναι ακατάλληλά, καθώς στην περίπτωση αυτή σκοπός είναι το άνοιγμα μιας “καθαρής” οπής στη σωλήνωση, και όχι ο κερματισμός της. (37).



Εικόνα 5.5 : Ειδικά κοπτικά άκρα (φρέζες) (mills) για την απόφραξη γεωτρήσεων. (38)

Η επιτυχία της κάθε εργασίας φρεζαρίσματος με περιελιγμένο σωλήνα καθορίζεται, πέρα από τη σωστή κοπή / θρυμματισμό / άλεσμα του κάθε εμποδίου σε μια γεώτρηση, και από την, κατά το δυνατό, πλήρη απομάκρυνση του εμποδίου από αυτή. Ο κύριος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η σωστή απομάκρυνση των υπολειμμάτων από τη γεώτρηση είναι η επιλογή της κατάλληλης λάσπης διάτρησης, η οποία θα πρέπει να μπορεί να μεταφέρει γρήγορα στην επιφάνεια όλα τα υπολείμματα του φρεζαρίσματος.

Για την πλευρική επέκταση μιας υπάρχουσας γεώτρησης, η χρήση περιελιγμένου σωλήνα αποτελεί μια εξαιρετικά συμφέρουσα λύση, καθώς δεν απαιτείται η αφαίρεση της παραγωγικής σωλήνωσης, μια διαδικασία χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος. Οι τεχνικοί περιορισμοί σχετικά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, αφορούν το μέγεθος του κοπτικού άκρου, το οποίο δεν μπορεί να υπερβαίνει την ελάχιστη εσωτερική διάμετρο (ID) της παραγωγικής σωλήνωσης (υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η διάμετρος αυτή μπορεί να διευρυνθεί με φρεζάρισμα της σωλήνωσης από κοπτικό μεγαλύτερης διαμέτρου). Πέρα από την επιλογή του κατάλληλου κοπτικού άκρου, πολύ σημαντική είναι η επιλογή της τεχνικής με την οποία θα έρθει το κοπτικό την επιθυμητή θέση μεταβολής της κλίσης (kick-off point / KOP) ώστε να πραγματοποιήσει την πλευρική επέκταση. Οι κύριες τεχνικές που εφαρμόζονται ευρέως περιλαμβάνουν τη χρήση της κοινής “σφήνας παρέκκλισης” (conventional whipstock), ή τη χρήση ειδικής σφήνας παρέκκλισης από τσιμέντο (cement whipstock). (14).

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται το σφράγισμα κάποιου τμήματος μιας γεώτρησης, είτε για μόνιμη απομόνωσή του από την παραγωγή υδρογονανθράκων, είτε για προσωρινή προστασία του από εργασίες συντήρησης, βελτίωσης παραγωγικότητας κ.α. σε ανώτερα τμήματα, τότε χρησιμοποιούνται πώματα (packers) ή τα λεγόμενα bridge plugs. Η αφαίρεση (αλλά και η τοποθέτησή) των στοιχείων αυτών, μετά το πέρας των όποιων εργασιών ή όταν επιχειρείται η επέκταση της γεώτρησης, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. Τα plugs χρησιμοποιούνται κατά κόρων σε οριζόντιες γεωτρήσεις για την παραγωγή σχιστολιθικού αερίου, όπου, για λόγους οικονομικότητας της εκμετάλλευσης, απαιτείται η υδραυλική ρωγμάτωση του σχιστόλιθου σε πολλαπλά στάδια (multi-stage hydraulic fracturing / fracking) (η μέθοδος θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 8). Η διαδικασία αυτή απαιτεί την απομόνωση τμημάτων της οριζόντιας γεώτρησης με plugs και την εισπίεση μεγάλης ποσότητας μίγματος νερού, άμμου και χημικών ώστε να επεκταθούν προϋπάρχουσες ή και να δημιουργηθούν νέες ρωγματώσεις για τη διευκόλυνση της ροής του αερίου προς το σωλήνα παραγωγής (production tubing). Μετά την ολοκλήρωση της ρωγμάτωσης τα plugs αυτά πρέπει να αφαιρεθούν ή να διατηρηθούν. Η χρήση μονάδων όρυξης με περιελιγμένο σωλήνα για την απομάκρυνση plugs που μπορούν να διατηρηθούν από οριζόντιες γεωτρήσεις σχιστολιθικού αερίου είναι πολύ διαδεδομένη στη Βόρεια Αμερική και προτιμάται από τα κοινά περιστροφικά γεωτρήματα. Ωστόσο, όσο οι γεωτρήσεις εισχωρούν βαθύτερα στο σχιστόλιθο

τόσο πιο δύσκολη είναι η διαδικασία φρεζαρίσματος των πωμάτων με περιελιγμένο σωλήνα, καθώς η απόδοση των φορτίων που ασκούνται στο σωλήνα από την επιφάνεια (από την κεφαλή προώθησης) είναι μειωμένη, με αποτέλεσμα την αναζήτηση και ανάπτυξη νέων εξαρτημάτων (κινητήρων πυθμένα με βελτιωμένη απόδοση, εξαρτημάτων βελτίωσης κατανομής βάρους επί του κοπτικού κ.α.) για την αύξηση της απόδοσης αυτής. (39).

### 5.3 ΑΛΙΕΥΣΗ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ Ή ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ (FISHING)

Με τη χρήση του όρου “αλίευση” (fishing) στην πετρελαϊκή βιομηχανία, εννοείται η διαδικασία προσέγγισης και ανάκτησης μη επιθυμητού, εγκλωβισμένου ή φθαρμένου εξοπλισμού από μια γεώτρηση, ο οποίος δεν μπορεί να ανακτηθεί με τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκε να λειτουργεί και να ανακτάται. Στην πραγματικότητα, η λέξη “εξοπλισμός” (fish) περιλαμβάνει οτιδήποτε (μεταλλικό ή μη, τμήμα της σωλήνωσης, κομμάτι του ηλεκτρονικού εξοπλισμού μέτρησης των συνθηκών της γεώτρησης κ.α.) έχει “χαθεί” εντός της γεώτρησης και η ανάκτησή του είναι απαραίτητη. Οι λόγοι για τους οποίους η ανάκτηση του εκάστοτε αντικείμενου κρίνεται απαραίτητη είναι συνήθως δύο. Είτε πρόκειται για αντικείμενο που προκαλεί “όχληση” (nuisance), και επηρεάζει τη παραγωγικότητα της γεώτρησης ή δημιουργεί λειτουργικές δυσκολίες και επομένως αυξάνει το κόστος παραγωγής, είτε πρόκειται για αντικείμενο του οποίου η ανάκτησή κρίνεται αναγκαία, για λόγους ασφαλείας ή για τεχνικούς λόγους, εάν επιθυμείται η συνέχιση της παραγωγής υδρογονανθράκων.

Πριν το 1980, η ποιότητα του σωλήνα των μονάδων Coiled Tubing (αδύναμες συγκολλήσεις, χαμηλό όριο διαρροής κ.α.) περιόριζε το εύρος των εφαρμογών στις οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και συχνά απαιτούνταν η αλίευση τμημάτων του σωλήνα που είχαν αστοχήσει και βρίσκονταν εγκλωβισμένα στη γεώτρηση. Ωστόσο με τη βελτίωση του εξοπλισμού και των μηχανικών ιδιοτήτων του σωλήνα των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα τα περιστατικά αστοχίας μειώθηκαν, βελτιώνοντας έτσι την αξιοπιστία αλλά και το πεδίο εφαρμογών της τεχνικής. Πλέον ο περιελιγμένος σωλήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην ανάκτηση εξοπλισμού, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη μέχρι τώρα συνήθη μέθοδο ανάκτησης με καλώδιο τύπου wireline.

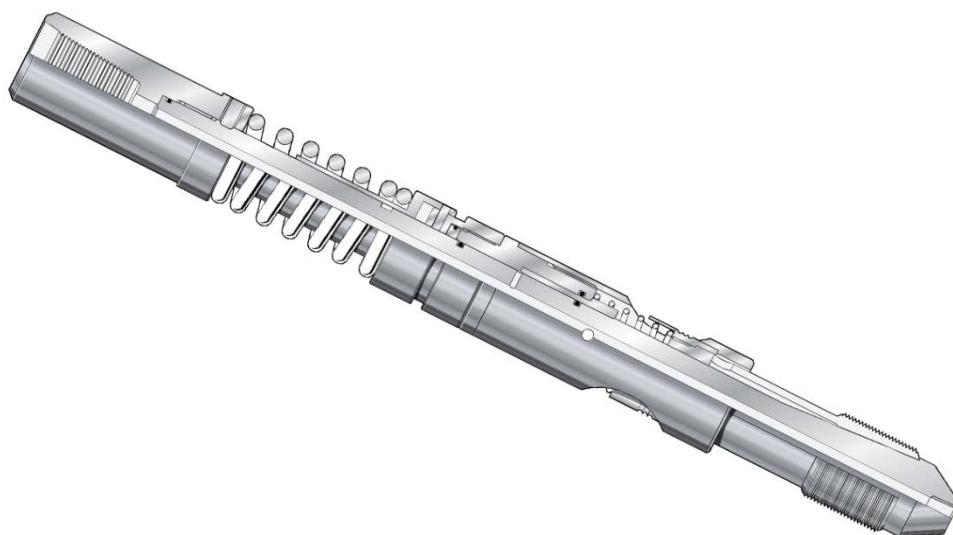
Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός οριζόντιων γεωτρήσεων και γεωτρήσεων με μεγάλη κλίση έχει οδηγήσει στην αύξηση των εργασιών ανάκτησης και ανάπτυξης με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα καθώς έχει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα καλώδια τύπου wireline, τα οποία εξαρτώνται από τη βαρύτητα για να φτάσουν στον επιθυμητό στόχο εντός της γεώτρησης. Επιπλέον, αν και οι εργασίες αλίευσης με wireline πολύ πιο οικονομικές και ταχείες σε σχέση με τις αντίστοιχες με περιελιγμένο σωλήνα, υπάρχουν και άλλοι φυσικοί περιορισμοί της

μεθόδου που την κάνουν να μειονεκτεί. Όταν, για παράδειγμα, πάνω από τον εγκλωβισμένο σχηματισμό έχουν αποθεθεί άμμος ή άλλου είδους μπάζα και υπολείμματα, το καλώδιο τύπου wireline αδυνατεί να προσεγγίσει το στόχο. Αντιθέτως, η δυνατότητα ταυτόχρονης κυκλοφορίας ρευστού για τον καθαρισμό της περιοχής (Κεφάλαιο 7) πάνω από το στόχο και ανάκτησής του που παρέχει η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα την καθιστά ως την πλέον κατάλληλη για τέτοιου είδους εργασίες.

Συνοπτικά, τα κύρια πλεονεκτήματα της αλίευσης με περιελιγμένο σωλήνα είναι τα εξής (40) :

- Παρέχει δυνατότητα κυκλοφορίας ρευστών καθαρισμού εντός της γεώτρησης, συμπεριλαμβανομένων αζώτου και οξέων, σε υψηλές πιέσεις για την απομάκρυνση ή διάλυση άμμου, λάσπης, επιφανειακών επιστρωμάτων (scales) και μπαζών (junk) που βρίσκονται πάνω από τον εξοπλισμό προς αλίευση.
- Έχει δυνατότητα να ασκεί ισχυρές αξονικές δυνάμεις για το “τράνταγμα” (jarring) ή / και την έλξη εξοπλισμού που είναι πολύ βαρύς για το καλώδιο τύπου wireline.
- Μπορεί να εκτελεί τις παραπάνω εργασίες ταυτόχρονα.

Η επιτυχία μιας εργασίας ανάκτησης “χαμένου” εξοπλισμού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Είναι πολύ σημαντικό ο χειριστής να γνωρίζει επακριβώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που πρέπει να αλιεύσει και τη συνολική κατάσταση της γεώτρησης (παλαιότητα σωλήνωσης, ομοιομορφία τσιμέντωσης κ.α.). Επιπλέον, για να έχει όσο το δυνατόν πλήρη εικόνα για τις συνθήκες και τους λόγους εγκλωβισμού του εξοπλισμού και για την ακριβή θέση του εντός της γεώτρησης, πριν την κάθοδο του περιελιγμένου σωλήνα με τον εξοπλισμό αλίευσης (ή σε κάποιες περιπτώσεις ταυτόχρονα με τη διαδικασία της αλίευσης) η γεώτρηση βιντεοσκοπείται στο σημείο εγκλωβισμού του εξοπλισμού ώστε, τελικά, να σχεδιαστεί σωστά η επέμβαση και κυρίως να επιλεγεί το κατάλληλο εργαλείο αλίευσης (Εικόνα 5.6) που θα εξασφαλίσει την επιτυχή και όσο το δυνατόν ταχεία ανάκτησή του.



Εικόνα 5.6 : Εργαλείο αλίευσης (fishing tool) για την εκ των έσω σύλληψη κυλινδρικών στοιχείων. (41)

#### 5.4 ΤΣΙΜΕΝΤΩΣΗ (CEMENTING)

Η τεχνική της τσιμέντωσης γεωτρήσεων με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα εφαρμόζεται επιτυχώς στην πετρελαϊκή βιομηχανία πάνω από μια τριακονταετία. Συγκεκριμένα, το 1983, η εταιρία Arco Alaska πρωτοστάτησε στη χρήση περιελιγμένου σωλήνα για τη συμπίεση τσιμέντου (cement squeezing) κατά τη διάρκεια επισκευαστικών εργασιών στο κοίτασμα Prudhoe Bay. (42).

Από τότε, η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί για την επισκευή κακοτεχνιών που εντοπίζονται μετά την ολοκλήρωση της κύριας τσιμέντωσης σε μια γεώτρηση, για την απομόνωση διόδων παραγωγής (perforations) ή και για την επισκευή σωληνώσεων που έχουν φθαρεί, και ουσιαστικά περιλαμβάνει την εισπίεση και συμπίεση τσιμέντου στα επιθυμητά κενά εντός της γεώτρησης. (43). Στις εργασίες αυτές, όπου είναι επιθυμητή η τσιμέντωση μιας ορισμένης ζώνης εντός της γεώτρησης, πρέπει με κάποιο τρόπο, προτού ξεκινήσει η διαδικασία εισπίεσης του τσιμέντου, να απομονωθούν οι ζώνες αυτές από την υπόλοιπη γεώτρηση. Η πρακτική που ακολουθείται είναι η κάθοδος εντός της γεώτρησης ειδικών πωμάτων (packers) (Εικόνα 5.7), τα οποία όταν φτάσουν στο επιθυμητό σημείο, διαστέλλονται / διογκώνονται (υδραυλικά με εισπίεση ρευστού – inflatable packers) απομονώνοντας έτσι τις ζώνες τσιμέντωσης. Η τοποθέτηση των πωμάτων αυτών, καθώς και πωμάτων για την απομόνωση ζωνών για λόγους σχετικούς με την παραγωγή (ζώνες που παράγουν μόνο νερό, εισπίεση χημικών, υδραυλική ρωγμάτωση κ.α.), μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. (44).



*Openhole packer.*



*Cased hole packer.*

**Εικόνα 5.7 : Τοποθέτηση υδραυλικών πωμάτων (inflatable packers) της εταιρίας Schlumberger για απομόνωση ζωνών προς τσιμέντωση, εισπίεση οξέων κ.α.) σε ανοιχτές (openhole) και σωληνωμένες (cased hole) γεωτρήσεις. (44)**

Το κίνητρο για την εισπίεση τσιμέντου με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα είναι κυρίως οικονομικό, καθώς η ευκολία εγκατάστασης της μονάδας στην εξέδρα (rig), και το χαμηλό λειτουργικό της κόστος μειώνουν κατά πολύ τα συνολικά έξοδα. Επιπλέον πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ελαχιστοποίηση της πιθανής μόλυνσης του πολφού κατά την απόθεσή του και η ικανότητα εισπίεσης μικρών ποσοτήτων με μεγάλη ακρίβεια σε συγκεκριμένους στόχους εντός της γεώτρησης. Ωστόσο, το ποσοστό επιτυχίας τέτοιων εργασιών με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα βρίσκεται λίγο πάνω από το 60%, κυρίως εξαιτίας των δυσκολιών στο σχεδιασμό του κατάλληλου πολφού τσιμέντωσης. (42).

Η μειωμένη πιθανότητα μόλυνσης του πολφού οφείλεται στον τρόπο απόθεσής του. Η διαδικασία ξεκινά με την τοποθέτηση της άκρης του σωλήνα στην επιθυμητή θέση. Ακολουθώντας, καθώς ο πολφός του τσιμέντου εξέρχεται από το σωλήνα με ένα συγκεκριμένο ρυθμό, ο σωλήνας ανακτάται με αντίστοιχο ρυθμό ώστε η άκρη του σωλήνα να βρίσκεται πάντα λίγο κάτω από την επιφάνεια του επιπέδου του πολφού. (45).

Η τσιμέντωση με περιελιγμένο σωλήνα μπορεί να πραγματοποιηθεί και για τη σφράγιση γεωτρήσεων κατά την εγκατάλειψή τους (well plugging and abandonment – P&A). Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση τσιμεντένιων στοιχείων σφράγισης (cement plugs), σε συνδυασμό, όταν κρίνεται αναγκαίο με συμβατικά plugs, σε διάφορα σημεία εντός της γεώτρησης, με σκοπό την πλήρη σφράγιση όλων των παραγωγικών οριζόντων (υδρογονανθράκων και νερού) και την εγκατάλειψή της με ασφάλεια. Η εφαρμογή της μεθόδου με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα πραγματοποιείται, πλέον, όλο και πιο συχνά, με αρκετά επιτυχημένα παραδείγματα να αφορούν εργασίες σε πολύ δύσκολες και απαιτητικές συνθήκες. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα επιτυχούς και πρωτοπόρου εφαρμογής της μεθόδου με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα αποτελεί το σφράγισμα μιας παραγωγικής γεώτρησης υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (High Pressure High Temperature – HPHT) στο Mobile Bay block του Κόλπου του Μεξικό στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Όταν η εγκατάλειψη της γεώτρησης κρίθηκε αναγκαία (λόγω παραγωγής άμμου), επιχειρήθηκε η σφράγιση της με τη συμβατική μέθοδο dump bail, δηλαδή απόθεση μικρής ποσότητας τσιμέντου με τη χρήση ειδικού καλωδίου τύπου wireline. Ωστόσο, καθώς η στατική θερμοκρασία πυθμένα του κοιτάσματος (BottomHole Static Temperature – BHST) ξεπερνούσε τους 400°F (~205°C), ο πολφός στερεοποιήθηκε εντός του κάδου του εξοπλισμού, καθιστώντας τον άχρηστο και αναγκάζοντας τους μηχανικούς να τον εγκαταλείψουν μέσα στη γεώτρηση. Τελικά, χρησιμοποιήθηκε περιελιγμένος σωλήνας για τον καθαρισμό της γεώτρησης πάνω από την εγκλωβισμένο εξοπλισμό, και ακολούθως για την εισπίεση τσιμέντου για το σφράγισμά της. Αξίζει να σημειωθεί πως εκτός της πολύ υψηλής θερμοκρασίας στο πυθμένα, η μονάδα περιελιγμένου σωλήνα αντιμετώπισε αποτελεσματικά και την περιεκτικότητα σε H<sub>2</sub>S του κοιτάσματος της τάξης των 75 ppm και σε CO<sub>2</sub> της τάξης του 4%. (46).

Συνοπτικά, και σε σύγκριση με έναν κοινό γεωτρητικό εξοπλισμό συντήρησης (workover rig), η τσιμέντωση με περιελιγμένο σωλήνα προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα (47) :

- Δεν είναι αναγκαία η αφαίρεση του εξοπλισμού ολοκλήρωσης της γεώτρησης (completion equipment).
- Οι εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς την ανάγκη αδρανοποίησης της γεώτρησης (kill the well).
- Η απόθεση του τσιμέντου μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες μόλυνσής του (contamination).



## 5.5 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (COMPLETION)

Μετά από κάθε επιτυχημένη όρυξη μιας γεώτρησης, προκειμένου να είναι δυνατή η παραγωγή υδρογονανθράκων από αυτή, απαιτείται η διενέργεια μιας σειράς εργασιών, γνωστές με τον όρο “ολοκλήρωση” (completion). Η εφαρμογή του περιελιγμένου σωλήνα σε διάφορα στάδια των εργασιών αυτών, όπως στη λειτουργία του σωλήνα ως σωλήνα παραγωγής ή η χρήση του για τη μεταφορά και εγκατάσταση εντός της γεώτρησης εξοπλισμού ολοκλήρωσης, περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

## 5.6 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Πέρα από την ανάκτηση εγκλωβισμένου εξοπλισμού από μια γεώτρηση, και μάλιστα από μια παραγωγική γεώτρηση όπου μπορεί να προκαλέσει μείωση της παραγωγής (Κεφάλαιο 5.3), η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία και για την απομάκρυνση άλλων υλικών που ευθύνονται για το ίδιο φαινόμενο. Τα υλικά αυτά μπορεί να προέρχονται από τον ίδιο το σχηματισμό ή να δημιουργούνται εντός της γεώτρησης ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης διάφορων χημικών ενώσεων κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Η αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων με τον καθαρισμό των γεωτρήσεων με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.

## 5.7 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (PRODUCTION ENHANCEMENT)

Με τον όρο “βελτίωση” (enhancement) της απόδοσης μιας παραγωγικής γεώτρησης (ή επαύξηση της απόληψης πετρελαίου) εννοούνται όλες εκείνες οι μέθοδοι που εφαρμόζονται κατά τη δευτερογενή και τριτογενή παραγωγή ενός κοιτάσματος. Η δευτερογενής παραγωγή περιλαμβάνει τις μεθόδους με τις οποίες προσδίδεται πρόσθετη ενέργεια στο κοίτασμα μέσω εισπίεσης νερού ή φυσικού αερίου στον ταμιευτήρα, ενώ η τριτογενής περιλαμβάνει όλες εκείνες τις μεθόδους ελάττωσης του υπολειμματικού πετρελαίου που πραγματοποιούνται μετά την κατάκλυση του σχηματισμού με νερό. Η χρήση μονάδων περιελιγμένου σωλήνα έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία στο στάδιο της τριτογενούς παραγωγής αποδεικνύοντας πως είναι μια αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα επιλογή, όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 8.



## 6. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL COMPLETION)

Ο όρος “ολοκλήρωση” (completion) χρησιμοποιείται από την πετρελαϊκή βιομηχανία για την περιγραφή των διαδικασιών τοποθέτησης ειδικού εξοπλισμού (ή και για την περιγραφή του ίδιου του εξοπλισμού) εντός μιας γεώτρησης μετά την πλήρη όρυξή της, για την ασφαλή και αποτελεσματική παραγωγή υδρογονανθράκων από αυτήν.

Ωστόσο, μεταξύ της όρυξης και της εκκίνησης της διαδικασίας παραγωγής από ένα ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, μεσολαβούν και κάποια άλλα βήματα τα οποία περιλαμβάνονται στη γενικότερη έννοια του όρου “ολοκλήρωση”. Τα βήματα αυτά πραγματοποιούνται για την εκτίμηση των περιεχόμενων στο σχηματισμό ρευστών, για την εγκατάσταση της παραγωγικής σωλήνωσης, και για την προστασία του σωλήνα παραγωγής από την είσοδο ανεπιθύμητων υλικών.

### 6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Το πρώτο βήμα μετά την όρυξη μιας γεώτρησης, και αφού έχει επιτευχθεί η είσοδος στο σχηματισμό που περιέχει υδρογονάνθρακες, είναι ο έλεγχος της παρουσίας και της ποιότητας των υδρογονανθράκων αυτών. Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας αυτής, ειδικά δειγματοληπτικά όργανα (formation testers) προσαρμόζονται πάνω στο άκρο της διατηρητικής στήλης και εισάγονται στη γεώτρηση, και συγκεκριμένα στη ζώνη ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, ειδικό πώμα (racker) τοποθετείται πάνω από το όργανο, και διαστέλλεται, απομονώνοντας, έτσι, από την υπόλοιπη γεώτρηση το τμήμα στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η δειγματοληψία. Όταν ολοκληρωθεί η συλλογή της επιθυμητής ποσότητας ρευστού δείγματος, το πώμα συστέλλεται και η στήλη ανακτάται για την εξέταση του δείγματος σε ειδικό εργαστήριο. (48).

### 6.2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Η κυκλοφορία των υδρογονανθράκων που παράγονται από τον ταμιευτήρα προς την επιφάνεια για τη συλλογή, τον καθαρισμό και τη μεταφορά τους, πραγματοποιείται, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, μέσω του λεγόμενου σωλήνα παραγωγής (production tubing) ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της παραγωγικής σωλήνωσης της γεώτρησης (production casing). Η σωλήνωση αυτή διατρέχει όλο το μήκος της γεώτρησης, από την επιφάνεια ως τον πυθμένα, και τοποθετείται μετά το τέλος της όρυξής της. Μετά την τοποθέτησή και την

τσιμέντωσή της, καθαρίζεται από τα ρευστά διάτρησης και από την υπολειπόμενη τσιμέντωση και διαρρέεται από ρευστά με βάση το νερό ή το πετρέλαιο. Τα ρευστά αυτά είναι πιο συμβατά με τις συνθήκες της παραγωγικής ζώνης, και επομένως κάνουν ομαλότερη την εκκίνηση της παραγωγής των υδρογονανθράκων από το σχηματισμό. Όταν έχει ολοκληρωθεί και ο καθαρισμός της σωλήνωσης, ειδική συσκευή (jet perforating gun) (Εικόνα 6.1) κατέρχεται εντός της γεώτρησης, συνήθως με καλώδιο τύπου wireline, και μόλις βρεθεί στο τμήμα της που αντιστοιχεί στην παραγωγική ζώνη, εκπυρσοκροτεί και διατρυπτά περιμετρικά τη σωλήνωση (perforation), δημιουργώντας διόδους παραγωγής ρευστών από το σχηματισμό στο εσωτερικό της σωλήνωσης. (48).



**Εικόνα 6.1 : Ειδική συσκευή εκπυρσοκρότησης (jet gun) για τη διάνοξη οπών στην παραγωγική σωλήνωση. (49)**

Υπάρχουν, σπανίως, περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται η εγκατάσταση μόνιμης παραγωγικής σωλήνωσης μέσα στον παραγωγικό σχηματισμό. Στις περιπτώσεις αυτές, η γεώτρηση ορύσσεται και σωληνώνεται κανονικά έως την οροφή του παραγωγικού σχηματισμού, και ακολούθως πραγματοποιείται η διάτρησή του με κοπτικό άκρο μικρότερης διαμέτρου. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτείται ο παραγωγικός σχηματισμός να είναι πολύ συνεκτικός για την αποφυγή του κινδύνου μεγάλων καταπτώσεων από την πίεση και τη ροή των ρευστών.

Μια τρίτη εναλλακτική μέθοδος σωλήνωσης για την παραγωγή ρευστών από ένα ταμιευτήρα είναι η εγκατάσταση διάτρητου liner στο παραγωγικό τμήμα της γεώτρησης. Η γεώτρηση ορύσσεται ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο, ωστόσο, το παραγωγικό τμήμα δεν αφήνεται κενό, αλλά επενδύεται με ειδικού τύπου σωλήνωση μικρής διαμέτρου η οποία φέρει μακρόστενες σχισμές (liner), η οποία συγκρατείται από ειδικά άγκιστρα στο εσωτερικό της τελευταίας σωλήνωσης, για να επιτρέψει την εισροή των ρευστών από το σχηματισμό. Η μέθοδος αυτή δεν εφαρμόζεται σε μαλακούς σχηματισμούς, καθώς είναι εύκολο για μικρού μεγέθους τεμαχίδια από το σχηματισμό να εισέλθουν στη γεώτρηση μέσω του liner, ωστόσο είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς αφήνει ελεύθερο το

σχηματισμό και επιτρέπει την παραγωγή ρευστών από όλο το τμήμα του το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη γεώτρηση. (48).

### 6.3 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ (PERFORATION)

Η διατρύπηση του παραγωγικού σχηματισμού είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται ώστε να δημιουργηθεί ένα σύστημα επικοινωνίας μεταξύ του σχηματισμού και της παραγωγικής σωλήνωσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται τόσο από τις οπές στη σωλήνωση όσο και από διόδους εντός του σχηματισμού που δημιουργούνται από τη διαδικασία διατρύπησης. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η διατρύπηση είναι πολλοί, όμως, ανεξαρτήτως μεθόδου, η δημιουργία των βέλτιστων δυνατών οπών στην παραγωγική σωλήνωση και στο σχηματισμό είναι ο πρωταρχικός στόχος της διαδικασίας, καθώς από την επιτυχία της εξαρτάται η αποδοτικότητα της ολοκλήρωσης και της γεώτρησης συνολικά. (50).

#### 6.3.1 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΣΦΑΙΡΕΣ (BULLET PERFORATING)

Η παλαιότερη μέθοδος διατρύπησης, γνωστή με τον όρο “bullet (gun) perforating”, δηλαδή διατρύπηση με σφαίρες, χρησιμοποιεί σκληρές χαλύβδινες σφαίρες ή βλήματα, τα οποία, μέσω ισχυρής έκρηξης, εκτοξεύονται και δημιουργούν τις επιθυμητές οπές στη σωλήνωση. Η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα βλήματα αυτά, από τη συσκευή που τα μεταφέρει στον πυθμένα της γεώτρησης (Εικόνα 6.2), φτάνει τα 900 m/s, και είναι αρκετή ώστε να δημιουργηθούν ευμεγέθεις οπές στη σωλήνωση (Εικόνα 6.3). Σε μεγάλης αντοχής, υψηλής κραμάτωσης σωληνώσεις, η μέθοδος αντιμετωπίζει δυσκολίες, καθώς, οι δημιουργούμενες οπές είναι συνήθως μικρές, αν όχι ανύπαρκτες, και με έντονα εσωτερικά εξογκώματα, και για το λόγο αυτό η μέθοδος τείνει να εγκαταλειφθεί πλήρως. Το μήκος εισχώρησης των βλημάτων εντός του σχηματισμού εξαρτάται κυρίως από τη σκληρότητά του, και κυμαίνεται μεταξύ 15 in +/- σε μαλακούς ασβεστόλιθους και 2-3 in σε δολομίτες. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός πως, σε αντίθεση με τις σύγχρονες συσκευές εκπυρσοκρότησης της μεθόδου shaped-charge perforating, τα βλήματα μάλλον κερματίζουν το σχηματισμό κατά τη διείσδυσή τους σε αυτόν, παρά το “συμπιέζουν”, αυξάνοντας κατά πολύ τη διαπερατότητά του κοντά στην παραγωγική σωλήνωση.



Εικόνα 6.2 : Η συσκευή (bazookas) από όπου εκτοξεύονταν οι σφαίρες διατρύπησης (1938). (51)

Εικόνα 6.3 : Οπές στη σωλήνωση από διατρύπηση με τη μέθοδο bullet perforating. (50)



### 6.3.2 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ (ABRASIVE PERFORATING)

Μια μέθοδος διατρύπησης με διαφορετική προσέγγιση ως προς την επίτευξη της δημιουργίας των διόδων, είναι η λεγόμενη “abrasive perforating method”, δηλαδή η διατρύπηση με αποξεστικά ρευστά. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μεγάλους όγκους ρευστών, πλούσιων σε αποξεστικά υλικά (π.χ. άμμος), τα οποία εκτοξεύονται από ένα ειδικό περιστρεφόμενο στόμιο - ακροφύσιο (nozzle) για τη δημιουργία οπών στην παραγωγική σωλήνωση. Η διάνοιξη κάθε

οπής μπορεί να διαρκέσει έως και 20 λεπτά, ωστόσο, η δυνατότητα χρήσης ακροφυσίων με διάφορα σχήματα που εστιάζουν την εκτόξευση των ρευστών σε ένα συγκεκριμένο σημείο της σωλήνωσης, επιτρέπει ιδιαίτερα “καθαρή” και ελεγχόμενη κοπή. Η μέθοδος αυτή, πλέον, χρησιμοποιείται περισσότερο σε εργασίες διατρύπησης σωληνώσεων για την τοπική εισπίεση / συμπίεση τσιμέντου (cement squeeze) (Εικόνα 6.4), παρά στην ολοκλήρωση γεωτρήσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς το όλο και αυξανόμενο βάθος των ταμιευτήρων στο οποίο στοχεύουν οι παραγωγικές γεωτρήσεις, σημαίνει όλο και υψηλότερη υδροστατική πίεση των κυκλοφορούντων ρευστών, τα οποία μειώνουν κατά πολύ την ισχύ με την οποία εκτοξεύονται τα αποξεστικά ρευστά με αποτέλεσμα να τα καθιστούν αναποτελεσματικά.

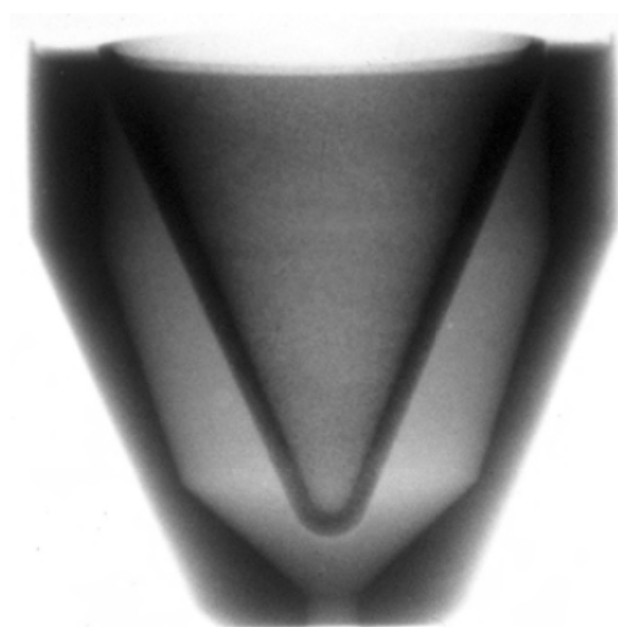
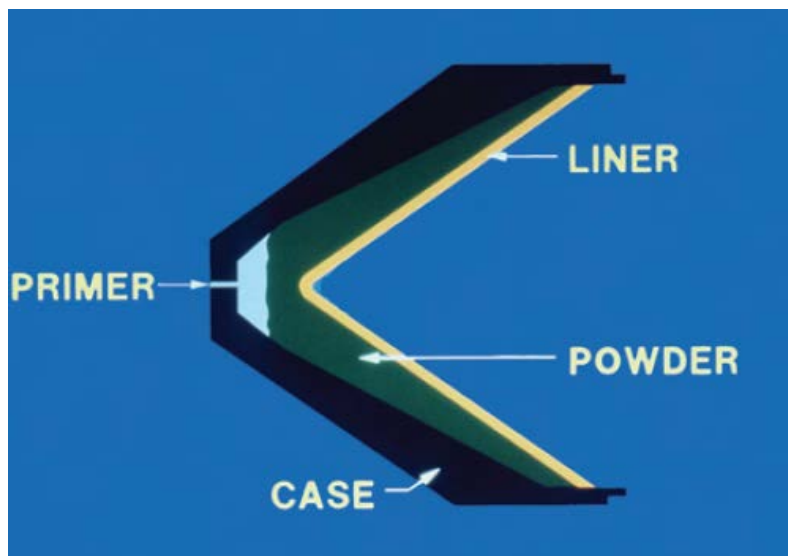


**Εικόνα 6.4 : Περιστροφική διατρύπηση σωλήνωσης με τη χρήση ειδικής συσκευής (DynaSlot) με τετραγωνικά στόμια της Dyna Energetics. (52)**

### **6.3.3 ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΜΕ ΕΚΠΥΡΣΟΚΡΟΤΗΣΗ (JET PERFORATING)**

Η πλέον διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδος διατρύπησης παραγωγικών σωληνώσεων χρησιμοποιεί τα λεγόμενα “shaped charges” ή αλλιώς “jet perforators”, δηλαδή ειδικές συσκευές εκπυρσοκρότησης (Εικόνα 6.1) που φέρουν εκρηκτικά στόμια (cases) τα οποία παράγουν υψηλής πίεσης πίδακες (jets) που διαπερνούν τη σωλήνωση και εισέρχονται σε κάποιο βάθος εντός του σχηματισμού. Τα στόμια αποτελούνται από 4 μέρη (Εικόνα 6.5), το εξωτερικό περίβλημα (case) μέσα στο οποίο βρίσκεται η γόμωση έναρξης (primer) και γύρω από αυτή βρίσκεται η υπόλοιπη εκρηκτική ύλη (powder) η οποία προστατεύεται εξωτερικά από μια επίστρωση (liner). Η διαδικασία για τη δημιουργία του πίδακα περιλαμβάνει μια σειρά εκρηκτικών ακολουθιών, οι οποίες συγκεντρώνονται, λόγω της γεωμετρίας του στομίου, στο κέντρο του στομίου, δημιουργώντας ισχυρά φορτία (charges), τα οποία, κινούνται προς την επίστρωση, και μόλις έρθουν σε επαφή με την κορυφή της, ρευστοποιούν μέρος της μάζας της δημιουργώντας ένα γραμμικό πίδακα. Ο πίδακας αυτός διαπερνά τη σωλήνωση, την τσιμέντωση και το σχηματισμό, λειτουργώντας ως “καρφί που εισχωρεί σε ξύλο”, ανοίγοντας μια δίοδο στο σχηματισμό συμπιέζοντας τα τοιχώματα γύρω από αυτό (Εικόνα 6.6). Η

ταχύτητα με την οποία ο πίδακας εισχωρεί στη σωλήνωση ξεπερνά τα 6.000 m/s. (50).

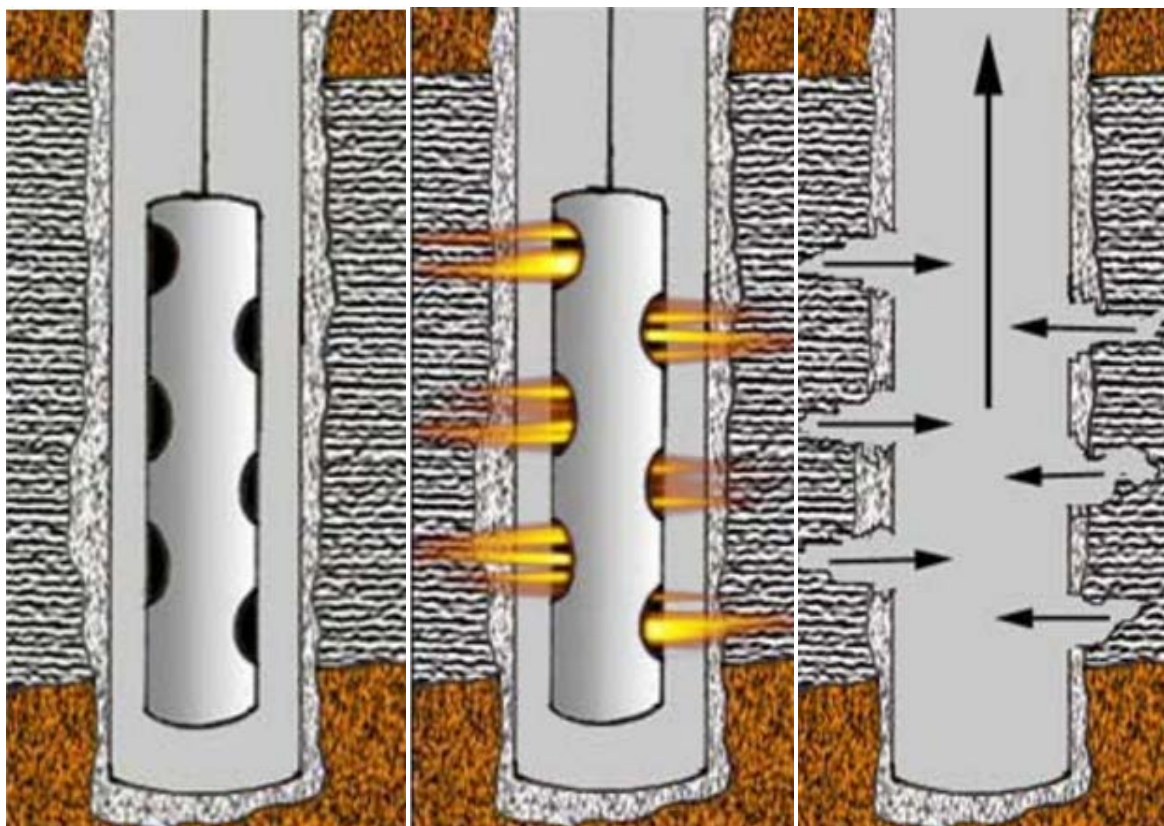


**Εικόνα 6.5 :** Γραφική (αριστερά) και πραγματική απεικόνιση με ακτίνες X (δεξιά) στομίου (case) που φέρουν οι συσκευές εκπυρσοκρότησης (jet guns). (50)

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, όπως η διαπερατότητα και το πορώδες, τα οποία είναι γνωστά στους μηχανικούς ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης από τις διαγραφίες (loggings) που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της όρυξης, από τις γεωλογικές εκτιμήσεις, από τα γεωφυσικά δεδομένα και από τη λήψη δειγμάτων από τη γεώτρηση, επιλέγεται, συχνά, η διατρύπηση του παραγωγικού σχηματισμού για την ενεργοποίησή του, πριν γίνει η ολοκλήρωση. Η πρακτική αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη σε κοιτάσματα σχιστολιθικού αερίου, όπου χρησιμοποιούνται ισχυρές συσκευές εκπυρσοκρότησης (guns) και για τη διεύρυνση προϋπαρχόντων ή τη δημιουργία νέων ρωγματώσεων στο σχηματισμό, παράλληλα με τη διάνοιξη οπών στη παραγωγική σωλήνωση. Στις γεωτρήσεις σχιστολιθικού αερίου, μάλιστα, για την



έναρξη παραγωγής αερίου εφαρμόζεται σχεδόν πάντα κατά το στάδιο ολοκλήρωσης της γεώτρησης και υδραυλική ρωγμάτωση του σχηματισμού (hydraulic fracturing).



Εικόνα 6.6 : Εκπυρσοκρότηση ειδικής συσκευής (jet gun) για τη δημιουργία οπών στη παραγωγική σωλήνωση και διόδων στο σχηματισμό (perforations), για τη διευκόλυνση της διέλευσης των περιεχόμενων σε αυτόν ρευστών . (53)

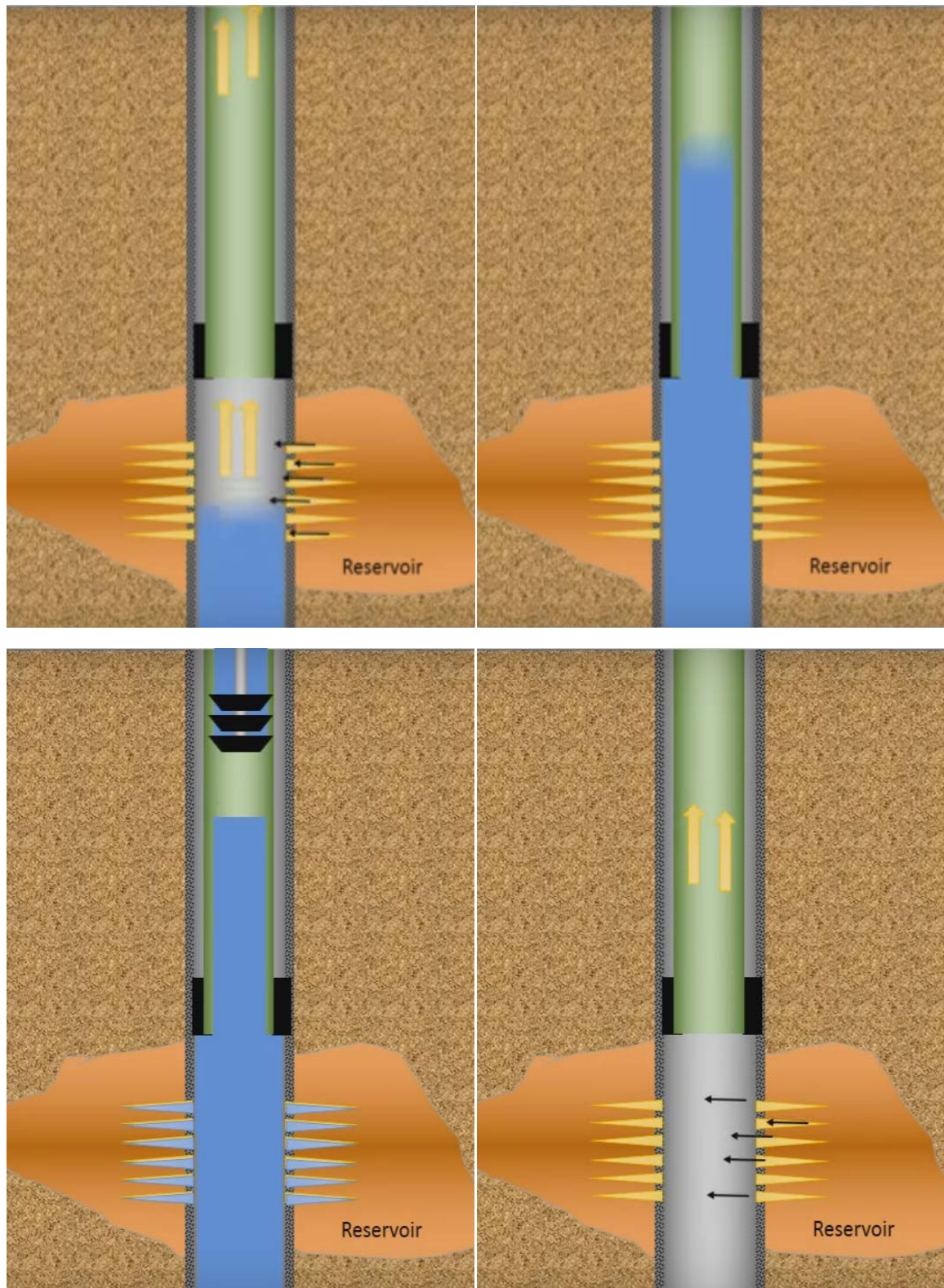
#### 6.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (SWABBING)

Πριν την έναρξη της παραγωγής υδρογονανθράκων από μια γεώτρηση, λαμβάνουν χώρα μια σειρά εργασιών, πολλές από τις οποίες περιλαμβάνουν την εισπίεση υγρών εντός του πυθμένα της γεώτρησης. Η πιο συνηθισμένη από αυτές είναι η υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracturing) του σχηματισμού με την εισπίεση ρευστών ρωγμάτωσης (fracturing fluids). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρων σε οριζόντιες γεωτρήσεις σχιστολιθικού αερίου, αλλά μπορεί να κριθεί σκόπιμη και η εφαρμογή της σε κατακόρυφες γεωτρήσεις για την ενεργοποίηση της παραγωγής ρευστών από τις παραγωγικές ζώνες. Εισπίεση υγρών πραγματοποιείται και κατά τη διαδικασία διατρύπησης με αποξεστικά ρευστά, όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 6.3.2, αλλά και κατά την εγκατάσταση χαλικοφίλτρων σε παραγωγικές ζώνες με σκοπό την συγκράτηση κόκκων άμμου που αποκολλώνται από το σχηματισμό και παρασύρονται από τα παραγόμενα ρευστά (η μέθοδος θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο).

Όλα τα παραπάνω υγρά, συσσωρεύονται εντός της στήλης της γεώτρησης. Κάποιες φορές, η συσσώρευση αυτή είναι τόσο μεγάλη, λόγω της ποσότητας και της πυκνότητας των υγρών, ώστε, αν και έχουν σχηματιστεί οι δίοδοι ροής στο σχηματισμό (perforations), τα ρευστά αδυνατούν να εισέλθουν στη γεώτρηση. (54).

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε κάποιες γεωτρήσεις φυσικού αερίου (Εικόνα 6.7). Μετά από κάποιο διάστημα ομαλής λειτουργίας της παραγωγικής γεώτρησης, διάφορα υγρά αρχίζουν να παράγονται από τον ταμιευτήρα, μαζί με το αέριο, και να συσσωρεύονται σταδιακά στον πυθμένα της παραγωγικής ζώνης, χωρίς να εμποδίζουν ουσιαστικά την παραγωγή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, η στήλη των συσσωρευμένων υγρών γίνεται τόσο ψηλή, ώστε να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί παραγωγή ρευστών από την παραγωγική. (55).

Και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή τόσο στο στάδιο της ολοκλήρωσης, όσο και μετά την έναρξη της παραγωγής, για την αντιμετώπιση του προβλήματος εφαρμόζεται μια τεχνική, γνωστή ως “swabbing”. Με τον όρο αυτό περιγράφονται όλες εκείνες οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την απομάκρυνση υγρών από μια γεώτρηση με σκοπό την έναρξη της παραγωγής ρευστών από τον ταμιευτήρα, οι οποίες αποτελούν ένα είδος καθαρισμού «σφουγγαρίσματος» του πυθμένα της γεώτρησης πριν αυτή τεθεί σε παραγωγική λειτουργία (56). Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την κάθοδο με τη χρήση σκληρού καλωδίου τύπου wireline, εντός της στήλης των υγρών, ενός ειδικού εργαλείου, γνωστού με το όνομα “swabbing cup”, το οποίο ουσιαστικά είναι ένα είδος κουβά, μέσα στον οποίο εισέρχεται κάποια ποσότητα υγρού, ο οποίος ακολούθως ανακτάται στην επιφάνεια, ολοκληρώνοντας έτσι ένα κύκλο εργασίας (run). Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές, έως ότου απομακρυνθεί η απαραίτητη ποσότητα υγρού για την εκκίνηση ή επανεκκίνηση της παραγωγής ρευστών από τον παραγωγικό σχηματισμό. (55).



Εικόνα 6.7 : Συσσώρευση παραγόμενων από τον ταμιευτήρα υγρών σε γεώτρηση αερίου. Αρχικά (πάνω αριστερά) η στήλη των υγρών δεν επηρεάζει την παραγωγή, ωστόσο στη συνέχεια αυξάνεται (πάνω δεξιά), διακόπτοντάς την πλήρως. Για την απομάκρυνση των υγρών ειδικό εργαλείο – κουβάς (swabbing cup) εισέρχεται στη γεώτρηση εντός της στήλης (κάτω αριστερά) και απομακρύνει την, απαραίτητη για την επανεκκίνηση της παραγωγής αερίου, ποσότητα υγρών (κάτω δεξιά). (55)

## 6.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ (COMPLETION SYSTEMS)

Τα συστήματα ολοκλήρωσης είναι όλοι εκείνοι οι συνδυασμοί των απαραίτητων εξαρτημάτων (πωμάτων, βαλβίδων ασφαλείας, ελαστομερών κ.α.) που εγκαθίστανται στη γεώτρηση για την προετοιμασία της παραγωγής υδρογονανθράκων. Οι συνδυασμοί που θα περιγραφούν παρακάτω αφορούν αποκλειστικά σωληνωμένες γεωτρήσεις (cased-hole completion systems), και ποικίλουν μεταξύ απλών σχεδίων, χαμηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας (low pressure/low temperature – LP/LT – designs), και πολύπλοκων σχεδίων υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (high pressure/high temperature – HP/HT – designs) τα οποία ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν με το διαθέσιμο εξοπλισμό πριν από 50 χρόνια. (57)

Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος ολοκλήρωσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψη διάφοροι παράγοντες, όπως οι συνθήκες λειτουργίας στις οποίες θα κληθεί να ανταπεξέλθει, και η επίδραση που θα έχουν οι όποιες αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία στη σωλήνωση και τον εξοπλισμό. Ο απώτερος σκοπός είναι το σύστημα να λειτουργεί αποδοτικά και με το μικρότερο δυνατό κόστος, ώστε να επιτευχθούν τόσο οι παραγωγικοί όσο και οι οικονομικοί στόχοι. Για το λόγο αυτό, ο σημαντικότερος, ίσως, παράγοντας στο σχεδιασμό ενός συστήματος ολοκλήρωσης είναι ο ρυθμός παραγωγής (production rate). Τα κύρια στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος για την επίτευξη του βέλτιστου ρυθμού παραγωγής είναι τα εξής (58) :

- Τα πώματα που θα χρησιμοποιηθούν (packers).
- Τα ελαστομερή (elastomers).
- Ο εξοπλισμός ελέγχου ροής (flow control equipment).
- Το υλικό και τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού (equipment metallurgy).
- Οι προδιαγραφές ασφαλείας του εξοπλισμού ISO, API (equipment standards and grades).
- Η κατανόηση της επίδρασης των δυνάμεων και της μεταβολής του μήκους της παραγωγικής σωλήνωσης.

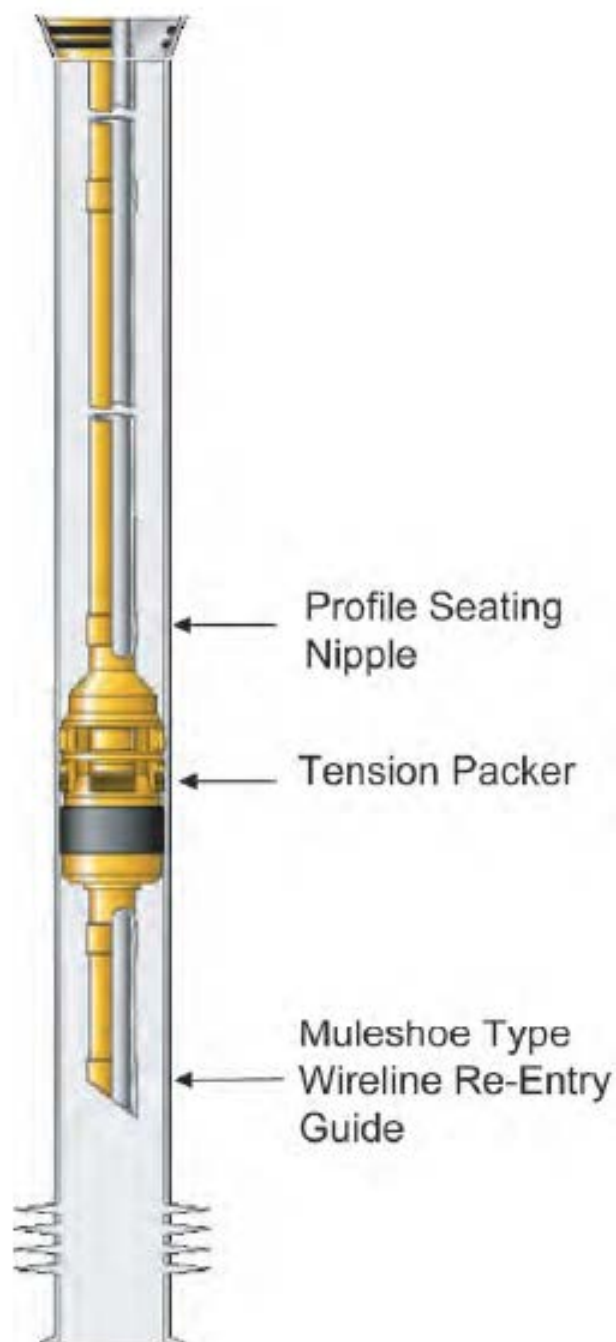
Τα πώματα αποτελούν τη βάση του σχεδιασμού της ολοκλήρωσης μιας σωληνωμένης γεώτρησης. Ουσιαστικά είναι διατάξεις σφράγισης που, απομονώνοντας επιλεκτικά τμήματα των παραγωγικών ζωνών, προστατεύουν τη σωλήνωση στο δακτύλιο της γεώτρησης και τους περιβάλλοντες σχηματισμούς γύρω από τη ζώνη αυτή. Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι πωμάτων κατάλληλων για συγκεκριμένες συνθήκες και απαιτήσεις λειτουργίας, όλα τα πώματα επιτελούν τις εξής λειτουργίες (59) :

- Εμποδίζουν την κίνηση του σωλήνα παραγωγής εντός της γεώτρησης.

- Υποστηρίζουν ένα μέρος του βάρους του σωλήνα.
- Παρέχουν ένα μέσο διαχωρισμού μεταξύ των διαφόρων παραγωγικών ζωνών.
- Συγκρατούν τα ρευστά επισκευών (well-servicing fluids – kill fluids, packer fluids κ.α.) στο δακτύλιο μεταξύ σωλήνα παραγωγής και παραγωγικής σωλήνωσης.

#### 6.5.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (SINGLE STRING WELL COMPLETION)

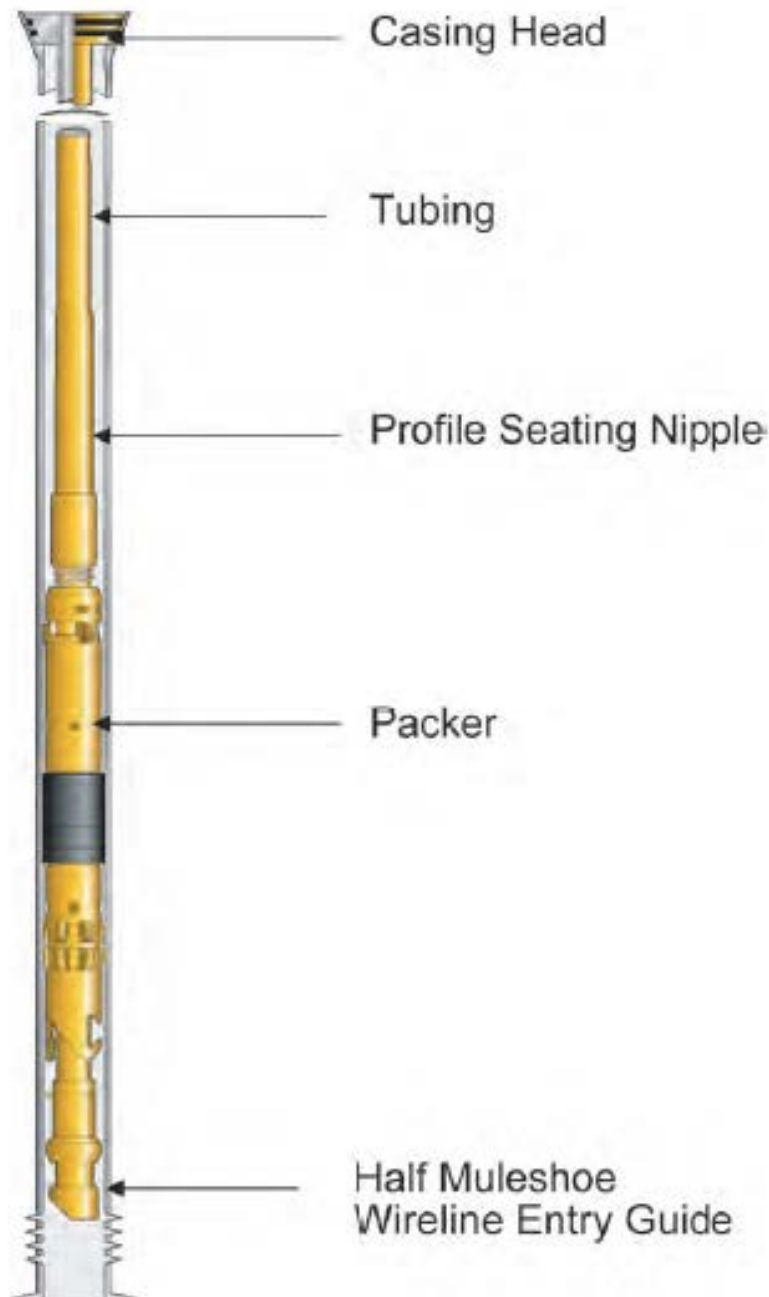
Σε γεωτρήσεις χαμηλής πίεσης (μικρότερης των 3.000 psi) που ολοκληρώνονται σε μικρά βάθη (έως 3.000 ft) ο εξοπλισμός ολοκλήρωσης (Low Pressure/Low Temperature – LP/LT wells) (Εικόνα 6.8) περιλαμβάνει, κατά κύριο λόγο, ανακτώμενο πώμα τάσης (retrievable tension packer). Η επιλογή του πώματος αυτού προκύπτει τόσο από την έλλειψη ικανού βάρους σωλήνα ώστε να χρησιμοποιηθεί το πιο κοινό πώμα συμπίεσης (compression packer), όσο και λόγω του χαμηλότερου κόστους και της απλούστερης κατασκευής του. Κάτω από το πώμα αλλά πάνω από το επίπεδο των οπών στην παραγωγική σωλήνωση, πρέπει να υπάρχει μια ειδική δίοδος που θα επιτρέπει την πρόσβαση καλωδίου τύπου wireline ή περιελιγμένου σωλήνα για την εκτέλεση διαφόρων επισκευαστικών επεμβάσεων στο μέλλον. (58).



Εικόνα 6.8 : Ολοκλήρωση γεώτρησης χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας (LP/LT completion). (58)

Σε εφαρμογές ολοκλήρωσης γεωτρήσεων μεσαίας πίεσης (μεταξύ 3.000 psi και 10.000 psi) και μεσαίας θερμοκρασίας (Medium Pressure/Medium Temperature – MP/MT wells) (Εικόνα 6.9), με θερμοκρασία πυθμένα (Bottom Hole Temperature / BHT) μεταξύ 38 °C και 150 °C, χρησιμοποιείται ανακτώμενο πώμα εύκολης εγκατάστασης τάσης/συμπίεσης (retrievable tension/compression set – versatile landing packer). Τα πώματα αυτά μπορούν να διαχειριστούν τα μεγαλύτερα βάθη στα οποία πραγματοποιούνται οι ολοκληρώσεις αυτές λόγω του τρόπου εγκατάστασής τους. Ομοίως με την προηγούμενη στήλη ολοκλήρωσης,

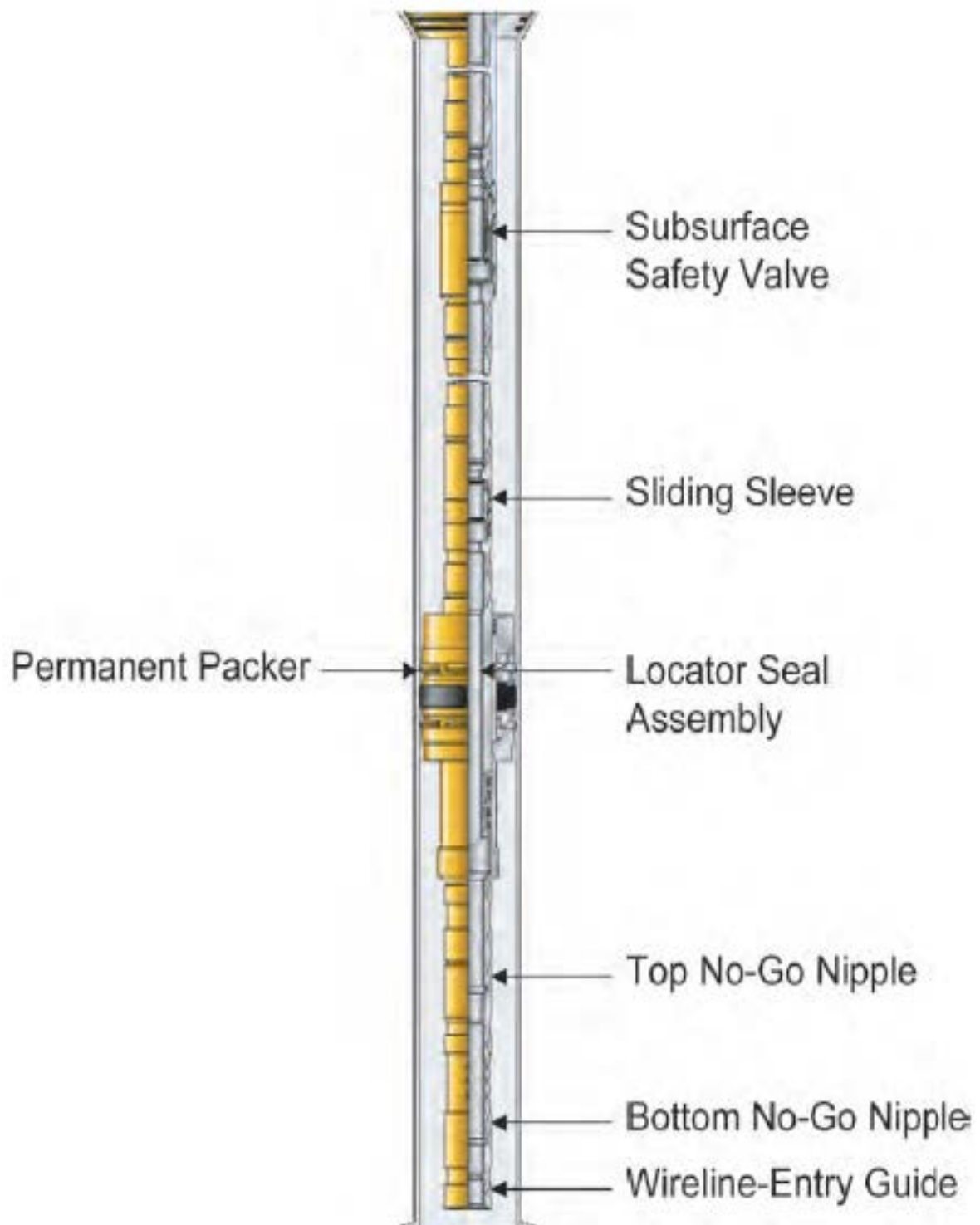
πρέπει να υπάρχει ειδική δίοδος για την πρόσβαση εξοπλισμού επισκευαστικών εργασιών. (58).



**Εικόνα 6.9 : Ολοκλήρωση γεώτρησης μεσαίας πίεσης και θερμοκρασίας (MP/MT). (58)**

Όταν η πίεση σε μια γεώτρηση ξεπερνά τα 10.000 psi και η θερμοκρασία πυθμένα τους 150 °C, τότε η ολοκλήρωσή της κατατάσσεται στην κατηγορία ολοκλήρωσης σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (High Pressure/High Temperature – HP/HT wells), όπου απαιτείται εξειδικευμένος και ανθεκτικός εξοπλισμός (Εικόνα 6.10). Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται πώμα μόνιμης σφράγισης (permanent sealbore packer), με ορισμένες εξαιρέσεις όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδικά κατασκευασμένο ανακτώμενο πώμα. Τα πώματα μόνιμης σφράγισης είναι πολύ ανθεκτικά στις ακραίες κινήσεις της σωλήνωσης και στις ισχυρές αξονικές τάσεις μεταξύ πώματος και σωλήνωσης που λαμβάνουν χώρα σε

συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ομοίως με τις παραπάνω περιπτώσεις, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δίοδου για τον εξοπλισμό επισκευαστικών εργασιών. (58).

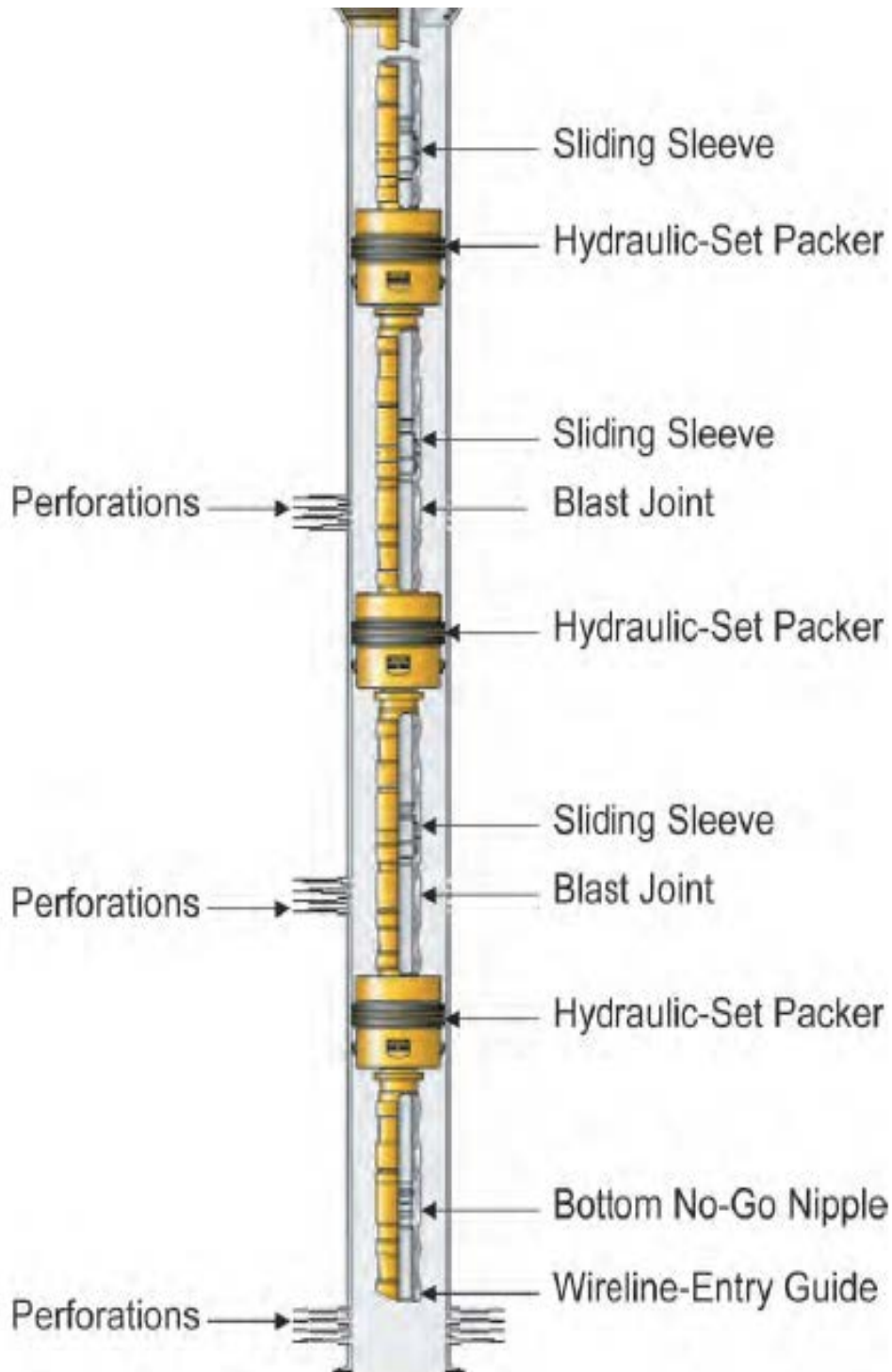


Εικόνα 6.10 : Ολοκλήρωση γεώτρησης υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (HP/HT). (58)



### 6.5.2 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΛΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΖΩΝΩΝ (MULTIPLE-ZONE SINGLE STRING SELECTIVE COMPLETION)

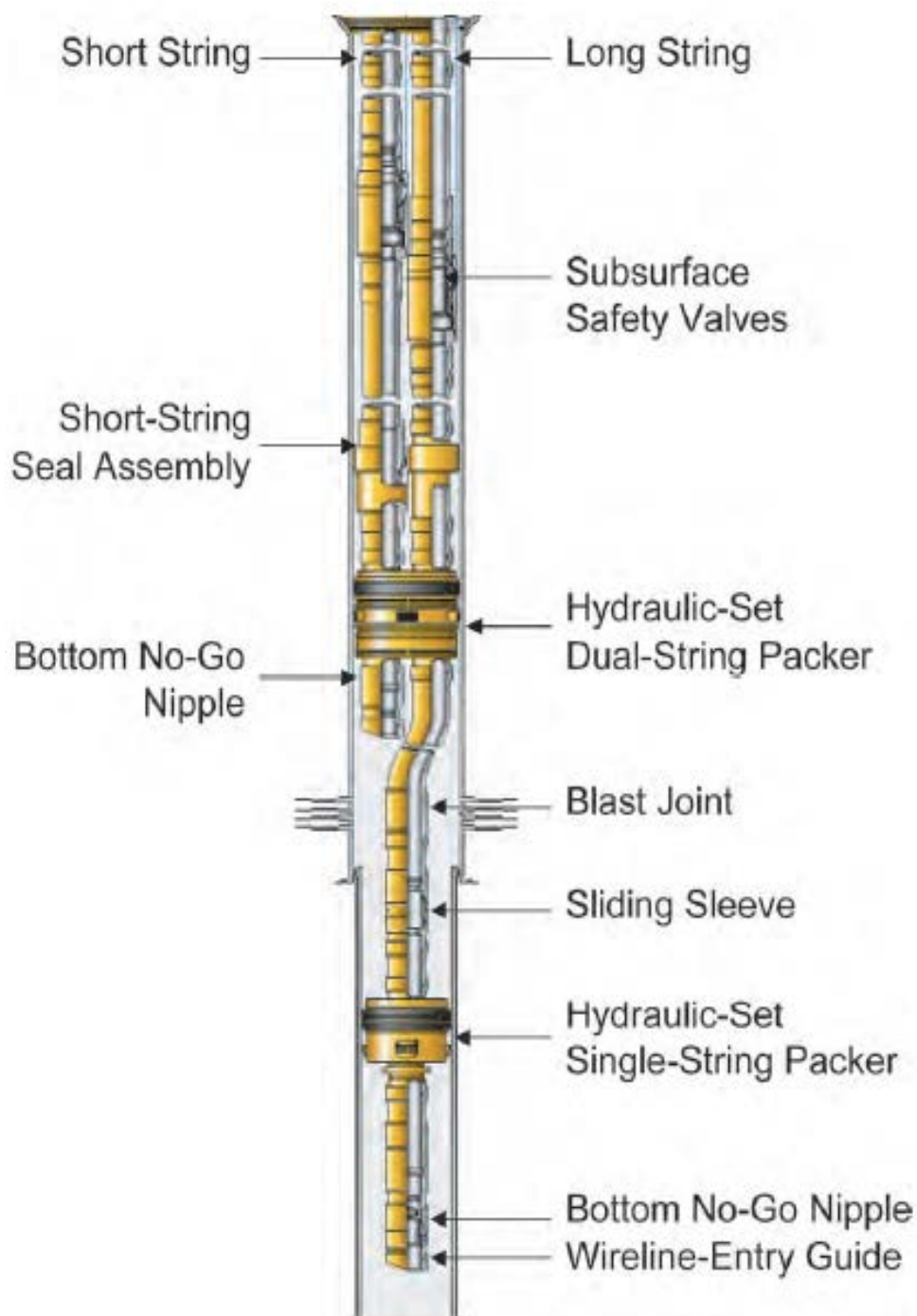
Σε γεωτρήσεις μεσαίας πίεσης και θερμοκρασίας όπου επιθυμείται η παραγωγή από περισσότερες παραγωγικές ζώνες, για την ολοκλήρωσή τους χρησιμοποιείται ανακτώμενο υδραυλικό πώμα (retrievable hydraulic-set single string packer). Το σύστημα ολοκλήρωσης αυτό (Εικόνα 6.11) επιτρέπει όλες οι διαθέσιμες παραγωγικές ζώνες της γεώτρησης να ολοκληρωθούν ταυτόχρονα και να παράγουν ατομικά ή σε συνδυασμό μεταξύ τους. Η παραγωγή στα ανώτερα επίπεδα πραγματοποιείται μέσω των λεγόμενων sliding sleeves που βρίσκονται στη σωλήνωση, δηλαδή διάτρητων τμημάτων τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση των ρευστών από το σχηματισμό προς το εσωτερικό της σωλήνωσης. Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τον αριθμό των πωμάτων που μπορούν να τοποθετηθούν, ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε υπ' όψη πως όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα σύστημα ολοκλήρωσης τόσο πιο δύσκολη και ακριβή είναι η πραγματοποίησή επισκευαστικών εργασιών στη γεώτρηση. (58).



Εικόνα 6.11 : Ολοκλήρωση γεώτρησης με παραγωγή από πολλαπλές ζώνες σε μια σωλήνωση. (58)

### 6.5.3 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ (DUAL-ZONE COMPLETION USING PARALLEL TUBING STRING)

Η μέθοδος ολοκλήρωσης διπλής ζώνης (Εικόνα 6.12) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου επιθυμείται η ταυτόχρονη παραγωγή από δύο διαφορετικές ζώνες, ενώ παραμένουν απομονωμένες η μία από την άλλη.



Εικόνα 6.12 : Ολοκλήρωση γεώτρησης με απομόνωση παραγωγικών ζωνών και παραγωγή από δύο σωλήνες παραγωγής. (58)

Αυτό το σύστημα ολοκλήρωσης περιλαμβάνει δύο σωλήνες παραγωγής, οι οποίοι ξεκινώντας από την επιφάνεια, καταλήγουν σε ένα διπλό πώμα (dual string packer). Ο ένας από τους δύο σωλήνες παραγωγής τερματίζει στο διπλό πώμα, ενώ ο άλλος συνεχίζει κατευθυνόμενος, βαθύτερα στη γεώτρηση, προς το απλό πώμα (single string packer). Ο σωλήνας για την παραγωγή της υπερκείμενης ζώνης ονομάζεται “άνω σωλήνας” (upper/short string) και ο σωλήνας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της κατώτερης ζώνης ονομάζεται “κατώτερος σωλήνας” (lower/long string). (58).

## 6.6 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

Οι εφαρμογές της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα δεν περιορίζονται στα στάδια πριν (όρυξη) και μετά (επισκευαστικές εργασίες) την έναρξη της παραγωγής υδρογονανθράκων από μια γεώτρηση. Η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε όλα τα στάδια ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης, τόσο για την παραγωγή, όσο και για την εισπίεση ρευστών.

### 6.6.1 ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Για τη λήψη δείγματος ρευστών από τον πυθμένα μιας γεώτρησης που μόλις έχει ολοκληρωθεί η όρυξή της (sampling with formation testers), συνήθως χρησιμοποιείται καλώδιο τύπου wireline. Ο ειδικός δειγματοσυλλέκτης προσαρμόζεται στο άκρο του καλωδίου, το οποίο κινείται καθοδικά εντός της γεώτρησης προς τον πυθμένα, όπου ειδικές βαλβίδες στο συλλέκτη ανοίγουν, επιτρέποντας την είσοδο των ρευστών. Ωστόσο, οι σημαντικές τεχνικές δυσκολίες της μεθόδου και συχνή αποτυχία λήψης αδιατάρακτου και μη μολυσμένου δείγματος έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών πρακτικών. Μια από αυτές περιλαμβάνει τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα για τη μεταφορά των συλλεκτών στον πυθμένα της γεώτρησης.

Η ευρεσιτεχνία με τίτλο “Coiled tubing deployed single phase fluid sampling apparatus” περιγράφει τη δυνατότητα χρήση περιελιγμένου σωλήνα για την μεταφορά δειγματολήπτη στον πυθμένα γεώτρησης και τη συλλογή δείγματος μονοφασικού ρευστού. (60).

### 6.6.2 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΩΣ ΣΩΛΗΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η πιο κοινή χρήση του περιελιγμένου σωλήνα σε εργασίες ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης είναι η μεταφορά του εξοπλισμού διατρύπησης εντός της γεώτρησης και η πραγματοποίηση μικρών εργασιών σχετικών με τον εξοπλισμό της ολοκλήρωσης.

Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις ο περιελιγμένος σωλήνας μπορεί να αποτελέσει τον ίδιο το σωλήνα παραγωγής μιας γεώτρησης. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η χρήση του περιελιγμένου σωλήνα ως μόνιμου σωλήνα παραγωγής σε μικρού βάθους γεωτρήσεις φυσικού αερίου, όπου τα τεχνικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του σωλήνα προσαρμόζονται ώστε να ανταποκρίνεται στις συνθήκες πιέσεων και τάσεων που υπόκειται ένας τυπικός σωλήνας παραγωγής. Επιπλέον, αρκετά συχνά ολόκληρος ο σωλήνας ή ένα τμήμα του μπορεί να αφηθεί στη γεώτρηση ως μόνιμο τμήμα της ολοκλήρωσής της, αποτελώντας μια οικονομικά συμφέρουσα προσέγγιση για την επέκταση της ζωής

παλιών γεωτρήσεων. Άλλες τυπικές εφαρμογές χρήσης του συνόλου ή τμημάτων του περιελιγμένου σωλήνα σε παραγωγικές γεωτρήσεις περιλαμβάνουν (47) :

- Την προσωρινή εγκατάστασή του στο εσωτερικό ενός σωλήνα παραγωγής, όπου λειτουργεί ως στήλη αύξησης της ταχύτητας ανόδου των ρευστών (velocity string) (θα μελετηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8)
- Τη χρήση τμήματός του ως “μπάλωμα” στην υπάρχουσα σωλήνωση (tubing patch)
- Τη χρήση του ίδιου του σωλήνα ως χαλικόφιλτρο (through-tubing gravel pack) (θα μελετηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7)
- Τη χρήση του σωλήνα για την κάλυψη των διάτρητων παραγωγικών τμημάτων της σωλήνωσης (sliding sleeves), που τοποθετούνται στις ενδιάμεσες παραγωγικές ζώνες, και τη διακοπή της παραγωγής από τη ζώνη αυτή

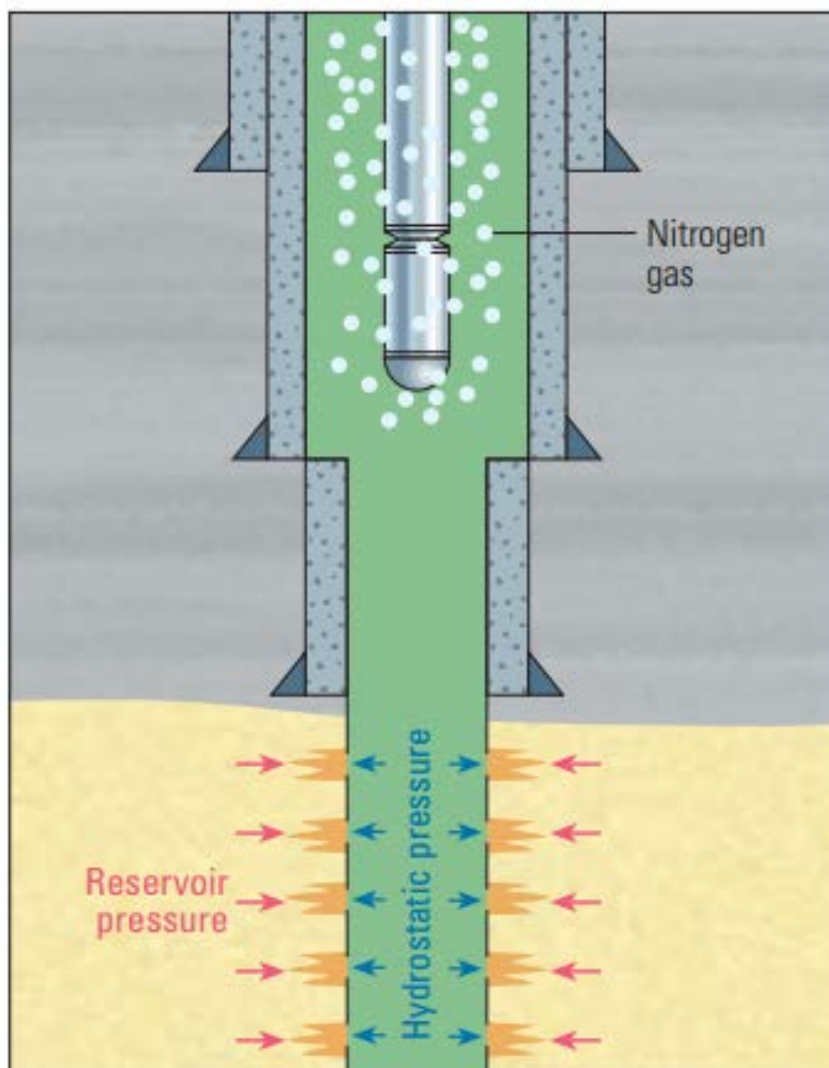
### 6.6.3 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΥΠΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τα μέσα για τη μεταφορά του εξοπλισμού διατρύπησης εντός της γεώτρησης είναι πολλά, και το κάθε ένα προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα. Η χρήση καλωδίου τύπου wireline είναι μακράν η πιο οικονομικά συμφέρουσα, καθώς το κόστος λειτουργίας του καλωδίου είναι μηδαμινό, και ο χρόνος για την ολοκλήρωση μιας εργασίας είναι συνήθως ο μικρότερος σε σχέση με τα άλλα διαθέσιμα μέσα. Σε συνθήκες, όμως, υποπίεσης (underbalanced wells), υπάρχει σοβαρός κίνδυνος τα κυκλοφορούντα ρευστά να εμποδίσουν την κατακόρυφη κίνηση του καλωδίου και να μην του επιτρέψουν να προσεγγίσει την επιθυμητή ζώνη. Για το λόγο αυτό, συνήθως, απαιτείται η αδρανοποίηση της γεώτρησης (kill well), μια διαδικασία χρονοβόρα και υψηλού ρίσκου. (50) Από την άλλη πλευρά, η μεταφορά του εξοπλισμού διατρύπησης με τη χρήση του γεωτρητικού εξοπλισμού συντήρησης απαιτεί μεγάλο αριθμό προσωπικού και πολύ χρόνο για τη σύνδεση των στελεχών της στήλης.

Η εφαρμογή των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα για τη μεταφορά του εξοπλισμού διατρύπησης στις επιθυμητές ζώνες μιας γεώτρησης είναι μια αξιόπιστη, ταχεία και ασφαλής επιλογή. Η δυνατότητα λειτουργίας σε επιτόπου συνθήκες (πίεση) που επικρατούν εντός της γεώτρησης (live well), η στιβαρότητα του σωλήνα που επιτρέπει την πρόσβασή του ακόμα και σε βαθιές οριζόντιες γεωτρήσεις, η σύντομη διάρκεια επέμβασης και ο μικρός αριθμός προσωπικού που απαιτείται είναι τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου.

#### 6.6.4 ΕΝΑΡΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΑΖΩΤΟΥ (NITROGEN LIFT/KICK OFF)

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 6.4, η συσσώρευση ρευστών στην παραγωγική ζώνη μιας γεώτρησης μπορεί να κάνει αδύνατη την έναρξη ή επανέναρξη της παραγωγής υδρογονανθράκων από αυτή. Εκτός της τεχνικής του swabbing, μια αποτελεσματική και εύκολη στην εκτέλεση μέθοδος έναρξης παραγωγής ρευστών είναι και η εισπίεση αζώτου με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα (nitrogen lift). Ο σωλήνας εισέρχεται στη γεώτρηση και φτάνει έως το εσωτερικό της στήλης των ρευστών, όπου εισπνέζεται άζωτο (Εικόνα 6.13), με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας των ρευστών. Όταν η υδροστατική πίεση της στήλης γίνει μικρότερη της πίεσης του ταμιευτήρα, ξεκινά η είσοδος των υδρογονανθράκων στο σωλήνα παραγωγής, και σταματά η διαδικασία της εισπίεσης. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί και με εισπίεση ντίζελ ή ειδικού αφρού αντί του αζώτου. (47).



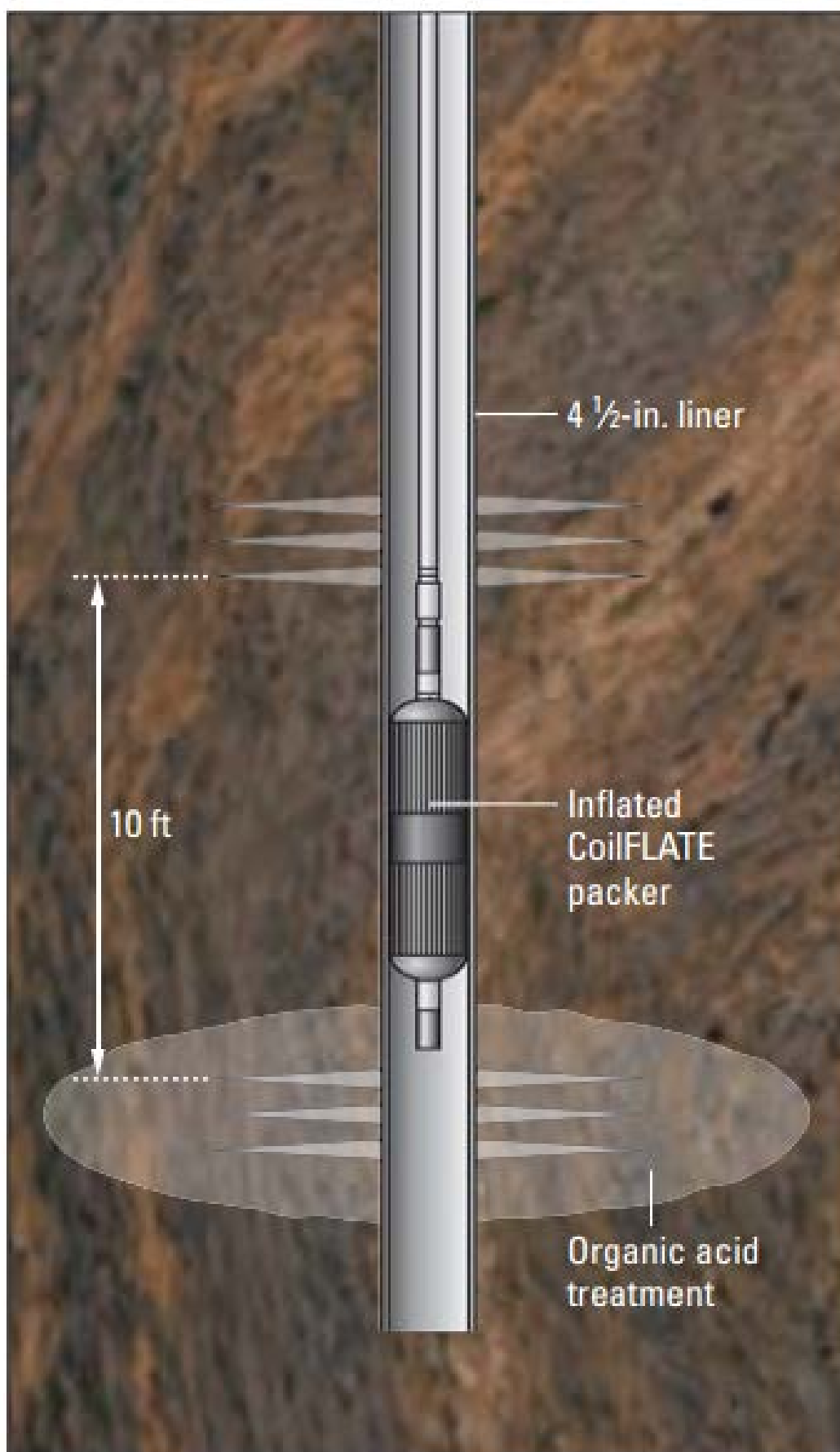
Εικόνα 6.13 : Εισπίεση αζώτου για τη μείωση της πυκνότητας της στήλης των ρευστών που εμποδίζουν την έναρξη της παραγωγής υδρογονανθράκων. (47)

### 6.6.5 ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΖΩΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (ZONAL ISOLATION)

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την απομόνωση ζωνών στις οποίες πρόκειται να γίνει εισπίεση τσιμέντου, ωστόσο δεν περιορίζεται μόνο σε αυτές τις εφαρμογές. Υπάρχουν πολλές επιτυχημένες εφαρμογές της τεχνικής στην απομόνωση τμημάτων παραγωγικών ζωνών με σκοπό τη χημική διέγερσή τους (stimulation), με τη χρήση υδραυλικών διογκούμενων πωμάτων (inflatable packers) (Εικόνα 6.14) (61). Η απομόνωση ζωνών είναι κύριο χαρακτηριστικό του σταδίου ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης αλλά και του παραγωγικού της βίου. Είτε για την εξασφάλιση επιπλέον προστασίας της γεώτρησης από κατάκλυσή της με νερό από τον υδροφόρο ορίζοντα, είτε για την επισκευή ζωνών όπου παρατηρείται διαρροή των κυκλοφορούντων ρευστών, η απομόνωση ζωνών σε μια γεώτρηση είναι συχνά απαραίτητη και αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες εργασίες (επισκευαστικές ή ολοκλήρωσης) που πραγματοποιούνται σε αυτή. Η δυνατότητα που παρέχει η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα να μεταφέρει πώματα (packers) ή plugs με σκοπό τη σφράγιση σωληνωμένων ή μη, τμημάτων μιας γεώτρησης, αλλά και να αποθέτει τσιμέντο για τη δημιουργία τσιμεντένιων plugs ακόμα και σε οριζόντιες γεωτρήσεις, την κάνει να ξεχωρίζει από το καλώδιο τύπου wireline και να προτιμάται σε πλήθος περιπτώσεων στην πετρελαϊκή βιομηχανία.

Η επιτυχημένη απομόνωση ζωνών σε μια γεώτρηση παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική αξιολόγηση της γεώτρησης αυτής. Οι υπηρεσίες που προσφέρει στη γεώτρηση είναι πολλαπλές και μεταξύ άλλων (62) :

- Προστατεύει τη σωλήνωση από τη χημική διάβρωση.
- Εμποδίζει τις εκρήξεις (blowouts) σχηματίζοντας ένα είδος στεγανοποιητικού παρεμβύσματος (seal) στη γεώτρηση.
- Προστατεύει τη σωλήνωση από ισχυρά φορτία κατά τη διάρκεια της όρυξης.



Εικόνα 6.14 : Απομόνωση τμήματος παραγωγικής ζώνης με υδραυλικό πώμα (inflatable CoilFLATE packer) της εταιρίας Schlumberger. (61)



## 6.7 ΜΟΝΑΔΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (HYDRAULIC WORKOVER/SNUBBING UNITS)

Μια εναλλακτική επιλογή για την πραγματοποίηση των εργασιών ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης είναι οι μονάδες υδραυλικής συντήρησης (Εικόνα 6.15). Όταν οι εργασίες της μονάδας πραγματοποιούνται παρουσία των επιτόπου συνθηκών (πίεση) που επικρατούν εντός της γεώτρησης (live well), τότε η τεχνική ονομάζεται “snubbing”, και διαφέρει αρκετά σε σχέση, τόσο με την τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα, όσο και του καλωδίου τύπου wireline, αν και το πεδίο εφαρμογών τους συμπίπτει. Το snubbing ουσιαστικά περιλαμβάνει τη μεταφορά μιας στήλης σωλήνα σε μια γεώτρηση μέσω μιας πλατφόρμας υδραυλικής συντήρησης (hydraulic workover rig). Σε αντίθεση με τον περιελιγμένο σωλήνα, ο σωλήνας που χειρίζεται μια μονάδα υδραυλικής συντήρησης δεν είναι ενιαίος, αλλά συναρμολογείται πάνω στην εξέδρα υδραυλικής συντήρησης, όπως ένα συμβατικό περιστροφικό γεωτρήσιμο. (63).

Τα κύρια τμήματα μιας μονάδας υδραυλικής συντήρησης (Εικόνα 6.16) είναι το επίπεδο εργασίας (work basket) στο οποίο βρίσκονται οι χειριστές και πραγματοποιείται η συναρμολόγηση των στελεχών του σωλήνα, και οι λαβές (slips) οι οποίες προωθούν υδραυλικά (εξ ου και η ονομασία “hydraulic workover) το σωλήνα εντός της γεώτρησης, όπως η κεφαλή προώθησης σε μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα.

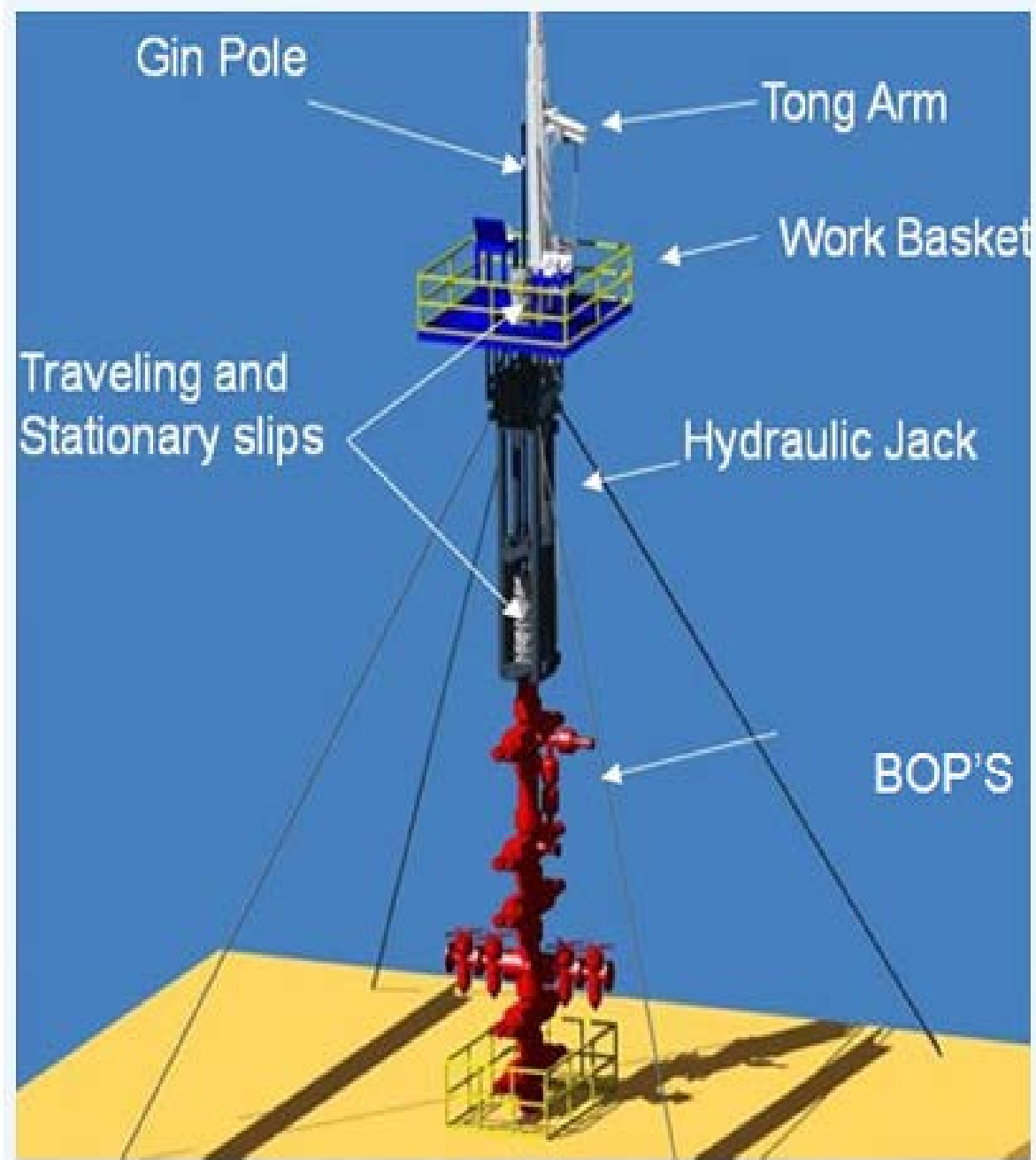
Οι εφαρμογές της τεχνικής είναι πολλές και εκτείνονται από την πλευρική ή κατακόρυφη επέκταση μιας γεώτρησης, έως την ολοκλήρωσή της. Η δυνατότητα λειτουργίας υπό συνθήκες πίεσης οφείλεται στην ικανότητα της μονάδας να προσαρμόζεται πάνω στον αντικερηκτικό εξοπλισμό ελέγχου πίεσης αλλά και πάνω στο επιφανειακό σύστημα βαλβίδων και βανών (christmas tree), καθιστώντας τη μια φθηνότερη εναλλακτική του συμβατικού εξοπλισμού συντήρησης (workover rig). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την εγκατάσταση της παραγωγικής σωλήνωσης γεωτρήσεων αλλά και για εργασίες ανάκτησης εγκλωβισμένου εξοπλισμού και φρεζαρίσματος. (64).

Το πλεονέκτημά της σε σχέση με την τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα έγκειται στην ικανότητα του σωλήνα να φτάσει σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη για την ολοκλήρωση ή επισκευή οριζόντιων γεωτρήσεων, αφού δεν παρατηρείται αναδίπλωσή του. Επιπλέον, ο περιορισμένος χώρος που καταλαμβάνει μια μονάδα (με εξαίρεση το μεγάλο ύψος της) την καθιστούν κατάλληλη εναλλακτική, όταν υπάρχει περιορισμός χώρου για μια μονάδα περιελιγμένου σωλήνα, σε θαλάσσιες πλατφόρμες. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της μεθόδου ελέγχου πιέσεων λόγω των τεχνικών χαρακτηριστικών του σωλήνα (αυξημένη διάμετρος στα σημεία ένωσης των στελεχών) και η χρονοβόρα διαδικασία συναρμολόγησης των στελεχών του σωλήνα, έχουν ως αποτέλεσμα η τεχνική να είναι μάλλον μια φθηνή

εναλλακτική των συμβατικών μονάδων συντήρησης παρά της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα και του καλωδίου τύπου wireline.



Εικόνα 6.15 : Εξέδρα μονάδας υδραυλικής συντήρησης (hydraulic workover/snubbing unit rig) της εταιρίας Halliburton. (64)



Εικόνα 6.16 : Τα τμήματα μιας μονάδας υδραυλικής συντήρησης (hydraulic workover/snubbing unit). (63)



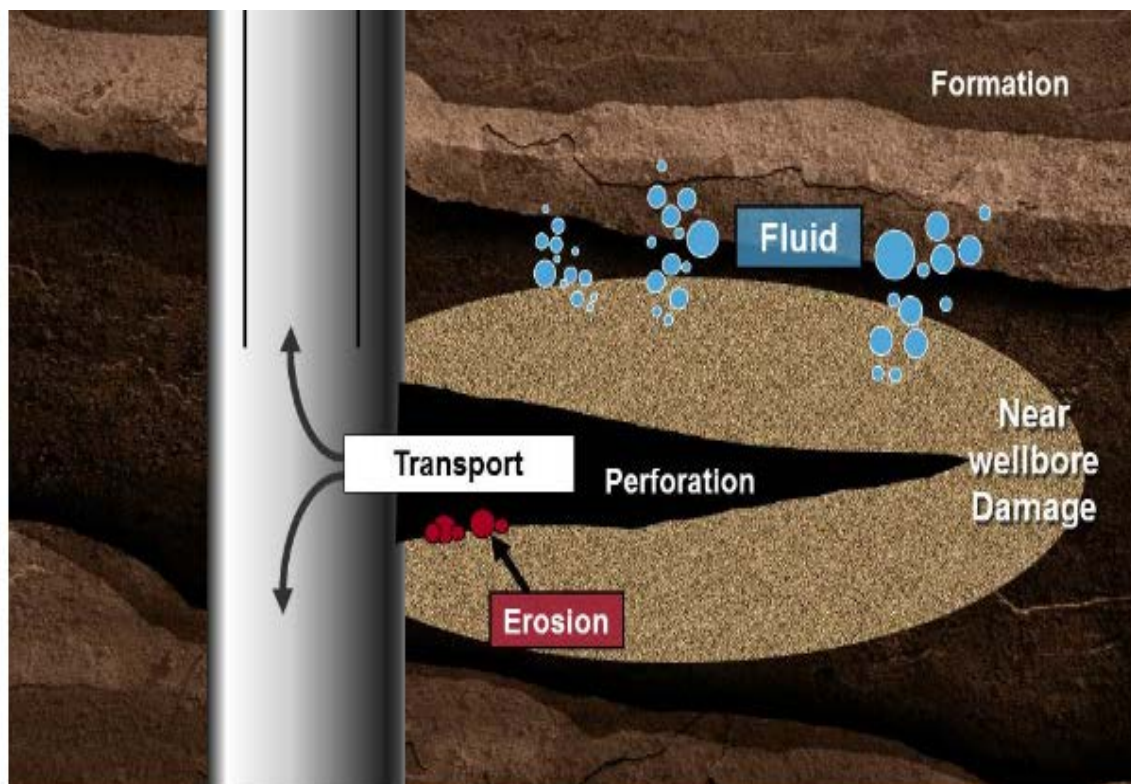
## 7. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL PRODUCTION PROBLEMS)

Η παραγωγή υδρογονανθράκων από μια παραγωγική γεώτρηση δεν πραγματοποιείται πάντοτε ανεμπόδιστα. Αντιθέτως, είναι σχεδόν βέβαιο πως σε κάποιο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας η παραγωγή θα παρεμποδιστεί, και σε κάποιες περιπτώσεις θα διακοπεί πλήρως. Οι λόγοι που παρατηρούνται τέτοια φαινόμενα ποικίλουν, και συνήθως οφείλονται σε συσσώρευση υλικών που έχουν αποκολληθεί από τη γεώτρηση (κατακρήμνιση σχηματισμού ή τσιμέντου, τμήματα σωλήνωσης) είτε υλικών που παράγονται ταυτόχρονα με τους υδρογονάνθρακες από τον ταμιευτήρα (άμμος, ασφαλτένια κ.α.), είτε που σχηματίζονται στη γεώτρηση κατά την παραγωγική διαδικασία (υδρίτες). Όποια και αν είναι η αιτία, η απομάκρυνση των υλικών αυτών (fills) είναι αναγκαία για τη συνέχιση της παραγωγικής διαδικασίας και για τη συνολική οικονομικότητα της εκμετάλλευσης.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, τμήματα σωλήνωσης που έχουν αποκολληθεί λόγω παλαιότητας, μηχανολογικός εξοπλισμός που έχει εγκλωβιστεί μέσα στη γεώτρηση και άλλοι πολλοί λόγοι μπορούν να προκαλέσουν μείωση της παραγωγής με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ανάκτησή τους. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις η παρεμπόδιση της ομαλότητας της παραγωγικής διαδικασίας δεν είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης παρέμβασης αλλά προκαλείται από τον ίδιο το σχηματισμό.

### 7.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΜΜΟΥ

Σε ασθενείς, μη συμπαγείς ψαμμιτικούς σχηματισμούς, η παραγωγή ρευστών συνοδεύεται πολύ συχνά από παραγωγή άμμου (Εικόνα 7.1). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στη ροή των ρευστών του ταμιευτήρα και στη διατμητική αστοχία του σχηματισμού κοντά στη γεώτρηση, με αποτέλεσμα τα παραγόμενα ρευστά να παρασύρουν λεπτομερείς κόκκους προς τον σωλήνα παραγωγής. Από εκεί, είτε οδηγούνται στην επιφάνεια μαζί με τους παραγόμενους υδρογονάνθρακες, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στον εξοπλισμό παραγωγής και επεξεργασίας, είτε εναποτίθενται σε διάφορα σημεία εντός της γεώτρησης, εμποδίζοντας την ομαλή παραγωγή υδρογονανθράκων. (65).



**Εικόνα 7.1 :** Αποκόλληση κόκκων άμμου από το σχηματισμό, και μεταφορά τους εντός του σωλήνα παραγωγής λόγω της ροής των υδρογονανθράκων. (66)

Ο έλεγχος εισόδου της άμμου (sand control) σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητος τόσο για να διατηρείται όσο το δυνατόν “καθαρότερος” ο σωλήνας παραγωγής και να πραγματοποιείται ανεμπόδιστα η παραγωγή υδρογονανθράκων από τη γεώτρηση, όσο και για τη διατήρηση της δομής του ταμιευτήρα γύρω από αυτή. Οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές ελέγχου εισόδου άμμου είναι αυτές που πραγματοποιούνται στα πρώτα στάδια ζωής μιας γεώτρησης, προτού η παραγωγή άμμου γίνει πρόβλημα. Μόλις αρχίσει να παράγεται άμμος, ως αποτέλεσμα υψηλών ρυθμών παραγωγής ή βίαιης εισροής νερού στον ταμιευτήρα (water break-through), τότε οι τεχνικές ελέγχου εισόδου της άμμου γίνονται δυσκολότερες και πολύ ακριβότερες στην εφαρμογή τους, με αποτέλεσμα, συχνά, να μην είναι προς το συμφέρον της εκμετάλλευσης η επέμβαση στις γεωτρήσεις αυτές. (67).

Οι τεχνικές ελέγχου εισόδου άμμου που συνδυάζονται με τις εργασίες ολοκλήρωσης της γεώτρησης, είναι οι πλέον αποδοτικές και ασφαλείς και περιλαμβάνουν (48) :

- Τη χρήση χαλικοφίλτρων (gravel packing).
- Τη συγκόλληση των κόκκων της άμμου (sand consolidation).

## 7.2 ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΩΝ (ASPHALTENES PRECIPITATION)

Τα συστατικά των ρευστών ενός ταμειυτήρα πετρελαίου είναι πολύπλοκα μίγματα υδρογονανθράκων τα οποία συνηθίζεται να κατηγοριοποιούνται σε τρία κλάσματα γνωστά και ως PNA (68) :

- Παραφινικό κλάσμα (Paraffins), το οποίο περιλαμβάνει κανονικά αλκάνια και ισοαλκάνια (n-alkanes and i-alkanes).
- Ναφθενικό κλάσμα (Naphthenes), που περιλαμβάνει τα κυκλοαλκάνια (cycloalkanes).
- Αρωματικό κλάσμα (Aromatics), το οποίο περιλαμβάνει όλες τις ενώσεις που περιέχουν μια ή περισσότερες κυκλικές δομές όμοιες με το βενζόλιο ( $C_6H_6$ ).

Τα ασφαλτένια είναι υποκατηγορία του αρωματικού κλάσματος και συναντώνται σε πολύ βαριά πετρέλαια. Είναι μεγαλομοριακές ενώσεις ατόμων άνθρακα και υδρογόνου, με ένα έως τρία άτομα θείου, οξυγόνου ή αζώτου ανά μόριο. Η βασική τους δομή αποτελείται κυρίως από αρωματικούς ή και ναφθενικούς δακτυλίους, οι οποίοι μπορεί να περιέχουν ετεροάτομα, με τα καθαρά ασφαλτένια να είναι σε μορφή μαύρης, μη πτητικής σκόνης. (68).

Η παραγωγή αργού πετρελαίου από μια γεώτρηση συνοδεύεται πολύ συχνά από αποθέσεις ασφαλτενίων, το μέγεθος και η ένταση των οποίων εξαρτάται από το είδος και τη σύσταση του πετρελαϊκού μίγματος, την πίεση και τη θερμοκρασία που επικρατεί στο παραγωγικό σύστημα (ταμειυτήρα, γεώτρηση), κατά τη διάρκεια του χρόνου παραγωγής του κοιτάσματος. Τα ασφαλτένια, ως το βαρύτερο κλάσμα του πετρελαίου, είναι αδιάλυτα σε διαλύτες ευθείας αλυσίδας (straight-chain solvents) όπως το πεντάνιο, το εξάνιο και το επτάνιο. Η κατακρήμνιση των ασφαλτενίων προκαλεί σοβαρά προβλήματα στις παραγωγικές γεωτρήσεις αργού πετρελαίου καθώς συσσωρεύονται και φράσσουν τους σωλήνες παραγωγής (Εικόνα 7.2), τις βαλβίδες ελέγχου παραγωγής, τους διαχωριστές στην επιφάνεια, τους αγωγούς μεταφοράς και τους πόρους του παραγωγικού σχηματισμού, μειώνοντας δραματικά την παραγωγικότητα των γεωτρήσεων. (69).



Εικόνα 7.2 : Συσσώρευση ασφαλτενίων σε σωλήνα παραγωγής. (70)

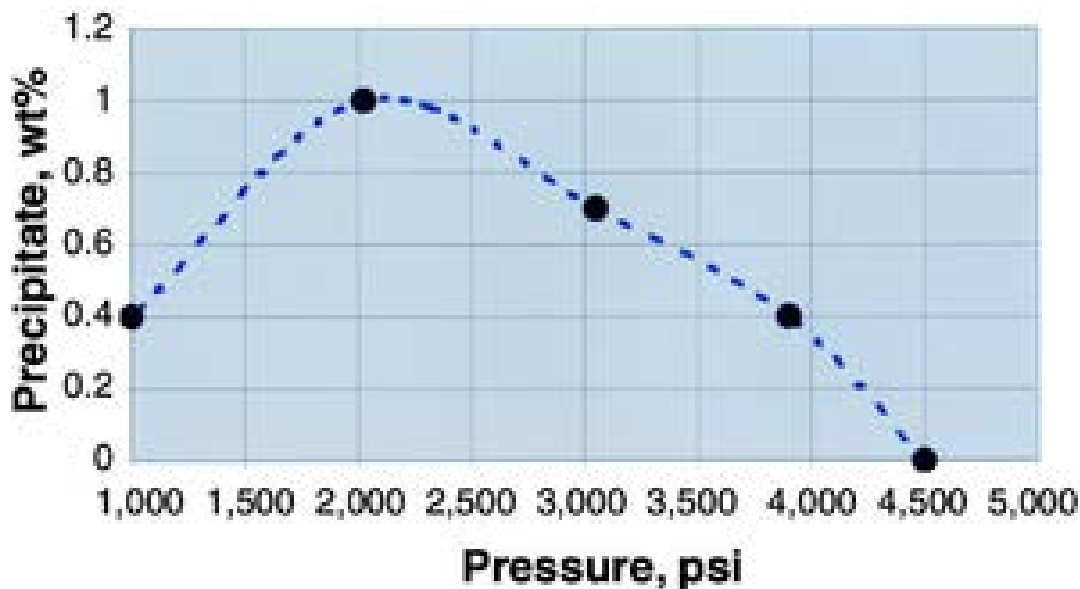
Η τάση του αργού πετρελαίου να αποθέσει στερεά ασφαλτένια δεν είναι αποκλειστικά συνδεδεμένη με την ποσότητα των διαλυμένων ασφαλτενίων που εμπεριέχονται στο ρευστό. Μάλιστα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου παραγόμενο πετρέλαιο με 1% περιεκτικότητα σε ασφαλτένια συνοδεύεται με απόθεση στερεών ασφαλτενίων, ενώ, αντιθέτως, το φαινόμενο μπορεί να εκλείπει σε παραγόμενο πετρέλαιο με 10% περιεκτικότητα σε ασφαλτένια. (69)

Οι παράγοντες εκείνοι που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κατακρήμιση των ασφαλτενίων είναι η σύσταση του πετρελαίου, η πίεση και η θερμοκρασία του ταμιευτήρα, ωστόσο και άλλοι παράγοντες έχουν κατά καιρούς ευνοήσει την κατακρήμιση, όπως η ανάμιξη διαφορετικών αργών πετρελαίων (από διαφορετικές παραγωγικές ζώνες), η τεχνική της ανύψωσης με χρήση αερίου (gas lift), η παραγωγή νερού μαζί με το πετρέλαιο και ηλεκτροκινητικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια της ροής του πετρελαίου. Η σύσταση του πετρελαίου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαλυτική του ικανότητα, άρα και στην τάση του να αποθέσει στερεά ασφαλτένια, ενώ, γενικά, όσο η πίεση (Εικόνα 7.3) και η θερμοκρασία του ταμιευτήρα μειώνονται, τόσο αυξάνεται η κατακρήμιση των ασφαλτενίων. Για το λόγο αυτό είναι σαφές, πως οι σωλήνες παραγωγής, στους οποίους η πίεση και η θερμοκρασία αλλάζουν δραματικά κατά το μήκος τους, επηρεάζονται περισσότερο από τη δημιουργία συσσωματωμάτων στερεών ασφαλτενίων. (71).

Στην Εικόνα 7.3, για ένα κοίτασμα με αρχική πίεση 5.000 psi, παρατηρείται πως η έναρξη της κατακρήμισης των ασφαλτενίων λαμβάνει χώρα μόλις η πίεση φτάσει τα 4.500 psi. Η πίεση αυτή ονομάζεται πίεση εκκίνησης (onset pressure), και όσο μειώνεται, τόσο αυξάνεται το κατά βάρος ποσοστό των κατακρημισμένων ασφαλτενίων. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό σταματάει να αυξάνεται σε μια συγκεκριμένη πίεση, η οποία προσεγγίζει κατά πολύ το σημείο φυσαλίδας (bubble

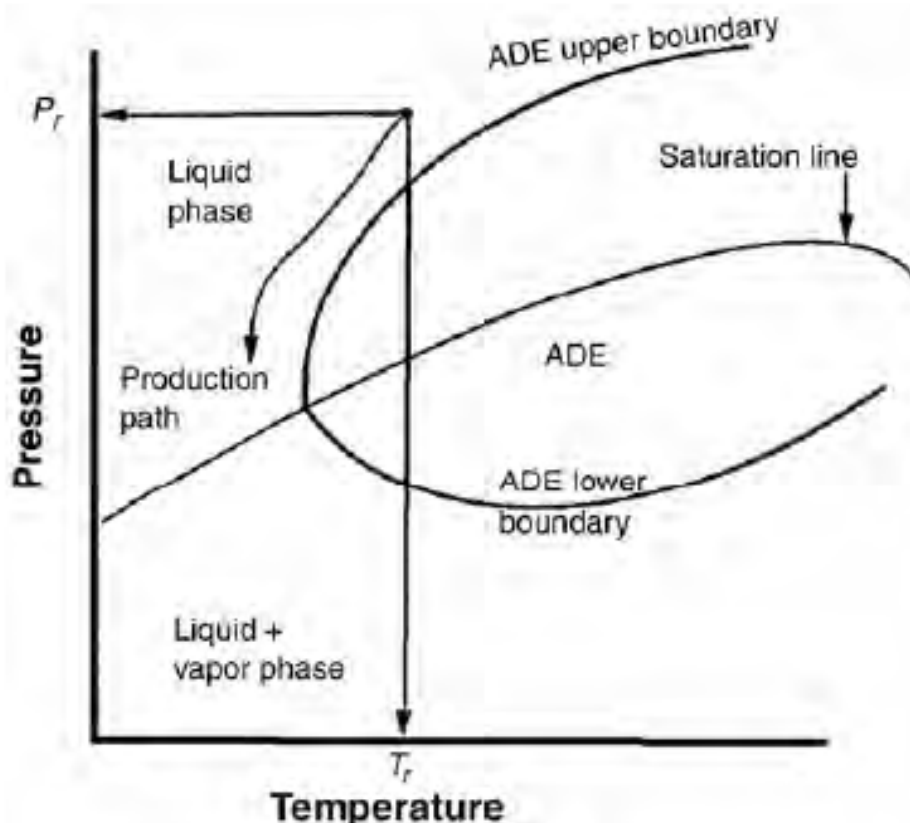


point), και ακολουθεί πτωτική τάση με περαιτέρω μείωση της πίεσης. Η μείωση του κατά βάρος ποσοστού κατακρημνισμένων ασφαλτενίων οφείλεται στην επαναδιάλυσή τους, η οποία, θεωρητικά, ολοκληρώνεται στη λεγόμενη πίεση διαλυτοποίησης (dissolution pressure). (69).



Εικόνα 7.3 : Η σχέση μεταξύ πίεσης ταμειυτήρα και κατά βάρος κατακρημνισμένων ασφαλτενίων υπο σταθερή θερμοκρασία 100 °C. Διακρίνονται οι δύο οριακές πιέσεις, η πίεση εκκίνησης (onset pressure) στα 4.500 psi, και το σημείο φυσαλίδας (bubble point) στα 2.000 psi. (69)

Όταν λαμβάνεται υπ' όψη και η μεταβολή της θερμοκρασίας, τότε, μέσω του θερμοδυναμικού διαγράμματος φάσεων ασφαλτενίων (Asphaltene Deposition Envelope – ADE) (Εικόνα 7.4), γίνονται ορατά τα όρια εντός των οποίων λαμβάνει χώρα το φαινόμενο. Συγκεκριμένα, το σύνολο των τιμών πίεσης εκκίνησης δημιουργεί την άνω καμπύλη (ADE upper boundary), ενώ το σύνολο των πιέσεων διάλυσης δημιουργεί την κάτω καμπύλη του φακέλου (ADE lower boundary). Στο κέντρο των δύο καμπυλών υπάρχει μια καμπύλη, ονομαζόμενη καμπύλη κορεσμού (saturation Pressure/Temperature curve), η οποία περιλαμβάνει το σύνολο των σημείων φυσαλίδας. Συνδυάζοντας τα δύο διαγράμματα, είναι προφανές πως η διαδικασία της κατακρήμνισης λαμβάνει χώρα όταν το σημείο συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας βρίσκεται εντός του φακέλου, με το φαινόμενο να είναι εντονότερο όσο το σημείο αυτό πλησιάζει καθοδικά την καμπύλη κορεσμού. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται μια προτεινόμενη πορεία μεταβολής πίεσης και θερμοκρασίας κατά την παραγωγή, για την αποφυγή της δημιουργίας στερεών αποθέσεων ασφαλτενίων. (69).



Εικόνα 7.4 : Φάκελος κατακρήμνισης ασφαλτενίων και προτεινόμενη πορεία παραγωγής για την αποφυγή δημιουργίας στερεών αποθέσεων. (69)

### 7.3 ΑΠΟΘΕΣΗ ΚΗΡΩΝ (WAXES)

Οι πετρελαϊκοί κηροί (waxes) είναι πολύπλοκα μίγματα κανονικών αλκανίων, ισοαλκανίων και κυκλοαλκανίων (n-alkanes, i-alkanes and cycloalkanes), και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη σύστασή τους (68) :

- Οι κηροί που αποτελούνται κυρίως από κανονικά αλκάνια ονομάζονται παραφινικοί κηροί (paraffin waxes), και κρυσταλλώνονται σε μεγάλες, πλατιές επιφάνειες (macrocrystalline structures).
- Οι κηροί που αποτελούνται κυρίως από κυκλοαλκάνια και ισοαλκάνια ονομάζονται μικροκρυσταλλικοί κηροί, και κρυσταλλώνονται σε μικρές, βελονοειδείς δομές (microcrystalline structures).

Οι παραφινικοί κηροί στο αργό πετρέλαιο αποτελούνται κυρίως από μεγάλο μήκους αλυσίδες κορεσμένων υδρογονανθράκων, με μήκη αλυσίδων ανθράκων μεταξύ C<sub>15</sub> και C<sub>75+</sub>, και σημείο τήξης μεταξύ 40 και 70 °C. Οι κηροί αυτοί αναφέρονται και ως μακροκρυσταλλικοί (macrocrystalline waxes) και δημιουργούν πολλά προβλήματα στην παραγωγή και μεταφορά του πετρελαίου, καθώς, υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, κατακρημνίζονται και δημιουργούν αποθέσεις (deposits). (69).

Η διαδικασία δημιουργίας στερεών κρυστάλλων κηρών περιλαμβάνει δύο στάδια, την πυρήνωση (nucleation) και την κρυσταλλική ανάπτυξη (crystal growth). Με την παραγωγή του αργού πετρελαίου, καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται ξεπερνώντας μια κρίσιμη τιμή (wax appearance temperature – WAT), και καθώς οι ελαφριοί υδρογονάνθρακες εξατμίζονται, οι διαλυμένοι στο πετρέλαιο κηροί αρχίζουν να σχηματίζουν αδιάλυτες συστάδες (clusters). Τα μόρια των κηρών προσκολλώνται και αποκολλώνται από τις συστάδες αυτές, έως ότου αποκτήσουν ένα κρίσιμο μέγεθος και σταθεροποιηθούν. Οι συστάδες αυτές ονομάζονται “πυρήνες” (nuclei), και η διαδικασία σχηματισμού τους ονομάζεται πυρήνωση. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη συνεχή ανάπτυξη (growth) των συστάδων κηρών μέσα στους σωλήνες παραγωγής, δεδομένου ότι η θερμοκρασία παραμένει κάτω της κρίσιμης τιμής (WAT), καθώς όλο και περισσότερα μόρια προσκολλώνται σε αυτούς, σχηματίζοντας, τελικά, τις χαρακτηριστικές, πεπλατυσμένες κρυσταλλικές δομές. (68).

Οι αποθέσει κηρών μπορούν να διαφέρουν δραματικά ως προς τη συνοχή και να εμφανίζονται, είτε με τη μορφή μαλακών άμορφων μαζών, είτε ως σκληρά, εύθραυστα, κρυσταλλικά συσσωματώματα. Επιπλέον, η θέση, εντός του σωλήνα παραγωγής, στην οποία θα σχηματιστούν τα συσσωματώματα διαφέρουν, ανάλογα με το μοριακό βάρος των κηρών που τα συνιστούν. Συγκεκριμένα, κηροί μεγάλου μοριακού βάρους τείνουν να αποτίθενται στα τμήματα της γεώτρησης με την υψηλότερη θερμοκρασία, ενώ οι μικρού μοριακού βάρους κηροί αποτίθενται σε πιο ψυχρά τμήματα. (69).

Τα προβλήματα που προκαλούν οι αποθέσεις είναι άμεσα ορατά στην παραγωγή (Εικόνα 7.5) και μεταφορά του αργού πετρελαίου, καθώς μπορεί να προκαλέσουν μείωση της παραγωγής, βλάβες στον εξοπλισμό ελέγχου παραγωγής πυθμένα, και να δυσχεράνουν εργασίες επισκευής της γεώτρησης, μην επιτρέποντας την πρόσβαση του εξοπλισμού ή και προκαλώντας του φθορές.



Εικόνα 7.5 : Απόθεση κηρών σε σωλήνα παραγωγής. (72)

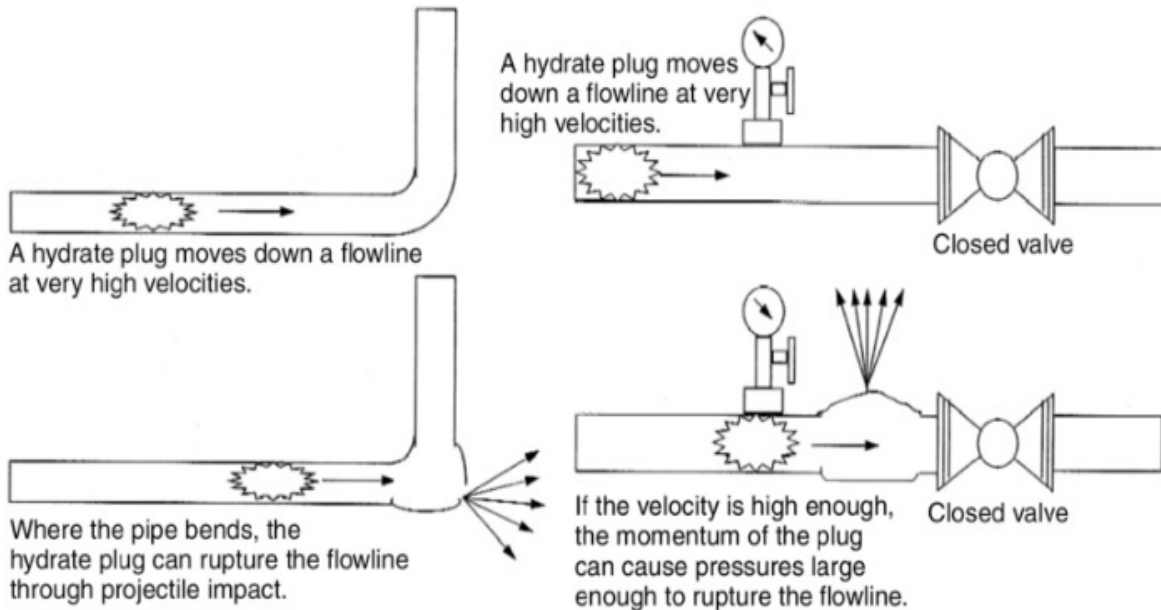
## 7.4 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΙΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (NATURAL GAS HYDRATES)

Οι υδρίτες φυσικού αερίου (natural-gas hydrates) είναι στερεές κρυσταλλικές ενώσεις, όμοιες με πάγο, και διαφέρουν από τους κοινούς υδρίτες ανόργανου άλατος (inorganic-salt hydrates), όπως το  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Σχηματίζονται όταν ελεύθερο νερό και φυσικό αέριο συνδυάζονται σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να λάβει χώρα τόσο σε γεωτρήσεις φυσικού αερίου, όσο και σε γεωτρήσεις πετρελαίου, και η ένταση αλλά και η θέση εμφάνισής του εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες (69) :

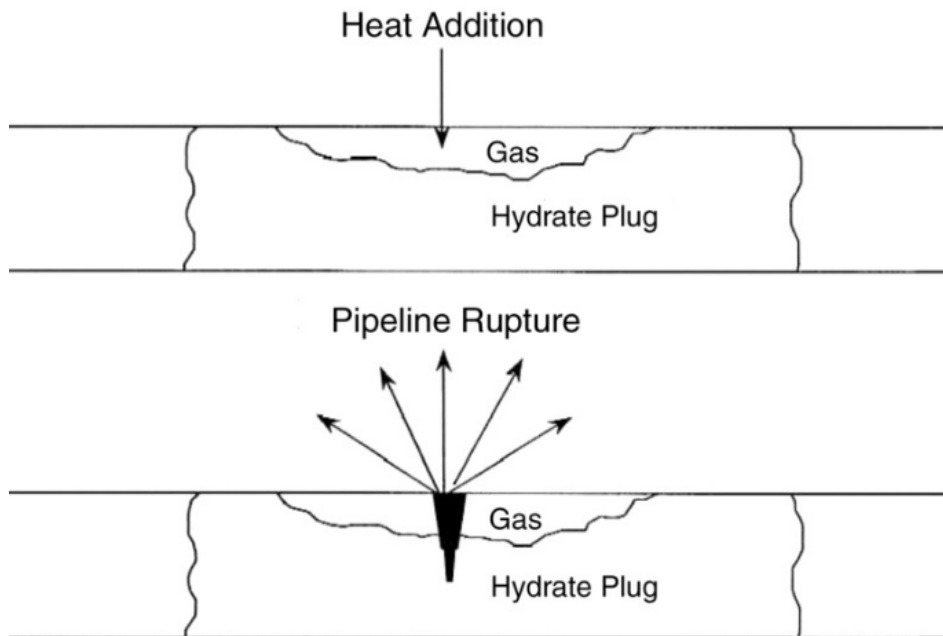
- Τις λειτουργικές παραμέτρους της εκμετάλλευσης.
- Το σχεδιασμό της γεώτρησης.
- Τη γεωθερμική της βαθμίδα.

Στις κατάλληλες συνθήκες συνδυασμού πίεσης, θερμοκρασίας και αερίων μικρού μοριακού βάρους, τα μόρια του νερού αναδιατάσσονται σε ομοεπίπεδους 5-μελής ή 6-μελής δακτυλίου. Οι δακτύλιοι αυτοί, με τη σειρά τους, σχηματίζουν τρισδιάστατα πολύεδρα (τετραεδρικά, δωδεκαεδρικά και εξαεδρικά) γύρω από τα αέρια. Τα πολύεδρα αυτά επίσης συνδυάζονται και σχηματίζουν ειδικά κρυσταλλικά πλέγματα. Σε αυτά τα στερεά, ένας όγκος νερού μπορεί να “εγκλείει” (enclathrate) 70 ή και 300 φορές μεγαλύτερο όγκο αερίων. Τα περισσότερα αέρια, εκτός του υδρογόνου και του ηλίου, μπορούν να σχηματίσουν υδρίτες. Συνήθως, τα παραπάνω στερεά, σχηματίζονται με  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_1$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  και ισοβουτάνιο, σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης (69).

Τα προβλήματα που προκαλούν οι υδρίτες ομοιάζουν με εκείνα που προκαλούνται από την κατακρήμνιση των ασφατενίων και των κηρών, ωστόσο είναι αρκετά πιο σοβαρά. Εκτός της φραγής των σωλήνων παραγωγής και της μείωσης της παραγωγής, οι υδρίτες δημιουργούν σοβαρά προβλήματα ασφαλείας στην εκμετάλλευση συνολικά. Όταν μικρά κομμάτια, από τα συσσωματώματα που δημιουργούν, αποκολληθούν και κινηθούν προς τις επιφανειακές σωληνώσεις, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος, λόγω της σκληρότητάς τους, να προκαλέσουν φθορές, ή ακόμα και να διαπεράσουν τα τοιχώματα των σωλήνων (Εικόνα 7.6). Σε περιπτώσεις όπου μέσα σε συσσωμάτωμα υδριτών σε μια σωλήνωση υπάρχει εγκλωβισμένο αέριο, εάν το αέριο αυτό θερμανθεί, οι υδρίτες που έρχονται σε επαφή με αυτό διασπώνται ταχύτατα, προκαλώντας απότομη αύξηση της πίεσης στο σημείο αυτό της σωληνώσεως, με αποτέλεσμα την ρωγμάτωσή της.



Εικόνα 7.6 : Φθορές σε επιφανειακές σωληνώσεις που μπορεί να προκαλέσουν αποκολλημένα κομμάτια υδριτών. (73)



Εικόνα 7.7 : Ρωγμάτωση σωλήνα παραγωγής λόγω διάσπασης υδριτών και απότομης αύξησης της τοπικής πίεσης. (73)

## 7.5 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ (INORGANIC SCALES)

Η παραγωγή νερού σε μια γεώτρηση πετρελαίου ή φυσικού αερίου είναι ένα συχνό φαινόμενο. Τα προβλήματα, ωστόσο, που δημιουργεί το νερό δεν περιορίζονται στην ανάγκη διαχείρισης των τεράστιων παραγόμενων ποσοτήτων και στο σχηματισμό υδριτών. Σε πολλές παραγωγικές γεωτρήσεις όπου παράγεται και νερό, παρατηρείται το φαινόμενο σχηματισμού αποθέσεων ανόργανων επιφανειακών επιστρωμάτων (scales). Τα επιστρώματα αυτά δημιουργούνται στα

τοιχώματα των σωλήνων παραγωγής (Εικόνα 7.8), στις βαλβίδες ασφαλείας, στις διόδους ροής (perforations) των παραγόμενων υδρογονανθράκων μέσα στο σχηματισμό και γενικά σε κάθε σημείο εντός της γεώτρησης, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στην παραγωγικότητά της και στη συνολική ασφάλεια της εκμετάλλευσης. Εάν δεν αντιμετωπιστούν άμεσα, η υπερβολική συσσώρευση επιφανειακών επιστρωμάτων μπορεί, εν τέλει, να οδηγήσει σε μόνιμη εγκατάλειψη μιας γεώτρησης. (69).



**Εικόνα 7.8 : Απόθεση ανόργανων επιφανειακών επιστρωμάτων (inorganic scales) σε παραγωγική γεώτρηση πετρελαίου. (74)**

Η διαδικασία σχηματισμού των επιφανειακών επιστρωμάτων είναι η εξής : Καθώς το πετρέλαιο, ή και το αέριο, μαζί με την άλμη (νερό με διαλυμένα άλατα – brine) κινούνται από το σχηματισμό προς την επιφάνεια, η πίεση και η θερμοκρασία τους αλλάζουν, με αποτέλεσμα ορισμένα άλατα που εμπεριέχονται στην άλμη να κατακρημνίζονται. Η άλμη αυτή, είτε προέρχεται από τον ίδιο το σχηματισμό, είτε από γεωτρήσεις εισπίεσης (injection wells), όπου νερό (συνήθως θαλασσινό) εισπνέζεται στον ταμειυτήρα με σκοπό τη διατήρηση της πίεσής του και την υποβοήθηση της ροής του πετρελαίου προς τις παραγωγικές γεωτρήσεις, και σε κάποιο στάδιο της παραγωγής το νερό αυτό εισχωρεί και στην παραγωγή (scale from incompatible waters). Η χημική σύσταση των πιο κοινών επιφανειακών επιστρωμάτων παρουσιάζεται στον πίνακα της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 7.9) (69).

Το φαινόμενο της απόθεσης επιφανειακών επιστρωμάτων μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορα στάδια μιας εκμετάλλευσης. (74) :

- Κατά το στάδιο της όρυξης ή της ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης, όταν τα ρευστά διάτρησης ή ολοκλήρωσης δεν είναι συμβατά με το ενδογενές νερό του σχηματισμού.

- Κατά το στάδιο της εισπίεσης νερού (όπως προαναφέρθηκε) όταν το εισπιεζόμενο νερό δεν είναι συμβατό με το νερό του σχηματισμού.
- Κατά το στάδιο της παραγωγής, όταν παράγεται νερό από το σχηματισμό μαζί με το πετρέλαιο.
- Σε περιπτώσεις παραγωγής από πολλαπλές ζώνες, όταν τα παραγόμενα ρευστά αναμιγνύονται και μεταφέρονται στην επιφάνεια.

<u>Mineral</u>	<u>Formula</u>
Calcite	CaCO <sub>3</sub>
Aragonite	CaCO <sub>3</sub>
Vaterite	CaCO <sub>3</sub>
Anhydrite	CaSO <sub>4</sub>
Gypsum	CaSO <sub>4</sub>
Barite	BaSO <sub>4</sub>
Celestite	SrSO <sub>4</sub>
Mackinawite	FeS
Pyrite	FeS <sub>2</sub>
Halite	NaCl
Fluorite	CaF <sub>2</sub>
Sphaerulite	ZnS
Galena	PbS

Εικόνα 7.9 : Πίνακας χημικής σύστασης και ονομασίας των πιο κοινών ανόργανων επιφανειακών επιστρωμάτων (inorganic scales). (69)

## 7.7 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

### 7.7.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΜΜΟΥ (SAND CONTROL)

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο αυτό (Παράγραφος 7.10), η βέλτιστη αντιμετώπιση του φαινομένου της εισόδου άμμου σε μια παραγωγική γεώτρηση είναι η εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου εισόδου στο στάδιο της ολοκλήρωσης της γεώτρησης αυτής. Οι δύο πιο αποτελεσματικές τεχνικές είναι η εγκατάσταση χαλικόφιλτρων στις παραγωγικές ζώνες (gravel packs) και η συγκόλληση των κόκκων της άμμου (sand consolidation). Και οι δύο τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν με μεγάλη επιτυχία με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα.

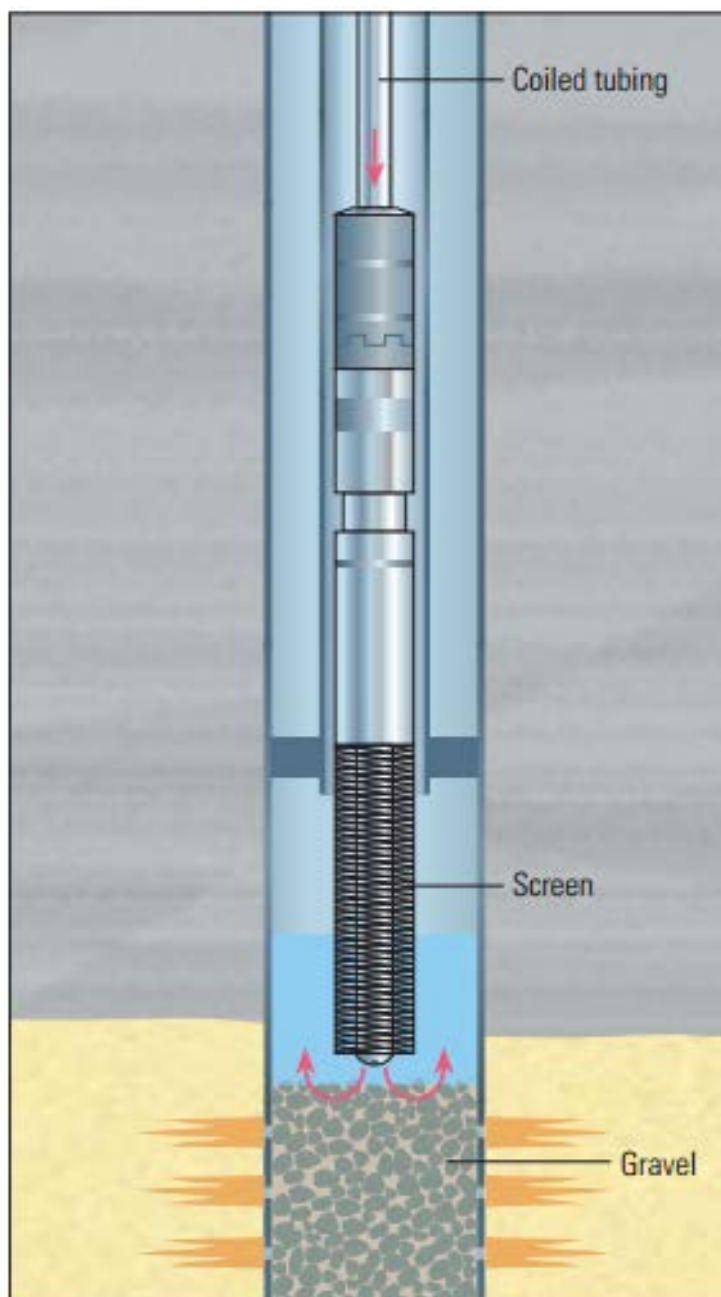
Η εγκατάσταση των χαλικόφιλτρων (gravel-pack washdown) είναι μια σχετικά απλή μέθοδος στη σύλληψή της (Εικόνα 7.4). Αρχικά ο σωλήνας κατέρχεται στο επίπεδο της παραγωγικής ζώνης και στη συνέχεια χαλίκια (ουσιαστικά κόκκοι άμμου 5-6 φορές μεγαλύτεροι από τους παραγόμενους από το

σχηματισμό) εισπιέζονται από το εσωτερικό του, δημιουργώντας ένα σωρό (πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης ή πάνω από πώματα που χωρίζουν τις παραγωγικές ζώνες), το ύψος του οποίου εξαρτάται από το ύψος της ζώνης που πρέπει να προστατευτεί. Ακολούθως, ο σωλήνας ανακτάται στην επιφάνεια, όπου προσαρμόζεται στο άκρο του ένα ειδικό κυλινδρικό πλέγμα (screen), και στη συνέχεια εισέρχεται και πάλι στη γεώτρηση κατευθυνόμενος προς το επίπεδο των χαλικιών. Μόλις το κυλινδρικό πλέγμα πλησιάσει σε μικρή απόσταση το σωρό των χαλικιών η κίνηση του σωλήνα αναστέλλεται, και ξεκινά η εκτόξευση ρευστού (συνήθως νερού) προς το σωρό με σκοπό την ανακίνησή του (washdown). Η ανακίνηση αυτή, διευκολύνει την εισχώρηση του πλέγματος εντός του σωρού και την τοποθέτησή του κατά μήκος της παραγωγικής ζώνης. Μόλις ολοκληρωθεί η τοποθέτηση του πλέγματος ο σωλήνας ανακτάται στην επιφάνεια, έχοντας εγκαταστήσει στη γεώτρηση ένα σύστημα το οποίο εμποδίζει τη διέλευση της άμμου εντός της παραγωγικής γεώτρησης, επιτρέποντας, ταυτόχρονα, την ανεμπόδιστη ροή των παραγόμενων ρευστών από τον ταμιευτήρα. Σε περιπτώσεις όπου παρατηρηθεί παραγωγή άμμου σε γεώτρηση (στην οποία δεν έχει εγκατασταθεί χαλκόφιλτρο), η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα παρέχει τη δυνατότητα εγκατάστασης χαλκόφιλτρου μέσα από το σωλήνα παραγωγής, χωρίς να επηρεάζεται η διάταξη ολοκλήρωσης της γεώτρησης αυτής. (47).

Η τεχνική εγκατάστασης χαλκόφιλτρων είναι η πιο διαδεδομένη, ωστόσο υπάρχουν δύο εξ ίσου αποτελεσματικές εναλλακτικές της. Η πρώτη περιλαμβάνει την εισπίεση ειδικών χαλικιών, επικαλυμμένων με ρητίνη, τα οποία γεμίζουν τις διόδους (perforations) του σχηματισμού και όλο το ύψος της παραγωγικής ζώνης, στερεοποιούνται (λόγω της θερμότητας του ταμιευτήρα ή με εισπίεση ατμού) και στη συνέχεια φρεζάρονται, δημιουργώντας ένα συμπαγές λεπτό στρώμα στα τοιχώματα της γεώτρησης και εξαλείφοντας την ανάγκη για τη χρήση των ειδικών πλεγμάτων. Η δεύτερη τεχνική περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός “προπληρωμένου” πλέγματος (prepacked screen). Το πλέγμα αυτό διαμορφώνεται από το συνδυασμό δύο πλεγμάτων, ανάμεσα στα οποία βρίσκεται ρητινωμένα χαλίκια, δημιουργώντας έτσι επιπλέον εμπόδια στη διέλευση της άμμου. (75).

Μια νέα τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των χαλκόφιλτρων είναι τα ονομαζόμενα “Expandable Sand Screens” ή “ESS”, δηλαδή ειδικά πλέγματα τα οποία τοποθετούνται στην παραγωγική ζώνη και στη συνέχεια διαστέλλονται, καταλαμβάνοντας όλη τη διάμετρο της γεώτρησης (σωληνωμένης ή μη). Σκοπός αυτής της τεχνικής είναι να μειωθεί ο δακτύλιος μεταξύ τοιχωμάτων της γεώτρησης και πλέγματος, απ όπου είναι πιθανό να υπάρξουν διαρροές άμμου ή χαλικιών. (76).





Εικόνα 7.10: Εγκατάσταση χαλικόφιλτρου (gravel pack) με τη μέθοδο gravel-pack washdown. (47)

Η τεχνική συγκόλλησης των κόκκων της άμμου (sand consolidation) ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση για τη λύση του προβλήματος. Στόχος της τεχνικής αυτής δεν είναι ο περιορισμός της μετακίνησης των κόκκων με τη χρήση μηχανικών μέσων, αλλά η χημική δέσμευση των κόκκων στην αρχική τους θέση, μέσα στο σχηματισμό. Για την επίτευξη της δέσμευσης αυτής χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών ρητίνες, οι οποίες εισπνέζονται εντός των οπών στη παραγωγική σωλήνωση και μέσα στις διόδους στο σχηματισμό (perforations) (ή απευθείας στο σχηματισμό εάν δεν έχει εγκατασταθεί ακόμα η παραγωγική σωλήνωση ή εάν δεν προβλέπεται εγκατάστασή της), όπου προσκολλούνται στους κόκκους τους σχηματισμού. Στη συνέχεια η ρητίνη σκληραίνει και σχηματίζει μια ομογενοποιημένη, σταθερή μάζα με τους κόκκους της άμμου, εμποδίζοντάς τους

να αποκολληθούν από το σχηματισμό. Ο στόχος της τεχνικής αυτής είναι η σταθεροποίηση των κόκκων του σχηματισμού σε μια ακτίνα 3 ft από τα τοιχώματα της γεώτρησης, χωρίς όμως να ελαττώνει αισθητά τη διαπερατότητά του. (77).

Οι τρεις εμπορικά διαθέσιμοι τύποι ρητινών που χρησιμοποιούνται στην τεχνική είναι οι εξής (77) :

- Εποξειδικές ρητίνες (epoxies).
- Ρητίνες φουρανίου (furans) (συμπεριλαμβανομένων των μιγμάτων φουρανίου/φαινόλης).
- Φαινολικές ρητίνες.

Κατά την είσοδό τους στον ταμιευτήρα οι ρητίνες βρίσκονται σε υγρή μορφή και, επομένως, απαιτείται κάποιος καταλύτης ή παράγοντας σκλήρυνσης (curing agent) για τη στερεοποίησή τους. Η προσθήκη του καταλύτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει την ανάμιξη καταλύτη και ρητίνης στην επιφάνεια, πριν την εισπίεσή της, καθώς αυτού του είδους οι καταλύτες (internal catalysts) χρειάζονται χρόνο ή και θερμότητα για να προκαλέσουν τη σκλήρυνση της ρητίνης. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει την επιτόπου εισπίεση του καταλύτη (external catalyst) στον ταμιευτήρα, αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εισπίεσης της ρητίνης. Το σαφές πλεονέκτημα του πρώτου τρόπου προσθήκης του καταλύτη είναι η εξασφάλιση της επαφής όλης της ποσότητας ρητίνης με την απαιτούμενη ποσότητα καταλύτη, λόγω της ελεγχόμενης ανάμιξής τους, για την αποτελεσματική σκλήρυνσή της στον ταμιευτήρα. Ωστόσο, εάν δεν γίνει σωστή επιλογή καταλύτη και η ανάμιξή του με τη ρητίνη υπο τις κατάλληλες συνθήκες, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος πρόωρης σκλήρυνσης του μίγματος εντός του σωλήνα παραγωγής, δημιουργώντας, έτσι, τεράστια προβλήματα στην εκμετάλλευση. Τόσο οι εποξειδικές όσο και οι φαινολικές ρητίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με καταλύτες τύπου internal και με τύπου external με την ίδια αποτελεσματικότητα. Η ταχεία, όμως, σκλήρυνση των ρητινών φουρανίου (και των μιγμάτων φουρανίου/φαινόλης) αποκλείει, αναγκαστικά, την ανάμιξή τους με τον καταλύτη (internal catalyst) στην επιφάνεια. (77).

Για τη σωστή εισπίεση των ρητινών, χωρίς τον κίνδυνο να μολυνθούν άλλες ζώνες της γεώτρησης ή ο εξοπλισμός ελέγχου παραγωγής πυθμένα, είναι απαραίτητη η απομόνωση του τμήματος στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η επέμβαση. Όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 6.5.4, η απομόνωση ζωνών εντός μιας γεώτρησης μπορεί να πραγματοποιηθεί επιτυχώς με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. Σε εργασίες συγκόλλησης των κόκκων της άμμου, λοιπόν, χρησιμοποιείται περιελιγμένος σωλήνας τόσο για τη μεταφορά και τοποθέτηση εντός της γεώτρησης υδραυλικών διογκούμενων πωμάτων (inflatable packers) για την απομόνωση των ζωνών επέμβασης, όσο και για την εισπίεση του μίγματος ή κάθε ρευστού ξεχωριστά. (78).

### 7.7.2 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΑΜΜΟΥ (SAND CLEANOUT)

Ο καθαρισμός γεωτρήσεων από άμμους, ήταν από τις πρώτες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν οι μονάδες περιελιγμένου σωλήνα στις αρχές τις δεκαετίας του 1960. Σήμερα, η αφαίρεση υλικών απόθεσης σε γεωτρήσεις όπως η άμμος, αποτελεί το πλέον σύνηθες πεδίο εφαρμογής του περιελιγμένου σωλήνα. Τα υλικά απόθεσης εκτός του ότι εμποδίζουν τη διέλευση των παραγόμενων ρευστών (πετρελαίου ή και αερίου), άρα μειώνουν σημαντικά την παραγωγικότητα μιας γεώτρησης, κάνουν αδύνατη την προσπέλαση επισκευαστικού εξοπλισμού, όπως το καλώδιο τύπου wireline, και εμποδίζουν τη λειτουργία των βαλβίδων ελέγχου ρευστών στον πυθμένα της γεώτρησης. (47).

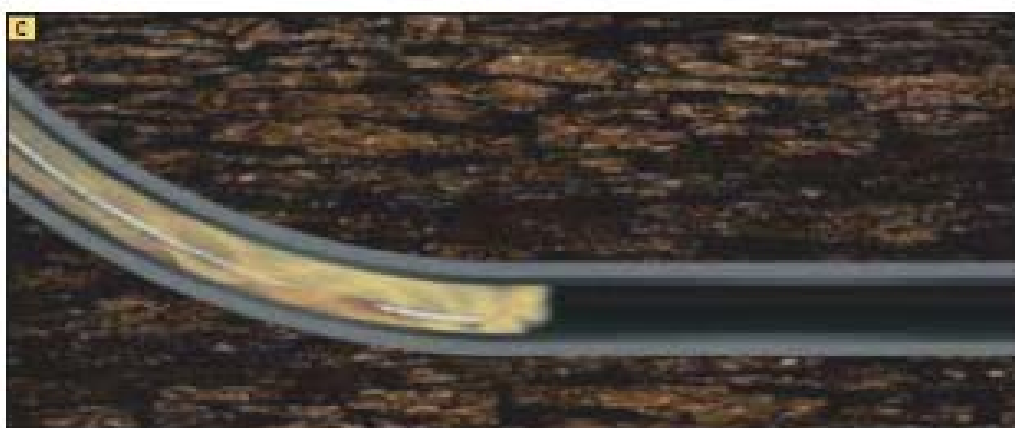
Οι συμβατικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την απομάκρυνση της άμμου (υψηλοί ρυθμοί κυκλοφορίας, μέθοδος wiper trip κ.α.) με τη χρήση του γεωτρητικού εξοπλισμού συντήρησης (workover rig) προκαλούν την αύξηση της υδροστατικής πίεσης στο σχηματισμό και την απώλεια κυκλοφορίας σε ζώνες μειωμένης πίεσης (lost circulation in pressure depleted reservoir zones). Για τη μείωση της ασκούμενης πίεσης στο σχηματισμό προστίθεται άζωτο στα κυκλοφορούντα ρευστά το οποίο ελαττώνει την πυκνότητά τους. Ωστόσο, ο καθαρισμός μιας γεώτρησης μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την άσκηση υψηλής πίεσης στο σχηματισμό, με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. (79).

Ο καθαρισμός της άμμου με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα πραγματοποιείται με την εισπίεση εντός της γεώτρησης ενός “ρευστού καθαρισμού” (cleanout fluid), το οποίο μπορεί να είναι νερό, άλμη ή ντίζελ. Το ρευστό αυτό εκτοξεύεται από ένα ειδικό στόμιο / ακροφύσιο (jet nozzle) στην άκρη του σωλήνα και διαλύει τα συσσωματώματα που σχηματίζει η άμμος, παρασύροντας τα υπολείμματα στην επιφάνεια μέσω του δακτυλίου μεταξύ του περιελιγμένου σωλήνα και του σωλήνα παραγωγής (conventional circulation). Όταν η εκτόξευση ρευστών δεν είναι αρκετή για την απομάκρυνση της άμμου, τότε μπορεί να πραγματοποιηθεί εισπίεση οξέων ή διαλυτικών μέσων για τη χημική διάλυση των συσσωματωμάτων, ώστε να παρασυρθούν, στη συνέχεια, ευκολότερα στην επιφάνεια από τα ρευστά. Επιπλέον, σε περιπτώσεις καθαρισμού οριζόντιων ή υπό μεγάλη κλίση γεωτρήσεων, όπου απαιτείται μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα στερεών και υψηλό ιξώδες για την επιβράδυνση της καθόδου των τεμαχίων, τα φθηνά τυπικά ρευστά καθαρισμού μπορεί να αντικατασταθούν από ρευστά ζελατινοειδούς μορφής (gelled fluids). (47).

Η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία για τον καθαρισμό διάφορων υλικών απόθεσης όπως χαλικιών (ύστερα από αστοχία χαλικόφιλτρων για τον έλεγχο εισόδου άμμου) και υπολειμμάτων υλικών υδραυλικής ρωγμάτωσης (proppant flowback). (15).

Σε οριζόντιες γεωτρήσεις όπου εφαρμόζεται η τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης του σχηματισμού (π.χ. για την παραγωγή σχιστολιθικού αερίου), το

ρευστό που εισπιέζεται (fracturing fluid) περιέχει κόκκους φυσικής ή τεχνητής άμμου (proppant), δημιουργώντας ένα μίγμα κατάλληλο για τη σταθεροποίηση των ρωγματώσεων και την ελεύθερη διέλευση των υδρογονανθράκων. Επομένως, εκτός της παραγόμενης από το σχηματισμό, συχνά απαιτείται η αφαίρεση και της υπολειμματικής άμμου από τα ρευστά ρωγμάτων. Η διαδικασία καθαρισμού (Εικόνα 7.11) ξεκινά με την κάθοδο του σωλήνα στο σημείο συσσώρευσης του υλικού απόθεσης (A) και την προώθησή του μέσα σε αυτό ενώ ταυτόχρονα εισπιέζει το ρευστό καθαρισμού. Σε κάποια προεπιλεγμένη απόσταση εντός του υλικού (bite), η κίνηση του σωλήνα αναστέλλεται ενώ η εισπίεση του ρευστού συνεχίζεται (B). Αμέσως μετά ξεκινά η ανάκτηση του σωλήνα (C) έως κάποιο συγκεκριμένο σημείο (D), μια διαδικασία γνωστή ως “σάρωμα” (sweeping). Μετά το πέρας κάθε ανάκτησης, ο σωλήνας εισχωρεί ξανά εντός του υλικού, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία καθαρισμού έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το μήκος εισχώρησης του σωλήνα εντός του υλικού απόθεσης, αλλά και το ύψος στο οποίο θα ανακτηθεί εξαρτώνται από είδος του υλικού απόθεσης, από το μέγεθος του περιελιγμένου σωλήνα και του σωλήνα παραγωγής, από το είδος του ρευστού καθαρισμού και από πολλούς άλλους τεχνικούς παράγοντες. Η επιλογή κατάλληλου άκρου εκτόξευσης του ρευστού και η ταχύτητα εισόδου και ανάκτησης του σωλήνα από το υλικό, είναι ανάμεσα στους σημαντικότερους παράγοντες επιτυχίας μιας επιχείρησης καθαρισμού. (80).



Εικόνα 7.11 : Καθαρισμός οριζόντιων γεωτρήσεων από υλικά απόθεσης (fills) με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. (80)

Μια εναλλακτική προσέγγιση στη διαδικασία καθαρισμού μιας παραγωγικής γεώτρησης από άμμο είναι η εφαρμογή αντίστροφης κυκλοφορίας (ροής) ρευστών καθαρισμού (reverse circulation). Κατά τη μέθοδο αυτή, τα ρευστά δεν εισπιέζονται μέσω ειδικού στομίου στην άκρη του σωλήνα, αλλά μέσω του δακτυλίου μεταξύ περιελιγμένου σωλήνα και σωλήνα παραγωγής, και επιστρέφουν στην επιφάνεια μέσω του εσωτερικού του περιελιγμένου σωλήνα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανόδου των ρευστών στο δακτύλιο μεταξύ περιελιγμένου σωλήνα και σωλήνα παραγωγής δεν είναι αρκετή για να μεταφέρει τους κόκκους του υλικού απόθεσης. Ωστόσο, η παρουσία εξοπλισμού ελέγχου ροής πυθμένα (downhole flow check devices), είναι απαγορευτική για την εφαρμογή της μεθόδου. (81).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης περιελιγμένου σωλήνα για την πραγματοποίηση τέτοιων εργασιών, είναι, όπως και σε πολλές άλλες εφαρμογές που έχουν ήδη αναφερθεί, η δυνατότητα λειτουργίας χωρίς την ανάγκη αδρανοποίησης της γεώτρησης, και η προστασία του σχηματισμού από την άσκηση υψηλής υδροστατικής πίεσης κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Επιπλέον, ο μικρός χρόνος που απαιτείται για μια επέμβαση, και το σχετικά χαμηλό κόστος σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, κάνουν την επιλογή του περιελιγμένου σωλήνα ακόμα πιο ελκυστική. (81).

### 7.7.3 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΣΦΑΛΤΕΝΙΑ (ASPHALTENE REMOVAL)

Όπως έγινε κατανοητό στις προηγούμενες παραγράφους, οποιασδήποτε μορφής αποθέσεις ή συσσωματώματα εντός μιας παραγωγικής γεώτρησης, εκτός της μείωσης της παραγωγής, προκαλούν και πολλά άλλα προβλήματα, κάνοντας απαραίτητη την πραγματοποίηση εργασιών για την αντιμετώπισή τους. Οι εργασίες αυτές μπορεί να αποσκοπούν στη απομάκρυνσή τους με μηχανικά ή και χημικά μέσα, και συνήθως, διαφέρουν ανάλογα με το είδος των αποθέσεων που πρέπει να απομακρυνθούν. Αξίζει να τονισθεί πως, ομοίως με τους σωλήνες παραγωγής, αντίστοιχα προβλήματα εντοπίζονται και σε αγωγούς μεταφοράς του πετρελαίου, τα οποία αντιμετωπίζονται με παρόμοιες μεθόδους, και για το λόγο αυτό δεν θα γίνει ειδική αναφορά σε αυτές.

Η μηχανική απόξεση των αποθέσεων είναι μια γρήγορη και μικρού ρίσκου μέθοδος καθαρισμού μιας γεώτρησης. Στην περίπτωση, όμως, των ασφατενίων, λόγω της πλαστικότητας που παρουσιάζουν οι αποθέσεις τους και η δυσκολία πρόσβασης σε κάποια τμήματα του κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα που μπορεί να έχουν προσβληθεί, η μηχανική απόξεση / άλεσμα (milling/jetting) μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις, όταν η σκληρότητά τους είναι μεγάλη ή όταν είναι εύκολα προσβάσιμα.

Η πιο αποτελεσματική πρακτική για την αντιμετώπιση των ασφατενίων είναι η πρόληψη. Ο καλύτερος τρόπος για την αποφυγή του σχηματισμού τους

είναι ο συνεχής έλεγχος της παραγωγής ώστε να μην δημιουργηθούν συνθήκες κατακρήμνισης (συνδυασμός πίεσης – θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στο φάκελο κατακρήμνισης ασφατενίων, Παράγραφος 7.2). Επιπλέον, μια αρκετά συνήθης πρακτική είναι η συνεχής ή κατά διαστήματα εισπίεση χημικών αναστολέων (chemical inhibitors) εντός του σωλήνα παραγωγής ή εντός του παραγωγικού σχηματισμού. Οι αναστολείς αυτοί είναι κατά κύριο λόγο ρητινώδη οργανικά πολυμερή, τα οποία, όμως, είναι διαλυτά στο πετρέλαιο με αποτέλεσμα η διάρκεια αποτελεσματικότητάς τους να είναι μικρή. Η λειτουργία τους είναι να αλληλεπιδρούν με τα ασφατενία και να τα διατηρούν σε διαλελυμένη μορφή. (69).

Όταν η πρόληψη σχηματισμού συσσωματωμάτων ασφατενίων αποτύχει, και η μηχανική απομάκρυνση είναι αδύνατη, τότε εφαρμόζονται χημικές μέθοδοι καθαρισμού που περιλαμβάνουν τη χρήση διαλυτών (solvents) με ή χωρίς παράγοντες διασποράς (dispersants). Ο πιο κοινός διαλύτης που χρησιμοποιείται είναι το ξυλόλιο (ή ξυλένιο) (xylene), το οποίο όμως μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο σχηματισμό και για τη χρήση του οποίου απαιτείται η διακοπή της παραγωγής για αρκετές ώρες. Για περιβαλλοντικούς και για λόγους ασφαλείας, τείνει να αντικατασταθεί από πιο φιλικά στο περιβάλλον προϊόντα, όπως τα τερπένια (κύριο συστατικό των φυτικών ελαίων), τα οποία είναι πολλές φορές ακριβότερα από το ξυλόλιο. (69) Μια ενδιάμεση λύση αποτελούν τα ενισχυμένα διαλυτικά γαλακτώματα νερού/αρωματικών, τα οποία δεν περιέχουν δύσκολες στη διαχείριση ουσίες όπως το ξυλόλιο, το βενζόλιο και το τολουόλιο, και υπόσχονται αποτελεσματική απομάκρυνση των ασφατενίων και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ των εργασιών καθαρισμού. (82) Καρβοξυλικά οξέα μεγάλης αλυσίδας (long chain carboxylic acids) έχουν, επίσης, χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην αφαίρεση ασφατενίων, ωστόσο, πρέπει να τονισθεί, πως η χρήση του κάθε τύπου διαλύτη εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των ασφατενίων. (83).



Εικόνα 7.12 : Ασφαλτένια σε τμήμα του κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από τη χημική απομάκρυνσή τους. (82)

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις διαδικασίες αντιμετώπισης των ασφαλτενίων. Για τη μηχανική απόξυσή τους, μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική του αλέσματος / απόξεσης (φρεζαρίσματος) (milling / scrapping) ή η περιστροφική εκτόξευση νερού ή άλλων αποξεστικών ρευστών με τη χρήση ειδικού στομίου (jetting). Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την εισπίεση χημικών αναστολέων στον ταμιευτήρα ή στον σωλήνα παραγωγής, όσο και στην εισπίεση διαλυτών. (83).

#### 7.7.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΗΡΟΥΣ (WAX REMOVAL)

Η αντιμετώπιση των κηρών σε μια παραγωγική γεώτρηση, ξεκινά, όπως και στην περίπτωση των ασφαλτενίων, από την πρόληψη. Η πρωταρχική παράμετρος που πρέπει να εξακριβωθεί είναι η κρίσιμη θερμοκρασία (WAT ή cloud point) σχηματισμού των συστάδων (clusters), η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε αργό πετρέλαιο και εξαρτάται από τη σύστασή του, την περιεκτικότητα του παραφινικού κλάσματος, την πίεση κ.α. Προκειμένου να αποφευχθεί ή πτώση της θερμοκρασίας των ρευστών υδρογονανθράκων από αυτή την κρίσιμη τιμή, συχνά εφαρμόζεται η τεχνική της ηλεκτρικής θέρμανσης των ρευστών μόλις εισέρχονται στη γεώτρηση. Αυτό πραγματοποιείται με ηλεκτρικούς θερμαντήρες που



τοποθετούνται στο σωλήνα παραγωγής, στο ύψος των παραγωγικών ζωνών, οι οποίοι, ωστόσο, χρήζουν συχνής συντήρησης και έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια. (69).

Η απόθεση των κηρών μπορεί να προληφθεί, να επιβραδυνθεί ή και να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση μέσων διασποράς (dispersants) ή κρυσταλλικούς τροποποιητές (crystal modifiers). Οι κρυσταλλικοί τροποποιητές είναι χημικά τα οποία αλληλεπιδρούν με τις αυξανόμενες συστάδες κηρών στο αργό πετρέλαιο και συγκρυσταλλώνονται με αυτές. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές οδηγούν στην παραμόρφωση της κρυσταλλικής μορφολογίας των κηρών, με αποτέλεσμα, να μην μπορούν να δημιουργήσουν τις τυπικές, πεπλατυσμένες κρυσταλλικές δομές απόθεσής τους. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι τροποποιητών είναι εστέρες μηλεϊνικού οξέος, πολυμερή ακρυλικών και μεθακρυλικών εστέρων κ.α. Τα μέσα διασποράς ενεργούν αποτρεπτικά στη δημιουργία των συστάδων καθώς εμποδίζουν τη συσσωμάτωση των πυρήνων. Γενικά είναι τασιενεργές ενώσεις (surfactants) και μπορούν να λειτουργήσουν ευνοϊκά στη διατήρηση της υδροφιλίας του εσωτερικού του σωλήνα παραγωγής, δυσχεραίνοντας την απόθεση των κηρών σε αυτό. (69).

Για την απομάκρυνση των ήδη σχηματισμένων κρυσταλλικών αποθέσεων κηρών, οι πιο συνηθισμένες πρακτικές περιλαμβάνουν τη διάτρηση (drilling), τη χημική διαλυτοποίηση (chemical dissolution) και την τήξη (melting) τους, με τη χρήση θερμού νερού ή πετρελαίου. Η τήξη των αποθέσεων κηρών με τη χρήση θερμού πετρελαίου είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνική, και πραγματοποιείται με την εισπίεση του πετρελαίου κοντά στις παραγωγικές ζώνες, ώστε, κατά την άνοδό του στο σωλήνα παραγωγής, να προκαλέσει, μέσω της θερμότητάς του, την τήξη των σχηματισμένων κρυσταλλικών αποθέσεων κηρών, οι οποίοι στη συνέχεια διαλύονται στην πετρελαϊκή φάση. Η τεχνική είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση των, πιο δύσκολων στην αντιμετώπιση, κηρών του πυθμένα της γεώτρησης, ωστόσο η διαλυτική ικανότητα του πετρελαίου μειώνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του με την ανοδική κίνησή του εντός της σωλήνωσης, ενώ ελλοχεύει σοβαρός κίνδυνος σημαντικής μείωσης της διαπερατότητας του σχηματισμού σε περίπτωση που το θερμό πετρέλαιο με τους διαλυμένους κηρούς εισέλθει σε αυτόν. Η επιλογή τήξης με θερμό νερό είναι ασφαλέστερη και με μεγαλύτερη θερμομαντική χωρητικότητα, ωστόσο δεν είναι το ίδιο αποδοτική ως προς τη διαλυτική της ικανότητα, και για το λόγο αυτό προστίθενται και τασιενεργές ενώσεις (surfactants).

Όπως και στην περίπτωση των ασφατενίων, είναι διαθέσιμη η επιλογή διαλυτών (solvents) για τον καθαρισμό της γεώτρησης από τις αποθέσεις κηρών, με πιο κοινό διαλύτη και στην περίπτωση των κηρών να είναι το ξυλόλιο, ωστόσο, όπως ισχύει και για τα ασφατένια, δεν είναι όλοι οι διαλύτες κατάλληλοι για όλους τους τύπους κηρών. (69).

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί, όπως και στα ασφατένια, να χρησιμοποιηθεί για την εισπίεση των διαλυτών και για τη μηχανική απόξεση των

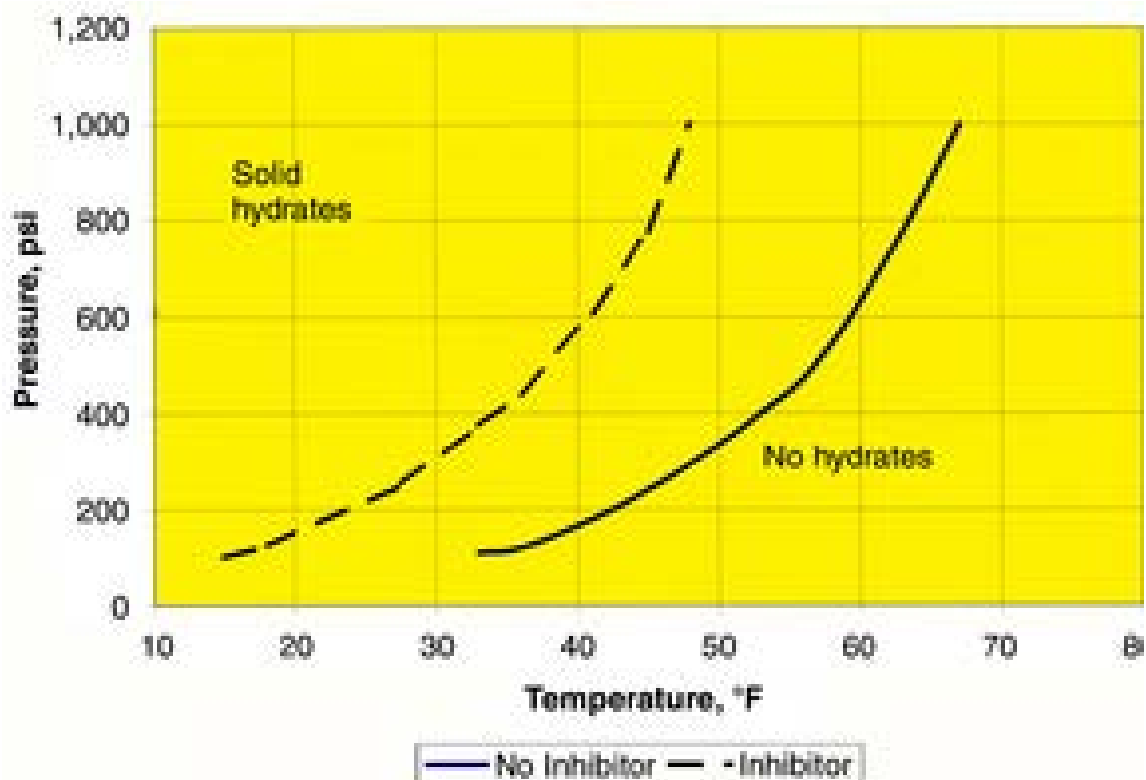
αποθέσεων, με μοναδικό περιορισμό το βάθος στο οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει την απόξεση σε οριζόντιες γεωτρήσεις. (69).

#### 7.7.5 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΔΡΙΤΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (NATURAL GAS HYDRATES REMOVAL)

Ο σχηματισμός των υδριτών οφείλεται, όπως αναφέρθηκε, στη συμπεριφορά του νερού υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η βέλτιστη, επομένως, μέθοδος προστασίας μιας παραγωγικής γεώτρησης από το σχηματισμό υδριτών είναι ο έλεγχος της παραγωγής. Όταν αυτό δεν είναι επιτεύξιμο, τότε η πιο συνήθης πρακτική είναι η εφαρμογή μεθόδων θερμοδυναμικής αναστολής (thermodynamic inhibition), όπως (84) :

- Η θέρμανση του αερίου.
- Η μείωση της πίεσης του συστήματος.
- Η εισπίεση διαλυμάτων αλάτων.
- Η εισπίεση αλκοολών ή γλυκολών.

Για τη θέρμανση του αερίου στις ζώνες σχηματισμού των υδριτών χρησιμοποιούνται καλώδια ηλεκτρικής αντίστασης που συνδέονται με έναν εναλλάκτη, ομοίως με την τεχνική θέρμανσης των κηρών, αποτρέποντας τη δημιουργία τους. Η εισπίεση διαλυμάτων αλάτων (κυρίως  $\text{CaCl}_2$ ) μειώνει, επίσης, σημαντικά το σχηματισμό των υδριτών λειτουργώντας ως μέσο μείωσης της χημικής κινητικότητας του νερού και, επιπλέον, μειώνοντας τη διαλυτότητα του αερίου σε αυτό. Η μέθοδος, ωστόσο, με τη μεγαλύτερη συχνότητα εφαρμογής πλέον, είναι η εισπίεση γλυκολών. Πιο συγκεκριμένα, η μεθανόλη, που χρησιμοποιούνταν κυρίως παλαιότερα, έχει αντικατασταθεί, για περιβαλλοντικούς και για λόγους ασφαλείας, από αιθυλενικές γλυκόλες, με την επίδραση που έχουν οι γλυκόλες αυτές στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σχηματισμού των υδριτών να φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 7.13.



Εικόνα 7.13 : Μετακίνηση προς χαμηλότερες θερμοκρασίες της οριακής καμπύλης σχηματισμού των υδριτών, μετά την εισπίεση αναστολέων, και συγκεκριμένα αλκοολών ή γλυκολών. (69)

Οι τεράστιες ποσότητες και το υψηλό κόστος αγοράς των χημικών αυτών έχει οδηγήσει στην αναζήτηση νέου τύπου αναστολέων. Οι πιο ελπιδοφόροι και πιο αποτελεσματικοί σε δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί, είναι οι λεγόμενοι κινητικοί αναστολείς (kinetic inhibitors). Πρόκειται για χημικά που εισπνέζονται σε μικρές ποσότητες και, όπως στην περίπτωση των ασφαλενίων και των κηρών, εμποδίζουν την ανάπτυξη πυρήνων υδριτών ή τη συσσώρευσή τους προς σχηματισμό μεγάλων κρυστάλλων. Οι πιο αποτελεσματικοί αναστολείς που δοκιμάστηκαν είναι άλατα τεταρτοταγούς αμμωνίου. (69).

Για την αφαίρεση των υδριτών μετά το σχηματισμό τους χρησιμοποιούνται, ουσιαστικά, οι ίδιες τεχνικές που εφαρμόζονται για την πρόληψή τους. Η απλούστερη μέθοδος περιλαμβάνει τη μείωση της πίεσης, όταν αυτό είναι δυνατό, πάνω από την απόθεση των υδριτών, ώστε να αντιστραφεί η αντίδραση ισορροπίας (equilibrium reaction) και να διαλυθούν. Η πιο κοινή μέθοδος καθαρισμού είναι η εισπίεση διαλυτών, όπως οι αλκοόλες και οι γλυκόλες, με την ύπαρξη ειδικής διάταξης, που επιτρέπει την εισπίεσή τους, στα συστήματα ολοκλήρωσης γεωτρήσεων φυσικού αερίου να είναι σχεδόν δεδομένη. (84).

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα αποτελεί το βασικό μέσο μηχανικής απομάκρυνσης υδριτών, τόσο σε σωλήνες παραγωγής, όσο, κυρίως, σε αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση στήλης νερού που μπορεί να έχει δημιουργηθεί πάνω από τα συσσωματώματα, μειώνοντας έτσι την πίεση πάνω από αυτά και διευκολύνοντας τη διάλυσή τους.

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εισπίεση των αλκοολών ή των γλυκολών σε δυσπρόσιτα σημεία εντός της γεώτρησης. (73) Η πιο αποτελεσματική μέθοδος, ωστόσο, για την αφαίρεση υδριτών με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα, είναι η μηχανική απόξεση. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με ειδικό κοπτικό άκρο ή φρέζα, ενώ έχουν καταγραφεί άκρως επιτυχημένες εφαρμογές για την αφαίρεση υδριτών με συνδυασμό εκτόξευσης νερού (jetting) και φρεζαρίσματος (milling). (85).

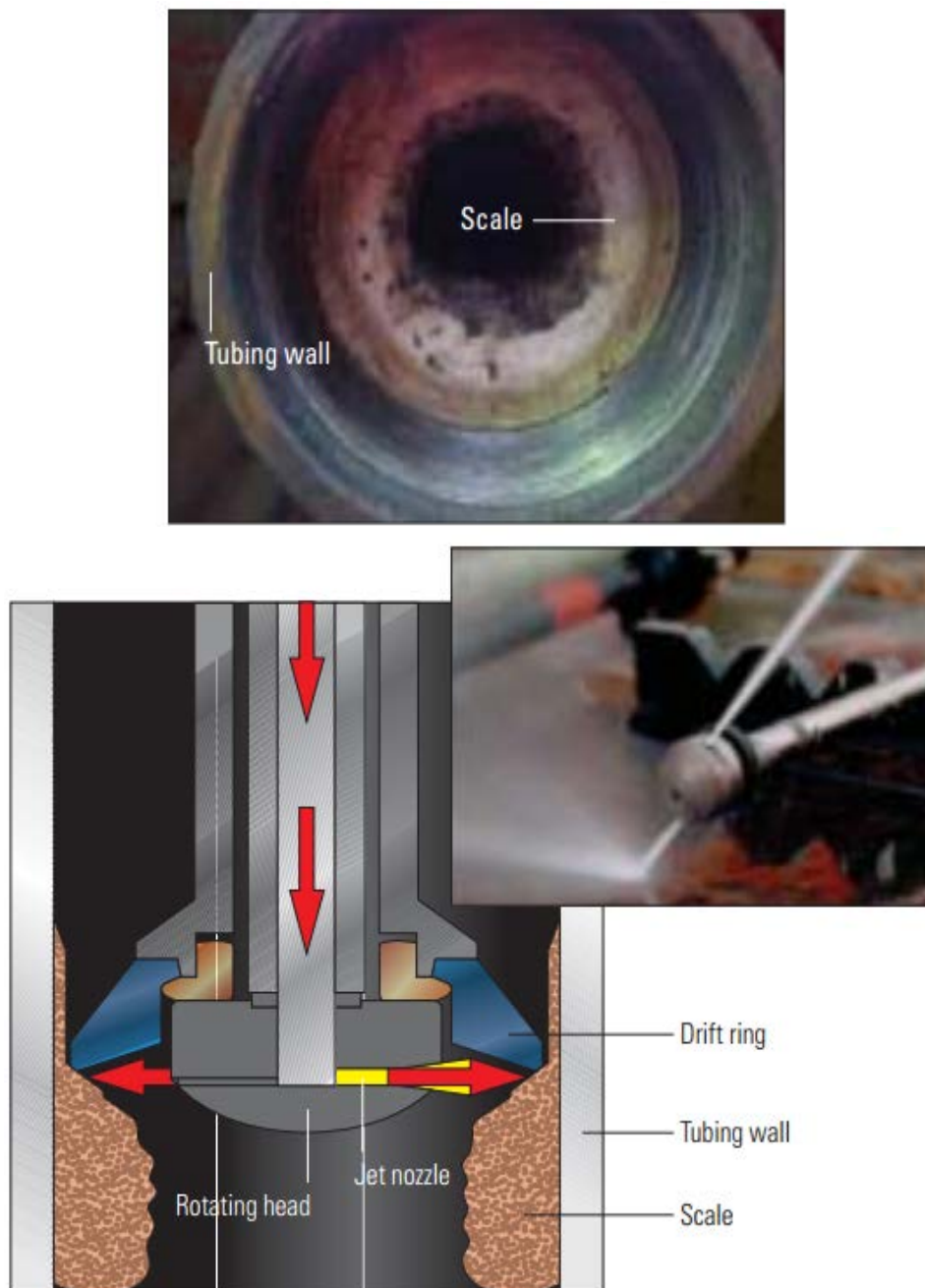
#### 7.7.6 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ (INORGANIC SCALE REMEDIATION)

Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις των αποθέσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η αντιμετώπιση των επιφανειακών επιστρωμάτων δεν βασίζεται στην πρόληψη του φαινομένου αλλά στις δράσεις μετά την εμφάνισή του. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας απόθεσης επιφανειακών επιστρωμάτων είναι η σύστασή τους και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Ανάλογα με αυτά τα χαρακτηριστικά ακολουθείται και η ανάλογη τεχνική απομάκρυνσής τους. (69).

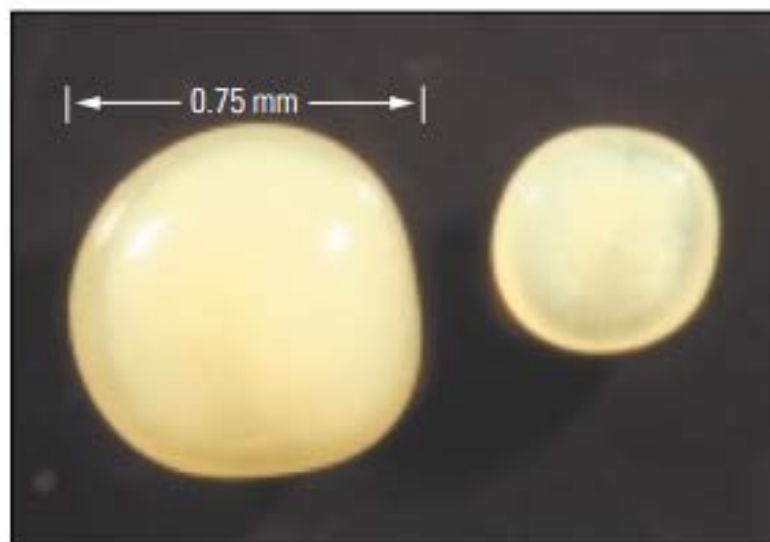
Μόλις εντοπιστούν αποθέσεις επιφανειακών επιστρωμάτων εντός μιας παραγωγικής γεώτρησης, στόχος είναι η ταχύτερη και η λιγότερο επιβλαβής, για την ίδια τη γεώτρηση, απομάκρυνσή τους είτε με μηχανικά είτε με χημικά μέσα. Οι μηχανικές μέθοδοι καθαρισμού των γεωτρήσεων είναι οι πλέον συνηθισμένες, ωστόσο η σωστή επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από το είδος, την ποσότητα και την υφή των επιστρωμάτων. Όταν τα δεδομένα της εκμετάλλευσης το επιτρέπουν, η ανάκτηση και ο καθαρισμός των σωληνώσεων στην επιφάνεια είναι συχνά η φθηνότερη λύση. Ωστόσο η πιο διαδεδομένη επιλογή για τον καθαρισμό μιας παραγωγικής γεώτρησης είναι η επιτόπου μηχανική απόξεση των επιστρωμάτων. Η ψαθυρότητά τους οδήγησε τους πρώτους μηχανικούς στην επιλογή εκρηκτικών για το θρυμματισμό τους, μια τεχνική που περιορίζεται πλέον σε επιστρώματα μικρού πάχους που απαιτούν μικρή ποσότητα εκρηκτικών. Όσο το πάχος αυξάνεται, τόσο πιο δραστικά μέτρα απαιτούνται για την απομάκρυνσή τους. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος καθαρισμού μεγάλου πάχους επιστρωμάτων είναι το άλεσμα ή η απόξεσή τους με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα, τεχνική που μπορεί να καθαρίσει 5 - 30 ft επιστρωμάτων / h. (86).

Σε πιο μαλακούς σχηματισμούς, ως εναλλακτική της άλεσης ή απόξεσης εφαρμόζεται η τεχνική εκτόξευσης νερού (jetting) (Εικόνα 7.14). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται πολλά χρόνια στη βιομηχανία και είναι πολύ αποτελεσματική. Για την απομάκρυνση μαλακών επιστρωμάτων, όπως ο αλίτης, η εκτόξευση καθαρού νερού είναι επαρκής, ωστόσο για πιο σκληρούς σχηματισμούς, όπως ο ασβεστίτης και ο βαρίτης, χρησιμοποιούνται αποξεστικά ρευστά (abrasive fluids). Καθώς τα υγρά αυτά, όμως, χρησιμοποιούνται και στη διατρύπηση παραγωγικών σχηματισμών, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 6.3.2, ελλοχεύει σοβαρός κίνδυνος πρόκλησης μόνιμων βλαβών στο σωλήνα παραγωγής και στις βαλβίδες

ασφαλείας. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί από το Schlumberger Cambridge Research ένα νέο αποξεστικό υλικό, ονόματι “sterling beads abrasive” (Εικόνα 7.15), το οποίο, ενώ έχει την ίδια διαβρωτική ικανότητα με την άμμο σε σκληρά, ψαθυρά επιστρώματα, είναι 20 φορές λιγότερο διαβρωτικό στο χάλυβα σε σχέση με αυτή. Το υλικό αυτό δεν είναι τοξικό και δεν βλάπτει τον παραγωγικό σχηματισμό, ενώ έχουν καταγραφεί ρυθμοί καθαρισμού σκληρών βαριτικών επιστρωμάτων με ρυθμούς μεγαλύτερους των 100 ft/h. (86).



Εικόνα 7.14 : Απόξεση (μηχανικά και με εκτόξευση νερού) (jetting) επιφανειακών επιστρωμάτων (scales) από γεώτρηση εισπίεσης αλμυρού νερού. (5)



**Εικόνα 7.15 : Σφαιρίδια από ειδικό αποξεστικό υλικό “Sterling Beads abrasive”. (87)**

Όταν δεν είναι δυνατή η εφαρμογή μηχανικών μεθόδων καθαρισμού των επιφανειακών επιστρωμάτων, είτε για λόγους αναποτελεσματικότητας είτε λόγω υψηλού κόστους, τότε πραγματοποιείται η εισπίεση ρευστών για τη χημική διάλυσή τους. Τα ανθρακικά ορυκτά είναι πολύ διαλυτά σε υδροχλωρικό οξύ (HCl), γεγονός που, παρά τις δυσκολίες διαχείρισης του οξέος, κάνει πολύ εύκολο τον καθαρισμό τέτοιων επιστρωμάτων. Από την άλλη, επιστρώματα διαφορετικής σύστασης, όπως τα θειικά άλατα, είναι ελάχιστα (έως καθόλου) διαλυτά σε οξέα με αποτέλεσμα ο χημικός καθαρισμός τους να είναι πολύ δύσκολος. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικά χημικά σύμπλοκα (chelants), τα οποία είναι ικανά να διαλύσουν τέτοιου είδους επιστρώματα, όπως τα βαριτικά. Ωστόσο, είναι ικανά να απομακρύνουν αποτελεσματικά μόνο λεπτά επιστρώματα, καθώς χρειάζονται πολύ χρόνο για να αντιμετωπίσουν παχύτερα και πιο χονδρόκοκκα, και επομένως έχουν πολύ υψηλό λειτουργικό κόστος. (86).

#### **7.7.8 ΜΟΝΙΜΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΕΝΤΟΣ ΣΩΛΗΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΓΗΡΑΣΜΕΝΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (VELOCITY STRINGS)**

Σε κοιτάσματα φυσικού αερίου όπου η μείωση της πίεσης έχει προκαλέσει πτώση της παραγωγής ή σχηματισμό συμπυκνωμάτων (condensates), αποτελεί συνήθη πρακτική η μόνιμη εγκατάσταση τμήματος περιελιγμένου σωλήνα (velocity string) στο εσωτερικό του σωλήνα παραγωγής. Όσο μειώνεται η ποσότητα του αερίου στο ρεύμα παραγωγής, και η πίεση, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα η ταχύτητα ανόδου του αερίου να μην είναι αρκετή ώστε να τα μεταφέρει το συμπύκνωμα στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται και να εμποδίζει την παραγωγή. Σκοπός του περιελιγμένου σωλήνα είναι να μειώσει το διαθέσιμο χώρο εντός του σωλήνα παραγωγής, έτσι ώστε το παραγόμενο αέριο να έχει αρκετή ταχύτητα ανόδου ώστε να παρασύρει ευκολότερα στην επιφάνεια τα παραγόμενα υγρά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παραγωγή αερίου. (47) Ο

σωλήνας αυτός (velocity string) είναι μικρής εξωτερικής διαμέτρου, μικρότερης των 2 in, τοποθετείται εντός της γεώτρησης με τη χρήση μονάδων περιελιγμένου σωλήνα, ενώ συνήθως έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε μονάδες και έχει αποσυρθεί. Το κόστος αυτής της επέμβασης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη διαθεσιμότητα και το κόστος αγοράς του σωλήνα. (15).





## **8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΕΛΙΓΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (PRODUCTION ENHANCEMENT WITH COILED TUBING)**

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, μια από τις εφαρμογές της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα είναι η πραγματοποίηση εργασιών, στο πλαίσιο της τριτογενούς παραγωγής, για τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων. Η τριτογενής παραγωγή, συμβατικά, περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους επαύξησης της απόληψης υδρογονανθράκων, εκτός της μεθόδου εισπίεσης νερού ή φυσικού αερίου. Η μέθοδος αυτή, καθώς προηγείται χρονικά όλων των άλλων, έχει επικρατήσει να αποτελεί τη λεγόμενη δευτερογενή παραγωγή (secondary production). Η χρήση του περιελιγμένου σωλήνα στο δευτερογενές στάδιο παραγωγής, αλλά και στις μεθόδους του τριτογενούς σταδίου που περιλαμβάνουν εισπίεση από ειδικές γεωτρήσεις εισπίεσης (injection wells) δεν έχει καταγραφεί βιβλιογραφικά, ή τουλάχιστον δεν ήταν δυνατό για το συγγραφέα της διπλωματικής αυτής εργασίας να συλλέξει στοιχεία και να τα παρουσιάσει. Ωστόσο, δεδομένου πως αποδεδειγμένα ο περιελιγμένος σωλήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σωλήνας παραγωγής σε κάποιες περιπτώσεις, φαντάζει πιθανή και η χρήση του και ως σωλήνας εισπίεσης σε ειδικές γεωτρήσεις εισπίεσης. Στο Κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν όλες οι μέθοδοι τριτογενούς παραγωγής οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση περιελιγμένου σωλήνα. Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων αυτών είναι η εξής (88) :

- Θερμικές, χημικές, μικροβιακές μέθοδοι εισπίεσης (από γεωτρήσεις εισπίεσης).
- Μέθοδοι εκτόπισης με εισπίεση αερίου υπό συνθήκες ανάμιξης (από γεωτρήσεις εισπίεσης).
- Μέθοδοι διέγερσης παραγωγικών γεωτρήσεων (well stimulation).

### **8.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ - ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟ ΑΤΜΟ**

Οι θερμικές μέθοδοι αποσκοπούν στην επαύξηση της απόδοσης μιας παραγωγικής γεώτρησης, βασιζόμενες στην αρχή πως, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των πετρωμάτων και των ρευστών του ταμειυτήρα, μειώνεται το ιξώδες και η σχετική κινητικότητα του πετρελαίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των ρευστών που εισέρχονται στη γεώτρηση. Οι κύριες θερμικές μέθοδοι είναι οι εξής (88) :

- Διέγερση με ατμό (steam stimulation).
- Εισπίεση θερμού ρευστού (ατμού ή νερού) (steam or hot water injection).
- Επιτόπου καύση (in situ combustion).

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι, εκτός της μεθόδου διέγερσης του ταμιευτήρα με ατμό, πραγματοποιούνται σε γεωτρήσεις εισπίεσης, και όχι απευθείας στην παραγωγική γεώτρηση. Η μέθοδος διέγερσης με ατμό μπορεί να εφαρμοστεί σε παραγωγικές γεωτρήσεις με τους εξής τρόπους :

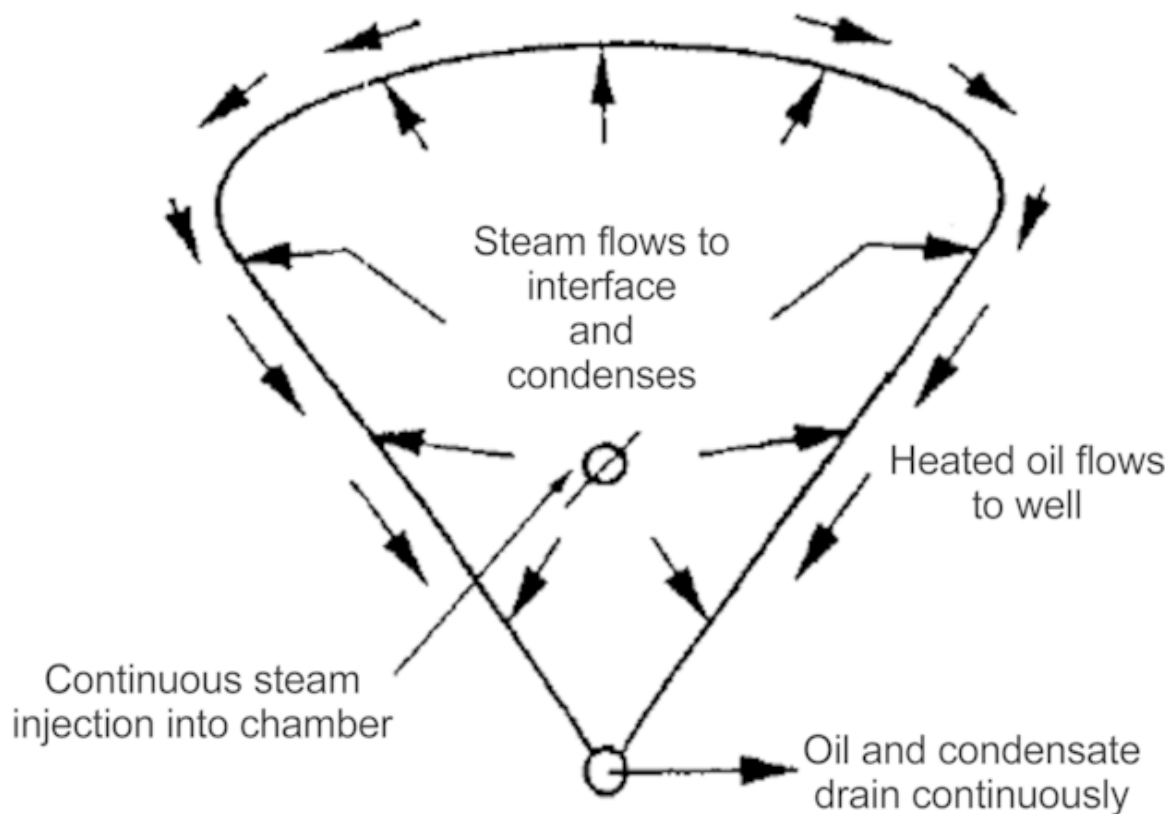
- Διακόπτοντας την παραγωγή κατά διαστήματα (cyclic steam injection).
- Συνεχής εισπίεση ταυτόχρονα με την παραγωγή (continuous steam injection).

Η παλαιότερη και πιο γνωστή μέθοδος διέγερσης με χρήση ατμού είναι η λεγόμενη μέθοδος κυκλικής εισπίεσης (cyclic steam injection) και εφαρμόζεται σε πολύ βαριά πετρέλαια και σε κοιτάσματα πίσσας (tar sands). Κατά τη μέθοδο αυτή εισπνέζεται ατμός στην παραγωγική γεώτρηση με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας στη γεώτρηση και στον παραγωγικό σχηματισμό γύρω από αυτή, ώστε να μειωθεί το ιξώδες του πετρελαίου, να ελαττωθεί η επίδραση του επιδερμικού παράγοντα (skin effect) και να συμπιεστεί το διαλυμένο αέριο. (88).

Η μέθοδος αυτή αποτελείται από τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο ρευστό μίγμα ατμού (slug of steam) εισπνέζεται στη γεώτρηση για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, κατά το δεύτερο στάδιο, η γεώτρηση σφραγίζεται (shut) και αφήνεται για αρκετές μέρες ώστε να επιτευχθεί επαρκής διάχυση της θερμικής ενέργειας μέσα στον ταμιευτήρα (soak). Τέλος, κατά το τρίτο στάδιο, το “ελαφρύτερο” (thinned), πλέον, πετρέλαιο ξεκινά να παράγεται με υψηλότερους ρυθμούς. Η μέθοδος της κυκλικής εισπίεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας μιας γεώτρησης, για όσο χρονικό διάστημα κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα, καθώς η διακοπή της παραγωγής κατά το δεύτερο στάδιο έχει μεγάλο οικονομικό κόστος για την εκμετάλλευση. (89).

Κατά την αναζήτηση μεθόδων για τη βελτίωση της απόληψης πετρελαίου στα μεγάλα κοιτάσματα πίσσας (tar sands) της Αλμπέρτας του Καναδά, προτάθηκε το 1979 από τους Butler, McNab και Lo μια μέθοδος συνεχούς εισπίεσης ατμού σε οριζόντιες γεωτρήσεις. Η μέθοδος ονομάστηκε “Αποστράγγιση δια βαρύτητας με υποβοήθηση ατμού” (steam assisted gravity drainage), και περιλαμβάνει δύο οριζόντιες γεωτρήσεις, η μια πολύ κοντά και πάνω από την άλλη. Από τη βαθύτερη γεώτρηση παράγεται το πετρέλαιο, ενώ από τη γεώτρηση πάνω από αυτή εισπνέζεται συνεχώς ατμός. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη δημιουργία ενός “θαλάμου θερμού ατμού” (steam chamber) πάνω από τις δύο γεωτρήσεις, όπου λόγω της επίδρασης του εισπνιζόμενου ατμού, στα όρια του θαλάμου αυτού ρέει ελαφρύτερο πετρέλαιο, το οποίο, λόγω της βαρύτητας,

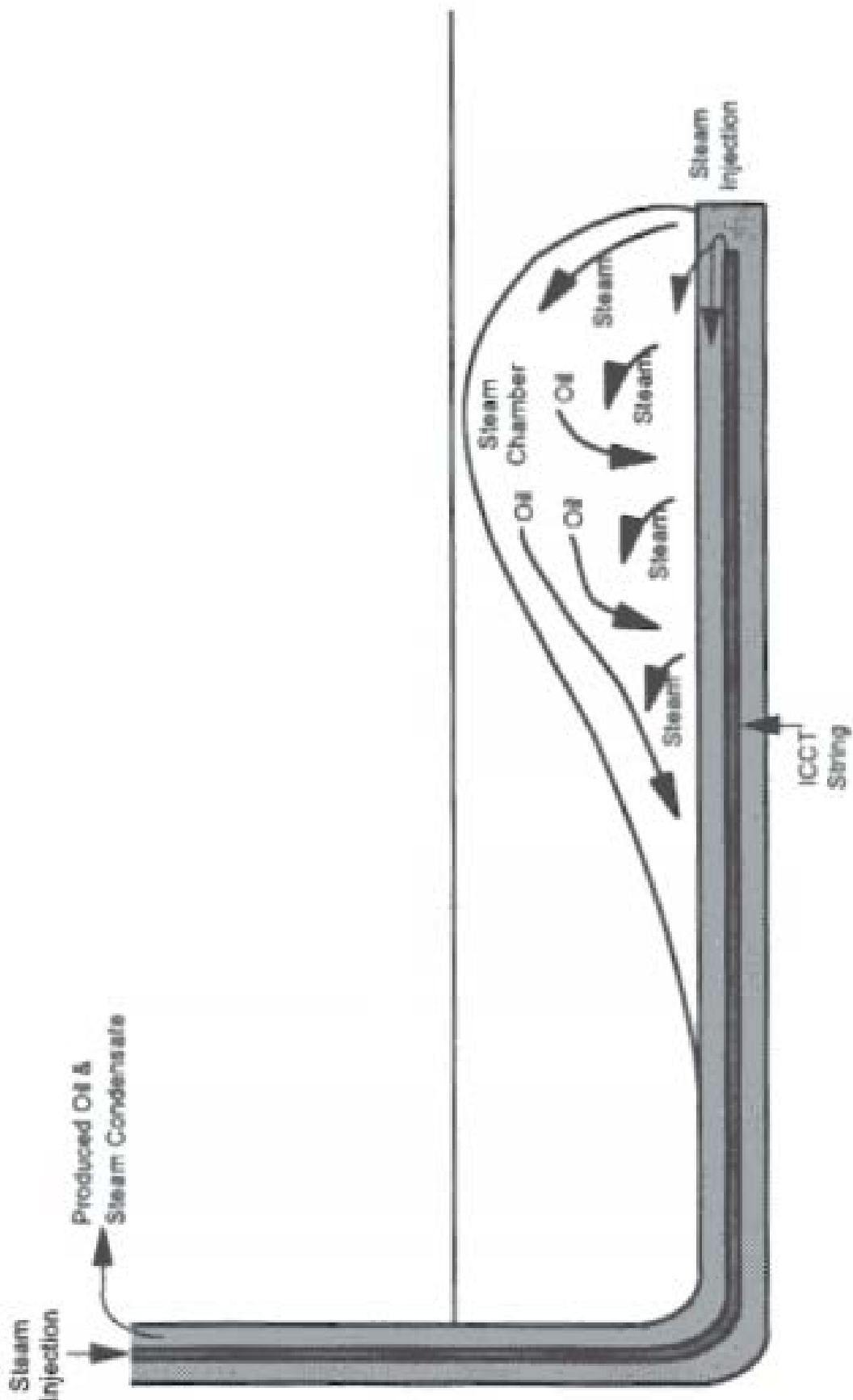
κατευθύνεται προς τη βαθύτερη παραγωγική γεώτρηση (Εικόνα 8.1). Σε πολύ δύσκολες περιπτώσεις η συνήθης πρακτική είναι η εκκίνηση της εκμετάλλευσης με ταυτόχρονη εισπίεση ατμού και από τις δύο γεωτρήσεις και ακολούθως η μετατροπή της βαθύτερης γεώτρησης σε παραγωγική (90).



**Εικόνα 8.1 :** Γραφική απεικόνιση λειτουργίας της μεθόδου “Steam assisted gravity drainage” για την παραγωγή πετρελαίου από βαριά κοιτάσματα και κοιτάσματα πίσσας. Καθώς ο ατμός θερμαίνει τη “θαλαμωτή” περιοχή πάνω από τη γεώτρηση εισπίεσης, θερμό πετρέλαιο ρέει στα όριά του και παράγεται από την παραγωγική γεώτρηση. (91)

Ωστόσο και αυτή η μέθοδος έχει μειονεκτήματα, κυρίως λόγω της απαίτησης για δεύτερη οριζόντια γεώτρηση, η οποία συνεπάγεται δραματική αύξηση του κόστους παραγωγής. Για το λόγο αυτό, μια νέα εκδοχή της παραπάνω μεθόδου έχει αναπτυχθεί την τελευταία 20ετία, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ειδικού περιελιγμένου σωλήνα για τη συνεχή εισπίεση θερμού ατμού μέσα στην παραγωγική γεώτρηση. Η μέθοδος ονομάζεται “Αποστράγγιση δια βαρύτητας με υποβοήθηση ατμού μονής γεώτρησης” ή Single Well – Steam Assisted Gravity Drainage / SW-SAGD, και στηρίζεται στη συνεχή εισπίεση υψηλής ποιότητας ατμού στον πυθμένα της οριζόντιας παραγωγικής γεώτρησης και στην ταυτόχρονη παραγωγή πετρελαίου από την ίδια γεώτρηση. Τα οφέλη της μεθόδου αυτής είναι τόσο οικονομικά όσο και ως προς την απόδοση της γεώτρησης, καθώς, εκτός του πολύ μικρότερου λειτουργικού κόστους και κόστους ολοκλήρωσης σε σχέση με την παραπάνω μέθοδο, επιτυγχάνεται καλύτερη θέρμανση του ταμιευτήρα, και επομένως απαιτείται λιγότερη ενέργεια, λόγω της καλύτερης θέσης εισπίεσης του ατμού. (92)

Για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου πρέπει να εξασφαλιστεί η διατήρηση της θερμοκρασίας του εισπιεζόμενου ατμού, έως ότου φτάσει στον πυθμένα της γεώτρησης, σε όσο το δυνατόν υψηλότερα επίπεδα. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να είναι επιτεύξιμο με τη χρήση απλού περιελιγμένου σωλήνα χωρίς μόνωση, καθώς οι θερμικές απώλειες θα ήταν τεράστιες, με αποτέλεσμα ο ατμός που θα εισπιεζόταν στον ταμιευτήρα να ήταν πολύ χαμηλής ποιότητας. Για το λόγο αυτό, το 1994, η Nowasco Well Services ανέπτυξε πρώτη ένα είδος περιελιγμένου σωλήνα, ο οποίος αποτελούνταν από δύο ομόκεντρους σωλήνες, διαφορετικής διατομής ( $1 \frac{3}{4}$  in και  $2 \frac{7}{8}$  in), στο δακτύλιο μεταξύ των οποίων τοποθετήθηκε ειδικό, κοκκώδες μονωτικό υλικό. Ο σωλήνας αυτός ονομάστηκε “Insulated Concentric Coiled Tubing – ICCT” και περιείχε ειδικά στοιχεία διατήρησης της εκκεντρότητας μεταξύ των σωλήνων, ώστε να μην μειώνεται ο δακτύλιος μεταξύ τους κατά την περιέλιξη ή την προώθηση εντός της γεώτρησης. Η παραγωγική σωλήνωση περιελάμβανε διπλό σύστημα ολοκλήρωσης, για το σωλήνα παραγωγής και για τον περιελιγμένο σωλήνα. Η πρώτη δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 1995 στην περιοχή Cactus Lake του Καναδά, όπου οι ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις παρήγαγαν 125-250 bbl/d. Η πρώτη SW - SAGD γεώτρηση, ονόματι Elan 3C16, Pilot III, παρήγαγε κατά μέσο όρο 460bbl/d κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της. (93) Από την πρώτη αυτή εφαρμογή και μετά, η μέθοδος αναπτύχθηκε ραγδαία στην περιοχή, με σχεδόν κάθε νέα γεώτρηση που ορυσσόταν να ολοκληρώνεται με σκοπό την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, με αποτέλεσμα την εξάπλωσή της και σε άλλα κοιτάσματα βαριών πετρελαίων και πίσσας στον Καναδά.



Εικόνα 8.2 : Γραφική αναπαράσταση της τεχνικής Single Well – SAGD, με τη χρήση διπλού, ομόκεντρου περιελιγμένου σωλήνα υψηλής μόνωσης (ICCT). (93)

## 8.2 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL STIMULATION)

Με τον όρο “διέγερση” περιγράφονται όλες εκείνες οι εργασίες που αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγικότητας μιας γεώτρησης, αποκαθιστώντας βλάβες στην παραγωγική ζώνη γύρω από τη γεώτρηση, ή δημιουργώντας περιοχές πολύ υψηλής αγωγιμότητας εντός του σχηματισμού. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, η έννοια της διέγερσης θα μπορούσε να περιλαμβάνει και όλες τις διαδικασίες αντιμετώπισης προβλημάτων που μπορεί να παρουσιαστούν σε μια γεώτρηση, όπως αναλύθηκαν στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Ωστόσο, καθώς οι διαδικασίες αυτές έχουν περισσότερο “επισκευαστικό” χαρακτήρα, και αποσκοπούν μάλλον στην αποκατάσταση της παραγωγικότητας της γεώτρησης, και λιγότερο στην επαύξηση της παραγωγής της, δεν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο αυτό. Θα μπορούσαν, όμως, σύμφωνα με τις συνήθειες κατηγοριοποιήσεις των τεχνικών εργασιών από την πετρελαϊκή βιομηχανία, να ληφθούν υπ’ όψη ως μέθοδοι επαύξησης της παραγωγικότητας, κάτι που δεν κρίθηκε σκόπιμο στη διπλωματική εργασία αυτή.

Οι δύο κύριες τεχνικές για τη διέγερση μιας παραγωγική γεώτρησης και την επαύξηση της απόδοσής της είναι οι εξής (94) :

- Υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracturing).
- Οξείδωση (acidizing).

### 8.2.1 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ (HYDRAULIC FRACTURING)

Η υδραυλική ρωγμάτωση είναι η πιο κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται στην πετρελαϊκή βιομηχανία για την επαύξηση της απόδοσης παραγωγικών σχηματισμών με χαμηλή διαπερατότητα. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα Κεφάλαια (5, 6 και 7), η τεχνική περιλαμβάνει την εισπίεση μεγάλης ποσότητας ρευστών ρωγμάτωσης (fracturing fluids) με σκοπό την οριζόντια επέκταση υφιστάμενων και τη δημιουργία νέων ρωγματώσεων εντός του παραγωγικού σχηματισμού, ξεπερνώντας πιθανές βλάβες – προβλήματα στα τοιχώματα του πυθμένα. Οι ρωγματώσεις επεκτείνονται προς αντίθετη κατεύθυνση από τη γεώτρηση, και σύμφωνα με τις εσωτερικές τάσεις του σχηματισμού, και συνιστούν διόδους πολύ υψηλής διαπερατότητας, βελτιώνοντας κατά πολύ την παραγωγή. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην αλλαγή του τρόπου ροής των ρευστών του ταμιευτήρα προς την παραγωγική γεώτρηση. Πριν την πραγματοποίηση της υδραυλικής ρωγμάτωσης οι υδρογονάνθρακες του ταμιευτήρα κινούνται αξονικά προς το εσωτερικό της γεώτρησης. Ωστόσο, μετά την επέκταση των ρωγματώσεων τα ρευστά κινούνται γραμμικά μέσα σε αυτές (κοντά στη γεώτρηση

η ροή μετατρέπεται ξανά σε αξονική), και επομένως με μεγαλύτερη ταχύτητα, αυξάνοντας έτσι τη συνολική παραγωγή.

Η τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης εφαρμόζεται σχεδόν σε όλες τις οριζόντιες γεωτρήσεις σχιστολιθικού αερίου στη Β. Αμερική, ενώ έχει εφαρμοστεί και στη διέγερση (ή την ενεργοποίηση μετά τη ρωγμάτωση, στο στάδιο της ολοκλήρωσης, παραγωγικών σχηματισμών με πολύ μικρή διαπερατότητα) και άλλων παραγωγικών σχηματισμών.

Τα ρευστά ρωγμάτωσης (fracturing fluids) στα κοιτάσματα σχιστολιθικού αερίου έχουν ως βάση το νερό (ή σε ορισμένες περιπτώσεις το πετρέλαιο ή ειδικό αφρό), και περιέχουν λεπτόκοκκα στερεά και διάφορα χημικά (σε μικρή ποσότητα). Τα στερεά αυτά, γνωστά ως proppant, μπορεί να είναι απλοί κόκκοι άμμου ή κόκκοι με ειδική επίστρωση ρητίνης, ή ακόμη, κεραμικά υλικά υψηλής αντοχής όπως πορώδης βωξίτης. Σκοπός των στερεών αυτών είναι να διατηρούν ανοιχτές τις ρωγματώσεις που δημιουργούνται, ακόμα και μετά την απομάκρυνση των ρευστών ρωγμάτωσης, ενώ παράλληλα να μην εμποδίζουν τη διέλευση των παραγόμενων υδρογονανθράκων. Το μέγεθος και η ομαλότητα της επιφάνειας των στερεών αυτών είναι καταλυτικά για την επιτυχία μιας εργασίας υδραυλικής ρωγμάτωσης. (95)

Τα χημικά που περιέχονται στα ρευστά ρωγμάτωσης είναι μη υδατικά ρευστά τα οποία μειώνουν την πίεση που δημιουργείται λόγω της τριβής, κατά την εισπίεση των ρευστών ρωγμάτωσης στον ταμιευτήρα. Τα ρευστά αυτά κυρίως περιέχουν τασιενεργές ενώσεις, μειωτήρες τριβής και άλλες ουσίες που συναντά κανείς σε καθαριστικά προϊόντα οικιακής χρήσης, ωστόσο ανάλογα με τις συνθήκες της κάθε επέμβασης επιλέγονται και οι κατάλληλοι συνδυασμοί χημικών. (96).

Ιδανικά, τα ρευστά ρωγμάτωσης πρέπει να επιτελούν τις εξής λειτουργίες (97) :

- Να μεταφέρουν αποτελεσματικά τα στερεά που περιέχουν (proppant) σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος εντός των ρωγματώσεων.
- Να είναι χημικά συμβατά με τα πετρώματα και τα ρευστά του σχηματισμού.
- Να μπορούν να ασκήσουν αρκετή πίεση εντός των ρωγματώσεων ώστε να μπορούν να τις επεκτείνουν κατά το μέγιστο δυνατό μήκος.
- Να μειώνουν στο ελάχιστο τις απώλειες πίεσης λόγω τριβής κατά την εισπίεσή τους.
- Να είναι εύκολη η αφαίρεσή τους με τα ρευστά καθαρισμού, μετά την ολοκλήρωση της ρωγμάτωσης.
- Να είναι οικονομικώς αποδεκτά.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ρευστών ρωγμάτωσης είναι το ιξώδες και η πυκνότητα. Το ιξώδες καθορίζει σε μεγάλο βαθμό, τόσο την επιτυχία επέκτασης των ρωγματώσεων, όσο και τη γεωμετρία που αυτές θα έχουν τελικά. Πολλές σύγχρονες πρακτικές, γνωστές ως “slickwater”, περιλαμβάνουν την εισπίεση σε μεγάλες ποσότητες υγρών ρωγμάτωσης με χαμηλό ιξώδες και μικρή περιεκτικότητα σε στερεά, με σκοπό τη δημιουργία στενών και σύνθετων ρωγματώσεων. Ο υψηλός ρυθμός εισπίεσης αποσκοπεί στη αποφυγή κατακρήσθησης των στερεών εντός του σωλήνα εισπίεσης ή κοντά στη γεώτρηση, λόγω του χαμηλού ιξώδους, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση στερεών και την αύξηση της πίεσης (screenout). Αντιθέτως, οι πιο συμβατικές πρακτικές αποσκοπούν στη δημιουργία ρωγματώσεων μεγάλου πλάτους, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ρευστά με υψηλό ιξώδες, ικανά να φέρουν περισσότερα στερεά, με μικρότερο ρυθμό εισπίεσης. Η πυκνότητα του ρευστού είναι εξ ίσου σημαντική, καθώς επηρεάζει την τριβή που αναπτύσσεται κατά την εισπίεση του ρευστού, αλλά και την ευκολία “επιστροφής” του στη γεώτρηση μετά την επέκταση των ρωγματώσεων (flowback), με σκοπό τη βέλτιστη ανάκτησή του. Τα ρευστά με βάση το νερό έχουν συνήθως πυκνότητα  $0.84 \text{ g/cm}^3$ , ενώ εκείνα με βάση το πετρέλαιο ή τον ειδικό αφρό έχουν περίπου 70 – 80% μικρότερη πυκνότητα. Σε σχηματισμούς χαμηλής πίεσης προτιμούνται τα ρευστά με βάση τον αφρό, λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας, η οποία διευκολύνει την απομάκρυνσή τους, ενώ σε βαθιές γεωτρήσεις η πυκνότητά τους μπορεί να ξεπεράσει τα  $1.2 \text{ g/cm}^3$ . (98).

Οι κατηγορίες των διαθέσιμων ρευστών ρωγμάτωσης είναι οι εξής (97) :

- Ενισχυμένου ιξώδους με βάση το νερό (viscosified water – based fluids).
- Μη ενισχυμένου ιξώδους με βάση το νερό (nonviscosified water – based fluids).
- Με βάση το πετρέλαιο.
- Με βάση ειδικό αφρό.
- Με βάση οξέα.

Η πλέον δημοφιλής κατηγορία ρευστών στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι εκείνα που έχουν ως βάση το νερό, κυρίως λόγω της ευκολίας πρόσβασης σε αυτό. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αφρός από άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα για τη διέγερση ρηχών ζωνών χαμηλής πίεσης. Η σύσταση και οι προτεινόμενες χρήσεις για κάθε κατηγορία ρευστού ρωγμάτωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα της Εικόνας 8.3. (97).

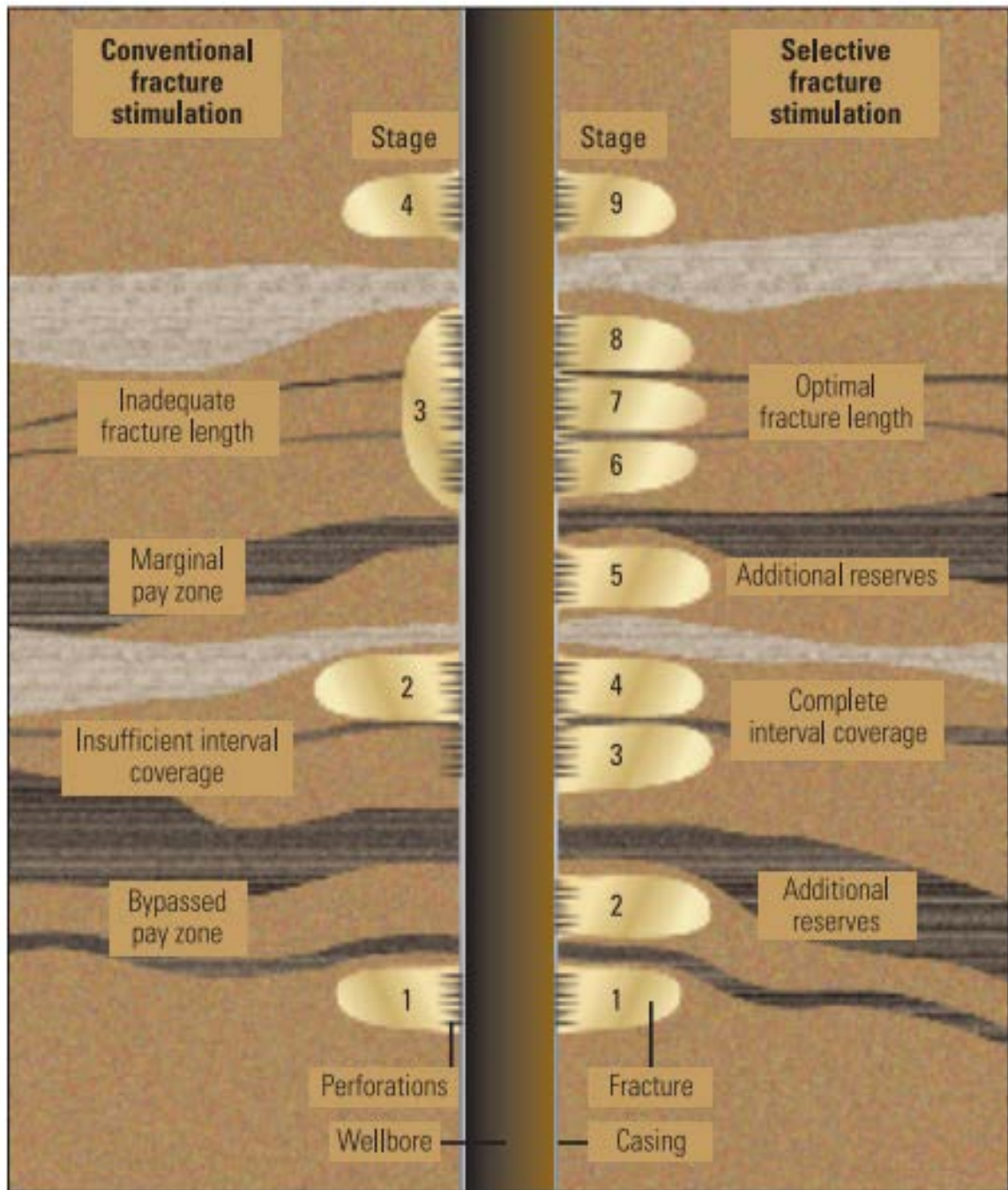


Base Fluid	Fluid Type	Main Composition	Used For
Water	Linear	Guar, HPG, HEC, CMHPG	Short fractures, low temperature
	Crosslinked	Crosslinker + Guar, HPG, CMHPG or CMHEC	Long fractures, high temperature
	Micellar	Electrolite + Surfactant	Moderate length fractures, moderate temperature
Foam	Water based	Foamer + N <sub>2</sub> or CO <sub>2</sub>	Low-pressure formations
	Acid based	Foamer + N <sub>2</sub>	Low-pressure, carbonate formations
	Alcohol based	Methonal + Foamer + N <sub>2</sub>	Low-pressure, water-sensitive formations
Oil	Linear	Gelling agent	Short fractures, water-sensitive formations
	Crosslinked	Gelling agent + Crosslinker	Long fractures, water-sensitive formations
	Water emulsion	Water + Oil + Emulsifier	Moderate length fractures, good fluid loss control
Acid	Linear	Guar or HPG	Short fractures, carbonate formations
	Crosslinked	Crosslinker + Guar or HPG	Longer, wider fractures, carbonate formations
	Oil emulsion	Acid + Oil + Emulsifier	Moderate length fractures, carbonate formations

Εικόνα 8.3 : Κατηγορίες ρευστών υδραυλικής ρωγμάτωσης (hydraulic fracturing fluids) και πεδίο εφαρμογής τους. (97)

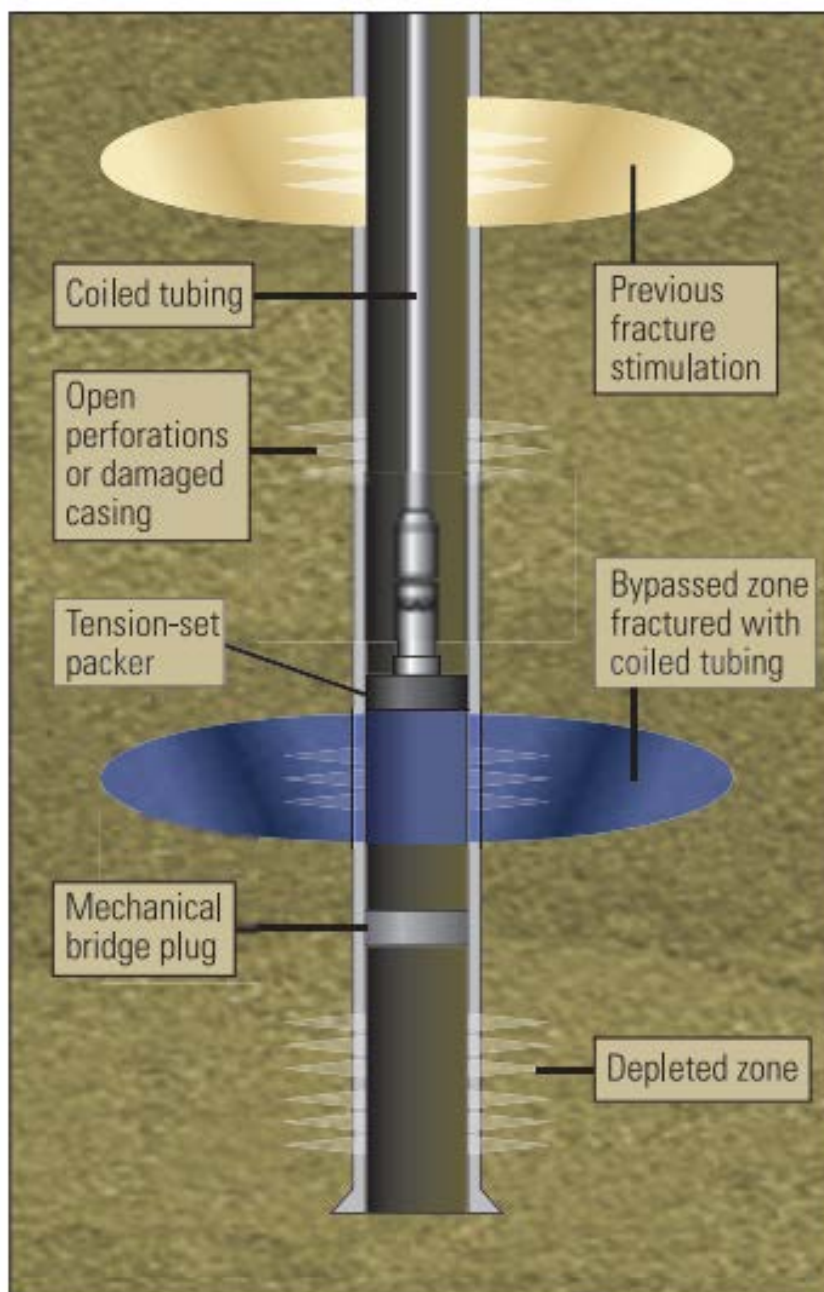
Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή της υδραυλικής ρωγμάτωσης σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν την εισπίεση του ρευστού ρωγμάτωσης εντός της γεώτρησης έως ότου η πίεση της στήλης των ρευστών υπερβεί την αντοχή του σχηματισμού, με τον οποίο έρχεται σε επαφή στα σημεία όπου έχει πραγματοποιηθεί διατρύπηση, με αποτέλεσμα τη διεύρυνση των διόδων και την είσοδο των ρευστών σε αυτές. Στις ζώνες στις οποίες δεν επιθυμείται η ρωγμάτωση, κατά τις συμβατικές τεχνικές, πραγματοποιείται μηχανική απομόνωσή τους ή εισπίεση τσιμέντου, με αποτέλεσμα το κόστος να εκτοξεύεται.

Η ικανότητα του σωλήνα να προσεγγίζει γρήγορα και με ακρίβεια τις επιθυμητές ζώνες, αλλά και η δυνατότητα πραγματοποίησης ρωγμάτωσης σε περισσότερες της μιας ζώνες, με ένα μόνο “πέρασμα” (run) (Εικόνα 8.4), χωρίς να επηρεάζεται όλη η γεώτρηση, την καθιστά βασική επιλογή για την πραγματοποίηση τέτοιων εφαρμογών. Επιπλέον, το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι η δυνατότητα εκτέλεσης όλων των απαραίτητων εργασιών πριν και μετά τη ρωγμάτωση, δηλαδή της απομόνωσης των ζωνών στις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι εργασίες και ο καθαρισμός της γεώτρησης από την παραγόμενη άμμο και από τα στερεά υπολείμματα των ρευστών ρωγμάτωσης (proppant). Το χαρακτηριστικό αυτό της τεχνικής την καθιστά, εκτός από αποδοτική, και άκρως συμφέρουσα από οικονομικής άποψης.



**Εικόνα 8.4 : Εφαρμογή της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα για την υδραυλική ρωγμάτωση πολλαπλών σχηματισμών σε μια γεώτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα από τις συμβατικές μεθόδους. (99)**

Τα χαρακτηριστικά αυτά της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα κατέστησαν δυνατή την εφαρμογή υδραυλικής ρωγμάτωσης και σε ζώνες χαμηλού ενδιαφέροντος μέσα σε παραγωγικές γεωτρήσεις (bypassed zones) (Εικόνα 8.5). Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα, με τη δυνατότητα απομόνωσης της επιθυμητής ζώνης πραγματοποίησης εργασιών με τη χρήση υδραυλικά διογκούμενων πωμάτων (inflatable packers) και τη δυνατότητα ρωγμάτωσης πλέον του ενός σχηματισμού ανά πέρασμα, άνοιξε το δρόμο για την εκμετάλλευσή τους. (99)



Εικόνα 8.5 : Υδραυλική ρωγμάτωση για ανάκτηση υδρογονανθράκων από ζώνη χαμηλού ενδιαφέροντος (bypassed zone), χωρίς να επηρεάζονται άλλες ευαίσθητες ζώνες εντός της γεώτρησης. (99)

Η κυριότερη ανησυχία σχετικά με τη χρήση του περιελιγμένου σωλήνα σε εφαρμογές υδραυλικής ρωγμάτωσης ήταν οι φθορές στον ίδιο το σωλήνα που μπορούν να προκαλέσουν τα στερεά που περιέχουν τα ρευστά ρωγμάτωσης. Οι φθορές αυτές μειώνουν την προσδοκώμενη διάρκεια ζωής του σωλήνα, και επομένως είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το μέγεθος της μείωσης αυτής ώστε να ρυθμιστούν αναλόγως τα μοντέλα υπολογισμού της κόπωσης του σωλήνα. Πλέον, το πρόβλημα αυτό έχει επιλυθεί χάρη στη συνεχή μέτρηση του πάχους του σωλήνα με χρήση υπερήχων (ultrasonic thickness gauge), κατά την εκτέλεση τέτοιων εργασιών. (15).

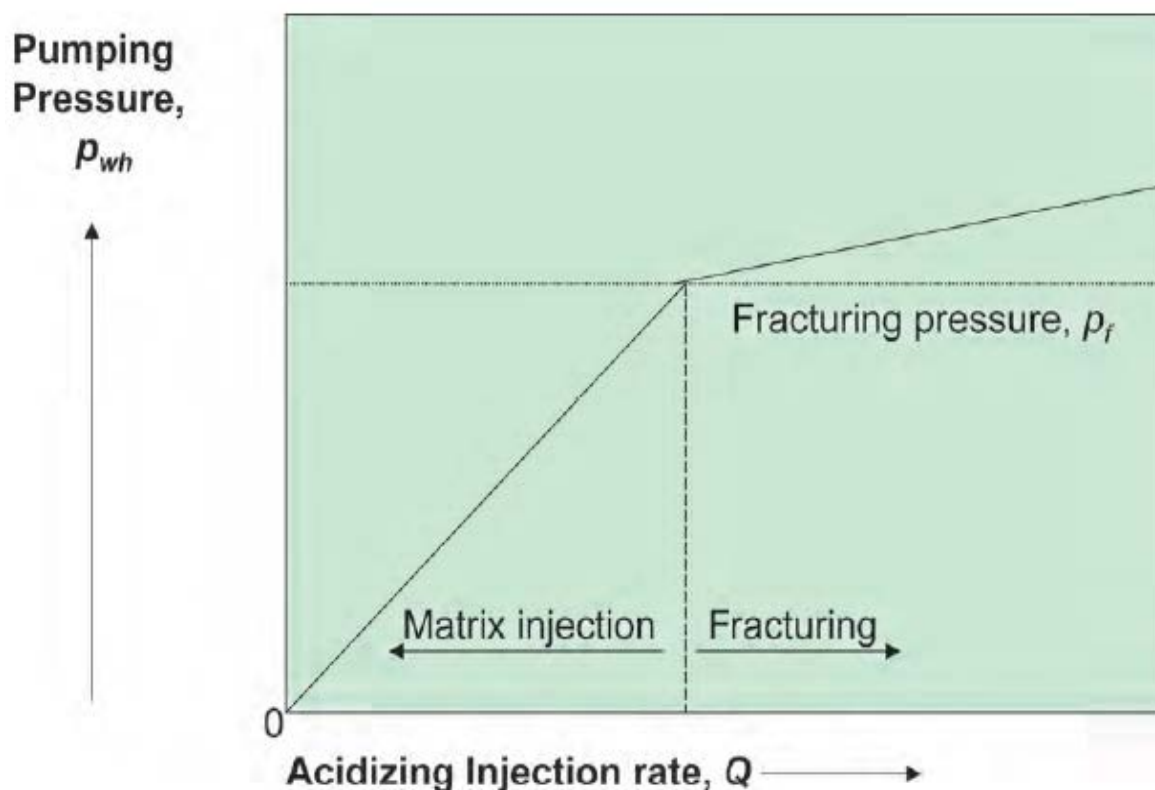
### 8.2.2 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΟΞΕΩΝ (ACIDIZING)

Η χρήση διαλυμάτων οξέων για τη βελτίωση της παραγωγικότητας γεωτρήσεων πετρελαίου αλλά και αερίου, είναι γνωστή στην πετρελαϊκή βιομηχανία για πάνω από 120 χρόνια. Η πρακτική αυτή προηγείται κατά πολύ, χρονικά, της υδραυλικής ρωγμάτωσης, και αποτελούσε, για πολλά χρόνια τη βασική μέθοδο καθαρισμού και διέγερσης των γεωτρήσεων με σκοπό την αύξηση της απόδοσής τους. Σήμερα, τα προβλήματα διάβρωσης των σωλήνων εισπίεσης των διαλυμάτων οξέων έχουν ξεπεραστεί με τη χρήση αναστολέων διάβρωσης (corrosion inhibitors), και η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται με μεγάλη συχνότητα, τόσο σε νέες γεωτρήσεις για τη μεγιστοποίηση της αρχικής τους παραγωγικότητας, όσο και σε γηρασμένα κοιτάσματα με σκοπό την αύξηση του συντελεστή απόληψης. (100).

Γενικά, όλες οι εργασίες που περιλαμβάνουν την εισπίεση διαλυμάτων οξέων μέσα σε μια παραγωγική γεώτρηση ονομάζονται “acid treatment”. Σκοπός κάθε εισπίεσης είναι η βελτίωση της παραγωγικότητας της γεώτρησης, ωστόσο ο τρόπος που αυτό θα επιτευχθεί διαφέρει ανά κατηγορία εισπίεσης οξέων. Οι τρεις βασικές κατηγορίες είναι οι εξής (100) :

- Καθαρισμός με οξέα (acid washing), που αποσκοπεί αποκλειστικά στον καθαρισμό της γεώτρησης από αποθέσεις, όπως επιφανειακά επιστρώματα (Κεφάλαιο 7), και δεν επηρεάζει το σχηματισμό.
- Οξειδωση συστατικών της μάζας του σχηματισμού (matrix acidizing), όπου τα διαλύματα οξέων εισπιέζονται χωρίς να υπερβαίνουν την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού (formation fracturing pressure).
- Ρωγμάτωση με οξέα (fracture acidizing), όπου τα διαλύματα οξέων εισπιέζονται υπερβαίνοντας την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού (Εικόνα 8.6).

Ο σκοπός των δύο τελευταίων κατηγοριών είναι η αποκατάσταση ή και η βελτίωση της παραγωγικότητας κοιτασμάτων πετρελαίου ή φυσικού αερίου, διαλύοντας οποιαδήποτε εμπόδια εντός του παραγωγικού σχηματισμού τα οποία δυσχεραίνουν τη ροή των υδρογονανθράκων, ή διαλυτοποιώντας ενώσεις / ορυκτά του σχηματισμού με σκοπό τη διεύρυνση ή τη δημιουργία νέων διόδων ροής προς την παραγωγική γεώτρηση.



Εικόνα 8.6 : Διάγραμμα διαχωρισμού των κατηγοριών εισπίεσης διαλυμάτων οξέων (acid treatment), οξείδωση του σχηματισμού (matrix acidizing) και ρωγμάτωση με οξέα (fracture acidizing), με βάση την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού. (101)

Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας εργασίας εισπίεσης διαλυμάτων οξέων για τη βελτίωση της απόδοσης μιας παραγωγικής γεώτρησης είναι :

- Το είδος του σχηματισμού (ασβεστολιθικός, σχιστολιθικός, ψαμμιτικός).
- Η διαπερατότητά του.

Γνωρίζοντας το είδος του σχηματισμού που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η εισπίεση των οξέων, επιλέγεται ο τύπος ή ο συνδυασμός διαλυμάτων οξέων που θα χρησιμοποιηθούν, ενώ η διαπερατότητά του καθορίζει την πίεση με την οποία θα εισπνεστούν τα διαλύματα.

Το πιο κοινό οξύ που χρησιμοποιείται στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι το υδροχλωρικό οξύ. Η ικανότητα του υδροχλωρικού οξέος να διαλύει με μεγάλη ευκολία τον ασβεστίτη και το δολομίτη, βασικά ορυκτά των ασβεστολιθικών κοιτασμάτων, είναι γνωστή, και επομένως, καθώς περίπου το 70% των κοιτασμάτων που έχουν εκμεταλλευθεί έως σήμερα είναι ασβεστολιθικά, εξηγείται η χρήση του οξέος αυτού ήδη από το 1896. Τόσο ο ασβεστίτης όσο και ο δολομίτης διαλύονται ταχύτατα παρουσία υδροχλωρικού οξέος και παράγουν προϊόντα ευδιάλυτα στο νερό, όπως φαίνεται από τις παρακάτω αντιδράσεις (102) :

- $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 4\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Το αποτέλεσμα της επαφής του εισπνεζόμενου διαλύματος υδροχλωρικού οξέος στον ασβεστολιθικό σχηματισμό είναι η δημιουργία καναλιών (channels) ακανόνιστου σχήματος, γνωστές ως “σκουληκότρυπες” (wormholes) (Εικόνα 8.7). Για το λόγο αυτό, η εισπίεση διαλύματος υδροχλωρικού οξέος περισσότερο χρησιμεύει στη δημιουργία ή την επέκταση παλαιών διόδων ροής των υδρογονανθράκων, παρά στην απομάκρυνση εμποδίων κοντά στην παραγωγική ζώνη. (102).



**Εικόνα 8.7 :** Εργαστηριακό καλούπι από κανάλια που δημιουργήθηκαν σε ασβεστολιθικό παραγωγικό σχηματισμό με την εισπίεση διαλύματος υδροχλωρικού οξέος από ένα κεντρικό μέσο (central conduit). (102)

Στους ψαμμιτικούς σχηματισμούς, το υδροχλωρικό οξύ δεν έχει την ίδια αποτελεσματικότητα όπως στους ασβεστολιθικούς. Για το λόγο αυτό οι περισσότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση της λεγόμενης “όξινης λάσπης” (mud acid), δηλαδή διαλύματος υδροχλωρικού οξέος συνδυασμένου με υδροφθορικό οξύ (HF). Η εισπίεση όξινης λάσπης σε ψαμμιτικούς σχηματισμούς αποσκοπεί στη διάλυση χαλαζιακής άμμου, αστρίων και αργίλων που συσσωρεύονται στους πόρους του σχηματισμού και εμποδίζουν τη φυσική ροή των υδρογονανθράκων, σε αντίθεση με τη χρήση υδροχλωρικού οξέος στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. (100)

Δεδομένου πως η ετερογένεια είναι σχεδόν δεδομένη στους περισσότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, είναι επόμενο πως ο σχεδιασμός και η επιλογή του κατάλληλου οξέος ή οξέων μιας εργασίας εισπίεσης απαιτούν μεγάλη προσοχή. Η συνήθης πρακτική για τις πιο απλές περιπτώσεις περιλαμβάνει τη χρήση μίγματος υδροχλωρικού και υδροφθορικού οξέος, σε αναλογία σύμφωνη με την ορυκτολογική σύσταση του ταμιευτήρα, η οποία προκύπτει ύστερα από εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων του σχηματισμού. Άλλα πρόσθετα που συνήθως εμπεριέχονται στο μίγμα οξέων είναι, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, αναστολείς διάβρωσης για την προστασία της σωλήνωσης από τα οξέα, αλλά και αναστολείς για την αποτροπή σχηματισμού γαλακτωμάτων νερού – πετρελαίου. Επιπλέον, για την αποτροπή μόλυνσης του ταμιευτήρα από πιθανή σκωρία λόγω διάβρωσης κάποιου μεταλλικού τμήματος του κατώτερου εξοπλισμού στο πυθμένα ή της σωλήνωσης, προστίθενται και οι λεγόμενοι παράγοντες ελέγχου σιδήρου (iron – control – agents).

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η διαπερατότητα του σχηματισμού στον οποίο θα πραγματοποιηθεί η εισπίεση διαλυμάτων οξέων, καθορίζει και την πίεση που πρέπει να του ασκηθεί ώστε να εισέλθουν τα οξέα στο εσωτερικό του. Κατά κανόνα, όσο μικρότερη η διαπερατότητα, τόσο μεγαλύτερη η απαίτηση σε πίεση. Σε πολύ περατούς σχηματισμούς, όπου η εισπίεση των διαλυμάτων οξέων μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς υπερβαίνεται η πίεση ρωγμάτωσης του ταμιευτήρα, η τεχνική ονομάζεται οξειδωση συστατικών της μάζας του σχηματισμού (matrix acidizing). Όταν η διαπερατότητα του σχηματισμού είναι μικρή, τότε η εισπίεση των διαλυμάτων οξέων πραγματοποιείται με υψηλότερη πίεση με σκοπό, τόσο την προχώρησή τους μέσα στο σχηματισμό μέσω φυσικών ή τεχνητών ρωγματώσεων, όσο και τη διεύρυνση των ρωγματώσεων αυτών. Εάν η πίεση αυτή, ξεπερνά την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού, τότε η τεχνική ονομάζεται ρωγμάτωση με οξέα (fracture acidizing). (100)

Σκοπός της τεχνικής οξειδωσης των συστατικών της μάζας του σχηματισμού (matrix acidizing) είναι η βελτίωση ή η αποκατάσταση της διαπερατότητας μιας ζώνης, περιμετρικά της παραγωγικής γεώτρησης, ακτίνας μεταξύ 8 και 24 in ( 20 – 61 cm), χωρίς την πρόκληση ρωγματώσεων στο σχηματισμό. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε γεωτρήσεις όπου η διαπερατότητα του σχηματισμού κοντά σε αυτές έχει μειωθεί λόγω φυσικών



φθορών που προκαλούν τα ρευστά διάτρησης, τα ρευστά ολοκλήρωσης ή άλλα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες επισκευαστικές εργασίες, ή λόγω του σχηματισμού συσσωματωμάτων κηρών ή επιφανειακών επιστρωμάτων. Στις περιπτώσεις αυτές, η αποτελεσματικότητα της τεχνικής στην επαύξηση της παραγωγικότητας της γεώτρησης μπορεί να φτάσει και το 100%. Ωστόσο, αν δεν έχει τραυματιστεί ο σχηματισμός από κάποια από τα παραπάνω και δεν έχει μειωθεί η διαπερατότητά του, η τεχνική της οξειδωσης των συστατικών της μάζας του σχηματισμού σπάνια προκαλεί αύξηση της παραγωγικότητας πάνω από 50%, ειδικά σε ψαμμιτικούς σχηματισμούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το κόστος εισπίεσης των διαλυμάτων οξέων μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ το κέρδος από την αύξηση της παραγωγικότητας, και για το λόγο αυτό η τεχνική αυτή αποφεύγεται. Σε πολλές εφαρμογές συνηθίζεται να εισπνέζεται διάλυμα υδροχλωρικού οξέως, περιεκτικότητας 5 - 15%, για την προετοιμασία του σχηματισμού για την κυρίως οξειδωση με το μίγμα υδροχλωρικού και υδροφθορικού οξέος. (103) Η αρχική αυτή εισπίεση (preflush) συμβάλλει στο να διαλύσει το υδροχλωρικό οξύ διάφορα ανθρακικά ορυκτά προτού αυτά έρθουν σε επαφή με το υδροφθόριο και αντιδράσουν, παράγοντας φθοριούχο ασβέστιο ( $\text{CaF}_2$ ), το οποίο κατακρημνίζεται πολύ εύκολα και φράσει τις διόδους παραγωγής. Τέλος, μετά την εισπίεση της όξινης λάσπης (mud acid -  $\text{HCl}/\text{HF}$ ), εισπνέζεται μίγμα αραιού διαλύματος υδροχλωρικού οξέος με χλωριούχο αμμώνιο ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), το οποίο παρασύρει τις μικρές ποσότητες φθοριούχου ασβεστίου, που πιθανόν έχουν σχηματιστεί, μακριά από την παραγωγική ζώνη, ώστε αν τελικά κατακρημνιστούν, η παραγωγική ζώνη να μείνει όσο το δυνατόν ανεπηρέαστη. (102).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, η εισπίεση υδροχλωρικού οξέος προκαλεί τη δημιουργία μικρών καναλιών (channels) στο σχηματισμό και δεν είναι κατάλληλη για την αποκατάσταση φθορών σε αυτόν. Επομένως, η τεχνική της οξειδωσης των συστατικών της μάζας του σχηματισμού δεν συνηθίζεται να εφαρμόζεται σε ασβεστολιθικά κοιτάσματα. Αντιθέτως εφαρμόζεται η τεχνική της ρωγμάτωσης με οξέα (fracture acidizing), με σκοπό τη χημική απόξεση ρωγματώσεων που λειτουργούν ως δίοδοι πολύ υψηλής αγωγιμότητας (conductivity). Οι ρωγματώσεις αυτές δημιουργούνται καθώς, πριν την εισπίεση των διαλυμάτων οξέων, εισπνέζεται στο σχηματισμό νερό σε μορφή τζελ (gelled water), προκαλώντας την υδραυλική ρωγμάτωση του σχηματισμού. Οι συνήθεις πρακτικές περιλαμβάνουν την εισπίεση μεγάλης ποσότητας πυκνού διαλύματος υδροχλωρικού οξέος (περίπου 10 έως 500 gal / foot σχηματισμού από τη θέση εισπίεσης), περιεκτικότητας 15 έως 30%. (103) Σε ορισμένες εφαρμογές σε συνθήκες πολύ υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεθανικό ( $\text{HCOOH}$ ) ή οξικό οξύ ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), τα οποία είναι ευκολότερα στη διαχείριση στις συνθήκες αυτές. Ωστόσο, το κόστος των οξέων αυτών ξεπερνά κατά πολύ το κόστος του υδροχλωρικού οξέος. Στην τεχνική της ρωγμάτωσης με οξέα δεν χρησιμοποιείται ποτέ υδροφθορικό οξύ. (104).

Η διαφορά της υδραυλικής ρωγμάτωσης, που περιγράφηκε στις αρχές του κεφαλαίου, και της ρωγμάτωσης με διαλύματα οξέων αφορά τον τρόπο με τον οποίο διατηρείται το πλάτος των δημιουργούμενων ρωγματώσεων. Κατά τη συμβατική ρωγμάτωση, τα στερεά (proppant) που περιέχονται στα ρευστά ρωγμάτωσης εξασφαλίζουν πως, μετά την απομάκρυνση των ρευστών, οι ρωγματώσεις θα παραμείνουν ανοιχτές, καθώς αυτά εγκλωβίζονται στο εσωτερικό τους και τις εμποδίζουν από το να κλείσουν. Αντιθέτως, κατά τη ρωγμάτωση με οξέα δεν πραγματοποιείται εισπίεση στερεών στο σχηματισμό για τη διατήρηση της αγωγιμότητας των ρωγματώσεων. Καθώς τα όξινα υγρά εισπιάζονται και διατρέχουν τις ρωγματώσεις που έχουν σχηματισθεί, αντιδρούν με ενώσεις και ορυκτά των τοιχωμάτων τους, διαλύοντάς τα και δημιουργώντας κανάλια – “σκουληκότρυπες” (wormholes) προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι διευρυμένες ρωγματώσεις δεν κλείνουν μετά την απομάκρυνση των υγρών (backflush), λόγω του μεγέθους τους και των καναλιών αυτών. Για το λόγο αυτό, για να είναι επιτυχημένη η τεχνική απαιτείται τα πετρώματα του σχηματισμού να είναι διαλυτά στο υδροχλωρικό οξύ. Επομένως, η τεχνική εφαρμόζεται ως κύρια μέθοδος ρωγμάτωσης μόνο σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (σχηματισμούς με περιεκτικότητα σε ασβεσίτη, δολομίτη και ανθρακικό ασβέστιο (chalk) άνω του 60%) και ποτέ σε ψαμμιτικούς ή σχιστολιθικούς σχηματισμούς. (104).

Υπάρχουν δύο ειδών εφαρμογές της μεθόδου ρωγμάτωσης με χρήση διαλυμάτων οξέων. Η πρώτη περιλαμβάνει τη χρήση της ως κύρια μέθοδος ρωγμάτωσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την εισπίεση νερού για την προ-ρωγμάτωση του σχηματισμού (στην πλειοψηφία των εφαρμογών) και ακολούθως την εισπίεση των διαλυμάτων οξέων (κυρίως υδροχλωρικού οξέος). Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιείται μόνο σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Η δεύτερη εφαρμογή περιλαμβάνει τη χρήση της τεχνικής ως προκαταρκτικό στάδιο της συμβατικής υδραυλικής ρωγμάτωσης, σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς ή σε ψαμμιτικούς και ασβεστολιθικούς σχηματισμούς με πάρα πολύ μικρή διαπερατότητα. Στις εφαρμογές αυτές, υδροχλωρικό οξύ, ή μίγμα υδροχλωρικού και υδροφθορικού οξέος, εισπιάζεται πριν τα ρευστά ρωγμάτωσης, με σκοπό τον καθαρισμό του “προσώπου” του σχηματισμού έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ρωγμάτωση του και να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα των στερεών (proppant) στη συγκράτηση των ρωγματώσεων. (100).

Το σημαντικότερο πρόβλημα της τεχνικής της ρωγμάτωσης με χρήση διαλυμάτων οξέων είναι η απώλεια διαλύματος στον ταμειυτήρα. Το γεγονός πως τα οξέα που χρησιμοποιούνται αντιδρούν σε μεγάλο βαθμό με τα πετρώματα του σχηματισμού μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή (acid leakoff) μέσα σε αυτόν, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ανάκτησή τους, αυξάνοντας υπερβολικά τόσο τις απαιτούμενες ποσότητες σε οξέα, όσο και το κόστος των εργασιών. Επιπλέον, το μήκος και η ποιότητα των ρωγματώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαρροή των οξέων, και επομένως η επιτυχία μιας επέμβασης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αυτήν. Το πρόβλημα στην εφαρμογή της μεθόδου ρωγμάτωσης

με χρήση οξέων είναι τα κανάλια που δημιουργεί το υδροχλωρικό οξύ γύρω από τις ρωγματώσεις. Όταν τα κανάλια αυτά υπερβούν ένα επιτρεπτό όριο, τεράστιες ποσότητες οξέων χάνονται μέσα σε αυτά. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, τεράστιες ποσότητες πρόσθετων υγρών (fluid-loss additives) εισπνέζονται μαζί με τα οξέα, ώστε να “γεφυρώσουν” (bridge) τα κανάλια, δηλαδή να τα σφραγίζουν λόγω του μεγάλου τους ιξώδους. Γίνεται, λοιπόν, φανερό, πως η δημιουργία και η διαχείριση μεγάλων και καλής ποιότητας ρωγματώσεων, είναι μια πολύ μεγάλη πρόκληση. (104).

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα έχει μεγάλη ιστορία στην εφαρμογή της ρωγμάτωσης με χρήση διαλυμάτων οξέων, αλλά και στην οξειδωση συστατικών της μάζας του σχηματισμού. Ο τρόπος εισπίεσης δεν διαφέρει σχεδόν σε τίποτα με τη συμβατική υδραυλική ρωγμάτωση που περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου, και μάλιστα όλα τα πλεονεκτήματά της έχουν εφαρμογή και στις τεχνικές οξειδωσης. Η δυνατότητα εφαρμογής της οξειδωσης σε κατακόρυφες αλλά και οριζόντιες γεωτρήσεις, η ανθεκτικότητα του σωλήνα στα οξέα αλλά και η μοναδική δυνατότητα που παρέχει η τεχνική της πραγματοποίησης όλων των σταδίων απομόνωσης, οξειδωσης και καθαρισμού της γεώτρησης για την επανέναρξη της λειτουργίας, την καθιστούν βασική επιλογή για την πραγματοποίηση εργασιών με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων. (105).



## 9. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εμπειρία χρόνων από την εφαρμογή της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα σε πληθώρα τεχνικών εργασιών, έχει αναδείξει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Σε όλες τις εφαρμογές που μελετήθηκαν και παρουσιάστηκαν στη διπλωματική αυτή εργασία, υπήρχαν κάποια σταθερά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της τεχνικής που την έκαναν να ξεχωρίζει, αλλά και κάποια τεχνικά μειονεκτήματα που περιορίζουν τους ορίζοντες εφαρμογής της.

Οι βασικοί τομείς στους οποίους υστερεί η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα έχουν ως ακολούθως :

- Αρχικά, η φύση του ίδιου του σωλήνα, δηλαδή η μεγάλη ευελιξία του, η οποία προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα της εύκολης μεταφοράς του σε τύμπανα περιέλιξης, περιορίζει τις εφαρμογές της τεχνικής, κυρίως σε οριζόντιες γεωτρήσεις. Η δύναμη που μπορεί να ασκήσει το κοπτικό άκρο σε οριζόντιες γεωτρήσεις ή σε εργασίες φρεζαρίσματος περιορίζεται με το μήκος του οριζόντιου τμήματος, λόγω της αναδίπλωσης του σωλήνα και λόγω του στατικού τρόπου διάτρησης (μη περιστροφή σωλήνα). Επομένως, υπάρχει φυσικός περιορισμός στο μέγιστο μήκος οριζόντιας διάτρησης αλλά και στο βάθος εντός μιας οριζόντιας γεώτρησης στο οποίο μπορεί ο σωλήνας να φρεζάρει ένα πώμα ή ένα plug.
- Επίσης, η μεγάλη μηχανική φθορά που υπόκειται ο σωλήνας, ακόμα και σε κατακόρυφες γεωτρήσεις, λόγω της μη γραμμικής διάταξής του μέσα σε αυτές, αλλά και η συνεχής κόπωσή του κατά τη διάρκεια προώθησης (ανάπτυξης) και περιέλιξής του (ανάκτησης) συνεπάγονται μειωμένη διάρκεια ζωής του σωλήνα .
- Οι πιθανές βλάβες και αστοχίες που οδηγούν στην απόσυρση του σωλήνα αυξάνουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα, με αποτέλεσμα να είναι, σε γενικές γραμμές, μια όχι και τόσο φθηνή τεχνική, η οποία, ωστόσο, ισοσταθμίζει το κόστος της με την υψηλή της απόδοση και το καλό ποσοστό επιτυχίας των εφαρμογών της.

Στον αντίποδα, πριν ακόμα φανούν τα αποτελέσματα της τεχνικής στην πραγματοποίηση κάποιας τεχνικής εργασίας, ο μικρός χρόνος εγκατάστασης και ο πρακτικά ελάχιστος χώρος που απαιτεί μια τυπική μονάδα περιελιγμένου σωλήνα της δίνουν σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνικές. Η γρήγορη εγκατάσταση της μονάδας συνεπάγεται λιγότερο “νεκρό” χρόνο, ο οποίος κοστίζει αρκετές χιλιάδες δολάρια τη μέρα σε μια πετρελαϊκή εταιρία, και συνολικά λιγότερο χρόνο παρουσίας της μονάδας περιελιγμένου σωλήνα στην πλατφόρμα και ταχύτερη αποκατάσταση ή βελτίωση της παραγωγικότητας της γεώτρησης. Ο

χρόνος είναι καταλυτικής σημασίας έννοια στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων καθώς το κόστος λειτουργίας μιας εξέδρας είναι συνεχές. Επομένως, όταν ένα κοιτάσμα δεν αποδίδει αρκετά, η καθυστέρηση των εργασιών βελτίωσης της παραγωγής, έστω και για ελάχιστο χρονικό διάστημα, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εκμετάλλευσης. Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα δεν είναι η ταχύτερη στην εγκατάσταση και στην ολοκλήρωση εργασιών σε μια γεώτρηση. Είναι, ωστόσο, αρκετά γρήγορη ώστε, σε συνδυασμό με την αποδοτικότητά της και το ποσοστό επιτυχίας των εργασιών της, να συγκαταλέγεται ανάμεσα στις πιο συμφέρουσες από οικονομικής άποψης.

Επιπλέον, η δυνατότητα λειτουργίας των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα υπό την παρουσία πίεσης στην επιφάνεια, χωρίς δηλαδή να αδρανοποιηθεί η γεώτρηση, αποτελεί ίσως το πιο αναγνωρίσιμο χαρακτηριστικό της και οδηγεί στην εξοικονόμηση πολλών εκατομμυρίων δολαρίων για τις εταιρίες που εκμεταλλεύονται κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Η αδρανοποίηση μιας παραγωγικής γεώτρησης, εκτός του υψηλού κόστους πραγματοποίησής της, συνεπάγεται διακοπή της παραγωγής, δηλαδή μηδενικό κέρδος από την εκμετάλλευση, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί και σοβαρά προβλήματα στον παραγωγικό σχηματισμό τα οποία, πιθανότατα, να επηρεάσουν την παραγωγικότητα και τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης.

Οι μονάδες περιελιγμένου σωλήνα είναι πλήρως ανεξάρτητες, τόσο ενεργειακά, όσο και ως προς τον εξοπλισμό που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας επισκευαστικής εργασίας. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι άκρως σημαντικό για τον καθορισμό του συνολικού κόστους εργασιών, καθώς η εταιρία ενοικίασης μιας μονάδας δεν επιβαρύνεται επιπλέον με το κόστος σε ενέργεια και αναλώσιμα.

Οι εφαρμογές της τεχνικής εκτείνονται σε όλα τα στάδια εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος, από τη διάτρησή του έως τη μόνιμη εγκατάλειψή του. Η τεχνική παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στις εφαρμογές όρυξης νέων ή επέκτασης υπάρχοντων γεωτρήσεων, οι οποίες αυξάνονται συνεχώς όσο βελτιώνεται ο εξοπλισμός των μονάδων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σωλήνα. Η δυνατότητα που παρέχει η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα για την πραγματοποίηση όλων των προπαρασκευαστικών εργασιών για την πραγματοποίηση μιας όρυξης είναι άκρως σημαντική στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους όρυξης. Σε μια ήδη υπάρχουσα γεώτρηση όπου επιθυμείται η πλευρική επέκτασή της, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα επιτρέπει :

- Την απομόνωση της ζώνης στην οποία θα πραγματοποιηθεί η όρυξη με τη τοποθέτηση πωμάτων ή plugs, ώστε να μη τίθεται σε κίνδυνο η υπόλοιπη γεώτρηση.
- Την όρυξη της γεώτρησης με τη χρήση ειδικού διατρητικού κατώτερου εξοπλισμού που περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, κοπτικό άκρο και κινητήρα πυθμένα ο οποίος τροφοδοτείται με ισχύ από την κίνηση των ρευστών διάτρησης.

- Την τσιμέντωση κατά το στάδιο της όρυξης και την εγκατάσταση της σωλήνωσης.
- Την ολοκλήρωση της νέας γεώτρησης με την εγκατάσταση της παραγωγικής σωλήνωσης και του εκάστοτε εξοπλισμού ολοκλήρωσης πυθμένα.
- Τη χρήση του ως σωλήνας παραγωγής.

Η ταχύτητα πραγματοποίησης εργασιών καθαρισμού γεωτρήσεων, παραγωγικών και εισπίεσης, αλλά και αγωγών μεταφοράς του πετρελαίου (ισχύουν σχεδόν οι ίδιες μέθοδοι καθαρισμού και οι ίδιες αρχές), αλλά και η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής σε οριζόντιες γεωτρήσεις όπου άλλες τεχνικές όπως το καλώδιο τύπου wireline δεν μπορούν να επέμβουν, της δίνει σημαντικό προβάδισμα έναντι των ανταγωνιστών της. Επιπλέον, η ανθεκτικότητα του σωλήνα στη χημική διάβρωση και η ασφάλεια με την οποία μπορεί να πραγματοποιήσει εισπίεση χημικών ενώσεων στο εσωτερικό μιας γεώτρησης με σκοπό τον καθαρισμό της καθιστούν την τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μια από τις βασικές επιλογές για τον καθαρισμό παραγωγικών γεωτρήσεων και όχι μόνο.

Ο καθαρισμός οριζόντιων γεωτρήσεων από αποθέσεις άμμου, επιφανειακών επιστρωμάτων, ασφατενίων κ.α., αποτελούσε ανέκαθεν πρόκληση για τις μονάδες καθαρισμού γεωτρήσεων. Το καλώδιο τύπου wireline είναι η ταχύτερη και φθηνότερη επιλογή για τον καθαρισμό μιας γεώτρησης. Ωστόσο, η τεχνική περιορίζεται σε κατακόρυφες ή ελαφρώς κεκλιμένες γεωτρήσεις, λόγω της μεγάλης ευελιξίας του καλωδίου που δεν του επιτρέπει την προώθηση σε γεωτρήσεις μεγάλης κλίσης.

Ομοίως, ο ίδιος περιορισμός ισχύει και όταν επιθυμείται η τσιμέντωση μιας γεώτρησης. Το καλώδιο τύπου wireline δεν μπορεί να προσεγγίσει κεκλιμένες γεωτρήσεις, ενώ υστερεί και στην τσιμέντωση κατακόρυφων γεωτρήσεων. Η μέθοδος τσιμέντωσης με wireline περιλαμβάνει τη μεταφορά ενός κάδου με τσιμέντο στο επιθυμητό βάθος, την απόθεσή του και ακολούθως την ανάκτηση του καλωδίου για την επαναπλήρωση του κάδου με τσιμέντο και τη συνέχιση των εργασιών. Ο χρόνος που απαιτείται για αυτή τη διαδικασία είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για την προώθηση του περιελιγμένου σωλήνα εντός της γεώτρησης και την εισπίεση / συμπίεση της επιθυμητής ποσότητας τσιμέντου, στην επιθυμητή θέση. Το υπερβολικά χαμηλό κόστος, ωστόσο, της ενοικίασης μιας μονάδας wireline αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την προτίμησή του έναντι του περιελιγμένου σωλήνα.

Η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα συνέβαλε στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και στη μείωση του κόστους της θερμικής μεθόδου διέγερσης με ατμό. Χωρίς την ύπαρξη των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα δεν θα ήταν δυνατή η εξέλιξη της μεθόδου από την όρυξη δεύτερης γεώτρησης εισπίεσης ατμού, στην επί τόπου εισπίεση εντός του σωλήνα παραγωγής. Η πρακτικότητα

και η μικρή διάμετρος του σωλήνα αποτέλεσε έμπνευση για τη δημιουργία της μεθόδου Single Well – Steam Assisted Gravity Drainage / SW-SAGD, η οποία αποτέλεσε επανάσταση στον τρόπο εκμετάλλευσης των τεράστιων κοιτασμάτων πετρελαίου μεγάλου βάρους και των κοιτασμάτων πίσσας στον Καναδά. Ο ειδικός διπλός σωλήνας ICCT που κατασκευάστηκε ειδικά για τις εφαρμογές αυτές, με τη χαρακτηριστική υψηλή μόνωση και την ικανότητα να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία του εισπνεζόμενου ατμού, μπορεί να αποτελέσει έμπνευση και για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχετικών με τη δημιουργία αποθέσεων στις παραγωγικές γεωτρήσεις λόγω της έντονης μεταβολής της θερμοκρασίας σε κάποια τμήματά του.

Στην πιο διαδεδομένη μέθοδο βελτίωσης της απόδοσης παραγωγικών γεωτρήσεων, δηλαδή στην εισπίεση διαλυμάτων οξέων στην παραγωγική ζώνη, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα είναι μια ασφαλής και άκρως αποδοτική επιλογή. Η επιτυχία της τεχνικής σε αυτές τις εργασίες είναι αποδεδειγμένη σε όλα τα χρόνια εφαρμογής της, γεγονός που δικαιολογεί τον μεγάλο αριθμό μονάδων περιελιγμένου σωλήνα που εκτελούν τέτοιες εργασίες κάθε χρόνο.

Προκειμένου η αποδοτικότητα και το εύρος εφαρμογών της τεχνικής του περιελιγμένου σωλήνα να αυξηθούν, κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σωλήνα. Όπως προαναφέρθηκε, αν το μέγιστο μήκος προώθησης του σωλήνα σε οριζόντιες γεωτρήσεις βελτιωνόταν, τότε θα αυξάνονταν σε μεγάλο βαθμό και οι εφαρμογές της τεχνικής. Ο φυσικός αυτός περιορισμός, λόγω της αναδίπλωσης του σωλήνα, αποτελεί διαχρονικά αντικείμενο έρευνας και πειραματισμού από τις εταιρίες coiled tubing αλλά και από τους μεγάλους κατασκευαστές χαλύβδινων σωλήνων. Η βελτιστοποίηση του συνδυασμού υψηλής αντοχής και σκληρότητας του σωλήνα με τη ταυτόχρονη περιέλιξή του χωρίς να ξεπερνιέται το όριο διαρροής του, φαντάζει ένα δύσκολο αλλά όχι ακατόρθωτο εγχείρημα. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σωλήνα δεν θα συμβάλει μόνο στη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογών του. Θα βελτιώσει κατά πολύ τη διάρκεια ζωής του σωλήνα, και επομένως θα μειωθεί σημαντικά το υψηλό κόστος αντικατάστασης ή επισκευής του.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του 8<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τη χρήση του περιελιγμένου σωλήνα ως μόνιμη σωλήνωση εισπίεσης. Ωστόσο, παρά τις ιδιαιτερότητες των γεωτρήσεων εισπίεσης, μια τέτοια εφαρμογή φαντάζει άκρως ρεαλιστική και εφικτή ως προς τις δυνατότητες του περιελιγμένου σωλήνα. Από πλευράς κόστους ή άλλων τεχνικών δυσκολιών δεν μπορεί να κριθεί αυτή τη στιγμή μια τέτοια εφαρμογή. Θα μπορούσε, όμως, να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας και πειραματισμού, καθώς το πλεονέκτημα που παρέχει η συνέχεια του περιελιγμένου σωλήνα και η απουσία συνδετικών σημείων είναι μοναδική. Οι συνδέσεις στους τυπικούς σωλήνες που τοποθετούνται από ένα συμβατικό γεωτρητικό εξοπλισμό συντήρησης απαιτούν μεγάλη προσοχή καθώς θα μπορούσε να παρατηρηθεί διαρροή νερού ή φυσικού αερίου με αποτέλεσμα η διαδικασία της εισπίεσης να



μην έχει την επιθυμητή ένταση. Το ενδεχόμενο αυτό εξαλείφεται στην περίπτωση χρήσης περιελιγμένου σωλήνα.

Εκτός από τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σωλήνα, το ενδιαφέρον των εταιριών coiled tubing, αλλά και της πετρελαϊκής βιομηχανίας γενικότερα σχετικά με την τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα, στρέφεται στις διαγραφίες πραγματικού χρόνου (real time loggings). Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.1, η διάταξη πυθμένα του εξοπλισμού όρυξης των μονάδων περιελιγμένου σωλήνα περιλαμβάνει ειδικό εξοπλισμό για τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων κατά τη διάρκεια της όρυξης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Logging While Drilling και αποτελεί πεδίο συνεχούς έρευνας για τη βελτίωση του αριθμού και της ποιότητας των ανακτώμενων δεδομένων. Η λήψη των δεδομένων αυτών συμβάλει στην όσο το δυνατό καλύτερη κατανόηση των συνθηκών όρυξης, με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού επιτυχίας της όρυξης αυτής.

Μια ακόμα καινοτομία που τείνει να εφαρμοστεί σε όλο και περισσότερες μονάδες περιελιγμένου σωλήνα, η οποία βασίζεται στην αρχή της λήψης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο όπως οι διαγραφίες, είναι η συνεχής μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σωλήνα καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης εργασιών. Μέχρι και σήμερα, η διάρκεια ζωής του σωλήνα βασίζεται σε θεωρητικά μοντέλα με βάση τους κύκλους ανάπτυξης και ανάκτησης και την παραμόρφωση του σωλήνα στα σημεία κόπωσης. Ωστόσο, για τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας στην πρόβλεψη της αστοχίας κάποιου τμήματος του σωλήνα, εταιρίες όπως η Schlumberger, έχουν εισάγει τη χρήση ενός ειδικού εξοπλισμού μέτρησης της γεωμετρίας του σωλήνα σε πραγματικό χρόνο. Ο εξοπλισμός αυτός τοποθετείται πολύ κοντά στο τύμπανο περιέλιξης και είναι πολύ απλός στην κατασκευή. Οι μετρήσεις αυτές αναδεικνύουν τα σημεία πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα, στα οποία είναι πολύ πιθανό να λάβει χώρα η αστοχία, καθώς συγκρίνουν την πραγματική διάμετρο του σωλήνα με τη θεωρητική. Ταυτόχρονα κάνουν δυνατή την ποσοτικοποίηση της έντασης της παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις σχετικά με την αστοχία του σωλήνα να είναι πολύ πιο ακριβείς, και επιπλέον να πραγματοποιούνται στοχευμένες επισκευαστικές εργασίες στο σωλήνα με σκοπό την επέκταση της διάρκειας ζωής του.

Οι ανάγκες της πετρελαϊκής βιομηχανίας για όσο το δυνατόν μεγιστοποίηση του κέρδους τους σε αυτή τη δύσκολη περίοδο, μπορούν να εξυπηρετηθούν, σε μεγάλο βαθμό, από τις μονάδες περιελιγμένου σωλήνα. Είτε πρόκειται για εργασίες καθαρισμού παραγωγικών γεωτρήσεων ή γεωτρήσεων εισπίεσης, είτε για εργασίες διέγερσης του παραγωγικού σχηματισμού με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του, η τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα μπορεί να προσφέρει γρήγορες, ασφαλείς και αποδοτικές λύσεις. Δεδομένων των νέων τεχνολογιών και των νέων μηχανικών χαρακτηριστικών που συνοδεύουν την τεχνική, η πετρελαϊκή βιομηχανία μπορεί να βασιστεί στην τεχνική του περιελιγμένου σωλήνα ακόμα περισσότερο, τόσο για να ανταπεξέλθει στο οικονομικό περιβάλλον της εποχής

μας, όσο και για να ανοίξει νέους ορίζοντες στον τρόπο εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος και μεγιστοποίησης της αποληψιμότητάς του, ώστε επόμενες κρίσεις αυτού του επιπέδου, να βρουν τη βιομηχανία ακόμα πιο προετοιμασμένη.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Knight, Bob, Smith, Harry and Barnett, Barry.** *PLUTO - World War 11's Best-Kept Secret.* s.l. : Bexley Council, 1998.
2. PLUTO - Pipeline Under the Ocean. *Combined Operations Command.* [Online] 2016. [Cited: Μάρτιος 15, 2016.] <http://www.combinedops.com/pluto.htm>.
3. **Searle, Adrian.** *PLUTO Pipe-line under the Ocean.* Isle of Wight : Shanklin Chine, 2006.
4. History of Coiled Tubing Technology. *PetroWiki.* [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/History\\_of\\_coiled\\_tubing\\_technology](http://petrowiki.org/History_of_coiled_tubing_technology).
5. **Chareuf Afghoul, Ali, και συν.** Oilfield Review, Coiled Tubing : The Next Generation. *Schlumberger.* [Ηλεκτρονικό] Spring 2004. [Παραπομπή: 18 Μάρτιος 2016.] [http://content.yudu.com/A1rjql/Spring2004/resources/index.htm?referrerUrl=http%3A%2F%2Fwww.slb.com%2Fresources%2Foilfield\\_review%2Fen%2F2004%2Ffor2004\\_spr.aspx](http://content.yudu.com/A1rjql/Spring2004/resources/index.htm?referrerUrl=http%3A%2F%2Fwww.slb.com%2Fresources%2Foilfield_review%2Fen%2F2004%2Ffor2004_spr.aspx).
6. **Slator, Damon T. and Hanson, W.E. Jr.** Continuous-String Light Workover Unit. *OnePetro.* [Online] Ιανουάριος 1965. <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-938-PA>.
7. **Priestman, Gerald και Priestman, George Dawson.** "Well drilling" U.S. 2548616 A. *Google Patents.* [Ηλεκτρονικό] 10 April 1951. <http://www.google.com/patents/US2548616>.
8. **Calhoun, George H. και Allen, Herbert.** "Equipment for inserting small flexible tubing into high-pressure wells" U.S. 2567009 A. *Google Patents.* [Ηλεκτρονικό] 4 September 1951. <http://www.google.com/patents/US2567009>.
9. **Sas-Jaworsky II, Alexander.** Coiled Tubing...operations and services Part 1 - The evolution of Coiled Tubing equipment. *SPE Reprint Series NO.38 "Coiled Tubing Technology".* 1994, σσ. 7-12.
10. Coiled Tubing Units. *Well Intervension Pressure Control.* Aberdeen : Aberdeen Drilling Schools Ltd., 2001, σσ. 4-13 - 4-18.
11. Coiled Tubing Unit. *China National Petroleum Corporation, Science and Technology Managment Department.* [Ηλεκτρονικό] 2013. <http://www.cnpc.com.cn/cnpc/gcdx/201407/94b4ad680ad94ea19a553675d70239c6/files/b2bf08a011e140648261b522f12ae7e6.pdf>.

12. Tubing Gripper Blocks. *Power Hydraulics Oilfield Equipment*. [Ηλεκτρονικό] <http://power-hydraulics.com/oilfield-products/tubing-gripper-blocks/>.
13. **Liou, Joanne**. Going The Distance. *Drilling Contractor*. [Ηλεκτρονικό] 12 March 2014. <http://www.drillingcontractor.org/going-the-distance-28006>.
14. **Williams, Thomas, και συν.** *Sound Coiled-Tubing Drilling Practices*. 2001. σ. 6.
15. An Introduction to Coiled Tubing - History, Applications, and Benefits. *International Coiled Tubing Association*. [Ηλεκτρονικό] 2005. <http://www.icota.com/usa/introct/introct.pdf>.
16. Injector Heads (Photo Gallery). *Stewart & Stevenson*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.stewartandstevenson.com/markets/oil-gas/well-intervention-coiled-tubing/injector-head>.
17. Prime Mover for CT Unit. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] June 2015. [http://petrowiki.org/Prime\\_mover\\_for\\_CT\\_unit](http://petrowiki.org/Prime_mover_for_CT_unit).
18. Power Packs. *Consolidated Rig Works, LP*. [Ηλεκτρονικό] <http://crwlp.com/products/power-packs/>.
19. Telescopic CT Control Cabin. *Stelkraft Coiled Tubing and Pumps Pte Ltd*. [Ηλεκτρονικό] 2012. <http://www.stelkraft.com/controlcabin.html>.
20. CT Control and Monitoring Equipment. *Petrowiki.com*. [Ηλεκτρονικό] June 2015. [http://petrowiki.org/CT\\_control\\_and\\_monitoring\\_equipment](http://petrowiki.org/CT_control_and_monitoring_equipment).
21. Control Cabins. *Consolidated Rig Works, LP*. [Ηλεκτρονικό] 2014. <http://crwlp.com/products/control-cabins/>.
22. **Ackert, David, και συν.** The Coiled Tubing Revolution. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] October 1989. [http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors89/oct89/1\\_coiled\\_tubing.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors89/oct89/1_coiled_tubing.pdf).
23. Stripper Packers. *Nexus Energy Technologies, Coiled Tubing Pressure Control Equipment Solutions*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.nexusenergytech.com/Strippers.html>.
24. Coil Tubing Stripper Rubbers. *Associated Research Developments LTD*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.associatedrd.com/\\_mnweb/Catalogue/MNetCatalogue.aspx?Guid=78fce8e8-b1f8-4c1d-91d0-53031d449531&OwnerID=1262&CatalogueName=Default&ParentID=3863&ViewMode=Icon&NavMode=NavigatingFolders&DisplayMap=no](http://www.associatedrd.com/_mnweb/Catalogue/MNetCatalogue.aspx?Guid=78fce8e8-b1f8-4c1d-91d0-53031d449531&OwnerID=1262&CatalogueName=Default&ParentID=3863&ViewMode=Icon&NavMode=NavigatingFolders&DisplayMap=no).

25. Well Control Stack for CT Operations. *Petrowiki.com*. [Ηλεκτρονικό] 26 June 2015. [http://petrowiki.org/Well\\_control\\_stack\\_for\\_CT\\_operations](http://petrowiki.org/Well_control_stack_for_CT_operations).
26. Blow Out Preventer Ram Configuration – Coiled Tubing. *WL Well Pressure Control Equipment Pte.Ltd*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.wlpce.com/Documents/BOP%20Ram%20Configuration%20-%20Coiled%20Tubing.pdf>.
27. **Li, Xiao, και συν.** Research on Coiled Tubing Butt Welding Process and Properties of Welded Joint. *Joining and Welding Research Institute, Osaka University*. [Ηλεκτρονικό] 2011. <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/publication/trans-jwri/pdf/WSE2011-P6.pdf>.
28. Oilfield Glossary : Butt Weld. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/butt\\_weld.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/butt_weld.aspx).
29. **Newman, K.R., και συν.** Analysis of Coiled Tubing Welding Techniques. *Society of Petroleum Engineers*. February 1996, σ. 1.
30. Oilfield Glossary : Bias Weld. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bias\\_weld.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bias_weld.aspx).
31. Coiled Tubing Fatigue. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] June 2015. [http://petrowiki.org/Coiled\\_tubing\\_fatigue](http://petrowiki.org/Coiled_tubing_fatigue).
32. **Tipton, Steven Michael, Smalley, Ed και VanArnam, Don.** Influence of a Straghtener on Coiled Tubing Fatigue. *Society of Petroleum Engineers*. March 2012, σ. 1.
33. History of CTD. *AnTech Ltd. - Coiled Tubing Drilling Service*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.coiledtubingdrilling.com/ctd/coiled-tubing/learn-about-ctd/history-ctd/>.
34. Coiled Tubing Drilling. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] January 2016. [http://petrowiki.org/Coiled\\_tubing\\_drilling](http://petrowiki.org/Coiled_tubing_drilling).
35. **Σταματάκη, Σοφία.** Κεκλιμένες & Οριζόντιες Γεωτρήσεις. *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2003, σ. 156.
36. Underbalanced Drilling. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Underbalanced\\_drilling\\_\(UBD\)](http://petrowiki.org/Underbalanced_drilling_(UBD)).
37. Oilfield Glossary : Mill. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/mill.aspx>.
38. Milling. *Trican Well Service*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.tricanwellservice.com/coiled-tubing/milling>.
39. **Castaneda, Juan Carlos, Schneider, Christopher E. και Brunskill, Doug.** Coiled Tubing Milling Operations: Successful Application of an Innovative Variable

Water Hammer Extended-Reach BHA To Improve End Load Efficiencies of a PDM in Horizontal Wells. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] April 2011. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-143346-MS>.

40. **Hilts, R. L., Fowler Jr., S. H. και Pleasants, C. W.** Fishing with Coiled Tubing. *Society of Petroleum Engineers*. March 1993.

41. Flow Activated Releasable Fishing / Bulldog Spear. *National Oilwell Varco*. [Ηλεκτρονικό] 2014. [http://www.nov.com/Segments/Wellbore\\_Technologies/Downhole/Intervention\\_and\\_Completion\\_Tools/Coiled\\_Tubing\\_Tools/CT\\_Fishing\\_Tools/Flow\\_Activated\\_Releasable\\_Fishing\\_Bulldog\\_Spear.aspx](http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Intervention_and_Completion_Tools/Coiled_Tubing_Tools/CT_Fishing_Tools/Flow_Activated_Releasable_Fishing_Bulldog_Spear.aspx).

42. **Vidick, B., Nash, F. D. και Hartley, I.** Cementing Through Coiled Tubing and Its Influence on Slurry Properties. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] October 1990. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-20959-MS>.

43. Oilfield Glossary : Cement Squeeze. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/cement\\_squeeze.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/cement_squeeze.aspx).

44. CoilFLATE, Coiled Tubing Through-Tubing Inflatable Packer. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] 2014. [http://www.slb.com/~media/Files/coiled\\_tubing/product\\_sheets/downhole\\_technology/downhole\\_coilflate\\_packer\\_ps.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/coiled_tubing/product_sheets/downhole_technology/downhole_coilflate_packer_ps.pdf).

45. Remedial cementing placement techniques. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Remedial\\_cementing\\_placement\\_techniques](http://petrowiki.org/Remedial_cementing_placement_techniques).

46. **Rudnik, Alexander, και συν.** Deep, HPHT well in GOM plugged and abandoned using coiled tubing. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] August 2013. [http://www.slb.com/~media/Files/coiled\\_tubing/industry\\_articles/201308\\_wo\\_deep\\_hpht\\_gom.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/coiled_tubing/industry_articles/201308_wo_deep_hpht_gom.pdf).

47. **Al-Arnaout, Ibrahim H., και συν.** Oilfield Review, Shining a Light on Coiled Tubing. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] 2008. [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors08/win08/shining\\_a\\_light\\_on\\_coiled\\_tubing.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors08/win08/shining_a_light_on_coiled_tubing.pdf).

48. **Σταματάκη, Σοφία.** Ολοκλήρωση Γεωτρήσεων. *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2003, σσ. 209-218.

49. Services - Perforating. *Tiger Wireline*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.tigerwireline.com/services/>.

50. **King, George E.** Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter 4 : Perforating. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2007, σσ. 149-171.

51. Downhole Bazooka. *American Oil & Gas Historical Society* . [Ηλεκτρονικό]  
<http://aoghs.org/technology/downhole-bazooka/>.
52. DynaSlot System. *Dyna Energetics*. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.dynaenergetics.com/uploads/files/55a93e381517b\\_Product\\_Brochures\\_DynaSlot\\_OnlineView.pdf](http://www.dynaenergetics.com/uploads/files/55a93e381517b_Product_Brochures_DynaSlot_OnlineView.pdf).
53. Cementing and Perforating. *US Oil and Gas Corp.* [Ηλεκτρονικό] 2008.  
<http://www.usoilandgas.net/cementing.htm>.
54. **Overholt, Mark**. Swabbing A Well: Explaining The Process In Simple Terms. *Tiger General*. [Ηλεκτρονικό] 17 September 2013.  
<http://www.tigergeneral.com/swabbing-well-explaining-process-simple-terms/>.
55. Hamman Swabbing Services, What is Swabbing. *YouTube*. [Ηλεκτρονικό] 2014. [https://www.youtube.com/watch?v=zOUORPU\\_tlo](https://www.youtube.com/watch?v=zOUORPU_tlo).
56. Oilfield Glossary : Swab. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό]  
<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/swab.aspx>.
57. Completion Systems. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015.  
[http://petrowiki.org/Completion\\_systems](http://petrowiki.org/Completion_systems).
58. **Ruddock, David**. Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter 2 : Completion Systems. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. 2007, σσ. 41-102.
59. Packers. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. <http://petrowiki.org/Packers>.
60. **Irani, Cyrus A. και Callarotti, Gian Franco**. Coiled Tubing Deployed Single Phase Fluid Sampling Apparatus, US 7967067 B2. *Google Patents*. [Ηλεκτρονικό] 28 June 2011.  
<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7967067.pdf>.
61. **Abderrahmane, Boumali, και συν.** Oilfield Review, Coiled Tubing : Innovative Rigless Interventions. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] Winter 2005/2006.  
[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors05/win05/03\\_coiled\\_tubing\\_rigless\\_interventions.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors05/win05/03_coiled_tubing_rigless_interventions.pdf).
62. Cementing Operations - Zonal Isolation. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015.  
[http://petrowiki.org/Cementing\\_operations#Zonal\\_isolation](http://petrowiki.org/Cementing_operations#Zonal_isolation).
63. How Snubbing Units Work. *Rigzone*. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.rigzone.com/training/insight.asp?i\\_id=348](http://www.rigzone.com/training/insight.asp?i_id=348).
64. HWO Snubbing. *Halliburton*. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.halliburton.com/public/bc/contents/data\\_sheets/h08262.pdf](http://www.halliburton.com/public/bc/contents/data_sheets/h08262.pdf).

65. **Armentor, Ricky J., και συν.** Oilfield Review, Regaining Sand Control. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] Summer 2007. [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors07/sum07/p4\\_13.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors07/sum07/p4_13.pdf).
66. **Kim, Amos.** Sand Control Mechanism and its Impact on Mature Fields. *Halliburtonblog.com*. [Ηλεκτρονικό] 2012. <http://halliburtonblog.com/sand-control-mechanism-and-its-impact-on-mature-fields/>.
67. **Restarick, H. L., Fowler Jr., S. H. και Sedotal, W. P.** Thru-Tubing Sand Control Techniques Reduce Completion Costs. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] December 1994. <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-23130-PA>.
68. Asphaltenes and Waxes. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Asphaltenes\\_and\\_waxes](http://petrowiki.org/Asphaltenes_and_waxes).
69. **Jasinski, Raymond.** Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter 9 : Well Production Problems. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2007, σσ. 367-409.
70. **Borden, Keefe.** The Challenges of Processing and Transporting Heavy Crude. *Oil and Gas Facilites*. [Ηλεκτρονικό] October 2013. <https://www.google.gr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=&url=http%3A%2F%2Fwww.maximizerecovery.com%2FLiteratureRetrieve.aspx%3FID%3D193443&bvm=bv.127984354,d.bGs&psig=AFQjCNFS7F8s6L9TwDYx0ZyCaDFUwtB6rQ&ust=1469632739192974>.
71. **Σφακιωτάκης, Σ., Πασαδάκης, Ν. και Ν., Βαρότσης.** Μελέτη της Θερμοδυναμικής Συμπεριφοράς των Ασφαλτενίων Δειγμάτων Πετρελαίων Ταμειυτήρων σε Υψηλές Πιέσεις. [Ηλεκτρονικό] 2003. [https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj2pZ\\_e1InOAhXID8AKHe5sC2kQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fdias.library.tuc.gr%2Fview%2Fmanf%2F55437&usg=AFQjCNEeUcyglwAkGbl487KOlst85VwTNw&sig2=sEq\\_uzNy6muWGIWdxAh9nA&bvm=bv](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj2pZ_e1InOAhXID8AKHe5sC2kQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fdias.library.tuc.gr%2Fview%2Fmanf%2F55437&usg=AFQjCNEeUcyglwAkGbl487KOlst85VwTNw&sig2=sEq_uzNy6muWGIWdxAh9nA&bvm=bv).
72. Removing Paraffin Wax Build-up from Oil Wells. *Envirofluid - Environmental Fluid Systems*. [Ηλεκτρονικό] 23 May 2014. <http://envirofluid.com/info-library/remove-paraffin-oil-well>.
73. Hydrate plug removal. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Hydrate\\_plug\\_removal](http://petrowiki.org/Hydrate_plug_removal).
74. Handling scale in oil production facilities . *Statoil*. [Ηλεκτρονικό] 2009. <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/fielddevelopment/flowassurance/sc/ale/pages/default.aspx>.



75. **Mayer, Michael H., McLaurin, David J. και Gurley, Darrel G.** Through-Tubing Sand Control is Now Important Option. *Oil & Gas Journal*. [Ηλεκτρονικό] 09 September 1991. <http://www.ogj.com/articles/print/volume-89/issue-36/in-this-issue/production/through-tubing-sand-control-is-now-important-option.html>.
76. **Kuncoro, B., Ulumuddin, B. και Palar, S.** SAND CONTROL FOR UNCONSOLIDATED RESERVOIRS. *IATMI-Ikatan Ahli Teknik Perminyakan Indonesia*. [Ηλεκτρονικό] October 2001. <http://www.iatmi.or.id/assets/bulletin/pdf/2001/2001-08.pdf>.
77. **Penberthy, W. L. Jr.** Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter5 : Sand Control. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2007, σσ. 175-240.
78. **Keith, Cheong Ing, και συν.** Coil Tubing Furan Resin Sand Consolidation Treatment on Multi Layered Formation in Peninsular Malaysia. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] October 2013. [https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-165911-MS?sort=&start=0&q=%22Coil+Tubing+Furan+Resin+Sand+Consolidation+Treatment+on+Multi+Layered+Formation+in+Peninsular+Malaysia%22&from\\_year=&peer\\_reviewed=&published\\_between=&fromSearchResults=true&to\\_yea](https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-165911-MS?sort=&start=0&q=%22Coil+Tubing+Furan+Resin+Sand+Consolidation+Treatment+on+Multi+Layered+Formation+in+Peninsular+Malaysia%22&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_yea).
79. **Li, Jeff, Misselbrook, John και Sach, Manfred.** Sand Cleanouts With Coiled Tubing: Choice of Process, Tools and Fluids. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] August 2010. <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-113267-PA>.
80. **Ali, Azhar, και συν.** Oilfield Review, Integrated Wellbore Cleanout Systems : Improving Efficiency and Reducing Risk. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] Summer 2005. [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors05/sum05/01\\_integrated\\_wellbore\\_cleanout.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors05/sum05/01_integrated_wellbore_cleanout.pdf).
81. Coiled tubing applications - Cleanout System. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Coiled\\_tubing\\_applications#Cleanout\\_system](http://petrowiki.org/Coiled_tubing_applications#Cleanout_system).
82. DuraKleen® Asphaltene Removal Service. *Halliburton*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.halliburton.com/en-US/ps/stimulation/acidizing/near-wellbore-cleanout/durakleen-asphaltene-removal-service.page#>.
83. **Eigner, Manfred.** Asphaltenes. *Oilfield Wiki*. [Ηλεκτρονικό] 2016. <http://www.oilfieldwiki.com/wiki/Asphaltenes>.
84. Hydrate Problems in Production. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2016. [http://petrowiki.org/Hydrate\\_problems\\_in\\_production](http://petrowiki.org/Hydrate_problems_in_production).

85. **Reyna, E. M. και Stewart, S. R.** Case History of the Removal of a Hydrate Plug Formed During Deep Water Well Testing. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] 2001. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-67746-MS>.
86. Scale Problems in Production. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2016. [http://petrowiki.org/Scale\\_problems\\_in\\_production](http://petrowiki.org/Scale_problems_in_production).
87. **Crabtree, Mike, και συν.** Oilfield Review : Fighting Scale - Removal and Prevention. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] Autumn 1999. [http://69.18.148.120/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors99/aut99/fighting.pdf](http://69.18.148.120/~media/Files/resources/oilfield_review/ors99/aut99/fighting.pdf).
88. **Σταματάκη, Σοφία και Αυλωνίτης, Γεράσιμος.** Τριτογενής Παραγωγή - Μέθοδοι Επαύξεσης της Απόληψης Πετρελαίου. *Μηχανική Πετρελαίων*. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2004, σσ. 133-158.
89. Oilfield Glossary : Cyclic Steam Injection. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/cyclic\\_steam\\_injection.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/cyclic_steam_injection.aspx).
90. **Butler, R.M., McNab, G. S. και Lo, H. Y.** Theoretical studies on the gravity drainage of heavy oil during in-situ steam heating. *Wiley Online Library*. [Ηλεκτρονικό] August 1981. [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjce.5450590407/epdf?r3\\_referer=wol&tracking\\_action=preview\\_click&show\\_checkout=1&purchase\\_referrer=petrowiki.org&purchase\\_site\\_license=LICENSE\\_DENIED\\_NO\\_CUSTOMER](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjce.5450590407/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=petrowiki.org&purchase_site_license=LICENSE_DENIED_NO_CUSTOMER).
91. Steam Assisted Gravity Drainage. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [http://petrowiki.org/Steam\\_assisted\\_gravity\\_drainage](http://petrowiki.org/Steam_assisted_gravity_drainage).
92. **Falk, Kelly, και συν.** A Review of Insulated Concentric Coiled Tubing Installations for Single Well, Steam Assisted Gravity Drainage. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] February 1996. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-36333-MS>.
93. **Luft, H. B. και Bennion, D. B.** Insulated Concentric Coiled Tubing for Steam Injection for the Single Well Steam - Assisted Gravity Drainage Process. *Weatherford Laboratories*. [Ηλεκτρονικό] January 1997. [http://www.acslabs.com.au/media/37269/insulated\\_concentric\\_coiled\\_tubing.pdf](http://www.acslabs.com.au/media/37269/insulated_concentric_coiled_tubing.pdf).
94. Oilfield Glossary : Well Stimulation. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/w/well\\_stimulation.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/w/well_stimulation.aspx).
95. Oilfield Glossary : Proppant. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/p/proppant.aspx>.
96. Fracturing Fluid. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/fracturing\\_fluid.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/fracturing_fluid.aspx).

97. Fracturing fluids and additives. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό]  
[http://petrowiki.org/Fracturing\\_fluids\\_and\\_additives](http://petrowiki.org/Fracturing_fluids_and_additives).
98. **Holditch, Stephen A.** Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter 8 : Hydraulic Fracturing. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2007, σσ. 323-366.
99. **Degenhardt, Kalon F., και συν.** Isolate and Stimulate Individual Pay Zones. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] Autumn 2001.  
[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors01/aut01/isolate.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors01/aut01/isolate.pdf).
100. Acidizing Treatment in Oil and Gas Operators . *American Petroleum Institute*. [Ηλεκτρονικό] 2014. <http://www.api.org/~media/files/oil-and-natural-gas/hydraulic-fracturing/acidizing-oil-natural-gas-briefing-paper-v2.pdf>.
101. **McLeod, Harry O.** Volume IV : Production Operations Engineering, Chapter 7 : Matrix Acidizing. [συγγρ. βιβλίου] Larry W. Lake. *Petroleum Engineering Handbook*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2007, σσ. 275-321.
102. **Crowe, Curtis, και συν.** Oilfield Review, Trends in Matrix Acidizing. *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό] October 1992.  
[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors92/1092/p24\\_40.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors92/1092/p24_40.pdf).
103. **King, George E.** Acidizing Concepts - Matrix vs. Fracture Acidizing. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] May 1986. <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-15279-PA>.
104. Acid Fracturing. *Petrowiki*. [Ηλεκτρονικό] 2016.  
[http://petrowiki.org/Acid\\_fracturing](http://petrowiki.org/Acid_fracturing).
105. **Thomas, R. L., Saxon, Alan και Milne, A. W.** The Use of Coiled Tubing During Matrix Acidizing of Carbonate Reservoirs Completed in Horizontal, Deviated, and Vertical Wells. *OnePetro*. [Ηλεκτρονικό] August 1998.  
<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-50964-PA>.
106. **Sepehrband, Pouriya.** Calculating Reel Capacity. *Coiled Tubing Services.blogspot*. [Ηλεκτρονικό] 12 March 2012.  
<http://coiledtubingservices.blogspot.gr/2012/03/calculating-reel-capacity.html>.
107. Oilfield Glossary : Sand . *Schlumberger*. [Ηλεκτρονικό]  
<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/sand.aspx>.