



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός Σωλήνωσης σε Γεωτρήσεις Πλευρικής Όρυξης

Αρτέμιος-Δημήτριος Κολομβάκης

Επιβλέπουσα: Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια,

Γεώργιος Αποστολόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής,

Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος, Επίκ. Καθηγητής,

Αθήνα

Μάρτιος 2017

Copyright © Αρτέμιος – Δημήτριος Κολομβάκης, 2017

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα του σχεδιασμού της σωλήνωσης σε γεωτρήσεις πλευρικής όρυξης. Αρχικά παρουσιάζεται ο ρόλος της σωλήνωσης (σκοπός, τύποι σωλήνωσης) στη διαδικασία όρυξης βαθιών γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών αρχών σχεδιασμού της σωλήνωσης σε συμβατικές γεωτρήσεις, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική και τη σχετική βιβλιογραφία. Η εργασία ολοκληρώνεται με το σχεδιασμό της σωλήνωσης σε μια γεώτρηση πλευρικής όρυξης.

Η εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας είναι μια πρωτόγνωρη διαδικασία για κάθε φοιτητή και απαιτεί τόσο τεχνική όσο και πνευματική υποστήριξη. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα. Σοφία Σταματάκη, για την καθοδήγησή της και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε σε κάθε στάδιο της μελέτης. Επιπλέον, θέλω να αναγνωρίσω τη βοήθεια που είχα από την αγαπητή κα. Ειρήνη Δημητρέλλου, μέλους του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού του Εργαστηρίου, για την σημαντική βοήθειά της στη συλλογή δεδομένων. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη διαρκή υποστήριξη τους τόσο στην εκπόνηση της διπλωματικής, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στη Σχολή.

Αρτέμιος-Δημήτριος Κολομβάκης

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό της σωλήνωσης γεωτρήσεων πλευρικής όρυξης, οι οποίες και αποτελούν ειδικό τύπο κεκλιμένων γεωτρήσεων. Αρχικά παρουσιάζονται συνοπτικά οι λόγοι και οι διαδικασίες όρυξης κεκλιμένων γεωτρήσεων και στη συνέχεια οι λειτουργίες και ο ρόλος των διαφόρων τύπων σωλήνωσης σε συμβατικές γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές αυτών. Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης σε μια γεώτρηση ξεκινάει με την επιλογή του βάθους έδρασης της κάθε στήλης σωλήνωσης που θα πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στη γεώτρηση (προκαταρκτικός σχεδιασμός). Στη συνέχεια, ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός της σωλήνωσης που αφορά στον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την αστοχία της σωλήνωσης και στην επιλογή του κατάλληλου τύπου σωλήνωσης για κάθε τμήμα της γεώτρησης (επιλογή του καταλληλότερου βάρους και κατηγορίας στελεχών), ώστε, σε κάθε φάση εξέλιξης της γεώτρησης (όρυξη, ολοκλήρωση, παραγωγή), να πληρούνται οι προϋποθέσεις ασφάλειας και οικονομικότητας. Το πρόγραμμα της σωλήνωσης θα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη του τις απαιτήσεις για την ολοκλήρωση της γεώτρησης και την παραγωγή των υδρογονανθράκων. Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι σωλήνωση ικανή να αντέχει στις εκτιμώμενες αξονικές τάσεις και στις εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Στις κεκλιμένες γεωτρήσεις, λόγω της αλλαγής γωνίας κλίσης, πρέπει κατά το σχεδιασμό να ληφθεί υπόψη και η αντοχή των στελεχών σε κάμψη. Μετά την ανάπτυξη της πλήρους μεθοδολογίας για το σχεδιασμό της σωλήνωσης οποιουδήποτε τύπου κεκλιμένης γεώτρησης, η οποία ακολουθεί τη διεθνή πρακτική, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της σωλήνωσης σε γεώτρηση πλευρικής όρυξης, ως προς την επιλογή σωλήνωσης κατάλληλου βάρους και κατηγορίας. Η σωλήνωση που επιλέχθηκε συγκρίθηκε με την σωλήνωση που χρησιμοποιήθηκε στην πραγματική γεώτρηση και διαπιστώθηκε πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων. Συμπερασματικά, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης σε γεωτρήσεις πλευρικής όρυξης.

Abstract

This Diplomat Thesis deals with the casing design for sidetrack wells, which are a special type of directional wells. In the beginning, the reasons and the procedures for drilling directional wells are summarized. Thereafter, the functions and the role of different casing types in typical oil and gas wells are presented, as well as the properties and the specifications for each casing type. The casing design starts with the selection of the appropriate casing setting depth for each casing string that is necessary to be placed in a well (preliminary design). The detailed casing design involves the determination of factors, which influence the failure of casing and the selection of the most suitable casing grades and weights for a specific operation (drilling, completion, production), both safely and economically. The casing program should also reflect the completion and production requirements. The end product of such a design is a 'pressure vessel' capable of withstanding the expected internal and external pressures and axial loading. In directional wells, due to changes in well path (hole angle and inclination) bending forces which must also be considered during the selection of casing grades. After the deployment of the methodology used by the international practice regarding the design of the casing in directional wells, the case of a sidetrack well was considered for which the appropriate casing grades and weights were determined. The selection was then compared to the selection made for the actual well. In conclusion, the methodology used gives very good results for the design of casing in sidetrack wells.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	1
Περίληψη	2
Abstract	3
Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 1°. Όρυξη Γεωτρήσεων - Γεωτρήσεις Πλευρικής Όρυξης.....	13
1.1 Στόχοι του Σχεδιασμού Γεωτρήσεων.....	13
1.2 Αλληλουχία Διαδικασιών Διάτρησης.....	15
1.3 Περιγραφή Διαδικασίας Όρυξης Γεωτρήσεων.....	15
1.4 Περιστροφικό Γεωτρύπανο.....	16
1.5 Κεκλιμένες και Οριζόντιες Γεωτρήσεις.....	16
1.5.1 Λόγοι Διάτρησης Κεκλιμένων Γεωτρήσεων (Deviated Wells).....	17
1.5.2 Ορισμοί.....	18
1.5.3 Γεωμετρικοί Παράμετροι Τροχιάς.....	22
1.6 Εξοπλισμός Παρέκκλισης (Deflection Tools).....	26
Κεφάλαιο 2°. Σωλήνωση Γεωτρήσεων και Γεωτρήσεων Πλευρικής Όρυξης.....	31
2.1 Λειτουργίες της Σωλήνωσης.....	33
2.2 Τύποι Σωλήνωσης.....	35
2.2.1 Σωλήνωση Οδηγός (Drive or Structural Pipe).....	36
2.2.2 Σωλήνωση Επαφής (Conductor Pipe).....	37
2.2.3 Επιφανειακή Σωλήνωση (Surface Casing).....	37
2.2.4 Ενδιάμεση ή Προστατευτική Σωλήνωση (Intermediate or Protection Casing).....	38
2.2.5 Παραγωγική Σωλήνωση (Production Casing).....	39
2.2.6 Σωλήνωση Liner (Liner Casing).....	40
2.3 Χαρακτηριστικά και Προδιαγραφές της Σωλήνωσης.....	42
2.3.1 Διάμετρος Στελεχών Σωλήνωσης.....	43
2.3.2 Ονομαστικό Βάρος Σωλήνωσης.....	44
2.3.3 Μήκος Στελεχών Σωλήνωσης.....	47
2.3.4 Κατηγορία Χάλυβα (Grade of Steel).....	48

2.3.5	Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σωλήνωσης.....	51
2.4	Σύνδεσμοι Σωλήνωσης και Σπειρώματα	52
2.5	Διαδικασία Σωλήνωσης και Πρόσθετος Εξοπλισμός.....	57
Κεφάλαιο 3°. Σχεδιασμός Σωλήνωσης (Casing Design)		65
3.1	Παράγοντες που Επηρεάζουν το Σχεδιασμό	70
3.2	Επιλογή Βάθους Έδρασης Σωλήνωσης	71
3.2.1	Μέθοδοι Πρόβλεψης και Εκτίμησης Γεωπιέσεων	73
3.3	Ρωγμάτωση του Σχηματισμού	82
3.3.1	Έμμεσες Μέθοδοι.....	83
3.3.2	Άμεσες Μέθοδοι (Δοκιμή Διαρροής – Leak off Test).....	85
3.4	Κριτήριο Θλιπτικής Αστοχίας (Collapse Criterion).....	86
3.4.1	Απώλεια Κυκλοφορίας Λάσπης (Lost Circulation)	88
3.4.2	Υπολογισμός Θλιπτικής Αστοχίας Μεμονωμένων Τύπων Σωλήνωσης.....	89
3.5	Κριτήριο Διάρρηξης (Burst Criterion)	92
3.5.1	Υπολογισμός Εξωτερικής Πίεσης για τον Σχεδιασμό με Βάση το Κριτήριο της Διάρρηξης.....	97
3.5.2	Υπολογισμός Πίεσης Διάρρηξης Μεμονωμένων Σωληνώσεων.....	98
3.6	Συντελεστές Ασφαλείας και Σχεδίασης (Design and Safety Factors) ...	102
3.6.1	Συντελεστής Ασφαλείας (Safety Factor).....	103
3.6.2	Συντελεστής Σχεδιασμού (Design Factor)	103
3.7	Επιλογή Κατηγορίας Σωλήνωσης με βάση το κριτήριο της Θλίψης και Διάρρηξης.....	104
3.8	Κριτήριο Αξονικών Φορτίων (Axial Load Criterion)	106
3.8.1	Βάρος Σωλήνωσης (F_{wt}) (στον αέρα)	108
3.8.2	Δύναμη Άνωσης (F_{buoy})	108
3.8.3	Δύναμη Κάμψης (F_{bend}).....	111
3.8.4	Φορτία λόγω Κραδασμών (Shock load) (F_{shock})	111
3.8.5	Οπισθέλκουσα Δύναμη (<i>Fdrag</i>).....	112
3.8.6	Δοκιμή Πίεσης (Pressure Testing).....	112
3.8.7	Δύναμη που Οφείλεται στη Μεταβολή της Θερμοκρασίας (<i>Ftemp</i>) 113	
3.8.8	Αξονική Δύναμη εξ' αίτιας “Φουσκώματος” (ballooning effect) (<i>Fbal</i>) 114	

3.8.9	Δύναμη κατά την ολοκλήρωση της τσιμέντωσης (Plug bumping pressure) (<i>Fplug</i>)	114
3.9	Υπολογισμός Συνολικού Αξονικού Φορτίου (<i>Ftotal</i>) ανά Περίπτωση.....	114
3.10	Διαξονική και Τριαξονική Φόρτιση (Biaxial and Triaxial Loading).....	115
3.10.1	Υπολογισμός ακτινικών και εφαπτομενικών τάσεων	117
3.10.2	Υπολογισμός αξονικής τάσης	118
3.10.3	Υπολογισμός ισοδύναμης τάσης Von Mises	118
3.11	Σύνοψη Διαδικασίας Σχεδιασμού Σωλήνωσης.....	120
3.12	Μηχανική Ανάλυση (Mechanical Analysis) και Σχεδιασμός Σωλήνωσης σε Κεκλιμένες Γεωτρήσεις υπό τη Δράση των Επιτόπου Τάσεων (In-Situ Stresses)	121
Κεφάλαιο 4°. Μελέτη Περίπτωσης σε Γεώτρηση Πλευρικής Όρυξης (Case Study)		
129		
4.1	Δεδομένα Σχεδιασμού	129
4.2	Υπολογισμός Κριτηρίου Θλιπτικής Αστοχίας.....	135
4.3	Υπολογισμός Κριτηρίου Διάρρηξης	137
4.4	Επιλογή Κατηγορίας Σωληνώσεων	138
4.5	Υπολογισμός Κριτηρίου Αξονικών Φορτίων	140
Κεφάλαιο 5°. Συμπεράσματα.....		145
Παράρτημα		149
Βιβλιογραφία		170

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διάγραμμα κόστους γεώτρησης σε σχέση με το μέγεθος της προσπάθειας που ενέχει η φάση του σχεδιασμού (Adams, 1985).....	14
Σχήμα 1.2: Σχηματική διάταξη περιστροφικού γεωτρύπανου ξηράς (Σταματάκη, 2003).....	17
Σχήμα 1.3: Παραδείγματα κατευθυνόμενων γεωτρήσεων (French Oil & Gas Industry Association, 1990).....	19
Σχήμα 1.4: Κατευθυνόμενη διάτρηση: κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις (Σταματάκη, 2003).....	20
Σχήμα 1.5: Ταξινόμηση των οριζόντιων γεωτρήσεων με βάση το μήκος της «ακτίνας καμπυλότητας» (Σταματάκη, 2003).....	21
Σχήμα 1.6: Σφήνα μόνιμης τοποθέτησης (Schlumberger, 1998).....	26
Σχήμα 1.7: Αντίβαρα σταθερής ή μεταβλητής κλίσης και κινητήρας πυθμένα (Craig, 2016).....	27
Σχήμα 1.8: Ειδικό εργαλείο διάτρησης με άρθρωση (Σταματάκη, 2003).....	27
Σχήμα 1.9: Ειδικό άκρο “jetting bit” (Netwas Group Oil, 2016).....	28
Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστικές διατάξεις κατώτερης συνδεσμολογίας διατρητικής στήλης: Όρυξη τμημάτων αύξησης της καμπυλότητας (πάνω αριστερά), Όρυξη εφαπτομενικών τμημάτων (πάνω δεξιά), Όρυξη τμημάτων μείωσης της καμπυλότητας (κάτω αριστερά), Όρυξη υπό σταθερό προσανατολισμό (κάτω δεξιά) (Σταματάκη, 2003).....	29
Σχήμα 2.1. Τομή γεώτρησης όπου εκτελείται σωλήνωση κατά στάδια (Professional Petroleum Data Management Association, 2010)......	31
Σχήμα 2.2: Μέθοδος σύνδεσης δύο στελεχών της σωλήνωσης (Rigzone).....	33
Σχήμα 2.3: Συμβατικό Christmas tree (Drilling Engineering Handbook).....	34
Σχήμα 2.4: Τύποι σωληνώσεων (Rigzone).....	36
Σχήμα 2.5: Τύποι liner (Rabia, 1985).....	41
Σχήμα 2.6: Διαστάσεις συνδέσμων API με κυκλικό σπείρωμα (API round thread couplings) (Chilingarian & Rahman, 1995)......	46
Σχήμα 2.7: Διαστάσεις συνδέσμων API με προιονωτό σπείρωμα (API buttress thread coupling) (Chilingarian & Rahman, 1995).....	46
Σχήμα 2.8: Απώλεια μήκους σωλήνωσης στο σύνδεσμο (Chilingarian & Rahman, 1995), όπου L_{jc} το μήκος του στελέχους σωλήνωσης συμπεριλαμβανομένου του συνδέσμου και L_j το μήκος του στελέχους σωλήνωσης.....	48
Σχήμα 2.9: Λιπαντικό νήμα για τη στεγάνωση της σύνδεσης (LA-CO Industries, n.d.).....	53
Σχήμα 2.10: Βασικά στοιχεία σπειρωμάτων API (Rabia, 1985)......	54
Σχήμα 2.11: Σύνδεσμος API με κυκλικό σπείρωμα (API round thread coupling) (Rabia, 1985).....	55

Σχήμα 2.12: Σύνδεσμος API με πριονωτό σπείρωμα (API buttress thread coupling) (Rabia, 1985).....	56
Σχήμα 2.13: Σύνδεσμος API με σπείρωμα τύπου Extreme Line (Extreme line thread coupling) (Rabia, 1985).....	57
Σχήμα 2.14: Κεντρωτήρας (centralizers) (Drilling Contractor, 2015).....	62
Σχήμα 2.15: Αποξεστήρας (scratcher) (Eneroil Offshore Drilling Ltd.).....	62
Σχήμα 2.16: Πέλμα σωλήνωσης (casing shoe) (Neftegazmash-Technologies).....	63
Σχήμα 2.17: Λαβή ακινητοποίησης σωλήνωσης (hanger) (Drilling Engineering Handbook)	63
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα επιλογής μεγέθους κοπτικού και διαμέτρου σωλήνωσης (Σταματάκη, Τεχνολογία Γεωτρήσεων, 2003).....	66
Σχήμα 3.2: Εναλλακτικές πυκνότητες λάσπης (Al-Mejed, 2015)	72
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα επιλογής βάθους έδρασης σωληνώσεων (Al-Mejed, 2015)	73
Σχήμα 3.4: Μεταβολή ειδικής αντίστασης με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάλων πιέσεων (Σταματάκη, 2003).....	75
Σχήμα 3.5: Μεταβολή της πυκνότητας με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάλων πιέσεων (Σταματάκη, 2003).....	76
Σχήμα 3.6: Μεταβολή του τμηματικού χρόνου διάδοσης ακουστικών κυμάτων με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάλων πιέσεων (Σταματάκη, 2003)	77
Σχήμα 3.7: Εμπειρική συσχέτιση της ανηγμένης πίεσης σχηματισμών με το λόγο κανονικής προς παρατηρούμενη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Hottman και Johnson) (Σταματάκη, 2003)	78
Σχήμα 3.8: Εμπειρική συσχέτιση της ανηγμένης πίεσης σχηματισμών με τη διαφορά παρατηρούμενης και κανονικής τιμής τμηματικού χρόνου διάδοσης ακουστικών κυμάτων (Hottman και Johnson) (Σταματάκη, 2003).....	78
Σχήμα 3.9: Μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης λόγω αλλαγής λιθολογίας (Α) ή αλλαγής της πίεσης των σχηματισμών (Β) (Σταματάκη, 2003)	79
Σχήμα 3.10: Μεταβολή της βαθμίδας πίεσης υπερκειμένων με το βάθος (Σταματάκη, 2003).....	84
Σχήμα 3.11: Μεταβολή του λόγου Poisson με το βάθος (Σταματάκη, 2003).....	84
Σχήμα 3.12: Δοκιμή διαρροής (Σταματάκη, 2003).....	86
Σχήμα 3.13: Κριτήριο θλιπτικής αστοχίας (Rabia, 1985)	87
Σχήμα 3.14: Υπεράκτια γεώτρηση και σημείο Mud Line (Eoff & Griffith, 1998)	90
Σχήμα 3.15: Μείωση ύψους στήλης λάσπης λόγω ύπαρξης ζώνης απωλειών (Rabia, 1985).....	91
Σχήμα 3.16: Κριτήριο διάρρηξης (Rabia, 1985).....	94
Σχήμα 3.17: Κυκλοφορία της λάσπης για την απομάκρυνση της εισροής αερίου (gas influx) σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers' για τον έλεγχο της γεώτρησης (well control) (Rabia, 1985).....	96

Σχήμα 3.18: Αντιστάθμιση της πίεσης του σχηματισμού με λάσπη μεγαλύτερης πυκνότητας, μετά την απομάκρυνση της εισροής αερίου (gas influx) σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers' για τον έλεγχο της γεώτρησης.....	96
Σχήμα 3.19: Μέγιστη εσωτερική πίεση στη σωλήνωση κατά την κυκλοφορία της εισροής αερίου προς την επιφάνεια (χωρίς εκτόνωση του εισρέοντος αερίου) (drillingHandbook.com).....	99
Σχήμα 3.20: Μέγιστη εσωτερική πίεση στη σωλήνωση κατά την κυκλοφορία της εισροής αερίου προς την επιφάνεια (με ελεγχόμενη εκτόνωση του εισρέοντος αερίου) (drillingHandbook.com).....	100
Σχήμα 3.21: Σχεδιασμός παραγωγικής σωλήνωσης σε διάρρηξη (Rabia, 1985)..	101
Σχήμα 3.22: Γραφική μέθοδος επιλογής κατηγορίας και ονομαστικού βάρους σωλήνωσης βάσει των κριτηρίων της θλίψης και της διάρρηξης (Rabia, 1985).....	106
Σχήμα 3.23: Αξονικά φορτία σωλήνωσης (Drilling Engineering Handbook).....	107
Σχήμα 3.24: Δύναμη άνωσης (Rabia, 1985)	109
Σχήμα 3.25: Δύναμη άνωσης για σωλήνωση μεταβαλλόμενης διαμέτρου (Rabia, 1985).....	110
Σχήμα 3.26: Κεφαλή γεώτρησης (Schlumberger Oilfield Glossary)	113
Σχήμα 3.27: Τριαξονική φόρτιση σωλήνωσης (Drilling Engineering Handbook)..	116
Σχήμα 3.28: Έλλειψη ελαστικότητας τριαξονικής φόρτισης (Drilling Engineering Handbook)	120
Σχήμα 3.29: Βήματα σχεδιασμού σωληνώσεων (Al-Mejed, 2015).....	121
Σχήμα 3.30: Σχηματική αναπαράσταση της σωλήνωσης κατευθυνόμενης γεώτρησης υπό τη δράση επιτόπου τάσεων (Yin & Gao, 2014).....	123
Σχήμα 3.31: Η διαδικασία στροφής συντεταγμένων (Yin & Gao, 2014).....	123
Σχήμα 3.32: Το απλοποιημένο μοντέλο επίπεδης μηχανικής φόρτισης (Yin & Gao, 2014).....	124
Σχήμα 3.33: Αντισυμμετρικοί πίνακες για τους οποίους ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα (Yin & Gao, 2014)	127
Σχήμα 4.1: Προφίλ κατευθυνόμενης γεώτρησης (μπλε πορεία).....	130
Σχήμα 4.2: Βάθη έδρασης σωληνώσεων, κατακόρυφο βάθος και μετρούμενο βάθος γεώτρησης.....	131
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα γωνίας dogleg.....	132
Σχήμα 4.4: Αποσπάσματα του πίνακα P2 (Trican Well Service, 2006).....	139
Σχήμα 4.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων, απόσπασμα παραρτήματος πίνακα P1 (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991).....	139

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ποσοστό κατασκευαστικής ανοχής στις ονομαστικές διαμέτρους των στελεχών της σωλήνωσης (Chilingarian & Rahman, 1995).....	43
Πίνακας 2.2: Εύρη μηκών στελεχών σωλήνωσης (Rabia, 1985).....	47
Πίνακας 2.3: Απώλειες μηκών για σωλήνωση API 10.000 ft (Chilingarian & Rahman, 1995).....	48
Πίνακας 2.4: Χημικές συστάσεις των σωλήνων τύπου API (Rabia, 1985).	49
Πίνακας 2.5: Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής των κατηγοριών σωλήνωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία (Rabia, 1985).	50
Πίνακας 2.6: Κατηγορίες σωλήνωσης σύμφωνα με το API (Rabia, 1985).	51
Πίνακας 2.7: Αναλυτικός πίνακας με σωληνώσεις κατά API (Institut Francais du Petrole, 1999).	59
Πίνακας 3.1: Συνηθισμένα κοπτικά που χρησιμοποιούνται για σωληνώσεις προδιαγραφών API (Al-Mejed, 2015).....	66
Πίνακας 3.2: Κοινά μεγέθη κοπτικά που διέρχονται μέσα από συγκεκριμένο μέγεθος σωλήνωσης API (Al-Mejed, 2015).....	67
Πίνακας 3.3: Κοινά μεγέθη κοπτικά που διέρχονται μέσα από συγκεκριμένο μέγεθος σωλήνωσης API (Al-Mejed, 2015).....	68
Πίνακας 3.4: Προέλευση δεδομένων για το σχεδιασμό της σωλήνωσης (Al-Mejed, 2015).....	69
Πίνακας 3.5: Οργάνωση απαιτούμενων δεδομένων (Al-Mejed, 2015).....	69
Πίνακας 3.6: Προτεινόμενοι συντελεστές σχεδιασμού (Drilling Engineering Handbook)	104
Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεώτρησης και σωλήνωσης (βάθος, διάμετρος)	134
Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστών σχεδιασμού	134
Πίνακας 4.3: Δεδομένα διάτρησης και σχετικές μετατροπές μονάδων (βάθος, γωνία κάμψης, πυκνότητα λάσπης, θερμοκρασία)	134
Πίνακας 4.4: Σύνοψη πιέσεων θλιπτικής αστοχίας και διάρρηξης σχεδιασμού της σωλήνωσης.....	138
Πίνακας 4.5: Σύνοψη κατηγορίας, γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών επιλεχθέντων σωληνώσεων	139
Πίνακας 4.6: Τελική επιλογή σωληνώσεων	143

Εισαγωγή

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός της σωλήνωσης σε γεωτρήσεις πλευρικής όρυξης. Αρχικά παρουσιάζεται ο ρόλος της σωλήνωσης (σκοπός, τύποι σωλήνωσης) στη διαδικασία όρυξης βαθιών γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών αρχών σχεδιασμού της σωλήνωσης σε συμβατικές γεωτρήσεις, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική και τη σχετική βιβλιογραφία. Η εργασία ολοκληρώνεται με το σχεδιασμό της σωλήνωσης σε μια γεώτρηση πλευρικής όρυξης.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο η διεθνώς ακολουθούμενη πρακτική σχεδιασμού της σωλήνωσης συμβατικών γεωτρήσεων μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς και σε γεωτρήσεις πλευρικής όρυξης.

Στο κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ο τρόπος όρυξης γεωτρήσεων και γεωτρήσεων πλευρικής όρυξης και παρατίθενται πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του περιστροφικού γεωτρύπανου και ορισμοί εννοιών που χρησιμοποιούνται ευρέως. Το κεφάλαιο 2 περιέχει όλες τις κατηγορίες σωληνώσεων και συνδέσμων των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών και την διαδικασία που ακολουθείται για να σωληνωθεί μια γεώτρηση. Εν συνεχεία, στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της σωλήνωσης των γεωτρήσεων. Ο σχεδιασμός αποτελείται από την επιλογή των βαθών έδρασης της σωλήνωσης, την επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αλλά και των κατάλληλων κατηγοριών σωλήνωσης ώστε να ανταπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση. Τέλος, στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μια μελέτη περίπτωσης όπου σχεδιάζεται η σωλήνωση μιας γεώτρησης πλευρικής όρυξης. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1^ο. Όρυξη Γεωτρήσεων - Γεωτρήσεις Πλευρικής Όρυξης

Ο σχεδιασμός της γεώτρησης (well planning) ίσως είναι η πιο απαιτητική φάση της μηχανικής των γεωτρήσεων (drilling engineering). Απαιτεί τον συγκερασμό των βασικών αρχών της μηχανικής, της ατομικής εμπειρίας, αλλά και την ομαδική συνεργασία. Ωστόσο, οι μέθοδοι και οι τεχνικές του σχεδιασμού των γεωτρήσεων μπορεί να διαφέρουν μέσα στη βιομηχανία. Όμως, το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να είναι μια γεώτρηση που να έχει ορυχθεί με ασφάλεια και χαμηλό κόστος ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των μηχανικών ταμιευτήρα (reservoir engineers) για παραγωγή υδρογονανθράκων. (Adams, 1985)

1.1 Στόχοι του Σχεδιασμού Γεωτρήσεων

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού των γεωτρήσεων είναι να διαμορφωθεί ένα πρόγραμμα για τη διάτρηση μιας γεώτρησης. Το πρόγραμμα αυτό είναι αναγκαίο να έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Adams, 1985):

- Ασφάλεια
- Χαμηλό κόστος
- Χρησιμοποιήσιμη γεώτρηση (usable hole)

Δυστυχώς, δεν είναι πάντοτε δυνατόν να επιτευχθούν τα παραπάνω σε κάθε γεώτρηση. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής, τον εξοπλισμό διάτρησης, τη θερμοκρασία, τη σωλήνωση (casing) και τα διαθέσιμα κεφάλαια.

Ο παράγοντας ασφάλεια είναι υψηλής προτεραιότητας κατά το σχεδιασμό μιας γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα η ασφάλεια του προσωπικού βρίσκεται πάνω από όλους τους άλλους παράγοντες του γεωτρητικού προγράμματος. Το σχέδιο όρυξης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια εφαρμογής του, σε περίπτωση που πρωτόγνωρα προβλήματα, μη δυνάμενα να προσδιοριστούν κατά τη φάση του

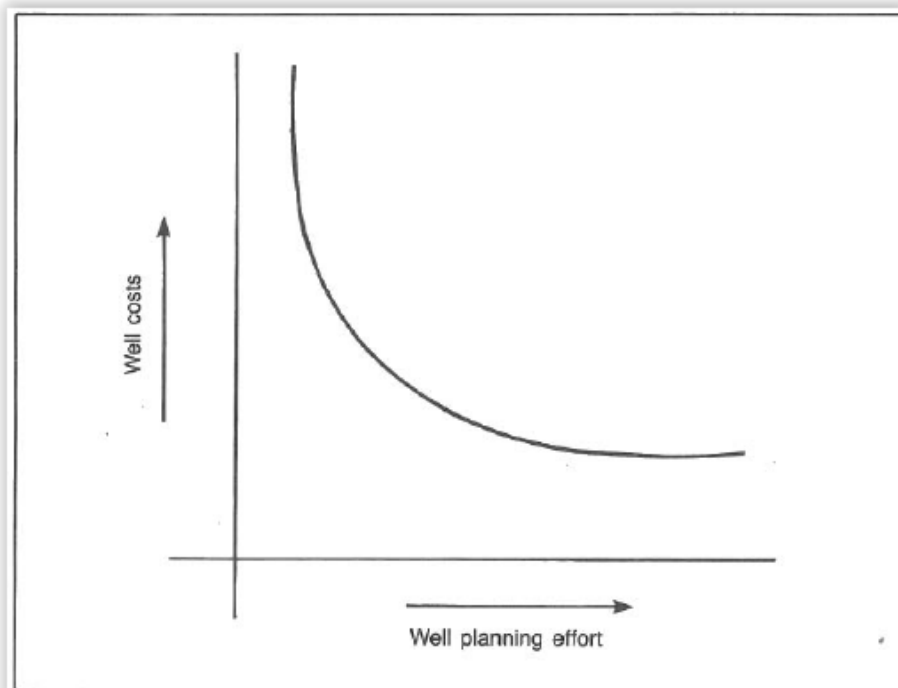
σχεδιασμού, μπορεί να θέτουν σε κίνδυνο το έργο και τους εργαζόμενους ιδιαίτερα. Μια τέτοιου είδους αστοχία στην ασφάλεια έχει ως συνέπεια την απώλεια ζωής.

Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι η ασφάλεια του πηγαδιού. Ο σχεδιασμός της γεώτρησης είναι απαραίτητο να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος εκρήξεων (blowouts) και να αποφεύγονται φαινόμενα που δύνανται να δημιουργήσουν προβλήματα.

Με τον όρο χαμηλό κόστος χαρακτηρίζεται η οικονομική εκτέλεση του γεωτρητικού έργου, χωρίς όμως να αμβλύνονται οι συντελεστές ασφαλείας. Η συσχέτιση του κόστους της γεώτρησης με το κόστος του σχεδιασμού παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1.

Το να διατηρηθεί μια γεώτρηση μέχρι το επιθυμητό βάθος δεν είναι το κυρίαρχο εάν το πηγάδι κρίνεται ως μη χρησιμοποιήσιμο (non usable). Ο όρος χρησιμοποιήσιμο υποδηλώνει ότι:

- Η διάμετρος της γεώτρησης είναι επαρκής ώστε να εκπληρώνει το σκοπό της όρυξής της.
- Η γεώτρηση ή ο παραγωγικός σχηματισμός να μην έχει καταστραφεί ανεπανόρθωτα.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα κόστους γεώτρησης σε σχέση με το μέγεθος της προσπάθειας που ενέχει η φάση του σχεδιασμού (Adams, 1985)

1.2 Αλληλουχία Διαδικασιών Διάτρησης

Η όρυξη μιας γεώτρησης περιλαμβάνει διαδικασίες που διακρίνονται σε 3 στάδια. Το πρώτο βήμα είναι να αρχίσει και να προχωρήσει η όρυξη μιας γεώτρησης στην επιφάνεια της γης για την εξόρυξη υδρογονανθράκων. Το δεύτερο βήμα αποτελεί η διαδικασία της σωλήνωσης του ανοιχτού πηγαδιού και το τρίτο βήμα η ολοκλήρωση του πηγαδιού. Επισημαίνεται ότι, τα δύο τελευταία βήματα χρειάζονται για να υποστηρίξουν τη διάτρηση της γεώτρησης με «βιώσιμο» τρόπο, δηλαδή κατά τη διάρκεια όρυξης ενός πηγαδιού η σωλήνωση είναι ανάγκη να ολοκληρώνεται ταυτόχρονα με τη διάτρηση. Το τρίτο βήμα ξεκινά αφού η γεώτρηση φτάσει το στόχο της. (Hossain & Al-Mejed, 2015)

1.3 Περιγραφή Διαδικασίας Όρυξης Γεωτρήσεων

Σήμερα, η όρυξη κατακόρυφων γεωτρήσεων γίνεται με τη μέθοδο της περιστροφικής διάτρησης. Στην περιστροφική διάτρηση χρησιμοποιούνται τρίκωνα κοπτικά άκρα τα οποία φέρουν δόντια ή κοπτικά άλλου τύπου, όπως αδαμαντοκορώνες και πολυκρυσταλλικά αδαμαντοτρύπανα (Polycrystalline Diamond Compacts – PDC). Η αποσύνθεση του πετρώματος γίνεται με ταυτόχρονη περιστροφή του κοπτικού και άσκηση πίεσης επί αυτού.

Γενικώς, το κοπτικό περιστρέφεται με την περιστροφή ολόκληρης της διατρητικής στήλης (διατρητικών στελεχών και αντιβάρων) μέσω της περιστροφικής τράπεζας η οποία εδράζεται επί της υποδομής του γεωτρύπανου. Η δύναμη (βάρος) επί του κοπτικού ασκείται μέσω στελεχών με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων (αντιβάρων και βαριών στελεχών), τα οποία τοποθετούνται στη διατρητική στήλη αμέσως πάνω από το κοπτικό άκρο.

Σοβαρό πλεονέκτημα αποτελεί η συνεχής κυκλοφορία ρευστού το οποίο εισπιέζεται μέσω της διατρητικής στήλης και του κοπτικού και μεταφέρει τα θρύμματα στην επιφάνεια, έτσι ώστε το μέτωπο κοπής (επαφή κοπτικού – πετρώματος) να είναι συνεχώς ελεύθερο από τα προκύπτοντα θρύμματα. Η μεταφορά των θρυμμάτων γίνεται μέσω του δακτυλίου της γεώτρησης (διάκενο μεταξύ διατρητικής στήλης και τοιχωμάτων γεώτρησης). Το ρευστό που επιστρέφει στην επιφάνεια ακολουθεί διαδικασία καθαρισμού και επανάχρησης (Σταματάκη, 2003).

1.4 Περιστροφικό Γεωτρύπανο

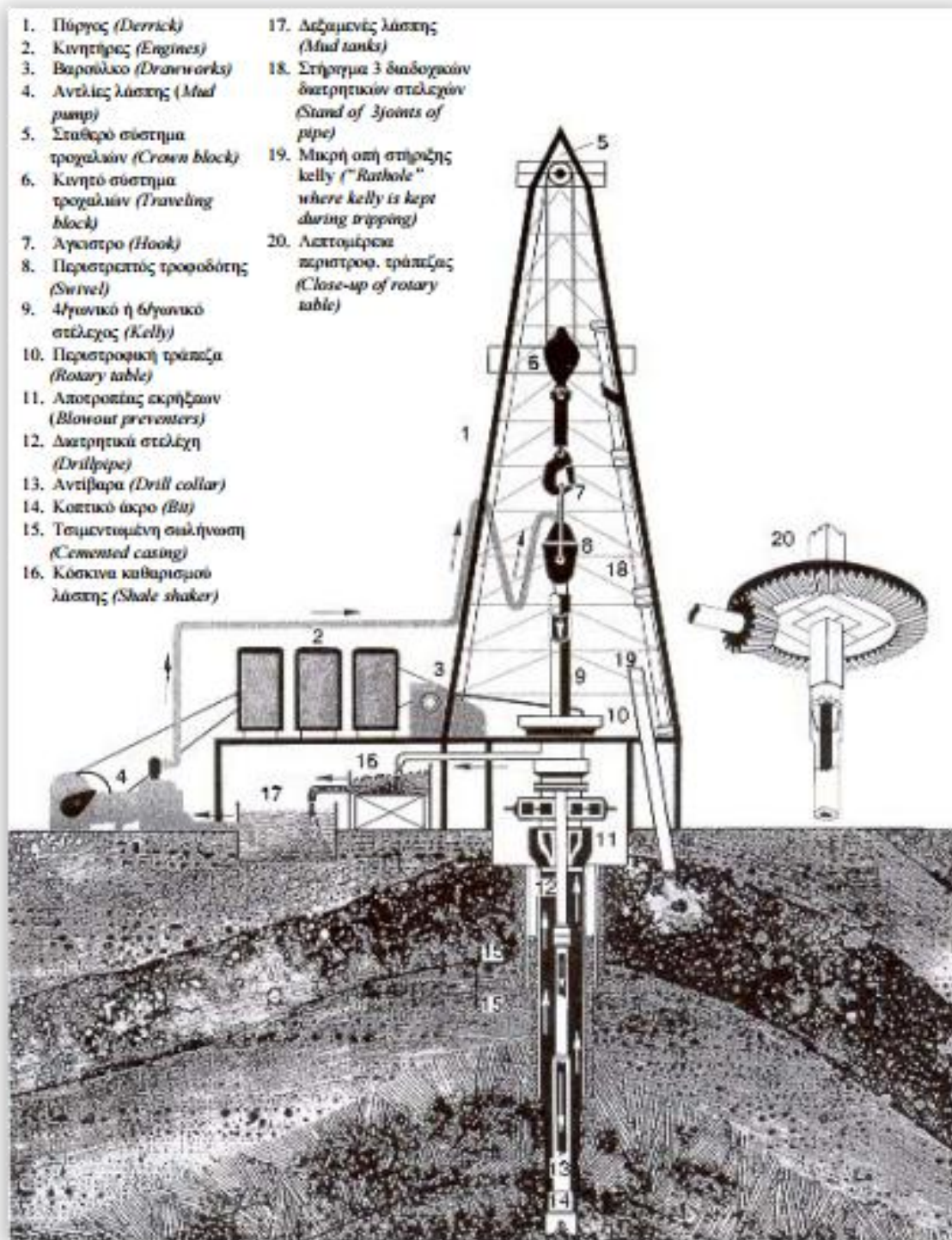
Το περιστροφικό γεωτρύπανο (σχήμα 1.2) είναι μια σύνθετη συνδεσμολογία μηχανικών μερών που πρέπει να εξυπηρετεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- Εφαρμογή βάρους επί του κοπτικού.
- Περιστροφή κοπτικού.
- Κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης.
- Βοηθητικές μετακινήσεις του εξοπλισμού που βρίσκεται στο υπέδαφος.
- Καταγραφή και έλεγχος των παραμέτρων της διάτρησης.
- Ασφάλεια λειτουργίας του εξοπλισμού και εκτέλεσης του έργου.

Τα περιστροφικά γεωτρύπανα διακρίνονται σε χερσαία (onshore) και υπερθαλάσσια (offshore). Στα χερσαία γεωτρύπανα οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι αφορούν τη δυνατότητα (ευκολία) μεταφοράς τους και το μέγιστο βάθος λειτουργίας τους. Διακρίνονται, επομένως σε συμβατικά (conventional) και κινητά (mobile). Στα συμβατικού τύπου γεωτρύπανα ο πύργος εγκαθίσταται επί τόπου. Στις περισσότερες περιπτώσεις μένει πάνω από το πηγάδι και μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης. Εντούτοις, το υψηλό κόστος επέβαλλε την κατασκευή χερσαίων γεωτρύπανων με πύργους μεταφερόμενους και επαναχρησιμοποιούμενους. Τμήματα των νέου τύπου γεωτρύπανων αποσυνδέονται και μεταφέρονται στη θέση επιλογής όπου και συναρμολογούνται εκ νέου (Σταματάκη, 2003).

1.5 Κεκλιμένες και Οριζόντιες Γεωτρήσεις

Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών υπήρξε μια θεαματική ανάπτυξη, αποδοχή και εφαρμογή της τεχνικής όρυξης κεκλιμένων και οριζόντιων γεωτρήσεων γνωστή με τον όρο **κατευθυνόμενη διάτρηση**. Η **κατευθυνόμενη διάτρηση** ήταν φυσικό να αναδειχθεί γρήγορα σε μια πολλά υποσχόμενη τεχνική, αφού όλοι οι ενδιαφερόμενοι παράγοντες έδωσαν έγκαιρα προτεραιότητα στην έρευνα, στην ανάπτυξη ή/και στη βελτίωση τεχνικών που περιορίζουν το κόστος και το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός τέτοιου μεγάλου γεωτρητικού προγράμματος.



Σχήμα 1.2: Σχηματική διάταξη περιστροφικού γεωτρύπανου ξηράς (Σταματάκη, 2003)

1.5.1 Λόγοι Διάτρησης Κεκλιμένων Γεωτρήσεων (Deviated Wells)

Οι λόγοι που διατρύονται γεωτρήσεις υπό κλίση οι εξής:

- Η προσέγγιση, από ξηράς, παράκτιων σχηματισμών.
- Η ανάπτυξη σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από ή πλευρικά ενός δόμου άλατος.

- Η ταυτόχρονη προσβολή πολλών ζωνών παράλληλης στρωμάτωσης.
- Η ταυτόχρονη προσβολή πολλών παραγωγικών σχηματισμών μικρών διαστάσεων, διεσπαρμένων στον ίδιο χώρο.
- Η παρέκκλιση της γεώτρησης από το περιβάλλον δόμων άλατος για να αποφευχθεί αστοχία στη σωλήνωση.
- Ειδικές γεωλογικές απαιτήσεις.
- Προγράμματα όρυξης πολλαπλών γεωτρήσεων από το ίδιο επιφανειακό – χερσαίο ή θαλάσσιο – σημείο.
- Αποφυγή δημιουργίας φαινομένων κώνων αερίου - νερού (Rabia, 1985).
- Η ανάπτυξη κοιτασμάτων που βρίσκονται κάτω από πυκνοκατοικημένες περιοχές, ή σε περιοχές όπου λόγω του δύσβατου τοπογραφικού ανάγλυφου η προσέγγισή τους καθίσταται από δυσχερής ως και αδύνατη.
- Η όρυξη γεώτρησης με σκοπό την προσέγγιση και στη συνέχεια αχρήστευση μιας γειτονικής, εξαιρετικά προβληματικής, γεώτρησης.
- Η ανάπτυξη – εκμετάλλευση υποθαλάσσιων σχηματισμών μεγάλης επιφανειακής εξάπλωσης (η πλειοψηφία των έργων) (Σταματάκη, 2003)

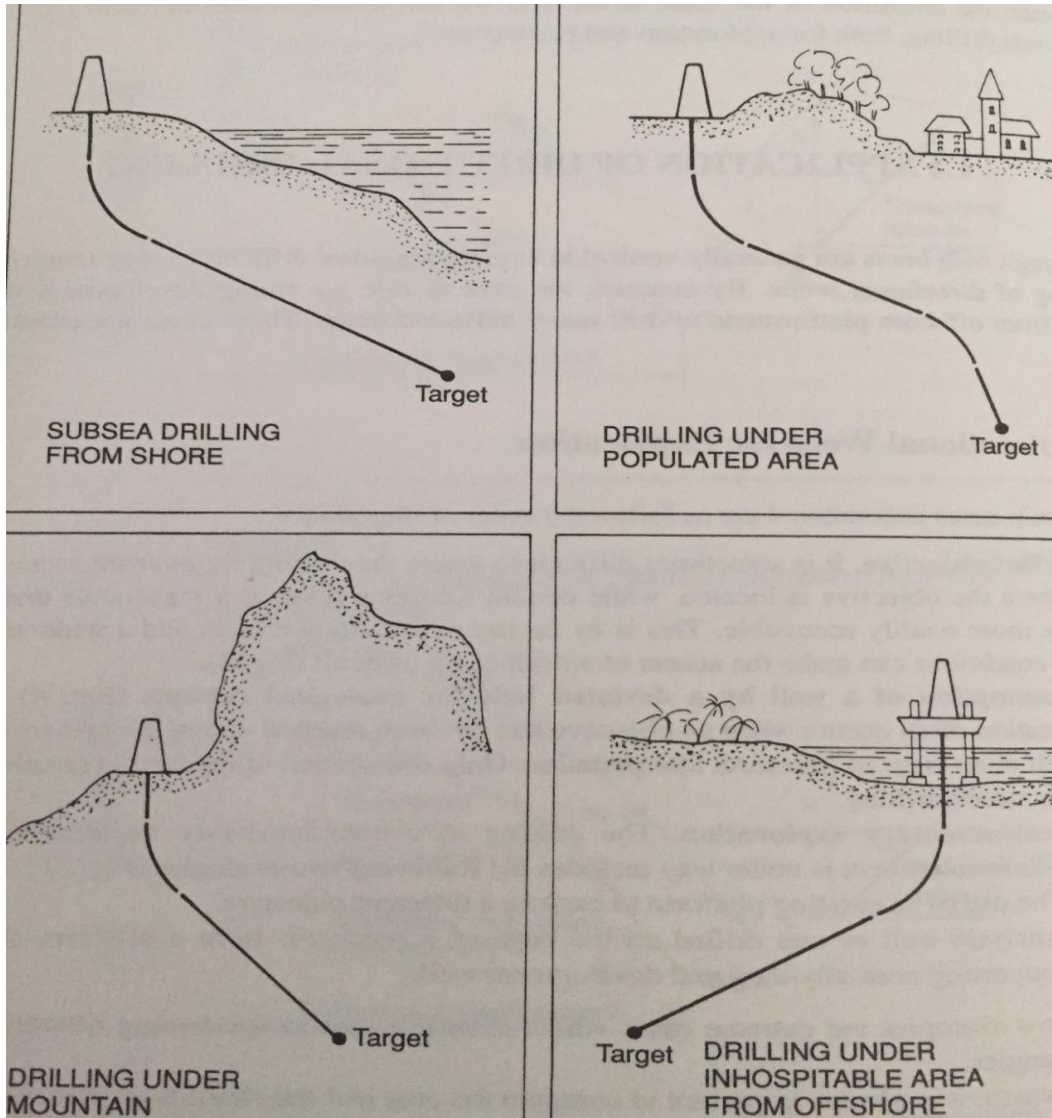
Στο σχήμα 1.3 φαίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα κατευθυνόμενων γεωτρήσεων.

1.5.2 Ορισμοί

Ως **κατευθυνόμενη διάτρηση** (directional drilling), **χαρακτηρίζεται η τεχνική όρυξης υπό συνθήκες προγραμματισμένης και ελεγχόμενης παρέκκλισης από την κατακόρυφη διεύθυνση**. Η επιθυμητή παρέκκλιση προσδίδεται στη γεώτρηση ώστε αυτή ακολουθώντας το συντομότερο κατά το δυνατόν δρόμο, να προσεγγίσει έναν ή και περισσότερους προκαθορισμένους γεωλογικούς «σχηματισμούς στόχους», οι οποίοι βρίσκονται σε κάποια οριζόντια απόσταση ως προς τη θέση εγκατάστασης του γεωτρήπανου στην επιφάνεια (σχήμα 1.4).

Ο ίδιος όρος είχε χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει την τεχνική ελαχιστοποίησής της –ανεπιθύμητης- παρέκκλισης γεωτρήσεων που όφειλαν να είναι κατακόρυφες, (τη λεγόμενη **φυσική παρέκκλιση**, που οφείλεται κύρια στην εναλλαγή

των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων και στη συμπεριφορά της διατρητικής στήλης εντός της

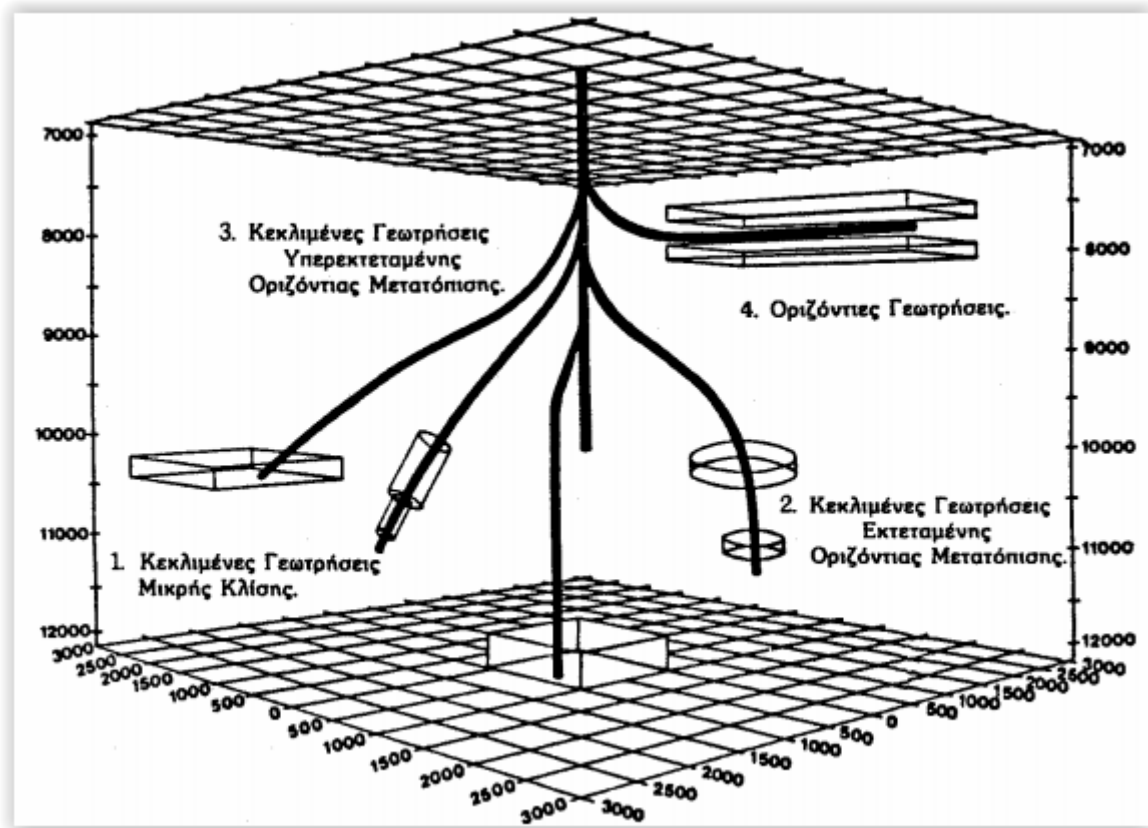


Σχήμα 1.3: Παραδείγματα κατευθυνόμενων γεωτρήσεων (French Oil & Gas Industry Association, 1990)

γεώτρησης), γνωστή με τον όρο, **συμβατική κατευθυνόμενη διάτρηση** (deviation control), καθορισμένων αποδεκτών ορίων (της τάξης των 3°-5°), όσο και την τεχνική πρόσδωσης παρέκκλισης σε μια γεώτρηση που είναι αναγκαίο να ορυχθεί υπό κλίση σύμφωνα με προκαθορισμένο πρόγραμμα, ώστε να προσεγγίσει οριζόντια μετατοπισμένο «σηματισμό στόχο».

Η **διάτρηση κεκλιμένων γεωτρήσεων με εκτεταμένη οριζόντια μετατόπιση** (extended-reach drilling) και η **οριζόντια διάτρηση** (horizontal drilling) δανείζονται

μεθόδους και εξοπλισμό από την κατευθυνόμενη διάτρηση κεκλιμένων γεωτρήσεων. Η μέγιστη γωνία κλίσης της γεώτρησης δεν υπερβαίνει τις 60°-65°, ενώ συχνά η έναρξη της



Σχήμα 1.4: Κατευθυνόμενη διάτρηση: κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις (Σταματάκη, 2003)

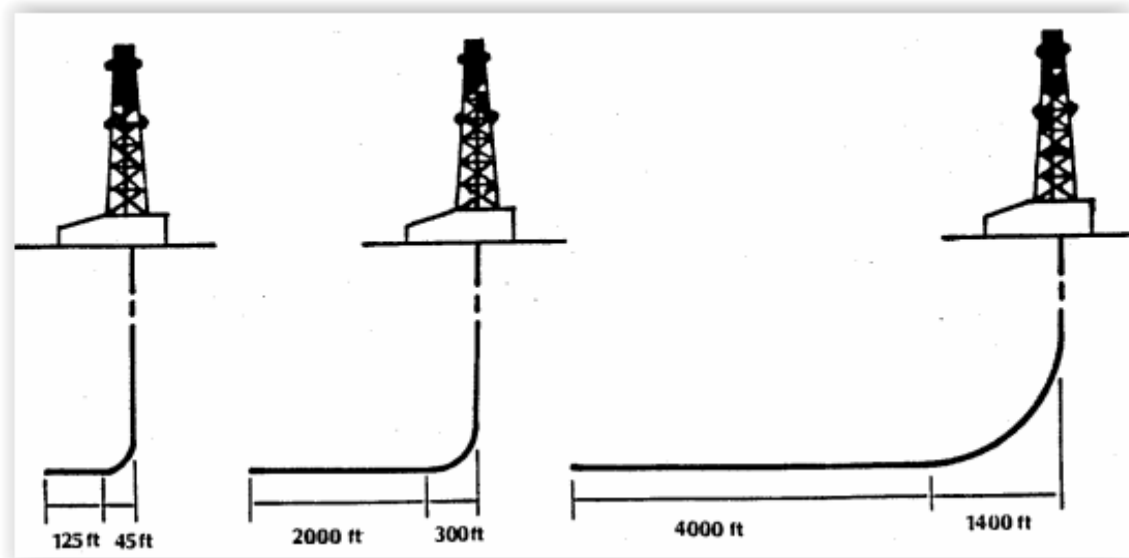
όρυξης στην επιφάνεια πραγματοποιείται με το γεωτρήπανο υπό κλίση. Για το λόγο αυτό και γίνεται χρήση του σύνθετου όρου «κατευθυνόμενη διάτρηση κεκλιμένων-οριζόντιων γεωτρήσεων».

Η διεθνώς αποδεκτή ταξινόμηση (σχήμα 1.5) των οριζόντιων γεωτρήσεων με βάση το μήκος της «ακτίνας καμπυλότητας» είναι η παρακάτω:

- «οριζόντιες γεωτρήσεις μικρής ακτίνας καμπυλότητας» (ultra-short ή short-radius horizontal wells,
- «οριζόντιες γεωτρήσεις μέσης ακτίνας καμπυλότητας» (medium-radius horizontal wells,
- «οριζόντιες γεωτρήσεις μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας» (long-radius horizontal wells.

Έτσι, με αυτό το διαχωρισμό επιτρέπεται όχι μόνο η σωστή επιλογή του κατάλληλου τύπου τροχιάς (λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες σε κάθε περίπτωση συνθήκες),

αλλά και η κατά το δυνατόν τυποποίηση του απαραίτητου ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού και των βοηθητικών τεχνικών.



Σχήμα 1.5: Ταξινόμηση των οριζόντιων γεωτρήσεων με βάση το μήκος της «ακτίνας καμπυλότητας» (Σταματάκη, 2003)

Η διάτρηση κεκλιμένων γεωτρήσεων με εκτεταμένη οριζόντια μετατόπιση, όπως και ο όρος υπονοεί, αποτελεί τεχνική που εφαρμόζεται για να προσδώσει γρήγορα στη γεώτρηση μεγάλη κλίση (μεγαλύτερη από 60° - 65°) που επιτρέπει την επίτευξη μεγάλης «οριζόντια μετατόπισης» για την προσέγγιση απομακρυσμένων «σηματισμών στόχων». Η «οριζόντια μετατόπιση» μιας κεκλιμένης γεώτρησης, κατά την οποία επιτυγχάνεται και η μέγιστη επιθυμητή γωνία κλίσης, αποτελεί την ενεργή ακτίνα δράσης του γεωτρήσανου.

Σύμφωνα με τον διεθνώς αποδεκτό ορισμό, μια κεκλιμένη γεώτρηση χαρακτηρίζεται ως εκτεταμένης μετατόπισης μόνο αν το «ολικό μετρούμενο βάθος» της είναι ίσο ή μεγαλύτερο τουλάχιστον κατά δύο φορές από το «πραγματικό κατακόρυφο βάθος» της. Αντίθετα, ως κεκλιμένες γεωτρήσεις υπέρ-εκτεταμένης οριζόντιας μετατόπισης (mega extended reach wells) χαρακτηρίζονται εκείνες που ο παραπάνω λόγος υπερβαίνει την τιμή 3/1. Με κριτήριο δε το επιτεύξιμο πραγματικό κατακόρυφο βάθος τους, οι κεκλιμένες γεωτρήσεις με εκτεταμένη οριζόντια μετατόπιση διακρίνονται σε μικρού, μέσου και μεγάλου βάθους (shallow, medium, deep extended-reach wells).

Η οριζόντια διάτρηση αποτελεί μια προχωρημένη τεχνική για την όρυξη μεγάλου μήκους οριζόντιων ή σχεδόν οριζόντιων τμημάτων εντός ενός ή πολλών ταυτοχρόνως παραγωγικών σχηματισμών, με βασικό σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητάς τους. Τα οριζόντια τμήματα, που στην ουσία αποτελούν μεγάλου μήκους και υψηλής διαπερατότητας αγωγούς, συμβάλλουν στην αύξηση της επιφάνειας προσβολής του κοιτάσματος και στην αύξηση της αντλητικής ικανότητας της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επίτευξη αυξημένης επιφάνειας επαφής μεταξύ γεώτρησης και παραγωγικού σχηματισμού, σε σύγκριση με εκείνη μιας κατακόρυφης ή μιας κεκλιμένης γεώτρησης (Σταματάκη, 2003).

1.5.3 Γεωμετρικοί Παράμετροι Τροχιάς

Μια κεκλιμένη αλλά και μια συμβατική κατακόρυφη γεώτρηση σχεδόν ποτέ δεν είναι απόλυτα οριοθετημένη στον 2-διάστατο χώρο, αλλά παρουσιάζει συνεχείς αλλαγές στον προσανατολισμό της τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτό οφείλεται κύρια στις συχνές εναλλαγές των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων που συναντά η γεώτρηση στην πορεία της, αλλά και στις τεχνικές προδιαγραφές και δυνατότητες που παρέχει ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.

Κατά συνέπεια, τόσο ο σχεδιασμός όσο και η θεώρηση της τροχιάς κρίνεται αναγκαίο να πραγματοποιούνται στον 3-διάστατο χώρο. Η τροχιά που ακολουθεί μια κεκλιμένη-οριζόντια γεώτρηση χαρακτηρίζεται στη γενική περίπτωση από τις παρακάτω παραμέτρους (Σταματάκη, 2003):

- **Γωνία Κλίσης (inclination angle ή drift angle).** Ορίζεται η γωνία μεταξύ της κατακόρυφης διεύθυνσης και της εφαπτομένης σε οποιοδήποτε σημείο της τροχιάς.
- **Γωνία Διεύθυνσης ή Αζιμούθιο (direction angle ή Azimuth).** Ορίζεται η γωνία, μετρούμενη στο οριζόντιο επίπεδο, μεταξύ της διεύθυνσης του Βορρά και της εφαπτόμενης επί οποιουδήποτε σημείου της τροχιάς. Ωστόσο, ορίζονται η διεύθυνση του μαγνητικού Βορρά (με βάση το γήινο μαγνητικό πεδίο) και η διεύθυνση του γεωγραφικού βορρά (με βάση τη θέση του Βόρειου πόλου), δυο διευθύνσεις που στη γενική περίπτωση δεν ταυτίζονται. Επειδή δε στην πράξη ο μαγνητικός Βορράς μετράται με τη χρήση πυξίδας, απαιτείται διόρθωση της τιμής

αυτής ώστε να βρεθεί η γωνία διεύθυνσης ως προς τον γεωγραφικό Βορρά. Η τιμή της γωνίας διόρθωσης είναι ίση με τη γωνία μεταξύ του μαγνητικού και του γεωγραφικού Βορρά, γνωστή ως «μαγνητική απόκλιση» (magnetic declination ή declination angle). Όταν ο μαγνητικός Βορράς μετράται ανατολικά του γεωγραφικού, η τιμή της μαγνητικής απόκλισης πρέπει να προστίθεται στη μετρούμενη με την πυξίδα τιμή, ώστε να προκύπτει η πραγματική τιμή της γωνίας διεύθυνσης ως προς το γεωγραφικό Βορρά. Στην αντίθετη περίπτωση όπου υπάρχει μαγνητική απόκλιση προς τα δυτικά, η τιμή αυτή πρέπει να αφαιρείται από τη μετρούμενη τιμή της γωνίας διεύθυνσης.

- **Γωνιακές Συνθήκες (angular conditions).** Ορίζεται το ζεύγος των επιθυμητών ή επιτεύξιμων γωνιών κλίσης και διεύθυνσης σε κάθε σημείο κατά το μήκος της τροχιάς και εκφράζει με αναλυτικό τρόπο τον υφιστάμενο προσανατολισμό της γεώτρησης στο ίδιο σημείο. Ειδικότερα ο όρος «**αρχικές γωνιακές συνθήκες**» χρησιμοποιείται για να εκφράσει τις γωνιακές συνθήκες στο αρχικό σημείο παρέκκλισης. Ο όρος «**τελικές γωνιακές συνθήκες**» αφορά στις γωνιακές συνθήκες με τις οποίες προσεγγίζεται το τελικό «σημείο στόχος» όπου θα καταλήξει η γεώτρηση, ενώ ο όρος «**ενδιάμεσες γωνιακές συνθήκες**» για τις γωνιακές συνθήκες κατά την προσέγγιση οποιοδήποτε άλλου ενδιάμεσου σημείου στην πορεία της γεώτρησης.
- **Πραγματικό Κατακόρυφο Βάθος (true vertical depth – TVD).** Ορίζεται η κατακόρυφη απόσταση κάθε σημείου της τροχιάς από την επιφάνεια.
- **Οριζόντια Μετατόπιση/Απόσταση (horizontal displacement ή drift – HDS).** Ορίζεται η οριζόντια απόσταση κάθε σημείου της τροχιάς από την κατακόρυφο που διέρχεται από τη θέση έναρξης της γεώτρησης στην επιφάνεια.
- **Ολικό Μετρούμενο Βάθος (measured depth – MD).** Ορίζεται το ολικό διάστημα που ορύσσεται για την προσέγγιση του τελικού στόχου ή κάποιου ενδιάμεσου σημείου πάνω στην τροχιά της γεώτρησης.
- **Συντεταγμένες B-N και A-Δ (coordinates N-S, E-W) ενός σημείου της τροχιάς.** Ορίζονται οι αποστάσεις κάθε σημείου της τροχιάς (προβαλλόμενου στο οριζόντιο επίπεδο), κατά τις διευθύνσεις B-N και A-Δ, από ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς. Σαν σημείο αναφοράς επιλέγεται συνήθως η τομή των αξόνων B-N και A-Δ της μαγνητικής πυξίδας. Οι συντεταγμένες στην διεθνή βιβλιογραφία

αναφέρονται και ως «Northing» (συντεταγμένες Β-Ν) και «Easting» (συντεταγμένες Α-Δ).

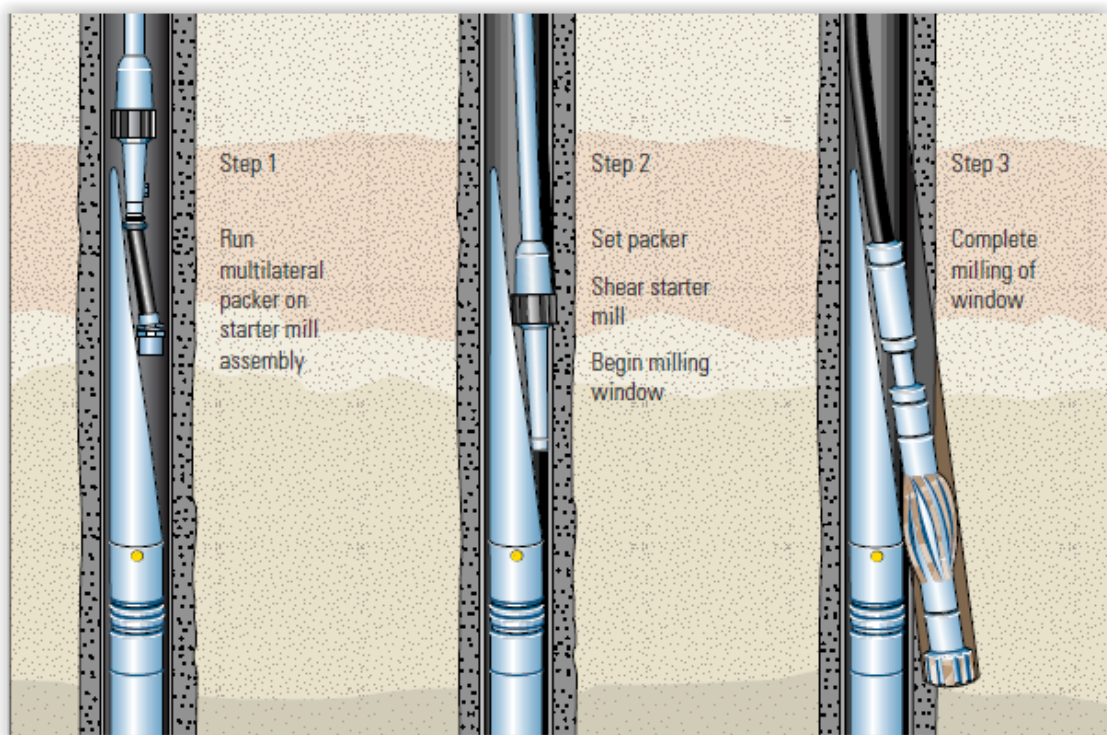
- **Σημείο “Kick - off” (kick – off point, KOP).** Ορίζεται το σημείο που βρίσκεται στο βάθος όπου αρχίζει η πρώτη παρέκκλιση της γεώτρησης από την κατακόρυφη διεύθυνση.
- **Σταθμός (survey station).** Ορίζεται κάθε σημείο της τροχιάς, όπου εκτελούνται μετρήσεις με σκοπό τον έλεγχο της πορείας της γεώτρησης.
- **Στόχος (target, target point ή objective).** Χαρακτηρίζεται ο γεωλογικός σχηματισμός που αποτελεί η ζώνη ενδιαφέροντος του εκάστοτε προγράμματος διάτρησης. Ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται ακόμα είτε αναφερόμαστε σε δεδομένο σημείο, σημειακός στόχος, που είναι το προκαθορισμένο σημείο όπου θα καταλήξει η γεώτρηση εντός του παραγωγικού σχηματισμού, είτε σε τμήμα του παραγωγικού καθορισμένων διαστάσεων στον χώρο. Επιπρόσθετα ο όρος «ενδιάμεσος στόχος», χαρακτηρίζει οποιοδήποτε γεωλογικό σχηματισμό ή σημείο εντός του γεωλογικού υποβάθρου που η γεώτρηση οφείλει να προσεγγίσει ή να αποφύγει, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του εκάστοτε γεωτρητικού έργου.
- **Γωνία “Dog – leg”.** Ορίζεται κάθε απότομη αλλαγή στην πορεία της γεώτρησης μεταξύ δύο σημείων – σταθμών, η οποία οφείλεται είτε σε αλλαγή της γωνίας κλίσης (αλλαγή πορείας στο κατακόρυφο επίπεδο), είτε σε αλλαγή της γωνίας διεύθυνσης (αλλαγή πορείας στο οριζόντιο επίπεδο), είτε σε ταυτόχρονη αλλαγή των δύο γωνιών (αλλαγή πορείας στον 3-διάστατο χώρο).
- **Ένταση του “Dog – leg” (dog – leg severity).** Πρόκειται για τη γωνία “dog – leg”, εκφρασμένη επί ενός καθορισμένου διαστήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).
- **Ρυθμός Build – up (Build – up rate):** Ορίζεται ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης εκφρασμένος σε μοίρες (deg) ανά δεδομένο διατηρηθέν μήκος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).
- **Ρυθμός Drop – off (Drop – off rate):** Ορίζεται ο ρυθμός μείωσης της γωνίας κλίσης εκφρασμένος σε μοίρες (deg) ανά δεδομένο διατηρηθέν μήκος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).

- **Ρυθμός μεταβολής της Γωνίας Διεύθυνσης (Turn rate):** Ορίζεται ο λόγος μεταβολής της γωνίας διεύθυνσης προς καθορισμένο μήκος διατηρηθέντος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m). Σε ορισμένες περιπτώσεις το μήκος αυτό δεν είναι το πραγματικό – δηλαδή το ολικό μετρούμενο μήκος τροχιάς – αλλά η προβολή αυτού του μήκους στο οριζόντιο επίπεδο. Πρόκειται, δηλαδή, για 100 ft ή 30 m μήκους μετρούμενου πάνω στην οριζόντια προβολή της τροχιάς.
- **Τμήμα “Build – up” (Build – up section):** Ορίζεται κάθε καμπυλόγραμμο τμήμα της τροχιάς κατά το οποίο η γωνία κλίσης συνεχώς αυξάνεται έως τη μέγιστη επιθυμητή τιμή.
- **Εφαπτομενικό τμήμα (Tangent ή Straight ή Hold section):** Ορίζεται το τμήμα που ακολουθεί διεύθυνση εφαπτομενική σε κάποιο σημείο του καμπυλόγραμμου τμήματος και κατά μήκος του οποίου οι γωνίες κλίσης και διεύθυνσης παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αντίστοιχες παραμέτρους του κοινού σημείου επαφής μεταξύ των δύο τμημάτων.
- **Τμήμα “Drop – off” (Drop – off section):** Ορίζεται το τμήμα που συνήθως ακολουθεί το εφαπτομενικό τμήμα, κατά μήκος του οποίου η γωνία κλίσης σταδιακά ελαττώνεται έως ότου προσεγγιστεί η επιθυμητή τιμή, κατά την επαφή ή τη διέλευση της γεώτρησης διαμέσου του στόχου.
- **Βασικά σημεία (Critical points) τροχιάς:** Ορίζεται κάθε σημείο πάνω στην τροχιά που αποτελεί αφετηρία ή κατάληξη ενός τμήματος δεδομένου τύπου, όπως είναι το βασικό σημείο ebu (end – of build – up point), ή το βασικό σημείο sdo (start – of drop – off point), σημείο όπου τελειώνει το τμήμα αύξησης και σημείο όπου αρχίζει το τμήμα μείωσης της καμπυλότητας αντίστοιχα.
- **Γωνία προσανατολισμού (Tool – face orientation angle):** Πρόκειται για μέγεθος που προκύπτει από το συνδυασμό των επιτεύξιμων γωνιακών συνθηκών σε κάθε σημείο της γεώτρησης, εκφράζει τον προσανατολισμό της στην ίδια θέση και μετράται σε κλίμακα από 0-90^ο ή από 90-0^ο προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά του υφιστάμενου προσανατολισμού.

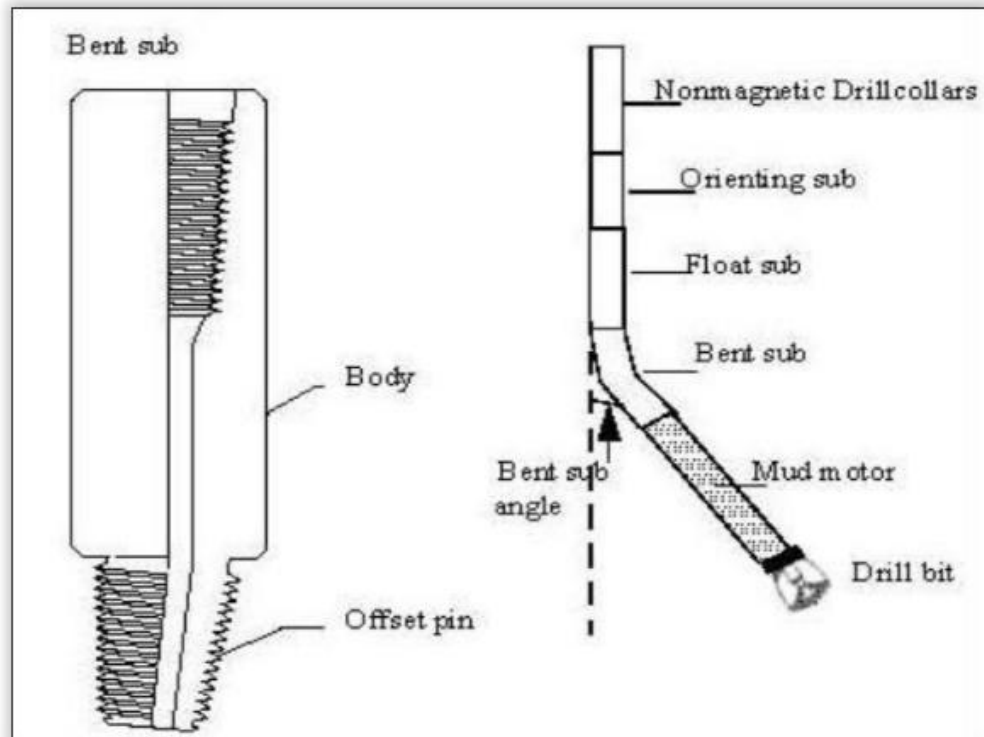
1.6 Εξοπλισμός Παρέκκλισης (Deflection Tools)

Για να επιτευχθεί η παρέκκλιση της γεώτρησης από την κατακόρυφη διεύθυνσή της πρέπει να εφαρμοστούν ορισμένες τεχνικές ώστε να οδηγηθεί το κοπτικό στην επιθυμητή κατεύθυνση.

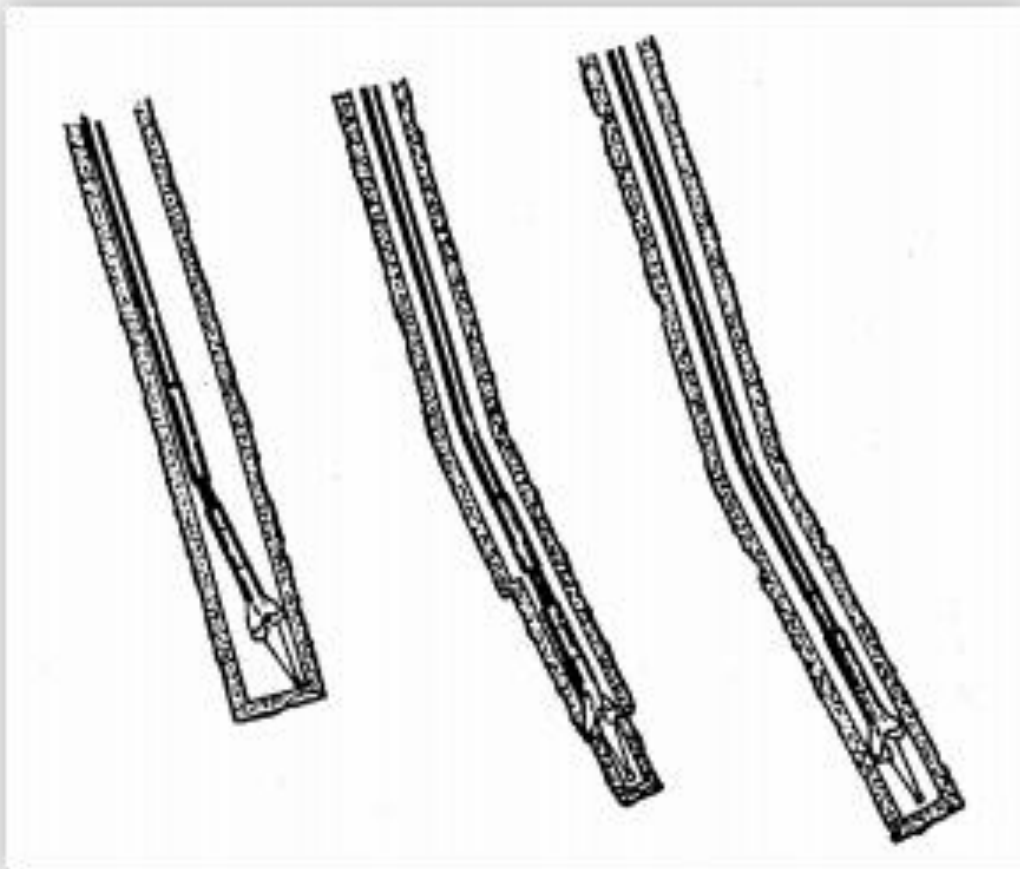
Το πρώτο εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε για να εκτρέψει το κοπτικό ήταν η σφήνα (whipstock), Υπάρχουν σφήνες μόνιμης τοποθέτησης ή ανακλήσιμες. Όμως, με το πέρασ των ετών τέθηκαν σε εφαρμογή και άλλα εξαρτήματα παρέκκλισης, όπως αντίβαρα σταθερής ή μεταβλητής κλίσης (bent – subs), αρθρωτά εργαλεία (knuckle – joint) και ειδικά κοπτικά άκρα για την όρυξη μαλακών σχηματισμών με τη βοήθεια των κυκλοφορούντων ρευστών διάτρησης (jetting – bits). Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα φαίνονται αναλυτικότερα στα σχήματα 1.6, 1.7, 1.8 και 1.9 αντίστοιχα. (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991)



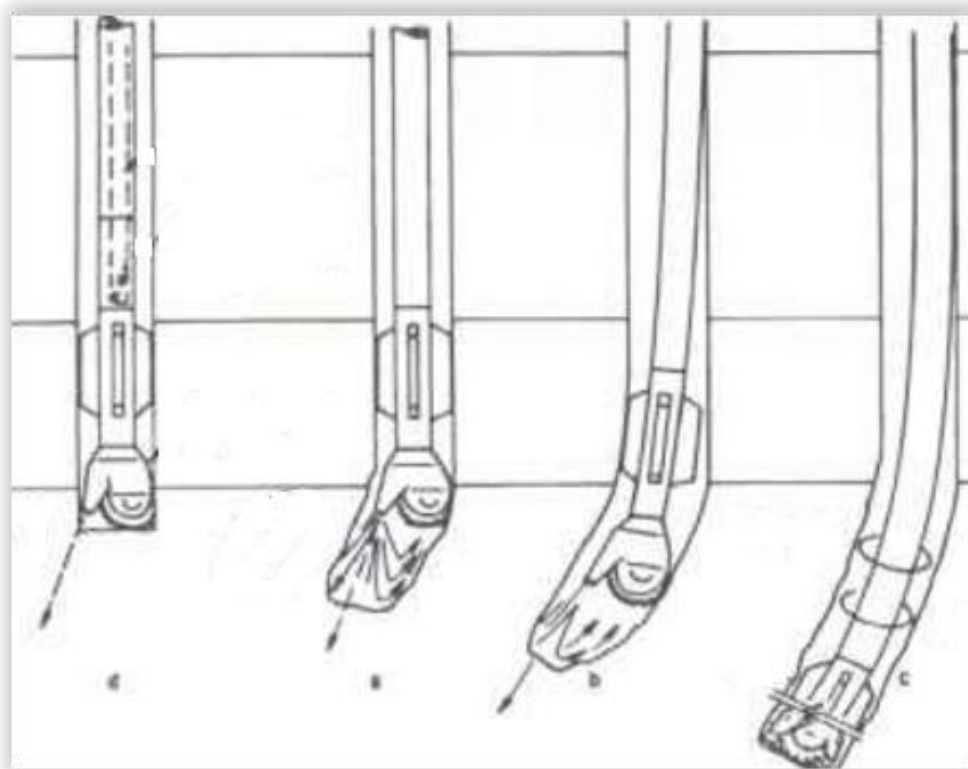
Σχήμα 1.6: Σφήνα μόνιμης τοποθέτησης (Schlumberger, 1998)



Σχήμα 1.7: Αντίβαρα σταθερής ή μεταβλητής κλίσης και κινητήρας πυθμένα (Craig, 2016)

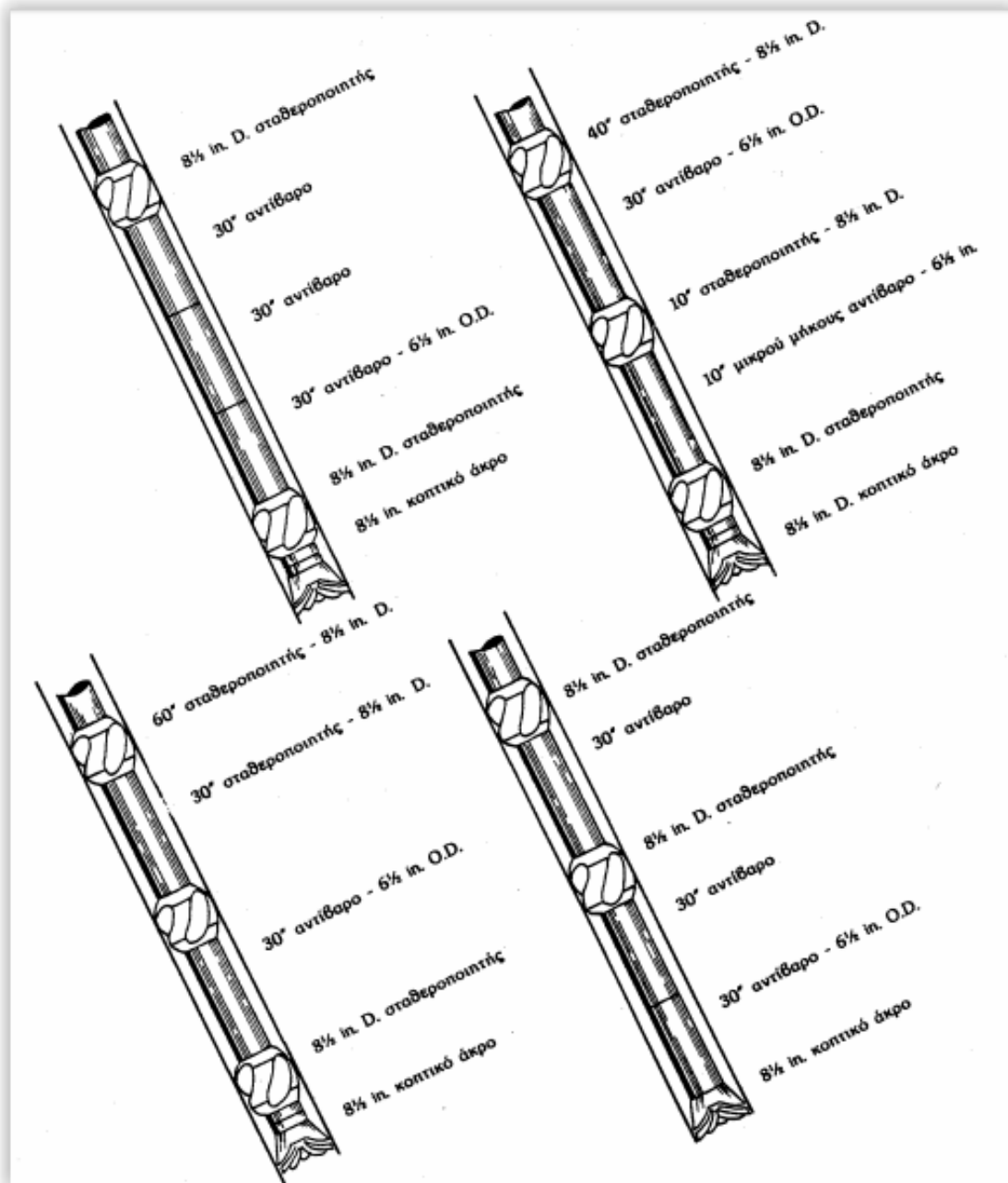


Σχήμα 1.8: Ειδικό εργαλείο διάτρησης με άρθρωση (Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 1.9: Ειδικό άκρο “jetting bit” (Netwas Group Oil, 2016)

Μετά το σημείο kick – off (ΚΟΡ) η σταδιακή μεταβολή στον προσανατολισμό της γεώτρησης επιτυγχάνεται με αλλαγές στο βάρος επί του κοπτικού, με τη χρήση ειδικών κοπτικών άκρων ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες ή με τη χρησιμοποίηση διαφόρων τύπων διατάξεων της κατώτερης συνδεσμολογίας της διατρητικής στήλης (Bottom Hole Assembly – B.H.A.), ανάλογα με ποιο τμήμα της γεώτρησης ορύσσεται. Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί τύποι B.H.A. που χρησιμοποιούνται στην πράξη. (Σταματάκη, 2003)

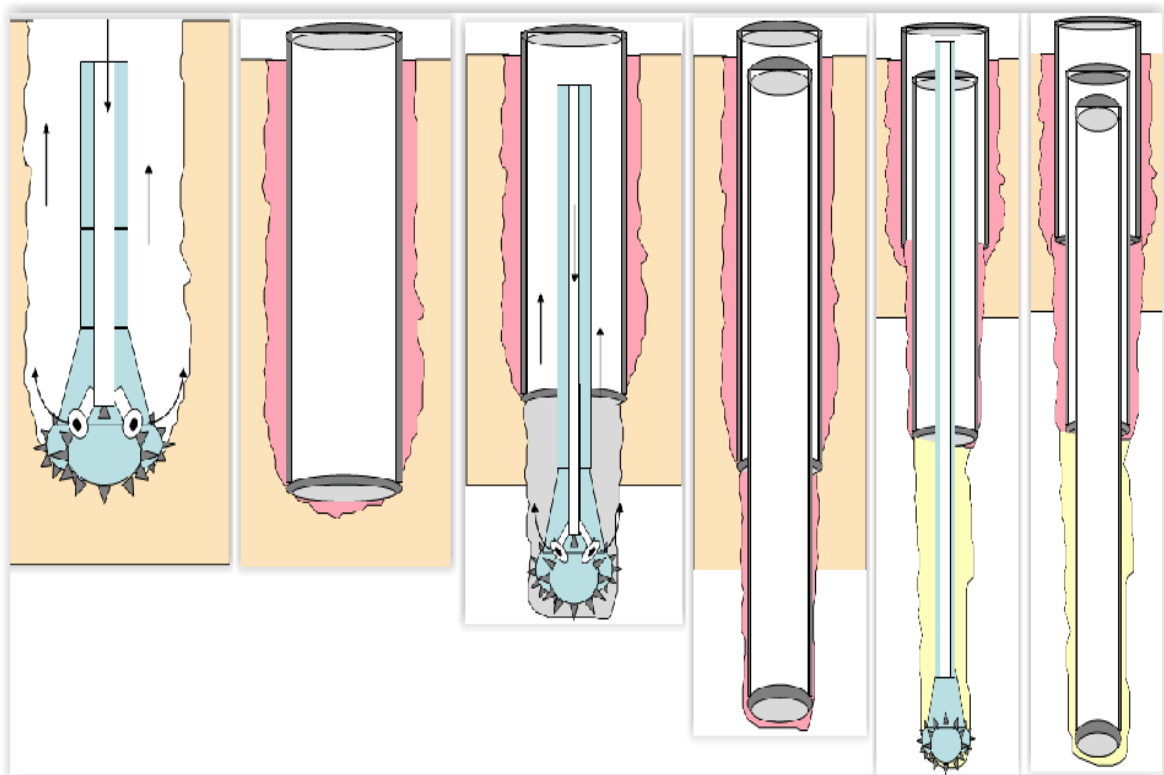


Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστικές διατάξεις κατώτερης συνδεσμολογίας διατρητικής στήλης: Όρυξη τμημάτων αύξησης της καμπυλότητας (πάνω αριστερά), Όρυξη επαπτομενικών τμημάτων (πάνω δεξιά), Όρυξη τμημάτων μείωσης της καμπυλότητας (κάτω αριστερά), Όρυξη υπό σταθερό προσανατολισμό (κάτω δεξιά) (Σταματάκη, 2003)

Κεφάλαιο 2°. Σωλήνωση Γεωτρήσεων και Γεωτρήσεων Πλευρικής Όρυξης

Κατά τη διάνοιξη μιας γεώτρησης, και όσο αυτή προχωρά σε μεγαλύτερο βάθος, τα τοιχώματά της δεν δύνανται να συγκρατηθούν από μόνα τους. Για να διασφαλιστεί η σταθερότητά τους και να αποτραπεί τυχόν κατακρήμιση υλικών τα τοιχώματα της γεώτρησης επενδύονται με σωλήνες ειδικού τύπου. Με τον όρο σωλήνωση (casing) περιγράφεται αυτή η διαδικασία επένδυσης της γεώτρησης από την επιφάνεια του γεωτρώπανου μέχρι το τελικό βάθος από αλληλοκοχλιούμενους σωλήνες διαφόρων διαμέτρων.

Η σωλήνωση γίνεται κατά στάδια (σχήμα 2.1) ανάλογα με το βάθος προχώρησης της γεώτρησης, το είδος των σχηματισμών και των ειδικών αναγκών της γεώτρησης (π.χ. απομόνωση υδροφόρων οριζόντων). Κάθε στάδιο σωλήνωσης εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς, ανάλογα με τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε αυτό το τμήμα της γεώτρησης.



Σχήμα 2.1. Τομή γεώτρησης όπου εκτελείται σωλήνωση κατά στάδια (Professional Petroleum Data Management Association, 2010).

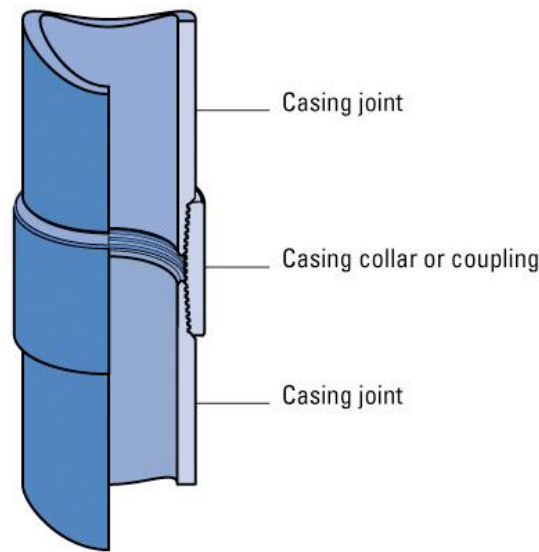
Η σωλήνωση ενός τμήματος της γεώτρησης έχει πάντοτε διάμετρο λίγο μικρότερη από αυτή του κοπτικού που χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη του συγκεκριμένου τμήματος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο θεωρητικός απαιτούμενος χώρος (ανοχή) για την ανεμπόδιση κάθοδό της. Στην πράξη, η κάθοδος της σωλήνωσης σπάνια πραγματοποιείται μόνο με τη επίδραση της βαρύτητας. Συνήθως απαιτείται ταυτόχρονη πρόωση και περιστροφή.

Μετά την κάθοδο της σωλήνωσης του πρώτου σταδίου, ακολουθεί τσιμέντωση του δακτυλίου μεταξύ των εξωτερικών τοιχωμάτων της σωλήνωσης και των πλευρικών τοιχωμάτων της γεώτρησης. Στη συνέχεια καθελκύεται η διατρητική στήλη με κοπτικό της αμέσου μικρότερης τυποποιημένης διαμέτρου, ώστε να συνεχιστεί η γεώτρηση μέχρι το βάθος που έχει πραγματοποιηθεί για το δεύτερο στάδιο σωλήνωσης. Με την επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας η σωλήνωση φτάνει στο ίδιο περίπου τελικό βάθος με τη γεώτρηση (πρακτικά σταματάει λίγο ψηλότερα). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η σωλήνωση του κάθε σταδίου δεν αρχίζει από το βάθος που τελειώνει η αμέσως μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνωση του προηγούμενου σταδίου, αλλά φτάνει μέχρι την επιφάνεια όπου και στερεώνεται. Αυτό έχει ως συνέπεια το μήκος της σωλήνωσης να είναι πολλαπλάσιο του μήκους της γεώτρησης και να παρατηρείται μια μεγάλη επικάλυψη (overlapping) σωληνώσεων διαφορετικών διαμέτρων στα ανώτερα τμήματα της γεώτρησης.

Στην παραπάνω τεχνική εξαίρεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο, όπου η μικρότερης διαμέτρου σωλήνωση τύπου liner δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια, αλλά αναρτάται με ειδικό σύστημα από το τελευταίο τμήμα της σωλήνωσης του προηγούμενου σταδίου.

Οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται συνήθως κατασκευάζονται σε τμήματα (στελέχη) μήκους 40 ft και κοχλιώνονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν μία στήλη σωλήνωσης μεγαλύτερου μήκους (casing string). Στην άκρη κάθε στελέχους σωλήνωσης υπάρχει αρσενικό σπείρωμα, που είναι καλυμμένο με προστατευτικό κάλυμμα (thread protector) μέχρις ότου να συνδεθεί με άλλο στέλεχος. Για τη σύνδεση δύο στελεχών με αρσενικό σπείρωμα χρησιμοποιείται ένας σύνδεσμος (κολάρο) (casing collar or coupling) με θηλυκό σπείρωμα στις δύο άκρες του. Το κολάρο είναι φτιαγμένο από κυλινδρικό

χαλύβδινο σωλήνα και έχει διάμετρο ελάχιστα μεγαλύτερη από τα στελέχη που συνδέει. Ο τρόπος σύνδεσης δύο στελεχών αναπαρίσταται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Μέθοδος σύνδεσης δύο στελεχών της σωλήνωσης (Rigzone).

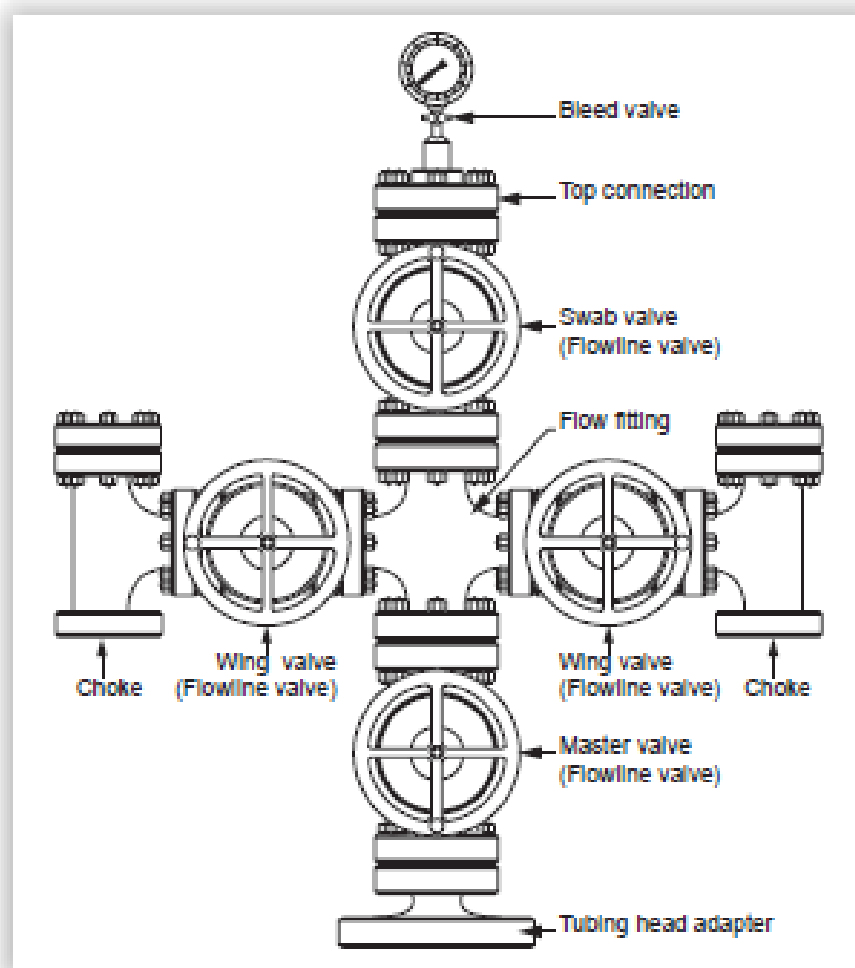
2.1 Λειτουργίες της Σωλήνωσης

Στην πράξη θα ήταν πολύ φθηνότερη η όρυξη μιας γεώτρησης να γινόταν μέχρι το τελικό βάθος (Total Depth - TD) με κοπτικό μικρής διαμέτρου και ύστερα η γεώτρηση να σωληνωνόταν από την επιφάνεια μέχρι το τελικό βάθος. Όμως, η παρουσία ζωνών υψηλής πίεσης σε διαφορετικά βάθη της γεώτρησης, καθώς και η παρουσία χαλαρών και μη συνεκτικών σχηματισμών καθιστούν αναγκαία την σωλήνωση του πηγαδιού για να ολοκληρωθεί απρόσκοπτα η διάνοιξη της γεώτρησης μέχρι το τελικό βάθος.

Οι λειτουργίες της σωλήνωσης είναι οι εξής:

- Να διατηρεί ανοιχτή τη γεώτρηση και να παρέχει υποστήριξη σε χαλαρούς ή κερματισμένους σχηματισμούς. Στην περίπτωση που η γεώτρηση δεν σωληνωθεί, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να έχουμε κατακρημνίσεις υλικών από τα τοιχώματα μέσα στη γεώτρηση, με συνέπεια να καθίσταται απαραίτητη η επανόρυξή της.
- Να απομονώνει τους περατούς σχηματισμούς (porous media) που περιέχουν ρευστά διαφορετικού τύπου ή/και παρουσιάζουν διαφορετικές πιέσεις, με στόχο να αποφευχθεί η μόλυνση της ζώνης ενδιαφέροντος από ρευστά άλλων ζωνών.

- Να αποφευχθεί η μόλυνση του γλυκού νερού που βρίσκεται εντός υδροφορέων κοντά στη επιφάνεια.
- Να παρέχεται μια ανοιχτή δίοδος μέχρι την επιφάνεια για τυχόν διέλευση υδρογονανθράκων κατά την προσέγγιση του σχηματισμού ενδιαφέροντος. Οι περισσότερες παραγωγικές διαδικασίες επιτελούνται με τη χρήση ειδικών σωλήνων παραγωγής (tubing), οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στη σωλήνωση.
- Να συνδέεται κατάλληλα ο εξοπλισμός της γεώτρησης με τον εξοπλισμό της επιφάνειας στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead equipment), όπως για παράδειγμα το Christmas tree (σχήμα 2.3). Επίσης, μέσω αυτής συνδέεται ο αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας (Blow-out Preventer – BOP), ο οποίος χρησιμοποιείται για να ελέγχονται οι πιέσεις μέσα στη γεώτρηση κατά τη διάρκεια της όρυξης.



Σχήμα 2.3: Συμβατικό Christmas tree (Drilling Engineering Handbook)

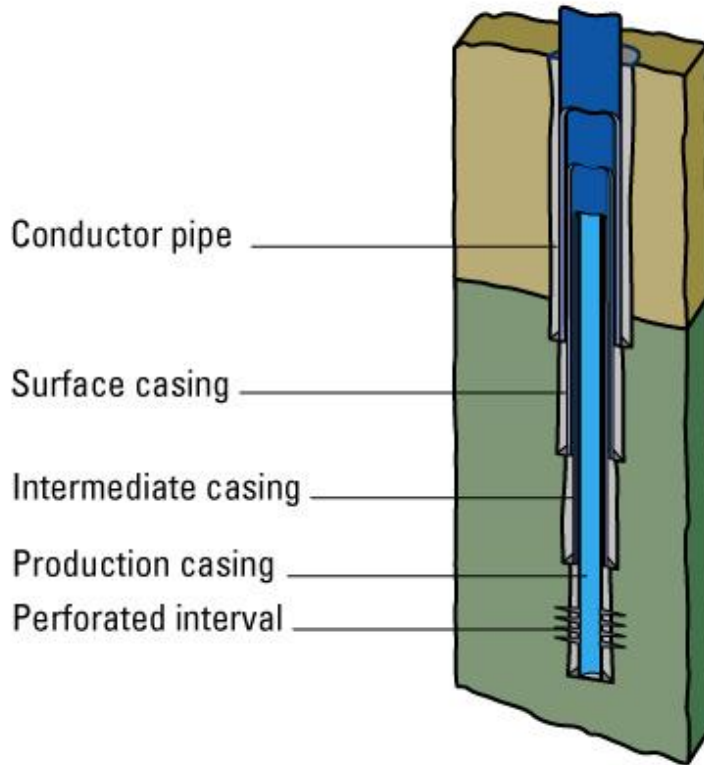
- Να παρέχεται μία γεώτρηση γνωστής διαμέτρου και βάρους ώστε να διευκολύνεται ο έλεγχος του εξοπλισμού και η ολοκλήρωση της γεώτρησης (Rabia, 1985).
- Να σφραγίζονται οι διαπερατές ζώνες όπου μπορεί να εμφανιστεί διακοπή της ομαλής κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης (lost circulation zone).
- Στις θαλάσσιες γεωτρήσεις η σωλήνωση επιτρέπει επίσης την επιστροφή της λάσπης από το δακτύλιο της γεώτρησης στην εξέδρα (Σταματάκη, 2003).

2.2 Τύποι Σωλήνωσης

Οι τύποι σωλήνωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι εξής:

- Σωλήνωση οδηγός (drive or structural pipe).
- Σωλήνωση επαφής (conductor pipe).
- Επιφανειακή σωλήνωση (surface casing).
- Ενδιάμεση σωλήνωση (intermediate casing).
- Παραγωγική σωλήνωση (production casing).
- Σωλήνωση Liner (liner casing).

Οι παραπάνω τύποι σωλήνωσης δεν χρησιμοποιούνται σε όλες τις γεωτρήσεις. Οι συνθήκες οι οποίες αναμένονται κάθε φορά αναλύονται προσεκτικά προκειμένου να προσδιοριστεί ο τύπος και ο αριθμός των στηλών σωλήνωσης που θα απαιτηθούν για την επένδυση της γεώτρησης. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των διαφόρων τύπων σωλήνωσης (Σταματάκη, 2003).



Σχήμα 2.4: Τύποι σωληνώσεων (Rigzone).

2.2.1 Σωλήνωση Οδηγός (Drive or Structural Pipe)

Πριν αρχίσει η διάτρηση τοποθετείται ένα πρώτο στάδιο σωλήνωσης μεγάλης διαμέτρου, σε βάθος 100-300 ft, η οποία καλείται σωλήνωση οδηγός (drive or structural pipe). Η σωλήνωση αυτή:

- Συμβάλλει στην κυκλοφορία της λάσπης διάτρησης.
- Εμποδίζει να παρασυρθούν οι χαλαροί σχηματισμοί της επιφάνειας από τα ρευστά διάτρησης (washout).
- Εξασφαλίζει τη σταθερότητα του εδάφους πάνω στο οποίο εδράζει το γεωτρήπανο.

Συνήθως τοποθετείται και τσιμεντώνεται από τις εταιρίες που αναλαμβάνουν την προετοιμασία του χώρου της γεώτρησης και συνδέεται με τη γραμμή επιστροφής της λάσπης διάτρησης (mud return line).

Στις θαλάσσιες γεωτρήσεις που ορύσσονται από σταθερή εξέδρα, η σωλήνωση οδηγός κατέρχεται από την επιφάνεια έως τον πυθμένα της θάλασσας. Αποτελείται από στελέχη διαμέτρου 26,30 ή 36 in με πάχος τοιχώματος 1 in, τα οποία συγκολλούνται

(welded) το ένα με το άλλο καθώς η στήλη προχωρά μέσα στη θάλασσα (Σταματάκη, 2003).

2.2.2 Σωλήνωση Επαφής (Conductor Pipe)

Είναι η πρώτη πραγματική στήλη σωλήνωσης που τοποθετείται μέσα στη γεώτρηση, σε βάθος συνήθως λίγων εκατοντάδων μέτρων από την επιφάνεια, εντός των χαλαρών σχηματισμών και τσιμεντώνεται πάντα μέχρι την επιφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα, η σωλήνωση επαφής τοποθετείται σε βάθος 600-1000 ft από την επιφάνεια ώστε:

- Να προλαμβάνει την αποκόλληση των χαλαρών σχηματισμών κοντά στην επιφάνεια.
- Να απομονώνει τους υδροφόρους ορίζοντες που βρίσκονται σε μικρό βάθος.
- Να προστατεύει τη γεώτρηση από εκλύσεις αερίων και τα θεμέλια του γεωτρήπανου από διεισδύσεις λάσπης διάτρησης.

Παρέχει επίσης, το κανάλι επιστροφής της λάσπης διάτρησης. Στις θαλάσσιες γεωτρήσεις η σωλήνωση επαφής διακρίνεται σε:

- **Marine conductor:** Χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες γεωτρήσεις όπου ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας (Blow Out Preventer-BOP) τοποθετείται πάνω στην εξέδρα, η οποία είναι συνήθως σταθερή.
- **Marine riser:** Χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες γεωτρήσεις όπου το BOP τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας. Το riser ανέρχεται μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. (Σταματάκη, 2003).

2.2.3 Επιφανειακή Σωλήνωση (Surface Casing)

Η επιφανειακή σωλήνωση εμποδίζει την αποκόλληση των χαλαρών σχηματισμών που συναντώνται σε μικρά βάθη και θα πρέπει να σταματά εντός κατάλληλων, ανθεκτικών σχηματισμών, όπως ο σκληρός ασβεστόλιθος. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι ο σχηματισμός στο πέλμα της σωλήνωσης (casing shoe) δεν θα ρωγματοωθεί υπό τη δράση υψηλών υδροστατικών πιέσεων που μπορεί να αναπτυχθούν αργότερα. Η επιφανειακή σωλήνωση παρέχει επίσης προστασία από εκτινάξεις ή εκρήξεις, λόγω εσωτερικών πιέσεων, που μπορεί να συμβούν σε μικρό βάθος, καθώς

συνεχίζεται η διάτρηση. Το βάθος που φτάνει η επιφανειακή σωλήνωση κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος των σχηματισμών που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη γεώτρηση, από 300 έως 5.000 ft. Τέτοιου είδους “προβληματικοί σχηματισμοί”, που χρειάζεται να επενδυθούν με επιφανειακή σωλήνωση, είναι περατές ζώνες όπου μπορεί να εμφανιστεί διακοπή της ομαλής κυκλοφορίας της λάσπης (thief zone), αμμόλιθοι που περιέχουν νερό (water sands), ρηχές ζώνες που περιέχουν υδρογονάνθρακες (shallow hydrocarbon zones), τμήματα κατευθυνόμενων γεωτρήσεων αυξανόμενης κλίσης (build-up sections of deviated wells).

Το βάθος τοποθέτησης αυτής της στήλης σωλήνωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές όπου αναμένονται ανώμαλες πιέσεις. Αν η σωλήνωση αυτή δεν προχωρήσει σε αρκετό βάθος μπορεί η αντοχή του σχηματισμού στη θέση έδρασής της να μην είναι επαρκής για να αντιμετωπίσει μια αιφνίδια εισροή όταν η όρυξη θα συνεχιστεί στο επόμενο τμήμα. Τέλος, ένα τυπικό μέγεθος αυτού του τύπου σωλήνωσης είναι $13\frac{3}{8}$ in (240 mm) (Σταματάκη, 2003).

2.2.4 Ενδιάμεση ή Προστατευτική Σωλήνωση (Intermediate or Protection Casing)

Η ενδιάμεση ή προστατευτική σωλήνωση χρησιμοποιείται για την απομόνωση σχηματισμών οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην όρυξη της γεώτρησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι σχιστόλιθοι με τάση αποκόλλησης (sloughing shale), ζώνες διακοπής της ομαλής κυκλοφορίας της λάσπης, ζώνες υψηλών πιέσεων κ.λπ. Ανάλογα με τον αριθμό των προβλημάτων που απαντώνται είναι δυνατό να απαιτηθούν αρκετές στήλες ενδιάμεσης σωλήνωσης ανάμεσα στην επιφανειακή σωλήνωση και στο τελικό βάθος της γεώτρησης.

Το βάθος τοποθέτησης της ενδιάμεσης σωλήνωσης εξαρτάται από την πίεση των πόρων του σχηματισμού και τη βαθμίδα ρωγμάτωσης. Κατά την όρυξη το βάρος της λάσπης εξισορροπεί την πίεση πόρων, αλλά δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή των ρηχών ζωνών.

Η πιο σημαντική λειτουργία της ενδιάμεσης σωλήνωσης σχετίζεται με την ύπαρξη ανώμαλα υψηλών πιέσεων πόρων του σχηματισμού. Καθώς, για τον έλεγχο και την εξισορρόπηση αυτών των πιέσεων απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα λάσπης, θα πρέπει να προστατευτούν οι ασθενέστεροι σχηματισμοί, προκειμένου να αποφευχθεί διακοπή

της ομαλής κυκλοφορίας της λάσπης. Η ενδιάμεση σωλήνωση προστατεύει τους σχηματισμούς κάτω από την επιφανειακή σωλήνωση από τις πιέσεις της λάσπης υψηλής πυκνότητας. Επίσης, όταν, κάτω από ζώνες ανώμαλων πιέσεων, συναντώνται ζώνες με κανονικές πιέσεις, η τοποθέτηση μιας δεύτερης στήλης ενδιάμεσης σωλήνωσης επιτρέπει τη μείωση της πυκνότητας της λάσπης και η διάτρηση προχωρά βαθύτερα με πιο οικονομικούς όρους.

Η ενδιάμεση σωλήνωση τσιμεντώνεται σε ύψος αρκετών εκατοντάδων μέτρων πάνω από την έδρασή της. Αν χρειαστεί μπορεί να εφαρμοστεί σωλήνωση κατά στάδια για την απομόνωση ρηχότερων σχηματισμών χωρίς να απαιτείται η τσιμεντώση ολόκληρου του ύψους από την έδραση της σωλήνωσης και πάνω. Το πιο συνήθης μέγεθος αυτού του τύπου σωλήνωσης είναι $9\frac{5}{8}$ ή $10\frac{3}{4}$ in (Σταματάκη, 2003).

2.2.5 Παραγωγική Σωλήνωση (Production Casing)

Η παραγωγική σωλήνωση αποτελεί το τελευταίο στάδιο σωλήνωσης και στοχεύει:

- Στην απομόνωση των παραγωγικών ζωνών (production zones) από άλλους σχηματισμούς (π.χ. αμμόλιθους που περιέχουν νερό).
- Στον έλεγχο των ρευστών του σχηματισμού (reservoir fluid control).
- Στην επιλεκτική παραγωγή σε περίπτωση που αυτή γίνεται από πολλές ζώνες (multizone production).
- Στην προστασία του ειδικού τύπου σωλήνων παραγωγής (tubing).

Ακόμη, αποτελεί τη βάση για το τελείωμα της γεώτρησης (well completion), και για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει πλήρης έλεγχος των πιέσεων πριν την τοποθέτηση του εξοπλισμού τελειώματος. Με την σωλήνωση αυτή ολοκληρώνεται τυπικά η όρυξη μιας γεώτρησης. Η συνηθέστερη διάμετρος για την παραγωγική σωλήνωση είναι 7 in (177,8 mm) (Σταματάκη, 2003).

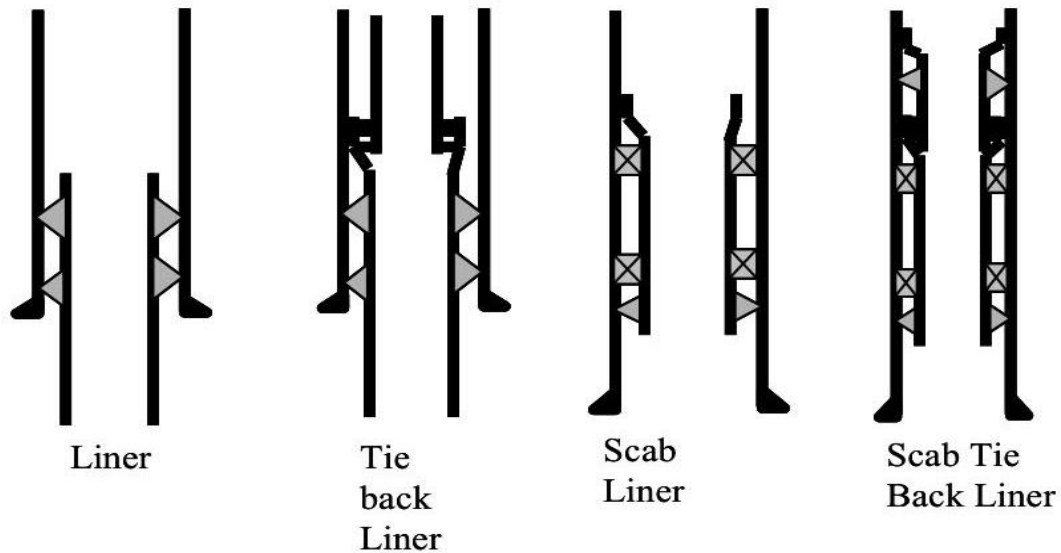
2.2.6 Σωλήνωση Liner (Liner Casing)

Ένα liner είναι μια σχετικά μικρού μήκους σωλήνωση (3.000 έως 5.000 ft συνήθως). Η σωλήνωση liner δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια, αλλά αναρτάται από την ενδιάμεση σωλήνωση, με τη βοήθεια ειδικής διάταξης (packer and slips) που ονομάζεται διάταξη ανάρτησης του liner (liner hanger). Ανάμεσα στο πάνω τμήμα του liner και την έδραση της ενδιάμεσης σωλήνωσης, από όπου αναρτάται το liner, παρατηρείται επικάλυψη των στηλών σωλήνωσης μήκους 300-500 ft (Σταματάκη, 2003).

2.2.6.1 Τύποι liners

Οι τύποι των liners φαίνονται στο σχήμα 2.5 και είναι τα παρακάτω:

- Παραγωγικά liner (production liner) χρησιμοποιούνται έναντι συμβατικής σωλήνωσης για να απομονώσουν ζώνες παραγωγής (production zone) ή ζώνες εισπίεσης (injection zone).
- Tie-back liner είναι ένα τμήμα σωλήνωσης υπάρχοντος liner, που φτάνει μέχρι την επιφάνεια και μπορεί να είναι ή όχι τσιμεντωμένο.
- Scab liner είναι ένα τμήμα σωλήνωσης που δεν φτάνει στην επιφάνεια. Χρησιμοποιείται για να επισκευασθεί κάποιο φθαρμένο τμήμα σωλήνωσης και είναι σφραγισμένο στην κορυφή και στην βάση του με παρεμβύσματα. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις τσιμεντώνεται.
- Το scab tie-back liner είναι το τμήμα της σωλήνωσης που εκτείνεται από την κορυφή ενός υπάρχοντος liner, αλλά δεν φτάνει έως την επιφάνεια. Το scab tie-back liner κανονικά τσιμεντώνεται (Rabia, 1985).



Σχήμα 2.5: Τύποι liner (Rabia, 1985).

Τα βασικά πλεονεκτήματα του liner είναι:

- Η μείωση του κόστους της παραγωγικής σωλήνωσης, καθώς και του χρόνου τοποθέτησης και τσιμεντώσης.
- Η μείωση του μήκους της σωλήνωσης με τη μικρότερη διάμετρο, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση ικανοποιητικού μεγέθους ειδικών σωλήνων παραγωγής (production tubing).
- Ολοκλήρωση των γεωτρήσεων με εφαρμογή μικρότερου φορτίου στο πηγάδι και στην επιφανειακή σωλήνωση.
- Στην περίπτωση scab tie-back liner δημιουργείται και ένα παχύ τμήμα τσιμέντου μέσα σε δόμους άλατος.
- Αποφεύγεται η διάτρηση με διατρητική στήλη μειωμένης διαμέτρου.
- Χρησιμοποιούνται όταν οι πλατφόρμες δεν δύναται να διαχειριστούν ολόκληρη τη σωλήνωση, π.χ. όταν εφαρμόζεται βαριά σωλήνωση $9\frac{5}{8}$ in.
- Παρέχουν ολοκλήρωση γεώτρησης τύπου PBR (polished bore receptable). Αποτελεί συνδεσμολογία, η οποία χρησιμοποιείται όταν αναμένονται έντονες μετακινήσεις των σωληνώσεων κατά την παραγωγή και επίσης επιτρέπει την αφαίρεση του παραγωγικού σωλήνα όταν απαιτείται. Αυτού του τύπου η ολοκλήρωση αναγνωρίζεται ως η καλύτερη διαδικασία σωλήνωσης στο τμήμα της παραγωγικής σωλήνωσης.
- Ευελιξία στην ολοκλήρωση της γεώτρησης.

- Χρησιμοποιούνται για έλεγχο σε κρίσιμες περιοχές που δεν ελέγχθηκαν (open hole testing).

Τα liner διάτρησης και παραγωγής (drilling and production liners) χρησιμοποιούνται συχνά ως μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος τον έλεγχο της πίεσης ή της βαθμίδας ρωγμάτωσης χωρίς τοποθέτηση μιας στήλης σωλήνωσης που θα φθάνει ως την επιφάνεια. Όταν χρησιμοποιείται ένα liner, η αμέσως προηγούμενη στήλη, συνήθως η ενδιάμεση, θα πρέπει να ελέγχεται ως προς τις πιέσεις διάρρηξης και θλίψης κατά την όρυξη του μη σωληνωμένου τμήματος της γεώτρησης κάτω από το liner.

Στα μειονεκτήματα του liner περιλαμβάνονται:

- Πιθανή διαρροή κατά μήκος της διάταξης ανάρτησης του liner.
- Δυσκολία για την επίτευξη καλής τσιμέντωσης λόγω του πολύ περιορισμένου μεγέθους του δακτυλίου ανάμεσα στο liner και τα τοιχώματα της γεώτρησης.
- Περισσότερο πολύπλοκες διαδικασίες σωλήνωσης και τσιμέντωσης.
- Η προηγούμενη στήλη θα πρέπει να έχει επαρκείς μηχανικά χαρακτηριστικά ώστε να αντέχει στην ίδια πίεση διάρρηξης όπως και το liner.

2.3 Χαρακτηριστικά και Προδιαγραφές της Σωλήνωσης

Η σωλήνωση μπορεί να είναι ένας σφυρήλατος σωλήνας από ατσάλι χωρίς ραφή, κατασκευάζεται από θερμοκατεργασμένο χάλυβα και, αν είναι απαραίτητο, με επακόλουθο ψυχρό φινίρισμα του σωλήνα. Αυτό συμβαίνει για να πάρει το επιθυμητό σχήμα. Επιπλέον, η σωλήνωση μπορεί να αποτελείται από επίπεδα ελάσματα τα οποία κόβονται, μορφοποιούνται οι δύο άκρες τους και συγκολλούνται (electric flash welding ή electric resistance welding), χωρίς την προσθήκη επιπλέον μετάλλου, ώστε να σχηματιστεί ο επιθυμητός σωλήνας. Ορισμένοι ηλεκτροσυγκολλούμενοι σωλήνες υφίστανται βαφή, η οποία αυξάνει το όριο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση στην οποία υποβάλλεται σε καταπόνηση και το μειώνει κατά τις κάθετες προς αυτή διευθύνσεις (Σταματάκη, 2003).

Τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη σωλήνωση και, κατά συνέπεια, και τις σχετικές προδιαγραφές της είναι τα εξής:

- Εξωτερική διάμετρος (outside diameter), εσωτερική διάμετρος (inside diameter) και πάχος τοιχωμάτων (wall thickness).
- Ονομαστικό βάρος (nominal weight).
- Μήκος στελεχών σωλήνωσης και συνδέσμων (length of pipe and joint).
- Τύπος συνδέσμου.
- Κατηγορία χάλυβα (steel grade).
- Μηχανικά χαρακτηριστικά.

Η εξωτερική διάμετρος και το πάχος των τοιχωμάτων, το ονομαστικό βάρος και το μήκος της σωλήνωσης αποτελούν τις διαστάσεις της σωλήνωσης και περιγράφονται στη συνέχεια. Ακολουθεί η παρουσίαση της κατηγορίας χάλυβα και των μηχανικών χαρακτηριστικών της σωλήνωσης, ενώ η περιγραφή των συνδέσμων και των σπειρωμάτων δίνεται σε διακριτή ενότητα.

2.3.1 Διάμετρος Στελεχών Σωλήνωσης

Κάθε στέλεχος σωλήνωσης χαρακτηρίζεται από την **εξωτερική του διάμετρο (outside diameter - OD)**. Τα στελέχη της σωλήνωσης διατίθενται σε πολλές διαφορετικές διαμέτρους, ώστε να σωληνώνονται διαφορετικά τμήματα (βάθη) μιας γεώτρησης. Το API (American Petroleum Institute) όρισε κάποια περιθώρια ανοχής (Πίνακας 2.1) στους κατασκευαστές ως προς τις εξωτερικές διαμέτρους των στελεχών της σωλήνωσης, ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα κατά τη μεταξύ τους σύνδεση αν κάποιο στέλεχος κατασκευάστηκε με διάμετρο μικρότερη από την ονομαστική (Chilingarian & Rahman, 1995).

Πίνακας 2.1: Ποσοστό κατασκευαστικής ανοχής στις ονομαστικές διαμέτρους των στελεχών της σωλήνωσης (Chilingarian & Rahman, 1995).

Εξωτερική διάμετρος (OD) (in)	Ανοχή (in)
1.05 έως $3\frac{1}{2}$	$+\frac{3}{32}$ ή $-\frac{1}{32}$
4 έως 5	$+\frac{7}{64}$ ή $-0,75\% OD$
$5\frac{1}{2}$ έως $8\frac{5}{8}$	$+\frac{1}{8}$ ή $-0,75\% OD$
$\geq 9\frac{5}{8}$	$+\frac{5}{32}$ ή $-0,75\% OD$

Η **εσωτερική διάμετρος (inside diameter – ID)** προσδιορίζεται από το **πάχος των τοιχωμάτων των σωλήνων (wall thickness)** και από την **ωφέλιμη διάμετρο (drift diameter)**. Η μέγιστη εξωτερική διάμετρος ελέγχεται από τη συνδυασμένη ανοχή της εξωτερικής διαμέτρου και του πάχους των τοιχωμάτων. Το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος τοιχωμάτων είναι 87,5% του ονομαστικού με ποσοστό ανοχής έως -12,5% (Chilingarian & Rahman, 1995).

Η **ωφέλιμη διάμετρος της σωλήνωσης** αναφέρεται στη διάμετρο ενός εμβόλου που διέρχεται από τη σωλήνωση, χωρίς την εμφάνιση αδικαιολόγητων τάσεων. Η ωφέλιμη διάμετρος είναι ελαφρώς μικρότερη της εσωτερικής. Κατά τη διάτρηση, ωφέλιμη διάμετρος θεωρείται η διάμετρος του κοπτικού που μπορεί να διέλθει με ασφάλεια διαμέσου της σωλήνωσης (Σταματάκη, 2003).

2.3.2 Ονομαστικό Βάρος Σωλήνωσης

Σύμφωνα με το API Bulletin 5C3 (1989) το βάρος της σωλήνωσης χαρακτηρίζεται από τα εξής στοιχεία (Chilingarian & Rahman, 1995):

- Ονομαστικό βάρος (nominal weight).
- Βάρος του κυρίως σώματος της σωλήνωσης (plain end weight).
- Συνολικό βάρος κυρίως σώματος και συνδέσμων (threaded and coupled weight).

Το βάρος της σωλήνωσης μετριέται σε lb/ft. Η ανοχή στο βάρος των στελεχών της σωλήνωσης κατά API 5CT είναι από +6,5% έως -3,5%.

Το **ονομαστικό βάρος (nominal weight)** είναι το βάρος της σωλήνωσης βασισμένο στο θεωρητικό βάρος σώματος και συνδέσμων ανά πόδι στελέχους μήκους 20 ft. Έτσι, το ονομαστικό βάρος εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$W_n = 10.68 (OD - t)t + 0.0722 OD^2 \quad (2.1)$$

Όπου,

W_n : το ονομαστικό βάρος ανά μονάδα μήκους (lb/ft),

OD : η εξωτερική διάμετρος (in),

t : το πάχος τοιχώματος της σωλήνωσης (in).

Το ονομαστικό βάρος δεν είναι το ακριβές βάρος της σωλήνωσης, αλλά χρησιμοποιείται για λόγους αναγνώρισης των διαφορετικών τύπων σωλήνωσης.

Το βάρος του κυρίως σώματος της σωλήνωσης δεν περιέχει το βάρος των συνδέσμων και εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W_{pe} = 10,68 (OD - t) \quad (2.2)$$

Όπου,

W_{pe} : το βάρος του κυρίως σώματος της σωλήνωσης (lb/ft),

OD : η εξωτερική διάμετρος (in),

t : το πάχος τοιχώματος σωλήνωσης (in).

Το **συνολικό βάρος του κυρίως σώματος και των συνδέσμων**, είναι το μέσο βάρος ενός στελέχους της σωλήνωσης συμπεριλαμβανομένου του βάρους των σπειρωμάτων και του συνδέσμου. Το συνολικό βάρος του κυρίως σώματος και των συνδέσμων (W_{tc}) εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$W_{tc} = \frac{1}{20} \left\{ \left(W_{pe} \left[20 - \frac{L_c + 2}{24} \right] + \text{Βάρος Συνδέσμου} \right) - \text{Βάρος που αφαιρείται λόγω διαμόρφωσης του σπειρώματος στις δύο άκρες του στελέχους} \right\} \quad (2.3)$$

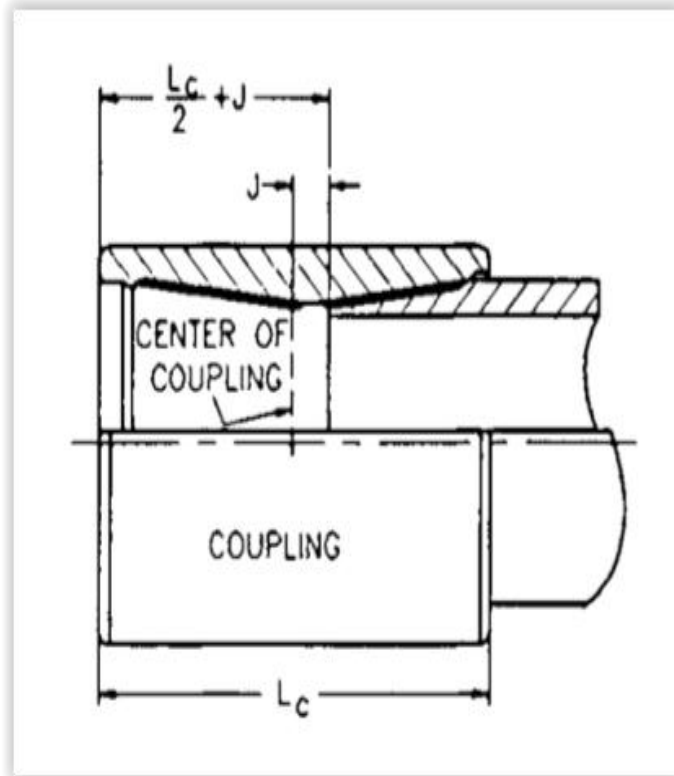
Όπου,

W_{tc} : το συνολικό βάρος του κυρίως σώματος της σωλήνωσης (lb/ft),

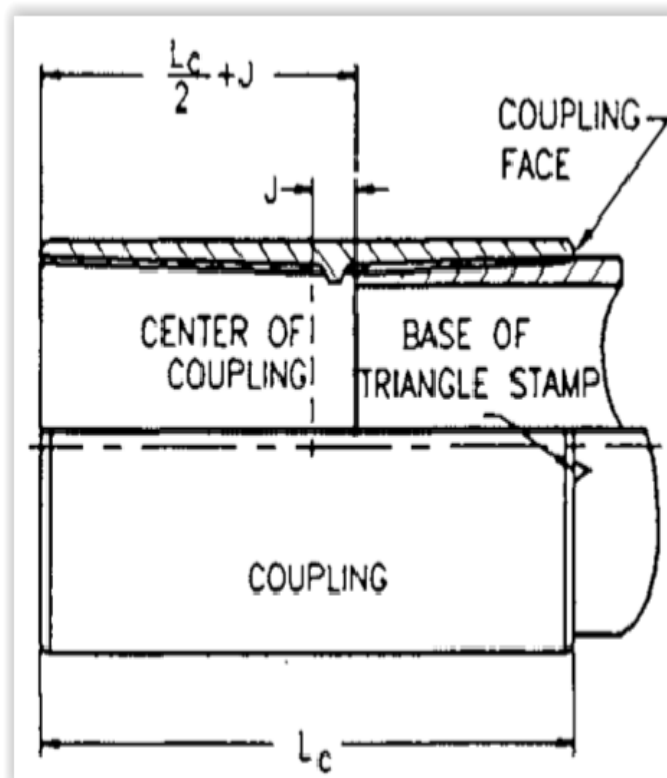
L_c : το μήκος του συνδέσμου (in),

J : η απόσταση μεταξύ του άκρου του στελέχους της σωλήνωσης και του κέντρου του συνδέσμου, όταν βρίσκονται σε σύνδεση (power tight position) (in).

Στα Σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνονται οι διαστάσεις των συνδέσμων κατά API με κυκλικό (round thread) και πριονωτό σπείρωμα (buttress thread), αντίστοιχα.



Σχήμα 2.6: Διαστάσεις συνδέσμων API με κυκλικό σπείρωμα (API round thread couplings) (Chilingarian & Rahman, 1995).



Σχήμα 2.7: Διαστάσεις συνδέσμων API με πριονωτό σπείρωμα (API buttress thread coupling) (Chilingarian & Rahman, 1995).

2.3.3 Μήκος Στελεχών Σωλήνωσης

Σύμφωνα με το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute - API) ορίζονται τρία εύρη μηκών, εντός των οποίων θα πρέπει να κατασκευάζεται κάθε τύπος σωλήνωσης. Τα εύρη αυτά καταγράφονται στον Πίνακα 2.2. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η σωλήνωση εύρους 3, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των συνδέσμων που απαιτούνται για τη στήλη της σωλήνωσης.

Πίνακας 2.2: Εύρη μηκών στελεχών σωλήνωσης (Rabia, 1985).

Εύρος	Μήκος (ft)	Μέσο Μήκος (ft)
1	16-25	22
2	25-34	31
3	Πάνω από 34-48	42

2.3.3.1 Απώλεια Μήκους (Makeup Loss)

Όταν στελέχη σωλήνωσης συνδεθούν για να δημιουργήσουν τη στήλη της σωλήνωσης (casing string) ή τμήματά της, το συνολικό μήκος της στήλης της σωλήνωσης είναι μικρότερο από το άθροισμα των μηκών των στελεχών της. Ο λόγος είναι ότι υπάρχει απώλεια μήκους στο σύνδεσμο και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (Chilingarian & Rahman, 1995):

$$L_t = \frac{L_c}{2} - J \quad (2.4)$$

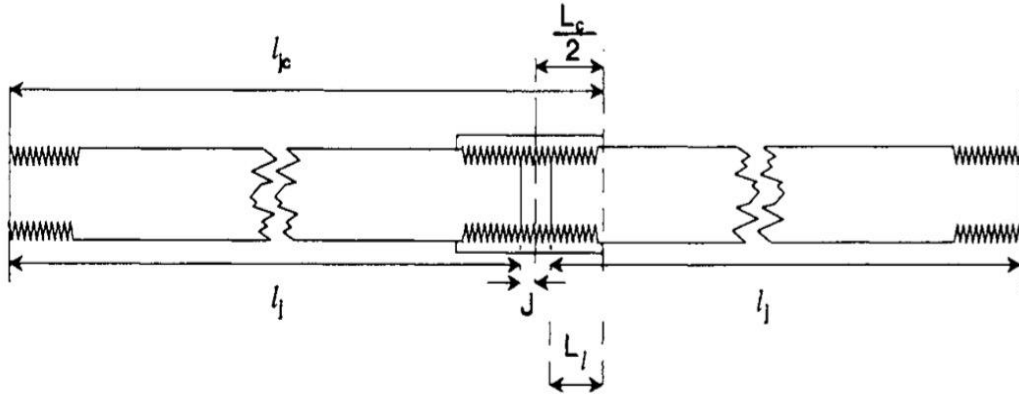
Όπου,

L_t : απώλεια μήκους σωλήνωσης, in,

L_c : μήκος συνδέσου, in,

J: η απόσταση μεταξύ του άκρου του στελέχους της σωλήνωσης και του κέντρου του συνδέσμου όταν βρίσκονται σε σύνδεση (power tight position) (in).

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η απώλεια μήκους κατά τη σύνδεση της σωλήνωσης.



Σχήμα 2.8: Απώλεια μήκους σωλήνωσης στο σύνδεσμο (Chilingarian & Rahman, 1995), όπου L_c το μήκος του στελέχους σωλήνωσης συμπεριλαμβανομένου του συνδέσμου και l_j το μήκος του στελέχους σωλήνωσης.

Στον Πίνακα 2.3 αναγράφονται οι απώλειες μηκών για σωλήνωση API 10.000 ft (Chilingarian & Rahman, 1995).

Πίνακας 2.3: Απώλειες μηκών για σωλήνωση API 10.000 ft (Chilingarian & Rahman, 1995).

Εύρος	Μήκος Στελέχους Σωλήνωσης (ft)	Απώλεια Μήκους (ft)
1	21	135,75
2	30	94,63
3	40	70,81

2.3.4 Κατηγορία Χάλυβα (Grade of Steel)

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή των στελεχών της σωλήνωσης δεν έχει συγκεκριμένη μικροδομή. Η μικροδομή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων αλλάζουν με την προσθήκη ειδικών κραμάτων ή με θερμική επεξεργασία. Έτσι, κατασκευάζονται διαφορετικές κατηγορίες (grades) σωλήνωσης με την προσθήκη στοιχείων όπως μαγνήσιο, μολυβδένιο, χρώμιο, νικέλιο και χαλκός, για να προσαρμοστούν σε διαφορετικές απαιτήσεις κατά τη διάτρηση.

Το API δίνει διαφορετικές κατηγορίες σωλήνωσης. Η κατηγορία της σωλήνωσης εκφράζεται με ένα γράμμα και ένα διψήφιο ή τριψήφιο αριθμό, π.χ. N-80. Το γράμμα αυτό είναι ένας γενικός ορισμός της ποιότητας του χάλυβα και της θερμικής του κατεργασίας. Τα αριθμητικά ψηφία εκφράζουν το ελάχιστο όριο ελαστικότητας σε χιλιάδες psi. Για παράδειγμα η κατηγορία N-80 έχει ελάχιστο όριο ελαστικότητας ίσο με 80.000 psi (Σταματάκη, 2003).

Στον Πίνακα 2.4 δίνονται οι κατηγορίες στελεχών (grades) κατά API ανάλογα με την προσθήκη στοιχείων στο χάλυβα (Rabia, 1985).

Πίνακας 2.4: Χημικές συστάσεις των σωλήνων τύπου API (Rabia, 1985).

Group	Grade	Type	Carbon		Manganese		Molybdenum		Chromium		Nickel	Cooper	Phosphorus	Sulphur	Silicon
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
1	H40												0.03	0.03	
	J55												0.03	0.03	
	K55												0.03	0.03	
	N80												0.03	0.03	
2	L80	1	-	0.43 ^a	-	1.9	-	-	-	-	0.25	0.35	0.03	0.03	0.45
	L80	9Cr	-	0.15	0.3	0.6	0.9	1.1	8	10	0.5	0.25	0.02	0.01	1.00
	L80	13Cr	0.15	0.22	0.25	1	-	-	12	14	0.5	0.25	0.02	0.01	1.00
	C90	1	-	0.35	-	1.00	0.25 ^b	0.75	-	1.2	0.99	-	0.02	0.01	-
	C90	2	-	0.50	-	1.90	-	N.L.	-	N.L.	0.99	-	0.03	0.01	-
	C95		-	0.45 ^c	-	1.90	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	0.45
	T95	1	-	0.35	-	1.20	0.25 ^d	0.85	0.40	1.50	0.99	-	0.02	0.01	-
	T95	2	-	0.50	-	1.20	-	-	-	-	0.99	-	0.03	0.01	-
3	P110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03 ^e	0.03 ^e	-
4	Q125	1	-	0.35	-	1.00	-	0.75	-	1.20	0.99	-	0.02	0.01	-
	Q125	2	-	0.35	-	1.00	-	-	-	N.L.	0.99	-	0.02	0.02	-
	Q125	3	-	0.50	-	1.00	-	-	-	N.L.	0.99	-	0.03	0.01	-
	Q125	4	-	0.50	-	1.00	-	-	-	N.L.	0.99	-	0.03	0.02	-

Όπου,

N.L.: (no limit) Χωρίς όριο. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να αναφέρονται στην ανάλυση προϊόντος.

a: η περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) για την κατηγορία L80 μπορεί να αυξηθεί το πολύ κατά 0,5% αν το προϊόν είναι ελαιόβαπτο (έχει υποστεί βαφή σε λάδι).

b: η περιεκτικότητα σε μολυβδένιο για την κατηγορία C90 τύπου 1 δεν έχει κατώτατο όριο αν το πάχος των τοιχωμάτων είναι μικρότερο από 0,7 in.

c: η περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) για την κατηγορία C95 μπορεί να αυξηθεί το πολύ κατά 0,55% αν το προϊόν είναι ελαιόβαπτο (έχει υποστεί βαφή σε λάδι).

d: η περιεκτικότητα σε μολυβδένιο για την κατηγορία T95 τύπου 1 μπορεί να μειωθεί το πολύ 0,15% αν το πάχος των τοιχωμάτων είναι μικρότερο από 0,7 in.

e: το ανώτατο όριο φωσφόρου και θείου είναι 0,02% και 0,01% αντίστοιχα για την κατηγορία P110.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 2.5 με τις πλέον συνήθεις κατηγορίες, κατά API, και τα αντίστοιχα πεδία εφαρμογής τους.

Πίνακας 2.5: Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής των κατηγοριών σωλήνωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία (Rabia, 1985).

Κατηγορία (Grade)	Συνοπτική περιγραφή
H40	Κατάλληλη μόνο για επιφανειακή σωλήνωση. Έχει μέγιστο όριο ελαστικότητας 80.000 psi, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με παρουσία υδρόθειου (H_2S).
J55	Βρίσκει εφαρμογή με την παρουσία H_2S . Αξιόπιστη σωλήνωση από την πετρελαϊκή βιομηχανία και συναντάται πιο συχνά σε γεωτρήσεις πετρελαίου από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία.
K55	Σωλήνωση αρκετά καλής ποιότητας χάλυβα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό παρουσία H_2S σε όλες τις θερμοκρασίες.
M65	Η κατηγορία προστέθηκε το Δεκέμβρη του 1999. Κοχλιώνεται είτε με L80 είτε με K55, ανάλογα με το πάχος των τοιχωμάτων.
L80	Η κατηγορία L παρουσιάζει την ίδια αντοχή σε εφελκυσμό με την κατηγορία N. Ωστόσο, η σκληρότητα της σωλήνωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ψαθυρότητα που εμφανίζεται σε περιβάλλον πλούσιο σε H_2S . Από την άποψη αυτή, η κατηγορία L είναι πιο κατάλληλη για όξινο-διαβρωτικό περιβάλλον.
N80	Αποτελεί standard της βιομηχανίας για γεωτρήσεις μέσου βάθους. Πρόκειται για χάλυβα σκληρού κράματος και δεν είναι κατάλληλη για H_2S σε όλες τις θερμοκρασίες.
C90	Βρίσκει εφαρμογή συνήθως σε γεωτρήσεις όπου επικρατούν υψηλές πιέσεις και υπάρχει παρουσία H_2S . Είναι κατασκευασμένη από κράμα χάλυβα που περιέχει χρώμιο και μολυβδένιο.
C95	Κατάλληλη για σχετικά βαθιές γεωτρήσεις και υψηλές πιέσεις σε μετρίως διαβρωτικό περιβάλλον.
P110	Σωλήνωση από χάλυβα πολύ υψηλής αντοχής για βαθιές γεωτρήσεις και συνθήκες υψηλών πιέσεων. Αν και είναι μια κατηγορία API είναι πιθανό να απαιτεί ειδική παραγγελία και είναι πολύ ακριβή.

Κατηγορία (Grade)	Συνοπτική περιγραφή
Q125	Χρησιμοποιείται μόνο σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις και εξαιρετικά υψηλές πιέσεις. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα H_2S για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 225 °F.

2.3.5 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σωλήνωσης

Τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης είναι τα εξής:

- (1) **Όριο ελαστικότητας (yield strength)** (α) για το κυρίως σώμα της σωλήνωσης (pipe body) και (β) για τον σύνδεσμο.
- (2) **Αντοχή σε θλίψη (collapse strength)**.
- (3) **Αντοχή σε διάρρηξη (burst strength)** (α) για το κυρίως σώμα της σωλήνωσης (pipe body) και (β) για τον σύνδεσμο.

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες σωλήνωσης κατά API με τα αντίστοιχα κύρια μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

Πίνακας 2.6: Κατηγορίες σωλήνωσης σύμφωνα με το API (Rabia, 1985).

Κατηγορία (Grade)	Ελάχιστο όριο ελαστικότητας (min. yield strength) (psi)	Μέγιστο όριο ελαστικότητας (max. yield strength) (psi)	Ελάχιστη συνολική αντοχή σε εφελκυσμό (min. ultimate tensile strength)
H40	40.000	80.000	60.000
J55	55.000	80.000	75.000
K55	55.000	80.000	95.000
M65	65.000	80.000	85.000
L80	80.000	95.000	95.000
N80	80.000	110.000	100.000
C90	90.000	105.000	100.000
C95	95.000	110.000	105.000
P110	110.000	140.000	125.000
Q125	125.000	150.000	135.000

Ως **όριο ελαστικότητας (yield strength)** ορίζεται από το API η εφελκυστική τάση που απαιτείται για να προκύψει συνολική επιμήκυνση ανά μονάδα μήκους 0,5%, σε ένα τυπικό δείγμα δοκιμών.

Το **μέσο όριο ελαστικότητας** είναι συνήθως 10.000 psi μεγαλύτερο από το ελάχιστο όριο ελαστικότητας (π.χ. 90.000 psi για την κατηγορία N-80). Η ελάχιστη τιμή του ορίου ελαστικότητας χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς διάρρηξης και αστοχίας,

ενώ το μέσο όριο ελαστικότητας λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις των διαξονικών τάσεων, στοιχεία ιδιαίτερα απαραίτητα στο σχεδιασμό της σωλήνωσης (casing design) (Σταματάκη, Τεχνολογία Γεωτρήσεων, 2003).

Ως **αντοχή σε θλίψη (collapse strength)** ορίζεται η εξωτερική πίεση που απαιτείται για να προκληθεί θλιπτική αστοχία σε ένα δείγμα σωλήνωσης (σύμφωνα με όσα ορίζει το API, API Bulletin 5C3).

Ως **αντοχή σε διάρρηξη (burst strength)** ορίζεται η εσωτερική πίεση που απαιτείται για να προκληθεί αστοχία σε διάρρηξη του χάλυβα της σωλήνωσης.

2.4 Σύνδεσμοι Σωλήνωσης και Σπειρώματα

Ο σύνδεσμος είναι τμήμα της σωλήνωσης και χρησιμοποιείται για να ενώνει δύο διαδοχικά στελέχη σωλήνωσης. Κάθε στέλεχος σωλήνωσης είναι εφοδιασμένο με εξωτερικό σπείρωμα (externally threaded) στα δύο άκρα του. Ο πιο κοινός τύπος συνδέσμου διαθέτει εσωτερικό σπείρωμα (internally threaded) σε κάθε ένα από τα δύο άκρα του.

Η κύρια λειτουργία των συνδέσμων είναι να αντέχουν τις πιέσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της γεώτρησης. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά των σπειρωμάτων:

- Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της σύνδεσης είναι ο μηχανισμός φραγής (στεγάνωσης) (sealing) του σπειρώματος.
- Σε γεωτρήσεις χαμηλής πίεσης, όπου δεν είναι κρίσιμη η ακεραιότητα του αερίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνδεσμοι τύπου API.
- Οι σύνδεσμοι τύπου API (API connector) χρησιμοποιούν λιπαντικό νήμα (pipe dope) για τη στεγάνωση της σύνδεσης (σχήμα 2.9).
- Το αυλάκι, στο οποίο τοποθετείται το λιπαντικό, (dope channel) σχηματίζεται από ένα κενό που διαμορφώνεται μεταξύ της βάσης (root) και της κορυφής (crest) του τραπεζοειδούς σπειρώματος (trapezoidal thread).



Σχήμα 2.9: Λιπαντικό νήμα για τη στεγάνωση της σύνδεσης (LA-CO Industries, n.d.)

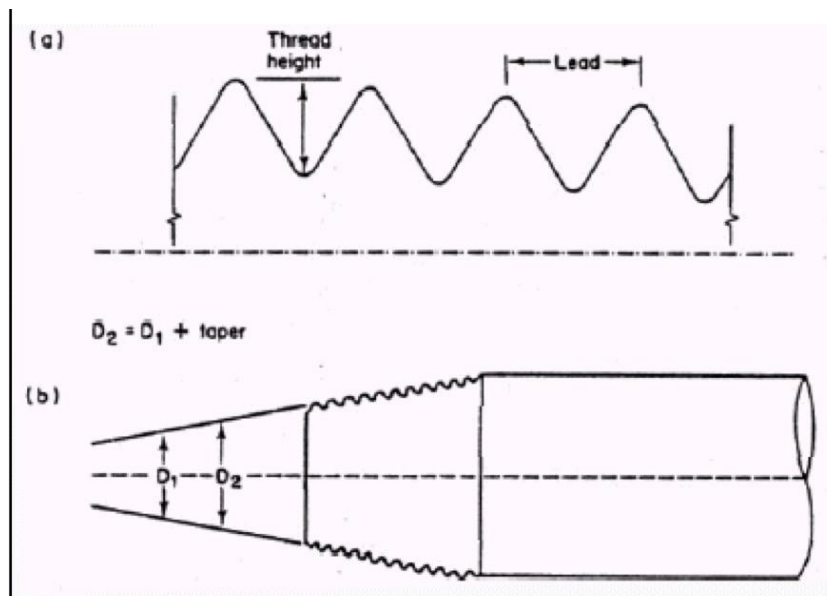
- Η οδός διαρροής (leak path) είναι ένα συνεχές ελικοειδές κανάλι που διατρέχει το σπειρώμα σε όλο το μήκος του συνδέσμου.
- Οι σύνδεσμοι τύπου API βασίζονται στο λιπαντικό του σπειρώματος για τη σφράγιση (στεγάνωση) αυτής της οδού διαρροής.
- Το ιξώδες του λιπαντικού (dope) εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία και την πίεση. Όσο υψηλότερες τιμές λαμβάνουν η θερμοκρασία ή η πίεση, τόσο γρηγορότερα το λιπαντικό εξωθείται μέσω της οδού διαρροής προκαλώντας διαρροή.

Έτσι, λοιπόν, οι σύνδεσμοι τύπου API δεν είναι κατάλληλοι για γεωτρήσεις με υψηλές θερμοκρασίες ή υψηλές πιέσεις ή για γεωτρήσεις αερίου (Rabia, 1985).

Το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Πετρελαίου (API – American Petroleum Institute) ορίζει ότι ο σύνδεσμος θα πρέπει να είναι της ίδιας κατηγορίας χάλυβα (grade) με το κυρίως σώμα της σωλήνωσης. Γενικά, η σωλήνωση και ο σύνδεσμος καθορίζονται από τον τύπο του σπειρώματος. Το API ορίζει τέσσερεις βασικές παραμέτρους σπειρωμάτων (Σχήμα 2.10), οι οποίες είναι οι εξής (Rabia, 1985):

- **Το ύψος ή το βάθος σπειρώματος (thread height or depth):** είναι η απόσταση μεταξύ της βάσης και της κορυφής του σπειρώματος, μετρούμενη κάθετα στον άξονα του σπειρώματος.

- **Το βήμα του σπειρώματος (Lead):** ορίζεται ως η απόσταση από ένα σημείο του σπειρώματος μέχρι το αντίστοιχο απέναντι σημείο, μετρούμενη παράλληλα στον άξονα του σπειρώματος.
- **Η κωνικότητα του σπειρώματος (Taper):** ορίζεται ως η αλλαγή της διαμέτρου ενός σπειρώματος εκφραζόμενη σε ίντσες ανά πόδι ($\frac{in}{ft}$) σπειρώματος.
- **Η μορφή του σπειρώματος (Thread Form):** τα περισσότερα σπειρώματα έχουν τετραγωνική διατομή ή διατομή τύπου V.



Σχήμα 2.10: Βασικά στοιχεία σπειρωμάτων API (Rabia, 1985).

2.4.1.1 Τύποι Συνδέσμων Ευρείας Χρήσης

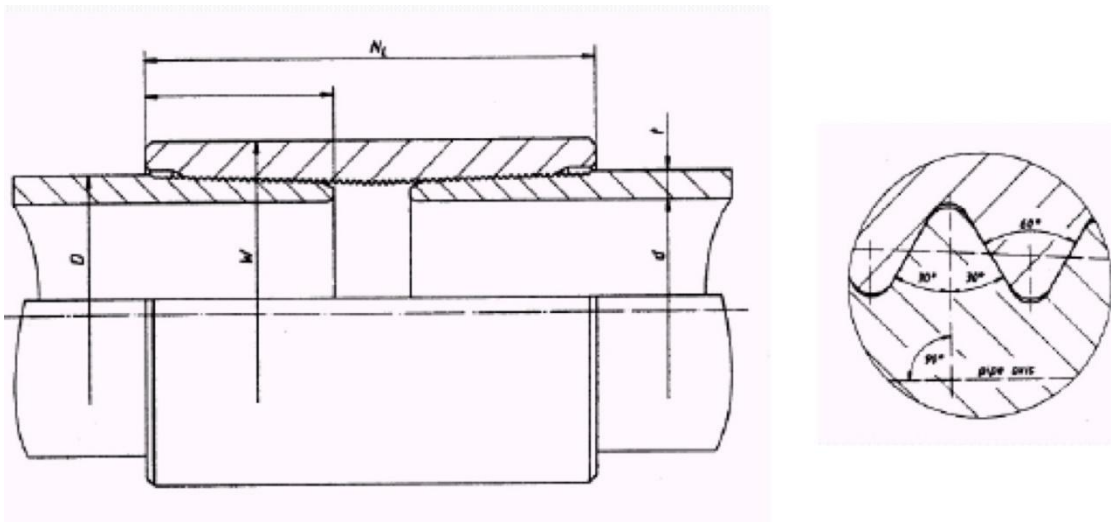
A. Σύνδεσμοι API με κυκλικό σπείρωμα (API 8 Round Thread Couplings)

Ο σύνδεσμος αυτού του τύπου διαθέτει 8 κυκλικά σπειρώματα ανά ίντσα, μορφής V και η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών σπειρωμάτων είναι 60 μοίρες. Ο σύνδεσμος αυτού του τύπου φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Τα σπειρώματα διαθέτουν κωνικότητα της τάξης των $\frac{3}{4}$ in ανά πόδι (ft) διαμέτρου, για όλα τα μεγέθη (διαμέτρους) στελεχών. Η βάση και η κορυφή του σπειρώματος έχουν κοπεί υπό γωνία. Όταν συζευχθεί η κορυφή ενός σπειρώματος με την κορυφή ενός άλλου υπάρχει διάκενο στην προσαρμογή τους της τάξης των 0,003 in περίπου, το οποίο σχηματίζει την οδό διαρροής. Στην πράξη, για να αποφευχθεί διαρροή μέσω αυτής της οδού, χρησιμοποιείται ένα ειδικό μίγμα (λιπαντικού) συνδέσμου (special thread compound). Ο

σύνδεσμος τύπου API με 8 κυκλικά σπειρώματα κοχλιώνεται και στα δύο άκρα ενός στελέχους σωλήνωσης που δε φέρουν ενίσχυση (non-upset pipe), και τα μεμονωμένα στελέχη συνδέονται μεταξύ τους με ένα σύνδεσμο που φέρει εσωτερικά κυκλικά σπειρώματα στα δύο άκρα του. Υπάρχουν δύο τύποι συνδέσμων τύπου API με κυκλικά σπειρώματα:

- Σύνδεσμοι μικρού μήκους σπειρώματος (short thread coupling - STC)
- Σύνδεσμοι μεγάλου μήκους σπειρώματος (long thread coupling - LTC)

Οι σύνδεσμοι STC και LTC είναι λιγότερο ανθεκτικοί από το κυρίως σώμα της σωλήνωσης που συνδέουν, ενώ ο LTC είναι ανθεκτικότερος στη μετάδοση υψηλών αξονικών φορτίων (higher axial loads) από τον STC. Οι σύνδεσμοι τύπου API δεν είναι κατάλληλοι για γεωτρήσεις αερίου και για γεωτρήσεις υπό υψηλή πίεση ή θερμοκρασία (Rabia, 1985).

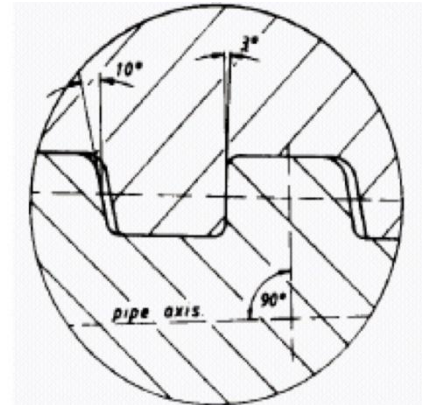
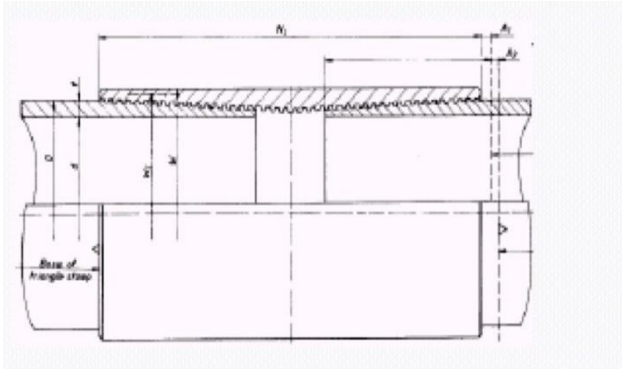


Σχήμα 2.11: Σύνδεσμος API με κυκλικό σπείρωμα (API round thread coupling) (Rabia, 1985).

B. Σύνδεσμοι API με πριονωτό σπείρωμα (API Buttress Thread Couplings)

Ο σύνδεσμος αυτού του τύπου διαθέτει 5 σπειρώματα τετραγωνικής μορφής ανά ίντσα. Η αλλαγή της διαμέτρου (taper) αντιστοιχεί είτε σε $\frac{3}{4}$ in ανά πόδι για σωληνώσεις, διαμέτρου μέχρι $7\frac{5}{8}$ in, είτε σε 1 in/ft για σωλήνωση διαμέτρου 16 in ή και μεγαλύτερη. Κάθε μεμονωμένο στέλεχος της σωλήνωσης φέρει εξωτερικά σπειρώματα στα δύο άκρα του και κοχλιώνεται με το επόμενο στέλεχος σωλήνωσης με σύνδεσμο API με πριονωτό σπείρωμα. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται ο σύνδεσμος API με πριονωτό σπείρωμα και το σπείρωμά του σε τομή. Τα σπειρώματα αυτά είναι ικανά να φέρουν

μεγαλύτερα φορτία από ότι τους συνδέσμους API 8 round thread. Ακόμη, είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών μιγμάτων στα σπειρώματα για να επιτευχθεί στεγανή σύζευξη (Rabia, 1985).



Σχήμα 2.12: Σύνδεσμος API με προνωτό σπείρωμα (API buttress thread coupling) (Rabia, 1985).

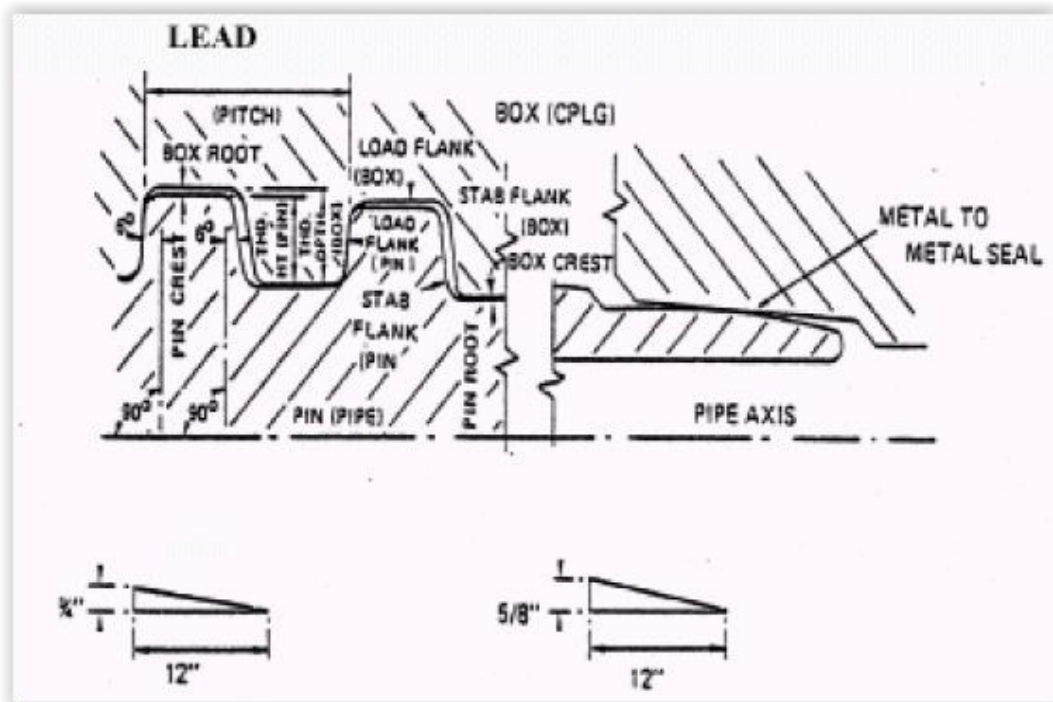
Γ. Σύνδεσμοι API με σπείρωμα τύπου extreme line (Extreme Line Thread Couplings)

Οι σύνδεσμοι API με σπείρωμα τύπου extreme line είναι ενσωματωμένοι πάνω στο κυρίως σώμα των στελεχών της σωλήνωσης, στα οποία το ένα άκρο τους διαθέτει αρσενικό σπείρωμα (pin end), ενώ το άλλο θηλυκό (box end). Το άκρο με το αρσενικό σπείρωμα διαθέτει εσωτερική ενίσχυση (internal upset), ενώ το άκρο με το θηλυκό σπείρωμα διαθέτει εξωτερική ενίσχυση (external upset). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην απαιτείται πρόσθετος σύνδεσμος – «κολάρο» για τη σύνδεση των στελεχών της σωλήνωσης μεταξύ τους. Τα άκρα τους έχουν κατασκευαστεί με ενισχυμένο πάχος τοιχώματος ώστε να αντισταθμίζεται το υλικό που χάνεται κατά τη σύνδεση ξηράς φραγής (metal-to-metal seal). Το σπείρωμα έχει τραπεζοειδή διατομή (trapezoidal profile), με συνέπεια να παρέχεται σύνδεση ξηράς φραγής και στα δύο άκρα. Έτσι, οι σύνδεσμοι API με σπείρωμα τύπου extreme line είναι κατάλληλοι για γεωτρήσεις υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, καθώς δεν χρειάζονται κάποιο επιπρόσθετο λιπαντικό για τη στεγάνωση της σύνδεσης. Κάποια χαρακτηριστικά των συνδέσμων αυτού του τύπου είναι τα ακόλουθα:

- 6 σπειρώματα ανά in για κωνικότητα (taper) 1½ in ανά ft για μεγέθη (διαμέτρους) σωλήνωσης από 5 in έως 7⁵/₈ in.

- 5 σπειρώματα ανά in για κωνικότητα (taper) 1¼ in ανά ft για τα μεγέθη (διαμέτρους) σωλήνωσης από 8⁵/₈ in και 10³/₄ in.

Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται σε τομή ένας σύνδεσμος με σπείρωμα τύπου extreme line (Rabia, 1985).



Σχήμα 2.13: Σύνδεσμος API με σπείρωμα τύπου Extreme Line (Extreme line thread coupling) (Rabia, 1985)

Στον Πίνακα 2.7 αναγράφονται αναλυτικά τα ονομαστικά βάρη, το πάχος των τοιχωμάτων καθώς και ο τύπος σύνδεσής τους ανάλογα με την εξωτερική διάμετρο (OD) και την κατηγορία του χάλυβα (grade) (Institut Francais du Petrole, 1999).

2.5 Διαδικασία Σωλήνωσης και Πρόσθετος Εξοπλισμός

Όταν το κοπτικό φτάσει στο προγραμματισμένο βάθος όπου θα γίνει η σωλήνωση, η γεώτρηση θα πρέπει να προετοιμαστεί για την εργασία αυτή.

Αρχικά, είναι συνήθως απαραίτητο να εκτελεστούν ορισμένες μετρήσεις-διαγραφίες (loggings), όπως:

- Caliper log για να προσδιοριστεί με ακρίβεια ο όγκος του διακένου μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης και να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ποσότητα γαλακτώματος τσιμέντου.

Πίνακας 2.7: Αναλυτικός πίνακας με σωληνώσεις κατά API (Institut Francais du Petrole, 1999).

Nominal outside diameter (in)	Nominal weight (lb/ft)	Wall thickness		Type of end finish*						
				Grade						
		(in)	(mm)	H40	J55 K55	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125
4 1/2	9.50	0.205	5.21	PS	PS PSB PSLB	PLB PLB	PLB PLB	PLB PLB	PLB PLB PLB	PLB
4 1/2	10.50	0.224	5.69							
4 1/2	11.60	0.250	6.35							
4 1/2	13.50	0.290	7.37							
4 1/2	15.10	0.337	8.56							
5	11.50	0.220	5.59		PS PSLB PSLBE	PLBE PLBE PLB PLB PLB	PLBE PLBE PLB PLB PLB	PLBE PLBE PLB PLB PLB	PLBE PLBE PLB PLB PLB	PLBE PLB PLB
5	13.00	0.253	6.43							
5	15.00	0.296	7.52							
5	16.00	0.362	9.19							
5	21.40	0.437	11.10							
5	23.20	0.478	12.14							
5	24.10	0.500	12.70							
5 1/2	14.00	0.244	6.20	PS	PS PSLBE PSLBE	PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE	PLBE
5 1/2	15.50	0.275	6.99							
5 1/2	17.00	0.304	7.72							
5 1/2	20.00	0.361	9.17							
5 1/2	23.00	0.415	10.54							
5 1/2	26.80	0.500	12.70							
5 1/2	29.70	0.562	14.27							
5 1/2	32.60	0.625	15.88							
5 1/2	35.30	0.687	17.45							
5 1/2	38.00	0.750	19.05							
5 1/2	40.50	0.812	20.62							
5 1/2	43.10	0.875	22.23							
6 5/8	20.00	0.288	7.32							
6 5/8	24.00	0.352	8.94							
6 5/8	26.00	0.417	10.59							
6 5/8	32.00	0.475	12.07							
7	17.00	0.231	5.87	PS PS	PS PSLBE PSLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE	
7	20.00	0.272	6.91							
7	23.00	0.317	8.05							
7	26.00	0.362	9.19							
7	29.00	0.408	10.36							
7	32.00	0.453	11.51							
7	35.00	0.498	12.65							
7	38.00	0.540	13.72							
7	42.70	0.625	15.88							
7	46.40	0.687	17.45							
7	50.10	0.750	19.05							
7	53.60	0.812	20.62							
7	57.10	0.875	22.23							
7 5/8	24.00	0.300	7.62							PS
7 5/8	26.40	0.328	8.33							
7 5/8	29.70	0.375	9.53							
7 5/8	33.70	0.430	10.92							
7 5/8	38.00	0.500	12.70							
7 5/8	42.80	0.562	14.27							
7 5/8	45.30	0.595	15.11							
7 5/8	47.10	0.625	15.88							
7 5/8	51.20	0.687	17.45							
7 5/8	55.30	0.750	19.05							

Πίνακας 2.7: Αναλυτικός πίνακας με σωληνώσεις τύπου API (συνέχεια) (Institut Francais du Petrole, 1999; Netwas Group Oil, 2016). (συνέχεια)

Nominal outside diameter (in)	Nominal weight (lb/ft)	Wall thickness		Type of end finish*						
				Grade						
		(in)	(mm)	H40	J55 K55	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125
7 3/4	46.10	0.595	15.11			P	P	P	P	P
8 5/8	24.00	0.264	6.71	PS PS	PS PSLBE PSLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE	PLBE
8 5/8	28.00	0.304	7.72							
8 5/8	32.00	0.352	8.94							
8 5/8	36.00	0.400	10.16							
8 5/8	40.00	0.450	11.43							
8 5/8	44.00	0.500	12.70							
8 5/8	49.00	0.557	14.15							
9 5/8	32.30	0.312	7.92	PS PS	PSLB PSLBE	PLBE PLBE PLBE PLBE PLB	PLBE PLBE PLBE PLBE PLB	PLBE PLBE PLBE PLBE PLB P P P	PLBE PLBE PLB	PLBE PLBE PLB
9 5/8	36.00	0.352	8.94							
9 5/8	40.00	0.395	10.03							
9 5/8	43.50	0.435	11.05							
9 5/8	47.00	0.472	11.99							
9 5/8	53.50	0.545	13.84							
9 5/8	58.40	0.595	15.11							
9 5/8	59.40	0.609	15.47							
9 5/8	64.90	0.672	17.07							
9 5/8	70.30	0.734	18.64							
9 5/8	75.60	0.797	20.24							
10 3/4	32.75	0.279	7.09							
10 3/4	40.50	0.350	8.89							
10 3/4	45.50	0.400	10.16							
10 3/4	51.00	0.450	11.43							
10 3/4	56.50	0.495	12.57							
10 3/4	60.70	0.545	13.84							
10 3/4	65.70	0.595	15.11							
10 3/4	73.20	0.672	17.07							
10 3/4	79.20	0.734	18.64							
10 3/4	85.30	0.797	20.24							
11 3/4	42.00	0.333	8.46	PS	PSB PSB PSB	PSB P P	PSB P P	PSB P P	PSB P P	PSB P P
11 3/4	47.00	0.375	9.53							
11 3/4	54.00	0.435	11.05							
11 3/4	60.00	0.489	12.42							
11 3/4	65.00	0.534	13.56							
11 3/4	71.00	0.582	14.78							
13 3/8	46.00	0.330	8.38	PS	PSB PSB PSB	PSB PSB	PSB PSB	PSB PSB	PSB PSB	PSB
13 3/8	54.50	0.380	9.65							
13 3/8	61.00	0.430	10.92							
13 3/8	68.00	0.490	12.19							
13 3/8	72.00	0.514	13.06							
16	65.00	0.375	9.53	PS	PSB PSB P	P	P	P	P	P
16	75.00	0.438	11.13							
16	94.00	0.495	12.57							
16	109.00	0.658	16.66							
18 5/8	87.50	0.435	11.05	PS	PSB					
20	94.00	0.438	11.13	PSL	PSLB PSLB PSLB					
20	106.50	0.500	12.70							
20	133.00	0.635	16.13							

- Μετρήσεις διεύθυνσης (αζιμούθιο) και κλίσης της τροχιάς, για να διαπιστωθεί η ακριβής τροχιά της γεώτρησης και να προσδιοριστεί το βάθος όπου παρουσιάζονται απότομες αλλαγές στη γωνία κλίσης ή στη διεύθυνση.
- Μετρήσεις μέγιστης θερμοκρασίας για τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης του τσιμέντου σε βαθιές γεωτρήσεις.

Οι παραπάνω μετρήσεις μπορούν να γίνονται και κατά τη διάρκεια της όρυξης αφού είναι απαραίτητες και στους γεωλόγους για τον εντοπισμό και την αναγνώριση των διατρυόμενων σχηματισμών.

Όταν ολοκληρωθούν οι διαγραφίες και πριν την κάθοδο της σωλήνωσης καθελκύεται η διατρητική στήλη για δύο λόγους:

- Για να ελεγχθεί η σταθερότητα των τοιχωμάτων.
- Για να κυκλοφορήσει η λάσπη και πιθανόν για να βελτιωθούν οι ιδιότητες της λάσπης (plastic viscosity and yield value), διαδικασία απαραίτητη, κυρίως όταν πρόκειται η σωλήνωση να κατέβει σε μεγάλο βάθος, οπότε είναι αναγκαίο να μειωθούν οι πιέσεις (surge pressures) που ασκούνται στον πυθμένα της γεώτρησης όταν καταβιβάζεται η σωλήνωση (Σταματάκη, 2003).

Η συναρμολόγηση της σωλήνωσης περιλαμβάνει κάποιο απαραίτητο πρόσθετο εξοπλισμό τα εξαρτήματα του οποίου είναι τα παρακάτω:

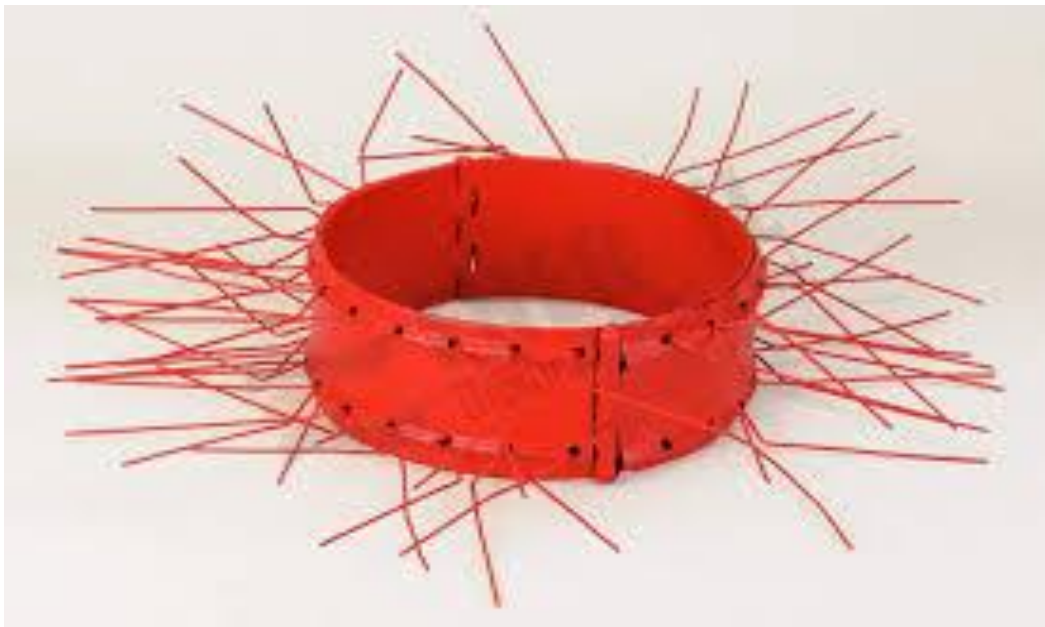
- Το **πέλμα (shoe)** και το **στέλεχος προσγείωσης (landing collar)**, τα οποία κοχλιώνονται πάνω στη στήλη της σωλήνωσης με τρόπο τέτοιο ώστε να μην αστοχήσει η σύνδεση όταν αργότερα συνεχιστεί η όρυξη μέσω της σωλήνωσης.
- Οι **κεντρωτήρες (centralizers)**, οι οποίοι τοποθετούνται στο κάτω μέρος της στήλης, σταθμίζονται με το πέλμα της σωλήνωσης που έχει προηγηθεί και διατηρούν τη νέα στήλη σωλήνωσης σε ομόκεντρη θέση σε σχέση με τη διάμετρο της γεώτρησης.
- Οι **αποξεστήρες (scratchers)**, οι οποίοι τοποθετούνται στο κάτω μέρος της στήλης σωλήνωσης ή και ψηλότερα για να καθαρίζουν το επίστρωμα που έχει δημιουργηθεί από την κυκλοφορία της λάσπης στα περατά τμήματα της γεώτρησης

- Οι **λαβές συγκράτησης (hangers)**, οι οποίες συγκρατούν και ακινητοποιούν τη σωλήνωση (Σταματάκη, 2003).

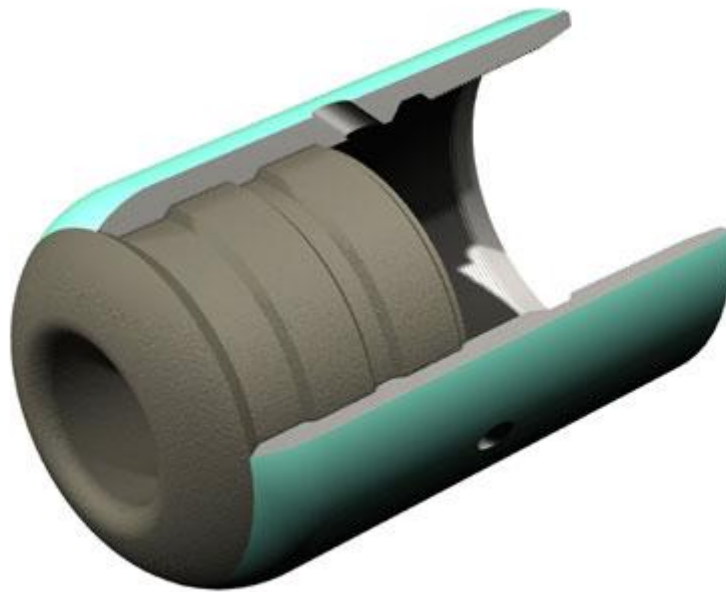
Ο πρόσθετος εξοπλισμός παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.14, 2.15, 2.16 και 2.17.



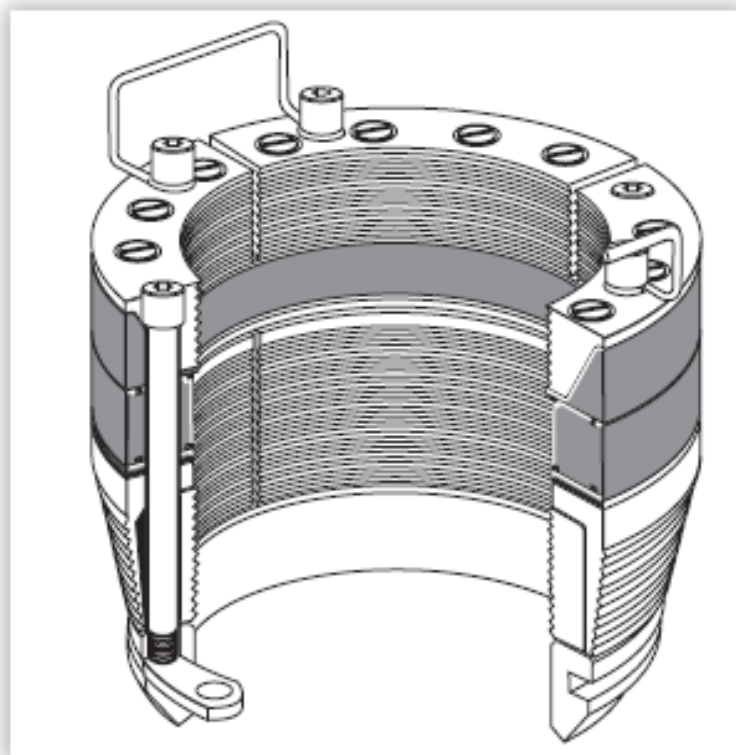
Σχήμα 2.14: Κεντρωτήρας (centralizers) (Drilling Contractor, 2015)



Σχήμα 2.15: Αποξεστήρας (scratcher) (Eneroil Offshore Drilling Ltd.)



Σχήμα 2.16: Πέλας σωλήνωσης (casing shoe) (Neftegazmash-Technologies)

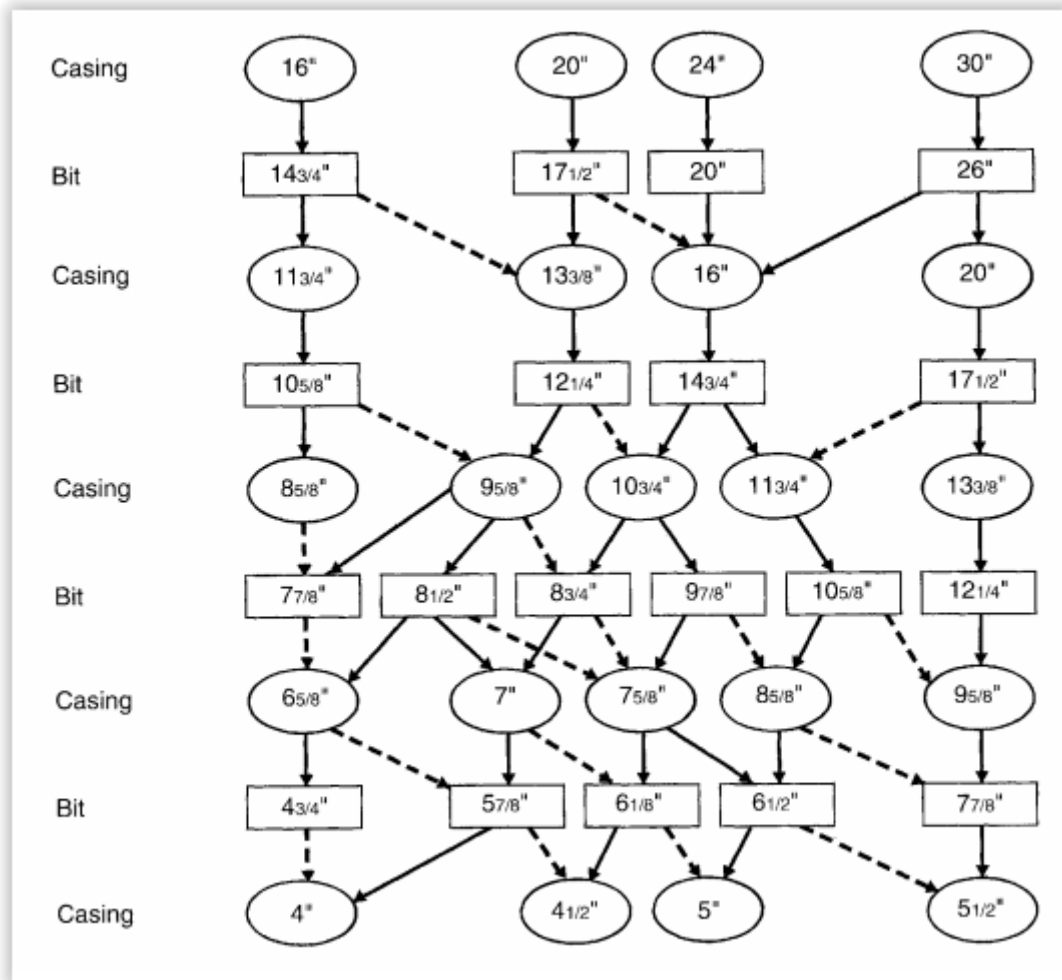


Σχήμα 2.17: Λαβή ακινητοποίησης σωλήνωσης (hanger) (Drilling Engineering Handbook)

Κεφάλαιο 3°. Σχεδιασμός Σωλήνωσης (Casing Design)

Βασισμένοι στην εμπορικότητα των ποσοτήτων υδρογονανθράκων που έχουν ανακαλυφθεί, ο σχεδιασμός του προγράμματος σωλήνωσης ξεκινάει με τον προσδιορισμό της θέσης της γεώτρησης, του στόχου της και του μεγέθους της παραγωγικής σωλήνωσης. Το πλήθος και το μέγεθος της σωλήνωσης καθώς και ο τύπος του εξοπλισμού που μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στη γεώτρηση επηρεάζουν σημαντικά την ελάχιστη εσωτερική διάμετρο (ID) της παραγωγικής σωλήνωσης. Γενικά, οι όροι αυτοί προσδιορίζονται από τους μηχανικούς γεωτρήσεων και από άλλα μέλη της ομάδας μηχανικών. Στην περίπτωση των ερευνητικών γεωτρήσεων οι μηχανικοί γεωτρήσεων συλλέγουν δεδομένα και καθορίζουν τα μεγέθη των κοπτικών, την κατηγορία των στελεχών της σωλήνωσης και θέτουν βάρη – στόχους ώστε να ολοκληρώνεται απρόσκοπτα και με ασφάλεια η όρυξη. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής των κοπτικών σύμφωνα με τις διαστάσεις της σωλήνωσης. Οι συμπαγείς γραμμές ορίζουν την συνήθως ακολουθούμενη πρακτική. Οι διακεκομμένες γραμμές μπορεί να ακολουθηθούν ως πορεία, όμως επιβάλλεται η με μεγαλύτερη προσοχή αντιμετώπιση των τεχνικών θεμάτων που προκύπτουν από τις πιο έντονες αλλαγές των διαμέτρων. Ακόμη, στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα πιο συνηθισμένα κοπτικά που χρησιμοποιούνται για σωληνώσεις προδιαγραφών API, ενώ στους πίνακες 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα πιο κοινά κοπτικά που περνούν μέσα από συγκεκριμένο μέγεθος σωλήνωσης API.

Για να επιτευχθεί ο οικονομικός σχεδιασμός, πολλές φορές η σωλήνωση αποτελείται από στελέχη διαφορετικής κατηγορίας, πάχους τοιχωμάτων και είδος συνδέσμου. Μία τέτοια σωλήνωση ονομάζεται συνδυασμένη στήλη (combination string). Ένας ακόμη τρόπος για τη μείωση του κόστους γίνεται με τη χρήση liner, και συγκεκριμένα liner-tie back, τα οποία δεν διατρέχουν όλη τη γεώτρηση όπως η κοινή σωλήνωση.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα επιλογής μεγέθους κοπτικού και διαμέτρου σωλήνωσης (Σταματάκη, Τεχνολογία Γεωτρήσεων, 2003)

Πίνακας 3.1: Συνηθισμένα κοπτικά που χρησιμοποιούνται για σωληνώσεις προδιαγραφών API (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Μέγεθος Σωλήνωσης (OD) (in)	Μέγεθος Συνδέσμου (OD) (in)	Μεγέθη κοινά χρησιμοποιούμενων κοπτικών (OD) (in)
4.5	5	6, 6.125, 6.25
5	5.563	6.5, 6.75
5.5	6.050	7.875, 8.375
6	6.625	7.875, 8.375, 8.5
6.625	7.390	7.875, 8.375, 8.5
7	7.656	8.625, 8.75, 9.5
7.625	8.500	9.875, 10.625, 11.0
8.625	9.625	11.0, 12.25
9.625	10.625	12.25, 14.75
10.75	11.750	15.0
13.375	14.375	17.5
16	17	20
20	21	24.0, 26.0

Πίνακας 3.2: Κοινά μεγέθη κοπτικά που διέρχονται μέσα από συγκεκριμένο μέγεθος σωλήνωσης API (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Μέγεθος Σωλήνωσης (OD) (in)	Βάρος ανά πόδι (IBM/ft)	Εσωτερική Διάμετρος (ID) (in)	Ωφέλιμη Διάμετρος (drift diameter) (in)	Μεγέθη κοινά χρησιμοποιούμενων κοπτικών (OD) (in)
4½	9.5	4.09	3.965	3 ⁷ / ₈
	10.5	4.052	3.927	
	11.6	4.000	3.875	
	13.5	3.920	3.795	3 ³ / ₄
5	11.5	4.560	4.435	4 ¹ / ₄
	13	4.494	4.369	
	15	4.408	4.283	
	18	4.276	4.151	3 ⁷ / ₈
5½	13	5.044	4.919	4 ³ / ₄
	14	5.012	4.887	
	15.5	4.950	4.825	
	17	4.892	4.764	
	20	4.778	4.653	4 ⁵ / ₈
	23	4.670	4.545	4 ¹ / ₄
6¾	17	6.135	6.010	6
	20	6.049	5.924	5 ⁵ / ₈
	24	5.921	5.796	
	28	5.791	5.666	
	32	5.675	5.550	4 ³ / ₄
7	17	6.538	6.413	6 ¹ / ₄
	20	6.456	6.331	
	23	6.366	6.241	
	26	6.276	6.151	6 ¹ / ₈
	29	6.184	6.059	6
	32	6.094	5.969	
	35	6.006	5.879	
	38	5.920	5.795	5 ⁵ / ₈
7½	20	7.125	7	6 ³ / ₈
	24	7.025	6.900	
	26.40	6.969	6.844	
	29.70	6.875	6.750	
	33.70	6.765	6.640	6 ¹ / ₂
	39	6.625	6.500	
8¾	24	8.097	7.972	7 ⁷ / ₈
	28	8.017	7.892	
	32	7.921	7.796	6 ³ / ₄
	36	7.825	7.700	
	40	7.725	7.600	
	44	7.625	7.500	
	49	7.511	7.386	

Πίνακας 3.3: Κοινά μεγέθη κοπτικά που διέρχονται μέσα από συγκεκριμένο μέγεθος σωλήνωσης API (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Μέγεθος Σωλήνωσης (OD) (in)	Βάρος ανά πόδι (IBM/ft)	Εσωτερική Διάμετρος (ID) (in)	Ωφέλιμη Διάμετρος (drift diameter) (in)	Μεγέθη κοινά χρησιμοποιούμενων κοπτικών (OD) (in)
9⁵/₈	29.3	9.063	8.907	8 ³ / ₄ , 8 ¹ / ₂
	32.3	9.001	8.845	
	36	8.921	8.765	
	40	8.835	8.679	8 ⁵ / ₈ , 8 ¹ / ₂
	43.5	8.755	8.599	
	47	8.681	8.525	8 ¹ / ₂
	53.50	8.535	8.379	7 ⁷ / ₈
10³/₄	32.75	10.192	10.036	9 ⁷ / ₈
	40.50	10.050	9.894	
	45.50	9.950	9.794	9 ⁵ / ₈
	51	9.850	9.694	
	55	9.760	9.604	
	60.70	9.660	9.504	8 ³ / ₄ , 8 ¹ / ₂
	65.37	9.560	9.404	8 ³ / ₄ , 8 ¹ / ₂
11³/₄	38	11.154	10.994	11
	42	11.084	10.928	10 ⁵ / ₈
	47	11	10.844	
	54	10.880	10.724	
	60	10.772	10.616	
13³/₈	48	12.715	12.599	12 ¹ / ₄
	54.50	12.615	12.459	
	61	12.515	12.359	
	68	12.415	12.259	
	72	12.347	12.191	11
16	55	15.375	15.188	15
	65	15.250	15.062	
	75	15.125	14.939	14 ³ / ₄
	84	15.010	14.822	
	109	14.688	14.500	
18⁵/₈	87.50	17.755	17.567	17 ¹ / ₂
20	94	19.124	18.936	17 ¹ / ₂

Η διαδικασία του σχεδιασμού της σωλήνωσης περιλαμβάνει τρεις βασικές παραμέτρους που είναι οι εξής:

- Εκτίμηση του βάθους έδρασης και του μεγέθους των σωληνώσεων.
- Έλεγχο της σωλήνωσης ως προς τα παρακάτω κριτήρια: α) την πίεση διάρρηξης (burst pressure), β) την πίεση θλιπτικής αστοχίας (collapse pressure), γ) την εφελκυστική τάση (tensile force) και δ) τις αξονικές τάσεις (axial loads).

- Επιλογή κατάλληλου βάρους και κατηγορίας στελεχών λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κριτήρια.

Πριν την έναρξη μιας διαδικασίας σχεδιασμού των σωληνώσεων τα απαιτούμενα δεδομένα λαμβάνονται από γεωλόγους, πετροφυσικούς, μηχανικούς ταμειωτήρων κ.λπ. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η προέλευση των δεδομένων αυτών. Αφού, τα απαιτούμενα δεδομένα συγκεντρωθούν οργανώνονται σε πίνακα, πράγμα που βοηθά στους υπολογισμούς του σχεδιασμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην περίπτωση μας αποτελεί ο πίνακας 3.5. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια του προγράμματος σωλήνωσης εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (Hossain & Al-Mejed, 2015).

Πίνακας 3.4: Προέλευση δεδομένων για το σχεδιασμό της σωλήνωσης (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Δεδομένα	Πηγή
Πίεση σχηματισμού (psi)	Εγγείς γεωτρήσεις, δεδομένα διαγραφιών, ανάλυση διαγραφιών
Βάθος έδρασης σωληνώσεων (ft)	Εγγείς γεωτρήσεις, προσδιορισμός ανοχής σε απότομη εισροή ρευστών (kicks)
Βαθμίδα ρωγμάτωσης (psi/ft) ή η πίεση ρωγμάτωσης στο κατώτερο σημείο της γεώτρησης (ppg ή psi)	Εγγείς γεωτρήσεις, δεδομένα διαγραφιών, υπολογισμός της βαθμίδας ρωγμάτωσης
Πυκνότητα ρευστού διάτρησης ppg	Εγγείς γεωτρήσεις, δεδομένα διαγραφιών, υπολογισμός της βαθμίδας ρωγμάτωσης
Μέση στάθμη της θάλασσας (ft)	Γεωγραφικά δεδομένα
Διαθέσιμες κατηγορίες και βάρη στελεχών σωληνώσεων	Αναφορά κατάστασης των αποθεμάτων
Μηχανικά χαρακτηριστικά	Κατάλογος κατασκευαστή API
Γεωθερμική θερμοκρασία (°F, °C)	Εγγείς γεωτρήσεις

Πίνακας 3.5: Οργάνωση απαιτούμενων δεδομένων (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Απαιτούμενα Δεδομένα				
Εξωτερική διάμετρος σωλήνωσης (in)	18 ⁵ / ₈	13 ³ / ₈	9 ⁵ / ₈	7
Βάθος έδρασης σωλήνωσης (TVD) (ft)				
Κατηγορία και βάρος (lb/ft)				
Εσωτερική διάμετρος (in)				
Ωφέλιμη διάμετρος (in)				
Τύπος συνδέσμου				

Απαιτούμενα Δεδομένα				
Εξωτερική διάμετρος σωλήνωσης (in)	18 ⁵ / ₈	13 ³ / ₈	9 ⁵ / ₈	7
Πίεση διάρρηξης (burst pressure) (psi)				
Πίεση θλιπτικής αστοχίας (collapse pressure) (psi)				
Όριο ελαστικότητας κυρίως σώματος σωλήνωσης (body yield strength) (lbf x 1000)				
Φορτίο αποκόλλησης συνδέσμου (connection parting load) (lbf x 1000)				
Πυκνότητα ρευστού διάτρησης (ppg)				
Αναμενόμενη πίεση σχηματισμού του επόμενου τελικού βάθους (psi)				
Βαθμίδα ρωγμάτωσης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (psi/ft)				
Στάθμη ρευστού διάτρησης (mudline depth) (ft)				
Γεωθερμική Βαθμίδα				

3.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν το Σχεδιασμό

Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την αστοχία της σωλήνωσης καθώς και την επιλογή του καταλληλότερου βάρους και κατηγορίας στελεχών, ώστε να επιτευχθεί με ασφάλεια και μικρό κόστος η διαδικασία της σωλήνωσης. Στο πρόγραμμα της σωλήνωσης περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις τόσο της ολοκλήρωσης της γεώτρησης, όσο και της παραγωγής.

Η γνώση και η δυνατότητα εφαρμογής της ανάλυσης των τάσεων που αναπτύσσονται είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό. Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού αυτού είναι μία σωλήνωση ικανή να αντέχει στις εκτιμώμενες αξονικές τάσεις και στις εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Επιπλέον, λόγω ανωμαλιών των γεωτρήσεων, π.χ. μεγάλη γωνιά κλίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντοχή των στελεχών σε κάμψη (bending force) κατά την επιλογή της κατηγορίας τους.

Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης εμπεριέχει ένα συντελεστή ασφαλείας, ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της σε μη προσδιοριζόμενους από την αρχή παράγοντες, όπως η σκουριά, η τριβή και η φθορά από την θερμότητα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό είναι οι εξής:

- Οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάτρηση και την παραγωγή (οι τάσεις αναλύονται στην ενότητα 3.10).
- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης.
- Ο βαθμός φθοράς των στελεχών καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής.
- Η διαθεσιμότητα της σωλήνωσης, δηλαδή, η ευκολία που δύναται να προμηθευτούν τα απαιτούμενα στελέχη).

Γενικά, το κόστος μιας δεδομένης κατηγορίας στελεχών είναι ανάλογο του βάρους τους, δηλαδή, τα βαρύτερα στελέχη είναι ακριβότερα. Επειδή, το κόστος της σωλήνωσης ανέρχεται μέχρι και το 40% του συνολικού κόστους της γεώτρησης ο σχεδιαστής επιλέγει τα 'μικρότερης' κατηγορίας και ελαφρύτερα στελέχη ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη ασφάλεια με το μικρότερο δυνατό κόστος.

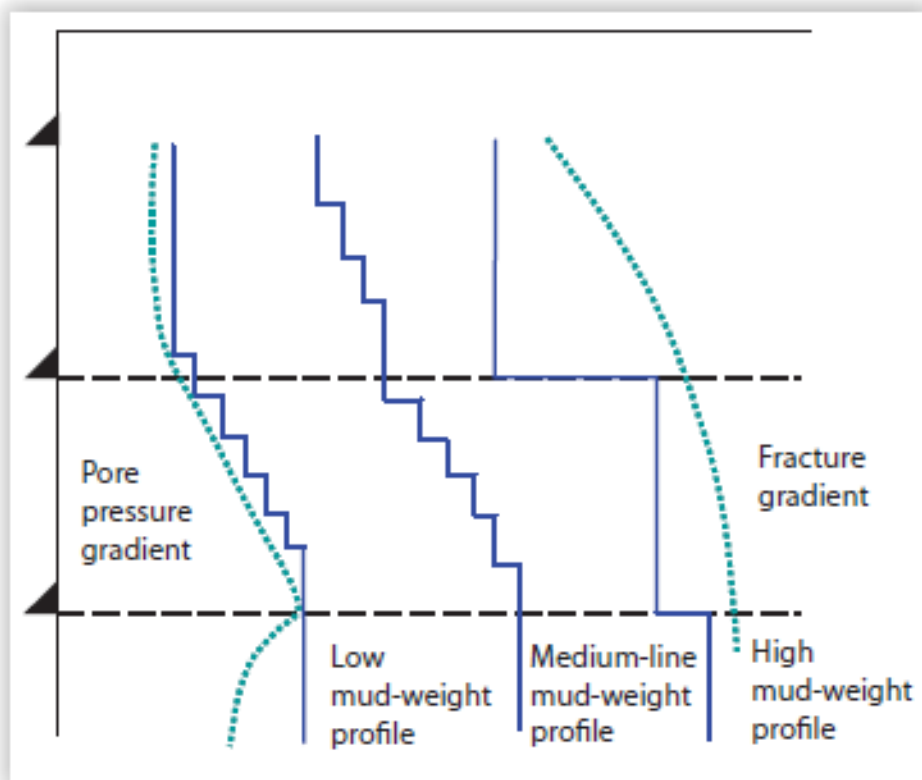
Η λανθασμένη σχεδίαση της σωλήνωσης έχει καταστροφικές συνέπειες. Πιο συγκεκριμένα τίθεται σε μεγάλο κίνδυνο η ζωή του προσωπικού, με την ταυτόχρονη φθορά ή απώλεια ακριβού εξοπλισμού. Επίσης, ολόκληρος ο ταμιευτήρας τίθεται σε κίνδυνο εάν η σωλήνωση αστοχήσει, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη οικονομική απώλεια και σημαντική μείωση των εκτιμώμενων αποθεμάτων του κοιτάσματος.

3.2 Επιλογή Βάθους Έδρασης Σωλήνωσης

Η επιλογή του πλήθους των σωληνώσεων και του σχετικού βάθους έδρασης της εκάστοτε σωλήνωσης βασίζεται στην θεώρηση της βαθμίδας πίεσης των πόρων (pore-pressure gradient) και της βαθμίδας ρωγμάτωσης (fracture gradient) του σχηματισμού που πρόκειται να διατηρηθεί. Τα δεδομένα για τον υπολογισμό της βαθμίδας πίεσης και της βαθμίδας ρωγμάτωσης προέρχονται από κάποια γειτονική γεώτρηση και από τα δεδομένα των διαγραφιών (well logs). Τα μεγέθη αυτά εκφράζονται σαν μια ισοδύναμη πυκνότητα και σχεδιάζονται σε σχέση με το βάθος (σχήμα 3.2). Επίσης, σχεδιάζεται η καμπύλη πυκνοτήτων του ρευστού διάτρησης. Η υδροστατική πίεση που θα ασκεί η εκάστοτε λάσπη θα πρέπει να είναι, τουλάχιστον, ίση με την πίεση των σχηματισμών στα αντίστοιχα βάθη, για να εξασφαλίζεται εξισορρόπηση και μικρότερη από τη βαθμίδα ρωγμάτωσης (kick margin) (για να μην ρωγματωθεί ο σχηματισμός από τη λάσπη).

Προτείνεται όμως ως συντελεστής ασφαλείας αυξημένη πίεση λάσπης κατά 200 psi. Επομένως, για κάθε βάθος η πίεση λάσπης θα είναι ίση με την πίεση των σχηματισμών στο βάθος αυτό συν το συντελεστή ασφαλείας.

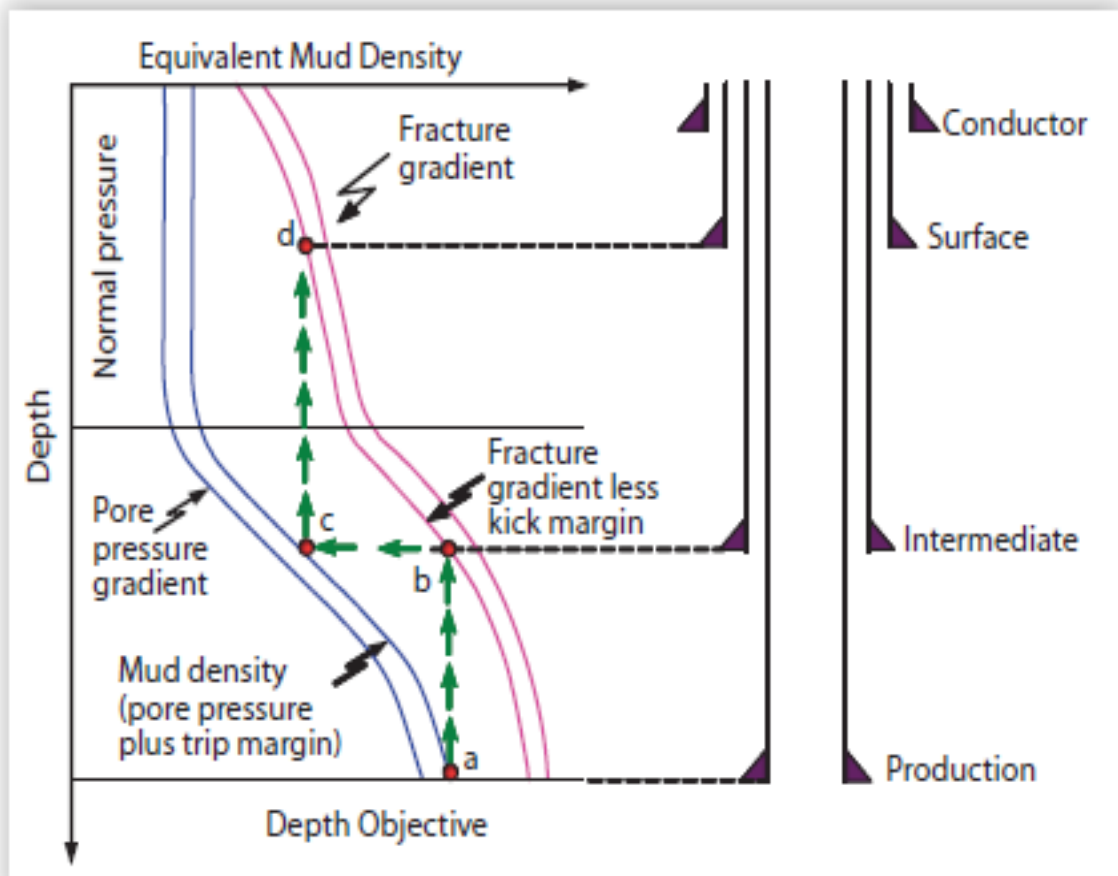
Πρακτικά, το κριτήριο για το σχεδιασμό της σωλήνωσης είναι: «η πίεση που θα ασκεί η λάσπη σε κάθε θεωρούμενο βάθος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του σχεδιασμού». Σε κάθε βάθος όπου ισχύει η ισότητα των μεγεθών αυτών επιβάλλεται η εκτέλεση σωλήνωσης και η αλλαγή της πυκνότητας της λάσπης. Το διάγραμμα των τιμών αυτών ως προς το βάθος επιτρέπει τη συγκριτική συσχέτισή τους (σχήμα 3.3) (Σταματάκη, 2003).



Σχήμα 3.2: Εναλλακτικές πυκνότητες λάσπης (Hossain & Al-Mejed, 2015)

Ο σχεδιασμός γίνεται από κάτω προς τα πάνω (bottom-up approach) (σχήμα 3.3). Επομένως, ξεκινώντας από το τελικό βάθος φέρουμε οριζόντια γραμμή έως ότου αυτή τμήσει τη βαθμίδα πίεσης. Από το σημείο τομής φέρουμε κατακόρυφη γραμμή έως ότου αυτή τμήσει τη βαθμίδα ρωγμάτωσης. Από το σημείο τομής φέρουμε οριζόντια γραμμή έως ότου αυτή τμήσει τη βαθμίδα πίεσης και ξανά κατακόρυφη έως τη βαθμίδα ρωγμάτωσης. Κάθε σημείο τομής των οριζόντιων με τη βαθμίδα πίεσης καθορίζει την πυκνότητα της λάσπης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση του τμήματος

(βάθους) που συμπεριλαμβάνεται μεταξύ δύο σημείων τομής. Κάθε σημείο τομής των κατακόρυφων γραμμών με τη βαθμίδα ρωγμάτωσης καθορίζει τις αλλαγές στη σωλήνωση και, επομένως, τη θέση (βάθος) στο οποίο θα τελειώνει κάθε σωλήνωση. Η υπέρβαση της βαθμίδας ρωγμάτωσης με λάσπη μεγαλύτερης πυκνότητας σημαίνει δυνατή ρωγμάτωση του σχηματισμού και απώλεια ελέγχου του πηγαδιού (Σταματάκη, 2003).



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα επιλογής βάθους έδρασης σωληνώσεων (Hossain & Al-Mejed, 2015)

3.2.1 Μέθοδοι Πρόβλεψης και Εκτίμησης Γεωπιέσεων

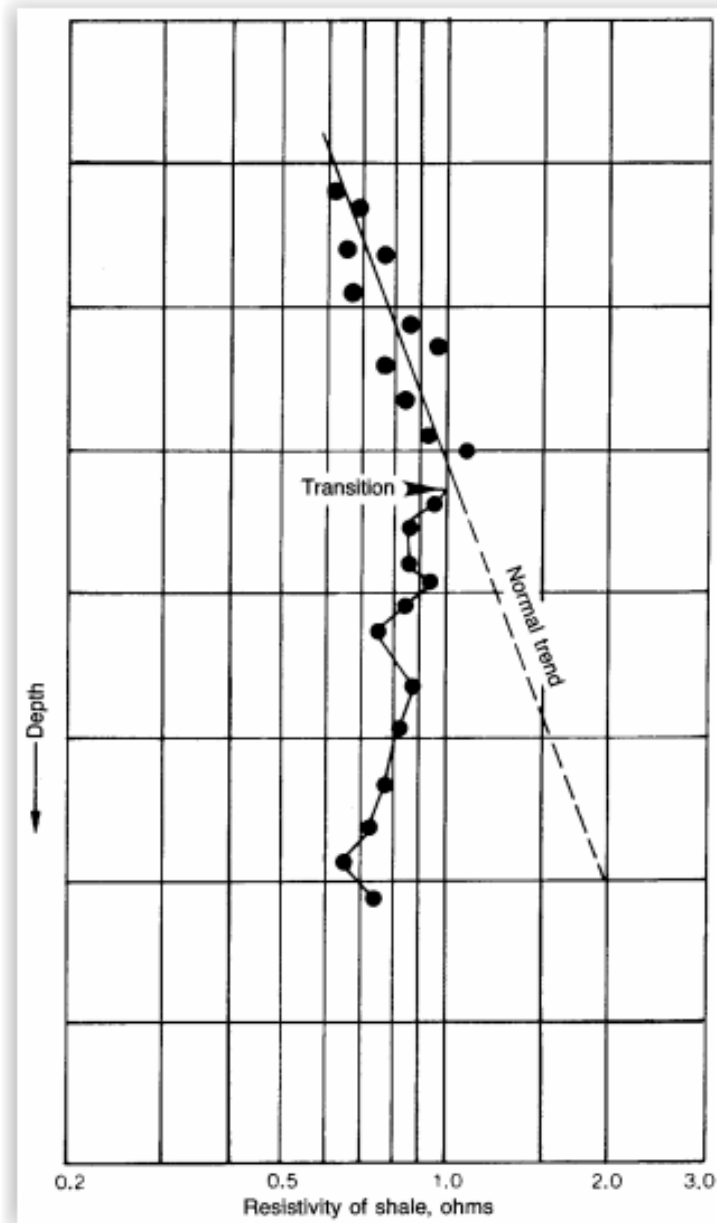
Οι μέθοδοι οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στην πρόβλεψη ή/και στην εκτίμηση των γεωπιέσεων ομαδοποιούνται ως ακολούθως:

3.2.1.1 Ανάλυση και Επεξεργασία Δεδομένων Διαγραφιών (Loggings)

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία αξιολόγησης των γεωπιέσεων μιας περιοχής ενδιαφέροντος είναι η επεξεργασία των πληροφοριών που προέρχονται από διαγραφίες (loggings) σε γεωτρήσεις της ευρύτερης περιοχής. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων είναι σημαντική για τον σχεδιασμό και την όρυξη μιας νέας γεώτρησης.

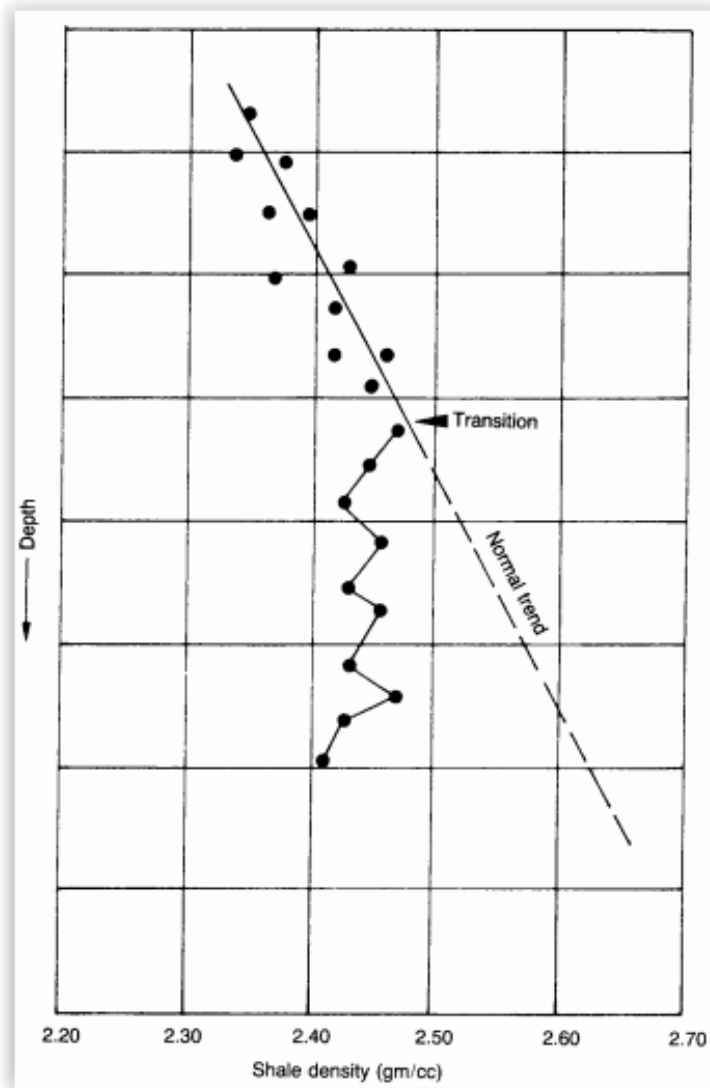
Μέσω των διαγραφιών μπορεί να εκτιμηθεί η πίεση των σχηματισμών συναρτήσει του βάθους και να προσδιοριστεί η τυχόν θέση (βάθος) μετάβασης σε ζώνες ανωμάλων πιέσεων. Οι διαγραφίες που συνήθως χρησιμοποιούνται έχουν σχέση με τις παραμέτρους που επηρεάζονται από τις πιέσεις των σχηματισμών, όπως: ο τμηματικός χρόνος διάδοσης ακουστικών κυμάτων (interval transit time of acoustic waves – sonic log), η πυκνότητα των πετρωμάτων (density log) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ή το αντίστροφο αυτής, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (resistivity log).

Κατά τη διάτρηση ζώνης κανονικών πιέσεων, η αγωγιμότητα των στρωμάτων μειώνεται με το βάθος, ενώ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνει με το βάθος. Με τη μετάβαση σε ζώνη που χαρακτηρίζεται από ανωμάλως υψηλό πορώδες και, επομένως, υψηλές πιέσεις, η αγωγιμότητα αυξάνει σημαντικά. Αντίστοιχα, θα μειώνεται η ειδική αντίσταση των στρωμάτων και οι τιμές της θα αποκλίνουν σημαντικά από τις κανονικές τιμές που θα αντιστοιχούν στα βάθη που εξετάζονται (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Μεταβολή ειδικής αντίστασης με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάτων πιέσεων (Σταματάκη, 2003)

Ανάλογο είναι το φαινόμενο της μεταβολής της πυκνότητας των πετρωμάτων με το βάθος. Είναι αναμενόμενο ότι η πυκνότητα των στρωμάτων αυξάνει με το βάθος σε ζώνες κανονικής συμπίεσης, ενώ θα αποκλίνει σημαντικά (μειούμενη) σε ζώνες υποσυμπίεσης (σχήμα 3.5).

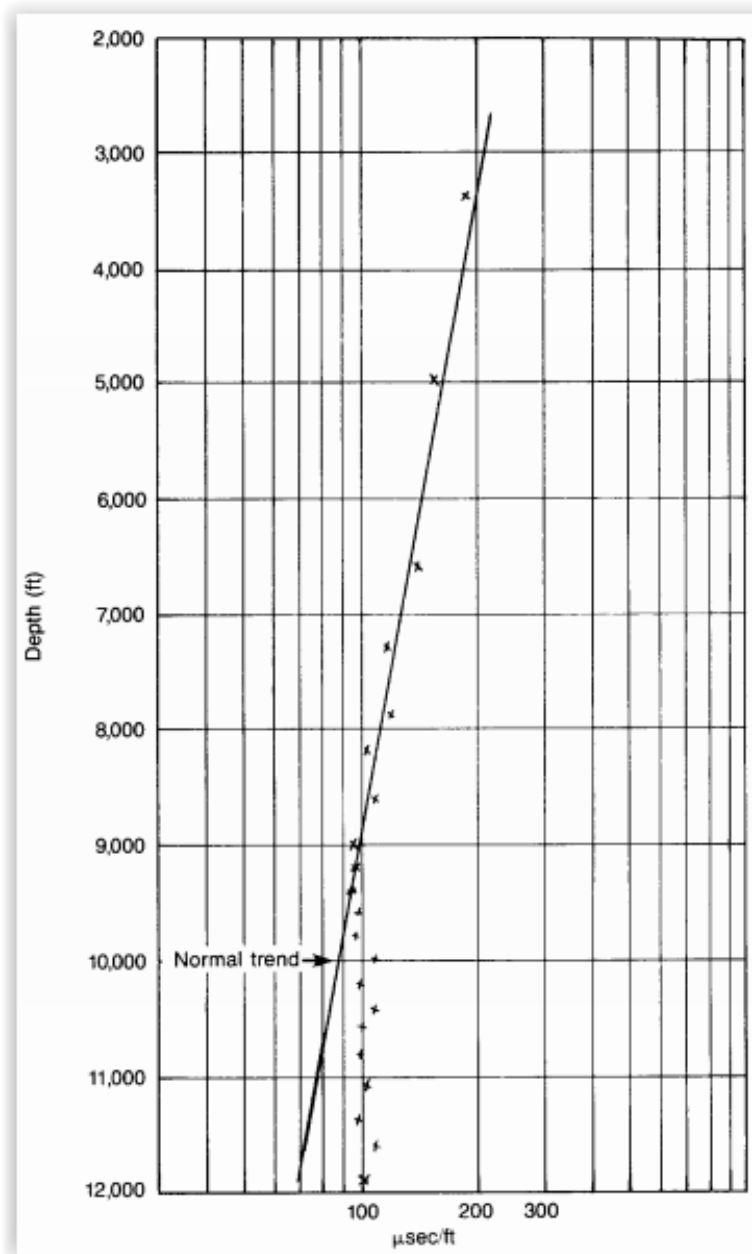


Σχήμα 3.5: Μεταβολή της πυκνότητας με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάτων πιέσεων (Σταματάκη, 2003)

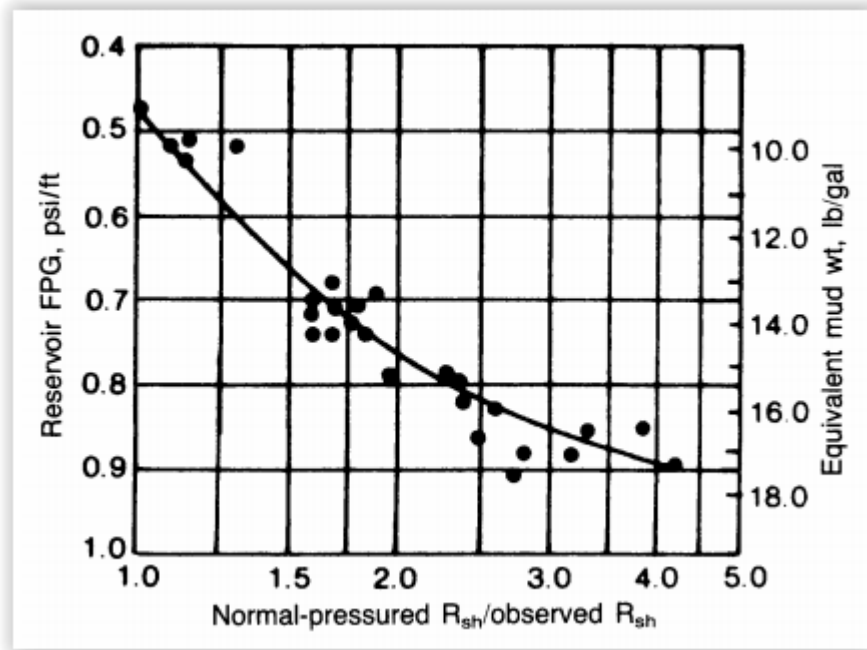
Ο χρόνος διάδοσης των ακουστικών κυμάτων μειώνεται κανονικά με το βάθος, ενώ αυξάνει στην περίπτωση μετάβασης σε ζώνες ανωμάτων πιέσεων (σχήμα 3.6).

Οι Hottman και Johnson ανέπτυξαν μια εμπειρική μεθοδολογία ανάλυσης των δεδομένων και εκτίμησης, μέσω αυτών, των πιέσεων των σχηματισμών. Αξιοποίησαν τις τιμές αυτές που οι παράμετροι θα έπρεπε να είχαν υπό κανονικές συνθήκες (normal) σε σχέση με τις μετρούμενες – παρατηρούμενες (observed) τιμές και τις συσχέτισαν με ανηγμένες εκφράσεις υδροστατικής πίεσης (βαθμίδα πίεσης σε psi/ft) που διαμορφώνονται στα βάθη ενδιαφέροντος, ή, κατ' αναλογία, με την ισοδύναμη πυκνότητα που θα πρέπει να έχει το ρευστό διάτρησης (equivalent mud weight) για να διατρυθούν οι σχηματισμοί αυτοί στα βάθη που βρίσκονται, ώστε να εξισορροπούνται οι

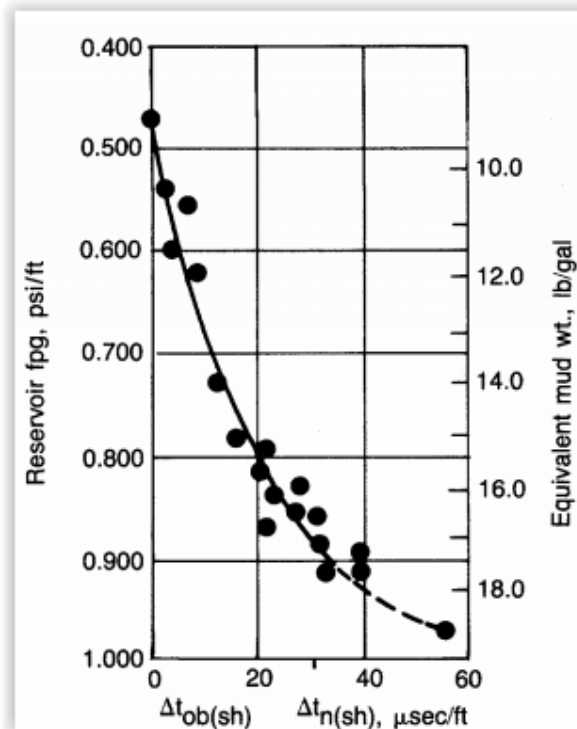
πιέσεις. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.7 και 3.8 (Σταματάκη, 2003).



Σχήμα 3.6: Μεταβολή του τμηματικού χρόνου διάδοσης ακουστικών κυμάτων με το βάθος σε ζώνες κανονικών και ανωμάτων πιέσεων (Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 3.7: Εμπειρική συσχέτιση της ανηγμένης πίεσης σχηματισμών με το λόγο κανονικής προς παρατηρούμενη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Hottman και Johnson) (Σταματάκη, 2003)

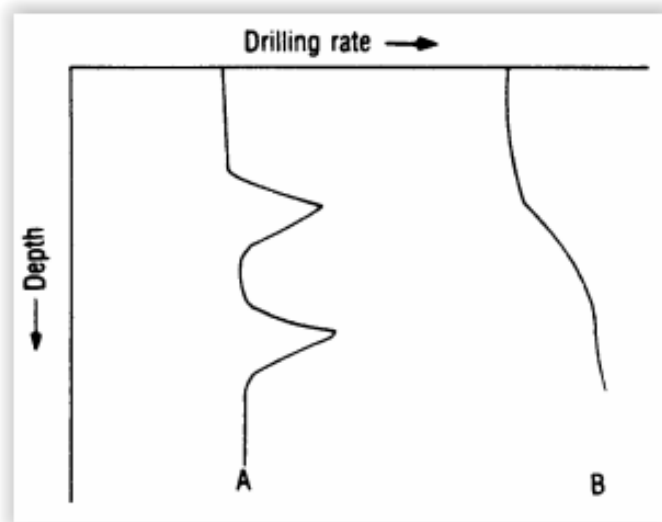


Σχήμα 3.8: Εμπειρική συσχέτιση της ανηγμένης πίεσης σχηματισμών με τη διαφορά παρατηρούμενης και κανονικής τιμής τμηματικού χρόνου διάδοσης ακουστικών κυμάτων (Hottman και Johnson) (Σταματάκη, 2003)

3.2.1.2 Ανάλυση και Επεξεργασία Δεδομένων επί τόπου Διάτρησης

Το έμπειρο τεχνικό προσωπικό πρέπει και μπορεί να αξιολογεί την «απόκριση» της γεώτρησης κατά τη διάρκεια της όρυξης. Δεν είναι τυχαίο αυτό που συνήθως λέγεται, ότι η γεώτρηση «ομιλεί» μέσω των τεχνικών παραμέτρων της και ιδιαίτερα μέσω της ταχύτητας διάτρησης. Απλά πρέπει να διασφαλίζεται η «καθαρότητα της γλώσσας» με την εξασφάλιση αποτελεσματικού και πλήρη καθαρισμού του μετώπου της διάτρησης από τα θρύμματα.

Η ταχύτητα διάτρησης επηρεάζεται από τη λιθολογία τις τεχνικές παραμέτρους της διάτρησης (βάρος επί του κοπτικού, ταχύτητα περιστροφής, χαρακτηριστικές ιδιότητες ρευστού διάτρησης) και τις αλλαγές στις πιέσεις των διατρυόμενων σχηματισμών. Εάν θεωρήσουμε ότι οι παράμετροι διάτρησης παραμένουν σταθεροί, τότε οι μεταβολές στην προχώρηση σχετίζονται με τη λιθολογία και τις πιέσεις. Ξαφνικές και έντονες αλλαγές στην ταχύτητα διάτρησης (σχήμα 3.9, A) υποδηλώνουν αλλαγές στη λιθολογία, γεγονός το οποίο μπορεί να επιβεβαιώνεται και υπό την ανάλυση των θρυμμάτων που ανέρχονται στην επιφάνεια. Σταδιακές αλλαγές (σχήμα 3.9, B) φανερώνουν γενικώς μεταβολές στις πιέσεις των σχηματισμών.



Σχήμα 3.9: Μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης λόγω αλλαγής λιθολογίας (A) ή αλλαγής της πίεσης των σχηματισμών (B) (Σταματάκη, 2003)

Το θέμα που απασχολεί είναι η δυνατότητα προσδιορισμού των πιέσεων των σχηματισμών σαν αποτέλεσμα της παρατηρούμενης μεταβολής της ταχύτητας διάτρησης. Είναι γεγονός ότι ο μηχανικός χρησιμοποιεί τις αλλαγές αυτές ως ενδείξεις

και οι εκτιμήσεις του είναι περισσότερο ποιοτικές. Θα πρέπει, όμως, ταυτόχρονα να συνεκτιμά και άλλα στοιχεία καθώς και να αξιοποιεί την εμπειρία του για να είναι σε θέση να δώσει θετικές απαντήσεις.

Οι Garnier και Lingen έδειξαν θεωρητικά ότι η ταχύτητα διάτρησης επηρεάζεται από τη διαφορά μεταξύ της πίεσης που ασκεί το ρευστό διάτρησης και της πίεσης του σχηματισμού στο βάθος που εξετάζεται. Οι Benit και Vindrine έδειξαν, με επί τόπου δοκιμές ότι διαφορές στις προαναφερόμενες πιέσεις από 0-500 psi έχουν σημαντική επίδραση στην προχώρηση. Οι Jordan και Shirley ανέπτυξαν ένα χρήσιμο μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της ταχύτητας διάτρησης, γνωστό ως μοντέλο «εκθέτη d», σύμφωνα με το οποίο ισχύει:

$$R = 60N \left(\frac{12W}{10^3 D_b} \right)^d \quad (3.1)$$

Όπου,

R: η ταχύτητα διάτρησης, ft/hr,

N: η ταχύτητα περιστροφής, rpm – στροφές/min,

W: το βάρος επί του κοπτικού, lb/1000,

D_b: η διάμετρος του κοπτικού, in,

d: ο εκθέτης d.

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει αλλαγή στην ταχύτητα περιστροφής, στο βάρος επί του κοπτικού και στη λιθολογία, ο εκθέτης d μεταβάλλεται μόνο με τη μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης, εάν δεν αλλάζει η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης. Η λύση της σχέσης 3.1 ως προς τον εκθέτη d, είναι:

$$d = \frac{\log\left(\frac{R}{60N}\right)}{\log\left(\frac{12W}{10^3 D_b}\right)} \quad (3.2)$$

Η γραφική απόδοση του εκθέτη d ως προς το βάθος δίδει διαγράμματα ανάλογα με αυτά των διαγραφιών, όπου παρουσιάζεται σοβαρή παρέκκλιση από τις κανονικές τιμές του όταν μεταβαίνουμε σε ζώνες υψηλών πιέσεων, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει αλλαγή στην πυκνότητα της χρησιμοποιούμενης λάσπης διάτρησης. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά μεταξύ της πίεσης που ασκεί το ρευστό διάτρησης και της πίεσης του σχηματισμού, στο βάθος που εξετάζεται, μειώνεται, λόγω της αύξησης της

πίεσης του σχηματισμού. Επομένως, η παρέκκλιση του εκθέτη d από τις κανονικές τιμές μπορεί να οφείλεται είτε στην αύξηση της πίεσης του σχηματισμού, με σταθερή πυκνότητα λάσπης, είτε στην αύξηση της πυκνότητας της λάσπης, χωρίς ανώμαλη μεταβολή της βαθμίδας πίεσης των σχηματισμών. Και στις δύο περιπτώσεις η διαφορά μεταξύ των πιέσεων μειώνεται.

Επειδή οι μεταβολές στην πυκνότητα της λάσπης μπορεί να καλύπτουν τις ανώμαλες μεταβολές της πίεσης των σχηματισμών, οι Rehm και McClendon ανέπτυξαν μία σχέση εξομάλυνσης (διόρθωσης) των τιμών του εκθέτη d , με ένα συντελεστή που αντιστοιχεί στο λόγο της πυκνότητας της λάσπης (ρ_n) που ισοδυναμεί με την κανονική πίεση των σχηματισμών στην περιοχή ενδιαφέροντος, προς την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης (ρ) που έχει χρησιμοποιηθεί σε κάθε βάθος ενδιαφέροντος:

$$d_{mod} = d \frac{\rho_n}{\rho} \quad (3.3)$$

Όπου,

d_{mod} : ο διορθωμένος εκθέτης,

d : ο εκθέτης που έχει υπολογιστεί από τη σχέση 3.2,

ρ_n : η ισοδύναμη πυκνότητα που αντιστοιχεί στην κανονική βαθμίδα πίεσης των σχηματισμών της περιοχής, lb/gal,

ρ : η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης lb/gal.

Θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από μία τιμή κανονικής πίεσης που αντιστοιχεί στην υδροστατική πίεση που ασκεί στήλη νερού (καθαρού ή αλμυρού) στο βάθος που βρίσκεται ο κάθε σχηματισμός. Στην περίπτωση του καθαρού νερού η πυκνότητά του λαμβάνεται ως 8,35 lb/gal (1 gr/cm³) (αντιστοιχεί σε βαθμίδα πίεσης 0,433 psi/ft), ενώ στην περίπτωση του αλμυρού νερού η πυκνότητά του λαμβάνεται ίση με 8,95 lb/gal (1,073 gr/cm³) (αντιστοιχεί σε βαθμίδα πίεσης 0,465 psi/ft). Συνήθως θεωρείται εκείνη του αλμυρού νερού.

Ο Zamora σε πρόσφατη μελέτη του δίδει μια εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό της πίεσης των σχηματισμών από γεωτρητικά δεδομένα εκφρασμένα μέσα από τον υπολογισμό του εκθέτη d . Οι τιμές του εκθέτη d πρώτα εξομαλύνονται (εξίσωση 3.3) και, στη συνέχεια, αναπαρίστανται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα κατά

τρόπο όμοιο με αυτόν που έχει αναφερθεί για τις διαγραφίες. Η τιμή του εκθέτη d_{mod} που προκύπτει από την ευθεία των κανονικών τιμών (d_{mod-n}) στο βάθος ενδιαφέροντος και η τιμή του εκθέτη d_{mod} που έχει υπολογιστεί στο αντίστοιχο βάθος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της πίεσης του σχηματισμού στο βάθος ενδιαφέροντος μέσω της σχέσης:

$$P_f = normal P_f \frac{d_{mod-n}}{d_{mod}} \quad (3.4)$$

Όπου,

d_{mod} : ο διορθωμένος εκθέτης,

P_f : η ζητούμενη βαθμίδα πίεσης του σχηματισμού, psi/ft,

normal P_f : η κανονική βαθμίδα πίεσης της περιοχής, psi/ft,

d_{mod-n} : ο διορθωμένος εκθέτης που προκύπτει από την κανονική τάση που εμφανίζουν οι ζώνες κανονικής συμπίεσης.

3.3 Ρωγμάτωση του Σχηματισμού

Στο σχεδιασμό των γεωτρήσεων απαιτείται η γνώση της τάσης υπό την οποία αρχίζει η ρωγμάτωση του σχηματισμού. Εάν, για παράδειγμα, η πίεση που ασκεί το χρησιμοποιούμενο ρευστό διάτρησης είναι μεγαλύτερη από την τάση ρωγμάτωσης, τότε ο σχηματισμός μπορεί να ρωγματωθεί ανεξέλεγκτα, με επακόλουθο την απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού και την απώλεια ελέγχου του πηγαδιού. Επομένως, το πρόβλημα δεν είναι απλά, όπως θα έλεγε κάποιος, η χρήση ρευστού διάτρησης με μεγάλη πυκνότητα έτσι ώστε να ελέγχονται οι πιέσεις των σχηματισμών, αλλά η ταυτόχρονη συνεκτίμηση της αλληλεπίδρασης ρευστού διάτρησης, πίεσης σχηματισμού και αντοχής του σχηματισμού. Εάν οι πιέσεις των σχηματισμών, που πρόκειται να διατρυθούν σε κάποιο τμήμα της γεώτρησης, επιβάλλουν τη χρήση ρευστού διάτρησης αυξημένης πυκνότητας για την αντιστάθμιση των πιέσεών τους, ενώ ταυτόχρονα οι σχηματισμοί που έχουν ήδη διατρυθεί δεν αντέχουν την πίεση που θα ασκεί η λάσπη αυτή στα βάθη που βρίσκονται, τότε είναι αναγκαία η σωλήνωση του διατρυθέντος τμήματος και η συνέχιση της όρυξης με νέα λάσπη διαφορετικών ιδιοτήτων. Επομένως, ο σχεδιασμός της θέσης κάθε σωλήνωσης διέπεται από τη γνώση τόσο της αντοχής των υπό διάτρηση σχηματισμών, όσο και από τη γνώση της πίεσης των πόρων.

Η ανηγμένη έκφραση της τάσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού (συνολική επί τόπου τάση/βάθος), γνωστή και ως βαθμίδα ρωγμάτωσης (fracture gradient - FG), απετέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνητών σε μια προσπάθεια εκτίμησης της παραμέτρου αυτής. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν έμμεσες και άμεσες μέθοδοι. Οι μεν πρώτες βασίζονται σε εμπειρικές μαθηματικές εκφράσεις, οι δε άλλες σε επί τόπου δοκιμές. Εδώ θα αναφερθούν εκείνες που εφαρμόζονται περισσότερο (Σταματάκη, 2003).

3.3.1 Έμμεσες Μέθοδοι

Η πρόσφατη δουλειά του Eaton καταλήγει σε μια σχετικά περισσότερο αξιόπιστη συσχέτιση μέσω της οποίας μπορεί να προσδιοριστεί η βαθμίδα ρωγμάτωσης (FG):

$$FG = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \left[\frac{\sigma_v - P_f}{D} \right] + \frac{P_f}{D} \quad (3.5)$$

Όπου,

FG: η βαθμίδα ρωγμάτωσης, psi/ft,

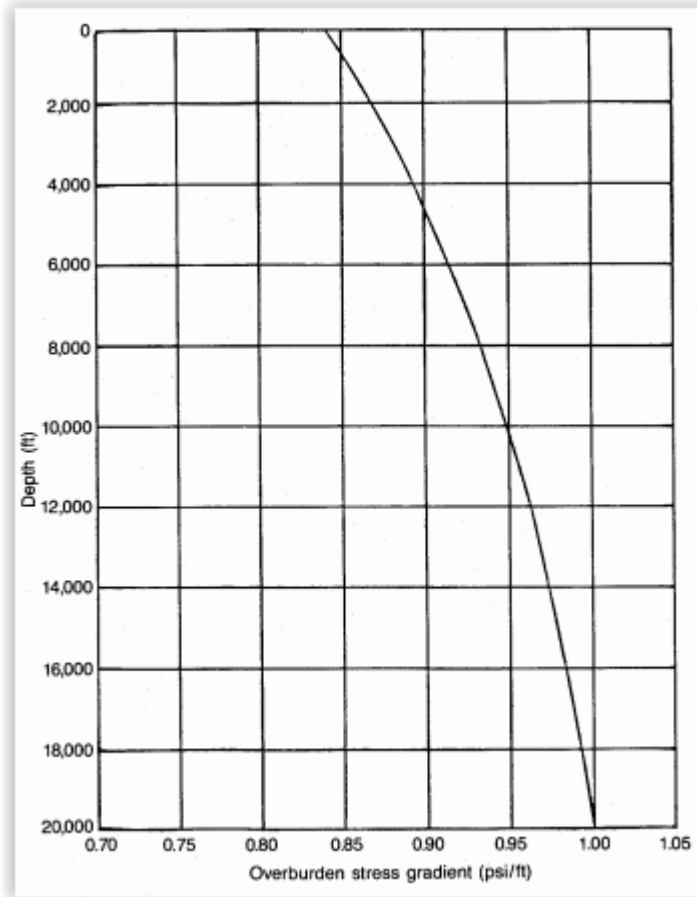
ν : ο λόγος Poisson, λόγος της πλευρικής παραμόρφωσης (διόγκωσης) προς την αξονική παραμόρφωση (βράχυνση) ενός πετρώματος υπό αξονική φόρτιση,

σ_v : η τάση υπερκειμένων, psi,

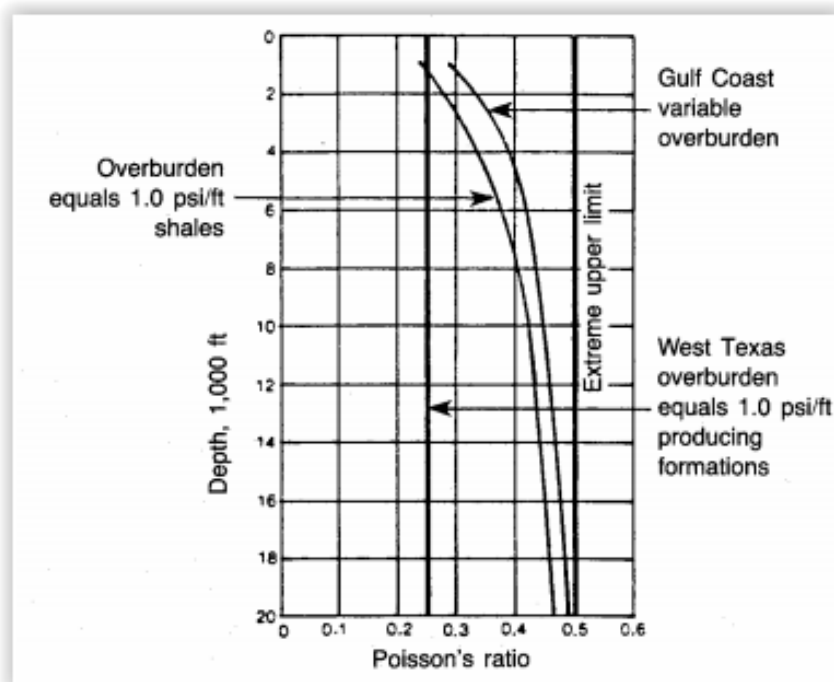
P_f : η πίεση του σχηματισμού, psi,

D: το βάθος του εξεταζόμενου σχηματισμού, ft.

Η μέθοδος του Eaton είναι μια έμμεση μέθοδος εκτίμησης της βαθμίδας ρωγμάτωσης. Η βαθμίδα πίεσης υπερκειμένων (σ_v/D) μπορεί, για λόγους απλοποίησης, να λαμβάνεται ίση με 1 psi/ft, αν και μεταβάλλεται ως προς το βάθος από 0,85-1 psi/ft (σχήμα 3.10). Ο λόγος Poisson κυμαίνεται, σε σχέση με το βάθος, από 0,25- 0,5, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Μια μέση τιμή της τάξης του 0,4 είναι αντιπροσωπευτική. Εάν υπάρχει απαίτηση για πολύ ακριβείς υπολογισμούς, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα που παρατίθενται.



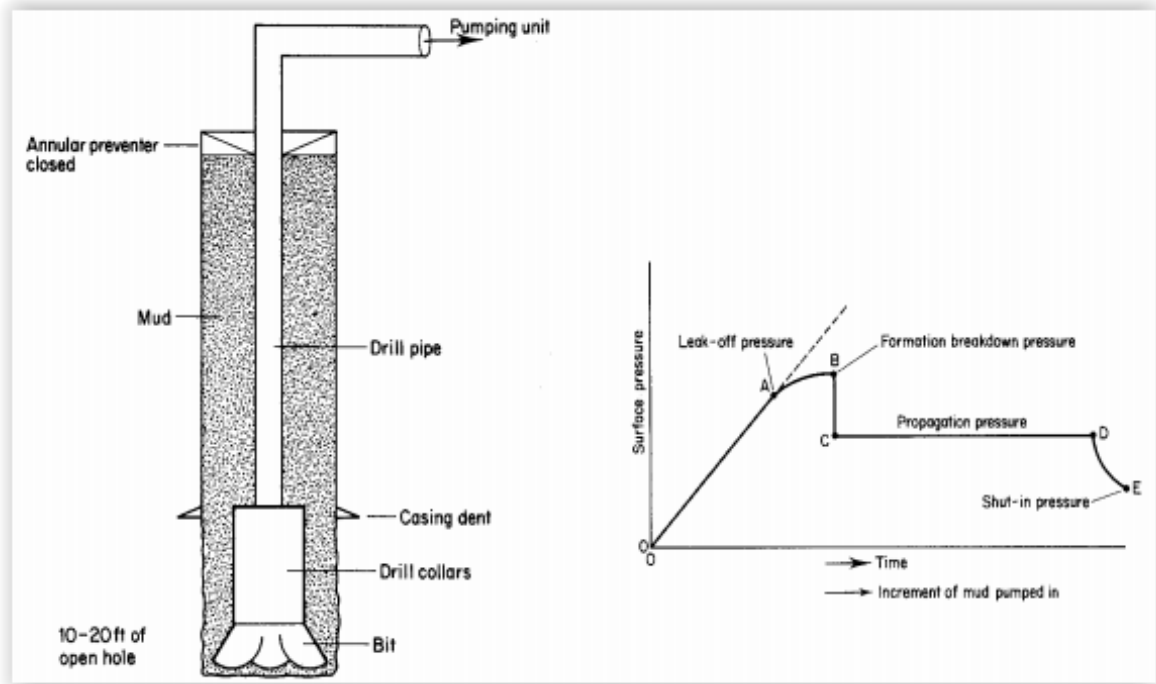
Σχήμα 3.10: Μεταβολή της βαθμίδας πίεσης υπερκειμένων με το βάθος (Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 3.11: Μεταβολή του λόγου Poisson με το βάθος (Σταματάκη, 2003)

3.3.2 Άμεσες Μέθοδοι (Δοκιμή Διαρροής – Leak off Test)

Στην άμεση αυτή μέθοδο χρησιμοποιείται το ρευστό διάτρησης, μέσω του οποίου κ ο τίθεται στην εφαρμοζείται, επί τόπου, πίεση στα τοιχώματα της γεώτρησης έως ότου διαπιστωθεί απώλεια κυκλοφορίας ή/και ρωγμάτωση του σχηματισμού. Η δοκιμή εκτελείται πάντα σε μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης (open hole), ανεξάρτητα της σωλήνωσης που έχει προηγηθεί (σχήμα 3.12). Για το σκοπό αυτό η γεώτρηση γεμίζει με ρευστό διάτρησης (λάσπη) και το σύστημα ασφάλειας (αποτροπέας εκτινάξεων και εκρήξεων-BOP) απομονώνεται και λείνει (απ μονώνεται ο δακτύλιος). Το σύστημα αντλιών στην επιφάνεια, εξοπλισμένο με μανόμετρα ακριβείας, χρησιμοποιείται για τη σταδιακή εισπίεση μικρών ποσοτήτων (όγκου) λάσπης μέσα στο πηγάδι. Με την έναρξη της δοκιμής η πίεση που καταγράφεται στην επιφάνεια σημειώνεται σε συνάρτηση με τον όγκο λάσπης που κάθε φορά εισπίζεται (διάγραμμα στο σχήμα 3.12). Έως το σημείο A (βλέπε διάγραμμα), ο σχηματισμός εξισορροπεί την εφαρμοζόμενη πίεση και το τμήμα OA εκφράζει την ελαστική συμπεριφορά του σχηματισμού. Για αύξηση του όγκου της λάσπης που αντιστοιχεί στο σημείο A κατά dV , εμφανίζεται διαρροή (leak) λάσπης (απώλεια κυκλοφορίας) προς τον σχηματισμό έως το σημείο B, όπου διαπιστώνεται απότομη μείωση της πίεσης που καταγράφεται στην επιφάνεια, η οποία και δηλώνει τη ρωγμάτωση του σχηματισμού. Συνέχιση της εισπίεσης λάσπης μετά το σημείο B απλά συντελεί στη διάδοση της ρωγμής (fracture propagation). Το σημείο E αντιστοιχεί στη στιγμιαία πίεση που καταγράφεται στην επιφάνεια, μόλις τερματιστεί η λειτουργία των αντλιών (πίεση στραγγαλισμού). Για τη μέτρηση της πίεσης διαρροής ή της πίεσης ρωγμάτωσης, προσδιορίζεται η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης και η πίεση των αντλιών και η οποία καταγράφεται στην επιφάνεια. Από τη στιγμή που προσδιοριστούν τα μεγέθη ενδιαφέροντος, η λάσπη που θα χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση του επόμενου τμήματος θα πρέπει να έχει πυκνότητα μικρότερη από αυτήν που υπολογίζεται ως βαθμίδα ρωγμάτωσης (ισοδύναμη πυκνότητα σε psi/ft) (Σταματάκη, 2003).



Σχήμα 3.12: Δοκιμή διαρροής (Σταματάκη, 2003)

3.4 Κριτήριο Θλιπτικής Αστοχίας (Collapse Criterion)

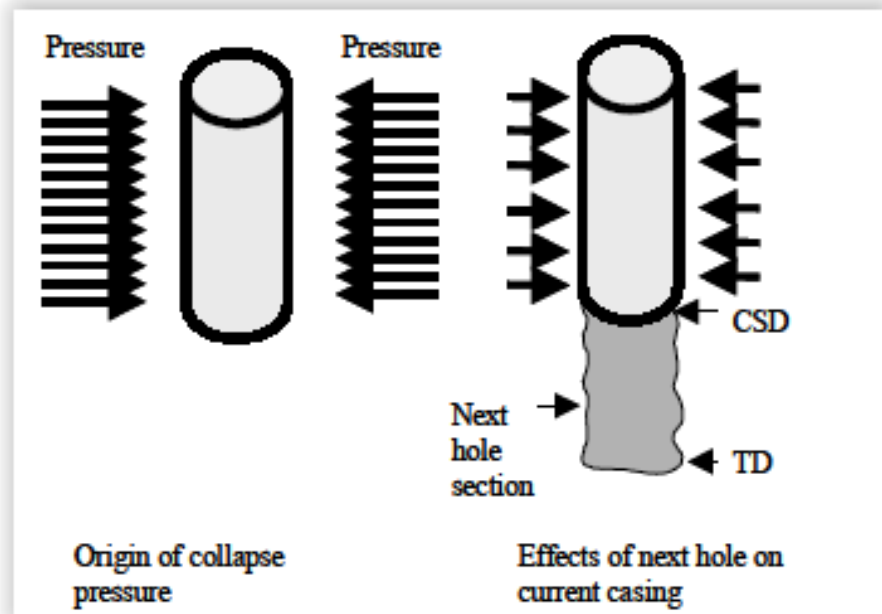
Η πίεση θλιπτικής αστοχίας (collapse pressure) προέρχεται από την πίεση που ασκείται στα εξωτερικά τοιχώματα της σωλήνωσης λόγω της στήλης της λάσπης που χρησιμοποιείται κατά τη διάτρηση. Επειδή, η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης είναι ανάλογη του βάθους, η πίεση θλιπτικής αστοχίας μεγιστοποιείται στον πυθμένα της γεώτρησης και μηδενίζεται στην επιφάνεια. Για πρακτικούς λόγους, η πίεση θλιπτικής αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Πίεση θλιπτικής αστοχίας} = \text{εξωτερική πίεση} - \text{εσωτερική πίεση} \quad (3.6)$$

Σήμερα, για το σχεδιασμό της σωλήνωσης με βάση το κριτήριο της θλιπτικής αστοχίας βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις, οι οποίες διαμορφώνουν το χειρίστο σενάριο και το οποίο βεβαίως δεν ανταποκρίνεται με αυτά που συμβαίνουν στην πράξη:

- Η σωλήνωση θεωρείται άδεια, εξαιτίας της απώλειας λάσπης διάτρησης, είτε στο βάθος έδρασης της (CSD), είτε στο τελικό βάθος (TD) του επόμενου διατρυόμενου τμήματος (σχήμα 3.13).
- Η εσωτερική πίεση της σωλήνωσης είναι μηδέν.

- Η σωλήνωση δεν έχει τσιμεντωθεί εξωτερικά, επομένως θεωρείται ότι πίσω από τη σωλήνωση υπάρχει λάσπης διάτρησης.
- Η εξωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση προέρχεται από το ρευστό διάτρησης, μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης.



Σχήμα 3.13: Κριτήριο θλιπτικής αστοχίας (Rabia, 1985)

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και τη σχέση (3.6), παρατηρείται ότι χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο η εξωτερική πίεση. Άρα,

$$\text{Πίεση θλιπτικής αστοχίας } (C) = 0,052 \times \rho \times CSD \dots \text{psi} \quad (3.7)$$

Όπου,

ρ : πυκνότητα λάσπης (ppg),

CSD: βάθος έδρασης σωλήνωσης (ft),

0,052: συντελεστής μετατροπής μονάδων, ppg ή lb/gal σε psi/ft.

Βέβαια, οι παραδοχές αυτές είναι ακραίες και διαμορφώνουν το χειρότερο σενάριο (Rabia, 1985).

3.4.1 Απώλεια Κυκλοφορίας Λάσπης (Lost Circulation)

Εάν οι υπολογισμοί για την πίεση θλιπτικής αστοχίας βασίστηκαν στην παραδοχή ότι η σωλήνωση είναι κενή από ρευστό διάτρησης, η εσωτερική πίεση ισούται με μηδέν. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν (Rabia, 1985):

- Η σωλήνωση εγκαταστάθηκε σε κενή γεώτρηση.
- Εμφανίζεται ολοκληρωτική απώλεια λάσπης σε έντονα καρστικοποιημένη περιοχή (thief zone).
- Εμφανίζεται ολοκληρωτική απώλεια ρευστού εξαιτίας απότομης εισροής αερίου (gas blowout) φαινόμενο που στη συνέχεια υποχώρησε.

Στην πράξη δεν επιτρέπεται καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις να εκδηλωθεί, με εξαίρεση την περίπτωση απώλειας λάσπης σε καρστικοποιημένους σχηματισμούς.

Στην περίπτωση μερικής απώλειας ρευστού, η στάθμη της λάσπης μέσα στη γεώτρηση μειώνεται. Στο ύψος ισορροπίας η υδροστατική πίεση της εναπομένουσας στήλης της λάσπης ισούται με την πίεση της ζώνης εισροής, με αποτέλεσμα να σταματά η περαιτέρω απώλεια του ρευστού. Εάν η πίεση του σχηματισμού στη ζώνη απώλειας (thief zone) (P_f) είναι άγνωστη, είναι σύνηθες να θεωρείται ότι μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κανονική βαθμίδα πίεσης (υδροστατική πίεση), δηλαδή, 0,465 psi/ft.

Θεωρώντας ότι η ζώνη απώλειας εντοπίζεται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (casing seat depth – CSD), κατά τη διάρκεια της απώλειας ρευστού η πίεση στη ζώνη αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$P_f = CSD \times 0.465 \quad (3.8)$$

$$P_{in} = L \times \rho_{ml} \times 0.052 \quad (3.9)$$

Όπου,

L: στάθμη της λάσπης μέσα στη σωλήνωση (ft),

P_{in} : εσωτερική πίεση στο κατώτερο άκρο της σωλήνωσης (psi),

ρ_{ml} : πυκνότητα λάσπης που χρησιμοποιήθηκε στην όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (ppg).

Συνδυάζοντας, τις σχέσεις (3.8) και (3.9) το ύψος της λάσπης μέσα στη σωλήνωση είναι:

$$L = \frac{P_f}{0.052 \times \rho_{ml}} \quad (3.10)$$

3.4.2 Υπολογισμός Θλιπτικής Αστοχίας Μεμονωμένων Τύπων Σωλήνωσης

Για κάθε τύπο σωλήνωσης αναφέρονται οι υπολογισμοί της πίεσης θλιπτικής αστοχίας, επισημαίνοντας ότι αυτοί οι υπολογισμοί ακολουθούν τις υποθέσεις που έχουν αναφερθεί στο μέρος 4.4 της παρούσας.

3.4.2.1 Σωλήνωση Επαφής (Conductor Pipe)

Η σωλήνωση επαφής εδράζεται συνήθως σε μικρά βάθη, τα οποία κυμαίνονται από 100-1500 ft. Για τον συγκεκριμένο τύπο σωλήνωσης θεωρείται ότι η εσωτερική πίεση είναι μηδέν.

Σε υπεράκτιες γεωτρητικές εργασίες η εξωτερική πίεση αποτελείται από δύο μέρη (Rabia, 1985): την υδροστατική πίεση της στήλης θαλασσινού νερού και την υδροστατική πίεση της στήλης της λάσπης.

Η πίεση θλιπτικής αστοχίας που ασκεί η στήλη του θαλασσινού νερού προσδιορίζεται από τη σχέση:

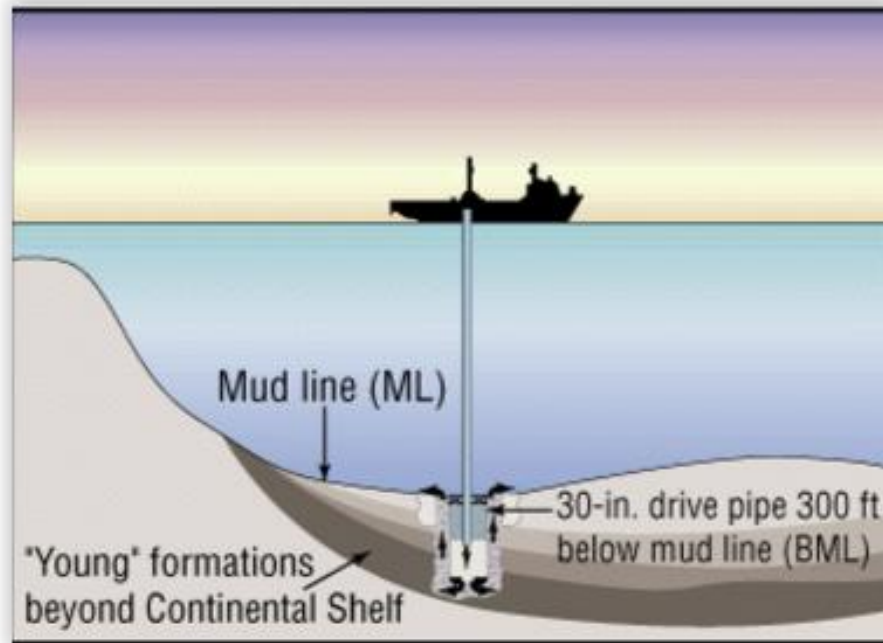
$$\text{Εξωτερική πίεση στήλης νερού} = 0,45 \text{ } \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times \text{βάθος θάλασσας} = C_1 \text{ } \text{psi} \quad (3.11)$$

Συνεπώς, η πίεση θλιπτικής αστοχίας στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης θα είναι:

$$\text{Πίεση θλιπτικής αστοχίας στο κατώτερο μέρος της σωλήνωσης} = C_1 + 0.052 \times \rho_m \times CSD \quad (3.12)$$

Όπου, ρ_m : η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης.

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται μία υπεράκτια γεώτρηση και το βάθος του πυθμένα (mudline) που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της σχέσης 3.11.



Σχήμα 3.14: Υπεράκτια γεώτρηση και σημείο Mud Line (Eoff & Griffith, 1998)

3.4.2.2 Επιφανειακή Σωλήνωση (Surface Casing)

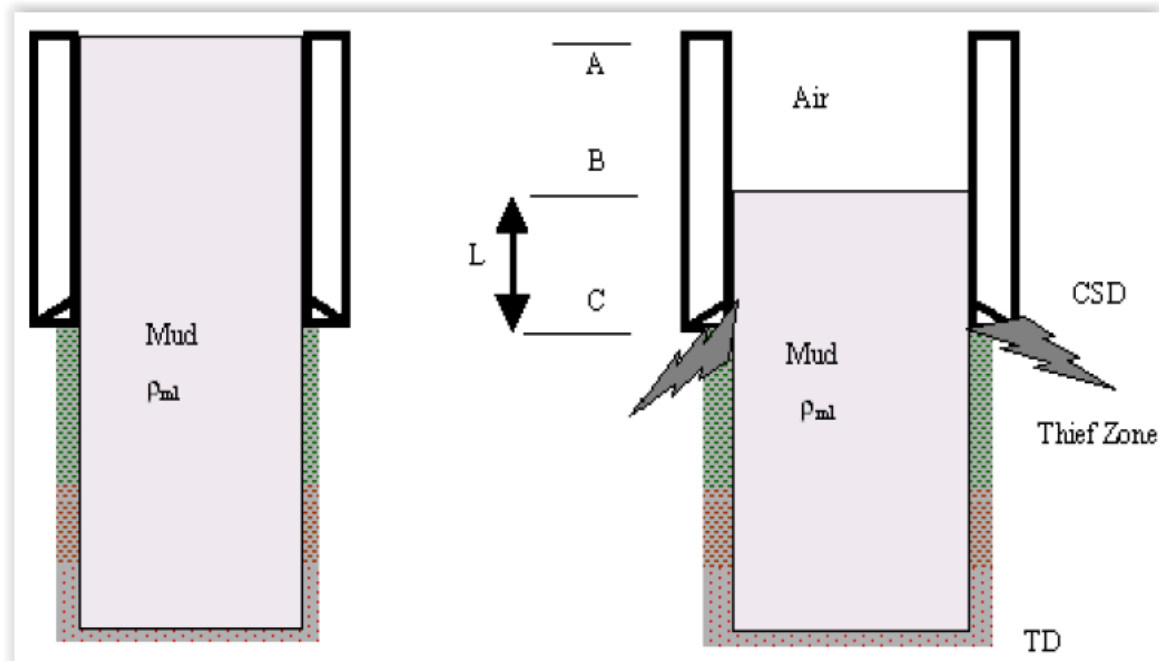
Εάν, η επιφανειακή σωλήνωση τοποθετείται σε μικρά βάθη τότε υπάρχει πιθανότητα απώλειας μεγάλου όγκου λάσπης, εάν συμβεί απώλεια ρευστού διάτρησης στο επόμενο τμήμα της γεώτρησης που δεν έχει σωληνωθεί. Μερικοί μηχανικοί θεωρούν ότι η επιφανειακή σωλήνωση είναι τελείως άδεια όταν σχεδιάζουν την αντοχή της σε θλίψη, ανεξάρτητα από το βάθος έδρασής της, ώστε να παρέχουν έναν επιπλέον συντελεστή ασφαλείας στο σχεδιασμό. Αντίθετα, άλλοι μηχανικοί θεωρούν ότι υπάρχει απώλεια ρευστού κατά 40% του όγκου της σωλήνωσης. Και οι δύο προσεγγίσεις στερούνται επιστημονικής βάσης, με συνέπεια να αυξάνεται το κόστος της σωλήνωσης διότι σχεδιάζεται με υπερβολικούς συντελεστές ασφαλείας (overdesign).

Για την αποφυγή υπερσχεδιασμού (overdesign) της επιφανειακής σωλήνωσης μπορεί να θεωρηθεί μερική απώλεια του ρευστού διάτρησης, οπότε η πίεση θλιπτικής αστοχίας προκύπτει με αφαίρεση της εσωτερικής πίεσης λόγω του μειωμένου ύψους της λάσπης εντός της σωλήνωσης από την εξωτερική πίεση. Η εσωτερική πίεση υπολογίζεται από τη σχέση (3.9) (Rabia, 1985).

$$P_{in} = L \times \rho_{ml} \times 0.052 \quad (3.13)$$

3.4.2.3 Ενδιάμεση ή Προστατευτική Σωλήνωση (Intermediate or Protection Casing)

Στην ενδιάμεση σωλήνωση η ολοκληρωτική απώλεια λάσπης είναι αδύνατη. Ο λόγος είναι ότι κατά την απώλεια ρευστού η στήλη λάσπης στο εσωτερικό της σωλήνωσης θα μειωθεί σε ύψος μέχρις ότου να βρεθεί σε ισορροπία με την πίεση του σχηματισμού στη ζώνη απώλειας. Έτσι, η πίεση θλιπτικής αστοχίας πρέπει να μελετηθεί σε τρία σημεία χρησιμοποιώντας τη γενική σχέση (3.6). Τα σημεία αυτά παρατηρούνται στο σχήμα 3.15 (Rabia, 1985).



Σχήμα 3.15: Μείωση ύψους στήλης λάσπης λόγω ύπαρξης ζώνης απωλειών (Rabia, 1985)

- Σημείο A: Στην επιφάνεια

$$C_1 = 0 \quad (3.14)$$

- Σημείο B: Σε βάθος που προσδιορίζεται από τη διαφορά του βάθους έδρασης της σωλήνωσης (CSD) και του ύψους της στήλης της λάσπης μέσα σε αυτή (L) (δηλ. CSD - L)

$$C_2 = 0.052 \times (CSD - L) \times p_m - 0 \rightarrow$$

$$C_2 = 0.052 \times (CSD - L) \times p_m \quad (3.15)$$

- Σημείο C: Στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (CSD)

$$C_3 = 0.052 \times CSD \times p_m - 0.052 \times L \times p_{mi} \quad (3.16)$$

Όπου,

p_{mi} : πυκνότητα λάσπης που χρησιμοποιήθηκε στην όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (p_{pg}).

3.4.2.4 Παραγωγική Σωλήνωση (Production Casing)

Στην παραγωγική σωλήνωση η ολοκληρωτική απώλεια λάσπης μπορεί να δικαιολογηθεί στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Εάν οι οπές παραγωγής της σωλήνωσης (perforations) είναι πιθανό να φράξουν κατά τη διάρκεια της παραγωγής, όπως π.χ. σε γεωτρήσεις φυσικού αερίου. Σε αυτή την περίπτωση η πίεση στην επιφάνεια μπορεί να αφεθεί να μηδενιστεί και, ως εκ τούτου, να εξισορροπεί ελάχιστα την πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης.
- Σε εφαρμογές τεχνητής ανέλκυσης (gas lift). Στις δραστηριότητες αυτές πραγματοποιείται εισπίεση αερίου, από την επιφάνεια, με σκοπό να ενισχυθεί η παραγωγή μειώνοντας την υδροστατική πίεση του υγρού σε σχέση με την πίεση του σχηματισμού. Αν η πίεση της γεώτρησης μηδενιστεί στην επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την ολοκληρωτική απώλεια της λάσπης.
- Σε περιπτώσεις διάτρησης με αέρα/αέριο (air/gas drilling) όλες οι σωληνώσεις πρέπει να σχεδιαστούν σε συνθήκες απώλειας ρευστού διάτρησης.
- Σε περίπτωση blowout.

Αν δεν συμβαίνει καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις η παραγωγική σωλήνωση σχεδιάζεται θεωρώντας μερική απώλεια λάσπης και εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.14), (3.15) και (3.16).

3.5 Κριτήριο Διάρρηξης (Burst Criterion)

Αυτή η καταπόνηση προκαλείται όταν η ενεργός εσωτερική πίεση (effective internal pressure) της γεώτρησης υπερβαίνει την αντοχή της σωλήνωσης σε διάρρηξη. Η ενεργός εσωτερική πίεση ισούται με τη διαφορά της εσωτερικής από την εξωτερική πίεση και υπολογίζεται από τη σχέση 3.17.

$$B = \text{εσωτερική πίεση} - \text{εξωτερική πίεση} \quad (3.17)$$

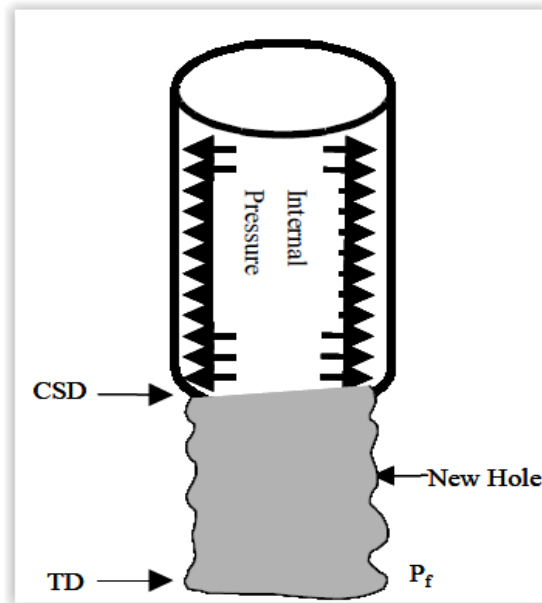
Στις γεωτρήσεις ανάπτυξης (development wells), όπου οι πιέσεις των σχηματισμών είναι γνωστές, η διαδικασία του υπολογισμού είναι σχετικά απλή. Στις ερευνητικές γεωτρήσεις, αντίθετα, οι δυσκολίες είναι πολλές όταν κάποιος επιχειρεί να υπολογίσει την πραγματική πίεση του σχηματισμού, διότι πρέπει να συμπεριλάβει:

- Το ακριβές βάθος της ζώνης που μελετάται (η πίεση των σχηματισμών μεταβάλλεται συναρτήσει του βάθους).
- Το είδος του ρευστού του σχηματισμού (νερό, πετρέλαιο ή αέριο).
- Το πορώδες (porosity) και την διαπερατότητα (permeability) του σχηματισμού.
- Τη θερμοκρασία.

Οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν την ένταση (σοβαρότητα) ενός Kick που μπορεί να συμβεί και τη δυνατότητα έγκαιρης αναγνώρισης του φαινομένου αυτού. Επομένως, κατά το σχεδιασμό μιας σωλήνωσης σε ερευνητικές γεωτρήσεις, αυτός πρέπει να γίνεται με μεγαλύτερο συντελεστή ασφάλειας λόγω της επισφάλειας στη γνώση των παραγόντων αυτών.

Η πίεση διάρρηξης ασκείται όταν ρευστό του σχηματισμού εισέλθει στη σωλήνωση κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (kick). Στο σχήμα 3.16 παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η πίεση του σχηματισμού είναι μέγιστη όταν η γεώτρηση φτάσει το τελικό βάθος (TD) ή το βάθος έδρασης της επόμενης στήλης σωλήνωσης. Για το κριτήριο της διάρρηξης λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω δυνητικές περιπτώσεις:

- Συμβαίνει απεριόριστη εισροή ρευστού εντός της γεώτρησης (unlimited kick).
- Συμβαίνει περιορισμένη εισροή ρευστού εντός της γεώτρησης (limited kick).



Σχήμα 3.16: Κριτήριο διάρρηξης (Rabia, 1985)

Στη δυνητική περίπτωση **της απεριόριστης εισροής** θεωρείται το χειρότερο σενάριο, δηλαδή, ότι το εισρέον ρευστό είναι αέριο και το οποίο εισερχόμενο στη γεώτρηση εκτοπίζει ολόκληρη τη στήλη της λάσπης, ενώ η γεώτρηση σφραγίζει (shut-in) τη στιγμή που η τελευταία ποσότητα λάσπης εκτοπίζεται από τη γεώτρηση. Είναι σαφές ότι η υπόθεση αυτή είναι απολύτως μη ρεαλιστική να συμβεί σήμερα, όπου η τεχνολογία επιτρέπει τον άμεσο εντοπισμό ακόμα και μικρών εισροών (της τάξης των 10 bbls).

Ωστόσο, υπάρχει μια περίπτωση κατά την οποία η ως άνω περίπτωση έχει πιθανότητα να συμβεί. Σε γεωτρήσεις παραγωγής αερίου, ο παραγωγικός σωλήνας (production tubing) είναι σχεδιασμένος για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ως να συνέβαινε μια συνεχής απεριόριστη εισροή αερίου. Αν το σύστημα λειτουργεί ομαλά, αυτό το φαινόμενο δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στη σωλήνωση η οποία βρίσκεται πίσω από τον παραγωγικό σωλήνα. Εάν, ωστόσο, υπάρξει διαρροή αερίου από τον παραγωγικό σωλήνα, τότε η σωλήνωση θα αντιμετωπίσει τις επιπτώσεις που δημιουργεί μια απεριόριστη εισροή ρευστού.

Έτσι, λοιπόν, βάσει του σχήματος 3.16 και υποθέτοντας ότι συμβαίνει εισροή αερίου σε πίεση σχηματισμού P_f και σε βάθος TD, και ολόκληρη η γεώτρηση γεμίζει με αέριο, τότε η εσωτερική πίεση στην κορυφή και στην έδραση της σωλήνωσης υπολογίζονται ως εξής:

- Εσωτερική πίεση στην επιφάνεια = $P_f - G \times TD$ (3.18)

- Εσωτερική πίεση στο σημείο έδρασης της σωλήνωσης = $P_f - G \times (TD - CSD)$
(3.19)

Η περίπτωση **της περιορισμένης εισροής ρευστού** ανταποκρίνεται περισσότερο στις ρεαλιστικές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν σε μια γεώτρηση.

Σύμφωνα με το σχήμα 3.17 παρατηρείται ότι όταν η εισροή του αερίου φτάσει στην έδραση της σωλήνωσης (casing shoe), ενώ η κυκλοφορία της λάσπης διεξάγεται σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers' για την ελεγχόμενη απομάκρυνση της εισροής (gas influx) και τον έλεγχο της γεώτρησης (well control), η πίεση, P_x , στο σημείο αυτό υπολογίζεται ως εξής:

$$P_x = P_f - P_g - (TD - H - CSD) \times \rho_m \quad (3.20)$$

Όπου,

P_f : η πίεση του σχηματισμού στο βάθος που συμβαίνει η εισροή, psi,

P_g : η πίεση της εισροής του αερίου = $H \times G$, psi,

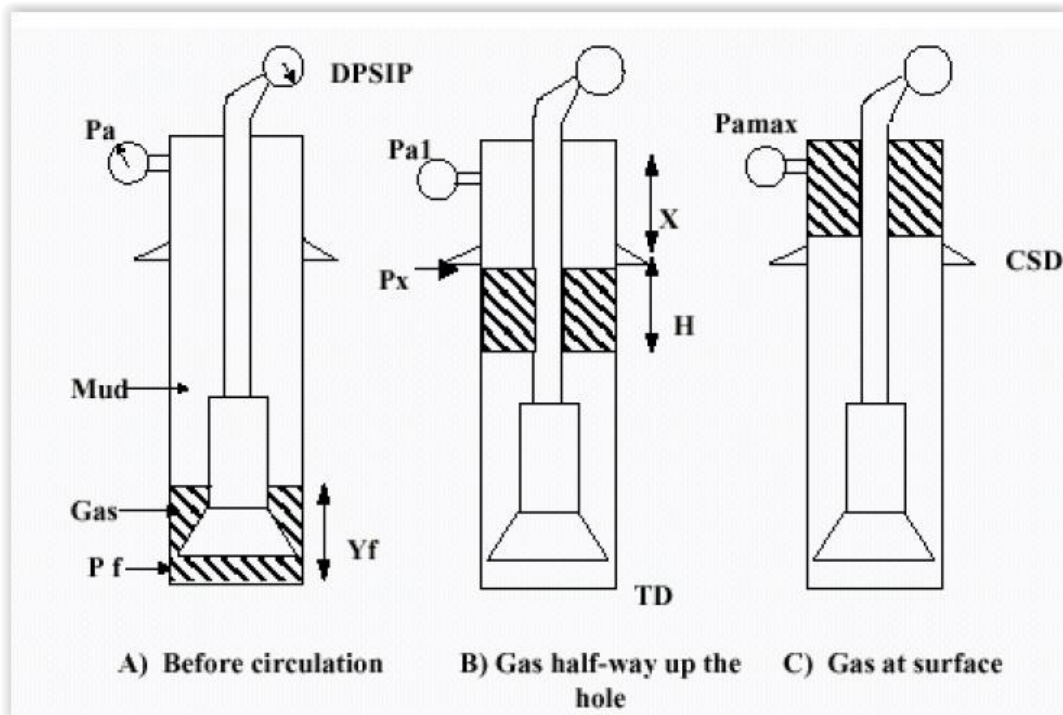
H : το ύψος της στήλης της εισροής του αερίου, ft,

G : η βαθμίδα πίεσης του αερίου = 0,05 έως 0,15 psi/ft,

TD : το βάθος διάτρησης, ft,

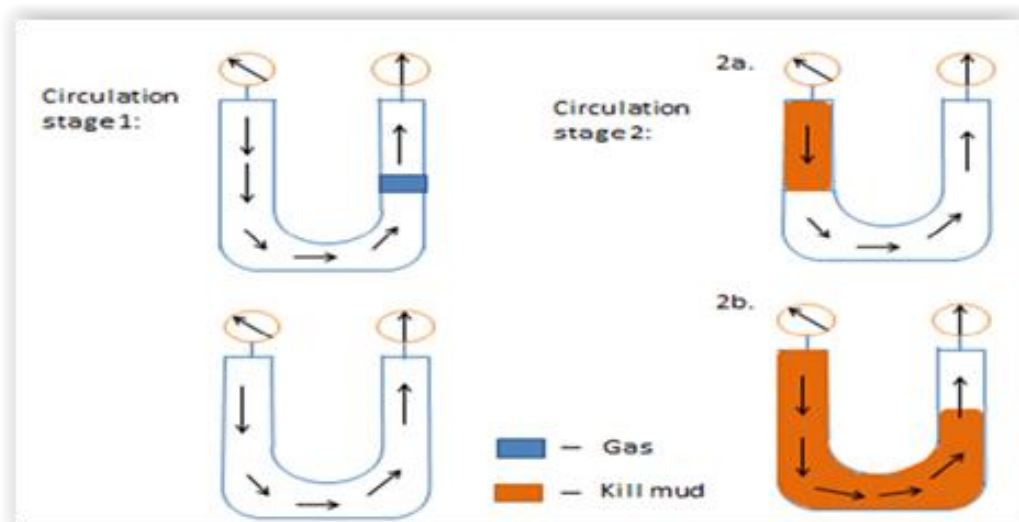
CSD : το βάθος έδρασης της σωλήνωσης, ft,

ρ_m : η πυκνότητα της λάσπης κυκλοφορίας της εισροής προς την επιφάνεια, ppg.



Σχήμα 3.17: Κυκλοφορία της λάσπης για την απομάκρυνση της εισροής αερίου (gas influx) σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers' για τον έλεγχο της γεώτρησης (well control) (Rabia, 1985)

Σημειώνεται πως σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers για τον έλεγχο της γεώτρησης, η εισροή αρχικά μεταφέρεται ελεγχόμενα προς την επιφάνεια με την αρχική λάσπη και στη συνέχεια λάσπη μεγαλύτερης πυκνότητας διοχετεύεται εντός της γεώτρησης ώστε να επιτευχθεί αντιστάθμιση της πίεσης του σχηματισμού (σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.18: Αντιστάθμιση της πίεσης του σχηματισμού με λάσπη μεγαλύτερης πυκνότητας, μετά την απομάκρυνση της εισροής αερίου (gas influx) σύμφωνα με τη μέθοδο Drillers' για τον έλεγχο της γεώτρησης

Μετασχηματίζοντας την σχέση 3.20, δηλαδή, λύνοντας ως προς H και αντικαθιστώντας την πίεση στην έδραση της σωλήνωσης με την βαθμίδα ρωγμάτωσης του σχηματισμού (FG) στο σημείο έδρασης της σωλήνωσης, προκύπτει η σχέση 3.21 (Rabia, 1985):

$$H = \frac{0,052 \times \rho_m (TD - CSD) + (FG \times CSD \times 0,052 - P_f)}{0,052 \times \rho_m - G} \quad (3.21)$$

Όπου,

FG: η βαθμίδα ρωγμάτωσης του σχηματισμού στην έδραση της σωλήνωσης, ppg,

P_f: η πίεση των πόρων του σχηματισμού, psi.

3.5.1 Υπολογισμός Εξωτερικής Πίεσης για τον Σχεδιασμό με Βάση το Κριτήριο της Διάρρηξης

Η εξωτερική πίεση είναι μια από τις δύσκολες παραμέτρους ως προς τον προσδιορισμό της. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της σωλήνωσης που σχεδιάζεται, τον τύπο της λάσπης (ρευστό διάτρησης), την πυκνότητα του τσιμέντου, το ύψος της στήλης του τσιμέντου και την πίεση του σχηματισμού στη γειτονία της σωλήνωσης.

Στην πράξη και ενώ η σωλήνωση τσιμεντώνεται είτε τοπικά, είτε μέχρι την επιφάνεια, ο υπολογισμός της εξωτερικής πίεσης δεν βασίζεται στην στήλη του τσιμέντου. Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους δεν χρησιμοποιείται η στήλη του τσιμέντου για την εξισορρόπηση της εσωτερικής πίεσης (back-up load) είναι οι παρακάτω:

- Είναι αδύνατο να εξασφαλιστεί συνεχής και ομοιόμορφη τσιμεντώση γύρω από τη σωλήνωση.
- Οποιαδήποτε παγίδευση λάσπης μέσα στο τσιμέντο δύναται να εκθέσει τη σωλήνωση στην αρχική υδροστατική πίεση του τσιμέντου (πριν την πήξη του).
- Το τσιμέντο έχει συνήθως μεγάλο πορώδες αλλά μικρή διαπερατότητα με αποτέλεσμα όταν είναι σε επαφή με το σχηματισμό, θεωρητικά μπορεί να μεταδώσει την πίεση του σχηματισμού στη σωλήνωση.

Ως εκ τούτων, για τον υπολογισμό της εξωτερικής πίεσης για το κριτήριο διάρρηξης από αρκετές εταιρίες πετρελαίου ακολουθούνται οι παρακάτω προσεγγίσεις:

1. Ανεξάρτητα αν η σωλήνωση έχει τσιμεντωθεί ή όχι, η εξωτερική πίεση ισοδυναμεί με την πίεση που ασκεί μία στήλη νερού κορεσμένη σε αλάτι:

$$\text{Εξωτερική πίεση} = 0,465 \text{ (psi/ft)} \times \text{CSD (ft)} \quad (3.22)$$

Η προσέγγιση αυτή είναι εύκολη και αξιόπιστη. Θεωρεί ότι οποιαδήποτε λάσπη και τσιμέντο πίσω από τη σωλήνωση υποβιβάζουν την πυκνότητά τους με την πάροδο του χρόνου σε μια τιμή που ισοδυναμεί με την πυκνότητα «λάσπης» κορεσμένης σε αλάτι, που ισούται με 0,465 psi/ft (πρακτικά ισοδυναμεί με την πυκνότητα νερού κορεσμένου σε αλάτι).

2. Εάν η σωλήνωση έχει τσιμεντωθεί σε όλο το μήκος της και η σωλήνωση μπορεί να έρθει σε επαφή με τον σχηματισμό μέσω προβληματικών τμημάτων της τσιμεντώσεως, τότε με την πάροδο του χρόνου και τη φθορά του τσιμέντου η σωλήνωση θα εκτεθεί στην πίεση του σχηματισμού που αντιστοιχεί στο βάθος όπου εμφανίζεται το πρόβλημα της σωστής τσιμεντώσεως:

$$\text{Εξωτερική πίεση} = \text{μέγιστη αναμενόμενη πίεση σχηματισμού}$$

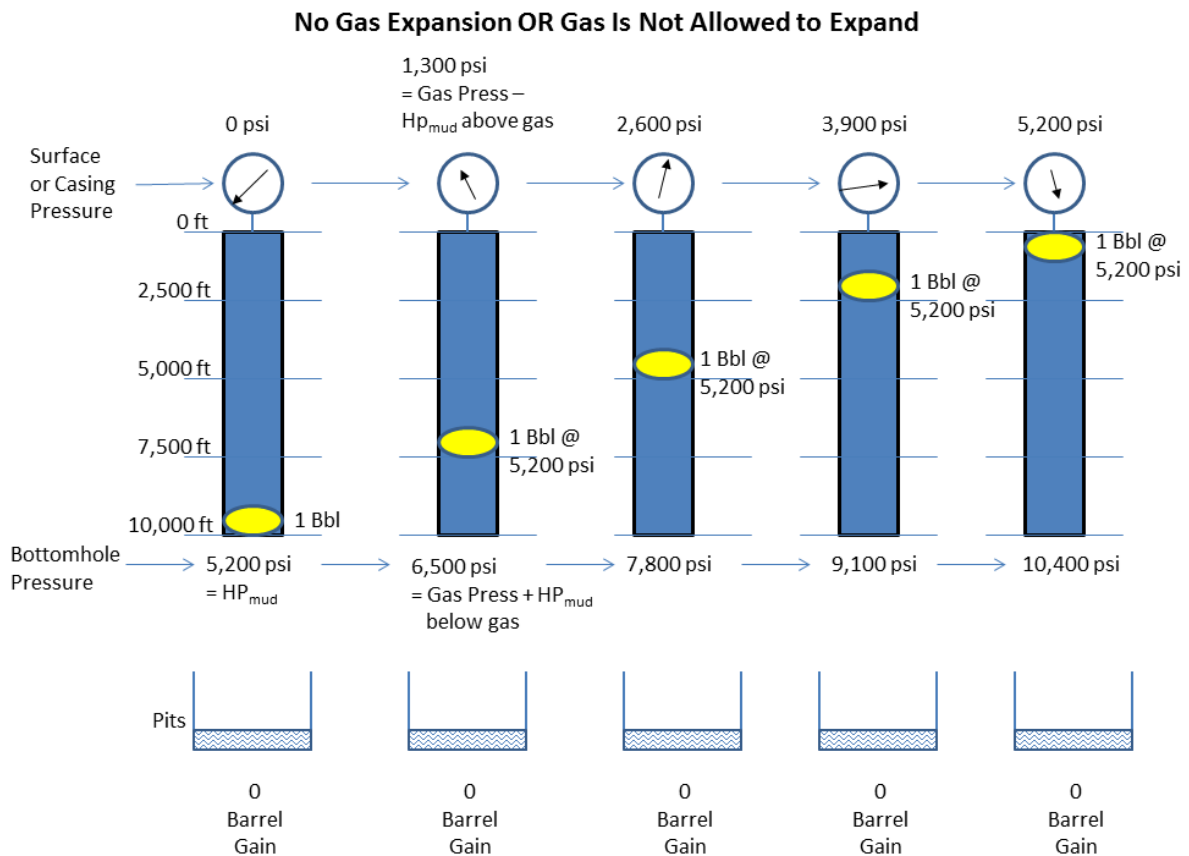
3. Εάν η σωλήνωση δεν έχει τσιμεντωθεί:
 - Στο ανοικτό τμήμα της γεώτρησης (open hole) θεωρείται στήλη λάσπης που εξισορροπεί τη χαμηλότερη πίεση πόρων του σχηματισμού στο τμήμα αυτό
 - Στο τμήμα αλληλεπικάλυψης των σωληνώσεων θεωρείται στήλη λάσπη μέχρι το ύψος που έχει τσιμεντωθεί η προηγούμενη σωλήνωση (TOC – Top of Cement) και για το υπόλοιπο τμήμα έως το βάθος έδρασης της υπό εξέταση σωλήνωσης, θεωρείται στήλη λάσπης που εξισορροπεί τη χαμηλότερη πίεση πόρων του σχηματισμού στο ανοικτό τμήμα της γεώτρησης.

Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται συνήθως σε ενδιάμεσες και παραγωγικές σωληνώσεις (Rabia, 1985).

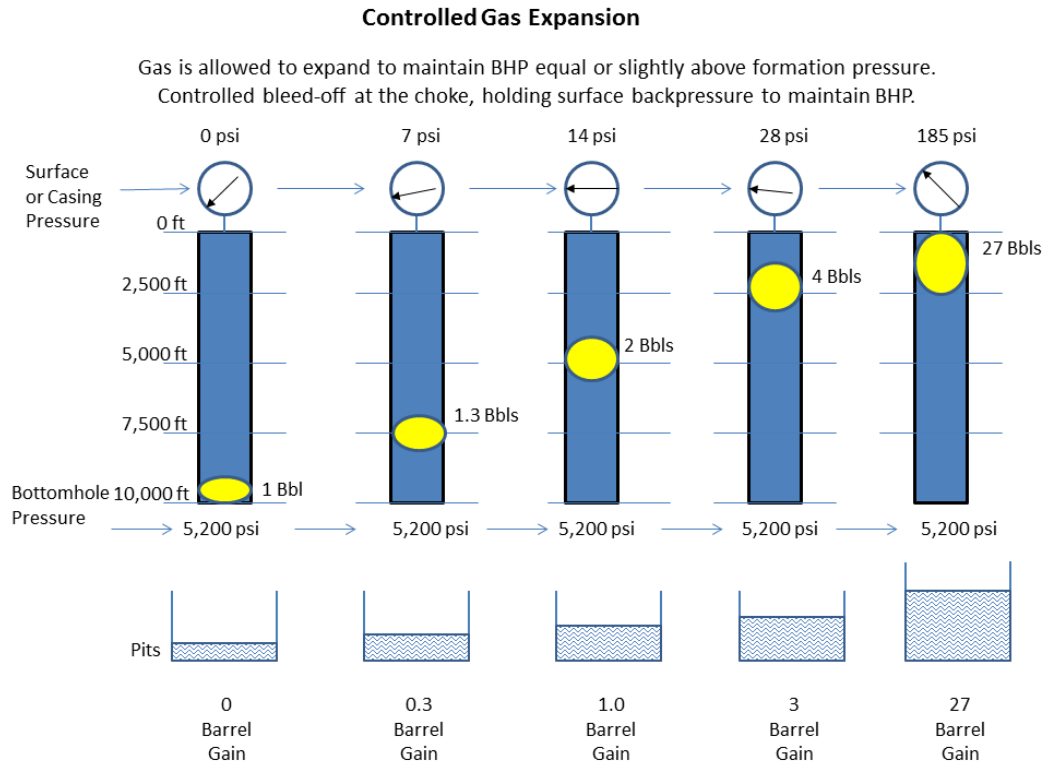
3.5.2 Υπολογισμός Πίεσης Διάρρηξης Μεμονωμένων Σωληνώσεων

Δεδομένου ότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κριτήριο της διάρρηξης λαμβάνει υπόψη το χειρότερο δυναμικό σενάριο, δηλαδή να επισυμβεί μια απεριόριστη εισροή αερίου εντός της γεώτρησης κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος αυτής (δηλαδή μετά την τοποθέτηση της υπό εξέταση σωλήνωσης), και λαμβάνοντας υπόψη τη

μεταβολή των πιέσεων εντός της γεώτρησης κατά την κυκλοφορία της εισροής προς την επιφάνεια, η μέγιστη εσωτερική πίεση στη σωλήνωση προκύπτει ότι η εισροή έχει φτάσει στην επιφάνεια (σχήματα 3.19 και 3.20), όπου βεβαίως εκεί η εξωτερική πίεση είναι μηδενική. Ως εκ τούτου, η πίεση διάρρηξης είναι μέγιστη στην επιφάνεια και ελάχιστη στην έδραση της σωλήνωσης (casing shoe). Βέβαια, στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι στην έδραση των παραγωγικών σωληνώσεων η πίεση διάρρηξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή της επιφάνειας σε περιπτώσεις που υπάρχει διαρροή αερίου από τον σωλήνα παραγωγής (Rabia, 1985).



Σχήμα 3.19: Μέγιστη εσωτερική πίεση στη σωλήνωση κατά την κυκλοφορία της εισροής αερίου προς την επιφάνεια (χωρίς εκτόνωση του εισρέοντος αερίου) (drillingHandbook.com)



Σχήμα 3.20: Μέγιστη εσωτερική πίεση στη σωλήνωση κατά την κυκλοφορία της εισροής αερίου προς την επιφάνεια (με ελεγχόμενη εκτόνωση του εισρέοντος αερίου) (drillingHandbook.com)

3.5.2.1 Σωλήνωση Επαφής (Conductor Pipe)

Το κριτήριο της πίεσης διάρρηξης δεν χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό της σωλήνωσης επαφής (Rabia, 1985).

3.5.2.2 Επιφανειακή και Ενδιάμεση Σωλήνωση (Surface and Intermediate Casing)

Πάντα με τη θεώρηση της απεριόριστης εισροής αερίου, οι υπολογισμοί για την πίεση διάρρηξης παρουσιάζονται παρακάτω:

Η εσωτερική πίεση P_i υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέγιστη πίεση του σχηματισμού στο επόμενο διατρυόμενο τμήμα θεωρώντας ότι η γεώτρηση είναι γεμάτη με αέριο (βλέπε σχήμα 3.16).

Πίεση διάρρηξης στην επιφάνεια ($B1$) = P_i – εξωτερική πίεση →

$$B1 = P_f - G \times TD \quad (3.23)$$

(σημειώνεται ότι η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι μηδέν)

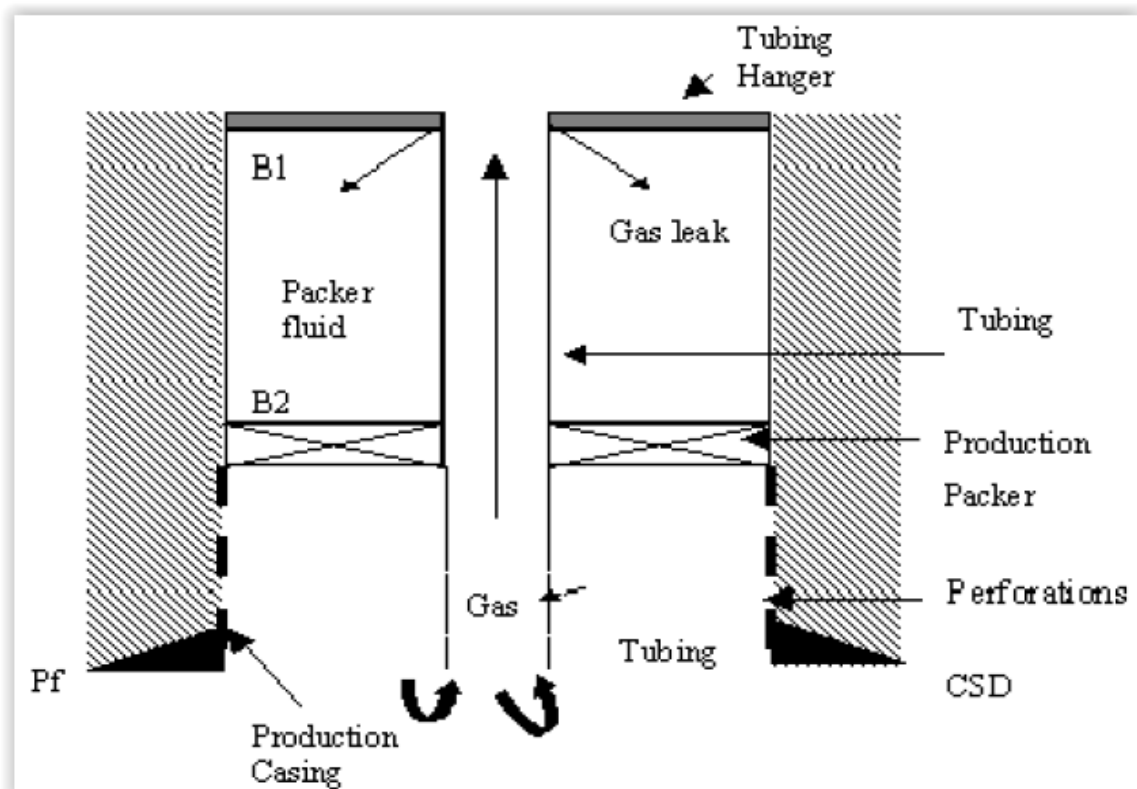
Πίεση διάρρηξης στο κατώτερο σημείο της σωλήνωσης ($B2$) = $P_i - 0,465 \times CSD$
(3.24)

(θεωρείται ότι η εξωτερική πίεση ισοδυναμεί με την πίεση που θα ασκούσε λάσπη που έχει υποβαθμιστεί σε νερό κορεσμένο σε αλάτι (salt-saturated water) με βαθμίδα πίεσης $0,465 \text{ psi/ft}$)

Για την περίπτωση της περιορισμένης εισροής αερίου (*limited gas kick*), χρησιμοποιείται το κατάλληλο μέγεθος εισροής, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, και εφαρμόζονται οι σχέσεις 3.23 και 3.24 (Rabia, 1985).

3.5.2.3 Παραγωγική Σωλήνωση (Production Casing)

Το χειρότερο σενάριο προκύπτει όταν υπάρχει διαρροή αερίου από την κορυφή του σωλήνα παραγωγής (production tubing) προς την σωλήνωση (casing). Η πίεση του αερίου θα μεταφερθεί μέσω του παρεμβύσματος ρευστών (packer fluid) από την επιφάνεια στην έδραση της σωλήνωσης (σχήμα 3.21) (Rabia, 1985).



Σχήμα 3.21: Σχεδιασμός παραγωγικής σωλήνωσης σε διάρρηξη (Rabia, 1985)

Οι πιέσεις διάρρηξης στην επιφάνεια και στην έδραση της σωλήνωσης B1 και B2 αντίστοιχα υπολογίζονται ως εξής:

$$B1 = P_f - G \times CSD$$

(ή η μέγιστη αναμενόμενη πίεση στην επιφάνεια – λαμβάνεται η μεγαλύτερη εκ των δύο τιμών)

$$B2 = B1 + 0.052 \times \rho_p \times CSD - CSD \times 0.465 \quad (3.25)$$

Όπου,

G: βαθμίδα πίεσης του αερίου, συνήθως 0,1 psi/ft,

P_f: πίεση του σχηματισμού στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, psi,

ρ_p: πυκνότητα ρευστού ολοκλήρωσης (completion fluid), ppg (το ρευστό που έχει απομείνει στη δακτυλιοειδή περιοχή μεταξύ σωλήνωσης και παραγωγικού σωλήνα πάνω από packer),

0,465: πυκνότητα του ρευστού εξωτερικά της σωλήνωσης που αντιπροσωπεύει την χειρότερη περίπτωση (psi/ft) – θεωρητικά νερό κορεσμένο σε αλάτι).

Τέλος, είναι ανάγκη να σημειωθεί ότι αν τοποθετηθεί παραγωγικό παρέμβυσμα (production packer) σε βάθος πάνω από την έδραση της σωλήνωσης, τότε στους παραπάνω υπολογισμούς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το βάθος αυτό αντί του βάθους στο οποίο εδράζεται η σωλήνωση (CSD). Η σωλήνωση κάτω από το παρέμβυσμα δεν υφίσταται πίεση διάρρηξης καθώς φέρει οπές (is perforated) (Rabia, 1985).

3.6 Συντελεστές Ασφαλείας και Σχεδίασης (Design and Safety Factors)

Η σωλήνωση ποτέ δεν σχεδιάζεται να ανταποκρίνεται σε τάσεις παραπλήσιες στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength) ή κοντά στο όριο ελαστικότητας (yield strength). Έτσι, λοιπόν, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής ασφαλείας στο σχεδιασμό με σκοπό να αποτρέψει πιθανή αστοχία. Η διαφορά μεταξύ συντελεστή σχεδιασμού και συντελεστή ασφαλείας προσδιορίζεται παρακάτω (Rabia, 1985).

3.6.1 Συντελεστής Ασφαλείας (Safety Factor)

Ο συντελεστής ασφαλείας βαθμονομείται με βάση την πλήρη αστοχία της σωλήνωσης.

$$\text{Συντελεστής ασφαλείας (SF)} = \frac{\text{φορτίο αστοχίας}}{\text{πραγματικό εφαρμοζόμενο φορτίο}} \quad (3.26)$$

Όταν το φορτίο αστοχίας ισούται με το πραγματικό εφαρμοζόμενο φορτίο ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τη μονάδα (SF=1), με αποτέλεσμα η αστοχία να είναι αναπόφευκτη. Αστοχίες παρουσιάζονται εάν το πραγματικό φορτίο είναι μεγαλύτερο του φορτίου αστοχίας, όπου στην περίπτωση αυτή SF<1. Για τους παραπάνω λόγους, οι συντελεστές ασφαλείας, έχουν τιμές πάντα μεγαλύτερες της μονάδας (SF>1). Επειδή, όμως, στο σχεδιασμό των σωληνώσεων δεν γνωρίζουμε ακριβώς ούτε το πραγματικό φορτίο ούτε το φορτίο αστοχίας, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές σχεδιασμού για να αξιολογηθεί η ακεραιότητα της σωλήνωσης (Rabia, 1985).

3.6.2 Συντελεστής Σχεδιασμού (Design Factor)

Ο συντελεστής σχεδιασμού βαθμονομείται βασιζόμενος στο ελάχιστο όριο ελαστικότητας (minimum yield strength) της σωλήνωσης.

Στην πετρελαϊκή βιομηχανία, για το σχεδιασμό εξοπλισμού σωληνωτού τύπου (tubulars) δεν χρησιμοποιούνται σκόπιμα οι συντελεστές σχεδιασμού, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δεν είναι γνωστά το πραγματικό φορτίο αστοχίας. Χρησιμοποιούνται περισσότερο οι συντελεστές σχεδιασμού και οι οποίοι βασίζονται στη σύγκριση του μέγιστου φορτίου λειτουργίας (maximum service load) που συσχετίζεται με το ελάχιστο όριο ελαστικότητας, όπως αυτό ορίζεται από το API. Υπενθυμίζεται ότι η σωλήνωση δεν αστοχεί στο ελάχιστο όριο ελαστικότητας και ότι η τιμή αυτή είναι μία μέση τιμή ορισμένων μετρήσεων που έγιναν στην εκάστοτε κατηγορία σωλήνωσης. Εύκολα, λοιπόν, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής σχεδιασμού παρέχει μία ευρύτερη οπτική από ό,τι ο συντελεστής ασφαλείας (Rabia, 1985).

$$\text{Συντελεστής σχεδιασμού (DF)} = \frac{\text{ελάχιστο όριο ελαστικότητας κατά API}}{\text{μέγιστο φορτίο λειτουργίας}} \quad (3.27)$$

Ο συντελεστής σχεδιασμού είναι συνήθως ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας (SF≥1). Ο συντελεστής σχεδιασμού σε διάρρηξη (DF-B) ισούται με:

$$DF - B = \frac{\text{αντοχή σε διάρρηξη (burst strength)}}{\text{πίεση διάρρηξης (B)}} \quad (3.28)$$

Αντίστοιχα, ο συντελεστής σχεδιασμού σε θλίψη (DF-C) ισούται με:

$$DF - C = \frac{\text{αντοχή σε θλίψη (collapse strength)}}{\text{πίεση θλίψης (C)}} \quad (3.29)$$

Οι συντελεστές σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται συνήθως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.6).

Πίνακας 3.6: Προτεινόμενοι συντελεστές σχεδιασμού (Drilling Engineering Handbook)

Συντελεστές σχεδιασμού	
Διάρρηξης (burst design factor)	1-1.33
Θλίψης (collapse design factor)	1-1.125
Εφελκυσμού (tension design factor)	1-2
Τριαξονικών τάσεων (triaxial design factor)	1.25

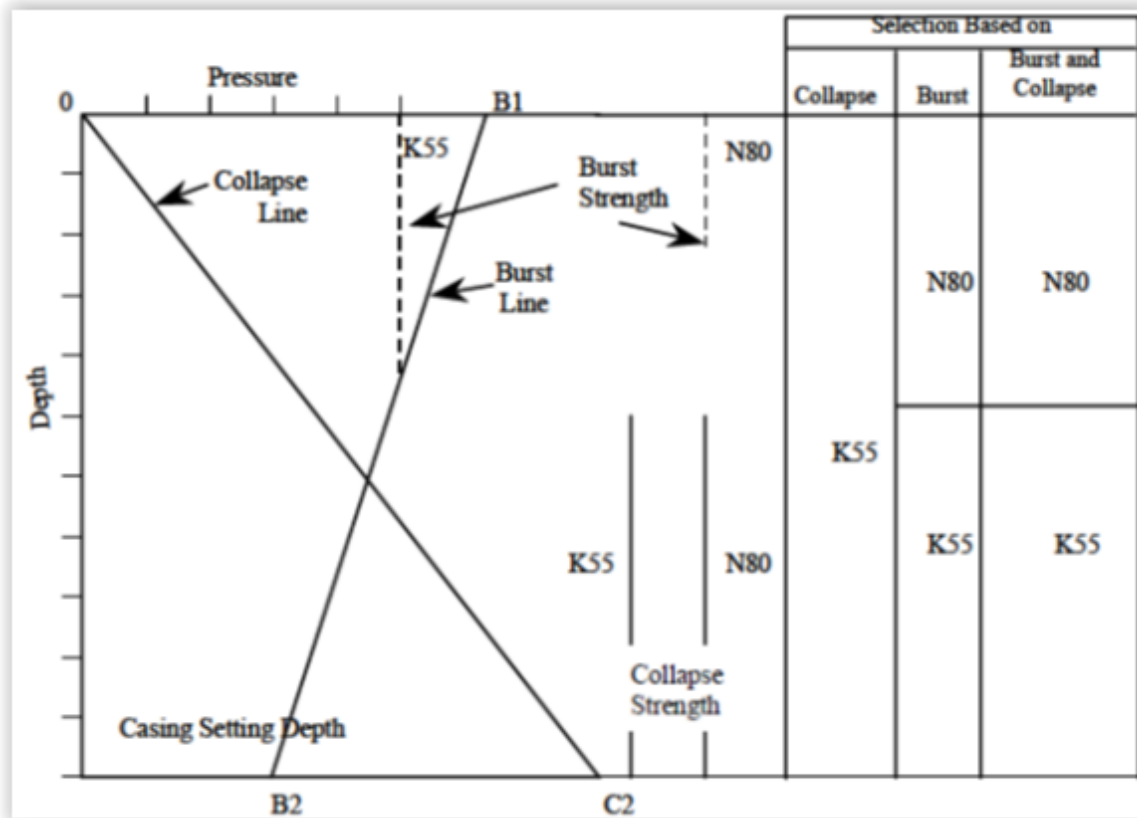
3.7 Επιλογή Κατηγορίας Σωλήνωσης με βάση το κριτήριο της Θλίψης και Διάρρηξης

Βάσει των υπολογισμών των κριτηρίων θλίψης και διάρρηξης μπορεί να γίνει η αρχική επιλογή κατηγορίας και ονομαστικού βάρους σωλήνωσης. Εάν είναι διαθέσιμη μόνο μια κατηγορία ή μόνο ένα ονομαστικό βάρος σωλήνωσης, τότε η επιλογή γίνεται εύκολα από τον πίνακα Π2 του Παραρτήματος. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλότερες τιμές φορτίων που υπολογίστηκαν βάσει των κριτηρίων θλίψης και διάρρηξης και δεδομένου των διαστάσεων που έχουν επιλεγεί για το εκάστοτε τμήμα της γεώτρησης, επιλέγεται η κατάλληλη κατηγορία (grade) και ονομαστικό βάρος σωλήνωσης (weight) ώστε να αντέχει στις παραπάνω πιέσεις. Αν οι συντελεστές σχεδιασμού για θλίψη και διάρρηξη λαμβάνουν αποδεκτές τιμές στη συνέχεια ακολουθεί ο έλεγχος των εφελκυστικών φορτίων (tension) πάνω στην επιλεγείσα σωλήνωση.

Είτε για γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, είτε όταν χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κατηγορίες και βάρη σωληνώσεων για την επιλογή κατάλληλης σωλήνωσης δύναται να εφαρμοστεί η γραφική μέθοδος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ως εξής:

1. Σχεδιάζεται το διάγραμμα πίεσης ως προς το βάθος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22, ξεκινώντας την κλίμακά τους από το μηδέν. Στο διάγραμμα σημειώνεται το βάθος έδρασης της σωλήνωσης (CSD).
2. Ευθεία θλίψης (collapse line): Τοποθετούμε το σημείο C_1 σε μηδενικό βάθος, ενώ το σημείο C_2 στο σημείο έδρασης της γεώτρησης. Σχεδιάζεται ευθεία γραμμή που διέρχεται από τα σημεία C_1 και C_2 . Ο υπολογισμός της θλιπτικής πίεσης στο σημείο C_2 γίνεται με χρήση της εξίσωσης 3.7.
3. Στην περίπτωση που υπάρχει μερική απώλεια ρευστού διάτρησης (partial lost circulation), σχεδιάζονται τρία σημεία θλίψης. Το C_1 τοποθετείται σε μηδενικό βάθος, το σημείο C_2 στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης αφαιρούμενο από τη στάθμη της λάσπης μέσα στη σωλήνωση (CSD-L) και το C_3 στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (CSD). Σχεδιάζονται δύο ευθείες που διέρχονται από τα σημεία αυτά.
4. Ευθεία διάρρηξης (burst line): Τοποθετείται σημείο B_1 σε μηδενικό βάθος και σημείο B_2 στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Σχεδιάζεται ευθεία που διέρχεται από τα σημεία B_1 και B_2 (σχήμα 3.22). Στις παραγωγικές σωληνώσεις η υψηλότερη πίεση παρουσιάζεται στο κατώτερο σημείο της σωλήνωσης (casing shoe). Ο υπολογισμός της πίεσης διάρρηξης στο σημείο B_1 γίνεται με τη χρήση της εξίσωσης 3.18 και στο σημείο B_2 με τη χρήση της εξίσωσης 3.19.
5. Τέλος, σχεδιάζεται η αντοχή σε θλίψη και διάρρηξη των διαθέσιμων σωληνώσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22, δύο κατηγορίες (N80 και K55) έχουν σχεδιαστεί.

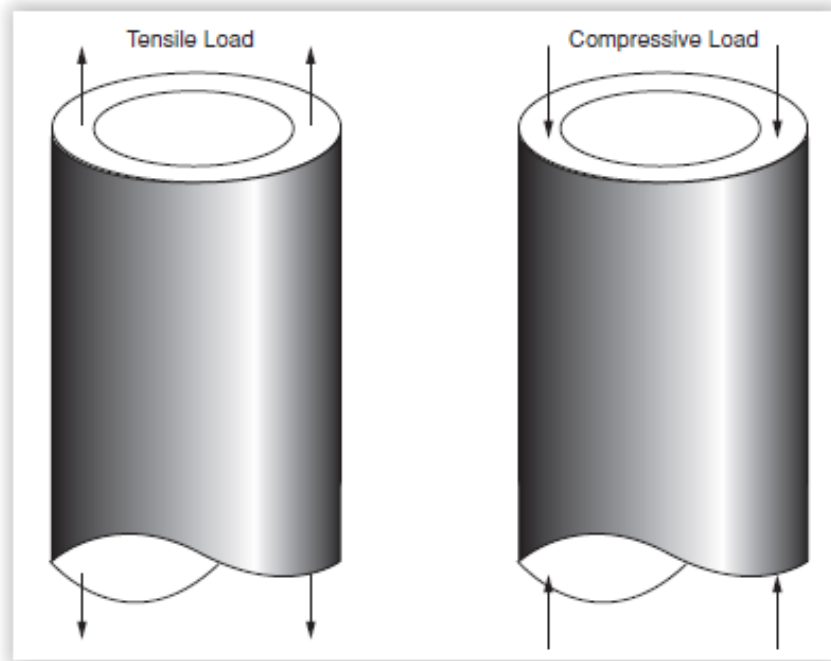
Η επιλογή της σωλήνωσης που ικανοποιεί τα κριτήρια της θλίψης και της διάρρηξης (σχήμα 3.22) αποτελεί την αρχική επιλογή. Σε πολλές περιπτώσεις η επιλογή αυτή διαφέρει ελάχιστα από την τελική επιλογή. Βέβαια, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια της παραγωγής.



Σχήμα 3.22: Γραφική μέθοδος επιλογής κατηγορίας και ονομαστικού βάρους σωλήνωσης βάσει των κριτηρίων της θλίψης και της διάρρηξης (Rabia, 1985)

3.8 Κριτήριο Αξονικών Φορτίων (Axial Load Criterion)

Τα αξονικά φορτία (axial loads), που δέχεται η σωλήνωση, εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας και μπορεί να είναι είτε εφελκυστικά (θετικό φορτίο) είτε θλιπτικά (αρνητικό φορτίο) (σχήμα 3.23). Τα αξονικά φορτία είναι διαφορετικά κατά μήκος της σωλήνωσης. Αυτό έχει ως συνέπεια η σωλήνωση να εκτίθεται σε ένα μεγάλο εύρος αξονικών φορτίων κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης, της διάτρησης και της παραγωγής. Επομένως, τα αξονικά φορτία που παρουσιάζονται σε κάθε διεργασία είναι ανάγκη να υπολογιστούν ώστε να προσδιοριστεί το συνολικό αξονικό φορτίο της σωλήνωσης (total axial load) (Drilling Engineering Handbook).



Σχήμα 3.23: Αξονικά φορτία σωλήνωσης (Drilling Engineering Handbook)

Το μεγαλύτερο τμήμα του αξονικού φορτίου προέρχεται από το ίδιο το βάρος της σωλήνωσης. Άλλοι τύποι αξονικού φορτίου μπορεί να προκύψουν λόγω: κάμψης (bending), οπισθέλκουσας δύναμης (drag), κραδασμών (shock loading) και κατά τις δοκιμές αντοχής σε πίεση της σωλήνωσης (pressure testing of casing).

Στο σχεδιασμό της σωλήνωσης το ανώτατο στέλεχος δέχεται το μέγιστο αξονικό φορτίο, διότι φέρει το συνολικό βάρος της υποκείμενης σωλήνωσης. Η επιλογή του βασίζεται σε συντελεστή σχεδιασμού $1.6 \leq DF \leq 1.8$.

Τα αξονικά φορτία που πρέπει να προσδιοριστούν είναι τα ακόλουθα:

1. Το ίδιο βάρος της σωλήνωσης (F_{wt}) στον αέρα στη βάση του τελικού κατακόρυφου βάθους (TVD).
2. Τη δύναμη άνωσης (buoyancy force – F_{buoy}).
3. Τη δύναμη κάμψης (bending force – F_{bend}), κυρίως για τις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις.
4. Την οπισθέλκουσα δύναμη (drag force – F_{drag}).
5. Τα φορτία λόγω κραδασμών (shock loads), κατά τη «σύλληψη» των στελεχών της σωλήνωσης από τους ολισθητήρες (slips).

6. Τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τις δοκιμές πίεσης (pressure testing forces).

Οι δυνάμεις (1) έως (3) παρουσιάζονται όταν η σωλήνωση είναι ακίνητη ή κινείται, ενώ οι δυνάμεις (4) και (5) εφαρμόζονται μόνο όταν η σωλήνωση κινείται. Το συνολικό εφελκυστικό φορτίο (μερικές φορές αναφέρεται και ως *φορτίο εγκατάστασης-installation load*) είναι αναγκαίο να προσδιορισθεί με ακρίβεια και πρέπει πάντοτε να είναι μικρότερο από το όριο ελαστικότητας του ανώτατου στελέχους. Επίσης, το φορτίο εγκατάστασης χρειάζεται να είναι μικρότερο από τη μέγιστη ικανότητα φορτίου του πύργου του γεωτρύπανου (derrick load capacity), έτσι ώστε η σωλήνωση να τοποθετείται εντός της γεώτρησης (run in) ή να απομακρύνεται από αυτή (pull out) χωρίς να προκληθούν ζημιές σε αυτόν.

Κατά την αρχική επιλογή της σωλήνωσης ελέγχεται αν η σωλήνωση μπορεί να φέρει το ίδιο βάρος της μέσα στη λάσπη διάτρησης. Όταν τελικά επιλεγθεί συγκεκριμένη κατηγορία σωλήνωσης υπολογίζεται το συνολικό εφελκυστικό φορτίο και συγκρίνεται με τις τιμές του ορίου ελαστικότητας για τον σύνδεσμο και το στέλεχος της σωλήνωσης. Υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιείται συντελεστής σχεδιασμού $1.6 \leq DF \leq 1.8$ (Rabia, 1985).

3.8.1 Βάρος Σωλήνωσης (F_{wt}) (στον αέρα)

Η ανάρτηση της σωλήνωσης σε μία κατακόρυφη ή κεκλιμένη γεώτρηση έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός εφελκυστικού φορτίου, λόγω του ίδιου βάρους της σωλήνωσης, το οποίο υπολογίζεται ως εξής (Rabia, 1985):

$$F_{wt} = W_n \times TVD \quad (3.30)$$

Όπου,

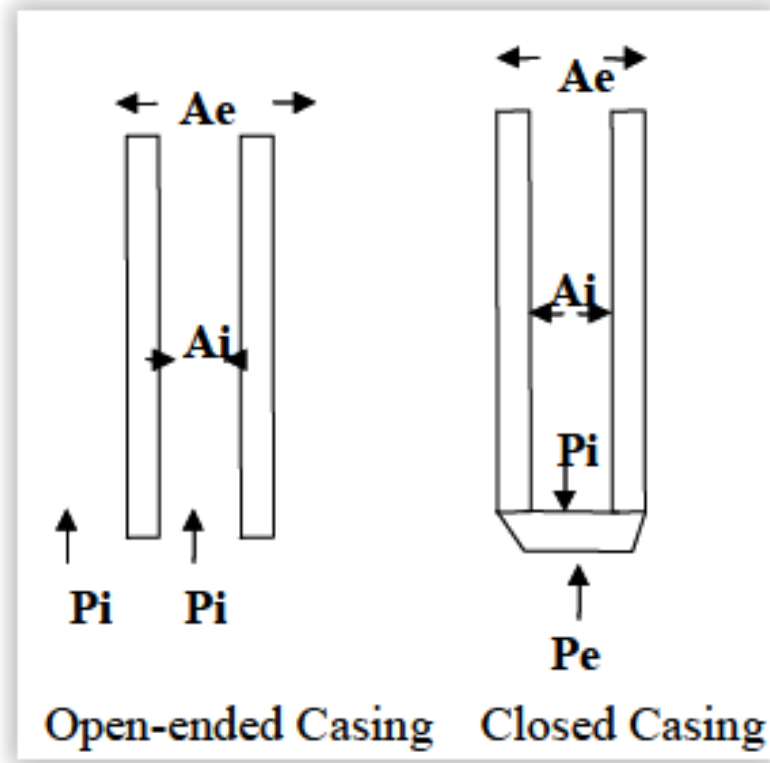
F_{wt} : βάρος σωλήνωσης (στον αέρα), lbf,

W_n : το ονομαστικό βάρος, lb/ft της σωλήνωσης,

TVD: τελικό κατακόρυφο βάθος, ft, στο οποίο εδράζει η σωλήνωση.

3.8.2 Δύναμη Άνωσης (F_{buoy})

Όταν η σωλήνωση βυθίζεται μέσα στο ρευστό διάτρησης εκτίθεται σε ένα θλιπτικό φορτίο, που ονομάζεται δύναμη άνωσης και υπολογίζεται παρακάτω σύμφωνα με το σχήμα 3.24 (Drilling Engineering Handbook).



Σχήμα 3.24: Δύναμη άνωσης (Rabia, 1985)

- Για σωλήνωση ανοιχτού τύπου (open – ended casing) η δύναμη άνωσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{buoy} = P_e \times (A_e - A_i) \quad (3.31)$$

- Για σωλήνωση κλειστού τύπου (closed casing) η δύναμη άνωσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{buoy} = P_e \times A_e - P_i \times A_i \quad (3.32)$$

Όπου,

F_{buoy} : δύναμη άνωσης, lbf,

P_e : εξωτερική υδροστατική πίεση, psi,

P_i : εσωτερική υδροστατική πίεση, psi,

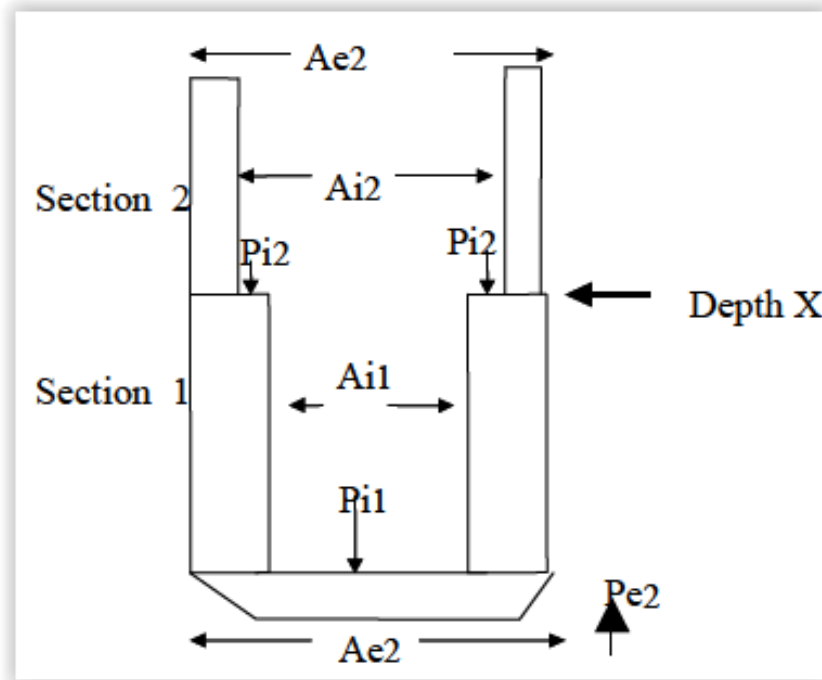
A_e : εμβαδόν διατομής σωλήνωσης χρησιμοποιώντας την εξωτερική διάμετρο (OD), in²

A_i : εμβαδόν διατομής σωλήνωσης χρησιμοποιώντας την εσωτερική διάμετρο (ID), in².

Επειδή η λάσπη (ρευστό διάτρησης) που βρίσκεται εσωτερικά και εξωτερικά της σωλήνωσης έχει κατά κανόνα την ίδια πυκνότητα, η δύναμη άνωσης υπολογίζεται από

τη σχέση (3.31). Εάν χρησιμοποιείται σωλήνωση μεταβαλλόμενης διαμέτρου (σχήμα 3.25), τότε η δύναμη άνωσης υπολογίζεται και πάλι από τη σχέση (3.31). Όμως, για μια τοπική μεταβολή η δύναμη άνωσης υπολογίζεται ως εξής (Rabia, 1985):

$$F_{buoy} = P_{e2} \times (A_{e2} - A_{e1}) - P_{i2} \times (A_{i2} - A_{i1}) \quad (3.33)$$



Σχήμα 3.25: Δύναμη άνωσης για σωλήνωση μεταβαλλόμενης διαμέτρου (Rabia, 1985)

Στις περισσότερες εφαρμογές προτείνεται η δύναμη άνωσης να υπολογίζεται όπως παρακάτω (Rabia, 1985):

$$F_{buoy} = F_{wt} \times f_{buoy} \quad (3.34)$$

Όπου,

f_{buoy} : συντελεστής άνωσης.

Ο συντελεστής άνωσης υπολογίζεται ως εξής (drillingformulas.com, n.d.):

$$f_{buoy} = \frac{65,5 - p_m \text{ σε } pp\text{g}}{65,5} \quad (3.35)$$

3.8.3 Δύναμη Κάμψης (F_{bend})

Όταν σχεδιάζεται η σωλήνωση μιας κατευθυνόμενης γεώτρησης πρέπει να ληφθεί υπόψη η καταπόνηση της σωλήνωσης λόγω κάμψης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα τμήματα της γεώτρησης όπου παρουσιάζεται έντονη γωνία κάμψης (dog – leg) (οξεία κάμψη). Τα πιο κρίσιμα σημεία είναι αυτά όπου η γωνία κάμψης (dog – leg severity) παρουσιάζει τιμές της τάξης των 10° ανά 100 ft. Το αξονικό φορτίο εξαιτίας της κάμψης υπολογίζεται ως εξής (Drilling Engineering Handbook):

$$F_{bend} = 63 \times W_n \times OD \times \theta \quad (3.36)$$

Όπου,

F_{bend} : δύναμη κάμψης, lbf,

θ : γωνία κάμψης (dog – leg severity), μοίρες/100 ft.

3.8.4 Φορτία λόγω Κραδασμών (Shock load) (F_{shock})

Αυτού του είδους τα φορτία παρουσιάζονται όταν:

- Εφαρμόζεται ξαφνική επιβράδυνση (κατά την καθέλκυση της σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση).
- Η σωλήνωση απομακρύνεται από τους ολισθητήρες (slips).
- Οι ολισθητήρες ενεργοποιούνται ενώ το στέλεχος της σωλήνωσης κινείται.
- Κατά την καθέλκυσή της μέσα στη γεώτρηση η στήλη της σωλήνωσης χτυπά ή αναπηδά πάνω σε κάποιο εμπόδιο (a bridge or an edge).

Το φορτίο λόγω κραδασμών (shock load) είναι μια ισχυρή δύναμη με μικρή διάρκεια εφαρμογής, περίπου ένα δευτερόλεπτο, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{shock} = 1780 \times V \times A_s \quad (3.37)$$

Όπου,

A_s : εμβαδόν εγκάρσιας διατομής σωλήνωσης, in^2 ,

V : στιγμιαία ταχύτητα κίνησης της σωλήνωσης, ft/s (αρκετοί χειριστές χρησιμοποιούν $V=5 \text{ ft/s}$ ως στιγμιαία ταχύτητα).

Η κύρια δυσκολία στη σχέση (3.37) είναι η γνώση της στιγμιαίας ταχύτητας όταν εφαρμόζεται το φορτίο λόγω κραδασμών. Η παρακάτω σχέση, χρησιμοποιείται και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα (Rabia, 1985).

$$F_{shock}(max) = 1500 \times W_n \quad (3.38)$$

3.8.5 Οπισθέλκουσα Δύναμη (F_{drag})

Αυτή η δύναμη είναι συνήθως της τάξης των 100.000 lbf (εφελκυστικό φορτίο). Επειδή ο υπολογισμός της οπισθέλκουσας δύναμης είναι πολύπλοκος και απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό του συντελεστή τριβής (friction factor) μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης, ο υπολογισμός του φορτίου λόγω κραδασμών θεωρείται επαρκής στις περισσότερες περιπτώσεις. Η δράση της οπισθέλκουσας δύναμης διαρκεί όσο μετακινείται ένα στέλεχος της σωλήνωσης, ενώ το φορτίο λόγω κραδασμών διαρκεί για ένα δευτερόλεπτο περίπου. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η οπισθέλκουσα δύναμη και το φορτίο λόγω κραδασμών δεν γίνεται να υπάρξουν ταυτόχρονα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγεθος του φορτίου λόγω κραδασμών και η οπισθέλκουσα είναι περίπου το ίδιο, άρα ο υπολογισμός μιας εκ των δύο είναι ικανοποιητικός.

Και οι δύο δυνάμεις (F_{drag} , F_{shock}) εφαρμόζονται μόνο όταν η σωλήνωση κινείται. Στην πραγματικότητα η οπισθέλκουσα δύναμη μειώνει τις δυνάμεις που ασκούνται στη σωλήνωση όταν αυτή εισέρχεται στη γεώτρηση, ενώ όταν εξέρχεται τις αυξάνει. Παρ' όλο που στην πράξη η κίνηση της σωλήνωσης είναι προς μια κατεύθυνση (καθέλκυση εντός της γεώτρησης) υπάρχει η πιθανότητα να παρουσιαστεί η ανάγκη ανέλκυσής της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάγκη ανέλκυσης της σωλήνωσης επειδή η διάμετρος της γεώτρησης είναι μικρότερη από την αναμενόμενη. Έτσι, λοιπόν, ακόμη και ακραία γεγονότα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό (Rabia, 1985).

3.8.6 Δοκιμή Πίεσης (Pressure Testing)

Η σωλήνωση είναι ανάγκη να δοκιμαστεί στη μέγιστη πίεση, η οποία δύναται να εμφανιστεί κατά τη διαδικασία διάτρησης και παραγωγής. Η δύναμη που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής πίεσης, F_t , υπολογίζεται ως εξής (Rabia, 1985):

$$F_t = \frac{\pi \times (ID^2)}{4} \times \text{πίεση δοκιμής} \quad (3.39)$$

Επίσης, όταν αποφασίζεται μία πίεση για τον έλεγχο της σωλήνωσης, η παραγόμενη δύναμη F_t δεν πρέπει να ξεπερνά:

- Το 80% της αντοχής σε διάρρηξη.
- Την ονομαστική πίεση (αντοχή σε πίεση) του συνδέσμου.
- Το 75% της εφελκυστικής αντοχής του συνδέσμου.
- Την τριαξονική αντοχή της σωλήνωσης.

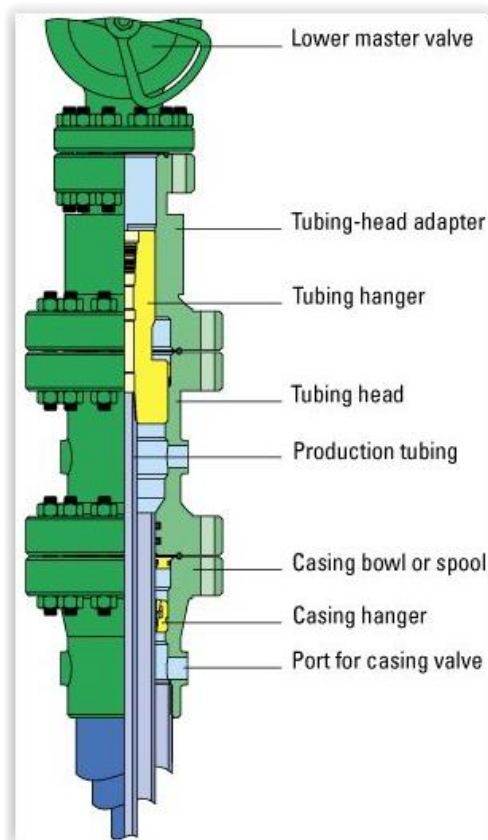
3.8.7 Δύναμη που Οφείλεται στη Μεταβολή της Θερμοκρασίας (F_{temp})

Όταν η γεώτρηση αρχίσει να παράγει αυξάνεται η θερμοκρασία της σωλήνωσης, με αποτέλεσμα αυτή να διαστέλλεται. Καθώς η σωλήνωση συγκρατείται στην επιφάνεια στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead) (σχήμα 3.26) και στον πυθμένα από το τοιμέντο, κατά τη διαστολή της λόγω αύξησης της θερμοκρασίας αναπτύσσεται πάνω της ένα θλιπτικό φορτίο (στρέβλωση-buckling). Το αξονικό φορτίο που αναπτύσσεται από την αύξηση της θερμοκρασίας υπολογίζεται ως εξής (Drilling Engineering Handbook):

$$F_{temp} = -200 \times A_s \times \Delta T \quad (3.40)$$

Όπου,

ΔT : η μεταβολή της θερμοκρασίας, °F.



Σχήμα 3.26: Κεφαλή γεώτρησης (Schlumberger Oilfield Glossary)

3.8.8 Αξονική Δύναμη εξ' αίτιας "Φουσκώματος" (ballooning effect) (F_{bal})

Κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής πίεσης (pressure test) η σωλήνωση τείνει να «φουσκώσει». Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εφαρμόζεται στη σωλήνωση ένα αξονικό φορτίο, επειδή συγκρατείται στην επιφάνεια από την κεφαλή και στον πυθμένα από το τσιμέντο. Το εν λόγω φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση (Drilling Engineering Handbook):

$$F_{bal} = 2\nu \times (A_i \times \Delta P_i - A_o \times \Delta P_e) \quad (3.41)$$

Όπου,

ν : ο λόγος του Poisson,

A_i : το εμβαδόν της εσωτερικής διατομής της σωλήνωσης, in²,

A_o : το εμβαδόν της εξωτερικής διατομής της σωλήνωσης, in²,

ΔP_i : η μεταβολή της πίεσης εσωτερικά της σωλήνωσης, psi,

ΔP_e : η μεταβολή της πίεσης εξωτερικά της σωλήνωσης, psi.

3.8.9 Δύναμη κατά την ολοκλήρωση της τσιμέντωσης (Plug bumping pressure) (F_{plug})

Κατά τη φάση ολοκλήρωσης της τσιμέντωσης και όταν το πώμα κορυφής επικάθεται στο κατώτερο πώμα, εφαρμόζεται στη σωλήνωση ένα αξονικό φορτίο, το οποίο υπολογίζεται ως εξής (Drilling Engineering Handbook):

$$F_{plug} = P_{surf} \times A_i \quad (3.42)$$

Όπου,

P_{surf} : η πίεση που ασκείται στην επιφάνεια, psi.

3.9 Υπολογισμός Συνολικού Αξονικού Φορτίου (F_{total}) ανά Περίπτωση

Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της σωλήνωσης εντός της γεώτρησης το συνολικό αξονικό φορτίο, ανάλογα με την περίπτωση, αποτελείται από το συγκερασμό των παραπάνω δυνάμεων. Ο σκοπός του σχεδιασμού είναι να προσδιοριστεί το μέγιστο αξονικό φορτίο που εφαρμόζεται στη σωλήνωση λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές περιπτώσεις λειτουργίας (Drilling Engineering Handbook):

- Απλή καθέλκυση (free running in) σωλήνωσης

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} \quad (3.43)$$

- Καθέλκυση σωλήνωσης με χρήση ολισθητήρων (ανάπτυξη φορτίων λόγω κραδασμών)

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{shock} \quad (3.44)$$

- Παγίδευση (stuck) σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{drag} \quad (3.45)$$

- Τσιμέντωση σωλήνωσης

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{plug} + F_{shock} \quad (3.46)$$

- Εφαρμογή οπισθέλκουσας δύναμης κατά την τσιμέντωση

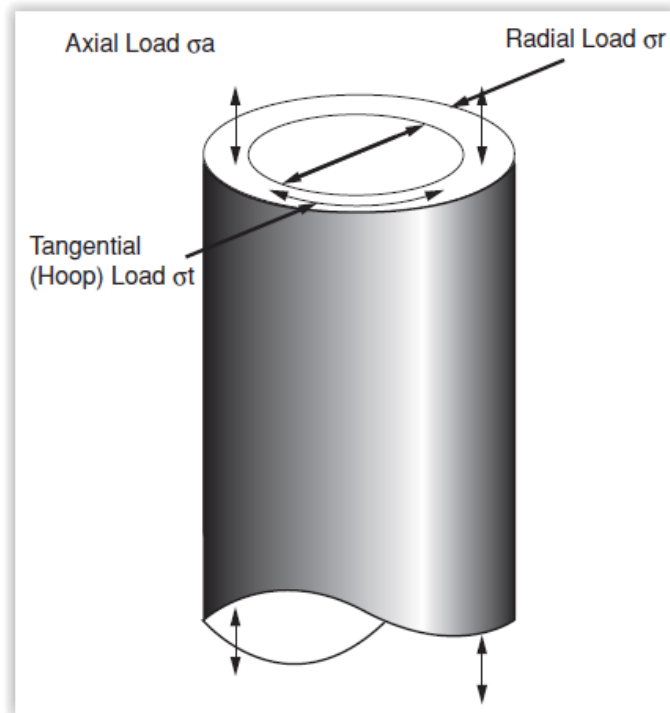
$$F_{tbase} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{plug} + F_{drag} \quad (3.47)$$

- Συνολικό αξονικό φορτίο κατά τη διάτρηση και την παραγωγή

$$F_{total} = F_{tbase} + F_{bal} + F_{temp} \quad (3.48)$$

3.10 Διαξονική και Τριαξονική Φόρτιση (Biaxial and Triaxial Loading)

Μπορεί να αποδειχθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά ότι η αξονική φόρτιση της σωλήνωσης δύναται να επηρεάσει την αντοχή της σε θλίψη και διάρρηξη. Παρατηρώντας το σχήμα 3.27 άγουμε το συμπέρασμα ότι όταν αυξάνεται το εφελκυστικό φορτίο (θετική εφελκυστική δύναμη), που εφαρμόζεται στη σωλήνωση, η αντοχή σε θλίψη μειώνεται, ενώ η αντοχή σε διάρρηξη αυξάνεται. Αντίθετα, η αύξηση του θλιπτικού φορτίου (αρνητική εφελκυστική δύναμη) έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής σε διάρρηξη και την αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Η βαθμονόμηση των διαφόρων τύπων σωλήνωσης από το API, όσον αφορά την αντοχή σε διάρρηξη και θλίψη, βασίζεται σε μηδενικό αξονικό φορτίο.



Σχήμα 3.27: Τριαξονική φόρτιση σωλήνωσης (Drilling Engineering Handbook)

Ο συνδυασμός των τάσεων που οφείλονται στο βάρος της σωλήνωσης (εφελκυστική φόρτιση) και στις εξωτερικές πιέσεις (θλιπτική φόρτιση) αναφέρεται ως **διαξονική φόρτιση (biaxial loading)**. Όσον αφορά τη θεώρηση της διαξονικής φόρτισης (biaxial loading) και με δεδομένο ότι η στήλη της σωλήνωσης πολύ συχνά υπόκειται σε συνδυασμό εφελκυστικής και θλιπτικής φόρτισης (tension and collapse loading), το API έχει καθιερώσει μια σειρά από εξισώσεις συσχέτισης των δύο αυτών τύπων φόρτισης. Ωστόσο, η παρουσίασή τους δεν περιλαμβάνεται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης και παρουσιάζουν κυρίως θεωρητικό ενδιαφέρον.

Στην πραγματικότητα η σωλήνωση δέχεται σύνθετη καταπόνηση τριών φορτίων (**τριαξονική φόρτιση – triaxial loading**). Αυτές είναι η ακτινική (radial), η αξονική (axial) και η εφαπτομενική (tangential) φόρτιση, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.27. Η εφαπτομενική φόρτιση είναι η συνισταμένη (resultant) των δύο άλλων τύπων φόρτισης. Η τριαξονική φόρτιση και η αστοχία της σωλήνωσης ως αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτών των φορτίων, είναι πολύ ασυνήθιστη, και για αυτό το λόγο ο υπολογισμός των τριαξονικών φορτίων πάνω στη σωλήνωση δεν διεξάγεται συχνά. Ωστόσο, στις

περίπτωσης που η σωλήνωση λειτουργεί σε ακραίες συνθήκες είναι αναγκαία η ανάλυση της τριαξονικής φόρτισης (Drilling Engineering Handbook).

Τέτοιες ακραίες συνθήκες που καθιστούν αναγκαία την ανάλυση της τριαξονικής φόρτισης πάνω στη σωλήνωση είναι οι εξής:

- Η πίεση των πόρων του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη από 12.000 psi.
- Η θερμοκρασία στο κατώτερο τμήμα της σωλήνωσης υπερβαίνει τους 250 °F (~120°C).
- Η σωλήνωση τοποθετείται σε περιβάλλον με υψηλή περιεκτικότητα σε H₂S.
- Ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου (OD) προς το πάχος των τοιχωμάτων της σωλήνωσης (t) είναι μικρότερος από 15 ($\frac{OD}{t} < 15$).
- Στις περιπτώσεις ενδιάμεσων και παραγωγικών σωληνώσεων που τοποθετούνται σε γεωτρήσεις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (High Pressure-High Temperature wells – HPHT wells).

Όσον αφορά στις θέσεις (σημεία) της σωλήνωσης στα οποία πρέπει να εκτελεστούν οι υπολογισμοί της τριαξονικής φόρτισης, είναι τα ακόλουθα:

- Στην επιφάνεια.
- Στην κορυφή της στήλης τσιμέντου (Top of Cement – TOC).
- Στις θέσεις αλλαγής ονομαστικού βάρους, κατηγορίας, εσωτερικής ή εξωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης (περιπτώσεις σύνθετων σωληνώσεων - combination strings).
- Στις θέσεις μεταβολής της εξωτερικής πίεσης.
- Στις θέσεις μεταβολής της γεωμετρίας της γεώτρησης: αλλαγή γωνίας κάμψης τροχιάς (dogleg severity), έκπλυση τοιχωμάτων (washouts) κ.λπ.

3.10.1 Υπολογισμός ακτινικών και εφαπτομενικών τάσεων

Η παρουσία ρευστών στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της σωλήνωσης έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ακτινικές (σ_r) και εφαπτομενικές (σ_t) τάσεις πάνω στη σωλήνωση. Οι τάσεις αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_r = \frac{d_i^2 P_i - d_e^2 P_e}{d_i^2 - d_e^2} - \frac{d_i^2 d_e^2 (P_i - P_e)}{(d_i^2 - d_e^2) r^2} \quad (3.49)$$

$$\sigma_t = \frac{d_i^2 P_i - d_e^2 P_e}{d_i^2 - d_e^2} - \frac{d_i^2 d_e^2 (P_i - P_e)}{(d_i^2 - d_e^2) r^2} \quad (3.50)$$

Όπου,

r: η απόσταση από την οποία υπολογίζονται οι σ_r και σ_t , in,

P_i: εσωτερική πίεση σωλήνωσης, psi,

P_e: εξωτερική πίεση σωλήνωσης, psi,

d_i: εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης, in,

d_e: εξωτερική διάμετρος σωλήνωσης, in.

3.10.2 Υπολογισμός αξονικής τάσης

Η ενεργός αξονική τάση (σ_α) δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\alpha = \frac{\text{βάρους σωλήνωσης}}{\text{εμβαδό διατομής σωλήνωσης}} - F_{buoy} \dots \dots \dots \text{psi} \quad (3.51)$$

Εάν η σωλήνωση υφίσταται κάμψη ($F_{bend} \neq 0$) και εφαρμόζονται σε αυτή θλιπτικά – καμπτικά φορτία (buckling loads) η εξίσωση αξονικών τάσεων μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\sigma_\alpha = \frac{\text{βάρους σωλήνωσης}}{\text{εμβαδό διατομής σωλήνωσης}} - F_{buoy} \pm \sigma_{bend} \pm \sigma_{buckling} \dots \text{psi} \quad (3.52)$$

3.10.3 Υπολογισμός ισοδύναμης τάσης Von Mises

Η θεωρία της ενέργειας παραμόρφωσης (distortion energy theory) του Von Mises χρησιμοποιείται ώστε να προβλεφθεί η έναρξη της παραμόρφωσης όλκιμων υλικών, όπως για παράδειγμα η σωλήνωση. Οι αξονικές, ακτινικές και εφαπτομενικές τάσεις μπορούν να μετατραπούν σε μία ισοδύναμη τριαξονική τάση (σ_{VM}), η οποία εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο και δίνεται από τη σχέση:

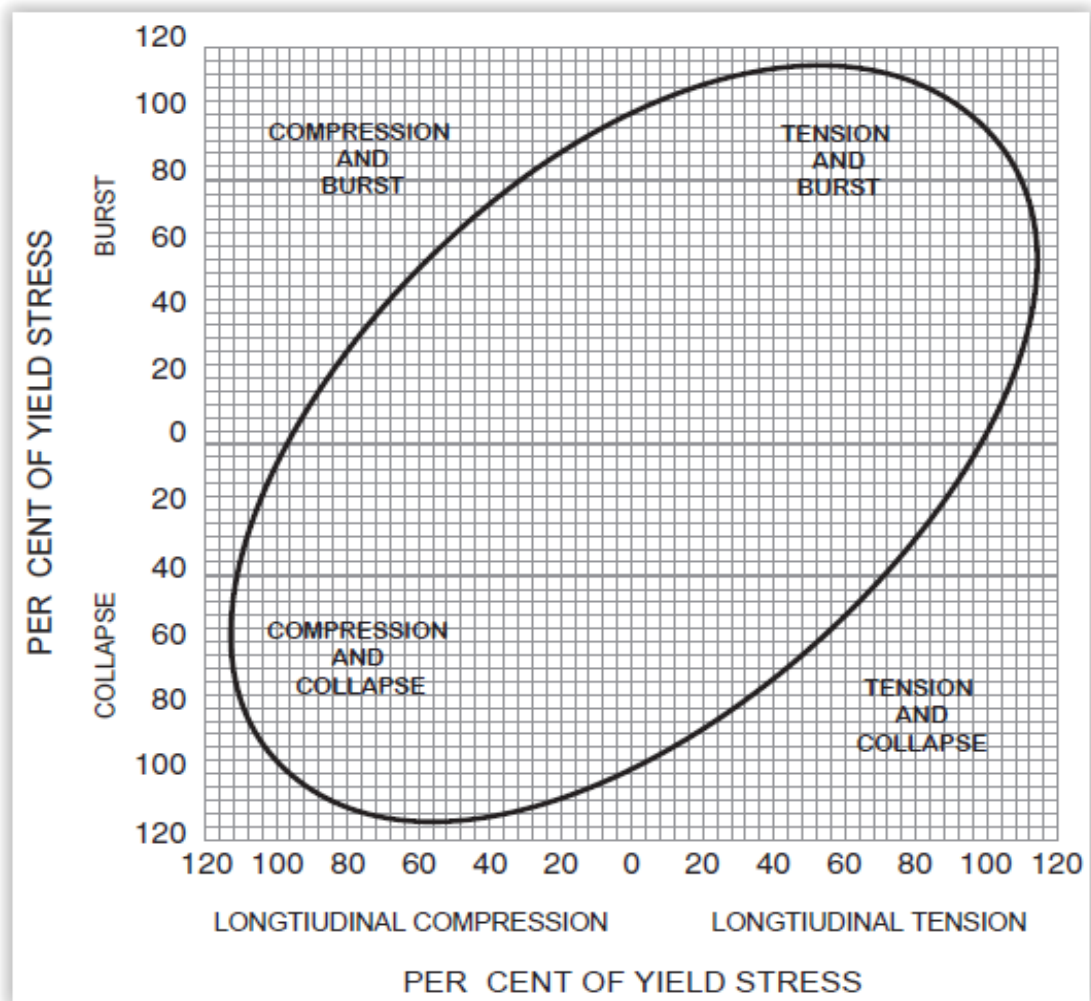
$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_\alpha - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\alpha)^2]^{0,5} \quad (3.53)$$

Το κριτήριο παραμόρφωσης ικανοποιείται όταν η τριαξονική τάση του Von Mises (σ_{VM}) ισούται με την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στο υλικό ώστε να παραμορφωθεί. Εάν δεν υφίσταται κάμψη η σωλήνωση, η μέγιστη σ_{VM} εφαρμόζεται στο εσωτερικό της σωλήνωσης, δηλαδή, σε απόσταση $r=d_i$. Αντίθετα, όταν η σωλήνωση κάμπτεται η

μέγιστη σ_{VM} εφαρμόζεται είτε στην εσωτερική ($r=di$) είτε στην εξωτερική διάμετρο ($r=de$) της σωλήνωσης.

Η ως άνω υπολογιζόμενη ισοδύναμη τάση Von Mises θα πρέπει συγκρινόμενη με το όριο ελαστικότητας της υπό εξέταση σωλήνωσης να διασφαλίζει σχεδιαστικό συντελεστή μεγαλύτερο του 1,25 ($DF = \frac{\text{όριο ελαστικότητας σωλήνωσης}}{\sigma_{VM}} \geq 1,25$).

Η έλλειψη που παριστάνεται στο σχήμα 3.28 (έλλειψη ελαστικότητας) είναι στην πραγματικότητα μια διδιάστατη απεικόνιση ενός τριδιάστατου φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα παρουσιάζει την τάση του Von Mises, που εφαρμόζεται στη σωλήνωση, με την μορφή αξονικών τάσεων ως προς την εσωτερική και εξωτερική πίεση. Έτσι, λοιπόν, η έλλειψη της ελαστικότητας παρουσιάζει οπτικά κατά πόσο η σωλήνωση πλησιάζει τα όρια του σχεδιασμού. Το διάγραμμα αυτό εφαρμόζεται μόνο για σωληνώσεις όπου ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος των τοιχωμάτων της είναι μικρότερος ή ίσος του 15 ($\frac{OD}{t} \leq 15$).

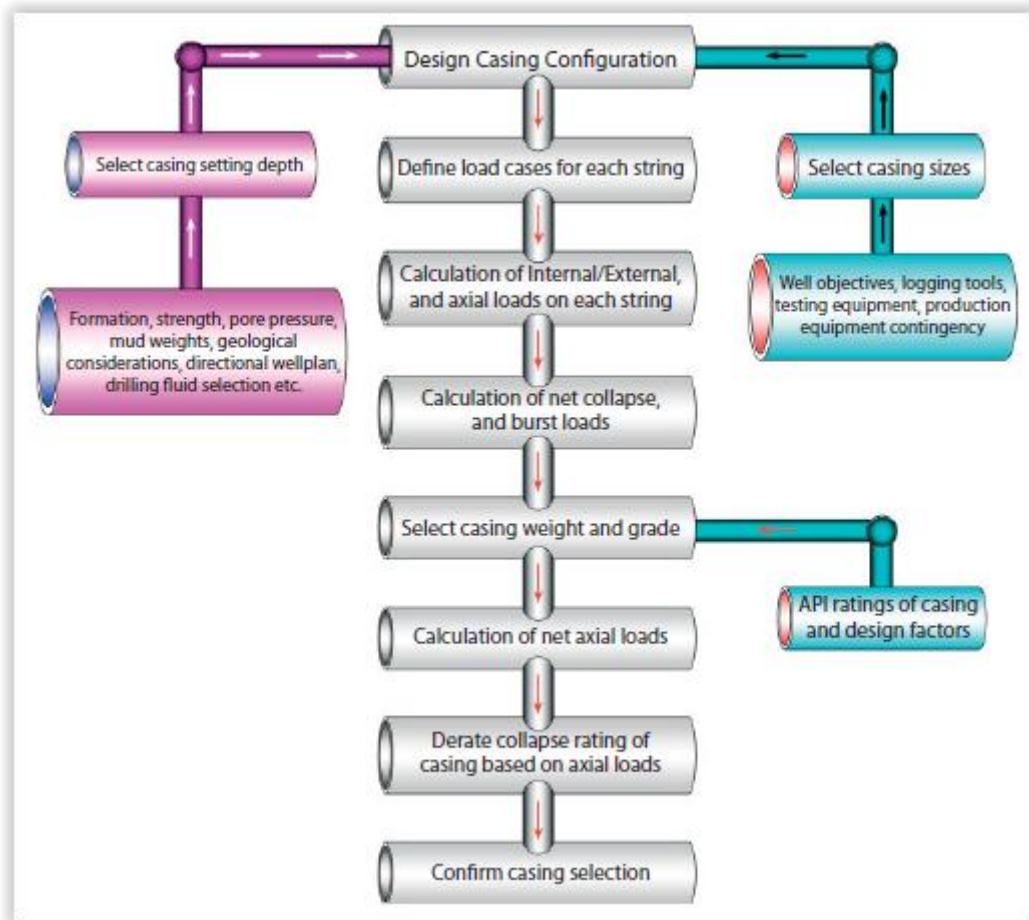


Σχήμα 3.28: Έλλειψη ελαστικότητας τριαξονικής φόρτισης (Drilling Engineering Handbook)

3.11 Σύνοψη Διαδικασίας Σχεδιασμού Σωλήνωσης

Η συνολική διαδικασία σχεδιασμού της σωλήνωσης παρουσιάζεται συνοπτικά στο διάγραμμα του σχήματος 3.29. Συνοπτικά, η διαδικασία σχεδιασμού της σωλήνωσης περιλαμβάνει τρεις διακριτές φάσεις:

1. Επιλογή των διαστάσεων της σωλήνωσης καθώς και των βαθών έδρασής της (προκαταρκτικός σχεδιασμός).
2. Προσδιορισμός της πίεσης θλίψης και διάρρηξης καθώς και των αξονικών φορτίων που δύναται να εφαρμοστούν στην σωλήνωση.
3. Υπολογισμός του μεγέθους αυτών των τάσεων ώστε να επιλεχθεί κατάλληλη κατηγορία σωλήνωσης (λεπτομερής σχεδιασμός).



Σχήμα 3.29: Βήματα σχεδιασμού σωληνώσεων (Hossain & Al-Mejed, 2015)

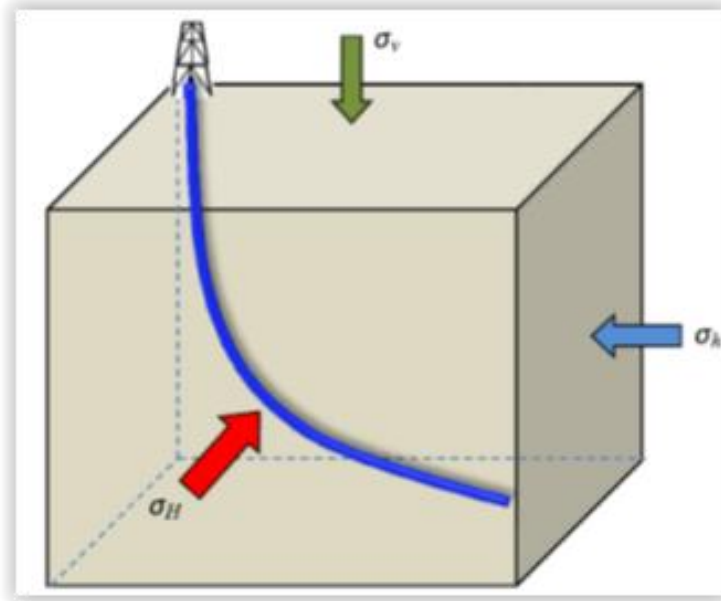
3.12 Μηχανική Ανάλυση (Mechanical Analysis) και Σχεδιασμός Σωλήνωσης σε Κεκλιμένες Γεωτρήσεις υπό τη Δράση των Επιτόπου Τάσεων (In-Situ Stresses)

Η ως άνω αναφερθείσα διαδικασία σχεδιασμού της σωλήνωσης βασίζεται στα πρότυπα του API τα οποία και λαμβάνουν υπόψη την υδροστατική πίεση των ρευστών και την πίεση των υπερκειμένων. Ωστόσο, το γεωλογικό περιβάλλον είναι πιο σύνθετο και εκτός από τα παραπάνω φορτία σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι επιτόπου τάσεις του σχηματισμού (formation forces) (Huaiwen and Xueshi, 1991), ιδιαίτερα στην περίπτωση των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων. Στους ανελαστικούς σχηματισμούς, όπως για παράδειγμα ορυκτά άλατα (salt rock) ή σχιστολιθικά πετρώματα (shale rock), η σωλήνωση σταδιακά εκτίθεται σε μηχανική καταπόνηση από το περιβάλλον πέτρωμα

(Willson et al., 2002; Poiate et al., 2006). Μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα, η μηχανική φόρτιση μετασχηματίζεται σε σταθερή πίεση η οποία ονομάζεται επιτόπου τάσεις (in-situ stresses) (Li and Yin, 2006). Η διαδικασία αστοχίας της σωλήνωσης είναι διαφορετική όταν το εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται από συμπαγές σχηματισμό ή ρευστό (Morita et al., 2005).

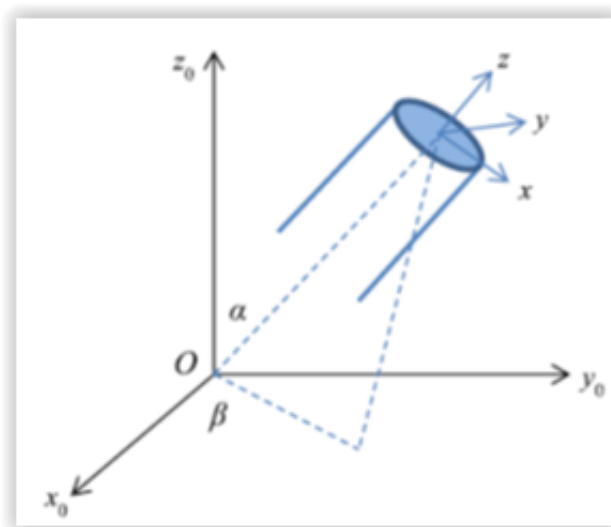
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, κατά καιρούς καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές προσπάθειες να ληφθούν υπόψη οι επιτόπου τάσεις σε μοντέλα σχεδιασμού της σωλήνωσης. Σύμφωνα με την ελαστική θεωρία (elastic theory), στις κατακόρυφες γεωτρήσεις, η μηχανική συμπεριφορά της σωλήνωσης υπό την δράση των επιτόπου τάσεων, μπορεί να αναλυθεί σε ένα πρόβλημα επίπεδων τάσεων (plane strain problem) (El-Sayed and Khalaf, 1992; Yin and Gao, 2012; Li et al., 2012). Επίσης, χρησιμοποιείται η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis - FEA) για να προσδιοριστούν τα φορτία της σωλήνωσης, της τσιμεντώσης και του σχηματισμού (Chatterjee and Mukhopadhyay, 2003; Nabipour et al., 2010). Η διαφορά μεταξύ θεωρητικού υπολογισμού και της μεθόδου με πεπερασμένα στοιχεία (FEA), που προέρχεται από τις τάσεις von Misses είναι αμελητέα (Rodriguez et al., 2003). Από άποψη εφαρμογής οι παραμορφώσεις της σωλήνωσης που προέρχεται από τεκτονικές δυνάμεις στο Andean Foothill έχουν αξιολογηθεί (Last et al., 2006). Ένα μοντέλο επίπεδης φόρτισης, που αναπτύχθηκε από τον Atkinson και τον Εφταξόπουλο (1996) εφαρμόστηκε σε μία σωληνωμένη και τσιμεντωμένη γεώτρηση. Η κατανομή των τάσεων, σε κεκλιμένα πηγάρια που έχουν σωληνωθεί μπορεί να εξομοιωθεί με αριθμητικά μοντέλα (Li et al., 2005; Jo and Gary, 2010).

Οι άξονες μιας κατευθυνόμενης γεώτρησης δεν είναι κάθετοι στο επίπεδο των οριζόντιων επιτόπου τάσεων. Επομένως, η μηχανική αλληλεπίδραση σωλήνωσης και περιβάλλον πετρώματος αναπαριστάνεται στον τρισδιάστατο χώρο. Οι Yin και Gao 2014, ανέπτυξαν το μοντέλο σωλήνωσης κατευθυνόμενων γεωτρήσεων υπό τη δράση επιτόπου τάσεων. Οι τάσεις σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη περιγράφονται από τις βασικές τριαξονικές επιτόπου τάσεις, την μέγιστη οριζόντια επιτόπου τάση, την ελάχιστη οριζόντια επιτόπου τάση και την κατακόρυφη επιτόπου τάση (σ_H , σ_h και σ_v αντίστοιχα) (σχήμα 3.30).



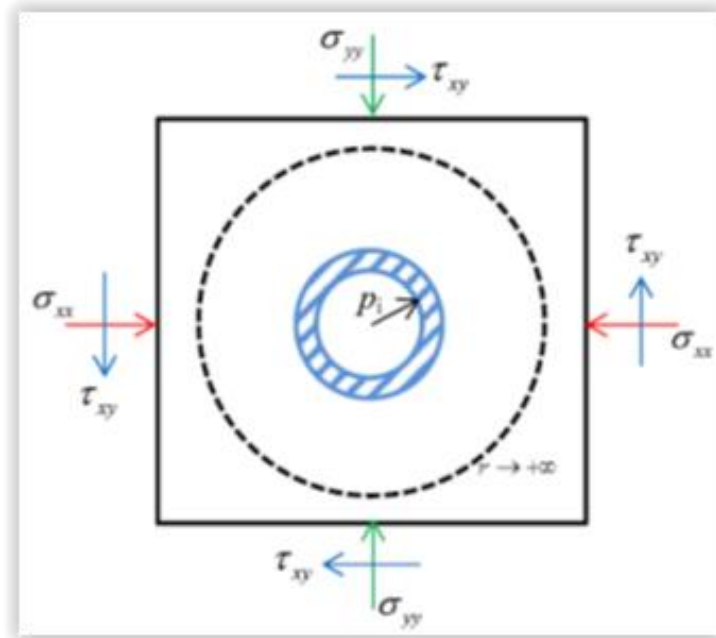
Σχήμα 3.30: Σχηματική αναπαράσταση της σωλήνωσης κατευθυνόμενης γεώτρησης υπό τη δράση επιτόπου τάσεων (Yin & Gao, 2014)

Με την στροφή των συντεταγμένων, οι τρεις αρχικές επιτόπου τάσεις μετασχηματίζονται σε τανυστές τάσεων στις συντεταγμένες της γεώτρησης. Η διαδικασία στροφής συντεταγμένων από το σύστημα συντεταγμένων των αρχικών επιτόπου τάσεων στο σύστημα συντεταγμένων της γεώτρησης παριστάνεται στο σχήμα 3.31, όπου α : η γωνία απόκλισης της γεώτρησης και β : η γωνία μεταξύ του αζιμούθιου της γεώτρησης και της μέγιστης οριζόντιας επιτόπου τάσης (σε μοίρες).



Σχήμα 3.31: Η διαδικασία στροφής συντεταγμένων (Yin & Gao, 2014)

Το απλοποιημένο μοντέλο επίπεδης φόρτισης της σωλήνωσης υπό την επίδραση των τάσεων του περιβάλλοντος πετρώματος και της υδροστατικής πίεσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.32, όπου σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} : οι τάσεις του περιβάλλοντος πετρώματος στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων της γεώτρησης (σε MPa).



Σχήμα 3.32: Το απλοποιημένο μοντέλο επίπεδης μηχανικής φόρτισης (Yin & Gao, 2014)

Με περιεκτική εξέταση των επιτόπου τάσεων και της εσωτερικής υδροστατικής πίεσης, οι τάσεις της σωλήνωσης στις κεκλιμένες γεωτρήσεις περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{cases} \sigma_r(r, \theta) = \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) s_1 + \left[-n_1 - n_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 - 2n_4 \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right] \cos 2\theta + \left[-n'_1 - n'_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 - 2n'_4 \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right] \sin 2\theta + \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 p_i}{(b^2 - a^2) r^2} \\ \sigma_\theta(r, \theta) = \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) s_1 + \left[n_1 + n_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 + 2n_3 \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right] \cos 2\theta + \left[n'_1 + n'_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 + 2n'_3 \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right] \sin 2\theta + \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 p_i}{(b^2 - a^2) r^2} \\ \tau_{r\theta}(r, \theta) = \left[n_1 - n_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 + n_3 \left(\frac{r}{b} \right)^2 - n_4 \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right] \sin 2\theta + \left[n'_1 - n'_2 \left(\frac{b}{r} \right)^4 + n'_3 \left(\frac{r}{b} \right)^2 - n'_4 \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right] \cos 2\theta \end{cases}$$

Όπου:

σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$: η ακτινική τάση, η εφαπτομενική τάση και η διατμητική τάση του περιβάλλοντος πετρώματος, αντίστοιχα, σε MPa,

a: η εσωτερική ακτίνα της σωλήνωσης, m,

b: η εξωτερική ακτίνα της σωλήνωσης, m,

r: η ακτίνα ή ακτινική συντεταγμένη του σφαιρικού συστήματος αξόνων (ακτίνα καμπυλότητας της σωλήνωσης ή του περιβάλλοντος πετρώματος), m,

θ: πολική γωνία του σφαιρικού συστήματος αξόνων (γωνία απόκλισης της σωλήνωσης ή του τμήματος της γεώτρησης από τον κατακόρυφο άξονα), σε μοίρες,

$s_1, s_2, s_3, n_1, n_2, n_3, n_4$: συντελεστές που προσδιορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$s_1 = -\frac{(1 - \nu_s)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{1 + \frac{1}{1-m^2} \frac{(1+\nu_c)}{(1+\nu_s)} \frac{E_c}{E_s} (1 - 2\nu_s + m^2)}$$

$$\begin{cases} n_1 = -\frac{1 + m^2 + 2m^4}{(1 - m^2)^3} s_2 + \frac{2m^4}{(1 - m^2)^3} s_3 \\ n_2 = -\frac{3m^4 + m^6}{(1 - m^2)^3} s_2 + \frac{2m^6}{(1 - m^2)^3} s_3 \\ n_3 = -\frac{1 + 3m^2}{(1 - m^2)^3} s_2 + \frac{1 - 3m^2}{(1 - m^2)^3} s_3 \\ n_4 = -\frac{m^2(2 + m^2 + m^4)}{(1 - m^2)^3} s_2 - \frac{m^2(m^2 + m^4)}{(1 - m^2)^3} s_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_2 = -\frac{D_1 + B_1}{A_1 D_1 - B_1 C_1} \frac{4(1 - \nu_s^2)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} (1 - m^2)^3 \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2} \\ s_3 = \frac{C_1 + A_1}{A_1 D_1 - B_1 C_1} \frac{4(1 - \nu_s^2)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} (1 - m^2)^3 \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 = A + \frac{(1 + \nu_s)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} \left(\frac{5}{3} - 2\nu_s\right) (1 - m^2)^3 \\ B_1 = B - \frac{(1 + \nu_s)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} \left(\frac{4}{3} - 2\nu_s\right) (1 - m^2)^3 \\ C_1 = C - \frac{(1 + \nu_s)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} \left(\frac{4}{3} - 2\nu_s\right) (1 - m^2)^3 \\ D_1 = D + \frac{(1 + \nu_s)}{(1 + \nu_c)} \frac{E_c}{E_s} \left(\frac{5}{3} - 2\nu_s\right) (1 - m^2)^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = \left(1 - \frac{2}{3}v_c\right) + (5 - 6v_c)m^2 + (3 - 2v_c)m^4 + \left(\frac{5}{3} - 2v_c\right)m^6 \\ B = -\frac{2}{3}v_c + 2v_cm^2 - 2(2 - v_c)m^4 - \left(\frac{4}{3} - 2v_c\right)m^6 \\ C = -\frac{2}{3}v_c + 2v_cm^2 - 2(2 - v_c)m^4 - \left(\frac{4}{3} - 2v_c\right)m^6 \\ D = \left(1 - \frac{2}{3}v_c\right) - (3 - 2v_c)m^2 + (3 - 2v_c)m^4 + \left(\frac{5}{3} - 2v_c\right)m^6 \end{cases}$$

Όπου:

E_s : μέτρο ελαστικότητας του σχηματισμού, MPa,

E_c : μέτρο ελαστικότητας της σωλήνωσης, MPa,

m : ο λόγος a προς b ,

v_s : ο λόγος Poisson του σχηματισμού,

v_c : ο λόγος Poisson της σωλήνωσης,

p_i : η εσωτερική υδροστατική πίεση της σωλήνωσης, MPa,

σ_s : η αντοχή διαρροής της σωλήνωσης, MPa.

Η τελευταία εξίσωση υποδηλώνει ότι η αντοχή της σωλήνωσης στις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως, οι επιτόπου τάσεις, η εσωτερική υδροστατική πίεση, η γωνία απόκλισης της γεώτρησης, το αζιμούθιο της γεώτρησης, η γεωμετρία της σωλήνωσης και οι ελαστικές παράμετροι της σωλήνωσης και του σχηματισμού. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς της εργασίας αυτής, η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για το σχεδιασμό της σωλήνωσης γενικά σε κεκλιμένες γεωτρήσεις υπό την εφαρμογή επιτόπου τάσεων.

Ο λόγος για τον οποίο δεν συνίσταται από τους συγγραφείς η γενική εφαρμογή της μεθόδου για το σχεδιασμό της σωλήνωσης σε κεκλιμένες γεωτρήσεις βρίσκεται στη μαθηματική επίλυση. Είναι γνωστό από τα μαθηματικά ότι η μετατόπιση, η στρέψη και η παραμόρφωση ενός σώματος στο χώρο περιγράφονται από τετραγωνικούς αντισυμμετρικούς πίνακες (3×3). Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο σώμα εκτελεί στροφή στους άξονες, το φαινόμενο μεταφράζεται σε πολλαπλασιασμό του πίνακα της διεύθυνσης κίνηση του σώματος επί τον πίνακα του άξονα ως προς τον οποίο γίνεται η στροφή. Για παράδειγμα, αν το σώμα κινείται πάνω στον άξονα x και εκτελεί στροφή ως προς τον y , ο πίνακας της παραμόρφωσής του μετά την στροφή προκύπτει από τον

πολλαπλασιασμό $\Pi_x \times \Pi_y$ (όπου Π_x και Π_y οι αντίστοιχοι πίνακες των διευθύνσεων x και y). Μεγάλη προσοχή απαιτείται στην κατεύθυνση που εκτελείται η στροφή γιατί στον πολλαπλασιασμό πινάκων δεν ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα. Για παράδειγμα, ο πολλαπλασιασμός $\Pi_y \times \Pi_x$ δηλώνει ότι το σώμα κινείται στον y άξονα και εκτελεί στροφή ως προς τον x και το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού αυτού είναι διαφορετικό από το αποτέλεσμα της πράξης $\Pi_x \times \Pi_y$.

Στην προκειμένη περίπτωση οι συγγραφείς μελετούν μία κεκλιμένη γεώτρηση συγκεκριμένης τροχιάς, που φαίνεται στο σχήμα 3.30. Για την εύρεση του τελικού πίνακα (3×3) της παραμόρφωσης, ώστε να προσδιορισθούν οι τάσεις που δέχεται η σωλήνωση, χρησιμοποιούν συγκεκριμένους αντισυμμετρικούς πίνακες για τους οποίους ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα. Οι πίνακες αυτοί απεικονίζονται στο σχήμα 3.33. Αντίθετα, για το σχεδιασμό της σωλήνωσης μιας κεκλιμένης γεώτρησης που δεν ακολουθεί τη συγκεκριμένη τροχιά θα ήταν καλό, όπως υποστηρίζουν και οι συγγραφείς, να μην χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$.

$$C_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x \end{bmatrix}$$

$$C_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha_y & 0 & -\sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{bmatrix}$$

$$C_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.33: Αντισυμμετρικοί πίνακες για τους οποίους ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα (Yin & Gao, 2014)

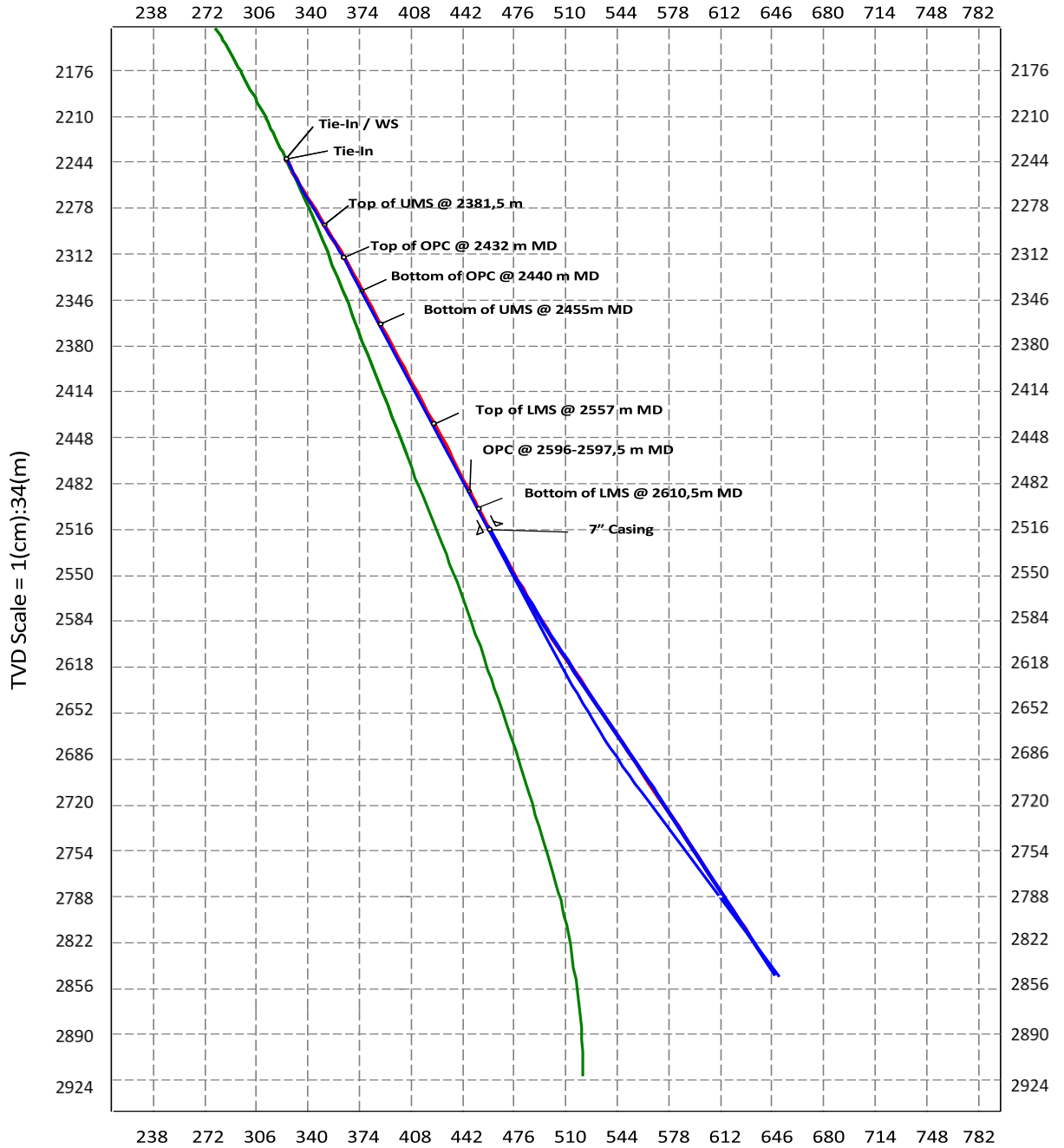
Κεφάλαιο 4°. Μελέτη Περίπτωσης σε Γεώτρηση Πλευρικής Όρυξης (Case Study)

4.1 Δεδομένα Σχεδιασμού

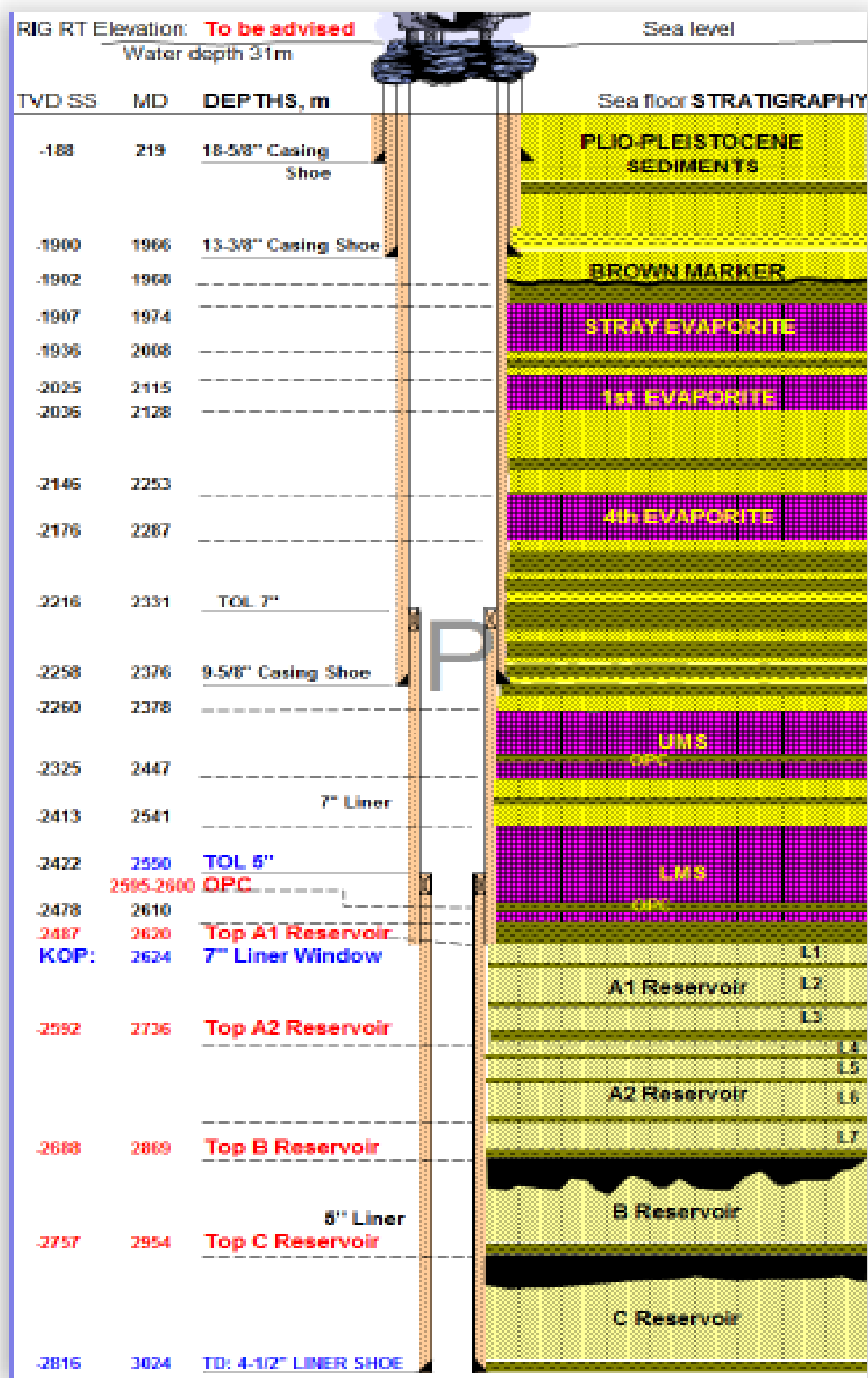
Το μοντέλο σχεδιασμού που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3 θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της σωλήνωσης του κατώτερου τμήματος μιας κεκλιμένης γεώτρησης πλευρικής όρυξης. Το προφίλ της γεώτρησης, τα βάθη έδρασης των σωληνώσεων και τα διαγράμματα της τροχιάς της γεώτρησης (ένταση κάμψης τροχιάς-dogleg severity και η κλίση-inclination) παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.

Επίσης, στο σχήμα 4.2 αναγράφεται επιπλέον το κατακόρυφο και το μετρούμενο βάθος (total vertical depth-TVD, measured depth-MD). Στον πίνακα 4.1 αναγράφονται τα βάθη διάτρησης, τα μεγέθη των κοπτικών άκρων που χρησιμοποιήθηκαν για την όρυξη της γεώτρησης, τα βάθη έδρασης και οι διαστάσεις των σωληνώσεων, ενώ οι τιμές των συντελεστών σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο αναγράφονται στον πίνακα 4.2. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές για τις παραμέτρους της διάτρησης που αντλήθηκαν από τη σχετική αναφορά δίνονταν στο σύστημα SI (m, deg/30m, g/cm^3) και μετατράπηκαν στο αγγλοσαξωνικό σύστημα (ft, deg/100ft, ppg), όπως απαιτούν οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Στον πίνακα 4.3 καταγράφονται οι απαραίτητες μετατροπές μονάδων. Παράλληλα, σημειώνεται ότι όσον αφορά τη γωνία κάμψης της τροχιάς (dogleg severity) λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό οι μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες αντλούνται από το σχήμα 4.3.

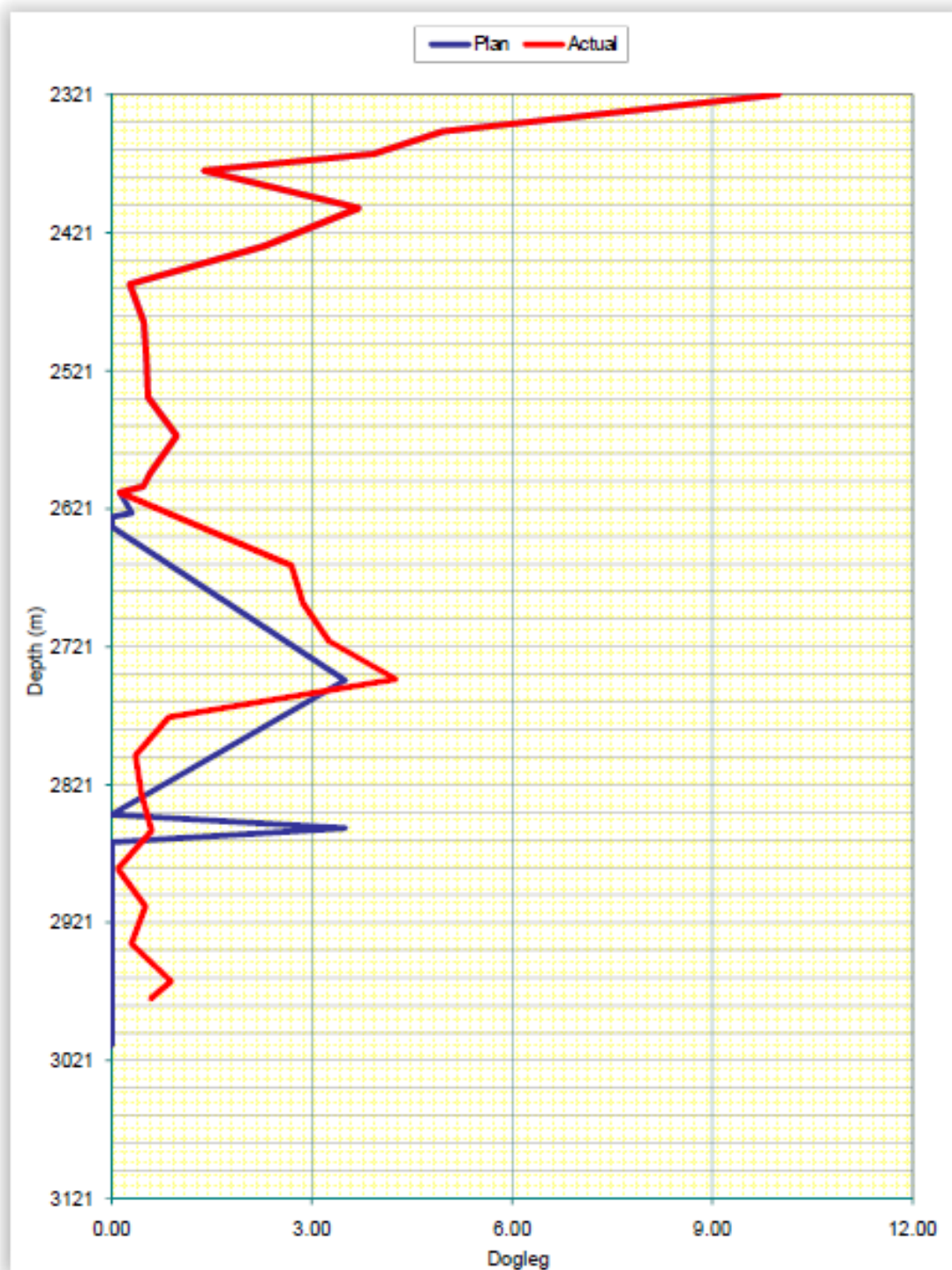
Σημειώνεται, ακόμη, ότι καθώς οι πιέσεις στις οποίες εκτέθηκε η γεώτρηση ήταν πολύ χαμηλότερες από 12.000 psi, δεν απαιτείται ο υπολογισμός της τριαξονικής φόρτισης. Τέλος, σημειώνεται ότι το κοίτασμα περιέχει υδρόθειο (H_2S) γεγονός που οπωσδήποτε επηρεάζει την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας σωλήνωσης.



Σχήμα 4.1: Προφίλ κατευθυνόμενης γεώτρησης (μπλε πορεία)



Σχήμα 4.2: Βάθη έδρασης σωληνώσεων, κατακόρυφο βάθος και μετρούμενο βάθος γεώτρησης



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα γωνίας dogleg



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα κλίσης

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεώτρησης και σωλήνωσης (βάθος, διάμετρος)

Open Hole Record			
	Hole Size	Start Depth (mBRT)	TD (mBRT)
	8 3/8 in	2321.0	2624.0
	6 in	2624.0	2976.0

Casina Record			
	Casing Size	Start Depth (mBRT)	TD (mBRT)
	13 3/8 in	0.0	1966.0
	9 5/8 in	0.0	2321.0
	7 in	2015.0	2623.0

Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστών σχεδιασμού

Συντελεστές σχεδιασμού	
Διάρρηξη (burst design factor)	1,2
Θλίψη (collapse design factor)	1,1
Εφελκυσμός (tension design factor)	1,5

Πίνακας 4.3: Δεδομένα διάτρησης και σχετικές μετατροπές μονάδων (βάθος, γωνία κάμψης, πυκνότητα λάσπης, θερμοκρασία)

Διάμετρος σωλήνωσης (liner OD)	Μετρούμενο βάθος-βάθος έδρασης σωλήνωσης (MD (CSD))		Κατακόρυφο βάθος (TVD)		Πυκνότητα λάσπης		Γωνίας κάμψης τροχιάς (DLS)		Θερμοκρασία σωλήνωσης	
	m	ft	m	ft	g/cm^3	ppg	deg/30m	deg/100ft	°C	°F
7 in	2620	8596	2487	8760	1,7	14,18	10	10	79,90	175,82
4½ in	3024	9921	2816	9239	1,17	9,76	4	4	83,4	182,12

Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός της σωλήνωσης αφορά μόνο στις παραγωγικές σωληνώσεις (liner) 7 και 4½ in οι οποίες τοποθετήθηκαν στην υπό παρέκκλιση νέα γεώτρηση. Για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός της σωλήνωσης έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Για τους υπολογισμούς του κριτηρίου της θλιπτικής αστοχίας θεωρείται μερική απώλεια του ρευστού διάτρησης.
- Για τους υπολογισμούς του κριτηρίου της διάρρηξης θεωρείται περιορισμένη εισροή αερίου από τον σχηματισμό (limited kick).
- Στους υπολογισμούς των αξονικών φορτίων:
 - Δεν λαμβάνεται υπόψη η τάση «φουσκώματος» (ballooning force).
 - Η θερμοκρασία των παραγόμενων ρευστών δεν μεταβάλλεται κατά μήκος των liner και θεωρείται ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα (244,4°F).
 - Η δύναμη ανέλκυσης (F_{drag}) θεωρείται ίση με 100.000 lbf (όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία).
 - Το αξονικό φορτίο που οφείλεται στην εισπίεση τσιμέντου (F_{plug}) θεωρείται αμελητέο.

4.2 Υπολογισμός Κριτηρίου Θλιπτικής Αστοχίας

Για το liner 7 in:

Θεωρείται μερική απώλεια λάσπης διάτρησης.

A) Στην επιφάνεια: Από εξίσωση (3.14) $\rightarrow C_1 = 0$

B) Σε βάθος που προσδιορίζεται από τη διαφορά του βάθους έδρασης της σωλήνωσης (CSD) και του ύψους της στήλης της λάσπης μέσα σε αυτή (L) (δηλ. CSD-L):

$$\text{Από εξίσωση (3.10)} \rightarrow L = \frac{CSD \times 0,465 \text{ psi/ft}}{0,052 \times \rho_{ml}} = \frac{8596 \text{ ft} \times 0,465 \text{ psi/ft}}{0,052 \times 9,76 \text{ psi/ft}} = 7876 \text{ ft}$$

Όπου,

L: στάθμη της λάσπης μέσα στη σωλήνωση (ft),

CSD: βάθος έδρασης σωλήνωσης (ft),

0,465: κανονική βαθμίδα πίεσης σχηματισμού (υδροστατική πίεση) (psi/ft),

0,052: συντελεστής μετατροπής μονάδων, ppg ή lb/gal σε psi/ft,

ρ_{ml} : πυκνότητα λάσπης που χρησιμοποιήθηκε στην όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (ppg).

$$\text{Από εξίσωση (3.15)} \rightarrow C_2 = 0,052 \times (CSD - L) \times \rho_m$$

Όπου

ρ_m : πυκνότητα λάσπης (ppg).

$$C_2 = \frac{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \times (8596 \text{ ft} - 7876 \text{ ft}) \times 14,18 \text{ ppg} \Rightarrow C_2 = 530,9 \text{ psi}$$

Γ) Σε βάθος CSD:

$$C_3 = 0,052 \times CSD \times \rho_m - 0,052 \times L \times \rho_{ml}$$

$$= \frac{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \times 8596 \text{ ft} \times 14,18 \text{ ppg} - \frac{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \times 7876 \text{ ft} \times 9,76 \text{ ppg} \Rightarrow$$

$$C_3 = 6338 \text{ psi} - 3997 \text{ psi} \Rightarrow C_3 = 2341 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή από τις παραπάνω πιέσεις και λαμβάνοντας υπ' όψη συντελεστή σχεδιασμού το 1,1 για το κριτήριο της θλίψης προκύπτει:

$$C_{Design} = 1,1 \times C_3 = 1,1 \times 2341 \text{ psi} \Rightarrow C_{Design} = 2575 \text{ psi}$$

Για το liner 4½ in:

A) Στην επιφάνεια: $C_1 = 0$

B) Σε βάθος CSD-L:

$$C_2 = 0,052 \times (CSD - L) \times \rho_m = \frac{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \times 9,76 \text{ ppg} \times (9921 \text{ ft} - 9090 \text{ ft}) \Rightarrow C_2 = 422 \text{ psi}$$

Γ) Σε βάθος CSD:

$$C_3 = 0,052 \times CSD \times \rho_m = \frac{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \times 9921 \text{ ft} \times 9,76 \text{ ppg} \Rightarrow C_3 = 5053 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή από τις παραπάνω πιέσεις και λαμβάνοντας υπ' όψη συντελεστή σχεδιασμού το 1,1 για το κριτήριο της θλίψης προκύπτει:

$$C_{Design} = 1,1 \times C_3 = 1,1 \times 5053 \text{ psi} \Rightarrow C_{Design} = 5539 \text{ psi}$$

4.3 Υπολογισμός Κριτηρίου Διάρρηξης

Για το liner 7 in

Θεωρείται περιορισμένη εισροή αερίου.

$$P_f = (0,052 \times \rho_m \times CSD) - 200 = \left(\frac{0,052 \frac{psi}{ft}}{ppg} \times 14,18 ppg \times 8596 ft \right) - 200 psi$$

$$= 6338 psi - 200 psi \Rightarrow P_f = 6138 psi$$

(κατά τον υπολογισμό της πίεσης σχηματισμού αφαιρούνται 200 psi για λόγους ασφαλείας)

A) Στην επιφάνεια:

$$\text{Από εξίσωση (3.23)} \rightarrow B_1 = P_f - G \times TD$$

Όπου:

P_f : η πίεση του σχηματισμού στο εξεταζόμενο βάθος, psi,

G : η βαθμίδα του αερίου = 0,1 psi/ft,

TD : το τελικό βάθος της επόμενης διάτρησης, ft.

$$B_1 = 6138 psi - 0,1 \frac{psi}{ft} \times 9921 ft \Rightarrow B_1 = 5145,9 psi$$

B) Σε βάθος CSD:

$$B_2 = P_f - G \times (TD - CSD) - 0,465 \times CSD$$

$$= 6138 psi - 0,1 \frac{psi}{ft} \times (9921 ft - 8596 ft) - 0,465 \frac{psi}{ft} \times 8596 ft \Rightarrow$$

$$B_2 = 6138 psi - 132,5 psi - 3997 psi \Rightarrow B_2 = 2009 psi$$

Χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή από τις παραπάνω πιέσεις και λαμβάνοντας υπ' όψη συντελεστή σχεδιασμού το 1,2 για το κριτήριο της διάρρηξης προκύπτει:

$$B_{Design} = 1,2 \times B_1 = 1,2 \times 5145,9 \Rightarrow B_{Design} = 6175 psi$$

Για το liner 4½ in

$$P_f = (0,052 \times \rho_m \times CSD) - 200 = \left(\frac{0,052 \frac{psi}{ft}}{ppg} \times 9,76 ppg \times 9921 ft \right) - 200 psi \Rightarrow$$

$$P_f = 5035 psi - 200 psi \Rightarrow P_f = 4835 psi$$

$$\text{A) Στην επιφάνεια: } B_1 = P_f - G \times TD = 4835 psi - 0,1 \frac{psi}{ft} \times 9921 ft \Rightarrow B_1 = 3842,9 psi$$

B) Σε βάθος CSD:

$$B_2 = P_f - G \times (TD - CSD) - 0,465 \times CSD$$

$$= 4835 \text{ psi} - 0,1 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (9921 \text{ ft} - 9921 \text{ ft}) - 0,465 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 9921 \text{ ft} \Rightarrow$$

$$B_2 = 4835 \text{ psi} - 4613 \text{ psi} \Rightarrow B_2 = 222 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή από τις παραπάνω πιέσεις και λαμβάνοντας υπ' όψη συντελεστή σχεδιασμού το 1,2 για το κριτήριο της διάρρηξης προκύπτει:

$$B_{Design} = 1,2 \times B_1 = 1,2 \times 3842,9 \text{ psi} \Rightarrow B_{Design} = 4611,5 \text{ psi}$$

Πίνακας 4.4: Σύνοψη πιέσεων θλιπτικής αστοχίας και διάρρηξης σχεδιασμού της σωλήνωσης

OD (in)	C_{Design} (psi)	B_{Design} (psi)
7	2575	6175
4½	5539	4611,5

4.4 Επιλογή Κατηγορίας Σωληνώσεων

Γνωρίζοντας τις πιέσεις σχεδιασμού όσον αφορά τη θλιπτική αστοχία και τη διάρρηξη γίνεται η επιλογή κατάλληλων κατηγοριών σωλήνωσης, για τις περιπτώσεις 7 και 4½ in αντίστοιχα, από τον Π2 του παραρτήματος (στο σχήμα 4.5 παριστάνεται τα αντίστοιχα αποσπάσματα του πίνακα Π2). Οι κατηγορίες των σωληνώσεων που επιλέχθηκαν, τα γεωμετρικά καθώς και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά καταγράφονται στον πίνακα 4.5. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε κατηγορία L-80 έναντι των άλλων κατηγοριών που πληρούν επίσης τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αντοχής αποτελεί το γεγονός ότι το κοίτασμα περιέχει H₂S και η κατηγορία L-80 είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως διεθνώς σε τέτοια περιβάλλοντα. Η κατηγορία L-80 προτιμήθηκε έναντι της οικονομικότερης C-75 που επίσης πληροί τις απαιτήσεις αντοχής, διότι η C-75 σύμφωνα με το τελευταίο πρότυπα του API (ANSI/API TR 5C3, 2008) δεν περιλαμβάνεται πλέον στις κατηγορίες του API. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα η εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων αναγράφονται στον πίνακα Π1 του παραρτήματος, ενώ στο σχήμα 4.6 παριστάνονται τα απαραίτητα αποσπάσματα του πίνακα Π1.

177.8	7	C-75	Long Round	34.23	23.00	41	5946	26	3771	185	416
177.8	7	C-75	Buttress	34.23	23.00	41	5946	26	3771	248	557
177.8	7	C-75	Long Round	38.69	26.00	47	6817	36	5221	217	488
177.8	7	C-75	Buttress	38.69	26.00	47	6817	36	5221	281	632
177.8	7	C-75	Long Round	43.16	29.00	53	7687	47	6817	250	562
177.8	7	C-75	Buttress	43.16	29.00	53	7687	47	6817	314	706
177.8	7	C-75	Long Round	47.62	32.00	58	8412	57	8267	282	634

114.3	4 1/2	C-75	Long Round	17.26	11.60	50	7252	42	6091	94	211
114.3	4 1/2	C-75	Buttress	17.26	11.60	50	7252	42	6091	128	288
114.3	4 1/2	C-75	Long Round	20.09	13.50	62	8992	56	8122	114	256
114.3	4 1/2	C-75	Buttress	20.09	13.50	62	8992	56	8122	149	335
114.3	4 1/2	C-75	Plain End	22.47	15.10	68	9862	72	10442	*	*

Σχήμα 4.5: Αποσπάσματα του πίνακα P2 (Trican Well Service, 2006)

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)
4½	9.50	H-40	0.205	4.090
	9.50	J-55	0.205	4.090
	10.50	J-55	0.224	4.052
	11.60	J-55	0.250	4.000
	9.50	K-55	0.205	4.090
	10.50	K-55	0.224	4.052
	11.60	K-55	0.250	4.000
	13.50	C-75	0.290	3.920
	11.60	L-80	0.250	4.000
	13.50	L-80	0.290	3.920

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)
7	17.00	H-40	0.231	6.538
	20.00	H-40	0.272	6.456
	20.00	J-55	0.272	6.456
	23.00	J-55	0.317	6.366
	26.00	J-55	0.362	6.276
	20.00	K-55	0.272	6.456
	23.00	K-55	0.317	6.366
	26.00	K-55	0.362	6.276
	23.00	C-75	0.317	6.366
	26.00	C-75	0.362	6.276
	29.00	C-75	0.408	6.184
	32.00	C-75	0.453	6.094

Σχήμα 4.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων, απόσπασμα παραρτήματος πίνακα P1 (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991)

Πίνακας 4.5: Σύνοψη κατηγορίας, γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών επιλεχθέντων σωληνώσεων

OD (in)	ID (in)	Weight (lb/ft)	Grade	Threads & Couplings	Joint Yield (1000lbf)
7	6,276	26	C-75	Long Round	488
4½	4,000	11,6	C-75	Long Round	211

4.5 Υπολογισμός Κριτηρίου Αξονικών Φορτίων

Για το liner 7 in

Από εξίσωση (3.30) $\rightarrow F_{wt} = W_n \times TVD$

Όπου,

F_{wt} : βάρος σωλήνωσης (στον αέρα), lbf,

W_n : μάζα σωλήνωσης (ονομαστικό βάρος), lb/ft,

TVD: τελικό κατακόρυφο βάθος, ft.

$$F_{wt} = 26 \frac{lb}{ft} \times 8760 ft = 227760 lbf$$

Από εξίσωση (3.34) $\rightarrow F_{buoy} = F_{wt} \times f_{buoy}$

Όπου,

f_{buoy} : συντελεστής άνωσης.

$$F_{buoy} = 227760 lbf \times \frac{65,5 ppg - 14,18 ppg}{65,5 ppg} = 177652,8 lbf$$

Από εξίσωση (3.36) $\rightarrow F_{bend} = 63 \times W_n \times OD \times \theta$

Όπου,

F_{bend} : δύναμη κάμψης, lbf,

θ : γωνία κάμψης (dog – leg severity), μοίρες/100 ft.

$$F_{bend} = 63 \times 26 \frac{lb}{ft} \times 7 in \times 10^\circ / 100ft = 114660 lbf$$

Από εξίσωση (3.38) \rightarrow

$$F_{shock}(max) = 1500 \times W_n = 1500 \times 26 lb/ft = 39000 lbf$$

Από εξίσωση (3.39) \rightarrow

$$F_t = \frac{\pi \times ID^2}{4} \times P_{test} = \frac{3,14 \times (6,276 in)^2}{4} \times (14,18 + 0,5) = 454 lbf$$

(Στη βιομηχανία ως δοκιμαστική πίεση στη σωλήνωση λαμβάνεται η πίεση της λάσπης αυξημένη κατά 0,5 ppg).

Από εξίσωση (3.40) $\rightarrow F_{temp} = -200 \times A_s \times \Delta T$

Όπου,

ΔT : η μεταβολή της θερμοκρασίας, °F.

$$F_{temp} = -200 \frac{3,14 \times (7^2 - 6,276^2)}{4} \times 244,4 - 175,82 \Rightarrow$$

$$F_{temp} = -200 \times 7,54 \times 69 = -104052 \text{ lbf}$$

$$F_{drag} = 100000 \text{ lbf}$$

- Καθέλκυση σωλήνωσης με χρήση ολισθητήρων (ανάπτυξη φορτίων λόγω κραδασμών)

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{shock} = 227760 - 177652,8 + 114660 + 39000 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 203767,2 \text{ lbf}$$

- Παγίδευση (stuck) σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{drag} = 227760 - 177652,8 + 114660 + 100000 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 264767,2 \text{ lbf}$$

- Συνολικό αξονικό φορτίο κατά τη διάτρηση και την παραγωγή

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{drag} + F_{bal} + F_{temp} = 264767,2 + 0 - 104052 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 160715,2 \text{ lbf}$$

Για το liner 4½ in

Από εξίσωση (3.30) $\rightarrow F_{wt} = W_n \times TVD$

Όπου,

F_{wt} : βάρος σωλήνωσης (στον αέρα), lbf,

W_n : μάζα σωλήνωσης (ονομαστικό βάρος), lb/ft,

TVD: τελικό κατακόρυφο βάθος, ft.

$$F_{wt} = 11,6 \frac{lb}{ft} \times 9239 ft = 107172,4 lbf$$

Από εξίσωση (3.34) $\rightarrow F_{buoy} = F_{wt} \times f_{buoy}$

Όπου,

f_{buoy} : συντελεστής άνωσης.

$$F_{buoy} = 107172,4 \times \frac{65,5 - 9,76}{65,5} = 91096,54 lbf$$

Από εξίσωση (3.36) $\rightarrow F_{bend} = 63 \times W_n \times OD \times \theta$

Όπου,

F_{bend} : δύναμη κάμψης, lbf,

θ : ένταση γωνίας κάμψης (dog – leg severity), μοίρες/100 ft,

$$F_{bend} = 63 \times 11,6 \times 4,5 \times 4 = 13154,4 lbf$$

Από εξίσωση (3.38) \rightarrow

$$F_{shock^{max}} = 1500 \times W_n = 1500 \times 11,6 = 17400 lbf$$

Από εξίσωση (3.39) \rightarrow

$$F_t = \frac{\pi \times ID^2}{4} \times P_{test} = \frac{3,14 \times 4^2}{4} \times (9,76 + 0,5) = 22,82 lbf$$

(Στη βιομηχανία ως δοκιμαστική πίεση στη σωλήνωση λαμβάνεται η πίεση της λάσπης αυξημένη κατά 0,5 ppg).

Από εξίσωση (3.40) $\rightarrow F_{temp} = -200 \times A_s \times \Delta T$

Όπου,

ΔT : η μεταβολή της θερμοκρασίας, °F.

$$F_{temp} = -200 \times A_s \times \Delta T = -200 \frac{3,14 \times (5^2 - 4^2)}{4} \times (244,4 - 182,12) \Rightarrow$$

$$F_{temp} = -200 \times 7,065 \times 62 = -87606 lbf$$

$$F_{drag} = 100000 lbf$$

- Καθέλκυση σωλήνωσης με χρήση ολισθητήρων (ανάπτυξη φορτίων λόγω κραδασμών)

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{shock} = 107172,4 - 91096,54 + 13154,4 + 17400 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 46630,26 \text{ lbf}$$

- Παγίδευση (stuck) σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{drag} \\ = 107172,4 - 91096,54 + 13154,4 + 100000 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 129230,26 \text{ lbf}$$

- Συνολικό αξονικό φορτίο κατά τη διάτρηση και την παραγωγή

$$F_{total} = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{drag} + F_{bal} + F_{temp} = 129230,26 + 0 - 87606 \Rightarrow$$

$$F_{total} = 41624,26 \text{ lbf}$$

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4.6) καταγράφεται η τελική επιλογή των γεωμετρικών, των μηχανικών χαρακτηριστικών και η κατηγορία των liner 7 και 4½ in.

Πίνακας 4.6: Τελική επιλογή σωληνώσεων

OD (in)	ID (in)	Weight (lb/ft)	Grade	Threads & Couplings	Joint Yield (1000lbf)
7	6,276	26	C-75	Long Round	488
4½	4,000	11,6	C-75	Long Round	211

Κεφάλαιο 5°. Συμπεράσματα

Η σωλήνωση των γεωτρήσεων αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας τόσο για την εύρυθμη λειτουργία των γεωτρήσεων όσο και για την ασφάλεια των εργαζομένων. Οποιαδήποτε αστοχία της σωλήνωσης δύναται να εξελιχθεί σε μεγάλη οικονομική και περιβαλλοντική καταστροφή, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από ανθρώπινες απώλειες. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός της σωλήνωσης των γεωτρήσεων λαμβάνει υπόψη τις δυσμενέστερες συνθήκες που ενδέχεται να προκύψουν και επιπλέον χρησιμοποιούνται για λόγους ασφαλείας προκαθορισμένοι συντελεστές σχεδιασμού, οι οποίοι προσαυξάνουν τα μεγέθη που προσδιορίζονται.

Βάσει του προτύπου API Bulletin 5C3 του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίων (American Petroleum Institute – API) και ακολουθώντας τη διεθνή βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό σωλήνωσης γεωτρήσεων, η σωλήνωση οποιαδήποτε γεώτρησης έχει ως αφετηρία το διάγραμμα της βαθμίδας ρωγμάτωσης ως προς το βάθος. Στο διάγραμμα αυτό καθορίζεται η μεταβολή της πίεσης των σχηματισμών, από τους οποίους διέρχεται η γεώτρηση, μέχρι τον τελικό στόχο. Βάσει των πιέσεων ρωγμάτωσης επιλέγονται τα βάθη έδρασης των σωληνώσεων και εν συνεχεία οι διαστάσεις αυτών που είναι συνάρτηση των διαστάσεων των κοπτικών (προκαταρκτικός σχεδιασμός).

Στη συνέχεια ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός της σωλήνωσης κατά τον οποίο αρχικά ορίζονται τα σενάρια φόρτισης για κάθε στήλη σωλήνωσης (επιφανειακή, ενδιάμεση, παραγωγική) και για κάθε φάση λειτουργίας της γεώτρησης (διάτρηση, ολοκλήρωση, παραγωγή). Στο πλαίσιο αυτό προσδιορίζονται η πίεση θλίψης (εξωτερική πίεση) και διάρρηξης (εσωτερική πίεση), για κάθε περίπτωση, οι οποίες αποτελούν και τον καθοριστικό παράγοντα για την τελική επιλογή του κατάλληλου βάρους και κατηγορίας σωληνώσεων (λεπτομερής σχεδιασμός). Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν τα αξονικά φορτία (biaxial loads) που δέχεται η σωλήνωση, ώστε να συγκριθεί η συνιστώσα αυτών με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας που έχει επιλεγεί με σκοπό την αποφυγή πιθανής αστοχίας.

Στην περίπτωση, όμως, των παρεκκλινόμενων γεωτρήσεων η σωλήνωση καλείται να ανταπεξέλθει σε επιπρόσθετα φορτία, τα οποία προέρχονται από την μη ευθύγραμμη πορεία της γεώτρησης ή από τις συνθήκες που επικρατούν στον ταμιευτήρα (για

παράδειγμα η ύπαρξη υδρόθειου). Για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός των τάσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών) της σωλήνωσης και ταυτόχρονα ο έλεγχος των τάσεων αυτών σε σύγκριση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατηγορίας που έχει επιλεχθεί. Ο έλεγχος σε τριαξονική φόρτιση της σωλήνωσης γίνεται σε ακραίες περιπτώσεις οι οποίες είναι οι εξής:

- Η πίεση των πόρων του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη από 12.000 psi.
- Η θερμοκρασία στο κατώτερο τμήμα της σωλήνωσης υπερβαίνει τους 250 °F (~120°C).
- Η σωλήνωση τοποθετείται σε περιβάλλον με υψηλή περιεκτικότητα σε H₂S.
- Ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου (OD) προς το πάχος των τοιχωμάτων της σωλήνωσης (t) είναι μικρότερος από 15 ($\frac{OD}{t} < 15$).
- Στις περιπτώσεις ενδιάμεσων και παραγωγικών σωληνώσεων που τοποθετούνται σε γεωτρήσεις υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (High Pressure-High Temperature wells – HPHT wells).

Όσον αφορά στις θέσεις (σημεία) της σωλήνωσης στα οποία πρέπει να εκτελεστούν οι υπολογισμοί της τριαξονικής φόρτισης, είναι τα ακόλουθα:

- Στην επιφάνεια.
- Στην κορυφή της στήλης τσιμέντου (Top of Cement – TOC).
- Στις θέσεις αλλαγής ονομαστικού βάρους, κατηγορίας, εσωτερικής ή εξωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης (περιπτώσεις σύνθετων σωληνώσεων - combination strings).
- Στις θέσεις μεταβολής της εξωτερικής πίεσης.
- Στις θέσεις μεταβολής της γεωμετρίας της γεώτρησης: αλλαγή γωνίας κάμψης τροχιάς (dogleg severity), έκπλυση τοιχωμάτων (washouts) κ.λπ.

Με τον σχεδιασμό της σωλήνωσης κεκλιμένων γεωτρήσεων, εκτελώντας μηχανική ανάλυση (mechanical analysis) και λαμβάνοντας υπόψη τη δράση των επιτόπου τάσεων (in-situ stresses), ασχολήθηκαν οι Yin & Gao, η έρευνα των οποίων παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.12 της παρούσας. Όμως, η μεθοδολογία που ανέπτυξαν περιορίζεται σε παρεκκλινόμενες γεωτρήσεις συγκεκριμένης τροχιάς, με συνέπεια, όπως υποστηρίζουν και οι συγγραφείς, να μην ενδείκνυται για το σχεδιασμό της σωλήνωσης για οποιαδήποτε γενικά παρεκκλινόμενη γεώτρηση.

Κατά το σχεδιασμό της παραγωγικής σωλήνωσης της γεώτρησης στη μελέτη περίπτωσης παρατηρήθηκε ότι τα σημαντικότερα φορτία που αναπτύσσονται είναι αποτέλεσμα της δύναμης κάμψης και της δύναμης άνωσης. Πιο συγκεκριμένα, η δύναμη κάμψης εξαρτάται από τη γωνία dog-leg, η οποία λαμβάνει μεγάλες τιμές στις παρεκκλινόμενες γεωτρήσεις με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η δύναμη αυτή. Ταυτόχρονα, η δύναμη άνωσης, εξαρτάται από την πυκνότητα της λάσπης, λειτουργεί ευεργετικά στο σχεδιασμό διότι μειώνει σημαντικά τη δύναμη λόγω ίδιου βάρους της σωλήνωσης. Σε περίπτωση που σημειωθεί απώλεια της λάσπης που υπάρχει μέσα στη γεώτρηση η δύναμη άνωσης εξασθενεί ή κατά την ολοκληρωτική απώλεια του ρευστού μηδενίζεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό το αξονικό φορτίο που εφαρμόζεται στη σωλήνωση.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική στο σχεδιασμό της σωλήνωσης στη μελέτη περίπτωσης η ορθολογική επιλογή κατηγορίας, με βάση τους καταλόγους του API (American Petroleum Institute), είναι η σωλήνωση C-75 και για τα δύο liner. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε κατηγορία L-80 έναντι των άλλων κατηγοριών που πληρούν επίσης τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αντοχής αποτελεί το γεγονός ότι το κοίτασμα περιέχει H_2S και η κατηγορία L-80 είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως διεθνώς σε τέτοια περιβάλλοντα. Η κατηγορία L-80 προτιμήθηκε έναντι της οικονομικότερης C-75 που επίσης πληροί τις απαιτήσεις αντοχής, διότι η C-75 σύμφωνα με το τελευταίο πρότυπα του API (ANSI/API TR 5C3, 2008) δεν περιλαμβάνεται πλέον στις κατηγορίες του API.

Επιπλέον, το liner των 7 in που τοποθετήθηκε στη γεώτρηση επιλέχθηκε με ονομαστικό βάρος 29 lb/ft σε αντίθεση με το liner ονομαστικού βάρους 26 lb/ft που επιλέχθηκε με βάση τον σχεδιασμό της παρούσας διπλωματικής. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι στην παρούσα εργασία για την εφαρμογή του κριτηρίου της διάρρηξης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που αφορούν στον σχεδιασμό του ενδιάμεσου τύπου σωλήνωσης, όπου θεωρείται περιορισμένη εισροή αερίου, και, συνεπώς, προσδιορίζεται χαμηλότερη τιμή πίεσης διάρρηξης. Δεν ήταν δυνατή η χρήση των σχέσεων που αφορούν στον σχεδιασμό του παραγωγικού τύπου σωλήνωσης (στον οποίο ανήκουν και τα liners που εξετάζονται εδώ), όπου θεωρείται απεριόριστη εισροή αερίου και ανάπτυξη της μέγιστης πίεσης διάρρηξης στο παρέμβυσμα παραγωγής (production

racker), θέση για την οποία δεν υπήρχαν διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα δεδομένα (πυκνότητα ρευστού που παρέμεινε στο παρέμβυσμα).

Σε μια σωλήνωση η μέγιστη εφελκυστική τάση ασκείται στο ανώτατο στέλεχος, με αποτέλεσμα να απαιτείται κατηγορία με ισχυρά μηχανικά χαρακτηριστικά ή βαριά στελέχη σε αυτό το σημείο. Η πίεση διάρρηξης παρουσιάζει μέγιστη τιμή στην κορυφή, με συνέπεια η σωλήνωση πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της. Στους υπολογισμούς θλιπτικής αστοχίας οι δυσμενέστερες συνθήκες λαμβάνουν χώρα στον πυθμένα της γεώτρησης, έτσι καθίσταται αναγκαία η επιλογή σωλήνωσης μεγάλου βάρους και στον πυθμένα.

Οι απαιτήσεις όσον αφορά την πίεση διάρρηξης και τον εφελκυσμό είναι διαφορετικές από αυτές του κριτηρίου θλίψης. Έτσι, λοιπόν, στο σχεδιασμό της σωλήνωσης πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός στην επιλογή κατηγορίας των σωληνώσεων. Ο συμβιβασμός αυτός πετυχαίνεται με τη δημιουργία μιας σύνθετης σωλήνωσης. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιείται σωλήνωση διαφορετικής κατηγορίας και βάρους ανάλογα με το βάθος στο οποίο εδράζεται η εκάστοτε σωλήνωση. Κάθε κατηγορία σωλήνωσης καλείται να αντέξει τα φορτία που ασκούνται σε αυτή για συγκεκριμένο βάθος έδρασης. Ισχυρή και βαριά σωλήνωση τοποθετείται στο μέσο τμήμα της γεώτρησης και βαριά σωλήνωση ενδέχεται να τοποθετηθεί στον πυθμένα της γεώτρησης προκειμένου να ανταπεξέλθει σε συνθήκες υψηλής θλιπτικής πίεσης. Η μέθοδος της σύνθετης σωλήνωσης αποτελεί τον πιο οικονομικό και ασφαλή τρόπο επιλογής σωληνώσεων.

Παράρτημα

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991)

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)
4½	9.50	H-40	0.205	4.090	3.965
	9.50	J-55	0.205	4.090	3.965
	10.50	J-55	0.224	4.052	3.927
	11.60	J-55	0.250	4.000	3.875
	9.50	K-55	0.205	4.090	3.965
	10.50	K-55	0.224	4.052	3.927
	11.60	K-55	0.250	4.000	3.875
	11.60	C-75	0.250	4.000	3.875
	13.50	C-75	0.290	3.920	3.795
	11.60	L-80	0.250	4.000	3.875
	13.50	L-80	0.290	3.920	3.795
	11.60	N-80	0.250	4.000	3.875
	13.50	N-80	0.290	3.920	3.795
	11.60	C-90	0.250	4.000	3.875
	13.50	C-90	0.290	3.920	3.795
	11.60	C-95	0.250	4.000	3.875
	13.50	C-95	0.290	3.920	3.795
	11.60	P-110	0.250	4.000	3.875
	13.50	P-110	0.290	3.920	3.795
	15.10	P-110	0.337	3.926	3.701
5	11.50	J-55	0.220	4.560	4.435
	13.00	J-55	0.253	4.494	4.369
	15.00	J-55	0.296	4.408	4.283
	11.50	K-55	0.220	4.560	4.435
	13.00	K-55	0.253	4.494	4.369
	15.00	K-55	0.296	4.408	4.283
	15.00	C-75	0.296	4.408	4.283
	18.00	C-75	0.362	4.276	4.151
	21.40	C-75	0.437	4.126	4.001
	23.20	C-75	0.478	4.044	3.919
	24.10	C-75	0.500	4.000	3.875
	15.00	L-80	0.296	4.408	4.283
	18.00	L-80	0.362	4.276	4.151
	21.40	L-80	0.437	4.126	4.001
	23.20	L-80	0.478	4.044	3.919
	24.10	L-80	0.500	4.000	3.875
	15.00	N-80	0.296	4.408	4.283
	18.00	N-80	0.362	4.276	4.151
	21.40	N-80	0.437	4.126	4.001
	23.20	N-80	0.478	4.044	3.919
	24.10	N-80	0.500	4.000	3.875
	15.00	C-90	0.296	4.408	4.283
	18.00	C-90	0.362	4.276	4.151
	21.40	C-90	0.437	4.126	4.001
	23.20	C-90	0.478	4.044	3.919
	24.10	C-90	0.500	4.000	3.875
	15.00	C-95	0.296	4.408	4.283
	18.00	C-95	0.362	4.276	4.151
	21.40	C-95	0.437	4.126	4.001
	23.20	C-95	0.478	4.044	3.919
	24.10	C-95	0.500	4.000	3.875
	15.00	P-110	0.296	4.408	4.283
18.00	P-110	0.362	4.276	4.151	
21.40	P-110	0.437	4.126	4.001	
23.20	P-110	0.478	4.044	3.919	
24.10	P-110	0.500	4.000	3.875	
5½	14.00	H-40	0.244	5.012	4.887
	14.00	J-55	0.244	5.012	4.887
	15.50	J-55	0.275	4.950	4.825
	17.00	J-55	0.304	4.892	4.767
	14.00	K-55	0.244	5.012	4.887
	15.50	K-55	0.275	4.950	4.825
	17.00	K-55	0.304	4.892	4.767
	17.00	C-75	0.304	4.892	4.767
	20.00	C-75	0.361	4.778	4.653
	23.00	C-75	0.415	4.670	4.545
	17.00	L-80	0.304	4.892	4.767
	20.00	L-80	0.361	4.778	4.653
	23.00	L-80	0.415	4.670	4.545
	17.00	N-80	0.304	4.892	4.767
	20.00	N-80	0.361	4.778	4.653
	23.00	N-80	0.415	4.670	4.545
17.00	C-90	0.304	4.892	4.767	
20.00	C-90	0.361	4.778	4.653	
23.00	C-90	0.415	4.670	4.545	
26.00	C-90	0.476	4.548	4.423	
35.00	C-90	0.650	4.200	4.075	
17.00	C-95	0.361	4.892	4.767	
20.00	C-95	0.361	4.778	4.653	
23.00	C-95	0.415	4.670	4.545	
17.00	P-110	0.304	4.892	4.767	
20.00	P-110	0.361	4.778	4.653	
23.00	P-110	0.415	4.670	4.545	
6¾	30.00	H-40	0.288	6.049	5.924
	30.00	J-55	0.288	6.049	5.924
	34.00	J-55	0.352	5.921	5.796
	30.00	K-55	0.288	6.049	5.924
	34.00	K-55	0.352	5.921	5.796
	34.00	C-75	0.352	5.921	5.796
	36.00	C-75	0.417	5.791	5.666
	32.00	C-75	0.475	5.675	5.550
	34.00	L-80	0.352	5.921	5.796
	38.00	L-80	0.417	5.791	5.666
	32.00	L-80	0.475	5.675	5.550
	34.00	N-80	0.352	5.921	5.796
	38.00	N-80	0.417	5.791	5.666
	32.00	N-80	0.475	5.675	5.550
	34.00	C-90	0.352	5.921	5.796
	38.00	C-90	0.417	5.791	5.666
32.00	C-90	0.475	5.675	5.550	
34.00	C-95	0.352	5.921	5.796	
38.00	C-95	0.417	5.791	5.666	
32.00	C-95	0.475	5.675	5.550	
34.00	P-110	0.352	5.921	5.796	
38.00	P-110	0.417	5.791	5.666	
32.00	P-110	0.475	5.675	5.550	

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991) (συνέχεια)

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)
7	17.00	H-40	0.231	6.538	6.413
	30.00	H-40	0.272	6.456	6.331
	30.00	J-55	0.272	6.456	6.331
	33.00	J-55	0.317	6.366	6.241
	36.00	J-55	0.362	6.276	6.151
	30.00	K-55	0.272	6.456	6.331
	33.00	K-55	0.317	6.366	6.241
	36.00	K-55	0.362	6.276	6.151
	33.00	C-75	0.317	6.366	6.241
	36.00	C-75	0.362	6.276	6.151
	39.00	C-75	0.408	6.184	6.059
	32.00	C-75	0.453	6.094	5.969
	35.00	C-75	0.498	6.004	5.879
	38.00	C-75	0.540	5.920	5.795
	33.00	L-80	0.317	6.366	6.241
	36.00	L-80	0.362	6.276	6.151
	39.00	L-80	0.408	6.184	6.059
	32.00	L-80	0.453	6.094	5.969
	35.00	L-80	0.498	6.004	5.879
	38.00	L-80	0.540	5.920	5.795
	33.00	N-80	0.317	6.366	6.241
	36.00	N-80	0.362	6.276	6.151
	39.00	N-80	0.408	6.184	6.059
	32.00	N-80	0.453	6.094	5.969
	35.00	N-80	0.498	6.004	5.879
	38.00	N-80	0.540	5.920	5.795
	33.00	C-90	0.317	6.366	6.241
	36.00	C-90	0.362	6.276	6.151
	39.00	C-90	0.408	6.184	6.059
	32.00	C-90	0.453	6.094	5.969
	35.00	C-90	0.498	6.004	5.879
	38.00	C-90	0.540	5.920	5.795
33.00	C-95	0.317	6.366	6.241	
36.00	C-95	0.362	6.276	6.151	
39.00	C-95	0.408	6.184	6.059	
32.00	C-95	0.453	6.094	5.969	
35.00	C-95	0.498	6.004	5.879	
38.00	C-95	0.540	5.920	5.795	
26.00	P-110	0.362	6.276	6.151	
29.00	P-110	0.408	6.184	6.059	
32.00	P-110	0.453	6.094	5.969	
35.00	P-110	0.498	6.004	5.879	
38.00	P-110	0.540	5.920	5.795	
7½	24.00	H-40	0.300	7.025	6.900
	26.40	J-55	0.328	6.968	6.844
	26.40	K-55	0.328	6.968	6.844
	26.40	C-75	0.328	6.968	6.844
	29.70	C-75	0.375	6.875	6.750
	33.70	C-75	0.430	6.765	6.640
	39.00	C-75	0.500	6.625	6.500
	42.80	C-75	0.562	6.501	6.376
	45.30	C-75	0.595	6.435	6.310
	47.10	C-75	0.625	6.375	6.250
	26.40	N-80	0.328	6.968	6.844
	29.70	N-80	0.375	6.875	6.750
	33.70	N-80	0.430	6.765	6.640
	39.00	N-80	0.500	6.625	6.500
	42.80	N-80	0.562	6.501	6.376
	45.30	N-80	0.595	6.435	6.310
	47.10	N-80	0.625	6.375	6.250
	26.40	C-90	0.328	6.968	6.844
	29.70	C-90	0.375	6.875	6.750
	33.70	C-90	0.430	6.765	6.640
39.00	C-90	0.500	6.625	6.500	
42.80	C-90	0.562	6.501	6.376	
45.30	C-90	0.595	6.435	6.310	
47.10	C-90	0.625	6.375	6.250	
8½	28.00	H-40	0.304	8.117	7.992
	32.00	H-40	0.352	7.521	7.396
	24.00	J-55	0.264	8.897	7.972
	32.00	J-55	0.352	7.521	7.396
	36.00	J-55	0.400	7.125	7.000
	24.00	K-55	0.264	8.897	7.972
	32.00	K-55	0.352	7.521	7.396
	36.00	K-55	0.400	7.125	7.000
	36.00	C-75	0.400	7.125	7.000
	40.00	C-75	0.450	7.225	7.600
	44.00	C-75	0.500	7.125	7.500
	49.00	C-75	0.557	7.511	7.386
	36.00	L-80	0.400	7.125	7.000
	40.00	L-80	0.450	7.225	7.600
	44.00	L-80	0.500	7.125	7.500
	49.00	L-80	0.557	7.511	7.386
	36.00	N-80	0.400	7.125	7.000
	40.00	N-80	0.450	7.225	7.600
	44.00	N-80	0.500	7.125	7.500
	49.00	N-80	0.557	7.511	7.386
36.00	C-90	0.400	7.125	7.000	
40.00	C-90	0.450	7.225	7.600	
44.00	C-90	0.500	7.125	7.500	
49.00	C-90	0.557	7.511	7.386	

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991) (συνέχεια)

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)		
8%	36.00	C-95	0.400	7.825	7.700		
	40.00	C-95	0.450	7.725	7.600		
	44.00	C-95	0.500	7.625	7.500		
	49.00	C-95	0.557	7.511	7.386		
	40.00	P-110	0.450	7.725	7.600		
	44.00	P-110	0.500	7.625	7.500		
9%	32.30	H-40	0.312	8.000	8.845		
	36.00	J-55	0.352	8.920	8.765		
	40.00	J-55	0.395	8.835	8.679		
	36.00	K-55	0.352	8.920	8.765		
	40.00	K-55	0.395	8.835	8.679		
	40.00	C-75	0.395	8.835	8.679		
	43.50	C-75	0.435	8.755	8.599		
	47.00	C-75	0.472	8.681	8.525		
	53.50	C-75	0.545	8.535	8.379		
	40.00	L-80	0.395	8.835	8.679		
	43.50	L-80	0.435	8.755	8.599		
	47.00	L-80	0.472	8.681	8.525		
	53.50	L-80	0.545	8.535	8.379		
	40.00	N-80	0.395	8.835	8.679		
	43.50	N-80	0.435	8.755	8.599		
	47.00	N-80	0.472	8.681	8.525		
	53.50	N-80	0.545	8.535	8.379		
	40.00	C-90	0.395	8.835	8.679		
	43.50	C-90	0.435	8.755	8.599		
	47.00	C-90	0.472	8.681	8.525		
	53.50	C-90	0.545	8.535	8.379		
40.00	C-95	0.395	8.835	8.679			
43.50	C-95	0.435	8.755	8.599			
47.00	C-95	0.472	8.681	8.525			
53.50	C-95	0.545	8.535	8.379			
43.50	P-110	0.435	8.755	8.599			
47.00	P-110	0.472	8.681	8.525			
53.50	P-110	0.545	8.535	8.379			
10%	32.75	H-40	0.279	10.182	10.036		
	40.50	H-40	0.350	10.080	9.894		
	40.50	J-55	0.350	10.080	9.894		
	45.50	J-55	0.400	9.980	9.794		
	51.00	J-55	0.450	9.880	9.694		
	40.50	K-55	0.350	10.080	9.894		
	45.50	K-55	0.400	9.980	9.794		
	51.00	K-55	0.450	9.880	9.694		
	51.00	C-75	0.450	9.880	9.694		
	55.50	C-75	0.495	9.780	9.604		
	51.00	L-80	0.450	9.880	9.694		
	55.50	L-80	0.495	9.780	9.604		
	51.00	N-80	0.450	9.880	9.694		
	55.50	N-80	0.495	9.780	9.604		
	10%	51.00	C-90	0.450	9.880	9.694	
		55.50	C-90	0.495	9.780	9.604	
		51.00	P-110	0.450	9.880	9.694	
		55.50	P-110	0.495	9.780	9.604	
		11%	42.00	H-40	0.333	11.064	10.928
			47.00	J-55	0.375	11.000	10.844
			54.00	J-55	0.435	10.860	10.724
60.00			J-55	0.489	10.772	10.616	
47.00			K-55	0.375	11.000	10.844	
54.00			K-55	0.435	10.860	10.724	
60.00			K-55	0.489	10.772	10.616	
60.00			C-75	0.489	10.772	10.616	
60.00			L-80	0.489	10.772	10.616	
60.00			N-80	0.489	10.772	10.616	
60.00			C-90	0.489	10.772	10.616	
60.00	C-95		0.489	10.772	10.616		
60.00	P-110		0.489	10.772	10.616		
13%	48.00		H-40	0.330	12.715	12.559	
	54.50		J-55	0.380	12.615	12.459	
	61.00	J-55	0.430	12.515	12.359		
	68.00	J-55	0.480	12.415	12.259		
	54.50	K-55	0.380	12.615	12.459		
	61.00	K-55	0.430	12.515	12.359		
	68.00	K-55	0.480	12.415	12.259		
	68.00	C-75	0.480	12.415	12.259		
	72.00	C-75	0.514	12.317	12.191		
	68.00	L-80	0.480	12.415	12.259		
	72.00	L-80	0.514	12.317	12.191		
	68.00	N-80	0.480	12.415	12.259		
	72.00	N-80	0.514	12.317	12.191		
	68.00	G-90	0.480	12.415	12.259		
	72.00	G-90	0.514	12.317	12.191		
68.00	C-95	0.480	12.415	12.259			
72.00	C-95	0.514	12.317	12.191			
68.00	P-110	0.480	12.415	12.259			
72.00	P-110	0.514	12.317	12.191			

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr., 1991) (συνέχεια)

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)
16	55.00	H-40	0.375	15.250	15.062
	75.00	J-55	0.438	15.124	14.936
	84.00	J-55	0.495	15.010	14.822
	75.00	K-55	0.438	15.124	14.936
18%	84.00	K-55	0.495	15.010	14.822
	87.50	H-40	0.435	17.775	17.567
	87.50	J-55	0.435	17.755	17.567
20	87.50	K-55	0.435	17.755	17.567
	94.00	H-40	0.438	19.124	18.936
	94.00	J-55	0.438	19.124	18.936
	106.50	J-55	0.500	19.000	18.812
	133.00	J-55	0.635	18.738	18.542
	94.00	K-55	0.438	19.124	18.936
	106.50	K-55	0.500	19.000	18.812
133.00	K-55	0.635	18.738	18.542	

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
114.3	4 1/2	H-40	Short Round	14.14	9.50	22	3191	19	2756	34	76
114.3	4 1/2	K-55	Plain End	22.47	15.10	50	7252	53	7687	*	*
114.3	4 1/2	K-55	Plain End	27.98	18.80	63	9137	66	9572	*	*
114.3	4 1/2	J-55	Short Round	14.14	9.50	30	4351	23	3336	45	101
114.3	4 1/2	J-55	Buttress	14.14	9.50	30	4351	23	3336	90	202
114.3	4 1/2	J-55	Short Round	15.63	10.50	33	4786	28	4081	59	133
114.3	4 1/2	J-55	Buttress	15.63	10.50	33	4786	28	4081	100	225
114.3	4 1/2	J-55	Short Round	17.26	11.80	37	5366	34	4931	78	171
114.3	4 1/2	J-55	Long Round	17.26	11.80	37	5366	34	4931	80	180
114.3	4 1/2	J-55	Buttress	17.26	11.80	37	5366	34	4931	123	276
114.3	4 1/2	C-75	Long Round	17.26	11.80	50	7252	42	6091	94	211
114.3	4 1/2	C-75	Buttress	17.26	11.80	50	7252	42	6091	128	288
114.3	4 1/2	C-75	Long Round	20.09	13.50	62	8992	56	8122	114	256
114.3	4 1/2	C-75	Buttress	20.09	13.50	62	8992	56	8122	149	335
114.3	4 1/2	C-75	Plain End	22.47	15.10	68	9882	72	10442	*	*
114.3	4 1/2	C-75	Plain End	27.98	18.80	86	12473	89	12908	*	*
114.3	4 1/2	L-80	Long Round	17.26	11.80	54	7832	44	6381	94	211
114.3	4 1/2	L-80	Buttress	17.26	11.80	54	7832	44	6381	129	290
114.3	4 1/2	L-80	Long Round	20.09	13.50	62	8992	59	8557	114	256
114.3	4 1/2	L-80	Buttress	20.09	13.50	62	8992	59	8557	149	335
114.3	4 1/2	N-80	Long Round	17.26	11.80	54	7832	44	6381	99	223
114.3	4 1/2	N-80	Buttress	17.26	11.80	54	7832	44	6381	135	303
114.3	4 1/2	N-80	Long Round	20.09	13.50	62	8992	59	8557	120	270
114.3	4 1/2	N-80	Buttress	20.09	13.50	62	8992	59	8557	155	348
114.3	4 1/2	N-80	Plain End	22.47	15.10	72	10442	78	11022	*	*
114.3	4 1/2	N-80	Plain End	27.98	18.80	95	13778	95	13778	*	*

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
114.3	4 1/2	C-95	Long Round	17.26	11.60	64	9282	48	6962	104	234
114.3	4 1/2	C-95	Buttress	17.26	11.60	64	9282	48	6962	145	326
114.3	4 1/2	C-95	Long Round	20.09	13.50	74	10732	66	9572	126	283
114.3	4 1/2	C-95	Buttress	20.09	13.50	74	10732	66	9572	166	373
114.3	4 1/2	C-95	Buttress	26.34	17.70	102	14793	106	15373	*	*
114.3	4 1/2	C-95	Buttress	27.98	18.80	109	15809	113	16389	*	*
114.3	4 1/2	P-110	Long Round	17.26	11.60	74	10732	52	7542	124	279
114.3	4 1/2	P-110	Buttress	17.26	11.60	74	10732	52	7542	171	384
114.3	4 1/2	P-110	Long Round	20.09	13.50	86	12473	74	10732	150	337
114.3	4 1/2	P-110	Buttress	20.09	13.50	86	12473	74	10732	197	443
114.3	4 1/2	P-110	Long Round	22.47	15.10	99	14358	99	14358	181	407
114.3	4 1/2	P-110	Buttress	22.47	15.10	93	13488	99	14358	*	*
114.3	4 1/2	P-110	Plain End	22.47	15.10	99	14358	99	14358	*	*
114.3	4 1/2	P-110	Plain End	26.34	17.70	118	17114	123	17839	*	*
114.3	4 1/2	P-110	Plain End	27.98	18.80	127	18419	131	18999	*	*
127.0	5	J-55	Short Round	17.11	11.50	29	4206	21	3046	59	133
127.0	5	J-55	Short Round	19.35	13.00	34	4931	28	4061	75	169
127.0	5	J-55	Long Round	19.35	13.00	29	4206	28	4061	81	182
127.0	5	J-55	Buttress	19.35	13.00	34	4931	28	4061	112	252
127.0	5	J-55	Short Round	22.32	15.00	39	5656	38	5511	92	207
127.0	5	J-55	Long Round	22.32	15.00	39	5656	38	5511	99	223
127.0	5	J-55	Buttress	22.32	15.00	39	5656	38	5511	130	292
127.0	5	K-55	Short Round	17.11	11.50	29	4206	21	3046	65	146
127.0	5	K-55	Short Round	19.35	13.00	34	4931	28	4061	83	187
127.0	5	K-55	Long Round	19.35	13.00	34	4931	28	4061	89	200
127.0	5	K-55	Buttress	19.35	13.00	34	4931	28	4061	137	308
127.0	5	K-55	Short Round	22.32	15.00	39	5656	38	5511	101	227
127.0	5	K-55	Long Round	22.32	15.00	39	5656	38	5511	109	245

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
127.0	5	K-55	Buttress	22.32	15.00	39	5656	38	5511	160	360
127.0	5	C-75	Long Round	22.32	15.00	54	7832	48	6962	131	294
127.0	5	C-75	Buttress	22.32	15.00	54	7832	48	6962	167	375
127.0	5	C-75	Long Round	26.79	18.00	65	9427	69	10007	167	375
127.0	5	C-75	Buttress	26.79	18.00	64	9282	69	10007	201	452
127.0	5	C-75	Long Round	31.85	21.40	70	10152	83	12038	207	465
127.0	5	C-75	Buttress	31.85	21.40	64	9282	83	12038	227	510
127.0	5	C-75	Long Round	35.86	24.10	70	10152	93	13488	239	537
127.0	5	C-75	Buttress	35.86	24.10	64	9282	93	13488	227	510
127.0	5	L-80	Long Round	22.32	15.00	57	8267	50	7252	131	294
127.0	5	L-80	Buttress	22.32	15.00	57	8267	50	7252	169	380
127.0	5	L-80	Long Round	26.79	18.00	70	10152	72	10442	167	375
127.0	5	L-80	Buttress	26.79	18.00	68	9862	72	10442	203	456
127.0	5	L-80	Long Round	31.85	21.40	74	10732	88	12763	207	465
127.0	5	L-80	Buttress	31.85	21.40	68	9862	88	12763	227	510
127.0	5	L-80	Long Round	35.86	24.10	68	9862	99	14358	239	537
127.0	5	L-80	Buttress	35.86	24.10	68	9862	99	14358	227	510
127.0	5	N-80	Long Round	22.32	15.00	57	8267	50	7252	138	310
127.0	5	N-80	Buttress	22.32	15.00	57	8267	50	7252	176	396
127.0	5	N-80	Long Round	26.79	18.00	70	10152	72	10442	176	396
127.0	5	N-80	Buttress	26.79	18.00	68	9862	72	10442	212	477
127.0	5	N-80	Long Round	31.85	21.40	74	10732	88	12763	218	490
127.0	5	N-80	Buttress	31.85	21.40	68	9862	88	12763	239	537
127.0	5	N-80	Long Round	35.86	24.10	74	10732	99	14358	252	566
127.0	5	N-80	Buttress	35.86	24.10	68	9862	99	14358	239	537
127.0	5	C-95	Long Round	22.32	15.00	68	9862	56	8122	145	326
127.0	5	C-95	Buttress	22.32	15.00	68	9862	56	8122	189	425

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
127.0	5	C-95	Long Round	26.79	18.00	83	12038	83	12038	185	416
127.0	5	C-95	Buttress	26.79	18.00	81	11748	83	12038	229	515
127.0	5	C-95	Long Round	31.85	21.40	88	12763	104	15083	229	515
127.0	5	C-95	Buttress	31.85	21.40	81	11748	104	15083	250	562
127.0	5	C-95	Long Round	35.86	24.10	87	12618	118	17114	265	596
127.0	5	C-95	Buttress	35.86	24.10	81	11748	118	17114	250	562
139.7	5 1/2	H-40	Short Round	20.83	14.00	18	2611	21	3046	58	130
139.7	5 1/2	J-55	Short Round	20.83	14.00	29	4206	21	3046	76	171
139.7	5 1/2	J-55	Short Round	23.07	15.50	33	4786	28	4061	90	202
139.7	5 1/2	J-55	Long Round	23.07	15.50	33	4786	28	4061	96	216
139.7	5 1/2	J-55	Buttress	23.07	15.50	33	4786	28	4061	133	299
139.7	5 1/2	K-55	Short Round	20.83	14.00	29	4206	21	3046	84	189
139.7	5 1/2	K-55	Short Round	23.07	15.50	33	4786	28	4061	99	223
139.7	5 1/2	K-55	Long Round	23.07	15.50	33	4786	28	4061	106	238
139.7	5 1/2	K-55	Buttress	23.07	15.50	33	4786	28	4061	163	366
139.7	5 1/2	K-55	Short Round	25.30	17.00	37	5366	34	4931	112	252
139.7	5 1/2	K-55	Long Round	25.30	17.00	37	5366	34	4931	121	272
139.7	5 1/2	K-55	Buttress	25.30	17.00	37	5366	34	4931	179	402
139.7	5 1/2	C-75	Long Round	25.30	17.00	50	7252	42	6091	145	326
139.7	5 1/2	C-75	Buttress	25.30	17.00	50	7252	42	6091	188	423

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
139.7	5 1/2	C-75	Long Round	29.76	20.00	59	8557	58	8412	179	402
139.7	5 1/2	C-75	Buttress	29.76	20.00	58	8412	52	7542	221	497
139.7	5 1/2	C-75	Long Round	34.23	23.00	64	9282	72	10442	210	472
139.7	5 1/2	C-75	Buttress	34.23	23.00	58	8412	72	10442	245	551
139.7	5 1/2	L-80	Long Round	25.30	17.00	53	7687	43	6236	150	337
139.7	5 1/2	L-80	Buttress	25.30	17.00	53	7687	43	6236	190	427
139.7	5 1/2	L-80	Long Round	29.76	20.00	63	9137	61	8847	185	416
139.7	5 1/2	L-80	Buttress	29.76	20.00	62	8992	61	8847	224	503
139.7	5 1/2	L-80	Long Round	34.23	23.00	68	9862	77	11168	217	488
139.7	5 1/2	L-80	Buttress	34.23	23.00	62	8992	77	11168	245	551
139.7	5 1/2	N-80	Long Round	25.30	17.00	53	7687	43	6236	155	348
139.7	5 1/2	N-80	Buttress	25.30	17.00	53	7687	43	6236	198	445
139.7	5 1/2	N-80	Long Round	29.76	20.00	63	9137	61	8847	190	427
139.7	5 1/2	N-80	Buttress	29.76	20.00	62	8992	61	8847	233	524
139.7	5 1/2	N-80	Long Round	34.23	23.00	68	9862	77	11168	223	501
139.7	5 1/2	N-80	Buttress	34.23	23.00	62	8992	77	11168	258	580
139.7	5 1/2	C-95	Long Round	25.30	17.00	63	9137	48	6962	166	373
139.7	5 1/2	C-95	Buttress	25.30	17.00	63	9137	48	6962	213	479
139.7	5 1/2	C-95	Long Round	29.76	20.00	75	10877	69	10007	205	461
139.7	5 1/2	C-95	Buttress	29.76	20.00	74	10732	69	10007	250	562
139.7	5 1/2	C-95	Long Round	34.23	23.00	81	11748	89	12908	240	539
139.7	5 1/2	C-95	Buttress	34.23	23.00	74	10732	89	12908	270	607
139.7	5 1/2	P-110	Long Round	25.30	17.00	73	10587	51	7397	197	443
139.7	5 1/2	P-110	Buttress	25.30	17.00	73	10587	51	7397	253	569
139.7	5 1/2	P-110	Long Round	29.76	20.00	87	12618	76	11022	244	548
139.7	5 1/2	P-110	Buttress	29.76	20.00	85	12328	76	11022	297	668
139.7	5 1/2	P-110	Long Round	34.23	23.00	94	13633	100	14503	286	643
139.7	5 1/2	P-110	Buttress	34.23	23.00	85	12328	100	14503	322	724

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
168.3	6 5/8	H-40	Short Round	29.76	20.00	21	3046	17	2466	82	184
168.3	6 5/8	J-55	Short Round	29.76	20.00	29	4206	20	2901	109	245
168.3	6 5/8	J-55	Long Round	29.76	20.00	29	4206	20	2901	118	265
168.3	6 5/8	J-55	Buttress	29.76	20.00	29	4206	20	2901	166	373
168.3	6 5/8	J-55	Short Round	35.72	24.00	35	5076	31	4496	140	315
168.3	6 5/8	J-55	Long Round	35.72	24.00	35	5076	31	4496	151	339
168.3	6 5/8	J-55	Buttress	35.72	24.00	35	5076	31	4496	201	452
168.3	6 5/8	C-75	Long Round	35.72	24.00	48	6962	38	5511	201	452
168.3	6 5/8	C-75	Buttress	35.72	24.00	48	6962	38	5511	259	582
168.3	6 5/8	C-75	Long Round	41.67	28.00	57	8267	54	7832	245	551
168.3	6 5/8	C-75	Buttress	41.67	28.00	57	8267	54	7832	304	683
168.3	6 5/8	C-75	Long Round	47.62	32.00	65	9427	68	9862	284	638
168.3	6 5/8	C-75	Buttress	47.62	32.00	63	9137	68	9862	343	771
168.3	6 5/8	L-80	Long Round	35.72	24.00	51	7397	40	5801	210	472
168.3	6 5/8	L-80	Buttress	35.72	24.00	51	7397	40	5801	263	591
168.3	6 5/8	L-80	Long Round	41.67	28.00	61	8847	56	8122	256	575
168.3	6 5/8	L-80	Buttress	41.67	28.00	61	8847	56	8122	308	692
168.3	6 5/8	L-80	Long Round	47.62	32.00	69	10007	71	10297	296	665
168.3	6 5/8	L-80	Buttress	47.62	32.00	68	9862	71	10297	348	782
168.3	6 5/8	N-80	Long Round	35.72	24.00	51	7397	40	5801	214	481
168.3	6 5/8	N-80	Buttress	35.72	24.00	51	7397	40	5801	274	616
168.3	6 5/8	N-80	Long Round	41.67	28.00	61	8847	56	8122	261	587
168.3	6 5/8	N-80	Buttress	41.67	28.00	61	8847	56	8122	321	722
168.3	6 5/8	N-80	Long Round	47.62	32.00	69	10007	71	10297	301	677
168.3	6 5/8	N-80	Buttress	47.62	32.00	68	9862	71	10297	362	814
168.3	6 5/8	C-95	Long Round	35.72	24.00	61	8847	43	6236	243	546
168.3	6 5/8	C-95	Buttress	35.72	24.00	61	8847	43	6236	296	665

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
168.3	6 5/8	C-95	Long Round	41.67	28.00	72	10442	63	9137	296	665
168.3	6 5/8	C-95	Buttress	41.67	28.00	72	10442	63	9137	347	780
168.3	6 5/8	C-95	Long Round	47.62	32.00	82	11893	81	11748	342	769
168.3	6 5/8	C-95	Buttress	47.62	32.00	80	11603	81	11748	391	879
177.8	7	H-40	Short Round	25.30	17.00	16	2321	10	1450	54	121
177.8	7	H-40	Short Round	29.76	20.00	19	2756	14	2030	78	175
177.8	7	J-55	Short Round	29.76	20.00	26	3771	16	2321	104	234
177.8	7	J-55	Short Round	34.23	23.00	30	4351	22	3191	126	283
177.8	7	J-55	Long Round	34.23	23.00	30	4351	22	3191	139	312
177.8	7	J-55	Buttress	34.26	23.00	30	4351	22	3191	192	432
177.8	7	J-55	Short Round	38.69	26.00	34	4931	30	4351	149	335
177.8	7	J-55	Long Round	38.69	26.00	34	4931	30	4351	163	366
177.8	7	J-55	Buttress	38.69	26.00	34	4931	30	4351	218	490
177.8	7	K-55	Short Round	29.76	20.00	26	3771	16	2321	113	254
177.8	7	K-55	Short Round	34.23	23.00	30	4351	22	3191	137	308
177.8	7	K-55	Long Round	34.23	23.00	26	3771	16	2321	152	342
177.8	7	K-55	Buttress	34.23	23.00	26	3771	16	2321	232	521
177.8	7	K-55	Short Round	38.69	26.00	34	4931	30	4351	162	364
177.8	7	K-55	Long Round	38.69	26.00	34	4931	30	4351	178	400
177.8	7	K-55	Buttress	38.69	26.00	34	4931	30	4351	263	591
177.8	7	C-75	Long Round	34.23	23.00	41	5946	26	3771	185	416
177.8	7	C-75	Buttress	34.23	23.00	41	5946	26	3771	248	557
177.8	7	C-75	Long Round	38.69	26.00	47	6817	36	5221	217	488
177.8	7	C-75	Buttress	38.69	26.00	47	6817	36	5221	281	632
177.8	7	C-75	Long Round	43.16	29.00	53	7687	47	6817	250	562
177.8	7	C-75	Buttress	43.16	29.00	53	7687	47	6817	314	706
177.8	7	C-75	Long Round	47.62	32.00	58	8412	57	8267	282	634

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
177.8	7	C-75	Buttress	47.62	32.00	55	7977	57	8267	346	778
177.8	7	C-75	Long Round	52.09	35.00	60	8702	67	9717	313	704
177.8	7	C-75	Buttress	52.09	35.00	55	7977	67	9717	370	832
177.8	7	C-75	Long Round	56.66	38.00	60	8702	74	10732	341	766
177.8	7	C-75	Buttress	56.66	38.00	55	7977	74	10732	370	832
177.8	7	L-80	Long Round	34.23	23.00	41	5946	26	3771	193	434
177.8	7	L-80	Buttress	34.23	23.00	41	5946	26	3771	251	564
177.8	7	L-80	Long Round	38.69	26.00	47	6817	37	5366	227	510
177.8	7	L-80	Buttress	38.69	26.00	47	6817	37	5366	285	641
177.8	7	L-80	Long Round	43.16	29.00	53	7687	48	6962	261	587
177.8	7	L-80	Buttress	43.16	29.00	53	7687	48	6962	319	717
177.8	7	L-80	Long Round	47.62	32.00	58	8412	59	8557	294	661
177.8	7	L-80	Buttress	47.62	32.00	55	7977	59	8557	352	791
177.8	7	L-80	Long Round	52.09	35.00	60	8702	70	10152	326	733
177.8	7	L-80	Buttress	52.09	35.00	55	7977	70	10152	370	832
177.8	7	L-80	Long Round	56.55	38.00	60	8702	78	11313	356	800
177.8	7	L-80	Buttress	56.55	38.00	55	7977	78	11313	370	832
177.8	7	N-80	Long Round	34.23	23.00	44	6381	26	3771	196	441
177.8	7	N-80	Buttress	34.23	23.00	44	6381	26	3771	262	589
177.8	7	N-80	Long Round	38.69	26.00	50	7252	37	5366	231	519
177.8	7	N-80	Buttress	38.69	26.00	50	7252	37	5366	297	668
177.8	7	N-80	Long Round	43.16	29.00	56	8122	48	6962	266	598
177.8	7	N-80	Buttress	43.16	29.00	56	8122	48	6962	332	746
177.8	7	N-80	Long Round	47.62	32.00	62	8992	59	8557	299	672
177.8	7	N-80	Buttress	47.62	32.00	58	8412	59	8557	366	823
177.8	7	N-80	Long Round	52.09	35.00	64	9282	70	10152	332	746
177.8	7	N-80	Buttress	52.09	35.00	58	8412	70	10152	390	877
177.8	7	N-80	Long Round	56.55	38.00	64	9282	78	11313	362	814
177.8	7	N-80	Buttress	56.55	38.00	58	8412	78	11313	390	877

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
177.8	7	C-95	Long Round	34.23	23.00	52	7542	27	3916	225	506
177.8	7	C-95	Buttress	34.23	23.00	52	7542	27	3916	283	636
177.8	7	C-95	Long Round	38.69	26.00	59	8557	40	5801	264	593
177.8	7	C-95	Buttress	38.69	26.00	59	8557	40	5801	321	722
177.8	7	C-95	Long Round	43.16	29.00	67	9717	54	7832	304	683
177.8	7	C-95	Buttress	43.16	29.00	67	9717	54	7832	359	807
177.8	7	C-95	Long Round	47.62	32.00	74	10732	67	9717	342	769
177.8	7	C-95	Buttress	47.62	32.00	69	10007	67	9717	396	890
177.8	7	C-95	Long Round	52.09	35.00	76	11022	80	11603	379	852
177.8	7	C-95	Buttress	52.09	35.00	69	10007	80	11603	409	919
177.8	7	C-95	Long Round	56.55	38.00	76	11022	92	13343	414	931
177.8	7	C-95	Buttress	56.55	38.00	69	10007	92	13343	409	919
193.7	7 5/8	H-40	Short Round	35.72	24.00	19	2756	14	2030	94	211
193.7	7 5/8	J-55	Short Round	39.29	26.40	28	4061	20	2901	140	315
193.7	7 5/8	J-55	Long Round	39.29	26.40	28	4061	20	2901	154	346
193.7	7 5/8	J-55	Buttress	39.29	26.40	28	4061	20	2901	215	483
193.7	7 5/8	K-55	Short Round	39.29	26.40	28	4061	20	2901	152	342
193.7	7 5/8	K-55	Long Round	39.29	26.40	28	4061	20	2901	168	378
193.7	7 5/8	K-55	Buttress	39.29	26.40	28	4061	20	2901	258	580
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	39.29	26.40	39	5656	23	3336	205	461
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	39.29	26.40	39	5656	23	3336	278	625
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	44.20	29.70	44	6381	32	4641	241	542
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	44.20	29.70	44	6381	32	4641	315	708
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	50.15	33.70	51	7397	44	6381	282	634
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	50.15	33.70	51	7397	44	6381	358	805
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	58.04	39.00	59	8557	58	8412	334	751
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	58.04	39.00	59	8557	58	8412	413	928

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	63.69	42.80	67	9717	71	10297	379	852
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	63.69	42.80	63	9137	71	10297	460	1034
193.7	7 5/8	C-75	Long Round	70.09	47.10	68	9862	78	11313	424	953
193.7	7 5/8	C-75	Buttress	70.09	47.10	63	9137	78	11313	507	1140
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	39.29	26.40	41	5946	23	3336	214	481
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	39.29	26.40	41	5946	23	3336	282	634
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	44.20	29.70	47	6817	33	4786	252	566
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	44.20	29.70	47	6817	33	4786	321	722
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	50.15	33.70	54	7832	45	6526	295	663
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	50.15	33.70	54	7832	45	6526	365	820
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	58.04	39.00	63	9137	61	8847	350	787
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	58.04	39.00	63	9137	61	8847	420	944
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	63.69	42.80	71	10297	74	10732	397	892
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	63.69	42.80	67	9717	74	10732	468	1052
193.7	7 5/8	L-80	Long Round	70.09	47.10	72	10442	83	12038	443	996
193.7	7 5/8	L-80	Buttress	70.09	47.10	67	9717	83	12038	516	1160
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	39.29	26.40	41	5946	23	3336	218	490
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	39.29	26.40	41	5946	23	3336	293	659
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	44.20	29.70	47	6817	33	4786	256	575
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	44.20	29.70	47	6817	33	4786	333	748
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	50.15	33.70	54	7832	45	6526	300	674
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	50.15	33.70	54	7832	45	6526	379	852
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	58.04	39.00	63	9137	61	8847	355	798
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	58.04	39.00	63	9137	61	8847	436	980
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	63.69	42.80	71	10297	74	10732	403	906
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	63.69	42.80	67	9717	74	10732	486	1092
193.7	7 5/8	N-80	Long Round	70.09	47.10	72	10442	83	12038	451	1014
193.7	7 5/8	N-80	Buttress	70.09	47.10	67	9717	83	12038	536	1205
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	39.29	26.40	49	7107	26	3771	249	560
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	39.29	26.40	49	7107	26	3771	318	715

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	44.20	29.70	56	8122	35	5076	293	659
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	44.20	29.70	56	8122	35	5076	362	814
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	50.15	33.70	65	9427	50	7252	343	771
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	50.15	33.70	65	9427	50	7252	411	924
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	58.04	39.00	75	10877	69	10007	407	915
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	58.04	39.00	75	10877	69	10007	474	1065
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	63.69	42.80	84	12183	86	12473	461	1036
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	63.69	42.80	80	11603	86	12473	528	1187
193.7	7 5/8	C-95	Long Round	70.09	47.10	86	12473	99	14358	515	1158
193.7	7 5/8	C-95	Buttress	70.09	47.10	80	11603	99	14358	578	1299
219.1	8 5/8	H-40	Short Round	41.67	28.00	17	2466	11	1595	104	234
219.1	8 5/8	H-40	Short Round	47.42	32.00	20	2901	15	2175	124	279
219.1	8 5/8	J-55	Short Round	35.72	24.00	20	2901	9	1305	108	243
219.1	8 5/8	J-55	Short Round	47.62	32.00	27	3916	17	2466	165	371
219.1	8 5/8	J-55	Long Round	47.62	32.00	27	3916	17	2466	185	416
219.1	8 5/8	J-55	Buttress	47.62	32.00	27	3916	17	2466	258	580
219.1	8 5/8	J-55	Short Round	53.57	36.00	31	4496	24	3481	193	434
219.1	8 5/8	J-55	Long Round	53.57	36.00	31	4496	24	3481	216	486
219.1	8 5/8	J-55	Buttress	53.57	36.00	31	4496	24	3481	291	654
219.1	8 5/8	K-55	Short Round	35.72	24.00	20	2901	9	1305	117	263
219.1	8 5/8	K-55	Short Round	47.62	32.00	27	3916	17	2466	179	402
219.1	8 5/8	K-55	Long Round	47.62	32.00	27	3916	17	2466	201	452
219.1	8 5/8	K-55	Buttress	47.62	32.00	27	3916	17	2466	307	690
219.1	8 5/8	K-55	Short Round	53.57	36.00	31	4496	24	3481	208	468
219.1	8 5/8	K-55	Long Round	53.57	36.00	31	4496	24	3481	234	526
219.1	8 5/8	K-55	Buttress	53.57	36.00	31	4496	24	3481	347	780
219.1	8 5/8	C-75	Long Round	53.57	36.00	42	6091	28	4061	288	647

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
219.1	8 5/8	C-75	Buttress	53.57	36.00	42	6091	28	4061	377	847
219.1	8 5/8	C-75	Long Round	59.53	40.00	47	6817	37	5366	330	742
219.1	8 5/8	C-75	Buttress	59.53	40.00	47	6817	37	5366	421	946
219.1	8 5/8	C-75	Long Round	65.48	44.00	52	7542	46	6672	371	834
219.1	8 5/8	C-75	Buttress	65.48	44.00	52	7542	46	6672	465	1045
219.1	8 5/8	C-75	Long Round	72.92	49.00	58	8412	56	8122	418	940
219.1	8 5/8	C-75	Buttress	72.92	49.00	58	8412	56	8122	515	1158
219.1	8 5/8	L-80	Long Round	53.57	36.00	45	6526	28	4061	302	679
219.1	8 5/8	L-80	Buttress	53.57	36.00	45	6526	28	4061	384	863
219.1	8 5/8	L-80	Long Round	59.53	40.00	50	7252	38	5511	345	775
219.1	8 5/8	L-80	Buttress	59.53	40.00	50	7252	38	5511	430	967
219.1	8 5/8	L-80	Long Round	65.48	44.00	56	8122	48	6962	389	874
219.1	8 5/8	L-80	Buttress	65.48	44.00	56	8122	48	6962	474	1065
219.1	8 5/8	L-80	Long Round	72.92	49.00	62	8992	59	8557	437	982
219.1	8 5/8	L-80	Buttress	72.92	49.00	62	8992	59	8557	525	1180
219.1	8 5/8	N-80	Long Round	53.57	36.00	45	6526	28	4061	306	688
219.1	8 5/8	N-80	Buttress	53.57	36.00	45	6526	28	4061	398	895
219.1	8 5/8	N-80	Long Round	59.53	40.00	50	7252	38	5511	350	787
219.1	8 5/8	N-80	Buttress	59.53	40.00	50	7252	38	5511	445	1000
219.1	8 5/8	N-80	Long Round	65.48	44.00	56	8122	48	6962	395	888
219.1	8 5/8	N-80	Buttress	65.48	44.00	56	8122	48	6962	491	1104
219.1	8 5/8	N-80	Long Round	72.92	49.00	62	8992	59	8557	443	996
219.1	8 5/8	N-80	Buttress	72.92	49.00	62	8992	59	8557	544	1223
219.1	8 5/8	C-95	Long Round	53.57	36.00	53	7687	30	4351	351	789
219.1	8 5/8	C-95	Buttress	53.57	36.00	53	7687	30	4351	434	976
219.1	8 5/8	C-95	Long Round	59.53	40.00	60	8702	41	5946	402	904
219.1	8 5/8	C-95	Buttress	59.53	40.00	60	8702	41	5946	486	1092
219.1	8 5/8	C-95	Long Round	65.48	44.00	66	9572	53	7687	452	1016

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
219.1	8 5/8	C-95	Buttress	65.48	44.00	66	9572	53	7687	536	1205
219.1	8 5/8	C-95	Long Round	72.92	49.00	72	10442	67	9717	509	1144
219.1	8 5/8	C-95	Buttress	72.92	49.00	74	10732	67	9717	593	1333
244.5	9 5/8	H-40	Short Round	48.07	32.30	16	2321	10	1450	113	254
244.5	9 5/8	H-40	Short Round	53.57	36.00	18	2611	12	1740	131	294
244.5	9 5/8	J-55	Short Round	53.57	36.00	24	3481	14	2030	175	393
244.5	9 5/8	J-55	Long Round	53.57	36.00	24	3481	14	2030	201	452
244.5	9 5/8	J-55	Buttress	53.57	36.00	24	3481	14	2030	284	638
244.5	9 5/8	J-55	Short Round	59.53	40.00	27	3916	18	2611	201	452
244.5	9 5/8	J-55	Long Round	59.53	40.00	27	3916	18	2611	231	519
244.5	9 5/8	J-55	Buttress	59.53	40.00	27	3916	18	2611	318	715
244.5	9 5/8	K-55	Short Round	53.57	36.00	24	3481	14	2030	188	423
244.5	9 5/8	K-55	Long Round	53.57	36.00	24	3481	14	2030	217	488
244.5	9 5/8	K-55	Buttress	53.57	39.00	24	3481	14	2030	336	755
244.5	9 5/8	K-55	Short Round	59.53	40.00	27	3916	18	2611	216	486
244.5	9 5/8	K-55	Long Round	59.53	40.00	27	3916	18	2611	249	560
244.5	9 5/8	K-55	Buttress	59.53	40.00	27	3916	18	2611	375	843
244.5	9 5/8	C-75	Long Round	59.53	40.00	37	5366	20	2901	309	695
244.5	9 5/8	C-75	Buttress	59.53	40.00	37	5366	20	2901	412	926
244.5	9 5/8	C-75	Long Round	64.74	43.50	41	5946	26	3771	345	775
244.5	9 5/8	C-75	Buttress	64.74	43.50	41	5946	26	3771	452	1016
244.5	9 5/8	C-75	Long Round	69.94	47.00	44	6381	32	4641	379	852
244.5	9 5/8	C-75	Buttress	69.94	47.00	44	6381	32	4641	488	1097
244.5	9 5/8	C-75	Long Round	79.62	53.50	51	7397	44	6381	444	998
244.5	9 5/8	C-75	Buttress	79.62	53.50	51	7397	44	6381	559	1256
244.5	9 5/8	L-80	Long Round	59.53	40.00	40	5801	21	3046	323	726

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
244.5	9 5/8	L-80	Buttress	59.53	40.00	40	5801	21	3046	421	946
244.5	9 5/8	L-80	Long Round	64.74	43.50	44	6381	26	3771	362	814
244.5	9 5/8	L-80	Buttress	64.74	43.50	44	6381	26	3771	462	1038
244.5	9 5/8	L-80	Long Round	69.94	47.00	47	6817	33	4786	397	892
244.5	9 5/8	L-80	Buttress	69.94	47.00	47	6817	33	4786	499	1122
244.5	9 5/8	L-80	Long Round	79.62	53.50	55	7977	46	6672	466	1047
244.5	9 5/8	L-80	Buttress	79.62	53.50	55	7977	46	6672	572	1286
244.5	9 5/8	N-80	Long Round	59.53	40.00	40	5801	21	3046	328	737
244.5	9 5/8	N-80	Buttress	59.53	40.00	40	5801	21	3046	435	978
244.5	9 5/8	N-80	Long Round	64.74	43.50	44	6381	26	3771	367	825
244.5	9 5/8	N-80	Buttress	64.74	43.50	44	6381	26	3771	478	1074
244.5	9 5/8	N-80	Long Round	69.94	47.00	47	6817	33	4786	403	906
244.5	9 5/8	N-80	Buttress	69.94	47.00	47	6817	33	4786	516	1160
244.5	9 5/8	N-80	Long Round	79.62	53.50	55	7977	46	6672	472	1061
244.5	9 5/8	N-80	Buttress	79.62	53.50	55	7977	46	6672	591	1328
244.5	9 5/8	C-95	Long Round	59.53	40.00	47	6817	23	3336	377	847
244.5	9 5/8	C-95	Buttress	59.53	40.00	47	6817	23	3336	478	1074
244.5	9 5/8	C-95	Long Round	64.74	43.50	52	7542	28	4061	422	949
244.5	9 5/8	C-95	Buttress	64.74	43.50	52	7542	28	4061	524	1178
244.5	9 5/8	C-95	Long Round	69.94	47.00	56	8122	35	5076	463	1041
244.5	9 5/8	C-95	Buttress	69.94	47.00	56	8122	35	5076	566	1272
244.5	9 5/8	C-95	Long Round	79.62	53.50	58	8412	50	7252	543	1220
244.5	9 5/8	C-95	Buttress	79.62	53.50	65	9427	50	7252	649	1459
273.1	10 3/4	H-40	Short Round	48.74	32.75	12	1740	6	870	91	205
273.1	10 3/4	H-40	Short Round	60.27	40.50	16	2321	10	1450	140	315
273.1	10 3/4	J-55	Short Round	60.27	40.50	22	3191	11	1595	187	420
273.1	10 3/4	J-55	Buttress	60.27	40.50	22	3191	11	1595	311	699

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
273.1	10 3/4	J-55	Short Round	67.71	45.50	25	3626	14	2030	219	492
273.1	10 3/4	J-55	Buttress	67.71	45.50	25	3626	14	2030	354	796
273.1	10 3/4	J-55	Short Round	75.90	51.00	28	4061	19	2756	251	564
273.1	10 3/4	J-55	Buttress	75.90	51.00	28	4061	19	2756	396	890
273.1	10 3/4	K-55	Short Round	60.27	40.50	22	3191	11	1595	200	450
273.1	10 3/4	K-55	Buttress	60.27	40.50	22	3191	11	1595	364	818
273.1	10 3/4	K-55	Short Round	67.71	45.50	25	3626	14	2030	235	528
273.1	10 3/4	K-55	Buttress	67.71	45.50	25	3626	14	2030	414	931
273.1	10 3/4	K-55	Short Round	75.90	51.00	28	4061	19	2756	270	607
273.1	10 3/4	K-55	Buttress	75.90	51.00	28	4061	19	2756	464	1043
273.1	10 3/4	C-75	Short Round	75.90	51.00	38	5511	21	3046	336	755
273.1	10 3/4	C-75	Buttress	75.90	51.00	38	5511	21	3046	516	1160
273.1	10 3/4	C-75	Short Round	82.59	55.50	42	6091	27	3916	375	843
273.1	10 3/4	C-75	Buttress	82.59	55.50	42	6091	27	3916	565	1270
273.1	10 3/4	L-80	Short Round	75.90	51.00	40	5801	22	3191	353	793
273.1	10 3/4	L-80	Buttress	75.90	51.00	40	5801	22	3191	529	1189
273.1	10 3/4	L-80	Short Round	82.59	55.50	44	6381	28	4061	393	883
273.1	10 3/4	L-80	Buttress	82.59	55.50	44	6381	28	4061	580	1304
273.1	10 3/4	N-80	Short Round	75.90	51.00	40	5801	22	3191	358	805
273.1	10 3/4	N-80	Buttress	75.90	51.00	40	5801	22	3191	546	1227
273.1	10 3/4	N-80	Short Round	82.59	55.50	44	6381	28	4061	398	895
273.1	10 3/4	N-80	Buttress	82.59	55.50	44	6381	28	4061	598	1344
273.1	10 3/4	C-95	Short Round	75.90	51.00	47	6817	24	3481	412	926
273.1	10 3/4	C-95	Buttress	75.90	51.00	48	6962	24	3481	602	1353
273.1	10 3/4	C-95	Short Round	82.59	55.50	47	6817	30	4351	459	1032
273.1	10 3/4	C-95	Buttress	82.59	55.50	51	7397	30	4351	660	1483

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
339.7	13 3/8	H-40	Short Round	71.43	48.00	12	1740	5	725	143	321
339.7	13 3/8	J-55	Short Round	81.10	54.50	19	2756	8	1160	229	515
339.7	13 3/8	J-55	Buttress	81.10	54.50	18	2611	8	1160	404	908
339.7	13 3/8	J-55	Short Round	90.78	61.00	21	3046	11	1595	265	596
339.7	13 3/8	J-55	Buttress	90.78	61.00	21	3046	11	1595	456	1025
339.7	13 3/8	J-55	Short Round	101.20	68.00	24	3481	13	1885	300	674
339.7	13 3/8	J-55	Buttress	101.20	68.00	24	3481	13	1885	507	1140
339.7	13 3/8	K-55	Short Round	81.10	54.50	19	2756	8	1160	243	546
339.7	13 3/8	K-55	Buttress	81.10	54.50	19	2756	8	1160	462	1038
339.7	13 3/8	K-55	Short Round	90.78	61.00	21	3046	11	1595	282	634
339.7	13 3/8	K-55	Buttress	90.78	61.00	21	3046	11	1595	520	1169
339.7	13 3/8	K-55	Short Round	101.20	68.00	24	3481	13	1885	319	717
339.7	13 3/8	K-55	Buttress	101.20	68.00	24	3481	13	1885	578	1299
339.7	13 3/8	C-75	Short Round	101.20	68.00	31	4496	15	2175	402	904
339.7	13 3/8	C-75	Buttress	101.20	68.00	32	4641	15	2175	665	1495
339.7	13 3/8	C-75	Short Round	107.15	72.00	31	4496	18	2611	435	978
339.7	13 3/8	C-75	Buttress	107.15	72.00	34	4931	18	2611	711	1598
339.7	13 3/8	L-80	Short Round	101.20	68.00	31	4496	16	2321	423	951
339.7	13 3/8	L-80	Buttress	101.20	68.00	34	4931	16	2321	687	1544
339.7	13 3/8	L-80	Short Round	107.15	72.00	31	4496	18	2611	458	1029
339.7	13 3/8	L-80	Buttress	107.15	72.00	34	4931	18	2611	734	1650
339.7	13 3/8	N-80	Short Round	101.20	68.00	31	4496	16	2321	428	962
339.7	13 3/8	N-80	Buttress	101.20	68.00	34	4931	16	2321	705	1585
339.7	13 3/8	N-80	Short Round	107.15	72.00	31	4496	18	2611	463	1041
339.7	13 3/8	N-80	Buttress	107.15	72.00	34	4931	18	2611	753	1693

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
339.7	13 3/8	C-95	Short Round	101.20	68.00	31	4496	16	2321	495	1113
339.7	13 3/8	C-95	Buttress	101.20	68.00	34	4931	16	2321	788	1771
339.7	13 3/8	C-95	Short Round	107.15	72.00	31	4496	19	2756	536	1205
339.7	13 3/8	C-95	Buttress	107.15	72.00	34	4931	19	2756	842	1893
406.4	16	H-40	Short Round	96.73	65.00	11	1595	5	725	195	438
406.4	16	J-55	Short Round	111.61	75.00	18	2611	7	1015	316	710
406.4	16	J-55	Buttress	111.61	75.00	18	2611	7	1015	534	1200
406.4	16	J-55	Short Round	125.01	84.00	20	2901	10	1450	363	816
406.4	16	J-55	Buttress	125.01	84.00	20	2901	10	1450	601	1351
406.4	16	K-55	Short Round	111.61	75.00	18	2611	7	1015	334	751
406.4	16	K-55	Buttress	111.61	75.00	18	2611	7	1015	592	1331
406.4	16	K-55	Short Round	125.01	84.00	20	2901	10	1450	385	865
406.4	16	K-55	Buttress	125.01	84.00	20	2901	10	1450	667	1499
473.1	18 5/8	H-40	Short Round	130.21	87.50	11	1595	4	580	249	560
473.1	18 5/8	J-55	Short Round	130.21	87.50	15	2175	4	580	335	753
473.1	18 5/8	J-55	Buttress	130.21	87.50	15	2175	4	580	591	1328
473.1	18 5/8	K-55	Short Round	130.21	87.50	15	2175	4	580	353	793
473.1	18 5/8	K-55	Buttress	130.21	87.50	15	2175	4	580	635	1427
508.0	20	H-40	Short Round	139.89	94.00	10	1450	4	580	258	580
508.0	20	J-55	Short Round	139.89	94.00	14	2030	4	580	349	784
508.0	20	J-55	Long Round	139.89	94.00	14	2030	4	580	403	906
508.0	20	J-55	Buttress	139.89	94.00	14	2030	4	580	624	1403
508.0	20	J-55	Short Round	158.49	106.50	16	2321	5	725	406	913

Πίνακας Π2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης (Trican Well Service, 2006)
(συνέχεια)

O.D. (mm)	O.D. (in)	Grade	Threads & Couplings	Weight (kg/m)	Weight (lb/ft)	Burst (MPa)	Burst (psi)	Collapse (MPa)	Collapse (psi)	Joint Yield (1000 dN)	Joint Yield (1000 lbf.)
508.0	20	J-55	Long Round	158.49	106.50	16	2321	5	725	470	1056
508.0	20	J-55	Buttress	158.49	106.50	16	2321	5	725	710	1596
508.0	20	J-55	Short Round	198.67	133.50	16	2321	10	1450	530	1191
508.0	20	J-55	Long Round	198.67	133.50	16	2321	10	1450	614	1380
508.0	20	J-55	Buttress	198.67	133.50	16	2321	10	1450	895	2012
508.0	20	K-55	Short Round	139.89	94.00	14	2030	4	580	366	823
508.0	20	K-55	Long Round	139.89	94.00	14	2030	4	580	425	955
508.0	20	K-55	Buttress	139.89	94.00	14	2030	4	580	658	1479
508.0	20	K-55	Short Round	158.49	106.50	16	2321	5	725	427	960
508.0	20	K-55	Long Round	158.49	106.50	16	2321	5	725	495	1113
508.0	20	K-55	Buttress	158.49	106.50	16	2321	5	725	749	1684
508.0	20	K-55	Short Round	198.67	133.50	16	2321	10	1450	557	1252
508.0	20	K-55	Long Round	198.67	133.50	16	2321	10	1450	646	1452
508.0	20	K-55	Buttress	198.67	133.50	16	2321	10	1450	944	2122

Βιβλιογραφία

- Adams, N. J. (1985). *Drilling engineering a complete well planning approach*. Tulsa: PennWell.
- Bourgoyne Jr, A., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young Jr., F. S. (1991). *Applied Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Chilingarian, G. V., & Rahman, S. S. (1995). *Casing Design - Theory and Practice*. ELSEVIER.
- Craig, J. A. (2016). Ανάκτηση από Slideshare: <http://www.slideshare.net/akinrcraig/petroleum-engineering-drilling-engineering-directional-drilling>
- Drilling Contractor. (2015, May 8). *Drilling Contractor*. Ανάκτηση 4 17, 2016, από Centek introduces deepwater inter casing centralizer sub: http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2015/05/ICCS-vis_HR-620x290.png
- Drilling Engineering Handbook*. (n.d.). Heriot-Watt University.
- drillingformulas.com. (n.d.). *drillingformulas.com*. Ανάκτηση 10 19, 2016, από <http://www.drillingformulas.com/buoyancy-factor-calculation/>
- drillingHandbook.com. (n.d.). *drillingHandbook.com*. Ανάκτηση 2017, από Kick theory: <http://www.drillinghandbook.com/category/kick-theory/>
- Eneroil Offshore Drilling Ltd. (n.d.). *Eneroil Offshore Drilling Ltd*. Ανάκτηση 4 17, 2016, από Accessories: <http://www.eneroiloffshore.com/products/offshore/6.jpg>
- Eoff, L., & Griffith, J. (1998). *Oil & Gas Journal*. Ανάκτηση 2016, από <http://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-44/in-this-issue/drilling/acrylate-monomer-solution-stops-artesian-water-geopressured-sand-flows.html>
- French Oil & Gas Industry Association. (1990). *Directional Drilling and Deviation Control Technology*. Technip.
- Hossain, M. E., & Al-Mejed, A. A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. Scrivener Publishing.
- Institut Francais du Petrole. (1999). *Drilling Data Handbook*.
- LA-CO Industries. (n.d.). *Pipe Thread Sealants*. Ανάκτηση 2017, από <http://www.laco.com/leak-tite-blue/>
- Neftegazmash-Technologies. (n.d.). *Neftegazmash-Technologies*. Ανάκτηση 4 17, 2016, από The BK-T Casing Shoe: <http://www.ngmt.ru/img/bash1.jpg>

- Netwas Group Oil. (2016). Ανάκτηση από <http://www.netwasgroup.us/services-2/jetting.html>
- Professional Petroleum Data Management Association*. (2010). Ανάκτηση από https://wiki.ppdm.org/Well_Operations_Reference_guide
- Rabia, H. (1985). *Oilwell drilling engineering: principles and practice*. Graham & Trotman.
- Rigzone. (n.d.). *Rigzone*. Ανάκτηση Δεκέμβριος 2015, από How Does Casing Work?: http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=333&c_id=24
- Schlumberger. (1998). *Oilfield Review - Multilateral Well Technology*. Schlumberger.
- Schlumberger Oilfield Glossary. (n.d.). *Oilfield Glossary*. Ανάκτηση 10 14, 2016, από <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/w/wellhead.aspx>
- Trican Well Service. (2006). *Trican Handbook*.
- Yin, F., & Gao, D. (2014). Mechanical analysis and design of casing in directional well under in-situ stresses. *Elsevier*.
- Σταματάκη, Σ. (2003). *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.