

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



29/07/2020

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΑΔΙΩΝ

ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

DESIGN OF THE DIFFERENT STAGES OF WELL

CASING DESIGN

ΜΑΡΙΟΣ ΚΑΠΕΤΑΝΟΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΑΔΙΩΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

COMPLETE DESIGN OF THE DIFFERENT STAGES OF WELL DESIGN

ΜΑΡΙΟΣ ΚΑΠΕΤΑΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΑΓΑΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΣΤΙΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΓΑΓΑΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,

ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ,

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ.....

Ιούλιος 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα του σχεδιασμού της σωλήνωσης σε κατακόρυφη γεώτρηση. Αρχικά παρουσιάζεται ο ρόλος της σωλήνωσης (σκοπός, λειτουργίες σωλήνωσης) καθώς και η αλληλουχία διαδικασιών που ακολουθούνται για το σχεδιασμό των σωληνώσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών αρχών σχεδιασμού της σωλήνωσης σε συμβατικές γεωτρήσεις και τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία γίνεται σχεδιασμός της σωλήνωσης σε μια κατακόρυφη γεώτρηση. Τέλος, επιλύεται μελέτη περίπτωσης βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα.

Η εκπόνηση μια 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 τον επιβλέπων καθηγητή μου κο. Βασίλειο Γαγάνη, για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε σε κάθε στάδιο μελέτης. Επιπλέον, θέλω να αναγνωρίσω τη βοήθεια που είχα από την αγαπητή κυρία Δημητρέλλου, μέλους του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού του Εργαστηρίου, για την σημαντική βοήθεια της. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω του ανθρώπους που είναι οικογένεια μου για τη διαρκή υποστήριξη τους τόσο στην εκπόνηση της διπλωματικής, όσο και καθ'όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στη Σχολή.

Μάριος Καπετάνος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό της σωλήνωσης κατακόρυφων γεωτρήσεων. Αρχικά παρουσιάζονται συνοπτικά οι λόγοι και οι διαδικασίες όρυξης κατακόρυφων 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 ξεκινά 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 τον 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 απραγωγή υδρογονανθράκων. Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι η σωλήνωση να είναι ικανή να αντέξει τις εκτιμώμενες αξονικές τάσεις και τις εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Μετά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας του σχεδιασμού των κατακόρυφων γεωτρήσεων σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της σωλήνωσης ως προς την επιλογή του κατάλλου βάρους και κατηγορίας. Συμπερασματικά, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, όπως υποστηρίζουν και οι συγγραφείς, έχει ως σκοπό την κατανόηση των βασικότερων επιστημονικών αρχών που αφορούν την τεχνολογία των γεωτρήσεων.

ABSTRACT

This Diplomat Thesis deals with the casing desing for vertical wells. In the beginning, the reasons and the procedure for drilling vertical 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 end product of such a design is a ‘pressure vessel’ capable of withstandingthe expected internal and external pressures and axial loading. After the deployment of the methodology used by the international practice regarding the design of the casing in vertical wells, the appropriate casing grades and weights were determined. In conclusopn. The methodology developed aimed to understand the basic scientific principles.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | 2 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 5 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 9 |
| 1.1 Στόχοι του Σχεδιασμού Γεωτρήσεων..... | 9 |
| 1.2 Η διαδικασία της σωλήνωσης..... | 11 |
| 1.3. Σχεδιασμός σωλήνωσης | 16 |
| 1.4. Συνοπτική περιγραφή της εργασίας | 16 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο. ΣΩΛΗΝΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL CASING) | 18 |
| 2.1. Λειτουργίες της σωλήνωσης..... | 19 |
| 2.2. Τύποι σωλήνωσης | 21 |
| 2.2.1. Σωλήνωση οδηγός (Drive or structural pipe) | 22 |
| 2.2.2. Σωλήνωση επαφής (Conductor casing)..... | 23 |
| 2.2.3. Επιφανειακή σωλήνωση (Surface casing)..... | 24 |
| 2.2.4. Ενδιάμεση ή προστατευτική σωλήνωση (Intermediate or protection casing)..... | 24 |
| 2.2.5. Παραγωγική σωλήνωση (Production casing) | 25 |
| 2.2.6. Σωλήνωση liner (Liner casing) | 26 |
| 2.3. Χαρακτηριστικά, προδιαγραφές και τυποποίηση της σωλήνωσης..... | 28 |
| 2.3.1. Διάμετρος στελεχών σωλήνωσης | 29 |
| 2.3.2. Ονομαστικό βάρος σωλήνωσης..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.3. Μήκος στελεχών σωλήνωσης..... | 30 |
| 2.3.4. Κατηγορία χάλυβα (Grade of Steel) | 32 |
| 2.3.5. Τύποι συνδέσμων..... | 35 |
| 2.4. Πρότυπα τυποποίησης στελεχών σωλήνωσης..... | 41 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ (CASIGN DESIGN)..... | 42 |
| 3.1. Εισαγωγή | 42 |
| 3.2. Διαδικασία σχεδιασμού σωλήνωσης..... | 43 |
| 3.3. Προκαταρκτικός σχεδιασμός..... | 45 |
| 3.3.1. Βάθη έδρασης τεχνικών σωληνώσεων - Προφίλ πιέσεων | 45 |
| 3.3.2. Διαστάσεις τεχνικών σωληνώσεων..... | 47 |
| 3.4. Λεπτομερής σχεδιασμός – Σενάρια φορτίσεων..... | 49 |
| 3.4.1. Καθορισμός σεναρίων λειτουργίας και επακόλουθων φορτίων στη σωλήνωση..... | 50 |
| 3.4.2. Συντελεστές σχεδιασμού | 51 |
| 3.4.3. Άλλες θεωρήσεις..... | 52 |
| 3.4.4. Μονοαξονική φόρτιση (uniaxial loading) | 52 |
| 3.4.5. Διαξονική και Τριαξονική Φόρτιση (biaxial and triaxial loading) | 61 |
| 3.4.6. Καθορισμός σχεδιαστικών συντελεστών | 64 |
| 3.5. Υπολογισμός κριτηρίων αστοχίας μεμονωμένων τύπων σωλήνωσης..... | 64 |
| 3.5.1. Σχεδιασμός επιφανειακής σωλήνωσης (surface casing design) | 64 |
| 3.5.2. Σχεδιασμός ενδιάμεσης ή προστατευτικής σωλήνωσης (intermediate casing design)..... | 71 |
| 3.5.3. Σχεδιασμός παραγωγικής σωλήνωσης (production casing design) | 73 |
| 3.5.4. Σχεδιασμός παραγωγικού liner (Production Liner Design) | 76 |
| 3.5.5. Άλλες σχεδιαστικές θεωρήσεις..... | 77 |

| | |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ (CASE STUDY)..... | 78 |
| 4.1. Δεδομένα σχεδιασμού | 78 |
| 4.2. Προκαταρκτικός σχεδιασμός – Βάθη έδρασης σωλήνωσης & διαστάσεις – Πρόγραμμα ρευστού διάτρησης..... | 81 |
| 4.3. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης..... | 86 |
| 4.3.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης..... | 86 |
| 4.3.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης..... | 88 |
| 4.3.3. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό..... | 91 |
| 4.4. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης | 93 |
| 4.4.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης..... | 93 |
| 4.4.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης..... | 94 |
| 4.4.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης | 97 |
| 4.4.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό..... | 97 |
| 4.5. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης..... | 98 |
| 4.5.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης..... | 98 |
| 4.5.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης..... | 100 |
| 4.5.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης | 103 |
| 4.5.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό..... | 106 |
| 4.5.5. Κριτήριο τριαξονικής φόρτισης..... | 107 |
| 4.6. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης..... | 116 |
| 4.6.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης..... | 116 |
| 4.6.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης..... | 118 |
| 4.6.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης | 121 |

| | |
|---|------------|
| 4.6.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό..... | 124 |
| 4.6.5. Κριτήριο αστοχίας σε τριαξονική φόρτιση | 125 |
| 4.7. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) παραγωγικού liner | 130 |
| 4.7.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης..... | 130 |
| 4.7.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης..... | 131 |
| 4.7.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης | 133 |
| 4.7.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό..... | 135 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 137 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 141 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας δίνει την δυνατότητα στις γεωτρήσεις να προσεγγίσουν στόχους μεγαλύτερου βάθους. Με την αύξηση των εκμεταλλεύσιμων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος των ολοένα διευρυνόμενων ενεργειακών απαιτήσεων. Μια γεώτρηση ταξινομείται ως ερευνητική (exploratory or wildcat) αν ο σκοπός της είναι η ανακάλυψη ενός καινούριου ταμιευτήρα πετρελαίου σε αντίθεση με την γεώτρηση ανάπτυξης (development) που ο σκοπός της είναι η εκμετάλλευση ενός ήδη γνωστού ταμιευτήρα. Υπάρχει και η κατηγορία των γεωθερμικών γεωτρήσεων που έχουν ως σκοπό την άντληση της γεωθερμικής ενέργειας από το υπέδαφος.

Ο σχεδιασμός της γεώτρησης (well planning) αποτελεί, ίσως, το πιο σημαντικό στάδιο της μηχανικής των γεωτρήσεων (drilling engineering). Απαιτεί τον συνδυασμό των βασικών αρχών της μηχανικής, της εμπειρίας, αλλά και της αποτελεσματικής ομαδικής συνεργασίας. Αν και οι τεχνικές και οι μέθοδοι του σχεδιασμού των γεωτρήσεων ποικίλλουν μέσα στην βιομηχανία, το κοινό τελικό αποτέλεσμα είναι να ορυχθεί η γεώτρηση με ασφάλεια και χαμηλό κόστος ώστε να πληροί τις προδιαγραφές των μηχανικών του ταμιευτήρα (reservoir engineers) για την παραγωγή υδρογονανθράκων. Παρόλα αυτά υπάρχει και ένα σύνολο περιορισμών που θα πρέπει να συμφωνούν με τον σχεδιασμό της γεώτρησης όπως οι γεωλογικοί περιορισμοί, ο διατρητικός εξοπλισμός, οι θερμοκρασιακές συνθήκες, οι περιορισμοί της σωλήνωσης, η διαστασιολόγηση των οπών της γεώτρησης και ο οικονομικός προϋπολογισμός.

1.1 Στόχοι του Σχεδιασμού Γεωτρήσεων

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

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

Δυστυχώς, τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν συναντώνται σε όλες τις γεωτρήσεις. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τους γεωλογικούς σχηματισμούς της

περιοχής, τον εξοπλισμό διάτρησης, τη θερμοκρασία, τη σωλήνωση (casing) και τα διαθέσιμα κεφάλαια. Με αποτέλεσμα να μην είναι όλες οι γεωτρήσεις εκμεταλλεύσιμες.

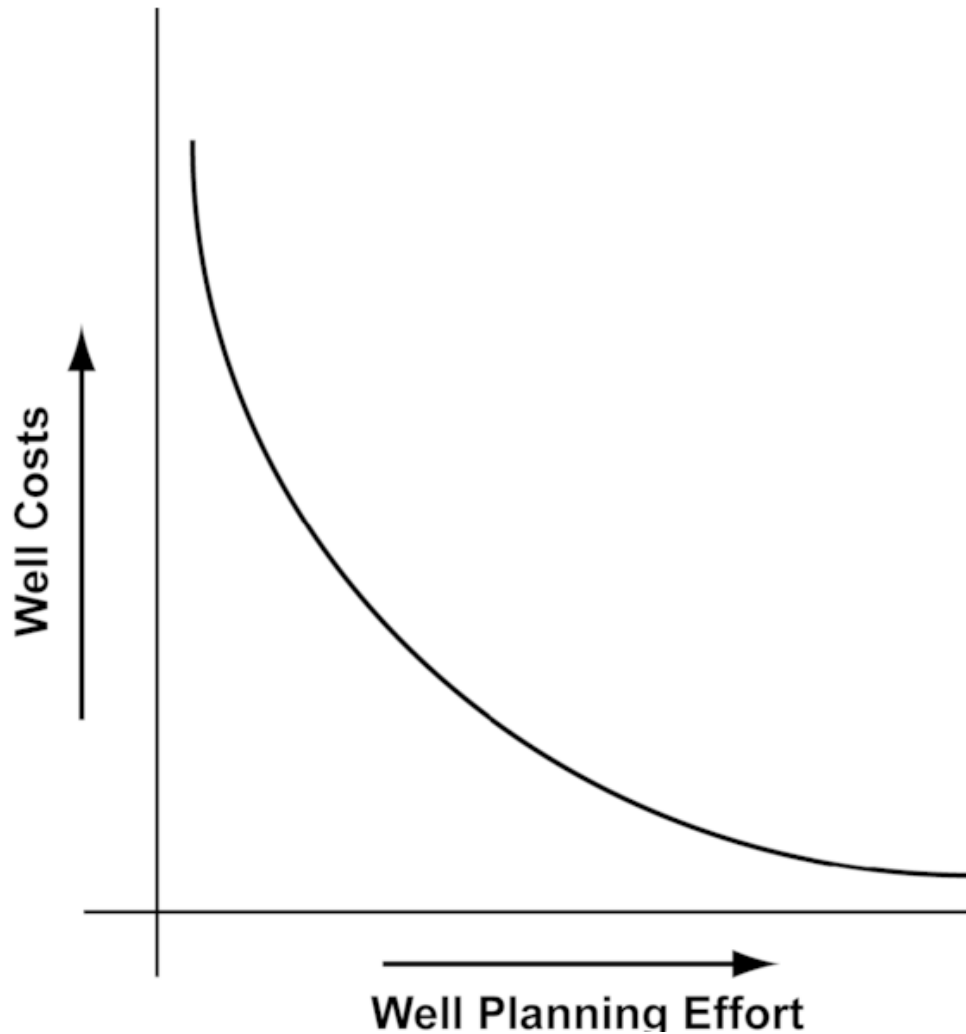
Η ασφάλεια στον σχεδιασμό της γεώτρησης είναι ύψιστης σημασίας. Αναλυτικότερα, η ασφάλεια του προσωπικού της γεώτρησης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας του γεωτρητικού προγράμματος. Το σχέδιο όρυξης πρέπει να έχει ελαστικότητα κατά τη διάρκεια εφαρμογής του, σε περίπτωση που προκύψουν αναπάντεχα προβλήματα που δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν στη φάση του σχεδιασμού με αποτέλεσμα να τεθεί σε κίνδυνο το έργο και η ασφάλεια των εργαζομένων. Μια τέτοια αστοχία στην ασφάλεια μπορεί να έχει ως συνέπεια τις απώλειες ζωής.

Ο αμέσως επόμενος πιο σημαντικός παράγοντας είναι η ασφάλεια της γεώτρησης. Ο σχεδιασμός της γεώτρησης είναι απαραίτητο να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος εκρήξεων (blowouts) και να αποφεύγονται φαινόμενα που είναι πιθανό να δημιουργήσουν προβλήματα ή ακόμη και την κατάρρευση της ίδιας της γεώτρησης.

Ο όρος χαμηλό κόστος χαρακτηρίζει την οικονομικοτεχνική εκτέλεση του γεωτρητικού έργου χωρίς όμως να επηρεάζονται οι προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας. Η σχέση μεταξύ της γεώτρησης και του κόστους του σχεδιασμού παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1.

Η διάτρηση της γεώτρησης μέχρι το επιθυμητό βάθος είναι ανώφελη αν το πηγάδι εν τέλει κριθεί ως μη χρησιμοποιήσιμο (non usable). Ο όρος χρησιμοποιήσιμο υποδηλώνει ότι:

- Η διάμετρος της γεώτρησης είναι επαρκής ώστε να εκπληρώνει τον σκοπό της όρυξης της.
- Η γεώτρηση ή ο παραγωγικός σχηματισμός να μην έχει καταστραφεί ολοκληρωτικά.



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα κόστους γεώτρησης σε σχέση με το μέγεθος της προσπάθειας που ενέχει η φάση του σχεδιασμού (Petrowiki)

1.2 Η διαδικασία της σωλήνωσης

Η όρυξη των γεωτρήσεων είναι μια διαδικασία που αποτελείται από 3 στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η διαδικασία διάτρησης της γεώτρησης μέχρι το βάθος που συναντώνται υδρογονάνθρακες. Το δεύτερο στάδιο αποτελεί η διαδικασία της σωλήνωσης της ανοιχτής γεώτρησης και το τρίτο βήμα είναι η ολοκλήρωση του πηγαδιού. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία της σωλήνωσης προχωράει παράλληλα με τη διαδικασία της διάτρησης καθώς η σωλήνωση τοποθετείται τμηματικά. Το τρίτο βήμα είναι ανεξάρτητο από τα άλλα δύο και ξεκινάει αφού η γεώτρηση έχει προσεγγίσει τον στόχο της. (Al-Mejed, 2015). Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο δεύτερο στάδιο.

Οι σωλήνες ή αλλιώς τα υπαίθρια σωληνοειδή προϊόντα πετρελαίου (oil country tubular goods-OCTG) περιλαμβάνουν τους σωλήνες διάτρησης (drill pipe), την προστατευτική σωλήνωση των γεωτρήσεων (casing), τη σωλήνωση παραγωγής (production tubing) και τους σωλήνες μεταφοράς (line pipe) .

Οι σωλήνες διάτρησης χρησιμοποιούνται κατά την όρυξη της γεώτρησης και λειτουργούν ως σωλήνες που έχουν τη δυνατότητα να τους ασκηθεί στρέψη, πρόσθετο φορτίο βάρους και υδραυλική πίεση κατά την διαδικασία της διάτρησης. Η λειτουργία των σωλήνων διάτρησης είναι πολύ διαφορετική από τους άλλους τύπους σωλήνων και έχει ειδικά θέματα σχεδιασμού, πέρα από την κλασική ανάλυση αντοχής, όπως η κόπωση μπορεί να είναι σημαντικά. Καθώς η αναζήτηση εμπορεύσιμων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων φθάνει σε μεγαλύτερα βάθη, ο αριθμός και τα μεγέθη των σωληνώσεων που απαιτούνται για την διάτρηση και την ολοκλήρωση της γεώτρησης αυξήθηκαν. Η σωλήνωση αποτελεί ένα από τα ακριβότερα τμήματα του γεωτρητικού έργου καθώς, σύμφωνα με μελέτες, το μέσο κόστος των σωληνοειδών αποτελεί περίπου το 18% του μέσου κόστους μιας ολοκληρωμένης γεώτρησης (Greenhip 1978). Ως εκ τούτου, μια σημαντική ευθύνη του μηχανικού γεώτρησης είναι ο σχεδιασμός του οικονομικότερου προγράμματος σωλήνωσης που θα επιτρέψει την ασφαλή διάτρηση και την λειτουργία του γεωτρητικού έργου. Η εξοικονόμηση μπορεί να επιτευχθεί μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού καθώς ο κίνδυνος αστοχίας από έναν ακατάλληλο σχεδιασμό δικαιολογεί μια σημαντική προσπάθεια των μηχανικών σε αυτήν την φάση του γεωτρητικού προγράμματος. (Mitchell, 2011)

Η προστατευτική σωλήνωση εξυπηρετεί πολλές σημαντικές λειτουργίες κατά τη διάτρηση και την ολοκλήρωση της γεώτρησης. Αρχικά στηρίζει την ανοιχτή γεώτρηση και απομονώνει υδραυλικά τα ρευστά διάτρησης από τους υπόγειους σχηματισμούς και τα ρευστά που αυτοοί ενδεχομένως περιέχουν, ελαχιστοποιώντας έτσι την επίδραση που έχει το υπόγειο περιβάλλον στη γεώτρηση και το αντίστροφο. Η σωλήνωση είναι ένας αγωγός υψηλής αντοχής που κατευθύνει τα ρευστά διάτρησης στην επιφάνεια και με την βοήθεια των BOP's (blowout preventers) δίνεται η δυνατότητα να ελέγχεται με ασφάλεια η πίεση πόρων του σχηματισμού. Η επιλεκτική διάτρηση των κατάλληλα τσιμεντωμένων σωληνώσεων επιτρέπει την μεμονωμένη επικοινωνία της γεώτρησης με τον ενδιαφερόμενο σχηματισμό. (Mitchell, 2011)

Η σωλήνωση παράγωγης μεταφέρει τα ρευστά από τον σχηματισμό παραγωγής στις επιφανειακές εγκαταστάσεις για επεξεργασία. Η διαφορά της προστατευτικής σωλήνωσης

με την σωλήνωση παραγωγής είναι ότι η σωλήνωση παραγωγής πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να υποστηρίζει τους αναμενόμενους ρυθμούς παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου ενώ η διαστασιολόγηση της προστατευτικής σωλήνωσης διαλέγεται σύμφωνα με την επαρκή προστασία της γεώτρησης.

Στο σχήμα 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ διαφόρων τύπων προστατευτικής σωλήνωσης.

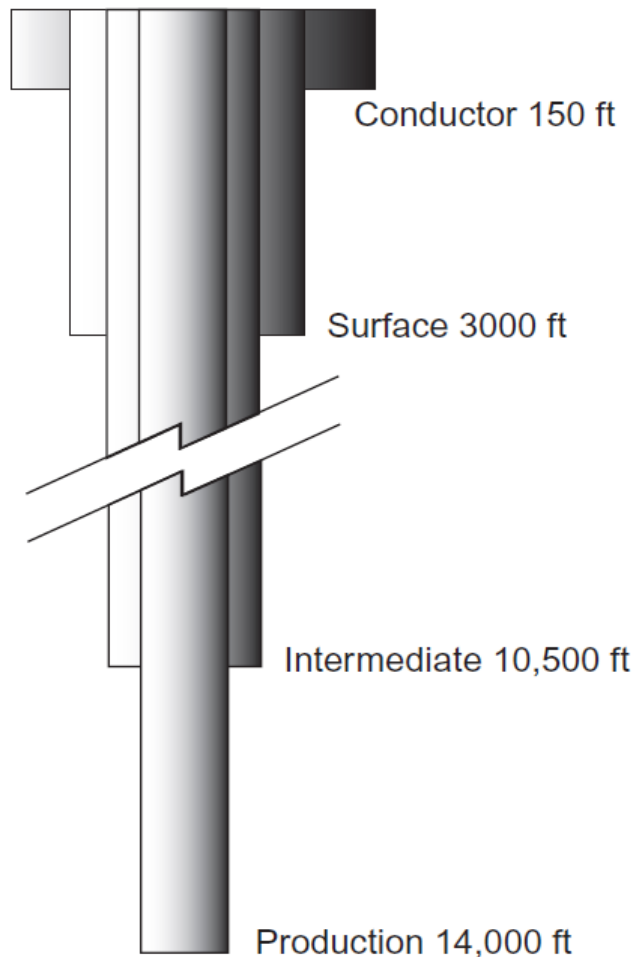
- Σωλήνωση επαφής (conductor casing): Χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης μέσω δονούμενων αναδευτήρων χωρίς να διαβρώνονται οι ρηχοί σχηματισμοί και τα θεμέλια κάτω από την εξέδρα. Η σωλήνωση επαφής προστατεύει τις επόμενες στήλες σωληνώσεων από διάβρωση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραλάβει ένα μέρος του δομικού φορτίου της γεώτρησης. Σε περίπτωση απροσδόκητης εισόδου ρευστών κατά την διάτρηση του τμήματος της επιφανειακής σωλήνωσης εγκαθίσταται ένα σύστημα εκτροπής στην σωλήνωση επαφής για να γίνει διαχωρισμός των ρευστών με την βοήθεια του προσωπικού της γεώτρησης και του σχετικού εξοπλισμού.
- Επιφανειακή σωλήνωση (surface casing): Αποτρέπει την κατάρρευση των ασθενέστερων και μη ενοποιημένων σχηματισμών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και προστατεύει τους υδροφόρους ορίζοντες από πιθανή μόλυνση. Η επιφανειακή σωλήνωση στηρίζει και προστατεύει από την διάβρωση τις επόμενες στήλες σωλήνωσης. Σε περίπτωση που θα συμβεί αιφνίδια εισροή ρευστών (kick), η επιφανειακή σωλήνωση δίνει την δυνατότητα να περιοριστεί η ροή με το κλείσιμο του αντιακρηκτικού μηχανισμού (Blowout preventer-BOP). Ο όρος kick περιγράφει ένα πρόβλημα ελέγχου της γεώτρησης το οποίο συμβαίνει κατά τη διάτρηση ενός σχηματισμού όταν η πίεση στην γεώτρηση καταστεί μικρότερη από την πίεση που ασκούν τα ρευστά του σχηματισμού με αποτέλεσμα να παρατηρείται ροή ρευστών σχηματισμού μέσα στην γεώτρηση. (Schlumberger Oilfield Glossary, 2019).
- Ενδιάμεση σωλήνωση (Intermediate casing): Αυτός ο τύπος σωλήνωσης συνήθως απαιτείται σε βαθύτερες γεωτρήσεις που διεισδύουν σε σχηματισμούς με ασυνήθιστες πιέσεις, με ζώνες απωλειών και τμήματα

ασταθούς σχιστολίθου ή δόμους άλατος. Μερικές γεωτρήσεις μπορεί να απαιτούν μία ή περισσότερες ενδιάμεσες σωληνώσεις μεταξύ της επιφανειακής σωλήνωσης και του τελικού βάθους της γεώτρησης. Όταν υπάρχουν ασυνήθιστες πιέσεις σχηματισμών στα βαθύτερα τμήματα της γεώτρησης, απαιτείται ενδιάμεση σωλήνωση για την προστασία των σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από την επιφανειακή σωλήνωση από τις πιέσεις που δημιουργούνται από το ρευστό διάτρησης υψηλής πυκνότητας. Ομοίως όταν απαντάται φυσιολογική πίεση πόρων κάτω από τμήματα που έχουν ανώμαλες πιέσεις, η τοποθέτηση μιας πρόσθετης στήλης προστατευτικής σωλήνωσης καθιστά δυνατή τη μείωση της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης για την οικονομική διάτρηση των βαθύτερων σχηματισμών. Σε περίπτωση που συναντάται ζώνη απωλειών ή διατρύονται δομές σχιστολίθου ή άλατος είναι αναγκαία η ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση για την αποφυγή προβλημάτων κατά την διάτρηση σε μεγαλύτερο βάθος από τις ζώνες αυτές.

- Σωλήνωση liner: Είναι προστατευτικές σωληνώσεις που δεν εκτείνονται μέχρι την επιφάνεια και εγκαθίστανται από το κατώτερο μέρος της σωλήνωσης που έχει αμέσως μεγαλύτερο μέγεθος. Το σύστημα ανάρτησης του liner χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση της κορυφής του liner από την σωλήνωση με το αμέσως μεγαλύτερο μέγεθος και για να σφραγίσει τον δακτύλιο μεταξύ αυτών. Συνηθίζεται να υπάρχει κάποιο μήκος επικάλυψης μεταξύ του άγκιστρου του liner και του βάθους έδρασης της προηγούμενης σωλήνωσης ώστε να εξασφαλιστεί περιθώριο σε περίπτωση που το άγκιστρο του liner δεν σφραγίζει επαρκώς. Το μήκος κατά το οποίο οι σωληνώσεις επικαλύπτονται είναι δυνατό να τσιμεντωθεί. Το κύριο πλεονέκτημα της σωλήνωσης liner είναι το χαμηλό κόστος της λόγω του περιορισμένου μήκους της. Ωστόσο μερικές φορές προκύπτουν προβλήματα αν ένα άγκιστρο δεν μπορεί να αναρτήσει σωστά την σωλήνωση ή αν δεν είναι σφραγίζεται αποτελεσματικά το διάκενο μεταξύ της σωλήνωσης liner και της σωλήνωσης με το αμέσως μεγαλύτερο μέγεθος. Επίσης η χρήση μιας σωλήνωσης liner εκθέτει τη στήλη της προστατευτικής σωλήνωσης που εδράζεται σε πρόσθετη φθορά κατά την διάρκεια της επόμενης διάτρησης.

Ένα liner διάτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως ενδιάμεση σωλήνωση είτε ως παραγωγική σωλήνωση.

- Παραγωγική σωλήνωση (Production casing): Είναι συνήθως η τελευταία στήλη προστατευτικής σωλήνωσης, έρχεται σε επαφή με τα ρευστά του σχηματισμού που βρίσκονται κάτω από το παρέμβυσμα παραγωγής (production packer) και το ρευστό ολοκλήρωσης (packer fluid). Αυτή η στήλη σωλήνωσης παρέχει προστασία του περιβάλλοντος σε περίπτωση βλάβης του σωλήνα παραγωγής (tubing) κατά την διάρκεια των εργασιών παραγωγής και δίνει την δυνατότητα αντικατάστασης του σωλήνα παραγωγής ή την μεταγενέστερη επισκευή του. (Mitchell, 2011)



Σχήμα 1.2: Τυπική δομή σωλήνωσης (Byrom, 2015)

1.3. Σχεδιασμός σωλήνωσης

Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης περιλαμβάνει την προστασία της γεώτρησης από όλες τις πιθανές καταστάσεις. Η σωλήνωση πρέπει να διαχειριστεί γεωλογικές συνθήκες όπως τα ρήγματα, τις ολόενα αυξανόμενες θερμοκρασίες, τις ζώνες γεωλογικών υπερπίεσεων και υποπίεσεων. Καθώς και ασυνήθιστους σχηματισμούς ασταθούς σχιστολίθου ή δόμους άλατος και την διάβρωση που προκαλείται εξαιτίας όξινου περιβάλλοντος. Επίσης θα πρέπει να διατηρήσει την ακεραιότητα της σε περιπτώσεις που διαταράσσονται οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις όπως όταν συναντάται ζώνη απωλειών ή αιφνίδια εισροή ρευστών. Καθώς και τις φορτίσεις που δέχεται η σωλήνωση σε ορισμένες ειδικές λειτουργικές συνθήκες όπως όταν ασκείται πρόσθετη εφελκυστική δύναμη για να «ξεκολλήσει» μια στήλη σωλήνωσης που έχει «κολλήσει» και τις πιέσεις που δέχεται η σωλήνωση κατά την διάρκεια της τσιμέντωσης. Στην συνέχεια προσδιόρονται το μήκος και το βάθος έδρασης κάθε τεχνικής σωλήνωσης μέσω του προφίλ της πίεσης πόρων και ρωγμάτωσης συναρτήσεως του βάθους. Οι διάμετροι των κοπτικών άκρων και σωληνώσεων επιλέγονται σύμφωνα με το σχετικό διάγραμμα ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή ακολουθία των διαμέτρων στην γεώτρηση. Τέλος, με τον προσδιορισμό των φορτίων διάρρηξης και κατάρρευσης μαζί με τα ανάλογα αξονικά φορτία (θλιπτικά ή εφελκυστικά) επιλέγεται σε κάθε περίπτωση ο κατάλληλος τύπος (ή τύποι) σωλήνωσης. Σε ακραίες περιπτώσεις πραγματοποιείται ο υπολογισμός τριαξονικής φόρτισης διότι το αξονικό εφελκυστικό φορτίο ενισχύει τις εξωτερικές πιέσεις ενώ το αξονικό θλιπτικό φορτίο ενισχύει τις εσωτερικές πιέσεις και αντιστρόφως.

1.4. Συνοπτική περιγραφή της εργασίας

Το θέμα της παρούσας εργασίας είναι ο πλήρης σχεδιασμός της σωλήνωσης σε μια κατακόρυφη γεώτρηση. Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η εφαρμογή των βασικών αρχών σχεδιασμού της σωλήνωσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τόσο κατά την επιλογή του βάθους έδρασης της κάθε στήλης σωλήνωσης που θα πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στη γεώτρηση (προκαταρκτικός σχεδιασμός), όσο και κατά τον λεπτομερή σχεδιασμό της σωλήνωσης που αφορά τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την αστοχία της σωλήνωσης και στην επιλογή του κατάλληλου τύπου σωλήνωσης για κάθε τμήμα της γεώτρησης, ώστε σε κάθε φάση της γεώτρησης να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η οικονομικότητα. Ο σχεδιασμός έγινε με χρήση υπολογιστικών φύλλων (Excel), με βάση τις

σχέσεις που προτείνονται από το American Petroleum Institute και τη διεθνή βιβλιογραφία. Στο 2^ο Κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται ο ρόλος της σωλήνωσης (σκοπός, λειτουργίες, τύποι σωλήνωσης) στη διαδικασία όρυξης βαθιών γεωτρήσεων. Παρουσιάζονται επίσης οι κατηγορίες σωληνώσεων και συνδέσμων των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, τα βασικά χαρακτηριστικά των σωληνώσεων και τα πρότυπα τυποποίησης των στελεχών της σωλήνωσης.

Στη συνέχεια ακολουθεί, στο 3^ο Κεφάλαιο, η παρουσίαση των βασικών αρχών σχεδιασμού της σωλήνωσης σε συμβατικές γεωτρήσεις, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική και τη σχετική βιβλιογραφία. Η εργασία ολοκληρώνεται με τον πλήρη σχεδιασμό όλων των στηλών σωλήνωσης που απαιτηθούν σε μια κατακόρυφη γεώτρηση συγκεκριμένης γεωμετρίας (4^ο Κεφάλαιο) (μελέτη περίπτωσης). Καταρχάς, γίνεται η επιλογή των βαθών έδρασης της κάθε στήλης σωλήνωσης που πρέπει να τοποθετηθεί στη γεώτρηση και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι κατάλληλες κατηγορίες χάλυβα, ώστε η κάθε στήλη σωλήνωσης να ανταπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση, βάσει των δυσμενέστερων σεναρίων σχεδιασμού.

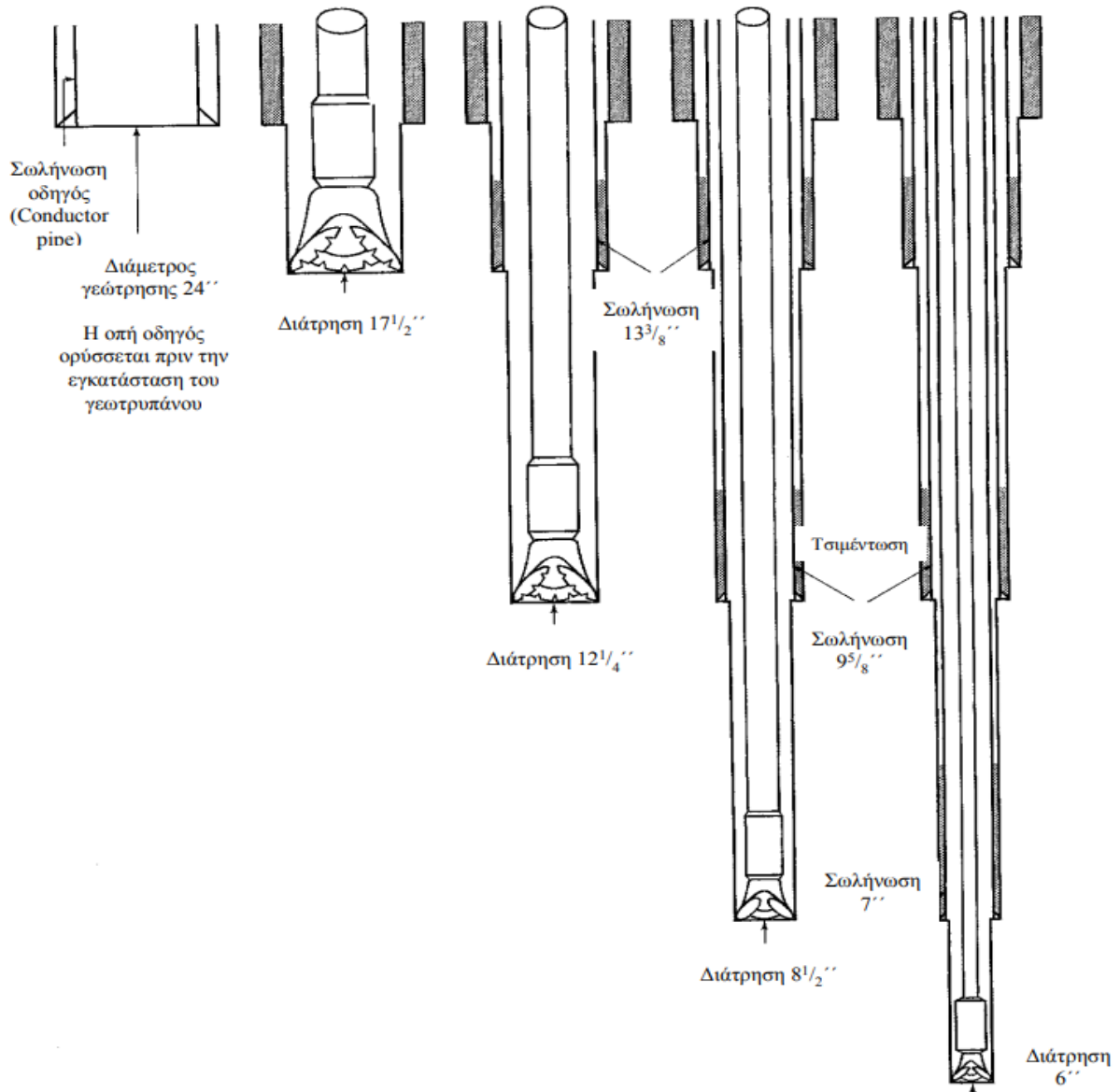
Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°. ΣΩΛΗΝΩΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (WELL CASING)

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 κατακρήμνιση 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 γεωτρυπάνου μέχρι το τελικό βάθος από αλληλοκοχλιούμενους σωλήνες διαφόρων διαμέτρων.

Η σωλήνωση γίνεται κατά στάδια και ο τύπος σωλήνωσης που εφαρμόζεται εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες που αναμένονται να συναντηθούν στο κάθε βάθος που πρόκειται να σωληνωθεί (Σχήμα 2.1). Η σωλήνωση ενός τμήματος της γεώτρησης έχει πάντοτε διάμετρο λίγο μικρότερη από το κοπτικό άκρο που χρησιμοποιήθηκε για την όρυξη του τμήματος αυτού, έτσι ώστε να είναι ανεμπόδιστη η κάθοδος της σωλήνωσης κατά την τοποθέτησή της. Μετά τη σωλήνωση ακολουθεί η τσιμέντωση του δακτυλίου μεταξύ των εξωτερικών τοιχωμάτων της σωλήνωσης και των πλευρικών τοιχωμάτων της γεώτρησης. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται ξεχωριστά για κάθε στάδιο της σωλήνωσης και είναι φυσικό κάθε επόμενο στάδιο της σωλήνωσης να είναι μικρότερης διαμέτρου από το προηγούμενο.

Η κάθε στήλη σωλήνωσης αναρτάται στην κεφαλή της γεώτρησης και εκτείνεται έως το εκάστοτε βάθος έδρασής της, με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος όλων των στηλών σωλήνωσης να είναι πολλαπλάσιο του μήκους της γεώτρησης. Εξάιρεση αποτελεί η σωλήνωση τύπου liner η οποία δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια, αλλά αναρτάται με ειδικό σύστημα από το τελευταίο τμήμα της σωλήνωσης του προηγούμενου σταδίου.



Σχήμα 2.1: Τομή γεώτρησης όπου εκτελείται σωλήνωση κατά στάδια (Σταματάκη, 2003)

2.1. Λειτουργίες της σωλήνωσης

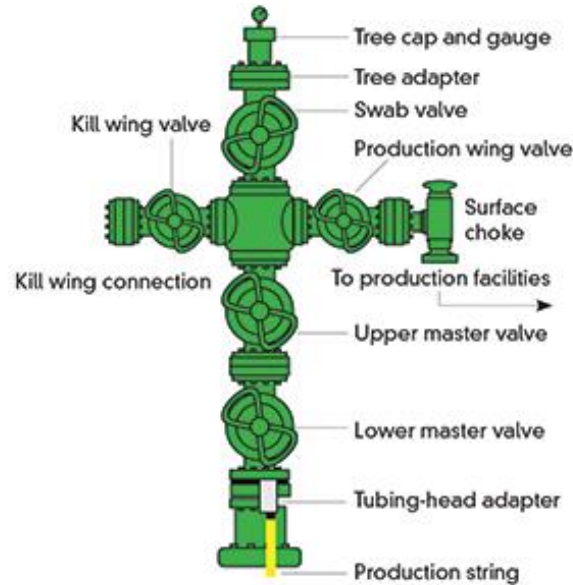
Η παρουσία ζωνών ανώμαλων πιέσεων, χαλαρών και μη συνεκτικών σχηματισμών καθιστούν αναγκαία τη σωλήνωση της γεώτρησης ανά τμήματα για να ολοκληρωθεί απρόσκοπτα η διάνοιξή της μέχρι το τελικό βάθος.

Οι λειτουργίες της σωλήνωσης είναι οι εξής:

- Να διατηρεί ανοιχτή τη γεώτρηση και να παρέχει υποστήριξη των τοιχωμάτων της εντός χαλαρών ή κερματισμένων σχηματισμών. Σε περίπτωση που η γεώτρηση δεν σωληνωθεί

ενδέχεται να κατακρημνισθούν υλικά από τα τοιχώματα και να καταπέσουν μέσα στη γεώτρηση, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η επανόρυξή της.

- Να απομονώνει τους περατούς σχηματισμούς 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» των υδροφόρων οριζόντων από τα ρευστά διάτρησης ή/και τα ρευστά βαθύτερων σχηματισμών.
- Να παρέχεται ανοιχτή δίοδος μέχρι την επιφάνεια για τη διαφυγή υδρογονανθράκων κατά την προσέγγιση των επιθυμητών σχηματισμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις εντός της σωληνωμένης γεώτρησης εγκαθίστανται και σωλήνες παραγωγής (tubing).
- Να συνδέεται κατάλληλα ο εξοπλισμός της γεώτρησης με τον εξοπλισμό επιφάνειας στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead equipment), όπως για παράδειγμα το Christmas tree (Εικόνα 2.1). Επίσης, μέσω αυτής συνδέεται και ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας (Blow out preventer-BOP), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των πιέσεων μέσα στη γεώτρηση (Adams, 1985).
- Να εξασφαλιστεί μία γεώτρηση δεδομένης διαμέτρου και βάθους, με σκοπό να διευκολύνεται ο έλεγχος του εξοπλισμού και η συντήρησή του (Rabia, 2002).
- Να διαχωρίσει ή να απομονώσει διάφορες περιοχές με σκοπό είτε να ελαχιστοποιήσει τα προβλήματα της γεώτρησης, είτε να μεγιστοποιήσει την παραγωγή (Σταματάκη, 2003).



Εικόνα 2.1: Συμβατικό Christmas tree (Schlumberger Oilfield Glossary, 2019)

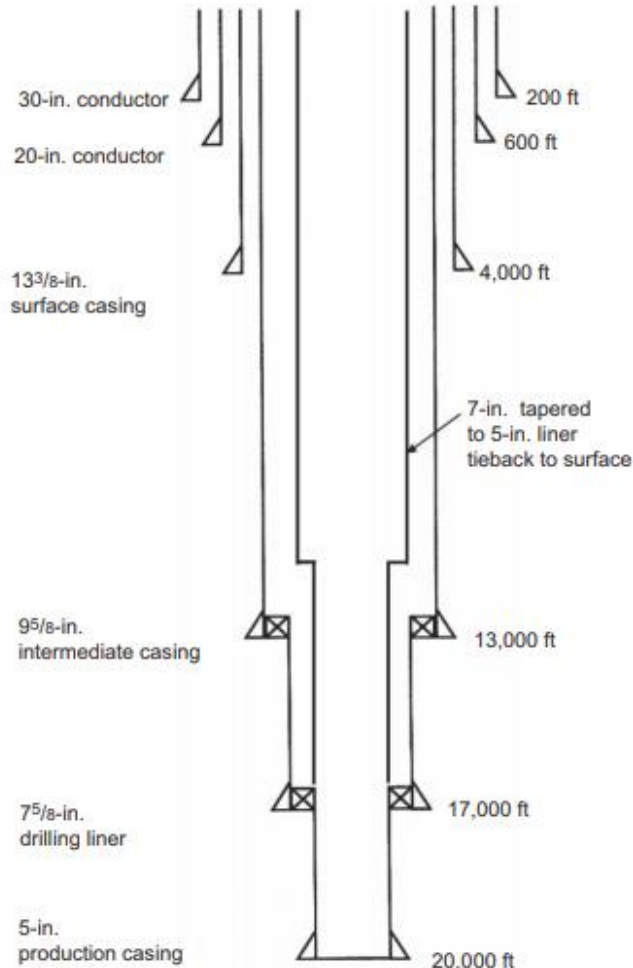
2.2. Τύποι σωλήνωσης

Με την πρόοδο της διάτρησης και την προοπτική εντοπισμού αποθεμάτων υδρογονανθράκων σε μεγαλύτερο βάθος, το πλήθος και οι διαστάσεις των στηλών της σωλήνωσης που απαιτούνται για τη γεώτρηση και την ολοκλήρωσή της αυξάνεται. Η στήλη της σωλήνωσης είναι ένα από τα ακριβότερα τμήματα του προγράμματος της γεώτρησης και σύμφωνα με έρευνες το μέσο κόστος των σωληνώσεων καλύπτει το 18% μιας ολοκληρωμένης γεώτρησης (Mitchell & Miska, 2011). Οι δεδομένες συνθήκες καθιστούν σημαντικό το ρόλο του μηχανικού γεωτρήσεων για τον οικονομικότερο και ασφαλέστερο σχεδιασμό της σωλήνωσης, καθ' όλη τη διάρκεια της γεωτρητικής διαδικασίας.

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 δεν χρησιμοποιούνται σε όλες τις γεωτρήσεις και ο τελικός αριθμός σωληνώσεων εξαρτάται από τις συνθήκες του εκάστοτε σχεδιασμού. Στο Σχήμα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των διαφόρων τύπων σωλήνωσης.



Σχήμα 2.2: Τυπική δομή σωλήνωσης (Mitchell, 2011)

2.2.1. Σωλήνωση οδηγός (Drive or structural pipe)

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

- Διευκολύνει την ομαλή 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 γεωτρύπανο.

Συνήθως τοποθετείται και τσιμεντώνεται από τις εταιρείες 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 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 casing)

Είναι η πρώτη πραγματική στήλη σωλήνωσης που τοποθετείται μέσα στην γεώτρηση, σε βάθος συνήθως μερικών εκατοντάδων μέτρων από την επιφάνεια, εντός των χαλαρών σχηματισμών.

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

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

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

- Marine conductor: Χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες γεωτρήσεις όπου ο αντiekρηκτικός μηχανισμός (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 την 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 πρόβλημα στην γεώτρηση, από 300 – 5000ft. 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 έδρασης αυτής της στήλης σωλήνωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές που 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 μία αιφνίδια εισροή όταν η όρυξη θα συνεχιστεί στο επόμενο τμήμα. Τέλος, ένα τυπικό μέγεθος αυτού του τύπου σωλήνωσης είναι 13 3/8in (240mm) (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 το τελικό βάθος της γεώτρησης.

Το βάθος τοποθέτησης της ενδιάμεσης σωλήνωσης εξαρτάται από την πίεση των πόρων του σχηματισμού, αλλά δεν 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 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 την 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 σύνηθες 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 την ολοκλήρωση της γεώτρησης (well completion), και για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει πλήρης έλεγχος των πιέσεων πριν την τοποθέτηση

του εξοπλισμού ολοκλήρωσης. Με τη σωλήνωση αυτή ολοκληρώνεται τυπικά η όρυξη μιας γεώτρησης. Η συνηθέστερη διάμετρος για την παραγωγική σωλήνωση είναι 7 in (177,8mm) (Σταματάκη, 2003).

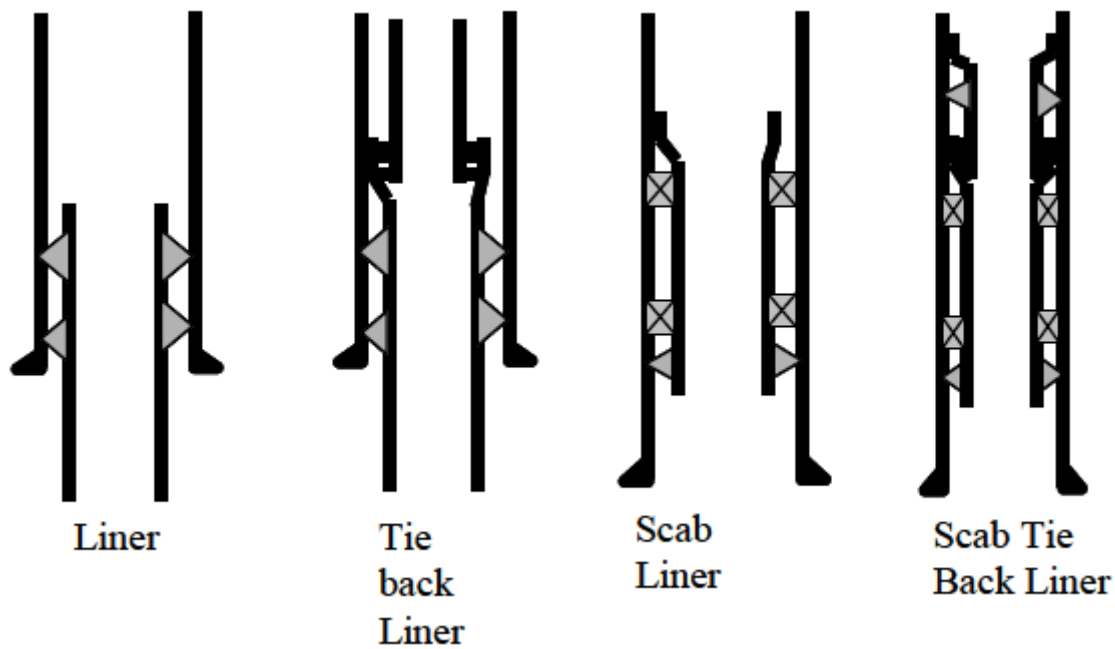
2.2.6. Σωλήνωση liner (Liner casing)

Ένα liner είναι μια σχετικά μικρού μήκους σωλήνωση (3000 έως 5000ft). Η σωλήνωση liner δε 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, επιδιώκεται επικάλυψη των στηλών σωλήνωσης μήκους 300-500ft (Σταματάκη, 2003).

2.2.6.1. Τύποι liner

Οι τύποι των liner φαίνονται στο Σχήμα 2.3 και είναι οι παρακάτω:

- **Liner παραγωγής (Production liner):** Χρησιμοποιείται αντί της συμβατικής παραγωγικής σωλήνωσης για να απομονώσει διακριτές μεταξύ τους ζώνες παραγωγής (production zone) ή ζώνες εισπίεσης (injection zone).
- **Tie-back liner.** Είναι ένα τμήμα σωλήνωσης το οποίο προσαρτάται πάνω από υφιστάμενο liner και φτάνει μέχρι την επιφάνεια. Μπορεί να είναι ή να μην είναι τσιμεντωμένο.
- **Scab liner.** Είναι ένα τμήμα σωλήνωσης που δε φτάνει ως την επιφάνεια. Χρησιμοποιείται για να επισκευασθεί κάποιο φθαρμένο τμήμα σωλήνωσης και είναι σφραγισμένο στην κορυφή και στη βάση του με παρέμβυσμα. Επιπλέον σε ορισμένες περιπτώσεις τσιμεντώνεται.
- Το scab tie-back liner είναι το τμήμα της σωλήνωσης που εκτείνεται από την κορυφή ενός υφιστάμενου liner, αλλά δε φτάνει ως την επιφάνεια. Το scab tie-back liner κανονικά τσιμεντώνεται (Rabia, 2002).



Σχήμα 2.3: Τύποι liner (Rabia, 2002)

Τα βασικά πλεονεκτήματα του liner είναι:

- Η μείωση του κόστους της παραγωγικής σωλήνωσης, καθώς και του χρόνου τοποθέτησης και τσιμέντωσης.
- Η μείωση του μήκους της σωλήνωσης με τη μικρότερη διάμετρο, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση ικανοποιητικού μεγέθους ειδικών σωλήνων παραγωγής (production tubing).
- Η ευελιξία στην ολοκλήρωση της γεώτρησης.

Τα liner διάτρησης και παραγωγής (drilling and production liners) χρησιμοποιούνται συχνά ως μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος για τον έλεγχο της πίεσης ή της βαθμίδας ρωγμάτωσης χωρίς τοποθέτηση μιας στήλης σωλήνωσης που θα φθάνει ως στην 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 επαρκή μηχανικά χαρακτηριστικά ώστε να αντέχει την ίδια πίεση διάρρηξης όπως και το liner.

2.3. Χαρακτηριστικά, προδιαγραφές και τυποποίηση της σωλήνωσης

Η σωλήνωση μπορεί να είναι ένας σφυρήλατος σωλήνας από ατσάλι χωρίς ραφή, κατασκευάζεται από θερμοκατεργασμένο χάλυβα και, αν είναι απαραίτητο, 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 της σωλήνωσης και, κατά συνέπεια, και οι σχετικές προδιαγραφές της είναι τα εξής:

- Η εξωτερική διάμετρος (outside diameter) που είναι χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε στελέχους σωλήνωσης. Διατίθενται σε πολλές διαφορετικές διαμέτρους, με σκοπό να σωληνώνονται διαφορετικά τμήματα (βάθη) μιας γεώτρησης.
- Η εσωτερική διάμετρος (inside diameter) που προσδιορίζεται από το πάχος των τοιχωμάτων των σωλήνων (wall thickness) και από την ωφέλιμη διάμετρο (drift diameter). Η ωφέλιμη διάμετρος αναφέρεται στην μέγιστη εγγυημένη διάμετρο ενός εμβόλου που διέρχεται από την σωλήνωση, χωρίς την εμφάνιση αδικαιολόγητων τάσεων.
- Ονομαστικό βάρος (nominal weight): Το ονομαστικό βάρος είναι το μέσο γραμμικό βάρος του σωλήνα, συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσης.

- 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 του χάλυβα και των μηχανικών χαρακτηριστικών της σωλήνωσης, ενώ η περιγραφή των συνδέσμων και των σπειρωμάτων γίνεται σε διακριτή ενότητα.

2.3.1. Διάμετρος στελεχών σωλήνωσης

Κάθε στέλεχος της 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.

Η **εσωτερική διάμετρος (inside diameter-ID)** προσδιορίζεται από το **πάχος τοιχωμάτων των σωλήνων (wall thickness)** και από την **ωφέλιμη διάμετρο (drift diameter)**. Η μέγιστη εξωτερική διάμετρος ελέγχεται από την συνδυασμένη ανοχή της εξωτερικής διαμέτρου και του πάχους των τοιχωμάτων.

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) ορίζονται τρία μεγέθη για το βάρος της σωλήνωσης:

- Ονομαστικό βάρος (nominal weight)
- Βάρος του κυρίως σώματος της σωλήνωσης (plain and weight)

- Συνολικό βάρος κυρίως σώματος και συνδέσμων (threaded and coupled weight)

Ο όρος «**ονομαστικό βάρος**» χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους αναγνώρισης των διαφορετικών τύπων σωλήνωσης, προκειμένου για την ταξινόμησή τους. Εκφράζεται σε lb/ft ή kg/m. Το ονομαστικό βάρος δεν είναι το πραγματικό βάρος της σωλήνωσης και συνήθως υπολογίζεται από το θεωρητικό βάρος ανά πόδι για σωλήνωση μήκους 20ft (εκτός από το κύριο σώμα περιλαμβάνονται και οι σύνδεσμοι).

Το ονομαστικό βάρος σε rounds/ft στην πραγματικότητα ορίζει το πάχος του στελέχους μέσω μιας εξίσωσης η οποία ορίζεται στις προδιαγραφές του API (API 5CT).

2.3.3. Μήκος στελεχών σωλήνωσης

Σύμφωνα με το Αμερικανικό 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 2.1. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η σωλήνωση εύρους 3, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των συνδέσμων που απαιτούνται για τη στήλη σωλήνωσης.

Πίνακας 2.1: Εύρη μηκών στελεχών σωλήνωσης (Rabia, 2001)

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

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σωλήνωσης, ενδεικτικά για σωληνώσεις με OD 7-9⁷/₈in., σύμφωνα με το API (American petroleum institute) και το ISO (International Organization for Standardization).

Πίνακας 2.2. Συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σολήνωσης.

| Size | | Weight lbs/ft | ID | | Drift | | Capacity bbl/100ft |
|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| Inches | mm | | Inches | mm | Inches | mm | |
| 7 | 177.80 | 17.00 | 6.538 | 166.07 | 6.413 | 162.89 | 4.15 |
| | | 20.00 | 6.456 | 163.98 | 6.331 | 160.81 | 4.05 |
| | | 23.00 | 6.366 | 161.70 | 6.241 | 158.52 | 3.94 |
| | | 26.00 | 6.276 | 159.41 | 6.151 | 156.24 | 3.83 |
| | | 29.00 | 6.184 | 157.07 | 6.059 | 153.90 | 3.71 |
| | | 32.00 | 6.094 | 154.79 | 5.969 | 151.61 | 3.61 |
| | | 35.00 | 6.004 | 152.50 | 5.879 | 149.33 | 3.50 |
| | | 38.00 | 5.920 | 150.37 | 5.795 | 147.19 | 3.40 |
| | | 41.00 | 5.820 | 147.83 | 5.695 | 144.65 | 3.29 |
| | | 42.70 | 5.750 | 146.05 | 5.625 | 142.88 | 3.21 |
| | | 44.00 | 5.720 | 145.29 | 5.595 | 142.11 | 3.18 |
| | | 45.40 | 5.660 | 143.78 | 5.535 | 140.59 | 3.11 |
| | | 49.50 | 5.540 | 140.72 | 5.415 | 137.54 | 2.98 |
| | | 56.10 | 5.376 | 136.55 | 5.251 | 133.38 | 2.81 |
| 58.00 | 5.240 | 133.10 | 5.115 | 129.92 | 2.67 | | |
| 66.50 | 5.040 | 128.02 | 4.915 | 124.84 | 2.47 | | |
| 7 5/8 | 193.68 | 20.00 | 7.125 | 180.98 | 7.000 | 177.80 | 4.93 |
| | | 24.00 | 7.025 | 178.44 | 6.900 | 175.26 | 4.79 |
| | | 26.40 | 6.969 | 177.01 | 6.844 | 173.84 | 4.72 |
| | | 29.70 | 6.875 | 174.63 | 6.750 | 171.45 | 4.59 |
| | | 33.70 | 6.765 | 171.83 | 6.640 | 168.68 | 4.45 |
| | | 39.00 | 6.625 | 168.28 | 6.500 | 165.10 | 4.28 |
| | | 42.80 | 6.501 | 165.13 | 6.376 | 161.95 | 4.11 |
| | | 45.30 | 6.435 | 163.45 | 6.310 | 160.27 | 4.02 |
| | | 47.10 | 6.375 | 161.93 | 6.250 | 158.75 | 3.95 |
| | | 51.20 | 6.249 | 158.72 | 6.125 | 155.58 | 3.80 |
| | | 52.80 | 6.201 | 157.81 | 6.000 | 152.40 | 3.74 |
| 55.75 | 6.201 | 157.51 | 6.176 | 156.87 | 3.74 | | |
| 7 3/4 | 198.85 | 46.10 | 6.560 | 166.62 | 6.500 | 165.10 | 4.18 |
| 8 5/8 | 219.08 | 24.00 | 8.097 | 205.66 | 7.972 | 202.49 | 6.37 |
| | | 28.00 | 8.017 | 203.63 | 7.892 | 200.46 | 6.24 |
| | | 32.00 | 7.921 | 201.19 | 7.798 | 198.02 | 6.09 |
| | | 36.00 | 7.825 | 198.76 | 7.700 | 195.58 | 5.95 |
| | | 40.00 | 7.725 | 196.22 | 7.6 | 193.04 | 5.8 |
| | | 44.00 | 7.625 | 193.68 | 7.500 | 190.50 | 5.65 |
| | | 49.00 | 7.511 | 190.78 | 7.386 | 187.60 | 5.48 |
| | | 52.00 | 7.435 | 188.85 | 7.310 | 185.67 | 5.37 |
| 8 3/4 | 222.25 | 49.70 | 7.636 | 193.95 | 7.500 | 190.50 | 5.66 |
| 9 5/8 | 244.48 | 29.30 | 9.063 | 230.20 | 8.907 | 226.24 | 7.98 |
| | | 32.30 | 9.001 | 228.63 | 8.845 | 224.66 | 7.87 |
| | | 36.00 | 8.921 | 226.59 | 8.765 | 222.63 | 7.73 |
| | | 38.00 | 8.885 | 225.68 | 8.76 | 222.50 | 7.67 |
| | | 40.00 | 8.835 | 224.41 | 8.679 | 220.45 | 7.58 |
| | | 43.50 | 8.755 | 222.38 | 8.599 | 218.41 | 7.45 |
| | | 47.00 | 8.681 | 220.50 | 8.525 | 216.54 | 7.32 |
| | | 53.50 | 8.535 | 216.79 | 8.379 | 212.83 | 7.08 |
| | | 58.40 | 8.435 | 214.25 | 8.279 | 210.29 | 6.91 |
| | | 59.40 | 8.407 | 213.54 | 8.251 | 209.58 | 6.87 |
| | | 61.10 | 8.375 | 212.73 | 8.219 | 208.76 | 6.81 |
| | | 64.90 | 8.281 | 210.34 | 8.125 | 206.38 | 6.66 |
| | | 70.30 | 8.157 | 207.19 | 8.001 | 203.23 | 6.46 |
| 71.80 | 8.125 | 206.38 | 7.969 | 202.41 | 6.41 | | |
| 9 3/4 | 247.65 | 59.20 | 8.560 | 217.42 | 8.500 | 215.90 | 7.12 |
| 9 7/8 | 250.83 | 62.80 | 8.625 | 219.08 | 8.500 | 215.90 | 7.23 |

2.3.4. Κατηγορία χάλυβα (Grade of Steel)

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 ώστε να πάρει το επιθυμητό σχήμα ή μπορεί να αποτελείται από επίπεδα 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 ηλεκτροσυγκολλητοί σωλήνες περνούν από βαφή η οποία αυξάνει το όριο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση στην οποία υποβάλλεται σε καταπόνηση και το μειώνει κατά τις κάθετες προς αυτή διευθύνσεις.

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, Τεχνολογία Γεωτρήσεων, 2003).

Στον Πίνακα 2.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες σωλήνωσης κατά API, ανάλογα με την προσθήκη στοιχείων στο χάλυβα (Rabia, 2001).

Πίνακας 2.3: Χημική σύσταση κατηγοριών χάλυβα τυποποιημένων από το API (Rabia, 2001)

| Group | Grade | Type | Carbon | | Manganese | | Molybdenum | | Chromium | | Nickel | Cooper | Phosphorus | Sulphur | Silicon |
|-------|-------|-------|--------|-------------------|-----------|------|-------------------|------|----------|------|--------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| | | | min. | max. | min. | max. | min. | max. | min. | 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 | 13 Cr | 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 άνθρακα (C) για την κατηγορία T95 τύπου 1 μπορεί να μειωθεί το πολύ κατά 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 2.4 με τις πλέον συνήθεις κατηγορίες κατά το API, και τα αντίστοιχα πεδία εφαρμογής τους.

Πίνακας 2.4: Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής των κατηγοριών σωλήνωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία. (Σταματάκη, 2003)

| 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 ₂ S. |
| J55 | Βρίσκει εφαρμογή με την παρουσία H ₂ S. 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 ₂ S σε όλες τις θερμοκρασίες. |
| M65 | Η κατηγορία προστέθηκε το Δεκέμβριο 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 ₂ S. Από την άποψη αυτή, η κατηγορία L είναι πιο κατάλληλη σε όξινο διαβρωτικό περιβάλλον. |
| N80 | Αποτελεί standard της βιομηχανίας σε γεωτρήσεις μέσου βάθους. Πρόκειται για χάλυβα σκληρού κράματος και δεν είναι κατάλληλη για H ₂ S σε όλες τις θερμοκρασίες |
| C90 | Βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε γεωτρήσεις που επικρατούν υψηλές πιέσεις και υπάρχει παρουσία H ₂ S. 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 του API είναι πιθανό να απαιτεί ειδική παραγγελία και είναι πολύ ακριβή. |
| Q125 | Χρησιμοποιείται μόνο σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις και εξαιρετικά υψηλές πιέσεις. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα H ₂ S για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 225 °F. |

Υπάρχουν επίσης κατηγορίες χάλυβα που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, οι οποίες δεν είναι σύμφωνες με τις προδιαγραφές του API. Αυτές οι κατηγορίες σωλήνωσης χρησιμοποιούνται συχνά σε ειδικές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή.

όπως σε περίπτωση εισροής υδρόθειου από τους σχηματισμούς. Ο Πίνακας 2.4 παρέχει έναν κατάλογο με κατηγορίες χάλυβα σωληνώσεων εκτός API.

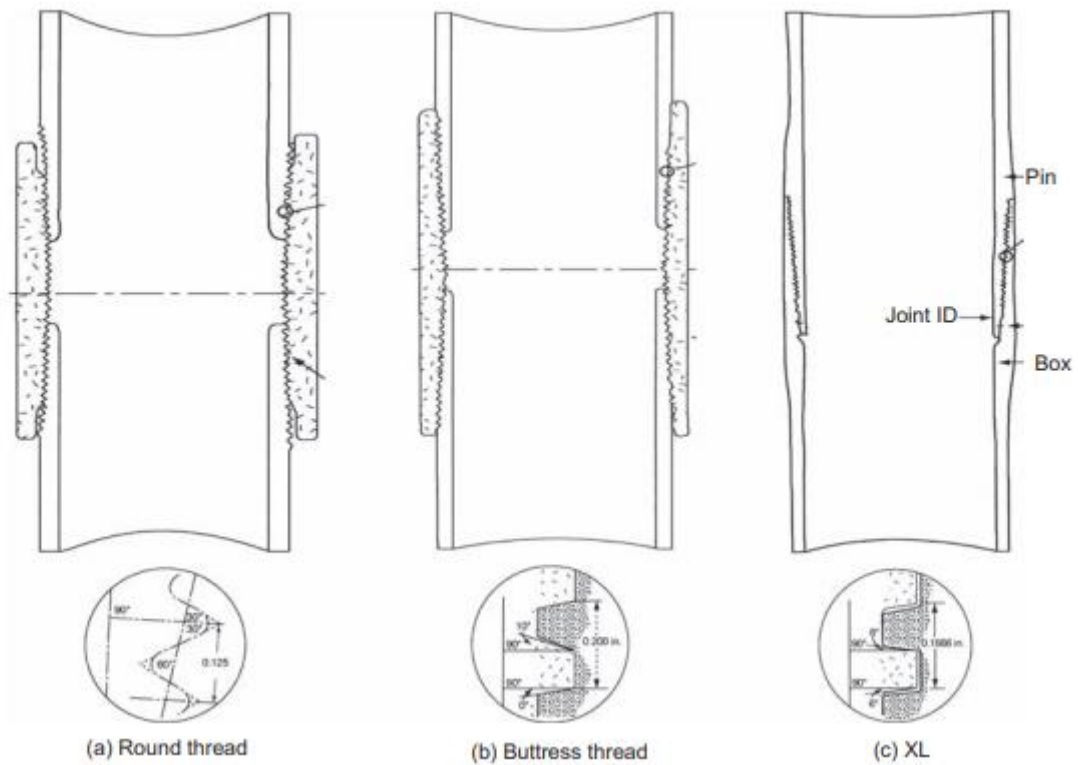
*Πίνακας 2.5: Τύποι χάλυβα σωληνώσεων εκτός μη τυποποιημένων από το API
 (PetroWiki, 2020)*

| TABLE 7.2—NON-API STEEL GRADES | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-------------------|---------|---------------------------|-----------------------|
| Non-API Grade | Manufacturers | Yield Stress, psi | | Minimum Ult. Tensile, psi | Minimum Elongation, % |
| | | Minimum | Maximum | | |
| S-80 | Lone Star | 75,000 | — | 75,000 | 20.0 |
| | Longitudinal | 55,000 | — | — | — |
| modN-80 | Mannesmann | 80,000 | 95,000 | 100,000 | 24.0 |
| C-90 | Mannesmann | 90,000 | 105,000 | 120,000 | 26.0 |
| SS-95 | Lone Star | 95,000 | — | 95,000 | 18.0 |
| | Longitudinal | 75,000 | — | — | — |
| SOO-95 | Mannesmann | 95,000 | 110,000 | 110,000 | 20.0 |
| S-95 | Lone Star | 95,000 | — | 110,000 | 16.0 |
| | Longitudinal | 92,000 | — | — | — |
| SOO-125 | Mannesmann | 125,000 | 150,000 | 135,000 | 18.0 |
| SOO-140 | Mannesmann | 140,000 | 165,000 | 150,000 | 18.0 |
| V-150 | U.S. Steel | 150,000 | 180,000 | 160,000 | 14.0 |
| SOO-155 | Mannesmann | 155,000 | 180,000 | 165,000 | 20.0 |

2.3.5. Τύποι συνδέσεων

Ο σύνδεσμος είναι τμήμα της σωλήνωσης και χρησιμοποιείται για να ενώσει 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 άκρα του. Το API ορίζει ότι ο σύνδεσμος θα πρέπει να είναι ίδιας κατηγορίας (grade) με το κυρίως σώμα της σωλήνωσης. Γενικά, η σωλήνωση και ο σύνδεσμος χαρακτηρίζονται από τον τύπο του σπειρώματος με τον οποίο είναι εφοδιασμένα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συνδέσεων και διαφοροποιούνται ως προς το μήκος, το πάχος και το σχήμα του σπειρώματος (Σχήμα 2.4). Σύμφωνα με το API μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι τύποι συνδέσεων (Σταματάκη, 2003):



Σχήμα 2.4. Τύποι συνδέσμων (Mitchell & Miska, 2011)

- Short round threads and couplings (SCSG). Σύνδεσμοι με κυλινδρικό σπείρωμα μικρού μήκους [Σχήμα 2.4 (a)]. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων SCSG.

Πίνακας 2.6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδέσμων SCSG (Mitchell & Miska, 2011)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) |
|------------------|-------------------------------|--|----------------------------|--|--|--|---|--|--|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|
| Size Designation | Major Diameter D ₄ | Nominal Weight: Thread and Coupling (lbm/ft) | Number of Threads per inch | Length: End of Hand-Tight Plane L ₁ | Length: Effective Threads L ₂ | Total Length: End of Vanish Point L ₄ | Pitch Diameter at Hand-Tight Plane E ₁ | End of Pipe to Center of Coupling, Power-Tight Make-Up J | Length: Face of Coupling to Hand-Tight Plane M | Diameter of Coupling Q | Depth of Coupling Recess q | Hand-Tight Stand-off, Turns A | Minimum Length, Full Crest from End of Pipe L _c [*] |
| 4½ | 4.500 | 9.50 | 8 | 0.921 | 1.715 | 2.000 | 4.40337 | 1.125 | 0.704 | 4 ¹⁹ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 0.875 |
| 4½ | 4.500 | Others | 8 | 1.546 | 2.340 | 2.625 | 4.40337 | 0.500 | 0.704 | 4 ¹⁹ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.500 |
| 5 | 5.000 | 11.50 | 8 | 1.421 | 2.215 | 2.500 | 4.90337 | 0.750 | 0.704 | 5 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.375 |
| 5 | 5.000 | Others | 8 | 1.671 | 2.465 | 2.750 | 4.90337 | 0.500 | 0.704 | 5 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.625 |
| 5½ | 5.500 | All | 8 | 1.796 | 2.590 | 2.875 | 5.40337 | 0.500 | 0.704 | 5 ¹⁹ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.750 |
| 6% | 6.625 | All | 8 | 2.046 | 2.840 | 3.125 | 6.52837 | 0.500 | 0.704 | 6 ²³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.000 |
| 7 | 7.000 | 17.00 | 8 | 1.296 | 2.090 | 2.375 | 6.90337 | 1.250 | 0.704 | 7 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.250 |
| 7 | 7.000 | Others | 8 | 2.046 | 2.840 | 3.125 | 6.90337 | 0.500 | 0.704 | 7 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.000 |
| 7% | 7.625 | All | 8 | 2.104 | 2.965 | 3.250 | 7.52418 | 0.500 | 0.709 | 7 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.125 |
| 8% | 8.625 | 24.00 | 8 | 1.854 | 2.715 | 3.000 | 8.52418 | 0.875 | 0.709 | 8 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 1.875 |
| 8% | 8.625 | Others | 8 | 2.229 | 3.090 | 3.375 | 8.52418 | 0.500 | 0.709 | 8 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.250 |
| 9% | 9.625 | All | 8 | 2.229 | 3.090 | 3.375 | 9.52418 | 0.500 | 0.709 | 9 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.250 ^a |
| 9% | 9.625 | All | 8 | 2.162 | 3.090 | 3.375 | 9.51999 | 0.500 | 0.713 | 9 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 4 | 2.250 ^b |
| 10% | 10.750 | 32.75 | 8 | 1.604 | 2.465 | 2.750 | 10.64918 | 1.250 | 0.709 | 10 ²⁹ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 1.625 ^a |
| 10% | 10.750 | Others | 8 | 2.354 | 3.215 | 3.500 | 10.64918 | 0.500 | 0.709 | 10 ²⁹ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.375 ^a |
| 10% | 10.750 | Others | 8 | 2.287 | 3.215 | 3.500 | 10.64499 | 0.500 | 0.713 | 10 ²⁹ / ₃₂ | 0.433 | 4 | 2.375 ^b |
| 11% | 11.750 | All | 8 | 2.354 | 3.215 | 3.500 | 11.64918 | 0.500 | 0.709 | 11 ²⁹ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.375 ^a |
| 11% | 11.750 | All | 8 | 2.287 | 3.215 | 3.500 | 11.64499 | 0.500 | 0.713 | 11 ²⁹ / ₃₂ | 0.433 | 4 | 2.375 ^b |
| 13% | 13.375 | All | 8 | 2.354 | 3.215 | 3.500 | 13.27418 | 0.500 | 0.709 | 13 ¹⁷ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 2.375 ^a |
| 13% | 13.375 | All | 8 | 2.287 | 3.215 | 3.500 | 13.26999 | 0.500 | 0.713 | 13 ¹⁷ / ₃₂ | 0.433 | 4 | 2.375 ^b |
| 16 | 16.000 | All | 8 | 2.854 | 3.715 | 4.000 | 15.89918 | 0.500 | 0.709 | 16 ⁷ / ₃₂ | 0.366 | 3½ | 2.875 |
| 18% | 18.625 | 87.50 | 8 | 2.854 | 3.715 | 4.000 | 18.52418 | 0.500 | 0.709 | 18 ²⁷ / ₃₂ | 0.366 | 3½ | 2.875 |
| 20 | 20.000 | All | 8 | 2.854 | 3.715 | 4.000 | 19.89918 | 0.500 | 0.709 | 20 ⁷ / ₃₂ | 0.366 | 3½ | 2.875 ^c |
| 20 | 20.000 | All | 8 | 2.787 | 3.715 | 4.000 | 19.89499 | 0.500 | 0.713 | 20 ⁷ / ₃₂ | 0.366 | 4 | 2.875 ^d |

Include taper on diameter, all sizes, 0.0625 in. per in.

Note: Hand-tight standoff "A" is the basic allowance for basic power make-up of the joint as shown in Figure 3.
^{*}L_c = L₄ - 1.125 in. for 8 round thread casing.
^aApplicable to coupling grades lower than P110.
^bApplicable to coupling grades P110 and higher.
^cApplicable to coupling grades lower than J55 and K55.
^dApplicable to coupling grades J55 and K55 and higher.

- Long round threads and couplings (LCSG). Σύνδεσμοι με κυλινδρικό σπείρωμα μεγάλου μήκους[Σχήμα 2.4(a)]. Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων LCSG.

Πίνακας 2.7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδέσμων LCSG (Mitchell & Miska, 2011)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---|---|---|--|--|---|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|
| Size Designation D | Major Diameter D ₄ | Number of Threads per inch | Length: End of Pipe to Hand-Tight Plane L ₁ | Length: Effective Threads L ₂ | Total Length: End of Pipe to Vanish Point L ₄ | Pitch Diameter at Hand-Tight Plane E ₁ | End of Pipe to Center Length: of Coupling, Power-Tight Make-Up J | Length: Face of Coupling to Hand-Tight Plane M | Diameter of Coupling Recess Q | Depth of Coupling Recess q | Hand-Tight Stand-off Turns A | Minimum Length, Full Crest Threads from End of Pipe L _c [*] |
| 4½ | 4.500 | 8 | 1.921 | 2.715 | 3.000 | 4.40337 | 0.500 | 0.704 | 4 ¹⁹ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 1.875 |
| 5 | 5.000 | 8 | 2.296 | 3.090 | 3.375 | 4.90337 | 0.500 | 0.704 | 5 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.250 |
| 5½ | 5.500 | 8 | 2.421 | 3.215 | 3.500 | 5.40337 | 0.500 | 0.704 | 5 ¹⁹ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.375 |
| 6¾ | 6.625 | 8 | 2.796 | 3.590 | 3.875 | 6.52837 | 0.500 | 0.704 | 6 ²³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.750 |
| 7 | 7.000 | 8 | 2.921 | 3.715 | 4.000 | 6.90337 | 0.500 | 0.704 | 7 ³ / ₃₂ | 0.500 | 3 | 2.875 |
| 7¾ | 7.625 | 8 | 2.979 | 3.840 | 4.125 | 7.52418 | 0.500 | 0.709 | 7 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 3.000 |
| 8¾ | 8.625 | 8 | 3.354 | 4.215 | 4.500 | 8.52418 | 0.500 | 0.709 | 8 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 3.375 |
| 9¾ | 9.625 | 8 | 3.604 | 4.465 | 4.750 | 9.52418 | 0.500 | 0.709 | 9 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 3½ | 3.625 ^a |
| 9¾ | 9.625 | 8 | 3.537 | 4.465 | 4.750 | 9.51999 | 0.500 | 0.713 | 9 ²⁵ / ₃₂ | 0.433 | 4 | 3.625 ^b |
| 20 | 20.000 | 8 | 4.104 | 4.965 | 5.250 | 19.89918 | 0.500 | 0.709 | 20 ⁷ / ₃₂ | 0.366 | 3½ | 4.125 ^c |
| 20 | 20.000 | 8 | 4.037 | 4.965 | 5.250 | 19.89499 | 0.500 | 0.713 | 20 ⁷ / ₃₂ | 0.366 | 4 | 4.125 ^d |

Include taper on diameter, all sizes, 0.0625 in. per in.

Note: Hand-tight standoff "A" is the basic allowance for basic power make-up of the joint as shown in Figure 3.
^{*}L_c = L₄ - 1.125 in. for 8 round thread casing.
^aApplicable to coupling grades lower than P110.
^bApplicable to coupling grades P110 and higher.
^cApplicable to coupling grades lower than J55 and K55.
^dApplicable to coupling grades J55 and K55 and higher.

- Buttress threads and couplings (BCSG). Σύνδεσμος με τραπεζοειδές σπείρωμα [Σχήμα 2.4 (b)] . Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων BCSG.

Πίνακας 2.8. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδέσμων BCSG (Mitchell & Miska, 2011)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) |
|------------------|---------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|----------------------------------|--|--|--|--------------------------------|---------------------------|---|
| Size Designation | Major Dia- meter D ₄ | Number of Threads per inch g | Length: Imperfect Threads L ₇ | Length: Perfect Threads L ₇ | Total Length: End of Pipe to Vanish Point L ₄ | Pitch Dia- meter ^a E ₇ | End of Pipe to Power- Make- Up J | End of Pipe to Hand- Tight Make- Up J _n | Length: Face of Coup- ling to Plane E ₇ | Length: End of Pipe to Tri- angle Stamp A ₁ | Hand- Tight Stand- off Turns A | Dia- meter in Cou- ling Q | Mini- mum Full Crest Length, End of Pipe L _c * |
| 4½ | 4.516 | 5 | 1.984 | 1.6535 | 3.6375 | 4.454 | 0.500 | 0.900 | 1.884 | 3 ¹⁵ / ₁₆ | ½ | 4.640 | 1.2535 |
| 5 | 5.016 | 5 | 1.984 | 1.7785 | 3.7625 | 4.954 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹ / ₁₆ | 1 | 5.140 | 1.3785 |
| 5½ | 5.516 | 5 | 1.984 | 1.8410 | 3.8250 | 5.454 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹ / ₈ | 1 | 5.640 | 1.4410 |
| 6% | 6.641 | 5 | 1.984 | 2.0285 | 4.0125 | 6.579 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ⁵ / ₁₆ | 1 | 6.765 | 1.6285 |
| 7 | 7.016 | 5 | 1.984 | 2.2160 | 4.2000 | 6.954 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4½ | 1 | 7.140 | 1.8160 |
| 7% | 7.641 | 5 | 1.984 | 2.4035 | 4.3875 | 7.579 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹¹ / ₁₆ | 1 | 7.765 | 2.0035 |
| 8% | 8.641 | 5 | 1.984 | 2.5285 | 4.5125 | 8.579 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹³ / ₁₆ | 1 | 8.765 | 2.1285 |
| 9% | 9.641 | 5 | 1.984 | 2.5285 | 4.5125 | 9.579 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹³ / ₁₆ | 1 | 9.765 | 2.1285 |
| 10% | 10.766 | 5 | 1.984 | 2.5285 | 4.5125 | 10.704 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹³ / ₁₆ | 1 | 10.890 | 2.1285 |
| 11% | 11.766 | 5 | 1.984 | 2.5285 | 4.5125 | 11.704 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹³ / ₁₆ | 1 | 11.890 | 2.1285 |
| 13% | 13.391 | 5 | 1.984 | 2.5285 | 4.5125 | 13.329 | 0.500 | 1.000 | 1.784 | 4 ¹³ / ₁₆ | 1 | 13.515 | 2.1285 |
| 16 | 16.000 | 5 | 1.488 | 3.1245 | 4.6125 | 15.938 | 0.500 | 0.875 | 1.313 | 4 ¹³ / ₁₆ | 7/8 | 16.154 | 2.7245 |
| 18% | 18.625 | 5 | 1.488 | 3.1245 | 4.6125 | 18.563 | 0.500 | 0.875 | 1.313 | 4 ¹³ / ₁₆ | 7/8 | 18.779 | 2.7245 |
| 20 | 20.000 | 5 | 1.488 | 3.1245 | 4.6125 | 19.938 | 0.500 | 0.875 | 1.313 | 4 ¹³ / ₁₆ | 7/8 | 20.154 | 2.7245 |

Include taper on diameter: Sizes 13% and smaller—0.0625 in. per in.
Sizes 16 and larger—0.0833 in. per in.

Notes:
1. At plane of perfect thread length L₇, the basic major diameter of the pipe thread and plug gage thread is 0.016 in. greater than specified pipe diameter D for sizes 13% and smaller and is equal to the specified pipe diameter for sizes 16 and larger.
2. Hand-tight standoff "A" is the basic allowance for basic power make-up of the joint as shown in Figure 5. The ¾ in. equilateral triangle stamp located on the pipe at the length A₁ from the end of the pipe facilitates obtaining the power make-up provided for by the hand-tight standoff "A"
^aPitch diameter on buttress casing thread is defined as being midway between the major and minor diameters.
*L_c = L₇ - 0.400 in. for buttress thread casing. Within the L_c length, as many as 2 threads showing the original outside surface of the pipe on their crests for a circumferential distance not exceeding 25% of the pipe circumference is permissible. The remaining threads in the L_c thread length shall be full crested threads.

- Extreme line threads (XC). Το σπείρωμα διαμορφώνεται απευθείας πάνω στο ένα άκρο του στελέχους της σωλήνωσης, το οποίο στην συνέχεια συνήθως ενισχύεται (σε πάχος) με σφυρηλάτηση. Το άκρο με το αρσενικό σπείρωμα διαθέτει εσωτερική ενίσχυση ενώ το άκρο με το θηλυκό σπείρωμα διαθέτει εξωτερική ενίσχυση [Σχήμα 2.4 (c)]. Στους Πίνακες 2.9 & 2.10 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων XC.

Πίνακας 2.9. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδέσμων XC - εξωτερικής ενίσχυσης (Mitchell & Miska, 2011)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |
|---|-------------------------------|----------------------------|--|--|--|---|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| Size Designation | Major Diameter D ₄ | Number of Threads per inch | Length: End of Hand-Tight Plane L ₁ | Length: Effective Threads L ₂ | Total Length: End of Vanish Point L ₄ | Pitch Diameter at Hand-Tight Plane E ₁ | End of Pipe to Center of Coupling, Power-Tight Make-Up J | Length: Face of Coupling to Hand-Tight Plane M | Diameter of Coupling to Re-cess Q | Depth of Coupling to Re-cess q | Hand-Tight Stand-off Turns A | Minimum Length, Full Crest Threads from End of Pipe L _c * |
| 1.050 | 1.050 | 10 | 0.448 | 0.925 | 1.094 | 0.98826 | 0.500 | 0.446 | 1.113 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.300 |
| 1.315 | 1.315 | 10 | 0.479 | 0.956 | 1.125 | 1.25328 | 0.500 | 0.446 | 1.378 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.300 |
| 1.660 | 1.660 | 10 | 0.604 | 1.081 | 1.250 | 1.59826 | 0.500 | 0.446 | 1.723 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.350 |
| 1.900 | 1.900 | 10 | 0.729 | 1.206 | 1.375 | 1.83826 | 0.500 | 0.446 | 1.963 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.475 |
| 2 ³ / ₈ | 2.375 | 10 | 0.979 | 1.456 | 1.625 | 2.31326 | 0.500 | 0.446 | 2.438 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.725 |
| 2 ⁷ / ₈ | 2.875 | 10 | 1.417 | 1.894 | 2.063 | 2.81326 | 0.500 | 0.446 | 2.938 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 1.163 |
| 3 ¹ / ₂ | 3.500 | 10 | 1.667 | 2.144 | 2.313 | 3.43826 | 0.500 | 0.446 | 3.563 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 1.413 |
| 4 | 4.000 | 8 | 1.519 | 2.140 | 2.375 | 3.91395 | 0.500 | 0.534 | 4.063 | ³ / ₈ | 2 | 1.375 |
| 4 ¹ / ₂ | 4.500 | 8 | 1.779 | 2.328 | 2.563 | 4.41395 | 0.500 | 0.534 | 4.563 | ³ / ₈ | 2 | 1.563 |
| Include taper on diameter, all sizes, 0.0625 in. per in. | | | | | | | | | | | | |
| Note: Hand-tight standoff "A" is the basic allowance for basic power make-up of the joint as shown in Figure 8. | | | | | | | | | | | | |
| *L _c = L ₄ - 0.900 in. for 10 thread tubing, but not less than 0.300. | | | | | | | | | | | | |
| L _c = L ₄ - 1.000 for 8 thread tubing. | | | | | | | | | | | | |

Πίνακας 2.10. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδέσμων XC - εσωτερικής ενίσχυσης (Mitchell & Miska, 2011)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |
|---|-------------------------------|----------------------------|--|--|--|---|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| Size Designation | Major Diameter D ₄ | Number of Threads per inch | Length: End of Hand-Tight Plane L ₁ | Length: Effective Threads L ₂ | Total Length: End of Vanish Point L ₄ | Pitch Diameter at Hand-Tight Plane E ₁ | End of Pipe to Center of Coupling, Power-Tight Make-Up J | Length: Face of Coupling to Hand-Tight Plane M | Diameter of Coupling to Re-cess Q | Depth of Coupling to Re-cess q | Hand-Tight Stand-off Turns A | Minimum Length, Full Crest Threads from End of Pipe L _c * |
| 1.050 | 1.315 | 10 | 0.479 | 0.956 | 1.125 | 1.25328 | 0.500 | 0.446 | 1.378 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.300 |
| 1.315 | 1.469 | 10 | 0.604 | 1.081 | 1.250 | 1.40706 | 0.500 | 0.446 | 1.531 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.350 |
| 1.660 | 1.812 | 10 | 0.729 | 1.206 | 1.375 | 1.75079 | 0.500 | 0.446 | 1.875 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.475 |
| 1.900 | 2.094 | 10 | 0.792 | 1.269 | 1.438 | 2.03206 | 0.500 | 0.446 | 2.156 | ⁵ / ₁₆ | 2 | 0.538 |
| 2 ³ / ₈ | 2.594 | 8 | 1.154 | 1.703 | 1.938 | 2.50775 | 0.500 | 0.534 | 2.656 | ³ / ₈ | 2 | 0.938 |
| 2 ⁷ / ₈ | 3.094 | 8 | 1.341 | 1.890 | 2.125 | 3.00775 | 0.500 | 0.534 | 3.156 | ³ / ₈ | 2 | 1.125 |
| 3 ¹ / ₂ | 3.750 | 8 | 1.591 | 2.140 | 2.375 | 3.66395 | 0.500 | 0.534 | 3.813 | ³ / ₈ | 2 | 1.375 |
| 4 | 4.250 | 8 | 1.716 | 2.265 | 2.500 | 4.16395 | 0.500 | 0.534 | 4.313 | ³ / ₈ | 2 | 1.500 |
| 4 ¹ / ₂ | 4.750 | 8 | 1.841 | 2.390 | 2.625 | 4.66395 | 0.500 | 0.534 | 4.813 | ³ / ₈ | 2 | 1.625 |
| Include taper on diameter, all sizes, 0.0625 in. per in. | | | | | | | | | | | | |
| Note: Hand-tight standoff "A" is the basic allowance for basic power make-up of the joint as shown in Figure 8. | | | | | | | | | | | | |
| *L _c = L ₄ - 0.900 in. for 10 thread tubing, but not less than 0.300. | | | | | | | | | | | | |
| L _c = L ₄ - 1.000 for 8 thread tubing. | | | | | | | | | | | | |

2.4. Πρότυπα τυποποίησης στελεχών σωλήνωσης

Τα βασικά πρότυπα που ισχύουν για την τυποποίηση των στελεχών της σωλήνωσης είναι τα ακόλουθα:

- **API Bull 5C2**, Ιδιότητες απόδοσης σωλήνωσης, σωλήνων παραγωγής και διατρητικών στελεχών.
- **API TR 5C3**, Τεχνική έκθεση με εξισώσεις και υπολογισμούς για τη σωλήνωση, τους σωλήνες παραγωγής και των διατρητικών στελεχών για λεπτούς σωλήνες που χρησιμοποιούνται ως τμήμα σωλήνωσης ή ως τμήμα σωλήνων παραγωγής. Περιλαμβάνει πίνακες αντοχών για την προστατευτική σωλήνωση και τους σωλήνες παραγωγής.
- **API Spec 5CT**, Προδιαγραφές προστατευτικών σωληνώσεων και σωλήνων παραγωγής.
- **ISO 11960**, Βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου - Περιλαμβάνει χαλύβδινα στελέχη που χρησιμοποιούνται σε προστατευτικές σωληνώσεις ή σε σωλήνες παραγωγής.
- **ISO 11961**, Βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου – Χαλύβδινοι σωλήνες που χρησιμοποιούνται ως προστατευτικές σωληνώσεις ή σωλήνες παραγωγής σε γεωτρήσεις.
- **ISO 13679**, Βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου – Διαδικασίες ελέγχου προστατευτικής σωλήνωσης και συνδέσμων σωλήνων παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ (CASIGN DESIGN)

3.1. Εισαγωγή

Για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης μιας γεώτρησης πρέπει να είναι γνωστά ο τύπος της γεώτρησης (π.χ. αν είναι ερευνητική γεώτρηση ή γεώτρηση ανάπτυξης), η γεωλογική τομή της περιοχής, οι διάμετροι των διαθέσιμων σωληνώσεων και κοπτικών άκρων, οι μέθοδοι τσιμέντωσης και διάτρησης, η απόδοση του γεωτρύπανου (rig performance), καθώς και οι κανονισμοί ασφαλείας και περιβάλλοντος. Για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος, ο μηχανικός που είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό της γεώτρησης (design engineer) πρέπει να θεωρεί τη σωλήνωση ως μέρος του συνολικού γεωτρητικού έργου και οφείλει να αντιμετωπίσει μια σειρά από παραμέτρους, όπως:

- Η εξασφάλιση της μηχανικής ακεραιότητας (integrity) της γεώτρησης μέσω υπολογισμού όλων των αναμενόμενων φορτίων που πρόκειται να αντιμετωπιστούν σε όλη τη διάρκεια του γεωτρητικού έργου.
- Ο σχεδιασμός να εξασφαλίζει το ελάχιστο κόστος σε κάθε φάση του γεωτρητικού έργου.
- Να παρέχεται σαφής τεκμηρίωση της βάσης σχεδιασμού στο προσωπικό που βρίσκεται στον χώρο της γεώτρησης. Αυτό θα βοηθήσει στην αποφυγή ανάπτυξης φορτίων που υπερβαίνουν τον σχεδιασμό και δεν περιλαμβάνονται σε αυτόν. Για παράδειγμα, αν το προσωπικό της γεώτρησης δεν γνωρίζει ποια είναι η μέγιστη δύναμη ανέλκυσης που είναι δυνατό να δεχθεί ένας τύπος σωλήνωσης ενδέχεται μια ρύθμιση του επιφανειακού εξοπλισμού να οδηγήσει στην αστοχία της στήλης σωλήνωσης.

Αν και ο σκοπός είναι να παρέχεται αξιόπιστος σχεδιασμός της γεώτρησης με το ελάχιστο δυνατό κόστος, μερικές φορές συμβαίνουν αστοχίες. Οι περισσότερες διαπιστωμένες αστοχίες συμβαίνουν επειδή η σωλήνωση εκτίθεται σε φορτία για τα οποία δεν ήταν σχεδιασμένη. Οι αστοχίες αυτές χαρακτηρίζονται «αστοχίες εκτός σχεδιασμού» ("off-design" failures). Οι αστοχίες «εντός σχεδιασμού» ("on-design" failures) είναι σπάνιες. Αυτό σημαίνει ότι οι πρακτικές σχεδιασμού της σωλήνωσης είναι ως επί το

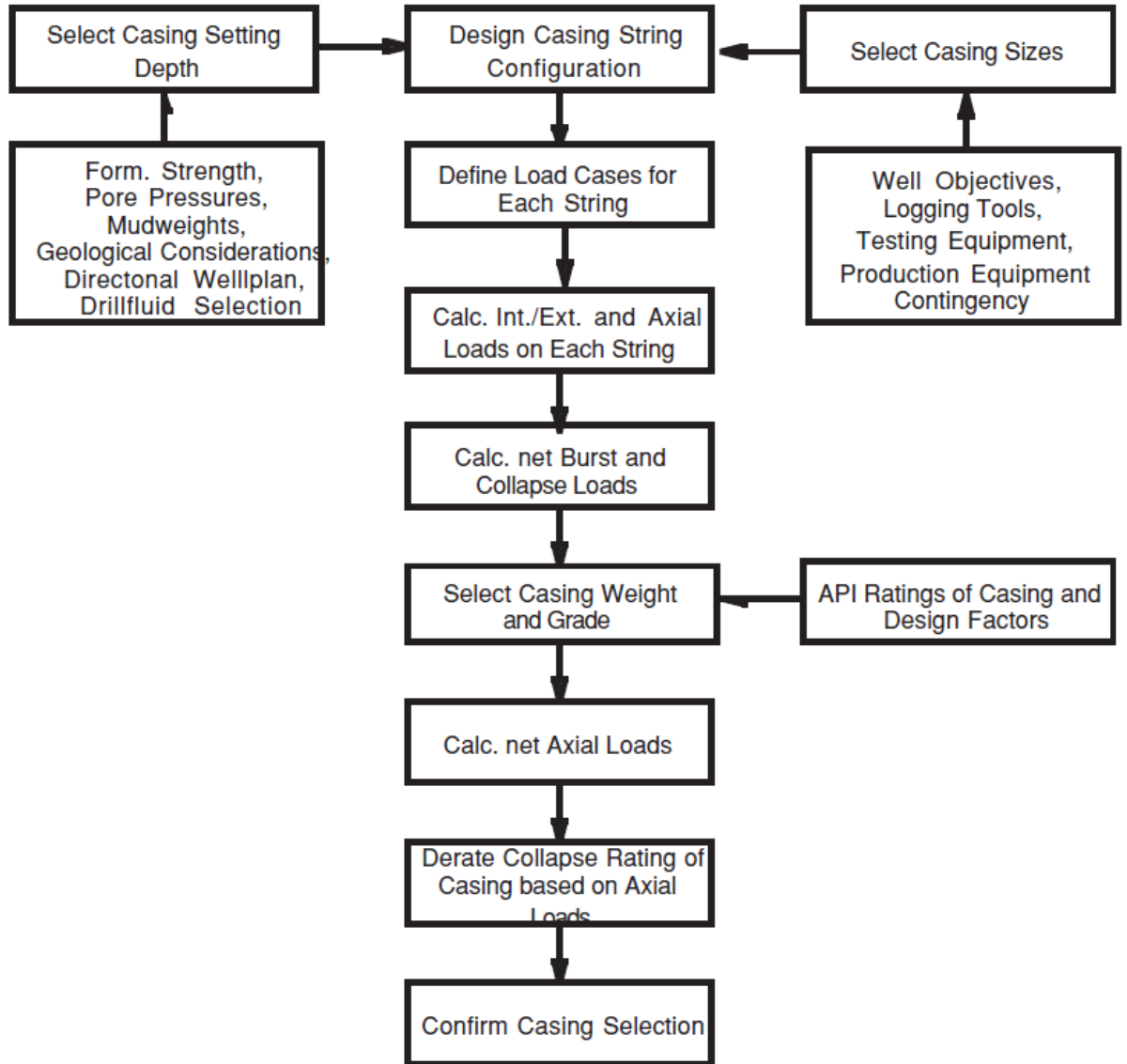
πλείστον συντηρητικές. Πολλές αστοχίες συμβαίνουν στους συνδέσμους. Αυτό συνεπάγεται ότι, είτε οι πρακτικές πεδίου δεν είναι επαρκείς, είτε ότι η βάση σχεδιασμού των συνδέσμων δεν είναι συνεπής με τη βάση σχεδιασμού της σωλήνωσης. (Heriot Watt, 2005)

3.2. Διαδικασία σχεδιασμού σωλήνωσης

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 ακόλουθα κριτήρια: α) την πίεση διάρρηξης (burst pressure) β) το φορτίο κατάρρευσης (collapse pressure γ) την εφελκυστική τάση (tensile force) και δ) τις αξονικές τάσεις (axial loads).
- Επιλογή κατάλληλου βάρους και κατηγορίας των στελεχών λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κριτήρια.

Τα στάδια του σχεδιασμού της σωλήνωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Στάδια διαδικασίας σχεδιασμού σωλήνωσης (Heriot Watt, 2005)

Οι απαιτούμενες πληροφορίες που χρειάζονται τόσο στον προκαταρκτικό όσο και στον λεπτομερή σχεδιασμό της σωλήνωσης είναι οι ακόλουθες.

- Ιδιότητες σχηματισμού: Πίεση πόρων και πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού, αντοχή του σχηματισμού (αστοχία της γεώτρησης), προφίλ θερμοκρασίας, θέση δομών άλατος και περιοχών σχιστολίθων, χημική σταθερότητα/ευαισθησία των σχιστολίθων (τύπος λάσπης και χρόνος έκθεσής της), ζώνες απωλειών, ζώνες αερίων μικρού βάθους, αβαθείς υδροφορείς, παρουσία H₂S και/ή CO₂.
- Δεδομένα τροχιάς της γεώτρησης: Επιφανειακή θέση, γεωλογικοί στόχοι και δεδομένα παρεμβολών γεώτρησης (well interference data).

- Ελάχιστες απαιτούμενες διαμέτροι: Ελάχιστη απαιτούμενη διάσταση της γεώτρησης για την επίτευξη του σκοπού διάτρησης και παραγωγής, εξωτερική διάμετρος (OD) του εργαλείου εκτέλεσης διαγραφιών (logging tool), διάσταση των σωλήνων παραγωγής, προδιαγραφές παρεμβυσμάτων και σχετικού εξοπλισμού, εξωτερική διάμετρος (OD) της υπεδαφικής βαλβίδας ασφαλείας (subsurface safety valve) (για υπεράκτιες γεωτρήσεις) και απαιτήσεις ολοκλήρωσης.
- Δεδομένα παραγωγής: πυκνότητα του ρευστού των παρεμβυσμάτων (packer-fluid density), σύνθεση του παραγόμενου ρευστού, δυσμενέστερα σενάρια φορτίσεων κατά τη διάρκεια της ολοκλήρωσης, της παραγωγής και των εργασιών συντήρησης (workover operations).
- Άλλα: διαθέσιμος εξοπλισμός, απαιτήσεις νομοθεσίας & κανονισμών και περιορισμοί εξοπλισμού του γεωτρύπανου (rig equipment limitations).

Πριν την έναρξη μια διαδικασίας σχεδιασμού των σωληνώσεων τα απαιτούμενα δεδομένα λαμβάνονται από γεωλόγους, πετροφυσικούς, μηχανικούς ταμειυτήρων κ.λπ. (Heriot Watt, 2005).

3.3. Προκαταρκτικός σχεδιασμός

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός αφορά στον προσδιορισμό του απαραίτητου αριθμού στηλών τεχνικής σωληνώσεως που απαιτούνται στη γεώτρηση βάσει του προφίλ των πιέσεων, της διαστασιολόγησής τους (εξωτερική διάμετρος) και του βάθους έδρασης της κάθε στήλης.

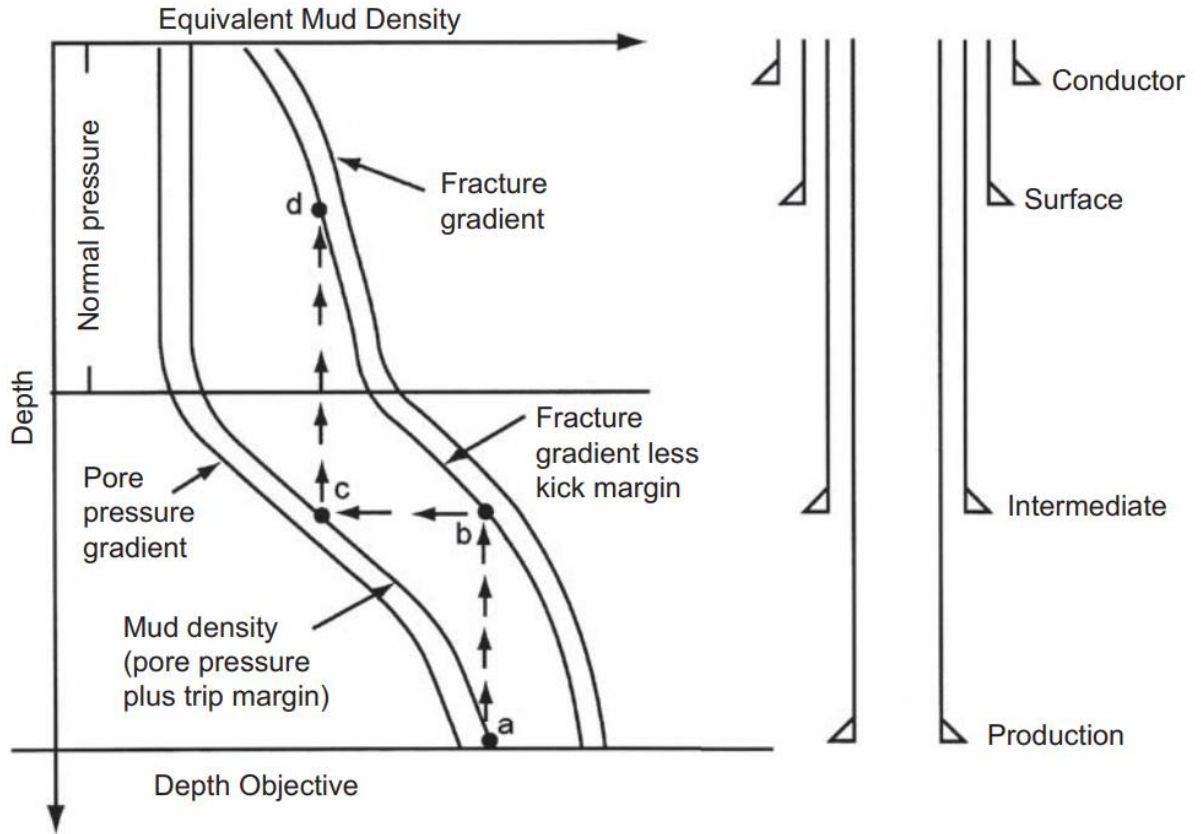
3.3.1. Βάθη έδρασης τεχνικών σωληνώσεων - Προφίλ πιέσεων

Η επιλογή του πλήθους των τεχνικών σωληνώσεων και του βάθους έδρασης της κάθε στήλης σωληνώσεως βασίζεται στη 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 διαγράμματα πίεσης των πόρων και ρωγμάτωσης εκφράζονται σε μονάδες ισοδύναμης πυκνότητας 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 λάσπη διάτρησης σε κάθε βάθος θα πρέπει να είναι, τουλάχιστον, ίση με την πίεση των σχηματισμών επαυξημένη με το περιθώριο ασφαλείας της τάξης των 0,2-0,4 prg (trip margin) στο αντίστοιχο βάθος, για να εξασφαλίζεται εξισορρόπηση των πιέσεων του σχηματισμού. Παράλληλα, η υδροστατική πίεση της λάσπης διάτρησης θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη βαθμίδα ρωγμάτωσης ελαττωμένη κατά το περιθώριο ασφαλείας της τάξης των 0,2-0,4 prg (kick margin) (ώστε να μην ρωγματωθεί ο σχηματισμός από την πίεση που ασκεί η λάσπη).

Πρακτικά, το βασικό 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 λάσπης (Σταματάκη, 2003).

Ο σχεδιασμός γίνεται από κάτω προς τα πάνω (bottom-up approach). Επομένως, ξεκινώντας από το τελικό βάθος φέρουμε οριζόντια γραμμή προς τα αριστερά έως ότου αυτή τμήσει την καμπύλη της βαθμίδας πίεσης. Από το σημείο τομής φέρουμε κατακόρυφη γραμμή προς τα πάνω έως ότου αυτή τμήσει την καμπύλη της βαθμίδας ρωγμάτωσης και στη συνέχεια νέα οριζόντια γραμμή προς τα αριστερά έως ότου αυτή τμήσει την καμπύλη της βαθμίδας πίεσης. Κάθε σημείο τομής των οριζοντίων γραμμών με την καμπύλη της βαθμίδας πίεσης καθορίζει την πυκνότητα της λάσπης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση του τμήματος (βάθους) που συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των δύο σημείων τομής. Κάθε σημείο τομής των κατακόρυφων γραμμών με την καμπύλη της βαθμίδας ρωγμάτωσης υπαγορεύει την τοποθέτηση νέας στήλης σωλήνωσης και επομένως τη θέση (βάθος) που αυτή θα εδραστεί. Αυτό υπαγορεύεται από την ανάγκη προστασίας των ανώτερων σχηματισμών έναντι της ρωγμάτωσης που μπορεί να προκληθεί από τη λάσπη μεγαλύτερης πυκνότητας που είναι αναγκαία για την όρυξη βαθύτερων σχηματισμών και για την αποφυγή απώλειας ελέγχου του πηγαδιού (Σταματάκη, 2003).



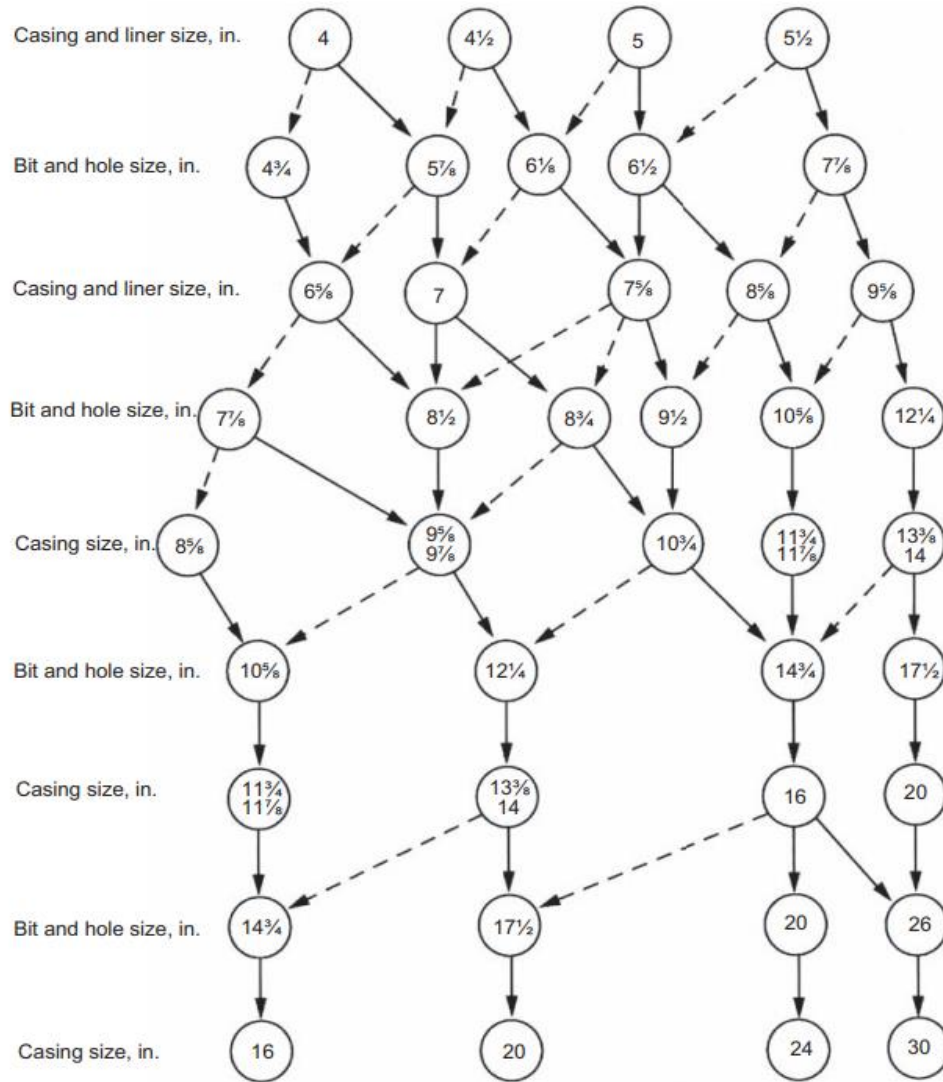
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα επιλογής βάθους έδρασης σωληνώσεων (Mitchell & Miska, 2011)

3.3.2. Διαστάσεις τεχνικών σωληνώσεων

Το μέγεθος κάθε σωλήνωσης καθορίζεται από την εσωτερική διάμετρο που θα πρέπει να έχει η παραγωγική σωλήνωση και τον αριθμό των στηλών ενδιάμεσης σωλήνωσης που απαιτούνται ώστε η γεώτρηση να φτάσει στο τελικό βάθος-στόχο. Προκειμένου η παραγωγική σωλήνωση να τοποθετηθεί εντός της γεώτρησης, το μέγεθος του κοπτικού που θα χρησιμοποιηθεί στην όρυξη του τελευταίου τμήματος της γεώτρησης θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγαλύτερο από την εξωτερική διάμετρο των συνδέσμων της παραγωγικής σωλήνωσης. Το επιλεγμένο μέγεθος κοπτικού θα πρέπει να εξασφαλίζει επαρκές διάκενο (clearance) μεταξύ των συνδέσμων της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης ώστε να επιτρέπει την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού της σωλήνωσης (κεντρωτήρες και αποξεστήρες). Το κοπτικό που χρησιμοποιείται στην όρυξη του κατώτερου τμήματος θα πρέπει να διέρχεται από το ήδη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης. Αυτό με τη σειρά του καθορίζει το ελάχιστο μέγεθος της αμέσως υψηλότερης στήλης

σωλήνωσης. Με τον ίδιο τρόπο επιλέγονται το μέγεθος του κοπτικού και της σωλήνωσης για τα ανώτερα, πιο ρηχά (επιφανειακά) τμήματα της γεώτρησης. (Σταματάκη, 2003)

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιλογής μεγέθους κοπτικών άκρων και διαμέτρων σωληνώσεων έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή ακολουθία διαμέτρων στη γεώτρηση, αλλά και η τυποποίηση των μεγεθών που είναι διαθέσιμα στην αγορά. Η επιλογή της κατάλληλης διαμέτρου σωλήνωσης επιλέγεται ξεκινώντας από την διάσταση της τελευταίας σωλήνωσης. Στην συνέχεια επιλέγεται η διάσταση του κοπτικού άκρου όπως υποδεικνύεται από τα βέλη στο Σχήμα 3.3, διαλέγοντας τα βέλη που είναι στο τέλος συνεχόμενων γραμμών καθώς θεωρούνται πιο αξιόπιστα από τα βέλη που είναι στο τέλος διακεκομμένων γραμμών. Ομοίως, ακολουθεί η επιλογή της διάστασης της επόμενης σωλήνωσης καθώς και η διάσταση του κατάλληλου κοπτικού άκρου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να προσδιοριστεί η διάσταση της πρώτης σωλήνωσης για την μελέτη περίπτωσης.



Σχήμα 3.3: Διαστάσεις κοπτικών άκρων & σωληνώσεων (Mitchell & Miska, 2011)

3.4. Λεπτομερής σχεδιασμός – Σενάρια φορτίσεων

Μετά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό που καθορίζει τον αριθμό, το μέγεθος και το βάθος έδρασης των στηλών σωληνώσεων που απαιτούνται σε μια γεώτρηση, ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός που αφορά στον υπολογισμό των φορτίων στα οποία θα εκτεθεί η κάθε στήλη σωληνώσης. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να επιλεγθούν τα στελέχη με τα κατάλληλα μηχανικά χαρακτηριστικά (ονομαστικό βάρος και κατηγορία χάλυβα) που θα μπορούν να διαχειριστούν τα αναμενόμενα φορτία.

Η κάθε στήλη σωληνώσης υπόκειται σε ένα συνδυασμό ακτινικών (radial loads) φορτίου διάρρηξης και φορτίου αστοχίας κατάρρευσης (burst load-collapse load) και

αξονικών φορτίων (axial loads). Τα ακτινικά φορτία αναπτύσσονται εσωτερικά και εξωτερικά της διατομής της σωλήνωσης στην ακτινική διεύθυνση και τα αξονικά κατά τον αξονική διεύθυνση της σωλήνωσης. Όταν αυτοί οι δυο τύποι φορτίων εξετάζονται ξεχωριστά τότε οι υπολογισμοί της σωλήνωσης αφορούν την μονοαξονική φόρτιση, ενώ όταν συνδυαστούν (όπως συμβαίνει και στις πραγματικές συνθήκες), οι υπολογισμοί της σωλήνωσης αφορούν είτε την διαξονική, είτε την τριαξονική φόρτιση. (Heriot Watt,2005)

Στην παράγραφο 3.4 που ακολουθεί καθορίζονται τα είδη φορτίων που πρόκειται να δεχθεί η σωλήνωση μαζί με τους ανάλογους συντελεστές ασφαλείας. Τα είδη φορτίων πρόκειται να αναλυθούν στα μονοαξονικά φορτία τα οποία περιλαμβάνουν τα ακτινικά φορτία και τα αξονικά φορτία. Τα ακτινικά φορτία διακρίνονται σε εξωτερικά και εσωτερικά, αν το εξωτερικό φορτίο υπερβαίνει το εσωτερικό φορτίο τότε γίνεται λόγος για φορτίο κατάρρευσης ενώ στην αντίθετη περίπτωση γίνεται λόγος για φορτίο διάρρηξης. Τα αξονικά φορτία είναι είτε εφελκυστικά είτε θλιπτικά ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Τέλος πρόκειται να εξεταστούν τα φαινόμενα που αντιμετωπίζονται στην περίπτωση διαξονικής ή τριαξονικής φόρτισης, δηλαδή συνεκτιμάται η συνύπαρξη και αλληλεπίδραση αξονικών και ακτινικών φορτίσεων.

3.4.1. Καθορισμός σεναρίων λειτουργίας και επακόλουθων φορτίων στη σωλήνωση

Οι φορτίσεις που θα δεχθεί η σωλήνωση σε όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης διαφοροποιούνται ανάλογα με τις λειτουργίες που επιτελούνται: κατά την τοποθέτηση της σωλήνωσης, κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης και κατά τη διάρκεια παραγωγής από τη γεώτρηση. Οι λειτουργίες αυτές θα έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη **ακτινικών φορτίων (radial loads)** (φορτίων διάρρηξης και φορτίων κατάρρευσης) και **αξονικών φορτίων (axial loads)** (εφελκυστικών και συμπιεστικών φορτίων) στις στήλες σωλήνωσης. Δεδομένου ότι οι λειτουργίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της σωλήνωσης διαφοροποιούνται για κάθε τύπο σωλήνωσης, είναι αναμενόμενο και τα ασκούμενα φορτία να διαφοροποιούνται επίσης για κάθε τύπο σωλήνωση. Ο καθορισμός των σεναρίων λειτουργίας που θα εξεταστούν είναι από τα σημαντικότερα στάδια στον σχεδιασμό της σωλήνωσης, σχετίζονται άμεσα με τη δαπάνη εγκατάστασης της σωλήνωσης και ως εκ τούτου καθιερώνονται ως εταιρική πολιτική.

Προκειμένου να γίνει επιλογή του κατάλληλου βάρους, της κατάλληλης κατηγορίας χάλυβα και των κατάλληλων συνδέσμων στη διάρκεια του λεπτομερούς σχεδιασμού πρέπει να καθοριστούν τα κριτήρια σχεδιασμού. Αυτά τα κριτήρια συνήθως περιλαμβάνουν περιπτώσεις φορτίσεων με τους ανάλογους σχεδιαστικούς συντελεστές και οι απαιτήσεις φόρτισης συγκρίνονται με τις προδιαγραφές των διαθέσιμων στελεχών σωλήνωσης έτσι ώστε να επιλεγούν στελέχη που εγγυημένα θα αντέχουν τις αναμενόμενες καταπονήσεις.

Τα φορτία που δέχεται η σωλήνωση είναι κυρίως φορτία λόγω πιέσεων, μηχανικά φορτία και θερμικά φορτία. Τα **φορτία λόγω πιέσεων (pressure loads)** προκαλούνται από τα ρευστά που βρίσκονται εσωτερικά της σωλήνωσης (εσωτερικές πιέσεις), από τα ρευστά και το τσιμέντο που βρίσκονται εξωτερικά της σωλήνωσης (εξωτερικές πιέσεις), από τις πιέσεις που ασκούνται στην επιφάνεια κατά τη διάτρηση και τις εργασίες συντήρησης, και τις πιέσεις από τους σχηματισμούς κατά τη διάτρηση και την παραγωγή. Τα **μηχανικά φορτία (mechanical loads)** συνδέονται με το αναρτώμενο βάρος της σωλήνωσης, τα φορτία λόγω κραδασμών (shock loads) που δέχεται η σωλήνωση κατά την τοποθέτησή της, τα φορτία των παρεμβυσμάτων κατά τη διάρκεια της παραγωγής και των εργασιών συντήρησης, και τα φορτία ανάρτησης της στήλης από την κεφαλή της γεώτρησης (hanger loads). Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και τα συνακόλουθα φορτία λόγω θερμικής διαστολής ασκούνται στη σωλήνωση κατά τις φάσεις της διάτρησης, της παραγωγής και των εργασιών συντήρησης. Αυτά τα φορτία μπορεί να προκαλέσουν λυγισμό της σωλήνωσης (buckling) σε μη τσιμεντωμένα διαστήματα. (Heriot Watt, 2005)

3.4.2. Συντελεστές σχεδιασμού

Για να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ του φορτίου που δέχεται η σωλήνωση με την αντοχή της, πρέπει προηγουμένως να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής σχεδιασμού.

$$DF = SF_{\min} \leq SF = \text{αντοχή σωλήνωσης/ασκούμενο φορτίο} \quad (3.1)$$

Όπου:

DF = ο συντελεστής σχεδιασμού (ο ελάχιστος αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας)

SF = ο συντελεστής ασφάλειας

Προκύπτει ότι:

$$DF \times (\text{ασκούμενο φορτίο}) \leq \text{αντοχή σωλήνωσης} \quad (3.2)$$

Ως εκ τούτου, πολλαπλασιάζοντας το ασκούμενο φορτίο με τον συντελεστή σχεδιασμού (DF) προκύπτει άμεση σύγκριση με την αντοχή της σωλήνωσης. Όσο η αντοχή της σωλήνωσης είναι μεγαλύτερη ή ίση με το μετασχηματισμένο ασκούμενο φορτίο (που ονομάζεται φορτίο σχεδιασμού), τότε ικανοποιούνται τα κριτήρια σχεδιασμού.

3.4.3. Άλλες θεωρήσεις

Με τον σχεδιασμό που βασίζεται στο φορτίο διάρρηξης, το φορτίο αστοχίας κατάρρευσης και το αξονικό φορτίο ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού. Πριν ολοκληρωθεί, ωστόσο, ο τελικός σχεδιασμός, πρέπει να συνυπολογιστούν ορισμένες ακόμα σχεδιαστικές παράμετροι όπως η επιλογή συνδέσμων, ο καθορισμός της φθοράς και η επίδραση της διάβρωσης. Επίσης, μπορεί να ληφθούν υπόψη και άλλες παράμετροι όπως η τριαξονική καταπόνηση, λόγω συνδυασμού ασκούμενων φορτίων (π.χ. διόγκωση και θερμικά φαινόμενα). Αυτή η διαδικασία καλείται «ανάλυση διάρκειας ζωής» (“service life analysis”).

3.4.4. Μονοαξονική φόρτιση (uniaxial loading)

Τα ακτινικά φορτία στα οποία εκτίθεται η σωλήνωση είναι το φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (collapse load) και το φορτίο διάρρηξης (burst load). Το φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (collapse load) προέρχεται από το φορτίο που ασκείται στα εξωτερικά τοιχώματα της σωλήνωσης λόγω της στήλης λάσπης διάτρησης, ενώ το φορτίο διάρρηξης (burst load) προκαλείται όταν η ενεργός εσωτερική πίεση (effective internal pressure) υπερβαίνει την αντοχή της σωλήνωσης σε διάρρηξη. (Heriot Watt, 2005)

A. Φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (collapse load)

Η σωλήνωση θα δεχθεί καθαρό φορτίο αστοχίας κατάρρευσης αν το εξωτερικό ακτινικό φορτίο (P_e) υπερβεί το εσωτερικό ακτινικό φορτίο (P_i) (Σχήμα 3.4). Επειδή η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη της σωλήνωσης είναι ανάλογη του βάθους, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης μεγιστοποιείται στον πυθμένα της γεώτρησης και μηδενίζεται στην επιφάνεια. Το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης παρουσιάζεται στην περίπτωση που η σωλήνωση εκκενωθεί για τον οποιοδήποτε λόγο. Το φορτίο αστοχίας κατάρρευσης, P_c , σε οποιοδήποτε σημείο της σωλήνωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_c = P_e - P_i \quad (3.3)$$

Ο υπολογισμός της πίεσης είναι σε psi (pounds square inch) δηλαδή δύναμη ανά τετραγωνική ίντσα που πρακτικά είναι τάση.

B. Φορτίο διάρρηξης (burst load)

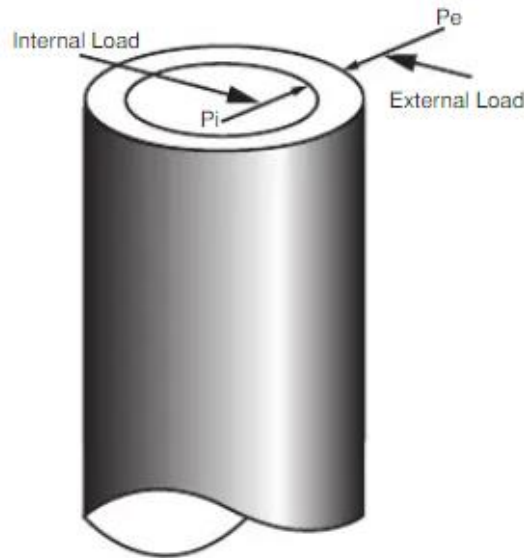
Η σωλήνωση θα δεχθεί καθαρό φορτίο διάρρηξης αν το εσωτερικό ακτινικό φορτίο (P_i) υπερβεί το εξωτερικό ακτινικό φορτίο (P_e). Η μέγιστη πίεση διάρρηξης ασκείται κατά την περίπτωση αιφνίδιας εισροής όπου το ρευστό του σχηματισμού που εισέρχεται στη σωλήνωση κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος γεώτρησης (kick) εκτοπίζει ολόκληρη τη στήλη της λάσπης. Το φορτίο διάρρηξης, P_b , σε οποιοδήποτε σημείο της σωλήνωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_b = P_i - P_e \quad (3.4)$$

Ουσιαστικά πρόκειται για το αντίθετο του φορτίου κατάρρευσης καθώς αυτή τη φορά η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική. Στον σχεδιασμό της σωλήνωσης ώστε να ανθίσταται στην πίεση διάρρηξης λαμβάνονται υπόψη οι οριακές συνθήκες πίεσης (pressure rating) της κεφαλής της γεώτρησης και του BOP, καθώς η σωλήνωση αποτελεί τμήμα του συστήματος ελέγχου της γεώτρησης.

Γ. Εσωτερικά (internal) και εξωτερικά φορτία (external)

Τα εσωτερικά, P_i , και τα εξωτερικά φορτία πιέσεων, P_e , που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των φορτίων διάρρηξης και των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης που ασκούνται στη σωλήνωση προκύπτουν από την ανάλυση των σεναρίων λειτουργίας. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται τα εσωτερικά και τα εξωτερικά ακτινικά φορτία πάνω στη σωλήνωση.



Σχήμα 3.4: Ακτινικά φορτία στη σωλήνωση (Heriot Watt, 2005)

Γ1. Εξωτερικά φορτία, P_e :

- Η πίεση πόρων του σχηματισμού (πίεση πόρων). Αν ο μηχανικός είναι σίγουρος ότι είναι δυνατό να αφαιρεθεί όλη η λάσπη που υπάρχει στον δακτύλιο μεταξύ της σωλήνωσης και της γεώτρησης (κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης) και να επιτευχθεί ικανοποιητική ποιότητα τσιμέντωσης, τότε η πίεση πόρων χρησιμοποιείται γενικά για να καθοριστεί το φορτίο που ασκείται κάτω από την κορυφή της τσιμέντωσης (top of cement-TOC) που βρίσκεται μεταξύ σωλήνωσης και γεώτρησης, μετά την σκλήρυνση του τσιμέντου.
- Τα βάρος της λάσπης διάτρησης κατά την τοποθέτηση της σωλήνωσης. Αν αναμένεται ασθενής πρόσφυση μεταξύ σωλήνωσης και τσιμέντου ή μεταξύ τσιμέντου και γεώτρησης, τότε δε λαμβάνεται υπόψη η ευεργετική δράση του τσιμέντου και θεωρείται ότι ο δακτύλιος μεταξύ σωλήνωσης και γεώτρησης είναι πληρωμένος με λάσπη διάτρησης. Οπότε η πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το εξωτερικά ασκούμενο ακτινικό φορτίο στη σωλήνωση σε όλο το ύψος κάτω από την κορυφή της τσιμέντωσης, και μετά το πέρας σκλήρυνσης του τσιμέντου. Αν η λάσπη έχει παραμείνει στον δακτύλιο για πάνω από έναν χρόνο τότε τα περιεχόμενα στερεά έχουν καθιζάνει και η πίεση που δέχεται πλέον η σωλήνωση ισούται με την πίεση που ασκεί μια στήλη αλμυρού νερού (για λάσπη με βάση το νερό).

- Η πίεση της στήλης μείγματος τσιμέντου και νερού. Η πίεση που ασκεί το μείγμα τσιμέντου και νερού χρησιμοποιείται συνήθως για να καθορίσει το εξωτερικό φορτίο της σωλήνωσης κατά τη διάρκεια της παραγωγικής φάσης του πηγαδιού. Η πίεση αυτή είναι ίση με την πυκνότητα γλυκού ή θαλασσινού νερού (για λάσπη με βάση το νερό) ή ίση με την πυκνότητα του πετρελαίου (για λάσπη με βάση το πετρέλαιο). Η θεώρηση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι ο βαρύτης έχει καθιζάνει και δεν παραμένει πια σε αιώρηση, διατηρώντας την πυκνότητα της λάσπης ίση με την αρχική.
- Η πίεση μια στήλης πολφού τσιμέντου. Η πίεση που ασκείται από μια στήλη πολφού τσιμέντου είναι αυτή που ασκείται εξωτερικά στη σωλήνωση μέχρι να πήξει το τσιμέντο. Θεωρείται ότι το τσιμέντο που έχει σκληρύνει δεν ασκεί πλέον υδροστατική πίεση στη σωλήνωση.
- Έμφραση του δακτυλίου (blockage in the annulus). Αν συμβεί έμφραξη του δακτυλίου κατά τη διάρκεια διαδικασιών τσιμέντωσης stinger (γενικά εκτελείται στη σωλήνωση επαφής), η υπερβάλλουσα πίεση της αντλίας πάνω στο τσιμέντο θα μεταφερθεί στον εξωτερικό δακτύλιο, αλλά όχι στο εσωτερικό της σωλήνωσης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να ασκηθεί ένα πρόσθετο εξωτερικό φορτίο κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης stinger. Στην περίπτωση της συμβατικής τσιμέντωσης ένα μπλοκάρισμα στον δακτύλιο θα έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση ίδιας τιμής πίεσης τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της σωλήνωσης.

Γ2. Εσωτερικά φορτία, P_i :

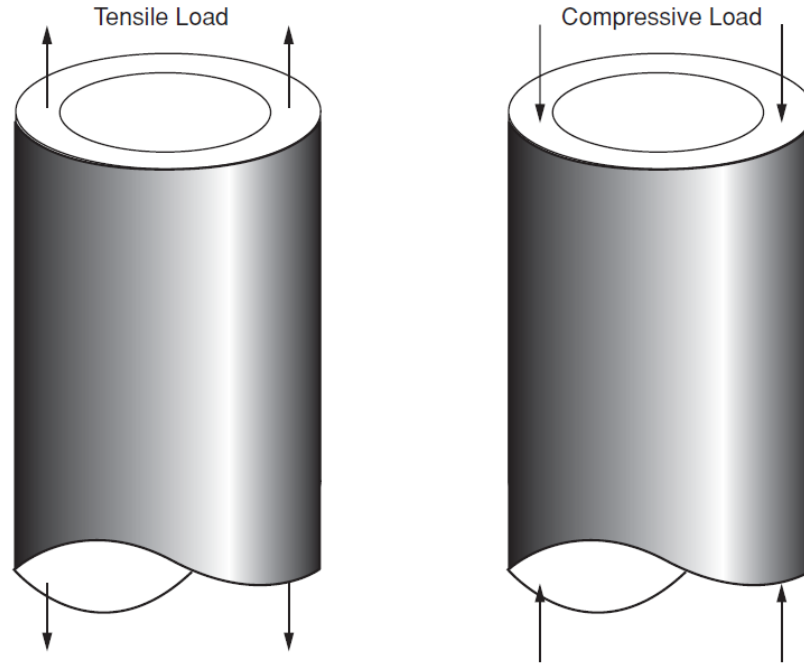
- Εσωτερικό πλήρες λάσπης από το πέλμα ως την επιφάνεια: Αυτή θα είναι η κύρια εσωτερική πίεση κατά τη διαδικασία της διάτρησης. Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης θα πρέπει να λάβει υπόψη την περίπτωση αλλαγής της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης κατά τη διάρκεια της διάτρησης μπορεί να αλλάξει, λόγω, για παράδειγμα, ζώνης απωλειών ή αιφνίδιας εισροής.
- Εσωτερικό πλήρες με ρευστό από αιφνίδια εισροή: Το χειρίστο σενάριο που μπορεί να προκύψει, ως προς την αστοχία σε διάρρηξη, είναι να συμβεί μια αιφνίδια εισροή υδρογονανθράκων, και να οδηγήσει στην πλήρωση όλης της στήλης σωλήνωσης εσωτερικά από αέριο που συνοδεύεται από ταυτόχρονο κλείσιμο του BOP.

- Πλήρης εκκένωση του εσωτερικού της σωλήνωσης: Το χειρίστο σενάριο που μπορεί να προκύψει από την άποψη φορτίου αστοχίας κατάρρευσης, είναι να αδειάσει όλη η στήλη σωλήνωσης από οποιοδήποτε ρευστό στο εσωτερικό της λόγω συνάντησης μια ζώνης απωλειών που θα έχει ως αποτέλεσμα να εκκενωθεί εσωτερικά η σωλήνωση.
- Διαρροή στον σωλήνα παραγωγής: Στην περίπτωση της παραγωγικής σωλήνωσης μια διαρροή στον σωλήνα παραγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγική σωλήνωση να εκτεθεί στις πιέσεις που αναπτύσσονται εντός του σωλήνα παραγωγής. Σε μια τέτοια περίπτωση, η πίεση κλεισίματος του σωλήνα παραγωγής (shut-in tubing pressure-SITP) χρησιμοποιείται ως βάση υπολογισμού της πίεσης στο εσωτερικό της σωλήνωσης. Υπολογίζεται δε με βάση την πίεση που ασκεί μια στήλης αερίου (το διαρρέον ρευστό από τον σωλήνα παραγωγής έναντι της πίεσης του σχηματισμού. Η πίεση κάτω από την επιφάνεια βασίζεται στο συνδυασμένο αποτέλεσμα της πίεσης στην κεφαλή του σωλήνα παραγωγής και της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η στήλη του ρευστού των παρεμβυσμάτων (αν υπάρχει στον δακτύλιο).
- Η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης: Κατά τον υπολογισμό των εσωτερικών φορτίων στη στήλη σωλήνωσης πρέπει να συνυπολογιστεί και η πίεση ρωγμάτωσης οποιουδήποτε σχηματισμό εκτίθεται στις εσωτερικές πιέσεις (δεν έχει σωληνωθεί). Η πίεση στο μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης δεν μπορεί να ξεπεράσει την πίεση ρωγμάτωσης του ασθενέστερου σχηματισμού. Ως εκ τούτου οι πιέσεις στο υπόλοιπο τμήμα της ανοιχτής γεώτρησης και της σωλήνωσης θα ελέγχονται από αυτή την πίεση ρωγμάτωσης. Ο σχηματισμός που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το πέλμα της σωλήνωσης γενικά θεωρείται ο ασθενέστερος σχηματισμός στο ελεύθερο τμήμα της γεώτρησης. (Heriot Watt, 2005)

Δ. Αξονικά φορτία (axial load)

Τα αξονικά φορτία που δέχεται η σωλήνωση μπορεί να είναι είτε εφελκυστικά, είτε θλιπτικά, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας (Σχήμα 3.5). Τα αξονικά φορτία ποικίλλουν καθ' όλο το μήκος της. Η σωλήνωση εκτίθεται σε ένα μεγάλο εύρος φορτίσεων κατά την εγκατάστασή της και αργότερα κατά την διάτρηση των επόμενων τμημάτων και την

παραγωγή. Τα αξονικά φορτία που θα προκύψουν κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε διεργασίας θα πρέπει να υπολογιστούν και να αθροιστούν συνολικά, με σκοπό να καθορίσουν τη συνισταμένη των αξονικών φορτίων της σωλήνωσης.



Σχήμα 3.5: Αξονικά φορτία στη σωλήνωση (Heriot Watt, 2005)

Τα αξονικά φορτία της σωλήνωσης προέρχονται από ένα σύνολο μεταβλητών, όπως:

W: Το βάρος στον αέρα της σωλήνωσης (lb)

ϕ : Η γωνία απόκλισης της γεώτρησης ($^{\circ}$)

A_o : Το εμβαδόν της πλήρους διατομής της σωλήνωσης (βάσει της εξωτερικής διαμέτρου) (in^2)

A_i : Το εμβαδόν της εσωτερικής διατομής της σωλήνωσης (βάσει της εσωτερικής διαμέτρου) (in^2)

DLS: Η ακτίνα καμπυλότητας της γεώτρησης σε κάθε σημείο ($^{\circ}/100ft$)

OD: Η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in)

P_{surf} : Η πίεση που ασκείται στο εσωτερικό της σωλήνωσης κοντά στην επιφάνεια (psi)

A_s : Η διατομή του στελέχους της σωλήνωσης ($A_o - A_i$) (in^2)

ΔT : Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε βάθος ($^{\circ}F$)

E: Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (psi)

ρ_m : Η πυκνότητα του πολφού διάτρησης (ppg)

TVD : Το κατακόρυφο βάθος της γεώτρησης (ft)

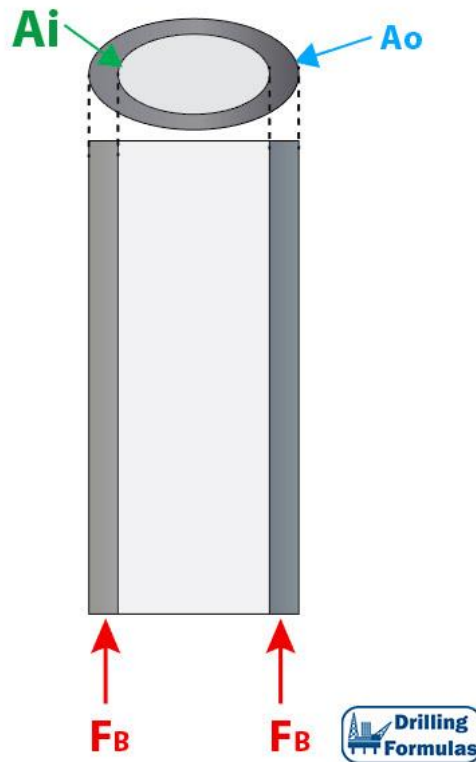
- i. Υπολογισμός βάρους σωλήνωσης στον αέρα, F_{wt}

Η ανάρτηση της στήλης σωλήνωσης κατά την τοποθέτησή της σε μια κατακόρυφη ή κεκλιμένη γεώτρηση έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση αξονικού φορτίου. Το συνολικό αξονικό φορτίο (βάρος της σωλήνωσης) στον αέρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{wt} \text{ (lb)} = W \cos \varphi \quad (3.5)$$

- ii. Επίδραση της άνωσης πάνω στη σωλήνωση, F_{buoy}

Η σωλήνωση όταν βυθίζεται στο ρευστό διάτρησης κατά την τοποθέτησή της στη γεώτρηση δέχεται ένα αξονικό **θλιπτικό** φορτίο (compressive axial load). Αυτό **το φορτίο** ονομάζεται δύναμη **άνωσης και ασκείται πάνω στη διατομή της σωλήνωσης με φορά προς τα πάνω (Σχήμα 3.6).**



Σχήμα 3.6: Επίδραση της άνωσης (F_B) πάνω στη σωλήνωση (ανοιχτή στον πυθμένα)
 (<http://www.drillingformulas.com/buoyancy-effect-on-weight-of-tubular-submersed-in-fluid/>)

Υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$F_{\text{buoy}} \text{ (lb)} = P_e (A_o - A_i) \text{ (ανοιχτή σωλήνωση)} \quad (3.6)$$

$$F_{\text{buoy}} \text{ (lb)} = P_e A_o - P_i A_i \text{ (κλειστή σωλήνωση)} \quad (3.7)$$

Όπου P_e η εξωτερική πίεση στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης ($P_e = 0,052 \times \rho_m \times \text{TVD}$).

iii. Δύναμη κάμψης, F_{bend}

Κατά τον σχεδιασμό σωλήνωσης σε κεκλιμένη γεώτρηση θα πρέπει να συνυπολογιστεί η φόρτιση λόγω κάμψης και ιδιαίτερα στα τμήματα της γεώτρησης που υπάρχουν απότομες αλλαγές τροχιάς (dog legs). Τα πιο κρίσιμα τμήματα (dog legs) είναι αυτά που παρουσιάζουν κλίσεις που υπερβαίνουν τις 10° ανά 100ft. Το αξονικό φορτίο λόγω κάμψης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{\text{bend}} \text{ (lb)} = \frac{E\pi}{360} (OD) (DLS) A_s \quad (3.8)$$

- iv. Πίεση κατά την προσγείωση των ελαστικών εμβόλων της τσιμέντωσης (plug bumping pressure), F_{plug}

Κατά την διαδικασία της βασικής τσιμέντωσης, όταν το πώμα της κορυφής τσιμέντωσης (top cementing plug), ωθούμενο από τη λάσπη διάτρησης, επικάθεται πάνω στο κατώτερο πώμα τσιμέντωσης (bottom cementing plug), αναπτύσσεται ένα αξονικό φορτίο (plug bumping pressure). Το αξονικό φορτίο υπολογίζεται από:

$$F_{\text{plug}} (\text{lb}) = P_{\text{surf}} A_i \quad (3.9)$$

- v. Πρόσθετη αξονική δύναμη ανέλκυσης (overpull), F_{pt}

Αν κατά την τοποθέτησή της μέσα στη γεώτρηση η σωλήνωση «κολλήσει» στη γεώτρηση ίσως είναι απαραίτητο να ασκηθεί μια πρόσθετη αξονική δύναμη ανέλκυσης προκειμένου να ξεκολλήσει. Η δύναμη ανέλκυσης προκαλεί εφελκυσμό κι επομένως προστίθεται απευθείας στα αξονικά φορτία που δέχεται η σωλήνωση κατά τη στιγμή που θα «κολλήσει»:

$$F_{\text{pt}} (\text{lb}) = \text{Direct Tension} \quad (3.10)$$

- vi. Επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών, F_{temp}

Όταν ξεκινήσει η παραγωγή, η σωλήνωση θα εκτεθεί σε μια αύξηση της θερμοκρασίας που θα προκαλέσει τη διαστολή της λόγω της κυκλοφορίας των υψηλής θερμοκρασίας υδρογονανθράκων. Καθώς η σωλήνωση είναι σταθεροποιημένη στην επιφάνεια από την κεφαλή της γεώτρησης και βαθύτερα από την τσιμέντωση, θα αναπτυχθεί ένα αξονικό φορτίο συμπίεσης (λυγισμός). Το αξονικό φορτίο που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{\text{temp}} (\text{lb}) = -200 (A_s) (\Delta T) \quad (3.11)$$

- vii. Αξονικό φορτίο λόγω κραδασμών, F_{shock}

Όταν κατά τη διάρκεια τοποθέτησής της μέσα στη γεώτρηση, η ταχύτητα καθέλκυσής της αυξάνεται ή μειώνεται, θα δεχθεί ένα φορτίο λόγω κραδασμών. Η επιτάχυνση και η επιβράδυνση συμβαίνει όταν τοποθετούνται ή αφαιρούνται οι ολισθητήρες

(casing slips) ή στο τέλος της άντλησης του τσιμέντου κατά τη διαδικασία της τσιμέντωσης. Το φορτίο λόγω κραδασμών (F_{shock}) προκύπτει από τη σχέση:

$$F_{shock} (lb) = 1780 v A_s \quad (3.13)$$

Όπου v = η ταχύτητα καθέλκυσης, που για τον υπολογισμό της δύναμης λόγω κραδασμών λαμβάνεται ίση με 5cm/s.

Κατά την εγκατάσταση της σωλήνωσης το συνολικό αξονικό φορτίο (F_t) είναι συνδυασμός των φορτίων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και εξαρτάται από τα σενάρια λειτουργίας. Σκοπός είναι ο καθορισμός του μέγιστου αξονικού φορτίου που προκύπτει από την εξέταση όλων των σεναρίων λειτουργίας. Αυτά είναι :

1. Καθέλκυση σωλήνωσης δια της βαρύτητας (free running of casing):

$$F_t = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend}$$

2. Καθέλκυση σωλήνωσης λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο λόγω κραδασμών:

$$F_t = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{shock}$$

3. Κόλλημα σωλήνωσης:

$$F_t = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{pt}$$

4. Τσιμέντωση σωλήνωσης:

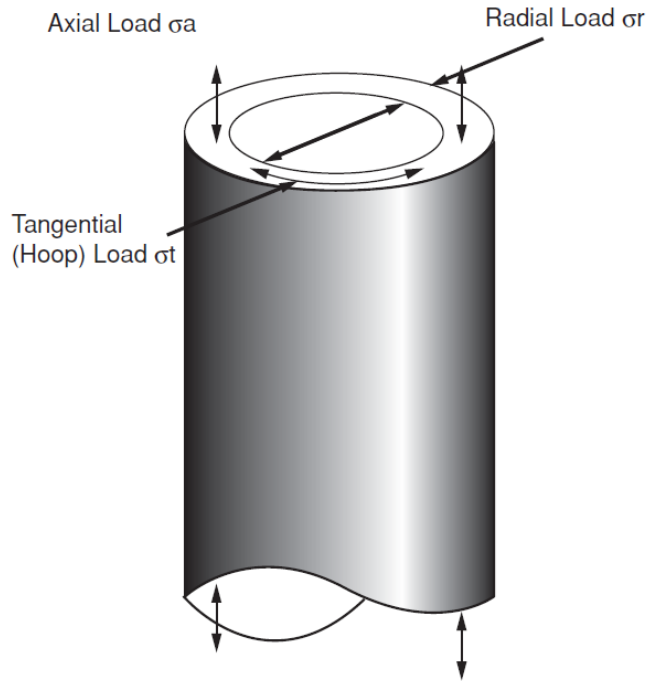
$$F_t = F_{wt} - F_{buoy} + F_{bend} + F_{plug} + F_{shock}$$

Οι παραπάνω υπολογιζόμενες δυνάμεις μετατρέπονται σε τάσεις (σ_z) διαιρούμενες με το εμβαδόν της διατομής της σωλήνωσης ($\sigma_z = F_t/A_s$).

3.4.5. Διαξονική και Τριαξονική Φόρτιση (biaxial and triaxial loading)

Μπορεί να αποδειχθεί, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, ότι τα αξονικά φορτία που δέχεται η σωλήνωση επηρεάζουν την αντοχή της σε διάρρηξη και αστοχία κατάρρευσης (burst & collapse ratings). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6, όσο αυξάνεται το εφελκυστικό φορτίο που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης, με την αντοχή διάρρηξης να αυξάνεται. Αντίθετα, όσο αυξάνεται το φορτίο συμπίεσης (compressive load) (το αντίθετο του εφελκυσμού) που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή σε διάρρηξη, με την αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης να αυξάνεται. Οι

προδιαγραφές των σωληνώσεων για διάρρηξη και αστοχία κατάρρευσης προσδιορίστηκε από το API (American Petroleum Institute-API) θεωρώντας ότι η σωλήνωση δέχεται μηδενικό αξονικό φορτίο. (Heriot Watt, 2005)



Σχήμα 3.7. Τριαξονική φόρτιση στην σωλήνωση (Heriot Watt, 2005)

Η έλλειψη που φαίνεται στο Σχήμα 3.7 είναι στην πραγματικότητα μια διδιάστατη απεικόνιση ενός τριδιάστατου φαινομένου. Ο άξονας x έχει την τιμή: $\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}} \times 100\%$ όπου σ_z είναι η αξονική τάση, σ_{yield} είναι το όριο ελαστικότητας του σωλήνα και P_i η εσωτερική πίεση που δέχεται ο σωλήνας. Ο άξονας y έχει την τιμή: $\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}} \times 100\%$ όπου σ_t είναι εφαπτομενική τάση που προκύπτει από τον τύπο:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 (r^2 + r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (3.14)$$

Όπου:

r: η απόσταση από την οποία συνυπολογίζονται οι σ_r και σ_t (in)

P_i : η εσωτερική πίεση στη σωλήνωση (psi)

P_e : η εξωτερική πίεση στη σωλήνωση (psi)

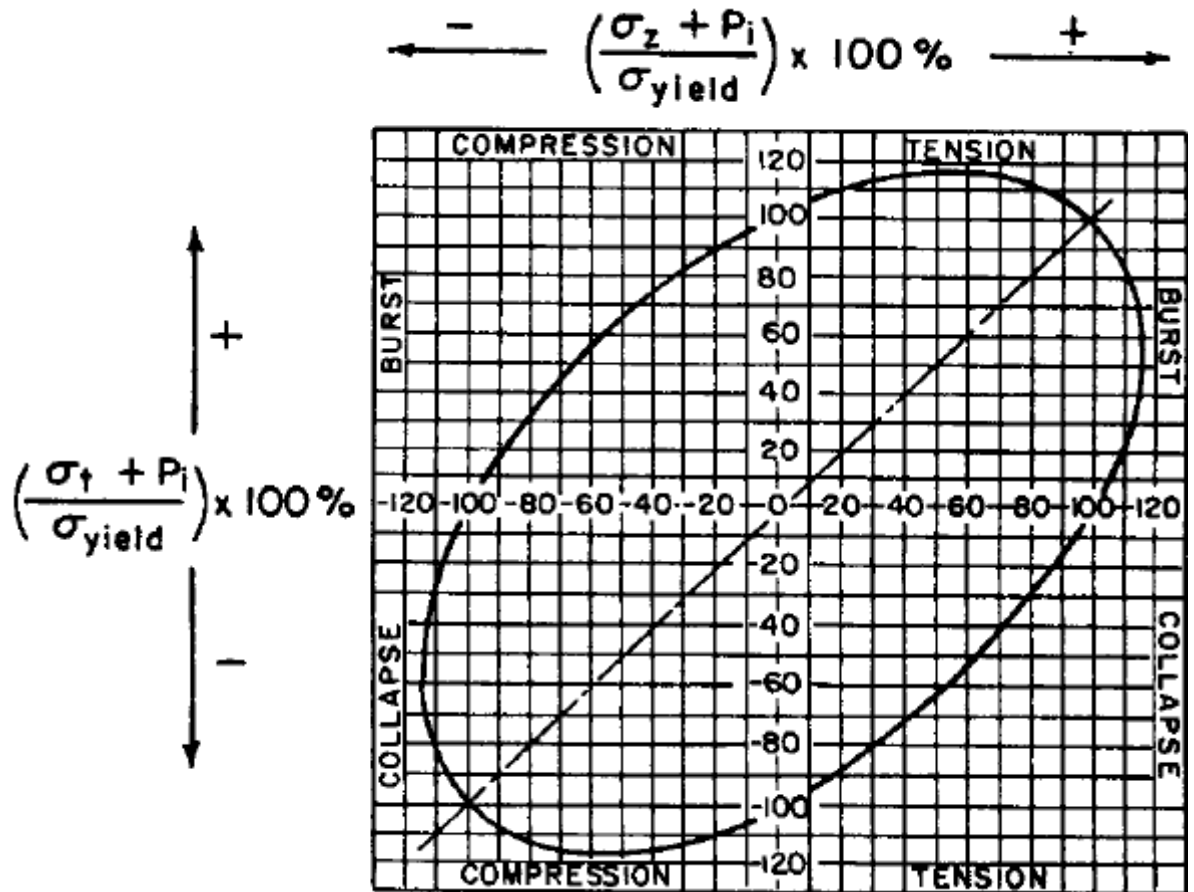
r_i : η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in)

r_o : η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in)

Η μέγιστη τάση θα ασκηθεί σε απόσταση στο εσωτερικό τοίχωμα της σωλήνωσης άρα για $r = r_i$ έτσι η σχέση 3.14 μετασχηματίζεται σε:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r_i^2) - P_e \cdot r_o^2 \cdot 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4} \quad (3.15)$$

Πρακτικά, η σωλήνωση δέχεται ένα συνδυασμό τριών φορτίων (τριαξονική φόρτιση): τα ακτινικά φορτία, τα αξονικά φορτία και τα εφαπτομενικά φορτία. Για οποιοδήποτε συνδυασμό εσωτερικής πίεσης (P_i) εξωτερικής πίεσης (P_e) και αξονικής πίεσης (σ_z) είναι δυνατό να εξετασθεί αν βρίσκεται εντός της έλλειψης τριαξονικής φόρτισης (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.8: Έλλειψη τριαξονικής φόρτισης (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.4.6. Καθορισμός σχεδιαστικών συντελεστών

Η αβεβαιότητα σχετικά με τις παραδοχές (σενάρια) για τον καθορισμό του εξωτερικού, εσωτερικού, αξονικού εφελκυστικού και συμπιεστικού φορτίου αντισταθμίζεται με τη χρήση του κατάλληλου συντελεστή σχεδιασμού. Ο συντελεστής σχεδιασμού χρησιμοποιείται για την αύξηση των υπολογιζόμενων φορτίων με σκοπό να προκύψουν τα φορτία σχεδιασμού. Οι συντελεστές σχεδιασμού καθορίζονται από την εμπειρία και τις συνέπειες της αστοχίας της σωλήνωσης. Ο βαθμός αβεβαιότητας θα πρέπει να συνυπολογιστεί (π.χ. μια ερευνητική γεώτρηση ίσως να χρειάζεται υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας). Το εύρος των συντελεστών σχεδιασμού είναι:

- Σχεδιαστικός συντελεστής φορτίου διάρρηξης 1,0-1,33
- Σχεδιαστικός συντελεστής φορτίου αστοχίας κατάρρευσης 1,0-1,25
- Σχεδιαστικό συντελεστής εφελκυσμού 1,0-2,0
- Σχεδιαστικός συντελεστής τριαξονικής φόρτισης 1,25

Στην παράγραφο 3.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι δυσμενέστερες συνθήκες που επικρατούν κατά τον υπολογισμό των κριτηρίων αστοχίας σε διάρρηξη και κατάρρευση για την επιφανειακή, την ενδιάμεση και την παραγωγική σωλήνωση καθώς και η μεθοδολογία υπολογισμού του αξονικού εφελκυστικού φορτίου.

3.5. Υπολογισμός κριτηρίων αστοχίας μεμονωμένων τύπων σωλήνωσης

Στην ενότητα αυτή πρόκειται να εξεταστούν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις φορτίσεων διάρρηξης (burst), αστοχίας κατάρρευσης (collapse) και εφελκυσμού (tension) για τον σχεδιασμό κάθε μεμονωμένου τύπου σωλήνωσης. Οι συνθήκες φόρτισης που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό της στήλης σωλήνωσης υπαγορεύονται από την εταιρεία που έχει αναλάβει τη σωλήνωση της γεώτρησης, με βάση τη διεθνή και τοπική εμπειρία. Οι συνθήκες φόρτισης έχουν μια γενική ταξινόμηση βασισμένη στον τύπο της σωλήνωσης.

3.5.1. Σχεδιασμός επιφανειακής σωλήνωσης (surface casing design)

Στην ενότητα αυτή πρόκειται να αναλυθούν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις φορτίσεων για την επιφανειακή σωλήνωση. Για την περίπτωση του υπολογισμού της πίεσης διάρρηξης

(burst design) η συνθήκη φόρτισης κατά την οποία παρουσιάζεται η υψηλότερη εσωτερική πίεση είναι όταν συμβαίνει μια αιφνίδια εισροή (kick). Για την περίπτωση του υπολογισμού της πίεσης αστοχίας κατάρρευσης (collapse design), η συνθήκη φόρτισης κατά την οποία παρουσιάζεται η υψηλότερη εξωτερική πίεση είναι στην περίπτωση απώλειας του ρευστού διάτρησης εντός του σχηματισμού. Τέλος, η περίπτωση υψηλότερου αξονικού φορτίου (tension design) συμβαίνει όταν η σωλήνωση “κολλήσει” κατά τη διαδικασία τοποθέτησής της, πριν το στάδιο της τσιμέντωσης.

Μετά την εγκατάσταση της επιφανειακής σωλήνωσης η διάταξη BOP τοποθετείται στην κεφαλή του πηγαδιού και σε περίπτωση που συμβεί kick, η γεώτρηση θα κλείσει (shut in) στην επιφάνεια και εν τέλει η εισροή θα απομακρυνθεί από τη γεώτρηση (circulate out). Ως εκ τούτου, η επιφανειακή σωλήνωση πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τα φορτία διάρρηξης που θα αναπτυχθούν κατά αυτήν τη διεργασία. Ορισμένες εταιρείες απαιτούν η σωλήνωση να μπορεί να αντέξει στα φορτία διάρρηξης που αναπτύσσονται όταν ολόκληρη η στήλη σωλήνωσης έχει εκκενωθεί από λάσπη και έχει γεμίσει με το αέριο της εισροής. Τα μέγιστα φορτία αστοχίας κατάρρευσης δύναται να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης ή όταν συναντάται ζώνη απωλειών κατά τη διάρκεια όρυξης του επόμενου τμήματος της γεώτρησης.

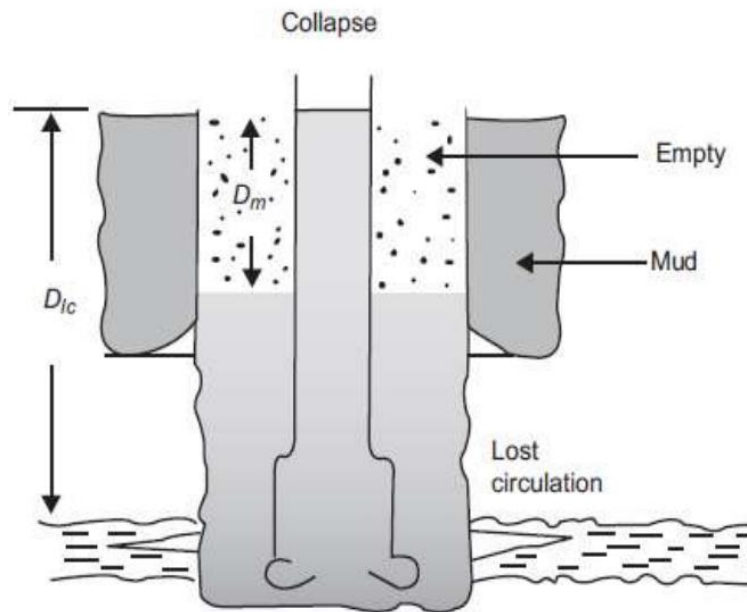
Το πλέον σύνηθες σενάριο λειτουργίας για τον σχεδιασμό της επιφανειακής σωλήνωσης σε αστοχία κατάρρευσης στην επιφανειακή σωλήνωση είναι η θεώρηση ζώνης απωλειών οπότε η σωλήνωση εκκενώνεται από λάσπη διάτρησης. Σε αυτή την περίπτωση η σωλήνωση είναι άδεια εσωτερικά, με την πίεση πόρων να ασκείται εξωτερικά.

Το μέγιστο φορτίο διάρρηξης συμβαίνει στην περίπτωση όπου η γεώτρηση κλείσει μετά από την αιφνίδια εισροή αερίου (gas kick). Η πίεση εσωτερικά της σωλήνωσης είναι αυτή της πίεση πόρων στον πυθμένα της γεώτρησης και μιας στήλης αερίου που εκτείνεται από τον πυθμένα της γεώτρησης μέχρι την επιφάνεια. Θεωρείται ότι η πίεση που ασκείται εξωτερικά της σωλήνωσης ισούται με αυτή των πόρων.

3.5.1.1. Υπολογισμός πίεσης αστοχίας κατάρρευσης (collapse design)

Ο σχεδιασμός έναντι πίεσης κατάρρευσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση της σωλήνωσης βασίζεται είτε στο χειρίστο σενάριο ολικής απώλειας του ρευστού διάτρησης στο εσωτερικό της σωλήνωσης είτε στα μέγιστα φορτία κατάρρευσης που πρόκειται να αναπτυχθούν κατά τη λειτουργία της σωλήνωσης. Και στις δύο περιπτώσεις,

η μέγιστη εξωτερική πίεση, η οποία τείνει να προκαλέσει αστοχία κατάρρευσης, θα ασκηθεί από το ρευστό διάτρησης που βρίσκεται εξωτερικά της σωλήνωσης κατά την έδραση και την τσιμέντωσή της. Η ευεργετική δράση του τσιμέντου και της λάσπης δεν συνυπολογίζεται, διότι υπάρχει η πιθανότητα το τσιμέντο να μην έχει “δέσει” επαρκώς τοπικά και οι ιδιότητες της λάσπης να έχουν υποβιβαστεί με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα πρέπει να συνυπολογιστεί όχι μόνο η αρνητική επίδραση της αξονικής τάσης στις τιμές πίεσης κατάρρευσης, αλλά και η θετική επίδραση της εσωτερικής πίεσης στην πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης μέσα στη σωλήνωση (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.9: Φορτία κατάρρευσης (collapse loads) (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

Στην περίπτωση που η γεώτρηση συναντήσει μια ζώνη όπου μπορεί να σημειωθούν σοβαρές απώλειες λάσπης ή παλινδρόμηση της πίεσης πόρων του σχηματισμού κοντά στον πυθμένα του επόμενου (μη σωληνωμένου) τμήματος της γεώτρησης και εάν δεν υπάρχουν περατοί σχηματισμοί πάνω από τη ζώνη απωλειών, τότε η στάθμη του ρευστού διάτρησης στο εσωτερικό της σωλήνωσης θα σημειώσει πτώση μέχρις ότου η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης να είναι ίση με την πίεση των πόρων της ζώνης. Η εξίσωση της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η λάσπη διάτρησης με την πίεση των πόρων στην ζώνη απωλειών δίνεται από τη σχέση:

$$0.052 * \rho_{\max} \text{ (psi/m)} * (Z_{lc} - Z_m) \text{ (m)} = 0.052 * g_p \text{ (psi/m)} * Z_{lc} \text{ (m)} \quad (3.14)$$

Όπου

Z_{lc} =είναι το κατακόρυφο βάθος της ζώνης απωλειών

g_p =η βαθμίδα της πίεσης πόρων του σχηματισμού

ρ_{max} = η μέγιστη αναμενόμενη πυκνότητα της λάσπης στη ζώνη απωλειών

Z_m =η πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης

Λύνοντας ως προς Z_m , η σχέση γίνεται

$$Z_m = \frac{(\rho_{max} - g_p)}{\rho_{max}} * Z_{lc} \quad (3.15)$$

Υπάρχει συνήθως σημαντική αβεβαιότητα στην επιλογή της ελάχιστης αναμενόμενης βαθμίδας πίεσης πόρων και του μέγιστου βάθους της ζώνης απωλειών στη σχέση 3.15. Σε περίπτωση απουσίας δεδομένων από προηγούμενες γεωτρήσεις στην περιοχή, η κανονική βαθμίδα πίεσης πόρων για την περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συντηρητική εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης βαθμίδας πίεσης πόρων. Ομοίως, αν η λιθολογία δεν είναι γνωστή, το βάθος που θα εδραστεί η επόμενη πλήρης στήλη τεχνικής σωλήνωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συντηρητική εκτίμηση του Z_{lc} (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986).

Η ελάχιστη στάθμη του ρευστού διάτρησης μέσα στη σωλήνωση κατά την τοποθέτησή της στη γεώτρηση εξαρτάται από τις πρακτικές που εφαρμόζονται στο πεδίο. Η σωλήνωση συνήθως πληρώνεται με λάσπη μετά από τη συναρμολόγηση κάθε νέου στελέχους πάνω στη στήλη και την καταβίβασή του μέσα στη γεώτρηση, και η πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης διατηρείται περίπου ίση με την εξωτερική πίεση. Ωστόσο σε μερικές περιπτώσεις η σωλήνωση τοποθετείται εντελώς ή μερικώς άδεια εσωτερικά εντός της γεώτρησης (floated in) με σκοπό να μειωθεί το φορτίο που φέρει το άγκιστρο του γεωτρυπάνου πριν η σωλήνωση ακουμπήσει τον πυθμένα. Αν αναμένεται να χρησιμοποιηθεί η πρακτική αυτή, η μέγιστη στάθμη της λάσπης θα πρέπει να συγκριθεί με το βάθος που υπολογίστηκε από τη σχέση 3.15 και η μεγαλύτερη τιμή εκ των δύο να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της πίεσης κατάρρευσης.

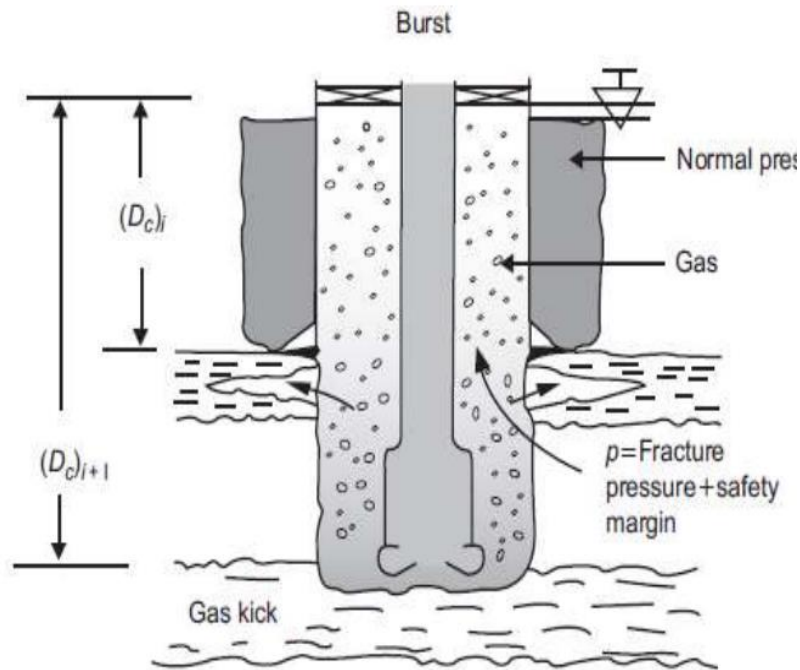
Το δυσκολότερο κομμάτι του σχεδιασμού έναντι αστοχίας κατάρρευσης είναι η διόρθωση της απαιτούμενης αντοχής κατάρρευσης υπό την άσκηση αξονικής εφελκυστικής τάσης. Η δυσκολία βρίσκεται στον καθορισμό της αξονικής εφελκυστικής τάσης που ασκείται κατά τη στιγμή που εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης, πρακτικά πρόκειται για το αξονικό εφελκυστικό φορτίο που εφαρμόζεται ενώ επιδρά το

φορτίο κατάρρευσης (παράγραφος 3.4.5). Αν το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης παρουσιάζεται κατά την τοποθέτηση της σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση, η αξονική τάση μπορεί να υπολογιστεί εύκολα καθώς είναι γνωστό το βάρος/πόδι και η υδροστατική πίεση της λάσπης.

Σε περίπτωση χειρωνακτικών υπολογισμών, συνηθίζεται να υπολογίζεται η αξονική τάση ως το συνολικό βάρος της σωλήνωσης που αναρτάται από το άγκιστρο του γεωτρυπάνου (hanging weight), μειωμένο κατά τον συντελεστή άνωσης του ρευστού που ασκεί τις υδροστατικές πιέσεις που παρουσιάζονται όταν ασκείται το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης. Σε αυτό προστίθεται οποιαδήποτε πρόσθετη τάση τυχόν ασκείται στη σωλήνωση κατά τη διάρκεια της τοποθέτησής της και μετά την έδρασή της (Mitchell & Miska, 2011)

3.5.1.2. Υπολογισμός πίεσης διάρρηξης (burst design)

Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης έναντι διάρρηξης πρέπει να εξασφαλίσει ότι η πίεση διάρρηξης που μπορεί να αναπτυχθεί στο πέλμα της θα είναι μεγαλύτερη από την πίεση ρωγμάτωσης του περιβάλλοντος σχηματισμού που πρόκειται να διατρυθεί, αυτό εξασφαλίζει ότι σε περίπτωση αιφνίδιας εισροής αερίου (gas kick) το αέριο θα διαφύγει μέσω του σχηματισμού και όχι μέσω της σωλήνωσης. Κατά το στάδιο αυτό η ρωγμάτωση των σχηματισμών χρησιμοποιείται σαν μηχανισμός ασφαλούς αποσυμπίεσης για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα συμβεί ρήξη της στήλης σωλήνωσης, με αποτέλεσμα να εκτεθεί σε κίνδυνο η γεώτρηση και το προσωπικό (Σχήμα 3.9).



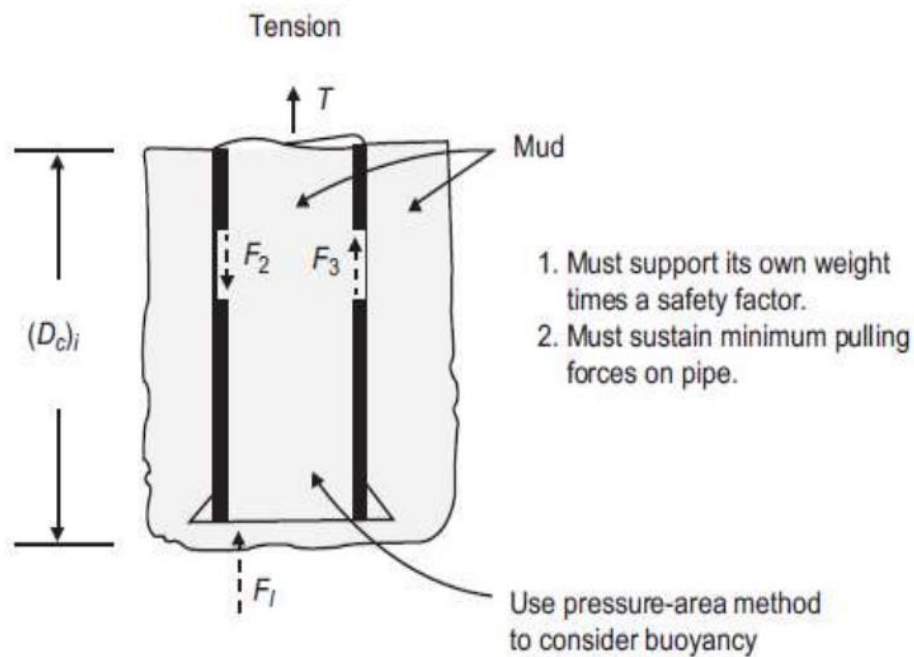
Σχήμα 3.10: Φορτία διάρρηξης (burst loads) (Mitchell & Miska, 2011)

Η σχεδιαστική πίεση διάρρηξης στο πέλμα της σωλήνωσης ισούται με την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού αυξημένη κατά ένα περιθώριο ασφάλειας, τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η άσκηση πίεσης εισπίεσης (injection pressure) λίγο μεγαλύτερης από την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού.

Η πίεση εσωτερικά της σωλήνωσης υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλο το ρευστό διάτρησης έχει χαθεί εντός του ρωγματωμένου σχηματισμού (fractured formation), αφήνοντας μέσα στη σωλήνωση μόνο αέριο που έχει εισέλθει από τον σχηματισμό. Η εξωτερική ή βοηθητική πίεση εξωτερικά της σωλήνωσης, που πρακτικά είναι αντίσταση στη διάρρηξη, λαμβάνεται ίση με την πίεση πόρων των σχηματισμών. Η ευεργετική δράση του τσιμέντου και της λάσπης δεν συνυπολογίζεται, διότι υπάρχει η πιθανότητα το τσιμέντο να μην έχει “δέσει” επαρκώς τοπικά και οι ιδιότητες της λάσπης να έχουν υποβιβαστεί με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη και κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας που παρέχει ένα επιπρόσθετο περιθώριο ασφαλείας σε περίπτωση που η σωλήνωση έχει υποστεί ζημιά κατά τη μεταφορά ή τους χειρισμούς στο περιβάλλον εργασίας. (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986).

3.5.1.3. Υπολογισμός αξονικού εφελκυστικού φορτίου (tension design)

Στον σχεδιασμό έναντι εφελκυσμού θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αξονικές τάσεις που ασκούνται κατά τη διαδικασία της τσιμέντωσης της σωλήνωσης, κατά την έδρασή της στο σύστημα ανάρτησης στην κεφαλή της γεώτρησης, στη διάρκεια της διάτρησης του επόμενου τμήματος της γεώτρησης και των διαδικασιών παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο σχεδιασμός των φορτίων βασίζεται σε καταστάσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν κατά τη λειτουργία της σωλήνωσης (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 3.11: Εφελκυστικά Φορτία (Tension Loads) (Mitchell & Miska, 2011)

Στον σχεδιασμό έναντι εφελκυσμού θεωρείται ότι η σωλήνωση μπορεί να “κολλήσει” κοντά στον πυθμένα και ότι μία μέγιστη δύναμη ανέλκυσης θα πρέπει να ασκηθεί, πέραν του εμβαπτισμένου εντός της λάσπης βάρους, προκειμένου να αποδεσμευτεί η σωλήνωση. Το κριτήριο για την εύρεση του μικρότερου συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται από την τιμή του μέγιστου φορτίου που θα επιλέγεται μεταξύ του σχεδιαστικού συντελεστή ασφαλείας και της δύναμης ανέλκυσης, ανάλογα ποια τιμή εκ των δύο είναι μεγαλύτερη. Η ελάχιστη δύναμη ανέλκυσης τείνει να έχει τον έλεγχο στον σχεδιασμό του άνω τμήματος της στήλης της σωλήνωσης, ενώ ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας τείνει να ελέγχει τον σχεδιασμό του κατώτερου τμήματος της στήλης σωλήνωσης. (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.5.2. Σχεδιασμός ενδιάμεσης ή προστατευτικής σωλήνωσης (intermediate casing design)

Η λειτουργία της προστατευτικής σωλήνωσης είναι παρόμοια με αυτή της επιφανειακής σωλήνωσης. Σκοπός της είναι να προσεγγίσει με ασφάλεια το τελικό βάθος. Η βιομηχανία χρησιμοποιεί ποικίλες μεθόδους για να εξασφαλισθεί ότι η προστατευτική σωλήνωση θα διαχειριστεί με ασφάλεια τα πιθανά kicks των σχηματισμών, τις ζώνες απωλειών (lost returns), και άλλα προβλήματα διάτρησης που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια της γεώτρησης. Ομοίως με τον σχεδιασμό της επιφανειακής σωλήνωσης, η εσωτερική και εξωτερική πίεση καθορίζονται από την ανάλυση της πίεσης διάρρηξης και της πίεσης κατάρρευσης. Η ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση δέχεται παρόμοια φορτία με αυτά της επιφανειακής σωλήνωσης.

Το πλέον σύνηθες σενάριο λειτουργίας για τον σχεδιασμό της ενδιάμεσης σωλήνωσης σε αστοχία κατάρρευσης είναι η θεώρηση ζώνη απωλειών οπότε η σωλήνωση εκκενώνεται τελειώς από λάσπη διάτρησης. Στην περίπτωση αυτή η σωλήνωση είναι άδεια εσωτερικά και η πίεση πόρων ασκείται στο εξωτερικό της.

Το μέγιστο φορτίο διάρρηξης συμβαίνει σε περίπτωση που η γεώτρηση ασφαλιστεί μετά από αιφνίδια εισροή αερίου (gas kick). Η πίεση εσωτερικά της σωλήνωσης είναι αυτή της πίεσης πόρων στον πυθμένα της γεώτρησης και μιας στήλης αερίου που εκτείνεται από τον πυθμένα της γεώτρησης μέχρι την επιφάνεια. Θεωρείται ότι η πίεση πόρων δρα εξωτερικά της σωλήνωσης.

3.5.2.1. Υπολογισμός πίεσης αστοχίας κατάρρευσης (collapse design)

Για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης οι σχεδιαστικές θεωρήσεις της προστατευτικής σωλήνωσης είναι συνήθως παρόμοιες με αυτές της επιφανειακής σωλήνωσης, συνυπολογίζοντας και τις ζώνες απωλειών. Συνήθως, ο σχεδιασμός της προστατευτικής σωλήνωσης θα καταλήξει σε στελέχη με χαμηλότερη κατηγορία χάλυβα και ονομαστικό βάρος από αυτές που αναμένονται στην παραγωγική σωλήνωση. Με αποτέλεσμα, μια προστατευτική σωλήνωση που είναι σχεδιασμένη για μια γεώτρηση

μεγάλου βάθους να μην έχει τις ίδιες προδιαγραφές με μια παραγωγική σωλήνωση σε γεώτρηση μικρότερου βάθους.

3.5.2.2. Υπολογισμός πίεσης διάρρηξης (burst design)

Για τον σχεδιασμό της πίεσης διάρρηξης, η εξωτερική πίεση ή πίεση εξισορρόπησης (back-up pressure) που ασκείται εξωτερικά της σωλήνωσης και είναι η αντίσταση στην πίεση διάρρηξης, θεωρείται ίση με την πίεση που έχουν οι σχηματισμοί στο βάθος αυτό.

Οι θεωρήσεις που γίνονται για την ανάλυση της πίεσης διάρρηξης ποικίλλουν σημαντικά στη βιομηχανία. Πολλοί μηχανικοί υπολογίζουν την εσωτερική πίεση που θα ασκηθεί σε κάθε βάθος με κριτήριο την περίπτωση που θα συμβεί kick. Η ένταση και όγκος του κάθε kick είναι τέτοιος ώστε οι πιέσεις που αναπτύσσονται στη γεώτρηση να είναι ίσες ή ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες πιέσεις των σχηματισμών στο πέγμα της προστατευτικής σωλήνωσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα kicks που μπορεί να προκύψουν θα περάσουν με ασφάλεια το τμήμα της προστατευτικής σωλήνωσης δίχως να παραβιάζεται η ακεραιότητα του σχηματισμού στο πέγμα της σωλήνωσης. Αν η πίεση που ασκεί το kick ξεπερνά τις αντοχές των σχηματισμών στο πέγμα της προστατευτικής σωλήνωσης, τότε το πιθανότερο είναι να οδηγήσει στην εκδήλωση μιας ζώνης απωλειών ή σε μια υπόγεια έκρηξη, με αποτέλεσμα το kick να μην οδηγηθεί στην επιφάνεια. Η μέγιστη επιφανειακή πίεση που ασκείται κατά την πορεία του kick στην επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί. Το BOP πρέπει να έχει τέτοια διαστασιολόγηση ώστε να μπορεί να διαχειριστεί τη μέγιστη επιφανειακή πίεση που μπορεί να ασκηθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής.

Πολλοί μηχανικοί σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιθανό να ακολουθήσουν την ίδια διαδικασία όπως και στον σχεδιασμό της επιφανειακής σωλήνωσης. Ωστόσο σε μερικές περιπτώσεις είναι αντιοικονομικό να ληφθούν τα μέτρα για την πίεση διάρρηξης (burst design) που φαίνονται στο Σχήμα 3.10, ειδικά όταν οι υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία υπερβαίνουν την τιμή του BOP και της διάταξης των βαλβίδων στην κεφαλή της γεώτρησης. Σε περίπτωση που ο επιφανειακός εξοπλισμός πρέπει να διατηρηθεί, δεν υπάρχει λόγος να σχεδιαστεί μια σωλήνωση που να δουλεύει σε υψηλότερες πιέσεις από αυτές που αντέχει ο επιφανειακός εξοπλισμός.

Όταν η πίεση διάρρηξης στην επιφάνεια βασίζεται στις προδιαγραφές του επιφανειακού εξοπλισμού, P_{max} , οι εσωτερικές πιέσεις στο βάθος της προστατευτικής σωλήνωσης θα πρέπει να προσδιοριστούν σύμφωνα με το Σχήμα 3.10. Θεωρείται ότι το

ανώτερο τμήμα της σωλήνωσης είναι πληρωμένο με λάσπη διάτρησης και το κατώτερο με αέριο. Το βάθος της διεπιφάνειας μεταξύ αερίου/λάσπης, Z_m , προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{inj} \text{ (psi)} = P_{max} \text{ (psi)} + 0.052 * \rho_m \text{ (psi/m)} * Z_m \text{ (m)} + 0.052 * \rho_g * (Z_{lc} - Z_m) \text{ (m)} \quad (3.16)$$

Με P_{inj} να είναι η πίεση εισπίεσης που αντιστέκεται στη ζώνη απωλειών, ρ_m και ρ_g είναι οι πυκνότητες του αερίου και της λάσπης διάτρησης, αντιστοίχως, και Z_{lc} είναι το βάθος της ζώνης απωλειών. Η επίλυση προς Z_m δίνει:

$$Z_m = \frac{P_{inj} - P_{max}}{0,052 * (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g Z_{lc}}{(\rho_m - \rho_g)} \quad (3.17)$$

Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης θα είναι ίση με την πυκνότητα της λάσπης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος. Αυτό μας επιτρέπει τον υπολογισμό των μέγιστων πιέσεων που δέχεται η προστατευτική σωλήνωση από την επιφάνεια μέχρι και το πέλμα της. Το βάθος της ζώνης απωλειών είναι αυτό που βρίσκεται ο ασθενέστερος εκτεθειμένος σχηματισμός και καθορίζεται από το διάγραμμα της πίεσης ρωγμάτωσης συναρτήσει του βάθους. (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.5.2.3. Υπολογισμός αξονικού εφελκυστικού φορτίου (tension design)

Υπό κανονικές συνθήκες, η μέθοδος υπολογισμού του αξονικού εφελκυστικού φορτίου είναι ίδια όπως και στην περίπτωση της επιφανειακής σωλήνωσης. (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.5.3. Σχεδιασμός παραγωγικής σωλήνωσης (production casing design)

Οι σχεδιαστικές περιπτώσεις για το φορτίο διάρρηξης και το φορτίο αστοχίας κατάρρευσης της παραγωγικής σωλήνωσης βασίζονται στις διαδικασίες παραγωγής.

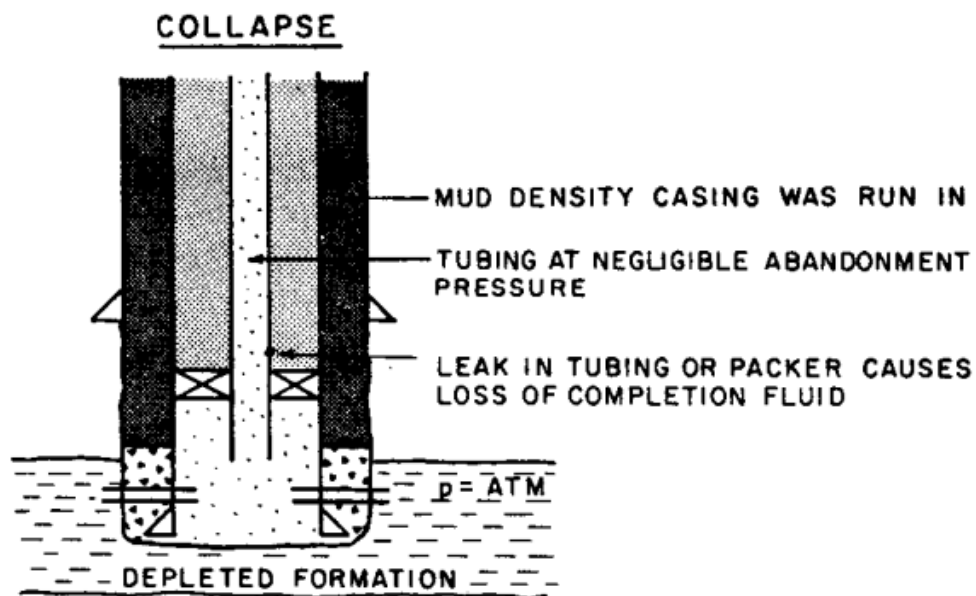
Το πλέον σύνηθες σενάριο λειτουργίας για τον σχεδιασμό της ενδιάμεσης σωλήνωσης σε διάρρηξη προκύπτει όταν παρουσιαστεί διαρροή στον σωλήνα παραγωγής ακριβώς κάτω από τη διάταξη ανάρτησής του στην κεφαλή της γεώτρησης. Σε αυτή την περίπτωση η πίεση στην κορυφή της παραγωγικής σωλήνωσης θα είναι ίση με την πίεση ταμιευτήρα μειωμένη κατά την πίεση που ασκεί η στήλη του αερίου που έχει διαρρεύσει

από τον σωλήνα παραγωγής, δηλαδή πολύ μειωμένη πολύ λιγότερο από όσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η πίεση θα δρα στο ρευστό που βρίσκεται στο δακτύλιο της γεώτρησης και θα ασκεί πολύ υψηλή εσωτερική πίεση στο κατώτερο μέρος της παραγωγικής σωλήνωσης.

Το σενάριο σχεδιασμού της παραγωγικής σωλήνωσης σε αστοχία κατάρρευσης συμβαίνει όταν ο δακτύλιος μεταξύ του σωλήνα παραγωγής και της σωλήνωσης παραγωγής έχει εκκενωθεί λόγω της εφαρμογής gas lift. Ως gas lift ορίζεται η μέθοδος τεχνητής ανύψωσης κατά την οποία εγχύεται αέριο στην παραγωγική σωλήνωση για να μειωθεί η υδροστατική πίεση της στήλης του ρευστού. Η προκύπτουσα μείωση της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης επιτρέπει στα ρευστά του ταμιευτήρα να εισέλθουν στη γεώτρηση με υψηλότερο ρυθμό ροής (Schlumberger, 2020).

3.5.3.1. Υπολογισμός πίεσης αστοχίας κατάρρευσης (collapse design)

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα φορτία που δέχεται η παραγωγική σωλήνωση σχετικά με την πίεση αστοχίας κατάρρευσης.



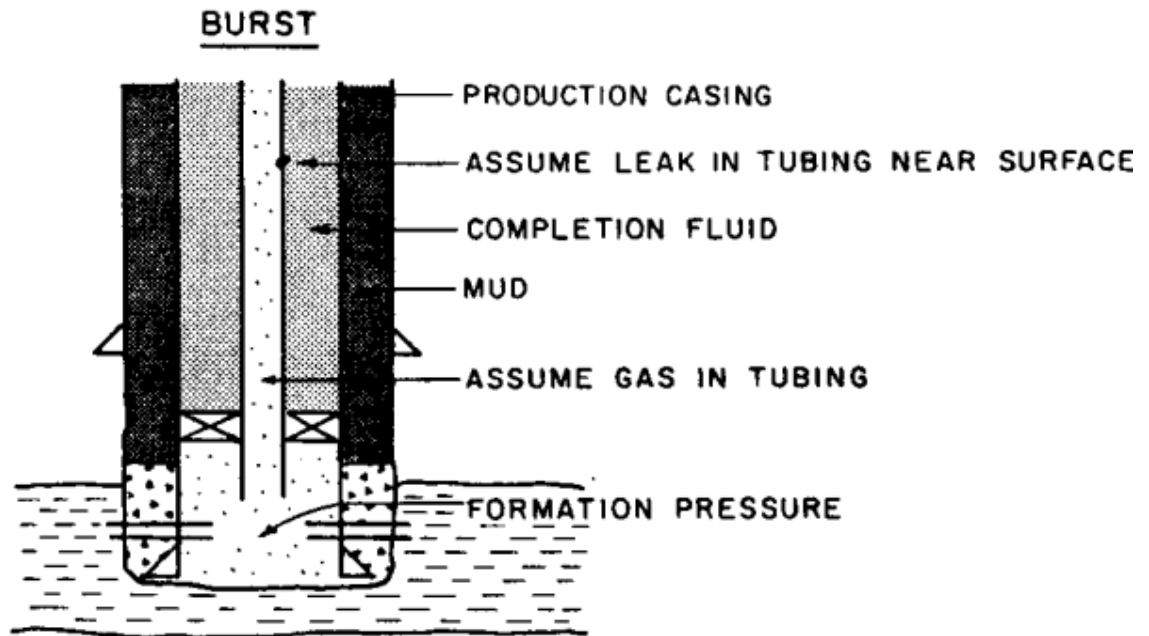
Σχήμα 3.12: Σχεδιαστικά φορτία παραγωγικής σωλήνωσης για την κατάρρευση (collapse)
(Mitchell & Miska, 2011)

Τα μέγιστα αναμενόμενα φορτία αστοχίας κατάρρευσης βασίζονται σε συνθήκες που ακολουθούν αργότερα στη ζωή ενός ταμιευτήρα, δηλαδή όταν η πίεση του ταμιευτήρα

πλησιάζει την πίεση εγκατάλειψης. Ένα σκίσιμο στο παρέμβυσμα (packer) ή στη σωλήνωση θα μπορούσε να προκαλέσει την απώλεια του ρευστού ολοκλήρωσης (completion fluid), με αποτέλεσμα η χαμηλή εσωτερική πίεση να μην περιορίζεται μόνο στο τμήμα της σωλήνωσης κάτω από το παρέμβυσμα. Έτσι για σχεδιαστικούς λόγους η σωλήνωση θεωρείται άδεια, με αποτέλεσμα η πυκνότητα του ρευστού διάτρησης εξωτερικά της σωλήνωσης να είναι ίση με την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης ακριβώς όπως συμβαίνει κατά την εγκατάσταση της σωλήνωσης, με την θετική επίδραση του τσιμέντου να αγνοείται.

3.5.3.2. Υπολογισμός πίεσης διάρρηξης (burst design)

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι συνθήκες φόρτισης της παραγωγικής σωλήνωσης όσον αφορά την πίεση διάρρηξης.



Σχήμα 3.13: Σχεδιαστικά φορτία παραγωγικής σωλήνωσης για την διάρρηξη (burst) (Mitchell & Miska, 2011)

Σε αυτό το παράδειγμα οι συνθήκες φόρτισης για την περίπτωση της διάρρηξης θεωρούνται δυσμενέστερες όταν σε μια γεώτρηση παραγωγής η πίεση στο πέλμα της σωλήνωσης είναι ίση με την πίεση πόρων, ενώ θα υπάρχει και παραγόμενο αέριο μέσα στη γεώτρηση. Η παραγωγική σωλήνωση (production casing) θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην αποτύχει ακόμα και αν ο σωλήνας παραγωγής (tubing) αστοχήσει. Γενικά θεωρείται ότι η πυκνότητα του ρευστού ολοκλήρωσης (completion fluid) που βρίσκεται εντός της

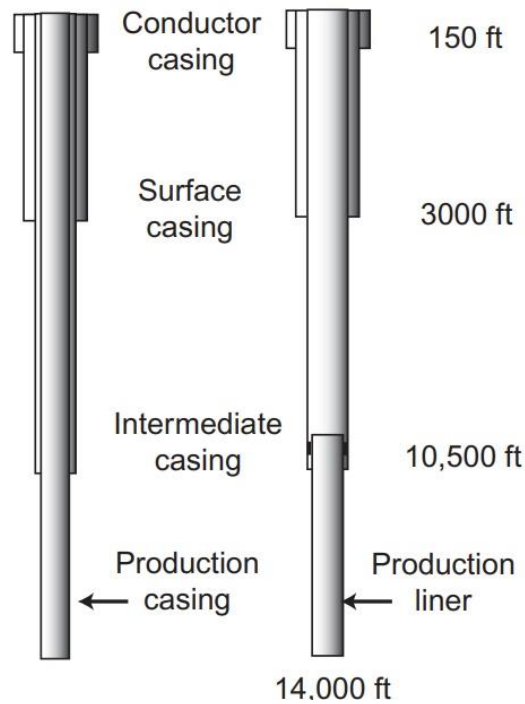
σωλήνωσης και πάνω από το παρέμβυσμα (racker) ισούται με την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης που απέμεινε εξωτερικά της σωλήνωσης. Αν η παραγωγική σωλήνωση σχιστεί κοντά στην επιφάνεια, η επίδραση της υδροστατικής πίεσης από το υγρό ολοκλήρωσης θα εξουδετερώσει την επίδραση της πίεσης που ασκεί η λάσπη διάτρησης εξωτερικά της σωλήνωσης. Η υποβάθμιση της λάσπης με τον χρόνο εξωτερικά της σωλήνωσης υποβαθμίζεται επειδή η πίεση πόρων στον οποιοδήποτε εκτεθειμένο σχηματισμό σχεδόν εξισορροπεί την υδροστατική πίεση της λάσπης. (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.5.3.3. Υπολογισμός αξονικού εφελκυστικού φορτίου (tension design)

Υπό κανονικές συνθήκες, η μέθοδος υπολογισμού του αξονικού εφελκυστικού φορτίου είναι ίδια όπως και στην περίπτωση της επιφανειακής και της ενδιάμεσης προστατευτικής σωλήνωσης. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται παραγωγικό liner, οι μέγιστες αναμενόμενες τάσεις θα πρέπει να ελεγχθούν για να καθοριστεί αν υπερβαίνουν τα σχεδιαστικά φορτία της στήλης σωλήνωσης από την οποία αναρτάται το liner (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986).

3.5.4. Σχεδιασμός παραγωγικού liner (Production Liner Design)

Τα liners είναι ιδιαίτερος εξοπλισμός. Ωστόσο, η προσέγγιση σχεδιασμού τους πλησιάζει αυτή της προστατευτικής ή της παραγωγικής σωλήνωσης. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι η καμπύλη φορτίσεων για ένα liner δεν αφορά αποκλειστικά το ίδιο αλλά σχετίζεται και με το τμήμα της σωλήνωσης από την οποία αναρτάται (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.14: Παράδειγμα γεώτρησης με παραγωγικό liner (Byrom, 2015)

Με άλλα λόγια ένα liner δεν σχεδιάζεται ποτέ μεμονωμένα αλλά ως προέκταση ενός άλλου στελέχους ή σωλήνωσης. Η μόνη ουσιαστική διαφορά όσον αφορά τα φορτία είναι στον υπολογισμό του αξονικού εφελκυστικού φορτίου, αφού είναι πρόσθετο τμήμα μιας άλλης στήλης σωλήνωσης. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται μια τυπική γεώτρηση με το παραγωγικό liner να αναρτάται από την προστατευτική σωλήνωση. Στην περίπτωση αυτή το άνω τμήμα της σύνθετης σωλήνωσης εξυπηρετεί τον σκοπό της προστατευτικής σωλήνωσης και το κατώτερο τμήμα εξυπηρετεί τον σκοπό της παραγωγικής σωλήνωσης. (Byrom, 2015).

3.5.5. Άλλες σχεδιαστικές θεωρήσεις

Στις προηγούμενες παραγράφους αναλύθηκε η τυπική προσέγγιση στον σχεδιασμό των διαφόρων τύπων σωλήνωσης. Ωστόσο, υπάρχουν ειδικές συνθήκες που δεν ικανοποιούνται από τον τυπικό σχεδιασμό. Κατά την αντιμετώπιση αυτών των περιπτώσεων πρέπει να γίνει προσεκτική αξιολόγηση και να τροποποιηθεί ανάλογα η διαδικασία σχεδιασμού. Αυτές οι ειδικές περιστάσεις περιλαμβάνουν:

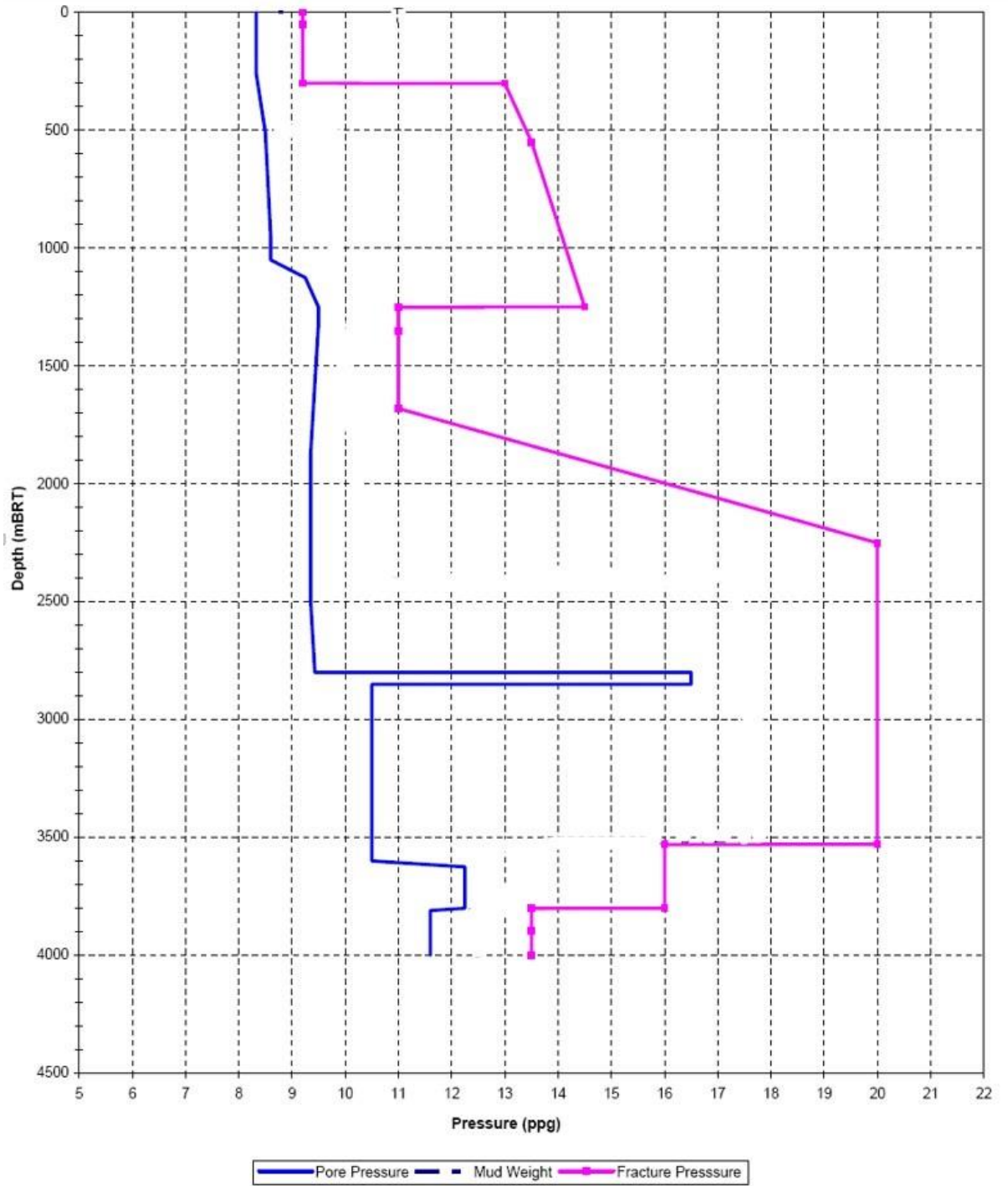
- **Επιδράσεις θερμοκρασίας:** Οι υψηλές θερμοκρασίες τείνουν να διογκώνουν τη σωλήνωση, προκαλώντας λυγισμό σε αυτή (buckling). Αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί στις γεωθερμικές γεωτρήσεις.
- **Σωλήνωση ζωνών αλάτων:** Οι εκτεταμένοι σχηματισμοί αλατιού ενδέχεται να ρέουν σε υπό την επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Αυτό θα επιφέρει άσκηση επιπρόσθετου φορτίου αστοχίας κατάρρευσης πάνω στη σωλήνωση και θα προκαλέσει διάτμηση. Ένα φορτίο αστοχίας κατάρρευσης περίπου 1 psi/ft (τάση υπερκειμένων) πρέπει να χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης όπου υπάρχει τέτοιος σχηματισμός.
- **Σωλήνωση που διέρχεται από ζώνες με H₂S:** Εάν στον σχηματισμό από τον οποίο θα διέλθει περιέχεται υδρόθειο ενδέχεται να προκληθεί αστοχία της σωλήνωσης λόγω της ευθραυστότητας που προκαλεί το υδρογόνο (hydrogen embrittlement). Η σωλήνωση κατηγορίας L-80 είναι ειδικά κατασκευασμένη για να χρησιμοποιείται σε ζώνες με παρουσία υδρόθειου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ (CASE STUDY)

4.1. Δεδομένα σχεδιασμού

Η διαδικασία σχεδιασμού που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 θα χρησιμοποιηθεί εδώ για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης μιας κατακόρυφης ερευνητικής γεώτρησης. Τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης περιλαμβάνουν το προφίλ των πιέσεων πόρων και θραύσης συναρτήσει του βάθους τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Το τελικό βάθος

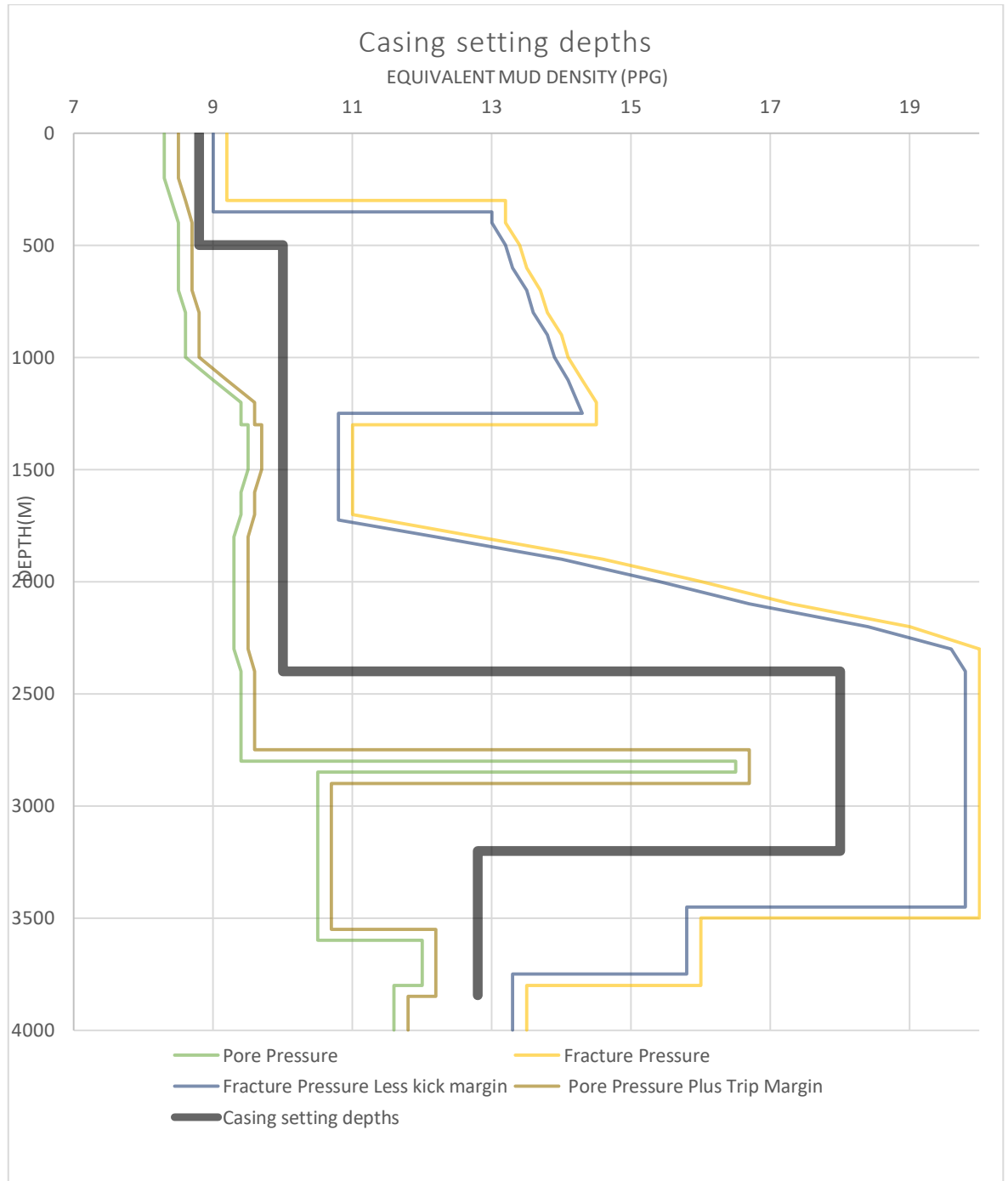
γεώτρησης όπου θα μπει προστατευτική σωλήνωση είναι τα 3845m και θεωρείται ότι η γεώτρηση θα φτάσει μέχρι τα 4000m. Η τελευταία στήλη προστατευτικής σωλήνωσης που χρησιμοποιείται είναι είτε μια παραγωγική σωλήνωση είτε ένα liner παραγωγής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται liner παραγωγής και σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης θα φτάσει μέχρι τα 3845m. Απαιτείται χρήση δύο στηλών επιφανειακής σωλήνωσης, όπου η μία χρησιμοποιείται για να απομονώσει τον επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα που συναντάται στα 200m και η άλλη για να προστατευθούν τα επόμενα βάθη από πιθανές ζώνες απωλειών λάσπης (mud loss zones) που έχουν εντοπιστεί μέχρι το βάθος των 500m. Υποδεικνύεται από τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης ότι για οικονομικούς λόγους θα χρησιμοποιηθεί liner η διάμετρος του οποίου θα είναι, οπωσδήποτε, 7in. Η πίεση λειτουργίας του BOP και επιφανειακού εξοπλισμού για την περίπτωση της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης είναι 3000psi και για την περίπτωση της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης είναι 6000psi. Τα δεδομένα αυτά θα αξιοποιηθούν κατάλληλα προκειμένου να επιλυθεί η μελέτη περίπτωσης.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα δεδομένων πίεσης πόρων και ρωγμάτων συναρτήσει του βάθους

4.2. Προκαταρκτικός σχεδιασμός – Βάθη έδρασης σωλήνωσης & διαστάσεις – Πρόγραμμα ρευστού διάτρησης

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.2 παρουσιάζεται το προφίλ πιέσεων πόρων και ρωγμάτωσης των σχηματισμών από τους οποίους θα διέλθει η κατακόρυφη γεώτρηση. Στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνονται επίσης τα βάθη έδρασης των σωληνώσεων και το προφίλ πυκνότητας της λάσπης διάτρησης σε κάθε βάθος (παχιά μαύρη γραμμή). Δεδομένου ότι η ισοδύναμη βαθμίδα πίεσης είναι σταθερή για μεγάλα διαστήματα κατά μήκος της γεώτρησης (π.χ. στο διάστημα 2400 m έως 3500 m) εφαρμόστηκε μια ελαφριά παραλλαγή της κλασικής μεθοδολογίας που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η παχιά μαύρη γραμμή τοποθετείται στο κέντρο του παραθύρου διάτρησης και όχι όσο πιο κοντά γίνεται στην πίεση ρωγμάτωσης. Αυτό γίνεται για λόγους οικονομικότητας, καθώς και για τεχνικούς λόγους (δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της πυκνότητας της λάσπης που απαιτείται για τα βάθη 2400-3200m). Η κλασική μεθοδολογία δεν παρέχει καμία επιπρόσθετη ασφάλεια και η εφαρμογή της θα απαιτούσε μεγαλύτερο αριθμό απαιτούμενων στηλών σωλήνωσης.

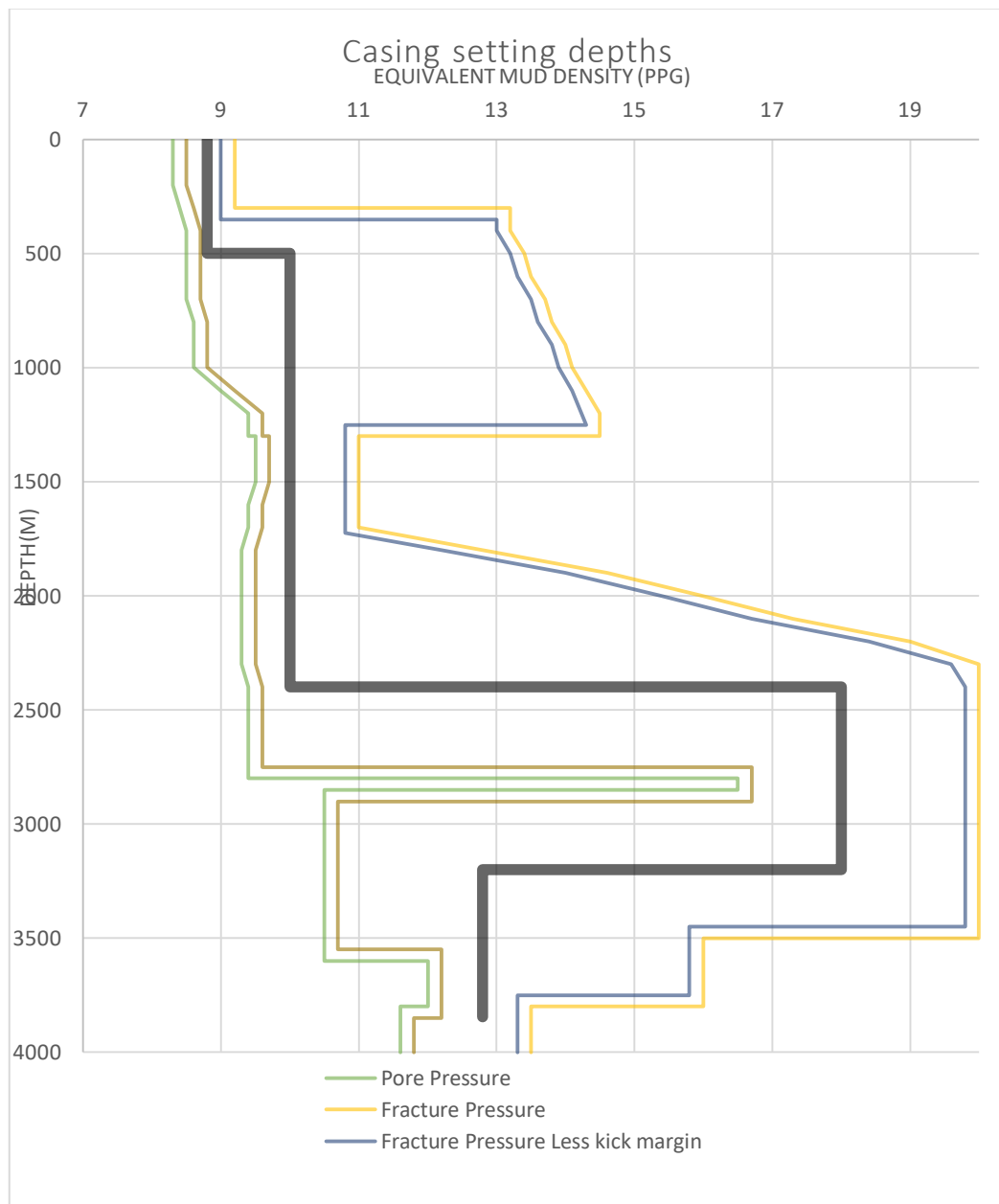


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα βαθών έδρασης σωληνώσεων & προγράμματος ρευστού διάτρησης

Ξεκινώντας από κάτω προς τα πάνω, σύμφωνα με αυτό τον σχεδιασμό, εντός του παραγωγικού σχηματισμού θα τοποθετηθεί liner παραγωγής (production liner) για οικονομικούς λόγους, το οποίο θα αναρτηθεί από τη δεύτερη ενδιάμεση στήλη σωλήνωσης. Συνολικά θα απαιτηθούν δύο στήλες ενδιάμεσης σωλήνωσης. Απαιτούνται επίσης δύο στήλες επιφανειακής σωλήνωσης μετά τη σωλήνωση επαφής (conductor casing). Ο λόγος είναι ότι πρέπει αρχικά να απομονωθεί ο υδροφόρος ορίζοντας που βρίσκεται στα πρώτα

200m και στη συνέχεια να τοποθετηθεί μια δεύτερη στήλη επιφανειακής σωληνώσεως για να προστατευθούν τα επόμενα βάρη από πιθανές ζώνες απώλειας λάσπης (mud loss zones), που έχουν εντοπιστεί μέχρι το βάθος των 500m με βάση τις διαθέσιμες γεωλογικές πληροφορίες.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα βάθη έδρασης των σωληνώσεων. Σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης η διάμετρος του τελευταίου παραγωγικού liner είναι 7in. Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.2 επιλέγονται οι διαστάσεις των κοπτικών άκρων και των σωληνώσεων και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα βαθών έδρασης σωληνώσεων & προγράμματος ρευστού διάτρησης

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεώτρησης και σωλήνωσης (βάθος, διάμετρος) από κάτω προς τα πάνω

| Τύπος σωλήνωσης | Βάθος έδρασης σωλήνωσης | Διάσταση κοπτικού (in) | Διάσταση σωλήνωσης (in) |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Production Liner | 3100-3845 m | 8 ^{1/2} | 7 |
| Intermediate Casing 2 | 0-3200 m | 12 ^{1/4} | 9 ^{5/8} |
| Intermediate Casing 1 | 0-2400 m | 17 ^{1/2} | 13 ^{3/8} |
| Surface Casing 2 | 0-500 m | 26 | 20 |
| Surface Casing 1 | 0-200 m | 36 | 30 |
| Conductor Casing | | | 42 |

Το παραγωγικό liner σχεδιάζεται έτσι ώστε να εμφανίζει το σύνηθες κοινό μήκος (overlap) των 100 m με το κατώτερο τμήμα της δεύτερης προστατευτικής σωλήνωσης για τον μηχανισμό εγκατάστασής του.

Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται το πρόγραμμα των ρευστών διάτρησης (πυκνότητας της λάσπης διάτρησης) που θα χρησιμοποιηθεί για την όρυξη του κάθε τμήματος, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.2.

Πίνακας 4.2: Πυκνότητες λάσπης διάτρησης για το βάθος έδρασης κάθε τύπου σωλήνωσης

| Τύπος σωλήνωσης | Βάθος έδρασης σωλήνωσης | Πυκνότητα λάσπης διάτρησης (ppg) |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Production Liner | 3100-3845 m | 12,8 |
| Intermediate Casing 2 | 0-3200 m | 18 |
| Intermediate Casing 1 | 0-2400 m | 10 |
| Surface Casing 2 | 0-500 m | 8,8 |
| Surface Casing 1 | 0-200 m | 8,8 |
| Conductor Casing | 0-100 m | - |

Τέλος, σημειώνεται ότι το κοίτασμα δεν περιέχει υδρόθειο (H₂S) γεγονός που απλοποιεί την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας σωλήνωσης. Οι τύποι σωληνώσεων που είναι διαθέσιμες να χρησιμοποιηθούν είναι:

- H-40: Σωλήνωση χαμηλής κατηγορίας με ελάχιστο yield strength 40.000 psi. Κατάλληλη μόνο για επιφανειακή σωλήνωση και ελαφριές περιπτώσεις.
- J-55: Σωλήνωση καλής ποιότητας χάλυβα με ελάχιστο yield strength 55.000 psi και συνολική εφελκυστική αντοχή 75.000 psi. Είναι μια αξιόπιστη σωλήνωση για την πετρελαϊκή βιομηχανία και συναντάται πιο συχνά σε γεωτρήσεις πετρελαίου από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία σωλήνωσης. Τα τελευταία χρόνια τείνει να εκτοπιστεί ολοκληρωτικά από την επόμενη κατηγορία.
- K-55: Σωλήνωση αρκετά καλής ποιότητας χάλυβα με ελάχιστο yield strength 55.000 psi, αλλά με συνολική εφελκυστική αντοχή 95.000 psi.
- N-80: Σωλήνωση καλή ποιότητας χάλυβα με ελάχιστο yield strength 80.000 psi. Αποτελεί το στάνταρντ της βιομηχανίας για γεωτρήσεις μέσου βάθους, σχετικά υψηλές πιέσεις και η χρήση της είναι πολύ διαδεδομένη. Πρόκειται για χάλυβα σκληρού κράματος.
- P-105: Σωλήνωση από χάλυβα πολύ υψηλής αντοχής για βαθιές γεωτρήσεις και συνθήκες υψηλών πιέσεων. Αν και είναι μια στάνταρντ κατηγορία του API είναι πιθανό να απαιτήσει ειδική παραγγελία και είναι πολύ ακριβή.

- P-110: Ίδια με την προηγούμενη με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. (Σταματάκη, 2003)

4.3. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης

Δεδομένου ότι η πρώτη επιφανειακή σωλήνωση εκτείνεται σε πολύ μικρό βάθος όπου οι πιέσεις πόρων και θραύσης εμφανίζουν τις αναμενόμενες για την περίπτωση τιμές, δεν αναμένονται ιδιαίτερες δυσκολίες στον σχεδιασμό. Όπως θα γίνει σαφές στις επόμενες παραγράφους, τα υπολογιζόμενα φορτία είναι εξαιρετικά μικρά, όπως άλλωστε αναμενόταν καθιστώντας το σχεδιασμό της συγκεκριμένης σωλήνωσης περισσότερο τυπικό και λιγότερο ουσιαστικό.

4.3.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας κατάρρευσης θεωρείται ως δυσμενέστερο σενάριο η περίπτωση κατά την οποία έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση της πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης και κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (όπου στη συνέχεια θα τοποθετηθεί η δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση) στο τελικό της βάθος συναντάται ζώνη απωλειών.

Έτσι θα πρέπει να υπολογιστεί η πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης (Z_m) μέσα στην πρώτη επιφανειακή σωλήνωση. Το Z_m υπολογίζεται από την σχέση 3.4 και τα δεδομένα του Πίνακα 4.2.

$$Z_m = \frac{(\rho_{max} - g_p)}{\rho_{max}} \times Z_{lc} = \frac{(8,8 \text{ ppg} - 8,7 \text{ ppg})}{8,8 \text{ ppg}} \times 500 \text{ m} = 6 \text{ m}$$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi, όπου η ατμοσφαιρική πίεση έχει αγνοηθεί για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών. Η εξωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης, P_{e-Z_m} , είναι:

$$P_{e-zm} = Z_m \times \rho_{m(0-200m)} = 6 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{e-zm} = 9 \text{ psi}$$

Η εξωτερική πίεση που ασκείται στο βάθος έδρασης της πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης, P_{e-CSD} , είναι:

$$P_{e-CSD} = CSD \times Mud \text{ density}_{(0-200m)} = 200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}}$$

$$\Rightarrow P_{e-CSD} = 300 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Αντίστοιχα, και η εσωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης είναι 0 psi.

Η εσωτερική πίεση που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{i-CSD} , είναι:

$$P_{i-CSD} = Mud \text{ level drop (m)} \times Mud \text{ density}_{(0-500m)} =$$

$$= 194 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} \Rightarrow P_{i-CSD} = 288 \text{ psi}$$

Συνεπώς, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στην επιφάνεια είναι 0 psi. Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στη στάθμη της λάσπης (P_{C-zm}) είναι:

$$P_{C-zm} = P_{e-zm} - P_{i-zm} = 9 \text{ psi} - 0 \Rightarrow P_{C-zm} = 9 \text{ psi}$$

Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{C-CSD} , είναι:

$$P_{C-CSD} = P_{e-CSD} - P_{i-CSD} = 300 \text{ psi} - 288 \text{ psi} \Rightarrow P_{C-CSD} = 12 \text{ psi}.$$

Από τη στιγμή που η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο επίπεδο της λάσπης είναι μικρότερη από αυτήν στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, λαμβάνεται ως μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης αυτό που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης.

Ο συντελεστής ασφαλείας για αστοχία κατάρρευσης είναι $SF_C = 1,1$, οπότε το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (φορτίο σχεδιασμού) είναι:

$$P_{Cmax} = P_{C-CSD} \times SF_C \text{ (psi)} = 12 \text{ psi} \times 1,1 \Rightarrow P_{Cmax} = 13,2 \text{ psi}.$$

Πίνακας 4.3: Δεδομένα αστοχίας κατάρρευσης για την πρώτη επιφανειακή σωλήνωση

| Depth (m) | Pore Pressure plus Trip Margin (ppg) | Mud density (0-500m) (ppg) | P_e (psi) | P_i (psi) | Collapse Pressure (psi) | Collapse Load \times S.F. (psi) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 8,5 | 8,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z_m (6) | 8,5 | 8,8 | 9 | 0 | 9 | 9,9 |
| CSD (200) | 8,5 | 8,8 | 300 | 288 | 12 | 14 |
| 500 | 8,7 | 8,8 | | | | |

4.3.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης

Η εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας λόγω διάρρηξης θεωρεί ως δυσμενέστερο σενάριο την περίπτωση που κατά την έδραση της πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης συμβαίνει απότομη εισροή αερίου (gas kick) κατά την έδραση της σωλήνωσης. Ο σχεδιασμός για διάρρηξη θα πρέπει να διασφαλίζει ότι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης θα πρέπει να υπερκεράσει την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο πέλμα της σωλήνωσης πριν τα φορτία διάρρηξης προκαλέσουν διάρρηξη της σωλήνωσης. Αυτό το σενάριο σχεδιασμού χρησιμοποιεί τη ρωγμάτωση του σχηματισμού ως μηχανισμό αποσυμπίεσης ασφαλείας (safety pressure-release mechanism) που διασφαλίζει ότι η διάρρηξη της σωλήνωσης δε θα συμβεί στην επιφάνεια, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια και την υγεία του προσωπικού.

Σύμφωνα με αυτόν τον σχεδιασμό η πίεση σχεδιασμού (πίεση εισπίεσης, P_{inj}) στο πέλμα της σωλήνωσης θα πρέπει να ισούται με την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού ($P_{fracture}$) συν ένα περιθώριο ασφάλειας. Η πίεση στο εσωτερικό της σωλήνωσης υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλο το ρευστό διάτρησης μέσα στη σωλήνωση έχει απωλεσθεί εντός του ρωγματισμένου σχηματισμού, αφήνοντας στο εσωτερικό της σωλήνωσης μόνο το αέριο που εισέρρευσε από τον σχηματισμό. Η πίεση στο εξωτερικό της σωλήνωσης (backup pressure) που δρα ενάντια στη διάρρηξη θεωρείται ίση με την βαθμίδα πίεσης των πόρων του σχηματισμού. Η ευεργετική δράση της τσιμέντωσης ή ενός υψηλής πυκνότητας ρευστού διάτρησης στο εξωτερικό της σωλήνωσης δεν λαμβάνεται υπόψη, λόγω της πιθανότητας

κακής ποιότητας τσιμέντωσης ή της υποβάθμισης της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης με την πάροδο του χρόνου.

Η βαθμίδα ρωγμάτωσης ($\rho_{fracture}$) από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 200 m είναι ίση με 9,2 ppg. Αντίστοιχα, η ισοδύναμη πυκνότητα βαθμίδα λάσπης διάτρησης (Equivalent Mud Density-EMD) που θα διασφαλίζει ότι η πίεση σχεδιασμού (πίεση εισπίεσης, P_{inj}) στο πέλμα της σωλήνωσης θα είναι ίση με την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού θα πρέπει να είναι:

$$EMD = \rho_{fracture} + 0,3 \text{ ppg} \Rightarrow EMD = 9,5 \text{ ppg}$$

Η τιμή 0,3 ppg είναι το περιθώριο που προστίθεται προκειμένου να πραγματοποιηθεί με βεβαιότητα η ρωγμάτωση του σχηματισμού. Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης για την όρυξη αυτού του τμήματος της γεώτρησης είναι ίση με 8,8 ppg. Η βαθμίδα πίεσης του αερίου (ρ_{gas}) που θα εισέλθει από τον σχηματισμό στη γεώτρηση σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης είναι 0,08 $\frac{psi}{ft}$ που είναι ίση με $\frac{0,08 \frac{psi}{ft}}{0,3048 \frac{m}{ft}} = 0,26 \frac{psi}{m}$. Η βαθμίδα πίεσης των πόρων του σχηματισμού αυξημένη με ένα περιθώριο ασφαλείας (pore pressure plus trip margin) είναι ίση με 8,5 ppg.

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση (P_e) είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού. Οπότε η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi, ενώ στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, (P_{e-CSD}) είναι:

$$P_{e-CSD} = 8,5 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{psi}{ft}}{\text{ppg}} \times 200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \Rightarrow P_{e-CSD} = 290 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση ($P_{i-surface}$) στην επιφάνεια είναι:

$$P_{i-surface} = P_{inj} - P_{gas-surface}$$

Η πίεση σχεδιασμού (P_{inj}) στο πέλμα της σωλήνωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{inj} = EMD \times CSD = 9,5 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{psi}{ft}}{\text{ppg}} \times 200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \Rightarrow P_{inj} = 324 \text{ psi}$$

Η πίεση που ασκεί η απότομη εισροή αερίου στην επιφάνεια ($P_{gas-surface}$) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{gas-surface} = \rho_g \times CSD = 0,26 \frac{psi}{m} \times 200 m \Rightarrow P_{gas-surface} = 52 psi$$

Αντίστοιχα, στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης η πίεση του εισρεόμενου αερίου είναι 0 psi.

Πίνακας 4.4: Δεδομένα αστοχίας διάρρηξης για την πρώτη επιφανειακή σωλήνωση

| Depth(m) | EMD (ppg) | Mud density (ppg) | P_{inj} (psi) | Gas Gradient (psi/m) | P_{gas} (psi) | Pore Pressure Plus Trip Margin (ppg) |
|-----------|-----------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|
| 0 | 9,5 | 8,8 | 324 | 0,26 | 52 | 8,5 |
| CSD (200) | 9,5 | 8,8 | 324 | 0,26 | 0 | 8,5 |

Η διαφορική πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη της σωλήνωσης στην επιφάνεια ($P_{B-surface}$) μετά την απότομη εισροή αερίου (gas kick) είναι:

$$P_{B-surface} = P_{i-surface} - P_{e-surface} = (P_{inj} - P_{gas-surface}) - 0 = 324 psi - 52 psi = 272 psi$$

Αντίστοιχα, η πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (P_{B-CSD}) είναι:

$$P_{B-CSD} = P_{i-CSD} - P_{e-CSD} = (P_{inj} - P_{gas-CSD}) - 290 psi = (324 psi - 0 psi) - 290 psi = 34 psi$$

Οι τιμές αυτές της πίεσης διάρρηξης που προκύπτουν διορθώνονται με τον συντελεστή ασφαλείας σε διάρρηξη $SF_B = 1.1$ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Τιμές φορτίων για αστοχία σε διάρρηξη

| Depth (m) | P_i (psi) | P_e (psi) | Burst Pressure (psi) | $SF_B \times$ Burst Pressure (psi) |
|-----------|-------------|-------------|----------------------|------------------------------------|
| 0 | 272 | 0 | 272 | 299 |
| 200 | 324 | 290 | 34 | 38 |

4.3.3. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας της σωλήνωσης υπό εφελκυσμό είναι απαραίτητο να υπολογιστεί το βάρος της σωλήνωσης ανά μονάδα μήκους μαζί με τους συνδέσμους και τα σπειρώματα. Στην περίπτωση της πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης δεν υπάρχει έγκυρη βιβλιογραφία που να αναφέρει το ονομαστικό βάρος για σωλήνωση με εξωτερική διάμετρο 30 in, επειδή δεν είναι γνωστή η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης και γίνεται κατόπιν παραγγελίας, ανάλογα με τις συνθήκες σε κάθε περίπτωση.

Για την εύρεση της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης πρέπει να προσδιοριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος της σωλήνωσης σύμφωνα με τα φορτία που δέχεται. Η ιδιότητα που είναι κοινή για κάθε μεμονωμένο τύπο σωλήνωσης ανεξαρτήτως της διαμέτρου του και του πάχους είναι η πυκνότητα.

Ο τύπος που συνδέει το ονομαστικό βάρος με την πυκνότητα και τη διάμετρο μιας σωλήνωσης είναι:

$$W = \rho \times A \quad (4.1.)$$

Όπου:

W = Ονομαστικό βάρος (lbm/ft)

ρ = Πυκνότητα τύπου σωλήνωσης (lbm/in³)

A = Εμβαδόν επιφάνειας σωλήνωσης (in²)

Μέχρι τώρα στους υπολογισμούς δεν έχουν συμπεριληφθεί τα κριτήρια αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης. Για τον λόγο αυτό κρίνεται καταλληλότερη η επιλογή εσωτερικής διαμέτρου σύμφωνα με το πάχος που έχει η σωλήνωση τύπου H-40 διαμέτρου 20 in. Τα χαρακτηριστικά αναγράφονται στο Σχήμα 4.3.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | **Internal Pressure Resistance, psi | | | |
|------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------|------------------|----------------------------|------------|--------------|------------|-------------------------------------|------|------------|--------------|
| | | | | | | | | | | | Buttress Thread | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | Regular Coupling | | | | Special Clearance Coupling | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Short | Long | Same Grade | Higher Grade |
| Outside Diameter (in.) | Nominal Weight and Coupling (lbm/ft) | Threads and Grade | Wall Thickness (in.) | Inside Diameter (in.) | Drift Diameter (in.) | Outside Diameter of Coupling (in.) | Outside Diameter of Special Coupling (in.) | Drift Diameter of Box (in.) | Outside Diameter of Powertight (in.) | Collapse Resistance (psi) | Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf) | Plain End or Extreme Line | Round Thread | Regular Coupling | Special Clearance Coupling | Same Grade | Higher Grade | Same Grade | Higher Grade | | | |
| 20 | 94.00 | H-40 | 0.438 | 19.124 | 18.936 | 21.000 | — | — | — | 520 | 1.077 | 1.530 | 1.530 | 1,530 | — | — | — | — | — | | | |
| | 94.00 | J-55 | 0.438 | 19.124 | 18.936 | 21.000 | — | — | — | 520 | 1.480 | 2.110 | 2.110 | 2.110 | 2.110 | 2.110 | 2.110 | — | — | | | |

Σχήμα 4.1: Απόσπασμα από Παράρτημα ΠΙ (Σταματάκη, 2003)

Σύμφωνα με τους Πίνακες 4.4 και Πίνακα 4.5 τα φορτία αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης είναι πολύ μικρότερα από τις αντοχές σε αστοχία κατάρρευσης και διάρρηξη της σωλήνωσης των 20 in, όπως επισημαίνεται στο Σχήμα 4.2. Για τον λόγο αυτό κρίνεται ότι η σωλήνωση H-40 των 24 in θα πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον ίσο με αυτό της σωλήνωσης H-40 των 20 in ($20 - 19,124 = 0,876 \text{ in}$). Με τα δεδομένα αυτά και χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.1 προκύπτει ότι το ονομαστικό βάρος της σωλήνωσης είναι:

$$W = \rho \times A = 0,29 \times \frac{\pi}{4} \times (30^2 - 29,124^2) = 9,40 \text{ lb/in} = 141,54 \text{ lb/ft}$$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης καταγράφονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρώτης επιφανειακής σωλήνωσης

| Grade | O.D.(in) | I.D. (in) | Nominal Weight (lb/ft) | Nominal Weight (lb/m) |
|-------|----------|-----------|------------------------|-----------------------|
| H-40 | 24 | 23.124 | 141.54 | 464.38 |

Το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο για την πρώτη επιφανειακή σωλήνωση θεωρείται ότι είναι το βάρος στον αέρα ολόκληρης της στήλης σωλήνωσης (αγνοείται η άνωση από το ρευστό διάτρησης) και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{tension} = 464,38 \frac{\text{lb}}{\text{m}} \times 200 \text{ m} = 92.876 \text{ lb}$$

Το κριτήριο για την εύρεση του καταλληλότερου συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται από την τιμή του σχεδιαστικού συντελεστή ασφαλείας και της δύναμης ανέλκυσης. Κάθε φορά επιλέγεται αυτός που δίνει τη μέγιστη τιμή εφελκυστικού φορτίου σχεδιασμού.

Στην περίπτωση μας, ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό είναι $SF_T = 1,3$. Συνεπώς το εφελκυστικό φορτίο σχεδιασμού με βάση τον συντελεστή ασφαλείας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Tdesign-SF} = 1,3 \times F_{tension} \Rightarrow F_{Tdesign} = 1,3 \times 92.876 = 120.739 \text{ lb}$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.3. το όριο ελαστικότητας της σωλήνωσης H-40 (pipe body yield strength) με εξωτερική διάμετρο 20 in είναι ίσο με $1077 \times 1000 = 1077000 \text{ lbf}$. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη της εφελκυστικής πίεσης σχεδιασμού που ασκείται στην

σωλήνωση. Συνεπώς ο τύπος σωλήνωσης H-40 με εξωτερική διάμετρο 30 in και εσωτερική διάμετρο 29,124 in είναι συμβατός με τα κριτήρια σχεδιασμού.

4.4. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης

4.4.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας κατάρρευσης θεωρείται ως δυσμενέστερο σενάριο η περίπτωση που κατά την οποία έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση της δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης και κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (όπου στη συνέχεια θα τοποθετηθεί η πρώτη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση) στο τελικό βάθος, συναντάται ζώνη απωλειών.

Έτσι θα πρέπει να υπολογιστεί η πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης (Z_m) μέσα στη δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση. Το Z_m υπολογίζεται από την σχέση 3.15 και τα δεδομένα του Πίνακα 4.2:

$$Z_m = \frac{(\rho_{max} - g_p)}{\rho_{max}} \times Z_{lc} = \frac{(10 \text{ ppg} - 9,6 \text{ ppg})}{10 \text{ ppg}} \times 2400 \text{ m} = 96 \text{ m}$$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Η εξωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης, P_{e-Z_m} , είναι:

$$P_{e-Z_m} = Z_m \times Mud \text{ density}_{(0-500m)} = 96 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{psi}{ft} =$$

$$> P_{e-Z_m} = 144 \text{ psi}$$

Η εξωτερική πίεση στο βάθος έδρασης της δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης (P_{e-CSD}) είναι:

$$P_{e-CSD} = CSD \times Mud \text{ density}_{(0-500m)} = 500 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{psi}{ft} =$$

$$= 751 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Αντίστοιχα, και η εσωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης είναι 0 psi.

Η εσωτερική πίεση που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{i-CSD} , είναι:

$$P_{i-CSD} = \text{Mud level drop (m)} \times \text{Mud density}_{(0-2400m)} =$$

$$= 404 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 10 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \Rightarrow P_{i-CSD} = 689 \text{ psi}$$

Συνεπώς, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στην επιφάνεια είναι 0 psi. Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στη στάθμη της λάσπης (P_{C-Zm}) είναι:

$$P_{C-Zm} = P_{e-Zm} - P_{i-Zm} = 144 \text{ psi} - 0 \Rightarrow P_{C-Zm} = 144 \text{ psi}$$

Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{C-CSD} , είναι:

$$P_{C-CSD} = P_{e-CSD} - P_{i-CSD} = 751 \text{ psi} - 689 \text{ psi} \Rightarrow P_{C-CSD} = 61 \text{ psi}$$

Από τη στιγμή που η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο επίπεδο της λάσπης είναι μεγαλύτερη από αυτήν στο βάθος έδρασης της δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης, λαμβάνεται ως μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης αυτό που ασκείται στο επίπεδο της λάσπης.

Ο συντελεστής ασφαλείας για αστοχία κατάρρευσης είναι $SF_C = 1,1$, οπότε το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (φορτίο σχεδιασμού) είναι:

$$P_{Cmax} = P_{C-Zm} \times SF_C (\text{psi}) = 144 \text{ psi} \times 1,1 \Rightarrow P_{Cmax} = 159 \text{ psi}.$$

Πίνακας 4.7: Δεδομένα αστοχίας κατάρρευσης για τη δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση

| Depth (m) | Pore Pressure plus Trip Margin (ppg) | Mud density(0-2400m) (ppg) | P_e (psi) | P_i (psi) | Collapse Pressure (psi) | Collapse Load \times S.F. (psi) |
|------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 8,5 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z_m (96) | 8,5 | 10 | 144 | 0 | 144 | 159 |
| CSD (500) | 8,5 | 10 | 751 | 689 | 61 | 67,1 |
| 2400 | 9,6 | 10 | | | | |

4.4.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης

Η εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας λόγω διάρρηξης θεωρεί ως δυσμενέστερο σενάριο την περίπτωση που κατά την έδραση της δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης

συμβαίνει απότομη εισροή αερίου (gas kick), σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν για την πρώτη επιφανειακή σωλήνωση.

Η βαθμίδα ρωγμάτωσης ($\rho_{fracture}$) από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 200m είναι ίση με 9,2 ppg, ενώ στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (500m) είναι ίση με 13,4 ppg. Αντίστοιχα, η ισοδύναμη πυκνότητας λάσπης (EMD) για τον υπολογισμό της πίεσης σχεδιασμού ($P_{injection}$) είναι ίση με τη βαθμίδα ρωγμάτωσης στο βάθος που εξετάζεται αυξημένη κατά 0,3, δηλαδή:

$$EMD_{CSD} = \rho_{fracture-CSD} + 0,3 \text{ ppg} = 13,4 \text{ ppg} + 0,3 \text{ ppg} = 13,7 \text{ ppg}$$

Η πυκνότητα της λάσπης για την όρυξη αυτού του τμήματος της γεώτρησης είναι 8,8 ppg. Η βαθμίδα πίεσης του αερίου που θα εισέλθει από τον σχηματισμό στη γεώτρηση είναι ίση με 0,26 psi/m. Η βαθμίδα πίεσης πόρων του σχηματισμού αυξημένη με ένα περιθώριο ασφαλείας (pore pressure plus trip margin) είναι ίση με 8,5 ppg από την επιφάνεια ως τα 200 m βάθος και 8,7 ppg από τα 200 m ως τα 500 m, αντίστοιχα.

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση (P_e) είναι ίση με την πίεση πόρων του σχηματισμού. Οπότε η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi, ενώ στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης είναι:

$$P_{e-CSD} = 8,7 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 500 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_{e-CSD} = 742 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση στην επιφάνεια ($P_{i-surface}$) είναι:

$$P_{i-surface} = P_{inj} - P_{gas-surface}$$

Η πίεση σχεδιασμού (P_{inj}) στο πέλμα της σωλήνωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{inj} = 13,7 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 500 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_{inj} = 1169 \text{ psi}$$

Η πίεση που ασκεί η απότομη εισροή αερίου στην επιφάνεια ($P_{gas-surface}$) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{gas-surface} = 0,26 \frac{\text{psi}}{\text{m}} \times 500 \text{ m} \Rightarrow P_{gas-surface} = 131 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης η πίεση του εισρεόμενου αερίου είναι 0 psi.

Πίνακας 4.8: Δεδομένα αστοχίας διάρρηξης για τη δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση

| Depth(m) | ρ_{inj} (EMD) (ppg) | Mud density (ppg) | P_{inj} (psi) | Gas Gradient (psi/m) | P_{gas} (psi) | Pore Pressure Plus Trip Margin (ppg) |
|-----------|--------------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|--|
| 0 | 9,5 | 8,8 | 1169 | 0,26 | 131 | 8,5 |
| CSD (500) | 13,7 | 8,8 | 1169 | 0,26 | 0 | 8,7 |

Η διαφορική πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη της σωλήνωσης στην επιφάνεια ($P_{B-surface}$) μετά την απότομη εισροή αερίου (gas kick) είναι:

$$P_{B-surface} = P_{i-surface} - P_{e-surface} = (P_{inj} - P_{gas-surface}) - 0 =$$

$$= 1169 \text{ psi} - 131 \text{ psi} = 1037 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (P_{B-CSD}) είναι:

$$P_{B-CSD} = P_{i-CSD} - P_{e-CSD} = (P_{inj} - P_{gas-CSD}) - 742 \text{ psi} =$$

$$= (1169 \text{ psi} - 0 \text{ psi}) - 742 \text{ psi} = 427 \text{ psi}$$

Οι τιμές αυτές της πίεσης διάρρηξης που προκύπτουν διορθώνονται με τον συντελεστή ασφαλείας σε διάρρηξη $SF_B = 1.1$ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Τιμές φορτίων για αστοχία σε διάρρηξη

| Depth (m) | P_i (psi) | P_e (psi) | Burst Pressure (psi) | $SF_B \times$ Burst Pressure (psi) |
|-----------|-------------|-------------|----------------------|---------------------------------------|
| 0 | 1037 | 0 | 1037 | 1141 |
| 500 | 1169 | 742 | 427 | 469 |

4.4.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης

Γνωρίζοντας τις κατάλληλες πιέσεις σχεδιασμού, όσον αφορά τη αστοχία κατάρρευσης και τη διάρρηξη, από τους Πίνακες 4.7 και 4.9, αντίστοιχα, η καταλληλότερη κατηγορία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης που επιλέγεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

| 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|---|----------------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|-------|----------------------------------|-------|---|---|
| Nominal Size Outside Diameter (in.) | Weight Threads and Coupling (lbm/ft) | Grade | Threaded and Coupled | | | Extreme Line | | | **Internal Pressure Resistance, psi | | | | | | | | | |
| | | | Wall Thickness (in.) | Inside Diameter (in.) | Drift Diameter (in.) | Outside Diameter of Coupling (in.) | Special Clearance Coupling (in.) | Drift Diameter (in.) | Outside Diameter of Box Powertight (in.) | Collapse Resistance (psi) | Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf) | Buttress Thread | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | Plain End or Extreme Line | Round Thread | | Special Clearance Coupling | | | |
| | | | Short | Long | Same Grade | Higher Grade | Same Grade | Higher Grade | | | | | | | | | | |
| 20 | 94.00 | H-40 | 0.438 | 19.124 | 18.936 | 21.000 | — | — | — | ‡520 | 1,077 | 1,530 | 1,530 | 1,530 | — | — | — | — |
| | 94.00 | J-55 | 0.438 | 19.124 | 18.936 | 21.000 | — | — | — | ‡520 | 1,480 | 2,110 | 2,110 | 2,110 | 2,110 | 2,110 | — | — |
| | 106.50 | J-55 | 0.500 | 19.000 | 18.812 | 21.000 | — | — | — | ‡770 | 1,685 | 2,410 | 2,400 | 2,400 | 2,320 | 2,320 | — | — |
| | 133.00 | J-55 | 0.635 | 18.730 | 18.542 | 21.000 | — | — | — | 1,500 | 2,125 | 3,060 | 2,400 | 2,400 | 2,320 | 2,320 | — | — |

Σχήμα 4.2: Απόσπασμα από Παράρτημα ΠΙ (Σταματάκη, 2003)

4.4.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό

Το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο για τη δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση θεωρείται ότι είναι το βάρος στον αέρα ολόκληρης της στήλης σωλήνωσης (αγνοείται η άνωση από το ρευστό διάτρησης) και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{tension} = 94 \frac{lb}{ft} \times \frac{1}{0,3048 \text{ m/ft}} \times 500 \text{ m} = 154200 \text{ lb}$$

Ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό είναι $SF_T = 1,3$. Συνεπώς το εφελκυστικό φορτίο σχεδιασμού με βάση τον συντελεστή ασφάλειας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Tdesign-SF} = 1,3 \times F_{tension} \Rightarrow F_{Tdesign} = 1,3 \times 154200 \text{ lb} = 200460 \text{ lb}$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.4. το όριο ελαστικότητας της σωλήνωσης H-40 (pipe body yield strength) με εξωτερική διάμετρο 20 in είναι ίσο με $1077 \times 1000 = 1077000 \text{ lbf}$. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη της εφελκυστικής πίεσης σχεδιασμού που ασκείται στην σωλήνωση. Συνεπώς ο συγκεκριμένος τύπος σωλήνωσης είναι συμβατός με τα κριτήρια εφελκυστικού σχεδιασμού.

4.5. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης

4.5.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας κατάρρευσης, όπως και στην περίπτωση των επιφανειακών σωληνώσεων, θεωρείται ως δυσμενέστερο σενάριο η περίπτωση κατά την οποία έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση της πρώτης ενδιάμεσης προστατευτικής σωλήνωσης και κατά τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (όπου στη συνέχεια θα τοποθετηθεί η δεύτερη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση) στο τελικό του βάθος, συναντάται ζώνη απωλειών.

Έτσι θα πρέπει να υπολογιστεί η πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης (Z_m) μέσα στην πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση. Το Z_m υπολογίζεται από την σχέση 3.17 και τα δεδομένα του Πίνακα 4.2:

$$Z_m = \frac{(\rho_{max} - g_p)}{\rho_{max}} \times Z_{lc} = \frac{(18 \text{ ppg} - 10,7 \text{ ppg})}{18 \text{ ppg}} \times 3200 \text{ m} = 1298 \text{ m}$$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Η εξωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης, P_{e-Z_m} , είναι:

$$P_{e-Z_m} = Z_m \times Mud \text{ density}_{(0-2400m)} = 1298 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 10 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{psi}{ft} =$$

>

$$P_{e-Z_m} = 2214 \text{ psi}$$

Η εξωτερική πίεση στο βάθος έδρασης της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης (P_{e-CSD}) είναι:

$$P_{e-CSD} = CSD \times Mud \text{ density}_{(0-2400m)} = 2400 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 10 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{psi}{ft} =$$

$$\Rightarrow P_{e-CSD} = 4094 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Αντίστοιχα, και η εσωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης είναι 0 psi.

Η εσωτερική πίεση που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{i-CSD} , είναι:

$$P_{i-CSD} = \text{Mud level drop (m)} \times \text{Mud density}_{(0-3200\text{m})} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{i-CSD} = 1102 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 18 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\frac{\text{psi}}{\text{ft}}}{\text{ppg}} = 3385 \text{ psi}$$

Συνεπώς, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στην επιφάνεια είναι 0 psi Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στη στάθμη της λάσπης (P_{C-Zm}) είναι:

$$P_{C-Zm} = P_{e-Zm} - P_{i-Zm} = 2214 \text{ psi} - 0 \Rightarrow P_{C-Zm} = 2214 \text{ psi}$$

Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{C-CSD} , είναι:

$$P_{C-CSD} = P_{e-CSD} - P_{i-CSD} = 4094 \text{ psi} - 3385 \text{ psi} \Rightarrow P_{C-CSD} = 710 \text{ psi}$$

Από τη στιγμή που η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο επίπεδο της λάσπης είναι μεγαλύτερη από αυτήν στο βάθος έδρασης της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης, λαμβάνεται ως μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης αυτό που ασκείται στο επίπεδο της λάσπης.

Ο συντελεστής ασφαλείας για αστοχία κατάρρευσης είναι $SF_C = 1,1$, οπότε το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (φορτίο σχεδιασμού) είναι:

$$P_{Cmax} = P_{C-Zm} \times SF_C (\text{psi}) = 2214 \text{ psi} \times 1,1 = 2435 \text{ psi}$$

Πίνακας 4.10: Δεδομένα αστοχίας κατάρρευσης για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

| Depth (m) | Pore Pressure plus Trip Margin (ppg) | Mud density (0-2400m) (ppg) | P_e (psi) | P_i (psi) | Collapse Pressure (psi) | Collapse Load \times S.F. (psi) |
|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 8,5 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z_m (1298) | 9,6 | 10 | 2214 | 0 | 2214 | 2435 |
| CSD (2400) | 9,6 | 10 | 4094 | 3385 | 710 | 781 |
| 3200 | 10,7 | 18 | | | | |

4.5.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης

Για τον σχεδιασμό σε διάρρηξη της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης το δυσμενέστερο σενάριο αφορά σε ανεξέλεγκτη εισροή ρευστών από τον σχηματισμό που δύναται να προκαλέσουν ένα underground blowout κατά τη διάρκεια κυκλοφορίας μιας προηγούμενης εισροής αερίου (design gas kick) μέσα στη σωλήνωση.

Το φορτίο διάρρηξης που δύναται να ασκηθεί στην επιφάνεια, κατά τη διάρκεια κυκλοφορίας της εισροής για την εξαγωγή της από τη γεώτρηση (circulating out the design kick) υπαγορεύει (και υπογορεύεται από) τη δυναμικότητα του επιφανειακού εξοπλισμού. Στην περίπτωση μας το μέγιστο φορτίο για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση που δύναται να διαχειριστεί το BOP (blowout preventer) και η διάταξη των βαλβίδων στην επιφάνεια είναι $P_{Bmax} = 3000 \text{ psi}$.

Στην περίπτωση της ενδιάμεσης σωλήνωσης, ωστόσο, η αποδεκτή απώλεια λάσπης από τη σωλήνωση εντός του ρωγματισμένου σχηματισμού στο πέλμα αυτής, δεν είναι ολική και περιορίζεται στη μέγιστη ποσότητα που απαιτείται ώστε στην επιφάνεια να μην ξεπεραστεί η τιμή της P_{Bmax} . Έτσι, σύμφωνα με αυτό το σενάριο θεωρείται ότι το ανώτερο τμήμα της σωλήνωσης περιέχει λάσπη διάτρησης και το κατώτερο τμήμα της έχει πληρωθεί με αέριο. Το βάθος που βρίσκεται η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και λάσπης διάτρησης (D_m) καθορίζεται από τη σχέση:

$$P_{inj} = P_{Bmax} + \rho_m \times D_m + \rho_g \times (D_{lc} - D_m) \quad (4.4)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

D_{lc} = Το βάθος της ζώνης απωλειών

P_{inj} = Η πίεση σχεδιασμού στη ζώνη απωλειών

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης για την όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (όπου θα τοποθετηθεί) η επόμενη σωλήνωση

ρ_g = Η πυκνότητα του αερίου που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση

D_m = Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και λάσπης διάτρησης

Λύνοντας ως προς D_m η σχέση 4.4 μετασχηματίζεται σε:

$$D_m = \left(\frac{P_{inj} - P_{Bmax}}{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times D_{lc} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}}}{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times (\rho_m - \rho_g)} \right) \times 0,3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}} \quad (4.5)$$

Το βάθος της ζώνης απωλειών είναι αυτό όπου παρουσιάζεται η μικρότερη τιμή της βαθμίδας ρωγμάτωσης για το τμήμα που σωληνώνεται. Επομένως, από το διάγραμμα του Σχήματος 4.1 διαπιστώνεται ότι: $D_{lc} = 1300 \text{ m}$.

Η ισοδύναμη πυκνότητας λάσπης στη ζώνη απωλειών (EMD_{Dlc}) είναι ίση με τη βαθμίδα ρωγμάτωσης εκεί αυξημένη κατά 0,3 ppg. Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.1 εντοπίζεται ότι η βαθμίδα ρωγμάτωσης στη ζώνη απωλειών είναι 11 ppg, οπότε η EMD_{Dlc} είναι:

$$EMD_{Dlc} = 11 \text{ ppg} + 0.3 \text{ ppg} = 11,3 \text{ ppg}$$

Για την παραπάνω τιμή EMD η πίεση σχεδιασμού στο βάθος έδρασης της πρώτης ενδιάμεσης σωλήνωσης είναι:

$$P_{inj} = CSD \times EMD_{Dlc} = 2400 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 11,3 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \Rightarrow$$

$$P_{inj} = 4626,77 \text{ psi}$$

Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης του επόμενου τμήματος της γεώτρησης είναι ίση με $\rho_m = 18 \text{ ppg}$, ενώ η πυκνότητα του αερίου είναι $\rho_g = 1,54 \text{ ppg}$. Έτσι από την 4.5 προκύπτει:

$$D_m = \left(\frac{P_{inj} - P_{Bmax}}{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times D_{lc} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}}}{0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times (\rho_m - \rho_g)} \right) \times 0,3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}}$$

$$\Rightarrow$$

$$D_m = 458 \text{ m}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση οφείλεται στη στήλη της λάσπης διάτρησης (για την όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης) που έχει ύψος μέχρι το βάθος $D_m = 458 \text{ m}$. Μέχρι το βάθος αυτό η εσωτερική πίεση περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_{i-surface\ to\ D_m} = P_{Bmax} + \rho_m \times D \quad (4.6)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης

D= Η τιμή του βάθους από την επιφάνεια μέχρι $D_m = 458$ m

Στη συνέχεια, μέχρι το βάθος έδρασης της πρώτης προστατευτικής σωλήνωσης η εσωτερική πίεση περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_{i-D_m\ to\ CSD} = P_{Bmax} + \rho_m \times D_m + \rho_g \times (D - D_m)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης για τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης

D_m = Το βάθος της διεπιφάνειας μεταξύ αερίου και λάσπης διάτρησης

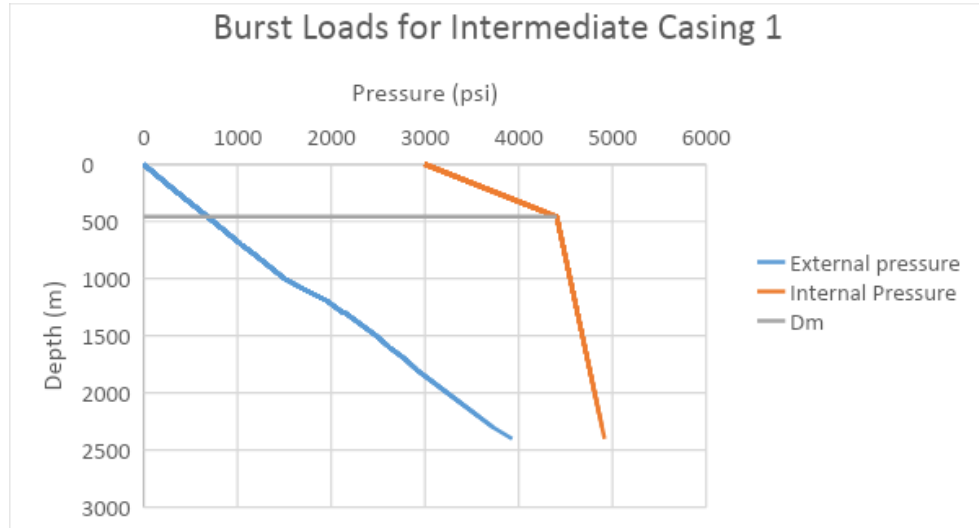
ρ_g = Η πυκνότητα του αερίου που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση

D= Η τιμή του βάθους από $D_m=458$ m μέχρι το βάθος έδρασης της σωλήνωσης ($D_{CSD}=2400$ m)

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση λαμβάνεται ίση με την πίεση των πόρων.

Στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προφίλ εξέλιξης της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης για τον υπολογισμό της πίεσης διάρρηξης για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωσης.



Σχήμα 4.3: Εσωτερικά και εξωτερικά φορτία για τον υπολογισμό της πίεσης διάρρηξης για την πρώτη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση

Το φορτίο διάρρηξης (burst load) (P_B) είναι:

$$P_B = P_i - P_e$$

Στο Παράρτημα Π2 παρουσιάζονται το σύνολο των αριθμητικών πράξεων που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του μέγιστου φορτίου διάρρηξης, το οποίο προσδιορίζεται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή ασφάλειας σε διάρρηξη $SF_B=1,1$, το φορτίο διάρρηξης σχεδιασμού στην επιφάνεια και στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης είναι:

$$P_{B-surface} = 4099 \text{ psi}$$

$$P_{B-CSD} = 3300 \text{ psi}$$

4.5.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης

Τα φορτία διάρρηξης (burst loads) και αστοχίας κατάρρευσης (collapse loads) που υπολογίστηκαν είναι τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας σωλήνωσης και παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11: Μέγιστα φορτία αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης για τη διαστασιολόγηση της πρώτης ενδιάμεσης σωλήνωσης

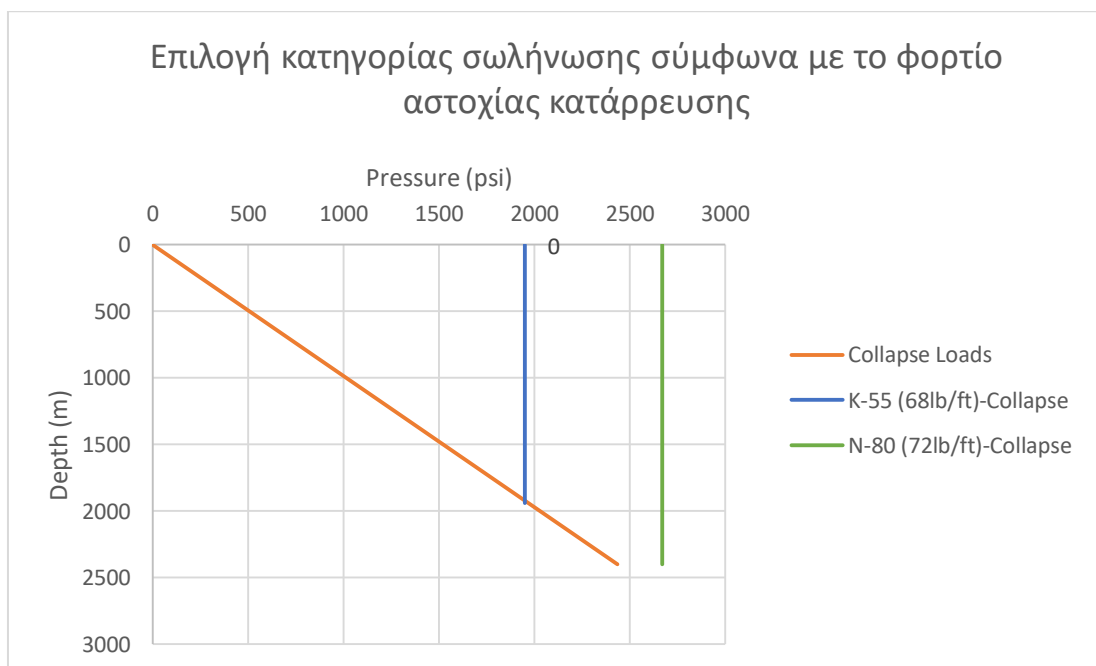
| Depth (m) | Collapse Loads (psi) | Burst Loads (psi) |
|-----------|----------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 3300 |
| 2400 | 2435 | 4099 |

Οι κατηγορίες σωλήνωσης που καλύπτουν τόσο τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης, όσο και διάρρηξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Μηχανικά χαρακτηριστικά κατηγοριών σωλήνωσης που πληρούν τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης για την πρώτη ενδιάμεση σωλήνωση (Παράρτημα Π1)

| Casing Grades | Collapse Resistance (psi) | Burst Resistance (psi) |
|-----------------|---------------------------|------------------------|
| K-55 (68 lb/ft) | 1950 | 3450 |
| N-80 (72 lb/ft) | 2670 | 5380 |

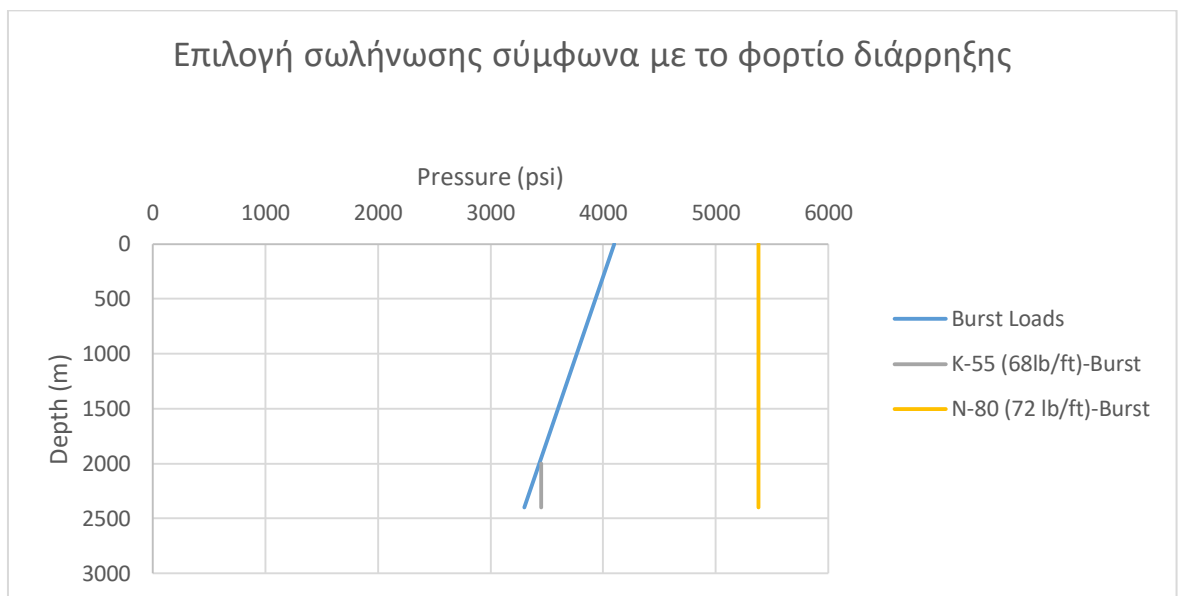
Η επιλογή του μήκους και του αντίστοιχου βάθους που θα τοποθετηθεί η κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες σωλήνωσης γίνεται με γραφικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η καμπύλη εξέλιξης των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης ως προς το βάθος και με κατακόρυφες γραμμές η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης για κάθε κατηγορία σωλήνωσης.



Σχήμα 4.4: Γραφική επίλυση πρώτης ενδιάμεσης σωλήνωσης για αστοχία κατάρρευσης

Το σημείο τομής της γραμμής K-55 (68 lb/ft) με την καμπύλη εξέλιξης με το βάθος των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης (collapse loads) ορίζει το μέγιστο βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος σωλήνωσης K-55 (68 lb/ft). Το βάθος αυτό είναι τα 1940 m. Αντίστοιχα, η κατηγορία σωλήνωσης N-80 (72 lb/ft) παρουσιάζει αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης πολύ μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού για τη σωλήνωση που εξετάζεται, οπότε το βάθος στο οποίο μπορεί να φτάσει με ασφάλεια ξεπερνάει τα 2400 m (βάθος έδρασης πρώτης ενδιάμεσης σωλήνωσης).

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον σχεδιασμό σε διάρρηξη, σύμφωνα με το Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.5: Γραφική επίλυση πρώτης ενδιάμεσης σωλήνωσης για διάρρηξη

Το σημείο τομής της γραμμής K-55 (68 lb/ft) με την καμπύλη εξέλιξης με το βάθος των φορτίων διάρρηξης (burst loads) ορίζει το βάθος κάτω από το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος σωλήνωσης K-55 (68 lb/ft). Το βάθος αυτό είναι τα 2000 m. Αντίστοιχα, η κατηγορία σωλήνωσης N-80 (72 lb/ft) παρουσιάζει αντοχή σε διάρρηξη πολύ μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού για τη σωλήνωση που εξετάζεται, οπότε μπορεί να φτάσει σε όλο το μήκος αυτής της σωλήνωσης με ασφάλεια (από την επιφάνεια έως το βάθος έδρασής της).

Συνοψίζοντας, η πρώτη ενδιάμεση σωλήνωση βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 4.13: Επιλογή κατηγορίας για την πρώτη ενδιάμεση σωλήνωση βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης & διάρρηξης

| Βάθος (m) | Αστοχία κατάρρευσης | Βάθος (m) | Αστοχία Διάρρηξης | Βάθος (m) | ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ |
|-----------|---------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------------|
| 0-1940 | K-55(68 lb/ft) | 0-2000 | N-80 (72 lb/ft) | 0-2400 | N-80 (72 lb/ft) |
| 1940-2400 | N-80 (72 lb/ft) | 2000-2400 | K-55 (68 lb/ft) | | |

4.5.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό

Ολόκληρη η στήλη της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης, από την επιφάνεια έως το βάθος έδρασής της (0-2400 m), θα περιλαμβάνει στελέχη κατηγορίας N-80 με ονομαστικό βάρος $NW_{N-80} = 72 \text{ lb/ft}$.

Το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο για την πρώτη ενδιάμεση σωλήνωση θεωρείται ότι είναι το βάρος στον αέρα ολόκληρης της στήλης σωλήνωσης (αγνοείται η άνωση από το ρευστό διάτρησης) και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{tension} = 72 \frac{lb}{ft} \times \frac{1}{0,3048 \text{ m/ft}} \times 2400 \text{ m} = 566929 \text{ lb}$$

Ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό είναι $SF_T = 1,3$. Συνεπώς το εφελκυστικό φορτίο σχεδιασμού με βάση τον συντελεστή ασφαλείας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Tdesign-SF} = 1.3 \times F_{tension} \Rightarrow F_{Tdesign} = 1.3 \times 566929 \text{ lb} = 737000 \text{ lb}$$

Το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής πίεσης παραλαμβάνεται από την σωλήνωση που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια.

Σύμφωνα με το Παράρτημα Π1 το όριο ελαστικότητας της σωλήνωσης K-55 (pipe body yield strength) με εξωτερική διάμετρο $13^{3/8} \text{ in}$ και ονομαστικό βάρος 68 lb/ft είναι ίσο με $1069 \times 1000 = 1069000 \text{ lbf}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της εφελκυστικής πίεσης σχεδιασμού που ασκείται στην σωλήνωση. Συνεπώς ο συγκεκριμένος τύπος σωλήνωσης είναι συμβατός με τα κριτήρια εφελκυστικού σχεδιασμού.

Ωστόσο, καθώς η ενδιάμεση σωλήνωση γενικά παραλαμβάνει φορτίο συνολικά πολύ μεγαλύτερο από τις λοιπές στήλες σωλήνωσης, θα εφαρμοστεί το κριτήριο της τριαξονικής φόρτισης.

4.5.5. Κριτήριο τριαξονικής φόρτισης

Η θεωρία πλαστικότητας ασχολείται με τη συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών, όταν οι παραμορφώσεις είναι πλέον αρκετά μεγάλες και ο γραμμικός νόμος του Hooke παύει να ισχύει. Ουσιαστικά, περιγράφει τη συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών, όταν αυτά περάσουν στην πλαστική περιοχή και οι παραμορφώσεις που υφίστανται είναι πλέον μόνιμες (πλαστικές παραμορφώσεις).

Τα κριτήρια διαρροής (yielding criteria) είναι εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες υπολογίζουν μία ισοδύναμη τάση (equivalent stress), που είναι συνάρτηση των κυρίων τάσεων που εμφανίζονται στην εντατική κατάσταση. Το κριτήριο στροφικής ενέργειας ή κριτήριο Von Mises (distortion-energy criterion) είναι από τα πιο γνωστά και χρησιμοποιείται εδώ για τον σχεδιασμό της σωλήνωσης σε τριαξονική φόρτιση. Σύμφωνα με αυτό η αστοχία της σωλήνωσης συμβαίνει λόγω της παραμόρφωσης που προκαλείται υπό την επίδραση αξονικής τάσης και όχι εξαιτίας ογκομετρικών αλλαγών (volumetric changes) στο υλικό της.

Η εξίσωση της έλλειψης πλαστικότητας (ellipse of plasticity) (κριτήριο von Mises) περιγράφεται από τη σχέση (Σχήμα 4.8):

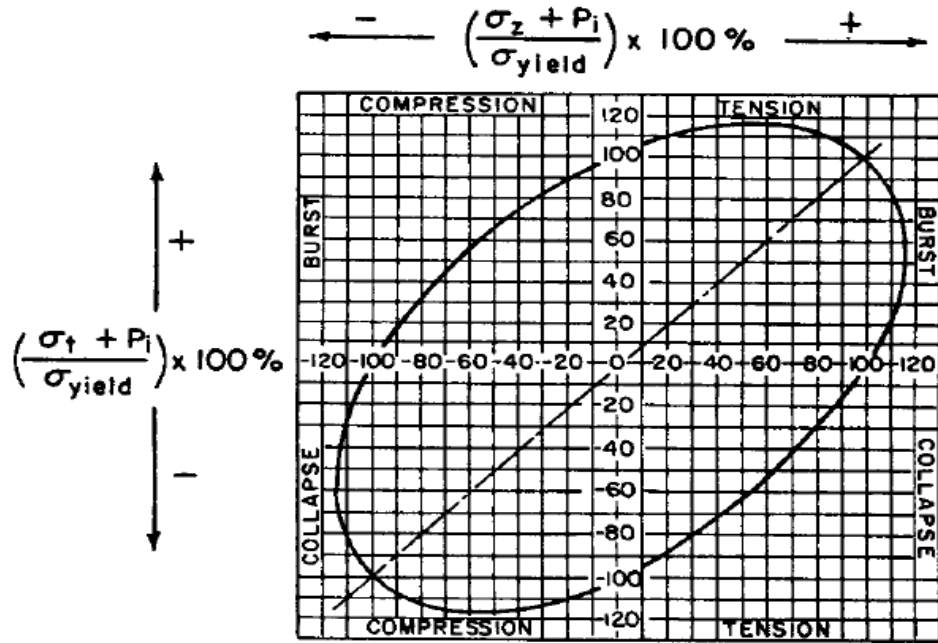
$$(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 = 2 \sigma_{yield}^2 \quad (4.7.)$$

Όπου:

σ_t : Η κύρια εφαπτομενική τάση

σ_z : Η κύρια αξονική τάση

σ_r : Η κύρια ακτινική τάση



Σχήμα 4.6: Έλλειψη τριαξονικής φόρτισης (ή έλλειψη πλαστικότητας- ellipse of plasticity)

Η κύρια ακτινική τάση σ_r και η κύρια εφαπτομενική τάση σ_t περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_r = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 - r^2) + P_e \cdot r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.8)$$

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 (r^2 + r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.9)$$

Όπου:

r : η απόσταση από την οποία συνυπολογίζονται οι σ_r και σ_t (in)

P_i : η εσωτερική πίεση στη σωλήνωση (psi)

P_e : η εξωτερική πίεση στη σωλήνωση (psi)

r_i : η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in)

r_o : η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in)

Η μέγιστη τάση θα ασκηθεί σε απόσταση $r=r_i$ και έτσι οι σχέσεις (4.8) και (4.9) μετασχηματίζονται στις ακόλουθες:

$$\sigma_r = -P_i \quad (4.10)$$

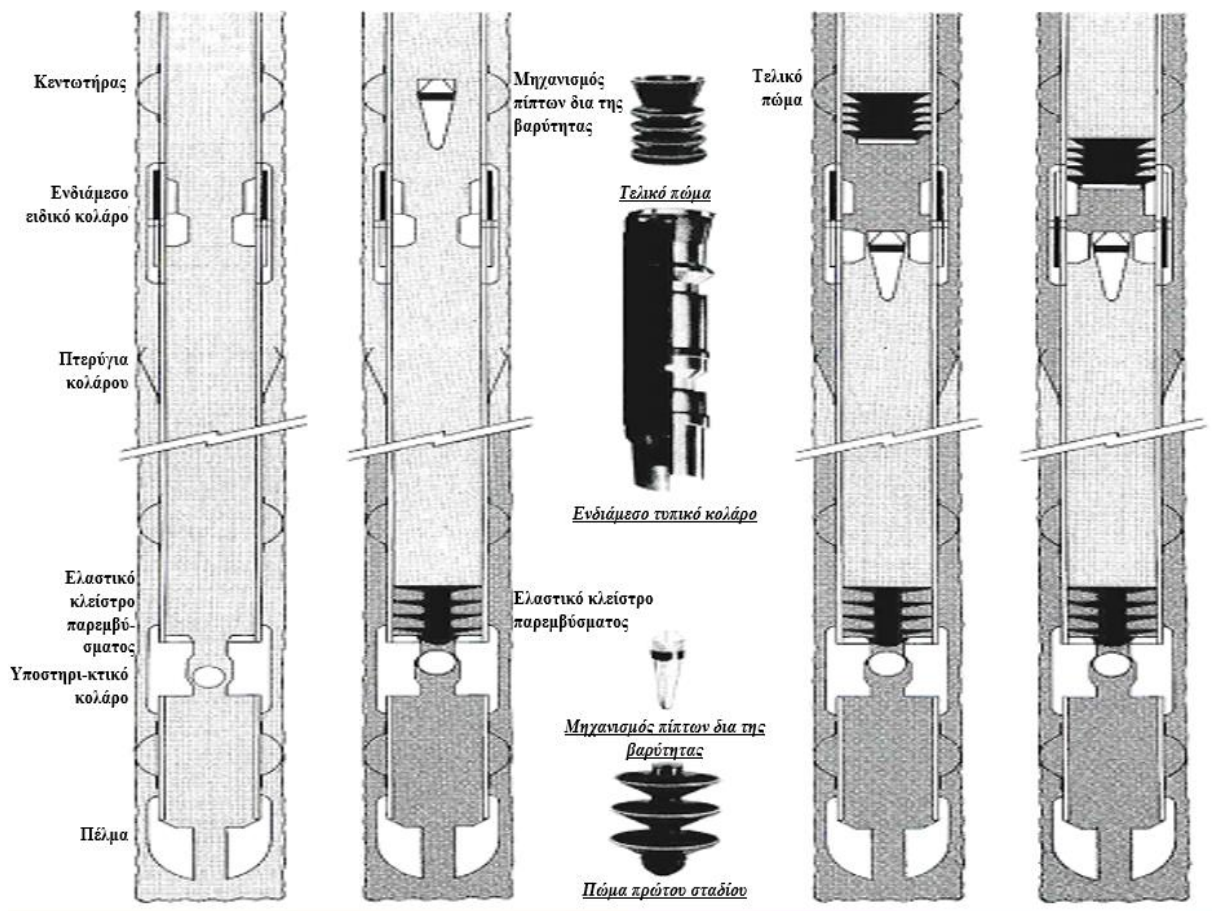
$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 \cdot 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4} \quad (4.11)$$

Τα αξονικά φορτία που δέχεται η σωλήνωση επηρεάζουν τα (ακτινικά) φορτία διάρρηξης και αστοχίας κατάρρευσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, όσο αυξάνεται το εφελκυστικό φορτίο που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης, ενώ η αντοχή σε διάρρηξη αυξάνεται. Επίσης, όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο συμπίεσης (compressive load – το αντίθετο του εφελκυσμού) που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή σε διάρρηξη, ενώ η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης αυξάνεται.

Σε αυτή την μελέτη περίπτωσης παρατηρείται απότομη μεταβολή της πίεσης πόρων και της πίεσης ρωγμάτωσης, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1, στις ζώνες που εντοπίζονται σε βάθη ~2000-3500 m, γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον έλεγχο αστοχίας σε τριαξονική φόρτιση, τουλάχιστον στις ενδιάμεσες στήλες σωλήνωσης στήλη σωλήνωσης που θα εδραθούν στα 2400 m και στα 3200 m βάθος. Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθεί το τι πρόκειται να συμβεί στο στάδιο που ακολουθεί μετά την τοποθέτησης της πρώτης ενδιάμεσης προστατευτικής σωλήνωσης που είναι η τσιμέντωση. Το στάδιο αυτό πρόκειται να εξεταστεί για να προσδιοριστεί η επίδραση της εισαγωγή πολφού τσιμέντου στην γεώτρηση που έχει διαφορετική πυκνότητα από αυτή της λάσπης.

Το στάδιο της τσιμέντωσης περιλαμβάνει ένα σύνολο διαδικασιών. Αρχικά καθορίζεται η πυκνότητα του πολφού του τσιμέντου. Πριν από κάθε άλλη εργασία πρέπει να λάβει χώρα συνεχής κυκλοφορία λάσπης διάτρησης μέσα στη γεώτρηση (circulating mud) ώστε να επιτευχθεί πλήρης καθαρισμός του πηγαδιού. Στην κορυφή της σωλήνωσης τοποθετούνται δύο πώματα (plugs) τσιμέντωσης. Το ευρισκόμενο στην κορυφή (top cementing plug) είναι συμπαγές, ενώ το κατώτερο (bottom cementing plug) φέρει διάφραγμα συγκεκριμένης αντοχής. Η μεσαία βαλβίδα της κεφαλής τσιμέντωσης ανοίγει και ο πολφός τσιμέντου διοχετεύεται μεταξύ των δύο πωμάτων (pumping slurry). Το κατώτερο πώμα οδηγείται, με την εισπίεση του τσιμέντου, μέσα στη σωλήνωση έως ότου το πώμα «καθίσει» στο υποστηρικτικό κολάρο (float collar) που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση. Συνεχίζοντας την εισπίεση, το διάφραγμα του κατώτερου πώματος διαρρηγνύεται, επιτρέποντας στο μίγμα του τσιμέντου να διέλθει και τελικά να καταλάβει

τον χώρο γύρω από τη σωλήνωση. Μετά τη διοχέτευση του απαιτούμενου όγκου τσιμέντου, η εισπίεση σταματά και η βαλβίδα κορυφής της κεφαλής τσιμέντωσης τίθεται σε λειτουργία. Μέσω αυτής, λάσπη διάτρησης εισπιέζεται στο σύστημα και το πώμα κορυφής οδηγείται (displacing) μέσα στη σωλήνωση έως ότου επικαθίσει στο κατώτερο πώμα. Όπως αναφέρθηκε το πώμα κορυφής είναι συμπαγές και, επομένως, δεν επιτρέπει τη διέλευση λάσπης. Οι εργασίες σταματούν (end of job) και το σύστημα αφήνεται για να σταθεροποιηθεί το τσιμέντο. (Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 4.7: Τεχνική βασικής τσιμέντωσης (ενιαία)

Τα σενάρια τριαξονικής φόρτισης που εξετάζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τσιμέντωσης είναι δύο:

1^ο Σενάριο: Η χρονική στιγμή κατά την οποία ο εξωτερικός δακτύλιος της σωλήνωσης είναι πληρωμένος σε όλο του το ύψος με ρευστό καθαρισμού (mud flash). Αντίστοιχα, η σωλήνωση έχει πληρωθεί εσωτερικά με πολφό τσιμέντου.

2° Σενάριο: Η χρονική στιγμή κατά την οποία ο εξωτερικός δακτύλιος της σωλήνωσης είναι πληρωμένος σε όλο του το ύψος με πολφό τσιμέντου. Αντίστοιχα, η σωλήνωση έχει πληρωθεί εσωτερικά με ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιείται για την εκτόπιση του πολφού του τσιμέντου (displacement fluid).

4.5.5.1. Πρώτο σενάριο τριαξονικής φόρτισης για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

Για την τσιμεντώση της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης, σύμφωνα με το πρόγραμμα της γεώτρησης, θα χρησιμοποιηθεί πολφός τσιμέντου, που περιέχει τσιμέντο, νερό και πρόσθετες ουσίες, με πυκνότητα αρχικά 12 ppg για τα ανώτερα 1920 m και 16 ppg από τα 1920 m ως τα 2400 m βάθος. Το τσιμέντο θα καλύψει πλήρως τον εξωτερικό δακτύλιο της σωλήνωσης σε όλο το ύψος της στήλης. Όταν η ως άνω στήλη πολφού τσιμέντου βρίσκεται στο εσωτερικό της σωλήνωσης, ο εξωτερικός δακτύλιος της σωλήνωσης θα είναι πληρωμένος με ρευστό καθαρισμού (mud flash) που έχει πυκνότητα $\rho_{mf} = 10$ ppg.

Η πυκνότητα του πολφού τσιμέντου είναι $\rho_{cement1920} = 12$ ppg για τα πρώτα 1920 m και $\rho_{cement2400} = 16$ ppg από τα 1920 m ως τα 2400 m. Συνεπώς, η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση στο βάθος έδρασής της από τον πολφό του τσιμέντου (P_i) σε αυτό το στάδιο είναι:

$$P_i = \rho_{cement1920} \times 1920 \text{ m} + \rho_{cement2400} \times (CSD - 1920 \text{ m}) \Rightarrow$$

$$P_i = 12 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 1920 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} + 16 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (2400 - 1920) \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_i = 5241 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η εξωτερική πίεση (P_e) που δέχεται το πέλμα της σωλήνωσης σε αυτό το στάδιο από το ρευστό καθαρισμού (mud flash) είναι:

$$P_e = \rho_{mf} \times CSD = 10 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 2400 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} = 4094 \text{ psi}$$

Για την εφαρμογή του κριτηρίου von Mises θα πρέπει στην έλλειψη πλαστικότητας του Σχήματος 4.8 να υπολογιστεί η τιμή της σχέσης:

$$\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% \quad (4.12)$$

Για τον σκοπό αυτό, αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η κύρια εφαπτομενική τάση (σ_t) από τη σχέση 4.11. Τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.14: Δεδομένα υπολογισμού κύρια εφαπτομενικής τάσης (σ_t) για το πρώτο σενάριο τριαξονικής φόρτισης

| P_i (psi) | P_e (psi) | r_o (in) | r_i (in) | σ_{yieldN80} (psi) |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 5241 | 4094 | 13,375 | 12,347 | 80.000 |

Έτσι από τη σχέση 4.11 προκύπτει:

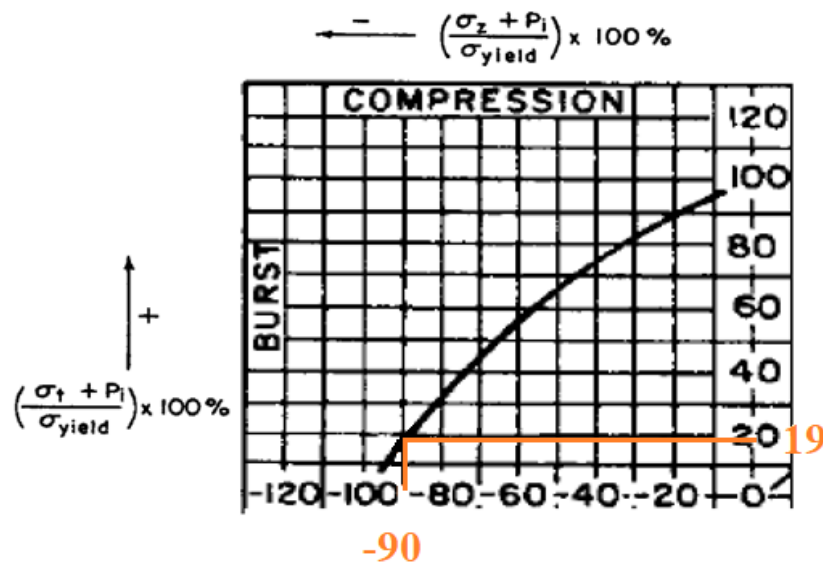
$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4} \\ &= \frac{5241 \text{ psi} \times 12,347^2 (13,375^2 + 12,347^2) (in^4) - 4094 \text{ psi} \times 13,375^2 \times 2 \times 12,347^2 (in^4)}{12,347^2 \times 13,375^2 - 12,347^4 (in^4)} \\ \Rightarrow \sigma_t &= 18005 \text{ psi} \end{aligned}$$

Οπότε :

$$\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% = \left(\frac{10271 \text{ psi} + 5241 \text{ psi}}{80000 \text{ psi}}\right) \times 100\% = 19\%$$

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.8 βρίσκουμε γραφικά ότι για $\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% = 19\%$ ποια είναι η τιμή της σχέσης (Σχήμα 4.12):

$$\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.8: Έλλειψη πλαστικότητας (ellipse of plasticity) για αξονικό φορτίο συμπίεσης και φορτίο διάρρηξης

Στην τριαξονική φόρτιση, όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο συμπίεσης που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή της σε διάρρηξη. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η αντοχή σε διάρρηξη τόσο μειώνεται η αντοχή σε αξονικό φορτίο συμπίεσης που είναι δυνατό να δεχτεί η σωλήνωση. Στο Σχήμα 4.10 επισημαίνεται ότι η τιμή της σχέσης 4.12 (19%) αντιστοιχεί πάνω στην έλλειψη πλαστικότητας σε τιμή περίπου -90% για τη σχέση 4.13. Αυτή είναι και η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η σχέση 4.13 σε αυτή την μελέτη περίπτωσης. Επομένως:

$$\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% \leq -90\% \Rightarrow \sigma_z \leq (-0,9 \times \sigma_{yield}) - P_i \Rightarrow$$

$$\sigma_z \leq (-0,9 \times 80000 \text{ psi}) - 5241 \text{ psi} \Rightarrow \sigma_z \leq -77241 \text{ psi}$$

Αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν τη μελέτη περίπτωσης, η πρώτη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση που έχει σχεδιαστεί δύναται να αστοχήσει κατά το στάδιο της τσιμέντωσης αν δεχτεί αξονικό φορτίο συμπίεσης $\sigma_z \geq -77241 \text{ psi}$.

4.5.5.2. Δεύτερο σενάριο τριαξονικής φόρτισης για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

Σε αυτή την περίπτωση ο πολφός του τσιμέντου καταλαμβάνει πλέον τον εξωτερικό δακτύλιο της σωλήνωσης και έχει πυκνότητα $\rho_{\text{cement1920}}=12$ ppg για τα πρώτα 1920 m και $\rho_{\text{cement3200}}=16$ ppg από τα 1920 m ως τα 2400 m. Αντίστοιχα, η σωλήνωση έχει πληρωθεί εσωτερικά με λάσπη διάτρησης (displacement fluid) πυκνότητας $\rho_m=10$ ppg. Η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση στο βάθος έδρασής της από τη λάσπη διάτρησης (P_i) σε αυτό το στάδιο είναι:

$$P_i = \rho_m \times CSD = 10 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 2400 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} = 4094 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η εξωτερική πίεση (P_e) που δέχεται το πέλμα της σωλήνωσης σε αυτό το στάδιο από τον πολφό τσιμέντου είναι:

$$P_e = \rho_{\text{cement1920}} \times 1920 \text{ m} + \rho_{\text{cement3200}} \times (CSD - 1920 \text{ m}) \Rightarrow$$

$$P_e = 12 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 1920 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} + 16 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (2400 - 1920) \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_e = 5241 \text{ psi}$$

Για την εφαρμογή του κριτηρίου von Mises θα πρέπει στην έλλειψη πλαστικότητας του Σχήματος 4.8 να υπολογιστεί η τιμή της σχέσης (4.12). Για τον σκοπό αυτό, αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η κύρια εφαπτομενική τάση (σ_t) από τη σχέση 4.11. Τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.15.

Πίνακας 4.15: Δεδομένα υπολογισμού κύρια εφαπτομενικής τάσης (σ_t) για το δεύτερο σενάριο τριαξονικής φόρτισης

| P_i (psi) | P_e (psi) | r_o (in) | r_i (in) | $\sigma_{\text{yieldN-80}}$ (psi) |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|
| 4094 | 5241 | 13,375 | 12,347 | 80.000 |

Έτσι από τη σχέση 4.11 προκύπτει:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4}$$

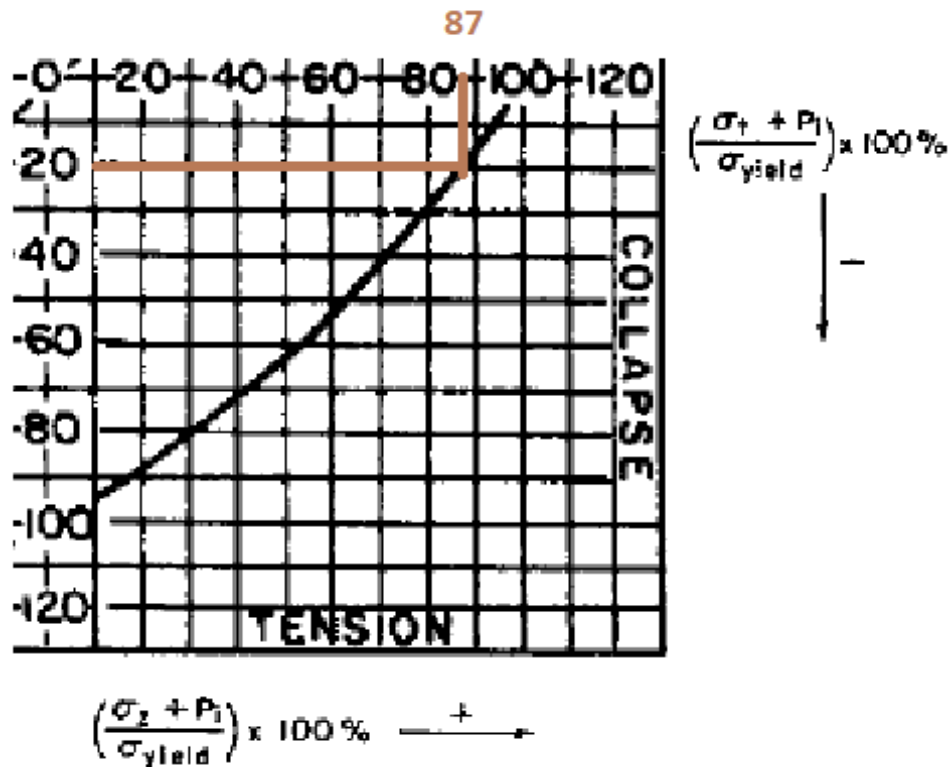
$$= \frac{4094 \text{ psi} \times 12,347^2 (13,375^2 + 12,347^2) (\text{in}^4) - 5241 \text{ psi} \times 13,375^2 \times 2 \times 12,347^2 (\text{in}^4)}{12,347^2 \times 13,375^2 - 12,347^4 (\text{in}^4)}$$

$$\Rightarrow \sigma_t = -19067 \text{ psi}$$

Οπότε:

$$\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = \left(\frac{-19067 \text{ psi} + 4094 \text{ psi}}{80000 \text{ psi}} \right) \times 100\% = -19\%$$

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.11 βρίσκουμε γραφικά ότι για $\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = -19\%$, η τιμή της σχέσης 4.13 είναι: $\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = 87\%$



Σχήμα 4.9: Έλλειψη πλαστικότητας (ellipse of plasticity) για αξονικό εφελκυστικό φορτίο και φορτίο αστοχίας κατάρρευσης

Στην τριαξονική φόρτιση, όσο αυξάνεται το αξονικό εφελκυστικό φορτίο που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή της σε αστοχία κατάρρευσης. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης τόσο μειώνεται η αντοχή σε αξονικό εφελκυστικό φορτίο που είναι δυνατό να δεχτεί η σωλήνωση. Επομένως:

$$\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% \leq 87\% \Rightarrow \sigma_z \leq (0,87 \times \sigma_{yield}) - P_i \Rightarrow$$

$$\sigma_z \leq (0,87 \times 80000 \text{ psi}) - 4094 \text{ psi} \Rightarrow \sigma_z \leq 11106 \text{ psi}$$

Αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν τη μελέτη περίπτωσης, η πρώτη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση που έχει σχεδιαστεί δύναται να αστοχήσει κατά το στάδιο της τσιμέντωσης αν δεχτεί αξονικό εφελκυστικό φορτίο $\sigma_z \geq 11106 \text{ psi}$.

4.6. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης

4.6.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας κατάρρευσης σε αυτή τη στήλη σωλήνωσης ακολουθούνται όσα αναφέρθηκαν στον σχεδιασμό της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης

Η πτώση στάθμης της λάσπης διάτρησης (Z_m) μέσα στην δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση υπολογίζεται από την σχέση 3.17 και τα δεδομένα του Πίνακα 4.2:

$$Z_m = \frac{(\rho_{max} - g_p)}{\rho_{max}} \times Z_{lc} = \frac{(12,8 \text{ ppg} - 11,8 \text{ ppg})}{12,8 \text{ ppg}} \times 3845 \text{ m} = 300 \text{ m}$$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Η εξωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης, P_{e-Z_m} , είναι:

$$P_{e-Z_m} = Z_m \times \text{Mud density}_{(0-3200m)} = 300 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 18 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \Rightarrow$$

$$P_{e-Z_m} = 922 \text{ psi}$$

Η εξωτερική πίεση στο βάθος έδρασης της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης (P_{e-CSD}) είναι:

$$P_{e-CSD} = CSD \times Mud\ density_{(0-3200m)} = 3200\ m \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 18\ ppg \times 0,052 \frac{psi}{ppg}$$

$$\Rightarrow P_{e-CSD} = 9827\ psi$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση στην επιφάνεια είναι 0 psi. Αντίστοιχα, και η εσωτερική πίεση στη στάθμη της λάσπης είναι 0 psi.

Η εσωτερική πίεση που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{i-CSD}, είναι:

$$P_{i-CSD} = Mud\ level\ drop\ (m) \times Mud\ density_{(0-3845m)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{i-CSD} = 2900\ m \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 12,8\ ppg \times 0,052 \frac{psi}{ppg} = 6332\ psi$$

Συνεπώς, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στην επιφάνεια είναι 0 psi Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στη στάθμη της λάσπης (P_{C-Zm}) είναι:

$$P_{C-Zm} = P_{e-Zm} - P_{i-Zm} = 922\ psi - 0 \Rightarrow P_{C-Zm} = 922\ psi$$

Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, P_{C-CSD}, είναι:

$$P_{C-CSD} = P_{e-CSD} - P_{i-CSD} = 9827\ psi - 6332\ psi \Rightarrow P_{C-CSD} = 3495\ psi$$

Από τη στιγμή που η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο επίπεδο της λάσπης είναι μικρότερη από αυτήν στο βάθος έδρασης της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης, λαμβάνεται ως μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης αυτό που ασκείται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης.

Ο συντελεστής ασφαλείας για αστοχία κατάρρευσης είναι SF_C = 1,1, οπότε το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης (φορτίο σχεδιασμού) είναι:

$$P_{Cmax} = P_{C-CSD} \times SF_C\ (psi) = 3495\ psi \times 1,1 = 3844\ psi$$

Πίνακας 4.16: Δεδομένα αστοχίας κατάρρευσης για τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

| Depth (m) | Pore Pressure plus Trip Margin (ppg) | Mud density (0-3200m) (ppg) | P _e (psi) | P _i (psi) | Collapse Pressure (psi) | Collapse Load×S.F. (psi) |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| 0 | 8,5 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z _m (300) | 8,7 | 18 | 922 | 0 | 922 | 1014 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| CSD (3200) | 10,7 | 18 | 9827 | 6332 | 3495 | 3844 |
| 3845 | 11,8 | 12,8 | | | | |

4.6.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης

Για τον σχεδιασμό σε διάρρηξη της δεύτερης ενδιάμεσης προστατευτικής σωλήνωσης, ακολουθούνται όσα αναφέρθηκαν στον σχεδιασμό σε διάρρηξη της πρώτης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης.

Στην περίπτωση της δεύτερης επιφανειακής σωλήνωσης το μέγιστο φορτίο που δύναται να διαχειριστεί το BOP (blowout preventer) και η διάταξη των βαλβίδων στην επιφάνεια είναι $P_{Bmax} = 6000$ psi.

Το που βρίσκεται η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου που έχει εισρεύσει από τον σχηματισμό και λάσπης διάτρησης (D_m) καθορίζεται από τη σχέση:

$$P_{inj} = P_{Bmax} + \rho_m \times D_m + \rho_g \times (D_{lc} - D_m) \quad (4.14)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

D_{lc} = Το βάθος της ζώνης απωλειών

P_{inj} = Η πίεση σχεδιασμού στη ζώνη απωλειών

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης για την όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης (όπου θα τοποθετηθεί) η επόμενη σωλήνωση

ρ_g = Η πυκνότητα του αερίου που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση

D_m = Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και λάσπης διάτρησης

Λύνοντας ως προς D_m η σχέση 4.14 μετασχηματίζεται σε:

$$D_m = \left(\frac{P_{inj} - P_{Bmax}}{0,052 \frac{psi}{ppg} \times (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g \times 0,052 \frac{psi}{ppg} \times D_{lc} \times 3,2808 \frac{ft}{m}}{0,052 \frac{psi}{ppg} \times (\rho_m - \rho_g)} \right) \times 0,3048 \frac{m}{ft} \quad (4.15)$$

Το βάθος της ζώνης απωλειών είναι αυτό όπου παρουσιάζεται η μικρότερη τιμή της βαθμίδας ρωγμάτωσης για το τμήμα που σωληνώνεται. Επομένως, από το διάγραμμα του Σχήματος 4.1 διαπιστώνεται ότι: $D_{lc} = 2400m$.

Η ισοδύναμη πυκνότητας λάσπης στη ζώνη απωλειών (EMD_{Dlc}) είναι ίση με τη βαθμίδα ρωγμάτωσης εκεί αυξημένη κατά 0,3 ppq. Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.2 εντοπίζεται ότι η βαθμίδα ρωγμάτωσης στη ζώνη απωλειών είναι 20 ppq, οπότε η EMD_{Dlc} είναι:

$$EMD_{Dlc} = 20 \text{ ppq} + 0.3 \text{ ppq} = 20,3 \text{ ppq}$$

Για την παραπάνω τιμή EMD η πίεση σχεδιασμού στο βάθος έδρασης της δεύτερης ενδιάμεσης σωλήνωσης είναι:

$$P_{inj} = CSD \times EMD_{Dlc} = 3200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{ft}{m} \times 20,3 \text{ ppq} \times 0,052 \frac{psi}{ppq} \Rightarrow$$

$$P_{inj} = 11083 \text{ psi}$$

Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης του επόμενου τμήματος της γεώτρησης είναι ίση με $\rho_m = 12,8 \text{ ppq}$, ενώ η πυκνότητα του αερίου είναι $\rho_g = 1,54 \text{ ppq}$. Έτσι από την 4.15 προκύπτει:

$$D_m = \left(\frac{P_{inj} - P_{Bmax}}{0,052 \frac{psi}{ppq} \times (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g, 052 \frac{ft}{ppq} \times D_{lc} \times 3,2808 \frac{ft}{m}}{0,052 \frac{psi}{ppq} \times (\rho_m - \rho_g)} \right) \times 0,3048 \frac{m}{ft} \Rightarrow$$

$$D_m = 2317 \text{ m}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση οφείλεται στη στήλη της λάσπης διάτρησης (για την όρυξη του επόμενου τμήματος της γεώτρησης) που έχει ύψος μέχρι το βάθος $D_m = 2317 \text{ m}$. Μέχρι το σημείο αυτό η εσωτερική πίεση περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_{i-surface \text{ to } D_m} = P_{Bmax} + \rho_m \times D \quad (4.16)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης για τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης

D = Η τιμή του βάθους από την επιφάνεια μέχρι $D_m=2317 \text{ m}$

Στη συνέχεια, μέχρι το βάθος έδρασης της δεύτερης προστατευτικής σωλήνωσης η εσωτερική πίεση περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_{i-Dm \text{ to } CSD} = P_{Bmax} + \rho_m \times D_m + \rho_g \times (D - D_m)$$

Όπου:

P_{Bmax} = Το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού του επιφανειακού εξοπλισμού

ρ_m = Η πυκνότητα λάσπης για τη διάτρηση του επόμενου τμήματος της γεώτρησης

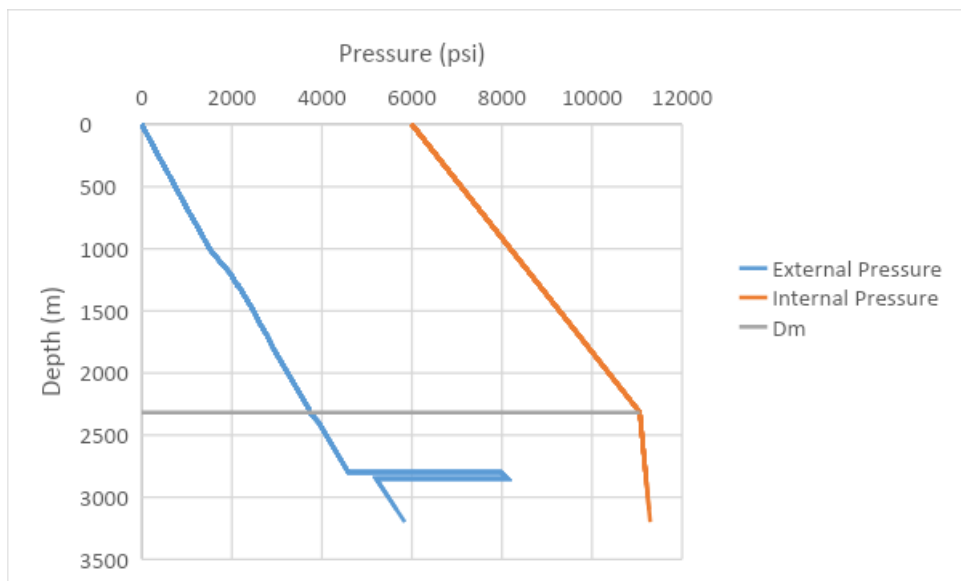
D_m = Το βάθος της διεπιφάνειας μεταξύ αερίου και λάσπης διάτρησης

ρ_g = Η πυκνότητα του αερίου που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση

D = Η τιμή του βάθους από $D_m=2317\text{m}$ μέχρι $D_{CSD}=3200\text{ m}$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση λαμβάνεται ίση με την πίεση των πόρων. Στο Σχήμα 4.12 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προφίλ της εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης για τον υπολογισμό της πίεσης διάρρηξης για τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση.



Σχήμα 4.10: Εσωτερικά και εξωτερικά φορτία για τον υπολογισμό της πίεσης διάρρηξης για τη δεύτερη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση

Το φορτίο διάρρηξης (burst load) είναι:

$$P_B = P_i - P_e$$

Στο Παράρτημα Π3 παρουσιάζονται το σύνολο των αριθμητικών πράξεων που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του μέγιστου φορτίου διάρρηξης, το οποίο προσδιορίζεται στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή ασφάλειας σε διάρρηξη $SF_B=1,1$, το φορτίο διάρρηξης σχεδιασμού στην επιφάνεια και στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης είναι:

$$P_{B-surface} = 8066 \text{ psi}$$

$$P_{B-CSD} = 6600 \text{ psi}$$

4.6.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης

Τα φορτία διάρρηξης (burst loads) και αστοχίας κατάρρευσης (collapse loads) που υπολογίστηκαν είναι τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας σωλήνωσης και παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.17.

Πίνακας 4.17: Μέγιστα θλιπτικά φορτία και φορτία διάρρηξης για τη διαστασιολόγηση της δεύτερης ενδιάμεσης σωλήνωσης

| Depth (m) | Collapse Loads (psi) | Burst Loads (psi) |
|-----------|----------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 6600 |
| 3200 | 3844 | 8066 |

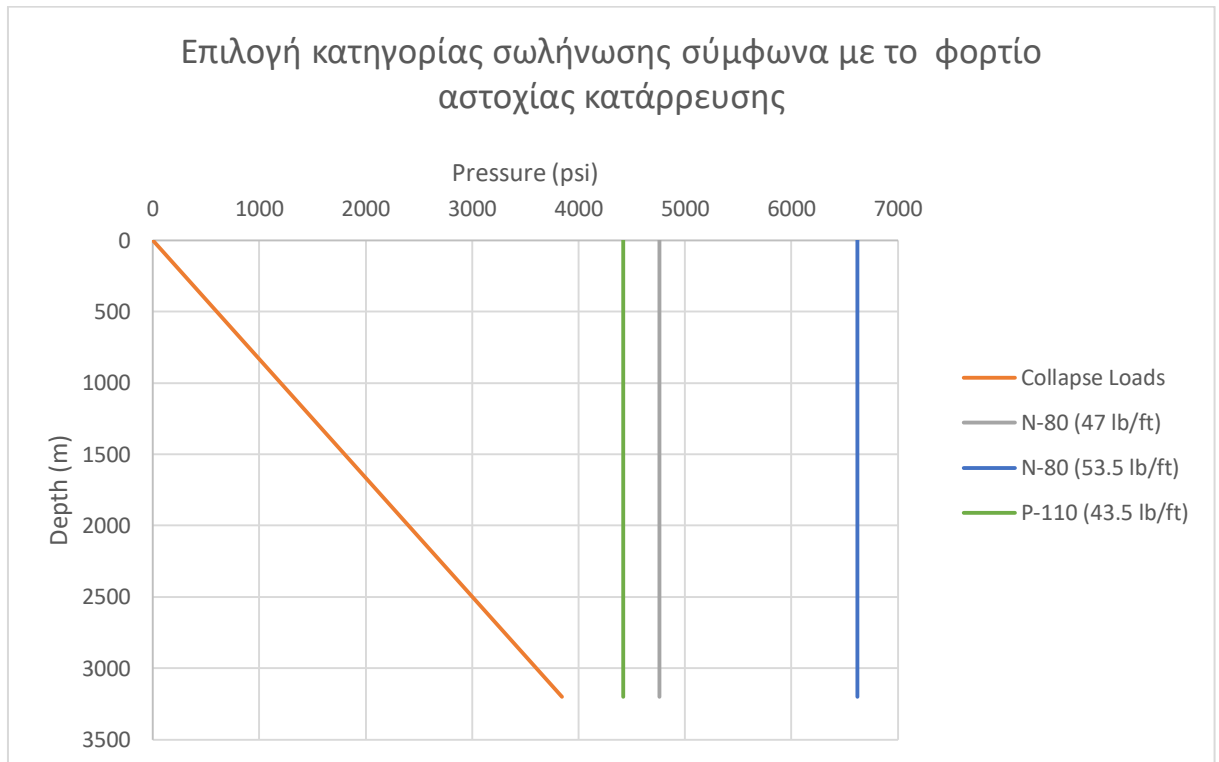
Οι κατηγορίες σωλήνωσης που καλύπτουν τόσο τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης, όσο και διάρρηξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18.

Πίνακας 4.18: Μηχανικά χαρακτηριστικά κατηγοριών σωλήνωσης που πληρούν τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης για τη δεύτερη ενδιάμεση σωλήνωση (Παράρτημα Π1)

| Casing Grades | Collapse Resistance (psi) | Burst Resistance (psi) |
|--------------------|---------------------------|------------------------|
| N-80 (47 lb/ft) | 4760 | 6870 |
| N-80 (53.5 lb/ft) | 6620 | 7930 |
| P-110 (43.5 lb/ft) | 4420 | 8700 |

Η επιλογή του μήκους και του αντίστοιχου βάθους που θα τοποθετηθεί η κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες σωλήνωσης γίνεται με γραφικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η καμπύλη εξέλιξης των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης ως

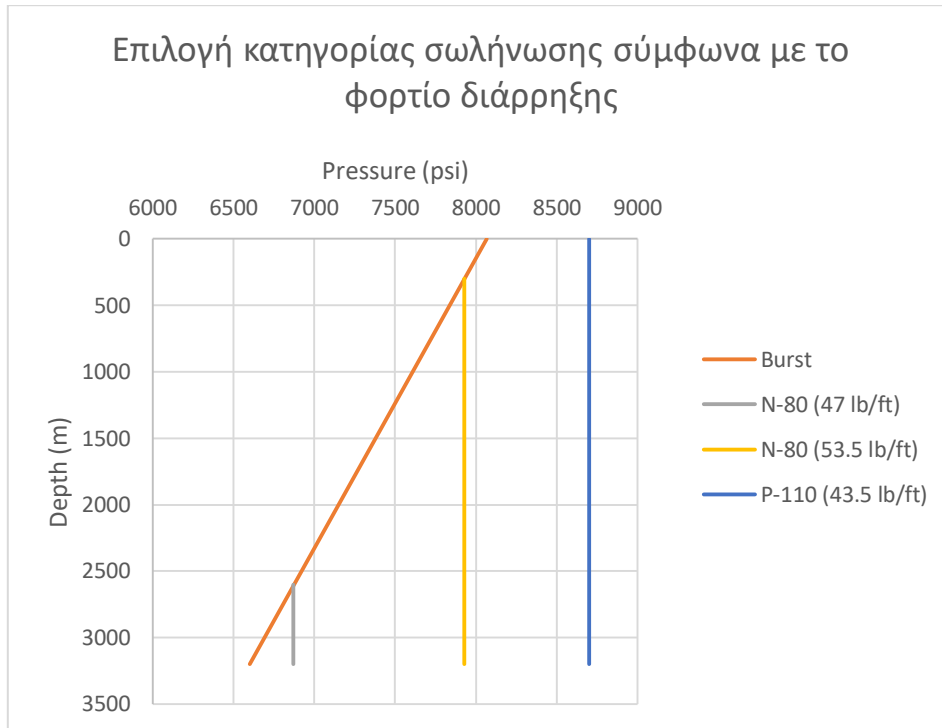
προς το βάθος και με κατακόρυφες γραμμές η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης για κάθε κατηγορία σωλήνωσης.



Σχήμα 4.11: Γραφική επίλυση δεύτερης ενδιάμεσης σωλήνωσης για αστοχία κατάρρευσης

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι όλες οι διαθέσιμες κατηγορίες σωλήνωσης παρουσιάζουν αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης πολύ μεγαλύτερη από το φορτίο σχεδιασμού ($P_{Cmax} = 3844$ psi) και συνεπώς πληρούν τις απαιτήσεις. Για οικονομικούς λόγους επιλέγεται η φθηνότερη κατηγορία N-80 (47 lb/ft) για όλο το μήκος της στήλης ενδιάμεσης προστατευτικής σωλήνωσης (0-3200 m).

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον σχεδιασμό σε διάρρηξη, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.12: Γραφική επίλυση δεύτερης ενδιάμεσης σωλήνωσης για διάρρηξη

Το σημείο τομής της γραμμής N-80 (47lb/ft) με την καμπύλη εξέλιξης με το βάθος των διάρρηξης (burst loads) ορίζει το βάθος κάτω από το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος σωλήνωσης N-80 (47lb/ft). Το βάθος αυτό είναι τα 2600 m. Αντίστοιχα, το σημείο τομής της γραμμής N-80 (53,5lb/ft) με την καμπύλη των φορτίων διάρρηξης (burst loads) ορίζει το βάθος κάτω από το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος σωλήνωσης N-80 (53,5lb/ft) και το οποίο είναι τα 3000 m. Η γραμμή P-110 (43,5lb/ft) παρουσιάζει αντοχή σε διάρρηξη πολύ μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού για τη σωλήνωση που εξετάζεται, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το μήκος αυτής της σωλήνωσης με ασφάλεια (από την επιφάνεια έως το βάθος έδρασής της - 3200 m).

Συνοψίζοντας, η δεύτερη ενδιάμεση σωλήνωση βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 4.19: Επιλογή κατηγορίας για τη δεύτερη ενδιάμεση σωλήνωση βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης & διάρρηξης

| Βάθος (m) | Αστοχία κατάρρευσης | Βάθος (m) | Αστοχία Διάρρηξης | Βάθος (m) | ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ |
|-----------|---------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| 0-3200 | N-80 (47lb/ft) | 0-300 | P-110 (43,5lb/ft) | 0-300 | P-110 (43,5lb/ft) |
| | | 300-2600 | N-80 (53,5lb/ft) | 300-2600 | N-80 (53,5lb/ft) |
| | | 2600-3200 | N-80 (47lb/ft) | 2600-3200 | N-80 (47lb/ft) |

4.6.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό

Η στήλη της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης θα διαμορφωθεί όπως φαίνεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 4-19:

0-300 m: P-110(43,5lb/ft) με ονομαστικό βάρος $NW_{P-110} = 43,5 \text{ lb/ft}$

300-2600 m: N-80(53,5lb/ft) με ονομαστικό βάρος $NW_{N-80(53,5)} = 53,5 \text{ lb/ft}$

2600-3200 m: N-80(47lb/ft) με ονομαστικό βάρος $NW_{N-80(47)} = 47 \text{ lb/ft}$

Το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο για την πρώτη ενδιάμεση σωλήνωση θεωρείται ότι είναι το βάρος στον αέρα ολόκληρης της στήλης σωλήνωσης (αγνοείται η άνωση από το ρευστό διάτρησης) και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{tension} = NW_{P-110} \times 300 \text{ m} + NW_{N-80(53,5)} \times 2300 \text{ m} + NW_{N-80(47)} \times 600 \text{ m} \Rightarrow F_{tension} = 43,5 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \times \frac{1}{0,3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}}} \times 300 \text{ m} + 53,5 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \times \frac{1}{0,3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}}} \times 2300 \text{ m} + 47 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \times \frac{1}{0,3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}}} \times 600 \text{ m} \Rightarrow F_{tension} = 428415 \text{ lb} + 403.707,35 \text{ lb} + 92520 \text{ lb} = 924642 \text{ lb}$$

Ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό είναι $SF_T = 1,3$. Συνεπώς το εφελκυστικό φορτίο σχεδιασμού με βάση τον συντελεστή ασφαλείας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Tdesign-SF} = 1,3 \times F_{tension} \Rightarrow F_{Tdesign} = 1,3 \times 924642 \text{ lb} = 1202035 \text{ lb}$$

Το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής πίεσης παραλαμβάνεται από την σωλήνωση που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια.

Σύμφωνα με το Παράρτημα Π1 το όριο ελαστικότητας της σωλήνωσης P-110 (pipe body yield strength) με εξωτερική διάμετρο $9^{5/8}$ in και ονομαστικό βάρος 43,5 lb/ft είναι ίσο με $1381 \times 1000 = 1381000 \text{ lbf}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της εφελκυστικής

πίεσης σχεδιασμού που ασκείται στην σωλήνωση. Συνεπώς ο συγκεκριμένος τύπος σωλήνωσης είναι συμβατός με τα κριτήρια εφελκυστικού σχεδιασμού.

Στη σωλήνωση αυτή παρατηρείται στο Παράρτημα Π1 ότι οι εσωτερικές πιέσεις P_{internal} είναι αρκετά κοντά στην τιμή των 12.000psi και συνεπώς καθίσταται απαραίτητο να γίνει υπολογισμός τριαξονικής φόρτισης.

4.6.5. Κριτήριο αστοχίας σε τριαξονική φόρτιση

4.6.5.1. Πρώτο σενάριο τριαξονικής φόρτισης για τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

Για την τσιμέντωση της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης θα χρησιμοποιηθεί πολφός τσιμέντου, που περιέχει τσιμέντο, νερό και πρόσθετες ουσίες, με πυκνότητα αρχικά 12 ppg για τα ανώτερα 1920 m και 16 ppg από τα 1920 m ως τα 3200 m βάθος. Το τσιμέντο θα καλύψει πλήρως τον εξωτερικό δακτύλιο της σωλήνωσης σε όλο το ύψος της στήλης. Όταν η ως άνω στήλη πολφού τσιμέντου βρίσκεται στο εσωτερικό της σωλήνωσης, ο εξωτερικός δακτύλιος της σωλήνωσης θα είναι πληρωμένος με ρευστό καθαρισμού (mud flash) που έχει πυκνότητα $\rho_{mf} = 18$ ppg.

Η πυκνότητα του πολφού τσιμέντου είναι $\rho_{\text{cement}1920} = 12$ ppg για τα πρώτα 1920 m και $\rho_{\text{cement}2400} = 16$ ppg από τα 1920 m ως τα 2400 m. Συνεπώς, η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση στο βάθος έδρασής της από τον πολφό του τσιμέντου (P_i) σε αυτό το στάδιο είναι:

$$P_i = \rho_{\text{cement}1920} \times 1920 \text{ m} + \rho_{\text{cement}2400} \times (CSD - 1920 \text{ m}) \Rightarrow$$

$$P_i = 12 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 1920 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} + 16 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (3200 - 1920) \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_i = 7245 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η εξωτερική πίεση (P_e) που δέχεται το πέλμα της σωλήνωσης σε αυτό το στάδιο από το ρευστό καθαρισμού (mud flash) είναι:

$$P_e = \rho_{mf} \times CSD = 18 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 3200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} = 9827 \text{ psi}$$

Για την εφαρμογή του κριτηρίου von Mises θα πρέπει στην έλλειψη πλαστικότητας του Σχήματος 4.8 να υπολογιστεί η τιμή της σχέσης (4.12). Για τον σκοπό αυτό, αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η κύρια εφαπτομενική τάση (σ_t) από τη σχέση 4.11. Τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.20. Εφαρμόζω το κριτήριο von Mises για την κατηγορία με το μικρότερο πάχος τοιχωμάτων δηλαδή την P-110.

Πίνακας 4.20: Δεδομένα υπολογισμού κύρια εφαπτομενικής τάσης (σ_t) για το πρώτο σενάριο τριαξονικής φόρτισης

| P_i (psi) | P_e (psi) | r_o (in) | r_i (in) | σ_{yieldP110} (psi) |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 7425 | 9827 | 9,625 | 8,755 | 110.000 |

Έτσι από τη σχέση 4.11 προκύπτει:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4}$$

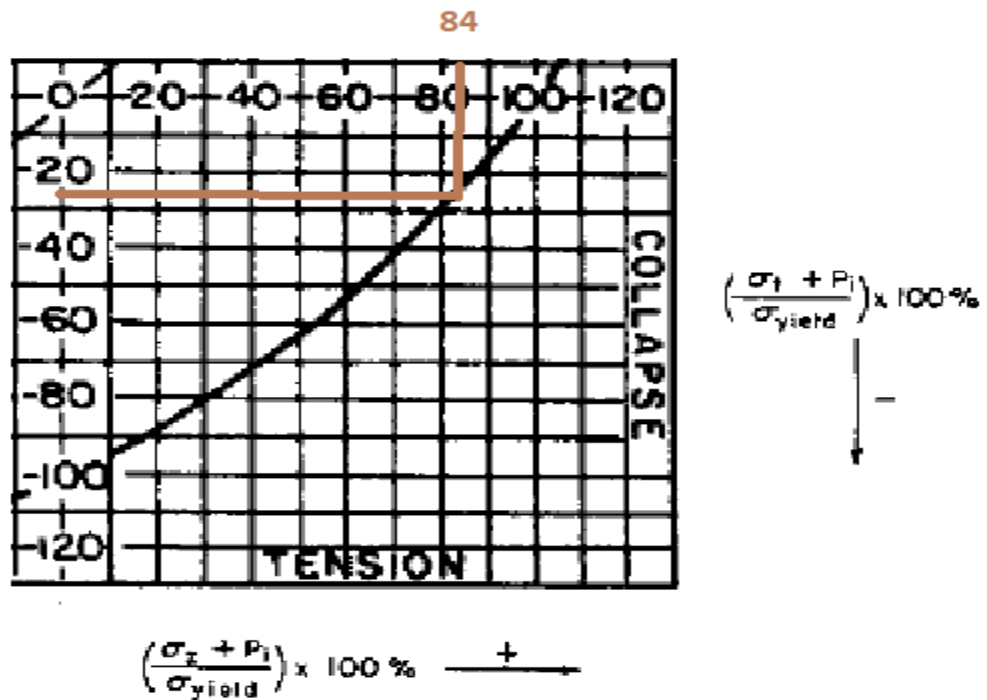
$$= \frac{7425 \text{ psi} \times 8,535^2 (9,625^2 + 8,535^2) (in^4) - 9827 \text{ psi} \times 9,625^2 \times 2 \times 8,535^2 (in^4)}{8,535^2 \times 9,625^2 - 8,535^4 (in^4)}$$

$$\Rightarrow \sigma_t = -35258 \text{ psi}$$

Οπότε:

$$\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = \left(\frac{-35258 \text{ psi} + 7425 \text{ psi}}{110000 \text{ psi}} \right) \times 100\% = -25\%$$

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.15 βρίσκουμε γραφικά ότι για $\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = -25\%$, η τιμή της σχέσης (4.13) είναι: $\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}} \right) \times 100\% = 84\%$.



Σχήμα 4.13: Έλλειψη πλαστικότητας (ellipse of plasticity) για αξονικό εφελκυστικό φορτίο και φορτίο αστοχίας κατάρρευσης

Στην τριαξονική φόρτιση, όσο αυξάνεται το αξονικό εφελκυστικό φορτίο που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή της σε αστοχία κατάρρευσης. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης τόσο μειώνεται η αντοχή της σε αξονικό εφελκυστικό φορτίο που είναι δυνατό να δεχτεί η σωλήνωση. Επομένως:

$$\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% \leq 84\% \Rightarrow \sigma_z \leq (0,84 \times \sigma_{yield}) - P_i \Rightarrow$$

$$\sigma_z \leq (0,84 \times 80000 \text{ psi}) - 7425 \text{ psi} \Rightarrow \sigma_z \leq 59775 \text{ psi}$$

Αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν τη μελέτη περίπτωσης, η δεύτερη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση που έχει σχεδιαστεί δύναται να αστοχήσει κατά το στάδιο της τσιμεντώσης αν δεχτεί αξονικό εφελκυστικό φορτίο $\sigma_z \geq 59775 \text{ psi}$.

4.6.5.2. Δεύτερο σενάριο τριαξονικής φόρτισης για τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση

Σε αυτή την περίπτωση ο πολφός του τσιμέντου καταλαμβάνει πλέον τον εξωτερικό δακτύλιο της σωλήνωσης και έχει πυκνότητα $\rho_{\text{cement}1920}=12 \text{ prg}$ για τα πρώτα 1920 m και $\rho_{\text{cement}3200}=16 \text{ prg}$ από τα 1920 m ως τα 3200 m. Αντίστοιχα, η σωλήνωση έχει πληρωθεί

εσωτερικά με λάσπη διάτρησης (displacement fluid) πυκνότητας $\rho_m=18$ ppg. Η εσωτερική πίεση που δέχεται η σωλήνωση στο βάθος έδρασής της από τη λάσπη διάτρησης (P_i) σε αυτό το στάδιο είναι:

$$P_i = \rho_m \times CSD = 18 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 3200 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} = 9827 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η εξωτερική πίεση (P_e) που δέχεται το πέλμα της σωλήνωσης σε αυτό το στάδιο από τον πολφό τσιμέντου είναι:

$$P_e = \rho_{\text{cement}1920} \times 1920 \text{ m} + \rho_{\text{cement}3200} \times (CSD - 1920 \text{ m}) =>$$

$$P_e = 12 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 1920 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} + 16 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (3200 - 1920) \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} => P_e = 7425 \text{ psi}$$

Για την εφαρμογή του κριτηρίου von Mises θα πρέπει στην έλλειψη πλαστικότητας του Σχήματος 4.8 να υπολογιστεί η τιμή της σχέσης (4.12). Για τον σκοπό αυτό, αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η κύρια εφαπτομενική τάση (σ_t) από τη σχέση 4.11. Τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.21.

Πίνακας 4.21: Δεδομένα υπολογισμού κύρια εφαπτομενικής τάσης (σ_t) για το δεύτερο σενάριο τριαξονικής φόρτισης

| P_i (psi) | P_e (psi) | r_o (in) | r_i (in) | $\sigma_{\text{yieldP110}}$ (psi) |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|
| 9827 | 7425 | 9,625 | 8,535 | 110.000 |

Έτσι από τη σχέση 4.11 προκύπτει:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 (r_o^2 + r^2) - P_e \cdot r_o^2 2r_i^2}{r_i^2 r_o^2 - r_i^4}$$

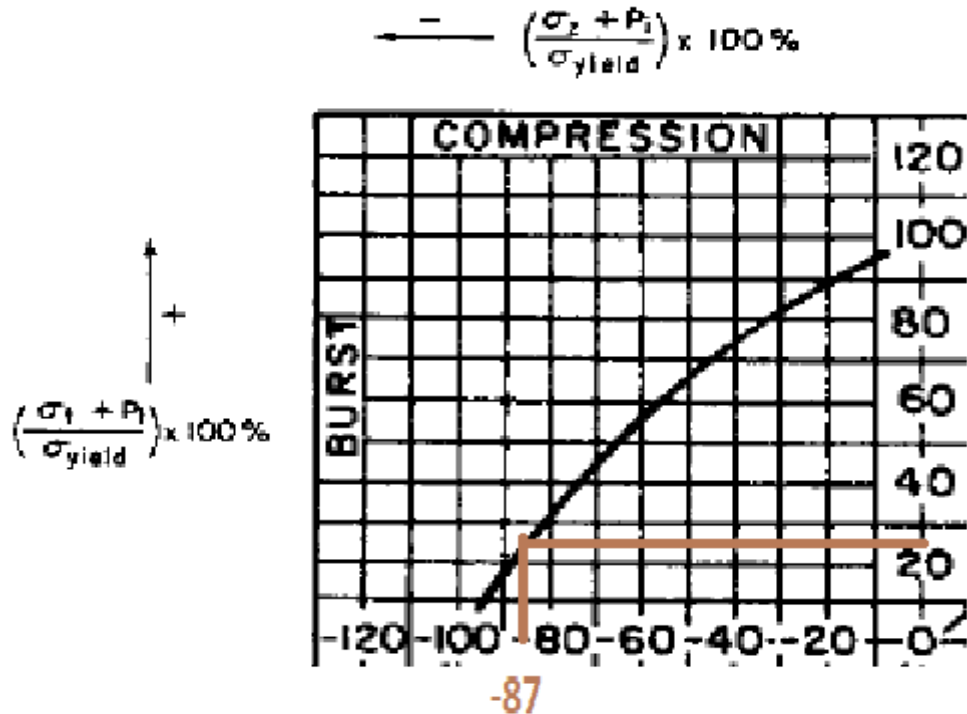
$$= \frac{9827 \text{ psi} \times 8,535^2 (9,625^2 + 8,535^2) (\text{in}^4) - 7425 \text{ psi} \times 9,625^2 \times 2 \times 8,535^2 (\text{in}^4)}{8,535^2 \times 9,625^2 - 8,535^4 (\text{in}^4)}$$

$$\Rightarrow \sigma_t = 18006 \text{ psi}$$

Οπότε:

$$\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{\text{yield}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{18006 \text{ psi} + 9827 \text{ psi}}{110000 \text{ psi}} \right) \times 100\% = 25\%$$

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4.16 βρίσκουμε γραφικά ότι για $\left(\frac{\sigma_t + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% = 25\%$, η τιμή της σχέσης 4.13 είναι: $\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% = -87\%$.



Σχήμα 4.14: Έλλειψη πλαστικότητας (ellipse of plasticity) για αξονικό φορτίο συμπίεσης και φορτίο διάρρηξης

Στην τριαξονική φόρτιση, όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο συμπίεσης που δέχεται η σωλήνωση τόσο μειώνεται η αντοχή της σε διάρρηξη. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η αντοχή σε διάρρηξη τόσο μειώνεται η αντοχή σε αξονικό φορτίο συμπίεσης που είναι δυνατό να δεχτεί η σωλήνωση. Επομένως:

$$\left(\frac{\sigma_z + P_i}{\sigma_{yield}}\right) \times 100\% \leq -87\% \Rightarrow \sigma_z \leq (-0,87 \times \sigma_{yield}) - P_i \Rightarrow$$

$$\sigma_z \leq (-0,87 \times 110000 \text{ psi}) - 9827 \text{ psi} \Rightarrow \sigma_z \leq -105527 \text{ psi}$$

Αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν τη μελέτη περίπτωσης, η δεύτερη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση που έχει σχεδιαστεί δύναται να αστοχήσει κατά το στάδιο της τσιμέντωσης αν δεχτεί αξονικό φορτίο συμπίεσης $\sigma_z \geq -105527 \text{ psi}$.

4.7. Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) παραγωγικού liner

4.7.1. Κριτήριο αστοχίας κατάρρευσης

Το μέγιστο φορτίο αστοχίας κατάρρευσης για τον σχεδιασμό του παραγωγικού liner βασίζεται σε συνθήκες που παρουσιάζονται προς το τέλος της παραγωγικής ζωής ενός ταμιευτήρα, όταν η πίεση στον ταμιευτήρα προσεγγίζει την πίεση εγκατάλειψης. Υπό αυτές τις συνθήκες, μια διαρροή στο παρέμβυσμα ή στη σωλήνωση θα μπορούσε να προκαλέσει την απώλεια ρευστού ολοκλήρωσης (completion fluid). Έτσι, για σχεδιαστικούς λόγους η σωλήνωση θεωρείται άδεια εσωτερικά από οποιοδήποτε ρευστό. Αντίστοιχα, εξωτερικά της σωλήνωσης θεωρείται ότι υπάρχει ρευστό διάτρησης.

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης το βάθος έδρασης του παραγωγικού liner είναι τα 3845 m. Ως προς μήκος του, εκτείνεται από τα 3100 m ως τα 3845m και επικαλύπτει (overlap) το κάτω μέρος της δεύτερης ενδιάμεσης-προστατευτικής σωλήνωσης, η οποία εδράζεται σε βάθος 3200m κατά 100 m. Εντός του επικαλυπτόμενου μήκους εμπεριέχεται το σύστημα ανάρτησης του παραγωγικού liner από τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2, για τη διάνοιξη του τελευταίου τμήματος της γεώτρησης, όπου θα τοποθετηθεί το παραγωγικό liner, χρησιμοποιήθηκε ρευστό διάτρησης με πυκνότητα $\rho_m = 12,8$ ppg.

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Συνεπώς, η εξωτερική πίεση (P_e) που ασκεί η λάσπη διάτρησης στην κορυφή του παραγωγικού liner (P_{e-3100}) είναι:

$$P_{e-3100} = 3100 \text{ m} \times \rho_m = 3100 \text{ m} \times 3,2808 \text{ ft/m} \times 12,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_{e-3100} = 7616 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, στο βάθος έδρασης του liner, η εξωτερική πίεση (P_{e-3845}) είναι:

$$P_{e-3845} = 3845 \text{ m} \times \rho_m = 3845 \text{ m} \times 3,2808 \text{ ft/m} \times 12,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_{e-3845} = 9446 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Καθώς στο εσωτερικό του το παραγωγικό liner θεωρείται άδειο η εσωτερική πίεση (P_i) σε όλο του το μήκος είναι ίση με 0 psi.

Συνεπώς, η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στην κορυφή του liner (P_{C-3100}) είναι:

$$P_{C-3100} = P_{e-3100} - P_{i-3100} = 7616 \text{ psi} - 0 \Rightarrow P_{C-3100} = 7616 \text{ psi}$$

Η πίεση αστοχίας κατάρρευσης στο βάθος έδρασης του liner, P_{C-3845} , είναι:

$$P_{C-3845} = P_{e-3845} - P_{i-3845} = 9446 \text{ psi} - 0 \Rightarrow P_{C-3845} = 9446 \text{ psi}$$

Οι τιμές αυτές της πίεσης αστοχίας κατάρρευσης που προκύπτουν διορθώνονται με τον συντελεστή ασφαλείας σε αστοχία κατάρρευσης, $SF_C = 1,1$ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.22.

Πίνακας 4.22: Τιμές φορτίων αστοχίας κατάρρευσης

| Depth (m) | Collapse Pressure (psi) | S.F. × Collapse Pressure (psi) |
|-----------|-------------------------|--------------------------------|
| 3100 | 6770 | 7616 |
| 3845 | 8396 | 9446 |

4.7.2. Κριτήριο αστοχίας λόγω διάρρηξης

Ως δυσμενέστερες συνθήκες φόρτισης για την περίπτωση αστοχίας λόγω διάρρηξης μιας παραγωγικής σωλήνωσης θεωρούνται αυτές κατά τις οποίες σε ένα πηγάδι παραγωγής η εξωτερική πίεση στο πέλμα της σωλήνωσης είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού, ενώ στο εσωτερικό της σωλήνωσης υπάρχει αέριο που παράγεται στο πηγάδι. Η παραγωγική σωλήνωση (production casing) θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην αστοχήσει ακόμα και αν ο σωλήνας παραγωγής (tubing) αστοχήσει. Διαρροή παραγόμενων ρευστών από τον σωλήνα παραγωγής είναι πιθανή σε οποιοδήποτε βάθος. Γενικά, θεωρείται ότι η πυκνότητα του υγρού ολοκλήρωσης (completion fluid) που βρίσκεται εντός της σωλήνωσης και πάνω από το παρέμβυσμα (packer) ισούται με την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης που απέμεινε εξωτερικά αυτής.

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης η αναμενόμενη πίεση εγκατάλειψης του σωλήνα παραγωγής (Shut In Tubing Pressure-SITP) είναι $SITP = 6.000 \text{ psi}$. Η πίεση πόρων του σχηματισμού (Pore Pressure-P.P.) στα 3100m είναι $P.P._{3100} = 10,7 \text{ ppq}$ (Σχήμα 4.1) και στα 3845 m είναι $P.P._{3845} = 12,2 \text{ ppq}$.

Υπολογισμός εσωτερικών φορτίων (P_i):

Για τον σχεδιασμό του liner σε διάρρηξη θεωρείται ότι ο σωλήνας παραγωγής θα αστοχήσει στην επιφάνεια και η εσωτερική πίεση που θα αναπτυχθεί στο liner είναι ίση με την πίεση εγκατάλειψης του σωλήνα παραγωγής (Shut In Tubing Pressure-SITP) = 6.000 psi. Σε αυτήν την πίεση θα πρέπει να προστεθεί και η πίεση που ασκεί το ρευστό του παρεμβύσματος (packer fluid), το οποίο έχει πυκνότητα $\rho_{pf}=8,8$ ppg.

Η εσωτερική πίεση στην κορυφή του liner (P_{i-3100}) θα είναι:

$$P_{i-3100} = SITP + 3100 \text{ m} \times \rho_{pf} = 6000 \text{ psi} + 3100 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \Rightarrow P_{i-3100} = 10654 \text{ psi}$$

Η εσωτερική πίεση στο πέλμα του liner (P_{i-3845}) θα είναι:

$$P_{i-3100} = SITP + 3845 \text{ m} \times \rho_{pf} = 6000 \text{ psi} + 3845 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times 8,8 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \Rightarrow P_{i-3100} = 11773 \text{ psi}$$

Υπολογισμός εξωτερικών φορτίων (P_e):

Η εξωτερική πίεση θεωρείται ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού. Συνεπώς, η εξωτερική πίεση στην κορυφή του liner (P_{e-3100}) θα είναι:

$$P_{e-3100} = 10,7 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times 3100 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_{e-3100} = 5658 \text{ psi}$$

Ομοίως, η εξωτερική πίεση στο πέλμα του liner (P_{e-3845}) θα είναι:

$$P_{e-3845} = 12,2 \text{ ppg} \times 0,052 \frac{\text{psi}}{\text{ppg}} \times 3845 \text{ m} \times 3,2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \Rightarrow P_{e-3845} = 8003 \text{ psi}$$

Η διαφορική πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη στην κορυφή του liner (P_{B-3100}) είναι:

$$P_{B-3100} = P_{i-3100} - P_{e-3100} = 10654 \text{ psi} - 5658 \text{ psi} = 4996 \text{ psi}$$

Αντίστοιχα, η πίεση που τείνει να προκαλέσει διάρρηξη στο πέλμα του liner (P_{B-3845}) είναι:

$$P_{B-3845} = P_{i-3845} - P_{e-3845} = 11773 \text{ psi} - 8003 \text{ psi} = 3770 \text{ psi}$$

Οι τιμές αυτές της πίεσης διάρρηξης που προκύπτουν διορθώνονται με τον συντελεστή ασφαλείας σε διάρρηξη, $SF_B = 1.1$ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.23.

Πίνακας 4.23: Τιμές φορτίων για αστοχία σε διάρρηξη

| Depth (m) | Burst Pressure (psi) | S.F. × Burst Pressure (psi) |
|-----------|----------------------|-----------------------------|
| 3100 | 4996 | 5495 |
| 3845 | 3770 | 4147 |

4.7.3. Επιλογή κατάλληλου τύπου σωλήνωσης

Τα φορτία διάρρηξης (burst loads) και αστοχίας κατάρρευσης (collapse loads) που υπολογίστηκαν είναι τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας liner και συνοψίζονται στον Πίνακα 4.24.

Πίνακας 4.24: Μέγιστα φορτία αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης για τη διαστασιολόγηση του παραγωγικού liner

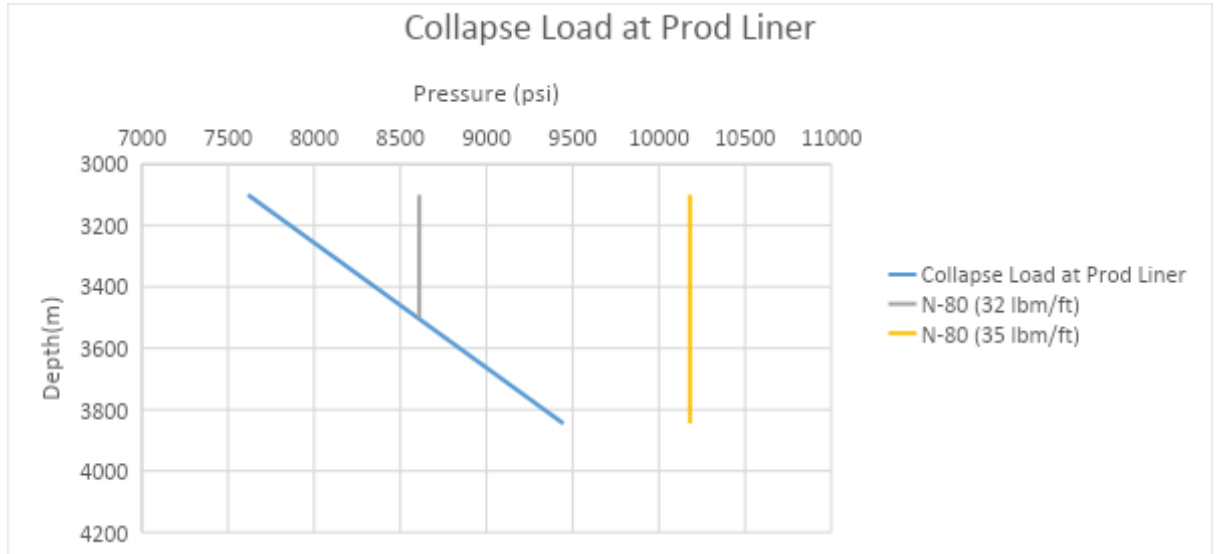
| Depth (m) | Collapse Loads (psi) | Burst Loads (psi) |
|-----------|----------------------|-------------------|
| 3100 | 7616 | 5495 |
| 3845 | 9446 | 4147 |

Οι κατηγορίες σωλήνωσης που καλύπτουν τόσο τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης, όσο και διάρρηξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.25.

Πίνακας 4.25: Μηχανικά χαρακτηριστικά κατηγοριών σωλήνωσης που πληρούν τις απαιτήσεις φορτίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης για το παραγωγικό liner (Παράρτημα Π1)

| Casing Grades | Collapse Resistance (psi) | Burst Resistance (psi) |
|-----------------|---------------------------|------------------------|
| N-80(32 lbm/ft) | 8610 | 9060 |
| N-80(35 lbm/ft) | 10180 | 9960 |

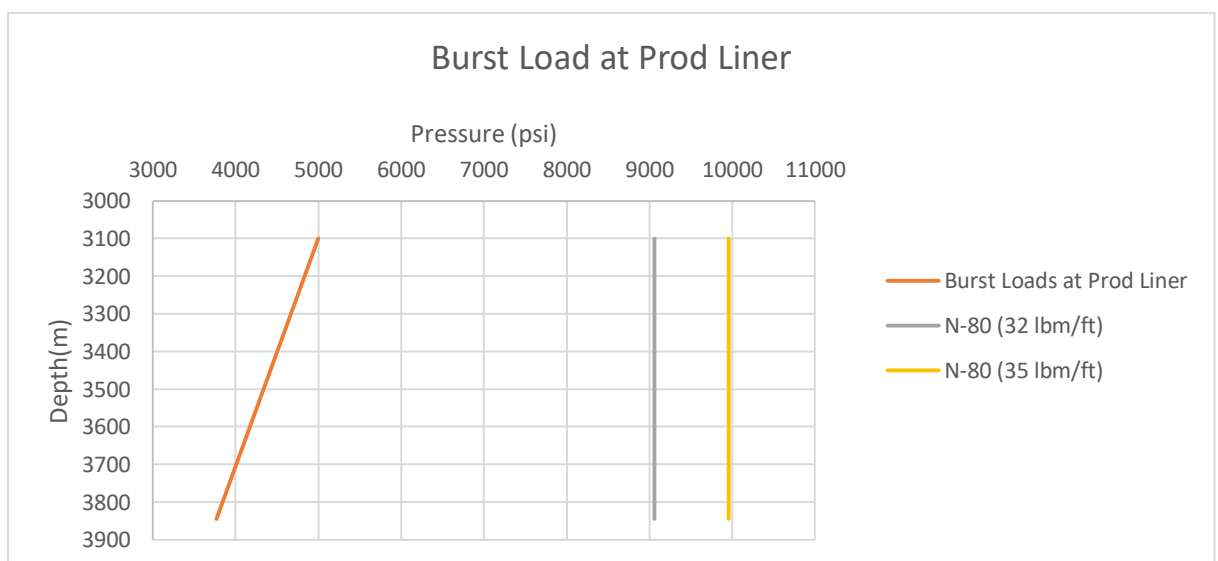
Η επιλογή του μήκους και του αντίστοιχου βάθους που θα τοποθετηθεί η κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες σωλήνωσης γίνεται με γραφικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η καμπύλη εξέλιξης των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης ως προς το βάθος και με κατακόρυφες γραμμές η αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης για κάθε κατηγορία σωλήνωσης.



Σχήμα 4.15: Γραφική επίλυση παραγωγικού liner για αστοχία κατάρρευσης

Το σημείο τομής της γραμμής N-80 (32 lb/ft) με την καμπύλη εξέλιξης με το βάθος των φορτίων αστοχίας κατάρρευσης (collapse loads) ορίζει το μέγιστο βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η κατηγορία σωλήνωσης. Το βάθος αυτό είναι τα 3500 m. Αντίστοιχα, η κατηγορία σωλήνωσης N-80 (35 lb/ft) παρουσιάζει αντοχή σε αστοχία κατάρρευσης πολύ μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού για τη σωλήνωση που εξετάζεται, οπότε το βάθος στο οποίο μπορεί να φτάσει με ασφάλεια ξεπερνάει τα 3845 m (βάθος έδρασης του παραγωγικού liner).

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον σχεδιασμό σε διάρρηξη, σύμφωνα με το Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.16: Γραφική επίλυση παραγωγικού liner για διάρρηξη

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι όλες οι διαθέσιμες κατηγορίες σωλήνωσης παρουσιάζουν αντοχή σε διάρρηξη πολύ μεγαλύτερη από το φορτίο σχεδιασμού ($P_{Bmax} = 5495$ psi) και συνεπώς πληρούν τις απαιτήσεις. Για οικονομικούς λόγους επιλέγεται η φθηνότερη κατηγορία N-80 (32 lb/ft) για όλο το μήκος του παραγωγικού liner (3100-3845 m).

Συνοψίζοντας, το παραγωγικό liner βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης και διάρρηξης διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 4.26: Επιλογή κατηγορίας για το παραγωγικό liner βάσει των κριτηρίων αστοχίας κατάρρευσης & διάρρηξης

| Βάθος (m) | Αστοχία κατάρρευσης | Βάθος (m) | Αστοχία Διάρρηξης | Βάθος (m) | ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ |
|-----------|---------------------|-----------|-------------------|-----------|----------------|
| 3100-3500 | N-80 (32lb/ft) | 3100-3845 | N-80 (32lb/ft) | 3100-3500 | N-80 (32lb/ft) |
| 3500-3845 | N-80 (35lb/ft) | | | 3500-3845 | N-80 (35lb/ft) |

4.7.4. Κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό

Το παραγωγικό liner θα διαμορφωθεί όπως φαίνεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 4-26:

3100-3500 m: N-80(32lb/ft) με ονομαστικό βάρος $NW_{N-80(32)} = 32$ lb/ft

3500-3845 m: N-80(35lb/ft) με ονομαστικό βάρος $NW_{N-80(35)} = 35$ lb/ft

Το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο για το παραγωγικό liner θεωρείται ότι είναι το βάρος στον αέρα ολόκληρης της στήλης του (αγνοείται η άνωση από το ρευστό διάτρησης) και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{tension} = NW_{N-80(32)} \times 400 \text{ m} + NW_{N-80(35)} \times 345 \text{ m} \Rightarrow F_{tension} =$$

$$32 \frac{lb}{ft} \times \frac{1}{0,3048 \text{ m/ft}} \times 400 \text{ m} + 35 \frac{lb}{ft} \times \frac{1}{0,3048 \text{ m/ft}} \times 345 \text{ m} \Rightarrow F_{tension} =$$

$$41994,75 \text{ lb} + 39616,14 \text{ lb} = 81611 \text{ lb}$$

Ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό είναι $SF_T = 1,3$. Συνεπώς το εφελκυστικό φορτίο σχεδιασμού με βάση τον συντελεστή ασφαλείας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Tdesign-SF} = 1,3 \times F_{tension} \Rightarrow F_{Tdesign} = 1,3 \times 81611 \text{ lb} = 106094 \text{ lb}$$

Το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής πίεσης παραλαμβάνεται από την σωλήνωση που βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του παραγωγικού liner.

Σύμφωνα με το Παράρτημα Π1 το όριο ελαστικότητας της σωλήνωσης N-80 (pipe body yield strength) με εξωτερική διάμετρο 7 in και ονομαστικό βάρος 32 lb/ft είναι ίσο με $745 \times 1000 = 745000 \text{ lbf}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της εφελκυστικής πίεσης σχεδιασμού που ασκείται στην σωλήνωση. Συνεπώς ο συγκεκριμένος τύπος σωλήνωσης είναι συμβατός με τα κριτήρια εφελκυστικού σχεδιασμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αποδοτικός και ασφαλής σχεδιασμός της σωλήνωσης μιας γεώτρησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα τόσο για την ομαλή λειτουργία της γεώτρησης, όσο και για την ασφάλεια των εργαζομένων. Οποιαδήποτε αστοχία της σωλήνωσης ενδέχεται να έχει μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ακόμα και απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Για τον λόγο αυτό ο σχεδιασμός της σωλήνωσης λαμβάνει υπόψη τα δυσμενέστερα σενάρια φορτίσεων που είναι πιθανό να προκύψουν, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης, και χρησιμοποιεί κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας, οι οποίοι διαμορφώνονται ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, αλλά και τη λειτουργία και την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της γεώτρησης.

Βάσει του προτύπου API Bulletin 5C3 του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίων (American Petroleum Institute-API) και σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό σωληνώσεων γεωτρήσεων, η διαδικασία σχεδιασμού έχει ως αφετηρία το διάγραμμα της βαθμίδας ρωγμάτωσης ως προς το βάθος. Στο διάγραμμα αυτό καθορίζεται επίσης η μεταβολή της πίεσης πόρων των σχηματισμών, από τους οποίους διέρχεται η γεώτρηση, μέχρι τον τελικό στόχο. Βάσει των πιέσεων των πόρων και των πιέσεων ρωγμάτωσης των σχηματισμών επιλέγονται τα βάθη έδρασης των επιμέρους σωληνώσεων που θα απαιτηθούν και εν συνέχεια οι διαστάσεις αυτών, που είναι συνάρτηση των διαστάσεων των κοπτικών άκρων (προκαταρκτικός σχεδιασμός).

Στη συνέχεια ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός της σωλήνωσης κατά τον οποίο αρχικά ορίζονται τα δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης για κάθε στήλη σωλήνωσης (επιφανειακή, ενδιάμεση και παραγωγικό liner) και για κάθε φάση λειτουργίας της γεώτρησης (διάτρηση, ολοκλήρωση, παραγωγή). Στο πλαίσιο αυτό προσδιορίζονται η πίεση που δύναται να προκαλέσει στη σωλήνωση αστοχία κατάρρευσης (εξωτερική πίεση) και η πίεση διάρρηξης (εσωτερική πίεση), για κάθε περίπτωση. Οι τιμές των πιέσεων αυτών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας χάλυβα και του ονομαστικού βάρους των σωληνώσεων (πάχος τοιχωμάτων) (λεπτομερής σχεδιασμός). Στη συνέχεια πρέπει να προσδιοριστούν τα αξονικά φορτία (axial loads) που δέχεται η σωλήνωση, διότι ενδέχεται ο συνδυασμός των αξονικών φορτίων με τις πιέσεις διάρρηξης και αστοχίας κατάρρευσης να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά αντοχής της σωλήνωσης.

Αν η στήλη της προστατευτικής σωλήνωσης κολλήσει κατά την τοποθέτησή της μέσα στη γεώτρηση, είναι πιθανό ο επιφανειακός εξοπλισμός να χρειαστεί να ασκήσει και επιπρόσθετο αξονικό εφελκυστικό φορτίο (tension load) ή/και φορτίο συμπίεσης (compression load) προκειμένου να την ξεκολλήσει, ενώ ταυτόχρονα η στήλη της προστατευτικής σωλήνωσης δέχεται και εσωτερική πίεση (φορτίο αστοχίας κατάρρευσης) και εξωτερική πίεση (φορτίο διάρρηξης).

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης που αναλύθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία απαιτείται ο έλεγχος σε τριαξονική φόρτιση κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης για τις δύο ενδιάμεσες-προστατευτικές σωληνώσεις διότι όχι μόνο καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της γεώτρησης με αποτέλεσμα να παραλαμβάνουν και το μεγαλύτερο μέρος των πιέσεων αλλά και η εισαγωγή του τσιμέντου μες στην γεώτρηση που είναι ένα ρευστό με διαφορετική πυκνότητα από αυτήν της λάσπης διάτρησης, επηρεάζει σημαντικά τις πιέσεις που δέχεται η σωλήνωση .

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, σχεδιάστηκαν εξ αρχής όλες οι στήλες σωλήνωσης που απαιτούνται για μια γεώτρηση (μελέτη περίπτωσης). Η επιλογή κατηγορίας χάλυβα και ονομαστικού βάρους (διαστασιολόγηση) βασίστηκε στους καταλόγους του Παραρτήματος Π1 (Σταματάκη, 2003). Για την πρώτη επιφανειακή σωλήνωση επιλέχθηκε κατηγορία H-40 (112,82 lb/ft) που χρησιμοποιείται ευρέως για επιφανειακές σωληνώσεις, με εξωτερική διάμετρο (24 in) και εσωτερική διάμετρο (23,124 in). Για τη δεύτερη επιφανειακή σωλήνωση επιλέχθηκε κατηγορία H-40 (94 lb/ft) που χρησιμοποιείται ευρέως για επιφανειακές σωληνώσεις, με εξωτερική διάμετρο 20 in. Απαιτείται χρήση δύο στηλών επιφανειακής σωλήνωσης, διότι η μία χρησιμοποιείται για να απομονώσει τον υδροφόρο ορίζοντα που συναντάται στα 200m και η άλλη για να προστατευθούν τα επόμενα βάρη από πιθανές ζώνες απωλειών λάσπης (mud loss zones) που έχουν εντοπιστεί μέχρι το βάθος των 500m.

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, εξαιτίας του παραθύρου διάτρησης που συναντάται μεταξύ των 2400-3200m κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν δύο ενδιάμεσες-προστατευτικές σωληνώσεις. Στην πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση επιλέχθηκε κατηγορία N-80 (72 lb/ft) που αποτελεί το στάνταρντ της βιομηχανίας για γεωρήσεις μέσου βάθους. Στη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση σχεδιάστηκε σύνθετη στήλη σωλήνωσης, δηλαδή σωλήνωση που αποτελείται από στελέχη διαφορετικής

κατηγορίας χάλυβα ή/και ονομαστικού βάρους, για τη βελτίωση της οικονομικότητας της γεώτρησης.

Για τη δεύτερη ενδιάμεση προστατευτική σωλήνωση χρησιμοποιήθηκαν στελέχη κατηγορίας χάλυβα P-110 με εξωτερική διάμετρο $9^{5/8}$ και ονομαστικό βάρος 43,5 lb/ft για τα πρώτα 300m και από τα 300m μέχρι τα 2600m χρησιμοποιήθηκαν στελέχη κατηγορίας χάλυβα N-80 με την ίδια εξωτερική διάμετρο και ονομαστικό βάρος 53,5 lb/ft. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν στελέχη κατηγορίας χάλυβα N-80 με την ίδια εξωτερική διάμετρο και ονομαστικό βάρος 47lb/ft από τα 2600m μέχρι το τελικό βάθος έδρασης της σωλήνωσης στα 3200m.

Το κριτήριο τριαξονικής φόρτισης που εφαρμόστηκε στη πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση είχε ως αποτέλεσμα ότι θα ήταν καταστροφικό για αυτή τη στήλη σωλήνωσης κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης η άσκηση αξονικού φορτίου συμπίεσης (compressive load) ανώτερο των 77241 psi (σύμφωνα με το 1^ο σενάριο που εξετάστηκε) και αξονικού εφελκυστικού φορτίου 11106 psi (σύμφωνα με το 2^ο σενάριο). Για τη δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωση το κριτήριο τριαξονικής φόρτισης είχε ως αποτέλεσμα ότι θα ήταν καταστροφικό για αυτή την στήλη σωλήνωσης κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης να ασκηθεί αξονικό φορτίο συμπίεσης (compressive load) ανώτερο των 105527psi (για το 1^ο σενάριο) και αξονικό εφελκυστικό φορτίο 59775 psi (για το 2^ο σενάριο).

Το μέγιστο αξονικό φορτίο κατά την φάση της τσιμέντωσης, ο υπολογισμός του οποίου παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.4.4 της παρούσας, δεν θα πρέπει να βρίσκεται εκτός των ορίων που διαμορφώνονται από το κριτήριο τριαξονικής φόρτισης.

Το παραγωγικό liner αποτελείται από σύνθετη στήλη. Από τα 3100m μέχρι τα 3500m θα περιλαμβάνει στελέχη κατηγορίας χάλυβα N-80, εξωτερικής διαμέτρου 7in και ονομαστικού βάρους 32lb/ft. Στη συνέχεια από τα 3500m μέχρι το τελικό βάθος έδρασης του (3850m) θα περιλαμβάνει στελέχη κατηγορίας χάλυβα N-80 ίδιας διαμέτρου με ονομαστικό βάρος 35lb/ft.

Με τον σχεδιασμό της σωλήνωσης κατακόρυφων γεωτρήσεων, εκτελώντας μηχανική ανάλυση και λαμβάνοντας υπόψη τη δράση επί τόπου τάσεων, ασχολήθηκαν οι Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, η έρευνα των οποίων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Όμως η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, όπως υποστηρίζουν και οι συγγραφείς,

έχει ως σκοπό την κατανόηση των βασικότερων επιστημονικών αρχών που αφορούν την τεχνολογία των γεωτρήσεων. Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν σε excel και εξετάστηκαν τα απολύτως βασικά σενάρια φόρτισης για κάθε στήλη σωλήνωσης με αρκετά απλουστευτικές παραδοχές, λόγω περιοσμένης υπολογιστικής ισχύος και μη διαθεσιμότητας των λεπτομερειών σχεδιασμού της γεώτρησης.

Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να προχωρήσει παραπέρα σε δύο επίπεδα: Καταρχήν, ο σχεδιασμός της σωλήνωσης να γίνει με κατάλληλο ειδικό λογισμικό και κατά δεύτερον να διερευνηθούν πως ορισμένες παράμετροι επηρεάζουν τον συνολικό σχεδιασμό της σωλήνωσης της συγκεκριμένης γεώτρησης.

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται, για παράδειγμα, το σενάριο σχεδιασμού σε τριαξονική φόρτιση. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε για τη συμβατική διαδικασία τσιμέντωσης. Παραπέρα θα μπορούσε να εφαρμοστεί και για μη συμβατικές διαδικασίες τσιμέντωσης (squeeze cementing), που δυνητικά θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη γεώτρηση κατά τη φάση πιθανών εργασιών συντήρησης.

Θα μπορούσαν επίσης να εξεταστούν πιο σύνθετες καταστάσεις φορτίσεων, κατά τη φάση παραγωγής της γεώτρησης, που σχετίζονται, για παράδειγμα, με τις μεταβολές της θερμοκρασίας ή/και την παρουσία θείου (S) στα παραγόμενα ρευστά.

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι στη μελέτη τυχαίας γεώτρησης θα υπάρξει απαίτηση να ληφθούν επιπρόσθετα υπόψιν τα φαινόμενα κάμψης, ιδίως στα σημεία όπου εμφανίζεται μέγιστος βαθμός dog leg severity, καθώς η κάμψη δημιουργεί επιπρόσθετα αξονικά φορτία. Στην προκειμένη μελέτη περίπτωσης δεν απαιτήθηκε καθώς η γεώτρηση είναι κατακόρυφη.

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Σταματάκη, 2003)
(συνέχεια)

| Nominal Weight and Threads | Wall Thickness | Inside Diameter | Drift Diameter | Threaded and Coupled | | Extreme Line | | Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf) | Pain End or Thread | **Internal Pressure Resistance, psi | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|--|-------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-------|
| | | | | Outside Diameter of Coupling | Outside Diameter Special Coupling | Outside Diameter of Box | Collapse Resistance (psi) | | | Butress Thread | Special Coupling | | | | | Threaded and Coupled Butress Thread | | | | | | | | |
| Size Coupling (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | (in.) | Line | Short | Long | Same Grade | Higher Grade | Same Grade | Higher Grade | Short | Long | Regular Coupling Grade | Higher Grade | Special Coupling Grade | Higher Grade | Special Coupling Grade | Extreme Line | |
| 10 3/4 | 51.00 | 4.50 | 9.580 | 9.694 | 11.750 | 11.250 | 9.694 | 11.460 | 3.400 | 6.590 | 6.590 | 6.590 | 6.590 | 4.150 | 4.150 | 692 | 1.297 | 1.297 | 1.297 | 1.112 | 1.112 | 1.112 | 1.112 | 1.455 |
| | 55.50 | 4.95 | 9.750 | 9.604 | 11.750 | 11.250 | 9.604 | 11.460 | 4.160 | 7.250 | 6.880 | 7.250 | 7.250 | 4.150 | 4.150 | 771 | 1.409 | 1.409 | 1.409 | 1.112 | 1.112 | 1.112 | 1.112 | 1.595 |
| | 51.00 | 4.50 | 9.580 | 9.694 | 11.750 | 11.250 | 9.694 | 11.460 | 3.480 | 6.960 | 6.880 | 6.960 | 6.960 | 4.150 | 4.150 | 927 | 1.354 | 1.354 | 1.354 | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.529 |
| | 55.50 | 4.95 | 9.750 | 9.604 | 11.750 | 11.250 | 9.604 | 11.460 | 4.290 | 7.560 | 7.860 | 7.560 | 7.560 | 4.150 | 4.150 | 1.032 | 1.483 | 1.483 | 1.483 | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.875 |
| | 51.00 | 4.50 | 9.580 | 9.694 | 11.750 | 11.250 | 9.694 | 11.460 | 3.660 | 8.060 | 7.860 | 7.450 | 7.450 | 4.150 | 4.150 | 1.080 | 1.594 | 1.594 | 1.594 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.820 |
| | 55.50 | 4.95 | 9.750 | 9.604 | 11.750 | 11.250 | 9.604 | 11.460 | 4.610 | 8.860 | 7.860 | 7.450 | 7.450 | 4.150 | 4.150 | 1.203 | 1.745 | 1.745 | 1.745 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.983 |
| | 60.70 | 5.145 | 9.660 | 9.504 | 11.750 | 11.250 | 9.504 | 11.460 | 5.880 | 9.760 | 7.860 | 7.450 | 7.450 | 4.150 | 4.150 | 1.338 | 1.912 | 1.912 | 1.912 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 2.000 |
| | 65.70 | 5.585 | 9.580 | 9.404 | 11.750 | 11.250 | 9.404 | 11.460 | 7.590 | 10.650 | 7.860 | 7.450 | 7.450 | 4.150 | 4.150 | 1.472 | 2.077 | 2.077 | 2.077 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 1.370 | 2.000 |
| 11 3/4 | 42.00 | 0.333 | 11.084 | 10.928 | 12.750 | 12.750 | 10.928 | 12.750 | 1.040 | 1.980 | 1.980 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 307 | 477 | 477 | 477 | 807 | 807 | 807 | 807 | 807 |
| | 47.00 | 0.375 | 11.000 | 10.844 | 12.750 | 12.750 | 10.844 | 12.750 | 1.510 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 477 | 807 | 807 | 807 | 807 | 807 | 807 | 807 | 807 |
| | 54.00 | 0.435 | 10.980 | 10.724 | 12.750 | 12.750 | 10.724 | 12.750 | 2.070 | 3.560 | 3.560 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 568 | 831 | 831 | 831 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 2.680 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 649 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 | 1.042 |
| | 47.00 | 0.375 | 11.000 | 10.844 | 12.750 | 12.750 | 10.844 | 12.750 | 1.510 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 3.070 | 509 | 935 | 935 | 935 | 1.079 | 1.079 | 1.079 | 1.079 | 1.079 |
| | 54.00 | 0.435 | 10.980 | 10.724 | 12.750 | 12.750 | 10.724 | 12.750 | 2.070 | 3.560 | 3.560 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 606 | 1.079 | 1.079 | 1.079 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 2.680 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 4.010 | 693 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 | 1.208 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.070 | 5.460 | 5.460 | 5.460 | 5.460 | 5.460 | 5.460 | 869 | 1.361 | 1.361 | 1.361 | 1.361 | 1.361 | 1.361 | 1.361 | 1.361 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.190 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 913 | 1.389 | 1.389 | 1.389 | 1.389 | 1.389 | 1.389 | 1.389 | 1.389 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.190 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 5.830 | 924 | 1.440 | 1.440 | 1.440 | 1.440 | 1.440 | 1.440 | 1.440 | 1.440 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.390 | 6.330 | 6.330 | 6.330 | 6.330 | 6.330 | 6.330 | 1.011 | 1.517 | 1.517 | 1.517 | 1.517 | 1.517 | 1.517 | 1.517 | 1.517 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.440 | 6.920 | 6.920 | 6.300 | 6.300 | 6.300 | 6.300 | 1.088 | 1.586 | 1.586 | 1.586 | 1.586 | 1.586 | 1.586 | 1.586 | 1.586 |
| | 60.00 | 0.489 | 10.772 | 10.616 | 12.750 | 12.750 | 10.616 | 12.750 | 3.610 | 8.010 | 5.830 | 6.300 | 6.300 | 6.300 | 6.300 | 1.242 | 1.877 | 1.877 | 1.877 | 1.877 | 1.877 | 1.877 | 1.877 | 1.877 |
| 13% | 48.00 | 0.330 | 12.715 | 12.559 | 14.375 | 14.375 | 12.559 | 14.375 | 740 | 1.730 | 1.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 322 | 909 | 909 | 909 | 909 | 909 | 909 | 909 | 909 |
| | 54.50 | 0.380 | 12.615 | 12.459 | 14.375 | 14.375 | 12.459 | 14.375 | 1.340 | 2.730 | 2.730 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 514 | 909 | 909 | 909 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 |
| | 61.00 | 0.430 | 12.515 | 12.359 | 14.375 | 14.375 | 12.359 | 14.375 | 1.840 | 3.090 | 3.090 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 595 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.440 | 3.450 | 3.450 | 3.810 | 3.810 | 3.810 | 3.810 | 676 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 | 1.025 |
| | 54.50 | 0.380 | 12.615 | 12.459 | 14.375 | 14.375 | 12.459 | 14.375 | 1.340 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 547 | 1.038 | 1.038 | 1.038 | 1.038 | 1.038 | 1.038 | 1.038 | 1.038 |
| | 61.00 | 0.430 | 12.515 | 12.359 | 14.375 | 14.375 | 12.359 | 14.375 | 1.840 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 3.090 | 633 | 1.169 | 1.169 | 1.169 | 1.169 | 1.169 | 1.169 | 1.169 | 1.169 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.440 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 3.450 | 718 | 1.300 | 1.300 | 1.300 | 1.300 | 1.300 | 1.300 | 1.300 | 1.300 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.800 | 4.710 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 905 | 1.486 | 1.486 | 1.486 | 1.486 | 1.486 | 1.486 | 1.486 | 1.486 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.200 | 5.040 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 978 | 1.588 | 1.588 | 1.588 | 1.588 | 1.588 | 1.588 | 1.588 | 1.588 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.860 | 5.020 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 952 | 1.545 | 1.545 | 1.545 | 1.545 | 1.545 | 1.545 | 1.545 | 1.545 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.260 | 5.020 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.029 | 1.650 | 1.650 | 1.650 | 1.650 | 1.650 | 1.650 | 1.650 | 1.650 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.860 | 5.020 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 963 | 1.585 | 1.585 | 1.585 | 1.585 | 1.585 | 1.585 | 1.585 | 1.585 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.260 | 5.390 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.040 | 1.693 | 1.693 | 1.693 | 1.693 | 1.693 | 1.693 | 1.693 | 1.693 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.820 | 5.650 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.057 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.220 | 6.030 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.142 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.820 | 5.650 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.057 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.220 | 6.030 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.142 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.820 | 5.650 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.057 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.220 | 6.030 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.142 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 | 1.787 |
| | 68.00 | 0.480 | 12.415 | 12.259 | 14.375 | 14.375 | 12.259 | 14.375 | 2.820 | 5.650 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.057 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 | 1.683 |
| | 72.00 | 0.514 | 12.347 | 12.191 | 14.375 | 14.375 | 12.191 | 14.375 | 3.220 | 6.030 | 4.550 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 4.300 | 1.142 | 1.787 | 1.787 | | | | | | |

Πίνακας Π1: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σωληνώσεων (Σταματάκη, 2003)

(συνέχεια)

| % | Nominal Weight and Threads (lb/ft) | Size Outside Diameter (in) | Wall Thickness (in) | Inside Diameter (in) | Outside Diameter of Coupling (in) | Special Clearance (in) | Ditch Diameter (in) | Outside Diameter of Box (in) | Collapse Resistance (psi) | Pipe Body Yield Strength (1,000 lb) | Plain End or Extreme Line | | Buttress Thread | | | | Treated and Coupled | | | | | | | | | |
|-------|------------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------|------|------|------|
| | | | | | | | | | | | Round Thread | Same Higher Grade | Regular Coupling | Special Clearance Higher Grade | Round Thread | Regular Coupling | Special Clearance Higher Grade | Buttress Thread | Regular Coupling | Special Clearance Higher Grade | Buttress Thread | Special Clearance Higher Grade | Extreme Line | | | |
| 7% | 24.00 | H-40 | 0.300 | 7.035 | 6.900 | 8.500 | 8.125 | 6.750 | 8.010 | 2.030 | 278 | 2.750 | 2.750 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 315 | 346 | 483 | 483 | 553 | 553 |
| 28.40 | H-40 | 0.328 | 6.959 | 6.844 | 8.500 | 8.125 | 6.750 | 8.010 | 2.890 | 414 | 414 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 342 | 377 | 591 | 591 | 824 | 824 |
| 26.40 | K-35 | 0.338 | 6.989 | 6.944 | 8.500 | 8.125 | 6.750 | 8.010 | 2.890 | 414 | 414 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 4.140 | 342 | 377 | 591 | 591 | 824 | 824 |
| 29.40 | C-75 | 0.328 | 6.989 | 6.844 | 8.500 | 8.125 | 6.750 | 8.010 | 2.890 | 564 | 564 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 5.650 | 461 | 524 | 684 | 684 | 924 | 924 |
| 29.70 | C-75 | 0.375 | 6.875 | 6.750 | 8.500 | 8.125 | 6.750 | 8.010 | 4.650 | 641 | 641 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 6.450 | 542 | 606 | 766 | 766 | 1006 | 1006 |
| 33.70 | C-75 | 0.430 | 6.756 | 6.650 | 8.500 | 8.125 | 6.640 | 8.010 | 6.300 | 729 | 729 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 7.400 | 635 | 706 | 866 | 866 | 1106 | 1106 |
| 39.00 | C-75 | 0.500 | 6.501 | 6.525 | 8.500 | 8.125 | 6.500 | 8.010 | 8.400 | 889 | 889 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 8.610 | 751 | 829 | 989 | 989 | 1229 | 1229 |
| 42.80 | C-75 | 0.562 | 6.501 | 6.536 | 8.500 | 8.125 | 6.500 | 8.010 | 10.240 | 989 | 989 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 9.970 | 852 | 935 | 1095 | 1095 | 1335 | 1335 |
| 45.30 | C-75 | 0.585 | 6.435 | 6.530 | 8.500 | 8.125 | 6.500 | 8.010 | 10.730 | 986 | 986 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 9.840 | 805 | 888 | 1048 | 1048 | 1288 | 1288 |
| 47.10 | C-75 | 0.625 | 6.375 | 6.250 | 8.500 | 8.125 | 6.500 | 8.010 | 11.290 | 1031 | 1031 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 10.760 | 853 | 936 | 1096 | 1096 | 1336 | 1336 |

Πίνακας Π2: Αριθμητικές πράξεις για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου διάρρηξης για την πρώτη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωσης

| Depth(m) | Pext(psi) | Pint(psi) | Burst Load*SF |
|------------|------------|-------------|---------------|
| 0 | 0 | 3000 | 3300.0 |
| 100 | 145 | 3307 | 3478.3 |
| 200 | 290 | 3614 | 3656.6 |
| 300 | 440 | 3921 | 3829.2 |
| 300 | 440 | 3921 | 3829.2 |
| 400 | 594 | 4228 | 3998.1 |
| 458 | 680 | 4406 | 4099.3 |
| 500 | 742 | 4417 | 4042.9 |
| 600 | 891 | 4444 | 3908.5 |
| 700 | 1039 | 4470 | 3774.1 |
| 800 | 1201 | 4496 | 3624.7 |
| 900 | 1351 | 4522 | 3488.4 |
| 1000 | 1501 | 4549 | 3352.1 |
| 1100 | 1727 | 4575 | 3133.3 |
| 1200 | 1965 | 4601 | 2899.4 |
| 1300 | 2129 | 4627 | 2748.2 |
| 1300 | 2151 | 4627 | 2723.8 |
| 1400 | 2317 | 4654 | 2570.6 |
| 1500 | 2482 | 4680 | 2417.4 |
| 1600 | 2620 | 4706 | 2294.3 |
| 1700 | 2784 | 4732 | 2143.0 |
| 1800 | 2917 | 4759 | 2025.5 |
| 1900 | 3079 | 4785 | 1876.1 |
| 2000 | 3241 | 4811 | 1726.7 |
| 2100 | 3404 | 4837 | 1577.3 |
| 2200 | 3566 | 4864 | 1427.9 |
| 2300 | 3728 | 4890 | 1278.5 |
| 2400 | 3931 | 4916 | 1084.0 |

Πίνακας Π3: Αριθμητικές πράξεις για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου διάρρηξης για την δεύτερη ενδιάμεση-προστατευτική σωλήνωσης

| Depth(m) | Pext(ψι) | Pint(ψι) | Burst Load*SF |
|-------------|-------------|--------------|---------------|
| 0 | 0 | 6000 | 6600 |
| 100 | 145 | 6218 | 6681 |
| 200 | 290 | 6437 | 6761 |
| 300 | 440 | 6655 | 6836 |
| 300 | 440 | 6655 | 6836 |
| 400 | 594 | 6873 | 6908 |
| 500 | 742 | 7092 | 6985 |
| 600 | 891 | 7310 | 7062 |
| 700 | 1039 | 7529 | 7139 |
| 800 | 1201 | 7747 | 7201 |
| 900 | 1351 | 7965 | 7276 |
| 1000 | 1501 | 8184 | 7351 |
| 1100 | 1727 | 8402 | 7343 |
| 1200 | 1965 | 8620 | 7321 |
| 1300 | 2129 | 8839 | 7381 |
| 1300 | 2151 | 8839 | 7356 |
| 1400 | 2317 | 9057 | 7414 |
| 1500 | 2482 | 9276 | 7473 |
| 1600 | 2620 | 9494 | 7561 |
| 1700 | 2784 | 9712 | 7621 |
| 1800 | 2917 | 9931 | 7715 |
| 1900 | 3079 | 10149 | 7777 |
| 2000 | 3241 | 10367 | 7839 |
| 2100 | 3404 | 10586 | 7901 |
| 2200 | 3566 | 10804 | 7962 |
| 2300 | 3728 | 11023 | 8024 |
| 2317 | 3728 | 11061 | 8066 |
| 2400 | 3931 | 11082 | 7867 |
| 2500 | 4094 | 11109 | 7716 |
| 2600 | 4258 | 11135 | 7564 |
| 2700 | 4422 | 11161 | 7413 |
| 2800 | 4586 | 11187 | 7262 |
| 2800 | 7977 | 11187 | 3531 |
| 2850 | 8120 | 11201 | 3389 |
| 2850 | 5203 | 11201 | 6598 |
| 2900 | 5294 | 11214 | 6512 |
| 3000 | 5476 | 11240 | 6340 |

| | | | |
|------|------|-------|------|
| 3100 | 5659 | 11266 | 6168 |
| 3200 | 5841 | 11292 | 5996 |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adams, N.J. (1985). *Drilling engineering-A Complete Well Planning Approach*. Tulsa: PennWell.
- Allen, T. (1998). *Production Operations*.
- Hossain, M.E., & Al-Mejed, A. A. (2015). *Fundamentals of Sustainable drilling engineering*. Scrivener publishing
- Bourgoyrne, A. (1986). *Applied Drilling Engineering*.
- Byrom. (2015). *Casing and liner for drilling and completion-Design and application*.
- Clegg. (2007). *Petroleum engineering handbook, Production Operations Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Devereaux, S. (1998). *Practical Well Planning & Drilling Manual*. Pennwell.
- Fothergill. (2003). *Ratings standardization for production packers*.
- Giancolm, A. (1992). *Inflatable Packer Fundamentals*.
- Guo, L. (2007). *Petroleum Production Engineering-Second Edition*.
- Mitchell. (2011). *Fundamental of drilling engineering*.
- Patton, L. A. (1985). *Well Completion and Workovers*. Dallas.
- Petrowiki. (n.d.).
- Rabia, H. (2002). *Well engineering & Construction*.
- Rahman, C. &. (1995). *Casing Design-Theory and Practice*.
- Schlumberger Oilfield Glossary. (n.d.).
- University, H. W. (2005). *Drilling engineering*.
- Σταματάκη. (2003). *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Rigzone. (n.d.). How does casing works, types of casing
- Society of Petroleum Engineers (SPE) - journal
- drillingformulas.com. (n.d.)

