



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Σχεδιασμός, Προσδιορισμός Φορτίων Καταπόνησης και
Διαστασιολόγηση Επένδυσης Βαθείας Γεώτρησης για την
Παραγωγή Υδρογονανθράκων



Διπλωματική Εργασία: Τασιούλης Φώτιος

Τριμελής Επιτροπή: Βαρότσης Νικόλαος (Επιβλέπων Καθηγητής)

Πασαδάκης Νικόλαος (Καθηγητής)

Γαγάνης Βασίλειος (ΕΔΙΠ)

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους, που με την βοήθεια και την πρόθυμη στήριξη τους, κατέστη εφικτή η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Πρωτίστως, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβέποντα καθηγητή μου κ. Βαρότση Νικόλαο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, καθώς υπήρξε πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να μου παράσχει τόσο τις επιστημονικές του γνώσεις, όσο και την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Πασαδάκη Νικόλαο, για τη συνεισφορά του στην διπλωματική εργασία και για την βοήθεια που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ κ. Γαγάνη Βασίλειο για την άψογη συνεργασία, την αμέριστη βοήθεια και τη στήριξη που μου παρείχε από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ειρήνη Βοναπάρτη για την πίστη και την υποστήριξη που έδειξε προς το πρόσωπό μου. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επιλογή κατάλληλων τύπων επένδυσης οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σε μια γεώτρηση υδρογονανθράκων, με σκοπό η τελευταία να φτάσει με ασφάλεια στο επιθυμητό βάθος παραγωγής του κοιτάσματος. Ο επιτυχημένος σχεδιασμός καθώς και η επιλογή κατάλληλων τύπων επένδυσης αποτελούν κομβικής σημασίας παράγοντες καθώς τυχόν αστοχία τους, αφενός μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα όπως κατάρρευση της γεώτρησης, μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, ακόμη και πρόκληση εργατικού δυστυχήματος και αφετέρου μπορεί να επηρεάσει το κόστος κατασκευής της επένδυσης, το οποίο είναι πολύ μεγάλο και ασύμφορο σε περίπτωση που χρειαστεί αυτή να αντικατασταθεί.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής επιμέρους θέματα: Αρχικά γίνεται αναφορά στις διάφορες λειτουργίες της επένδυσης καθώς και στα διαφορετικά προβλήματα τα οποία μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή και να αντιμετωπιστούν με την χρήση της.

Στην συνέχεια περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται μια ολοκληρωμένη επένδυση γεώτρησης καθώς και η διαδικασία επιλογής των ποικίλων τύπων που την αποτελούν.

Επιπρόσθετα μελετήθηκαν και υπολογίστηκαν συγκεκριμένα σχεδιαστικά κριτήρια, με βασικό στόχο ο σχεδιασμός του προγράμματος επένδυσης να είναι όσο το δυνατόν αξιόπιστος και ασφαλής. Τέλος για την επιλογή κατάλληλου τύπου επένδυσης έγιναν δοκιμές αντοχής υποθετικών σεναρίων καταπόνησης, με σκοπό να εξασφαλιστεί η επιτυχία του προγράμματος επένδυσης.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Υδρογονάνθρακες	8
1.2	Γεωτρήσεις υδρογονανθράκων	8
1.3	Διαδικασία της γεώτρησης	9
1.4	Ασφάλιση της γεώτρησης	11
1.5	Χαρακτηριστικά της επένδυσης	12
1.6	Επένδυση (Casing)	12
1.7	Ολοκλήρωση της γεώτρησης	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

2.1	Γενικά	15
2.2	Θεμελιακή επένδυση	15
2.3	Επιφανειακή επένδυση	15
2.4	Ενδιάμεση επένδυση	16
2.5	Παραγωγική επένδυση	16
2.6	Liner	17
2.7	Ταξινόμηση τύπων επένδυσης	18
2.8	Προδιαγραφές της επένδυσης	18
2.9	Δευτερεύοντα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της γεώτρησης	22
2.10	Κεφαλή της γεώτρησης (Wellhead)	23
2.11	Αποτρεπτής έκρηξης (Blow Out Preventer)	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

3.1	Γενικά	26
3.2	Πίεση θραύσης και πίεση του σχηματισμού	26
3.3	Κανονική και ανώμαλη πίεση του σχηματισμού	27

3.4	Ισοδύναμη πυκνότητα πολφού	28
3.5	Επιλογή επένδυσης για την ρύθμιση του βάθους	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

4.1	Γενικά	31
4.2	Συντελεστές ασφάλειας για τον σχεδιασμό επένδυσης (design factors)	32
4.3	Σχεδιασμός επένδυσης λόγω καταπόνησης	33
4.3.1	Αντοχή σε κατάρρευση	34
4.3.2	Αντοχή σε έκρηξη	37
4.3.3	Αξονικά φορτία – τάσεις	38
4.4	Σχεδιασμός επιφανειακής επένδυσης	
4.4.1	Γενικά	40
4.4.2	Κατάρρευση	40
4.4.3	Έκρηξη	42
4.4.4	Αξονικά φορτία – τάσεις	44
4.5	Σχεδιασμός ενδιάμεσης επένδυσης	46
4.5.1	Κατάρρευση	46
4.5.2	Έκρηξη	47
4.6	Σχεδιασμός παραγωγικής επένδυσης	49
4.6.1	Κατάρρευση	49
4.6.2	Έκρηξη	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

5.1	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	52
5.2	Συλλογή δεδομένων	52
5.3	Υπολογισμός βάθους τοποθέτησης και αριθμού τύπων επένδυσης για την γεώτρηση	53
5.4	Επιλογή τύπων επένδυσης	56
5.5	Υπολογισμός εξωτερικής διαμέτρου επένδυσης	56

5.6	Σχεδιασμός επιφανειακής επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (20 in.) _____	59
5.7	Σχεδιασμός ενδιάμεσης επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (13.375 in.) _____	68
5.8	Σχεδιασμός δεύτερης ενδιάμεσης εξωτερικής διαμέτρου (9.625 in.) _____	79
5.9	Σχεδιασμός παραγωγικής επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (7 in.) _____	89
5.10	Επιβεβαίωση επιλεγόμενης διαμέτρου για κάθε τύπο επένδυσης σύμφωνα με τα κοπτικά άκρα _____	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1	Γενικά συμπεράσματα _____	100
6.2	Προτάσεις _____	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1	Ελληνική βιβλιογραφία _____	102
7.2	Αγγλική βιβλιογραφία _____	103
7.3	Αναφορές ιστοσελίδων _____	103

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υδρογονάνθρακες

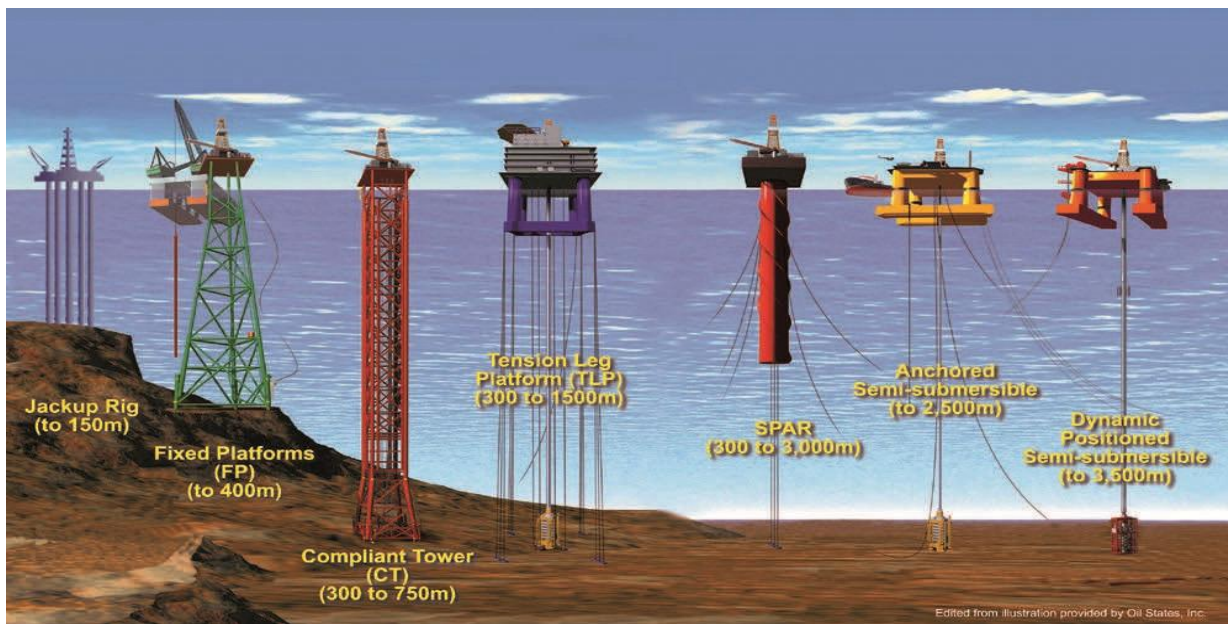
Οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο/αέριο) αποτελούν την σημαντικότερη μορφή φυσικής ενέργειας που αξιοποιείται για τις ανθρώπινες ανάγκες κατά τα τελευταία 150 χρόνια.

Η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη σε όλους τους τομείς των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων καθώς αποτελούν πρωταρχική ύλη για την παραγωγή άλλων μορφών ενέργειας (πχ ηλεκτρισμός), χρησιμοποιούνται ως βασικά συστατικά στα είδη πρώτων αναγκών (πχ στο ρουχισμό, στη φαρμακευτική περίθαλψη κ.α.), αποτελούν την κυρίαρχη κινητήρια δύναμη ολόκληρης της μηχανοκίνητης τεχνολογίας (π.χ. των μηχανών εσωτερικής καύσης), διαδραματίζοντας έτσι έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Για τους παραπάνω λόγους κυρίως, οι χώρες που έχουν βρεθεί να είναι πλούσιες σε τέτοιου είδους κοιτάσματα, ευδοκιμούν οικονομικά αποκτώντας τεράστια γεωπολιτική σημασία.

Δεδομένων όλων όσων προαναφέρθηκαν, είναι ξεκάθαρο πως καθίσταται απαραίτητη η συνεχής αναζήτηση και εκμετάλλευση νέων κοιτασμάτων με ρυθμούς που να μπορούν να καλύπτουν τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις παγκοσμίως. Άμεσο συνακόλουθο αυτού είναι η ανάγκη αναζήτησης και δημιουργίας νέων τεχνογνωσιών και τεχνολογιών ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίηση κοιτασμάτων των οποίων η εκμετάλλευση στο παρελθόν δεν ήταν εφικτή.

1.2 Γεωτρήσεις υδρογονανθράκων

Για την προσέγγιση και εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων στο υπέδαφος πραγματοποιούνται γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις περιλαμβάνουν μια σειρά διεργασιών που αφορούν την θραύση και την απομάκρυνση πετρωμάτων, με σκοπό την διάνοιξη φρέατος το οποίο θα φτάσει στο επιθυμητό βάθος. Οι γεωτρήσεις διακρίνονται στις αβαθείς και στις βαθιές. Ως αβαθείς χαρακτηρίζονται εκείνες που εκτείνονται από 100 μέχρι τα 600 ft και ως βαθιές εκείνες που ξεκινούν από τα 600 και φτάνουν έως και τα 30000 ft. Στις βαθιές γεωτρήσεις, η θερμοκρασία είναι της τάξης των 200°C και η πίεση φτάνει τις 1000 atm, επίσης ο μηχανολογικός εξοπλισμός στις βαθιές γεωτρήσεις είναι πολύ μεγαλύτερος και κοστοβόρος έναντι των αβαθών. Τέλος, οι γεωτρήσεις υδρογονανθράκων δεν ακολουθούν απαραίτητα κατακόρυφη τροχιά αλλά έχουν την δυνατότητα όπου χρειάζεται να αλλάζουν κατεύθυνση (Γαγάνης, 2013).



Εικόνα 1.1: Κατηγορίες πλατφόρμας ανάλογα με το βάθος της θάλασσας (MNN, 2010).

1.3 Διαδικασία της γεώτρησης

Η διατρητική στήλη συνδέει το σύστημα παροχής ενέργειας (drawworks) και τον πύργο του γεωτρύπανου (derrick) με το κοπτικό άκρο (drill bit).

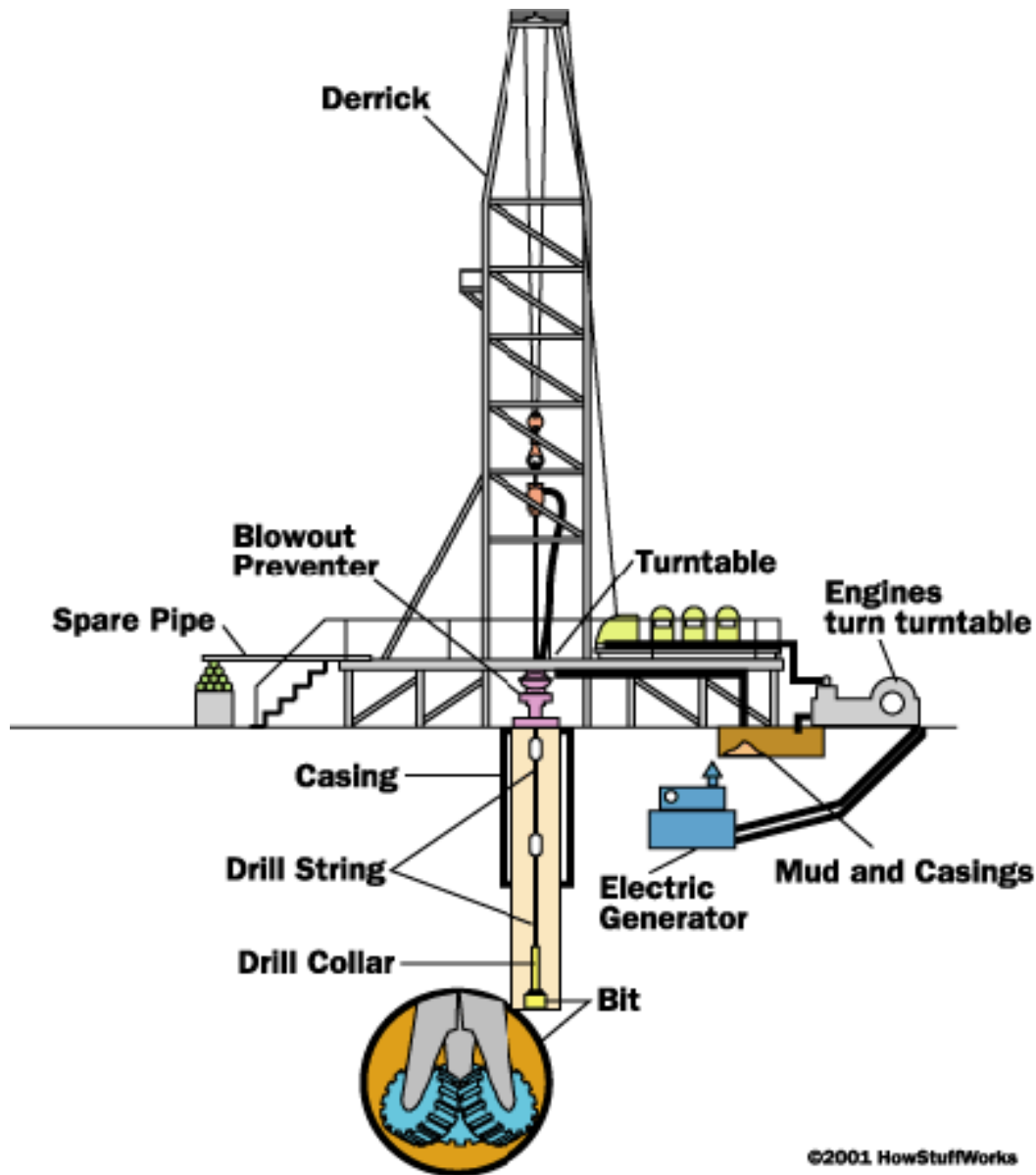
Η διάνοιξη της γεώτρησης ξεκινάει με τη μετάδοση ενέργειας από το σύστημα παροχής ισχύος στις τροχαλίες (crown block), (traveling block), που χρησιμοποιούνται για να αναβεκατεβάζουν την διατρητική στήλη και στη συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση της στην περιστροφική τράπεζα με αποτέλεσμα την μετάδοση της περιστροφικής κίνησης στο κοπτικό άκρο το οποίο είναι ενσωματωμένο στο κάτω μέρος της διατρητικής στήλης .

Η γεωτρητική στήλη απαρτίζεται επίσης από τα κολάρα (drill collars), τα οποία αποτελούν τα βαρύτερα τμήματα των διατρητικών στελεχών. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται πάνω από το κοπτικό άκρο ασκώντας του επιπλέον βάρος, τέτοιο ώστε να περιορίζεται η τάση για αλλαγή της τροχιάς του, να το κινούν προς την επιθυμητή κατεύθυνση και να μειώνεται σημαντικά το κόστος διάτρησης.

Σύμφωνα με τη βασική αρχή των περιστροφικών γεωτρήσεων, εφαρμόζεται στο κοπτικό άκρο επιπλέον σταθερό βάρος, εκτός από το βάρος των κολάρων και της διατρητικής στήλης, μέσω του άγκιστρου και του βαρούλκου (drawworks) κατά τη διαδικασία της γεώτρησης με σκοπό να διασφαλίζεται η μόνιμη διεπαφή του με το υπέδαφος. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ του βάρους στο άγκιστρο που στηρίζεται η διατρητική στήλη και το κοπτικό άκρο όταν αυτά δεν ακουμπάνε στον πυθμένα (Off bottom) και του βάρους όταν βρίσκονται στον πυθμένα και είναι σε λειτουργία (On bottom). Επίσης από το βάρος στο κοπτικό άκρο εξαρτάται άμεσα ο ρυθμός διάνοιξης της γεώτρησης (Γαγάνης 2013, Κελεσιδής 2009).

Ακόμη απαραίτητο κομμάτι για τη διεξαγωγή μιας γεώτρησης είναι η κυκλοφορία πολφού στο εσωτερικό της. Κατά την είσοδο του κοπτικού άκρου στο εσωτερικό του φρέατος χρησιμοποιείται πολφός, που έχει ως βάση συνήθως συστατικά πετρελαίου, ο οποίος κινείται διαμέσω των διατρητικών στελεχών στο κοπτικό άκρο, όπου μέσω των ενσωματωμένων ακροφύσιων του φτάνει στον πυθμένα του φρέατος από όπου ξεκινάει την άνοδο προς την επιφάνεια.

Τέλος, η χρήση πολφού είναι αναγκαία για τη λίπανση του κοπτικού άκρου, τη διαρκή ψύξη του για αποφυγή υπερθέρμανσης, τη μεταφορά των θραυσμάτων (cuttings) από τον πυθμένα της γεώτρησης, καθώς και τη διατήρηση της πίεσης στο εσωτερικό της.



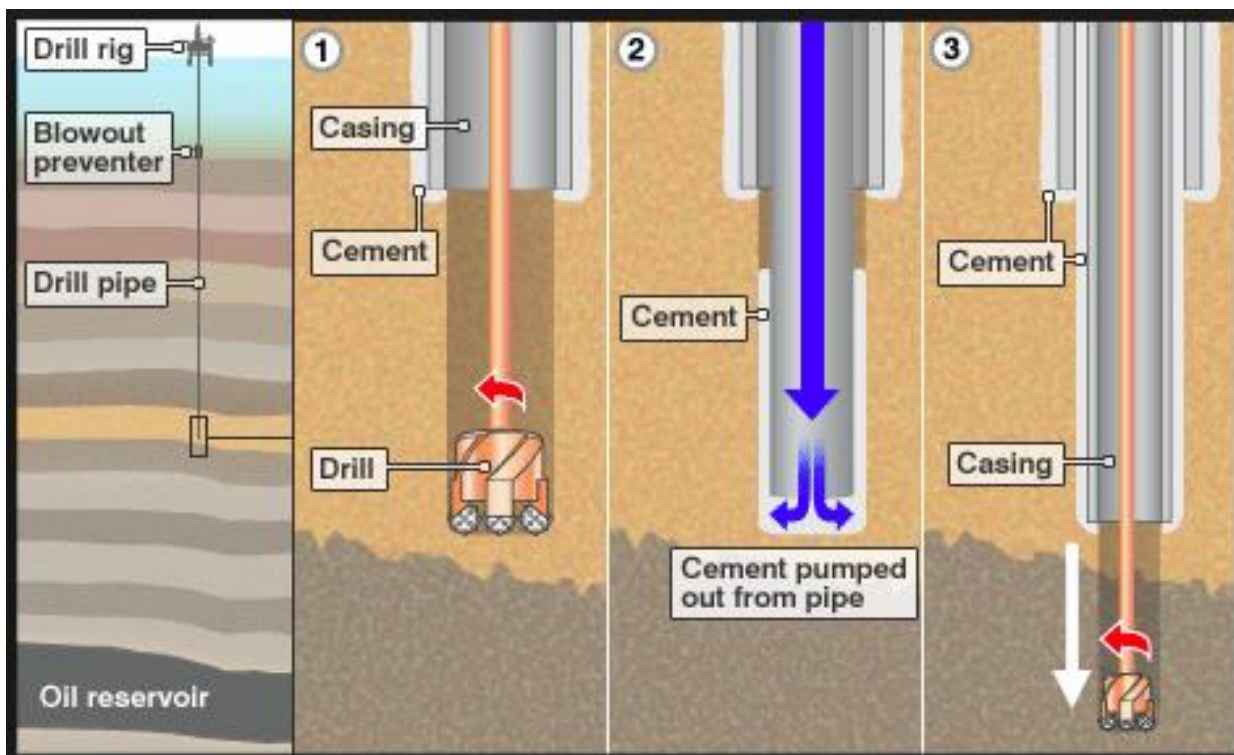
Εικόνα 1.2: Βασικά μέρη που απαρτίζουν την γεώτρηση εξόρυξης (PET, 2011).

1.4 Ασφάλιση της γεώτρησης

Μια γεώτρηση για να καταλήξει στο ζητούμενο επιθυμητό βάθος χρειάζεται να διαπεράσει σταδιακά ορισμένα επίπεδα, έτσι ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος πιθανής εισροής ρευστών στο εσωτερικό της (Kick), να μη καταστραφούν οι περιβάλλοντες σχηματισμοί, καθώς επίσης και να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να χαθεί ολόκληρο το πηγάδι (Γαγάνης, 2013).

Λόγω διαφορετικών σχηματισμών και συνθηκών στα διάφορα επίπεδα του υπεδάφους (θερμοκρασία, πίεση), απαιτείται τμηματική επένδυση (Casing) της γεώτρησης ανά επίπεδο κάθε φορά. Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ακεραία μετάβασή της μέχρι το τελικό βάθος παραγωγής του κοιτάσματος. Μόλις αυτή η διαδικασία ολοκληρωθεί, ακολουθεί η σταθεροποίηση της επένδυσης με την τσιμεντώση του δακτυλίου μεταξύ του φρέατος και της επένδυσης. Ύστερα από την διάνοιξη της γεώτρησης στο πρωταρχικό βάθος, χρειάζεται να γίνει η επένδυσή της ώστε να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του εσωτερικού της. Έπειτα, θα χρησιμοποιηθεί κοπτικό άκρο μικρότερης διατομής από αυτήν της επένδυσης για την διάνοιξη του επόμενου σταδίου και να τοποθετηθεί η μετέπειτα ακόμη μικρότερης διατομής επένδυση.

Στο σημείο αυτό τοποθετούνται στην επιφάνεια, ακριβώς πάνω από την πρώτη επένδυση, η κεφαλή του φρέατος και ο αποτρεπτής έκρηξης για τον διαρκή έλεγχο του εσωτερικού της. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την αποπεράτωση της γεώτρησης και είναι αρκετά δύσκολη και επικίνδυνη.



Εικόνα 1.4: Διαδικασία επένδυσης της γεώτρησης (KALAMU, 2010).

1.5 Χαρακτηριστικά της επένδυσης

Σύμφωνα με τα γεωφυσικά και τα γεωλογικά δεδομένα που υπολογίστηκαν για τη διάνοιξη μιας γεώτρησης, κρίνεται αναγκαίο να γίνει επιλογή της καταλληλότερης επένδυσης. Η επιλογή αυτή επιτυγχάνεται με βάση ορισμένα χαρακτηριστικά που σκοπό έχουν την επιτυχή λειτουργία της (Γαγάνης, 2013).

Η διάμετρος της επένδυσης εξαρτάται από την εκάστοτε διάμετρο του φρέατος και από το μέγεθος του μηχανολογικού εξοπλισμού (logging tools) που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο εσωτερικό της. Το πάχος της εξαρτάται από το βάθος του φρέατος και των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του. Ο αριθμός των επενδύσεων προσδιορίζεται από το διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας συναρτήσει του βάθους του σχηματισμού. Το τελικό μήκος της εξαρτάται από το μήκος των διαφόρων κομματιών που την αποτελούν.

Τέλος ο τύπος της επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί ελέγχεται ως προς την αντοχή του σε καταπόνηση για περίπτωση έκρηξης (burst), κατάρρευσης (collapse) και φόρτισης από αξονικά φορτία (axial tension).

1.6 Επένδυση (casing)

Η επένδυση ή αλλιώς casing είναι ένας κυλινδρικός μεταλλικός σωλήνας φτιαγμένος κυρίως από χάλυβα, ο οποίος τοποθετείται στο εσωτερικό της γεώτρησης και έχει τα εξής λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- Είναι υψηλής αντοχής σωλήνωση που επιτρέπει τη ροή γεωτρητικού ρευστού.
- Αποτρέπει τη μόλυνση υπόγειων στρωμάτων νερού κοντά στην επιφάνεια από τη διατρητική λάσπη.
- Απομονώνει τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Συγκρατεί τα τοιχώματα της γεώτρησης όταν υπάρχουν τριγύρω χαλαροί ή έντονα ρωγματισμένοι σχηματισμοί.
- Προστατεύει τη γεώτρηση από την κατάρρευση των μη ενισχυμένων πετρωμάτων ή αλλιώς το λεγόμενο caving in.
- Παρέχει έλεγχο των πιέσεων και προστατεύει τους αδύναμους σχηματισμούς από την υψηλή πυκνότητα πολφού που ρέει μέσα στη γεώτρηση και μπορεί να προκαλέσει την θραύση τους ή την ρωγμάτωσή τους.
- Απομονώνει τις ανώμαλες ζώνες πίεσης από τις κανονικές ζώνες πίεσης που βρίσκονται βαθύτερα.
- Είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να υποστηρίζει τη κεφαλή της γεώτρησης (wellhead) και τον αποτρεπτή έκρηξης ή αλλιώς BOP (Blow out preventer).
- Βοηθάει στην εκμετάλλευση των κοιτασμάτων όταν υπάρχουν παραγωγικές γεωτρήσεις. Συνήθως η παραγωγή γίνεται δια μέσου της σωλήνωσης παραγωγής (tubing) που είναι τοποθετημένη εντός της επένδυσης.
- Απομονώνει τους περατούς σχηματισμούς και τα ρευστά τους για να αποφευχθεί τυχόν μόλυνση της ζώνης εκμετάλλευσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό επένδυσης και τσιμέντωσης, με στόχο την ανεμπόδιστη παραγωγή από τη ζώνη εκμετάλλευσης.



***Εικόνα 1.5:** Σωληνώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την επένδυση γεώτρησης (ALAMY, 2017).*

Για τους παραπάνω λόγους η επιλογή κατάλληλου τύπου επένδυσης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια στις γεωτρήσεις πετρελαίου και αερίου, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση τέτοιου είδους γεωτρήσεων. Το κόστος κατασκευής της επένδυσης είναι αρκετά δαπανηρό, περίπου το 20-30 τοις εκατό του συνολικού κόστους που χρειάζεται ολόκληρη η κατασκευή της γεώτρησης από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση της παραγωγής.

Στις βαθιές θαλάσσιες γεωτρήσεις για παράδειγμα, το ημερήσιο επιχειρησιακό κόστος λειτουργίας για ένα πλοίο γεωτρύπανο είναι περίπου 500,000\$, πράγμα που σημαίνει ότι η επιλογή του βάθους τοποθέτησης και το είδος της επένδυσης, είναι παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν και να σχεδιαστούν προσεκτικά έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος της γεώτρησης όσο το δυνατόν περισσότερο (Γαγάνης 2013, Κελεσίδης 2009).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η αντοχή της επένδυσης σε τρεις υποθετικές περιπτώσεις ακραίων συνθηκών καταπόνησης, που αφορούσαν σενάρια έκρηξης (burst), κατάρρευσης (collapse) και φόρτισης από αξονικά φορτία (axial tension).

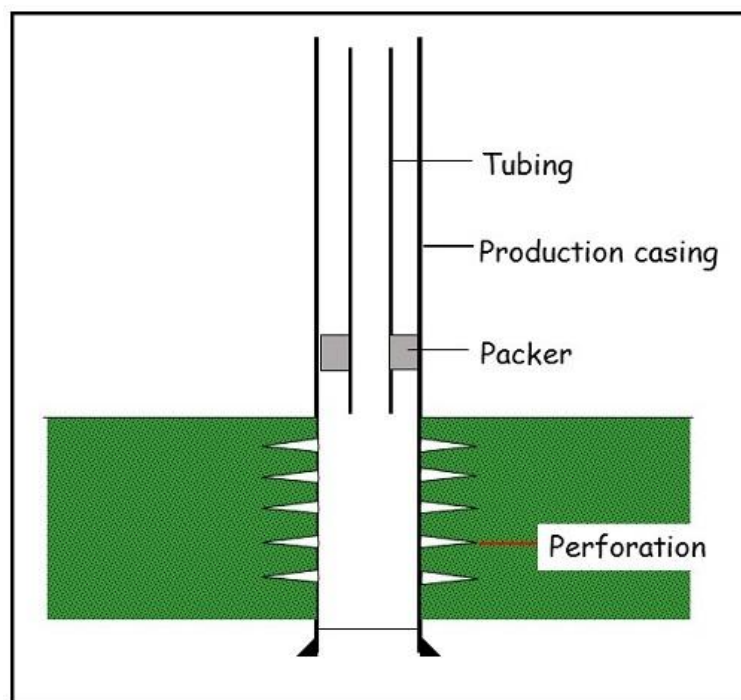
Η μελέτη αυτή είχε ως στόχο τη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας μιας χερσαίας γεώτρησης, η οποία είναι η πρώτη που θα διεξαχθεί στην περιοχή (wildcat) και οι πληροφορίες για τις πιέσεις και το είδος των σχηματισμών που υπάρχουν στο υπεδάφος είναι περιορισμένες. Επομένως, η γεώτρηση του υπεδάφους θα γίνει πολύ προσεκτικά και με αργούς ρυθμούς έτσι

ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος ασφάλειας της γεώτρησης (οικονομική καταστροφή) και του πληρώματος.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ο κατάλληλος σχεδιασμός επένδυσης λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που μελετήθηκε και το μέγεθος της παραγωγικής σωλήνωσης που θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που η γεώτρηση συναντήσει κοίτασμα.

1.7 Ολοκλήρωση της γεώτρησης

Η ολοκλήρωση (completion) της γεώτρησης αποτελεί την τελευταία διαδικασία ύστερα από την τοποθέτηση και του τελικού τμήματος επένδυσης. Στο σημείο αυτό τοποθετείται εντός της επένδυσης η σωλήνωση παραγωγής (tubing) καθώς και οι απομονωτές (packers). Έπειτα αρχίζει η εισροή των υδρογονανθράκων διαμέσω διατρήσεων στην επένδυση, οι οποίες δημιουργούνται με βέλη-ακίδες που πυροδοτούνται από ειδικά εργαλεία τοποθετημένα στο βάθος του φρέατος, οδηγώντας στην έναρξη της παραγωγής (Γαγάνης 2013).



Εικόνα 1.3: Τομή της επένδυσης παραγωγής (DRILL, 2009).

Κεφάλαιο 2

ΤΥΠΟΙ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

2.1 Γενικά

Η παρουσία ζωνών υψηλών πιέσεων σε διάφορα βάθη κατά μήκος της γεώτρησης, καθώς και η ύπαρξη ασύνδετων μη συμπαγών σχηματισμών, απαιτεί τη χρήση επένδυσης με σκοπό την στεγανοποίησή της από τέτοιου είδους προβληματικές ζώνες, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ασφαλής διάνοιξη της μέχρι το επιθυμητό βάθος. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι επένδυσης ώστε να στελεχώσουν τα επιμέρους τμήματα της (Γαγάνης, 2013).

Αρχικά τοποθετείται στην επιφάνεια μία αρκετά μεγάλου μεγέθους σωλήνωση (θεμελιακή επένδυση), έπειτα μία μικρότερης διατομής (επιφανειακή επένδυση), ακολουθούμενη από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες (ενδιάμεση επένδυση), ώσπου τελικά να τοποθετηθεί ο μικρότερος σε μέγεθος σωλήνας για το τελικό στάδιο της παραγωγής (παραγωγική επένδυση ή liner).

Ποικίλοι συνδυασμοί μεγεθών επένδυσης χρησιμοποιούνται σε πολλαπλές γεωτρήσεις ανά τον κόσμο.

2.2 Θεμελιακή Επένδυση

Το πρώτο τμήμα της επένδυσης όπως προαναφέρθηκε είναι η θεμελιακή. Πρόκειται για επένδυση μεγάλης διαμέτρου περίπου 30 ίντσες η οποία τοποθετείται σε σχετικά μικρά βάθη στο εσωτερικό της γεώτρησης. Σκοπός του τμήματος αυτού είναι να αποτραπεί η κατάρρευση των μη συμπαγών τοιχωμάτων (caving in) μέσα στη γεώτρηση.

Επιπλέον, η θεμελιακή επένδυση βοηθάει στην επιστροφή του πολφού διαμέσω του διαχωριστή στερεών (shaleshaker) στις δεξαμενές πολφού. Ωστόσο, χρησιμοποιείται και για τη στήριξη του βάρους της κεφαλής της γεώτρησης (wellhead) καθώς επίσης και για τη στήριξη του αποτρεπτή έκρηξης (BOP).

Τέλος, η τσιμέντωση της θεμελιακής επένδυσης πραγματοποιείται με την εκτόπιση τσιμέντου από το εσωτερικό της, οδηγώντας το στο δακτύλιο της γεώτρησης και από εκεί προς την επιφάνεια.

2.3 Επιφανειακή Επένδυση

Το δεύτερο τμήμα είναι η επιφανειακή επένδυση (surface casing) που με τη σειρά της εξυπηρετεί επίσης πολλαπλούς σκοπούς. Καταρχάς, προστατεύει το φρέαρ από την κατάρρευση των μη συμπαγών πετρωμάτων μέσα στη γεώτρηση, καθώς επίσης αποτρέπει τη μόλυνση των επιφανειακών στρωμάτων νερού. Η επιφανειακή επένδυση έχει τη δυνατότητα να

στηρίζει το βάρος του αποτρεπτή σε περίπτωση έκρηξης (BOP) πράγμα το οποίο επιτρέπει και τη διάνοιξη γεωτρήσεων μεγαλύτερου βάθους. Επιπλέον, η επιφανειακή επένδυση προσφέρει παραπάνω στήριξη και προστασία από το φαινόμενο της διάβρωσης σε οποιοδήποτε μεταγενέστερο κομμάτι επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί εντός της γεώτρησης. Τέλος, η τσιμεντώση της πραγματοποιείται από τα κατώτερα τμήματα προς την επιφάνεια.

2.4 Ενδιάμεση Επένδυση

Το τρίτο τμήμα επένδυσης της γεώτρησης ονομάζεται ενδιάμεση ή προστατευτική, η οποία σχετίζεται κυρίως με την ασφάλεια της. Σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους που περνούν μέσα από προβληματικές ζώνες, η ενδιάμεση επένδυση συμβάλλει καθοριστικά στην προστασία από σχηματισμούς ανώμαλων πιέσεων, καθώς επίσης και από ζώνες που μπορεί να προκύψει απώλεια πολφού με αποτέλεσμα και την απώλεια της πίεσης.

Σημαντική επίσης λειτουργία είναι η προστασία των αδύναμων σχηματισμών της γεώτρησης από υψηλής πυκνότητας λάσπες, που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για τη γεώτρηση σε μεγαλύτερα βάθη.

Πολλές φορές μπορεί να θεωρηθεί απαραίτητη η χρήση δύο ενδιάμεσων τμημάτων επένδυσης, όπως για παράδειγμα σε περιοχές όπου υπάρχουν πιέσεις ρευστών πετρωμάτων πέραν των κανονικών, όπου τοποθετείται η πρώτη ενδιάμεση επένδυση σε σχετικά μικρό βάθος και κατόπιν το δεύτερο τμήμα της σε βάθος που είναι πιθανόν να κινδυνεύσει από “κλότσημα” (εισροή ρευστού μέσα στη γεώτρηση π.χ. αέριο) ή αλλιώς το λεγόμενο “kick”.

Τέλος, η ενδιάμεση επένδυση τσιμεντώνεται μέχρι την επιφάνεια. Η σταθεροποίησή της πραγματοποιείται με την εκτόπιση τσιμέντου από το εσωτερικό της σωλήνωσης και οδηγώντας το στο δακτύλιο της γεώτρησης και από εκεί προς την επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η τσιμεντώση και σε όλα τα ανώτερα, τμήματα της επένδυσης.

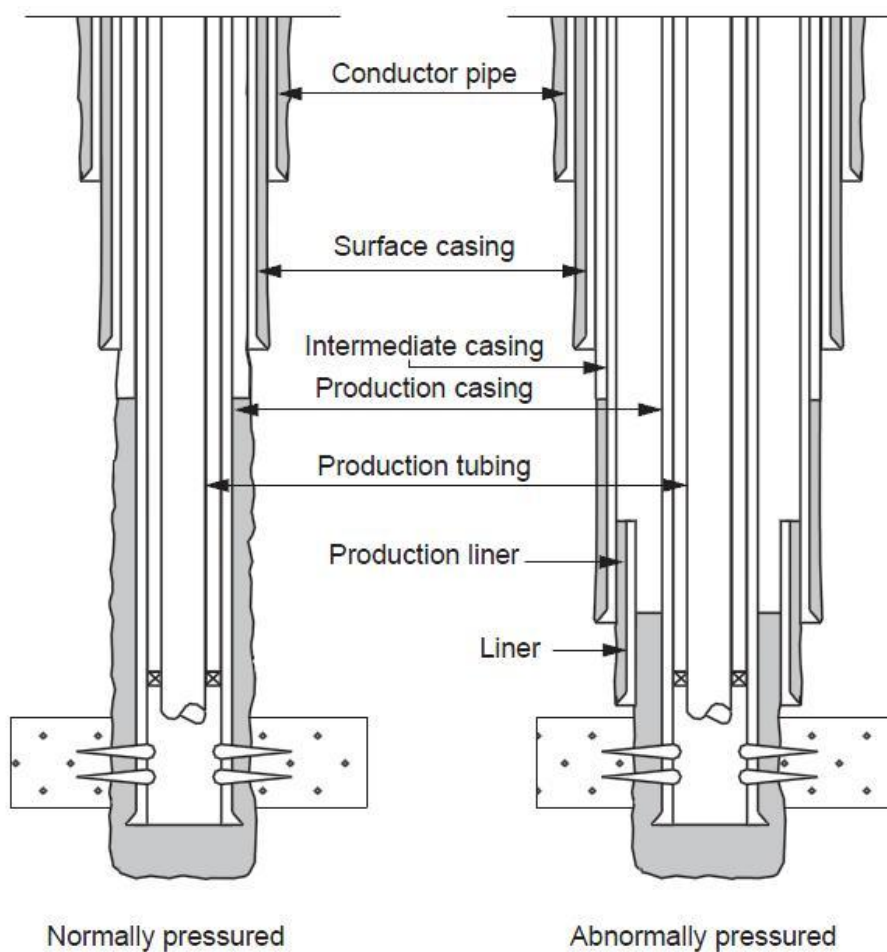
2.5 Παραγωγική Επένδυση

Η παραγωγική επένδυση χρησιμοποιείται κατά το διάστημα της παραγωγής του ταμιευτήρα για την προσέγγιση του κοιτάσματος και αποτελεί το τελευταίο τμήμα επένδυσης της γεώτρησης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει συγκριτικά με τα προηγούμενα στάδια επένδυσης, καθώς στις γεωτρήσεις παραγωγής τοποθετείται στο εσωτερικό της ένας μικρότερος διατομής σωλήνας (tubing), ο οποίος χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια άντλησης ρευστών από τον ταμιευτήρα, όπως επίσης και οι απομονωτές (packers) οι οποίοι πλαισιώνονται ανάμεσα στην σωλήνωση παραγωγής και την επένδυση με σκοπό να σφραγίζεται ο δακτύλιος που δημιουργείται στο εσωτερικό της επένδυσης και όλα τα ρευστά του ταμιευτήρα να εισέρχονται στο εσωτερικό του tubing.

Βασικές λειτουργίες που παρέχει είναι: η προστασία των περιβαλλόντων σχηματισμών από διαρροή, έκρηξη κτλ που μπορεί να προκληθεί λόγω αστοχίας του εσωτερικού σωλήνα παραγωγής. Επιπλέον με τη χρήση της παρέχεται η ικανότητα αντικατάστασης ή διόρθωσης του ελαττωματικού σωλήνα παραγωγής καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής της γεώτρησης (Γαγάνης, 2013).

Μία άλλη σημαντική λειτουργία της είναι η εύκολη πρόσβαση που παρέχει σε όλα τα εξαρτήματα ή εξοπλισμούς που θα τοποθετηθούν στον πυθμένα του φρέατος για την υποβοήθηση της παραγωγής. Επίσης, απομονώνει τα κοιτάσματα ή το κοίτασμα παραγωγής από άλλα κοιτάσματα πετρελαίου ή νερού, πράγμα το οποίο είναι πολύ σημαντικό καθώς πετρελαϊκά κοιτάσματα με διαφορετικές πιέσεις μπορεί να επικοινωνήσουν μεταξύ τους εάν η παραγωγική σωλήνωση δεν τσιμεντωθεί.



Εικόνα 2.1: Ολοκληρωμένη επένδυση γεώτρησης σε κανονικές και ανώμαλες συνθήκες πίεσης (OIL, 2017).

2.6 Liner

Αυτός ο τύπος επένδυσης χρησιμοποιείται συνήθως αντί της παραγωγικής επένδυσης, για τον λόγο του ότι είναι λιγότερο δαπανηρός, εφόσον σε αντίθεση με την παραγωγική επένδυση δεν εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια αλλά στηρίζεται μέσω του liner hanger στην προηγούμενη ενδιάμεση επένδυση που έχει τοποθετηθεί στο αμέσως προηγούμενο βάθος.

Ένα liner είναι μικρότερο σε μήκος από την παραγωγική επένδυση (3000 ft - 5000 ft συνήθως). Επίσης, οι λειτουργίες που επιτελεί είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές της επένδυσης παραγωγής. Στα μειονεκτήματα του περιλαμβάνονται: **α)** πιθανή διαρροή κατά μήκος της διάταξης ανάρτησης του liner, **β)** δυσκολία για την επίτευξη καλής τσιμέντωσης λόγω του πολύ περιορισμένου δακτυλίου ανάμεσα στο liner και τα τοιχώματα της γεώτρησης, **γ)** περισσότερο πολύπλοκες διαδικασίες επένδυσης και τσιμέντωσης, **δ)** η ενδιάμεση επένδυση θα πρέπει να έχει επαρκείς διαστάσεις έτσι ώστε να αντέχει στην ίδια πίεση όπως και το liner. Τέλος χρησιμοποιείται συνήθως σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις.

2.7 Ταξινόμηση τύπων επένδυσης

Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες ταξινόμησης των διαφόρων τύπων επένδυσης:

- Οι τύποι επένδυσης που δίνονται από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο (American Petroleum Institute, API)
- Οι τύποι επένδυσης που δεν δίνονται από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο (non-API)

Στην πλειοψηφία των γεωτρήσεων προτιμώνται οι τύποι επένδυσης που δίνονται από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο καθώς η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω της αξιοπιστίας τους στις κλασσικές γεωτρήσεις υδρογονανθράκων.

Η δεύτερη κατηγορία επιλέγεται συνήθως για γεωτρήσεις μεγάλου βάθους συγκριτικά με τις εκάστοτε συνθήκες που πρόκειται να εκπονηθεί η γεώτρηση και είναι εμπειρικές (Bourgoyne et al. , 1986).

2.8 Προδιαγραφές της επένδυσης

Μερικοί από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό και την επιλογή κατάλληλου τύπου επένδυσης είναι ο αριθμός των σταδίων σωλήνωσης που θα χρησιμοποιηθούν συνολικά, ο ακριβής προσδιορισμός του βάθους τοποθέτησης κάθε επένδυσης, η επιλογή εσωτερικής διαμέτρου, καθώς και το πάχος της.

Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή επένδυσης είναι :

- Η εξωτερική διάμετρος της (OD)
- Η εσωτερική διάμετρος της (ID)
- Το πάχος της (wall thickness)
- Η διάμετρος που συνιστούν οι κατασκευαστές (drift diameter)
- Το μήκος της (Length)
- Το βάρος της (Weight)
- Ο τύπος της (Grade)

Εξωτερική διάμετρος επένδυσης (OD):

Εξαρτάται από την διάμετρο του φρέατος και από το μέγεθος των εργαλείων που πρόκειται να κατέλθουν στον πυθμένα της γεώτρησης από εσωτερικό της.

Εσωτερική διάμετρος επένδυσης (ID):

Εξαρτάται από την διάμετρο που συνιστούν οι κατασκευαστές, από το πάχος της επένδυσης, από το είδος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο εσωτερικό της κατά την διάρκεια της γεώτρησης, από την διάμετρο των κοπτικών άκρων, καθώς και από την διάμετρο του εσωτερικού σωλήνα παραγωγής.

Επίσης, η εσωτερική διάμετρος της επένδυσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε η τοποθέτηση της σωλήνωσης παραγωγής να γίνεται με ευκολία. Ακόμη, χρειάζεται να διευκολύνει την τοποθέτηση διαφόρων εργαλείων υποβοήθησης της παραγωγής καθώς και εξοπλισμού (completion equipment) για το τελείωμα της γεώτρησης.

Πάχος επένδυσης (wall thickness):

Σχετίζεται με το βάρος της επένδυσης και εξαρτάται από το βάθος και τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της γεώτρησης.

Βάρος επένδυσης:

Εκφράζεται σαν βάρος ανά πόδι (lbm/ft) και χρησιμοποιείται κυρίως από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο για την ταυτοποίηση των διαφόρων τύπων επένδυσης, καθώς και για την ταξινόμησή τους ανάλογα με την εσωτερική διάμετρο και το πάχος της εκάστοτε επένδυσης.

Commonly Used Bit Sizes That Will Pass Through API Casing

Casing Size, OD, in.	Weight/ft. lbm/ft	ID, in.	Drift Diameter, in.	Commonly Used Bit Sizes, in.
4 1/2	9.5	4.090	3.965	3 7/8
	10.5	4.052	3.927	
	11.6	4.000	3.875	
	13.5	3.920	3.795	
5	11.5	4.560	4.435	3 3/4
	13.0	4.494	4.369	
	15.0	4.408	4.283	
	18.0	4.276	4.151	
5 1/2	13.0	5.044	4.919	3 7/8
	14.0	5.012	4.887	
	15.5	4.950	4.825	
	17.0	4.892	4.764	
6 5/8	20.0	4.778	4.653	4 5/8
	23.0	4.670	4.545	
	17.0	6.135	6.010	
	20.0	6.049	5.924	
7	24.0	5.921	5.796	4 3/4
	28.0	5.791	5.666	
	32.0	5.675	5.550	
	17.00	6.538	6.413	
7 5/8	20.00	6.456	6.331	6 1/4
	23.00	6.366	6.241	
	26.00	6.276	6.151	
	29.00	6.184	6.059	
8 5/8	32.00	6.094	5.969	6 1/8
	35.00	6.006	5.879	
	38.00	5.920	5.795	
	20.00	7.125	7.000	
9 5/8	24.00	7.025	6.900	6 3/4
	26.40	6.969	6.844	
	29.70	6.875	6.750	
	33.70	6.765	6.640	
10 3/4	39.00	6.625	6.500	6 1/2
	24.00	8.097	7.972	
	28.00	8.017	7.892	
	32.00	7.921	7.796	
11 3/4	36.00	7.825	7.700	7 7/8
	40.00	7.725	7.600	
	44.00	7.625	7.500	
	49.00	7.511	7.386	
12 3/4	29.30	9.063	8.907	8 3/4, 8 1/2
	32.30	9.001	8.845	
	36.00	8.921	8.765	
	40.00	8.835	8.679	
13 3/8	43.50	8.755	8.599	8 5/8, 8 1/2
	47.00	8.681	8.525	
	53.50	8.535	8.379	
	32.75	10.192	10.036	
14 3/8	40.50	10.050	9.894	8 1/2
	45.50	9.950	9.794	
	51.00	9.850	9.694	
	55.00	9.760	9.604	
15 3/8	60.70	9.660	9.504	8 3/4, 8 1/2
	65.37	9.560	9.404	
	38.00	11.154	10.994	
	42.00	11.084	10.928	
16 3/8	47.00	11.000	10.844	11
	54.00	10.880	10.724	
	60.00	10.772	10.616	
	48.00	12.715	12.559	
17 3/8	54.50	12.615	12.459	12 1/4
	61.00	12.515	12.359	
	68.00	12.415	12.259	
	72.00	12.347	12.191	
18 3/8	75.00	12.250	12.088	15
	84.00	12.125	11.962	
	109.00	12.010	11.822	
	109.00	14.688	14.500	
20	87.50	17.755	17.567	17 1/2
	94.00	19.124	18.936	

Εικόνα 2.2: Τυποποιημένα μεγέθη κοπτικών άκρων ανάλογα με την διάμετρο της επένδυσης (DRILL, 2016).

Διάμετρος που συνιστούν οι κατασκευαστές (drift diameter):

Εκφράζει την διάμετρο που είναι ελαφρώς μικρότερη της εσωτερικής και θεωρείται σαν η διάμετρος του κοπτικού που μπορεί να διέλθει με ασφάλεια διαμέσω της σωλήνωσης.

Weight lb/ft	OD in.	ID in.	Wall Thickness in.	Drift Diameter in.
53.5	9.625	8.535	0.545	8.379
47	9.625	8.681	0.472	8.525
43.5	9.625	8.755	0.435	8.599
40	9.625	8.835	0.395	8.679

Εικόνα 2.3: Συσχέτιση εσωτερικής διαμέτρου επένδυσης (PETRO, 2015).

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, για εξωτερική διάμετρο επένδυσης 9.625 in (9 5/8 in) και βάρος 53.5 lbm/ft οι κατασκευαστές συνιστούν η drift διάμετρος της επένδυσης να είναι μικρότερη από 8.535 in και ίση με 8.379 in. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν μπορεί να περάσει από το εσωτερικό της επένδυσης κοπτικό άκρο 8.5 in καθώς θα πρέπει να είναι μικρότερο της drift διαμέτρου.

Μήκος επένδυσης:

Σύμφωνα με το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο ορίζονται τρία εύρη μηκών, εντός των οποίων θα κατασκευάζεται κάθε στέλεχος (joint) της επένδυσης:

Απόσταση	Μήκος (ft)	Μέσο μήκος (ft)
1	16-25	22
2	25-34	31
3	34+	42

Πίνακας 2.1: Εύρη μηκών εντός των οποίων κατασκευάζεται κάθε επένδυση

Τύπος επένδυσης:

Σχετίζεται με την ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό της επένδυσης σε περίπτωση καταπόνησης και εξαρτάται άμεσα από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη. Οι διάφοροι τύποι επένδυσης εκφράζονται με την μορφή ενός γράμματος και ενός αριθμού (H-40). Το γράμμα χρησιμοποιείται για να προσδώσει μία μοναδική ονομασία στον κάθε τύπο και ο αριθμός εκφράζει το ελάχιστο όριο ελαστικότητας σε περίπτωση μεγάλης πίεσης.

API Grade	Yield Stress (psi)		Minimum Ultimate Tensile Strength (psi)	Minimum Elongation (%)
	Minimum	Maximum		
H-40	40,000	80,000	60,000	29.5
J-55	55,000	80,000	75,000	24.0
K-55	55,000	80,000	95,000	19.5
N-80	80,000	110,000	100,000	18.5
L-80	80,000	95,000	95,000	19.5
C-90	90,000	105,000	100,000	18.5
C-95	95,000	110,000	105,000	18.5
T-95	95,000	110,000	105,000	18.0
P-110	110,000	140,000	125,000	15.0
Q-125	125,000	150,000	135,000	18.0

Εικόνα 2.4: Τύποι επένδυσης που δίνονται από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο σύμφωνα με τα όρια ελαστικότητάς τους (Bourgoyne et al. , 1986).

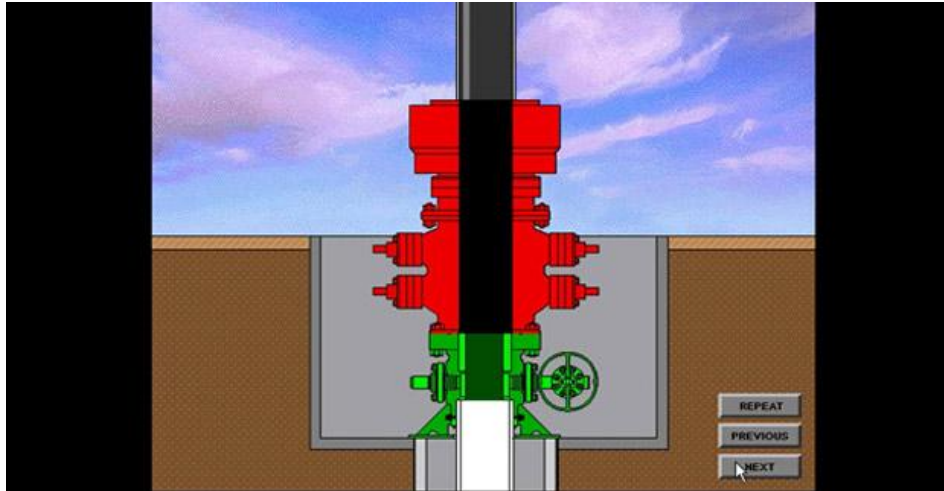
2.9 Δευτερεύοντα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της γεώτρησης

Για την ασφάλεια και την μεγαλύτερη αποδοτικότητα της γεώτρησης έχουν αναπτυχθεί σημαντικά συστήματα παρακολούθησης που αφορούν τον διαρκή έλεγχο της.

Τα συστήματα αυτά είναι ο αποτρεπτής έκρηξης και η κεφαλή της γεώτρησης. Κατά την διεξαγωγή μιας γεώτρησης σε μεγάλα βάθη απαιτείται η χρήση του αποτρεπτή έκρηξης καθώς έχει την ιδιότητα να ελέγχει την κατάσταση στο εσωτερικό της κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Η σύνδεση του αποτρεπτή έκρηξης με το είδος της επένδυσης που χρησιμοποιείται κάθε φορά, επιτυγχάνεται μέσω της κεφαλής της γεώτρησης, η οποία τοποθετείται ανάμεσά τους.

Έτσι για μια γεώτρηση σε οποιοδήποτε βάθος αρχικά τοποθετείται η επένδυση που έχει επιλεγεί, έπειτα η κεφαλή της γεώτρησης και τέλος ο αποτρεπτής έκρηξης. Χωρίς αυτά τα συστήματα θα ήταν αδύνατη η γεώτρηση σε μεγάλα βάθη πράγμα που καθίστα αναγκαία τη χρήση τους στις γεωτρήσεις πετρελαίου και αερίου (Γαγάνης 2013, Κελεσιδης 2009).

2.10 Κεφαλή της γεώτρησης (wellhead)



Εικόνα 2.5: Κεφαλή της γεώτρησης (PET, 2012).

Η κεφαλή του φρέατος τοποθετείται πάντα στην επιφάνεια της γεώτρησης και βρίσκεται ανάμεσα στον αποτρεπτή έκρηξης και την θεμελιακή επένδυση (Γαγάνης 2013, Κελεσίδης 2009).

Η χρήση της κεφαλής φρέατος είναι αναγκαία καθώς:

- Σφραγίζεται ο δακτύλιος (annulus) ανάμεσα στα διαδοχικά κομμάτια της επένδυσης
- Συνδέονται όλα τα επιμέρους τμήματα της επένδυσης με τον αποτρεπτή έκρηξης
- Παρέχεται πρόσβαση στον δακτύλιο οποιασδήποτε ενδιάμεσης επένδυσης καθώς και της επένδυσης παραγωγής

Κατόπιν της τοποθέτησης της κεφαλής του φρέατος και του αποτρεπτή έκρηξης (BOP), διεξάγεται μία σειρά δοκιμών υπό υψηλή πίεση τόσο στην επένδυση όσο και στα δύο προαναφερθέντα συστήματα. Εάν όλα είναι σύμφωνα με τα απαιτούμενα για την ασφάλεια της γεώτρησης, αρχίζει η επόμενη φάση αυτής που περιλαμβάνει την τοποθέτηση του εξοπλισμού παραγωγής, την εγκατάσταση της σωλήνωσης παραγωγής μαζί με τους απομονωτές (packers) κ.α.

2.11 Αποτρεπτής έκρηξης (blow out preventer)



Εικόνα 2.6: Αποτρεπτής έκρηξης (PET, 2012.)

Η χρήση του αποτρεπτή έκρηξης (BOP) είναι αναγκαία σε μια γεώτρηση υδρογονανθράκων έτσι ώστε να υπάρχει συνεχής έλεγχος της. Με την χρήση του αποφεύγεται η μη ελεγχόμενη είσοδος ρευστών των σχηματισμών (αέριο ή πετρέλαιο) στο εσωτερικό της γεώτρησης. Οι σημερινοί αποτρεπτές έκρηξης μπορούν να συγκρατήσουν πιέσεις έως 15000 psig (Γαγάνης 2013, Κελεσίδης 2009).

Με την χρήση αυτού του συστήματος για τον έλεγχο και την ρύθμιση του φρέατος επιτρέπεται:

- Ο έλεγχος του kick
- Το κλείσιμο του φρέατος στην επιφάνεια
- Η κυκλοφορία στο εσωτερικό της γεώτρησης υπό πίεση για την απομάκρυνση των ρευστών των πετρωμάτων και μετέπειτα την αύξηση της πυκνότητας πολφού
- Η εκτροπή της ροής των ρευστών μακριά από το προσωπικό και τα μηχανήματα

Το BOP ενεργοποιείται από το πλήρωμα της γεώτρησης όταν το κοπτικό άκρο διαπερνά διαπερατά πετρώματα όπου η πίεση των ρευστών του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση του φρέατος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μη ελεγχόμενη εισροή των ρευστών (αέριο) στο εσωτερικό του φρέατος και τον αναπόφευκτο εκτοπισμό του πολφού.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κλότσημα (kick) της γεώτρησης (Γαγάνης 2013, Κελεσιδής 2009). Σε αυτή την περίπτωση γίνεται υδραυλική ενεργοποίηση του BOP. Τέλος υπάρχουν και διάφοροι αισθητήρες πίεσης κυρίως για την παρακολούθηση της λειτουργίας του.

Σε περίπτωση μη έγκαιρης ενεργοποίησης του αποτρεπτή έκρηξης υπάρχει κίνδυνος ανόδου του αερίου πάνω από τα επιτρεπτά επίπεδα με αποτέλεσμα να συμβεί έκρηξη (blow up). Αυτό είναι και το πλέον επικίνδυνο φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια γεώτρηση και έχει ως συνέπεια την πρόκληση εργατικών δυστυχημάτων, την καταστροφή του εξοπλισμού, την απώλεια των κοιτασμάτων στο υπέδαφος καθώς και την μόλυνση του περιβάλλοντος.

Ο εντοπισμός των kick γίνεται με διάφορους τρόπους, ωστόσο οι δυο βασικότεροι είναι οι εξής:

- η χρήση μανόμετρων πίεσης στην επιφάνεια.
- η χρήση συστήματος για τον έλεγχο της αύξησης της ροής.

Η χρήση συστήματος για τον έλεγχο της αύξησης της ροής είναι σχετικά ο πιο γρήγορος τρόπος για τον εντοπισμό προβλημάτων.

Κεφάλαιο 3

ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

3.1 Γενικά

Ύστερα από την επιλογή της περιοχής όπου θα γίνει η γεώτρηση, ακολουθεί η συλλογή των διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με τη περιοχή αυτή. Με το καθορισμό των γεωλογικών και γεωφυσικών στοιχείων της περιοχής αναλύεται και αξιολογείται το υποψήφιο πηγάδι με σκοπό, την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων κατά τη διαδικασία των εργασιών της γεώτρησης, καθώς και την επιλογή του βάθους και του αριθμού των τύπων επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν.

Για το λόγο αυτό οι πρώτες εκτιμήσεις που χρειάζεται να γίνουν, θα αφορούν το σαφή προσδιορισμό των πιέσεων στο υπέδαφος. Ύστερα από τον καθορισμό των πιέσεων, το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της πυκνότητας του πολφού για κάθε βάθος που θα χρησιμοποιηθεί στο εσωτερικό της γεώτρησης, με σκοπό η τελευταία να φτάσει με ασφάλεια στο επιθυμητό βάθος παραγωγής.

Με τον προσδιορισμό των πιέσεων στο υπέδαφος μπορεί να ξεκινήσει ο σχεδιασμός επένδυσης της γεώτρησης, με το προσδιορισμό της πυκνότητας πολφού που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε βάθος, τον καθορισμό του ελαχίστου αριθμού τύπων επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν, όπως επίσης και το βάθος τοποθέτησής τους.

3.2 Πίεση θραύσης και πίεση του σχηματισμού

Πίεση θραύσης των πετρωμάτων του σχηματισμού (fracture pressure):

Η γνώση της πίεσης θραύσης είναι πολύ σημαντική για την επιλογή του βάθους όπου θα τοποθετηθεί ο κατάλληλος τύπος επένδυσης, για την αποφυγή ζωνών απώλειας πολφού και για τον σχεδιασμό της υδραυλικής ρωγμάτωσης, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής της γεώτρησης σε περιοχές όπου υπάρχει χαμηλή διαπερατότητα (Matthews and Kelly, 1967).

Πίεση των πόρων του σχηματισμού (formation pressure):

Η πίεση των πόρων, ορίζεται ως η πίεση που ασκείται σε ένα ρευστό εντός των πόρων του πετρώματος του σχηματισμού. Η εκτίμηση του αριθμού των σωληνώσεων και του βάθους έδρασης κάθε μιας, βασίζεται στον προσδιορισμό των δύο παραπάνω πιέσεων για την ασφαλή διάτρηση των σχηματισμών (Rehn and McClendon, 1971).

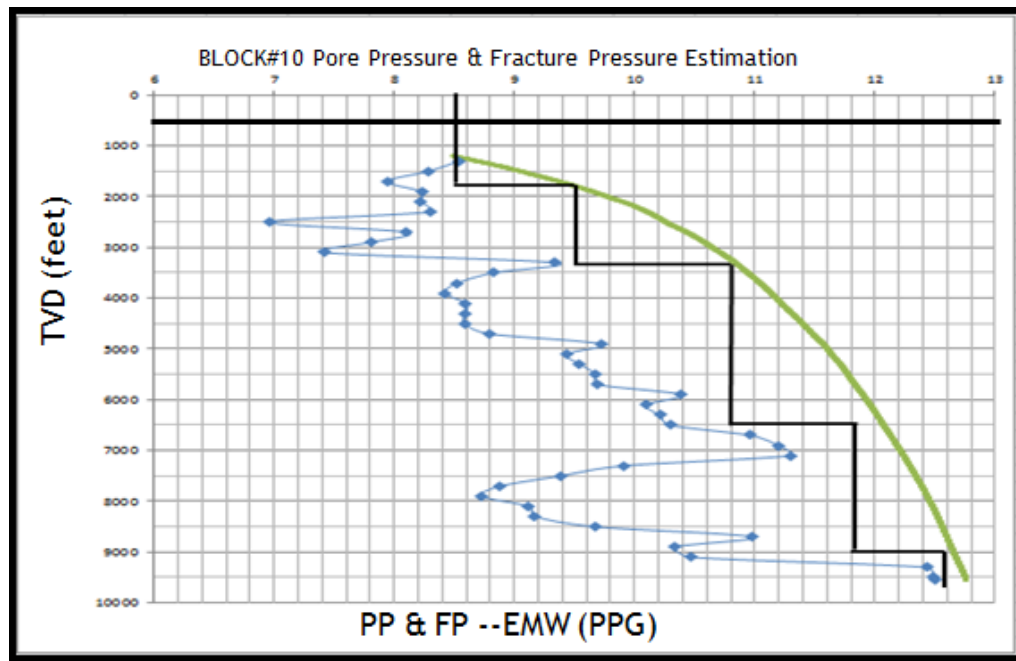
3.3 Κανονική και ανώμαλη πίεση του σχηματισμού

Κανονική πίεση πόρων του σχηματισμού:

Ένας σχηματισμός βρίσκεται υπό κανονική πίεση όταν η πίεση των πόρων του είναι ίση με την υδροστατική πίεση μιας γεμάτης στήλης άλμης του σχηματισμού. Η κανονική βαθμίδα πίεσης των πόρων λαμβάνει τιμές από 0.433 έως 0.465 psi/ft .

Ανώμαλη πίεση σχηματισμού:

Ένας προβληματικός σχηματισμός με ανώμαλες πιέσεις αποτελείται συνήθως από ζώνες μη διαπερατές δυσκολεύοντας την ροή ρευστού στο εσωτερικό του. Επίσης, υπάρχει κίνδυνος οι ανώμαλες πιέσεις να γίνουν ανεξέλεγκτες κατά την γεώτρηση του σχηματισμού και να προκληθεί μέχρι και έκρηξη λόγω της ανεξέλεγκτης κατάστασης.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ανώμαλης πίεσης σχηματισμών (SCIENCE, 2011).

Στο διάγραμμα (εικόνα 3.5) πίεσης πόρων και θραύσης συναρτήσει του βάθους του σχηματισμού, παρατηρείται ανωμαλία όσον αφορά την μεταβολή της πίεσης των πόρων σε διάφορα βάθη. Όταν υπάρχουν τέτοιου είδους αυξομειώσεις στις πιέσεις, όπως για παράδειγμα στα 2500 ft, 3000 ft, 7000 ft, 8000 ft, 10000 ft γίνεται αντιληπτό ότι επρόκειτο για ένα προβληματικό σχηματισμό με πολλαπλές ζώνες ανώμαλων πιέσεων και επομένως η γεώτρηση μαζί με τον σχεδιασμό επένδυσης απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.

3.4 Ισοδύναμη πυκνότητα πολφού

Στις γεωτρήσεις, η ροή των ρευστών γίνεται μέσα σε σωληνώσεις και είναι μονοφασική εκτός από την περίπτωση που υπάρξει εισροή αερίου στο εσωτερικό της γεώτρησης και η ροή γίνει πολυφασική. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι οι πιέσεις που δημιουργούνται είναι υδροστατικές και δεν λαμβάνονται υπόψη οι τριβές.

Ο προσδιορισμός της ισοδύναμης πυκνότητας πολφού είναι σημαντικός παράγοντας για την αποφυγή περιπτώσεων απώλειας πολφού (lost circulation) ή εισροής αερίου (kick) στο εσωτερικό της γεώτρησης. Επίσης, παρέχει ικανή υδροστατική πίεση με σκοπό την εξισορρόπηση της πίεσης μεταξύ των πόρων του σχηματισμού (formation pressure) και της θραύσης των πετρωμάτων του σχηματισμού (fracture pressure).

Ισοδύναμη πυκνότητα πολφού (equivalent mud density or EMD):

Η ισοδύναμη πυκνότητα πολφού χρησιμοποιείται για να περιγράψει με απλό τρόπο τις περιπτώσεις πολλαπλών πιέσεων που δέχεται ο πολφός σε μία σύνθετη στήλη γεωτρητικών ρευστών, συγκρίνοντάς τη με μια ισοδύναμη απλή στήλη ενός γεωτρητικού ρευστού η οποία είναι ανοιχτή στον ατμοσφαιρικό αέρα. Εκφράζεται συνήθως σε lbm/gal (ppg), σε lbm/ft³ ή σαν πτώση πίεσης ανά πόδι (psi/ft).

Η ισοδύναμη πυκνότητα πολφού σε συγκεκριμένο βάθος καθορίζεται από τη σχέση:

$$\rho_{eq} = \frac{P}{0.052 \cdot D} \quad (3.1)$$

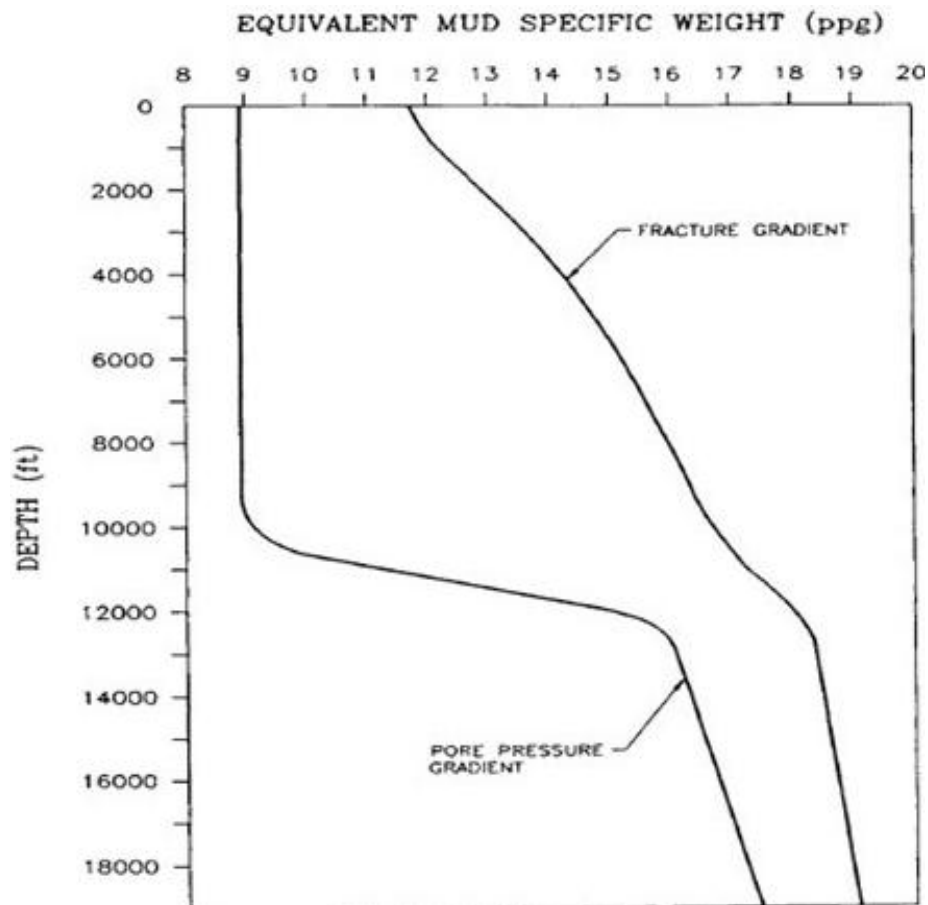
Όπου:

P = πίεση σε συγκεκριμένο βάθος (psi)

ρ_{eq} = ισοδύναμη πυκνότητα πολφού (lbm/gal)

D = βάθος (ft)

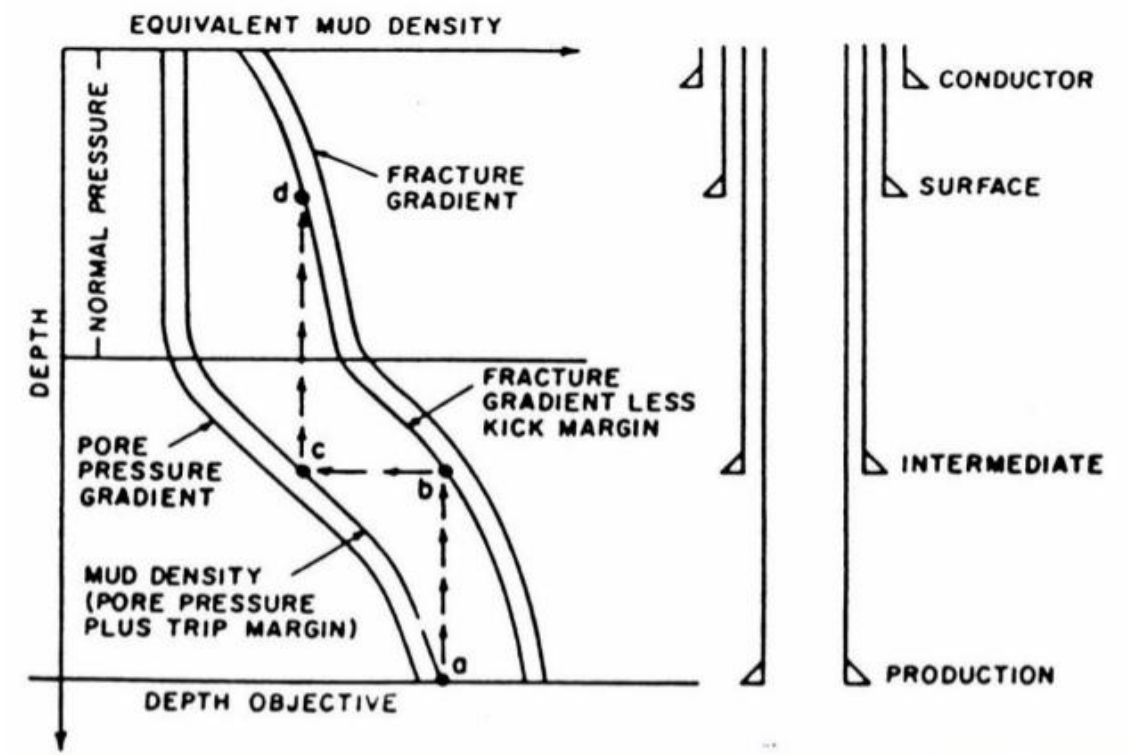
3.6 Επιλογή επένδυσης για τη ρύθμιση του βάθους



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας πολφού συναρτήσει του βάθους (Bourgoyne *et al.*, 1986).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από την πίεση των πόρων και την πίεση θραύσης του σχηματισμού, μετατρέπονται σε ισοδύναμη πυκνότητα πολφού και παρουσιάζονται σε διάγραμμα (εικόνα 3.2), συναρτήσει του βάθους της γεώτρησης (Eaton, 1969).

Η επιλογή του αριθμού των επενδύσεων που χρειάζονται για την γεώτρηση, καθώς και ο καθορισμός του βάθους τοποθέτησής τους, εξαρτώνται από την ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης των πόρων (pore pressure gradient) και από την ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης των σχηματισμών (fracture pressure gradient). Το διάγραμμα (εικόνα 3.3) απεικονίζει την σχέση ανάμεσα στο βάθος τοποθέτησης της επένδυσης και σε αυτές τις πιέσεις.



Εικόνα 3.3: Καθορισμός βάθους τοποθέτησης σωληνώσεων (SPE, 2017).

Κατά τη διαδικασία ανέλκυσης της γεώτρησης στην επιφάνεια προκειμένου να τοποθετηθεί το επόμενο διατρητικό στέλεχος (tripping out), μειώνεται η στάθμη του πολφού μέσα στο πηγάδι. Άμεσο συνακόλουθο αυτού είναι και η πτώση της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης. Για το λόγο αυτόν, οι πυκνότητες του πολφού επιλέγονται έτσι ώστε η υδροστατική τους πίεση να είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη πίεση των πόρων των σχηματισμών. Η επιλογή αυτή έχει ως στόχο, να αντισταθμίζει την πτώση της πίεσης που προκαλείται στον πυθμένα λόγω της ανέλκυσης της γεώτρησης. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας παράγοντας μετακίνησης του πολφού (trip margin) που είναι ίσος με $+0.5 \text{ lbm/gal}$.

Εκτός από τον παράγοντα μετακίνησης του πολφού, ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας λαμβάνεται υπόψη και αναπαρίστανται στο διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας με το βάθος, ο οποίος χρησιμοποιείται στην περίπτωση εισροής αερίου εσωτερικά της γεώτρησης (kick margin). Εάν δεν υπάρχει παράγοντας για εισροή αερίου μέσα στην γεώτρηση είναι αδύνατον να αφαιρεθεί μετέπειτα οποιαδήποτε εισροή αερίου χωρίς να υπάρξει κίνδυνος υπόγειας έκρηξης στο βάθος που είναι τοποθετημένη η επένδυση (Bourgoyne et al. , 1986). Συνήθως χρησιμοποιείται ένας παράγοντας εισροής αερίου (kick margin) στην γεώτρηση που είναι ίσος με -0.5 lbm/gal .

Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το βάθος τοποθέτησης μιας επένδυσης είναι η προστασία του υδροφόρου ορίζοντα, η παρουσία προβληματικών σχηματισμών που μπορεί να προκαλέσουν απώλεια πολφού, καθώς και αδύναμες ζώνες σχηματισμών χαμηλής πίεσης όπου υπάρχει ο κίνδυνος να κολλήσει η επένδυση (stuck pipe).

Κεφάλαιο 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

4.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός κάθε επένδυσης γίνεται με απώτερο σκοπό την αντοχή της σε οποιοδήποτε ακραίο σενάριο είναι πιθανό ή αναμένεται να συμβεί κατά την διάρκεια τοποθέτησης, αλλά και για την μετέπειτα παραμονή της, μέχρι το πέρας της διάρκειας ζωής της γεώτρησης. Οι συνθήκες καταπόνησης που λαμβάνονται πάντα υπόψη είναι: η έκρηξη, κατάρρευση και οι τάσεις από αξονικά φορτία. Ωστόσο, μπορεί να υποστεί και διάφορους άλλους τύπους καταπόνησης όπως λυγισμό ή κάμψη.

Για τους παραπάνω λόγους οι συνθήκες φόρτισης ποικίλουν ανάλογα με το βάθος τοποθέτησης της επένδυσης κάθε φορά. Επίσης, λόγω του μεγάλου κόστους να χρησιμοποιείται ένας τύπος επένδυσης για όλη τη γεώτρηση, η βιομηχανία συνήθως προτιμάει να επιλέγεται ένας λιγότερο ακριβός σχεδιασμός όπου θα αποτελείται από πολλαπλούς τύπους επένδυσης με διαφορετικό βάρος (Bourgoyne et al. , 1986).

Πολύ συχνά είναι αδύνατον να γίνει πρόβλεψη για το τι είδους καταπόνηση μπορεί να υποστεί μία επένδυση κατά την διάρκεια ζωής της γεώτρησης. Για αυτόν το λόγο ο σχεδιασμός της γίνεται πάντα λαμβάνοντας υπόψιν υποθετικά σενάρια δυσμενών καταστάσεων που μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια της γεώτρησης, αλλά και κατά την τοποθέτηση της επένδυσης. Τα σενάρια κάτω από τα οποία θα εξεταστεί η αντοχή της είναι από τα χειρότερα που μπορεί να προκύψουν, έτσι ώστε να υπάρχει ελάχιστη πιθανότητα να συμβεί κάποια χειρότερη περίπτωση η οποία δεν θα έχει ληφθεί υπόψη και να προκληθεί ζημιά, μέχρι και καταστροφή της επένδυσης.

Οι τύποι καταπόνησης που μπορεί να υποστεί είναι αρκετοί και διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με τις λειτουργίες που χρειάζεται να κάνει κάθε φορά μία γεώτρηση. Γενικότερα, το ελάχιστο κόστος σχεδιασμού επιτυγχάνεται όταν η επένδυση που θα επιλεγεί πληροί ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια αντοχής, ζυγίζοντας το μικρότερο πιθανό βάρος ανά πόδι (weight per foot), κατασκευασμένη από το φθηνότερο υλικό κατασκευής, με το μικρότερο τύπο επένδυσης (grade).

Οι συνθήκες γεώτρησης που εφαρμόζονται για την επιφανειακή επένδυση είναι διαφορετικές από τις συνθήκες που εφαρμόζονται για την ενδιάμεση. Για αυτόν το λόγο, ο κάθε τύπος επένδυσης θα εξεταστεί και θα σχεδιαστεί με διαφορετικά κριτήρια καταπόνησης (Bourgoyne et al. , 1986).

4.2 Συντελεστές ασφάλειας για τον σχεδιασμό επένδυσης (design factors)

Οι συντελεστές για σχεδιασμό (design factors) που δίνονται από το αμερικανικό πετρελαϊκό ινστιτούτο (API), είναι στην ουσία συντελεστές ασφάλειας (safety factors) που επιτρέπουν τον σχεδιασμό αξιόπιστων και ασφαλών τύπων επένδυσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Οι συντελεστές ασφάλειας για τον σχεδιασμό της επένδυσης είναι απαραίτητοι διότι:

- Δεν θα υπάρχει αβεβαιότητα στον καθορισμό των καταπονήσεων, με σκοπό η επιλεγμένη επένδυση να αντέξει με σιγουριά σε οποιοδήποτε φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή τύπου της οποίας τα όρια αντοχής θα είναι πάντα μεγαλύτερα από την καταπόνηση που αναμένεται να υποστεί η επένδυση.
- Υπάρχει περίπτωση να υποστεί φθορά η επένδυση κατά την μεταφορά της ή κατά την διάρκεια αποθήκευσής της.
- Είναι πιθανόν να συμβεί περιστροφική φθορά από την διατρητική στήλη κατά την διάρκεια της γεώτρησης.
- Παρέχουν την δυνατότητα πρόληψης και αποτροπής οποιασδήποτε φθοράς μπορεί να προκύψει κατά την τοποθέτηση εξαρτημάτων στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό της επένδυσης, όπως couplings και εργαλεία για διάφορες εργασίες διαγραφιών.
- Από τη χρήση τους, εξαρτάται έμμεσα η ασφάλεια του πληρώματος και το κόστος κατασκευής της γεώτρησης.

Παράδειγμα:

Από το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο δίνονται οι παρακάτω συντελεστές ασφάλειας για τα διάφορα είδη καταπονήσεων:

API Design Factors (typical)			
<u>Required</u>			<u>Design</u>
10,000 psi	Collapse	1.125	11,250 psi
100,000 lbf	Tension	1.8	180,000 lbf
10,000 psi	Burst	1.1	11,000 psi

Εικόνα 4.1: Παράδειγμα εφαρμογής τυπικών συντελεστών ασφάλειας για σχεδιασμό (Akin and Craig, 2014.)

4.3 Σχεδιασμός επένδυσης λόγω καταπόνησης

Τα πιο σημαντικά κριτήρια καταπόνησης που πρέπει να πληροί ένας τύπος επένδυσης για την επιλογή του από άποψη αντοχής είναι:

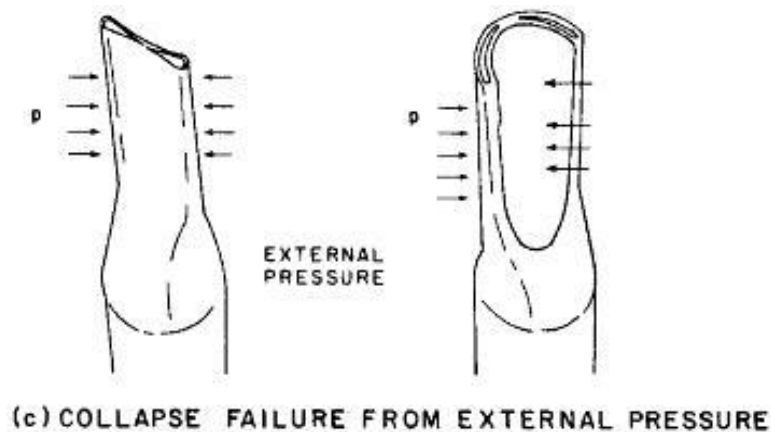
- Αντοχή σε κατάρρευση
- Αντοχή σε έκρηξη
- Αντοχή σε αξονικά φορτία

Στην περίπτωση που ένας τύπος επένδυσης δεν πληροί ένα από τα παραπάνω κριτήρια σε αντοχή, κρίνεται ακατάλληλος για την χρήση του στην γεώτρηση και επιλέγεται διαφορετικός τύπος επένδυσης που να πληροί ταυτόχρονα όλες τις προδιαγραφές (Bourgoyne et al. , 1986).

4.3.1 Αντοχή σε κατάρρευση

Σε περίπτωση μέγιστης εξωτερικής πίεσης η επένδυση πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική έτσι ώστε να μην κινδυνεύει κανένα τμήμα της επένδυσης από κατάρρευση. Υπό την επίδραση της εξωτερικής πίεσης η επένδυση κινδυνεύει να καταρρεύσει με τους εξής τρόπους:

- Ελαστική κατάρρευση
- Πλαστική κατάρρευση
- Μεταβατική κατάρρευση
- Ολοκληρωτική κατάρρευση που μπορεί να προκληθεί από την υπέρβαση της αντοχής σε τάση που αντέχει η επένδυση.



Εικόνα 4.2: Κατάρρευση επένδυσης λόγω μεγάλης εξωτερικής πίεσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Οι κατηγορίες κατάρρευσης της επένδυσης καθορίζονται κάθε φορά από τη γεωμετρία της και από τις ιδιότητες του υλικού που είναι φτιαγμένη.

Οι ζώνες κατάρρευσης καθορίζονται από το λόγο D/t , όπου D = η εξωτερική διάμετρος της επένδυσης και t = το πάχος της επένδυσης.

Έχει παρατηρηθεί ότι για σχετικά λεπτή επένδυση (μεγάλη συχνότητα D/t), η κατάρρευση που θα προκληθεί είναι συνήθως ελαστική και καθώς η συχνότητα D/t μειώνεται ή καθώς η επένδυση γίνεται παχύτερη μπορεί να οδηγηθεί στην αποτυχία της από πλαστική κατάρρευση (ενδιάμεση συχνότητα D/t) ή στην ολοκληρωτική κατάρρευση (χαμηλή συχνότητα D/t).

Ελαστική κατάρρευση:

Στην ελαστική κατάρρευση, η επένδυση αποτυγχάνει πριν παραμορφωθεί και μπορούμε να υπολογίσουμε την ελαστική πίεση κατάρρευσης σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$P_E = \frac{46.95 \times 10^6}{(d_n / t)[(d_n / t) - 1]^2} \quad (4.1)$$

όπου :

t = πάχος της επένδυσης (in.)

d_n = εξωτερική διάμετρος της επένδυσης (in.)

Πλαστική κατάρρευση:

Στην πλαστική κατάρρευση, η επένδυση παραμορφώνεται πριν την καταστροφή της και η πλαστική πίεση κατάρρευσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_P = \sigma_Y \left[\frac{F_1}{d_n / t} - F_2 \right] - F_3 \quad (4.2)$$

F = εμπειρικός συντελεστής

σ_Y = ελάχιστη αντοχή της επένδυσης σε περίπτωση μεγάλης εξωτερικής πίεσης (psi)

Μεταβατική ζώνη κατάρρευσης:

Η μεταβατική ζώνη κατάρρευσης, είναι η περιοχή ανάμεσα στην πλαστική κατάρρευση της επένδυσης και στην ελαστική κατάρρευση της επένδυσης και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$P_T = \sigma_Y \left[\frac{F_4}{d_n / t} - F_5 \right] \quad (4.3)$$

Ολοκληρωτική κατάρρευση:

Μία επένδυση μπορεί να καταρρεύσει τελείως εάν υπάρξει υπέρβαση της αντοχής της από μία μεγάλη τάση που μπορεί να της ασκηθεί.

$$P_{yp} = 2\sigma_y \left[\frac{d_n/t - 1}{(d_n/t)^2} \right] \quad (4.4)$$

Εμπειρικοί συντελεστές και ζώνες κατάρρευσης:

Παρακάτω απεικονίζονται σε μορφή πινάκων οι εμπειρικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης, καθώς και οι κατηγορίες κατάρρευσης για κάθε τύπο επένδυσης σύμφωνα με το πετρελαϊκό ινστιτούτο:

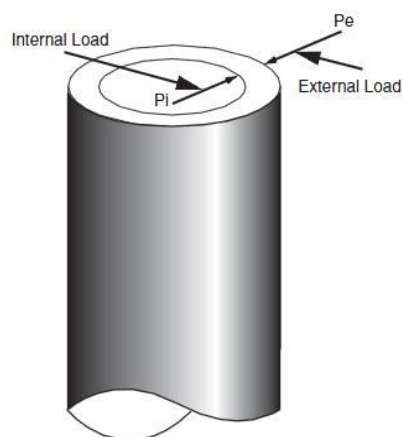
Grade*	Empirical Coefficients				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
H-40	2.950	0.0465	754	2.063	0.0325
-50	2.976	0.0515	1,056	2.003	0.0347
J-K 55 & D	2.991	0.0541	1,206	1.989	0.0360
-60	3.005	0.0566	1,356	1.983	0.0373
-70	3.037	0.0617	1,656	1.984	0.0403
C-75 & E	3.054	0.0642	1,806	1.990	0.0418
L-80 & N-80	3.071	0.0667	1,955	1.998	0.0434
C-90	3.106	0.0718	2,254	2.017	0.0466
C-95	3.124	0.0743	2,404	2.029	0.0482
-100	3.143	0.0768	2,553	2.040	0.0499
P-105	3.162	0.0794	2,702	2.053	0.0515
P-110	3.181	0.0819	2,852	2.066	0.0532
-120	3.219	0.0870	3,151	2.092	0.0565
-125	3.239	0.0895	3,301	2.106	0.0582
-130	3.258	0.0920	3,451	2.119	0.0599
-135	3.278	0.0946	3,601	2.133	0.0615
-140	3.297	0.0971	3,751	2.146	0.0632
-150	3.336	0.1021	4,053	2.174	0.0666
-155	3.356	0.1047	4,204	2.188	0.0683
-160	3.375	0.1072	4,356	2.202	0.0700
-170	3.412	0.1123	4,660	2.231	0.0734
-180	3.449	0.1173	4,966	2.261	0.0769

Πίνακας 4.1: Εμπειρικοί συντελεστών που χρησιμοποιούνται για το σενάριο κατάρρευσης της επένδυσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Grade*	←Yield Strength→ Collapse	←Plastic→ Collapse	←Transition→ Collapse	←Elastic→ Collapse
H-40	16.40	27.01	42.64	
-50	15.24	25.63	38.83	
J-K-55 & D	14.81	25.01	37.21	
-60	14.44	24.42	35.73	
-70	13.85	23.38	33.17	
C-75 & E	13.60	22.91	32.05	
L-80 & N-80	13.38	22.47	31.02	
C-90	13.01	21.69	29.18	
C-95	12.85	21.33	28.36	
-100	12.70	21.00	27.60	
P-105	12.57	20.70	26.89	
P-110	12.44	20.41	26.22	
-120	12.21	19.88	25.01	
-125	12.11	19.63	24.46	
-130	12.02	19.40	23.94	
-135	11.92	19.18	23.44	
-140	11.84	18.97	22.98	
-150	11.67	18.57	22.11	
-155	11.59	18.37	21.70	
-160	11.52	18.19	21.32	
-170	11.37	17.82	20.60	
-180	11.23	17.47	19.93	

Πίνακας 4.2: Περιοχή κατάρρευσης για κάθε τύπο επένδυσης (Bourgoyne et al. , 1986).

4.3.2 Αντοχή σε έκρηξη



Εικόνα 4.3: Εσωτερικά και εξωτερικά φορτία που ασκούνται στην επένδυση (Akin and Craig, 2014).

Η αντοχή της επένδυσης από έκρηξη καθορίζεται από την μέγιστη εσωτερική πίεση που χρειάζεται έτσι ώστε να προκληθεί διαρροή στην επένδυση. Η ελάχιστη πίεση που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην επένδυση υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Barlow (Mitchell and Miska, 2011):

$$P_{br} = 0.875 \frac{2\sigma_{yield} t}{d_n} \quad (4.5)$$

όπου: t = το πάχος της επένδυσης (in)

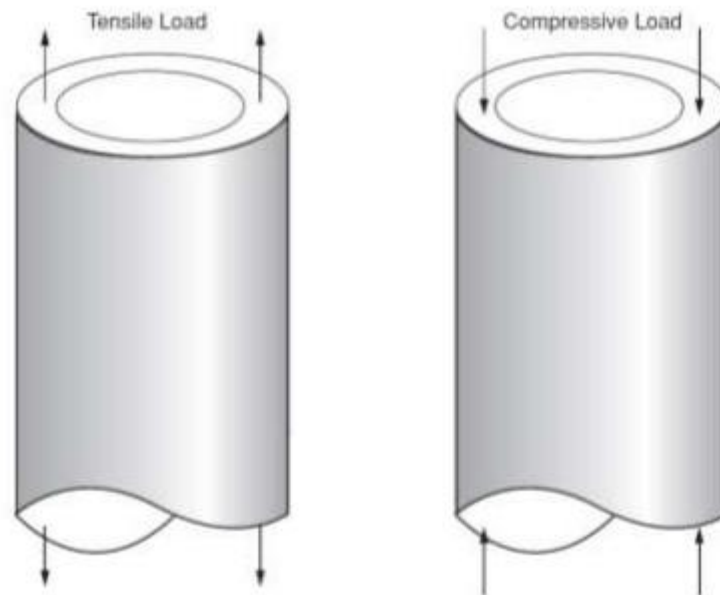
d_n = εξωτερική διάμετρος της επένδυσης (in)

σ_{yield} = ελάχιστη αντοχή της επένδυσης σε περίπτωση μεγάλων εξωτερικών πιέσεων (psi)



Εικόνα 4.4: Αστοχία της επένδυσης από έκρηξη, λόγω της επίδρασης μεγάλων εσωτερικών πιέσεων (Bourgoyne et al. , 1986).

4.3.3 Αξονικά φορτία – τάσεις



Εικόνα 4.5: Εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία που ασκούνται στην επένδυση (Akin and Craig, 2014).

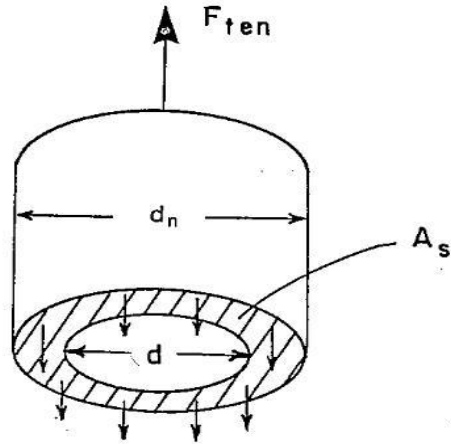
Η τάση που ασκείται σε μία επένδυση εξαρτάται από την δύναμη που ασκείται στην επένδυση, καθώς και από την διατομή της επένδυσης. Η αξονική τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.6)$$

Για να εγκριθεί ένας συγκεκριμένος τύπος επένδυσης εκτός από αντοχή σε έκρηξη και κατάρρευση, σχεδιάζεται έτσι ώστε να αντέχει και στα χειρότερα σενάρια αξονικών τάσεων και μόνο όταν πληροί και τις 3 προδιαγραφές καταπόνησης η επένδυση επιλέγεται τελικά.

Όσον αφορά τα αξονικά φορτία, η επένδυση επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τάσεις οι οποίες θα ασκηθούν πάνω της στην περίπτωση των χειρότερων σεναρίων να είναι μικρότερες από το όριο αντοχής τάσεων της επένδυσης.

$$\text{Δηλαδή, } \sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{yield}$$



Εικόνα 4.6: Εφελκυστική δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στην επένδυση και να προκαλέσει την αστοχία της (Akin and Craig, 2014).

Στο σχήμα η δύναμη F_{ten} είναι η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στην επένδυση στην προσπάθεια να ανελκυστεί. Η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στην επένδυση υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{ten} = \sigma_{yield} * A_s \quad (4.7)$$

Όπου:

σ_{yield} = η ελάχιστη αντοχή της επένδυσης (psi)

A_s = η διατομή της επένδυσης (in.)

4.4 Σχεδιασμός επιφανειακής επένδυσης

4.4.1 Γενικά

Γενικά για τον προσδιορισμό εσωτερικής διαμέτρου, βάρους και τύπου για την επιφανειακή επένδυση χρειάζεται να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση, έκρηξη και αξονικά φορτία.

- Ο τύπος επένδυσης που θα επιλεγεί θα είναι ικανός να αντέχει σε καταπονήσεις που οφείλονται σε μεγάλες εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις, έτσι ώστε να αποφευχθεί η έκρηξη και η κατάρρευση αντίστοιχα, καθώς ακόμη και σε καταπονήσεις από αξονικά φορτία.
- Για την επιλογή κατάλληλης εσωτερικής διαμέτρου επένδυσης θα χρησιμοποιηθούν οι πίνακες που δίνονται από το SPE για την επιφανειακή επένδυση.
- Για κάθε τύπο επένδυσης θα γίνει τεστ αντοχής και για τα τρία είδη καταπόνησης. Τα σενάρια που θα υπολογίζονται θα είναι τα χειρότερα που μπορεί να συμβούν σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

4.4.2 Κατάρρευση

Μελέτη σεναρίου κατάρρευσης στην επιφανειακή επένδυση:

Η πίεση κατάρρευσης προκύπτει από την διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εξωτερικό της επένδυσης και το εσωτερικό της, η οποία είναι μέγιστη στον πυθμένα της επένδυσης.

Το χειρότερο σενάριο που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση, είναι πολύ πιθανόν να συμβεί εάν η επένδυση τοποθετηθεί άδεια (χωρίς πολφό στο εσωτερικό της), μέσα στην γεώτρηση ή εάν προκύψει ένα σοβαρό πρόβλημα απώλειας πολφού και επομένως απώλεια εσωτερικής πίεσης κατά την γεώτρηση του επόμενου διαστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εξωτερική πίεση της επένδυσης θα είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική, με αποτέλεσμα την κατάρρευση της γεώτρησης.

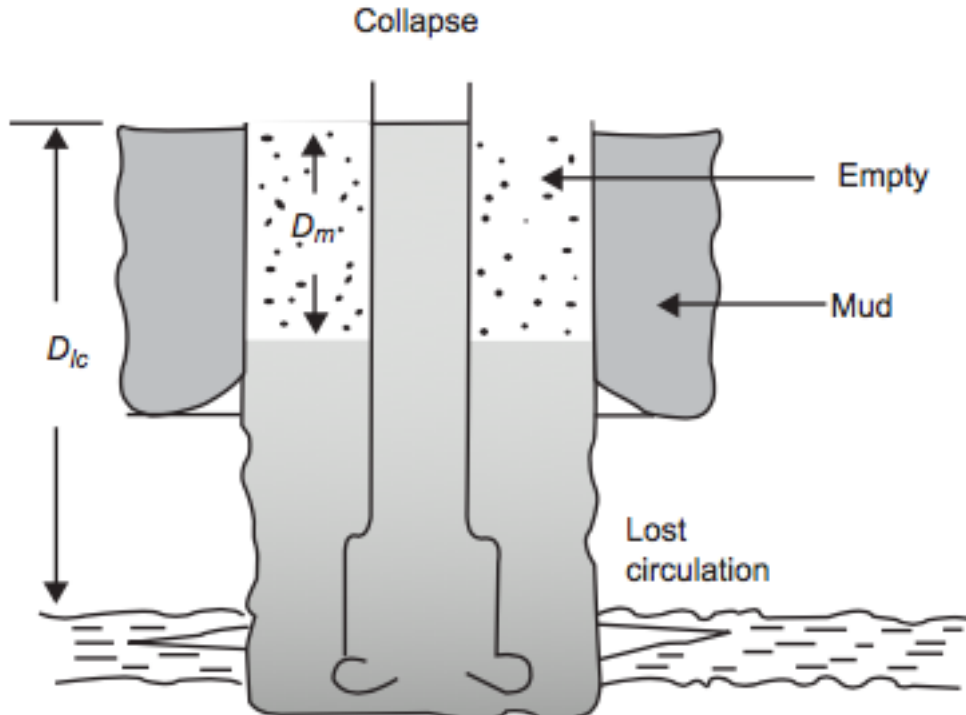
Σε ρηχά βάθη, είναι αρκετά συχνό φαινόμενο η ύπαρξη ζωνών οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν απώλεια πολφού. Στην περίπτωση λοιπόν που προκύψει ένα σοβαρό πρόβλημα απώλειας στον πυθμένα της γεώτρησης κατά την γεώτρηση του επόμενου σταδίου (χειρότερο σενάριο), η στάθμη του πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης θα μειωθεί, με αποτέλεσμα να μειωθεί και η εσωτερική πίεσή της.

Ακριβώς παρόμοιο πρόβλημα μπορεί να προκύψει και με μία άδεια επένδυση εσωτερικά από πολφό, όπου κατά την τοποθέτηση της μέσα στην γεώτρηση η εσωτερική πίεση της θα είναι μηδενική και επομένως η εξωτερική πίεση του περιβάλλοντος σχηματισμού θα είναι μεγαλύτερη, κάτι το οποίο θα την θέσει σε κίνδυνο κατάρρευσης.

Η στάθμη του πολφού θα μειώνεται εσωτερικά της γεώτρησης και επομένως της επένδυσης, έως ότου ισοσταθμιστούν οι πιέσεις εσωτερικά και εξωτερικά της γεώτρησης.

Η πίεση που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση στην επένδυση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p_{collapse} = P_{external} - P_{internal} \quad (4.8)$$



Εικόνα 4.7: Σενάριο κατάρρευσης, λόγω της μετατόπιση του επιπέδου πολφού από το εσωτερικό της επιφανειακής επένδυσης (Mitchell and Miska, 2011).

Επομένως για τον τελικό σχεδιασμό της επιφανειακής επένδυσης γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις (Mitchell and Miska, 2011):

- Θα προκύψει απώλεια πολφού και επομένως απώλεια πίεσης στο βάθος όπου υπάρχει η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων του σχηματισμού και της ισοδύναμης πυκνότητας πολφού (διάγραμμα 5.2), όπου είναι και το χειρότερο σενάριο
- Από την πτώση της στάθμης του πολφού, η επένδυση στο εσωτερικό της θα είναι από ένα σημείο και πάνω κενή χωρίς πολφό
- Η τσιμέντωση της επένδυσης δεν λαμβάνεται υπόψη
- Θα υπάρξει αξονική καταπόνηση από το βάρος της ίδιας της επένδυσης

Ο υπολογισμός της εξωτερικής πίεσης της επένδυσης για το σχεδιασμό από φορτία κατάρρευσης, εξαρτάται από την πυκνότητα του πολφού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της επένδυσης κατά την τοποθέτησή της στο επιθυμητό βάθος.

$$P_e = 0.052 * \rho_{mud} * D \quad (4.9)$$

[40]

Όπου:

P_e = η εξωτερική πίεση στον πυθμένα της επένδυσης

ρ_{mud} = η πυκνότητα πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης

D = το βάθος τοποθέτησης της επένδυσης

Ο υπολογισμός της εσωτερικής πίεσης της για τον σχεδιασμό από φορτία κατάρρευσης, εξαρτάται από την μέγιστη απώλεια της στάθμης των ρευστών που μπορεί να συμβεί ξαφνικά από μία ζώνη απώλειας πίεσης. Το μέγιστο βάθος μετατόπισης του πολφού υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$D_m = \frac{\rho_{mud} - \rho_p}{\rho_{mud}} * D_{lc} \quad (4.10)$$

Όπου :

D_{lc} = το βάθος που προκύπτει η απώλεια πολφού

ρ_p = η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης των πόρων για το βάθος που προέκυψε η απώλεια των ρευστών

ρ_{mud} = η μέγιστη πυκνότητα του πολφού που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στο εσωτερικό της επένδυσης, κατά την γεώτρηση στο βάθος απώλειας του πολφού

D_m = το βάθος στο οποίο θα υποχωρήσει το επίπεδο της στάθμης των ρευστών – η μετατόπιση της στάθμης του πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης

4.4.3 Έκρηξη

Μελέτη σεναρίου έκρηξης στην επιφανειακή επένδυση:

Για το σχεδιασμό επένδυσης που θα αντέξει σε περίπτωση έκρηξης γίνεται υπόθεση για την ύπαρξη αερίου στον σχηματισμό, το οποίο εισέρχεται στο εσωτερικό της επένδυσης λόγω μεγάλης πίεσης και μικρότερης πυκνότητας πολφού από αυτήν που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί.

Ωστόσο για να είναι το χειρότερο σενάριο, υποτίθεται ότι η εισχώρηση γίνεται κατά την γεώτρηση του πηγαδιού στο επόμενο μέγιστο βάθος όπου θα τοποθετηθεί η ενδιάμεση επένδυση.

Έτσι, με την εισχώρηση αερίου η πίεση στο εσωτερικό της επιφανειακής επένδυσης θα αυξηθεί, με αποτέλεσμα η πίεση των πόρων του σχηματισμού να είναι μικρότερη από την πίεση στο εσωτερικό της επένδυσης και να προκληθεί αναπόφευκτα έκρηξη.

Η εσωτερική πίεση λόγω εισροής αερίου στον πυθμένα της επένδυσης (injection pressure), είναι ίση με την ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού (fracture pressure

gradient), συν μια επιπλέον πυκνότητα πίεσης (συντελεστής ασφάλειας) έτσι ώστε το αέριο να εισχωρήσει στην επένδυση από τη θραύση του σχηματισμού (Crammer, 1982).

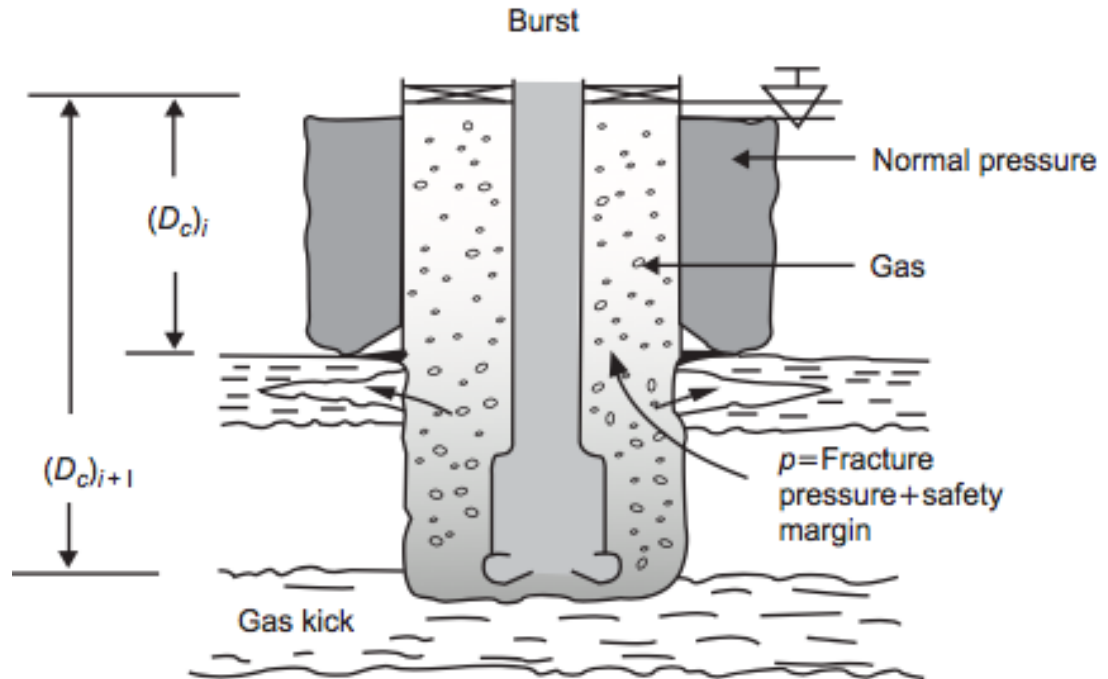
Επομένως η πίεση στον πυθμένα θα είναι:

$$P_{injection} = 0.052 * (\text{ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης} + \text{συντελεστή ασφάλειας}) * (D_c)_i \quad (4.11)$$

Όπου:

$P_{injection}$ = πίεση λόγω εισχώρησης αερίου στον πυθμένα της επένδυσης

$(D_c)_i$ = βάθος τοποθέτησης της επένδυσης



Εικόνα 4.8: Σενάριο έκρηξης, λόγω εισροής αερίου στο εσωτερικό της επιφανειακής επένδυσης (Mitchell and Miska, 2011).

Η πίεση που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην επένδυση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p_{burst} = P_{internal} - P_{external} \quad (4.12)$$

4.4.4 Αξονικά φορτία - τάσεις

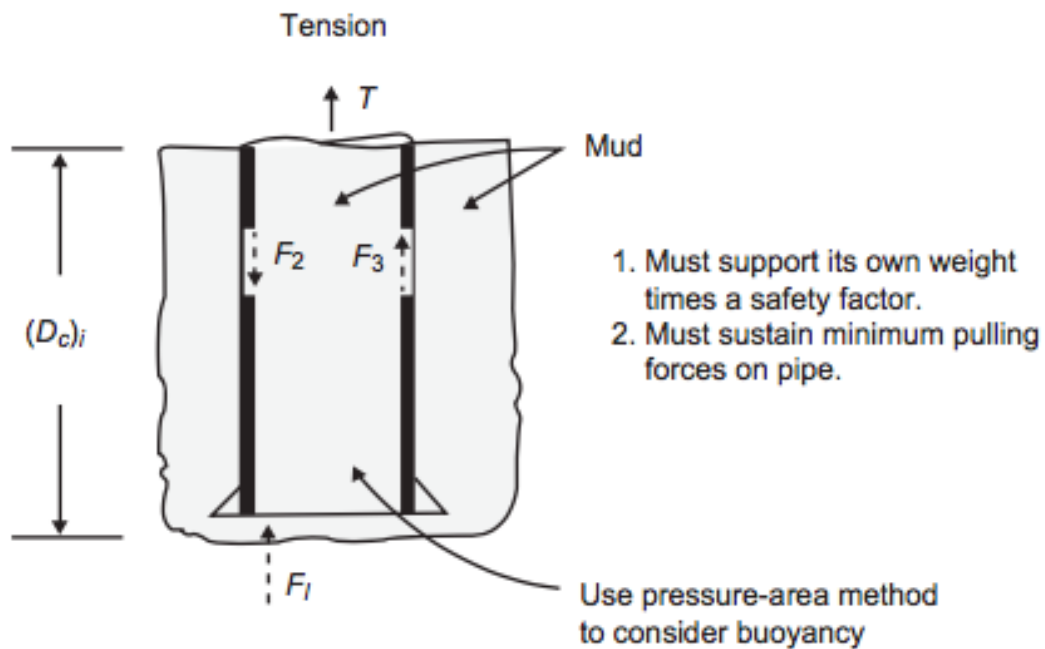
Η τάση που ασκείται σε μία επένδυση εξαρτάται από την δύναμη που ασκείται στην επένδυση, καθώς και από την διατομή της επένδυσης. Η αξονική τάση δίνεται από την εξίσωση (4.6):

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Για να εγκριθεί ένας συγκεκριμένος τύπος επένδυσης, εκτός από αντοχή σε έκρηξη και κατάρρευση, σχεδιάζεται έτσι ώστε να αντέχει και στα χειρότερα σενάρια αξονικών τάσεων και μόνο όταν πληροί και τις 3 προδιαγραφές καταπόνησης η επένδυση επιλέγεται τελικά.

Όσον αφορά τα αξονικά φορτία η επένδυση επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι τάσεις οι οποίες θα ασκηθούν πάνω της στην περίπτωση των χειρότερων αναμενόμενων σεναρίων να είναι μικρότερες από το όριο αντοχής τάσεων της επένδυσης.

$$\text{Δηλαδή, } \sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{yield}$$



Εικόνα 4.9: Σενάριο αστοχίας της επιφανειακής επένδυσης λόγω μεγάλων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων (Bourgoyne et al. , 1986).

Μελέτη σεναρίων καταπόνησης από αξονικά φορτία στην επιφανειακή επένδυση:

Για το σχεδιασμό της επιφανειακής επένδυσης για αντοχή από αξονικά φορτία εξετάζονται 2 αντίθετα σενάρια εφελκυσμού και θλίψης (Mitchell and Miska, 2011):

Για το πρώτο σενάριο γίνεται η παραδοχή ότι κατά την τοποθέτηση της επένδυσης μέσα στο πηγάδι, κάπου κολλάει (stuck pipe) και δεν μπορεί να κατέβει σε μεγαλύτερο βάθος. Το πλήρωμα της γεώτρησης στην προσπάθεια να τραβήξει την γεώτρηση προς την επιφάνεια υπάρχει περίπτωση να ασκήσει δύναμη (overpull) μεγαλύτερη από την αντοχή της επένδυσης με αποτέλεσμα να την καταστρέψει. Η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι το βάρος της όταν είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό του πηγαδιού σύν μία επιπλέον δύναμη ασφάλειας έτσι ώστε οι υπολογισμοί εφελκυστικής καταπόνησης να είναι αξιόπιστοι, δηλαδή:

$$F = W_{wet} + SF \quad (4.13)$$

Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη η άνωση λόγω πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης. Έτσι, ο συντελεστής άνωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \frac{\rho_{\text{steel}} - \rho_{\text{mud}}}{\rho_{\text{steel}}} \quad (4.14)$$

ή

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right) \quad (4.15)$$

Για το δεύτερο σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι κατά την τοποθέτηση της επένδυσης στον πυθμένα, η επένδυση μπορεί να μην αντέξει το βάρος της και να υποστεί θλίψη με καταστροφικά αποτελέσματα. Για αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο το βάρος της επένδυσης υποθέτοντας ότι δεν αναρτάται από κάπου.

Ωστόσο υπάρχει μία σημαντική διαφορά σε σχέση με το πρώτο σενάριο και αυτή είναι ότι η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι μόνο το βάρος της ίδιας της επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης, δηλαδή

$$F = W_{\text{air}} \quad (4.16)$$

Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την υπόθεση που γίνεται, ότι τη στιγμή της εξόδου του γεωτρύπανου από το εσωτερικό του πηγαδιού η στάθμη του πολφού εσωτερικά θα μειωθεί, ενώ στην συνέχεια που θα τοποθετηθεί η επένδυση στο εσωτερικό της γεώτρησης, η στάθμη του πολφού θα αυξηθεί αλλά δεν θα είναι στο ίδιο επίπεδο που ήταν πριν η στάθμη της αλλά χαμηλότερα. Αυτό συμβαίνει διότι το κοπτικό άκρο είναι μεγαλύτερο σε διάμετρο από την

επένδυση που θα τοποθετηθεί μετέπειτα, η οποία είναι πιο λεπτή και σαν αποτέλεσμα συμβαίνει η παραπάνω διαδικασία.

Σύμφωνα με την παραπάνω υπόθεση, την στιγμή της τοποθέτησης της επένδυσης στο εσωτερικό του πηγαδιού, κάποια στιγμή η επένδυση θα βρεθεί να κρέμεται στον αέρα λόγω της μείωσης της στάθμης του πολφού από την έξοδο του κοπτικού άκρου από το πηγάδι, με αποτέλεσμα να προκύψει η παραπάνω ισότητα.

Τέλος, επιπρόσθετες καταπονήσεις από τις οποίες μπορεί να κινδυνέψει μία σωλήνωση είναι ο λυγισμός, θερμικά φαινόμενα, τριαξονικές τάσεις, διάβρωση.

4.5 Σχεδιασμός ενδιάμεσης επένδυσης

4.5.1 Γενικά

Για τον προσδιορισμό εσωτερικής διαμέτρου, βάρους και τύπου για την ενδιάμεση επένδυση χρειάζεται να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση, έκρηξη και αξονικά φορτία όπως ανωτέρω.

Ο σχεδιασμός της ενδιάμεσης επένδυσης είναι παρόμοιος με τον σχεδιασμό της επιφανειακής επένδυσης, καθώς και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ένας κοινός στόχος ο οποίος είναι η γεώτρηση να φτάσει με ασφάλεια στο επιθυμητό βάθος. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές μεταξύ των 2 σχεδιασμών, όπως στις απαιτήσεις της επένδυσης για σχεδιασμό από έκρηξη.

Αυτό διότι χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν ο αποτρεπτής έκρηξης. Συνήθως, η ενδιάμεση επένδυση δέχεται μεγαλύτερες πιέσεις από την επιφανειακή για το λόγο ότι τοποθετείται σε μεγαλύτερα βάθη και σε σχηματισμούς οι οποίοι είναι προβληματικοί από άποψη υψηλών πιέσεων. Έτσι, για την επιλογή αποτρεπτή έκρηξης λαμβάνονται σαν όριο αντοχής οι πιέσεις που θα υποστεί η ενδιάμεση επένδυση.

Εάν γίνει σχεδιασμός της επένδυσης σύμφωνα με την επιφανειακή, κατά την γεώτρηση σε μεγαλύτερα βάθη οι πιέσεις θα αυξάνονται και κάποια στιγμή θα υπερβούν τα όρια αντοχής σε πίεση του αποτρεπτή έκρηξης. Μία τέτοια διαδικασία είναι ταυτόχρονα ασύμφορη καθώς θα χρειαστεί άλλος αποτρεπτής έκρηξης με μεγαλύτερη αντοχή αλλά και επικίνδυνη για την ασφάλεια του πληρώματος.

Όπως στην επιφανειακή επένδυση έγιναν διάφορες υποθέσεις για τον σχεδιασμό, ακριβώς η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στον σχεδιασμό της ενδιάμεσης επένδυσης (Adams et al ., 1985).

4.5.2 Κατάρρευση

Μελέτη σεναρίου κατάρρευσης στην ενδιάμεση επένδυση:

Ο σχεδιασμός της επένδυσης για αντοχή σε κατάρρευση ακολουθεί την ίδια λογική με τον σχεδιασμό της επιφανειακής επένδυσης.

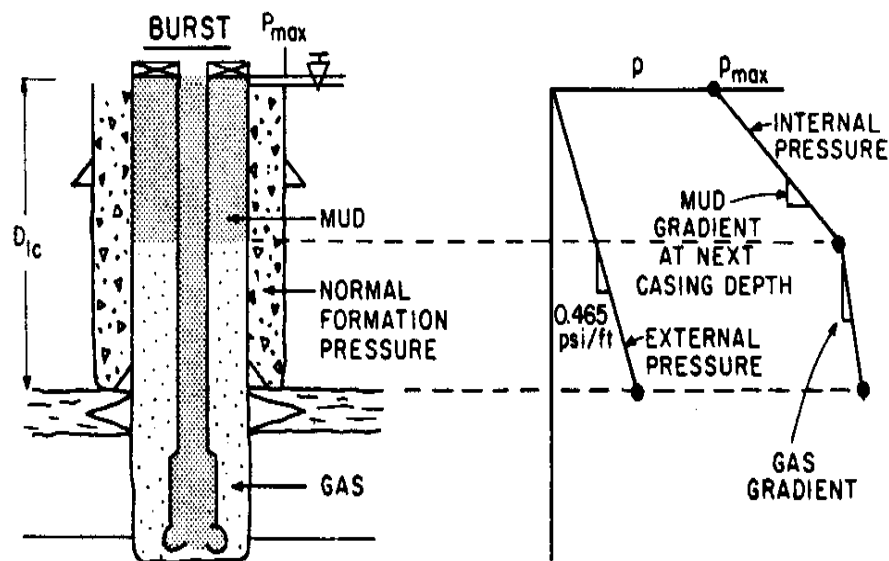
4.5.3 Έκρηξη

Μελέτη σεναρίου έκρηξης στην ενδιάμεση επένδυση:

Το βασικό σενάριο στον σχεδιασμό για έκρηξη είναι ότι κατά την προσπάθεια εξαγωγής του αερίου από το εσωτερικό της γεώτρησης (circulating out), υπάρχει περίπτωση να προκύψει υπόγεια έκρηξη λόγω μεγάλης εσωτερικής πίεσης στην ενδιάμεση επένδυση (Chenevert et al., 1981).

Επίσης, η απώλεια πολφού από το εσωτερικό της επένδυσης, θα έχει ως όριο εσωτερικής πίεσης την μέγιστη πίεση αντοχής του αποτρεπτή εκρήξεων και των πολλαπλών βαλβίδων, έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποια πιθανή αλλαγή τους σε περίπτωση που οι πιέσεις σε μεγαλύτερα βάθη, ξεπεράσουν τα όρια αντοχής τους.

Ακόμη, γίνεται η παραδοχή ότι το πάνω μέρος της επένδυσης είναι γεμάτο με πολφό και το κάτω μέρος με αέριο.



Εικόνα 4.10: Σενάριο έκρηξης της ενδιάμεσης επένδυσης, λόγω εισροής αερίου στο εσωτερικό της (Mitchell and Miska, 2011).

Η πίεση στο πυθμένα της επένδυσης εξαρτάται από την πίεση στην κορυφή εσωτερικά της επένδυσης και ισούται με τη πίεση αντοχής του επιφανειακού εξοπλισμού P_{max} . Τέλος, η πίεση στο πυθμένα της επένδυσης εξαρτάται από την πίεση λόγω πολφού, καθώς και λόγω εισροής αερίου.

Το βάθος διεπαφής μεταξύ επιπέδου αερίου με επίπεδο πολφού D_m , υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_{max} + 0.052 * p_m * D_m + 0.052 * \rho_g(D_{lc} - D_m) = P_i \quad (4.17)$$

Όπου

P_i = η πίεση του αερίου στο σημείο που μπαίνει στο εσωτερικό της γεώτρησης (psi)

ρ_m = η πυκνότητα του πολφού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της γεώτρησης (lbm/ft)

ρ_g = η πυκνότητα του αερίου στο εσωτερικό της επένδυσης (lbm/ft)

D_{lc} = το βάθος εισροής του αερίου στο εσωτερικό της επένδυσης (ft)

P_{max} = η μέγιστη πίεση αντοχής του επιφανειακού εξοπλισμού (αποτρεπτής εκρήξεων) στην επιφάνεια της επένδυσης (psi)

D_m = το επίπεδο της στάθμης πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης (ft)

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς το βάθος μετατόπισης του πολφού D_m από την στιγμή που εισχώρησε το αέριο στο εσωτερικό της γεώτρησης προκύπτει η σχέση:

$$D_m = \frac{P_i - P_{max}}{0.052 (p_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g - D_{lc}}{(\rho_m - \rho_g)} \quad (4.18)$$

Η πυκνότητα του πολφού που θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει το χειρότερο σενάριο, θα είναι η πυκνότητα του πολφού που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί, κατά την τοποθέτηση του επόμενου τύπου επένδυσης της γεώτρησης.

Αυτό δίνει την δυνατότητα υπολογισμού των μέγιστων πιέσεων που θα ασκηθούν μεταξύ της επιφάνειας και του πυθμένα της επένδυσης. Το βάθος εισροής του αερίου στο εσωτερικό της επένδυσης, εξαρτάται από τη μετατόπιση του πολφού στο εσωτερικό της και από το βάθος έδρασης του πυθμένα της (casing shoe).

Η εσωτερική πίεση λόγω εισροής αερίου στον πυθμένα της επένδυσης (injection pressure), είναι ίση με την ισοδύναμη πίεση θραύσης του σχηματισμού (fracture pressure gradient), συν μια επιπλέον πίεση έτσι ώστε το αέριο να εισχωρήσει στην επένδυση από τη θραύση του σχηματισμού (Crammer, 1982).

Η πυκνότητα και ο προσδιορισμός της βαθμίδας του αερίου, δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho_g = \frac{P * M}{Z * R * T} \quad (4.19)$$

Όπου:

ρ_g = η πυκνότητα του αερίου στο εσωτερικό της γεώτρησης

P = η πυκνότητα του πολφού στο εσωτερικό της γεώτρησης

M = το μοριακό βάρος της σύστασης του αερίου

R = σταθερά

T = 520 + 0.012 * D θερμοκρασία του σχηματισμού σε °R

Z = ιδανικό αέριο

4.6 Σχεδιασμός παραγωγικής επένδυσης

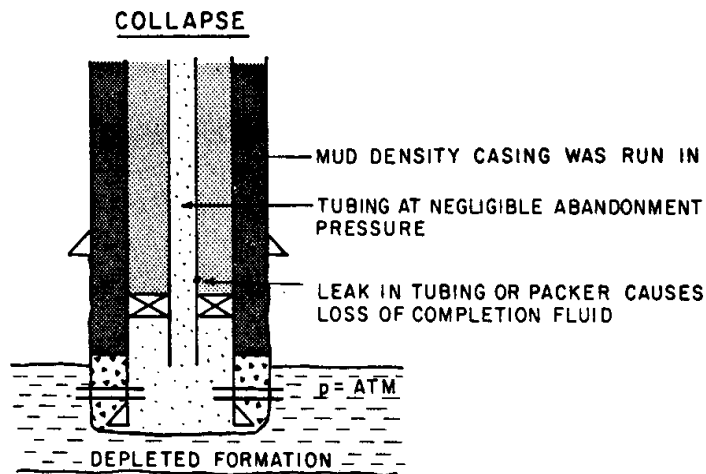
4.6.1 Κατάρρευση

Μελέτη σεναρίου κατάρρευσης στην παραγωγική επένδυση:

Ο σχεδιασμός της επένδυσης παραγωγής για σενάριο κατάρρευσης βασίζεται στην παραδοχή ότι, κατά την παραγωγή ρευστών (αέριο ή πετρέλαιο) από το εσωτερικό ενός ταμιευτήρα με την πάροδο των χρόνων η πίεση στο εσωτερικό του ταμιευτήρα θα μειωθεί. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί και η πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα παραγωγής (tubing) κάτω από τα packers. Η πίεση ωστόσο πάνω από τα packers θα εξακολουθεί να παραμένει αμετάβλητη καθώς λειτουργούν σαν αποτρεπτές πτώσης πίεσης.

Στην περίπτωση όμως που υπάρξει κάποια διαρροή στον εσωτερικό σωλήνα παραγωγής πάνω από τα packers θα γίνει μεταφορά της πίεσης από κάτω προς τα πάνω. Σαν αποτέλεσμα αυτής της μεταφοράς της πίεσης θα είναι η πτώση πίεσης και στο πάνω μέρος της επένδυσης, που σημαίνει ότι η εξωτερική πίεση του σχηματισμού θα είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική πίεση της παραγωγικής επένδυσης και θα υπάρξει έτσι κίνδυνος κατάρρευσης.

Για σχεδιαστικούς σκοπούς θεωρείται ότι ολόκληρη η επένδυση είναι άδεια, καθώς επίσης ότι η πίεση στο εξωτερικό της επένδυσης είναι ίση με την πίεση του σχηματισμού (Craft et al., 1962).



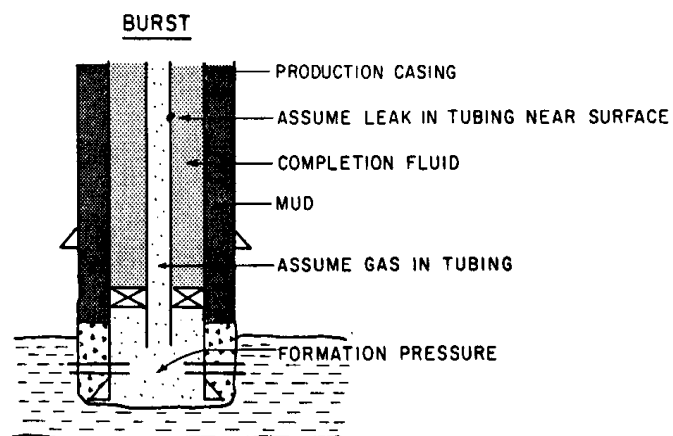
Εικόνα 4.11: Σενάριο κατάρρευσης της παραγωγικής επένδυσης λόγω μεγάλης εξωτερικής πίεσης (Bourgoyne et al. , 1986).

4.6.2 Έκρηξη

Μελέτη σεναρίου έκρηξης στην παραγωγική επένδυση:

Για τον σχεδιασμό της παραγωγικής επένδυσης για αντοχή σε έκρηξη γίνεται η υπόθεση ότι στο εσωτερικό της επένδυσης υπάρχει μόνο παραγόμενο αέριο από τον σχηματισμό και η αρχική εσωτερική πίεση στον πυθμένα του πηγαδιού είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού ($BHP = \text{Formation pressure}$). Ωστόσο, στο εσωτερικό της επένδυσης είναι τοποθετημένος ο εσωτερικός σωλήνας παραγωγής (tubing), ο οποίος χρησιμοποιείται για την άντληση των ρευστών του ταμειυτήρα κατά την παραγωγή (Economides et al. , 1998).

Για το σενάριο έκρηξης γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει διαρροή στην εσωτερική σωλήνωση παραγωγής πάνω από τα packers. Έτσι ο σχεδιασμός της παραγωγικής επένδυσης θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε περίπτωση που αποτύχει ο εσωτερικός σωλήνας παραγωγής να μην επηρεαστεί η ίδια. Ακόμη γίνεται η υπόθεση ότι η εξωτερική πίεση για την επένδυση παραγωγής στο σενάριο για έκρηξη, θα είναι ίση με την πίεση του σχηματισμού στο εξωτερικό της επένδυσης.



Εικόνα 4.12: Σενάριο έκρηξης της παραγωγικής επένδυσης λόγω μεγάλης εσωτερικής πίεσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Κεφάλαιο 5

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

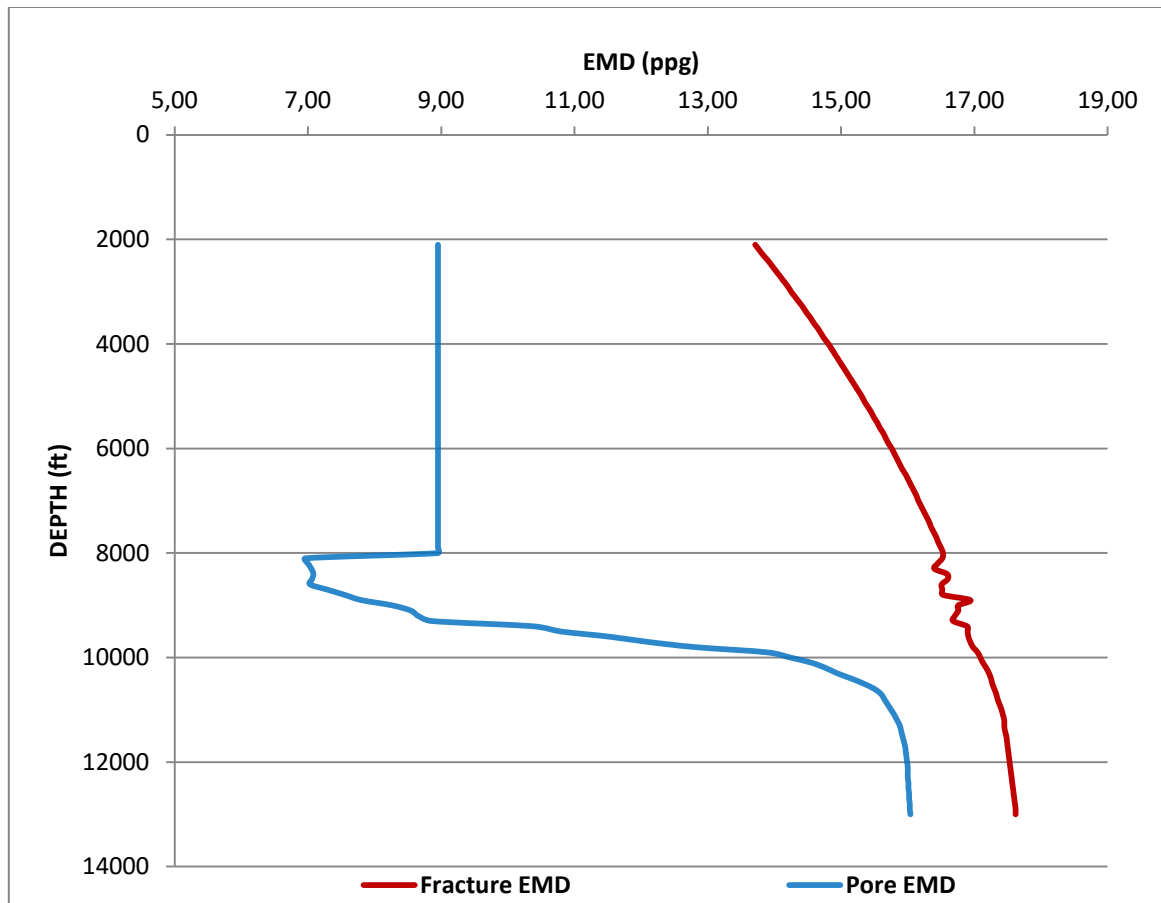
5.1 Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να επιλεγούν οι κατάλληλοι τύποι επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν για την γεώτρηση πηγαδιού βάθους 13000 ft. Η επιλογή των τύπων επένδυσης χρειάζεται να είναι αρκετά προσεχτική καθώς ο τύπος του πηγαδιού που θα γίνει η γεώτρηση είναι wildcat, που σημαίνει ότι είναι η πρώτη γεώτρηση που θα γίνει στην περιοχή και οι πληροφορίες για τις πιέσεις στο βάθος του σχηματισμού, καθώς και για το είδος των πετρωμάτων που υπάρχουν – προβληματικές ζώνες είναι αρκετά περιορισμένες και η γεώτρηση απαιτείται να γίνει με πολύ αργούς ρυθμούς για λόγους ασφάλειας.

5.2 Συλλογή δεδομένων

Αρχικά για τον σχεδιασμό της επένδυσης δόθηκαν τα γεωλογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από γειτονικά πηγάδια, της πίεσης των πόρων του σχηματισμού σε κάθε βάθος ανά 100 ft και της πίεσης θραύσης των πετρωμάτων για κάθε βάθος μέχρι τα 13000 ft.

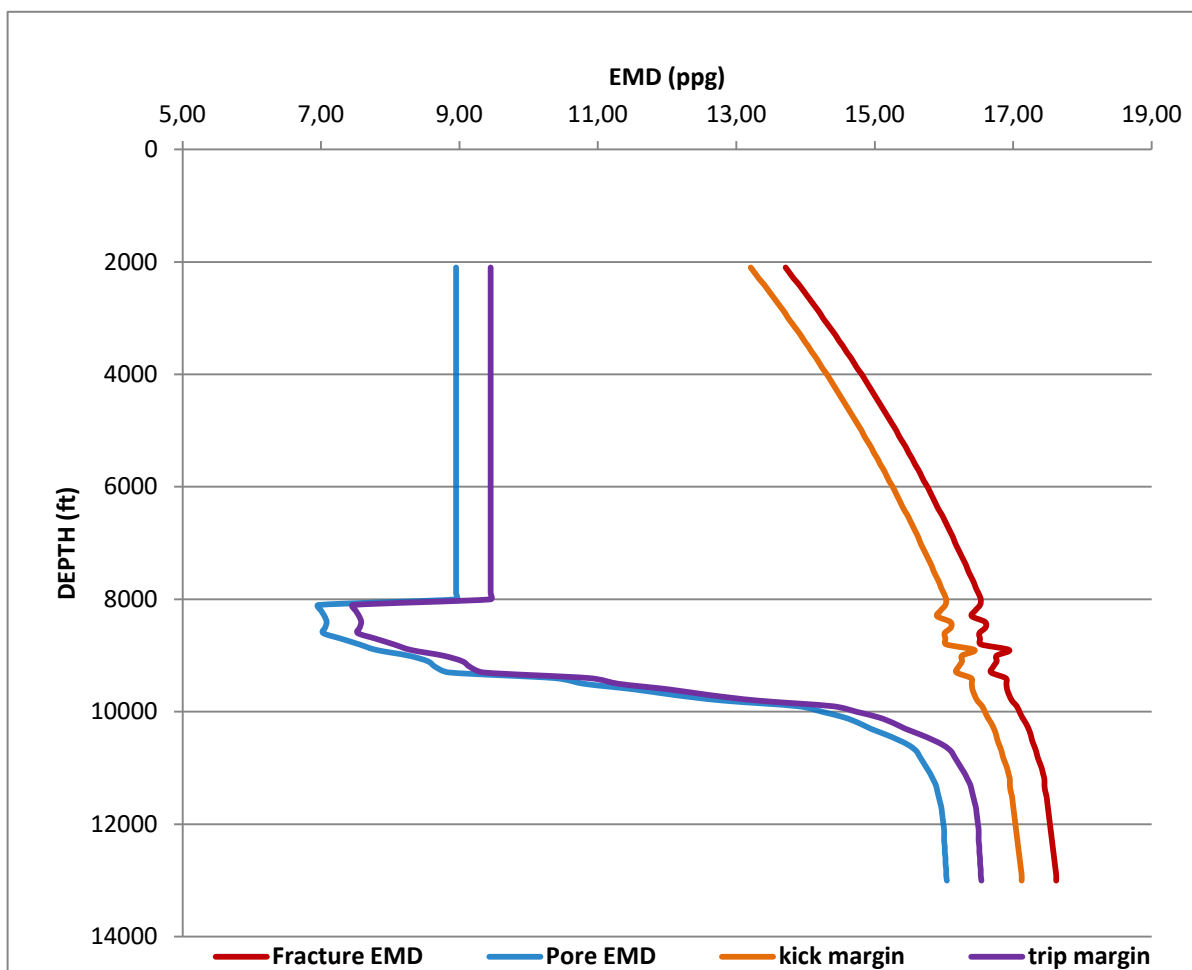
Στην συνέχεια έγινε μετατροπή των δεδομένων αυτών σε ισοδύναμη πυκνότητα πολφού και τοποθετήθηκαν σε διάγραμμα (5.1 και 5.2) συναρτήσει του βάθους, με σκοπό τον προσδιορισμό του βάθους και του ελαχίστου αριθμού τύπων επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν για τη γεώτρηση. Ο προσδιορισμός της ισοδύναμης πυκνότητας πολφού είναι σημαντικός παράγοντας για την αποφυγή περιπτώσεων απώλειας πολφού (lost circulation) ή εισροής αερίου (kick) στο εσωτερικό της γεώτρησης.



Διάγραμμα 5.1: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων και θραύσης του σχηματισμού, συναρτήσει του βάθους.

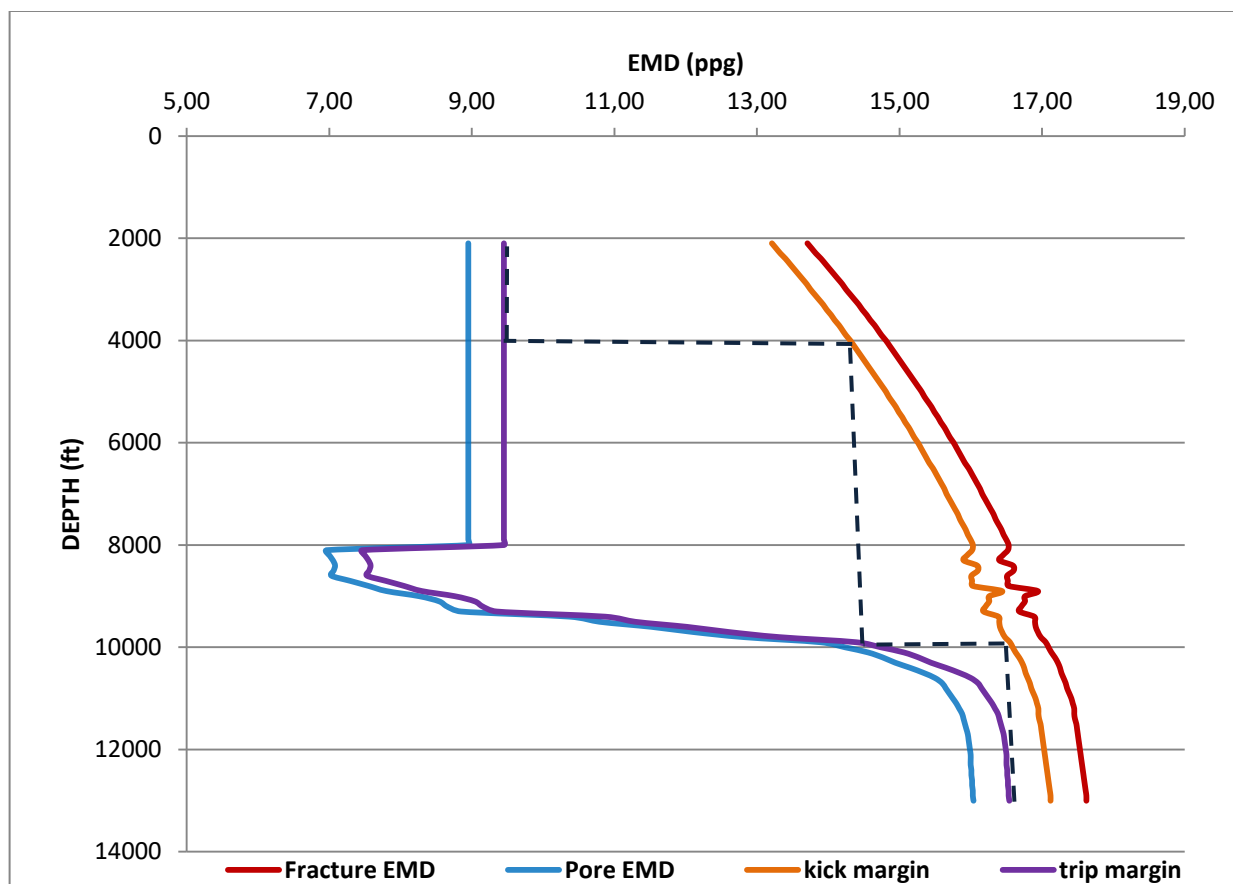
5.3 Υπολογισμός βάθους τοποθέτησης και αριθμού τύπων επένδυσης για την γεώτρηση

Λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα μετακίνησης του πολφού (trip margin) που είναι ίσος με +0.5 lbm/gal, καθώς και τον παράγοντα εισροής αερίου στο εσωτερικό της επένδυσης (kick margin) που είναι ίσος με -0.5 lbm/gal, το διάγραμμα (5.2) ισοδύναμης πυκνότητας πολφού συνάρτηση του βάθους του σχηματισμού θα είναι το παρακάτω:



Διάγραμμα 5.2: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων και θραύσης του σχηματισμού, λόγω μετακίνησης του πολφού (trip margin) και λόγω εισροής αερίου (kick margin) στο εσωτερικό της γεώτρησης, συναρτήσει του βάθους.

Ο υπολογισμός του αριθμού των τύπων επένδυσης που θα χρειαστεί να στελεχώσουν την γεώτρηση ξεκινάει με τον σχεδιασμό από κάτω προς τα πάνω μιας συνεχούς γραμμής που ουσιαστικά ελαχιστοποιεί τον αριθμό των διαφόρων τύπων επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν (διάγραμμα 5.3), λαμβάνοντας υπόψη και την ανάγκη για τοποθέτηση θεμελιακής επένδυσης στα 100 ft και επιφανειακής επένδυσης στα 2000 ft, λόγω της ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα στα 1800 ft.



Διάγραμμα 5.3: Επιλογή ισοδύναμης πυκνότητας πολφού, βάθους και αριθμού τύπων επένδυσης.

Για να φτάσει η γεώτρηση στο επιθυμητό βάθος, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (5.3) με την διακεκομμένη γραμμή που είναι τα 13000 ft, πρέπει η πυκνότητα του πολφού να είναι 16,40 lbm/gal, έτσι ώστε να μην επιτραπεί η εισροή ρευστών από τον σχηματισμό μέσα στην γεώτρηση (αέριο).

Ωστόσο, για να περάσει 16,40 lbm/gal πολφός μέσα από όλη την γεώτρηση, η ενδιάμεση προστατευτική επένδυση πρέπει να εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι τα 9800 ft, όπου ο βαθμός θραύσης του σχηματισμού είναι ίσος με την πυκνότητα του πολφού που απαιτείται για να γίνει γεώτρηση στα 13000 ft.

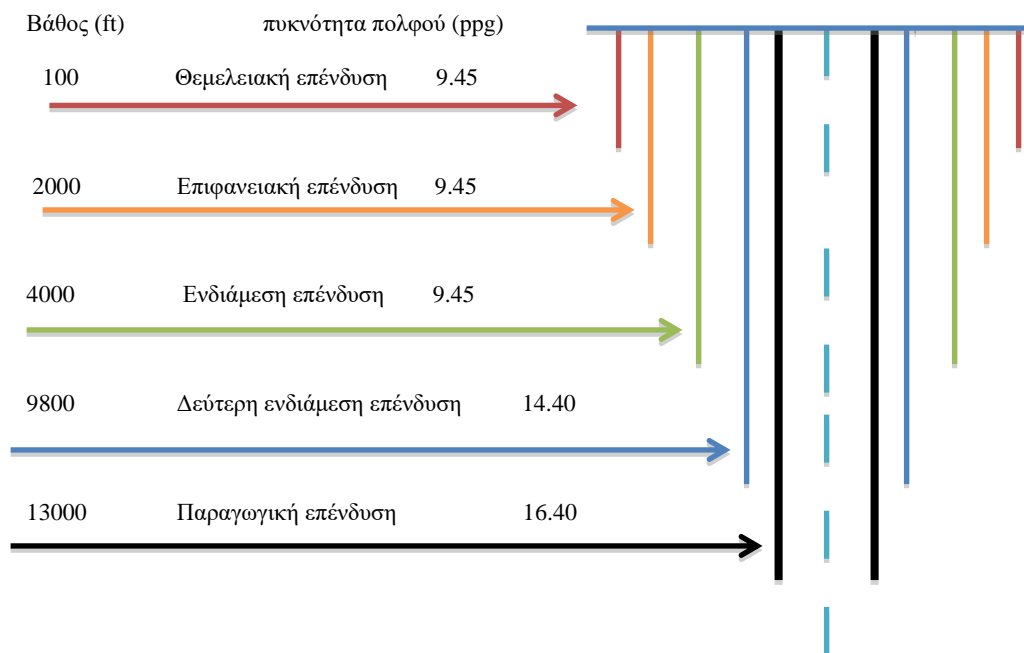
Παρόμοια, για να γίνει γεώτρηση στα 9800 ft και να τοποθετηθεί η ενδιάμεση επένδυση, θα χρειαστεί η πυκνότητα πολφού να είναι ίση ή μικρότερη από 14,40 lbm/gal, που σημαίνει ότι η τοποθέτηση της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης θα είναι τουλάχιστον στα 4000 ft βάθος.

Επίσης για να φτάσει η γεώτρηση στα 4000 ft και να τοποθετηθεί η προστατευτική επένδυση, θα πρέπει η πυκνότητα πολφού να είναι ίση ή μικρότερη από 9,45 lbm/gal, επομένως η τοποθέτηση της επιφανειακής επένδυσης θα είναι στα 2000 ft.

Τέλος, στα πρώτα 100 ft της γεώτρησης θα τοποθετηθεί η θεμελειακή επένδυση το οποίο συνίστανται στις κλασσικές γεωτρήσεις πετρελαίου από το Αμερικανικό πετρελαϊκό ινστιτούτο και η πυκνότητα του πολφού θα είναι ίση η μικρότερη από 9,45 lbm/gal.

5.4 Επιλογή τύπων επένδυσης

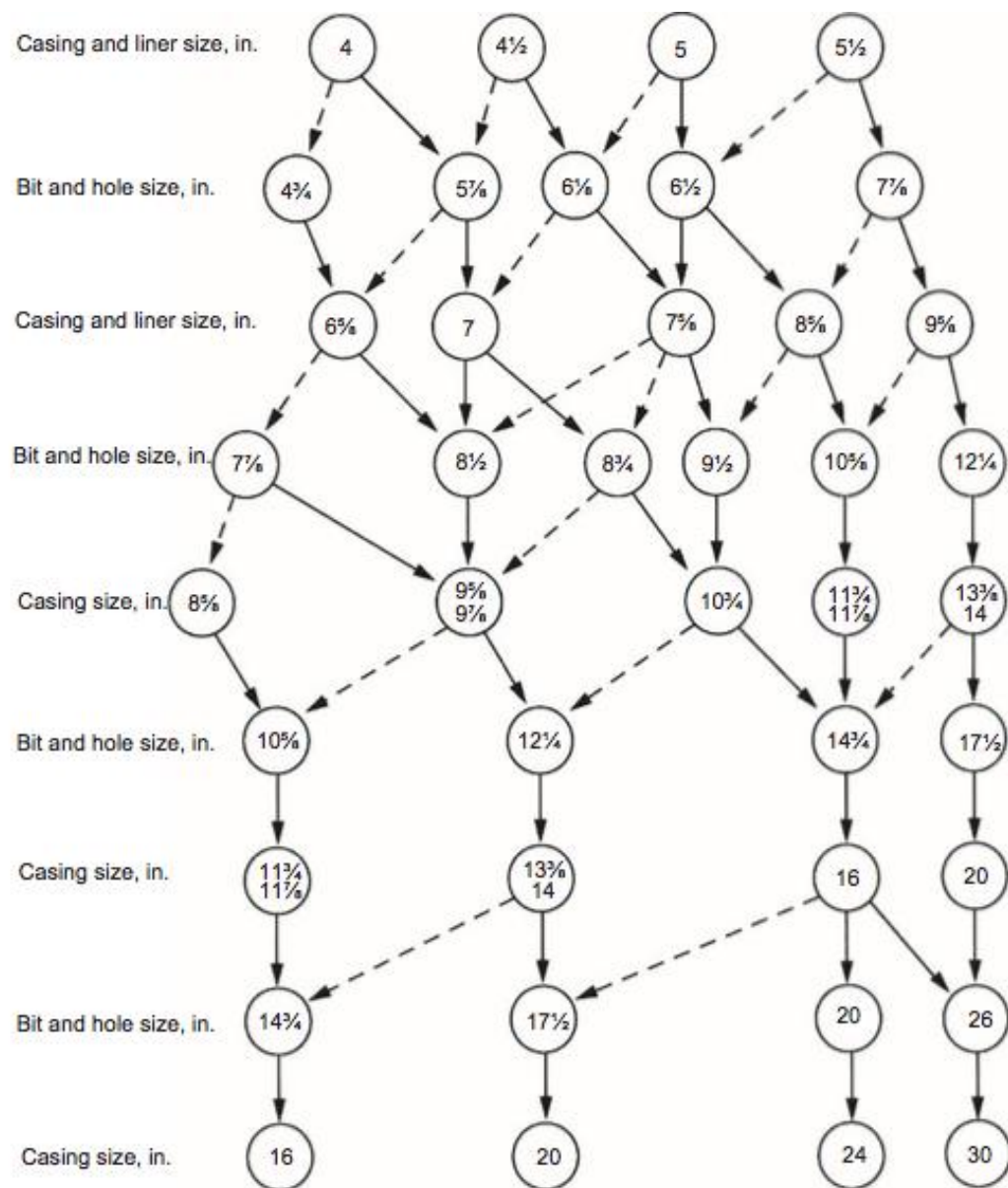
Οι τύποι επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν και η πυκνότητα πολφού που χρειάζεται για την τοποθέτησή τους στο κατάλληλο βάθος, παρουσιάζονται μαζί με την τομή τους.



Εικόνα 5.1: Τομή τύπων επένδυσης που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε βάθος και πολφός αντίστοιχα

5.5 Υπολογισμός εξωτερικής διαμέτρου επένδυσης

Ο υπολογισμός της εξωτερικής διαμέτρου κάθε επένδυσης, εξαρτάται από το μέγεθος του κοπτικού άκρου που χρησιμοποιείται κάθε φορά για τη διάνοιξη του φρέατος σε κάθε βάθος. Παρακάτω απεικονίζεται το δέντρο που συσχετίζει την εξωτερική διάμετρο κάθε επένδυσης και το μέγεθος των αντίστοιχων κοπτικών άκρων (Moore, 1974).



Εικόνα 5.2: Δέντρο που συσχετίζει την εξωτερική διάμετρο της επένδυσης που θα τοποθετηθεί σε κάθε βάθος, με το μέγεθος του κοπτικού άκρου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση (Bourgoyne et al. , 1986).

Η επιλογή εξωτερικής διαμέτρου για τον κάθε τύπο επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί γίνεται από πάνω προς τα κάτω σύμφωνα με το παραπάνω δέντρο, δηλαδή ξεκινάει από την επιθυμητή εξωτερική διάμετρο της επένδυσης παραγωγής (Bourgoyne et al. , 1986).

Όπως παρατηρείται από το δέντρο:

Για την επιλογή 7'' παραγωγικής επένδυσης η διάμετρος του φρέατος θα είναι 8 ½'.

Για την επιλογή 9^{5/8}' ενδιάμεσης επένδυσης η διάμετρος του φρέατος θα είναι 12 ¼'.

Για την επιλογή 13^{3/8}' ενδιάμεσης επένδυσης η διάμετρος του φρέατος θα είναι 17 ½'.

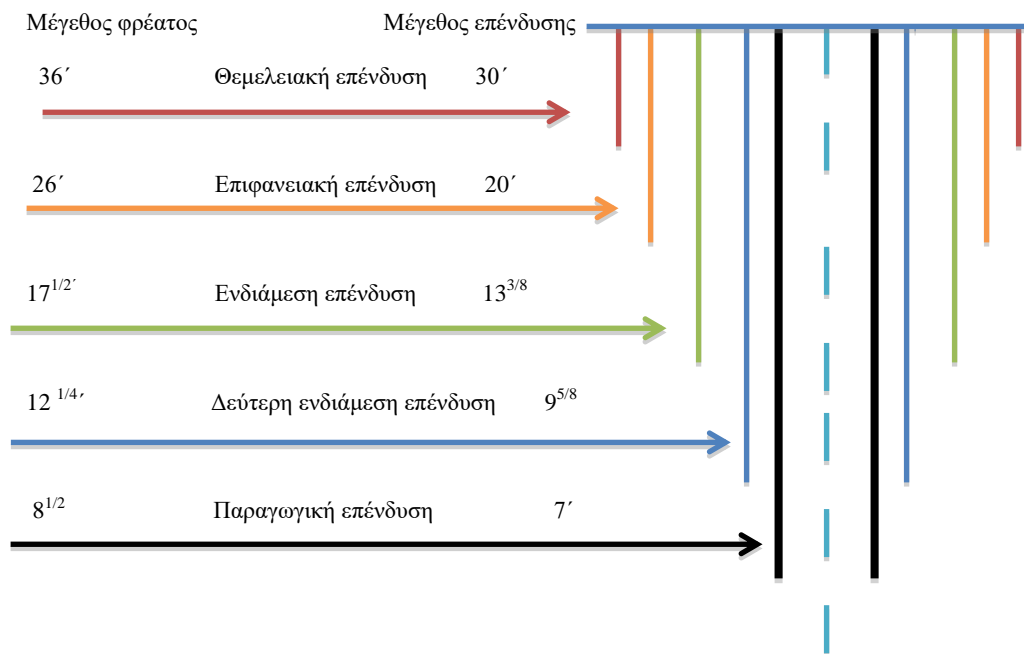
Για την επιλογή 20'' επιφανειακής επένδυσης η διάμετρος του φρέατος θα είναι 26''.

Για την επιλογή 30'' θεμελιακής επένδυσης η διάμετρος του φρέατος θα είναι 36''.

Επίσης χρειάζεται να επισημανθεί ότι οι προδιαγραφές της θεμελιακής επένδυσης είναι προκαθορισμένες σύμφωνα με το API.

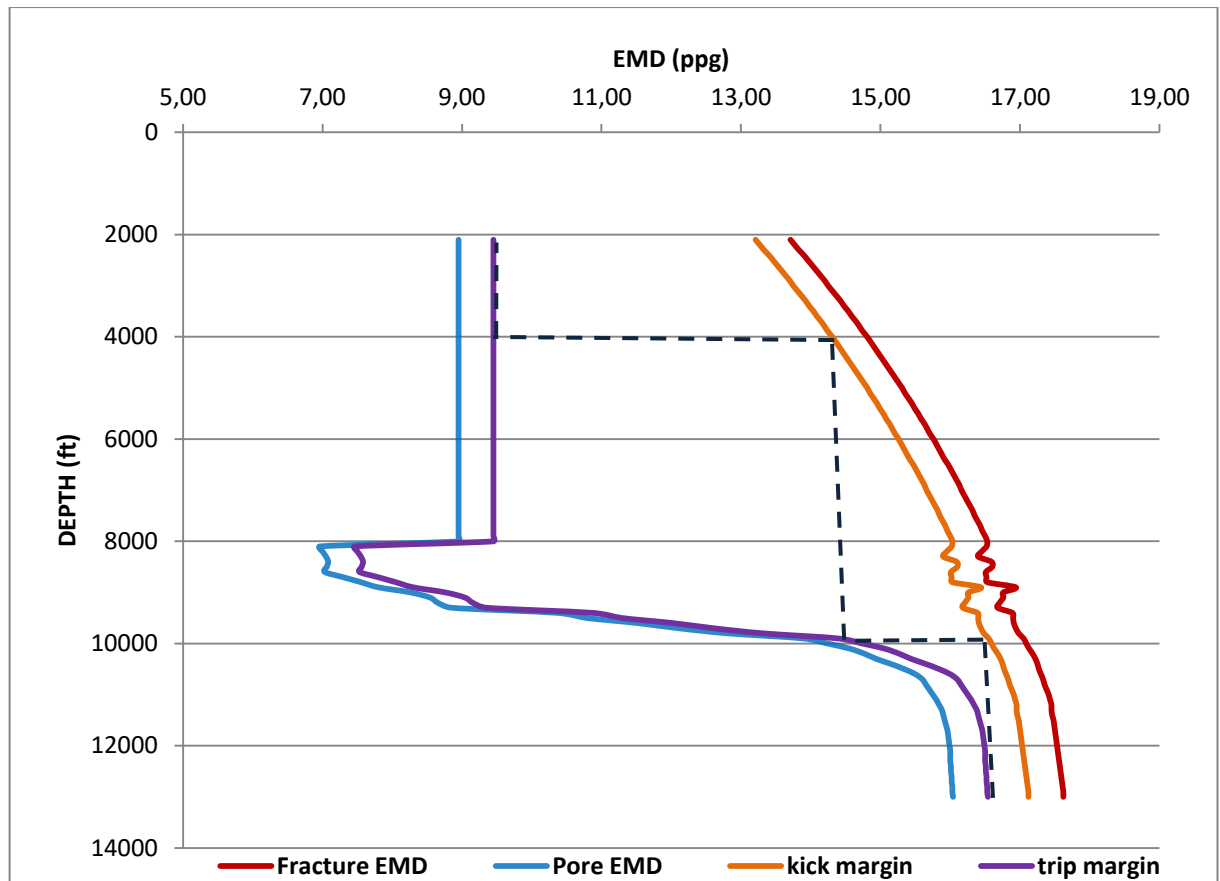
Τομή εξωτερικής διαμέτρου και μεγέθους φρέατος:

Στην συνέχεια παρατίθενται η εξωτερική διάμετρος που θα έχει κάθε επένδυση και η ανάλογη διάμετρος του φρέατος σε κάθε περίπτωση με την τομή τους.



Εικόνα 5.3: Τομή εξωτερικής διαμέτρου και μεγέθους φρέατος σε κάθε βάθος

5.6 Σχεδιασμός επιφανειακής επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (20 in.)



Διάγραμμα 5.3: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πολφού συναρτήση του βάθους της γεώτρησης.

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της επιφανειακής επένδυσης από κατάρρευση γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Θα προκύψει απώλεια πολφού και επομένως απώλεια πίεσης στα 4000 ft
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης των πόρων στα 4000 ft είναι ίση με 0.465 psi/ft, ισοδύναμο βάρος πολφού 8.95 ppg
- Η πυκνότητα του πολφού στα 2000 ft είναι ίση με 9.45 lbm/gal
- Η πυκνότητα του πολφού στα 4000 ft είναι ίση με 9.45 lbm/gal

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της επιφανειακής επένδυσης από έκρηξη γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού στα 2000 ft είναι ίση με 13.15 lbm/gal
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης αυξάνεται κατά 0.5 lbm/gal σε σχέση με την αρχική ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού, έτσι ώστε να εισχωρήσει το αέριο στην επένδυση, επομένως θα ισούται με 13.65 lbm/gal
- Βάθος επένδυσης είναι τα 2000 ft
- Το μοριακό βάρος του αερίου είναι 18

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της επιφανειακής επένδυσης από αξονικά φορτία γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν μια επιπλέον δύναμη ασφάλειας 10000 lbf
- Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η επένδυση είναι χάλυβας πυκνότητας 65.5 lbm/ft
- Λαμβάνεται υπόψη η άνωση λόγω πολφού
- Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της επένδυσης πριν τη τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης
- Η επιλογή επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί με εξωτερική διάμετρο 20 in., δίνεται από τον πίνακα του API, στον οποίο απεικονίζονται οι ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για κάθε τύπο επένδυσης.

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Coupling (in.)	Outside Diameter Special Clearance Coupling (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Box Powertight (in.)	Collapse Resistance (psi)	Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf)
16	65.00	H-40	0.375	15.250	15.062	17.000	—	—	—	630	736
	75.00	J-55	0.438	15.124	14.936	17.000	—	—	—	1,020	1,178
	84.00	J-55	0.495	15.010	14.822	17.000	—	—	—	1,410	1,326
	75.00	K-55	0.438	15.124	14.936	17.000	—	—	—	1,020	1,178
	84.00	K-55	0.495	15.010	14.822	17.000	—	—	—	1,410	1,326
18 ^{5/8}	87.50	H-40	0.435	17.775	17.567	20.000	—	—	—	†630	994
	87.50	J-55	0.435	17.755	17.567	20.000	—	—	—	†630	1,367
	87.50	K-55	0.435	17.755	17.567	20.000	—	—	—	†630	1,367
20	94.00	H-40	0.438	19.124	18.936	21.000	—	—	—	†520	1,077
	94.00	J-55	0.438	19.124	18.936	21.000	—	—	—	†520	1,480
	106.50	J-55	0.500	19.000	18.812	21.000	—	—	—	†770	1,685
	133.00	J-55	0.635	18.730	18.542	21.000	—	—	—	1,500	2,125
	94.00	K-55	0.438	19.124	18.936	21.000	—	—	—	†520	1,480
	106.50	K-55	0.500	19.000	18.812	21.000	—	—	—	†770	1,685
	133.00	K-55	0.635	18.730	18.542	21.000	—	—	—	1,490	2,125

Πίνακας 5.1: Ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για την επιφανειακή επένδυση σύμφωνα με το API (Bourgoyne et al. , 1986)

Υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση :

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:

Από το διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας συναρτήσεως του βάθους (διάγραμμα 5.3) παρατηρούμε ότι η πυκνότητα του πολφού που θα χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση της επιφανειακής επένδυσης στα 2000 ft είναι ίση με 9.45 lbm/gal.

Επομένως η εξωτερική πίεση στα 2000 ft από την σχέση (4.9) θα είναι:

$$P_e = 0.052 * 9.45 * 2000 = 983 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:

Το μέγιστο βάθος μετατόπισης του πολφού σύμφωνα με τη σχέση (4.10) θα είναι:

$$D_m = \frac{\rho_{mud} - \rho_p}{\rho_{mud}} * Z_{lc} = \frac{9.45 - 8.95}{9.45} * 4000 = 212 \text{ ft}$$

Πού σημαίνει ότι η στάθμη του πολφού στο εσωτερικό της επένδυσης θα μειωθεί κατά 212 ft.

Έτσι η εσωτερική πίεση της επιφανειακής επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.2) θα είναι:

$$P_{internal} = 0.052 * 9.45 * (2000 - 212) = 879 \text{ psi}$$

Στόχος του σχεδιασμού κατάρρευσης είναι να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά εξωτερικής με εσωτερικής πίεσης με την χρησιμοποίηση της επένδυσης που θα επιλεγεί με σκοπό να υπάρξει αντοχή σε μία ορισμένη διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση.

➤ **Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης:**

Η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση στην επιφανειακή επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.8) είναι:

$$DP_{collapse \ rating} = P_{external} - P_{internal} = 983 - 879 = 104 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι για την 20-in. επένδυση για αντοχή σε κατάρρευση, είναι κατάλληλες όλες οι επιλογές που δίνονται από το API (πίνακας 5.1).

Έτσι χρειάζεται επένδυση για 20-in. με αντοχή σε κατάρρευση

$$P_{collapse \ rating} > 104 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός διορθωμένης πίεσης κατάρρευσης**

Για τον τύπο επένδυσης H-40 με βάρος 94 lbm/ft και πάχος 0.438 (πίνακας 5.1), το κλάσμα της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος της επένδυσης για 20-in. επένδυση δίνει το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{D_o}{t} = \frac{20}{0.438} = 45.66$$

➤ Υπολογισμός ζώνης κατάρρευσης:

Grade*	←Yield Strength→ Collapse	←Plastic→ Collapse	←Transition→ Collapse	←Elastic→ Collapse
H-40	16.40	27.01	42.64	
-50	15.24	25.63	38.83	
J-K-55 & D	14.81	25.01	37.21	
-60	14.44	24.42	35.73	
-70	13.85	23.38	33.17	
C-75 & E	13.60	22.91	32.05	
L-80 & N-80	13.38	22.47	31.02	
C-90	13.01	21.69	29.18	
C-95	12.85	21.33	28.36	
-100	12.70	21.00	27.60	

Πίνακας 5.2: Περιοχή κατάρρευσης για την επιφανειακή επένδυση (Bourgoyne et al. , 1986).

Παρατηρείται ότι ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος βρίσκεται στην περιοχή της ελαστικής κατάρρευσης (πίνακας 5.2). Η πίεση της ελαστικής κατάρρευσης δίνεται από την εξίσωση (4.1):

$$P_{elastic} = \frac{46.95 * 10^6}{\left(\frac{D_o}{t}\right) * \left(\frac{D_o}{t} - 1\right)^2} = \frac{46.95 * 10^6}{\left(\frac{20}{0.438}\right) * \left(\frac{20}{0.438} - 1\right)^2} = 515.46 \text{ psi}$$

Το συμπέρασμα από το παραπάνω αποτέλεσμα είναι ότι η μέγιστη καταπόνηση που θα υποστεί αυτού του τύπου η επένδυση είναι ελαστική και είναι μικρότερη από το μέγιστο όριο αντοχής της όπου είναι τα 520 psi (πίνακας 5.1). Έτσι ο τύπος επένδυσης H-40 εγκρίνεται για αντοχή από κατάρρευση.

Υπολογισμοί για αντοχή σε έκρηξη :

➤ Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:

Από την υπόθεση για αέριο, η πίεση στον πυθμένα της επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (4.11) θα είναι:

$$P_{internal} = 0.052 * (13.65) * 2000 = 1420 \text{ psi}$$

Όπου:

Βάθος = 2000 ft

Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης, λόγω εισροής αερίου στην επένδυση = 13.65 lbm/gal

➤ **Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:**

Η εξωτερική πίεση στα 2000 ft θα είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού. Σύμφωνα με τη σχέση (4.9), η εξωτερική πίεση ισούται:

$$P_{external} = 0.052 * 9.45 * 2000 = 983 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός πίεσης έκρηξης:**

Η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.12) ισούται:

$$DP_{burst} = P_{internal} - P_{external} = 1420 - 983 = 437 \text{ psi}$$

Έτσι ο τύπος επένδυσης που πρέπει να επιλεγθεί, χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1 θα πρέπει να αντέχει σε πιέσεις μεγαλύτερες των 437 psi.

➤ **Επιλογή επένδυσης και έλεγχος για αντοχή σε έκρηξη**

Για τον τύπο επένδυσης H-40 με βάρος 94 lbm/ft και πάχος 0.438 (πίνακας 5.1), τα όρια αντοχής σε περίπτωση έκρηξης από την εξίσωση (4.5) θα είναι:

$$P_{burst} = 0.875 \frac{2 * 40000 * 0.438}{20} = 1533 \text{ psi} > 437 \text{ psi}$$

Επομένως ο τυπός επένδυσης H-40 αντέχει και το σενάριο της έκρηξης.

Μελέτη εφελκυστικής καταπόνησης

Κατά την διάρκεια τοποθέτησης της επένδυσης τύπου H-40 με βάρος 94 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 20-in, εσωτερική διάμετρο 19.124-in και πάχος 0.438-in (πίνακας 5.1), στο εσωτερικό της γεώτρησης η επένδυση κάπου κολλάει και χρειάζεται να της ασκηθεί εφελκυστική δύναμη προς την επιφάνεια για να ξεκολλήσει. Η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν μια επιπλέον δύναμη ασφάλειας 10000 lbf (υπερβολικό τράβηγμα).

➤ **Υπολογισμός βάρους επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στην γεώτρηση:**

Το βάρος της επένδυσης στον αέρα εξαρτάται από το μήκος της επένδυσης και το βάρος της.

$$\text{Έτσι } W_{air} = W_{\pi} * L = 94 * 2000 = 188000 \text{ lbf}$$

➤ **Υπολογισμός συντελεστή άνωσης :**

Ο συντελεστής άνωσης της επένδυσης για τα 2000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.14) ισούται με:

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \frac{65.5 - 9.45}{65.5} = 0.8557$$

➤ **Υπολογισμός βάρους επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης:**

Το βάρος της επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης ισούται με το γινόμενο του βάρους της επένδυσης στον αέρα, δηλαδή πριν τοποθετηθεί στο πηγάδι επί τον παράγοντα της άνωσης.

$$W_{\text{wet}} = \text{συντελεστής άνωσης} * W_{\text{air}} = 160872 \text{ lbf}$$

➤ **Υπολογισμός εφελκυστικής δύναμης :**

Τελικά, η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με την σχέση (4.13) θα είναι:

$$F = 160872 + 10000 = 170872 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς και σύμφωνα με τη σχέση (4.6), διαπιστώνεται ότι η μέγιστη δύναμη για το πρώτο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην επιφανειακή επένδυση τύπου H-40 με $F=170872 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από την μέγιστη δύναμη αντοχής της επένδυσης που είναι ίση με $F_{\text{max}}=1,077,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.1), έτσι $F \leq F_{\text{max}}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης H-40 για αντοχή από εφελκυστική καταπόνηση.

Μελέτη θλιπτικής καταπόνησης

Η υπόθεση που γίνεται για το δεύτερο σενάριο αφορά την στιγμή όπου ύστερα από την τοποθέτησή της, η επένδυση τύπου H-40 με βάρος 94 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 20-in, με εσωτερική διάμετρο 19.124-in και πάχος 0.438-in θα φτάσει στον πυθμένα του πηγαδιού (πίνακας 5.1), αλλά λόγω του υπερβολικού της βάρους τη στιγμή που θα προσγειωθεί στον πυθμένα θα υποστεί ένα μέρος της θλίψη, πράγμα το οποίο θα καταστρέψει την επένδυση και πιθανόν να θέσει σε κίνδυνο την γεώτρηση και όλο το πηγάδι.

Και σε αυτήν την περίπτωση για να επιλεγεί η κατάλληλη επένδυση θα πρέπει η μέγιστη δύναμη που ενδέχεται να ασκηθεί στην επιφανειακή επένδυση τύπου H-40 να είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης σε θλίψη που είναι ίσο με $F_{\text{max}} = 1,077,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.1), δηλαδή:

$$F \leq F_{\text{max}}$$

➤ **Υπολογισμός δύναμης που θα ασκηθεί στην επένδυση λόγω θλίψης:**

Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.16) ισούται:

$$F = W_{air} = 188000 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η μέγιστη δύναμη για το δεύτερο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην επιφανειακή επένδυση τύπου H-40 με $F=188000 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης που είναι ίσο με $F_{max}=1,077,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.1), έτσι $F \leq F_{max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης H-40 για αντοχή από θλιπτική καταπόνηση.

Τελικά για την επιφανειακή επένδυση διαμέτρου 20-in η οποία θα τοποθετηθεί στα 2000 ft βάθος ο καταλληλότερος τύπος επένδυσης είναι ο H-40 με βάρος 94 lbm/ft, εσωτερική διάμετρο 19.124-in και πάχος 0.438-in, καθώς πληροί όλες τις προδιαγραφές για αντοχή σε έκρηξη, κατάρρευση και αξονικές τάσεις και είναι και ο χαμηλότερος σε κόστος.

Όλα τα στοιχεία της επιφανειακής επένδυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω πρόγραμμα σχεδιασμού της:

Casing design

<i>Type</i>	<i>From depth(ft)</i>	<i>To depth (ft)</i>	<i>ρ_{mud} (ppg)</i>	<i>Bit (in)</i>	<i>Casing (in)</i>
<i>Surface</i>	<i>0</i>	<i>2000</i>	<i>9.45</i>	<i>26</i>	<i>20</i>

Πίνακας 5.3: Στοιχεία σχεδιασμού επιφανειακής επένδυσης για βάθος 2000 πόδια

Additional data

<i>ρ_{gas} (ppg)</i>	<i>ρ_{steel} (ppg)</i>
<i>0.5</i>	<i>65.5</i>

Πίνακας 5.4: Στοιχεία πυκνότητας αερίου και πυκνότητας του υλικού της επιφανειακής επένδυσης

Select casing data

<i>Type</i>	<i>OD(in)</i>	<i>ID(in)</i>	<i>Weight (lbm/ft)</i>	<i>Wall thickness (in)</i>	<i>Max axial load (lbf)</i>	<i>Max collapse p (psi)</i>	<i>Max burst p (psi)</i>	<i>Yield stress (psi)</i>
<i>H-40</i>	<i>20</i>	<i>19.124</i>	<i>94</i>	<i>0.438</i>	<i>1077000</i>	<i>520</i>	<i>1530</i>	<i>40000</i>

Πίνακας 5.5: Στοιχεία ιδιοτήτων του επιλεγόμενου τύπου για την επιφανειακή επένδυση

Axial stress worst case 1

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length (ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight (lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>overpull</i>
<i>0</i>	<i>2000</i>	<i>188000</i>	<i>160872</i>	<i>170872</i>	<i>ok</i>	<i>10000</i>

Πίνακας 5.6: Στοιχεία καταπόνησης της επιφανειακής επένδυσης λόγω εφελκυστικών τάσεων

Axial stress worst case 2

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length(ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight (lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
<i>2000</i>	<i>2000</i>	<i>188000</i>	<i>160872</i>	<i>188000</i>	<i>ok</i>	<i>-</i>

Πίνακας 5.7: Στοιχεία καταπόνησης της επιφανειακής επένδυσης λόγω του βάρους της

Burst stress (internal pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Burst pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
<i>2000</i>	<i>1420</i>	<i>983</i>	<i>437</i>	<i>ok</i>	<i>1</i>

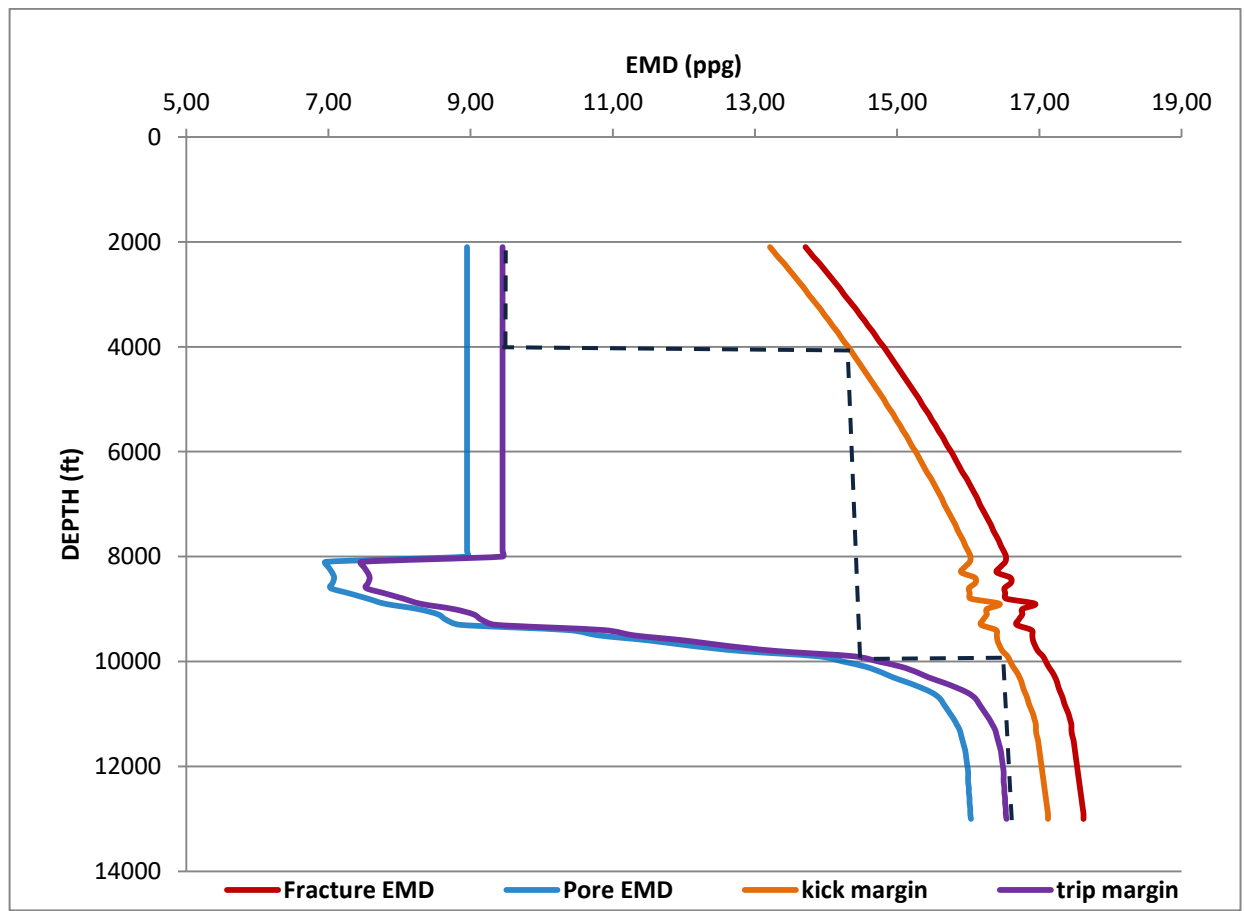
Πίνακας 5.8: Στοιχεία καταπόνησης της επιφανειακής επένδυσης από έκρηξη λόγω μεγάλων εσωτερικών πιέσεων

Collapse stress (external pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Collapse pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
2000	879	983	104	ok	1

Πίνακας 5.9: Στοιχεία καταπόνησης της επιφανειακής επένδυσης από κατάρρευση λόγω μεγάλων εξωτερικών πιέσεων

5.7 Σχεδιασμός ενδιάμεσης επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (13.375 in.)



Διάγραμμα 5.3: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων και θραύσης του σχηματισμού και επιλογή αριθμού τύπων επένδυσης, συναρτήσει του βάθους.

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της ενδιάμεσης επένδυσης από κατάρρευση γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Θα προκύψει απώλεια πολφού και επομένως απώλεια πίεσης στα 8500 ft
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης των πόρων στα 8500 ft είναι ίση με 0.367 psi/ft, ισοδύναμο βάρος πολφού 7.06 ppg
- Η πυκνότητα του πολφού στα 4000 ft είναι ίση με 9.45 lbm/gal
- Η πυκνότητα του πολφού στα 8500 ft είναι ίση με 14.40 lbm/gal

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της ενδιάμεσης επένδυσης από έκρηξη γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού στα 4000 ft είναι ίση με 14.40 lbm/gal
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεση θραύσης αυξάνεται κατά 0.5 lbm/gal σε σχέση με την αρχική ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού, έτσι ώστε να εισχωρήσει το αέριο στην επένδυση, επομένως θα ισούται με 14.90 lbm/gal
- Βάθος τοποθέτησης της επένδυσης είναι τα 4000 ft
- Το μοριακό βάρος του αερίου είναι 18
- Η αντοχή του αποτρεπτή έκρηξης έχει ως όριο τα 1500 psi

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της ενδιάμεσης επένδυσης από αξονικά φορτία γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν μια επιπλέον δύναμη ασφάλειας 10000 lbf
- Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η επένδυση είναι χάλυβας πυκνότητας 65.5 lbm/ft
- Λαμβάνεται υπόψη η άνωση λόγω πολφού
- Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της επένδυσης πριν τη τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης
- Η επιλογή επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί με εξωτερική διάμετρο 13.375 in., δίνεται από τον πίνακα του API, στον οποίο απεικονίζονται οι ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για κάθε τύπο επένδυσης.

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Coupling (in.)	Outside Diameter Special Clearance Coupling (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Box Powertight (in.)	Collapse Resistance (psi)	Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf)
10¾	51.00	C-90	0.450	9.850	9.694	11.750	11.250	9.694	11.460	3,400	1,310
	55.50	C-90	0.495	9.760	9.604	11.750	11.250	9.604	11.460	4,160	1,435
	51.00	C-95	0.450	9.850	9.694	11.750	11.250	9.694	11.460	3,480	1,383
	55.50	C-95	0.495	9.760	9.604	11.750	11.250	9.604	11.460	4,290	1,515
	51.00	P-110	0.450	9.850	9.694	11.750	11.250	9.694	11.460	3,660	1,602
	55.50	P-110	0.495	9.760	9.604	11.750	11.250	9.604	11.460	4,610	1,754
	60.70	P-110	0.545	9.660	9.504	11.750	11.250	9.504	11.460	5,880	1,922
	65.70	P-110	0.595	9.560	9.404	11.750	11.250	—	—	7,500	2,088
11¾	42.00	H-40	0.333	11.084	10.928	12.750	—	—	—	1,040	478
	47.00	J-55	0.375	11.000	10.844	12.750	—	—	—	1,510	737
	54.00	J-55	0.435	10.880	10.724	12.750	—	—	—	2,070	850
	60.00	J-55	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	2,660	952
	47.00	K-55	0.375	11.000	10.844	12.750	—	—	—	1,510	737
	54.00	K-55	0.435	10.880	10.724	12.750	—	—	—	2,070	850
	60.00	K-55	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	2,660	952
	60.00	C-75	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,070	1,298
	60.00	L-80	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,180	1,384
	60.00	N-80	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,180	1,384
	60.00	C-90	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,360	1,557
	60.00	C-95	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,440	1,644
	60.00	P-110	0.489	10.772	10.616	12.750	—	—	—	3,610	1,903
	48.00	H-40	0.330	12.715	12.559	14.375	—	—	—	740	541
	54.50	J-55	0.380	12.615	12.459	14.375	—	—	—	1,130	853
	61.00	J-55	0.430	12.515	12.359	14.375	—	—	—	1,540	962
	68.00	J-55	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	1,950	1,069
13¾	54.50	K-55	0.380	12.615	12.459	14.375	—	—	—	1,130	853
	61.00	K-55	0.430	12.515	12.359	14.375	—	—	—	1,540	962
	68.00	K-55	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	1,950	1,069
	68.00	C-75	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,220	1,458
	72.00	C-75	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,600	1,558
	68.00	L-80	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,260	1,556
	72.00	L-80	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,670	1,661
	68.00	N-80	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,260	1,556
	72.00	N-80	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,670	1,661
	68.00	G-90	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,320	1,750
	72.00	G-90	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,780	1,869
	68.00	C-95	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,330	1,847
	72.00	C-95	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,820	1,973
	68.00	P-110	0.480	12.415	12.259	14.375	—	—	—	2,330	2,139
	72.00	P-110	0.514	12.347	12.191	14.375	—	—	—	2,890	2,284

Πίνακας 5.10: Ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για την ενδιάμεση επένδυση σύμφωνα με το API (Bourgoyne et al. , 1986).

Υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση :

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:

Ο υπολογισμός της εξωτερικής πίεσης της επένδυσης για το σχεδιασμό από φορτία κατάρρευσης, εξαρτάται από την πυκνότητα του πολφού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της επένδυσης κατά την τοποθέτησή της στο επιθυμητό βάθος. Έτσι από το διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας συναρτήσει του βάθους (διάγραμμα 5.3), παρατηρείται ότι η

πυκνότητα του πολφού που θα χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση της ενδιάμεσης επένδυσης στα 4000 ft είναι ίση με 9.45 lbm/gal.

Επομένως η εξωτερική πίεση στα 4000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται :

$$P_{external} = 0.052 * 9.45 * 4000 = 1966 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός μετατόπισης του επιπέδου του πολφού:**

Το μέγιστο βάθος μετατόπισης του πολφού υπολογίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στην επιφανειακή επένδυση και σύμφωνα με τη σχέση (4.10) ισούται :

$$D_m = \frac{\rho_{mud} - \rho_p}{\rho_{mud}} * Z_{lc} = \frac{14.40 - 7.06}{14.40} * 8500 = 4333 \text{ ft}$$

Που σημαίνει ότι η στάθμη του πολφού θα πέσει 333 ft κάτω από τον πυθμένα της επένδυσης και επομένως στο εσωτερικό της θα είναι άδεια.

➤ **Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:**

Η εσωτερική πίεση της ενδιάμεσης επένδυσης από τη στιγμή που θα είναι χωρίς πολφό ισούται:

$$P_{internal} = 0$$

Στόχος του σχεδιασμού κατάρρευσης είναι να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά εξωτερικής με εσωτερικής πίεσης με την χρησιμοποίηση της επένδυσης που θα επιλεγεί με σκοπό να υπάρξει αντοχή σε μία ορισμένη διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση.

➤ **Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης:**

Η διαφορά πίεσης σύμφωνα με τη σχέση (4.8) ισούται :

$$DP_{collapse \text{ rating}} = P_{external} - P_{internal} = 1966 - 0 = 1966 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι για την 13.375 in. επένδυση για αντοχή σε κατάρρευση, υπάρχουν αρκετές κατάλληλες επιλογές που δίνονται από το πρόγραμμα του API (πίνακας 5.10), ωστόσο πρέπει να επιλεγεί η πιο συμφέρουσα.

Έτσι επιλέγεται επένδυση εξωτερικής διαμέτρου 13.375 in. με αντοχή σε κατάρρευση

$$P_{collapse \text{ rating}} > 1966 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός διορθωμένης πίεσης κατάρρευσης:

Για τον τύπο επένδυσης K-55 με βάρος 68 lbm/ft και πάχος 0.480 in.(πίνακας 5.10), το κλάσμα της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος της επένδυσης για 13.375 in. εξωτερική διάμετρο δίνει το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{D_o}{t} = \frac{13.375}{0.480} = 27.86$$

➤ Υπολογισμός ζώνης κατάρρευσης:

Παρατηρείται ότι ο λόγος της διαμέτρου της εξωτερικής διαμέτρου με το πάχος βρίσκεται στην περιοχή transition collapse - μεταβατικής ζώνης κατάρρευσης.

Grade*	←Yield Strength→ Collapse	←Plastic→ Collapse	←Transition→ Collapse	←Elastic→ Collapse
H-40	16.40	27.01	42.64	
-50	15.24	25.63	38.83	
J-K-55 & D	14.81	25.01	37.21	
-60	14.44	24.42	35.73	
-70	13.85	23.38	33.17	
C-75 & E	13.60	22.91	32.05	
L-80 & N-80	13.38	22.47	31.02	
C-90	13.01	21.69	29.18	
C-95	12.85	21.33	28.36	
-100	12.70	21.00	27.60	

Πίνακας 5.11: Περιοχή κατάρρευσης για την ενδιάμεση επένδυση (Bourgoyne et al. , 1986).

Grade*	Empirical Coefficients				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
H-40	2.950	0.0465	754	2.063	0.0325
-50	2.976	0.0515	1,056	2.003	0.0347
J-K 55 & D	2.991	0.0541	1,206	1.989	0.0360
-60	3.005	0.0566	1,356	1.983	0.0373
-70	3.037	0.0617	1,656	1.984	0.0403
C-75 & E	3.054	0.0642	1,806	1.990	0.0418
L-80 & N-80	3.071	0.0667	1,955	1.998	0.0434
C-90	3.106	0.0718	2,254	2.017	0.0466
C-95	3.124	0.0743	2,404	2.029	0.0482
-100	3.143	0.0768	2,553	2.040	0.0499

Πίνακας 5.12: Χρήση εμπειρικών συντελεστών για το σενάριο κατάρρευσης της ενδιάμεσης επένδυσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Η εξίσωση κατάρρευσης για την μεταβατική ζώνη σύμφωνα με την εξίσωση (4.3) και τους πίνακες (5.11, 5.12) ισούται:

$$P_{transition} = (\sigma_{yield})_e * \left(\frac{F_4}{\frac{D_o}{t}} - F_5 \right) = 55000 * \left(\frac{1.989}{27.86} - 0.036 \right) = 55000 * 0.035$$

$$= 1947 \text{ psi}$$

Όπου:

$(\sigma_{yield})_e$ = η ελάχιστη αντοχή καταπόνησης της επένδυσης

F_4, F_5 = εμπειρικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης (πίνακας 5.12).

Όπως παρατηρείται η μέγιστη καταπόνηση που θα υποστεί η ενδιάμεση επένδυση τύπου K-55 βρίσκεται στη μεταβατική ζώνη κατάρρευσης (πίνακας 5.11) και είναι ίση με το μέγιστο όριο αντοχής της όπου είναι τα 1947 psi. Ωστόσο λόγω ότι οι υπολογισμοί γίνονται με τα χειρότερα σενάρια κατάρρευσης, έχει σαν αποτέλεσμα οι μετρήσεις καταπόνησης να είναι αρκετά μεγαλύτερες από ότι οι πραγματικές.

Ακόμη η εμπειρία έχει δείξει ότι όταν η επένδυση αντέχει οριακά ένα είδος καταπόνησης δεν απορρίπτεται, καθώς λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας του κόστους (Adams et al., 1985).

Έτσι ο τύπος επένδυσης K-55 εγκρίνεται για αντοχή από κατάρρευση.

Υπολογισμοί για αντοχή σε έκρηξη :

➤ Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης λόγω εισροής αερίου:

Από την εισροή αερίου στον πυθμένα της επένδυσης (4000 ft) η εισπίεση λόγω αερίου σύμφωνα με τη σχέση (4.11) ισούται:

$$P_{injection} = 0.052 * (14.90) * 4000 = 3100 \text{ psi}$$

Όπου:

Βάθος = 4000 ft

Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού, λόγω εισροής αερίου στα 4000 ft = 14.90 lbm/gal

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:

Η εξωτερική πίεση στα 4000 ft θα είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού και σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται::

$$P_{external} = 0.052 * 4000 * 9.45 = 1966 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός πυκνότητας και βαθμίδας αερίου:**

Η βαθμίδα του αερίου για τα 4000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.19) ισούται:

$$0.052 * p_{\text{gas}} = 0.052 * \frac{(3100 + 15) * 18}{80.3 * 1 * (520 + 0.012 * 4000)} \Leftrightarrow 0.052 * p_{\text{gas}} = 0.064 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

και

$$p_{\text{gas}} = 1.23 \text{ lb/gal}$$

➤ **Υπολογισμός μετατόπισης του επιπέδου του πολφού:**

Η μετατόπιση του πολφού από τον πυθμένα της επένδυσης (4000 ft) σύμφωνα με τη σχέση (4.18) ισούται:

$$D_m = \frac{P_i - P_{\text{max}}}{0.052 (p_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g - D_{\text{lc}}}{(\rho_m - \rho_g)} = \frac{3100 - 1500}{0.052 * (14.40 - 1.23)} - \frac{1.23 * 4000}{14.40 - 1.23} = 1962 \text{ ft}$$

Ύστερα από όλους τους υπολογισμούς του χειρότερου σεναρίου, δηλαδή το πρόβλημα να προκύψει κατά την γεώτρηση του επόμενου τομέα της γεώτρησης στα 9800 ft, μπορεί να υπολογιστεί η εσωτερική πίεση στα 4000 ft όπου θα τοποθετηθεί τελικά η ενδιάμεση επένδυση.

➤ **Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:**

Η εσωτερική πίεση της επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.2, 4.17) ισούται:

$$P_{\text{internal}} = P_{\text{injection}} = 3100 \text{ psi}$$

Υπολογισμός πίεσης έκρηξης:

Τελικά η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην ενδιάμεση επένδυση στα 4000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.12) ισούται:

$$DP_{\text{burst}} = P_{\text{internal}} - P_{\text{external}} = 3100 - 1966 = 1134 \text{ psi}$$

Έτσι ο τύπος επένδυσης που θα επιλεγεί, χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1, θα χρειαστεί το όριο αντοχής του σε πιέσεις να είναι μεγαλύτερο από τα 1134 psi.

➤ **Επιλογή επένδυσης και έλεγχος για αντοχή σε έκρηξη:**

Για τον τύπο επένδυσης K-55 με βάρος 68 lbm/ft και πάχος 0.480 in.(πίνακας 5.10), τα όρια αντοχής σε περίπτωση έκρηξης από την εξίσωση (4.5) θα είναι:

$$P_{\text{burst}} = 0.875 * \frac{2 * 55000 * 0.480}{13.375} = 3454 \text{ psi}$$

Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο της ελάχιστης αντοχής (1134 psi) που απαιτείται να έχει η επένδυση για αντοχή σε έκρηξη, επομένως ο τύπος επένδυσης K-55 αντέχει και το σενάριο έκρηξης.

Μελέτη εφελκυστικής καταπόνησης

Κατά την διάρκεια τοποθέτησης της επένδυσης τύπου K-55 με βάρος 68 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 13.375-in, εσωτερική διάμετρο 12.415-in και πάχος 0.480-in (πίνακας 5.10), στο εσωτερικό της γεώτρησης η επένδυση κάπου κολλάει και χρειάζεται να της ασκηθεί εφελκυστική δύναμη προς την επιφάνεια για να ξεκολλήσει. Η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν έναν συντελεστή ασφάλειας 10000 lbf (υπερβολικό τράβηγμα).

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στην γεώτρηση:

Το βάρος της επένδυσης στον αέρα εξαρτάται από το μήκος της επένδυσης και το βάρος της. Έτσι θα είναι:

$$W_{air} = W_{\pi} * L = 68 * 4000 = 272000 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός συντελεστή άνωσης:

Ο συντελεστής άνωσης της επένδυσης για τα 4000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.14) ισούται:

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \frac{65.5 - 9.45}{65.5} = 0.8557$$

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης:

Το βάρος της επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης ισούται με το γινόμενο του βάρους της επένδυσης στον αέρα, δηλαδή πριν τοποθετηθεί στο πηγάδι επί τον παράγοντα της άνωσης.

$$W_{wet} = \text{συντελεστής άνωσης} * W_{air} = 232750 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός εφελκυστικής δύναμης :

Τελικά η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με την σχέση (4.13) θα είναι:

$$F = 232750 + 10000 = 242750 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται και σύμφωνα με τη σχέση (4.6), ότι η δύναμη για το πρώτο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην ενδιάμεση επένδυση τύπου K-55 με $F = 242750 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης που είναι ίσο με $F_{\max} = 1,069,000 \text{ lbf}$, έτσι $F \leq F_{\max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης K-55 για το πρώτο σενάριο καταπόνησης.

Μελέτη θλιπτικής καταπόνησης

Η υπόθεση που γίνεται για το δεύτερο σενάριο, αφορά την στιγμή όπου ύστερα από την τοποθέτησή της, η επένδυση τύπου K-55 με βάρος 68 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 13.375-in, εσωτερική διάμετρο 12.415-in και πάχος 0.480-in θα φτάσει στον πυθμένα του πηγαδιού, αλλά λόγω του υπερβολικού της βάρους τη στιγμή που θα προσγειωθεί στον πυθμένα θα υποστεί ένα μέρος της συμπίεση, πράγμα το οποίο θα καταστρέψει την επένδυση και πιθανόν να θέσει σε κίνδυνο την γεώτρηση και όλο το πηγάδι. Και σε αυτήν την περίπτωση για να επιλεγεί η κατάλληλη επένδυση θα πρέπει η δύναμη που πρόκειται να ασκηθεί στην ενδιάμεση επένδυση τύπου K-55 να είναι μικρότερη από τη μέγιστη δύναμη αντοχής της επένδυσης που είναι ίση με $F_{max} = 1,069,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.10), δηλαδή:

$$F \leq F_{max}$$

Ωστόσο, η μέγιστη δύναμη που ενδέχεται να ασκηθεί στην επένδυση, θα είναι μόνο το βάρος της ίδιας της επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης, δηλαδή $F = W_{air}$.

➤ Υπολογισμός δύναμης που θα ασκηθεί στην επένδυση λόγω θλίψης:

Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.16) ισούται:

$$F = W_{air} = 272000 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η δύναμη για το δεύτερο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην ενδιάμεση επένδυση τύπου K-55 με $F = 272000 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής σε δύναμη της επένδυσης που είναι ίσο με $F_{max} = 1,069,000 \text{ lbf}$, έτσι $F \leq F_{max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης K-55 και για το δεύτερο σενάριο καταπόνησης (πίνακας 5.10).

Τελικά, για την ενδιάμεση επένδυση διαμέτρου 13.375-in η οποία θα τοποθετηθεί στα 4000 πόδια βάθος, ο καταλληλότερος τύπος επένδυσης είναι ο K-55 με βάρος 68 lbm/ft, εσωτερική διάμετρο 12.415-in και πάχος 0.480-in (πίνακας 5.10), καθώς πληροί όλες τις προδιαγραφές για αντοχή σε έκρηξη, κατάρρευση και αξονικές τάσεις και είναι και ο χαμηλότερος σε κόστος.

Όλα τα στοιχεία της ενδιάμεσης επένδυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω πρόγραμμα σχεδιασμού της:

Casing design

<i>Type</i>	<i>From depth(ft)</i>	<i>To depth (ft)</i>	<i>ρ_{mud} (ppg)</i>	<i>Bit (in)</i>	<i>Casing (in)</i>
<i>Int 1</i>	<i>0</i>	<i>4000</i>	<i>9.45</i>	<i>17.5</i>	<i>13.375</i>

Πίνακας 5.13: Στοιχεία σχεδιασμού ενδιάμεσης επένδυσης για βάθος 4000 πόδια

Additional data

<i>ρ_{gas} (ppg)</i>	<i>ρ_{steel} (ppg)</i>
<i>0.5</i>	<i>65.5</i>

Πίνακας 5.14: Στοιχεία πυκνότητας αερίου και πυκνότητας του υλικού της ενδιάμεσης επένδυσης

Select casing data

<i>Type</i>	<i>OD (in)</i>	<i>ID (in)</i>	<i>Weight (lbm/ft)</i>	<i>Wall thickness (in)</i>	<i>Max axial load (lbf)</i>	<i>Max collapse p (psi)</i>	<i>Max burst p(psi)</i>	<i>Yield stress (psi)</i>
<i>K-55</i>	<i>13.375</i>	<i>12.415</i>	<i>68</i>	<i>0.480</i>	<i>1069000</i>	<i>1950</i>	<i>3454</i>	<i>55000</i>

Πίνακας 5.15: Στοιχεία ιδιοτήτων του επιλεγόμενου τύπου για την ενδιάμεση επένδυση

Axial stress worst case 1

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length(ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight(lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>Overpull</i>
<i>0</i>	<i>4000</i>	<i>272000</i>	<i>232750</i>	<i>242750</i>	<i>ok</i>	<i>10000</i>

Πίνακας 5.16: Στοιχεία καταπόνησης της ενδιάμεσης επένδυσης λόγω εφελκυστικών τάσεων

Axial stress worst case 2

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length(ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight (lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
4000	4000	272000	232750	272000	Ok	-

Πίνακας 5.17: Στοιχεία καταπόνησης της ενδιάμεσης επένδυσης λόγω του βάρους της

Burst stress (internal pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Burst pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
4000	3100	1966	1134	Ok	1

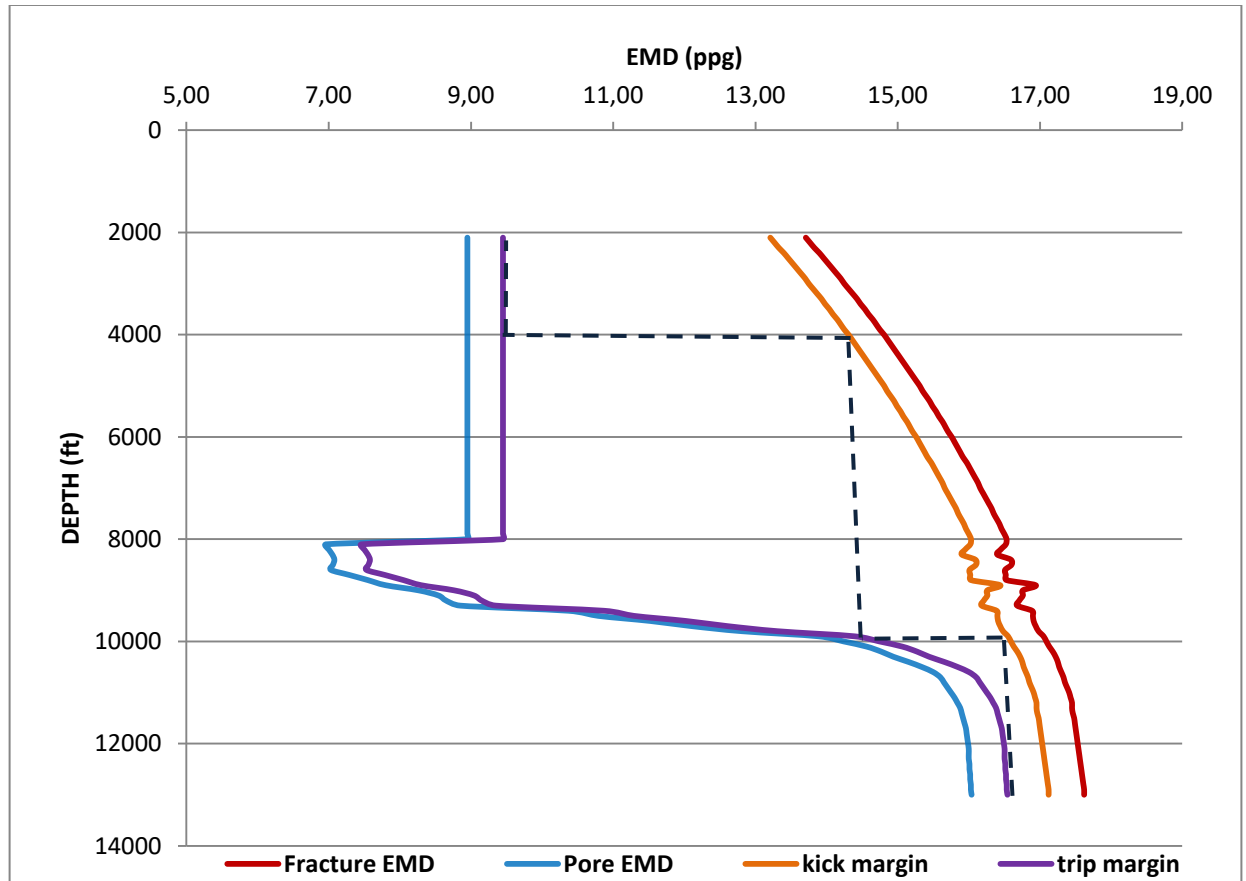
Πίνακας 5.18: Στοιχεία καταπόνησης της ενδιάμεσης επένδυσης από έκρηξη λόγω μεγάλων εσωτερικών πιέσεων

Collapse stress (external pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Collapse pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
4000	0	1966	1966	Ok	1

Πίνακας 5.19: Στοιχεία καταπόνησης της ενδιάμεσης επένδυσης από κατάρρευση λόγω μεγάλων εξωτερικών πιέσεων

5.8 Σχεδιασμός δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (9.625 in.)



Διάγραμμα 5.3: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων και θραύσης του σχηματισμού και επιλογή αριθμού τύπων επένδυσης, συναρτήσει του βάθους.

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης από κατάρρευση γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Θα προκύψει απώλεια πολφού και επομένως απώλεια πίεσης στα 9900 ft
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης των πόρων στα 9900 ft είναι ίση με 0.749 psi/ft, ισοδύναμο βάρος πολφού 14.40 ppg
- Η πυκνότητα του πολφού στα 9900 ft είναι ίση με 14.40 lbm/gal
- Η πυκνότητα του πολφού στο βάθος τοποθέτησης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης 9800 ft είναι ίση με 14.40 lbm/gal

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης από έκρηξη γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού στα 9800 ft είναι ίση με 16.40 lbm/gal
- Η ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης αυξάνεται κατά 0.5 lbm/gal σε σχέση με την αρχική ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού, έτσι ώστε να εισχωρήσει το αέριο στην επένδυση, επομένως θα ισούται με 16.90 lbm/gal
- Βάθος επένδυσης είναι τα 9800 ft
- Το αέριο έχει μοριακό βάρος 18
- Η αντοχή του αποτρεπτή έκρηξης έχει ως όριο τα 1500 psi

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης από αξονικά φορτία γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν μια επιπλέον δύναμη ασφάλειας 10000 lbf
- Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η επένδυση είναι χάλυβας πυκνότητας 65.5 lbm/ft
- Λαμβάνεται υπόψη η άνωση λόγω πολφού
- Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της επένδυσης πριν τη τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης
- Η επιλογή επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί με εξωτερική διάμετρο 9.625 in., δίνεται από τον πίνακα του API, στον οποίο απεικονίζονται οι ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για κάθε τύπο επένδυσης.

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Coupling (in.)	Outside Diameter Special Clearance Coupling (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Box Powertight (in.)	Collapse Resistance (psi)	Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf)
8%	36.00	C-95	0.400	7.825	7.700	9.625	9.125	7.700	9.120	4,350	982
	40.00	C-95	0.450	7.725	7.600	9.625	9.125	7.600	9.120	6,020	1,098
	44.00	C-95	0.500	7.625	7.500	9.625	9.125	7.500	9.120	7,740	1,212
	49.00	C-95	0.557	7.511	7.386	9.625	9.125	7.386	9.120	9,710	1,341
	40.00	P-110	0.450	7.725	7.600	9.625	9.125	7.600	9.120	6,390	1,271
	44.00	P-110	0.500	7.625	7.500	9.625	9.125	7.500	9.120	8,420	1,404
	49.00	P-110	0.557	7.511	7.386	9.625	9.125	7.386	9.120	10,740	1,553
9%	32.30	H-40	0.312	9.001	8.845	10.625	—	—	—	1,370	365
	36.00	H-40	0.352	8.921	8.765	10.625	—	—	—	1,720	410
	36.00	J-55	0.352	8.921	8.765	10.625	10.125	—	—	2,020	564
	40.00	J-55	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	2,570	630
	36.00	K-55	0.352	8.921	8.765	10.625	10.125	—	—	2,020	564
	40.00	K-55	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	2,570	630
	40.00	C-75	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	2,990	859
	43.50	C-75	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	3,730	942
	47.00	C-75	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	4,610	1,018
	53.50	C-75	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	6,350	1,166
	40.00	L-80	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	3,090	916
	43.50	L-80	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	3,810	1,005
	47.00	L-80	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	4,760	1,086
	53.50	L-80	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	6,620	1,244
	40.00	N-80	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	3,090	916
	43.50	N-80	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	3,810	1,005
	47.00	N-80	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	4,760	1,086
	53.50	N-80	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	6,620	1,244
	40.00	C-90	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	3,250	1,031
	43.50	C-90	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	4,010	1,130
	47.00	C-90	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	5,000	1,221
	53.50	C-90	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	7,120	1,399
	40.00	C-95	0.395	8.835	8.679	10.625	10.125	8.599	10.100	3,320	1,088
	43.50	C-95	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	4,120	1,193
	47.00	C-95	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	5,090	1,289
	53.50	C-95	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	7,340	1,477
	43.50	P-110	0.435	8.755	8.599	10.625	10.125	8.599	10.100	4,420	1,381
	47.00	P-110	0.472	8.681	8.525	10.625	10.125	8.525	10.100	5,300	1,493
	53.50	P-110	0.545	8.535	8.379	10.625	10.125	8.379	10.100	7,950	1,710

Πίνακας 5.20: Ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για την δεύτερη ενδιάμεση επένδυση σύμφωνα με το API (Bourgoyne et al. , 1986).

Υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση:

Ύστερα από όλες τις παραπάνω υποθέσεις οι υπολογισμοί που γίνονται για τον έλεγχο ενδεχόμενης κατάρρευσης είναι οι εξής:

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης :

Ο υπολογισμός της εξωτερικής πίεσης της επένδυσης για το σχεδιασμό από φορτία κατάρρευσης, εξαρτάται από την πυκνότητα του πολφού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της επένδυσης κατά την τοποθέτησή της στο επιθυμητό βάθος. Έτσι από το διάγραμμα ισοδύναμης πυκνότητας συναρτήσει του βάθους (διάγραμμα 5.3) παρατηρείται ότι η πυκνότητα του πολφού που θα χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση της ενδιάμεσης επένδυσης στα 9800 ft είναι ίση με 14.40 lbm/gal.

Επομένως η εξωτερική πίεση στα 9800 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται:

$$P_{external} = 0.052 * 14.40 * 9800 = 7338 \text{ psi}$$

Ο υπολογισμός της εσωτερικής πίεσης στα 9800 ft για τον σχεδιασμό από φορτία κατάρρευσης, εξαρτάται από την μέγιστη απώλεια της στάθμης των ρευστών που μπορεί να συμβεί ξαφνικά από μία ζώνη απώλειας πίεσης.

➤ **Υπολογισμός μετατόπισης του επιπέδου του πολφού:**

Το μέγιστο βάθος μετατόπισης του πολφού υπολογίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στην επιφανειακή επένδυση και σύμφωνα με τη σχέση (4.10) ισούται:

$$D_m = \frac{\rho_{\text{mud}} - \rho_p}{\rho_{\text{mud}}} * Z_{lc} = \frac{16.40 - 14.40}{16.40} * 9900 = 1207 \text{ ft}$$

➤ **Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:**

Η εσωτερική πίεση της ενδιάμεσης επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.2) ισούται:

$$P_{\text{internal}} = 0.052 * 16.40 * (9800 - 1207) = 7328 \text{ psi}$$

Στόχος του σχεδιασμού κατάρρευσης είναι να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά εξωτερικής με εσωτερικής πίεσης με την χρησιμοποίηση της επένδυσης που θα επιλεγεί με σκοπό να υπάρξει αντοχή σε μία ορισμένη διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση.

➤ **Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης:**

Η διαφορά πίεσης που θα προκαλέσει κατάρρευση στην δεύτερη ενδιάμεση επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.12) ισούται:

$$DP_{\text{collapse rating}} = P_{\text{external}} - P_{\text{internal}} = 7338 - 7328 = 10 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1, οδηγούμεθα στο συμπέρασμα ότι για την 9.625-in. επένδυση για αντοχή σε κατάρρευση, υπάρχουν αρκετές κατάλληλες επιλογές που δίνονται από το πρόγραμμα του αμερικάνικου πετρελαϊκού ινστιτούτου, ωστόσο πρέπει να επιλεγεί η πιο συμφέρουσα.

Έτσι επιθυμείτε επένδυση για 9.625-in. με αντοχή σε κατάρρευση

$$P_{\text{collapse rating}} > 10 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός διορθωμένης πίεσης κατάρρευσης**

Για τον τύπο επένδυσης C-75 με βάρος 40 lbm/ft και πάχος 0.395, το κλάσμα της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος της επένδυσης για 9.625-in εξωτερική διάμετρο (πίνακας 5.20) δίνεται το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{D_o}{t} = \frac{9.625}{0.395} = 24.37$$

➤ **Υπολογισμός ζώνης κατάρρευσης:**

Παρατηρείται ότι ο λόγος της διαμέτρου της εξωτερικής διαμέτρου με το πάχος βρίσκεται στην περιοχή transition collapse - μεταβατικής ζώνης κατάρρευσης.

Grade*	←Yield Strength→ Collapse	←Plastic→ Collapse	←Transition→ Collapse	←Elastic→ Collapse
H-40	16.40	27.01	42.64	
-50	15.24	25.63	38.83	
J-K-55 & D	14.81	25.01	37.21	
-60	14.44	24.42	35.73	
-70	13.85	23.38	33.17	
C-75 & E	13.60	22.91	32.05	
L-80 & N-80	13.38	22.47	31.02	
C-90	13.01	21.69	29.18	
C-95	12.85	21.33	28.36	
-100	12.70	21.00	27.60	

Πίνακας 5.21: Περιοχή κατάρρευσης για τη δεύτερη ενδιάμεση επένδυση (Bourgoyne et al. , 1986).

Grade*	Empirical Coefficients				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
H-40	2.950	0.0465	754	2.063	0.0325
-50	2.976	0.0515	1,056	2.003	0.0347
J-K 55 & D	2.991	0.0541	1,206	1.989	0.0360
-60	3.005	0.0566	1,356	1.983	0.0373
-70	3.037	0.0617	1,656	1.984	0.0403
C-75 & E	3.054	0.0642	1,806	1.990	0.0418
L-80 & N-80	3.071	0.0667	1,955	1.998	0.0434
C-90	3.106	0.0718	2,254	2.017	0.0466
C-95	3.124	0.0743	2,404	2.029	0.0482
-100	3.143	0.0768	2,553	2.040	0.0499

Πίνακας 5.22: Χρήση εμπειρικών συντελεστών για το σενάριο κατάρρευσης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης (Bourgoyne et al. , 1986).

Έτσι, η πίεση κατάρρευσης από την σχέση (4.3) και από τους πίνακες (5.21, 5.22) θα ισούται:

$$P_{transition} = (\sigma_{yield})_e * \left(\frac{F_4}{\frac{D_o}{t}} - F_5 \right) = 75000 * \left(\frac{1.990}{24.37} - 0.0418 \right) = 2989 \text{ psi}$$

Όπως παρατηρείται η μέγιστη καταπόνηση που θα υποστεί η ενδιάμεση επένδυση τύπου C-75 βρίσκεται στη μεταβατική ζώνη κατάρρευσης (πίνακας 5.21) και είναι ελάχιστα μικρότερη από

το μέγιστο όριο αντοχής της όπου είναι τα 2990 psi. Ωστόσο λόγω ότι η μελέτη γίνεται πάνω στα χειρότερα σενάρια κατάρρευσης και χρησιμοποιούνται και συντελεστές ασφάλειας με αποτέλεσμα οι μετρήσεις καταπόνησης να είναι αρκετά μεγάλες.

Ακόμη, η εμπειρία έχει δείξει ότι στον σχεδιασμό καταπονήσεων όταν οι μετρήσεις είναι οριακές ή ίσες γίνεται τέτοιου τύπου επιλογή, καθώς λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας του κόστους (Aadnøy, 1996).

Έτσι ο τύπος επένδυσης C-75 εγκρίνεται για αντοχή από κατάρρευση.

Υπολογισμοί για αντοχή σε έκρηξη:

➤ Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης λόγω εισροής αερίου:

Από την εισροή αερίου στον πυθμένα της επένδυσης (9800 ft) η εισπίεση λόγω αερίου σύμφωνα με τη σχέση (4.11) ισούται:

$$P_{injection} = 0.052 * (16.90) * 9800 = 8612 \text{ psi}$$

Όπου:

Βάθος = 9800 ft

Ισοδύναμη πυκνότητα πίεσης θραύσης του σχηματισμού, λόγω εισροής αερίου στα 9800 ft = 16.90 lbm/gal

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:

Η εξωτερική πίεση στα 9800 ft θα είναι ίση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού και σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται:

$$P_{external} = 0.052 * 9800 * 14.40 = 7338 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός πυκνότητας και βαθμίδας αερίου:

Σύμφωνα με τη σχέση (4.19) η βαθμίδα του αερίου για τα 13000 ft θα είναι:

$$0.052 * p_{gas} = 0.052 * \frac{(8612 + 15) * 18}{80.3 * 1 * (520 + 0.012 * 9800)} \Leftrightarrow 0.052 * p_{gas} = 0.157 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

$$\text{και } p_{gas} = 3.03 \text{ lb/gal}$$

➤ **Υπολογισμός μετατόπισης του επιπέδου του πολφού:**

Η μετατόπιση πολφού από τον πυθμένα της επένδυσης (9800 ft) σύμφωνα με τη σχέση (4.18) ισούται:

$$D_m = \frac{P_i - P_{\max}}{0.052 (\rho_m - \rho_g)} - \frac{\rho_g - D_{lc}}{(\rho_m - \rho_g)} = \frac{8612 - 1500}{0.052 * (16.40 - 3.03)} - \frac{3.03 * 9800}{16.40 - 3.03} = 7939 \text{ ft}$$

Ύστερα από όλους τους υπολογισμούς του χειρότερου σεναρίου, δηλαδή το πρόβλημα να προκύψει κατά την γεώτρηση του επόμενου τομέα της γεώτρησης στα 13000 ft, μπορεί να υπολογιστεί η εσωτερική πίεση στα 9800 ft όπου θα τοποθετηθεί τελικά η ενδιάμεση επένδυση.

➤ **Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:**

Η εσωτερική πίεση της επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.1, 4.17) ισούται :

$$P_{\text{internal}} = P_{\text{injection}} = 8612 \text{ psi}$$

➤ **Υπολογισμός πίεσης έκρηξης:**

Τελικά η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην ενδιάμεση επένδυση στα 9800 ft θα είναι ίση με:

$$DP_{\text{burst}} = P_{\text{internal}} - P_{\text{external}} = 8612 - 7338 = 1274 \text{ psi}$$

Έτσι ο τύπος επένδυσης που πρέπει να επιλεγεί χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή ασφάλειας SF=1, θα χρειαστεί το όριο αντοχής σε πιέσεις να είναι μεγαλύτερο από 1274 psi.

➤ **Επιλογή επένδυσης και έλεγχος για αντοχή σε έκρηξη**

Για τον τύπο επένδυσης C-75 με βάρος 40 lbm/ft και πάχος 0.395 (πίνακας 5.20), τα όρια αντοχής σε περίπτωση έκρηξης από την εξίσωση (4.5) θα είναι:

$$P_{\text{burst}} = 0.875 * \frac{2 * 75000 * 0.395}{9.625} = 5386 \text{ psi}$$

Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο της ελάχιστης αντοχής (1274 psi) που απαιτείται να έχει η επένδυση για αντοχή σε έκρηξη, επομένως ο τυπός επένδυσης C-75 αντέχει και το σενάριο έκρηξης.

Μελέτη εφελκυστικής καταπόνησης

Κατά την διάρκεια τοποθέτησης της επένδυσης τύπου C-75 με βάρος 40 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 9.625-in, εσωτερική διάμετρο 8.835-in και πάχος 0.395-in (πίνακας 5.20), στο εσωτερικό της γεώτρησης, η επένδυση κάπου κολλάει και χρειάζεται να της ασκηθεί εφελκυστική δύναμη προς την επιφάνεια για να ξεκολλήσει. Η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της σύν έναν συντελεστή ασφάλειας 10000 lbf (υπερβολικό τράβηγμα).

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στην γεώτρηση:

Το βάρος της επένδυσης στον αέρα εξαρτάται από το μήκος της επένδυσης, καθώς και από το βάρος της.

$$\text{Έτσι } W_{\text{air}} = W_{\text{επ}} * L = 40 * 9800 = 392000 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός συντελεστή άνωσης:

Ο συντελεστής άνωσης της επένδυσης για τα 9800 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.14) ισούται:

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \frac{65.5 - 14.40}{65.5} = 0.7801$$

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης:

Το βάρος της επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης ισούται με το γινόμενο του βάρους της επένδυσης στον αέρα, δηλαδή πριν τοποθετηθεί στο πηγάδι επί τον παράγοντα της άνωσης.

$$W_{\text{wet}} = \text{συντελεστής άνωσης} * W_{\text{air}} = 305799 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός εφελκυστικής δύναμης:

Τελικά, η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με την σχέση (4.13) θα είναι:

$$F = 305799 + 10000 = 315799 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς και σύμφωνα με τη σχέση (4.6), διαπιστώνεται ότι η δύναμη για το πρώτο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην δεύτερη ενδιάμεση επένδυση τύπου C-75 με $F=315799 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης σε δυνάμεις που είναι ίσο με $F_{\text{max}} = 859,000 \text{ lbf}$, έτσι $F \leq F_{\text{max}}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης C-75 για το πρώτο σενάριο καταπόνησης.

Μελέτη θλιπτικής καταπόνησης

Η υπόθεση που γίνεται για το δεύτερο σενάριο αφορά την στιγμή όπου ύστερα από την τοποθέτησή της, η επένδυση τύπου C-75 με βάρος 40lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 9.625-in, εσωτερική διάμετρο 8.835-in και πάχος 0.395-in θα φτάσει στον πυθμένα του πηγαδιού, αλλά λόγω του υπερβολικού της βάρους τη στιγμή που θα προσγειωθεί στον πυθμένα θα υποστεί ένα μέρος της συμπίεση, με συνέπεια καταστρέψει την επένδυση και πιθανόν να θέσει σε κίνδυνο την γεώτρηση και όλο το πηγάδι.

Και σε αυτήν την περίπτωση για να επιλεγεί η κατάλληλη επένδυση θα πρέπει η μέγιστη τάση που πρόκειται να ασκηθεί στην επιφανειακή επένδυση τύπου C-75 να είναι μικρότερη από το όριο αντοχής σε τάση της επένδυσης που είναι ίσο με $F_{max}=859,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.20), δηλαδή:

$$F \leq F_{max}$$

Ωστόσο η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι μόνο το βάρος της ίδιας της επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης, δηλαδή $F=W_{air}$.

➤ Υπολογισμός δύναμης που θα ασκηθεί στην επένδυση λόγω θλίψης:

Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.16) ισούται:

$$F = W_{air} = 392000 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η δύναμη για το δεύτερο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην δεύτερη ενδιάμεση επένδυση τύπου C-75 με $F=392000 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής σε δυνάμεις της επένδυσης που είναι ίσο με $F_{max}=859,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.20), έτσι $F \leq F_{max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης C-75 και για το δεύτερο σενάριο καταπόνησης.

Τελικά για την ενδιάμεση επένδυση διαμέτρου 9.625-in η οποία θα τοποθετηθεί στα 9800 πόδια βάθος, ο καταλληλότερος τύπος επένδυσης είναι ο C-75 με βάρος 40 lbm/ft, εσωτερική διάμετρο 8.835-in και πάχος 0.395-in (πίνακας 5.20), καθώς πληροί όλες τις προδιαγραφές για αντοχή σε έκρηξη, κατάρρευση και αξονικές τάσεις και είναι και ο χαμηλότερος σε κόστος.

Όλα τα στοιχεία της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω πρόγραμμα σχεδιασμού της:

Casing design

<i>Type</i>	<i>From depth(ft)</i>	<i>To depth (ft)</i>	ρ_{mud} (ppg)	<i>Bit (in)</i>	<i>Casing (in)</i>
<i>Int 2</i>	<i>0</i>	<i>9800</i>	<i>14.40</i>	<i>12.25</i>	<i>9.625</i>

Πίνακας 5.23: Στοιχεία σχεδιασμού της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης για βάθος 9800 πόδια

Additional data

ρ_{gas} (ppg)	ρ_{steel} (ppg)
<i>0.5</i>	<i>65.5</i>

Πίνακας 5.24: Στοιχεία πυκνότητας αερίου και πυκνότητας του υλικού της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης

Select casing data

<i>Type</i>	<i>OD(in)</i>	<i>ID(in)</i>	<i>Weight(lbm/ft)</i>	<i>Wall thickness (in)</i>	<i>Max axial load (lbf)</i>	<i>Max collapse p (psi)</i>	<i>Max burst p(psi)</i>	<i>Yield stress (psi)</i>
<i>C-75</i>	<i>9.625</i>	<i>8.835</i>	<i>40</i>	<i>0.395</i>	<i>859000</i>	<i>2990</i>	<i>5386</i>	<i>75000</i>

Πίνακας 5.25: Στοιχεία ιδιοτήτων του επιλεγόμενου τύπου για την δεύτερη ενδιάμεση επένδυση

Axial stress worst case 1

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length(ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight(lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>Overpull</i>
<i>0</i>	<i>9800</i>	<i>392000</i>	<i>305799</i>	<i>315799</i>	<i>ok</i>	<i>10000</i>

Πίνακας 5.26: Στοιχεία καταπόνησης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης λόγω εφελκυστικών τάσεων

Axial stress worst case 2

<i>Depth (ft)</i>	<i>Load length(ft)</i>	<i>Load in air (lbm)</i>	<i>Wet weight(lbm)</i>	<i>Total load (lbm)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
9800	9800	392000	305799	392000	ok	-

Πίνακας 5.27: Στοιχεία καταπόνησης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης λόγω του βάρους της

Burst stress (internal pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Burst pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
9800	8612	7338	1274	ok	1

Πίνακας 5.28: Στοιχεία καταπόνησης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης από έκρηξη λόγω μεγάλων εσωτερικών πιέσεων

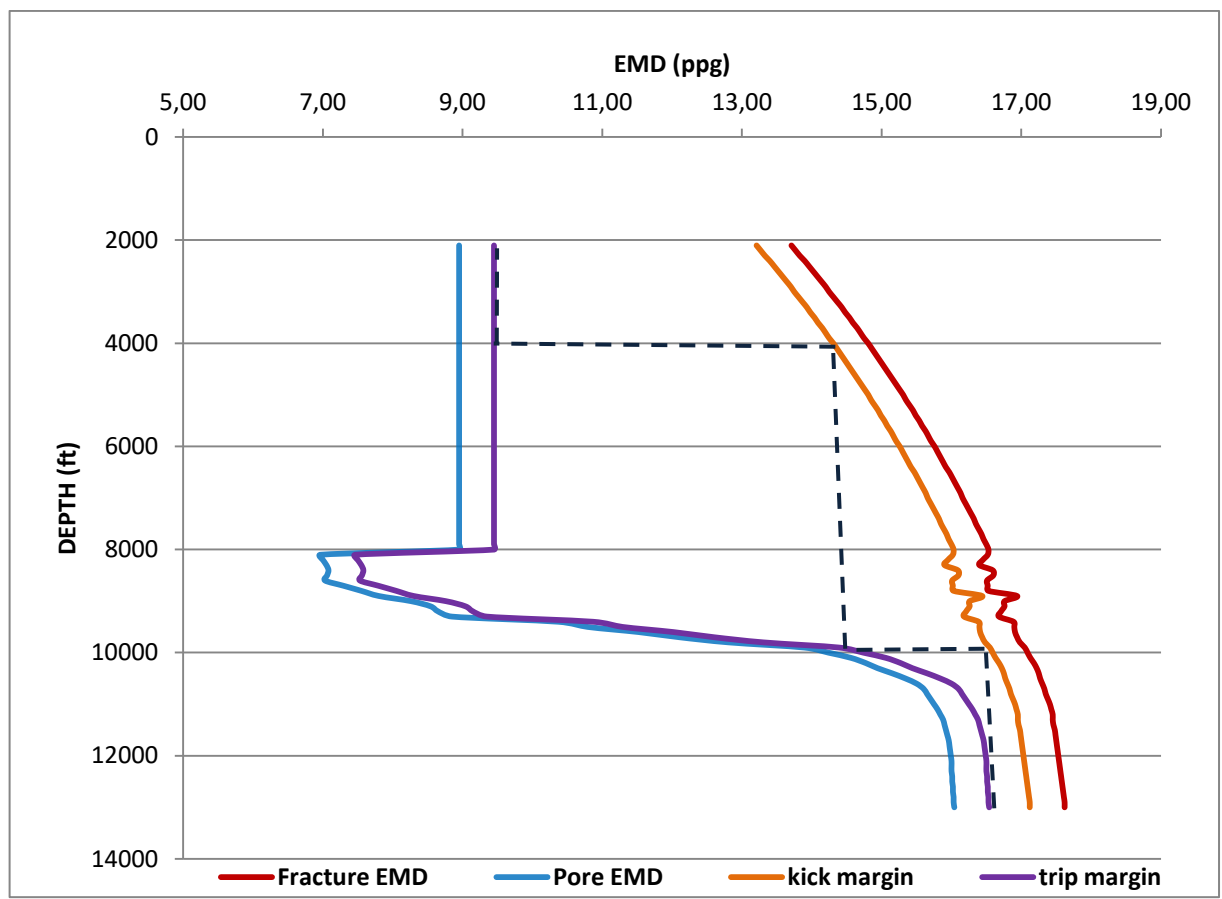
Collapse stress (external pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Collapse pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
9800	7328	7338	10	Ok	-

Πίνακας 5.29: Στοιχεία καταπόνησης της δεύτερης ενδιάμεσης επένδυσης από κατάρρευση λόγω μεγάλων εξωτερικών πιέσεων

5.9 Σχεδιασμός παραγωγικής επένδυσης εξωτερικής διαμέτρου (7 in.)

Η επένδυση παραγωγής αποτελεί το τελευταίο κομμάτι επένδυσης που θα τοποθετηθεί στο εσωτερικό της γεώτρησης, με σκοπό το πλήρωμα να φτάσει στο τελικό επιθυμητό βάθος όπου βρίσκεται το κοίτασμα και είναι τα 13000 ft. Η εξωτερική διάμετρος της επένδυσης θα είναι 7-in και η λάσπη που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το βάθος θα είναι ίση με 16.40 lbm/gal. Επίσης στο εσωτερικό της επένδυσης παραγωγής κατά την διάρκεια άντλησης ρευστών από τον ταμιευτήρα, τοποθετείται ο εσωτερικός σωλήνας παραγωγής (tubing), καθώς και τα packers τα οποία πλαισιώνονται ανάμεσα στον σωλήνα παραγωγής και την επένδυση. Το ρευστό που υπάρχει στα packers είναι άλμη με πυκνότητα 8.8 lbm/gal και η εσωτερική πίεση του σωλήνα παραγωγής (shut-in tubing pressure) είναι τα 6000 psi.



Διάγραμμα 5.3: Προφίλ ισοδύναμης πυκνότητας πίεσης πόρων και θραύσης του σχηματισμού και επιλογή αριθμού τύπων επένδυσης, συναρτήσει του βάθους.

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της παραγωγικής επένδυσης από κατάρρευση γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η πυκνότητα του πολφού στα 13000 ft είναι ίση με 16.40 lbm/gal
- Το ρευστό που υπάρχει στα packers αλατόνερο πυκνότητας 8.8 lbm/gal
- Η επένδυση είναι άδεια
- Η πίεση εξωτερικά της επένδυσης είναι ίση με τη πίεση του σχηματισμού

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της παραγωγικής επένδυσης από έκρηξη γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Στο εσωτερικό της επένδυσης υπάρχει μόνο παραγόμενο αέριο
- Η πίεση στο πυθμένα του πηγαδιού είναι ίση με τη πίεση των πόρων του σχηματισμού
- Η εσωτερική πίεση του σωλήνα παραγωγής είναι 6000 psi
- Θα συμβεί διαρροή στη κεφαλή της γεώτρησης (wellhead)
- Βάθος επένδυσης είναι τα 13000 ft

Για το τελικό σχεδιασμό αντοχής της παραγωγικής επένδυσης από αξονικά φορτία γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της συν μια επιπλέον δύναμη ασφάλειας 10000 lbf
- Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η επένδυση είναι χάλυβας πυκνότητας 65.5 lbm/ft
- Λαμβάνεται υπόψη η άνωση λόγω πολφού
- Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της επένδυσης πριν τη τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης
- Η επιλογή επένδυσης που θα χρησιμοποιηθεί με εξωτερική διάμετρο 7 in., δίνεται από τον πίνακα του API στον οποίο απεικονίζονται οι ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για κάθε τύπο επένδυσης.

Size Outside Diameter (in.)	Nominal Weight Threads and Coupling (lbm/ft)	Grade	Wall Thickness (in.)	Inside Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Coupling (in.)	Outside Diameter Special Clearance Coupling (in.)	Drift Diameter (in.)	Outside Diameter of Box Power-tight (in.)	Collapse Resistance (psi)	Pipe Body Yield Strength (1,000 lbf)
7	17.00	H-40	0.231	6.538	6.413	7.656	—	—	—	1,420	196
	20.00	H-40	0.272	6.456	6.331	7.656	—	—	—	1,970	230
	20.00	J-55	0.272	6.456	6.331	7.656	—	—	—	2,270	316
	23.00	J-55	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	3,270	366
	26.00	J-55	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	4,320	415
	20.00	K-55	0.272	6.456	6.331	7.656	—	—	—	2,270	316
	23.00	K-55	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	3,270	366
	26.00	K-55	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	4,320	415
	23.00	C-75	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	3,750	499
	26.00	C-75	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	5,220	566
	29.00	C-75	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	6,730	634
	32.00	C-75	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	8,200	699
	35.00	C-75	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	9,670	763
	38.00	C-75	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	10,680	822
	23.00	L-80	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	3,830	532
	26.00	L-80	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	5,410	604
	29.00	L-80	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	7,020	676
	32.00	L-80	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	8,610	745
	35.00	L-80	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	10,180	814
	38.00	L-80	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	11,390	877
	23.00	N-80	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	3,830	532
	26.00	N-80	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	5,410	604
	29.00	N-80	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	7,020	676
	32.00	N-80	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	8,610	745
	35.00	N-80	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	10,180	814
	38.00	N-80	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	11,390	877
	23.00	C-90	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	4,030	599
	26.00	C-90	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	5,740	679
	29.00	C-90	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	7,580	760
	32.00	C-90	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	9,380	839
	35.00	C-90	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	11,170	915
	38.00	C-90	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	12,820	986
	23.00	C-95	0.317	6.366	6.241	7.656	7.375	6.151	7.390	4,140	632
	26.00	C-95	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	5,880	717
	29.00	C-95	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	7,830	803
	32.00	C-95	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	9,750	885
	35.00	C-95	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	11,650	966
	38.00	C-95	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	13,440	1,041
	26.00	P-110	0.362	6.276	6.151	7.656	7.375	6.151	7.390	6,230	830
	29.00	P-110	0.408	6.184	6.059	7.656	7.375	6.059	7.390	8,530	929
	32.00	P-110	0.453	6.094	5.969	7.656	7.375	5.969	7.390	10,780	1,025
	35.00	P-110	0.498	6.004	5.879	7.656	7.375	5.879	7.530	13,020	1,119
	38.00	P-110	0.540	5.920	5.795	7.656	7.375	5.795	7.530	15,140	1,205

Πίνακας 5.30: Ελάχιστες ιδιότητες απόδοσης για την παραγωγική επένδυση σύμφωνα με το API (Bourgoyne et al. , 1986).

Υπολογισμοί για αντοχή σε κατάρρευση :

➤ Υπολογισμός εσωτερικής πίεσης:

Η εσωτερική πίεση της παραγωγικής επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.2) ισούται:

$$P_{internal} = 0$$

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης:

Η εξωτερική πίεση της παραγωγικής επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται:

$$P_{external} = 0.052 * 16.40 * 13000 = 11086 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης:

Η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση στα 13000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.8) ισούται:

$$DP_{collapse} = 0.052 * 16.40 * 13000 - 0 = 11086 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιώντας συντελεστή ασφάλειας SF=1, οδηγούμεθα στο συμπέρασμα ότι για την 7-in. επένδυση για αντοχή σε κατάρρευση, υπάρχουν αρκετές κατάλληλες επιλογές που δίνονται από το πρόγραμμα του API, ωστόσο πρέπει να επιλεγεί η πιο συμφέρουσα (Short, 1982).

Έτσι επιθυμείται επένδυση για 7-in. με αντοχή σε κατάρρευση:

$$P_{collapse\ rating} > 11086\ psi$$

➤ Υπολογισμός διορθωμένης πίεσης κατάρρευσης

Για τον τύπο επένδυσης L-80 με βάρος 38 lbm/ft και πάχος 0.540 (πίνακας 5.30), το κλάσμα της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος της επένδυσης για 7-in εξωτερική διάμετρο δίνει το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{D_o}{t} = \frac{7}{0.540} = 12.96$$

➤ Υπολογισμός ζώνης κατάρρευσης:

Παρατηρείται ότι ο λόγος της διαμέτρου της εξωτερικής διαμέτρου με το πάχος βρίσκεται στην περιοχή της yield ζώνης κατάρρευσης - yield strength collapse.

Grade*	←Yield Strength→ Collapse	←Plastic→ Collapse	←Transition→ Collapse	←Elastic→ Collapse
H-40	16.40	27.01		42.64
-50	15.24	25.63		38.83
J-K-55 & D	14.81	25.01		37.21
-60	14.44	24.42		35.73
-70	13.85	23.38		33.17
C-75 & E	13.60	22.91		32.05
L-80 & N-80	13.38	22.47		31.02
C-90	13.01	21.69		29.18
C-95	12.85	21.33		28.36
-100	12.70	21.00		27.60

Πίνακας 5.31: Περιοχή κατάρρευσης για την παραγωγική επένδυση (Bourgoyne et al. , 1986).

Η εξίσωση κατάρρευσης για την yield ζώνη από εξίσωση (4.4) και σύμφωνα με το πίνακα (5.31) ισούται:

$$P_{cr} = 2(\sigma_{yield})_e * \left(\frac{\frac{D_o}{t} - 1}{\left(\frac{D_o}{t}\right)^2} \right) = 2 * 80000 * \frac{12.96 - 1}{12.96^2} = 160000 * \frac{11.96}{168} = 11390\ psi$$

Όπως παρατηρείται η μέγιστη καταπόνηση που θα υποστεί η ενδιάμεση επένδυση τύπου L-80 είναι yield και είναι ίση με το μέγιστο όριο αντοχής της όπου είναι τα 11390 psi. Ακόμη η εμπειρία έχει δείξει ότι στον σχεδιασμό καταπονήσεων όταν οι μετρήσεις είναι οριακές ή ίσες γίνεται τέτοιου τύπου επιλογή, καθώς λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας του κόστους (Aadnoy, 1996).

Έτσι ο τύπος επένδυσης L-80 εγκρίνεται για αντοχή από κατάρρευση.

Υπολογισμοί για αντοχή σε έκρηξη :

➤ Υπολογισμός εσωτερικής στην επένδυση:

Στα 13000 ft η πίεση στο εσωτερικό της επένδυσης σύμφωνα με τη σχέση (3.2) ισούται:

$$P_{internal} = (6000 + 0.052 * 8.8 * 13000) = 11949 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός εξωτερικής πίεσης στην επένδυση:

Η εξωτερική πίεση στα 13000 ft για την επένδυση παραγωγής σύμφωνα με τη σχέση (4.9) ισούται:

$$P_{external} = 0.052 * 16.40 * 13000 = 11086 \text{ psi}$$

➤ Υπολογισμός πίεσης έκρηξης:

Τελικά, η διαφορά πίεσης που μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στην παραγωγική επένδυση σε βάθος 13000 ft σύμφωνα με τη σχέση (4.12) ισούται:

$$DP_{burst} = P_{internal} - P_{external} = 11949 - 11086 = 863 \text{ psi}$$

Έτσι ο τύπος επένδυσης που πρέπει να επιλεγθεί χρησιμοποιώντας και συντελεστή ασφάλειας SF=1, θα χρειαστεί η αντοχή του σε πιέσεις να είναι μεγαλύτερη από 863 psi.

➤ Επιλογή επένδυσης και έλεγχος για αντοχή σε έκρηξη

Για τον τύπο επένδυσης L-80 με βάρος 38 lbm/ft και πάχος 0.540 (πίνακας 5.30) τα όρια αντοχής σε περίπτωση έκρηξης από την εξίσωση (4.5) θα είναι:

$$P_{burst} = 0.875 * \frac{2 * 80000 * 0.540}{7} = 10800 \text{ psi}$$

Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο της ελάχιστης αντοχής (863 psi) που απαιτείται να έχει η επένδυση για αντοχή σε έκρηξη επομένως ο τυπός επένδυσης L-80 αντέχει και το σενάριο έκρηξης.

Μελέτη εφελκυστικής καταπόνησης

Κατά την διάρκεια τοποθέτησης της επένδυσης τύπου L-80 με βάρος 38 lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 7-in, εσωτερική διάμετρο 5.920-in και πάχος 0.540-in στο εσωτερικό της γεώτρησης, η επένδυση κάπου κολλάει και χρειάζεται να της ασκηθεί εφελκυστική δύναμη προς την επιφάνεια για να ξεκολλήσει. Η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι ίση με το βάρος της σύν έναν συντελεστή ασφάλειας 10000 lbf (υπερβολικό τράβηγμα).

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στην γεώτρηση:

Το βάρος της επένδυσης στον αέρα εξαρτάται από το μήκος της επένδυσης, την διατομή της και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη.

$$W_{air} = W_{\pi} * L = 38 * 13000 = 494000 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός συντελεστή άνωσης:

Ο συντελεστής άνωσης της επένδυσης για τα 4000 πόδια σύμφωνα με τη σχέση (4.14) ισούται:

$$\text{Συντελεστής άνωσης} = \frac{65.5 - 16.40}{65.5} = 0.7496$$

➤ Υπολογισμός βάρους επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης:

Το βάρος της επένδυσης στο εσωτερικό της γεώτρησης ισούται με το γινόμενο του βάρους της επένδυσης στον αέρα, δηλαδή πριν τοποθετηθεί στο πηγάδι επί τον παράγοντα της άνωσης.

$$W_{wet} = \text{συντελεστής άνωσης} * W_{air} = 370302 \text{ lbf}$$

➤ Υπολογισμός εφελκυστικής δύναμης :

Τελικά η εφελκυστική δύναμη που θα ασκηθεί σύμφωνα με την σχέση (4.13) θα είναι:

$$F = 370302 + 10000 = 380302 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η δύναμη για το πρώτο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην παραγωγική επένδυση τύπου L-80 με $F=380302 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης σε δυνάμεις που είναι ίσο με $F_{\max}=877,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.30), έτσι $F \leq F_{\max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης L-80 για το πρώτο σενάριο καταπόνησης.

Μελέτη θλιπτικής καταπόνησης

Η υπόθεση που γίνεται για το δεύτερο σενάριο, αφορά την στιγμή όπου ύστερα από την τοποθέτησή της η επένδυση τύπου L-80 με βάρος 38lbm/ft, εξωτερική διάμετρο 7-in, εσωτερική διάμετρο 5.920-in και πάχος 0.540-in θα φτάσει στον πυθμένα του πηγαδιού (πίνακας 5.30), αλλά λόγω του υπερβολικού της βάρους τη στιγμή που θα προσγειωθεί στον

πυθμένα θα υποστεί ένα μέρος της θλίψης, πράγμα το οποίο μπορεί να καταστρέψει την επένδυση και πιθανόν να θέσει σε κίνδυνο την γεώτρηση και όλο το πηγάδι.

Και σε αυτήν την περίπτωση για να επιλεγεί η κατάλληλη επένδυση θα πρέπει η μέγιστη τάση που πρόκειται να ασκηθεί στην επιφανειακή επένδυση τύπου L-80 να είναι μικρότερη από το όριο αντοχής σε τάση της επένδυσης που είναι ίσο με $\sigma_{yield}=877,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.30), δηλαδή:

$$F \leq F_{max}$$

Ωστόσο η δύναμη που θα ασκηθεί στην επένδυση θα είναι μόνο το βάρος της ίδιας της επένδυσης πριν την τοποθέτησή της στο εσωτερικό της γεώτρησης, δηλαδή $F=W_{air}$.

➤ **Υπολογισμός δύναμης που θα ασκηθεί στην επένδυση λόγω θλίψης:**

Η θλιπτική δύναμη που θα ασκηθεί στην παραγωγική επένδυση σύμφωνα με τη σχέση (4.16) ισούται:

$$F = W_{air} = 494000 \text{ lbf}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η δύναμη για το δεύτερο σενάριο που πρόκειται να ασκηθεί στην επένδυση τύπου L-80 με $F=494000 \text{ lbf}$ είναι μικρότερη από το όριο αντοχής της επένδυσης σε δυνάμεις που είναι ίσο με $F_{max}=877,000 \text{ lbf}$ (πίνακας 5.30), έτσι $F \leq F_{max}$ που σημαίνει ότι εγκρίνεται ο τύπος επένδυσης L-80 και για το δεύτερο σενάριο καταπόνησης.

Τελικά για την επένδυση παραγωγής διαμέτρου 7-in η οποία θα τοποθετηθεί στα 13000 πόδια βάθος, ο καταλληλότερος τύπος επένδυσης είναι ο L-80 με βάρος 38 lbf/ft, εσωτερική διάμετρο 5.920-in και πάχος επένδυσης 0.540-in, καθώς πληροί όλες τις προδιαγραφές για αντοχή σε έκρηξη, κατάρρευση και αξονικές τάσεις και είναι και η χαμηλότερη επιλογή από άποψη κόστους.

Όλα τα στοιχεία της παραγωγικής επένδυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω πρόγραμμα σχεδιασμού της:

Casing design

Type	From depth(ft)	To depth (ft)	ρ_{mud} (ppg)	Bit (in)	Casing (in)
Production	0	13000	16.40	8.50	7.00

Πίνακας 5.32: Στοιχεία σχεδιασμού της παραγωγικής επένδυσης για βάθος 13000 ft

Additional data

ρ_{gas} (ppg)	ρ_{steel} (ppg)
0.5	65.5

Πίνακας 5.33: Στοιχεία πυκνότητας αερίου και πυκνότητας του υλικού της παραγωγικής επένδυσης

Select casing data

Type	OD(in)	ID(in)	Weight(lbm/ft)	Wall thickness (in)	Max axial load (lbf)	Max collapse p (psi)	Max burst p (psi)	Yield stress (psi)
L-80	7	5.920	38	0.540	877000	11390	10800	80000

Πίνακας 5.34: Στοιχεία ιδιοτήτων του επιλεγόμενου τύπου για την παραγωγική επένδυση

Axial stress worst case 1

Depth (ft)	Load length(ft)	Load in air (lbm)	Wet weight (lbm)	Total load (lbm)	Result	overpull
0	13000	494000	370302	380302	ok	10000

Πίνακας 5.35: Στοιχεία καταπόνησης της παραγωγικής επένδυσης λόγω εφελκυστικών τάσεων

Axial stress worst case 2

Depth (ft)	Load length(ft)	Load in air (lbm)	Wet weight (lbm)	Total load (lbm)	Result	Design factor
13000	13000	494000	370302	494000	ok	-

Πίνακας 5.36: Στοιχεία καταπόνησης της παραγωγικής επένδυσης λόγω του βάρους της

Burst stress (internal pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Burst pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
13000	11949	11086	863	Ok	1

Πίνακας 5.37: Στοιχεία καταπόνησης της παραγωγικής επένδυσης από έκρηξη λόγω μεγάλων εσωτερικών πιέσεων

Collapse stress (external pressure)

<i>Depth (ft)</i>	<i>Inner p (psi)</i>	<i>Outer p (psi)</i>	<i>Collapse pressure (psi)</i>	<i>Result</i>	<i>Design factor</i>
13000	0	11086	11086	Ok	-

Πίνακας 5.38: Στοιχεία καταπόνησης της παραγωγικής επένδυσης από κατάρρευση λόγω μεγάλων εξωτερικών πιέσεων

5.10 Επιβεβαίωση επιλεγόμενης διαμέτρου για κάθε τύπο επένδυσης σύμφωνα με τα κοπτικά άκρα.

Διαδικασία επιλογής

Το μέγεθος του επιλεγόμενου κοπτικού άκρου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο κατώτερο κομμάτι της γεώτρησης, χρειάζεται να είναι λίγο πιο μικρό από το μέγεθος της παραπάνω επένδυσης μέσω της οποίας θα φτάσει στον πυθμένα. Με αυτόν τον τρόπο επιλέγονται τα κοπτικά άκρα που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διάρκεια της γεώτρησης (Hughes, 1969).

Το API παρέχει τύπους μεγεθών διαφόρων κοπτικών άκρων σύμφωνα με την εξωτερική διάμετρο της επένδυσης, όπου είναι δύσκολο άμα γίνει συνδυασμός τους να κολλήσει κάποια επένδυση ή να μην γίνει τοποθέτηση της επένδυσης με ασφάλεια.

Στον πίνακα (5.39) παρατίθενται τα στοιχεία από τα επιλεγόμενα κοπτικά άκρα και από τις διαμέτρους επένδυσης που συνιστούν οι κατασκευαστές, έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να περνάνε μέσα από την προηγούμενη επένδυση.

<i>Τύπος επένδυσης</i>	<i>Βάθος (ft)</i>	<i>Πολφός (ppg)</i>	<i>Κοπτικό άκρο (in)</i>	<i>Εξωτερική διάμετρος επένδυσης (in)</i>	<i>Εσωτερική διάμετρος επένδυσης (in)</i>	<i>Πάχος επένδυσης (in)</i>	<i>Διάμετρος κατασκευαστών (in)</i>	<i>Βάρος (lbm/ft)</i>	<i>Υλικό επένδυσης</i>
<i>Θεμελειακή</i>	<i>100</i>	<i>9.45</i>	<i>36</i>	<i>30</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Επιφανειακή</i>	<i>2000</i>	<i>9.45</i>	<i>26</i>	<i>20</i>	<i>19.124</i>	<i>0.438</i>	<i>18.936</i>	<i>94</i>	<i>H-40</i>
<i>Ενδιάμεση</i>	<i>4000</i>	<i>9.45</i>	<i>17.5</i>	<i>13.375</i>	<i>12.415</i>	<i>0.480</i>	<i>12.259</i>	<i>68</i>	<i>K-55</i>
<i>Ενδιάμεση</i>	<i>9800</i>	<i>14.40</i>	<i>12.25</i>	<i>9.625</i>	<i>8.835</i>	<i>0.395</i>	<i>8.679</i>	<i>40</i>	<i>C-75</i>
<i>Παραγωγική</i>	<i>13000</i>	<i>16.40</i>	<i>8.5</i>	<i>7</i>	<i>5.920</i>	<i>0.540</i>	<i>5.795</i>	<i>38</i>	<i>L-80</i>

Πίνακας 5.39: Στοιχεία των επιλεγόμενων κοπτικών άκρων και των διαμέτρων επένδυσης που συνιστούν οι κατασκευαστές

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη γεώτρηση που επιλέχθηκε, ο προτεινόμενος σχεδιασμός επένδυσης της γεώτρησης για αντοχή από έκρηξη, κατάρρευση και καταπόνηση λόγω αξονικών φορτίων έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

<i>Βάθος (ft)</i>	<i>Τύπος επένδυσης</i>	<i>Εξωτερική διάμετρος (in)</i>	<i>Ισοδύναμη πυκνότητα πολφού (lbm/gal)</i>	<i>Επιλεγόμενη επένδυση</i>	<i>Βάρος επένδυσης (lbm/ft)</i>
<i>0 – 100</i>	<i>Θεμελειακή</i>	<i>30</i>	<i>9.45</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>100 – 2000</i>	<i>Επιφανειακή</i>	<i>20</i>	<i>9.45</i>	<i>H-40</i>	<i>94</i>
<i>2000 - 4000</i>	<i>1^η Ενδιάμεση</i>	<i>13.375</i>	<i>9.45</i>	<i>K-55</i>	<i>68</i>
<i>4000 – 9800</i>	<i>2^η Ενδιάμεση</i>	<i>9.625</i>	<i>14.40</i>	<i>C-75</i>	<i>40</i>
<i>9800 - 13000</i>	<i>Παραγωγική</i>	<i>7</i>	<i>16.40</i>	<i>L-80</i>	<i>38</i>

***Πίνακας 6.1:** Προδιαγραφές κάθε τύπου επένδυσης για τη γεώτρηση σε βάθος 13000 ft*

- Τα σενάρια καταπόνησης της επένδυσης που ελήφθησαν υπόψη ήταν από τα χειρότερα που μπορεί να συμβούν κατά τη γεώτρηση ενός πηγαδιού.
- Εάν υπήρχε μεγαλύτερη εμπειρία από γειτονικά πηγάδια ίσως να χρησιμοποιούνταν πιο ελαστικά σενάρια καταπόνησης, επομένως θα δημιουργούνται μικρότερες φορτίσεις καθώς και θα επιλέγονταν μικρότερα πάχη επενδύσεων.
- Για την επιλογή των τύπων επένδυσης πάρθηκαν οριακές τιμές στο collapse rating και σε αυτό σημαντικός παράγοντας ήταν το κριτήριο του κόστους.

6.2 Προτάσεις

Προκειμένου να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη όσον αφορά το σχεδιασμό της επένδυσης για το συγκεκριμένο πηγάδι, χρειάζεται να ληφθούν και άλλα κριτήρια καταπόνησης υπόψη.

- Θα πρέπει να επανεξεταστούν τα σενάρια καταπόνησης λαμβάνοντας υπόψη επιπρόσθετα λιθολογικά δεδομένα ανάλογα με τα πετρώματα των σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής και του υπογήφιου πηγαδιού.
- Με γνώση τη λιθολογία της περιοχής, μπορεί να γίνει κατάλληλη επιλογή κοπτικού άκρου που θα χρησιμοποιηθεί στη γεώτρηση και επομένως να μειωθεί σημαντικά το κόστος διάτρησης, καθώς και να προσδιοριστεί το αντίστοιχο μέγεθος επένδυσης που θα τοποθετηθεί σε κάθε βάθος.
- Προτείνεται η λήψη επιπρόσθετων δεδομένων και κριτηρίων καταπόνησης, όπως η συνδεσμολογία (couplings) μεταξύ των σωληνώσεων, η καταπόνηση από διάβρωση, το λυγισμό, καθώς και από θερμικά φαινόμενα. Με τον τρόπο αυτό, η επιλογή των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε επένδυσης θα είναι αξιόπιστη, καθώς επίσης θα αποφευχθούν τυχόν αστοχίες τους από τα παραπάνω φαινόμενα κατά τη διάρκεια γεώτρησης του πηγαδιού.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφία

7.1 Αγγλική βιβλιογραφία

Aadnoy B.S., “Modern Well Design”, A.A Balkema, Rotterdam, (1996)

Adams, Neal and Tommy Charrier, *Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1985

Bourgoyne, A.T., Jr., Chenevert, M.E., Millheim, K.K. & Young, F.S., Jr.: “Applied Drilling Engineering”, Society of Petroleum Engineers, Richardson (1986)

Chenevert, Martin E., and Reuven Hollo, *TI-59 Drilling Engineering Manual*, Penn Well Publishing Company, Tulsa, 1981

Crammer Jr., John L., *Basic Drilling Engineering Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1982

Craft B.C., Holden W.R., Graves E.D., “Well Design: Drilling and Production”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs New Jersey, (1962)

Eaton, B. A. “Fracture Gradient Prediction and Its Application in Oilfield Operations,” JPT, October, 1969

Economides M.J., Watters L.T., Dunn-Norman S., “Petroleum Well Construction”, John Wiley & Sons Publishing, (1998)

Hughes Tool Company, “Drilling Manual”, Section B, care, handling & specifications for tool joints, drill pipe, casing & tubing, (1969)

Matthews, W. R. and J. Kelly, “How to Predict Formation Pressure and Fracture Gradient,” *Oil and Gas Journal*, February 20, 1967

Mitchell, F.R., Miska, S.Z.: “Fundamentals of Drilling Engineering”, SPE Textbook Series, Vol. 12, Society of Petroleum Engineers, (2011)

Moore, P. L., *Drilling Practices Manual*, PennWell Publishing Company, Tulsa, 1974

Rehn, B. and R. McClendon, “Measurement of Formation Pressure from Drilling Data,” SPE Paper 3601, AIME Annual fall Meeting, New Orleans, La., 1971

Short J.A., “Drilling and Casing Operations”, PennWell Publishing, Tulsa Oklahoma, (1982)

7.2 Ελληνική βιβλιογραφία

Βαρότσης, Ν. (2013), “Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων”, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Γαγάνης, Β. (2013), “Τεχνική γεωτρήσεων”, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Κελεσιδης, Β. Χ. (2009), “Τεχνική Γεωτρήσεων”, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

7.3 Αναφορές ιστοσελίδων

MNN (2010), “ **Types of offshore oil rigs** ”, <https://www.mnn.com/earth-matters/energy/stories/types-of-offshore-oil-rigs>, τελευταία πρόσβαση στις 30/08/17

MAER (2017), “ **Drilling rigs** ”, <https://www.maerskdrilling.com/en/drilling-rigs>, τελευταία πρόσβαση στις 07/08/17

DRILL (2016), “ **Casing size selection** ”, <http://www.drillingformulas.com/casing-size-selection-how-to-select-casing-size-to-match-the-drilling-and-completion-goal/>, τελευταία πρόσβαση στις 01/09/2017

PETRO (2015), “ **Casing design** ”, http://petrowiki.org/Casing_design, τελευταία πρόσβαση στις 01/09/2017

SLIDE (2014), Drilling engineering, Petroleum engineering, “ **Casing design** ”, <https://www.slideshare.net/akincraig/petroleum-engineering-drilling-engineering-casing-design>, τελευταία πρόσβαση στις 03/09/17

SCIENCE (2011), “ **Abnormal pressures** ”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825211000821>, τελευταία πρόσβαση στις 02/09/17

OIL (2017), “ **Parts of casing string** ”, <http://www.oilngasdrilling.com/component-parts-of-casing-string.html>, τελευταία πρόσβαση στις 04/09/17

SPE (2017), “ **Casing setting depth**”, <http://spebuesc.org/2017/02/12/primary-considerations-in-determining-the-casing-setting-depth/>, τελευταία πρόσβαση στις 04/09/17

PET (2012), “ **Well completion** ”, <http://petoil.blogspot.com/2012/03/oil-and-gas-well-completions.html>, τελευταία πρόσβαση στις 05/10/17

DRILL (2009), “ **Wellbore design** ”, <http://www.drillingcontractor.org/monobore-wellbore-design-bangladesh-exploration-program-highlights-pros-cons-1920>, τελευταία πρόσβαση στις 05/10/17

PET (2011), “ **Drill string components** ”, <http://petroleum-uir.blogspot.com/2011/03/drill-string-component.html>, τελευταία πρόσβαση στις 06/10/17

KALAMU (2010),” **How cement and casing is place in borehole**”, <http://kalamu.posthaven.com/gulf-oil-disaster-what-do-we-know-about-the-d>, τελευταία πρόσβαση στις 07/10/17

ALAMY (2017), “ **Onshore casing** ”, <https://www.alamy.com/stock-photo-onshore-oil-and-gas-exploration-site-pipes-and-casings-in-compound-53135841.html>, τελευταία πρόσβαση στις 08/11/17