



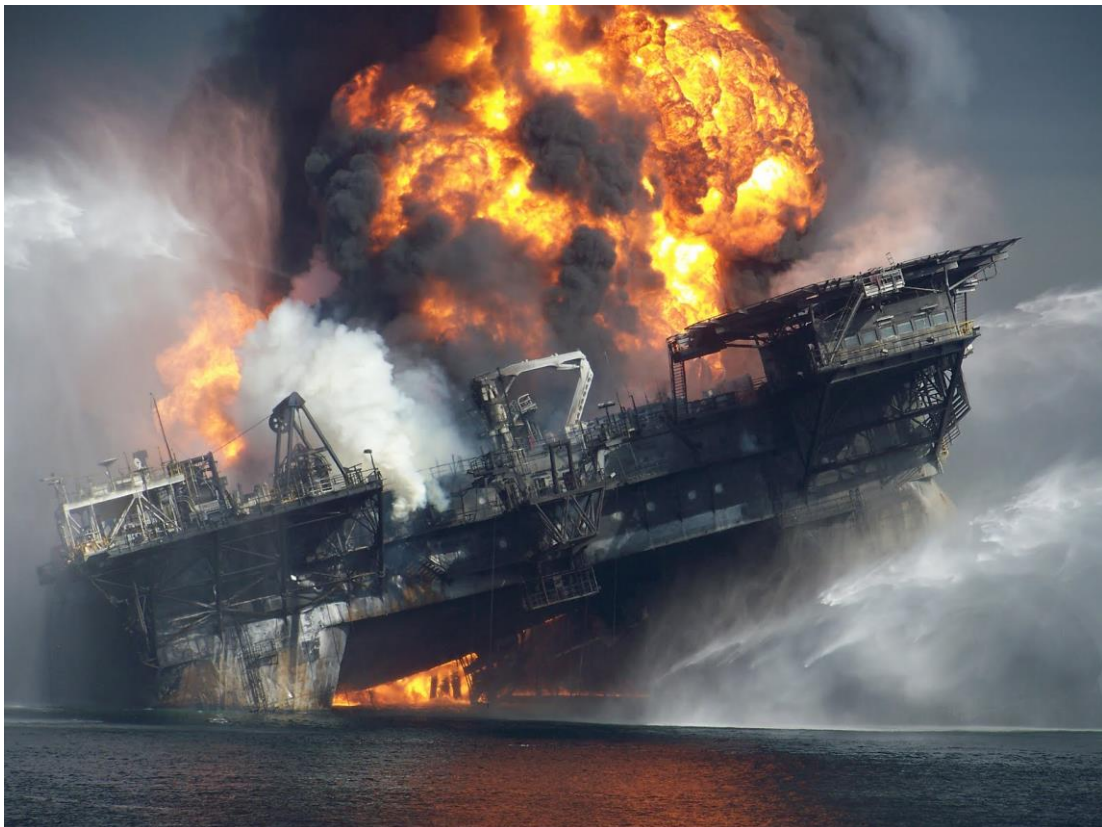
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντιμετώπιση εισροών και εκρήξεων σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων και ανάπτυξη σχετικής εφαρμογής σε προγραμματιστικό περιβάλλον



Πετράκης Ελευθέριος

Επιβλέπουσα : Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων.....	I
Ευχαριστίες.....	III
Περίληψη.....	IV
Abstract.....	V
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες	4
1.1. Βασική μεθοδολογία όρυξης της γεώτρησης.....	4
1.2. Επιλογή της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης	6
1.3. Σωλήνωση της γεώτρησης.....	8
1.4. Εισροή - Λάκτισμα και Έκρηξη (Kick & Blowout)	14
1.5. Αντικρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας	16
1.6. Γενική μέθοδος αντιμετώπισης	19
Κεφάλαιο 2 : Αιτίες εισροής στη γεώτρηση.....	20
2.1. Μείωση της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης	21
2.2. Μείωση του ύψους στήλης της λάσπης διάτρησης	23
Κεφάλαιο 3 : Ενδείξεις εισροής - Λήψη μέτρων αντιμετώπισης.....	27
3.1 Ενδείξεις εισροής.....	27
3.1.1. Κύριες Ενδείξεις	27
3.1.2. Δευτερεύουσες Ενδείξεις.....	31
3.2. Λήψη μέτρων αντιμετώπισης.....	33
Κεφάλαιο 4 : Συνθήκες στατικής ισορροπίας της γεώτρησης – Αέρια εισροή 35	
4.1. Κλείσιμο της γεώτρησης και ύπαρξη στατικών συνθηκών	35
4.1.1. Πίεση στήλης και πίεση δακτυλίου	36
4.2. Συνθήκες στατικής ισορροπίας της γεώτρησης	38
4.2.1. Πίεση στήλης σε στατικές συνθήκες (SIDPP _s)	38

4.2.2. Πίεση δακτυλίου σε στατικές συνθήκες (SICP _s).....	39
4.2.3. Υπολογισμός πυκνότητας της λάσπης εξουδετέρωσης.....	43
4.3. Αέρια εισροή	44
4.3.1. Υπεδαφική έκρηξη.....	45
4.3.2. Μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο (MASSP)	46
4.3.3. Εκτόνωση αέριας εισροής	47
Κεφάλαιο 5 : Μέθοδοι αντιμετώπισης και ελέγχου.....	49
5.1. Δυναμικές συνθήκες της γεώτρησης.....	49
5.1.1. Slow Circulation Rate	49
5.1.2. Πίεση στραγγαλισμού.....	50
5.1.3. Παροχή της λάσπης εξουδετέρωσης.....	50
5.2. Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή - Μέθοδος δύο κυκλοφοριών	51
5.3. Μέθοδος του Μηχανικού - Μέθοδος μιας κυκλοφορίας.....	58
5.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων	62
5.5. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου	64
Κεφάλαιο 6 : Υπολογιστικές εφαρμογές σε χερσαίες και υπεράκτιες γεωτρήσεις	66
6.1. Χερσαία γεώτρηση.....	66
6.2. Υπεράκτια γεώτρηση	75
6.2.1. Πτώση πίεσης λόγω τριβών στη γραμμή στραγγαλισμού.....	75
6.2.2. Υπολογιστική εφαρμογή	76
Κεφάλαιο 7 : Ανάπτυξη προγράμματος.....	85
7.1. Η ανάπτυξη του προγράμματος.....	85
7.2. Παραδοχές.....	89
7.3. Μελέτη Περίπτωσης.....	91
Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα	101
Βιβλιογραφία	103

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας είναι μια πρωτόγνωρη διαδικασία για κάθε φοιτητή και απαιτεί τόσο τεχνική όσο και πνευματική υποστήριξη. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Σταματάκη Σοφία, για την καθοδήγησή της και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε σε κάθε στάδιο της μελέτης. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη διαρκή υποστήριξη τους τόσο στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου.

Ε. Πετράκης

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνεται η μελέτη του φαινομένου της εισροής ρευστών σε γεωτρήσεις, που εμπεριέχονται στους πόρους των διατρυόμενων σχηματισμών. Το θέμα αρχικά προσεγγίζεται στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφοντας τις βασικές έννοιες ενός γεωτρητικού έργου όπως είναι ο αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας, η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας του ρευστού διάτρησης και η επιλογή του βάθους έδρασης των σωληνώσεων μιας γεώτρησης. Στα επόμενα δύο κεφάλαια, αναλύονται οι παράγοντες που συμβάλουν στην ύπαρξη εισροών καθώς και οι τρόποι με τους οποίους το προσωπικό της εξέδρας του γεωτρητικού έργου οφείλει να αναλύσει τις ενδείξεις στην επιφάνεια και να επιβεβαιώσει μια εισροή στη γεώτρηση. Εν συνεχεία, σημειώνονται οι σοβαρές επιπτώσεις που μπορούν να υπάρξουν στη περίπτωση που δεν εντοπιστεί και δεν αντιμετωπιστεί άμεσα μια εισροή. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις που προσδιορίζουν την φύση της εισροής· και επεξηγείται με ποιον τρόπο μια εισροή αερίου επιφέρει την κατάσταση σε μεγαλύτερο κίνδυνο. Επιπρόσθετα στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο, αναλύονται οι βασικές μέθοδοι αντιμετώπισης εισροών, οι μαθηματικές εξισώσεις εξισορρόπησης των πιέσεων στη γεώτρηση, καθώς και ο τρόπος αποτροπής περαιτέρω εισροών. Επιπλέον, πραγματοποιούνται υπολογιστικά παραδείγματα με εφαρμογή των αναλυμένων εξισώσεων και επεξηγείται ο τρόπος επιλογής της κατάλληλης μεθόδου αντιμετώπισης. Παρουσιάζεται η δημιουργία του σχετικού προγράμματος που υλοποιήθηκε στην πλατφόρμα ανάπτυξης Microsoft Visual Studio 2015, στο έβδομο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε ώστε να δέχεται τα δεδομένα μιας περίπτωσης εισροής σε ένα γεωτρητικό έργο και να επιστρέφει αποτελέσματα χρόνων αντιμετώπισης, πιέσεων κ.α. όπως επίσης να εμφανίζει τα διαγράμματα των πιέσεων που πρέπει να ακολουθηθούν για την ορθή αντιμετώπιση της εισροής. Τέλος, εξετάζεται μια μελέτη περίπτωσης εισροής σε ένα γεωτρητικό έργο που επιλύεται μέσω του προγράμματος· και στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Abstract

This diploma thesis includes the study of the phenomenon of influx of fluids into the borehole, that exist in the pores of the formations being drilled. The subject is initially approached in the first chapter by describing the basic concepts of a drilling project such as the blowout preventer, the selection of the appropriate density of the drilling mud and the choice of the depth of the casing (casing shoe). In the next two chapters, the factors that contribute to the existence of these influxes are analyzed as well as the ways in which the crew of the drilling rig must observe the warning signs and confirm an inflow into the borehole. Thereafter, the serious consequences that may occur are noted in case of an inflow that is not detected and not addressed directly. In the fourth chapter, the mathematical equations that determine the nature of the inflow are analyzed; and explanations are given on how an inflow of gas brings the situation to a greater risk. Moreover, in the fifth and sixth chapter, the basic methods of dealing and prevent further influxes are developed, using the mathematical equations of the equilibrium pressures of the borehole. Furthermore, mathematical examples are performed by applying the analyzed equations and the way to choose the appropriate method to restore the well is explained. The creation of the relevant program implemented in Microsoft Visual Studio 2015 is presented, in the seventh chapter. The program was developed to accept the data of an influx at a drilling project and to return the results of pressures, time of restoration etc. It also presents the graphs of the pressures that have to be followed to properly address the influx. Finally, a case study of an occurred influx into the borehole of a drilling project is solved through the program that was developed; and in the last chapter the conclusions of the thesis are presented.

Εισαγωγή

Στα τέλη του 19^{ου}, αρχές του 20^{ου} αιώνα η εικόνα ενός πίδακα πετρελαίου που εκτινασσόταν από μια γεώτρηση, αποτελούσε παραλληλισμό του νεοπλουτισμού της έρευνας πετρελαίου. Εκείνη την περίοδο, οι απλές τεχνικές διάτρησης και η έλλειψη αντiekρηκτικών μηχανισμών ασφαλείας καθιστούσαν αδύνατο τον έλεγχο των ταμιευτήρων υδρογονανθράκων υψηλών πιέσεων. Όταν μια τέτοια ζώνη υψηλής πίεσης διατρώονταν, το υπερπυεσμένο πετρέλαιο ή αέριο ανερχόταν στην επιφάνεια σχηματίζοντας πίδακα δεκάδων μέτρων.

Οι πίδακες αυτοί, ανεξαρτήτως του το ότι αποτελούσαν σύμβολα του πυρετού του μαύρου χρυσού, ήταν επικίνδυνοι και πολυδάπανοι. Πολλοί εργαζόμενοι στις εγκαταστάσεις εξόρυξης χάσανε τη ζωή τους εξαιτίας των εκρήξεων των ανεξέλεγκτων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων. Εξοπλισμοί καταστράφηκαν και χιλιάδες βαρέλια πετρελαίου επικάλυψαν τα γειτονικά εδάφη. Η επίπτωση στην πανίδα και γενικώς το οικολογικό αποτύπωμα, χαρακτηρίζεται ως δραματικό και μακροχρόνιο.

Το 1924 ο πρώτος επιτυχής αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας εμπορευματοποιήθηκε. Ο μηχανισμός είχε την ικανότητα να σφραγίζει τη γεώτρηση όταν κάποια υπερπυεσμένη ζώνη διατρώονταν, προτού τα ρευστά δημιουργήσουν μία έκρηξη· καθιστώντας εφικτή την εφαρμογή μεθόδων επαναφοράς του ελέγχου των πιέσεων στο πηγάδι. Καθώς η τεχνολογία εξελισσόταν, οι πίδακες πετρελαίου αποτελούσαν πλέον παρελθόν.

Στη σύγχρονη βιομηχανία υδρογονανθράκων, οι εκρήξεις στις εγκαταστάσεις παραγωγής είναι συγκριτικά σπάνιες. Υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη στην τεχνολογία, στις τεχνικές ελέγχου των γεωτρήσεων και στην εκπαίδευση του προσωπικού των εγκαταστάσεων, συνθήκες που αποτέλεσαν αρωγό στην αποτροπή των εκρήξεων.

Πλέον όμως, οι γεωτρήσεις φτάνουν σε πολύ μεγάλα βάθη, συνεπώς και οι πιέσεις που αντιμετωπίζονται είναι εξίσου μεγάλες. Μία έκρηξη στη σημερινή εποχή, συνήθως συνεπάγεται με τεράστια προβλήματα. Το οικονομικό κόστος μιας έκρηξης είναι γιγαντιαίο, ωστόσο είναι η λιγότερο σεβαστή

συνέπεια. Ανεπανόρθωτες ζημιές στο περιβάλλον, σπατάλη πολύτιμων πόρων, καταστροφή εξοπλισμού και σημαντικότερα, η απώλεια της ασφάλειας ή και της ζωής των μελών του προσωπικού. Η επαναφορά ελέγχου μιας γεώτρησης που εξεράγει μπορεί να κρατήσει πολλές μέρες, χρονικό διάστημα κατά το οποίο τεράστιος όγκος ρευστών θα εκρέει ανεξέλεγκτα με τραγικές συνέπειες για το περιβάλλον.

Αναφορικά, στις 20 Απριλίου 2010, συνέβη η μεγαλύτερη έκρηξη σε γεώτρηση υδρογονανθράκων για τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η έκρηξη έλαβε χώρα στο Deerwater Horizon, μία κινούμενη πλευστή εξέδρα για υπεράκτιες γεωτρήσεις στον κόλπο του Μεξικού. Ήταν ιδιοκτησία της Transocean και λειτουργούσε με συμβόλαιο της BP όταν συνέβη η έκρηξη. Έντεκα ζωές χάθηκαν στο συμβάν. Εκτιμάται πως η αρχική εκροή ήταν 62.000 βαρέλια ανά ημέρα. Ο ακριβής όγκος της πετρελαιοκηλίδας που δημιουργήθηκε δεν είναι γνωστός, όμως υπολογίζεται πως ήταν 4,9 εκατομμύρια βαρέλια (780 εκατομμύρια λίτρα). Η γεώτρηση σφραγίστηκε στις 19 Σεπτεμβρίου, 87 ημέρες μετά την έκρηξη. Στις αρχές του 2012 υπήρχαν ακόμη αναφορές ότι η γεώτρηση συνέχιζε να διαρρέει. Είναι εμφανείς οι τραγικές συνέπειες που υπήρξαν για το περιβάλλον και την άγρια ζωή της ευρύτερης περιοχής.

Ο έλεγχος των πιέσεων της γεώτρησης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πτυχές ενός γεωτρητικού έργου. Ο ακατάλληλος χειρισμός των εισροών που πιθανώς να υπάρξουν σε μια γεώτρηση, μπορεί να οδηγήσει σε μία έκρηξη με σοβαρές συνέπειες. Υπάρχουν μεθοδολογίες επιβεβαίωσης και αντιμετώπισης μιας εισροής, οι οποίες εάν εκτελεστούν σωστά, δύναται να αποτρέψουν τις εκρήξεις και τις καταστροφικές συνέπειες αυτών. Αξίζει να σημειωθεί πως απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ορθή επιλογή ενός απόλυτα λειτουργικού αντικερηκτικού μηχανισμού ασφαλείας.

Σε αυτή την εργασία, αναλύεται το πως μια εισροή που λαμβάνει χώρα σε μια γεώτρηση· μπορεί να επιφέρει μία έκρηξη στην εγκατάσταση της επιφάνειας. Επίσης, αναλύονται οι τρόποι διαπίστωσης και επιβεβαίωσης μιας εισροής καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισης και επαναφοράς του ελέγχου των πιέσεων της γεώτρησης. Παρατίθενται αριθμητικά παραδείγματα αντιμετώπισης εισροών και ο τρόπος επιλογής της βέλτιστης μεθόδου αντιμετώπισης.

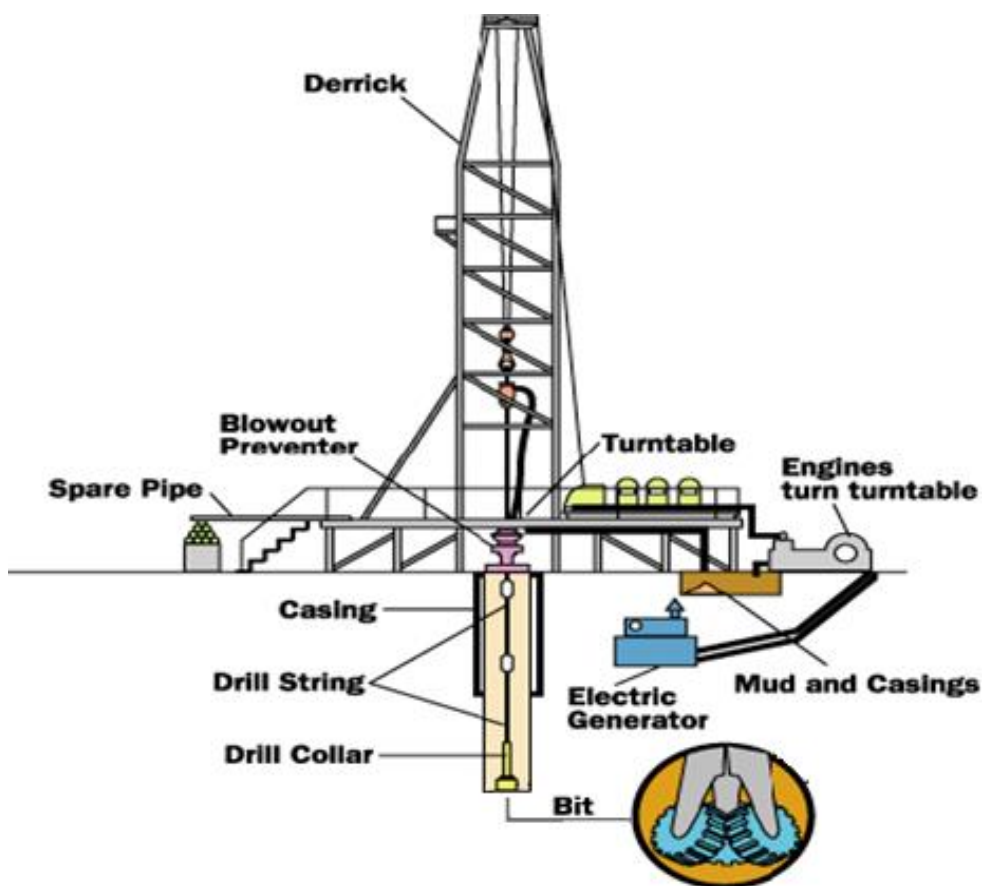
Εν κατακλείδι, αναλύεται η ανάπτυξη σχετικού προγράμματος που δημιουργήθηκε. Το πρόγραμμα δέχεται τα δεδομένα μιας γεώτρησης και εισροής και υπολογίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα για την αντιμετώπιση της, με παρουσίαση των απαραίτητων διαγραμμάτων εκτόνωσης των πιέσεων.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες

1.1. Βασική μεθοδολογία όρυξης της γεώτρησης

Σε ένα γεωτρητικό έργο, για τη διασφάλιση του προσωπικού και της εγκατάστασης· απαιτείται η διατήρηση της κατάλληλης υδροστατικής πίεσης που ασκείται από το *ρευστό διάτρησης* συναρτήσει του βάθους της γεώτρησης. Όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια, η συνθήκη αυτή· είναι κρίσιμη για την αποτροπή εισροών στο πηγάδι από τα ρευστά που εμπεριέχονται στους πόρους των περιβαλλόντων σχηματισμών.

Για λόγους εισαγωγής στο θέμα της εργασίας δίδεται μια σύντομη περιγραφή της βασικής μεθοδολογίας όρυξης μιας γεώτρησης. Η αποσύνθεση του πετρώματος γίνεται εφικτή με περιστροφή και άσκηση βάρους επί του κοπτικού άκρου (*drill bit*), Σχήμα (1.1). Στην περιστροφική διάτρηση χρησιμοποιούνται τρίκωνα κοπτικά άκρα τα οποία φέρουν οδόντες· είτε κοπτικά άλλου τύπου, όπως αδαμαντοκορώνες.



Σχήμα (1.1) : Σχηματική διάταξη περιστροφικού γεωτρήσανου ξηράς

Από την περιστροφική τράπεζα (*turntable*), η οποία εδράζεται επί της πλατφόρμας του γεωτρύπανου, μεταδίδεται η περιστροφική κίνηση στη διατρητική στήλη (*drill string*) και μέσω αυτής στο κοπτικό άκρο (*drill bit*).

Η διατρητική στήλη πρόκειται για σχεδιασμένη κατάλληλα συνδεσμολογία σωληνοειδών, μέσω της οποίας διοχετεύεται το *ρευστό διάτρησης* (λάσπη διάτρησης) εντός της γεώτρησης. Η λάσπη διάτρησης εισπιέζεται μέσα στη διατρητική στήλη μέχρι το κοπτικό άκρο, και επιστρέφει στην επιφάνεια, μέσω του διάκενου μεταξύ της στήλης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης (*δακτύλιος γεώτρησης, annular*). Η συνεχής κυκλοφορία της λάσπης μεταφέρει τα θρύμματα του πετρώματος στην επιφάνεια, ώστε το μέτωπο κοπής να είναι συνεχώς ελεύθερο από τα προκύπτοντα θρύμματα.

Η δύναμη (βάρος) επί του κοπτικού ασκείται μέσω των αντίβαρων (*Drill Collar*), είτε και μέσω των βαριών διατρητικών στελεχών (*Heavy Weight Drill Pipes*). Τα αντίβαρα είναι σωληνοειδή στελέχη με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων τα οποία τοποθετούνται στη διατρητική στήλη αμέσως πάνω από το κοπτικό άκρο. Τα αντίβαρα και τα βαριά διατρητικά στελέχη αποτελούν την κατώτερη συνδεσμολογία της διατρητικής στήλης. (*BHA – Bottom Hole Assembly*)



Η προχώρηση σε μεγαλύτερα βάθη γίνεται σταδιακά προσθέτοντας διατρητικά στελέχη (*Drill Pipes*), αυξάνοντας το μήκος της διατρητικής στήλης. Τα διατρητικά στελέχη έχουν συνήθως μήκος 9 μέτρα (30 πόδια), και συνδέονται μεταξύ τους είτε αλληκοχλιούμενα· είτε με ειδικούς συνδέσμους, όπως όλα τα σωληνοειδή στελέχη της διατρητικής στήλης.

Ενώ η σειρά των διατρητικών στελεχών σχεδιάζεται για να λειτουργεί υπό εφελκυσμό, η κατώτερη συνδεσμολογία λειτουργεί υπό θλίψη, προκειμένου να υποστηρίξει την άσκηση του απαιτούμενου βάρους επί του κοπτικού. Η μετάβαση από την κατάσταση εφελκυσμού στην κατάσταση θλίψης γίνεται ομαλά, με το ουδέτερο σημείο να μετατοπίζεται στο μήκος εκείνων των βαριών διατρητικών στελεχών που έχουν αυξημένη αντοχή σε σχέση με τα συνήθη στελέχη.

1.2. Επιλογή της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης

Το ρευστό διάτρησης αποτελεί μία από τις πλέον βασικές παραμέτρους που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση μιας γεώτρησης. Χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη πυκνότητα που καθορίζεται από τις παραμέτρους του γεωλογικού περιβάλλοντος εντός του οποίου ορύσσεται η γεώτρηση. Εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς εκτός από την μεταφορά των θρυμμάτων στην επιφάνεια, όπως το να ψύχει και να λιπαίνει το κοπτικό άκρο, να μεταδίδει ενέργεια στον κινητήρα πυθμένα, να παρέχει χρήσιμες γεωλογικές πληροφορίες, αλλά και ταυτοχρόνως να *μην επιτρέπει εισροές στη γεώτρηση*.

Η υδροστατική πίεση που ασκείται σε κάθε σημείο (βάθος) της γεώτρησης (πηγάδι) εξαρτάται από το ύψος της στήλης του ρευστού διάτρησης (λάσπης) και την πυκνότητα του. Γνωστό, για παράδειγμα, είναι ότι μία στήλη νερού (πυκνότητα 1g/cm^3) ύψους 10 μέτρων, δημιουργεί υδροστατική πίεση $1\text{kg/cm}^2 = 1\text{atm}$ (14.6959psi) στο βάθος αυτό. Αντίστοιχα η πίεση που ασκεί το ρευστό διάτρησης προς τον περιβάλλοντα σχηματισμό ποικίλλει ανάλογα με το βάθος και την πυκνότητα.

- Πιέσεις που επικρατούν στους διατρυόμενους σχηματισμούς

Η πίεση που ασκούν τα ρευστά που εμπεριέχονται στους πόρους του πετρώματος είναι γνωστή ως **πίεση πόρων του σχηματισμού, pore pressure** ή **πίεση του σχηματισμού, formation pressure (Pf)**.

Εάν η πίεση αυτή υπερβεί την πίεση που ασκεί η λάσπη διάτρησης στα τοιχώματα της γεώτρησης, τότε τα ρευστά που εμπεριέχονται στους πόρους του σχηματισμού θα εισέλθουν στο πηγάδι· γεγονός που, όπως θα γίνει αντιληπτό αργότερα, είναι πολύ επικίνδυνο. Αυτή η εισροή ρευστών στο πηγάδι είναι γνωστή στα γεωτρητικά έργα με τον όρο «**Kick**».

Από την ανάλυση δεδομένων γεωφυσικών διαγραφιών εντός των γεωτρήσεων ή από την αξιολόγηση γεωτρητικών δεδομένων είναι δυνατή η εκτίμηση της πίεσης πόρων των σχηματισμών, τόσο κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός γεωτρητικού έργου (χρησιμοποιώντας δεδομένα από γεωτρήσεις που έχουν ορυχθεί στην ευρύτερη περιοχή), όσο και κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας γεώτρησης (με τη χρήση επιτόπου δεδομένων).

Εφόσον υπάρχει η εκτίμηση για την πίεση πόρων των σχηματισμών του υπεδάφους, σχεδιάζεται η πυκνότητα που θα πρέπει να έχει η λάσπη διάτρησης, ώστε η στήλη της να δημιουργεί υδροστατική πίεση μεγαλύτερη από αυτή του σχηματισμού (**Pf**) σε κάθε βάθος.

Για παράδειγμα, εάν ένας σχηματισμός είχε πυκνότητα 2 τόνους ανά κυβικό μέτρο και εκτεινόταν ομοιόμορφα για 10 μέτρα εις βάθος από την επιφάνεια, η πίεση σε αυτό το σημείο θα μπορούσε να υπολογιστεί από τον τύπο $P=\rho gh$ όπου P · η πίεση, ρ · η πυκνότητα του πετρώματος, g · η επιτάχυνση της βαρύτητας, h · το βάθος.

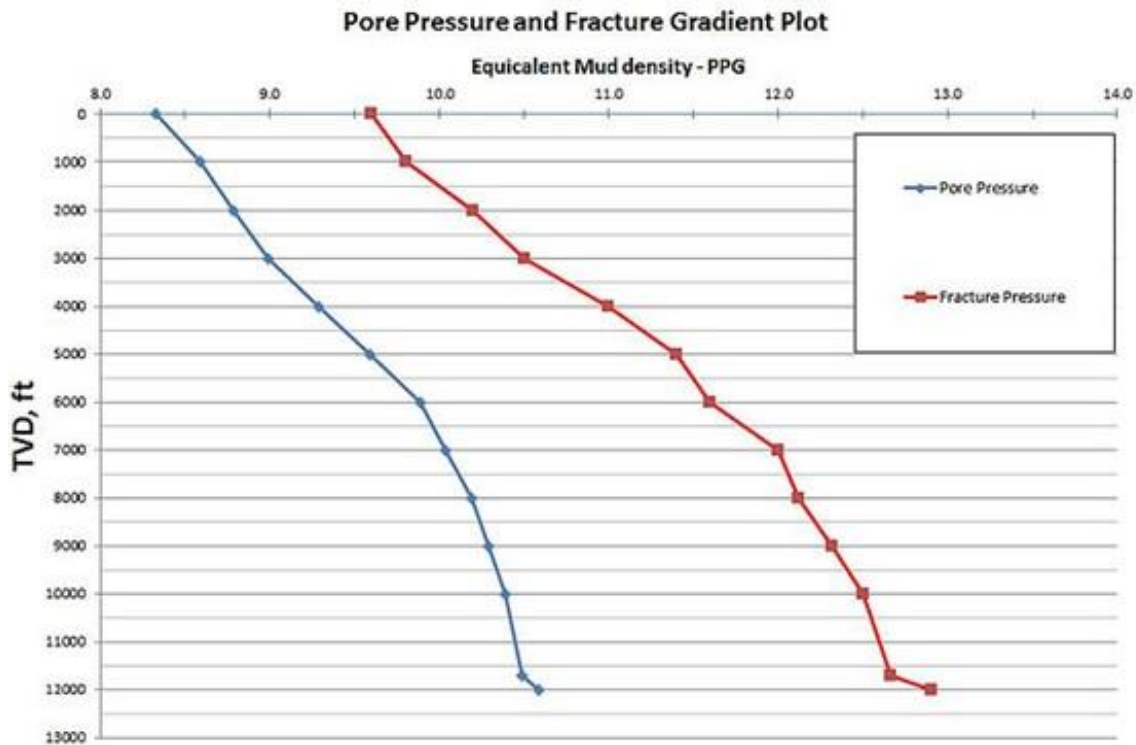
$$P = \frac{kg}{m^3} \times \frac{m}{s^2} \times m = \frac{kg \times m}{s^2} \times \frac{1}{m^2} = \frac{N}{m^2} \quad (1.1)$$

Άρα η πίεση θα ήταν $196 \frac{KN}{m^2} = 196 \text{ KPa}$ στο βάθος των 10 μέτρων. Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε, η υδροστατική της στήλη να ασκεί σε αυτό το σημείο πίεση μεγαλύτερη από 196 KPa . Η πυκνότητα της θα βρεθεί επίσης με τον τύπο $P=\rho gh$, αυτή την φορά ο άγνωστος θα είναι η πυκνότητα ρ .

- Πίεση ρωγμάτωσης σχηματισμού

Κάθε σχηματισμός έχει μια μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί πριν ρωγματωθεί. Στην περίπτωση όπου η πίεση που ασκεί το ρευστό διάτρησης είναι μεγαλύτερη από την τάση ρωγμάτωσης, τότε πιθανόν ο σχηματισμός να ρωγματωθεί ανεξέλεγκτα, με επακόλουθο την απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης και την απώλεια ελέγχου της γεώτρησης.

Η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης λοιπόν, και κατά συνέπεια η πίεση που ασκεί με το βάθος, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την **πίεση πόρων του σχηματισμού (Pore Pressure)** αλλά παράλληλα να μην υπερβαίνει την **πίεση ρωγμάτωσης (Fracture Pressure)** του.



Διάγραμμα (1.1) : Πίεση πόρων και πίεση ρωγμάτωσης σχηματισμών

Στο Διάγραμμα (1.1) παρουσιάζονται οι πιέσεις αυτές συναρτήσει του βάθους. Με το μπλε χρώμα, αναπαριστάται η πίεση πόρων του σχηματισμού (**Pore Pressure**), ενώ με το κόκκινο χρώμα αναπαριστάται η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού (**Fracture Pressure**).

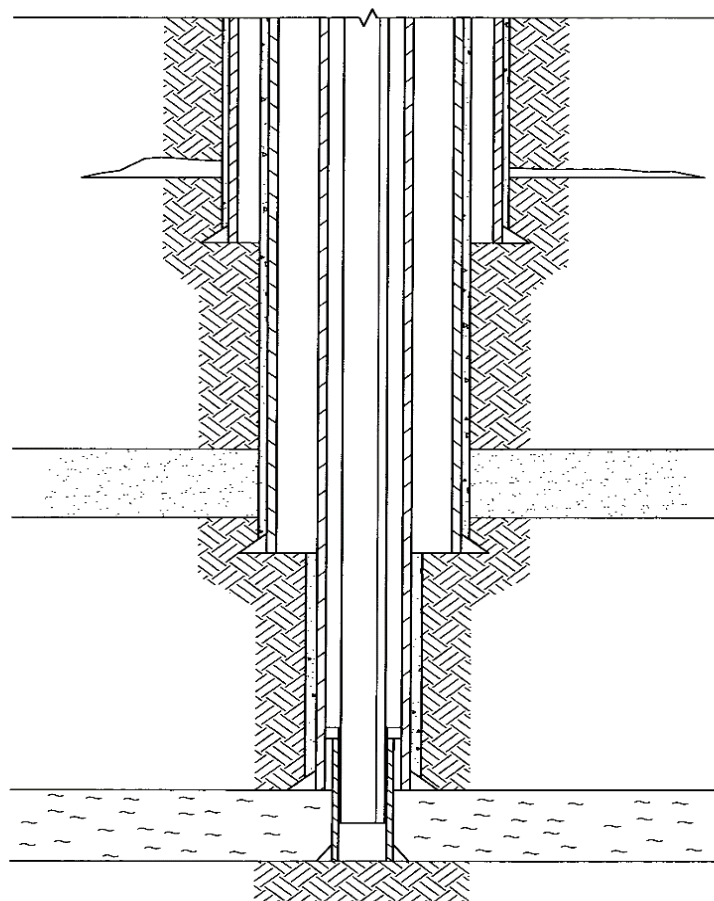
Ως είναι φανερό, οι δύο πιέσεις δεν αυξάνονται απόλυτα αναλογικά με το βάθος, καθώς στο υπέδαφος υπάρχουν εναλλαγές από διαφορετικά στρώματα πετρώματος· και υπάρχουν διαφορές στη διαπερατότητα και το πορώδες αυτών των στρωμάτων ανά το βάθος. Το περιθώριο ανάμεσα σε αυτές τις δύο πιέσεις, σε σχέση με το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί κατάλληλα η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης· ώστε η πίεση που ασκεί με το βάθος να βρίσκεται πάντοτε εντός αυτού του περιθωρίου, είναι γνωστό ως «**Drilling Window**».

1.3. Σωλήνωση της γεώτρησης

Όπως αναφέρθηκε, από το Διάγραμμα (1.1) φαίνεται πως η πίεση πόρων του πετρώματος όπως και η πίεση ρωγμάτωσης του· δεν αυξάνονται απόλυτα αναλογικά με το βάθος. Αντίθετα, η υδροστατική πίεση της στήλης ενός ρευστού διάτρησης με ορισμένη πυκνότητα αυξάνεται αναλογικά. Αυτό καθιστά αδύνατη την χρησιμοποίηση λάσπης της ίδιας πυκνότητας σε όλο το

έργο· καθώς σε κάποια σημεία ανά το βάθος το πέτρωμα θα ρωγματώνονταν και σε άλλα η πίεση πόρων του σχηματισμού θα υπερέβαινε την πίεση του ρευστού διάτρησης, με αποτέλεσμα την ύπαρξη εισροών.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη σωλήνωση του πηγαδιού (**casing**), καθώς με αυτό τον τρόπο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ρευστό διάτρησης μεγαλύτερης πυκνότητας που να ασκεί πίεση μεγαλύτερη αυτής των πόρων του σχηματισμού στο μέγιστο βάθος κατά την προχώρηση της όρυξης, που φυσιολογικά όμως θα ξεπερνούσε την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού σε ένα μικρότερο βάθος. Η ρωγμάτωση δεν λαμβάνει χώρα διότι η πίεση που ασκεί το ρευστό διάτρησης σε μικρότερα βάθη από το βάθος έδρασης της σωλήνωσης (**casing shoe**)· ασκείται πλέον στα εσωτερικά τοιχώματά της.



Σχήμα (1.2) : Ανάπτυξη σωληνώσεων γεώτρησης

Τονίζεται ότι η σωλήνωση του κάθε σταδίου της γεώτρησης· δεν αρχίζει από το βάθος που τελειώνει η αμέσως μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνωση του προηγούμενου σταδίου, αλλά φτάνει μέχρι την επιφάνεια όπου και

στερεώνεται (τεχνική εξαίρεση η σωλήνωση «liner»). Παρατηρείται μεγάλη επικάλυψη σωληνώσεων διαφορετικών διαμέτρων στα ανώτερα τμήματα της γεώτρησης, όπως γίνεται φανερό από το Σχήμα (1.2).

- Διαδικασία σωλήνωσης

Απαραίτητο είναι να εκτελεστούν ορισμένες μετρήσεις-διαγραφές (*loggings*) πριν καταβιβαστεί η σωλήνωση στη γεώτρηση. Αυτές οι μετρήσεις θα προσδιορίσουν με ακρίβεια τον όγκο του διάκενου μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης ώστε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ποσότητα γαλακτώματος τσιμέντου, το οποίο απαιτείται για την ασφαλή σύνδεση της σωλήνωσης με τον σχηματισμό. Επίσης, προσδιορίζεται ο χρόνος πήξης του τσιμέντου, ιδιαίτερα σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους όπου η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό παράγοντα.

Η διαδικασία σωλήνωσης ενός πηγαδιού απαιτεί αρχικά την ανέλκυση της διατρητικής στήλης από τη γεώτρηση, ενέργεια γνωστή ως **μανούβρα** ή «**tripping**». Απόλυτα σημαντικό είναι το γεγονός ότι το πηγάδι πρέπει να είναι πάντα πλήρες με λάσπη, ακόμα και μετά από μια διαδικασία μανούβρας όπου η γεώτρηση μένει κενή (δίχως διατρητική στήλη). καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα υπήρχαν εισροές στη γεώτρηση.

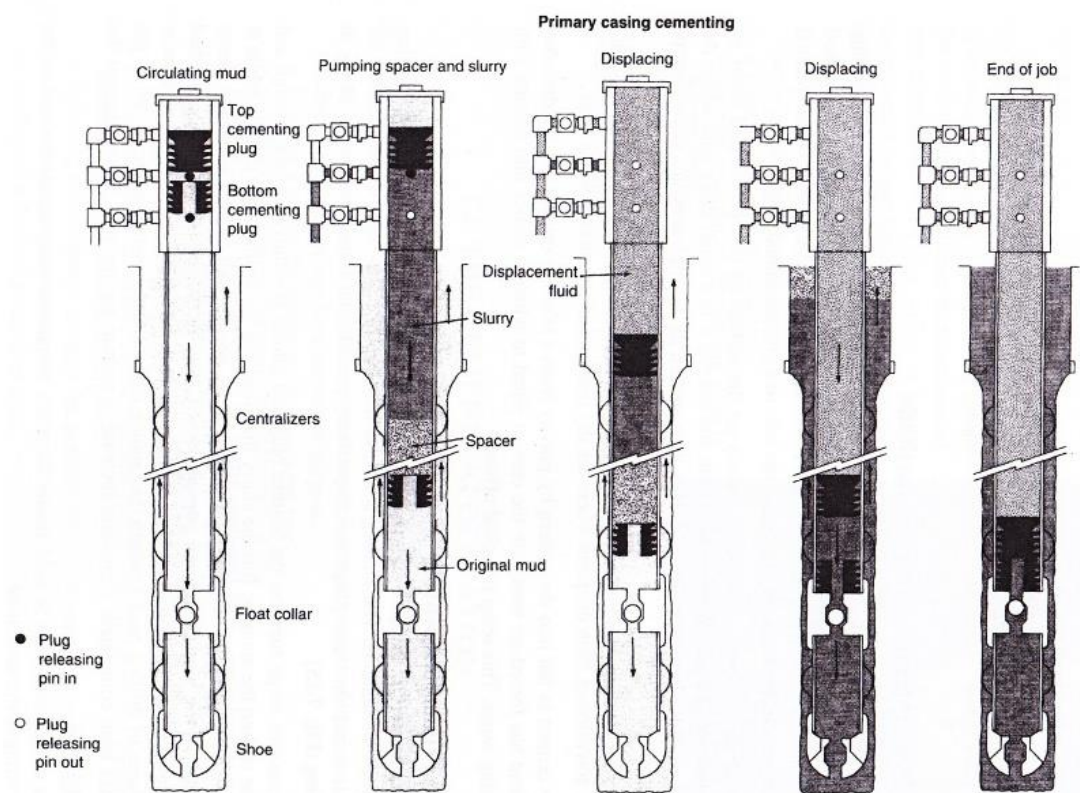
Η στήλη σωλήνωσης καθελκύεται μέχρι το βάθος έδρασης, συνδέοντας διαδοχικά τα στελέχη της σωλήνωσης. Τυπικά τα στελέχη σωλήνωσης έχουν μήκος 12 μέτρα και κάθε στέλεχος είναι εφοδιασμένο με εξωτερικό ή εσωτερικό σπείρωμα στα άκρα· όπου και γίνεται η συνδεσμολογία μεταξύ τους. Η σωλήνωση θα πρέπει να κατέβει όσο το δυνατό πιο γρήγορα, καθώς ο χρόνος που απαιτείται είναι μη παραγωγικός (όπως ισχύει για κάθε είδους μανούβρα).

- Διαδικασία βασικής τσιμεντώσης

Από τις μετρήσεις (*loggings*) υπολογίζεται ο όγκος και η σύσταση του μίγματος υλικών με βάση το τσιμέντο, γνωστό με τον όρο πολφός ή γαλάκτωμα (*slurry*), που θα πρέπει να παρασκευαστεί. Ο πολφός θα πληρώσει το δακτύλιο μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων του

πηγαδιού· μέχρι το απαιτούμενο βάθος πάνω από το σημείο έδρασης της σωλήνωσης. Μετά τη στερεοποίηση του μίγματος, σε ένα συμπαγές και αδιαπέρατο υλικό, επιτυγχάνεται η ασφαλής σύνδεση της σωλήνωσης με το σχηματισμό.

Αρχικά πραγματοποιείται συνεχής κυκλοφορία λάσπης διάτρησης μέσα στη γεώτρηση ώστε να επιτευχθεί πλήρης καθαρισμός του πηγαδιού. Στην κορυφή της σωλήνωσης τοποθετούνται δύο πώματα (*plugs*) και ο πολφός του τσιμέντου διοχετεύεται μεταξύ των δύο μέσω της κεφαλής τσιμέντωσης. Με την εισπίεση του τσιμέντου· το κατώτερο πώμα, το οποίο φέρει διάφραγμα συγκεκριμένης αντοχής, «οδηγείται» στο υποστηρικτικό κολάρο (*float collar*) που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση. Συνεχίζοντας την εισπίεση το διάφραγμα διαρρηγνύεται, επιτρέποντας στον πολφό να διέλθει και να καταλάβει το διάκενο μεταξύ σωλήνωσης και του περιβάλλοντος σχηματισμού.



Σχήμα (1.3) : Βασική τσιμέντωση γεώτρησης

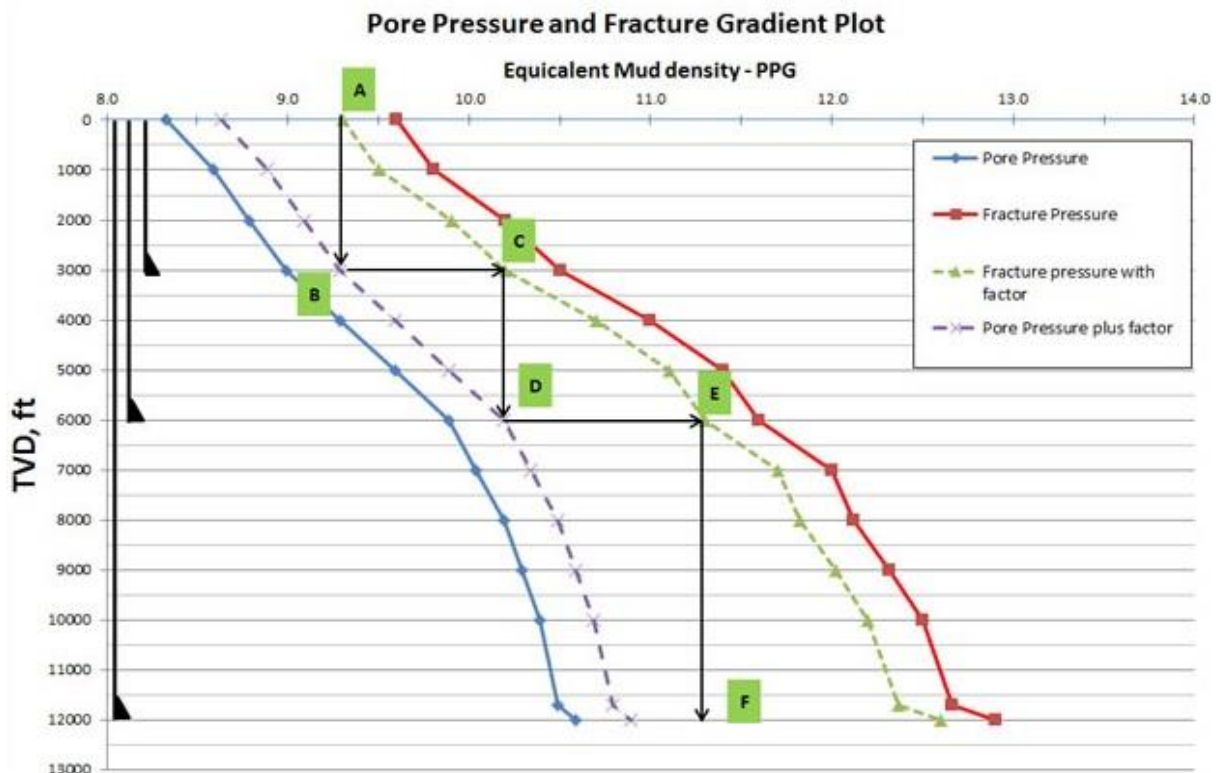
Όταν διοχετευθεί ο απαιτούμενος όγκος τσιμέντου η εισπίεση σταματά και η βαλβίδα κορυφής της κεφαλής τσιμέντωσης τίθεται σε λειτουργία. Μέσω αυτής εισπνέζεται λάσπη διάτρησης· «οδηγώντας» το ανώτερο συμπαγές πώμα μέσα στη σωλήνωση έως ότου επικαθήσει στο κατώτερο πώμα,

εκτοπίζοντας τον όγκο του πολφού τσιμέντωσης στον εξωτερικό δακτύλιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα (1.3). Αφού στερεοποιηθεί ο πολφός, το πώμα διαρρηγνύεται από το κοπτικό άκρο που επιλέγεται για τα επόμενα βάρη. Η βασική τσιμέντωση μπορεί να εκτελεστεί ενιαία, όπως έχει περιγραφεί ανωτέρω, ή κατά περισσότερα στάδια.

Η όρυξη συνεχίζεται με κοπτικό άκρο και διατρητικά στελέχη τα οποία φυσικά είναι μικρότερης διαμέτρου από τα προηγούμενα χρησιμοποιούμενα, καθώς θα εισέρχονται μέσα από τη σωλήνωση.

- Σχεδιασμός σωληνώσεων

Η εκτίμηση του αριθμού των σωληνώσεων και του βάθους έδρασης κάθε μιας βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση των κριτηρίων ότι η πίεση της λάσπης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση πόρων και ταυτόχρονα μικρότερη από την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού σε κάθε βάθος.



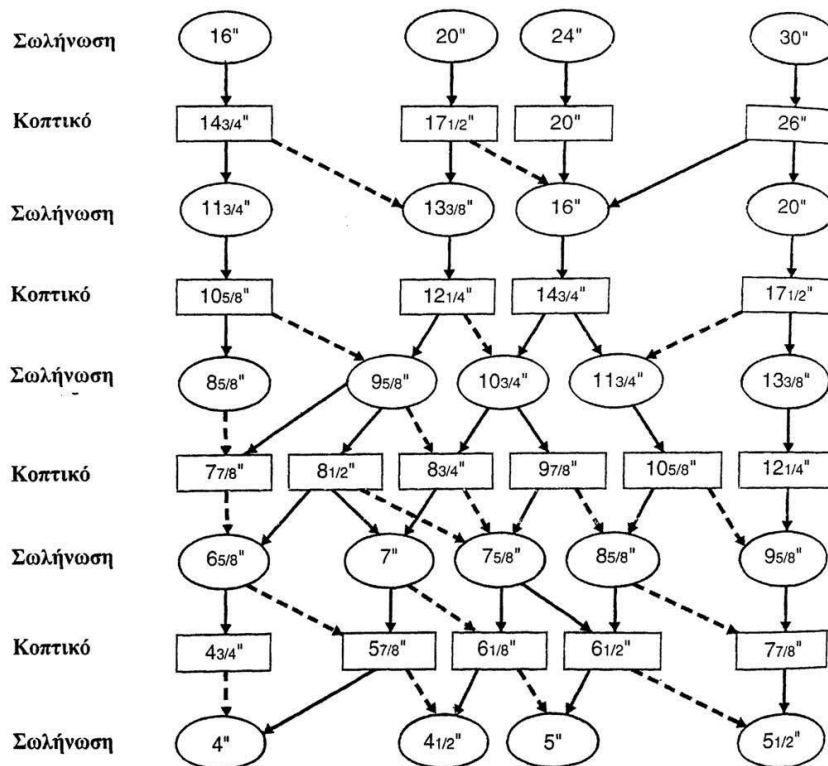
Διάγραμμα (1.2) : Επιλογή βάθους έδρασης σωληνώσεων

Ως εκ τούτου, η αποτύπωση των τιμών αυτών των πιέσεων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα (1.2). Για λόγους ασφαλείας οι καμπύλες των πιέσεων που ασκούνται με το βάθος έχουν μετατοπιστεί. Η μπλε καμπύλη, που αντιπροσωπεύει την πίεση πόρων (**Pore Pressure**), αυξάνεται παράλληλα (200-300 psi) ώστε η πίεση της λάσπης να είναι μεγαλύτερη. Η κόκκινη

καμπύλη μετατοπίζεται μειούμενη ώστε ο σχεδιασμός της υδροστατικής πίεσης που θα ασκεί η στήλη της λάσπης να μην προσεγγίζει το ανώτατο όριο ρωγμάτωσης του σχηματισμού (**Fracture Pressure**).

Η εκτίμηση του βάθους έδρασης των σωληνώσεων ξεκινά για την κατώτερη σωλήνωση που θα τοποθετηθεί και διαδοχικά για τις υπόλοιπες προς την επιφάνεια (bottom-up approach).

Στο Διάγραμμα (1.2) τονίζονται τα σημεία στα οποία είναι απαραίτητη η τοποθέτηση σωλήνωσης. Επιλέγοντας το σημείο έδρασης της τελευταίας (παραγωγικής) σωλήνωσης, στο σημείο F με ρευστό διάτρησης πυκνότητας 11,4 rpg (rounds per gallon, *lb/gal*), προσδιορίζονται τα βάθη έδρασης των υπολοίπων σωληνώσεων. Λάσπη με πυκνότητα 11,4 rpg μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως ότου η υδροστατική της πίεση να είναι μεγαλύτερη από την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού (σημείο E). Στο βάθος αυτό θα πρέπει μειωθεί η πυκνότητα της λάσπης (10,25 rpg) (σημείο D). Η συγκεκριμένη λάσπη μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως το σημείο C, με βάση το ίδιο κριτήριο· και η ίδια λογική συνεχίζεται έως την επιφάνεια. Βέβαια, ενώ ο σχεδιασμός γίνεται «από κάτω προς τα πάνω», οι διαδικασίες αυτές εξελίσσονται αντίστροφα.



Σχήμα (1.4) : Επιλογή μεγέθους κοπτικού

Αντίστοιχα, επιλέγονται τα βάθη έδρασης των υπόλοιπων απαραίτητων σωληνώσεων για τη γεώτρηση (bottom-up approach). Το μέγεθος κάθε σωλήνωσης καθορίζεται από την εσωτερική διάμετρο που θα πρέπει να έχει η στήλη της παραγωγικής σωλήνωσης και τον αριθμό των στηλών ενδιάμεσης σωλήνωσης που απαιτούνται ώστε η γεώτρηση να φτάσει στο βάθος-στόχο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (1.4).

1.4. Εισροή - Λάκτισμα και Έκρηξη (Kick & Blowout)

Ο έλεγχος ασφαλείας του έργου απαντάται στη διατήρηση της κατάλληλης υδροστατικής πίεσης που ασκεί η στήλη του ρευστού διάτρησης σε κάθε σημείο στο ανοικτό, μη σωληνωμένο (**open hole**), τμήμα της γεώτρησης.



Εικόνα(1.1) Έκρηξη σε υπεράκτια γεώτρηση

Στην περίπτωση όπου ο έλεγχος χαθεί, δηλαδή υπάρξουν απώλειες της λάσπης διάτρησης προς τον περιβάλλοντα σχηματισμό (πίεση μεγαλύτερη από την πίεση ρωγμάτωσης) ή λάβει χώρα εισροή ρευστών που εμπεριέχονται στους πόρους του περιβάλλοντα σχηματισμού (πίεση που δεν είναι αρκετή για να εξισορροπήσει την πίεση πόρων του σχηματισμού), πρέπει άμεσα να γίνουν ενέργειες ώστε να επαναφέρουν τη γεώτρηση σε πλήρη έλεγχο.

Ιδιαίτερα σε εισροή ρευστών στο πηγάδι (**Kick**), εάν δεν γίνουν άμεσα οι απαραίτητες ενέργειες για την αποτροπή της, το αποτέλεσμα είναι καταστροφικό. Η ανεξέλεγκτη εισροή, ιδιαίτερα εάν πρόκειται για αέρια εισροή, μπορεί να προκαλέσει εκτίναξη όλου του υπεδαφικού συστήματος, εκρήξεις και πυρκαγιές, φαινόμενο γνωστό ως «**Blowout**», όπως φαίνεται στην Εικόνα (1.1) για τη σημερινή εποχή ή όπως στην Εικόνα (1.2) για τις αρχές του 20^{ου} αιώνα



Εικόνα (1.2) : Πίδακας πετρελαίου 1901, Τέξας

Εάν συμβεί μία έκρηξη, οι συνέπειες είναι πολύ σοβαρές. Καταρχάς κινδυνεύουν άμεσα οι ανθρώπινες ζωές του προσωπικού της εγκατάστασης. Ο ακριβός εξοπλισμός της εγκατάστασης τίθεται σε κίνδυνο. Χάνεται ποσότητα της παραγωγής σε περίπτωση έκρηξης από ταμειυτήρα υδρογονανθράκων, μολύνοντας παράλληλα το περιβάλλον. Επίσης οικονομικά η επαναφορά του ελέγχου του πηγαδιού είναι πολύ δαπανηρή.

Υπάρχουν περιπτώσεις που το περιθώριο του **Drilling Window** είναι πολύ απαιτητικό (**Pore Pressure - Fracture Pressure**) και συνυπολογίζοντας τον παράγοντα του σφάλματος στις προβλέψεις των γεωπιέσεων, είναι πλέον κατανοητό ότι δεν μπορεί η ασφάλεια του έργου να εξαρτάται μόνο από την υδροστατική πίεση της στήλης του ρευστού διάτρησης.

1.5. Αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας

Αυτή η καταστροφική εισροή των ρευστών που εμπεριέχονται στους πόρους των διατρυόμενων σχηματισμών μπορεί να ανασχεθεί με τον αντιεκρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας (**Blowout Preventer, BOP**).

Ο μηχανισμός ασφαλείας αποτελείται από ένα σύμπλεγμα εμβόλων και τοποθετείται κάτω από την υποδομή του γεωτρύπανου, Εικόνα (1.3), ή στον πυθμένα της θάλασσας σε υπεράκτιες γεωτρήσεις. Η διατρητική στήλη διέρχεται μέσω του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, ο οποίος αποτελείται από έμβολα που ποικίλουν στο σχήμα, στο μέγεθος, στην αντοχή πιέσεων, ανάλογα την περίπτωση.

Κάποια έμβολα μπορούν να σφραγίσουν αποδοτικά μια γεώτρηση από την οποία έχει ανελκυθεί η διατρητική στήλη. Άλλα έμβολα έχουν σχεδιαστεί ώστε να σφραγίζουν γύρω από τα σωληνοειδή στελέχη της στήλης, κλείνοντας κατά αυτό τον τρόπο το δακτύλιο της γεώτρησης. Υπάρχουν επίσης έμβολα που φέρουν μηχανικά μέρη και είναι ικανά να τμήσουν τη διατρητική στήλη η οποία διέρχεται μέσω του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, σφραγίζοντας ολοκληρωτικά το πηγάδι.

Το κλείσιμο των κατάλληλων ανά περίπτωση υδραυλικά χειριζόμενων εμβόλων αποτρέπει την εκροή των ρευστών στην επιφάνεια, την *περαιτέρω* εισροή στη γεώτρηση, καθώς και την εκτίναξη του υπεδαφικού εξοπλισμού.

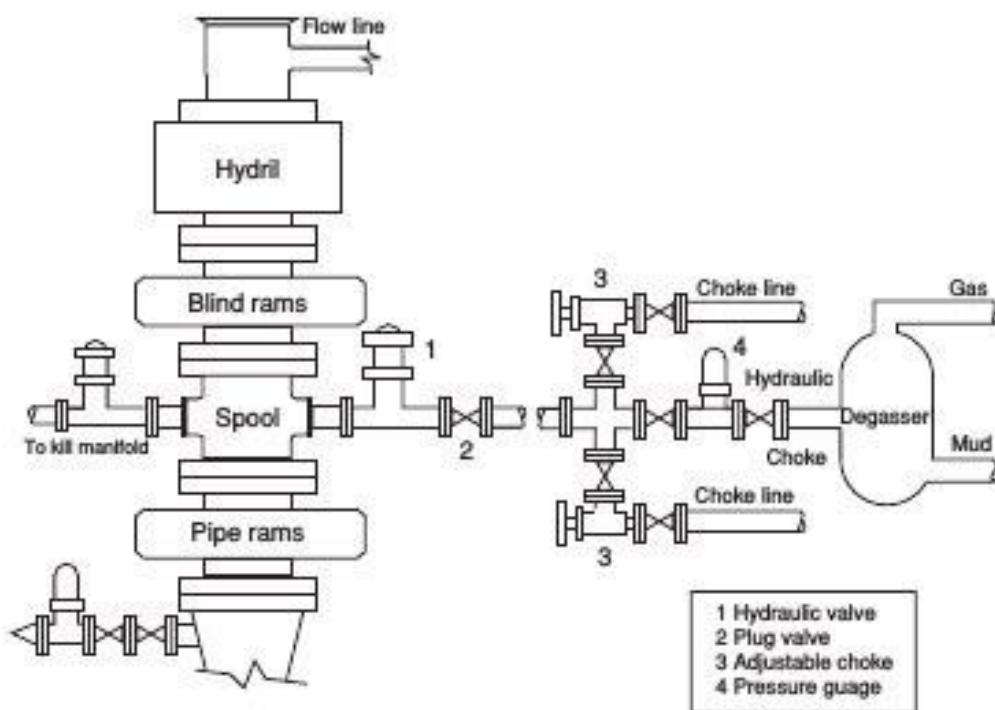
Αυτό συμβαίνει διότι καθώς η εισροή εισέρχεται με κλειστό κύκλωμα κυκλοφορίας πλέον, αυξάνεται η μέση πίεση στο δακτύλιο της γεώτρησης· έως ότου, στο σημείο που έλαβε χώρα η εισροή, η πίεση που ασκείται από τη στήλη των ρευστών του δακτυλίου (λάσπη διάτρησης και εισροή) ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού και περαιτέρω εισροή είναι αδύνατη.



Εικόνα(1.3) : Αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας

Είναι σύνηθες μια εισροή να πραγματοποιείται στον πυθμένα της γεώτρησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εισροή διακόπτεται όταν η πίεση που ασκείται στον πυθμένα της γεώτρησης από τα ρευστά του δακτυλίου (ρευστό διάτρησης, εισροή), πίεση γνωστή ως «**Bottom Hole Pressure**» ή με το ακρωνύμιο «**BHP**», ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού.

Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας φέρει επίσης βαλβίδες στραγγαλισμού (**choke valves**) για την ελεγχόμενη έξοδο του ρευστού στην επιφάνεια και βαλβίδες ελεγχόμενης εκτόνωσης με την είσοδο ρευστού (**kill valves**). Στις βαλβίδες συνδέονται οι γραμμές στραγγαλισμού (**choke line**) και εξουδετέρωσης (**kill line**), όπως φαίνεται στο Σχήμα (1.5). Οι δύο γραμμές είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση της εισροής καθώς, εφόσον το πηγάδι είναι σφραγισμένο, τα ρευστά εξέρχονται από αυτό μέσω της γραμμής στραγγαλισμού, ενώ η διοχέτευση νέου ρευστού με ιδιότητες ικανές να αντιμετωπίσουν τις πιέσεις που επικρατούν στη γεώτρηση γίνεται μέσω της γραμμής εξουδετέρωσης.



Σχήμα (1.5) : Γραμμές στραγγαλισμού και εξουδετέρωσης

Κάθε εταιρία έχει την δική της πολιτική πάνω στην αντιμετώπιση προβλημάτων πιέσεων, που περιλαμβάνει τον συχνό έλεγχο του εξοπλισμού του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, δοκιμές του μηχανισμού κατά την όρυξη και αναπαραστάσεις διαδικασίας αντιμετώπισης μιας εισροής. Επίσης, γίνονται τακτικά εκπαιδεύσεις του προσωπικού, ιδιαίτερα για πως μπορούν να αντιληφθούν τα σημάδια μιας εισροής και ποιες ενέργειες πρέπει να γίνουν άμεσα για να αντιμετωπιστεί.

Γενικά, ο έλεγχος της πίεσης πόρων του σχηματισμού είτε με την διαβεβαίωση ότι η πίεση της στήλης της λάσπης διάτρησης είναι η κατάλληλη, είτε μέσω του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, αναφέρεται ως Έλεγχος Γεώτρησης (**Well Control**).

1.6. Γενική μέθοδος αντιμετώπισης

Η επαναφορά ελέγχου του πηγαδιού αντιμετωπίζοντας την εισροή αναφέρεται ως Εκτόνωση/Εξουδετέρωση της Γεώτρησης (**Well Kill**). Επιγραμματικά, πρώτη ενέργεια είναι να σφραγιστεί το διάκενο μεταξύ σωλήνωσης και διατρητικής στήλης στην επιφάνεια από τον αντiekρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας (**BOP**), ώστε να διακοπεί η περαιτέρω εισροή. Εν συνεχεία, εισπιέζεται νέο ρευστό διάτρησης, κατάλληλα πυκνότερο από το προηγουμένως χρησιμοποιούμενο (αρχική λάσπη διάτρησης), ώστε να υπερβαίνει την πίεση πόρων του σχηματισμού. Η νέα λάσπη διάτρησης (λάσπη εξουδετέρωσης) κυκλοφορεί σε όλο το πηγάδι εκτοπίζοντας την αρχική λάσπη καθώς και την εισροή προς την επιφάνεια και εκτός γεώτρησης μέσω της γραμμής στραγγαλισμού (**choke line**). (Βιβλιογραφικά στις μεθόδους αντιμετώπισης που αναλύονται· η αρχική λάσπη διάτρησης, που χρησιμοποιούνταν όταν η εισροή έλαβε χώρα, αναφέρεται ως **old mud**)

Η πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης εξουδετέρωσης υπερνικά την πίεση πόρων του σχηματισμού σε κάθε σημείο στο ανοικτό, μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης, οπότε τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ανοίγουν και συνεχίζεται κανονικά η όρυξη. Παράλληλα, η πίεση πυθμένα (**BHP**) θα πρέπει να παραμείνει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της αντιμετώπισης της εισροής, υπερβαίνοντας κατά ένα μικρό μέγεθος πάντα την πίεση πόρων ώστε να μην υπάρξει περαιτέρω εισροή στη γεώτρηση.

Αυτή είναι η γενική διαδικασία που ακολουθείται κατά την αντιμετώπιση μιας εισροής, η οποία θα αναλυθεί λεπτομερώς, όπως επίσης οι λόγοι που οδηγούν σε μια εισροή και οι ενδείξεις που πιθανώς την προμηνύουν.

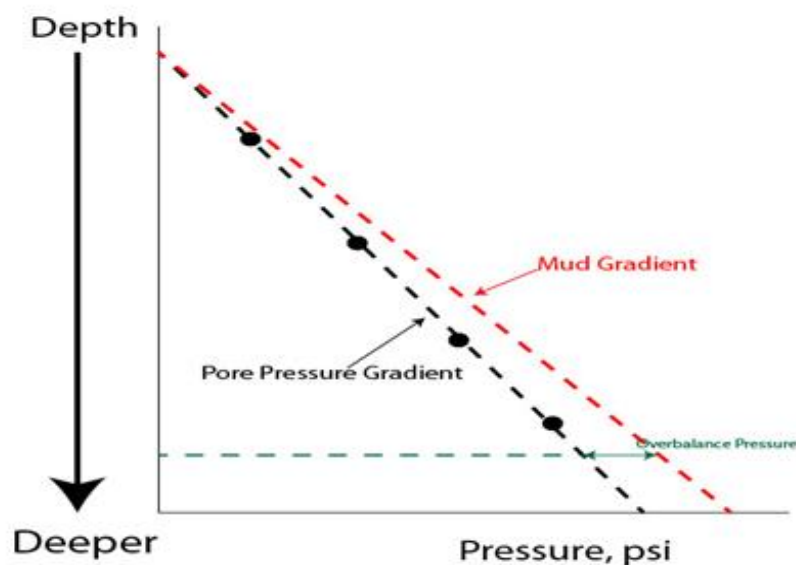
Κεφάλαιο 2 : Αιτίες εισροής στη γεώτρηση

Εισροή ρευστών που εμπεριέχονται στους πόρους των σχηματισμών, είναι εφικτή όταν η πίεση πόρων ενός σχηματισμού (**Pore Pressure**) υπερβεί την πίεση που ασκεί η στήλη του ρευστού διάτρησης σε αυτό το σημείο - βάθος.

Η πίεση που ασκεί η λάσπη διάτρησης εξαρτάται, όπως έχει προαναφερθεί, από την πυκνότητα και το ύψος της στήλης της. Αυτοί οι δύο παράγοντες αν αποκλίνουν από το επιθυμητό μπορεί να οδηγήσουν σε εισροή· και υπάρχουν αρκετοί λόγοι που μπορούν να επηρεάσουν τον καθέναν.

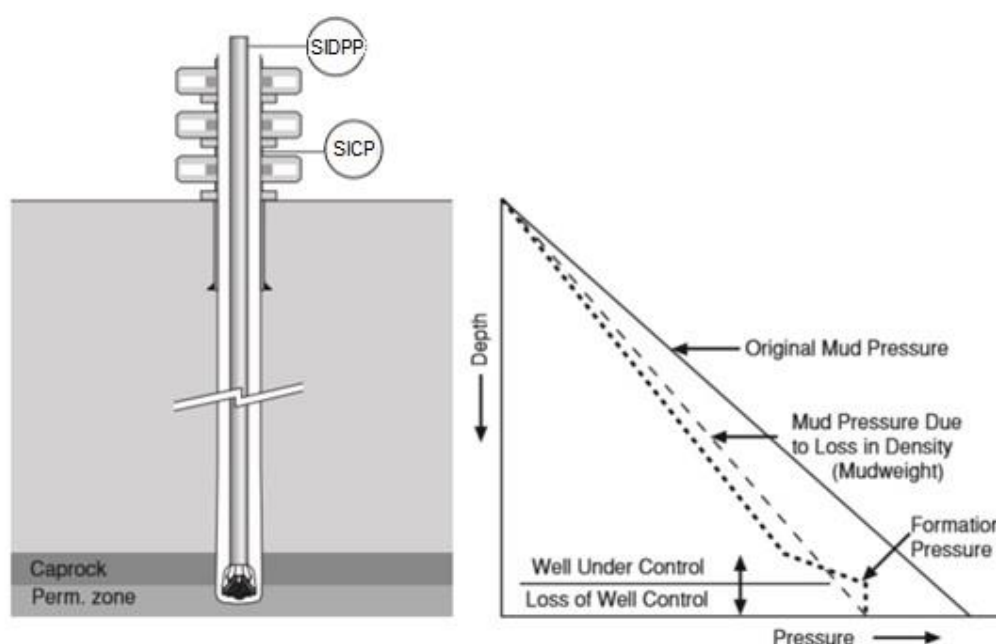
Γενικά η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης προγραμματίζεται από τον μηχανικό έτσι ώστε η υδροστατική πίεση της στήλης της· να υπερβαίνει την πίεση πόρων του σχηματισμού (**pore pressure**) συνήθως κατά 200-300 psi (12-20 atm).

Αυτή η επιπλέον πίεση ονομάζεται πίεση ασφαλείας, γνωστή με τον όρο «**Overbalance**», και είναι καίρια για την ύπαρξη ελέγχου της γεώτρησης, Διάγραμμα (2.1). Στην περίπτωση όπου είτε η υδροστατική πίεση μειωθεί για οποιονδήποτε λόγο είτε η πίεση πόρων του σχηματισμού σε κάποιο βάθος είναι μεγαλύτερη από ότι είχε προβλεφθεί· η πίεση που ασκεί η λάσπη διάτρησης εξακολουθεί να υπερβαίνει την πίεση πόρων, αν και εφόσον η πίεση ασφαλείας «καλύπτει» αυτή τη διαφορά πιέσεων.



Διάγραμμα(2.1) : Πίεση ασφαλείας (Overbalance)

2.1. Μείωση της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης



Σχήμα (2.1) : Μείωση πυκνότητας - μείωση της υδροστατικής πίεσης

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (2.1), η μείωση της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης, μπορεί να οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου σε κάποιο βάθος η πίεση πόρων υπερβαίνει την υδροστατική πίεση της στήλης της λάσπης, με συνέπεια την ύπαρξη εισροής στη γεώτρηση.

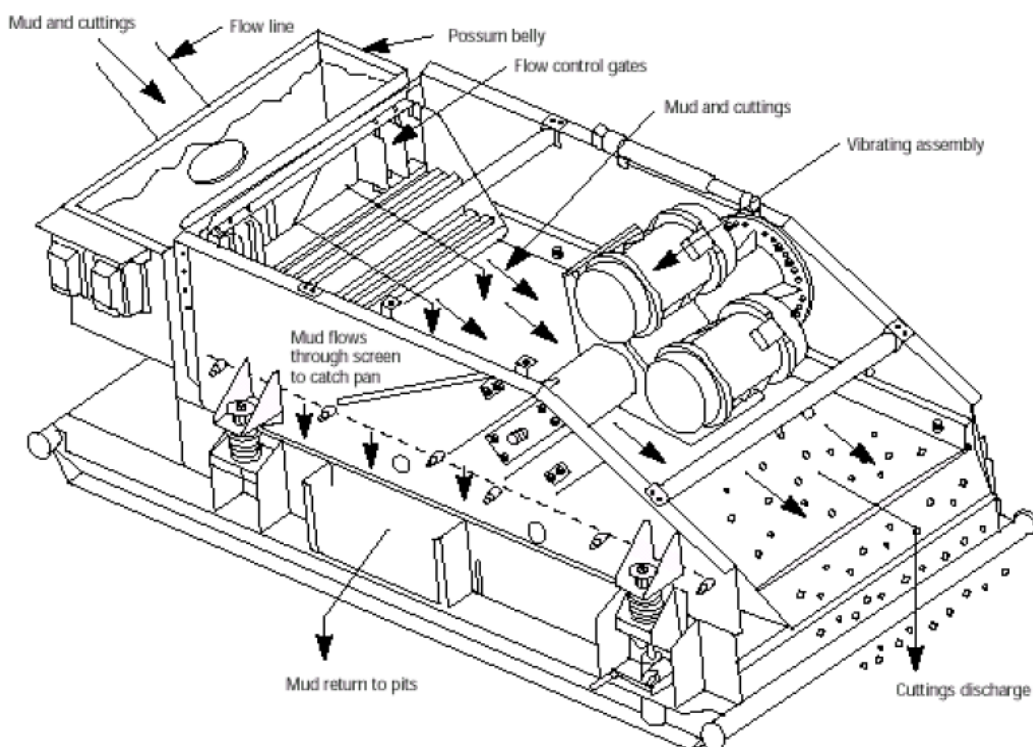
Αιτίες μείωσης της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης είναι :

α. Μείωση περιεκτικότητας της λάσπης σε στερεά

Η λάσπη επιστρέφει στην επιφάνεια μαζί με τα θρύμματα του πετρώματος που αποσυντίθεται. Για να επαναχρησιμοποιηθεί η λάσπη διάτρησης θα πρέπει να αφαιρεθούν τα θρύμματα, διατηρώντας την πυκνότητα της αμετάβλητη.

Αν όμως ο εξοπλισμός για την αφαίρεση αυτή δεν είναι απόλυτα αποδοτικός τότε μπορεί να αφαιρείται από την λάσπη και μεγάλο μέρος των στερεών που χρησιμοποιείται για τη στάθμιση της πυκνότητας της, όπως ο βαρύτης, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η αρχική της σύσταση, συνεπώς και η πυκνότητα της.

Ο εξοπλισμός για την αφαίρεση των θρυμμάτων, Σχήμα (2.2), θα πρέπει να σχεδιάζεται για να κατακρατεί μόνο τα θρύμματα του πετρώματος. Στην περίπτωση που λαμβάνεται και βαρύτης, θα πρέπει να αναπληρώνεται ορθά στο ρευστό διάτρησης πριν την επανακυκλοφόρησή του στη γεώτρηση.



Σχήμα (2.2) : Mud Separator

β. Αύξηση περιεκτικότητας της λάσπης σε αέριο

Υπάρχει το ενδεχόμενο να γίνεται όρυξη πετρώματος που τυχόν εμπεριέχει στους πόρους του αέρια, τα οποία έχουν διαρρεύσει στο πηγάδι. Η μέση πυκνότητα των ρευστών στο δακτύλιο θα μειωθεί, συνεπώς και η πίεση που ασκείται από τη στήλη ρευστών. Το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε εισροή, εάν η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη των ρευστών ξεπεραστεί από την πίεση πόρων του σχηματισμού σε κάποιο βάθος.

Επίσης, καθώς ο όγκος αερίου ανέρχεται προς την επιφάνεια δια του δακτυλίου της γεώτρησης, αυξάνει λόγω της συνεχώς μειούμενης πίεσης. Η διαστολή του αερίου όγκου, η οποία μπορεί να είναι πολλές φορές πολλαπλάσια του αρχικού όγκου, μειώνει επιπλέον την μέση πυκνότητα των ρευστών της δακτυλίου, ιδιαίτερα όσο πλησιάζει προς την επιφάνεια.

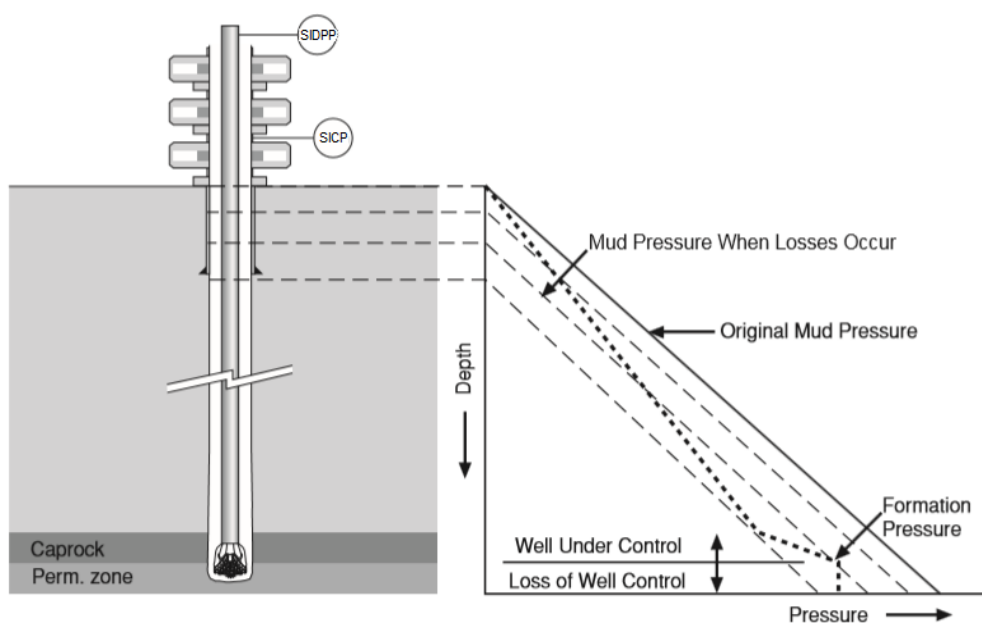
Ωστόσο, η παρουσία αερίου στο πηγάδι, όσο μικρή και αν είναι αυτή, αποτελεί πρόβλημα. Ο όγκος του αερίου πρέπει να αφαιρεθεί, σε αντίθετη περίπτωση το πρόβλημα λαμβάνει μεγαλύτερες διαστάσεις κάνοντας την επίλυση του πιο χρονοβόρα και δαπανηρή. Η ποσότητα του αερίου θα πρέπει να παρακολουθείται και κάθε σημαντική αύξηση πρέπει να αναφέρεται άμεσα.

γ. Αραίωση της λάσπης

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου χρειάζεται να μειωθεί η πυκνότητα του ρευστού διάτρησης, διαδικασία που επιτυγχάνεται με την αραίωση της αρχικής λάσπης. Ρευστό μικρότερης πυκνότητας εισέρχεται στη κυκλοφορία είτε για να μειώσει τη μέση πυκνότητα της λάσπης, είτε και για να βελτιώσει μια παράμετρο της (λ.χ. Ιξώδες). Τα πλέον συνήθη ρευστά είναι θαλασσινό ή φρέσκο νερό, συνθετικό πετρέλαιο ή ντίζελ.

Σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους· το φαινόμενο της εξάτμισης των ρευστών, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών και πιέσεων, μπορεί να είναι σημαντικό. Η αλλαγή φάσης κάποιου ποσοστού της λάσπης διάτρησης· μειώνει τη μέση πυκνότητα της περαιτέρω, με κίνδυνο την ύπαρξη εισροής. Η αραίωση πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα ανά περίπτωση και να παρακολουθείται στενά, ώστε να μην γίνει η αιτία μιας εισροής.

2.2. Μείωση του ύψους στήλης της λάσπης διάτρησης



Σχήμα (2.3) : Σχέση στάθμης της στήλης λάσπης και της υδροστατικής πίεσης

Στο Σχήμα (2.3), παρουσιάζονται οι βαθμίδες πίεσης της λάσπης, ανάλογα με το ύψος της στήλης της. Η μείωση του ύψους της στήλης της λάσπης στη γεώτρηση είναι εξίσου επικίνδυνη με την μείωση της πυκνότητας της.

α. Ανέλκυση διατρητικής στήλης (Tripping out)

Κατά τη διάρκεια μιας μανούβρας, καθώς ανεγκύονται και αφαιρούνται από την διατρητική στήλη· τα διατρητικά στελέχη, το ύψος της στήλης του ρευστού διάτρησης, όπως είναι φυσικό, μειώνεται. Καθώς αποσυνδέεται το ένα διατρητικό στέλεχος από το άλλο, δεν επιτρέπεται το ύψος της στήλης της λάσπης να μειωθεί. Συμπληρώνεται κατάλληλη ποσότητα ρευστού με την έξοδο κάθε διατρητικού στελέχους· ώστε το ύψος της στήλης να μην μεταβληθεί και να παραμείνει ίδια η υδροστατική πίεση. Σε αντίθετη περίπτωση η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP**) θα μειωνόταν αισθητά και πιθανόν τα ρευστά που εμπεριέχονταν στους πόρους του σχηματισμού σε αυτό το βάθος να εισέρχονταν στη γεώτρηση.

β. Απώλεια κυκλοφορίας της λάσπης (Lost Circulation)

Πρόκειται για την περίπτωση όπου ποσότητα από τη λάσπη διάτρησης χάνεται προς τους πλευρικούς σχηματισμούς. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα μπορεί να υπάρξει εφόσον η πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης σε κάποιο βάθος, ξεπεράσει την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού. Δημιουργούνται ρωγμές μέσα από τις οποίες το ρευστό διάτρησης εξέρχεται προς τον περιβάλλοντα σχηματισμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα (2.4).

Επίσης, μπορεί ο ίδιος ο σχηματισμός να είναι εκ φύσεως ρωγματωμένος ή καρστικοποιημένος, γεγονός που οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα. Σε άλλη περίπτωση, μια ζώνη του υπεδάφους με μεγάλη διαπερατότητα· κάλλιστα δεν θα μπορούσε να αποτρέψει το ρευστό διάτρησης από το να εισέλθει σε αυτή.

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν, είτε με την βέλτιστη πρόβλεψη των πιέσεων και χρησιμοποίηση του κατάλληλου ρευστού διάτρησης· είτε με την εισαγωγή πρόσθετων χημικών υλικών (Lost Circulation Materials, LCM) στη λάσπη. Τα πρόσθετα χημικά υλικά δημιουργούν μία μεμβράνη (filter cake) ανάμεσα στα τοιχώματα του

πετρώματος και στην λάσπη, η οποία αποτρέπει τις εκροές προς τον «αδύναμο» σχηματισμό.

Ωστόσο, εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, θα μειωθεί η στήλη της λάσπης καθώς θα χάνεται ποσότητά της προς τον σχηματισμό. Η υδροστατική πίεση ανά σημεία πιθανόν να γίνει μικρότερη από την πίεση πόρων του σχηματισμού, και εκείνη τη στιγμή μια εισροή να λάβει χώρα.

Ιδιαίτερα δύσκολο είναι το να εξακριβωθεί μια τέτοια κατάσταση κατά τη διάρκεια μιας μανούβρας καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ύψος της στήλης του ρευστού διάτρησης αυξομειώνεται. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται μία μικρής χωρητικότητας δεξαμενή επονομαζόμενη «**trip tank**» η οποία μετράει με ακρίβεια τον όγκο λάσπης που συμπληρώνεται ή αφαιρείται· όταν τα διατρητικά στελέχη ανελκύνονται ή καθελκύνονται στη γεώτρηση αντίστοιχα. Η δεξαμενή **trip tank** έχει μικρή αναλογία διαμέτρου προς ύψος για μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις.



Σχήμα (2.4) : Απώλεια λάσπης διάτρησης στο περιβάλλον πέτρωμα

γ. Πιέσεις εμβολισμού κατά την ανέλκυση/καθέλκυση της διατρητικής στήλης (Swabbing-Surging)

Στην περίπτωση όπου κατά τη διάρκεια μιας μανούβρας η διατρητική στήλη ανελκυθεί γρήγορα, η κατώτερη συνδεσμολογία της στήλης (**BHA**), της οποίας η διάμετρος είναι ελαφρώς μικρότερη της γεώτρησης, λειτουργεί σαν έμβολο και εισάγονται ρευστά στο πηγάδι που εμπεριέχονται στους πόρους των πλευρικών σχηματισμών. Ως αποτέλεσμα η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης μειώνεται. Αυτή η πτώση πίεσης που δημιουργείται ονομάζεται πίεση εμβολισμού κατά την ανέλκυση και μια εισροή μπορεί να λάβει χώρα εάν αυτή η πτώση είναι σημαντική.

Όταν η διατρητική στήλη καθελκύεται στη γεώτρηση καθώς εισπνέζεται το ρευστό διάτρησης μέσω αυτής, δημιουργείται αντίστοιχα πίεση εμβόλου καθέλκυσης. Εάν αυτή η πίεση είναι μεγάλη μπορεί να υπερβεί την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού σε κάποιο βάθος της γεώτρησης, καταλήγοντας σε απώλεια της κυκλοφορίας της λάσπης.

Τα παραπάνω φαινόμενα αυξάνονται αρνητικά όταν:

- Προσκολλάται λάσπη διάτρησης στη διατρητική στήλη
- Η ταχύτητα που ανελκύεται/καθελκύεται η στήλη είναι μεγάλη
- Χρησιμοποιείται ρευστό διάτρησης με μεγάλο ιξώδες
- Υπάρχει μικρό διάκενο μεταξύ στήλης και πετρώματος (δακτύλιος)
- Μη αποδοτικό καθάρισμα του κοπτικού άκρου από τα θρύμματα

Κεφάλαιο 3 : Ενδείξεις εισροής - Λήψη μέτρων αντιμετώπισης

Σημάδια και πιθανές ενδείξεις μιας εισροής παρατηρούνται στην επιφάνεια από το προσωπικό. Κάθε μέλος του προσωπικού έχει την ευθύνη να αναγνωρίζει και να ερμηνεύει κάθε πιθανή ένδειξη εισροής· και να διεκπεραιώνει τις κατάλληλες ενέργειες.

Εφόσον μια εισροή λαμβάνει χώρα στο ανοικτό, μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης (**open hole**), μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο από ενδείξεις στην επιφάνεια. Παρά το ότι μπορεί να παρατηρηθούν κάποια σημάδια, δεν σημαίνει απαραίτητα πως υπάρχει εισροή στο πηγάδι, όμως παρέχουν προειδοποιήσεις και πρέπει να παρακολουθούνται στενά.

Κάποιες ενδείξεις κατατάσσονται ως πιο σημαντικές από άλλες, λόγω επικινδυνότητας και αυξημένης πιθανότητας εισροής· για αυτό τον λόγο και ορίζονται ως **Κύριες ενδείξεις**. Οι **Δευτερεύουσες ενδείξεις** είναι εκείνες που δεν είναι απόλυτα συνδεδεμένες με την ύπαρξη εισροής και μπορεί να οφείλονται και σε κάποια άλλη αιτία.

3.1 Ενδείξεις εισροής

3.1.1. Κύριες Ενδείξεις

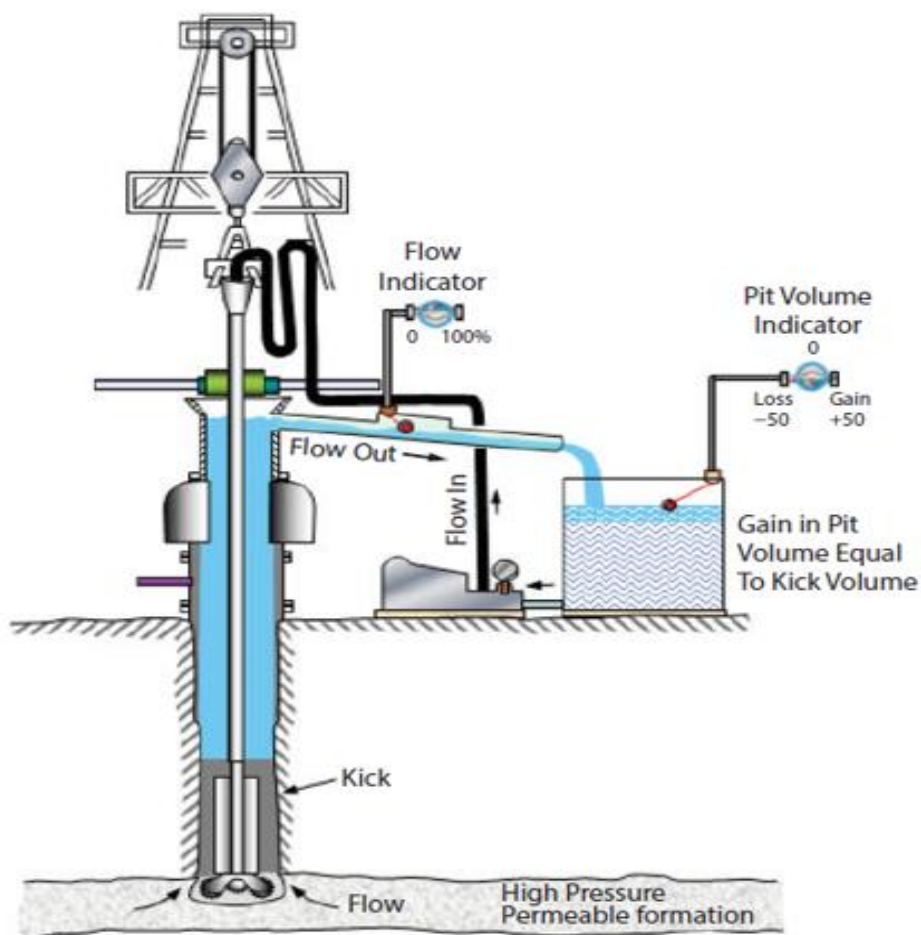
- Αύξηση του όγκου της λάσπης στις δεξαμενές επιφάνειας
- Κυκλοφορία ρευστών με αντλίες σε μη λειτουργία
- Αύξηση της ταχύτητας κυκλοφορίας της λάσπης
- Διαφοροποιήσεις όγκων κατά τη συμπλήρωση λάσπης στις εργασίες μανούβρας

α. Αύξηση του όγκου της λάσπης στις δεξαμενές επιφάνειας

Το ρευστό διάτρησης διατηρείται σε δεξαμενή ή δεξαμενές στην επιφάνεια, οι οποίες τροφοδοτούν την κυκλοφορία της λάσπης μέσω των αντλιών· και αναπληρώνονται από την επαναχρησιμοποιούμενη λάσπη που επιστρέφει

στην επιφάνεια (εφόσον έχει ακολουθήσει τη διαδικασία καθαρισμού από τα προϊόντα της όρυξης). Εφόσον ο όγκος εισόδου και εξόδου της λάσπης στη γεώτρηση φυσιολογικά είναι ίδιος, αντίστοιχα το ύψος της στάθμης στις ενεργές δεξαμενές της επιφάνειας είναι γνωστό και σχετικά σταθερό. Μια αύξηση του ύψους της στάθμης δηλώνει πως κάποιο “ξένο” ρευστό εισήλθε στο σύστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα (3.1).

Το ύψος της στάθμης στις δεξαμενές του ρευστού διάτρησης παρακολουθείται στενά από το προσωπικό, καθώς είναι βασική ένδειξη για την ύπαρξη μιας εισροής. Ο όγκος κατά τον οποίο αυξήθηκε το ρευστό στις δεξαμενές ισοδυναμεί με τον όγκο της εισροής στη γεώτρηση, πληροφορία που όπως θα γίνει αντιληπτό αργότερα· θα χρησιμοποιηθεί στην αντιμετώπιση της εισροής.



Σχήμα (3.1) : Αύξηση ύψους της στάθμης ενεργών δεξαμενών

β. Κυκλοφορία λάσπης με αντλίες σε μη λειτουργία

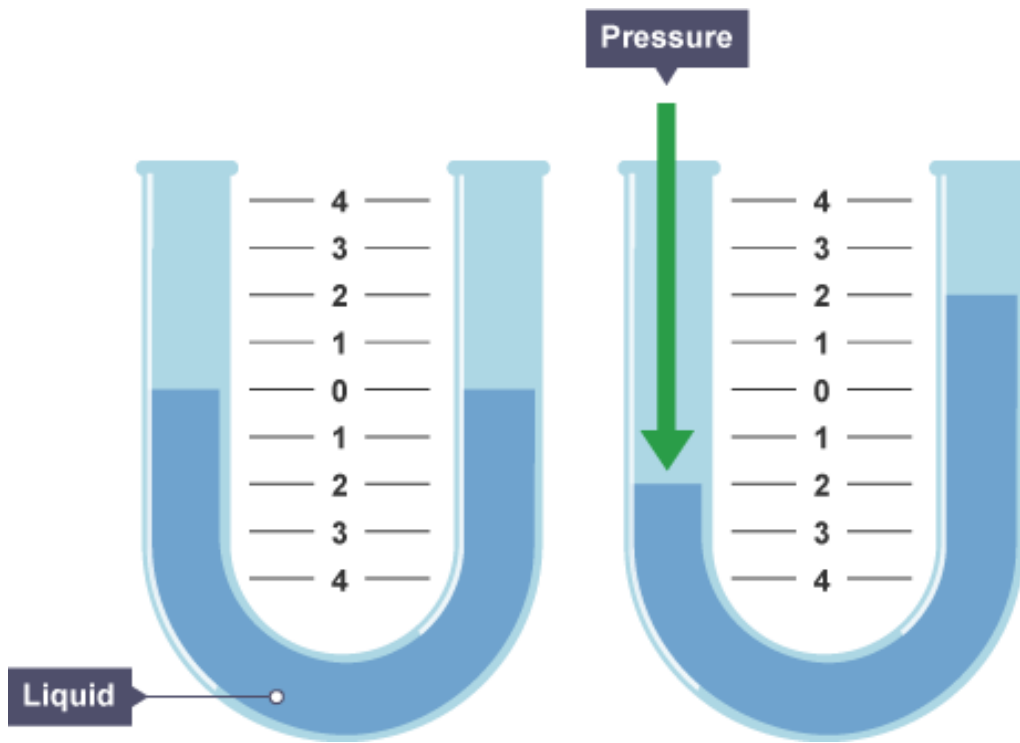
Λογικό είναι όταν οι αντλίες, που εισπνέζουν το ρευστό διάτρησης και είναι η αιτία της κυκλοφορίας στο πηγάδι, παραμείνουν κλειστές· να μην υπάρχει επιστροφή λάσπης στην επιφάνεια. Σε αντίθετη περίπτωση, μια άλλη δύναμη είναι η αιτία που πιέζει το ρευστό του δακτυλίου προς την επιφάνεια.

Το κλείσιμο των αντλιών και η παρατήρηση για το αν συνεχίζει να υπάρχει κυκλοφορία στη γεώτρηση (έλεγχος ροής, **flow check**) είναι απαραίτητη ενέργεια για την εξακρίβωση μιας εισροής, διαδικασία που θα αναλυθεί αργότερα. Παρ' όλα αυτά δεν σημαίνει απόλυτα πως έχει λάβει μέρος κάποια εισροή.

Σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους η γεωθερμική βαθμίδα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλους τους υπολογισμούς ($\approx 3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Καθώς το ρευστό διάτρησης μένει σε ακινησία στο πηγάδι, σε βάθη όπου η θερμοκρασία είναι μεγάλη, εκτονώνεται. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται ο όγκος του και εμφανίζεται εκροή ρευστού προς την επιφάνεια, που φαινομενικά θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως αποτέλεσμα εισροής. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να λάβει χώρα και κατά τη διάρκεια που οι αντλίες τεθούν εκτός λειτουργίας για να γίνει π.χ. σύνδεση νέου διατρητικού στελέχους.

Σε άλλη περίπτωση, θα μπορούσε να είχε εισαχθεί λανθασμένα μια μικρή ποσότητα πυκνότερης λάσπης, η οποία θα εκτόπιζε το ελαφρύτερο ρευστό του δακτυλίου προς την επιφάνεια λόγω της αρχής Pascal (Υοειδές μανόμετρο, **U-tube**), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα (3.2).

Το ύψος της στήλης του υγρού στο ένα σκέλος του **U-tube** επηρεάζεται από την αλλαγή της πυκνότητας του ρευστού στο άλλο σκέλος αυτού. Μια γεώτρηση μπορεί να προσομοιάσει το υοειδές μανόμετρο. Η στήλη του ρευστού διάτρησης εντός της διατρητικής στήλης αποτελεί το ένα σκέλος· και η στήλη του ρευστού στο δακτύλιο το άλλο σκέλος. Αν εισαχθεί πυκνότερη λάσπη στη διατρητική στήλη τότε θα δημιουργηθεί ροή προς το δακτύλιο και αντίστροφα.



Σχήμα (3.2) : Υοειδές μανόμετρο – U tube

γ. Αύξηση της ταχύτητας κυκλοφορίας της λάσπης

Ο όγκος εξόδου των ρευστών από το πηγάδι ανά μονάδα χρόνου, θα πρέπει φυσιολογικά να είναι περίπου ίδιος με την παροχή λάσπης (εισπιεζόμενος όγκος) στον ίδιο χρόνο ώστε να επιβεβαιώνεται το ότι δεν υπάρχουν εισροές. Αν μετρηθεί στην επιστροφή μεγαλύτερος όγκος εκροής ρευστών από αυτόν που εισάγεται, είναι ένδειξη ότι ρευστά εισέρχονται στο δακτύλιο της γεώτρησης εκτοπίζοντας τα ήδη υπάρχοντα ρευστά του δακτυλίου προς την επιφάνεια.

δ. Διαφοροποιήσεις όγκων κατά τη συμπλήρωση λάσπης στις εργασίες μανούβρας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρέπει να συμπληρώνεται κατάλληλη ποσότητα ρευστού διάτρησης καθώς ανελκύνονται από τη γεώτρηση διατρητικά στελέχη. Στην περίπτωση ορθής συμπλήρωσης της λάσπης, όπου οι μετρήσεις της επιστροφής υποδεικνύουν πως το πηγάδι ξεχυλίζει, μια εισροή είναι πολύ πιθανή.

3.1.2. Δευτερεύουσες Ενδείξεις

- Αύξηση περιεκτικότητας της λάσπης σε αέριο
- Αλλαγές στην πίεση κυκλοφορίας και στον ρυθμό εμβολισμών των αντλιών
- Αύξηση της ταχύτητας διάτρησης

α. Αύξηση περιεκτικότητας της λάσπης σε αέριο

Είναι σχεδόν αδύνατο να αποτραπεί η οποιαδήποτε εισροή αερίου που εμπεριέχεται στους πόρους των διατρυόμενων σχηματισμών. Όταν ένα τέτοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα πρέπει να θεωρείται ως προειδοποιητικό σημάδι μιας πιθανής επερχόμενης εισροής. Τα προϊόντα της όρυξης πετρώματος που εμπεριέχει αέρια στους πόρους του, λέγονται **gas-cuttings**. Τα gas cuttings μπορεί να οφείλονται επίσης σε πίεση εμβολισμού κατά την ανέλκυση στη διάρκεια μιας μανούβρας ή μιας ένωσης στελεχών της διατρητικής στήλης.

Απαιτείται στενή παρατήρηση του ρευστού διάτρησης για αυξημένη περιεκτικότητα σε αέριο, όμως κάθε ανίχνευση αερίου δεν ερμηνεύεται ως απαίτηση για αύξηση της πυκνότητας της λάσπης. Η αιτία των gas-cuttings πρέπει να ερευνηθεί εις βάθος πριν αναληφθεί οποιαδήποτε σημαντική ενέργεια.

β. Αλλαγές στην πίεση κυκλοφορίας και στον ρυθμό εμβολισμών των αντλιών

Καθώς εισέρχονται τα ρευστά που εμπεριέχονται στους πόρους του σχηματισμού στο πηγάδι, συνήθως η μέση πυκνότητα των ρευστών στο δακτύλιο της γεώτρησης μειώνεται, όπως επίσης μειώνεται και το μέσο ιξώδες. Η κυκλοφορία της λάσπης διάτρησης στο πηγάδι θα χρειάζεται πλέον μικρότερη πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**), που ασκείται από τις αντλίες, για την επιστροφή της στην επιφάνεια.

Επιπλέον, η λάσπη στο δακτύλιο της γεώτρησης θα γίνεται συνεχώς ελαφρύτερη σε σχέση με τη λάσπη στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης. Η λάσπη θα τείνει να προωθείται προς το δακτύλιο λόγω της αρχής Pascal (υοειδές μανόμετρο), με αποτέλεσμα να μειώνεται το ύψος της στήλης της

εσωτερικά της διατρητικής στήλης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού εμβολισμών της λάσπης από τις αντλίες (strokes/min).

Βέβαια, οι ενδείξεις στην επιφάνεια, δηλαδή η μείωση της πίεσης κυκλοφορίας και η αύξηση του ρυθμού εμβολισμών των αντλιών, δεν είναι απαραίτητο να δηλώνουν ότι υπάρχει κάποια εισροή. Τις ίδιες ενδείξεις μπορούν να προκαλέσουν άλλα προβλήματα κατά την όρυξη. Ένας έλεγχος ροής είναι απαραίτητος σε αυτή την περίπτωση για να διασταυρωθεί τι προκάλεσε αυτές τις ενδείξεις.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση ενός ελέγχου ροής (**flow check**) είναι η εξής: ανύψωση του **Kelly** (τετραγωνικό ή εξαγωνικό στέλεχος το οποίο μεταφέρει την περιστροφική κίνηση από την περιστροφική τράπεζα στη διατρητική στήλη) έως ότου είναι οπτικά φανερός ο πρώτος σύνδεσμος μεταξύ των διατρητικών στελεχών. Κλείσιμο των αντλιών εισπίεσης της λάσπης διάτρησης. Εφαρμόζονται οι λαβές ακινητοποίησης της διατρητικής στήλης (**slips**). Τέλος, παρατηρείται στην έξοδο των ρευστών από τη γεώτρηση εάν υπάρχει εκροή ή αύξηση του ύψους της στάθμης των δεξαμενών επιφάνειας που φυσιολογικά δεν θα έπρεπε, καθώς οι αντλίες εισπίεσης είναι κλειστές. Αν δεν υπάρχει, συνεχίζεται η όρυξη κανονικά, αντίθετα η γεώτρηση τίθεται σε κατάσταση αντιμετώπισης εισροής. Ο χρόνος εκτέλεσης ενός ελέγχου ροής πρέπει να είναι αρκετός ώστε να επιβεβαιώνεται η κατάσταση της γεώτρησης και διαρκεί μερικά λεπτά έως και μισή ώρα ανάλογα με την περίπτωση.

γ. Αύξηση της ταχύτητας διάτρησης

Το φαινόμενο της ξαφνικής αύξησης της ταχύτητας διάτρησης κατά την όρυξη της γεώτρησης ονομάζεται «**Drilling break**». Όταν αυτή η αύξηση είναι σημαντική, της τάξεως του διπλάσιου ή και παραπάνω από την αναμενόμενη, τότε μπορεί να υποδεικνύει αλλαγή του σχηματισμού που διατρεύεται, αλλαγή στην πίεση πόρων του σχηματισμού, ή και τα δύο. Συχνά μεταφράζεται ως ένδειξη ότι το κοπτικό άκρο διατρεύει έναν αμμώδη σχηματισμό (μεγαλύτερες ταχύτητες διάτρησης).

Όμως ένας σχηματισμός που διατρεύεται εύκολα μπορεί να εμπεριέχει και ρευστά υπό πίεση. Φυσιολογικά ύστερα από μια αύξηση της ταχύτητας

διάτρησης, διακόπτεται η όρυξη και εκτελείται ένας έλεγχος ροής για να γίνει εκτίμηση πιθανόν εισροών.

3.2. Λήψη μέτρων αντιμετώπισης

α. Κατά τη διάρκεια της όρυξης

Στην περίπτωση όπου παρατηρηθεί από το προσωπικό κατά τη διάρκεια της όρυξης ένδειξη πιθανής εισροής, τότε θα πρέπει να λάβει χώρα ένας έλεγχος ροής ώστε να εξακριβωθεί η πιθανή αιτία και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας θα πρέπει να κλείσουν αμέσως μετά την ένδειξη χωρίς να χαθεί περισσότερος χρόνος μέχρι τον έλεγχο ροής, παρά το ότι αυτός ο χρόνος είναι μόλις μερικά λεπτά. Σε αντίθετη περίπτωση, στον χρόνο που θα χρειαζόταν για την επιβεβαίωση της εισροής, μεγαλύτερος όγκος θα μπορούσε να εισέλθει στο πηγάδι, κάνοντας δυσκολότερη την επαναφορά του ελέγχου του· και αυξάνοντας την επικινδυνότητα σε περισσότερα από ένα σημεία στη γεώτρηση, όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια.

β. Κατά τη διάρκεια μιας μανούβρας

Έχει παρατηρηθεί πως οι περισσότερες εκρήξεις έχουν γίνει κατά τη διάρκεια που πραγματοποιούνται εργασίες μανούβρας. Όταν το κοπτικό άκρο δεν βρίσκεται στον πυθμένα της γεώτρησης, όπως είναι λογικό, δεν είναι εφικτό να γίνει κυκλοφορία της λάσπης διάτρησης σε εκείνο το σημείο. Στην περίπτωση που υπάρξει εισροή κατά τη διάρκεια ανέλκυσης της διατρητικής στήλης, πρέπει η διατρητική στήλη να βρεθεί ξανά στον πυθμένα το συντομότερο δυνατόν· ενώ ταυτόχρονα τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας σφραγίζουν τη γεώτρηση, διαδικασία γνωστή ως **«stripping-in»**.

Πριν την έναρξη των εργασιών μιας μανούβρας, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν θα υπάρξει κάποιο πρόβλημα κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής της, ότι το πηγάδι είναι σε κατάσταση ισορροπίας,

καθώς μια κατάσταση αντιμετώπισης εισροής κατά τη διάρκεια της· καθιστά την κατάσταση περιπλοκότερη. Απαιτείται, λοιπόν, έλεγχος ροής πριν από κάθε εκτέλεση μανούβρας, ώστε να μπορεί να διεξαχθεί με σχετική ασφάλεια.

Κεφάλαιο 4 : Συνθήκες στατικής ισορροπίας της γεώτρησης – Αέρια εισροή

Συμβαίνει συχνά στις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, κατά τη διάρκεια των διατρητικών εργασιών, να συναντώνται περατοί σχηματισμοί με πίεση πόρων μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση που ασκεί στον πυθμένα της γεώτρησης η στήλη της λάσπης διατρήσης.

Η μελέτη των φαινομένων που αναπτύσσονται στο σύστημα της γεώτρησης, όταν ρευστά του σχηματισμού εισχωρήσουν απότομα στον πυθμένα της· καθώς και όταν ακολουθείται η διαδικασία για τη διοχεύευση της εισροής προς την επιφάνεια, γίνεται με την εξέταση δύο περιπτώσεων :

- 1) Η γεώτρηση είναι κλειστή και το σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες στατικής ισορροπίας
- 2) Η γεώτρηση βρίσκεται σε δυναμική κατάσταση κατά τη διάρκεια κυκλοφορίας της λάσπης

4.1. Κλείσιμο της γεώτρησης και ύπαρξη στατικών συνθηκών

Στην περίπτωση που έχει διαπιστωθεί ότι υπάρχει εισροή στη γεώτρηση, ο έλεγχος του πηγαδιού έχει πλέον χαθεί και πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες το συντομότερο δυνατόν ώστε να μην συνεχίσει περαιτέρω η εισροή.

Μια εισροή εκτυλίσσεται συνήθως στον πυθμένα της γεώτρησης και κυκλοφορεί δια μέσου του δακτυλίου (διάκενο μεταξύ της διατρητικής στήλης και των τοιχωμάτων του πετρώματος ή της σωλήνωσης) προς την επιφάνεια.

Η εισροή δεν μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης καθώς η κίνηση της λάσπης διάτρησης που εξέρχεται από αυτή το καθιστά αδύνατο. Ως εκ τούτου, η εισροή καταλαμβάνει χώρο από τα ήδη υπάρχοντα ρευστά στο δακτύλιο με αποτέλεσμα να εκτοπίζει όγκο λάσπης έξω από τη γεώτρηση προς την επιφάνεια.

Η πρώτη ενέργεια που απαιτείται να γίνει, είναι το σφράγισμα του δακτυλίου (**annular**) της γεώτρησης από τα σχετικά έμβολα του αντiekρηκτικού

μηχανισμού ασφαλείας (**BOP**). Κατά αυτό τον τρόπο καθίσταται αδύνατη η περαιτέρω εκτόπιση λάσπης διάτρησης προς την επιφάνεια.

Παράλληλα, εσωτερικά της διατρητικής στήλης, ο όγκος της λάσπης διάτρησης είναι ελεγχόμενος καθώς στην επιφάνεια η διατρητική στήλη είναι συνδεδεμένη με τις αντλίες εισπίεσης της λάσπης, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η κίνηση της εισροής εσωτερικά της διατρητικής στήλης· ακόμη και όταν ο δακτύλιος είναι κλειστός.

4.1.1. Πίεση στήλης και πίεση δακτυλίου

Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας φέρει μανόμετρα που υποδεικνύουν τις πιέσεις που ασκούνται σε αυτόν, από τη λάσπη διάτρησης εσωτερικά της διατρητικής στήλης και από τα ρευστά του δακτυλίου της γεώτρησης (λάσπη διάτρησης, εισροή) από τη στιγμή σφραγίσματος του πηγαδιού.

Η πίεση που ασκεί η λάσπη διάτρησης εσωτερικά της διατρητικής στήλης στο μηχανισμό ασφαλείας από τη στιγμή που ο μηχανισμός ασφαλείας σφραγίζει τη γεώτρηση, ορίζεται ως *πίεση στήλης* (**Shut In DrillPipe Pressure, SIDPP**). Από τη στιγμή εγκλεισμού του πηγαδιού, ορίζεται ως *πίεση δακτυλίου* (**Shut In Casing Pressure, SICP**) η πίεση που ασκείται στον αντιεκρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας (**BOP**) από τα ρευστά του δακτυλίου, δηλαδή από τη λάσπη διάτρησης και την εισροή.

Αυτές οι δύο πιέσεις είναι γνωστές στο προσωπικό στην επιφάνεια ανά πάσα στιγμή και είναι απολύτως απαραίτητες για την αντιμετώπιση της εισροής.

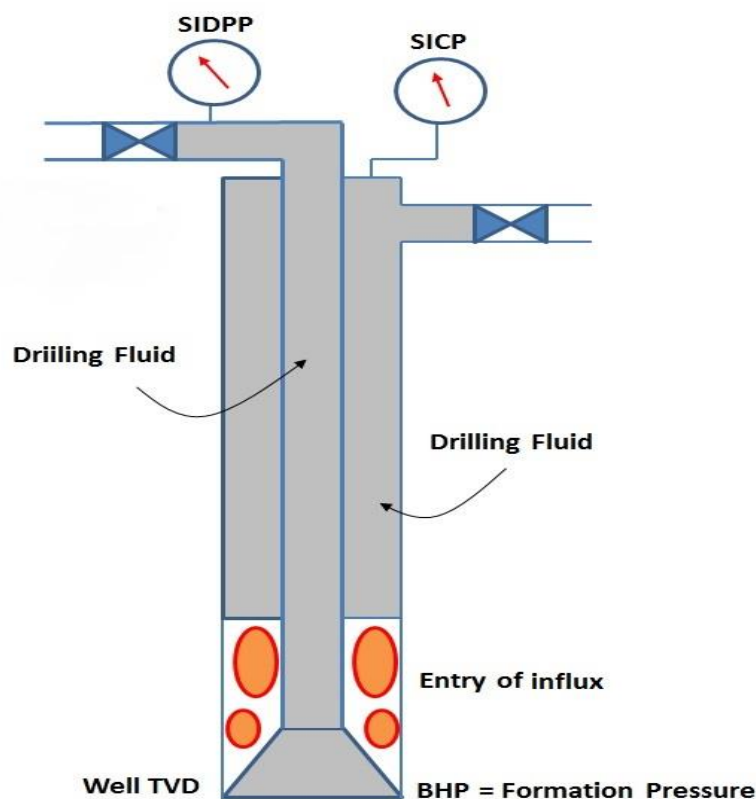
Το πηγάδι εφόσον είναι πλέον απομονωμένο, οι ενδείξεις των μανόμετρων του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας δείχνουν πως οι πιέσεις, τόσο στο δακτύλιο της γεώτρησης όσο και στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης, αυξάνονται καθώς τα ρευστά συνεχίζουν να εισέρχονται στο δακτύλιο. Αυτή η αύξηση των πιέσεων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP, Bottom Hole Pressure**) όπου ασκείται και η υδροστατική πίεση των ρευστών (λάσπης και εισροής) που εμπεριέχονται στο δακτύλιο.

Η μεταβολή της πίεσης του πυθμένα στο σκέλος του δακτυλίου που προκαλείται από την εμφάνιση της εισροής, επηρεάζει και το σκέλος της

διατρητικής στήλης με αποτέλεσμα να καταγράφονται στην επιφάνεια διαφορές πιέσεων τόσο στη στήλη (πίεση στήλης, **SIDPP**) όσο και στο δακτύλιο (πίεση δακτυλίου, **SICP**).

Η εισροή σταματά όταν η πίεση πυθμένα (**BHP**) γίνει ίση με την πίεση πόρων του σχηματισμού (**Pore Pressure**), όπου μετά από αυτή την χρονική στιγμή περαιτέρω εισροή είναι αδύνατη.

Είναι πολύ σημαντικό η πίεση πυθμένα να παραμείνει τουλάχιστον ίση με την πίεση πόρων του σχηματισμού καθ' όλη τη διάρκεια της επαναφοράς ελέγχου του πηγαδιού. Σε αντίθετη περίπτωση, περαιτέρω ρευστά που εμπεριέχονται στους πόρους του σχηματισμού θα εισέλθουν στο πηγάδι δυσχεραίνοντας την κατάσταση. Υπό τις συνθήκες αυτές η γεώτρηση βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας. Οι μέθοδοι εκτόνωσης και ελέγχου που θα αναλυθούν (**well killing**), βασίζονται στο ότι η πίεση πυθμένα πρέπει να υπερβαίνει την πίεση πόρων του σχηματισμού στο αντίστοιχο βάθος.



Σχήμα (4.1) : Ενδείξεις πιέσεων στην επιφάνεια

4.2. Συνθήκες στατικής ισορροπίας της γεώτρησης

Όταν οι πιέσεις έχουν εξισορροπηθεί, όπου η πίεση πυθμένα ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού σε αυτό το βάθος, οι ενδείξεις από τα μανόμετρα στην επιφάνεια, Σχήμα (4.1), αναγράφουν την *πίεση δακτυλίου* σε στατικές συνθήκες (***Shut In Casing Pressure_{static}, SICP_s***) και την *πίεση στήλης* σε στατικές συνθήκες (εσωτερικό διατρητικής στήλης) (***Shut In Drill Pipe Pressure_{static}, SIDPP_s***).

Αυτές οι δύο πιέσεις στην επιφάνεια είναι τα πρώτα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της εισροής. Θα είναι διαφορετικές μεταξύ τους διότι η μεν διατρητική στήλη θα εμπεριέχει μόνο τη λάσπη διάτρησης, ενώ ο δακτύλιος θα εμπεριέχει τη λάσπη διάτρησης καθώς και το ρευστό (πετρέλαιο, νερό ή αέριο) που εισήλθε.

4.2.1. Πίεση στήλης σε στατικές συνθήκες (SIDPP_s)

Το άθροισμα της *πίεσης στήλης* (***SIDPP***) και της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η λάσπη διάτρησης εντός της διατρητικής στήλης ισοδυναμεί με την πίεση πυθμένα (***BHP***), για κάθε χρονική στιγμή από το κλείσιμο των εμβόλων του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας. Από τη στιγμή σφραγίσματος του πηγαδιού η πίεση πυθμένα συνεχώς αυξάνεται, όπως αναφέρθηκε, συνεπώς αναλογικά θα αυξάνεται και η *πίεση στήλης* (***SIDPP***) έως ότου επέλθει ισορροπία (***BHP = Pore Pressure***) όπου οι δύο πιέσεις σταθεροποιούνται.

Το σύστημα όταν βρεθεί σε στατική ισορροπία ισχύει η Εξίσωση :

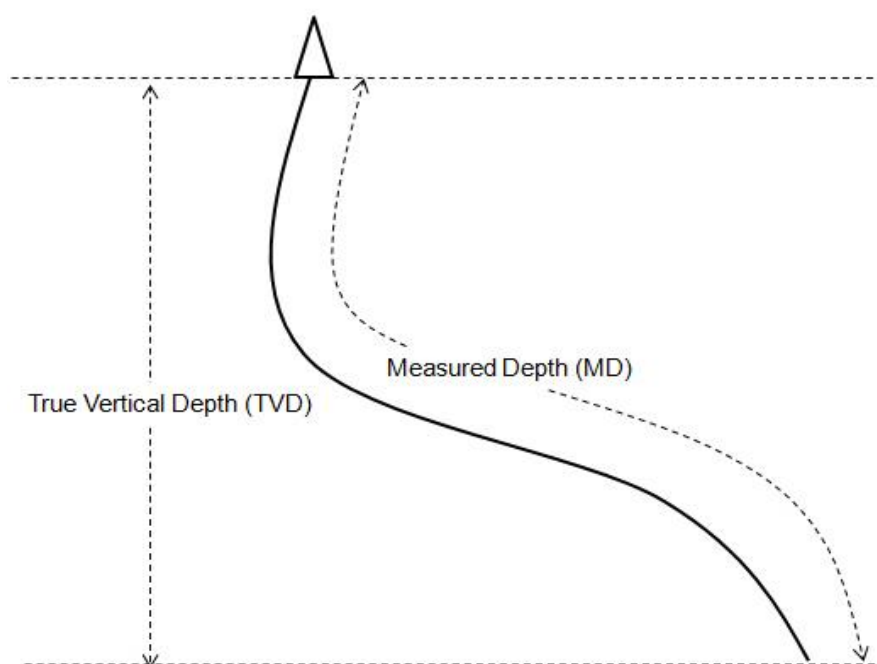
$$SIDPP_s + \rho_m * TVD = BHP \quad (4.1)$$

Όπου,

ρ_m = πυκνότητα της λάσπης διάτρησης

TVD = *πραγματικό κατακόρυφο** βάθος

*Σε κεκλιμένες γεωτρήσεις, το βάθος που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς είναι το πραγματικό κατακόρυφο βάθος (**True Vertical Depth**) από την επιφάνεια στον πυθμένα της γεώτρησης· και όχι το μετρούμενο βάθος-μήκος που έχει ορυχθεί, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (4.2)



Σχήμα (4.2) : Σχέση μετρούμενου και πραγματικού κατακόρυφου βάθους

Στην Εξίσωση (4.1), η πυκνότητα και το ύψος της στήλης λάσπης εσωτερικά της διατρητικής στήλης (**TVD**) είναι γνωστά. Όταν η ένδειξη της **πίεσης στήλης (SIDPP)** θα σταθεροποιηθεί· θα είναι εφικτό να γνωστοποιηθεί η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP**) όπου θα ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού (**Pore Pressure**).

Η πίεση πυθμένα δεν θα πρέπει να μειωθεί σε καμία χρονική στιγμή καθ' όλη την επαναφορά ελέγχου του πηγαδιού, καθώς όπως προαναφέρθηκε σε αντίθετη περίπτωση θα υπάρξει περαιτέρω εισροή στη γεώτρηση.

4.2.2. Πίεση δακτυλίου σε στατικές συνθήκες (**SICP_s**)

Το άθροισμα της **πίεσης δακτυλίου (SICP)** και της υδροστατικής πίεσης της λάσπης διάτρησης καθώς και της υδροστατικής πίεσης της εισροής

ισοδυναμεί με την πίεση πυθμένα. Η υδροστατική πίεση της εισροής αναλύεται με αγνώστους την πυκνότητα της (ρ_i) και το ύψος της στήλης της (h_i). Το ύψος της στήλης της λάσπης διάτρησης στο δακτύλιο πλέον θα ισοδυναμεί με $TVD - h_i$.

Αντίστοιχα όπως και με την πίεση στήλης (**SIDPP**), η πίεση δακτυλίου (**SICP**) αυξάνεται από τη στιγμή απομόνωσης του πηγαδιού μέχρι τη στιγμή ισοροπίας των πιέσεων.

Στην ισοροπία ισχύει :

$$SICP_s + h_i * \rho_i + (TVD - h_i) * \rho_m = BHP \quad (4.2)$$

Όπου,

$h_i * \rho_i$ = η υδροστατική πίεση της εισροής

$(TVD - h_i) * \rho_m$ = η υδροστατική πίεση της λάσπης διάτρησης

Αναλύοντας όμως το ύψος της εισροής σε όγκο ανά διατομή του δακτυλίου, μπορεί να υπολογιστεί το ύψος της εισροής (h_i).

$$h_i = V/A \quad (4.3)$$

Όπου :

V , ο όγκος που καταλαμβάνει η εισροή στο δακτύλιο που ισοδυναμεί με τον όγκο λάσπης που έχει εκτοπίσει προς την επιφάνεια, όγκος ο οποίος έχει μετρηθεί σαν αύξηση στις δεξαμενές που επιστρέφει η λάσπη πριν επανακυκλοφορήσει στο σύστημα. Το V επομένως μπορεί να εκφραστεί ως αύξηση του όγκου του ρευστού στη δεξαμενή επιστροφής (**Pit Gain**) και μετράται με σχετική ακρίβεια από το προσωπικό σε *bbls* ή m^3 .

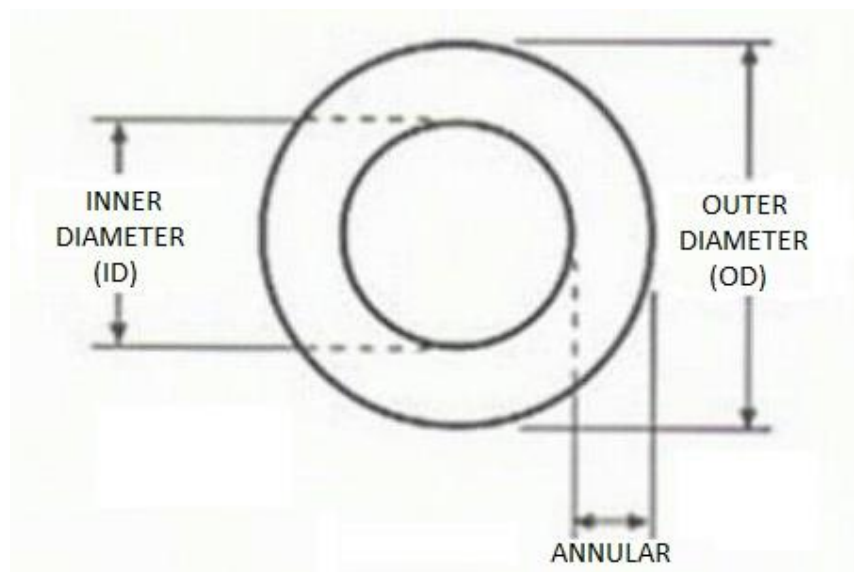
A , το εμβαδόν του δακτυλίου της γεώτρησης. Η εξωτερική και η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου (**annular**), Σχήμα (4.3), είναι γνωστές από τον σχεδιασμό της διατρητικής στήλης και της σωλήνωσης και συνήθως μετρώνται σε ίντσες (inch). Η εξίσωση για την εύρεση του εμβαδού του δακτυλίου είναι:

$$A = \frac{\pi}{4}(OD^2 - ID^2) \quad (4.4)$$

Όπου,

OD = εξωτερική διάμετρος (Outer Diameter) του δακτυλίου, είτε είναι η διάμετρος της γεώτρησης στο μη σωληνωμένο τμήμα της· είτε είναι η διάμετρος της σωλήνωσης

ID = εσωτερική διάμετρος (Inner Diameter) του δακτυλίου, είτε είναι διάμετρος των διατρητικών στελεχών ή των αντιβάρων είτε των βαριών διατρητικών στελεχών



Σχήμα (4.3) : Εσωτερική και εξωτερική διάμετρος δακτυλίου

Όμως απαραίτητο για τους υπολογισμούς είναι να μετατραπεί το εμβαδόν σε χωρητικότητα του δακτυλίου ανά μονάδα μήκους. Για παράδειγμα, στο βρετανικό σύστημα (**Imperial**) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονάδες σε *bbls/ft*.

Η μετατροπή από $inch^2$ σε *bbls/ft* πραγματοποιείται διαιρώντας με τον αριθμό 1029,4 διότι :

$$1 \text{ bbl} = 9702 \text{ inch}^3$$

$$1 \text{ inch} = 0,08333 \text{ ft}$$

$$\frac{Volume}{Height} \left(\frac{bbl}{ft} \right) = \left(\frac{\pi}{4} \right) \times (D(inch^2)) \times \left(\frac{1 bbl}{9702 inch^3} \right) \times \left(\frac{1 inch}{0,08333 ft} \right)$$

$$\frac{Volume}{Height} \left(\frac{bbl}{ft} \right) = (D(inch^2)) \times \left(\frac{1}{1029,4} \right)$$

Το h_i υπολογίζεται λοιπόν από τον τύπο $\frac{V(Pit Gain)}{A} \left(\frac{bbls}{bbls/ft} = ft \right)$

Ο άγνωστος της Εξίσωσης (4.2) πλέον είναι η πυκνότητα της εισροής, ρ_i . Λύνοντας την εξίσωση ως προς το ρ_i μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε το μέγεθος αυτό.

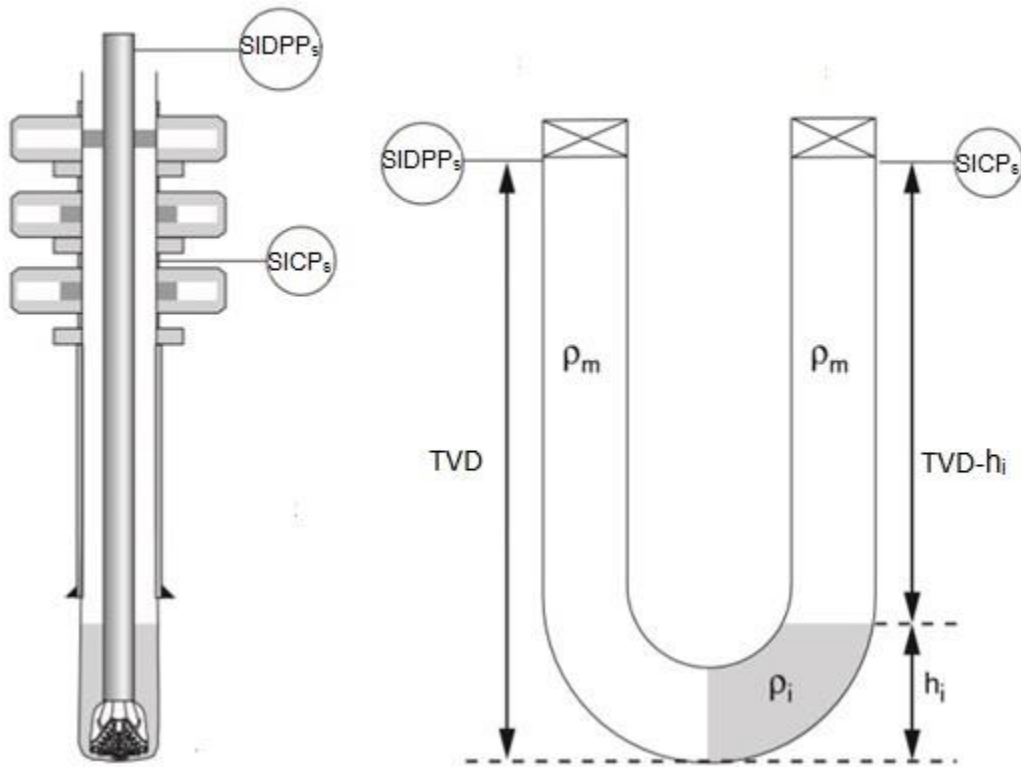
$$\rho_i = \rho_m - \frac{SICPs - SIDPPs}{h_i} \quad (4.5)$$

Υπολογίζοντας την πυκνότητα της εισροής είναι εφικτό να γίνει μια εκτίμηση ως προς τη φύση της, Πίνακας (4.1). Τα συμπεράσματα που βγάζουμε άμεσα για την φύση της εισροής είναι πολύ σημαντικά για την επιλογή του τρόπου αντιμετώπισης της, όπως θα γίνει αντιληπτό αργότερα.

Gas	0.075 - 0.150 psi/ft
Oil	0.3 - 0.4 psi/ft
Seawater	0.470 - 0.520 psi/ft

Πίνακα (4.1) : Η φύση της εισροής σε σχέση με την πυκνότητα της

Στο Σχήμα (4.4) απεικονίζεται η *πίεση στήλης* και η *πίεση δακτυλίου* σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**, **SICP_s**) όπως αυτές καταγράφονται στα μανόμετρα του αντικρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας και αποτυπώνονται σε ένα κλειστό σύστημα μανομετρικού τύπου-U (U-tube).



Σχήμα (4.4) : Πίεση στήλης και δακτυλίου σε στατικές συνθήκες

4.2.3. Υπολογισμός πυκνότητας της λάσπης εξουδετέρωσης

Όπως έχει αναφερθεί η λάσπη που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε να συνεχιστεί η όρυξη φυσιολογικά, πρέπει να είναι τέτοιας πυκνότητας προκειμένου η υδροστατική πίεση που θα ασκεί η στήλη της να υπερβαίνει την πίεση πυθμένα (**BHP**) που ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού (**Pore Pressure**) σε στατικές συνθήκες. Η επιπλέον πίεση ασφαλείας (**Overbalance**) που θα ασκεί η λάσπη εξουδετέρωσης, ορίζεται πάντα και με γνώμονα την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού.

Η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης (**kill mud**) υπολογίζεται ως εξής :

$$\rho_k * TVD = BHP + P_{ob} = SIDPP_s + \rho_m * TVD + P_{ob}$$

$$\rho_k = \rho_m + \frac{(SIDPP_s + P_{ob})}{TVD} \quad (4.6)$$

Όπου,

ρ_k , η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης (kill mud weight)

P_{ob} , η πίεση ασφαλείας που θέτει ο μηχανικός (overbalance)

Υπολογίζεται επίσης απλοποιημένα και ως εξής :

$$\rho_k = \frac{BHP + P_{ob}}{TVD} \quad (4.7)$$

4.3. Αέρια εισροή

Απόλυτα σημαντικό είναι να αναφερθεί για ποιο λόγο η φύση της εισροής αποτελεί πιθανή σοβαρή απειλή για μια γεώτρηση. Αν η πυκνότητα της εισροής υπολογιστεί σε 1 - 3 rpg ή αντίστοιχα 0.05 - 0.150 psi/ft, τότε σημαίνει πως πιθανότατα είναι αέριο. Μια αέρια εισροή αποτελεί τον πιο επικίνδυνο τύπο εισροής, όπως θα γίνει αντιληπτό.

Η μεγάλη διαφορά πυκνότητας μεταξύ της εισροής αερίου και της λάσπης διάτρησης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του φαινομένου της *πλευστότητας* του αερίου. Ο αέριος όγκος έχει την τάση να ανέρχεται στο δακτύλιο της γεώτρησης προς την επιφάνεια· ακόμη και όταν η κυκλοφορία έχει διακοπεί.

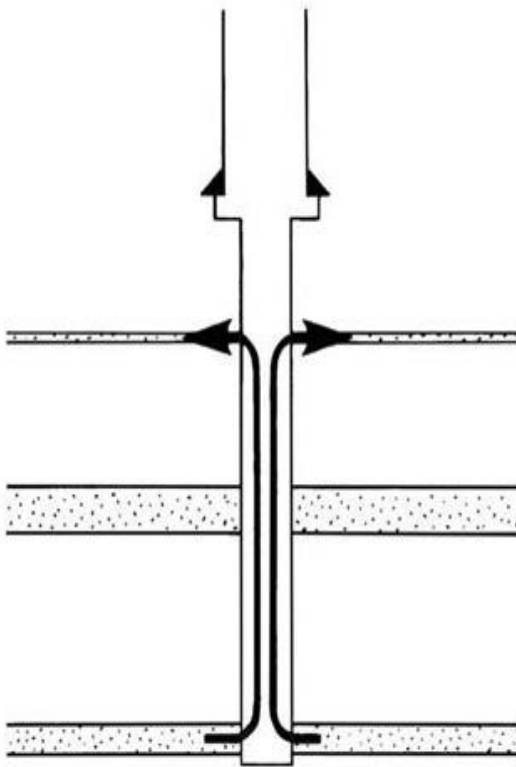
Καθώς το πηγάδι είναι σφραγισμένο και η αέρια εισροή θα ανέρχεται προς την επιφάνεια, δεν θα μπορεί να εκτονωθεί (αύξηση όγκου, πτώση πίεσης) συνεπώς θα διατηρηθεί η υψηλή πίεση που ασκεί στα τοιχώματα της γεώτρησης.

Το φαινόμενο αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της *πίεσης στήλης* και της *πίεσης δακτυλίου* (**SICP, SIDPP**), άρα και την αύξηση της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης. Ύστερα από τη σταθεροποίηση των ενδείξεων στα μανόμετρα της επιφάνειας όπου έχει επέλθει η στατική ισοροπία στη γεώτρηση και συνεπώς η πίεση πυθμένα ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού (**BHP = Pore Pressure**), αν παρατηρηθεί ταυτόχρονη περαιτέρω αύξηση στην *πίεση δακτυλίου* και στην *πίεση στήλης*· είναι ένδειξη ότι πολύ πιθανόν η εισροή είναι αέριας φύσης και ανέρχεται προς την επιφάνεια.

4.3.1. Υπεδαφική έκρηξη

Βαθύτερα από το βάθος έδρασης της τελευταίας σωλήνωσης του πηγαδιού (**Casing Shoe**) είναι το ανοικτό (**open hole**), μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης· όπου η λάσπη διάτρησης βρίσκεται σε επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα.

Εξαιρετικά επικίνδυνο για μια γεώτρηση είναι να ανέλθει ο συμπιεσμένος αέριος όγκος της εισροής στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Σε αυτό το βάθος, ακριβώς κάτω από τη σωλήνωση το πέτρωμα έχει φυσιολογικά την μικρότερη πίεση ρωγμάτωσης (**Fracture Pressure**) σε σχέση με τα τοιχώματα του πετρώματος σε μεγαλύτερα βάθη. Είναι πιθανό η πίεση που



Σχήμα (4.5) : Υπεδαφική έκρηξη

ασκεί ο αέριος όγκος να υπερβαίνει την πίεση ρωγμάτωσης του πετρώματος σε αυτό το βάθος το οποίο αποτελεί το πιο αδύναμο και επικίνδυνο σημείο σε μια γεώτρηση.

Εάν για κάποιο λόγο αφεθεί η αέρια εισροή να ανέλθει σε αυτό το σημείο χωρίς να έχει εκτονωθεί, είτε από αμέλεια είτε επειδή δεν αξιοποιήθηκε σωστά ο χρόνος για την επαναφορά ελέγχου του πηγαδιού, η εισροή μπορεί να διαρρεύσει μέσα στους πόρους του πετρώματος σε εκείνο το βάθος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα (4.5).

Η έξοδος του συμπιεσμένου όγκου αερίου έχει ως αποτέλεσμα την πτώση πίεσης στο δακτύλιο. Παράλληλα η υδροστατική πίεση στον πυθμένα μειώνεται και επιπλέον αέριο εισέρχεται στο πηγάδι, καθώς η πίεση πόρων του σχηματισμού υπερβαίνει πάλι την πίεση πυθμένα (**BHP**). Μία τέτοια κατάσταση όπου θα εισέρχεται περισσότερος όγκος εισροής από βαθύτερο σημείο της γεώτρησης και θα εξέρχεται προς τον σχηματισμό σε μικρότερο βάθος ονομάζεται υπεδαφική έκρηξη (**underground blowout**). Είναι μια

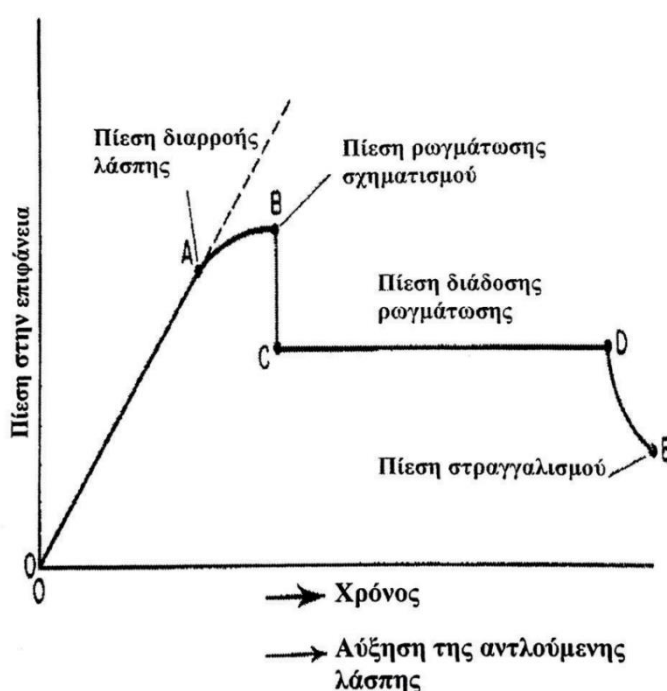
πολύ δύσκολα αναστρέψιμη κατάσταση και αποτελεί ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν σε μια γεώτρηση.

Στην περίπτωση όπου μια υπεδαφική έκρηξη λάβει χώρα και η γεώτρηση δεν έχει μεγάλο βάθος, το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία κρατήρα στο έδαφος (είτε στον πυθμένα της θάλασσας) και πιθανώς να επηρεάσει την κατασκευή της πλατφόρμας είτε ακόμα και να προκαλέσει την κατάρρευση της.

4.3.2. Μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο (MASSP)

Μία σημαντική παράμετρος είναι η μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο (**Maximum Allowable Annular Surface Pressure, MAASP**) όπου αντιπροσωπεύει την μέγιστη πίεση δακτυλίου (**SICP**) που μπορεί να υπάρξει προτού υπερνικηθεί η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, από την πίεση που θα ασκεί η εισροή σε αυτό το σημείο κατά την άνοδο της στην επιφάνεια.

Η πίεση ρωγμάτωσης συνήθως υπολογίζεται μετά από κάθε τοποθέτηση σωλήνωσης με τη λεγόμενη δοκιμή διαρροής (**leak off test**). Στη δοκιμή χρησιμοποιείται το ρευστό διάτρησης, μέσω του οποίου εφαρμόζεται επί τόπου πίεση στα τοιχώματα της γεώτρησης με τη σταδιακή εισπίεση μικρών ποσοτήτων λάσπης μέσα στο πηγάδι, έως ότου διαπιστωθεί απώλεια κυκλοφορίας, Σχήμα (4.6).



Σχήμα (4.6) : Δοκιμή διαρροής

Γνωρίζοντας την μέγιστη πίεση που μπορεί να ασκηθεί πριν ρωγματωθεί ο σχηματισμός σε αυτό το βάθος, γίνεται γνωστή και η *πίεση δακτυλίου (SICP)* που θα προμηνύει το ίδιο δυσχερό αποτέλεσμα.

$$MAASP = P_{fracture} - P_{mudshoe} \quad (4.8)$$

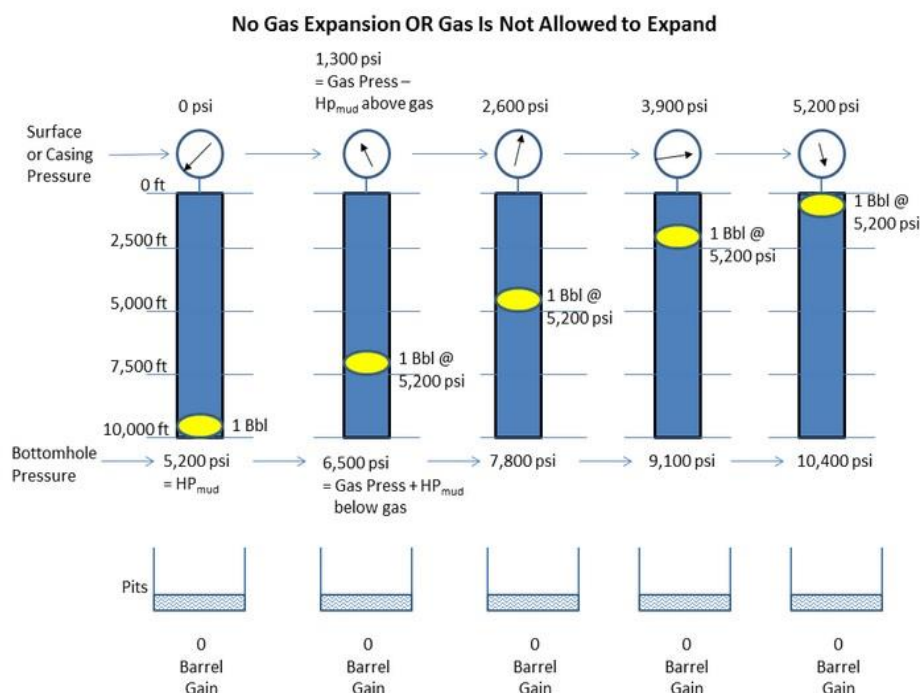
Όπου,

$P_{fracture}$, η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού με βάση τη δοκιμή διαρροής

$P_{mudshoe}$, η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη του ρευστού διάτρησης στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης

Αν η *πίεση δακτυλίου (SICP)* ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο (*MAASP*) σημαίνει πως μια υπεδαφική έκρηξη έχει λάβει χώρα.

4.3.3. Εκτόνωση αέριας εισροής



Σχήμα (4.7) : Συγκράτηση πίεσης του αέριου όγκου κατά την άνοδο

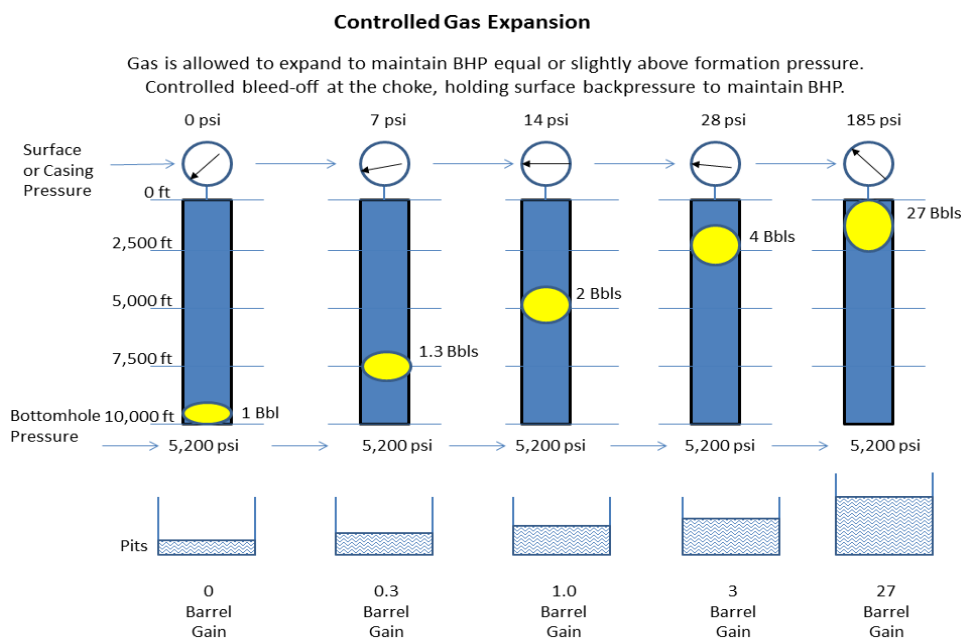
Ένας όγκος υπερπιεσμένου αερίου που ανέρχεται προς την επιφάνεια εκτός από τα τοιχώματα του πετρώματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί απειλή και για τη σωλήνωση της γεώτρησης. Κάθε σωλήνωση έχει

προδιαγραφές εκ κατασκευής της και η επιλογή των στελεχών της σωλήνωσης γίνεται βάση των πιέσεων που πρόκειται να δεχθούν.

Εάν, λοιπόν, ο αέριος όγκος εισέλθει σε περιοχή του δακτυλίου όπου τα στελέχη δεν έχουν επιλεγεί για την αντιμετώπιση τέτοιων πιέσεων, Σχήμα (4.7), θα θραυστούν. Όπως είναι λογικό ένα τέτοιο γεγονός έχει τραγικές συνέπειες για το μέλλον της γεώτρησης.

Στην περίπτωση αέριας εισροής, που επιβεβαιώνεται από τη συγχρονισμένη αύξηση της *πίεσης στήλης* και της *πίεσης δακτυλίου* (**SIDPP, SICP**)· μετά την αρχική αύξηση τους μέχρι τη στατική ισορροπία, πρέπει να ληφθεί κάποια ενέργεια ώστε να μειωθεί η πίεση της εισροής.

Πρέπει να εκτονωθεί το αέριο ώστε να μειωθεί η πίεση του, γεγονός που επιτυγχάνεται με το ελεγχόμενο άνοιγμα της βαλβίδας της γραμμής στραγγαλισμού (**choke line**) ώστε να εκτοπίζεται λάσπη διάτρησης και να δημιουργείται χώρος, όπως στο Σχήμα (4.8). Στόχος είναι η *πίεση στήλης* (**SIDPP**) να επανέλθει το δυνατότερο πιο κοντά στην τιμή που είχε κατά την ισορροπία των πιέσεων (**SIDPP_s**) ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία επαναφοράς του ελέγχου φυσιολογικά.



Σχήμα (4.8) : Εκτόνωση του αερίου και μείωση πίεσης κατά την άνοδο

Κεφάλαιο 5 : Μέθοδοι αντιμετώπισης και ελέγχου

Θα αναλυθούν δύο μέθοδοι επαναφοράς ελέγχου του πηγαδιού· η Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή (***Driller's Method***) και η Μέθοδος του Μηχανικού (***Wait and Weight, Engineer's Method***), δεδομένου ότι έχουν τη μεγαλύτερη πρακτική εφαρμογή στην αντιμετώπιση εισροών. Οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν εφαρμογή όταν το κοπτικό άκρο βρίσκεται στον πυθμένα της γεώτρησης.

Με την έναρξη της κυκλοφορίας για τη διοχέτευση της εισροής προς την επιφάνεια και την αντικατάσταση της αρχικής λάσπης διάτρησης από τη νέα βαρύτερη λάσπη, το σύστημα παύει να βρίσκεται σε στατική ισορροπία και νέα δυναμικά φαινόμενα εμφανίζονται.

5.1. Δυναμικές συνθήκες της γεώτρησης

5.1.1. Slow Circulation Rate

Κατά την κυκλοφορία της λάσπης στη γεώτρηση είναι φυσικό να υπάρχουν τριβές με την διατρητική στήλη, το κοπτικό άκρο, τα τοιχώματα του πετρώματος στο τμήμα που δεν έχει σωληνωθεί το πηγάδι (***open hole***) καθώς και με τη σωλήνωση.

Η πτώση πίεσης λόγω τριβών στη γεώτρηση κατά την κυκλοφορία συγκεκριμένης πυκνότητας λάσπης διάτρησης· ονομάζεται σύμφωνα με την βιβλιογραφία ***Slow Circulation Rate (SCR), Kill Rate Pressure, Standpipe Pressure, Slow Circulation Pressure, Dynamic Pressure Lose*** κ.α.

Αυτή η πτώση πίεσης, που θα αναφέρεται στο εξής ως ***SCR***, ισοδυναμεί με την επιπλέον πίεση που ασκείται στην πίεση κυκλοφορίας (***Circulation Pressure***) της λάσπης διάτρησης από τις αντλίες, η οποία είναι απαραίτητη για να υπερνικηθούν οι τριβές που δημιουργούνται μεταξύ της λάσπης και των τοιχωμάτων στο πηγάδι.

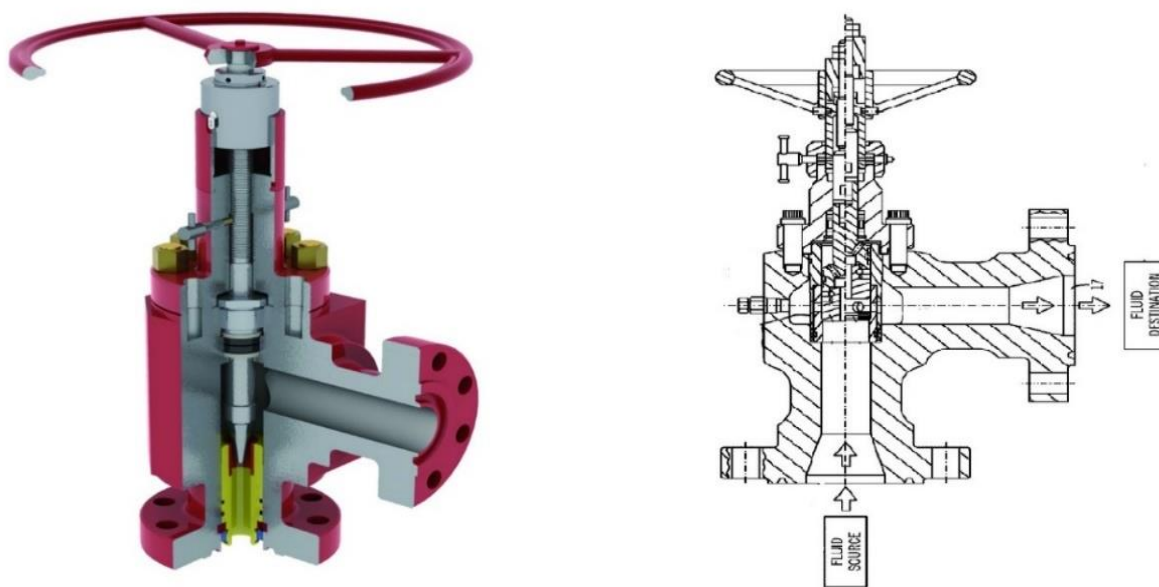
Αυτή η πίεση πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου :

1. Σε κάθε αλλαγή της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης
2. Σε αλλαγή της προκαθορισμένης παροχής λάσπης

3. Ανά διαστήματα βάθους όρυξης, π.χ. 400ft
4. Όταν αλλάζει το κοπτικό άκρο και γενικά σε κάθε αλλαγή της κατώτερης συνδεσμολογίας της διατρητικής στήλης. (**BHA**)

5.1.2. Πίεση στραγγαλισμού

Το πηγάδι εφόσον είναι πάντοτε σφραγισμένο από τον αντιεκρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας κατά την αντιμετώπιση μιας εισροής, η φυσιολογική έξοδος των ρευστών από το δακτύλιο της γεώτρησης είναι αδύνατη. Τα ρευστά, συμπεριλαμβανομένης και της εισροής, εξέρχονται από το πηγάδι μέσω της γραμμής στραγγαλισμού· η οποία συνδέεται με τη βαλβίδα στραγγαλισμού (**choke valve**), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα (5.1). Η βαλβίδα ελέγχει την ποσότητα ρευστών που εξάγονται· και ρυθμίζεται μέσω της πίεσης στραγγαλισμού (**Choke Pressure**).



Σχήμα (5.1) : Βαλβίδα στραγγαλισμού

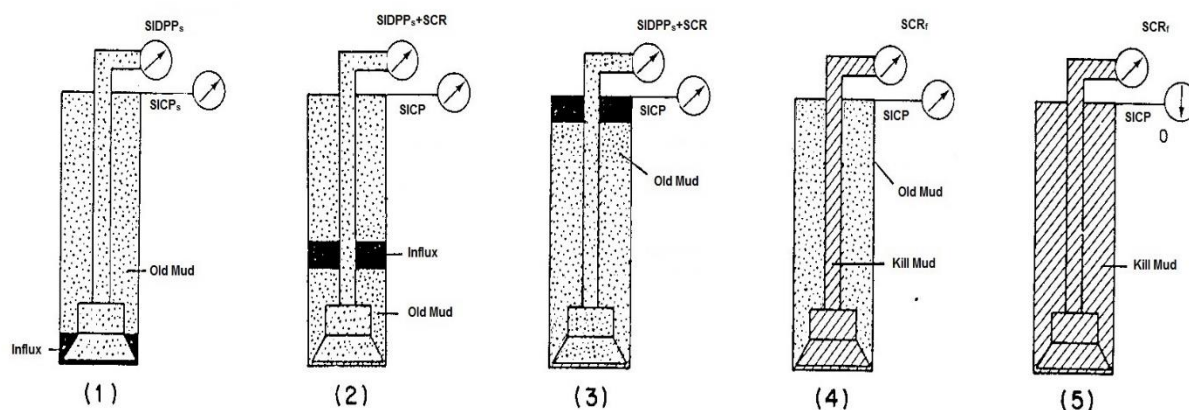
5.1.3. Παροχή της λάσπης εξουδετέρωσης

Η παροχή της λάσπης κατά την αντιμετώπιση μιας εισροής (**kill rate**) διαφέρει από την παροχή που χρησιμοποιείται υπό φυσιολογικές συνθήκες διάτρησης (**drilling rate**). Η παροχή πρέπει να είναι σαφώς μικρότερη, για να ελαχιστοποιήσει την περίπτωση διάρρηξης του σχηματισμού στο μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης. Επίσης εξασφαλίσει περισσότερο χρόνο, ώστε να υπάρχει η ευχέρεια για τυχόν διορθώσεις της πίεσης στραγγαλισμού

της βαλβίδας (**Choke Pressure**), για τον έλεγχο της εξόδου του όγκου των ρευστών· που ακολουθεί ένα πολύ συγκεκριμένο πρόγραμμα, ώστε να εξαχθεί η εισροή με ασφάλεια.

Η διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης με σκοπό την αποτροπή περαιτέρω όγκου εισροής, επιτυγχάνεται με τη σωστή διαχείριση της πίεσης στραγγαλισμού (**Choke Pressure**). Μεταβάλλεται κατάλληλα συναρτήσει του χρόνου, ώστε η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) που ασκείται από την αντλία που εισπιέζει λάσπη στην κατάλληλη παροχή (**kill rate**)· σε συνδυασμό με την ελεγχόμενη έξοδο των ρευστών από τη γεώτρηση, να προξενούν πίεση στον πυθμένα σταθερά μεγαλύτερη από την πίεση πόρων του σχηματισμού.

5.2. Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή - Μέθοδος δύο κυκλοφοριών



Σχήμα (5.2) : Αναπαράσταση των κυκλοφοριών της Μεθόδου του Γεωτρυπανιστή

Η Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή (**Driller's Method**) αποτελεί μια μέθοδο που εκτελείται σε δύο φάσεις για αυτό και είναι επιπλέον γνωστή ως *μέθοδος δύο κυκλοφοριών*. Εφόσον το σφραγισμένο πηγάδι είναι σε ισορροπία πιέσεων και δεν δέχεται περαιτέρω εισροή, καταγράφεται η *πίεση στήλης* (**SIDPP_s**) και η *πίεση δακτυλίου* (**SICP_s**) σε στατικές συνθήκες. Υπολογίζεται η πυκνότητα και ο όγκος της εισροής, καθώς επίσης και η κατάλληλη νέα πυκνότητα του ρευστού διάτρησης. (Όπως έχει υπολογιστεί από τις Εξισώσεις (4.5), (4.6))

Στην πρώτη κυκλοφορία σκοπός είναι να απομακρυνθεί ο όγκος της εισροής από τη γεώτρηση. Εισπιέζεται από την επιφάνεια η αρχική λάσπη διάτρησης,

ώστε να εκτοπίσει την εισροή στην επιφάνεια. Στη δεύτερη κυκλοφορία της μεθόδου, αφότου δηλαδή έχει απομακρυνθεί η εισροή από το πηγάδι, εισπιέζεται η λάσπη εξουδετέρωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (5.2). Κυκλοφορεί φυσιολογικά από την επιφάνεια δια μέσου της διατρητικής στήλης μέχρι τον πυθμένα και επιστρέφει στην επιφάνεια δια του δακτυλίου της γεώτρησης. Όταν σε όλο το πηγάδι κυκλοφορεί μόνο η λάσπη εξουδετέρωσης· είναι πλέον ασφαλές να ανοίξουν τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας. Η γεώτρηση βρίσκεται πάλι υπό έλεγχο. Αναλυτικότερα η μέθοδος αναλύεται σε τέσσερις φάσεις.

- **Πρώτη κυκλοφορία**

1. Πρώτη φάση (Εκτόπιση της εισροής στην επιφάνεια)

Η πρώτη φάση πιέσεων, αποτελεί τη χρονική περίοδο όπου εισπιέζεται η αρχική λάσπης διάτρησης, έως ότου ο όγκος της εισροής εκτοπιστεί στην επιφάνεια, λίγο πριν εξέλθει της γεώτρησης.

Η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) της λάσπης διάτρησης κατά την εκκίνηση της πρώτης κυκλοφορίας (δυναμικές συνθήκες) υπολογίζεται :

$$P_{circ} = SIDPP_s + SCR + P_{ob} = ICP \quad (5.1)$$

Όπου,

SCR, (Slow Circulation Rate) η επιπλέον πίεση που ασκείται από την αντλία, η οποία είναι απαραίτητη για να υπερνικηθούν οι τριβές που δημιουργούνται μεταξύ της λάσπης και των τοιχωμάτων στο πηγάδι.

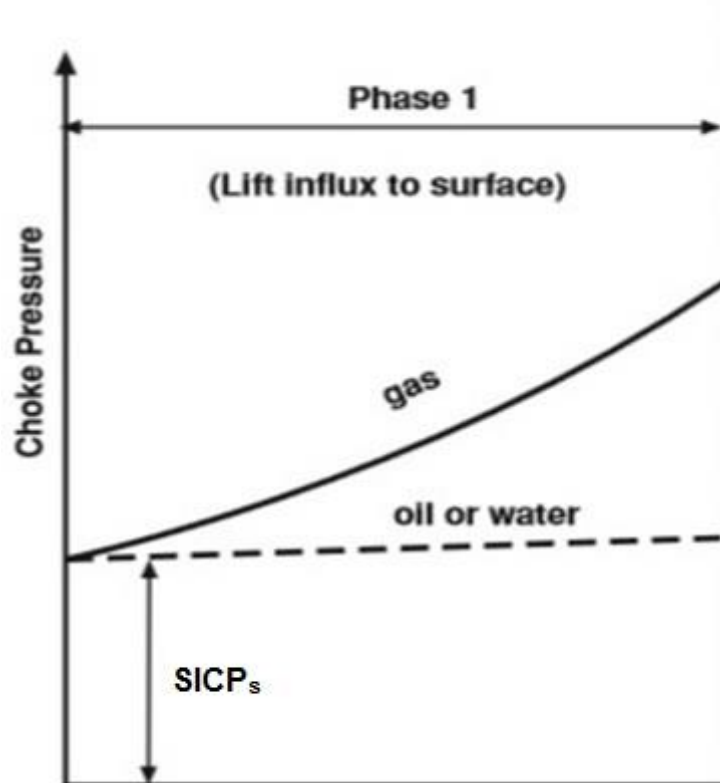
P_{ob}, (Overbalance) η επιπλέον πίεση η οποία ορίζεται σαν πίεση ασφαλείας ώστε εάν ελαττωθεί η πίεση στον πυθμένα για οποιονδήποτε λόγο· να μην ξεπεραστεί από την πίεση πόρων του σχηματισμού.

Η αρχική πίεση κυκλοφορίας (πίεση αντλίας) είναι γνωστή ως **ICP (Initial Circulation Pressure)**

Αντίστοιχα η αρχική πίεση της βαλβίδας της γραμμής στραγγαλισμού (**Choke Pressure**) υπολογίζεται:

$$P_{choke} = SICP_s + P_{ob} \quad (5.2)$$

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης η πίεση στραγγαλισμού (**Choke Pressure**) ρυθμίζεται ώστε να παραμένει σταθερή στην περίπτωση που η εισροή δεν είναι αέρια. Σε αντίθετη περίπτωση θα αυξηθεί αισθητά καθώς η εισροή θα εκτοπίζεται προς την επιφάνεια, με μέγιστη πίεση την χρονική στιγμή πριν αρχίσει να εξέρχεται από το πηγάδι, όπως φαίνεται από το Διάγραμμα (5.1). Για αυτή τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι απαραίτητο η βαλβίδα της γραμμής στραγγαλισμού να αντέχει εξαιρετικά υψηλές πιέσεις.



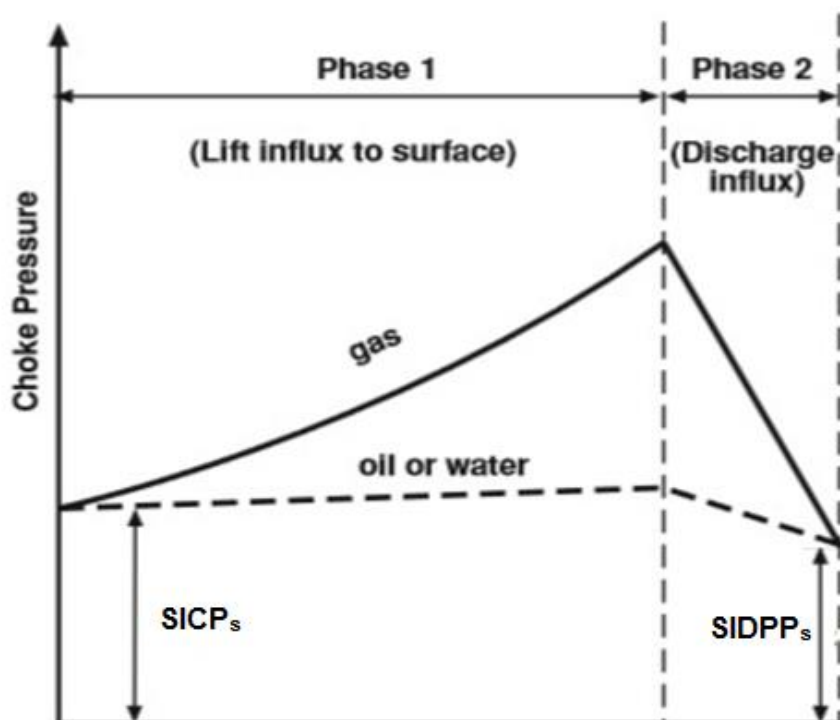
Διάγραμμα (5.1) : Πίεση στραγγαλισμού κατά την πρώτη φάση της μεθόδου

Η πίεση στραγγαλισμού θα πρέπει να ρυθμιστεί σύμφωνα με το Διάγραμμα (5.1) ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) καθ'όλη τη διάρκεια της πρώτης φάσης της μεθόδου. Κατά αυτόν

τον τρόπο θα διατηρηθεί σταθερή η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP**) αποτρέποντας περαιτέρω εισροές.

2. Δεύτερη φάση (Εξοδος της εισροής από το πηγάδι)

Η δεύτερη φάση αποτελεί τη χρονική περίοδο που εξέρχεται η εισροή από τη γεώτρηση. Σε αυτή τη φάση η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) θα πρέπει να συνεχίσει να παραμένει σταθερή ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση πυθμένα (**BHP**), γεγονός που επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας τη βαλβίδα της γραμμής στραγγαλισμού. Η βαλβίδα ανοίγεται σταθερά έως ότου η πίεση στραγγαλισμού να ισοδυναμίσει με την *πίεση στήλης* σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**): τη στιγμή που όλη η εισροή έχει εξέλθει, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα (5.2).



Διάγραμμα (5.2) : Πίεση στραγγαλισμού μέχρι και τη δεύτερη φάση της μεθόδου,

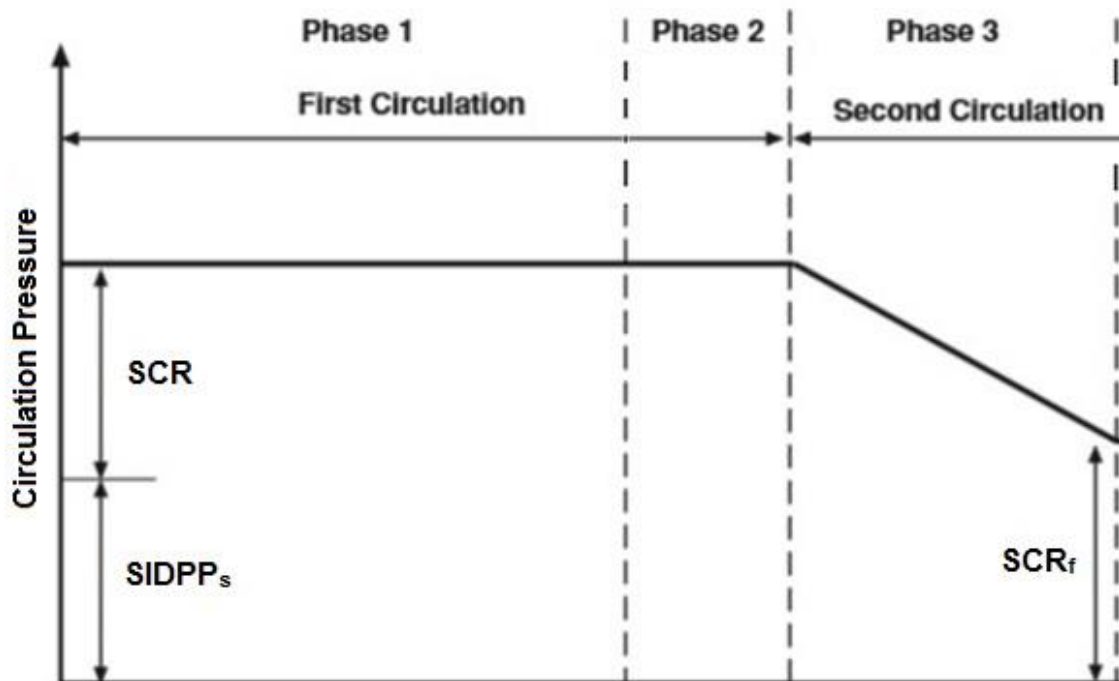
Αφού πλέον στο πηγάδι κυκλοφορεί μόνο η αρχική λάσπη διάτρησης και δεν υπάρχει υπολειπόμενος όγκος εισροής, είναι φυσικό η *πίεση στήλης* να ισοδυναμεί με την *πίεση δακτυλίου* (**SIDPP = SICP**).

- **Δεύτερη Κυκλοφορία**

3. Τρίτη φάση (Η διατηρητική στήλη πληρούται με τη λάσπη εξουδετέρωσης)

Η τρίτη φάση της μεθόδου είναι και η αρχή της δεύτερης κυκλοφορίας. Ονομάζεται δεύτερη κυκλοφορία καθώς πλέον το ρευστό διάτρησης που θα εισπιέζεται θα είναι η νέα, βαρύτερη λάσπη κατάλληλης πυκνότητας. (Όπως αυτή έχει υπολογιστεί από την Εξίσωση (4.6))

Η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**), η οποία έως τώρα παρέμενε σταθερή, πρέπει να μειώνεται καθώς η διατηρητική στήλη πληρούται με τη λάσπη εξουδετέρωσης· διότι η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης αυξάνει λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας. Η διατήρηση της πίεσης στον πυθμένα απαιτεί τη μείωση της πίεσης κυκλοφορίας, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα (5.3), η οποία επιτυγχάνεται διατηρώντας την πίεση στραγγαλισμού σταθερή.



Διάγραμμα (5.3) : Πίεση κυκλοφορίας στις πρώτες τρεις φάσεις

Η πίεση πυθμένα, στην πρώτη κυκλοφορία της μεθόδου, διατηρούνταν ίση με το άθροισμα της *πίεσης στήλης* σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**) και της υδροστατικής πίεσης της λάσπης εσωτερικά της διατρητικής στήλης, αφού όλη η **SCR** διατίθεται για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής κατά την κυκλοφορία. Καθώς η λάσπη εξουδετέρωσης σταδιακά καταλαμβάνει χώρο εσωτερικά των διατρητικών στελεχών· η *πίεση στήλης* (**SIDPP**) μειώνεται έως ότου γίνει μηδενική όταν πλέον όλη η διατρητική στήλη είναι πλήρης με τη νέα βαρύτερη λάσπη. Στο σημείο αυτό, εάν έχει προσδιοριστεί ορθά η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης, η υδροστατική πίεση της λάσπης εσωτερικά της διατρητικής στήλης είναι τουλάχιστον ίση με την πίεση πόρων του σχηματισμού.

Η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) τη χρονική στιγμή πλήρωσης της διατρητικής στήλης με τη λάσπη εξουδετέρωσης θα πρέπει να είναι:

$$P_{circ} = SCR_f = FCP$$

Όπου,

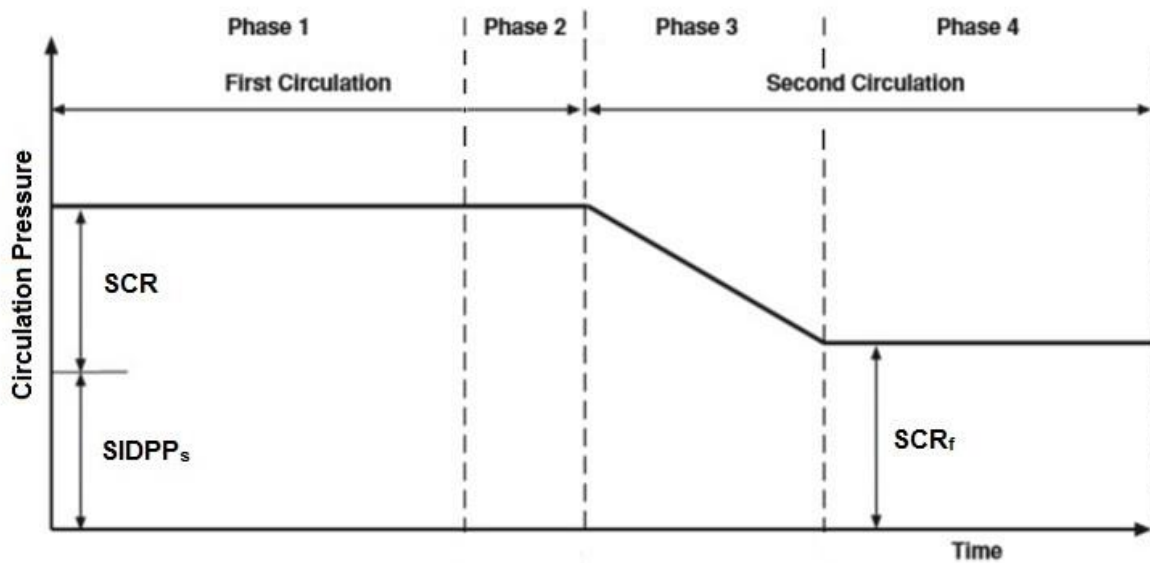
SCR_f , η πίεση υπερνίκησης των τριβών μεταξύ των τοιχωμάτων στο πηγάδι και της λάσπης εξουδετέρωσης.

$$SCR_f = SCR * \frac{\rho_k}{\rho_m} = FCP \quad (5.3)$$

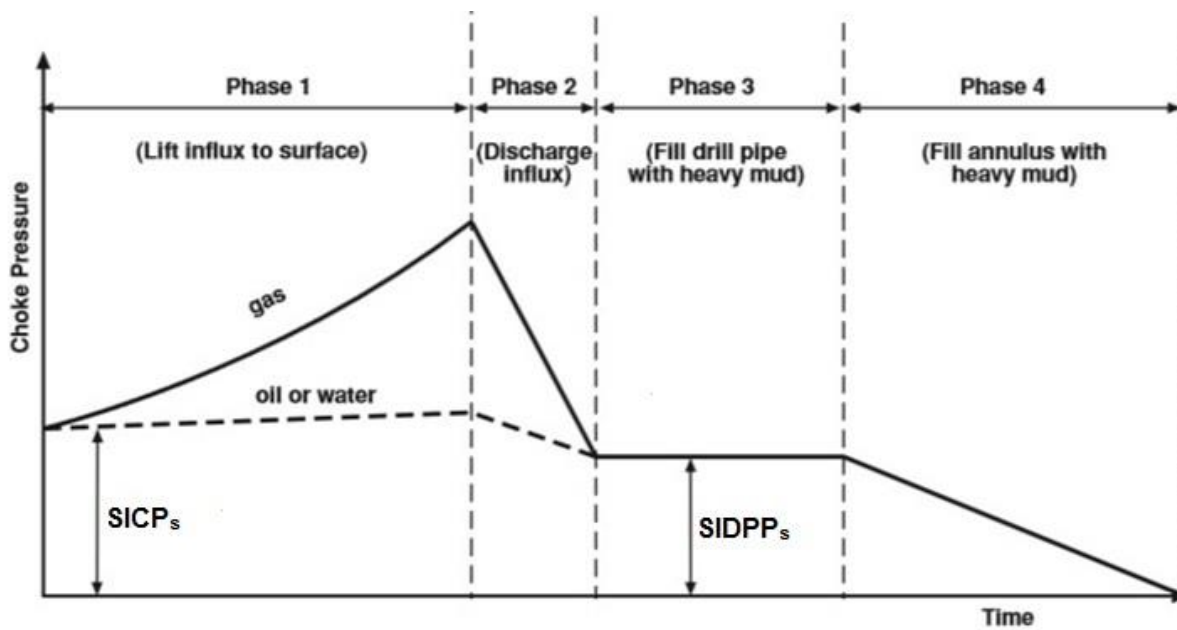
4. Τέταρτη φάση (Η λάσπη εξουδετέρωσης πληρεί το δακτύλιο της γεώτρησης)

Η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) στο τέλος της τρίτης φάσης (SCR_f), που αντιπροσωπεύει την πίεση υπερνίκησης τριβών, αποτελεί και την τελική πίεση κυκλοφορίας ή **FCP (Final Circulation Pressure)**.

Καθώς η λάσπη εξουδετέρωσης πληρεί από κάτω προς τα πάνω το δακτύλιο, η βαλβίδα στραγγαλισμού θα πρέπει να ανοίγει, έως ότου η πίεση στραγγαλισμού (**Choke Pressure**) μηδενιστεί όταν το πηγάδι είναι πλέον πλήρες με τη λάσπη εξουδετέρωσης. Όταν η πίεση στραγγαλισμού μηδενίζεται, η βαλβίδα είναι τελείως ανοιχτή.

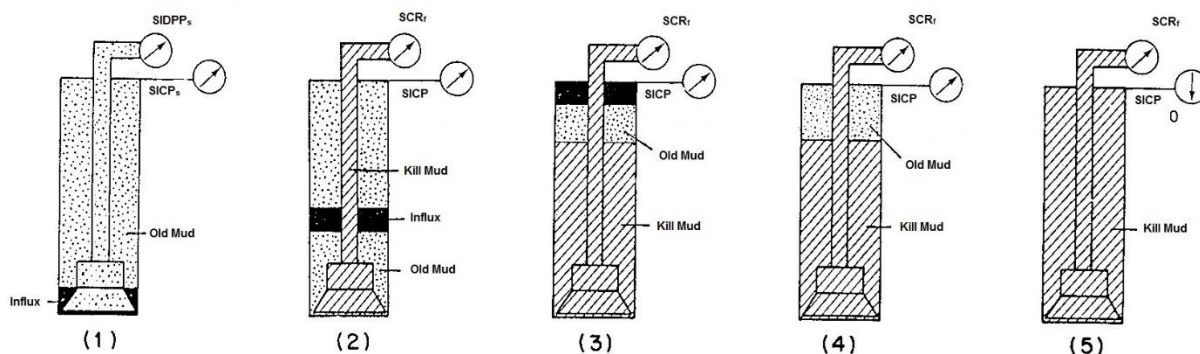


Διάγραμμα (5.4) : Πίεση κυκλοφορίας κατά την εκτέλεση της μεθόδου



Διάγραμμα (5.5) : Πίεση στραγγαλισμού κατά την εκτέλεση της μεθόδου

5.3. Μέθοδος του Μηχανικού - Μέθοδος μιας κυκλοφορίας



Σχήμα (5.3) : Αναπαράσταση της Μεθόδου του Μηχανικού

Σε αυτή τη μέθοδο αφού οι πιέσεις στη γεώτρηση σταθεροποιηθούν και υπολογιστεί η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης, σε αντίθεση με τη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή (**Driller's Method**)· δεν εισπιέζεται η αρχική λάσπη διάτρησης για να εκτοπίσει την εισροή. Αντιθέτως, παρασκευάζεται η λάσπη εξουδετέρωσης και αυτή είναι που εισπιέζεται κατευθείαν στο πηγάδι, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (5.3). Για αυτόν το λόγο η μέθοδος είναι γνωστή ως *μέθοδος μιας κυκλοφορίας* ή και αλλιώς γνωστή ως Μέθοδος του Μηχανικού (**Engineer's Method, Wait and Weight**).

Στη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή υπάρχει πάντα ένα ρευστό συγκεκριμένης πυκνότητας που πληρεί είτε το δακτύλιο της γεώτρησης είτε το εσωτερικό της διατρητικής στήλης. Αυτό ισχύει και για τις τέσσερις φάσεις της μεθόδου, γεγονός που καθιστά σχετικά εύκολα διαχειρίσιμη την πίεση στραγγαλισμού, άρα και την πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) που εξαρτάται από αυτή.

Αντίθετα, στη Μέθοδο του Μηχανικού, από την αρχή της μεθόδου, στη διατρητική στήλη συνυπάρχουν η αρχική λάσπη διάτρησης καθώς και η λάσπη εξουδετέρωσης που εισπιέζεται· και στο δακτύλιο η αρχική λάσπη με την εισροή. Για αυτόν το λόγο στη μέθοδο αυτή είναι περιπλοκότερη η προσαρμογή των πιέσεων για τη διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης. Εντούτοις, αν η μέθοδος εκτελεστεί σωστά, η επαναφορά ελέγχου του πηγαδιού πραγματοποιείται στα 2/3 του χρόνου της Μεθόδου του Γεωτρυπανιστή. Αναλυτικότερα και αυτή η μέθοδος αναλύεται σε τέσσερις φάσεις.

1. Πρώτη φάση (Η διατρητική στήλη πληρούται από τη λάσπη εξουδετέρωσης)

Η αρχική πίεση κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης (**ICP**) ισοδυναμεί όπως και στη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή (**Driller's Method**) με το άθροισμα της **SCR**, της πίεσης στήλης σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**) καθώς και της επιπλέον πίεσης ασφαλείας, **P_{ob}** (**Overbalance**). Αντίστοιχα η πίεση στραγγαλισμού στην εκκίνηση της μεθόδου ισοδυναμεί με το άθροισμα της πίεσης δακτυλίου σε στατικές συνθήκες (**SICP_s**) και της επιπλέον πίεσης ασφαλείας.

$$P_{circ} = SIDPP_s + SCR + P_{ob} = ICP \quad (5.1)$$

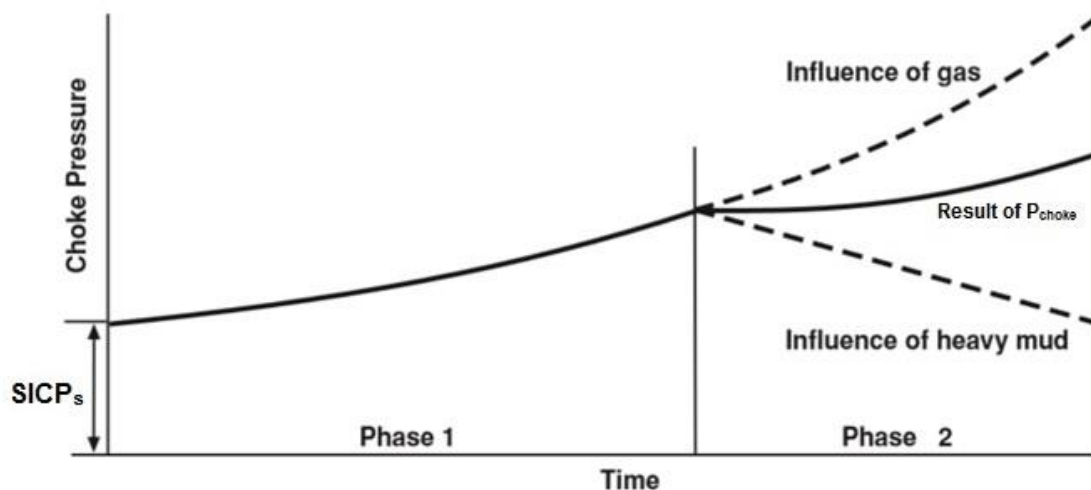
$$P_{choke} = SICP_s + P_{ob} \quad (5.2)$$

Καθώς η λάσπη εξουδετέρωσης εισέρχεται και πληρεί τη διατρητική στήλη, αυξάνεται η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη της λάσπης· καθώς αυξάνεται η μέση πυκνότητα της. Η πίεση στον πυθμένα θα πρέπει να παραμείνει σταθερή, οπότε η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) θα πρέπει σταδιακά να μειώνεται έως ότου η λάσπη εξουδετέρωσης καλύψει όλη τη διατρητική στήλη, χρονική στιγμή όπου θα αποτελεί την τελική πίεση κυκλοφορίας (**FCP**) και ισοδυναμεί με **SCR_f**. Η μεταβολή της επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας τη βαλβίδα της γραμμής στραγγαλισμού. Η πίεση κυκλοφορίας θα πρέπει να παραμείνει σταθερή για τις επόμενες τρεις φάσεις της μεθόδου (**FCP**).

2. Δεύτερη φάση (Εκτόπιση της εισροής στην επιφάνεια)

Η βαλβίδα της γραμμής στραγγαλισμού ρυθμίζεται πλέον έτσι ώστε να παραμένει σταθερή η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**). Σε αυτή την φάση η πίεση στραγγαλισμού προσδιορίζεται από δύο παράγοντες. Ο πρώτος αφορά στην αύξηση της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η στήλη των ρευστών του δακτυλίου καθώς εισέρχεται σε αυτόν η νέα πυκνότερη λάσπη, με αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης δακτυλίου (**SICP**). Ο δεύτερος αφορά στην περίπτωση αέριας εισροής, όπου καθώς αυτή ανέρχεται στην επιφάνεια·

εκτονώνεται καταλαμβάνοντας όγκο της λάσπης διάτρησης μέσα στο δακτύλιο. Τούτο έχει ως συνέπεια τη μείωση της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η στήλη της λάσπης, επομένως προκαλεί αύξηση της *πίεσης δακτυλίου (SICP)*, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα (5.6).



Διάγραμμα (5.6) : Πίεση στραγγαλισμού τις δύο πρώτες φάσεις της μεθόδου

Συνεπώς, η πίεση στραγγαλισμού ρυθμίζεται κατάλληλα, σύμφωνα με τους παραπάνω δύο παράγοντες στην περίπτωση εισροής αερίου.

3. Τρίτη φάση (Εξοδος της εισροής από το πηγάδι)

Η εισροή εκτοπίζεται από το πηγάδι της γεώτρησης και ο χώρος που είχε στο δακτύλιο καταλαμβάνεται από τη λάσπη εξουδετέρωσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική αύξηση της υδροστατικής πίεσης στο δακτύλιο, συνεπώς και τη μεγάλη μείωση της *πίεσης δακτυλίου (SICP)*. Η πίεση κυκλοφορίας (**Circulation Pressure**) πρέπει να διατηρηθεί σταθερή, για το λόγο αυτό· η πίεση στραγγαλισμού θα πρέπει να μειώνεται δραστικά συναρτήσει του χρόνου καθώς εξέρχεται η εισροή από τη γεώτρηση.

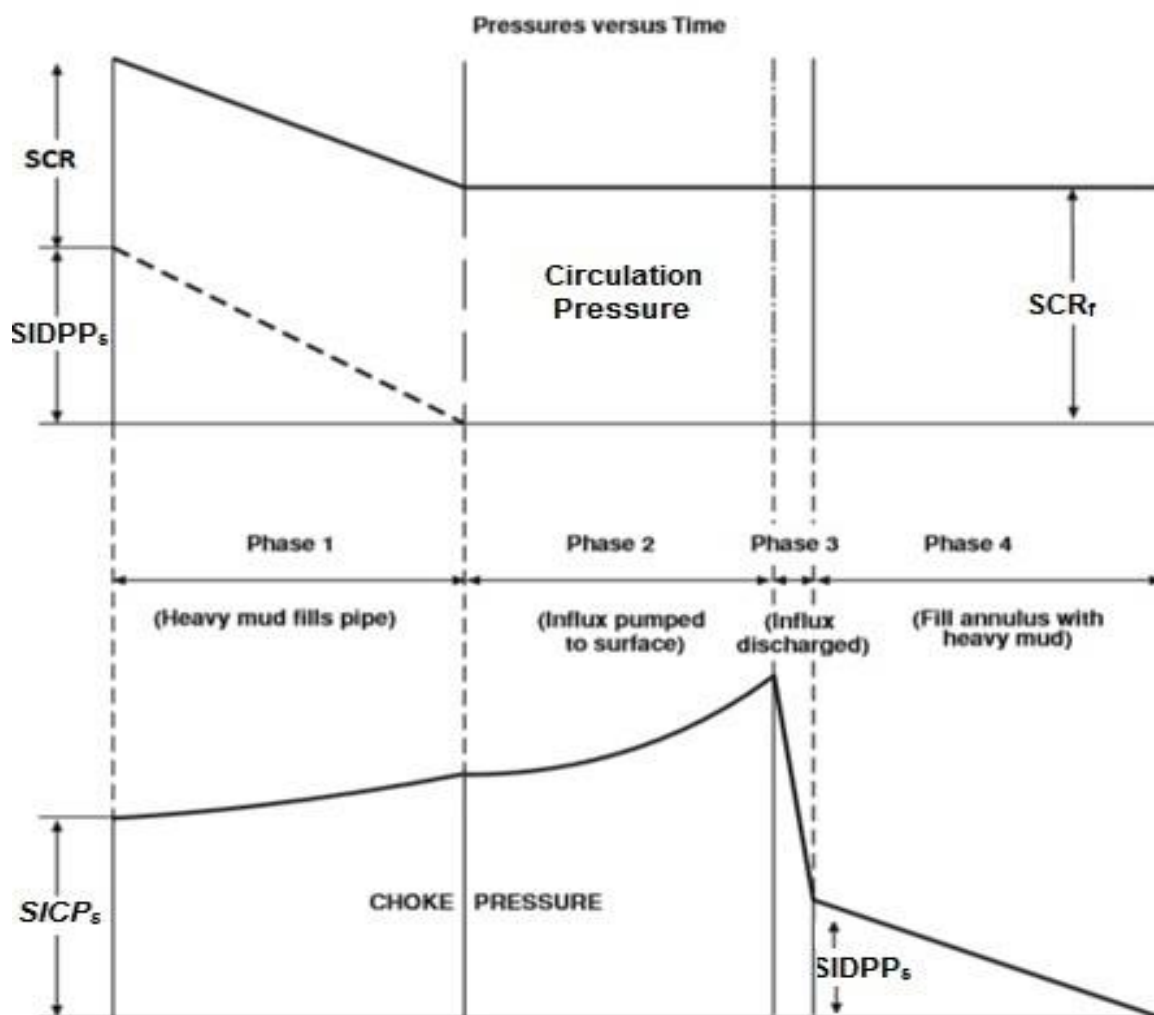
4. Τέταρτη φάση (Η λάσπη εξουδετέρωσης πληρεί το δακτύλιο της γεώτρησης)

Στο τέλος αυτής της φάσης ο δακτύλιος, συνεπώς και όλο το πηγάδι, πληρούται από την νέα, μεγαλύτερης πυκνότητας λάσπη διάτρησης. Η πυκνότητα της είχε επιλεγεί έτσι ώστε η υδροστατική πίεση που θα ασκεί να

υπερβαίνει την πίεση πόρων του σχηματισμού. Συνεπώς, καθώς ο δακτύλιος είναι γεμάτος από τη λάσπη εξουδετέρωσης, η *πίεση δακτυλίου (SICP)* θα πρέπει να είναι μηδενική· όπως επίσης και η *πίεση στήλης (SIDPP)*. Αν η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης έχει προσδιοριστεί σωστά, στο τέλος της μεθόδου θα πρέπει να ισχύει:

$$SICP = 0 , \quad SIDPP = 0 , \quad P_{choke} = 0$$

Τα έμβολα του αντικρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας μπορούν να ανοίξουν και να συνεχιστεί η όρυξη με ασφάλεια καθώς η γεώτρηση βρίσκεται και πάλι υπό έλεγχο.



Διάγραμμα (5.7) : Απεικόνιση πιέσεων στραγγαλισμού και κυκλοφορίας, ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση πυθμένα κατά την εκτέλεση της μεθόδου

5.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων

Οι δύο μέθοδοι είναι συγκρίσιμες και είναι λάθος να θεωρηθεί κάποια ως καλύτερη. Η επιλογή εξαρτάται από την κάθε περίπτωση εισροής και συνθηκών, για αυτό και χρησιμοποιούνται και οι δύο. Πιο συγκεκριμένα :

Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή (*Driller's Method*)

Πλεονεκτήματα

Με τη μέθοδο αυτή είναι εφικτό να ξεκινήσει άμεσα η αντιμετώπιση μιας εισροής, καθώς στην πρώτη κυκλοφορία εισπνέζεται η λάσπη διάτρησης που ήδη υπάρχει στις δεξαμενές επιφάνειας.

Λόγω της άμεσης κυκλοφορίας, δεν υπάρχει χρόνος ώστε μια εισροή αερίου να ανέλθει σε επικίνδυνα σημεία του δακτυλίου της γεώτρησης (λ.χ. Βάθος έδρασης σωλήνωσης) χωρίς να αρχίσει να εκτονώνεται και να εκτοπίζεται προς την επιφάνεια.

Η εισροή εκτοπίζεται από τη γεώτρηση ακόμα και όταν δεν υπάρχουν τα απαραίτητα· ώστε να παραχθεί η λάσπη εξουδετέρωσης (υλικά στάθμισης της πυκνότητας της). Η δεύτερη κυκλοφορία καθυστερεί, αλλά εφόσον στην πρώτη έχει εκτοπιστεί επιτυχώς η εισροή και διατηρείται σταθερή η υδροστατική πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης, υπάρχει σχετική ασφάλεια.

Η διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα ώστε να αποτρέπονται περαιτέρω εισροές, είναι σχετικά εύκολη, καθώς πάντα κατά τη διάρκεια της μεθόδου στο ένα σκέλος της γεώτρησης (υοειδές μανόμετρο, U-tube) θα υπάρχει μόνο ένα, συγκεκριμένης πυκνότητας, ρευστό. Γενικώς, οι υπολογισμοί για την εκτέλεση της μεθόδου είναι σχετικά απλοί.

Μειονεκτήματα

Ο επιφανειακός εξοπλισμός είναι εκτεθειμένος σε πολύ υψηλές πιέσεις, ιδιαίτερα όταν ασκείται η μέγιστη πίεση ενός αερίου όγκου πριν εξέλθει της γεώτρησης. Το πηγάδι βρίσκεται για αρκετή ώρα σε υψηλές τιμές πιέσεων καθώς η εκτέλεση της μεθόδου διαρκεί αρκετό χρόνο, λόγω των δύο κυκλοφοριών των ρευστών διάτρησης.

Η διατήρηση πίεσης στο πηγάδι για αρκετό χρόνο επιφέρει αυξημένη επικινδυνότητα διεύρυνσης μιας περιοχής της γεώτρησης στο μη σωληνωμένο τμήμα της (ένα τμήμα αποκτά μεγαλύτερη διάμετρο από την φυσιολογική, λόγω μηχανικής ή χημικής καταπόνησης που δυσχεραίνεται με το χρόνο, washout).

Μέθοδος του Μηχανικού (*Wait and Weight*)

Πλεονεκτήματα

Εφόσον η νέα πυκνότερη λάσπη συνήθως εισέρχεται στο δακτύλιο πριν η εισροή φτάσει στην επιφάνεια, η πίεση στο δακτύλιο διατηρείται χαμηλή συνεπώς και οι πιέσεις στα ευαίσθητα σημεία της γεώτρησης.

Εφόσον η γεώτρηση επανέρχεται σε έλεγχο με μία κυκλοφορία λάσπης, συνεπάγεται και μείωση του μη παραγωγικού χρόνου του γεωτρητικού έργου. Βέβαια, απαιτείται να είναι εφικτό να παραχθεί η λάσπη εξουδετέρωσης άμεσα.

Μειονεκτήματα

Ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή της λάσπης εξουδετέρωσης. Μέχρι να εισπιαστεί η λάσπη εξουδετέρωσης στο πηγάδι, εάν ο σχηματισμός είναι αδύναμος (πίεση ρωγμάτωσης) στο μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης, υπάρχει πιθανότητα να συμβεί απώλεια κυκλοφορίας της λάσπης διάτρησης, καθώς θα διαρρέουν στον πλευρικό σχηματισμό που θα έχει ρωγματωθεί από την πίεση που ασκεί ο όγκος της αέριας εισροής καθώς ανέρχεται στην επιφάνεια.

Απαιτούνται να είναι διαθέσιμα όλα τα υλικά που είναι απαραίτητα για την παρασκευή της λάσπης εξουδετέρωσης, αντίθετα η μέθοδος είναι αδύνατον να εφαρμοστεί.

Σε κάθε σκέλος της γεώτρησης (υοειδές μανόμετρο, U-tube) συνυπάρχουν ρευστά διαφορετικής πυκνότητας κατά την εκτέλεση της μεθόδου. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη διατήρηση σταθερής υδροστατικής πίεσης στον πυθμένα του πηγαδιού. Ιδιαίτερα σε κεκλιμένες γεωτρήσεις οι υπολογισμοί είναι αρκετά περίπλοκοι. Επίσης, καθώς μια εισροή αερίου ανέρχεται στην

επιφάνεια ενώ ο δακτύλιος γεμίζει σταδιακά με τη λάσπη εξουδετέρωσης, εύκολα δημιουργείται σύγχυση των πιέσεων καθώς ο δακτύλιος θα εμπεριέχει τριών ειδών ρευστά.

5.5. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου

Στη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή, υπάρχουν προβλήματα πιέσεων τόσο στη γεώτρηση όσο και στον επιφανειακό εξοπλισμό. Σε περίπτωση εισροής αερίου, η πίεση του όγκου αερίου διατηρείται αρκετά υψηλή καθώς ανέρχεται στην επιφάνεια. Η μείωση της πίεσης αυτής, είναι εφικτή με την εκτόνωση του αερίου όγκου (αύξηση όγκου - μείωση πίεσης), γεγονός που απαιτεί την διάθεση χώρου στο δακτύλιο της γεώτρησης, δηλαδή την αφαίρεση όγκου λάσπης. Η υδροστατική πίεση της λάσπης όμως δεν είναι ικανή να υπερβεί την πίεση πόρων του σχηματισμού ενώ ταυτόχρονα να διατίθεται αρκετός χώρος στο δακτύλιο για να εκτονωθεί ικανοποιητικά η εισροή.

Αντίθετα στη Μέθοδο του Μηχανικού, καθώς η νέα πυκνότερη λάσπη εισέρχεται στο δακτύλιο, αυξάνει την υδροστατική πίεση στον πυθμένα, καθιστώντας εφικτή την αφαίρεση όγκου της αρχικής λάσπης άρα και την επιπλέον εκτόνωση της εισροής. Οι καταστροφικές συνέπειες της διατήρησης της πίεσης του όγκου αερίου που θα μπορούσαν να υπάρξουν, είναι λιγότερο πιθανές.

Οι καταστροφές θα συνέβαιναν είτε στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης, υπερβαίνοντας την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού, είτε πιο επιφανειακά υπερβαίνοντας την πίεση θραύσης των στελεχών της σωλήνωσης, είτε με την αστοχία του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας στην επιφάνεια (ή στον πυθμένα της θάλασσας).

Μια εισροή που θα μπορούσε να επιφέρει τέτοια αποτελέσματα στη γεώτρηση, λογικό είναι να αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο μιας κυκλοφορίας που παρέχει περισσότερη ασφάλεια. Ωστόσο, δεν είναι πάντα εφικτό να εφαρμοστεί η μέθοδος.

Ο όγκος της αέριας εισροής ανέρχεται στην επιφάνεια, προς τα σημεία που πιθανόν να υπάρξει πρόβλημα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Παράλληλα στις δεξαμενές επιφάνειας αυξάνεται κατάλληλα η πυκνότητα της λάσπης που θα κυκλοφορήσει στη γεώτρηση για την επαναφορά του ελέγχου. Εάν αυτή η διαδικασία διαρκέσει αρκετή ώρα, ο όγκος αέριου μπορεί να έχει ανέλθει στο πρώτο «τρωτό» σημείο της γεώτρησης, το βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Σε αυτή την περίπτωση η εισροή θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί με τη μέθοδο δύο κυκλοφοριών (Μέθοδος Γεωτρυπανιστή), καθώς η πίεση του αέριου όγκου θα είχε τουλάχιστον μειωθεί έως ένα βαθμό.

Όμως το χρονικό περιθώριο για να παραχθεί η λάσπη εξουδετέρωσης, δεν είναι το μοναδικό πρόβλημα της Μεθόδου του Μηχανικού (***Wait and Weight***). Η διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης για την αποτροπή περαιτέρω εισροών, είναι αρκετά περίπλοκη όπως προαναφέρθηκε στα μειονεκτήματα της μεθόδου. Γενικώς η εκτέλεση της μεθόδου των δύο κυκλοφοριών είναι αρκετά πιο απλή.

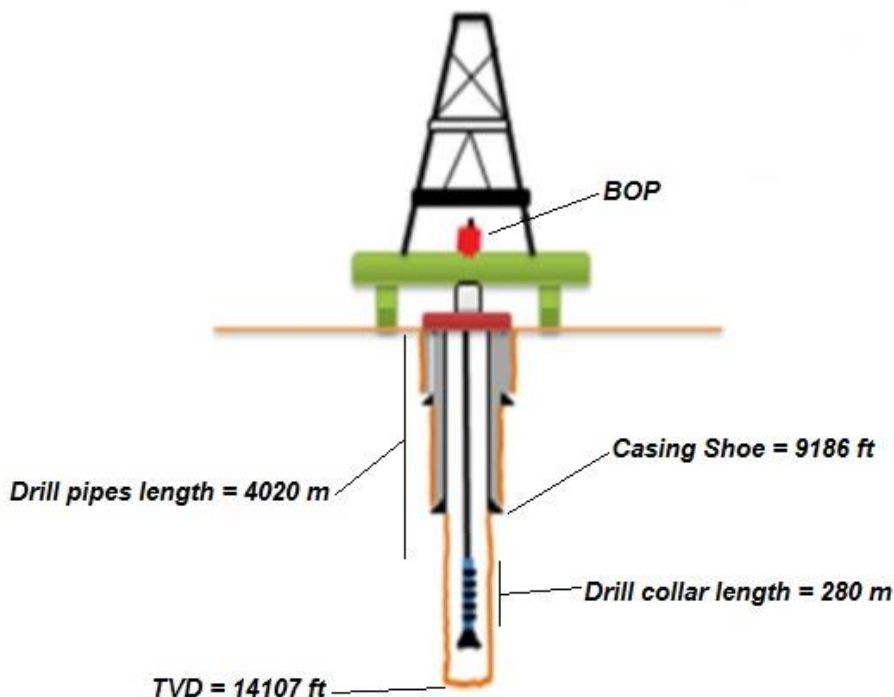
Συμπεραίνουμε ότι η επιλογή της μεθόδου αντιμετώπισης μιας εισροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κατά κύριο λόγο, η αντοχή του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας, η αντοχή των στελεχών σωλήνωσης και η πίεση ρωγμάτωσης των πλευρικών σχηματισμών σε σχέση με τη φύση και τον όγκο της εισροής προσεγγίζει την μέθοδο αντιμετώπισης. Επιπλέον, ο χρόνος αντίδρασης από την ένδειξη έως την επιβεβαίωση μιας εισροής, καθώς και η ύπαρξη των απαραίτητων υλικών και του χρόνου για τη δημιουργία της λάσπης εξουδετέρωσης· έχουν άμεση σχέση με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου. Σαφώς επίσης, σημαντικό ρόλο στην επιλογή διαδραματίζει η εμπειρία του προσωπικού στην σωστή εκτέλεση κάθε μεθόδου.

Κεφάλαιο 6 : Υπολογιστικές εφαρμογές σε χερσαίες και υπεράκτιες γεωτρήσεις

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο εφαρμογές, μία σε χερσαία γεώτρηση και μία σε υπεράκτια γεώτρηση· στις οποίες γίνεται χρήση των μεθόδων αντιμετώπισης εισροών που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των παραμέτρων που απαιτούνται για την ασφαλή και αποτελεσματική αντιμετώπιση της εισροής ρευστού εντός της γεώτρησης· και την ελεγχόμενη εκτόνωση του πηγαδιού και αποκατάσταση της ισορροπίας εντός αυτού.

6.1. Χερσαία γεώτρηση

Σε χερσαίο γεωτρητικό έργο επιβεβαιώνεται εισροή ρευστών που εμπεριέχονται στους πόρους των διατρυόμενων σχηματισμών, στον πυθμένα της γεώτρησης. Τα στοιχεία της γεώτρησης δίδονται παρακάτω.



Σχήμα (6.1) : Διαστασιολόγηση χερσαίας γεώτρησης

1. Πραγματικό κατακόρυφο βάθος γεώτρησης = 14.107 ft (4.300 μέτρα)
(TVD, True Vertical Depth)
2. Βάθος έδρασης σωλήνωσης = 9.186 ft (2.800 μέτρα)
3. Πυκνότητα λάσπης = 12,69 ppg (pounds per U.S. gallon) (ρ_{mud})
4. Πίεση δακτυλίου σε στατικές συνθήκες = 696 psi (SICPs)
5. Πίεση στήλης σε στατικές συνθήκες = 580 psi (SIDPPs)
6. Επιπλέον πίεση ασφαλείας = 145 psi (P_{ob}) (Overbalance)
7. Όγκος εμβολισμού αντλίας λάσπης = 17,5 λίτρα/εμβολισμό (l/stroke)
8. Οι μέθοδοι αντιμετώπισης εκτελούνται με :
 - A. 34 εμβολισμούς ανά λεπτό (strokes per minute, spm)
 - B. Παροχή λάσπης 595 λίτρα ανά λεπτό (l/min) (kill rate)
9. Τα διατρητικά στελέχη έχουν μήκος 4.020 μέτρα (h_{DP}) και χωρητικότητα 9,15 λίτρα ανά μέτρο (l/m)
10. Τα αντίβαρα έχουν μήκος 280 μέτρα (h_{DC}) και χωρητικότητα 4 λίτρα ανά μέτρο (l/m)
11. Η χωρητικότητα των τμημάτων (διάκενα) μεταξύ διατρητικών στελεχών, σωλήνωσης και τοιχωμάτων γεώτρησης έχουν ως εξής :
 - A. Διάκενο μεταξύ : Διατρητικών στελεχών - Σωλήνωσης = 24,2 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DP/CSG, Drill pipes/Casing) , ($\Delta\Sigma/\Sigma$, Διατρητικά Στελέχη/Σωλήνωση)
 - B. Διάκενο μεταξύ : Διατρητικών στελεχών - Τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα) = 23,6 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DP/OH, Drill pipes/Open hole) , ($\Delta\Sigma/\Gamma\Gamma$, Διατρητικά Στελέχη/Τοιχώματα Γεώτρησης)
 - Γ. Διάκενο μεταξύ : Αντίβαραν - Τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα) = 15,2 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DC/OH, Drill collars/Open hole) , (A/ $\Gamma\Gamma$, Αντίβαρα/Τοιχώματα Γεώτρησης)
12. Πτώση πίεσης λόγω τριβών κατά την κυκλοφορία της λάσπης (Slow Circulation Rate, SCR) = 261 psi

Με εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών αντιμετώπισης που αναλύθηκαν, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζονται οι παράμετροι και τα διαγράμματα εκτόνωσης του πηγαδιού για την αποκατάσταση της ισορροπίας και του ελέγχου.

Υπολογίζονται :

- Η πίεση πόρων του σχηματισμού
- Η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης
- Η αρχική και τελική πίεση κυκλοφορίας (ICP , FCP)
- Ο αριθμός των εμβολισμών της αντλίας σε κάθε τμήμα της γεώτρησης
- Ο όγκος της λάσπης εξουδετέρωσης που θα πληρεί τη διατρητική στήλη και το δακτύλιο
- Ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών
- Τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων της γεώτρησης

Τα περισσότερα από τα παραπάνω ζητούμενα είναι όμοια και για τις δύο μεθόδους, η διαδικασία εκτόνωσης και ο χρόνος πραγματοποίησης κάθε διαδικασίας διαφοροποιείται.

Πίεση πόρων του σχηματισμού

Μετά την ισορροπία των πιέσεων στο πηγάδι, όπου περαιτέρω εισροή είναι αδύνατη, η πίεση πόρων του σχηματισμού (**Pore Pressure**) ισούται με την υδροστατική πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP**).

Σύμφωνα με την Εξίσωση (4.1) :

$$BHP = SIDPP_s + \rho_m \times TVD$$

$$BHP = 580 \text{ psi} + (12.69 \text{ ppg} \times 0.052 \times 14107 \text{ ft})$$

$$BHP = 9888 \text{ psi} = 672.8 \text{ atm}$$

* $\text{ppg} \times 0.052 = \text{psi/ft}$

Πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης

Σύμφωνα με την Εξίσωση (4.6) :

$$\rho_k = \rho_m + \frac{SIDPP_s + P_{ob}}{TVD}$$

$$\rho_k = (12.69 \text{ ppg} \times 0.052) + \frac{580 \text{ psi} + 145 \text{ psi}}{14107 \text{ ft}}$$

$$\rho_k = 0.65988 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} + 0.05139 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

$$\rho_k = 0.71127 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} = 13.67 \text{ ppg}$$

Εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της πυκνότητας με την Εξίσωση (4.7) :

$$\rho_k = \frac{BHP + P_{ob}}{TVD}$$

$$\rho_k = \frac{9888 \text{ psi} + 145 \text{ psi}}{14107 \text{ ft}} = 0.711 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} = 0.711 \times 0.052 \text{ ppg} = 13.67 \text{ ppg}$$

Αρχική και Τελική πίεση κυκλοφορίας (ICP, FCP)

Σύμφωνα με την Εξίσωση (5.1) :

$$ICP = SIDPP_s + P_{ob} + SCR$$

$$ICP = 580 \text{ psi} + 145 \text{ psi} + 261 \text{ psi}$$

$$ICP = 986 \text{ psi}$$

Σύμφωνα με την Εξίσωση (5.3) :

$$FCP = SCR_f = SCR \times \frac{\rho_k}{\rho_m}$$

$$FCP = 261 \text{ psi} \times \frac{13.67 \text{ ppg}}{12.69 \text{ ppg}}$$

$$FCP = 281 \text{ psi}$$

Εφόσον έχει υπολογιστεί η αρχική και τελική πίεση κυκλοφορίας, μπορεί να υπολογιστεί και η βαθμίδα (gradient) μείωσης της πίεσης κυκλοφορίας που θα πρέπει να ακολουθηθεί καθώς η λάσπη εξουδετέρωσης θα πληρεί τη διατηρητική στήλη, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η υδροστατική πίεση στον πυθμένα.

$$\Delta P_{gradient} = \frac{ICP - FCP}{TVD} \quad (6.1)$$

$$\Delta P_{gradient} = \frac{(986 - 281) \text{ psi}}{14107 \text{ ft}}$$

$$\Delta P_{gradient} = 0.04997 \text{ psi/ft}$$

Αριθμός εμβολισμών της αντλίας λάσπης και όγκος ρευστών σε κάθε τμήμα της γεώτρησης

Ο όγκος ρευστών στη διατρητική στήλη είναι :

$$V_{DP} = capacity \times h_{DP} \quad (6.2)$$

$$V_{DP} = 9.15 \frac{l}{m} \times 4020 m$$

$$V_{DP} = 367831 l$$

Συνεπώς ο αριθμός των εμβολισμών που απαιτούνται για να πληρωθεί η διατρητική στήλη είναι :

$$Strokes = \frac{V_{DP}}{\frac{l}{stroke}} \quad (6.3)$$

$$Strokes = \frac{V_{DP}}{17.5 \frac{l}{stroke}} = \frac{367831 l}{17.5 \frac{l}{stroke}}$$

$$Strokes = 2102 strokes$$

Αντίστοιχα υπολογίζονται οι όγκοι ρευστών στα αντίβαρα και σε κάθε τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης (Α/ΤΓ, ΔΣ/ΤΓ, ΔΣ,Σ), (DC/OH, DP/OH, DP/CSG) όπως επίσης και ο αριθμός των εμβολισμών που χρειάζονται ώστε να συμπληρωθεί το κάθε τμήμα με λάσπη.

Οι παραπάνω υπολογισμοί συνήθως αποτυπώνονται σε ένα πίνακα τιμών ώστε να είναι συγκεντρωμένοι. Συγκεκριμένα για αυτό το παράδειγμα :

Τμήμα	Βάθος (m)	Χωρητικότητα (L/m)	Όγκοι (L)	Εμβολισμοί
ΔΣ	4020	9,15	36783	2102
A	280	4	1120	64
ΔΣ / Σ	2800	24,2	67760	3872
ΔΣ / ΤΓ	1220	23,6	28792	1646
A / ΤΓ	280	15,2	4256	244
Σύνολο			138711	7928

Πίνακας (6.1) : Πίνακας τιμών για κάθε τμήμα της γεώτρησης

Όπου,

ΔΣ, διατρητικά στελέχη

A, αντίβαρα

ΔΣ / Σ , διάκενο μεταξύ διατρητικών στελεχών και σωλήνωσης

ΔΣ / ΤΓ , διάκενο μεταξύ διατρητικών στελεχών και τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

A / ΤΓ , διάκενο μεταξύ αντίβαρων και τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

Όγκος λάσπης εξουδετέρωσης που θα γεμίσει τη διατρητική στήλη και το δακτύλιο

Η λάσπη εξουδετέρωσης θα πρέπει να πληρεί τη διατρητική στήλη και το δακτύλιο της γεώτρησης, προκειμένου το πηγάδι να επαναφερθεί σε έλεγχο και να ανοίξουν με ασφάλεια τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού. Ο όγκος της λάσπης εξουδετέρωσης όπως φαίνεται από τον Πίνακα (6.1) είναι 138.711 λίτρα. Όμως, πρέπει ανά πάσα στιγμή να υπάρχει διαθέσιμος όγκος λάσπης κατά 50% περισσότερο από τον απαιτούμενο με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης. Συνεπώς, ο απαραίτητος όγκος της λάσπης εξουδετέρωσης για την αντιμετώπιση της εισροής είναι 208.066 λίτρα.

Χρόνος εκτέλεσης εργασιών σε κάθε τμήμα της γεώτρησης

Οι μέθοδοι αντιμετώπισης εκτελούνται με 34 εμβολισμούς ανά λεπτό. Ο προσδιορισμός του χρόνου όπου η λάσπη πληρεί το μήκος των διατρητικών στελεχών σύμφωνα με τον Πίνακα (6.1), γίνεται ως εξής :

$$Time = \frac{\text{number of strokes}}{\text{strokes/min}} \quad (6.4)$$

$$Time = \frac{2102 \text{ strokes}}{34 \text{ strokes/min}} = 61.8 \text{ min}$$

Αντίστοιχα γίνονται και οι υπόλοιποι υπολογισμοί και ο πίνακας συμπληρώνεται ως ακολούθως :

Τμήμα	Βάθος (m)	Χωρητικότητα (L/m)	Όγκοι (L)	Εμβολισμοί	Χρόνος (min)
ΔΣ	4020	9,15	36783	2102	61,8
A	280	4	1120	64	1,9
ΔΣ / Σ	2800	24,2	67760	3872	113,9
ΔΣ / ΤΓ	1220	23,6	28792	1646	48,4
A / ΤΓ	280	15,2	4256	244	7,2
Σύνολο			138711	7928	233,2

Πίνακας (6.2) : Τελικός πίνακας τιμών για κάθε τμήμα της γεώτρησης

Μέθοδος του Γεωτρυπανιστή – Driller's Method

Η εισροή εκτοπίζεται από το δακτύλιο της γεώτρησης όταν εισπνεστεί σε αυτόν όγκος λάσπης που να αντιστοιχεί στον όγκο των ρευστών που πληρούν το δακτύλιο. Το γεγονός αυτό καθιστά λογικό· το ότι η πρώτη κυκλοφορία της μεθόδου δεν είναι πλήρης. Η αρχική λάσπη διάτρησης εισπνέζεται έως ότου η εισροή εκτοπιστεί από το πηγάδι, δηλαδή για 169,5 λεπτά σύμφωνα με τον Πίνακα (6.2), διάρκεια η οποία είναι το άθροισμα των χρόνων πλήρωσης κάθε τμήματος του δακτυλίου της γεώτρησης με λάσπη.

Στη συνέχεια εισπιέζεται η νέα βαρύτερη λάσπη η οποία πληρεί τη διατρητική στήλη σε 63,7 λεπτά· και στα επόμενα 169,5 λεπτά γεμίζει και ο δακτύλιος της γεώτρησης. Συνολικά, λοιπόν, η εκτέλεση της εργασίας διαρκεί 402,7 λεπτά.

Φυσικά, αυτός ο χρόνος είναι θεωρητικός, καθώς στην πραγματικότητα η ασφάλεια προέχει όλων· και πιθανότατα η συνολική διάρκεια των εργασιών να αυξηθεί, εάν οι συνθήκες το απαιτήσουν.

Μέθοδος του Μηχανικού - Wait and Weight

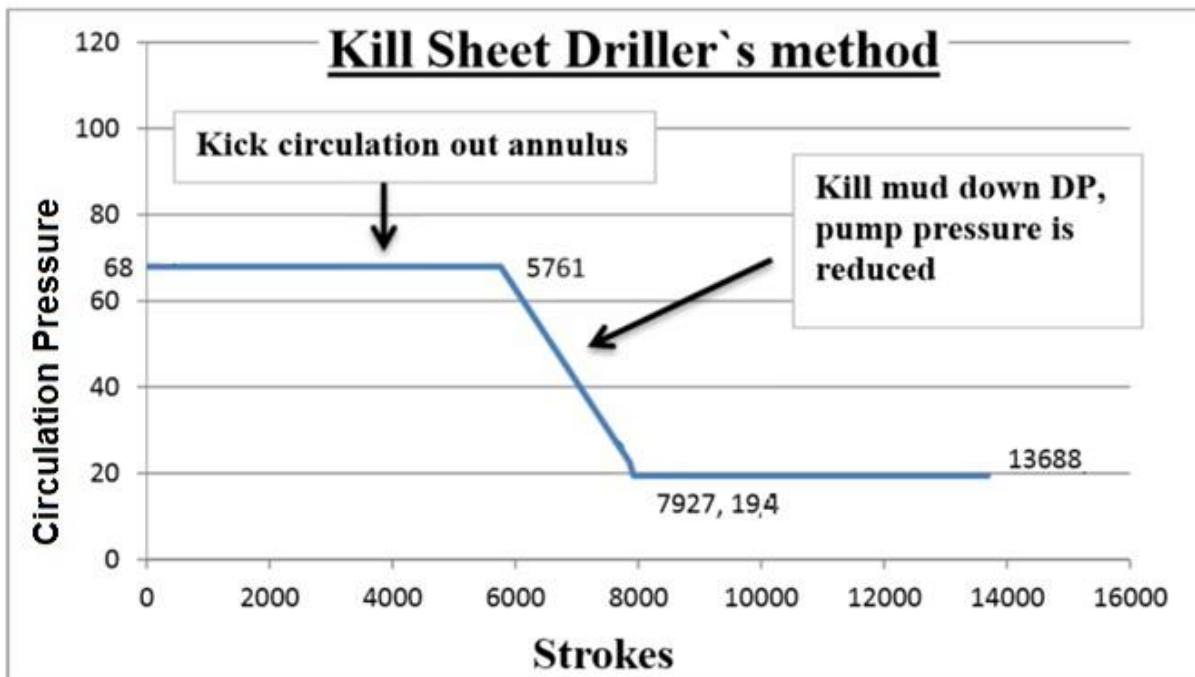
Στη μέθοδο μιας κυκλοφορίας, εισπιέζεται η νέα βαρύτερη λάσπη και ταυτόχρονα εκτοπίζεται η εισροή. Ο θεωρητικός χρόνος εκτέλεσης των εργασιών αυτών είναι 233,2 λεπτά, όπως φαίνεται από τον Πίνακα (6.2). Σε αυτό το χρόνο βέβαια δεν συνυπολογίζεται η διάρκεια της παρασκευής της λάσπης εξουδετέρωσης.

Διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης

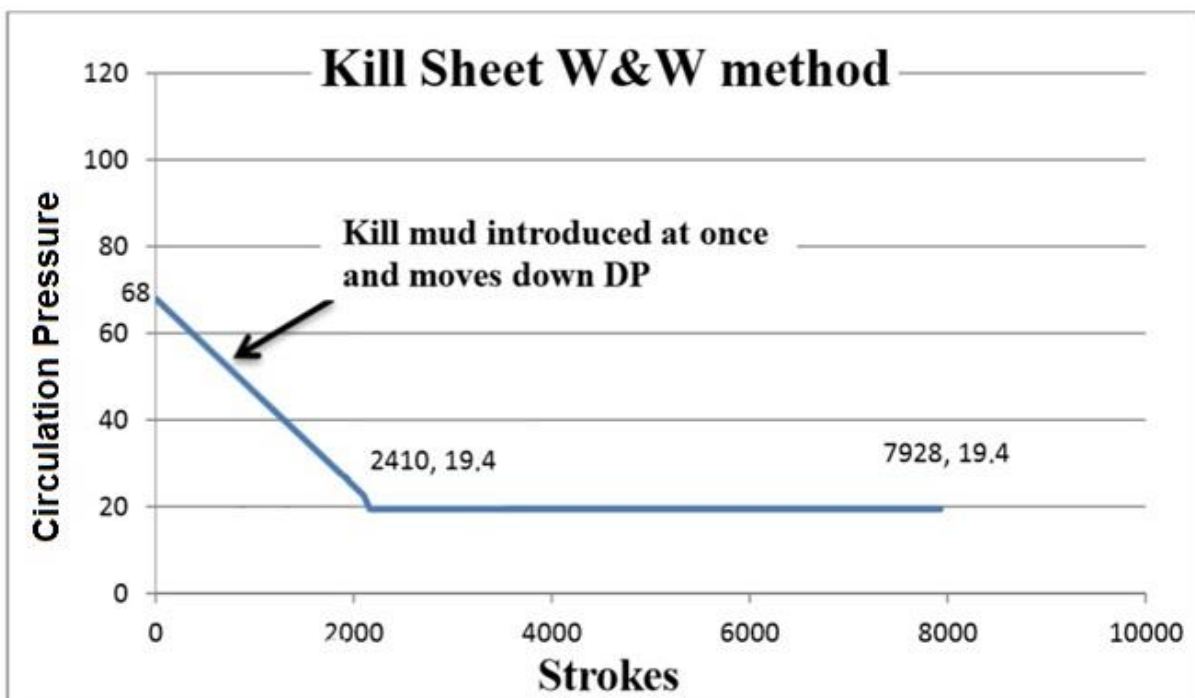
Όπως αναλύθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο, η διατήρηση σταθερής πίεσης στον πυθμένα, επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα την πίεση στραγγαλισμού της βαλβίδας της γραμμής στραγγαλισμού· μέσω της οποίας γίνεται ελεγχόμενη εκροή των ρευστών από τη γεώτρηση.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, υπολογίστηκε η αρχική και τελική πίεση κυκλοφορίας, καθώς και η *βαθμίδα* πτώσης της πίεσης κυκλοφορίας (gradient) που θα πρέπει να ακολουθηθεί καθώς η λάσπη εξουδετέρωσης θα πληρεί τη διατρητική στήλη.

Στο Διάγραμμα (6.1) και (6.2) παρουσιάζεται η πίεση κυκλοφορίας συναρτήσει του εισπιεζόμενου όγκου λάσπης εντός της γεώτρησης, που πρέπει να ακολουθηθεί πιστά ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης και κατά αυτόν τον τρόπο να μην υπάρξει περαιτέρω εισροή.



Διάγραμμα (6.1) : Πίεση κυκλοφορίας κατά τη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή



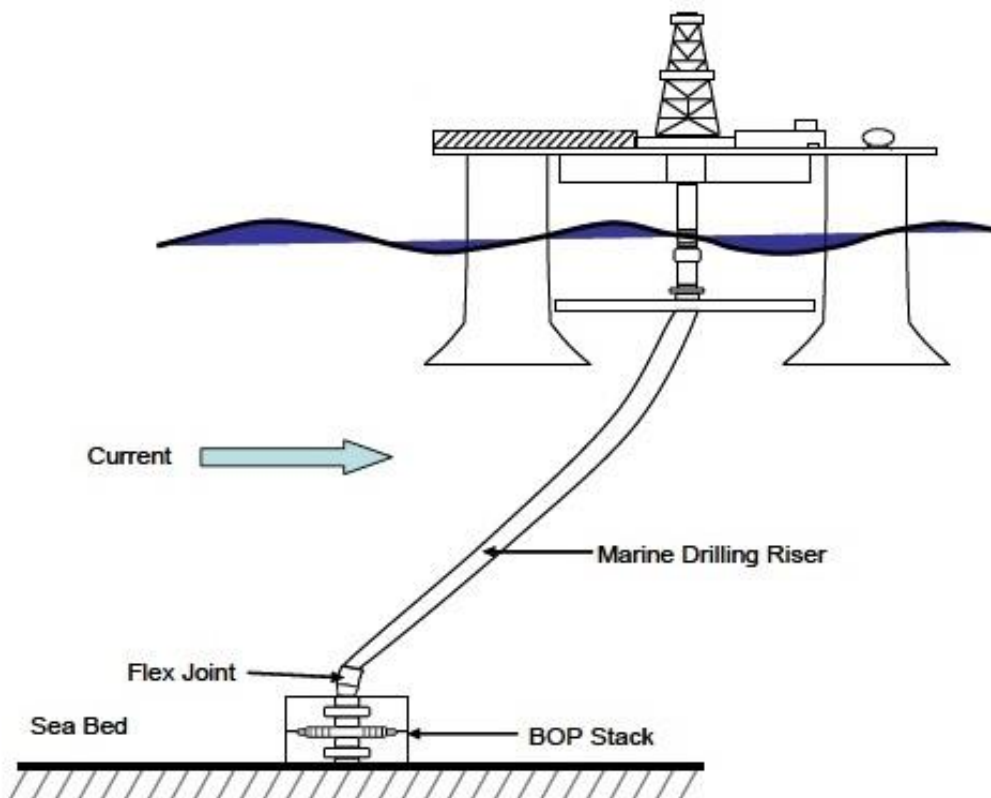
Διάγραμμα (6.2) : Πίεση κυκλοφορίας κατά τη Μέθοδο του Μηχανικού

6.2. Υπεράκτια γεώτρηση

6.2.1. Πτώση πίεσης λόγω τριβών στη γραμμή στραγγαλισμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βασική διαφορά μεταξύ των χερσαίων και των υπεράκτιων γεωτρητικών έργων είναι η θέση που βρίσκεται ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας (**BlowOut Preventer, BOP**). Στις χερσαίες γεωτρήσεις τοποθετείται κάτω από την υποδομή του γεωτρύπανου, ενώ στις υπεράκτιες τοποθετείται συνήθως στον πυθμένα της θάλασσας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα (6.2).

Από τον πυθμένα της θάλασσας, στις υπεράκτιες γεωτρήσεις υπό κανονικές συνθήκες όρυξης, το ρευστό διάτρησης επιστρέφει στην πλωτή εξέδρα στην επιφάνεια μέσω του **riser**. Ο **riser** αποτελεί μια μεγάλης διαμέτρου σωλήνα η οποία συνδέει τον αντιεκρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας με την πλωτή εξέδρα. Μέσω του διάκενου μεταξύ διατρητικής στήλης και **riser**, το ρευστό διάτρησης επιστρέφει στην επιφάνεια, μεταφέροντας τα θρύμματα των διατρυόμενων σχηματισμών.



Σχήμα (6.2) : Αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας στον πυθμένα της θάλασσας

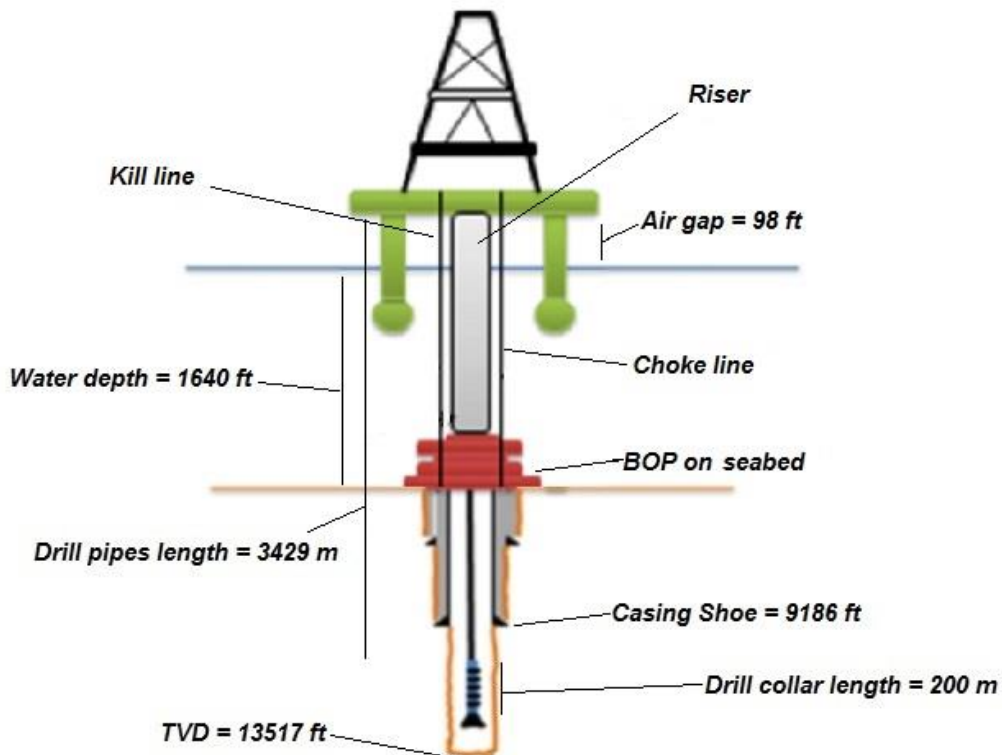
Σε περίπτωση εισροής, τα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας σφραγίζουν το δακτύλιο της γεώτρησης, συνεπώς η εκροή ρευστών από τη γεώτρηση πραγματοποιείται μέσω της γραμμής στραγγαλισμού (**choke line**). Στις χερσαίες γεωτρήσεις η γραμμή στραγγαλισμού δεν έχει μεγάλο μήκος καθώς ο μηχανισμός ασφαλείας βρίσκεται στην επιφάνεια. Αντίθετα, στις υπεράκτιες γεωτρήσεις η γραμμή στραγγαλισμού έχει μήκος τουλάχιστον όσο το βάθος της θάλασσας, καθώς εκτείνεται παράλληλα του **riser**.

Έχει αναφερθεί πως κατά την κυκλοφορία της λάσπης στη γεώτρηση είναι φυσικό να υπάρχουν τριβές (διατρητική στήλη, κοπτικό άκρο, σωλήνωση, τοιχώματα σχηματισμών). Η πτώση πίεσης λόγω τριβών εντός της γεώτρησης (**Slow Circulation Rate, SCR**), υπολογίζεται κατά την κυκλοφορία κάθε χρησιμοποιούμενης λάσπης διάτρησης ανάλογα με την πυκνότητα της.

Στις υπεράκτιες γεωτρήσεις όπου η γραμμή στραγγαλισμού έχει μεγάλο μήκος, δημιουργούνται σημαντικές τριβές που επηρεάζουν την πίεση κυκλοφορίας. Οφείλεται λοιπόν, να υπολογίζεται αυτή η πτώση πίεσης και για την κυκλοφορία ρευστών μέσω της γραμμής στραγγαλισμού αντί του **riser**. Είναι απαραίτητο να είναι γνωστή, καθώς θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της πίεσης στραγγαλισμού της βαλβίδας, ώστε να διατηρείται σταθερή η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης κατά την αντιμετώπιση μιας εισροής.

6.2.2. Υπολογιστική εφαρμογή

Σε μία υπεράκτια γεώτρηση, στο βάθος των 15.026 ft (4.580 μέτρα) (MD, Measured Depth), πραγματικού κατακόρυφου βάθους 13.517 ft (4.120 μέτρα) (TVD, True Vertical Depth) μία εισροή λαμβάνει χώρα.



Σχήμα (6.3) : Διαστασιολόγηση υπεράκτιας γεώτρησης με αντιεκρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας στον πυθμένα της θάλασσας

Στοιχεία της γεώτρησης :

1. Βάθος έδρασης σωλήνωσης = 9.186 ft (2.800 μέτρα)
2. Πυκνότητα λάσπης = 14,43 rpg (ρ_{mud})
3. Πίεση δακτυλίου σε στατικές συνθήκες = 826 psi (SICP_s)
4. Πίεση στήλης σε στατικές συνθήκες = 623 psi (SIDPP_s)
5. Επιπλέον πίεση ασφαλείας = 145 psi (P_{ob}, Overbalance)
6. Όγκος εμβολισμού αντλίας λάσπης = 17,2 λίτρα/εμβολισμό (l/stroke)
7. Οι μέθοδοι αντιμετώπισης εκτελούνται με 35 εμβολισμούς ανά λεπτό (strokes per minute , spm)
8. Τα διατρητικά στελέχη έχουν μήκος 4.380 μέτρα (h_{DP}) (MD)/ 3.429 μέτρα (TVD) και χωρητικότητα 9,15 λίτρα ανά μέτρο (l/m)
9. Τα αντίβαρα έχουν μήκος 200 μέτρα (h_{DC}) (MD)/ 129 μέτρα (TVD) και χωρητικότητα 4,01 λίτρα ανά μέτρο (l/m)

10. Η χωρητικότητα των τμημάτων (διάκενα) μεταξύ διατρητικών στελεχών, σωλήνωσης και τοιχωμάτων γεώτρησης έχουν ως εξής :

A. Διάκενο μεταξύ : Διατρητικών στελεχών - Σωλήνωσης = 24,2 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DP/CSG, Drill pipes/Casing) , (ΔΣ/Σ, Διατρητικά Στελέχη/Σωλήνωση)

B. Διάκενο μεταξύ : Διατρητικών στελεχών - Τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα) = 23,6 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DP/OH, Drill pipes/Open hole) , (ΔΣ/ΤΓ, Διατρητικά Στελέχη/Τοιχώματα Γεώτρησης)

Γ. Διάκενο μεταξύ : Αντίβαρων – Τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα) = 15,2 λίτρα ανά μέτρο (l/m) , (DC/OH, Drill collars/Open hole) , (Α/ΤΓ, Αντίβαρα/Τοιχώματα Γεώτρησης)

11. Πτώση πίεσης λόγω τριβών κατά την κυκλοφορία της λάσπης, μέσω του riser (Slow Circulation Rate, SCR) = 507 psi

12. Πτώση πίεσης λόγω τριβών κατά την κυκλοφορία της λάσπης, μέσω της γραμμής στραγγαλισμού (choke line) (Slow Circulation Rate through choke line, SCR_{cl}) = 710 psi

13. Το βάθος της θάλασσας είναι 1.640 ft (500 μέτρα) και το ύψος μεταξύ της στάθμης της θάλασσας και της πλωτής εξέδρας είναι 98 ft (μέτρα).

Υπολογίζονται :

- Η πίεση πόρων του σχηματισμού
- Η πυκνότητα της λάσπης εξουδετέρωσης και η πυκνότητα της *λάσπης εγκατάλειψης*
- Η αρχική και τελική πίεση κυκλοφορίας (ICP , FCP)
- Η πτώση πίεσης λόγω τριβών στη μεγάλου μήκους γραμμή στραγγαλισμού (choke line)
- Η αρχική πίεση στραγγαλισμού (Choke Pressure)

- Ο αριθμός των εμβολισμών της αντλίας, ο όγκος της λάσπης εξουδετέρωσης και ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών σε κάθε τμήμα της γεώτρησης
- Τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων της γεώτρησης

Πίεση πόρων του σχηματισμού

Σύμφωνα με την Εξίσωση (4.1) :

$$BHP = SIDPP_s + \rho_m \times TVD$$

$$BHP = 623 \text{ psi} + (14.43 \text{ pp}g \times 0.052 \times 13517 \text{ ft})$$

$$BHP = 10765 \text{ psi}$$

Η υδροστατική πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης υπολογίζεται σε 10.765 psi , πίεση η οποία όπως έχει αναφερθεί· ισοδυναμεί με την πίεση πόρων του σχηματισμού μετά την εξισορρόπηση των πιέσεων (στατική ισοροπία).

Πυκνότητα λάσπης εξουδετέρωσης και πυκνότητα λάσπης εγκατάλειψης

Σύμφωνα με την Εξίσωση (4.7) :

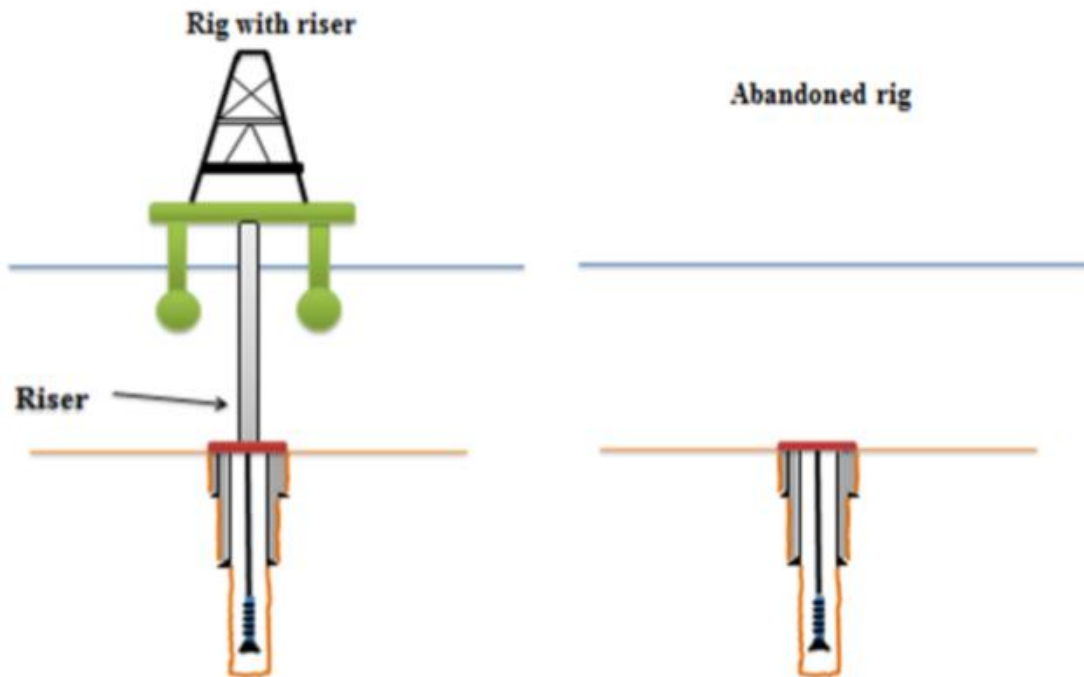
$$\rho_k = \frac{BHP + P_{ob}}{TVD}$$

$$\rho_k = \frac{10765 \text{ psi} + 145 \text{ psi}}{13517 \text{ ft}} = 0.807 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

$$\rho_k = 15.52 \text{ pp}g$$

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η πλωτή εξέδρα είναι αναγκαίο να αποδεσμευτεί από την κεφαλή της γεώτρησης που βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο **riser** αποσυνδέεται από τον αντικρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας, όπως φαίνεται στο Σχήμα (6.4). Ως είναι λογικό, η στήλη της λάσπης διάτρησης εσωτερικά του **riser** πλέον δεν υφίσταται, και η υδροστατική πίεση ασκείται από τη στήλη του θαλασσινού νερού για αυτό το τμήμα.

Προφανώς, πριν εγκαταλειφθεί η γεώτρηση, πρέπει να εισαχθεί νέα, μεγαλύτερης πυκνότητας λάσπη· η οποία θα ασκεί υδροστατική πίεση που θα αντισταθμίζει τη μείωση της πίεσης που θα προέλθει από την αποσύνδεση του *riser*. Αυτή η πίεση σε συνδυασμό με την πίεση της στήλης του θαλασσινού νερού, πρέπει να υπερβαίνει την πίεση πόρων των σχηματισμών στο ανοικτό, μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης· ενώ παράλληλα να μην υπερβαίνει την πίεση ρωγμάτωσής τους.



Σχήμα (6.4) : Εγκατάλειψη υπεράκτιας γεώτρησης

Αυτή η λάσπη, ονομάζεται λάσπη εγκατάλειψης και η πυκνότητά της για το συγκεκριμένο παράδειγμα, υπολογίζεται ως εξής :

$$\rho_{abandon\ mud} \times (TVD - h_{water} - h_{air\ gap}) + (\rho_{water} \times h_{water}) = BHP + P_{ob} \quad (6.5)$$

$$\rho_{abandon\ mud} = \frac{10765\ psi + 145\ psi - (8.54\ ppg \times 0.052 \times 1640\ ft)}{(13517\ ft - 1640\ ft - 98\ ft)}$$

$$\rho_{abandon\ mud} = 0.8644 \frac{psi}{ft}$$

$$\rho_{abandon\ mud} = 16.62\ ppg$$

Όπου,

h_{water} , το ύψος της στήλης του θαλασσινού νερού (1.640 ft)

$h_{air\ gap}$, το ύψος από τη στάθμη της θάλασσας στην πλωτή εξέδρα (98 ft)

ρ_{water} , η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (8,54 ppg).

Αρχική και Τελική πίεση κυκλοφορίας (ICP, FCP)

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις (5.1) και (5.2) :

$$ICP = SIDPP_s + P_{ob} + SCR$$

$$ICP = 623\ psi + 145\ psi + 507\ psi$$

$$ICP = 1275\ psi$$

$$FCP = SCR_f = SCR \times \frac{\rho_k}{\rho_m}$$

$$FCP = 507\ psi \times \frac{15.52\ ppg}{14.43\ ppg}$$

$$FCP = 545\ psi$$

Βαθμίδα πίεσης κυκλοφορίας (πτώση πίεσης κατά την πλήρωση της διατρητικής στήλης με τη λάσπη εξουδετέρωσης) :

$$\Delta P_{gradient} = \frac{ICP - FCP}{TVD} \quad (6.1)$$

$$\Delta P_{gradient} = \frac{(1275 - 545)\psi i}{13517\ ft}$$

$$\Delta P_{gradient} = 0.054\ \psi i / ft$$

Πτώση πίεσης λόγω τριβών στη μεγάλη μήκους γραμμή στραγγαλισμού

Η πτώση πίεσης που συμβαίνει στη γραμμή στραγγαλισμού σε μία υπεράκτια γεώτρηση, υπολογίζεται από τις πτώσεις πιέσεων που είναι γνωστές· κατά

την κυκλοφορία μέσω του **riser** και κατά την κυκλοφορία μέσω της **choke line**. Όπως έχει αναφερθεί, αυτές οι πτώσεις πιέσεων υπολογίζονται σε κάθε αλλαγή της κατώτερης συνδεσμολογίας ή της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης, ανά τακτικά διαστήματα αύξησης του συνολικού βάθους κ.α.

$$\Delta P_{friction,cl} = SCR_{cl} - SCR \quad (6.6)$$

$$\Delta P_{friction,cl} = 710 \text{ psi} - 507 \text{ psi}$$

Η πτώση πίεσης λόγω τριβών, λοιπόν, μόνο στο τμήμα της γραμμής στραγγαλισμού είναι :

$$\Delta P_{friction,cl} = 203 \text{ psi}$$

Αρχική πίεση στραγγαλισμού, για τη διατήρηση σταθερής πίεσης πυθμένα (BHP)

Για να αποφευχθεί η ρωγμάτωση του σχηματισμού σε κάποιο βάθος, εξαιτίας της εκτεταμένης τριβής στη γραμμή στραγγαλισμού, η βαλβίδα στραγγαλισμού ρυθμίζεται ώστε να είναι περισσότερο ανοιχτή από ότι θα ήταν σε μια περίπτωση χερσαίας γεώτρησης, αντίστοιχων πιέσεων. Κατά αυτό τον τρόπο, οι τριβές στη γραμμή στραγγαλισμού εξισορροπούνται.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η αρχική πίεση της βαλβίδας στραγγαλισμού υπολογίζεται :

$$\text{Initial choke pressure} = SICP_s + P_{ob} - \Delta P_{friction,cl} \quad (6.7)$$

$$\text{Initial choke pressure} = 826 \text{ psi} + 145 \text{ psi} - 203 \text{ psi} = 768 \text{ psi}$$

Αντιμετωπίζοντας την εισροή χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι τριβές στη γραμμή στραγγαλισμού, αυξάνουν τις πιθανότητες ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο ανοικτό, μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης.

Ο αριθμός των εμβολισμών της αντλίας, ο όγκος της λάσπης εξουδετέρωσης και ο χρόνος εκτέλεσης εργασιών σε κάθε τμήμα της γεώτρησης

Όπως ακριβώς υπολογίστηκαν και στο παράδειγμα της χερσαίας γεώτρησης, υπολογίζονται οι εμβολισμοί, ο όγκος λάσπης και ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών σε κάθε τμήμα της γεώτρησης· χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις :

$$V_{DP} = capacity \times h_{DP} \quad (6.2)$$

$$Strokes = \frac{V_{DP}}{\frac{l}{stroke}} \quad (6.3)$$

$$Time = \frac{number\ of\ strokes}{strokes/min} \quad (6.4)$$

Ο πίνακας με τους υπολογισμούς για κάθε τμήμα της γεώτρησης διαμορφώνεται ως εξής :

Τμήμα	Βάθος (m) (TVD)	Βάθος (m) (MD)	Χωρητικότητα (L/m)	Όγκοι (L)	Εμβολισμοί (ανά τμήμα)	Εμβολισμοί (σύνολο)	Χρόνος (min)
ΔΣ	3429	4380	9,15	40075	2330	2330	66,6
A	3578	4580	4,01	802	47	2377	1,3
A / ΤΓ		200	15,2	3040	177	2553	5
ΔΣ / ΤΓ		1580	23,6	37288	2168	4721	61,9
ΔΣ / Σ		2800	24,2	67760	3940	8300	112,6
Σύνολο				148967	8300		247

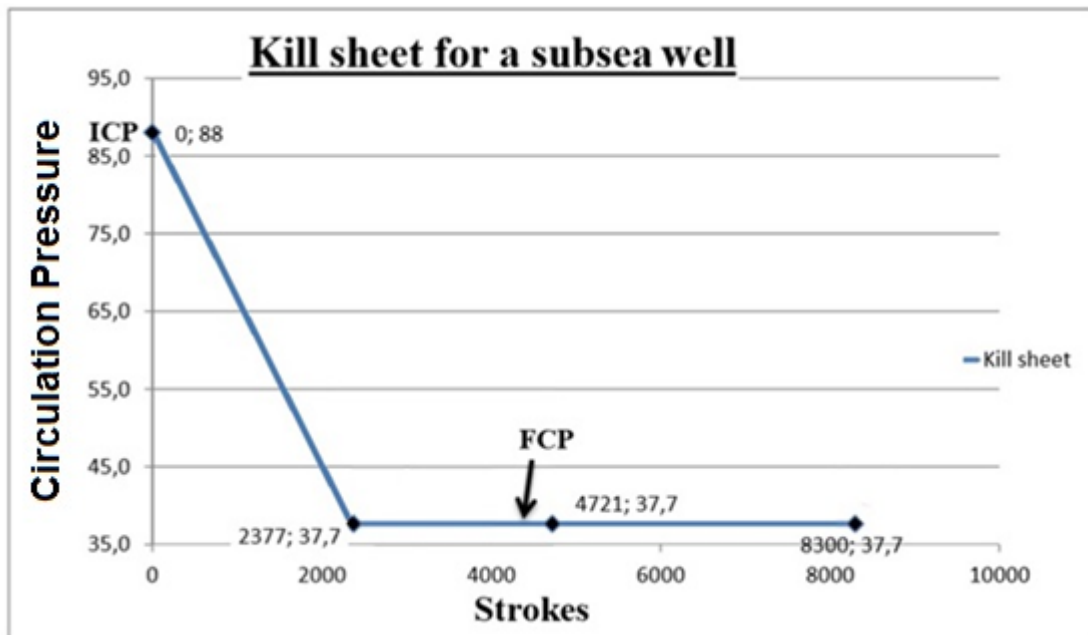
Πίνακας (6.3) : Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών κάθε τμήματος της γεώτρησης

Διάγραμμα πίεσης κυκλοφορίας

Στο Διάγραμμα (6.3) παρουσιάζεται το προφίλ της πίεσης κυκλοφορίας που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (**BHP**), κατά την εκτέλεση της Μεθόδου του Μηχανικού (**Wait and Weight**).

Αυτή η πίεση, όπως έχει αναφερθεί, ελέγχεται μέσω της βαλβίδας στραγγαλισμού ώστε να ακολουθεί πιστά το διάγραμμα. Όπως τονίστηκε, στις υπεράκτιες γεωτρήσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν οι τριβές στη μεγάλο μήκους γραμμή στραγγαλισμού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπολογίστηκε

πως η αρχική πίεση στραγγαλισμού πρέπει να είναι 768 psi ώστε η αρχική πίεση κυκλοφορίας, για τη συγκεκριμένη παροχή της αντλίας (**kill rate**), να είναι ορθή.



Διάγραμμα (6.3) : Πίεση κυκλοφορίας κατά τη Μέθοδο του Μηχανικού

Κεφάλαιο 7 : Ανάπτυξη προγράμματος

Τα φαινόμενα και οι εξισώσεις που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια μπορούν να αποδοθούν σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον. Σκοπός είναι η αποφυγή των χρονοβόρων υπολογισμών του κάθε ενός απαραίτητου ζητούμενου για την αντιμετώπιση της εισροής. Με την άμεση εύρεση των απαραίτητων στοιχείων μέσω του προγράμματος, είναι επιπλέον εφικτή η δημιουργία των διαγραμμάτων της πίεσης κυκλοφορίας και της πίεσης στραγγαλισμού ως προς το χρόνο εκτέλεσης της εκάστοτε μεθόδου αντιμετώπισης, με σκοπό την διατήρηση σταθερής πίεσης πυθμένα (διαγράμματα εκτόνωσης γεώτρησης). Είναι επιτακτική η ανάγκη ύπαρξης ενός τέτοιου προγράμματος καθώς χρονικά η θεωρητική επίλυση προβλημάτων εισροών βελτιστοποιείται εξαιρετικά, παράγοντας ο οποίος όπως έχει αναφερθεί είναι καθοριστικός σε μια κατάσταση εισροής.

7.1. Η ανάπτυξη του προγράμματος

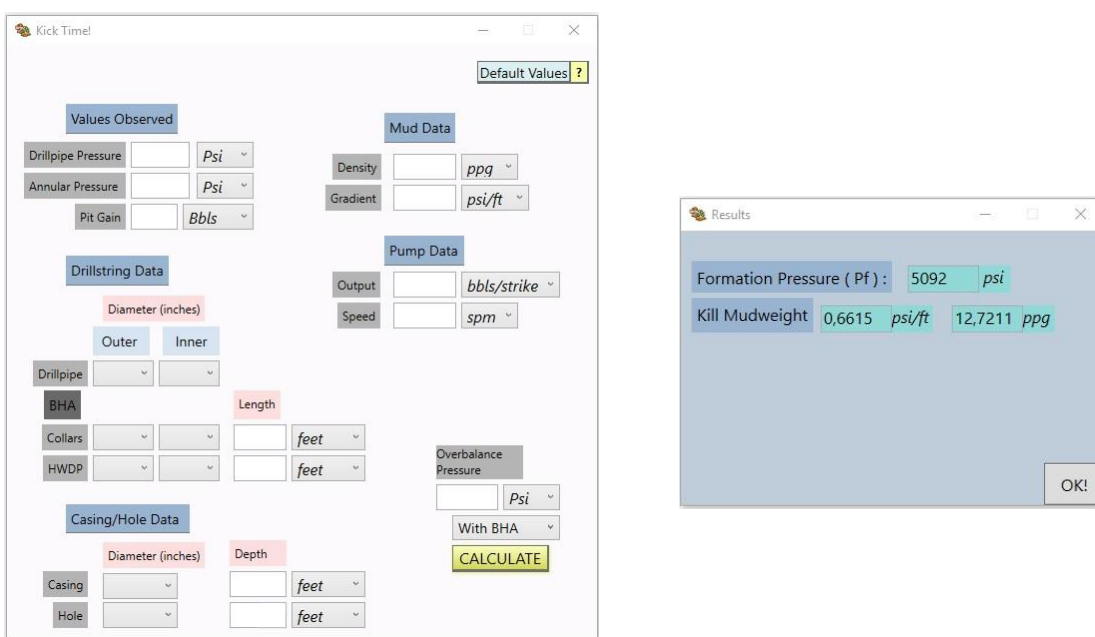
Η ανάπτυξη του προγράμματος έγινε στην πλατφόρμα Visual Studio 2015 της Microsoft, και ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Πραγματοποιήθηκε μια συνεχής ανάπτυξη του κώδικα κατά την πάροδο του χρόνου, καθώς συνεχώς υπήρχε η ανάγκη για βελτίωση του σε αρκετούς τομείς.

Το πρωταρχικό ζήτημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν το ότι το πρόγραμμα εφόσον δεχόταν αριθμητικά δεδομένα, εάν εισάγονταν αλφαριθμητικά στοιχεία, όταν θα εκτελούνταν ο αλγόριθμος και κατά την πραγματοποίηση μιας πράξης με μη αριθμητική μεταβλητή, τερματιζόταν.

Το πρόβλημα επιλύθηκε, με τη δημιουργία κώδικα που ελέγχει τα κελιά εισαγωγής δεδομένων σχετικά με το τι στοιχεία περιέχουν. Στην περίπτωση που τα κελιά έχουν συμπληρωθεί με οτιδήποτε εκτός από πραγματικούς αριθμούς, παρουσιάζεται ένα παράθυρο που ζητάει από το χρήστη να εισάγει αριθμητικές τιμές στα κελιά.

Καθώς αναπτύχθηκε η εφαρμογή και νέες δυνατότητες εισήχθησαν, όπως περισσότερα κελιά εισαγωγής δεδομένων για το χρήστη· εκ των οποίων μερικά είναι προαιρετικά για να εκτελεστεί το πρόγραμμα και να αποδώσει αποτελέσματα, ακολουθήθηκε η ίδια λογική σε όλο τον αλγόριθμο που απέτρεπε τη ροή του κώδικα, ώστε να μην τερματιστεί, σε περίπτωση κακής εισαγωγής στοιχείων.

Επιπλέον, προστέθηκαν φραγμοί εκτέλεσης του προγράμματος όταν τα αριθμητικά δεδομένα, συγκρινόμενα μεταξύ τους, ήταν λάθος. Για παράδειγμα, η εισαγωγή μεγαλύτερης εσωτερικής διαμέτρου σε σχέση με την εξωτερική διάμετρο σε ένα τμήμα της γεώτρησης, το βάθος έδρασης σωλήνωσης μεγαλύτερο του συνολικού βάθους, η πίεση δακτυλίου σε στατικές συνθήκες (**SICP_s**) μικρότερη της πίεσης στήλης σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**) κ.α. Επίσης, εισήχθη η απαραίτητη μετατροπή της υποδιαστολής των εισαγόμενων τιμών, ανεξάρτητα με το αν ο χρήστης χρησιμοποιούσε «τελεία» ή «κόμμα» σαν υποδιαστολή στα αριθμητικά δεδομένα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα θα ήταν λανθασμένα. Γενικώς, κατά την ανάπτυξη του προγράμματος παρουσιάστηκαν και επιλύθηκαν πολλά μικρά προβλήματα, τα οποία είτε παρήγαγαν λανθασμένα αποτελέσματα είτε καθιστούσαν το πρόγραμμα δύσχρηστο.

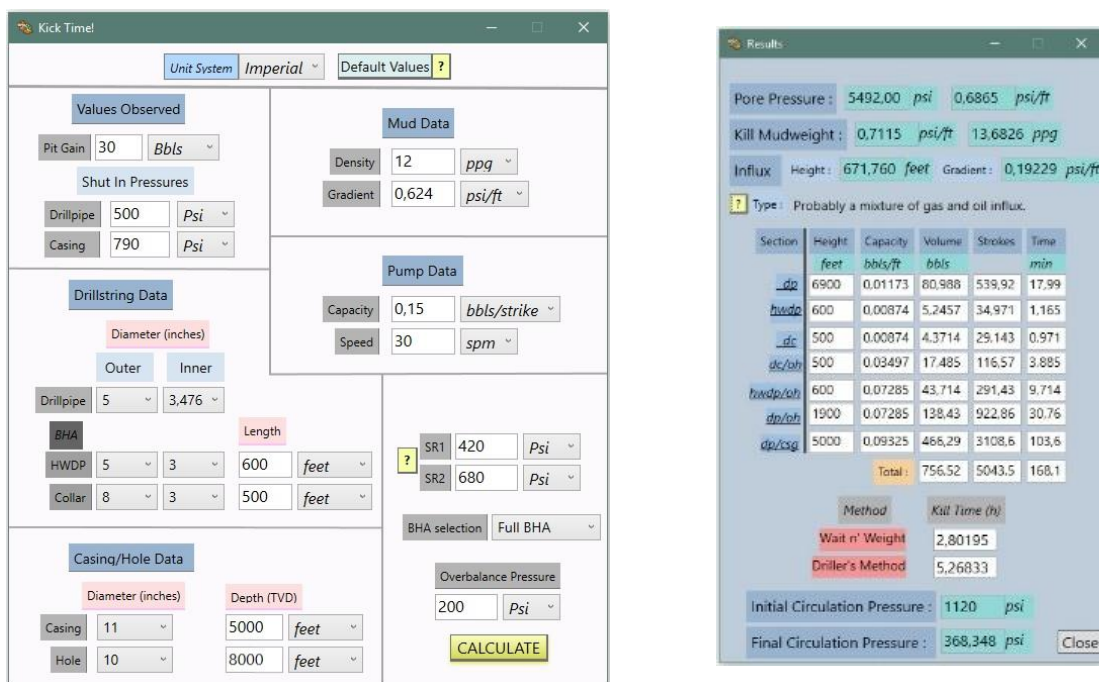


Εικόνα (7.1) : Μητρικό παράθυρο προγράμματος (αριστερά) και παράθυρο αποτελεσμάτων (δεξιά)

Η πρώτη μορφή του προγράμματος αποδίδεται στην Εικόνα (7.1) όπου το πρόγραμμα δέχεται τα βασικά, απαραίτητα στοιχεία μιας γεώτρησης. Τη διαστασιολόγηση της διατρητικής στήλης και της γεώτρησης, την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης, τη λειτουργία της αντλίας εισπίεσης ρευστών, τις πιέσεις στην επιφάνεια καθώς και την αύξηση όγκου στις ενεργές δεξαμενές της επιφάνειας.

Οι υπολογισμοί των αποτελεσμάτων γίνονται μέσω των εξισώσεων που έχουν αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα μόνα αποτελέσματα που υπολογίζονταν ήταν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα (7.1), η πίεση πόρων του σχηματισμού στον πυθμένα της γεώτρησης και η πυκνότητα που θα πρέπει να έχει το νέο ρευστό διάτρησης. Επίσης, το πρόγραμμα θεωρούσε πως τα εισαγόμενα στοιχεία έχουν Βρετανικές μονάδες μέτρησης, ανεξάρτητα από τις μονάδες μέτρησης που επέλεγε ο χρήστης.

Αρκετά αργότερα κατά την εξέλιξη του προγράμματος, εισάγεται η έννοια της κατώτερης συνδεσμολογίας της διατρητικής στήλης (BHA, Bottom Hole Assembly). Πλέον ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, παραδείγματος χάριν, να μην εισάγει δεδομένα για βαριά διατρητικά στελέχη στο πρόγραμμα· που σε προηγούμενες εκδόσεις ήταν αναγκασμένος να εισάγει, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν θα εκτελούνταν ο κώδικας.

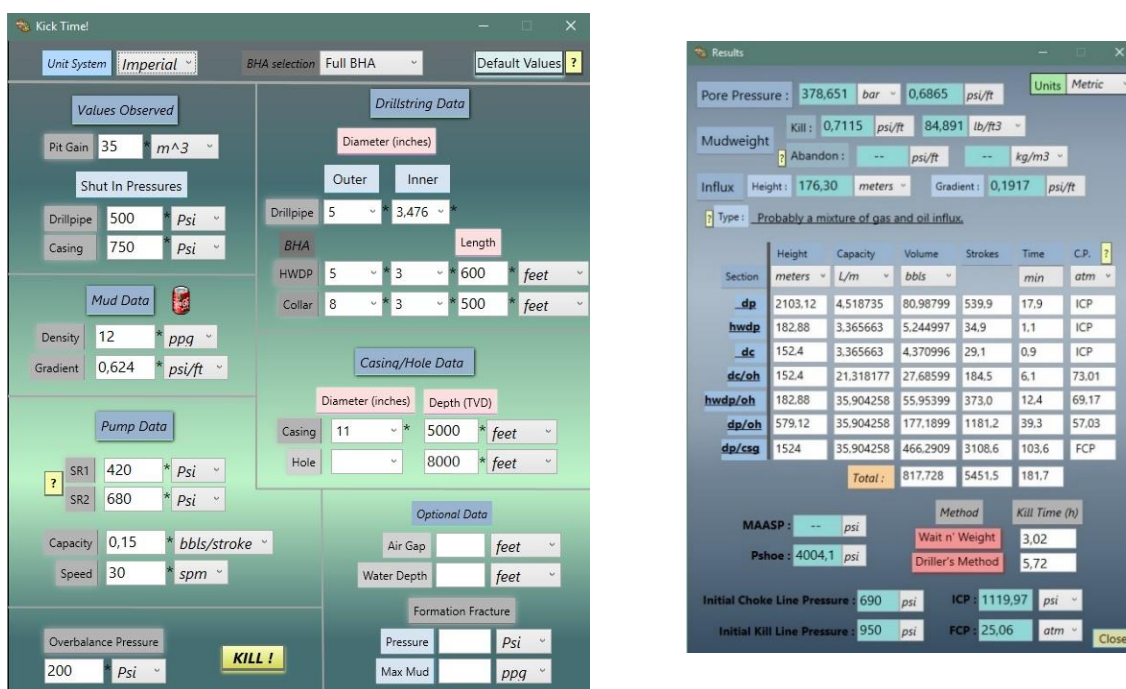


Εικόνα (7.2) : Μητρικό παράθυρο προγράμματος (αριστερά) και παράθυρο αποτελεσμάτων (δεξιά)

Επίσης, το πρόγραμμα έδινε περισσότερα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα (7.2). Πλέον υπάρχει ένας σχετικά ολοκληρωμένος πίνακας τιμών και υπολογίζονται οι χρόνοι εκτέλεσης των δύο μεθόδων που αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία. Παρόλα αυτά μπορούσαν να υπάρξουν πολλές βελτιώσεις στην εφαρμογή, όπως ιδιαίτερα σημαντικό ήταν να μπορεί ο χρήστης να αλλάζει τις μονάδες μέτρησης για κάποια ή και για όλα τα δεδομένα εισαγωγής, χωρίς φυσικά να υπάρξουν λανθασμένοι υπολογισμοί ή τερματισμός του προγράμματος.

Ενίοτε άλλαζε η εμφάνιση των παράθυρων και προστέθηκαν επιπλέον επιλογές για το χρήστη, όπως η δυνατότητα εύρεσης της μέγιστης επιτρεπτής πίεσης στο δακτύλιο (**MAASP**) προτού ρωγματωθεί ο σχηματισμός στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης και η εύρεση της πυκνότητας της λάσπης εγκατάλειψης σε μια υπεράκτια γεώτρηση.

Το πρόγραμμα αποκτά πραγματική μορφή όταν πλέον είναι εφικτό για το χρήστη να επιλέγει για κάθε κελί εισαγωγής ξεχωριστή μονάδα μέτρησης. Επίσης, στα αριθμητικά αποτελέσματα υπήρξε πλέον η δυνατότητα να αλλάξει η μονάδα μέτρησης σε κάθε μία από τις εξαγόμενες τιμές, γνωστοποιώντας καθ'αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα και σε άλλες μονάδες μέτρησης. Στην Εικόνα (7.3) απεικονίζονται οι βελτιώσεις στο πρόγραμμα.



Εικόνα (7.3) : Μητρικό παράθυρο προγράμματος (αριστερά) και παράθυρο αποτελεσμάτων (δεξιά)

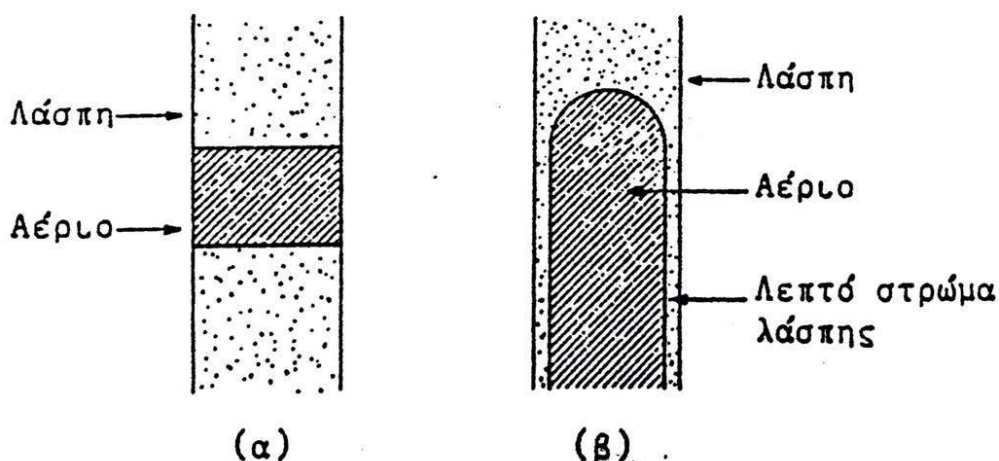
Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έπρεπε να επιλυθούν, ήταν το ότι ο χρήστης δεν είχε τη δυνατότητα να εισάγει χωρητικότητες έναντι διαστάσεων διαμέτρων των τμημάτων της διατρητικής στήλης. Όμως, ίσως η πιο σημαντική έλλειψη στο πρόγραμμα ήταν η αδυναμία εμφάνισης ενός παράθυρου με τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων της γεώτρησης. Ανάλογα με τη μέθοδο αντιμετώπισης που θα επέλεγε ο χρήστης, θα εμφανίζονταν τα αντίστοιχα διαγράμματα της πίεσης κυκλοφορίας και της πίεσης στραγγαλισμού ως προς το χρόνο ή τους εμβολισμούς της αντλίας.

Τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων της γεώτρησης ήταν απαραίτητα, καθώς θα πρέπει να ακολουθούνται πιστά για τη διατήρηση σταθερής πίεσης πυθμένα, ώστε να υπάρξει αποτροπή περαιτέρω εισροών και ασφαλή ανάκτηση του ελέγχου της γεώτρησης.

7.2. Παραδοχές

- 1) Η εισροή διαπιστώνεται αμέσως με την εμφάνιση της, συνεπώς η αύξηση του όγκου της λάσπης επιστροφής παρέχει και τον όγκο της εισροής.
- 2) Μια εισροή αερίου εισέρχεται στον πυθμένα της γεώτρησης σαν μια αδιάλυτη φάση και παραμένει αδιάλυτη καθ' όλη τη διάρκεια της κυκλοφορίας. Η υπόθεση αυτή ισχύει θεωρητικά μόνο όταν η λάσπη διάτρησης έχει βάση το νερό. Όταν χρησιμοποιείται λάσπη με βάση το πετρέλαιο, η διαλυτότητα του αερίου είναι μεγάλη. Η μέτρηση επομένως της αύξησης του όγκου της λάσπης επιστροφής, δεν δίνει ακριβή μέτρηση του όγκου της εισροής.
- 3) Η ροή του αερίου μέσα στο δακτύλιο θεωρείται ομοιόμορφη. Το αέριο εκτονούμενο, εκτοπίζει τη λάσπη από το δακτύλιο με τη μορφή εμβόλου. Εν τούτοις, σε πολυφασική ροή, όπου υπάρχει διαφορά στις πυκνότητες / ιξώδη των φάσεων, η φάση με τη μικρότερη πυκνότητα τείνει να κινηθεί με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα. Το πραγματικό επομένως μοντέλο ροής παρουσιάζεται στην Εικόνα (7.4) όπου ένα

λεπτό στρώμα λάσπης παρεμβάλλεται μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και του αερίου. Σε σχέση με το αέριο, το στρώμα αυτό κινείται προς τα κάτω και το πάχος του είναι δύσκολο να υπολογιστεί. Το αέριο μη καλύπτοντας όλο το τμήμα του δακτυλίου, έχει πραγματικό ύψος μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο που σημαίνει ότι το αέριο φτάνει στην επιφάνεια σε χρόνο μικρότερο από τον προσδιοριζόμενο.



Εικόνα (7.4) : Πραγματικό μοντέλο ροής αερίου

- 4) Η πυκνότητα της λάσπης στο δακτύλιο πάνω από τη στήλη του αερίου, θεωρείται η ίδια με την πυκνότητα της λάσπης της διατηρητικής στήλης όταν η γεώτρηση σφραγιστεί. Στην πραγματικότητα η υπόθεση αυτή δεν ισχύει απόλυτα. Λόγω της κάποιας διαλυτότητας του αερίου στη λάσπη καθώς και της ύπαρξης θρυμμάτων από τον πυθμένα της γεώτρησης, διαφέρει η πυκνότητα και το ιζώδες της.
- 5) Δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες πιέσεων λόγω τριβών κατά την κίνηση του αερίου λόγω του χαμηλού ιζώδες του.
- 6) Θεωρείται πως με το σφράγισμα του πηγαδιού η κίνηση των ρευστών παύει και η εισροή δεν ανέρχεται χωρίς κυκλοφορία, γεγονός που στην περίπτωση εισροής αερίου δεν υφίσταται.

7.3. Μελέτη Περίπτωσης

Σε μία υπεράκτια γεώτρηση επιβεβαιώνεται η ύπαρξη εισροής. Το προσωπικό τίθεται σε κατάσταση αντιμετώπισης της εισροής, εφόσον ο έλεγχος της γεώτρησης έχει χαθεί και σφραγίζεται το πηγάδι από τα υδραυλικά χειριζόμενα έμβολα του αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας.

Μετά την εξισορρόπηση των πιέσεων στο πηγάδι, οι ενδείξεις των μανόμετρων στην επιφάνεια δείχνουν πως η *πίεση δακτυλίου* σε στατικές συνθήκες (**SICP_s**) είναι 900 psi, ενώ η *πίεση στήλης* σε στατικές συνθήκες (**SIDPP_s**) είναι 640 psi. Η αύξηση του ύψους της στάθμης στις ενεργές δεξαμενές της επιφάνειας υποδεικνύει πως ο όγκος της εισροής που έλαβε χώρα είναι 25 bbls. Η πυκνότητα του ρευστού διάτρησης στη γεώτρηση είναι 14 rpg. Η πτώση πίεσης λόγω τριβών με τα τοιχώματα της γεώτρησης κατά την κυκλοφορία της λάσπης, μέσω του *riser*, είναι 320 psi. Αντίστοιχα η πτώση πίεσης όταν η λάσπη διάτρησης κυκλοφορείται μέσω της γραμμής στραγγαλισμού (**choke line**) είναι 405 psi.

Η διαστασιολόγηση της γεώτρησης και της διατρητικής στήλης :

- Η γεώτρηση έχει πραγματικό κατακόρυφο βάθος 4700 μέτρα
- Η έδραση της σωλήνωσης είναι στο βάθος των 4000 μέτρων
- Η χωρητικότητα των διατρητικών στελεχών είναι 10 λίτρα/μέτρο
- Τα αντίβαρα έχουν μήκος 220 πόδια και χωρητικότητα 5 λίτρα/μέτρο.

Οι χωρητικότητες στο δακτύλιο είναι :

- DP/CSG, 25 λίτρα/μέτρο
(Διάκενο μεταξύ Διατρητικών στελεχών - Σωλήνωσης)
- DP/OH, 22 λίτρα/μέτρο
(Διάκενο μεταξύ Διατρητικών στελεχών - Τοιχωμάτων γεώτρησης)
- DC/OH, 12 λίτρα/μέτρο
(Διάκενο μεταξύ Αντίβαρων - Τοιχωμάτων γεώτρησης)

Όπου, DP=drill pipes, DC= drill collars, CSG=casing, OH=open hole

Η αντιμετώπιση της εισροής εκτελείται με 28 εμβολισμούς ανά λεπτό και ο όγκος εμβολισμού της αντλίας είναι 25 λίτρα. Το βάθος της θάλασσας είναι

240 μέτρα και το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας στην περιστροφική τράπεζα της εξέδρας είναι 25 μέτρα. Τέλος, η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στον πυθμένα της γεώτρησης είναι αρκετά χαμηλή, συνεπώς η επιπλέον πίεση ασφαλείας ορίζεται σε 80 psi.

Επίλυση

Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα (7.5). Καθώς η εισροή πραγματοποιείται σε υπεράκτια γεώτρηση είναι επιλεγμένο το «Subsea», το οποίο καθιστά στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει την τιμή της πτώσης πίεσης κατά την κυκλοφορία της λάσπης μέσω της γραμμής στραγγαλισμού (SCR_{cl}). Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να εισάγει προαιρετικά το βάθος της θάλασσας και το ύψος της εξέδρας από την επιφάνεια της θάλασσας, δεδομένα που στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνονται.

The screenshot shows the 'Kick Time!' software interface with the following data entered:

- Units:** Imperial
- Subsea:** Checked
- BHA selection:** Only Collar
- Default Values:** ?
- Values Observed:** Pit Gain: 25 bbls
- Shut In Pressures:** Drillpipe: 640 psi, Casing: 900 psi
- Mud Data:** Density: 14 ppg, Gradient: 0,728 psi/ft
- Pump Data:** SCR: 320 psi, SCR_{cl}: 405 psi, Capacity: 25 L/stroke, Speed: 28 spm
- Safety Margin:** 80 psi
- Drillstring Data:** Capacities: L/m, Inner Capacities: Drillpipe: 10, Collar: 5 * 220 * feet
- Casing/Hole Data:** Depth (TVD): Casing: 4000 feet, Hole: 4700 feet, Annular Capacities: Dp/Csg: 25, Dp/OH: 22, Dc/OH: 12, HWDP/OH: [empty]
- Optional Data:** Air Gap: 25 meters, Water Depth: 240 meters
- Formation Fracture:** Pressure: [empty] psi, Max Mud: [empty] ppg

A 'Recalculate' button is visible at the bottom left of the interface.

Εικόνα (7.5) : Τα δεδομένα εισαγόμενα στο πρόγραμμα

Το «BHA selection» (Bottom Hole Assembly selection) ορίζεται ως «Only Collar» (μόνο αντίβαρα), καθώς δεν αναφέρονται βαριά διατρητικά στελέχη για να εισαχθούν τιμές στα αντίστοιχα κελιά (μήκος, διαστασιολόγηση).

Επίσης, καθώς τα δεδομένα γεώτρησης αναφέρονται σε χωρητικότητες σε κάθε σκέλος της, επιλέγονται «Capacities» έναντι των «Diameters» που είναι η προεπιλογή του προγράμματος στην εισαγωγή των δεδομένων της διατρητικής στήλης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα (7.5), πλέον δεν υπάρχουν κελιά εισαγωγής εσωτερικών και εξωτερικών διαμέτρων, αλλά κελιά εισαγωγής χωρητικότητας για κάθε τμήμα της γεώτρησης και επιλογή μονάδων μέτρησης σε L/m ή bbls/ft.

Η επίλυση του προβλήματος από το πρόγραμμα γίνεται ως εξής :

- Εύρεση της πίεσης πόρων του σχηματισμού

Από την Εξίσωση (4.1)

$$SIDPP_s + \rho_m \times TVD = BHP$$

$$14 \text{ ppg} = 0.728 \frac{\text{psi}}{\text{ft}}$$

$$640 \text{ psi} + 0.728 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 4700 \text{ ft} = BHP$$

$$BHP = 4061.6 \text{ psi}$$

- Εύρεση της πυκνότητας της λάσπης εξουδετέρωσης και της λάσπης εγκατάλειψης

Από την Εξίσωση (4.7)

$$\rho_k = \frac{BHP + P_{ob}}{TVD}$$

$$\rho_k = \frac{4061,6 \text{ psi} + 80 \text{ psi}}{4700 \text{ ft}}$$

$$\rho_k = 16.94 \text{ ppg}$$

Από την Εξίσωση (6.5)

$$\rho_{\text{abandon mud}} \times (TVD - h_{\text{water}} - h_{\text{air gap}}) + (\rho_{\text{water}} \times h_{\text{water}}) = BHP + P_{ob}$$

$$\rho_{abandon\ mud} = \frac{4061.6\ psi + 80\ psi - (8.54\ ppg \times 0.052 \times 240\ m)}{(4700\ ft - 240m - 25m)}$$

$$1m = 3.2808399\ ft$$

$$\rho_{abandon\ mud} = 19.03\ ppg$$

- Εύρεση ύψους στήλης και πυκνότητας εισροής

Από την Εξίσωση (4.3)

$$h_i = V/A \qquad \frac{V(\text{Pit Gain})}{A} \left(\frac{\text{bbls}}{\text{bbls/ft}} = \text{ft} \right)$$

$$h_i = \frac{25\text{bbl}}{12\ \text{l/m}}$$

Όπου 12 L/m , η χωρητικότητα του διάκενου μεταξύ αντίβαρων και τοιχωμάτων γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

$$1 \frac{\text{l}}{\text{m}} = 0.0025974077787251 \frac{\text{bbl}}{\text{ft}}$$

$$h_i = 802.083\ \text{ft}$$

Όμως, τα αντίβαρα έχουν μήκος 220 ft. Η εισροή, λοιπόν, καλύπτει και άλλα τμήματα της γεώτρησης· διαφορετικής χωρητικότητας, συνεπώς το ύψος της εισροής είναι λανθασμένο. Πρέπει να υπολογιστεί το ύψος στο επόμενο σκέλος της γεώτρησης, αφαιρώντας τον όγκο που υπάρχει στο διάκενο μεταξύ αντίβαρων και τοιχωμάτων της γεώτρησης.

$$h_i = L_{collars} + \frac{V - (C_{collars-oh} \times L_{collars})}{C_{dp-oh}}$$

Όπου,

$L_{collars}$, το μήκος των αντίβαρων

$C_{collars-oh}$, η χωρητικότητα του διάκενου μεταξύ αντίβαρων και των τοιχωμάτων της γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

C_{dp-oh} , η χωρητικότητα του διάκενου μεταξύ διατρητικών στελεχών και των τοιχωμάτων της γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

$$h_i = 220 \text{ ft} + \frac{25 \text{ bbls} - (12 \frac{L}{m} \times 220 \text{ ft})}{22 \text{ L/m}}$$

$$1 \frac{l}{m} = 0.0025974077787251 \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \quad 220 \text{ ft} = 67.056 \text{ m}$$

$$h_i = 220 \text{ ft} + \frac{25 \text{ bbls} - 5.057 \text{ bbls}}{22 \text{ L/m}} = 220 \text{ ft} + 472.74 \text{ ft}$$

$$h_i = 692.74 \text{ ft}$$

Το ύψος της εισροής υπολογίστηκε σε 692,74 μέτρα, μήκος το οποίο είναι μικρότερο από το ανοικτό (μη σωληνωμένο) τμήμα της γεώτρησης. Η εισροή, λοιπόν, δεν καταλαμβάνει χώρο στο διάκενο μεταξύ διατρητικών στελεχών και σωλήνωσης. Σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να υπολογιστεί το ύψος της εισροής εκ νέου λόγω ύπαρξης νέου σκέλους διαφορετικής χωρητικότητας.

Από την Εξίσωση (4.5) υπολογίζεται η πυκνότητα της εισροής

$$\rho_i = \rho_m - \frac{SICP_s - SIDPP_s}{h_i}$$

$$\rho_i = 0.728 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} - \frac{900 \text{ psi} - 640 \text{ psi}}{692.74 \text{ ft}}$$

$$\rho_i = 0.3526 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} = 6.78 \text{ ppG}$$

Από την πυκνότητα της εισροής, γίνεται η εκτίμηση για τη φύση της. Σύμφωνα με τον Πίνακα (7.1), η εισροή δεν είναι αέριο.

Gas	0.075 - 0.150 psi/ft
Oil	0.3 - 0.4 psi/ft
Seawater	0.470 - 0.520 psi/ft

Πίνακα (7.1) : Η φύση της εισροής σε σχέση με την πυκνότητα της

- Εύρεση Αρχικής και Τελικής πίεσης κυκλοφορίας (ICP, FCP)

Από τις Εξισώσεις (5.1) και (5.2)

$$ICP = SIDPP_s + P_{ob} + SCR$$

$$ICP = 640 \text{ psi} + 80 \text{ psi} + 320 \text{ psi}$$

$$ICP = 1040 \text{ psi}$$

$$FCP = SCR_f = SCR \times \frac{\rho_k}{\rho_m}$$

$$FCP = 320 \text{ psi} \times \frac{16.94 \text{ pp}g}{14 \text{ pp}g}$$

$$FCP = 387.33 \text{ psi}$$

- Εύρεση πτώσης πίεσης στη γραμμή στραγγαλισμού και της αρχικής πίεσης στραγγαλισμού

Από την Εξίσωση (6.6)

$$\Delta P_{friction,cl} = SCR_{cl} - SCR$$

$$\Delta P_{friction,cl} = 405 \text{ psi} - 320 \text{ psi} = 85 \text{ psi}$$

Από την Εξίσωση (6.7)

$$\text{Initial choke pressure} = SICP_s + P_{ob} - \Delta P_{friction,cl}$$

$$\text{Initial choke pressure} = 900 \text{ psi} + 80 \text{ psi} - 85 \text{ psi}$$

$$\text{Initial choke pressure} = 895 \text{ psi}$$

- Εύρεση των εμβολισμών της αντλίας, του όγκου λάσπης και των χρόνων εκτέλεσης σε κάθε τμήμα της γεώτρησης

Όπως έχει παρουσιαστεί και στις υπολογιστικές εφαρμογές του Κεφαλαίου 6, τα παραπάνω ζητούμενα υπολογίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις (6.2), (6.3), (6.4).

$$V_{DP} = \text{capacity} \times h_{DP}$$

$$\text{Strokes} = \frac{V_{DP}}{\frac{l}{\text{stroke}}}$$

$$\text{Time} = \frac{\text{number of strokes}}{\text{strokes/min}}$$

- Η πίεση στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης

Όπως έχει αναφερθεί, το βάθος έδρασης της σωλήνωσης αποτελεί το πιο επικίνδυνο σημείο της γεώτρησης. Είναι απαραίτητο να υπολογίζεται με δοκιμή διαρροής (**leak off tests**) η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού σε αυτό το βάθος, γνωστοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο που μπορεί να αναπτυχθεί (**MAASP**)· προτού ρωγματωθεί ο σχηματισμός στο ανοικτό, μη σωληνωμένο, τμήμα της γεώτρησης και προκληθεί μια υπεδαφική έκρηξη.

Ωστόσο, δεν παρέχονται στοιχεία για την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης. Σε αντίθετη περίπτωση ο χρήστης θα μπορούσε να εισάγει στα προαιρετικά κελιά την πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού. Από την Εξίσωση (7.1) θα μπορούσε να υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο (**MAASP**) εάν υπήρχαν δεδομένα πίεσης ρωγμάτωσης.

$$MAASP = ((P_{fracture} / D_{casing}) - \rho_m) \times D_{casing} \quad (7.1)$$

Όπου,

MAASP, η μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο δακτύλιο

$P_{fracture}$, η πίεση ρωγμάτωσης του σχηματισμού στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης (δοκιμή διαρροής)

D_{casing} , το βάθος έδρασης της σωλήνωσης

ρ_m , η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης

Ωστόσο, είναι εφικτό να γίνει μια εκτίμηση της πίεσης που ασκείται στο βάθος έδρασης της γεώτρησης, καθώς η εισροή βρίσκεται σε αυτό το σημείο κατά τη διάρκεια της αντιμετώπισής της, σύμφωνα με [5] αναπτύσσεται η Εξίσωση :

$$P_{casing} = \frac{1}{2} (A + (A^2 + 4 \times BHP \times M \times h_i \times \rho_m)^{0.5}) \quad (7.2)$$

Όπου,

P_{casing} , πίεση στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης

BHP, πίεση πυθμένα = πίεση πόρων του σχηματισμού

h_i , ύψος στήλης της εισροής

ρ_m , η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης

$$A, \quad A = BHP - \rho_m \times (TVD - D_{casing}) - \rho_i \times h_i$$

Όπου,

TVD, το πραγματικό κατακόρυφο βάθος της γεώτρησης

ρ_i , η πυκνότητα της εισροής

D_{casing} , το βάθος έδρασης της σωλήνωσης

$$M, \quad M = \frac{C_{dp-c}}{C_{dp-oh}}$$

Όπου,

C_{dp-c} , η χωρητικότητα του διάκενου μεταξύ των διατρητικών στελεχών και των τοιχωμάτων της σωλήνωσης

C_{dp-oh} , η χωρητικότητα του διάκενου μεταξύ διατρητικών στελεχών και των τοιχωμάτων της γεώτρησης (μη σωληνωμένο τμήμα)

Σύμφωνα με την Εξίσωση (7.2) λοιπόν, η πίεση στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης είναι :

$$P_{casing} = \frac{1}{2} \times \left(A + \left(A^2 + 4 \times 4061.6 \text{ psi} \times M \times 692.74 \text{ ft} \times 0.728 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \right)^{0.5} \right)$$

Όπου,

$$A = 4061.6 \text{ psi} - 0.728 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times (4700 \text{ ft} - 4000 \text{ ft}) - 0.3526 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} \times 692.74 \text{ ft}$$

$$M = \frac{25 \text{ L/m}}{22 \text{ L/m}}$$

Συνεπώς,

$$P_{casing} = 3784 \text{ psi}$$

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίζονται και παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, με το πάτημα του κουμπιού «Calculate», στο δεύτερο παράθυρο του προγράμματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα (7.6).

The screenshot shows the 'Results' window with the following data:

- Pore Pressure:** 4061,60 psi, 0,8641 psi/ft. Units: Imperial.
- Kill:** 0,8811 psi/ft, 16,94 ppg.
- Mudweight:** Abandon: 0,9899 psi/ft, 19,03 ppg.
- Influx:** Height: 692,74 feet, Gradient: 0,3526 psi/ft.
- Type:** Probably an oil influx.

Section	Height feet	Capacity bbls/ft	Volume bbls	Strokes	Time min
dp	4480	0,019171	85,887	546,2	19,5
hwdp					
dc	220	0,009585	2,108	13,4	0,4
dc/oh	220	0,023005	5,061	32,1	1,1
hwdp/oh					
dp/oh	480	0,042176	20,244	128,7	4,5
dp/csg	4000	0,047928	191,713	1219,2	43,5
Total :			305,016	1939,7	69,2

Additional parameters:

- ICP: 1040 psi, Initial Choke Line Pressure: 895 psi
- FCP: 387,33 psi, MAASP: -- psi, Pshoe: 3784,0 psi

Buttons and Kill Times:

- Pressure/Strokes: Kill Sheet (yellow), Driller's Method (red, 1,97 h), Wait n' Weight (red, 1,15 h)

Εικόνα (7.6) : Αποτύπωση αποτελεσμάτων υπολογισμών

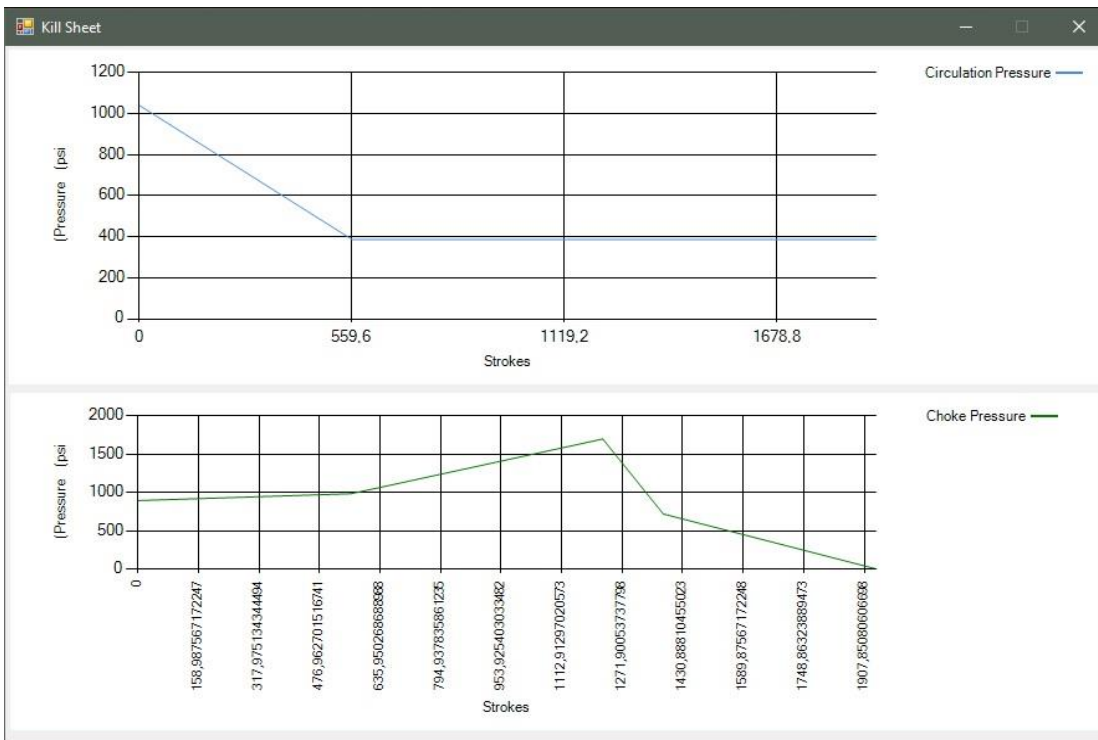
- Διαγράμματα πιέσεων κυκλοφορίας και πιέσεων στραγγαλισμού κατά την εκτέλεση των μεθόδων αντιμετώπισης

Στη συνέχεια, δίνεται η επιλογή στο χρήστη να εμφανίσει σε ένα τρίτο παράθυρο τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων της γεώτρησης. Η εμφάνιση του παράθυρου γίνεται πατώντας το αντίστοιχο κουμπί «Kill Sheet» της κάθε μεθόδου, επιλέγοντας παράλληλα την απεικόνιση των πιέσεων ως προς το χρόνο ή τους εμβολισμούς.

Για αυτή τη μελέτη περίπτωσης τα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων που πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πίεση πυθμένα κατά την αντιμετώπιση της εισροής, παρουσιάζονται στην Εικόνα (7.7) και στην Εικόνα (7.8) για τη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή και τη Μέθοδο του Μηχανικού αντίστοιχα.



Εικόνα (7.7) : Εκτόνωση πιέσεων με τη Μέθοδο του Γεωτρυπανιστή



Εικόνα (7.8) : Εκτόνωση πιέσεων με τη Μέθοδο του Μηχανικού

Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα

- Ο έλεγχος των πιέσεων μιας γεώτρησης καθορίζει την ασφάλεια των μελών του προσωπικού και του γεωτρητικού έργου στο σύνολο του. Η ορθή εκτίμηση των πιέσεων αποτελεί αναγκαιότητα. Η ακραιότερη περίπτωση πιέσεων πρέπει να είναι διαχειρίσιμη τόσο από την πλευρά του προσωπικού όσο και από την πλευρά του εξοπλισμού της εγκατάστασης. Απαιτείται η γρήγορη επιβεβαίωση μιας πιθανής εισροής, όπως επίσης τάχιστα πρέπει να σφραγίσουν τη γεώτρηση τα κατάλληλα ανά περίπτωση έμβολα του αντιακρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας.
- Η βασική διαφοροποίηση των υπεράκτιων γεωτρήσεων ξεκινά από τη στιγμή εισόδου της εισροής στη γραμμή στραγγαλισμού όπου η *πίεση δακτυλίου* αυξάνεται τάχιστα. Αν η πίεση αυτή δεν εφαρμοστεί αμέσως στην επιφάνεια, η πίεση πυθμένα (BHP) ελαττώνεται καθιστώντας πιθανή την περαιτέρω εισροή στη γεώτρηση.
- Η μέγιστη τιμή της *πίεσης δακτυλίου* (SICP) σε υπεράκτιες γεωτρήσεις είναι μεγαλύτερη από τις μέγιστες τιμές σε χερσαίες γεωτρήσεις. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μικρότερη διάμετρο της γραμμής στραγγαλισμού (choke line), η οποία ταχύτατα πληρούται από τα ρευστά μιας εισροής με αποτέλεσμα να αυξάνει απότομα το μήκος της εισροής· γεγονός που επηρεάζει αισθητά την *πίεση δακτυλίου*.
- Η πίεση στο βάθος έδρασης της σωλήνωσης δεν λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της όταν η *πίεση δακτυλίου* (SICP) είναι η μέγιστη, αλλά όταν η εισροή βρίσκεται ακριβώς σε αυτό το βάθος. Η *πίεση δακτυλίου* είναι η μέγιστη όταν η εισροή εξέρχεται από τη γεώτρηση.

➤ Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε είναι απαραίτητο για την άμεση μαθηματική επίλυση ενός προβλήματος εισροής. Σε μια πραγματική εισροή· ο χρόνος μέχρι την έναρξη της αντιμετώπισης της, όπως έχει αποσαφηνιστεί σε αυτή την εργασία, αποτελεί καίριο παράγοντα. Ο χρόνος για τον υπολογισμό των απαραίτητων δεδομένων για να ξεκινήσει η αντιμετώπιση, ελαχιστοποιείται με τη χρήση του προγράμματος.

➤ Η πυκνότητα της εισροής, όπως υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.5), μπορεί ως αποτέλεσμα να έχει αρνητική τιμή, όταν :

$$SICP_s - SIDPP_s > \rho_m \times h_i$$

Το πρόγραμμα ζητάει από το χρήστη να επεξεργαστεί αυτές τις τιμές ώστε να επιφέρουν θετική πυκνότητα εισροής. Επίσης, στα διαγράμματα εκτόνωσης των πιέσεων, η μέγιστη πίεση στραγγαλισμού είναι ενδεικτική μιας αέριας εισροής, ανεξάρτητα από την πρόβλεψη που γίνεται σχετικά με τη φύση της, καθώς δε βρέθηκε η εξίσωση που αποδίδει αυτή τη μέγιστη τιμή πίεσης.

➤ Η επιλογή μιας άλλης γλώσσας προγραμματισμού θα είχε βοηθήσει στην υλοποίηση της εφαρμογής σε αρκετά πιο βέλτιστο χρόνο. Πολλές περισσότερες λύσεις σε προβλήματα που συναντήθηκαν κατά τη δημιουργία του προγράμματος, παρατηρήθηκε πως δίνονταν στις γλώσσες C# και JavaScript. Συμπεραίνεται πως δεν υπάρχει η απαραίτητη υποστήριξη πλέον για τη Visual Basic, τουλάχιστον συγκριτικά με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Η επιλογή μιας πιο διαδεδομένης γλώσσας θα προσέφερε δυνατότητες ανάπτυξης της εφαρμογής σε μια καλύτερη έκδοση γενικώς, ιδιαίτερα όμως στο τμήμα των διαγραμμάτων.

Βιβλιογραφία

1. Σταματάκη, Σ., Τεχνολογία Γεωτρήσεων, Εκδόσεις Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), Αθήνα 2003
2. Σταματάκη, Σ., Μηχανική Πετρελαίων, Εκδόσεις Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), Αθήνα 2004
3. Σταματάκη, Σ., Έλεγχος πιέσεων σε χερσαίες και θαλάσσιες γεωτρήσεις πετρελαίου με χρήση μαθηματικών μοντέλων, Mining-Metallurgical Annals, 1987
4. Røssland, Ø., A Discussion of Well Control Methods, Master Thesis, Stavanger, 2013
5. Rabia, H., Well engineering and construction, 2001
6. Drilling Engineering Handbook, Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University
7. Rabia, H., Fundamental of Casing Design, 1987
8. National Commission on the BP Deepwater Horizon, The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling, 2011
9. Technical Data Book, Wild Well Control Inc, 2014
10. Schlumberger Oilfield Glossary, <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>