



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Συγκριτική διερεύνηση προβλεψιμότητας καθιερωμένων κριτηρίων
θραύσης πετρωμάτων γύρω από γεωτρήσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΚΟΠΑΣΑΚΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητης Γ.Εξαδάκτυλος (επιβλέπων)

Αν.Καθηγητής Εμμ.Στειακάκης

Δρ. Π.Λιόλιος

Χανιά

Ιανουάριος, 2020

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που διατυπώνονται σε αυτήν την εργασία, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής συμφωνούν με αυτές.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής ήταν απαραίτητη η βοήθεια κάποιων προσώπων τα οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Εξαδάκτυλο Γεώργιο καθώς μου εμπιστεύθηκε ένα θέμα το οποίο είχε άμεση σχέση με αυτό που ήθελα και ζήτησα να δουλέψω. Επίσης τον ευχαριστώ για όλη την βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν.Καθηγητή Στειακάκη Εμμανουήλ , τον κ. Λιόλιο Παντελή και τον Δρ. Ξηρουδάκη Γεώργιο για την σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν στην διεκπεραίωση της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και του φίλους μου καθώς η υποστήριξη που μου παρείχαν ήταν απαραίτητη για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός των τάσεων γύρω από κατακόρυφες γεωτρήσεις παραγωγής υδρογονανθράκων και ο υπολογισμός του κατάλληλου ειδικού βάρους του γεωτρητικού πολφού για την αποφυγή της θραύσης του πετρώματος. Η τελευταία είναι πιθανόν να προκύψει λόγω διαταραχής του επιτόπου εντατικού πεδίου από την αφαίρεση του στερεού υλικού που βρισκόταν υπό πίεση.

Για την εύρεση τού σωστού μοναδιαίου βάρους του πολφού χρησιμοποιήθηκαν τρία κριτήρια αστοχίας θραύσης πετρωμάτων: Mohr-Coulomb, Mogi-Coulomb, Modified-Lade και οι αναλυτικές λύσεις του Kirsch για τον υπολογισμό του εντατικού πεδίου γύρω από κυκλική γεώτρηση. Οι λύσεις αυτές προγραμματίστηκαν στο λογισμικό Matlab και προσδιορίστηκε το εύρος του ειδικού βάρους του πολφού για να μην παρουσιαστεί αστοχία εντός της γεώτρησης. Για την επαλήθευση της μεθοδολογίας έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με δεδομένα από τέσσερις πραγματικές γεωτρήσεις με σκοπό την εύρεση του καταλληλότερου κριτηρίου αστοχίας που δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Πιο αναλυτικά στα κριτήρια που προαναφέρθηκαν εισάγονται οι ενεργές κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 , σ_3 που προκύπτουν από τις δυσδιάστατες λύσεις του Kirsch με την αντί-επίπεδη ορθή τάση να δίδεται από την εξίσωση του (Fairhurst, 1970). Στις εξισώσεις αυτές εισάγονται οι τάσεις που επικρατούν στην περιοχή της γεώτρησης και η πίεση των πόρων από τις καταγραφές των γεωτρήσεων για το υπό μελέτη βάθος.

Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας τονίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση του συγκεκριμένου θέματος και περεταίρω προτάσεις για την πιο λεπτομερή ανάπτυξη του προβλήματος της σωστής πρόβλεψης μοναδιαίου βάρους λάσπης γεώτρησης για αποτροπή αποσταθεροποίησης αυτής.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the calculation of the stresses around a vertical borehole and the calculation of the necessary mud unit weight for the avoidance of the rock failure.

For the estimation of the mud unit weight three types of failure criteria have been used: the Mohr-Coulomb, the Modified-Lade and the Mogi-Coulomb. Additionally, the analytical Kirsch solutions have been considered for the calculation of the in situ stresses around the circular borehole. These solutions have been programmed in MATLAB in order to determine the range of the unit weight of the mud for the prevention of failure at the walls of the borehole. For the validation of this methodology, the results of the algorithm were compared with four borehole case studies in order to identify the most appropriate failure criterion.

More precisely, the Kirsch solution is used to calculate the stress field around the perimeter of the borehole. The boundary conditions were found in the data given in the case studies. Subsequently, the calculated stress field was converted into the effective principal stresses σ_1' , σ_2' , σ_3' . Finally, these principal stresses were used with the aforementioned failure criteria to estimate if the borehole will fail.

At the end of this diploma thesis the results of the algorithm were compared with the results of the literature in order to identify the failure criterion which give the most appropriate range of the mud weight unit for better prevention of failure at the borehole walls. Additionally suggestion for further studying of the problem are given.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	II
Περίληψη	III
Abstract	IV
1 Εισαγωγή	8
1.1 Σκοπός	8
1.2 Γεωτρήσεις σε κοίτασμα πετρελαίου	8
1.3 Μέρη εξέδρας γεώτρησης	10
1.4 Γεωτρητικός πολφός	12
1.5 Πετρώματα στα οποία εντοπίζεται πετρέλαιο και φυσικό αέριο	13
1.5.1 Σχιστόλιθος	13
1.5.2 Ψαμμίτης	13
1.5.3 Ανθρακικά πετρώματα	14
2 Κατανομή τάσεων σε κυκλικό ανυποστήρικτο άνοιγμα	15

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	15
2.2 Βασικές αρχές της θεωρίας ελαστικότητας για τον υπολογισμό των τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα.....	16
2.3 Λύσεις Kirsch.....	20
2.4 Εφελκυστική και διατμητική αστοχία στα τοιχώματα της γεώτρησης.....	23
Κεφάλαιο 3: Κριτήρια αστοχίας.....	25
3.1 Βασικές έννοιες.....	25
3.1.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb	26
3.1.2 Κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb.....	27
3.1.3 Κριτήριο αστοχίας Modified Lade.....	28
3.2 Διαγράμματα ροής κώδικα.....	29
Κεφάλαιο 4: Σύγκριση προβλέψεων κριτηρίων αστοχίας με επιτόπου μετρήσεις	34
4.1 :Γεώτρησεις στην περιοχή Krishna Godavari.....	36
4.1.1 Γεώτρηση W-1.....	37
4.1.2 Γεώτρηση W-1.....	39
4.1.3 Γεώτρηση W-14.....	42
4.1.4 Γεώτρηση W-12.....	45
4.2 :Γεώτρηση στο νοτιοδυτικό Ιράν	49
Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα-Προτάσεις	53
Παράρτημα Α :KirschOnBoundary	54
Παράρτημα Β :PressureOnBoundary.....	56
Βιβλιογραφία	57
Πηγες διαδικτύου	57

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός της τάσης θραύσης του σχηματισμού και του απαιτούμενου μοναδιαίου βάρους του γεωτρητικού πολφού σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων με την βοήθεια της αναλυτικής λύσης του Kirsch και τριών κριτηρίων αστοχίας (Mohr-Coulomb, Mogi-Coulomb και Modified-Lade) τα οποία προγραμματίστηκαν στο λογισμικό Matlab και δίδονται στα Παραρτήματα (Α και Β). Ο στόχος της δημιουργίας του συγκεκριμένου κώδικα είναι η πρόβλεψη ανά κριτήριο αστοχίας του μοναδιαίου βάρους πολφού για την αποτροπή της θραύσης και η εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για το ποιο κριτήριο από τα τρία μπορεί να θεωρηθεί το πιο αποτελεσματικό σε πραγματικές συνθήκες. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του κώδικα έγινε σύγκριση με δεδομένα και τιμές μοναδιαίων βαρών που αντλήθηκαν από πραγματικές γεωτρήσεις υδρογονανθράκων.

1.2 Γεωτρήσεις σε κοίτασμα πετρελαίου

Οι υδρογονάνθρακες προέρχονται από υπολείμματα ζωικών και φυτικών οργανισμών που αποτέθηκαν στον ωκεανό πριν εξακόσια χιλιάδες έως δέκα εκατομμύρια χρόνια. Με το πέρασμα των χρόνων αυτοί οι οργανισμοί αποσυντέθηκαν μέσα σε ιζηματογενή στρώματα και με την απουσία οξυγόνου και την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας λόγω των υπερκείμενων στρωμάτων τα μόρια της οργανικής ύλης διασπάστηκαν και δημιούργησαν νέα πολυπλοκότερα μόρια, τα μόρια των χημικών ενώσεων που αποτελούν το πετρέλαιο.

Ο σκοπός μίας γεώτρησης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες της εταιρίας που την έχει αναλάβει. Έτσι ανάλογα με το πώς έχει κατηγοριοποιηθεί το υπό εξέταση κοίτασμα από τους γεωλόγους ή τους γεωφυσικούς οι γεωτρήσεις χωρίζονται σε:

- Γεώτρηση για εκμετάλλευση κοιτάσματος
- Γεώτρηση για αρχική εκτίμηση αποθεμάτων υδρογονανθράκων
- Γεώτρηση για έγχυση υγρών ή αερίων μέσα σε κοίτασμα. Ένα παράδειγμα είναι η έγχυση διοξειδίου του άνθρακα σε ταμειυτήρες πετρελαίου με σκοπό τη αύξηση της απόληψης υδρογονανθράκων μέσω αύξησης της πίεσης στο εσωτερικό του.

Τα συνήθεις βήματα που ακολουθούνται από τις πετρελαϊκές εταιρίες για την διεξαγωγή μια νέας γεώτρησης είναι:

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

- Διεξαγωγή γεωφυσικών μεθόδων όπως σεισμικές μέθοδοι για τον εντοπισμό και για εκτίμηση αποθεμάτων του ταμιευτήρα
- Ακριβέστερος υπολογισμός αποθεμάτων ταμιευτήρα μέσω ερευνητικών γεωτρήσεων ώστε να υπάρχει οικονομικό όφελος από την μακροχρόνια διαδικασία άντλησης των υδρογονανθράκων
- Έκδοση αδειών από την εκάστοτε αρμόδια εθνική αρχή
- Προετοιμασία διαδικασίας γεώτρησης
- Δημιουργία κατάλληλων υποδομών όπως δρόμοι , εργοτάξια ,πλατφόρμα και εγκαταστάσεις νερού για την διεξαγωγή της εκμετάλλευσης
- Ολοκλήρωση του φρέατος που θα δημιουργηθεί και αποκατάστασή του

Τα είδη των γεωτρήσεων ανάλογα με το εάν γίνονται σε θάλασσα η στεριά χωρίζονται σε χερσαίες (Σχήμα 1-1) και παράκτιες (Σχήμα 1-2)



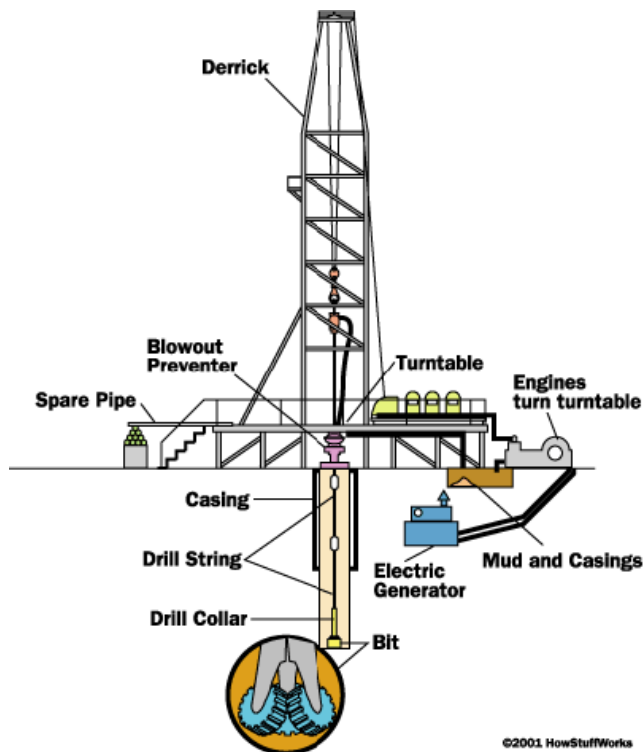
Σχήμα 1-1 : Χερσαία γεωτρητική πλατφόρμα (www.wellcontrol.com.au)



Σχήμα 1-2 : Παράκτια γεωτρητική πλατφόρμα (www.oilandgaspeople.com)

1.3 Μέρη εξέδρας γεώτρησης

Όταν ο εξοπλισμός καταφτάσει στο σημείο της εξόρυξης ,το προσωπικό της εταιρίας συναρμολογεί την εξέδρα η οποία αποτελείται από αρκετά κομμάτια τα οποία είναι απαραίτητα για την ομαλή διεξαγωγή της γεώτρησης όπως φαίνεται στο σχήμα (1.3)



Σχήμα 1.3: Μέρη εξέδρας (science.howstuffworks.com)

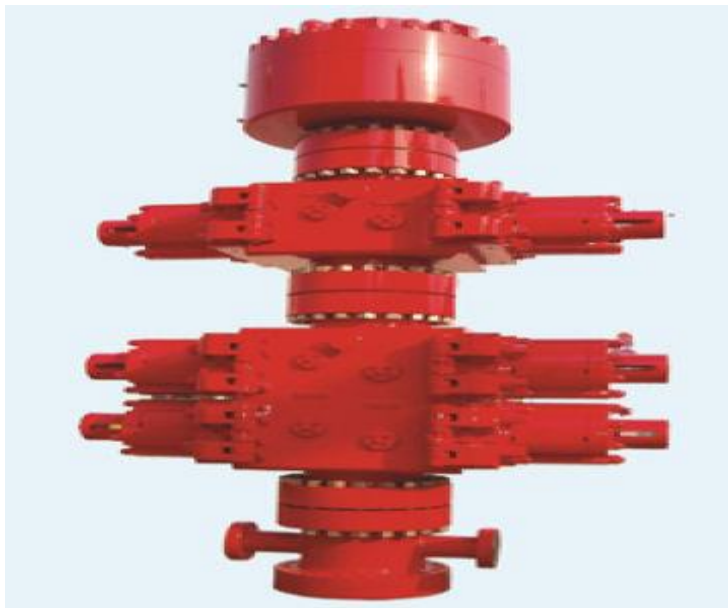
Πιο αναλυτικά τα κύρια μέρη είναι (science.howstuffworks.com) :

- Το σύστημα ενέργειας το οποίο αποτελείτε από μεγάλες μηχανές ντίζελ και ηλεκτροκινητήρες
- Εξοπλισμός περιστροφής της γεωτρητικής στήλης όπως το διατρητικό στέλεχος μαζί με τα κοπτικά άκρα (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4 : Διατρητικό στέλεχος με κινητήρα πολφού και κοπτικό άκρο (www.rigzone.com)

- Χαλύβδινη σωλήνωση ενισχυμένη με τσιμεντένιο περίβλημα (Casing) με σκοπό την υποστήριξη της γεώτρησης και την διευκόλυνση της ροής του γεωτρητικού πολφού
- Σύστημα κυκλοφορίας γεωτρητικού πολφού το οποίο μέσω αντλιών κυκλοφορεί υπό πίεση, γύρω από το διατρητικό στέλεχος
- BOP (Blow out preventer) είναι μία ειδική βαλβίδα ή σύστημα βαλβίδων (Σχήμα 1.5) η οποία χρησιμοποιείτε για το σφράγισμα ,έλεγχο και επιτήρηση ενός κοιτάσματος από την ανεξέλεγκτη απελευθέρωση αργού πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

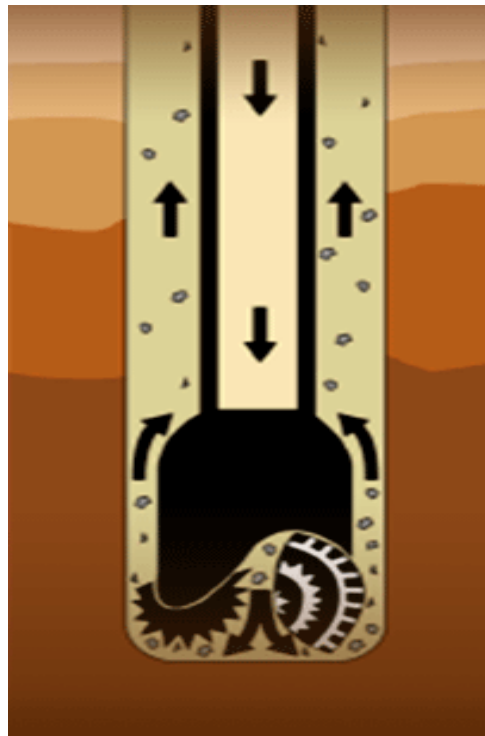


Σχήμα 1.5 : Σύστημα βαλβίδων BOP (www.hydrocarbons-technology.com)

1.4 Γεωτρητικός πολφός

Η ανάγκη για γεωτρήσεις μεγαλύτερου βάθους για την εκμετάλλευση όλο και πιο απαιτητικών ταμιευτήρων έχει επιφέρει βελτιώσεις στις τεχνολογίες γεώτρησης άρα και στα γεωτρητικά ρευστά. Ο γεωτρητικός πολφός ή αλλιώς γεωτρητική λάσπη προστίθεται και ανακυκλώνετε με συγκεκριμένη ροή (Σχήμα 1.6) στην γεώτρηση για την απομάκρυνση του τεμαχισμένου πετρώματος, τη σταθεροποίηση των μη υποστηριγμένων πετρωμάτων, τον έλεγχο της πίεσης και για την ψύξη και λίπανση των κοπτικών άκρων.

Ο γεωτρητικός πολφός έχει ως βάση το νερό ή το πετρέλαιο ή ακόμα και ένα συνθετικό παράγωγο του πετρελαίου. Κάθε σύνθεση παράγει διαφορετικά αποτελέσματα και η επιλογή του σωστού είδους εξαρτάται κυρίως από τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για αυτόν τον λόγο υπάρχει μηχανικός γεωτρητικών ρευστών που επιβλέπει την διαδικασία και προσθέτει όταν χρειαστεί τα κατάλληλα χημικά για την ρύθμιση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του πολφού (www.rigzone.com)



Σχήμα 1.6: Πορεία γεωτρητικού πολφού κατά την άντληση (www.rigzone.com)

1.5 Πετρώματα στα οποία εντοπίζεται πετρέλαιο και φυσικό αέριο

Οι τύποι πετρώματος οι οποίοι περιέχουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο είναι όλοι ιζηματογενούς προέλευσης πετρώματα τα οποία σχηματίζονται όταν κόκκοι και ανόργανα στοιχεία που έχουν τοποθετηθεί από τρεχούμενο νερό συνενώνονται μαζί. Επειδή αυτά τα πετρώματα δημιουργούνται από τόσο μικρά στοιχεία, είναι γεμάτα κενά στα οποία ενεργειακά πλούσιες χημικές ενώσεις άνθρακα βρίσκονται εγκλωβισμένες. (sciencing.com/elements-fossil-fuels)

1.5.1 Σχιστόλιθος

Ο σχιστόλιθος είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα συχνά αναφερόμενο ως φυσική πηγή καυσίμου, πιθανόν λόγω της αφθονίας του και της σύνθεσης του. Ο σχιστόλιθος δημιουργείται όταν στρώματα λάσπης πλούσιας σε άνθρακα συμπιέζονται μέχρις ότου σκληρύνουν και σχηματίσουν πέτρωμα που συγκρατεί αυτά τα στρώματα.



Σχήμα 1.7: Σχιστόλιθος (<http://www.geo.auth.gr/>)

1.5.2 Ψαμμίτης

Άλλος τύπος πετρώματος με μεγάλο πορώδες συχνά σχηματιζόμενο πάνω από σχιστολιθικά στρώματα, ο οποίος μπορεί να παγιδεύσει χαμηλής πυκνότητας στοιχεία άνθρακα είναι ο ψαμμίτης. Το πέτρωμα αυτό αποτελείται από κόκκους ορυκτών όπως χαλαζίας και αστρίους. Το συνδετικό υλικό των ψαμμιτικών πετρωμάτων είναι συνήθως άργιλος ή αργιλικός σχιστόλιθος ή ανθρακικό ορυκτό όπως ο ασβεστίτης και σπανιότερα ο δολομίτης. Στα ψαμμιτικά στρώματα οι χημικές ενώσεις του άνθρακα συνήθως βρίσκονται σε υγρή μορφή το οποίο σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να απελευθερώσει φυσικό αέριο όταν τραβηχτεί στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 1.8: Ψαμμίτης (el.wikipedia.org)

1.5.3 Ανθρακικά πετρώματα

Όπως τον ψαμμίτη, τα ανθρακικά πετρώματα είναι ιζηματογενή πετρώματα τα οποία συναντάμε συνήθως σε συνδυασμό με σχιστόλιθο. Τα ανθρακικά πετρώματα, ωστόσο, σε μεγάλο βαθμό σχηματίζονται από υπολείμματα θαλάσσιας ζωής και πιο συγκεκριμένα από όστρακα και κόκαλα, συνδυασμένα με άλλα ορυκτά. Για τον λόγο αυτό, είναι πλούσια σε ασβέστιο και άλλες χημικές ενώσεις τα οποία οδηγούν στην κατηγοριοποίηση αυτών σε :

- Ασβεστόλιθο ο οποίος περιέχει ανθρακικό ασβέστιο
- Δολομίτης ο οποίος περιέχει ανθρακικό μαγνήσιο και ασβέστιο

Τα κενά που υπάρχουν μέσα στο ανθρακικό πέτρωμα είναι και αυτά που φιλοξενούν πετρέλαιο ή αέριο.



Σχήμα 1.9: Δολομίτης (www.nhmc.uoc.gr)

2 Κατανομή τάσεων σε κυκλικό ανυποστήρικτο άνοιγμα

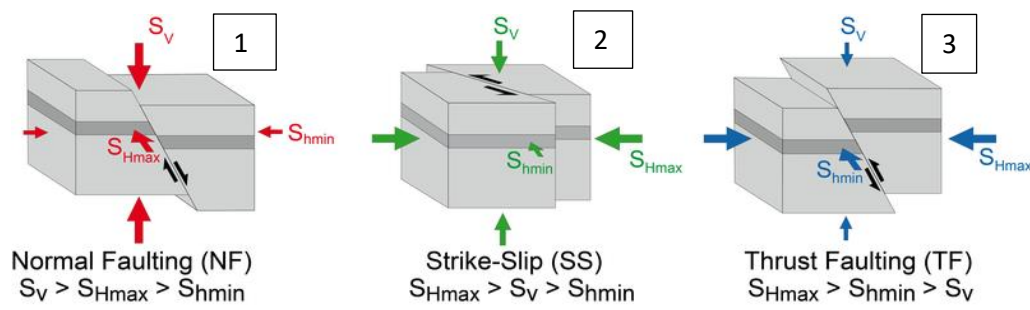
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το μέγεθος των επιτόπου τάσεων και ο προσανατολισμός τους αποτελούν σπουδαίο κομμάτι της γεωμηχανικής, και είναι οι πιο βασικές παράμετροι στον σχεδιασμό υπογείων κατασκευών όπως μία γεώτρηση. Οι επιτόπου τάσεις χαρακτηρίζονται από το μέγεθος και την κατεύθυνση των τριών κυρίων τάσεων.

Από τις τρεις επιτόπου κύριες τάσεις, η μέγιστη κύρια τάση συνήθως είναι η κατακόρυφη ($\sigma_v = \sigma_1$) λόγω βαρύτητας των υπερκειμένων ενώ η ενδιάμεση και ελάχιστη κύρια τάση είναι οι οριζόντιες ($\sigma_H = \sigma_2$) και ($\sigma_h = \sigma_3$) αντιστοίχως.

ύμφωνα λοιπόν με την σχέση μεταξύ τους, μπορούν να διακριθούν τρεις περιπτώσεις οι οποίες περιγράφουν την εντατική κατάσταση σύμφωνα με τον E. M. Anderson (Mark D. Zoback, 2007). Αυτές είναι :

- 1) Συνθήκες κανονικού ρήγματος. Σε αυτήν την περίπτωση η κατακόρυφη τάση (σ_v) είναι η μεγαλύτερη αριθμητικά τιμή σ_1 , ενώ η ενδιάμεση οριζόντια τάση σ_2 είναι παράλληλη του επιπέδου του ρήγματος (σχήμα 2.1 περίπτωση 1)
- 2) Συνθήκες διατμητικού ρήγματος. Εδώ η κατακόρυφη τάση (σ_v) είναι η ενδιάμεση τάση σ_2 . (σχήμα 2.1 περίπτωση 2)
- 3) Συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. Στην περίπτωση αυτή η κατακόρυφη τάση (σ_v) είναι η ελάχιστη τάση σ_3 . (σχήμα 2.1 περίπτωση 3)



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση τριών ειδών αστοχίας σε τρία διαφορετικά εντατικά πεδία(word-stress-map.org)

Θεωρείται ότι η κατακόρυφη κύρια τάση οφείλεται στο βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών και η διεύθυνση της ταυτίζεται με το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας g η οποία έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της γης.

Ο υπολογισμός της κατακόρυφης κύριας τάσης γίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad (2.1)$$

Όπου n ο αριθμός των υπερκείμενων στρωμάτων, γ_i το μοναδιαίο βάρος κάθε στρώματος και h_i το αντίστοιχο πάχος του. Στην περίπτωση που υπάρχει νερό τότε χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το ειδικό βάρος του πετρώματος κορεσμένου σε νερό.

Οι οριζόντιες κύριες τάσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη δυσκολία στον υπολογισμό τους καθώς είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων όπως (Douglas R. et al ,2012). :

1. Τεκτονικές δυνάμεις
2. Δομή φλοιού γης
3. Τοπογραφία επιφανείας
4. Πλευρικά περιορισμένες τάσεις που προκαλούνται από την αύξηση του λόγου Poisson
5. Θερμικές ανωμαλίες και ροή ρευστών

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού των τιμών των οριζόντιων κύριων τάσεων. Κάποιοι από αυτούς θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 4 όπου παρατίθενται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις ερευνητικές εργασίες για την εύρεση αυτών των τιμών.

2.2 Βασικές αρχές της θεωρίας ελαστικότητας για τον υπολογισμό των τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού των τάσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα ανάλογα με τη θεώρηση του μέσου. Η πιο διαδεδομένη θεώρηση η οποία χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία είναι η θεώρηση του γραμμικά ελαστικού ισότροπου μέσου. Σύμφωνα με την θεώρηση αυτή:

1. Το πέτρωμα θεωρείται γραμμικά ελαστικό (ακολουθεί τον νόμο του Hooke) ,ομογενές και ισότροπο.
2. Το άνοιγμα έχει γίνει σε ένα αδιατάρακτο μέσο του οποίου τα όρια θεωρούνται πάρα πολύ μακριά (άπειρο)
3. Επειδή η επίλυση είναι δισδιάστατη για να ισχύουν οι θεωρήσεις της λύσης του Kirsch, το μήκος της γεώτρησης πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τις

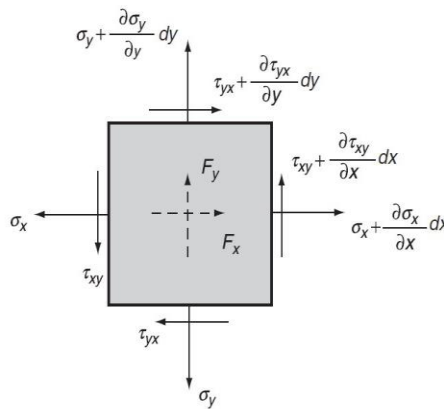
διαστάσεις της διατομής ώστε η κατανομή των τάσεων κατά τον επιμήκη άξονα (σ_z) να είναι ανεξάρτητη του μήκους.

4. Ο άξονας της γεώτρησης ταυτίζεται με τον άξονα της μίας κύριας τάσης που συνήθως για κατακόρυφη γεώτρηση είναι η σ_1 .
5. Ανυποστήρικτη γεώτρηση (πρίν την τοποθέτηση χαλύβδινης επένδυσης)

Για τις παραδοχές αυτές μπορεί να θεωρηθεί ότι ικανοποιούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, δηλαδή η παραμόρφωση κατά τον άξονα της γεώτρησης είναι αμελητέα και το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα δύο διαστάσεων.

Στην επίπεδη εντατική ανάλυση οποιοδήποτε σημείο στο σώμα αποτυπώνεται με ένα στοιχειώδη όγκο όπως φαίνεται στο Σχήμα (2.2). Η εντατική κατάσταση στο σημείο αυτό δίδεται από ένα τανυστή δεύτερης τάξης της μορφής:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.2: Στοιχειώδης όγκος και ισορροπία δυνάμεων (Martin H. Sadd, 2005)

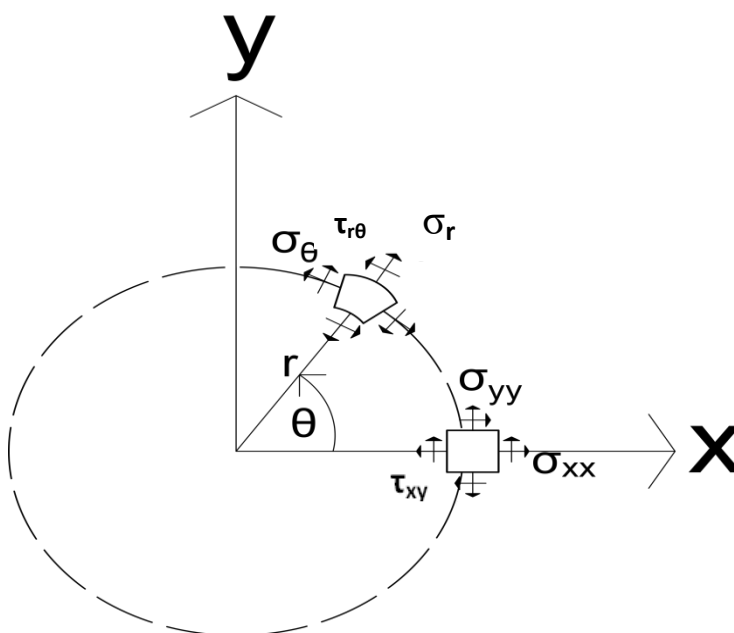
όπου σ_{xx} η ορθή τάση με διεύθυνση τον άξονα x , σ_{yy} η ορθή τάση με διεύθυνση τον άξονα y και τ_{xy}, τ_{yx} οι διατμητικές τάσεις. Λόγω ισορροπίας ροπών μπορεί να αποδειχθεί ότι $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ενώ από την ισορροπία δυνάμεων προκύπτει ότι:

$$\sigma_{ij,j} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$(2.4)$$

Επειδή οι γεωτρήσεις έχουν κυκλικό σχήμα, είναι προτιμότερο να μετασχηματισθούν οι προηγούμενες σχέσεις (2.3) και (2.4) σε πολικό σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στο σχήμα (2.3). Έτσι ο προσανατολισμός των ορθών και διατμητικών τάσεων ακολουθεί το σχήμα και είναι πολύ ευκολότερη η ερμηνεία τους. Η ισορροπία δυνάμεων μετασχηματίζεται

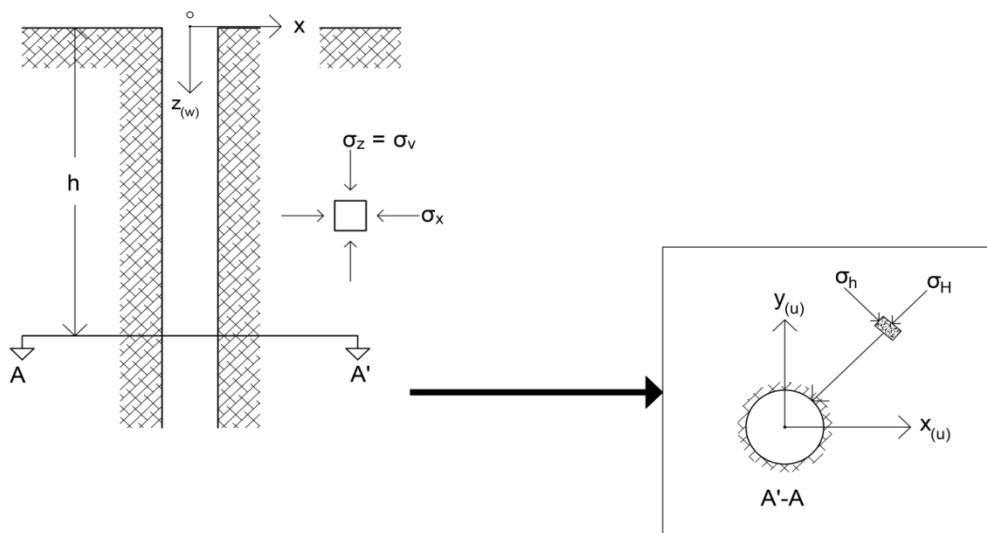
$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0\end{aligned}\quad (2.5)$$



Σχήμα 2.3: Ο τανυστής τάσεων στο πολικό σύστημα συντεταγμένων

Όπου σ_θ η εφαπτομενική τάση και σ_r η ακτινική τάση.

Στην περίπτωση της επιμήκης κυκλικής-κυλινδρικής γεώτρησης, το τρισδιάστατο αυτό πρόβλημα μπορεί να μελετηθεί ως επίπεδο πρόβλημα (σε επίπεδο Oxy) αν ισχύουν συγκεκριμένες παραδοχές.



Σχήμα 2.4: Κατακόρυφη τομή βαθειάς γεώτρησης

Θεωρείται επίπεδη πλάκα πετρώματος σε βάθος h με μικρή διαφορά μετατόπισης w στην πάνω και κάτω έδρα της (Σχήμα 2.4). Τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι $\partial w \approx 0$ και $w \approx 0$ συνεπώς:

$$1. \quad W=0, \quad u=u(x,y), \quad U=U(x,y) \quad (2.6)$$

$$2. \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (2.7)$$

$$3. \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

$$4. \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Όπου w διαμήκη ή κατακόρυφη μετατόπιση των δύο εδρών της πλάκας με σχεδόν μηδενική μεταβολή σε μικρό dz κατά τον άξονα OZ και u, v οι μετατοπίσεις κατά τους άξονες Ox και Oy .

Από τον νόμο του Hooke ισχύει ότι:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{άρα } \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ \{Συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης (Plain strain)\}} \quad (2.11)$$

Όπου ν ο λόγος του Poisson.

Η σ_z δρά στην πάνω και κάτω επιφάνεια των εδρών της πλάκας σε βάθος h που μελετάμε έτσι ώστε να συγκρατούν άκαμπτες αυτές τις έδρες ($w = 0$).

2.3 Λύσεις Kirsch

Η επίλυση του προβλήματος της γεώτρησης σε γραμμικά ελαστικό και ισότροπο μέσο έγινε από τον Γερμανό μηχανικό Ernst Gustav Kirsch (1898). Η λύση του Kirsch δεν περιλαμβάνει εσωτερική πίεση P_w στη γεώτρηση. Για να συμπεριληφθεί και η πίεση του γεωτρητικού πολφού η λύση του Kirsch συνδυάζεται με τη λύση του Lamé για τον χονδρότοιχο σωλήνα μέσω της αρχής της υπέρθεσης. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη και η πίεση των πόρων P_p (Terzaghi, Biot) και οι σχέσεις περιγράφουν πλέον τις ενεργές τάσεις του σκελετού. (Mark D. Zoback ,2007).

Έτσι η τελική μορφή της επίλυσης του προβλήματος για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης δίδεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{R^2}{r^2} - P_p \quad (2.12)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + P_w \frac{R^2}{r^2} - P_p \quad (2.13)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (2.14)$$

Όπου σ_z η εξίσωση από (Fairhurst,1970)

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_p \quad (2.15)$$

όπου στις παραπάνω εξισώσεις τα επιμέρους στοιχεία αυτών είναι:

εφαπτομενική τάση (σ_θ), ακτινική τάση(σ_r), αξονική τάση(σ_z) , εφαπτομενική διατμητική τάση($\tau_{r\theta}$)

r = η απόσταση ενός τυχαίου σημείου από το κέντρο της γεώτρησης

R = η ακτίνα της γεώτρησης

P_w = είναι η εσωτερική πίεση της γεώτρησης ή η πίεση του γεωτρητικού πολφού

ν = ο λόγος του Poisson του περιβάλλοντος πετρώματος

θ = είναι η μετρούμενη γωνία από την κατεύθυνση της σ_H

P_p = πίεση των πόρων

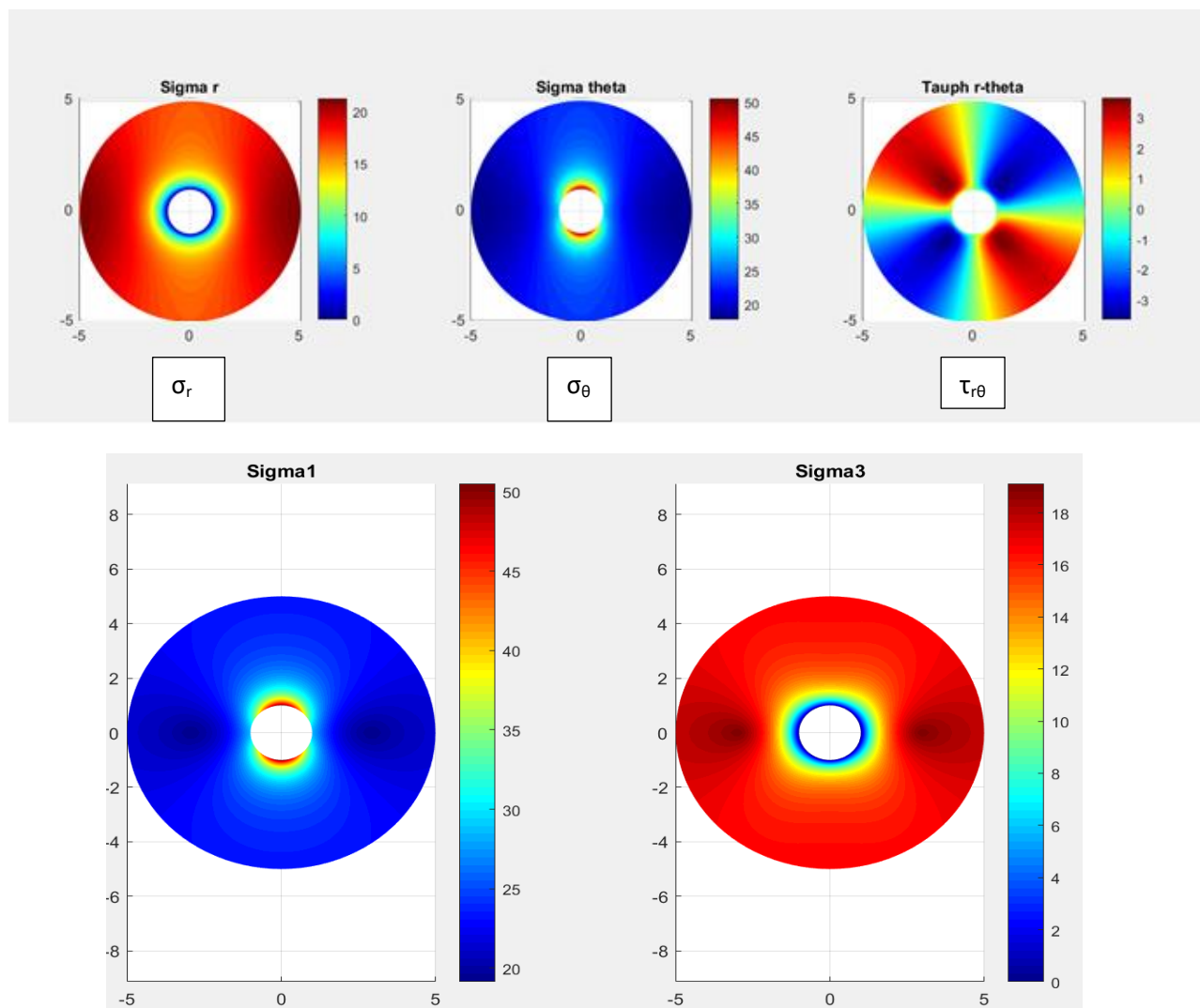
σ_h = ελάχιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

σ_H = Μέγιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

Από την εξίσωση (2.14) πάνω στο σύνορο της γεώτρησης φαίνεται ότι οι διατμήσεις είναι μηδενικές, όποτε η τάση δεν χρησιμοποιείται στους κώδικες υπολογισμού αστοχίας στα σύνορα. Η τάση αυτή θα ήταν απαραίτητη στην περίπτωση που εξετάζονταν τα κριτήρια αστοχίας εντός του άπειρου μέσου.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι τάσεις γύρω από το κυκλικό, ανυποστήρικτο άνοιγμα με βάση τις εξισώσεις (2.12-2.15) . Ενδεικτικά οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν πάρθηκαν από τον πίνακα 4.1

Κεφάλαιο 2^ο: Κατανομή τάσεων σε κυκλικό ανυποστήρικτο άνοιγμα



Σχήμα 2.5: Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή όπου η μακρινή οριζόντια τάση (Oy άξονας) είναι $\sigma_h=17$ MPa ενώ η οριζόντια τάση (Ox άξονας) $\sigma_H=22.5$ MPa και για ανυποστήριχτη γεώτρηση δίνει μέγιστη εφαπτομενική τάση στον οριζόντιο άξονα $\sigma_\theta=50$ MPa.

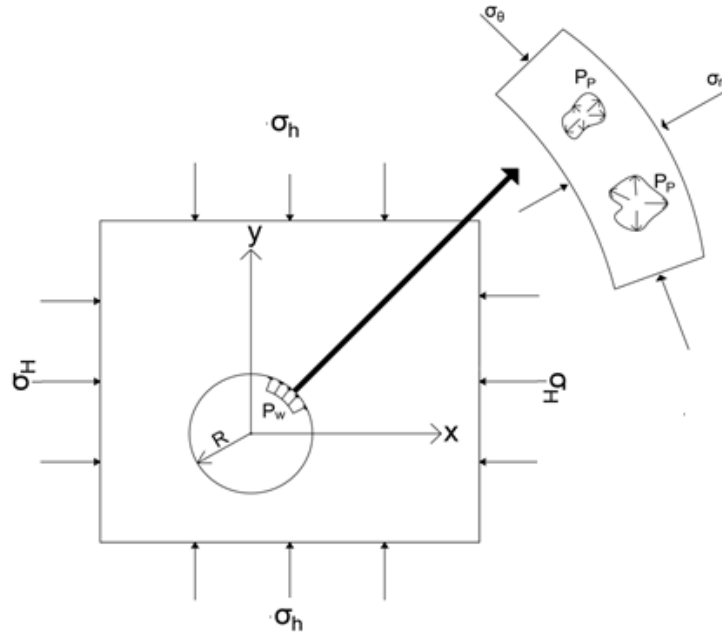
Η παραπάνω λύση προβλέπει ότι η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων είναι ακριβώς στο σύνορο της γεώτρησης από όπου και θα ξεκινήσει μια πιθανή αστοχία. Αρκεί ,λοιπόν, να μελετηθεί μόνο το σύνορο της γεώτρησης και η εφαρμογή των κριτηρίων αστοχίας να γίνει μόνο για την περιοχή αυτή. Αν στις παραπάνω σχέσεις (2.12- 2.15) τεθεί $\gamma=R$ τότε η λύση αφορά μόνο το σύνορο της γεώτρησης και οι εξισώσεις απλοποιούνται ως εξής:

$$\sigma_r = P_w - P_p \quad (2.16)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h + 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_w - P_p \quad (2.17)$$

$$\sigma_z = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_p \quad (2.18)$$

Όπου το νέο στοιχείο P_p είναι η πίεση πόρων.



Σχήμα 2.6: Οι τάσεις γύρω και εντός γεωτρήσεως

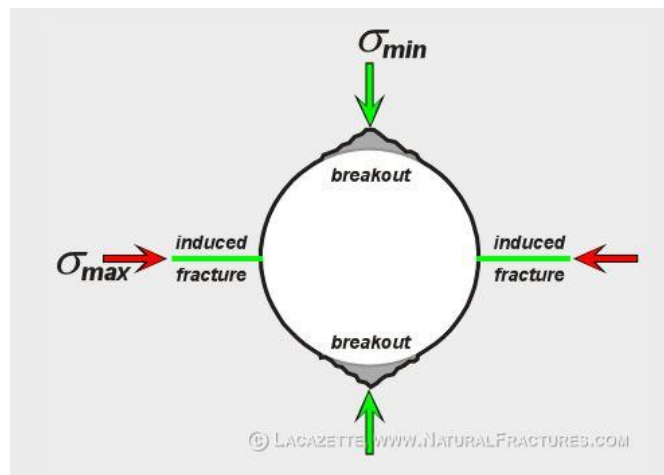
2.4 Εφελκυστική και διατμητική αστοχία στα τοιχώματα της γεώτρησης

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.16-2.18), οι εφαπτομενικές, ακτινικές και αξονικές τάσεις είναι συναρτήσεις της γωνίας θ . Αυτή η γωνία δείχνει την θέση του υπο μελέτη σημείου γύρω από την περίμετρο της γεώτρησης, και έχει εύρος τιμής από 0 έως 360 μοίρες. Παρατηρώντας τις εξισώσεις (2.16-2.18), βλέπουμε ότι οι συναρτήσεις εμφανίζουν ακρότατα στις θέσεις $\theta = \pi/2$, $\theta = -\pi/2$, $\theta = 0$ και $\theta = \pi$. Αυτές οι κρίσιμες θέσεις παραμένουν σταθερές για οποιαδήποτε τιμή σ_v , σ_h , σ_H . Άρα γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι αστοχία μπορεί να συμβεί μόνο σε αυτές τις θέσεις.

Επιπλέον οι εφαπτομενικές και ακτινικές τάσεις στις εξισώσεις (2.16-2.18), σ_θ και σ_r , εξαρτώνται από την πίεση του γεωτρητικού πολφού P_w , ενώ η αξονική τάση σ_z όχι.

Η επίδραση της πίεσης του γεωτρητικού πολφού P_w στις σ_θ και σ_r είναι κρίσιμη και θα καθορίσει αν θα υπάρξει διατμητική ή εφελκυστική αστοχία στα τοιχώματα της γεώτρησης. Όταν η πίεση του πολφού αυξάνει, η σ_θ μειώνεται και το πέτρωμα μπορεί να οδηγηθεί σε αστοχία με τη μορφή εφελκυστικής ρωγμής, η οποία δημιουργείται στην κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα (2.4). Συνεπώς δημιουργείται ένα εύρος (‘παράθυρο’) για την επιτρεπτή πίεση του πολφού η οποία και σταθεροποιεί την γεώτρηση. Να σημειωθεί ότι υπο την επίδραση κατάλληλου εξωτερικού πεδίου και των κατάλληλων ιδιοτήτων του πετρώματος το ‘παράθυρο’ αυτό μπορεί να μην υπάρχει, δηλαδή το πέτρωμα αστοχεί για οποιαδήποτε πίεση πολφού.

Αντίθετα όταν η πίεση του πολφού μειωθεί, η σ_θ αυξάνει και μπορεί το πέτρωμα να οδηγηθεί σε διατμητική αστοχία στην κατεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης, με τη δημιουργία λοβών θραύσης (Break outs), όπως διακρίνεται και στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.7: Διατμητική και εφελκυστική αστοχία (www.naturalfractures.com)

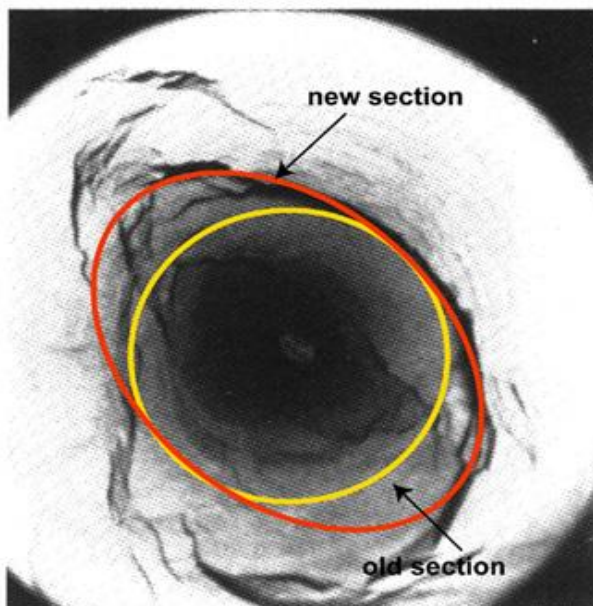
Κεφάλαιο 3: Κριτήρια αστοχίας

3.1 Βασικές έννοιες

Οι υπόγειοι σχηματισμοί υπόκεινται σε μία κατακόρυφη θλιπτική τάση η οποία οφείλεται στο βάρος των υπερκειμένων σχηματισμών καθώς και σε οριζόντιες τάσεις . Κάτω υπό την επίδραση αυτών των επιτόπιων τάσεων ,προτού ξεκινήσει η διάνοιξη της γεώτρησης, η βραχώμαζα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας η οποία θα διαταραχθεί από την εκσκαφή . Όταν γίνεται διάνοιξη μιας γεώτρησης ,το φορτίο το οποίο κρατάει το αφαιρούμενο πέτρωμα μεταφέρεται στο γειτονικό πέτρωμα για να υπάρξει αποκατάσταση της ισορροπίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα , τη συγκέντρωση τάσεων περιμετρικά του ανοίγματος και την μεταβολή του επιτόπου εντατικού πεδίου.

Για την αποτροπή αστοχίας στο πέτρωμα απαιτείται να υπάρχει μία υποστηρικτική πίεση στο εσωτερικό της γεώτρησης .Αυτή παρέχεται από ένα πεπιεσμένο ρευστό που ονομάζεται γεωτρητικός πολφός. Η αστάθεια στην γεώτρηση κατά την διάρκεια της διάνοιξης είναι ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που απασχολούν τους μηχανικούς στην βιομηχανία πετρελαίου. Στον όρο αστάθεια περιλαμβάνονται φαινόμενα όπως η συρρίκνωση διαμέτρου της γεώτρησης ,οι απώλειες γεωτρητικής λάσπης,η απώλεια κυκλοφορίας,η κατάρρευση της γεώτρησης και η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στα τοιχώματα. (Ayub Elyasi, Kamran Goshtasbi, 2015).

Στο σχήμα (3.1) παρατίθεται παράδειγμα κατάρρευσης των τοιχωμάτων της γεώτρησης λόγω διατμητικής αστοχίας.



Σχήμα 3.1 Αύξηση διαμέτρου γεώτρησης λόγω διατμητικής αστοχίας (<http://legacy.ingv.it>)

Για την αποτροπή αυτών των φαινομένων είναι αναγκαία η ακριβής εύρεση της επιτρεπτής πίεσης γεωτρητικού πολφού ο προσδιορισμός της οποίας απαιτεί την εφαρμογή ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας το οποίο λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση της γεώτρησης και τις ιδιότητες του πετρώματος.

Τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb, το Modified Lade και το Mogi-Coulomb. Τα κριτήρια αυτά θα μπορούσαμε να τα διαχωρίσουμε σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που αγνοούν την ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 όπως το κριτήριο Mohr-Coulomb και σε αυτά που δεν την αγνοούν όπως τα κριτήρια Modified Lade και Mogi-Coulomb.

Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις ανά κριτήριο που χρησιμοποιήθηκαν και εισήχθησαν στο λογισμικό Matlab για την εύρεση τυχόν ζωνών αστοχίας στις υπό μελέτη κατακόρυφες γεωτρήσεις πετρελαίου άρα και της κατάλληλης πίεσης πολφού για την αποτροπή αυτών.

3.1.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος εύρεσης των τάσεων για τις οποίες το πέτρωμα αστοχεί. Αυτή η μέθοδος ωστόσο αγνοεί την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 στην αστοχία του πετρώματος το οποίο μπορεί να παίζει αρνητικό ρόλο σε κάποιες περιπτώσεις.

Η εξίσωση που περιγράφει το κριτήριο βασισμένο στις παραμέτρους της ορθής και διατμητικής τάσης δίδεται από τη σχέση:

$$\tau = \mu \sigma + c \quad (3.1)$$

$$\text{όπου } \mu = \tan \varphi \quad (3.2)$$

Η παράμετρος c είναι η συνοχή του πετρώματος και φ η γωνία εσωτερικής τριβής.

Στην παρούσα διπλωματική το κριτήριο χρησιμοποιήθηκε με την εναλλακτική του μορφή έχοντας δηλαδή, ως παραμέτρους τις κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ με την εξής μορφή:

$$\sigma_1 = q \sigma_3 + C_0 \quad (3.3)$$

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.4)$$

$$C_0 = \frac{2ccos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3.5)$$

Το C_0 είναι η μοναξονική αντοχή σε θλίψη (UCS) και q είναι η παράμετρος η οποία σχετίζεται με την γωνία εσωτερικής τριβής.

Η εξίσωση (3.3) μπορεί να γραφεί και ως:

$$F = \sigma_1 - \frac{2ccos\varphi}{1 - \sin\varphi} - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 \quad (3.6)$$

Αν $F < 0$ δεν υπάρχει αστοχία, αντίθετα αν $F > 0$ το πέτρωμα αστοχεί. Στον κώδικα που αναπτύχθηκε (Παράρτημα Α) το κριτήριο Mohr-Coulomb χρησιμοποιήθηκε με την μορφή της εξίσωσης (3.6).

3.1.2 Κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας του Mogi λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή του πετρώματος. Οι ερευνητές (Al-Ajmi, Zimmerman, 2006) συσχέτισαν τις παραμέτρους του κριτηρίου του Mogi με τις παραμέτρους c, φ του κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb. Το κριτήριο του Mogi δίδεται από τη σχέση:

$$\tau_{oct} = \alpha + b\sigma'_{m,2} \quad (3.7)$$

όπου $\sigma_{m,2}$ και τ_{oct} αντιπροσωπεύουν την ενεργή μέση τάση (effective mean stress) και την οκταεδρική διατμητική τάση, αντιστοίχως. Οι δύο αυτές παράμετροι ορίζονται με τις εξής εξισώσεις:

$$\sigma'_{m,2} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (3.8)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} \quad (3.9)$$

όπου $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ οι ενεργές κύριες τάσεις.

Οι παράμετροι a και b είναι σταθερές του υλικού και σχετίζονται με την συνοχή c και την γωνία εσωτερικής τριβής φ όπως παρουσιάζεται ακολούθως:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi \quad (3.10)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (3.11)$$

Η εξίσωση (3.7) μπορεί να γραφεί και ως:

$$F = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi - \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad (3.12)$$

Αν $F < 0$ δεν υπάρχει αστοχία, αντίθετα αν $F > 0$ το πέτρωμα αστοχεί. Στον κώδικα που αναπτύχθηκε (Παράρτημα Α) το κριτήριο Mogi-Coulomb χρησιμοποιήθηκε με την μορφή της εξίσωσης (3.12).

3.1.3 Κριτήριο αστοχίας Modified Lade

Το κριτήριο του Lade συσχετίζει την πρώτη και την τρίτη αναλλοίωτη του τανυστή των τάσεων κατά την αστοχία. Δίδεται από την σχέση:

$$n_1 = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1^m}{P_a^m} \right) \quad (3.13)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι παράμετροι m και n_1 είναι σταθερές του υπό εξέταση υλικού και P_a η ατμοσφαιρική πίεση, ενώ οι αναλλοίωτες I_1 και I_3 δίδονται από τις σχέσεις:

$$I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.14)$$

$$I_3 = (\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3) \quad (3.15)$$

Έχοντας ως βάση τα παραπάνω ο Ewy ανέπτυξε το κριτήριο Modified Lade (R.T.Ewy, 1999). Παρέλειψε την σταθερά m του υλικού ενώ στο νέο κριτήριο προστέθηκε η επίδραση της πίεσης των πόρων με σκοπό να συμπεριληφθούν ενεργές τάσεις στο κριτήριο. Επιπλέον, επειδή το αρχικό κριτήριο του Lade αναφέρετε σε συνεκτικά εδάφη, ο Ewy εισήγαγε την παράμετρο S ως συνάρτηση της συνοχής για να επεκτείνει την εφαρμογή του κριτηρίου σε συνεκτικά πετρώματα.

Το κριτήριο παρουσιάστηκε με την εξής μορφή:

$$\frac{I''_1^3}{I''_3} = 27 + n_1 \quad (3.16)$$

Όπου οι σταθερές I''_1 και I''_3 είναι οι ακόλουθες :

$$I''_1 = (\sigma'_1 + S) + (\sigma'_2 + S) + (\sigma'_3 + S) \quad (3.17)$$

$$I''_3 = (\sigma'_1 + S) (\sigma'_2 + S) (\sigma'_3 + S) \quad (3.18)$$

Τέλος οι παράμετροι S και n_1 μπορούν να υπολογιστούν από τις παραμέτρους συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής του κριτηρίου Mohr-Coulomb όπως φαίνεται παρακάτω.

$$S = \frac{c}{\tan \varphi} \quad (3.19)$$

$$\text{και } n = \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)} \quad (3.20)$$

Η εξίσωση (3.16) μπορεί να γραφεί και ως:

$$F = \frac{((\sigma'_1 + \frac{c}{\tan \varphi}) + (\sigma'_2 + \frac{c}{\tan \varphi}) + (\sigma'_3 + \frac{c}{\tan \varphi}))^3}{(\sigma'_1 + \frac{c}{\tan \varphi}) (\sigma'_2 + \frac{c}{\tan \varphi}) (\sigma'_3 + \frac{c}{\tan \varphi})} - 27 - \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)} \quad (3.21)$$

Αν $F < 0$ δεν υπάρχει αστοχία, αντίθετα αν $F > 0$ το πέτρωμα αστοχεί. Στον κώδικα που αναπτύχθηκε (Παράρτημα Α) το κριτήριο Modified_Lade χρησιμοποιήθηκε με την μορφή της εξίσωσης (3.21)

3.2 Διαγράμματα ροής κώδικα

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα ροής του κώδικα που δημιουργήθηκε στο λογισμικό της Matlab με σκοπό να γίνει κατανοητή με απλουστευμένο τρόπο η δομή λειτουργίας αυτού.

Στον κώδικα Kirsch on boundary (Παράρτημα Α) χρησιμοποιούνται ως είσοδοι από τον χρήστη τα εξής δεδομένα:

S_v η κάθετη τάση μακρινού πεδίου

σ_H η μέγιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

σ_h η ελάχιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

P_w η πίεση του πολφού

P_p η πίεση των πόρων

C η συνοχή του πετρώματος

F η γωνία εσωτερικής τριβής

ν ο λόγος Poisson

Έπειτα δημιουργούνται σημεία στην περίμετρο του κύκλου και για κάθε σημείο σύμφωνα με τις τιμές που υπάρχουν ως είσοδοι από τον χρήστη ,υπολογίζονται οι τάσεις σ_r , σ_θ , σ_z σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.10-3.12):

$$\sigma_r = P_w - P_p$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h + 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_w - P_p$$

$$\sigma_z = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_p$$

Έπειτα υποθέτοντας ότι ισχύει η συνθήκη $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ υπολογίστηκαν για κάθε σημείο τις περιμέτρου οι κύριες τάσεις ,υπολογίζοντας μεταξύ των τάσεων σ_r , σ_θ , σ_z ποιο έχει την μέγιστη, ποιο την ελάχιστη και ποιο την ενδιάμεση τιμή.

Τέλος σύμφωνα με τις εξισώσεις των κριτηρίων αστοχίας Mohr- Coulomb ,Mogi-Coulomb και Modified Lade οι οποίες είναι (3.6, 3.12, 3.21) :

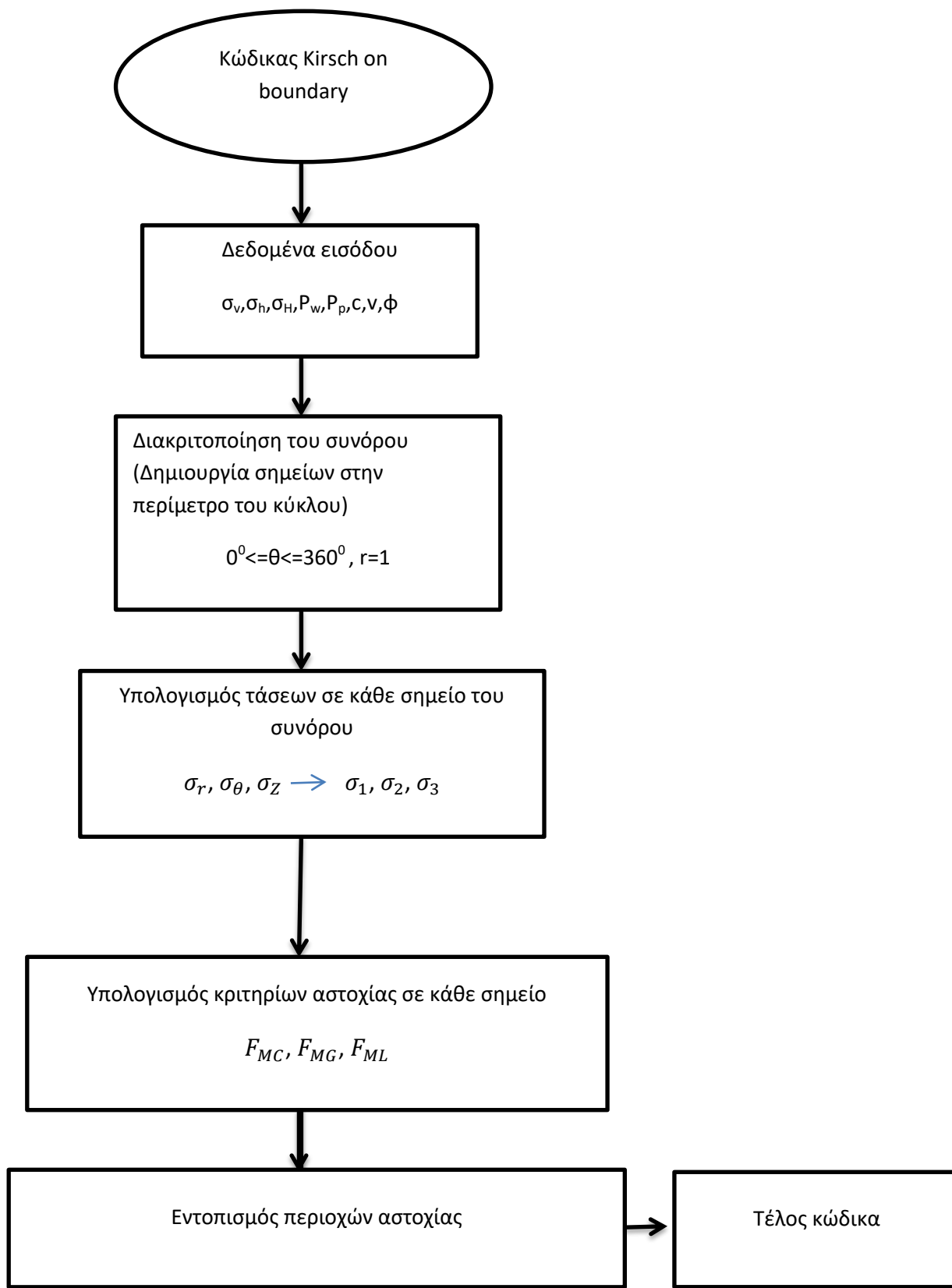
$$F_{MC} = \sigma_1 - \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3$$

$$F_{MG} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi - \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2}$$

$$F_{ML} = \frac{((\sigma'_1 + \frac{c}{\tan \varphi}) + (\sigma'_2 + \frac{c}{\tan \varphi}) + (\sigma'_3 + \frac{c}{\tan \varphi}))^3}{(\sigma'_1 + \frac{c}{\tan \varphi}) (\sigma'_2 + \frac{c}{\tan \varphi}) (\sigma'_3 + \frac{c}{\tan \varphi})} - 27 - \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{(1 - \sin \varphi)}$$

Η γεώτρηση είναι ευσταθής όταν σε οποιοδήποτε σημείο της περιμέτρου τα αντίστοιχα κριτήρια αστοχίας F_{MC} , F_{MG} , F_{ML} είναι αρνητικά ,ενώ σε αντίθετη περίπτωση που έστω σε κάποιο σημείο της περιμέτρου της γεώτρησης τα κριτήρια αστοχίας F_{MC} , F_{MG} , F_{ML} γίνουν θετικά τότε η γεώτρηση αστοχεί.

Κεφάλαιο 3° : Κριτήρια αστοχίας



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής Kirsch on boundary (Παράρτημα Α)

Στον κώδικα pressure on boundary χρησιμοποιούνται ως είσοδοι από τον χρήστη τα εξής δεδομένα:

S_v η κάθετη τάση μακρινού πεδίου

S_H η μέγιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

S_h η ελάχιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου

P_p η πίεση των πόρων

C η συνοχή του πετρώματος

φ η γωνία εσωτερικής τριβής

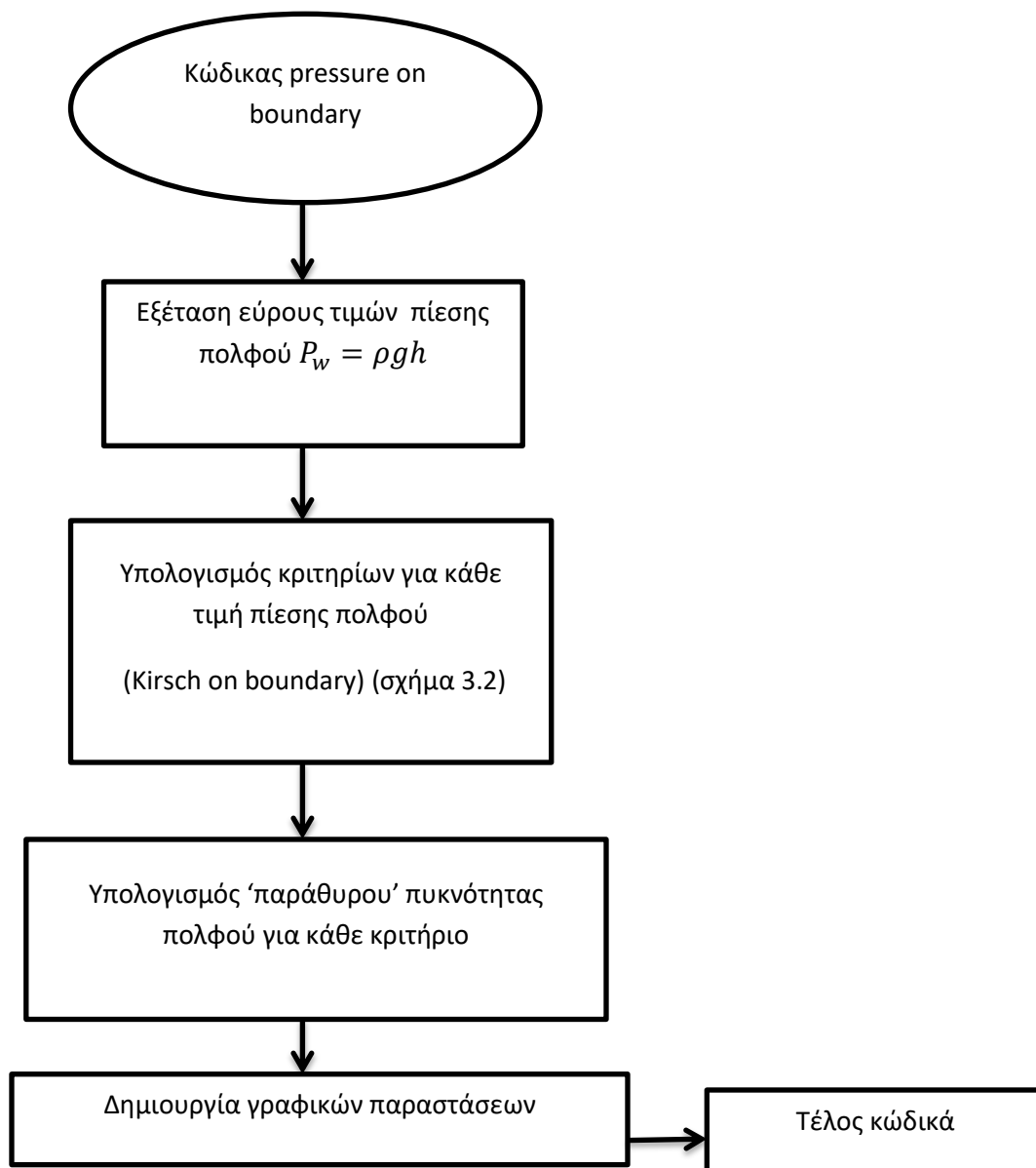
ν ο λόγος Poisson

h το βάθος της τομής στην (κατακόρυφη) γεώτρηση που μελετάμε

Έπειτα εξετάζεται το εύρος όλων των δυνατών τιμών πίεσης του πολφού $P_w = \rho gh$ με την βοήθεια του κώδικα Kirsch on boundary (Παράρτημα Α) και εντοπίζεται για κάθε τιμή P_w για τα τρία κριτήρια αστοχίας:

- αν παρουσιάζεται αστοχία ($F_{MC}, F_{MG}, F_{ML} = 1$)
- ή εάν δεν παρουσιάζεται αστοχία ($F_{MC}, F_{MG}, F_{ML} = 0$).

Τέλος δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σε συνάρτηση με την πυκνότητα του πολφού για τα τρία κριτήρια αστοχίας με βάση τις οποίες προσδιορίζονται οι περιοχές ευστάθειας της γεώτρησης για το κάθε κριτήριο.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής pressure on boundary (Παράρτημα Β)

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση προβλέψεων κριτηρίων αστοχίας με επιτόπου μετρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της σύγκρισης των κριτηρίων από τον κώδικα Matlab με τα αποτελέσματα των ερευνητικών εργασιών (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017) και (Abbas Khaksar et al.2014). Παράλληλα βάσει αυτών θα εξαχθούν συμπεράσματα τα οποία θα μας φανούν αναγκαία για την εύρεση του καταλληλότερου κριτηρίου αστοχίας για την διεξαγωγή μίας γεώτρησης.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε γεώτρηση όπως για παράδειγμα συνοχή , λόγος Poisson , γωνία εσωτερικής τριβής , ελάχιστη και μέγιστη οριζόντια τάση , κατακόρυφη κύρια τάση και πίεση πόρων προήλθαν ανάλογα με την κατακόρυφη γεώτρηση που μελετάτε από την εκάστοτε ερευνητική εργασία

Σε όλες τις εργασίες των ερευνητών η εκτίμηση των παραμέτρων του πετρώματος και του εντατικού πεδίου έγινε με τον ίδιο τρόπο. Ο λόγος του Poisson υπολογίστηκε με βάση την σχέση:

$$\nu = \frac{0.5\left(\frac{DTSM}{DTCO}\right)^2 - 1}{\left(\frac{DTSM}{DTCO}\right)^2 - 1} \quad (3.22)$$

όπου DTSM είναι η ταχύτητα του διατμητικού ή εγκάρσιου ακουστικού κύματος και DTCO είναι η ταχύτητα του διαμήκους ή θλιπτικού ακουστικού κύματος .

Η συνοχή του πετρώματος υπολογίζεται από την σχέση του κριτηρίου Mohr-Coulomb :

$$c = \frac{Co}{2} \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.23)$$

όπου η γωνία εσωτερικής τριβής φ εκτιμάται με γραμμική παρεμβολή από την μέτρηση των τιμών $GR(shale)$, $GR(sand)$ και των συντελεστών τριβής μ_{shale} και μ_{sand} για τον σχιστόλιθο και τον ψαμμίτη αντίστοιχα :

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(GR - GR_{sand})\mu_{shale} + (GR_{shale} - GR)\mu_{sand}}{(GR_{shale} - GR_{sand})} \quad (3.24)$$

Κεφάλαιο 4^ο: Σύγκριση προβλέψεων κριτηρίων αστοχίας με επιτόπου μετρήσεις

GR=τιμή ακτίνων γάμμα

μ = συντελεστής τριβής λόγω κινητικής ενέργειας

Η κατακόρυφη κύρια τάση σ_v υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \quad (3.25)$$

όπου $\rho(z)$ =μέση πυκνότητα πετρώματος στο σημείο μέτρησης

g = επιτάχυνση βαρύτητας

Για την μέγιστη οριζόντια κύρια τάση χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με την ερευνητική εργασία (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017) η εξίσωση:

$$\sigma_H = 0.9\sigma_v \quad (3.26)$$

Ενώ για την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017):

$$\sigma_h = P_p + \frac{v(\sigma_v - P_p)}{1 - v} \quad (3.27)$$

Όπου P_p =Πίεση πόρων.

Για την πίεση πόρων P_p χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017):

$$P_p = VSG - (VSG - P_{hg}) \frac{DTCON^3}{DTCO} \quad (3.28)$$

Όπου VSG είναι η κάθετη βαθμίδα τάσεων (MPa/km), P_{hg} είναι η βαθμίδα υδροστατικής πίεσης (MPa/km) και DTCO είναι η ταχύτητα του διαμήκους ή θλιπτικού ακουστικού κύματος .

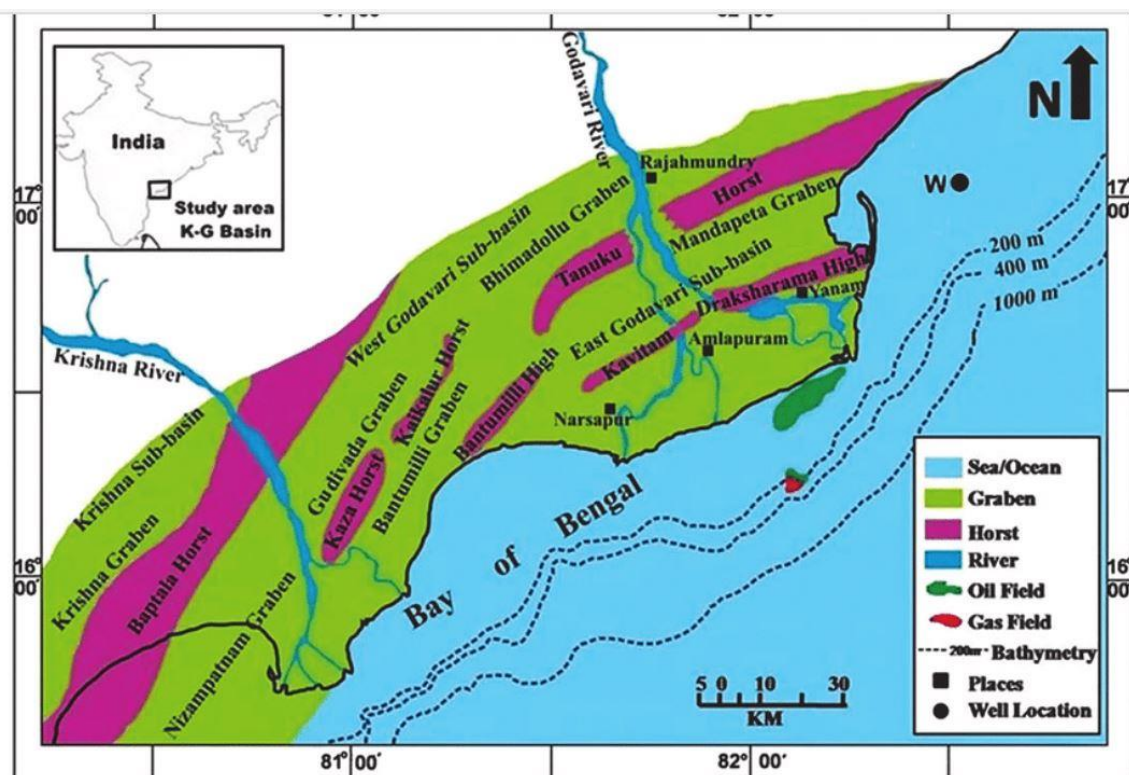
Στην συνέχεια θα μελετηθούν τρεις γεωτρήσεις από την ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017) από την περιοχή Krishna Godavari και άλλη μία από την ερευνητική εργασία των (Abbas Khaksar et al.2014) στην περιοχή του νοτιοδυτικού Ιράν. Στις συγκεκριμένες γεωτρήσεις επικεντρωθήκαμε σε βάθη που εντοπίστηκε αστοχία ,ενώ σε αυτά τα βάθη ήταν γνωστές οι επιτόπου τάσεις ,οι πιέσεις πόρων και η πυκνότητα του πολφού. Με βάση αυτά τα δεδομένα έγινε ανάδρομος υπολογισμός της ελάχιστης πυκνότητας του γεωτρητικού

πολφού με βάση τα κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb, Mogi-Coulomb, Modified-Lade και μετέπειτα έγινε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές της πυκνότητας του πολφού που υπήρξε αστοχία και τις εκτιμώμενες τιμές πυκνότητας των ερευνητών (Baisakhi Das , Rima Chatterjee,2017) και (Abbaw Khaksar et al.2014)

4.1 :Γεώτρησεις στην περιοχή Krishna Godavari

Η περίπτωση αυτή μελετήθηκε από τους(Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017) και αφορά γεωτρήσεις πετρελαίου/φυσικού αερίου στην θαλάσσια περιοχή της Krishna Godavari στην Ινδία. Η υποθαλάσσια λεκάνη αποτελείται κυρίως από άργιλο και άμμο ,ενώ το κατώτερο τμήμα καλύπτεται από σχιστόλιθο Κρητιδικής και Παλαιοκαινικής περιόδου αναμεμιγμένα με στρώσεις ηφαιστειακής λάβας.

Το υπό εξέταση κοίτασμα φυσικού αερίου/πετρελαίου βρέθηκε στα κατώτερα πλειόκαινικα και μεσαία μειοκαινικά κλαστικά ιζήματα σε βάθος αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Στο σχήμα (4.1) φαίνεται σε κάτοψη η περιοχή όπου βρίσκονται οι τέσσερις γεωτρήσεις.



Σχήμα 4.1: γεωλογικός χάρτης περιοχής Krishna Godavari

4.1.1 Γεώτρηση W-1

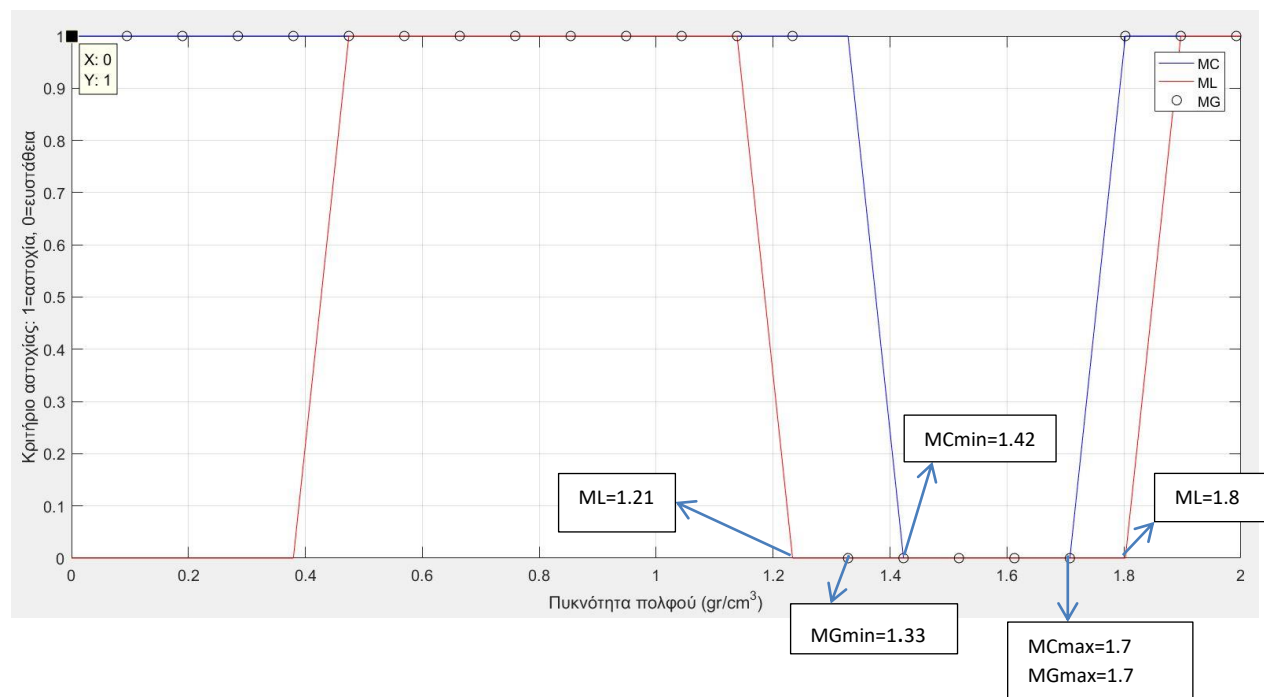
Στον πίνακα (4.1) δίδονται οι ιδιότητες του πετρώματος και οι κύριες τάσεις στο βάθος των 1080 μέτρων της γεώτρησης W-1 όπως ανακτήθηκαν από την ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017)

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες και κύριες τάσεις στο βάθος των 1080 μέτρων

c	4 MPa
v	0.3
ϕ	30 deg
σ_h	17 MPa
σ_H	22.5 MPa
P_p	11.5 MPa
σ_v	25 MPa

Από τον κώδικα στη Matlab (Παραρτήματα A και B) με βάση τα παραπάνω δεδομένα προέκυψε το γράφημα του σχήματος (4.2). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται αν το εκάστοτε κριτήριο δεν εντοπίζει αστοχία γύρω από την γεώτρηση παίρνοντας την τιμή 0 ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 1.

Αναλυτικότερα στο διάγραμμα με κόκκινη συνεχή γραμμή εμφανίζονται τα σημεία αστοχίας και ευστάθειας του κριτηρίου Modified Lade ,με μαύρα κυκλικά σημεία το κριτήριο Mogi-Coulomb και με μπλε συνεχή γραμμή το κριτήριο Mohr-Coulomb. Πιο αναλυτικά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δείχνει ευστάθεια για τιμές πυκνότητας πολφού από 1.42-1.7gr/cm³ και το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb από 1.33- 1.7gr/cm³. Το κριτήριο αστοχίας Modified Lade παρατηρείται ότι σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια δίνει δύο περιοχές ευστάθειας, όπου η πρώτη περιοχή ξεκινάει από το μηδέν (ανυποστήρικτη γεώτρηση) έως μια μικρή πυκνότητα πολφού. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο εύρος τιμών στις ενεργές τάσεις η σ_3 είναι αρνητική ενώ σ_1, σ_2 θετικές ή μικρότερες κατά απόλυτη τιμή από τον λόγο $\frac{c}{\tan \phi}$ (σχέση 3.21) . Για αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας δεν λαμβάνεται η πρώτη περιοχή ευστάθειας αλλά η δεύτερη η οποία είναι 1.21 gr/cm³ έως 1.8 gr/cm³ .Τέλος ,από τα εύρη τιμών πυκνότητας για τα οποία έχουμε ευστάθεια ανά κριτήριο αστοχίας, θα επιλεχθούν για σύγκριση με την πραγματική τιμή πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση αλλά και με τις τιμές που εξάγει η ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017) οι ελάχιστες επιτρεπτές τιμές αυτών όπως παρουσιάζονται στον πίνακα(4.2). Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές καθώς για την ελάχιστη δυνατή τιμή πυκνότητας πολφού υπάρχει ευστάθεια στην γεώτρηση που μελετάτε.



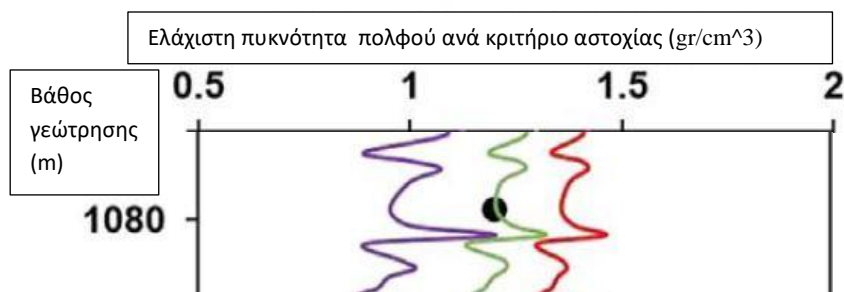
Σχήμα 4.2 : γράφημα από κώδικα για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού

Η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα αποτυπώνεται στον πίνακα (4.2):

Πίνακας 4.2: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.42 g/cc	1.33 g/cc	1.21 g/cc

Τα αποτελέσματα που εξάγει η ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee, 2017) για το αντίστοιχο βάθος ανά κριτήριο αστοχίας προσδιορίζονται σύμφωνα με το σχήμα (4.3). Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται η ελάχιστες πυκνότητες πολφού ανά κριτήριο αστοχίας για την αποτροπή αστοχίας. Με μωβ χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Modified Lade, με πράσινο χρώμα οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb και με κόκκινο χρώμα του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.



Σχήμα 4.3: τιμές ελάχιστης πυκνότητας γεωτρητικού πολφού σύμφωνα με τους ερευνητές Baisakhi Das , Rima Chatterjee

Πιο αναλυτικά οι πυκνότητες του πολφού ανά κριτήριο αστοχίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με ερευνητές

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.4 gr/cm ³	1.3 gr/cm ³	1.1 gr/cm ³

Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές των δύο γραφημάτων ,ο κώδικας (Παράρτημα Α και Β) απέδωσε σχεδόν ίδιες τιμές με την ερευνητική εργασία έχοντας απόκλιση μικρότερη του ενός δεκαδικού της μονάδας.

Σε σύγκριση τώρα με την πραγματική πυκνότητα πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση το οποίο είναι 1.3 gr/cm³, παρατηρείται ότι το κριτήριο Mogi-Coulomb απέδωσε τιμή αυξημένη κατά 2.3%, το κριτήριο Mohr- Coulomb αυξημένη κατά 0.1 g/cc ή 9.23% ενώ το κριτήριο Modified Lade υποεκτιμημένη κατά 0.1 g/cc ή μειωμένη κατά 6.92%. Επομένως τα δύο κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασφαλή εκτίμηση της κατάλληλης πυκνότητας πολφού για αποτροπή αστοχίας είναι το κριτήριο Mogi-Coulomb και το κριτήριο Mohr- Coulomb. Το κριτήριο Modified Lade δεν είναι κατάλληλο καθώς δίνει τιμή μικρότερη από 1.3 gr/cm³ για την οποία υπήρξε αστοχία στην γεώτρηση.

4.1.2 Γεώτρηση W-1

Στον πίνακα (4.4) δίδονται οι ιδιότητες του πετρώματος και οι κύριες τάσεις στο βάθος των 1030 μέτρων της γεώτρησης W-1 όπως ανακτήθηκαν από την ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017)

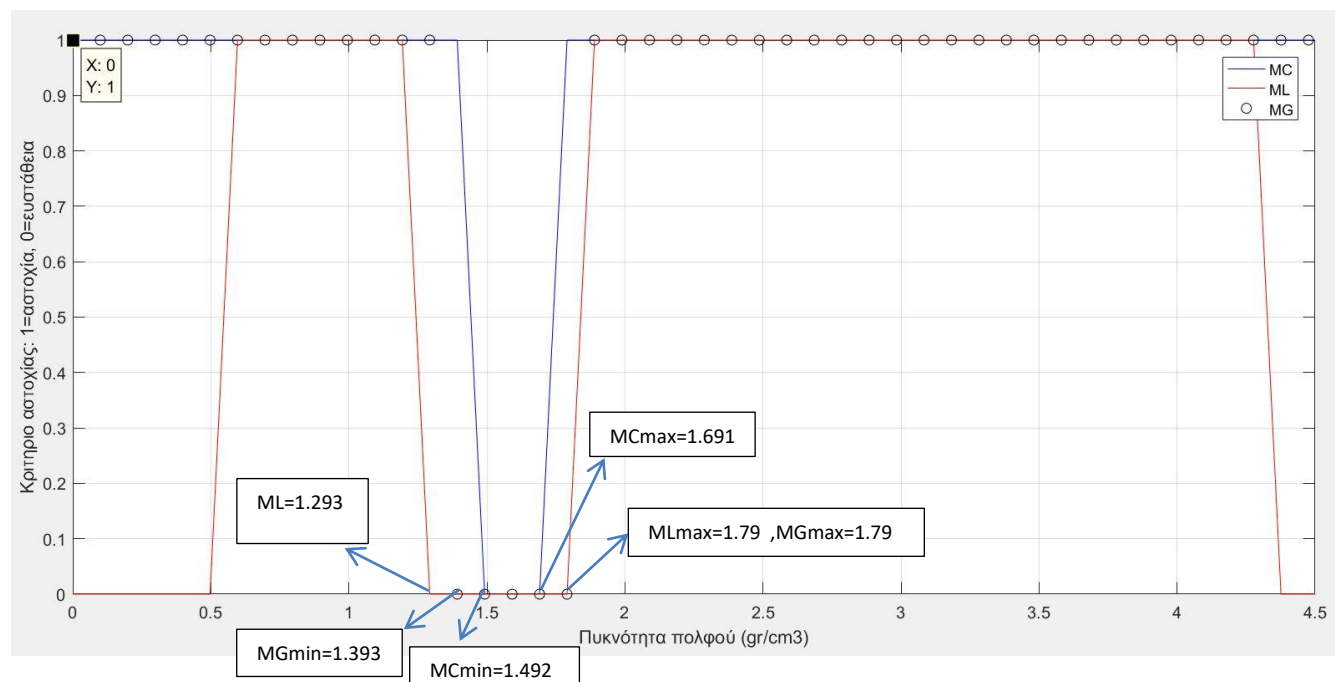
Πίνακας 4.4: Ιδιότητες και κύριες τάσεις στο βάθος των 1030 μέτρων

c	3.92 MPa
v	0.32
φ	31.2 deg
σ _h	16.6 MPa
σ _H	21.8 MPa
P _P	11.8 MPa
σ _v	24.252 MPa

Από τον κώδικα στη Matlab (Παραρτήματα Α και Β) με βάση τα παραπάνω δεδομένα προέκυψε το γράφημα του σχήματος (4.4). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται αν το εκάστοτε κριτήριο δεν εντοπίζει αστοχία γύρω από την γεώτρηση παίρνοντας την τιμή 0 ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 1.

Αναλυτικότερα στο διάγραμμα με κόκκινη συνεχή γραμμή εμφανίζονται τα σημεία αστοχίας και ευστάθειας του κριτηρίου Modified Lade ,με μαύρα κυκλικά σημεία το κριτήριο Mogi-Coulomb και με μπλε συνεχή γραμμή το κριτήριο Mohr-Coulomb. Πιο αναλυτικά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δείχνει ευστάθεια για τιμές πυκνότητας πολφού από 1.492-1.691 gr/cm³ και το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb από 1.393- 1.79 gr/cm³. Το κριτήριο αστοχίας Modified Lade παρατηρείται ότι σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια δίνει δύο περιοχές ευστάθειας, όπου η πρώτη περιοχή ξεκινάει από το μηδέν(ανυποστήρικτη γεώτρηση) έως μια μικρή πυκνότητα πολφού. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο εύρος τιμών στις ενεργές τάσεις η σ₃ είναι αρνητική ενώ σ₁, σ₂ θετικές ή μικρότερες κατά απόλυτη τιμή από τον λόγο $\frac{c}{\tan \varphi}$ (σχέση 3.21) .

Για αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας δεν λαμβάνεται η πρώτη τιμή πυκνότητας πολφού που υπάρχει ευστάθεια αλλά η δεύτερη η οποία είναι 1.293 gr/cm³. Τέλος ,από τα εύρη τιμών πυκνότητας για τα οποία έχουμε ευστάθεια ανά κριτήριο αστοχίας. Θα επιλεχθούν για σύγκριση με την πραγματική τιμή πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση αλλά και με τις τιμές που εξάγει η ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και RimaChatterjee,2017) οι ελάχιστες επιτρεπτές τιμές αυτών όπως παρουσιάζονται στον (πίνακα 4.5)



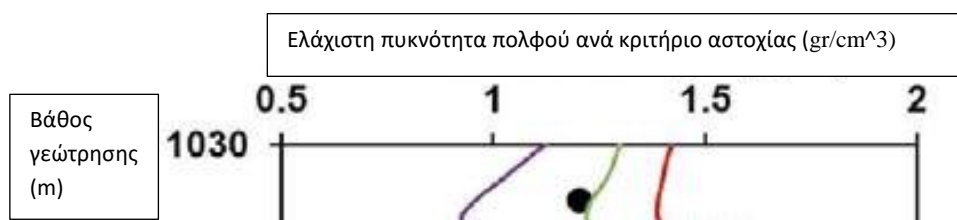
Σχήμα 4.4 : γράφημα από κώδικα για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού

Η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα αποτυπώνεται στον πίνακα (4.5):

Πίνακας 4.5: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.492 gr/cm ³	1.393 gr/cm ³	1.293 gr/cm ³

Τα αποτελέσματα που εξάγει η ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee, 2017) για το αντίστοιχο βάθος ανά κριτήριο αστοχίας προσδιορίζονται σύμφωνα με το σχήμα (4.5). Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι ελάχιστες πυκνότητες πολφού ανά κριτήριο αστοχίας για την αποτροπή αστοχίας. Με μωβ χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Modified Lade, με πράσινο χρώμα οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb και με κόκκινο χρώμα του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.



Σχήμα 4.5: τιμές ελάχιστης πυκνότητας γεωτρητικού πολφού σύμφωνα με τους ερευνητές Baisakhi Das , Rima Chatterjee

Από το σχήμα (4.5) η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο είναι:

Πίνακας 4.6: ελάχιστη πυκνότητα πολφού για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με ερευνητές

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.42 gr/cm ³	1.29 gr/cm ³	1.11 gr/cm ³

Στο συγκεκριμένο βάθος παρατηρούμε ότι οι τιμές του κώδικα με αυτές του ερευνητή είναι πάλι αρκετά κοντά. Στο κριτήριο Mohr-Coulomb υπάρχει μία απόκλιση κατά 0.072 gr/cm³, στο κριτήριο Mogi-Coulomb απόκλιση κατά 0.1 gr/cm³ ενώ η μεγαλύτερη απόκλιση βρέθηκε στο κριτήριο Modified Lade με τιμή 0.18 gr/cm³.

Τέλος η πυκνότητα πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση είναι 1.2 g/cc . Με την συγκεκριμένη πυκνότητα παρατηρήθηκε αύξηση διατομής στην γεώτρηση σύμφωνα με την ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017) άρα ήπια αστοχία, επομένως αυξημένη πυκνότητα γεωτρητικής λάσπης καθίσταται αναγκαία κάτι το οποίο μας δίνουν και τα τρία κριτήρια αστοχίας.

Το κριτήριο Mogi-Coulomb μας δίνει μια τιμή αυξημένη κατά 16%, το κριτήριο Mohr-Coulomb μας δίνει ξανά μια πιο υπερεκτιμημένη τιμή αυξημένη κατά 24% ,ενώ το κριτήριο Modified Lade παρουσιάζει την μικρότερη αύξηση κατά 7.75%.

4.1.3 Γεώτρηση W-14

Στον πίνακα (4.7) δίδονται οι ιδιότητες του πετρώματος και οι κύριες τάσεις στο βάθος των 1175 μέτρων της γεώτρησης W-1 όπως ανακτήθηκαν από την ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017)

Πίνακας 4.7: Ιδιότητες και κύριες τάσεις στο βάθος των 1175 μέτρων

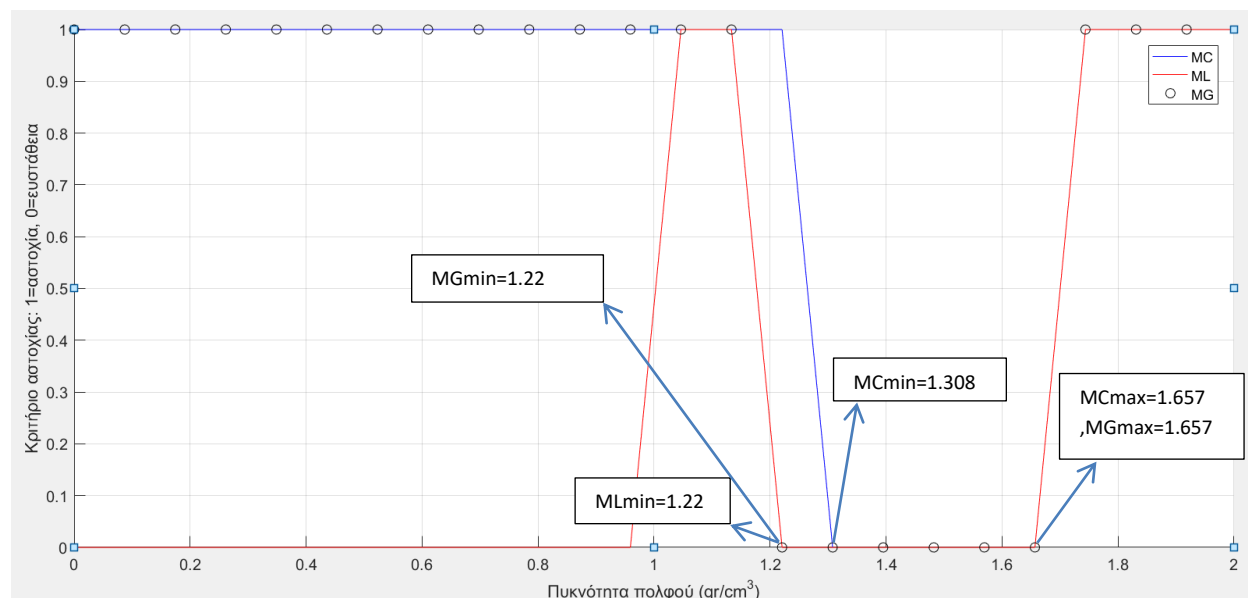
c	1.5	MPa
v	0.3	
φ	40	deg
σ _h	17.14	MPa
σ _H	18.46	MPa
P _P	13.32	MPa
σ _v	20.51	MPa

Από τον κώδικα στη Matlab (Παραρτήματα Α και Β) με βάση τα παραπάνω δεδομένα προέκυψε το γράφημα του σχήματος (4.6). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται αν το εκάστοτε κριτήριο δεν εντοπίζει αστοχία γύρω από την γεώτρηση παίρνοντας την τιμή 0 ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 1.

Αναλυτικότερα στο διάγραμμα με κόκκινη συνεχή γραμμή εμφανίζονται τα σημεία αστοχίας και ευστάθειας του κριτηρίου Modified Lade ,με μαύρα κυκλικά σημεία το κριτήριο Mogi-Coulomb και με μπλε συνεχή γραμμή το κριτήριο Mohr-Coulomb. Πιο αναλυτικά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δείχνει ευστάθεια για τιμές πυκνότητας πολφού από 1.308-1.657 gr/cm³ και το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb από 1.22- 1.657 gr/cm³. Το κριτήριο αστοχίας Modified Lade παρατηρείται ότι σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια δίνει δύο περιοχές ευστάθειας, όπου η πρώτη περιοχή ξεκινάει από το μηδέν(ανυποστήρικτη γεώτρηση) έως μια μικρή πυκνότητα πολφού. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο εύρος τιμών στις ενεργές τάσεις η σ₃ είναι αρνητική ενώ σ₁, σ₂ θετικές ή μικρότερες κατά απόλυτη τιμή από τον λόγο $\frac{c}{\tan \varphi}$ (σχέση 3.21) .

Για αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας δεν λαμβάνεται η πρώτη τιμή πυκνότητας πολφού που υπάρχει ευστάθεια αλλά η δεύτερη η οποία είναι 1.22 gr/cm³. Τέλος ,από τα εύρη τιμών πυκνότητας για τα οποία έχουμε ευστάθεια ανά κριτήριο αστοχίας. Θα επιλεχθούν για σύγκριση με την πραγματική τιμή πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση αλλά και με τις τιμές που εξάγει η ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και RimaChatterjee,2017) οι ελάχιστες επιτρεπτές τιμές αυτών όπως παρουσιάζονται στον πίνακα (4.8)

Κεφάλαιο 4^ο: Σύγκριση προβλέψεων κριτηρίων αστοχίας με επιτόπου μετρήσεις



Σχήμα 4.6 : γράφημα από κώδικα για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού

Η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα αποτυπώνονται στον πίνακα (4.8):

Πίνακας 4.8: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.308 gr/cm ³	1.221 gr/cm ³	1.221 gr/cm ³

Τα αποτελέσματα που εξάγει η ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017) για το αντίστοιχο βάθος ανά κριτήριο αστοχίας προσδιορίζονται σύμφωνα με το σχήμα (4.7). Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι ελάχιστες πυκνότητες πολφού ανά κριτήριο αστοχίας για την αποτροπή αστοχίας. Με μωβ χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Modified Lade, με πράσινο χρώμα οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb και με κόκκινο χρώμα του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.



Σχήμα 4.7: τιμές ελάχιστης πυκνότητας γεωτρητικού πολφού σύμφωνα με τους ερευνητές Baisakhi Das , Rima Chatterjee

Από το σχήμα (4.8) η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο είναι:

Πίνακας 4.8: ελάχιστη πυκνότητα πολφού για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με ερευνητές

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.394 gr/cm ³	1.31 gr/cm ³	1.11 gr/cm ³

Σε αυτήν την γεώτρηση παρατηρούμε ότι ο κώδικας απέδωσε ξανά παραπλήσιες τιμές με αυτές της ερευνητικής εργασίας έχοντας απόκλιση για το κριτήριο Modified Lade 0.1 gr/cm³ ,για το κριτήριο Mogi-Coulomb 0.089 gr/cm³ και για το κριτήριο Mohr-Coulomb 0.086 gr/cm³.

Σε σύγκριση τώρα με την πραγματική πυκνότητα πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση το οποίο είναι 1.20 g/cc , παρατηρείται από τα αποτελέσματα του κώδικα ότι το κριτήριο Mogi-Coulomb και Modified Lade απέδωσαν παραπλήσια τιμή ενώ το κριτήριο Mohr- Coulomb υπερεκτιμημένη τιμή κατά 0.1 g/cc .

4.1.4 Γεώτρηση W-12

Στον πίνακα (4.9) δίδονται οι ιδιότητες του πετρώματος και οι κύριες τάσεις στο βάθος των 3465 μέτρων της γεώτρησης W-12 όπως ανακτήθηκαν από την ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017)

Πίνακας 4.9: Ιδιότητες και κύριες τάσεις στο βάθος των 3465 μέτρων

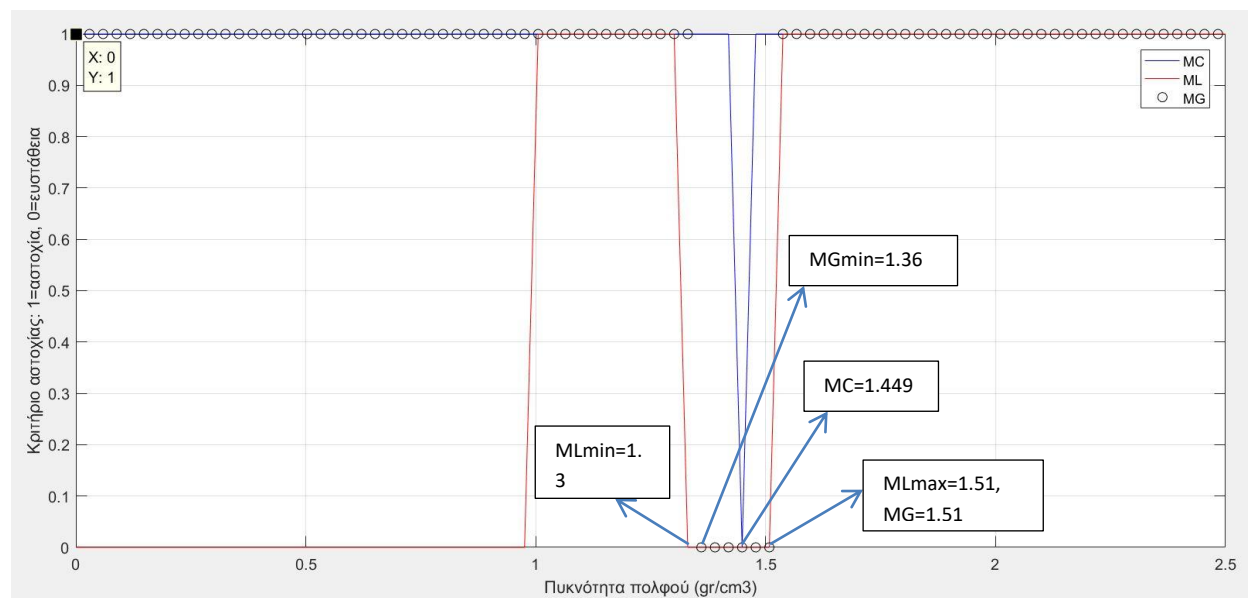
c	2.03 MPa
v	0.336
φ	37.13 deg
σ _h	52 MPa
σ _H	65.376 MPa
P _p	36.16 MPa
σ _v	72.64 MPa

Από τον κώδικα στη Matlab (Παραρτήματα Α και Β) με βάση τα παραπάνω δεδομένα προέκυψε το γράφημα του σχήματος (4.8). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται αν το εκάστοτε κριτήριο δεν εντοπίζει αστοχία γύρω από την γεώτρηση παίρνοντας την τιμή 0 ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 1.

Αναλυτικότερα στο διάγραμμα με κόκκινη συνεχή γραμμή εμφανίζονται τα σημεία αστοχίας και ευστάθειας του κριτηρίου Modified Lade ,με μαύρα κυκλικά σημεία το κριτήριο Mogi-Coulomb και με μπλε συνεχή γραμμή το κριτήριο Mohr-Coulomb. Πιο αναλυτικά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δείχνει ευστάθεια για μία τιμή πυκνότητας πολφού 1.449 gr/cm³ και το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb από 1.36- 1.51 gr/cm³. Το κριτήριο αστοχίας Modified Lade παρατηρείται ότι σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια δίνει δύο περιοχές ευστάθειας, όπου η πρώτη περιοχή ξεκινάει από το μηδέν(ανυποστήρικτη γεώτρηση) έως μια μικρή πυκνότητα πολφού. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο εύρος τιμών στις ενεργές τάσεις η σ₃ είναι αρνητική ενώ σ₁, σ₂ θετικές ή μικρότερες κατά απόλυτη τιμή από τον λόγο $\frac{c}{\tan \varphi}$ (σχέση 3.21) .

Για αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας δεν λαμβάνεται η πρώτη τιμή πυκνότητας πολφού που υπάρχει ευστάθεια αλλά η δεύτερη η οποία είναι 1.33 gr/cm³. Τέλος ,από τα εύρη τιμών πυκνότητας για τα οποία έχουμε ευστάθεια ανά κριτήριο αστοχίας. Θα επιλεχθούν για σύγκριση με την πραγματική τιμή πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση αλλά και με τις τιμές που εξάγει η ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και RimaChatterjee,2017) οι ελάχιστες επιτρεπτές τιμές αυτών όπως παρουσιάζονται στον (πίνακα 4.10)

Κεφάλαιο 4^ο: Σύγκριση προβλέψεων κριτηρίων αστοχίας με επιτόπου μετρήσεις



Σχήμα 4.8 : γράφημα από κώδικα για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού

Η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα αποτυπώνονται στον πίνακα (4.9):

Πίνακας 4.10: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.449 g/cc	1.36 g/cc	1.3 g/cc

Τα αποτελέσματα που εξάγει η ερευνητική εργασία των (Baisakhi Das και Rima Chatterjee, 2017) για το αντίστοιχο βάθος ανά κριτήριο αστοχίας προσδιορίζονται σύμφωνα με το σχήμα (4.9). Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι ελάχιστες πυκνότητες πολφού ανά κριτήριο αστοχίας για την αποτροπή αστοχίας. Με μωβ χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Modified Lade, με πράσινο χρώμα οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb και με κόκκινο χρώμα του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.



Σχήμα 4.9: τιμές επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού σύμφωνα με τους ερευνητές Baisakhi Das , Rima Chatterjee

Από το σχήμα (4.9) οι πυκνότητες πολφού ανά κριτήριο είναι:

Πίνακας 4.11: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με ερευνητές

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.426 g/cc	1.349 g/cc	1.115 g/cc

Από τους παραπάνω δύο πίνακες διακρίνουμε ότι οι τιμές του κώδικα κυμαίνονται στα ίδια πλαίσια με αυτές της ερευνητικής εργασίας. Πιο αναλυτικά οι δύο τιμές για το κριτήριο Mohr-Coulomb έχουν μία διαφορά της τάξεως του 0.28% ,για το κριτήριο Mogi-Coulomb παρουσιάζουν μια διαφορά της τάξεως του 0.074% ενώ για το κριτήριο Modified Lade μια διαφορά της τάξεως του 1.34%.

Στην συγκεκριμένη γεώτρηση η πυκνότητα του πολφού που χρησιμοποιήθηκε είναι 1.3 g/cc . Με την συγκεκριμένη πυκνότητα παρατηρήθηκε αύξηση διατομής στην γεώτρηση σύμφωνα με την ερευνητική εργασία (Baisakhi Das και Rima Chatterjee,2017) άρα ήπια αστοχία, επομένως όπως και στην γεώτρηση W-1 απαιτείται αυξημένη πυκνότητα γεωτρητικής λάσπης για την αποτροπή της αστοχίας.

Το κριτήριο Mogi-Coulomb μας δίνει τιμή αυξημένη κατά 0.06 g/cc ,το κριτήριο Mohr-Coulomb αυξημένη κατά 0.19 g/cc ενώ το κριτήριο Modified Lade στην προκειμένη περίπτωση απέδωσε ίδια τιμή. Επομένως κατάλληλο κριτήριο αστοχίας για την αποτροπή αστοχίας μπορεί να θεωρηθεί το Modified Lade.

4.2 :Γεώτρηση στο νοτιοδυτικό Ιράν

Στην περίπτωση αυτή μελετάται μία κάθετη γεώτρηση σε κοίτασμα στο Ιράν το οποίο αποτελείται από ανθρακικούς σχηματισμούς. Για το συγκεκριμένο πετρελαϊκό κοίτασμα δεν δίνονται από την ερευνητική εργασία που αντλήθηκαν τα δεδομένα περεταίρω πληροφορίες σχετικά με την γεωλογία της περιοχής και την ακριβή γεωγραφική θέση αυτής.



Σχήμα 4.10: Απεικόνιση των μεγαλύτερων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου στο νοτιοδυτικό Ιράν

Στον πίνακα (4.12) δίδονται οι ιδιότητες του πετρώματος και οι κύριες τάσεις στο βάθος των 3190 μέτρων της γεώτρησης όπως ανακτήθηκαν από την ερευνητική εργασία των (Abbas Khaksar et al.2014). Σύμφωνα με την ερευνητική εργασία για το συγκεκριμένο βάθος οι ιδιότητες του πετρώματος αλλά και οι κύριες τάσεις είναι:

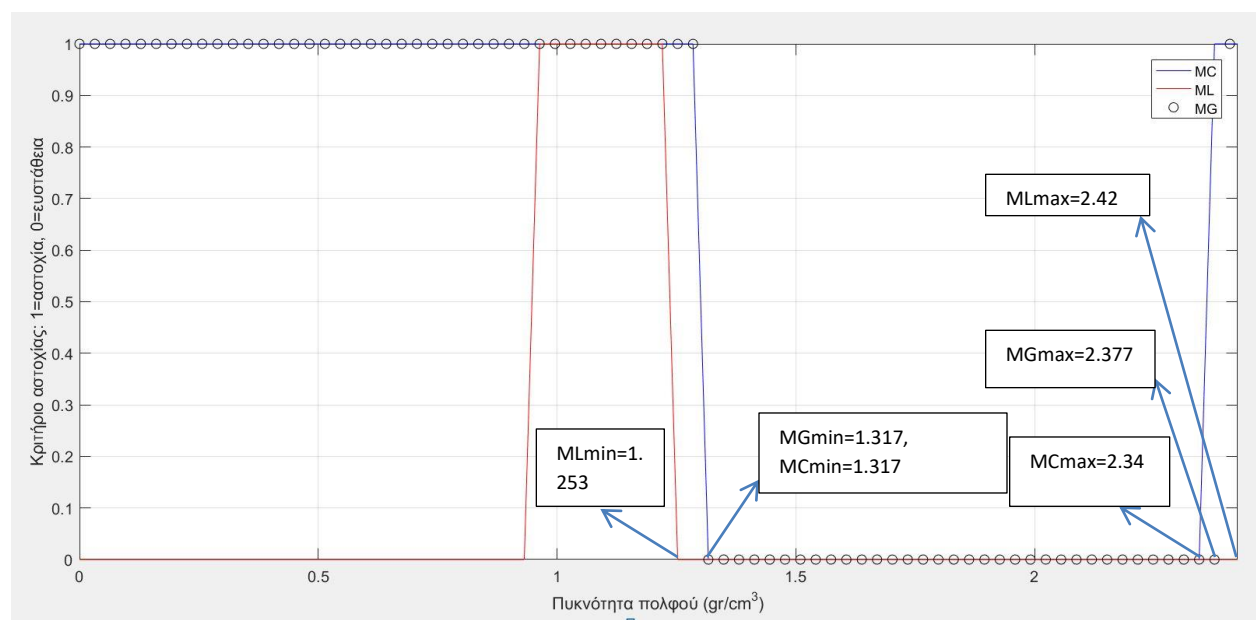
Πίνακας 4.12: Ιδιότητες και κύριες τάσεις στο βάθος των 3190 μέτρων

c	4 MPa
v	0.31
ϕ	40 deg
σ_h	58 MPa
σ_H	60 MPa
P_p	34.5 MPa
σ_v	80 MPa

Από τον κώδικα στη Matlab (Παραρτήματα Α και Β) με βάση τα παραπάνω δεδομένα προέκυψε το γράφημα του σχήματος (4.11). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται αν το εκάστοτε κριτήριο δεν εντοπίζει αστοχία γύρω από την γεώτρηση παίρνοντας την τιμή 0 ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 1.

Αναλυτικότερα στο διάγραμμα με κόκκινη συνεχή γραμμή εμφανίζονται τα σημεία αστοχίας και ευστάθειας του κριτηρίου Modified Lade ,με μαύρα κυκλικά σημεία το κριτήριο Mogi-Coulomb και με μπλε συνεχή γραμμή το κριτήριο Mohr-Coulomb. Πιο αναλυτικά το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δείχνει ευστάθεια για τιμές πυκνότητας πολφού από 1.317-2.344 gr/cm³ και το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb από 1.317- 2.377 gr/cm³. Το κριτήριο αστοχίας Modified Lade παρατηρείται ότι σε σχέση με τα άλλα δύο κριτήρια δίνει δύο περιοχές ευστάθειας, όπου η πρώτη περιοχή ξεκινάει από το μηδέν(ανυποστήρικτη γεώτρηση) έως μια μικρή πυκνότητα πολφού. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο εύρος τιμών στις ενεργές τάσεις η σ_3 είναι αρνητική ενώ σ_1, σ_2 θετικές ή μικρότερες κατά απόλυτη τιμή από τον λόγο $\frac{c}{\tan \varphi}$ (σχέση 3.21) .

Για αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας δεν λαμβάνεται η πρώτη τιμή πυκνότητας πολφού που υπάρχει ευστάθεια αλλά η δεύτερη η οποία είναι 1.253 gr/cm³. Τέλος, από τα εύρη τιμών πυκνότητας για τα οποία έχουμε ευστάθεια ανά κριτήριο αστοχίας. Θα επιλεχθούν για σύγκριση με την πραγματική τιμή πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση αλλά και με τις τιμές που εξάγει η ερευνητική εργασία (Abbas Khaksar et al.2014) οι ελάχιστες επιτρεπτές τιμές αυτών όπως παρουσιάζονται στον πίνακα (4.13).



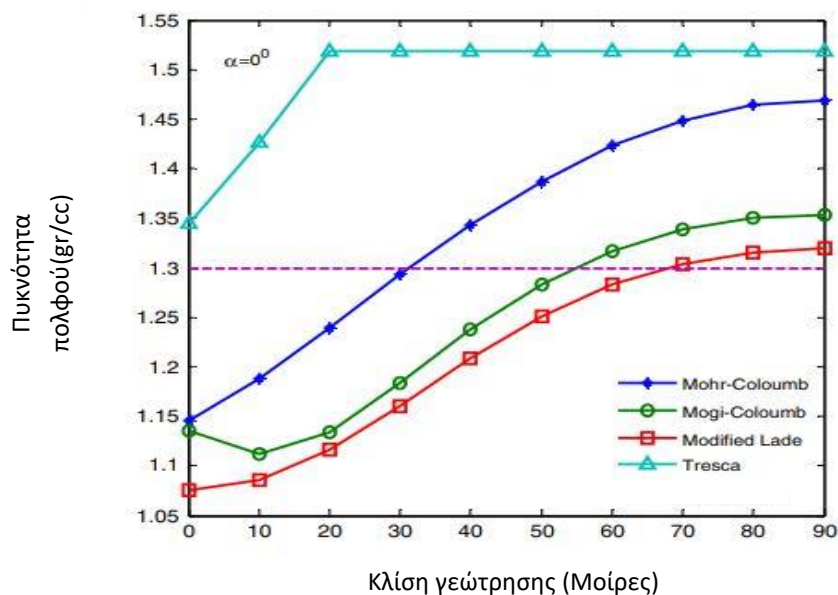
Σχήμα 4.11 : γράφημα από κώδικα για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού

Η ελάχιστη πυκνότητα πολφού ανά κριτήριο για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα αποτυπώνονται στον πίνακα (4.13):

Πίνακας 4.13: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.317 gr/cm ³	1.317 gr/cm ³	1.253 gr/cm ³

Τα αποτελέσματα που εξάγει η ερευνητική εργασία των (Abbas Khaksar et al.2014) ανά κριτήριο αστοχίας για την εκτιμώμενη πίεση του πολφού αποτυπώνονται στον πίνακα (4.14) σύμφωνα με το σχήμα (4.12) για κλίση γεώτρησης 0 μοίρες.



Σχήμα 4.12: τιμές επιτρεπτού εύρους πυκνότητας γεωτρητικού πολφού σύμφωνα με την ερευνητική εργασία (Abbas Khaksar et al.2014)

Πίνακας 4.14: ελάχιστες τιμές πυκνότητας πολφού για την αποτροπή αστοχίας σύμφωνα με την ερευνητική εργασία (Abbas Khaksar et al.2014)

Mohr-Coulomb	Mogi-Coulomb	Modified Lade
1.15 gr/cm ³	1.14 gr/cm ³	1.08 gr/cm ³

Σε αυτό το κοίτασμα παρατηρείτε ότι οι τιμές του κώδικα με αυτές της ερευνητικής εργασίας έχουν λίγο μεγαλύτερη ασυμφωνία σε σχέση με προηγούμενες γεωτρήσεις . Ποιό συγκεκριμένα για το κριτήριο Mohr-Coulomb η διαφορά είναι 0.167 g/cc ή 14.52% ,για το κριτήριο Mogi-Coulomb η διαφορά είναι 0.177 g/cc ή 15.52% ενώ για το κριτήριο Modified Lade η τιμή είναι 0.173 g/cc ή 16.01%.

Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα του κώδικα για τα κριτήρια Mogi-Coulomb και Mohr-Coulomb είναι παραπλήσια της πραγματικής πυκνότητας πολφού που χρησιμοποιήθηκε στην γεώτρηση και δεν υπήρξε αστοχία.

Η τιμή αυτή είναι 1.3 g/cc και η απόκλιση από τις τιμές του κώδικά για τα κριτήρια Mogi-Coulomb και Mohr-Coulomb για τα δύο κριτήρια είναι 0.017 g/cc ή 1.3% .Αντιθέτως στην ερευνητική εργασία για τα δύο αυτά κριτήρια η απόκλιση αυξάνει με μία μέση τιμή και για της δύο σε 0.155 g/cc ή 13%. Το κριτήριο Modified Lade και σε αυτήν την περίπτωση μας δίνει μικρότερη τιμή πυκνότητας πολφού σε σχέση με την πραγματική τιμή άρα δεν θεωρείται τόσο αξιόπιστο όσο τα άλλα δύο κριτήρια αστοχίας.

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα-Προτάσεις

Συμπεράσματα

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία πραγματικών δεδομένων γεωτρήσεων στην παρούσα εργασία είναι:

- Προγραμματίστηκε κώδικας , με την λύση του Kirsch στο λογισμικό Matlab ,με βάση την οποία μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις γύρω από την γεώτρηση σε συνάρτηση με το βάθος και την πίεση του πολφού.
- Από τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό Matlab για την εύρεση της πυκνότητας του γεωτρητικού πολφού, αυτό που και στις πέντε γεωτρήσεις έδωσε τιμές αυξημένες αλλά χωρίς μεγάλη απόκλιση σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο ήταν το κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb. Άρα το κριτήριο αυτό προτείνεται ως μια ασφαλή μέθοδος πρόβλεψης της πυκνότητας του γεωτρητικού πολφού για την αποτροπή αστάθειας στην γεώτρηση.
- Το κριτήριο Modified Lade αν και λαμβάνει υπόψη του την επίδραση την ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 όπως και το κριτήριο Mogi-Coulomb στις τρεις από τις πέντε γεωτρήσεις έδωσε τιμές πυκνότητας μικρότερες από τις πραγματικές, άρα δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη λύση πρόβλεψης της πυκνότητας γεωτρητικού πολφού για την αποτροπή αστοχίας στην γεώτρηση. Επίσης στο κριτήριο εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν και μια περιοχή ευστάθειας στις μικρές πυκνότητες πολφού που δεν θεωρείται ρεαλιστική.
- Γενικά, το κριτήριο Mohr-Coulomb με το να μην υπολογίζει την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 στην αντοχή του πετρώματος , τείνει να υπερεκτιμάει την ελάχιστη πυκνότητα πολφού, δίνοντας στις τέσσερις από τις πέντε γεωτρήσεις ελάχιστες πυκνότητες πολφού για την αποτροπή αστοχίας αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην πραγματικότητα.

Προτάσεις

- Στον ήδη υπάρχον κώδικα θα μπορούσε να προστεθούν περισσότερα κριτήρια αστοχίας για την εύρεση του πιο αποδοτικού σε σχέση με το κριτήριο Mogi-Coulomb και κριτήρια που να συμπεριλαμβάνουν και άλλες παραμέτρους αντοχής, όπως αντοχή σε εφελκυσμό.
- Θα μπορούσε να γίνει και τρισδιάστατη ανάλυση του προβλήματος με αριθμητικές μεθόδους για την περίπτωση κεκλιμένου συστήματος κυρίων τάσεων ως προς τον άξονα της γεώτρησης.
- Το ίδιο θα μπορούσε να γίνει με μετατροπή του κώδικα στη Matlab έτσι ώστε να γίνεται υπολογισμός μοναδιαίου βάρους πολφού για γεωτρήσεις που δεν είναι κατακόρυφες αλλά κεκλιμένες ή οριζόντιες.

Παράρτημα Α :KirschOnBoundary

```
function Fp=kirschOnBoundary(sv,sH,sh,p,pp,c,f,v)
% Υπολογισμός τάσεων γύρο από κυκλικό άνοιγμα
% Σε πολικές συντεταγμένες (Λύση του Kirsch).
% SYNTAX: kirsch(sv,sH,sh,p, pp, c,f,v, enableplot)

% sv = Κατακόρυφη τάση μακρινού πεδίου (MPa)
% sH = Μέγιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου (MPa)
% sh = Ελάχιστη οριζόντια τάση μακρινού πεδίου (MPa)
% p = Πίεση πολφού (MPa)
% pp = Πίεση πόρων (MPa)
% c = Συνοχή
% f = Γωνία εσωτερικής τριβής (deg)
% v = Λόγος Poisson
% enableplot = boolean (True of False) to enable plotting

% Πολικός κώνναβος σημείων.
nr = 101;
theta=linspace(0,2*pi,nr)';
sr = zeros(nr,1);
sth = zeros(nr,1);
sz = zeros(nr,1);
s1 = zeros(nr,1);
s2 = zeros(nr,1);
s3 = zeros(nr,1);
for N=1:1:nr
    % Υπολογισμός πολικών τάσεων (ενεργών)
    sr(N)=p-pp;
    sth(N)=sH+sh+2*(sH-sh)*cos(2*theta(N))-p-pp;

    % Υπολογισμός τάσης sz (Fairhurst) (ενεργή)
    sz(N)=sv+2*v*(sH-sh)*cos(2*theta(N))-pp;

    % Υπολογισμός κυρίων τάσεων υποθέτοντας ότι ισχύει s1>s2>s3
    s1(N)=max([sr(N),sth(N),sz(N)]);
    s2(N)=median([sr(N),sth(N),sz(N)]);
    s3(N)=min([sr(N),sth(N),sz(N)]);
end
```

```

% Αρχικοποίηση πινάκων
Fp=zeros(4,1);
MC = zeros(nr,1);
ML = zeros(nr,1);
MG = zeros(nr,1);
HB = zeros(nr,1);
for N=1:1:nr
    % Υπολογισμός σημείων αστοχίας για το κριτήριο Mohr Coulomb
    MC(N)=s1(N)-2*c*cos(f*pi/180)/(1-sin(f*pi/180))-
(1+sin(f*pi/180))/(1-sin(f*pi/180))*s3(N);
    if MC(N)>=0
        Fp(1,1)=1;
    end

    % Υπολογισμός σημείων αστοχίας για το κριτήριο Modified Lade
    ML(N)=(((s1(N)+(c/tan(f*pi/180)))+(s2(N)+(c/tan(f*pi/180)))+(s3(N)+(c/tan(f*pi/180))))^3/((s1(N)+(c/tan(f*pi/180)))*(s2(N)+(c/tan(f*pi/180)))*(s3(N)+(c/tan(f*pi/180))))-27-
((4*tan(f*pi/180)^2)*(9-7*sin(f*pi/180)))/(1-sin(f*pi/180)));
    if ML(N)>=0
        Fp(2,1)=1;
    end

    % Υπολογισμός σημείων αστοχίας για το κριτήριο Mogi Coulomb
    MG(N)=(1/3)*sqrt((s1(N)-s2(N))^2+(s2(N)-s3(N))^2+(s3(N)-s1(N))^2)-((2*sqrt(2))/3)*c*(cos(f*pi/180))-
((2*sqrt(2))/3)*sin(f*pi/180)*((s1(N)+s3(N))/2);
    if MG(N)>=0
        Fp(3,1)=1;
    end
end
end

```


Παράρτημα Β :PressureOnBoundary

Παράδειγμα δεδομένων (Abbas Khaksar Manshad et al.2014)

```
PressureOnBoundary(80,60,58,34.5,4,40,0.31,3190)
```

```
function PressureOnBoundary(sv,sH,sh,pp,c,f,v,h)
```

```
% Δημιουργία διανύσματος με δυνατές τιμές πίεσης πολφού  
(Πίνακας p)  
p=linspace(0,200,200);  
% Υπολογισμός αστοχίας στα τοιχώματα της γεώτρησης συναρτήσει της  
πίεσης πολφού  
Fp = 5*ones(length(p),4);  
for I=1:length(p)  
    Fp(I,:)=kirschOnBoundary(sv,sH,sh,p(I),pp,c,f,v);  
end  
  
% Διάγραμμα πυκνότητας-Κριτηρίων αστοχίας  
figure  
g=9.81;  
rho=p/(g*h)*1000;  
plot(rho,Fp(:,1),'b',rho,Fp(:,2),'r',rho,Fp(:,3),'go')  
grid on  
xlabel('Mud density (gr/cm3)')  
ylabel('Failed? 1=true, 0=false')  
legend('MC','ML','MG')
```

Βιβλιογραφία

- i. Douglas R. Schmitt, Claire A. Currie and Lei Zhang(2012). *Crustal stress determination from borehole and rock cores:Fundamental principles*, Tectophysics 580, pp. 1-26.
- ii. Martin H. Sadd (2005). *Elasticity Theory, Applications, and Numerics*, University of Rhode Island, Rhode Island.
- iii. Baisakhi Das, Rima Chatterjee (2017), *Wellbore stability analysis and prediction of minimum mud weight for few wells in Krishna-Godavari Basin, India*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 93, pp. 30-37
- iv. Abbas Khaksar, H.Jalalifar, M.Aslannejad (2014), *Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods*.
- v. Mark D. Zoback (2007). *Reservoir Geomechanics*. Stanford Unversity, California.
- vi. A.M. Al-Ajmi , R.W. Zimmerman (2006), *Stability analysis of vertical borehole using the Mogi-Coulomb failure criterion*, International Journal of Rock &Mining Sciences 43, pp. 1200-1211
- vii. Fairhurst, C. “*Borehole Methods of Stress Determination*,” in Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics (Madrid, October 1968), pp. 273-279. Madrid: Editorial Blume, 1970.
- viii. Ayub Elyasi, Kamran Goshtasbi (2015). *Using different rock failure criteria in wellbore stability*, Geomechanics for Energy and the Environment 2, pp.15-21
- ix. R.T. Ewy (1999), *Wellbore-Stability Prediction by Use of a Modified Lade Criterion*

Πηγες διαδικτύου

- i. science.howstuffworks.com
- ii. www.rigzone.com
- iii. sciencing.com/elements-fossil-fuels
- iv. www.naturalfractures.com