

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΚΑΙ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ
ΒΑΘΙΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΣΤΟ FLAC**

υπό

ΑΓΓΕΛΟΥ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2017

© 2017 Άγγελος Παπαγιάννης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα και την Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους μου και τον αδερφό μου για την ηθική υποστήριξή τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Άγγελος Παπαγιάννης

ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΚΑΙ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΒΑΘΙΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΣΤΟ FLAC

Άγγελος Παπαγιάννης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2017

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Εφραιμίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Ο προσδιορισμός της κατάλληλης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος είναι ένα ουσιαστικό βήμα για τον έλεγχο ευστάθειας μιας γεώτρησης. Στη παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ελάχιστη και η μέγιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος, που απαιτείται για τον έλεγχο αυτό. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αφού υπολογίστηκαν οι τάσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης, εφαρμόζοντας τη θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας, ακολούθησε η επιλογή του κριτηρίου αστοχίας, καθώς και η εφαρμογή του. Αρχικά επιλέχθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Το κριτήριο αυτό συμπεριλαμβάνει μόνο τη μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση σ_1 και σ_3 , υποθέτοντας ότι η ενδιάμεση τάση σ_2 δεν επηρεάζει την αστοχία του υλικού. Σύμφωνα με μεταγενέστερες μελέτες, αυτό δεν συμβαίνει στη πραγματικότητα. Έτσι στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε και το κριτήριο Mogi-Coulomb, το οποίο συμπεριλαμβάνει και την ενδιάμεση τάση σ_2 . Στο κυρίως μέρος παρουσιάζεται η ανάλυση ευστάθειας που πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος FLAC7, με τη εφαρμογή και των δύο αυτών μοντέλων, σε διάφορα πεδία εφαρμογής, των οποίων τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις συγκρίσεις που διεξήχθησαν.

STABILITY ANALYSIS OF VERTICAL HORIZONTAL AND DEVIATED DEEP BOREHOLES USING PROGRAMMING IN FLAC

Angelos Papagiannis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2017

Supervisor: George Efremidis, Assistant Professor

Abstract

Determination of the appropriate drilling fluid pressure by rock failure analysis is an essential step to control wellbore instability. This diploma thesis determines the minimum and the maximum drilling fluid pressure required to maintain a stable wellbore. This has been achieved by using linear elasticity theory to calculate the stresses at the wellbore wall, and an appropriate rock failure criterion. Firstly Mohr-Coulomb criterion was chosen, which is the most frequently used for rock mechanics analysis. This criterion involves only the minimum and maximum principal stresses, σ_1 and σ_3 . Therefore, it assumes that the intermediate stress σ_2 has no influence on rock strength, but that happens in the field only when $\sigma_2 = \sigma_3$. In this manner Mogi-Coulomb criterion was applied, which involves the intermediate stress component σ_2 . In the main part of the diploma thesis, the stability analysis of deep boreholes using FLAC7, is developed, by applied Mohr-Coulomb and Mogi-Coulomb failure criteria to several field cases available in the literature. Finally the results of the analysis and the comparisons between the two criteria are presented.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γεωτητική ιλύς.....	3
2.	Βασική θεωρία των τάσεων.....	5
2.1	Η έννοια της τάσης.....	5
2.2	Συνιστώσες των τάσεων στις τρεις διαστάσεις.....	6
2.3	Κύριες τάσεις σε δύο διαστάσεις.....	7
2.4	Κύριες τάσεις σε τρεις διαστάσεις.....	9
2.5	Οκταεδρικές τάσεις.....	11
2.6	Αποκλίνων τανυστής τάσεων.....	12
3.	Τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από την οπή της γεώτρησης.....	14
3.1	Τάσεις και παραμορφώσεις σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.....	14
3.2	Τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από κεκλιμένη γεώτρηση.....	16
3.3	Τάσεις που αναπτύσσονται στα τοιχώματα της γεώτρησης σε ανισότροπο πεδίο τάσεων.....	19
3.3.1	Κεκλιμένη γεώτρηση.....	19
3.3.2	Κατακόρυφη γεώτρηση.....	20
3.3.3	Οριζόντια γεώτρηση.....	21
4.	Κριτήρια αστοχίας.....	23
4.1	Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	24
4.2	Κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb.....	26
5.	Ανάλυση αστοχίας κατακόρυφης γεώτρησης.....	27
5.1	Επιτόπου τάσεις.....	28
5.1.1	Κατακόρυφη επιτόπου τάση.....	29
5.1.2	Οριζόντιες επιτόπου τάσεις.....	29
5.2	Ανάλυση τάσεων κατακόρυφης γεώτρησης.....	31
5.2.1	Αστοχία λόγω θλίψης.....	32
5.2.2	Αστοχία λόγω εφελκυσμού.....	33

5.3	Εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb	34
5.4	Εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb.....	37
6.	Ανάλυση αστοχίας μη κατακόρυφης γεώτρησης.....	42
6.1	Ανάλυση τάσεων μη κατακόρυφης γεώτρησης.....	42
6.1.1	Οριζόντια γεώτρηση	43
6.1.2	Κεκλιμένη γεώτρηση.....	45
6.2	Εφαρμογή κριτηρίων αστοχίας σε μη κατακόρυφη γεώτρηση	47
7.	Εφαρμογή της ανάλυσης ευστάθειας.....	51
7.1	Ταμεικτήρας Cygus στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Η.Β.	51
7.2	Πεδίο Wanaea στην βορειοδυτική υφαλοκρηπίδα της Αυστραλίας.....	54
7.3	Πετρελαϊκό πεδίο του Ιράν	58
7.4	Υπεράκτιες γεωτρήσεις στον Αραβικό κόλπο	62
7.5	Πετρελαϊκό πεδίο ABK στην υπεράκτια περιοχή του Άμπου Ντάμπι	66
8.	Συμπεράσματα	71
	Βιβλιογραφία	74

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αστοχία λόγω κατάρρευσης και ρωγμάτωσης της γεώτρησης.....	2
Σχήμα 2.1: Παράδειγμα ενός σώματος, το οποίο φορτίζεται υπό μία ομοιόμορφη τάση σ_{axial} ..	6
Σχήμα 2.2: Συνιστώσες των τάσεων σε τρεις διαστάσεις.....	6
Σχήμα 2.3: Συνιστώσες των τάσεων σε δύο διαστάσεις.....	7
Σχήμα 2.4: Τάσεις σε ένα τυχαίο επίπεδο.....	8
Σχήμα 2.5: Συνιμήτονα κατεύθυνσης.....	10
Σχήμα 3.1: (α) Τάσεις και (β) μετακινήσεις στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.....	14
Σχήμα 3.2: Σύστημα συντεταγμένων των επιτόπου (in situ) τάσεων.....	16
Σχήμα 3.3: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κεκλιμένη γεώτρηση.....	17
Σχήμα 3.4: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κατακόρυφη γεώτρηση.....	20
Σχήμα 3.5: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κατακόρυφη γεώτρηση.....	21
Σχήμα 4.1: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	24
Σχήμα 5.1: Επιτόπου τάσεις: (α) Κανονικό ρήγμα (normal fault), (β) Ανάστροφο ρήγμα (thrust fault), (γ) Ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip fault).....	28

Σχήμα 6.1: α)Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων στο νέο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z). β) Τάσεις στο νέο σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) στο επίπεδο x-y. γ) Στοιχειώδης κύβος, στον οποίο περιγράφεται το πεδίο των τάσεων, στα τοιχώματα της γεώτρησης, στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z).....45

Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος, που απαιτείται για την εξασφάλιση της ευστάθειας της γεώτρησης50

Σχήμα 7.1: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στον ταμιευτήρα ψαμμίτη Cygus, στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m, με (α) $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$ και (β) $\sigma_H = \sigma_h = 19kPa/m$...52

Σχήμα 7.2: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της βάθους της γεώτρησης στον ταμιευτήρα ψαμμίτη Cygus, στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m για τη διεξαγωγή κατακόρυφων γεωτρήσεων, με $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$53

Σχήμα 7.3: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, με (α) $a = 0^\circ$ και (β) $a = 30^\circ$ 55

Σχήμα 7.4: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, με (α) $a = 60^\circ$ και (β) $a = 90^\circ$ 56

Σχήμα 7.5: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb57

Σχήμα 7.6: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, με (α) $a = 0^\circ$ και (β) $a = 30^\circ$	59
Σχήμα 7.7: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, με (α) $a = 60^\circ$ και (β) $a = 90^\circ$	60
Σχήμα 7.8: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb	61
Σχήμα 7.9: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, με (α) $a = 0^\circ$ και (β) $a = 30^\circ$	63
Σχήμα 7.10: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, με (α) $a = 60^\circ$ και (β) $a = 90^\circ$	64
Σχήμα 7.11: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb.....	65

Σχήμα 7.12: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, με (α) $a = 0^\circ$ και (β) $a = 30^\circ$ 67

Σχήμα 7.13: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, με (α) $a = 60^\circ$ και (β) $a = 90^\circ$ 68

Σχήμα 7.14: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb69

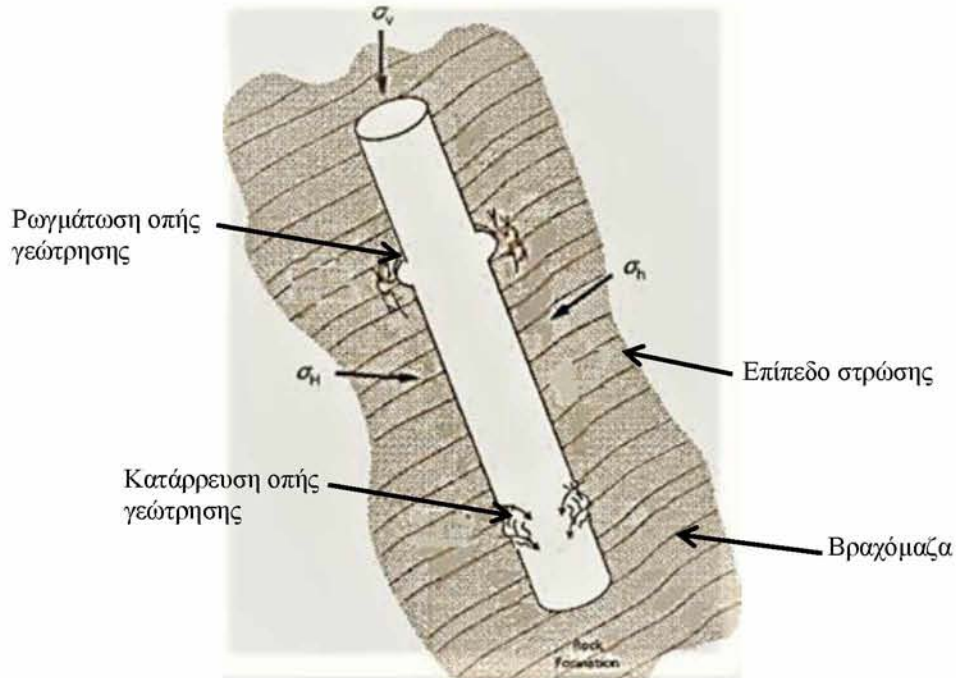
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Εφαρμογή του Mohr-Coulomb για την αποφυγή κατάρρευσης κατακόρυφων γεωτρήσεων	35
Πίνακας 5.2: Εφαρμογή του Mohr-Coulomb για την αποφυγή αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης σε κατακόρυφες γεωτρήσεις.....	36
Πίνακας 5.3: Εφαρμογή του Mogi-Coulomb για την αποφυγή κατάρρευσης κατακόρυφων γεωτρήσεων.....	39
Πίνακας 5.4: Εφαρμογή του Mogi-Coulomb για την αποφυγή αστοχίας λόγω ρηγμάτωσης σε κατακόρυφες γεωτρήσεις.....	40
Πίνακας 7.1: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του ταμιευτήρα Cygus στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m, με $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$ και $\sigma_H = \sigma_h = 19kPa/m$	51
Πίνακας 7.2: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m.	54
Πίνακας 7.3: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του Ιράν στα 3200m	58
Πίνακας 7.4: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m.....	62
Πίνακας 7.5: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m.....	66

1. Εισαγωγή

Η ευστάθεια βαθιάς γεώτρησης είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής και απασχολεί ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας στην επιστήμη της βραχομηχανικής σε όλο τον κόσμο. Υπάρχουν πολλοί λόγοι, που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ευστάθεια μιας βαθιάς γεώτρησης. Με βάση αυτούς τους λόγους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα διάφορα είδη ασταθειών ως εξής [19]:

1. Κλείσιμο της οπής ή στένωμα (hole closure or narrowing). Είναι μία χρονικά εξαρτημένη διαδικασία και μερικές φορές αναφέρεται και ως ερπυσμός, λόγω του ιδίου βάρους των υπερκείμενων και τη παραμόρφωση σε σχέση με τον χρόνο.
2. Μεγέθυνση της οπής (hole enlargement). Αναφέρεται συχνά και ως διάβρωση (washout), επειδή το μέγεθος της οπής αυξάνεται ανεπιθύμητα σε σχέση με το αρχικό μέγεθος σχεδιασμού.
3. Κατάρρευση (collapse). Αυτό επιτυγχάνεται, όταν η πίεση της γεωτρητικής ιλύος (drilling mud) είναι τόσο μικρή, έτσι ώστε να μην μπορεί να διατηρηθεί η δομική ακεραιότητα (structural integrity) της γεώτρησης.
4. Ρωγμάτωση (fracturing). Αυτό επιτυγχάνεται, όταν η πίεση της γεωτρητικής ιλύος ξεπερνά τη μέγιστη τιμή, που μπορεί να πάρει και προκαλείται εφελκυστική αστοχία στα τοιχώματα της οπής γεώτρησης και δημιουργία ρωγματώσεων.



Σχήμα 1.1: Αστοχία λόγω κατάρρευσης και ρωγμάτωσης της γεώτρησης [2].

Στη βιομηχανία υδρογονανθράκων επικρατεί η άποψη, ότι παρόμοια προβλήματα αστάθειας μπορούν να αυξήσουν τουλάχιστον 10% το κόστος, που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός τέτοιου μεγάλου γεωτρητικού προγράμματος καθώς και το χρόνο υλοποίησης του. Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ανάγκη για την υλοποίηση νέων ερευνητικών γεωτρήσεων μεγάλου βάθους με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια, απαιτεί πιο πολύπλοκη ανάλυση ευστάθειας, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εξέλιξη του έργου. Κατά τη διάρκεια των δυο τελευταίων δεκαετιών υπήρξε μια θεαματική ανάπτυξη, αποδοχή και εφαρμογή της τεχνικής όρυξης κεκλιμένων και οριζοντίων βαθιών γεωτρήσεων. Οι ορυκτοί υδρογονάνθρακες (π.χ. το πετρέλαιο), συνήθως, εξάγονται από πλατφόρμες, οι οποίες επηρεάζουν κατά πολύ το κόστος του έργου. Ο απαιτούμενος αριθμός πλατφορμών (platforms) μπορεί να μειωθεί με τη διάνοιξη μη κατακόρυφων παραγωγικών φρεατίων (production wells). Αυτά τα φρεάτια έχουν τη δυνατότητα να διευρύνουν την περιοχή εξόρυξης (π.χ. του πετρελαίου), με αποτέλεσμα να αυξηθεί η παραγωγή και να μειωθεί ο αριθμός των πλατφορμών. Επιπλέον οι μη κατακόρυφες γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για να προσεγγίσουν περιοχές, που δεν είναι προσβάσιμες από τις κατακόρυφες [1].

Οι σημαντικότερες αιτίες, που προκαλούν προβλήματα αστάθειας σε μία γεώτρηση είναι η μηχανική κατάρρευση και ρωγμάτωση των τοιχωμάτων της οπής της γεώτρησης. Στην ανάλυση ευστάθειας μιας γεώτρησης σημαντικό ρόλο παίζει το πεδίο των επιτόπου τάσεων (γεωστατικές τάσεις ή πρωτογενείς τάσεις πεδίου). Όταν γίνεται διάτρηση ενός φρέατος, ο βράχος γύρω από τη γεώτρηση παραλαμβάνει το φορτίο του αφαιρούμενου υλικού και γίνεται αναδιάταξη του εντατικού πεδίου στην νέα θέση ισορροπίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη τροποποίηση των τάσεων γύρω από τη γεώτρηση (δευτερογενείς τάσεις). Η αναδιάταξη αυτή προκαλεί συγκέντρωση των τάσεων, η οποία παίρνει μεγάλες τιμές και μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του βράχου, αν υπερβεί την αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Το βασικό πρόβλημα, που αναδύεται σε αυτό το σημείο είναι η δυνατότητα της πρόβλεψης της μηχανικής συμπεριφοράς του βράχου, σε αυτή την αλλαγή της μηχανικής φόρτισης.

1.1 Γεωτρητική ιλύς

Για να εξασφαλιστεί, η ευστάθεια της γεώτρησης, πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα αυτή η ανακατανομή των τάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας εσωτερικής πίεσης στο φρεάτιο και παράλληλα με τον έλεγχο των ευνοϊκών συνθηκών σχετικά με τον προσανατολισμό και την κλίση της γεώτρησης. Η πίεση αυτή, ασκείται μέσω της γεωτρητικής ιλύος (λάσπη), η οποία είναι ένα ρευστό, που αποτελείται κυρίως από ένα μείγμα νερού, μπετονίτη και ειδικών χημικών πρόσθετων, αναλόγως της λιθολογίας. Οι κύριες λειτουργίες της γεωτρητικής ιλύος είναι [20]:

- η μεταφορά των θρυμμάτων στην επιφάνεια, επειδή ο μπετονίτης λόγω μικρότερου ειδικού βάρους από το νερό και μεγαλύτερου ιξώδους, έχει τη δυνατότητα να ανεβάζει στην επιφάνεια της γεώτρησης πολύ πιο βαριά θρύμματα.
- η ψύξη και η λίπανση του κοπτικού άκρου και η μείωση των τριβών της διατρητικής στήλης,
- η σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της οπής της γεώτρησης. Η λάσπη (γεωτρητική ιλύς) με βασικό συστατικό της τον μπετονίτη σχηματίζει στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης ένα λεπτό επίστρωμα, το οποίο φράζει τις ρωγμές της περιβάλλουσας

βραχόμαζας και αυξάνει τη συνοχή της, προστατεύοντας τη γεώτρηση από τις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχίων,

- η αποτροπή εισροής των ρευστών των διατρυόμενων σχηματισμών μέσα στη γεώτρηση,
- η παροχή γεωλογικών πληροφοριών μέσω των θρυμμάτων,
- η λειτουργία ως σταθεροποιητικού παράγοντα της διάτρησης. Η άσκηση μεγαλύτερης υδροστατικής πίεσης, στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης, υπερνικά την πίεση των γεωλογικών σχηματισμών και εμποδίζει την εισροή των ρευστών από τα διάφορα στρώματα μέσα στη γεώτρηση.
- η μετάδοση ενέργειας στο μηχανισμό της διατρητικής κεφαλής, που βρίσκεται στον πυθμένα της γεώτρησης.

2. Βασική θεωρία των τάσεων

Η έννοια της τάσης και η ανάλυσή της σε ένα στερεό σώμα υπό φόρτιση είναι θεμελιώδης για την έρευνα στα διάφορα πεδία της βραχομηχανικής. Γενικά, η τάση μέσα σε ένα σώμα κατανέμεται μη ομοιόμορφα. Δεν είναι απλά ένα βαθμωτό μέγεθος, αλλά ένας τανυστής δευτέρου βαθμού, ο οποίος περιέχει έξι ανεξάρτητες συνιστώσες, που ενεργούν σε οποιοδήποτε σημείο στο σώμα. Η λεπτομερής περιγραφή της μετάδοσης τάσεων, στο εσωτερικό βραχωδών και εδαφικών μαζών, είναι ιδιαίτερη πολύπλοκη, λόγω της ασυνεχούς φύσης των γεωυλικών.

2.1 Η έννοια της τάσης

Γενικά, η τάση ορίζεται ως ο λόγος μιας δύναμης (F), που δρα πάνω σε μία στοιχειώδη επιφάνεια (A). Όπως φαίνεται και από τη παρακάτω σχέση, η τάση είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του σώματος [2].

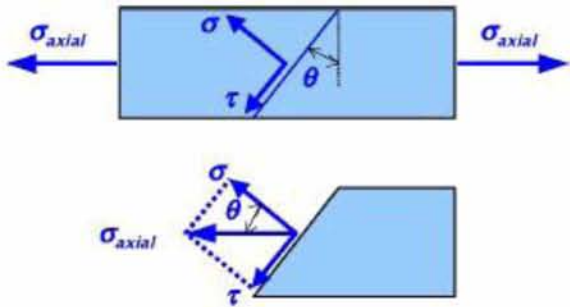
$$\sigma = \frac{\text{Force}}{\text{Area}} = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

όπου σ είναι η τάση (Pa), F η δύναμη (N) και A το εμβαδό της επιφάνειας (m^2).

Σημειώνεται ότι στη βραχομηχανική, αντίθετα με τη μηχανική του στερεού σώματος και τη θεωρία αντοχής των υλικών, η σύμβαση προσήμου είναι αντίθετη, οι θλιπτικές τάσεις είναι θετικές και οι εφελκυστικές τάσεις είναι αρνητικές.

Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται μία εντατική κατάσταση, όπου ένα στερεό σώμα φορτίζεται υπό μία ομοιόμορφη εφελκυστική τάση σ_{axial} . Αν θεωρηθεί ότι το σώμα βρίσκεται σε ισορροπία, η τάση που δρα στο αριστερό μέρος πρέπει να ισορροπεί με μία τάση (αντίδρασης), που θα δρα στο δεξιό μέρος όπως φαίνεται στο σχήμα. Στη συνέχεια ορίζεται ένα τυχαίο επίπεδο μέσα στο σώμα. Οι δυνάμεις που δρουν σε αυτό το επίπεδο πρέπει να βρίσκονται και αυτές σε ισορροπία, ανεξάρτητα από το προσανατολισμό του επιπέδου. Έτσι προκύπτουν δύο ειδών τάσεων, με βάση τη κατάσταση ισορροπίας. Αυτές είναι η ορθή τάση σ , που επιδρά κάθετα στο τυχαίο επίπεδο

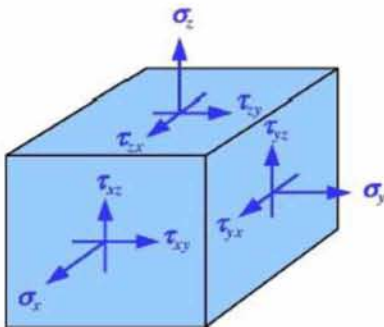
και η διατμητική τάση τ , η οποία ασκείται κατά μήκος του τυχαίου επιπέδου. Η ορθή τάση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία έναντι εφελκυσμού (ή διάτμησης), αν είναι εφελκυστική και σε αστοχία έναντι έμμεσου εφελκυσμού (ή διάτμησης), αν είναι θλιπτική, ενώ η διατμητική τάση οδηγεί σε αστοχία διάτμησης [2].



Σχήμα 2.1: Στερεό σώμα, το οποίο φορτίζεται υπό ομοιόμορφη εφελκυστική τάση σ_{axial} [2].

2.2 Συνιστώσες των τάσεων στις τρεις διαστάσεις

Στη περίπτωση των τριών διαστάσεων, απεικονίζεται ένας στοιχειώδης κύβος, στον οποίο ασκούνται τάσεις (σχήμα 2.2). Η ισορροπία των δυνάμεων απαιτεί και την δράση ίσων τάσεων, αντίθετης διεύθυνσης στη κάθε μία από τις τρεις πλευρές του στοιχειώδους κύβου. Στο σχήμα αυτό, αναγράφονται οι εννιά συνιστώσες των τάσεων, οι οποίες είναι απαραίτητες για να οριστεί η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο. Οι συνιστώσες των τάσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μέρη: α) οι ορθές τάσεις $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ και β) οι διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$. Οι δείκτες των συνιστωσών σχετίζονται με το καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων [2].

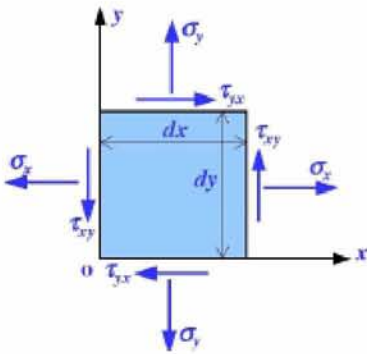


Σχήμα 2.2: Συνιστώσες των τάσεων σε τρεις διαστάσεις [2].

Έτσι ο τανυστής των τάσεων ισούται με:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Η επίπεδη εντατική κατάσταση στο επίπεδο x - y , περιγράφεται από τις ορθές τάσεις, οι οποίες λόγω ισορροπίας δυνάμεων ισορροπούν, ενώ αν θεωρηθεί ισορροπία ροπών τότε προκύπτει για τις διατμητικές τάσεις ότι $\tau_{xy} = \tau_{yx}$.



Σχήμα 2.3: Συνιστώσες των τάσεων σε δύο διαστάσεις[2].

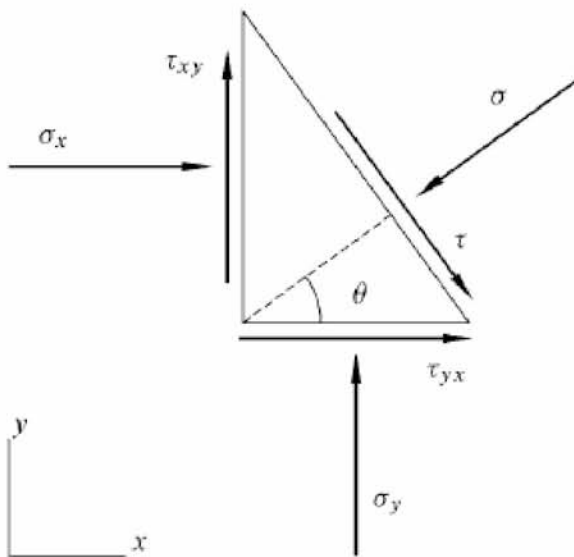
Ομοίως, για τα επίπεδα x - z και y - z ισχύει $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ και $\tau_{zy} = \tau_{yz}$, αντίστοιχα.

2.3 Κύριες τάσεις σε δύο διαστάσεις

Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται η ορθή τάση (σ) και η διατμητική τάση (τ) σε ένα τυχαίο επίπεδο x - y . Η ορθή τάση σχηματίζει γωνία θ με τον άξονα x και το στοιχειώδες τρίγωνο του σχήματος θεωρείται ότι βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Εφαρμόζοντας σε αυτό τις εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων κατά τον άξονα x και κατά τον άξονα y προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}\tau &= \sigma_y \sin \theta \cos \theta - \sigma_x \cos \theta \sin \theta + \tau_{xy} \cos \theta \cos \theta - \tau_{xy} \sin \theta \sin \theta \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\end{aligned}\quad (2.4)$$



Σχήμα 2.4: Τάσεις σε ένα τυχαίο επίπεδο [1].

Για να υπολογιστεί η ορθή τάση (κύρια τάση) σε ένα επίπεδο, στο οποίο η διατμητική τάση είναι μηδέν, τίθεται $\tau = 0$ στην σχέση (2.4) και προκύπτει ως αποτέλεσμα

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)}\quad (2.5)$$

όπου θ ο προσανατολισμός του επιπέδου των κυρίων τάσεων.

Η εξίσωση (2.5) έχει δύο λύσεις, τις θ_1, θ_2 . Αυτές οι δύο λύσεις αντιπροσωπεύουν τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων, όπου η διατμητική τάση είναι μηδέν.

Με αντικατάσταση της σχέσης (2.5) στη σχέση (2.3) προκύπτουν οι κύριες τάσεις των σ_1, σ_2 ως εξής:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad (2.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad (2.7)$$

όπου $\sigma_1 > \sigma_2$.

2.4 Κύριες τάσεις σε τρεις διαστάσεις

Η δισδιάστατη ανάλυση εξετάζει την ισορροπία σε 2 διευθύνσεις και έτσι απαιτούνται τρεις ανεξάρτητες συνιστώσες του τανυστή τάσεων για να προσδιορίσουμε το πεδίο των τάσεων, $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yz}$. Όμως η γενική ανάλυση των τάσεων γίνεται στις τρεις διαστάσεις. Σε αυτή τη περίπτωση, απαιτούνται έξι ανεξάρτητες συνιστώσες (τρεις ορθές και τρεις διατμητικές, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$). Στη περίπτωση που οι διατμητικές τάσεις είναι μηδέν, τότε οι ορθές οι τάσεις αντιστοιχούν στις κύριες τάσεις. Οι διευθύνσεις τους θα είναι οι άξονες των κυρίων τάσεων και ο τανυστής των τάσεων σε ένα σημείο θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

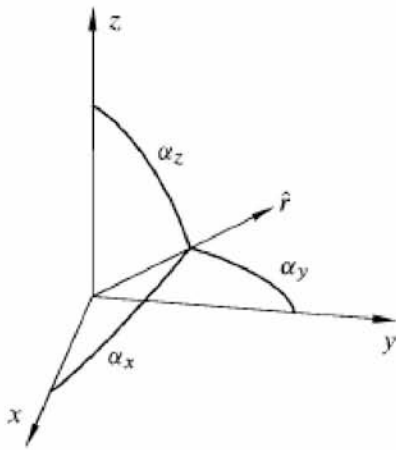
όπου σ_1 είναι η μέγιστη κύρια τάση, σ_2 η ενδιάμεση κύρια τάση και η σ_3 η ελάχιστη κύρια τάση.

Αρχικά, πρέπει να προσδιοριστούν οι διευθύνσεις τους μέσα στο χώρο, χρησιμοποιώντας τα συνημίτονα κατεύθυνσης [1]:

$$\lambda_x = \cos \alpha_x \quad (2.9)$$

$$\lambda_y = \cos \alpha_y \quad (2.10)$$

$$\lambda_z = \cos \alpha_z \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.5: Συνημίτονα κατεύθυνσης [1].

Οι γωνίες α_x , α_y , α_z είναι οι γωνίες μεταξύ της τυχαίας διεύθυνσης με τους άξονες x, y, z αντίστοιχα. Το διάνυσμα $\hat{r} = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης.

Σημειώνεται ότι ισχύει πάντα $\lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 = 1$.

Οι κύριες τάσεις μπορούν να βρεθούν λύνοντας τη παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Αυτή οδηγεί στην} \quad \sigma^3 - I_1 \sigma^2 - I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (2.13)$$

όπου

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2.14.α)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (2.14.β)$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \quad (2.14.γ)$$

Οι τρεις λύσεις της (2.13) είναι οι τρεις κύριες τάσεις και I_1, I_2, I_3 οι αναλλοίωτες του τανυστή των τάσεων.

Τα συνημίτονα κατεύθυνσης $\lambda_{1y}, \lambda_{1y}, \lambda_{1z}$ προσδιορίζουν τον κύριο άξονα, που σχετίζεται με την σ_1 με τις παρακάτω εξισώσεις [1]:

$$\lambda_{1x} (\sigma_x - \sigma_1) + \lambda_{1y} \tau_{xy} + \lambda_{1z} \tau_{xz} = 0 \quad (2.15)$$

$$\lambda_{1x} \tau_{xy} + \lambda_{1y} (\sigma_y - \sigma_1) + \lambda_{1z} \tau_{yz} = 0 \quad (2.16)$$

$$\lambda_{1x} \tau_{xz} + \lambda_{1y} \tau_{yz} + \lambda_{1z} (\sigma_z - \sigma_1) = 0 \quad (2.17)$$

Ομοίως με την ίδια λογική προσδιορίζονται οι κύριοι άξονες, που σχετίζονται με τις δύο άλλες κύριες τάσεις αντικαθιστώντας το 1, με 2 και 3 αντίστοιχα για τη σ_2 και σ_3 .

Οι τάσεις τ και σ σε ένα τυχαίο επίπεδο με συνημίτονα κατεύθυνσης $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ υπολογίζονται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων [1]:

$$\lambda_1^2 \sigma_1 + \lambda_2^2 \sigma_2 + \lambda_3^2 \sigma_3 = \sigma, \quad (2.18.α)$$

$$\lambda_1^2 \sigma_1^2 + \lambda_2^2 \sigma_2^2 + \lambda_3^2 \sigma_3^2 = \sigma^2 + \tau^2. \quad (2.18.β)$$

2.5 Οκταεδρικές τάσεις

Η διεύθυνση κατά την οποία, ένα επίπεδο έχει τέτοιο προσανατολισμό ως προς τους κύριους άξονες, ώστε να ισχύει

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.19)$$

ονομάζεται οκταεδρικό επίπεδο [1].

Η ορθή και η διατμητική τάση που δρουν σε αυτό το επίπεδο ονομάζονται ορθή οκταεδρική τάση (σ_{oct}) και διατμητική οκταεδρική τάση (τ_{oct}). Εισάγοντας τη σχέση (2.19) στη σχέση (2.18.α) η οκταεδρική ορθή τάση μπορεί να βρεθεί από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}I_1 \quad (2.20)$$

Ομοίως η οκταεδρική διατμητική τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω σχέση:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sqrt{\frac{2(I_1^2 - 3I_2)}{3}} \quad (2.21)$$

2.6 Αποκλίνων τανυστής τάσεων

Έστω σ_m είναι η μέση ορθή τάση

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{I_1}{3} \quad (2.22)$$

όπου I_1 είναι ή πρώτη αναλλοίωτη του τανυστή των τάσεων.

Ο τανυστής των τάσεων μπορεί να αναλυθεί σαν άθροισμα δύο τανυστών ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (2.23.α)$$

ή

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij} \cdot \sigma_m \quad (2.23.β)$$

Ο πίνακας (s_{ij}), ως διαφορά δύο τανυστών δεύτερης τάξης, είναι ένας τανυστής δεύτερης τάξης και ονομάζεται αποκλίνων τανυστής τάσεων. Ο τανυστής, που έχει ως διαγώνια στοιχεία την μέση ορθή τάση σ_m , λέγεται υδροστατικός ή ισότροπος τανυστής τάσεων [2].

Οι κύριοι άξονες του αποκλίνοντα τανυστή των τάσεων θα είναι ίδιοι με εκείνους του τανυστή των τάσεων. Οι κύριες αποκλίνουσες τάσεις s_1, s_2, s_3 υπολογίζονται από το παρακάτω τύπο:

$$s_1 = \sigma_1 - \sigma_m = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) / 3 \quad (2.24.α)$$

$$s_2 = \sigma_2 - \sigma_m = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / 3 \quad (2.24.β)$$

$$s_3 = \sigma_3 - \sigma_m = (2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2) / 3 \quad (2.24.γ)$$

Οι αναλλοίωτες του αποκλίνοντα τανυστή, έχουν τις ακόλουθες μορφές:

$$J_1 = s_x + s_y + s_z = 0, \quad (2.25.α)$$

$$J_2 = -(s_x s_y + s_y s_z + s_z s_x) + s_{xy}^2 + s_{yz}^2 + s_{zx}^2, \quad (2.25.β)$$

$$J_3 = s_x s_y s_z + 2s_{xy} s_{yz} s_{zx} - s_x s_{yz}^2 - s_y s_{zx}^2 - s_z s_{xy}^2 \quad (2.25.γ)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση μπορούμε να καταλήξουμε και σε έναν άλλο τύπο για τον υπολογισμό της οκταεδρικής διατμητικής τάσης, όπως φαίνεται παρακάτω

$$\tau_{oct} = (2J_2 / 3)^{1/2} \quad (2.26)$$

3. Τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από την οπή της γεώτρησης

Αρχικά, πριν από την γεώτρηση, το πρωτογενές πεδίο των τάσεων του υπεδάφους βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Κατά τη διάρκεια της γεώτρησης, αφαιρείται υλικό και τα φορτία που ενεργούσαν σε αυτό πρέπει να αντισταθμιστούν από τα παρακείμενα πετρώματα (βράχοι, βραχώμαζα). Αυτό επιτυγχάνεται με την ανακατανομή των τάσεων, που συγκεντρώνονται γύρω από τη γεώτρηση. Η νέα κατάσταση ισορροπίας οδηγεί σε τάσεις μεγαλύτερες από αυτές, που ο βραχώδης σχηματισμός μπορεί να υποστηρίξει και να καταλήξει με αυτόν τον τρόπο στην αστάθεια της γεώτρησης, εάν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, όπως είναι η εσωτερική πίεση, που ασκείται μέσω της γεωτρητικής ιλύος. Συμπερασματικά προκύπτει, ότι ο προσδιορισμός των τάσεων, γύρω από τη γεώτρηση, είναι ένα βασικό βήμα στην ανάλυση ευστάθειας μιας γεώτρησης.

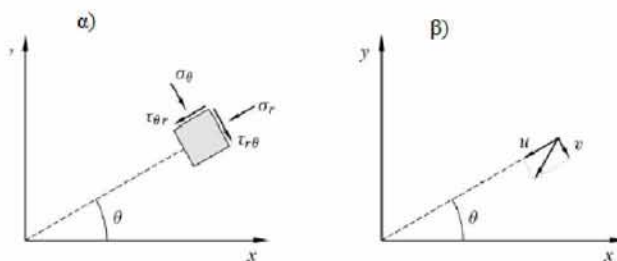
3.1 Τάσεις και παραμορφώσεις σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων

Το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) είναι το πιο κατάλληλο σύστημα για τη μελέτη του πεδίου των τάσεων ενός βράχου γύρω από μία γεώτρηση. Οι σχέσεις των τάσεων μεταξύ των κυλινδρικών και καρτεσιανών συντεταγμένων ορίζονται ως εξής:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (3.2)$$

$$\sigma_z = \sigma_z \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.1: (α) Τάσεις και (β) μετακινήσεις στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων [1].

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (3.4)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta \quad (3.5)$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta \quad (3.6)$$

Ομοίως για τις παραμορφώσεις ισχύουν τα παρακάτω:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta + \gamma_{xy} \sin 2\theta \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta - \gamma_{xy} \sin 2\theta \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z \quad (3.9)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (3.10)$$

$$\gamma_{rz} = \gamma_{xz} \cos \theta + \gamma_{yz} \sin \theta \quad (3.11)$$

$$\gamma_{\theta z} = \gamma_{yz} \cos \theta - \gamma_{xz} \sin \theta \quad (3.12)$$

Τα σύμβολα u, v, w χρησιμοποιούνται συχνά για να εκφράσουν τις μετατοπίσεις στις κυλινδρικές συντεταγμένες. Έτσι, ορίζεται ως u η μετατόπιση στην ακτινική διεύθυνση, v η μετατόπιση στην εφαπτομενική διεύθυνση και w η μετατόπιση στη αξονική διεύθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 (β). Οι σχέσεις μεταξύ των παραμορφώσεων και μετακινήσεων ορίζονται ως εξής [1]:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.15)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} - v \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial r} \quad (3.16)$$

$$\gamma_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.17)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.18)$$

Οι εξισώσεις ισορροπίας σε κυλινδρικές συντεταγμένες εκφράζονται παρακάτω:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta = 0 \quad (3.20)$$

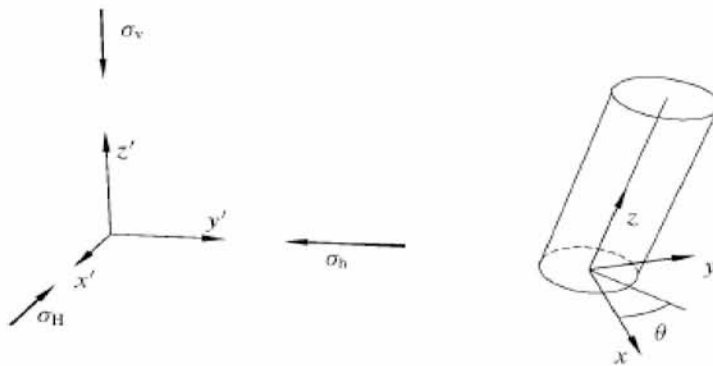
$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{\theta z}}{r} + F_z = 0 \quad (3.21)$$

όπου F_r, F_θ, F_z οι δυνάμεις σώματος (body forces).

3.2 Τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από κεκλιμένη γεώτρηση

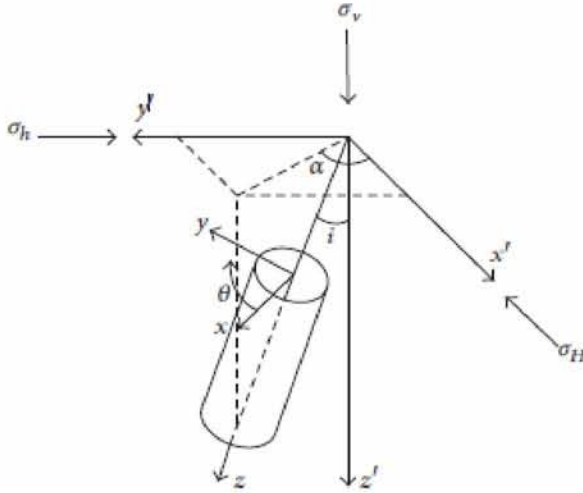
Στην ενότητα αυτή αναλύονται οι τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται γύρω από κεκλιμένες γεωτρήσεις, όπου οι οριζόντιες τάσεις παρουσιάζουν ανισοτροπία. Θεωρείται ότι οι επιτόπου (in situ) κύριες τάσεις είναι η κατακόρυφη τάση σ_v , η μέγιστη οριζόντια τάση σ_H και η μικρότερη οριζόντια τάση σ_h . Αυτές περιγράφονται με το σύστημα συντεταγμένων (x', y', z') όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Ο z' άξονας είναι παράλληλος στη διεύθυνση της σ_v , ο x' άξονας της σ_H και ο y' της σ_h .

Αυτές οι αρχικές τάσεις πρέπει να αλλάξουν σύστημα συντεταγμένων (x', y', z') , για να προσδιοριστεί η κατανομή των τάσεων, γύρω από μία γεώτρηση. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται και το σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) , όπου ο z άξονας είναι παράλληλος στον άξονα της γεώτρησης, ο x άξονας στη μικρότερη ακτινική διεύθυνση της γεώτρησης και ο y είναι οριζόντιος.



Σχήμα 3.2: Σύστημα συντεταγμένων των επιτόπου (in situ) τάσεων [1].

Αύτη η αλλαγή συντεταγμένων πραγματοποιείται από μία στροφή a (αζιμούθιο), γύρω από τον άξονα z' και έπειτα από μία στροφή i γύρω από τον άξονα y' , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κεκλιμένη γεώτρηση [5].

Αύτη η αλλαγή, λοιπόν, μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με τα συνημίτονα κατεύθυνσης, όπου l_{ij} είναι το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ του άξονα i και j' , με τις παρακάτω σχέσεις [1]:

$$l_{xx'} = \cos a \cos i, \quad l_{xy'} = \sin a \cos i, \quad l_{xz'} = -\sin i$$

$$l_{yx'} = -\sin a, \quad l_{yy'} = \cos a, \quad l_{yz'} = 0 \quad (3.22)$$

$$l_{zx'} = \cos a \sin i, \quad l_{zy'} = \sin a \sin i, \quad l_{zz'} = \cos i$$

$$\sigma_x^0 = l_{xx'}^2 \sigma_H + l_{xy'}^2 \sigma_h + l_{xz'}^2 \sigma_v \quad (3.23)$$

$$\sigma_y^0 = l_{yx'}^2 \sigma_H + l_{yy'}^2 \sigma_h + l_{yz'}^2 \sigma_v \quad (3.24)$$

$$\sigma_z^0 = l_{zx'}^2 \sigma_H + l_{zy'}^2 \sigma_h + l_{zz'}^2 \sigma_v \quad (3.25)$$

$$\tau_{xy}^0 = l_{xx'} l_{yx'} \sigma_H + l_{xy'} l_{yy'} \sigma_h + l_{xz'} l_{yz'} \sigma_v \quad (3.26)$$

$$\tau_{yz}^0 = l_{yx'} l_{zx'} \sigma_H + l_{yy'} l_{zy'} \sigma_h + l_{yz'} l_{zz'} \sigma_v \quad (3.27)$$

$$\tau_{zx}^0 = l_{zx'} l_{xx'} \sigma_H + l_{zy'} l_{xy'} \sigma_h + l_{zz'} l_{xz'} \sigma_v \quad (3.28)$$

Πιο συγκεκριμένα οι τάσεις στο νέο σύστημα συντεταγμένων (x, y, z): περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις [2]:

$$\sigma_x^0 = (\sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a) \cos^2 i + \sigma_v \sin^2 i, \quad (3.29.\alpha)$$

$$\sigma_y^0 = \sigma_H \sin^2 a + \sigma_h \cos^2 a, \quad (3.29.\beta)$$

$$\sigma_z^0 = (\sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a) \sin^2 i + \sigma_v \cos^2 i, \quad (3.29.\gamma)$$

$$\tau_{xy}^0 = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2a \cos i, \quad (3.29.\delta)$$

$$\tau_{yz}^0 = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2a \sin i, \quad (3.29.\epsilon)$$

$$\tau_{xz}^0 = 0.5(\sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a - \sigma_v) \sin 2i. \quad (3.29.\zeta)$$

όπου a το αζιμούθιο και i η κλίση της γεώτρησης.

Τέλος, η εκσκαφή δημιουργεί μια αλλαγή στο πεδίο των τάσεων και το αποτέλεσμα περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων [1], όπου R η ακτίνα της γεώτρησης, P_w η εσωτερική της πίεση και ν ο λόγος Poisson. Η γωνία θ υπολογίζεται με τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον άξονα x , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{1}{2}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \\ & + \tau_{xy}^0 \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + P_w \frac{R^2}{r^2} \end{aligned}, \quad (3.30.\alpha)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{1}{2}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \\ & - \tau_{xy}^0 \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - P_w \frac{R^2}{r^2} \end{aligned}, \quad (3.30.\beta)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \nu \left[2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^0 \frac{R^2}{r^2} \sin 2\theta \right], \quad (3.30.\gamma)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y^0 - \sigma_x^0) \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy}^0 \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta, \quad (3.30.\delta)$$

$$\tau_{\theta z} = \left(-\tau_{xz}^0 \sin \theta + \tau_{yz}^0 \cos \theta\right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right), \quad (3.30.\epsilon)$$

$$\tau_{rz} = \left(\tau_{xz}^0 \sin \theta + \tau_{yz}^0 \cos \theta\right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right), \quad (3.30.\zeta)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρείται επειδή οι σχέσεις (3.30) περιέχουν r^2 και r^4 , ότι όσο το r αυξάνεται, δηλαδή όσο μεγαλώνει η απόσταση από τη γεώτρηση, οι τάσεις δεν επηρεάζονται από την ακτίνα της γεώτρησης.

3.3 Τάσεις που αναπτύσσονται στα τοιχώματα της γεώτρησης σε ανισότροπο πεδίο τάσεων

Σε ένα γραμμικό ελαστικό υλικό, η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων παρατηρείται στα τοιχώματα της γεώτρησης. Για αυτό το λόγο, η αστοχία της γεώτρησης αναμένεται να ξεκινήσει εκεί. Κατά συνέπεια, για την ανάλυση ευσταθείας, οι τάσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης είναι αυτές, που πρέπει να μελετηθούν και να εφαρμοστούν σε αυτές ένα κατάλληλο κριτήριο αστοχίας [3]. Αυτές οι τάσεις προσδιορίζονται για κεκλιμένες, κατακόρυφες και οριζόντιες γεωτρήσεις στις παρακάτω ενότητες.

3.3.1 Κεκλιμένη γεώτρηση

Για να προσδιοριστούν οι τάσεις στα τοιχώματα της κεκλιμένης γεώτρησης, λαμβάνεται $r = R$ στην εξίσωση (3.30), και προκύπτουν παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_r = P_w, \quad (3.31.\alpha)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta - P_w, \quad (3.31.\beta)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \nu \left[2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta \right], \quad (3.31.\gamma)$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz}^0 \sin \theta + \tau_{yz}^0 \cos \theta), \quad (3.31.δ)$$

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad (3.31.ε)$$

$$\tau_{rz} = 0. \quad (3.31.ζ)$$

3.3.2 Κατακόρυφη γεώτρηση

Για να υπολογιστούν οι τάσεις στα τοιχώματα της κατακόρυφης γεώτρησης, λαμβάνεται $i = 0$ στην εξίσωση (3.29) και για απλοποίηση προσανατολίζονται οι οριζόντιοι άξονες, ώστε η διεύθυνση $\theta=0$ να είναι παράλληλη στην διεύθυνση της σ_H ($\alpha=0$), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Τέλος θέτουμε $r = R$ στην εξίσωση (3.30) και καταλήγουμε στα παρακάτω:

$$\sigma_r = P_w, \quad (3.32.α)$$

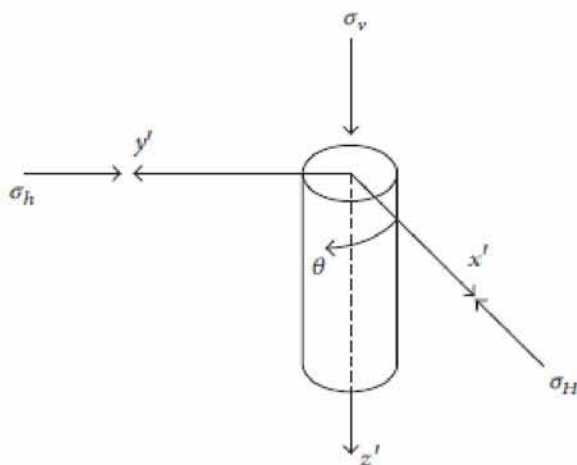
$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w, \quad (3.32.β)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta, \quad (3.32.γ)$$

$$\tau_{\theta z} = 0, \quad (3.32.δ)$$

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad (3.32.ε)$$

$$\tau_{rz} = 0. \quad (3.32.ζ)$$



Σχήμα 3.4: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κατακόρυφη γεώτρηση [5].

3.3.2 Οριζόντια γεώτρηση

Για να προσδιορίσουμε τις τάσεις στα τοιχώματα της οριζόντιας γεώτρησης, αρχικά θέτουμε $i = \pi/2$ στην εξίσωση (3.29) και έχουμε:

$$\sigma_x^0 = \sigma_v \quad (3.33.α)$$

$$\sigma_y^0 = \sigma_H \sin^2 a + \sigma_h \cos^2 a \quad (3.33.β)$$

$$\sigma_z^0 = \sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a \quad (3.33.γ)$$

$$\tau_{xy}^0 = 0 \quad (3.33.δ)$$

$$\tau_{yz}^0 = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2a \quad (3.33.ε)$$

$$\tau_{xz}^0 = 0 \quad (3.33.ζ)$$

Εισάγοντας τις εξισώσεις (3.33) στις εξίσωση (3.31), οι τάσεις στα τοιχώματα της οριζόντιας γεώτρησης τελικά ορίζονται ως εξής:

$$\sigma_r = P_w, \quad (3.34.α)$$

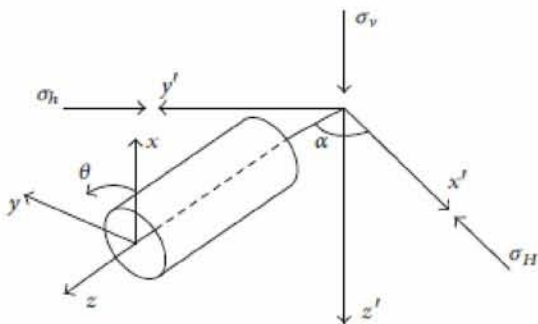
$$\sigma_\theta = (\sigma_v + \sigma_H \sin^2 a + \sigma_h \cos^2 a) - 2(\sigma_v - \sigma_H \sin^2 a - \sigma_h \cos^2 a) \cos 2\theta - P_w, \quad (3.34.β)$$

$$\sigma_z = \sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a - 2\nu(\sigma_v - \sigma_H \sin^2 a - \sigma_h \cos^2 a) \cos 2\theta, \quad (3.34.γ)$$

$$\tau_{\theta z} = (\sigma_h - \sigma_H) \sin 2a \cos \theta, \quad (3.34.δ)$$

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad (3.34.ε)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (3.34.ζ)$$



Σχήμα 3.5: Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων για τη περιγραφή των τάσεων σε κατακόρυφη γεώτρηση [5].

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η γωνία θ μετράται με την αντίθετη φορά των δεικτών του ρολογιού από το x' άξονα.

Στη περίπτωση που ο άξονας της γεώτρησης είναι παράλληλος με την διεύθυνση της σ_H ($\alpha=0$), οι τάσεις στα τοιχώματα της οριζόντιας διεύθυνσης ορίζονται ως εξής:

$$\sigma_r = P_w, \quad (3.35.\alpha)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_v + \sigma_h - 2(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w, \quad (3.35.\beta)$$

$$\sigma_z = \sigma_H - 2\nu(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta, \quad (3.35.\gamma)$$

$$\tau_{\theta z} = 0, \quad (3.35.\delta)$$

$$\tau_{r\theta} = 0, \quad (3.35.\epsilon)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (3.35.\zeta)$$

4. Κριτήρια αστοχίας

Στο τομέα της βραχομηχανικής έχουν αναπτυχθεί πολλά κριτήρια αστοχίας, τόσο για ακέραια πετρώματα όσο και για βραχώμαζες. Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb είναι ένα από τα κριτήρια, που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη πράξη. Το κριτήριο αυτό περιλαμβάνει μόνο τη μέγιστη κύρια τάση σ_1 και τη ελάχιστη κύρια τάση σ_3 , υποθέτοντας ότι η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 δεν έχει επίδραση. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά κριτήρια αστοχίας, όπου χρησιμοποιούν αυτή την υπόθεση. Παρόλα αυτά, διαπιστώθηκε, με μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, ότι στα κρυσταλλικά πετρώματα παίζει μεγάλο ρόλο η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 . Έτσι άρχισαν να αναλύουν και να εφαρμόζουν περισσότερο τρισδιάστατα κριτήρια αστοχίας, που συμπεριλαμβάνουν την σ_3 , σε μεγάλο αριθμό πετρωμάτων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να διαπιστωθεί ότι η σ_2 έχει μεγάλη επιρροή στη κατασκευή υπογείων έργων. Όμως, συνήθως τα τρισδιάστατα κριτήρια αστοχίας αποτελούνται από πολλούς παραμέτρους, οι οποίοι είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια κάθε φορά. Για αυτό, το πιο συνηθισμένο κριτήριο που χρησιμοποιούνταν ήταν το Drucker-Prager, το οποίο έχει μόνο δύο παραμέτρους. Διαπιστώθηκε στη συνέχεια βέβαια, ότι αυτό το κριτήριο υπερεκτιμάει τη ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 . Έτσι αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο κριτήριο αστοχίας, το Mogi-Coulomb, το οποίο περιλαμβάνει γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας στο καθεστώς των τάσεων Mogi και αποτελείται από δύο παραμέτρους, που σχετίζονται με αυτές του Coulomb, την συνοχή και την γωνία τριβής και δεν υπερεκτιμάει την σ_2 , όπως το Drucker-Prager [3]. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται τα κριτήρια Mohr-Coulomb και Mogi-Coulomb, όπου θα εφαρμοστούν στα επόμενα κεφάλαια, σε διάφορα πεδία.

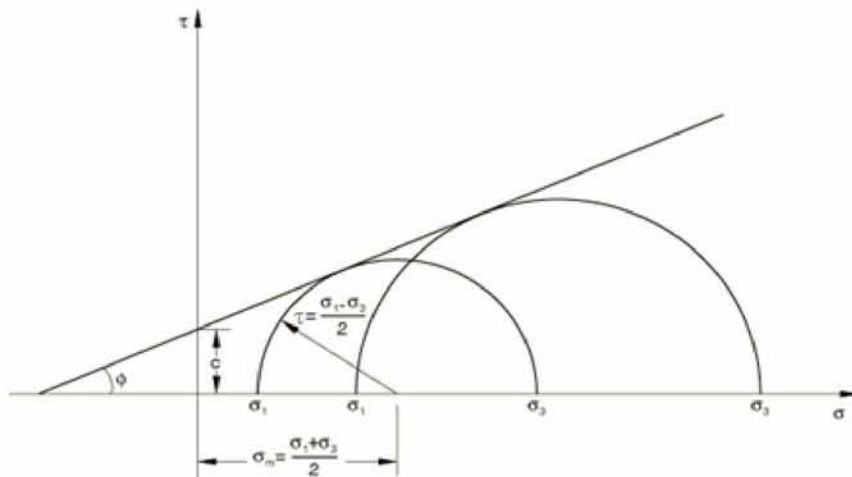
4.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb αποτελεί το πιο διαδεδομένο κριτήριο για την περιγραφή της συμπεριφοράς ψαθυρών υλικών και βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων της εδαφομηχανικής, της βραχομηχανικής ή της μηχανικής του οπλισμένου σκυροδέματος. Ο Coulomb θεώρησε ότι η θραύση επέρχεται λόγω της ολίσθησης κατά μήκος ενός επιπέδου και πρότεινε ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο η συνοχή κατά μήκος του επιπέδου θραύσης όσο και η τριβή λόγω της κάθετης στο επίπεδο δύναμης. Ο γερμανός μηχανικός Karl Culmann ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τη γραφική αναπαράσταση των τάσεων με τη μορφή τασικών κύκλων, όρισε τον πόλο του κύκλου και ανακάλυψε τις ιδιότητές του. Όμως ο γερμανός μηχανικός Christian Otto Mohr ήταν αυτός που χρησιμοποίησε συστηματικά τους κύκλους τάσεων για προβλήματα δύο και τριών διαστάσεων και πρότεινε ένα κριτήριο αστοχίας, βασισμένο στην περιβάλλουσα κύκλων που αντιστοιχούν σε διάφορες περιπτώσεις αστοχίας. Το προτεινόμενο από το Mohr κριτήριο αποτελεί στην ουσία μια γενίκευση της θεωρίας του Coulomb και για αυτό τον λόγο αναφέρεται ως κριτήριο διαρροής Mohr-Coulomb [18].

Σύμφωνα με αυτό η διατμητική αντοχή αυξάνει αυξανόμενης της ορθής τάσης στο επίπεδο θραύσης. Η αστοχία επέρχεται όταν η διατμητική τάση τ και η ορθή τάση σ ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (4.1)$$

όπου c η συνοχή, φ η γωνία τριβής και η τάση σ θεωρείται θετική όταν είναι θλιπτική



Σχήμα 4.1: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Από τη γραφική απεικόνιση του κριτηρίου (Σχήμα 4.1), η σχέση (4.1) μπορεί να επαναδιατυπωθεί συναρτήσει της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης ως:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin(\varphi) = 2c \cos(\varphi) \quad (4.2)$$

Επιπλέον μπορεί να προκύψει μία εναλλακτική μορφή του κριτηρίου Mohr-Coulomb

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (4.3)$$

όπου C_0 , η μονοαξονική θλιπτική αντοχή

$$C_0 = 2c \cos(\varphi) / (1 - \sin(\varphi)) \quad (4.4)$$

και

$$q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4.5)$$

Το κριτήριο αυτό μπορεί ακόμα να εκφραστεί και με τον παρακάτω τρόπο, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη διατμητική τάση τ_{\max} και την μέση ορθή τάση $\sigma_{m,2}$ ως εξής:

$$\tau_{\max} = c \cos(\varphi) + \sin(\varphi) \sigma_{m,2} \quad (4.6)$$

όπου

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ και } \sigma_{m,2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \quad (4.7)$$

4.1 Κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb

Το κριτήριο αυτό λαμβάνεται από τη γενίκευση της θεωρίας του Von Mises και εκφράζεται από την σχέση:

$$\tau_{oct} = f_1(\sigma_1 + \sigma_3), \quad (4.8)$$

όπου η συνάρτηση f_1 είναι μονότονα αύξουσα. Σύμφωνα με το Mogi η οκταεδρική τάση δεν είναι πάντοτε σταθερή, αλλά αυξάνει μονότονα με τη μέση ορθή τάση $\sigma_{m,2}$ ή $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$. Η αστοχία επέρχεται, όταν η ενέργεια παραμορφώσεως φτάσει σε μία κρίσιμη τιμή, η οποία αυξάνεται μονότονα με την ορθή μέση τάση, επί της επιφάνειας ολίσθησης παράλληλα με την κατεύθυνση της σ_2 . Η τ_{oct} σχεδιάζεται συναρτήσει της $\sigma_{m,2}$ πιο αναλυτικά όπως φαίνεται παρακάτω [6]:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2}, \quad (4.9)$$

όπου a και b οι παράμετροι του κριτηρίου που σχετίζονται με αυτούς του Coulomb με τον εξής τρόπο:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos(\varphi) \quad (4.10)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin(\varphi) \quad (4.11)$$

Το κριτήριο αυτό μπορεί να εκφραστεί και με τον εξής τρόπο:

$$\left(I_1^2 - 3I_2\right)^{\frac{1}{2}} = A + B(I_1 - \sigma_2), \quad (4.12)$$

όπου

$$A = 2c \cos(\varphi) \quad (4.13)$$

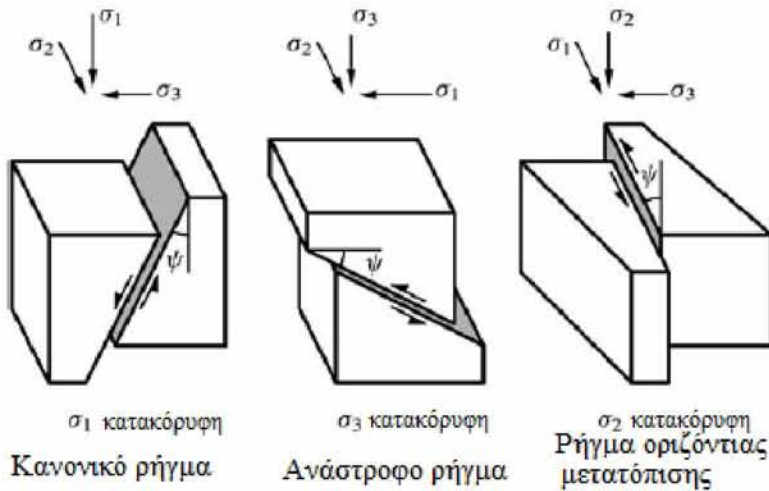
$$B = \sin(\varphi) \quad (4.14)$$

5. Ανάλυση αστοχίας κατακόρυφης γεώτρησης

Η προσδιορισμός της κατάλληλης ποσότητας γεωτρητικής ιλύος έχει σκοπό να αποτρέψει την αστοχία της γεώτρησης έναντι κατάρρευσης και ρωγμάτωσης, εξασφαλίζοντας την ευστάθεια. Η ανάλυση ευστάθειας απαιτεί, κυρίως, τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου: α) τον προσανατολισμό και το μέγεθος των επιτόπου τάσεων, β) την πίεση των πόρων, γ) τους παραμέτρους της αντοχής του βράχου και δ) ένα κριτήριο αστοχίας. Ο προσδιορισμός των επιτόπου τάσεων είναι πιθανώς, η σημαντικότερη παράμετρος εισαγωγής. Ωστόσο, αυτοί είναι συνήθως προσεγγιστικά γνωστοί. Συγκεκριμένα ο προσανατολισμός και το μέγεθος της οριζόντιας τάσης συνήθως δεν μετράται, αλλά γίνονται εκτιμήσεις. Αυτό και μόνο αυξάνει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Ο υπολογισμός της πίεσης πόρων είναι ζωτικής σημασίας, γιατί με αυτό το τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν οι ενεργές τάσεις, με τις οποίες θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευστάθειας. Τέλος, όσον αφορά το κριτήριο αστοχίας και τους παραμέτρους αντοχής, η διαθεσιμότητα δειγμάτων του εκάστοτε σχηματισμού είναι πολύ σημαντική για να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα, αλλά συνήθως είναι περιορισμένη [3]. Είναι κρίσιμο, εντούτοις, να διαπιστωθούν οι παράμετροι αντοχής του σχηματισμού σε ένα εύρος τάσεων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή στον προσδιορισμό των επιτόπου τάσεων. Επιπλέον θα παρουσιαστούν οι απαραίτητες εξισώσεις για να προσδιοριστούν οι κρίσιμες τιμές εσωτερικής πίεσης, έτσι ώστε να εξουδετερωθεί η ανακατανομή των τάσεων που επιφέρει η γεώτρηση. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τα κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb και Mogi-Coulomb σε ένα γραμμικό ελαστικό μοντέλο, το οποίο προσδιορίζει τις τάσεις γύρω από τη γεώτρηση, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.

5.1 Επιτόπου τάσεις

Οι επιτόπου κύριες τάσεις είναι συνήθως ανισότροπες και θεωρούνται κάθετες και οριζόντιες. Για χαρακτηριστικά βάθη των δεξαμενών πετρελαίου, έχει διαπιστωθεί ότι η αναλογία της ελάχιστης οριζόντιας τάσης με την κατακόρυφη οριζόντιας τάσης (σ_h/σ_v) κυμαίνεται από 0.3 μέχρι 1.5 και η αναλογία της μέγιστης οριζόντιας τάσης με την ελάχιστη (σ_H/σ_h) από 1 μέχρι 2 περίπου. Ο Anderson (1951) πρότεινε τη περιγραφή των επιτόπου τάσεων βασιζόμενος στη διαφορά μεγέθους μεταξύ της κατακόρυφης τάσης με τις οριζόντιες. Πιο συγκεκριμένα πρότεινε ότι η κανονική ρηγμάτωση (normal faulting) σχετίζεται με το πεδίο τάσεων $\sigma_v \geq \sigma_H \geq \sigma_h$, η ανάστροφη ρηγμάτωση (reverse/thrust faulting) σχετίζεται με το $\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_v$ και η ρηγμάτωση οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip faulting) με το $\sigma_H \geq \sigma_v \geq \sigma_h$. Άρα, όταν η σ_1 είναι κατακόρυφη θα προκύπτουν κανονικά ρήγματα, όταν η σ_3 είναι κατακόρυφη θα προκύπτουν ανάστροφα ρήγματα και τέλος όταν η σ_2 είναι κατακόρυφη θα δημιουργούνται ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [1].



Σχήμα 5.1: Επιτόπου τάσεις: (α) Κανονικό ρήγμα (normal fault), (β) Ανάστροφο ρήγμα (thrust fault), (γ) Ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip fault) [1].

5.1.1 Κατακόρυφη επιτόπου τάση

Η εκτίμηση των επιτόπου τάσεων είναι σημαντική, καθώς δεν υπάρχει τρόπος να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι τιμές των τάσεων στο υπέδαφος, ειδικά όταν πρόκειται για πολύ μεγάλα βάθη. Η κύρια κατακόρυφη επιτόπου τάση, σ_v , είναι συνήθως ίση με το βάρος των υπερκειμένων γεωλογικών σχηματισμών, δηλαδή [10]

$$\sigma_v = \rho gh \quad (5.1)$$

όπου ρ είναι ο μέσος όρος της πυκνότητας (kg/m^3) των υπερκειμένων, g (m/s^2) ή επιτάχυνση της βαρύτητας και h (m) το βάθος. Αν η πυκνότητα δεν είναι σταθερή τότε υπολογίζεται με χρήση ολοκληρώματος για το κάθε στρώμα.

5.1.2 Οριζόντιες επιτόπου τάσεις

Οι επιτόπου τάσεις σχετίζονται μεταξύ τους. Όταν η κατακόρυφη τάση συμπιέζει κατακόρυφα τον εκάστοτε γεωλογικό σχηματισμό, συμπιέζει και κατά την οριζόντια διεύθυνση, με την επίδραση των οριζόντιων τάσεων. Οι οριζόντιες τάσεις, λοιπόν, εξαρτώνται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από το λόγο του Poisson (ν). Για παράδειγμα, εάν ο ένας βράχος έχει μεγαλύτερο μέτρο Poisson, θα έχει μεγαλύτερη οριζόντια τάση, από ότι θα είχε αν είχε μικρότερο μέτρο Poisson. Ο Avasthi et al. πρότεινε μία εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της οριζόντιας επιτόπου τάσης [2]

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \beta P_0) + \beta P_0, \quad (5.2)$$

όπου β είναι η σταθερά του Biot και P_0 η πίεση των πόρων.

Όμως επειδή δεν μπορεί να προσδιοριστεί η δεύτερη οριζόντια τάση σ_H , πρέπει να γίνει κάποια υπόθεση.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές, όπου μπορεί να εκτιμηθεί ο προσανατολισμός και το μέγεθος των δύο οριζόντιων τάσεων .

Η πιο αποτελεσματική είναι η υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracture test). Βέβαια δεν είναι πάντα εύκολο να πραγματοποιηθούν αυτά τα tests. Όταν πρόκειται να μελετηθούν βράχοι χαμηλής αντοχής αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιούνται για να εξάγουν ένα αποτέλεσμα σχετικά με την διαφορά των οριζόντιων τάσεων, κάνοντας χρήση και της εξίσωσης (5.2).

Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι άμεσες και κάποιες έμμεσες τεχνικές για την εκτίμηση των οριζόντιων επιτόπου τάσεων [2]:

i. Άμεσες τεχνικές υπολογισμού οριζόντιων επιτόπου τάσεων:

- Υδραυλική ρωγμάτωση (Hydraulic fracture test)
- Μέθοδος του επιπέδου γρύλλου (The flatjack test)
- Δοκιμή μέτρησης πυρηνοληψίας (The overcoring gauge test USBM & CSIRO)

ii. Έμμεσες τεχνικές υπολογισμού οριζόντιων επιτόπου τάσεων [2]:

- Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)
- Αστοχίες οπής γεώτρησης (Borehole breakouts)
- Επιλύσεις επιπέδου ρήγματος (Fault plane solutions)
- Ανάλυση διαφορικών ανηγμένων παραμορφώσεων (Differential strain analysis)
- Ανελαστική παραμορφωσιακή χαλάρωση (Inelastic strain relaxation)
- Πυρηνοληψία (Core discing)
- Παρατήρηση συστημάτων ασυνεχειών (Observation of discontinuity states)

5.2 Ανάλυση τάσεων κατακόρυφης γεώτρησης

Οι τάσεις στα τοιχώματα της κατακόρυφης γεώτρησης, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (3.32), ισούνται με:

$$\sigma_r = P_w,$$

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

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

$$\tau_{\theta z} = 0,$$

$$\tau_{r\theta} = 0,$$

$$\tau_{rz} = 0.$$

Επειδή οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές, αυτό σημαίνει ότι οι ορθές τάσεις που περιγράφονται παραπάνω είναι οι κύριες τάσεις. Παρατηρείται ότι η εφαπτομενική τάση σ_θ και η ακτινική τάση σ_r είναι συνάρτηση της γωνίας θ και της εσωτερικής πίεσης. Αυτή η γωνία θ είναι ο προσανατολισμός των τάσεων γύρω από τη γεώτρηση. Συνεπώς, η σ_θ και η σ_z φτάνουν στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή όταν $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ και $\theta = 0$ αντίστοιχα. Αυτά τα κρίσιμα σημεία είναι ανεξάρτητα από τις επιτόπου τάσεις. Άρα είναι, γνωστό εκ των προτέρων, ότι η αστοχία θα εμφανιστεί σε αυτά τα κρίσιμα σημεία της γεώτρησης.

Οι τάσεις σ_θ και σ_r είναι συνάρτηση της εσωτερικής πίεσης, P_w . Όπως έχει προαναφερθεί, στον τοίχο της γεώτρησης υπάρχουν κυρίως δύο προβλήματα αστάθειας κατά τη διάρκεια της γεώτρησης:

- κατάρρευση της γεώτρησης, λόγω θλιπτικής αστοχίας (borehole collapse)
- ρωγμάτωση της γεώτρησης, λόγω εφελκυστικής αστοχίας (borehole fracture)

Εξαιτίας αυτής της προκύπτουσας κατάστασης, δηλαδή ότι η σ_θ και η σ_r επηρεάζονται μόνο από την μεταβολή της P_w , υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις που μπορούν να διαχωριστούν:

- $\sigma_\theta \geq \sigma_r$, όπου σχετίζεται με την κατάρρευση της γεώτρησης. Όταν η P_w μειώνεται (σ_r), η σ_θ αυξάνεται προς την θλιπτική αντοχή. Για αυτό το λόγο, το κάτω όριο της εσωτερικής πίεσης της γεώτρησης, P_{wb} , σχετίζεται με την κατάρρευση της γεώτρησης, όπου η $\sigma_\theta \geq \sigma_r$.
- $\sigma_\theta \leq \sigma_r$, όπου σχετίζεται με τη ρωγμάτωση της γεώτρησης. Όταν η P_w αυξάνεται (σ_r), η σ_θ μειώνεται προς την εφελκυστική αντοχή. Για αυτό το λόγο, το άνω όριο της εσωτερικής πίεσης της γεώτρησης, P_{wf} , σχετίζεται με τη ρωγμάτωση της γεώτρησης, όπου η $\sigma_\theta \leq \sigma_r$.

5.2.1 Αστοχία λόγω θλίψης

Η θλιπτική αντοχή του βράχου τείνει να ξεπεραστεί στο σημείο, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη σ_θ ή σ_z , δηλαδή $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$. Οι κύριες τάσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης θα είναι ίσες με:

$$\sigma_r = P_w \quad (5.3.α)$$

$$\sigma_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad (5.3.β)$$

$$\sigma_z = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h). \quad (5.3.γ)$$

Τώρα θα πρέπει να ερευνηθεί ποια από τις τρεις περιπτώσεις υφίσταται, όσον αφορά τις τάσεις, δηλαδή: (1) $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$, (2) $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$, (3) $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$, για να μπορούν να εφαρμοστούν αυτές οι κύριες τάσεις σε ένα κριτήριο αστοχίας.

Η εξίσωση (5.3) μπορεί να γραφεί με μία άλλη πιο απλή μορφή για να βοηθήσει στην ανάλυση:

$$\sigma_r = P_w, \quad (5.4.α)$$

$$\sigma_\theta = A - P_w, \quad (5.4.β)$$

$$\sigma_z = B. \quad (5.4.\gamma)$$

όπου A και B σταθερές και ορίζονται ως

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad (5.5.\alpha)$$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (5.5.\beta)$$

5.2.2 Αστοχία λόγω εφελκυσμού

Η εφελκυστική αντοχή του βράχου τείνει να ξεπεραστεί στο σημείο, όπου παρουσιάζεται η ελάχιστη σ_θ ή σ_z , δηλαδή $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$. Οι κύριες τάσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης θα είναι ίσες με:

$$\sigma_r = P_w, \quad (5.6.\alpha)$$

$$\sigma_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad (5.6.\beta)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h). \quad (5.6.\gamma)$$

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση θα πρέπει να διαπιστωθεί ποια από τις τρεις ανισώσεις ισχύει, δηλαδή: (1) $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$, (2) $\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$, (3) $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$, για να εφαρμοστούν οι αντίστοιχες κύριες τάσεις σε ένα επιλεγμένο κριτήριο αστοχίας.

Αρχικά, γράφεται η εξίσωση (5.6) με μία άλλη πιο απλή μορφή για να μας βοηθήσει στην ανάλυση:

$$\sigma_r = P_w, \quad (5.7.\alpha)$$

$$\sigma_\theta = D - P_w, \quad (5.7.\beta)$$

$$\sigma_z = E. \quad (5.7.\gamma)$$

όπου D και E σταθερές και ορίζονται ως

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad (5.8.\alpha)$$

$$E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h). \quad (5.8.\beta)$$

5.3 Εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας αναφέρεται στο προσδιορισμό των τάσεων, όπου μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση της γεώτρησης ή αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης. Σε αυτή την ενότητα θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο αστοχίας της γεώτρησης, κάνοντας χρήση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για αυτά τα δύο είδη αστοχιών.

Εάν ληφθεί υπόψη η επίδραση των ενεργών τάσεων, το κριτήριο Mohr-Coulomb, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.4), γίνεται

$$(\sigma_1 - P_0) = C_0 + q(\sigma_3 - P_0) \quad (5.9)$$

ή

$$\sigma_1 = C + q\sigma_3 \quad (5.10)$$

όπου C σταθερά που δίνεται από τον τύπο

$$C = C_0 - P_0(q-1). \quad (5.11)$$

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση της κατάρρευσης της γεώτρησης. Επειδή λαμβάνεται η περίπτωση 1 $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$, αυτό σημαίνει ότι ισχύει: $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$.

Εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας με την εξίσωση (5.10) και χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.5) προκύπτει [3]:

$$B = C + qP_{wb1} \quad (5.12)$$

όπου P_{wb} η ελάχιστη εσωτερική πίεση της γεώτρησης και

$$P_{wb1} = (B - C) / q \quad (5.13)$$

Εάν η πίεση του πηγαδιού (της γεώτρησης) πέσει κάτω από αυτή τη τιμή της P_{wb1} και ισχύει η περίπτωση (1), τότε θα προκληθεί κατάρρευση της γεώτρησης. Ομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία και για τις άλλες δύο περιπτώσεις (2) και (3) και τα αποτελέσματα αυτών, παρουσιάζονται όλα μαζί στον ακόλουθο πίνακα 5.1 [3].

Περίπτωση $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Εάν $P_w \leq P_{wb}$ θα προκληθεί κατάρρευση της γεώτρησης, όπου P_{wb} δίνεται
1 $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = (B - C) / q$
2 $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = (A - C) / (1 + q)$
3 $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb2} = A - C - qB$

Πίνακας 5.1: Εφαρμογή του Mohr-Coulomb για την αποφυγή κατάρρευσης κατακόρυφων γεωτρήσεων.

Δεδομένου ότι η πίεση P_w μειώνεται, οι κύριες τάσεις θα αλλάζουν. Έτσι θα παρατηρείται εναλλαγή από τη μία κατάσταση (1, 2, 3) στην άλλη. Για αυτό το λόγο οι πιέσεις P_{wb1} , P_{wb2} , P_{wb3} , όπως δίνονται στο παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον επαναπροσδιορισμό των κύριων τάσεων $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$, εφαρμόζοντας την εξίσωση (5.4), όπου $P_w = P_{wb}$. Για κάθε περίπτωση, οι κύριες τάσεις ενσωματώνονται στην εξίσωση (5.10) του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Το ελάχιστο όριο της πίεσης είναι αυτό, όπου προσδιορίζεται όταν οι κύριες τάσεις ικανοποιούν το κριτήριο αστοχίας.

Σε πραγματικές συνθήκες, γενικά, η κατάρρευση γεώτρησης σχετίζεται με τις περιπτώσεις (1) και (2), όπου η ακτινική τάση σ_r είναι η μικρότερη κύρια τάση. Έτσι μπορεί να προσδιοριστεί η ελάχιστη πίεση χρησιμοποιώντας μόνο μία εξίσωση, που θα σχετίζεται με την περίπτωση (1),(2).

Το πεδίο των τάσεων μπορεί να εκφραστεί ως $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_r$, όπου

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2}, \quad (5.14.a)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2}. \quad (5.14.β)$$

Εισάγοντας τις σχέσεις (5.14) στην (5.10), η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης για τις δύο αυτές περιπτώσεις είναι [3].

$$P_{wb} = \frac{S + \sqrt{R}}{2(q + q^2)} \quad (5.15)$$

όπου S και R σταθερές που δίνονται από τους παρακάτω τύπους

$$S = Aq - C(1 + 2q) + B(1 + q), \quad (5.16.a)$$

$$R = B^2(1 + 2q + q^2) - 2AB(q + q^2) - 2BC(1 + q) + (Aq + C)^2 \quad (5.16.β)$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η μελέτη ρωγμάτωσης (θραύσης) της γεώτρησης, όπου χρειάζεται να υπολογιστεί το ανώτατο όριο της εσωτερικής πίεσης. Υποθέτοντας ότι ισχύει η περίπτωση (1) $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$, αυτό σημαίνει ότι $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$. Εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας με την εξίσωση (5.11) και χρησιμοποιώντας της σχέση (5.7) προκύπτει

$$P_{wf1} = C + qE \quad (5.17)$$

όπου P_{wf} η μέγιστη εσωτερική πίεση της γεώτρησης.

Εάν η πίεση του πηγαδιού ξεπεράσει αυτή τη τιμή της P_{wf1} και επικρατεί η κατάσταση (1) των τάσεων, τότε θα προκληθεί θραύση (λόγω ρωγμάτωσης) στην γεώτρηση (borehole fracture). Παρομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία και για τις άλλες δύο καταστάσεις (2) και (3) των τάσεων και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται όλα μαζί στον παρακάτω πίνακα 5.2 [3].

Περίπτωση $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Εάν $P_w \geq P_{wf}$ θα προκληθεί ρωγμάτωση στη γεώτρηση, όπου P_{wf} δίνεται
1 $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{wf1} = C + qE$
2 $\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{wf2} = (C + qD) / (1 + q)$
3 $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{wf3} = (C - E) / q + D$

Πίνακας 5.2: Εφαρμογή του Mohr-Coulomb για την αποφυγή αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης σε κατακόρυφες γεωτρήσεις.

Είναι γνωστό, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την εφελκυστική αντοχή. Έτσι με σκοπό να μελετηθεί η αστοχία λόγω εφελκυσμού, μπορεί να

χρησιμοποιηθεί το κριτήριο Mohr-Coulomb με χρήση ορίου εφελκυσμού (tension cut-off). Το όριο εφελκυσμού δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$\sigma_3 - P_0 = T_0 \quad (5.18)$$

όπου T_0 η μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό (οι τάσεις εφελκυσμού θεωρούνται αρνητικές).

Στις κατακόρυφες γεωτρήσεις έχουμε υποθέσει ότι η εφαπτομενική κύρια τάση σ_θ είναι η μόνη εφελκυστική τάση που δρα στα τοιχώματα της γεώτρησης. Έτσι εισάγοντας την σχέση (5.8) στην (5.18) προκύπτει ότι

$$P_{wcutoff} = D - P_0 - T_0 \quad (5.19)$$

Αυτή η τιμή της πίεσης πρέπει να συγκριθεί με την τιμή της P_{wf} και η μικρότερη από αυτές τις δύο, θα δίνει τη μέγιστη πίεση, που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης.

5.4 Εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Mogi-Coulomb

Η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή του βράχου, μπορεί να ενσωματωθεί στην ανάλυση, χρησιμοποιώντας το κριτήριο Mogi-Coulomb. Εάν ληφθεί υπόψη η επίδραση των ενεργών τάσεων, τότε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.12), το κριτήριο Mogi-Coulomb γίνεται:

$$\left(I_1^2 - 3I_2\right)^{\frac{1}{2}} = a' + b' (I_1 - \sigma_2 - 2P_0) \quad (5.20)$$

$$\text{όπου } a' = 2c \cos(\varphi) \text{ και } b' = \sin(\varphi) \quad (5.21)$$

Όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις, όσον αφορά τις τάσεις, για να εφαρμοστούν αυτές οι κύριες τάσεις σε ένα κριτήριο αστοχίας. Αφού οι δύο πρώτες αναλλοίωτες των τάσεων, I_1 και I_2 , έχουν την ίδια τιμή σε όλες τις περιπτώσεις, μόνο η ενδιάμεση κύρια τάση θα αλλάζει από τη μία κατάσταση στην άλλη. Έτσι υπάρχουν τρία διαφορετικά σενάρια, όπου η σ_2 θα ισούται με σ_θ ή σ_z ή σ_r . Σε κάθε σενάριο θα προκύπτουν δύο ρίζες, όπου η μία θα σχετίζεται με την κατάρρευση και η άλλη με τη ρωγμάτωση (θραύση). Αρχικά εξετάζεται η κατάσταση, που σχετίζεται με την κατάρρευση της γεώτρησης.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.5) και τις αναλλοίωτες των τάσεων προκύπτει

$$I_1 = A + B, \quad (5.22.α)$$

$$I_2 = AB + AP_w - P_w^2. \quad (5.22.β)$$

Εξετάζεται, αρχικά, το πρώτο σενάριο, όπου $\sigma_2 = \sigma_\theta = A - P_w$ και $P_w = P_{wb1}$, και εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας εισάγοντας την σχέση (5.22) στην (5.20), όπου προκύπτει

$$\left[(A+B)^2 - 3(AB + AP_{wb1} - P_{wb1}^2) \right]^{\frac{1}{2}} - bP_{wb1} = K \quad (5.23)$$

$$\text{όπου } K = a' + b'(B - 2P_0) \quad (5.24)$$

Από τη λύση της εξίσωσης (5.24) ως προς P_{wb1} , προκύπτουν δύο ρίζες. Επειδή μελετάται η κατάρρευση της γεώτρησης, η μικρότερη ρίζα θα είναι η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης, η οποία είναι

$$P_{wb1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[3A + 2b'K - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right] \quad (5.25)$$

όπου

$$H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12) \quad (5.26)$$

Στη περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, όπου $\sigma_2 = \sigma_z = B$ και $P_w = P_{wb2}$, εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας εισάγοντας την σχέση (5.22) στην (5.20) και προκύπτει

$$(A+B)^2 - 3(AB + AP_{wb2} - P_{wb2}^2) = (a' + b'(A - 2P_0))^2 \quad (5.27)$$

Λύνοντας την εξίσωση (5.27) ως προς P_{wb2} , προκύπτουν δύο ρίζες. Επειδή εξετάζεται η κατάρρευση, η μικρότερη ρίζα θα είναι η ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης, η οποία είναι

$$P_{wb2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(A - 2B)^2} \quad (5.28)$$

Τέλος, εξετάζεται και το τρίτο σενάριο, όπου $\sigma_2 = \sigma_r = P_w = P_{wb3}$. Με εισαγωγή της εξίσωσης (5.20) στην (5.22) προκύπτει

$$\left[(A+B)^2 - 3(AB + AP_{wb3} - P_{wb3}^2) \right]^{\frac{1}{2}} + b'P_{wb3} = G \quad (5.29)$$

όπου

$$G = K + b'A \quad (5.30)$$

Η λύση της εξίσωσης (5.29) ως προς P_{wb3} , δίνει δύο ρίζες. Ομοίως η ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης είναι

$$P_{wb3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[3A - 2b'G - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right] \quad (5.31)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα παρακάτω για όλες τις περιπτώσεις [3].

Περίπτωση $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Εάν $P_w \leq P_{wb}$ θα προκληθεί κατάρρευση της γεώτρησης, όπου P_{wb} δίνεται
1 $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[3A + 2b'K - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$
2 $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12 \left[a' + b'(A - 2P_0) \right]^2 - 3(A - 2B)^2}$
3 $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[3A - 2b'G - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right]$
$A = 3\sigma_H - \sigma_h$ $B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$ $H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12)$ $K = a' + b'(B - 2P_0)$ $G = K + b'A$	

Πίνακας 5.3: Εφαρμογή του Mogi-Coulomb για την αποφυγή κατάρρευσης κατακόρυφων γεωτρήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης σχετίζεται μόνο με τις 2 πρώτες περιπτώσεις.

Όσον αφορά τώρα τη μέγιστη πίεση που χρειάζεται, για την αποφυγή αστάθειας, ακολουθείται η ίδια διαδικασία, όπως περιγράφεται και παραπάνω. Αρχικά γίνεται αντικατάσταση των A και B με τα D και E για την μετατροπή των κυρίων τάσεων και υπολογίζονται οι μεγαλύτερες ρίζες στα τρία διαφορετικά σενάρια, όπως και παραπάνω [3].

Περίπτωση $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Εάν $P_w \geq P_{wf}$ θα προκληθεί υδραυλική ρωγμάτωση στη γεώτρηση, όπου P_{wf} δίνεται
1 $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{wf1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3D+2b'N) + \sqrt{J+12(N^2+b'DN)} \right]$
2 $\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{wf2} = \frac{1}{2}D + \frac{1}{6} \sqrt{12[a'+b'(D-2P_0)]^2 - 3(D2E)^2}$
3 $\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{wf3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3D-2b'M) + \sqrt{J+12(M^2-b'DM)} \right]$
$D = 3\sigma_h - \sigma_H$ $E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - s_h)$ $J = D^2(4b'^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b'^2 - 12)$ $N = a' + b'(E - 2P_0)$ $M = N + b'D$	

Πίνακας 5.4: Εφαρμογή του Mogi-Coulomb για την αποφυγή αστοχίας λόγω ρωγμάτωσης σε κατακόρυφες γεωτρήσεις.

Επιπλέον η μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό που καθορίζεται από το κριτήριο Mogi-Coulomb είναι ίδια όπως ορίστηκε προηγουμένως από το κριτήριο Mohr-Coulomb. Έτσι και εδώ με τον ίδιο τρόπο εισάγεται στην ανάλυση το όριο εφελκυσμού. Έχει παρατηρηθεί ότι με την εφαρμογή της ανάλυσης αυτής, η μέγιστη εσωτερική πίεση υπολογίζεται και από τα δύο κριτήρια περίπου 40% μεγαλύτερη από τη σ_h , το οποίο είναι μακριά από αυτό που συμβαίνει συνήθως στη πράξη. Όταν η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη επιτόπου τάση, υπάρχει κίνδυνος διακοπής ομαλής κυκλοφορίας της γεωτρητικής ιλύος. Για αυτό το λόγο η μέγιστη εσωτερική πίεση τίθεται ίση με τη ελάχιστη επιτόπου τάση [3].

6. Ανάλυση αστοχίας μη κατακόρυφης γεώτρησης

Σε θέσεις εξόρυξης πετρελαίου, είναι αναγκαία πολλές φορές η διάνοιξη μη κατακόρυφων γεωτρήσεων, με σκοπό να διευρυνθεί η ευρύτερη περιοχή εξόρυξης από μία πλατφόρμα παραγωγής, γεγονός που θα οδηγήσει πιθανόν σε μείωση των πλατφόρμων, που απαιτούνται για τη παραγωγή του πετρελαίου και κατά συνέπεια σε μείωση του κόστους [1]. Η ευστάθεια της γεώτρησης, όπως έχει αναφερθεί σχετίζεται με το προσδιορισμό κατάλληλης πίεσης γεωτρητικής ιλύος. Από το προηγούμενο κεφάλαιο έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι το ανώτατο όριο της εσωτερικής πίεσης, πρέπει να εξισωθεί με την ελάχιστη επιτόπου τάση. Με βάση αυτή την υπόθεση, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης λάσπης, που απαιτείται για την ευστάθεια οριζόντιων και κεκλιμένων γεωτρήσεων, έναντι κατάρρευσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας, σε ένα γραμμικό ελαστικό μοντέλο μηχανικής συμπεριφοράς, το οποίο προσδιορίζει τις τάσεις περιμετρικά της γεώτρησης, με αντίστοιχο τρόπο όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

6.1 Ανάλυση τάσεων μη κατακόρυφης γεώτρησης

Κατά τη διαδικασία της γεώτρησης οι επιτόπου τάσεις τροποποιούνται και αναπτύσσεται συγκέντρωση των τάσεων γύρω από τη γεώτρηση, η οποία συνδέεται με την πύκνωση των ισοτασικών καμπυλών, λόγω της ατέλειας δομής της περιβάλλουσας βραχώμαζας που προκλήθηκε κατά την δημιουργία της οπής της γεώτρησης. Ο καθορισμός των τάσεων γύρω από μία οριζόντια γεώτρηση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τον προσανατολισμό των επιτόπου τάσεων, την πίεση των πόρων και τη συμπεριφορά του βράχου. Για ένα βράχο, που παρουσιάζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, η συγκέντρωση των τάσεων παρουσιάζει μέγιστη τιμή στα τοιχώματα της γεώτρησης. Για αυτό το λόγο, η αστοχία της γεώτρησης αναμένεται να ξεκινήσει εκεί. Το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) είναι το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων για την ανάλυση των τάσεων, όπως παρουσιάζεται και στο κεφάλαιο 3.

6.1.1 Οριζόντια γεώτρηση

Οι τάσεις στα τοιχώματα της οριζόντιας γεώτρησης, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.34), είναι ίσες με:

$$\sigma_r = P_w,$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_v + \sigma_H \sin^2 a + \sigma_h \cos^2 a) - 2(\sigma_v - \sigma_H \sin^2 a - \sigma_h \cos^2 a) \cos 2\theta - P_w,$$

$$\sigma_z = \sigma_H \cos^2 a + \sigma_h \sin^2 a - 2\nu(\sigma_v - \sigma_H \sin^2 a - \sigma_h \cos^2 a) \cos 2\theta,$$

$$\tau_{\theta z} = (\sigma_h - \sigma_H) \sin 2a \cos \theta,$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0.$$

Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση είναι συνάρτηση της γωνίας θ . Η αστοχία θα επέλθει, όταν οι τάσεις αυτές ή οι κύριες τάσεις στο επίπεδο $\theta - z$ φτάσουν τη μέγιστη τιμή. Παρατηρώντας την εξίσωση (6.1) συμπεραίνεται ότι και η ακτινική και η εφαπτομενική τάση γίνονται μέγιστες, όταν $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ ή $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$, ανάλογα κυρίως την τιμή των επιτόπου τάσεων. Για $\theta = 0$ και

$\theta = \frac{\pi}{2}$ η εφελκυστική τάση είναι ίση με:

$$\sigma_0 = 3\sigma_H \sin^2 a + 3\sigma_h \cos^2 a - \sigma_v - P_w \quad (6.1.\alpha)$$

$$\sigma_{90} = 3\sigma_v - \sigma_H \sin^2 a - \sigma_h \cos^2 a - P_w \quad (6.1.\beta)$$

Για να φτάσει τη μέγιστη τιμή η εφαπτομενική τάση, στη θέση $\theta = 0$, πρέπει

$$\sigma_0 - \sigma_{90} \geq 0 \quad (6.2)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (6.2) στην (6.1) προκύπτει

$$\sigma_v \leq \sigma_H \sin^2 a + \sigma_h \cos^2 a \quad (6.3)$$

Από την εξίσωση (6.3), λαμβάνοντας υπόψη ότι η αναλογία της μέγιστης οριζόντιας τάσης με την ελάχιστη (σ_H/σ_h) είναι από 1 μέχρι 2 [3], και το a κυμαίνεται από 0 μέχρι 90 μοίρες, παρατηρείται ότι για να φτάσει τη μέγιστη τιμή η εφαπτομενική τάση στη θέση $\theta = 0$ πρέπει $\sigma_v \leq \sigma_H$. Άρα η κρίσιμη θέση $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$ σχετίζεται με το καθεστώς των επιτόπου τάσεων για ανάστροφο ρήγμα (reverse fault) και για ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip fault).

Από την άλλη πλευρά, για να φτάσει τη μέγιστη τιμή η εφαπτομενική τάση, στη θέση $\theta = \frac{\pi}{2}$,

$$\text{πρέπει } \sigma_{\theta_0} - \sigma_0 \geq 0 \quad (6.4)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (6.4) στην (6.1) προκύπτει

$$\sigma_v \geq \sigma_H + (\sigma_h - \sigma_H) \cos^2 a \quad (6.5)$$

Από την σχέση (6.5), λαμβάνοντας υπόψη ότι η αναλογία της μέγιστης οριζόντιας τάσης με την ελάχιστη (σ_H/σ_h) είναι από 1 μέχρι 2 και το a κυμαίνεται από 0 μέχρι 90 μοίρες, παρατηρείται ότι για να φτάσει τη μέγιστη τιμή η εφαπτομενική τάση στη θέση $\theta = \frac{\pi}{2}$ πρέπει $\sigma_v \geq \sigma_h$. Άρα η κρίσιμη θέση $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ σχετίζεται με το καθεστώς των επιτόπου τάσεων για κανονικό ρήγμα (normal fault) και για ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip fault).

Άρα λοιπόν εάν οι επιτόπου τάσεις σχετίζονται με την εντατική κατάσταση κανονικού ρήγματος, η κρίσιμη θέση είναι $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$, ενώ εάν σχετίζονται με την εντατική κατάσταση ανάστροφου ρήγματος, η κρίσιμη θέση είναι $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$. Τέλος, αν σχετίζονται με την εντατική κατάσταση ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης, η κρίσιμη θέση θα είναι $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ ή $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$.

6.1.2 Κεκλιμένη γεώτρηση

Οι τάσεις στα τοιχώματα μιας κεκλιμένης γεώτρησης, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.31), είναι ίσες με:

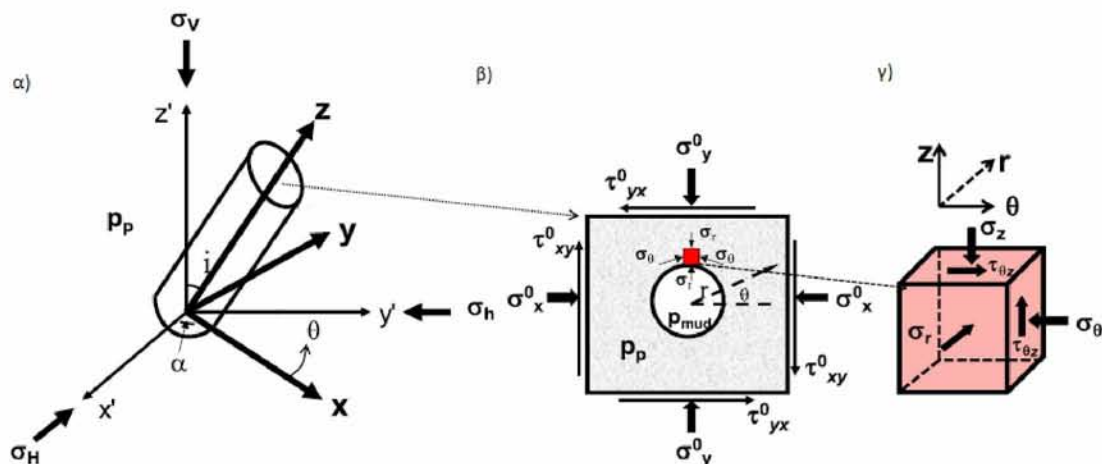
$$\sigma_r = P_w,$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta - P_w,$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \nu \left[2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0)\cos 2\theta + 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta \right],$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz}^0 \sin \theta + \tau_{yz}^0 \cos \theta),$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0.$$



Σχήμα 6.1: α) Αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων στο νέο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z). β) Τάσεις στο νέο σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) στο επίπεδο x-y. γ) Στοιχειώδης κύβος, στον οποίο περιγράφεται το πεδίο των τάσεων, στα τοιχώματα της γεώτρησης, στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) [9].

Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση είναι συνάρτηση της γωνίας θ. Η αστοχία θα επέλθει, όταν οι κύριες τάσεις στο επίπεδο θ - z φτάσουν τη μέγιστη τιμή. Όπως στην ανάλυση των τάσεων των κατακόρυφων και οριζώντιων γεωτρήσεων, έτσι και εδώ πρέπει να προσδιοριστεί η θέση της

μέγιστης συγκέντρωσης τάσεων, πριν εφαρμοστεί ένα κριτήριο αστοχίας. Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση θα φτάσουν τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή τους στην ίδια σημείο θ. Εξετάζοντας τη πρώτη παράγωγο των $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ οι θέσεις των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων προσδιορίζονται με τον παρακάτω τρόπο [2]:

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctan \left(2 \frac{\sigma_z^0 \tau_{xy}^0 - \tau_{xz}^0 \tau_{yz}^0}{(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \sigma_z^0 - \tau_{yz}^{0\ 2} - \tau_{xz}^{0\ 2}} \right), \quad \theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} \quad (6.6)$$

Όμως οι διατμητικές τάσεις είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους μικρότερες από τις ορθές τάσεις (την αξονική και την εφαπτομενική). Έτσι η επίδραση α) του τετραγώνου των διατμητικών τάσεων και β) του μεταξύ τους γινομένου, στον προσανατολισμό των μέγιστων τάσεων, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες και η εξίσωση (6.6) να πάρει τη παρακάτω μορφή

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\tau_{xy}^0}{\sigma_x^0 - \sigma_y^0} \right), \quad \theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} \quad (6.7)$$

Αυτές οι δύο οι γωνίες, μετά τον υπολογισμό τους, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εφαπτομενικής και της ακτινικής τάσης, με σκοπό να προσδιοριστεί ποια από τις δύο γωνίες σχετίζεται με τη μέγιστη συγκέντρωση τάσεων.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο προσδιορισμός της κρίσιμης θέσης θ , όταν οι οριζόντιες επιτόπου τάσεις είναι ισότροπες. Τότε $\tau_{xy}^0 = 0$, όπου συνεπάγεται ότι $\theta_{\max} = 0$ ή $\theta_{\max} = \frac{\pi}{2}$. Σε αυτά τα σημεία η εφαπτομενική τάση ισούται με

$$\sigma_0 = 3\sigma_y^0 - \sigma_x^0 \quad (6.8.a)$$

$$\sigma_{90} = 3\sigma_x^0 - \sigma_y^0 \quad (6.8.β)$$

Εισάγοντας τη σχέση (3.29) στην (6.8) προκύπτει

$$\sigma_0 = \sigma_h (3 - \cos^2 i) + \sigma_v (\cos^2 i - 1) \quad (6.9.a)$$

$$\sigma_{90} = \sigma_h (3 \cos^2 i - 1) + 3\sigma_v (1 - \cos^2 i) \quad (6.9.\beta)$$

Προκειμένου να ληφθεί η κρίσιμη τιμή για $\theta_{\max} = 0$, θα πρέπει

$$\sigma_0 - \sigma_{90} \geq 0 \quad (6.10)$$

Εισάγοντας τη σχέση (6.9) στην (6.10) προκύπτει ότι η κατακόρυφη επιτόπου τάση σ_v πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από την οριζόντια τάση σ_h για να εμφανιστεί η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων στη θέση $\theta = 0$. Άρα η κρίσιμη θέση $\theta = 0$ ή $\theta = \pi$ σχετίζεται με το καθεστώς των επιτόπου τάσεων για ανάστροφο ρήγμα.

$$\text{Ομοίως και για } \theta = \frac{\pi}{2}, \text{ θα πρέπει } \sigma_{90} - \sigma_0 \geq 0 \quad (6.11)$$

Εισάγοντας τις σχέσεις (6.9) στην (6.11) προκύπτει ότι η κατακόρυφη επιτόπου τάση σ_v πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την οριζόντια τάση σ_h για να εμφανιστεί η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων στη θέση $\theta = \frac{\pi}{2}$. Άρα η κρίσιμη θέση $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ σχετίζεται με το καθεστώς των επιτόπου τάσεων για κανονικό ρήγμα.

6.2 Εφαρμογή κριτηρίων αστοχίας σε μη κατακόρυφες γεωτρήσεις

Στις μη κατακόρυφες γεωτρήσεις, οι τάσεις στα τοιχώματα των γεωτρήσεων μπορούν να υπολογιστούν με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε, όπως, στην παραπάνω ενότητα. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ελάχιστη πίεση λάσπης, που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης, πρέπει να εφαρμοστεί ένα κριτήριο αστοχίας. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5. Ωστόσο, η εφαπτομενική και η αξονική τάση δεν αντιπροσωπεύουν τις κύριες τάσεις του συστήματος πάντα, καθώς η διατμητική τάση $\tau_{\theta z}$ μπορεί να μην είναι μηδενική. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την εύρεση των κύριων τάσεων.

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις, όσον αφορά τη κατάταξη των κύριων τάσεων, όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο 5. Γενικά η κατάρρευση της γεώτρησης σχετίζεται με την πρώτη και δεύτερη περίπτωση, όπου η ακτινική είναι η ελάχιστη κύρια τάση. Το πεδίο των τάσεων, λοιπόν, μπορεί να περιγραφεί ως $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_r$, όπου [2]

$$\sigma_r = P_w, \quad (6.12.α)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \tau_{\theta z}^2}, \quad (6.12.β)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \tau_{\theta z}^2}. \quad (6.12.γ)$$

Ο υπολογισμός αυτός των κυρίων τάσεων πραγματοποιείται αφού έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της κρίσιμης γωνίας θ , όπου η εφαπτομενική τάση φτάνει στη μέγιστη τιμή της.

Εάν εφαρμοστεί το κριτήριο Mohr-Coulomb, μπορεί να παραχθεί μια κλειστή αναλυτική λύση μπορεί να παραχθεί. Αυτό επιτυγχάνεται εισάγοντας τη σχέση (6.12) στην (5.10), και προκύπτει η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

$$P_w = \frac{L + \sqrt{K}}{2(q + q^2)} \quad (6.13)$$

όπου L και K δίνονται παρακάτω

$$L = \sigma_{\theta d} q - C(1 + 2q) + \sigma_z(1 + q), \quad (6.14.α)$$

$$K = \sigma_z^2(1 + 2q + q^2) + 4\tau_{\theta z}^2(q + q^2) - 2\sigma_{\theta d}\sigma_z(q + q^2) - 2\sigma_z C(1 + q) + (\sigma_{\theta d} q + C)^2 \quad (6.14.β)$$

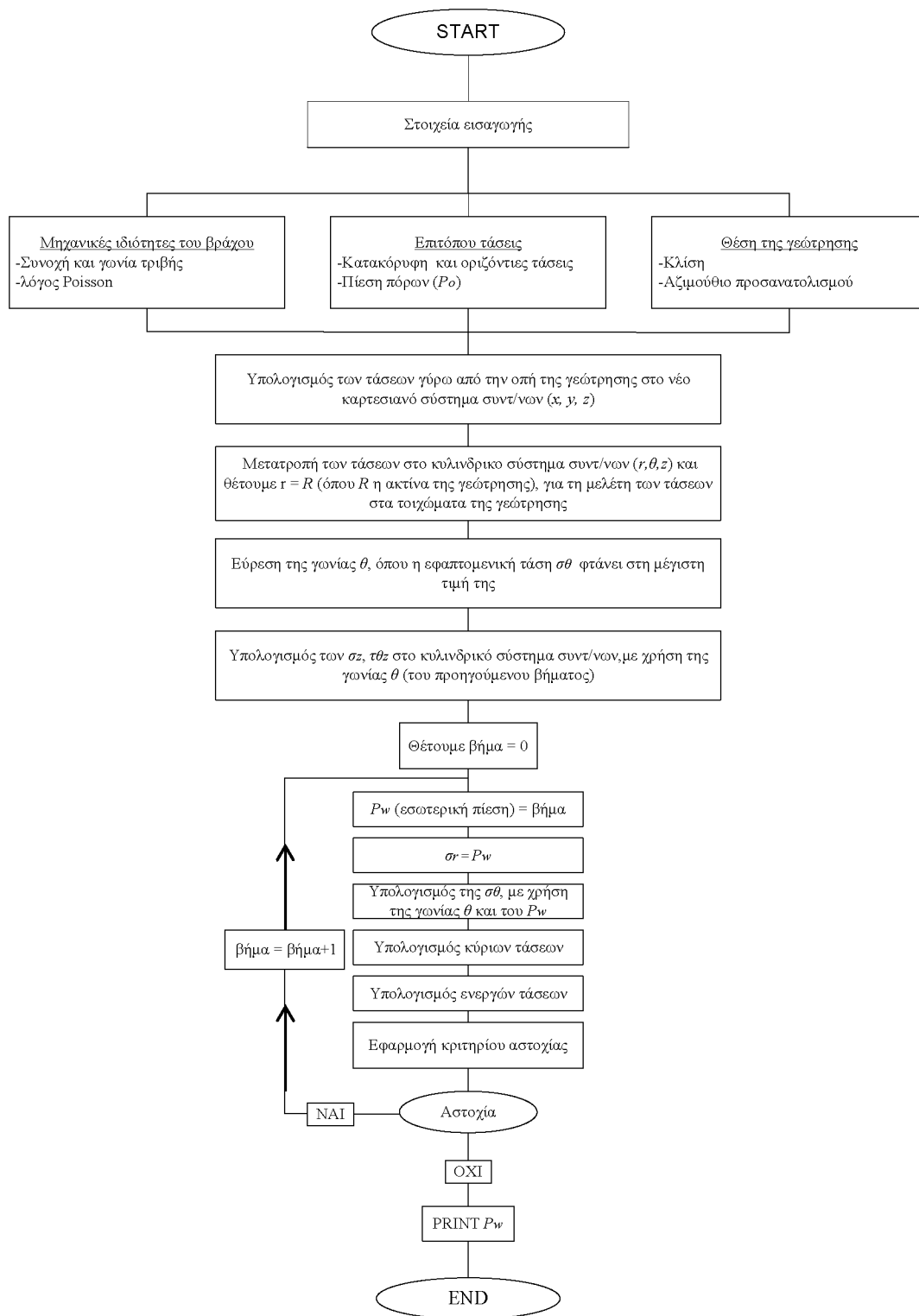
και

$$\sigma_{\theta d} = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta \quad (6.15)$$

Εάν οι κύριες τάσεις εισαχθούν τώρα στο κριτήριο αστοχίας Mogi-Coulomb, μία εξίσωση τετάρτου βαθμού πρέπει να λυθεί, για το προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται. Σε αυτή τη περίπτωση, η πίεση μπορεί να προσδιοριστεί πιο εύκολα αριθμητικά, εφαρμόζοντας επαναληπτικούς βρόχους σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα.

Η ανάγκη για την επίτευξη μίας γενικής λύσης για όλες τις περιπτώσεις, οδήγησε στην σύνθεση ενός υποπρογράμματος με χρήση του λογισμικού FLAC7, για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης που χρειάζεται η γεώτρηση για την εξασφάλιση της ευστάθειας της. Το υποπρόγραμμα αυτό, υπολογίζει τις τάσεις στα τοιχώματα της γεώτρησης, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Ύστερα, υπολογίζει τη μέγιστη τιμή της εφαπτομενικής τάσης, καθώς και τη γωνία προσανατολισμού θ , που επιτυγχάνεται η τιμή αυτή. Στην συνέχεια, υπολογίζει την αξονική τάση σ_z και τη διατμητική $\tau_{\theta z}$, για το προσδιορισμό των κύριων τάσεων και τέλος εφαρμόζει το εκάστοτε κριτήριο αστοχίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του υποπρογράμματος, το οποίο υπολογίζει την ελάχιστη πίεση της γεωτρητικής ίλως, για την εξασφάλιση ευστάθειας σε κεκλιμένες, οριζόντιες και κατακόρυφες βαθιές γεωτρήσεις. Τα κριτήρια αστοχίας, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι το Mohr-Coulomb και το Mogi-Coulomb. Η μέγιστη εσωτερική πίεση, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, θα είναι ίση με τη ελάχιστη επιτόπου τάση. Επομένως, δεν χρειάστηκε να μελετηθεί περαιτέρω η μέγιστη τιμή της εσωτερικής πίεσης.

Ανάλυση ευστάθειας γεωτρήσεων



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της ελάχιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος, που απαιτείται για την εξασφάλιση της ευστάθειας της γεώτρησης.

7. Εφαρμογή της ανάλυσης ευστάθειας

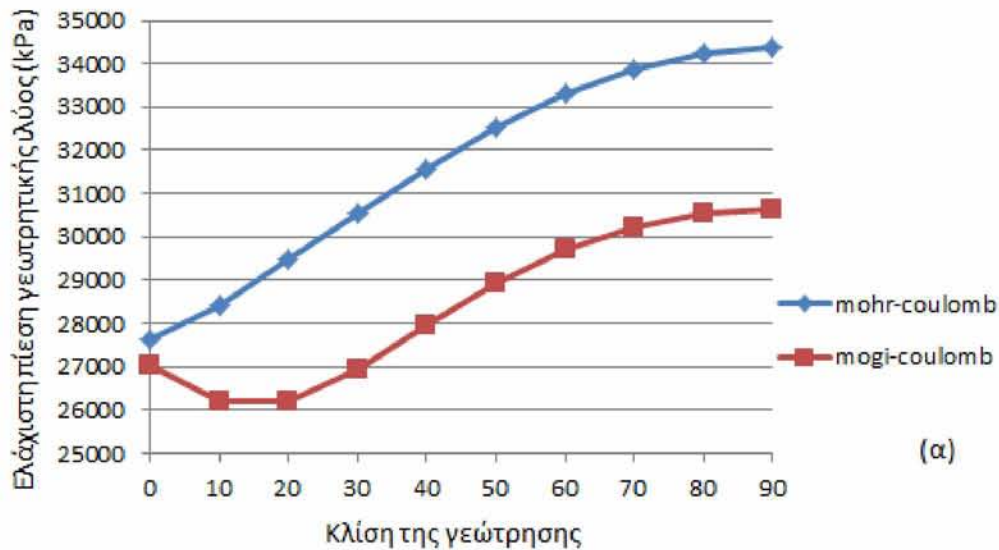
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή της ανάλυσης σε διάφορα πεδία, όπου τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από το μαθηματικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε παραπάνω, με χρήση του λογισμικού FLAC7 και τέλος εισάγονται σε φύλλο εργασίας στο excel για τη δημιουργία διαγραμμάτων. Η ανάλυση αυτή γίνεται κυρίως, για να δοθεί έμφαση στη λειτουργία των κριτηρίων αστοχίας, όσον αφορά τη σταθερότητα των γεωτρήσεων.

7.1 Ταμειυτήρας Cygus στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Η.Β.

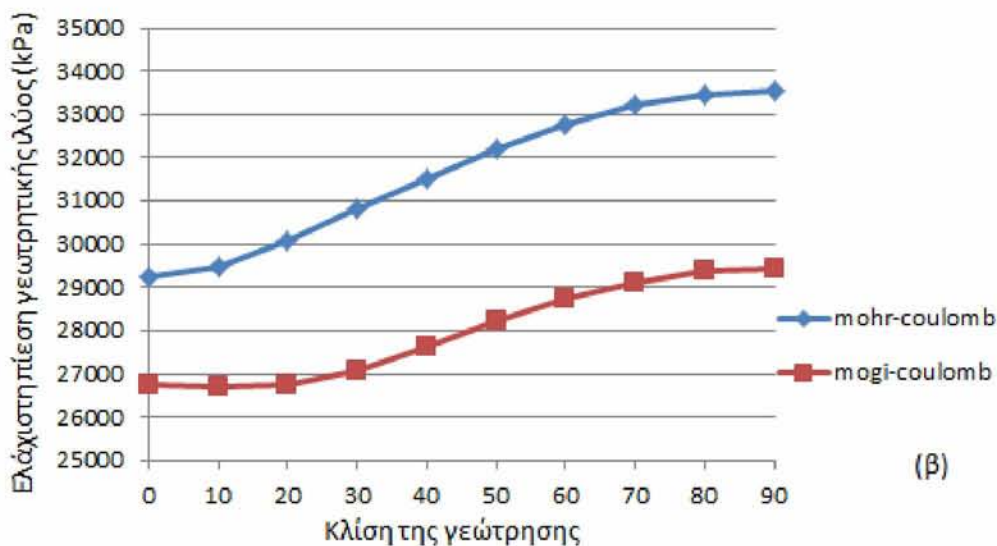
Η πρώτη εφαρμογή διεξάγεται στον ταμειυτήρα πετρελαίου Cygus στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m. Ο ταμειυτήρας αυτός αποτελείται από ψαμμίτη. Ο ψαμμίτης ύστερα από μετρήσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψε ότι έχει συνοχή $c = 6MPa$, γωνία τριβής $\phi = 43.8^\circ$ και μέτρο Poisson $\nu = 0.2$. Η κατακόρυφη επιτόπου τάση εκτιμήθηκε ότι ισούται με $\sigma_v = 22.6kPa/m$ και η πίεση των πόρων με $P_0 = 10.2kPa/m$. Επειδή δεν ήταν διαθέσιμες οι μετρήσεις σε αυτό το βάθος για τον προσδιορισμό των οριζόντιων τάσεων, οι McLean και Addis υπέθεσαν ότι και οι δύο οριζόντιες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους και ισούνται με $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$ [17]. Εδώ το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με κανονική ρηγμάτωση, με ισότροπες οριζόντιες τάσεις. Ύστερα, έγινε η υπόθεση ότι οι οριζόντιες επιτόπου τάσεις είναι $\sigma_H = \sigma_h = 19kPa/m$. Στα 2600m τα στοιχεία εισαγωγής στην ανάλυση είναι [3]:

Ψαμμίτης (2600m)	$c = 6MPa$	$\phi = 43.8^\circ$	$\nu = 0.2$
$P_0 = 26520kPa$	1 περίπτωση:	$\sigma_H = 44200kPa$	$\sigma_h = 44200kPa$
$\sigma_v = 58760kPa$	2 περίπτωση:	$\sigma_H = 49400kPa$	$\sigma_h = 49400kPa$

Πίνακας 7.1: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του ταμειυτήρα Cygus στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m, με $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$ και $\sigma_H = \sigma_h = 19kPa/m$.



(α)

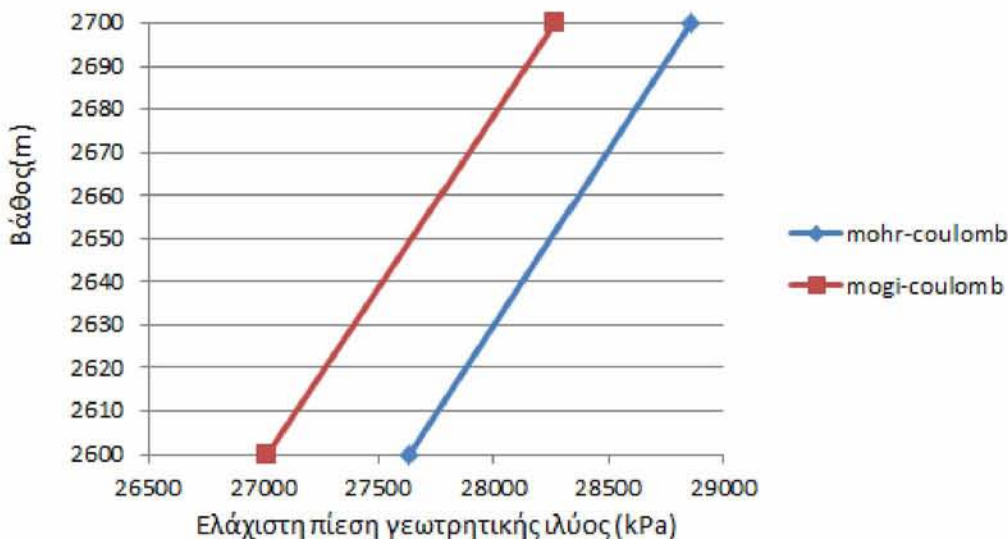


(β)

Σχήμα 7.1: Ελάχιστη πίεση γεωρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στον ταμειωτήρα ψαμμίτη Cygus, στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m, με (α) $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$ και (β) $\sigma_H = \sigma_h = 19kPa/m$.

Τόσο στην περίπτωση (α), όσο και στην περίπτωση (β), επειδή οι οριζόντιες επιτόπου τάσεις είναι ισότροπες, προέκυψε ότι η ανάλυση ευστάθειας είναι ανεξάρτητη του αζιμούθιου α της γεώτρησης. Για κάθε τιμή του α το σχήμα 7.1 αναπαριστά την ελάχιστη πίεση λάσπης που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης. Παρατηρείται, το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για όλες τις περιπτώσεις, σε σχέση με το

κριτήριο Mogi-Coulomb. Επιπλέον η ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς σε σχέση με τις οριζόντιες, όταν οι επιτόπου τάσεις σχετίζονται με εντατικές συνθήκες κανονικού ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα το κριτήριο Mogi-Coulomb εκτιμάει ότι πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 10%. Τέλος, είναι εμφανείς, οι διαφορές στην αλλαγή των οριζόντιων επιτόπου τάσεων, ειδικά στην κατακόρυφη γεώτρηση με χρήση του Mohr-Coulomb. Διαπιστώνεται ότι είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός των οριζόντιων επιτόπου τάσεων. Δυστυχώς, ο ακριβής προσδιορισμός τους είναι συνήθως πολύ δύσκολος και είναι στη κρίση του γεωτεχνικού μηχανικού να κάνει τις κατάλληλες εκτιμήσεις, βασιζόμενος αρκετές φορές σε εμπειρικά κριτήρια και επί τόπου παρατήρηση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της ελάχιστης πίεσης συναρτήσει του βάθους και για τα δύο κριτήρια αστοχίας, που χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία, για κατακόρυφες γεωτρήσεις και για $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$.



Σχήμα 7.2: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της βάθους της γεώτρησης στον ταμειωτήρα ψαμίτιη Cygus, στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του Ηνωμένου Βασιλείου στα 2600m για τη διεξαγωγή κατακόρυφων γεωτρήσεων, με $\sigma_H = \sigma_h = 17kPa/m$.

Στο σχήμα 7.2 παρατηρείται η μεγάλη υπερεκτίμηση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, έναντι του Mogi-Coulomb, για το προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης γεωτρητικής ιλύς, που απαιτείται για την ευστάθεια των κατακόρυφων γεωτρήσεων, όταν το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατικές συνθήκες κανονικού ρήγματος και $\sigma_2 = \sigma_3$.

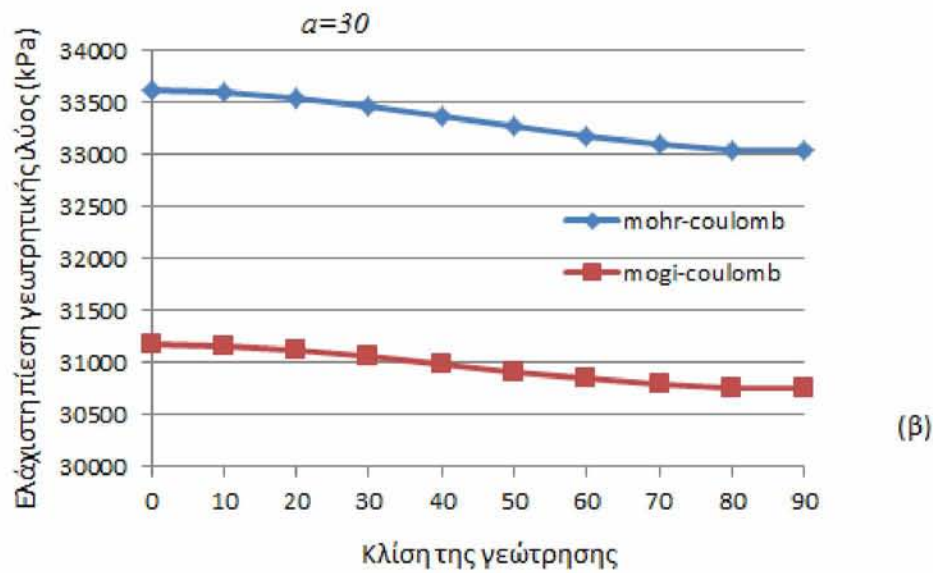
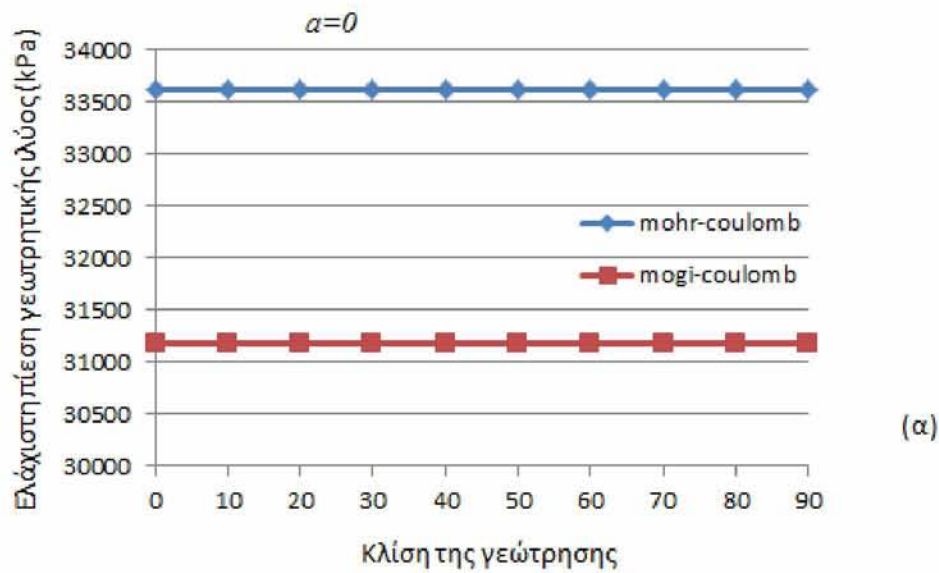
7.2 Πεδίο Wanaea στην βορειοδυτική υφαλοκρηπίδα της Αυστραλίας

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση ευστάθειας, όπου διεξάγεται σε μία γεώτρηση πετρελαίου στην Αυστραλία στα 2142m. Ο ταμιευτήρας αυτός αποτελείται από σχιστόλιθο. Ο σχιστόλιθος ύστερα από μετρήσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψε ότι έχει συνοχή $c = 3MPa$, γωνία τριβής $\varphi = 31^\circ$ και μέτρο Poisson $\nu = 0.25$. Η κατακόρυφη επιτόπου τάση εκτιμήθηκε ότι ισούται με $\sigma_v = 20.8kPa/m$, η μέγιστη οριζόντια με $\sigma_H = 20.8kPa/m$ και η ελάχιστη με $\sigma_h = 16.3kPa/m$. Τέλος η πίεση των πόρων ισούται με $P_0 = 11.1kPa/m$. Εδώ το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με το όριο μεταξύ εντατικής κατάστασης κανονικού ρήγματος και ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης. Στα 2142m τα στοιχεία εισαγωγής στην ανάλυση είναι [7]:

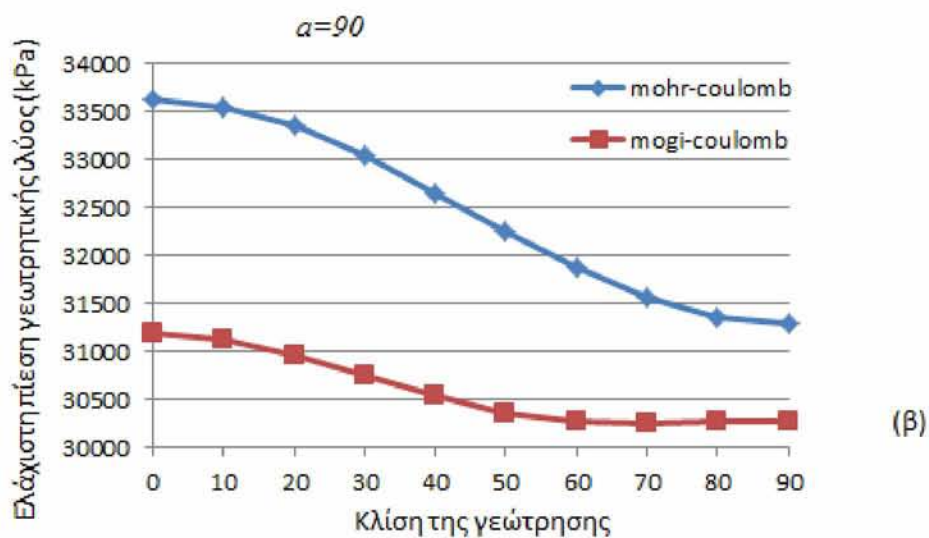
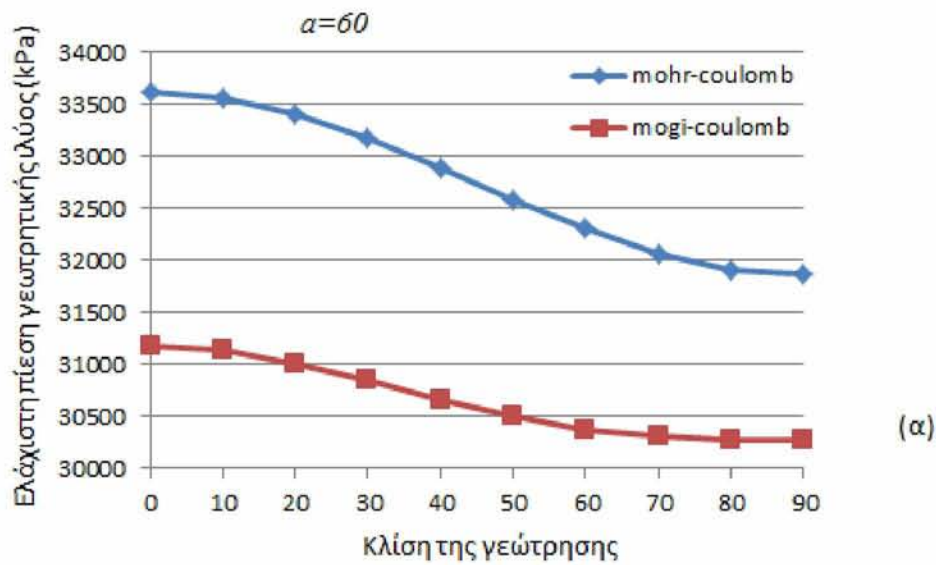
Σχιστόλιθος (2142m)	$c = 3MPa$	$\varphi = 31^\circ$	$\nu = 0.25$
$P_0 = 23776.2kPa$	$\sigma_v = 44553.6kPa$	$\sigma_H = 44553.6kPa$	$\sigma_h = 34914.6kPa$

Πίνακας 7.2: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης. Το μοντέλο αυτό, εφαρμόζεται για τέσσερα διαφορετικά αζιμούθια γεώτρησης: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Ύστερα από τη παρουσίασή τους, θα συζητηθούν τα συμπεράσματα, που προκύπτουν.

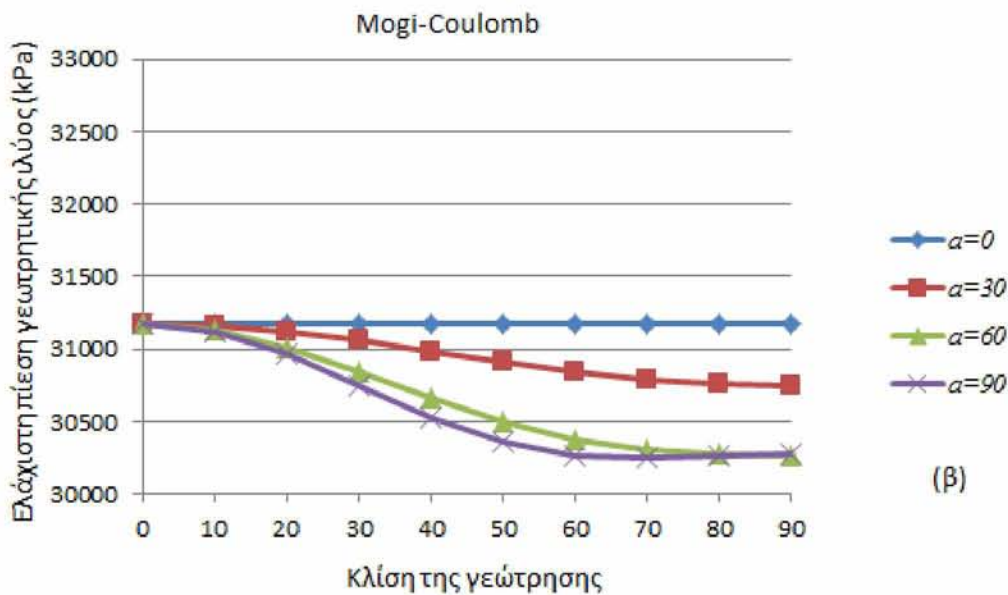
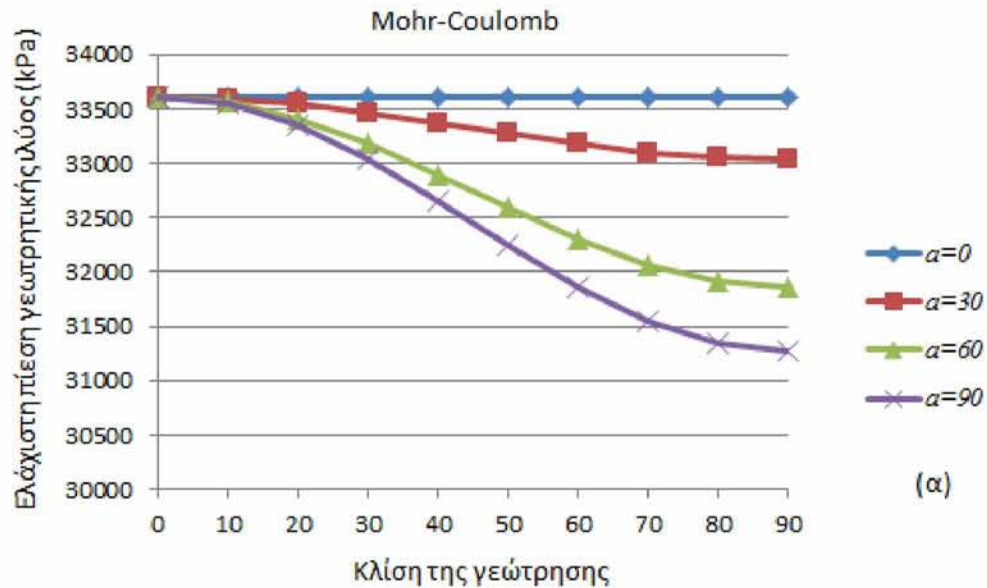


Σχήμα 7.3: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμειντήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, με (α) $\alpha = 0^\circ$ και (β) $\alpha = 30^\circ$.



Σχήμα 7.4: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμεινίθρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, με (α) $\alpha = 60^\circ$ και (β) $\alpha = 90^\circ$.

Τέλος παρουσιάζεται από ένα διάγραμμα για κάθε κριτήριο αστοχίας, παραθέτοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία.



Σχήμα 7.5: Ελάχιστη πίεση γεωρητικής ύλης που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμιευτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Αυστραλίας στα 2142m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb.

Στην ανάλυση αυτή, όπου ισχύει $\sigma_v = \sigma_H > \sigma_h$, δηλαδή οι επιτόπου τάσεις σχετίζονται με το όριο μεταξύ εντατικής κατάστασης κανονικού ρήγματος και εντατικής κατάστασης ρήματος οριζόντιας μετατόπισης, είναι πάλι εμφανής η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Όπως και

στο προηγούμενο πεδίο, το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση που απαιτείται για ευστάθεια της γεώτρησης, έναντι του κριτηρίου Mogi-Coulomb. Στην ανάλυση αυτή, υπάρχει επίδραση του αζιμούθιο α της γεώτρησης, εκτός από την περίπτωση $\alpha = 0^\circ$, όπου η ελάχιστη πίεση που απαιτείται, παραμένει ίδια, ανεξάρτητα από τη κλίση της γεώτρησης. Επίσης στις κατακόρυφες γεωτρήσεις η ελάχιστη εσωτερική πίεση είναι κοντά με την τιμή της μέγιστης. Εδώ, σε αντίθεση με την εντατική κατάσταση κανονικού ρήγματος που εξετάστηκε αρχικά, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι οριζόντιες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις κατακόρυφες. Πιο συγκεκριμένα το κριτήριο Mogi-Coulomb εκτιμάει ότι η πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 70% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $\alpha = 90^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της επιτόπου τάσης σ_h .

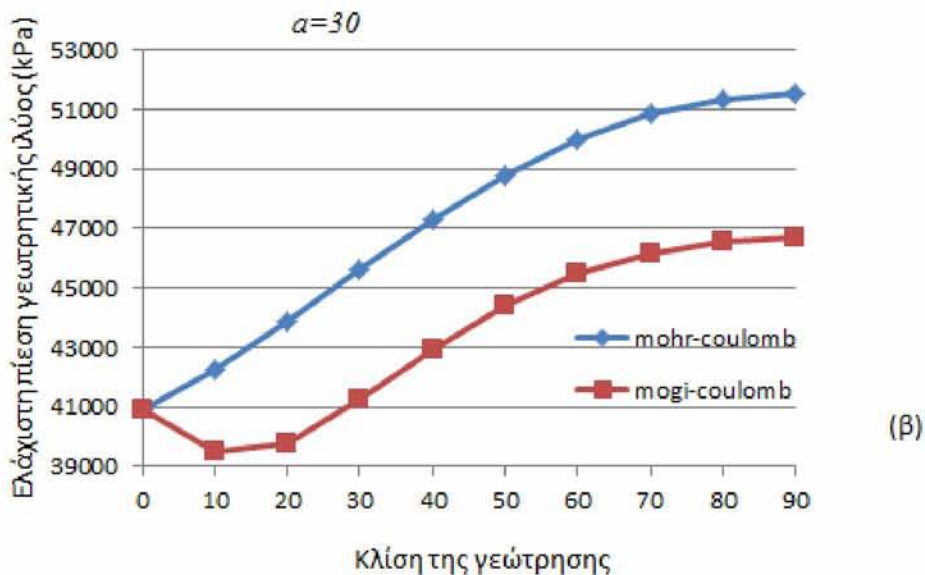
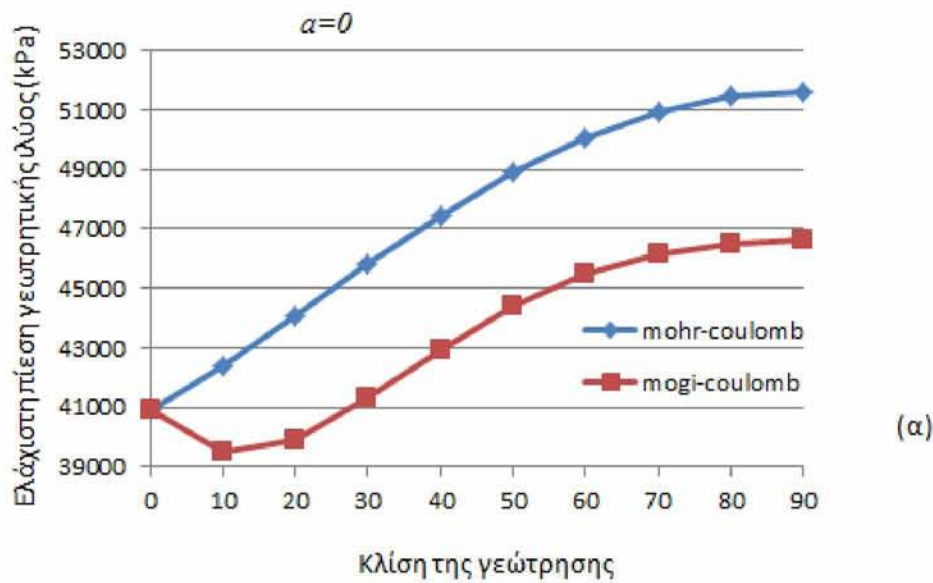
7.3 Πετρελαϊκό πεδίο του Ιράν

Ακολουθεί η εφαρμογή της ανάλυσης ευστάθειας, σε μία γεώτρηση πετρελαίου στο Ιράν βάθους 3200m. Ο ταμιευτήρας αυτός αποτελείται από ανθρακικό πέτρωμα. Το ανθρακικό αυτό πέτρωμα, ύστερα από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψε ότι έχει συνοχή $c = 4MPa$, γωνία τριβής $\varphi = 40^\circ$ και μέτρο Poisson $\nu = 0.31$. Η κατακόρυφη επιτόπου τάση εκτιμήθηκε ότι ισούται με $\sigma_v = 25kPa/m$, η μέγιστη οριζόντια με $\sigma_H = 18.75kPa/m$ και η ελάχιστη με $\sigma_h = 18.125kPa/m$. Τέλος η πίεση των πόρων ισούται με $P_0 = 10.78kPa/m$. Εδώ το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με κανονική ρηγμάτωση, όπως στην πρώτη εφαρμογή, με τη μόνη διαφορά, ότι εδώ οι οριζόντιες τάσεις δεν παρουσιάζουν ανισοτροπία. Στα 3200m τα στοιχεία εισαγωγής στην ανάλυση είναι τα ακόλουθα[8]:

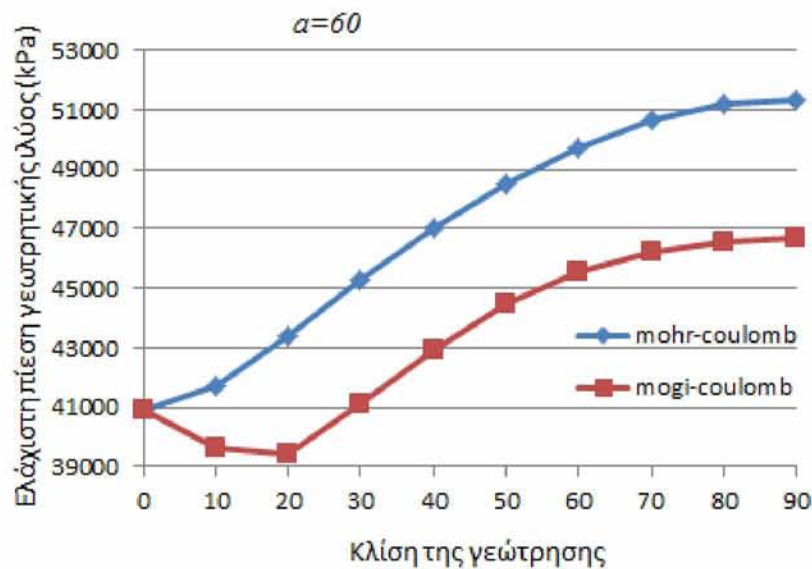
Ανθρακικό πέτρωμα (3200m)	$c = 4MPa$	$\varphi = 40^\circ$	$\nu = 0.31$
$P_0 = 34500kPa$	$\sigma_v = 80000kPa$	$\sigma_H = 60000kPa$	$\sigma_h = 58000kPa$

Πίνακας 7.3: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του Ιράν στα 3200m.

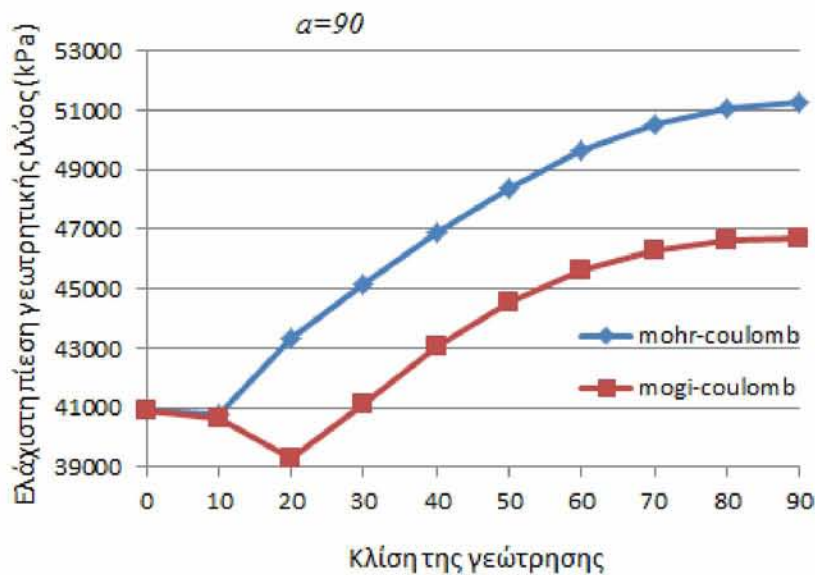
Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται, για την ευστάθεια της γεώτρησης, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης. Το μοντέλο αυτό, όπως και προηγουμένως, εφαρμόζεται για τέσσερα διαφορετικά αζιμούθια γεώτρησης: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Ύστερα από τη παρουσίασή τους, θα αναφερθούν τα συμπεράσματα, που προκύπτουν.



Σχήμα 7.6: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμειντήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, με (α) $\alpha = 0^\circ$ και (β) $\alpha = 30^\circ$.



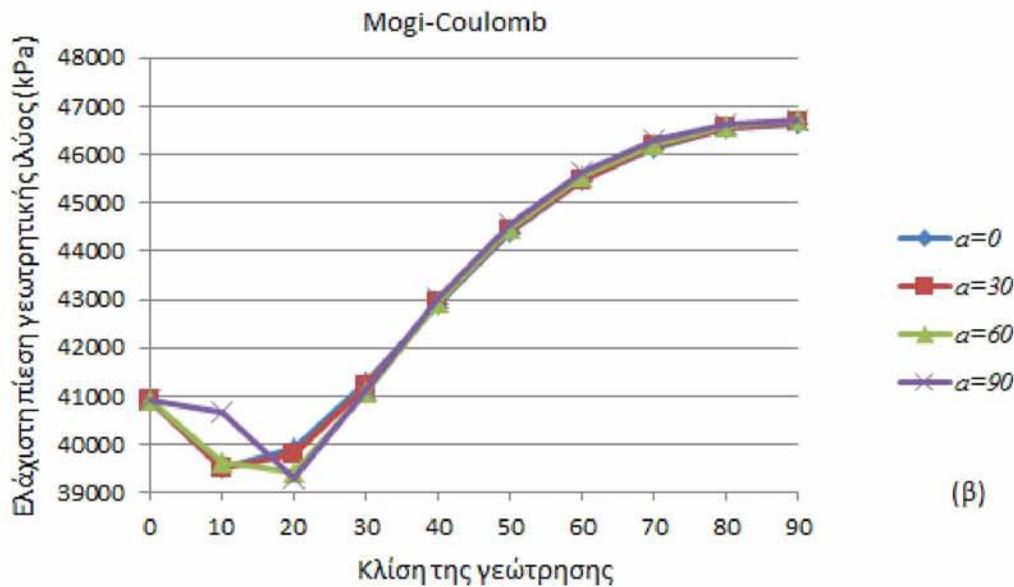
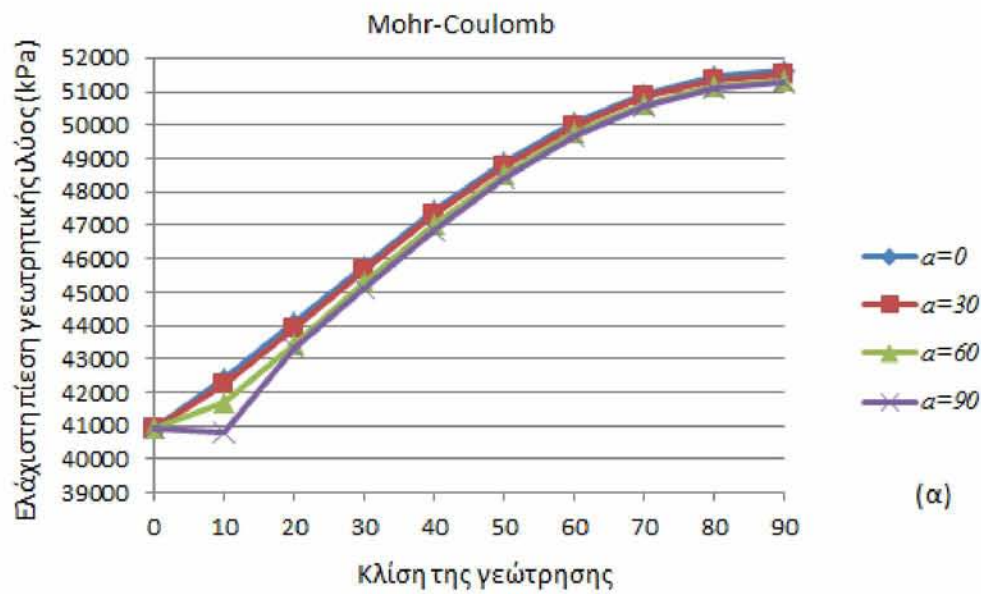
(α)



(β)

Σχήμα 7.7: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμειντήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, με (α) $\alpha = 60^\circ$ και (β) $\alpha = 90^\circ$.

Τέλος παρουσιάζεται από ένα διάγραμμα για κάθε κριτήριο αστοχίας, παραθέτοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία.



Σχήμα 7.8: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμευτήρα ανθρακικού πετρώματος, στην περιοχή του Ιράν στα 3200m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb.

Στην ανάλυση αυτή, όπου ισχύει $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, δηλαδή το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατικές συνθήκες κανονικού ρήγματος, το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για ευστάθεια της γεώτρησης, έναντι του

κριτήριου Mogi-Coulomb, εκτός από τις κατακόρυφες γεωτρήσεις, όπου η διαφορά είναι ελάχιστη. Στην ανάλυση αυτή, παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η κλίση της γεώτρησης, αυξάνεται η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Η επιρροή του αζιμούθιου α της γεώτρησης, είναι μικρή. Εδώ, όπως και στο πρώτο πεδίο εφαρμογής, όπου υφίσταται το ίδιο καθεστώς επιτόπου τάσεων, με τη διαφορά, ότι εδώ αναπτύσσονται ανισότροπες οριζόντιες τάσεις, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις οριζόντιες. Πιο συγκεκριμένα το κριτήριο Mohr-Coulomb εκτιμάει ότι πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 10% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $\alpha = 90^\circ$. Από την εκτίμηση του κριτηρίου Mogi-Coulomb, το οποίο σχετίζεται πολύ περισσότερο με τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν, προκύπτει ότι η πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 20% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $\alpha = 90^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της επιτόπου τάσης σ_h .

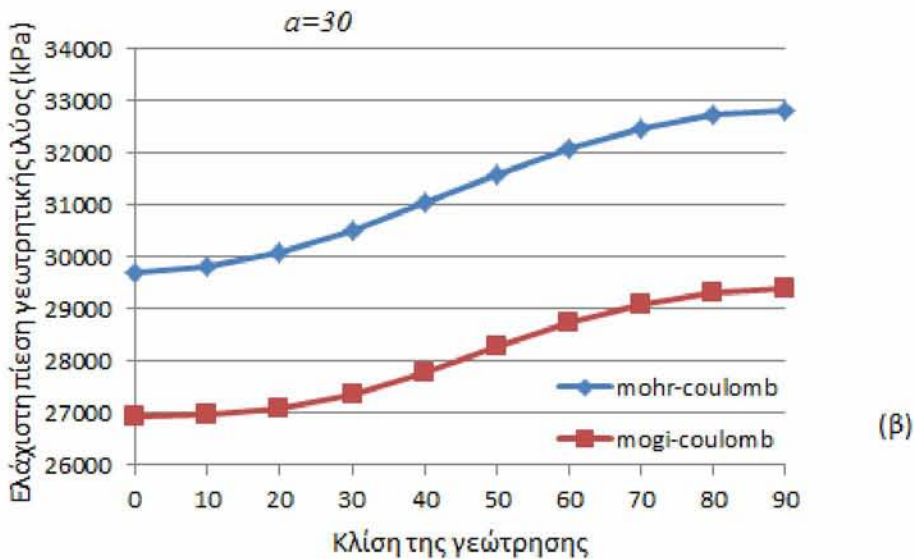
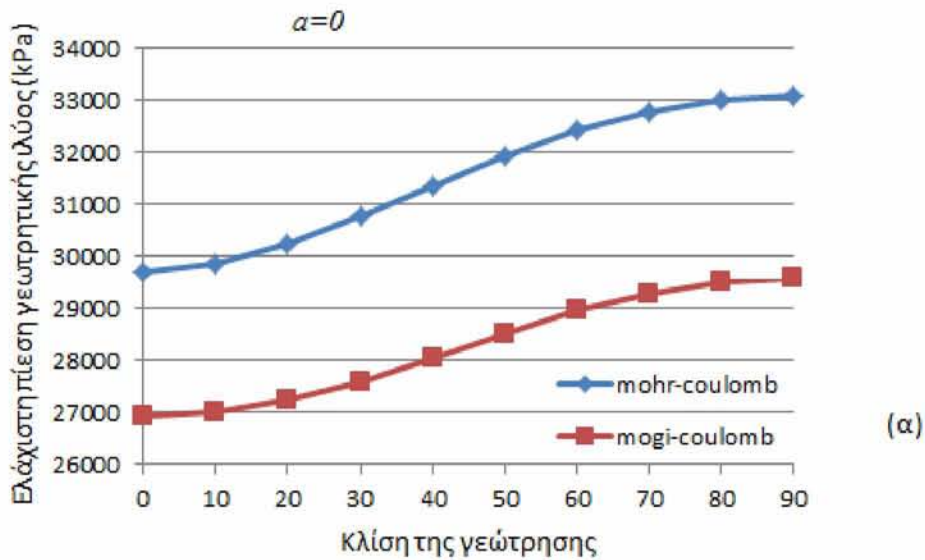
7.4 Υπεράκτιες γεωτρήσεις στον Αραβικό κόλπο

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή της ανάλυσης ευστάθειας, σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου στη Σαουδική Αραβία στα 2072m. Ο ταμιευτήρας αυτός, αποτελείται από σχιστόλιθο. Ο σχιστόλιθος, ύστερα από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψε ότι έχει συνοχή $c = 6MPa$, γωνία τριβής $\varphi = 31.3^\circ$ και μέτρο Poisson $\nu = 0.33$. Η κατακόρυφη επιτόπου τάση εκτιμήθηκε ότι ισούται με $\sigma_v = 24.882kPa/m$, η μέγιστη οριζόντια με $\sigma_H = 22.68kPa/m$ και η ελάχιστη με $\sigma_h = 20.36kPa/m$. Τέλος η πίεση των πόρων ισούται με $P_0 = 10.405kPa/m$. Εδώ το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατική κατάσταση κανονικού ρήγματος, όπως στην προηγούμενη εφαρμογή, με τη μόνη διαφορά, ότι εδώ, η διαφορά των οριζόντιων τάσεων είναι μεγαλύτερη. Στα 2072m τα στοιχεία εισαγωγής στην ανάλυση είναι τα εξής [4]:

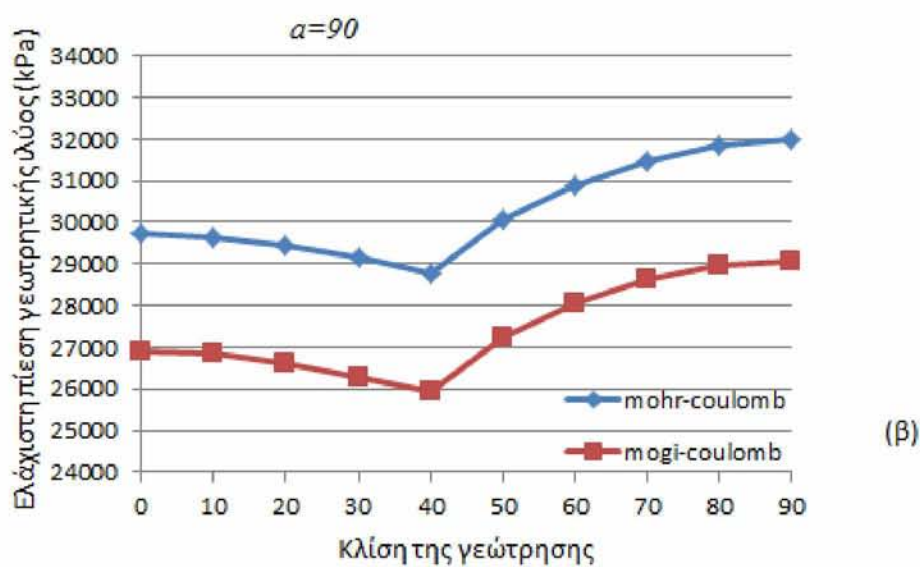
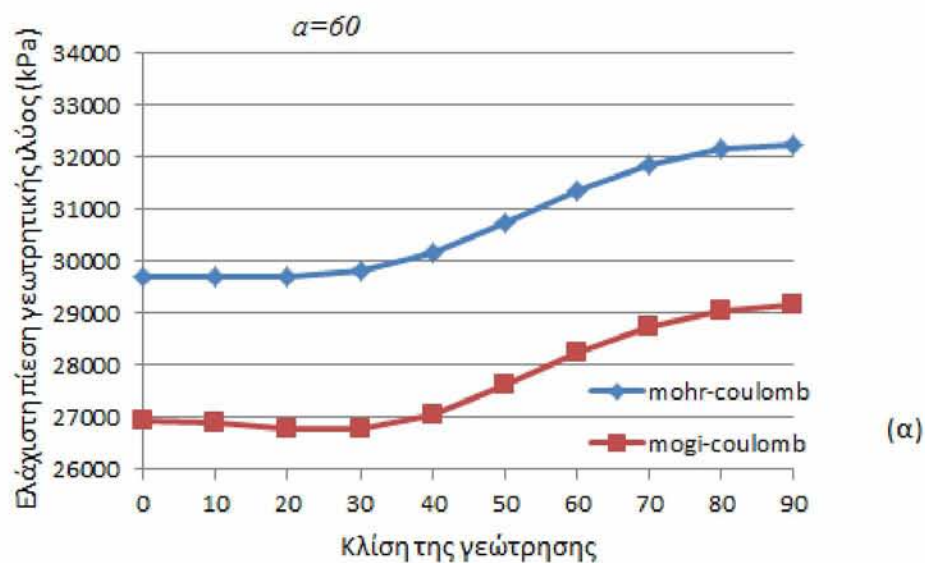
Σχιστόλιθος (2072m)	$c = 6MPa$	$\varphi = 31.3^\circ$	$\nu = 0.33$
$P_0 = 21559.16kPa$	$\sigma_v = 51555.504kPa$	$\sigma_H = 46868.64kPa$	$\sigma_h = 42185.92kPa$

Πίνακας 7.4: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης. Το μοντέλο αυτό, όπως και προηγουμένως, εφαρμόζεται για τέσσερα διαφορετικά αζιμούθια γεώτρησης: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Ύστερα από τη παρουσίασή τους, ακολουθούν τα συμπεράσματα, που προκύπτουν.

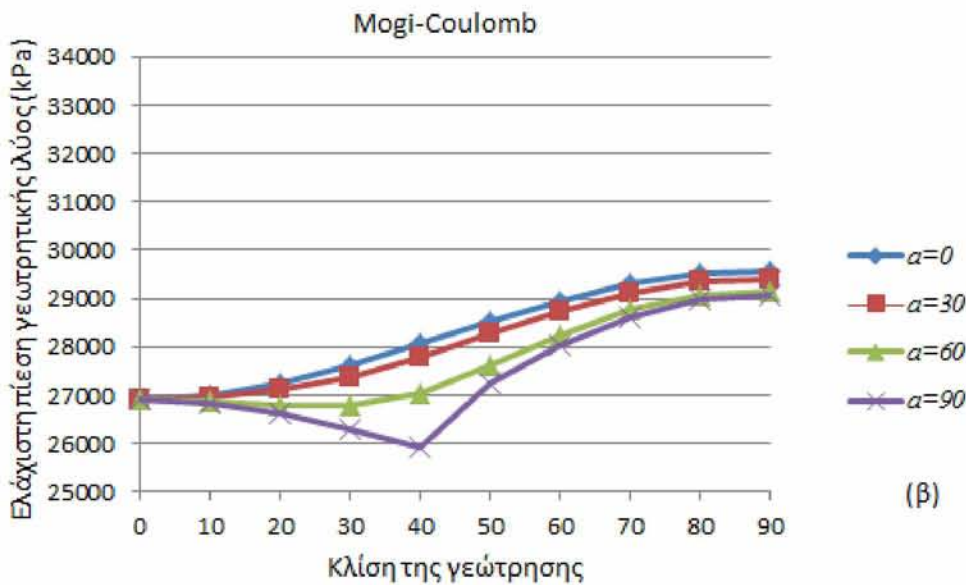
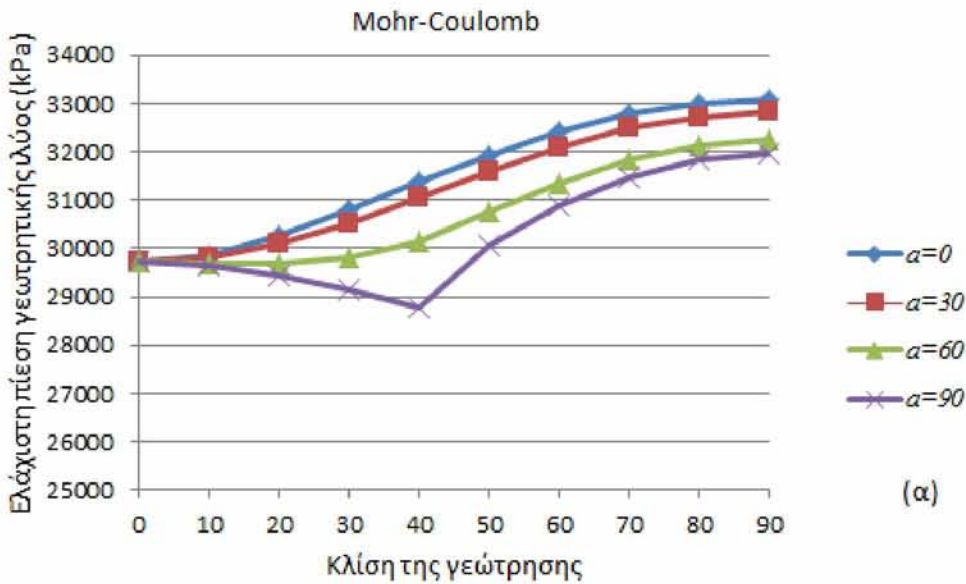


Σχήμα 7.9: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμειντήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, με (α) $a = 0^\circ$ και (β) $a = 30^\circ$.



Σχήμα 7.10: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, σε ταμεινιέρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, με (α) $\alpha = 60^\circ$ και (β) $\alpha = 90^\circ$.

Τέλος παρουσιάζεται από ένα διάγραμμα για κάθε κριτήριο αστοχίας, παραθέτοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία.



Σχήμα 7.11: Ελάχιστη πίεση γεωρητικής ιλύος που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, σε ταμειυτήρα σχιστόλιθου, στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας στα 2072m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb.

Στην ανάλυση αυτή, όπου ισχύει $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, δηλαδή το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατικές συνθήκες κανονικού ρήγματος, είναι πάλι εμφανής η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Όπως και στα προηγούμενα πεδία, το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για ευστάθεια της γεώτρησης, έναντι του κριτηρίου Mogi-Coulomb. Εδώ, όπως και στο προηγούμενο πεδίο εφαρμογής, όπου ισχύει το ίδιο καθεστώς επιτόπου τάσεων, εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα, ότι οι κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις οριζόντιες. Εδώ η επιρροή του αζιμούθιου a της γεώτρησης, είναι μικρή, όταν έχουμε $a = 0^\circ$ και $a = 30^\circ$. Αντίθετα, όταν $a = 60^\circ$ και $a = 90^\circ$, παρατηρούνται κάποιες αλλαγές στην ελάχιστη πίεση που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης και μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα, όσον αφορά το προσδιορισμό της πιο ευσταθής γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα και τα δύο κριτήρια αστοχίας εκτιμούν ότι πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 40% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $a = 90^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της επιτόπου τάσης σ_h .

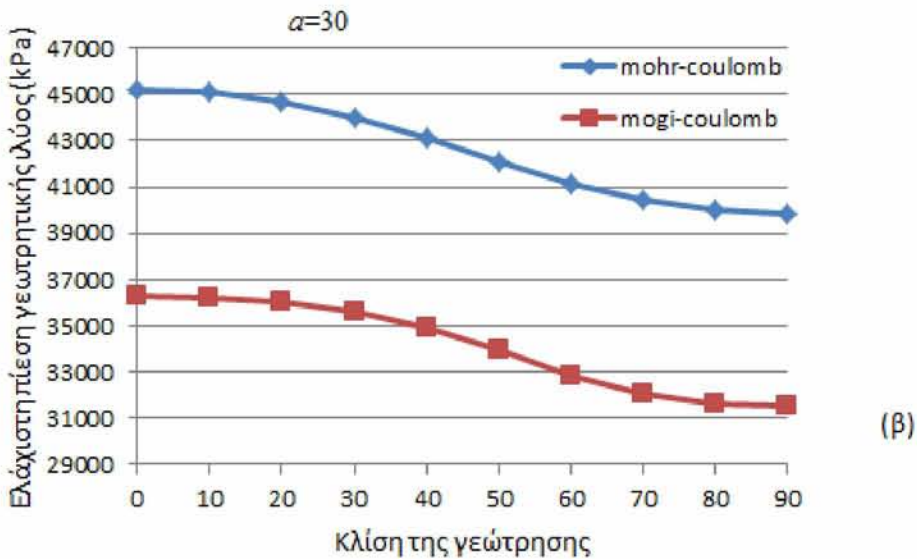
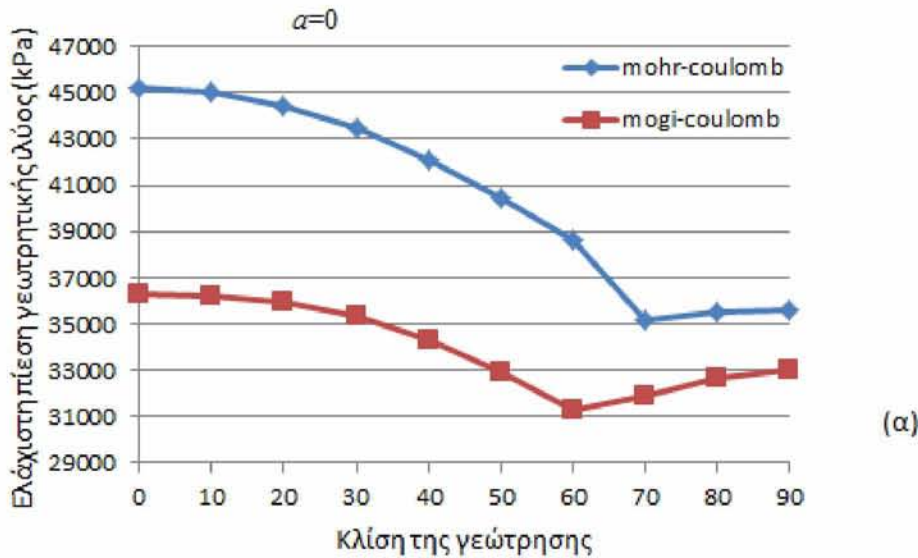
7.5 Πετρελαϊκό πεδίο ABK στην υπεράκτια περιοχή του Άμπου Ντάμπι

Τέλος εφαρμόζεται η ανάλυση, σε μία γεώτρηση πετρελαίου στο Άμπου Ντάμπι στα 2958m. Ο ταμιευτήρας αυτός, αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθο, δολομίτη), [21]. Ωστόσο όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές: συνοχή $c = 7.6MPa$, γωνία τριβής $\varphi = 50.2^\circ$ και μέτρο Poisson $\nu = 0.3$. Η κατακόρυφη επιτόπου τάση εκτιμήθηκε ότι ισούται με $\sigma_v = 22.62kPa/m$, η μέγιστη οριζόντια με $\sigma_H = 34.38kPa/m$ και η ελάχιστη με $\sigma_h = 24.43kPa/m$. Τέλος η πίεση των πόρων ισούται με $P_0 = 10.18kPa/m$. Εδώ το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατικές συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. Στα 2958m τα στοιχεία εισαγωγής στην ανάλυση είναι [4]:

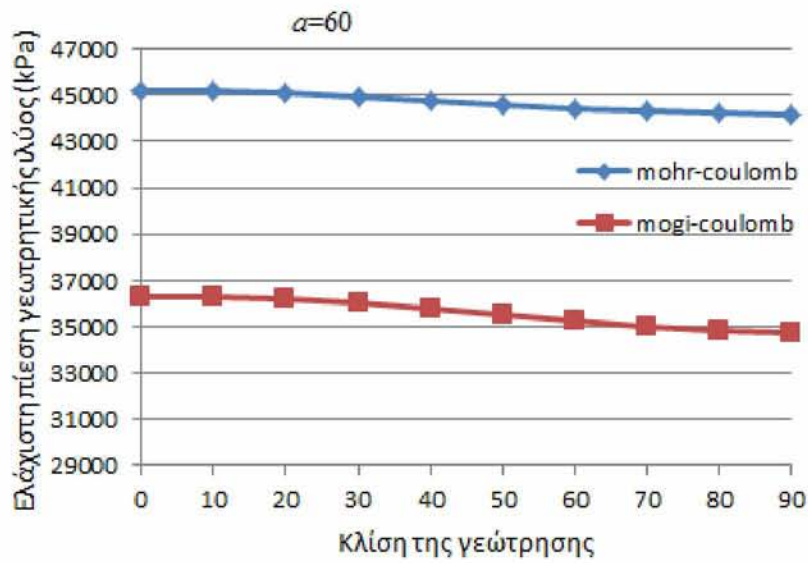
Ανθρακικό πέτρωμα (2958m)	$c = 7.6MPa$	$\varphi = 50.2^\circ$	$\nu = 0.3$
$P_0 = 30112kPa$	$\sigma_v = 66910kPa$	$\sigma_H = 101696kPa$	$\sigma_h = 72264kPa$

Πίνακας 7.5: Δεδομένα για μία γεώτρηση πετρελαίου στη περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m.

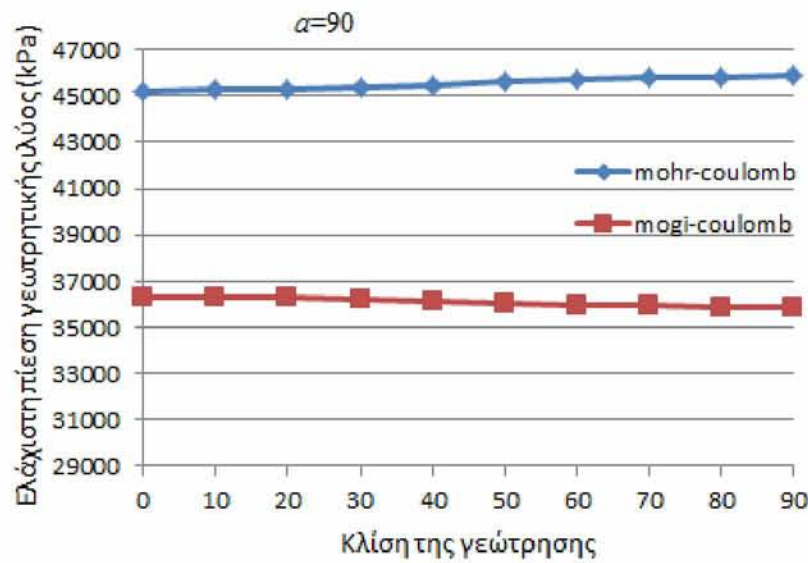
Παρακάτω θα παρουσιαστούν διαγράμματα της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης. Το μοντέλο αυτό, όπως και προηγουμένως, εφαρμόζεται για τέσσερα διαφορετικά αζιμούθια γεώτρησης: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Ύστερα από τη παρουσίασή τους, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα, που προκύπτουν.



Σχήμα 7.12: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής υλός που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, με (α) $\alpha = 0^\circ$ και (β) $\alpha = 30^\circ$.



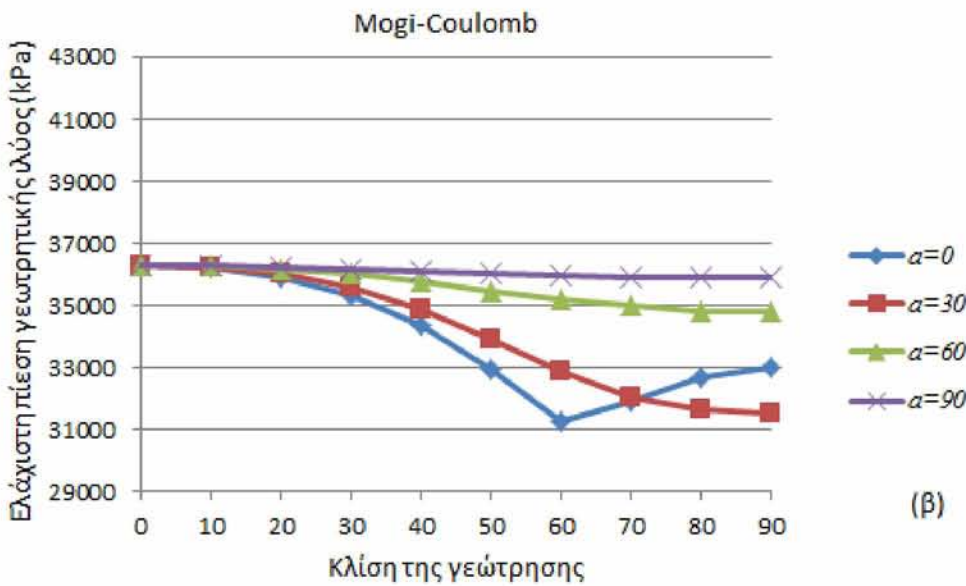
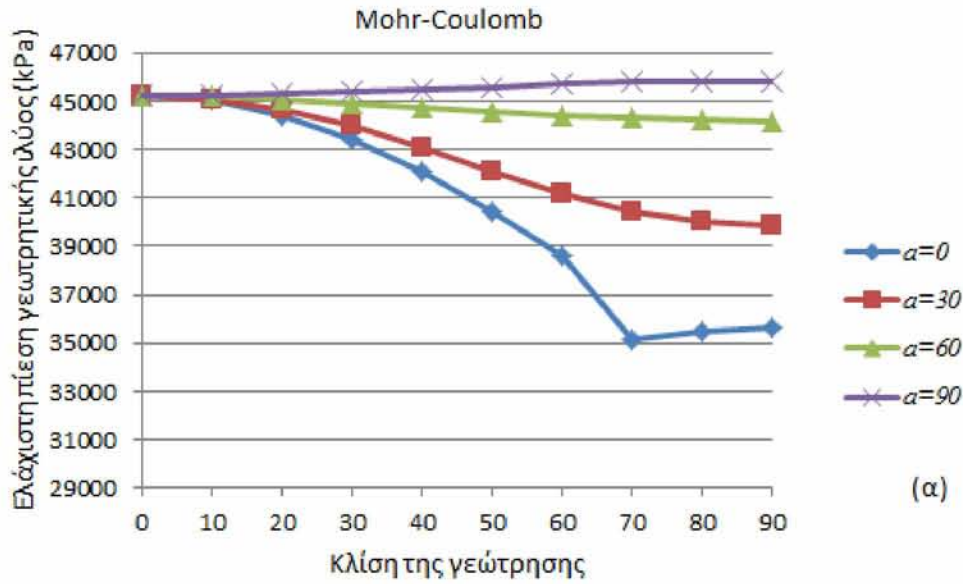
(α)



(β)

Σχήμα 7.13: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής υλός που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, με (α) $\alpha = 60^\circ$ και (β) $\alpha = 90^\circ$.

Τέλος παρουσιάζεται από ένα διάγραμμα για κάθε κριτήριο αστοχίας, παραθέτοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία.



Σχήμα 7.14: Ελάχιστη πίεση γεωτρητικής υλός που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης και του αζιμούθιου της γεώτρησης, στην περιοχή του Άμπου Ντάμπι στα 2958m, όπου (α) το κριτήριο Mohr-Coulomb και (β) το κριτήριο Mogi-Coulomb.

Στην ανάλυση αυτή ισχύει $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, δηλαδή το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατική κατάσταση ανάστροφου ρήγματος. Όπως και στα προηγούμενα πεδία, το κριτήριο Mohr-Coulomb υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση, που απαιτείται για ευστάθεια της γεώτρησης, έναντι του κριτηρίου Mogi-Coulomb. Εδώ παρατηρείται, ότι οι οριζόντιες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις κατακόρυφες. Επίσης όταν το αζιμούθιο παίρνει τιμές $\alpha = 60^\circ$ και $\alpha = 90^\circ$ η ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύς παρουσιάζει μικρές μεταβολές συναρτήσει την κλίση της γεώτρησης. Αντίθετα όταν το αζιμούθιο παίρνει τιμές $\alpha = 0^\circ$ και $\alpha = 30^\circ$ παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στην ελάχιστη πίεση γεωτρητικής ιλύς που απαιτείται, συναρτήσει της κλίσης της γεώτρησης και μπορούν έτσι να εξαχθούν συμπεράσματα, όσον αφορά το προσδιορισμό και τον προσανατολισμό της πιο ευσταθούς γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα το κριτήριο Mohr-Coulomb εκτιμάει ότι πιο ευμενής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο μελέτης είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 70% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $\alpha = 0^\circ$. Σύμφωνα με το κριτήριο Mogi-Coulomb, το οποίο σχετίζεται περισσότερο με τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν, η πιο ευμενής γεώτρηση είναι αυτή, που πραγματοποιείται με κλίση 60% και σε αζιμούθιο γεώτρησης ίσο με $\alpha = 0^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της επιτόπου τάσης σ_H .

8. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την ανάλυση ευστάθειας των βαθιών γεωτρήσεων, έναντι μηχανικής αστοχίας. Η ανάλυση αυτή σχετίζεται με το προσδιορισμό της ελάχιστης και μέγιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος, η οποία ασκείται στο εσωτερικό της οπής της γεώτρησης. Για την επίτευξη αυτού, χρησιμοποιήθηκε γραμμική ελαστικότητα για τον υπολογισμό των τάσεων γύρω από τη γεώτρηση, σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και εφαρμόστηκαν δύο κριτήρια αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb, ένα από τα κριτήρια, που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην πράξη. Το κριτήριο αυτό όμως, περιλαμβάνει μόνο τη μέγιστη κύρια τάση σ_1 και τη ελάχιστη κύρια τάση σ_3 , υποθέτοντας ότι η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 δεν έχει επίδραση. Έτσι επιλέχθηκε και το κριτήριο Mogi-Coulomb, το οποίο περιλαμβάνει γραμμική περιβάλλουσα αστοχίας στο καθεστώς των τάσεων Mogi, έχοντας λάβει υπόψη τη επίδραση την ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 και αποτελείται από δύο παραμέτρους, που σχετίζονται με αυτές του Coulomb, την συνοχή και την γωνία τριβής. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι η μέγιστη εσωτερική πίεση της γεώτρησης πρέπει να είναι ίση με την ελάχιστη επιτόπου τάση, η οποία είναι συνήθως η σ_h , γιατί αλλιώς θα υπάρχει κίνδυνος διακοπής ομαλής κυκλοφορίας της γεωτρητικής ιλύος. Έτσι κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία ενός μοντέλου ευστάθειας, το οποίο σχετίζεται με τον προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος. Για την επίτευξη μιας λύσης για όλες τις περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκε η σύνθεση ενός υποπρογράμματος με χρήση του λογισμικού FLAC7, που υπολογίζει την ελάχιστη πίεσης, που χρειάζεται η γεώτρηση, για την εξασφάλιση της ευστάθειας της.

Το μοντέλο ευστάθειας εφαρμόστηκε σε διάφορα πεδία, για το προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος, που απαιτείται. Εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την εκτίμηση των δύο κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και το προσδιορισμό της πιο ευσταθής γεώτρησης, όσον αφορά την κλίση της γεώτρησης και το αζιμούθιο προσανατολισμού της. Πιο συγκεκριμένα προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb, επειδή δεν περιλαμβάνει την ενδιάμεση κύρια τάση, υπερεκτιμάει την ελάχιστη πίεση της γεωτρητικής ιλύος, σε σχέση με το

κριτήριο Mogi-Coulomb. Από την άλλη πλευρά το κριτήριο Mogi-Coulomb περιλαμβάνει την επίδραση της ενδιάμεσης τάσης και τα αποτελέσματα σχετίζονται πολύ περισσότερο με τις πραγματικές συνθήκες. Η διαφορά εκτίμησης της ελάχιστης πίεσης, όσον αφορά τα κριτήρια αστοχίας, δεν μπορεί να κριθεί αμελητέα και έτσι προτείνεται ότι το κριτήριο Mogi-Coulomb είναι αυτό, που θα πρέπει να εφαρμόζεται για την ανάλυση ευστάθειας βαθιών γεωτρήσεων.

- Όταν οι επιτόπου οριζόντιες τάσεις είναι ισότροπες ή μελετάται μία κατακόρυφη γεώτρηση, η ευστάθεια της γεώτρησης, δεν επηρεάζεται από το αζιμούθιου προσανατολισμού.
- Όταν το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατική κατάσταση κανονικού ρήγματος, παρατηρείται και για τα δύο κριτήρια αστοχίας ότι οι κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις οριζόντιες και ότι η πιο ευσταθής γεώτρηση είναι αυτή, που πραγματοποιείται με αζιμούθιο προσανατολισμού $\alpha = 90^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της σ_h . Επιπλέον όσο μεγαλώνει η διαφορά στην τιμή της κατακόρυφης επιτόπου τάσης με τις οριζόντιες, και οι οριζόντιες είναι ίσες ή σχεδόν ίσες, ο προσδιορισμός της ελάχιστης πίεσης της γεωτρητικής ιλύος είναι σχεδόν ίδιος και για τα δύο κριτήρια αστοχίας, όταν μελετάμε κατακόρυφες γεωτρήσεις. Τώρα, όσον αφορά τη κλίση της γεώτρησης σε αυτά τα πεδία προσδιορίστηκε, σύμφωνα με το κριτήριο Mogi-Coulomb, ότι η πιο ευμενής κατάσταση είναι για κλίση γεώτρησης $i = 10^\circ$ (αντιστοιχεί στο πρώτο πεδίο εφαρμογής, με ισότροπες οριζόντιες τάσεις), $i = 20^\circ$, $i = 40^\circ$ αντίστοιχα για κάθε μία από τις αναλύσεις.
- Όταν το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με το όριο μεταξύ εντατικής κατάστασης κανονικού ρήγματος και ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης, προέκυψε και για τα δύο κριτήρια αστοχίας, ότι οι οριζόντιες γεωτρήσεις είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις κατακόρυφες και ότι η πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο είναι αυτή, που πραγματοποιείται με αζιμούθιο προσανατολισμού $\alpha = 90^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της σ_h . Όσον αφορά τη κλίση της γεώτρησης προσδιορίστηκε, σύμφωνα με το κριτήριο Mogi-Coulomb, ότι η πιο ευμενής κατάσταση είναι για κλίση γεώτρησης $i = 70\%$.
- Όταν το καθεστώς των επιτόπου τάσεων σχετίζεται με εντατική κατάσταση ανάστροφου ρήγματος, παρατηρείται και για τα δύο κριτήρια αστοχίας, ότι οι οριζόντιες γεωτρήσεις

είναι πιο ευσταθείς, σε σχέση με τις κατακόρυφες και ότι η πιο ευσταθής γεώτρηση σε αυτό το πεδίο είναι αυτή, που πραγματοποιείται με αζιμούθιο προσανατολισμού $\alpha = 0^\circ$, δηλαδή στην διεύθυνση της σ_H . Όσον αφορά τη κλίση της γεώτρησης προσδιορίστηκε, σύμφωνα με το κριτήριο Mogi-Coulomb, ότι η πιο ευμενής κατάσταση είναι για κλίση γεώτρησης $i = 60\%$.

- Τέλος, παρατηρείται ότι και τα δύο κριτήρια αστοχίας, αν και έχουν σημαντικές αποκλίσεις στη τιμή της ελάχιστης πίεσης που απαιτείται για την ευστάθεια της γεώτρησης, όσον αφορά το αζιμούθιο προσανατολισμού (της γεώτρησης) για τον προσδιορισμό της πιο ευσταθής γεώτρησης, οι εκτιμήσεις τους συμπίπτουν. Ενώ, όσον αφορά τη κλίση (της γεώτρησης) για το προσδιορισμό της πιο ευσταθής γεώτρησης, τα δυο κριτήρια αστοχίας δεν καταλήγουν πάντα στο ίδιο συμπέρασμα, αλλά εάν όχι, οι εκτιμήσεις τους είναι κοντά.

Βιβλιογραφία

- [1]. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R., (2008). “Petroleum Related Rock Mechanics”, 2nd Edition. Elsevier, Petroleum Science 53.
- [2]. Adnooy B. S., and Looyeh R., (2010). “Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design”. Gulf Professional Publishing, Elsevier.
- [3]. Al-Ajmi A. M., Zimmerman R. W., (2006). “Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 1200-1211.
- [4]. Al-Ajmi A. M., Zimmerman R. W., Qaboos J., (2006). “Stability analysis of deviated boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion with applications to some oil and gas reservoirs”. *IADC/SPE 104035, Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*.
- [5]. Al-Khayari Mahmood R., Al-Ajmi A. M., Al-Wahaibi Y., (2016). “Probabilistic approach in wellbore stability analysis during drilling”. *Journal of Petroleum Engineering*, 3472158, 13.
- [6]. Colmenares L. B., Zoback M. D., (2002). “A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 695-729.
- [7]. Kingsborough R. H., Williams A. F., Hillis R. R., (1991). “Borehole instability on the Northwest Shelf of Australia”. In: Proceeding of the *SPE Asia Pacific Conference*, Perth, Western Australia, *SPE 23015*.
- [8]. Manshad Abbas Khaksar, Jalalifar H., Aslannejad M., (2014). “Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods”. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4: 359-369.
- [9]. Zhang Jincai, (2013). “Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 160-170.
- [10]. Al-Ajmi A. M., Zimmerman R. W., (2009). “A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability”. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69, 53-62.
- [11]. Tianshou Ma, Ping Chen, Chunhe Yang, Jian Zhao, (2015). “Wellbore stability analysis and well path optimization based on the breakout width model and Mogi-Coulomb criterion”. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 678-701.

- [12]. Al-Ajmi A. M., Zimmerman R. W., (2005). “Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 431-439.
- [13]. Kaffash A., Zare-Reisabadi M.R., (2013). “Borehole stability evaluation in overbalanced and underbalanced drilling: based on 3D failure criteria”. *Geosystem Engineering*, 16:2, 175-182.
- [14]. Yuan Jun-Liang, Deng Jin-Gen, Tan Qiang, Yu Bao-Hua, Jin Xiao-Chun, (2013). “Borehole stability analysis of horizontal drilling in shale gas reservoirs”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46:1157-1164.
- [15]. Aadnoy B.S., Larsen K., Berg P.C., (2002). “Analysis of stuck pipe in deviated boreholes”. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 37, 195-212.
- [16]. Simangunsong R.A., Villator J.J., Davis A.K., (2006). “Wellbore stability assessment for highly inclined wells using limited rock-mechanics data”. *SPE* 99644.
- [17]. McLean M., Addis M., (1990). “Wellbore stability: the effect of strength criteria on mud weight recommendations”. In: Proceedings of the 65th annual technical conference and exhibition, *Society of Petroleum Engineers*, New Orleans, *SPE* 20405
- [18]. Χατζηγώγος Θ., Καραουλάκης Φ., (2015). “Ανάλυση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”. Εκδόσεις ΣΕΑΒ.
- [19]. www.petrowiki.org/Borehole_instability (τελευταία επίσκεψη 27/02/2017)
- [20]. www.metal.ntua.gr/index.pl/notew7d1d1d2d8_gr (τελευταία επίσκεψη 27/02/2017)
- [21]. Javaux C., Cochet F., Gauthier B., Prinnet C., Ten haven L., TOTALFINAELF & Herriou M., TOTAL ABK, (2000). “3D geological model to reservoir simulation of the Lower Arab Formation – Abu Al Bukhoosh (ABK) field, offshore Abu Dhabi”. *SPE* 87235, *Society of Petroleum Engineers*.