



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για την περιγραφή αστοχιών σε τοιχώματα γεωτρήσεων μεγάλου βάθους και μεταβλητής διαμέτρου.

Βιτώρη Σοφία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2018

© 2018 Βιτώρη Σοφία

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).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής      Εφραιμίδης Γεώργιος.  
(Επιβλέπων)            Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,

Δεύτερος Εξεταστής    Κωμοδρόμος Αιμίλιος  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής      Καλλιόγλου Πολυξένη  
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# Αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για την περιγραφή αστοχιών σε τοιχώματα γεωτρήσεων μεγάλου βάθους και μεταβλητής διαμέτρου.

Βιτώρη Σοφία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραϊμίδης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής.

## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ευστάθειας τοιχωμάτων γεωτρήσεων μεγάλου βάθους και μεταβλητής διαμέτρου μέσω αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων. Γίνεται ανάλυση των παραμέτρων που καθορίζουν την σωστή πρόβλεψη της ευστάθειας και περιγράφονται οι αστοχίες, οι οποίες παρατηρούνται στον εδαφικό/ή βραχώδη σχηματισμό κατά την διάνοιξη μίας γεώτρησης, και εκτιμάται πως μέσω αυτών μπορεί να προσεγγιστεί η διεύθυνση των κύριων τάσεων του πεδίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καταστατικές εξισώσεις και περιγράφεται το εντατικό πεδίο γύρω από την οπή της γεώτρησης, σε δύο και τρεις διαστάσεις. Επιπρόσθετα μελετάται η επιρροή του καταστατικού μοντέλου περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς του γεωυλικού περιμετρικά της γεώτρησης, συγκρίνοντας τη θεωρία κλασσικής ελαστικότητας με τη θεωρία γραμμικής διακλάδωσης και θεωρίες ανωτέρας τάξης [π.χ. θεωρία βαθμοελαστικότητας (gradient elasticity)]. Ακολουθώντας, γίνεται αναφορά σε πειραματικά μοντέλα περιγραφής της βραχώμαζας γύρω από την γεώτρηση, με σκοπό την περιγραφή της επίδρασης του μεγέθους της οπής στην αντοχή των τοιχωμάτων της γεώτρησης που είναι γνωστή και ως φαινόμενο κλίμακας (size/scale effect). Στη συνέχεια ορίζεται ο συντελεστής SE ο οποίος αποτελεί ένα δείκτη σύγκρισης της ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης γύρω από την οπή. Χρησιμοποιώντας την θεωρία βαθμοελαστικότητας, για ισότροπο πρωτογενές πεδίο τάσεων, υπολογίζεται ο συντελεστής SE και συγκρίνεται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την θεωρία διακλάδωσης και της κλασσικής ελαστικότητας. Η απόκλιση από την κλασική λύση είναι πιο έντονη όσο αυξάνεται ο συντελεστής βαθμίδας  $c$  (gradient coefficient). Τέλος, γίνεται προσομοίωση του προβλήματος της οπής γεώτρησης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις. Για την περίπτωση μη ισότροπου πεδίου τάσεων τάσεων, ο λόγος SE τείνει στον λόγο της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση, όσο η αδιάστατη ακτινική απόσταση τείνει στο άπειρο.

# Analytical and numerical methods to describe breakouts on deep boreholes, with variable diameter.

## Abstract

The aim of the diploma thesis is to investigate the stability of drilling walls of deep boreholes with variable diameter through analytical and numerical methods. What follows is the analysis of the parameters determining the correct stability prediction, and the description of the failures observed in the soil / rocky formation during drilling. Through this methodology, the direction of the main stresses of the field, can be approached. Next, the constitutive equations are presented, and the stress field around the drilling hole is described, in two and three dimensions. In addition, we study the influence of the constitutive model describing the mechanical behavior of the geomaterial at the perimeter of the borehole, comparing classical elasticity theory with bifurcation theory and higher order theories (e.g. gradient elasticity theory). Subsequently, reference is made to experimental measurements describing the rock mass around the borehole, in order to describe the effect of size on the strength of borehole walls known as size/scale effect. Then, the SE coefficient is defined, as a comparison coefficient of the radial and tangential stress component around the hole. Using the gradient elasticity theory, for an isotropic far-field stress state, the SE coefficient is calculated and compared with the results obtained by the bifurcation theory and the classical elasticity. The deviation from the classical solution is more pronounced as the gradient coefficient  $c$  (gradient coefficient) increases. Finally, simulation of the borehole problem is made by using finite elements in 2D. In the case of non-isotropic in situ stress field, the SE ratio tends to the ratio of the maximum horizontal field stress to the minimum horizontal field stress as the non-dimensional radial distance tends to infinity.

## Περιεχόμενα

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας Συμβόλων .....  | 8   |
| Κατάλογος Πινάκων .....   | 12  |
| Κατάλογος Σχημάτων.....   | 12  |
| I. Γεωτρήσεις Μεγάλου Βάθους .....  | 18  |
| A. Περιγραφή και Εφαρμογές.....   | 18  |
| B. Κλίση της γεώτρησης και επίδραση στην μηχανική συμπεριφορά του βράχου .....  | 20  |
| II. Αστοχίες του βράχου κατά την διεξαγωγή της γεώτρησης, περιμετρικά της οπής.....   | 22  |
| A. Αστοχίες των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης (Borehole breakouts).....   | 22  |
| B. Θραύσεις κατά την διάνοιξη της οπής γεώτρησης.....   | 35  |
| III. Γεωστατικό Πεδίο Τάσεων Γύρω Από Την Οπή Γεώτρησης.....  | 39  |
| A. Κλασσική Ελαστικότητα .....  | 39  |
| I. Τάσεις γύρω από την οπή γεώτρησης.....   | 39  |
| II. Τάσεις και Παραμορφώσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες.....  | 40  |
| III. Τάσεις κοίλου κυλίνδρου.....   | 42  |
| IV. Κατανομή τάσεων με σταθερή πίεση πόρων .....  | 43  |
| B. Κατανομή τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης σε δισδιάστατο επίπεδο.....   | 46  |
| C. Κατανομή τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης σε τρισδιάστατο επίπεδο .....   | 48  |
| IV. Αναλυτικά Μοντέλα Περιγραφής Της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωϋλικού<br>Περιμετρικά Της Οπής Γεώτρησης .....   | 53  |
| A. Θεωρία Ελαστικότητας .....   | 53  |
| I. Ισότροπη Βραχόμαζα.....  | 53  |
| II. Μη ισότροπη Βραχόμαζα.....  | 57  |
| B. Θεωρία Γραμμικής Διακλάδωσης .....   | 63  |
| C. Θεωρία Βαθμοελαστικότητας.....   | 70  |
| V. Πειραματικά Μοντέλα Περιγραφής της Μηχανικής Συμπεριφοράς του βράχου γύρω<br>από την οπή μίας γεώτρησης.....   | 75  |
| A. Φαινόμενα Κλίμακας και Επίδραση Σχήματος και Τύπου Εδαφικού Υλικού.....  | 75  |
| VI. Σύγκριση των Αναλυτικών Μοντέλων Περιγραφής της Μηχανικής Συμπεριφοράς<br>Γεωϋλικού Οπής Γεώτρησης με βάση τον λόγο της εφαπτομενικής τάσης ως προς την<br>ακτινική τάση (SE) ..... | 91  |
| A. Υπολογισμός του λόγου SE: Θεωρία Ελαστικότητας.....  | 93  |
| B. Υπολογισμός του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση SE: Θεωρία<br>Γραμμικής Διακλάδωσης.....   | 95  |
| C. Υπολογισμός του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση: Θεωρία<br>Βαθμοελαστικότητας .....  | 97  |
| VII. Αριθμητική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της οπής γεώτρησης με την χρήση<br>του Phase .....   | 99  |
| A. Ισότροπο Πεδίο Τάσεων .....  | 101 |
| B. Ανισότροπο Πεδίο Τάσεων .....  | 116 |
| VIII. Συμπεράσματα και προτάσεις .....  | 126 |

|     |                    |     |
|-----|--------------------|-----|
| IX. | Παράρτημα.....     | 130 |
| X.  | Βιβλιογραφία ..... | 141 |

## Πίνακας Συμβόλων

(λ,μ)

οι ελαστικές σταθερές Lamé

(σ,ε)

τα απειροελάχιστα διανύσματα τάσης και παραμόρφωσης

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \gamma_{zx} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r & \frac{\gamma_{r\theta}}{2} & \frac{\gamma_{rz}}{2} \\ \frac{\gamma_{\theta r}}{2} & \varepsilon_\theta & \frac{\gamma_{\theta z}}{2} \\ \frac{\gamma_{zr}}{2} & \frac{\gamma_{z\theta}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

τανυστής ορθών παραμορφώσεων (τροπών) σε καρτεσιανές και κυλινδρικές συντεταγμένες

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

τανυστής τάσεων Cauchy σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κυλινδρικές συντεταγμένες.

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma'_x & \tau'_{xy} & \tau'_{xz} \\ \tau'_{yx} & \sigma'_y & \tau'_{yz} \\ \tau'_{zx} & \tau'_{zy} & \sigma'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma'_r & \tau'_{r\theta} & \tau'_{rz} \\ \tau'_{\theta r} & \sigma'_\theta & \tau'_{\theta z} \\ \tau'_{zr} & \tau'_{z\theta} & \sigma'_z \end{bmatrix}$$

τανυστής ενεργών τάσεων Cauchy σε καρτεσιανές και κυλινδρικές συντεταγμένες στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης

$\nabla^2$

ο Laplacianός τελεστής

$2\alpha$

μήκος ασυνέχειας με βάση το πρόβλημα λυγισμού ενός ημιχώρου [1]

$A_E$

ακουστικό-ελαστικοί παράμετροι

c

ο συντελεστής βαθμίδας

$C_{55}, C_{44}, C_{66}$

μέτρα δυσκαμψίας

D

διάμετρος οπής γεώτρησης

$E_{dynamic}$

μη ισότροπη δυναμική παράμετρος

$E_{horz}, E_{vert}, \nu_{vert}, \nu_{horz}$

μη ισότροπες δυναμικές και ελαστικές παράμετροι ((μέτρα ελαστικότητα και λόγοι Poisson))

$E_{static}$

μη ισότροπη ελαστική παράμετρος

$G_{fr}$

μέτρο διάτμησης του εκάστοτε σχηματισμού

h

αδιάστατη ακτίνας οπής με βάση τη θεωρία βαθμοελαστικότητας

k

συντελεστής γεωστατικών τάσεων



|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $L$                         | ύψος κυλινδρικού δοκιμίου οπής γεώτρησης  |
| $p_f$                       | η σταθερή πίεση πόρων του ρευστού   |
| $p_w$                       | πίεση της γεώτρησης που ασκείται στο εσωτερικό σύνορο της οπής της γεώτρησης  |
| $q$                         | μία σταθερά του υλικού, που σχετίζεται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη   |
| $R$                         | η ακτίνα της οπής της γεώτρησης   |
| $\Re$                       | το πραγματικό τμήμα μιγαδικής συνάρτησης  |
| $r_B$                       | η απόσταση από το κέντρο της οπής της γεώτρησης μετά την δημιουργία αστοχιών  |
| $R_o$                       | απόσταση του εξωτερικού συνόρου της οπής από το κέντρο της  |
| $R_w$                       | απόσταση του εσωτερικού συνόρου της οπής από το κέντρο της  |
| $S$                         | Αποτελέσματα απλοποιημένης επίλυσης του προβλήματος της μεταβολή της τάσης γύρω από μία οπή γεώτρησης [2]   |
| $SE$                        | ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση που ασκούνται στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης  |
| $u$                         | η μετατόπιση στην ακτινική διεύθυνση $r$ του τοιχώματος της οπής γεώτρησης  |
| $v$                         | η μετατόπιση στην εφαπτομενική διεύθυνση $\theta$ του τοιχώματος της οπής γεώτρησης   |
| $w$                         | η μετατόπιση στην αξονική διεύθυνση $z$ του τοιχώματος της οπής γεώτρησης   |
| $\alpha$                    | κατεύθυνση διατμητικής αστοχίας ως προς τον άξονα της γεώτρησης   |
| $\alpha_B$                  | παράμετρος Biot   |
| $\alpha_{ij} (i,j=1,2...6)$ | τανυστής συμβατότητας (compliance tensor)   |
| $\beta$                     | κατεύθυνση εφελκυστικής αστοχίας ως προς τον άξονα της γεώτρησης  |
| $\Delta P$                  | Διαφορά μεταξύ της πίεσης στο εσωτερικό της οπής της γεώτρησης και της πίεσης που ασκείται από τον σχηματισμό περιμετρικά του τοιχώματος της οπής της γεώτρησης |

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| E                                  | Αποτελέσματα ελαστικής επίλυσης του προβλήματος της μεταβολή της τάσης γύρω από μία οπή γεώτρησης [2]   |
| $\epsilon_f$                       | κανονικοποιημένη παραμόρφωση αστοχίας με βάση τη θεωρία βαθμοελαστικότητας                              |
| $\theta$                           | αζιμούθιο μεταξύ του άξονα της γεώτρησης και των επί τόπου τάσεων                                       |
| I                                  | ο μοναδιαίος τανυστής   |
| $K = \frac{\sigma_\theta}{\sigma}$ | ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης  |
| $\kappa$                           | κατεύθυνση της κύριας τάσης της οπής της γεώτρησης ως προς τον άξονα της γεώτρησης                      |
| $K_n$                              | η n-οστή τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 2 <sup>ου</sup> τύπου                                     |
| $\mu'$                             | συντελεστής τριβής του γεωλογικού σχηματισμού   |
| $\nu$                              | ο λόγος Poisson   |
| N                                  | Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος της μεταβολή της τάσης γύρω από μία οπή γεώτρησης [2] |
| $\xi$                              | αδιάστατη κρίσιμη τάση λυγισμού   |
| $\rho(z)$                          | η πυκνότητα σε βάθος z κάτω από την επιφάνεια του εδαφικού σχηματισμού                                  |
| $\sigma(h)$                        | η ολική κατακόρυφη τάση σε βάθος h  |
| $\sigma_\infty$                    | η αδιάστατη τάση στο άπειρο   |
| $\sigma_1$                         | μέγιστη κύρια κάθετη τάση στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης  |
| $\sigma_2$                         | ενδιάμεση κύρια κάθετη τάση στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης  |
| $\sigma_3$                         | ελάχιστη κύρια κάθετη τάση στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης   |
| $\sigma_c$                         | σταθερά του υλικού (τάση αστοχίας)  |
| $\sigma_f$                         | η κανονικοποιημένη τάση αστοχίας  |
| $\sigma_h$                         | ελάχιστη οριζόντια θλιπτική κύρια τάση  |
| $\sigma_r^*$                       | η αδιάστατη ακτινική τάση   |
| $\sigma_{r0}$                      | ακτινική τάση που ασκείται στο εξωτερικό σύνορο της οπής της γεώτρησης                                  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $\sigma_v$          | αξονική τάση που ασκείται στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης   |
| $\sigma_H$          | μέγιστη οριζόντια θλιπτική κύρια τάση  |
| $\sigma_{H1}$       | πρώτο επίπεδο μέγιστης οριζόντιας τάσης το οποίο ταυτοποιείται από την πρώτη ακουστική εκπομπή   |
| $\sigma_{H2}$       | δεύτερο επίπεδο μέγιστης οριζόντιας τάσης το οποίο ταυτοποιείται από την έναρξη των εμφανών αστοχιών, σε συνύπαρξη έντονων ακουστικών εκπομπών |
| $\sigma_{\theta^*}$ | η αδιάστατη εφαπτομενική τάση  |
| $\tau_o$            | μέγιστη τιμή συνεκτικής αντοχής (cohesive strength) βραχόμαζας   |
| $\phi$              | γωνία εσωτερικής τριβής  |
| $\phi_c$            | η γωνία τριβής του υλικού σε θλιπτική αστοχία  |

## Κατάλογος Πινάκων

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας II.1: Ταξινόμηση των Aadnoy και Bell (1998) των θραύσεων που δημιουργούνται κατά την διάνοιξη της οπής της γεώτρησης..... | 36 |
| Πίνακας VI.1 Δεδομένα παρατηρήσεων αστοχιών οπής γεώτρησης στο Auburn της Νέας Υόρκης [16]. ....                                  | 93 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα I.1 Ανωδομή της γεώτρησης στην χερσόνησο Κόλα, το 2007 (Kola Superdeep Borehole) [6].....   | 18 |
| Σχήμα I.2 (α) Το πραγματικό κάθετο βάθος μίας γεώτρησης, β)το μήκος της γεώτρησης, το οποίο ονομάζεται απλά και βάθος ( measured depth ή depth ή MD) [7].....   | 19 |
| Σχήμα I.3 Κύριες τάσεις στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης: (α) Κύριες τάσεις που δρουν κάθετα και παράλληλα στον άξονα της γεώτρησης, (b) κύριες τάσεις που δεν δρουν κάθετα, και παράλληλα στον άξονα της γεώτρησης [10]. ....  | 21 |
| Σχήμα II.1 Παρατήρηση αστοχίας του τοιχώματος της οπής γεώτρησης σε εργαστηριακή δοκιμή, η οποία εκτελέστηκε σε ψαμμίτη τύπου Berea. Η διαδοχική κατάρρευση του τοιχώματος οδηγεί στην ισορροπία του τοιχώματος της οπής [14].....  | 23 |
| Σχήμα II.2 Γεωμετρία της επίλυσης του Kirsch (1898) για την κατανομή των τάσεων γύρω από μία κυκλική οπή, υπό την επίδραση μονοαξονικής τάσης $\sigma_{xx}$ . Το κυλινδρικό στοιχείο στην θέση $(r, \theta)$ παρουσιάζει τις τάσεις που ασκούνται, σε κυλινδρικές συντεταγμένες [15]. ....  | 24 |
| Σχήμα II.3 Θραύση σε θλίψη, η οποία ενεργοποιήθηκε από μία ρωγμή: (α) οι τάσεις συγκεντρώνονται στα άκρα της ρωγμής, (b) οι μικρορωγμές διαδίδονται παράλληλα στην κατεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης [17]. ...  | 28 |
| Σχήμα II.4 Όψη του τοιχώματος της κατακόρυφης γεώτρησης 1 m, η οποία διανοίχτηκε σε γρανίτη (Lac du Bonnet). Παρατηρούνται τμήματα βράχου που έχουν υποστεί λυγισμό κατά μήκος της διεύθυνσης της $\sigma_H$ [18]... ..   | 29 |
| Σχήμα II.5 Μορφές αστοχίας σε (α) γρανίτη στο πεδίο και (b) ψαμμίτη σε εργαστηριακή δοκιμή [19]. ....   | 30 |
| Σχήμα II.6 Λεπτομέρεια της αστοχίας του σχήματος II.4. (α), όπου παρατηρούνται, λεπτά τμήματα βράχου που έχουν υποστεί λυγισμό, τα οποία δημιουργήθηκαν από σχεδόν παράλληλες μικρορωγμές κατά την διεύθυνση της $\sigma_H$ [18].....   | 30 |
| Σχήμα II.7 Τυπικές μορφές αστοχίας σχήματος V, σε γρανίτη τύπου (a) Lac du Bonnet και (b) Westerly [18].....  | 31 |
| Σχήμα II.8 Μορφή αστοχίας σε ασβεστόλιθο της Ιντιάνα. Παρατηρούνται μικρορωγμές λόγω εφελκυσμού, πίσω από το τοίχωμα της γεώτρησης, στην διεύθυνση της $\sigma_H$ και σχεδόν παράλληλα της κατεύθυνσης της $\sigma_H$ [18].....   | 31 |
| Σχήμα. II.9 Τυπικές μορφές αστοχίας σε ασβεστόλιθο τύπου Cordona Cream, οι οποίες ξεκινώντας από το τοίχωμα της γεώτρησης, τοποθετούνται συμμετρικά στις δύο πλευρές της κατεύθυνσης άσκησης της $\sigma_H$ . Οι διατμητικές ρηγματώσεις πορεύονται προς τον βράχο κατά μήκος των τροχιών της μέγιστης διατμητικής τάσης. Η λεπτομέρεια στο (b) παρέχει στοιχεία για την μορφή των χαλαρών κόκκων που παρουσιάζεται στο (α). Οι χαλαροί αυτοί κόκκοι απομακρύνονται λόγω διάτμησης [18]. .... | 32 |
| Σχήμα II.10 Μορφές περιοχών θραύσης, σχήματος V, σε ασβεστόλιθο τύπου Cordona Cream [18].....   | 33 |
| Σχήμα II.11 Διατομές γεωτρήσεων διανοιγμένες σε μέτριου προς υψηλού πορώδους ψαμμίτες, οι οποίοι είναι καλά συγκολλημένοι, με ποσοστά αστρίου μεταξύ 15% και 35% και χαλαζία μεταξύ 50% και 75% [18].....   | 33 |
| Σχήμα II.12 Διατομές γεωτρήσεων, διανοιγμένες σε 4 τύπους ψαμμίτη, μέτριου προς υψηλού πορώδους, οι οποίοι περιέχουν ποσοστό κόκκων χαλαζία από 90% έως 100% [18].....  | 34 |
| Σχήμα II.13 Ελλειπτική πλαστική περιοχή, η οποία περικλείει μία κυκλική οπή [20].....   | 35 |
| Σχήμα II.14 Μεταβολή της περιμετρικής τάσης $\sigma_{\theta\theta}$ , η οποία ασκείται στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης. Σχηματικές διατομές της μορφής της οπής γεώτρησης όσον αφορά τις αστοχίες αλλά και τις εφελκυστικές θραύσεις της οπής [22]. ....   | 37 |
| Σχήμα II.15 Παραδείγματα εφελκυστικών θραύσεων κατά την διάνοιξη οπής γεώτρησης (DITF) και αστοχιών οπής γεώτρησης (BB): Παρατηρούνται α) αξονικές εφελκυστικές θραύσεις (A-DITF) και αστοχίες οπής γεώτρησης (BB) , b) αξονικές εφελκυστικές θραύσεις (A-DITF) και αρχικές αστοχίες οπής γεώτρησης (BB), c) εντός της βαθμίδας θραύσεις (en-echelon, E-DITF), d) θραύσεις σχήματος οβάλ [15].....  | 39 |
| Σχήμα III.1 Τάσεις και μετατοπίσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες [23]. ....   | 40 |
| Σχήμα III.2 Τομή του μοντέλου, του κοίλου κυλίνδρου [23]. ....  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα III.3 Τάσεις γύρω από την οπή γεώτρησης σε γραμμικά ελαστικό σχηματισμό [23].  | 45 |
| Σχήμα III.4 Γεωμετρία της επίλυσης του Kirsch [1898], για την κατανομή των τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης [15].   | 47 |
| Σχήμα III.5 (α) Βραχόμαζα με ομογενή συγκέντρωση τάσεων, (β) βραχόμαζα με διανοιγμένη οπή όπου η συγκέντρωση των τάσεων θα μεταβληθεί [10].  | 48 |
| Σχήμα III.6 Σχηματική απεικόνιση των τάσεων πεδίου γύρω από μίας γεώτρησης [10].   | 50 |
| Σχήμα III.7 Απεικόνιση των τάσεων γύρω από μίας γεώτρησης [10].  | 50 |
| Σχήμα IV.0.1 Υπέρθυση των τάσεων πεδίου (Aadnoy et. al, 2011)  | 52 |
| Σχήμα IV.1 (α) Κατεύθυνση των πιθανών διατμητικών περιοχών αστοχίας για $\sigma = 45$ MPa, $\sigma_h = 30$ MPa, $\Delta P = 0$ και $\mu = 1$ , (β) Περιοχή στην οποία αναμένεται αστοχία για $\tau_o = 12.5$ MPa [16].   | 54 |
| Σχήμα IV.2 Σχέση μεταξύ του λόγου της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση και του μέγιστου βάθους και πλάτους των αστοχιών ανάλογα με την γωνία τριβής $\phi_B$ [16].  | 55 |
| Σχήμα IV.3 Διπλά Συμμετρική Οπή [25].  | 56 |
| Σχήμα IV.4 (α) Διπλά συμμετρική οπή, η οποία υπόκειται σε μη ισότροπη τάση, (β) δίσκος μοναδιαίας ακτίνας και σύστημα συντεταγμένων [26].  | 57 |
| Σχήμα IV.5 Συστήματα συντεταγμένων [28].   | 60 |
| Σχήμα IV.6 Διαφορά μεταξύ της ολικής τάσης, η οποία υπολογίστηκε σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για μία οπή γεώτρησης χρησιμοποιώντας ισότροπα και ανισότροπα μοντέλα [28].   | 62 |
| Σχήμα IV.7 Μορφές αστοχίας στο τοίχωμα της οπής: (α) επιφανειακή αστάθεια, (β) διατμητική ζώνωση (shear banding) [29].   | 63 |
| Σχήμα IV.8 Μεταβολή της αρχικής τάσης και της γωνίας τριβής περιμετρικά του τοιχώματος της οπής γεώτρησης [29].  | 64 |
| Σχήμα IV.9 Γεωμετρική απεικόνιση γεώτρησης μεγάλου βάθους [30].  | 65 |
| Σχήμα IV.10 Σχέση μεταξύ της κρίσιμης τάσης διακλάδωσης και της γωνίας τριβής του σχηματισμού [31].  | 66 |
| Σχήμα IV.11 Η ακτινική σύγκλιση μίας γεώτρησης, εξορυγμένης σε $h = 400$ m για λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης τάσης να ισούται με την μονάδα [2].  | 67 |
| Σχήμα IV.12 Η μεταβολή της τάσης γύρω από μία οπή γεώτρησης, εξορυγμένης σε $h = 400$ m για λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης τάσης να ισούται με την μονάδα [2].   | 68 |
| Σχήμα IV.13 Ακτινική σύγκλιση γεώτρησης σε βάθος $h = 1200$ m, για $n = 0.7$ [2].  | 69 |
| Σχήμα IV.14 Μεταβολή τάσης γεώτρησης σε βάθος $h = 1200$ m, για $n = 0.7$ [2].   | 69 |
| Σχήμα IV.15 Μεταβολή του παράγοντα τάσης $K$ και της κανονικοποιημένης τάσης αστοχίας $\sigma_f$ με την αδιάστατη ακτίνα της οπής $h$ [3].   | 71 |
| Σχήμα IV.16 Μεταβολή της κανονικοποιημένης παραμόρφωσης αστοχίας με την αδιάστατη ακτίνα της γεώτρησης $h$ [3].  | 72 |
| Σχήμα IV.17 Τάση, παραμόρφωση και μετατόπιση σύμφωνα με τα αποτελέσματα των θεωριών κλασσικής ελαστικότητας και βαθμοελαστικότητας, σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση [32].  | 73 |
| Σχήμα IV.18 Κανονικοποιημένη παραμόρφωση αστοχίας συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας της γεώτρησης [32].  | 74 |
| Σχήμα V.1 Πειραματικά δεδομένα για φαινόμενα κλίμακας σε προβλήματα γεωτρήσεων [33].   | 75 |
| Σχήμα V.2 Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου κλίμακας της επίδρασης του σχήματος του δοκιμίου, από δοκιμές αξονικής συμπίεσης, σε κυλινδρικά δοκίμια βράχου. (α) Σταθερή διάμετρος $D$ και μεταβαλλόμενο ύψος $L$ του δοκιμίου (επίδραση σχήματος), (β) Σταθερό ύψος $L$ και μεταβαλλόμενη διάμετρος $D$ (επίδραση σχήματος), (c) Σταθερός λόγος $D/L$ (φαινόμενο κλίμακας) [33]. | 76 |
| Σχήμα V.3 Σταθεροποιημένη αστοχία (Στάδιο 4ο). Εφαρμοζόμενες τάσεις μακρινού πεδίου τάσεων $\sigma_h = 10$ MPa, $\sigma_v = 15$ MPa, $\sigma_h = 38$ MPa. Η αστοχία έχει σχήμα V, ενώ η αρχική θέση του τοιχώματος της οπής σκιαγραφείται από την διακεκομμένη γραμμή [34].  | 78 |
| Σχήμα V.4 Μορφή αστοχίας υπό επιβολή ομοιόμορφης οριζόντιας τάσης. $\sigma_h = \sigma_v = 40$ MPa, $\sigma_v = 10$ MPa [34].   | 79 |
| Σχήμα V.5 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της αξιμουθιακής γωνίας και της ελάχιστης οριζόντιας τάσης [34].  | 80 |
| Σχήμα V.6 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της μέγιστης οριζόντιας τάσης και της ελάχιστης οριζόντιας τάσης [34].  | 80 |
| Σχήμα V.7 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της αξιμουθιακής γωνίας και της ελάχιστης κύριας τάσης [34].  | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα V.8 Σχέση μεταξύ της $\sigma_{H1}$ και της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης $\sigma_h$ [35].....   | 82  |
| Σχήμα V.9 Σχέση μεταξύ της $\sigma_{H2}$ και της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης $\sigma_h$ [35].....   | 83  |
| Σχήμα V.10 Τυπική μορφή αστοχίας σε ψαμμίτη μέτριου πορώδους τύπου Berea. (α) Διατομή της γεώτρησης, η οποία διανοίχθηκε υπό τάσεις μακρινού πεδίου, $\sigma_H=100$ MPa, $\sigma_h=50$ MPa, $\sigma_v=60$ MPa. Η αστοχία έχει τη μορφή σχήματος V, και είναι στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης.(b) Λεπτομέρεια της «άκρης» της αστοχίας του σχήματος (α), όπου φαίνονται διασταλτικές μικρορωγμές μεταξύ των κόκκων, οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό αστοχιών μορφής V [18]. .....  | 84  |
| Σχήμα V.11 Μοντέλο του προτεινόμενου μη διασταλτικού μηχανισμού αστοχίας, ο οποίος οδηγεί σε αστοχίες τύπου ρηγματώσεων σε υψηλού πορώδους ψαμμίτες Berea. (a) Η υψηλή συγκέντρωση τάσης στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης (βέλη χρώματος γκρι) αποδυναμώνει τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων, οι οποίοι έτσι κατευθύνονται προς την διεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης και δημιουργούν μία συμπαγή λωρίδα (compaction band). Τα μαύρα βέλη δείχνουν την μετακίνηση της συγκέντρωσης τάσης καθώς η αστοχία διευρύνεται. Το ανακυκλιζόμενο νερό υποβοηθά στην απομάκρυνση των κόκκων. (b) Η συγκέντρωση τάσης παραμένει υψηλή στην άκρη της αστοχίας, επεκτείνοντας την συμπαγή λωρίδα και απελευθερώνοντας επιπλέον κόκκους [18]..... | 85  |
| Σχήμα V.12 Τυπική μορφή αστοχίας σε ψαμμίτη Berea, με 25% πορώδες. (α) Διατομή της γεώτρησης, στην οποία παρατηρούνται 2 αστοχίες με μορφή ρηγματώσεων, οι οποίες επεκτείνονται κάθετα στη μέγιστη οριζόντια κύρια τάση. (b) Μικρογραφία της αστοχίας σε μία διαφορετική διατομή του ίδιου δοκιμίου με το (α), στην οποία παρατηρούνται κόκκοι άμμου να αποτελούν το τοίχωμα της οπής της γεώτρησης και απουσιάζουν μικρορωγμές μεταξύ των κόκκων [18]. .....   | 86  |
| Σχήμα V.13 Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης των αστοχιών στον βιτουμενιούχο σχιστόλιθο κατά την αύξηση της πίεσης [36].....   | 88  |
| Σχήμα V.14 Σχέση τάσης και παραμόρφωσης για διαμέτρους οπής 10 mm και 20 mm, δείγματος με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 7% [37]. .....   | 90  |
| Σχήμα VI.1 Σφαιρικό στοιχείο, σύμφωνα με τον McCutchen (1982), στο οποίο παρουσιάζονται (α) η μετατόπιση $u$ λόγω της βαρύτητας, (b) οι αντίστοιχες τάσεις που ασκούνται στο στοιχείο [40].....   | 92  |
| Σχήμα VI.2 Μεταβολή του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση (SE) σε συνάρτηση του λόγου $r/R$ , με βάση την Θεωρία Ισότροπης Βραχώμαζας (Zoback et. al., 1985), για $\sigma_H/\sigma_h = 2.24$ , $\mu=0.6$ .....  | 94  |
| Σχήμα VI.3 Μεταβολή του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση σε συνάρτηση του λόγου $r/R$ , με βάση την Θεωρία γραμμικής διακλάδωσης [29] για $\sigma_{inf}=0.5\sigma_v$ , $N=1$ και $\phi_c=32,86^\circ$ .....  | 96  |
| Σχήμα VI.4 Λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση SE σε συνάρτηση του λόγου $r/R$ , σύμφωνα με την θεωρία βαθμοελαστικότητας των Efreimidis et. al. (1998), και Efreimidis & Aifantis (2004) .....   | 98  |
| Σχήμα VII.1 Αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη Lac du Bonnet, με τη χρήση της δοκιμής Brazilian Test [41].....   | 100 |
| Σχήμα VII.2 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase για $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 101 |
| Σχήμα VII.3 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase για $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 101 |
| Σχήμα VII.4 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase για $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 102 |
| Σχήμα VII.5 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 103 |
| Σχήμα VII.6 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 103 |
| Σχήμα VII.7: Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 104 |
| Σχήμα VII.8 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 104 |
| Σχήμα VII.9 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 105 |
| Σχήμα VII.10 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα VII.11 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 106 |
| Σχήμα VII.12 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 106 |
| Σχήμα VII.13 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 107 |
| Σχήμα VII.14 Μεταβολή του λόγου $\sigma_r/\sigma$ σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήση με ακτίνα οπής 1cm και ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa).<br>.....  | 108 |
| Σχήμα VII.15 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 109 |
| Σχήμα VII.16 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 109 |
| Σχήμα VII.17 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 110 |
| Σχήμα VII.18 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 110 |
| Σχήμα VII.19 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 111 |
| Σχήμα VII.20 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 111 |
| Σχήμα VII.21 Μεταβολή του λόγου $\sigma_r/\sigma$ σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήση με ακτίνα οπής 1cm και ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa)<br>.....   | 112 |
| Σχήμα VII.22 Μεταβολή του λόγου $\sigma_r/\sigma$ σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήσεις με ακτίνα οπής 1cm, 5 cm, 10 cm και ισότροπο πεδίο οριζόντιων τάσεων με α) $\sigma=\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa και β) $\sigma=\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa. Επαλήθευση της κλασικής ελαστικότητας δηλαδή καμμία εξάρτηση της ακτινικής (αλλά και της εφαπτομενικής) τάσης από το μέγεθος της οπής γεώτρησης.<br>..... | 113 |
| Σχήμα VII.23 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης $r/R$ για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa). ....  | 114 |
| Σχήμα VII.24 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης $r/R$ για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa). ....   | 114 |
| Σχήμα VII.25 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης $r/R$ για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με την θεωρία κλασικής ελαστικότητας (αναλυτική επίλυση) για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=54$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa). ....  | 115 |
| Σχήμα VII.26 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης $r/R$ για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με την θεωρία κλασικής ελαστικότητας (αναλυτική επίλυση) για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=12$ MPa, $\sigma_v=36$ MPa). ....  | 116 |
| Σχήμα VII.27 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase για $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 117 |
| Σχήμα VII.28 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase για $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 117 |
| Σχήμα VII.29 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase για $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....   | 118 |
| Σχήμα VII.30 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 118 |
| Σχήμα VII.31 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 119 |
| Σχήμα VII.32 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa. ....  | 119 |





|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα IX.16 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 137 |
| Σχήμα IX.17 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 138 |
| Σχήμα IX.18 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 138 |
| Σχήμα IX.19 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa.....  | 139 |
| Σχήμα IX.20 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_1$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa..... | 139 |
| Σχήμα IX.21 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση $\sigma_3$ με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου $\sigma_h=12$ MPa, $\sigma_H=54$ MPa, και $\sigma_v=36$ MPa..... | 140 |

## I. Γεωτρήσεις Μεγάλου Βάθους

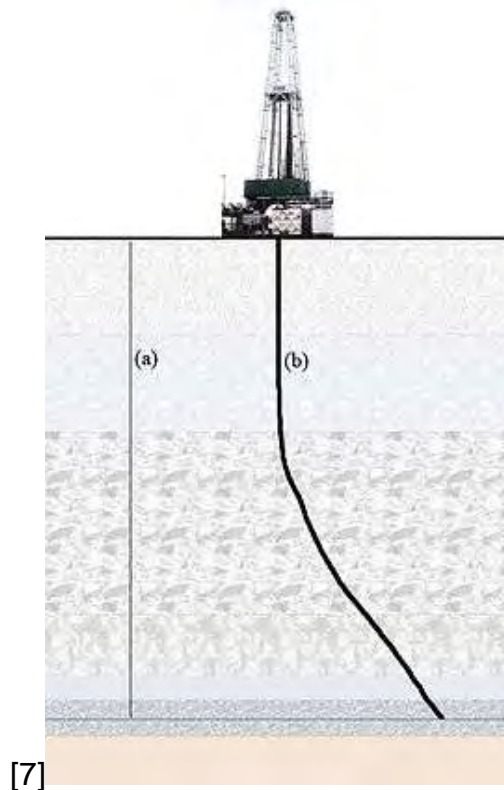
### A. Περιγραφή και Εφαρμογές

Γενικά, ως γεώτρηση ορίζεται η κατακόρυφη ή η κεκλιμένη κυκλικής ή άλλης διαμέτρου, οπή, η οποία ορύσσεται στο υπέδαφος με ειδικό μηχάνημα και κατάλληλο εξοπλισμό [4].

Ειδικά, ο όρος γεώτρηση μεγάλου βάθους αναφέρεται στην γεώτρηση των βαθύτερων στρωμάτων του φλοιού της γης και μπορεί να φτάσει σε πραγματικά βάθη μεγαλύτερα των 12 km (Σχήμα I.2). Η βαθύτερη γεώτρηση, όσον αφορά το πραγματικό βάθος, διανοίχτηκε το 1989, στην χερσόνησο Κόλα της Ρωσίας, σε πλαίσια επιστημονικής έρευνας της Σοβιετικής Ένωσης, με το βαθύτερο σημείο να φτάνει τα 12262 m (Kola Superdeep Borehole, Σχήμα I.1). Έκτοτε έχουν διανοιχτεί και άλλες γεωτρήσεις με παρόμοια βάθη, όπως η πετρελαιοπηγή Al Shaheen, στο Κατάρ (12289 m) και η γεώτρηση εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, OP-11 (12376 m), στη Σαχαλίνη της Ρωσίας [5] [6].



Σχήμα I.1 Ανωδομή της γεώτρησης στην χερσόνησο Κόλα, το 2007 (Kola Superdeep Borehole) [6].



Σχήμα 1.2 (α) Το πραγματικό κάθετο βάθος μίας γεώτρησης, (β) το μήκος της γεώτρησης, το οποίο ονομάζεται απλά και βάθος ( measured depth ή depth ή MD) [7]

Ο σκοπός διάνοιξης γεωτρήσεων μεγάλου βάθους είναι η άντληση πετρελαίου, φυσικού αερίου ή γεωθερμικών υλικών [8]. Οι γεωτρήσεις μεγάλου βάθους εφαρμόζονται επίσης στην γεωτεχνική έρευνα, στην μεταλλευτική εκμετάλλευση, στην κατασκευή πασσάλων θεμελίωσης (drilled shafts, piles), στην έρευνα η οποία αφορά ραδιενεργά απόβλητα και γεωλογικούς κινδύνους και σε στρατιωτικές εφαρμογές [9].

Οι γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι οποίες πραγματοποιούνται τα τελευταία 100 έτη, αποτελούν την κυριότερη πηγή δεδομένων της γεωτεχνικής έρευνας. Τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου συναντώνται συνήθως σε ιζηματογενή πετρώματα, και σε ειδικότερες περιπτώσεις σε περιοχές ρηγματώσεων πλουτωνικών πετρωμάτων (π.χ. γρανίτες) [9].

Όσον αφορά στις γεωτρήσεις γεωθερμικών υλικών, οι οποίες αν και έχουν πολλά

κοινά χαρακτηριστικά με τις γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, παρουσιάζουν δυσκολίες διότι συναντούν σκληρούς βραχώδεις σχηματισμούς αλλά και αντίξοες θερμοκρασιακές συνθήκες [9].

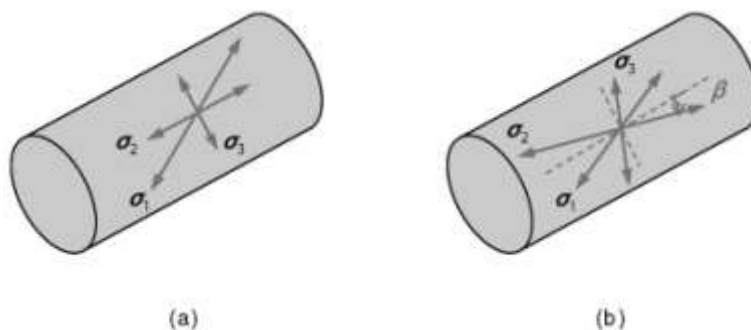
Σημειώνεται επιπλέον πως οι γεωτρήσεις που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στην κατανόηση των μηχανικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν και ελέγχουν τις γεωτρήσεις μεγάλου βάθους [9].

Η επιστήμη που ασχολείται με την πρόβλεψη της παραμόρφωσης, ρηγμάτωσης ή κατάρρευσης ενός βραχώδους σχηματισμού, η οποία προκαλείται κατά την γεώτρηση ή την παραγωγή πετρελαίου καλείται βραχομηχανική πετρελαίου (petroleum rock mechanics). Η βραχομηχανική πετρελαίου αναπτύχθηκε κατά τις αρχές της βιομηχανικής παραγωγής πετρελαίου, ενώ η εκμετάλλευση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου λαμβάνει χώρα από τον περασμένο αιώνα [10].

## B. Κλίση της γεώτρησης και επίδραση στην μηχανική συμπεριφορά του βράχου

Για την διάνοιξη μίας πετρελαιοπηγής πρέπει να γίνουν αντιληπτοί οι βασικοί μηχανισμοί που χαρακτηρίζουν την αστοχία του βράχου, καθώς και οι αρχές της βραχομηχανικής. Η βραχομηχανική βασίζεται στην εφαρμογή της Νευτώνιας μηχανικής για την μελέτη των βραχωδών σχηματισμών. Συγκεκριμένα μελετά την συμπεριφορά του βράχου κατά τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα κατά την εκσκαφή, την μεταβολή τάσης, την παραμόρφωση των τοιχωμάτων, την ροή ρευστών, την θερμοκρασιακή μεταβολή, την διάβρωση και άλλα φαινόμενα [10].

Κατά την διάνοιξη της οπής, η οποία δεν είναι απαραίτητα κάθετη, προκαλούνται υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων περιμετρικά αυτής (Σχήμα Ι.3). Οι τάσεις αυτές είναι πιθανό να ξεπεράσουν την αντοχή του βραχώδους σχηματισμού με επακόλουθο την αστοχία [10].



Σχήμα 1.3 Κύριες τάσεις στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης: (a) Κύριες τάσεις που δρουν κάθετα και παράλληλα στον άξονα της γεώτρησης, (b) κύριες τάσεις που δεν δρουν κάθετα, και παράλληλα στον άξονα της γεώτρησης [10].

Η σωστή πρόβλεψη της ευστάθειας των γεωτρήσεων αποτελεί ουσιώδη παράγοντα στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς η ανάπτυξη των διεθνών εταιρειών πετρελαίου και φυσικού αερίου σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση των ενεργειακών πρώτων υλών, οδηγούν στην σταδιακή μείωση των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη εκμετάλλευσης διαφορετικών ενεργειακών πηγών όπως οι αέριοι και οι υγροί υδρογονάνθρακες, το έγκλειστο φυσικό αέριο κ.α. Η εκμετάλλευση των παραπάνω, σε μεγαλύτερα βάθη τόσο στη στεριά όσο και στον θαλάσσιο πυθμένα, απαιτεί την κατασκευή κεκλιμένων γεωτρήσεων, στις οποίες η ανάπτυξη κλίσης δημιουργεί αυξημένες πιέσεις και θερμοκρασίες [10], [11]. Οι κεκλιμένες αυτές γεωτρήσεις αν και αποτελούν οικονομικότερη λύση, χαρακτηρίζονται από μικρότερη ευστάθεια. Συνεπώς ο κακός σχεδιασμός αυτών μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο κόστος [10].

Τα προβλήματα αστάθειας των γεωτρήσεων κοστίζουν πάνω από 100 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο παγκοσμίως. Η μελέτη αυτών των προβλημάτων, καθώς και της ευστάθειας των γεωτρήσεων καθορίζεται από την κατανομή των τάσεων, η οποία εξαρτάται από τον καταστατικό νόμο που χαρακτηρίζει τον βραχώδη σχηματισμό και το κριτήριο αστοχίας που επιλέγεται από τον εκάστοτε ερευνητή [11].

Όσον αφορά στην επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας, για την ανάλυση της ευστάθειας μίας γεώτρησης, αυτή εξαρτάται από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του βραχώδους σχηματισμού [12]. Ένας βραχώδης σχηματισμός, αποτελείται από κόκκους διαφορετικών μεγεθών, σχήματος και κατεύθυνσης, κενά μεταξύ των κόκκων, προέρχεται από

διαφορετικά ορυκτά υλικά και γενικά δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ισότροπο και ομογενές υλικό. Η αντοχή ενός βραχώδους σχηματισμού καθορίζεται από όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά του, αλλά και από την κατηγοριοποίησή του ως ισότροπο, ανισότροπο, ομογενές ή μη ομογενές υλικό [10].

Σύμφωνα με τον Aadnøy (1988), σε βραχώδεις σχηματισμούς που έχουν χαρακτηριστεί ως ανισότροπα υλικά, οι ελαστικές τους παράμετροι, όπως το μέτρο του Young και ο λόγος του Poisson, επηρεάζουν σημαντικά την ρηγμάτωση και την αστοχία των γεωτρήσεων. Η τάση και η παραμόρφωση αυξάνονται, γεγονός που υποδεικνύει την σημασία των ελαστικών παραμέτρων στον καθορισμό της παραμόρφωσης της οπής της γεώτρησης.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας όσον αφορά τις γεωτρήσεις μεγάλου βάθους σε ιζηματογενή πετρώματα, είναι η επιλογή της κατάλληλης κλίσης διάνοιξης της γεώτρησης [10]. Η διατμητική αντοχή μειώνεται σημαντικά όταν το επίπεδο διαστρωμάτωσης του βράχου διαφέρει από  $10^\circ$  έως  $40^\circ$  (μοίρες) από τον άξονα της γεώτρησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο καθορίζονται τα επίπεδα στα οποία είναι πιθανότερο να επέλθει αστοχία της κατασκευής [10].

## II. Αστοχίες του βράχου κατά την διεξαγωγή της γεώτρησης, περιμετρικά της οπής

Δύο είναι οι τύποι αστοχιών που σχετίζονται με τις γεωτρήσεις μεγάλου βάθους: οι αστοχίες των τοιχωμάτων των οπών των γεωτρήσεων (borehole breakouts), οι οποίες προκαλούνται λόγω των κατανεμημένων τάσεων (διατμητικές αστοχίες), καθώς και οι εφελκυστικές θραύσεις κατά την διάνοιξη αυτών (drilling induced tensile fractures ή DITFs).

Οι αστοχίες αυτές αποτελούν σημαντικές ενδείξεις της κατεύθυνσης της οριζόντιας τάσης, συγκεκριμένα σε μεσαία βάθη (<5 km) και σε μη σεισμικές περιοχές, καθώς και το 19% της βάσης του Διεθνή Χάρτη Τάσεων έχει προσδιοριστεί από τους παραπάνω τύπους αστοχιών [13]. Επιπλέον, αυτοί οι τύποι αστοχιών παρέχουν την πλειονότητα των διευθύνσεων των τάσεων σε πετρελαϊκά και γεωθερμικά συστήματα [13].

### A. Αστοχίες των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης (Borehole breakouts)

Οι γεωτρήσεις που διανοίγονται σε βραχώδεις σχηματισμούς, δύναται να προκαλέσουν την αστοχία ή κατάρρευση αυτού περιμετρικά της οπής της γεώτρησης, καθώς το υλικό που απομακρύνεται δεν συγκρατεί πλέον την βραχώμαζα (Σχήμα II.1). Συνεπώς, παρεμποδίζεται η διάνοιξη αυτής, αλλά και οι τεχνικές επί τόπου μέτρησης.

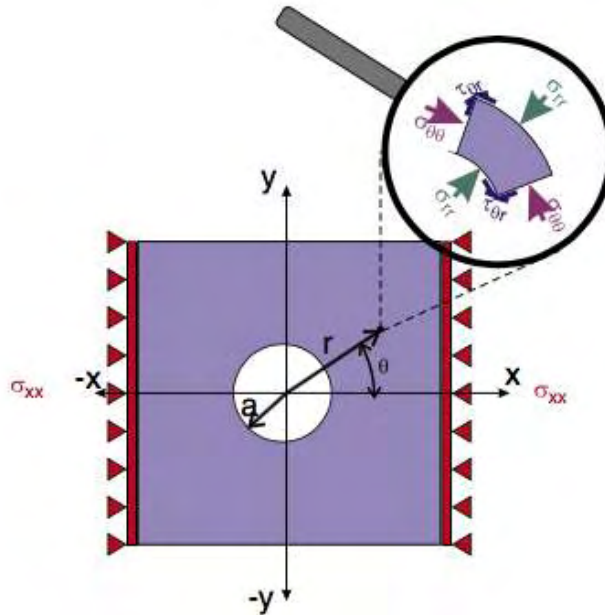


Σχήμα II.1 Παρατήρηση αστοχίας του τοιχώματος της οπής γεώτρησης σε εργαστηριακή δοκιμή, η οποία εκτελέστηκε σε ψαμμίτη τύπου Berea. Η διαδοχική κατάρρευση του τοιχώματος οδηγεί στην ισορροπία του τοιχώματος της οπής [14].

Συνήθως το αποτέλεσμα της αστοχίας είναι η επιμήκυνση του τέμνοντος τμήματος της γεώτρησης, κατά την διεύθυνση της ελάχιστης κύριας θλιπτικής τάσης, κάθετα στον άξονα της γεώτρησης [14]. Όπως επισήμαναν οι Zheng et. Al. (1989), τέτοιου είδους περιοχές θραύσεως υποδεικνύουν την διεύθυνση της ελάχιστης θλιπτικής τάσης κάθετα στον άξονα της γεώτρησης. Ακόμη, το σχήμα των περιοχών αυτών παρέχει πληροφορίες τόσο για την μέγιστη, όσο και για την ελάχιστη τάση και σχετίζεται με την αντοχή του βράχου.

Ακόμη και σε συνθήκες στις οποίες το μέγεθος των τάσεων που ασκούνται στον βράχο αλλά και η αντοχή του βράχου είναι ίσες, έχει δειχθεί πως παρατηρούνται θραύσεις στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης [14].

Οι Gough and Bell (1982) και Zoback et al. (1985) εφάρμοσαν το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για την κατανομή των τάσεων περιμετρικά μίας κυκλικής οπής γεώτρησης σε ελαστικό υλικό, σύμφωνα με τις εξισώσεις του Kirsch (Σχήμα II.2), ώστε να αναλύσουν τις παραπάνω αστοχίες [14].



Σχήμα II.2 Γεωμετρία της επίλυσης του Kirsch (1898) για την κατανομή των τάσεων γύρω από μία κυκλική οπή, υπό την επίδραση μονοαξονικής τάσης  $\sigma_{xx}$ . Το κυλινδρικό στοιχείο στην θέση  $(r, \theta)$  παρουσιάζει τις τάσεις που ασκούνται, σε κυλινδρικές συντεταγμένες [15].

Σύμφωνα με τους Gough and Bell (1981), Bell and Gough (1982), οι θραύσεις περιμετρικά των οπών γεωτρήσεων εμφανίζονται ως κατακερματισμένες περιοχές βραχόμαζας με κατεύθυνση προς το αζιμούθιο της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης, όπου η συγκέντρωση της θλιπτικής κύριας τάσης είναι μέγιστη.

Ως αζιμούθιο  $\theta$  ορίζεται ο προσανατολισμός (η γωνία) μεταξύ του άξονα της γεώτρησης και των επί τόπου τάσεων (Σχήμα II.2). Σε περίπτωση οριζόντιου ή κατακόρυφου πεδίου τάσεων, το αζιμούθιο ταυτίζεται με το γεωγραφικό αζιμούθιο της γεώτρησης (Σχήμα I.3 (a)). Όταν οι κύριες τάσεις δρουν κάθετα, αλλά όχι παράλληλα στον άξονα της γεώτρησης (Σχήμα I.3 (b)), δημιουργείται μία γωνία απόκλισης  $\beta$  από αυτόν [10].

Οι θραύσεις είναι αποτέλεσμα της τοπικής διατμητικής αστοχίας. Η ανάλυσή τους, με βάση τις εξισώσεις του Kirsch προέβλεπε πως η περιοχή της αστοχίας σε τομή της γεώτρησης έχει σχήμα τριγωνικό και περιβάλλεται από διατμητικά επίπεδα με σταθερό προσανατολισμό στο αζιμούθιο της επί-τόπου οριζόντιας κύριας τάσης (far-field stress) [16]. Με βάση τα παραπάνω, οι Gough and Bell (1981), Bell and Gough (1982) πρότειναν πως το αζιμούθιο



αυτών των διατμητικών θραύσεων παρείχε στοιχεία για τις τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της βραχόμαζας [15].

Η θεωρητική ανάλυση του μηχανισμού θραύσεως επεκτάθηκε από τους Zoback et. al. (1985), οι οποίοι βασιζόμενοι στο κριτήριο Mohr-Coulomb όρισαν περιοχές περιμετρικά της κυκλικής οπής, στις οποίες οι ελαστικές τάσεις υπερβαίνουν την αντοχή της βραχόμαζας. Στη συνέχεια όρισαν περιοχές τις αρχικές περιοχές θραύσης, οι οποίες είχαν ευρεία ανάπτυξη χωρίς την εμφάνιση περιοχής θραύσης τριγωνικού σχήματος. Με χρήση αριθμητικών μοντέλων για την ανάλυση της ανάπτυξης των ζωνών θραύσης, συμπέραναν πως επιπρόσθετες περιοχές θραύσης δημιουργούνται μπροστά από τις αρχικές. Προέβλεψαν ότι όσο η περιοχή θραύσης μεγαλώνει, η περιοχή κάθετα στον άξονα της γεώτρησης επεκτείνεται, προς την κατεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης. Επομένως, παρατηρείται μία συνεχής αύξηση της συγκέντρωσης τάσεων γύρω από την γεώτρηση. Συμπέραναν πως η εφαρμοσιμότητα του κλασσικού ελαστικού μοντέλου είναι αμφίβολη για την ανάλυση του παραπάνω μηχανισμού αστοχίας, καθώς λαμβάνει χώρα ανελαστική παραμόρφωση κατά την αστοχία της βραχόμαζας [16].

Οι Detournay και Roegiers (1986) επισήμαναν τα παρακάτω, όσον αφορά στην έρευνα των Zoback et al. (1985): η ανάλυση των αστοχιών της οπής γεώτρησης πρέπει να λάβει υπόψη τόσο τις αναπτυσσόμενες τάσεις, όσο και τις γεωμετρικές επιδράσεις. Ακόμη το μοντέλο της οπής γεώτρησης μπορεί να προσομοιωθεί ως δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, όπου μπορούν να προκύψουν 3 μορφές αστοχίας: α) ρωγμές παράλληλα στην διεύθυνση της φόρτισης (ψαθυρή μορφή αστοχίας –έμμεσος εφελκυσμός), β) διατμητική αστοχία κατά μήκος διακριτών επιπέδων (ψαθυρή μορφή αστοχίας) και γ) ομογενής διατμητική αστοχία (ελαστική μορφή αστοχίας). Τέλος, η αρχική αστοχία κινητοποιεί τη δημιουργία περαιτέρω περιοχών θραύσης, λόγω της ανακατανομής των τάσεων.

Σύμφωνα με τους Zheng et. al. (1989), η βραχόμαζα, η οποία περικλείει μία οπή γεώτρησης (χωρίς πίεση αντιστήριξης), υπόκειται στην περίμετρο της οπής, σε έντονη εφαπτομενική θλίψη και μηδενική ακτινική τάση. Ακόμη στην μονοαξονική θλίψη, η βραχόμαζα που περικλείει μια κυλινδρική επιφάνεια, υπόκειται επίσης σε υψηλή τάση παράλληλα στην επιφάνεια της και μηδενική τάση κάθετα στην επιφάνειά της. Έτσι, στην

μονοαξονική θλίψη ή την τριαξονική θλίψη, υπό την επίδραση πολύ μικρών θλιπτικών τάσεων, παρατηρείται διάρρηξη λόγω εφελκυσμού της βραχώμαζας παράλληλα στην κατεύθυνση φόρτισης [14]. Αντιθέτως, υπό υψηλότερες τιμές τάσης πεδίου, η διάρρηξη λόγω εφελκυσμού δεν υπάρχει και λαμβάνει χώρα διατμητική αστοχία. Η διάρρηξη λόγω εφελκυσμού έχει αποδειχθεί πως συμβαίνει λόγω της ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (tensile cracks), οι οποίες προέρχονται από συγκεντρώσεις τάσεων, όπως σε ρωγμές, σε πορώδη πετρώματα (porous rocks), περιοχές μετάβασης διαφορετικών υλικών (material contrasts), και σε σύνορα κόκκων (grain boundaries) [14].

Στην έρευνα των Zheng et al. (1989), υποστηρίζεται πως κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια της οπής της γεώτρησης η φόρτιση γίνεται σε συνθήκες ανεμπόδιστης επίπεδης παραμόρφωσης (unconfined plane strain), με παρουσία υψηλής εφαπτομενικής τάσης, μίας τάσης παράλληλης στον άξονα της γεώτρησης και μηδενικής ακτινικής τάσης. Επίσης αναφέρεται ότι η αστοχία είναι πιθανό να συμβεί λόγω της διάρρηξης λόγω εφελκυσμού παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια, πράγμα το οποίο γίνεται σε τιμές τάσεις μικρότερες από την αντοχή του βράχου σε μονοαξονική θλίψη. Οι Zheng et. al. (1989) θεώρησαν πως για την διάρρηξη λόγω εφελκυσμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία σταθερή ανεμπόδιστη αντοχή επίπεδης παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, υπέθεσαν πως η διάρρηξη λόγω εφελκυσμού αποτελεί μικρομηχανικό μοντέλο του διαδοχικού θρυμματισμού, ο οποίος συμβαίνει πλησίον του τοιχώματος της οπής και δημιουργεί την περιοχή θραύσης. Τέλος, υποστήριξαν πως σε μεγάλη απόσταση από το σύνορο της γεώτρησης, όπου η ακτινική τάση δεν είναι πλέον μηδενική, αλλά αυξάνεται με την απόσταση ,έως ότου πάρει μία σταθερή τιμή, η αστοχία είναι πιθανότερο να συμβεί ως θραύση με διάτμηση. Έτσι χρησιμοποίησαν το κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb λόγω της θραύσης με διάτμηση για τις περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το σύνορο της γεώτρησης.

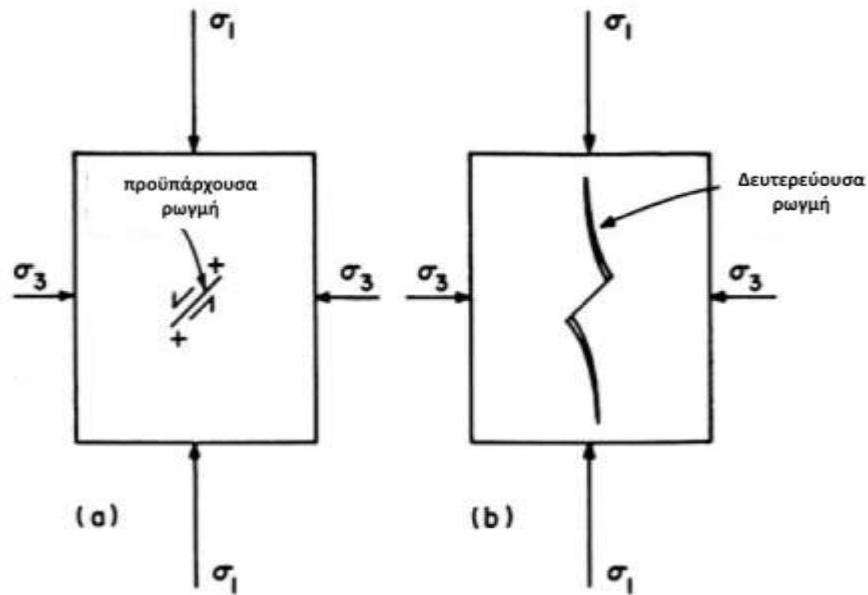
Συμπερασματικά, οι Zheng et. al. (1989) πρότειναν πως η ανάπτυξη των περιοχών θραύσεως συνίσταται στον σταδιακό θρυμματισμό λεπτών πλακών κοντά στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης, ο οποίος οφείλεται στη διάρρηξη λόγω εφελκυσμού. Επίσης απέδειξαν πως η παραπάνω διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε σταθερό σχήμα της διατομής θραύσεως, όσον αφορά τα ελαστικά και ψαθυρά υλικά.

Στη συνέχεια ανέπτυξαν μία αριθμητική μέθοδο για την μοντελοποίηση του θρυμματισμού, της ανάπτυξης και της σταθεροποίησης των περιοχών θραύσεως, θεωρώντας γραμμικά ελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό. Σύγκριναν την κατανομή των τάσεων γύρω από την τελική διατομή της περιοχής θραύσεως με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb. Υπέθεσαν πως η ελαστική κατανομή των τάσεων της βραχόμαζας, γύρω από την οπή γεώτρησης δεν οδηγεί σε αστοχία, με σκοπό την επαλήθευση της θεώρησης ελαστικού υλικού. Πρόσθεσαν ακόμη πως οι σταθερές διατομές των περιοχών θραύσεως έχουν διακριτές "μυτερές" άκρες, οι οποίες καθορίζουν την σταθεροποίηση των περιοχών θραύσεως.

Οι Zheng et. al. (1989) τόνισαν πως διαφορετικές ιστορίες φόρτισης μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη αστοχιών, με διαφορετικούς βαθμούς ευστάθειας, ανεξάρτητα από την κατανομή των τάσεων του βράχου σε μεγάλη απόσταση από την οπή γεώτρησης. Σύμφωνα με την θεωρία των Zheng et. al. (1989), δεν υφίστανται μονοσήμαντες σχέσεις μεταξύ του μεγέθους της περιοχής θραύσης και του μεγέθους των ασκούμενων τάσεων. Επομένως οι παρατηρούμενες αστοχίες στα τοιχώματα της οπής γεώτρησης δεν διευκολύνουν στον προσδιορισμό των τάσεων του πεδίου.

Παρατηρήθηκε από πληθώρα μελετητών ότι οι θραύσεις δημιουργούνται σε μία γεώτρηση μέσω μίας σειράς διαδοχικών θρυμματισμών, οι οποίες προέρχονται από την διάρρηξη λόγω εφελκυσμού παράλληλα στην ελεύθερη επιφάνεια, ή στην κατεύθυνση την τοπικής κύριας τάσης [14].

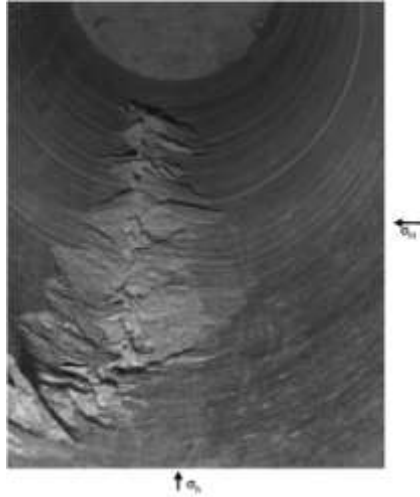
Στην έρευνα των Zheng et. al. (1989), αναφέρεται πως οι Brace and Bombolakis (1963) θεώρησαν το μοντέλο της διάρρηξης λόγω εφελκυσμού (extensile splitting / slabbing) ως έναν βασικό μικροσκοπικό μηχανισμό για την αστοχία του βράχου. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η διάρρηξη λόγω εφελκυσμού συμβαίνει με την ανάπτυξη ρωγμών, οι οποίες προέρχονται από ρηγματώσεις ή άλλες ετερογένειες και διαδίδονται στην κατεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης (Σχήμα II.3). Αυτού του είδους η διάρρηξη λόγω εφελκυσμού δύναται να λάβει χώρα σε τάσεις μικρότερες από την οριακή αντοχή του βράχου, συγκεκριμένα σε ανεμπόδιστη θλίψη.



Σχήμα 11.3 Θραύση σε θλίψη, η οποία ενεργοποιήθηκε από μία ρωγμή: (α) οι τάσεις συγκεντρώνονται στα άκρα της ρωγμής, (β) οι μικρορωγμές διαδίδονται παράλληλα στην κατεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης [17].

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναφορές, παρατηρείται πως οι μηχανισμοί αστοχίας μίας γεώτρησης δεν έγιναν απόλυτα κατανοητοί κατά την αρχική προσπάθεια των ερευνητών. Όπως προαναφέρθηκε, οι έρευνες επεκτάθηκαν τόσο σε αναλυτικό επίπεδο, όσο και σε αριθμητικό αλλά και σε διαφορετικές μορφές αστοχίας.

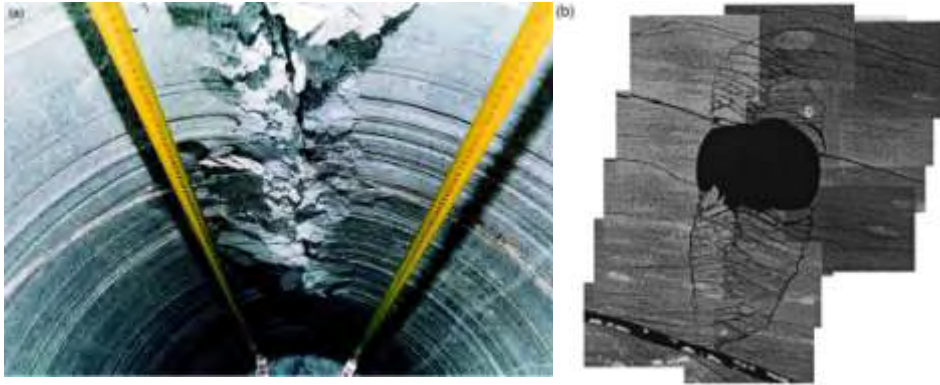
Όπως υποστηρίζεται από τους Schmitt et. al. (2012), οι θραύσεις που παρατηρούνται στις οπές των γεωτρήσεων μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας.



Σχήμα II.4 Όψη του τοιχώματος της κατακόρυφης γεώτρησης 1 m, η οποία διανοίχτηκε σε γρανίτη (Lac du Bonnet). Παρατηρούνται τμήματα βράχου που έχουν υποστεί λυγισμό κατά μήκος της διεύθυνσης της  $\sigma_h$  [18].

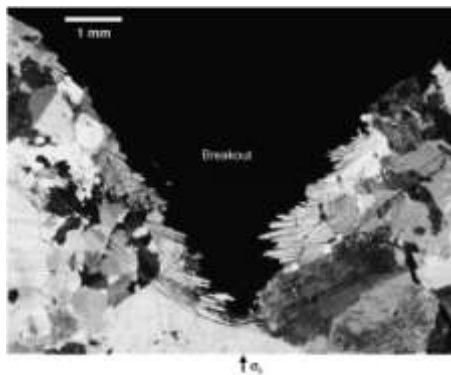
Όσον αφορά τα ψαθυρά και δύσκαμπτα πετρώματα, η θραύση προκαλείται από την διόγκωση λόγω εφελκυσμού [15]. Σύμφωνα με τους Germanovich και Dyskin (2000) ο μηχανισμός της ψαθυρής αστοχίας ενεργοποιείται όταν η πίεση στο εσωτερικό της γεώτρησης, η οποία οφείλεται στην παρουσία ρευστών διάτρησης κατά την διάνοιξη της γεώτρησης, είναι μικρότερη ή ίση με την πίεση του βραχώδους σχηματισμού.

Αναφέρουν πως η αστοχία λαμβάνει χώρα καθώς αναπτύσσονται ρωγμές παράλληλα στην επιφάνεια της γεώτρησης. Υποστηρίζουν ακόμη πως, αυτές οι ρηγματώσεις δημιουργούν λεπτά επίπεδα ή πλάκες στην βραχώμαζα, τα οποία δύναται να υποστούν λυγισμό ( buckling), να θρυμματιστούν και να δημιουργήσουν νέες επιφάνειες (Σχήμα II.4). Μία νέα επιφάνεια επιτρέπει την ανάπτυξη νέων ρηγματώσεων. Έτσι η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αυξάνοντας σημαντικά το μέγεθος της γεώτρησης (δηλαδή την περίμετρο της γεώτρησης λόγω υπερεκσαφών). Οι Germanovich and Dyskin (2000) διευκρινίζουν πως αποτελεί αστοχία λόγω εφελκυσμού, και μπορεί να προκληθεί είτε από μικρές προ υπάρχουσες ρωγμές (Σχήμα II.5 (α)), είτε από επίπεδες επιφάνειες με μειωμένη τριβή που συμπεριφέρονται ως μικρές ρωγμές (Σχήμα II.5 (b)).

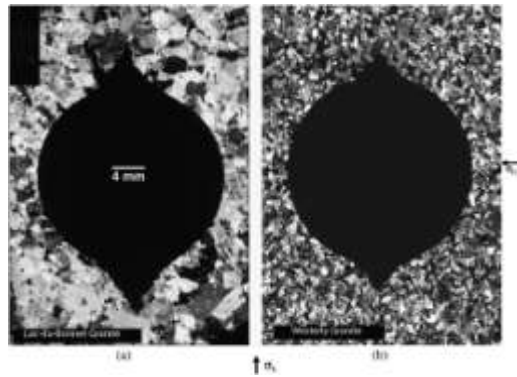


Σχήμα 11.5 Μορφές αστοχίας σε (α) γρανίτη στο πεδίο και (β) ψαμμίτη σε εργαστηριακή δοκιμή [19].

Σύμφωνα με τον Haimson (2007), όσον αφορά κρυσταλλικά γρανιτικά πετρώματα ο μικρομηχανισμός αστοχίας αποτελείται από την ανάπτυξη μικρορωγμών πίσω από το τοίχωμα της γεώτρησης και κατά μήκος της διεύθυνσης της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης  $\sigma_h$  (Σχήματα 11.6 και 11.7).

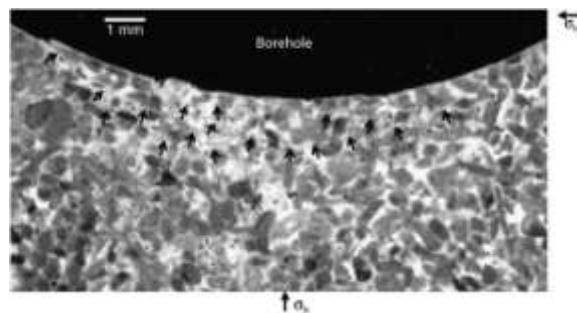


Σχήμα 11.6 Λεπτομέρεια της αστοχίας του σχήματος 11.4. (α), όπου παρατηρούνται, λεπτά τμήματα βράχου που έχουν υποστεί λυγισμό, τα οποία δημιουργήθηκαν από σχεδόν παράλληλες μικρορωγμές κατά την διεύθυνση της  $\sigma_h$  [18].



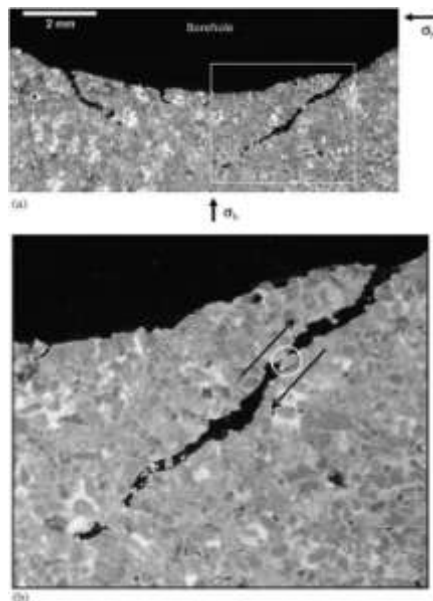
Σχήμα 11.7 Τυπικές μορφές αστοχίας σχήματος V, σε γρανίτη τύπου (a) Lac du Bonnet και (b) Westerly [18].

Ο Haimson (2007) αναφέρει πως οι μικρορωγμές είναι πυκνά τοποθετημένες και σχεδόν παράλληλες με την μέγιστη οριζόντια θλιπτική κύρια τάση του πεδίου, δημιουργώντας λεπτούς φλοιούς βραχώδους υλικού, οι οποίοι είναι εξαιρετικά αδύναμοι ώστε να υποστηρίξουν την επικρατούσα συγκέντρωση εφαπτομενικής τάσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο υποστηρίζει πως λυγίζουν και απομακρύνονται / καταπέφτουν διαδοχικά προξενώντας αστοχίες σχήματος V (Σχήμα 11.6). Σημειώνεται πως παρόμοιου σχήματος αστοχίες παρατηρούνται σε ασβεστόλιθους της Ιντιάνα (Σχήμα 11.8), αλλά σε αντίθεση με τα γρανιτικά πετρώματα οι μικρορωγμές που οδηγούν στην αστοχία της γεώτρησης βρίσκονται τόσο εκτός όσο και εντός των κόκκων και δεν έχουν τόσο πυκνή τοποθέτηση.



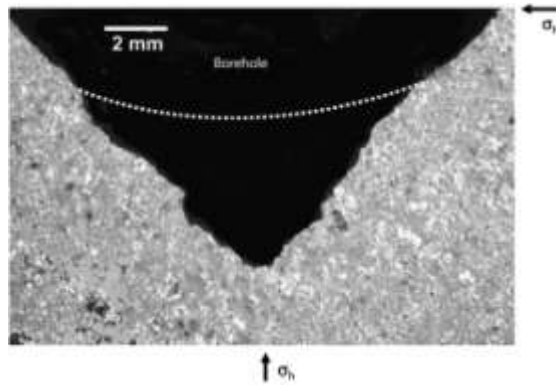
Σχήμα 11.8 Μορφή αστοχίας σε ασβεστόλιθο της Ιντιάνα. Παρατηρούνται μικρορωγμές λόγω εφελκυσμού, πίσω από το τοίχωμα της γεώτρησης, στην διεύθυνση της  $\sigma_h$  και σχεδόν παράλληλα της κατεύθυνσης της  $\sigma_H$  [18].

Σε μαλακότερους βράχους, η θραύση οφείλεται κυρίως στην διατμητική αστοχία. Συγκεκριμένα εξηγείται πως η πρόκληση της θραύσης σε ασθενέστερους ασβεστόλιθους, πραγματοποιείται λόγω των μικρορωγμών στο τοίχωμα της γεώτρησης, οι οποίες επεκτείνονται στην βραχώμαζα κατά μήκος των τροχιών υψηλών διατμητικών τάσεων, οδηγώντας σε περιοχές θραύσης σχήματος V (Σχήμα II.9 και II.10) .



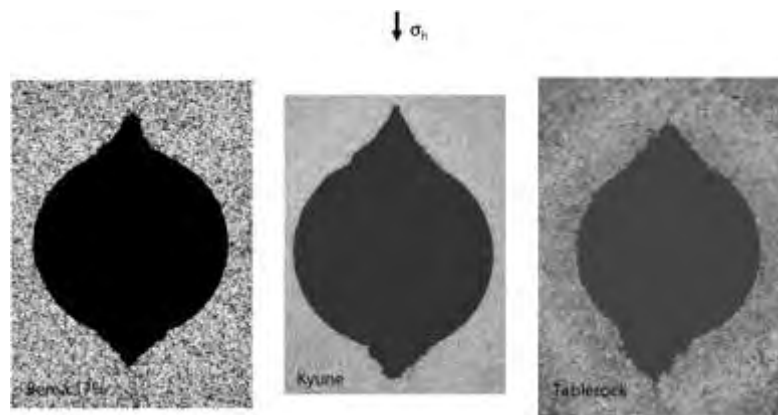
Σχήμα. II.9 Τυπικές μορφές αστοχίας σε ασβεστόλιθο τύπου Cordova Cream, οι οποίες ξεκινώντας από το τοίχωμα της γεώτρησης, τοποθετούνται συμμετρικά στις δύο πλευρές της κατεύθυνσης άσκησης της  $\sigma_h$ . Οι διατμητικές ρηγματώσεις πορεύονται προς τον βράχο κατά μήκος των τροχιών της μέγιστης διατμητικής τάσης. Η λεπτομέρεια στο (b) παρέχει στοιχεία για την μορφή των χαλαρών κόκκων που παρουσιάζεται στο (α). Οι χαλαροί αυτοί κόκκοι απομακρύνονται λόγω διάτμησης [18].





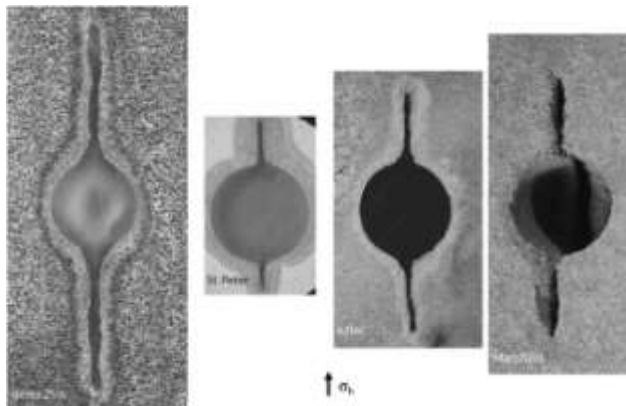
Σχήμα II.10 Μορφές περιοχών θραύσης, σχήματος V, σε ασβεστόλιθο τύπου Cordova Cream [18].

Καλά συγκολλημένοι ψαμμίτες, οι οποίοι αποτελούνται από κόκκους χαλαζία και αστρίου, τείνουν να αναπτύξουν ομάδες εφελκυστικών μικρορωγμών εντός των κόκκων τους, σχεδόν παράλληλα στην μέγιστη οριζόντια τάση (Σχήμα II.11) . Οι ρωγμές αυτές περιστρέφονται γύρω από την γεώτρηση όταν οι άκρες τους είναι αρκετά μακριά από την κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας τάσης. Τελικά, και αυτή η περίπτωση μικρομηχανισμού οδηγεί στον σχηματισμό περιοχών θραύσης σχήματος V [18].



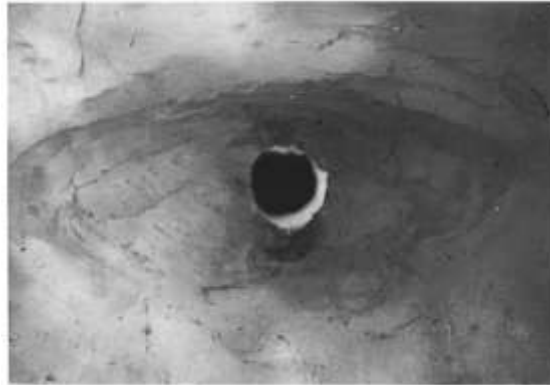
Σχήμα II.11 Διατομές γεωτρήσεων διανοιγμένες σε μέτριου προς υψηλού πορώδους ψαμμίτες, οι οποίοι είναι καλά συγκολλημένοι, με ποσοστά αστρίου μεταξύ 15% και 35% και χαλαζία μεταξύ 50% και 75% [18].

Τέλος, όπως υποστηρίζεται από τον Haimson (2007), σε εξαιρετικά πορώδεις και ασθενείς ψαμμίτες, οι θραύσεις προκαλούνται λόγω τοπικών παραμορφώσεων, οι οποίες έχουν την μορφή στενών και μεγάλου μήκους ρωγμωδών ζωνώσεων (contraction banding). Αναφέρεται πως, οι ασυνήθεις αυτές περιοχές θραύσης δημιουργούνται με την απομάκρυνση κόκκων άμμου κατά την διάτρηση ρευστού και παράγουν γραμμικές ρωγμές παράλληλες στην  $\sigma_h$ , συνεισφέροντας στην παραγωγή άμμου μέσω ασθενών σχηματισμών (Σχήμα II.12).



Σχήμα II.12 Διατομές γεωτρήσεων, διανοιγμένες σε 4 τύπους ψαμμίτη, μέτριου προς υψηλού πορώδους, οι οποίοι περιέχουν ποσοστό κόκκων χαλαζία από 90% έως 100% [18].

Όπως παρατηρείται από τους Schmitt et. al. (2012), οι ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις συνηθίζονται σε βράχους που υπόκεινται σε ερπυσμό. Ένα παράδειγμα εργαστηριακής δοκιμής σε εποξειδική ρητίνη (epoxy resin) [20] επισημαίνει την ελλειπτική περιοχή διαρροής της παραμόρφωσης. Στην παραπάνω περίπτωση, στο τμήμα του βράχου ασκήθηκε ανισότροπη τάση, η οποία δεν ήταν πλήρως καθορισμένη (Σχήμα II.13).



Σχήμα II.13 Ελλειπτική πλαστική περιοχή, η οποία περικλείει μία κυκλική οπή [20].

#### B. Θραύσεις κατά την διάνοιξη της οπής γεώτρησης

Οι θραύσεις που προκαλούνται λόγω της διάνοιξης της οπής γεώτρησης, δημιουργούνται όταν οι τάσεις, οι οποίες είναι συγκεντρωμένες περιμετρικά της οπής της γεώτρησης ξεπεράσουν την αντοχή της βραχώμαζας και προκαλείται αστοχία λόγω εφελκυσμού στο τοίχωμα της γεώτρησης [21].

Σύμφωνα με τους Aadnoy και Bell (1998), στην οπή γεώτρησης παρατηρούνται τόσο φυσικές θραύσεις (natural fractures) όσο και θραύσεις λόγω διάνοιξης της οπής, οι οποίες ταξινομούνται με βάση τους μηχανισμούς αστοχίας και τις κατευθύνσεις των κυρίων τάσεων σε σχέση με τη διεύθυνση της γεώτρησης. Αναφέρουν ως μηχανισμούς αστοχίας: α) την εφελκυστική αστοχία σε κατακόρυφες, κεκλιμένες και ελλειπτικές οπές, β) την εφελκυστική αστοχία λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, γ) την διατμητική αστοχία σε κατακόρυφες ή κεκλιμένες γεωτρήσεις που υπόκεινται σε χαμηλές πιέσεις ρευστών, δ) την διατμητική αστοχία κεκλιμένων γεωτρήσεων που υπόκεινται σε υψηλές πιέσεις ρευστών και ε) τις αστοχίες γεωτρήσεων λόγω ισότροπων κύριων οριζόντιων τάσεων ίσων μέτρων. Η ανάλυση των παραπάνω μηχανισμών αστοχίας έγινε από τους Aadnoy και Bell (1998), θεωρώντας γραμμική ελαστικότητα και υπέδειξε πως η γεωμετρία των θραύσεων στα τοιχώματα των γεωτρήσεων εξαρτάται από το διάνυσμα της τάσης πεδίου, το σχετικό προσανατολισμό του διανύσματος της τάσης πεδίου και της γεώτρησης, την πίεση των διατρητικών ρευστών και την

περιβάλλουσα βραχώμαζα (δηλαδή την συνοχή και την γωνία εσωτερικής τριβής της), (Πίνακας II.1).

Πίνακας II.1: Ταξινόμηση των Aadnøy και Bell (1998) των θραύσεων που δημιουργούνται κατά την διάνοιξη της οπής της γεώτρησης.

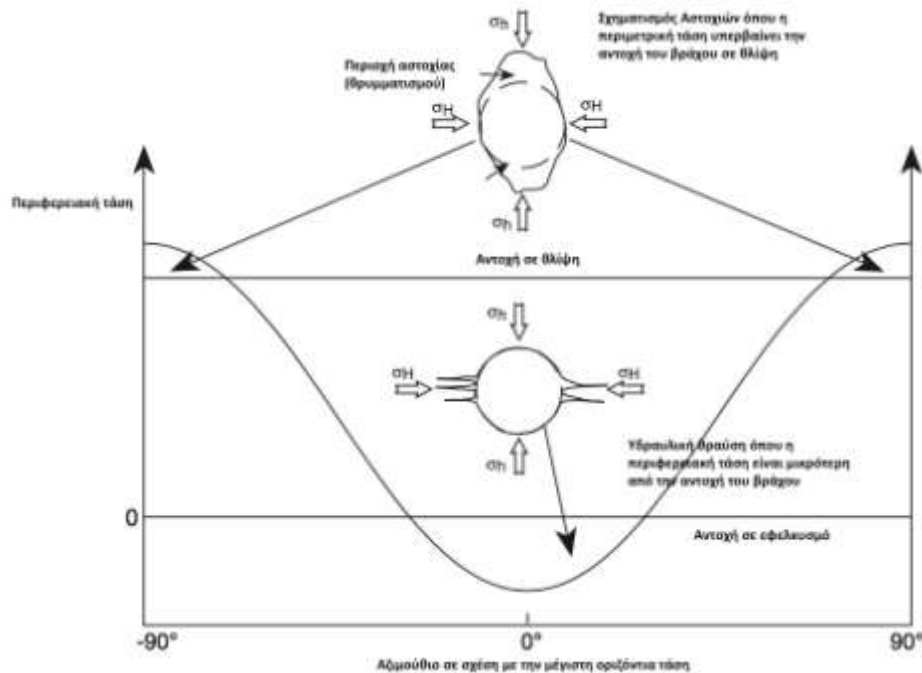
| Διάταξη θραύσης | Μηχανισμός θραύσης | Τροχιά Γεώτρησης σε σχέση με την κατεύθυνση των τάσεων | Βάθος διατρητικού ρευστού σε σχέση με την πίεση πόρων | Σχόλια                               | Ίσες οριζόντιες τάσεις πεδίου    | Εξίσωση περιγραφής της αστοχίας       | Τυπική τιμή της κλίσης της αστοχίας |
|-----------------|--------------------|--|---|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                 | Φυσική Αστοχία     |  |   | Προϋπάρχουσα                         | -                                | -                                     | Οποιαδήποτε                         |
|                 | Ελαστική           | Ίση  | Υψηλό   |                                      | -                                | -                                     | 0°-5°                               |
|                 | Ελαστική           | Διαφορετική  | Υψηλό   |                                      | -                                | B (Εξίσωση 7 Aadnøy & Bell, [1998])   | 0°-20°                              |
|                 | Ελαστική           | -  | Χαμηλό  | A: $\sigma_1/\sigma_2 < a/b$         | -                                | -                                     | 0°-5°                               |
|                 | Ελαστική           | -  | Χαμηλό  | B: $\sigma_1/\sigma_2 > a/b$         | -                                | -                                     | 0°-5°                               |
|                 | Διατμητική         | Ίσες κατευθύνσεις ή ίσες τάσεις                        | Χαμηλό  | Εναρξη σχηματισμού αστοχιών          | Οποιαδήποτε κατεύθυνση γεώτρησης | 45°-φ/2                               | 30°                                 |
|                 | Διατμητική         | Ίση  | Υψηλό   | Εναρξη σχηματισμού αστοχιών (Σπάνιο) | Οποιαδήποτε κατεύθυνση γεώτρησης | 45°+φ/2                               | 60°                                 |
|                 | Διατμητική         | Διαφορετική  | Χαμηλό  | Εναρξη σχηματισμού αστοχιών          | -                                | $\alpha = \kappa + 45^\circ - \phi/2$ | 30°-50°                             |
|                 | Διατμητική         | Διαφορετική  | Υψηλό   | Εναρξη σχηματισμού αστοχιών (Σπάνιο) | -                                | $\alpha = \kappa + 45^\circ + \phi/2$ | 60°-80°                             |

\* Προσανατολισμός, Κατεύθυνση

Σύμφωνα με τους Tingay et. al. (2008), οι θραύσεις που προκαλούνται λόγω της διάνοιξης της οπής γεώτρησης, χαρακτηρίζονται ως αιχμηρές και περιορισμένου ανοίγματος (narrow sharply defined features). Ακόμη, σε κατακόρυφες γεωτρήσεις, είναι σχεδόν παράλληλες στον άξονα της γεώτρησης. Επιπλέον, υποστηρίζεται από τους Tingay et. al. (2008) πως οι θραύσεις λόγω διάνοιξης γεώτρησης και οι αστοχίες των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης δύναται να σχηματιστούν στο ίδιο βάθος και σε κάθετες διευθύνσεις. Σημειώνεται πως έχει αναφερθεί από τον Aadnøy (1990) ότι η ανάπτυξη των ρηγματώσεων λόγω διάνοιξης της οπής είναι σχεδόν παράλληλη στην κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης.

Σύμφωνα με τους Hillis και Reynolds (2000) και όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα II.14, οι περιμετρικές τάσεις είναι μέγιστες σε κάθετες διευθύνσεις σε σχέση με το αξιμούθιο της σ<sub>h</sub>. Επίσης, εκεί που η μέγιστη περιμετρική τάση ξεπερνά την αντοχή σε θλίψη της βραχώμαζας

στην οπή της γεώτρησης, δύναται να συμβεί διατμητική αστοχία. Αστοχία διατμητικών επιπέδων οδηγεί σε θρυμματισμό (spalling) της βραχώμαζας, ή κατάπτωση του τοιχώματος της οπής, ή και επιμήκυνση της διατομής της γεώτρησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω ως



Σχήμα II.14 Μεταβολή της περιμετρικής τάσης  $\sigma_{\theta\theta}$ , η οποία ασκείται στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης. Σχηματικές διατομές της μορφής της οπής γεώτρησης όσον αφορά τις αστοχίες αλλά και τις εφελκυστικές θραύσεις της οπής [22].

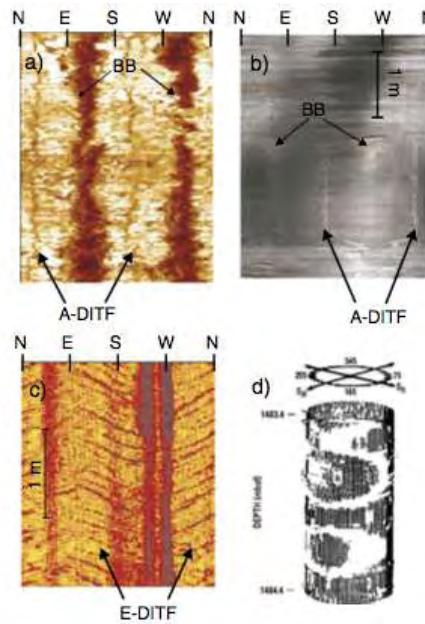
αστοχία των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης (borehole breakouts). Οι περιμετρικές τάσεις ελαχιστοποιούνται στο αζιμούθιο της  $\sigma_H$ . Οι εφελκυστικές θραύσεις σχηματίζονται όταν η περιμετρική τάση είναι μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή της βραχώμαζας, η οποία αποτελεί το τοίχωμα της γεώτρησης, και είναι κάθετες στις αστοχίες των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης (Σχήμα II.15).

Επιπλέον αναφέρεται από τους Hillis και Reynolds (2000), πως οι θραύσεις των οπών σε κεκλιμένες γεωτρήσεις δεν είναι αξιόπιστοι δείκτες της κατεύθυνσης της οριζόντιας τάσης, καθώς σε αυτή τη περίπτωση οι κατευθύνσεις αυτές εξαρτώνται από το διάνυσμα της ολικής τάσης, συμπεριλαμβανομένης και της κάθετης τάσης.

Σύμφωνα με τους Schmitt et. al. (2012), οι θραύσεις της οπής γεώτρησης δεν αποτελούν τον μόνο τύπο αστοχίας λόγω ασκούμενης τάσης που έχει παρατηρηθεί στα τοιχώματα αυτής. Αναφέρουν πως έχει παρατηρηθεί πληθώρα θραύσεων λόγω εφελκυσμού κατά την διάτρηση της οπής καθώς και θραύσεων λόγω διάτμησης. Οι αξονικές (A-DITF) και εντός της βαθμίδας-κλίμακας (en-echelon) θραύσεις (E-DITF) συμβαίνουν σε συνθήκες όπου οι κύριες τάσεις είναι ευθυγραμμισμένες (aligned), διαγώνιες (oblique) ή σε σχηματισμό V (Σχήμα II.15).

Προσθέτουν ότι σε κάποιες περιπτώσεις, συμβαίνουν ακούσια υδραυλικές θραύσεις λόγω της στατικής ή της μεταβαλλόμενης πίεσης των διατρητικών ρευστών γεώτρησης. Επισημαίνουν πως θραύσεις μπορεί ακόμη να προκύψουν από θερμοκρασιακές μεταβολές, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας των διατρητικών ρευστών. Επιπλέον, μπορεί να προκληθούν από την εφαπτομενική τάση σύμφωνα με την αναλυτική επίλυση του Kirsch. Οι Schmitt et al. (2012) υπογραμμίζουν πως έχουν θεωρηθεί και φυσικές θραύσεις, οι οποίες έχουν προκύψει λόγω εφελκυσμού και έχουν αναφερθεί ως θραύσεις λόγω διάτμησης.

Συμπληρώνουν ότι οι θραύσεις αυτές υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης, αλλά και παρέχουν και χρήσιμες πληροφορίες στον σχεδιασμό των γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, οι πληροφορίες αυτές διευκολύνουν την εκτίμηση και τον καθορισμό της πίεσης των διατρητικών ρευστών, ώστε να περιοριστεί η επιρροή των τάσεων πεδίου, και οι επακόλουθες αστοχίες.



Σχήμα II.15 Παραδείγματα εφελκυστικών θραύσεων κατά την διάνοιξη οπής γεώτρησης (DITF) και αστοχιών οπής γεώτρησης (BB): Παρατηρούνται α) αξονικές εφελκυστικές θραύσεις (A-DITF) και αστοχίες οπής γεώτρησης (BB) , b) αξονικές εφελκυστικές θραύσεις (A-DITF) και αρχικές αστοχίες οπής γεώτρησης (BB), c) εντός της βαθμίδας θραύσεις (en-echelon, E-DITF), d) θραύσεις σχήματος οβάλ [15].

### III. Γεωστατικό Πεδίο Τάσεων Γύρω Από Την Οπή Γεώτρησης

#### A. Κλασσική Ελαστικότητα

##### I. Τάσεις γύρω από την οπή γεώτρησης.

Είναι γνωστό ότι στους υπόγειους σχηματισμούς υπάρχει πάντα δράση τάσεων, λόγω των τεκτονικών δυνάμεων και του βάρους των υπερκείμενων (overburden) [23]. Όταν μία οπή διανοίγεται σε έναν γεωλογικό σχηματισμό, στερεό υλικό απομακρύνεται και η οπή στηρίζεται μόνο με την πίεση των ρευστών που προωθούνται κατά την διάτρηση. Οι αρχικές τάσεις πεδίου του βράχου γύρω από την οπή διαφοροποιούνται οδηγώντας σε συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων γύρω από το σύνορο της γεώτρησης. Η ακτινική τάση είναι μηδενική στο τοίχωμα της οπής όταν δεν υπάρχει εσωτερική πίεση ή ισούται με την πίεση του ρευστού στην οπή [14]. Όπως αναφέρεται από τους Fjær et. al. (2008), γενικά η πίεση των ρευστών που

προωθούνται κατά την διάτρηση δεν ταυτίζεται με τις τάσεις πεδίου του γεωλογικού σχηματισμού. Επομένως δημιουργείται μία ανακατανομή τάσεων γύρω από την οπή της γεώτρησης, που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορικές τάσεις μεγαλύτερες της αντοχής του σχηματισμού, δηλαδή προκαλείται αστοχία. Η γνώση των τάσεων γύρω από την γεώτρηση είναι επομένως ιδιαίζουσας σημασίας και η σωστή ανάλυσή τους αποτελεί μείζον ζήτημα στην κατασκευή γεωτρήσεων μεγάλου βάθους.

## II. Τάσεις και Παραμορφώσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες

Για την εξέταση των τάσεων γύρω από την οπή μίας γεώτρησης, απαιτείται η έκφραση των τάσεων και των παραμορφώσεων σε κυλινδρικές συντεταγμένες, οι οποίες σε ένα τυχαίο σημείο P δίνονται, συναρτήσει των τάσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ως εξής [23]:

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

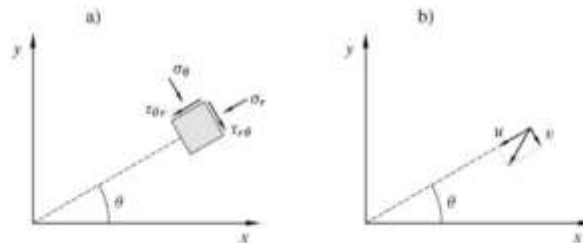
$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta, \quad (\text{III.2})$$

$$\sigma_z = \sigma_z, \quad (\text{III.3})$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta, \quad (\text{III.4})$$

$$\tau_{rz} = \tau_{xz}\cos\theta + \tau_{yz}\sin\theta, \quad (\text{III.5})$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{yz}\cos\theta - \tau_{xz}\sin\theta. \quad (\text{III.6})$$



Σχήμα III.1 Τάσεις και μετατοπίσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες [23].

Οι αντίστοιχες σχέσεις του πεδίου των ορθών παραμορφώσεων  $[\epsilon]$ , και των διατμητικών παραμορφώσεων  $[\gamma]$  είναι οι ακόλουθες [23]:



$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta + \gamma_{xy}\sin 2\theta, \quad (\text{III.7})$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta - \gamma_{xy}\sin 2\theta, \quad (\text{III.8})$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z, \quad (\text{III.9})$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_y - \varepsilon_x)\sin 2\theta + \gamma_{xy}\cos 2\theta, \quad (\text{III.10})$$

$$\gamma_{rz} = \gamma_{xz}\cos\theta + \gamma_{yz}\sin\theta, \quad (\text{III.11})$$

$$\gamma_{\theta z} = \gamma_{yz}\cos\theta - \gamma_{xz}\sin\theta. \quad (\text{III.12})$$

Έστω  $u$  η μετατόπιση στην ακτινική κατεύθυνση  $r$ ,  $v$  η μετατόπιση στην εφαπτομενική κατεύθυνση  $\theta$  και  $w$  η μετατόπιση στην αξονική κατεύθυνση  $z$ . Οι σχέσεις μεταξύ των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων είναι οι εξής [23]:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (\text{III.13})$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad (\text{III.14})$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (\text{III.15})$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2r} \left( \frac{\partial u}{\partial \theta} - v \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial r}, \quad (\text{III.16})$$

$$\gamma_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (\text{III.17})$$

Για έναν πορώδη και διαπερατό γεωλογικό σχηματισμό, ο νόμος του Hooke σε ενεργούς όρους ενεργών τάσεων δίνεται παρακάτω [23]:

$$\sigma'_r = (\lambda + 2G_{fr})\varepsilon_r + \lambda \varepsilon_\theta + \lambda \varepsilon_z, \quad (\text{III.18})$$

$$\sigma'_\theta = \lambda \varepsilon_r + (\lambda + 2G_{fr})\varepsilon_\theta + \lambda \varepsilon_z, \quad (\text{III.19})$$

$$\sigma'_z = \lambda \varepsilon_r + \lambda \varepsilon_\theta + (\lambda + 2G_{fr})\varepsilon_z, \quad (\text{III.20})$$

$$\tau_{r\theta} = 2G_{fr}\gamma_{r\theta}, \quad (\text{III.21})$$

$$\tau_{rz} = 2G_{fr}\gamma_{rz}, \quad (\text{III.22})$$

$$\tau_{\theta z} = 2G_{fr}\gamma_{\theta z}, \quad (\text{III.23})$$

όπου  $\lambda$  η παράμετρος Lamé και  $G_{fr}$  το μέτρο διάτμησης.

Οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να εκφραστούν σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής [23]:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho f_r = 0, \quad (\text{III.24})$$

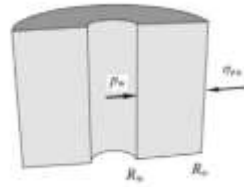
$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \rho f_\theta = 0, \quad (\text{III.25})$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho f_z = 0. \quad (\text{III.26})$$

### III. Τάσεις κοίλου κυλίνδρου

Όπως αναφέρεται από τους Fjær et. al., (2008) το μοντέλο του κοίλου κυλίνδρου είναι ένα απλό παράδειγμα μίας οπής σε έναν σχηματισμό, ο οποίος βρίσκεται σε δεδομένο εντατικό πεδίο και παρέχει πληροφορίες για κατακόρυφες γεωτρήσεις, οι οποίες διανοίγονται σε γεωλογικούς σχηματισμούς που υπόκεινται σε ίσες μεταξύ τους οριζόντιες τάσεις πεδίου.

Θεωρείται ότι ο απείρου μήκους κοίλος κύλινδρος έχει περιστροφική συμμετρία γύρω από τον άξονα του, και συμμετρία χωρικής μετατόπισης (αξονοσυμμετρία). Υποθέτοντας πως ο κύλινδρος φορτίζεται με μία αξονική τάση  $\sigma_v$ , μία εσωτερική πίεση  $p_w$  και μία εξωτερική οριζόντια τάση  $\sigma_{r0}$ , οι εξωτερικές τάσεις που ασκούνται στον κύλινδρο είναι πάντα κάθετες σε αυτόν, και ανεξάρτητες του  $\theta$  και  $z$ . Οι άξονες των κυλινδρικών συντεταγμένων, με τον άξονα  $z$  κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου, αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις των κύριων τάσεων. Η παραμόρφωση θα εμφανίζεται στην ακτινική διεύθυνση, χωρίς να υπάρχει παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα (επίπεδη παραμόρφωση,  $\varepsilon_z=0$ ,  $\gamma_{rz}=\gamma_{\theta z}=0$ ).



Σχήμα III.2 Τομή του μοντέλου, του κοίλου κυλίνδρου [23].

Αγνοώντας τις δυνάμεις σώματος (body forces), οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να απλοποιηθούν σε μία μόνο εξίσωση [23]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (\text{III.27})$$

Αντικαθιστώντας την τάση με την ακτινική μετατόπιση  $u$ , την ενεργή τάση και τις παραμορφώσεις με όρους της  $u$  προκύπτει [23]:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} + \frac{a}{\lambda + 2G_{fr}} \frac{dp_f}{dr} = 0, \quad (\text{III.28})$$

όπου  $p_f$  η σταθερή πίεση πόρων του ρευστού.

Με την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης, μπορούν να προσδιορισθούν η ακτινική και η εφαπτομενική τάση. Επομένως οι τάσεις μπορούν να υπολογισθούν με βάση τον νόμο του Hooke.

#### IV. Κατανομή τάσεων με σταθερή πίεση πόρων

Για σταθερή πίεση πόρων η εξίσωση της ακτινικής μετατόπισης απλοποιείται ως εξής [23]:

$$\frac{du^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = \frac{d}{dr} \left( \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) = \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d(ru)}{dr} \right) = 0. \quad (\text{III.29})$$

Το άθροισμα της κεντρικής παρένθεσης αποτελείται από την ακτινική και την εφαπτομενική παραμόρφωση, και είναι σταθερό. Το παραπάνω συμπέρασμα, σε συνδυασμό

με την συνθήκη της επίπεδης παραμόρφωσης ( $\varepsilon_z=0$ ), τους οδηγεί να θεωρήσουν μηδενικές ογκομετρικές μεταβολές.

Η εξίσωση :

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r}, \quad (\text{III.30})$$

αποτελεί τη γενική λύση της εξίσωσης (III.29) ως προς την ακτινική μετατόπιση  $u$ , με  $C_1$  και  $C_2$  να είναι οι σταθερές ολοκλήρωσης.

Η ακτινική και αξονική παραμόρφωση δίνονται από τις εξισώσεις [23]:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = C_1 - \frac{C_2}{r^2}, \quad (\text{III.31})$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = C_1 + \frac{C_2}{r^2}, \quad (\text{III.32})$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις παραμόρφωσης στην εξίσωση III.19 προκύπτει:

$$\sigma_r - \alpha_B p_f = (2\lambda + 2G_{fr})c_1 - \frac{2G_{fr}C_2}{r^2}, \quad (\text{III.33})$$

όπου  $p_f$  η σταθερή πίεση πόρων και  $\alpha_B$  η παράμετρος Biot [23].

Οι σταθερές ολοκλήρωσης προκύπτουν από τις συνοριακές συνθήκες για την ακτινική τάση

- $\sigma_r = p_w$  για  $r = R_w$ ,
- $\sigma_r = \sigma_{r0}$  για  $r = R_0$ ,

όπου  $p_w$  και  $\sigma_{r0}$  η ακτινική τάση στο εσωτερικό και το εξωτερικό σύνορο του κυλίνδρου, αντίστοιχα [23].

Σύμφωνα με τους Fjær et. al. [2008] το αποτέλεσμα είναι:

$$c'_1 = \frac{R_0^2 \sigma_{r0} - R_w^2 p_w}{R_0^2 - R_w^2}, \quad (\text{III.34})$$

$$c'_2 = \frac{R_0^2 R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} (\sigma_{r0} - p_w). \quad (\text{III.35})$$

Επίσης η ακτινική και εφαπτομενική τάση σε έναν κοίλο πορώδη κύλινδρο είναι:

$$\sigma_r = \frac{R_0^2 \sigma_{r0} - R_w^2 p_w}{R_0^2 - R_w^2} - \frac{R_0^2 R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \frac{1}{r^2} (\sigma_{r0} - p_w), \quad (\text{III.36})$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_0^2 \sigma_{r0} - R_w^2 p_w}{R_0^2 - R_w^2} + \frac{R_0^2 R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \frac{1}{r^2} (\sigma_{r0} - p_w). \quad (\text{III.37})$$

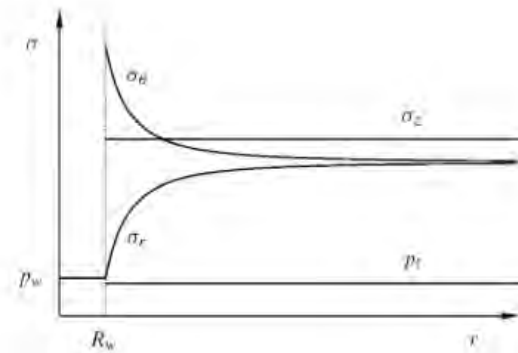
Όταν οι παραπάνω εξισώσεις εφαρμοστούν σε περιπτώσεις κατακόρυφων γεωτρήσεων, υποθέτοντας πως  $R_0 \gg R_w$  και θέτοντας ως  $\sigma_{r0} = \sigma_h$  (Fjær et. al., 2008):

$$\sigma_r = \sigma_h - (\sigma_h - p_w) \frac{R_w^2}{r^2} = \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) \sigma_h + \frac{R_w^2}{r^2} p_w, \quad (\text{III.38})$$

$$\sigma_\theta = \sigma_h + (\sigma_h - p_w) \frac{R_w^2}{r^2} = \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) \sigma_h - \frac{R_w^2}{r^2} p_w, \quad (\text{III.39})$$

$$\sigma_z = \text{σταθερό}. \quad (\text{III.40})$$

Στο Σχήμα III.3 απεικονίζεται σχηματικά η κατανομή τάσεων γύρω από μία οπή γεώτρησης, όπως προβλέπεται από το μοντέλο του κοίλου κυλίνδρου. Παρατηρείται από τους Fjær et. al. (2008) ότι η εφαπτομενική τάση αυξάνεται σημαντικά κοντά στην οπή της γεώτρησης. Το γεγονός πως η τάση αυξάνεται πλησίον της περιοχής ανομοιογένειας συνήθως αναφέρεται ως συγκέντρωση τάσης.



Σχήμα III.3 Τάσεις γύρω από την οπή γεώτρησης σε γραμμικά ελαστικό σχηματισμό [23].

Η ακτινική μετατόπιση  $u$  μπορεί να προσδιορισθεί υπολογίζοντας τις σταθερές  $C_1$  και  $C_2$ , από τις σταθερές  $c'_1$  και  $c'_2$  [23]:

$$u = \frac{\sigma_h - \rho_f}{2\lambda + 2G_{fr}} r + \frac{\sigma_h - \rho_w}{2G_{fr}} \frac{R_w^2}{r} \quad (\text{III.41})$$

Σε περιπτώσεις εφαρμογών πεδίου χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για την μετατόπιση λόγω διάνοιξης οπής γεώτρησης [23]:

$$u_d = \frac{\sigma_h - \rho_w}{2G_{fr}} \frac{R_w^2}{r} \quad (\text{III.42})$$

Η παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει ότι μία μείωση στην πίεση της γεώτρησης μπορεί να οδηγήσει σε θετική ακτινική μετατόπιση, η οποία συνεπάγεται τη μείωση της ακτίνας της οπής γεώτρησης [23].

## B. Κατανομή τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης σε δισδιάστατο επίπεδο

Αξίζει να σημειωθεί πως οι εξισώσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν από τον Kirsch (1898) χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την ανάλυση της ευστάθειας των οπών γεωτρήσεων.

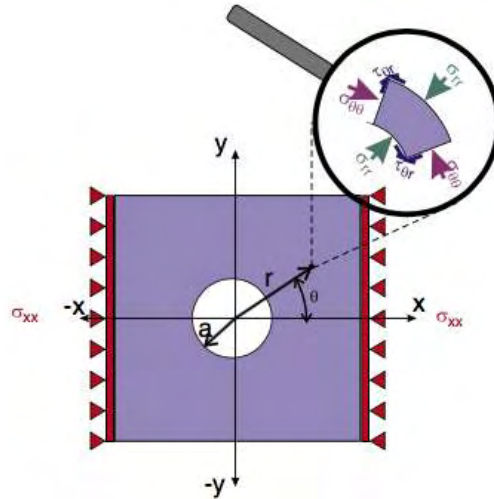
Θεωρείται κυκλική οπή, διαμέτρου  $R$ , σε οριζόντιο επίπεδο, η οποία υπόκειται σε κύρια τάση  $\sigma_{xx}$ . Σε απόσταση  $r$  από τον άξονα της οπής και σε αζιμουθιακή γωνία  $\theta$  από τον άξονα  $x$ , οι τάσεις ανακατανέμονται περιμετρικά της οπής σύμφωνα με τον Kirsch (1898), ώστε να επέλθει ισορροπία και εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_{xx}}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (\text{III.43})$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_{xx}}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos(2\theta) \quad (\text{III.44})$$

$$\tau_{\theta r} = -\frac{\sigma_{xx}}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{4R^2}{r^2}\right) \sin(2\theta) \quad (\text{III.45})$$

όπου  $\sigma_{\theta\theta}$  η εφαπτομενική κύρια τάση,  $\sigma_{rr}$  η ακτινική κύρια τάση και  $\tau_{\theta r}$  η διατμητική τάση.



Σχήμα III.4 Γεωμετρία της επίλυσης του Kirsch [1898], για την κατανομή των τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης [15].

Παρατηρείται ότι, όταν η κύρια τάση  $\sigma_{xx}$  είναι θλιπτική, δημιουργείται αζιμουθιακή εφελκυστική τάση  $\sigma_{\theta\theta} = -\sigma_{xx}$  στα σημεία της οπής με την κατεύθυνση της  $\sigma_{xx}$  (π.χ.  $\theta=0$  και  $\theta=90$  μοίρες). Σε διευθύνσεις κάθετες στις παραπάνω κατευθύνσεις (π.χ.  $\theta=90$  και  $\theta=270$  μοίρες) η αζιμουθιακή (εφαπτομενική) τάση είναι ίση με  $\sigma_{\theta\theta} = 3\sigma_{xx}$ .

Καθώς η οπή της γεώτρησης πληρώνεται με πυκνό ρευστό διάτρησης, αναφέρεται πως δημιουργείται πίεση του ρευστού  $P_w$  (θετικό πρόσημο) αυξανόμενη με το βάθος. Η πίεση αυτή αποτελεί συνοριακή συνθήκη του τοιχώματος της οπής και καθορίζει μια αξονοσυμμετρική τάση πεδίου, όταν  $r \geq R$ . Η μέγιστη αζιμουθιακή τάση  $\sigma_{\theta\theta} = -P_w$  εμφανίζεται στο τοίχωμα της οπής όπου  $r = R$ .

Η πίεση του ρευστού, η οποία δρα στην γεώτρηση δημιουργεί μία εφελκυστική αζιμουθιακή (εφαπτομενική) τάση και μία θλιπτική ακτινική τάση.

Σημειώνεται επίσης πως οι συγκεντρώσεις τάσεων σε έναν κενό κύλινδρο μεγάλου βάθους, οι οποίες υπολογίζονται με βάση την επίλυση του Lamé για κούλο κύλινδρο μεγάλου βάθους και δίνονται από τις εξισώσεις [15]:

$$\sigma_{rr}^w = -\frac{P_w \cdot R^2}{r^2}, \quad (\text{III.46})$$

$$\sigma_{\theta\theta}^w = -\frac{P_w \cdot R^2}{r^2}. \quad (\text{III.47})$$

Οι εξισώσεις του Kirsch τροποποιήθηκαν μεταξύ άλλων ([16], [24]) και από τους Zheng et. al. (1979), έτσι ώστε να συνδέονται με την μέγιστη και την ελάχιστη οριζόντια τάση ως εξής:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cdot \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) + p, \quad (\text{III.48})$$

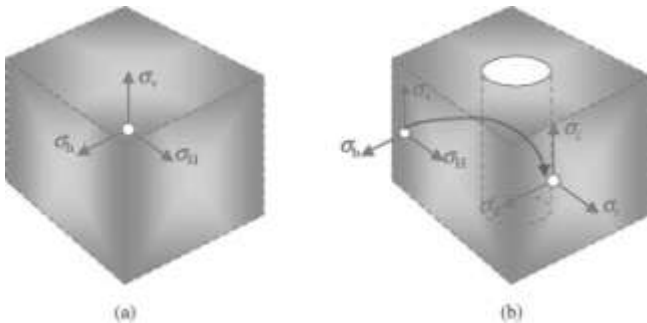
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cdot \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) - p, \quad (\text{III.49})$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cdot \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \sin(2\theta), \quad (\text{III.50})$$

όπου R είναι η ακτίνα της οπής,  $\theta$  η γωνία από την μέγιστη κύρια τάση,  $p$  η πίεση του ρευστού της οπής και  $\sigma_H, \sigma_h$  η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση κάθετα στον άξονα της οπής αντίστοιχα.

Αναφέρεται πως στην περίπτωση μηδενικής εσωτερικής πίεσης, η βραχόμαζα πλησίον του τοιχώματος υπόκειται κυρίως σε ανεμπόδιστη επίπεδη θλιπτική παραμόρφωση, με μέγιστη εφαπτομενική τάση,  $\sigma_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h$ , όταν  $\theta = 90^\circ$  και ελάχιστη εφαπτομενική τάση  $\sigma_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H$ , όταν  $\theta = 0^\circ$ . Σε μεγάλη απόσταση από την γεώτρηση, υπογραμμίζεται ότι η εφαπτομενική τάση μειώνεται με την ακτινική απόσταση από το τοίχωμα της γεώτρησης, και η ακτινική τάση αυξάνεται με την ακτινική απόσταση από το τοίχωμα της γεώτρησης.

### C. Κατανομή τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης σε τρισδιάστατο επίπεδο



Σχήμα III.5 (a) Βραχόμαζα με ομογενή συγκέντρωση τάσεων, (b) βραχόμαζα με διανοιγμένη οπή όπου η συγκέντρωση των τάσεων θα μεταβληθεί [10].

Η ανάλυση της συγκέντρωσης των τάσεων γύρω από την οπή της γεώτρησης, σύμφωνα με την επίλυση του Kirsch (1898) και την ανάλυση των Aadnoy et al. (2011) σε τρισδιάστατο επίπεδο, υποθέτει τα παρακάτω:

1. Πριν την εκσκαφή η βραχόμαζα θεωρείται πως βρίσκεται σε ισορροπία, δίχως να υπάρχει σεισμική δραστηριότητα, και σε αυτήν επιδρούν οι γεωστατικές τάσεις.



2. Μετά την εκσκαφή, όπου δημιουργείται διατάραξη της αρχικής ισορροπίας, παρατηρείται αστάθεια στον βραχώδη σχηματισμό, και αναπτύσσεται μία νέα κατανομή τάσεων στην περιοχή της εκσκαφής.
3. Η γεώτρηση δημιουργεί μία ελεύθερη επιφάνεια, η οποία επιδρά στην βραχώμαζα μειώνοντας την αντοχή της.
4. Τα διατρητικά ρευστά που εισέρχονται στην οπή, μεταβάλλουν την πίεση των πόρων του βραχώδους σχηματισμού και μειώνουν την συνοχή του.
5. Οι χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας είναι οι ελαστικές της ιδιότητες, η αντοχή του ακέραιου πετρώματος και η δυσκαμψία των ασυνεχειών της.
6. Ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξισώσεις ισορροπίας, συμβιβαστού και οι καταστατικοί νόμοι.
7. Γίνεται η παραδοχή αξονικής και περιστροφικής συμμετρίας (αξονοσυμμετρία).
8. Θεωρείται ομογενής βραχώμαζα, γνωστές τάσεις πεδίου, γνωστά μεγέθη συνοχής  $c$ , γωνίας τριβής  $\phi$ , λόγος Poisson  $\nu$  και η κατανομή των πρωτογενών τάσεων πεδίου αποτελείται από τρεις κύριες τάσεις, την κατακόρυφη τάση  $\sigma_v$ , την μέγιστη και την ελάχιστη οριζόντια τάση,  $\sigma_H$  και  $\sigma_h$ , αντίστοιχα. Ακόμη η βραχώμαζα έχει σταθερή πίεση πόρων  $P_f$ .

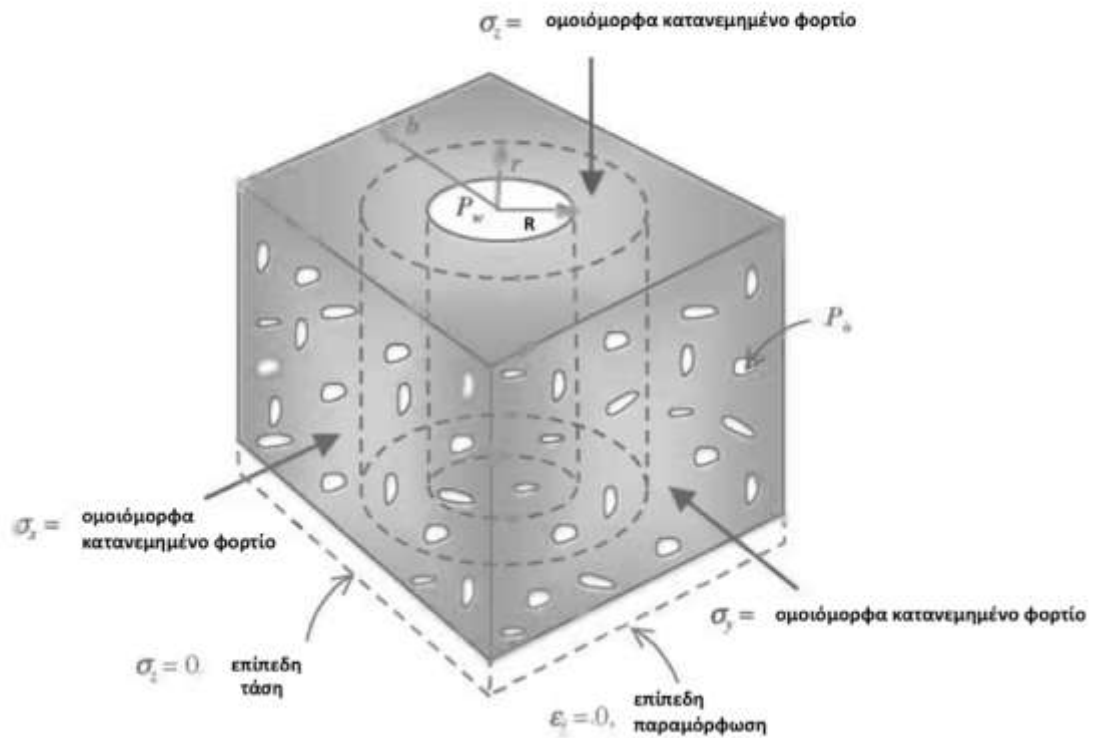
### Ισότροπη επίλυση

Επιπλέον των γενικών παραδοχών, θεωρείται πως οι τάσεις πεδίου είναι ίσες,  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_R$ , δηλαδή υφίσταται ισότροπη εξωτερική φόρτιση. Υποθέτοντας πως δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία, διατμητικές τάσεις ή περιστροφή οι Aadnoug et al. (2011) κατέληξαν στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_r = \sigma_R \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + P_w \left(\frac{R}{r}\right)^2, \quad (\text{III.51})$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_R \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + P_w \left( \frac{R}{r} \right)^2 \quad , \quad (\text{III.52})$$

όπου  $\sigma_r$  η ακτινική τάση,  $\sigma_{\theta}$  η αζιμουθιακή (εφαπτομενική) τάση (Σχήμα III.3), R η ακτίνα της οπής, r η ακτινική απόσταση από το κέντρο της οπής,  $\theta$  η αζιμουθιακή γωνία και  $P_w$  η πίεση του διατρητικού ρευστού.



Σχήμα III.7 Απεικόνιση των τάσεων γύρω από μίας γεώτρησης [10].

### Ανισότροπη Επίλυση

Είναι αρκετά σύνηθες οι ορθές τάσεις να μην έχουν ίσα μέτρα σε κάθε διεύθυνση. Οι Aadnøy et al. [2011], υποστηρίζοντας πως κατ' αυτόν τον τρόπο εμφανίζονται διατμητικές τάσεις και εισάγοντας μία τασική συνάρτηση, καταλήγουν στις παρακάτω εξισώσεις, οι οποίες αναγνωρίζονται και ως εξισώσεις του Kirsch, [1898]:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\
&+ \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} - 4\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \frac{R^2}{r^2} P_w, \\
\sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
&- \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - \frac{R^2}{r^2} P_w, \\
\sigma_z &= \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \frac{R^2}{r^2} \sin 2\theta, & \text{Επίπεδη παραμόρφωση} \\
\sigma_z &= \sigma_{zz} = 0, & \text{Επίπεδη Τάση} \\
\tau_{r\theta} &= \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\right] \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right), \\
\tau_{rz} &= (\tau_{xy} \cos \theta + \tau_{xy} \sin \theta) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right), \\
\tau_{\theta z} &= (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right).
\end{aligned}$$

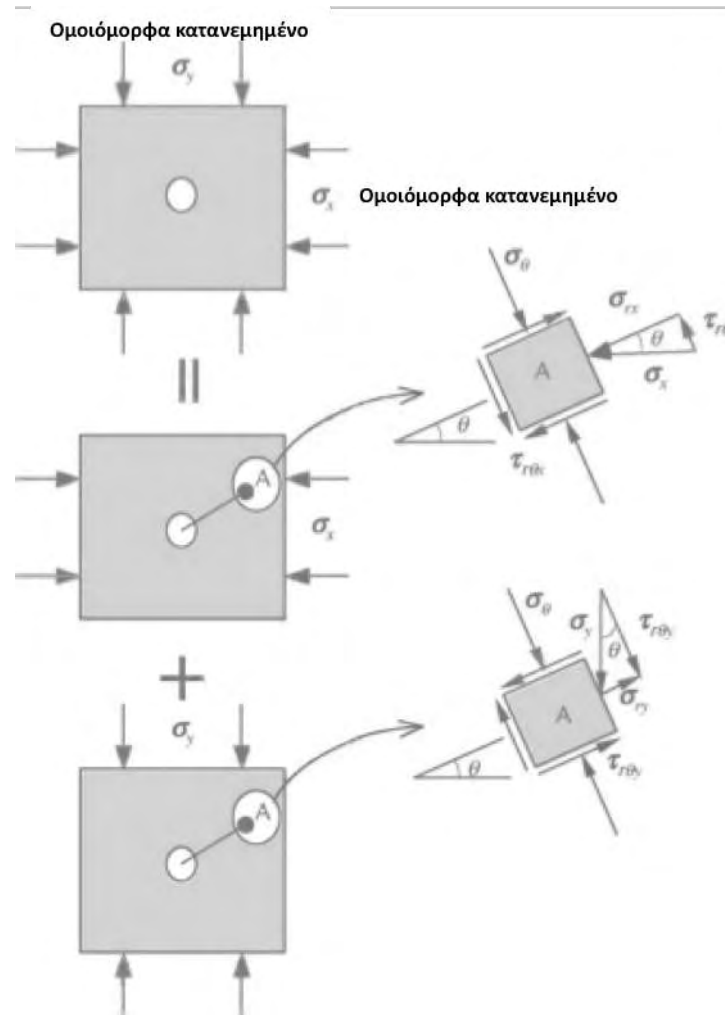
( III.53)

Στην περίπτωση όπου  $r=R$  οι εξισώσεις απλοποιούνται ως εξής:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= P_w, \\
\sigma_\theta &= \sigma_x + \sigma_y - P_w - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin \theta, \\
\sigma_z &= \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \frac{\alpha^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \frac{\alpha^2}{r^2} \sin 2\theta, & \text{Επίπεδη παραμόρφωση} \\
\sigma_z &= \sigma_{zz} = 0, & \text{Επίπεδη Τάση} \\
\tau_{r\theta} &= 0, \\
\tau_{rz} &= 0, \\
\tau_{\theta z} &= 2(-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta),
\end{aligned}$$

( III.54)

όπου  $\sigma_r$  η ακτινική τάση,  $\sigma_\theta$  η αζιμουθιακή (εφαπτομενική) τάση,  $\sigma_z$  η κατακόρυφη τάση,  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{rz}$ ,  $\tau_{\theta z}$  οι διατμητικές τάσεις,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{zz}$  οι τάσεις πεδίου, (Σχήμα III.5),  $R$  η ακτίνα της οπής,  $r$  η ακτινική απόσταση από το κέντρο της οπής,  $\theta$  η αζιμουθιακή γωνία και  $P_w$  η πίεση του διατρητικού ρευστού.



Σχήμα IV.0.1 Υπέρθεση των τάσεων πεδίου (Aadnoy et. al, 2011)

## IV. Αναλυτικά Μοντέλα Περιγραφής Της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωϋλικού Περιμετρικά Της Οπής Γεώτρησης

Όπως έχει προαναφερθεί παραπάνω ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της ευστάθειας της γεώτρησης είναι η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του υλικού. Η επιλογή του κατάλληλου καταστατικού νόμου για την συμπεριφορά της βραχόμαζας γύρω από την οπή γεώτρησης αποτελεί το πιο σημαντικό παράγοντα, ο οποίος επηρεάζει τους υπολογισμούς. Οι βασικές απαιτήσεις μίας ανάλυσης ευσταθείας γεωτρήσης είναι η τάση, η παραμόρφωση και η μετατόπιση καθώς και το κριτήριο αστοχίας σε συνδυασμό με την γεωμετρία, το καταστατικό νόμο, και τις συνοριακές συνθήκες.

### A. Θεωρία Ελαστικότητας

#### I. Ισότροπη Βραχόμαζα

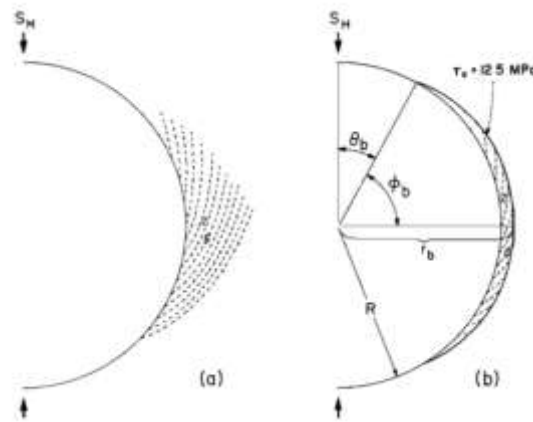
Οι Zoback et. al. (1985), ανέλυσαν το σχήμα των αστοχιών σε πληθώρα πετρωμάτων. Όσον αφορά την περιγραφή των τάσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Kirsch (1898) και Jaeger (1961). Επιπλέον υιοθετήθηκε το εκτεταμένο κριτήριο Griffith των Mc Clintock and Walsh (1962), το οποίο θεωρεί τον εφελκυσμό κλειστών ρωγμών που έχουν πεπερασμένη αντοχή σε τριβή σε διαξονικό τασικό πεδίο. Οι ρωγμές αυτές αποτελούν επίπεδα αστοχίας με συντελεστή τριβής  $\mu'$  και υπόκεινται σε διατμητική και ορθή τάση. Η περιοχή γύρω από την οπή της γεώτρησης, η οποία δύναται να αστοχήσει, χαρακτηρίζεται από τάσεις  $\sigma_\theta$  και  $\sigma_r$  τέτοιες ώστε η ακτίνα  $R'$  του κύκλου του Mohr  $R' = \{[(\sigma_\theta - \sigma_r)/2]^2 + \tau_{r\theta}^2\}^{1/2}$  να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την απόσταση από το κέντρο του κύκλου,  $R' \geq \left[ \frac{\mu'}{(1+\mu'^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \{ \sigma_\theta + (\sigma_\theta + \sigma_r)/2 \}$ . Η παραπάνω ανισότητα εκφράζεται ως εξής:

$$\{[(\sigma_\theta - \sigma_r)/2]^2 + \tau_{r\theta}^2\}^{1/2} \geq \left[ \frac{\mu'}{(1+\mu'^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \{ \sigma_\theta + (\sigma_\theta + \sigma_r)/2 \}. \quad (IV.1)$$

Επιπλέον θεωρήθηκε πως ικανοποιείται το κριτήριο Navier- Coulomb:  $\sigma_r = \tau_o - \mu' \sigma_\theta$  και η μέγιστη τιμή της συνεκτικής αντοχής (cohesive strength)  $\tau_o$  είναι:

$$\tau_o = (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \mu' \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right). \quad (IV.2)$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο ήταν σε θέση να προβλέψουν το μέγεθος της αρχικής περιοχής, στο οποίο ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση των πιθανών διατμητικών επιφανειών είναι αρκετά μεγάλος ώστε να προκαλέσει αστοχία.



Σχήμα IV.1 (a) Κατεύθυνση των πιθανών διατμητικών περιοχών αστοχίας για  $\sigma = 45$  M (b) Περιοχή στην οποία αναμένεται αστοχία για  $\tau_o = 12.5$  MPa [16].

Η ανάλυση επεκτάθηκε περαιτέρω, θεωρώντας το γενικό πρόβλημα του αρχικού μεγέθους των περιοχών αστοχίας, οι οποίες βασίζονται στην συνεκτική αντοχή του βράχου, τον συντελεστή τριβής και το μέγεθος της οριζόντιας κύριας τάσης.

Υποθέτοντας πως  $\sigma_H \leq 3\sigma_h$  και  $\Delta P = 0$  καταλήγουν στις παρακάτω σχέσεις:

$$\tau_o(R, \theta_B) = \frac{1}{2}(a\sigma_H + b\sigma_h), \quad (IV.3)$$

$$\tau_o\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}(c\sigma_H + d\sigma_h), \quad (IV.4)$$

όπου

$$a = \left[ (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} - \mu' \right] (1 - 2\cos 2\theta_B), \quad (IV.5)$$

$$b = \left[ (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} - \mu' \right] (1 + 2\cos 2\theta_B), \quad (IV.6)$$

$$c = -\mu' + (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{R^2}{r_B^2} \left[ (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} - 2\mu' \right] + 3 \frac{R^4}{r_B^4} (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (IV.7)$$

$$d = -\mu' - (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} + 3 \frac{R^2}{r_B^2} \left[ (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}} + 2\mu' \right] - 3 \frac{R^4}{r_B^4} (1 + \mu'^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (IV.8)$$

όπου R η αρχική ακτίνα της οπής της γεώτρησης,  $r_B$  η απόσταση από το κέντρο της οπής της γεώτρησης και  $\theta_B$  η αζιμουθιακή γωνία.

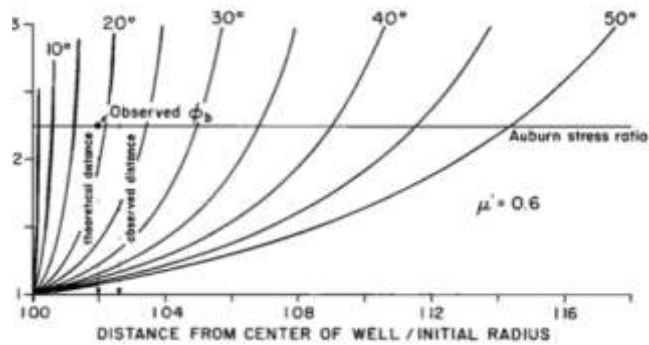
Υποθέτοντας ακόμη πως η περιοχή αστοχίας ακολουθεί μία τροχιά για μία συγκεκριμένη τιμή της  $\tau_o$  ισχύει  $\tau_o(R, \theta_B) = \tau_o \left( r_b, \frac{\pi}{2} \right)$  και έτσι

$$\sigma_h = \frac{2\tau_o(a-c)}{ad-bc}, \quad (IV.9)$$

$$\sigma_H = \frac{2\tau_o(d-b)}{ad-bc}, \quad (IV.10)$$

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = \frac{d-b}{a-c}. \quad (IV.11)$$

Στο Σχήμα IV.2 παρατηρείται πως ο λόγος των οριζόντιων τάσεων είναι ανεξάρτητος του  $\tau_o$  για συντελεστή τριβής  $\mu' = 0.6$ . Σημειώνεται πως όταν οι δύο κύριες οριζόντιες τάσεις



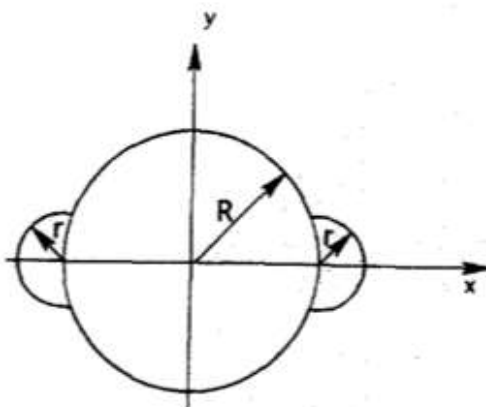
Σχήμα IV.2 Σχέση μεταξύ του λόγου της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση και του μέγιστου βάθους και πλάτους των αστοχιών ανάλογα με την γωνία τριβής  $\phi_B$  [16].

είναι ίσες, παρατηρείται ελάχιστος θρυμματισμός των τοιχωμάτων της οπής. Καθώς ο λόγος των οριζόντιων τάσεων αυξάνεται οι αστοχίες γίνονται μεγαλύτερες και επεκτείνονται σε βάθος από την περιφέρεια της οπής της γεώτρησης, αλλά η ακτίνα της γεώτρησης αυξάνεται μόνο κατά 15% όταν η γωνία  $\phi_B$  είναι περίπου  $50^\circ$ .

Συμπεραίνεται λοιπόν πως ένα απλό ελαστικό μοντέλο μπορεί να επιβεβαιώσει την υπόθεση πως οι περιοχές αστοχιών αναπτύσσονται με μία διαδικασία θλιπτικής αστοχίας. Η θεωρία των Zoback et. al. (1985) επιβεβαιώνει πολλά γενικά χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων αστοχιών.

Όπως αναφέρεται από τους Exadaktylos et. al. (2003), οι υπόγειες εκσκαφές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και οι γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, παρουσιάζουν απόκλιση από το κυκλικό σχήμα λόγω των αστοχιών των τοιχωμάτων τους. Παρόλα αυτά τα περισσότερα αναλυτικά μοντέλα, όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω, βασίστηκαν στην ελαστική ανάλυση του Kirsch για μία κυκλική οπή.

Σύμφωνα με τον Cheatham (1993), μία ακριβής ελαστική επίλυση, η οποία είναι πανομοιότυπη με το σχήμα της αρχικής περιοχής αστοχίας της οπής γεώτρησης, βρέθηκε από τον Mitchell, επιλύοντας το πρόβλημα της κατανομής τάσης για μία συμμετρική οπή της οποίας το σύνορο αποτελείται από τμήματα τριών τεμνόμενων κύκλων (Σχήμα IV.3). Χρησιμοποίησε τη μέθοδο της μιγαδικής μεταβλητής, (complex variable method) ώστε να προσδιορίσει τις τάσεις γύρω από την κυκλική οπή του σχήματος IV.3, για ένα απείρων διαστάσεων επίπεδο στο οποίο ασκείται ομοιόμορφη τάση. Απέδειξε ότι τα αποτελέσματα μπορούν να προσεγγιστούν με μεγάλο βαθμό ακρίβειας με μία «ισοδύναμη έλλειψη». Η έλλειψη αυτή έχει τον ίδιο κύριο άξονα με την διπλά συμμετρική κυκλική οπή, και την ίδια

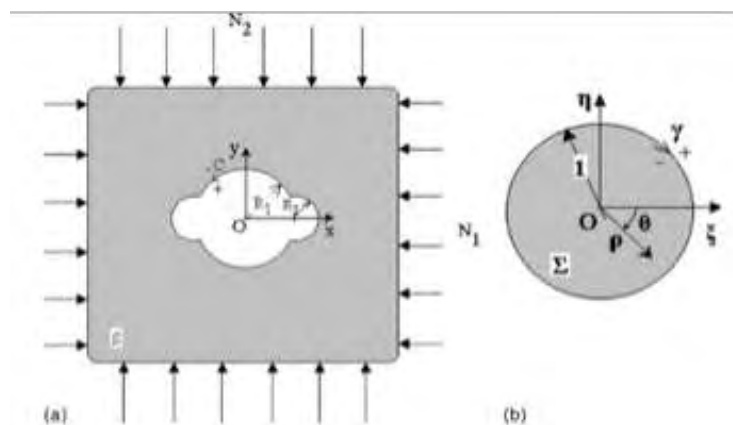


Σχήμα IV.3 Διπλά Συμμετρική Οπή [25].



ελάχιστη ακτίνα στο σημείο που ασκείται η μέγιστη τάση. Παρόλα αυτά ο Mitchell δεν παρουσίασε την ολοκληρωμένη επίλυση για τις ελαστικές τάσεις και παραμορφώσεις γύρω από την διπλά συμμετρική κυκλική οπή του σχήματος IV.3.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι Exadaktylos et. al. (2003), παρουσίασαν μία ημί-αναλυτική επίλυση για μία οδοντωτή κυκλική οπή (notched circular hole) σε ελαστικό, ισότροπο και ομογενές βράχο, η οποία βασίστηκε στο σύμμορφο μετασχηματισμό του συνόρου της οδοντωτής οπής  $C$  και της εξωτερικής περιοχής  $S$  (Σχήμα 4) και στη χρήση αριθμητικού μοντέλου και μιγαδικών συναρτήσεων. Κατέληξαν σε μία επίλυση η οποία συμφωνεί με την επίλυση του Mitchell, και δύναται να χρησιμοποιηθεί σε μη κυκλικές αντιδιαμετρικές εγκοπές.



Σχήμα IV.4 (a) Διπλά συμμετρική οπή, η οποία υπόκειται σε μη ισότροπη τάση, (b) δίσκος μοναδιαίας ακτίνας και σύστημα συντεταγμένων [26].

## II. Μη ισότροπη Βραχώμαζα

Οι Vardoulakis and Paramichos (1991), θεωρώντας λυγισμό σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης σε ελαστικό, μη ισότροπο ημιεπίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει ομοεπίπεδες ασυνέχειες σε τυχαίες θέσεις, εφάρμοσαν την μέθοδο ασυνέχειας (Discontinuity Method), η οποία λαμβάνει υπόψη το αρχικό πεδίο τάσεων. Συμπέραναν ότι στα προβλήματα λυγισμού ενός ημιχώρου με ελαστικά μέσα, που περιέχουν ασυνέχειες τύπου Griffith παράλληλα στην επιφάνεια, η κρίσιμη τάση λυγισμού μειώνεται ραγδαία με την αύξηση με το βάθος, μήκους

των ρωγμών. Συνεπώς οι ρωγμές κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια τείνουν να γίνονται ασταθείς και να μεγεθύνονται, οδηγώντας σε θρυμματισμό της επιφάνειας. Επιπρόσθετα, αποδεικνύεται πως η ανάπτυξη ρωγμής ακολουθεί ακριβώς μετά την αστάθεια της επιφάνειας, η οποία παράγει δευτερογενείς εφελκυστικές τάσεις στα άκρα της ασυνέχειας. Οι εφελκυστικές αυτές τάσεις αποτελούν τον μηχανισμό για την ανάπτυξη των ασυνεχειών στη βραχώμαζα.

Για την περίπτωση των ημιχώρων με περιοδικές ομάδες ομοεπίπεδων ασυνεχειών, αποδεικνύεται ακόμη ότι η κρίσιμη τάση λυγισμού προσδιορίζεται κυρίως από τις ιδιότητες του υλικού και το σχετικό με το μήκος της ρωγμής βάθος, αλλά και την τοποθέτηση των οικογενειών των ασυνεχειών. Παρόλα αυτά ο αριθμός των ασυνεχειών δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα [1].

Σε έναν σχηματισμό, ο οποίος βρίσκεται υπό την δράση των υπερκείμενων στρωμάτων, η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη ενεργή τάση  $\sigma_v$  και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση [27]:

$$\sigma(h) = \int_0^h \rho(z) g dz, \quad (IV.12)$$

όπου  $\sigma(h)$  η ολική κατακόρυφη τάση σε βάθος  $h$ ,  $\rho(z)$  η πυκνότητα σε βάθος  $z$  κάτω από την επιφάνεια και  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\sigma_v = \sigma(h) - p_f. \quad (IV.13)$$

Σε αυτήν την περίπτωση οι άλλες δύο κύριες τάσεις  $\sigma_h$  και  $\sigma_H$  βρίσκονται στο οριζόντιο επίπεδο. Σε τεκτονικά ενεργές περιοχές, οι οποίες δύναται να περιλαμβάνουν εκτός των άλλων αστοχίες και ενεργά ρήγματα, τα μεγέθη των κύριων τάσεων είναι δυσκολότερο να υπολογιστούν.

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης, γίνεται χρήση της μη ισότροπης πόρο-ελαστικής εξίσωσης [27].

$$\sigma_h - \theta p_f = \frac{E_{horz}}{E_{vert}} \frac{v_{vert}}{1-v_{horz}} (\sigma_v - \theta(1-\xi)p_f) + \frac{E_{horz}}{1-v_{horz}^2} \varepsilon_h + \frac{E_{horz} v_{horz}}{1-v_{horz}^2} \varepsilon_H. \quad (IV.14)$$

Οι μη ισότροπες δυναμικές και ελαστικές παράμετροι ( $E_{horz}, E_{vert}, \nu_{vert}, \nu_{horz}$ ) υπολογίζονται από προηγμένο εξοπλισμό ηχητικής καταγραφής, με την μετατροπή των τιμών σε στατικές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού. Ο συσχετισμός Wang για μαλακούς βράχους εφαρμόζεται στις μετρήσεις ώστε να μετατραπούν οι δυναμικές τιμές σε στατικές [27].

$$E_{static} = 0.4145 E_{dynamic} - 1.0593. \quad (IV.15)$$

Ο υπολογισμός της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης και της τάσης των υπερκειμένων γίνεται συναρτήσεως του βάθους. Χρησιμοποιούνται ακουστικό-ελαστικοί παράμετροι  $A_E$  και μέτρα θραύσης  $C_{55}$  και  $C_{66}$  και υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια κύρια τάση με βάση τον παρακάτω τύπο [27]:

$$\sigma_H = \sigma_h + (C_{55} - C_{44}) / A_E. \quad (IV.16)$$

Για τον υπολογισμό της κατανομής τάσης γύρω από την οπή μίας γεώτρησης, θεωρείται επίπεδη παραμόρφωση και παρατίθενται οι εξισώσεις [27]:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + P_w \frac{R^2}{r^2}, \quad (IV.17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{R^2}{r^2}, \quad (IV.18)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta, \quad (IV.19)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - 3\frac{R^4}{r^4} + 2\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta, \quad (IV.20)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0. \quad (IV.21)$$

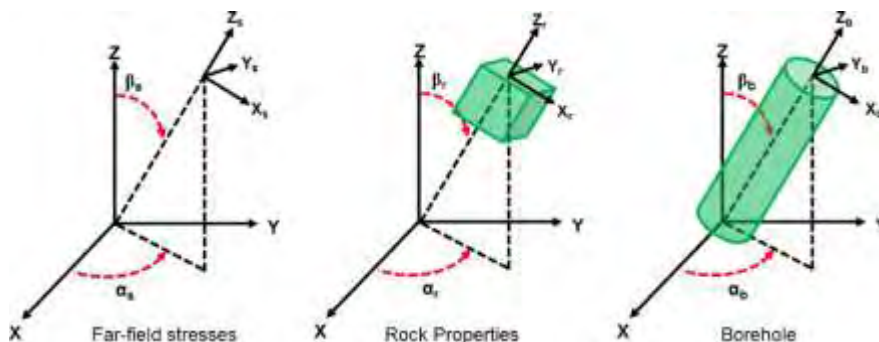
Όπου  $R$  η ακτίνα της οπής,  $P_w$  η πίεση που εξέρχεται από την γεώτρηση μέσω του διατρητικού ρευστού,  $\nu$  ο λόγος Poisson του σχηματισμού,  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}$  οι ακτινική, εφαπτομενική, αξονική και διατμητική τάση αντίστοιχα και  $\alpha$  η γωνία που μετριέται σχετικά με την κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης.

Όσον αφορά την προσέγγιση της κατεύθυνσης της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι. Ο πιο αξιόπιστος τρόπος, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, ώστε να προσδιορισθεί η κατεύθυνση της τάσης είναι η αναγνώριση γεωλογικών χαρακτηριστικών ή αστοχιών της γεώτρησης, των οποίων η κατεύθυνση εξαρτάται από τις κατευθύνσεις των κύριων τάσεων.

Οι Kanfar et. al. (2015) ανέλυσαν το τρισδιάστατο πρόβλημα της κατανομής τάσεων κυκλικής οπής σε μη ισότροπους σχηματισμούς, βασιζόμενοι στις αναλύσεις των Amadei (1983) και Lekhnitskii (1981), χρησιμοποιώντας 3 συστήματα συντεταγμένων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα IV.5: ένα σύστημα συντεταγμένων για το μακρινό πεδίο τάσεων, ένα σύστημα για την βραχόμαζα και τέλος ένα σύστημα για την οπή της γεώτρησης. Τα συστήματα συντεταγμένων του μακρινού πεδίου τάσεων και της βραχόμαζας μετασχηματίζονται σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων της οπής.

Για την ανισότροπη βραχόμαζα ισχύει ο γενικευμένος νόμος του Hooke

$\epsilon_i = C_{ij} \sigma_j$  ;  $i, j = 1, 2 \dots 6$  , όπου  $\epsilon$ ,  $C$  και  $\sigma$  είναι το διάνυσμα παραμόρφωσης, το μητρώο ευκαμψίας (compliance) και το διάνυσμα τάσης, αντίστοιχα.



Σχήμα IV.5 Συστήματα συντεταγμένων [28].

Η γενική αναλυτική επίλυση για κυλινδρικές οπές απείρου συνόρου που παρουσιάζεται από τους Kanfar et. al. (2015), αναπτύχθηκε από τον Lekhnitskii (1981) και τροποποιήθηκε από

τον Amadei (1983). Οι τάσεις κατά μήκος της οπής της γεώτρησης με βάση της συντεταγμένες της οπής για μη ισότροπους σχηματισμούς έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{x,0} + \sigma_{x,h} = \sigma_{x,0} + 2\Re[\mu_1^2 \varphi_1'(z_1) + \mu_2^2 \varphi_2'(z_2) + \lambda_3 \mu_3^2 \varphi_3'(z_3)], \quad (IV.22)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{y,0} + \sigma_{y,h} = \sigma_{y,0} + 2\Re[\varphi_1'(z_1) + \varphi_2'(z_2) + \lambda_3 \varphi_3'(z_3)], \quad (IV.23)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy,0} + \tau_{xy,h} = \tau_{xy,0} - 2\Re[\mu_1 \varphi_1'(z_1) + \mu_2 \varphi_2'(z_2) + \lambda_3 \mu_3 \varphi_3'(z_3)], \quad (IV.24)$$

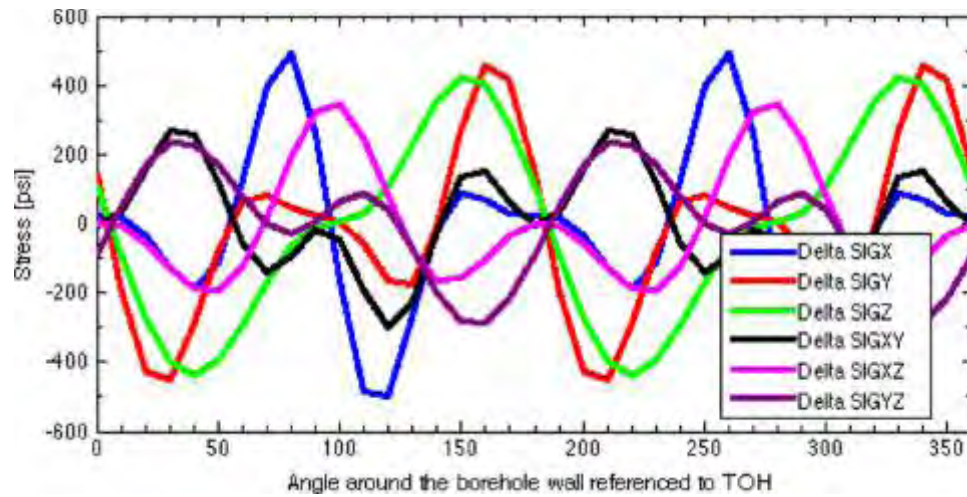
$$\tau_{xz} = \tau_{xz,0} + \tau_{xz,h} = \tau_{xz,0} + 2\Re[\lambda_1 \mu_1 \varphi_1'(z_1) + \lambda_2 \mu_2 \varphi_2'(z_2) + \mu_3 \varphi_3'(z_3)], \quad (IV.25)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{yz,0} + \tau_{yz,h} = \tau_{yz,0} - 2\Re[\lambda_1 \varphi_1'(z_1) + \lambda_2 \varphi_2'(z_2) + \varphi_3'(z_3)], \quad (IV.26)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z,0} + \sigma_{z,h} = \sigma_{z,0} - \left(\frac{1}{a_{33}}\right) [a_{31} \sigma_{x,h} + a_{32} \sigma_{y,h} + a_{34} \tau_{yz,h} + a_{35} \tau_{xz,h} + a_{36} \tau_{xy,h}], \quad (IV.27)$$

όπου  $\Re$  το πραγματικό τμήμα της μιγαδικής συνάρτησης,  $\sigma_{i,h}$  και  $\tau_{ij,h}$  ( $i,j = x, y$  και  $z$  οι κύριες κατευθύνσεις του συστήματος συντεταγμένων της οπής γεώτρησης) είναι οι τάσεις που δημιουργούνται κατά την διάνοιξη της οπής,  $a_{ij}$  ( $i,j=1,2...6$ ) είναι ο τανυστής συμβατότητας (compliance tensor) μετασχηματισμένος στις συντεταγμένες της οπής της γεώτρησης. Οι αναλυτικές συναρτήσεις  $\varphi_i$ , οι οποίες συνάγονται από την επίλυση της υπέρθεσης του προβλήματος των μακρινών τάσεων πεδίου, οι οποίες προκαλούνται από την διάνοιξη της γεώτρησης και του προβλήματος της εσωτερικής πίεσης της γεώτρησης. Οι υπόλοιποι συντελεστές περιγράφονται αναλυτικά από τους Kanfar et. al. (2015).

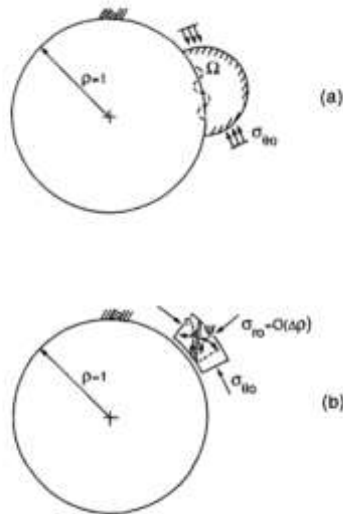
Οι Kanfar et. al. (2015) θεωρώντας την επίλυση του Kirsch για την κατανομή τάσεων γύρω από την οπή γεώτρησης σε ισότροπη βραχώμαζα συγκρίναν την λύση που βρέθηκε για ανισότροπη βραχώμαζα με την λύση που βρέθηκε για ισότροπη βραχώμαζα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα IV.6. Είναι φανερό πως υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο λύσεων για όλες τις κατευθύνσεις των τάσεων. Συμπεραίνεται πως η παράβλεψη της επίλυσης που αφορά την ελαστική ανισοτροπία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βλάβες και αστοχίες στην κατασκευή μίας γεώτρησης.



Σχήμα IV.6 Διαφορά μεταξύ της ολικής τάσης, η οποία υπολογίστηκε σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για μία οπή γεώτρησης χρησιμοποιώντας ισότροπα και ανισότροπα μοντέλα [28].

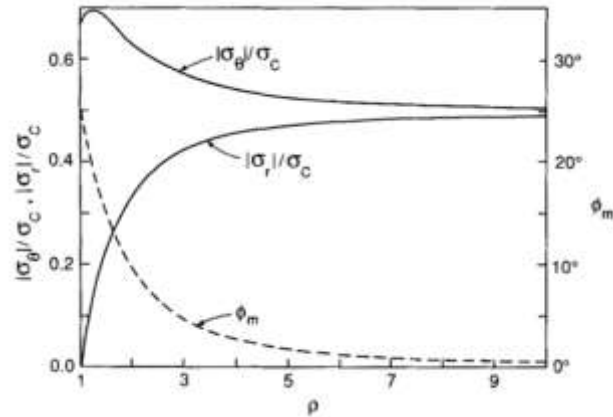
## B. Θεωρία Γραμμικής Διακλάδωσης

Σύμφωνα με τους Vardoulakis και Papanastasiou (1988), οι αστοχίες της γεώτρησης θεωρείται πως προέρχονται από επιφανειακές αστάθειες [Σχήμα 7 (α)], οι οποίες τείνουν να ανοίγουν και να ενεργοποιούν μικρορωγμές παράλληλα στην επιφάνεια. Εάν δεν είναι δυνατή η εμφάνιση επιφανειακών ασταθειών τότε λαμβάνει χώρα διατμητική αστοχία [Σχήμα IV. 7 (b)].



Σχήμα IV.7 Μορφές αστοχίας στο τοίχωμα της οπής: (a) επιφανειακή αστάθεια , (b) διατμητική ζώνωση (shear banding) [29].

Η αστάθεια της γεώτρησης εξετάζεται από τους Vardoulakis & Papanastasiou (1988) με την θεωρία γραμμικής διακλάδωσης (linear bifurcation). Ο βράχος μοντελοποιείται από τις καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα στερεό πλαστικό σώμα, ευαίσθητο στην πίεση. Αρχικά θεωρείται πως ο βράχος είναι ασυμπίεστος και δίνεται πλήρης η επίλυση για το επίπεδο τάσης παραμόρφωσης γύρω από την οπή γεώτρησης. Στο Σχήμα IV.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης και της γωνίας τριβής περιμετρικά του τοιχώματος της οπής γεώτρησης. Είναι προφανές πως η γωνία τριβής μειώνεται δραματικά με την αύξηση της απόστασης από το τοίχωμα της οπής. Επομένως, οι αστάθειες προβλέπεται να συμβούν στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα της οπής.



Σχήμα IV.8 Μεταβολή της αρχικής τάσης και της γωνίας τριβής περιμετρικά του τοιχώματος της οπής γεώτρησης [29].

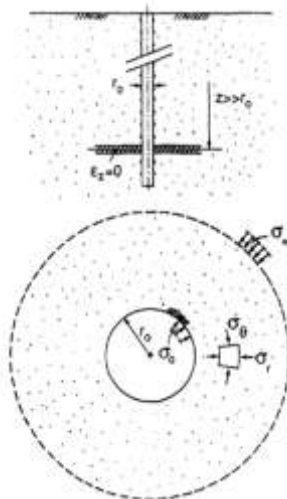
Σε δεύτερη φάση επιλύεται από τους Vardoulakis & Papanastasiou (1988) αριθμητικά το ανομοιογενές πρόβλημα διακλάδωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα δεδομένα από την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιούνται για την υιοθέτηση μίας απλοποιημένης ανάλυσης ευστάθειας που συνδυάζει τη μέθοδο οδογράφου του Biot και την επιφανειακή ανάλυση ευστάθειας.

Η ανάλυση των Vardoulakis & Papanastasiou (1988) δείχνει πως σε περιπτώσεις ομοιόμορφης τάσης σε άπειρο μήκος, η ευστάθεια της γεώτρησης μπορεί να επιλυθεί απλά μέσω της εκτίμησης των τάσεων στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητη ούτε η πλήρης επίλυση για την τάση, ούτε η αναπτυγμένη ανάλυση ανομοιογενούς διακλάδωσης. Επομένως, η αστάθεια της γεώτρησης μπορεί να μελετηθεί με ανάλυση ευστάθειας, τα ποσοτικά αποτελέσματα της οποίας εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τον καταστατικό νόμο.

Για πιο ρεαλιστικά συμπεράσματα αναπτύχθηκε μία ανάλυση διακλάδωσης από τους Vardoulakis et al [1988] για γεωτρήσεις σε βραχώδεις σχηματισμούς μεγάλου βάθους, υπό ομοιόμορφη τάση, σε άπειρο μήκος για να προσδιοριστεί το οριακό φορτίο αστοχίας και για να προβλεφθεί ο μηχανισμός αστοχίας. Υποστηρίζεται πως η θεωρία γραμμικής ελαστικότητας δεν επαρκεί για την περιγραφή των πραγματικών ιδιοτήτων του βράχου. Διάφορα φαινόμενα όπως η ευαισθησία πίεσης, η μη γραμμική ογκομετρική παραμόρφωση ακόμη και το γραμμικό μέρος του νόμου τάσης παραμόρφωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση. Αυτό είναι



δυνατό με μία θεωρία γραμμικής διακλάδωσης η οποία αντιπροσωπεύει τα παραπάνω φαινόμενα. Ο βράχος περιγράφεται από τις καταστατικές εξισώσεις της θεωρίας πλαστικής παραμόρφωσης για στερεά πλαστικά, ευαίσθητα στην πίεση υλικά. Θεωρείται πως οι παραμορφώσεις του βράχου συμβαίνουν σε επίπεδα κάθετα του άξονα της γεώτρησης. Πρόκειται επομένως για πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης, το οποίο αναλύεται σε πολικές συντεταγμένες, με τον άξονα  $z$  να συμπίπτει με τον άξονα της γεώτρησης. Για απλούστευση υιοθετείται η θεωρία μικρής-απειροστικής παραμόρφωσης. Χρησιμοποιούνται συναρτήσεις για την περιγραφή των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών. Ορίζεται το διάνυσμα της Cauchy τάσης, το διάνυσμα της απειροστικής παραμόρφωσης καθώς και η φορά της αρνητικής θλίψης.

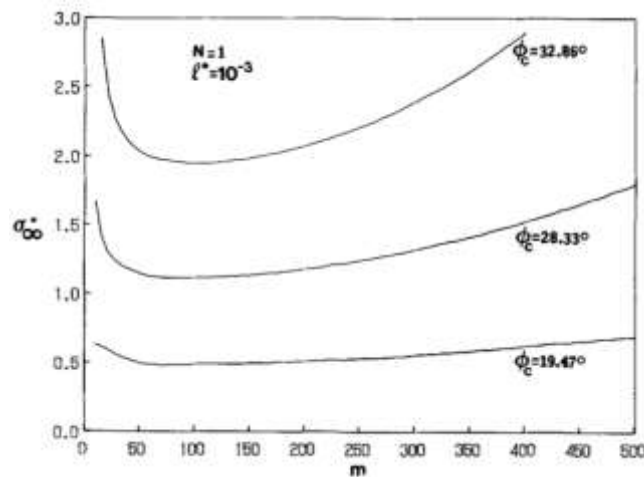


Σχήμα IV.9 Γεωμετρική απεικόνιση γεώτρησης μεγάλου βάθους [30].

Αναφέρεται από τους Vardoulakis & Papanastasiou (1988) πως πειράματα σε κώλους κυλίνδρους και πραγματικές παρατηρήσεις σε υπόγειες εκσκαφές υποδεικνύουν πως υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αστοχίας, η διατμητική ζώνωση (shear banding) και ο επιφανειακός λυγισμός (surface buckling). Η ανάλυση διακλάδωσης των Vardoulakis & Papanastasiou (1988) συμφωνεί με αυτές τις παρατηρήσεις. Παρόλο που βασίζεται σε αρκετές απλοποιητικές παραδοχές, επιτρέπει τον προσδιορισμό της κρίσιμης παραμόρφωσης και της τάσης διακλάδωσης και προβλέπει την μορφή αστοχίας. Παρουσιάζει το γεγονός ότι η αστοχία δεν είναι μια ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από την τασική πορεία και τις συνοριακές

συνθήκες του προβλήματος. Η εφαρμογή του μοντέλου από τους Vardoulakis & Papanastasiou (1988) σε πραγματικές περιπτώσεις παρέχει ικανοποιητικές εξηγήσεις των πειραματικών παρατηρήσεων.

Σε συνέχεια της ανάλυσης διακλάδωσης γεωτρήσεων μεγάλου βάθους, οι Papanastasiou and Vardoulakis (1989) ανέλυσαν την επίδραση της ακτίνας της οπής της γεώτρησης στην ευστάθειά της, καθώς η προηγούμενη επίλυση διακλάδωσης επιδρά μόνο σε ένα απειροελάχιστο δακτύλιο υλικού κοντά στο τοίχωμα της οπής. Περιγράφοντας τη βραχόμαζα από τις εξισώσεις της θεωρίας παραμόρφωσης πλαστικού, συνεκτικού, ασυμπίεστου υλικού με δομή τύπου Cosserat, το πρόβλημα της ανομοιογενούς διακλάδωσης επιλύθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αποδείχτηκε πως ο συνδυασμός της δομής Cosserat και οι επιδράσεις της κλίμακας τάσης οδηγούν στην αύξηση της τάσης διακλάδωσης, καθώς η ακτίνα της οπής γεώτρησης μειώνεται. Σημειώνεται πως οι γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου αστοχούν σε μεγαλύτερες εξωτερικές τάσεις από ότι οι μεγαλύτερες οπές. Ακόμη τα φαινόμενα κλίμακας είναι εντονότερα σε υλικά με μεγαλύτερες γωνίες τριβής (Σχήμα IV.10).

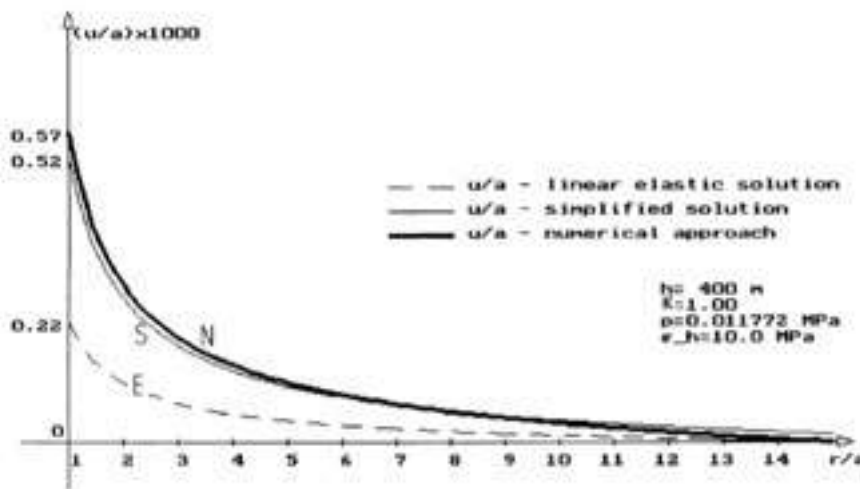


Σχήμα IV.10 Σχέση μεταξύ της κρίσιμης τάσης διακλάδωσης και της γωνίας τριβής του σχηματισμού [31].

Οι Paraschiv-Munteanu and Cristescu (2001) εξέτασαν την μεταβολή των τάσεων κατά την διάρκεια της σύγκλισης ερπυσμού μίας γεώτρησης μεγάλου βάθους, η οποία

πραγματοποιείται σε βραχώδη σχηματισμό ορυκτού άλατος (rock salt). Χρησιμοποιήθηκε μία ελαστο-βίσκο-πλαστική καταστατική εξίσωση για την περιγραφή της συμπεριφοράς και της διόγκωσης (dilatancy) της βραχώμαζας κατά την διάρκεια παροδικού ή σταθερού ερπυσμού, καθώς και των βλαβών που πιθανώς να οδηγήσουν σε αστοχία. Με την εφαρμογή αριθμητικής μεθόδου υπολογίστηκε η μεταβολή με τον χρόνο της ακτινικής σύγκλισης (μετατόπισης) του τοιχώματος της γεώτρησης και της τάσης (σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνειες της γεώτρησης). Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα IV.11 και IV.12 αντίστοιχα.

Στο σχήμα IV.11 απεικονίζεται η σύγκλιση  $u$  μίας γεώτρησης εξορυγμένης σε βάθος  $h=400$  m, όταν ο λόγος  $K$  της οριζόντιας προς την κατακόρυφη τάση πεδίου ισούται με τη μονάδα, οι τάσεις είναι 10 MPa και η εσωτερική επιφάνεια δέχεται πίεση. Παρουσιάζονται τρεις λύσεις, η καμπύλη E είναι η ελαστική λύση, η καμπύλη S αντιστοιχεί στην απλοποιημένη επίλυση και η καμπύλη N αποτελεί την αριθμητική επίλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, και λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της τάσης κατά τη διάρκεια του

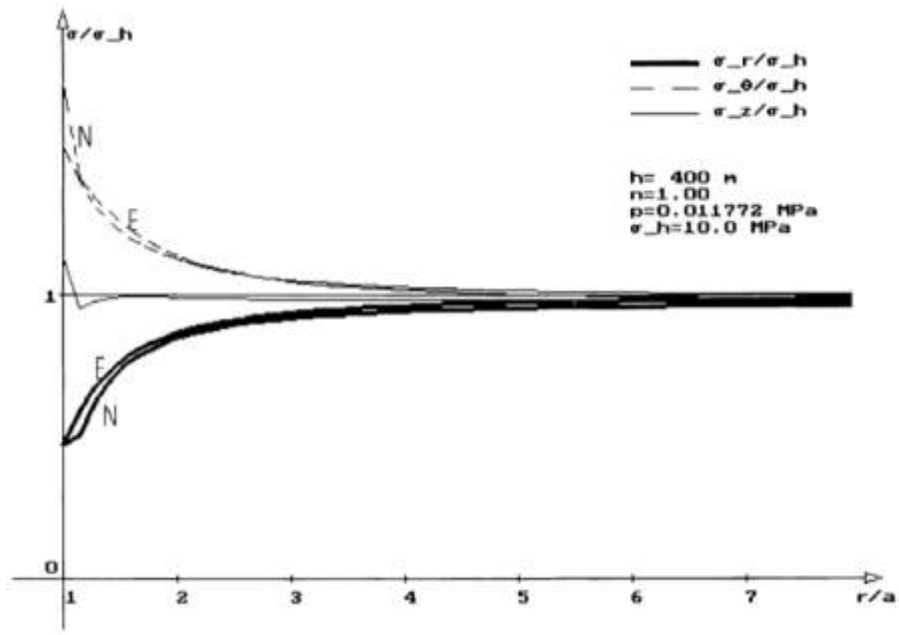


Σχήμα IV.11 Η ακτινική σύγκλιση μίας γεώτρησης, εξορυγμένης σε  $h=400$  m για λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης τάσης να ισούται με την μονάδα [2].

ερπυσμού. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες N και S σχεδόν ταυτίζονται.

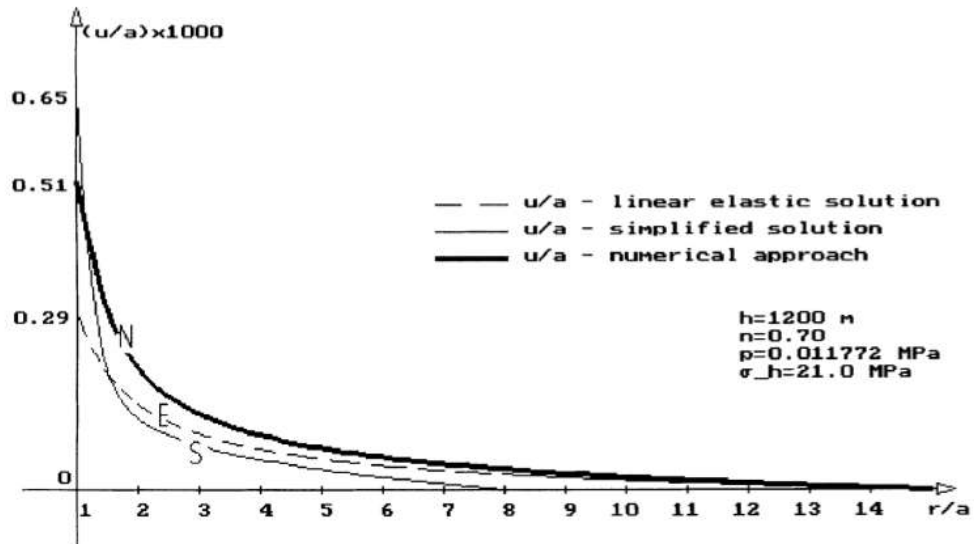
Η αντίστοιχη μεταβολή της τάσης, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα IV.13, αποτελείται από την καμπύλη  $\sigma_\theta$  στο επάνω τμήμα, η οποία αφορά την αζιμουθιακή (εφαπτομενική) τάση,

και την καμπύλη  $\sigma_r$  στο κατώτερο τμήμα, η οποία αφορά την ακτινική τάση. Η αξονική τάση  $\sigma_z$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά στην αριθμητική επίλυση. Κοντά στην επιφάνεια της γεώτρησης η  $\sigma_\theta$  είναι μεγαλύτερη στην αριθμητική επίλυση παρά στην ελαστική, ενώ η ακτινική τάση  $\sigma_r$  είναι μικρότερη.

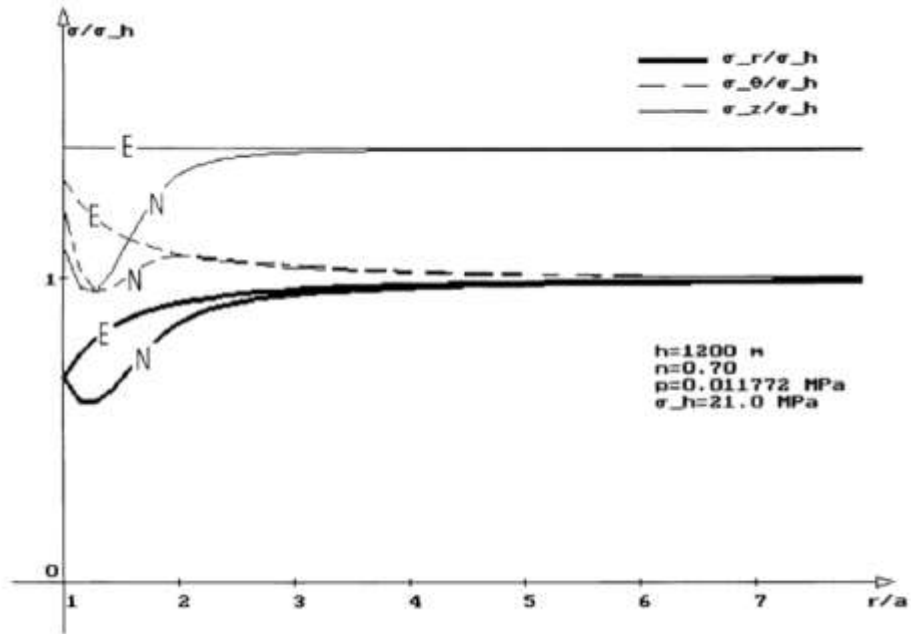


Σχήμα IV.12 Η μεταβολή της τάσης γύρω από μία οπή γεώτρησης, εξορυγμένης σε  $h=400$  m για λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης τάσης να ισούται με την μονάδα [2].

Σε μεγαλύτερο βάθος, και κυρίως όταν ο λόγος  $\eta$  δεν ισούται με την μονάδα, οι τρεις παραπάνω λύσεις παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση (Σχήμα IV.13). Στο Σχήμα IV.13 παρουσιάζεται η ακτινική σύγκλιση σε βάθος  $h=1200$  m, για λόγο κατακόρυφης τάσης πεδίου προς οριζόντιας τάσης πεδίου,  $\eta=0.7$ . Η ελαστική λύση E, η αριθμητική λύση N και η απλοποιημένη S, παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Στην αντίστοιχη κατανομή τάσεων του σχήματος IV.14, παρατηρείται πως σε μεγαλύτερο βάθος η αριθμητική επίλυση διαφοροποιείται σημαντικά από την αρχική ελαστική επίλυση.



Σχήμα IV.13 Ακτινική σύγκλιση γεώτρησης σε βάθος  $h=1200\text{m}$ , για  $n=0.7$  [2].



Σχήμα IV.14 Μεταβολή τάσης γεώτρησης σε βάθος  $h=1200\text{m}$ , για  $n=0.7$  [2].

### C. Θεωρία Βαθμοελαστικότητας

Το πρόβλημα της αστοχίας της οπής γεώτρησης αναθεωρείται από τους Efremidis et. al. (1998) στα πλαίσια της θεωρίας βαθμοελαστικότητας, με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\sigma = \lambda(\text{tr } \varepsilon)I + 2\mu\varepsilon - c\lambda\nabla^2(\text{tr}\varepsilon)I, \quad (\text{IV.28})$$

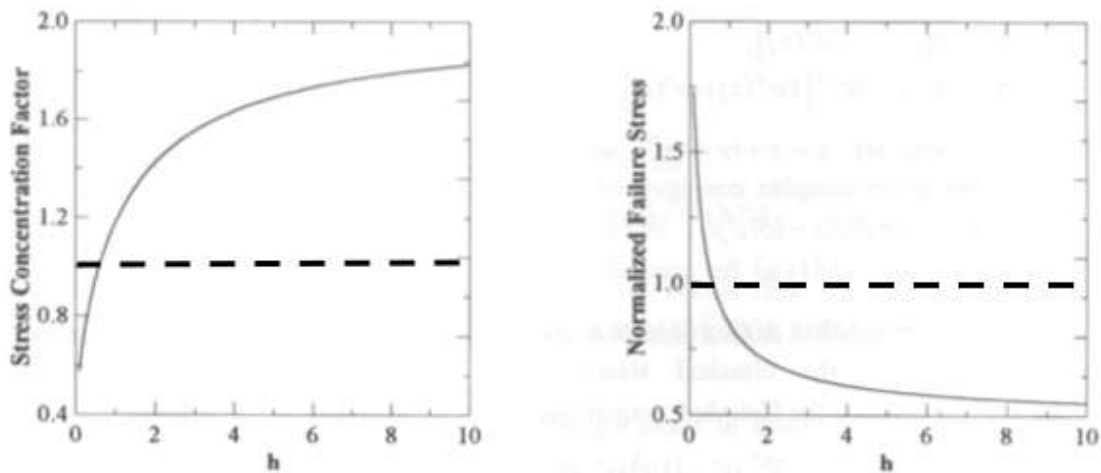
όπου  $(\sigma, \varepsilon)$  οι τανυστές τάσης και παραμόρφωσης,  $(\lambda, \mu)$  οι ελαστικές σταθερές Lamé,  $I$  ο μοναδιαίος τανυστής,  $\nabla^2$  ο Λαπλασιανός τελεστής και  $c$  ο συντελεστής βαθμίδας.

Η πρώτη περίπτωση της ανάλυσης αφορά τα φαινόμενα βαθμίδας που χρησιμοποιούν την λαπλασιανή της υδροστατικής παραμόρφωσης ή την χωρική μεταβολή λόγω ογκομετρικής παραμόρφωσης, σε συνδυασμό με το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης. Αναπτύσσεται για έναν κοίλο κύλινδρο ακτίνας  $R$ , που εκτείνεται στο άπειρο και υπόκειται ομοιόμορφη θλιπτική τάση  $\sigma$ . Προσδιορίζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης  $K$  και η κανονικοποιημένη τάση αστοχίας  $\sigma_f$  σε συνάρτηση της ακτίνας της οπής.

$$K = \frac{\sigma_\theta}{\sigma} = 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ h \frac{K_1(h)}{K_0(h)} + 1 \right]} \right\}, \quad \sigma_f = \frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + 1 / \left[ h \frac{K_1(h)}{K_0(h)} \right] \right\} \quad (\text{IV.29})$$

όπου  $\sigma_c$  μία σταθερά του υλικού,  $K_n$  η  $n$ -οστής τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 2ου τύπου και  $h = \frac{R}{\sqrt{c'}}$ ,  $c' = \frac{\nu c}{1-\nu}$ , όπου  $\nu$  ο λόγος Poisson.

Αποδεικνύεται με την επίλυση του προβλήματος συνοριακών τιμών πως ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης αυξάνεται, όσο η ακτίνα της γεώτρησης μεγαλώνει, το οποίο συμφωνεί με διάφορες πειραματικές παρατηρήσεις (Σχήμα IV.15).



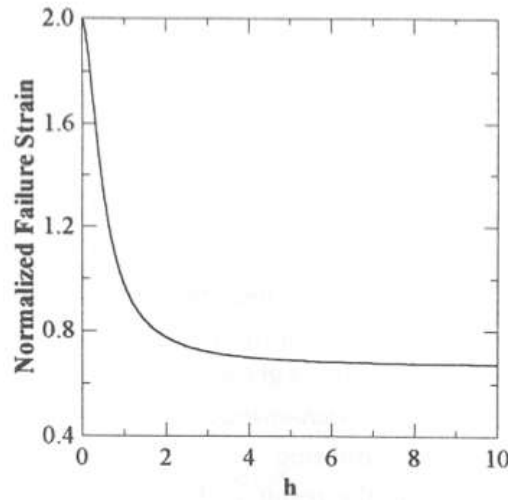
Σχήμα IV.15 Μεταβολή του παράγοντα τάσης  $K$  και της κανονικοποιημένης τάσης αστοχίας  $\sigma_f$  με την αδιάστατη ακτίνα της οπής  $h$  [3].

Μία εναλλακτική συνθήκη αστοχίας αποτελεί το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης, το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί στην επίλυση του προβλήματος συνοριακών τιμών μίας γεώτρησης (Εξίσωση IV.28). Σύμφωνα με την ανάλυση των Efreimidis et al (1998), σε αυτή τη περίπτωση λαμβάνονται υπόψη τόσο οι υδροστατικοί όροι όσο και οι μη υδροστατικοί όροι του τανυστή της παραμόρφωσης. Χρησιμοποιείται επίσης μία σχέση μιγαδικών συναρτήσεων, όσον αφορά τις μετατοπίσεις, τις παραμορφώσεις και τις τάσεις, σε πολικό σύστημα συντεταγμένων  $(r, \theta)$ , με αρχή το κέντρο της κυκλικής οπής. Θεωρώντας αξονοσυμμετρία, επιλύεται το πρόβλημα συνοριακών τιμών από τους Efreimidis et al (1998), καταλήγοντας σε μία κανονικοποιημένη παραμόρφωση  $\varepsilon_f$  (Σχήμα IV.16) .

$$\varepsilon_f = 1 / \left[ \frac{\kappa+1}{2} - \frac{4K_1(h)}{(4+3h^2)(K_1(h)+2hK_0(h))} \right] \quad (IV.30)$$

όπου  $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$ ,  $K_n$  η  $n$ -οστής τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel,  $h=R/\sqrt{c}$ .

Το συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι ότι η καταστατική εξίσωση IV.28 προβλέπει τα φαινόμενα κλίμακας με όρους παραμόρφωσης αλλά και με όρους τάσης.



Σχήμα IV.16 Μεταβολή της κανονικοποιημένης παραμόρφωσης αστοχίας με την αδιάστατη ακτίνα της γεώτρησης  $h$  [3].

Σε συνέχεια της παραπάνω επίλυσης οι Efremidis and Aifantis (2004), μελέτησαν τα φαινόμενα κλίμακας με την επίλυση του αξονοσυμμετρικού προβλήματος γεώτρησης, σε ένα ελαστικό, ισότροπο, άπειρο μέσο υπό ομοιόμορφη θλίψη, σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με βάση την θεωρία βαθμοελαστικότητας, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη καταστατική σχέση,

$$\sigma = \lambda(\text{tr}\epsilon)I + 2\mu\epsilon - c\nabla^2[\lambda(\text{tr}\epsilon)I + 2\mu\epsilon]. \quad (\text{IV.31})$$

Η αναλυτική επίλυση προέκυψε χρησιμοποιώντας το θεώρημα Ru- Aifantis, με το οποίο το πρόβλημα συνοριακών τιμών απλοποιείται, οδηγώντας στην επίλυση μια σχετικά απλούστερης διαφορικής εξίσωσης, χρησιμοποιώντας την κλασική και την βαθμιακή μορφή του πεδίου των μετατοπίσεων. Η επίλυση του προβλήματος οδηγεί σε πεδίο τάσεων ταυτόσημο με το κλασικό και διαφορετικά πεδία παραμορφώσεων και μετατοπίσεων. Οι τελικές εκφράσεις για την τάση την παραμόρφωση και την μετατόπιση, είναι οι εξής:

$$\sigma_r = \sigma \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right), \quad (\text{IV.32})$$

$$\sigma_\theta = \sigma \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right), \quad (\text{IV.33})$$

$$\sigma_z = \sigma \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad (\text{IV.34})$$

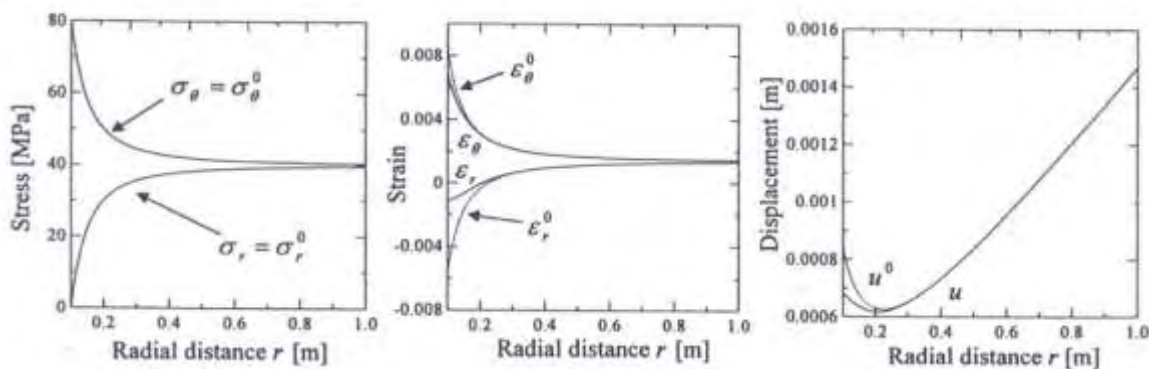


$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{2\mu} \left\{ (1 - 2\nu) - \frac{R^2}{r^2} + \frac{2R}{(h^2+2)K_1(h)+hK_0(h)} \left[ \frac{1}{\sqrt{c}} K_0\left(\frac{r}{\sqrt{c}}\right) + \frac{1}{r} K_1\left(\frac{r}{\sqrt{c}}\right) \right] \right\}, \quad (IV.35)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma}{2\mu} \left\{ (1 - 2\nu) + \frac{R^2}{r^2} - \frac{2R}{(h^2+2)K_1(h)+hK_0(h)} \left[ \frac{1}{r} K_1\left(\frac{r}{\sqrt{c}}\right) \right] \right\}, \quad (IV.36)$$

$$u = \frac{\sigma}{2\mu} \left\{ (1 - 2\nu)r + \frac{R^2}{r^2} - \frac{2R}{(h^2+2)K_1(h)+hK_0(h)} \left[ K_1\left(\frac{r}{\sqrt{c}}\right) \right] \right\}. \quad (IV.37)$$

Στο σχήμα IV.17 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των επιλύσεων της κλασσικής ελαστικότητας και της βαθμοελαστικότητας. Παρατηρείται ότι όσο η ακτινική απόσταση αυξάνεται, τα αποτελέσματα τη θεωρίας κλασσικής ελαστικότητας και τη θεωρίας βαθμοελαστικότητας συμπίπτουν. Η θεωρία βαθμοελαστικότητας διαφοροποιεί την μετατόπιση και την παραμόρφωση σε σχετικά μικρές αποστάσεις από την περιφέρεια της οπής.

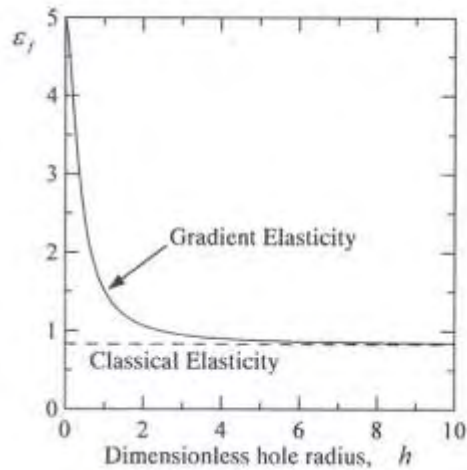


Σχήμα IV.17 Τάση, παραμόρφωση και μετατόπιση σύμφωνα με τα αποτελέσματα των θεωριών κλασσικής ελαστικότητας και βαθμοελαστικότητας, σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση [32].

Επιπρόσθετα ορίζεται από τους Efremidis and Aifantis [2004] εκ νέου η κανονικοποιημένη παραμόρφωση αστοχίας ως εξής:

$$\varepsilon_f = \frac{1}{2(1-\nu) \frac{2K_1(h)}{(h^2+2)K_1(h)+hK_0(h)}} \quad (IV.38)$$

Στο σχήμα IV.18 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη παραμόρφωση αστοχίας σε συνάρτηση με την αδιάστατη ακτίνα της οπής για  $\nu=0.4$ . Στη θεωρία βαθμοελαστικότητας οι μικρότερες οπές είναι πιο δύσκαμπτες και αστοχούν σε μεγαλύτερες τάσεις από τις μεγαλύτερες οπές. Η θεωρία κλασσικής ελαστικότητας δεν δύναται να ερμηνεύσει αυτό το φαινόμενο.



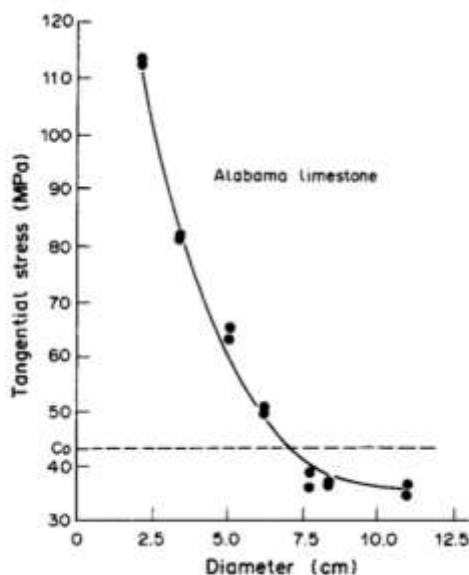
Σχήμα IV.18 Κανονικοποιημένη παραμόρφωση αστοχίας συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας της γεώτρησης [32].

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης ( IV.28) παρουσιάζει πεδίο τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων που διαφοροποιούνται από την κλασική ελαστικότητα, ενώ η εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης ( IV.39) παρουσιάζει πεδίο παραμορφώσεων και μετατοπίσεων που διαφοροποιούνται από την κλασική ελαστικότητα, ενώ το πεδίο των τάσεων παραμένει το ίδιο με την κλασική λύση. Επιπλέον αποδεικνύεται από τους Efreimidis and Aifantis (2004) ότι ακόμη κι αν η παραμόρφωση και μετατόπιση της εξίσωσης IV.28 διαφοροποιείται από την αντίστοιχη κλασική επίλυση, η τάση παραμένει η ίδια και στις δύο θεωρίες. Οι αναλυτικές επιλύσεις με χρήση των δύο παραπάνω καταστατικών εξισώσεων ελαστικότητας βαθμίδων ανωτέρας τάξης σε συνδυασμό με τα κριτήρια της μέγιστης παραμόρφωσης και τάσης χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν το παρατηρούμενα φαινόμενα κλίμακας, δηλαδή την εξάρτηση της αντοχής των τοιχωμάτων της οπής γεώτρησης από την ακτίνα της οπής. Τέτοια φαινόμενα αδυνατεί να ερμηνεύσει η κλασική θεωρία ελαστικότητας. [32].

## V. Πειραματικά Μοντέλα Περιγραφής της Μηχανικής Συμπεριφοράς του βράχου γύρω από την οπή μίας γεώτρησης

### A. Φαινόμενα Κλίμακας και Επίδραση Σχήματος και Τύπου Εδαφικού Υλικού

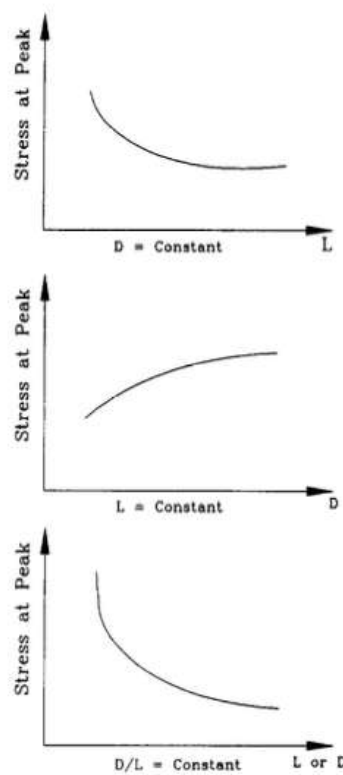
Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η ακτίνα της γεώτρησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην δημιουργία αστοχιών. Γενικά ισχύει πως οι μικρότερες σε μέγεθος οπές αστοχούν σε μεγαλύτερες εξωτερικές τάσεις από ότι οι μεγαλύτερες. Ακόμη κρίνεται σημαντική η εξέταση της επίδρασης του σχήματος και του τύπου του γεωυλικού, ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα σχετικά με την δημιουργία αστοχιών στα τοιχώματα των οπών των γεωτρήσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί μία παρουσίαση ορισμένων πειραματικών μοντέλων, τα οποία αναπτύχθηκαν για τον σκοπό αυτό.



Σχήμα V.1 Πειραματικά δεδομένα για φαινόμενα κλίμακας σε προβλήματα γεωτρήσεων [33].

Οι Haimson & Herrick (1989) εξέτασαν την συμπεριφορά δειγμάτων **ασβεστόλιθου από την Αλαμπάμα**, με διαφορετικά μεγέθη οπών, διαμέτρου από 2cm έως 12cm και με λόγο μήκους δοκιμίου προς διάμετρο οπής 5:1, υπό εξωτερική ομοιόμορφη τάση [33]. Δείχθηκε πως

μικρότερες οπές απαιτούσαν μεγαλύτερες τάσεις για την δημιουργία αστοχίας (Σχήμα V.1). Επιπλέον οι δοκιμές υπέδειξαν πως όσο το μέγεθος της οπής μεγαλώνει (πάνω από 9 cm για ασβεστόλιθο Αλαμπάμα), το φαινόμενο κλίμακας γίνεται λιγότερο εμφανές, καθώς η εφαρμοζόμενη τάση αστοχίας συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μία σταθερή τιμή. Παρόλα αυτά, το διαφορετικό επίπεδο τάσης εξαρτάται από το φαινόμενο κλίμακας ή την επίδραση του σχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα V.2.

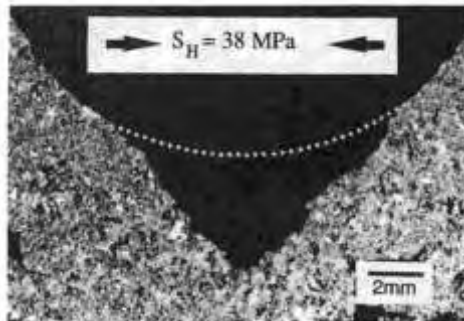


Σχήμα V.2 Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου κλίμακας της επίδρασης του σχήματος του δοκιμίου, από δοκιμές αξονικής συμπίεσης, σε κυλινδρικά δοκίμια βράχου. (α) Σταθερή διάμετρος  $D$  και μεταβαλλόμενο ύψος  $L$  του δοκιμίου (επίδραση σχήματος), (b) Σταθερό ύψος  $L$  και μεταβαλλόμενη διάμετρος  $D$  (επίδραση σχήματος), (c) Σταθερός λόγος  $D/L$  (φαινόμενο κλίμακας) [33].

Οι Haimson & Song (1993) διεξήγαγαν μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών, σε ασβεστολιθικά δοκίμια του εδαφικού σχηματισμού Cordova Cream, με σκοπό την μελέτη του μηχανισμού δημιουργίας των αστοχιών στα τοιχώματα της οπής γεώτρησης, και την εκτίμηση της πιθανότητας χρήσης των αστοχιών για την πρόβλεψη του μεγέθους των επιτόπου τάσεων μακρινού πεδίου. Χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δείγματα ύψους 180mm και διατομής 130x130 mm, με κεντρικές οπές διαμέτρου 22mm, τα οποία εξετάστηκαν σε τριαξονική δοκιμή τάσεων μακρινού πεδίου ( $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$ ).

Ο πρώτος τύπος δοκιμής περιλάμβανε την διάνοιξη της γεώτρησης κάθετα στη στρωμάτωση του εδαφικού σχηματισμού, με αρχική ταυτόχρονη εφαρμογή τάσεων σε τρεις κάθετες διευθύνσεις, διατηρώντας σταθερό λόγο φόρτισης. Όταν η ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση έφτανε μία επιλεγμένη τιμή, η φόρτιση σταματούσε στην κατεύθυνση της, αλλά συνεχιζόταν στις άλλες δύο διευθύνσεις, έως ότου να φτάσει μία επιλεγμένη τιμή η κατακόρυφη τάση. Ακόμη η μέγιστη οριζόντια κύρια τάση αυξήθηκε μονότονα έως ότου να σχηματιστούν αστοχίες. Ο σκοπός των παραπάνω δοκιμών ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των αστοχιών υπό ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων.

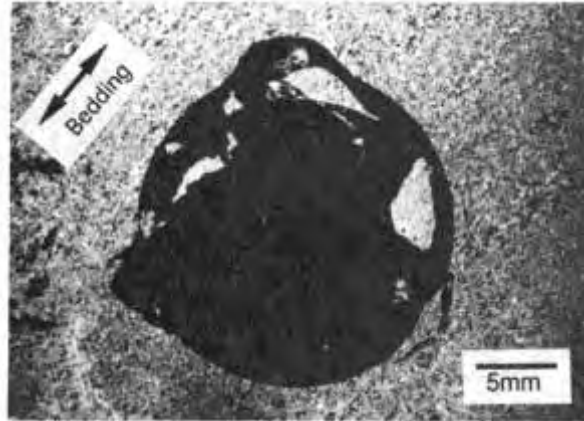
Σύμφωνα με τους Haimson & Song (1993), οι ακουστικές εκπομπές, η παραμόρφωση της γεώτρησης και η εικονική παρακολούθηση του τοιχώματος της οπής γεώτρησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής αποκάλυψαν 4 στάδια ανάπτυξης των αστοχιών : α) την εμφάνιση των ρωγμών κάθετα στην κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης, β) την διεύρυνση τους σε συνδυασμό με την εμφάνιση χαλαρών κόκκων, γ) τον σχηματισμό αστοχιών και τέλος, δ) την σταθεροποίηση αυτών.



Σχήμα V.3 Σταθεροποιημένη αστοχία (Στάδιο 4ο). Εφαρμοζόμενες τάσεις μακρινού πεδίου τάσεων  $\sigma_h=10$  MPa,  $\sigma_v=15$  MPa,  $\sigma_H=38$  MPa. Η αστοχία έχει σχήμα V, ενώ η αρχική θέση του τοιχώματος της οπής σκιαγραφείται από την διακεκομμένη γραμμή [34].

Υποστηρίζεται από τους Haimson & Song (1993) πως η παραπάνω ανάλυση υποδεικνύει ότι η εμφάνιση των αστοχιών στον εδαφικό σχηματισμό Cordova Cream δύναται να προκαλείται από την διατμητική αστοχία, καθώς οι ρωγμές, οι οποίες προκαλούν την αστοχία εμφανίζονται στην περιφέρεια της οπής, και επεκτείνονται εσωτερικά κατά την διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης. Σημειώνεται ότι οι χαλαροί κόκκοι που εμφανίζονται λόγω τριβής μεταξύ των τοιχωμάτων των ρωγμών μπορούν να διακριθούν με ευκολία. Τέλος οι διατμητικές μετατοπίσεις είναι επίσης εμφανείς.

Ο δεύτερος τύπος δοκιμών που διεξήχθησαν από τους Haimson & Song (1993), περιλάμβανε την ταυτόχρονη αύξηση των τριών κυρίων τάσεων έως ότου δημιουργηθούν αστοχίες. Σε αυτή τη περίπτωση η στρωμάτωση του σχηματισμού ήταν παράλληλη στην άξονα της γεώτρησης. Ο σκοπός των δοκιμών αυτών ήταν η μελέτη της επιρροής της ανισοτροπίας όσον αφορά την στρωμάτωση του σχηματισμού στον προσανατολισμό των αστοχιών.

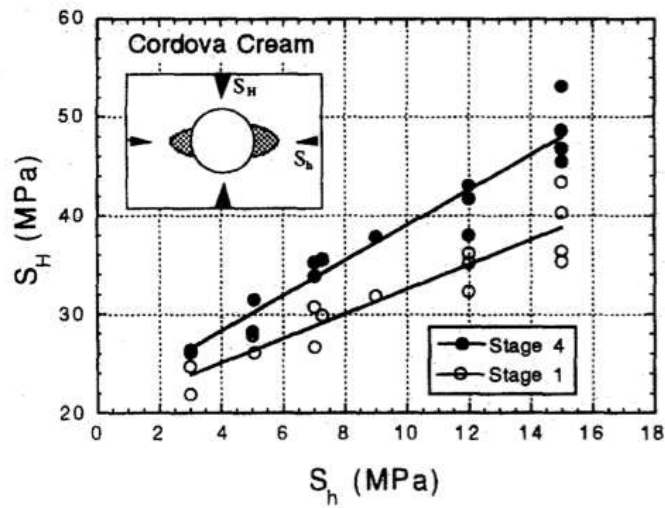


Σχήμα V.4 Μορφή αστοχίας υπό επιβολή ομοιόμορφης οριζόντιας τάσης.  $\sigma_h = \sigma_H = 40 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_v = 10 \text{ MPa}$  [34].

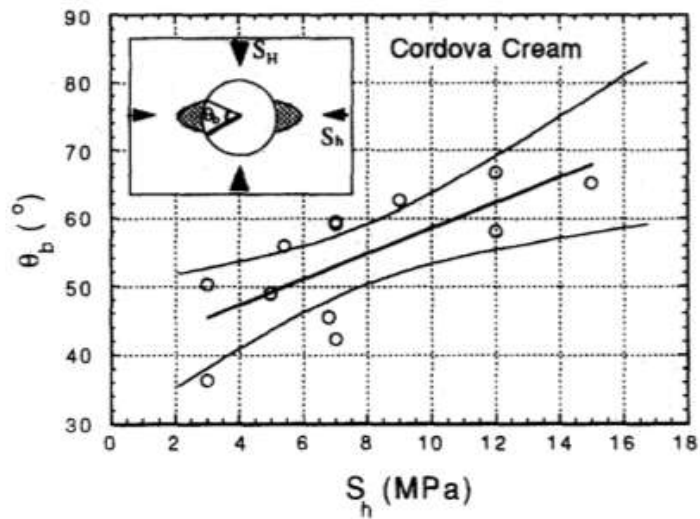
Το αποτέλεσμα του δεύτερου τύπου δοκιμών υπέδειξε, όπως αναφέρεται από τους Haimson & Song (1993), πως οι αστοχίες αναπτύσσονται σε τυχαίες κατευθύνσεις γύρω από την οπή της γεώτρησης. Συμπληρώνεται επίσης πως ενώ η παραπάνω συμπεριφορά είναι συνήθης σε ισότροπα υλικά, στην περίπτωση του συγκεκριμένου σχηματισμού παρατηρείται ανισοτροπία όσον αφορά την στρωμάτωση του. Η ανισοτροπία όμως αυτή μειώνεται όσο η συμπίεση αυξάνεται, πράγμα που σημαίνει πως απαιτείται περαιτέρω εξέταση για την εκτίμηση των τάσεων γύρω από την οπή.

Όσον αφορά το μέγεθος της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης, οι παραπάνω δοκιμές υπέδειξαν πως είναι γραμμικά ανάλογο με το μέγεθος της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης (Σχήμα V.5). Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα εύκολης εκτίμησης της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης.

Ακόμη βρέθηκε από τους Haimson & Song (1993) πως η αζιμουθιακή γωνία  $\theta$  και ο λόγος του μέγιστου βάθους των αστοχιών προς την ακτίνα της γεώτρησης ( $r_b/R$ ) αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήματα V.6 και V.7).

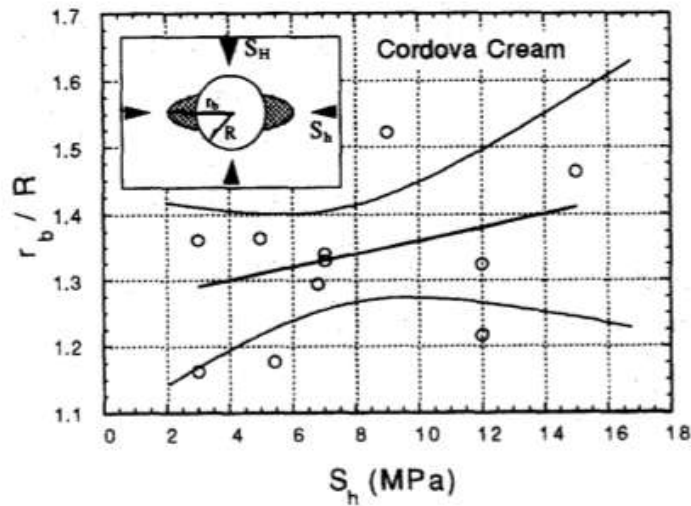


Σχήμα V.5 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της αζιμουθιακής γωνίας και της ελάχιστης οριζόντιας τάσης [34].



Σχήμα V.6 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της μέγιστης οριζόντιας τάσης και της ελάχιστης οριζόντιας τάσης [34].





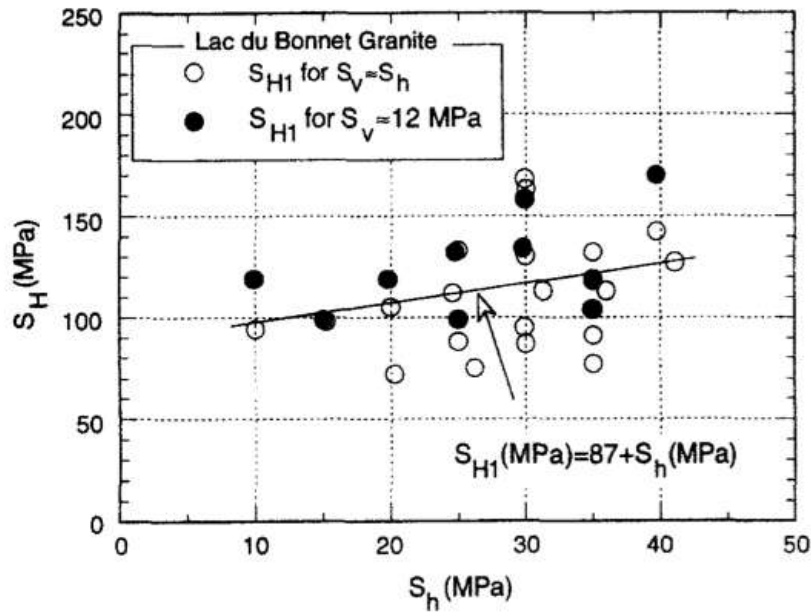
Σχήμα V.7 Πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την σχέση μεταξύ της αζιμουθιακής γωνίας και της ελάχιστης κύριας τάσης [34].

Οι Lee & Haimson (1993) χρησιμοποίησαν κυβικά δοκίμια γρανίτη τύπου Lac Du Bonet με διανοιγμένες οπές κατακόρυφα σε αυτά, υποβάλλοντας σταθερή κατακόρυφη τάση και ελάχιστη οριζόντια τάση απομακρυσμένου πεδίου έως ότου εμφανιστούν αστοχίες. Ο σκοπός της μελέτης αυτής ήταν ο χαρακτηρισμός του μηχανισμού αστοχίας, και ο καθορισμός των περιοριστικών συνθηκών των επιτόπου τάσεων οι οποίες οδηγούν στις αστοχίες της γεώτρησης. Τα κυβικά δοκίμια είχαν διαστάσεις 10cm και διάμετρο οπής 2,1cm. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε σε τριαξονική συσκευή, η οποία επέτρεπε την εφαρμογή δύο γενικά άνισων φορτίων σε αυτό. Το τρίτο θλιπτικό φορτίο (κατακόρυφο) εφαρμόστηκε μέσω μίας συσκευής συμπίεσης.

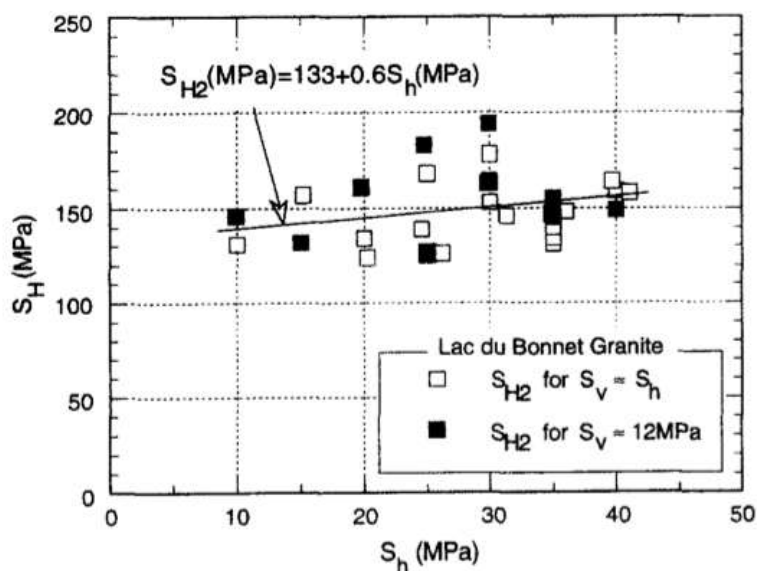
Η ελάχιστη οριζόντια κυρία τάση εκτιμήθηκε, σύμφωνα με τους Lee & Haimson (1993), σε επίπεδα που ήταν αντιπροσωπευτικά της κατάστασης πεδίου. Η κατακόρυφη τάση διατηρήθηκε κοντά στην ελάχιστη, ώστε να προσομοιώνει την επιτόπου κατακόρυφη τάση σε βάθος 400 m έως 500 m. Σε αυτό το επίπεδο βάθους παρατηρήθηκαν αστοχίες σε διάφορα κυκλικά ανοίγματα. Η ελάχιστη οριζόντια τάση και η κατακόρυφη τάση διατηρήθηκαν

σταθερές κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής, η μέγιστη οριζόντια τάση αυξανόταν γραμμικά με ρυθμό 0,01 MPa/s, έως ότου εμφανίστηκαν και αναπτύχθηκαν αστοχίες.

Σε περισσότερα από 40 δοκίμια, που εξετάστηκαν από τους Lee & Haimson (1993), παρατηρήθηκαν δύο επίπεδα μέγιστης οριζόντιας τάσης. Το πρώτο επίπεδο ( $\sigma_{H1}$ ) αντιπροσώπευε την έναρξη δημιουργίας αστοχιών και ταυτοποιήθηκε από την πρώτη ακουστική εκπομπή, ενώ το δεύτερο ( $\sigma_{H2}$ ) αποτελούσε την έναρξη των εμφανών αστοχιών, σε συνύπαρξη έντονων ακουστικών εκπομπών. Οι Lee & Haimson (1993) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το πρώτο επίπεδο μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης ήταν γενικά ανάλογο της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης (Σχήμα V.8). Ακόμη, το δεύτερο επίπεδο μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης αυξανόταν με την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση και η σχέση τους θεωρήθηκε γραμμική (σχήμα V.9). Σε αντίθεση η κατακόρυφη τάση είχε μικρή ή καμιά επιρροή στην οριζόντια τάση.



Σχήμα V.8 Σχέση μεταξύ της  $\sigma_{H1}$  και της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης  $\sigma_h$  [35].

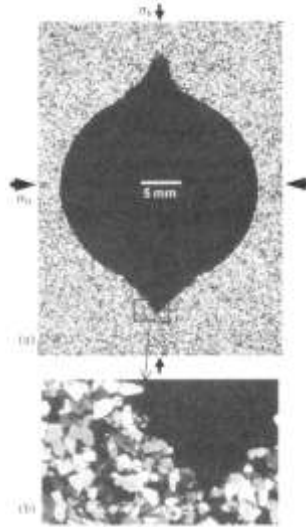


Σχήμα V.9 Σχέση μεταξύ της  $\sigma_{H2}$  και της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης  $\sigma_h$  [35].

Μια μελέτη λεπτών τομών των Lee & Haimson (1993), υπέδειξε πως προϋπήρχαν ρηγματώσεις λόγω εφελκυσμού, πίσω από το τοίχωμα της οπής της γεώτρησής, διατεταγμένες σε δύο ζώνες στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης. Παρατηρήθηκε πως η σταδιακή αποκόλληση λεπτών τμημάτων βράχου με μεγάλο μήκος, τα οποία δεσμεύτηκαν από πυκνά τοποθετημένες παράλληλες ρωγμές, οδήγησε στο σχηματισμό αστοχιών σχήματος V. Υποστηρίζεται ακόμη πως ο μηχανισμός αστοχίας και η μορφή της ταιριάζουν με τις παρατηρήσεις του πεδίου [35]. Τα αποτελέσματα των Lee & Haimson (1993) προτείνουν την χρήση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων ώστε να εκτιμηθεί η μέγιστη οριζόντια τάση, σε περίπτωση που η ελάχιστη οριζόντια τάση είναι γνωστή, και αντιστρόφως.

Πειράματα σε δοκίμια ψαμμίτη (διαστάσεων 152mm X 152mm X 229mm) τύπου Berea, με πορώδες τάξεως του 25%, διεξάχθηκαν από τον Haimson (2001). Σε αυτά διανοίχθηκαν γεωτρήσεις με οπές διαμέτρου 23mm, και σε συνέχεια υποβλήθηκαν σε σταθερή τριαξονική τάση μακρινού πεδίου ώστε να μελετηθούν οι επακόλουθες αστοχίες. Ο κύριος στόχος των πειραμάτων αυτών, ήταν όπως και στα προηγούμενα πειράματα, να μελετηθεί ο μηχανισμός αστοχίας και να αποκτηθούν πληροφορίες όσον αφορά τις τάσεις πεδίου.

Σύμφωνα με τον Haimson (2001), ο τύπος αυτός πετρώματος αποτελείται από μεγάλου μεγέθους κόκκους χαλαζία (0.5 mm), οι οποίοι συγκολλούνται με δεσμούς κόκκων. Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν δεν είχαν σχήμα V όπως στις παραπάνω περιπτώσεις του γρανίτη Lac du Bonnet, αλλά και δοκιμίων ψαμμίτη με πορώδες τάξης του 17% (Σχήμα V.10). Η μορφή των αστοχιών περιγράφεται ως μεγάλου μήκους ρωγμές ή σχισμές, οι οποίες αναπτύχθηκαν κάθετα στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήμα 12).

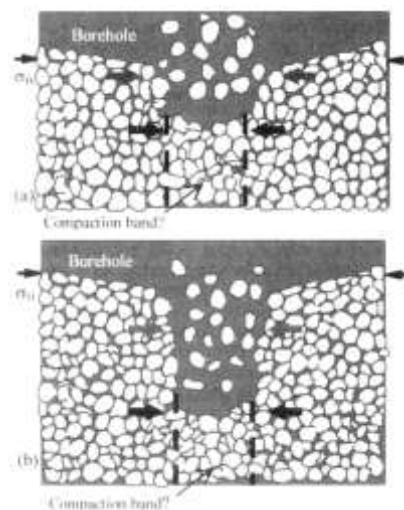


Σχήμα V.10 Τυπική μορφή αστοχίας σε ψαμμίτη μέτριου πορώδους τύπου Berea. (α) Διατομή της γεώτρησης, η οποία διανοίχθηκε υπό τάσεις μακρινού πεδίου,  $\sigma_H=100$  MPa,  $\sigma_h=50$  MPa,  $\sigma_v=60$  MPa. Η αστοχία έχει τη μορφή σχήματος V, και είναι στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης. (b) Λεπτομέρεια της «άκρης» της αστοχίας του σχήματος (α), όπου φαίνονται διασταλτικές μικρορωγμές μεταξύ των κόκκων, οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό αστοχιών μορφής V [18].

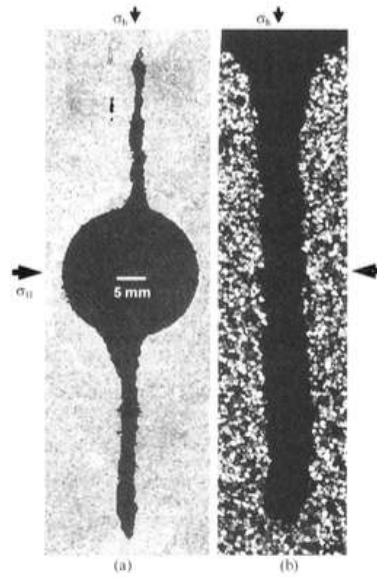
Υπογραμμίζεται από τον Haimson (2001) ότι οι αστοχίες αυτές δημιουργούνται στα σημεία όπου παρουσιάζεται μέγιστη τάση συμπίεσης στο τοίχωμα της οπής. Αναφέρεται πως μικρογραφήματα των αστοχιών αναδεικνύουν πιθανό σχηματισμό συμπαγών λωρίδων (compaction bands), οι οποίες βρίσκονται στις «άκρες» των αστοχιών, με μορφή στενού στρώματος κόκκων, οι οποίοι συμπιέζονται κάθετα της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης. Σημειώνεται πως τέτοιου είδους συμπαγείς λωρίδες παρατηρούνται συχνά και στο πεδίο. Ο μηχανισμός που οδηγεί σε τέτοιου είδους αστοχίες χαρακτηρίζεται ως μη διασταλτικός (anti-

dilatant), και σχετίζεται άμεσα με την αποκόλληση των κόκκων και την μείωση του πορώδους, η οποία συμβαίνει κατά τον σχηματισμό των συμπαγών λωρίδων (Σχήμα V.11).

Όπως περιγράφεται από τον Haimson (2001), ορισμένοι συμπαγείς κόκκοι στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης απομακρύνονται λόγω της εφαπτομενικής φόρτισης και της ακτινικής διαστολής των γειτονικών κόκκων. Το διατρητικό ρευστό απομακρύνει τους εναπομείναντες χαλαρούς κόκκους στην διεπιφάνεια του βράχου και του τοιχώματος της οπής. Όσο η αστοχία διευρύνεται, η συγκέντρωση τάσης επεκτείνει τις συμπαγείς λωρίδες, οδηγώντας σε περαιτέρω απομάκρυνση κόκκων και αύξηση του μήκους των αστοχιών. Συνεπώς, η διαδικασία αυτή μπορεί να συνεχιστεί για μεγάλο διάστημα σε περιπτώσεις πεδίου, οδηγώντας σε σημαντική παραγωγή άμμου.



Σχήμα V.11 Μοντέλο του προτεινόμενου μη διασταλτικού μηχανισμού αστοχίας, ο οποίος οδηγεί σε αστοχίες τύπου ρηγματώσεων σε υψηλού πορώδους ψαμμίτες Berea. (a) Η υψηλή συγκέντρωση τάσης στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης (βέλη χρώματος γκρι) αποδυναμώνει τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων, οι οποίοι έτσι κατευθύνονται προς την διεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης και δημιουργούν μία συμπαγή λωρίδα (compaction band). Τα μαύρα βέλη δείχνουν την μετακίνηση της συγκέντρωσης τάσης καθώς η αστοχία διευρύνεται. Το ανακυκλιζόμενο νερό υποβοηθά στην απομάκρυνση των κόκκων. (b) Η συγκέντρωση τάσης παραμένει υψηλή στην άκρη της αστοχίας, επεκτείνοντας την συμπαγή λωρίδα και απελευθερώνοντας επιπλέον κόκκους [18].



Σχήμα V.12 Τυπική μορφή αστοχίας σε ψαμμίτη Berea, με 25% πορώδες. (α) Διατομή της γεώτρησης, στην οποία παρατηρούνται 2 αστοχίες με μορφή ρηγματώσεων, οι οποίες επεκτείνονται κάθετα στη μέγιστη οριζόντια κύρια τάση. (β) Μικρογραφία της αστοχίας σε μία διαφορετική διατομή του ίδιου δοκιμίου με το (α), στην οποία παρατηρούνται κόκκοι άμμου να αποτελούν το τοίχωμα της οπής της γεώτρησης και απουσιάζουν μικρορωγμές μεταξύ των κόκκων [18].

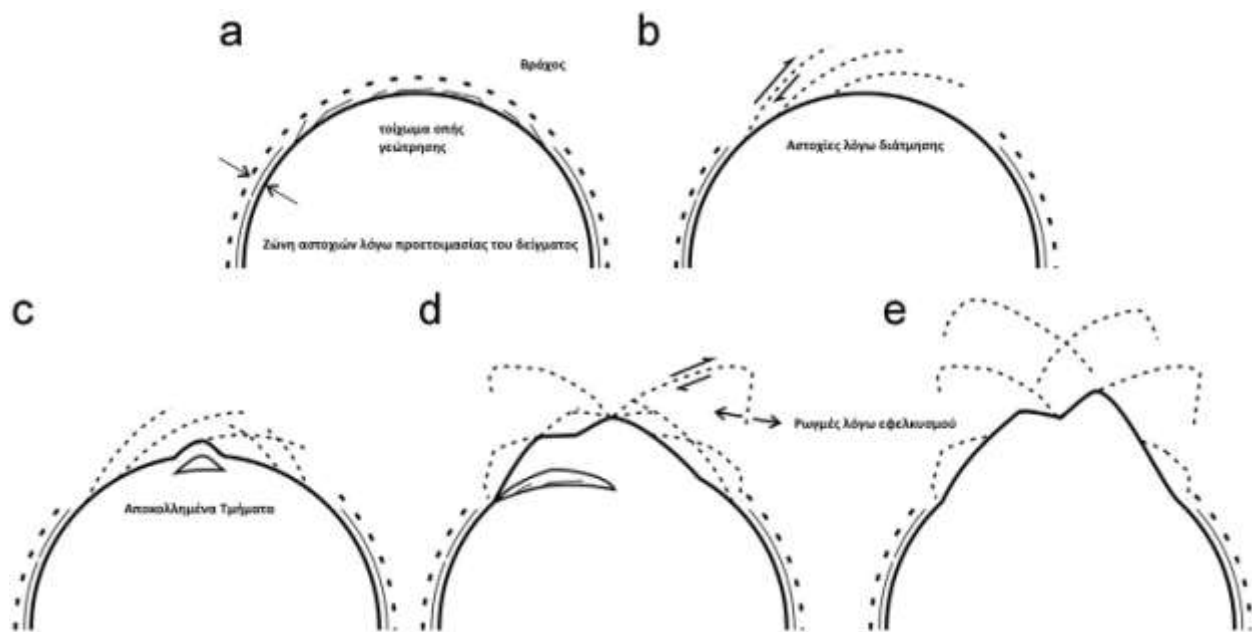
Οι Meier et al [2013] ασχολήθηκαν με την εξέταση των αστοχιών που εμφανίζονται σε πετρώματα βιτουμενιούχου σχιστόλιθου (Posidonia shale), ώστε να μελετήσουν την επιρροή της διαμέτρου της οπής στην ευστάθεια της γεώτρησης. Κυλινδρικά δοκίμια, με τοίχωμα μεγάλου πάχους και με μεταβαλλόμενη διάμετρο οπής, φορτίστηκαν υπό αυξανόμενη υδροστατική πίεση μέχρι τον σχηματισμό αστοχιών.

Ο μηχανισμός εμφάνισης των αστοχιών περιγράφεται ως εξής: τοπικές ατέλειες του πετρώματος στο τοίχωμα της οπής προκαλούν την εκκίνηση σχηματισμού πολλαπλών διατμητικών ρηγματώσεων (Σχήμα V.13α). Ο προσανατολισμός αυτών των ρηγματώσεων είναι παράλληλος στο τοίχωμα της γεώτρησης. Ακόμη οι ρηγματώσεις αυτές, καθώς έχουν προκληθεί από την διάνοιξη της οπής, κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από την γεώτρηση. Όταν η πίεση φτάσει την κρίσιμη τιμή της, διατμητικές ρηγματώσεις αναπτύσσονται ξεκινώντας από το τοίχωμα της οπής και συνεχίζοντας στο εσωτερικό του πετρώματος (Σχήμα

V.13b). Σε περίπτωση που οι ρηγματώσεις διασταυρωθούν, προκύπτει διεύρυνση της οπής (Σχημα V.13c). Οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω του γεγονότος αυτού προκαλούν την δημιουργία περεταίρω διατμητικών ρηγματώσεων, στο μπροστινό μέρος της προϋπάρχουσας αστοχίας. Η περιστροφή των αποκολλημένων τμημάτων βράχου προς το τοίχωμα της οπής πυροδοτεί την δημιουργία εφελκυστικών ρηγματώσεων, οι οποίες περιορίζουν το πλάτος της αστοχίας (Σχημα V.13d). Τελικά, υποστηρίζεται από τους Meier et al (2013) πως διαμορφώνονται αστοχίες μορφής 'V', λόγω της επαναλαμβανόμενης διασταύρωσης των διατμητικών ρηγματώσεων. Η οπή της γεώτρησης επεκτείνεται έτσι σε βάθος περίπου ίσο με την αρχική της ακτίνα (Σχημα V.13e).

Αναφέρεται από τους Meier et al (2013) πως το σχήμα των επιπέδων αστοχίας μπορεί να προβλεφθεί από το κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb, με την προϋπόθεση πως δεν παρατηρείται μετατόπιση κατά την διεύθυνση των ρηγματώσεων.

Επιπλέον υπογραμμίζεται πως η κρίσιμη υδροστατική πίεση για την ανάπτυξη αστοχιών μειώθηκε σημαντικά από 275 MPa για δοκίμια με 1mm διάμετρο οπής, σε 89 MPa για δοκίμια με 19 mm διάμετρο οπής, προσεγγίζοντας την αντοχή σε μονοαξονική συμπίεση του υλικού. Το παρατηρούμενο φαινόμενο κλίμακας προσαρμόστηκε από τους Meier et al (2013), σε διάφορα κριτήρια αστοχίας, προβλέποντας εκκίνηση της αστοχίας σε βάθος περίπου 0,15 mm γύρω από το τοίχωμα της οπής, στο εσωτερικό του σχιστόλιθου.



Σχήμα V.13 Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης των αστοχιών στον βιτουμενιούχο σχιστόλιθο κατά την αύξηση της πίεσης [36].

Τέλος αναφέρεται πως η μορφή των αστοχιών είναι συμμετρική όσον αφορά τον άξονα της γεώτρησης σε δοκίμια με μικρότερες διαμέτρους σπής. Ακόμη παρατηρείται αύξηση του βάθους των αστοχιών με την αύξηση της διαμέτρου της γεώτρησης [36].

Σύμφωνα με τους Hashemi et al (2015), ένας μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων διανοίγεται σε σχηματισμούς που περιέχουν γεωλογικά νέους και μη στερεοποιημένους σχηματισμούς άμμου ή ψαμμίτη, των οποίων οι κόκκοι είναι φτωχά συνδεδεμένοι ή και μη συγκολλημένοι. Όταν η συνοχή μεταξύ των κόκκων άμμου δεν είναι αρκετά μεγάλη η συγκέντρωση εφελκυστικής τάσης μπορεί να προκαλέσει την αποδέσμευσή τους και την δημιουργία αστοχιών.

Οι Hashemi et al (2015) διεξήγαγαν εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και τριαξονικές δοκιμές σε στερεούς αλλά και κοίλους κυλίνδρους φτωχά συγκολλημένης άμμου, και εφάρμοσαν αρκετά μεγάλες τάσεις ώστε να δημιουργηθούν αστοχίες. Διαφορετικά μίγματα άμμου, τσιμέντου και νερού χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμίων. Τα

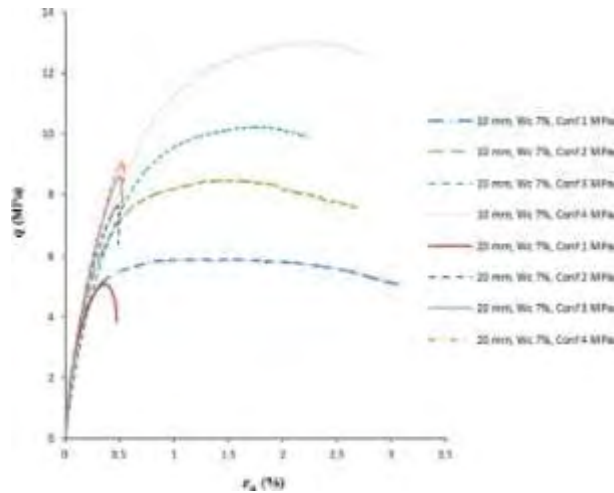


δοκίμια αυτά είχαν διάμετρο 63,50 mm και μήκος 127 mm. Συγκεκριμένα για την περίπτωση των κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων, έγιναν δοκιμές για περιεκτικότητα σε τσιμέντο 6%, 7% και 8% και για διαμέτρους οπής 10 mm και 20 mm.

Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της δοκιμής, αλλά και η μέτρηση της παραμόρφωσης υπέδειξαν την ανάπτυξη σε αρχικό επίπεδο ρηγματώσεων, χωρίς μεταβολή του όγκου. Σε υψηλότερες όμως τάσεις, όταν η ογκομετρική παραμόρφωση παρουσίασε δραματική μείωση, παρατηρήθηκε σχηματισμός περιορισμένων ζωνών αστοχιών και συμπαγών λωρίδων (compaction bands) στο τοίχωμα της γεώτρησης. Από την δοκιμή προέκυψε το συμπέρασμα πως μία περιορισμένη ζώνη αστοχιών αναπτύσσεται κάθετα στην κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης.

Στο Σχήμα V.14 παρουσιάζεται η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης για τα δοκίμια διαμέτρου οπής 10 mm και 20 mm, με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 7%, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών των Hashemi et al (2015). Παρατηρείται η επιρροή του μεγέθους της γεώτρησης στην ανάπτυξη περιορισμένων ζωνών αστοχίας. Όπως αναφέρεται, η αντοχή των δοκιμίων με οπή 20 mm είναι γενικά μικρότερη από την αντοχή των δοκιμίων με μικρότερη διάμετρο οπής, λόγω του φαινομένου κλίμακας. Υπογραμμίζεται πως η αύξηση της διαμέτρου της γεώτρησης δεν επηρεάζει την δυσκαμψία πριν από την μέγιστη τιμή της. Αυτό σημαίνει πως οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων δεν μεταβάλλονται λόγω του φαινομένου κλίμακας.

Σημειώνεται ακόμη πως η σημαντική διαφορά στην ακαμψία (stiffness) των δοκιμίων με διαφορετικές διαμέτρους οπών μπορεί να αποδοθεί στην επιρροή της υψηλότερης συγκέντρωσης τάσης στο τοίχωμα της οπής. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση, και επομένως την ανάπτυξη περιορισμένων ζωνών αστοχίας στα δοκίμια με την μεγαλύτερη οπή, σε αντίθεση με αυτά με την διάμετρο οπής των 10 mm. Επομένως, η αύξηση του μεγέθους της οπής οδηγεί στην μετάβαση από την άκαμπτη κατάσταση στην ψαθυρή κατάσταση.



Σχήμα V.14 Σχέση τάσης και παραμόρφωσης για διαμέτρους οπής 10 mm και 20 mm, δείγματος με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 7% [37].

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Hashemi et al [2015], για την ογκομετρική παραμόρφωση, αυτά υπέδειξαν πως οι περιορισμένες λωρίδες αστοχίας δέχθηκαν θλίψη (contraction) για τάσεις μεγαλύτερες των 2 MPa. Σημειώνεται ότι διαστολή (dilation) παρατηρείται σε μικρότερες τάσεις συμπίεσης, και συστολή κατά την διάρκεια δημιουργίας των διατμητικών ζωνώσεων (shear banding) σε υψηλότερες πιέσεις.

Συμπληρώνεται ακόμη πως, η γεωμετρία των περιοχών αστοχίας επηρεάζεται από το τασικό πεδίο και το μέγεθος της γεώτρησης. Το βάθος και το πλάτος των ζωνών αστοχίας αυξάνεται με την αύξηση της τάσης συμπίεσης, και το ποσοστό τσιμέντου επηρεάζει το σχήμα της ζώνης αστοχίας.

Τέλος, παρατηρείται πως οι κόκκοι της άμμου παρέμειναν ανέπαφοι υπό τις ασκούμενες τάσεις και οι ρηγματώσεις δημιουργούνταν κατά μήκος του συνόρου των κόκκων. Αναφέρεται πως το παραπάνω υποδηλώνει ότι η τάση η οποία προκάλεσε την αποκόλληση των κόκκων δεν ήταν αρκετή ώστε να προκαλέσει αστοχία του ίδιου του κόκκου [37].

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις παραπάνω αναφορές, απαιτείται ιδιαίτερη ανάλυση για κάθε διαφορετικό τύπο εδάφους, όσον αφορά την πρόβλεψη των αστοχιών και του μηχανισμού αστοχίας που οδηγεί σε αυτές, με απώτερο σκοπό την κατάλληλη διαστασιολόγηση και μελέτη μίας ευσταθούς γεώτρησης.

## VI. Σύγκριση των Αναλυτικών Μοντέλων Περιγραφής της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωϋλικού Οπής Γεώτρησης με βάση τον λόγο της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση (SE)

Η μέτρηση των τάσεων πεδίου αποτελεί μία δύσκολη και οικονομικά ακριβή διαδικασία. Η πρόβλεψη τους μέσω εμπειρικών σχέσεων έχει γίνει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητών.

Μία από τις θεωρίες που αναπτύχθηκαν, υπολογίζει την κατακόρυφη και την οριζόντια τάση πεδίου σε ένα σημείο, λόγω του βάρους του υπερκείμενου φορτίου. Ο υπολογισμός βασίζεται στην θεώρηση πως η οριζόντια τάση αποτελεί συνάρτηση της κατακόρυφης τάσης, η οποία εξαρτάται από τον λόγο  $\nu$  Poisson του βράχου [38]. Η σχέση αυτή μεταξύ της κατακόρυφης και της οριζόντιας τάσης εκφράζεται μέσω του συντελεστή γεωστατικών τάσεων  $k$ . Ο συντελεστής  $k$  είναι ο λόγος της μέσης οριζόντιας τάσης προς την κατακόρυφη τάση. Ο McCutchen (1982), θεώρησε ένα σφαιρικό στοιχείο (Σχήμα IV.1), με εφαπτομενική παραμόρφωση  $\epsilon_\theta = u/r$ , όπου  $u$  η ακτινική μετατόπιση και  $r$  η ακτίνα. Υποθέτοντας πως η μετατόπιση  $u$  είναι ομοιόμορφη ως προς την σφαιρική επιφάνεια που ορίζεται από το  $r$ , αλλά μεταβάλλεται κατά μήκος της ακτίνας, όρισε επίσης την ακτινική παραμόρφωση ως  $du/dr$  ή  $u'$ .

Επιπλέον, θεωρώντας πως το σφαιρικό στοιχείο δέχεται μόνο την επίδραση της βαρύτητας, υπέθεσε πως η ακτινική τάση, η οποία αποτελεί κύρια τάση, αντιστοιχεί στην κατακόρυφη τάση. Αντίστοιχα υπέθεσε πως η εφαπτομενική τάση αντιστοιχεί στην μέση οριζόντια τάση. Στη συνέχεια όρισε τον συντελεστή γεωστατικών τάσεων ως τον λόγο της εφαπτομενικής τάσης  $\sigma_\theta$  ως προς την ακτινική τάση  $\sigma_r$ , καταλήγοντας στην παρακάτω έκφραση,

$$k = \frac{(1-2\beta)u' + 2(1-\beta)u/r}{u' + 2(1-2\beta)u/r}, \quad (\text{VI.1})$$

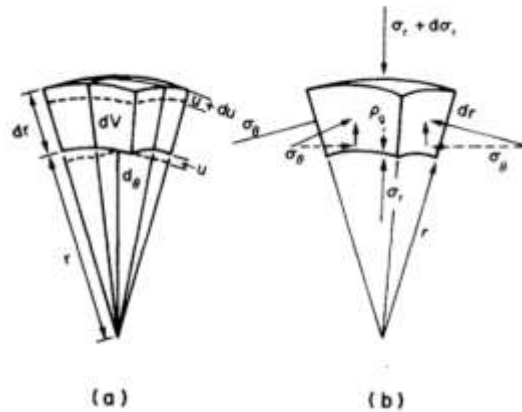
$$\text{όπου } \beta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}.$$

Σχετικά με τον συντελεστή  $k$ , ο McCutchen (1982) υποστηρίζει πως τείνει στο άπειρο όταν βρισκόμαστε στην επιφάνεια του σφαιρικού στοιχείου. Όταν η ακτινική και η

εφαπτομενική τάση γίνονται ίσες, ο συντελεστής  $k$  ισούται με την μονάδα. Τέλος στην περίπτωση που  $r$  τείνει στο μηδέν [39], αποδεικνύεται πως ο συντελεστής  $k$  είναι:

$$k = 1 - 2\beta = \frac{\nu}{1-\nu}. \quad (\text{VI.2})$$

Ο τύπος VI.2, ο οποίος συνδέει την μέση οριζόντια τάση πεδίου  $\sigma_H$  με την κατακόρυφη τάση πεδίου  $\sigma_V$ , είναι ίδιος με αυτόν που προκύπτει με εφαρμογή της κλασικής ελαστικότητας (Νόμος του Hooke) θεωρώντας ότι η παραμόρφωση αναπτύσσεται μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ , σύμφωνα με την ανάλυση του Terzaghi, (1962).



Σχήμα VI.1 Σφαιρικό στοιχείο, σύμφωνα με τον McCutchen (1982), στο οποίο παρουσιάζονται (α) η μετατόπιση  $u$  λόγω της βαρύτητας, (β) οι αντίστοιχες τάσεις που ασκούνται στο στοιχείο [40].

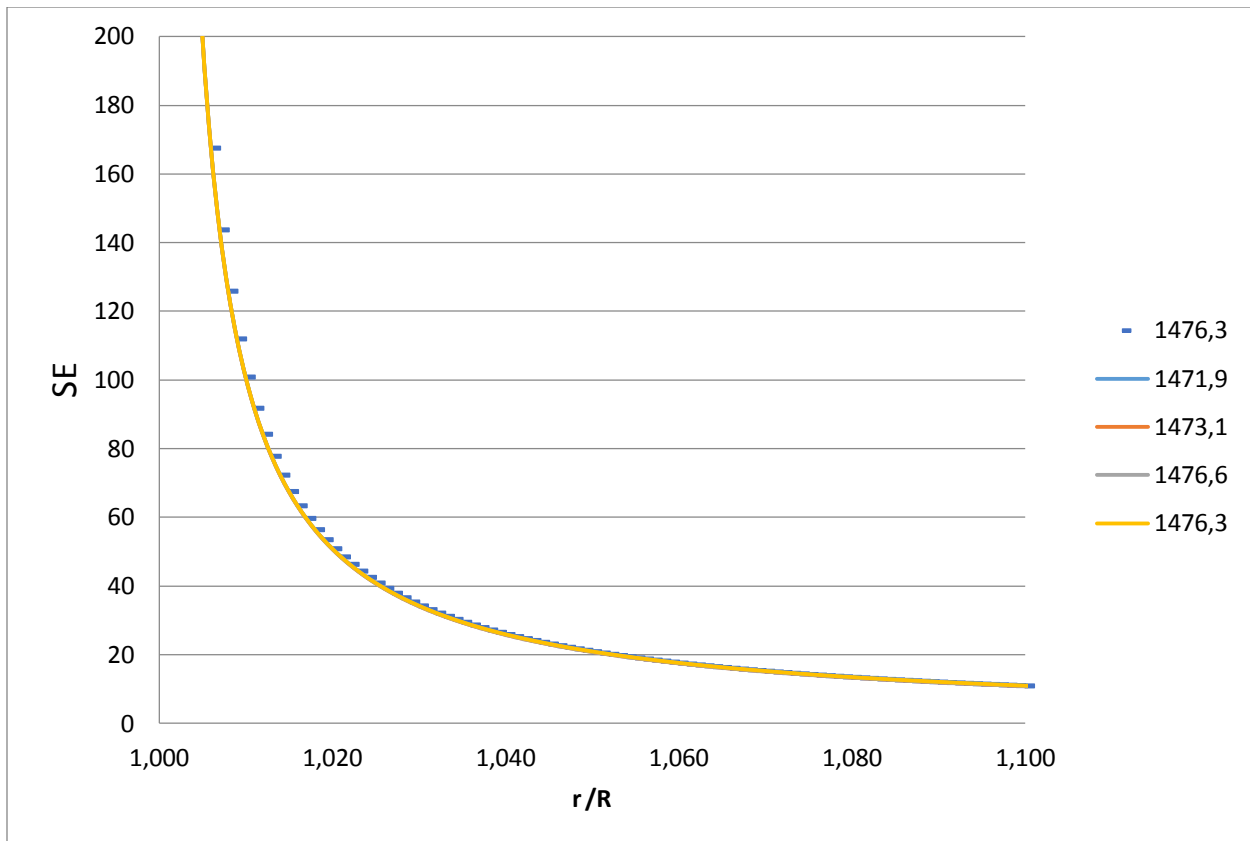
Στις συγκρίσεις που ακολουθούν, υπολογίζεται ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση (SE), ως ένα μέτρο εκτίμησης της απόκλισης αυτών σε μία οπή γεώτρησης. Η γνώση του παραπάνω λόγου επιτρέπει την εκτίμηση της έντασης του πεδίου καθώς όσο η αδιάστατη ποσότητα  $SE = \sigma_\theta / \sigma_r$  είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας το περιβάλλον της βραχόμαζας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασταθές. Επομένως, με τη γνώση λόγου  $\sigma_\theta / \sigma_r$  και των παραμέτρων που τον καθορίζουν διευκολύνεται η πρόγνωση της συμπεριφοράς της οπής της γεώτρησης.

## A. Υπολογισμός του λόγου SE: Θεωρία Ελαστικότητας

Σύμφωνα με τους Zoback et. al (1985), έγινε χρήση των εξισώσεων III.48 και III.49 για τον υπολογισμό της ακτινικής και της εφαπτομενικής τάσης αντίστοιχα για αστοχίες που παρατηρήθηκαν στο Auburn της Νέας Υόρκης (Πίνακας VI.1). Για λόγο μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης προς ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_H/\sigma_h=2.24$ ,  $\mu'=0.6$  και  $\Delta P=0$ , υπολογίστηκε ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση SE, για κάθε διαφορετικό βάθος (Depth, Πίνακας VI.1), σε συνάρτηση με τον λόγο  $r/R$ , όπου R η αρχική ακτίνα της οπής γεώτρησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα VI.2.

Πίνακας VI.1 Δεδομένα παρατηρήσεων αστοχιών οπής γεώτρησης στο Auburn της Νέας Υόρκης [16].

| Depth,<br>m | Observed |         |               |
|-------------|----------|---------|---------------|
|             | $\phi_b$ | $r_b/R$ | $r_b$ ,<br>mm |
| 1471.9      | 19°      | 1.027   | 115.0         |
| 1473.1      | 20°      | 1.063   | 119.1         |
| 1474.6      | 22°      | 1.071   | 120.0         |
| 1476.3      | 15°      | 1.027   | 115.0         |
| 1476.3      | 22°      | 1.045   | 117.0         |



Σχήμα VI.2 Μεταβολή του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση (SE) σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , με βάση την Θεωρία Ισότροπης Βραχόμαζας (Zoback et. al., 1985), για  $\sigma_H/\sigma_h = 2.24$ ,  $\mu = 0.6$ .

Από το σχήμα VI.2 παρατηρείται πως για διαφορετικά βάθη, η καμπύλη συνάρτησης του λόγου SE ως προς την ακτινική τάση ως προς την απόσταση  $r/R$ , δεν διαφοροποιείται. Όταν η απόσταση  $r$  γίνεται ίση με την ακτίνα της οπής  $R$  δηλαδή βρισκόμαστε στην περιφέρεια της οπής γεώτρησης ο λόγος SE λαμβάνει εξαιρετικά μεγάλες τιμές ( $SE > 200$ ). Ενώ όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα της οπής γεώτρησης, ο λόγος SE τείνει στην μονάδα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις συμφωνούν με τις παρατηρήσεις του McCutchen (1982).

B. Υπολογισμός του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση  
SE: Θεωρία Γραμμικής Διακλάδωσης

Σύμφωνα με τους Vardoulakis & Papanastasiou (1998), υπολογίζεται ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση με βάση τις παρακάτω εξισώσεις, όπου  $\sigma_r^*$  η αδιάστατη ακτινική τάση,  $\sigma_\theta^*$  η αδιάστατη εφαπτομενική τάση,  $q$  μία σταθερά του υλικού/που σχετίζεται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη,  $\sigma_\infty$  η αδιάστατη τάση στο άπειρο,  $N$  η δύναμη στη οποία θεωρείται πως υψώνεται η καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης για δοκιμή μονοαξονικής και επίπεδης συμπίεσης και  $\phi_c$  η γωνία τριβής του υλικού σε θλιπτική αστοχία.

$$\sigma = \exp[-x(x - x_0)/N] - 1, \quad (VI.3)$$

$$\sigma_r^* = -\frac{\sigma_r}{q} = \sigma, \quad (VI.4)$$

$$\sigma_\theta^* = \frac{-\sigma_\theta}{q} = 2x + (1 + 2x)\sigma, \quad (VI.5)$$

$$x = x_0 \rho^{-2N}, \quad (VI.6)$$

$$x_0 = N \ln(1 + \sigma_\infty^*), \quad (VI.7)$$

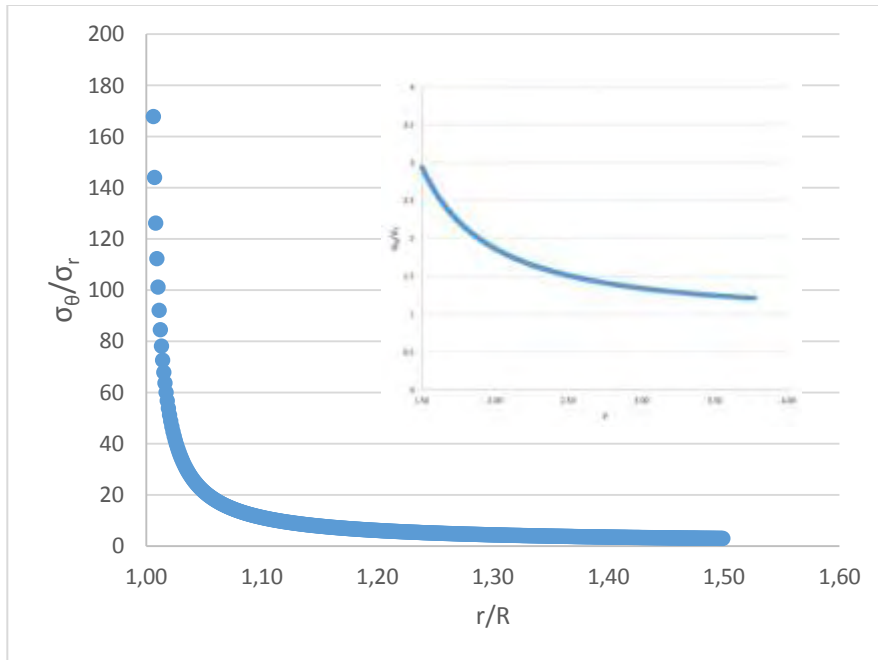
$$\sigma_\infty^* = \sigma_\infty/q, \quad (VI.8)$$

$$\sigma_c = \frac{2q}{\tan\left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2}\right) \cot(\phi_c)}, \quad (VI.9)$$

$$\rho = r/R, \quad (VI.10)$$

$$SE = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_r} = \frac{2x + (1 + 2x)\sigma}{\exp[-x(x - x_0)/N] - 1}. \quad (VI.11)$$

Για  $N=1$ ,  $\phi_c = 32,86^\circ$ ,  $\frac{\sigma_\infty^*}{\sigma_c} = 0,5$  υπολογίζεται ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση σε συνάρτηση με τον λόγο  $r/R$  (Σχήμα VI.3).



Σχήμα VI.3 Μεταβολή του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , με βάση την Θεωρία γραμμικής διακλάδωσης [29] για  $\sigma_{inf}=0.5\sigma_c$ ,  $N=1$  και  $\phi_c=32,86^\circ$ .

Παρατηρείται, όπως και στην θεωρία ισότροπης βραχόμαζας, πως για απόσταση  $r$  ίση με την ακτίνα της οπής  $R$  (περιφέρεια της οπής), ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση λαμβάνει εξαιρετικά μεγάλες τιμές ( $SE>200$ ). Ενώ όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα της οπής γεώτρησης, ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση τείνει στην μονάδα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις συμφωνούν επίσης με τις παρατηρήσεις του McCutchen (1982).



C. Υπολογισμός του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση:  
Θεωρία Βαθμοελαστικότητας

Σύμφωνα με τους Efremidis et. al. (1998), υπολογίζεται ο λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση SE, για έναν κοίλο κύλινδρο ακτίνας R, στον οποίο ασκείται ομοιόμορφη τάση μακρινού πεδίου.

$$SE = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_r} = \frac{\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - 2\sqrt{c'} \left[ \sqrt{c'} F(r) + K_0\left(\frac{r}{\sqrt{c'}}\right) \right]}{\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{2\sqrt{c'} F(r)}{rT}} \quad (\text{VI.12})$$

$$\text{όπου } F(r) = K_1\left(\frac{r}{\sqrt{c'}}\right) - \frac{R}{r} K_1(h) \quad (\text{VI.13})$$

$$T = RK_1(h) + \sqrt{c'} K_0(h) \quad (\text{VI.14})$$

και R η αρχική ακτίνα της σπής.

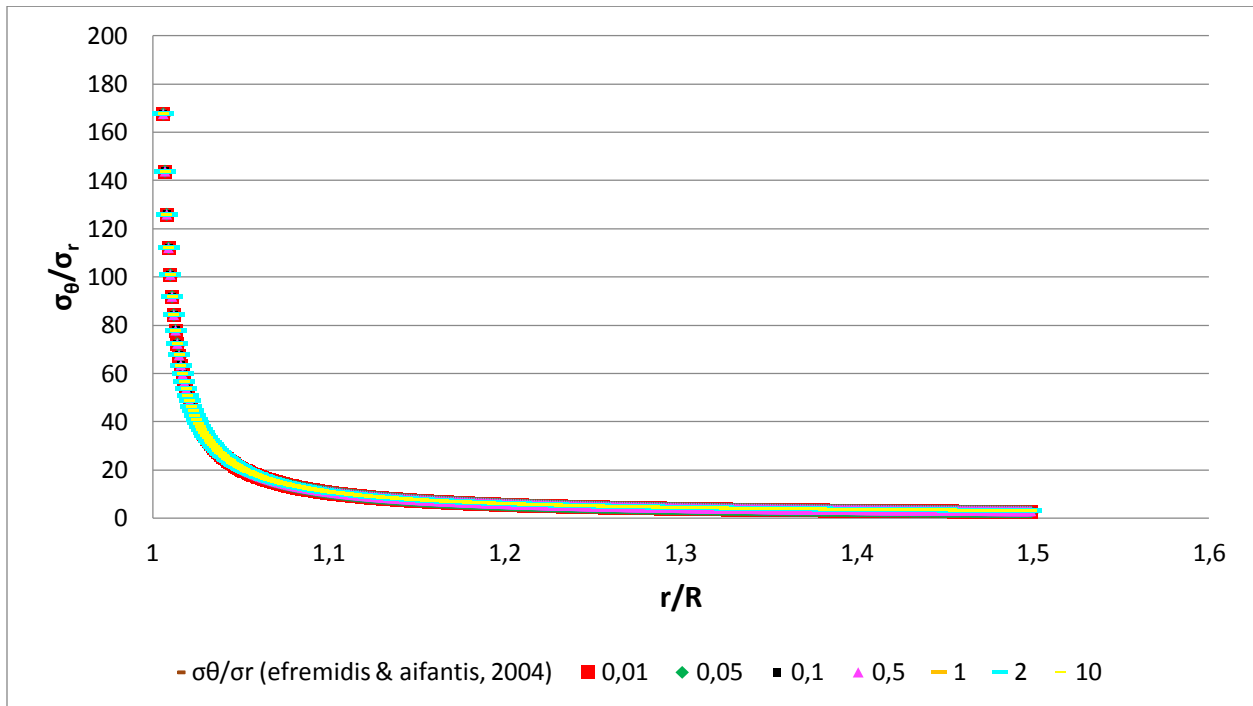
Για διαφορετικές τιμές του συντελεστή βαθμίδας ( $\frac{\sqrt{c'}}{R} = 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.00, 2.00, 10.00$ ) υπολογίζεται ο λόγος SE σε συνάρτηση με την τον λόγο r/R (Σχήμα VI.4). Παρατηρείται πως ο συντελεστής βαθμίδας δεν επηρεάζει εμφανώς τη σχέση μεταξύ του λόγου της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση και του λόγου r/R.

Στην περίπτωση της κλασικής ελαστικότητας ο λόγος SE εξαρτάται μόνο από την ακτίνα της σπής R και την ακτινική απόσταση (r).

$$SE = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_r} = \frac{\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)}{\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)} \quad (\text{VI.15})$$

Στο Σχήμα VI.4 παρουσιάζεται ο λόγος SE, σύμφωνα με τις εργασίες των Efremidis et. al. (1998), αλλά και την θεωρία των Efremidis & Aifantis (2004) όπου λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι δύο καταστατικοί νόμοι της θεωρίας βαθμοελαστικότητας, 1)  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - c \lambda \nabla^2 \varepsilon_{ij}$  και 2)  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - c \nabla^2 (\lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij})$ . Και οι δύο καταστατικοί νόμοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, συμφωνώντας ταυτόχρονα και με τα

αποτελέσματα της θεωρίας κλασσικής ελαστικότητας, αλλά και τα αποτελέσματα της θεωρίας γραμμικής διακλάδωσης.



Σχήμα VI.4 Λόγος της εφαπτομενικής τάσης ως προς την ακτινική τάση SE σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , σύμφωνα με την θεωρία βαθμοελαστικότητας των Efremidis et. al. (1998), και Efremidis & Aifantis (2004)

## VII. Αριθμητική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της οπής γεώτρησης με την χρήση του Phase

Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος της οπής γεώτρησης, γίνεται χρήση του λογισμικού Phase, θεωρώντας αρχικά ισότροπο πεδίο τάσεων, με μέγιστη οριζόντια κύρια τάση  $\sigma_H=54$  MPa, η οποία ισούται με την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση  $\sigma_h$ , και κατακόρυφη τάση πεδίου  $\sigma_v=36$  MPa. Ακολούθως, θεωρείται μη ισότροπο πεδίο τάσεων με μέγιστη οριζόντια κύρια τάση  $\sigma_H=54$  MPa, ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση  $\sigma_h=12$  MPa, και κατακόρυφη τάση πεδίου  $\sigma_v=36$  MPa.

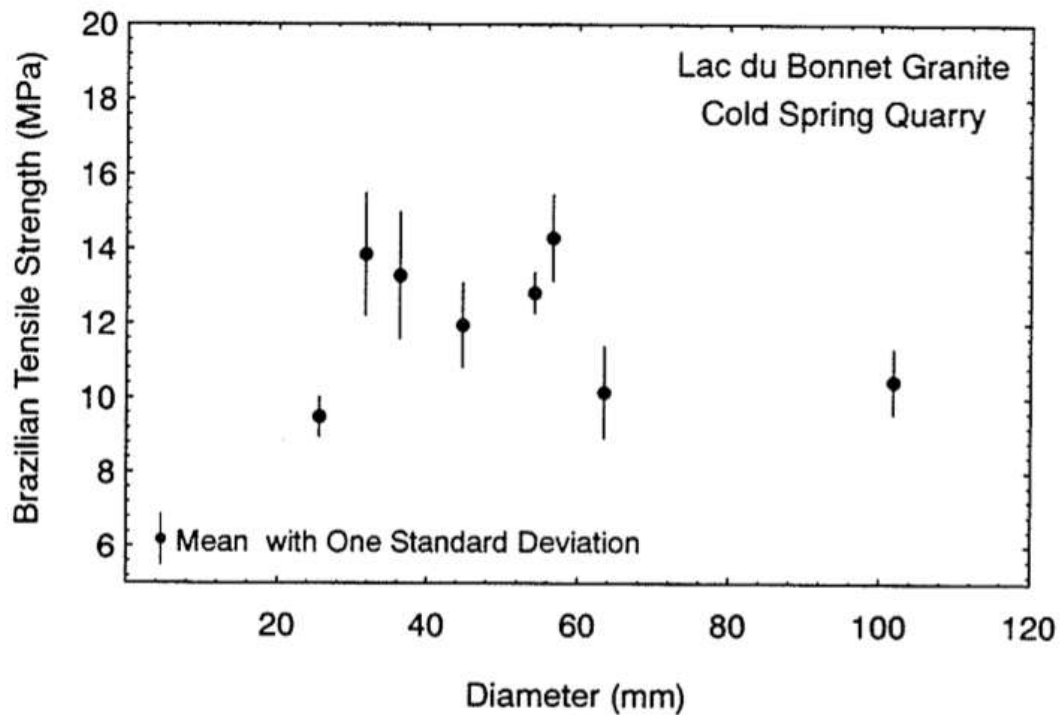
Λαμβάνονται τρεις περιπτώσεις για την ακτίνα R της οπής γεώτρησης (1cm, 5cm, 10cm), οι οποίες επιλύονται αριθμητικά με τη χρήση του Phase για την περίπτωση τόσο ισότροπου όσο και ανισότροπου πεδίου τάσεων.

Και για τις δύο περιπτώσεις πεδίου τάσεων, θεωρείται οριζόντια τομή της γεώτρησης σε βάθος z, με εξωτερικό σύνορο (external boundary) τετράγωνου σχήματος, η ακμή (x) του οποίου για κάθε διαφορετική ακτίνα R ισούται με  $20 \cdot R$ . Λόγω της μεγάλης απόστασης από το τοίχωμα της οπής, θεωρείται πως αυτή δεν επιδρά στο εξωτερικό σύνορο του μοντέλου. Επομένως, για κάθε πλευρά του τετραγώνου του εξωτερικού συνόρου, επιλέγεται ως συνοριακή συνθήκη η πάκτωση.

Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση πως η γεώτρηση διανοίγεται σε εδαφικό σχηματισμό γρανίτη, τύπου Lac du Bonnet. Σύμφωνα με τον Haimson (2007), ο γρανίτης Lac du Bonnet έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (uniaxial compressive strength) από 170 MPa έως 220 MPa, λόγο Poisson που κυμαίνεται από 0.25 έως 0.30 και μέτρο του Young από 55 μέχρι 60 GPa. Στην αριθμητική ανάλυση που ακολουθεί η λόγος Poisson θεωρείται ίσος με 0.25, το μέτρο Young 60 GPa, και ο γρανίτης ισότροπος.

Σύμφωνα με τον Martin (1993), η γωνία τριβής του γρανίτη Lac du Bonnet για  $\sigma_H=54$  MPa και  $\sigma_v=36$  MPa, θεωρείται  $42^\circ$ . Επιπλέον, η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (unconfined compressive strength) θεωρείται ίση με 150 MPa, και επομένως η παραμένουσα αντοχή (cohesion strength), λαμβάνεται ίση με το 70% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, δηλαδή 105 MPa.

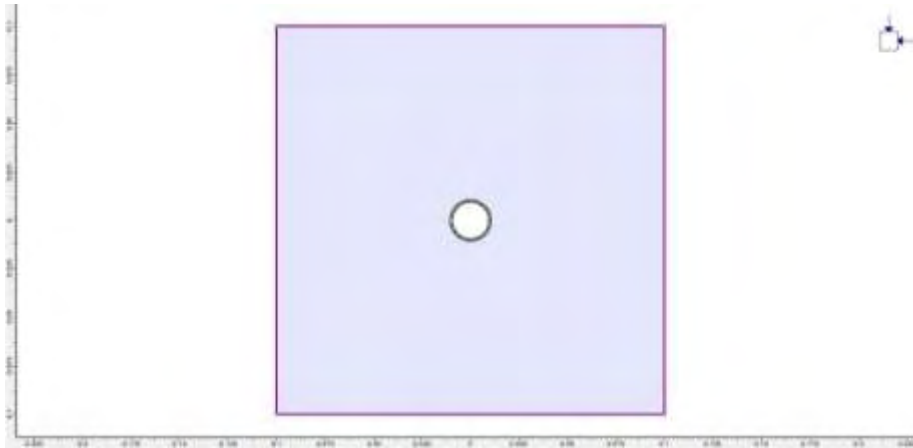
Στην εργασία του Martin (1993), γίνεται ερμηνεία των φαινομένων κλίμακας σχετικά με την μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σε κυλινδρικά δοκίμια γρανίτη με οπή συναρτήσει του μεγέθους της οπής. Επομένως για ακτίνα οπής 1cm, η εφελκυστική αντοχή λαμβάνεται ίση με 7 MPa, για ακτίνα 5cm, 12.5MPa και για ακτίνα 10cm, 11 MPa (Σχήμα VIII.1).



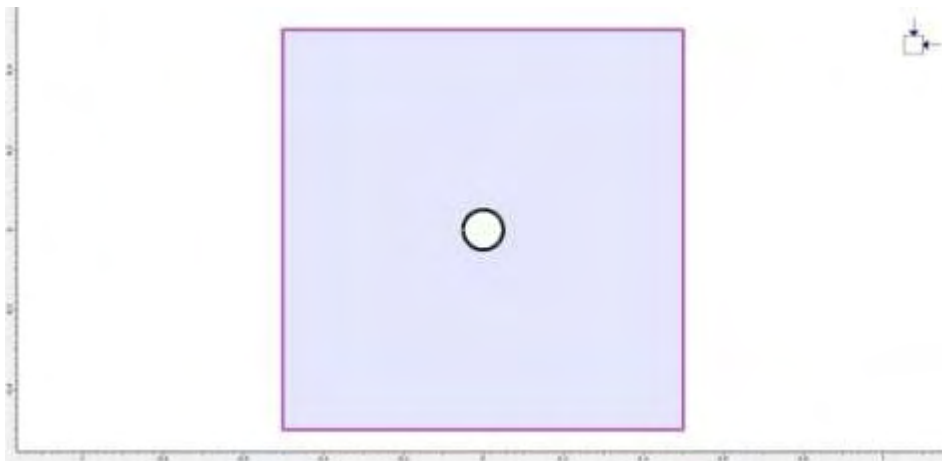
Σχήμα VII.1 Αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη Lac du Bonnet, με τη χρήση της δοκιμής Brazilian Test [41].

## A. Ισότροπο Πεδίο Τάσεων

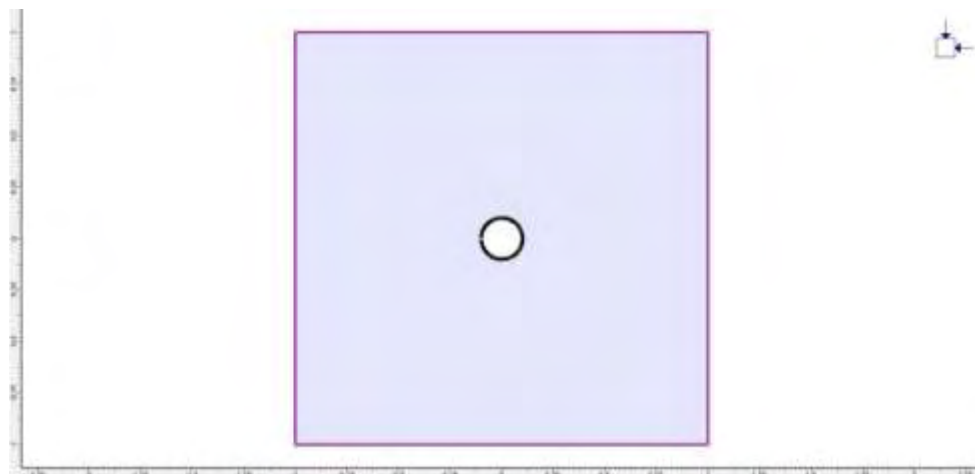
Για την περίπτωση ισότροπου πεδίου τάσεων, γίνονται τρεις αναλύσεις, διαφοροποιώντας την ακτίνα R, της οπής γεώτρησης (1cm, 5cm και 10cm, Σχήμα VII.2, Σχήμα VII.3, Σχήμα VII.4, αντίστοιχα) για τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



Σχήμα VII.2 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase για  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.

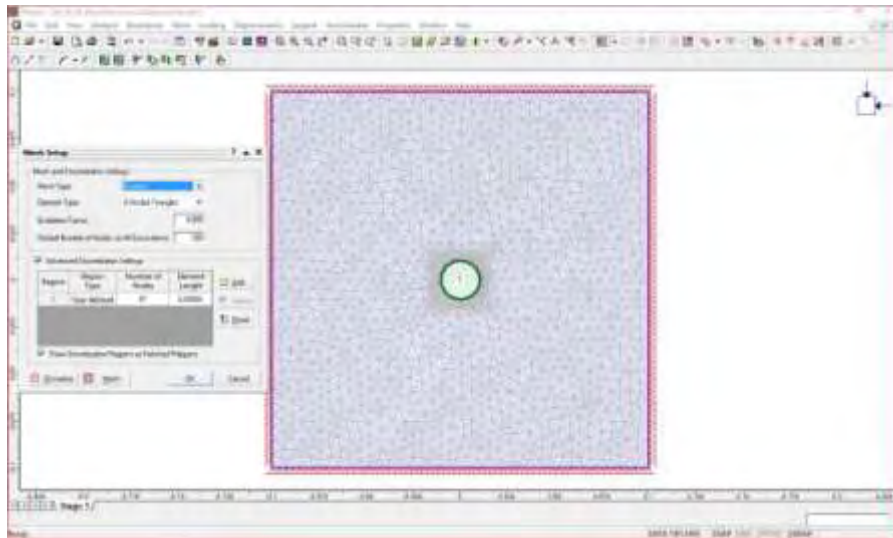


Σχήμα VII.3 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase για  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.

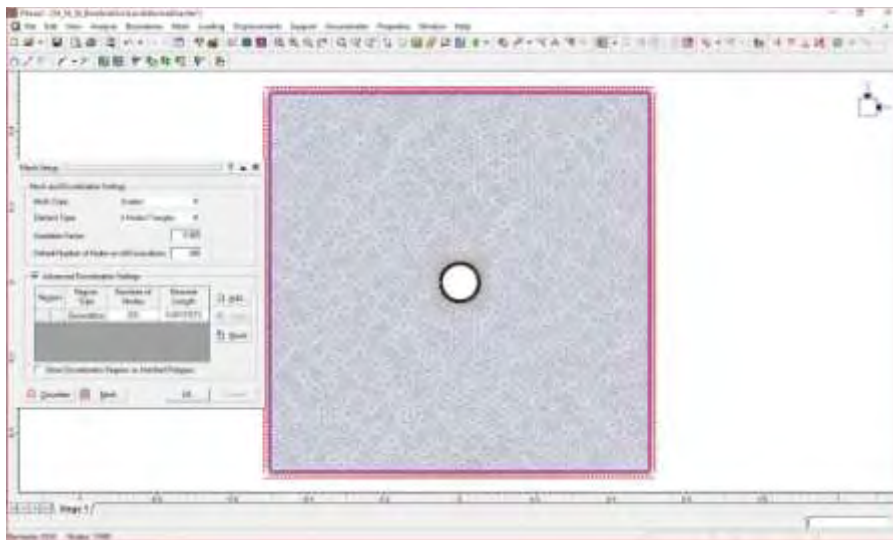


Σχήμα VII.4 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase για  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.

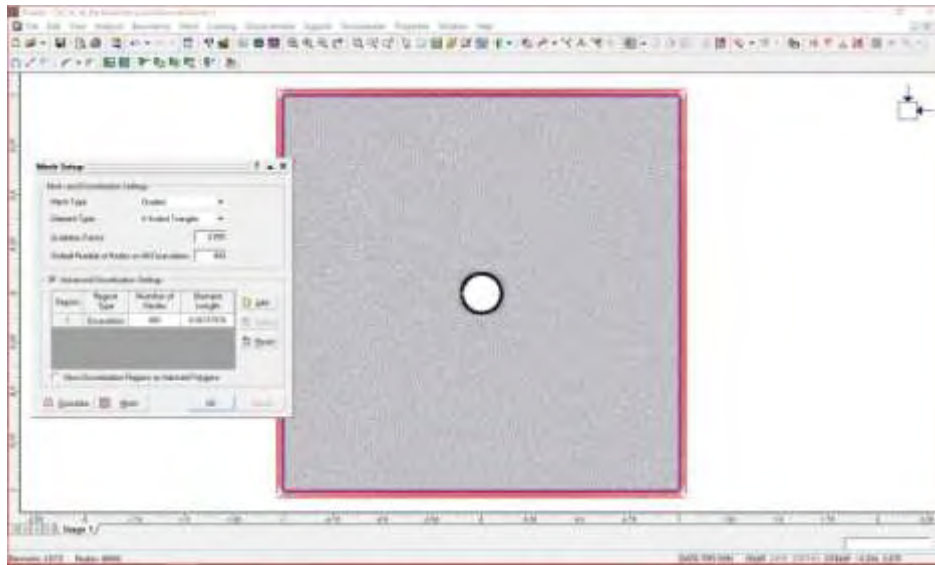
Και για τις τρεις περιπτώσεις ακτίνας οπής της γεώτρησης των σχημάτων VII.2, VII.3 και VII.4, αναπτύχθηκε το μοντέλο και έγινε η διακριτοποίηση και η δημιουργία του κανάβου (Σχήματα VII.5, VII.6, VII.7 αντίστοιχα). Ακολουθεί η αριθμητική επίλυση του προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στα σχήματα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέγιστη τάση  $\sigma_1$  (Σχήματα VII.8, VII.9, VII.10) και την ελάχιστη τάση  $\sigma_3$  (Σχήματα VII.11, VII.12, VII.13). Στο παράρτημα ( Σχήματα VIII.10 έως VIII.15) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέγιστη τάση  $\sigma_1$  και την ελάχιστη τάση  $\sigma_3$ , εστιάζοντας στην περιοχή περιμετρικά της οπής.



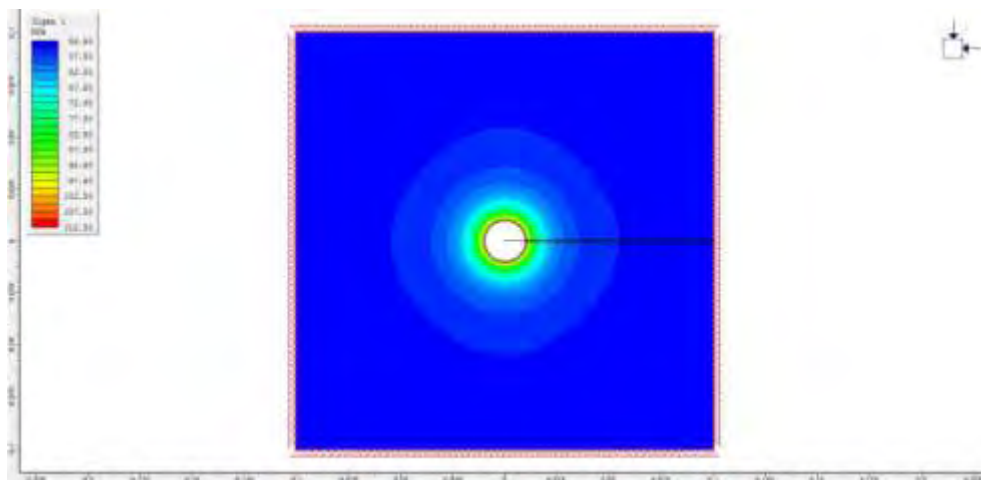
Σχήμα VII.5 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα σπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα VII.6 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα σπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

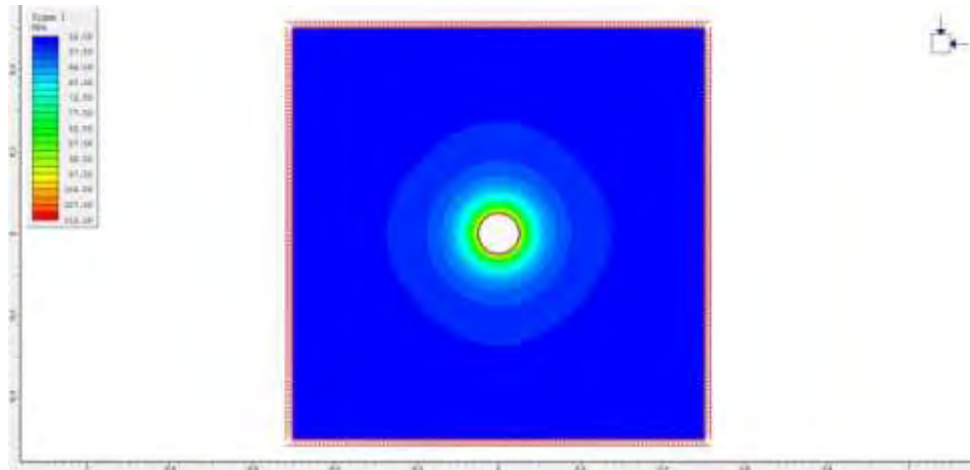


Σχήμα VII.7: Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_V = 36$  MPa.

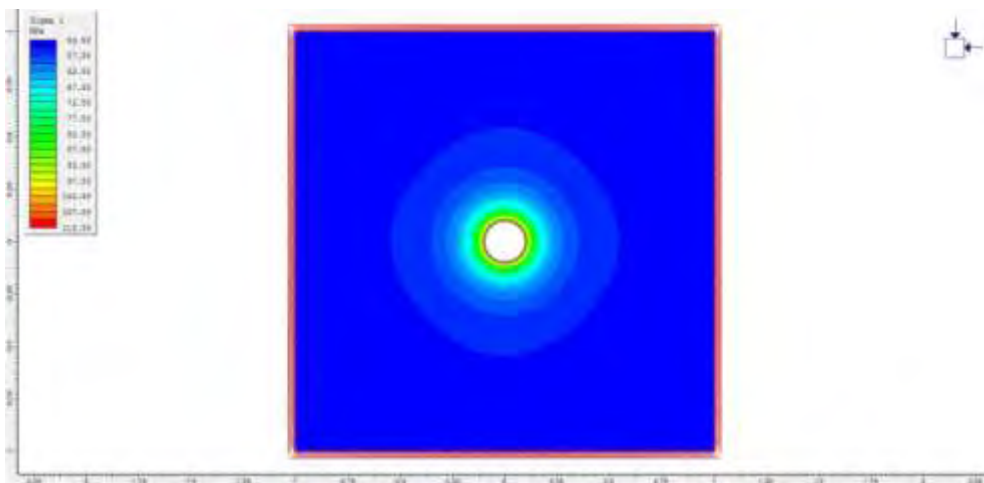


Σχήμα VII.8 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_V = 36$  MPa.

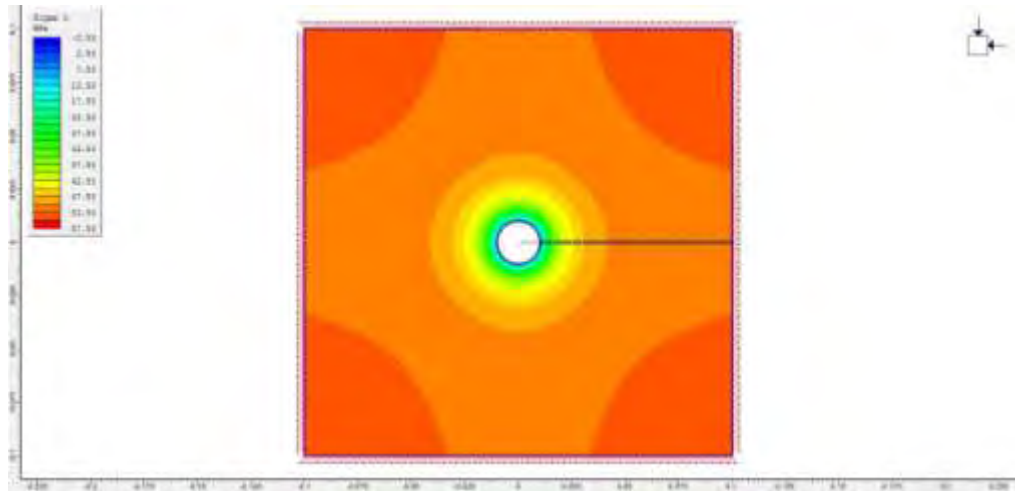




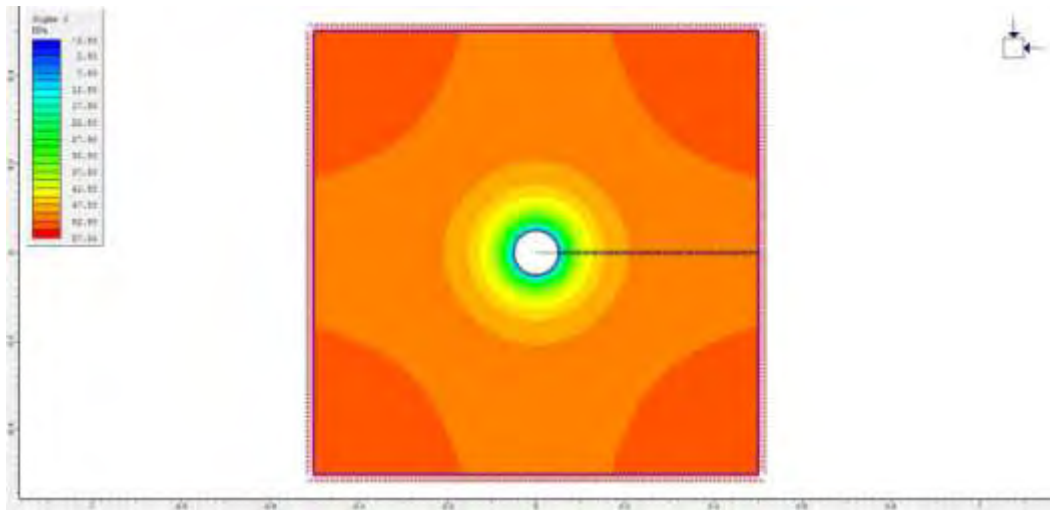
Σχήμα VII.9 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



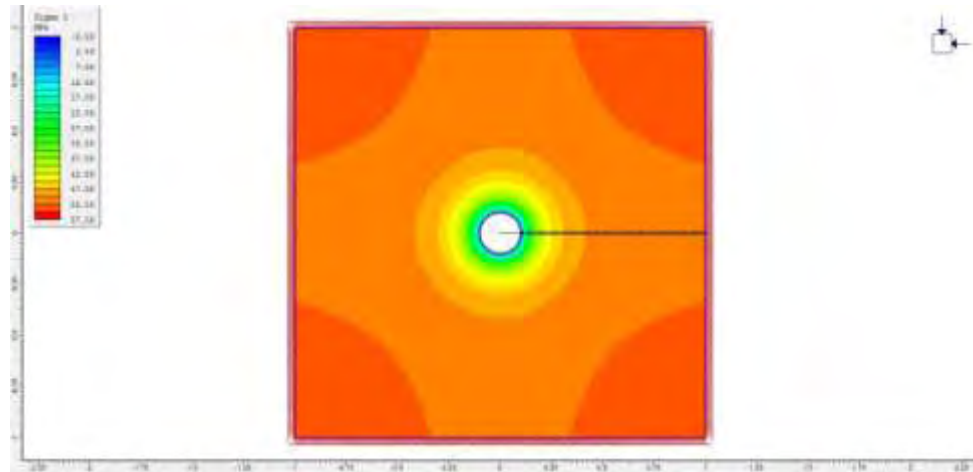
Σχήμα VII.10 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα VII.11 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



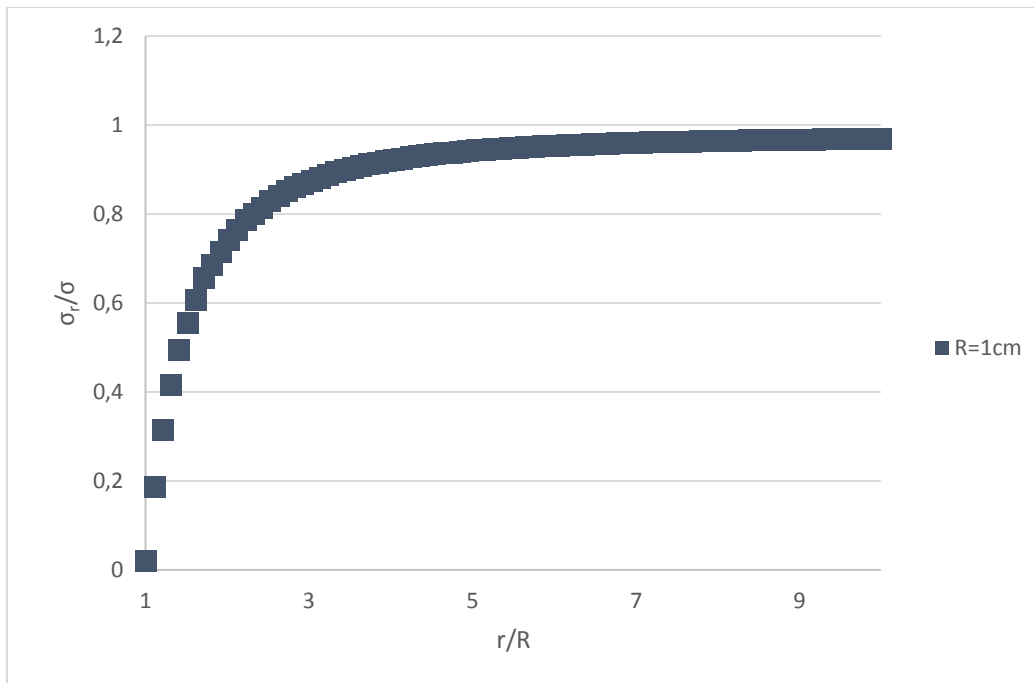
Σχήμα VII.12 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα VII.13 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_V = 36$  MPa.

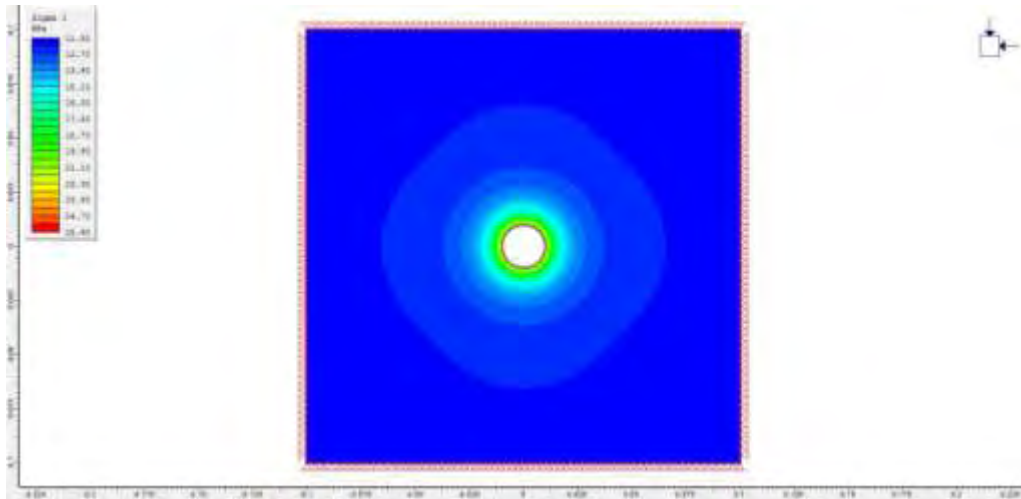
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θεωρείται μία νοητή γραμμή, με κατεύθυνση παράλληλη στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήματα VII.11, VII.12, VII.13). Για την γραμμή αυτή, λαμβάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της ελάχιστης κύριας τάσης  $\sigma_3$ , η οποία ταυτίζεται με την ακτινική τάση  $\sigma_r$ . Υπολογίζεται ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$ , όπου  $\sigma = 54$  MPa. Στο σχήμα VII.14 παρουσιάζεται η μεταβολή αυτού σε σχέση με τον αδιάστατο λόγο της ακτινικής απόστασης προς την ακτίνα της οπής  $r/R$ , για ακτίνα οπής 1cm, 5cm και 10cm.

Από το σχήμα VII.14, όπως αναμενόταν, ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$  μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο για διαφορετικές τιμές της ακτίνας της οπής της γεώτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι το Phase, στην περίπτωση θεώρησης ελαστικής συμπεριφοράς, λειτουργεί με βάση τον καταστατικό νόμο της κλασικής ελαστικότητας, γεγονός που δεν προκαλεί εξάρτηση των τάσεων, των τροπών και των μετατοπίσεων από το μέγεθος της οπής. Επίσης επιβεβαιώνεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα της οπής ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$  τείνει στην μονάδα.

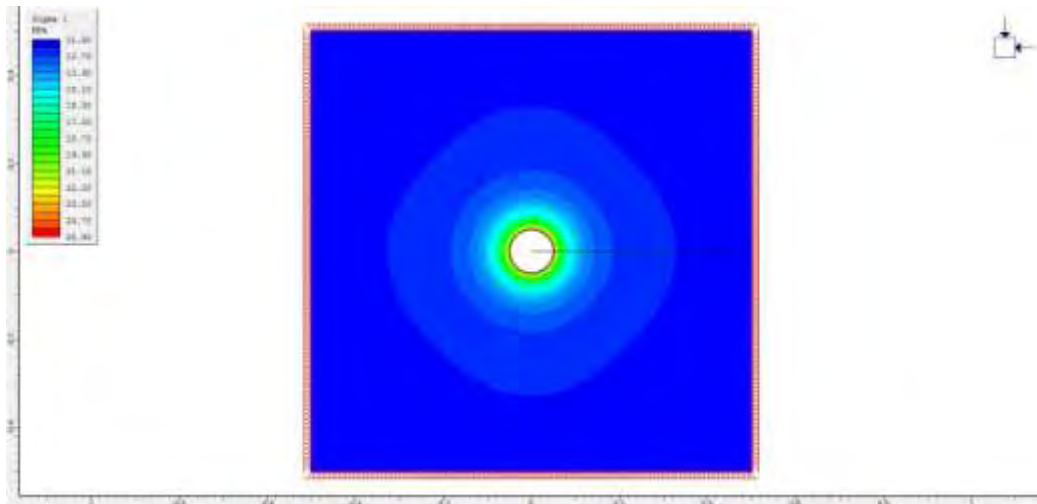


Σχήμα VII.14 Μεταβολή του λόγου  $\sigma_1/\sigma_3$  σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση  $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήση με ακτίνα οπής 1cm και ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa).

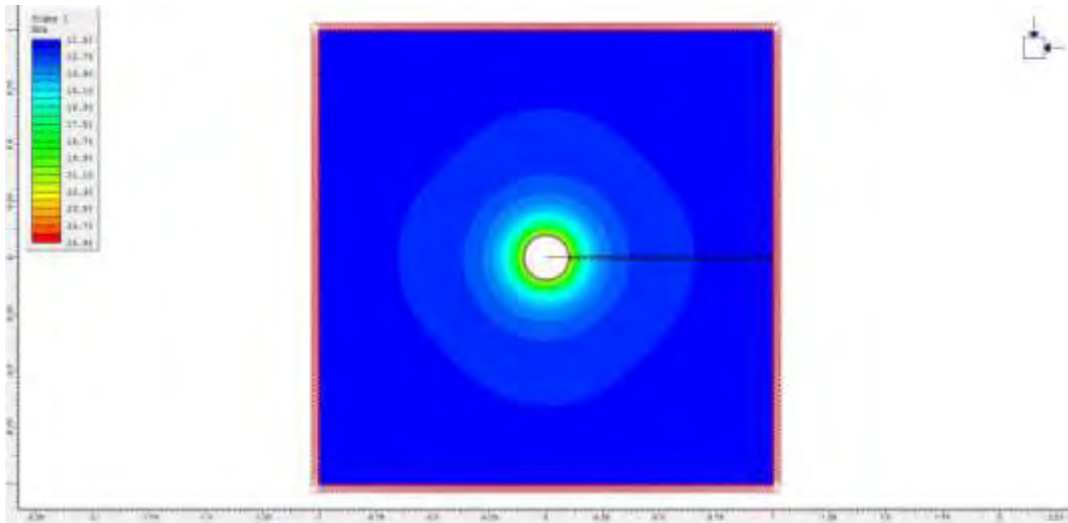
Στη συνέχεια επιλύεται το ίδιο πρόβλημα ( για τις τρεις τιμές ακτίνας οπή 1cm, 5cm και 10 cm), αλλά με διαφορετικό αρχικό πεδίο τάσεων που έχει  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa, θεωρείται δηλαδή ότι οι οριζόντιες αρχικές τάσεις είναι μικρότερες από την κατακόρυφη τάση πεδίου. Τα αποτελέσματα για την μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  παρουσιάζονται στα σχήματα VII.15, VII.16, VII.17 και τα αποτελέσματα για την ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$  στα σχήματα VII.18, VII.19 και VII.20. Στο παράρτημα ( Σχήματα VIII.4 έως VIII.9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέγιστη τάση  $\sigma_1$  και την ελάχιστη τάση  $\sigma_3$ , εστιάζοντας στην περιοχή περιμετρικά της οπής.



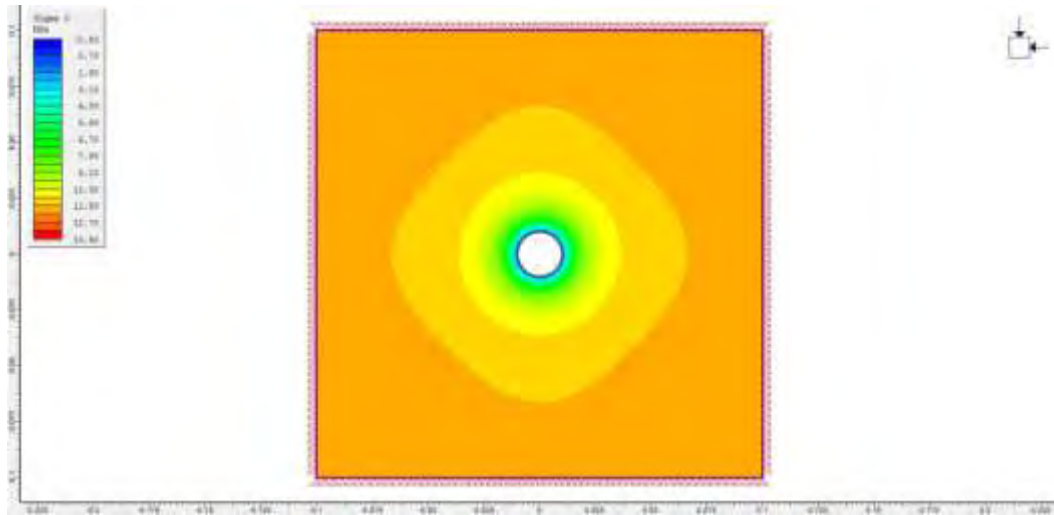
Σχήμα VII.15 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



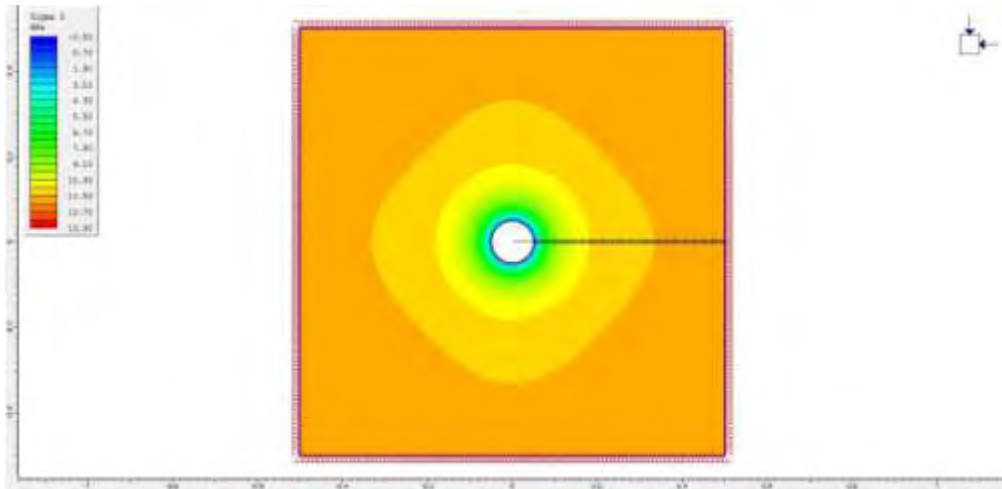
Σχήμα VII.16 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



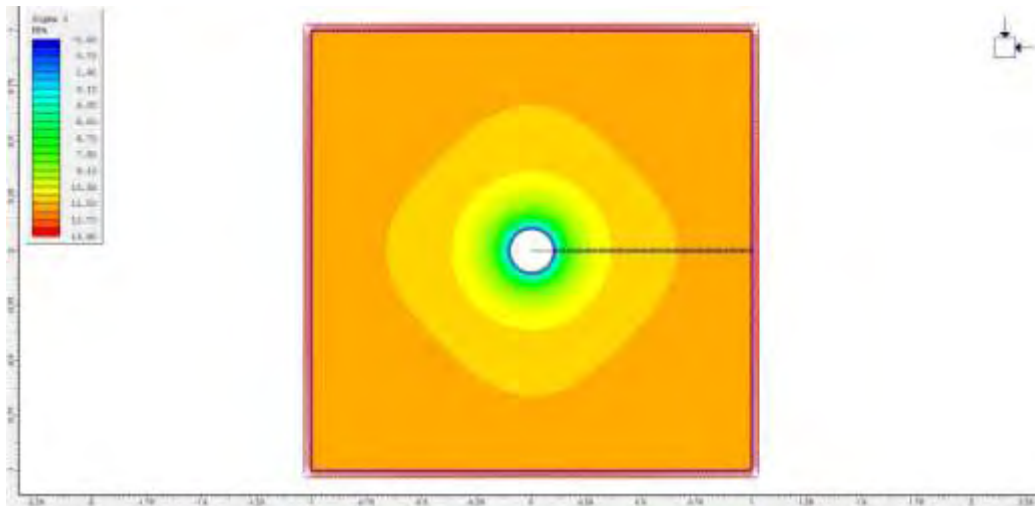
Σχήμα VII.17 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.



Σχήμα VII.18 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.



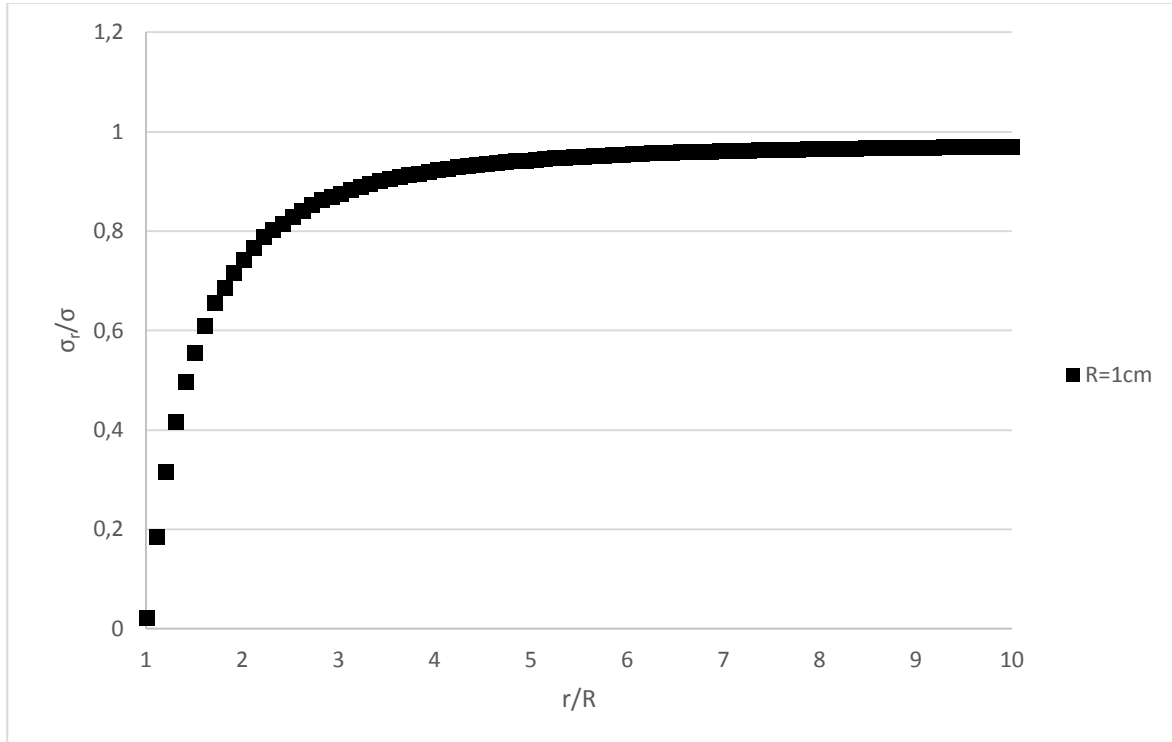
Σχήμα VII.19 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα VII.20 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θεωρείται μία νοητή γραμμή, με κατεύθυνση παράλληλη στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήματα VII.20). Κατά μήκος της γραμμής αυτής, υπολογίζεται αριθμητικά η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$ , η οποία ταυτίζεται με την ακτινική τάση  $\sigma_r$ . Με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως υπολογίζεται ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$ , όπου  $\sigma=12$

MPa, και στο σχήμα VII.21 παρουσιάζεται η μεταβολή αυτού του λόγου σε σχέση με τον αδιάστατο λόγο της ακτινικής απόστασης προς την ακτίνα της οπής  $r/R$ , για ακτίνα οπής 1cm.

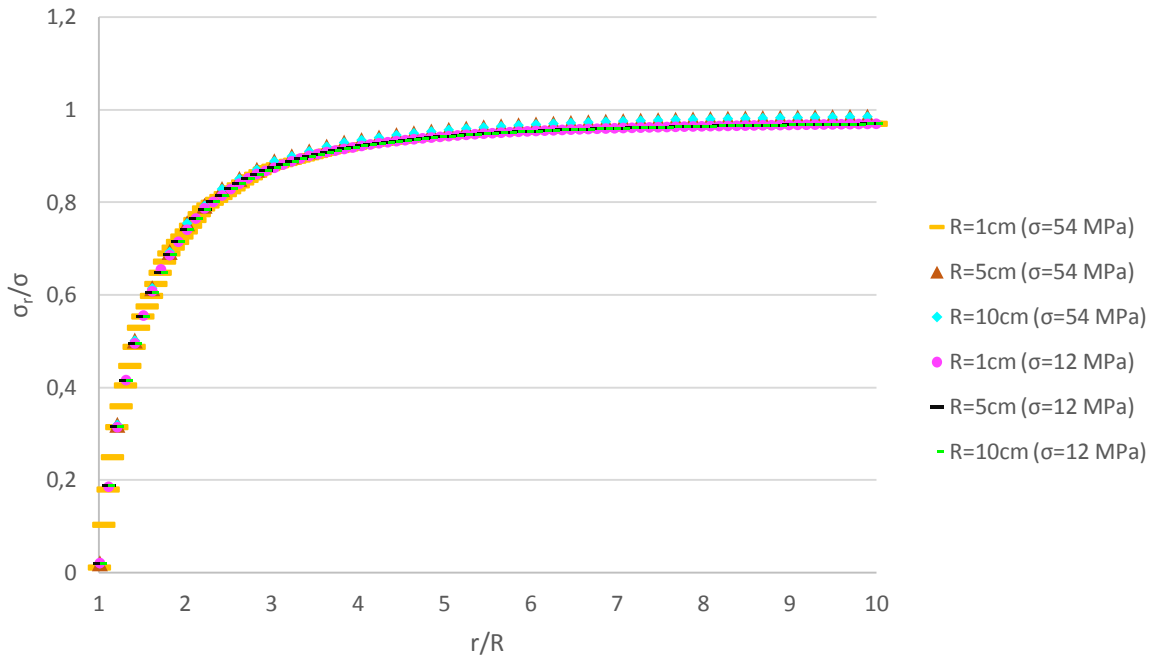


Σχήμα VII.21 Μεταβολή του λόγου  $\sigma_r/\sigma$  σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση  $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήση με ακτίνα οπής 1cm και ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=12\text{ MPa}, \sigma_v=36\text{ MPa}$ )

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για ισότροπο πεδίο τάσεων με  $\sigma=12\text{ MPa}$ , και με  $\sigma=54\text{ MPa}$ , συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των σχημάτων VII.14 και VII.21 στο σχήμα VII.23. Παρατηρείται πως ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$  δεν διαφοροποιείται σημαντικά για διαφορετική τιμή της τάσης του ισότροπου πεδίου.

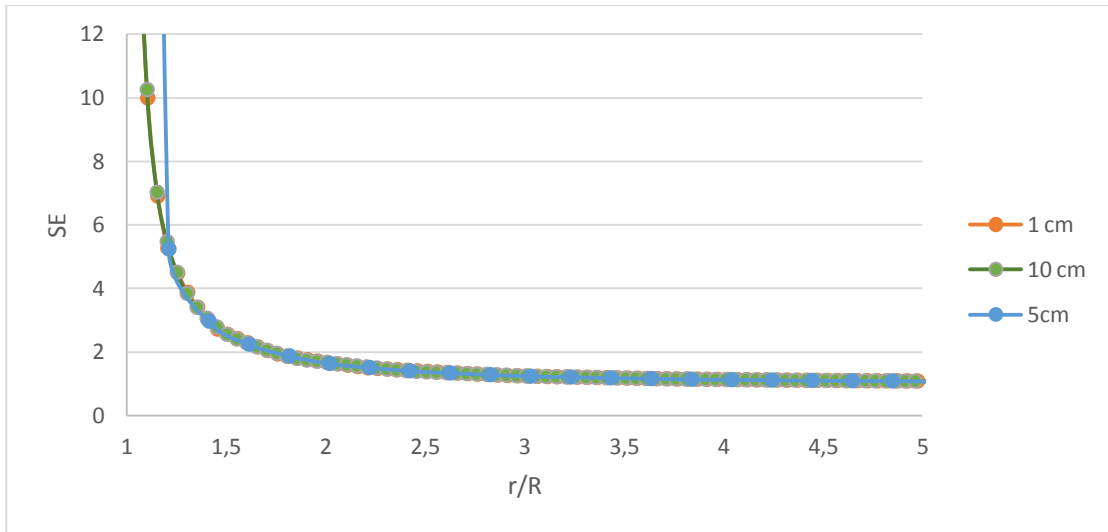
Ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$  μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο για διαφορετικές τιμές της ακτίνας της οπής της γεώτρησης. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται πως όσο απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα της οπής ο λόγος  $\sigma_r/\sigma$  τείνει στην μονάδα.



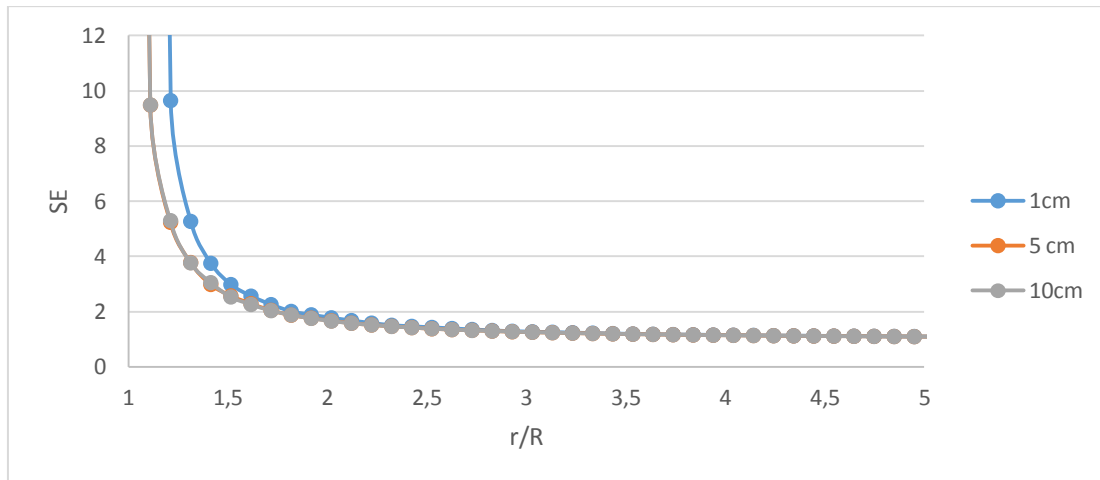


Σχήμα VII.22 Μεταβολή του λόγου  $\sigma_r/\sigma$  σε συνάρτηση με την αδιάστατη απόσταση  $r/R$ , σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση, για γεωτρήσεις με ακτίνα οπής 1cm, 5 cm, 10 cm και ισότροπο πεδίο οριζόντιων τάσεων με α)  $\sigma=\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa και β)  $\sigma=\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa. Επαλήθευση της κλασικής ελαστικότητας δηλαδή καμμιά εξάρτηση της ακτινικής (αλλά και της εφαπτομενικής) τάσης από το μέγεθος της οπής γεώτρησης.

Στα Σχήματα VII.23 και VII.24 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του λόγου SE, σε συνάρτηση με την αδιάστατη ακτινική απόσταση  $r/R$ , για ισότροπο πεδίο τάσεων με  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa και  $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa, αντίστοιχα. Επιβεβαιώνεται και από τα δύο διαγράμματα πως, σε ένα ισότροπο πρωτογενές πεδίο τάσεων, σύμφωνα με την θεωρία της κλασικής ελαστικότητας ο λόγος SE τείνει στο άπειρο όταν  $r=R$ , και όταν το  $r$  τείνει στο άπειρο, ο λόγος SE ισούται με την μονάδα.



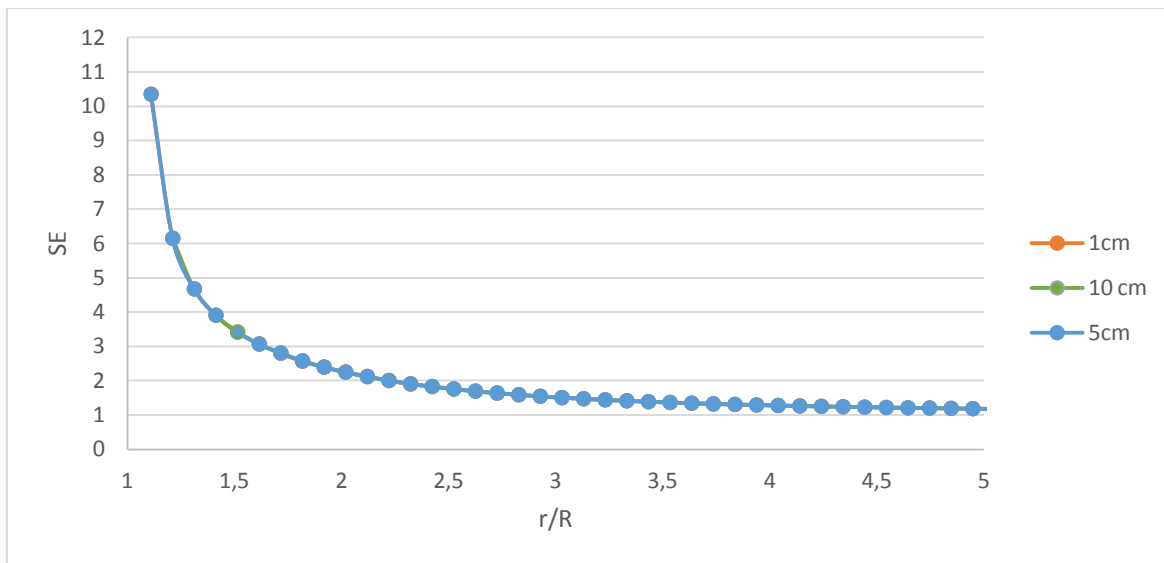
Σχήμα VII.23 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης  $r/R$  για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa).



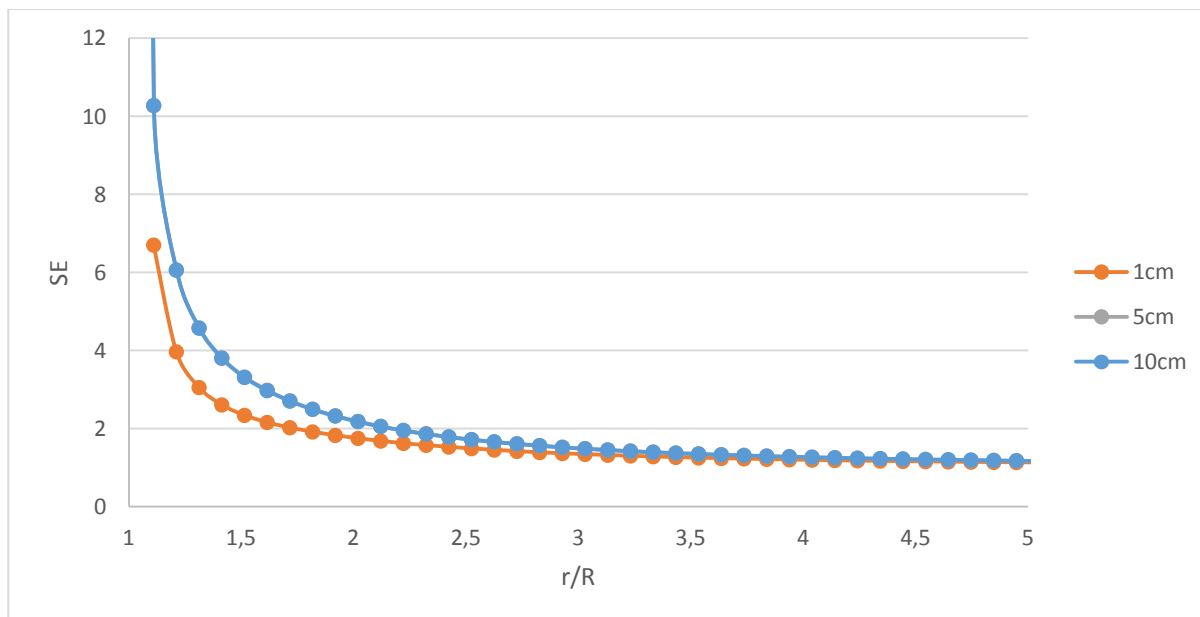
Σχήμα VII.24 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης  $r/R$  για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h=\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa).

Στα Σχήματα VII.25 και VII.26 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του λόγου SE σε συνάρτηση με την αδιάστατη ακτινική απόσταση για για ισότροπο πεδίο τάσεων με  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa,  $\sigma_v = 36$  MPa και  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa,  $\sigma_v = 36$  MPa , αντίστοιχα, τα οποία εξάχθηκαν υπολογίζοντας τις τάσεις  $\sigma_\theta$  και  $\sigma_r$  με βάση τις εξισώσεις III.48 και III.49. Θεωρήθηκε πως  $\sigma_h = \sigma_{xx}$ ,  $\sigma_H = \sigma_{yy}$  και  $\theta = 0$ .

Παρατηρείται πως τα αποτελέσματα της αριθμητικής και της αναλυτικής επίλυσης (Σχήματα VII.25 και VII.26) για μεγάλη ακτινική απόσταση συμφωνούν, αλλά για τιμές του  $r$  κοντά στην ακτίνα της οπής υπάρχει απόκλιση των αποτελεσμάτων, η οποία ίσως οφείλεται στα πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα VII.25 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης  $r/R$  για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με την θεωρία κλασσικής ελαστικότητας (αναλυτική επίλυση) για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa,  $\sigma_v = 36$  MPa).

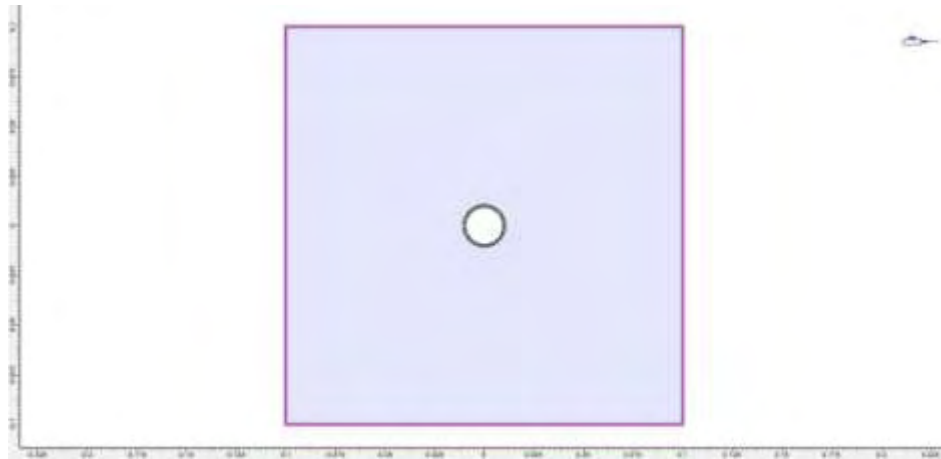


Σχήμα VII.26 Μεταβολή του λόγου SE σε συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης  $r/R$  για γεωτρήσεις με ακτίνες 1cm, 5cm και 10 cm, σύμφωνα με την θεωρία κλασσικής ελαστικότητας (αναλυτική επίλυση) για ισότροπο πεδίο τάσεων ( $\sigma_h = \sigma_H = 12 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_v = 36 \text{ MPa}$ ).

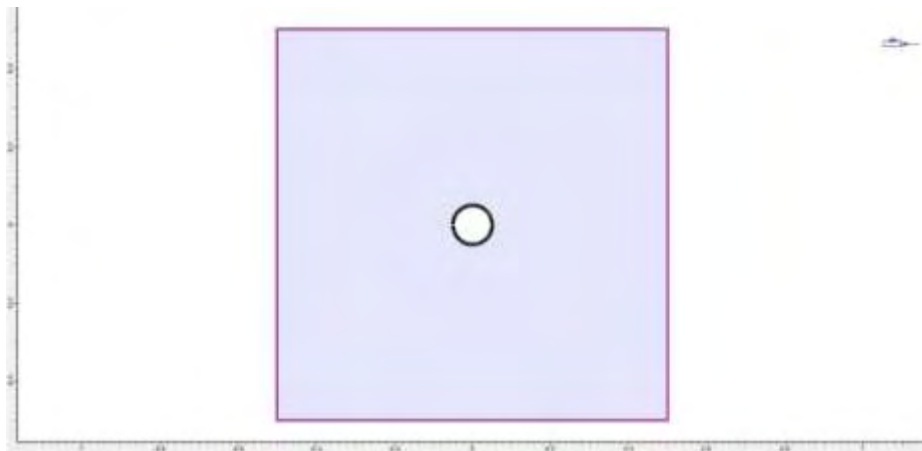
## B. Ανισότροπο Πεδίο Τάσεων

Για την περίπτωση ανισότροπου πεδίου τάσεων, γίνονται τρεις αναλύσεις, μεταβάλλοντας την ακτίνα  $R$ , της οπής γεώτρησης (1cm, 5cm και 10cm), για τάσεις πεδίου  $\sigma_h = 12 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_H = 54 \text{ MPa}$ , και  $\sigma_v = 36 \text{ MPa}$ .

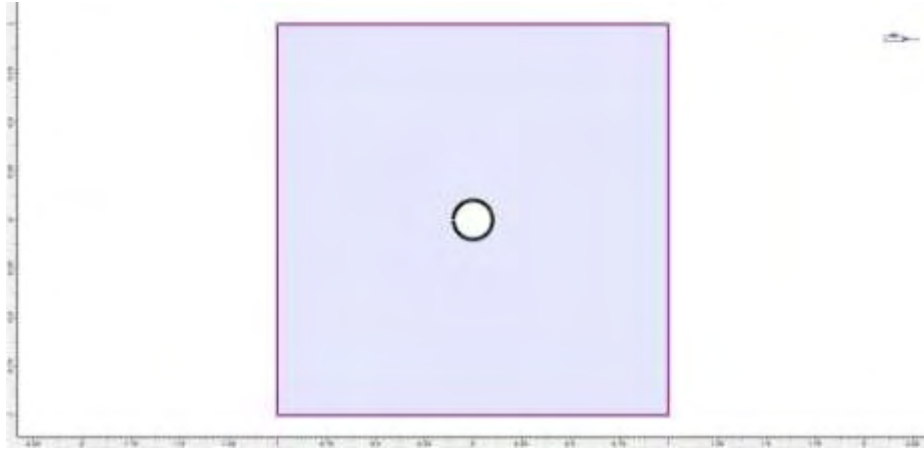
Και για τις τρεις περιπτώσεις ακτίνας οπής της γεώτρησης (Σχήματα VII.27, VII.28, VII.29), αναπτύχθηκε το αριθμητικό μοντέλο και έγινε η διακριτοποίηση και η δημιουργία του κανάβου (Σχήματα VII.30, VII.31, VII.32). Ακολούθησε η επίλυση του αριθμητικού προβλήματος. Στα σχήματα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  (Σχήματα VII.33, VII.34, VII.35) και την ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$  (Σχήματα VII.36, VII.37, VII.38). Στο παράρτημα ( Σχήματα VIII.16 έως VIII.21) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέγιστη τάση  $\sigma_1$  και την ελάχιστη τάση  $\sigma_3$ , εστιάζοντας στην περιοχή περιμετρικά της οπής.



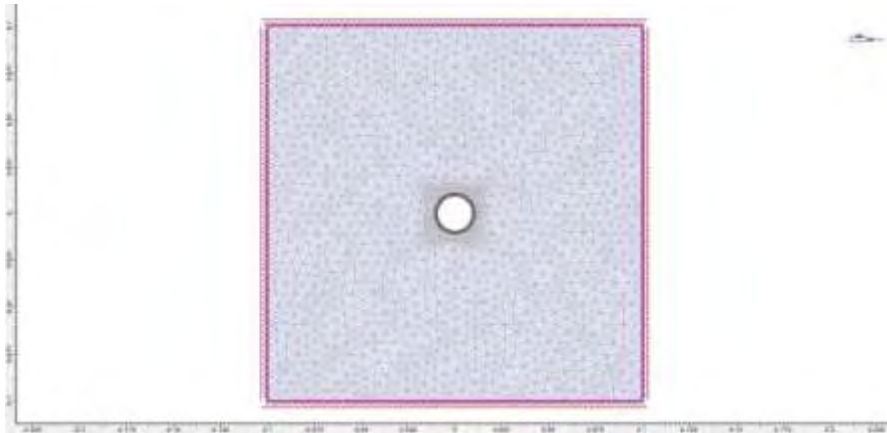
Σχήμα VII.27 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase για  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



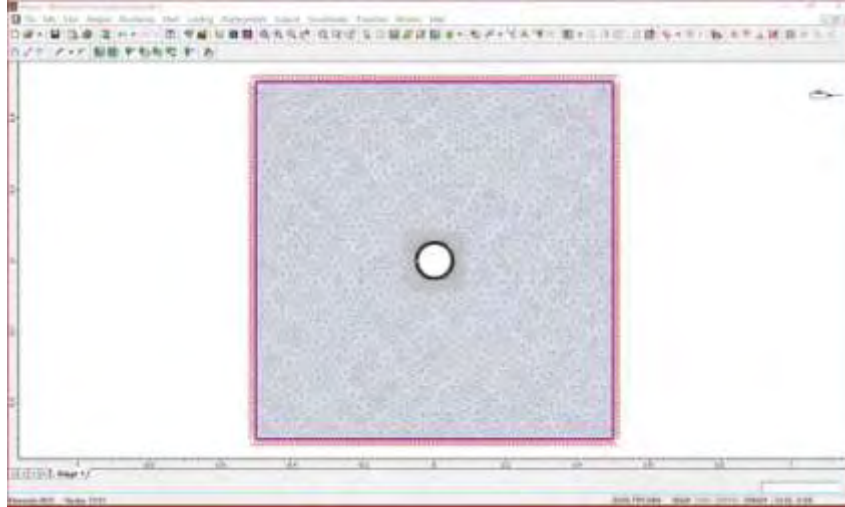
Σχήμα VII.28 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase για  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



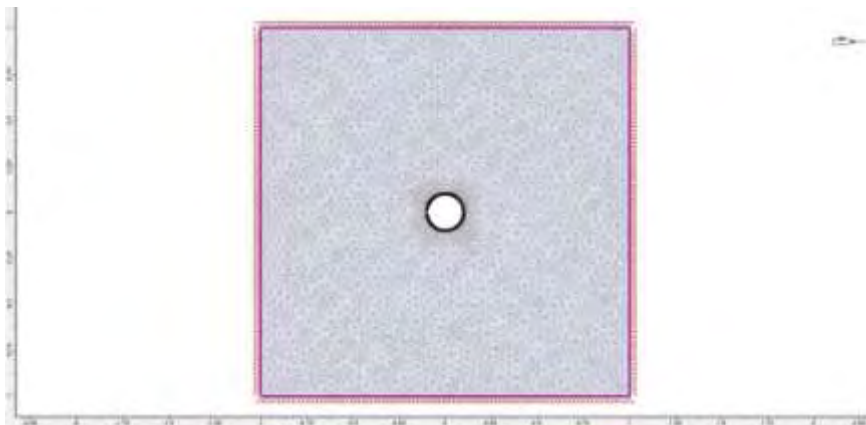
Σχήμα VII.29 Απεικόνιση οριζόντιας τομής γεώτρησης με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase για  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



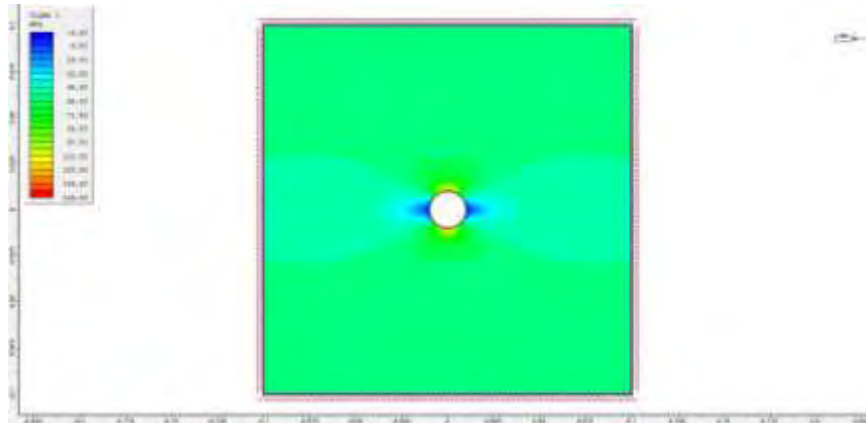
Σχήμα VII.30 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



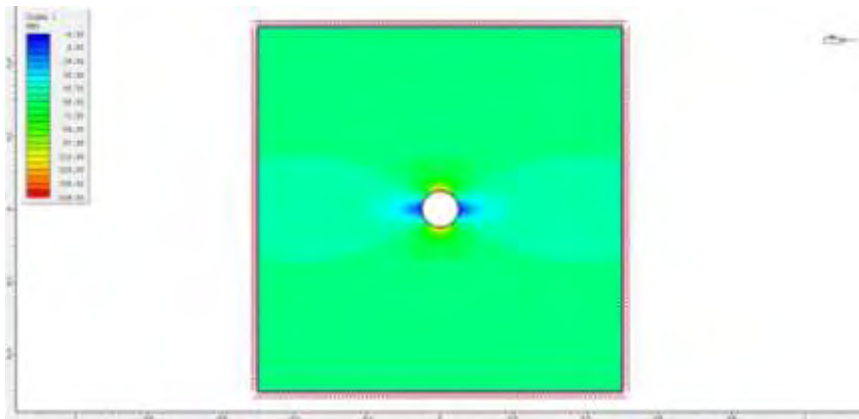
Σχήμα VII.31 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.



Σχήμα VII.32 Διακριτοποίηση και δημιουργία κανάβου για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.

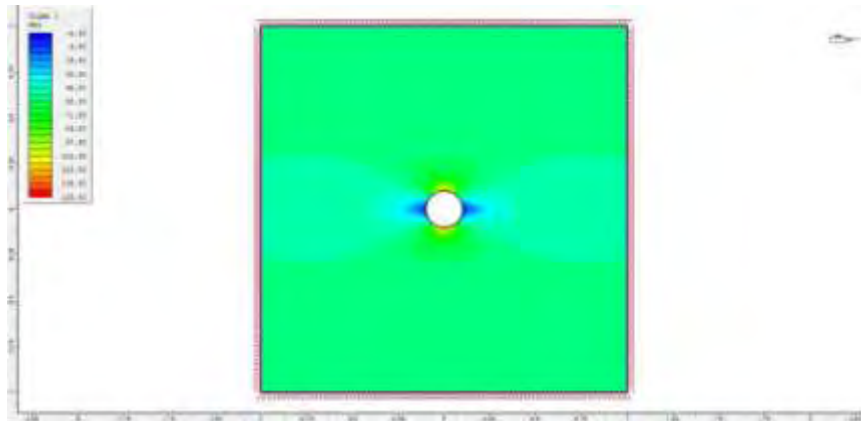


Σχήμα VII.33 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

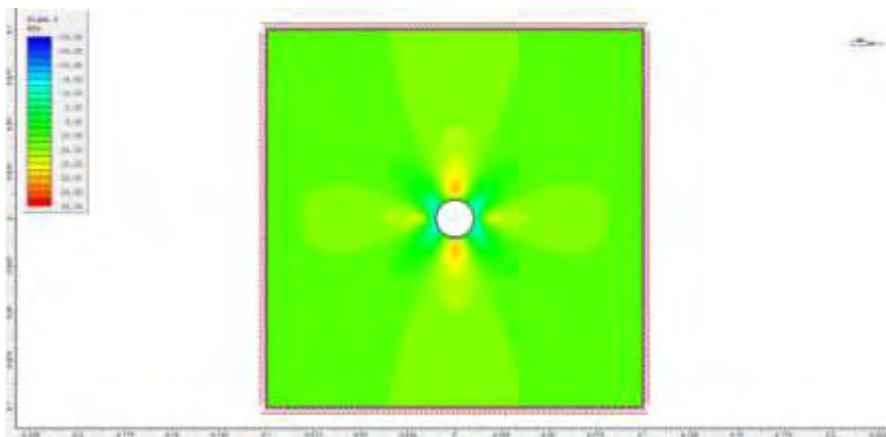


Σχήμα VII.34 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

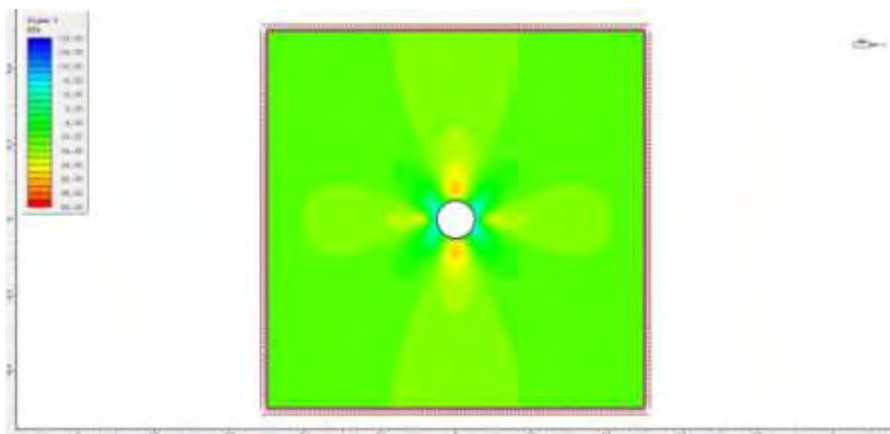




Σχήμα VII.35 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



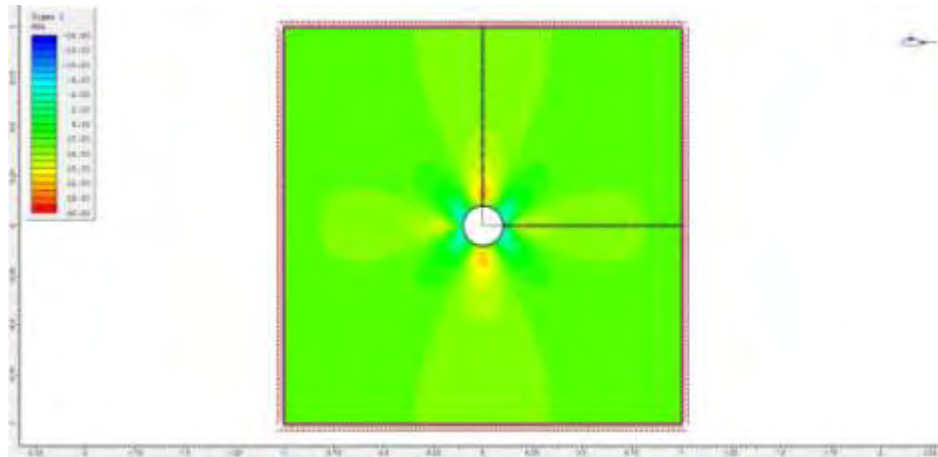
Σχήμα VII.36 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα VII.37 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θεωρείται μία νοητή γραμμή, με κατεύθυνση παράλληλη στην ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήμα VII.38). Για την γραμμή αυτή, λαμβάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της μέγιστης κύριας τάσης  $\sigma_1$ , η οποία αντιστοιχεί στην εφαπτομενική τάση  $\sigma_\theta$ . Λαμβάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της ελάχιστης κύριας τάσης  $\sigma_3$ , η οποία ταυτίζεται με την ακτινική τάση  $\sigma_r$ .

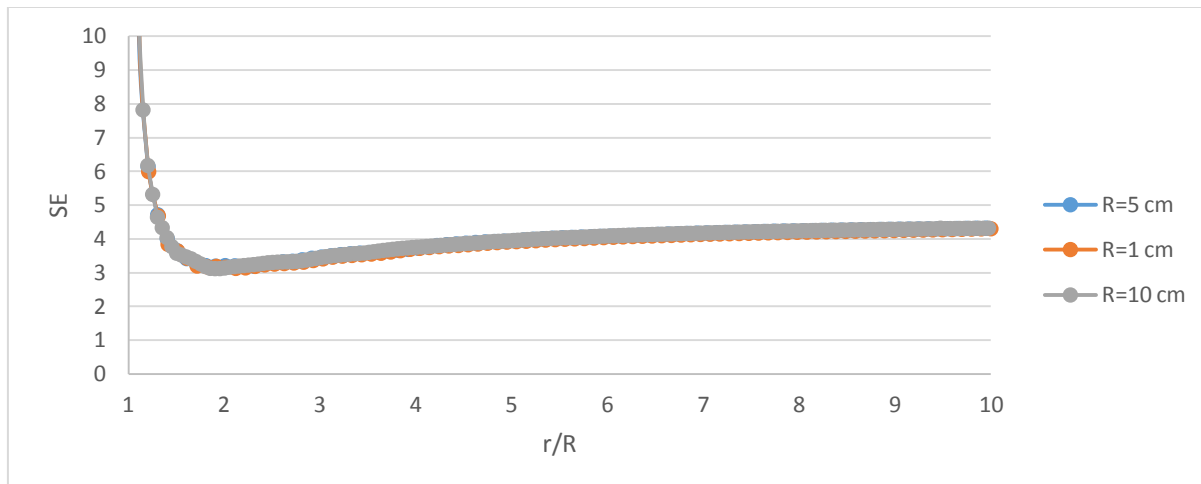
Υπολογίζεται ο λόγος  $\sigma_\theta/\sigma_r$ , και στο σχήμα VII.28 παρουσιάζεται η μεταβολή αυτού σε σχέση με τον αδιάστατο λόγο της ακτινικής απόστασης προς την ακτίνα της οπής  $r/R$ , για ακτίνα οπής 1cm, 5cm και 10cm. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα αποτελέσματα σε μία νοητή γραμμή παράλληλη στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση (Σχήμα VII.38). Τα αποτελέσματα για αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται στο σχήμα VII.39.



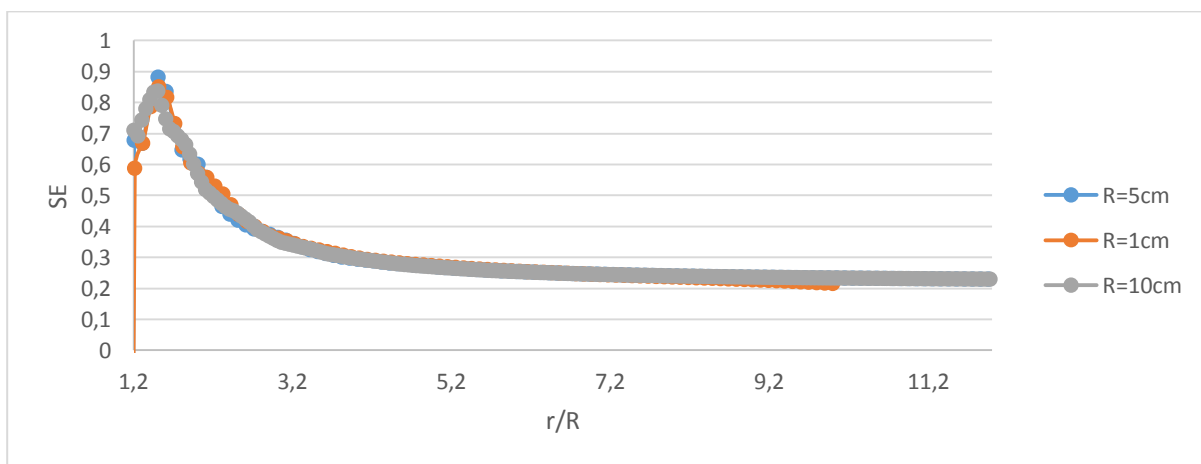
Σχήμα VII.38 Ορίζονται δύο νοητές γραμμές, μία παράλληλη στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση και μία παράλληλη στην ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση.

Παρατηρείται πως στην κατεύθυνση παράλληλα στην μέγιστη οριζόντια κύρια τάση ο λόγος SE τείνει στο 0.22, δηλαδή στο λόγο  $\sigma_h / \sigma_H$  (Σχήμα VII.40), και στην κατεύθυνση παράλληλα στην ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση, ο λόγος SE τείνει στο 4.44, δηλαδή στο λόγο  $\sigma_H / \sigma_h$  (Σχήμα VII.39).

Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως τόσο στο σχήμα VII.39, όσο και στο σχήμα VII.40, το μέγεθος της ακτίνας επηρεάζει τον λόγο SE, για τιμές του λόγου  $r/R$  από 1 έως 1.2, δηλαδή κοντά στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης, χωρίς όμως να μπορεί να οριστεί κάποιος συσχετισμός μεταξύ της ακτίνας της οπής και της αδιάστατης απόστασης  $r/R$ . Το παραπάνω υποστηρίζεται καθώς τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα VII.39 και VII.40 δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη συμπεριφορά για  $r/R$  μικρότερο του 1.2.



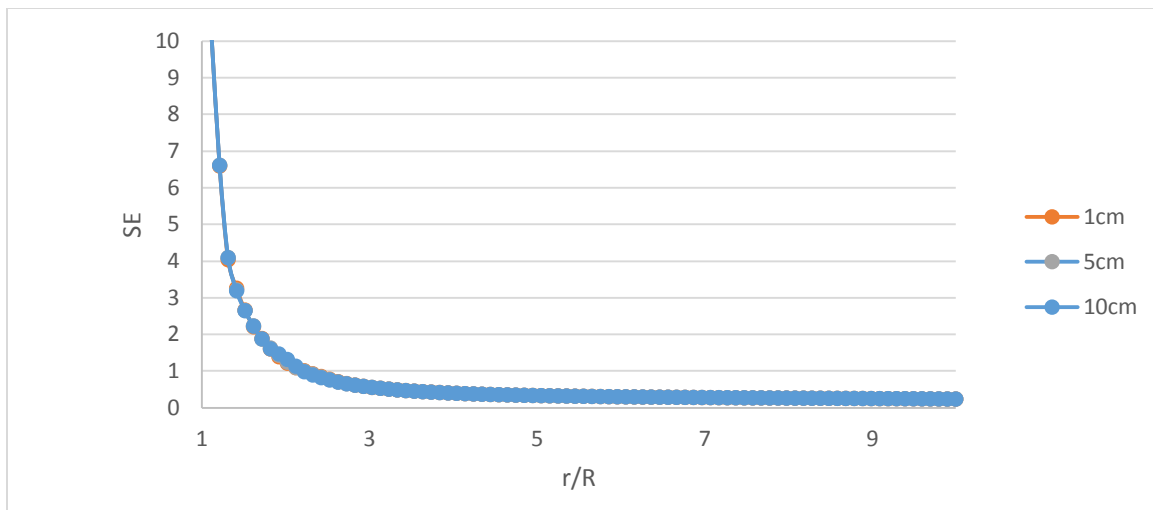
Σχήμα VII.39 Λόγος SE σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, για γεωτρήσεις με ακτίνα οπής 1 cm, 5 cm και 10 cm, και  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa στην κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας τάσης. Ο λόγος SE τείνει στο 4.44, δηλαδή στο λόγο  $\sigma_h / \sigma_H$ .



Σχήμα VII.40 Λόγος SE σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, για γεωτρήσεις με ακτίνα οπής 1 cm, 5 cm και 10 cm, και  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa στην κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας τάσης. Ο λόγος SE τείνει στο 0.22, δηλαδή στο λόγο  $\sigma_h / \sigma_H$ .

Στο Σχήμα VII.41 παρουσιάζεται ο λόγος SE σε συνάρτηση με την αδιάστατη ακτινική απόσταση για για ανισότροπο πεδίο τάσεων με  $\sigma_h=12$ ,  $\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa σε κατεύθυνση παράλληλη με την μέγιστη οριζόντια κύρια τάση, τα οποία εξάχθηκαν υπολογίζοντας τις τάσεις  $\sigma_\theta$  και  $\sigma_r$  με βάση τις εξισώσεις III.48 και III.49. Θεωρήθηκε πως  $\sigma_h=\sigma_{xx}$ ,  $\Sigma h=\sigma_{yy}$  και  $\theta=0$ .

Παρατηρείται πως η κύρια διαφορά των αποτελεσμάτων του σχήματος VII.41 από τα αποτελέσματα του σχήματος VII.40 είναι πως στην αριθμητική επίλυση παρατηρείται διαφοροποίηση που εξαρτάται από την ακτίνα της οπής για μικρές τιμές της ακτινικής απόστασης. Παρόλα αυτά και στην περίπτωση της επίλυσης με την θεωρία ελαστικότητας ο λόγος SE τείνει στην τιμή 0.22 όταν η ακτινική απόσταση τείνει στο άπειρο.



Σχήμα VII.41 Λόγος SE σε συνάρτηση του λόγου  $r/R$ , σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επίλυσης με βάση την θεωρία ελαστικότητας, για γεωτρήσεις με ακτίνα οπής 1 cm, 5 cm και 10 cm, και  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa,  $\sigma_v=36$  MPa στην κατεύθυνση της μέγιστης οριζόντιας τάσης (Θεωρήθηκε πως  $\sigma_h=\sigma_{xx}$ ,  $\Sigma h=\sigma_{yy}$  και  $\theta=0$ ). Ο λόγος SE τείνει στο 0.22, δηλαδή στο λόγο  $\sigma_h/\sigma_H$ .

## VIII. Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αναλυτικές και αριθμητικές επιλύσεις του προβλήματος της οπής γεώτρησης σε μεγάλα βάθη. Αρχικά παρουσιάζεται η σημαντικότητα της σωστής πρόβλεψης της ευστάθειας των τοιχώματων των γεωτρήσεων, για την έρευνα και την εκμετάλλευση συμβατικών ενεργειακών πηγών (όπως το φυσικό αέριο και οι υγροί υδρογονάνθρακες). Η αυξημένη ζήτηση των ενεργειακών πρώτων υλών και ταυτόχρονα η σταδιακή μείωση των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθιστά την διενέργεια βαθιών γεωτρήσεων (ερευνητικών, παραγωγής) σημαντικό τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας εξόρυξης υδρογονανθράκων. Υπάρχει απαίτηση για ολοένα και βαθύτερες γεωτρήσεις σε ολοένα και πιο δυσπρόσιτες περιοχές και ως εκ τούτου, η ευστάθεια των τοιχωμάτων των γεωτρήσεων αυτών είναι ύψιστης σημασίας. Υπογραμμίζεται επίσης πως ο σωστός σχεδιασμός γεωτρήσεων μεγάλου βάθους αποτελεί διαδικασία που επηρεάζεται από πληθώρα διαφορετικών παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με τον τύπο του γεωλογικού σχηματισμού, την κλίση της γεώτρησης, τον καταστατικό νόμο περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς του γεωυλικού, του επι-τόπου εντατικού πεδίου κ.α. .

Για τον σωστό σχεδιασμό μιας γεώτρησης μεγάλου βάθους, απαραίτητη είναι η κατανόηση των βασικών μηχανισμών αστοχίας των βραχωδών υλικών, οι οποίοι επηρεάζονται από την κατανομή των τάσεων, τον καταστατικό νόμο που χαρακτηρίζει τον βραχώδη σχηματισμό και το κριτήριο αστοχίας που επιλέγεται από τον εκάστοτε ερευνητή.

Οι αστοχίες, οι οποίες παρατηρούνται στα γεωυλικά κατά την διάνοιξη μιας γεώτρησης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αστοχιών είναι οι αστοχίες των τοιχωμάτων των οπών των γεωτρήσεων, οι οποίες προκαλούνται λόγω των κατανεμημένων τάσεων πεδίου και των δευτερογενών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της δημιουργίας της οπής γεώτρησης, και εξαρτώνται από τον μηχανισμό αστοχίας που χαρακτηρίζει τον εδαφικό ή βραχώδη σχηματισμό. Τέτοιου είδους περιοχές θραύσης υποδεικνύουν την διεύθυνση της ελάχιστης θλιπτικής τάσης πεδίου κάθετα στον άξονα της γεώτρησης [14]. Ακόμη, το σχήμα των περιοχών αυτών παρέχει πληροφορίες τόσο για την μέγιστη, όσο και για την ελάχιστη τάση πεδίου και σχετίζεται με την αντοχή του γεωυλικού [14].

Ως δεύτερη περίπτωση αστοχιών αναφέρονται οι θραύσεις κατά την διάνοιξη της γεώτρησης, οι οποίες υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης, αλλά και παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στον σχεδιασμό των γεωτρήσεων, διευκολύνοντας στην εκτίμηση και τον καθορισμό της πίεσης των διατρητικών ρευστών, ώστε να περιοριστεί η επιρροή των τάσεων πεδίου [15].

Στη συνέχεια δίνονται οι εξισώσεις περιγραφής του εντατικού πεδίου γύρω από το τοίχωμα της οπής της γεώτρησης σύμφωνα με την ελαστική επίλυση ενός κοίλου κυλίνδρου. Η δημιουργία της οπής της γεώτρησης έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της εφαπτομενικής τάσης στην περιφέρεια της οπής της γεώτρησης, φαινόμενο που ονομάζεται συγκέντρωση τάσης [23].

Επιπρόσθετα παρατίθεται η επίλυση του Kirsch, η οποία περιγράφει το εντατικό πεδίο γύρω από την γεώτρηση σε δύο και τρεις διαστάσεις, σε ισότροπο αλλά και ανισότροπο πρωτογενές εντατικό πεδίο. Σημειώνεται πως η κατανομή των τάσεων εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από το τοίχωμα της οπής, αλλά και από την πίεση του διατρητικού ρευστού.

Ακολουθεί η σύγκριση της επίλυσης του Kirsch για ισότροπη βραχόμαζα με την αντίστοιχη επίλυση για ανισότροπη βραχόμαζα. Η παράβλεψη της θεώρησης της ελαστικής ανισοτροπίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βλάβες και αστοχίες κατά την εκτέλεση μιας βαθείας γεώτρησης [28].

Σύμφωνα με τις επιλύσεις με βάση την θεωρία γραμμικής διακλάδωσης των Papanastasiou & Vardoulakis (1989), συμπεραίνεται πως οι γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου αστοχούν σε μεγαλύτερες εξωτερικές τάσεις από ότι οι μεγαλύτερες οπές, δηλαδή παρατηρούνται φαινόμενα κλίμακας, τα οποία είναι εντονότερα σε υλικά με μεγαλύτερες γωνίες τριβής [31].

Στη συνέχεια παρατίθεται η επίλυση με βάση την θεωρία βαθμοελαστικότητας [3], [32]. Μέσω αυτής αποδεικνύεται πως ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης αυξάνεται, όσο η ακτίνα της γεώτρησης μεγαλώνει, δηλαδή παρατηρούνται επίσης φαινόμενα κλίμακας. Αποδεικνύεται πως μικρότερες οπές είναι πιο δύσκαμπτες και αστοχούν σε μεγαλύτερες τάσεις από τις μεγαλύτερες οπές.

Ακολούθως γίνεται αναφορά σε εργαστηριακές δοκιμές περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς βραχώμαζας γύρω από την οπή μίας γεώτρησης. Συγκεκριμένα περιγράφεται η επίδραση των φαινομένων κλίμακας και διαπιστώνεται πως όσο το μέγεθος της οπής μεγαλώνει, το φαινόμενο κλίμακας γίνεται λιγότερο εμφανές, καθώς η εφαρμοζόμενη τάση αστοχίας συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μία σταθερή τιμή, η οποία προβλέπεται από την θεωρία κλασσικής ελαστικότητας. Η τάση αστοχίας των δοκιμών αυτών εξαρτάται από το μέγεθος των δοκιμών (φαινόμενα κλίμακας) [33]. Επίσης παρουσιάζονται εργαστηριακές μετρήσεις όπου αποδεικνύεται ότι το μέγεθος της μέγιστης οριζόντιας είναι γραμμικά ανάλογο με το μέγεθος της ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης [34].

Ακολουθεί περιγραφή της αναφερόμενης επίδρασης του σχήματος της οπής και του τύπου του γεωυλικού στο οποίο θα γίνει η διάνοιξη της γεώτρησης. Συμπεραίνεται πως απαιτείται ιδιαίτερη ανάλυση για διαφορετικό τύπο γεωυλικού, όσον αφορά την πρόβλεψη των αστοχιών και του μηχανισμού αστοχία.

Οι παραπάνω θεωρίες συγκρίνονται με την βοήθεια του συντελεστή SE, ο οποίος αποτελεί ένα δείκτη σύγκρισης της ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης γύρω από την οπή. Ο υπολογισμός του λόγου SE σύμφωνα με την κλασική θεωρία ελαστικότητας, οδηγεί στο συμπέρασμα πως, για διαφορετικά βάθη, η καμπύλη συνάρτησης του λόγου SE ως προς την αδιάστατη ακτινική απόσταση  $r/R$ , δεν διαφοροποιείται. Επίσης όσο η αδιάστατη ακτινική απόσταση αυξάνεται ο λόγος SE, τείνει να σταθεροποιηθεί, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται τόσο από την θεωρία ελαστικότητας, όσο και την θεωρία γραμμικής διακλάδωσης αλλά και την θεωρία βαθμοελαστικότητας. Σημειώνεται πως και για μικρές τιμές της αδιάστατης ακτινικής απόστασης, όταν δηλαδή βρισκόμαστε κοντά στο τοίχωμα της οπής, οι θεωρίες κλασσικής ελαστικότητας, γραμμικής διακλάδωσης και βαθμοελαστικότητας, παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις, ενώ όσο η αδιάστατη ακτινική απόσταση τείνει στο άπειρο οι θεωρίες συμπίπτουν.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως ο λόγος SE, ο οποίος αποτελεί μία παράμετρο ελέγχου των τάσεων που ασκούνται στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης, μπορεί να υπολογιστεί με ευκολία και να ποσοτικοποιήσει την ένταση στο τασικό πεδίο περιμετρικά της οπής της γεώτρησης.



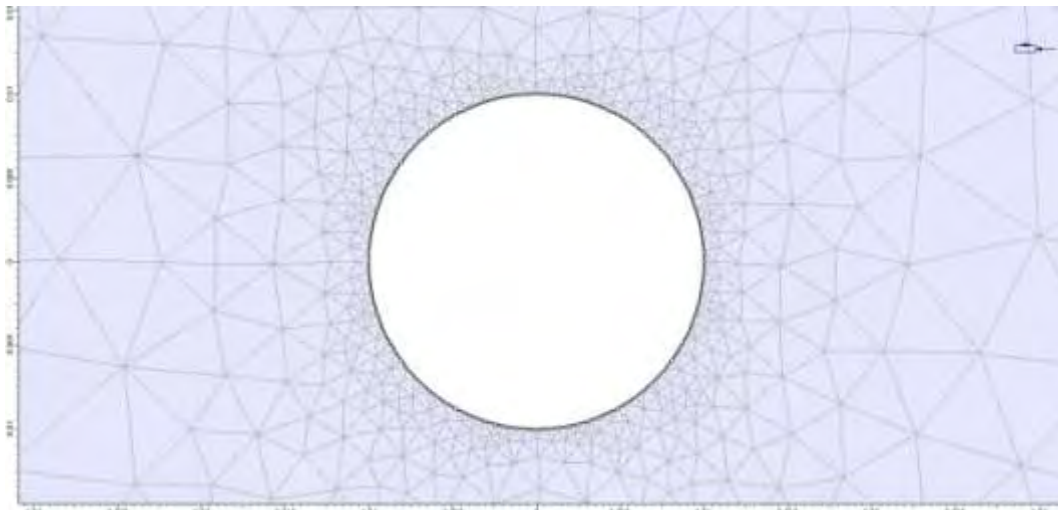
Σε επόμενο στάδιο γίνεται προσομοίωση του προβλήματος της οπής γεώτρησης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις, και συγκεκριμένα του προγράμματος Phase, τόσο για την περίπτωση ισότροπου πεδίου οριζοντίων πρωτογενών τάσεων, όσο και για την περίπτωση ανισότροπου πεδίου πρωτογενών τάσεων, μεταβάλλοντας επίσης και την ακτίνα της οπής της γεώτρησης.

Με βάση την επίλυση αυτή διαπιστώνεται πως η αδιάστατη ακτινική τάση  $\sigma_r/\sigma$ , η οποία ασκείται σε οπή γεώτρησης σε ισότροπο πρωτογενές πεδίο τάσεων αυξάνεται και τείνει ασυμπτωτικά στην μονάδα. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα που έγιναν με βάση την θεωρία γραμμικής διακλάδωσης (Σχήμα VI.3), βαθμοελαστικότητας (Σχήμα VI.4), και την προσομοίωση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Σχήματα VI.14 και VI.21).

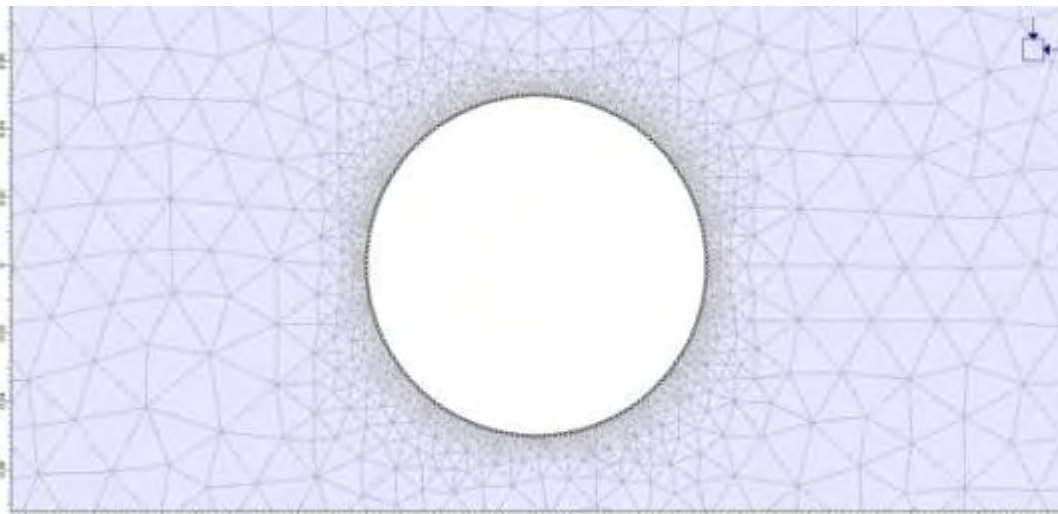
Όσον αφορά τον λόγο SE, για οπή γεώτρησης σε ανισότροπο πρωτογενές πεδίο τάσεων, έγινε προσπάθεια εκτίμησης της σχέσης του με την αδιάστατη ακτινική απόσταση. Όταν η αδιάστατη ακτινική απόσταση τείνει στο άπειρο, όπως και στο ισότροπο πεδίο τάσεων, ο λόγος SE τείνει στο λόγο των πρωτογενών τάσεων πεδίου. Για τιμές της αδιάστατης ακτινικής απόστασης κοντά στην ακτίνα της οπής, προκύπτει, με την επίλυση μέσω του Phase πως ο λόγος SE επηρεάζεται από το μέγεθος της οπής της γεώτρησης. Παρόλα αυτά, από επίλυση με βάση τη θεωρία ελαστικότητας το μέγεθος της οπής δεν επηρεάζει την σχέση του λόγου SE και της αδιάστατης ακτινικής απόστασης.

Τέλος, προτείνεται ως μελλοντική έρευνα η εξέταση της επίδρασης των διαφορετικών βραχωδών ή εδαφικών σχηματισμών και της μεταβαλλόμενης πίεσης των διατρητικών ρευστών, στην σχέση του λόγου SE και της αδιάστατης ακτινικής απόστασης, αλλά και στην σχέση της αδιάστατης εφαπτομενικής τάσης και της αδιάστατης ακτινικής απόστασης. Επιπλέον, σημαντικές πληροφορίες για την αναπτυσσόμενη τάσεις γύρω από μία γεώτρηση και συνεπώς για την πρόβλεψη της ευστάθειας αυτής, μπορούν να εξαχθούν μέσω της επίλυσης με θεώρηση πλαστικού ή και ελαστοπλαστικού υλικού.

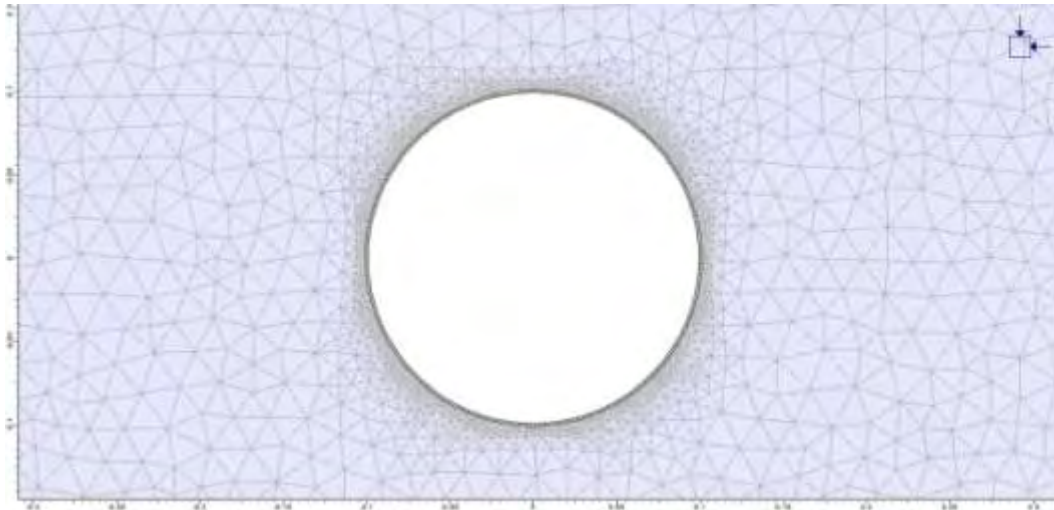
## ΙΧ. Παράρτημα



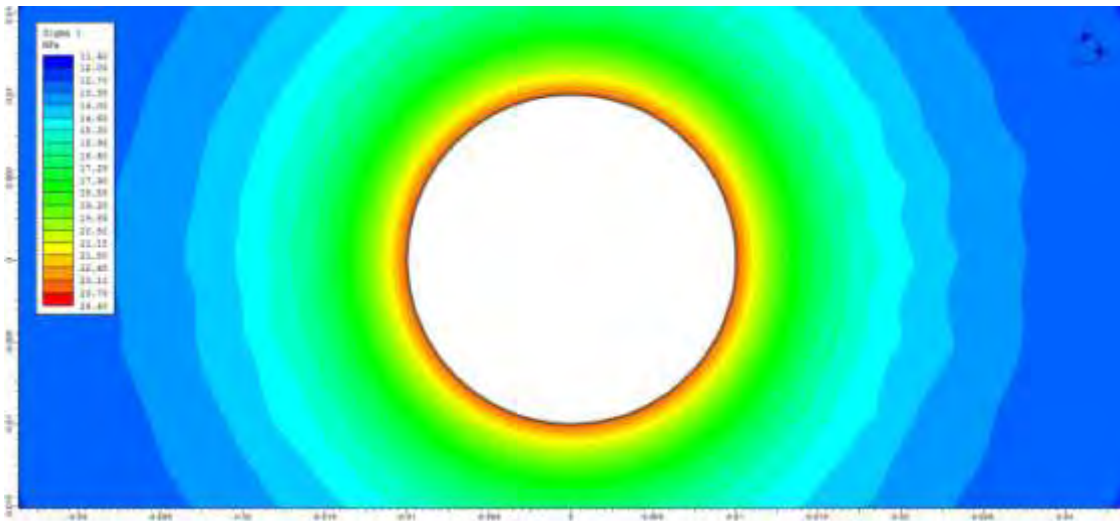
Σχήμα ΙΧ.1 Λεπτομέρεια κανάβου περιμέτρικα της οπής γεώτρησης με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.



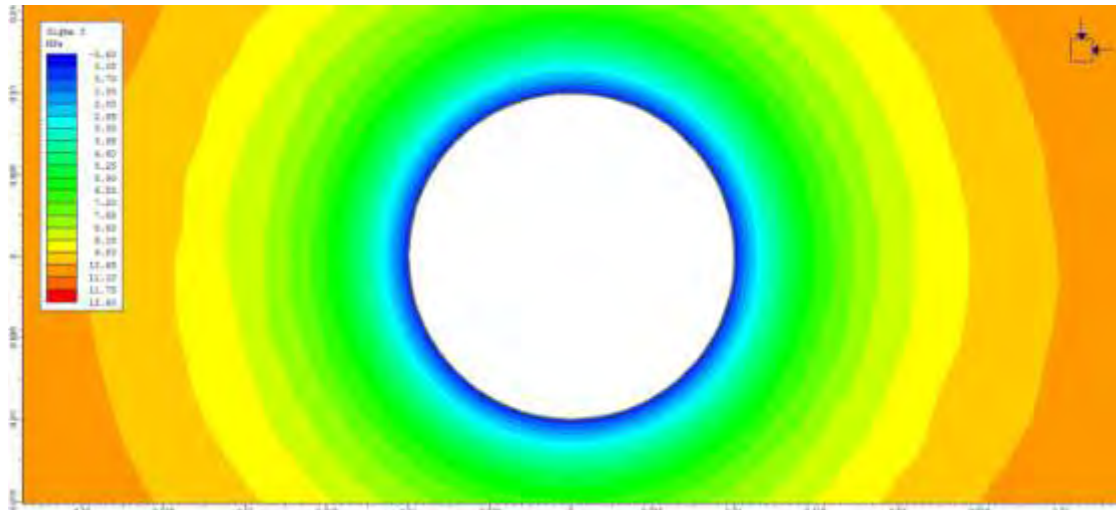
Σχήμα ΙΧ.2 Λεπτομέρεια κανάβου περιμετρικά της οπής γεώτρησης με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_H=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_V=36$  MPa.



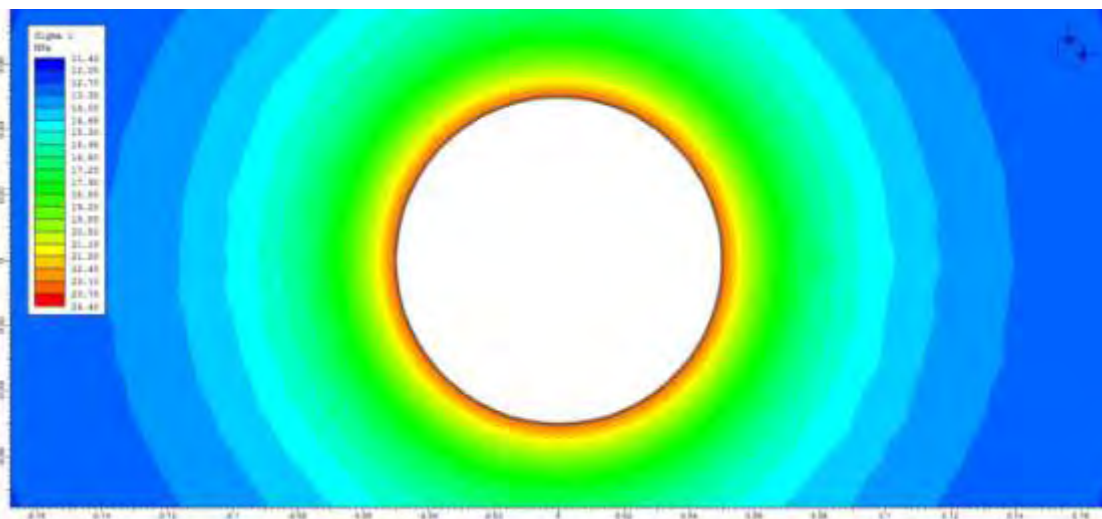
Σχήμα ΙΧ.3 Λεπτομέρεια κανάβου περιμετρικά της οπής γεώτρησης με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



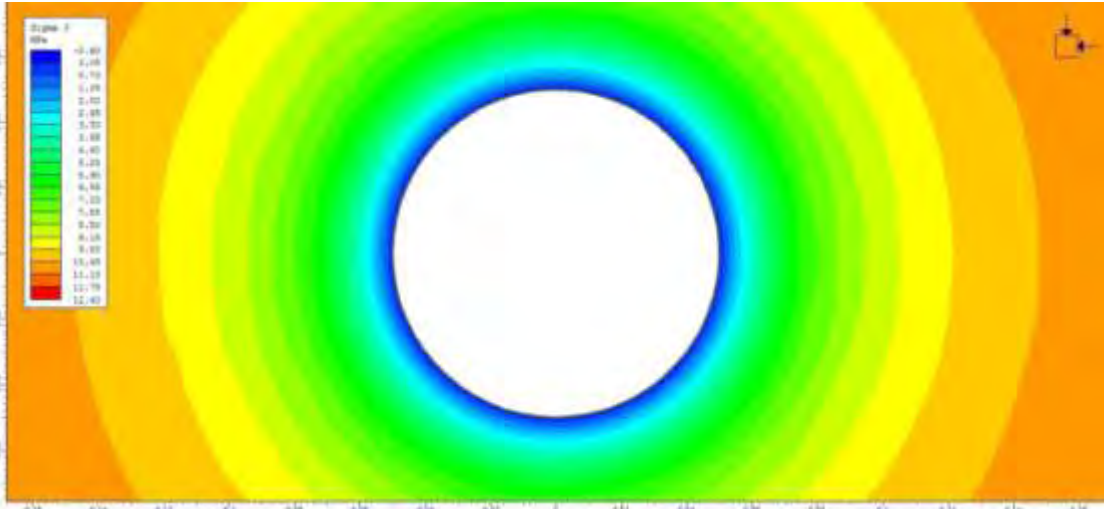
Σχήμα ΙΧ.4 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



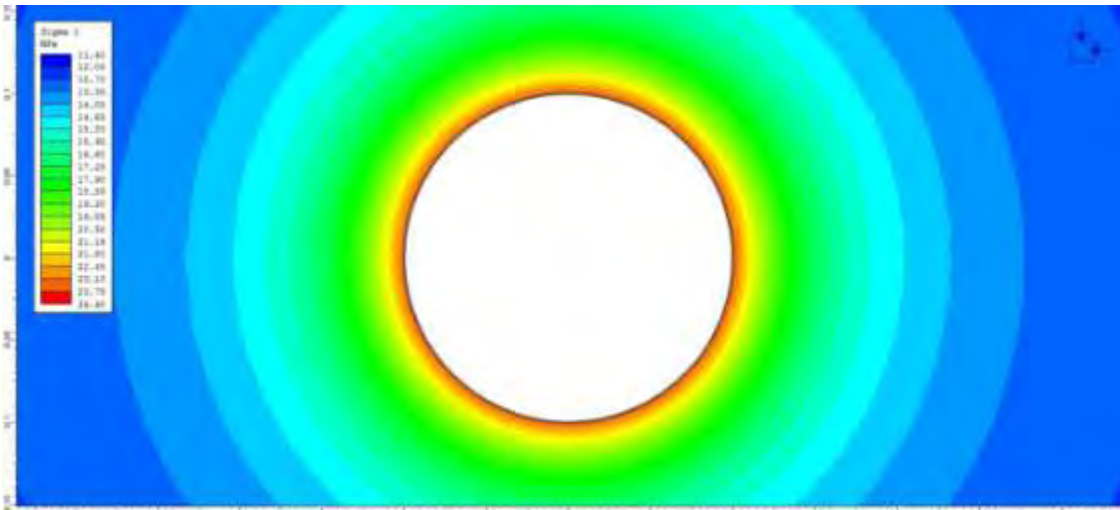
Σχήμα ΙΧ.5 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



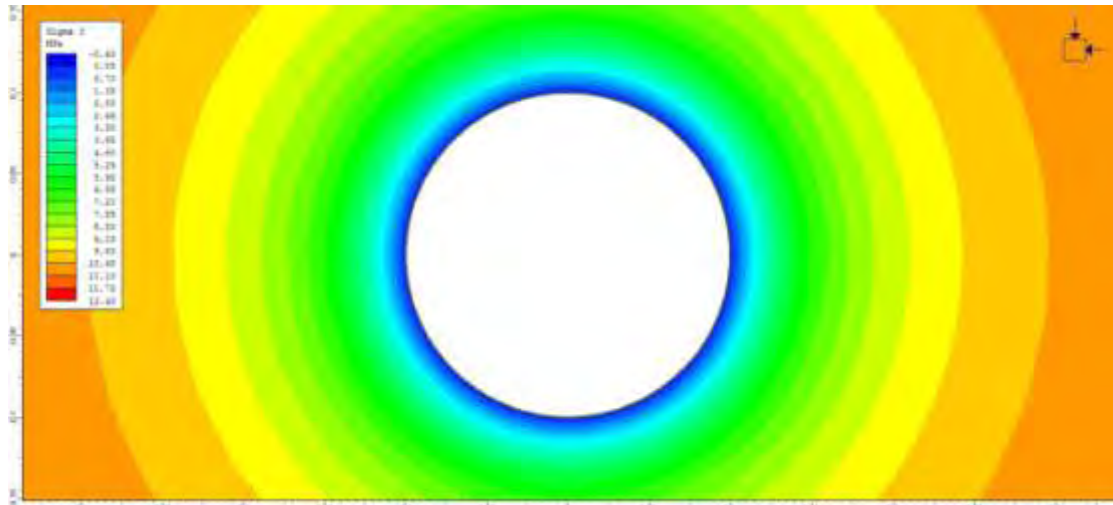
Σχήμα ΙΧ.6 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



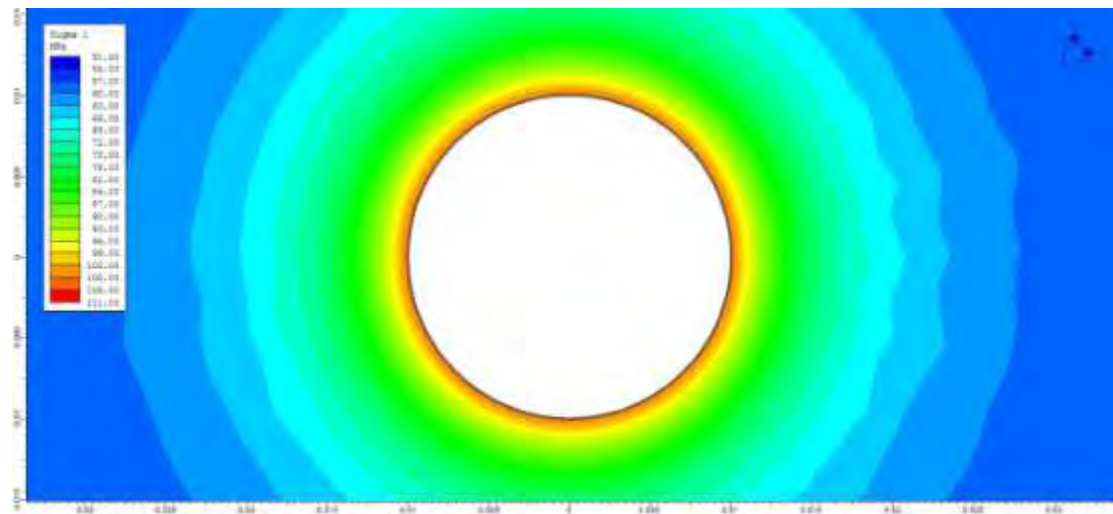
Σχήμα ΙΧ.7 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



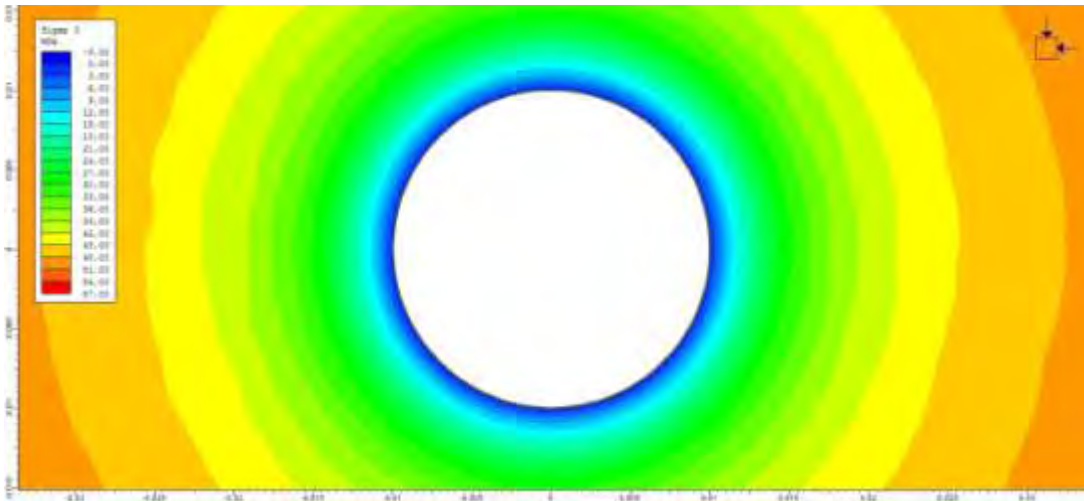
Σχήμα ΙΧ.8 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



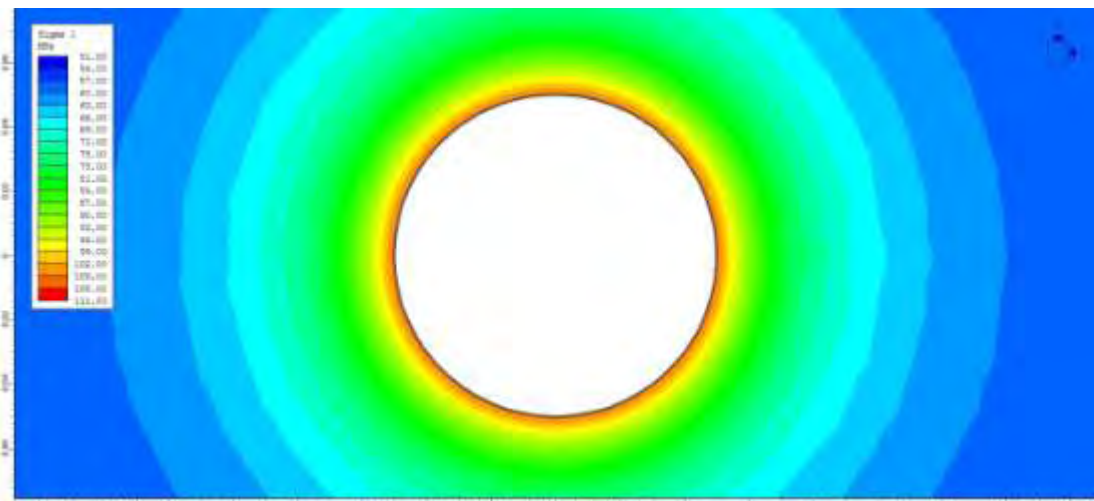
Σχήμα ΙΧ.9 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 12$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



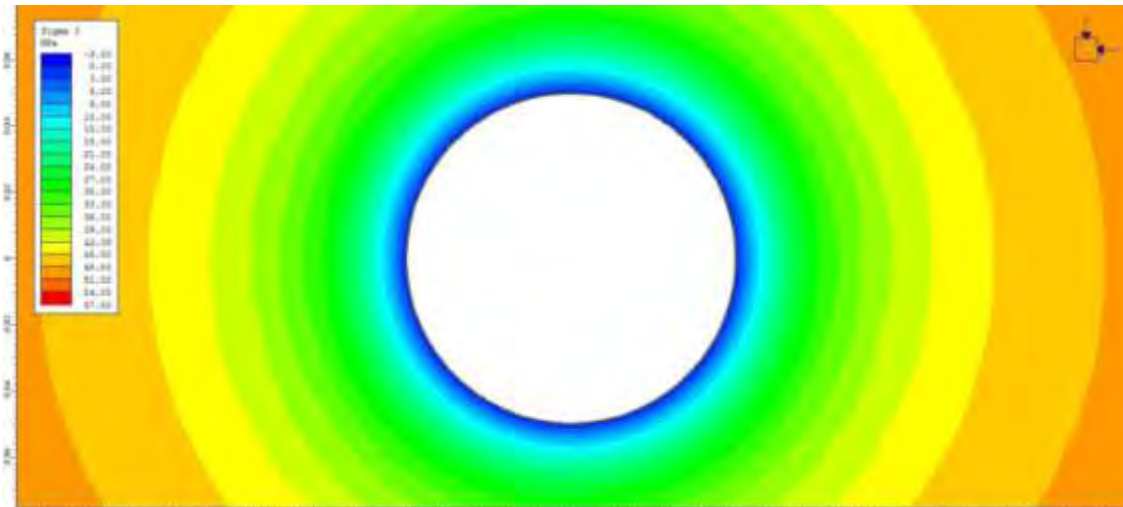
Σχήμα ΙΧ.10 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



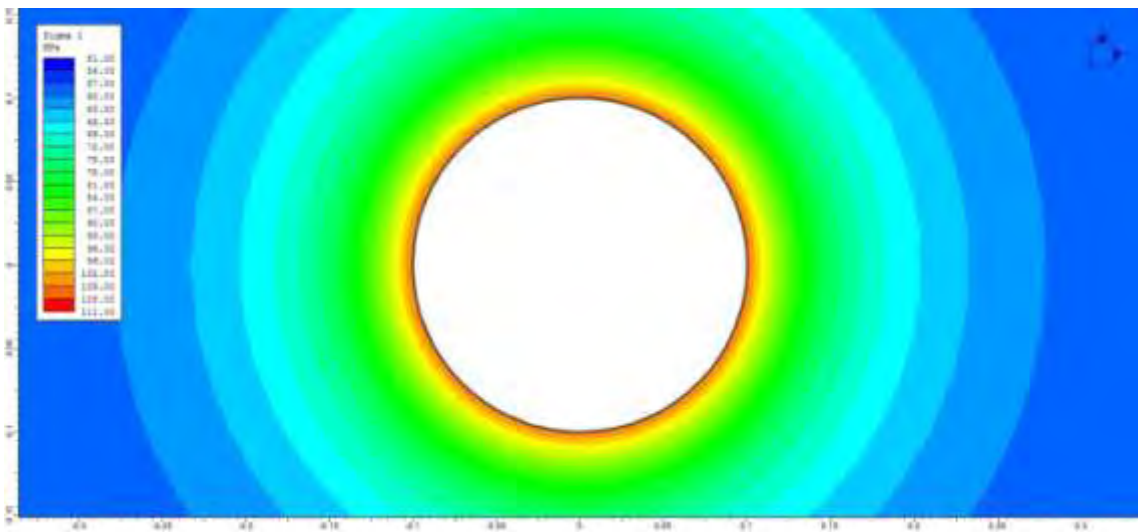
Σχήμα ΙΧ.11 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα ΙΧ.12 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

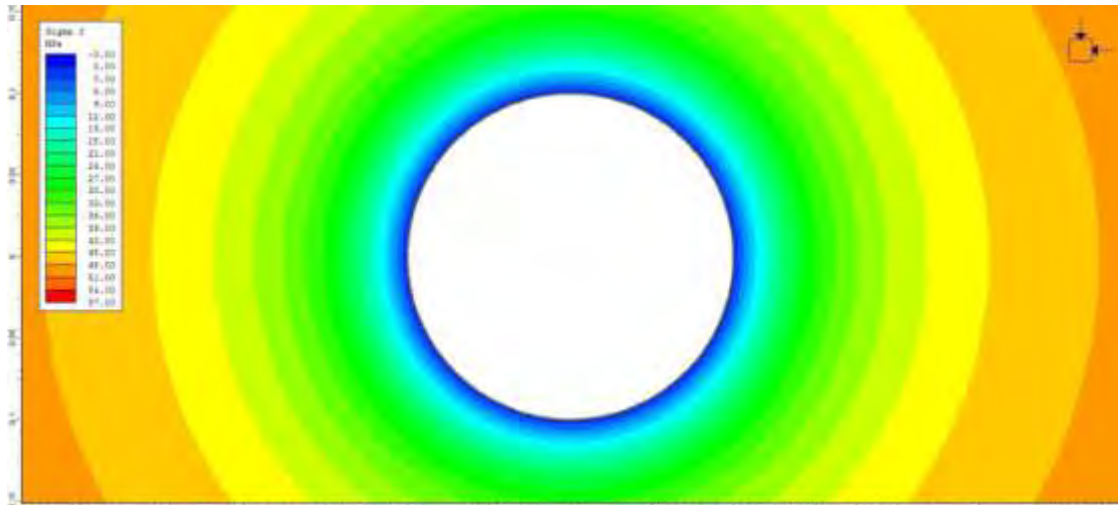


Σχήμα ΙΧ.13 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.

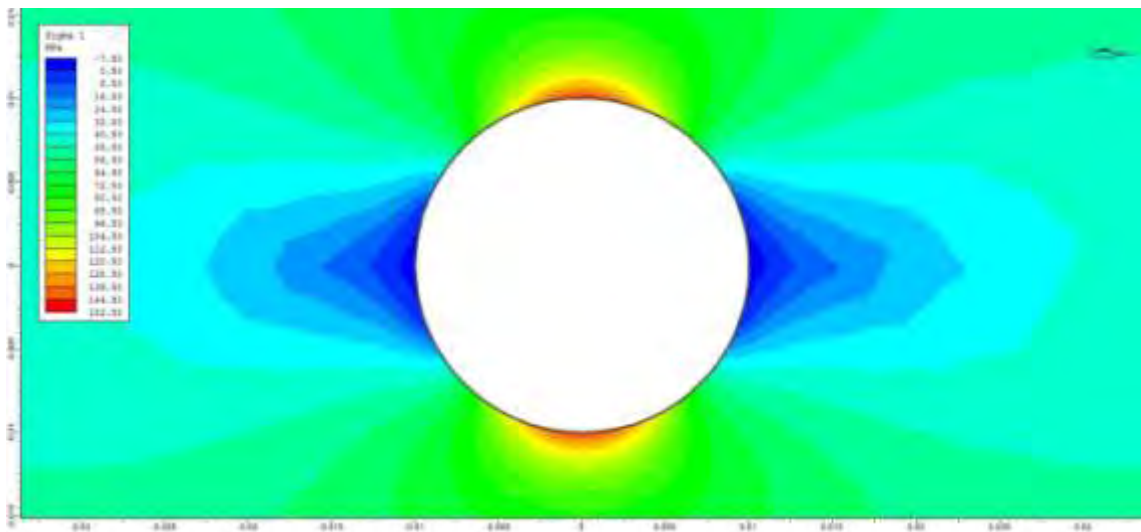


Σχήμα ΙΧ.14 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.

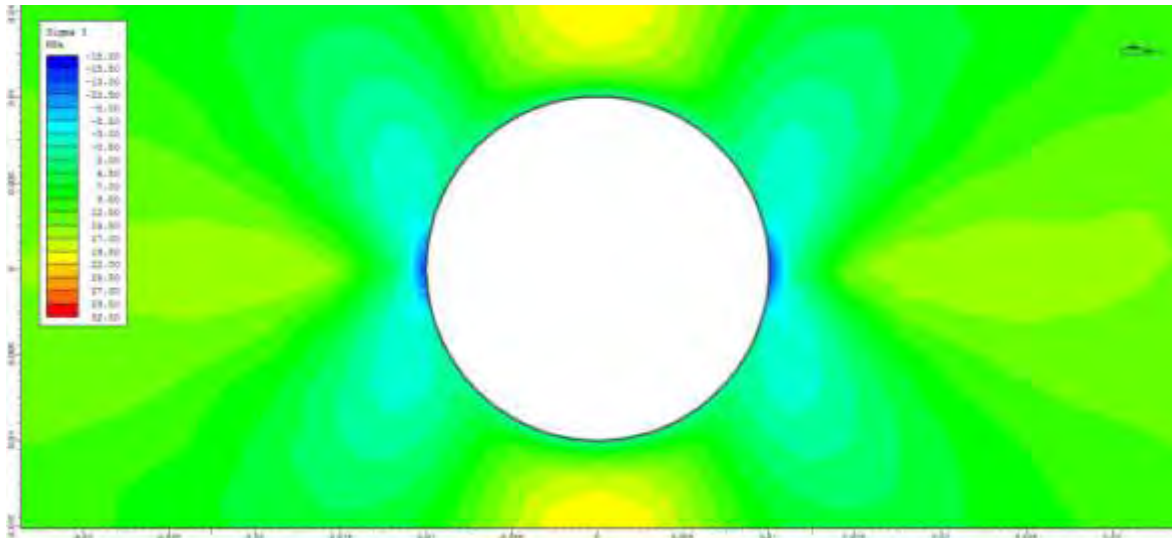




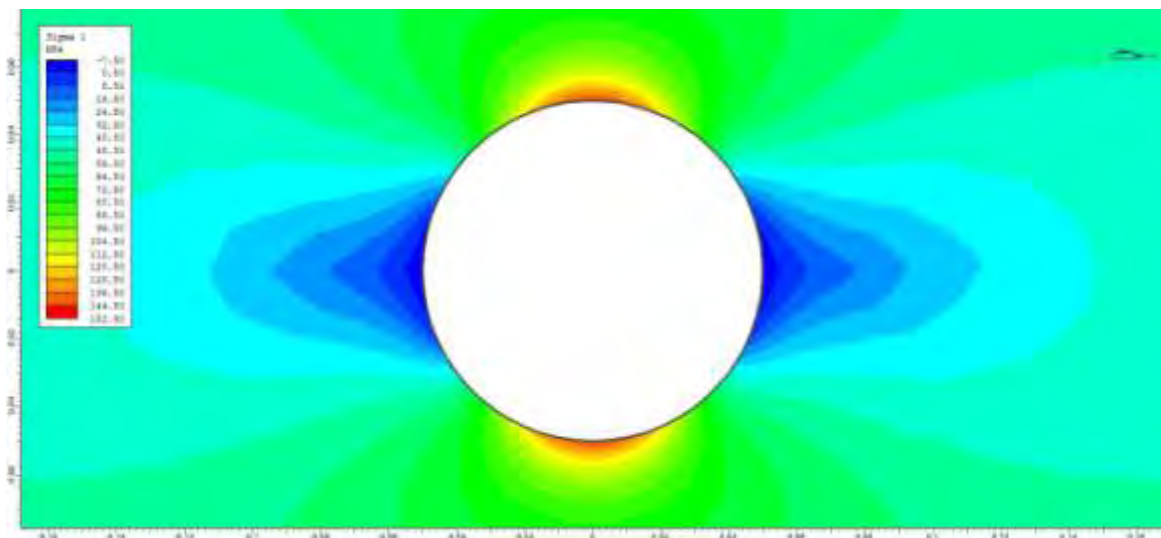
Σχήμα ΙΧ.15 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = \sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



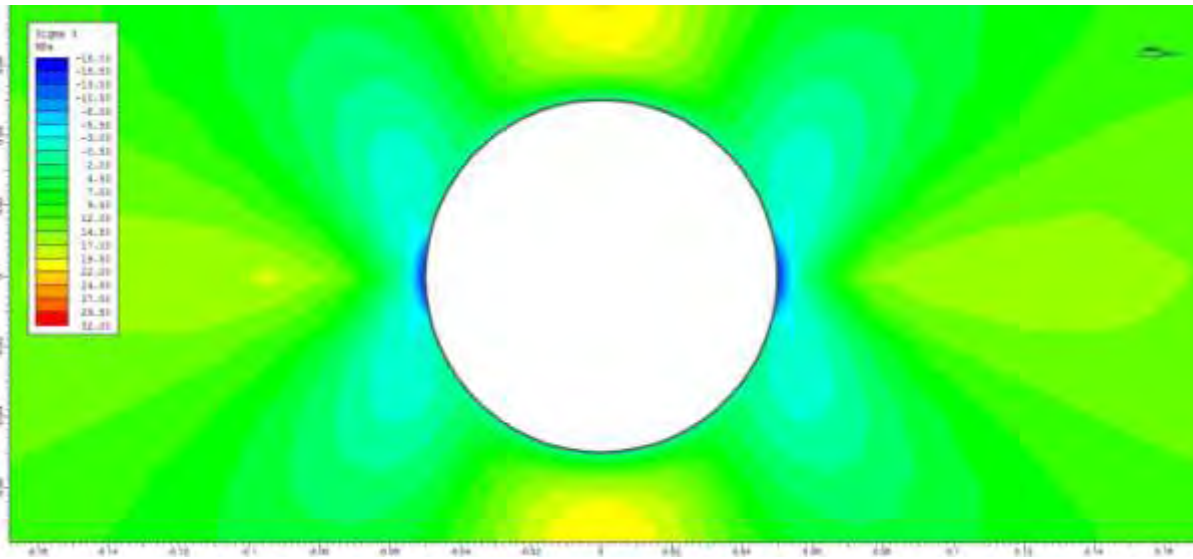
Σχήμα ΙΧ.16 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h = 12$  MPa,  $\sigma_H = 54$  MPa, και  $\sigma_v = 36$  MPa.



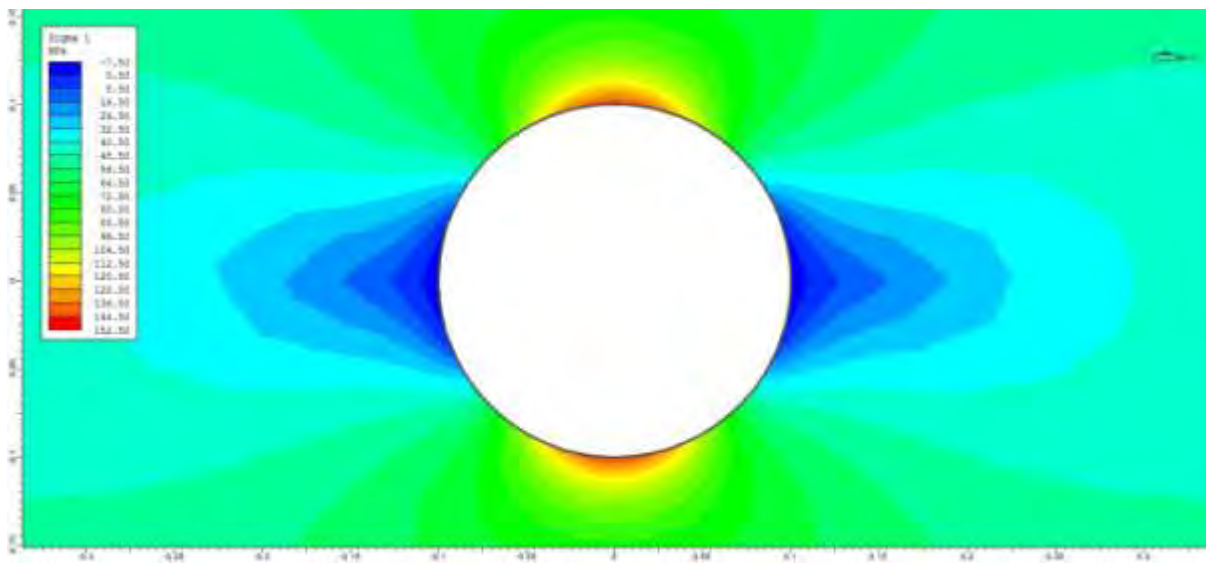
Σχήμα ΙΧ.17 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 1 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



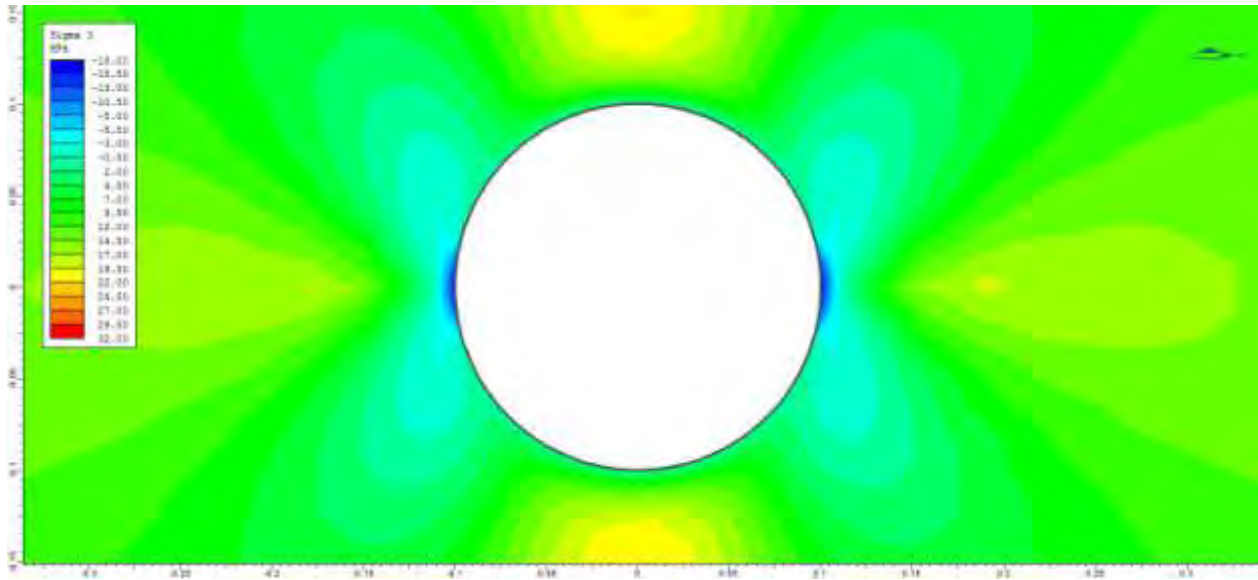
Σχήμα ΙΧ.18 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα ΙΧ.19 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 5 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα ΙΧ.20 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_1$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.



Σχήμα ΙΧ.21 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης για την τάση  $\sigma_3$  με τη χρήση του Phase, περιμετρικά της οπής, για γεώτρηση με ακτίνα οπής 10 cm στο Phase με τάσεις πεδίου  $\sigma_h=12$  MPa,  $\sigma_H=54$  MPa, και  $\sigma_v=36$  MPa.

## Χ. Βιβλιογραφία

- [1] I. Vardoulakis και E. Papamichos , «Surface Instabilities in Elastic Anisotropic Media with Surface-parallel Griffith Cracks,» *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* , τόμ. 28, αρ. 2/3, pp. 163-173, 1919.
- [2] I. Paraschiv-Munteanu και N. D. Cristescu, «Stress relaxation during creep of rocks around deep boreholes,» *International Journal of Engineering Science*, τόμ. 39, αρ. 7, pp. 737-754, May 2001.
- [3] G. T. Efreimidis, J. Ning, G. E. Exadaktylos και E. C. Aifantis, «Gradient Elasticity and Size Effects,» σε *5th National Congress on Mechanics*, 1998.
- [4] Σ. Σταματάκη, «Υλικό από τις διαλέξεις που δίδονται στα πλαίσια του μαθήματος "Μεταλλευτική Έρευνα" του 4ου εξαμήνου,» Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων -Μεταλλουργών, 2006.
- [5] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sakhalin-I>. [Πρόσβαση 2 11 2017].
- [6] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kola\\_Superdeep\\_Borehole](https://en.wikipedia.org/wiki/Kola_Superdeep_Borehole). [Πρόσβαση 2 11 2017].
- [7] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Measured\\_depth](https://en.wikipedia.org/wiki/Measured_depth). [Πρόσβαση 2 11 2017].
- [8] «Exploration Production Services,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://exploration-production-services.de/en/home.html>. [Πρόσβαση 27 2 2017].
- [9] J. Beswick, «Status of Technology For Deep Borehole Disposal,» April 2008.
- [10] B. Aadnøy και L. Reza , *Petroleum Rock Mechanics*, Boston: Gulf Professional Publishing, 2011, pp. 121-172.
- [11] M. Tianshou , P. Chen, C. Yang και J. Zhao, «Wellbore stability analysis and well path optimization based on the breakout width model and Mogi-Coulomb criterion,» *ournal of Petroleum Science and Engineering*, τόμ. 135, 01 10 2015.
- [12] K. M. Abbas, H. Jalalifar και M. Aslannejad, Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods, τόμ. 4, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, pp. 359-369.
- [13] M. Tingay, J. Reinecker και B. Muller , «Borehole breaout and drilling-induced fracture analysis from image logs,» *World Stress Map Project*, 2008.
- [14] Z. Zheng , J. Kemeny και N. G. Cook, «Analysis of Borehole Breakouts,» *Journal of Geophysical Research*, τόμ. 94, αρ. B6, pp. 7171-7182, 1989.
- [15] R. D. Schmitt, C. A. Currie και L. Zhang, «Crustal stress determination from boreholes and rock holes: Fundamental Principles,» *Tectonophysics* , αρ. 580, pp. 1-26, 2012.
- [16] M. D. Zoback, D. Moos, L. Mastin και R. N. Anderson , «Well Bore Breakouts and in Situ Stress,» *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, τόμ. 90, αρ. B7, pp. 2156-2202, 1985.
- [17] N. R. Council, *Drilling and Excavation Technologies for the Future.*, Washington, DC: The National Academies Press., 1994.

- [18] B. C. Haimson, «Fracture-like borehole breakouts in high-porosity sandstone: Are they caused by compaction bands?,» *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, τόμ. 26, αρ. 1, pp. 15-20, 2001.
- [19] L. N. Germanovich και A. V. Dyskin, «Fracture mechanisms and instability of openings in compression,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, τόμ. 37, pp. 263-284, 2000.
- [20] G. Tokar, «Experimental Analysis of the Elasto-Plastic Zone Surrounding a borehole in a specimen of rock like material under multiaxial pressure,» *Engineering Fracture Mechanics*, τόμ. 35, αρ. 4/5, pp. 879-887, 1990.
- [21] B. Aadnøy, Inversion technique to determine the in-situ stress field from fracturing data, τόμ. 4, *J. Pet. Sci. Eng.*, 1990, pp. 127-141.
- [22] R. Hillis και S. D. Reynolds, «The Australian Stress Map,» *J. Geol. Soc.*, τόμ. 157, pp. 915-921, 2000.
- [23] E. Fjaer, R. M. Holt, P. Horsrud, A. M. Raaen και R. Risnes, «Stresses around boreholes. Borehole failure criteria,» σε *Developments in Petroleum Science*, τόμ. 53, Elsevier, 2008, pp. 135-174.
- [24] S. Grandi, R. Rama και N. M. Toksoz, «Geomechanical Modeling of In-Situ Stresses Around a Borehole,» Cambridge, 2002.
- [25] J. B. Cheatham , «A new hypothesis to explain stability of borehole breakouts,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, τόμ. 30, αρ. 7, pp. 1095-1101, 1993.
- [26] G. E. Exadaktylos, P. A. Liolios και M. C. Stavropoulou, «A semi-analytical elastic stress-displacement solution for notched circular openings in rocks,» *International Journal of Solids and Structures*, τόμ. 40, αρ. 5, pp. 1165-1187, March 2003.
- [27] M. Ostadhassan , S. Benson, S. Zamiran και B. Bubach, «Stress Analysis and Wellbore Stability in Unconventional Reservoirs,» *Americal Rock Mechanics Association*, 1 January 2013.
- [28] M. F. Kanfar , Z. Chen και S. S. Rahman, «Risk-controlled wellbore stability analysis in anisotropic formations,» *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015.
- [29] I. Vardoulakis και P. Papanastasiou , «Bifurcation analysis of deep boreholes I. Surface Instabilities,» *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, τόμ. 12, pp. 379-399, 1988.
- [30] I. Vardoulakis, J. Sulem και A. Guenot, «Borehole Instabilities as Bifurcation Phenomena,» *Int. J. Rock. Min. Sci. & Geomech. Abst.* , τόμ. 25, αρ. 3, pp. 159-170, 1988.
- [31] P. Papanastasiou και I. Vardoulakis, «Bifurcation analysis of deep boreholes II. Scale effect,» *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, τόμ. 13, pp. 183-198, 1989.
- [32] G. T. Efremidis και E. C. Aifantis, «Gradient Elasticity and size effects in borehole breakouts: An application of Ru-Aifantis theorem,» *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, τόμ. 15, pp. 279-289, 2004.

- [33] G. Frantziskonis, F. F. Tang και C. S. Desai, «Borehole scale effects and related instabilities,» *Engineering Fracture Mechanis*, τόμ. 39, αρ. 2, pp. 377-389, 1991.
- [34] B. C. Haimson και I. Song, «Laboratory Study of borehole breakouts in Cordova Cream: a case of shear failure mechanism,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, τόμ. 30, αρ. 7, pp. 1047-1056, 1993.
- [35] M. B. Lee και B. Haimson, «Laboratory study of borehole breakouts in Lac Du Bonnet granite: a case of extensile failure mechanism,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, τόμ. 30, αρ. 7, pp. 1039-1045, December 1993.
- [36] T. Meier, E. Rybacki, A. Reinicke και G. Dresen, «Influence of borehole diameter on the formation of borehole breakouts in black shale,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, τόμ. 62, pp. 74-85, September 2013.
- [37] S. S. Hashemi, N. Melkounian και A. Taheri, «A borehole stability study by newly designed laboratory tests on thick-walled hollow cylinders,» *Journal of Rock Mechanis and Geotechnical Engineering*, τόμ. 7, αρ. 5, pp. 519-531, October 2015.
- [38] E. T. Brown και E. Hoek, «Trends in Relationships between Measured In-Situ Stresses and Depth,» *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, τόμ. 15, pp. 211-215, 1978.
- [39] K. Terzaghi, «Measurement of Stresses in Rock,» *Geotechniquir*, τόμ. 12, αρ. 2, pp. 105-124, June 1962.
- [40] W. R. McCutchen, «Some Elements of a Theory for In-situ Stress,» *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr.*, τόμ. 19, pp. 201-203, 1982.
- [41] C. D. Martin, *The Strength of Massive Lac du Bonnet Granite Around Underground Openings*, Winnipeg, Manitoba: Department of Civil & Geological Engineering, 1993.
- [42] B. Aadnøy και J. S. Bell, *Classification of Drilling-induced Fractures And Their Relationship To In-situ Stress Directions*, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1998.
- [43] J. S. Bell και D. I. Gough, «The use of borehole breakouts in the study of crustal stress,» *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, pp. 82-1075, 539- 557, 1982.
- [44] D. Gough και J. S. Bell, «Stress orientation from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada,» *Can. J. Earth. Sci.*, τόμ. 19, pp. 1358-1370, 1982.
- [45] D. I. Gough και J. S. Bell, «Stress orientations from oil well fracture in Alberta and Texas,» *Can. J. Earth Sci.*, αρ. 18, pp. 638-645, 1981.
- [46] T. G. Tokar, «Zone Surrounding a borehole in a specimen of rock-like material under multiaxial pressure,» *Engineering Fracture Mechanis*, τόμ. 35, αρ. 4/5, pp. 879-887, 1990.
- [47] B. C. Haimson και C. G. Herick, «Borehole breakouts and in situ stress.,» 1989.