

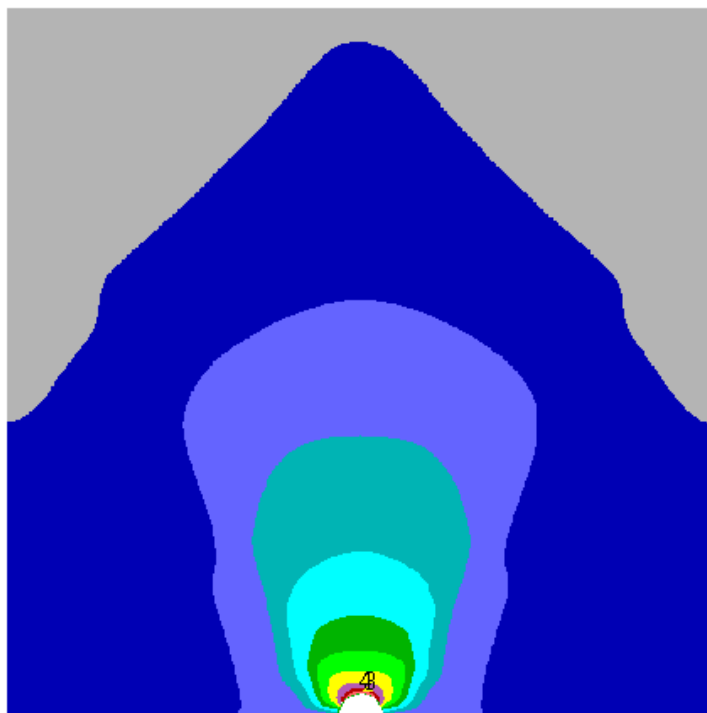


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

---

**Διπλωματική Εργασία**

**Διερεύνηση της Συσχέτισης των Μηχανικών  
Ιδιοτήτων του Πετρώματος και των Δεικτών  
Ταξινόμησης, με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών**



---

**ΓΚΟΓΚΙΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ**

**ΧΑΝΙΑ, Ιούνιος 2004**

---

ΓΚΟΓΚΙΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση της Συσχέτισης Μεταξύ των Μηχανικών  
Ιδιοτήτων του Πετρώματος και των Δεικτών  
Ταξινόμησης, με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών

*Εξεταστική επιτροπή:*

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| Καθηγητής     | Ζ. Αγιουτάντης (Επιβλέπων) |
| Καθηγητής     | Γ. Εξαδάκτυλος             |
| Αν. Καθηγητής | Κ. Κομνίτσας               |

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, μέσω του λογισμικού FLAC, σε μη γραμμικά προβλήματα μελέτης και κατασκευής σήραγγων. Η μη γραμμική συμπεριφορά σχετίζεται με τα περισσότερα υλικά στη φύση και ιδιαίτερα με τα γεωυλικά: πετρώματα και εδάφη.

Για τη μελέτη της περίπτωσης κατασκευάστηκαν μοντέλα για τρεις σήραγγες με διαμέτρους 6.5, 3.0 και 1.85 m αντίστοιχα. Για το περιβάλλον υλικό επιλέχθηκε τιμή RMR 40. Με βάση την τιμή αυτή και τις εμπειρικές εξισώσεις του Bieniawski υπολογίστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του.

Για την επίλυση στο πρόγραμμα FLAC, η συμπεριφορά του υλικού θεωρήθηκε ότι ανταποκρίνεται στο μοντέλο Mohr – Coulomb, ενώ η παράμετρος του χρόνου εισήχθη στο πρόβλημα μετά από ενεργοποίηση παραμέτρων ερπυσμού (creep), με το αντίστοιχο μοντέλο Burger. Η επίλυση έγινε για χρονική διάρκεια 10, 100 και 1000 ωρών.

Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων κοντά στη στέψη της σήραγγας, με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που προέβλεψε εμπειρικά ο Unal για περίπτωση ίδιου πετρώματος και ίδιας διατομής ανοίγματα. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε:

- Οι μετατοπίσεις ως προς το χρόνο έχουν την ίδια μορφή, τόσο στο εμπειρικό όσο και στο αριθμητικό διάγραμμα. Αυτό ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις
- Και στα δυο η μετατόπιση είναι ανάλογη του μεγέθους του ανοίγματος και του χρόνου επιβολής της φόρτισης
- Υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις εμπειρικές και τις αριθμητικές τιμές. Έτσι, οι αριθμητικές καμπύλες για τις σήραγγες των 3.0 και 1.85m δίνουν λίγο μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το εμπειρικό, ενώ αντίθετα για την εκσκαφή των 6.5m λίγο μεγαλύτερες

## **Πρόλογος**

### **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την έμπνευση και την αμέριστη συμπαράσταση του Καθηγητή Κυρίου Ζ. Αγιουτάντη, ο οποίος συμπαραστάθηκε με τις συμβουλές του αλλά και τον ελεύθερο χρόνο του στην ανάπτυξη του θέματος, στις δυσκολίες που προέκυψαν κατά της διάρκεια της εργασίας αλλά και με τον πολύτιμο χρόνο του στην ανάπτυξη του θέματος και στη δόμηση της τελικής εργασίας.

Ευχαριστίες επίσης αρμόζουν στους Καθηγητές Γ. Εξαδάκτυλο και Κ. Κομνίτσα, για το χρόνο που διέθεσαν στη διόρθωση και εξέταση της παρούσας εργασίας.

Χανιά, Ιούνιος 2004

Δ.Γ. Γκογκίδου

## Περιεχόμενα

|   |               |
|---|---------------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή.....</b>  | <b>1</b>      |
| 1.1 Γενικά.....   | 1             |
| 1.2 Σημασία των όρων Έδαφος και Πέτρωμα για τους μηχανικούς.....  | 4             |
| 1.3 Η θεώρηση του ασυνεχούς πετρώματος.....   | 4             |
| 1.4 Η ανάγκη σύνδεσης των μηχανικών παραμέτρων με τους δείκτες ταξινόμησης.....   | 7             |
| 1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....  | 9             |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης προβλημάτων ευστάθειας -<br/>Συστήματα ταξινόμησης<br/>πετρωμάτων.....</b> | <br><b>11</b> |
| 2.1 Γενικά.....   | 11            |
| 2.2 Το σύστημα ταξινόμησης των φορτίων στο πέτρωμα.....   | 13            |
| 2.3 Το σύστημα ταξινόμησης των Stini και Lauffer.....   | 14            |
| 2.4 Ο δείκτης ταξινόμησης RQD.....  | 16            |
| 2.5 Η ταξινόμηση κατά Franklin.....   | 18            |
| 2.6 Η ταξινόμηση RSR.....   | 18            |
| 2.7 Το σύστημα Γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR.....  | 22            |
| 2.7.1 Εφαρμογές.....  | 26            |
| 2.7.2 Συσχέτιση συστημάτων ταξινόμησης.....   | 29            |
| 2.8 Η Ταξινόμηση NGI ή Σύστημα Q.....   | 29            |
| 2.9 Το σύστημα GSI.....   | 36            |
| 2.9.1 Συσχέτιση της τιμής GSI και των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr –<br>Coulomb.....   | 37            |
| 2.9.2 Μέτρο παραμορφωσιμότητας.....   | 38            |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της ευστάθειας υπογείων<br/>ανοιγμάτων.....</b>                          | <br><b>4</b>  |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 3.1   | Επί τόπου εντατικό πεδίο.....   | 45        |
| 3.2   | Εντατικό πεδίο γύρω από κυκλικά ανοίγματα.....                              | 47        |
| 3.2.1   | Τάσεις στα όρια της εκσκαφής.....   | 49        |
| 3.2.2   | Κύριες τάσεις γύρω από κυκλικό άνοιγμα.....                                 | 51        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Αντοχή και αστοχία του πετρώματος.....</b>   |   | <b>55</b> |
| 4.1   | Η ελαστική συμπεριφορά.....   | 55        |
| 4.1.1   | Η ελαστική συμπεριφορά σε μία διάσταση.....                                 | 56        |
| 4.1.2   | Η ελαστική συμπεριφορά σε δύο διαστάσεις.....                               | 56        |
| 4.1.2.1   | Η παραδοχή της επίπεδης τάσης.....  | 57        |
| 4.1.2.2   | Η παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης.....                                   | 58        |
| 4.1.3   | Η ελαστική συμπεριφορά σε τρεις διαστάσεις.....                             | 59        |
| 4.2   | Η πλαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά.....                              | 60        |
| 4.3   | Η βισκοελαστική συμπεριφορά.....  | 61        |
| 4.3.1   | Το μοντέλο Burger.....  | 62        |
| 4.4   | Συναρτήσεις ορίων διαρροής.....   | 62        |
| 4.4.1   | Τα κριτήρια διαρροής Tresca και Von Mises.....                              | 62        |
| 4.4.2   | Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....                                    | 63        |
| 4.4.3   | Το κριτήριο Hoek – Brown.....   | 66        |
| 4.4.4   | Το κριτήριο διαρροής Drucker – Prager.....                                  | 67        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών – Καταστατικά μοντέλα στο λογισμικό FLAC.....</b> |   | <b>69</b> |
| 5.1   | Γενικά.....   | 69        |
| 5.2   | Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.....                                    | 69        |
| 5.3   | Οι πεπερασμένες διαφορές.....   | 70        |
| 5.3.1   | Οι κόμβοι και ο κানাβος των πεπερασμένων διαφορών.....                      | 70        |
| 5.3.2   | Η έννοια των πεπερασμένων διαφορών.....                                     | 71        |
| 5.4   | Εφαρμογή της μεθόδου σε γεωτεχνικά προβλήματα μέσω του λογισμικού FLAC..... | 72        |
| 5.4.1   | Η ‘άμεση’ μέθοδος της χρονικής αλληλουχίας των πεπερασμένων διαφορών.....   | 73        |
| 5.4.2   | Η διαδικασία επίλυσης.....  | 74        |
| 5.5   | Το λογισμικό FLAC.....  | 76        |
| 5.6   | Τα καταστατικά μοντέλα του FLAC.....  | 82        |

|       |                               |    |
|-------|-------------------------------|----|
| 5.5.1 | Ομάδα μηδενικών μοντέλων..... | 82 |
| 5.5.2 | Ομάδα ελαστικών μοντέλων..... | 82 |
| 5.5.3 | Ομάδα πλαστικών μοντέλων..... | 83 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Μοντελοποίηση κυκλικής εκσκαφής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.....85**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 6.1 | Η δημιουργία του αρχικού κανάβου.....                            | 85 |
| 6.2 | Η δημιουργία της εκσκαφής.....                                   | 86 |
| 6.3 | Ορισμός των παραμέτρων του περιβάλλοντος πετρώματος.....         | 87 |
| 6.4 | Καθορισμός των συνοριακών συνθηκών και φόρτιση του μοντέλου..... | 89 |
| 6.5 | Η εντολή ‘Creep’.....  | 90 |
| 6.6 | Η δυνατότητες της εντολής ‘Utility’.....                         | 93 |
| 6.7 | Η επίλυση των μοντέλων.....                                      | 94 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....95**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1   | Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 6.5m.....          | 95  |
| 7.1.1 | Μεταβολή της μετατόπισης.....                     | 95  |
| 7.1.2 | Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης.....               | 97  |
| 7.1.3 | Μεταβολή της οριζόντιας τάσης.....                | 97  |
| 7.2   | Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 3.0m.....          | 100 |
| 7.2.1 | Μεταβολή της μετατόπισης.....                     | 100 |
| 7.2.2 | Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης.....               | 100 |
| 7.2.3 | Μεταβολή της οριζόντιας τάσης.....                | 102 |
| 7.3   | Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 1.85m.....         | 103 |
| 7.3.1 | Μεταβολή της μετατόπισης.....                     | 103 |
| 7.3.2 | Μεταβολή της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση..... | 105 |
| 7.4   | Σύγκριση εμπειρικής και αριθμητικής μεθόδου.....  | 106 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις.....109**

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>   | <b>112</b> |
| Διεθνής βιβλιογραφία.....  | 112        |
| Ελληνική βιβλιογραφία..... | 115        |



## **Κεφάλαιο 1**

### **Εισαγωγή**

#### **1.1 Γενικά**

‘Με τον όρο Μηχανική Πετρωμάτων ή Βραχομηχανική εννοούμε τη θεωρητική και εφαρμοσμένη επιστήμη, αντικείμενο της οποίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, τόσο στο περιβάλλον τους όσο και εργαστηριακά, υπό την επίδραση διαφόρων εντατικών καταστάσεων.’ (Αγιουτάντης, 2002).

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί σημαντική ανάπτυξη στον τομέα κατασκευής υπογείων έργων, ιδιαίτερα στις μεγαλουπόλεις όπου το πρόβλημα χώρου είναι εντονότερο και η χρήση γης περιορισμένη. Τα υπόγεια έργα και κυρίως οι σήραγγες εξυπηρετούν τα οχήματα και άλλα μέσα μαζικής μεταφοράς, στην ύδρευση, άρδευση και αποχέτευση, κλπ. Συχνή είναι επίσης η χρήση σηράγγων σε τοποθεσίες εκτός πόλεων, προκειμένου να παρακαμφθούν ορεινοί όγκοι και ποτάμιες περιοχές

Η κατασκευή σηράγγων παρουσιάζεται από πολύ νωρίς στην ιστορία του ανθρώπου. Η πολυπλοκότητα όμως του έργου και η ιδιαιτερότητα των εδαφών και των πετρωμάτων που τη ‘φιλοξενούν’, καθιστά τη διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη. Πρόσφατα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, της τεχνογνωσίας και των υπολογιστικών μεθόδων, η κατασκευή υπογείου ανοίγματος είναι εφικτή σε οποιοδήποτε έδαφος και πέτρωμα. Σε περιοχές με ασθενή εδάφη, που παρουσιάζουν την πιθανότητα κατάρρευσης ή καθίζησης, η γεωτεχνική μελέτη είναι απαραίτητη.

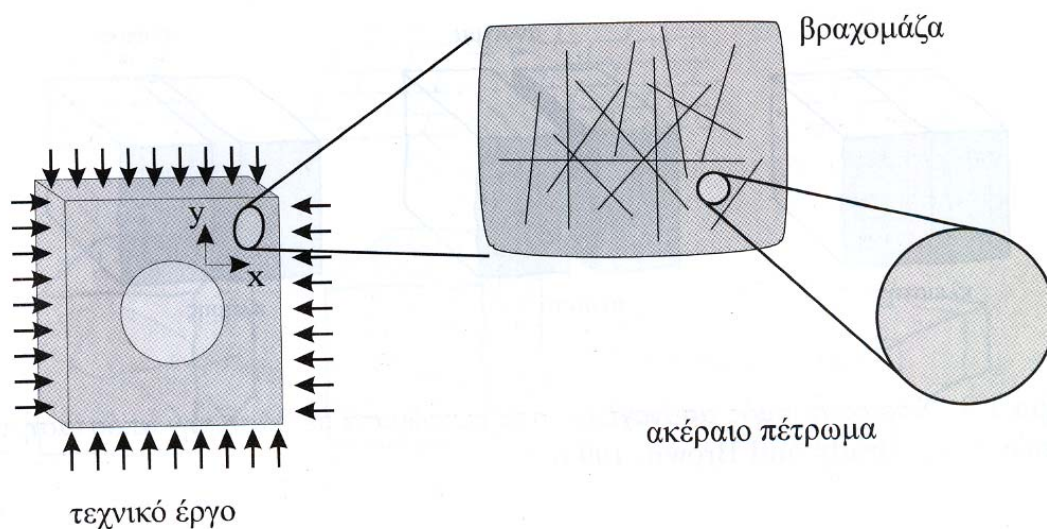
Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι ανάλυσης και μελέτης της ευστάθειας ενός υπογείου ανοίγματος. Ο εμπειρικός, ο αναλυτικός και ο αριθμητικός. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται σε παρατηρήσεις κατά την κατασκευή παρόμοιων τεχνικών έργων σε διαφορετικά εδάφη. Κατά τη διαδικασία αυτή προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των ανοιγμάτων σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, καθώς και τη συμπεριφορά των διαφόρων τύπων υποστήριξης ως προς τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν.

Βασικό μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι η ακρίβειά τους. Η ποικιλομορφία και η διαφορετικότητα των φυσικών πετρωμάτων ως προς τη συμπεριφορά και τις μηχανικές ιδιότητες (Σχήμα 1.1), καθιστά σχεδόν αδύνατη την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του έργου. Συγκεκριμένα οι εμπειρικές μέθοδοι:



Σχήμα 1.1: Η ασυνεχής φύση των πετρωμάτων (Hoek, 2000)

- Δεν μπορούν να δώσουν σαφή στοιχεία για τη κάθε περιοχή μελέτης
- Κατά το σχεδιασμό σηράγγων απαιτείται η χρήση μεγάλων συντελεστών ασφαλείας ώστε να συμπεριληφθούν τυχόν παραλήψεις και άγνωστες παράμετροι που αφορούν την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 1.2: Διαφορά βραχομάζας και ακεραίου πετρώματος

Οι αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται στην επίλυση μαθηματικών σχέσεων, που μπορούν να αποδώσουν τις τάσεις και παραμορφώσεις σε κάθε σημείο, για δεδομένη περιοχή και με μεγάλη ακρίβεια. Το πρόβλημα εδώ είναι οι πολλαπλές παραδοχές που γίνονται ως προς τη συμπεριφορά των πετρωμάτων και της βραχομάζας (Σχήμα 1.2) και αυτό γιατί οι εξισώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υπεραπλουστευμένα προβλήματα. Όταν η γεωμετρία του ανοίγματος είναι πολύπλοκη και οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής περίπλοκες, η μέθοδος αυτή δεν εξυπηρετεί. Έτσι βρίσκουν εφαρμογή σε πολύ μικρό ποσοστό προβλημάτων.

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που έλαβε χώρα τα τελευταία χρόνια, συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων. Η χρήση ηλ. υπολογιστή είναι απαραίτητη λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού των μαθηματικών σχέσεων που πρέπει να επιλυθούν κατά τη διαδικασία και του όγκου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Οι μέθοδοι αυτές θεωρούν το μέσο είτε ως συνεχές (πεπερασμένα στοιχεία – finite elements, πεπερασμένες διαφορές – finite differences, συνοριακά στοιχεία – boundary elements), είτε ως ασυνεχές (διακριτά στοιχεία – block elements).

## **1.2 Σημασία των όρων Έδαφος και Πέτρωμα για τους μηχανικούς**

Τα εδάφη συγκροτούνται από στερεά σωματίδια ορυκτών, ανάμεσα στα οποία υπάρχουν κενά. Τα κενά αυτά μπορεί να πληρούνται από νερό (κορεσμένα) ή αέρα (ακόρεστα). Τα εδάφη είναι χαλαροί σχηματισμοί και διακρίνονται σε συνεκτικά (άργιλος) και μη συνεκτικά (άμμος).

Αντίθετα τα πετρώματα είναι υλικά ανομοιογενή, ανισότροπα, με ποικίλη χημική σύσταση, που χαρακτηρίζονται από συνέχεια και σκληρότητα. Αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο το μηχανικό είναι η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος, γι' αυτό είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός της αντοχής του στις καταπονήσεις, των ελαστικών σταθερών του, του πορώδους, κλπ.

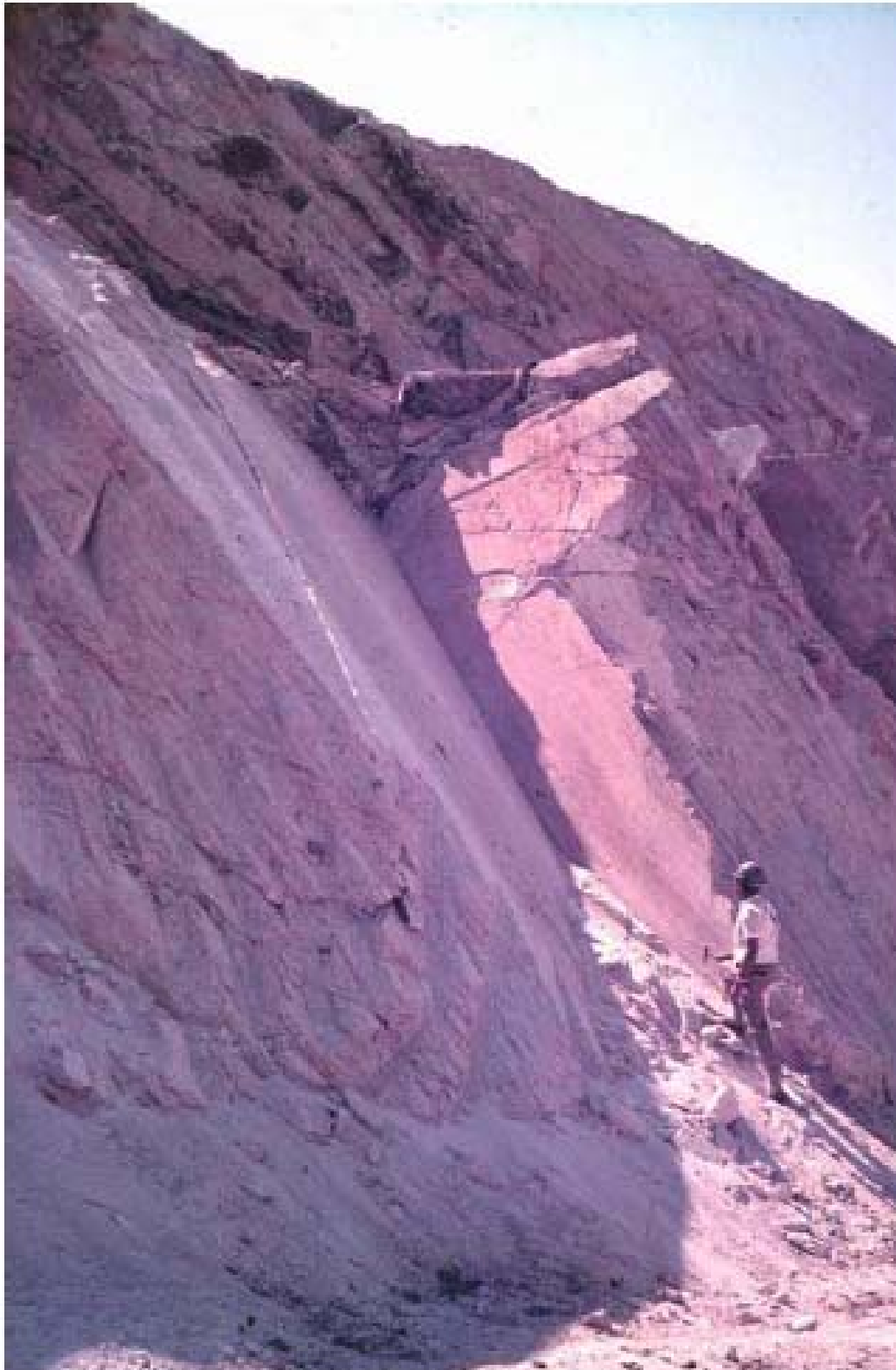
Όπως είναι αναμενόμενο, τα πετρώματα που βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον, δεν μπορεί να είναι τέλεια. Οι ατέλειες που παρουσιάζουν στη δομή τους μπορεί να οφείλονται σε ενδογενείς ή εξωγενείς παράγοντες, όπως φυσικοχημικές διεργασίες, εντατικά πεδία ή καιρικά φαινόμενα (διάβρωση και αποσάθρωση) και επηρεάζουν αποφασιστικά τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος. Αυτό γίνεται με τη δημιουργία ρωγμών, ασυνεχειών ή με τη μεταβολή του ιστού τους. Έτσι διαφορετική αναμένεται η συμπεριφορά π.χ. των ιζηματογενών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Συχνά δε το επιφανειακό τμήμα αυτών έχει υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες. Το σχήμα 1.3 δείχνει την αστοχία μιας σφήνας πετρώματος σε λατομείο ανοιχτής εκμετάλλευσης, η οποία προκλήθηκε από αλληλοτεταμένης ασυνέχειες στο πέτρωμα.

Ο όρος ασυνέχεια σημαίνει τη 'μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρή ή αμελητέα αντοχή σε εφελκυσμό.' (Αγιουτάντης, 2002). Σ' αυτόν δεν περιλαμβάνονται πληροφορίες για τον τρόπο δημιουργίας

της ασυνέχειας, την ηλικία και τη μορφή της. Οι ασυνέχειες μπορεί να δημιουργηθούν είτε με φυσικό τρόπο είτε κατά τη διάρκεια μεταλλευτικών και άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Αν και σε γενικές γραμμές οι γεωμετρία τους είναι ακανόνιστη, μπορεί σε πολλές περιπτώσεις μέρος αυτής ή ολόκληρη, να παρασταθεί από ένα επίπεδο με συγκεκριμένη γωνία κλίσης στο επίπεδο ή διεύθυνση και γωνία κλίσης στο χώρο.

## **1.3 Η θεώρηση του ασυνεχούς πετρώματος**

Ο γενικός όρος ασυνέχειες (discontinuities) περιγράφει όλα τα επίπεδα αδυναμίας, που σχετίζονται είτε με τη μηχανική διακοπή της συνέχειας του πετρώματος



Σχήμα 1.3: Αστοχία μιας σφήνας πετρώματος σε λατομείο ανοιχτής εκμετάλλευσης (Hoek, 2000)

είτε με τη μεταβολή της ομοιογένειας και της ισοτροπίας του. Οι ασυνέχειες μπορεί να είναι μακροσκοπικές (ορατές με γυμνό μάτι) ή μικροσκοπικές (ορατές με το μι-

κροσκόπιο) και μπορεί να οφείλονται:

- ο στις συνθήκες γένεσης του πετρώματος (σύσταση, ταχύτητα ψύξης του μάγματος, ύπαρξη πτητικών συστατικών, μεταβολή της σύστασης των ιζημάτων, κλπ.)
- ο σε δευτερογενείς τεκτονικές, βαρυτικές ή άλλου είδους καταπονήσεις
- ο σε φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές διεργασίες όπως διάβρωση και αποσάθρωση.

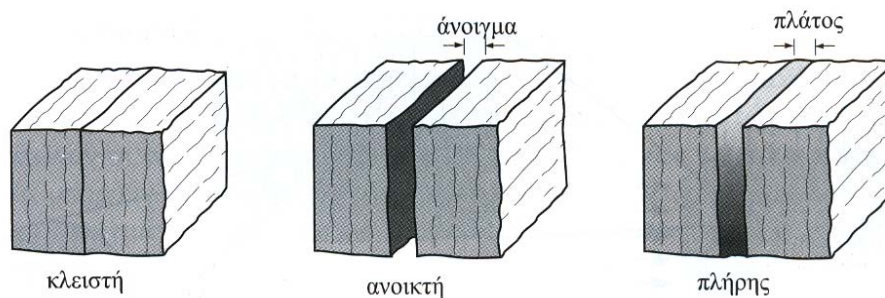
Συναντώνται διάφοροι τύποι ασυνεχειών όπως ρήγματα, διακλάσεις και κατακλάσεις, μικρορωγματώσεις, ασθενή επίπεδα διάστρωσης, ζώνες διάτμησης, σχισμός, κλπ.)

Το τμήμα του φυσικού υλικού συμπεριλαμβανομένων και των ατελειών του, όπως ασυνέχειες ή ύπαρξη νερού, ονομάζεται βραχόμαζα. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας σχετίζονται άμεσα με την ύπαρξη ασυνεχειών και τις ιδιότητες αυτών. Υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες οι αρχικές (πρωτογενείς) ιδιότητες μιας ασυνέχειας έχουν μεταβληθεί. Οι νέες αυτές ιδιότητες, (δευτερογενείς ή παραμένουσες) προκύπτουν συνήθως μετά από ολίσθηση των παρειών της ασυνέχειας, διεύρυνση ή πλήρωσή της. Βασικό χαρακτηριστικό των ασυνεχειών πάντως, ανεξάρτητα από τις μεταβολές που έχουν υποστεί, είναι η πολύ χαμηλή αντοχή τους σε εφελκυστικές και διατμητικές καταπονήσεις. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση των πληρωμένων ασυνεχειών, στις οποίες το υλικό πλήρωσης έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το ίδιο το πέτρωμα, π.χ. ασβεστίτης, χαλαζίας, πυρίτης.

Οι γεωμετρικές και φυσικές παράμετροι, που χαρακτηρίζουν μία ασυνέχεια, είναι οι ακόλουθες (Αγιουτάντης, 2002):

- Προσανατολισμός των ασυνεχειών στο χώρο (διεύθυνση και γωνία κλίσης)
- Την ύπαρξη ομάδων (συστημάτων) ασυνεχειών με τον ίδιο προσανατολισμό των επιφανειών αδυναμίας
- Τον τρόπο διάταξης, την έκταση και τη δομή των συστημάτων ασυνεχειών στο χώρο
- Την πυκνότητα των ασυνεχειών (αριθμός ασυνεχειών ανά μονάδα όγκου ή μήκους)
- Τον τύπο των παρειών των ασυνεχειών (λείες, αδρές, κλπ.)

Ανάλογα με τη γεωμετρία και το υλικό πλήρωσης τους, οι ασυνέχειες περιγράφονται ως ανοικτές, κλειστές και πληρωμένες με υλικό (Σχήμα 1.4). Σημαντικά για τις ανοιχτές ασυνέχειες είναι το μέγεθος του κενού μεταξύ των παρειών, για τις κλειστές η τραχύτητα των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και για τις πλήρεις, το υλικό πλήρωσης. Μεγάλη είναι τέλος η επίδραση του νερού που υπάρχει στα ανοίγματα των ασυνεχειών, στις μηχανικές ιδιότητες αυτών.



Σχήμα 1.4: Χαρακτηρισμός ασυνεχειών στα πετρώματα με βάση την απόσταση των παρειών τους (Brady and Brown, 1993)

Η εκτίμηση των ιδιοτήτων της βραχόμαζας μπορεί να γίνει άμεσα, μόνο με δοκιμές στο πεδίο. Η διαδικασία είναι γενικά πολύπλοκη και ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι εξειδικευμένος. Συνηθέστερος τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων αυτών είναι ο έμμεσος, κατά τον οποίο προσδιορίζονται στο εργαστήριο οι ιδιότητες του ακεραίου πετρώματος. Στη συνέχεια συνεκτιμώνται αυτές και οι παράμετροι των ασυνεχειών ή η ύπαρξη νερού και έτσι το αποτέλεσμα αφορά το σύνολο της μάζας του πετρώματος.

#### **1.4 Η ανάγκη σύνδεσης των μηχανικών παραμέτρων με τους δείκτες ταξινόμησης**

Για αιώνες τώρα, οι ταξινομήσεις έχουν παίξει ουσιαστικό ρόλο στα προβλήματα μηχανικής. Το πρώτο σύστημα ταξινόμησης αφορούσε το σχεδιασμό πλοίων και καθιερώθηκε το 1760.

Στη μηχανική πετρωμάτων, το πρώτο σημαντικό σύστημα ταξινόμησης προτάθηκε πριν 60 χρόνια από τον Terzaghi και ήταν σχετικό με την υποστήριξη σιδηρόδρομων με ατσάλινα πλαίσια (Terzaghi, 1946). Για πολλά χρόνια, τρεις ήταν οι βασικές προσεγγίσεις σχεδιασμού εκσκαφών στα πετρώματα στον τομέα των μεταλλείων και των πολιτικών μηχανικών – η αναλυτική, η εμπειρική και η μέθοδος παρατήρησης- Έτσι, η ταξινόμηση των πετρωμάτων αποτελεί σήμερα, ένα ολοκληρωμένο τμήμα του κύριου τρόπου σχεδιασμού, που είναι η χρήση εμπειρικών μεθόδων. Σε πολλές υπόγειες κατασκευές και μεταλλεία, η ταξινόμηση των πετρωμάτων ήταν η μόνη που παρείχε ουσιαστική βοήθεια για συστηματικό σχεδιασμό, απέναντι στην επισφαλή μέθοδο της ‘δοκιμής και σφάλματος’.

Ωστόσο, οι σύγχρονες μέθοδοι ταξινόμησης δεν θεωρήθηκαν ποτέ η απόλυτη λύση στα προβλήματα σχεδιασμού, αλλά μόνο ένα μέσο προς αυτήν. Στην πραγματι-

κότητα όταν άρχισαν οι συστηματικές εργασίες πάνω στα συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται σήμερα, οι δραστηριότητες κατασκευής σιηράγγων χαρακτηρίζονταν από περιορισμένη έρευνα στο πεδίο και ακόμη πιο περιορισμένες ή και καθόλου προσπάθειες σχεδιασμού. Έτσι τα συστήματα ταξινόμησης δημιουργήθηκαν για να βάλουν κάποια τάξη στο χάος που επικρατούσε σχετικά με τις έρευνες στο πεδίο και για να παρέχουν βοήθεια στο σχεδιασμό. Δεν είχαν δηλαδή σκοπό να αντικαταστήσουν τις αναλυτικές μελέτες, τις παρατηρήσεις και μετρήσεις στο πεδίο στο πεδίο ή την κρίση του μηχανικού.

Αντίθετα, θα πρέπει να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τις μεθόδους παρατήρησης και τις αναλυτικές μεθόδους, για το σχηματισμό μια ολοκληρωμένης θεώρησης, συμβατής με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού και της γεωλογία του πεδίου. Συγκεντρωτικά, οι αξιώσεις της ταξινόμησης των πετρωμάτων είναι (Bieniawski, 1989):

- ο Εντοπισμός των σημαντικότερων παραμέτρων καθορισμού της συμπεριφοράς της βραχώμαζας.
- ο Διαίρεση της βραχώμαζας σε τμήματα με παρόμοια συμπεριφορά.
- ο Παροχή βάσης για την κατανόηση των χαρακτηριστικών κάθε τάξης πετρώματος.
- ο Συσχέτιση της εμπειρίας που αποκτάται σε συγκεκριμένο γεωλογικό χώρο με τις συνθήκες που συναντώνται σε κάποια άλλη περιοχή.
- ο Παροχή ποσοτικών δεδομένων και κατευθυντήριων γραμμών για το μηχανικό σχεδιασμό.
- ο Παροχή κοινής βάσης για την επικοινωνία μεταξύ των μηχανικών και των γεωλόγων.

Τα τρία βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων ταξινόμησης είναι τα ακόλουθα (Bieniawski, 1989):

- ο Η βελτίωση της ποιότητας των ερευνών που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο, απαιτώντας μόνο τα ελάχιστα δυνατά δομένα, σαν παραμέτρους ταξινόμησης.
- ο Παροχή ποσοτικών πληροφοριών που βοηθούν στο σχεδιασμό.
- ο Υποβοήθηση της σωστής κρίσης από τους μηχανικούς και της καλύτερης επικοινωνίας μεταξύ των επιστημονικών ομάδων, κατά την κατασκευή ενός έργου.

## **1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας**

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, μέσω του λογισμικού FLAC, σε μη γραμμικά προβλήματα μελέτης και κατασκευής σιράγγων. Η μη γραμμική συμπεριφορά σχετίζεται με τα περισσότερα υλικά στη φύση και ιδιαίτερα με τα γεωυλικά: πετρώματα και εδάφη.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες γενικές εισαγωγικές έννοιες σχετικά με το πέτρωμα και τη βραχώμαζα και τονίζεται η σημασία των υπογείων κατασκευών στον ανθρώπινο πολιτισμό. Στη συνέχεια απαριθμούνται οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της συμπεριφοράς και της ευστάθειας μίας υπόγειας εκσκαφής και διευκρινίζεται ο ρόλος των εμπειρικών μεθόδων και των συστημάτων ταξινόμησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής περιγραφή των εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας, από την πρώτη εμφάνισή τους μέχρι και σήμερα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα σύγχρονα συστήματα ταξινόμησης, όπως αυτά των Bieniawski, Barton και Hoek. Επίσης γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης της συσχέτισης της τιμής του δείκτη ταξινόμησης ενός πετρώματος με τις ιδιότητές του, αλλά και των συστημάτων ταξινόμησης μεταξύ τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο επεξηγείται η προέλευση και οι ιδιότητες του εντατικού πεδίου στο υπέδαφος, καθώς και τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται σε αυτό, μετά τη δημιουργία υπογείων ανοιγμάτων. Περιγράφεται επίσης η μορφή που έχει το εντατικό πεδίο πριν και μετά τη δημιουργία της εκσκαφής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς σε μία, δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα και αναφέρονται οι παραδοχές που γίνονται ως προς το υλικό και τις ιδιότητές του, σε κάθε περίπτωση. Γίνεται επίσης αναφορά στην πλαστική και βισκώδη συμπεριφορά. Τέλος αναφέρονται και επεξηγούνται τα συνηθέστερα κριτήρια αστοχίας και τι εκφράζουν αυτά.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και τον τρόπο που αυτή εφαρμόζεται μέσω του λογισμικού FLAC. Γίνεται μια σύγκριση της μεθόδου αυτής με άλλες αριθμητικές μεθόδους καθώς και των διαφόρων αλγορίθμων της ίδιας της μεθόδου, μεταξύ τους. Ακολουθεί ο τρόπος κατασκευής ενός μοντέλου στο FLAC και γίνεται γνωριμία με την ορολογία που χρησιμοποιεί. Εν τέλει, γίνεται ταξινόμηση των μοντέλων αστοχίας που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα

ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού και τις περιπτώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν.

Το πρακτικό μέρος της εργασίας εμφανίζεται στο κεφάλαιο έξι. Εκεί παρουσιάζονται οι ενέργειες που έγιναν προκειμένου να κατασκευαστούν τα μοντέλα των τριών σηράγγων, οι εντολές που επιλέχθηκαν και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εργασίας που εκπονήθηκε (επίλυση των μοντέλων των σηράγγων). Παρατίθενται τα διαγράμματα των μετατοπίσεων και των τάσεων που προέκυψαν ανάλογα με τη διάμετρο του ανοίγματος και τη χρονική διάρκεια της φόρτισης. Ακολουθεί συγκεντρωτική παρουσίαση των τιμών των μετατοπίσεων και απεικόνιση σε κοινό διάγραμμα, αυτών και των αντίστοιχων εμπειρικών τιμών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση προβλημάτων, που σχετίζονται με τη μελέτη ευστάθειας υπογείων ανοιγμάτων.

## **Κεφάλαιο 2**

# **Εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης προβλημάτων ευστάθειας - Συστήματα ταξινόμησης πετρωμάτων**

## **2.1 Γενικά**

Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας είναι συχνά πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Μια απόπειρα αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού ήταν η ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων ταξινόμησης των πετρωμάτων ανάλογα με τα φυσικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά τους. Τέτοια συστήματα βασίζονται σε εμπειρικές παρατηρήσεις και μπορούν να συσχετιστούν ποιοτικά άλλα και ποσοτικά με τις μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση των ιδιοτήτων είναι η πετρολογική υφή των πετρωμάτων, η διάστρωσή τους, η ύπαρξη και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών η δυνατότητα παραλαβής φορτίων και ο τρόπος παραμόρφωσης τους (Αγιουτάνης, 2002). Τα συστήματα ταξινόμησης μπορεί να αναφέρονται στο ακέραιο πέτρωμα ή στη βραχώμαζα. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης στον κόσμο.

Οι βασικότεροι στόχοι στην επίτευξη των οποίων στοχεύουν τα συστήματα ταξινόμησης είναι (Bieniawski, 1984):

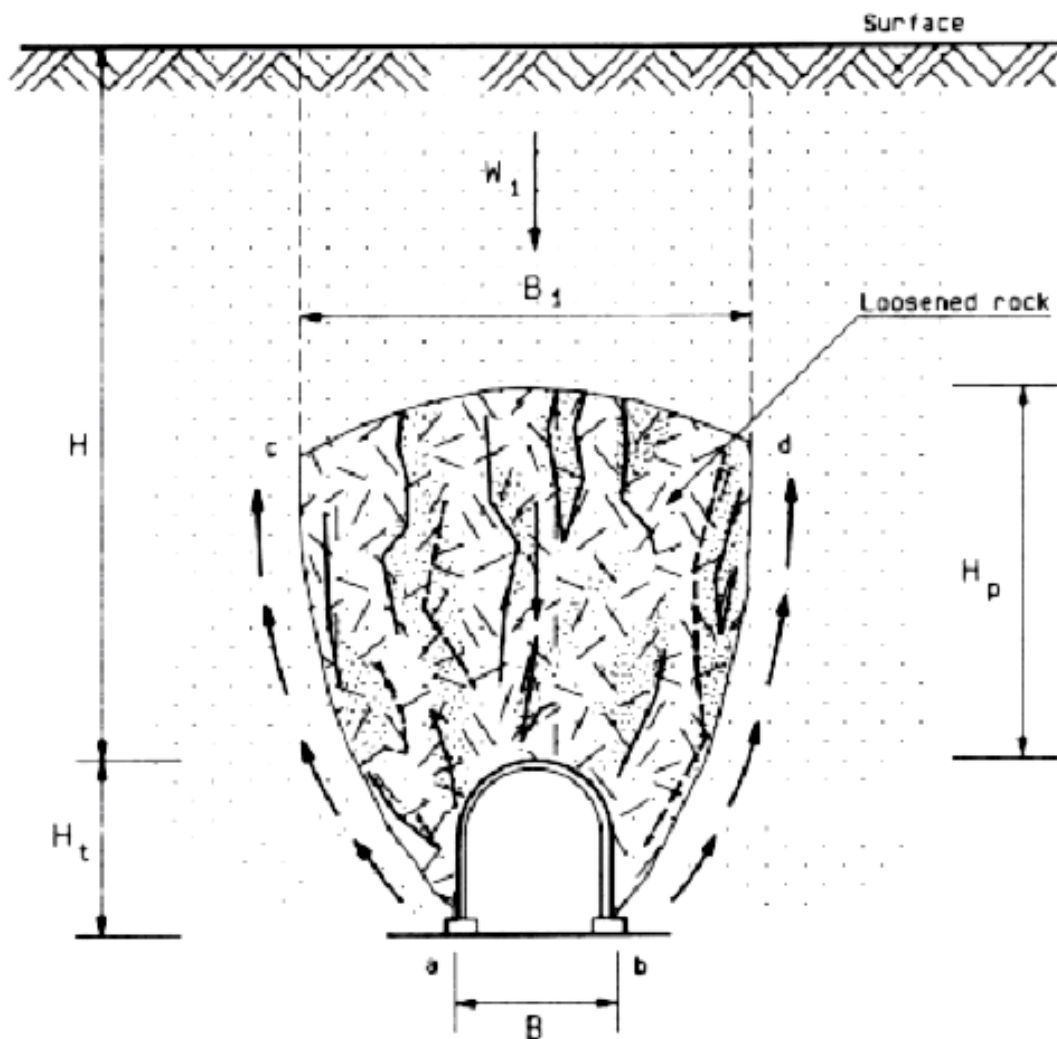
- Η διαίρεση της μάζας του πετρώματος σε κατηγορίες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά
- Η κατανόηση των χαρακτηριστικών ομάδων πετρωμάτων
- Η έκφραση της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος με ποσοτικούς δείκτες, που μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων
- Η δυνατότητα συνεννόησης και ανταλλαγής πληροφοριών για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων

Όταν το σύστημα ταξινόμησης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, η επίτευξη των παραπάνω στόχων καθίσταται ευκολότερη:

Πίνακας 2.1: Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης και πεδίο εφαρμογής τους (Αγιουτάντης, 2002- Bieniawski, 1989).

| Όνομα συστήματος ή Κύρια παράμετρος              | Προέλευση                            | Εφαρμογή                                  |
|--|--------------------------------------|---|
| Φορτία στο πέτρωμα                               | Terzaghi, 1946 (ΗΠΑ)                 | Σήραγγες                                  |
| Χρόνος ζωής ανοίγματος                           | Lauffer, 1958 (Αυστρία)              | Σήραγγες                                  |
| Δείκτης ποιότητας (RQD)                          | Deere, 1964 (ΗΠΑ)                    | Γεωτρήσεις, Σήραγγες                      |
| Αντοχή ακεραίου πετρώματος (ΗΠΑ)                 | Deere και Miller, 1966 (ΗΠΑ)         | Κοινή βάση συνεννόησης                    |
| Ταξινόμηση πετρωμάτων για τη Μηχανική Πετρωμάτων | Patching and Coates, 1969            | Κοινή βάση συνεννόησης                    |
| Ενοποιημένη ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων     | Deere et al, 1969 (ΗΠΑ)              | Κοινή βάση συνεννόησης                    |
| Σύστημα RSR                                      | Wickham et al, 1972 (ΗΠΑ)            | Σήραγγες                                  |
| Γεωμηχανική ταξινόμηση (CSIR) ή Σύστημα RMR      | Bieniawski, 1973 (Ν. Αφρική και ΗΠΑ) | Σήραγγες, μεταλλεία, θεμελιώσεις          |
| Σύστημα NGI ή Σύστημα Q                          | Barton et al, 1974 (Νορβηγία)        | Σήραγγες, ανοίγματα                       |
| Αντοχή, μέγεθος τμημάτων πετρώματος              | Franklin, 1975 (Καναδάς)             | Σήραγγες                                  |
| Ενοποιημένη ταξινόμηση πετρωμάτων                | Williamson, 1980                     | Κοινή βάση συνεννόησης                    |
| Γεωτεχνική ταξινόμηση                            | ISRM, 1981 (Διεθνής)                 | Γενικά θέματα                             |
| Δείκτης GSI                                      | Hoek, 1994 (Διεθνής)                 | Σχεδιασμός υποστήριξης                    |
| Δείκτης βραχόμαζας (RMI)                         | Palmstroem, 1995                     | Γενική ταξινόμηση, σχεδιασμός υποστήριξης |

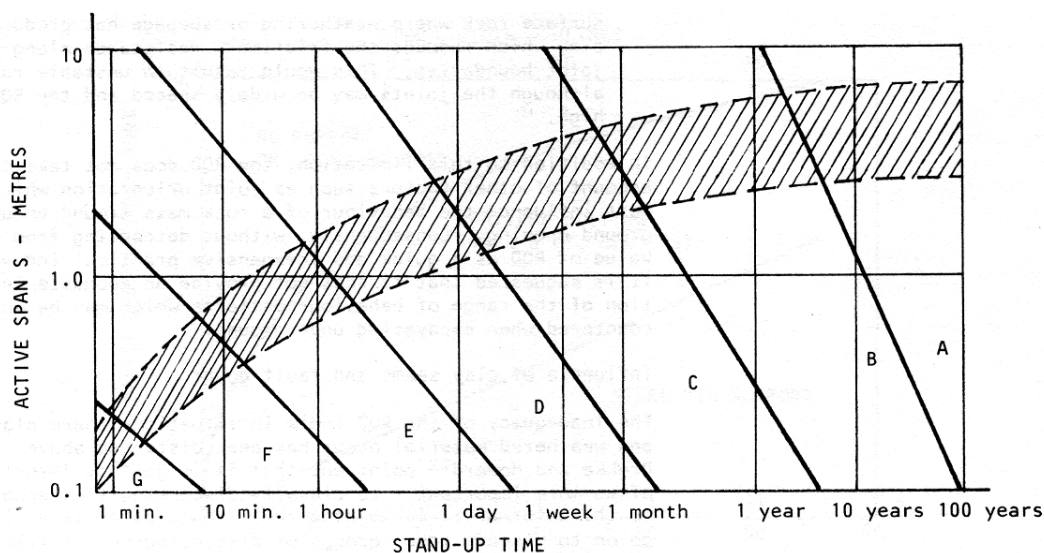
- Απλότητα, ευκολία στη χρήση και είναι εύκολα κατανοητό
- Χρησιμοποιεί όρους αποδεκτούς από τις περισσότερες εφαρμοσμένες γεωεπιστήμες
- Λαμβάνει υπόψη όσο το δυνατόν περισσότερες ιδιότητες της βραχόμαζας
- Οι παράμετροι που περιλαμβάνει να μπορούν να μετρηθούν εύκολα στο πεδίο ή το εργαστήριο
- Έχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των παραμέτρων που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος
- Μπορεί να συσχετιστεί με τον ποσοτικό προσδιορισμό των παραμέτρων που απαιτούνται προκειμένου να σχεδιαστεί ένα τεχνικό έργο.



Σχήμα 2.1: Απλοποιημένο σχήμα που παριστά την κίνηση ενός χαλαρωμένου πετρώματος προς τη σήραγγα και τα φορτία που μεταφέρονται στο περιβάλλον πέτρωμα.

## 2.2 Το σύστημα ταξινόμησης των φορτίων στο πέτρωμα

Το 1946 ο Terzaghi πρότεινε ένα απλό σύστημα ταξινόμησης των πετρωμάτων, που χρησίμευε στον υπολογισμό του φορτίου που παραλάμβαναν τα ατσάλινα πλαίσια κατά την υποστήριξη των σιηράγγων (Σχήμα 2.1). Περιέγραψε διαφόρων ειδών εδάφη και τα συνέδεσε με τα επιτρεπόμενα φορτία, που μπορούν να δεχθούν. Στην εισαγωγή της εργασίας του, τονίζει τη σημασία της γεωλογικής έρευνας που πρέπει να γίνεται, πριν το σχεδιασμό οποιουδήποτε υπόγειου έργου, με έμφαση στις ατέλειες δομής των πετρωμάτων.



Σχήμα 2.2: Σχέση μεταξύ ενεργής διαμέτρου του ανοίγματος και χρόνου αυτούποστήριξης για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων (Hoek and Brown, 1980).

Προχώρησε ακόμη στον ορισμό εννοιών σχετικών με υπόγεια ανοίγματα, οι οποίες καθιστούν εφικτή την κατανόηση των παραμέτρων που σχετίζονται με αυτά (Terzaghi, 1946). Όρισε εννέα κατηγορίες πετρωμάτων και σε κάθε μια απ' αυτές αντιστοίχησε ένα φορτίο στήλης πετρώματος που εξαρτάται από το πλάτος (B) και το ύψος ( $H_i$ ) του ανοίγματος. Από τα δύο αυτά μεγέθη, μπορεί να υπολογιστεί η κατακόρυφη τάση στην κορυφή της σήραγγας, λόγω του ύψους των υπερκείμενων μαζών,  $H_0$ , ως εξής:

$$\sigma_v = H_0 \gamma \quad (2.1)$$

Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι κατηγορίες των πετρωμάτων σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του Terzaghi, τα χαρακτηριστικά κάθε μιας καθώς και οι τιμές  $H_0$  για κάθε περίπτωση.

## 2.3 Το σύστημα ταξινόμησης των Stini και Lauffer.

Ο Stini (1950) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης πετρωμάτων και εντόπισε πολλές από τις δυσμενείς συνθήκες, που μπορούν να παρουσιαστούν κατά την όρυξη σπηραίων. Έδωσε έμφαση στη σημασία των ατελειών της βραχώμαζας και τόνισε την ανάγκη αποφυγής κατασκευής σπηραίων παράλληλα στη διεύθυνση ασυνεχειών μεγάλης κλίσης.

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση κατά Terzaghi (Bieniawski, 1984 – Hoek & Brown 1980)

| Κατηγορία πετρώματος                              | Χαρακτηριστικά   | Φορτίο υπερκειμένων $H_v$ (m)       |
|---|--|-------------------------------------|
| Σκληρό και ακέραιο πέτρωμα                        | Δεν περιλαμβάνει συνενώσεις ή ασυνέχειες και η θραύση του δε σχετίζεται με την ύπαρξη ατελειών   | μηδέν                               |
| Σκληρό στρωματογενές ή σχιστώδες πέτρωμα          | Αποτελούνται από διακριτές στρώσεις με μικρή ή καθόλου αντίσταση στον αποχωρισμό κατά μήκος των ορίων των στρώσεων   | 0 έως 0.5 B                         |
| Συμπαγές ή με λίγες διακλάσεις πέτρωμα            | Περιέχουν αρμούς και μικρορωγμές, αλλά τα τεμάχια ανάμεσά τους είναι τόσο στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, ώστε οι παρειές ενός ανοίγματος, να μην απαιτούν υποστήριξη | 0 έως 0.25 B                        |
| Πέτρωμα με μέτρια διαχωρισμένα τμήματα και όγκους | Αποτελείται από διακριτά τμήματα, χημικά ομογενή ή σχεδόν ομογενή  | 0.25 B έως 0.35 (B+H <sub>i</sub> ) |
| Πέτρωμα με πλήρως διαχωρισμένα τμήματα και όγκους | Αποτελείται από διακριτά τμήματα, χημικά ομογενή ή σχεδόν ομογενή, ατελώς συνδεδεμένα μεταξύ τους  | 0.35 B έως 1.10 (B+H <sub>i</sub> ) |
| Κατακερματισμένο πέτρωμα                          | Είναι χημικά ομογενές και όταν είναι λεπτόκοκκο και βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, μπορεί να έχει συμπεριφορά άμμου.                          | 1.10 (B+H <sub>i</sub> )            |
| Ελαφρώς διογκούμενο πέτρωμα σε μέσο βάθος         | Κινείται αργά προς το μέρος της σήραγγας, χωρίς ιδιαίτερη αύξηση όγκου του. Το φαινόμενο εντείνεται με την παρουσία αργιλικών και φυλλωδών ορυκτών                   | 1.10 έως 2.10 (B+H <sub>i</sub> )   |
| Ελαφρώς διογκούμενο πέτρωμα σε μεγάλο βάθος       | Κινείται αργά προς το μέρος της σήραγγας, χωρίς ιδιαίτερη αύξηση όγκου του. Το φαινόμενο εντείνεται με την παρουσία αργιλικών και φυλλωδών ορυκτών                   | 2.10 έως 4.50 (B+H <sub>i</sub> )   |
| Διογκούμενο πέτρωμα                               | Κινούνται προς την κατεύθυνση του ανοίγματος λόγω διόγκωσης και διαστολής.   | Έως 76 μέτρα                        |

Σημειώνεται ότι το βάθος της σήραγγας πρέπει να είναι τουλάχιστον  $1.5 B + H_i$

Τόσο ο Terzaghi όσο και ο Stini έθεσαν το ζήτημα της ευστάθειας ενός ανοίγματος συναρτήσει του χρόνου. Ο Lauffer (1959) όμως ήταν αυτός που πρότεινε πως ο χρόνος αυτοϋποστήριξης για οποιαδήποτε ενεργή διατομή σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, με τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Στο διάγραμμα του εν λόγω σχήματος, τα γράμματα αναφέρονται στην κατηγορία του πετρώματος. Η κατηγορία A υποδηλώνει πέτρωμα πολύ καλής ποιότητας ανάλογο με το 'ακέραιο πέτρωμα' του Terzaghi. Το G σημαίνει πέτρωμα με πολύ κακές

πέτρωμα' του Terzaghi. Το G σημαίνει πέτρωμα με πολύ κακές ιδιότητες, όπως το 'διογκούμενο πέτρωμα' του συστήματος κατά Terzaghi.

Αν και το σύστημα ταξινόμησης του Stini δεν είχε μεγάλη απήχηση στις αγγλόφωνες χώρες, είχε εντούτοις σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη περισσότερο πρόσφατων συστημάτων ταξινόμησης, όπως αυτό των Brekke και Howard (1972) και του Bieniawski (1974).

## 2.4 Ο δείκτης ταξινόμησης RQD

Το 1964 ο Deere (1964) πρότεινε ένα ποσοτικό δείκτη ποιότητας της βραχώ-μαζας, που βασιζόταν στη απόληψη πυρήνα πετρώματος, με χρήση ειδικού γεωτρυ-πάνου. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο στην κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων όσο και στην επιλογή της καταλληλότερης υποστήριξης για δεδομένο άνοιγμα.

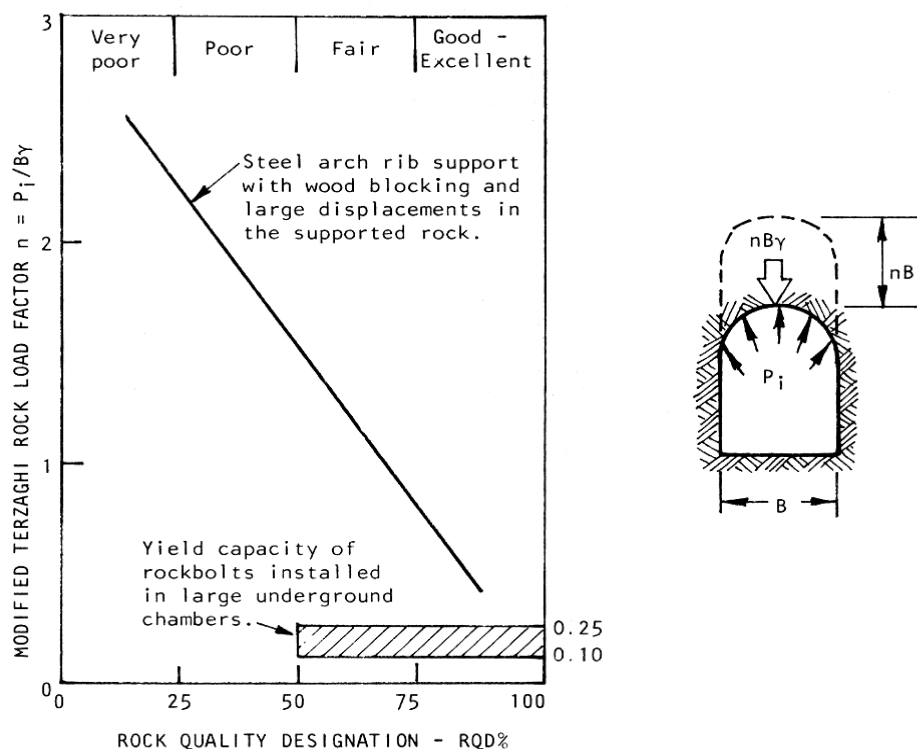
Ο δείκτης RQD εκτιμάται σε πυρήνα διαμέτρου τουλάχιστον 50mm, που έχει ληφθεί με εξοπλισμό αδαμαντογεωτρυπάνου. Υπολογίζεται συνήθως ανά 2m τρέχου-σας γεώτρησης και ορίζεται σαν το ποσοστό του πυρήνα που ανακτάται σε ακέραια κομμάτια μήκους 100mm ή και περισσότερο, ως προς το συνολικό μήκος πετρώμα-τος που έχει διατηρηθεί. Δηλαδή,

$$RQD (\%) = 100 \times \frac{\text{Συνολικό μήκος τμημάτων πυρήνα με } l > 100mm}{\text{Συνολικό μήκος διάτρησης}} \quad (2.2)$$

Ο Deere πρότεινε την ακόλουθη σχέση μεταξύ της αριθμητικής τιμής του RQD και της ποιότητας του πετρώματος κατά τους μηχανικούς.

| RQD (%)  | Χαρακτηρισμός του πετρώματος |
|----------|------------------------------|
| < 25     | πολύ κακό                    |
| 25 - 50  | κακό                         |
| 50 - 75  | μέτριο                       |
| 75 - 90  | καλό                         |
| 90 - 100 | πολύ καλό                    |

Επιπλέον, οι Cording, Hendron και Deere (1971) έκαναν μία απόπειρα να συ-σχετίσουν την τιμή του δείκτη RQD με το ποιοτικό σύστημα ταξινόμησης του Terzaghi. Τροποποίησαν το συντελεστή φόρτισης του Terzaghi συσχέτισαν την τιμή που προέκυψε, με το RQD του πετρώματος. Ο συσχετισμός που έγινε φαίνεται στο Σχήμα



Σχήμα 2.3: Προσεγγιστική σχέση ανάμεσα στο Συντελεστή Φόρτισης Πετρώματος του Terzaghi (τροποποιημένου) και του δείκτη RQD (Cording, Hendron και Deere, 1971).

2.3. Το διάγραμμα αυτό προτείνει την ύπαρξη λογικής αλληλεξάρτησης ανάμεσα στις τιμές του δείκτη και του συντελεστή αντίστοιχα για ανοίγματα που έχουν υποστηριχθεί με ατσάλινα πλαίσια ενώ δε φαίνεται να υπάρχει σχέση μεταξύ των δυο, σε περιπτώσεις ανοιγμάτων στηριζόμενων με κοχλίες.

Σύμφωνα με τον Merritt (1972), το σύστημα κριτηρίων υποστήριξης που βασίζεται στο δείκτη RQD, παρουσιάζει περιορισμούς σε πετρώματα των οποίων οι διακλάσεις είναι πληρωμένες με λεπτόκοκκα αργιλικά ορυκτά ή άλλα εξαλλοιωμένα υλικά. Τέτοιες είναι οι περιπτώσεις επιφανειακών πετρωμάτων. Σ' αυτές, η αποσάθρωση και η διάβρωση έχουν δημιουργήσει αργιλικά ορυκτά μέσα στις διακλάσεις, μειώνοντας σημαντικά την αντίσταση τους στην τριβή. Έτσι το πέτρωμα καθίσταται ασταθές, παρά το γεγονός ότι το RQD του μπορεί να είναι υψηλό.

Ένας άλλος περιορισμός που υπεισέρχεται σχετίζεται με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και των διακλάσεων, παράγοντας που δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του RQD, μπορεί όμως να επηρεάσει τη συμπεριφορά ενός υπογείου ανοίγματος.

Όπως προαναφέρθηκε, η εκτίμηση του δείκτη RQD, βασίζεται στην απόληψη πυρήνα από το πέτρωμα. Το 1982, ο Palmstrom (1982) πρότεινε έναν άλλο τρόπο υπολογισμού του, όταν ο πυρήνας δεν είναι διαθέσιμος. Αυτός σχετίζεται με τον αριθ-

μό των ασυνεχειών ανά μονάδα όγκου πετρώματος ( $J_v$ ). Για ένα πέτρωμα με ασυνέχειες που δεν περιέχουν άργιλο, η σχέση είναι:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (2.3)$$

Γενικά μπορεί να ειπωθεί, χωρίς να υποβαθμίζεται η αξία του δείκτη RQD, ότι από μόνος του δεν αρκεί για να δώσει μία ικανοποιητική ένδειξη, των διαφορετικών μηχανικών συμπεριφορών που μπορούν να επιδείξουν τα πετρώματα, κατά την όρυξη υπογείων ανοιγμάτων. Αποτελεί όμως σημαντική παράμετρο στις διαγραφίες πυρήνος και είναι βασικό στοιχείο των δύο βασικών συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q.

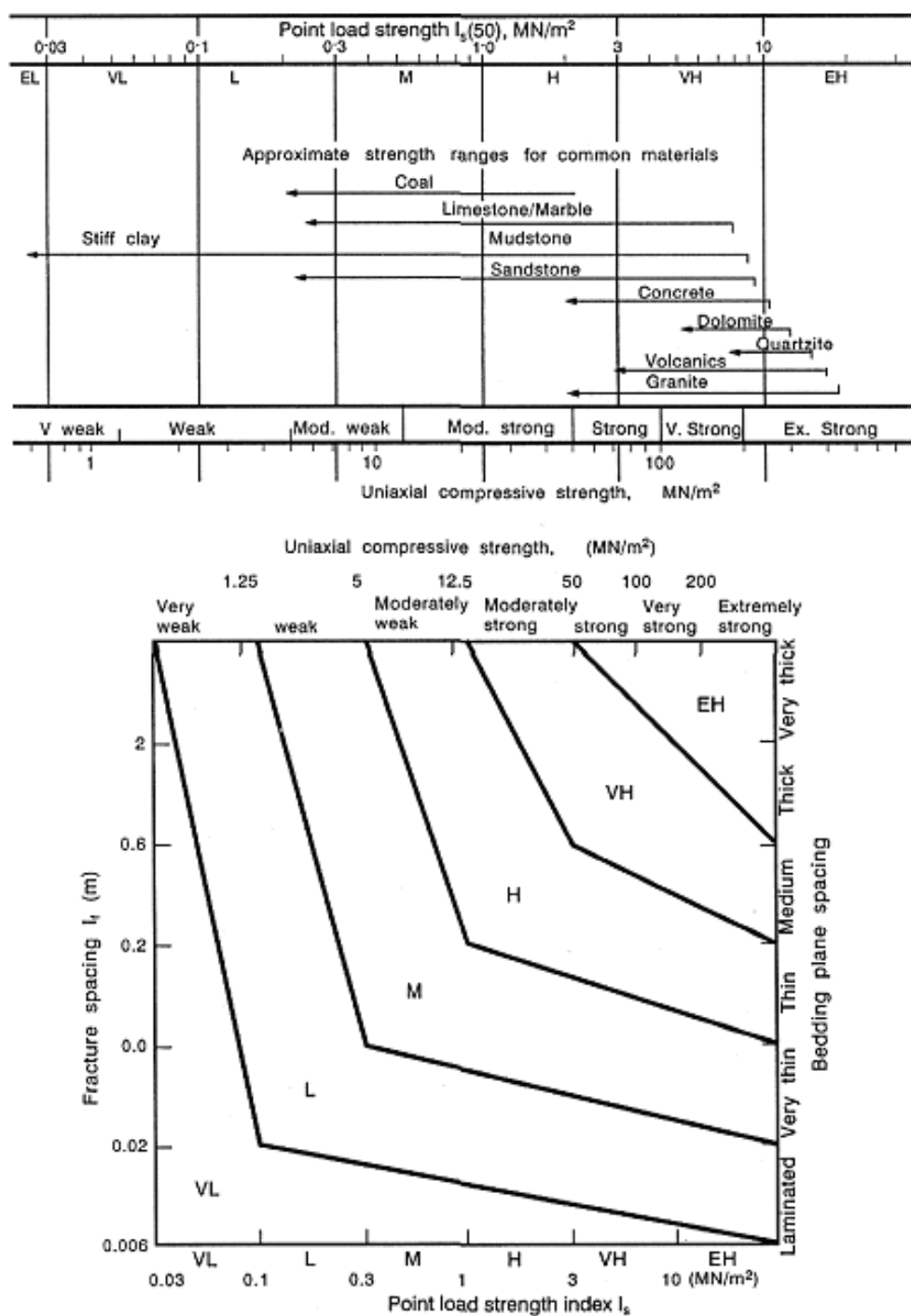
## **2.5 Η ταξινόμηση κατά Franklin**

Το σύστημα αυτό επινοήθηκε από τους Franklin και Broch και ταξινομεί τη βραχώμαζα σε επτά κατηγορίες (Σχήμα 2.4). Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και η απόσταση των ασυνεχειών. Η ταξινόμηση αυτή είναι σχετικά απλή, μπορεί όμως να αποτελέσει τη βάση για άλλα, πιο σύνθετα συστήματα ταξινόμησης (Roberts, 1977).

## **2.6 Η ταξινόμηση RSR**

Η ταξινόμηση με βάση το δείκτη RSR ήταν το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα ταξινόμησης μετά από αυτό του Terzaghi. Αναπτύχθηκε στην Αμερική το 1972 από τους Wickham, Tiedemann και Skinner και πρόκειται για μία ποσοτική μέθοδο περιγραφής της ποιότητας της βραχώμαζας και επιλογής της κατάλληλης υποστήριξης της (Bieniawski 1984).

Η εν λόγω ταξινόμηση εισήγαγε ένα σύστημα κατηγοριοποίησης της βραχώμαζας, που ήταν το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας των παραμέτρων που λαμβάνονταν υπόψη. Γενικά θεωρήθηκε, ότι η συμπεριφορά του πετρώματος κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας, επηρεάζεται από δύο κατηγορίες παραμέτρων, τις γεωλογικές και τις κατασκευαστικές (Πίνακας 2.3). Όλοι αυτοί οι συντελεστές κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις βασικές παραμέτρους A, B και C (Πίνακας 2.4). Η τελική τιμή του δείκτη RSR λαμβάνεται μετά από άθροιση του ποσοστού που έχει δοθεί σε καθεμιά από τις παραπάνω παραμέτρους. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι το 100.



Σχήμα 2.4: Το σύστημα ταξινόμησης κατά Franklin (Roberts, 1977)

Έχει ήδη αναφερθεί ότι με βάση το σύστημα RSR μπορεί να προβλεφθεί η κατάλληλη υποστήριξη για δεδομένο πέτρωμα και άνοιγμα. Προκειμένου να γίνει αυτό εισήχθη η έννοια του λόγου των πλευρών (Rib Ratio) RR. Ο σκοπός ήταν η ύπαρξη κοινής βάσης για τη συσχέτιση του RSR με την πραγματική ή την απαιτούμενη υποστήριξη. Λόγω του ότι το 90% των σηράγγων που κατασκευάζονταν τότε

Πίνακας 2.3: Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στο σύστημα ταξινόμησης RSR (Bieniawski, 1989)

| Γεωλογικές παράμετροι      | Κατασκευαστικές παράμετροι             |
|----------------------------|--|
| τύπος πετρώματος           | μέγεθος της σήραγγας                   |
| σύστημα ασυνεχειών         |  |
| προσανατολισμός ασυνεχειών |  |
| τύπος ασυνεχειών           | προσανατολισμός του άξονά της σήραγγας |
| κύρια ρήγματα, πτυχές      | μέθοδος εξόρυξης                       |
| ιδιότητες του πετρώματος   |  |
| εξαλλοίωση                 |  |

υποστηρίζονταν με ατσάλινα πλαίσια, ο λόγος RR έδινε το θεωρητικό υπολογισμό τους (μέγεθος και απόσταση πλαισίων).

Η τιμή του RR προέκυπτε μετά από διαίρεση της θεωρητικής απόστασης των πλαισίων με την πραγματική και πολλαπλασιασμό του αποτελέσματος με το 100. Σημειώνεται ότι διαφορετικού μεγέθους ανοίγματα που έχουν το ίδιο RR, θα απαιτούσαν διαφορετική υποστήριξη ως προς το μέγεθος και το βάρος της για να πετύχουν το ίδιο αποτέλεσμα. Ένα ανυποστήρικτο άνοιγμα θα έχει τιμή RR ίση με το μηδέν, ενώ ένα πλήρως καλυμμένο ίση με το 100.

Επιπλέον, μέσα από μία εμπειρική σχέση, ο συντελεστής RR συνδέθηκε με την τιμή του δείκτη RSR, ως εξής (Bieniawski, 1989):

$$(RR + 80)(RSR + 30) = 8800 \quad (2.4)$$

$$(RR + 70)(RSR + 8) = 6000 \quad (2.5)$$

Το συμπέρασμα ήταν ότι πετρώματα με τιμές RSR μικρότερες του 19 απαιτούν πλήρη υποστήριξη, ενώ όταν η τιμή του RSR υπερβαίνει το 80, δεν απαιτείται υποστήριξη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το σύστημα RSR αναπτύχθηκε για υπολογισμό των ιδιοτήτων υποστήριξης με ατσάλινα πλαίσια. Σε περιπτώσεις όμως υποστήριξης με σκυροκονίαμα ή κοχλίες, τα δεδομένα που παρείχε ήταν ανεπαρκή. Μια εκτίμηση του απαιτούμενου συστήματος κοχλίωσης, μπορούσε να γίνει με θεώρηση των φορτίων που ασκούνται στο πέτρωμα, αναφορικά με την αντοχή του κοχλία σε εφελκυσμό. Αυτό όμως ήταν μια πολύ γενική προσέγγιση (Wickham et al., 1972), που υπέθετε πως η αγκύρωση ήταν επαρκής και όλοι οι κοχλίες δρούσαν μόνο εφελκυστικά. Απέκλειε την περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών όγκων πετρώματος και

Πίνακας 2.4: Παράμετροι του συστήματος RSR (Bieniawski 1989)

|   |
|---|
| Παράμετρος Α: Γενική εκτίμηση της δομής του πετρώματος με βάση:   |
| α. Τον τύπο του πετρώματος (πυριγενές, ιζηματογενές, μεταμορφωμένο)                                       |
| β. Τη σκληρότητα του πετρώματος (σκληρό, ενδιάμεσο, μαλακό, αποσπασμένο)                                  |
| γ. Τη γεωλογική δομή του πετρώματος (συμπαγές, ελαφρώς ρηγματωμένο, τεκτονισμένο)                         |
| Παράμετρος Β: επίδραση του συστήματος των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό της σήραγγας με βάση: |
| α. Την απόσταση των ασυνεχειών  |
| β. Τον προσανατολισμό των ασυνεχειών  |
| γ. Τον προσανατολισμό της σήραγγας  |
| Παράμετρος C: επίδραση της εισροής υπόγειου νερού σε σχέση με:  |
| α. Τη συνολική ποιότητα του πετρώματος, όπως προκύπτει από τις παραμέτρους Α και Β                        |
| β. Την κατάσταση των ασυνεχειών (καλή, μέτρια, κακή)  |
| γ. Το ρυθμό εισροής νερού (σε γαλόνια ανά λεπτό ή ανά 1000 πόδια στοάς)                                   |

το σχηματισμό αψίδας θλιπτικών τάσεων προκαλούμενη από τους κοχλίες. Παρόλα αυτά, η παρακάτω σχέση αναφέρεται σε κοχλίες με διάμετρο 25mm που δέχονται φορτίο 24000 lb ή περίπου 109 kN (Bieniawski, 1989):

$$\text{Απόσταση (ft)} = \frac{24}{W} \quad (2.6)$$

όπου W είναι το φορτίο στο πέτρωμα σε lb/ft<sup>2</sup>.

Αντίθετα, ο συσχετισμός μεταξύ των επιθυμητών ιδιοτήτων του σκυροκονιάματος και του των γεωλογικών συνθηκών σε επετεύχθη. Για το λόγο αυτό προτάθηκαν οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις (Bieniawski, 1979):

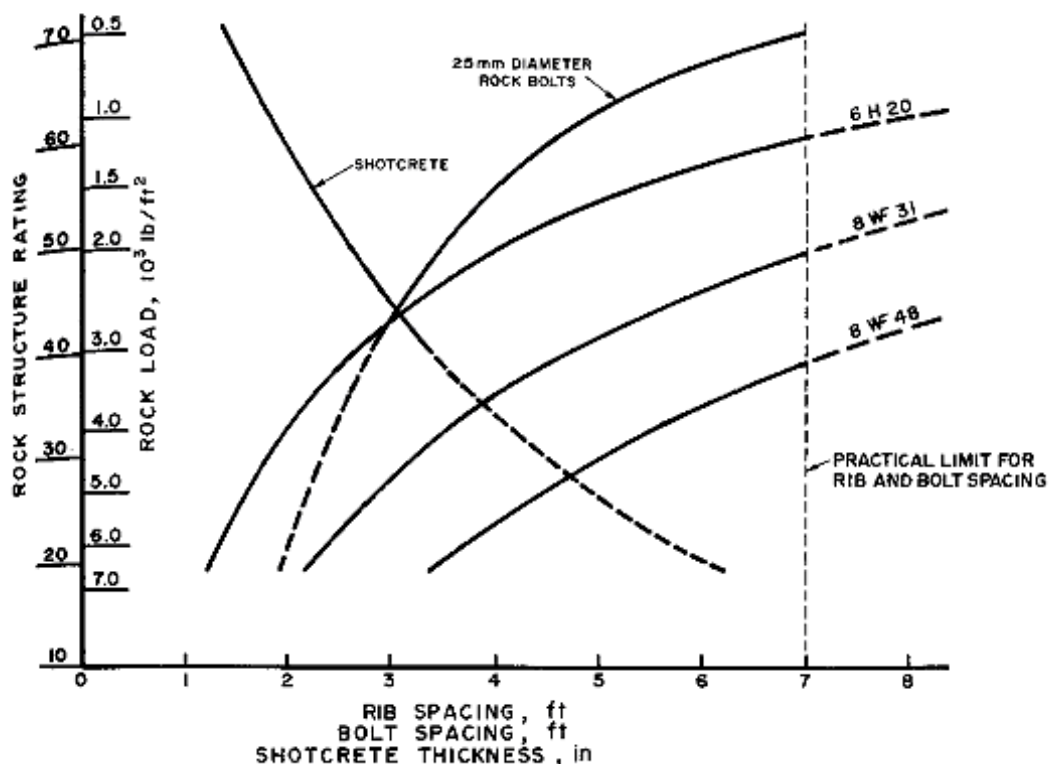
$$t = 1 + \frac{W}{1.25} \quad \eta \quad t = D \frac{65 - RSR}{150} \quad (2.7)$$

όπου t = το πάχος του σκυροκονιάματος σε in

W= το φορτίο στο πέτρωμα σε lb/ft<sup>2</sup>

D = η διάμετρος της σήραγγας σε ft.

Παράλληλα, κατασκευάστηκαν νομογράμματα, που παρείχαν ένα μέσο προσδιορισμού των συστημάτων υποστήριξης βασισμένα σε προβλέψεις της τιμής RSR των πετρωμάτων, μέσα από τα οποία θα περνούσε η σήραγγα. Τέτοια διαγράμματα υπάρχουν για διάμετρο ανοίγματος 3m, 6m, 7m και 10m (Σχήμα 2.5). Οι τρεις καμπύλες για τα πλαίσια, αντανakλούν τρία τυπικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για



Σχήμα 2.5: Δείκτης SRS: νομόγραμμα υποστήριξης για σήραγγα διαμέτρου 24ft (7.3m) (Wickham et al., 1972)

δεδομένη διάμετρο ανοίγματος. Οι καμπύλες για τους κοχλίες και το σκυροκονίαμα είναι διακεκομμένες, για να τονιστεί ότι βασίζονται σε υποθέσεις και δεν προκύπτουν από μετρήσεις και παρατηρήσεις. Τα νομογράμματα μπορούν αν εφαρμοστούν τόσο σε κυκλικής όσο και σε πεταλοειδούς διατομής ανοίγματα, παραπλήσιου μεγέθους.

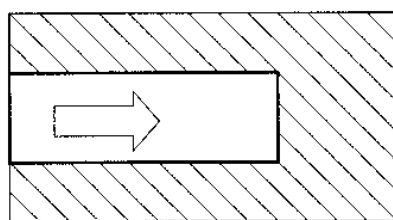
## 2.7 Το σύστημα Γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR

Το σύστημα RMR, γνωστό και ως Γεωμηχανική ταξινόμηση αναπτύχθηκε από το Bieniawski το 1971 – 1972. Η ισχύς του επιβεβαιώθηκε μέσα από 351 περιπτώσεις γεωτεχνικών έργων, όπως σήραγγες, μεταλλευτικές στοές, πρανή και θεμελιώσεις. Αν και έχει τροποποιηθεί και αρκετές φορές, η κεντρική του ιδέα παραμένει η ίδια. Η ταξινόμηση βασίζεται στους έξι ακόλουθους παράγοντες:

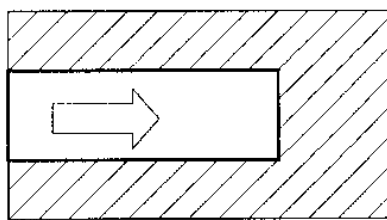
- Αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη
- Δείκτης ποιότητας RQD

- Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- Κατάσταση των ασυνεχειών
- Ύπαρξη και επίδραση υπόγειου νερού
- Προσανατολισμός των ασυνεχειών

Προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση, το πέτρωμα διαιρείται σε επιμέρους περιοχές, των οποίων τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες είναι παραπλήσια. Για κάθε μία από της περιοχές αυτές εκτιμώνται ή μετρώνται στο πεδίο οι παράμετροι της ταξινόμησης, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο Πίνακας 2.5 παρουσιάζει το Γεωμηχανικό σύστημα ταξινόμησης. Στο μέρος Α του Πίνακα 2.5, πέντε παράμετροι κατηγοριοποιούνται σε πέντε εύρη τιμών. Λόγω του ότι η σημασία όλων των παραμέτρων δεν είναι ίδια, δίνεται ένας συντελεστής βαρύτητας. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση της βραχώμαζας. Στη συνέχεια, οι συντελεστές που προέκυψαν για κάθε μία από τις παραμέτρους αθροίζονται και προκύπτει η βασική



όρυξη μαζί με την κλίση



όρυξη αντίθετα από την κλίση

Σχήμα 2.6: Κλίση ασυνεχειών και φορά όρυξης

τιμή RMR, που αναφέρεται στη δομή του πετρώματος.

Το επόμενο βήμα είναι να συμπεριληφθεί η έκτη παράμετρος, δηλαδή η επίδραση της διεύθυνσης και της κλίσης των ασυνεχειών, προσαρμόζοντας τη βασική τιμή RMR σύμφωνα με το Μέρος Β του Πίνακα 2.5. Το βήμα αυτό γίνεται ξεχωριστά γιατί η επίδραση των ασυνεχειών εξαρτάται και από το έργο που πρόκειται να κατασκευαστεί, π.χ. σήραγγα, μεταλλευτική στοά, θεμελίωση, κλπ. Σημειώνεται ότι η 'τιμή' της παραμέτρου 'προσανατολισμός των ασυνεχειών' δεν δίνεται ποσοτικά άλλα με ποιοτικούς όρους, όπως 'πολύ καλός, καλός, κλπ'. Η τιμή δε αυτή, αντανακλά την σημασία των διαφόρων ομάδων ασυνεχειών που υπάρχουν στο πέτρωμα. Η κύρια ομάδα, που συνήθως καλείται Νο. 1, ελέγχει την ευστάθεια της εκσκαφής. Σε περίπτωση που δεν υφίσταται κύρια ομάδα συνεχειών ή όταν εκτιμάται η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του πετρώματος, λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών που δίνεται για καθεμιά ομάδα ασυνεχειών. Τελικά, το άθροισμα των τιμών για τις έξι παραμέτρους δίνει τη συνολική τιμή RMR, που μπορεί να κυμαίνεται από μηδέν έως 100.

Πίνακας 2.5 Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Σύστημα RMR)

**Μέρος Α**

| Παράμετρος  | Αντοχή του πετρώματος |         |        |       |      |     |    |
|-------------|-----------------------|---------|--------|-------|------|-----|----|
| $I_s$ (Mpa) | > 10                  | 4-10    | 2-4    | 1-2   | -    | -   | -  |
| $C_o$ (Mpa) | > 250                 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25 | 1-5 | <1 |
| Συντελεστής | 15                    | 12      | 7      | 4     | 2    | 1   | 0  |

Όπου,  $C_o$  = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και  $I_s$  = ο δείκτης σημειακής φόρτισης

| Παράμετρος  | Δείκτης ποιότητας του πετρώματος |       |       |       |     |
|-------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-----|
| RQD (%)     | 90-100                           | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 |
| Συντελεστής | 20                               | 17    | 13    | 8     | 3   |

| Παράμετρος  | Απόσταση των ασυνεχειών (mm) |          |         |        |     |
|-------------|------------------------------|----------|---------|--------|-----|
| Απόσταση    | >2000                        | 600-2000 | 200-600 | 60-200 | <60 |
| Συντελεστής | 20                           | 15       | 10      | 8      | 5   |

| Παράμετρος  | Κατάσταση των ασυνεχειών |    |    |    |    |
|-------------|--------------------------|----|----|----|----|
| Περιγραφή   | A1                       | A2 | A3 | A4 | A5 |
| Συντελεστής | 30                       | 25 | 20 | 10 | 0  |

A1: τραχείες επιφάνειες, ασυνεχείς, χωρίς ανοίγματα, ακέραια πετρώματα

A2: ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα <1mm, ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχ.

A3: ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα <1mm, πολύ αποσαθρωμένα τοιχώματα

A4: λείες επιφάνειες, συνεχείς, άνοιγμα 1-5 mm, υλικό πλήρωσης <5 mm

A5: συνεχείς, άνοιγμα >5mm, υλικό πλήρωσης >5mm (μαλακό)

| Παράμετρος   | Επίδραση των υπογείων υδάτων |           |         |          |           |
|--------------|------------------------------|-----------|---------|----------|-----------|
| Εισροή /10 m | 0                            | <10       | 10-25   | 25-125   | >125      |
| $u/\sigma_1$ | 0                            | 0.0-0.1   | 0.1-0.2 | 0.2-0.5  | >0.5      |
| Κατάσταση    | ξηρό                         | λίγο υγρό | υγρό    | σταγόνες | ροή νερού |
| Συντελεστής  | 15                           | 10        | 7       | 4        | 0         |

Όπου,  $u$  = πίεση νερού στα επίπεδα των ασυνεχειών και  $\sigma_1$  = μέγιστη κύρια τάση

**Μέρος Β**

| Παράμετρος      | Διόρθωση λόγω προσανατολισμού των ασυνεχειών |       |         |       |            |
|-----------------|--|-------|---------|-------|------------|
| Προσανατολισμός | πολύ καλός                                   | καλός | μέτριος | κακός | πολύ κακός |
| Σήραγγες        | 0  | -2    | -5      | -10   | -12        |
| Θεμελιώσεις     | 0  | -2    | -7      | -15   | -25        |
| Πρανή           | 0  | -5    | -25     | -50   | -60        |

Ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών προκύπτει από τον ακόλουθο πίνακα:

| Περιγραφή ασυνέχειας (Σχήμα 2.6)                       |                             | Κλίση ασυνέχειας (μοίρες) | Χαρακτηρισμός ασυνέχειας |
|--|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σήραγγας    | Όρυξη μαζί με την κλίση     | 45-90                     | Πολύ καλός               |
|  |                             | 20-45                     | Καλός                    |
|  |                             | 0-20                      | Μέτριος                  |
|  | Όρυξη αντίθετα από τη κλίση | 45-90                     | Μέτριος                  |
|  |                             | 20-45                     | Κακός                    |
|  |                             | 0-20                      | Μέτριος                  |
| Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλη στον άξονα της σήραγγας |                             | 45-90                     | Πολύ κακός               |
|  |                             | 20-45                     | Μέτριος                  |
|  |                             | 0-20                      | Μέτριος                  |

### Μέρος Γ

| Α. Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση το συνολικό συντελεστή |           |       |        |       |           |
|---|-----------|-------|--------|-------|-----------|
| Συνολικός συντελεστής                                       | 100-81    | 80-61 | 60-41  | 40-21 | <20       |
| Τάξη  | I         | II    | III    | IV    | V         |
| Περιγραφή   | πολύ καλό | καλό  | μέτριο | κακό  | πολύ κακό |

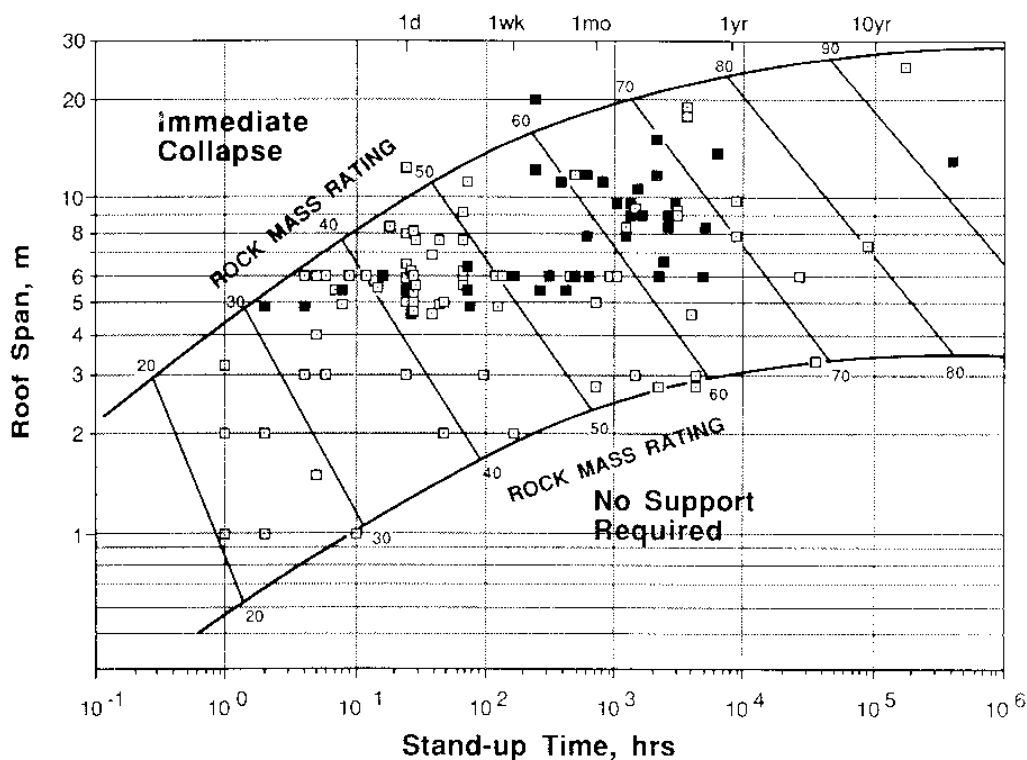
### Μέρος Δ

| Β. Ερμηνεία της ταξινόμησης      |           |           |            |           |          |
|----------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|
| Τάξη                             | I         | II        | III        | IV        | V        |
| Χρόνος ζωής                      | 10 χρόνια | 6 μήνες   | 1 εβδομάδα | 10 ώρες   | 30 λεπτά |
| Άνοιγμα                          | 15 m      | 8 m       | 5 m        | 2.5 m     | 1 m      |
| Συνοχή πετρώματος (kPa)          | > 400     | 300 - 400 | 200 - 300  | 100 - 200 | < 100    |
| Γωνία εσωτερικής τριβής (μοίρες) | < 45      | 35 - 45   | 25 - 35    | 15 - 25   | < 15     |

Μετά από αυτό, γίνεται η κατάταξη του πετρώματος σύμφωνα με το Μέρος Γ του Πίνακα 2.5. Εκεί τα πετρώματα κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την τελική τιμή του RMR. Κάθε κατηγορία έχει εύρος RMR ίσο με 20. Επιπλέον, το Μέρος Δ του ίδιου πίνακα δίνει την σημασία κάθε τάξης και τις συσχετίζει με συγκεκριμένα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν οι μηχανικοί. Σε περιπτώσεις που συναντώνται πετρώματα δύο ή περισσότερων κατηγοριών, τότε είναι σημαντικό να εντοπιστούν οι ‘πιο δύσκολες συνθήκες’ δηλαδή οι παράμετροι του χειρότερου πετρώματος, π.χ. ρήγματα.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η γεωμηχανική ταξινόμηση μπορεί να αποτελέσει οδηγό στην επιλογή της κατάλληλης υποστήριξης για δεδομένο άνοιγμα. Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι το βάθος του ανοίγματος κάτω από την επιφάνεια, το μέγεθος και το σχήμα του και τη μέθοδο εκσκαφής.

Το Σχήμα 2.7 δίνει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους της σήραγγας και του χρόνου αυτοϋποστήριξης για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων, σύμφωνα με τη Γεωμηχανική Ταξινόμηση. Εφαρμόζεται τόσο σε περιπτώσεις σιηράγγων όσο και μεταλλευτικών στοών. Τα δεδομένα που φαίνονται στο διάγραμμα έχουν προκύψει από μελέτες που έγιναν σε περιπτώσεις καταπτώσεων οροφής διαφόρων ανοιγμάτων. Τα λευκά τετράγωνα αντιστοιχούν σε περιπτώσεις σιηράγγων, ενώ τα μαύρα σε περιπτώσεις μεταλλευτικών στοών. Οι περιμετρικές γραμμές είναι τα όρια εφαρμοσιμότητας του διαγράμματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα μπαίνει η ακριβής τιμή του RMR και όχι η κατηγορία του πετρώματος. Αυτό γιατί το εύρος διακύμανσης των



Σχήμα 2.7: Σχέση μεταξύ χρόνου αντοχότητας και διαμέτρου του ανοίγματος για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων, σύμφωνα με τη Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Bieniawski, 1989).

τιμών RMR που περιλαμβάνεται σε καθεμία απ' αυτές, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα

Σύμφωνα με τον Unal (1983), το φορτίο που παραλαμβάνει η υποστήριξη μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \gamma B \quad (2.8)$$

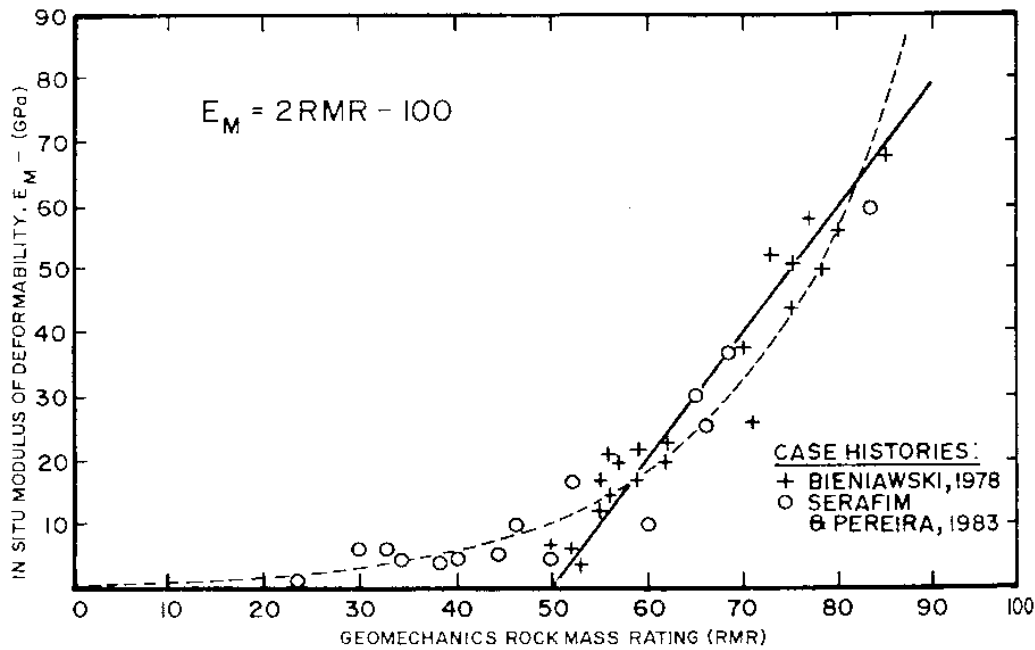
όπου  $P$  = το φορτίο που δέχεται η υποστήριξη, kN

$B$  = η διάμετρος του ανοίγματος, m

$\gamma$  = η πυκνότητα του πετρώματος, kg/m<sup>3</sup>

### 2.7.1 Εφαρμογές

Αν και η Γεωμηχανική Ταξινόμηση έχει χρησιμοποιηθεί σε πλειάδα γεωτεχνικών προβλημάτων, η πλειοψηφία αυτών αφορούσε στην κατασκευή σηράγγων. Εν-



Σχήμα 2.8: Σχέση μεταξύ του μέτρου παραμορφωσιμότητας και του δείκτη RMR (Bieniawski, 1989)

διαφέρουν όμως παρουσιάζει και το πρόβλημα των θεμελιώσεων. Εδώ η γνώση του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας, θεωρείται πρωταρχικής σημασίας. Το σύστημα ταξινόμησης RMR παρέχει μία χρήσιμη μέθοδο για τον *in situ* υπολογισμό της παραμορφωσιμότητας (Bieniawski, 1978). Το Σχήμα 2.8 προέκυψε εμπειρικά από μετρήσεις και η θεωρητική με τη οποία ταυτίζεται είναι:

$$E_M = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (2.9)$$

όπου  $E_M$  είναι το *in situ* μέτρο παραμορφωσιμότητας σε GPa και  $\text{RMR} > 50$ .

Αργότερα, οι Serafim και Pereira (1989) πρότειναν μία νέα σχέση, για  $\text{RMR} < 50$ :

$$E_M = 10^{(\text{RMR} - 10)/40} \quad (2.10)$$

όπου  $E_M$  το μέτρο παραμορφωσιμότητας .

Σε περιπτώσεις πρανών, οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι η συνοχή του πετρώματος ( $C_M$ ) και η γωνία εσωτερικής τριβής του ( $\Phi_M$ ). Ενδεικτικές τιμές για τις παράμετρος αυτές δίνονται στο Μέρος Δ του Πίνακα 2.5. Το 1989 ο Bieniawski πρότεινε έναν άλλο τρόπο εκτίμησης των δύο αυτών με βάση τη τιμή του δείκτη RMR. Συγκεκριμένα,

$$C_M = 5 \text{ RMR} \quad (\text{kPa}) \quad (2.11)$$

$$\Phi_M = 5 + \frac{RMR}{2} \quad (\text{μοίρες}) \quad (2.12)$$

Το 1980 οι Hoek και Brown, εισήγαγαν μία μέθοδο υπολογισμού της αντοχής της βραχώμαζας, βασιζόμενοι στο σύστημα ταξινόμησης RMR. Το κριτήριο αυτό είναι:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \quad (2.13)$$

όπου  $\sigma_1$  = η μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία  
 $\sigma_3$  = η ελάχιστη κύρια τάση  
 $\sigma_c$  = η αντοχή του γεωυλικού σε μονοαξονική θλίψη  
 $m$  και  $s$  = σταθερές εξαρτώμενες από τις ιδιότητες του πετρώματος και το βαθμό στον οποίο υπέστη ρηγμάτωση υπό την επίδραση των  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ .

Στην περίπτωση ακεραίου πετρώματος  $m = m_i$ , το οποίο προκύπτει από προσαρμογή της σχέσης 2.12 σε τριαξονικές δοκιμές εργαστηριακών δοκιμίων, λαμβάνοντας  $s = 1$ . Για τη βραχώμαζα, οι σταθερές  $m$  και  $s$  συνδέονται με το δείκτη RMR ως εξής (Hoek και Brown, 1988):

*Για αδιατάρακτα πετρώματα (εκσκαφή με μηχανικά μέσα ή ήπια ανατίναξη)*

$$m = m_i \exp \left( \frac{RMR - 100}{28} \right) \quad (2.14)$$

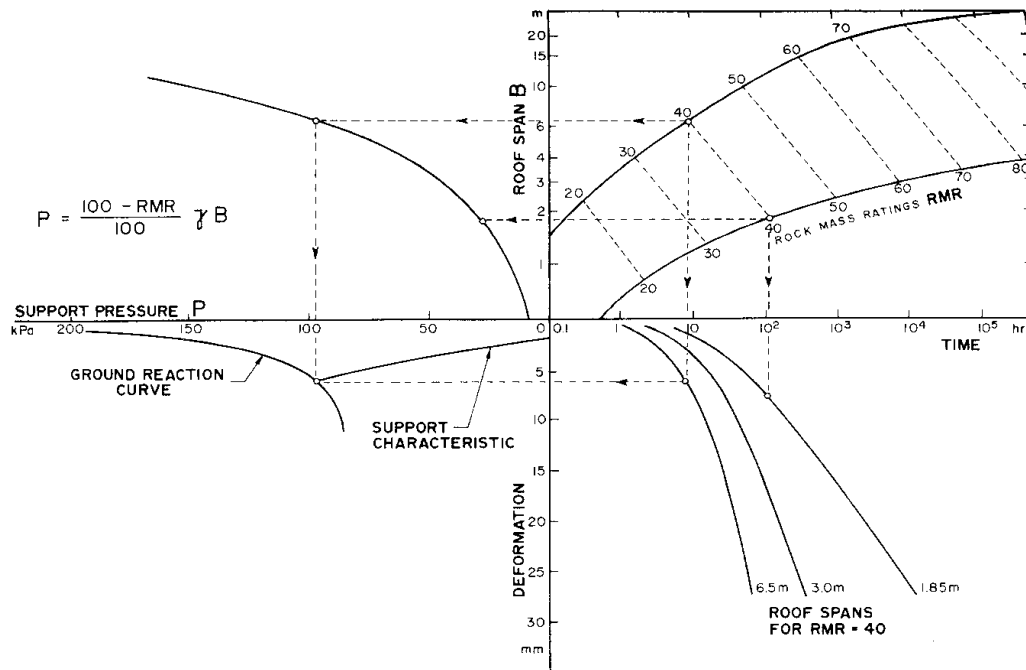
$$s = \exp \left( \frac{RMR - 100}{9} \right) \quad (2.15)$$

*Για διαταραγμένα πετρώματα (πρανή ή εκσκαφές μετά από ανατίναξη)*

$$m = m_i \exp \left( \frac{RMR - 100}{14} \right) \quad (2.16)$$

$$s = \exp \left( \frac{RMR - 100}{6} \right) \quad (2.17)$$

Ο Moreno Tallon (1982) ανέπτυξε μια σειρά από σχέσεις μεταξύ της παραμόρφωσης που υφίσταται ένα υπόγειο άνοιγμα, του RMR και του χρόνου, βασιζόμενος σε μετρήσεις που έγιναν στην Ισπανία. Ο Unal (1983), πρότεινε μια “ολοκληρω-



Σχήμα 2.9: Συσχετισμός του RMR με τα χαρακτηριστικά της υποστήριξης και την παραμόρφωση της οροφής σε ανθρακωρυχεία (Unal, 1983).

μένη προσέγγιση” για την εκτίμηση της ευστάθειας οροφής σε ανθρακωρυχεία, συσχετίζοντας το δείκτη RMR με τη διάμετρο του ανοίγματος, το φορτίο στην υποστήριξη, το χρόνο και την παραμόρφωση. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.

## 2.7.2 Συσχέτιση συστημάτων ταξινόμησης

Μετά από μελέτη επτά περιπτώσεων όρυξης σήραγγας στη Ν. Ζηλανδία, οι Rutledge και Preston (1978) έδωσαν μία σχέση ανάμεσα στην τιμή των RMR και RSR για ένα πέτρωμα:

$$RSR = 0.77 RMR + 12.4 \quad (2.18)$$

## 2.8 Η Ταξινόμηση NGI ή Σύστημα Q

Το σύστημα ταξινόμησης πετρωμάτων Q, αναπτύχθηκε στη Νορβηγία το 1974 από τους Barton, Lien και Lunde και η ανάπτυξή του βασίστηκε στη μελέτη 212

σηράγγων στη Νορβηγία. Πρόκειται για ένα ποσοτικό σύστημα ταξινόμησης, που διευκολύνει το σχεδιασμό της υποστήριξης υπογείων ανοιγμάτων. Βασίζεται στην αριθμητική εκτίμηση της ποιότητας της βραχόμαζας χρησιμοποιώντας έξι παραμέτρους:

- RQD
- Αριθμός των ομάδων ασυνεχειών
- Τραχύτητα της πιο δυσμενούς διάκλασης ή ασυνέχειας
- Βαθμός της εξαλλοίωσης ή πλήρωσης κατά μήκος της ασθενέστερης διάκλασης
- Εισροή νερού
- Εντατική κατάσταση

Οι έξι παράμετροι ομαδοποιούνται σε τρία πηλίκα για να δώσουν τη συνολική ποιότητα  $Q$  της βραχόμαζας, ως ακολούθως:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.19)$$

- όπου
- RQD = δείκτης ποιότητας του πετρώματος
  - $J_n$  = δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών
  - $J_r$  = δείκτης τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών
  - $J_a$  = δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας
  - $J_w$  = δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες
  - SRF = συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος

Ο δείκτης  $Q$  μπορεί να κυμαίνεται από 0.001 έως 1000 και η κλίμακα του είναι λογαριθμική.

Οι Πίνακες 2.6 έως 2.10 δίνουν τις τιμές των παραμέτρων του συστήματος κατάταξης. Οι δύο πρώτες παράμετροι αντιπροσωπεύουν τη συνολική δομή της βραχόμαζας και το πηλίκο τους δίνει το σχετικό μέγεθος των ογκοτεμαχίων της. Το πηλίκο της τρίτης και τέταρτης παραμέτρου θεωρείται δείκτης της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Η πέμπτη παράμετρος είναι ένα μέτρο της πίεσης του νερού, ενώ η έκτη θεωρείται η παράμετρος της ‘συνολικής τάσης’ το πηλίκο τους περιγράφει την ‘ενεργή τάση’.

Η τιμή  $Q$ , μπορεί να συσχετιστεί με την απαιτούμενη υποστήριξη δεδομένης σήραγγας μέσω του ορισμού της ισοδύναμης διάστασης της εκσκαφής (equivalent dimension). Η ισοδύναμη διάσταση είναι συνάρτηση τόσο του μεγέθους όσο και του σκοπού της εκσκαφής και λαμβάνεται ως ο λόγος της διαμέτρου ή του ύψους των

Πίνακας 2.6: Ταξινόμηση NGI, Μέρος Α. (Καββαδάς, 2000).

Ορισμός της παραμέτρου  $J_n$

| Οικογένειες ασυνεχειών                           | Τιμή του $J_n$ |
|--|----------------|
| Ακέραιο πέτρωμα ή με λίγες ασυνέχειες            | 0.5 – 1.0      |
| Μία οικογένεια                                   | 2              |
| Μία οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες    | 3              |
| Δύο οικογένειες                                  | 4              |
| Δύο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες   | 6              |
| Τρεις οικογένειες                                | 9              |
| Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες | 12             |
| Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες              | 15             |
| Θρυμματισμένο πέτρωμα                            | 20             |

πλευρών μίας εκσκαφής, και μιας ποσότητας που καλείται λόγος υποστήριξης εκσκαφής, ESR (excavation support ratio). Έτσι:

$$\text{Ισοδύναμη διάσταση} = \frac{\text{διάμετρος ή ύψος (m)}}{ESR} \quad (2.20)$$

Το ESR εξαρτάται από τη χρήση της εκσκαφής και τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας. Οι τιμές του φαίνονται στον Πίνακα 2.11.

Η σχέση μεταξύ του δείκτη  $Q$  και της ισοδύναμης διαμέτρου της εκσκαφής, ορίζει τα μέτρα υποστήριξης που πρέπει να ληφθούν (Σχήμα 2.10). Οι Barton et al. (1974), πρότειναν 38 κατηγορίες υποστήριξης, προκειμένου για μόνιμη υποστήριξη. Για υπολογισμό προσωρινής υποστήριξης, είτε το  $Q$  αυξάνεται σε  $5Q$ , είτε το ESR αυξάνεται στο 1.5 ESR. Ειδικά για περιπτώσεις κοχλίωσης, το μήκος των κοχλιών δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{2.0 + 0.15B}{ESR} \quad (2.21)$$

Όπου  $B$  = το πλάτος της εκσκαφής.

Το μέγιστο ανυποστήρικτο άνοιγμα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Μέγιστο ανυποστήρικτο άνοιγμα} = 2 (ESR) Q^{0.4} \quad (2.22)$$

Πίνακας 2.7: Ταξινόμηση NGI, Μέρος Β (Καββαδάς, 2000).

Ορισμός της παραμέτρου  $J_r$

(α) Περίπτωση βραχύμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερων των 10 cm.

| Κατάσταση ασυνεχειών                 | Τιμή του $J_r$ |
|--------------------------------------|----------------|
| Ασυνεχείς διακλάσεις                 | 4              |
| Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις | 3              |
| Ομαλές, κυματώδεις                   | 2              |
| Λείες ή ολισθηρές, κυματώδεις        | 1.5            |
| Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες     | 1.5            |
| Ομαλές επίπεδες                      | 1.0            |
| Ολισθηρές επίπεδες                   | 0.5            |

(β) Περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος, ακόμη και μετά από σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

| Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών  | Τιμή του $J_r$ |
|--|----------------|
| Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος            | 1.0            |
| Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικώδες υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος | 1.0            |

Στην περίπτωση που η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του  $J_r$  αυξάνει κατά 1.

Ο ακόλουθος τύπος υπολογίζει το φορτίο που δέχεται η μόνιμη υποστήριξη, σαν συνάρτηση της τιμής του  $Q$ :

Το μέγιστο ανυποστήρικτο άνοιγμα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Μέγιστο ανυποστήρικτο άνοιγμα} = 2 \text{ (ESR)} Q^{0.4} \quad (2.22)$$

Ο ακόλουθος τύπος υπολογίζει το φορτίο που δέχεται η μόνιμη υποστήριξη, σαν συνάρτηση της τιμής του  $Q$ :

$$P_{\text{roof}} = \frac{2.0}{J_r} Q^{-1/3} \quad (2.23)$$

Πίνακας 2.8: Ταξινόμηση NGI, Μέρος Γ (Καββαδάς, 2000).

Ορισμός της παραμέτρου  $J_a$

(α) Περίπτωση βραχύμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας των τοιχωμάτων του πετρώματος

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών                  | Τιμή του $J_a$ |
|--|----------------|
| Υγιή και πλήρως 'επουλωμένα' πετρώματα                               | 0.75           |
| Οξειδωμένα πετρώματα χωρίς αποσάθρωση                                | 1.0            |
| Ελαφρώς αποσαθρωμένα πετρώματα με αμμώδεις (αργιλικό) υλικό πλήρωσης | 2.0            |
| Αμμώδεις ή ιλυώδεις υλικό πλήρωσης                                   | 3.0            |
| Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm                    | 4.0            |

(β) Περίπτωση βραχύμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10 cm).

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών   | Τιμή του $J_a$ |
|---|----------------|
| Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά   | 4.0            |
| Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5 mm  | 6.0            |
| Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5mm   | 8.0            |
| Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5mm. Η τιμή του $J_a$ εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης άργιλου. | 8 - 12         |

(γ) Περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά από σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών                                    | Τιμή του $J_a$ |
|--|----------------|
| Ζώνες από θρυμματισμένο ιλο-αμμώδεις υλικό   | 5              |
| Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος) | 6 - 24         |

Αν οι ομάδες των ασυνεχειών που υπάρχουν στο πέτρωμα είναι λιγότερες από τρεις, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_{\text{roof}} = \frac{2}{3} J_n^{1/2} J_r^{-1} Q^{-1/3} \quad (2.24)$$

Παρόλο που το σύστημα ταξινόμησης  $Q$  περιλαμβάνει 9 κατηγορίες πετρωμάτων και 38 κατηγορίες υποστήριξης, δεν είναι απαραίτητα περίπλοκο. Επιπλέον δυσκολία μπορεί να εισαχθεί, λόγω της λογαριθμικής κλίμακας που χρησιμοποιείται, σε αντίθεση με τη γραμμική. Τέλος, δεκαδικές τιμές  $Q$  όπως '11.53', δεν είναι συνήθης σε άλλα συστήματα ταξινόμησης και πολλοί χρήστες ενδέχεται να μην είναι εξοικειωμένοι.

Πίνακας 2.9: Ταξινόμηση NGI, Μέρος Δ (Καββαδάς, 2000).

Ορισμός της παραμέτρου  $J_w$

| Παρουσία υπογείων υδάτων   | Τιμή του $J_w$ |
|--|----------------|
| Στεγνή εκσκαφή ή μικρή εισροή νερού έως 5 lt/min                       | 1.0            |
| Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης             | 0.66           |
| Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές, χωρίς υλικό πλήρωσης    | 0.50           |
| Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση υλικού πλήρωσης              | 0.33           |
| Πολύ μεγάλη εισροή νερού, βαθμιαίως μειούμενη με την πάροδο του χρόνου | 0.2 – 0.1      |
| Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου         | 0.05 – 0.1     |

Ορισμός της παραμέτρου SRF

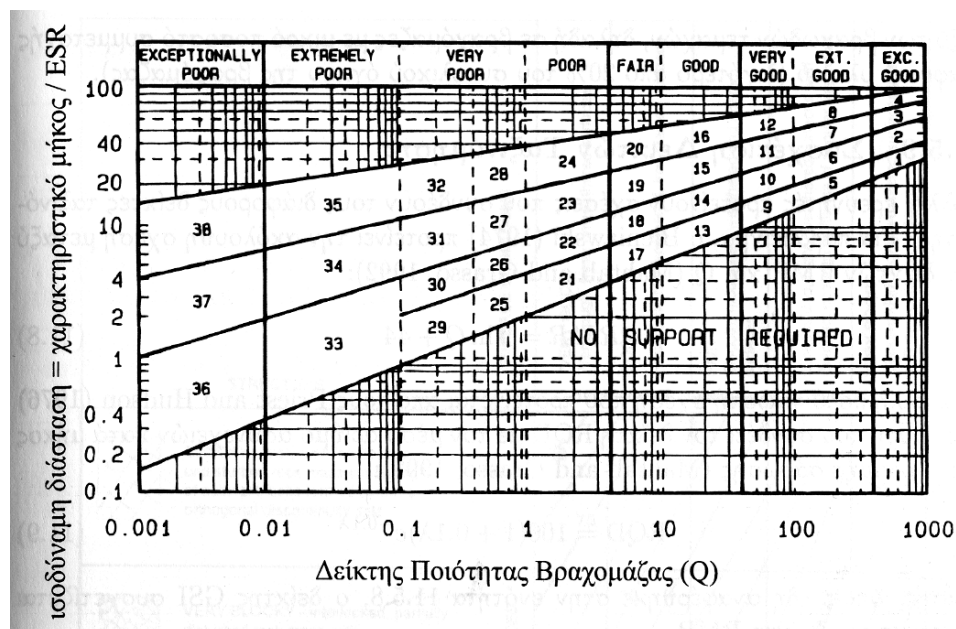
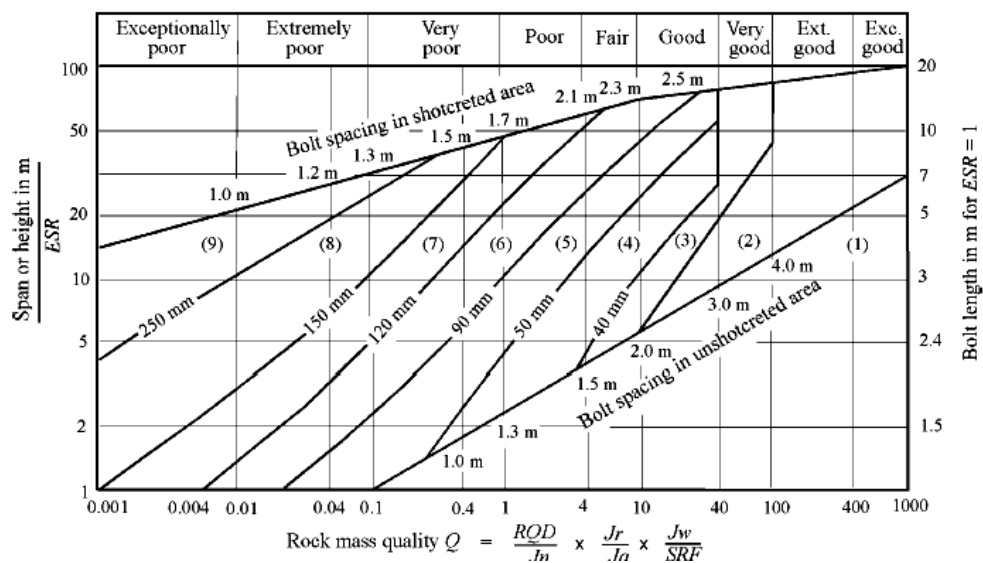
(α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας.

| Περίπτωση  | Τιμή του SRF |
|--|--------------|
| Αφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)  | 10           |
| Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)  | 5            |
| Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)  | 2.5          |
| Αφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | 7.5          |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)  | 5            |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)  | 2.5          |
| Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλαδισμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)                                     | 5            |

Μετά από ανάλυση 111 περιπτώσεων εκσκαφών, αναπτύχθηκε μία σχέση σύνδεσης της τιμής RMR με τη τιμή Q για ένα πέτρωμα (Bieniawski, 1989). Αυτή είναι:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (2.25)$$

Το Σχήμα 2.11 δίνει τα σημεία (μετρήσεις), από τις οποίες προέκυψε η παραπάνω σχέση.



### Κατηγορίες υποστήριξης

1. Ανυποστήρικτο
2. Τοποθέτηση κοχλιών σε μεμονωμένα σημεία
3. Κανονική τοποθέτηση κοχλιών
4. Κανονική τοποθέτηση κοχλιών με ταυτόχρονη τοποθέτηση σκυροκονιάματος σε πάχος 40 – 100 mm
5. Ινοπλισμένο σκυροκονίαμα πάχους 50 – 90 mm και κοχλίωση
6. Ινοπλισμένο σκυροκονίαμα πάχους 90 – 120 mm και κοχλίωση
7. Ινοπλισμένο σκυροκονίαμα πάχους 120 – 150 mm και κοχλίωση
8. Ινοπλισμένο σκυροκονίαμα πάχους > 150 mm, με ενισχυμένες παρειές από σκυροκονίαμα και κοχλίες
9. Επένδυση από μπετόν

Σχήμα 2.10: Κατηγορίες υποστήριξης βασισμένες στο δείκτη ταξινόμηση Q (Grimstad και Barton, 1993).

## 2.9 Το σύστημα GSI

Ο δείκτης GSI, που προτάθηκε από το Hoek (1995) και τους Hoek, Kaiser και Bawden (1995), παρέχει ένα σύστημα υπολογισμού της μείωσης της αντοχής της βραχώμαζας ανάλογα με τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.12 και 2.13. Μετά την εκτίμηση της τιμής του GSI, γίνεται ο υπολογισμός των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας, με την ακόλουθη σχέση:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28} \right) \quad (2.26)$$

Για τιμές  $GSI > 25$ , δηλαδή πετρώματα καλής έως μέτριας ποιότητας, το κριτήριο του Hoek εφαρμόζεται με:

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9} \right) \quad (2.27)$$

$$\alpha = 0.5 \quad (2.28)$$

Για  $GSI < 25$ , δηλαδή πετρώματα πολύ φτωχής ποιότητας, το τροποποιημένο κριτήριο Hoek – Brown θεωρεί:

$$s = 0 \quad (2.29)$$

και

$$\alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (2.30)$$

Το εν λόγω σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι συμβατό με το σύστημα RMR του Bieniawski για πετρώματα με τιμές  $RMR > 40$ . Για πετρώματα πολύ χαμηλής ποιότητας όμως, το σύστημα RMR δεν μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα στον υπολογισμό της αντοχής της βραχώμαζας. Σε τέτοιες περιπτώσεις συνίσταται η χρήση του συστήματος GSI, το οποίο επιτυγχάνει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συμβατότητά του με το σύστημα RMR. Η παρακάτω σχέση συσχετίζει τις τιμές των GSI και RMR (Bieniawski, 1989) για δεδομένο πέτρωμα:

$$GSI = RMR - 5 \quad (2.31)$$

Πίνακας 2.10: Ταξινόμηση NGI, Μέρος Ε (Καββαδάς, 2000).

#### Ορισμός της παραμέτρου SRF (συνέχεια)

(β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων

| Περίπτωση  | C <sub>o</sub> | T <sub>o</sub> | Τιμή του SRF |
|--|----------------|----------------|--------------|
| Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες      | >200           | >13            | 2.5          |
| Μέσες τάσεις   | 200-10         | 13-0.66        | 1.0          |
| Υψηλές τάσεις, πολύ 'σφιχτή' δομή                              | 10-5           | 0.66-0.33      | 0.5 – 2.0    |
| Μέτρια 'εκτίναξη' σκληρού πετρώματος μετά από 1 ώρα            | 5-2.5          | 0.33-0.16      | 5 – 10       |
| Έντονη 'έκρηξη' και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος | <2.5           | <0.16          | 10 - 20      |

(γ) Συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, λόγω πολύ υψηλών τάσεων

| Περίπτωση                           | Τιμή του SRF |
|-------------------------------------|--------------|
| Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 5 – 10       |
| Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 10 – 20      |

(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού.

| Περίπτωση                           | Τιμή του SRF |
|-------------------------------------|--------------|
| Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 5 – 10       |
| Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 10 – 20      |

### 2.9.1 Συσχέτιση της τιμής GSI και των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr – Coulomb

Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια, που χρησιμοποιούνται για επίλυση πλειάδας γεωτεχνικών προβλημάτων είναι αυτό των Mohr – Coulomb. Οι παράμετροι του, συνοχή  $c'$  και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi'$ , αποτελούν δεδομένο σε πολλά λογισμικά πακέτα. Τα δύο αυτά μεγέθη υπολογίζονται ως εξής:

$$\sin \phi' = \frac{k-1}{k+1} \quad (2.32)$$

$$c' = \frac{\sigma_{cm}(1 - \sin \phi')}{2 \cos \phi'} \quad (2.33)$$

Πίνακας 2.11: Τιμές του δείκτη ESR ανάλογα με τη χρήση της εκσκαφής

| Κατηγορία εκσκαφής   | ESR | Αριθμός περιπτώσεων |
|--|-----|---------------------|
| A. Προσωρινές μεταλλευτικές στοές  | 3-5 | 2                   |
| B. Κάθετα φρέατα   |     |                     |
| Κυκλικό τμήμα  | 2.5 |                     |
| Τετραγωνικό ή ορθογωνικό τμήμα   | 2.0 |                     |
| C. Μόνιμες μεταλλευτικές στοές, ανοίγματα μεταφοράς νερού για υδροηλεκτρική χρήση, διευθυντικές στοές μεταλλείου και στοές οδηγού για μεγάλες εκσκαφές | 1.6 | 83                  |
| D. Οδικές σήραγγες, υπόγεια ανοίγματα για αποθήκευση, εγκαταστάσεις καθαρισμού νερών, σήραγγες πρόσβασης   | 1.3 | 25                  |
| E. Λεκτικοί σταθμοί, μεγάλες οδικές σήραγγες, είσοδοι σηράγγων, διασταυρώσεις σηράγγων   | 1.0 | 73                  |
| F. Υπόγειοι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας, σιδηροδρομικές σήραγγες, εργοστάσια   | 0.8 | 2                   |

όπου  $k$  = η κλίση της ευθείας που συνδέει τη μέγιστη και την ελάχιστη κύρια τάση (Σχήμα 2.14)

$\sigma_{cm}$  = η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη

Τα Σχήματα 2.15 και 2.16 δίνουν τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr –Coulomb, της σταθεράς  $m_i$  και του δείκτη GSI. Σημειώνεται ότι το  $m_i$  προκύπτει από τη σχέση:

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[ \frac{\sum xy - (\sum x \sum y / n)}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n} \right] \quad (2.34)$$

όπου  $n$  = ο αριθμός των δειγμάτων

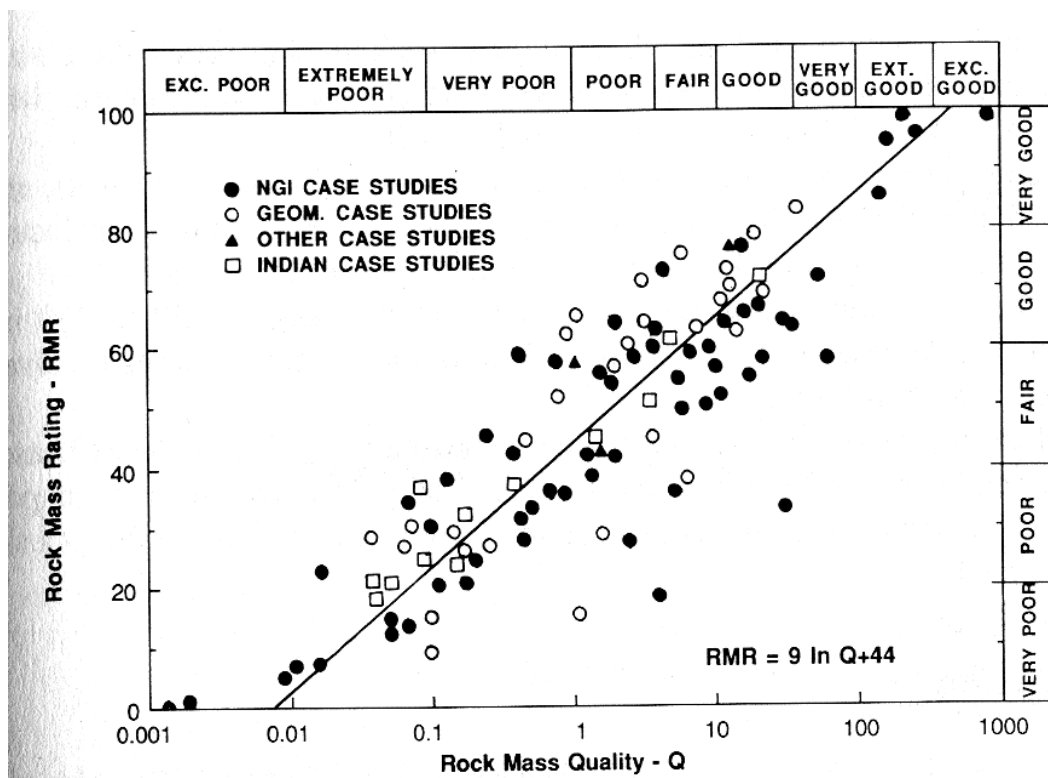
$\sigma_{ci}$  = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

$x$  =  $\sigma'_3$

$y$  =  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)^2$

## 2.9.2 Μέτρο παραμορφωσιμότητας

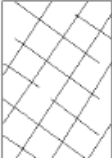



Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι Serafim και Pereira (1983) ανέπτυξαν μία σχέση μεταξύ του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας και του δείκτη RMR. Αυτή προέκυψε μέσα από μελέτες περιπτώσεων που αφορούσαν θεμελιώσεις φραγμάτων και δίνει καλά αποτελέσματα για πετρώματα καλής ποιότητας. Ωστόσο όμως για πετρώματα κακής ποιότητας, το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει έχει πολύ



Σχήμα 2.11: Συσχέτιση του συστήματος Q με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1976 και Jethwa et al, (1982).

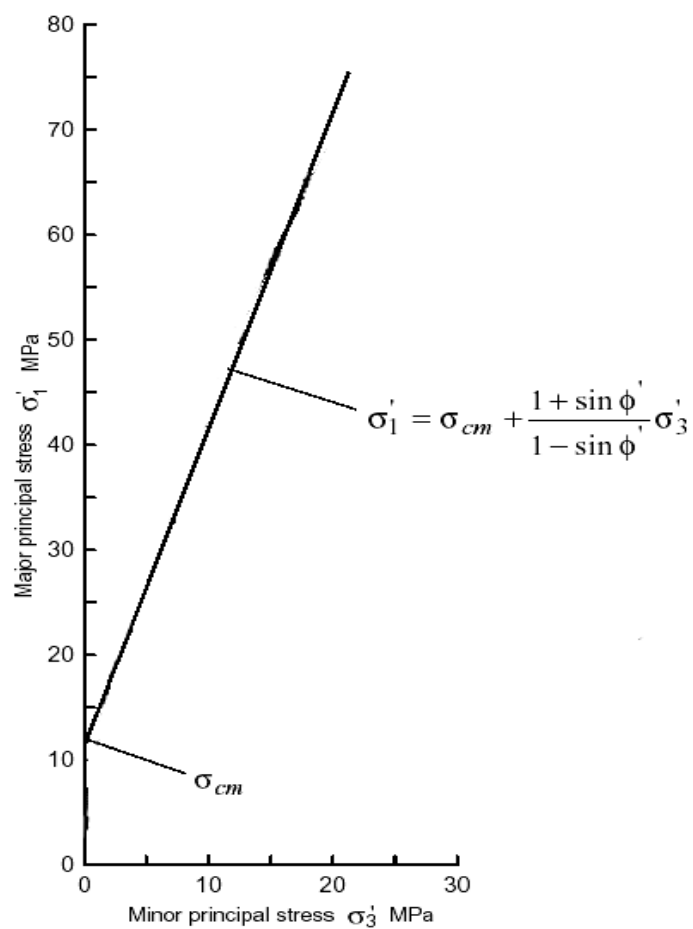
τρώματα κακής ποιότητας, το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει έχει πολύ μεγάλη τιμή. Με βάση πρακτικές παρατηρήσεις και αναλύσεις που έγιναν, για τη συμπεριφορά ανοιγμάτων σε ασθενή πετρώματα, προτάθηκε η ακόλουθη τροποποίηση της σχέσης των Serafim και Pereira. Εφαρμογή αυτής γίνεται όταν  $\sigma_{ci} < 100$

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (2.35)$$

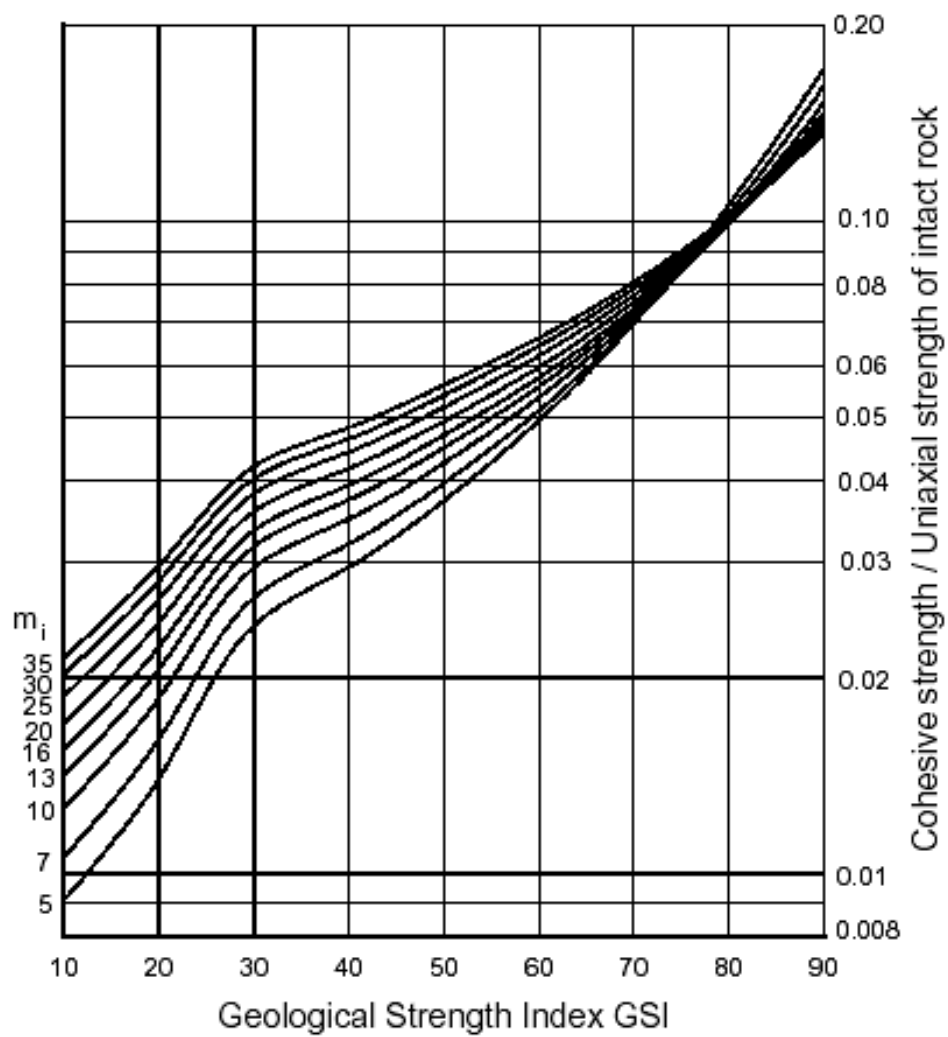
| ROCK MASS CHARACTERISTICS FOR STRENGTH ESTIMATES   |   | SURFACE CONDITIONS                       |      |      |      |       |
|--|---|--|------|------|------|-------|
| Based upon the appearance of the rock, choose the category that you think gives the best description of the 'average' undisturbed in situ conditions. Note that exposed rock faces that have been created by blasting may give a misleading impression of the quality of the underlying rock. Some adjustment for blast damage may be necessary and examination of diamond drill core or of faces created by pre-split or smooth blasting may be helpful in making these adjustments. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration. |   | DECREASING SURFACE QUALITY ▼             |      |      |      |       |
| STRUCTURE  |   | DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ▼ |      |      |      |       |
|   | BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets     | B/VG                                     | B/G  | B/F  | B/P  | B/VP  |
|   | VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets | VB/VG                                    | VB/G | VB/F | VB/P | VB/VP |
|   | BLOCKY/DISTURBED- folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets                          | BD/VG                                    | BD/G | BD/F | BD/P | BD/VP |
|   | DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces                      | D/VG                                     | D/G  | D/F  | D/P  | D/VP  |

Σχήμα 2.12: Χαρακτηρισμός της βραχόμαζας, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης και τις διακλάσεις του (Hoek, 2000).

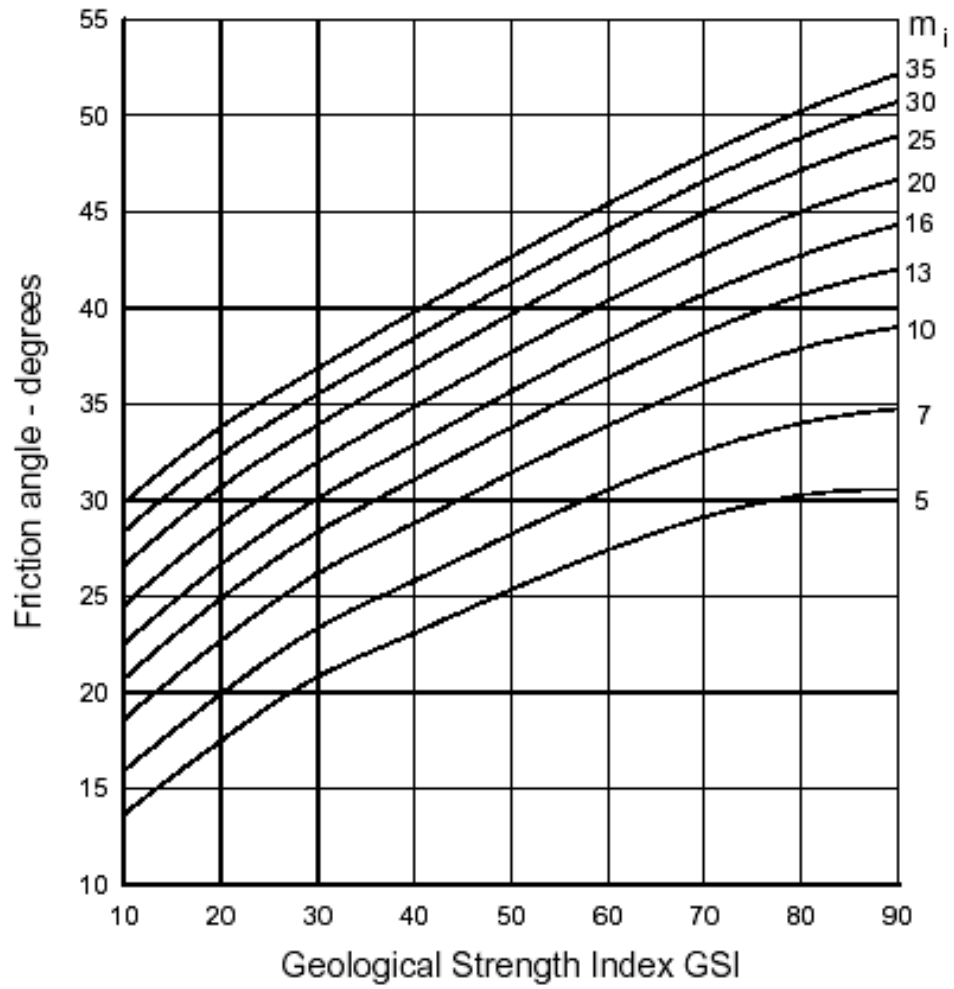




Σχήμα 2.14: Διάγραμμα κυρίων τάσεων, η κλίση της ευθείας δίνει το συντελεστή  $k$  (Hoek, 2000)



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα το λόγου συνοχής της βραχώμαζας προς την αντοχή του ακεραίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, συναρτήσει του δείκτη GSI (Hoek, 2000).



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα της γωνίας εσωτερικής τριβής συναρτήσει του δείκτη GSI (Hoek, 2000).

## Κεφάλαιο 3

### Αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της ευστάθειας υπογείων ανοιγμάτων.

Το σημαντικότερο ίσως θέμα κατά την κατασκευή ενός υπογείου ανοίγματος είναι η ευστάθειά του. Προκειμένου να διατηρηθεί αυτή και να επιλεγεί η κατάλληλη υποστήριξη, είναι απαραίτητη η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ανοίγματος και του περιβάλλοντος σχηματισμού, πετρώματος ή εδάφους.

#### 3.1 Επί τόπου εντατικό πεδίο.

Οι τάσεις που ασκούνται σε δεδομένο σημείο ενός ανυποστήρικτου πετρώματος είναι συνάρτηση του βάρους των υπερκειμένων μαζών και της γεωλογικής ιστορίας του ίδιου του πετρώματος. Αρχικά, το εντατικό αυτό πεδίο είναι αδιατάρακτο και η βραχώμαζα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Οι τάσεις διακρίνονται σε (Αγιουτάντης, 2002):

- Βαρυτικές τάσεις, οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας
- Τεκτονικές τάσεις, οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις
- Παραμένουσες τάσεις, που μπορεί να προκληθούν από φυσικές ή χημικές διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένους όγκους πετρωμάτων

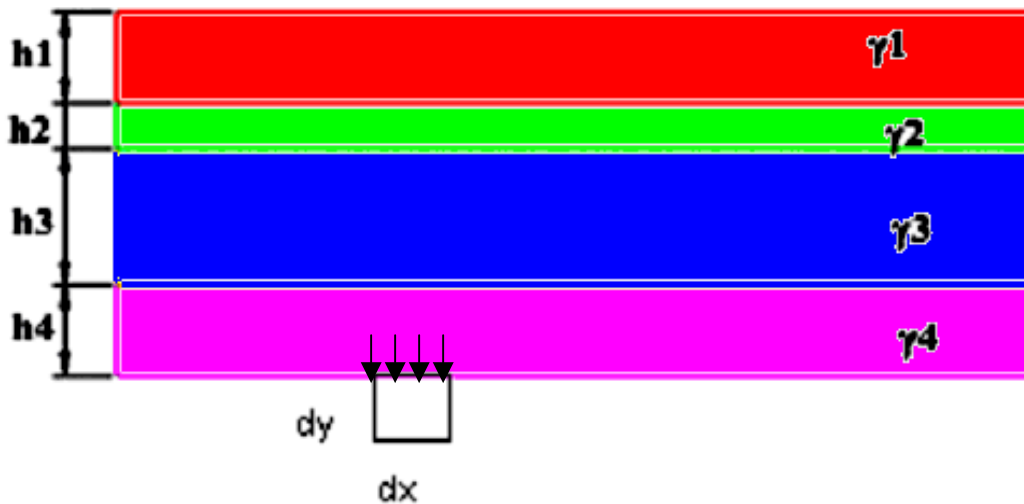
Ο υπολογισμός των τάσεων που δημιουργούνται λόγω του φορτίου των υπερκειμένων, μπορεί να γίνει αν θεωρηθεί ισορροπία στον κατακόρυφο άξονα. Ουσιαστικά θεωρείται μία στήλη πετρώματος, της οποίας η διατομή ισούται με αυτή του στοιχειώδους σημείου. Οι κατακόρυφες τάσεις επομένως είναι:

$$\sigma_v = \gamma h \quad (3.1)$$

όπου  $\sigma_v$  = η κατακόρυφη θλιπτική τάση

$\gamma$  = το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος

$h$  = η απόσταση του στοιχειώδους σημείου από την επιφάνεια.



Σχήμα 3.1: Κατακόρυφες τάσεις στο στοιχειώδες τμήμα  $dx-dy$ , περίπτωση πολλαπλών διαφορετικών στρωμάτων.

Σε περίπτωση που τα υπερκείμενα στρώματα είναι περισσότερα από ένα και έχουν διαφορετικά ύψη και ειδικά βάρη (Σχήμα 3.1) , η κατακόρυφη τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (3.2)$$

όπου  $\gamma_i$  = το μοναδιαίο βάρος κάθε στρώματος  
 $h_i$  = το πάχος κάθε στρώματος  
 $n$  = ο αριθμός των στρωμάτων

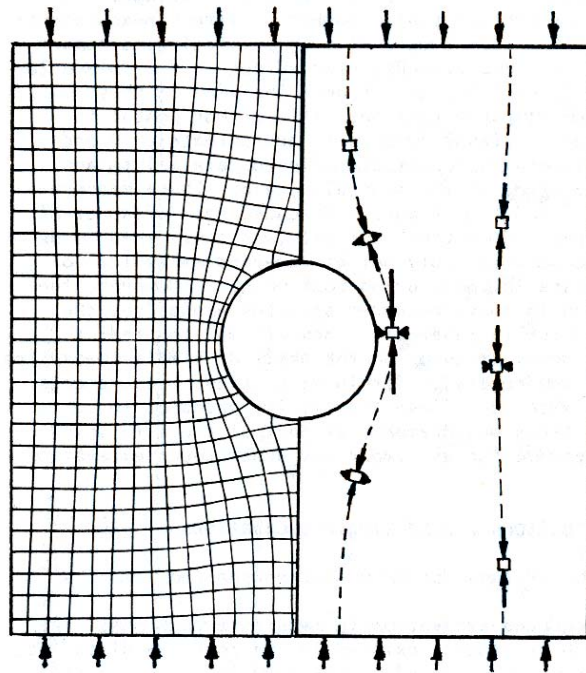
Εκτός από τις κατακόρυφες τάσεις όμως, συχνά εκδηλώνονται και οριζόντιες. Αυτές είναι συνάρτηση των πρώτων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_h = k \sigma_v \quad (3.3)$$

όπου  $\sigma_h$  = η οριζόντια θλιπτική τάση

$k$  = συντελεστής πλευρικών τάσεων ή συντελεστής πλευρικής ώθησης. Πρόκειται για μία σταθερά, που εξαρτάται από τον τύπο του εντατικού πεδίου και δίνεται από τον τύπο  $k = \frac{\nu}{1-\nu}$ , όπου  $\nu$  ο λόγος του Poisson και προκύπτει:  $0 \leq k \leq 1$

Τα παραπάνω ισχύουν σε ελαστικές συνθήκες και το σώμα δεν υφίσταται παραμόρφωση ( $\epsilon_x = 0$ ). Σε μη ελαστικές συνθήκες το  $k$  λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή. Συνήθως όμως θεωρείται  $k = 1/3$



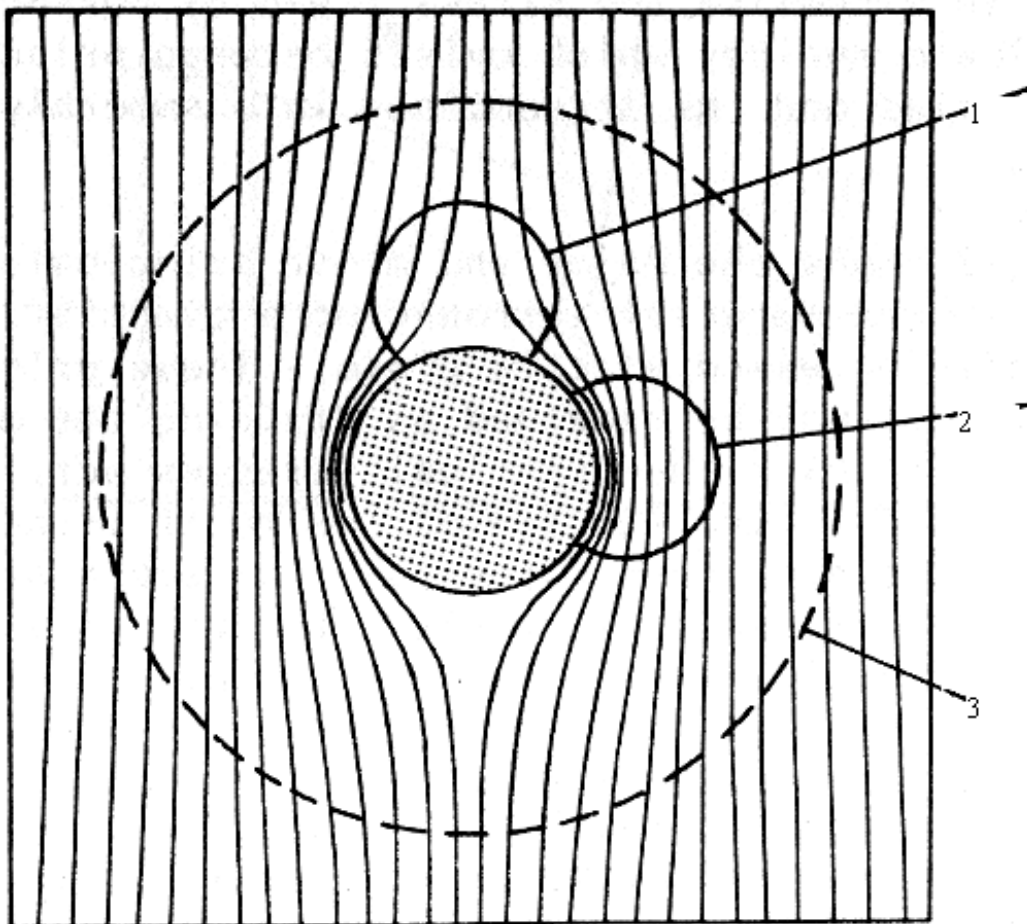
Σχήμα 3.2: Ισοτασικές καμπύλες μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης σε τομή ελαστικού σώματος, μέσα σε μονοαξονικό θλιπτικό πεδίο. Στο δεξί κομμάτι φαίνεται η αλληλεπίδραση των τάσεων με φανταστικά στοιχεία. Τα βέλη δείχνουν κάθε φορά τη διεύθυνση και το μέγεθος των τάσεων. Μακριά από το άνοιγμα η μέγιστη κύρια τάση είναι κατακόρυφη και η ελάχιστη οριζόντια. Γύρω από το άνοιγμα όμως καμπυλώνονται (Hoek and Brown, 1980).

Οι τεκτονικές και οι παραμένουσες τάσεις είναι δύσκολο να υπολογιστούν και για το λόγο αυτό, προσδιορίζονται με επί τόπου μετρήσεις.

### 3.2 Εντατικό πεδίο γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Η δημιουργία μιας υπόγειας εκσκαφής έχει σαν αποτέλεσμα τη διαταραχή του υπάρχοντος πεδίου τάσεων και την ανακατανομή των τελευταίων, ώστε το σύστημα να ισορροπήσει εκ νέου. Συχνά δε, σε μερικά σημεία οι τάσεις γίνονται τόσο μεγάλες, που μπορεί να ξεπεράσουν και την αντοχή του πετρώματος. Ένας τρόπος παράστασης του νέου εντατικού πεδίου είναι ο σχεδιασμός των ισοτασικών καμπυλών των κυρίων τάσεων (Σχήμα 3.2). Σημειώνεται ότι κύριες τάσεις είναι οι ορθές τάσεις σε συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο δεν υπάρχουν διαμητικές τάσεις.

Κατά τη δημιουργία ενός κυλινδρικού ανοίγματος, όπως μίας σήραγγας, οι τάσεις μεταβάλλονται και λαμβάνουν τη μορφή του Σχήματος 3.3. Συγκεκριμένα επέρχεται αποχωρισμός των ισοτασικών καμπυλών στο πάνω μέρος της εκσκαφής,



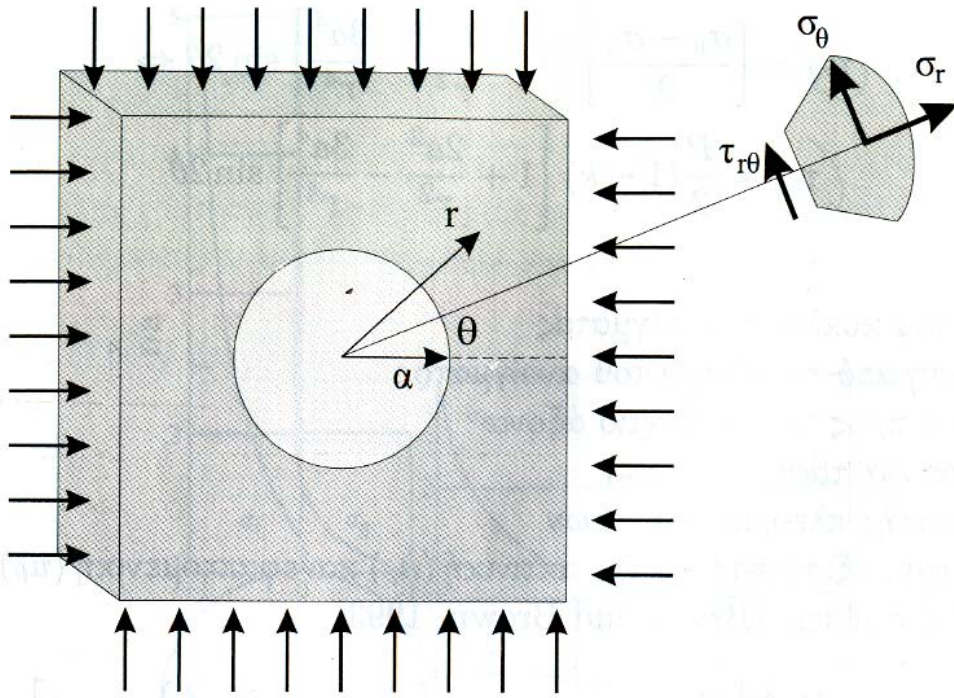
Σχήμα 3.3: Μεταβολή των ισοτασικών καμπυλών γύρω από κυκλικό άνοιγμα σε ελαστικό μέσο (Hoek and Brown, 1980).

- 1: Περιοχή απόκλισης των ισοτασικών καμπυλών, εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων.
- 2: Περιοχή συμπίκνωσης των ισοτασικών καμπυλών, εμφάνιση θλιπτικών τάσεων.
- 3: Ακτίνα επίδρασης του ανοίγματος.

που έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων στα σημεία αυτά. Αντίθετα, στα πλευρά αυτής παρατηρείται συμπίκνωση των ισοτασικών, που σημαίνει αύξηση της θλιπτικής τάσης έως και τρεις φορές. Σε σημεία μακριά από τη σήραγγα (απόσταση μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της ακτίνας του ανοίγματος) το πεδίο παραμένει αδιατάρακτο.

### 3.2.1 Τάσεις στα όρια της εκσκαφής

Προκειμένου να υπολογιστούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις γύρω από μια εκσκαφή σε ελαστικό μέσο, είναι απαραίτητα η εφαρμογή της μα-



Σχήμα 3.4: Κυκλικό άνοιγμα και ελαστικό ομογενές και ισότροπο μέσο και οι εξισώσεις του Kirsch (Αγιουτάντης, 2002).

θηματικής θεωρίας της ελαστικότητας. Με βάση αυτήν, ο Kirsch το 1898, έδωσε μία αναλυτική εξίσωση υπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων. Η προσέγγισή του αφορούσε κυκλικά ανοίγματα και χρησιμοποιούσε σύστημα πολικών συντεταγμένων. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το μοντέλο κυκλικού ανοίγματος, σε ομογενές, ελαστικό και ισότροπο μέσο, υπό την επίδραση διαζονικού εντατικού πεδίου προσανατολισμένου επί του κάθετου επιπέδου στον επιμήκη άξονα της σήραγγας.

Οι συνιστώσες της τάσης σε σημείο με συντεταγμένες  $r$ ,  $\theta$  είναι (Mahtab and Grasso, 1992):

$$\sigma_r = \left[ \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \right] \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \left[ \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \right] \left[ 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \quad (3.4)$$

$$\sigma_\theta = \left[ \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \right] \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} \right] - \left[ \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \right] \left[ 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \quad (3.5)$$

$$\tau_{r\theta} = \left[ \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \right] \left[ 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right] \sin 2\theta \quad (3.6)$$

όπου  $\sigma_r$  = η ακτινική τάση  
 $\sigma_\theta$  = η εφαπτομενική τάση  
 $\tau_{r\theta}$  = η διατμητική τάση  
 $a$  = η ακτίνα του κυκλικού ανοίγματος  
 $r$  = η απόσταση από το κέντρο του ανοίγματος  
 $\theta$  = η γωνία ως προς τον οριζόντιο άξονα  
 $\sigma_v$  και  $\sigma_h$  = η κατακόρυφη και οριζόντια τάση αντίστοιχα

Αντίστοιχα, η ακτινική ( $u_r$ ) και οι εφαπτομενική ( $u_\theta$ ) παραμόρφωση δίνονται από τις σχέσεις: (Brady and Brown, 1993):

$$u_r = -\frac{Pa^2}{4Gr} \left[ (1+k) - (1-k) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad (3.7)$$

$$u_\theta = -\frac{Pa^2}{4Gr} \left[ (1-k) \left\{ 2(1-2\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right] \quad (3.8)$$

όπου  $G$  = το μέτρο διάτμησης  
 $\nu$  = ο λόγος του Poisson  
 $k$  = ο συντελεστής πλευρικών τάσεων

Σχόλια – παρατηρήσεις (Αγιουτάντης, 2002):

- Οι ελαστικές σταθερές του υλικού, δεν επηρεάζουν τον τρόπο κατανομής του εντατικού πεδίου γύρω από το άνοιγμα.
- Οι τιμή των εφαπτομενικών τάσεων είναι αρκετά μεγάλη κοντά στο σύνορο του ανοίγματος, ελαττώνεται όμως απότομα, καθώς η απόσταση από το κέντρο του ανοίγματος αυξάνει (Σχήμα 3.5(α) και (β)).
- Στο σύνορο του ανοίγματος, τόσο οι ακτινικές όσο και οι διατμητικές τάσεις είναι ίσες με το μηδέν (Σχήμα 3.5).
- Οι τιμές των τάσεων εξαρτώνται μόνο από το λόγο  $a/r$  και επομένως είναι ανεξάρτητες από τη ακτίνα του ανοίγματος.
- Για μονοαξονικό εντατικό πεδίο,  $\sigma_h = 0$ , και  $\theta = 0$  ή  $180$ , στο σύνορο του ανοίγματος, η εφαπτομενική τάση που ασκείται είναι θλιπτική και το μέτρο της είναι τριπλάσιο αυτής που ασκείται στο αδιατάρακτο πέτρωμα ( $\sigma_v$ ).
- Για  $\theta = 90$  (στέψη του ανοίγματος), όταν  $k = 1/3$ , η εφαπτομενική τάση είναι αρνητική (δηλαδή εφελκυστική) και το μέτρο της ισούται με τη θλιπτική τάση  $\sigma_v$ , που δέχεται το πέτρωμα πριν την εκσκαφή. (Σχήμα 3.5)

Είναι γνωστό ότι η αντοχή των πετρωμάτων σε εφελκυσμό είναι μικρή, έως αμελητέα. Όπως προκύπτει, η τιμή της εφαπτομενικής τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να είναι και αρνητική (εφελκυσμός). Αυτό όμως εξαρτάται από το συντελεστή πλευρικών τάσεων  $k$ . Το Σχήμα 3.6 δίνει τις καμπύλες κατανομής των συνοριακών εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα, για διάφορες τιμές  $k$ .

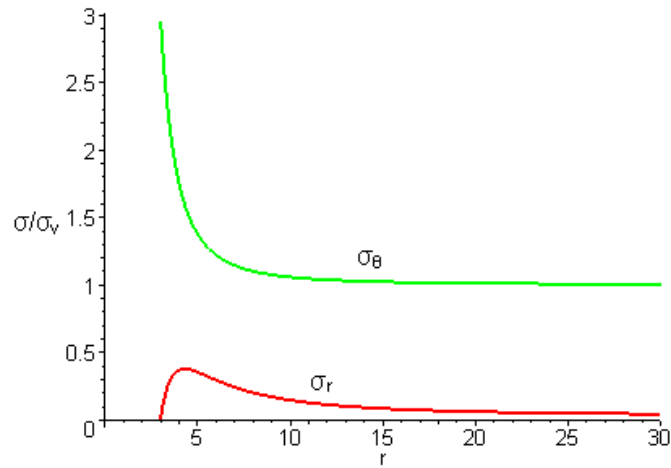
### 3.2.2 Κύριες τάσεις γύρω από κυκλικό άνοιγμα

Κατά τη μελέτη της επίδρασης του εντατικού πεδίου στη ευστάθεια ενός κυκλικού ανοίγματος, μεγάλης σημασίας είναι ο εντοπισμός της ζώνης αστοχίας γύρω από αυτό. Είναι γνωστό ότι η αστοχία ενός τυπικού πετρώματος καθορίζεται από το μέγεθος της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης στο υπό σημείο. Οι κύριες τάσεις υπολογίζονται από τις σχέσεις:

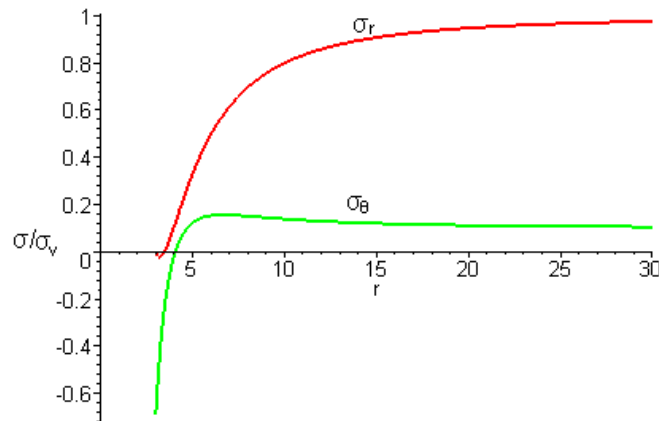
$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \left(\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) - \left(\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

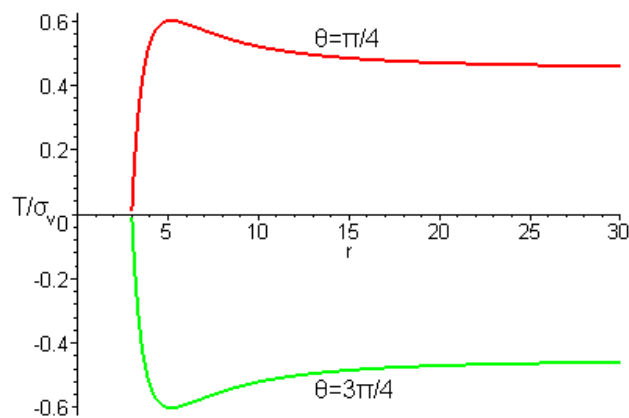
Το σχήμα 3.7 δείχνει τις καμπύλες των κυρίων τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα. Το γράφημα αυτό δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την ευστάθεια του.



Σχήμα 3.5(α): Κατανομή ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης κατά την οριζόντια ακτινική διεύθυνση (Ασημίδης, 2003).

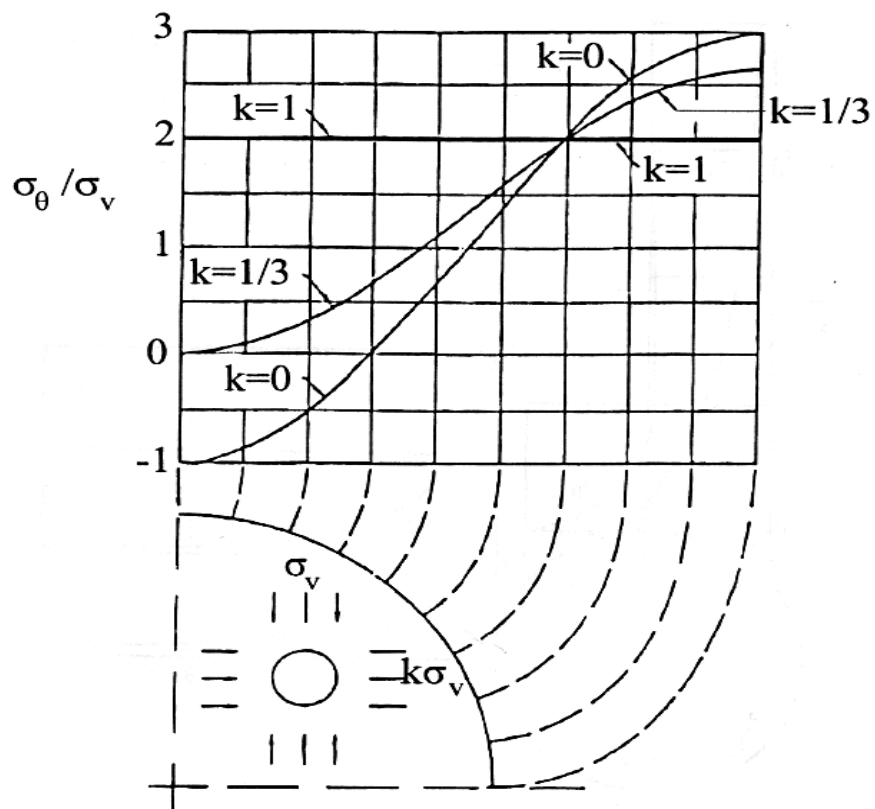


Σχήμα 3.5(β): Καμπύλες κατανομής της ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση.

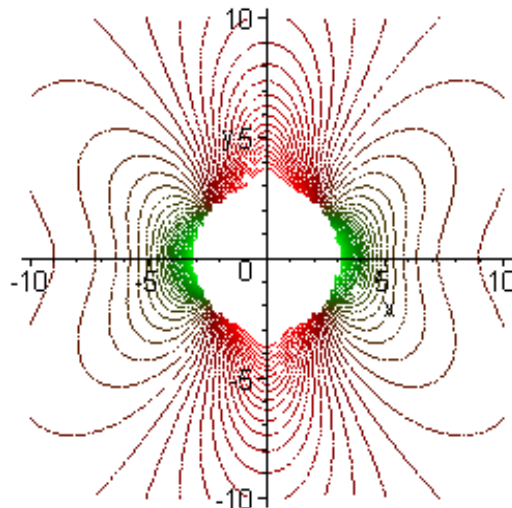


Σχήμα 3.5(γ): Καμπύλες κατανομής της διατμητικής τάσης κατά μήκος των διαγώνιων κατευθύνσεων.

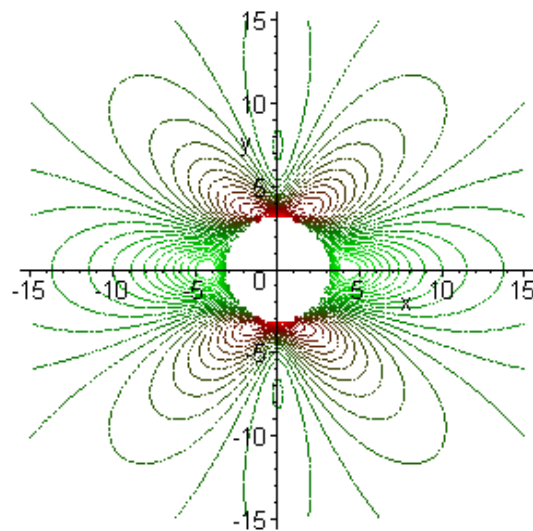
Σημειώνεται ότι για όλα τα σχήματα ισχύει  $\alpha = 3$ . Η εντατική κατάσταση εκφράζεται σαν λόγος  $\sigma_\theta/\sigma_v$ ,  $\sigma_r/\sigma_v$  και  $\tau/\sigma_v$ , που ονομάζονται συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων.



Σχήμα 3.6: Καμπύλες κατανομής συνοριακών εφαπτομενικών τάσεων  $\sigma_\theta$  γύρω από κυκλικό άνοιγμα, για τιμές  $k = 0, 1/3, 1$  (Obert and Duvall, 1967).



Σχήμα 3.7 (α): Πεδίο ισότιμων καμπυλών μέγιστης κύριας τάσης για μονοαξονικό πεδίο



Σχήμα 3.7 (β): Πεδίο ισότιμων καμπυλών ελάχιστης κύριας τάσης για μονοαξονικό πεδίο(Ασημίδης, 2003)

## Κεφάλαιο 4

### Αντοχή και αστοχία του πετρώματος

Η ευστάθεια μιας υπόγειας εκσκαφής εξαρτάται από τη δομή του πετρώματος και της σχέσης μεταξύ της τάσης που δέχεται και της αντοχής του. Η ευστάθεια ανοιγμάτων κοντά στην επιφάνεια, όπως είναι οι σιδηροδρομικές και οι οδικές σήραγγες, επηρεάζεται περισσότερο από τη δομή του πετρώματος και το βαθμό εξαλλοίωσης του υπερκείμενου πετρώματος. Αντίθετα, σε εκσκαφές που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, καθοριστικής σημασίας είναι η ανταπόκριση του πετρώματος στο εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω απ' αυτές. Αυτή εξαρτάται από τη συμπεριφορά του, η οποία μπορεί να είναι ελαστική, πλαστική, βισκοελαστική, βισκοπλαστική, κλπ.

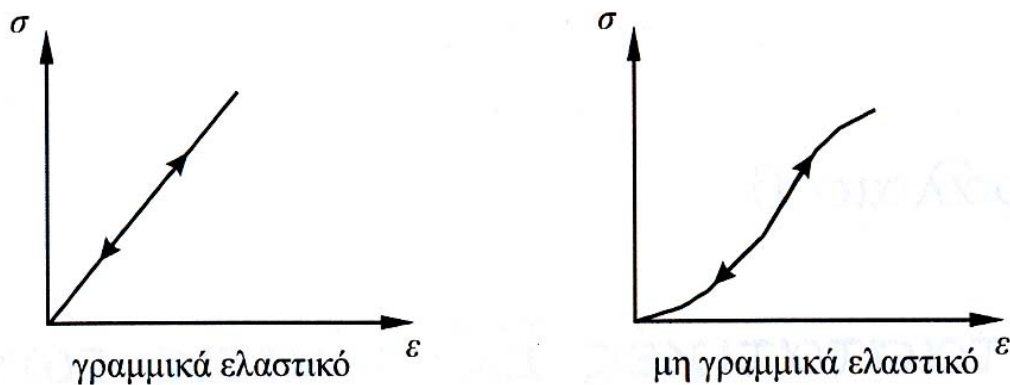
#### 4.1 Η ελαστική συμπεριφορά

Η βασικότερη θεώρηση στα προβλήματα της μηχανικής είναι η ελαστική συμπεριφορά, που διέπει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις. Ελαστική συμπεριφορά επιδεικνύει ένα υλικό όταν κατά την παύση του επιβαλλόμενου φορτίου, το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, χωρίς παραμένονσα παραμόρφωση. Η γενική εξίσωση της ελαστικότητας δίνεται από το νόμο του Hooke:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4.1)$$

όπου:  $\sigma_{ij}$  = η τάση  
 $\varepsilon_{kl}$  = η παραμόρφωση  
 $c_{ijkl}$  = τανυστής τετάρτης τάξης, που είναι συνάρτηση των ελαστικών σταθερών του σώματος.

Στη γενική περίπτωση, το  $c_{ijkl}$  έχει 81 όρους άλλα όταν υπάρχει συμμετρία οι διαφορετικοί είναι μόνο 36. Συγκεκριμένα, για ελαστικό, ομογενές και ισότροπο μέσο, οι 36 αυτοί όροι είναι συνάρτηση μόνο των σταθερών του Lamé,  $\lambda$  και  $\mu$ . Αυτές δε, μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του λόγου του Poisson,  $\nu$  και του μέτρου ελαστικότητας του Young,  $E$  (Αγιουντάντης, 2002).



Σχήμα 4.1: Τυπικά διαγράμματα ελαστικής συμπεριφοράς (Αγιουτάντης, 2002)

Σημειώνεται ότι ο λόγος του Poisson έχει εύρος  $0 \leq \nu \leq 0.5$  και για μονοαξονική φόρτιση δίνεται από τη σχέση:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (4.3)$$

όπου:  $-\varepsilon_x$  = η εγκάρσια παραμόρφωση  
 $\varepsilon_y$  = η κατακόρυφη παραμόρφωση

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , αποτελεί την κλίση της καμπύλης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης. Το Σχήμα 4.1 δίνει χαρακτηριστικά γραφήματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για υλικά με γραμμική και μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά αντίστοιχα.

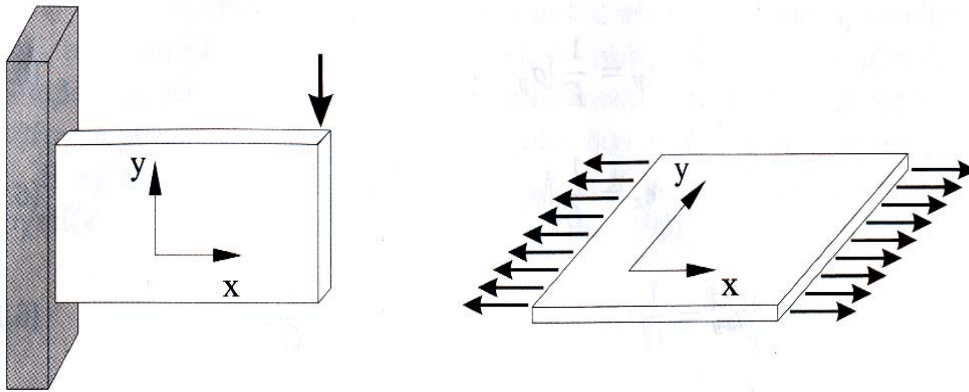
#### 4.1.1 Η ελαστική συμπεριφορά σε μία διάσταση

Σε περίπτωση που η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι γραμμική, η σχέση (4.1) γίνεται:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4.4)$$

όπου:  $E$  = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Ο νόμος είναι ανάλογος με το νόμο των ελατηρίων.

#### 4.1.2 Η ελαστική συμπεριφορά σε δύο διαστάσεις



Σχήμα 4.2: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιουτάντης, 2002)

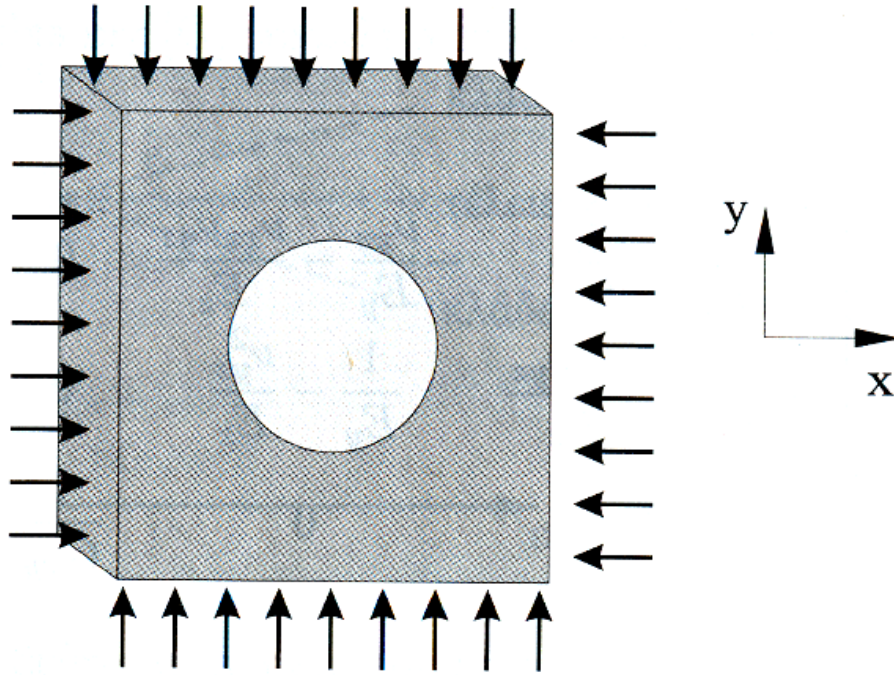
Στις περισσότερες περιπτώσεις η εύρεση της εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης είναι ένα τρισδιάστατο πρόβλημα. Όταν όμως, τόσο η γεωμετρία όσο και η φόρτιση του σώματος το επιτρέπουν, η μελέτη μπορεί να γίνει σε δύο διαστάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, το σώμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε διαζονική καταπόνηση και τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις, αναφέρονται στ επίπεδο (x,y). Οι σχέσεις που δίνουν τα δύο αυτά μεγέθη είναι:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{και} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

#### 4.1.2.1 Η παραδοχή της επίπεδης τάσης

Κατά τη θεώρηση αυτή το σώμα παρομοιάζεται με μία λεπτή πλάκα, της οποίας η τρίτη διάσταση θεωρείται αμελητέα ως προς τις άλλες δύο (Σχήμα 4.2). Έτσι, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις βρίσκονται στο επίπεδο των δύο σημαντικών διαστάσεων. Οι εξισώσεις υπολογισμού της τάσης και της παραμόρφωσης είναι (Αγιουτάντης, 2002):

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.3: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002)

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{-\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4.8)$$

#### 4.1.2.2 Η παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης

Στο μοντέλο αυτό, η τρίτη διάσταση δεν θεωρείται αμελητέα, όμως η συνιστώσα  $u_z$  του διανύσματος της μετατόπισης λαμβάνεται ίση με το μηδέν και άλλες δύο συνιστώσες της είναι ανεξάρτητες της τρίτης διάστασης (Σχήμα 4.3). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι και  $\sigma_z = 0$ . Ακολουθούν οι καταστατικές εξισώσεις, που είναι συνάρτηση των συντεταγμένων  $x$  και  $y$ .

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (4.10)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4.11)$$

### 4.1.3 Η ελαστική συμπεριφορά σε τρεις διαστάσεις

Σε ένα τρισδιάστατο πρόβλημα, οι γενικές εξισώσεις που συνδέουν τις τάσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις για ένα ελαστικό, ομογενές και ισότροπο σώμα, είναι (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (4.13)$$

Σε καθεμία από τις τρεις διαστάσεις, οι παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουν τη μορφή (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_x = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (4.14)$$

$$\sigma_y = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \quad (4.15)$$

$$\sigma_z = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad (4.16)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (4.17)$$

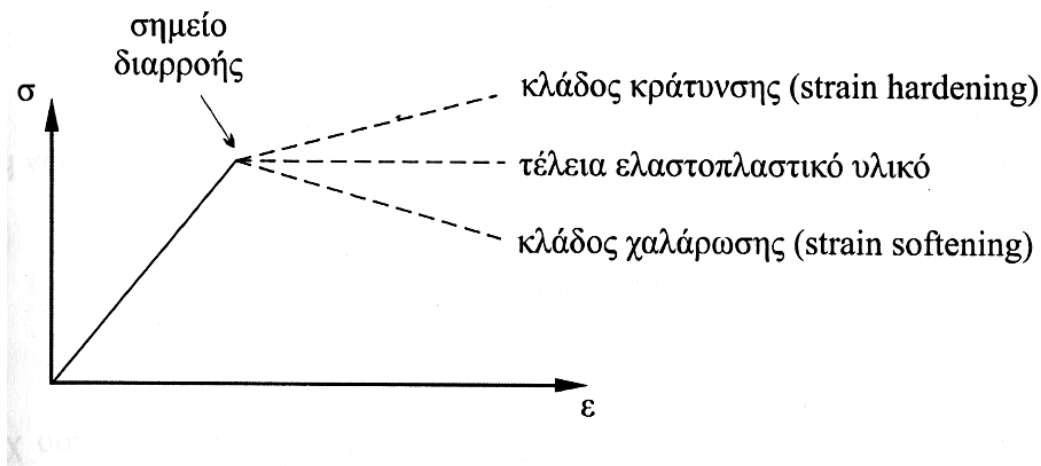
$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} \quad (4.18)$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4.22)$$



Σχήμα 4.4: Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά (Αγιουτάντης, 2002)

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (4.23)$$

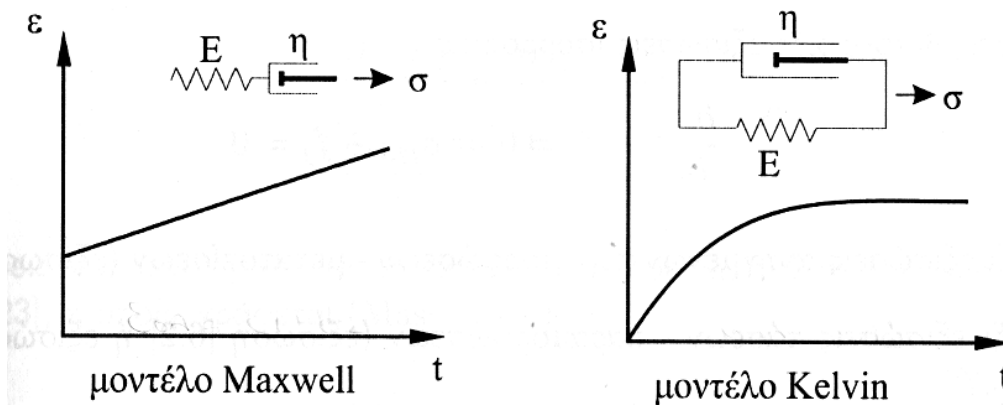
το  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης ή μέτρο ακαμψίας του υλικού και δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.24)$$

και  $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$

## 4.2 Η πλαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά

Σε γενικές γραμμές, η ελαστική συμπεριφορά ενός σώματος διατηρείται μέχρι κάποια ορισμένη τιμή τάσης. Μετά από το όριο αυτό, η δομή των υλικών επηρεάζεται και η συμπεριφορά τους γίνεται ελαστοπλαστική ή πλαστική. Στο στάδιο αυτό εκδηλώνονται μεγάλες παραμορφώσεις, συχνά χωρίς μεταβολή όγκου, ενώ η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή. Σε μερικές περιπτώσεις, προκαλείται ρήξη στη δομή των πετρωμάτων και μπορεί να παρουσιαστούν μεταβολές όγκου, χαλάρωση ή κράτυνση. Αυτή είναι η ελαστοπλαστική κατάσταση. Τόσο η πλαστική όσο και η ελαστοπλαστική κατάσταση είναι μη αντιστρεπτές, αφού η μηχανική ενέργεια που δαπανάται μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και ενέργεια παραμόρφωσης. Η ύπαρξη ενός οριζοντίου κλάδου στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, δηλώνει την καθαρή πλαστική συμπεριφορά (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.5: Τα απλοποιημένα μοντέλα Maxwell και Kelvin (Αγιουτάντης, 2002)

### 4.3 Η βισκοελαστική συμπεριφορά

Τα απλά βισκοελαστικά μοντέλα αποτελούν συνδυασμό του απλού ελαστικού μοντέλου και του απλού μοντέλου απόσβεσης. Η σύνδεση αυτών σε σειρά είναι γνωστό σαν μοντέλο Maxwell. Η παράλληλη σύνδεσή τους αποτελεί το μοντέλο Kelvin. Βασικό στοιχείο της βισκώδους συμπεριφοράς ενός υλικού είναι ο χρόνος.

Σε μία διάσταση, τα πλαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από σταθερή τάση με συνεχή αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης, που εκφράζεται από τη σχέση  $\sigma = \sigma_0$ . Τη συμπεριφορά των βισκωδών υλικών, μπορεί να χαρακτηρίζουν γραμμικές ή μη γραμμικές σχέσεις. Αυτή δε είναι συνάρτηση του ρυθμού επιβολής του φορτίου. Οι σχέσεις που τη περιγράφουν είναι:

$$\sigma = \eta \left[ \frac{d\varepsilon}{dt} \right] \quad (4.25)$$

$$\sigma = \eta \left[ \frac{d\varepsilon}{dt} \right]^m \quad (4.26)$$

το  $\eta$  είναι ο συντελεστής ιξώδους και το  $m$  εκθετικός συντελεστής.

Το σχήμα 4.5 παρουσιάζει τα μοντέλα Maxwell και Kelvin. Η σχέση 4.27 αναφέρεται στο πρώτο του Maxwell ενώ η 4.28 σ' αυτό του Kelvin.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\eta} \quad (4.27)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 - e^{-Et/\eta} \right] \quad (4.28)$$

Στο μοντέλο Maxwell θεωρείται  $\varepsilon_{ολ} = \varepsilon_e + \varepsilon_\beta$ , ενώ στον Kelvin  $\sigma_{ολ} = \sigma_e + \sigma_\beta$ . Οι δείκτες  $\varepsilon$  και  $\beta$  αναφέρονται στο ελαστικό και το βισκώδες μοντέλο αντίστοιχα (Αγιουτάντης, 2002).

### 4.3.1 Το μοντέλο Burger

Το μοντέλο Burger περιέχει το μοντέλα Kelvin και Maxwell, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, τόσο στην ορθή όσο και στη διατμητική διεύθυνση, σε ένα σημείο επαφής (Σχήμα 4.6). Οι συνολική μετατόπιση,  $u$  στο μοντέλο προκύπτει σαν άθροισμα της μετατόπισης στο στοιχείο Kelvin ( $u_k$ ) και στο στοιχείο Maxwell ( $u_{mk}$ ,  $u_{mc}$ ) (FLAC 4.0, 2002)

$$u = u_k + u_{mk} + u_{mc} \quad (4.29)$$

## 4.4 Συναρτήσεις ορίων διαρροής

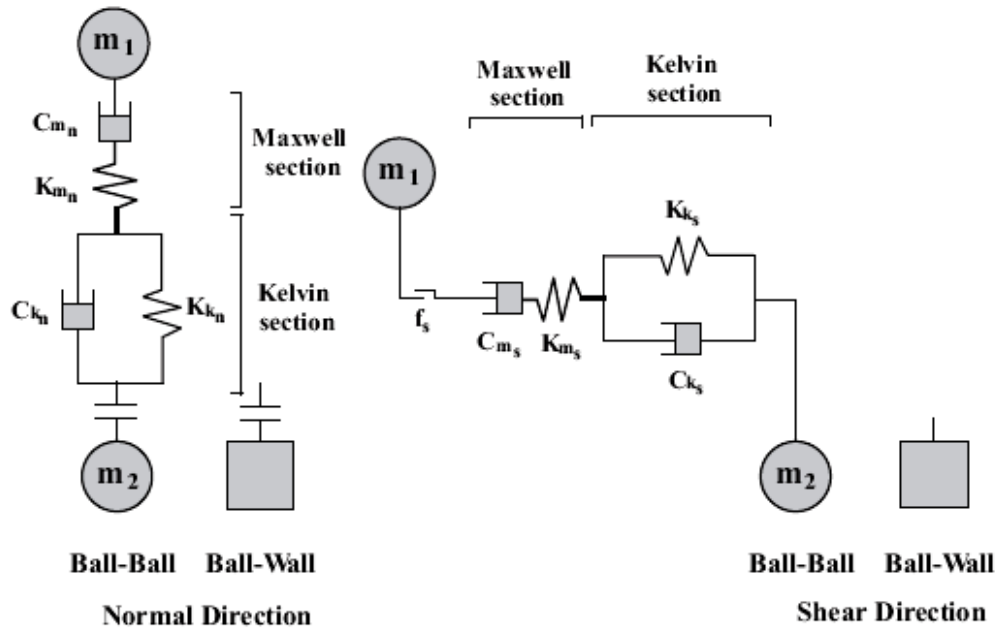
### 4.4.1 Τα κριτήρια διαρροής Tresca και Von Mises

Κατά την υπόθεση του Tresca (1868), η έναρξη της διαρροής για ένα υλικό που παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά, γίνεται όταν η μέγιστη διατμητική τάση λάβει κάποια κρίσιμη τιμή (Μαρκέτος 1992α):

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k_T \quad (4.30)$$

Η τιμή  $k_T$  αντιστοιχεί στην αντοχή του υλικού σε καθαρή διάτμηση ή ισούται με το μισό της μονοαξονικής αντοχής σε εφελκυσμό. Το εν λόγω κριτήριο παριστάνεται στο χώρο με ένα εξάπλευρο πρίσμα (Σχήμα 4.7α).

Σύμφωνα με το κριτήριο αντοχής του von Mises, σε ένα υλικό που βρίσκεται κάτω από σύνθετη εντατική κατάσταση, η διαρροή αρχίζει όταν η ισοδύναμη τάση γίνει ίση με την αντοχή σε εφελκυσμό. Η ισοδύναμη τάση  $\sigma_{eq}$ , μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση των κύριων τάσεων, ως εξής:



Σχήμα 4.6: Το μοντέλο Burger (FLAC 4.0, 2002)

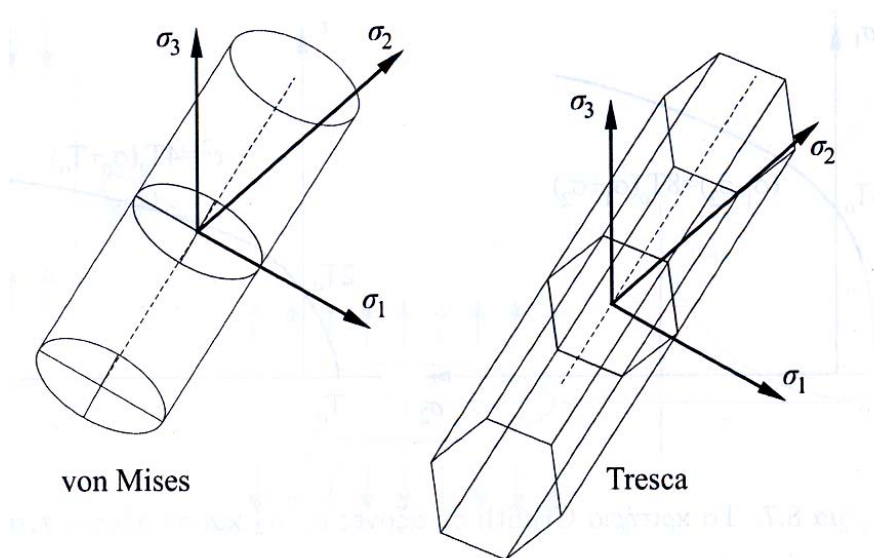
$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{2} \quad (4.31)$$

Η γεωμετρική αναπαράσταση του κριτηρίου στο χώρο, είναι κύλινδρος με άξονα τον υδροστατικό άξονα (Σχήμα 4.7α). Το Σχήμα 4.7β δείχνει την αναπαράσταση των δύο κριτηρίων στο επίπεδο.

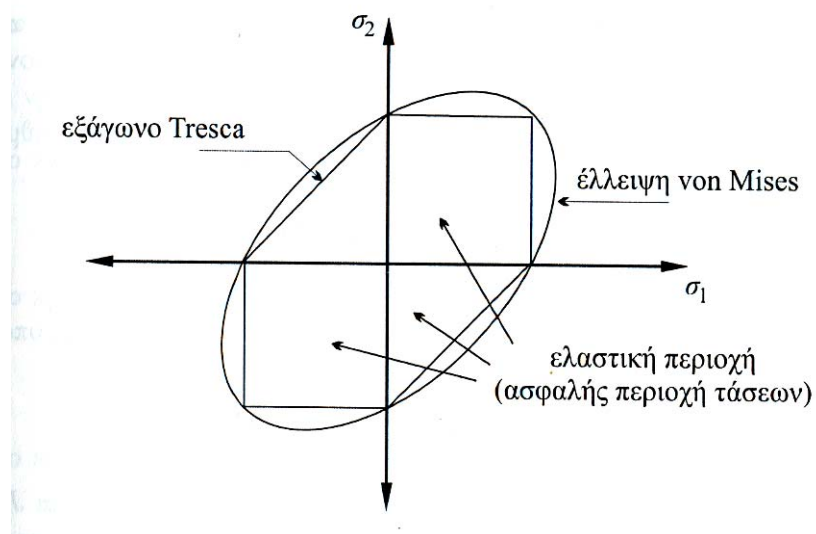
#### 4.4.2 Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αποτελεί γενίκευση του κριτηρίου αστοχίας του Tresca, έτσι ώστε να περιλαμβάνει και την επίδραση των υδροστατικών τάσεων. Η συνάρτηση διαρροής περιλαμβάνει τις τάσεις που δρουν στο υλικό και δύο σταθερές, που εξαρτώνται από το υλικό. Αυτές είναι η συνοχή,  $c$  και η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ . Για επεξήγηση των δύο αυτών όρων, αναφέρονται τα ακόλουθα (Roberts, 1977):

- Τα μη συνεκτικά εδαφικά υλικά, δηλαδή αυτά στα οποία  $S_0 = 0$ , έχουν σαν χαρακτηριστικό τους το ότι η μέγιστη κλίση πρανούς, ισούται με τη γωνία



Σχήμα 4.7α: Τα κριτήρια αστοχίας κατά Tresca και von Mises στο χώρο (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.7β: Τα κριτήρια αστοχίας κατά Tresca και von Mises στο επίπεδο (Αγιουτάντης, 2002).

φυσικής απόθεσης. Καθορίζεται δε, από τη γωνία εσωτερικής τριβής των κόκκων.

- Στα συνεκτικά εδαφικά υλικά η μέγιστη κλίση πρανούς είναι μεγαλύτερη από τη γωνία φυσικής απόθεσης. Οι επιπλέον δυνάμεις που αναπτύσσονται και συμβάλλουν στη συγκράτησή του οφείλονται στη συνοχή του.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση των κυρίων τάσεων, ως εξής:

$$F = \max_{i \neq j} [\sigma_i - \sigma_j + (\sigma_i - \sigma_j) \sin \varphi] - 2 \cos \varphi \quad (4.32)$$

Για την περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης όπου  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  και  $\sigma_1 = \sigma_y$  και του εφελκυσμού, όπου  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  και  $\sigma_1 = \sigma_T$  η σχέση 4.32 γίνεται αντίστοιχα:

$$Y_C = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad Y_C = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4.33)$$

Από τις σχέσεις (4.32) και (4.33) μπορούν να προκύψουν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του υλικού, συνοχή  $c$  και γωνία εσωτερικής τριβής  $\varphi$ , από τις δυο ακόλουθες σχέσεις:

$$c = \frac{Y_T}{2} \sqrt{\frac{Y_C}{Y_T}} \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{Y_T}{Y_C}} \right) \quad (4.34)$$

Η απεικόνιση της επιφάνειας διαρροής του κριτηρίου Mohr – Coulomb γίνεται με τη μορφή ακανόνιστης εξαγωνικής πυραμίδας (Σχήμα 4.8).

Προκειμένου να εφαρμοστεί το κριτήριο του Coulomb, απαιτείται η ορθή τάση να είναι θετική. Δηλαδή:

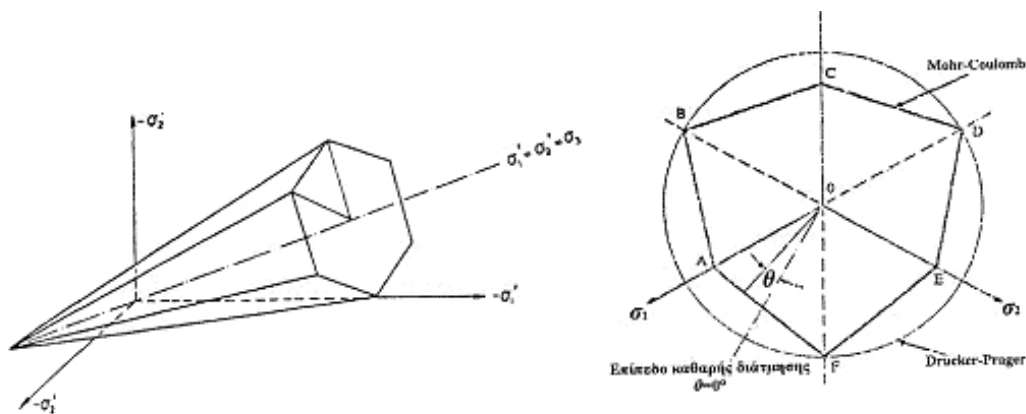
$$\sigma > 0 \Rightarrow \sigma_1 [\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu] + \sigma_2 [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu] > 0 \quad (4.35)$$

έτσι:

$$\sigma_1 > S_o [\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu] \Rightarrow \sigma_1 > \frac{1}{2} C_o \quad (4.36)$$

Είναι ευνόητο ότι το κριτήριο Coulomb δεν εφαρμόζεται για εφελκυστικές ορθές τάσεις, εφόσον αυτές δε δημιουργούν συνθήκες διάτμησης του υλικού.

Το Σχήμα 4.9 αποτελεί τη γραφική απεικόνιση του κριτηρίου του Coulomb σε άξονες  $\tau$ ,  $\sigma$  και συγχρόνως παριστάνει τον κύκλο του Mohr. Αυτός περιγράφει την εντατική κατάσταση τη στιγμή της αστοχίας, για δεδομένη τιμή της κύριας τάσης  $\sigma_2$ . Το σημείο αστοχίας είναι το σημείο επαφής του κύκλου και της γραμμής του κριτηρίου.



Σχήμα 4.8: α) Αναπαράσταση της συνάρτησης (πυραμίδας) διαρροής Mohr - Coulomb β) τομή με το αποκλίνον επίπεδο. Σύγκριση με το κριτήριο Drucker – Prager.

(Κοζάνης, 2002)

#### 4.4.3 Το κριτήριο Hoek – Brown

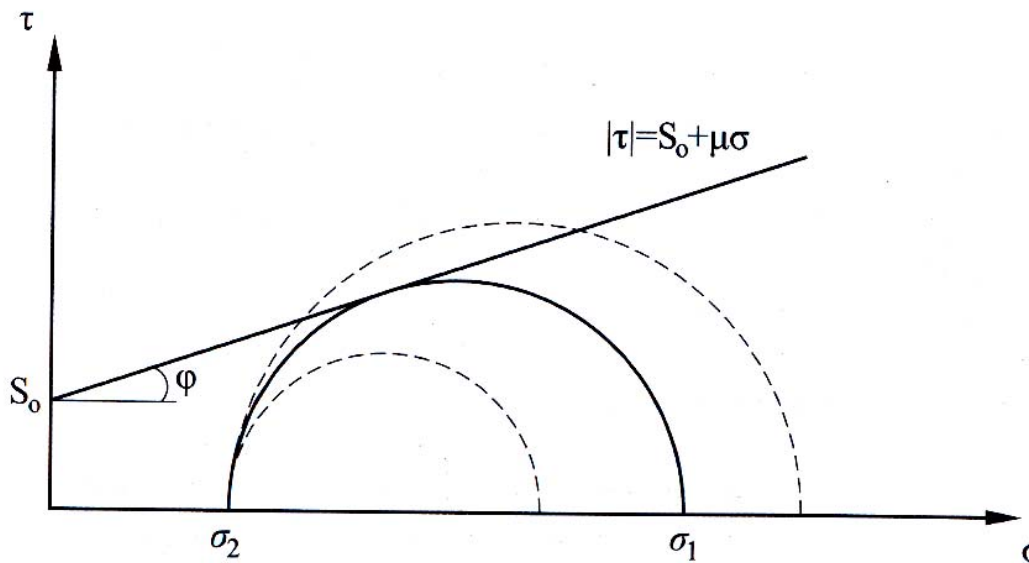
Πρόκειται για ένα εμπειρικό κριτήριο, στόχος του οποίου ήταν η αντιμετώπιση των δυσκολιών και των χαρακτηριστικών, που παρουσιάζονται συχνά στα πετρώματα και δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb.

Πλεονέκτημα του κριτηρίου Hoek – Brown είναι η ικανότητά του να περιγράφει καλύτερα τη μη γραμμική συμπεριφορά των πετρωμάτων, ενώ πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη τις ασυνέχειες, που υπάρχουν στα πετρώματα.

Το κριτήριο έχει τέτοια μορφή ώστε να επιτρέπει τη περιγραφή της συμπεριφοράς ενός ομογενούς δοκιμίου πετρώματος, σε όλες τις φορτίσεις. Από τη μονοαξονική θλίψη, μέχρι την τριαξονική θλιπτική καταπόνηση. Δίνει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής της επίδρασης των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Δεδομένου ότι τα πετρώματα είναι στην πραγματικότητα ανομοιογενή και ανισότροπα σώματα, το κριτήριο Hoek – Brown υπερτερεί έναντι αυτό των Mohr – Coulomb, εφόσον περιγράφει καλύτερα τη συμπεριφορά τους (Hoek and Brown, 1990).

Η σχέση που ακολουθεί, περιγράφει τη μορφή του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (4.36)$$



Σχήμα 4.9: Κριτήριο Coulomb και κύκλος του Mohr (Αγιουτάντης, 2002).

όπου:

$\sigma_1$  = η μέγιστη κύρια τάση

$\sigma_2$  = η ελάχιστη κύρια τάση

$\sigma_c$  = η αντοχή του ακεραίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

$m, s$  = σταθερές που εξαρτώνται από το είδος του πετρώματος και το βαθμό κατακερματισμού του (για τον τρόπο υπολογισμού τους, βλ. Κεφ. 2).

Το κριτήριο Hoek – Brown, μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την ορθή και τη διατμητική τάση ως εξής:

$$\tau = (\sigma_1 \cdot \sigma_3) \cdot \sqrt{1 + \frac{m \cdot \sigma_c}{4T_m}} \quad (4.37)$$

όπου:  $\sigma, \tau$  = η ορθή και η διατμητική τάση αντίστοιχα και

$$T_m = 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3)$$

#### 4.4.4 Το κριτήριο διαρροής Drucker – Prager

Το κριτήριο των Drucker – Prager αποτελεί μαθηματική τροποποίηση του κριτηρίου του von Mises, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της υδρο-

στατικής συνιστώσας. Περιγράφεται από την ακόλουθη γενική εξίσωση (Κοζάνης, 2002):

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = aI_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (4.31)$$

Η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από έναν κώνο με άξονα τον υδροστατικό άξονα (Σχήμα 4.8). Αυτή μπορεί να προσαρμοστεί στην επιφάνεια τύπου πυραμίδας του κριτηρίου Mohr – Coulomb. Όταν γίνεται αυτό, οι παράμετροι  $k$  και  $a$  μπορούν να εκφραστούν σαν συνάρτηση της συνοχής  $c$  και της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  του υλικού, ως εξής:

$$a = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.32)$$

## **Κεφάλαιο 5**

# **Στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών – Καταστατικά μοντέλα στο λογισμικό FLAC**

### **5.1 Γενικά**

Μία από τις μεθόδους αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων είναι αυτή των μερικών διαφορικών εξισώσεων (Μ.Δ.Ε). Στις υπό μελέτη περιπτώσεις θεωρείται ότι το πρόβλημα είναι ‘καλά ορισμένο’, δηλαδή, εάν υπάρχει λύση, τότε αυτή είναι μοναδική και η εξάρτησή της από τα δεδομένα είναι άμεση και συνεχής.

Οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι Μ.Δ.Ε είναι η υπερβολική, η παραβολική και η ελλειπτική. Οι δύο πρώτες κατηγορίες είναι προβλήματα ‘αρχικών ή συνοριακών τιμών’ ενώ η τελευταία αφορά πάντα προβλήματα ‘αρχικών τιμών’, εφόσον οι συνθήκες του προβλήματος στην αρχή του διαστήματος είναι γνωστές στην αρχή του χωρίου ή του διαστήματος επίλυσης. Στα προβλήματα συνοριακών τιμών είναι γνωστές οι συνθήκες του προβλήματος στην αρχή και στο τέλος αυτού.

### **5.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών**

Στην πραγματικότητα, η μαθηματική ανάλυση αδυνατεί να επιλύσει την πλειοψηφία των προβλημάτων Μ.Δ.Ε. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων για την εύρεση λύσης, που να προσεγγίζει την πραγματική. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ονομάζονται ‘Μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών’ και επιτυγχάνουν την προσέγγιση των μερικών παραγώγων, που αποτελούν μία Μ.Δ.Ε από διηρημένες πεπερασμένες διαφορές (Αβδελάς και Σίμος, 2001).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, είναι ίσως η παλαιότερη τεχνική αριθμητικής επίλυσης ομάδων διαφορικών εξισώσεων, για δεδομένες αρχικές ή/ και συνοριακές συνθήκες. Από τότε που πρωτοεμφανίστηκε, βρίσκεται σε συνεχή εξέλι-

ξη, σε συνδυασμό με τη ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σήμερα αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων σε πολλούς θεωρητικούς ή εφαρμοσμένους επιστημονικούς τομείς.

Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες, βασίζεται στην ικανότητα των πεπερασμένων διαφορών να περιγράφουν και να αναλύουν προβλήματα, που είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και πολλές φορές αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Είναι γνωστό ότι η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για μερικά υπεραπλουστευμένα μοντέλα, μετά από πολλές παραδοχές. Προβλήματα που αφορούν πολύπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση η μόνη διέξοδος είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων, μία από τις οποίες είναι και οι πεπερασμένες διαφορές.

Οι βασικές τεχνικές επίλυσης είναι η έμμεση (implicit), η άμεση (explicit), η μέθοδος μεικτής διακριτοποίησης: ακριβής μοντελοποίηση, πλαστική κατάρρευση και πλαστική ροή. Οι μέθοδοι είναι επαναληπτικές και στοχεύουν στη μείωση του σφάλματος σε αποδεκτά επίπεδα.

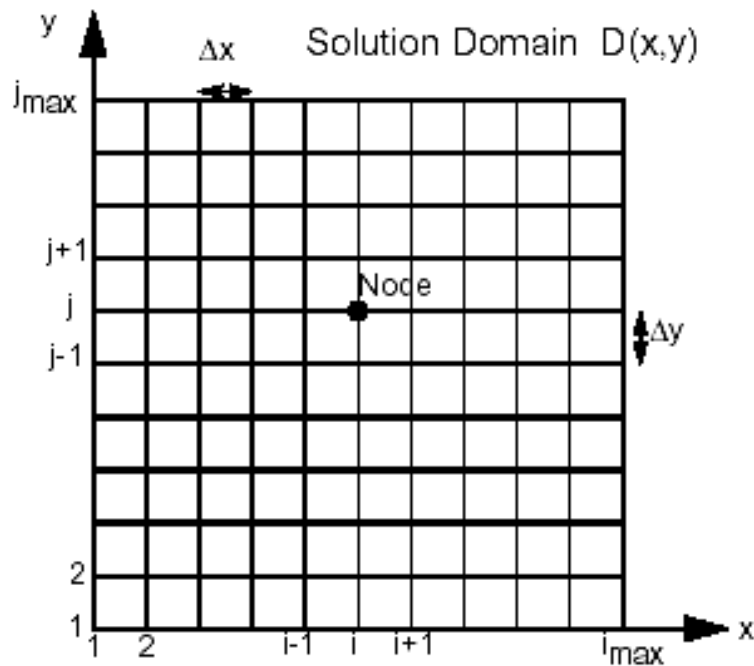
### **5.3 Οι πεπερασμένες διαφορές**

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα:

- Τα προβλήματα είναι ιδανικής γεωμετρίας (προβλήματα συνοριακών τιμών: κλειστό πεδίο ορισμού)
- Τα υλικά αποτελούν εξιδανικευμένα καταστατικά μοντέλα
- Τα φορτία είναι εξιδανικευμένα

Ωστόσο, η μέθοδος αριθμητικής επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων, που καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού είναι διαφορετική. Επίσης, στα πεπερασμένα στοιχεία, η συμπεριφορά του σώματος εξαρτάται από τη συμπεριφορά των στοιχείων, ενώ στις πεπερασμένες διαφορές οι κόμβοι είναι αυτοί που καθορίζουν τη συμπεριφορά (FLAC 4.0, 2002).

#### **5.3.1 Οι κόμβοι και ο κánaβος των πεπερασμένων διαφορών**



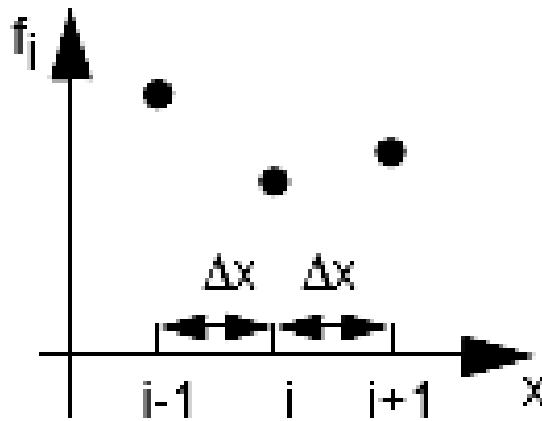
Σχήμα 5.1. Απλός κάναβος πεπερασμένων διαφορών (Beaty and Byrne, 1999).

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η υπό μελέτη περιοχή  $R$  διαιρείται σε ένα κάναβο. Το Σχήμα 5.1 απεικονίζει έναν απλό κάναβο πεπερασμένων διαφορών. Το πεδίο στο οποίο γίνεται η επίλυση είναι το  $D(x,y)$ . Η απόσταση  $\Delta x$  είναι περίπου σταθερή. Το  $\Delta x$  δεν είναι απαραίτητο να ισούται με το  $\Delta y$  αλλά όταν συμβαίνει αυτό, έχει συνήθως πλεονεκτήματα κυρίως ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η τιμή μιας συνάρτησης  $f$ , για τους κόμβους  $x = i$ ,  $y = j$  μπορεί να γραφτεί σαν  $f_{ij}$ . Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE's) που δημιουργούνται, μπορεί να είναι πρώτης ή δεύτερης τάξης, ως προς  $x$  ή ως προς  $y$ :

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial x} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial y} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial x^2} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial y^2} \quad (5.1)$$

Μία από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι η εξίσωση Laplace. Αυτή περιγράφει τη ροή σταθερής κατάστασης (steady state flow) υγρού ή θερμότητας. Εδώ, μετά τη σταθεροποίηση της κατάστασης δεν συμβαίνει καμία αλλαγή με το χρόνο.

### 5.3.2 Η έννοια των πεπερασμένων διαφορών



Σχήμα 5.2. Στοιχειώδες διάστημα στις πεπερασμένες διαφορές. (Beaty and Byrne, 1999).

Χρησιμοποιώντας μία πεπερασμένη απόσταση  $\Delta x$  η  $\Delta y$  (Σχήμα 5.2), η μεταβολή της συνάρτησης  $f$  μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} \quad \text{ή} \quad \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} \quad \text{ή} \quad \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (5.2)$$

όπου το πρώτο κλάσμα αφορά τις προς τα μπρος πεπερασμένες διαφορές, το δεύτερο τις προς τα πίσω και το τρίτο τις κεντρικές.

#### 5.4 Εφαρμογή της μεθόδου σε γεωτεχνικά προβλήματα μέσω του λογισμικού FLAC

Στα γεωτεχνικά προβλήματα, οι πεπερασμένες διαφορές αντιπροσωπεύουν εξισώσεις μητρώου (matrix) για κάθε κόμβο, με τη χρήση δυναμικών εξισώσεων κίνησης:

$$(\text{Δυνάμεις})_{\text{στους κόμβους}} = f(\text{μετατοπίσεων})_{\text{στους κόμβους}}$$

Στη διαδικασία γίνεται χρήση του επικαμπύλιου ολοκληρώματος των πεπερασμένων διαφορών. Έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα που σχετίζονται με το σχήμα του κανάβου. Η μέθοδος είναι σταθερή υπό συνθήκες και αυτό εξαρτάται από το συντελεστή απόσβεσης και το λόγο της μάζας και του χρονικού βήματος. Για παράδειγμα, η ενέργεια παραμόρφωσης μπορεί να μετατραπεί σε κινητική ενέργεια και ν' απελευθερωθεί.

Για την υλοποίηση των ‘κόμβων’ στο FLAC χρησιμοποιούνται πρότυπα τετραγωνικά στοιχεία (elements), που οδηγούν σε ένα μητρώο ακαμψίας, ανάλογο με αυτό των τετρακομβικών, τετραγωνικών πεπερασμένων στοιχείων. Παρόλα αυτά μπορεί να γίνει χρήση στοιχείων οποιουδήποτε σχήματος.

Η μέθοδος της δυναμικής χαλάρωσης (dynamic relaxation) για τη στατική ανάλυση τίθεται σε εφαρμογή για να λύσει το αλγεβρικό σύστημα των εξισώσεων της κίνησης και να προκύψει μία λύση σταθερής κατάστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση είναι η άμεση μέθοδος χρονικής αλληλουχίας (explicit time marching). Οι έμμεσες (implicit) μέθοδοι χρησιμοποιούνται περισσότερο στα πεπερασμένα στοιχεία.

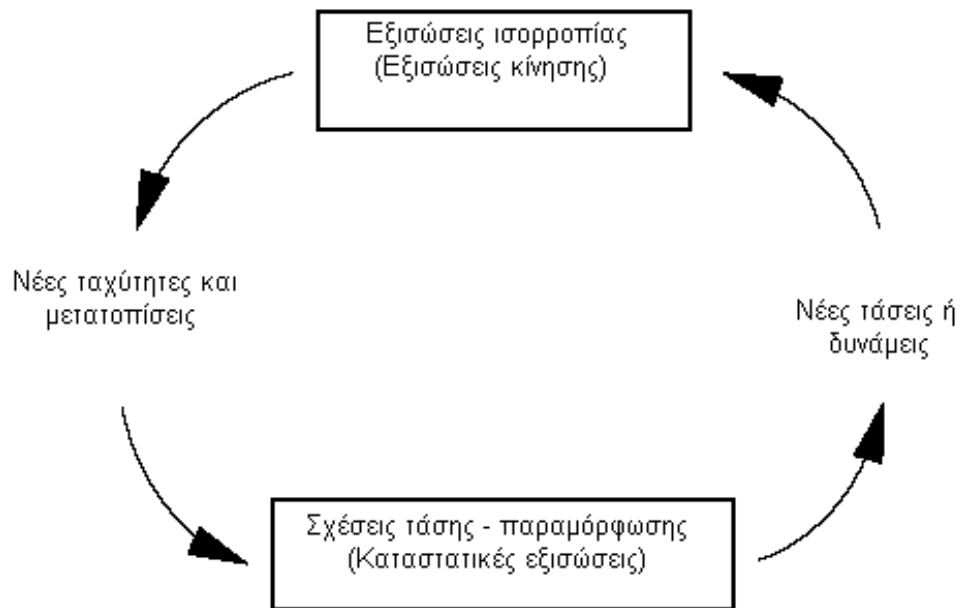
#### **5.4.1 Η ‘άμεση’ μέθοδος της χρονικής αλληλουχίας των πεπερασμένων διαφορών**

Παρόλο που το ζητούμενο από το FLAC είναι η επίλυση ενός στατικού προβλήματος, στο σχηματισμό των εξισώσεων περιλαμβάνονται και οι δυναμικές εξισώσεις της κίνησης. Ένας λόγος που γίνεται αυτό, είναι η διασφάλιση ότι το αριθμητικό σχήμα θα είναι σταθερό, ακόμη και όταν το φυσικό σύστημα που μελετάται είναι ασταθές. Ιδιαίτερα στα μη γραμμικά υλικά, υπάρχει πάντα η πιθανότητα της φυσικής αστάθειας, όπως π.χ. η ξαφνική κατάρρευση ενός στύλου.

Στην πραγματικότητα, μέρος της ενέργειας παραμόρφωσης ενός συστήματος μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και χάνεται. Το FLAC εξομοιώνει επακριβώς τη διαδικασία αυτή, λόγω του ότι συμπεριλαμβάνει τους όρους αδράνειας (inertial terms) – η κινητική ενέργεια δημιουργείται και χάνεται. Σε αντίθεση, διαδικασίες επίλυσης που δεν περιλαμβάνουν όρους αδράνειας, πρέπει να εισάγουν κάποια αριθμητική διαδικασία που να αντιμετωπίζει τις φυσικές αστάθειες. Αυτή δε, μπορεί να είναι επιτυχής ακόμη και αν δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Το Σχήμα 5.3 δείχνει την αλληλουχία υπολογισμών που γίνονται στο FLAC. Αρχικά τίθενται σε εφαρμογή οι εξισώσεις της κίνησης, έτσι ώστε να προκύψουν νέες ταχύτητες και μετατοπίσεις εξαιτίας των επιβαλλόμενων τάσεων και δυνάμεων. Έπειτα, από τις ταχύτητες προκύπτουν οι τιμές της παραμόρφωσης και από αυτές, νέες τάσεις. Κάθε ολοκληρωμένος κύκλος αυτής της διαδικασίας αποτελεί ένα χρονικό βήμα (time step). Αυτό επιλέγεται τόσο μικρό, ώστε οι τιμές για κάθε μέγεθος, να αφορούν μόνο ένα στοιχείο, χωρίς να επηρεάζουν τα γειτονικά (FLAC 4.0, 2002).

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:



Σχήμα 5.3: Βασικός κύκλος υπολογισμού στις άμεσες μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (FLAC 4.0, 2002).

- Ένα πρόβλημα με δεδομένο αριθμό βαθμών ελευθερίας μπορεί να αναλυθεί γρήγορα και αποτελεσματικά με τη χρήση ενός απλού προσωπικού υπολογιστή. Δεδομένου ότι τα μητρώα δεν αποθηκεύονται, οι απαιτήσεις του συστήματος σε μνήμη είναι μικρές.
- Η μέθοδος είναι συγκρίσιμη με τους πρότυπους κώδικες των έμμεσων πεπερασμένων διαφορών για εξαιρετικά μη γραμμικά προβλήματα.

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Παρά την εξέλιξη της μεθόδου, εξακολουθούν να υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί ως προς τον τύπο του πλέγματος (τα στοιχεία πρέπει να είναι κατά το δυνατόν τετραγωνικού σχήματος), διαφορετικά η αποδοτικότητα της μεθόδου είναι μειωμένη.
- Για γραμμικά προβλήματα, η μέθοδος είναι πιο αργή από αυτήν των πεπερασμένων στοιχείων
- Ο χρόνος επίλυσης επηρεάζεται από την τοποθέτηση δομικών στοιχείων, από μεγάλες διαφορές ακαμψίας ή μεγάλες αλλαγές στο μέγεθος των στοιχείων. (FLAC 4.0 2002).

Ο Πίνακας 5.1 δίνει μία σύγκριση της έμμεσης και της άμεσης μεθόδου.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μεταξύ της έμμεσης και έμμεσης μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FLAC 4.0, 2002).

| (Άμεσες)  | (Έμμεσες)  |
|---|--|
| Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι μικρότερο από μία τιμή που θεωρείται κρίσιμη για τη σταθερότητα του μοντέλου.        | Το χρονικό βήμα μπορεί να επιλέγεται αυθαίρετα μεγάλο και το σχήμα που προκύπτει είναι σταθερό ανεξάρτητα απ' αυτό.                      |
| Μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις για κάθε χρονικό βήμα.  | Μεγάλος απαιτούμενος υπολογιστικός κόπος για κάθε χρονικό βήμα.  |
| Η δυναμική επίλυση ενός προβλήματος δεν εισάγει προβλήματα αριθμητικής κατάρρευσης (numerical damping) του μοντέλου.    | Η αριθμητική κατάρρευση εξαρτάται από το χρονικό βήμα  |
| Δεν είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση επαναλήψεων, προκειμένου να εφαρμοστούν οι μη γραμμικοί καταστατικοί νόμοι.       | Απαραίτητη η πραγματοποίηση επαναλήψεων κατά την εφαρμογή των μη γραμμικών καταστατικών νόμων  |
| Υπό τον όρο ότι το κριτήριο του χρονικού βήματος ικανοποιείται, οι μη γραμμικοί νόμοι εφαρμόζονται και ισχύουν πάντα.   | Πάντοτε είναι απαραίτητο να καταδεικνύεται ότι η προαναφερόμενη διαδικασία είναι: (α) σταθερή και (β) σύμφωνη με το σωστό, φυσικό τρόπο. |
| Δε δημιουργούνται μαθηματικοί πίνακες και γι' αυτό οι απαιτήσεις σε μνήμη είναι ελάχιστες.                              | Τα μητρώα ακαμψίας θα πρέπει να αποθηκεύονται και έτσι οι απαιτήσεις σε μνήμη του συστήματος είναι συνήθως μεγάλες.                      |
| Εφόσον δε δημιουργούνται πίνακες, η ύπαρξη εκτεταμένων τάσεων και παραμορφώσεων δεν απαιτεί πρόσθετο υπολογιστικό κόπο. | Προκειμένου να υπολογιστούν μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις, απαιτείται πρόσθετος υπολογιστικός κόπος.                                  |

## 5.4.2 Η διαδικασία επίλυσης

Η διαδικασία επίλυσης μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως (Beaty and Byrne, 1999):

1. Υποθέτοντας γνωστές παραμορφώσεις, οι ταχύτητες και οι δυνάμεις στους κόμβους υπολογίζονται σε χρόνο  $t_i$  νέες κομβικές επιταχύνσεις.
2. Με ολοκλήρωση των επιταχύνσεων στους κόμβους προκύπτουν οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις των κόμβων
3. Από τις ταχύτητες και μετατοπίσεις των κόμβων επιβάλλονται νέοι καταστατικοί νόμοι και επιτυγχάνεται μία νέα εντατική κατάσταση.

4. Υπολογισμός των νέων, εσωτερικών δυνάμεων στους κόμβους και ολοκλήρωση της εντατικής κατάστασης κατά μήκος των συνοριακών στοιχείων.
5. Ορισμός κατάλληλου ορίου για τις δυνάμεις εκτός ισορροπίας (unbalanced forces). Πρόκειται για τη διαφορά μεταξύ των εξωτερικών και των εσωτερικών δυνάμεων.
6. Έλεγχος της τρέχουσας τιμής της δύναμης εκτός ισορροπίας.
  - a. Αν είναι μικρότερη από το όριο που έχει τεθεί, ακολουθεί τερματισμός της διαδικασίας.
  - b. Αν είναι μεγαλύτερη, γίνεται αύξηση του χρονικού βήματος έως ότου επιτευχθεί λύση σταθερής κατάστασης.

Το Σχήμα 5.4 δείχνει τη γενική διαδικασία επίλυσης στο FLAC.

## **5.5 Το λογισμικό FLAC**

Για την ανάλυση τάσεων, το FLAC χρησιμοποιεί σε γενικές γραμμές την ονοματολογία των συμβατικών προγραμμάτων πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Ακολουθεί ορισμός και επεξήγηση των βασικών όρων, ώστε να γίνουν περισσότερο κατανοητοί. Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει τους όρους που χρησιμοποιούνται στο FLAC (FLAC 4.0, 2002)

- **Μοντέλο στο FLAC (FLAC Model)**

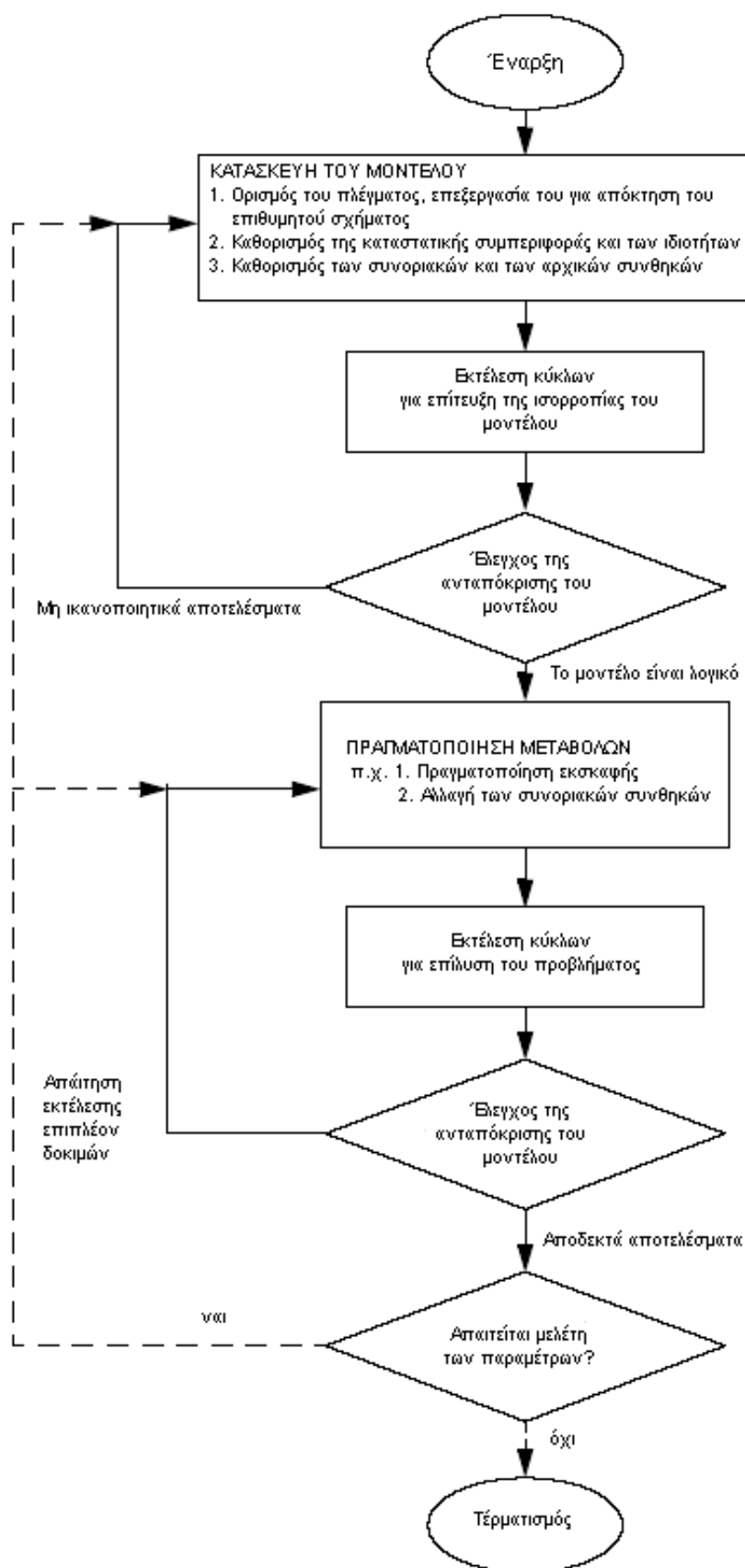
Το μοντέλο στο FLAC δημιουργείται από το χρήστη προκειμένου να εξομοιωθεί ένα φυσικό πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, το μοντέλο είναι μία ακολουθία εντολών του FLAC που ορίζουν τις συνθήκες του προβλήματος για αριθμητική επίλυση.

- **Ζώνη (Zone)**

Η ζώνη στις πεπερασμένες διαφορές είναι ο μικρότερος γεωμετρικός τόπος, μέσα στον οποίο γίνεται αποτίμηση της μεταβολής ενός φαινομένου (π.χ. τάσης ως προς την παραμόρφωση, ροή ρευστού ή μετάδοση θερμότητας). Στο FLAC χρησιμοποιούνται κυρίως ζώνες τετραγωνικού σχήματος. Άλλος ένας όρος ταυτόσημος με τη ζώνη είναι αυτός του στοιχείου (element). Εσωτερικά το FLAC διαιρεί κάθε ζώνη σε τριγωνικές ‘υπο-ζώνες’, όμως ο χρήστης συνήθως δεν έχει επίγνωση αυτού.

- **Σημείο πλέγματος (Gridpoint)**

Τα σημεία πλέγματος σχετίζονται με τις γωνίες των ζωνών των πεπερασμένων διαφορών. Κάθε ζώνη περιλαμβάνει πάντοτε τέσσερα (4) σημεία πλέγματος. Στο μοντέλο, σε κάθε σημείο πλέγματος προσδίδεται ένα ζεύγος συντεταγμένων  $x$  και  $y$  και έτσι προσδιορίζεται η ακριβής θέση της ζώνης. Ταυτόσημος όρος με το σημείο πλέγματος είναι και αυτός του κομβικού σημείου ή απλά κόμβου.



Σχήμα 5.4: Γενική διαδικασία επίλυσης στο FLAC, (FLAC 4.0, 2002)

- **Πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών (Finite difference grid)**

Το πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών αποτελείται από ένα σύνολο μίας ή περισσότερων ζωνών επί της περιοχής που αναλύεται. Ταυτόσημος όρος με το πλέγμα είναι και ο κάναβος.

- **Σύνоро του μοντέλου (Model boundary)**

Το σύνоро του μοντέλου είναι η περιφέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων διαφορών. Εσωτερικά σύνορα (δηλαδή εκσκαφές μέσα στο πλέγμα) θεωρούνται επίσης σύνορα του μοντέλου.

- **Συνοριακή συνθήκη (Boundary condition)**

Συνοριακή συνθήκη είναι μια εντολή περιορισμού ή ελέγχου των συνθηκών κατά μήκος ενός συνόρου του μοντέλου (π.χ. περιορισμός της μετακίνησης ή επιβολή φόρτισης στα μηχανικά προβλήματα, αδιαπέρατο όριο στα προβλήματα ροής υπογείων νερών, αδιαβατικό όριο στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, κλπ).

- **Αρχικές συνθήκες (Initial conditions)**

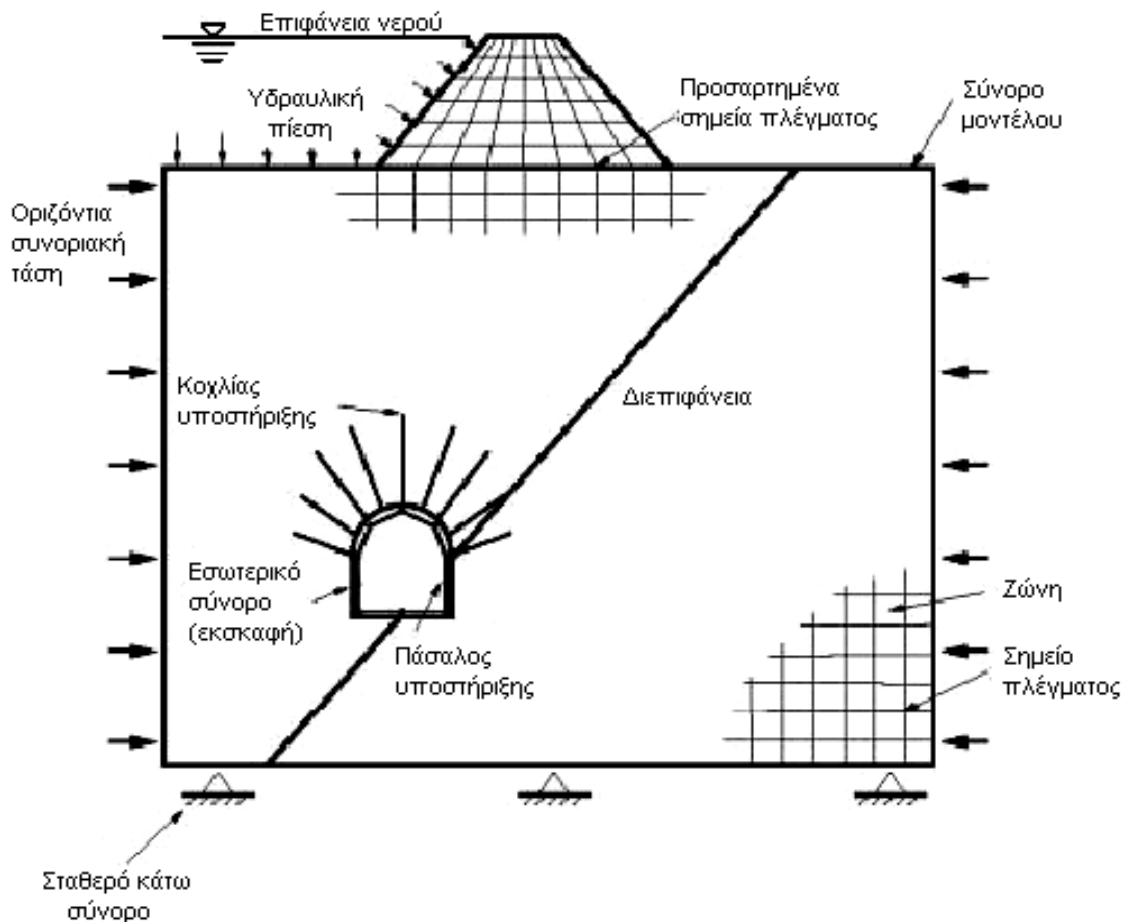
Πρόκειται για την κατάσταση όλων των μεταβλητών του μοντέλου (π.χ. τάσεις ή πίεση πόρων) πριν από οποιαδήποτε αλλαγή στη φόρτιση ή κάποια άλλη μεταβολή (όπως εκσκαφή).

- **Καταστατικό μοντέλο (Constitutive model)**

Το καταστατικό μοντέλο ή μοντέλο υλικού περιγράφει τη συμπεριφορά ως προς την παραμόρφωση και την αντοχή, που επιβλήθηκε στις ζώνες ενός μοντέλου. Υπάρχουν αρκετά μοντέλα διαθέσιμα στο FLAC, που να ανταποκρίνονται στον διαφόρων ειδών συμπεριφορές, που σχετίζονται συνήθως με τα γεωυλικά. Διαφορετικά καταστατικά μοντέλα και ιδιότητες υλικών μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε μεμονωμένη ζώνη του μοντέλου.

- **‘Υπο-πλέγμα’ (Sub-grid)**

Το πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους υπο-πλέγματα. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία περιοχών διαφορετικού σχήματος μέσα στο μοντέλο (π.χ. το φράγμα και η θεμελίωσή του στο Σχήμα 5.5). Τα διάφορα υπο-πλέγματα δεν μπορούν να μοιράζονται κοινούς κόμβους μεταξύ τους, γι’ αυτό πρέπει να διαχωρίζονται με ‘μηδενικές ζώνες’.



Σχήμα 5.5: Παράδειγμα μοντέλου στο FLAC (FLAC 4.0, 2002)

- **Μηδενική ζώνη (Null zone)**

Μηδενικές ζώνες είναι οι ζώνες που αντιπροσωπεύουν κενά (απουσία υλικού) μέσα στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. Κάθε νέα ζώνη που δημιουργείται θεωρείται αυτόματα μηδενική ζώνη.

- **Προσαρτημένοι κόμβοι ή σημεία πλέγματος (Attached grid points)**

Οι προσαρτημένοι κόμβοι είναι κόμβοι που ανήκουν σε διαφορετικά υπο-πλέγματα, τα οποία έχουν συνενωθεί. Στο Σχήμα 5.5, το φράγμα είναι ενωμένο με τη θεμελίωσή του κατά μήκος των προσαρτημένων κόμβων. Οι προσαρτημένοι κόμβοι των δύο υπο-πλεγμάτων δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στην ίδια ευθεία, αλλά από τη στιγμή που θα γίνει η συνένωσή τους, δεν μπορούν να διαχωριστούν.

- **Διεπιφάνεια (Interface)**

Διεπιφάνεια είναι η σύνδεση μεταξύ δύο υπο-πλεγμάτων, τα οποία όμως μπορούν να αποχωριστούν (π.χ. ολίσθηση ή άνοιγμα). Μια διεπιφάνεια μπορεί να αντι-

προσωπεύει μία φυσική ασυνέχεια όπως ένα ρήγμα ή επιφάνεια επαφής. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συνένωση υπο-ζωνών με διαφορετικές ιδιότητες.

- **Σημαδεμένα σημεία πλέγματος (Marked grid points)**

Τα σημαδεμένα σημεία του πλέγματος είναι κάποια ειδικά επιλεγμένα σημεία, που οριοθετούν μια περιοχή με σκοπό να εφαρμοστεί σε αυτήν μία αρχική συνθήκη. Αυτή μπορεί να προσδιορίζει μοντέλα και ιδιότητες υλικών. Η σήμανση των σημείων αυτών δεν έχει καμία επίδραση στη διαδικασία της επίλυσης.

- **Περιοχή (Region)**

Η περιοχή στο FLAC αναφέρεται σε όλες τις ζώνες που εμπεριέχονται σε μία συνεχή αλληλουχία 'σημαδεμένων' σημείων πλέγματος. Οι περιοχές χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν το χώρο εφαρμογής σημαντικών εντολών του λογισμικού, όπως της 'MODEL', που προσδίδει κάποιο μοντέλο υλικού στο επιλεγμένο τμήμα.

- **Σύνολο (Group)**

Ένα σύνολο στο μοντέλο του FLAC αναφέρεται σε μια σειρά ζωνών που ταυτοποιούνται με κάποιο μοναδικά καθορισμένο όνομα.

- **Δομικά στοιχεία (Structural elements)**

Τα δομικά στοιχεία είναι γραμμικά στοιχεία, που εκφράζουν τη αλληλεπίδραση δομών (όπως επενδύσεις σιδηράγων, κοχλιών και υποστηρίξεων) με το έδαφος ή τη βραχώμαζα. Στα στοιχεία δομής υπάρχει πιθανότητα περιορισμένου βαθμού μη γραμμικότητας του υλικού. Γεωμετρική μη γραμμικότητα προκύπτει στην κατάσταση 'Large-strain' (βλ. παρακάτω).

- **Βήμα (Step)**

Λόγω του ότι το FLAC είναι άμεσος κώδικας πεπερασμένων διαφορών, η διαδικασία επίλυσης απαιτεί έναν αριθμό υπολογιστικών βημάτων. Κατά τη διάρκεια των βημάτων αυτών οι πληροφορίες που σχετίζονται με το υπο εξέταση φαινόμενο διαδίδονται κατά μήκος των ζωνών στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. Για να φτάσει το μοντέλο σε κατάσταση ισορροπίας ή κατάσταση σταθερής ροής κατά τη στατική επίλυση, απαιτείται ένας σημαντικός αριθμός βημάτων. Για την επίλυση στα συνήθη προβλήματα απαιτούνται 2000 έως 4000 βήματα, ωστόσο τα μεγάλης πολυπλοκότητας προβλήματα απαιτούν δεκάδες χιλιάδες βήματα για να φτάσουν σε κατάσταση ισορροπίας. Όταν το πρόβλημα δεν είναι στατικό αλλά απαιτείται και δυναμική ανάλυση, το βήμα αναφέρεται στο πραγματικό χρονικό βήμα για το δυναμικό

πρόβλημα. Άλλοι όροι για το βήμα είναι το χρονικό βήμα (time step) και ο κύκλος (cycle).

- **Στατική επίλυση (Static solution)**

Η στατική ή ημιστατική (quasi-static) λύση επιτυγχάνεται στο FLAC όταν τιμή της μεταβολής της κινητικής ενέργειας σ' ένα μοντέλο προσεγγίζει πολύ μικρή τιμή, έτσι ώστε να θεωρείται αμελητέα. Αυτό επιτυγχάνεται με απόσβεση (damping) των εξισώσεων κίνησης. Στην φάση της στατικής επίλυσης, το μοντέλο θα είναι σε κατάσταση ισορροπίας δυνάμεων ή σε κατάσταση σταθερής ροής υλικού, σε περίπτωση που ένα τμήμα του υλικού παρουσιάζεται ασταθές (καταρρέει) κάτω από τις δεδομένες συνθήκες φόρτισης. Αυτή είναι η προκαθορισμένη επιλογή στο FLAC. Στατικές μηχανικές λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις μεταβατικής ροής υπόγειου νερού ή μεταφοράς θερμότητας.

- **Μη ισορροπημένη δύναμη (Unbalanced force)**

Η μη ισορροπημένη δύναμη δείχνει πότε έχει επιτευχθεί η κατάσταση μηχανικής ισορροπίας (ή η έναρξη της πλαστικής ροής) σε μια στατική ανάλυση. Το μοντέλο βρίσκεται σε απόλυτη ισορροπία όταν το διάνυσμα της μέγιστης πραγματικής κομβικής τάσης σε κάθε σημείο του πλέγματος ισούται με το μηδέν. Το μέγιστο διάνυσμα της κομβικής δύναμης ελέγχεται στο FLAC και καταγράφεται στην οθόνη όταν τίθενται σε εφαρμογή οι εντολές 'STEP' ή 'SOLVE'. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται επίσης και μη ισορροπημένη δύναμη ή δύναμη εκτός ισορροπίας.

Στην πραγματικότητα, η μέγιστη τιμή της μεταβλητής αυτής δεν μπορεί ποτέ να γίνει μηδέν σε μια αριθμητική ανάλυση. Το μοντέλο όμως θεωρείται ότι έχει φτάσει σε ισορροπία όταν γίνει τόσο μικρή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, σε σχέση με τις υπόλοιπες ασκούμενες δυνάμεις, που ενέχονται σε πρόβλημα. Σε περίπτωση που η δύναμη εκτός ισορροπίας προσεγγίζει μία σταθερή τιμή διάφορη του μηδενός, σημαίνει ότι μέσα στο μοντέλο λαμβάνει χώρα αστοχία και πλαστική ροή.

- **Δυναμική επίλυση (Dynamic solution)**

Στη δυναμική λύση επιλύονται οι ολοκληρωμένες δυναμικές εξισώσεις της κίνησης (συμπεριλαμβανομένων και των όρων αδράνειας). Η γένεση και η απώλεια της κινητικής ενέργειας επηρεάζουν άμεσα τη λύση. Η δυναμική επίλυση απαιτείται σε προβλήματα που σχετίζονται με έντονες φορτίσεις μικρής χρονικής διάρκειας π.χ. σεισμικές καταπονήσεις ή απότομες φορτίσεις λόγω εκρήξεων.

- **Μεγάλη παραμόρφωση / Μικρή παραμόρφωση (Large strain / Small strain)**

Αν δεν οριστεί διαφορετικά το FLAC λειτουργεί σε κατάσταση μικρής παραμόρφωσης: Αυτό σημαίνει ότι οι συντεταγμένες των σημείων του πλέγματος δεν αλλάζουν, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλες είναι οι υπολογιζόμενες μετατοπίσεις (σε σύγκριση με τα τυπικά μεγέθη των ζωνών). Στην κατάσταση μεγάλης παραμόρφωσης οι συντεταγμένες αυτές αναπροσδιορίζονται μετά από κάθε βήμα, σύμφωνα με τις υπολογιζόμενες παραμορφώσεις. Επίσης εδώ είναι πιθανή η γεωμετρική μη γραμμικότητα.

## **5.6 Τα καταστατικά μοντέλα του FLAC**

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων καταστατικών μοντέλων που περιλαμβάνονται στο FLAC (FLAC 4.0, 2002).

### **5.6.1 Ομάδα μηδενικών μοντέλων**

- **Το μηδενικό μοντέλο**

Το μοντέλο μηδενικού υλικού χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει υλικό που αφαιρείται ή εκσκάπτεται.

### **5.6.2 Ομάδα ελαστικών μοντέλων**

- **Το ελαστικό, ισότροπο μοντέλο (Elastic, isotropic model)**

Το ελαστικό, ισότροπο μοντέλο παρέχει την απλούστερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς ενός υλικού. Ισχύει για ομογενή, ισότροπα, συνεχή μέσα, στα οποία η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι γραμμική χωρίς υστέρηση κατά την αποφόρτιση.

- **Το ελαστικό, εγκάρσια ισότροπο μοντέλο (Elastic, transversely isotropic model)**

Το μοντέλο αυτό δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης στρωματοειδών ελαστικών μέσων, στα οποία οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας σε διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στις στρώσεις είναι σημαντικά διαφορετικές.

### 5.6.3 Ομάδα πλαστικών μοντέλων

- **Το μοντέλο Drucker – Prager**

Το πλαστικό μοντέλο Drucker – Prager μπορεί να χρησιμεύσει στη μοντελοποίηση μαλακών αργίλων με μικρή γωνία εσωτερικής τριβής. Ωστόσο το μοντέλο αυτό δε συνίσταται για εφαρμογή στα γεωυλικά. Περιλαμβάνεται όμως στο FLAC για να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά άλλων αριθμητικών προγραμμάτων.

- **Το μοντέλο Mohr – Coulomb**

Το μοντέλο Mohr – Coulomb είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την αναπαράσταση της διατμητικής αστοχίας στα εδάφη και τα πετρώματα. Οι Vermeer και de Borst (1984) δημοσίευσαν αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που έγιναν σε άμμο και σκυρόδεμα και ανταποκρίνονταν καλά στο μοντέλο Mohr – Coulomb.

- **Το μοντέλο ‘Ubiquitous – Joint’**

Το μοντέλο αυτό είναι ένα ανισοτροπικό πλαστικό μοντέλο, που περιλαμβάνει επίπεδα αδυναμίας συγκεκριμένου προσανατολισμού, μέσα σε ένα στερεό με συμπεριφορά Mohr – Coulomb.

- **Μοντέλα ‘Strain – hardening και Strain – softening’**

Το μοντέλο Strain - hardening / Strain – softening επιτρέπει την περιγραφή τη μη γραμμική συμπεριφορά σκλήρυνσης ή κράτυνσης, βασιζόμενο σε προκαθορισμένες αποκλίσεις των ιδιοτήτων του μοντέλου Mohr – Coulomb (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής, γωνία διαστολής, αντοχή σε εφελκυσμό) σαν συνάρτηση της (deviatoric) πλαστικής παραμόρφωσης.

- **Διγραμμικό ‘Strain – hardening/ softening ubiquitous – joint’ μοντέλο**

Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την εξομοίωση της συμπεριφοράς σκλήρυνσης ή κράτυνσης που εμφανίζει το κυρίως υλικό (μήτρα) άλλα και τα επίπεδα ασυνέχειας που περιλαμβάνει, βασιζόμενο σε προκαθορισμένες αποκλίσεις των ιδιοτήτων του μοντέλου ubiquitous – joint (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής, γωνία διαστολής, αντοχή σε εφελκυσμό) σαν συνάρτηση της (deviatoric) πλαστικής παραμόρφωσης.

- **Μοντέλο Διπλής διαρροής (Double – yield model)**

Το μοντέλο διπλής διαρροής στοχεύει στην περιγραφή υλικών, στα οποία μπορεί να επέλθει σημαντική μη αντιστρεπτή συμπίεση μαζί με τη διατμητική διαρ-

ροή όπως αποσυμπίεση λόγω υδραυλικής εκτόνωσης ή ελαφριά τσιμέντωση κοκκώδους υλικού.

- **Το τροποποιημένο μοντέλο Cam – clay (Modified Cam – clay model)**

Το τροποποιημένο μοντέλο Cam – clay μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση υλικών, στα οποία η επίδραση της αλλαγής του όγκου στις κύριες ιδιότητες και στην αντίσταση στη διάτμηση πρέπει να ληφθεί υπόψη όπως στις μαλακές αργίλους. Υπάρχουν διαθέσιμα έξι χρονικά - εξαρτώμενα μοντέλα ερπυσμού (creep).

## **Κεφάλαιο 6**

### **Μοντελοποίηση κυκλικής εκσκαφής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών**

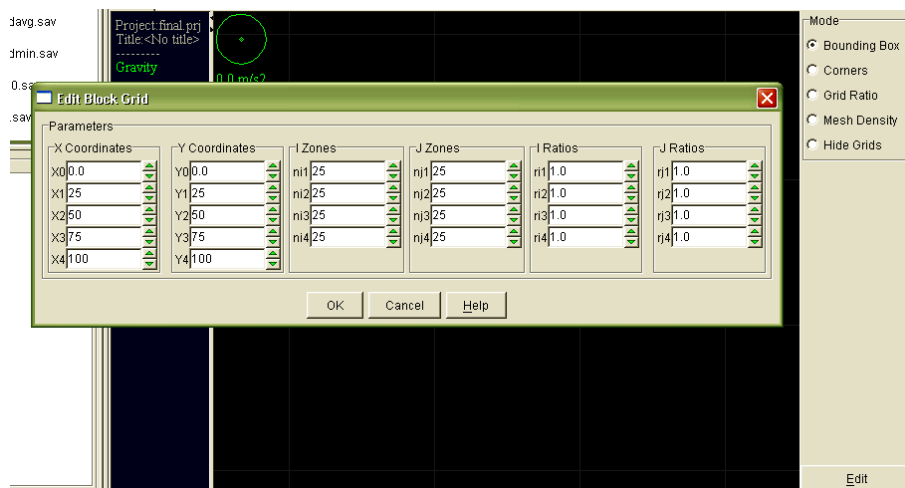
Για τη μελέτη ενός προβλήματος εκσκαφής υπογείου ανοίγματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, απαιτείται αρχικά η μοντελοποίηση του μέσου, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η εκσκαφή. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εισαγωγή των κατάλληλων καταστατικών μοντέλων υλικού στην αρχική γεωμετρία του μέσου και εφαρμογή των αρχικών συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Η εν λόγω μελέτη βασίστηκε στη δημιουργία τριών μοντέλων κυκλικής σήραγγας για διαμέτρους 6.5, 3.0 και 1.85m αντίστοιχα.

#### **6.1 Η δημιουργία του αρχικού κανάβου**

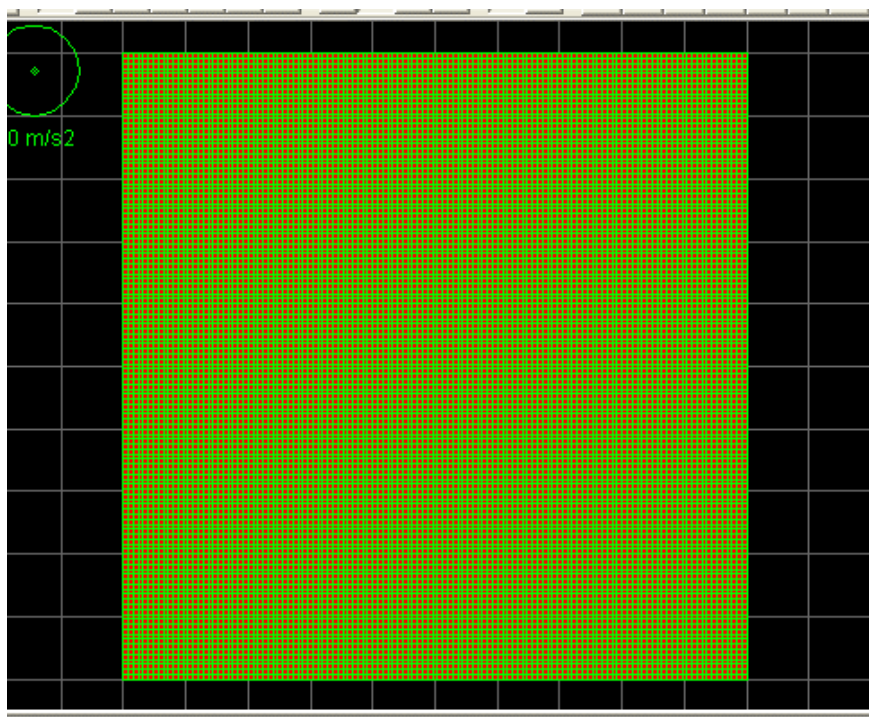
Προκειμένου να υλοποιηθεί το πρόβλημα, αρχικά δημιουργήθηκε ένας τετραγωνικός κανάβος διαστάσεων 100 x 100m. Οι διαστάσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε τα όρια του κανάβου να βρίσκονται αρκετά μακριά από την εκσκαφή και να μην επηρεάζουν την λύση του προβλήματος. Ο κανάβος αυτός διαιρέθηκε σε 15625 στοιχεία (elements), δηλαδή ο κανάβος είχε διαστάσεις 125 x 125 χωρίς τοπικές πυκνώσεις. Το τετραγωνικό σχήμα των στοιχείων επιλέχθηκε γιατί συμβάλλει στη μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Ο κανάβος κατασκευάστηκε με την εντολή 'Block' του λογισμικού FLAC. Αυτή επιλέχθηκε γιατί επιτρέπει τοπικές πυκνώσεις και αραιώσεις του κανάβου κατά βούληση καθώς και λεπτομερή διακριτοποίηση. Στο Σχήμα 6.1α φαίνεται ο πίνακας καθορισμού των διαστάσεων και διακριτοποίησης του κανάβου.

Στην περίπτωση της εκσκαφής με διάμετρο 1.85m, ο κανάβος που σχεδιάστηκε είχε διαστάσεις 160 x 160 και οι διαστάσεις του ήταν 60 x 60m. Η διακριτοποίηση δηλαδή εδώ ήταν πιο λεπτομερής. Η τροποποίηση αυτή στον κανάβο έγινε για να είναι πιο εμφανής η εκσκαφή και η διακριτοποίηση κοντά στα όρια της σήραγγας καλύτερη. Το Σχήμα 6.1β δείχνει τον κανάβο για τις τρεις περιπτώσεις, καθώς δεν παρουσιάζονται σημαντικά διαφορετικοί οπτικά.



Σχήμα 6.1α: Ορισμός των παραμέτρων του κανάβου

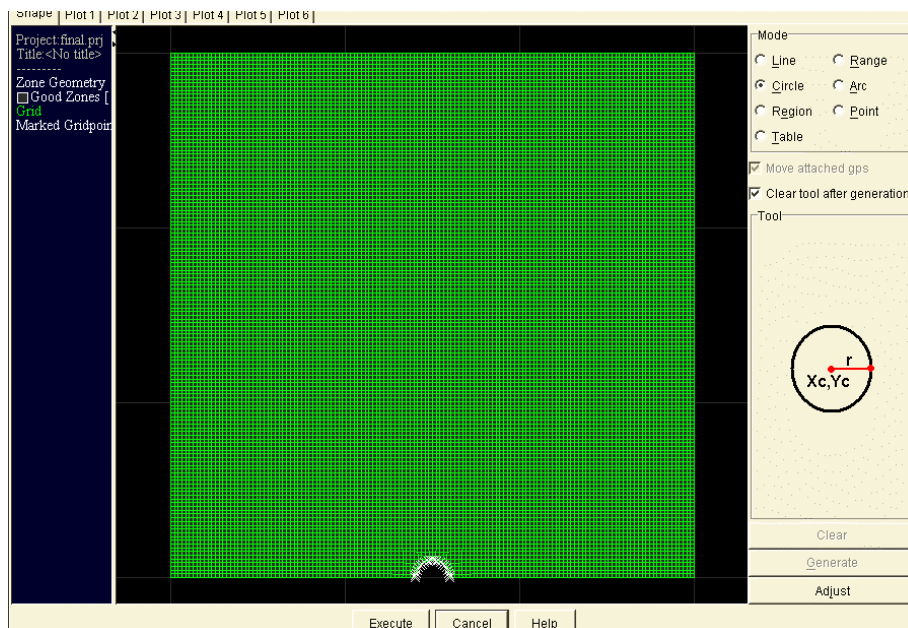


Σχήμα 6.1β: Αρχικός κανάβος

## 6.2 Η δημιουργία της εκσκαφής

Τη δημιουργία του κανάβου ακολούθησε η τοποθέτηση της εκσκαφής. Αυτό έγινε με τη χρήση της εντολής 'Alter', που δίνει τη δυνατότητα τροποποιήσεων στο σχήμα του αρχικού κανάβου. Η 'τροποποίηση' εδώ ήταν κυκλική και υλοποιήθηκε με

την



Σχήμα 6.2: Η τοποθέτηση της εκσκαφής.

επιλογή 'circle'. Το κέντρο της εκσκαφής τοποθετήθηκε στο μέσο της βάσης του κανάβου και σχεδιάστηκε σαν ημικύκλιο, εφόσον το επέτρεπε η συμμετρία στη γεωμετρία και τη φόρτιση του προβλήματος. Κατασκευάστηκαν συνολικά τρία μοντέλα εκσκαφών για κάθε μία από τις διαμέτρους. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας της εκσκαφής.

### 6.3 Ορισμός των παραμέτρων του περιβάλλοντος πετρώματος

Μετά την πραγματοποίηση της εκσκαφής ορίστηκαν οι παράμετροι του πετρώματος που τη φιλοξενεί. Το περιβάλλον πέτρωμα θεωρήθηκε ότι έχει τιμή RMR 40. Αυτή η τιμή ανταποκρίνεται περίπου στις ιδιότητες των υπερκειμένων του άνθρακα για εφαρμογή στα ανθρακωρυχεία.

Με βάση τις εμπειρικές εξισώσεις του Bieniawski (βλ. Κεφάλαιο 2) υπολογίζονται όλες οι παράμετροι του υλικού, που ζητούνται από το λογισμικό, για την ενεργοποίηση ενός μοντέλου Mohr – Coulomb. Αυτές είναι η πυκνότητα του πετρώματος, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson, η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής του, η αντοχή σε εφελκυσμό και η γωνία διαστολής. Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στ διεθνές σύστημα SI. Το Σχήμα 6.3 δείχνει τον τρόπο ορισμού των παραμέτρων και ο Πίνακας 6.1 τις τιμές που αντιστοιχούν σε πέτρωμα με τιμή RMR 40.

Σχήμα 6.3: Ορισμός των παραμέτρων του πετρώματος.

Πίνακας 6.1: Τιμές των παραμέτρων ενός υλικού με RMR 40

| RMR                               | 40          |
|-----------------------------------|-------------|
| Μέτρο παραμορφωσιμότητας, E (GPa) | 5.62 (2.10) |
| Ειδικό βάρος (kg/m <sup>3</sup> ) | 2700 (1)    |
| Γωνία εσωτερικής τριβής (μοίρες)  | 25 (2.12)   |
| Λόγος του Poisson, ν              | 0.3         |
| Αντοχή σε εφελκυσμό (Pa)          | 0 (2)       |
| Συνοχή (MPa)                      | 0.2 (2.11)  |

- (1) Τυπική τιμή πυκνότητας για ιζηματογενές πέτρωμα
- (2) Δυσμενέστερη περίπτωση

Το μοντέλο Mohr – Coulomb, που αντιπροσωπεύει τη διατμητική αστοχία ενός υλικού, επιλέχθηκε γιατί θεωρήθηκε περισσότερο ακριβές σε σύγκριση με τα απλά ελαστικά μοντέλα. Στα τελευταία, η παραμόρφωση είναι πάντα ανάλογη της τάσης και η αστοχία του υλικού δεν επέρχεται ποτέ.

## **6.4 Καθορισμός των συνοριακών συνθηκών και φόρτιση του μοντέλου**

Εν συνεχεία τοποθετούνται στο μοντέλο οι συνοριακές συνθήκες. Αυτές είναι:

- Περιορισμός (fix) της κατακόρυφης κίνησης της βάσης του μοντέλου
- Περιορισμός της οριζόντιας κίνησης των πλευρικών ορίων του κανάβου
- Σημειώνεται ότι ο ακραίος αριστερός και ακραίος δεξής κόμβος της βάσης δεν κινείται ούτε στην οριζόντια ούτε στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Το Σχήμα 6.4 δείχνει τις συνοριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν για το μοντέλο και μια κοντινότερη άποψη αυτών.

Η φόρτιση στο πέτρωμα θεωρήθηκε ότι είναι βαρυτική. Αυτό σημαίνει ότι η σήραγγα φορτίζεται μόνο από το βάρος των υπερκείμενων πετρωμάτων. Στην πραγματικότητα η σήραγγα δεν δέχεται όλο το βάρος των πετρωμάτων, από τη στέψη της μέχρι την επιφάνεια του εδάφους αλλά μόνο σε ύψος μερικών μέτρων από αυτήν. Το ύψος αυτό εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος και περιλαμβάνει τη διαταραχή του εντατικού πεδίου λόγω της εκσκαφής (αψίδα τάσεων).

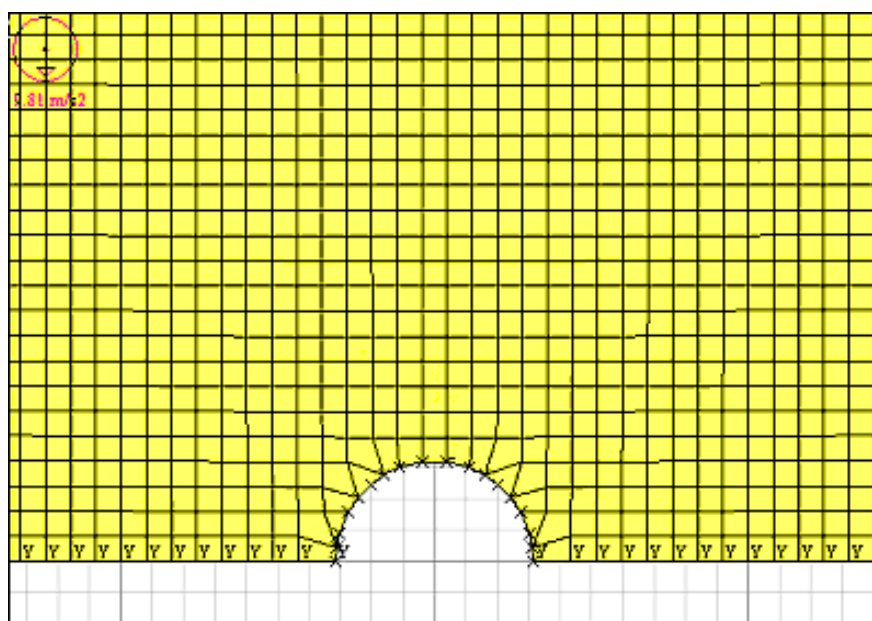
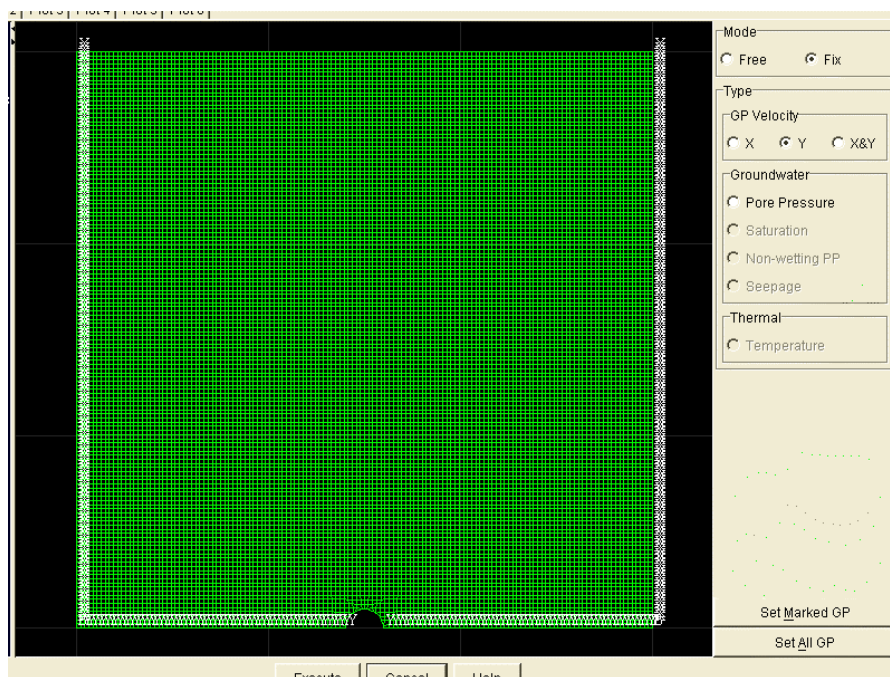
Για την επιβολή βαρυτικής φόρτισης στο FLAC απαιτείται η δήλωση της τιμής της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Ο τρόπος που γίνεται αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.5α.

Στο σημείο αυτό, δόθηκε στο πρόγραμμα η εντολή για εκτέλεση μηχανικών υπολογισμών. Η παράμετρος ‘Local damping’ που επιλέχθηκε, λειτουργεί προσθέτοντας ή αφαιρώντας μάζα από ένα σημείο του κανάβου ή από ένα κόμβο σε συγκεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης. Παντού υπάρχει διατήρηση της μάζας, αφού όση μάζα προστίθεται, τόση και αφαιρείται. Μάζα προστίθεται όταν η ταχύτητα αλλάζει και αφαιρείται όταν σημειώνει μέγιστο ή ελάχιστο.

Μια τροποποιημένη μορφή του ‘Local damping’ αποτελεί η εντολή ‘Combined damping’, και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε δυναμικά προβλήματα (FLAC 4.0, 2002).

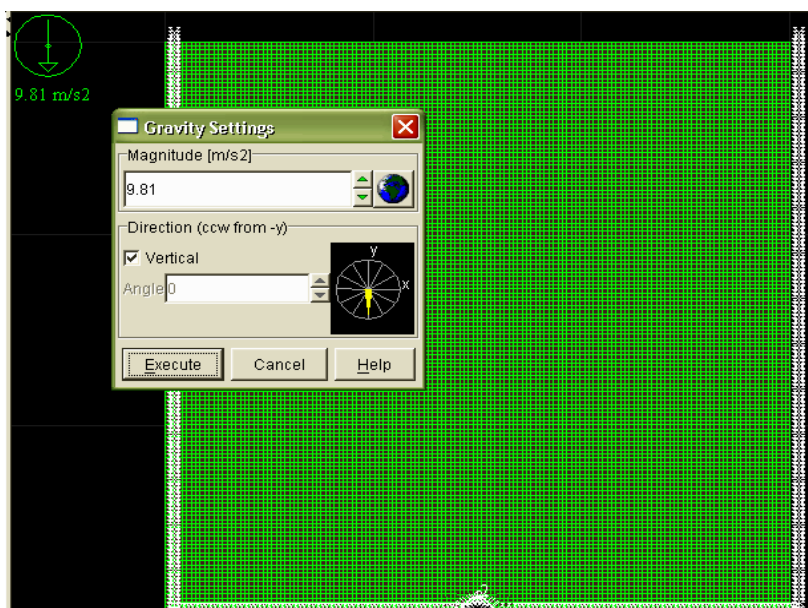
Επιπλέον, ενεργοποιείται η επιλογή ‘Large strain’. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής εξηγείται στο κεφάλαιο 5.

Το σχήμα 6.5β δείχνει το πίνακα ενεργοποίησης των παραμέτρων μηχανικών υπολογισμών.

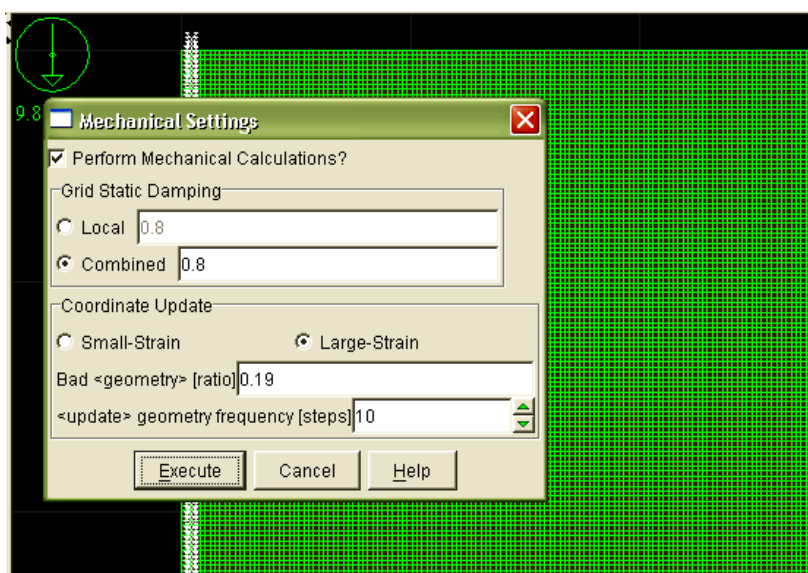


Σχήμα 6.4: Ορισμός συνοριακών συνθηκών και λεπτομερέστερη απεικόνισή τους.

## 6.5 Η εντολή 'Creep'



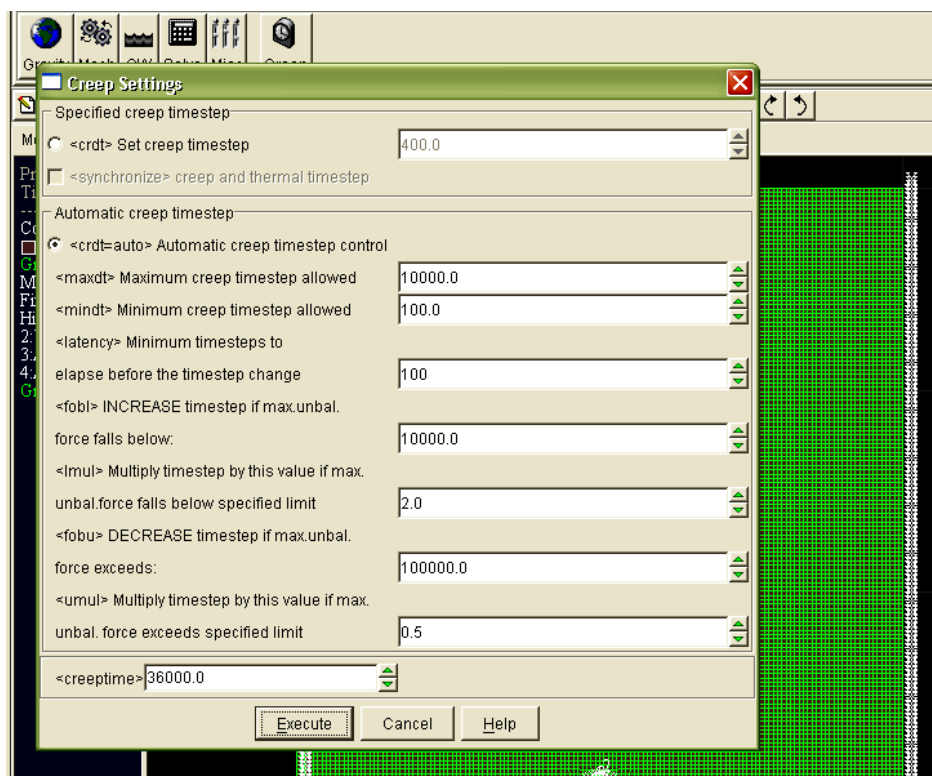
Σχήμα 6.5α: Τρόπος επιβολής της βαρυτικής φόρτισης.



Σχήμα 6.5β: Ενεργοποίηση παραμέτρων μηχανικών υπολογισμών

Προκειμένου να εισαχθεί στο πρόβλημα η παράμετρος του χρόνου, ήταν απαραίτητη η ενεργοποίηση της εντολής ‘Creep’. Αυτή, ακόμη και αν δεν επιλεγεί κάποιο μοντέλο βισκοπλαστικής ή βισκοελαστικής συμπεριφοράς, συσχετίζει τα βήματα που γίνονται για την επίλυση του προβλήματος, με συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η λήψη του διαστήματος αυτού και ο ορισμός των υπόλοιπων τιμών φαίνεται στο Σχήμα 6.6.

Το μοντέλο που επιλέχθηκε για την επίλυση ήταν το βισκοπλαστικό μοντέλο Burger– creep. Αυτό χαρακτηρίζεται από βισκο–ελαστο–πλαστική και ογκομετρική

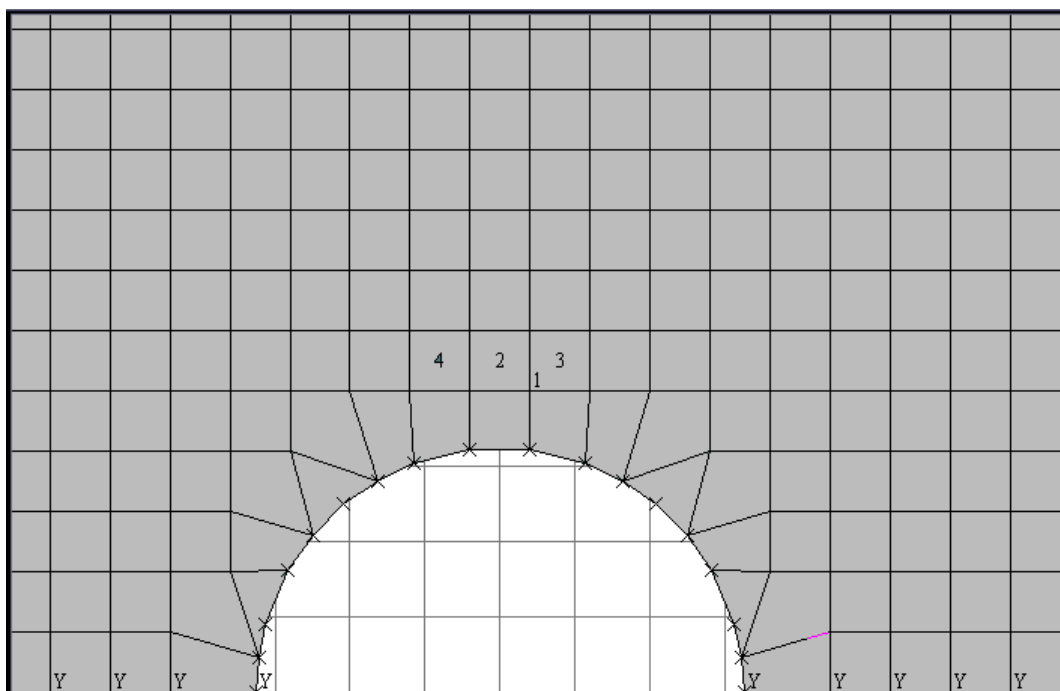


Σχήμα 6.6 Πίνακας παραμέτρων της εντολής 'Creep'.

ελαστο– πλαστική συμπεριφορά. Οι συνιστώσες της βισκοελαστικής και πλαστικής κατανομής της τάσης θεωρείται ότι δρουν διαδοχικά. Ο βισκοελαστικός καταστατικός νόμος ανταποκρίνεται στο μοντέλο Burger (διάταξη Kelvin σε σειρά με ένα στοιχείο Maxwell), και το πλαστικό καταστατικό μοντέλο αντιστοιχεί στο Mohr– Coulomb.

Τελικά, αυτό που γίνεται είναι ο υπολογισμός νέων συνιστωσών τάσης, υποθέτοντας ότι η διεύθυνση των κυρίων τάσεων δεν επηρεάζεται από την πλαστική ροή. Το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης, που σχετίζεται με τη διατμητική αστοχία και την αστοχία σε εφελκυσμό προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τις σταθερές του τανυστή πλαστικής παραμόρφωσης (incremental plastic strain tensor).

Αν δεν οριστεί διαφορετικά από το χρήστη, τόσο οι ιδιότητες ιξώδους του Maxwell όσο και του Kelvin M και K αντίστοιχα, θεωρούνται άπειρες (παρόλο που στο FLAC απεικονίζονται σαν μηδενικά διανύσματα). Επίσης, το χρονικό βήμα, αν δεν οριστεί λαμβάνεται ίσο με το μηδέν και το μοντέλο θεωρείται ότι έχει ελαστική συμπεριφορά. Εδώ έχει ληφθεί από 100 – 10000sec, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6.



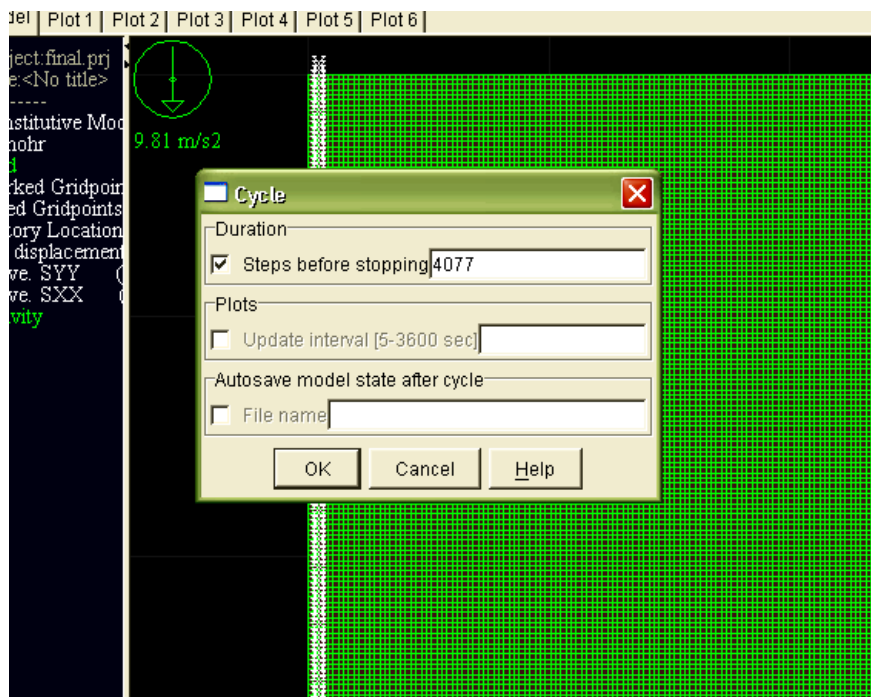
Σχήμα 6.7: Σημεία ελέγχου κοντά στη στέψη της σήραγγας

1. Μετατόπιση στην κατακόρυφη διεύθυνση
2. Τάση στην κατακόρυφη διεύθυνση
3. Τάση στην οριζόντια διεύθυνση
4. Μέγιστη κύρια τάση

## 6.6 Η δυνατότητες της εντολής 'Utility'

Στο FLAC δίνεται στους χρήστες η δυνατότητα ενεργοποίησης επιπλέον παραμέτρων, που σχετίζονται είτε με εντολές στη γλώσσα προγραμματισμού ('Fish'), είτε με την παρακολούθηση της συμπεριφοράς κάποιων συγκεκριμένου σημείου, που παρουσιάζει ενδιαφέρον ('history'). Στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν εδώ δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια εντολή Fish αλλά μόνο το History.

Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν κάποια σημεία κοντά στη στέψη της σήραγγας και κατεγράφησαν οι τιμές της τάσης σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση και της μετατόπισης σαν συνάρτηση του χρόνου. Αυτά τα μεγέθη μπορούν στη συνέχεια να παρασταθούν γραφικά. Τα σημεία που επιλέχθηκαν προς παρατήρηση φαίνονται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.8: Η εντολή επίλυσης 'cycle'

## 6.7 Η επίλυση των μοντέλων

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 5, η επίλυση του μοντέλου ολοκληρώνεται όταν η τιμή της δύναμης εκτός ισορροπίας (unbalanced force) φτάσει σε ικανοποιητικά μικρό επίπεδο. Τότε θεωρείται ότι έχει επέλθει ισορροπία.

Στην περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ η επίλυση έγινε πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, που αντιστοιχούσε σε χρόνο 10, 100 και 1000 ορών αντίστοιχα. Αυτό έγινε μαζί με τον ορισμό των παραμέτρων του 'creep' και ήταν εφικτό λόγω του ότι κάθε βήμα εκτέλεσης πράξεων ταυτιζόταν με δεδομένο χρονικό διάστημα πραγματικού χρόνου. Έτσι το λογισμικό εκτελούσε όσα βήματα του ορίζονταν απ' την αρχή, ανάλογα με τον επιθυμητό πραγματικό χρόνο. Το Σχήμα 6.8 δείχνει τη διαδικασία επιλογής των βημάτων.

## **Κεφάλαιο 7**

### **Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων**

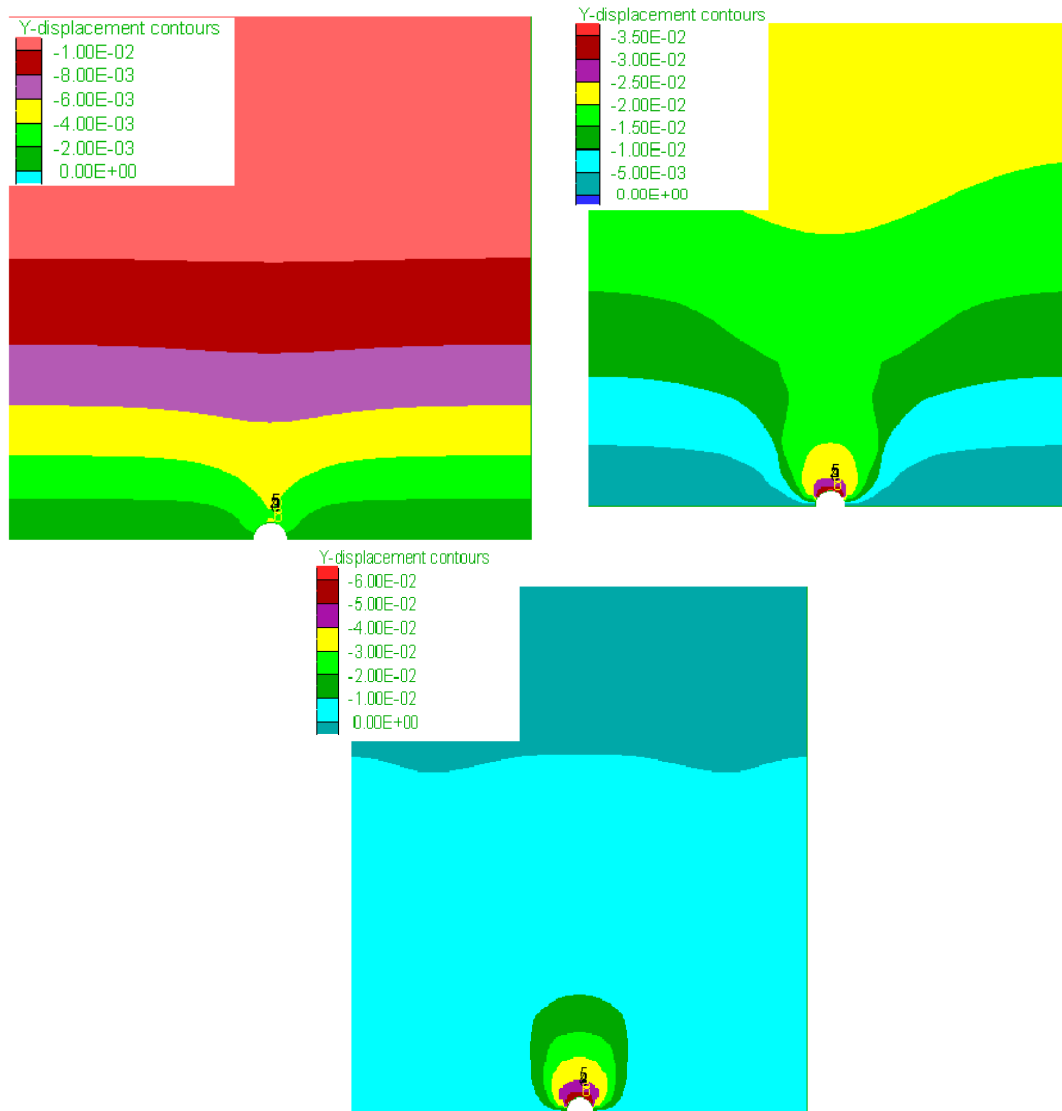
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων που δημιουργήθηκαν και επιλύθηκαν με το λογισμικό πακέτο FLAC. Επιπλέον θα γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων με το εμπειρικό διάγραμμα του Bieniawski, που αφορά επίσης, πέτρωμα με ιδιότητες που ανταποκρίνονται στην τιμή RMR 40 και ανοίγματα διαμέτρων 6.5, 3.0 και 1.85m αντίστοιχα. Για να γίνει αυτό, σχεδιάστηκε γραφικά η μετατόπιση της οροφής της σήραγγας για τις τρεις διαμέτρους, χρησιμοποιώντας τις τιμές μετατόπισης για πάροδο διαστήματος 10, 100 και 1000 ωρών.

Παρατίθενται διαγράμματα μετατόπισης σε κατακόρυφη διεύθυνση, κατακόρυφης και οριζόντιας τάσης, μέγιστης κύριας τάσης και μερικά διαγράμματα ιστορικού (History plots) για τα σημεία ελέγχου που ορίστηκαν (βλ. κεφ. 6)

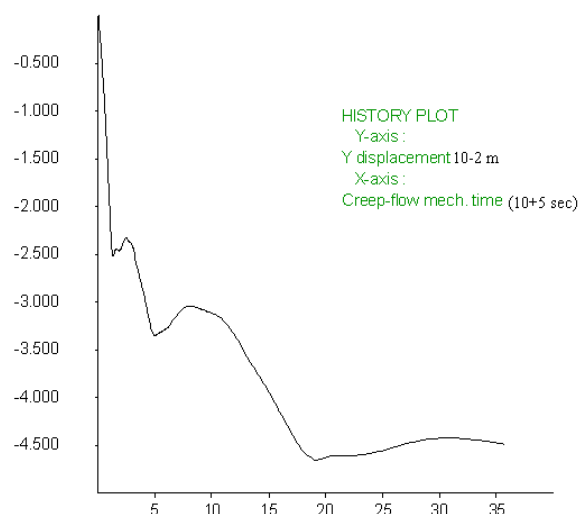
#### **7.1 Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 6.5m**

##### **7.1.1 Μεταβολή της μετατόπισης**

Στο σημείο αυτό θα γίνει παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που έδωσε η αριθμητική επίλυση για την περίπτωση σήραγγας διαμέτρου 6.5m, που διανοίγεται σε πέτρωμα με δείκτη RMR 40. Το Σχήμα 7.1 δείχνει την πορεία την μετατόπισης στην κατακόρυφη διεύθυνση και για χρόνο 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται κοντά στη στέψη του ανοίγματος ενώ κοντά στην επιφάνεια η τιμή τους είναι μικρή. Σαν να έχει προκύψει δηλαδή μία φυσική συμπαγοποίηση του πετρώματος λόγω του βάρους των υπερκειμένων. Παράλληλα, με την πάροδο του χρόνου η μετατόπιση αυξάνεται και μερικά mm που είναι στις 10 ώρες, φτάνει στα 80 στις 1000 ώρες. Το Σχήμα 7.2 είναι το γράφημα της μετατόπισης σαν συνάρτηση του χρόνου στη διάρκεια 1000 ωρών.



Σχήμα 7.1 Κατακόρυφη μετατόπιση (m) για διάρκεια φόρτισης 10, 100, 1000 ωρών αντίστοιχα.



7.2: Πορεία μετατόπισης ενός σημείου πάνω από τη στέψη της σήραγγα, κατά την πάροδο των 1000 ωρών.

### 7.1.2 Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης

Το Σχήμα 7.3 δείχνει την εξέλιξη της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς η χρονική διάρκεια της βαρυτικής φόρτισης αυξάνει. Οι μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής τάσης παρουσιάζονται στα πλευρικά όρια της εκσκαφής και μπορεί να γίνουν μέχρι και τριπλάσιες της αρχικής τάσης. Οι μικρότερες θλιπτικές τάσεις αντίστοιχα ασκούνται κοντά στη στέψη της σήραγγας. Αυτό σχετίζεται με το σχηματισμό της αψίδας των τάσεων, ακριβώς πάνω από το εν λόγω σημείο. Εκεί η τάση μπορεί να γίνει και εφελκυστική, με ιδιαίτερα δυσμενή αποτελέσματα.

Στο μοντέλο, μετά από πάροδο 10 ωρών τα σημεία εμφάνισης των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων συμφωνούν απόλυτα με τα αναμενόμενα. Οι τιμές δε αυτών είναι της τάξεως των 0.8 MPa και 0.1MPa αντίστοιχα. Καθώς η χρονική διάρκεια της φόρτισης αυξάνει στις 100 ώρες, αυξάνεται περαιτέρω η τιμή της μέγιστης θλιπτικής τάσης (3MPa περίπου) ενώ αυτή της ελάχιστης παραμένει σταθερή.

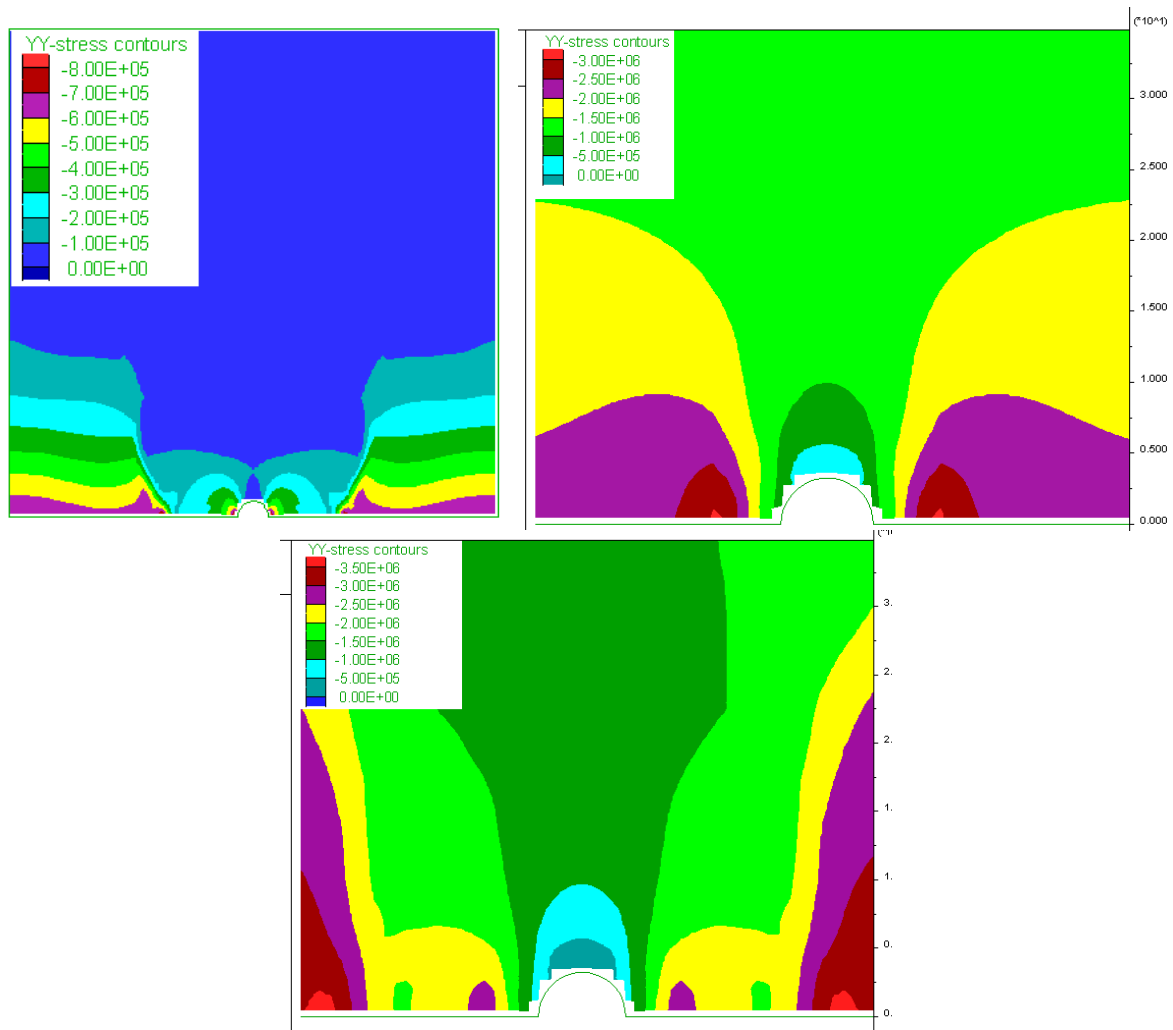
Μετά από φόρτιση 1000 ωρών όμως παρατηρείται μεν αύξηση των τιμών των τάσεων αλλά η αψίδα παίρνει μορφή, που πιθανόν να οφείλεται σε αστάθεια. Στην επιφάνεια οι τάσεις έχουν πολύ μικρή τιμή.

Το Σχήμα 7.4 δείχνει την πορεία μεταβολής της τάσης σε διάρκεια 1000 ωρών.

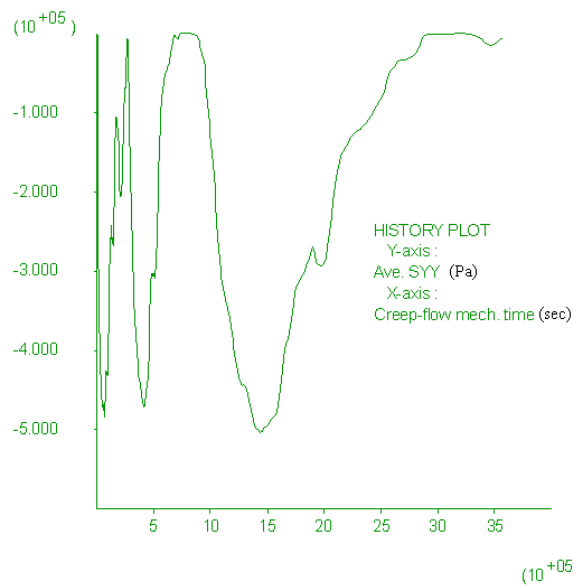
### 7.1.3 Μεταβολή της οριζόντιας τάσης

Το Σχήμα 7.5 δίνει την εξέλιξη της κατανομής της οριζόντιας τάσης μέχρι τις 100 ώρες. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, η μέγιστη θλιπτική τάση εμφανίζεται στη βάση του μοντέλου και έχουν τιμή λίγο μεγαλύτερη από 1MPa. Προς την επιφάνεια οι οριζόντιες τάσεις είναι πολύ μικρές έως μηδενικές. Μετά από 100 ώρες, η κατανομή παραμένει ως έχει όμως οι τιμές είναι τώρα λίγο μεγαλύτερες, περίπου 0,5MPa.

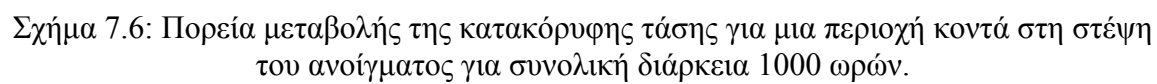
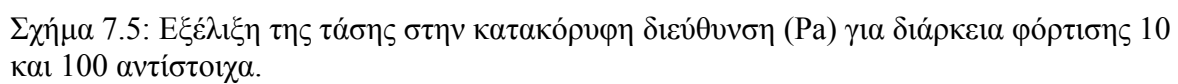
Το Σχήμα 7.6 δίνει τη συνολική μεταβολή των τιμών της τάσης στην οριζόντια διεύθυνση για συνολική χρονική διάρκεια 1000 ωρών.



Σχήμα 7.3: Εξέλιξη της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση (Pa) για διάρκεια φόρτισης 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα.



Σχήμα 7.4: Πορεία μεταβολής της κατακόρυφης τάσης για μια περιοχή κοντά στη στέψη του ανοίγματος



## **7.2 Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 3.0m**

### **7.2.1 Μεταβολή της μετατόπισης**

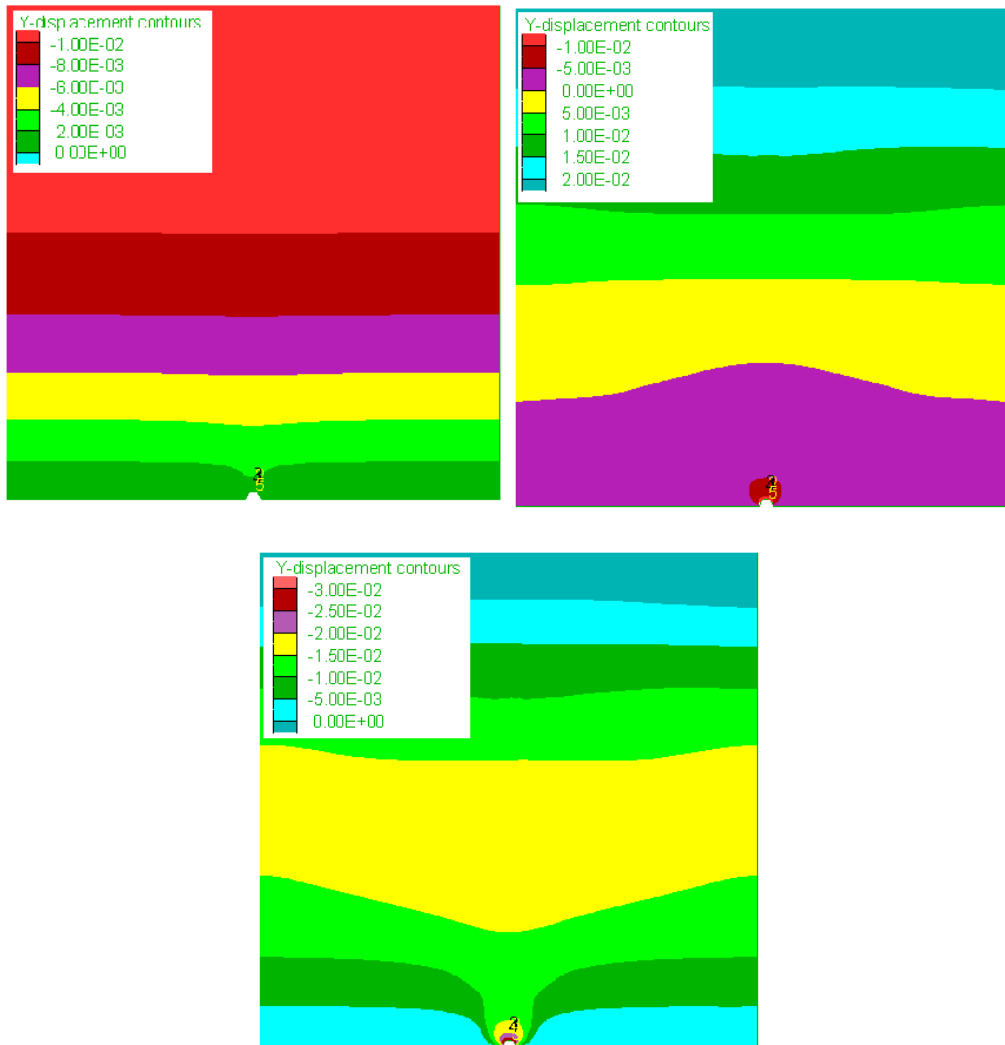
Ακολουθεί παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης για τη σήραγγα με διάμετρο 3.0m. Το Σχήμα 7.7 δείχνει την πορεία της μετατόπισης στην κατακόρυφη διεύθυνση και για χρόνο 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις, όπως είναι αναμενόμενο, εμφανίζονται κοντά στη στέψη του ανοίγματος ενώ κοντά στην επιφάνεια η τιμή τους είναι μικρή, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Καθώς ο χρόνος αυξάνεται, αυξάνεται και η μετατόπιση. Στις 10 ώρες δεν είναι μεγαλύτερη από 2mm, στις 100 είναι λίγο περισσότερο από 10mm και στις 1000 ώρες έχει ξεπεράσει τα 30mm. Κοντά στην επιφάνεια δε, δεν ξεπερνάει τα λίγα χιλιοστά. Το Σχήμα 7.8 είναι το γράφημα της μετατόπισης σαν συνάρτηση του χρόνου στη διάρκεια 1000 ωρών.

### **7.2.2 Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης**

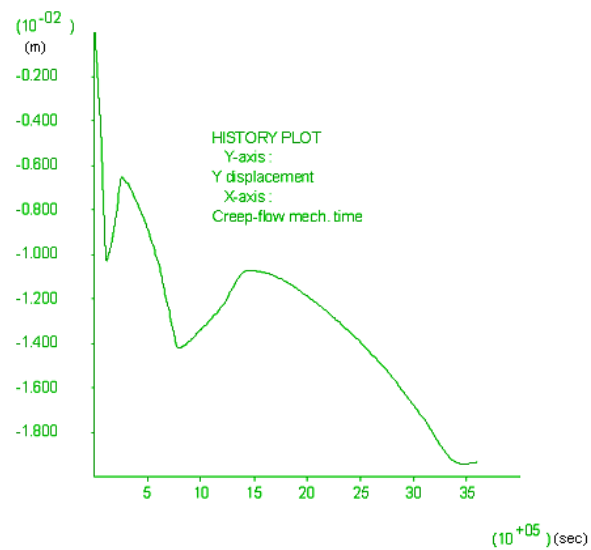
Το Σχήμα 7.9 δείχνει την εξέλιξη της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς η χρονική διάρκεια της βαρυντικής φόρτισης αυξάνει. Η μορφή της κατανομής είναι παρόμοια με αυτή της σήραγγας μεγαλύτερης διαμέτρου. Οι μέγιστες τιμές θλιπτικής τάσης παρουσιάζονται στα πλευρικά όρια της εκσκαφής. Οι μικρότερες αντίστοιχα ασκούνται κοντά στη στέψη της σήραγγας, αφού λαμβάνει χώρα και πάλι σχηματισμός της αψίδας τάσεων.

Στο μοντέλο, μετά από πάροδο 10 ωρών τα σημεία εμφάνισης των μέγιστων τάσεων συμφωνούν απόλυτα με τα αναμενόμενα. Οι τιμές δε αυτών είναι της τάξεως των 1,2 MPa ενώ η αψίδα τάσεων δεν έχει σχηματιστεί ακόμη. Καθώς η χρονική διάρκεια της φόρτισης αυξάνει στις 100 ώρες, αυξάνεται περαιτέρω η τιμή της μέγιστης θλιπτικής τάσης ενώ αυτή της ελάχιστης παραμένει σταθερή. Η αψίδα εδώ έχει αρχίσει να διακρίνεται.

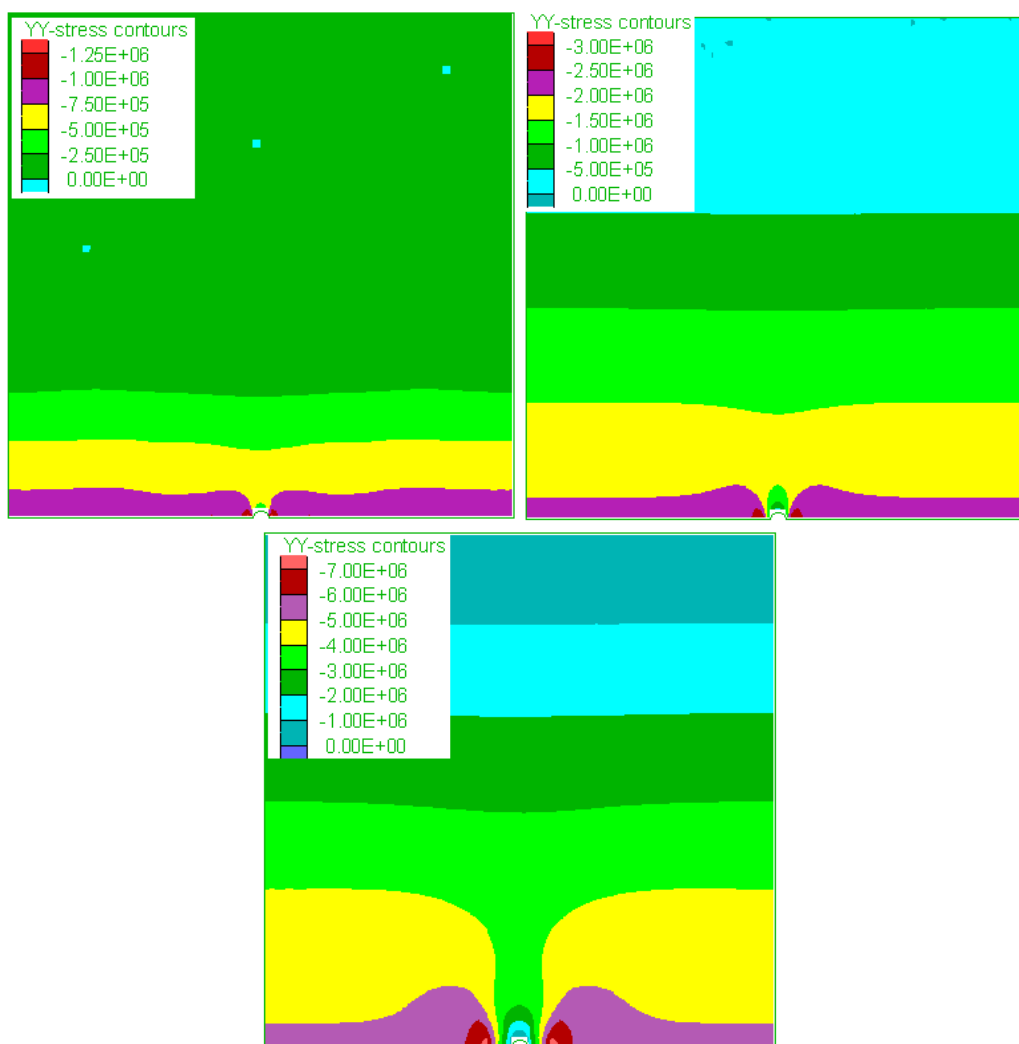
Στην περίπτωση της φόρτισης των 1000 ωρών παρατηρείται περαιτέρω αύξηση της μέγιστης θλιπτικής τάσης ενώ η αψίδα έχει σχηματιστεί πλήρως.



Σχήμα 7.7 Κατακόρυφη μετατόπιση (m) για διάρκεια φόρτισης 10, 100, 1000 ωρών αντίστοιχα



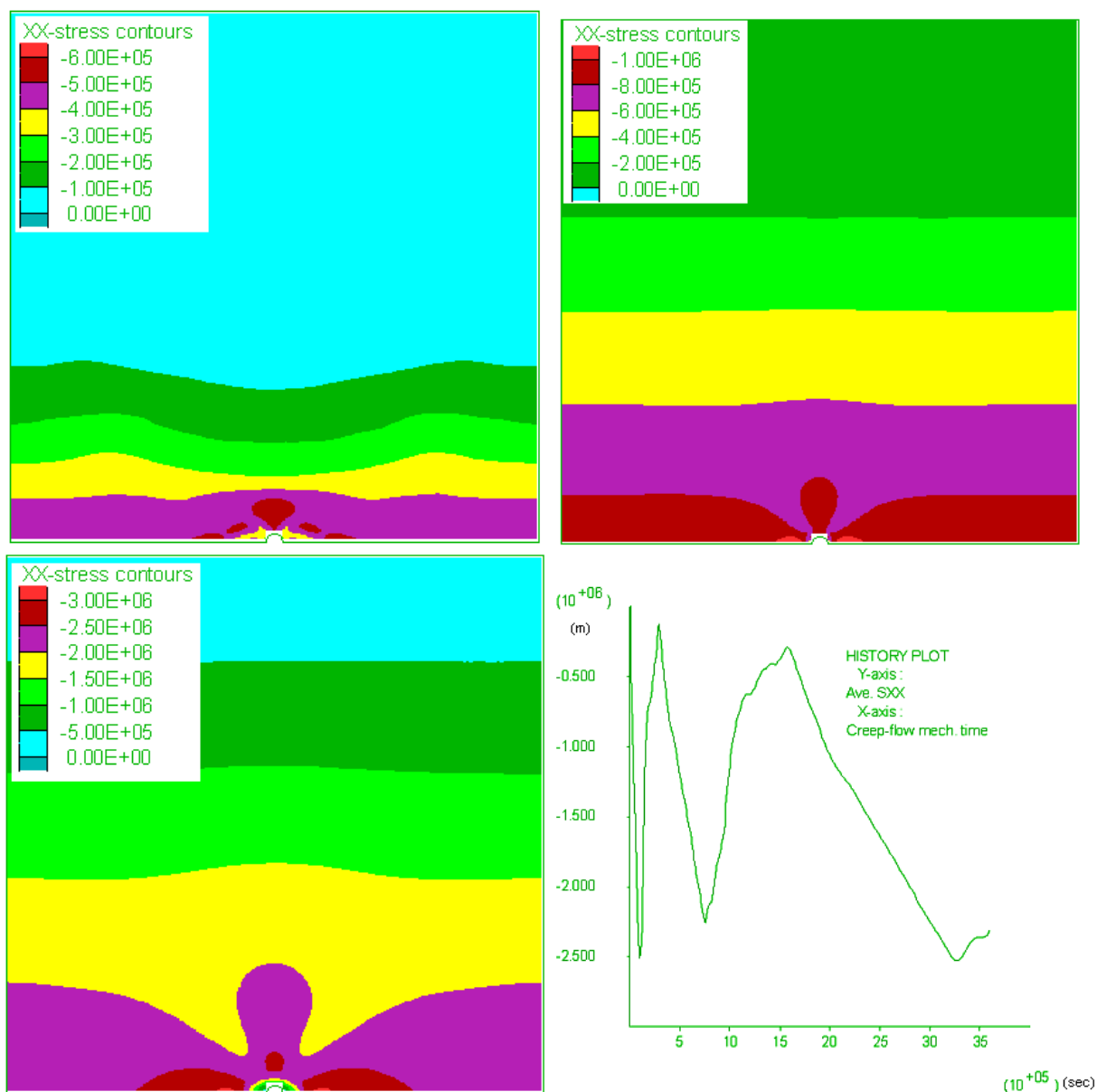
Σχήμα 7.6: Πορεία μεταβολής της κατακόρυφης τάσης για μια περιοχή κοντά στη στέψη του ανοίγματος



Σχήμα 7.9: Εξέλιξη της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση (Pa) για διάρκεια φόρτισης 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα.

### 7.2.3 Μεταβολή της οριζόντιας τάσης

Το Σχήμα 7.10 δίνει την εξέλιξη της κατανομής της οριζόντιας τάσης μέχρι τις 1000 ώρες και τη μεταβολή των τιμών της τάσης στην οριζόντια διεύθυνση για την ίδια χρονική διάρκεια. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, η μέγιστες θλιπτικές τάσεις εμφανίζονται και στην περίπτωση αυτή στη βάση του μοντέλου. Στις 10 ώρες η τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το 1 MPa. Μετά από 100 ώρες, οι τιμές είναι τώρα λίγο μεγαλύτερες, πάνω από 1 MPa και παρατηρείται μία περιοχή ακριβώς πάνω από τη στέψη όπου οι τιμές είναι μεγαλύτερες. Στις 1000 ώρες, η περιοχή αυτή έχει διευρυνθεί και οι τάσεις είναι 3 MPa περίπου. Προς την επιφάνεια οι οριζόντιες τάσεις είναι πολύ μικρές έως μηδενικές.

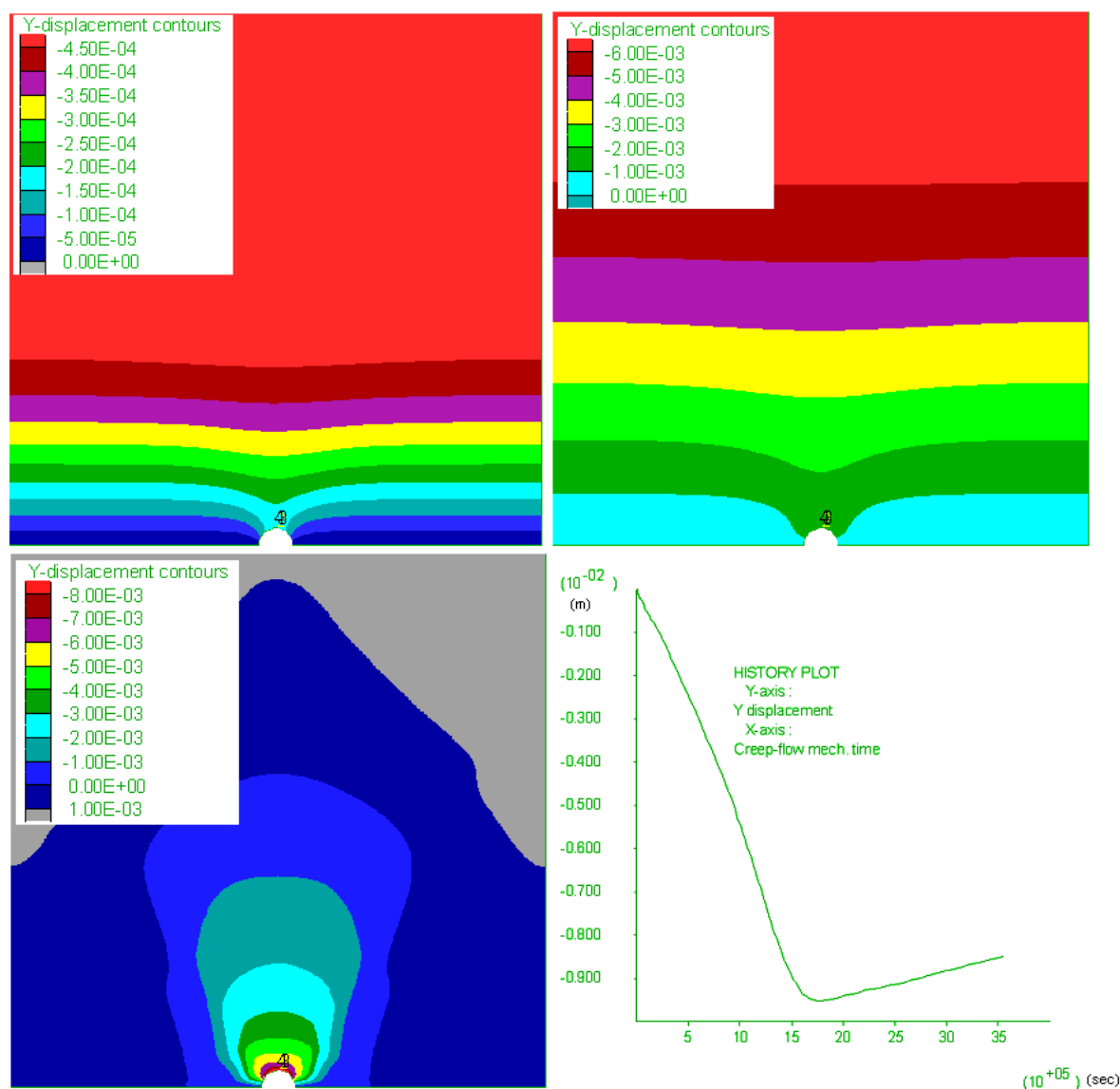


Σχήμα 7.10: Εξέλιξη της κατανομής της οριζόντιας τάσης μέχρι τις 1000 ώρες και μεταβολή των τιμών της τάσης στην οριζόντια διεύθυνση για την ίδια χρονική διάρκεια

### 7.3 Περίπτωση σήραγγας με διάμετρο 1.85m

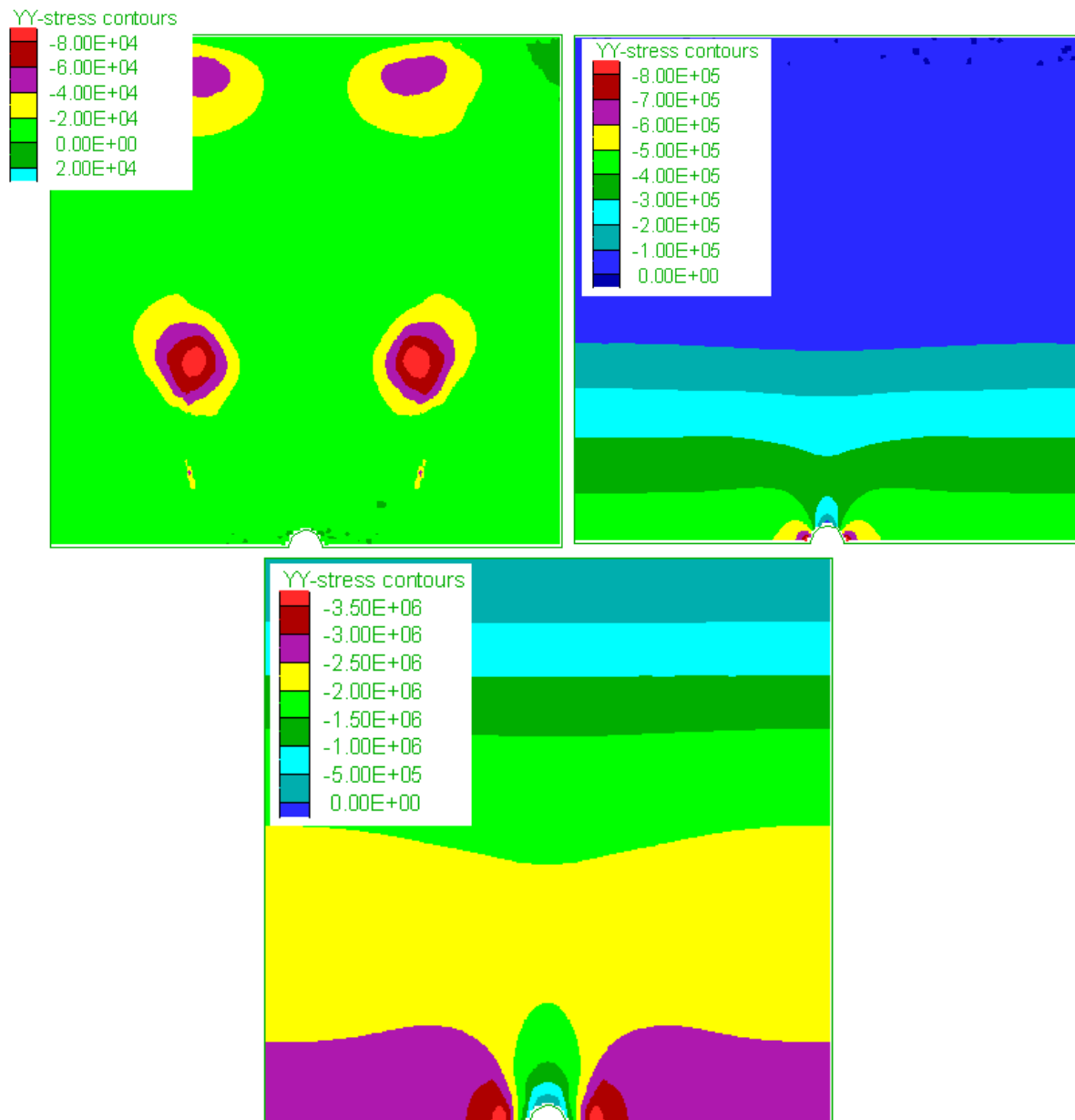
#### 7.3.1 Μεταβολή της μετατόπισης

Ακολουθεί παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης για τη σήραγγα με διάμετρο 1.85m. Το Σχήμα 7.11 δείχνει τη χρονική μεταβολή της μετατόπισης στην κατακόρυφη διεύθυνση και για χρόνο 10, 100 και 1000



Σχήμα 7.11: Χρονική μεταβολή της μετατόπισης στην κατακόρυφη διεύθυνση και για χρόνο 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα και το γράφημα της μετατόπισης σαν συνάρτηση του χρόνου στην ίδια χρονική περίοδο.

ωρών αντίστοιχα και το γράφημα της μετατόπισης σαν συνάρτηση του χρόνου στην ίδια χρονική περίοδο. Και εδώ οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται κοντά στη στέψη του ανοίγματος όμως η τιμή τους είναι αρκετά μικρή, της τάξεως των μερικών mm. Κοντά στην επιφάνεια η τιμή τους είναι μικρή. Καθώς ο χρόνος αυξάνεται, αυξάνεται και η μετατόπιση. Στις 10 ώρες είναι μόλις μερικά δέκατα ή εκατοστά του χιλιοστού, στις 100 είναι 1 με 2mm πάνω από τη στέψη και λίγο περισσότερο προς την επιφάνεια και στις 1000 ώρες έχει λάβει την κανονική της μορφή με μετατοπίσεις κοντά στα 10mm γύρω από το άνοιγμα. Κοντά στην επιφάνεια δε, δεν ξεπερνάει τα λίγα χιλιοστά.



Σχήμα 7.12: πορεία της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς για χρόνους 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα

### 7.3.2 Μεταβολή της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση

Το Σχήμα 7.12 δείχνει την πορεία της τάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς η χρονική διάρκεια της βαρυντικής φόρτισης αυξάνει. Η μορφή της κατανομής είναι παρόμοια με αυτή της σήραγγας μεγαλύτερης διαμέτρου. Οι μέγιστες τιμές θλιπτικής τάσης παρουσιάζονται στα πλευρικά όρια της εκσκαφής. Οι μικρότερες αντίστοιχα ασκούνται κοντά στη στέψη της σήραγγας, αφού λαμβάνει χώρα και πάλι σχηματισμός της ανίδας τάσεων.

Πίνακας 7.1. Μετατοπίσεις οροφής των τριών ανοιγμάτων για χρονικό διάστημα 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα.

| Μετατοπίσεις (mm) |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Διάμετρος         | T=10   | T=100  | T=1000 |
| (m)               | (Ωρες) | (Ωρες) | (Ωρες) |
| 6.50              | 13.0   | 35.0   | 75     |
| 3.00              | 2.0    | 12.5   | 31     |
| 1.85              | 0.8    | 4.0    | 10     |

Στο μοντέλο, μετά από πάροδο 10 ωρών παρατηρούνται τέσσερις σχετικά συμμετρικές περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει πολύ μικρές τάσεις, μερικά kPa. Είναι πιθανό να έχει εκδηλωθεί αστάθεια. Στις 100 ώρες η κατανομή της τάσης λαμβάνει την κανονική της μορφή και έχει αρχίσει ο σχηματισμός της ανίδαας των τάσεων. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα πλευρικά όρια της σήραγγας και η τιμή τους είναι κοντά στο 1MPa.

Μετά από 1000 ώρες οι τάσεις έχουν τιμή μεγαλύτερη από 3MPa και η ανίδα τάσεων είναι πλέον καλά σχηματισμένη. Στην επιφάνεια, και στις τρεις περιπτώσεις η φόρτιση είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μικρότερη.

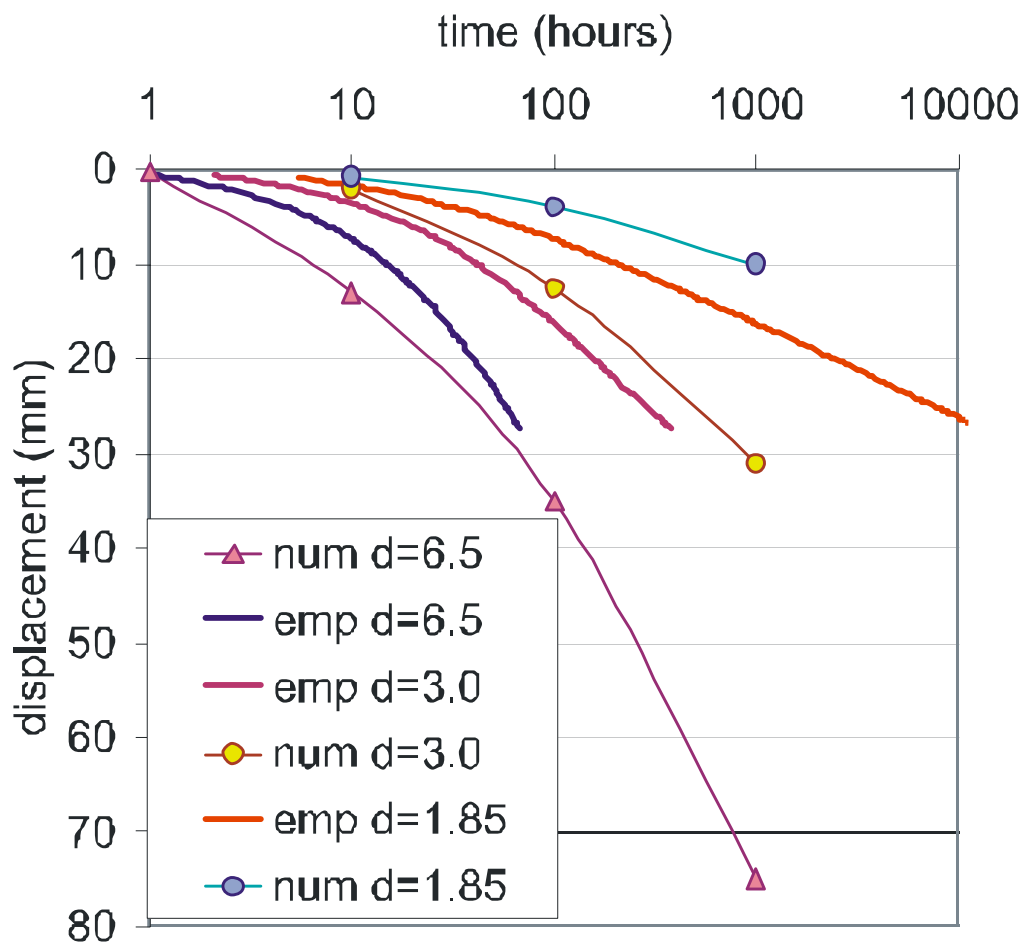
#### 7.4 Σύγκριση εμπειρικής και αριθμητικής μεθόδου

Στη συνέχεια, όπως έχει ήδη αναφερθεί έγινε μια προσπάθεια σύγκρισης των μετατοπίσεων της οροφής για τα τρία διαφορετικά ανοίγματα, όπως προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση με τις μετατοπίσεις που κατέγραψε εμπειρικά ο Unal για πέτρωμα ίδιων ιδιοτήτων και σήραγγες ίδιων διαμέτρων. Ο Πίνακας 7.1 δίνει συγκεντρωτικά τις μετατοπίσεις της οροφής των τριών εκσκαφών για χρόνους 10, 100 και 1000 ωρών αντίστοιχα.

Το διάγραμμα του Unal ψηφιοποιήθηκε και τα δεδομένα σχεδιάστηκαν σε κοινό διάγραμμα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης. Το Σχήμα 7.13 δίνει το κοινό αυτό διάγραμμα.

Σύμφωνα με αυτό:

- Οι μετατοπίσεις ως προς το χρόνο έχουν την ίδια μορφή, τόσο στο εμπειρικό όσο και στο αριθμητικό διάγραμμα. Αυτό ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις.



Σχήμα 7.13: Κοινό διάγραμμα αριθμητικών και εμπειρικών αποτελεσμάτων.

- Υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις εμπειρικές και τις αριθμητικές τιμές. Έτσι, οι αριθμητικές καμπύλες για τις σήραγγες των 3.0 και 1.85m δίνουν λίγο μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το εμπειρικό, ενώ αντίθετα για την εκσκαφή των 6.5m λίγο μεγαλύτερες.
- Στις 10 ώρες το εμπειρικό διάγραμμα δίνει για τις σήραγγες των 6.5, 3.0 και 1.85m μετατοπίσεις 7.5, 4.0 και 1.3mm αντίστοιχα, ενώ το αριθμητικό 13.0, 2.0 και 0.8mm.
- Στις 100 ώρες, για τις σήραγγες των 3.0 και 1.85 το εμπειρικό διάγραμμα δίνει μετατοπίσεις 17.5 και 7.5mm αντίστοιχα, ενώ το αριθμητικό 12.5 και 4.0mm.
- Στις 1000 ώρες, για τη σήραγγα μικρότερης διαμέτρου, η μετακίνηση σύμφωνα με το εμπειρικό διάγραμμα είναι 16mm, ενώ σύμφωνα με το αριθμητικό 10mm.
- Για τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές δεν μπορεί να υπάρξει σύγκριση, καθώς δεν υπάρχουν εμπειρικές τιμές.

Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εμπειρικής και αριθμητικής μεθόδου.

|           | Μετατοπίσεις (mm) |            |           |            |           |            |
|-----------|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Διάμετρος | T=10              |            | T=100     |            | T=1000    |            |
| (m)       | (Ωρες)            |            | (Ωρες)    |            | (Ωρες)    |            |
|           | Εμπειρικό         | Αριθμητικό | Εμπειρικό | Αριθμητικό | Εμπειρικό | Αριθμητικό |
| 6.5       | 7.5               | 13.0       | -----     | 35.0       | -----     | 75.0       |
| 3.0       | 4.0               | 2.0        | 17.5      | 12.5       | -----     | 31.0       |
| 1.85      | 1.3               | 0.8        | 7.5       | 4.0        | 16.0      | 10.0       |

Ο πίνακας 7.2 δίνει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εμπειρικής και αριθμητικής μεθόδου.

#### Παρατηρήσεις:

- Μερικά γραφήματα (history plots) παρουσιάζουν απότομες μεταβολές και διαδοχικές αυξομειώσεις της τιμής της μεταβλητής που απεικονίζουν.
- Μερικά μοντέλα κατανομής των μεταβλητών σε ζώνες παρουσιάζουν μορφές μη αναμενόμενες.
- Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι πιθανόν να οφείλονται σε στιγμιαίες αστάθειες του προγράμματος κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαμόρφωση των μοντέλων κατανομής σε ζώνες είναι συνεχής και μπορεί να παρακολουθείται καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης. Κάποιες στιγμές η κατανομή αλλοιώνεται σημαντικά και την αμέσως επόμενη στιγμή επανέρχεται πλήρως στην κανονική της μορφή. Δεδομένου ότι τα στιγμιότυπα έχουν ληφθεί πριν επέλθει η πλήρης ισορροπία, είναι αναμενόμενο να εκδηλώνονται στιγμιαίες αστάθειες.
- Στα μοντέλα ζωνών κατανομής των τάσεων υπάρχει ένα κενό ακριβώς γύρω από το άνοιγμα. Στην περιοχή δηλαδή αυτή δεν υπάρχουν τιμές για τις τάσεις. Αυτό γίνεται ενδεχομένως γιατί οι τιμές των ιδιοτήτων προκύπτουν με κάποιο είδος παρεμβολής. Αυτό μπορεί να μην είναι εφικτό κοντά στο άνοιγμα γιατί οι υπάρχουν τιμές μόνο από τη μία πλευρά ή γιατί οι τιμές ενδέχεται να ξεπεράσουν το όριο του ανοίγματος.

## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα και προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια ανακεφαλαίωση της εργασίας, σχολιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα και ακολουθούν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε ένα υποθετικό υλικό με σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες και τιμή RMR 40. Με βάση τις εμπειρικές εξισώσεις του Bieniawski υπολογίστηκαν οι μηχανικές του παράμετροι όπως μέτρο ελαστικότητας, συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής. Οι τιμές για το λόγο του Poisson, την πυκνότητα, την αντοχή σε εφελκυσμό και τη γωνία διαστολής ελήφθησαν υποθετικά, σύμφωνα όμως με τις τυπικές τιμές των περισσότερων πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια, όπου και λαμβάνουν χώρα τα υπόγεια έργα.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τρία μοντέλα στο λογισμικό πακέτο FLAC-2D, με τρεις διαφορετικές διαμέτρους, 6.5, 3.0 και 1.85m αντίστοιχα. Η επίλυσή τους βασιζόταν στο κριτήριο αστοχίας σε διάτμηση, Mohr – Coulomb, ενώ παράλληλα είχε ενεργοποιηθεί η παράμετρος ερπυσμού. Αυτό εισήγαγε στο πρόβλημα την παράμετρο του χρόνου και επέτρεψε τη μελέτη της συμπεριφοράς της εκσκαφής και ως προς το χρόνο και ως προς τη φόρτιση. Η φόρτιση ήταν μόνο βαρυτική, δηλαδή οφειλόμενη αποκλειστικά στο βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων.

Η επίλυση έγινε για χρόνους φόρτισης 10, 100 και 1000 ωρών για κάθε μια από τις τρεις σήραγγες. Στο τέλος σχεδιάστηκαν διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων για όλες της περιπτώσεις. Οι μετατοπίσεις σχεδιάστηκαν σε κοινό διάγραμμα με τις μετατοπίσεις που προέβλεψε εμπειρικά ο Unal (μετά από ψηφιοποίηση του εμπειρικού διαγράμματος) για τα ίδια ανοίγματα και τους ίδιους χρόνους.

Αξίζει ίσως να σημειωθεί ότι αρχικά έγινε μία προσπάθεια επίλυσης των μοντέλων μέχρι την τελική του ισορροπία (και όχι για επιλεγμένους χρόνους) και ψηφιοποίησης ενός διαγράμματος ‘history’, που να αφορά τη μετατόπιση ενός σημείου κοντά στη στέψη της σήραγγας. Το πρόβλημα εδώ ήταν η ψηφιοποίηση του άξονα του χρόνου του παραπάνω διαγράμματος, καθώς η κλίμακά του δεν είναι ούτε γραμμική ούτε λογαριθμική και οι τιμές του χρόνου που λαμβάνονταν δεν ήταν σωστές.

Αντίθετα μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της δύναμης εκτός ισορροπίας και αυτό δεν μπορεί να προβλεφθεί.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι τα δύο διαγράμματα, εμπειρικό και αριθμητικό βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ τους. Και στα δυο η μετατόπιση είναι ανάλογη του μεγέθους του ανοίγματος και του χρόνου επιβολής της φόρτισης.

Οι μετατοπίσεις ως προς το χρόνο έχουν και στο εμπειρικό και στο αριθμητικό διάγραμμα την ίδια μορφή. Αυτό ισχύει και στις τρεις περιπτώσεις. Επίσης, υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις εμπειρικές και τις αριθμητικές τιμές. Έτσι, οι αριθμητικές καμπύλες για τις σήραγγες των 3.0 και 1.85m δίνουν λίγο μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το εμπειρικό, ενώ αντίθετα για την εκσκαφή των 6.5m λίγο μεγαλύτερες.

Συγκεκριμένα, στις 10 ώρες το εμπειρικό διάγραμμα δίνει για τη σήραγγα των 6.5, 3.0 και 1.85m μετατοπίσεις 7.5, 4.0 και 1.3mm αντίστοιχα, ενώ το αριθμητικό 13.0, 2.0 και 0.8mm. Στις 100 ώρες, για τις σήραγγες των 3.0 και 1.85 το εμπειρικό διάγραμμα δίνει μετατοπίσεις 17.5 και 7.5mm αντίστοιχα, ενώ το αριθμητικό 12.5 και 4.0mm. Στις 1000 ώρες, για τη σήραγγα μικρότερης διαμέτρου η μετακίνηση σύμφωνα με το εμπειρικό διάγραμμα είναι 16mm, ενώ σύμφωνα με το αριθμητικό 10mm.

Σημειώνεται επίσης ότι διαφοροποιήσεις μπορεί να οφείλονται και σε σφάλματα κατά την ψηφιοποίηση του εμπειρικού διαγράμματος, με αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού της αρχής και του πέρατος των αξόνων και του ορισμού της λογαριθμικής κλίμακας.

Επίσης κάποια σφάλματα της αριθμητικής μεθόδου μπορεί να σχετίζονται με στιγμιαίες αστάθειες των μοντέλων. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων στα οποία φαίνονται απότομες μεταβολές των τιμών των τάσεων και των παραμορφώσεων, καθώς και μη αναμενόμενες μορφές των ζωνών κατανομής της τάσης.

Επιπλέον προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν σε σημεία πάνω ή πολύ κοντά στο σύνορο του ανοίγματος. Εκεί συχνά λαμβάνει χώρα απειρισμός των τάσεων και τα αποτελέσματα είναι μη αναμενόμενα. Εκεί ίσως να οφείλεται η κενή περιοχή που εμφανίζεται γύρω από το άνοιγμα σε όλα τα διαγράμματα τάσεων. Μία άλλη εξήγηση για αυτό είναι η ενδεχόμενη αδυναμία του προγράμματος να υπολογίσει τις τιμές αυτές με παρεμβολή, λόγω του ότι μπορεί να υπερβεί το σύνορο της εκσκαφής.

Μειονέκτημα της εργασίας αποτελεί το γεγονός ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αναλυτική λύση σε προβλήματα τόσο μεγάλης πολυπλοκότητας και έτσι δεν μπορεί να υπάρξει και μία θεωρητική προσέγγιση.

Για τη συνέχιση της παραπάνω έρευνας θα μπορούσαν να επιλυθούν οι ίδιες περιπτώσεις με κάποιο άλλο αριθμητικό πρόγραμμα τόσο σαν δισδιάστατα όσο και σαν τρισδιάστατα μοντέλα. Θα μπορούσε ακόμη να μελετηθεί η περίπτωση της επίδρασης κοντινών εκσκαφών, όπως συμβαίνει στην πράξη κατά την ανάπτυξη ενός υπογείου μεταλλείου με τη δημιουργία στύλων.

Τέλος, για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, αντί για το εμπειρικό σύστημα ταξινόμησης RMR του Bieniawski, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλα συστήματα ταξινόμησης, όπως του Q του Barton ή του GSI του Hoek.

## **Βιβλιογραφία**

### **Διεθνής βιβλιογραφία**

1. Barton, N., R. Lien and J. Lunde, 1974 *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*, Rock Mech. 6
2. Beaty, M.H. and Byrne P.M., 1999, *A Synthesised Approach for Modelling Liquefaction and Displacements*, International FLAC Symposium, Minneapolis, Minnesota
3. Bieniawski, Z.T. 1978, *Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 15
4. Bieniawski, Z.T., 1979, *Rock Mass Classification in Rock Engineering Applications*, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Montreaux, Vol. 2
5. Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, A. A. Balkema.
6. Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering Rock Mass classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*, Pennsylvania
7. Brady, B.H.G. and E.T. Brown, 1993, *Rock Mechanics for underground Mining*, 2<sup>nd</sup> Edition, Kluwer Academic Publishers.
8. Brekke, T.L. and Howard, T., 1972 *Stability Problems Caused by Seams and Faults*. Proc. First North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference, AIME, New York
9. Cecil, O.S., 1970, *Correlation of Rockbolts – Shotcrete Support and Pock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana.
10. Cording, E.J., Hendron, A.J and Deere, D.U., 1971, *Rock Engineering for Underground Cavern*, Proc. Symposium on Underground Rock Chambers, Phoenix, Arizona

11. Deere, D.U., 1964, *Technical description of Rock Cores for Engineering Geology*, Volume 1, Number 1.
12. Deere, D U., Peck, R. B., Parker, H. W., Monsees, J. F. and Schmidt, B., 1970, *Design of Tunnel Support Systems.*, Highway Research Record, Number 399, 170
13. Grimstad, E and Barton, N. 1993, *Updating the Q – System for NMT*, Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, (eds Kompen, Opsahl and Berg). Oslo: Norwegian Concrete Assn.
14. FLAC 4.0, 2002, *Theory and Background*, ITASCA Inc.
15. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, *Underground Excavation in Rock*, London, Institution of Mining and Metallurgy.
16. Hoek, E. and E.T. Brown, 1988, *The Hoek – Brown Failure Criterion – A 1988 Update*, Proc. 15<sup>th</sup> Can. Rock Mech. Symp., University of Toronto
17. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Rotterdam: Balkema.
18. Hoek, E., 2000, *Rock Engineering – Course Notes by Evert Hoek*
19. Jethwa, J.L., A.K. Dube, B. Singh and R.S. Mithal, 1982, *Evaluation of Methods for Tunnel Support design in squeezing Rock Conditions*. Proc. 4<sup>th</sup> Assoc. Eng. Geol., Delhi, Vol. 5
20. Kirsch, G., 1898, *Die Theorie der Elastizitaet und die Bedurfnisse der Festigkeislehre*, Veit. Deit. Ing.
21. Lauffer, H. 1958, *Gebirgsklassifizierung fuer den Stollenbau. Geologie und Bauwesen*, Volume 24, Number 1
22. Mahtab, A.M. and P. Grasso, 1992, *Geomechanics Principles in the design of Tunnels and Caverns in Rocks*, Elsevier

23. Merritt, A.H., 1972, *Geologic Prediction for Underground Excavations*, Proc. First North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference, AIME, New York
24. Moreno Tallon, E., 1982, *Comparison and Application of the Geomechanics Classification Schemes in Tunnel Construction*, Proc. Tunnelling '82, Institution of Mining and Metallurgy, London
25. Obert, L. and Duvall, W.I., 1967, *Rock Mechanics and the design of Structures in Rock*, New York: Wiley.
26. Palmstrom, A., 1982, *The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the degree of Rock Jointing*. Proc. 4<sup>th</sup> Congr. Int. Assn Engng Geol., Delhi 5
27. Roberts, A., 1977, *Geotechnology – An Introductory Text for Students and Engineers*, Pergamon Press.
28. Rutledge, J.C. and R.L. Preston, 1978, *Experience with Engineering Classification of Rock*, Proc. Int. Tunneling Symp., Tokyo
29. Serafim, J.L. and J.P., Pereira, 1983, *Considerations of the Geomechanics Classification of Bieniawski*, Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr., LNEC, Lisbon.
30. Stinni, I., 1950 *Tunnelbaugeologie*, Springer – Verlag, Vienna.
31. Terzaghi, K., 1946 *Rock Defects and Loads on tunnel Support*. Rock Tunnelling with Steel Supports, ed. R. V. Proctor and T. White, commercial Shearing Co., Youngstown, OH.
32. Unal, E. 1983. *Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs*, Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, University Park.
33. Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., and Skinner, E.H., 1972, *Support Determination Based on Geological Predictions.*, proc. First North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference, AIME, New York

## Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αβδελάς Γ. και Θ. Σίμος, 2001, *Αριθμητική ανάλυση*, Αθήνα
2. Αγιουτάντης, Ζ., 2002, *Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
3. Ασημίδης, Β., 2003, *Μέθοδοι Υπογείων Εκμεταλλεύσεων και Κατασκευής Σηράγγων*, Σημειώσεις Εργαστηριακών ασκήσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
4. Καββαδάς, Μ., 2000, *Σχεδιασμός Υπογείων Έργων*, Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα
5. Κοζάνης Σ.Σ., 2002, *Συμβολή στη Μελέτη της Βραχώμαζας, Θεωρούμενης ως Μέσον με Μη Γραμμική – Ανισοτροπική Συμπεριφορά, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Έμφαση στα Υπόγεια Έργα*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα
6. Μαρκέτος, Ε.Γ., 2002, *Τεχνική Μηχανική II – Αντοχή των Υλικών*, Συμμετρία
7. Στειακάκης, Χ., 2001, *Γεωτεχνική Ανάλυση σηράγγων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά