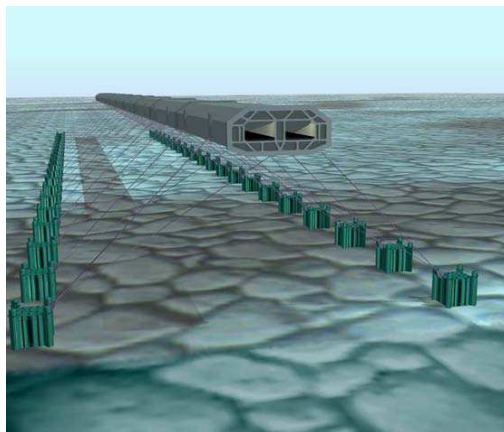


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΠΜΣ: «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ  
ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**



**ΑΝΔΡΕΑΣ Β. ΦΡΑΓΚΟΣ**  
**ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ 2009**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί μια εισαγωγή στο θέμα της σηραγγοποιίας με εξειδίκευση σε θέματα υποθαλάσσιων, επικαθήμενων και πλωτών σηράγγων.

Η ολοκλήρωσή της μου πρόσδωσε πολλές νέες γνώσεις και με βοήθησε να εξοικειωθώ με τις έννοιες της μελέτης και κατασκευής σηράγγων, καθώς και με σχετικά λογισμικά (Examine2D), αλλά και διαδοσόμενες γλώσσες προγραμματισμού (Visual Basic).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Μιχάλη Σακελλαρίου για την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του. Ευελπιστώ η εργασία αυτή να αποτελέσει ερέθισμα για πολλές ακόμη νέες εργασίες στο θέμα των σηράγγων και της αλληλεπίδρασής τους με το θαλάσσιο περιβάλλον.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |    |
|---|----|
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ                      | 5  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ                  | 6  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ                       | 6  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ                       | 7  |
| <br>                                    |    |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ                                | 10 |
| SUMMARY                                 | 11 |
| <br>                                    |    |
| ΜΕΡΟΣ Α΄ :                              |    |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ                             | 12 |
| 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ     | 13 |
| 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ     | 14 |
| 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ RMR                         | 15 |
| 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ Q                           | 17 |
| 2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ R <sub>Mi</sub>             | 17 |
| 2.5 ΣΥΣΤΗΜΑ GSI                         | 18 |
| 2.6 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GSI TOOL                  | 20 |
| 3. ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ                    | 24 |
| 3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ NATM                        | 24 |
| 3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ NTM                         | 26 |
| 3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ CUT&COVER                   | 27 |
| 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΤΒΜ                      | 27 |
| 4. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ           | 27 |
| 5. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ         | 31 |
| 5.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΟHR-COULOMB               | 31 |
| 5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK-BROWN                 | 32 |
| 5.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ GRIFFITH                   | 36 |
| 5.4 ΛΟΙΠΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ                      | 37 |
| 6. ΘΕΩΡΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ            | 37 |
| 6.1 ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΜΕ ΠΑΧΙΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ | 37 |
| 6.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ KIRSCH                    | 38 |
| 6.3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΟHR-COULOMB                | 40 |
| 6.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ       | 41 |
| 7. ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ                | 45 |
| 8. ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ                | 47 |
| 8.1 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ              | 50 |

|  |     |
|--|-----|
| 9. ΠΛΩΤΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ                     | 54  |
| 9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ                  | 57  |
| 9.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ               | 59  |
| ΜΕΡΟΣ Β΄ :                             |     |
| 10. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ     | 62  |
| 10.1 ΣΗΡΑΓΓΑ 1                         | 63  |
| 10.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ι                     | 64  |
| 10.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙ                    | 68  |
| 10.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙΙ                   | 71  |
| 10.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙV                    | 75  |
| 10.2 ΣΗΡΑΓΓΑ 2                         | 78  |
| 10.3 ΣΗΡΑΓΓΑ 3                         | 85  |
| 10.4 ΣΗΡΑΓΓΑ 4                         | 89  |
| 10.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑ ΚΙΡΣΧ                | 92  |
| 10.5.1 ΣΗΡΑΓΓΑ 1 - ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ι         | 93  |
| 10.5.2 ΣΗΡΑΓΓΑ 1 - ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙ        | 94  |
| 10.5.3 ΣΗΡΑΓΓΑ 2                       | 95  |
| 10.5.4 ΣΗΡΑΓΓΑ 3                       | 96  |
| 10.5.5 ΣΗΡΑΓΓΑ 4                       | 97  |
| 10.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ            | 97  |
| ΜΕΡΟΣ Γ΄ :                             |     |
| 11. ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ                  | 101 |
| 12. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ       | 110 |
| 12.1 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ               | 112 |
| 12.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ | 115 |
| 12.3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ | 116 |
| 12.3.1 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑ             | 117 |
| 12.3.2 ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ             | 118 |
| 12.3.3 ΠΛΩΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ                   | 119 |
| 12.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ               | 120 |
| 12.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Η/Υ       | 120 |
| 13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ                       | 124 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ                           | 128 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| ΣΧΗΜΑ 1  | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΣ ΒΡΑΧΥΝΣΕΩΣ  | 37  |
| ΣΧΗΜΑ 2  | ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΥΠΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ  | 38  |
| ΣΧΗΜΑ 3  | ΤΑΣΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 39  |
| ΣΧΗΜΑ 4  | ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΠΗ   | 41  |
| ΣΧΗΜΑ 5  | ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΑΝΕΤ ΣΕ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ                            | 42  |
| ΣΧΗΜΑ 6  | ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΑΝΕΤ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΗ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ | 43  |
| ΣΧΗΜΑ 7  | ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΑΝΕΤ ΣΕ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ  | 44  |
| ΣΧΗΜΑ 8  | Φ.Ι. ΚΑΤΑ TERZAGHI   | 51  |
| ΣΧΗΜΑ 9  | Φ.Ι. ΚΑΤΑ ΜΕΥΕΡΗΟΦ   | 52  |
| ΣΧΗΜΑ 10 | ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΛΑΔΩΝ   | 58  |
| ΣΧΗΜΑ 11 | ΚΥΜΑ ΠΡΟΣΠΗΠΤΟΝ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΟ  | 61  |
| ΣΧΗΜΑ 12 | ΔΟΜΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ   | 84  |
| ΣΧΗΜΑ 13 | ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ   | 110 |
| ΣΧΗΜΑ 14 | ΜΕΡΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ   | 111 |
| ΣΧΗΜΑ 15 | ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΖΩΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ   | 112 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

|             |                     |     |
|-------------|---------------------|-----|
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 | ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 93  |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 | ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 94  |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 | ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 95  |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 | ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 96  |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 | ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ KIRSCH  | 97  |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6 | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΣΣ-KIRSCH | 100 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| <b>ΠΙΝΑΚΑΣ</b> | <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>                   | <b>ΣΕΛ.</b> |
|----------------|------------------------------------|-------------|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1      | ΝΟΡΒΗΓΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ | 46          |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| ΕΙΔΟΣ   | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ                                      | ΣΕΛ. |
|---------|--|------|
| ΕΙΚ. 1  | ΕΚΤΙΜΗΣΗ GSI ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ           | 19   |
| ΕΙΚ. 2  | ΕΚΤΙΜΗΣΗ GSI ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ         | 20   |
| ΕΙΚ. 3  | ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ                           | 21   |
| ΕΙΚ. 4  | ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ                         | 21   |
| ΕΙΚ. 5  | ΠΙΝΑΚΑΣ GSI (ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ)             | 22   |
| ΕΙΚ. 6  | ΠΙΝΑΚΑΣ GSI (ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ)           | 22   |
| ΕΙΚ. 7  | ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ                           | 23   |
| ΕΙΚ. 8  | ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ                          | 23   |
| ΕΙΚ. 9  | ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ                          | 24   |
| ΕΙΚ. 10 | ΧΑΡΤΗΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕΙΚΑΝ | 45   |
| ΕΙΚ. 11 | ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕΙΚΑΝ                 | 45   |
| ΕΙΚ. 12 | ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΗΣ ΜΑΓΧΗΣ             | 46   |
| ΕΙΚ. 13 | ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΗΣ ΜΑΓΧΗΣ        | 47   |
| ΕΙΚ. 14 | ΚΑΘΕΛΚΥΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ                    | 48   |
| ΕΙΚ. 15 | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΗΝ ΞΗΡΑ         | 48   |
| ΕΙΚ. 16 | ΕΠΙΧΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΟ ΒΥΘΟ                      | 48   |
| ΕΙΚ. 17 | ΖΕΥΞΗ ΑΚΤΙΟΥ - ΠΡΕΒΕΖΑΣ                        | 49   |
| ΕΙΚ. 18 | ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΤΑ Η.Α.Ε.                 | 49   |
| ΕΙΚ. 19 | ΣΚΙΤΣΟ ΠΛΩΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ                         | 50   |
| ΕΙΚ. 20 | ΤΡΟΠΟΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ                | 55   |
| ΕΙΚ. 21 | ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΛΩΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ                  | 56   |
| ΕΙΚ. 22 | ΜΟΝΤΕΡΝΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΛΩΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ                | 57   |
| ΕΙΚ. 23 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ROCLAB               | 64   |
| ΕΙΚ. 24 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                          | 64   |
| ΕΙΚ. 25 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                           | 65   |
| ΕΙΚ. 26 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                            | 65   |
| ΕΙΚ. 27 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                             | 66   |
| ΕΙΚ. 28 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                             | 66   |
| ΕΙΚ. 29 | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 67   |
| ΕΙΚ. 30 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )       | 67   |
| ΕΙΚ. 31 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                          | 68   |
| ΕΙΚ. 32 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                           | 68   |
| ΕΙΚ. 33 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                            | 69   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| ΕΙΚ. 34 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                                | 69 |
| ΕΙΚ. 35 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                                | 70 |
| ΕΙΚ. 36 | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ<br>ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 70 |
| ΕΙΚ. 37 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )          | 71 |
| ΕΙΚ. 38 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                             | 71 |
| ΕΙΚ. 39 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                              | 72 |
| ΕΙΚ. 40 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                               | 72 |
| ΕΙΚ. 41 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                                | 73 |
| ΕΙΚ. 42 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                                | 73 |
| ΕΙΚ. 43 | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ<br>ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 74 |
| ΕΙΚ. 44 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )          | 74 |
| ΕΙΚ. 45 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                             | 75 |
| ΕΙΚ. 46 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                              | 75 |
| ΕΙΚ. 47 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                               | 76 |
| ΕΙΚ. 48 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                                | 76 |
| ΕΙΚ. 49 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                                | 77 |
| ΕΙΚ. 50 | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ<br>ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 77 |
| ΕΙΚ. 51 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )          | 78 |
| ΕΙΚ. 52 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ROCLAB                  | 79 |
| ΕΙΚ. 53 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                             | 79 |
| ΕΙΚ. 54 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                              | 80 |
| ΕΙΚ. 55 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                               | 80 |
| ΕΙΚ. 56 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                                | 81 |
| ΕΙΚ. 57 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                                | 81 |
| ΕΙΚ. 58 | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ<br>ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 82 |
| ΕΙΚ. 59 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )          | 82 |
| ΕΙΚ. 60 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ROCLAB                               | 85 |
| ΕΙΚ. 61 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                             | 86 |
| ΕΙΚ. 62 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                              | 86 |
| ΕΙΚ. 63 | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                               | 87 |
| ΕΙΚ. 64 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                                | 87 |
| ΕΙΚ. 65 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                                | 88 |
| ΕΙΚ. 66 | ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                 | 88 |
| ΕΙΚ. 67 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ )          | 89 |
| ΕΙΚ. 68 | ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                             | 90 |
| ΕΙΚ. 69 | ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ                              | 90 |



|         |  |     |
|---------|--|-----|
| ΕΙΚ. 70 | ΤΑΣΗ $\sigma_{xx}$                       | 91  |
| ΕΙΚ. 71 | ΤΑΣΗ $\sigma_{yy}$                       | 91  |
| ΕΙΚ. 72 | ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ        | 92  |
| ΕΙΚ. 73 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ( $SF < 1$ ) | 92  |
| ΕΙΚ. 74 | ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ       | 121 |
| ΕΙΚ. 75 | ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ       | 121 |
| ΕΙΚ. 76 | ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΠΛΩΤΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ             | 122 |
| ΕΙΚ. 77 | ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ                     | 122 |
| ΕΙΚ. 78 | ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ                    | 123 |
| ΕΙΚ. 79 | ΜΗΝΥΜΑ ΠΡΟΣ ΧΡΗΣΤΗ                       | 123 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία κάνει μια δυναμική είσοδο στο πεδίο της μελέτης σηράγγων επιχειρώντας να ερευνήσει τον τρόπο μελέτης και κατασκευής σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Χωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα. Το πρώτο μέρος κάνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση των κύριων σημείων στη μελέτη και κατασκευή σηράγγων τόσο συμβατικών όσο και πιο εξειδικευμένων όπως των υποθαλάσσιων, επικαθήμενων και πλωτών σηράγγων. Το δεύτερο μέρος ασχολείται με συγκεκριμένα παραδείγματα μοντέλων σηράγγων κάνοντας στατική ανάλυση με τη βοήθεια του προγράμματος συνοριακών στοιχείων Examine2D και των αναλυτικών σχέσεων του Kirsch, καθώς και μεθοδολογίας καθορισμού της πλαστικής ζώνης των Μασσίνα & Σακελλαρίου. Το τρίτο μέρος επιχειρεί να διαμορφώσει κατάλληλα κριτήρια για τη διερεύνηση του ποιος τύπος σήραγγας είναι πιο ενδεδειγμένος τεχνικά σε μια θαλάσσια περιοχή. Αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής είναι μια εφαρμογή σε Visual Basic.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα σχετικά με τη μεθοδολογία σχεδιασμού σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον και τη στατική συμπεριφορά συμβατικών και υποθαλάσσιων σηράγγων.

## SUMMARY

The thesis is making a dynamic entrance in the field of tunnel design trying to study the way of designing and constructing tunnels in a marine environment.

It is separated in three parts. The first part makes a review about the main points in the design and construction of conventional and specialized tunnels such as subsea, immersed and floating tunnels. The second part is involved with specific models of tunnels doing structural analysis with the help of the boundary elements program Examine2D, the analytic relations of Kirsch and the plastic zone methodology of Massinas & Sakellariou. The third part is trying to create suitable criteria in order to assess which type of tunnel is more suitable from a technical aspect in a marine area. A result of this effort is a program in Visual Basic.

The thesis closes with the conclusions for the methodology of designing tunnels in a marine environment and the structural behavior of conventional and subsea tunnels.

# ΜΕΡΟΣ Α΄

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σήραγγες αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά τεχνικά έργα λόγω του ότι συνδέουν δυσπρόσιτες περιοχές και εξυπηρετούν κυρίως συγκοινωνιακές ανάγκες και δευτερευόντως άλλες χρήσεις (π.χ. μεταφορά νερού, πετρελαίου κλπ.). Αποτελούν δύσκολα έργα λόγω της ετερογένειας και μη προβλεψιμότητας των ιδιοτήτων του εδάφους, του μεγάλου βάρους που καλούνται να συγκρατήσουν και του υψηλού κόστους που οφείλεται κυρίως στον εξειδικευμένο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη διάνοιξη. Το θαλάσσιο στοιχείο δίνει μια άλλη σημασία στα έργα αυτά λόγω του ότι η σύνδεση θαλάσσιων περιοχών αποτελεί πάντα πολύ δύσκολο εγχείρημα επιστημονικά και κατασκευαστικά με έμφαση στα θέματα ασφαλείας.

Οι σήραγγες σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες: υποθαλάσσιες (υπό τον πυθμένα της θάλασσας), επικαθήμενες (τοποθετημένες πάνω στον πυθμένα) και πλωτές (πακτωμένες στα δύο άκρα με το ενδιάμεσο σώμα να επιπλέει μέσα στο υδάτινο στρώμα). Η τελευταία κατηγορία είναι ακόμη υπό έρευνα. Η ανάλυση των σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον προϋποθέτει πρώτιστα την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του εδαφικού στρώματος μέσα από τις επιστήμες της μηχανικής και κυρίως της εδαφομηχανικής και της βραχομηχανικής. Η αλληλεπίδραση με το νερό παίζει δευτερεύοντα ρόλο για τις υποθαλάσσιες σήραγγες όπου πρέπει να μελετηθεί η υπόγεια υδραυλική, ενώ παίζει κυρίαρχο ρόλο στις επικαθήμενες και πλωτές σήραγγες στις οποίες πρέπει να μελετηθούν θέματα που σχετίζονται με τη μηχανική των ρευστών, τη θαλάσσια υδραυλική και την υδροδυναμική ανάλυση.

Στη θεωρητική ανασκόπηση της εργασίας (Μέρος Α΄: Κεφ.2-9) γίνεται αναφορά στα βασικότερα θέματα που επηρεάζουν τη μελέτη και κατασκευή σηράγγων με έμφαση στο γεωτεχνικό τομέα ο οποίος είναι καθοριστικός και για τις τρεις κατηγορίες σηράγγων οι οποίες εδράζονται ολόκληρες ή τμηματικά σε εδαφικά στρώματα και επομένως μας ενδιαφέρει άμεσα η συμπεριφορά του γαιώδους υλικού. Στη συνέχεια (Μέρος Β΄: κεφ.10) γίνεται στατική ανάλυση συγκεκριμένων παραδειγμάτων σηράγγων (υπογείων και υποθαλάσσιων) με τη βοήθεια προγράμματος συνοριακών στοιχείων και γίνεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Κατόπιν (Μέρος Γ΄: κεφ.11-12) διαμορφώνονται τεχνικά κριτήρια για τη δημιουργία σήραγγας σε θαλάσσια περιοχή και παρουσιάζεται λογισμικό που κατασκευάστηκε για να επιλέγει τον κατάλληλο τύπο σήραγγας συγκεντρώνοντας τα παραπάνω κριτήρια. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συνολικά συμπεράσματα (Κεφ.13).

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Βραχώμαζα είναι ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδες υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επιτόπου και σε μεγάλη έκταση (Κούκης & Σαμπατάκης 2007). Με το γενικό όρο ασυνέχεια ορίζεται οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος, που έχει μηδενική ή χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό (Τσουτρέλης 1985). Πρακτικά περιλαμβάνει τις διακλάσεις (επιφάνεια αποχωρισμού τεμαχών τεκτονικής προέλευσης (ρωγμάτωση) πάνω στην οποία δεν παρατηρείται σχετική μετακίνηση των παρειών), τις ασθενείς διαστρώσεις (επιφάνεια αποχωρισμού παράλληλη με την αρχική επιφάνεια ιζηματογένεσης του υλικού, που διαχωρίζει τα διάφορα στρώματα του υλικού), τα ασθενή επίπεδα σχιστότητας (επιφάνεια που προήλθε από παράλληλο προσανατολισμό φυλλωδών ορυκτών των μεταμορφωμένων πετρωμάτων), τις ασθενείς ζώνες και τις μεταπτώσεις. Υπάρχουν επιπλέον και οι μικροσκοπικής κλίμακας ασυνέχειες όπως η εκλεκτική εξαλλοίωση ορισμένων ορυκτών, οι μικρορωγμές κ.ά. οι οποίες επηρεάζουν τις εργαστηριακές δοκιμές αντοχής. Η μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υλικού όπως προσδιορίζεται εργαστηριακά είναι προφανές ότι δεν μπορεί να επεκταθεί στη βραχώμαζα, καθόσον οι εκτιμώμενες παράμετροι αναφέρονται στα υγιέστερα δείγματα του βράχου που είναι απαλλαγμένα από ασυνέχειες.

Η προϊστορία της φόρτισης παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη της βραχώμαζας. Ο χρόνος ως παράγοντας που επηρεάζει τη βραχώμαζα έχει μεγάλη σημασία, αφού η γεωλογική δραστηριότητα συνεχίζεται εσαεί αν και στο χρόνο ζωής ενός τεχνικού έργου οι τεκτονικές δραστηριότητες θεωρούνται αμελητέες. Φαινόμενα όμως όπως ο ερπυσμός (η συνεχόμενη αύξηση της παραμόρφωσης με σταθερή τάση) και της χαλάρωσης (η συνεχόμενη μείωση της παραμόρφωσης με σταθερή τάση) έχουν χρονική διάσταση σε αντίθεση με τη θεωρία ελαστικότητας -τη βάση της μηχανικής και κατ' επέκταση και της βραχομηχανικής- που είναι αμετάβλητη χρονικά. Ένα υπόγειο έργο καλείται να ανακαταναείμει τις υπάρχουσες τάσεις του βραχώδους υλικού κατά τρόπο ώστε να είναι εφικτή η παραμονή του μέσα στη βραχώμαζα τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του έργου. Η παρουσία του υπόγειου νερού έχει επίσης μεγάλη σημασία αν και οι πιέσεις των πόρων δε λαμβάνονται υπόψη γιατί ο βράχος θεωρείται συμπαγές υλικό στο οποίο έχει επίδραση η υδραυλική του αγωγιμότητα μόνο μέσω των ασυνεχειών.

Ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς προϋποθέτει τη διερεύνηση όλων των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν άμεσα τη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας. Μία συστηματική ταξινόμηση της βραχώμαζας μπορεί να δώσει αρκετά ικανοποιητική πληροφόρηση με την ανάπτυξη κατάλληλων κριτηρίων, ώστε να επιτυγχάνεται η συστηματική κατάταξη της βραχώμαζας σε συγκεκριμένες κατηγορίες και

ομάδες που κάθε μια να έχει παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, οπότε και να απαιτεί ενιαία αντιμετώπιση (π.χ. αντιστήριξη). Η ανάπτυξη μιας τέτοιας ταξινόμησης και η συσχέτιση των κατασκευαστικών απαιτήσεων του έργου με τις επιμέρους κατηγορίες της ταξινόμησης προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σημαντικού δείγματος πραγματικών περιστατικών τα οποία να πιστοποιούν την εφαρμοσιμότητά της. Σήμερα οι ταξινομήσεις της βραχόμαζας αποτελούν τη βάση του εμπειρικού σχεδιασμού τεχνικών έργων σε βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ η αξιοπιστία τους θεωρείται συνήθως δεδομένη εφόσον βασίζεται στην αποκτηθείσα εμπειρία από προηγούμενα έργα. Αν και η εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης είναι ιδιαίτερα ελκυστική δεν πρέπει να υποκαθιστά τη γεωλογική και την τεχνική κρίση στην εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας.

Η χρησιμοποίηση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχόμαζας έχουν τους παρακάτω βασικούς στόχους: Πρώτον να ταξινομηθεί η βραχόμαζα σε επιμέρους κατηγορίες που η κάθε μία να χαρακτηρίζεται από παρόμοια μηχανική συμπεριφορά οπότε να απαιτεί και ενιαία αντιμετώπιση. Δεύτερον να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός τεχνικών έργων στο βράχο δίνοντας ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία και παραμέτρους της βραχόμαζας που απαιτούνται στην επίλυση των τεχνικών προβλημάτων σχεδιασμού. Τρίτον να αποτελεί μια κοινή βάση συνεννόησης μεταξύ των επιστημονικών ειδικοτήτων που ασχολούνται με τα γεωτεχνικά προβλήματα.

## **2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ**

Ο Terzaghi το 1946 πρότεινε ένα πρώτο σύστημα ταξινόμησης όπου συσχέτισε τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας (αντοχή πετρώματος και βαθμός κερματισμού) με τα φορτία που αναμένονται στην επένδυση της σήραγγας ανάλογα με τις διαστάσεις της διατομής. Οι κατηγοριοποιήσεις της βραχόμαζας ήταν εντελώς ποιοτικές. Το 1958 ο Lauffer εισήγαγε την έννοια του «χρόνου αυτοϋποστήριξης» δηλαδή της χρονικής διάρκειας ευστάθειας του ανυποστήρικτου τμήματος μετά την εκσκαφή που συσχετίζεται άμεσα με τις διάφορες κατηγορίες βραχόμαζας. Το 1967 οι Deere et al. εισήγαγαν το «Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος» (RQD) που αποτελεί μια απλή και πρακτική μέθοδο περιγραφής της ποιότητας του πετρώματος από τα δείγματα μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης. Με βάση το δείκτη RQD προτάθηκαν κατηγορίες ποιότητας βραχόμαζας οι οποίες στη συνέχεια συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες απαιτήσεις υποστήριξης. Τα μέχρι τώρα περιγραφέντα συστήματα ταξινόμησης βασίζονται αποκλειστικά σε ποιοτικές περιγραφές και εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας οι οποίες έχουν μεγάλη υποκειμενικότητα και δεν λαμβάνουν υπόψη κρίσιμες παραμέτρους που σχετίζονται με τις ασυνέχειες όπως ο προσανατολισμός τους, το υλικό πλήρωσης, η τραχύτητα κ.ά. Το 1972 οι Wickam, Tiedemann και Skinner πρότειναν την ταξινόμηση RSR (Rock Structure Rating) που αποτελεί την πρώτη ποσοτική μέθοδο για την περιγραφή της ποιότητας της βραχόμαζας και

την επιλογή των απαιτήσεων υποστήριξης. Το σύστημα αυτό λαμβάνει υπόψη τρεις βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχόμαζας: α) την υφή και δομή του πετρώματος, β) την επίδραση των ασυνεχειών σε σχέση με τη διεύθυνση διάνοιξης και γ) την επίδραση των υπόγειων νερών. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι κατασκευαστικοί παράγοντες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου στην τελική ταξινόμηση (μέγεθος διατομής βραχόμαζας, μέθοδος-τρόπος εκσκαφής). Η εισαγωγή καθαρά ποσοτικών περιγραφών των διαφόρων κριτηρίων ταξινόμησης της βραχόμαζας έγινε από τον Bieniawski (1973) που πρότεινε τη γεωμηχανική ταξινόμηση (σύστημα RMR-Rock Mass Rating) και από τους Barton, Lien και Lude (1974) οι οποίοι πρότειναν το σύστημα Q. Τα συστήματα αυτά επεκτάθηκαν διεθνώς και περιέλαβαν ποσοτικά στοιχεία σχετικά με τις απαιτήσεις των πιο σύγχρονων μέτρων υποστήριξης σηράγγων όπως τα αγκύρια και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το 1994 ο Hoek πρότεινε το γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI-Geological Strength Index) που αποτελεί ένα σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση της απομείωσης της αντοχής της βραχόμαζας μέσω της εφαρμογής του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Το 1995 ο Palmstrom πρότεινε το σύστημα RMi (Rock Mass index) που βασίζεται σε παρατηρήσεις υπαίθρου και απλές μετρήσεις των βασικών παραμέτρων της βραχόμαζας. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την αντοχή της βραχόμαζας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υποστηρίξεις υπόγειων έργων, για την επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown και για την εκτίμηση της ικανότητας διάτρησης των μηχανημάτων ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων (TBM).

## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ RMR

Είναι γνωστό σαν «Σύστημα Bieniawski», προτάθηκε αρχικά το 1973 ενώ πήρε την τελική του μορφή το 1989. Περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η περιοχή για την οποία θα γίνει η ταξινόμηση διαχωρίζεται σε επιμέρους ζώνες και σε καθεμία από τις ζώνες αυτές τα κύρια χαρακτηριστικά της βραχόμαζας (λιθολογική σύσταση, προσανατολισμός και απόσταση ασυνεχειών, φυσική κατάσταση γεωλογικού σχηματισμού) φαίνονται μακροσκοπικά παρόμοια. Τα όρια των ζωνών αυτών οριοθετούνται συνήθως από τις διάφορες γεωλογικές δομές (π.χ. ρήγματα, ζώνες διάτμησης ή από τις μεταβολές της λιθολογικής σύστασης των γεωλογικών σχηματισμών). Στο δεύτερο στάδιο γίνεται για κάθε ζώνη, με συστηματική εργασία υπαίθρου ή λεπτομερή εξέταση δειγμάτων από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, προσδιορισμός ορισμένων κριτηρίων τα οποία είναι:

- Αντοχή σε ανεμπόδιση (μονοαξονική) θλίψη του βραχώδους υλικού: εκτιμάται με την εκτέλεση εργαστηριακής δοκιμής αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη ή με τη χρήση της δοκιμής σε σημειακή φόρτιση ή με τη χρήση του σφυριού Schmidt-L ή από επιτόπου μετρήσεις με τη χρήση του κλασσικού γεωλογικού σφυριού.

- Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD): εκτιμάται από μετρήσεις σε βραχώδη δείγματα γεωτρήσεων ή με συστηματικές μετρήσεις της απόστασης των ασυνεχειών και τον υπολογισμό του δείκτη  $J_v$  (συνολικό άθροισμα της επιμέρους πυκνότητας των κυρίων συστημάτων ασυνεχειών) με χρήση της σχέσης του Palmstrom (1982):

$$RQD=115-3.3J_v \quad (RQD=100 \text{ για } J_v < 4.5) \quad (2.1)$$

Άλλος τρόπος υπολογισμού είναι με βάση τη μέση απόσταση των ασυνεχειών με χρήση της σχέσης των Priest & Hudson (1976):

$$RQD=100e^{\left(\frac{-0.1}{s}\right)}\left(\frac{0.1}{S}+1\right) \quad (2.2)$$

- Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών: εκτιμάται από μετρήσεις υπαίθρου και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της απόστασης για κάθε σύστημα ασυνεχειών χωριστά.

- Κατάσταση ασυνεχειών: εκτιμάται από μετρήσεις υπαίθρου της τραχύτητας, του ανοίγματος, της αποσάθρωσης των τοιχωμάτων και του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Κατόπιν γίνεται στατιστική επεξεργασία όλων των μετρήσεων για συγκεκριμένο σύστημα ασυνεχειών για την εκτίμηση των επικρατέστερων στατιστικά τιμών.

- Υδρογεωλογικές συνθήκες: εκφράζεται ποιοτικά με την ύπαρξη ή όχι υπόγειου νερού και ποσοτικά με την εκτίμηση των υδροστατικών πιέσεων που αναπτύσσονται στις ασυνέχειες.

- Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη γεωμετρία του τεχνικού έργου: γίνεται αρχικά προσδιορισμός των κυρίων συστημάτων ασυνεχειών τα οποία διατέμνουν τη βραχώμαζα και στη συνέχεια συγκρίνεται ο προσανατολισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών με τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των κύριων γεωμετρικών στοιχείων του τεχνικού έργου.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η τελική βαθμονόμηση της βραχώμαζας (RMR) και η ταξινόμησή της σε μια από τις πέντε (5) κατηγορίες.

Στο τρίτο στάδιο η ολοκλήρωση της κατάταξης της βραχώμαζας έχει σαν αποτέλεσμα τον καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της και την ποσοτική εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων της και των απαιτήσεων υποστήριξής της.

Το σύστημα RMR είναι ένα πολύ καλό σύστημα ταξινόμησης με ευρεία εφαρμογή για σήραγγες. Τα σοβαρότερα μειονεκτήματα (Κούκης-Σαμπατάκης 2007) είναι ότι έχει περιορισμένη αξιοπιστία σε πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες και μαλακά πετρώματα. Δεν εφαρμόζεται σε όλες τις δυνατές εντατικές καταστάσεις της βραχώμαζας σε μια σήραγγα. Ζώνες διαταραγμένες από ρήγματα με έντονες πτυχώσεις δεν καλύπτονται από τις παραμέτρους βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση δεν είναι αρκετά ευαίσθητη στις μεταβολές των επιμέρους παραμέτρων που τη συνθέτουν.



## 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ Q

Βασίζεται στον ποσοτικό προσδιορισμό του δείκτη ποιότητας της βραχόμαζας Q που δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2.3)$$

Όπου:

RQD: ο δείκτης ποιότητας πετρώματος

J<sub>n</sub>: αριθμητικός παράγοντας του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών

J<sub>r</sub>: αριθμητικός παράγοντας της τραχύτητας των ασυνεχειών

J<sub>a</sub>: αριθμητικός παράγοντας του βαθμού αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

J<sub>w</sub>: συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού στις ασυνέχειες

SRF: συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων

Ο λόγος (RQD/J<sub>n</sub>) αντιπροσωπεύει την υφή της βραχόμαζας.

Ο λόγος (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) αντιπροσωπεύει την τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ή του υλικού πλήρωσης και αποτελεί ένα συγκριτικό μέτρο της διατμητικής αντοχής των βραχωδών τεμαχών.

Ο λόγος (J<sub>w</sub>/SRF) αποτελεί ένα συνδυασμό της επίδρασης α) των υδροστατικών πιέσεων που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών προκαλώντας μείωση της ορθής ενεργής τάσης ή ακόμα απόπλυση του υλικού πλήρωσης και β) των επιτόπου τάσεων που έχουν προκαλέσει σύνθλιψη του πετρώματος.

Η μεθοδολογία για την ταξινόμηση είναι αντίστοιχη με αυτή που περιγράφεται για το σύστημα RMR με τρία βασικά στάδια και με μόνη διαφορά τις παραμέτρους. Στο παράρτημα φαίνονται εποπτικά όλοι οι πίνακες με τις παραμέτρους και τις αντίστοιχες παραμέτρους για κάθε περίπτωση βραχόμαζας.

## 2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ RMi

Ο δείκτης RMi εκφράζει την αντοχή της βραχόμαζας ουσιαστικά σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους υπολογισμούς όπως για υποστηρίξεις υπόγειων έργων, για την επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown για τη βραχόμαζα, καθώς και για την εκτίμηση της ικανότητας διάτρησης των μηχανημάτων ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων.

Ο δείκτης βραχόμαζας (RMi – Rock Mass Index) ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

Για έντονα διακλασμένη βραχόμαζα:

$$RMi = \sigma_c JP = \sigma_c 0.2 \sqrt{jC} Vb^D \quad (D=0.37jC^{-0.2}) \quad (2.4)$$

Για συμπαγές πέτρωμα:

$$RMi = \sigma_c f_\sigma = \sigma_c \left( \frac{0.05}{Db} \right)^{0.2} \cong 0.5 \sigma_c \quad (2.5)$$

$\sigma_c$ : η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη του βραχώδους υλικού που αναφέρεται σε βραχώδη δείγματα διαμέτρου 50mm

$jC$ : αριθμητικός παράγοντας της κατάστασης των ασυνεχειών που εκτιμάται απ' το συνδυασμό της εξάπλωσης της ασυνέχειας ( $jL$ ), της τραχύτητας ( $jR$ ) και της αποσάθρωσης των τοιχωμάτων ( $jA$ ), ενώ η τιμή του δίνεται από τη σχέση:

$$(jC) = (jL)(jR)/(jA) \quad (2.6)$$

$Vb$ : ο μέσος όγκος των βραχωδών τεμαχών σε  $m^3$  (η ισοδύναμη διάμετρος των τεμαχών σε  $m$  εκφράζεται από την παράμετρο:  $D = \sqrt[3]{Vb}$ ) (2.7)







$Jp$ : αριθμητικός παράγοντας που αντιπροσωπεύει το βαθμό τεμαχισμού της βραχώμαζας λόγω ασυνεχειών και δίνεται από τη σχέση:  $jP = 0.2 \sqrt{jC} Vb^D$  (2.8)

$f_\sigma$ : αριθμητικός παράγοντας που εκφράζει το κατά πόσο συμπαγές είναι το πέτρωμα. Η τιμή του δίνεται από τη σχέση:  $f_\sigma = (0.05/Db)^{0.2}$  (2.9)

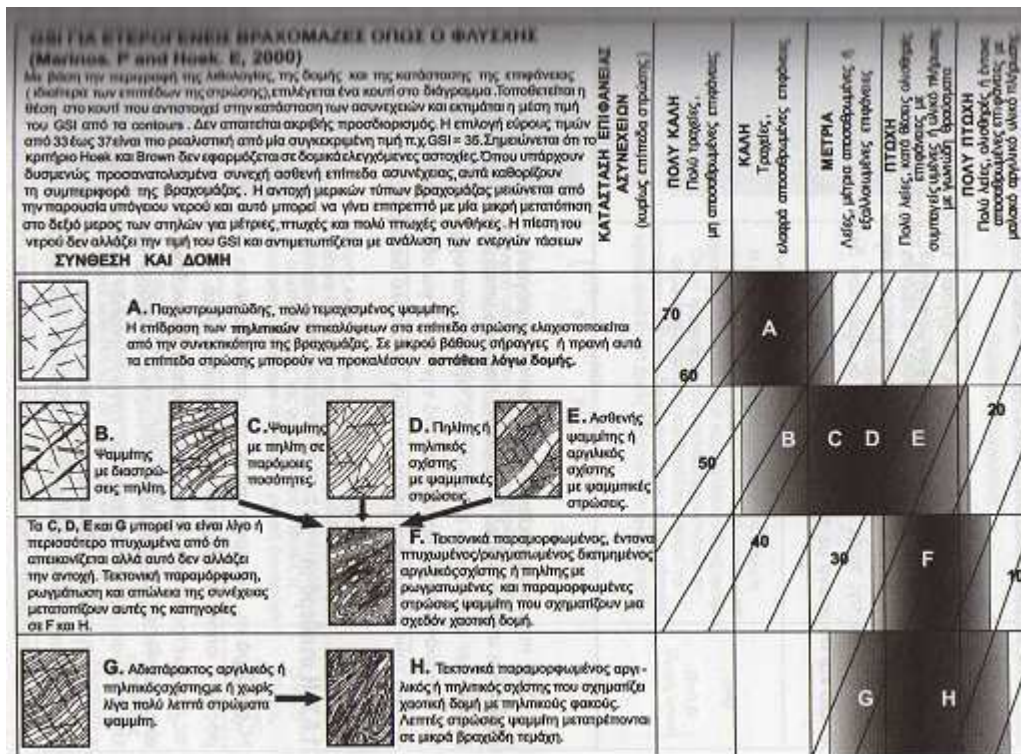
Για ( $jP$ ) η βραχώμαζα θεωρείται συμπαγής και είναι  $f_\sigma = 0.5$ , ενώ για ( $jP$ ) < 0.50 η βραχώμαζα θεωρείται διακλασμένη και εφαρμόζεται η παραπάνω σχέση.

## 2.5 ΣΥΣΤΗΜΑ GSI

Το σύστημα GSI είναι ένα σύστημα ταξινόμησης που εκτιμά την αντοχή της βραχώμαζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες και βασίζεται σε παρατηρήσεις υπαίθρου. Τόσο η υφή του πετρώματος όσο και η επιφάνεια των ασυνεχειών λαμβάνονται υπόψη και οδηγούν στον υπολογισμό της τιμής του GSI (Geological Strength Index – Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής). Γίνεται διάκριση για ομογενείς και ετερογενείς βραχώμαζες οι οποίες εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά.

| <p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ<br/>(Hoek and Marinos, 2000)<br/>Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> |  | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ               | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ<br>Πολύ τραχείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ<br>Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ<br>Λείες, μετρίως αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ<br>Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθωμένες με συμπληρωματικά ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ<br>Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσπασθωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης |
|--|--|---|--|--|--|--|--|
| ΔΟΜΗ   |  | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →               |  |  |  |  |  |
|   | INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση   | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ | 90   |  |  | N/A  | N/A  |
|   | BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών  |   | 80   | 70   |  |  |  |
|   | VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών  |   | 60   | 50   |  |  |  |
|   | BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας   |   | 40   | 30   |  |  |  |
|   | DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων  |   | 20   |  |  |  |  |
|   | LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων |   | N/A  | N/A  |  |  | 10   |

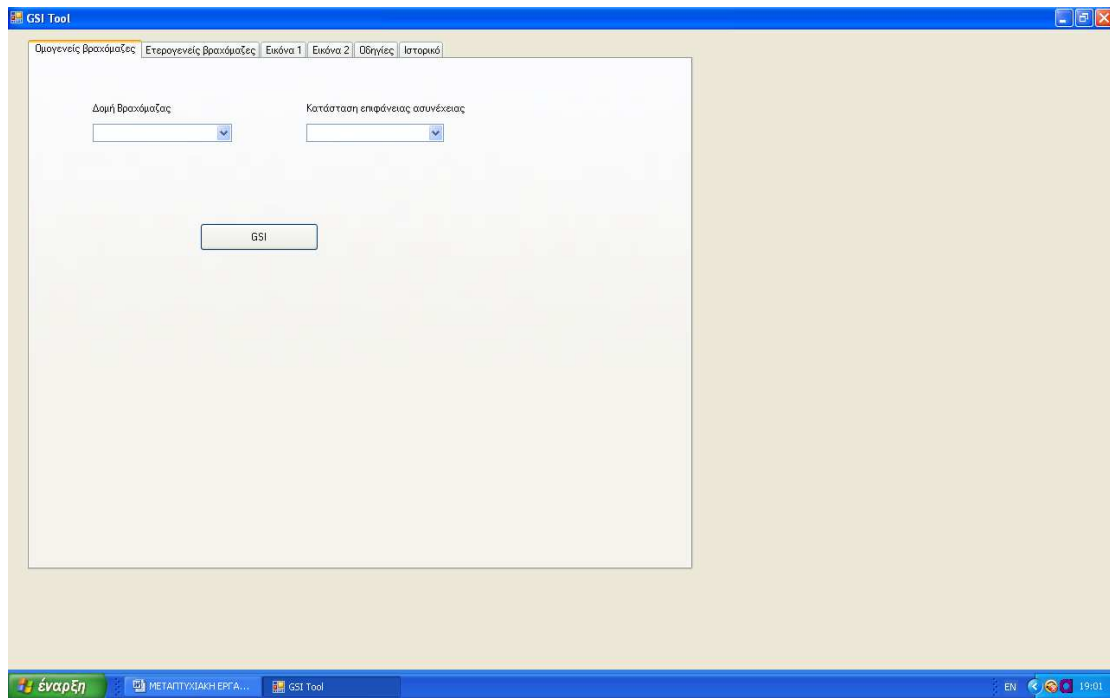
Εικ. 1 – Εκτίμηση GSI σε ομογενείς βραχόμαζες



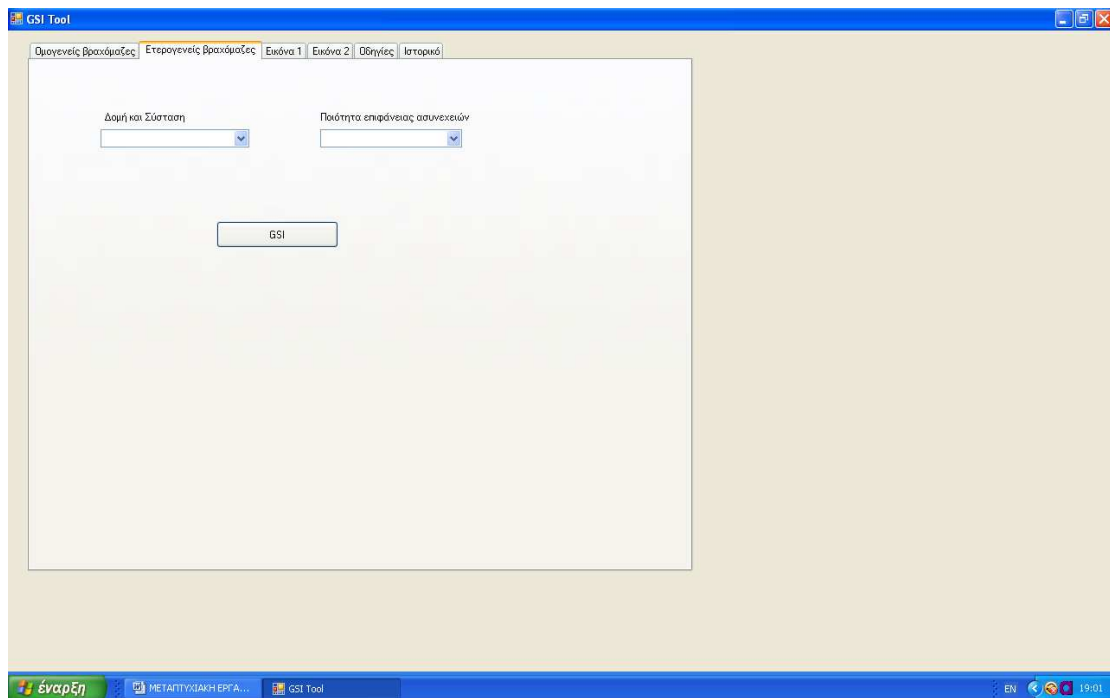
Εικ. 2 – Εκτίμηση GSI σε ετερογενείς βραχομάζες

## 2.6 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GSI TOOL

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε το βοηθητικό πρόγραμμα GSI Tool που υπολογίζει την τιμή του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) ανάλογα με το πώς χαρακτηρίζει ο χρήστης τη δομή της βραχομάζας και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών. Το πρόγραμμα δίνει ένα εύρος τιμών για το GSI και ο χρήστης ανάλογα με τα στοιχεία και την εικόνα που διαθέτει για το πέτρωμα, επιλέγει την τελική τιμή. Κατασκευάστηκε με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

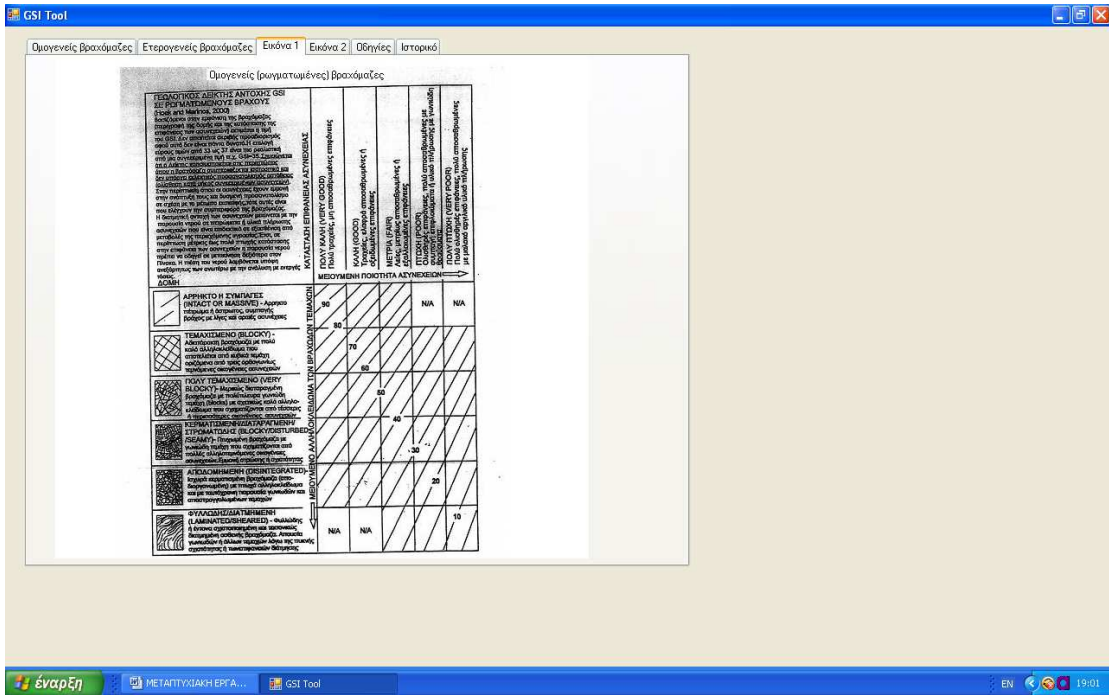


**Εικ.3 – Ομογενείς βραχόμαζες**

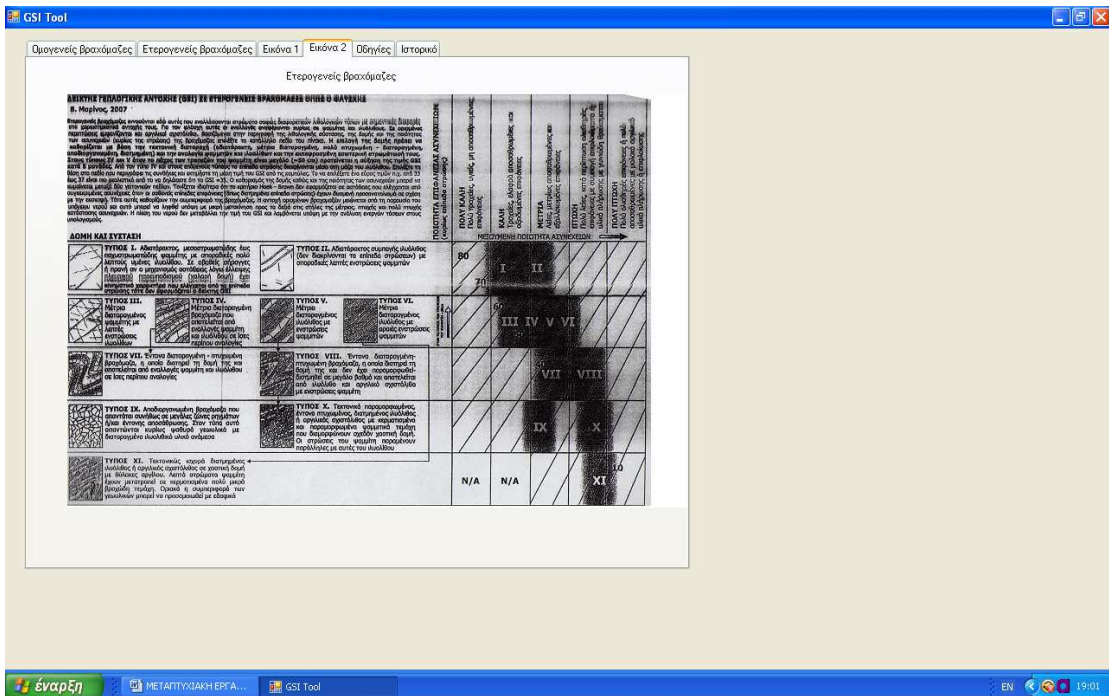


**Εικ.4 – Ετερογενείς βραχόμαζες**

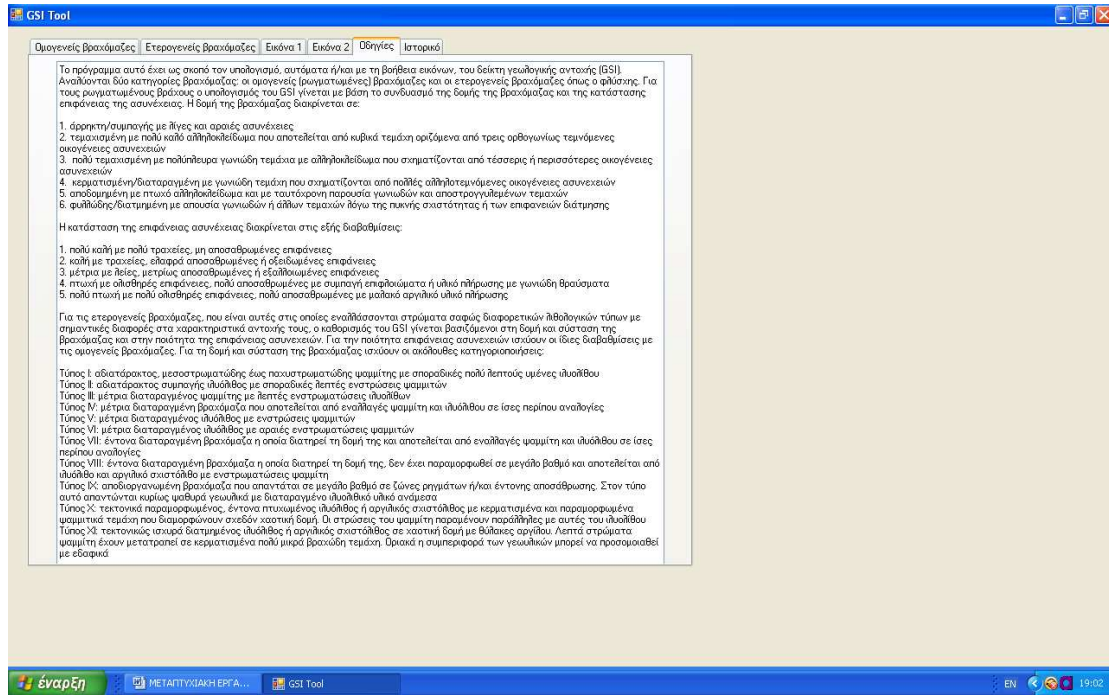




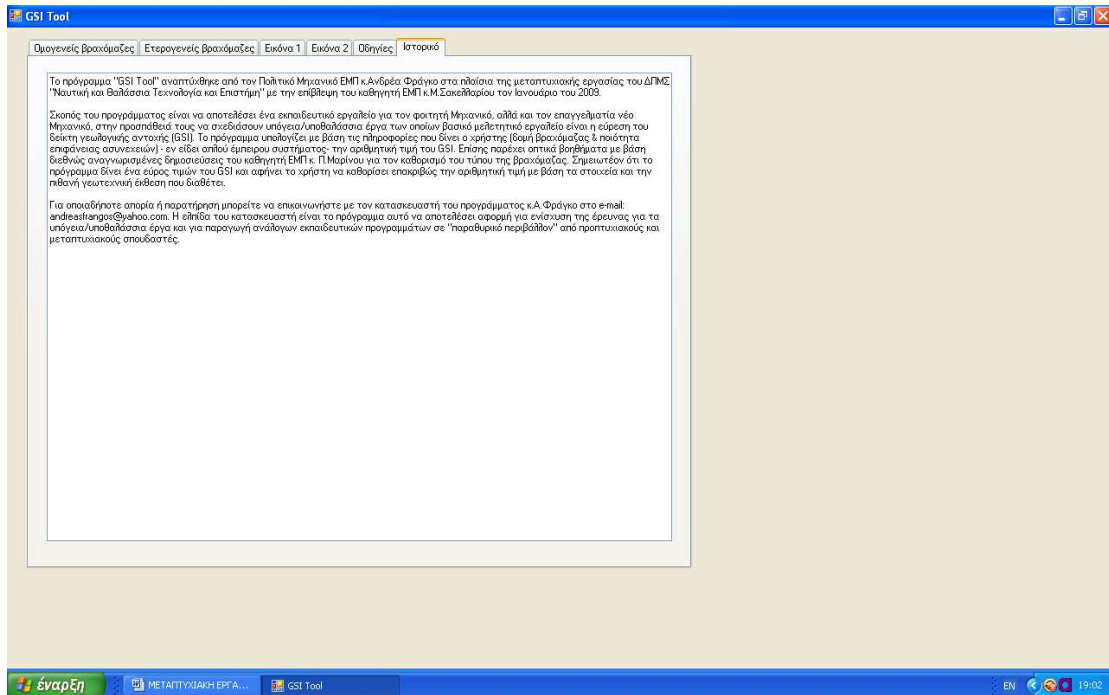
Εικ.5 – Πίνακας GSI (ομογενείς βραχώμαξες)



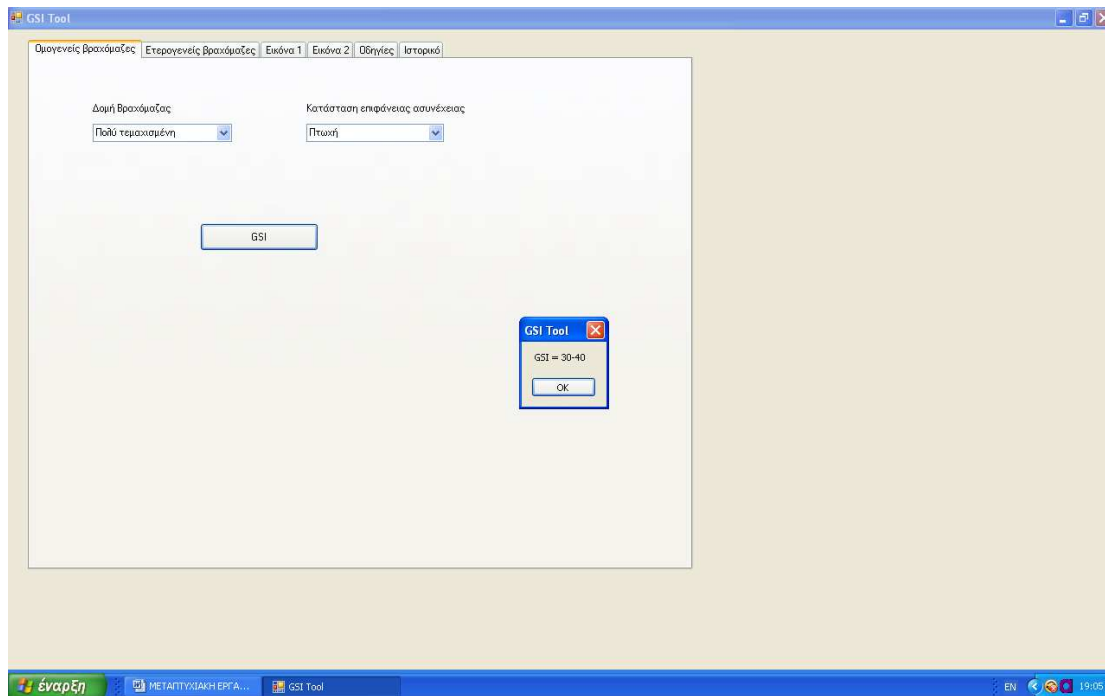
Εικ.6 – Πίνακας GSI (ετερογενείς βραχώμαξες)



Εικ.7 – Οδηγίες προγράμματος



Εικ.8 – Ιστορικό προγράμματος



**Εικ.9 – Απάντηση προγράμματος**

### **3. ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

#### **3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ NATM**

Η βασική ιδέα πίσω από τη μέθοδο NATM είναι η ενεργοποίηση της αντοχής της περιβάλλουσας της εκσκαφής ώστε να περιοριστεί στο ελάχιστο η αποσυμπίεση και η χαλάρωσή της βραχώμαζας. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης κυρίως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια που ενισχύουν την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συμβάλλουν στην πίεση σταθεροποίησης που προκύπτει από το φαινόμενο της θολωτής δράσης.

Η σχεδιασμός της διάνοιξης εξαρτάται από την επιφάνεια της τελικής διατομής και από την ποιότητα της βραχώμαζας. Συνήθως γίνεται εκσκαφή που πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής περιλαμβάνει το θόλο ή την τοξωτή άνω ημιδιατομή η οποία μπορεί να εκσκαπεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά πλάτος της σήραγγας. Η δεύτερη φάση γίνεται στο υπόλοιπο τμήμα παραλληλόγραμμου σχήματος. Η τρίτη φάση περιλαμβάνει το ανεστραμμένο τόξο. Είναι επίσης δυνατή η εκσκαφή με πλευρικές στοές η οποία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις έργων μεγάλων διαστάσεων ή μεγάλης διατομής σήραγγες που κατασκευάζονται σε βραχώμαζα χαμηλής ποιότητας.

Ο κύκλος εργασιών που ακολουθείται είναι: (α) Διαμόρφωση των μετώπων στα στόμια με την τοποθέτηση προπλαισίων καθώς και μέτρων προστασίας



από καταπτώσεις βραχυδών τεμαχίων στα πρανή των στομιών. (β) Τοπογραφική χάραξη της γραμμής ελάχιστης εκσκαφής. (γ) Εξόρυξη βράχου με μηχανική εκσκαφή ή χρήση εκρηκτικών. Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την προσχώρηση της εκσκαφής είναι η απομάκρυνση επισφαλών όγκων αμέσως μετά την εξόρυξη, η αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής και η γεωλογική αποτύπωση του μετώπου και των τοιχωμάτων της εκσκαφής με βάση τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης. Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι τα αγκύρια, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα μεταλλικά πλαίσια, οι δοκοί και ράβδοι προπορείας κ.ά. Η μόνιμη επένδυση κατασκευάζεται από σπλισμένο σκυρόδεμα, συνήθως μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και της άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας, οπότε και έχουν ολοκληρωθεί οι μετακινήσεις-παραμορφώσεις στη βραχώμαζα και έχει επέλθει ισορροπία των επιτόπου τάσεων.

Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου NATM περιλαμβάνει τη διάνοιξη σηράγγων με :

1. Ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς πίεση στο μέτωπο με μηχανικά μέσα (π.χ. TBM)
2. Άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου, δηλαδή χωρίς υποστήριξη με συμβατικές μεθόδους (π.χ. ξύλινες δοκούς) χωρίς άμεση υποστήριξη με μεταλλικό κέλυφος (ασπίδα) και χωρίς άμεση εφαρμογή τελικής επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία ή έγχυτο σκυρόδεμα

Η επιτυχής διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη σηράγγων με τη μέθοδο NATM βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας και στη συνεχή προσαρμογή των χαρακτηριστικών της διάνοιξης και υποστήριξης με βάση τα αποτελέσματα της παρακολούθησης (π.χ. τροποποίηση του βήματος εκσκαφής και της διαδικασίας τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, πύκνωση ή αραίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, τροποποίηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τροποποίηση του μήκους των αγκυρίων, προσθήκη αγκυρίων σε χαρακτηριστικές θέσεις κλπ). Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής των. Κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη σηράγγων συνήθως μετρούνται τα εξής (Καββαδάς 2005):

1. Μετακινήσεις: του τοιχώματος της σήραγγας, της βραχώμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα και της επιφάνειας του εδάφους.
2. Πιέσεις: της βραχώμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υδατικές πιέσεις στο έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα.
3. Δυνάμεις: εφελκυσμός στα αγκύρια, θλίψη/κάμψη στα χαλύβδινα πλαίσια.
4. Παροχή διηθήσεων υπογείων υδάτων.

Τα πλεονεκτήματα της NATM σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι τα εξής:

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες. Συνεπώς δύσκολα αποτυγχάνει ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι παραδοχές της μελέτης διαφέρουν σημαντικά από τις επιτόπου συνθήκες

- Πλεονεκτεί σε περιπτώσεις έντονα διογκούμενων εδαφών όπου η μηχανική διάνοιξη (TBM) μπορεί να αποτύχει πλήρως
- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής (π.χ. διευρύνσεις της διατομής)
- Πλεονεκτεί σε διατομές μεγάλου μεγέθους (πολλαπλές φάσεις)
- Μπορεί να εφαρμοσθεί στη διάνοιξη μη-κυκλικών διατομών
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (που τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης)
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικά μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους
- Δεν απαιτεί μεγάλη αρχική οικονομική επένδυση, αλλά έχει υψηλό κόστος προσωπικού
- Σε ομοιογενείς γεωτεχνικές συνθήκες επιτυγχάνουν ταχύτερους ρυθμούς διάνοιξης
- Υπάρχουν κατάλληλα μηχανήματα πρακτικώς για όλους τους τύπους των εδαφών. Υπάρχει μεγάλο πρόβλημα σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενων γεωτεχνικών συνθηκών
- Σε ομοιογενείς γεωτεχνικές συνθήκες και σήραγγες μεγάλου μήκους επιτυγχάνουν μικρότερο λειτουργικό κόστος. Έχουν μικρό κόστος προσωπικού, αλλά υψηλή αρχική επένδυση
- Ελέγχουν καλύτερα το μέτωπο εκσκαφής σε περιπτώσεις αστάθειας (π.χ. εδάφη μικρής αντοχής, άμμοι) ή λόγω έντονης εισροής νερού μέσω της εφαρμογής αντι-πίεσης και της "κλειστής" κεφαλής

### **3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ NTM**

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας Q. Εφαρμόζεται για διακλασμένο πέτρωμα με εύρος αντοχών σε μονοαξονική θλίψη 3 έως 300MPa και για αργιλικές ζώνες με ισχυρές επιτόπου τάσεις. Οι συνήθεις μέθοδοι εκσκαφής συνίστανται σε διάτρηση και χρήση εκρηκτικών, μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) για σκληρά πετρώματα και μηχανική εκσκαφή σε αργιλικές ζώνες. Η προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη περιλαμβάνει ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων, περιστασιακά αγκύρια, δακτύλιο από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ράβδους και προκατασκευασμένα με σκυρόδεμα πλαίσια. Η προσωρινή υποστήριξη αποτελεί μέρος της μόνιμης υποστήριξης, δε χρησιμοποιείται ενίσχυση με μεταλλικό πλέγμα, δε χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται σαν ξηρό μίγμα (gunite) αλλά μόνο σαν υγρό μίγμα και δε χρησιμοποιούνται άκαμπτα ή εύκαμπτα μεταλλικά πλαίσια. Η μέθοδος NTM εφαρμόζεται κυρίως σε διακλασμένες βραχώμαζες που έχουν την τάση να δημιουργούν υπερεκσκαφές και όπου η διάνοιξη γίνεται με τη χρήση εκρηκτικών.

### **3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ CUT & COVER**

Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται συνήθως σήραγγες μικρού βάθους. Στην πράξη ανοίγεται μια τάφρος και αφού κατασκευαστεί μέσα της η σήραγγα γίνεται επίχωση. Προβλέπεται προσωρινή αντιστήριξη για την εκσκαφή. Επίσης ο στόχος είναι η τμηματική επίχωση του ορύγματος έτσι ώστε να μην διακόπτεται η κυκλοφορία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ενδείκνυται για ρηχές κατασκευές και όταν δεν υπάρχουν ιδιοκτησίες στην εγγύτερη περιοχή του έργου.

### **3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ TBM**

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μηχανημάτων εκσκαφής σιράγγων: (α) Τα μηχανήματα σημειακής κοπής που προσβάλλουν ένα περιορισμένο τμήμα του μετώπου εκσκαφής και χρησιμοποιούνται σε σήραγγες μη κυκλικής διατομής με ενδεικτική ταχύτητα προχώρησης 8-10μ. την ημέρα. (β) Τα μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής που προσβάλλουν όλη την έκταση του μετώπου εκσκαφής και εκσκάπτουν μόνο κυκλικές διατομές. Αποτελούνται από την κεφαλή κοπής, το σύστημα προώθησης της κοπτικής κεφαλής και της ασπίδας μαζί με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, καθώς και το σύστημα μεταφοράς και αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής και την ασπίδα. Υπάρχουν οι εξής τύποι TBM ολομέτωπης εκσκαφής:

- (1) TBM ανοικτού τύπου χωρίς ασπίδα για προσωρινή συγκράτηση των τοιχωμάτων, κατάλληλο για καλής ποιότητας βραχώμαζες
- (2) TBM με απλή ή διπλή ασπίδα για μέτρια και πτωχής ποιότητας βραχώμαζες
- (3) TBM με ασπίδα εξισορρόπησης της πίεσης εδάφους για ασταθείς εδαφικές καταστάσεις με εφαρμογή σε μαλακά και πλαστικά γεωϋλικά
- (4) TBM κλειστού μετώπου όπου η υποστήριξη του μετώπου γίνεται με τη βοήθεια μετονίτη και χρησιμοποιείται σε αμμώδη και χαλικώδη εδάφη

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μηχανημάτων ολομέτωπης εκσκαφής είναι η υψηλή ταχύτητα προχώρησης σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους εξόρυξης, η μικρή διαταραχή της βραχώμαζας, οι μειωμένες δονήσεις, η διαμόρφωση ομοιόμορφης διατομής, η σημαντική μείωση των υπερεκσκαφών, η τυποποίηση της υποστήριξης και η αυξημένη ασφάλεια των εργαζομένων. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος, οι μειωμένες επιδόσεις, η προβληματική συμπεριφορά σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες και τα προβλήματα σε εισροές υπόγειων νερών.

## **4. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

1. Διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη:

Σκοπός: προσωρινή ευστάθεια της διατομής και περιορισμός των παραμορφώσεων (σύγκλιση τοιχώματος, καθιζήσεις εδάφους)

## 2. Τελική επένδυση

Σκοπός: ανάληψη μακροχρόνιων και υδραυλικών φορτίων, στεγανότητα και αισθητική του εσωραχίου

Μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου:

- Αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (μείωση των διαστάσεων του μετώπου)
- Διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο (εδαφικός τάκος)
- Ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια (συνήθως fiberglass)
- Ενίσχυση της οροφής με ράβδους ή δοκούς προπορείας (spiles, forepoling)
- Κατασκευή τσιμεντενέσεων στο μέτωπο (σε διαπερατούς σχηματισμούς)
- Προσωρινή κάλυψη του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (σε περιπτώσεις διακοπής των εργασιών διάνοιξης)

### 1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

• Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζολάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του

• Με την προσθήκη της ποζολάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης (rebound) κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm. Η πλαστιμότητα και η εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός

• Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα (wire mesh reinforcement). Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-50 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος

• Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους:

\* Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση του σκυροδέματος

\* Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς

\* Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη ιδίως όταν η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι ανώμαλη.

Η χρήση μεταλλικού πλέγματος πλεονεκτεί στο δάπεδο της σήραγγας (λόγω κόστους) και όπου αναμένεται πιθανή ρηγμάτωση του εκτοξ. σκυροδέματος (καλύτερος έλεγχος κατάρρευσης)

### 2. Αγκύρια βράχου

Διακρίνονται σε δυο κατηγορίες :

- Προεντεταμένα αγκύρια (tensioned cables)

Αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχόμαζας λόγω της προέντασης.

- Παθητικά αγκύρια (rock-bolts)

Η λειτουργία τους βασίζεται στη φόρτιση λόγω της παραμόρφωσης της βραχόμαζας

Τα παθητικά αγκύρια διακρίνονται σε:

- αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (fully bonded)
  - Πρόσφυση με τσιμεντένεμα
  - Πρόσφυση με ρητινένεμα
  - Αμεσης πρόσφυσης (Swellex, Split-set, κλπ)
  - αγκύρια πρόσφυσης άκρου (end anchored)
- (συνήθως είναι διαστελλόμενης κεφαλής)

Στα αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης ανήκουν οι εξής τύποι:

(α) Οι ηλώσεις βράχου (grouted nails)

Αποτελούνται από χαλύβδινη ράβδο (StIV, Φ20-25mm) η οποία τοποθετείται εντός οπής (διαμέτρου 38-50mm) που πληρούται με ένεμα (τσιμεντένεμα ή ένεμα συνθετικής ρητίνης). Οι ηλώσεις αυτές είναι συνήθως προσωρινές, μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως μόνιμες με κατάλληλη προστασία από τη διάβρωση.

(β) Οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex (Atlas-Corco) ή τύπου Split-Set (Ingersoll-Rand) Αποτελούνται από κοίλη μεταλλική διατομή και αποκτούν συνεχή πρόσφυση με τη βραχόμαζα με εισπίεση νερού στο εσωτερικό της διατομής που προκαλεί τη διόγκωσή της. Έχουν μικρή διάρκεια ζωής (λόγω έλλειψης προστασίας από τη διάβρωση και λόγω της λεπτότοιχης διατομής). Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι αναλαμβάνουν φορτία πολύ γρήγορα επειδή δεν απαιτούν την πήξη του ενέματος για την επίτευξη πρόσφυσης.

### 3. Χαλύβδινες νευρώσεις

Λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων

Είναι των εξής τύπων :

- Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB100-160
- Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders). Αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος
- Συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού (π.χ. 4-6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη, συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες)

Συνήθως θεωρείται ότι τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης παύουν να αναλαμβάνουν φορτία με την πάροδο του χρόνου μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης, επειδή:

1. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής υποστήριξης έχει μεγαλύτερο ερπυσμό από το έγχυτο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης.

2. Τα χαλύβδινα πλαίσια συνήθως δεν έχουν την απαραίτητη επικάλυψη και διαβρώνονται.
3. Τα αγκύρια διαβρώνονται και έρπουν λόγω παρεμπόδισης της μετακίνησης της κεφαλής τους.

Αρχές σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σήραγγων :

1. Η τελική επένδυση αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχόμαζας (συνήθως θεωρείται ότι η προσωρινή υποστήριξη καθίσταται ανενεργή στην μόνιμη κατάσταση της σήραγγας).
2. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη.

Η τελική επένδυση σχεδιάζεται να αναλάβει τα εξής φορτία:

1. Το φορτίο των προσωρινών αγκυρίων (σε βραχόμαζα με έντονα ερπυστική συμπεριφορά, ή πιθανότητα διάβρωσης των αγκυρίων).
2. Το φορτίο των χαλύβδινων πλαισίων σε περίπτωση που έχουν ανεπαρκή επικάλυψη και μπορούν να διαβρωθούν
2. Το φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε περίπτωση που έχει έντονο ερπυσμό (π.χ. λόγω των προσμίκτων).
3. Μέρος του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μόνιμου έργου (κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας)
4. Τυχόν αυξημένα μακροχρόνια φορτία της βραχόμαζας λόγω ερπυσμού
5. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης
6. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα
7. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας

Η διαδικασία εκσκαφής και βαθμιαίας υποστήριξης της σήραγγας επιτρέπει την ελεγχόμενη αποτόνωση της βραχόμαζας (μέσω της σύγκλισης του τοιχώματος). Έτσι αναπτύσσεται το «φαινόμενο θόλου» στη βραχόμαζα και μειώνεται η πίεση στην άμεση υποστήριξη.

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης πρέπει να προσομοιώνει όλες τις φάσεις διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Ειδικότερα απαιτείται η προσομοίωση :

1. Της σύγκλισης της βραχόμαζας πριν από την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Η σύγκλιση αυτή συμβαίνει:

- πριν το μέτωπο εκσκαφής φθάσει στη συγκεκριμένη θέση
- στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εκσκαφής και της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Τα ανωτέρω μπορούν να προσομοιωθούν είτε μέσω του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) (καμπύλες Panet) είτε μέσω μιας ισοδύναμης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας ( $E/E_0 < 1$ )

2. Της βαθμιαίας ενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης π.χ. της βαθμιαίας αύξησης του μέτρου ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, της βαθμιαίας αύξησης της συνάφειας των αγκυρίων πλήρους πάκτωσης με τσιμεντένεμα, της ατελούς επαφής των χαλύβδινων πλαισίων με τη βραχώμαζα κλπ.

## 5. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

### 5.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ MOHR-COULOMB

Θεωρώντας ένα τμήμα βράχου που υπόκειται στις κύριες τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ , η ορθή και η διατμητική τάση σε ένα κεκλιμένο επίπεδο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (5.1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \beta \quad (5.2)$$

Όπου  $\beta$ : η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της  $\sigma_1$  και του κεκλιμένου επιπέδου. Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να παρασταθούν από τον κύκλο του Mohr για διάφορες κατευθύνσεις του κεκλιμένου επιπέδου. Για κάθε ζεύγος ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) που προκαλεί αστοχία, υφίσταται ένας κύκλος με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ομάδας κύκλων. Η περιβάλλουσα που περικλείει τους κύκλους λέγεται περιβάλλουσα του Mohr. Κάθε κύκλος που δημιουργείται για ένα ζεύγος τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) που ασκούνται στη βραχώμαζα ο οποίος αγγίζει ή τέμνει την περιβάλλουσα, προκαλεί αστοχία.

Το κριτήριο Mohr-Coulomb ορίζει ότι η αστοχία σε ένα επίπεδο πραγματοποιείται όταν:  $|\tau| = \tau_s + \mu\sigma$  (5.3)

Όπου  $\sigma, \tau$  η ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο,  $\mu = \tan\phi$ ,  $\mu$  και  $\phi$  είναι ο συντελεστής και η γωνία εσωτερικής τριβής και  $\tau_s$  είναι η διατμητική δύναμη.

Αν οι  $\sigma, \tau$  αναχθούν στις σχέσεις που είδαμε για την περιβάλλουσα προκύπτει ότι:

$$|\tau| - \mu\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} (\sin 2\beta + \mu \cos 2\beta) - \mu \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (5.4)$$

Με τη μέγιστη τιμή να πραγματοποιείται για  $\tan 2\beta = 1/\mu = \cot \phi$ , με αποτέλεσμα να προκύπτει:

$$\sin 2\beta = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}, \cos 2\beta = \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (5.5)$$

$$\text{Το κριτήριο αστοχίας γίνεται: } \sigma_1(\sqrt{1+\mu^2} - \mu) - \sigma_3(\sqrt{1+\mu^2} + \mu) = 2\tau_s \quad (5.6)$$

Από τα παραπάνω οι αρχικές σχέσεις για  $\sigma, \tau$  παίρνουν τη μορφή:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (5.7)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi \quad (5.8)$$

## 5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK-BROWN

Το 1980 οι Hoek και Brown πρότειναν ένα μη γραμμικό κριτήριο αντοχής της βραχώμαζας βασισμένο σε εμπειρικές θεωρήσεις από διάφορα τεχνικά έργα. Η βασική παραδοχή ήταν η βραχώμαζα η οποία διατέμενεται από πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών από τα οποία όμως κανένα δεν δημιουργεί δυνητική αστάθεια, ώστε η βραχώμαζα να μπορεί να θεωρηθεί σαν «ισότροπη» και χωρίς την παρουσία λεπτομερών υλικών στη δομή της. Το αρχικό κριτήριο που βασίζεται στα χαρακτηριστικά του βραχώδους υλικού περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \sqrt{\left( \frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right) + s} \quad (5.9)$$

Όπου  $\sigma'_1, \sigma'_3$  : η μέγιστη και ελάχιστη ενεργή κύρια τάση κατά τη θραύση (αξονική και πλευρική ενεργή τάση αντίστοιχα)

$\sigma_{ci}$  : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού

$m_b$  και  $s$  : σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βραχώδους υλικού και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας

Για το βραχώδες υλικό η παραπάνω σχέση έχει εφαρμογή με τιμές  $s=1$  και  $m_b=m_i$ . Οι τιμές του  $m_i$  μπορούν να υπολογιστούν από τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές σε κυλινδρικά δείγματα του βραχώδους υλικού.

Το 1988 οι Hoek και Brown πρότειναν την εκτίμηση των  $s, m_b$  με το σύστημα ταξινόμησης RMR θεωρώντας εντελώς στεγνές συνθήκες βραχώμαζας και ευνοϊκό προσανατολισμό ασυνεχειών. Για αδιατάρακτες βραχώμαζες (μετά από ήπια χρήση εκρηκτικών ή εκσκαπτικών μηχανημάτων) ισχύουν οι εξής σχέσεις:



$$m_b = m_i e^{\left(\frac{RMR-100}{28}\right)} \quad (5.10)$$

$$s = e^{\left(\frac{RMR-100}{9}\right)} \quad (5.11)$$

Για διαταραγμένες βραχώμαζες (μετά από χρήση εκρηκτικών) ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{RMR-100}{14}\right)} \quad (5.12)$$

$$s = e^{\left(\frac{RMR-100}{6}\right)} \quad (5.13)$$

Για να συμπεριληφθούν οι έντονα διακλασμένες βραχώμαζες με μηδενική εφελκυστική αντοχή οι Hoek, Wood και Shah πρότειναν το τροποποιημένο κριτήριο που περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( \frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right)^\alpha \quad (5.14)$$

Ακολούθησαν συνεχείς τροποποιήσεις με στόχο να συμπεριληφθεί ολόκληρο το εύρος της ποιότητας της βραχώμαζας, δηλαδή να ληφθούν υπόψη τόσο οι μέτριας μέχρι πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες όσο και πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με αυξημένη παρουσία λεπτομερών υλικών. Το κριτήριο Hoek-Brown πήρε τη γενικευμένη του μορφή μετά το 1994 με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( \frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (5.15)$$

Σε αδιατάρακτη βραχώμαζα με  $GSI > 25$  ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)} \quad (5.16)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)} \quad (5.17)$$

$$\alpha = 0.5$$

Σε αδιατάρακτη πτωχής ποιότητας βραχώμαζα για  $GSI < 25$  ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$s=0$$

$$\alpha=0.65-(GSI/200) \quad (5.18)$$

Για το βραχώδες υλικό ισχύει:  $m_b=m_i$ ,  $s=1$  και  $\alpha=0.5$

Οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις έχουν οδηγήσει στην εφαρμογή των ακόλουθων σχέσεων ανεξάρτητα της τιμής του GSI:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (5.19)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (5.20)$$

$$a = \frac{1}{2} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (5.21)$$

Ο παράγοντας διατάραξης  $D$  εξαρτάται από το βαθμό διατάραξης που έχει υποστεί η βραχώμαζα από την επίδραση εκρηκτικών ή από την ανακατανομή και αποτόνωση των τάσεων και κυμαίνεται από 0 για αδιατάρακτες βραχώμαζες μέχρι 1 για πολύ διαταραγμένες. Οι τιμές της σταθεράς  $m_i$  προσδιορίζονται από πίνακες κατά λιθολογικό τύπο πετρώματος.

Το κριτήριο Hoek-Brown συσχετίζεται με το κριτήριο Mohr-Coulomb μέσα από τις σχέσεις του Balmer (1954) οι οποίες συσχετίζουν τις ορθές και διατμητικές τάσεις ( $\sigma_n$ ,  $\tau$ ) με τις κύριες τάσεις ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ) ως εξής:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 k}{k+1} \quad (5.22)$$

$$\tau = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) \sqrt{k}}{k+1} \quad (5.23)$$

$$\text{Όπου } k = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} \quad (5.24)$$

Κατά τους Hoek et al. (2002) έχουμε:

$$k = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + am_b \left( \frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (5.25)$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad (5.26)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha) \sqrt{1 + \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{[(1+\alpha)(2+\alpha)]}}} \quad (5.27)$$

$$\text{όπου } \sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} \quad (5.28)$$

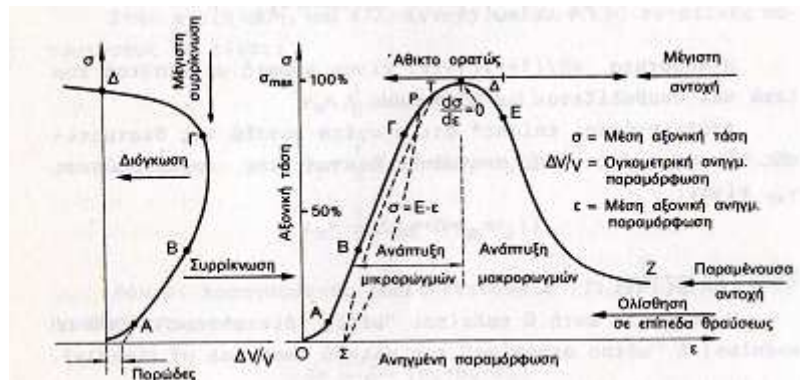
$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (5.29)$$

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (5.30)$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left( \frac{m_b}{4+s} \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (5.31)$$

$$\varepsilon = 0.2 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{p_o} \right)^{-2} \quad (5.32)$$

### 5.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ GRIFFITH



Σχήμα 1 – Διάγραμμα τάσεως-βραχύνσεως

Σαν όλκιμη συμπεριφορά χαρακτηρίζεται η πλαστική εκείνη κατάσταση του υλικού στην οποία καθώς σε αυτό αυξάνεται η μόνιμη παραμόρφωσή του, συνεχίζει να αυξάνεται και η αντίστασή του προς το επιβαλλόμενο φορτίο. Η περιοχή ΓΔ (σχήμα 1) που αρχίζει από το όριο ελαστικότητας και φθάνει μέχρι το σημείο Δ, όπου μηδενίζεται η κλίση  $d\sigma/de$ , αντιστοιχεί στην περιοχή της όλκιμης συμπεριφοράς της βραχύμαζας. Πέρα από το σημείο Δ, η βραχύμαζα βρίσκεται σε ψαθυρή κατάσταση όπου η ικανότητά της να ανθίσταται στο επιβαλλόμενο φορτίο μειώνεται, καθώς αυξάνεται η μόνιμη παραμόρφωσή της. Γενικά ψαθυρά καλούνται εκείνα τα υλικά που θραύονται χωρίς να υποστούν σημαντικές παραμορφώσεις. Χαρακτηριστικό γνώρισμά τους είναι ότι η αντοχή τους σε θλίψη είναι πάντα πολύ μεγαλύτερη από εκείνη σε εφελκυσμό. Γι' αυτό και τα ψαθυρά πετρώματα έχουν τις περισσότερες σε αριθμό και έκταση ασυνέχειες.

Η θεωρία αστοχίας Griffith αναφέρεται στα ψαθυρά υλικά και υποστηρίζει ότι:  
 (i) Τα ψαθυρά υλικά περιέχουν προσανατολισμένες ρωγμές μικροσκοπικής κλίμακας (μικρορωγμές) που στο επίπεδο μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν σχήμα ελλείψεως.

(ii) Νέες ρωγμές μπορεί να δημιουργηθούν όταν η εφελκυστική τάση στην αιχμή μιας ρωγμής είναι αρκετά υψηλή, ώστε να δώσει την ενέργεια που απαιτείται για να δημιουργήσει νέες επιφάνειες ρωγμών. Η συνθήκη αυτή για

ένα ελαστικό υλικό καθορίζεται από τη σχέση: 
$$\sigma_i^* = \left( \frac{2\gamma E}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (5.33)$$

Όπου: E=το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$\gamma$ =η ειδική επιφανειακή ενέργεια, δηλ. η ενέργεια που απαιτείται για να σχηματισθεί μια μονάδα νέας επιφάνειας ρωγμής

c=το μισό του μήκους ρωγμής

(iii) Η διεύθυνση επεκτάσεως κάθε ρωγμής είναι πάντα κάθετη προς τη διεύθυνση της μέγιστης εφελκυστικής τάσεως που αναπτύσσεται σε αυτή.

## 5.4 ΛΟΙΠΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Η ιστορία των εμπειρικών κριτηρίων αστοχίας της βραχόμαζας είναι μεγάλη. Σταθμός αυτής της ιστορίας είναι το κριτήριο Hoek-Brown (1980). Από τη δεκαετία του 1960 μέχρι σήμερα έχουν προταθεί διάφορα κριτήρια τα οποία παραθέτουμε παρακάτω:

$$\sigma_1 = \sigma_c + a\sigma_3^b \quad (5.34) \quad (\text{Murrel 1965})$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 + \alpha\sigma_3^b \quad (5.35) \quad (\text{Hobbs 1964})$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + a\sigma_3 \quad (5.36) \quad (\text{Bodonyi 1970})$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \alpha(\sigma_1 + \sigma_3)^b \quad (5.37) \quad (\text{Franklin 1971})$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = a + b\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right)^a \quad (5.38) \quad (\text{Bieniawski 1974, Yudhbir et al. 1983})$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \alpha\sigma_3\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3}\right)^b \quad (5.39) \quad (\text{Ramamurthy et al. 1985})$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \alpha\sigma_c\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^b \quad (5.40) \quad (\text{Yoshida 1990})$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \alpha + b(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (5.41) \quad (\text{Fairhurst 1964})$$

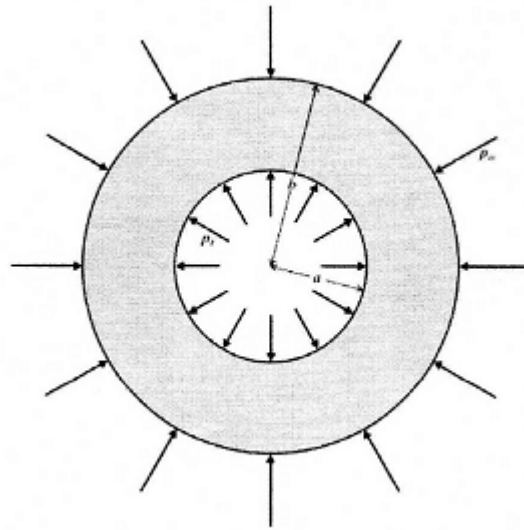
$$\sigma_1 = \sigma_c\left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t}\right)^b \quad (5.42) \quad (\text{Balmer 1952, Shorey et al. 1989})$$

Οι σταθερές  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $s$  προσδιορίζονται μαζί με τις μονοαξονικές τάσεις  $\sigma_c$  και  $\sigma_t$  με στατιστική ανάλυση (συνήθως γραμμική παλινδρόμηση) αποτελεσμάτων δοκιμών.

## 6. ΘΕΩΡΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

### 6.1 ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΜΕ ΠΑΧΙΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Θεωρούμε κυλινδρικό σωλήνα με παχιά τοιχώματα ο οποίος υποβάλλεται σε εσωτερική ( $p_a$ ) και εξωτερική πίεση ( $p_b$ ). Το πρόβλημα είναι αξονοσυμμετρικό και μηδενίζονται οι διατμητικές τάσεις ( $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0$ ).



**Σχήμα 2 - Κύλινδρος υπό εσωτερική και εξωτερική πίεση**

Προκύπτει (Σακελλαρίου 2009) ότι:

$$\sigma_r = C - \frac{D}{r^2} \quad (6.1)$$

$$\sigma_\theta = C + \frac{D}{r^2} \quad (6.2)$$

$$u_r = -\frac{1}{2G} \left\{ (1-2\nu)Cr + \frac{D}{r} \right\} \quad (6.3)$$

$$C = \frac{(b^2 p_b - a^2 p_a)}{(b^2 - a^2)} \quad (6.4)$$

$$D = \frac{(p_b - p_a)a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \quad (6.5)$$

## 6.2 ΕΙΣΩΣΕΙΣ KIRSCH

Εφόσον ο βράχος δέχεται τάσεις κάτω από το όριο ελαστικότητας, δηλαδή κάτω από το μισό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και εφόσον οι ασυνέχειες είναι αραιές και κλειστές, μια σήραγγα μπορεί να προσομοιωθεί με μια οπή σε ένα δίσκο απείρων διαστάσεων σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης. Για την περίπτωση οπής κυκλικού σχήματος και με την παραδοχή ότι το μέσο είναι ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό, εφαρμόζουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[ (1+k) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-k) \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (6.6)$$

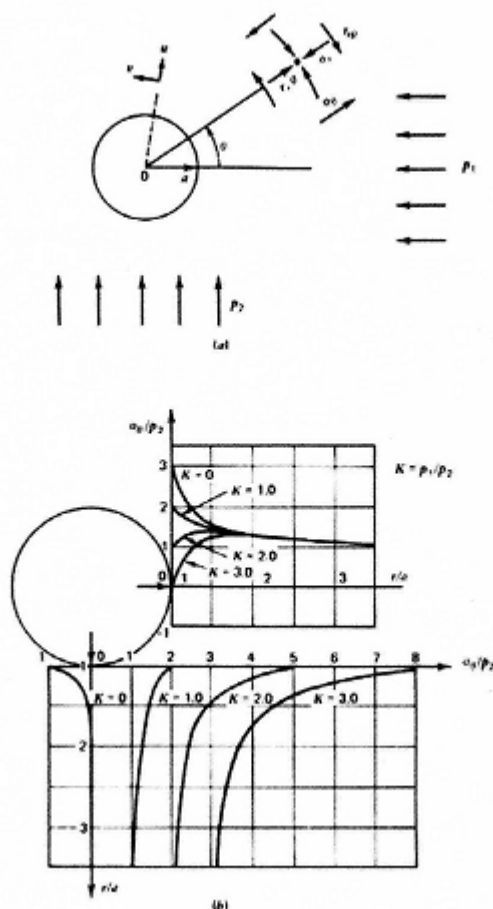
$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[ (1+k) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-k) \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (6.7)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[ (1-k) \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \quad (6.8)$$

$$u_r = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[ (1+k) - (1-k) \left\{ 4(1-\nu) + \frac{\alpha^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad (6.9)$$

$$u_\theta = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[ (1-k) \left\{ 2(1-\nu) + \frac{\alpha^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right] \quad (6.10)$$

Όπου  $k$  είναι ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη τάση στο άπειρο.



Σχήμα 3 - Τασικό πεδίο γύρω από σήραγγα κατά Kirsch

### 6.3 ΣΧΕΣΕΙΣ MOHR-COULOMB

Για σήραγγα κυκλικής διατομής σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης με ισότροπη γεωστατική ένταση ( $\sigma_{vo} = \sigma_{ho} = p_o$ ) πριν τη διάνοιξη της σήραγγας και έδαφος ελαστικό-απολύτως πλαστικό, οι τάσεις για αστοχία κατά Mohr-Coulomb δίνονται από τις εξής σχέσεις (Καββαδάς 2005):

- Για επίλυση στην πλαστική περιοχή ( $R < r < r_p$ ), όπου  $r_p$  ακτίνα της πλαστικής περιοχής και  $\phi \neq 0$  είναι:

$$\sigma_r = \left[ p + \frac{2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \right] \left( \frac{r}{R} \right)^{N_\phi - 1} - \left( \frac{2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \right) \quad (6.11)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (6.12)$$

$$\text{Όπου } N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (6.13)$$

Για  $\phi = 0$  έχουμε:

$$\sigma_r = p + 2c \ln \left( \frac{r}{R} \right) \quad (6.14)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2c \quad (6.15)$$

- Για επίλυση στην ελαστική περιοχή παίρνουμε:

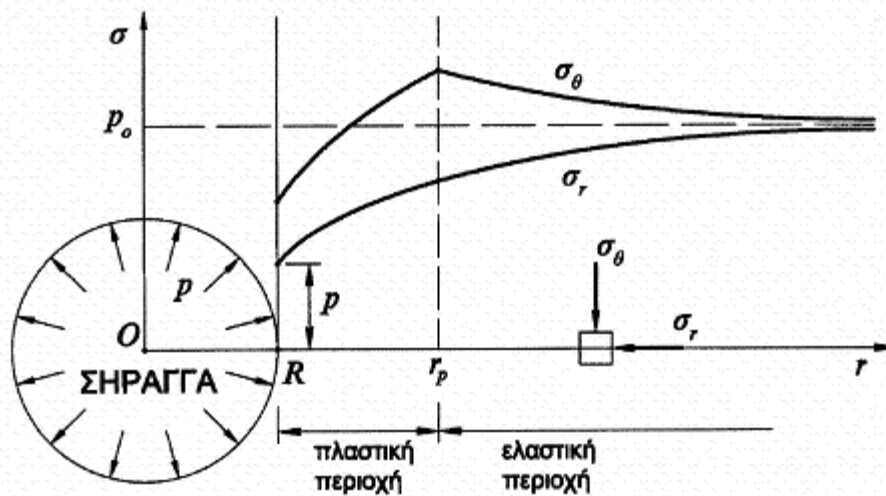
$$\sigma_r = p_o - c_2 D (1 - K_o) \frac{1}{r^2} \quad (6.16)$$

$$\sigma_\theta = p_o + c_2 D (1 - K_o) \frac{1}{r^2} \quad (6.17)$$

$$\text{Όπου } D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6.18)$$

Η σταθερά  $c_2$  προσδιορίζεται από την απαίτηση ισότητας των τάσεων στο όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, η σταθερά  $c_2$  προσδιορίζεται από τη σχέση:  $\sigma_r (r = R) = p$ .

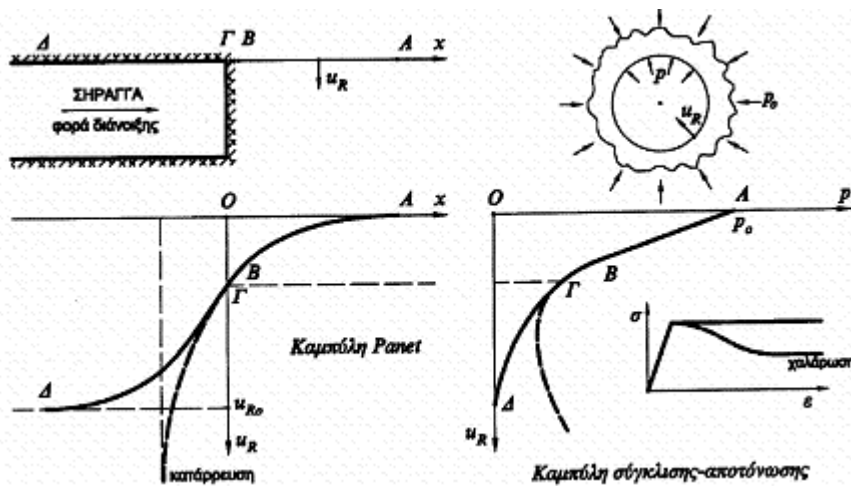




Σχήμα 4 – Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική οπή

#### 6.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το Σχήμα 5 παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα  $x - uR$  όπου ( $uR$ ) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και ( $x$ ) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης ( $uRO$ ), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση ( $x$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης  $x-uR$  μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος ( $uR$ ). Για τη συγκεκριμένη τιμή ( $uR$ ) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης ( $p$ ), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση ( $p_0$ ). Η πίεση ( $p$ ) ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση ( $x$ ) από το μέτωπο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Σχήμα 5 – Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα

Η συσχέτιση της σύγκλισης ( $u_R$ ) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση ( $x$ ) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Σημειώνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου της σήραγγας, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί (της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης). Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης. Στα επόμενα εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης ( $x$ ) από το μέτωπο εκσκαφής. Η σύγκλιση  $u_R(x)$  του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ( $x < 0$ ) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση  $x = 0$ ) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

$$u_R(x) = u_R(o) + [u_{R\infty} - u_R(o)] \left\{ 1 - \left[ \frac{m}{m + \xi(-x/R)} \right]^2 \right\} \quad (6.19)$$

$u_{R\infty}$  = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ( $x = -\infty$ )

πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

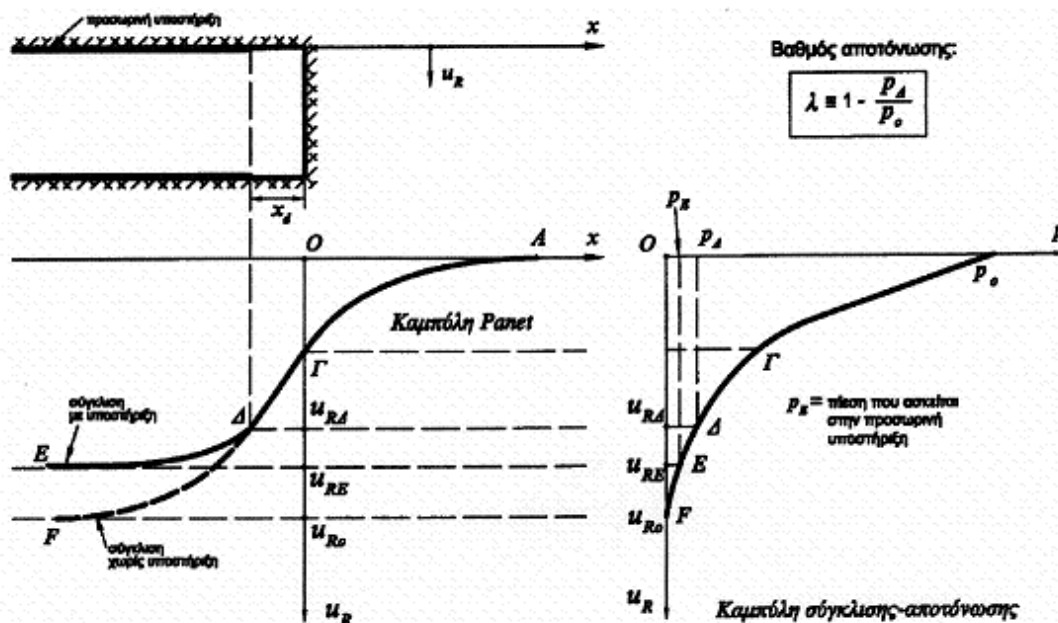
$R$  = η ακτίνα της σήραγγας

$\xi = ueR_{\infty} / u_{R\infty}$  = συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση. Για ισότροπη βραχόμαζα η ελαστική τελική σύγκλιση δίνεται από τη σχέση:

$u_R(o)$  = σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση  $x = 0$ )

$m = \text{συντελεστής}$

Οι τιμές των δύο τελευταίων συντελεστών εξαρτώνται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχώμαζας  $N_s = 2\rho_0 / \sigma_{cm}$  ( $\sigma_{cm} = \text{αντοχή της βραχώμαζας σε μοναξονική θλίψη}$ ). Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τις αντίστοιχες καμπύλες σε διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



**Σχήμα 6 – Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Η καμπύλη  $x-u_R$  ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση ( $u_{RE}$ ) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σύγκλιση της ανυποστήρικτης διατομής ( $u_{RO}$ ). Αντιστοίχως, στην τελική κατάσταση ισορροπίας (κατάσταση Ε) ασκείται πίεση ( $p_E$ ) στην προσωρινή υποστήριξη. Εάν ( $\Delta$ ) είναι η κατάσταση κατά τη στιγμή της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (σε απόσταση  $x_d$  πίσω από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας), τότε στο σημείο  $\Delta$  αντιστοιχεί μια τιμή της σύγκλισης ( $u_{R\Delta}$ ) και μια ισοδύναμη εσωτερική πίεση ( $p_\Delta$ ). Ο βαθμός αποτόνωσης (deconfinement ratio) των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 - (p_\Delta / p_0) \quad (6.20)$$

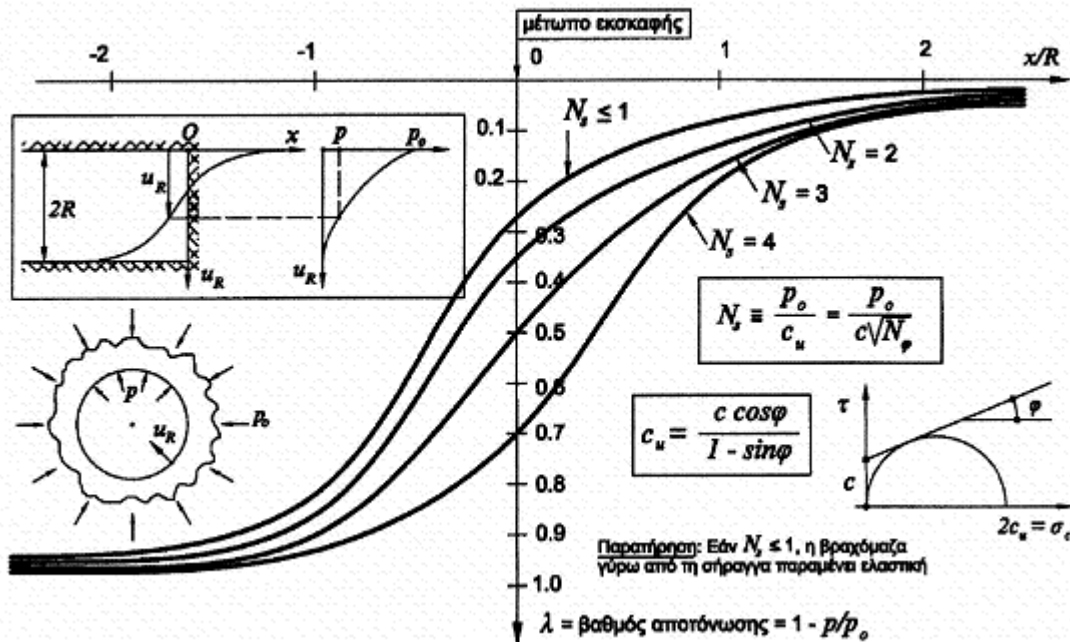
όπου ( $p_0$ ) είναι η αρχική γεωστατική πίεση και ( $p_\Delta$ ) είναι η ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί στη θέση τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Η συσχέτιση μεταξύ της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης ( $p$ ), ή του βαθμού αποτόνωσης  $\lambda \equiv 1 - p/p_0$ , και της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας ( $u_R$ ) περιγράφεται από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (convergence-confinement curve).

Ο συνδυασμός των καμπύλων Panet (Σχήμα 5) και της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του

τοιχώματος σε κάθε θέση (x) του άξονα της σήραγγας. Η μέθοδος είναι η εξής:

1. Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης ( $N_s$ ).
2. Από τη συγκεκριμένη καμπύλη Panet (Σχήμα 5) και τη συγκεκριμένη τιμή (x) υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) και στη συνέχεια η ισοδύναμη εσωτερική πίεση  $p = p_o (1-\lambda)$ .
3. Υπολογίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης με βάση τις ελαστικές παραμέτρους ( $E, \nu$ ) και τις παραμέτρους αντοχής ( $c, \varphi$ ) του εδάφους.
4. Από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και για την τιμή της πίεσης (p) που υπολογίστηκε παραπάνω, υπολογίζεται η σύγκλιση της διατομής ( $u_R$ ).



Σχήμα 7 – Καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα

Πράγματι, μέσω των καμπύλων Panet, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση (p) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση (x) τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δυο φάσεις ως εξής: (1) Η εσωτερική πίεση μειώνεται από ( $p_o$ ) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης. (2) Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p) στο μηδέν. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Είναι προφανές ότι όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής

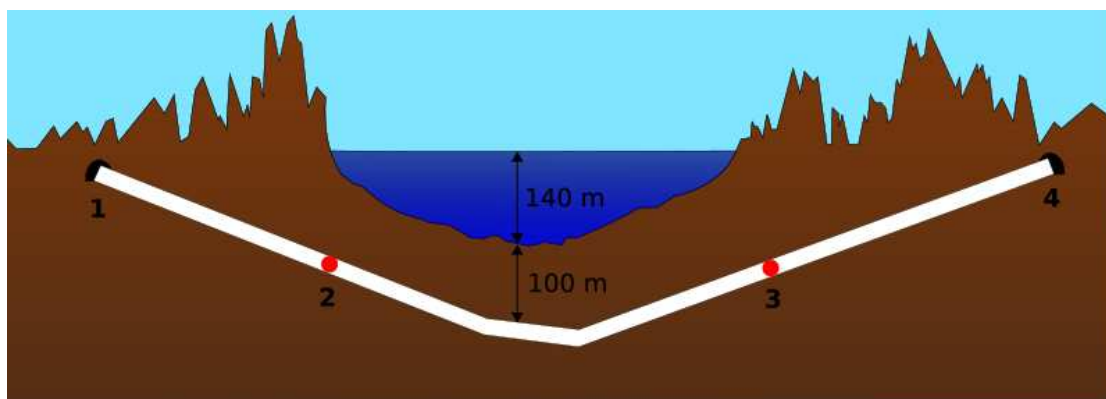
υποστήριξης τόσο μικρότερο φορτίο θα αναλάβουν και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας.

## 7. ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Οι υποθαλάσσιες σήραγγες κατασκευάζονται για να συνδέσουν συγκοινωνιακά δύο περιοχές που χωρίζονται με τμήμα θάλασσας. Βρίσκονται κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Υπάρχουν αρκετά τέτοια έργα σε όλο τον κόσμο, ενώ υπό συζήτηση είναι ορισμένες σημαντικές επεμβάσεις όπως αυτή της σύνδεσης των στενών του Γιβραλτάρ.



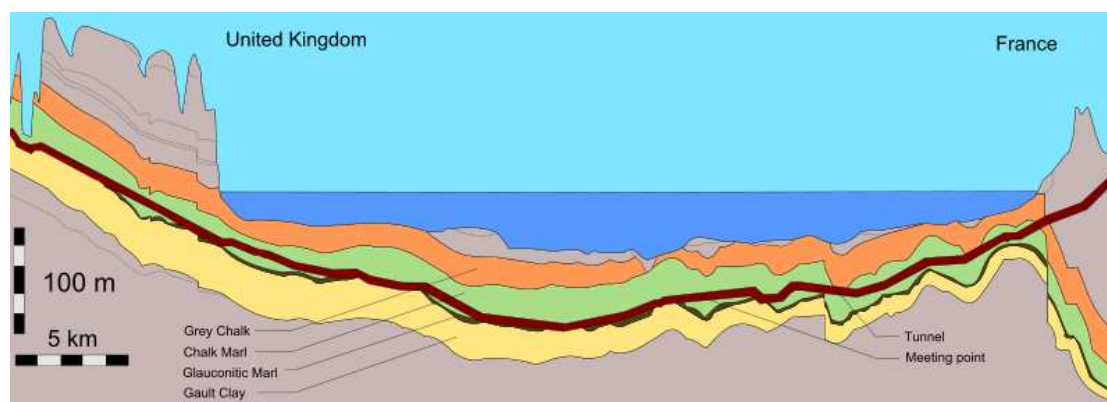
Εικ. 10 – Χάρτης αποτύπωσης υποθαλάσσιας σήραγγας Seikan



Εικ. 11 – Σχηματική τομή σήραγγας Seikan

| A/A | Έργο          | Έτος ολοκλήρωσης | Πέτρωμα                | Διατομή (m <sup>2</sup> ) | Συνολικό μήκος (km) | Ελάχιστη εδαφική κάλυψη (m) | Χαμηλότερο επίπεδο κάτω από θάλασσα (m) |
|-----|---------------|------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---|
| 1   | Vardo         | 1981             | Αμμώδες                | 53                        | 2.6                 | 28                          | 88                                      |
| 2   | Ellingsoy     | 1987             | Γνεύσιος               | 68                        | 3.5                 | 42                          | 140                                     |
| 3   | Valderoy      | 1987             | Γνεύσιος               | 68                        | 4.2                 | 34                          | 145                                     |
| 4   | Kvalsund      | 1988             | Γνεύσιος               | 43                        | 1.6                 | 23                          | 56                                      |
| 5   | Godoy         | 1989             | Γνεύσιος               | 52                        | 3.8                 | 33                          | 153                                     |
| 6   | Hvaler        | 1989             | Γνεύσιος               | 45                        | 3.8                 | 35                          | 121                                     |
| 7   | Flekkeroy     | 1989             | Γνεύσιος               | 46                        | 2.3                 | 29                          | 101                                     |
| 8   | Nappstraumen  | 1990             | Γνεύσιος               | 55                        | 1.8                 | 27                          | 60                                      |
| 9   | Fannefjord    | 1991             | Γνεύσιος               | 54                        | 2.7                 | 28                          | 100                                     |
| 10  | Maurusund     | 1991             | Γνεύσιος               | 43                        | 2.3                 | 20                          | 92                                      |
| 11  | Byfjord       | 1992             | Φυλλίτης               | 70                        | 5.8                 | 34                          | 223                                     |
| 12  | Mastrafjord   | 1992             | Γνεύσιος               | 70                        | 4.4                 | 40                          | 132                                     |
| 13  | Freifjord     | 1992             | Γνεύσιος               | 70                        | 5.2                 | 30                          | 132                                     |
| 14  | Hitra         | 1994             | Γνεύσιος               | 70                        | 5.6                 | 38                          | 264                                     |
| 15  | Tromsoysund   | 1994             | Γνεύσιος               | 60                        | 3.4                 | 45                          | 101                                     |
| 16  | Bjoroy        | 1996             | Γνεύσιος               | 53                        | 2                   | 35                          | 85                                      |
| 17  | Sloverfjord   | 1997             | Γνεύσιος               | 55                        | 3.3                 | 40                          | 100                                     |
| 18  | North Cape    | 1999             | Αμμώδες                | 50                        | 6.8                 | 49                          | 212                                     |
| 19  | Oslofjord     | 2000             | Γνεύσιος               | 79                        | 7.2                 | 32                          | 134                                     |
| 20  | Froya         | 2000             | Γνεύσιος               | 52                        | 5.2                 | 41                          | 164                                     |
| 21  | Ibestad       | 2000             | Σχιστόλιθος, γρανίτης  | 46                        | 3.4                 | 30                          | 125                                     |
| 22  | Bomlafjord    | 2000             | Γνεύσιος, φυλλίτης     | 74                        | 7.9                 | 35                          | 260                                     |
| 23  | Skatestraumen | 2002             | Γνεύσιος               | 52                        | 1.9                 | 40                          | 80                                      |
| 24  | Halsnoy       | 2008             | Γνεύσιος               | 50                        | 4.1                 | 45                          | 135                                     |
| 25  | Eiksundet     | 2007             | Γνεύσιος, ασβεστόλιθος | 71                        | 7.8                 | 50                          | 287                                     |

**Πίνακας 1 – Νορβηγικές συγκοινωνιακές σήραγγες**



**Εικ. 12 – Σχηματική τομή σήραγγας της Μάγχης**

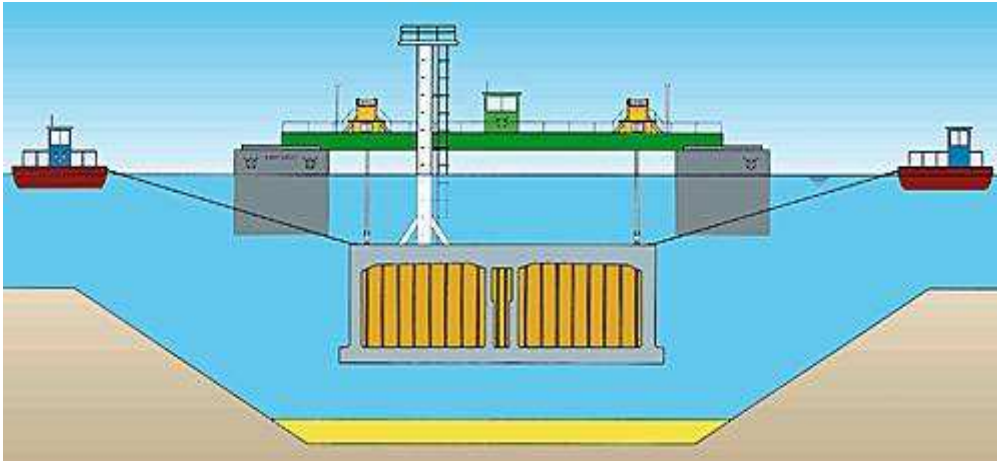


Εικ. 13 – Σχηματική αποτύπωση σήραγγας της Μάγχης

## 8. ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Οι επικαθήμενες στο βυθό σήραγγες κατασκευάζονται είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα. Αποτελούνται συνήθως από επιμέρους στοιχεία (σπονδύλους) τα οποία τελικώς συνδέονται μεταξύ τους στην τελική θέση και σχηματίζουν τη σήραγγα.. Κάθε σπόνδυλος είναι σφραγισμένος στις δύο άκρες του ώστε να μην εισέρχεται το νερό στο εσωτερικό του και να επιπλέει. Η κατασκευή τους ολοκληρώνεται είτε σε νηοδόχο στην ξηρά, είτε καθελκύνονται όπως τα πλοία και ολοκληρώνονται στη θάλασσα κοντά στην τελική τους θέση. Το σύνηθες βάθος νερών στα οποία κατασκευάζονται είναι τα 5-30 μ, σπανιότερα 100μ. Ο σπόνδυλος βυθίζεται σταδιακά μέχρι να ακουμπήσει στο βυθό. Κάθε νέος σπόνδυλος που βυθίζεται προσαρμόζεται στον προηγούμενο και ύστερα γίνεται άντληση του νερού που υπάρχει στη σύνδεση και αφαιρούνται τα προσωρινά διαχωριστικά τοιχώματα. Χρειάζεται προσοχή στην επίδραση των παλιρροιών και των αποθέσεων ιζημάτων. Το γεγονός ότι οι σπόνδυλοι κατασκευάζονται στην ξηρά εξασφαλίζει υψηλή κατασκευαστική ποιότητα και αξιοπιστία. Μπορούν να κατασκευαστούν σε εδάφη που κρίνονται ακατάλληλα για κατασκευή σήραγγων μετωπικής εκσκαφής, όπως για παράδειγμα σε μαλακά και αλλουβιακά εδάφη και σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα. Η τοποθέτηση τους μπορεί να γίνει ακριβώς κάτω από το βυθό, συνήθως 1-2 μ κάτω από την επιφάνεια του βυθού έτσι επιτυγχάνονται μικρά μήκη και ομαλότερες κλίσεις. Αποφεύγεται η επένδυση σε ακριβά μηχανήματα TBM. Η παρουσία τους δεν εμποδίζει την κυκλοφορία των πλοίων. Οι απαιτήσεις εξαερισμού μπορεί να είναι καθοριστικές για τα χαρακτηριστικά της σήραγγας.



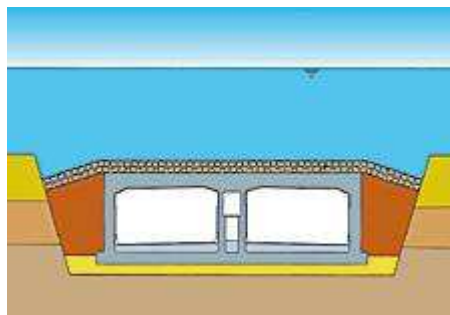


**Εικ. 14 – Καθέλκυση τμήματος σήραγγας**



**Εικ. 15 – Κατασκευή σπονδύλων σήραγγας στην ξηρά**

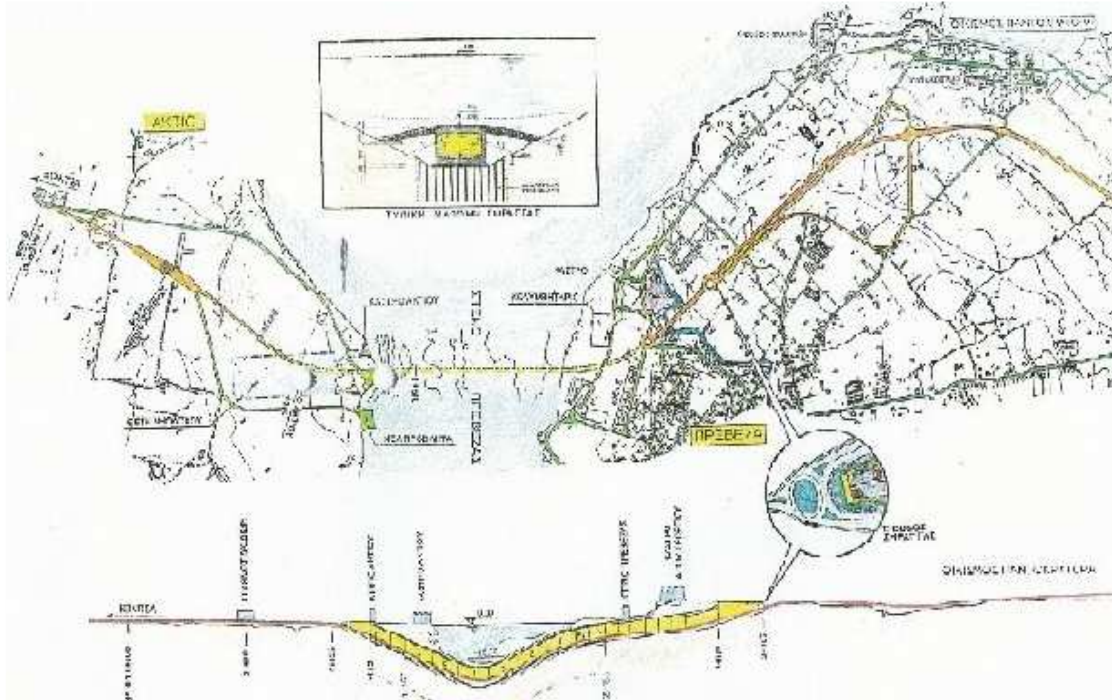
Απαιτούμενες εργασίες είναι η βυθομέτρηση, για την πλήρη απεικόνιση της μορφής του βυθού, η γεωφυσική έρευνα, για τον καθορισμό των υποκείμενων εδαφικών στρώσεων και οι εκσκαφές και η λήψη εδαφικών δειγμάτων κατά μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει το τούνελ για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας



**Εικ. 16 – Επίχωση σήραγγας στο βυθό**



Η έδραση της σήραγγας μπορεί να γίνει σε αδρανές υλικό που θα επιστρωθεί στο βυθό με ειδικά μηχανήματα. Συνήθως χρειάζεται και πασσαλόμψηξη ώστε να είναι υγιές το εδαφικό υπόστρωμα και να μπορεί να παραλάβει το φορτίο της επικαθήμενης σήραγγας το οποίο είναι μεγάλο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά τόσο η οριζοντιογραφία όσο και μια ενδεικτική τομή και διατομή της επικαθήμενης σήραγγας στο τμήμα Άκτιο-Πρέβεζα.



**Εικ. 17 – Ζεύξη Ακτίου - Πρέβεζας**



**Εικ. 18 – Επικαθήμενη σήραγγα στα Η.Α.Ε.**

## 8.1 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

Η θεμελίωση με πασσάλους είναι μια ειδική τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα περισσότερα σοβαρά γεωτεχνικά έργα. Οι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε αποθέσεις μαλακών ή χαλαρών εδαφών, που είναι κατά κόρον τα υποθαλάσσια εδαφικά στρώματα, για μεταβίβαση στο έδαφος υψηλών φορτίων με ταυτόχρονο περιορισμό των καθιζήσεων. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ενός πασσάλου δεχόμαστε ότι το φορτίο της ανωδομής μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω του πασσάλου μέσω της αντοχής της αιχμής του ( $Q_b$ ) και της αντοχής από πλευρικές τριβές ( $Q_s$ ), οπότε ισχύει η σχέση:  $P_u = Q_b + Q_s$ .

Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το υλικό, τη μορφή και τον τρόπο κατασκευής του πασσάλου, καθώς και το είδος του περιβάλλοντος εδάφους. Οι πάσσαλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στους πασσάλους με εκτόπιση που διακρίνονται επιπλέον σε προκατασκευασμένους-εμπηγνύομενους και σε επιτόπου εγχυόμενους και στους πασσάλους χωρίς εκτόπιση. Τα πλεονεκτήματα των προκατασκευασμένων πασσάλων με εκτόπιση είναι ότι μπορούν να εμπηχθούν σε προκαθορισμένη διάταξη, είναι κατάλληλοι για να περιβάλλονται από μαλακούς σχηματισμούς, η ποιότητά τους ελέγχεται πριν την έμπηξη, επανεμπηγνύονται σε περίπτωση ανύψωσης, η κατασκευή τους δεν επηρεάζεται από τα υπόγεια ύδατα, επιτυγχάνονται μεγάλα μήκη και είναι κατάλληλοι για θαλάσσιες κατασκευές. Τα μειονεκτήματά τους είναι η ανύψωση του εδάφους κατά την έμπηξη, ότι δε μεταβάλλεται εύκολα το μήκος τους, ότι μπορούν να καταστραφούν κατά την έμπηξη και ότι είναι δύσκολη η έμπηξη για μεγάλη διατομή. Τα πλεονεκτήματα των εμπηγνύομενων επί τόπου εγχυόμενων πασσάλων είναι ότι μπορούν να εμπηχθούν σε προκαθορισμένο βάθος, το μήκος τους μπορεί να καθορισθεί κατά την έμπηξη, στην περίπτωση στάθμης υπόγειων υδάτων κατασκευάζονται με κλειστό σωλήνα. Τα μειονεκτήματά τους είναι η ανύψωση της παρακείμενης εδαφικής επιφάνειας, η πιθανή ανύψωση γειτονικών πασσάλων, ο έλεγχος της ακεραιότητας των πασσάλων, η προσοχή που χρειάζεται κατά την εξόλκευση του σωλήνα επενδύσεως. Τα πλεονεκτήματα των πασσάλων χωρίς εκτόπιση είναι ότι δεν προκαλούν ανύψωση του περιβάλλοντος εδάφους, το μήκος τους μπορεί να καθορισθεί κατά την κατασκευή τους, επιτυγχάνονται μεγάλα μήκη-μεγάλη διάμετρος, η πολύ μικρή επίδραση στις υπάρχουσες κατασκευές. Τα μειονεκτήματα είναι ότι η διαδικασία διατήσεως μπορεί να χαλαρώσει τα κοκκώδη εδάφη, δυσκολίες κατά τη σκυροδέτηση του πασσάλου κάτω από το νερό, καθώς και η επίτευξη της προδιαγεγραμμένης ποιότητας σκυροδέματος.

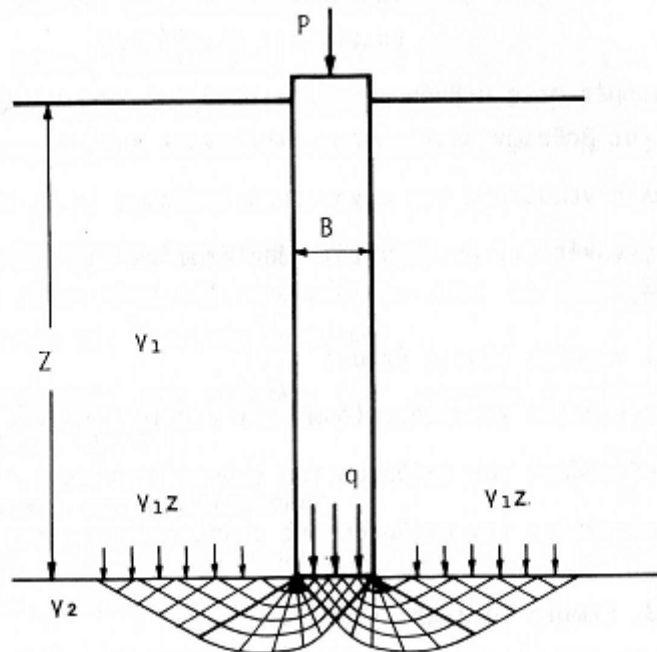
Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή του τύπου πασσάλου σε ένα έργο είναι: α) Η θέση και ο τύπος της ανωδομής, β) Οι συνθήκες υπεδάφους καθώς και η στάθμη των υπόγειων υδάτων, γ) οι ειδικές επιτόπου συνθήκες (π.χ. άλατα και οξείδια που μπορεί να προσβάλλουν τους πασσάλους, δ) η διάρκεια ζωής του έργου και ε) οι δυνατότητες και το κόστος κατασκευής. Οι πιο διαδεδομένες

μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου (φορτίου θραύσης) πασσάλου είναι: α. Μέθοδοι βασιζόμενες σε μετρηθείσες ιδιότητες του εδάφους και τη βοήθεια στατικών τύπων φέρουσας ικανότητας, β. Εμπειρικές μέθοδοι βασιζόμενες σε αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών, γ. Μέθοδοι που βασίζονται σε παρατηρήσεις κατά τη διείσδυση με κρούση των πασσάλων (δυναμικοί τύποι), δ. Μέθοδοι που βασίζονται στην εξίσωση της μετάδοσης κύματος κατά την κρούση για την έμπηξη πασσάλου, ε. Μέθοδοι με τις οποίες αξιολογούνται δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων.

Για τις μεθόδους βασιζόμενες σε στατικούς τύπους οι γενικές αρχές υπολογισμού θεωρούν ότι ο πάσσαλος είναι απειρομήκης με πλάτος  $B$  (διδιάστατο πεδίο τάσεων, πρόβλημα επιπέδου παραμόρφωσης), έδαφος πλήρως πλαστικό που υπακούει στο κριτήριο Mohr-Coulomb, επιλέγεται μηχανισμός θραύσης, η διατμητική αντοχή ενεργοποιείται πλήρως κατά τη στιγμή της οριακής ισορροπίας, γίνεται διόρθωση των αποτελεσμάτων με συντελεστές μορφής. Επομένως οι γνωστές λύσεις έχουν προσεγγιστικό χαρακτήρα, δεν εξετάζουν την επίδραση του ρυθμού φόρτισης και δεν εξετάζουν την επίδραση της συμπίεστος του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα προτείνονται οι εξής λύσεις:

- Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου κυκλικής διατομής ανά μονάδα επιφάνειας δίδεται κατά Terzaghi από τη σχέση:  $q_u = 1.3cN_c + \gamma_1 z N_q + 0.3\gamma_2 B N_\gamma$  (8.1)

Όπου οι συντελεστές  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  εξαρτώνται από τη γωνία τριβής του πασσάλου



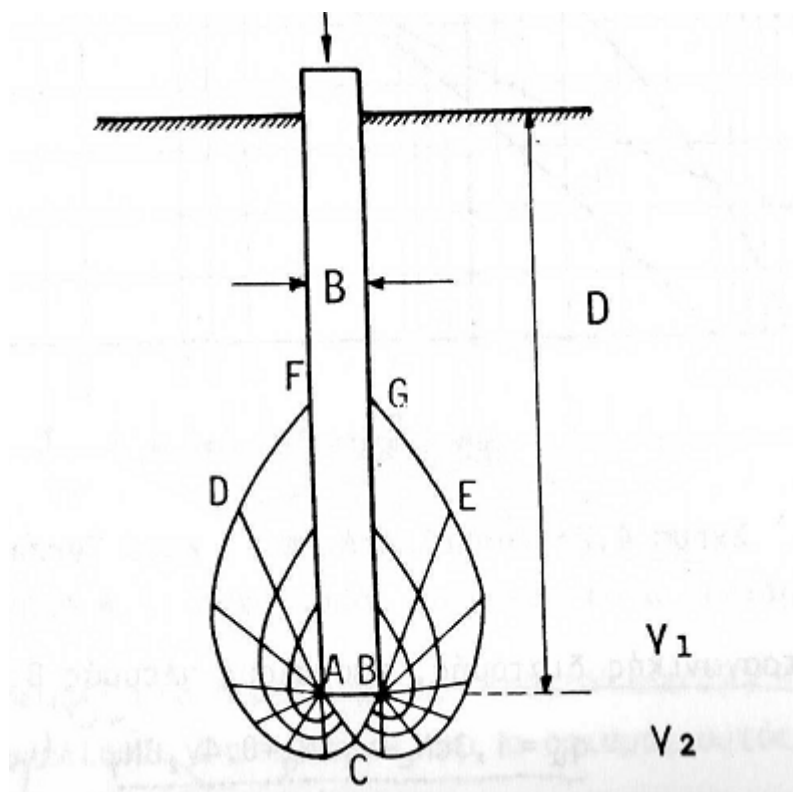
Σχήμα 8 – Φ.Ι. κατά Terzaghi

- Η αντοχή αιχμής του πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας δίδεται από τη σχέση (Meyerhof 1951):

$$Q_u = cN_c + k_s \gamma_1 D N_q + \gamma_2 B N_{\gamma} / 2 \quad (8.2)$$

Όπου:  $k_s$  = συντελεστής ωθήσεως των γαιών επί της παραπλεύρου επιφάνειας του πασσάλου

$N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_{\gamma}$  = συντελεστές Φ.Ι. εξαρτώμενοι από τη γωνία τριβής  $\phi$  και από το λόγο πασσάλου  $D/B$ , καθώς και από τη μεθοδολογία κατασκευής του πασσάλου.



Σχήμα 9 – Φ.Ι. κατά Meyerhof

Η αντοχή του πασσάλου λόγω πλευρικών τριβών σε συνεκτικά εδάφη αναλύεται με αναφορά σε ολικές και ενεργές τάσεις. Η ανάλυση με αναφορά σε ολικές τάσεις έχει εφαρμογή για την περίπτωση βραχυχρόνιας φόρτισης πασσάλων εντός κορεσμένου αργιλικού εδάφους και βασίζεται στη σχέση:

$$f_s = \alpha C_u \quad (8.3), \quad \text{όπου:}$$

$f_s$ : οριακή τριβή πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας

$\alpha$  = συντελεστής συνάφειας μεταξύ πασσάλου και εδάφους ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο του περιβάλλοντος εδάφους, το υλικό και τον τρόπο κατασκευής του πασσάλου

$C_u$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους

Η ανάλυση με αναφορά σε ενεργές τάσεις δίδεται από τη σχέση:

$$f'_s = \sigma'_h s \tan \delta' \quad (8.4), \quad \text{όπου:}$$

$\delta'$  = ενεργός γωνία τριβής της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου

$\sigma'_h$  = ενεργός οριζόντια τάση κατά τη θραύση

Για μη συνεκτικά εδάφη η ανά μονάδα επιφάνειας αντοχή λόγω πλευρικών τριβών δίνεται από τη σχέση:

$$F_s = K \sigma' \nu \tan \delta' \quad (8.5), \text{ όπου:}$$

$K$ =συντελεστής ωθήσεως επί του πασσάλου

$\delta'$ =γωνία τριβής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους

$\sigma' \nu$ =ενεργός κατακόρυφη τάση

Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης γίνεται αφού ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ασφαλείας ο οποίος επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τη φύση του υπεδάφους, τις τυχόν μεταβολές του καθώς και την αξιοπιστία της μεθόδου με την οποία προσδιορίστηκε η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το επιτρεπόμενο φορτίο θραύσης για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε άργιλο είναι (Tomlinson, 1986) η μικρότερη τιμή μεταξύ:

$$P_{ua} = (Q_b + Q_s)/2.5 \text{ και } P_{ua} = (Q_b/3) + (Q_s/1.5) \quad (8.6)$$

Αντίστοιχοι τύποι υπάρχουν και για τις μεθόδους που βασίζονται σε αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών. Για παράδειγμα η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων βάσει αποτελεσμάτων πενετρομετρήσεων CPT είναι:

$$P_u = Q_b + Q_s = (1/\lambda) q_{cb} A_b + (1/\mu) q_c A_s \quad (8.7), \text{ όπου:}$$

$q_b$ : αντοχή αιχμής του πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας

$1/\lambda$ : μειωτικός συντελεστής για την αντίσταση αιχμής

$q_{cb}$ : μέση αντίσταση αιχμής κώνου στην επριοχή της αιχμής του πασσάλου

$A_b$ : εμβαδόν διατομής της βάσης του πασσάλου

$1/\mu$ : μειωτικός συντελεστής για την αντίσταση πλευρικής τριβής

$q_c$ : μέση αντίσταση αιχμής κώνου κατά το ύψος του πασσάλου

$A_s$ : παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας βάσει δυναμικών τύπων ο πάσσαλος κατά την έμπηξη θεωρείται στερεό σώμα, η στατική και δυναμική αντίσταση του πασσάλου θεωρούνται ίσες και η στατική φέρουσα ικανότητα θεωρείται ανεξάρτητη του χρόνου. Μια από τις πιο διαδεδομένες σχέσεις είναι ο τύπος του Hiley:

$$R = k W h \ln / (s + c/2) \quad (8.8), \text{ όπου}$$

$W$ =το βάρος της σφύρας

$h$ =το ύψος πτώσεως της σφύρας

$s$ =διείσδυση/κτύπο στην τελική φάση διείσδυσης

$n$ =η αποδοτικότητα της σφύρας κατά την κρούση

$c$ =η συνολική ελαστική παραμόρφωση του συστήματος πάσσαλος-έδαφος

$k$ =συντελεστής εξαρτώμενος από τον τύπο της σφύρας

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλου με εξίσωση μετάδοσης κύματος (θλιπτικού κύματος μεταδιδόμενου από την κεφαλή στη βάση του πασσάλου μέσω του κριού, δηλαδή του βάρους που σπρώχνει τον πάσσαλο προς το έδαφος) θεωρούμε ότι ο πάσσαλος είναι γραμμικό στοιχείο και ότι η απόκριση του πασσάλου είναι γραμμικά ελαστική.

Όσον αφορά στις προκύπτουσες καθιζήσεις, η καθίζηση στην κορυφή αξονικά φορτιζόμενου ασυμπίεστου πασσάλου με φορτίο  $P$  δίνεται από τη σχέση:

$$P=PI/Ed, \text{ όπου}$$

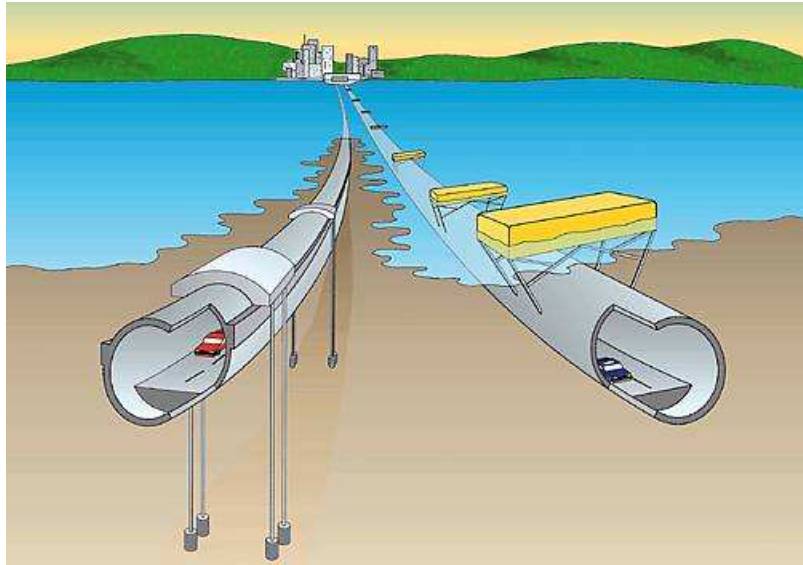
$d$ =διάμετρος πασσάλου

$I$ =εμπειρικός συντελεστής

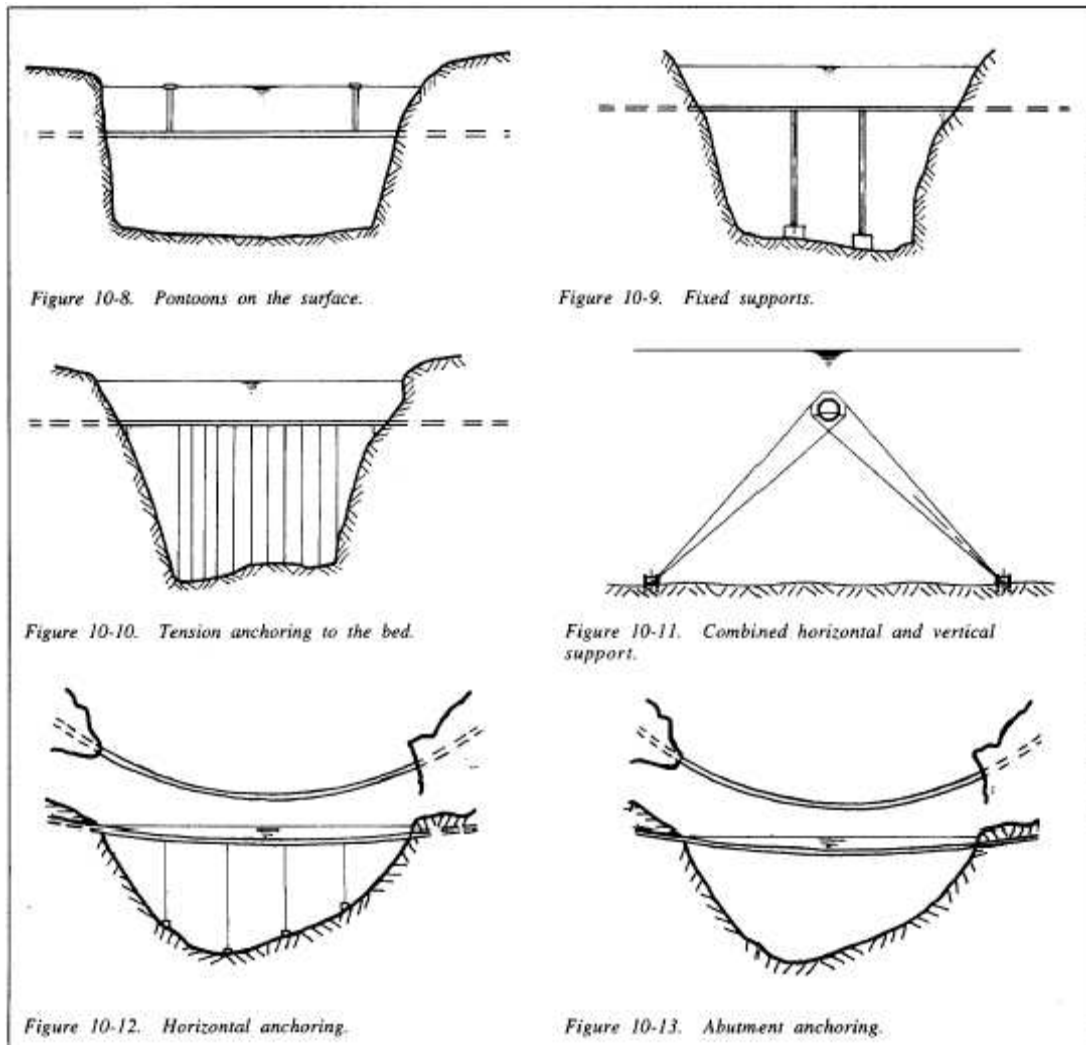
Για ομάδα πασσάλων παίζει ρόλο και η γεωμετρική τους διάταξη η οποία είναι καθοριστική για την κατανομή των φορτίων και τον υπολογισμό καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας.

## 9. ΠΛΩΤΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Είναι σήραγγες που βρίσκονται μέσα στο υδάτινο σώμα μεταξύ του βυθού και της επιφάνειας του νερού. Βρίσκονται υπό άνωση. Αν η απόσταση που συνδέουν είναι μικρή, τότε μπορούν να στηρίζονται μόνο στα δύο άκρα σαν μια υποβρύχια γέφυρα. Πρέπει να αντέχουν σε δυναμικά φορτία όπως αυτά του σεισμού, των κυμάτων, της παλίρροιας, των ρευμάτων και των προσκρούσεων με πλοία ή μεγάλα θηλαστικά. Συμβάλλουν στην αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας θαλάσσιων διαδρομών και στην προστασία της αισθητικής του τοπίου και του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Μέχρι σήμερα δεν έχει κατασκευαστεί καμιά πλωτή σήραγγα, όμως οι μηχανικοί έχουν προτείνει συγκεκριμένες τεχνικές λύσεις σε πιθανές μελλοντικές κατασκευές. Αυτές είναι: α) η ανάρτηση της σήραγγας με καλώδια από σειρά από πλωτές πλατφόρμες που συγκρατούν την κατασκευή από το να πέσει στο βυθό, β) η συγκράτηση της κατασκευής από καλώδια που συνδέονται με το βυθό όταν η άνωση είναι σε θέση να ανεβάσει επικίνδυνα τη σήραγγα προς την επιφάνεια του νερού, γ) η στήριξη της σήραγγας από πυλώνες που βρίσκονται μέσα στο νερό με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας υποθαλάσσιας γέφυρας-σήραγγας, δ) η στήριξη της σήραγγας μόνο στα άκρα κατάλληλη μόνο για μικρά ανοίγματα.



Εικ.19 – Σκίτσο πλωτής σήραγγας



Εικ. 20 – Τρόποι στήριξης πλωτών σηράγγων



Τα φορτία που καλούνται να αναλάβουν οι πλωτές σήραγγες είναι:

1. Μόνιμα φορτία: ίδιο βάρος, υδροστατική πίεση, άνωση.
2. Λειτουργικά φορτία: από κυκλοφορία οχημάτων, από φορτίσεις κατά την κατασκευή
3. Παραμορφωτικά φορτία που προκαλούν γεωμετρικές αλλαγές: διαφορικές καθιζήσεις, μεταβολές θερμοκρασίας.
4. Περιβαλλοντικά φορτία: κύματα, ρεύματα, παλίρροιες, πάγος, αλλαγές στην πυκνότητα του νερού.
5. Τυχηματικά φορτία: έκρηξη, φωτιά, απώλεια άνωσης, αστοχία στο σύστημα στήριξης, σύγκρουση με πλοίο, πτώση αντικειμένων.



**Εικ. 21 – Βασικοί τύποι πλωτής σήραγγας**





**Εικ. 22 – Μοντέρνος τύπος πλωτής σήραγγας**

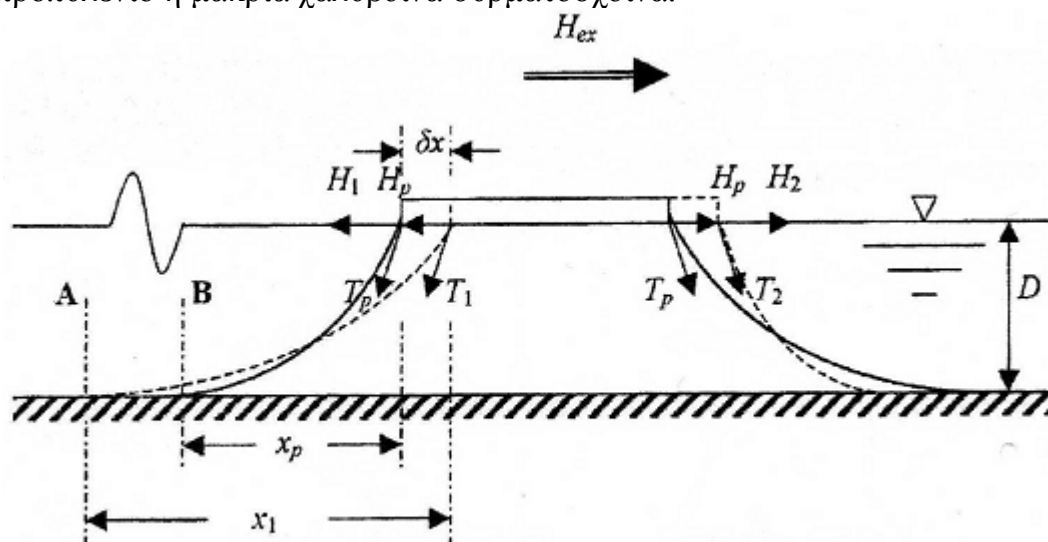
## **9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ**

Το πιο σημαντικό ίσως κομμάτι μιας πλωτής σήραγγας είναι το σύστημα αγκύρωσής της το οποίο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε με την αγκύρωση της σήραγγας με καλώδια στο βυθό για να μην ανέλθει στην επιφάνεια από τη δύναμη της άντωσης, είτε με την σύνδεσή της με πλωτήρες που βρίσκονται στην επιφάνεια του νερού και συμβάλλουν στη συγκράτηση της σήραγγας από το να βυθιστεί. Τελευταία μέθοδος είναι η συμβατική θεμελίωση της σήραγγας όταν πρόκειται για σήραγγα με υποστύλωση δηλαδή για μια βυθισμένη ουσιαστικά κλειστή γέφυρα. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι δεν έχει κατασκευαστεί ποτέ πλωτή σήραγγα οπότε δεν υπάρχει γνώση από εμπειρία και τυχόν προβλήματα που θα είχαν δημιουργηθεί κατά την κατασκευή.

Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στην αγκυρωμένη κατασκευή εξαιτίας της δράσης των κυματισμών, του ανέμου και των ρευμάτων προκαλούν μετατόπιση της κατασκευής από τη θέση ισορροπίας της. Ο σκοπός του συστήματος αγκύρωσης είναι ο περιορισμός αυτής της μετατόπισης και η συγκράτηση της κατασκευής όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην απαιτούμενη θέση χωρίς την εφαρμογή πολύ μεγάλων δυνάμεων συγκράτησης στις γραμμές αγκύρωσης. Η δημιουργία μεγάλων δυνάμεων συγκράτησης μπορεί να αποφευχθεί με την κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος αγκύρωσης, ώστε να παρέχει επαρκή ελαστικότητα στην αγκυρωμένη κατασκευή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των δυνάμεων επαναφοράς οι οποίες εφαρμόζονται στην

αγκυρωμένη κατασκευή όταν η τελευταία μετακινηθεί από τη θέση ισορροπίας λόγω των εξωτερικών περιβαλλοντικών φορτίσεων. Οι εξωτερικές δυνάμεις και οι κινήσεις του σκάφους απαρτίζονται από στατικές συνιστώσες μεγάλου πλάτους και υψηλόσυχνες συνιστώσες λόγω της δράσης των κυματισμών. Αυτές οι δυνάμεις και οι κινήσεις επηρεάζουν τη στατική και δυναμική συμπεριφορά του συστήματος αγκύρωσης. Στην πραγματικότητα η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος αγκύρωσης επηρεάζεται από τρεις τύπους διέγερσης (χαμηλόσυχνες κινήσεις λόγω κυματισμών και ανεμοπιέσεων, υψηλόσυχνες διεγέρσεις λόγω κυματισμών και ταλαντώσεις λόγω στροβιλότητας του πεδίου ροής).

Ο κύριος σκοπός τω συστημάτων αγκύρωσης είναι η δημιουργία μιας ελαστικής σύνδεσης με τον πυθμένα. Η ευκαμψία ή ακαμψία ενός συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: (α) με τη βαρύτητα: αλυσοειδής (δηλαδή η μορφή που παίρνει μια γραμμή αγκύρωσης στο νερό υπό την επίδραση του βάρους της μόνο) και τα προσδεδεμένα βάρη, (β) με την άντωση: συστήματα αγκύρωσης ενός κλάδου και πλατφόρμες στο σημείο πρόσδεσης, (γ) με την ελαστικότητα των υλικών: γραμμές από νάilon ή προπυλένιο ή μακριά χαλύβδινα συρματόσχοινα.



**Σχήμα 10 – Σύστημα αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων**

Όταν έχουμε δύο γραμμές αγκύρωσης και οι δυνάμεις μεταβάλλονται με το χρόνο, το σύστημα αγκύρωσης εμποδίζει τις μεγάλες μετακινήσεις αφού λειτουργεί σαν ισοδύναμο ελατήριο που παραλαμβάνει δυνάμεις και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι μετακινήσεις αυτές δεν πρέπει να ξεπερνούν μια δεδομένη τιμή που τίθεται για λειτουργικούς λόγους και η οποία λαμβάνεται ως ένα ποσοστό του βάθους του νερού. Ο περιορισμός των μετακινήσεων επιτυγχάνεται με την προένταση, δηλαδή φροντίζοντας να επιβάλλουμε αρκετή τάση στα δύο σχοινιά ακόμη και με μηδενικό εξωτερικό φορτίο, ώστε η ισοδύναμη σταθερά επαναφοράς να είναι αρκετά υψηλή. Το σχήμα 10 δείχνει

σχηματικά τη στατική συμπεριφορά ενός συστήματος αγκύρωσης δύο κλάδων υπό την επίδραση μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης  $H_{ex}$ .

Για ένα σύστημα αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων η στατική ανάλυση δίδει την εξής σχέση για την οριζόντια μετατόπιση  $\delta x$  (Μαυράκος 2007):

$$\delta x = D \left\{ \sqrt{1 + 2 \frac{H_p}{wD}} - \sqrt{1 + 2 \frac{H_1}{wD}} \right\} + \frac{H_1}{w} \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{wD}{H_1} \right) - \frac{H_p}{w} \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{wD}{H_p} \right) \quad (9.1)$$

Όπου:  $H_1$ : οριζόντια δύναμη στην κορυφή (κλάδος 1)

$H_2$ : οριζόντια δύναμη στην κορυφή (κλάδος 2)

$H_p$ : οριζόντια δύναμη προέντασης

$w$ : βάρος ανά μονάδα μήκους

$D$ : βάθος νερού

## 9.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η πιο απλή περίπτωση κυματισμού είναι ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) για τον οποίο η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και το δυναμικό του πεδίου ροής δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις, εφόσον συμπίπτει η διεύθυνση προχώρησης του κυματισμού με τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα των  $x$ :

$$\zeta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (9.2)$$

$$\phi(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cos[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (9.3)$$

Όπου:

$k$ =ο αριθμός κύματος που ισούται με  $k=2\pi/\lambda$

$\lambda$ =το μήκος κύματος

$\omega$ =η κυκλική συχνότητα του κύματος

$d$ =το βάθος του νερού

Η γραμμική θεωρία κυματισμών έχει σαν βασική υπόθεση τον απειροστό λόγο ύψους προς μήκος κύματος ( $H/\lambda$ ) για όλα τα βάθη του νερού ( $d/\lambda$ ). Πρακτικά θεωρείται ότι δίνει καλά αποτελέσματα για  $H/\lambda < 1/50$ .

Μία κατασκευή που εκτίθεται στην επίδραση θαλάσσιων κυματισμών υπόκειται σε δυνάμεις που προκαλούνται από διάφορους μηχανισμούς. Οι κύριοι τύποι είναι οι ακόλουθοι (Μαυράκος 1997):

α. Δυνάμεις Froude-Kryloff: Ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Η βασική παραδοχή για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία του σώματος δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής, το σώμα δηλαδή είναι σαν να μην υπάρχει.

β. Δυνάμεις περίθλασης (diffraction): Εάν λάβουμε υπόψη την παρουσία του σώματος και την παραμόρφωση που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής, θεωρήσουμε όμως το σώμα ακίνητο, τότε θα πρέπει στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού να προστεθεί και ένα επιπλέον δυναμικό που οφείλεται ακριβώς στην παραμόρφωση και ονομάζεται δυναμικό περίθλασης. Οι δυνάμεις που βρίσκονται συνυπολογίζοντας τα δύο δυναμικά ονομάζονται δυνάμεις περίθλασης. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας η υπέρθεση σημαίνει άθροιση των δύο δυναμικών.

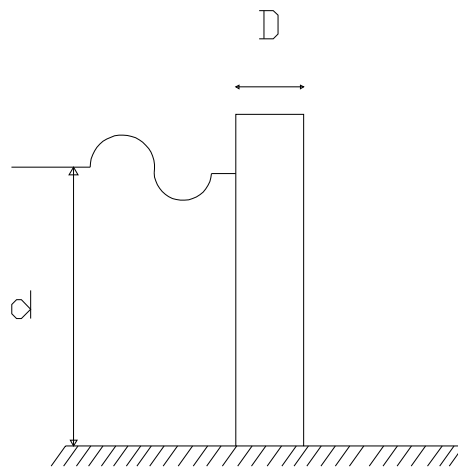
γ. Δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation): Εάν επιπλέον θεωρήσουμε την κατασκευή κινούμενη, τότε δημιουργούνται κυματισμοί και κατ' επέκταση ένα δυναμικό ροής που με τη σειρά της επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στα δύο προηγούμενα δυναμικά.

δ. Δυνάμεις αντίστασης: Οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας.

- Οι δυνάμεις ακτινοβολίας και οι δυνάμεις Froude-Kryloff αναφέρονται ως αδρανειακές δυνάμεις ρευστού (fluid inertia forces).

- Στην υδροδυναμική ανάλυση η κατασκευή θεωρείται ως άκαμπτο σώμα. Η ποικιλία στις γεωμετρικές μορφές, τις διαστάσεις και τις συνθήκες κάθε περιοχής δεν επιτρέπουν ενιαία μεθοδολογική προσέγγιση για την υδροδυναμική ανάλυση.

- Η συμπεριφορά της κατασκευής θεωρείται γραμμική για την πιο απλή περίπτωση των υπολογισμών. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις δεν μπορούν να παραληφθούν μη γραμμικά φαινόμενα όπως δυνάμεις αντίστασης, μη γραμμικός συνδυασμός συνιστωσών της κίνησης, δυνάμεις κυματισμού ανώτερης τάξης, μη γραμμικές δυνάμεις επαναφοράς κ.ά.



**Σχήμα 11 – Κύμα προσπίπτον σε κύλινδρο**

Η δύναμη ανά μονάδα μήκους του κυλινδρικού στοιχείου είναι άθροισμα των αδραειακών δυνάμεων και των δυνάμεων αντίστασης και δίδεται από την ακόλουθη σχέση (τύπος του Morison):

$$\frac{dF_x}{dz} = C_M \rho \frac{\pi d^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{\rho}{2} D |u| u \quad (9.4)$$

$D$ =η διάμετρος του κυλίνδρου

$\frac{du}{dt}$ =η τοπική επιτάχυνση του σωματιδίου του ρευστού στον κεντρικό άξονα

του κυλίνδρου

$C_M$ =συντελεστής αδραειάς

$C_D$ =συντελεστής αντίστασης

$u$ =στιγμιαία ταχύτητα του σωματιδίου ρευστού

- Οι συντελεστές  $C_M$  και  $C_D$  προσδιορίζονται πειραματικά

- Ο τύπος εφαρμόζεται μόνο:

α. Όταν η δύναμη αντίστασης είναι σημαντική

β. Για λεπτά υδροδυναμικά σώματα

γ. Για κυλινδρικά σώματα

## ΜΕΡΟΣ Β΄

### 10. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί η μελέτη σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον με τη βοήθεια εξειδικευμένου λογισμικού – Examine2D της Rocscience – το οποίο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων αναλύει στατικά σήραγγες μέσα σε βράχο ή έδαφος. Η περίπτωση πλωτών σηράγγων δε μελετάται, καθώς αφενός ξεφεύγει από τις δυνατότητες του προγράμματος και αφετέρου μεγαλύτερη σημασία έχει η μελέτη της θεμελίωσης των άκρων της σήραγγας και τυχόν πλωτήρων ή αγκυρώσεων παρά της ίδιας της σήραγγας τουλάχιστον από την άποψη της γεωμηχανικής.

Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων βασίζεται στη διαμέριση του συνόρου μιας επιφάνειας σε επιμέρους τμήματα. Στόχος είναι η επίλυση του φυσικού προβλήματος με την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων στα σημεικόμβους του συνόρου. Είναι διαφορετική τεχνική από αυτή των πεπερασμένων στοιχείων που απαιτεί τη διαμέριση της επιφάνειας και όχι του συνόρου. Όπως είναι φυσικό η μέθοδος συνοριακών στοιχείων οδηγεί σε μικρότερο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων συγκριτικά με τα πεπερασμένα στοιχεία (Crouch & Starfield, 1983). Η βασική διάκριση στην τεχνική των συνοριακών στοιχείων είναι σε άμεση και έμμεση μέθοδο. Γενικά σε οποιοδήποτε συνοριακό πρόβλημα, κάποιες από τις συνοριακές παραμέτρους δίδονται ως περιορισμοί, ενώ οι υπόλοιπες προέρχονται από τη συνολική λύση του προβλήματος. Στην έμμεση μέθοδο βρίσκουμε πρώτα τις λύσεις που ικανοποιούν τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες και έπειτα υπολογίζουμε τις υπόλοιπες συνοριακές παραμέτρους σε σχέση με τις υπολογιζόμενες λύσεις. Στην άμεση μέθοδο, χρησιμοποιούνται ορισμένα θεμελιώδη θεωρήματα και υπολογίζουμε άμεσα τις άγνωστες συνοριακές παραμέτρους από αλγεβρικές εξισώσεις που συσχετίζονται με τις άγνωστες συνοριακές παραμέτρους. Το Examine2D εφαρμόζει την έμμεση μέθοδο συνοριακών στοιχείων.

Ο σκοπός των παρατιθέμενων παραδειγμάτων είναι η μελέτη των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων στο χώρο που περικλείει η σήραγγα με έμφαση στη διατομή της σήραγγας και στην επιφάνεια του εδάφους. Η προσομοίωση υποθαλάσσιων σηράγγων γίνεται με άσκηση πίεσης στο εδαφικό σύνορο ίσης με την πίεση του υπερκείμενου υδάτινου στρώματος. Για πεδίο σταθερών κυρίων τάσεων ασκείται επιπλέον και πίεση ίση με αυτή του υπερκείμενου εδαφικού στρώματος. Συγκεκριμένα, έχουν επιλεγεί τα εξής παραδείγματα:

1. Σήραγγα σε ασβεστολιθικό στρώμα με πίεση στην άνω επιφάνεια του στρώματος ίση με την πίεση 50μ. νερού και 20μ. υπερκείμενου εδαφικού στρώματος (σταθερό πεδίο τάσεων).

2. Σήραγγα σε ασβεστολιθικό στρώμα με πίεση στην άνω επιφάνεια του στρώματος ίση με την πίεση 100μ. νερού και 20μ. υπερκείμενου εδαφικού στρώματος (σταθερό πεδίο τάσεων).
3. Σήραγγα σε ασβεστολιθικό στρώμα σε 39.231μ. βάθος ισοδύναμο με πίεση 1.02MPa στην άνω επιφάνεια του γεωλογικού στρώματος (μεταβαλλόμενες με το βάθος - βαρυτικές - τάσεις).
4. Σήραγγα σε ασβεστολιθικό στρώμα σε 58.462μ. βάθος ισοδύναμο με πίεση 1.52MPa στην άνω επιφάνεια του γεωλογικού στρώματος (μεταβαλλόμενες με το βάθος - βαρυτικές - τάσεις).
5. Σήραγγα σε ιζηματογενές στρώμα από γύψο με πίεση στην άνω επιφάνεια του στρώματος ίση με την πίεση 50μ. νερού και 20μ. υπερκείμενου εδαφικού στρώματος (σταθερό πεδίο τάσεων).
6. Σήραγγα σε σχιστόλιθο με πίεση στην άνω επιφάνεια του στρώματος ίση με την πίεση 50μ. νερού και 20μ. υπερκείμενου εδαφικού στρώματος (σταθερό πεδίο τάσεων).
7. Σήραγγα σε γενέσιο με πίεση στην άνω επιφάνεια του στρώματος ίση με την πίεση 50μ. νερού και 20μ. υπερκείμενου εδαφικού στρώματος (σταθερό πεδίο τάσεων).

Η επίλυση της ανάλυσης των σηράγγων γίνεται με το κριτήριο Mohr-Coulomb. Οι γεωτεχνικές παράμετροι ( $\phi$ ,  $c$  κλπ.) προκύπτουν από το λογισμικό RocLab της Rocscience με κατάλληλη προσαρμογή του διαγράμματος Mohr-Coulomb. Παρακάτω παρατίθενται οι παραδοχές και εποπτικά οι αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις για τις αναφερθείσες περιπτώσεις.

## 10.1 ΣΗΡΑΓΓΑ 1

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 1:

**Βάθος  $d=20m$  (απόσταση κέντρου σήραγγας από επιφάνεια)**

**Ακτίνα  $r=5m$**

**Σταθερό τασικό πεδίο**

**Από πρόγραμμα RocLab:**

**Πέτρωμα: Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (με  $GSI=70$ )**

**Μέτρο ελαστικότητας  $E=27480.53MPa$**

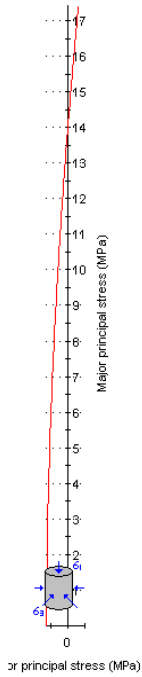
**Λόγος του Poisson:  $\nu=0.25$**

**Συνοχή:  $c=1.771MPa$**

**Γωνία τριβής:  $\phi=61.33^\circ$**

**Εφελκυστική αντοχή =  $0.651MPa$**

Analysis of Rock Strength using RocLab



**Hoek-Brown Classification**

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 75 MPa  
 GSI = 70  $m_i = 12$  Disturbance factor (D) = 0  
 intact modulus (Ei) = 10000 MPa

**Hoek-Brown Criterion**

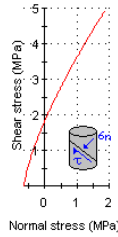
$m_b = 4.110$   $s = 0.0357$   $a = 0.501$

**Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 1.771 MPa friction angle = 61.33 deg

**Rock Mass Parameters**

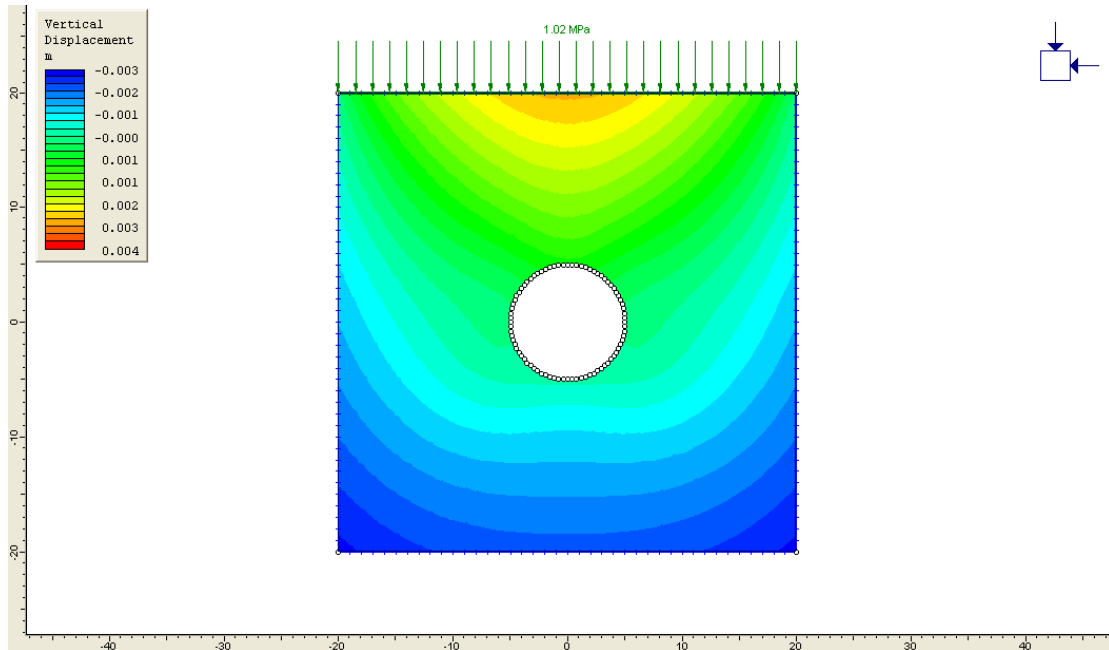
tensile strength = -0.651 MPa  
 uniaxial compressive strength = 14.102 MPa  
 global strength = 22.617 MPa  
 deformation modulus = 7328.14 MPa



Εικ.23 - Αποτελέσματα προγράμματος RocLab

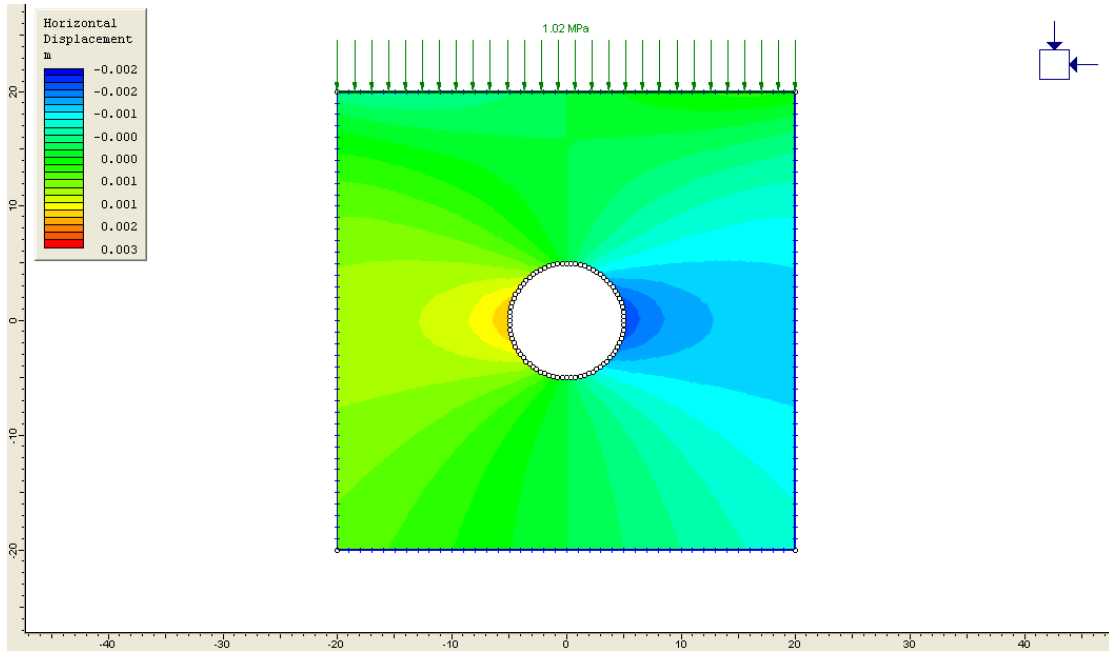
10.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ι

(I) ΣΗΡΑΓΓΑ 1 ΜΕ ΕΛΑΦΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 500kPa (ισοδύναμη με 50m νερού) + 520kPa (πίεση υπερκείμενου εδαφικού στρώματος πάχους 20m)

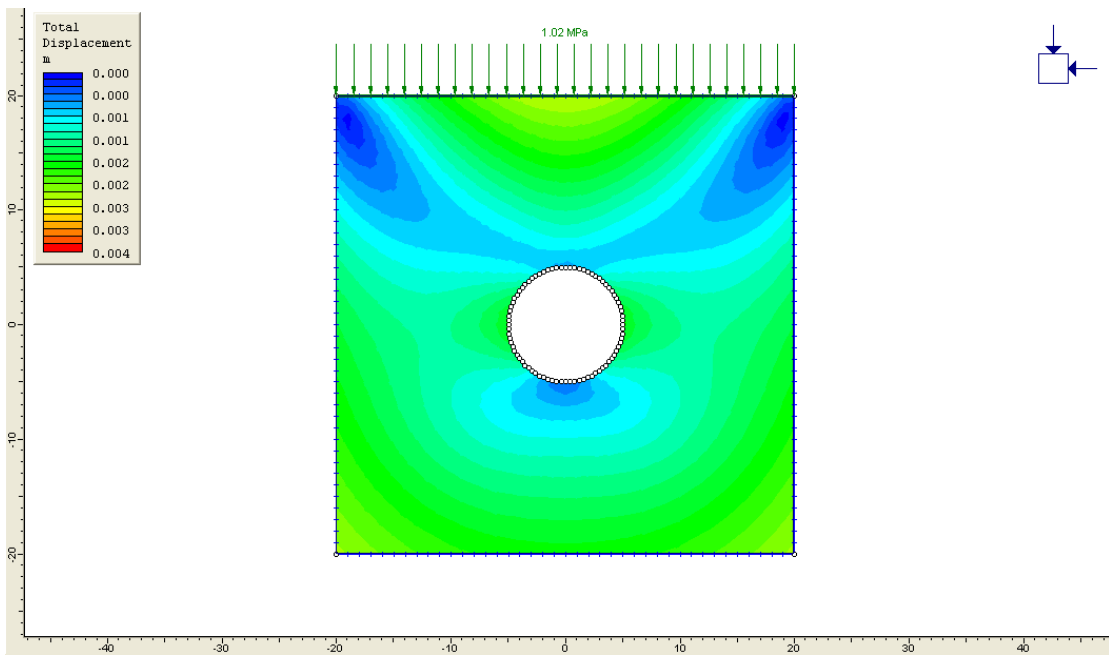


Εικ.24 - Κατακόρυφη μετακίνηση

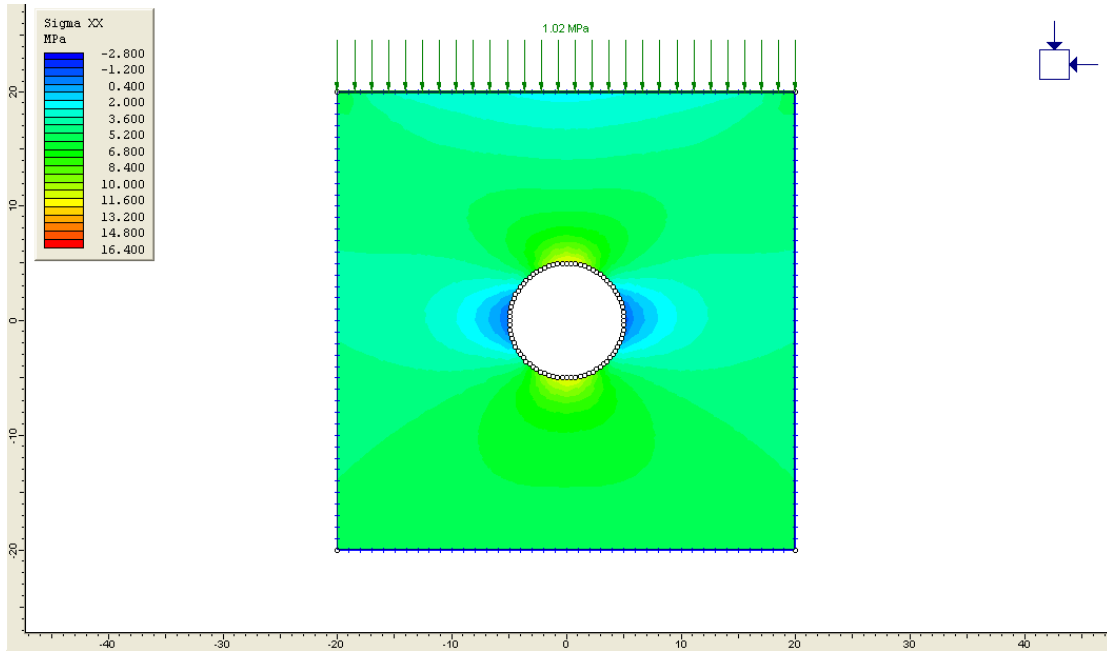




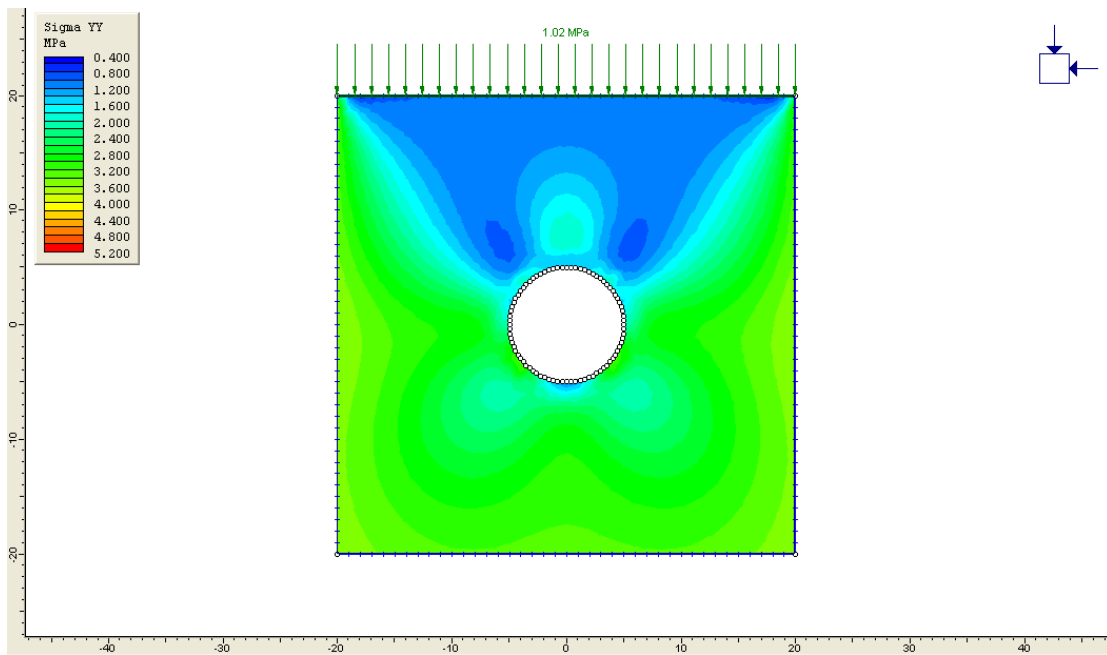
**Εικ.25 - Οριζόντια μετακίνηση**



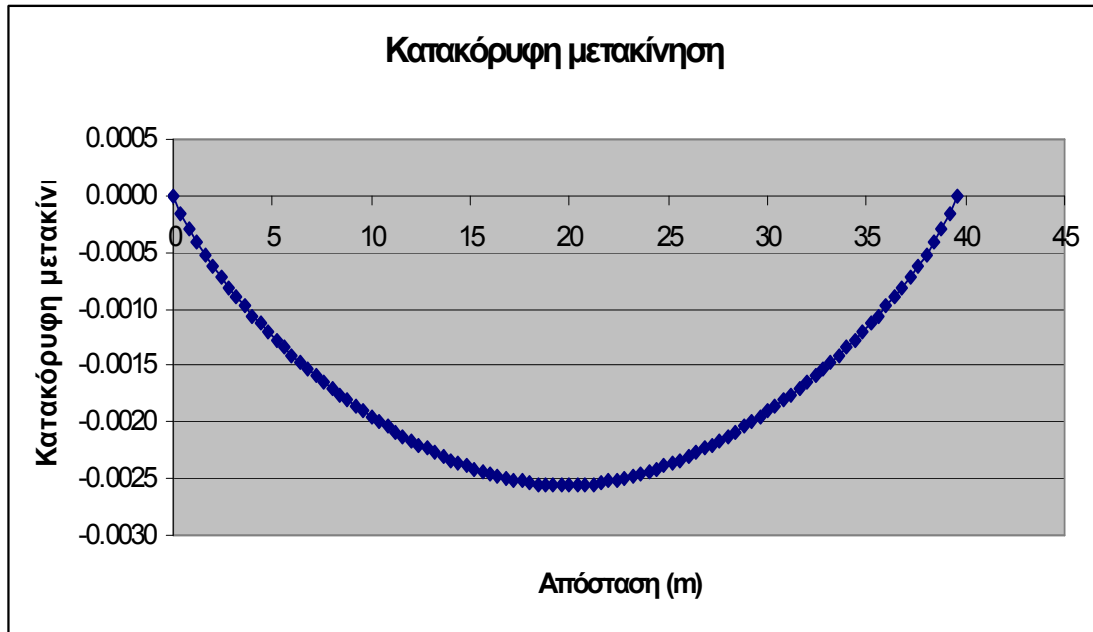
**Εικ.26 - Συνολική μετακίνηση**



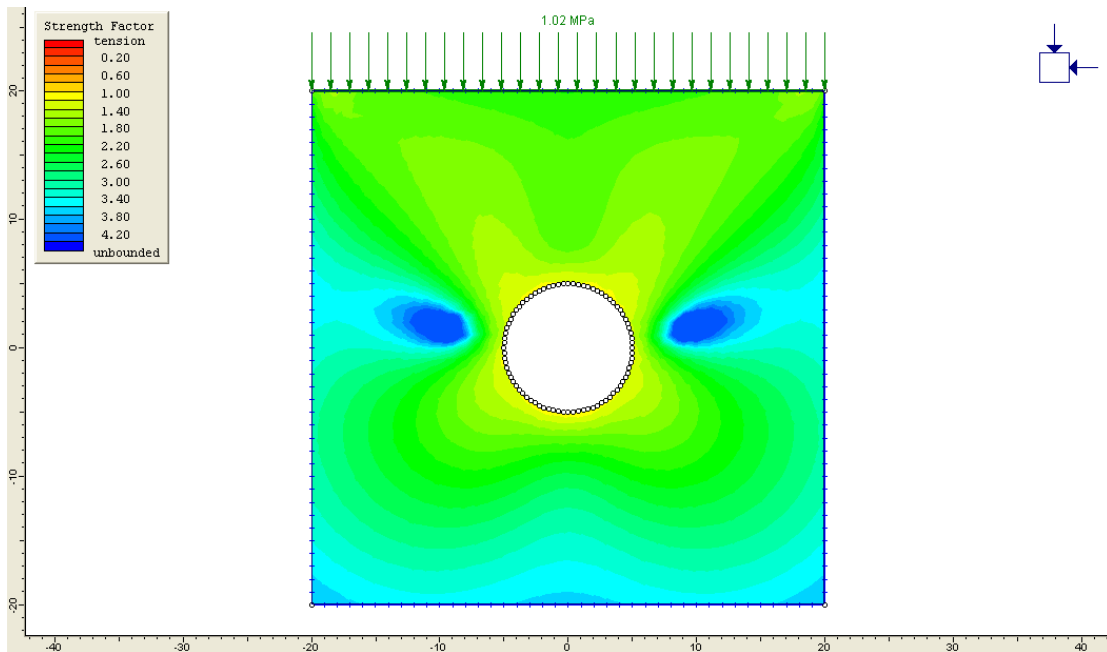
Εικ.27 - Τάση  $\sigma_{xx}$



Εικ.28 - Τάση  $\sigma_{yy}$



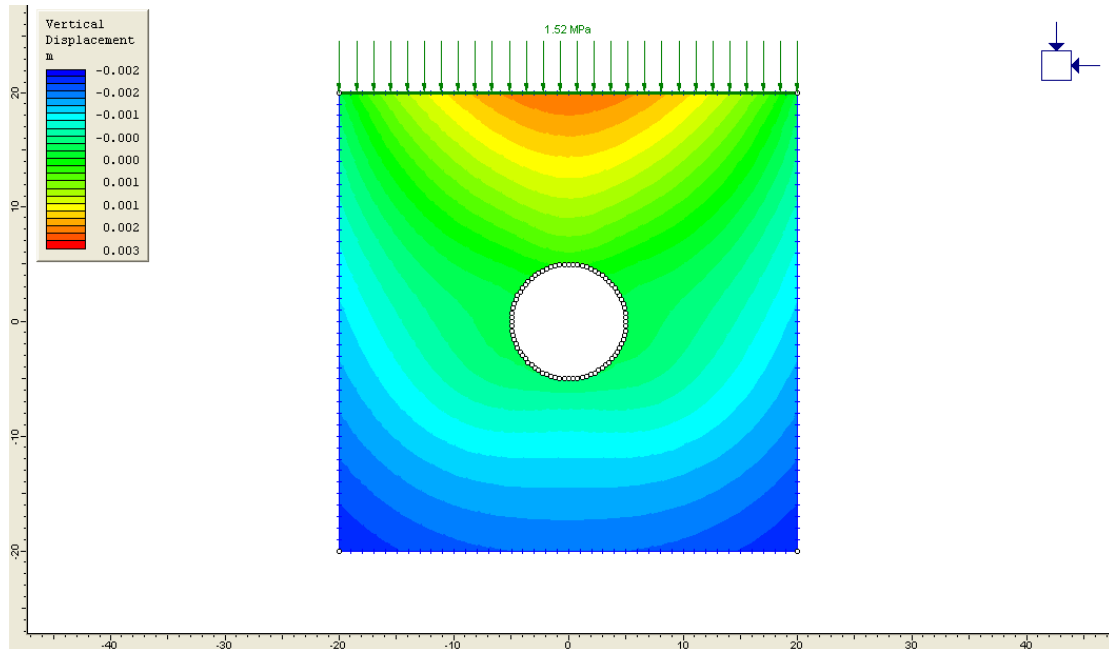
**Εικ.29 - Διάγραμμα επιφανειακής κατακόρυφης μετακίνησης**



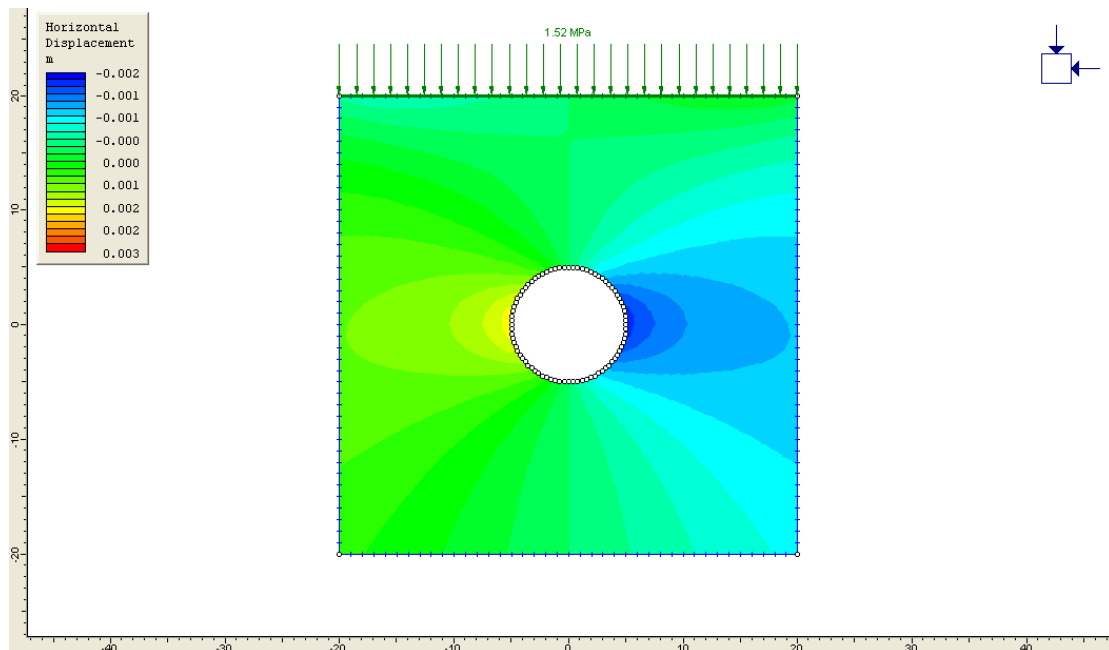
**Εικ.30 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)**

## 10.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ II

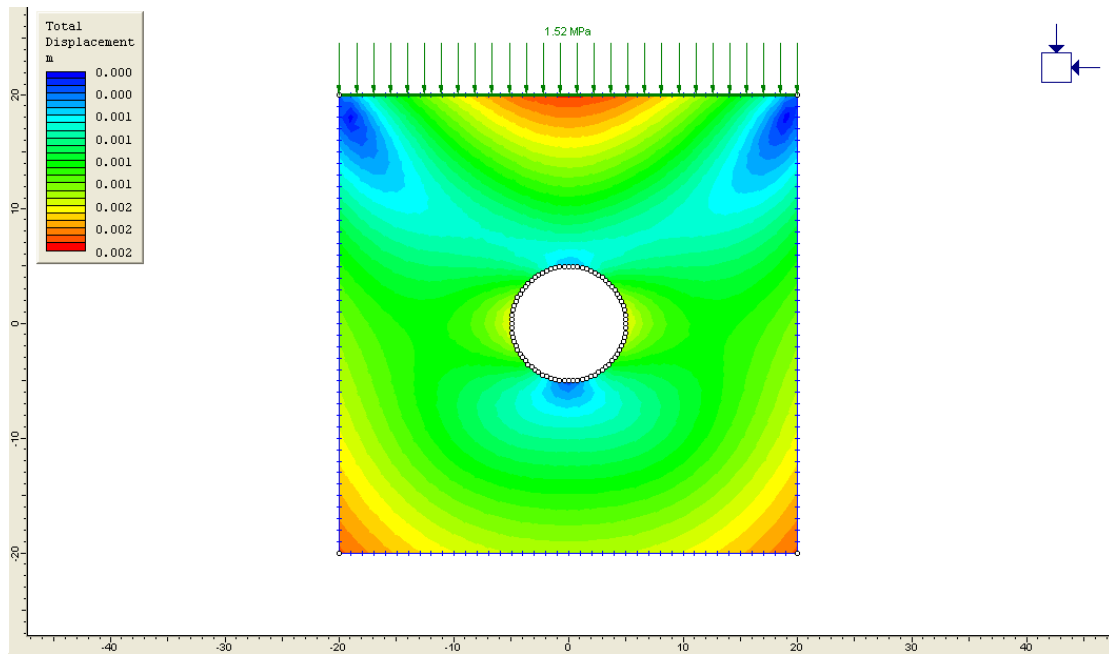
(II) ΣΗΡΑΓΓΑ 1 ΜΕ ΕΛΑΦΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 1000kPa (ισοδύναμη με 100m νερού) + 520kPa (πίεση υπερκείμενου εδαφικού στρώματος πάχους 20m)



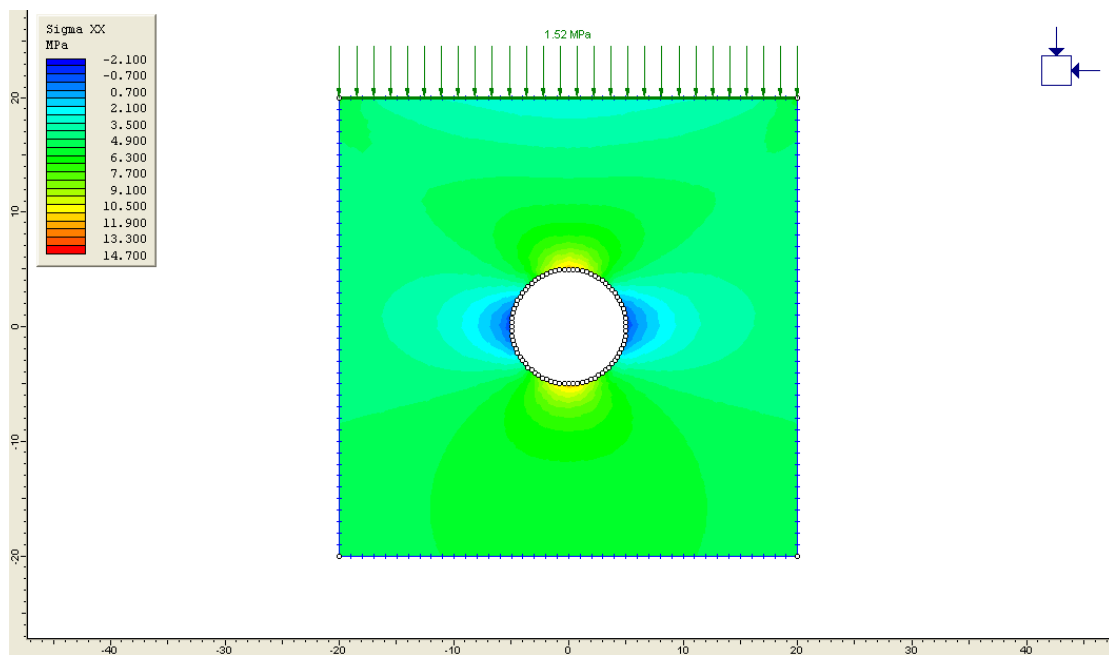
Εικ.31 - Κατακόρυφη μετακίνηση



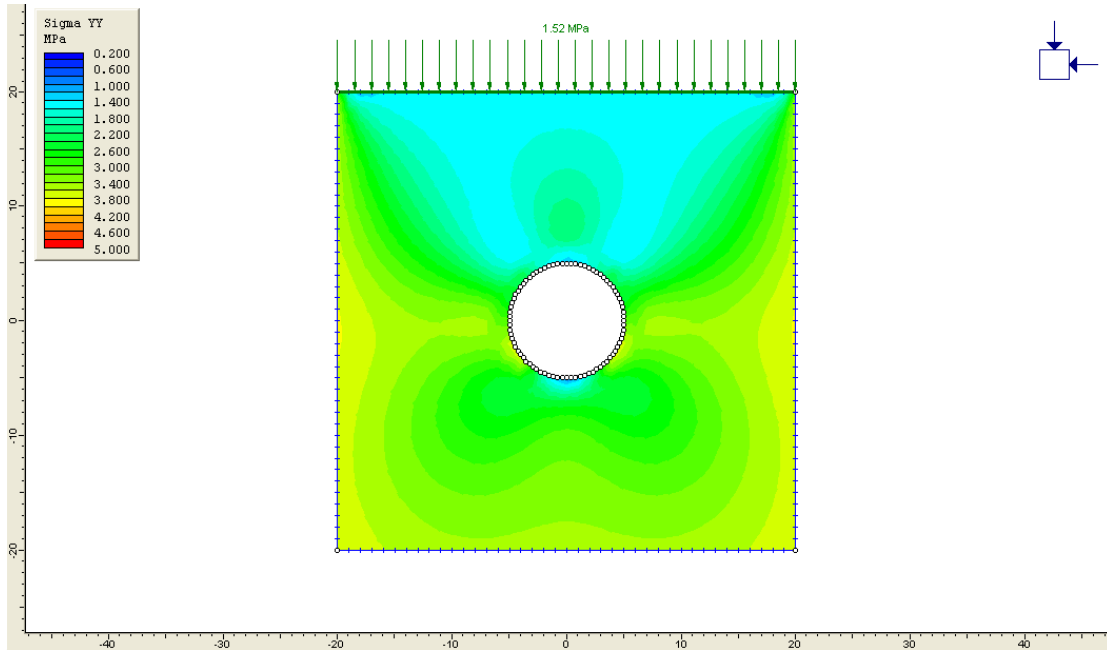
Εικ.32 - Οριζόντια μετακίνηση



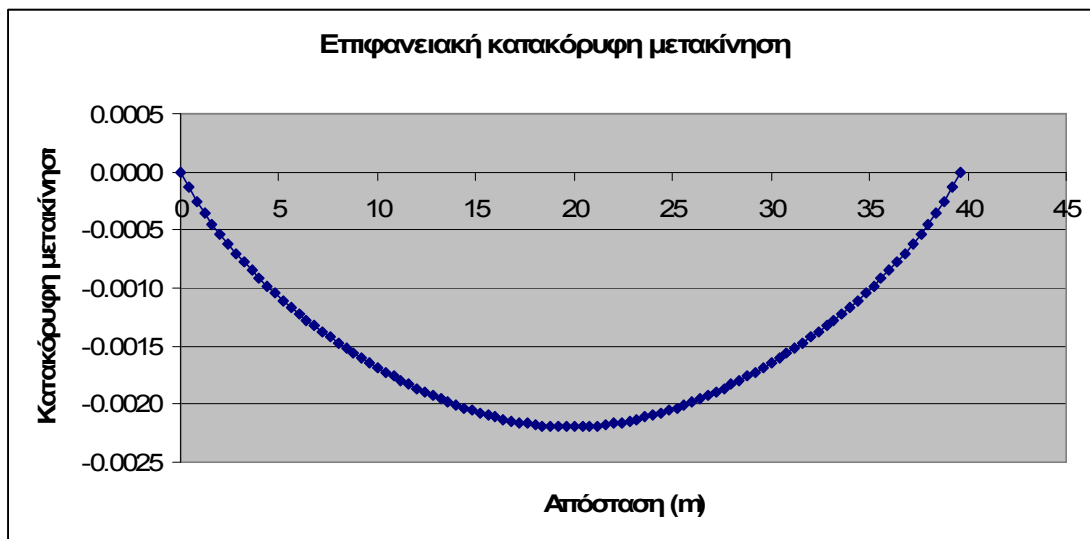
**Εικ.33 - Συνολική μετακίνηση**



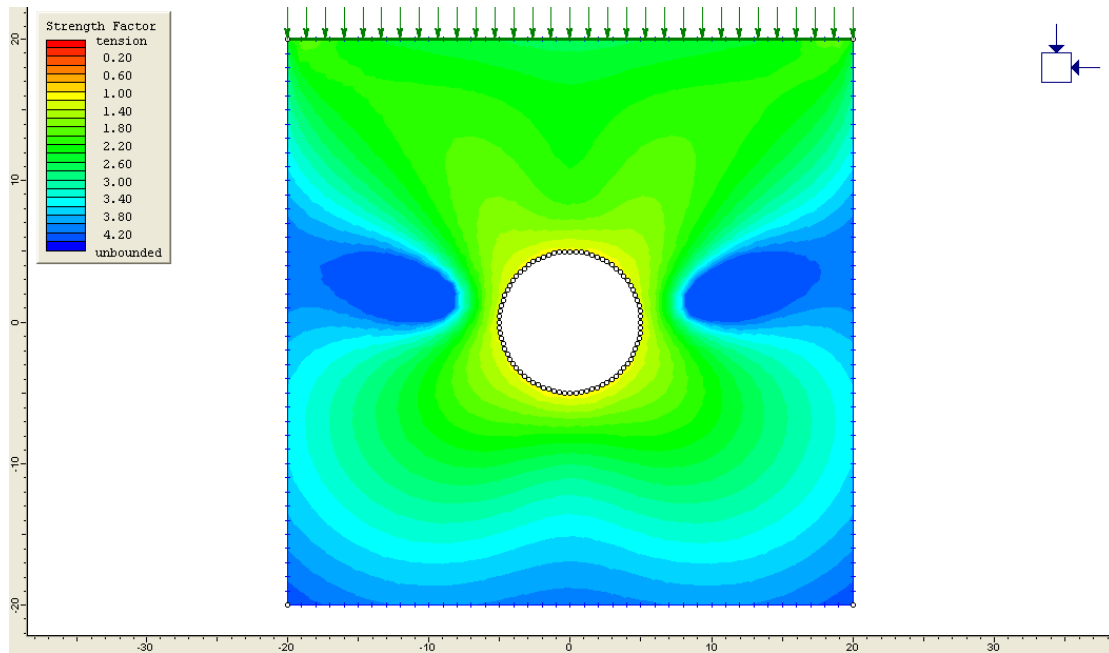
**Εικ.34 - Τάση σxx**



Εικ.35 - Τάση σyy



Εικ.36 - Διάγραμμα επιφανειακής κατακόρυφης μετακίνησης

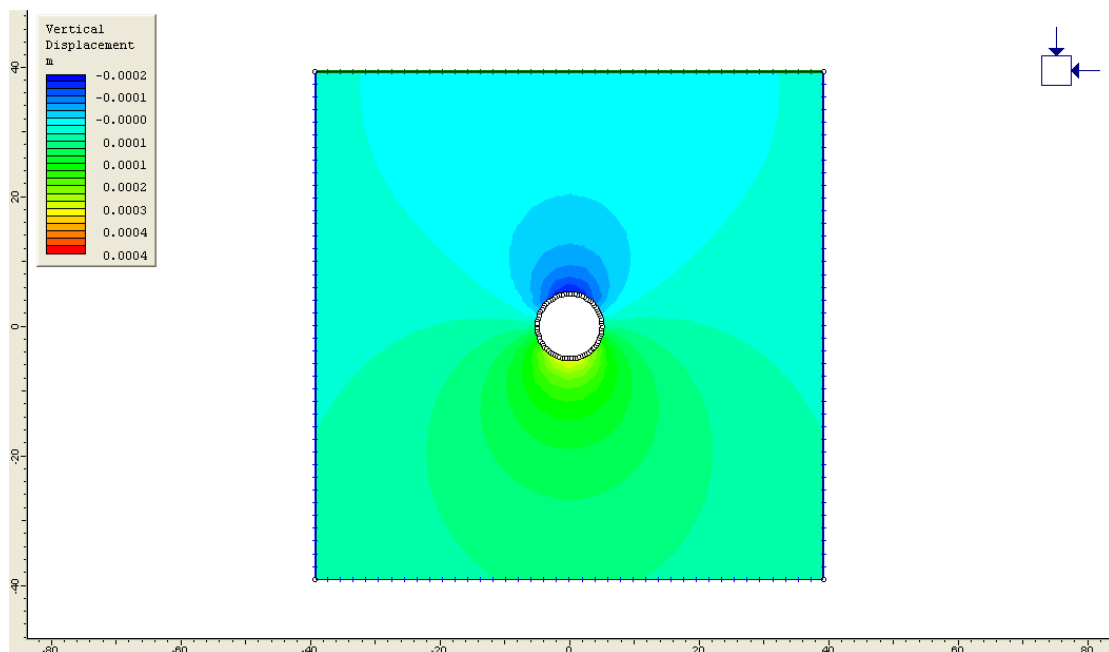


Εικ.37 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)

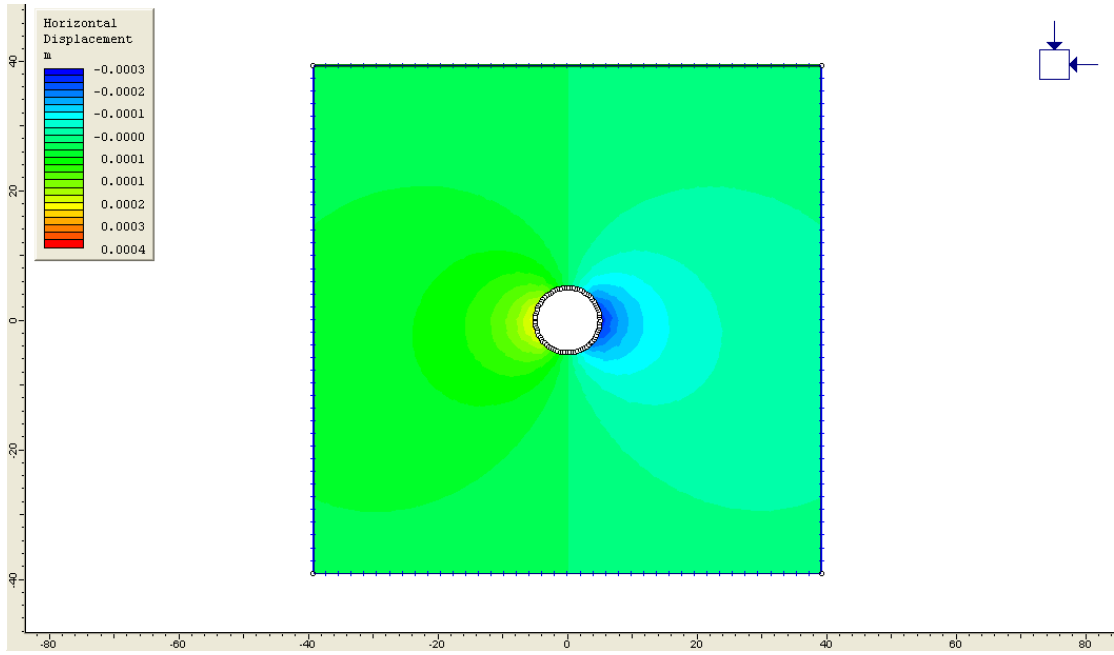
### 10.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΙΙΙ

(ΙΙΙ) ΣΗΡΑΓΓΑ 1 ΣΕ ΕΛΑΦΟΣ ΒΑΘΟΥΣ 39.231m (ισοδύναμο με πίεση 1,02MPa στο εδαφικό σύνορο σε τασικό πεδίο με βαρυντικές τάσεις)

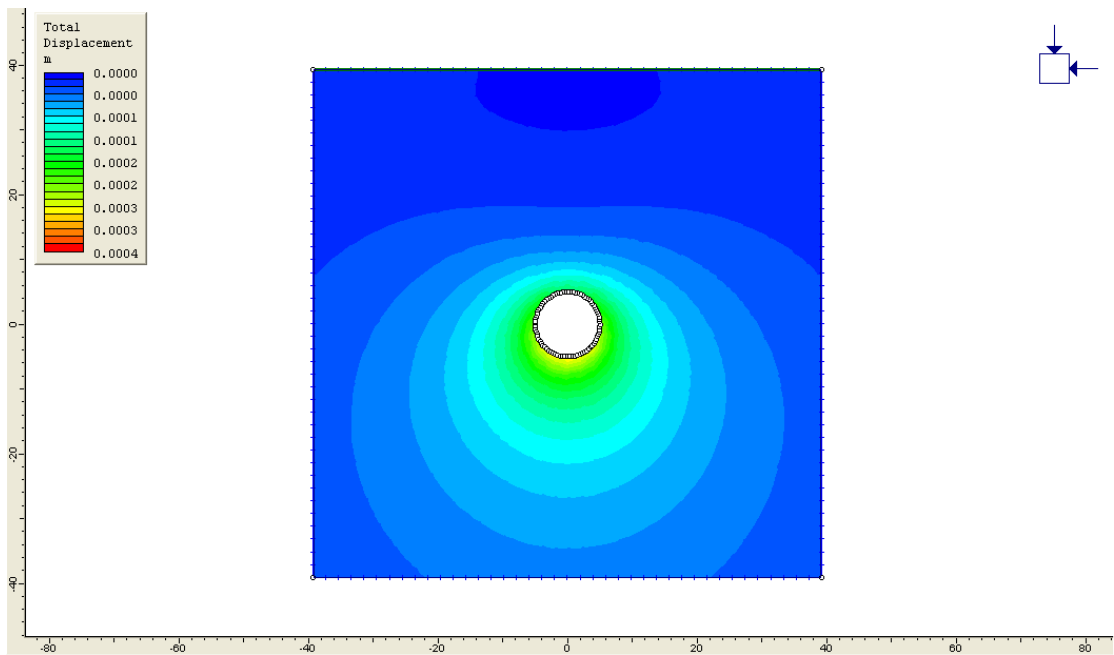
$c=1.811\text{MPa}$ ,  $\varphi=59.70^\circ$



Εικ.38 - Κατακόρυφη μετακίνηση

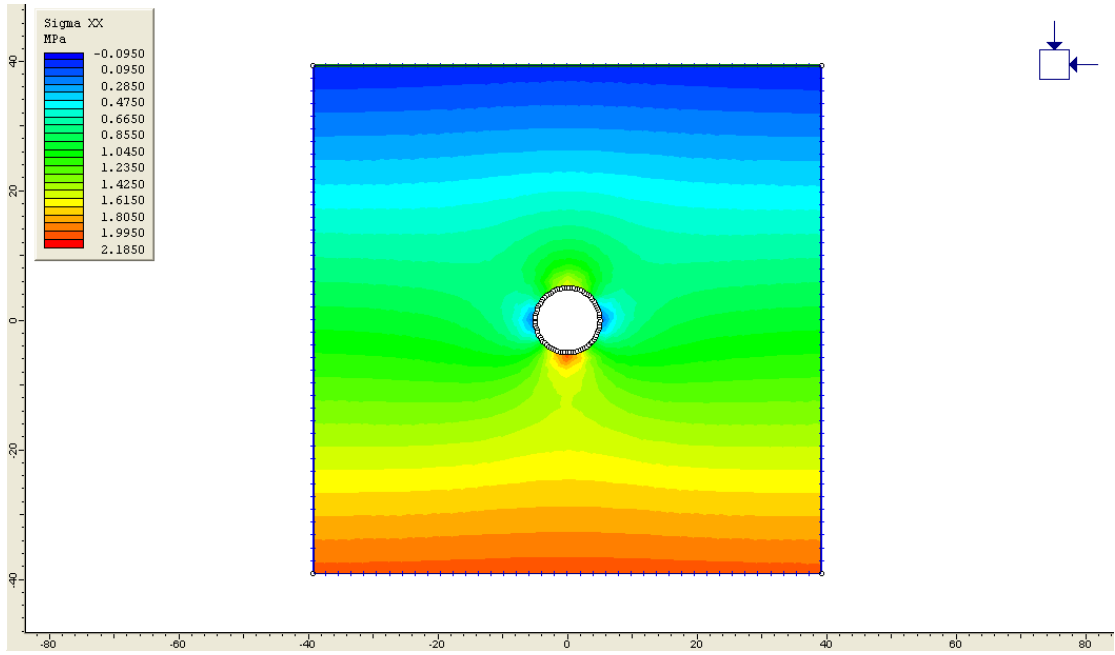


Εικ.39 - Οριζόντια μετακίνηση

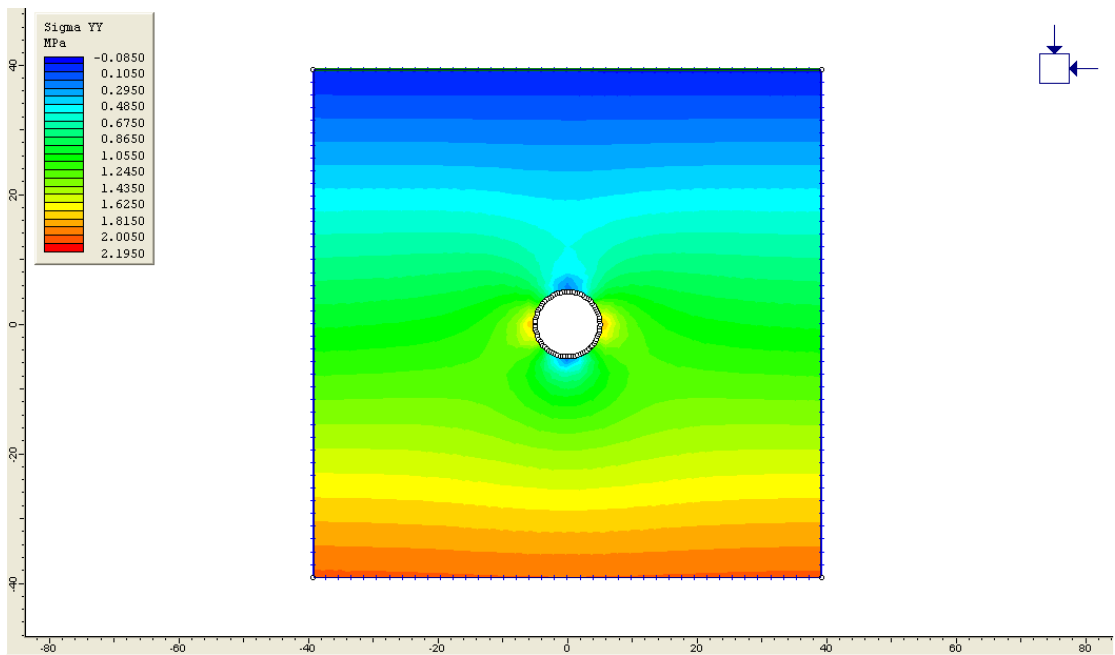


Εικ.40 - Συνολική μετακίνηση

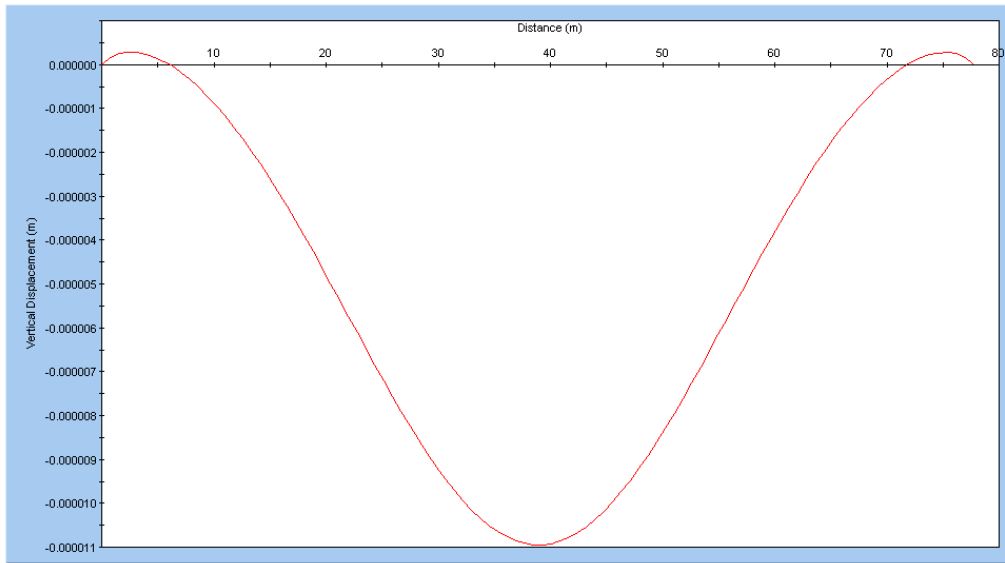




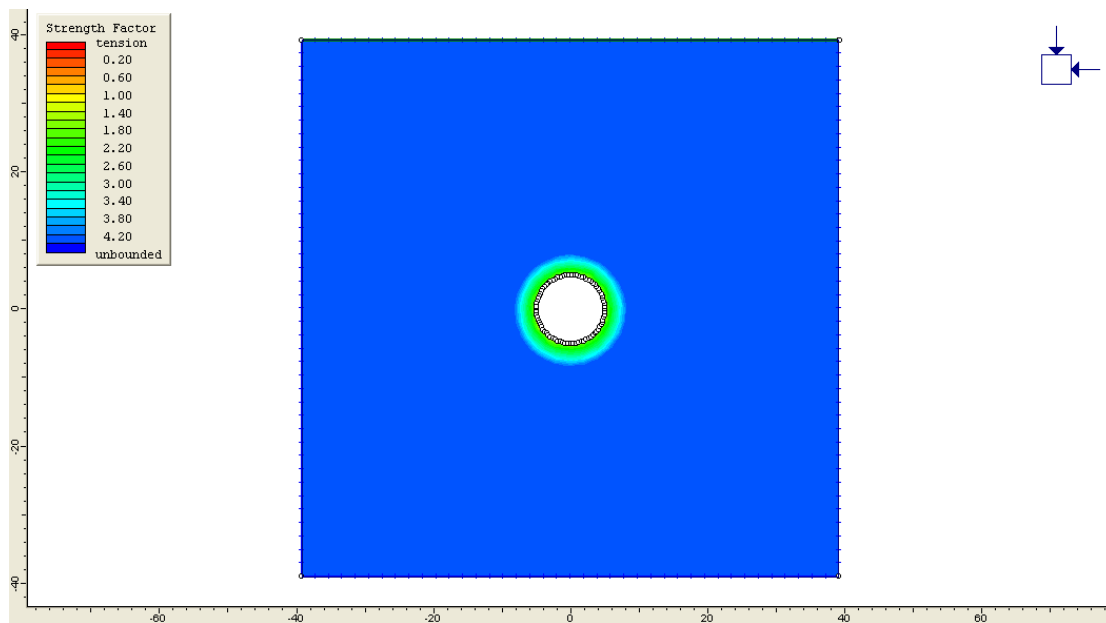
Εικ.41 - Τάση  $\sigma_{xx}$



Εικ.42 - Τάση  $\sigma_{yy}$



**Εικ.43 - Διάγραμμα επιφανειακής κατακόρυφης μετακίνησης**

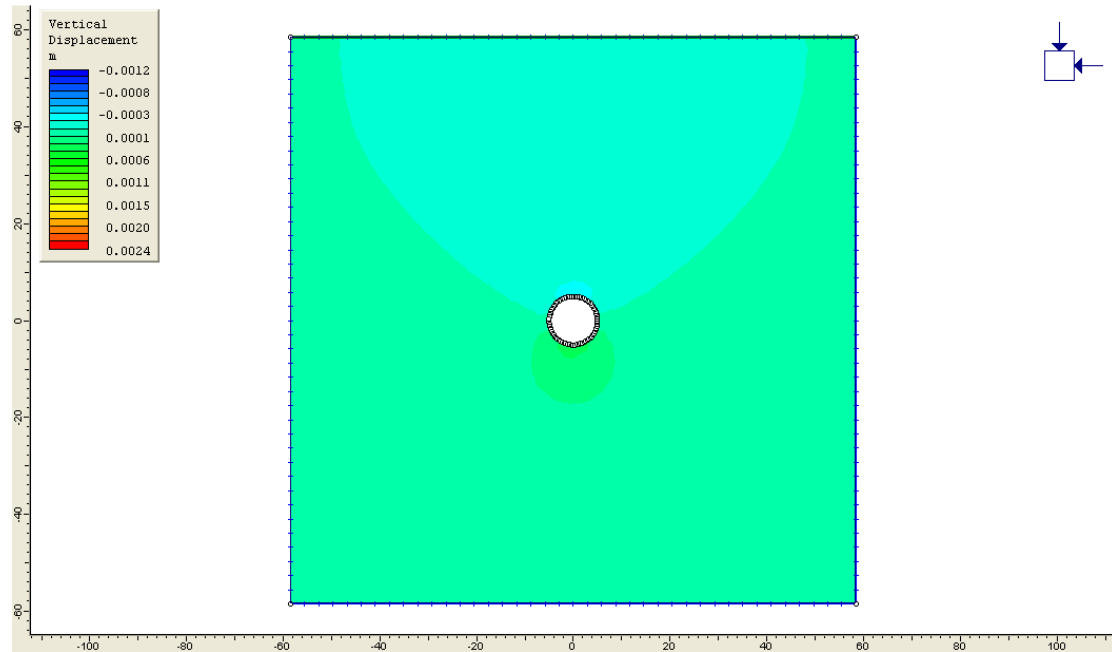


**Εικ.44 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)**

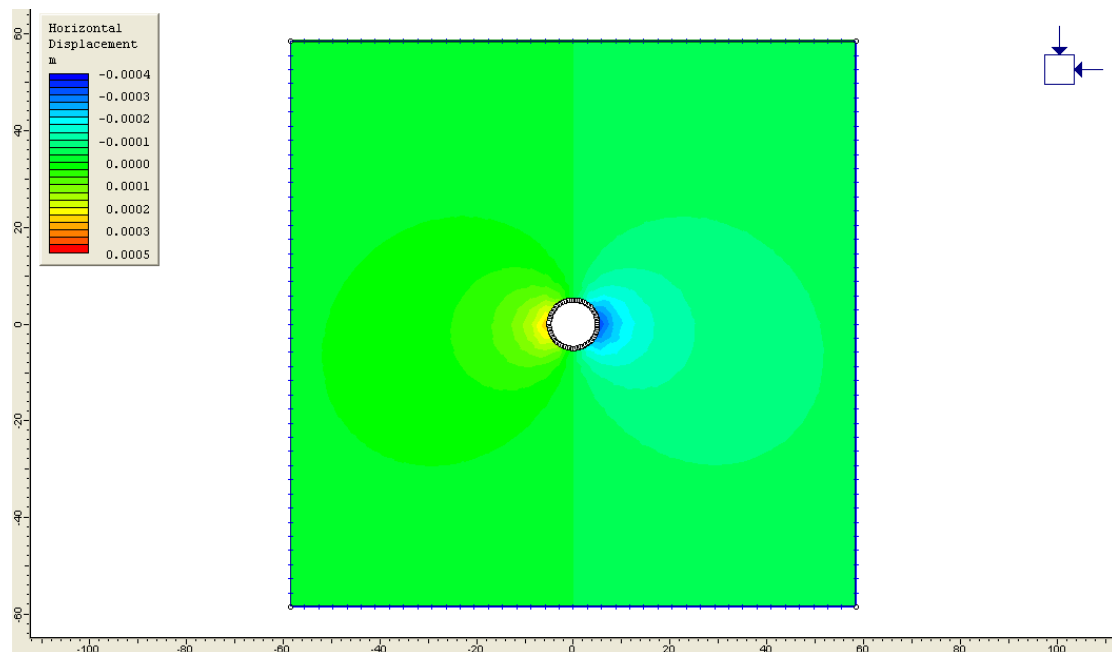
### 10.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ IV

(IV) ΣΗΡΑΓΓΑ 1 ΣΕ ΕΛΑΦΟΣ ΒΑΘΟΥΣ 58.462m (ισοδύναμο με πίεση 1,52MPa στο εδαφικό σύνορο σε τασικό πεδίο με βαρυτικές τάσεις)

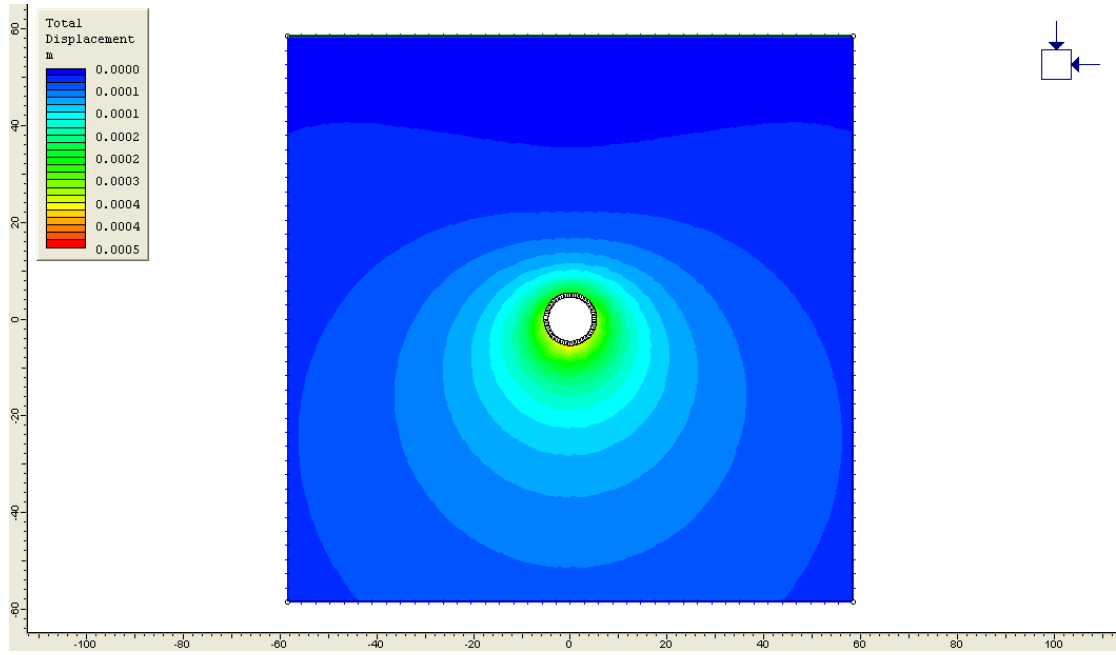
$c=1.861\text{MPa}$ ,  $\varphi=58.39^\circ$



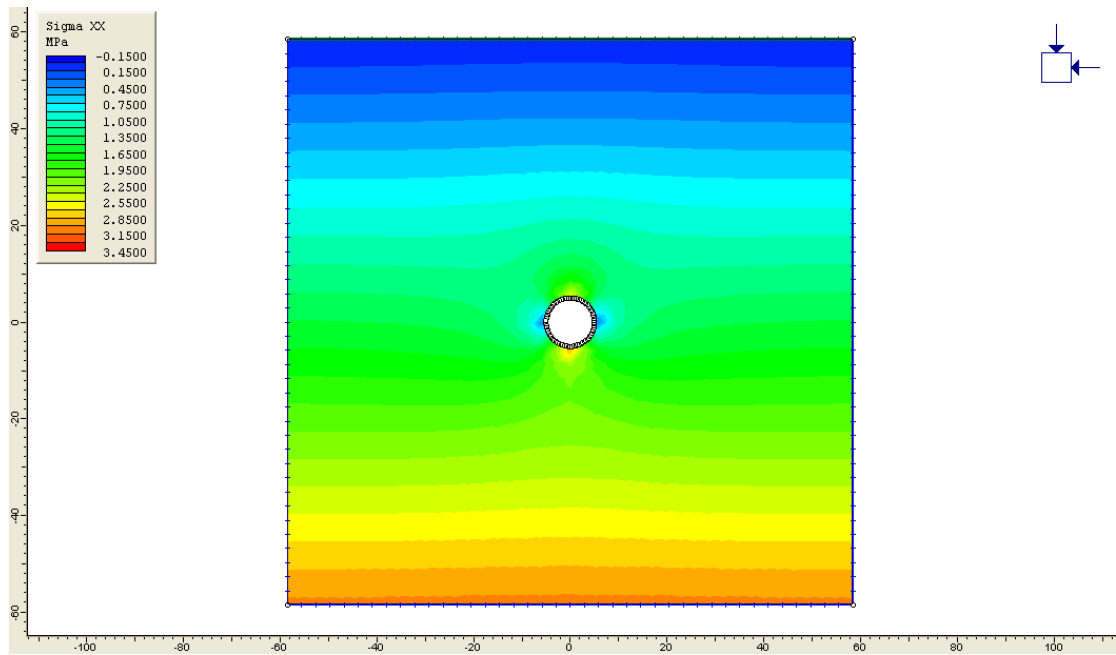
Εικ.45 – Κατακόρυφη μετακίνηση



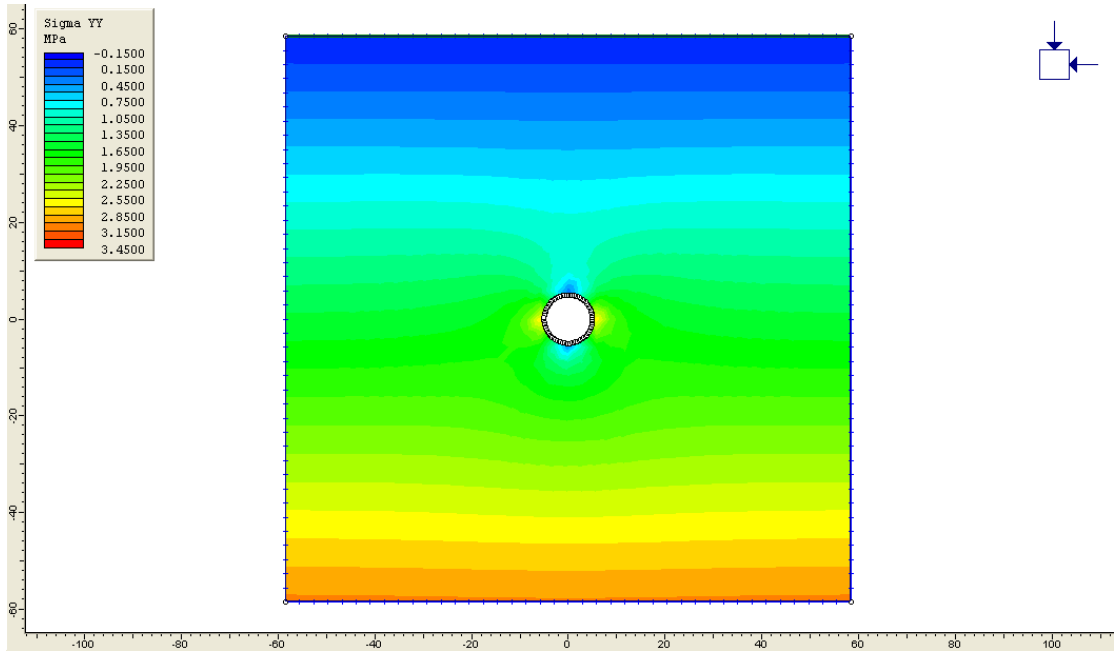
Εικ.46 – Οριζόντια μετακίνηση



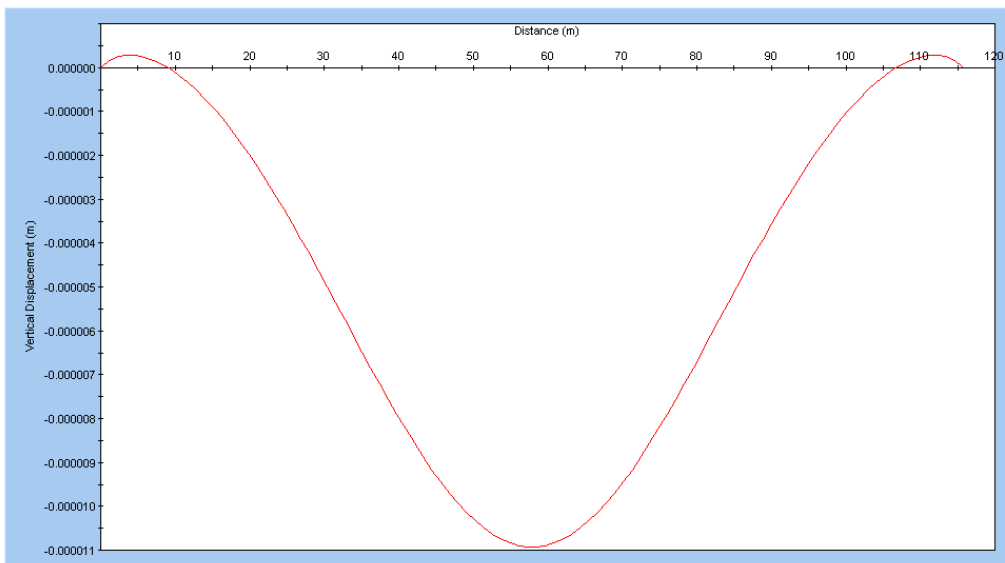
Εικ.47 – Συνολική μετακίνηση



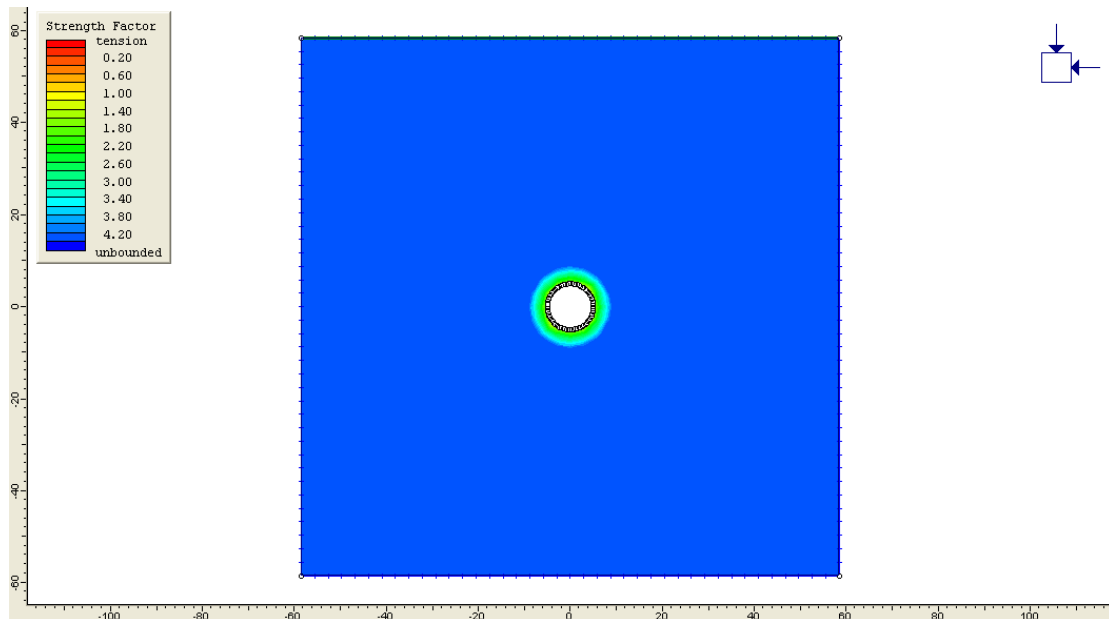
Εικ.48 – Τάση  $\sigma_{xx}$



**Εικ.49 – Τάση  $\sigma_{yy}$**



**Εικ.50 – Διάγραμμα επιφανειακής κατακόρυφης μετακίνησης**



Εικ.51 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)

## 10.2 ΣΗΡΑΓΓΑ 2

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 2:

**Βάθος  $d=20\text{m}$  (απόσταση κέντρου σήραγγας από επιφάνεια)**

**Ακτίνα  $r=5\text{m}$**

**Σταθερό τασικό πεδίο**

**Από πρόγραμμα RocLab:**

**Πέτρωμα: Chalk (ιζηματογενές πέτρωμα από γύψο με GSI=15)**

**Μέτρο ελαστικότητας  $E=546.73\text{MPa}$**

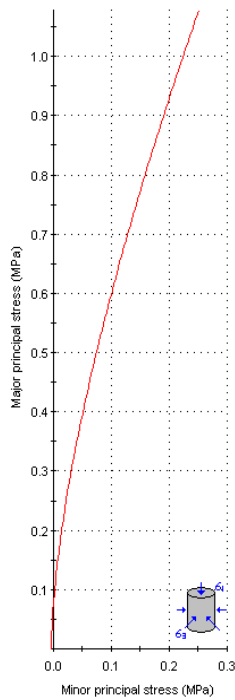
**Λόγος του Poisson:  $\nu=0.25$**

**Συνοχή:  $c=0.049\text{MPa}$**

**Γωνία τριβής:  $\phi=35.27^\circ$**

**Εφελκυστική αντοχή =  $0.004\text{MPa}$**

Analysis of Rock Strength using RocLab



**Hoek-Brown Classification**

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 15 MPa  
 GSI = 15  $m_i$  = 7 Disturbance factor (D) = 0  
 intact modulus (Ei) = 15000 MPa  
 modulus ratio (MR) = 1000

**Hoek-Brown Criterion**

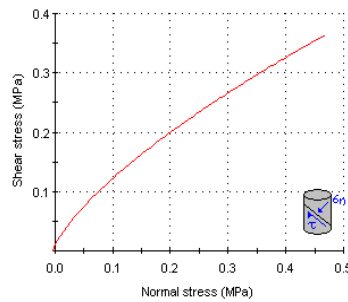
$m_b$  = 0.336  $s$  = 0.0001  $a$  = 0.561

**Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 0.049 MPa friction angle = 35.27 deg

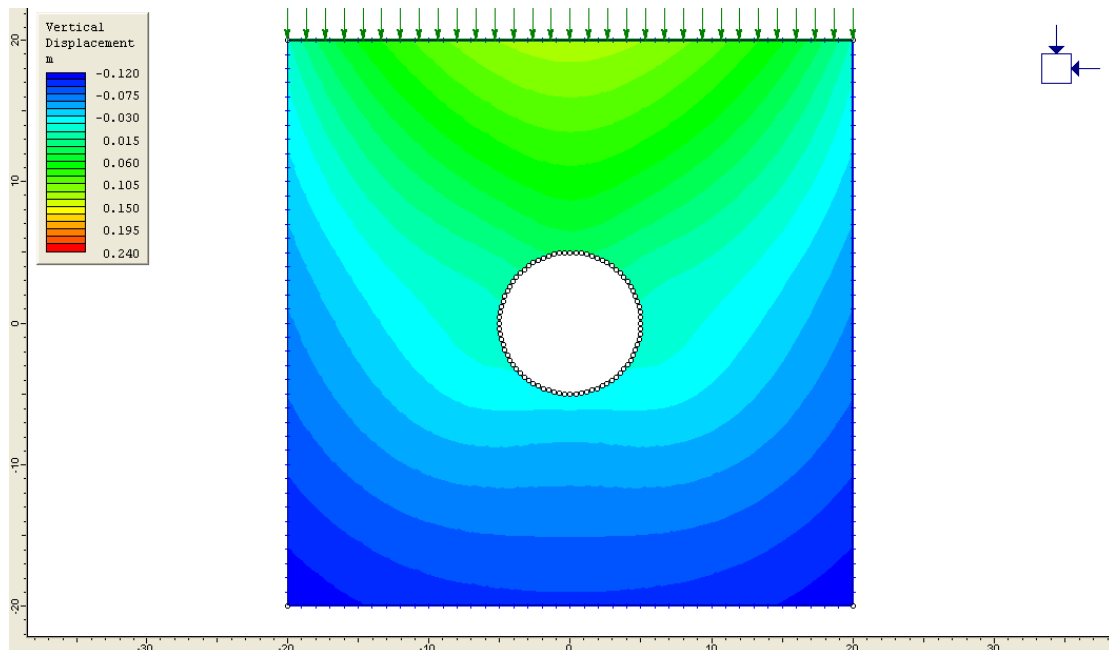
**Rock Mass Parameters**

tensile strength = -0.004 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.075 MPa  
 global strength = 0.824 MPa  
 deformation modulus = 546.73 MPa

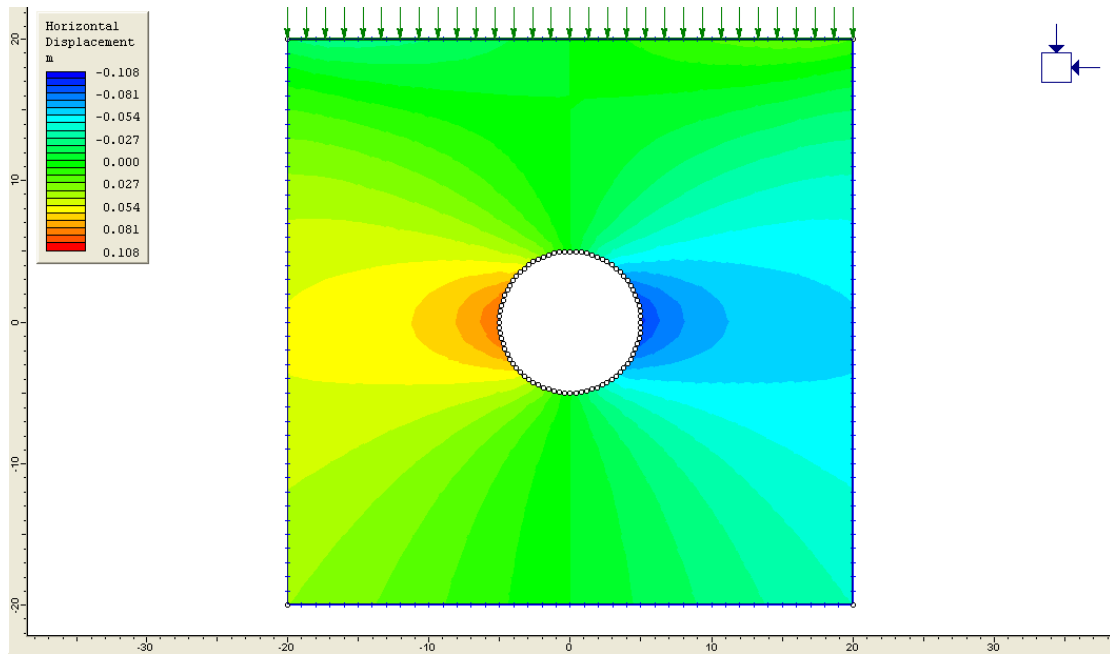


Εικ.52 - Αποτελέσματα προγράμματος RocLab

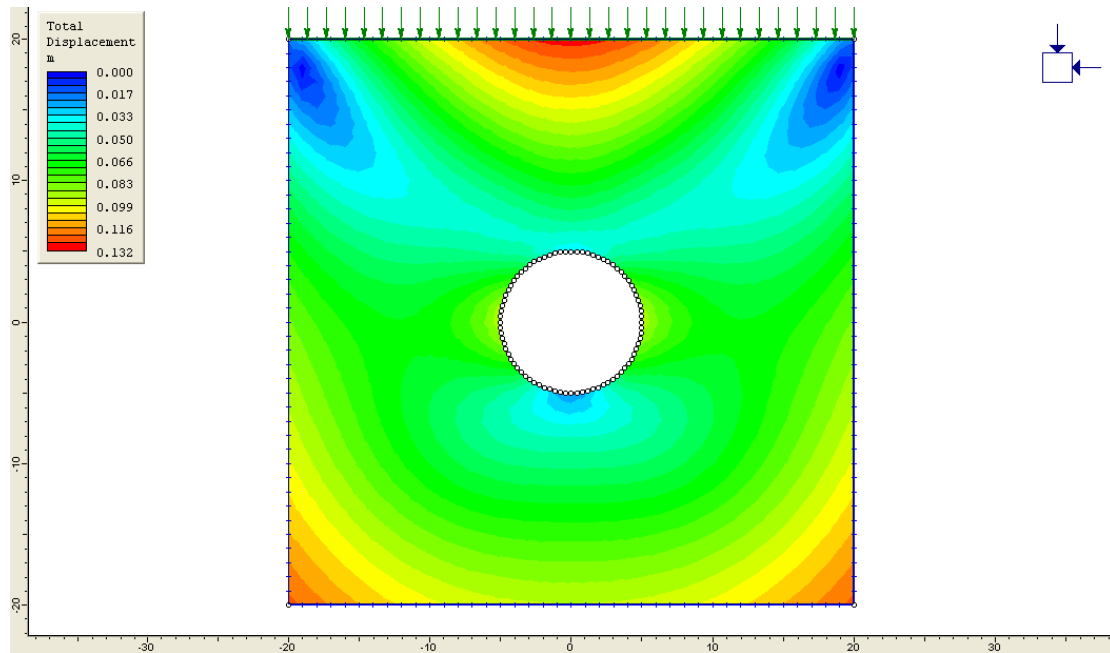
**ΣΗΡΑΓΓΑ 2 ΜΕ ΕΛΑΦΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 500kPa (ισοδύναμη με 50m νερού) + 520kPa (πίεση υπερκείμενου εδαφικού στρώματος πάχους 20m) [τασικό πεδίο με σταθερές τάσεις]**



Εικ.53 - Κατακόρυφη μετακίνηση

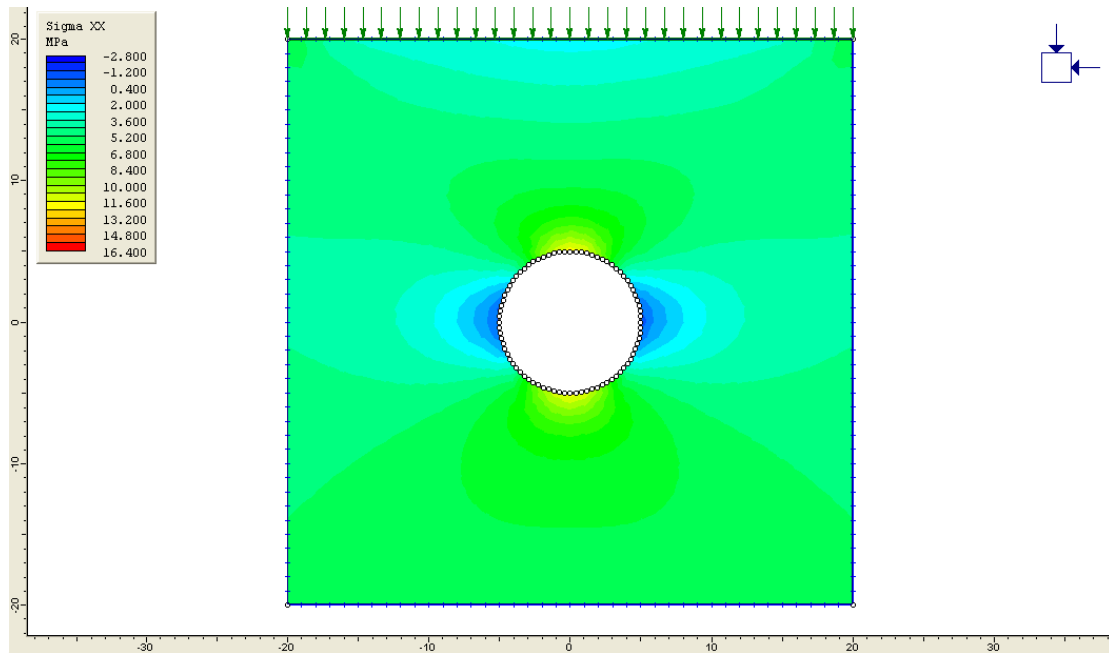


Εικ.54 - Οριζόντια μετακίνηση

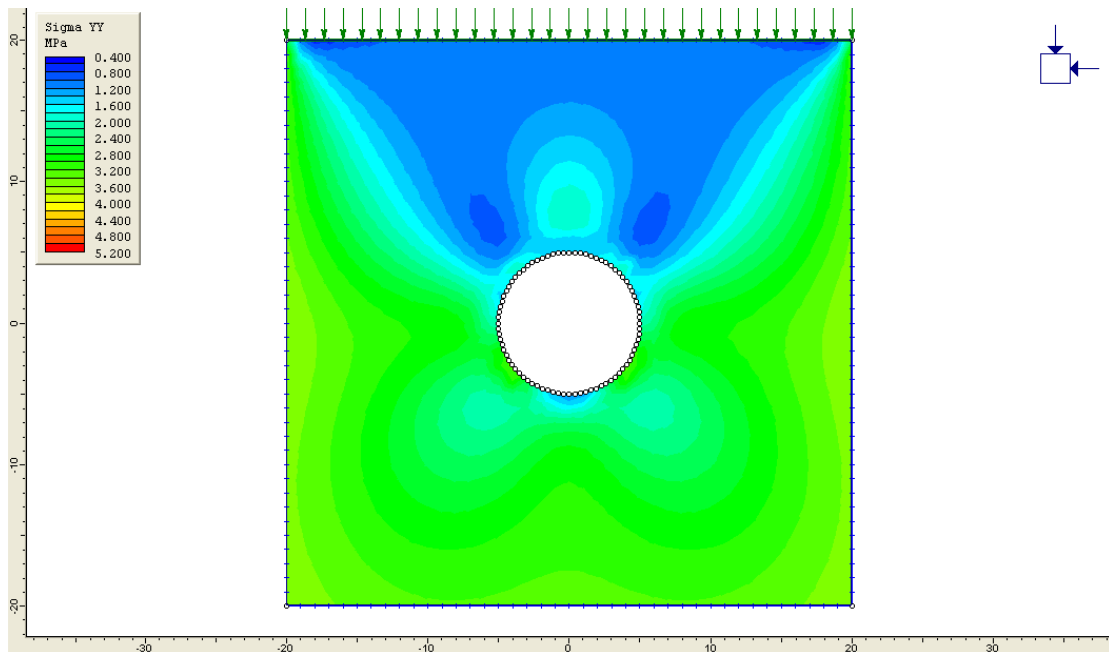


Εικ.55 - Συνολική μετακίνηση

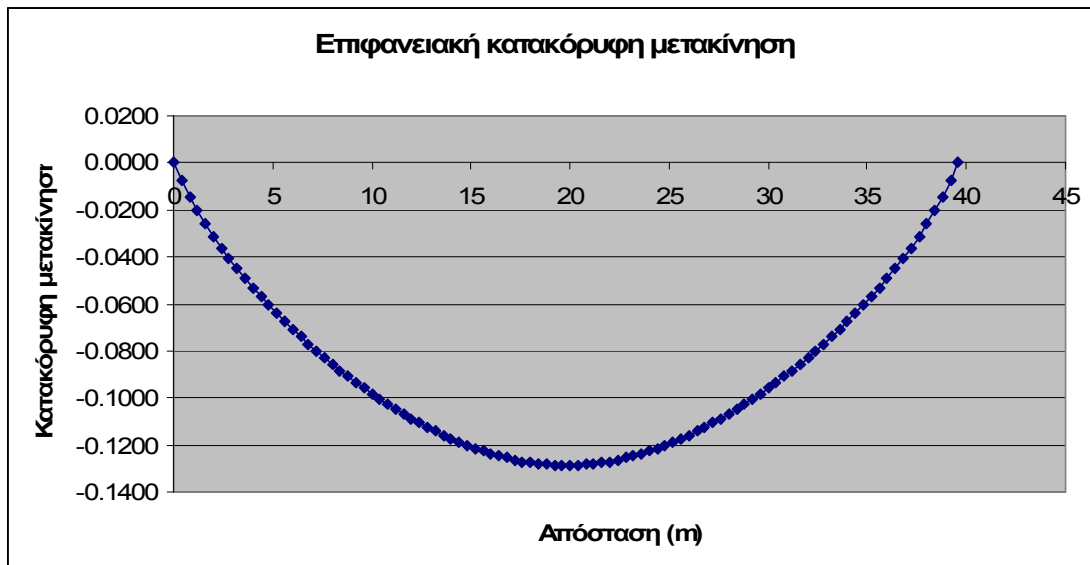




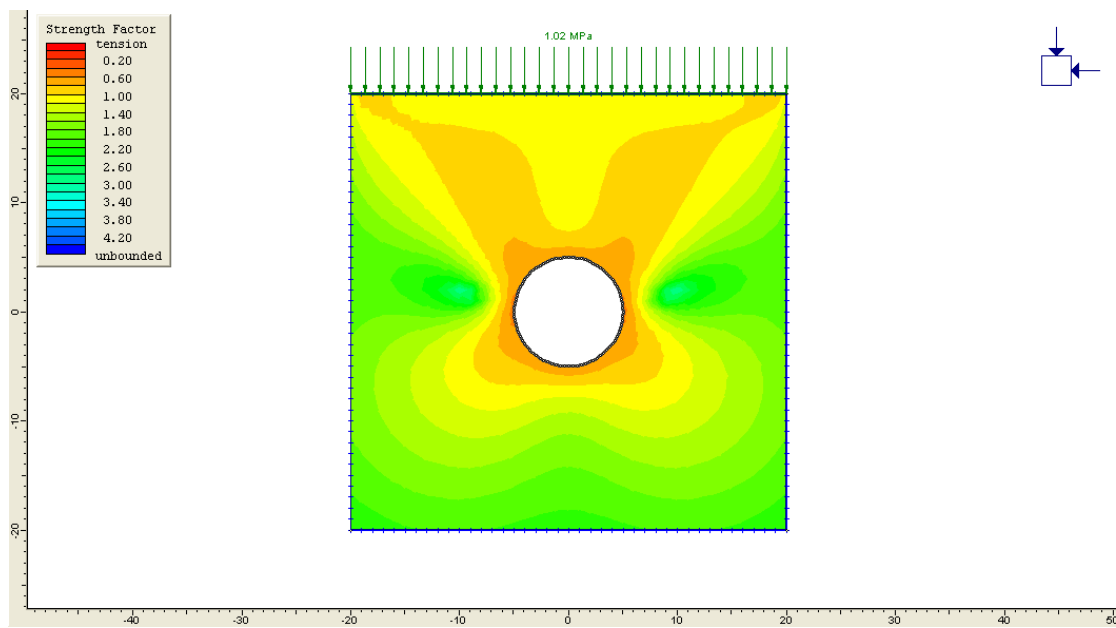
**Εικ.56 - Τάση  $\sigma_{xx}$**



**Εικ.57 - Τάση  $\sigma_{yy}$**



**Εικ.58 - Διάγραμμα επιφανειακής κατακόρυφης μετακίνησης**



**Εικ.59 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)**

### **ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ**

Η οριοθέτηση της πλαστικής ζώνης μιας κυκλικής σήραγγας είναι λυμένη στη δημοσίευση των Massinas & Sakellariou (2009). Ο τύπος από τον οποίο μπορεί

κανείς να υπολογίσει τις συντεταγμένες της πλαστικής ζώνης είναι ο ακόλουθος:

$$\left( \frac{r_c d_i - r_i \cos \beta}{r_i d_c - r_c \cos \beta} \right)^{1-\lambda} = \frac{[2M_o + \kappa^2(\lambda - 1)] \cdot [Y + P_i(\lambda - 1)]}{2M_o [Y + P_o(\lambda - 1)]} \quad (10.1)$$

Όπου  $M_o = \kappa^2 + r_c^2 \sin^2 \beta$  και ακόμη:

$d_c$  = βάθος κέντρου πλαστικής ζώνης από την επιφάνεια

$d_i$  = βάθος κέντρου κυκλικής σήραγγας από την επιφάνεια

$P_o$  = ομοιόμορφη επιφανειακή πίεση

$P_c$  = κρίσιμη πίεση που περιορίζει την περαιτέρω επέκταση της πλαστικής ζώνης

$P_i$  = εσωτερική πίεση στην περιφέρεια της σήραγγας

$r_c$  = ακτίνα πλαστικής ζώνης

$r_i$  = ακτίνα κυκλικής σήραγγας

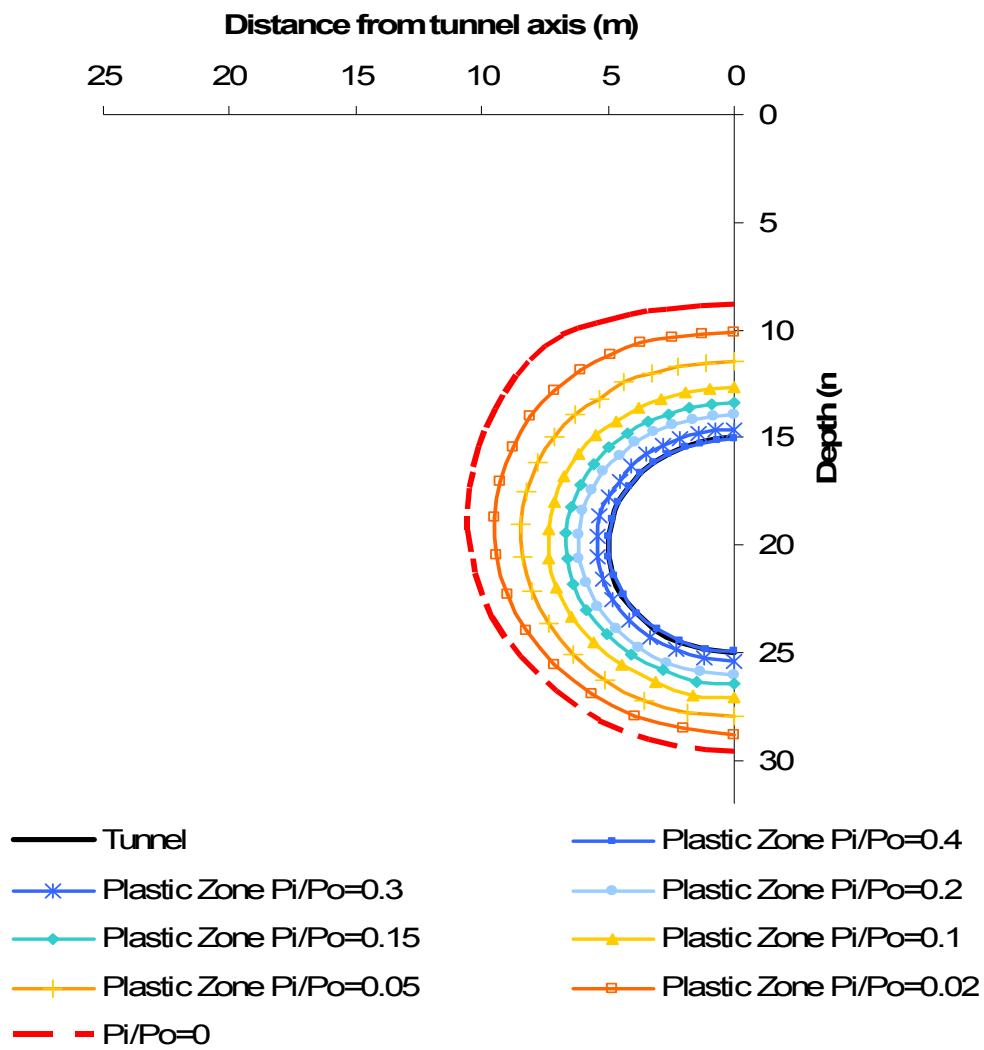
$\beta$  = διπολική συντεταγμένη

$\kappa$  = απόσταση του πόλου από την αρχή των συντεταγμένων σε διπολικές

$\lambda$  = σταθερά στο κριτήριο Mohr-Coulomb σχετιζόμενη με τη γωνία τριβής του εδάφους

$Y$  = σταθερά στο κριτήριο Mohr-Coulomb σχετιζόμενη με τη γωνία τριβής και τη συνοχή του εδάφους

Αμέσως μετά τη διάνοιξη μιας σήραγγας αναπτύσσονται τάσεις και κατ' επέκταση και παραμορφώσεις γύρω από τη διατομή και στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τη σήραγγα. Η στατική ανάλυση μιας σήραγγας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσεων στην πλαστική περιοχή που σημαίνει ότι η παραμόρφωση αυξάνεται συνεχώς με σταθερή την τιμή της ασκούμενης τάσης. Η περιοχή αυτή κινδυνεύει σημαντικά από τη δημιουργία αστοχίας και γι' αυτό είναι σημαντική η οριοθέτησή της. Σύμφωνα με τους Μασσίνα & Σακελλαρίου (2009) η απόκριση μιας σήραγγας στην ασκούμενη πίεση εξαρτάται από το πάχος του υπερκείμενου γεωλογικού στρώματος (βαθιά ή αβαθής σήραγγα), την ακτίνα της διατομής της σήραγγας, το αρχικό τασικό πεδίο (πριν τη διάνοιξη), τις ιδιότητες της βραχώμαζας και την εσωτερική υποστηρικτική πίεση (λόγω προσωρινών υποστηρικτικών μέτρων). Σημαντικό ρόλο στη μορφή της πλαστικής ζώνης παίζει η σχέση της ακτίνας με το βάθος της σήραγγας (Bray 1987). Στις αβαθείς σήραγγες ( $d/r \leq 7$ ) η πλαστική ζώνη μπορεί να φτάσει μέχρι την επιφάνεια δημιουργώντας κίνδυνο και στις υπέργειες κατασκευές.



**Σχήμα 12 – Πλαστική ζώνη σήραγγας**

### 10.3 ΣΗΡΑΓΓΑ 3

#### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 3:

Βάθος  $d=20\text{m}$  (απόσταση κέντρου σήραγγας από επιφάνεια)

Ακτίνα  $r=5\text{m}$

Σταθερό τασικό πεδίο

Λόγος του Poisson:  $\nu=0.25$

Από πρόγραμμα RocLab:

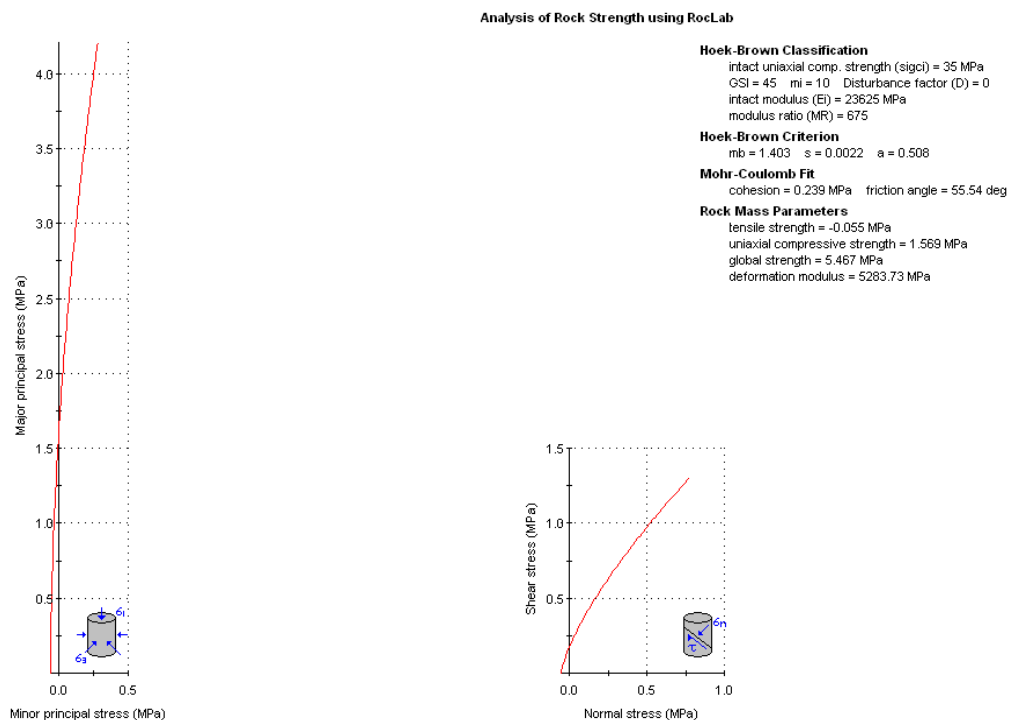
Πέτρωμα: Σχιστόλιθος (με  $GSI=45$ )

Μέτρο ελαστικότητας  $E=5283.73\text{MPa}$

Συνοχή:  $c=0.239\text{MPa}$

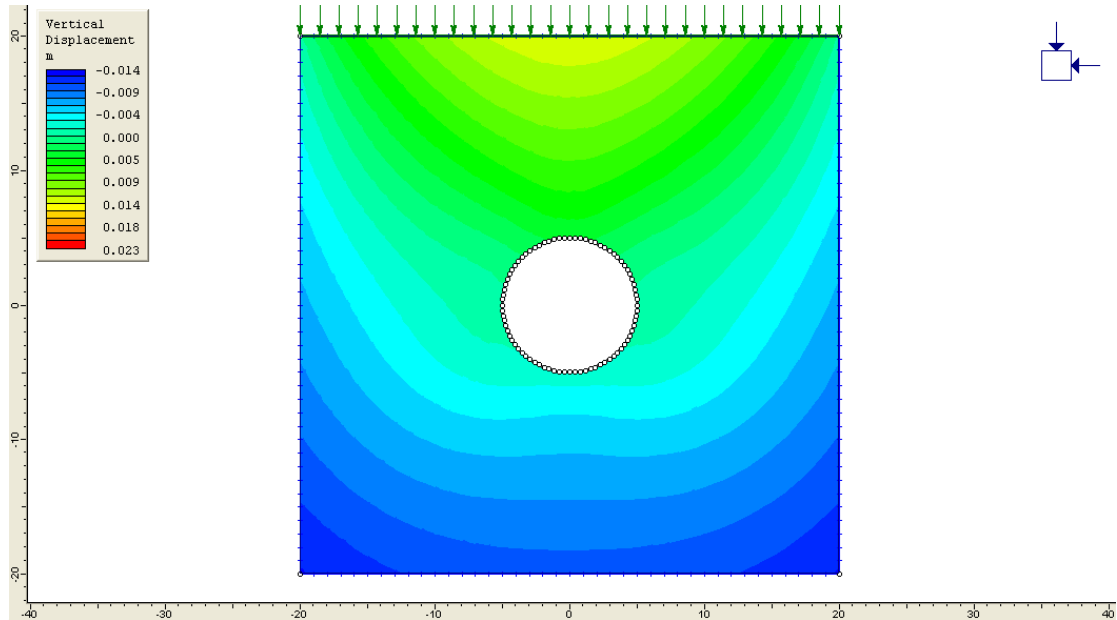
Γωνία τριβής:  $\phi=55.54^\circ$

Εφελκυστική αντοχή =  $0.055\text{MPa}$

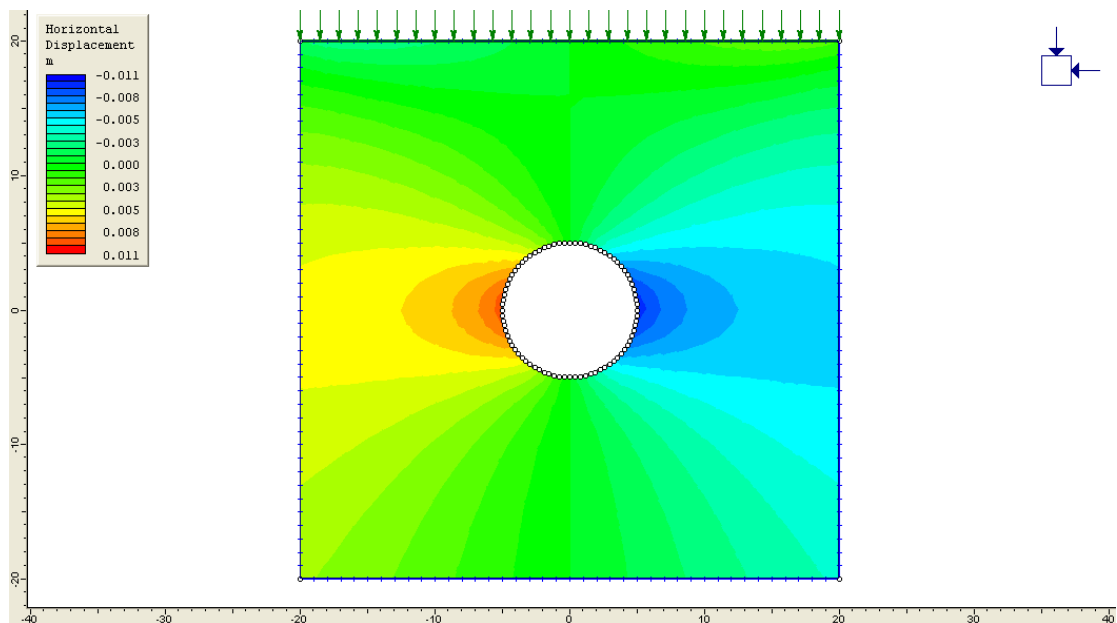


Εικ.60 - Αποτελέσματα RocLab

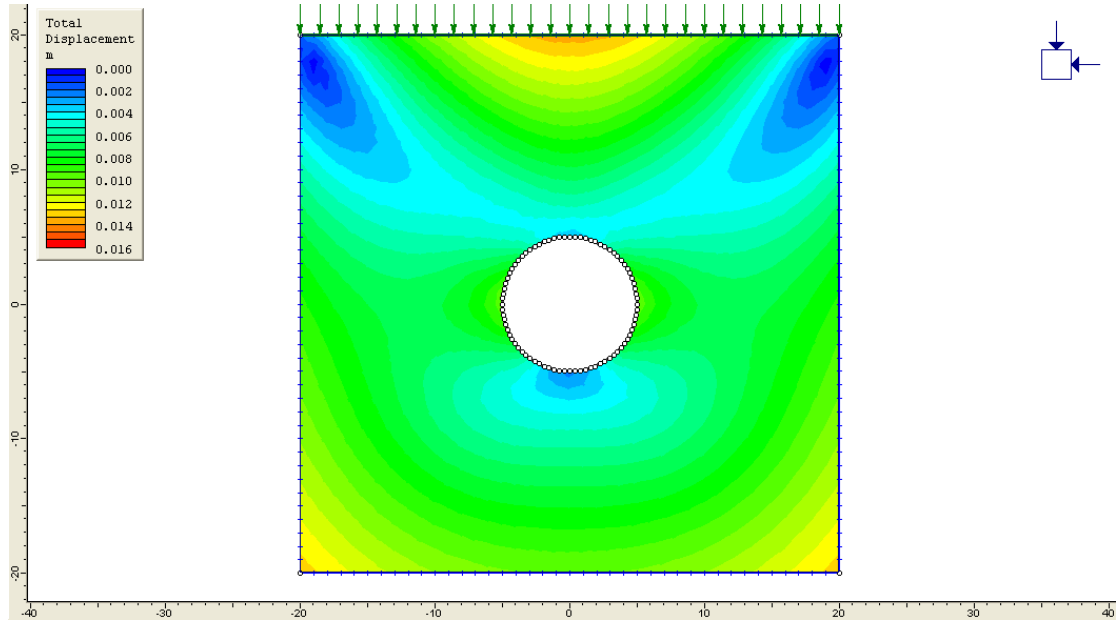
**ΣΗΡΑΓΓΑ 3 ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟ ΕΛΑΦΙΚΟ ΣΥΝΟΡΟ 500kPa (ισοδύναμη με 50m νερού) + 520kPa (πίεση υπερκείμενου εδαφικού στρώματος πάχους 20m) [σταθερό τασικό πεδίο]**



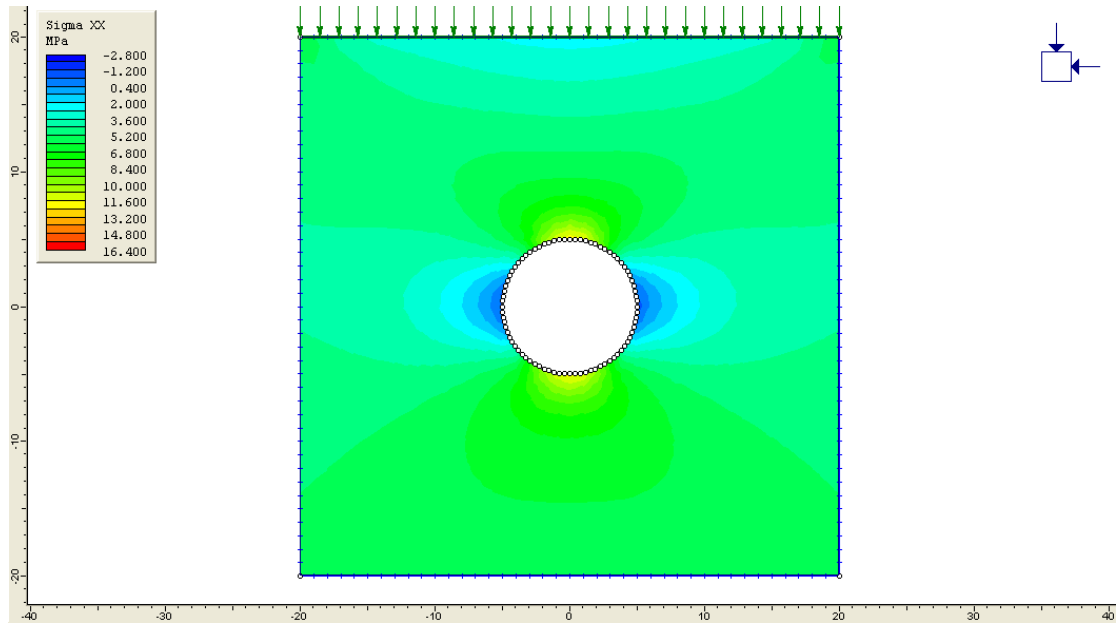
**Εικ.61 – Κατακόρυφη μετακίνηση**



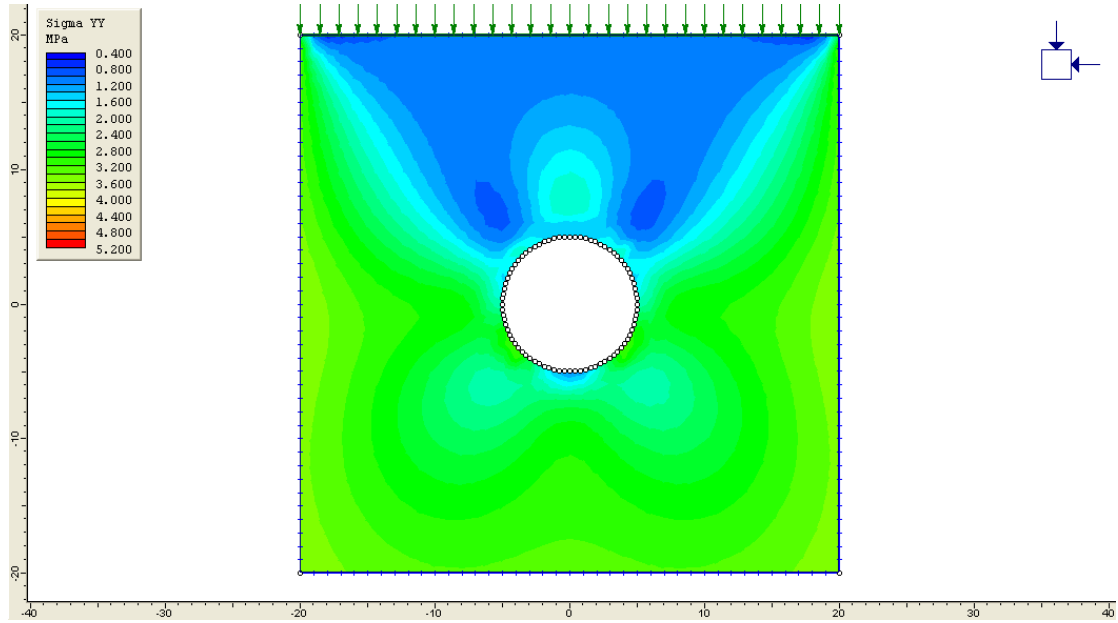
**Εικ.62 – Οριζόντια μετακίνηση**



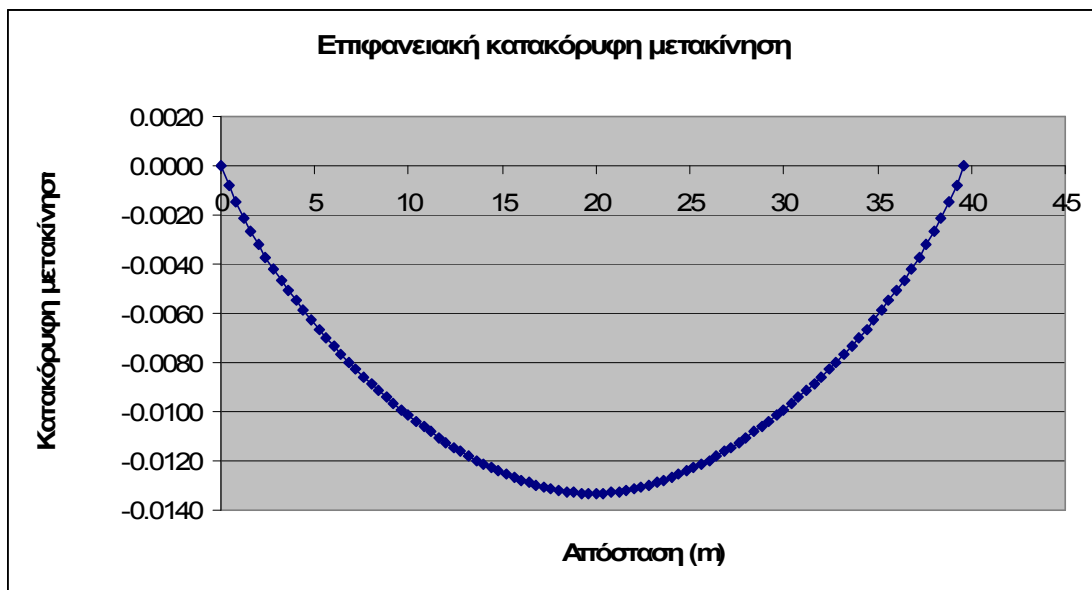
**Εικ.63 – Συνολική μετακίνηση**



**Εικ.64 – Τάση σxx**

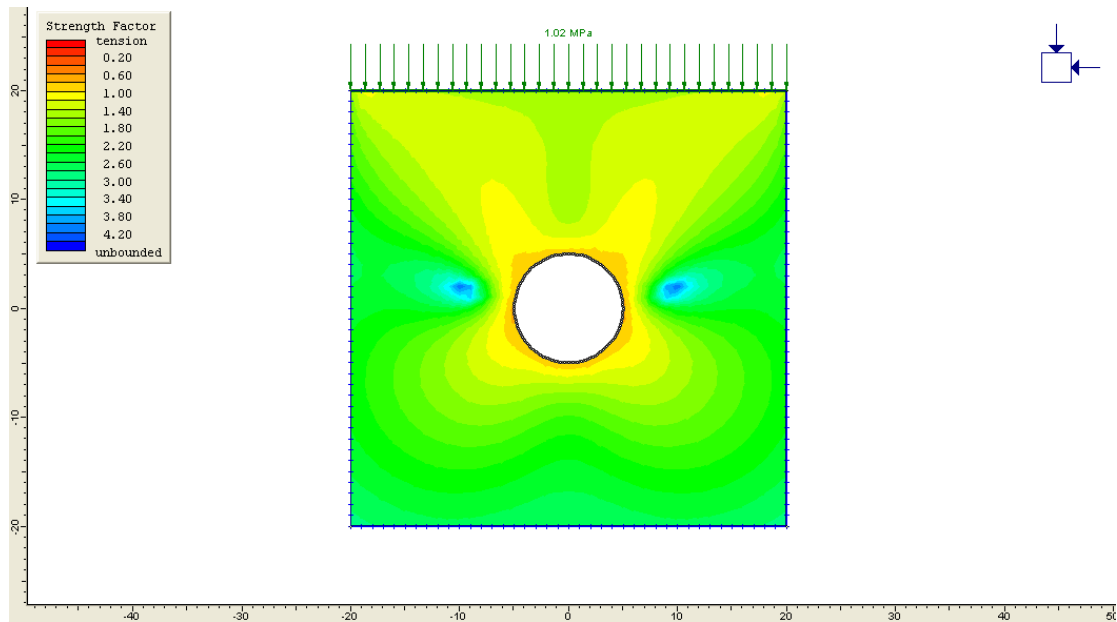


Εικ.65 – Τάση σyy



Εικ.66 – Επιφανειακή κατακόρυφη μετακίνηση





Εικ.67 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)

#### 10.4 ΣΗΡΑΓΓΑ 4

##### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 4:

**Βάθος  $d=20\text{m}$  (απόσταση κέντρου σήραγγας από επιφάνεια)**

**Ακτίνα  $r=5\text{m}$**

**Σταθερό τασικό πεδίο**

**Από πρόγραμμα RocLab:**

**Πέτρωμα: Γνεύσιος (με  $GSI=80$ )**

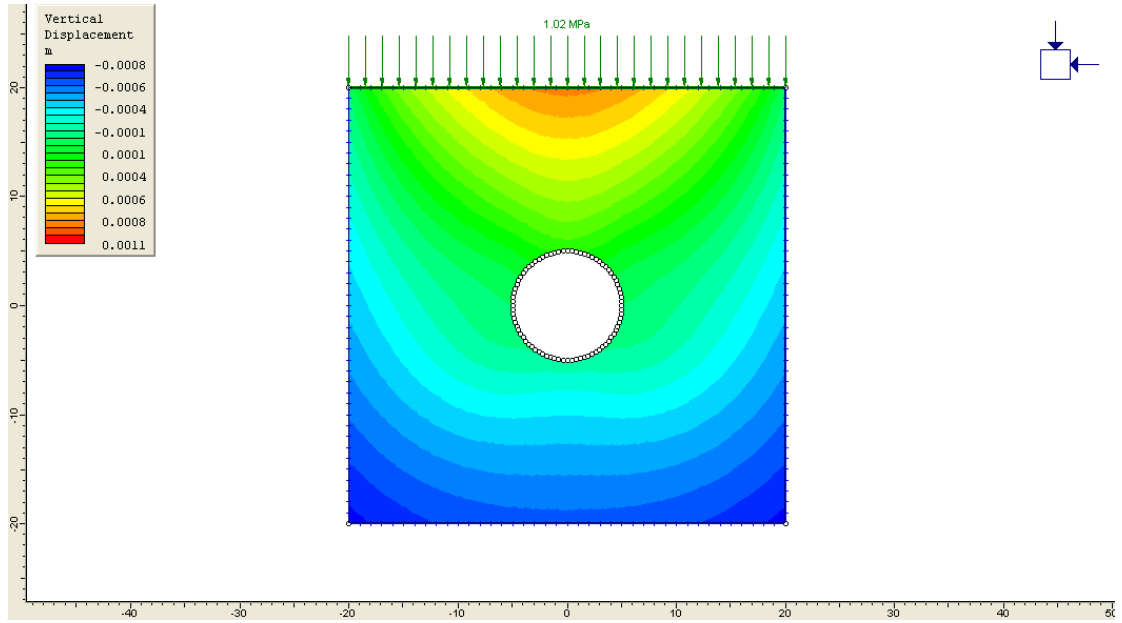
**Μέτρο ελαστικότητας  $E=80881.96\text{MPa}$**

**Λόγος του Poisson:  $\nu=0.25$**

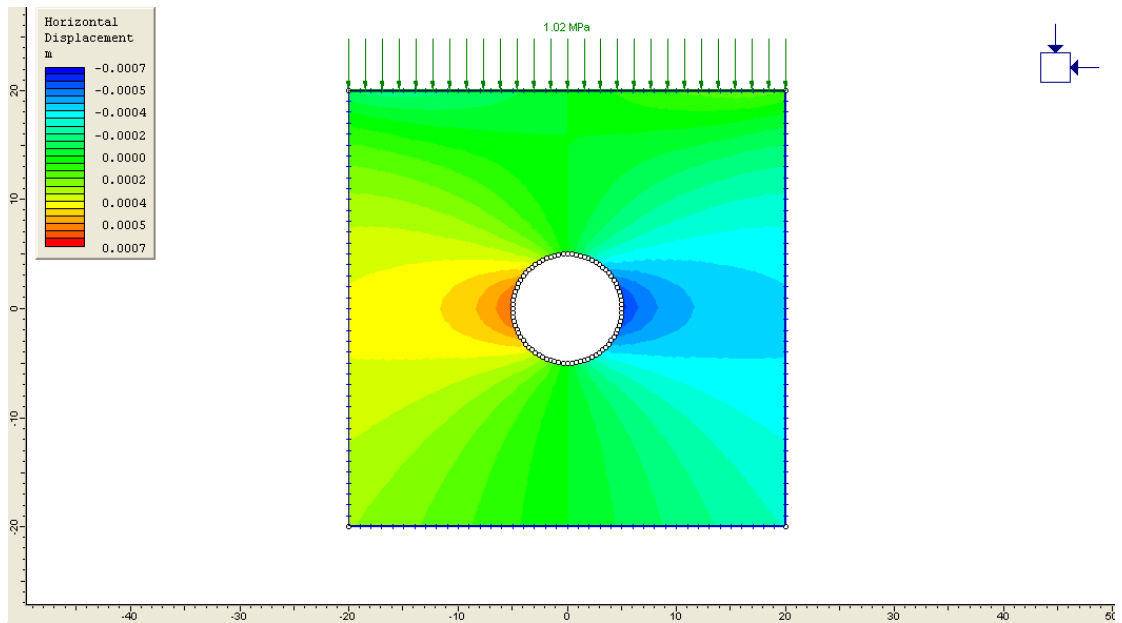
**Συνοχή:  $c=5.255\text{MPa}$**

**Γωνία τριβής:  $\phi=69.6^\circ$**

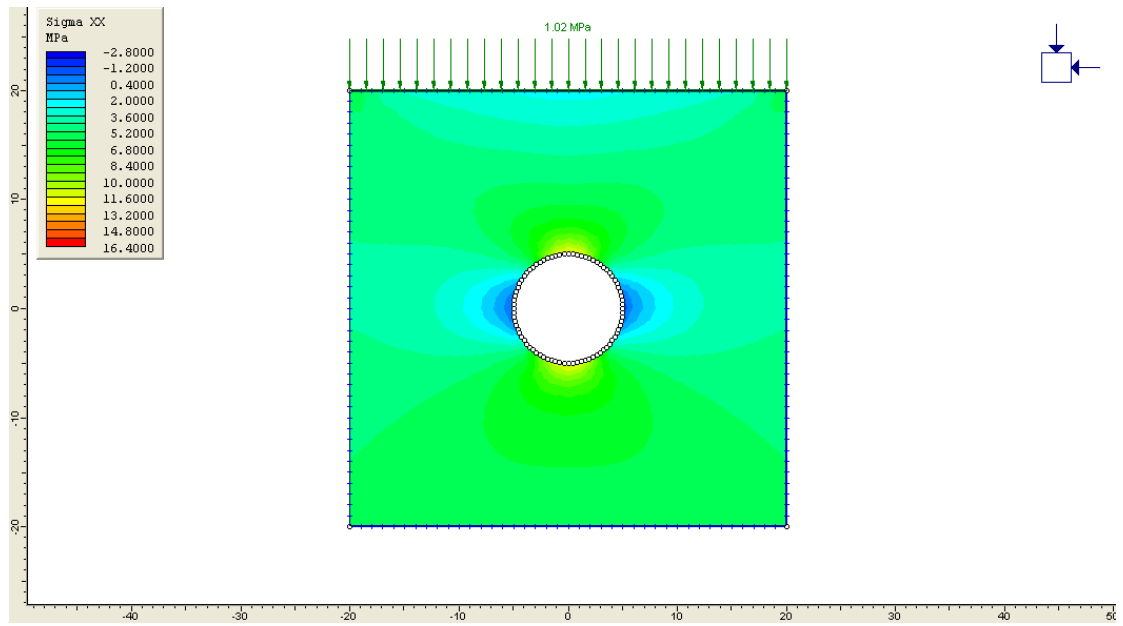
**Εφελκυστική αντοχή =  $1.384\text{MPa}$**



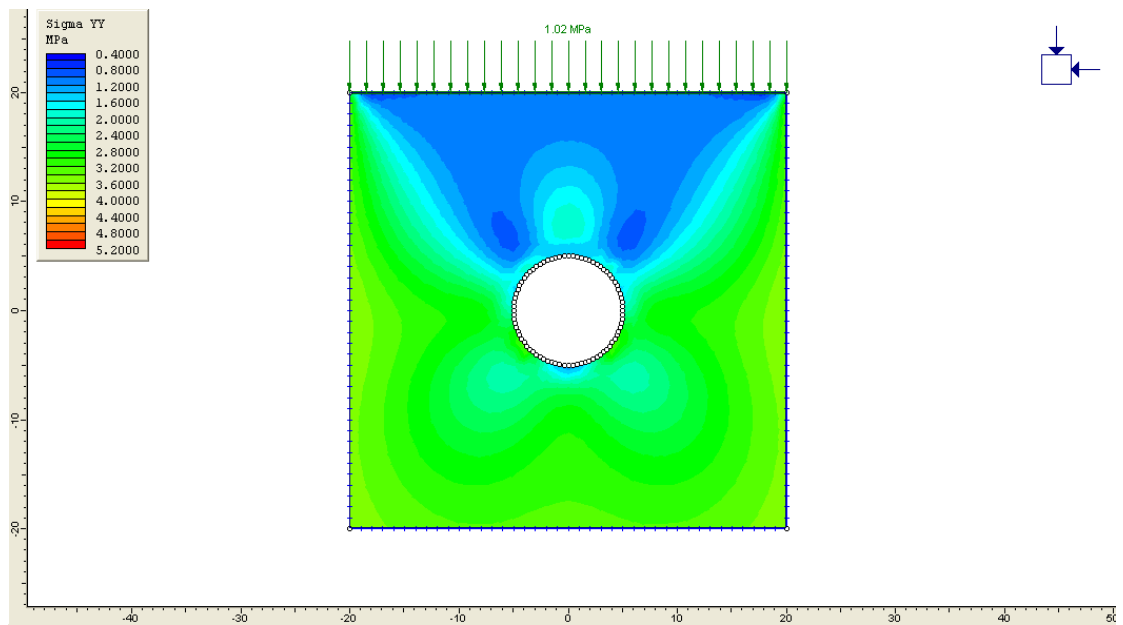
**Εικ.68 – Κατακόρυφη μετακίνηση**



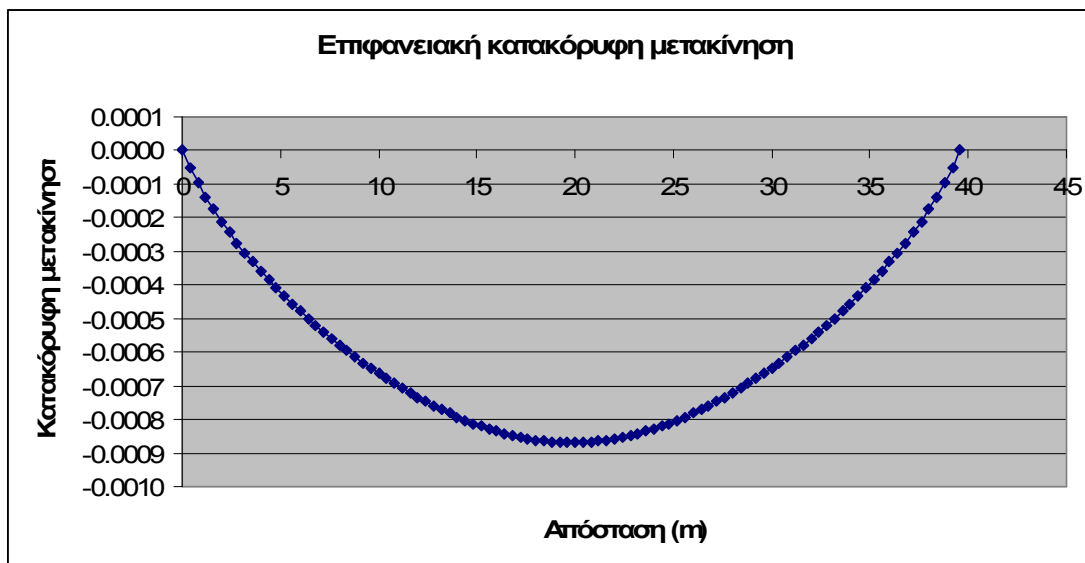
**Εικ.69 – Οριζόντια μετακίνηση**



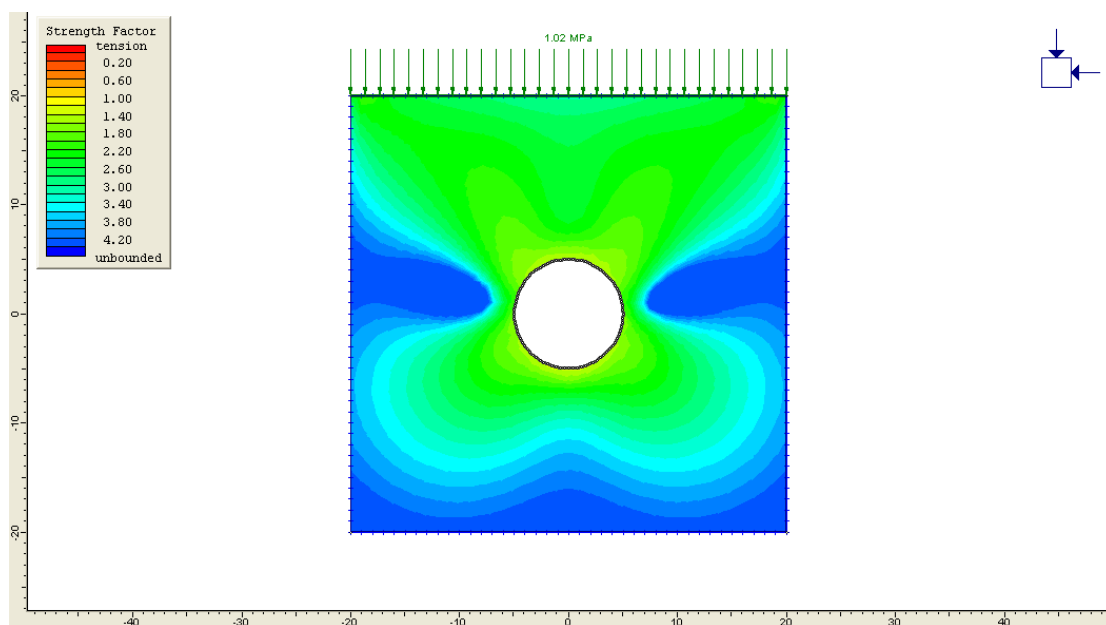
**Εικ.70 – Τάση  $\sigma_{xx}$**



**Εικ.71 – Τάση  $\sigma_{yy}$**



**Εικ.72 – Επιφανειακή κατακόρυφη μετακίνηση**



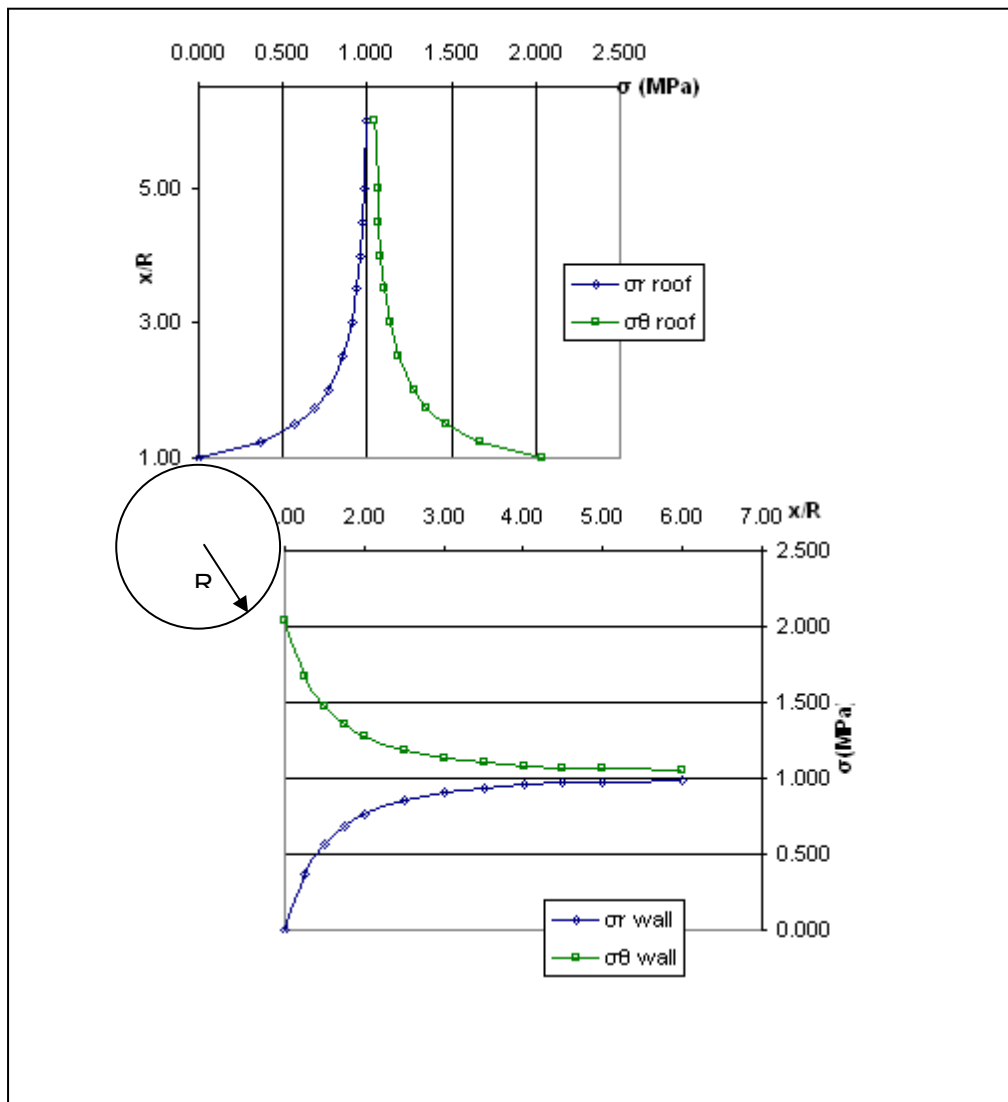
**Εικ.73 – Συντελεστής μείωσης αντοχής (SF<1)**

## 10.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑ KIRSCH

Οι εξισώσεις του Kirsch είναι από τις πιο διαδεδομένες αναλυτικές επιλύσεις για κυκλικές σήραγγες και σε φάση προμελέτης ή θεωρητικής έρευνας μπορεί να φανούν πολύ χρήσιμες. Κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών τύπων κατά Kirsch και της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων προκειμένου να εντοπιστούν διαφορές και ομοιότητες και να ερμηνευτούν ποιοτικά οι διαφοροποιήσεις στις τάσεις και τις

παραμορφώσεις. Η επίλυση των τύπων έγινε με την εφαρμογή σε Excel που διαθέτει το εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ ΕΜΠ η οποία παράγει διαγράμματα τάσεων σε πολικούς άξονες στα τοιχώματα και την οροφή (άνω μέρος) της σήραγγας, καθώς και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις. Για την επίλυση  $k=1$ , δηλαδή οι οριζόντιες με τις κατακόρυφες τάσεις είναι ίσες.

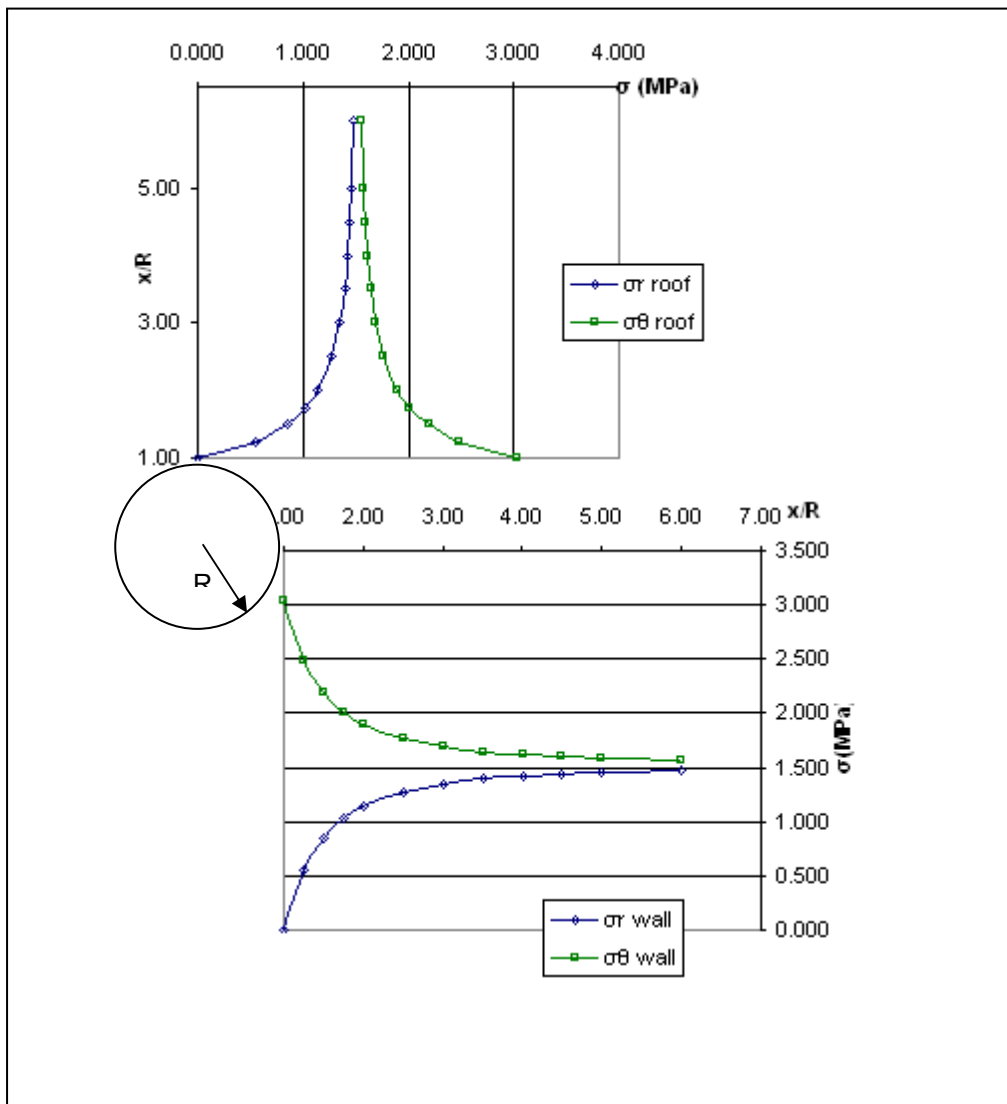
### 10.5.1 ΣΗΡΑΓΓΑ 1 – ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ι



**Διάγραμμα 1 – Τάσεις κατά Kirsch**

Σύγκλιση οροφής = Σύγκλιση τοιχωμάτων = 0.23mm

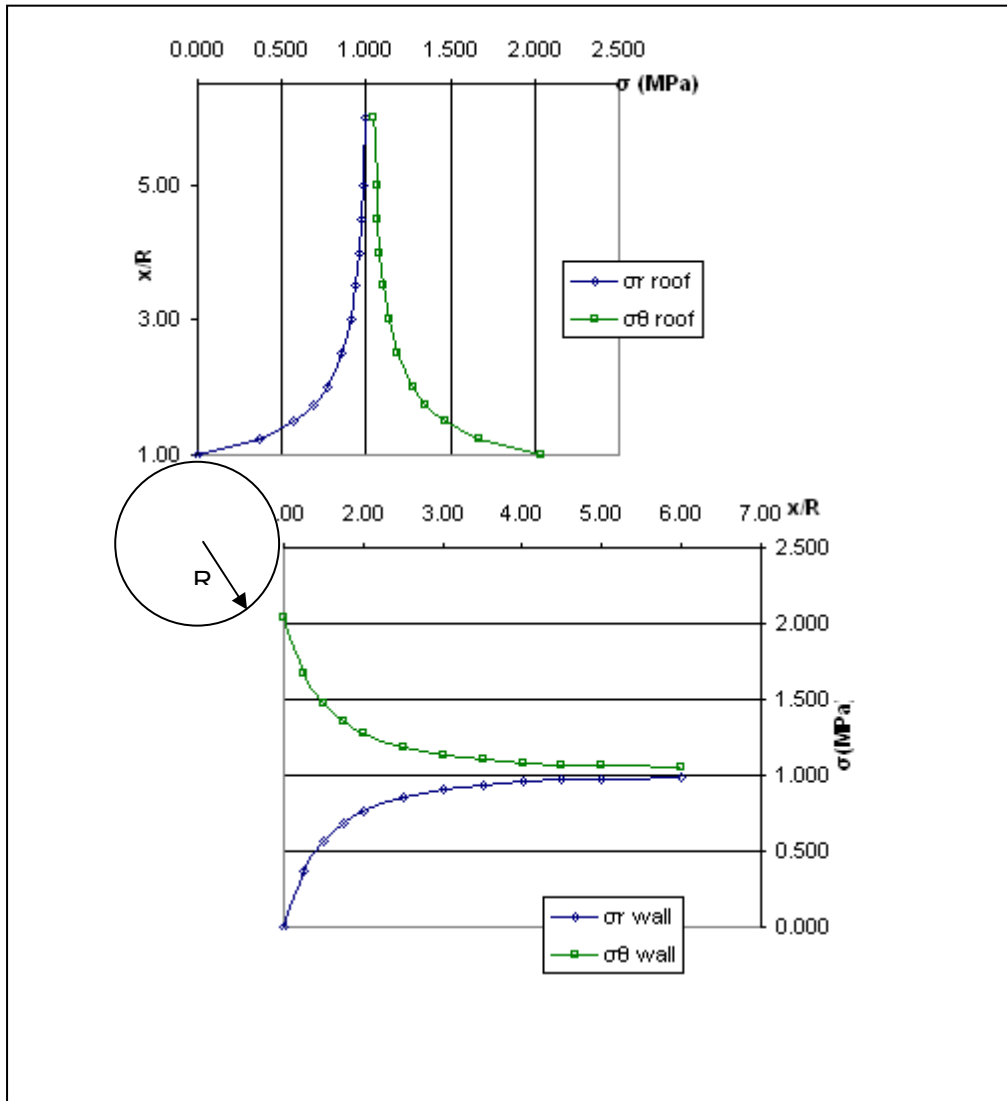
### 10.5.2 ΣΗΡΑΓΓΑ 1 – ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ II



**Διάγραμμα 2 – Τάσεις κατά Kirsch**

Σύγκλιση οροφής = Σύγκλιση τοιχωμάτων = 0.35mm

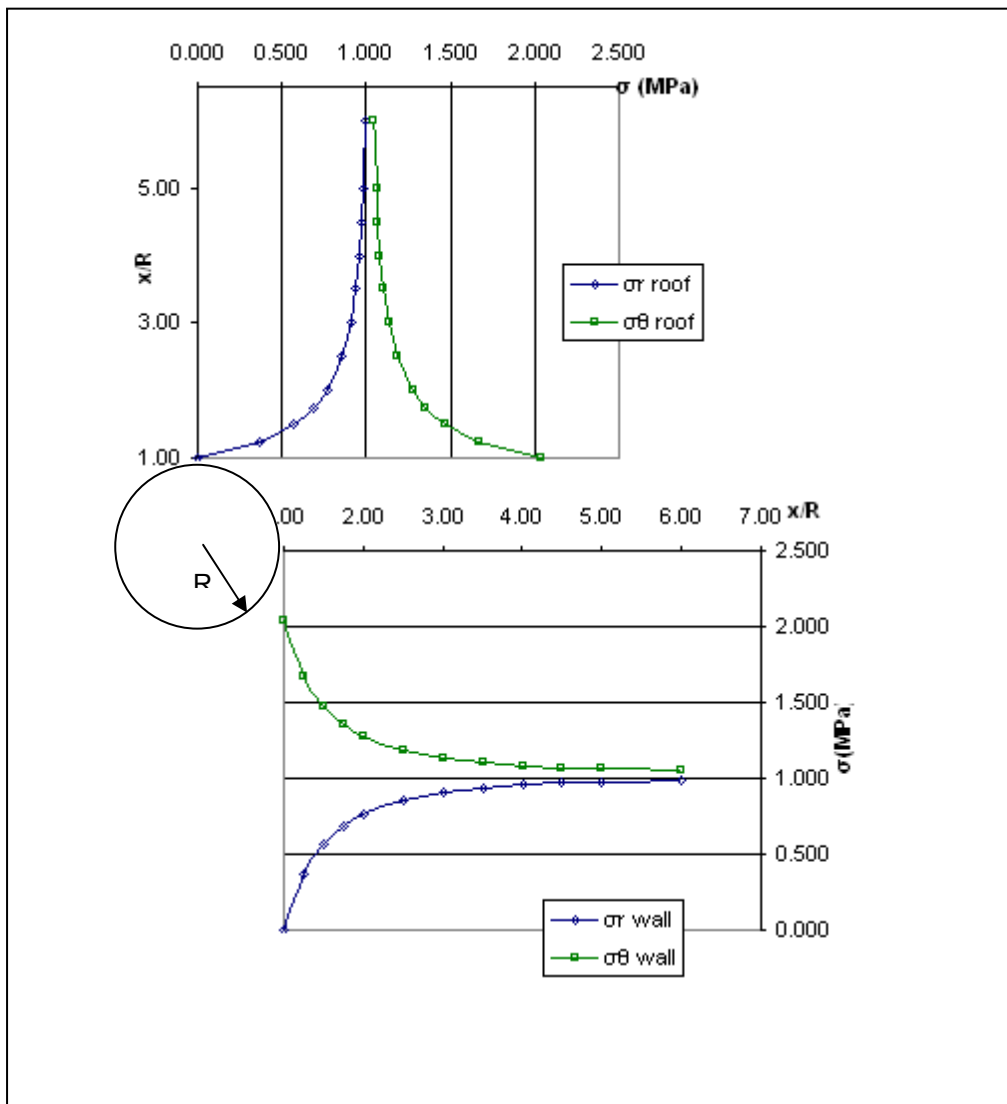
### 10.5.3 ΣΗΡΑΓΓΑ 2



**Διάγραμμα 3 – Τάσεις κατά Kirsch**

Σύγκλιση οροφής = Σύγκλιση τοιχωμάτων = 11.65mm

### 10.5.4 ΣΗΡΑΓΓΑ 3

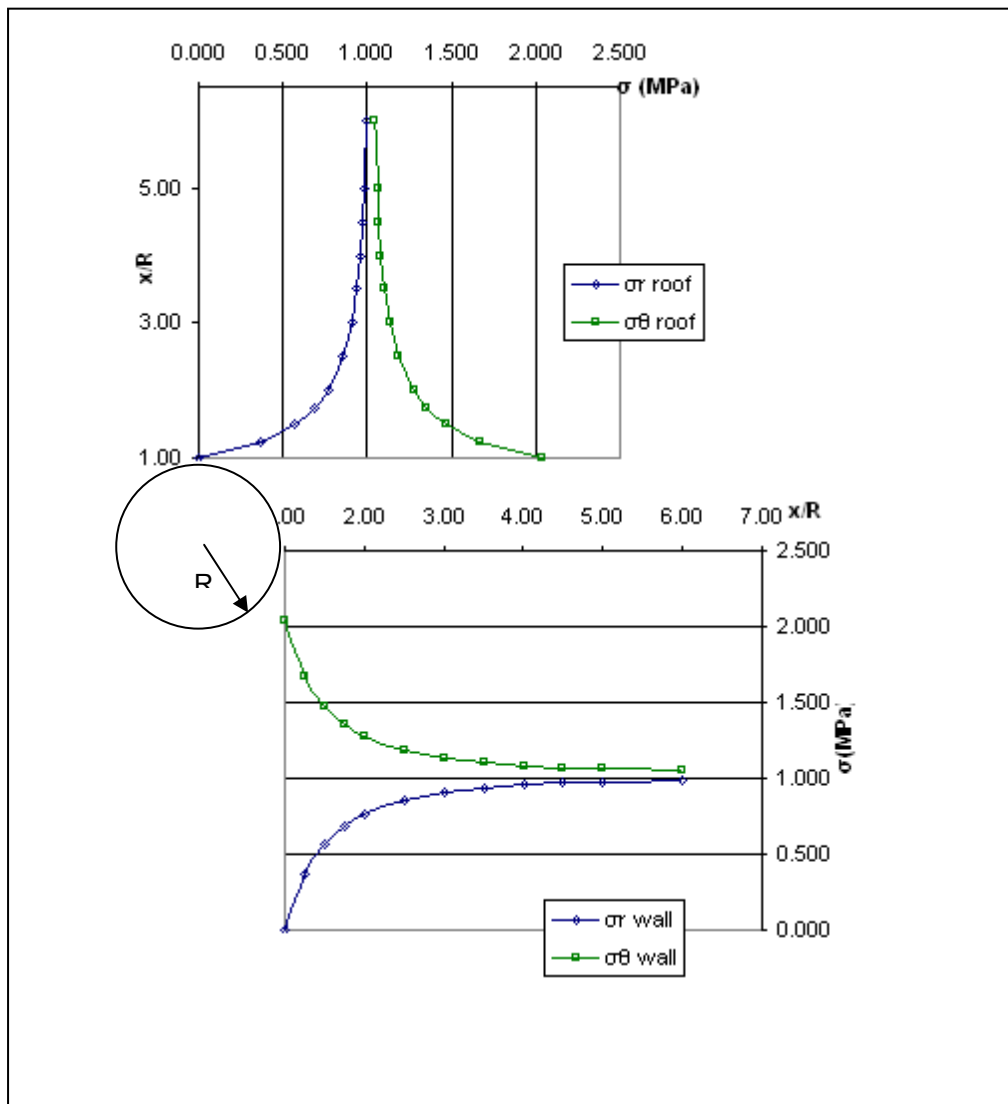


**Διάγραμμα 4 – Τάσεις κατά Kirsch**

Σύγκλιση οροφής = Σύγκλιση τοιχωμάτων = 1.21mm



### 10.5.5 ΣΗΡΑΓΓΑ 4



Διάγραμμα 5 – Τάσεις κατά Kirsch

Σύγκλιση οροφής = Σύγκλιση τοιχωμάτων = 0.08mm

### 10.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παράδειγμα της σήραγγας 1 - περ.Ι, οι προκύπτουσες μετακινήσεις είναι πολύ μικρές (λιγότερο από 1cm) γεγονός που δείχνει ότι η πίεση που ασκείται στο εδαφικό σύνορο (1.02MPa) απορροφάται με επιτυχία από το ασβεστολιθικό στρώμα πάχους 20m. Οι επιφανειακές μετακινήσεις είναι επίσης αμελητέες, επομένως ο κίνδυνος καθιζήσεων από τη στατική ανάλυση

είναι πολύ μικρός. Φυσικά αγνοείται ο παράγοντας του σεισμού που μπορεί να αλλάξει άρδην την κατάσταση, αλλά η ανάλυση που γίνεται είναι αποκλειστικά στατική και όχι δυναμική. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις σχηματίζουν καμπύλες που διαχέονται σχεδόν ομοιόμορφα μέσα στο γεωλογικό στρώμα όπως δείχνει η εικ.29. Υπάρχει ομοιομορφία ως προς κάθετο άξονα όπως αναμένεται λόγω της συμμετρικής γεωμετρίας του προβλήματος. Ίδια συμμετρία εμφανίζεται και για τις οριζόντιες μετακινήσεις, καθώς και για τις τάσεις (σxx, σyy). Αστοχία δεν σημειώνεται όπως δείχνει η εικ.30 η οποία απεικονίζει το δείκτη μείωσης αντοχής (strength factor) που είναι ίσος με το λόγο της αντοχής του πετρώματος δια της επιβαλλόμενης τάσης, οπότε όταν ο δείκτης είναι μικρότερος του 1 έχουμε αστοχία.

Στο παράδειγμα της σήραγγας 1- περ.Π, οι προκύπτουσες μετακινήσεις είναι πολύ μικρές, οπότε και πάλι ο κίνδυνος καθιζήσεων είναι αμελητέος. Τα δύο αυτά παραδείγματα μελετούν υποθαλάσσια σήραγγα διότι θεωρούν ομοιόμορφη πίεση στο εδαφικό σύνορο ίση με την πίεση του υπερκείμενου ύδατος ( $\gamma \approx 1t/m^3$ ).

Τα δύο επόμενα παραδείγματα (Σηρ.1- παρ.ΙΙΙ & παρ.ΙV) απεικονίζουν υπόγεια σήραγγα σε τέτοιο βάθος, ώστε να προκύπτει η ίδια πίεση στο σύνορο της σήραγγας με αυτό της υποθαλάσσιας σήραγγας. Πλέον οι τάσεις μεταβάλλονται βαρυτικά, δηλαδή ανάλογα του βάθους. Ουσιαστικά αντικαθίσταται η πίεση του νερού με κατάλληλο εδαφικό στρώμα που ασκεί την ίδια πίεση. Παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις είναι μικρότερες. Ομοίως και οι επιφανειακές μετακινήσεις είναι αμελητέες. Η διαφορά που διαπιστώνεται στις προκύπτουσες μετακινήσεις οφείλεται στο ότι η σήραγγα βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος και οι τάσεις κατανέμονται πιο ομαλά αφού απορροφούνται από το παχύτερο πλέον στρώμα. Το στρώμα του νερού αντικαθίσταται από αντίστοιχου βάρους γεωλογικό στρώμα. Η δυσκαμψία του γεωλογικού στρώματος μειώνει τις αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις σε σχέση με την υποθαλάσσια σήραγγα. Η σήραγγα δεν αστοχεί ούτε στη μία ούτε στην άλλη περίπτωση και εμφανίζεται μόνο μια κυκλική ζώνη γύρω από τη σήραγγα όπου ο δείκτης αντοχής (SF) είναι μειωμένος χωρίς να πέφτει κάτω από 1.

Το πέμπτο παράδειγμα (Σήραγγα 2) απεικονίζει μια σήραγγα σε ασθενές πέτρωμα (chalk) με σταθερό τασικό πεδίο και πίεση 1.02MPa. Τόσο η γωνία τριβής όσο και η συνοχή, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας έχουν πολύ δυσμενέστερες τιμές εξαιτίας της χαλαρότητας και ευπάθειας του πετρώματος. Όπως είναι αναμενόμενο οι μετακινήσεις είναι πολύ μεγαλύτερες (15-20 φορές μεγαλύτερες) και οι επιφανειακές μετακινήσεις είναι επικίνδυνες. Δημιουργείται μεγάλη πλαστική ζώνη, ένδειξη ότι το πέτρωμα θα αστοχήσει σε πολλά σημεία, κάτι που επιβεβαιώνεται από το SF (strength factor) όπως δείχνει η εικ.59. Σχετικά με το πάχος της πλαστικής ζώνης που υποδεικνύει το τμήμα του υπεδάφους που αστοχεί, σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Μασσίνια & Σακελλαρίου, προκύπτει 4.57μ. για ανυποστήρικτη σήραγγα. Η εσωτερική

πίεση της υποστήριξης πρέπει να προσεγγίσει το 40% της πίεσης που ασκείται στη σήραγγα προκειμένου να μην έχουμε τη δημιουργία πλαστικής ζώνης και επομένως να μην αστοχήσει κανένα σημείο του υπεδάφους. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να καθορίσει με σχετική ακρίβεια το είδος και το πάχος της εσωτερικής υποστήριξης η οποία χρειάζεται η σήραγγα και πρέπει να ασκεί κατ' ελάχιστον μια εσωτερική προστατευτική πίεση ίση με  $0.40P_i$ , όπου  $P_i$  η πίεση που ασκείται στη διατομή της σήραγγας. Αν βάλουμε και ένα συντελεστή ασφαλείας είναι προφανές ότι θα έχουμε αύξηση του πάχους της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας.

Το έκτο παράδειγμα (Σήραγγα 3) απεικονίζει μια σήραγγα σε σχιστόλιθο με σταθερό τασικό πεδίο και πίεση 1.02MPa. Η αντοχή του πετρώματος δεν επαρκεί για να αντιμετωπιστεί η πίεση των 1.02MPa κι έτσι παρουσιάζεται οριακή αστοχία γύρω από τη διατομή της σήραγγας (εικ.67). Παρόλα αυτά το μεγαλύτερο τμήμα του υπεδάφους αντιστέκεται επιτυχώς στην πίεση, χωρίς να αστοχεί, χωρίς όμως αυτό να αλλάζει σε κάτι την έκβαση του προβλήματος.

Το έβδομο παράδειγμα (Σήραγγα 4) απεικονίζει μια σήραγγα σε γνεύσιο με σταθερό τασικό πεδίο και πίεση 1.02MPa. Η αντοχή του πετρώματος είναι τέτοια, ώστε να μην προκαλείται αστοχία σε κανένα σημείο του υπεδάφους (εικ.73).

Το επόμενο σημείο σχολιασμού είναι η σύγκριση των λύσεων με τη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων και με τις σχέσεις του Kirsch. Το διάγραμμα 6 υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει κάποια σαφής σχέση των δύο λύσεων υπό την έννοια ότι άλλοτε τα αποτελέσματα κατά Kirsch είναι μεγαλύτερα και άλλοτε τα αποτελέσματα του Examine2D (ως προς τη μετακίνηση της οροφής). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η επίλυση κατά Kirsch προϋποθέτει άπειρο χώρο υπεδάφους και ο περιορισμός σε ένα βάθος 20m δεν επιτρέπει την ομαλή εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση οι διαφορές σε απόλυτα μεγέθη σε τάσεις και μετακινήσεις είναι μικρές έως αμελητέες. Σε σχετικά όμως μεγέθη οι διαφορές είναι σημαντικές όπως δείχνει το διαγρ.6, αφού π.χ. στη σηρ.1-περ.Π η μετακίνηση κατά Kirsch είναι πολλαπλάσια (9 φορές) μεγαλύτερη. Η πιο ουσιαστική διαφορά εμφανίζεται στη σήραγγα 2 όπου έχουμε διευρυμένη αστοχία και η μέθοδος συνοριακών στοιχείων δίνει υπερδιπλάσιες μετακινήσεις. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι επειδή η ανάλυση που κάνει η μεθοδολογία κατά Kirsch είναι αποκλειστικά ελαστική, ενώ στην πραγματικότητα δημιουργείται μια εκτεταμένη πλαστική περιοχή, τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς αλλοιωμένα.



**Διάγραμμα 6 – Μετακινήσεις κατά Kirsch και ΜΣΣ**

## ΜΕΡΟΣ Γ΄

### 11. ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Έμπειρο Σύστημα (expert system) ή σύστημα γνώσης (knowledge-based system) είναι ένα ευφυές πρόγραμμα Η/Υ που χρησιμοποιεί γνώση και διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων για να λύσει προβλήματα που είναι αρκετά δύσκολα, ώστε να χρειάζονται τη συνδρομή της ανθρώπινης εξειδικευμένης εμπειρίας (πείρας) για να λυθούν.

Κατά τη Βρετανική Εταιρία Υπολογιστών, ένα έμπειρο σύστημα θεωρείται σαν η ενσωμάτωση στον υπολογιστή μιας βασισμένης-στη-γνώση συνιστώσας κατά τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα να μπορεί να δίνει μια ευφυή συμβουλή ή να παίρνει ευφυείς αποφάσεις σχετικά με κάποια λειτουργία επεξεργασίας. Μια πρόσθετη επιθυμητή χαρακτηριστική ιδιότητα, που από πολλούς θεωρείται ουσιώδη, είναι η ικανότητα του έμπειρου συστήματος να αιτιολογεί, όταν του ζητηθεί, τον τρόπο σκέψης του κατάλληλα κατανοητά από αυτόν που το ζήτησε. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιτυγχάνονται με προγραμματισμό βασισμένο σε κανόνες.

Η γνώση στα έμπειρα συστήματα μπορεί να προέρχεται είτε από εμπειρογνώμονες είτε από βιβλία και δημοσιεύσεις. Τα πλεονεκτήματα των έμπειρων συστημάτων είναι:

- Άμεση και συνεχής διαθεσιμότητα: όποτε χρειάζεται, είναι στη διάθεση του πελάτη σε αντίθεση με τον εμπειρογνώμονα, ενώ και η ανταπόκρισή του είναι πολύ πιο γρήγορη από αυτή ενός ειδικού..
- Μειωμένο κόστος: το κόστος για συμβουλές/συνεργασία από εμπειρογνώμονες είναι πολύ υψηλότερο σε σχέση με την αγορά ενός προγράμματος Η/Υ – έμπειρο σύστημα.
- Αντοχή στο χρόνο: διατηρείται παντοτινά και η γνώση τους παραμένει ή και αυξάνεται σε αντίθεση με τους εμπειρογνώμονες που είναι προσωρινοί.
- Αξιοπιστία και σταθερότητα: δεν επηρεάζεται από εξωγενείς συνθήκες και παράγει αιτιολογημένα συμπεράσματα.
- Εκπαίδευση: μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός μη ειδικού
- Πρόσβαση προς πληροφορίες: δίδει επιλεκτική και προσαρμοσμένη πρόσβαση στη βάση δεδομένων του.
- Συστηματοποίηση γνώσης: η κατασκευή ή και χρήση ενός έμπειρου συστήματος δίνει την ευκαιρία για συστηματική συλλογή και επεξεργασία διασκορπισμένων πληροφοριών από διακριτές πηγές.
- Ευκολία προσαρμογής: η διακριτοποίηση της γνώσης και του μηχανισμού εξαγωγής συμπερασμάτων δίνει την ευκαιρία, ώστε το έμπειρο σύστημα να προσαρμόζεται στις εξελίξεις της γνώσης αλλάζοντας παραμέτρους όπως οι τιμές μεταβλητών του μετά από παρέμβαση του χρήστη.

- Κατάλληλα για ελλιπή δεδομένα: μπορούν να λύσουν προβλήματα όταν δεν υπάρχουν ακριβή ή πλήρη δεδομένα, φαινόμενο που εμφανίζεται συχνά στα πραγματικά προβλήματα.
- Επεξηγηματικότητα: εξηγούν με σαφήνεια τον τρόπο με τον οποίο φτάνουν σε μια λύση.
- Αντικειμενικότητα: ειδικά όταν η γνώση προέρχεται από πολλούς ειδικούς.

Μειονεκτήματα Έμπειρων Συστημάτων:

- Πιθανότητα λάθους γνωμάτευσης: λόγω του ότι στηρίζονται σε συγκεκριμένες εμπειρικές γνώσεις, μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα
- Περιορισμένη γνώση σε συγκεκριμένο τομέα: το γεγονός αυτό εμποδίζει την αξιολόγηση εάν ένα πρόβλημα εντάσσεται πράγματι στο εύρος γνώσης του συστήματος.
- Έλλειψη κοινής λογικής: βασίζονται μόνο σε συγκεκριμένη γνώση και κανόνες και δεν έχουν αίσθηση της κοινής πραγματικής λογικής με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να δώσουν παράλογα αποτελέσματα.
- Απουσία έμπνευσης – περιορισμένο πεδίο σκέψης.

Η κατασκευή ενός έμπειρου συστήματος περιλαμβάνει την εξής δομή:

Ειδικός  $\leftrightarrow$  Μηχανικός γνώσης  $\leftrightarrow$  Βάση γνώσης έμπειρου συστήματος

Ένα επιτυχημένο έμπειρο σύστημα πρέπει να έχει υψηλή επίδοση, να δίνει λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, να είναι αξιόπιστο και κατανοητό ως προς τη συλλογιστική του και ευέλικτο ως προς την προσαρμογή νέας γνώσης. Η δομή του διαφέρει από τα συμβατικά προγράμματα ως εξής:

Δεδομένα + Αλγόριθμοι = Προγράμματα

Γνώση + Εξαγωγή συμπερασμάτων = Έμπειρα Συστήματα

Οι κύριες διαφορές των εμπειρών συστημάτων από τα συμβατικά προγράμματα είναι:

- Ο διαχωρισμός της γνώσης και του τρόπου χρησιμοποίησής της
- Η χρήση υψηλού επιπέδου εξειδικευμένης γνώσης σε ένα συγκεκριμένο τομέα
- Η ευριστική, και όχι αλγοριθμική, φύση της διατιθέμενης γνώσης

Τα έμπειρα συστήματα είναι κατάλληλα στις εξής περιπτώσεις:

- Προβλήματα διαγνωστικής
- Δεν υπάρχει καθιερωμένη θεωρία
- Η ανθρώπινη εμπειρία είναι σπάνια
- Τα δεδομένα περιέχουν αβεβαιότητα

Ενώ είναι ακατάλληλα για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Καθαρά υπολογιστικά προβλήματα
- Υπάρχει μαθηματική λύση
- Φθηνοί εμπειρογνώμονες
- Τα δεδομένα είναι ακριβή

Κάθε πλήρες έμπειρο σύστημα έχει τέσσερις συνιστώσες:

1. Τη βάση γνώσης: περιέχει όλη τη γνώση του συστήματος. Αποτελείται από τη στατική βάση γνώσης η οποία δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος και τη δυναμική βάση γνώσης που περιέχει τα μερικά συμπεράσματα που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση του προγράμματος, καθώς και την τελική λύση του προβλήματος.
2. Τη μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων: είναι υπεύθυνη για το χειρισμό της βάσης γνώσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτήν. Χωρίζεται σε δύο μέρη, το διερμηνέα και το χρονοπρογραμματιστή. Ο διερμηνέας αποτελείται συνήθως από αλγορίθμους που υλοποιούν με κάποιο τρόπο την αντίστοιχη συλλογιστική. Ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει πότε και με ποια σειρά θα χρησιμοποιηθούν τα διάφορα στοιχεία της βάσης γνώσης.
3. Τη συνιστώσα λήψης της γνώσης: υποβάλλει ερωτήματα προς το χρήστη και αντλεί πληροφορίες.
4. Τη συνιστώσα ερμηνείας: απαντά σε δύο βασικά ερωτήματα, πώς κατέληξε σε ένα συμπέρασμα και γιατί ζητά κάποια πληροφορία από το χρήστη.

Τρόποι παράστασης γνώσης:

- Δέντρα αποφάσεων
- Σημαντικά δίκτυα
- Κατηγορικός λογισμός

Η μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων έχει να κάνει με αβέβαια δεδομένα τα οποία απαιτούν ειδικές μεθόδους αντιμετώπισης όπως ασαφής λογική, λογική Bayesian, λογική πολλαπλών τιμών, μέθοδος συντελεστών αβεβαιότητας κ.ά.

Στην κατηγορηματική λογική η έννοια μιας πρότασης έχει μια ακριβή και καλά ορισμένη σημασία. Συγκεκριμένα μια πρόταση θεωρείται ότι αληθεύει τότε και μόνο τότε εάν η αλήθεια όλων των υποθέσεων του συνεπάγεται την αλήθεια των συμπερασμάτων του.

Από υπολογιστική άποψη είναι ωφέλιμο να έχουμε ένα ενιαίο τρόπο απόδειξης ο οποίος να διεκπεραίωσε την απόδειξη, ανάγοντας τις διάφορες διαδικασίες λογικής αιτιολόγησης σε μια μοναδική λογική πράξη. Μια τέτοια τεχνική στηρίζεται στην αρχή της απόφασης με βάση την οποία ελέγχουμε την ύπαρξη ή όχι αντίφασης. Η απόδειξη γίνεται με αντίκρουση της αντίφασης. Δηλαδή για να αποδείξουμε την αλήθεια ενός γεγονότος προσπαθούμε να αποδείξουμε ότι

η άρνηση του γεγονότος αυτού οδηγεί σε αντίφαση με τα γνωστά γεγονότα (δηλαδή ότι δεν ικανοποιείται).

Για να περιγράψουμε ένα πρόβλημα τεχνητής νοημοσύνης πρέπει να κάνουμε τα ακόλουθα (Τζαφέστας 2005):

1. Να ορίσουμε ένα χώρο κατάστασης που περιέχει όλες τις δυνατές (ή και μη δυνατές) περιπτώσεις (συνδυασμούς κλπ.) των σχετικών αντικειμένων.
2. Να καθορίσουμε μία ή περισσότερες καταστάσεις που περιγράφουν συνθήκες από τις οποίες μπορεί να αρχίσει η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Οι καταστάσεις αυτές ονομάζονται αρχικές καταστάσεις.
3. Να καθορίσουμε μία ή περισσότερες καταστάσεις που είναι αποδεκτές σαν λύσεις του προβλήματος. Οι καταστάσεις αυτές ονομάζονται καταστάσεις στόχου.
4. Να καθορίσουμε ένα σύνολο κανόνων που περιγράφουν τις ενέργειες που είναι διαθέσιμες.

Τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που μας οδηγούν στον προσδιορισμό της πιο κατάλληλης ευρετικής μεθόδου είναι τα εξής:

- Αν το πρόβλημα μπορεί να διασπαστεί σε ένα σύνολο ανεξάρτητων μικρότερων και πιο εύκολων προβλημάτων.
- Αν μερικά βήματα μπορούν να αγνοηθούν εάν αποδειχθούν ακατάλληλα.
- Αν μία λύση του προβλήματος είναι καλή, χωρίς να γίνει σύγκριση με άλλες δυνατές λύσεις.
- Αν η βάση γνώσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη λύση του προβλήματος είναι εσωτερικά συνεπής.
- Αν χρειάζεται μεγάλη ποσότητα γνώσης για τη λύση του προβλήματος ή αν η γνώση χρησιμεύει μόνο για να περιορίσει την ανίχνευση.
- Αν χρειάζεται αλληλεπίδραση χρήστη-υπολογιστή προκειμένου να βρεθεί η λύση.

Ένας τρόπος για να λύσουμε κάποιο πρόβλημα είναι με τη βοήθεια των γράφων ή δέντρων ακολουθιών των κανόνων που εφαρμόζονται και των καταστάσεων που προκύπτουν. Τα δέντρα αυτά ονομάζονται δέντρα ανίχνευσης ή έρευνας. Στην κορυφή του δέντρου εικονίζεται μια περιγραφή της αρχικής κατάστασης. Οι διάφοροι κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν παριστάνονται με τους κλάδους που οδηγούν σε κατερχόμενους κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί παριστούν τις καταστάσεις που προκύπτουν μετά από την εφαρμογή των κανόνων. Ένα δέντρο ανίχνευσης αναπτύσσεται μέχρι που να πάρουμε μια βάση δεδομένων η οποία να ικανοποιεί τις συνθήκες τερματισμού. Αν ο τρόπος ανίχνευσης από την αρχική κατάσταση στην κατάσταση στόχου λέγεται «ευθύς» (ορθός), τότε και το σύστημα που προκύπτει λέγεται ευθύ ή ορθό σύστημα παραγωγής. Αν ξεκινήσουμε από την κατάσταση στόχου και με ανάστροφες κινήσεις προχωρήσουμε προς την αρχική κατάσταση, τότε το σύστημα λέγεται ανάστροφο σύστημα παραγωγής.



Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει οποιοδήποτε σύστημα δομημένης παράστασης της γνώσης ενός πεδίου είναι:

- Επάρκεια παράστασης: ικανότητα παράστασης όλων των μορφών της γνώσης του πεδίου.
- Επάρκεια συλλογισμού: ικανότητα χειρισμού των δομών που παριστάνει έτσι ώστε να παράγονται νέες δομές οι οποίες αντιστοιχούν σε νέα γνώση που προκύπτει από τη παλιά.
- Αποδοτικότητα συλλογισμού: ικανότητα προσθήκης πληροφορίας στη δομή της γνώσης η οποία να κάνει τους μηχανισμούς συλλογισμού να δίνουν μεγαλύτερη προσοχή προς τις πιο κατάλληλες κατευθύνσεις.
- Αποδοτικότητα λήψης πληροφορίας: ικανότητα εύκολης αποδοχής νέας πληροφορίας.

Οι τεχνικές δομημένης παράστασης που έχουν αναπτυχθεί χωρίζονται σε δηλωτικές (π.χ. κατηγορικός λογισμός) και διαδικαστικές (στις οποίες η γνώση παρίσταται υπό τη μορφή διαδικασιών χρησιμοποίησης της γνώσης). Η παράσταση της γνώσης με τα σημαντικά ή σημασιολογικά ή εννοιολογικά δίκτυα στηρίζεται στην παλιά και πολύ απλή ιδέα ότι η μνήμη απαρτίζεται από συσχετίσεις (συνδέσεις) μεταξύ εννοιών.

Για την παράσταση και επεξεργασία της γνώσης προς εξαγωγή συμπερασμάτων από αβέβαια δεδομένα υπάρχουν τρεις γενικές περιγραφές:

- Τεχνική συντελεστών βεβαιότητας: ο συντελεστής βεβαιότητας δίνει ένα μέτρο της σιγουριάς που έχουμε για κάποιο γεγονός με βάση τη μαρτυρία που έχουμε στη διάθεσή μας.
- Πιθανοθεωρητική Τεχνική Bayes
- Τεχνική αξίας κανόνων: αντιστοιχούμε μια τιμή (αξία) σε κάθε στοιχείο μαρτυρίας (κανόνα) κατά τη διαδικασία συλλογισμού και κάνουμε πρώτα την ερώτηση που έχει τη μεγαλύτερη τιμή.

Η τεχνική Shafer-Dempster ανήκει στην κατηγορία των παράλληλων συμπερασματολογιών (συλλογιστικών) βεβαιότητας, οι οποίες χειρίζονται την αβεβαιότητα ως ξεχωριστές οντότητες με διαδικασίες χαλαρά συνδεδεμένες. Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων χειρίζεται τη γνώση σαν να είναι βέβαιη, ενώ ακολουθεί μια παράλληλη μορφή συμπερασματολογίας αβεβαιότητας, που υπολογίζει την αβεβαιότητα μετά από κάθε νέα μαρτυρία. Η μέθοδος αποτελείται από τέσσερα βασικά σημεία:

- Τα βασικά στοιχεία στα οποία στηρίζεται η θεωρία. Σε αυτά περιλαμβάνονται μια άλγεβρα προτάσεων που περιγράφουν το πεδίο ορισμού, συναρτήσεις βεβαιότητας και συναρτήσεις αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.
- Την κωδικοποίηση των μαρτυριών σε μορφή επεξεργάσιμη από τη θεωρία.
- Το μηχανισμό ανανέωσης ο οποίος καθορίζει τον τρόπο μετάβασης από μια κατάσταση βεβαιότητας σε κάποια άλλη.
- Το μηχανισμό απόφασης.

Ασαφής λογική – Ασαφή συστήματα

Η αρχιτεκτονική των ασαφών συστημάτων περιλαμβάνει τέσσερις μονάδες (Τζαφέστας 2005):

1. Μία βάση ασαφών κανόνων της μορφής EAN-TOTE (Ασαφής βάση γνώσης)
2. Μια ασαφή συλλογιστική μηχανή (μηχανισμό εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων ή αποφάσεων)
3. Μια μονάδα ασαφοποίησης (ασαφοποιητική μονάδα διεπαφής) η οποία μετατρέπει τα δεδομένα εισόδου σε ασαφή σύνολα.
4. Μια μονάδα αποασαφοποίησης (αποασαφοποιητική μονάδα διεπαφής) η οποία μετατρέπει τα ασαφή συμπεράσματα/αποφάσεις σε σαφώς καθορισμένη/ντετερμινιστική μορφή.

Η ασαφής βάση γνώσης περιέχει εκτός από ασαφείς (γλωσσικούς) κανόνες και ένα τμήμα βάσης αριθμητικών δεδομένων τα οποία απαιτούνται για τη διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Οι κανόνες της βάσης γνώσης λαμβάνονται συνήθως από τους εμπειρογνώμονες ή και από διαδικασίες προσομοίωσης.

Η ασαφής συλλογιστική μηχανή αποτελεί τον πυρήνα του ασαφούς συστήματος και περιέχει τη λογική λήψης αποφάσεων. Η μονάδα ασαφοποίησης εκτελεί τις παρακάτω εργασίες:

- Μετράει (παραλαμβάνει) τις μη ασαφείς τιμές των εισόδων του συστήματος.
- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των τιμών εισόδου σε κατάλληλα υπερσύνολα αναφοράς.
- Ασαφοποιεί τις εισερχόμενες τιμές των εισόδων δηλαδή τις μετατρέπει σε ασαφή ή γλωσσική μορφή.

Η μονάδα αποασαφοποίησης εκτελεί τις εξής δύο εργασίες:

- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των μεταβλητών εξόδου σε αντίστοιχα υπερσύνολα μεταφοράς.
- Αποασαφοποιεί τα αποτελέσματα που δίνει η ασαφής συλλογιστική μηχανή, δηλαδή τα μετατρέπει σε ντετερμινιστική (μη ασαφή) μορφή για παραπέρα χρήση από επόμενα συστήματα ή διεργασίες απόφασης.

Μερικά από τα πιο γνωστά έμπειρα συστήματα πάνω στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη πολλών άλλων μεταγέστερων εμπείρων συστημάτων είναι τα εξής: MYCIN, PROSPECTOR, INTERNIST-I, INTERNIS-II και CASNET. Το έμπειρο σύστημα PROSPECTOR αναπτύχθηκε στο Ερευνητικό Ινστιτούτο του Stanford για να βοηθήσει τους γεωλόγους στην αναζήτηση υπόγειων ορυκτών αποθεμάτων. Υλοποιήθηκε απευθείας στη γλώσσα INTERLISP και περιέχει εξελιγμένες συνιστώσες απόκτησης της γνώσης και επεξήγησης. Η βάση γνώσης αποτελείται από περισσότερους από 1000 κανόνες και χρησιμοποιεί μια ρητή ταξινόμια γεωλογικών όρων με περισσότερα από 1000 στοιχεία. Το σύστημα υποβάλλει ερωτήματα προς το χρήστη ο οποίος παρέχει πληροφορίες

για την υπό εξέταση περιοχή. Το σύστημα με βάση τη βεβαιότητα του χρήστη για την είσοδο δίνει ένα μέτρο βεβαιότητας για την απάντηση.

Το σύστημα PROSPECTOR στηρίζεται σε κανόνες που συνδέουν την παρατηρούμενη μαρτυρία (E) συγκεκριμένων γεωλογικών ευρημάτων με υποθέσεις (H) που συμπεραίνονται από τη μαρτυρία. Ένας τυπικός κανόνας έχει τη μορφή:

EAN E TOTE H (με βαθμό) BY, BK

Όπου ο αριθμός BY δείχνει το βαθμό βεβαιότητας που έχουμε να είναι παρούσα η μαρτυρία E στην υπόθεση H (Βαθμός Υπέρ) και ο αριθμός BK δείχνει το βαθμό βεβαιότητάς μας να μην είναι παρούσα η μαρτυρία E στην υπόθεση H (Βαθμός Κατά). Ο αριθμός BY ονομάζεται συντελεστής επάρκειας και ο αριθμός BK ονομάζεται συντελεστής αναγκαιότητας. Το σύστημα συνοδεύει κάθε στοιχείο μαρτυρίας και κάθε υπόθεση με ένα βαθμό βεβαιότητας P που εκφράζει την πιθανότητα παρουσίας (ύπαρξης) της μαρτυρίας ή την πιθανότητα ισχύος (αλήθειας) της υπόθεσης. Οι τιμές των βαθμών βεβαιότητας BY και BK ορίστηκαν κατά το κτίσιμο του συστήματος και παραμένουν αμετάβλητες κατά τη λειτουργία αυτού. Οι συντελεστές βεβαιότητας της μαρτυρίας και των υποθέσεων (P) ορίστηκαν και αυτές κατά την κατασκευή του μοντέλου, αλλά μπορούν να μεταβάλλονται με βάση τη νέα πληροφορία που δίνει ο χρήστης. Η ανανέωση (διάδοση) των πιθανοτήτων P γίνεται με βάση τον κανόνα του Bayes. Το τμήμα του συστήματος που εκτελεί τη διάδοση των πιθανοτήτων προς τα εμπρός στο συλλογιστικό δίκτυο αποτελεί το συλλογιστικό μηχανισμό (μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων) του PROSPECTOR. Επειδή η επεξεργασία των κανόνων ξεκινάει από το «EAN» και προχωράει προς το «TOTE», ο μηχανισμός του συστήματος ακολουθεί την ορθή αλυσίδα συλλογισμού. Η διάδοση των πιθανοτήτων δεν μπορεί να ξεκινήσει πριν ο χρήστης τροφοδοτήσει το σύστημα με ένα καινούργιο στοιχείο πληροφορίας. Επομένως, η συλλογιστική μηχανή του συστήματος πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τι ερωτήσεις να κάνει στο χρήστη. Εξετάζει τους κανόνες που υποστηρίζουν την τρέχουσα υπόθεση στόχου και κάνει την καλύτερη δυνατή ερώτηση που μπορεί σχετικά με τη μαρτυρία των κανόνων αυτών. Η απάντηση στην καλύτερη αυτή ερώτηση έχει τη μεγαλύτερη επίδραση πάνω στην πιθανότητα του κόμβου του στόχου.

Οι κύριες κατηγορίες των εργασιών τις οποίες μπορούν να εκτελέσουν τα έμπειρα συστήματα είναι: πρόβλεψη, διάγνωση, σχεδίαση, σχεδιασμός, παρακολούθηση, επιδιόρθωση, διδασκαλία, έλεγχος συμπεριφοράς, προσομοίωση και παροχή συμβουλών. Οι κύριες περιοχές εφαρμογής των έμπειρων συστημάτων είναι ιατρική, χημεία, γεωλογία, φυσική, μαθηματικά, τεχνολογία, διοίκηση, βιομηχανία, ρομποτική, νομική επιστήμη κλπ.

Η γνώση σε ένα έμπειρο σύστημα μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές όπως τεχνικές εκθέσεις, βάσεις δεδομένων, εγχειρίδια, εμπειρικά δεδομένα και

προσωπική εμπειρία. Η κυρίαρχη πηγή γνώσης είναι ο εμπειρογνώμονας. Ο μηχανικός γνώσης λαμβάνει τη γνώση αυτή μέσω άμεσης επικοινωνίας με τον εμπειρογνώμονα. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το πρόβλημα για να είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός έμπειρου συστήματος είναι τα εξής:

- Το πρόβλημα δεν απαιτεί κοινή λογική.
- Το πρόβλημα απαιτεί μόνο ικανότητες αντίληψης.
- Οι εμπειρογνώμονες μπορούν να εξηγήσουν τις μεθόδους τους με σαφήνεια.
- Υπάρχουν ικανοί εμπειρογνώμονες που μπορούν να εκτελέσουν το έργο με επιτυχία.
- Οι εμπειρογνώμονες συμφωνούν στις λύσεις που δίνουν.
- Το έργο δεν είναι εξαιρετικά δύσκολο.
- Το πρόβλημα έχει κατανοηθεί επαρκώς.

Οι φάσεις ανάπτυξης ενός έμπειρου συστήματος περιλαμβάνουν:

Αναγνώριση (εντοπισμός των σημαντικών πλευρών του προβλήματος) → Αντίληψη (κατανόηση και ορισμός εννοιών) → Διατύπωση (παράσταση γνώσης) → Υλοποίηση (καθορισμός κανόνων) → Έλεγχος (δοκιμασία εγκυρότητας κανόνων)

Αναπαράσταση γνώσης είναι ένα σύνολο συντακτικών και σημασιολογικών παραδοχών οι οποίες καθιστούν δυνατή την περιγραφή ενός κόσμου. Τα δομικά στοιχεία που έχει κάθε μέθοδος αναπαράστασης γνώσης είναι (Βλαχάβας & λοιποί 2006):

- το συντακτικό, δηλαδή ο ορισμός των συμβόλων που χρησιμοποιεί και οι κανόνες με τους οποίους τα σύμβολα αυτά μπορούν να συνδυαστούν.
- η σημασιολογία, δηλαδή ο καθορισμός των εννοιών που αποδίδονται στα σύμβολα και συνδυασμούς συμβόλων που επιτρέπει το συντακτικό.

Έχει σημασία να διαχωρίσουμε τις έννοιες: δεδομένα, πληροφορία και γνώση, έτσι ώστε γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα της ύπαρξης των μεθόδων αναπαράστασης της γνώσης. Τα δεδομένα είναι μη-οργανωμένα και μη-επεξεργασμένα γεγονότα. Συνήθως τα δεδομένα αποτελούν κάποιες μετρήσιμες ή υπολογίσιμες τιμές των ιδιοτήτων των αντικειμένων. Είναι στατικά, δηλαδή από τη στιγμή που θα καταγραφούν δεν αλλάζουν. Η πληροφορία αποτελείται από δεδομένα τα οποία έχουν φιλτραριστεί και μορφοποιηθεί κατάλληλα. Η πληροφορία έχει νόημα, σκοπό και συνάφεια, ώστε να διευκολύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η γνώση είναι πληροφορία που έχει υποστεί μια σειρά ειδικών ελέγχων για την πιστοποίησή της. Ουσιαστικά αναδεικνύει τη σημαντικότητα της πληροφορίας συσχετίζοντάς τη με χρήσιμα συμπεράσματα ή αναγκαίες ενέργειες. Τέλος, θα μπορούσε να προστεθεί και η έννοια της «σοφίας» ή «μετα-γνώσης» ως η ικανότητα να χρησιμοποιεί κάποιος τη γνώση αποδοτικά με βασικές ιδιότητες την ικανότητα αναθεώρησης της γνώσης, τη μάθηση από τα λάθη, τη διορατικότητα και την ικανότητα πρόβλεψης.

Τα βασικά είδη συλλογιστικής είναι τρία:

- η συνεπαγωγική συλλογιστική: το συμπέρασμα που εξάγεται είναι λογικό επακόλουθο του γενικού κανόνα και του γεγονότος που καταγράφεται ως αληθές με απόλυτη βεβαιότητα.
- η επαγωγική συλλογιστική: η εξαγωγή συμπερασμάτων από ένα σύνολο παραδειγμάτων με την ορθότητα των συμπερασμάτων να μην είναι εγγυημένη.
- η απαγωγική συλλογιστική: ξεκινά με ένα παρατηρούμενο γεγονός το οποίο αποτελεί συμπέρασμα ενός κανόνα και υποθέτει ότι οι συνθήκες στις οποίες βασίζεται το συμπέρασμα είναι έγκυρες. Ωστόσο δεν υπάρχει τρόπος να εγγυηθεί ότι οι υποθέσεις που κάνει για τις συνθήκες είναι έγκυρες. Γι' αυτό συνήθως χρειάζεται επιβεβαίωση της υπόθεσης με τη χρήση άλλων τεχνικών. Η απαγωγική συλλογιστική χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα όπου οι παρατηρήσεις αποτελούν συμπτώματα, τα αίτια των οποίων δεν είναι απευθείας παρατηρήσιμα.

Μερικές από τις πιο σύγχρονες και εξελιγμένες συλλογιστικές των συστημάτων γνώσης οι οποίες αναπτύχθηκαν ώστε να μειώσουν την ανάγκη για ενσωμάτωση της εμπειρικής γνώσης είναι η συλλογιστική βασισμένη σε μοντέλα, η ποιοτική συλλογιστική και η συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις. Η ανάπτυξη των συλλογιστικών αυτών οδήγησε στη γενίκευση του όρου έμπειρα συστήματα σε συστήματα γνώσης, ώστε να συμπεριλάβει και τα συστήματα στα οποία η γνώση δεν προέρχεται μόνο από ειδικούς.

Η συλλογιστική βασισμένη σε μοντέλα βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα (περιγράφουν με αναλυτικές εξισώσεις ένα σύστημα), στοχαστικά μοντέλα (περιγράφουν τη στατιστική λειτουργία ενός συστήματος) και αιτιοκρατικά μοντέλα (περιγράφουν ένα σύστημα μέσω των αλληλεπιδράσεων των επιμέρους τμημάτων του). Η ποιοτική συλλογιστική βασίζεται στην ποιοτική κατανόηση ενός φυσικού συστήματος δημιουργώντας ένα ποιοτικό μοντέλο. Η συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις βασίζεται στη χρήση καταγεγραμμένης εμπειρίας για την επίλυση νέων προβλημάτων. Χρησιμοποιεί παραδείγματα προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς στο παρελθόν προκειμένου να επιλυθεί το τρέχον πρόβλημα με παραπλήσιο τρόπο. Η επιλογή των κατάλληλων περιπτώσεων βασίζεται στην ομοιότητά τους με την τρέχουσα.

Η προτασιακή λογική αποτελεί την απλούστερη μορφή μαθηματικής λογικής. Κάθε γεγονός του πραγματικού κόσμου αναπαρίσταται με μια λογική πρόταση, η οποία χαρακτηρίζεται είτε ως αληθής είτε ως ψευδής, δηλαδή μπορεί να έχει δυο λογικές τιμές.

Η κατηγορηματική λογική αποτελεί επέκταση της κατηγορηματικής λογικής. Ο κόσμος περιγράφεται σαν ένα σύνολο αντικειμένων, ιδιοτήτων και σχέσεων που προσδίνονται σε αυτά, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για αναπαραστάσεις που είναι κοντινότερες στην ανθρώπινη εμπειρία.

Η μη-μονότονη λογική έχει ως χαρακτηριστικό ότι η προσθήκη νέων αξιωμάτων είναι δυνατό να μειώσει το σύνολο των δυνατών συμπερασμάτων, αφαιρώντας κάποια που αποδεικνύονται εσφαλμένα μετά την προσθήκη. Έχει ως πλεονεκτήματα ότι κάθε φορά που προστίθεται ένα νέο γεγονός δε χρειάζονται νέοι έλεγχοι για τη συνέπεια της γνώσης του συστήματος και ότι για κάθε νέο γεγονός που αποδεικνύεται δεν είναι απαραίτητη η καταγραφή των γεγονότων πάνω στα οποία βασίζεται η αλήθεια του, αφού δεν υπάρχει κίνδυνος απομάκρυνσης παλιότερων γεγονότων.

Υπάρχουν δύο είδη κανόνων, αυτοί που εκφράζουν διαδικαστική γνώση και αυτοί που εκφράζουν δηλωτική. Και στα δύο είδη, οι συνθήκες είναι μια ακολουθία από κατηγορήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με σύζευξη (AND) ή διάζευξη (OR).

Διαδικαστική γνώση: AN οι συνθήκες αληθεύουν ΤΟΤΕ εκτέλεσε τις ενέργειες.

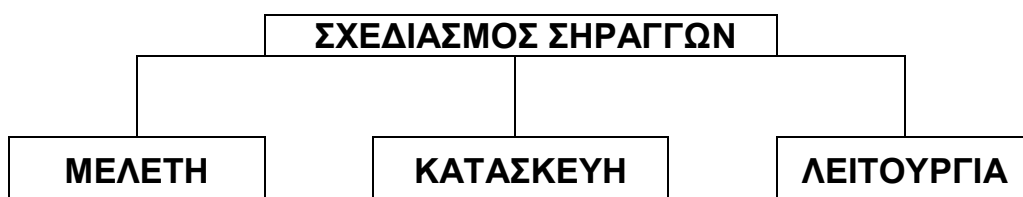
Δηλωτική γνώση: AN οι συνθήκες αληθεύουν ΤΟΤΕ αληθεύει και το συμπέρασμα.

Ανάλογα με το είδος κανόνων που χρησιμοποιούν, τα συστήματα κανόνων μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων, όπου οι κανόνες εκφράζουν δηλωτική γνώση, δηλαδή γνώση που δηλώνει μια αλήθεια για τον κόσμο του προβλήματος, αλλά δεν αναφέρει ρητά πότε και πώς εφαρμόζεται.
- Συστήματα παραγωγής, όπου οι κανόνες εκφράζουν διαδικαστική γνώση, δηλαδή γνώση για το ποιες συγκεκριμένες ενέργειες πρέπει να εκτελεστούν δεδομένης μιας κατάστασης.

## 12. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Ο σχεδιασμός σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να βασιστεί σε ένα πλήθος κριτηρίων που προέρχονται από τις μελετητικές και κατασκευαστικές ανάγκες ενός τέτοιου έργου. Φυσικά πρέπει να γίνει διάκριση ανάλογα με το αν αναφερόμαστε σε υποθαλάσσια, επικαθήμενη ή πλωτή σήραγγα στοχεύοντας όμως σε μια ενοποιημένη θεώρηση που θα έχει σαν αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός πρακτικού εργαλείου υποβοήθησης τεχνικών αποφάσεων σχετικά με τη δημιουργία μιας σήραγγας σε μια θαλάσσια περιοχή.



Σχήμα 13 – Δομή σχεδιασμού σηράγγων

Ο σχεδιασμός οποιουδήποτε τύπου σήραγγας περιλαμβάνει τρεις κύριους άξονες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον τεχνικό σχεδιασμό και περιλαμβάνουν τη μελέτη, την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου. Πρόκειται για τρεις αλληλένδετους τομείς που ο ένας επηρεάζει τον άλλο. Ένας σωστός, σύγχρονος και ολοκληρωμένος σχεδιασμός αντιμετωπίζει ενιαία και τις τρεις αυτές πλευρές του έργου και λαμβάνει εξ' αρχής τα απαιτούμενα μέτρα προκειμένου να προληφθούν προβλήματα σε οποιαδήποτε φάση.

Η μελέτη μιας σήραγγας σε θαλάσσιο περιβάλλον κινείται σε τρία θεματικά πεδία που επηρεάζουν καθοριστικά τη στατική και δυναμική ανάλυση της κατασκευής και προσδιορίζουν επομένως το συνολικό δομικό σχεδιασμό. Πρόκειται για το γεωλογικό, το γεωτεχνικό και το υδροδυναμικό μοντέλο του έργου. Τα μοντέλα αυτά ερμηνεύουν ποιοτικά και ποσοτικά το περιβάλλον του έργου η αλληλεπίδραση με το οποίο πρέπει να είναι σε αρμονία, ώστε να υπάρχει ασφάλεια για το έργο.



**Σχήμα 14 – Μοντέλα μελέτης σήραγγας**

Η κατασκευή μιας σήραγγας αποτελείται από τέσσερις παράγοντες-κλειδιά: τη μέθοδο κατασκευής, τα μέτρα υποστήριξης κατά μήκος του άξονα και κατά πλάτος της διατομής, την τελική επένδυση που καλείται να παραλάβει τα σημαντικότερα φορτία και τις Η/Μ εγκαταστάσεις που επηρεάζουν καθοριστικά τη λειτουργικότητα του έργου και την ποιότητα χρήσης του.

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



**Σχήμα 15 – Μέρη κατασκευής σήραγγας**

### **12.1 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

Η τεχνική ανάλυση που έχει προηγηθεί σχετικά με τη μελέτη και κατασκευή συμβατικών, υποθαλάσσιων, επικαθήμενων στο βυθό και πλωτών σήραγγων αποτελεί την πηγή των πληροφοριών που θα διαμορφώσουν τα κριτήρια αξιολόγησης του έργου. Συγκεκριμένα, σχετικά με τις υποθαλάσσιες σήραγγες όλη η κατασκευή γίνεται μέσα στη βραχόμαζα. Τα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας μπορούν να αποτελέσουν μια πλούσια πηγή στοιχείων σχετικών με τις απαιτούμενες ιδιότητες της μελετητικής και κατασκευαστικής μεθοδολογίας της υποθαλάσσιας σήραγγας η οποία καλείται να δεχτεί επιπλέον του βάρους της βραχόμαζας και το βάρος του θαλασσινού νερού, καθώς και να αντιμετωπίσει πιθανές εισροές θαλασσινού νερού στο χώρο της κατασκευής της σήραγγας.

Ξεκινώντας από το σύστημα RMR μπορούμε να εισάγουμε ως κύρια κριτήρια αξιολόγησης της βραχόμαζας, την αντοχή σε θλίψη του βραχώδους υλικού, καθώς και το μήκος, την απόσταση, την αποσάθρωση των τοιχωμάτων, την τραχύτητα, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, όπως επίσης και την ύπαρξη υπόγειου νερού. Το σύστημα Q προσθέτει στις ιδιότητες της βραχόμαζας, την ύπαρξη νερού στις ασυνέχειες. Το σύστημα RMi επιβεβαιώνει αυτές τις ιδιότητες. Το σύστημα GSI δίνει βάρος στη δομή της βραχόμαζας και στην κατάσταση των ασυνεχειών. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η αντοχή του συμπαγούς και αδιάρρηκτου βραχώδους υλικού που μπορεί να προκύψει από πειράματα, η κατάσταση και η



πυκνότητα των ασυνεχειών που προκύπτει οπτικά και η ύπαρξη υπόγειου νερού στην περιοχή του έργου που ανιχνεύεται από τις γεωτρήσεις και την πορεία του έργου αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της βραχόμαζας και καθιστούν εύκολη ή δυσχερή τη διάνοιξη μιας υπόγειας ή και υποθαλάσσιας σήραγγας.

Οι κατασκευαστικές τεχνικές επιβεβαιώνουν τα παραπάνω κριτήρια και προσθέτουν τις εξής πληροφορίες: η ταχύτητα προχώρησης αυξάνει όσο πιο ομοιογενείς είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες κατά τον άξονα της σήραγγας, η διάνοιξη παρουσιάζει προβλήματα σε περίπτωση αστάθειας, δηλαδή για εδάφη μικρής αντοχής και συνεκτικότητας όπως είναι οι άμμοι που συναντώνται κατά κόρον στο βυθό της θάλασσας, η εισροή νερού θεωρείται σοβαρό τεχνικό πρόβλημα που δημιουργεί επιπλέον υδροστατικές πιέσεις και ενδεχόμενα προβλήματα στο μηχανολογικό εξοπλισμό, η αλληλεπίδραση με παράπλευρες κατασκευές λόγω των παραγόμενων δονήσεων είναι σημαντικό πρόβλημα στις σήραγγες σε αστικές περιοχές και λιγότερο σε θαλάσσιες όπου οι κοντινότερες κατασκευές βρίσκονται συνήθως σε μεγάλη απόσταση (φυσικά αν εδράζεται κοντά στην περιοχή του έργου κάποια γέφυρα ή κάποια πλατφόρμα εξαγωγής πετρελαίου, τότε μπορεί να υπάρξει σοβαρό πρόβλημα). Για τις υποθαλάσσιες σήραγγες η πιο διαδεδομένη κατασκευαστική μέθοδος είναι η διάνοιξη με TBM οπότε και χρειάζεται προσοχή στην επιλογή του τύπου του μηχανήματος ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι η παραγόμενη διατομή της σήραγγας είναι αναγκαστικά αποκλειστικά κυκλική. Ως προς τα μέτρα υποστήριξης της σήραγγας απαιτούν κατασκευαστικά σχέδια και επιτόπου παρακολούθηση του έργου και έχουν μικρό ενδιαφέρον σε μια μελέτη τεχνικής εφικτότητας που δεν μπορεί ακόμη να προσδιορίσει επακριβώς τις τεχνικές ανάγκες ενός τόσο σύνθετου έργου όπως μια υποθαλάσσια σήραγγα.

Τα κριτήρια αστοχίας της βραχόμαζας μπορούν να μας δώσουν επιπλέον πληροφορίες για την ποιότητα του βραχώδους υλικού και τις απαιτήσεις του έργου. Από το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι εμφανής η σημασία του συντελεστή και της γωνίας εσωτερικής τριβής του γαιώδους υλικού. Όσο πιο μικρή είναι η εσωτερική τριβή, τόσο πιο χαλαρό είναι το υλικό και επομένως είναι χαμηλότερες οι απαιτούμενες τάσεις για την αστοχία του υλικού. Βέβαια από κατασκευαστικής άποψης όσο πιο χαλαρό είναι το υλικό τόσο πιο εύκολη και γρήγορη είναι η εκσκαφή του, όμως η ετερογένεια του βραχώδους υλικού σε συνδυασμό με τη χαλαρότητα οδηγεί σε υπερεκσκαφές και αποτμήσεις βραχώδους ή εδαφικού υλικού με αποτέλεσμα τελικά να είναι πιο αργή η προχώρηση της σήραγγας. Γενικά προτιμώνται ομογενείς και συμπαγείς βραχόμαζες χωρίς πολλά κενά και ανομοιογένειες που μπορεί να καθυστερήσουν δραματικά την εκτέλεση του έργου. Τα σύγχρονα μηχανήματα TBM σχεδιάζονται με βάση τα γεωλογικά δεδομένα και οποιαδήποτε σοβαρή ετερογένεια μπορεί να αυξήσει το κόστος του μηχανήματος ή ακόμη και να υποχρεώσει στην αντικατάσταση της κεφαλής του.

Το κριτήριο Hoek-Brown καταδεικνύει τη σημασία της δομής της βραχόμαζας και της κατάστασης των ασυνεχειών. Όσο πιο αποσαθρωμένη και κατακερματισμένη είναι η βραχόμαζα, τόσο πιο χαμηλός είναι ο δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI) και αντίστοιχα μικρότερες είναι οι τάσεις αστοχίας του βράχου. Η θεωρία του Griffith υπερτονίζει τη σημασία της ύπαρξης ρωγμών των οποίων το μήκος και η ευκολία σχηματισμού οδηγεί σε όλο και πιο ταχεία αστοχία του υλικού. Τα υπόλοιπα εμπειρικά κριτήρια αστοχίας της βραχόμαζας επιβεβαιώνουν τα παραπάνω συμπεράσματα.

Οι θεωρίες ανάλυσης των σηράγγων μπορούν να δώσουν νέα στοιχεία στην προσπάθεια αξιολόγησης του γεωτεχνικού μοντέλου της περιοχής του έργου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της διατομής της σήραγγας τόσο πιο αυξημένες είναι οι προκύπτουσες τάσεις και τόσο δυσχερέστερη είναι προφανώς η διάνοιξη. Η σημασία των γεωτεχνικών παραμέτρων ( $c$ ,  $\phi$ ) είναι καθοριστική.

Για τις υποθαλάσσιες σήραγγες οι οποίες κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου μέσα στη βραχόμαζα ισχύουν όλα τα παραπάνω συμπεράσματα με έμφαση στο επιπλέον αναλαμβανόμενο βάρος του θαλασσινού νερού. Σημαντικός είναι ο κίνδυνος διαρροών θαλασσινού ή υπόγειου νερού που μπορεί να δημιουργήσει επιπλέον υδροστατικές τάσεις και να καταστρέψει τα μηχανολογικό εξοπλισμό.

Για τις επικαθήμενες σήραγγες, η θεμελίωση τους στο βυθό είναι το πιο κρίσιμο σημείο μελετητικά δεδομένου ότι το μεγαλύτερο κομμάτι της κατασκευής πραγματοποιείται στην ξηρά (σε νηοδόχους). Η αντοχή των πασσάλων παίζει πρωτεύοντα ρόλο. Από τους σχετικούς υπολογιστικούς τύπους μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η συνοχή, η γωνία τριβής και το ειδικό βάρος του εδάφους όπως επίσης και το είδος του υλικού (τραχύτητα, μέτρο ελαστικότητας) επηρεάζουν τη μορφή της θεμελίωσης και επομένως και τη δυσκολία του έργου. Οι υδροδυναμικές συνθήκες (ύψος και ταχύτητα κυμάτων, ταχύτητα-συχνότητα ρευμάτων και βάθος νερού) επηρεάζουν προφανώς τη στατική και δυναμική λειτουργία της κατασκευής. Το ανάγλυφο του πυθμένα παίζει σημαντικό ρόλο στην έδραση της σήραγγας. Αν υπάρχουν υποθαλάσσια πρηνή η δυσκολία κατασκευής είναι πολύ μεγάλη. Το βάθος του νερού έχει επίσης μεγάλη σημασία γιατί αφενός αυξάνει την υδροστατική πίεση και αφετέρου επαυξάνει τα υδροδυναμικά φαινόμενα.

Για τις πλωτές σήραγγες είναι καθοριστική η έλλειψη κάποιου ολοκληρωμένου έργου που θα πρόσφερε σημαντικά στοιχεία τόσο για τη μελέτη όσο και για την κατασκευή αντίστοιχων έργων. Το σύστημα αγκύρωσης αναμένεται να έχει πολύ σημαντικό ρόλο στη δομική λειτουργία του φορέα. Ο σχετικός τύπος της μετατόπισης (π.χ. του πλωτήρα που στηρίζει τη σήραγγα) δείχνει ότι το βάθος του νερού επηρεάζει δυσμενώς τη μετατόπιση, ενώ και το βάρος ανά μονάδα μήκους επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετακινήσεων. Οι φορτίσεις από κυματισμούς είναι πολύ σημαντικές. Ο τύπος του Morison είναι ενδεικτικός για τον τρόπο επηρεασμού της κατασκευής. Η ταχύτητα και η

επιτάχυνση του νερού επηρεάζει δυσμενώς τη φόρτιση της σήραγγας από κύματα. Το μέγεθος της κατασκευής παίζει επίσης μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη δυνάμεων αντίστασης και επομένως στην καταπόνηση της σήραγγας. Αναλυτική λύση δεν υπάρχει για οριζόντιο κύλινδρο μέσα στο νερό. Η υδροδυναμική ανάλυση γίνεται με αριθμητικές μεθόδους και επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes.

## 12.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

Σε ένα σύστημα αποφάσεων που ασχολείται με το ποιος τύπος σήραγγας είναι ο πιο κατάλληλος τεχνικά για ένα θαλάσσιο άνοιγμα, μπορούμε να παραθέσουμε τα εξής κριτήρια με μια ποιοτική διακριτοποίηση σε τρεις διαβαθμίσεις ανάλογα με τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά από μετρήσεις ή την προσωπική εμπειρία και αντίληψη του μελετητή από παραπλήσια ή κοντινά έργα:

### I. Υποθαλάσσια σήραγγα

1. Δομή βραχόμαζας: καλή – ικανοποιητική – κακή
2. Κατάσταση ασυνεχειών: καλή – ικανοποιητική – κακή
3. Αντοχή βράχου: καλή – ικανοποιητική – χαμηλή
4. Εισροή υπόγειου νερού: αμελητέα – μικρή – μεγάλη
5. Γεωτεχνικές παράμετροι εδάφους: καλές – ικανοποιητικές - κακές
6. Σεισμικότητα: μικρή – μέση – υψηλή
7. Κίνδυνος ενεργού ρήγματος: αμελητέος – μικρός – υψηλός

### II. Επικαθήμενη σήραγγα

1. Υδροδυναμικές συνθήκες: καλές – ικανοποιητικές – κακές
2. Γεωτεχνικές παράμετροι εδάφους: καλές – ικανοποιητικές - κακές
3. Απαιτήσεις συστήματος θεμελίωσης: χαμηλές – μέσες – υψηλές
4. Σεισμικότητα: μικρή – μέση – υψηλή
5. Κίνδυνος εδαφικής ρευστοποίησης: αμελητέος – μικρός – υψηλός
6. Κίνδυνος επικάλυψης ή υποσκαφής από ιζήματα: αμελητέος – μικρός – υψηλός
7. Κίνδυνος ενεργού ρήγματος: αμελητέος – μικρός – υψηλός
8. Ανάγλυφο πυθμένα: ήπιο – ανώμαλο – πολύ ανώμαλο
9. Βάθος νερού: μικρό – μέσο - μεγάλο

### III. Πλωτή σήραγγα

1. Υδροδυναμικές συνθήκες: καλές – ικανοποιητικές – κακές

2. Απαιτήσεις συστήματος θεμελίωσης: χαμηλές – μέσες – υψηλές
3. Απαιτήσεις συστήματος αγκύρωσης: χαμηλές – μέσες – υψηλές
4. Κίνδυνος από τσουνάμι ή παλίρροια: αμελητέος – μικρός – υψηλός

Θα μπορούσε κανείς να παραθέσει και άλλα ποιοτικά κριτήρια σε μια ολοκληρωμένη-διεπιστημονική αξιολόγηση του προβλήματος μελέτης και κατασκευής μιας σήραγγας σε θαλάσσιο περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θα ήταν ο χρόνος και το κόστος κατασκευής, η ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά ή η πιθανότητα ατυχήματος (σύγκρουση οχημάτων μέσα στη σήραγγα ή σύγκρουση με πλεύοντα). Όμως στόχος είναι η ανάλυση να παραμείνει σε τεχνικά θέματα που άπτονται κυρίως του πεδίου του πολιτικού μηχανικού και να προσφέρει μια προσέγγιση στο θέμα του δομικού σχεδιασμού ενός τέτοιου έργου χωρίς να μπαίνει σε θέματα διαστασιολόγησης. Γι' αυτό και τα προτεινόμενα κριτήρια έχουν σαφή τεχνικό-μελετητικό χαρακτήρα και ουσιαστικά μελετούν την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το περιβάλλον της (θαλάσσιο και γαιώδες). Μία καθολική ανάλυση θα έπρεπε να λάβει υπόψη και ηλεκτρομηχανολογικά ζητήματα τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μελέτη τέτοιων έργων (π.χ. αερισμός, φωτισμός, αεροδυναμικά φαινόμενα κ.ά) και ξεφεύγουν από το επιστημονικό πεδίο με το οποίο ασχολείται η εργασία. Τέλος, δεν πρέπει να αμελήσει κανείς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να επηρεάσουν τη χωροθέτηση του έργου ή ακόμη και τη μέθοδο κατασκευής.

### **12.3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ**

Τα παραπάνω ποιοτικά κριτήρια πρέπει να ερμηνευτούν κατά τρόπο επιστημονικό και αντικειμενικό και παράλληλα να ποσοτικοποιηθούν κατάλληλα, ώστε το εργαλείο που θα διαμορφωθεί να παράγει αξιόπιστα και αντικειμενικά αποτελέσματα. Η διαβάθμιση, που έχει γίνει σε τρεις κατηγοριοποιήσεις (καλό – ικανοποιητικό – κακό ή αμελητέα – χαμηλή – υψηλή) ανάλογα με το κριτήριο, εξυπηρετεί την προσέγγιση που μπορεί να κάνει κάποιος εμπειρογνώμονας σε φάση προμελέτης ή μελέτης σκοπιμότητας. Ένας μηχανικός σε ένα δήμο ή μια νομαρχία που καλείται να κάνει μια τεχνική εισήγηση για ένα τέτοιο έργο, πρέπει να έχει ένα εύχρηστο εργαλείο που να μπορεί να το εμπιστευτεί και να το τροφοδοτήσει με πληροφορίες που είναι διαθέσιμες σε ένα προκαταρκτικό μελετητικό στάδιο. Έτσι έχει αποφευχθεί η εισαγωγή ποσοτικών προσδιορισμών. Η ποιοτική βέβαια εκτίμηση των επιμέρους παραγόντων που επηρεάζουν κυρίως τη μελέτη, αλλά και την κατασκευή και λειτουργία του έργου, βασίζεται σε ποσοτικά δεδομένα τα οποία περιγράφουμε παρακάτω.

### 12.3.1 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑ

Σχετικά με τα κριτήρια που σχετίζονται με γεωτεχνικά ζητήματα, πηγή πληροφοριών αποτελεί ο πίνακας προσδιορισμού του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) όπως έχει διαμορφωθεί από τους Hoek & Marinos (2000) με δοκιμασμένα καλά αποτελέσματα. Για τη δομή της βραχόμαζας μπορούμε να δώσουμε την εξής τεχνική περιγραφή για κάθε διαβάθμιση:

- Καλή δομή βραχόμαζας θεωρείται ο άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση ή η αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα με τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.
- Ικανοποιητική δομή βραχόμαζας θεωρείται η μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.
- Κακή δομή βραχόμαζας θεωρείται η ισχυρά κατακερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και παρουσία γωνιωδών ή στρογγυλεμένων τεμαχίων ή φυλλώσης, σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα.

Για την κατάσταση των ασυνεχειών η διαβάθμιση έχει ως εξής:

- Καλή όταν έχουμε πολύ τραχείες μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ή τραχείες ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες.
- Ικανοποιητική όταν έχουμε λείες μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες.
- Κακή όταν έχουμε επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα ή με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης.

Για την αντοχή της βραχόμαζας μπορούμε να λάβουμε υπόψη την τιμή του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) όπως προκύπτει από τον πίνακα των Hoek & Marinos ο οποίος καθορίζει το αποτέλεσμα του πλέον διαδεδομένου κριτηρίου αστοχίας της βραχόμαζας, του κριτηρίου Hoek-Brown . Με βάση τον πίνακα αυτό μπορούμε να καθορίσουμε ότι:

- Καλή αντοχή έχουμε για  $GSI=65-100$
- Ικανοποιητική αντοχή έχουμε για  $GSI=35-65$
- Χαμηλή αντοχή έχουμε για  $GSI=5-35$

Για την εισροή υπόγειου νερού στο χώρο της σήραγγας οι διαβαθμίσεις έχουν ως εξής:

- Αμελητέα όταν οι ερευνητικές γεωτρήσεις ή στοιχεία από γειτονικά έργα υποδεικνύουν χαμηλή υδαρότητα στα στρώματα που βρίσκονται κοντά στο στόμιο της σήραγγας
- Μικρή όταν τα στρώματα στο χώρο του έργου είναι κορεσμένα
- Μεγάλη όταν υπάρχουν ενδείξεις για υπόγεια ροή ύδατος λόγω υδραυλικής κλίσης

Για την ποιότητα των γεωτεχνικών παραμέτρων του εδάφους με τις οποίες αναφερόμαστε κυρίως στη γωνία τριβής και στη συνεκτικότητα, έχουμε τα εξής:

- Καλές για υγιή εδάφη με υψηλή πυκνότητα κόκκων
- Ικανοποιητικές για εδάφη με μέση πυκνότητα κόκκων
- Κακές για αποσαθρωμένα χαλαρά εδάφη με χαμηλή πυκνότητα κόκκων

Για το μέγεθος της σεισμικότητας λαμβάνεται υπόψη σε ποια από τις τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (κατά τον Ε.Α.Κ.) ανήκει η περιοχή του έργου (με βάση το συντελεστή  $\alpha$  όπου  $\alpha=A/g$  με  $A$ : σεισμική επιτάχυνση εδάφους και  $g$  επιτάχυνση βαρύτητας), επομένως έχουμε:

- Μικρή σεισμικότητα για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I ( $\alpha=0.16$ )
- Μέση σεισμικότητα για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II ( $\alpha=0.24$ )
- Υψηλή σεισμικότητα για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III ( $\alpha=0.36$ )

Για τον κίνδυνο ενεργού ρήγματος λαμβάνεται υπόψη αν υπάρχει κοντά στην περιοχή του έργου με βάση ιστορικά στοιχεία ενεργό ρήγμα που έχει δώσει σεισμό αρκετά μεγάλης έντασης, οπότε ο κίνδυνος είναι:

- Αμελητέος όταν δεν υπάρχει ενεργό ρήγμα
- Μικρός όταν υπάρχει ενεργό ρήγμα που έχει δώσει μικρούς σεισμούς
- Υψηλός όταν υπάρχει ενεργό ρήγμα που έχει δώσει σεισμούς αρκετά μεγάλης έντασης και πάνω

### 12.3.2 ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

Σχετικά με τα κριτήρια που αφορούν στη σεισμικότητα, την παρουσία ενεργού ρήγματος και τις γεωτεχνικές παραμέτρους ισχύουν τα ίδια με παραπάνω. Επιπλέον έχουμε:

Για τις υδροδυναμικές συνθήκες ισχύει ότι είναι:

- Καλές όταν οι κυματισμοί και τα ρεύματα είναι ήπιας έντασης, δηλαδή για κλειστούς κόλπους με σχετικά ήπιες ανεμολογικές συνθήκες.
- Ικανοποιητικές όταν οι κυματισμοί και τα ρεύματα είναι μεσαίας έντασης, δηλαδή για ανοιχτούς κόλπους ή κλειστούς κόλπους με ισχυρά ρεύματα και ανέμους.
- Κακές όταν οι κυματισμοί και τα ρεύματα είναι μεγάλης έντασης δηλαδή για ανοιχτές υπεράκτιες περιοχές με υψηλό κυματισμό και ισχυρούς ανέμους.

Για τις απαιτήσεις του συστήματος θεμελίωσης ισχύουν τα παρακάτω:

- Είναι χαμηλές όταν η έδραση γίνεται μόνο σε εξυγιαντική στρώση χωρίς ειδικά γεωτεχνικά έργα (π.χ. πάσσαλοι).
- Είναι μέσες όταν χρειάζεται ειδική ενίσχυση του υπεδάφους με αραιές πασσαλομπήξεις ή τσιμεντενέσεις.

- Είναι υψηλές όταν σε όλο τον άξονα της σήραγγας το υπέδαφος είναι σαθρό σε μεγάλο βάθος και χρειάζονται πάσσαλοι σε πυκνή διάταξη.

Ο κίνδυνος εδαφικής ρευστοποίησης είναι:

- Αμελητέος όταν δεν υπάρχει υδραυλική κλίση
- Μικρός όταν υπάρχει υδραυλική κλίση και το έδαφος έχει μεγάλη πυκνότητα
- Υψηλός όταν υπάρχει σημαντική υδραυλική κλίση και το έδαφος είναι χαλαρό

Ο κίνδυνος επικάλυψης ή υποσκαφής από ιζήματα είναι:

- Αμελητέος όταν η ταχύτητα τριβής (στον πυθμένα) είναι αμελητέα
- Μικρός όταν η ταχύτητα τριβής είναι μικρή και οι εδαφικοί κόκκοι είναι μικρού ή μέσου μεγέθους
- Υψηλός όταν η ταχύτητα τριβής είναι σημαντική

Το ανάγλυφο του πυθμένα είναι:

- Ήπιο όταν ο πυθμένας είναι ομαλός (μικρή κλίση)
- Ανώμαλο όταν υπάρχουν πτυχώσεις (εναλλαγή κλίσεων)
- Πολύ ανώμαλο όταν υπάρχουν υποθαλάσσια πρηνή

Το βάθος του νερού είναι:

- Μικρό για βάθος μικρότερο των 50μ.
- Μέσο για βάθος 50-100μ.
- Μεγάλο για βάθος άνω των 100μ.

### **12.3.3 ΠΛΩΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ**

Για την περίπτωση πλωτής σήραγγας οι υδροδυναμικές συνθήκες εφαρμόζονται όπως παραπάνω, ενώ για τα υπόλοιπα κριτήρια όπως για τις απαιτήσεις του συστήματος θεμελίωσης ισχύουν:

- Χαμηλές όταν η θεμελίωση στα άκρα της σήραγγας γίνεται μόνο με πέδιλα και υπάρχει συγκράτηση με πλωτήρες ή υποστύλωση της σήραγγας με στηρίγματα.
- Μέσες όταν η θεμελίωση στα άκρα της σήραγγας γίνεται με πασσάλους, αλλά θα προβλέπεται υποστύλωση ή αγκυρώσεις κατά τον άξονά της για διαμοίραση του φορτίου.
- Υψηλές όταν η θεμελίωση γίνεται με βαθείς πασσάλους και δεν υπάρχει στατική υποστήριξη κατά τον άξονά της.

Οι απαιτήσεις του συστήματος αγκύρωσης είναι:

- Χαμηλές όταν έχουμε μικρό βάθος νερού και μικρό αριθμό αγκυρώσεων.
- Μέσες όταν έχουμε σχετικά μεγάλο βάθος νερού και όχι μεγάλο αριθμό αγκυρώσεων.

- Υψηλές όταν έχουμε μεγάλο βάθος νερού και πυκνή διάταξη αγκυρώσεων ή όταν υπάρχει συγκράτηση της σήραγγας από το να ανέλθει με αγκυρώσεις οπότε ο ρόλος τους δεν είναι βοηθητικός, αλλά καθοριστικός.

Ο κίνδυνος από τσουνάμι ή παλίρροια μπορεί να είναι:

- Αμελητέος όταν δεν υπάρχουν στοιχεία για παρουσία τέτοιων φαινομένων στην περιοχή του έργου.

- Μικρός όταν υπάρχουν ιστορικά στοιχεία για τσουνάμι με πολύ μεγάλη περίοδο επαναφοράς ή στοιχεία για περιορισμένη σε ύψος παλίρροια.

- Υψηλός όταν υπάρχουν στοιχεία για παρουσία τσουνάμι με περίοδο επαναφοράς κάτω των 100 χρόνων ή υπάρχει σημαντική παλίρροια.

## **12.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Τα παραπάνω κριτήρια με τρεις διαβαθμίσεις το κάθε ένα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για ένα έγκυρο και αξιόπιστο σύστημα αξιολόγησης για τον πιο ενδεικνυόμενο τύπο σήραγγας σε μια θαλάσσια περιοχή. Ένας τρόπος εκτίμησης της εφικτότητας και αξιοπιστίας κάθε μεθόδου είναι η βαθμολόγηση των κριτηρίων με τρεις αριθμούς:

1 – για χαρακτηρισμό «υψηλό» ή «μεγάλο» ή «κακή»

2 – για χαρακτηρισμό «μέσο» ή «μικρό» ή «ικανοποιητική»

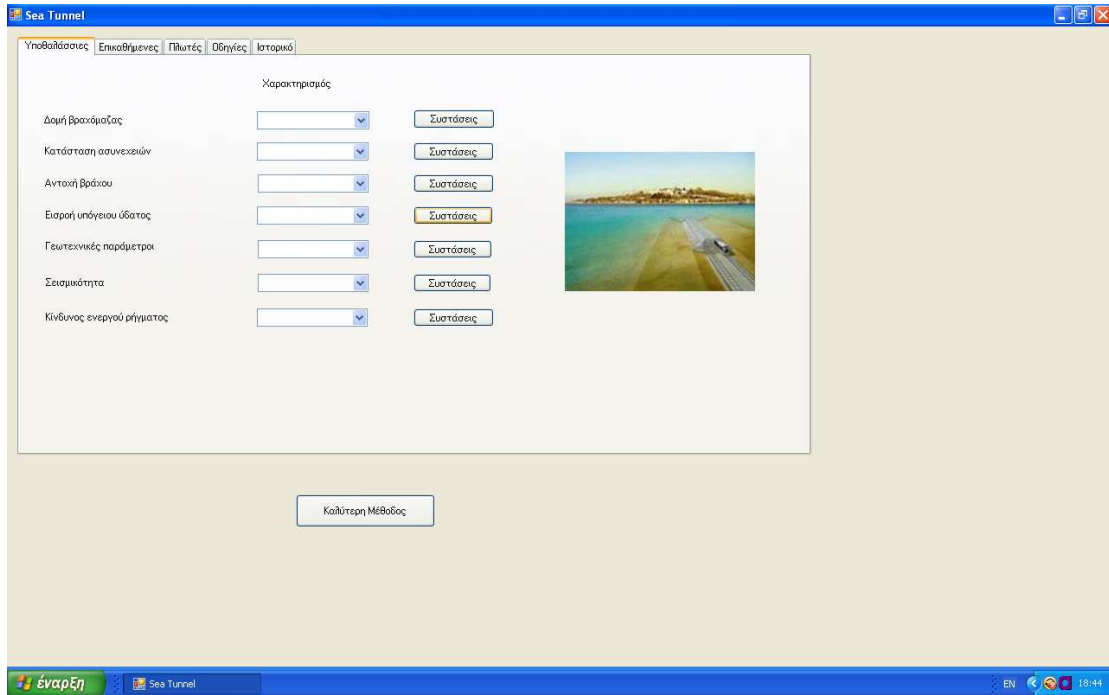
3 – για χαρακτηρισμό «χαμηλό» ή «αμελητέο» ή «καλή»

Ένας ισοσταθμισμένος μέσος όρος της βαθμολογίας οδηγεί στον υπολογισμό του δείκτη καταλληλότητας κάθε μεθόδου με άριστα το 3 και χείριστο το 1. Όσο πιο κοντά είναι ο βαθμός στο 3 τόσο περισσότερο ενδείκνυται η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου κατασκευής. Όσο πιο κοντά είναι ο βαθμός στο 1 τόσο πιο δυσχερής και επικίνδυνη είναι η συγκεκριμένη μέθοδος. Μια απλή σύγκριση των τριών βαθμών μπορεί να δώσει τη ζητούμενη ως πιο κατάλληλη μέθοδο κατασκευής η οποία προφανώς θα έχει τη μεγαλύτερη βαθμολογία.

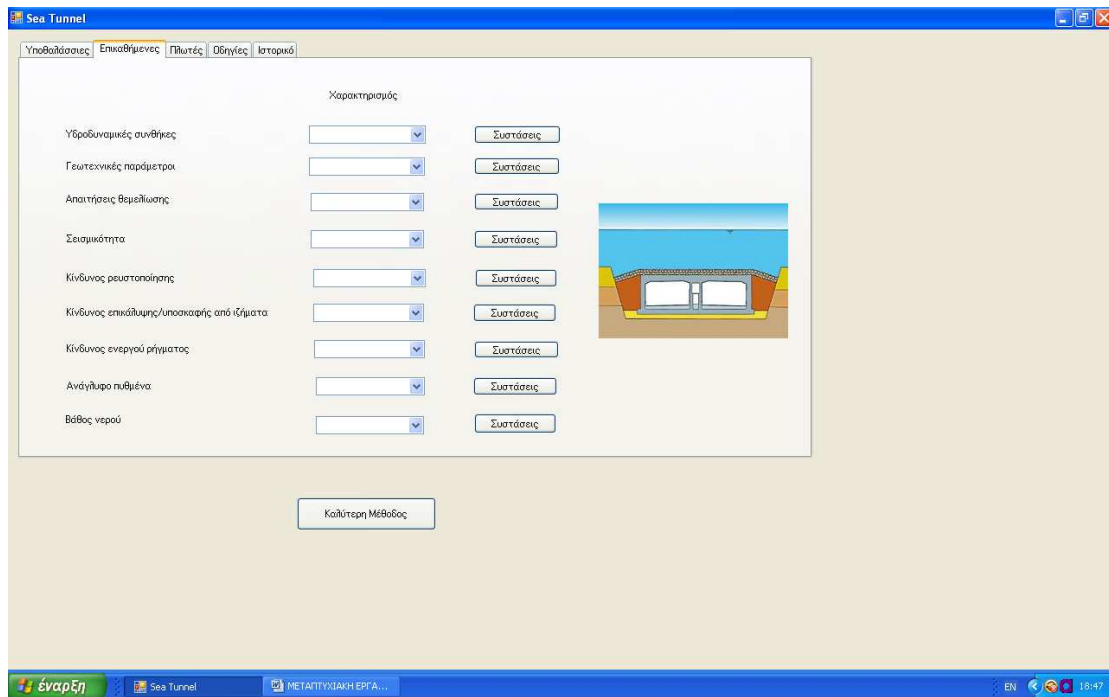
## **12.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Η/Υ**

Το πρόγραμμα λειτουργεί με βάση το περιγραφέν σύστημα αξιολόγησης και δίνει τη βέλτιστη μέθοδο κατασκευής ανάλογα με την υψηλότερη βαθμολογία. Κατασκευάστηκε σε παραθυρικό περιβάλλον μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

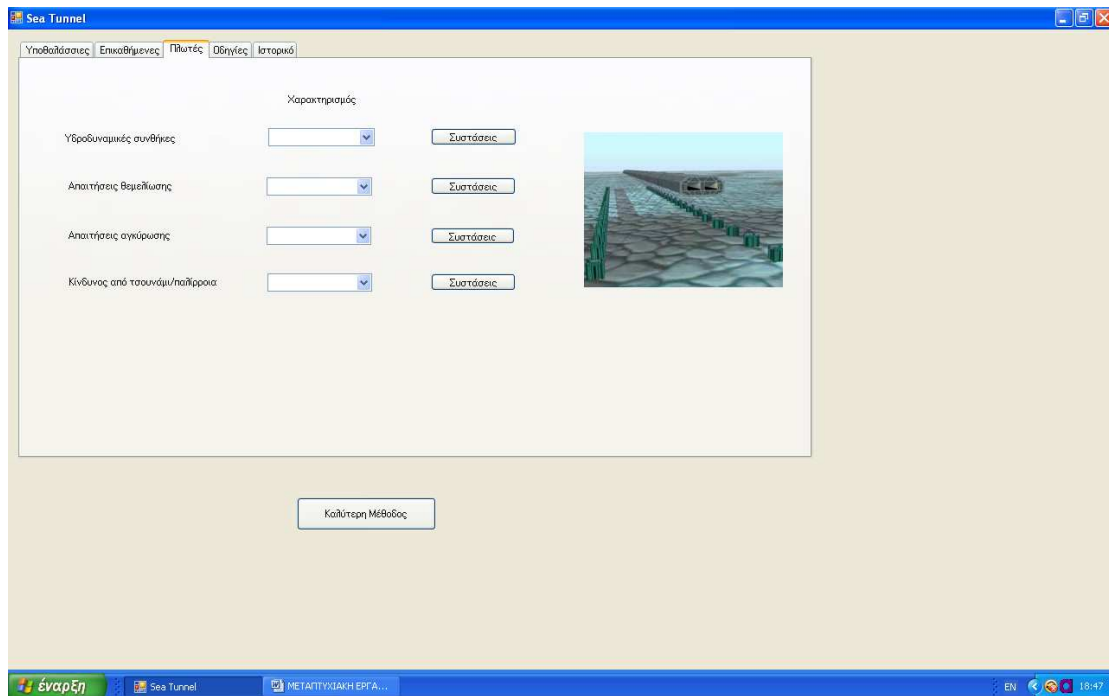




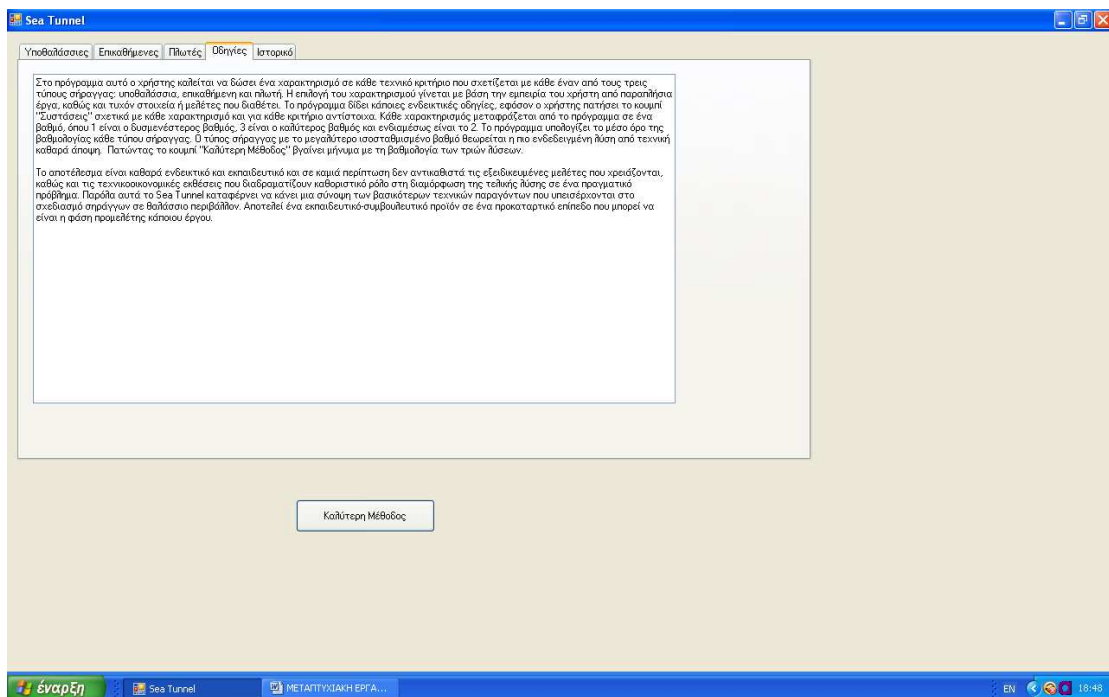
**Εικ. 74 – Κριτήρια για υποθαλάσσιες σήραγγες**



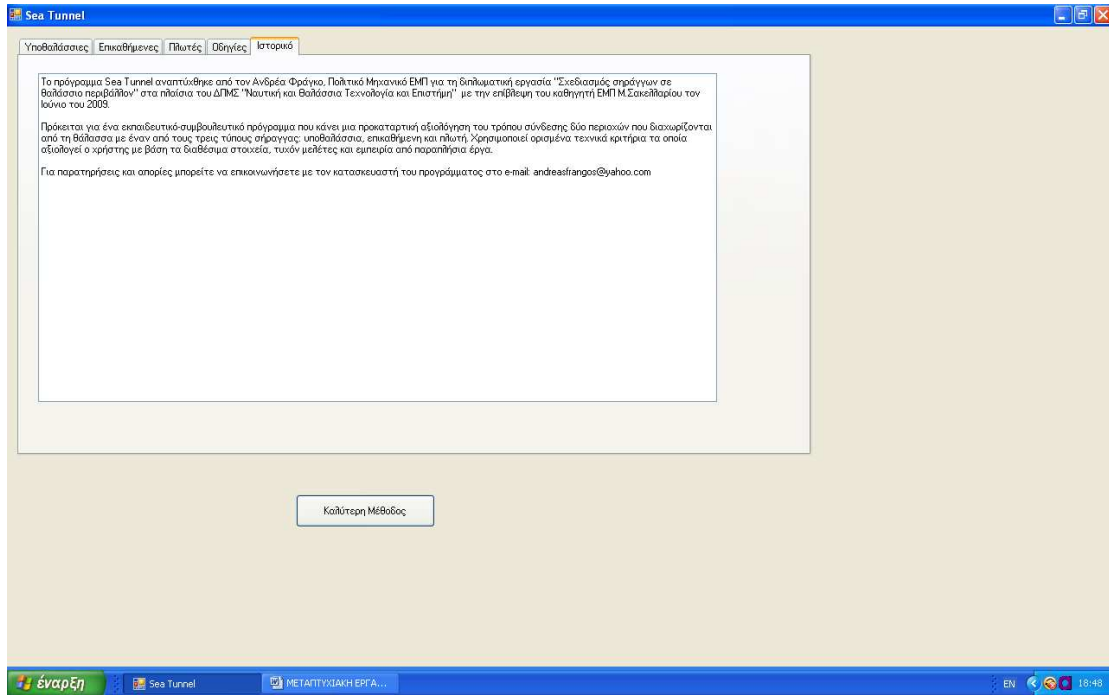
**Εικ. 75 – Κριτήρια για επικαθήμενες σήραγγες**



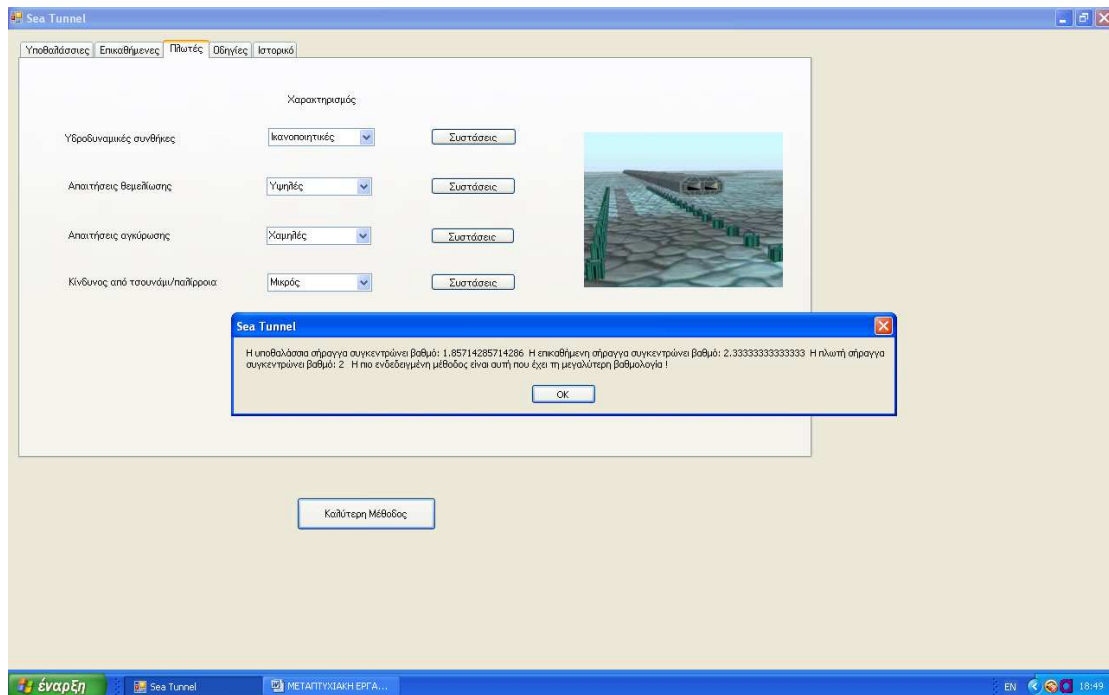
**Εικ. 76 – Κριτήρια για πλωτές σήραγγες**



**Εικ. 77 – Οδηγίες προγράμματος**



**Εικ. 78 – Ιστορικό προγράμματος**



**Εικ. 79 – Μήνυμα προς χρήστη**

### 13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενασχόληση με τη μελέτη σηράγγων σε βιβλιογραφικό επίπεδο, καθώς και σε εφαρμοσμένο επίπεδο με την προσπάθεια που έγινε να καθορισθούν κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου τύπου σήραγγας, καθώς και με τη μελέτη συγκεκριμένων αριθμητικών παραδειγμάτων οδήγησε σε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα.

Κατ' αρχάς είναι εμφανής η έλλειψη σε παγκόσμιο επίπεδο αριθμητικών και στατιστικών δεδομένων σχετικών με υποθαλάσσιες και επικαθήμενες σήραγγες. Κυριαρχούν γενικόλογες δημοσιεύσεις που αποτελούν μια εισαγωγή περισσότερο στο θέμα της κατασκευής παρά στο θέμα της μελέτης των ειδικών αυτών σηράγγων. Γενικά δεν υπάρχουν μεθοδολογίες που εφαρμόζονται χωριστά στον τομέα των υποθαλάσσιων, επικαθήμενων και πλωτών σηράγγων. Χρησιμοποιούνται οι ίδιες αρχές με αυτές των συμβατικών σηράγγων, δηλαδή τα συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας, τα κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb και Hoek-Brown, οι μέθοδοι των πεπερασμένων και των συνοριακών στοιχείων και σε καθαρά ακαδημαϊκό επίπεδο αναλυτικές εξισώσεις όπως αυτές του Kirsch.

Η μη ύπαρξη βιβλιογραφικών δεδομένων σχετικών με κατασκευασμένες πλωτές σήραγγες έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη στοιχείων σχετικών με αυτό τον τύπο έργου και λιγιστά στοιχεία σχετικά με το υδροδυναμικό ζήτημα που είναι καίριας σημασίας για αυτό το είδος κατασκευής. Ο τύπος του Morison εφαρμόζεται για κατακόρυφους κυλίνδρους και απέχει αρκετά από το να προσομοιώσει τη γεωμετρία και φόρτιση των πλωτών σηράγγων. Η απουσία συναφούς βιβλιογραφίας ακόμη και σε ερευνητικό επίπεδο δικαιολογεί εν μέρει τη μη ύπαρξη κατασκευασμένων αντίστοιχων έργων σε συνδυασμό πάντα με τη σημασία που έχουν τα θέματα ασφαλείας και τα θέματα κόστους.

Ως προς τον τρόπο κατασκευής, οι επικαθήμενες σήραγγες συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω του ότι απαρτίζονται από σπονδύλους των οποίων η τοποθέτηση στο βυθό απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και αυξημένη τεχνογνωσία από τους κατασκευαστές. Οι πλωτές σήραγγες εμφανίζουν ποικιλία ως προς τον τρόπο υποστήριξης σε ακαδημαϊκό όμως επίπεδο, αφού η πράξη δεν έχει αποδείξει ποιος τύπος πλωτής σήραγγας είναι ο πιο εφικτός και ενδεδειγμένος. Φαίνεται ότι ακόμη δεν έχει ωριμάσει η ιδέα κατασκευής ενός τέτοιου έργου και τα όποια σχετικά σενάρια βρίσκονται ακόμη στο χώρο της φαντασίας. Είναι βέβαια σαφές ότι κατασκευαστικά και μελετητικά οι δυσκολίες ενός τέτοιου έργου είναι πολύ μεγάλες. Η αιώρηση μέσα στο υδάτινο στρώμα μιας πολύ βαριάς κατασκευής όπως μιας σήραγγας έχει τεράστιες στατικές προκλήσεις και με τα σημερινά βαριά υλικά (χάλυβας και σκυρόδεμα) δε φαίνεται να βρίσκεται κάποια εφικτή τεχνικά λύση.

Ο καθορισμός τεχνικών κριτηρίων για την επιλογή του κατάλληλου τύπου σήραγγας σε μια θαλάσσια περιοχή αποτέλεσε μια πολύ δύσκολη αποστολή

ακόμη και στο γενικό προκαταρκτικό επίπεδο κατά το οποίο εκτελέσθηκε. Για την εξαγωγή των κριτηρίων χρησιμοποιήθηκε όλη η γνώση και η εμπειρία από την κατασκευή συμβατικών και μη σηράγγων. Το σύστημα GSI, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και οι παράμετροι που υπεισέρχονται στους συνήθεις τύπους στατικής ανάλυσης τέτοιων έργων αποτέλεσαν τη βάση γνώσης της ανάλυσης. Το τελικό αποτέλεσμα δείχνει ότι τα θέματα της αντοχής και ποιότητας του υπεδάφους, της σεισμικότητας και παρουσίας ενεργού ρήγματος, των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων και της κατάστασης των υδροδυναμικών συνθηκών αποτελούν τα σημεία κλειδιά στη μελέτη σηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η ποσοτικοποίηση αυτών των κριτηρίων έγινε με βάση τις προδιαγραφές από το σύστημα ταξινόμησης GSI, τον E.A.K. (αντισεισμικός κανονισμός, για τις αντισεισμικές ζώνες), τα συγγράμματα και τις δημοσιεύσεις σχετικά με εξειδικευμένα τεχνικά θέματα όπως η επικάλυψη της επικαθήμενης σήραγγας από ιζήματα ή κατασκευαστικά ζητήματα όπως το σύστημα θεμελίωσης και το σύστημα αγκύρωσης της κατασκευής. Η ανάλυση δεν μπήκε καθόλου σε θέματα διαστασιολόγησης και ασχολήθηκε αποκλειστικά με μια προκαταρκτική εκτίμηση του τρόπου σύνδεσης δύο σημείων (αφετηρία-προορισμός) που χωρίζονται από τη θάλασσα.

Σχετικά με τις υποθαλάσσιες σήραγγες, οι ιδιότητες των γεωλογικών στρωμάτων παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στο δομικό σχεδιασμό. Πρόκειται για ένα έργο που γίνεται εξ' ολοκλήρου μέσα στο έδαφος και η παρουσία της υπερκείμενης θάλασσας απλώς προσθέτει ένα επιπλέον φορτίο στην καταπόνηση της σήραγγας. Μοναδικό σημείο που χρήζει προσοχής είναι η είσοδος θαλασσινού και υπόγειου νερού στο χώρο της σήραγγας ειδικά στα τμήματα που βρίσκονται κοντά στην ακτή και είναι πιθανό να βρίσκονται σε μικρό βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας. Σημασία έχει επίσης το είδος και η δομή των πετρωμάτων που συναντώνται κάτω από το βυθό της θάλασσας που συνήθως είναι ιζηματογενή και επομένως χαμηλής συνεκτικότητας και αντοχής. Πέραν αυτών των σημείων, ο σχεδιασμός της σήραγγας ακολουθεί τις ίδιες αρχές και την ίδια πορεία με αυτή των συμβατικών υπόγειων σηράγγων. Ένα τελευταίο σημείο είναι ότι οι υποθαλάσσιες σήραγγες συνήθως είναι πολύ βαθιές σήραγγες (με βάθος άνω των 100μ. από τον πυθμένα της θάλασσας) κι επομένως καταπονούνται με υψηλά φορτία σε δύσκολα προς εκσκαφή πετρώματα.

Σχετικά με τις επικαθήμενες σήραγγες, πρόκειται για ένα υβριδικό έργο με διττή έκφραση λόγω του ότι επηρεάζεται τόσο από το γαιώδες υλικό όσο και από το νερό. Κατασκευαστικά είναι πολύ εξειδικευμένο έργο με πολλές πρακτικές δυσκολίες όπως η καθέλκυση των επιμέρους σπονδύλων, η επίχωση με γαιώδες υλικό και η εξυγίανση του πυθμένα της θάλασσας. Μελετητικά επηρεάζεται τόσο από τις ιδιότητες του γεωλογικού στρώματος κάτω από το επίπεδο της σήραγγας όσο και από τις υδροδυναμικές συνθήκες. Κυρίαρχο στοιχείο είναι η σταθερή έδραση στον πυθμένα χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος καθιζήσεων, μετακινήσεων ή απόθεσης/μεταφοράς ιζημάτων. Ο κίνδυνος ρευστοποίησης του εδάφους είναι πάντοτε υπαρκτός και συνήθως γίνεται

εξυγίανση του πυθμένα τόσο με στρώση συμπαγούς υλικού όσο και με τοποθέτηση μικρών πασσάλων (π.χ. χαλικοπάσσαλοι). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατασκευή των σπονδύλων γίνεται στην ξηρά (σε νηοδόχους) το πρωτεύοντα ρόλο τον έχει η θεμελίωση στον πυθμένα. Φυσικά πρέπει να ληφθούν υπόψη και θέματα συντήρησης της κατασκευής και επίδρασης του θαλασσινού νερού στα υλικά της σήραγγας και της θεμελίωσης. Η κόπωση αυτών των κατασκευών και κυρίως η χημική αλλοίωση είναι θέματα προς διερεύνηση.

Σχετικά με τις πλωτές σήραγγες, επιπλέον αυτών που έχουν ήδη αναφερθεί, πρέπει να γίνει εκ νέου αναφορά στο πόσο περιορισμένες γνώσεις υπάρχουν καθότι πρόκειται ακόμη για μια πειραματική κατασκευή. Δύο σημεία είναι κυρίαρχα: η θεμελίωση των άκρων της σήραγγας και η σταθερότητα και στατική επάρκεια του τμήματος που βρίσκεται μέσα στο νερό. Το σύστημα αγκύρωσης και συγκράτησης/υποστύλωσης της σήραγγας είναι επίσης πολύ σημαντικό. Και εδώ πρόκειται για ένα υβριδικό έργο που εν μέρει είναι γεωτεχνικό έργο και εν μέρει είναι υδραυλικό/ναυπηγικό έργο.

Τα αριθμητικά παραδείγματα φανερώνουν τη σημασία που έχουν οι ιδιότητες του γεωλογικού στρώματος στην απόκριση της κατασκευής στην υπερκείμενη πίεση. Το μέτρο ελαστικότητας, η συνοχή και η γωνία τριβής του πετρώματος διαμορφώνουν τη συμπεριφορά του. Το κάθε πέτρωμα που θα συναντήσει η σήραγγα απαιτεί διαφορετική εσωτερική υποστήριξη και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία την κατασκευή. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις παίζουν τεράστιο ρόλο στην επιτυχή μελέτη και λειτουργία του έργου. Το βάθος των 20μ. κρίνεται επαρκές για να απορροφήσει την πίεση που ασκεί το ίδιο βάρος των πετρωμάτων και το βάρος του θαλασσινού νερού τουλάχιστον για τα πιο ανθεκτικά πετρώματα.

Είναι βέβαιο φυσικά ότι μια στατική ανάλυση απέχει πολύ από το να ερμηνεύσει με επιτυχία την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού σιηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Απλώς προσθέτει στοιχεία στη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν το πραγματικό πρόβλημα. Η ανάλυση με συνοριακά ή πεπερασμένα στοιχεία δεν μπορεί να αντικαταστήσει την έρευνα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Η έρευνα αυτή γίνεται προσεκτικά και με συστηματική παρακολούθηση της δομής και ποιότητας του υπεδάφους, ώστε να προληφθούν τυχόν προβλήματα που εντοπίζονται τόσο στις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις όσο και σε πιο εξειδικευμένα προβλήματα όπως η είσοδος νερού στο μέτωπο και τα τοιχώματα της σήραγγας, η εσωτερική υποστήριξη των σιηράγγων και τα H/M θέματα όπως ο αερισμός, ο φωτισμός, η πρόληψη σε περίπτωση πυρκαγιάς ή ατυχήματος.

Θεωρώ ότι η μεταπτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί ένα σημαντικό ερέθισμα για την περαιτέρω διερεύνηση του τρόπου σχεδιασμού συμβατικών σιηράγγων και σιηράγγων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Τα υπάρχοντα δεδομένα λογισμικά και οι σημαντικότερες μεθοδολογίες δεν κάνουν διάκριση για το αν η σήραγγα

βρίσκεται κάτω από ένα βουνό ή κάτω από τη θάλασσα. Αυτό ίσως να ευσταθεί για τις πολύ βαθιές σήραγγες, αλλά δεν ανταποκρίνεται στα προβλήματα των πιο ρηχών σηράγγων που διέρχονται από ασθενή ιζηματογενή πετρώματα και ζώνες με υψηλή υδραυλική κλίση. Όσον αφορά στις επικαθήμενες και πλωτές σήραγγες πρόκειται για ένα τελείως διαφορετικό έργο σε ιδιαίζουσες συνθήκες. Η αλληλεπίδραση του νερού και του εδάφους κάνουν ακόμη πιο πολύπλοκο το πρόβλημα και απαιτούν νέες κατασκευαστικές τεχνικές και νέες μελετητικές μεθόδους που σήμερα είναι οικείες σε πολύ μικρό αριθμό μηχανικών και εταιριών. Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία είναι ένα μικρό, αλλά σταθερό βήμα για την καλύτερη κατανόηση των σηράγγων και των προβλημάτων που καλούνται να λύσουν οι σημερινοί μηχανικοί.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### A. ΒΙΒΛΙΑ

1. Κούκης Χ. και Σαμπατάκης Ν., Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2007
2. Σακελλαρίου Μ., Γεωτεχνική Μηχανική, ΕΜΠ, 2008
3. Σακελλαρίου Μ., Σημειώσεις Μηχανικής Συνεχούς Μέσου, ΕΜΠ (υπό έκδοση), 2009
4. Καββαδάς Μ., Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων, ΕΜΠ, 2005
5. Τσουτρέλης Χ., Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων, ΕΜΠ, 1985
6. Μαμανέα Σ., Διπλωματική εργασία «Μεθοδολογία ανάλυσης & κατασκευής υποθαλάσσιας σήραγγας από βυθιζόμενα προκατασκευασμένα κιβώτια-ανάλυση τυπικής διατομής με πεπερασμένα στοιχεία», ΕΜΠ, 2006
7. Μαυράκος Σ. Σημειώσεις Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών, ΕΜΠ, 2007
8. Μαυράκος Σ., Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, ΕΜΠ, 1997
9. Αναγνωστόπουλος Α., Θεμελιώσεις με πασσάλους, Εκδόσεις Συμεών, 1990
10. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ & Ε.Ε.Ε.Θ., 2006
11. Μουτζούρης Κ., Εισαγωγή στην ακτομηχανική, ΕΜΠ, 2005
12. Βαδαλούκας Γ. & Γεωργοπούλου Μ., Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός Ε.Α.Κ.2000, 2004
13. Χαραλάμπους Σ., Διπλωματική εργασία «Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρανών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων σε περιβάλλον GIS», ΕΜΠ, 2003
14. Τζάμος Σ., Διδακτορική διατριβή «Εκτίμηση της υποστήριξης υπόγειων έργων με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης», ΕΜΠ, 2007
15. Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., Κατασκευή και Μηχανική των σηράγγων και των υπογείων έργων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2006
16. Barnes G., Εδαφομηχανική: Αρχές και Εφαρμογές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
17. Hudson J. & Harrison J., Engineering Rock Mechanics, Pergamon, 1997
18. Sheorey P., Empirical Rock Failure Criteria, Balkema, 1997
19. Crouch S. & Starfield A., Boundary element methods in solid mechanics, G.Allen & Unwin, 1983

### B. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Palmstrom A., Huang Z., Application of Norwegian Subsea Tunnel Experience to Construction of Xiamen Xang'an Subsea Tunnel, Int.



- Symp. on Construction techniques of subsea tunnels, Nov. 6-8, 2007, Xiamen, China
2. Ding W., Li S., Zhu W., Analysis on Construction of a Sub-sea Tunnel, ICCS 2007, Part III, LNCS 4489, pp. 145–148, 2007
  3. Tveit P., Ideas on downward arched and other underwater concrete tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 69-78, 2000
  4. Eisenstein Z., Large Undersea Tunnels and the Progress of Tunnelling Technology, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 283-292, 2000
  5. Ikuma M., Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 20, 143–149, 2005
  6. Tu Z., Yang Q., Shen Q., Wang X., Determination of rock resistant coefficient based on Mohr-Coulomb criterion for underwater tunnel, Univ Sci A , pp. 1239-1244, 2008
  7. Brezhnev V., Abramson V., Zemelman A., Vlasov S., Koulaguin N., Merkin V., Razbeguin V., Russian underwater tunnels in the system of international transportation ways, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, pp. 595–599, 2005
  8. Nilsen B., Palmstrom A., Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels, Modern Tunneling Science and Technology, pp. 497-502, 2001
  9. Bejui H., Avril T., French Experience in the field of Submarine Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.1, pp. 251-260, 1986
  10. Palmstrom A., Ziping H., Application of Norwegian subsea tunnel experiences to construction of Xiamen Xiang's subsea tunnel, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol.26, pp. 2236-224, 2007
  11. Blindheim O., Grov E., Nilsen B., Nordic sub sea tunnel projects, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, pp. 570–580, 2005
  12. Nilsen B., Analysis of Potential Cave-in from Fault Zones in Hard Rock Subsea Tunnels, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 27, pp. 63-75, 1994
  13. Comolli R., Cuaz F., Ferro V., Pigorini B., The Channel Expressway: Twin-bored road tunnels under the English Channel, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 1, pp. 261-269, 1986
  14. Saveur J., Grantz W., Structural design of immersed tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, pp. 93-109, 1997
  15. Grantz W., Immersed tunnel settlements Part 2: case histories, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.16, pp. 203-210, 2001
  16. Ahrens D., Gursoy A., Submerged floating tunnels-a concept whose time has arrived, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, pp. 317-336, 1997

17. Massinas S. & Sakellariou M., Closed-form solution for plastic zone formation around a circular tunnel in half-space obeying Mohr-Coulomb criterion, *Geotechnique*, Vol.59, pp. 1-11, 2009
18. Marinos V., Marinos P. & Hoek E., The geological strength index: applications and limitations, *Bull Eng Geol Environ*, Vol. 64, pp. 55–65, 2005
19. Marinos V., Marinos P. & Hoek E., Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling, *Bull Eng Geol Environ*, Vol. 65, pp. 129-142, 2006
20. Trifunac M. & Todorovska M., Maximum distance and minimum energy to initiate liquefaction in water saturated sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, pp. 89–101, 2004