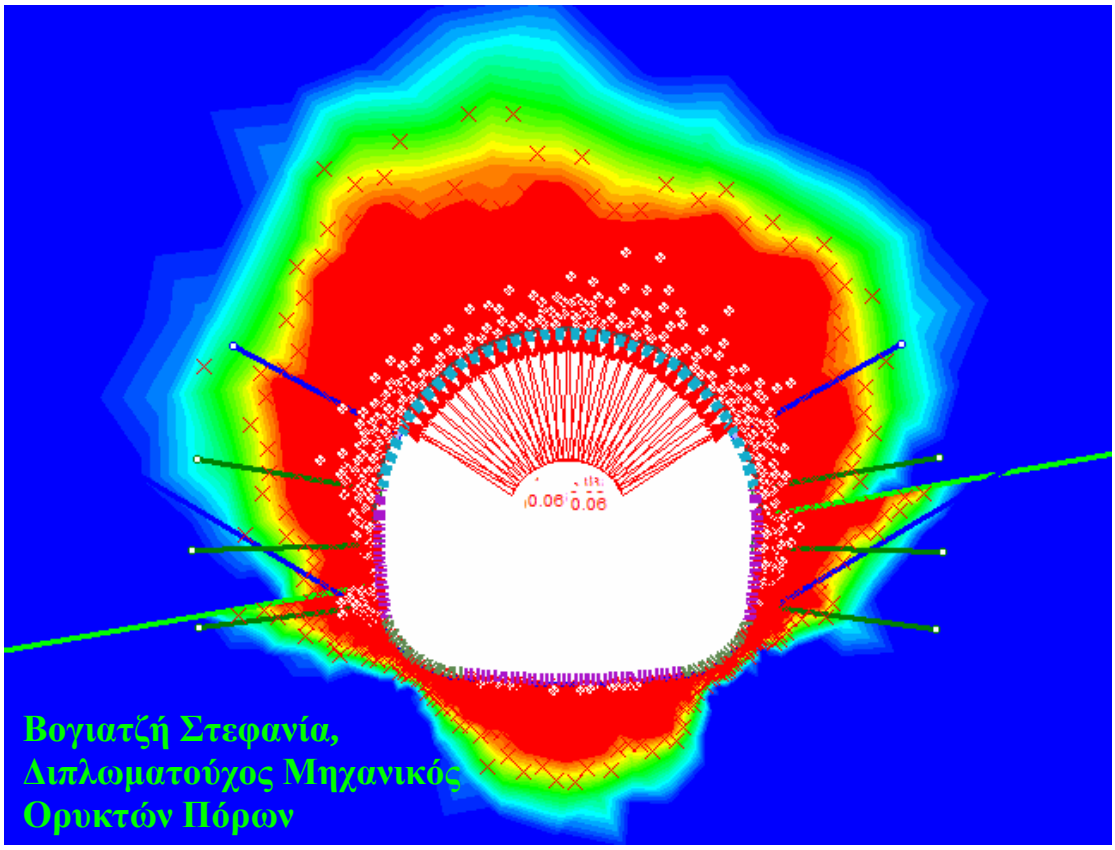
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΜΣ «ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΑΣΙΚΟΥ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ



Βογιατζή Στεφανία,
Διπλωματούχος Μηχανικός
Ορυκτών Πόρων

Εξεταστική επιτροπή:
Αγιουτάντης Ζ., Καθηγητής
Εξαδάκτυλος Γ., Καθηγητής
Στειακάκης Ε., Λέκτορας

Χανιά, Ιούνιος 2012

Αφιερώνεται στους γονείς μου,

Βασίλη και Κατερίνα

και στα αδέρφια μου

Νίκο και Χριστίνα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής μου διατριβής για την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού προγράμματος «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον», του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του πολυτεχνείου Κρήτης. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου αλλά και σε όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με αρκετούς αξιόλογους καθηγητές του πολυτεχνείου αλλά και συμφοιτητές μου που συνέβαλαν σημαντικά στην αποπεράτωση των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη που εκτός από επιβλέπων καθηγητής της παρούσας διατριβής, υπήρξε και επιβλέπων στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας για το προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών μου. Οι επιστημονικές του συμβουλές αλλά και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη διάρκεια φοίτησής μου στο πολυτεχνείο ήταν καταλυτικής σημασίας για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον λέκτορα κ. Μανόλη Στειακάκη για την αξιολόγηση της εργασίας μου αλλά και για την άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια συμμετοχής μου ως επιστημονικός βοηθός στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής του πολυτεχνείου.

Ευχαριστώ επίσης και τον καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο, Γεώργιο για τον χρόνο που αφιέρωσε για την διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας μου και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης και στον πτυχιούχο Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Ευθύμιο Παπαχρήστο για την συνεργασία που είχαμε και την ανταλλαγή απόψεων επάνω σε θέματα αριθμητικής ανάλυσης κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής του εργασίας.

Δεν ξεχνώ επίσης την τεχνική υποστήριξη που προσέφερε αναφορικά με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad ο υποψήφιος διδάκτωρ του πολυτεχνείου Κρήτης, Γιώργος Παναγόπουλος.

Στο σημείο αυτό οφείλω θερμά ευχαριστώ σε ένα σύνολο ανθρώπων, που εργάζονται στο εργοτάξιο κατασκευής της σήραγγας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον κ. Νικόλαο Λόλα, πολιτικό μηχανικό υπεύθυνο των έργων Κρήτης, της κατασκευαστικής εταιρίας «J&P Άβαξ», που μου εμπιστεύτηκε όλο το απαραίτητο υλικό αλλά και επιπλέον πληροφορίες για την ολοκλήρωση της εργασίας μου και με διαρκή επικοινωνία απάντησε σε απορίες που προέκυπταν κατά την διεξαγωγή της μελέτης μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Ντούλη της εταιρίας τεχνικών μελετών «Εδαφομηχανική Α.Ε.», πολιτικό μηχανικό συντάκτη της τεχνικής μελέτης της σήραγγας που με την άδεια παρέλαβα το τεχνικό υλικό.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Έμυ Γιαλύτη, γεωλόγο, συνεργάτη της εταιρίας «J&P Άβαξ» για την αποστολή του φωτογραφικού υλικού και για την παροχή τεχνικών συμβουλών με τηλεφωνική και ηλεκτρονική επικοινωνία.

Τέλος, τις πιο θερμές μου ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου αλλά και στους φίλους μου που μου παρείχαν την απαραίτητη ηθική υποστήριξη και αμέριστη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της ανάπλασης του Β.Ο.Α.Κ. για τον νομό Ηρακλείου, πραγματοποιήθηκε παράκαμψη της παλαιάς οδού Καστέλλι- Άγιοι Δέκα – Αγία Βαρβάρα, με διάνοιξη νέας οδού από βόρεια. Το τμήμα της νέας οδού που κατασκευάστηκε περιλαμβάνει ένα σύστημα σηράγγων, μία από τις οποίες είναι και η σήραγγα στην Α.Κ. Αγ. Βαρβάρας. Η σήραγγα αυτή αποτελεί τον τελευταίο συνδετικό κρίκο του νέου τμήματος του δρόμου με τον υπόλοιπο Β.Ο.Α.Κ στην βορειοανατολική πλευρά. Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε μαλακά πετρώματα (συγκεκριμένα σε σχηματισμούς μάργας και λατυποπαγούς) και για τον λόγο αυτό έγινε εκσκαφή με συμβατικά μέσα και εφαρμογή τεχνικής NATM.

Στα πλαίσια της μελέτης της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση του τασικού-παραμορφωσιακού πεδίου γύρω από αυτήν, με συνδυασμό μεθόδων. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι:

1) ελαστοπλαστική ανάλυση
2) αριθμητική ανάλυση με αξονοσυμμετρικά μοντέλα
3) αριθμητική ανάλυση με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης.

Η ελαστοπλαστική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε σε ανυποστήρικτη σήραγγα, με χρήση εμπειρικής μεθόδου (convergence-confinement) με την θεώρηση κυκλικής διατομής, για την εξαγωγή των κατάλληλων συντελεστών σύμφωνα με το εμπειρικό κριτήριο του Chern (Chern et al, 1998). Οι συντελεστές αυτοί είναι απαραίτητοι για τις δισδιάστατες αναλύσεις που ακολουθούν.

Οι αναλύσεις αξονοσυμμετρικών μοντέλων πραγματοποιήθηκαν για έλεγχο και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της ελαστοπλαστικής ανάλυσης.

Οι δισδιάστατες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης, για τον έλεγχο επάρκειας της προσωρινής υποστήριξης και εκτίμηση των συγκλίσεων.

ABSTRACT

The reconstruction of the North Road Axis of Crete (N.R.A.C.), for the prefecture of Irakleion, involves a detour of the old road that passes through Kasteli- Agioi Deka-Agia Varvara. The section of the new road includes a system of tunnels, one of which is constructed at the municipality of Agia Varvara. This tunnel is the connecting link between the new section with the main road (N.R.A.C.), in the northeastern part. The tunnel is excavated in soft rocks (more specifically in Marl and Breccia formations). The excavation is designed based on the NATM technique due to the large strains anticipated.

In this work, the stress - strain regime around the tunnel was estimated using a number of methods:

a) elastoplastic analysis with empirical approach
b) numerical analysis with axisymmetric models
c) numerical analysis with plane-strain models.

The elastoplastic analysis was performed using an empirical convergence-confinement method, which considers an unsupported tunnel, with the assumption of a circular cross-section. Chern's empirical criterion (Chern et al, 1998), was used for the calculation of the coefficients necessary for the plane-strain analysis.

Axisymmetric models were studied and the results were compared to results from the elastoplastic analysis.

2-D plane-strain models, were investigated for examining the efficiency of the temporary support and for estimating the convergence.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ I

ΠΕΡΙΛΗΨΗ III

ABSTRACT IV

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

2 ΣΗΡΑΓΓΕΣ 3

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 3
2.2 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ LAERDAL 3
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ 5
2.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ 5
2.3.2 ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ 7
2.3.2.1 Συμβατική διάνοιξη 8
2.3.2.2 Συνεχής διάνοιξη 8
2.3.2.3 Διάνοιξη με μηχανικά μέσα 8
Σφύρα 8
Εκσκαφέας 9
Μηχάνημα σημειακής κοπής (roadheader) 9
Μηχανή ολομέτωπης κοπής (TBM) 10
2.3.2.4 Διάνοιξη με εκρηκτικές ύλες 14
Συστήματα μετάδοσης φλόγας 17
Συστήματα μετάδοσης κρουστικού παλμού 17

3 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ 18

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 18
3.2 ΗΛΩΣΕΙΣ 19
3.2.1 ΚΟΧΛΙΕΣ 19
Κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης 20
Κοχλίες αγκύρωσης με ρητίνη 21
3.2.2 ΑΓΚΥΡΙΑ 22
Αγκύρια ενεμάτωσης 22
Αγκύρια πρόσφυσης (Split set και Swellex) 23
3.2.3 ΗΛΩΣΕΙΣ ΤΥΠΟΥ CABLEBOLT 24
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΠΑΣΣΑΛΩΣΗΣ ΟΡΟΦΗΣ 26
3.3.1 ΠΡΟΠΑΣΣΑΛΩΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (JET GROUTING) 26
3.3.2 ΠΡΟΠΑΣΣΑΛΩΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΔΟΚΟΥΣ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ (FOREPOLING) 28
3.3.3 ΠΡΟΠΑΣΑΛΩΣΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΡΑΒΔΟΥΣ ΠΡΟΑΓΚΥΡΩΣΗΣ (SPILING) 31
3.3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ PRETUNNEL 32
3.3.5 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΠΡΟΤΜΗΣΗ 36
3.4 ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ 37
3.4.1 ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΟΡΦΟΧΑΛΥΒΑ 38
3.4.2 ΔΙΚΤΥΩΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ 40

3.5 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 41
3.5.1 ΑΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 41
Σκυρόδεμα τύπου Dry mix 41
Σκυρόδεμα τύπου Wet mix 42
3.5.2 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 43

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ 44

4.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. 45
4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ 46
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ. 48
4.4 ΕΙΔΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 49
4.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ 51
4.5.1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΡΙΚΟΜΒΙΚΟ ΤΡΙΓΩΝΟ. 52
4.6 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ 54
4.6.1 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ 54
4.6.2 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ 56
Θεώρηση επίπεδης τάσης 56
Θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης 57
Αξονοσυμμετρική θεώρηση 57
4.7 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ 59
4.7.1 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ 59
4.7.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΩΝ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ 63
4.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ 64
4.9 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 66

5 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΑΓΙΑΣ ΒΑΡΒΑΡΑΣ 68

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 68
5.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 69
5.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 69
5.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 70
5.5 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 71
5.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ 71
5.7 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ 74
5.8 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ. 78
5.8.1 ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 78
5.8.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ 80
Παραδοχές 80
Υπολογισμοί 83
5.8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 85
Διατομή ελέγχου 103 88
Διατομή ελέγχου 111 89
Διατομή ελέγχου 117 92
Διατομή ελέγχου Α5 94
5.9 ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE2 96
5.9.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ 97
5.9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 99
5.9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΕΙΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 102
5.10 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE2 104
5.10.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ 104
5.10.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ 107

5.10.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ 110
5.10.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ 111
Αγκύρια 111
Σκυρόδεμα 112
Δοκοί προπορείας 113
5.10.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 114
Εκτίμηση πλαστικής ζώνης 114
Συγκλίσεις οροφής 117
Αναθόλωση δαπέδου 119
Συγκλίσεις στις παρειές 120
Εκτίμηση αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια 122
Εκτίμηση επιφανειακών καθιζήσεων 122

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 124

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 124
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 126

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 128

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 128
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 130
ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ 134
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ 134

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ 135

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β-ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΈΛΑ 165

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ-ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ) 181

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΑΠΟΔΟΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΦΥΡΑΣ HM-2500 ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ KRUPP BERCO (KOLYMBAS, 2008) ---------- 8
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ (HOEK ET AL. 2002, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ) ---------- 76
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ---------- 78
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ-ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ---------- 87
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ---------- 87
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 103 ---------- 88
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 111 ---------- 90
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 111 ---------- 92
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ Α5 ---------- 94
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ. ---------- 98
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ (CM) ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Α' ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ. ---------- 101
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ (CM) ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ Β' ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ---------- 101
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ (CM), ΓΙΑ ΤΗΝ Α' ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ. ---------- 102
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12:ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ (CM), ΓΙΑ ΤΗΝ Β' ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ. ---- 102
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ. ---------- 106
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ. ---------- 112
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ---------- 117

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1: ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ LAERDAL ΣΕ ΜΗΚΟΤΟΜΗ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΚΑΤΩ), (WWW.LOTSBERG.NET.) ---------- 4
ΣΧΗΜΑ 2.2: ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ: ΔΥΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 480Μ^3/S (WWW.LOTSBERG.NET)---------- 5
ΣΧΗΜΑ 2.3: "MOUNTAIN HALL",ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΦΩΤΙΣΜΟ ΠΟΥ ΠΑΡΑΠΕΜΠΕΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΤΟΛΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ (WWW.LOTSBERG.NET). ---------- 5
ΣΧΗΜΑ 2.4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ CUT & COVER (W3.KRTCO.TW).---------- 7
ΣΧΗΜΑ 2.5: ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΦΥΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΓΙΑΣ ΒΑΡΒΑΡΑΣ, ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ.---------- 9
ΣΧΗΜΑ 2.6: VOIST-ALPINE AM75 ROAD HEADER (60-TON CLASS) (WWW.MAGMINESERV.COM) ----- 10
ΣΧΗΜΑ 2.7: TBM ΠΟΛΦΟΥ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ : 1.ΚΟΠΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΠΟΛΦΟ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ, 2.ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΕΡΑ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ, 3.ΣΩΛΗΝΕΣ ΕΙΣΡΟΗΣ-ΕΚΡΟΗΣ ΠΟΛΦΟΥ, 4.ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ, 5.ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ (WWW.TUNNELSEIS.DE).---------- 12
ΣΧΗΜΑ 2.8: TBM ΑΣΠΙΔΑΣ ΜΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΠΙΕΣΗΣ ΓΑΙΩΝ: 1.ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΚΟΠΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ, 2.ΘΑΛΑΜΟΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ, 3.ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ, 4.ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΔΡΑΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ, 5.ΚΟΧΛΙΩΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΑΣ, 6.ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, 7.ΤΑΙΝΙΩΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΑΣ (WWW.TUNNELSEIS.DE).---------- 13
ΣΧΗΜΑ 2.9: ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΦΡΩΔΟΥΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΚΟΠΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ ΕΝΟΣ TBM ΑΣΠΙΔΑΣ ΜΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΠΙΕΣΗΣ ΓΑΙΩΝ (WWW.TUNNELSEIS.DE). ---------- 13
ΣΧΗΜΑ 2.10: ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ-ΑΝΑΤΙΝΑΞΗ (EC.EUROPA.EU)---------- 14
ΣΧΗΜΑ 2.11: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΩΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ. ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΤΕΣΣΕΡΑ ΚΕΝΑ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (WWW.TUNNELSEIS.DE).15
ΣΧΗΜΑ 2.12: ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΚΟΠΗ ΡΙΠΙΔΙΟΥ, ΔΕΞΙΑ: ΣΦΗΝΟΕΙΔΗΣ ΚΟΠΗ (JOHANSEN, 2000).---------- 16
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΕΙΔΗ ΗΛΩΣΕΩΝ (SING & GOEL, 2006). ---------- 19
ΣΧΗΜΑ 3.2: ΕΙΔΗ ΚΟΧΛΙΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ, (SINGH & GOEL, 2006). ---------- 20
ΣΧΗΜΑ 3.3: ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΤΥΠΟΥ SLOT AND WEDGE, KOLYMBAS, 2008).---------- 20
ΣΧΗΜΑ 3.4: ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΤΥΠΟΥ EXPANSION SHELL, KOLYMBAS, 2008)---------- 21
ΣΧΗΜΑ 3.5: ΚΟΧΛΙΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΡΗΤΙΝΗ, (HOEK, 2007-ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ). ---------- 22
ΣΧΗΜΑ 3.6: ΑΓΚΥΡΙΟ ΤΥΠΟΥ SPLIT-SET, (SINGH & GOEL, 2006). ---------- 23
ΣΧΗΜΑ 3.7: ΑΓΚΥΡΙΟ ΤΥΠΟΥ SWELLEX (KOLYMBAS, 2008). ---------- 24
ΣΧΗΜΑ 3.8: ΣΥΝΗΘΗΣ ΤΥΠΟΙ CABLEBOLTS (HOEK, 2007 ΑΠΟ WINDSOR, 1992). ---------- 25
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΟΛΟΥ ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΔΑΦΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (PEILA & OGGERI, 2006). ---------- 28
ΣΧΗΜΑ 3.10: ΕΦΑΡΜΟΓΗ «ΟΜΠΡΕΛΑΣ FOREPOLING» (AKSOY & ONARGAN, 2010 ΑΠΟ HOEK, 2004). - 29
ΣΧΗΜΑ 3.11: ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ FOREPOLING (ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΓΙΑΣ ΒΑΡΒΑΡΑΣ, 2008, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ). ---------- 30
ΣΧΗΜΑ 3.12: ΕΦΑΡΜΟΓΗ FOREPOLING ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΑΓΙΑΣ ΒΑΡΒΑΡΑΣ, ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ.---------- 30
ΣΧΗΜΑ 3.13: ΕΦΑΡΜΟΓΗ FOREPOLING ΜΕ ΔΟΚΟΥΣ "MICROTUNNELS" ΣΤΗΝ ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ «ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ». ΤΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΙΝΑΙ 18Μ (KAVVADAS, 2005). --------- 31
ΣΧΗΜΑ 3.14: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΑΒΔΩΝ ΠΡΟΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΥΠΟΥ LATTICE GIRDER (VOLKMANN ET AL., 2006).---------- 32
ΣΧΗΜΑ 3.15: ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ PRETUNNEL (TONON ET AL., 2005, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ). ---------- 34
ΣΧΗΜΑ 3.16: ΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ PRETUNNEL (TONON ET AL., 2005, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ). ---------- 35
ΣΧΗΜΑ 3.17: ΜΗΧΑΝΗΜΑ PERFOREX (PEILA ET AL., 2006).---------- 36
ΣΧΗΜΑ 3.18: ΤΜΗΜΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΗΕΒ. ---------- 39
ΣΧΗΜΑ 3.19: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΥΠΟΥ ΗΕΒ.----- 39
ΣΧΗΜΑ 3.20: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΗΕΒ, ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ Β' ΦΑΣΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ. ---------- 39
ΣΧΗΜΑ 3.21: LATTICE GIRDER ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (WWW.DSIGROUNDSUPPORT.COM). ---------- 40
ΣΧΗΜΑ 3.22: LATTICE GIRDER ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (WWW.DEVORAN-METALS.CO.UK).---------- 41
ΣΧΗΜΑ 3.23: ΤΥΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ DRY MIX (HOEK ET AL., 1995, ΑΠΟ MAHAR ET AL., 1975). ---------- 42
ΣΧΗΜΑ 3.24: ΤΥΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ WET MIX (HOEK ET AL., 1995, ΑΠΟ MAHAR ET AL., 1975). ---------- 42

ΣΧΗΜΑ 4.1: ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΣΟΥ ΣΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, 2006). ---------- 47
ΣΧΗΜΑ 4.2: ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ, ΜΕ ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (BRADY & BROWN, 2004). ---------- 47
ΣΧΗΜΑ 4.3: ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΜΙΚΡΟΤΕΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ) ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ Π.Σ. PHASE2. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΒΑΘΜΗΣΗΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥ 0.1 ΔΕΞΙΑ: ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΒΑΘΜΗΣΗΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥ 0.05. ---------- 49
ΣΧΗΜΑ 4.4: ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΤΡΙΓΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ) ΑΠΟ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ Π.Σ.MARC-MENTAT (ΒΙΟΠΟΥΛΟΣ, 2006). -- 49
ΣΧΗΜΑ 4.5: ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΔΙΑΣΤΑΣΗ (ΛΙΑΡΑΚΟΣ, 2005). ---------- 50
ΣΧΗΜΑ 4.6: ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ ΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΛΙΑΡΑΚΟΣ, 2005 ΑΠΟ FAGAN, 1992). ---------- 52
ΣΧΗΜΑ 4.7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ. ---------- 57
ΣΧΗΜΑ 4.8: ΘΕΩΡΗΣΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ. ---------- 59
ΣΧΗΜΑ 4.9: ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑ. 66
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΚΑΘΕΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΑΞΟΝΑ (ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ Β.Ο.Α.Κ.) ---------- 68
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΤΟΥ ΙΓΜΕ (ΚΛΙΜΑΚΑ 1:50000). ---------- 70
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 2.2. ---------- 70
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ (HOEK, 2001). ---------- 73
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (HOEK, 1998, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ) ---------- 79
ΣΧΗΜΑ 5.6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΚΥΚΛΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ. ---------- 81
ΣΧΗΜΑ 5.7: ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Λ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ N_S (ΚΑΒΒΑΔΑΣ, 2000, ΑΠΟ AFTES, 1986) ---------- 82
ΣΧΗΜΑ 5.8: ΘΕΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΣΤΗ ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ. ---------- 85
ΣΧΗΜΑ 5.9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 103. ---------- 89
ΣΧΗΜΑ 5.10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LDP ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 103 ---------- 89
ΣΧΗΜΑ 5.11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 111 ---------- 91
ΣΧΗΜΑ 5.12: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LDP ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 111. ---------- 91
ΣΧΗΜΑ 5.13: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 117 ---------- 93
ΣΧΗΜΑ 5.14: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LDP ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 117 ---------- 93
ΣΧΗΜΑ 5.15: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗΑ5 ---------- 95
ΣΧΗΜΑ 5.16: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LDP ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ Α5. ---------- 95
ΣΧΗΜΑ 5.17: ΣΥΓΚΡΙΣΗ LDPS ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (VLACHOPOULOS & DIEDERICHS, 2009) ---------- 96
ΣΧΗΜΑ 5.18: ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ (VLACHOPOULOS & DIEDERICHS, 2009). ---------- 97
ΣΧΗΜΑ 5.19: ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 103 ΜΕ ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Α' ΦΑΣΗ, ΔΕΞΙΑ: Β' ΦΑΣΗ. ---------- 99
ΣΧΗΜΑ 5.20: LDP ΔΙΑΤΟΜΗΣ 103, ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ: Α) ΣΕ ΕΝΑ ΣΤΑΔΙΟ, Β) ΣΕ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΑ, Γ) ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΤΑΔΙΑ. ---------- 100
ΣΧΗΜΑ 5.21: LDP ΔΙΑΤΟΜΗΣ 117, ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ: Α) ΣΕ ΕΝΑ ΣΤΑΔΙΟ, Β) ΣΕ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΑ, Γ) ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΤΑΔΙΑ. ---------- 100
ΣΧΗΜΑ 5.22: LDP ΔΙΑΤΟΜΗΣ 111, ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (CHERN), ΜΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ. ---------- 103
ΣΧΗΜΑ 5.23: LDP ΔΙΑΤΟΜΗΣ 117, ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (CHERN), ΜΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ. ---------- 103
ΣΧΗΜΑ 5.24: ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ. ---------- 107
ΣΧΗΜΑ 5.25: ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 103. ---------- 108
ΣΧΗΜΑ 5.26: ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ---------- 109
ΣΧΗΜΑ 5.27: ΓΕΝΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ---------- 110
ΣΧΗΜΑ 5.28: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ Α5. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Α' ΦΑΣΗ, ΔΕΞΙΑ: Β' ΦΑΣΗ ---------- 115
ΣΧΗΜΑ 5.29: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 117. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Α' ΦΑΣΗ, ΔΕΞΙΑ: Β' ΦΑΣΗ ---------- 115

ΣΧΗΜΑ 5.30: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 111. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Α' ΦΑΣΗ, ΔΕΞΙΑ: Β' ΦΑΣΗ ----------116
ΣΧΗΜΑ 5.31: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 103. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Α' ΦΑΣΗ, ΔΕΞΙΑ: Β' ΦΑΣΗ ----------116
ΣΧΗΜΑ 5.32: ΔΙΑΤΟΜΗ 111, ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΟΡΟΦΗΣ. ----------118
ΣΧΗΜΑ 5.33:ΔΙΑΤΟΜΗ 111, ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ ----------119
ΣΧΗΜΑ 5.34: ΔΙΑΤΟΜΗ 103, ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ. ----------120
ΣΧΗΜΑ 5.35: ΔΙΑΤΟΜΗ 111, ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΕΙΕΣ ----------121
ΣΧΗΜΑ 5.36: ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ), ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΟΜΗ 111. ----------121
ΣΧΗΜΑ 5.37: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΜΟΝΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΔΕΞΙΑ ΚΑΙ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ. ----------122
ΣΧΗΜΑ 5.38: ΔΙΑΤΟΜΗ 111, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗ.----------123

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης, ενός υπόγειου τεχνικού έργου, είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την ασφάλεια των εργαζομένων κατά την διάρκεια της εκσκαφής αλλά και για την ευστάθεια του υπόγειου ανοίγματος και την εξασφάλιση του απαιτούμενου χρόνου ζωής και του συντελεστή ασφαλείας το έργου ανάλογα με τη χρήση του.

Ο επιστημονικός κόσμος συνεχώς επιστρατεύει ολοένα και πιο σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης τόσο για την πιο ρεαλιστική πρόβλεψη των συνθηκών του πεδίου αλλά και τεχνολογίας για την επίτευξη των εκάστοτε στόχων. Οι αναλύσεις πρόβλεψης των συνθηκών του πεδίου, προσεγγίζονται με ποικιλία μεθόδων που βασίζονται σε παρατηρήσεις προηγούμενων περιπτώσεων για την εξαγωγή εμπειρικών τύπων, μαθηματικές αναλύσεις ελαστικής θεωρίας αλλά και με τη χρήση υπολογιστικών αριθμητικών μεθόδων διάφορων λογισμικών πακέτων.

Η παρούσα διερεύνηση έγινε στα πλαίσια της διάνοιξης και εφαρμογής της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας της Αγίας Βαρβάρας, στο νομό Ηρακλείου. Οι αναλύσεις που έγιναν περιλαμβάνουν:

1) την πρόβλεψη των συγκλίσεων και του λόγου αποτόνωσης της βραχομάζας με ελαστοπλαστική ανάλυση και τη χρήση ενός εμπειρικού κριτηρίου (Chern, 1998), που βασίζεται σε γεωτεχνικές ιδιότητες που απορρέουν από το κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown (1980),
2) την εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της προηγούμενης ανάλυσης,
3) την εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης για τον έλεγχο επάρκειας των προσωρινών μέτρων υποστήριξης και εκτίμηση των συγκλίσεων που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα από τα στάδια εφαρμογής των μέτρων αυτών.

Στην συνέχεια γίνεται σύντομη περιγραφή των περιεχομένων των κεφαλαίων της εργασίας:

- ✓ ***Στο κεφάλαιο 2*** γίνεται περιγραφή των μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και του απαιτούμενου εξοπλισμού για την εκσκαφή αυτών

- ✓ ***Στο κεφάλαιο 3*** περιγράφονται τα στοιχεία εκείνα που αποτελούν την προσωρινή υποστήριξη και επένδυση μιας σήραγγας με άμεση εφαρμογή αλλά και με συστήματα προενίσχυσης.
- ✓ ***Στο κεφάλαιο 4*** περιγράφεται συνοπτικά η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (η οποία εφαρμόζεται από το λογισμικό πακέτο Phase2, που χρησιμοποιήθηκε).
- ✓ ***Στο κεφάλαιο 5*** γίνεται σύντομη περιγραφή του πεδίου εφαρμογής της σήραγγας αλλά και της μεθόδου διάνοιξης αυτής, ενώ γίνεται και αναφορά στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά της βραχομάζας και πως αυτή επηρεάζει τις αναλύσεις. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο αλλά και η διαδικασία εφαρμογής των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκάστοτε μέθοδο.
- ✓ Τέλος ***στο κεφάλαιο 6*** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την διερεύνηση αλλά και οι προτάσεις που προέκυψαν μελλοντική μελέτη.

2 ΣΗΡΑΓΓΕΣ

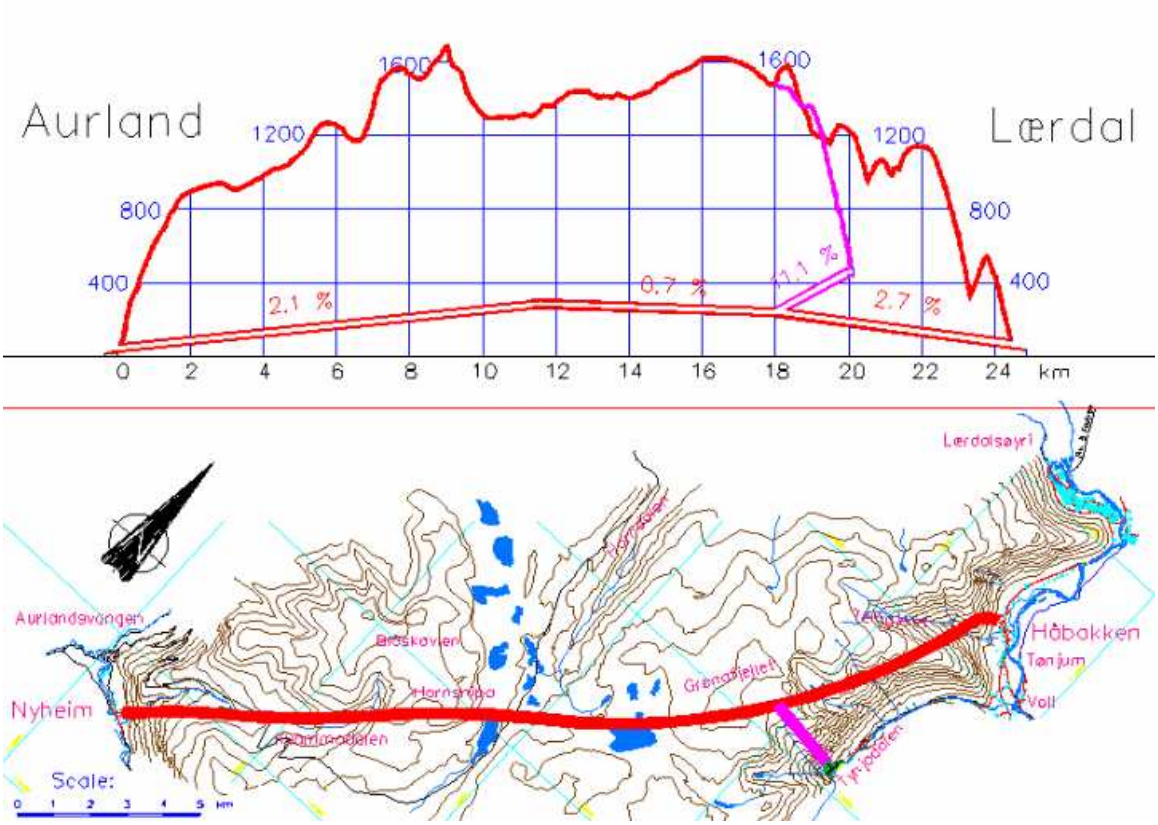
2.1 Εισαγωγή

Οι σήραγγες διακρίνονται σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τη χρήση τους: Οδικές, σιδηροδρομικές, σήραγγες μετρό, μεταφοράς υπόγειων υδάτων κ.α. Η κάθε κατηγορία έχει και κάποια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις ανάγκες της εκάστοτε λειτουργίας.

Οι δυνατότητες προσαρμογής και λειτουργικότητάς τους στις εκάστοτε συνθήκες ολοένα και αυξάνονται με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τεχνογνωσίας γεγονός που οδηγεί, ειδικά τα τελευταία χρόνια, σε θεαματικά επιτεύγματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου τεχνικού έργου είναι η όρυξη της σήραγγας στο Laerdal της Νορβηγίας, που είναι η μεγαλύτερη σε μήκος οδική σήραγγα στον κόσμο.

2.2 Η σήραγγα του Laerdal

Η σήραγγα του Laerdal, ξεκίνησε να κατασκευάζεται τον Ιούλιο του 1995 και δόθηκε σε κυκλοφορία τον Νοέμβριο του 2000. Έχει συνολικό μήκος 24.51km και ενώνει την πόλη Laerdal από βόρεια με την πόλη Nyheim (Aurland) στο νότιο τμήμα της. Η διάνοιξή της έγινε με τη μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης μέσα σε γνεύσιο του Προκάμβριου (www.engineering.com). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται μια τυπική τομή και οριζοντιογραφία της σήραγγας.



Σχήμα 2.1: Σκαρίφημα της σήραγγας Laerdal σε μηκοτομή (πάνω) και οριζοντιογραφία (κάτω), (**www.lotsberg.net**.)

Δύο σημαντικές προκλήσεις κατά τη διάνοιξη μιας τέτοιου μεγέθους σήραγγας είναι αυτή του επαρκούς εξαερισμού αλλά και του κατάλληλου φωτισμού που πέραν του πρακτικού κομματιού (ορατότητα), πρέπει να συμπεριλαμβάνει και το ψυχολογικό μέρος για τους οδηγούς που πρέπει να μένουν σε επαγρύπνηση μέσα σε κλειστό και μονότονο δρόμο για αρκετά χιλιόμετρα. Όσον αφορά τον φωτισμό, η σήραγγα έχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό: Την ύπαρξη τριών μεγάλων σπηλαίων πλάτους 30m (mountain halls), σε απόσταση 6km μεταξύ τους, που με κατάλληλο φωτισμό δίνουν την αίσθηση οδήγησης σε ανοιχτό δρόμο την ώρα της ανατολής του ηλίου. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ο κεντρικός σταθμός εξαερισμού, ενώ στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα από τα “mountain halls”.

Σχήμα 2.2: Κεντρικός σταθμός εξαερισμού: Δύο γεννήτριες συνολικής αποδοτικότητας 480m^3/s (**www.lotsberg.net**)

Σχήμα 2.3: "Mountain Hall",με χαρακτηριστικό φωτισμό που παραπέμπει στην ανατολή του ηλίου (**www.lotsberg.net**).

2.3 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

Για την κατασκευή υπόγειων έργων εφαρμόζονται δύο διαφορετικοί τρόποι: η μέθοδος ανοιχτού ορύγματος όπου η εκσκαφή γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος κλειστής διάνοιξης όπου το έργο κατασκευάζεται υπόγεια χωρίς να διαταραχθεί η επιφάνεια (Μαραγκός,1997).

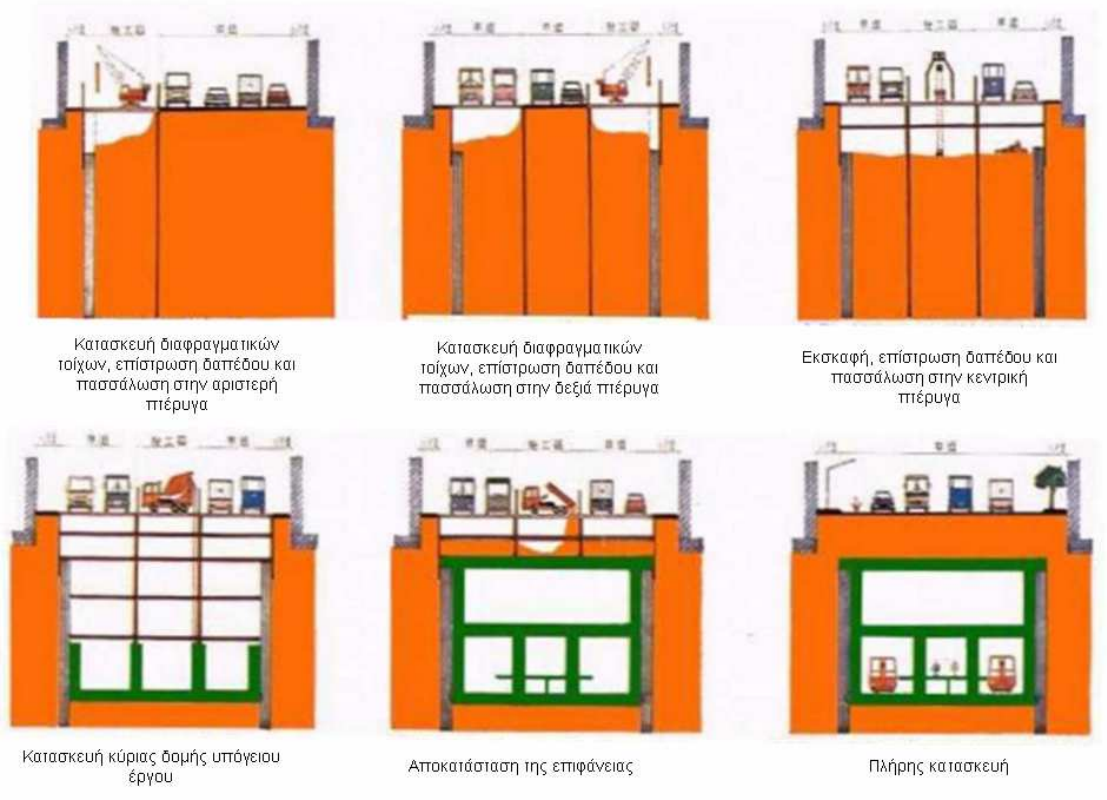
2.3.1 Η μέθοδος ανοιχτού ορύγματος

Η μέθοδος αυτή, πλέον γνωστή ως μέθοδος Εκσκαφής & Επίχωσης (Cut & Cover), εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εδαφικών σχηματισμών όπου το έργο βρίσκεται σε μικρό βάθος (Σχήμα 2.4). Σε ακατοίκητες περιοχές δεν υπάρχουν ιδιαίτερες

δυσκολίες εφαρμογής. Η εκσκαφή γίνεται χωρίς περιορισμούς και χωρίς αντιστήριξη στις παρειές εφόσον σκάβονται μέχρι την επιτρεπόμενη κλίση ευστάθειάς τους. Ωστόσο σε αστικά περιβάλλοντα υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί αφού η εκσκαφή δεν πρέπει να επηρεάσει την κυκλοφορία αλλά ούτε να προκαλέσει ζημιές σε γειτονικές κατασκευές (οικοδομές, υπόγειους αγωγούς, καλώδια). Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται δύο λύσεις (Μαραγκός, 1997):

- Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη. Αρχικά κατασκευάζεται η μισή διατομή ώστε να είναι δυνατή η κυκλοφορία στο άλλο ήμισυ της οδού. Η εκσκαφή έχει πλευρική αντιστήριξη (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλοσανίδες) και έπειτα συνδέεται με το άλλο ήμισυ.

- Διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης. Μετά την εκσκαφή και αντιστήριξη των παρειών του ανοίγματος, τοποθετείται πλάκα κάλυψης πάχους 60-80 cm , σε βάθος περίπου 1,5 m από την επιφάνεια και έπειτα γίνεται η κατασκευή της σήραγγας, ενώ γίνεται και αποκατάσταση της επιφάνειας του εδάφους πάνω από την πλάκα.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση κατασκευής υπόγειου σταθμού με την μέθοδο Cut & Cover (w3.krtco.tw).

2.3.2 Οι μέθοδοι κλειστής διάνοιξης

Οι μέθοδοι κλειστής διάνοιξης ενός υπόγειου ανοίγματος ποικίλουν, ανάλογα με την γεωμετρία του προβλήματος αλλά και με τις περιβάλλουσες συνθήκες που αφορούν το είδος και την ποιότητα των περιβαλλόντων σχηματισμών. Σε γενικές γραμμές οι ενέργειες που περιλαμβάνει η διάνοιξη μιας σήραγγας είναι η εκσκαφή, η υποστήριξη και η απομάκρυνση των απορριμμάτων της εκσκαφής. Μια γενική κατηγοριοποίηση που αφορά στον τρόπο προχώρησης είναι (Kolymbas, 2008) :

- Συμβατική διάνοιξη
- Συνεχής διάνοιξη

Μια διαφορετική κατηγοριοποίηση αφορά στο μέσο που χρησιμοποιείται για την όρυξη της σήραγγας. Έτσι διακρίνονται δύο μέθοδοι:

- Διάνοιξη με μηχανικά μέσα
- Διάνοιξη με εκρηκτικές ύλες (διάτρηση και ανατίναξη).

2.3.2.1 Συμβατική διάνοιξη

Χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι η προχώρηση του μετώπου σταδιακά, ολοκληρώνοντας σε κάθε στάδιο έναν κύκλο εργασιών (εκσκαφή, υποστήριξη, καθαρισμό). Το βήμα εκσκαφής σε αυτή την μέθοδο είναι μήκους έως και 1m για μαλακά εδάφη και είναι από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός ανοίγματος αλλά και το μέγεθος της καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους.

2.3.2.2 Συνεχής διάνοιξη

Χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι η απρόσκοπτη εκσκαφή του μετώπου με διατρητικά μηχανήματα εκτελώντας όλες τις εργασίες ταυτόχρονα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην πράξη συνηθίζεται ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων.

2.3.2.3 Διάνοιξη με μηχανικά μέσα

Σφύρα

Υδραυλική ή σφύρα αέρος που χρησιμοποιείται κυρίως είτε σε πολύ ασθενής σχηματισμούς (σχήμα 2.5), είτε γιατί επιφέρει την μικρότερη δυνατή διαταραχή στη βραχομάζα αποφεύγοντας τις έντονες δονήσεις που προκαλούνται από τη μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η απόδοση μιας τυπικής υδραυλικής σφύρας σε σχέση με την αντοχή του πετρώματος

Πίνακας 2.1: Απόδοση υδραυλικής σφύρας HM-2500 της εταιρίας Krupp Berco (Kolymbas, 2008)

Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (MPa)	Ρυθμός εκσκαφής (m^3/h)
40-50	40
70-80	26
80-100	20

Σχήμα 2.5: Χρήση υδραυλικής σφύρας για την διάνοιξη της σήραγγας Αγίας Βαρβάρας, Ηρακλείου.

Εκσκαφέας

Για ασθενή πετρώματα χρησιμοποιείται συχνά ο εκσκαφέας ανεστραμμένου κάδου ενώ όταν απαντώνται σχηματισμοί υψηλότερης αντοχής η εκσκαφή γίνεται με άλλα κοπτικά εργαλεία.

Μηχάνημα σημειακής κοπής (roadheader)

Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται σε μέτριας αντοχής πετρώματα (σχήμα 2.6). Το κοπτικό άκρο ανυψώνεται στον βραχίονα επέκτασης (boom), του εκσκαφέα και θρυμματίζει το πέτρωμα. Έτσι περιορίζεται σημαντικά η υπερεκσκαφή αλλά και το ποσοστό χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχομάζας. Σημαντικό μειονέκτημα έναντι των συμβατικών εκσκαφέων είναι το υψηλό ποσοστό παραγωγής σκόνης.

Σχήμα 2.6: Voist-Alpine AM75 Road Header (60-Ton Class) (**www.magmineserv.com**)

Μηχανή ολομέτωπης κοπής (TBM)

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σηράγγων κυκλικής διατομής σε πετρώματα μέσης έως υψηλής αντοχής. Οι διάμετροι διάνοιξης ποικίλουν από 1m έως 15m ενώ η ταχύτητα εκσκαφής ποικίλει ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που συναντώνται στο πεδίο. Ο τρόπος με τον οποίο η κοπτική κεφαλή βρίσκεται σε διαρκή επαφή με το μέτωπο κατά την εκσκαφή, γίνεται με ένα σύστημα προώθησης που διακρίνει μαζί και με κάποια άλλα χαρακτηριστικά τα διάφορα είδη TBM (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2007):

TBM με προωθητικούς γρύλλους (grippers)

Ένα τέτοιο TBM είναι κατάλληλο σε περιπτώσεις όπου το όρυγμα μπορεί να ευσταθεί με προσωρινά μέτρα υποστήριξης. Ένα gripper TBM αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα:

- Σύστημα διάτρησης.
- Σύστημα προώθησης με πλευρική υποστήριξη (gripper) και bracing.

- Σύστημα υποστύλωσης και τοποθέτησης προκατασκευασμένων δακτυλίων. σκυροδέματος.
- Σύστημα μεταφορικής ταινίας (για απομάκρυνση των προϊόντων της εκσκαφής).

ΤΒΜ με προστατευτική ασπίδα

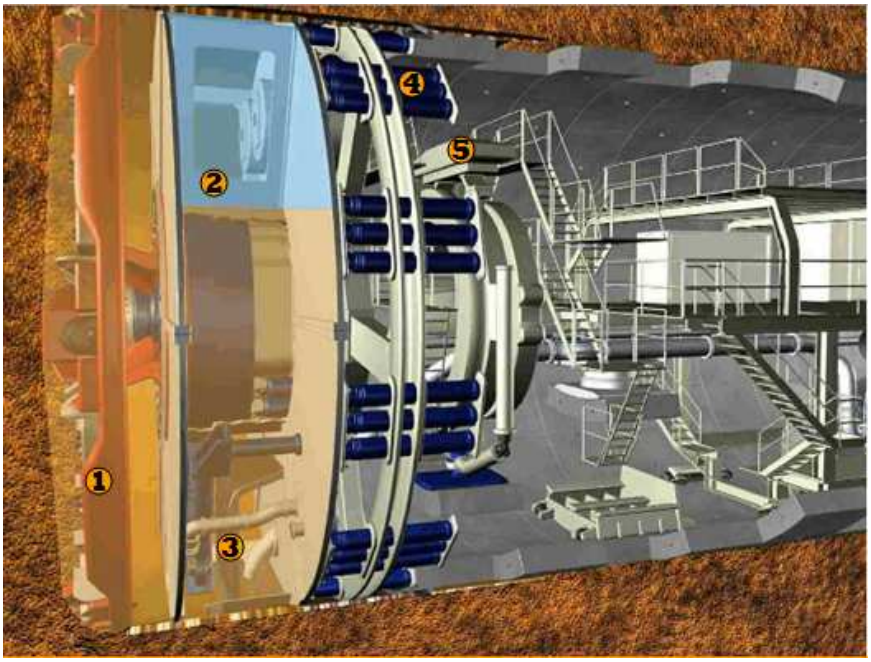
Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η περιβάλλουσα βραχομάζα δεν έχει αρκετά υψηλή αντοχή για να υποστηρίξει τα φορτία της πλευρικής αντιστήριξης του συστήματος gripper. Τα κέλυφος της ασπίδας παίζει τον ρόλο της προσωρινής υποστήριξης, ενώ η μόνιμη επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος. Ως βάση για την προώθηση της κεφαλής στο μέτωπο, χρησιμοποιείται το τελευταίο κάθε φορά τμήμα της τελικής υποστήριξης.

Ασπίδες με την χρήση πεπιεσμένου αέρα

Χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις ύπαρξης υπόγειου ύδατος για την αποφυγή εισροής του ύδατος στην εκσκαφή, αντί για ταπείνωση του υδροφόρου.

ΤΒΜ πολφού ή νερού

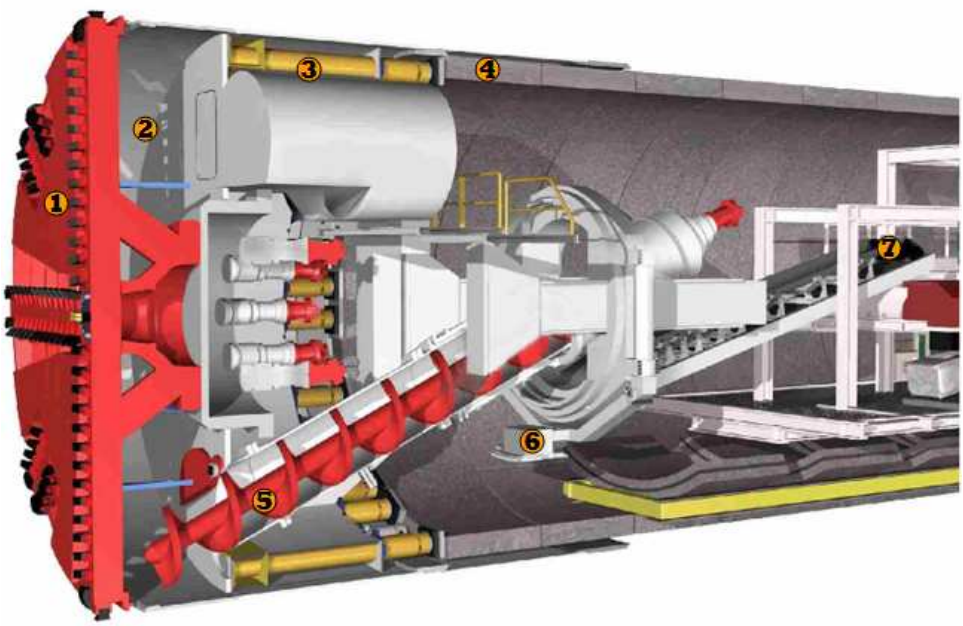
Τέτοιου τύπου ΤΒΜ (σχήμα 2.7) χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή χρήζει άμεσης υποστήριξης και σε περιπτώσεις εδαφών υψηλής περατότητας για να αποφεύγεται η εισροή ύδατος μέσα στην εκσκαφή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή βρίσκεται ένας υδατοπερατός υπό πίεση θάλαμος μέσα στον οποίο κινείται ο πολφός. Το μίγμα πολφού-προϊόντων εκσκαφής μεταφέρεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος έξω από την σήραγγα όπου και διαχωρίζεται για την ανακύκλωση του πολφού.



Σχήμα 2.7: TBM πολφού μπεντονίτη : 1.Κοπτική κεφαλή πλημμυρισμένη με πολφό μπεντονίτη, 2.Θάλαμος αέρα υπό πίεση, 3.Σωλήνες εισροής-εκροής πολφού, 4.Κύλινδροι προώθησης, 5.Βραχίονες τοποθέτησης προκατασκευασμένων τμημάτων υποστήριξης (**www.tunnelseis.de**).

Ασπίδες με ισορροπία πίεσης γαιών (EPB)

Τέτοιες ασπίδες χρησιμοποιούνται σε μικτές διατομές (εδάφους-πετρώματος) και σε περιπτώσεις υψηλής αποσάθρωσης πετρωμάτων (σχήμα 2.8). Ως μέσω εφαρμογής της πίεσης στο μέτωπο χρησιμοποιείται το ίδιο το προϊόν της εκσκαφής με ανάμιξη ειδικών διαλυμάτων και αφρωδών υλικών για το σχηματισμό ειδικής λάσπης (σχήμα 2.9). Τα προϊόντα απομακρύνονται μέσα από τον θάλαμο πίεσης μέσω ενός κοχλιωτού μεταφορέα. Ο έλεγχος της πίεσης στο θάλαμο γίνεται με ρύθμιση συνδυαστικά της ταχύτητας προχώρησης και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής.



Σχήμα 2.8: TBM ασπίδας με ισορροπία πίεσης γαιών: 1.περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, 2.Θάλαμος υπό πίεση, 3.κύλινδροι προώθησης, 4.τμήμα υποστήριξης σκυροδέματος πάνω στο οποίο εδράζονται οι κύλινδροι προώθησης, 5.κοχλιωτός μεταφορέας, 6.περιστρεφόμενο σύστημα με βραχίονες τοποθέτησης προκατασκευασμένων τμημάτων σκυροδέματος, 7.ταινιωτός μεταφορέας (**www.tunnelseis.de**).

Σχήμα 2.9: Έλεγχος εισπίεσης αφρώδους μίγματος μέσα από κοπτική κεφαλή ενός TBM ασπίδας με ισορροπία πίεσης γαιών (**www.tunnelseis.de**).

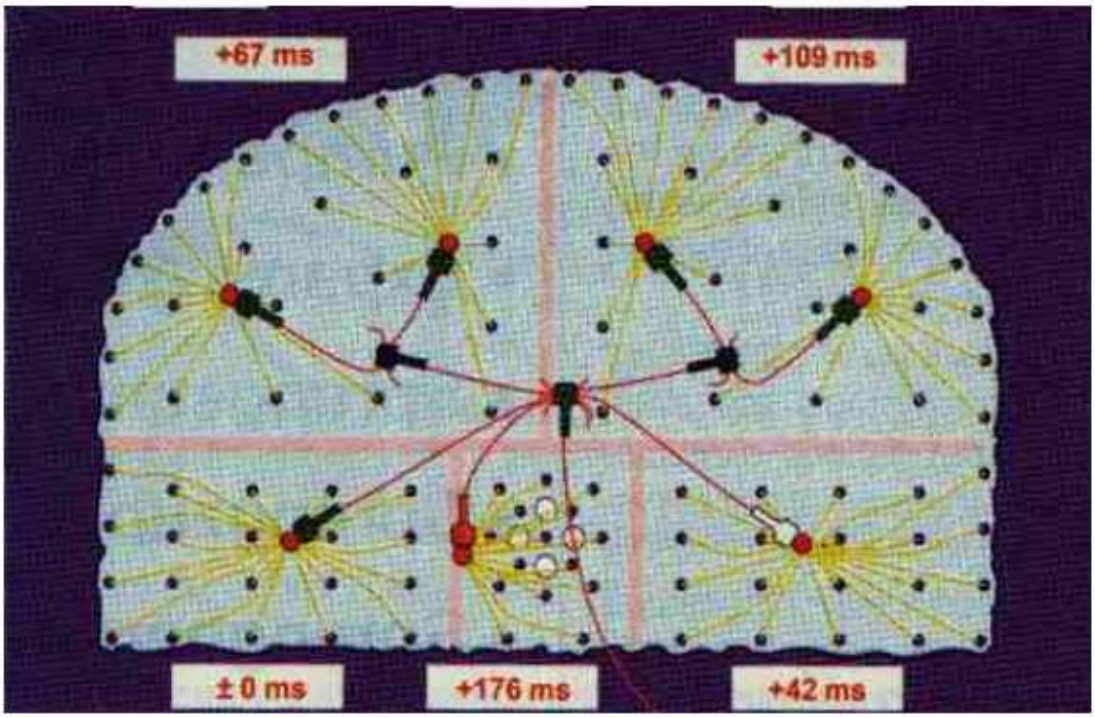
2.3.2.4 Διάνοιξη με εκρηκτικές ύλες

Η διάνοιξη που γίνεται με διάτρηση και ανατίναξη με εκρηκτικές ύλες (σχήμα 2.10) περιλαμβάνει σε γενικές γραμμές τον παρακάτω κύκλο: διάτρηση, γόμωση των διατρημάτων, ανατίναξη, αερισμός, απομάκρυνση των υλικών, ξεσκάρωμα και υποστήριξη (Παπαχρήστος, 2011). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μικρού μήκους σηράγγων (όπου η χρήση του TBM δεν είναι συμφέρουσα), σε πολύ σκληρά πετρώματα και στη διάνοιξη σηράγγων μη κυκλικής διατομής. Επειδή αυτή η μέθοδος είναι πολύ χρονοβόρα θα πρέπει να γίνεται πολύ καλός σχεδιασμός ώστε να μην υπάρχει νεκρός χρόνος μεταξύ των εργασιών (Kolympas, 2000). Ο τρόπος διάνοιξης των οπών γίνεται με περιστροφική ή κρουστική διάτρηση και η διάμετρός τους ποικίλει μεταξύ 17mm και 127mm με ρυθμό διάτρησης έως και 3m/min.

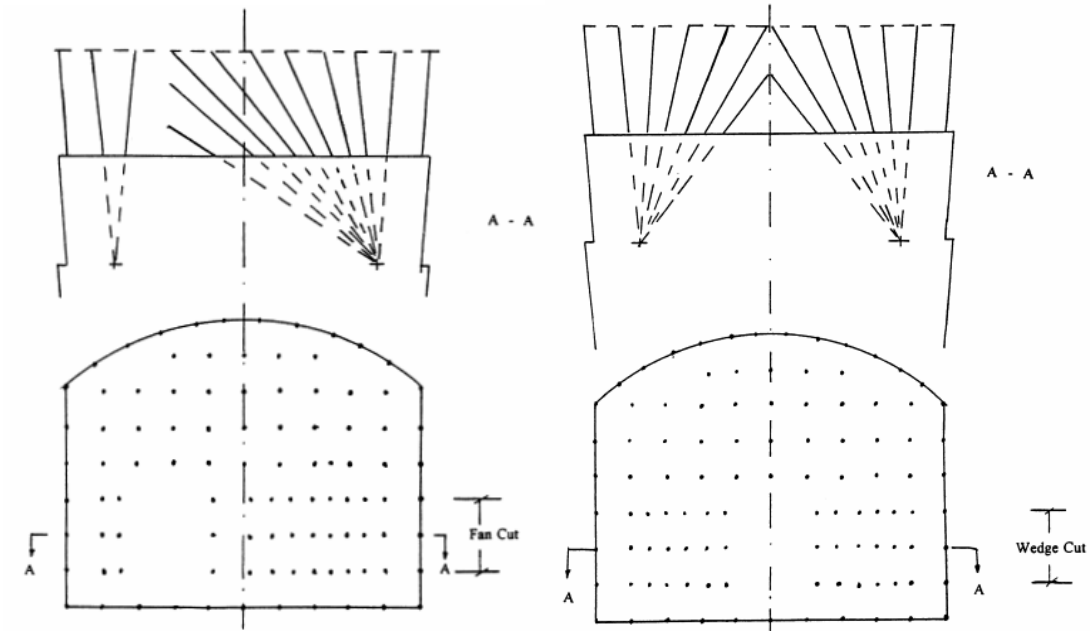
Σχήμα 2.10: Διάνοιξη μετώπου σήραγγας με διάτρηση-ανατίναξη (**ec.europa.eu**)

Σε μια υπαίθρια ανατίναξη τα διατρήματα ανοίγονται παράλληλα με την ελεύθερη επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η απόσπαση της βραχομάζας. Σε μια υπόγεια ανατίναξη η μόνη ελεύθερη επιφάνεια είναι αυτή του μετώπου της σήραγγας επομένως η παράλληλη προς αυτήν την επιφάνεια, διάτρηση, δεν είναι εφικτή. Επομένως θα πρέπει αρχικά να δημιουργηθεί ένα άνοιγμα (αρχική κοπή), που να δημιουργήσει τις ελεύθερες επιφάνειες, ώστε να επιτευχθεί η ανατίναξη της περιβάλλουσας βραχομάζας (σχήμα 2.11). Το είδος της αρχικής κοπής εξαρτάται από το σχήμα και το εμβαδόν της διατομής, τον διαθέσιμο εξοπλισμό, το βήμα εκσκαφής και την ποιότητα των πετρωμάτων. Δύο βασικές κατηγορίες αρχικών κοπών είναι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12 (Johansen,2000):

- **Η κοπή τύπου V:** Σφηνοειδής (wedge) ή ριπιδίου (fan).
- **Η παράλληλη κοπή:** Μεγάλης διαμέτρου ή τύπου Burn. Στις αρχικές κοπές τέτοιου τύπου το αρχικό άνοιγμα διαμορφώνεται από ένα σύστημα κενών διατρημάτων στο κέντρο του μετώπου και με διάτρηση των υπολοίπων προς την κατεύθυνση αυτή.



Σχήμα 2.11: Αναπαράσταση διάτρησης σε μέτωπο σήραγγας. Στο κέντρο διακρίνεται η περιοχή αρχικής κοπής με τέσσερα κενά διατρήματα μεγάλης διαμέτρου (**www.tunnelseis.de**).



Σχήμα 2.12: Αριστερά: κοπή ριπιδίου, Δεξιά: Σφηνοειδής κοπή (Johansen, 2000).

Η διαδικασία της γόμωσης των διατρημάτων καθώς και η διάτρηση είναι οι πιο χρονοβόρες διαδικασίες του κύκλου εργασιών. Εντούτοις, απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και προσοχή κατά την εκτέλεσή τους.

Στις σήραγγες γενικά εφαρμόζονται αρκετά επιμήκη διατρήματα. Τα φυσίγγια εισπιέζονται μέσα σε αυτά με την βοήθεια δοκών και γομώνονται με το εκρηκτικό υλικό. Για να είναι αποδοτική η ανατίναξη πρέπει να υπάρχει ακαριαία μεταβολή της εκρηκτικής ύλης σε αέριο το οποίο θα είναι περιορισμένο ώστε να προκαλέσει έκρηξη και επομένως διάρρηξη των πετρωμάτων. Για τον λόγο αυτό τα διατρήματα καλύπτονται με ένα στρώμα άμμου ή νερού (Kolymbas, 2008).

Η έναυση των εκρηκτικών γίνεται με διάφορους τρόπους. Διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων έναυσης ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος (Αγιουτάντης, 2005):

- Τα ηλεκτρικά συστήματα
- Τα μη ηλεκτρικά συστήματα

Ενώ ανάλογα με τον τρόπο ενεργοποίησής τους διακρίνονται σε:

- Συστήματα μετάδοσης φλόγας

- Συστήματα μετάδοσης κρουστικού παλμού, που περιγράφονται στη συνέχεια και αναφέρονται οι επιμέρους μηχανισμοί που τα αποτελούν.

Συστήματα μετάδοσης φλόγας

Χρησιμοποιούνται σε πυρίτιδες. Η έναυση της πυρίτιδας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους μηχανισμούς που περιγράφονται παρακάτω (Αγιουτάντης, 2005):

- **Θρυαλλίδα ασφαλείας:** Έχει την μορφή σκοινιού και φέρει πυρήνα από πυρίτιδα, ενώ περιμετρικά καλύπτεται με αλλεπάλληλα στρώματα μονωτικών υλικών. Έχει ταχύτητα ανάφλεξης 90-150 s/m.
- **Ηλεκτρικά καψύλλια πυρίτιδας:** Αποτελούνται από εύφλεκτο υλικό το οποίο με θέρμανσή του παράγει φλόγα που διαρρηγνύοντας το περίβλημα του καψυλλίου προκαλεί έναυση της εκρηκτικής ύλης.

Συστήματα μετάδοσης κρουστικού παλμού

Χρησιμοποιούνται σε εκρηκτικά υψηλής διαρρηκτικότητας (δυναμίτιδες και μίγματα ANFO). Τα υλικά αυτά μπορούν να ενεργοποιηθούν με τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- **Κοινά καψύλλια δυναμίτιδας:** Η πυροδότηση αυτών των καψυλλίων γίνεται με θρυαλλίδα ασφαλείας. Η ανάφλεξη της θρυαλλίδας προκαλεί έκρηξη της γόμωσης ενίσχυσης, η οποία στη συνέχεια ενεργοποιεί την εκρηκτική ύλη.
- **Ηλεκτρικά καψύλλια δυναμίτιδας:** Η πυροδότηση τέτοιων καψυλλίων γίνεται με πύρωση ηλεκτρικής αντίστασης.
- **Εκρηκτική (ακαριαία) θρυαλλίδα:** Αποτελείται από αδιάβροχο περίβλημα ενώ στον πυρήνα περιέχεται η εκρηκτική ύλη (PETN). Ο κρουστικός παλμός μεταδίδεται με ταχύτητα 6700m/s.
- **Σύστημα Nonel:** Είναι σύστημα μετάδοσης ασθενούς κρουστικού παλμού (1800m/s). Αποτελείται από ένα πλαστικό περίβλημα που περιέχει μικροποσότητα εκρηκτικού.
- **Σύστημα Hercudet:** Επίσης σύστημα μετάδοσης ασθενούς κρουστικού παλμού (3000m/s) που προκαλείται με αντίδραση αερίου.
- **Συνδυασμό των παραπάνω.**

3 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Κατά την μελέτη και τον σχεδιασμό κατασκευής μιας σήραγγας το κομμάτι με την πιο βαρύνουσα σημασία είναι αυτό της προσωρινής υποστήριξης. Η προσωρινή υποστήριξη ενός υπόγειου ανοίγματος εξυπηρετεί κυρίως την ικανοποιητική ευστάθεια της κατασκευής για την ασφάλεια των εργαζομένων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, αλλά και την ευστάθεια μέχρι την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης, ώστε η κατασκευή να μην εμπεριέχει κινδύνους για ολόκληρο το χρόνο ζωής του έργου.

Η επιλογή των μέτρων υποστήριξης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από ένα συνδυασμό πολλών και διαφορετικών παραγόντων που αφορούν τόσο στη χρήση για την οποία προορίζεται η σήραγγα (οδική, σιδηροδρομική, υπόγειας εκμετάλλευσης κ.α.), όσο και στις συνθήκες οι οποίες προβλέπεται να αντιμετωπιστούν στην περιοχή του έργου.

Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διάνοιξη και υποστήριξη ενός υπόγειου ανοίγματος, είναι (Heiniö, 1999):

- ✓ Οι διαστάσεις και η γεωμετρία της κατασκευής.
- ✓ Το συνολικό μήκος και ο όγκος του υλικού προς εκσκαφή.
- ✓ Γεωλογικές συνθήκες και μηχανικές ιδιότητες των περιβαλλόντων σχηματισμών.
- ✓ Το καθεστώς των υπόγειων υδάτων.
- ✓ Η επιτρεπόμενη διαταραχή της βραχομάζας (δονήσεις, επιτρεπόμενο βήμα εκσκαφής).
- ✓ Επιτρεπόμενες καθιζήσεις επιφάνειας.
- ✓ Χρήση και αναμενόμενος χρόνος ζωής του έργου.

Συνήθεις μηχανισμοί για την υποστήριξη σηράγγων είναι:

- ✓ *Ηλώσεις: σημειακά ή συστηματικά αγκύρια και κοχλίες .
- ✓ Συστήματα προενίσχυσης οροφής.
- ✓ Σκυροδέματα (ενισχυμένα ή μη).
- ✓ Δικτυώματα και μεταλλικά πλαίσια.

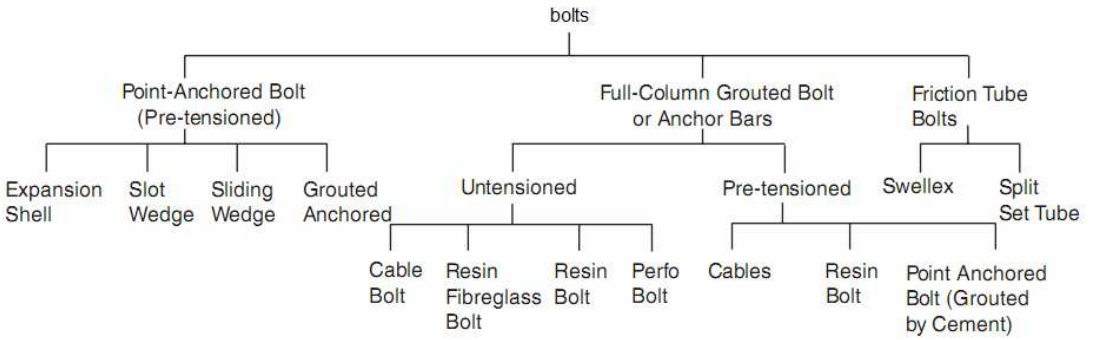
*Στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία οι όροι που περιγράφουν τα διάφορα είδη ηλώσεων (rockbolts, dowels, anchors, nails, κοχλίες, αγκύρια) παίρνουν πολλές φορές διαφορετικές έννοιες με διασταυρούμενες απόψεις. Για λόγους σαφήνειας στο παρόν κείμενο θα δίνονται οι εξής αντιστοιχίες, η έννοια των οποίων περιγράφεται στο κύριο σώμα του κειμένου: α) rockbolt=κοχλίας, β) dowel, anchor bar=αγκύριο.

3.2 Ηλώσεις

Διακρίνονται δύο είδη ηλώσεων ανάλογα με την προένταση της μεταλλικής ράβδου: α) προεντεταμένες ηλώσεις (κοχλίες), β) μη προεντεταμένες ηλώσεις (αγκύρια) και ανάλογα με τον τύπο αγκύρωσής τους διακρίνονται σε: α) ηλώσεις σημειακής αγκύρωσεις, β) ηλώσεις κατανεμημένης αγκύρωσης. Στο Σχήμα 3.1 γίνεται μια γενική κατηγοριοποίηση των πιο συνήθων τύπων ηλώσεων .

Γενικά ένας κοχλίας αποτελείται από μία απλή χαλύβδινη ράβδο η οποία φέρει έναν μηχανισμό αγκύρωσης στο ένα άκρο και μια πλάκα έδρασης στο άλλο η οποία εφαρμόζεται στην επιφάνεια του πετρώματος μέσω ενός περικόχλιου. Η προένταση του κοχλία εφαρμόζεται μετά την εγκατάστασή του, στρέφοντας με κατάλληλη ροπή το περικόχλιο πάνω στην πλάκα έδρασης.

Ένα αγκύριο αποτελείται από μία διαμορφωμένη μεταλλική ράβδο η οποία πακτώνεται με ένεμα μέσα στο πέτρωμα. Η προένταση δεν είναι εφικτή και έτσι η ενεργοποίηση του αγκυρίου παράγεται από τις μετακινήσεις της βραχομάζας. Για να είναι ικανοποιητικά ενεργό το αγκύριο, πρέπει να εγκαθίσταται προτού λάβουν χώρα σημαντικές μετακινήσεις της βραχομάζας (Hoek et al., 1995).



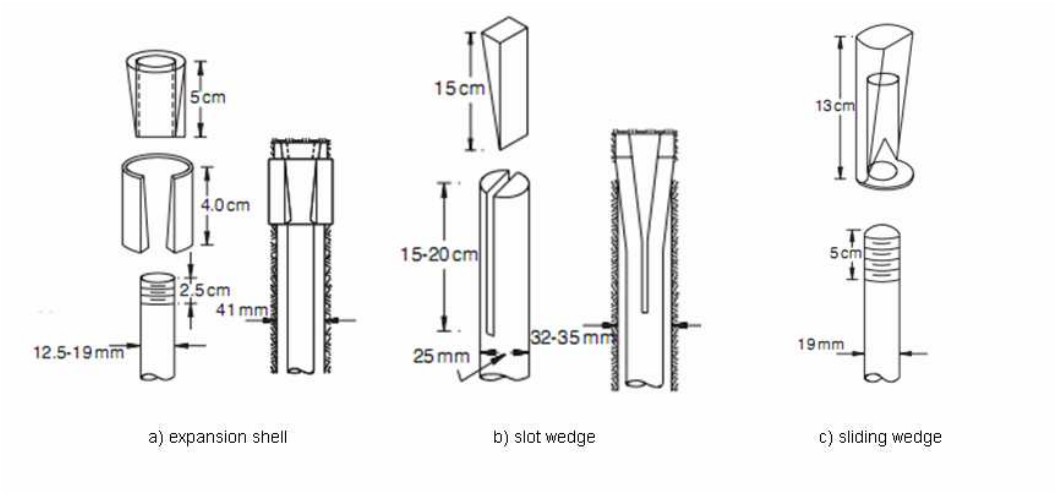
Σχήμα 3.1: Είδη ηλώσεων (Sing & Goel, 2006).

3.2.1 Κοχλίες

Ανάλογα με τον τρόπο που οι κοχλίες συνδέονται με το πέτρωμα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

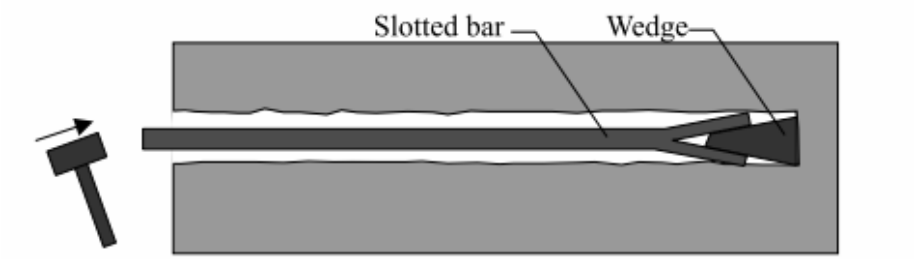
Κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης

Στο βάθος του διατρήματος, τοποθετούνται κωνικές σφήνες, οι οποίες πακτώνονται στον κοχλία είτε με βίδωμα του σπειρώματος (expansion shell bolts) του κοχλία πάνω στη σφήνα, είτε χτυπώντας με σφυρί τον κοχλία που φέρει στο άκρο του σχισμή (slot and wedge bolt), πάνω στην σφήνα (Kolymbas, 2008). Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει μερικά συνήθη είδη κοχλίων μηχανικής αγκύρωσης.



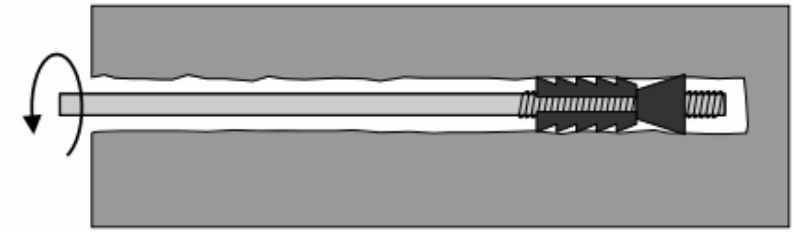
Σχήμα 3.2: Είδη κοχλίων μηχανικής αγκύρωσης, (Singh & Goel, 2006).

Στην περίπτωση της αγκύρωσης τύπου slot-wedge, η εγκατάσταση του κοχλία εάν γίνει με χτυπήματα ιδανικής πίεσης και συχνότητας, η διάμετρος του άκρου μπορεί να ξεπεράσει έως και 15% την διάμετρο της διάτρησης (Σχήμα 3.3). Κοχλίες τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται σε πολύ σκληρά πετρώματα, γιατί εάν το πέτρωμα είναι χαμηλής σκληρότητας υπάρχει κίνδυνος η σφήνα να υποχωρήσει μέσα στη βραχομάζα (Singh & Goel, 2006).



Σχήμα 3.3: Αγκύρωση τύπου slot and wedge, Kolymbas, 2008).

Ο μηχανισμός αγκύρωσης τύπου expansion shell, αποτελείται από κώνο με εσωτερικό σπείρωμα και ένα ζεύγος σφηνών που συγκρατούνται πάνω στον κώνο με ειδικό υποστήριγμα. Ο κώνος βιδώνεται πάνω στο άκρο του κοχλία και όλο το σύστημα τοποθετείται στο διάτρημα (Σχήμα 3.4). Έπειτα, τεντώνοντας τον κοχλία ο κώνος αναγκάζεται να εισχωρήσει βαθύτερα ανάμεσα στις σφήνες με αποτέλεσμα την πάκτωση του συστήματος (Hoek et al., 1995) .



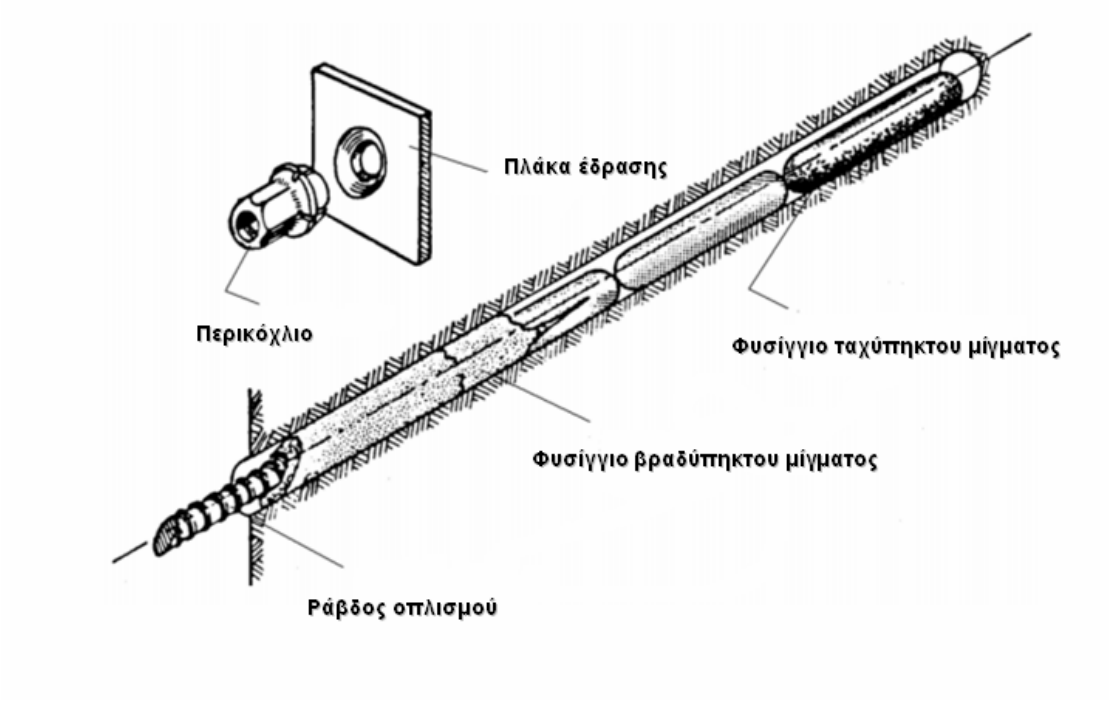
Σχήμα 3.4: Αγκύρωση τύπου expansion shell, Kolymbas, 2008)

Γενικά οι κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης δεν ενδείκνυνται για μαλακά πετρώματα και εδάφη αλλά ούτε και σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή προκαλεί σημαντικές δονήσεις (πχ. ανατίναξη), διότι οι ταλαντώσεις του εδάφους οδηγούν σε απαγκίστρωση των κοχλιών.

Κοχλίες αγκύρωσης με ρητίνη

Ένα τυπικό προϊόν ρητίνης αποτελείται από δύο φυσίγγια που περιέχουν ρητίνη και έναν χημικό επιταχυντή σε διαφορετικούς θαλάμους. Πριν την τοποθέτηση του κοχλία στο διάτρημα, εισάγονται σε αυτό τα δύο φυσίγγια και έπειτα ο κοχλίας μέσω της διάτρησης διαπερνά τα φυσίγγια σπάζοντας τα περιβλήματα και προκαλώντας ανάμειξη των περιεχομένων τους (Σχήμα 3.5).

Αυτός ο τύπος αγκύρωσης είναι ιδανικός για τα περισσότερα πετρώματα και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μαλακών σχιστόλιθων ή ιλυόλιθων, όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης (Hoek et al, 1995). Σε περιπτώσεις πολύ απαιτητικής ενίσχυσης, εφαρμόζεται πλήρης ενεμάτωση του κοχλία χρησιμοποιώντας πολλαπλά φυσίγγια, με μίγματα βραδύτερης πήξεως από αυτό της τελικής ρητίνης, που εισάγονται πίσω από το αρχικό μίγμα ταχείας πήξεως.



Σχήμα 3.5: Κοχλίας αγκύρωσης με ρητίνη, (Hoek, 2007-τροποποιημένο).

Σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου αγκύρωσης είναι κυρίως το υψηλό κόστος της ρητίνης αλλά και το γεγονός ότι μπορεί να αχρηστευθεί εάν μείνει αποθηκευμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε δυσμενείς συνθήκες (Αγιουτάντης, 2002).

3.2.2 Αγκύρια

Σε περιπτώσεις όπου η υποστήριξη βρίσκεται πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής και σε περιπτώσεις όπου αναμένονται διαφορικές τάσεις λόγω της σταδιακής διάνοιξης τα αγκύρια προτιμώνται έναντι των κοχλίων. Η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους είναι ότι στους κοχλίες εφαρμόζεται μια δεδομένη τάση που θα προκαλέσει την ενίσχυση της βραχομάζας ενώ τα αγκύρια βασίζονται στις εδαφικές παραμορφώσεις για να ενεργοποιήσουν τον μηχανισμό ενίσχυσης.

Αγκύρια ενεμάτωσης

Η απλούστερη και πιο συνήθης μορφή τέτοιων ηλώσεων είναι τα αγκύρια ενεμάτωσης τσιμέντου. Πριν την ενεμάτωση θα πρέπει το διάτρημα να καθαριστεί ώστε να εξασφαλιστεί η καλή επαφή μεταξύ τσιμέντου και εδάφους. Επίσης θα

πρέπει να βεβαιωθεί ότι το περιβάλλον πέτρωμα δεν περιέχει ασυνέχειες μεγάλου πλάτους μέσα στις οποίες θα μπορούσε να διαφύγει το ένεμα. Αυτές οι περιπτώσεις αντιμετωπίζονται τοποθετώντας γεοσυνθετικά υλικά στην διεπιφάνεια γύρω από το διάτρημα.

Το αγκύριο τοποθετείται στο διάτρημα και το κενό ανάμεσα στον οπλισμό και το έδαφος πληρώνεται με τσιμέντο, εισπιέζοντας το στο τέλος της οπής μέχρι το ένεμα να φτάσει στην επιφάνεια. Έπειτα εφαρμόζεται σε αυτό μια μεταλλική πλάκα με ένα περικόχλιο.

Σε αυτήν την κατηγορία εμπίπτουν και τα αυτοδιατρούμενα αγκύρια των οποίων η εγκατάσταση γίνεται με τη διάτρηση του οπλισμού που φέρει σπείρωμα μέσα στην βραχομάζα. Έπειτα εισπιέζεται τσιμεντένεμα στην διεπιφάνεια μεταξύ οπλισμού και εδάφους.

Αγκύρια πρόσφυσης (Split set και Swellex)

Τα αγκύρια τύπου split-set κατασκευάζονται από την εταιρία Ingersoll-Rand. Αποτελούνται από μία υψηλής αντοχής ράβδο οπλισμού που φέρει μια κοιλότητα σε όλο το μήκος του σώματος και από μία πλάκα έδρασης (Σχήμα 3.6).

Η εγκατάσταση του αγκυρίου γίνεται με την εισπίεσή του σε οπή μικρότερης αναλογικά διαμέτρου, με αποτέλεσμα την διαστολή της κοιλότητας και δημιουργίας αγκύρωσης ενεργής πρόσφυσης σε όλο το μήκος του οπλισμού.

Σχήμα 3.6: Αγκύριο τύπου split-set, (Singh & Goel, 2006).

Τα αγκύρια τύπου swellex που κατασκευάζονται από την εταιρία Atlas Copco, μπορούν να φτάσουν σε μήκος έως και τα 12m και δίνουν οπλισμό 42mm. Κατά την κατασκευή τους διπλώνονται σε διατομή διαμέτρου 25-28mm η οποία μπορεί να εισαχθεί σε οπή διαμέτρου 32-39mm (Σχήμα 3.7). Τα αγκύρια, που είναι χαλύβδινοι

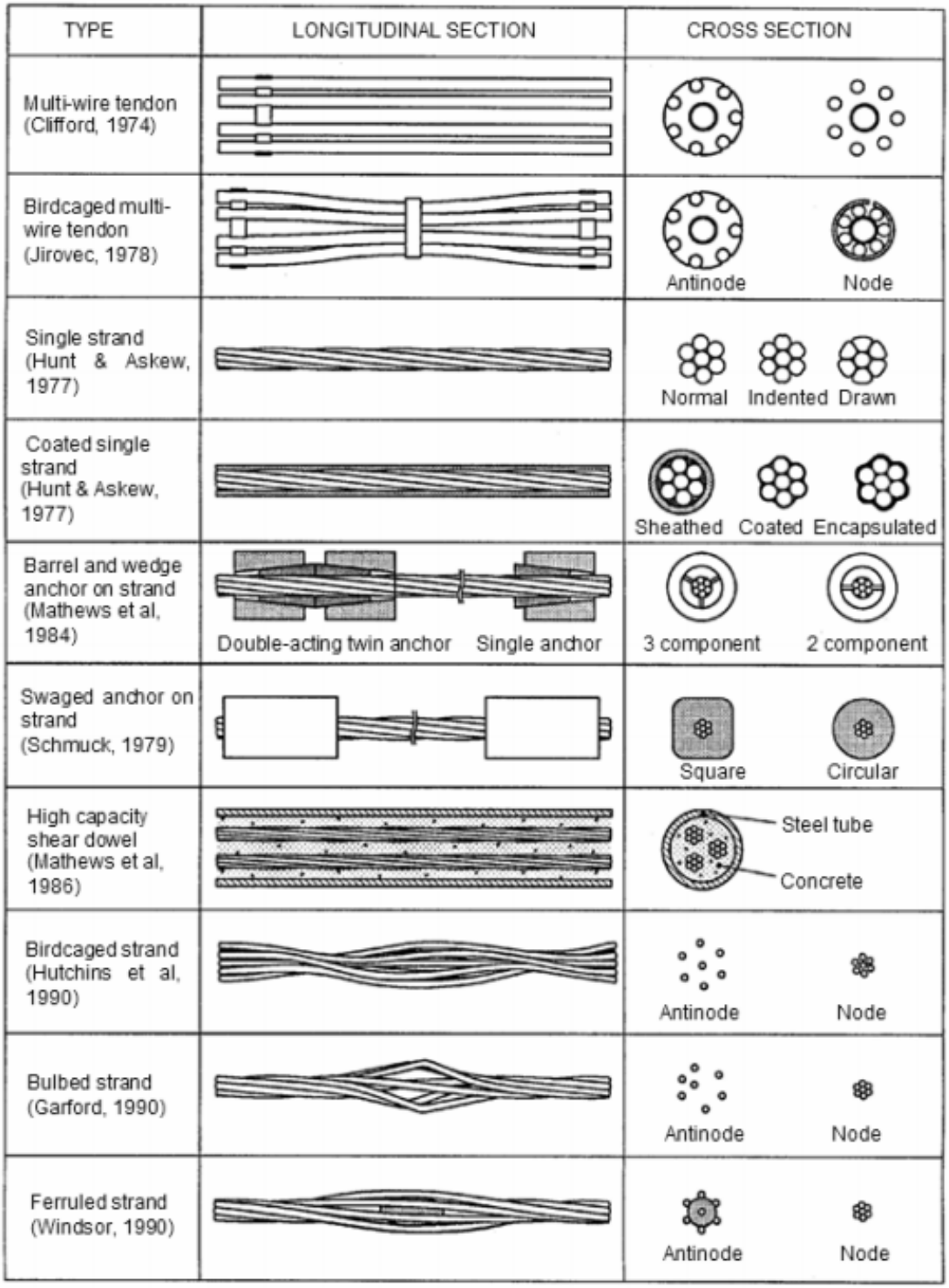
σωληνοειδείς ράβδοι, απλά τοποθετούνται στο διάτρημα και η πάκτωσή τους με το πέτρωμα επιτυγχάνεται με έγχυση στο εσωτερικό του σωλήνα νερού υψηλής πίεσης (περίπου 30MPa) που προκαλεί την διόγκωση τους.

Σχήμα 3.7: Αγκύριο τύπου swellex (Kolymbas, 2008).

3.2.3 Ηλώσεις τύπου cablebolt

Μια ειδική κατηγορία ηλώσεων είναι αυτές με συρμάτινους οπλισμούς ή χαλύβδινους τένοντες (strand cables). Πρόκειται για ηλώσεις προέντασης που αποτελούνται συνήθως από δύο σύρματα διαμέτρου 15.2mm και το μήκος τους κυμαίνεται μεταξύ 10-25m. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν μέτρα προενίσχυσης πριν την εκσκαφή ή και κατά τη διάρκεια αυτής. Συνήθως χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν κατολισθήσεις σε πρανή (Heiniö, 1999). Το σύστημα συνήθως αποτελείται από τον κύριο κορμό των συρμάτων που είναι δεμένο με ένα σωλήνα πολύ μικρής διαμέτρου για να επιτρέπει την έξοδο του αέρα καθώς το ένεμα αντλείται μέσα στο διάτρημα. Με την εφαρμογή της προέντασης, τα επιμέρους τμήματα των συρμάτων εξαναγκάζονται σε ακτινική μετατόπιση και διαστολή των επιφανειών μεταξύ τσιμέντου και σύρματος, προκαλώντας πλευρικό περιορισμό.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται μερικοί από τους κυριότερους τύπους τέτοιων ηλώσεων.



Σχήμα 3.8: Συνήθης τύποι cablebolts (Hoek, 2007 από Windsor, 1992).

3.3 Συστήματα προπασσάλωσης οροφής

Σε περιπτώσεις εκσκαφής σηράγγων κάτω από δυσμενείς συνθήκες όπου πρέπει να αποφευχθεί η σημαντική διατάραξη της βραχομάζας (πχ. σε αστικά περιβάλλοντα με κίνδυνο επιφανειακών καθιζήσεων), αλλά και σε περιπτώσεις όπου προβλέπεται μικρός χρόνος αυτοϋποστήριξης (έντονα κατακερματισμένα πετρώματα, χαλαροί σχηματισμοί με φτωχές γεωτεχνικές ιδιότητες, περιπτώσεις εκσκαφής υπό καθεστώς έντονων πιέσεων “squeezing” κ.α.), απαιτείται μέθοδος υποστήριξης τεχνικά βαρύτερης κατηγορίας, η οποία προβλέπει και μέτρα προενίσχυσης κυρίως στην οροφή της σήραγγας.

Ένα σύστημα προϋποστήριξης τοποθετείται για να ενισχύσει το προς διάνοιξη τμήμα της βραχομάζας πριν ξεκινήσει η εκσκαφή του. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ζώνη με αυξημένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, μπροστά από το μέτωπο και περιμετρικά του δακτυλίου. Η ζώνη αυτή σχηματίζει ένα τόξο (ομπρέλα), υπό την προστασία του οποίου εκτελούνται όλες οι εργασίες για την διάνοιξη του τμήματος αυτού.

Οι μέθοδοι προενίσχυσης είναι πολύ διαδεδομένες και ενδείκνυνται σε όλους τους τρόπους διάνοιξης (διάτρηση και ανατίναξη, ολομέτωπη κοπή, διάνοιξη με συμβατικά μέσα) και χωρίζονται, ανάλογα με τα μέσα και τον τρόπο υποστήριξης, στις εξής κατηγορίες:

- ✓ Προπασσάλωση οροφής με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet grouting).
- ✓ Προπασσάλωση οροφής με δοκούς προπορείας (forepoling-pipe roof umbrella).
- ✓ Προπασσάλωση οροφής με χαλύβδινες ράβδους προαγκύρωσης (spiling).
- ✓ Μέθοδος pretunnel.
- ✓ Περιφερειακή πρότμηση.

3.3.1 Προπασσάλωση οροφής με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet grouting)

Η μέθοδος jet grouting είναι πολύ αποτελεσματική στη βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών εδαφών. Η τεχνική που εφαρμόζεται είναι η εισροή με υψηλή πίεση τσιμεντενέματος στη μάζα του εδάφους με αποτέλεσμα την θραύση του, γεγονός που επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας την πίεση στο ακροφύσιο του jet ώστε να υπερβαίνει την

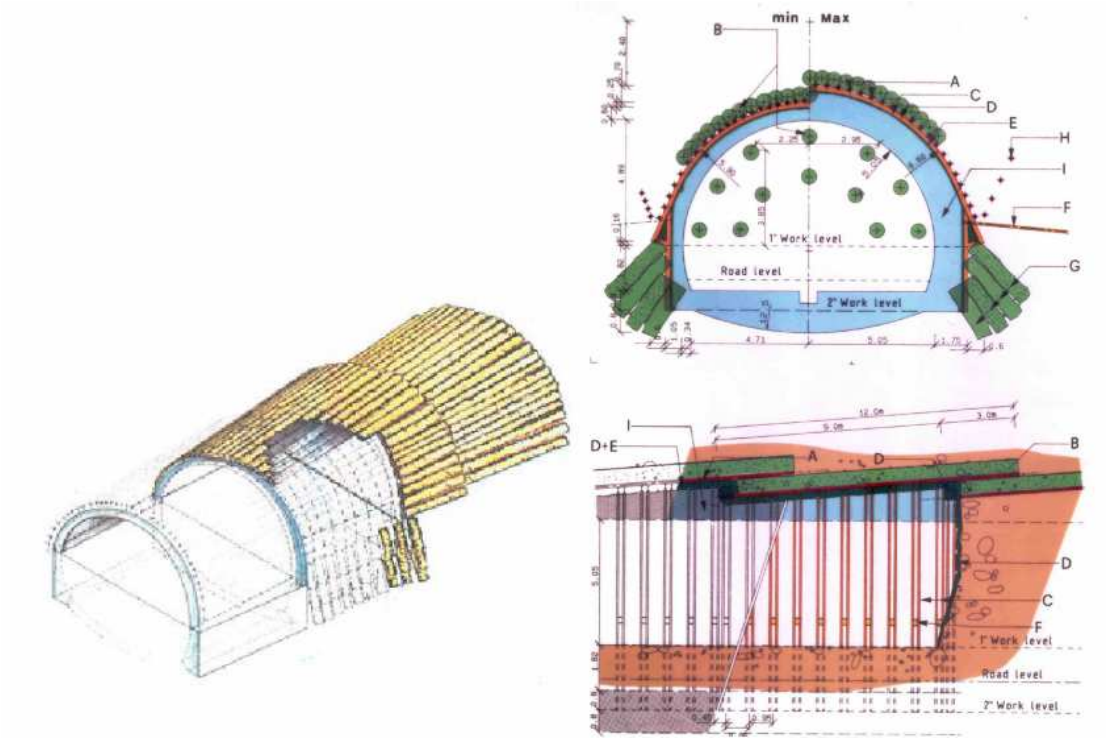
διατμητική αντοχή το εδάφους. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός στύλου που αποτελείται από μίγμα εδαφικού υλικού-τσιμεντενέματος (τσιμεντοεδαφοπάσσαλος) με ενισχυμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Αρχικά η μέθοδος ήταν αρκετά διαδεδομένη, ως μέτρο ενίσχυσης του υπεδάφους σε θεμελιώσεις δημιουργώντας κάθετους πασσάλους από την επιφάνεια, εντούτοις τα τελευταία χρόνια λαμβάνει ευρεία εφαρμογή είτε για την ενίσχυση του εδάφους που υπέρκειται της σήραγγας με εφαρμογή από την επιφάνεια (ως μέτρο πρόσληψης επιφανειακών καθιζήσεων), είτε ως μέθοδος υποστήριξης της οροφής σηράγγων με τη δημιουργία οριζόντιων η ελαφρώς κεκλιμένων τσιμεντοεδαφοπασσάλων (sub-horizontal jet grouting), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.

Για τις ανάγκες της σηραγγοποιΐας, η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε πρώτη φορά κατά την διάνοιξη της σήραγγας Campiolo το 1983 (Lunardi, 2008). Η εφαρμογή της ως μέτρο υποστήριξης οροφής σηράγγων προβλέπει την δημιουργία τοξωτού θόλου από τέτοιους πασσάλους το μήκος των οποίων κυμαίνεται μεταξύ 10-15m και η διάμετρός τους είναι 600mm.

Προκειμένου να ενισχυθεί η μηχανική αντοχή του στύλου, αμέσως μετά την πλήρωση με τσιμεντένεμα εισάγεται στον στύλο χαλύβδινος σωλήνας, με έμπηξή του στο υλικό όσο αυτό βρίσκεται ακόμα σε ρευστή μορφή (Δουβής, 2002).

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι αυτό της ανάδρομης ροής του τσιμεντενέματος λόγω βαρύτητας, πριν αυτό σκληρύνει. Επίσης μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε αστράγγιστες συνθήκες εδαφών. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει κίνδυνος εκρήξεων του εδάφους πάνω από τους πασσάλους λόγω πίεσης του jet αλλά και διαστολής της ζώνης που υπέρκειται του θόλου (Tonon, 2011).

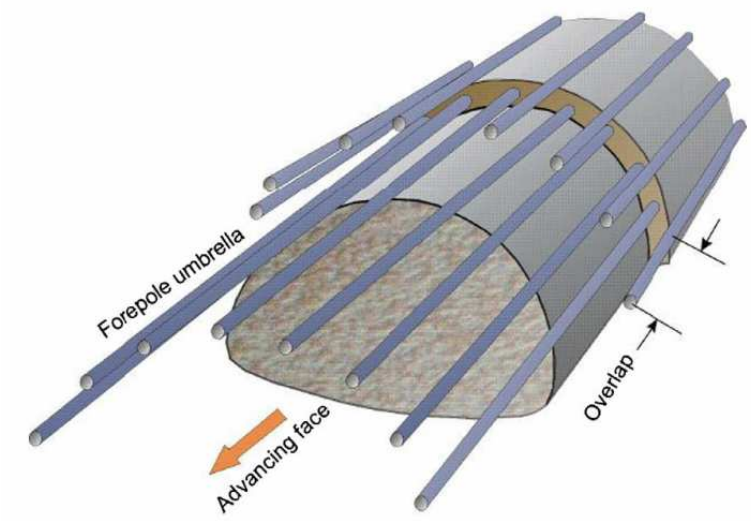


Σχήμα 3.9: Εφαρμογή θόλου με οριζόντιους τσιμεντοεδαφοπασσάλους στην οροφή της σήραγγας (Peila & Oggeri, 2006).

3.3.2 Προπασσάλωση οροφής με δοκούς προπορείας (forepoling)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι επιτρεπόμενες επιφανειακές καθιζήσεις είναι πολύ περιορισμένες και σε περιπτώσεις όπου η σήραγγα γειτνιάζει με αστικές κατασκευές και υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης ζημιών από πλευρικές μετακινήσεις.

Η τεχνική της μεθόδου περιλαμβάνει την εγκατάσταση χαλύβδινων ή τσιμεντένιων σωλήνων (δοκών) στην οροφή της σήραγγας με κλίση από τον οριζόντιο άξονα 4-6°, συνήθως συνδεδεμένων (με ένεμα πλήρωσης). Η εξωτερική διάμετρος των δοκών κυμαίνεται μεταξύ 60-200mm ανά περίπτωση και το πάχος τους ποικίλει από 5 έως 10mm. Το μήκος των δοκών ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της υποστήριξης, ενώ υπάρχει και μια επικάλυψη των διαδοχικών τόξων που φτάνει έως και στο ½ του συνολικού μήκους των δοκών και δεν είναι ποτέ μικρότερο από το 20% του μήκους τους (Σχήμα 3.10).



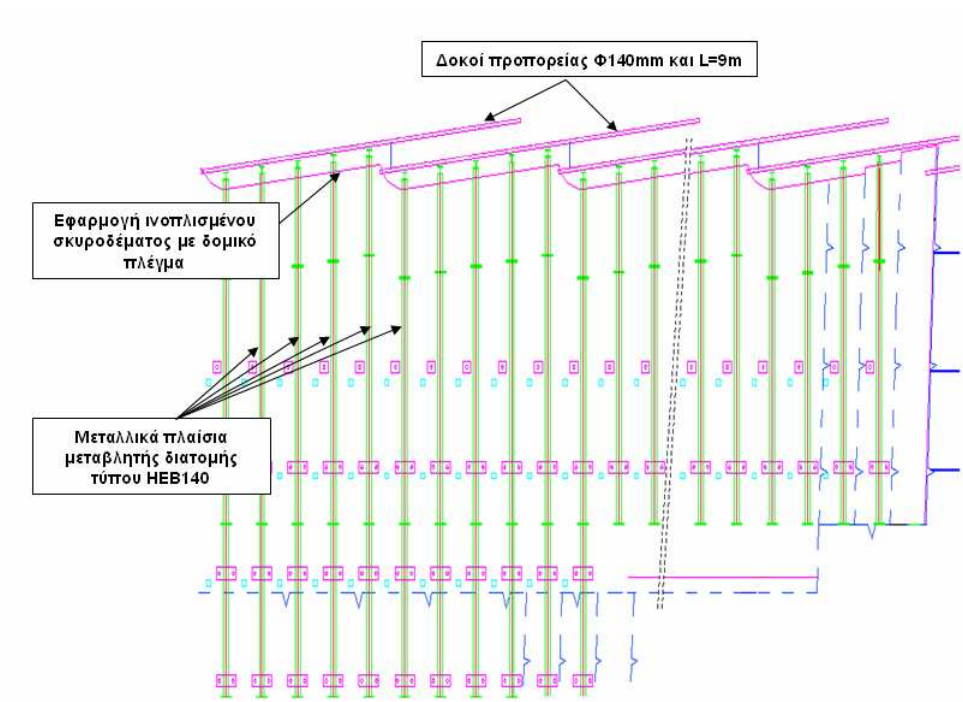
Σχήμα 3.10: Εφαρμογή «ομπρέλας forepoling» (Aksoy & Onargan, 2010 από Hoek, 2004).

Η διάτρηση των οπών μπορεί να γίνει είτε με συμβατικά μηχανήματα διάτρησης (υδραυλική σφύρα) είτε με εξειδικευμένο εξοπλισμό. Υπάρχουν κυρίως δύο τρόποι εγκατάστασης των σωλήνων: το σύστημα pre-drilling και το σύστημα case-drilling. Η βασική διαφορά των δύο συστημάτων είναι ότι στην πρώτη περίπτωση πρώτα ανοίγονται οι οπές και σε μεταγενέστερο στάδιο γίνεται η τοποθέτηση των δοκών. Στη δεύτερη περίπτωση η διάτρηση και τοποθέτηση γίνονται ταυτόχρονα με εξειδικευμένο εξοπλισμό διάτρησης και τοποθέτησης των δοκών (casing system) (Volkmann et al., 2006). Αφού γίνει η εγκατάσταση τους, ακολουθεί η πλήρωση του εσωτερικού του σωλήνα αλλά και στο κενό μεταξύ σωλήνα και διατρήματος.

Η διάνοιξη του μετώπου σε κάθε κύκλο εγκατάστασης των δοκών προπορείας γίνεται με μεταβλητή διατομή, έτσι ώστε η μηκοτομή της κατασκευής να δημιουργεί ένα προφίλ πριονωτού σχήματος (chainsaw profile).

Μετά την εγκατάσταση των δοκών και την πλήρωση με τσιμεντένεμα, γίνεται ρίψη σκυροδέματος στην οροφή σε συνδυασμό με την εφαρμογή δομικού πλέγματος. Όλο το σύστημα επικάθεται σε μεταλλικά πλαίσια μεταβλητής διατομής που τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις (ανάλογα με το βήμα εκσκαφής), σε όλο το μήκος του μη επικαλυπτόμενου τμήματος της δοκού (Σχήμα 3.11). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα σύστημα πλαισίων-σκυροδέματος-δοκών με σκοπό να παραλαμβάνει τα φορτία και να τα αναδιανέμει ισοδύναμα σε όλο το σώμα της

κατασκευής έτσι ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση τάσεων σε επισφαλή σημεία (Σχήμα 3.12).

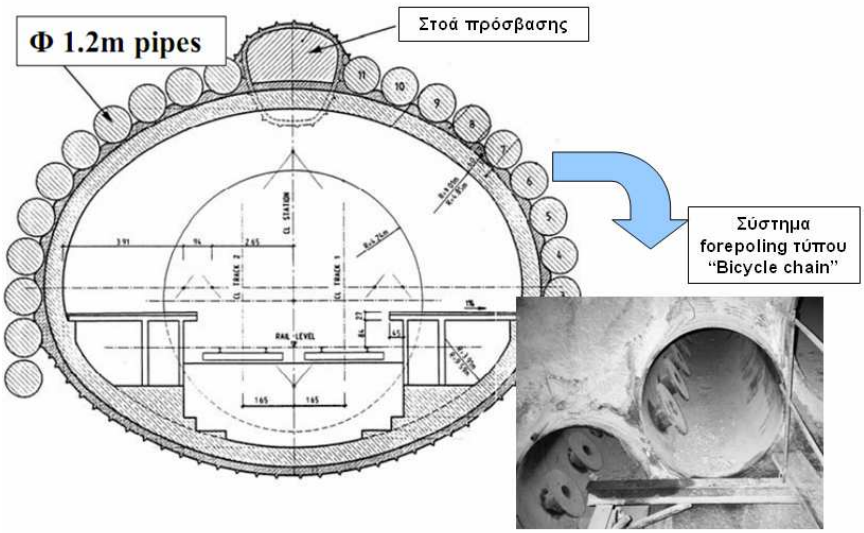


Σχήμα 3.11: Μηκοτομή συστήματος υποστήριξης με forepoling (οριστική μελέτη σήραγγας Αγίας Βαρβάρας, 2008, τροποποιημένο).

Σχήμα 3.12: Εφαρμογή forepoling στη σήραγγα της Αγίας Βαρβάρας, Ηρακλείου.

Σε πολύ ειδικές περιπτώσεις όπου απαντώνται πολύ δυσμενείς συνθήκες, η διάμετρος των δοκών μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, όπως στην περίπτωση της σήραγγας μετρό για το σταθμό στο Μοναστηράκι (Σχήμα 3.13), όπου το άνοιγμα της σήραγγας είναι 18m και εφαρμόστηκε σύστημα forepoling με δοκούς προπορείας

διαμέτρου Φ1.2m σε οπή διαμέτρου Φ2m. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου των δοκών, η τεχνική αυτή είναι γνωστή και ως microtunneling.



Σχήμα 3.13: Εφαρμογή forepoling με δοκούς "microtunnels" στην σήραγγα του μετρό στο σταθμό «Μοναστηράκι». Το άνοιγμα της σήραγγας είναι 18m (Kavvadas, 2005).

3.3.3 Προπασάλωση οροφής με χαλύβδινες ράβδους προαγκύρωσης (spiling)

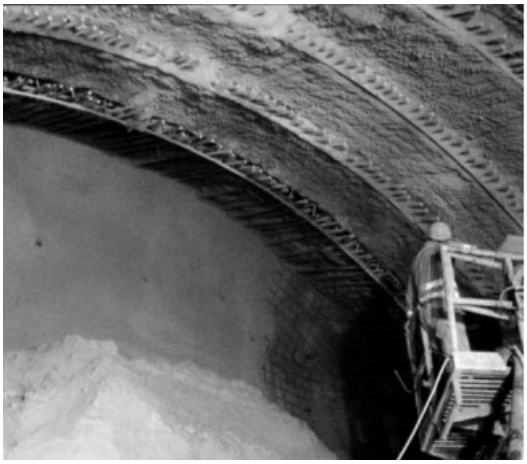
Αποτελεί την πιο απλή μορφή προπασσάλωσης οροφής και εφαρμόζεται για την αύξηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας, δημιουργώντας μια ζώνη με ενισχυμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, στην οροφή της σήραγγας.

Οι ράβδοι προαγκύρωσης έχουν διάμετρο μικρότερη των 50mm (συνήθη αγκύρια βράχου), ενώ το μήκος τους ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής.

Η εγκατάστασή τους γίνεται είτε με διάτρηση οπών και μετέπειτα εισπίεσή τους στα διατρήματα, είτε χρησιμοποιώντας αυτοδιατρούμενα αγκύρια. Μετά την εγκατάστασή τους το κενό ανάμεσα στην ράβδο και στο διάτρημα πληρώνεται με τσιμεντένεμα, ενώ επιπρόσθετα μπορούν να εφαρμοστούν τσιμεντενέσεις περιφερειακά της σήραγγας, σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται έντονα ρηγματωμένες ζώνες. Η οροφή της σήραγγας μπορεί να ενισχυθεί επιπλέον, με

εφαρμογή ηλώσεων μεγαλύτερου μήκους που τοποθετούνται ανάμεσα από τις ράβδους προαγκύρωσης.

Η τεχνική της μεθόδου περιλαμβάνει την δημιουργία διαδοχικών τόξων αποτελούμενων από χαλύβδινες ράβδους, σε πλήρη επικάλυψη και σε πολύ μικρά διαστήματα εφαρμογής (συνήθως σε κάθε βήμα εκσκαφής), ενώ η απόκλισή τους από τον οριζόντιο άξονα είναι μεγαλύτερη από ότι στην τεχνική forepoling (περίπου 30°), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Μετά την τοποθέτηση των ράβδων και πλήρωση των διατρημάτων με τσιμεντένεμα, γίνεται ρίψη σκυροδέματος στην οροφή.



Σχήμα 3.14: Εγκατάσταση ράβδων προαγκύρωσης μέσα από πλαίσια τύπου lattice girder (Volkmann et al., 2006).

Το σύστημα των ράβδων προαγκύρωσης δεν αποτελεί μια κλειστή αψίδα και δεν συνδέεται με τα μεταλλικά πλαίσια στο κυρίως σώμα του οπλισμού παρά μόνο στο άκρο του. Τα σύστημα των ράβδων δημιουργεί έναν μηχανισμό ενίσχυσης της ζώνης που υπέρκειται της οροφής, αποτελούμενο από μεμονωμένα στοιχεία. Επομένως η διάνοιξη της σήραγγας κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται με σταθερή διατομή, ενώ η υποστήριξη με μεταλλικά πλαίσια γίνεται με χρήση όμοιων πλαισίων.

3.3.4 Μέθοδος pretunnel

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις σηράγγων μεγάλης διατομής και σε πολύ δυσμενείς εδαφικές συνθήκες. Ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου περιφερειακής πρότμησης (mechanical precut). Η καινοτομία της μεθόδου έγκειται

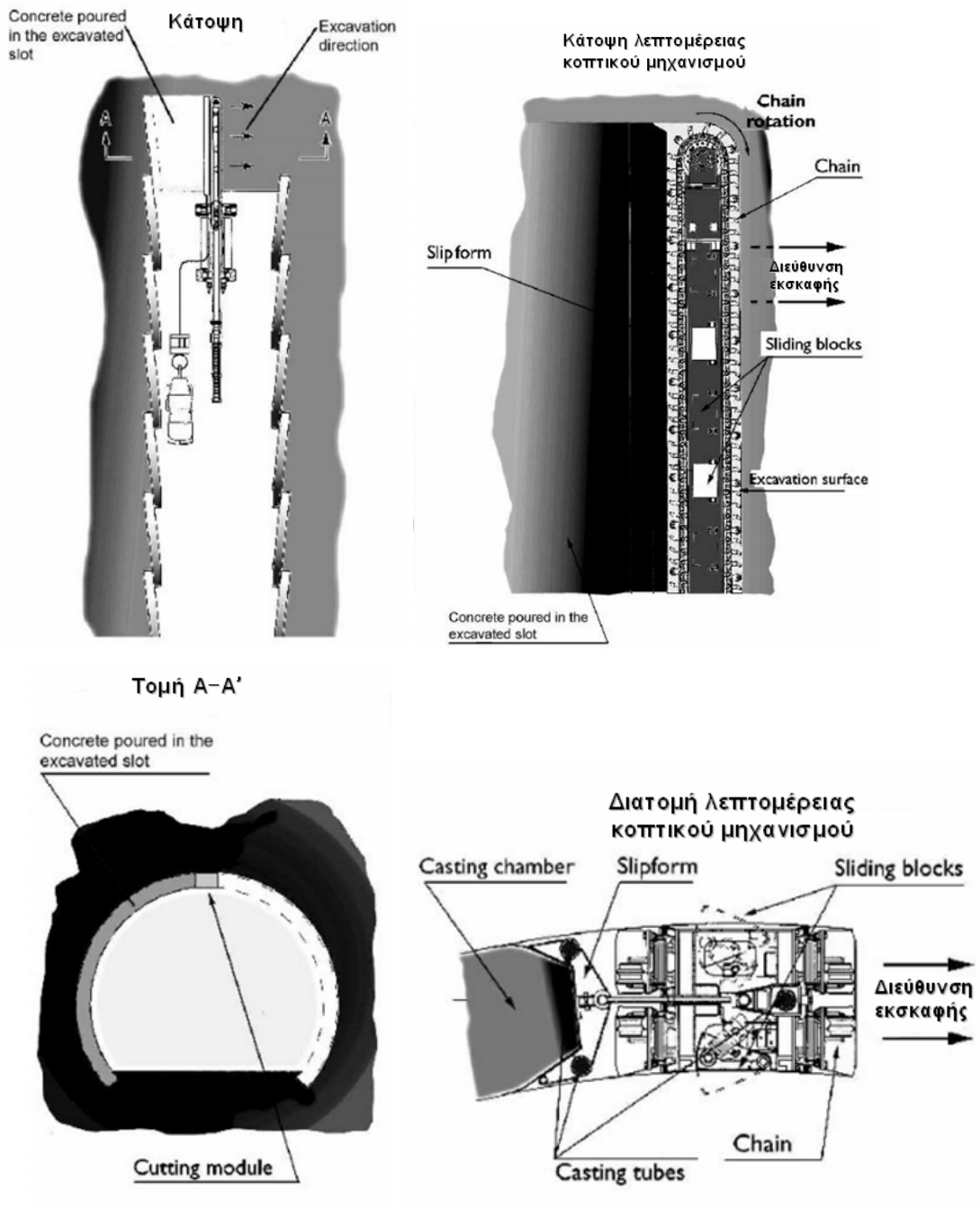
στην κατασκευή της τελικής εσωτερικής επένδυσης (κέλυφος), πριν την διαδικασία της εκσκαφής γεγονός που δεν καθιστά αναγκαία την λήψη μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Με τον τρόπο αυτό τεχνική pretunnel υπερτερεί έναντι των συμβατικών μεθόδων σε τρία σημεία: α) υψηλή ευστάθεια της εκσκαφής, λόγω του πάχους της επένδυσης αλλά και χάριν στο γεγονός ότι η σκλήρυνση του σκυροδέματος λαμβάνει χώρα πριν την εκσκαφή, β) ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας κατά την διάρκεια κατασκευής της σήραγγας, γ) ελάχιστες καθιζήσεις (Tonon et al., 2005).

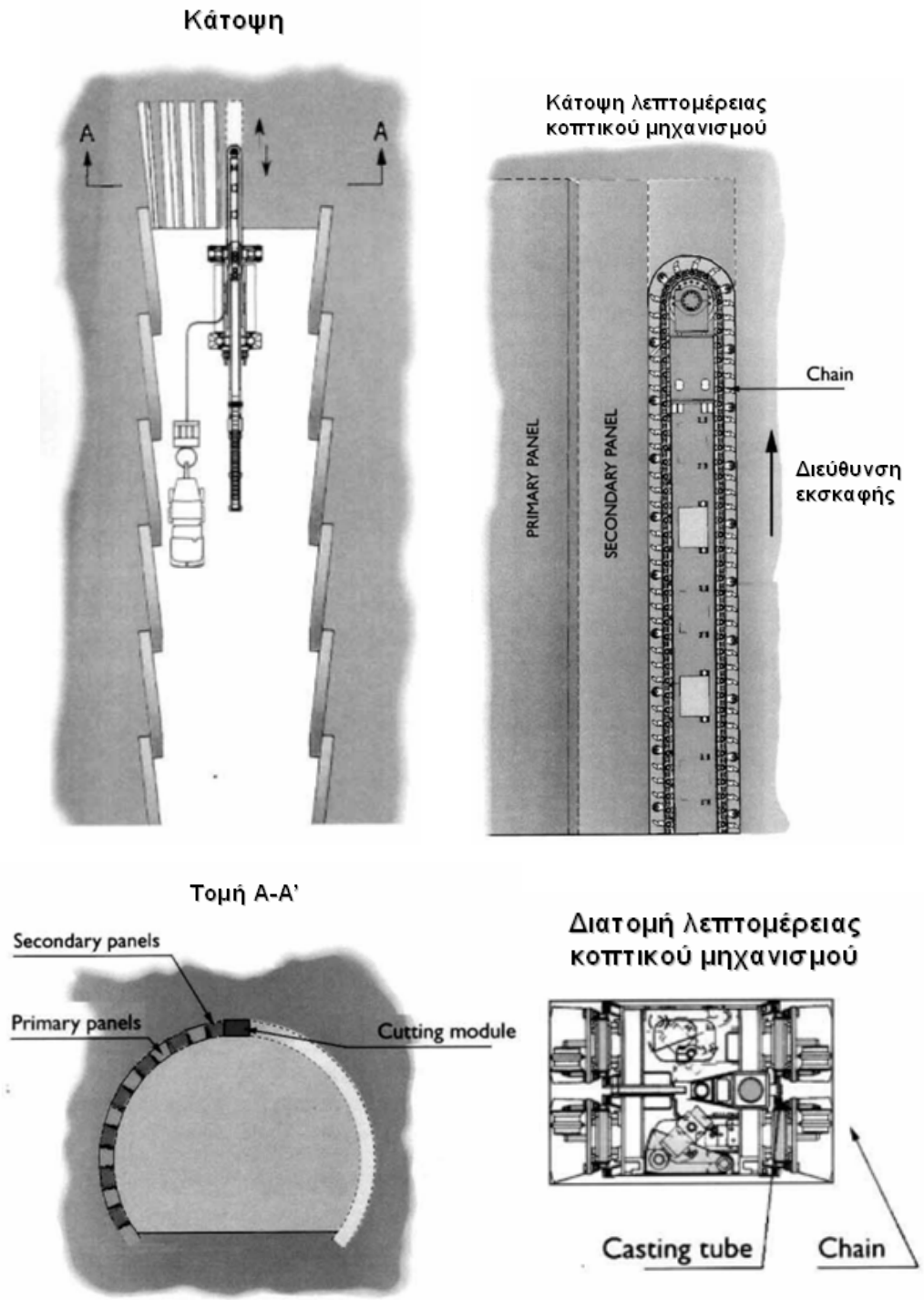
Η τεχνική pretunnel εφαρμόζεται με εξειδικευμένο εξοπλισμό που αποτελείται από ερπυστριοφόρο όχημα που φέρει ένα πλαίσιο ανύψωσης με βραχίονα που στηρίζει και οδηγεί τον κοπτικό μηχανισμό σε όλη την περιφέρεια της σήραγγας (Peila et al., 1995). Με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα η κοπή της βραχομάζας και η έγχυση σκυροδέματος στην διεπιφάνεια που δημιουργείται γίνεται ταυτόχρονα. Η διαδικασία της εγκατάστασης της επένδυσης γίνεται σε δύο φάσεις: α) κατασκευή της στρώσης της επένδυσης. Μετά την τοποθέτηση μιας στρώσης, το μηχάνημα υποχωρεί και β) εκσκαφή του εδάφους κάτω από την επένδυση και απομάκρυνση των υλικών. Τα μηχάνημα pretunnel προχωράει στο επόμενο βήμα εγκατάστασης.

Διακρίνονται δύο τύποι αυτής της τεχνικής: α) η συνεχής και β) η μη συνεχής. Στη συνεχή μέθοδο, ο κοπτικός μηχανισμός διαπερνά την μάζα του εδάφους που βρίσκεται πάνω από το προς εκσκαφή μέτωπο. Μόλις ολόκληρο το σώμα του κοπτικού μηχανισμού εισχωρήσει στη μάζα του εδάφους, το σύστημα έγχυσης ενέματος αρχίζει να πληρώνει την σχισμή με τσιμεντένεμα. Λόγω της υψηλής πίεσης της ενεμάτωσης, το τσιμέντο αναγκάζει τον κοπτικό μηχανισμό να κινηθεί προς την κατεύθυνση της εκσκαφής, πληρώνοντας την σχισμή που αφήνει στο πέρασμά του (Σχήμα 3.15).

Στη μη συνεχή μέθοδο η κατασκευή της επένδυσης αποτελείται από τις κύριες πλάκες και στη συνέχεια γίνεται η εφαρμογή δευτερευόντων ενδιάμεσα. Μόλις ο κοπτικός μηχανισμός εισχωρήσει στην εδαφική μάζα ξεκινάει η πλήρωση της σχισμής με τσιμεντένεμα μέσω σωλήνα που βρίσκεται πάνω στο άκρο του κοπτικού μηχανισμού. Η πίεση ενεμάτωσης αναγκάζει τον μηχανισμό να υποχωρήσει σταδιακά μέχρι την ολοκληρωτική πλήρωση του κενού. Η διαφορά με την συνεχή μέθοδο βρίσκεται στο σύστημα ενεμάτωσης (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.15: Συνεχής μέθοδος pretunnel (Tonon et al., 2005, τροποποιημένο).



Σχήμα 3.16: Μη συνεχής μέθοδος pretunnel (Tonon et al., 2005, τροποποιημένο).

3.3.5 Περιφερειακή πρότμηση

Η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως μέθοδος perforex. Είναι ο πρόδρομος της μεθόδου pretunnel επομένως και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρεμφερής (Σχήμα 3.17). Ο κοπτικός μηχανισμός (αλυσοπρίονο), σταθεροποιείται πάνω σε κινητό πλαίσιο που φέρει μηχανισμό ανύψωσης. Το αλυσοπρίονο κόβει μια σχισμή περιφερειιακά της σήραγγας η οποία πληρώνεται με ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι διαδοχικές σχισμές που δημιουργούνται έχουν βάθος περίπου 5m και πάχος 19-35cm. Η διάταξη των σχισμών είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται μια επικάλυψη 0.5-2m (Kolymbas, 2005).

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε δύο περιπτώσεις (Tonon et al. 2005): α) σε διάνοιξη με διάτρηση και ανατίναξη, όπου ο θόρυβος και οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν θραύση και αστοχία της περιβάλλουσας βραχομάζας. Με την εφαρμογή στρώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος πάνω από το μέτωπο που πρόκειται να ανατιναχθεί, μπορούν να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα και β) σε μαλακά εδάφη όπου το προς εκσκαφή μέτωπο πρέπει να σταθεροποιηθεί μέχρι να γίνει η εφαρμογή σε αυτό της τελικής στρώσης σκυροδέματος.

Η διαφορά με την μέθοδο pretunnel είναι ότι δεν αποτελεί την τελική επένδυση αφού το πάχος των στρώσεων είναι μικρό σε σχέση με αυτό στην pretunnel.

Σχήμα 3.17: Μηχάνημα perforex (Peila et al., 2006).

3.4 Μεταλλικά πλαίσια

Γενικά τα μεταλλικά πλαίσια αποτελούνται από στοιχεία και συνδέσεις υψηλής ακαμψίας. Ουσιαστικά είναι χαλύβδινοι δακτύλιοι που τοποθετούνται διαδοχικά σε τακτικά διαστήματα, ενισχύοντας την ακαμψία της εσωτερικής επένδυσης. Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα όπως μεταλλικά φύλλα, ήλους, επένδυση από σκυρόδεμα, δομικό πλέγμα, κλπ., (Σοφιανός, 2012).

Ο τρόπος, ο τύπος αλλά και ο αριθμός των πλαισίων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, εξαρτάται από τον σκοπό τον οποίο καλούνται να εξυπηρετήσουν. Βασικό χαρακτηριστικό που διακρίνει τα πλαίσια από άλλες μεταλλικές κατασκευές υποστήριξης είναι το στοιχείο της ασυνέχειας, δηλαδή το γεγονός ότι αποτελούν μεμονωμένα στοιχεία που διακρίνονται από σχετική ανεξαρτησία από την υπόλοιπη επένδυση και από την βραχομάζα που καλούνται να υποστηρίξουν σε αντίθεση πχ. με τα δομικά πλέγματα που αποτελούν ένα συνεχές στοιχείο ενίσχυσης του σκυροδέματος το οποίο παραμορφώνεται σε συνάφεια με το υπόλοιπο σώμα της επένδυσης.

Ανάλογα με το βάρος τους τα πλαίσια χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, που περιλαμβάνουν τους επιμέρους τύπους πλαισίων:

Βαριά πλαίσια από μορφοχάλυβα

- **Πρότυπες διατομές πλαισίων μορφοχάλυβα**
- Δικτύωμα
- Αρθρωτά πλαίσια

Ελαφρά πλαίσια

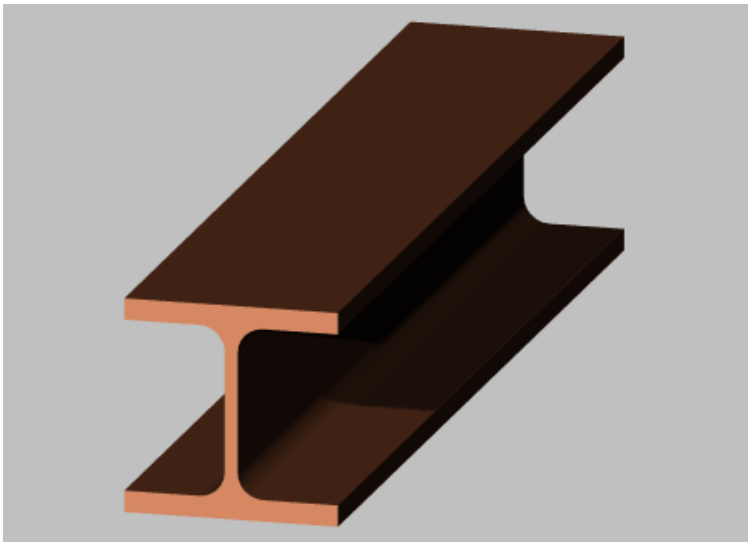
- Ολισθαίνοντα πλαίσια.
- Ελαφρές διατομές.
- Πτυχωτά Φύλλα.
- Δικτυωτά πλαίσια.

Στη συνέχεια περιγράφονται δύο αντιπροσωπευτικοί τύποι πλαισίων από τις δύο κατηγορίες.

3.4.1 Πρότυπες διατομές πλαισίων μορφοχάλυβα

Λόγω της μεγάλης ροπής αδράνειας που τα διακρίνει, τα βαριά πλαίσια έχουν μεγάλες αντιστάσεις στις παραμορφώσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας. Το γεγονός ότι φέρουν μεγάλη αντίσταση σε παραμορφώσεις μπορεί να εμπεριέχει κινδύνους απότομης αστοχίας. Για το λόγο αυτό τα πλαίσια αυτά πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η ακριβής διατήρηση του σχήματος της διατομής. μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνα τους και ως μέτρα προϋποστρήριξης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, είτε σε συνδυασμό με μεταλλικά διάτρητα φύλλα. Τα πλαίσια συντίθενται από πρότυπες δοκούς μορφοχάλυβα διατομής απλής ή σε ζεύγος, από δικτυώματα μορφοχάλυβα, και από αρθρωτές δοκούς (Σοφιανός, 2012).

Κάποιες συνήθης διατομές βαριών πλαισίων είναι IPE, HEA και HEB (Σχήμα 3.18). Είναι επίσης γνωστές και ως I-beam (τα ονόματά τους μαζί με τον εκάστοτε δείκτη προσδιορίζουν τις αναλογίες των διαστάσεων). Μπορούν να προσαρμοστούν σε μεταβλητές διατομές της σήραγγας, ενώ τα επιμέρους τμήματα που τα αποτελούν συναρμολογούνται ανάλογα με το σχήμα της διατομής αλλά και τον τρόπο εκσκαφής. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις εκσκαφής του μετώπου σε δύο φάσεις, αρχικά τοποθετούνται τα αψιδωτά τμήματα στον θόλο της σήραγγας που συγκρατούνται με ζεύγη αγκυρίων στις παρειές της εκσκαφής (Σχήμα 3.19). Στη συνέχεια και αφού γίνει η διάνοιξη της β’ φάσης, ενώνονται σε αυτά τα δευτερεύοντα τμήματα, με κοχλίωση πλακών στα άκρα (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.18: Τμήμα πλαισίου διατομής τύπου ΗΕΒ.

Σχήμα 3.19: Τοποθέτηση του αρχικού τμήματος του μεταλλικού πλαισίου τύπου ΗΕΒ.

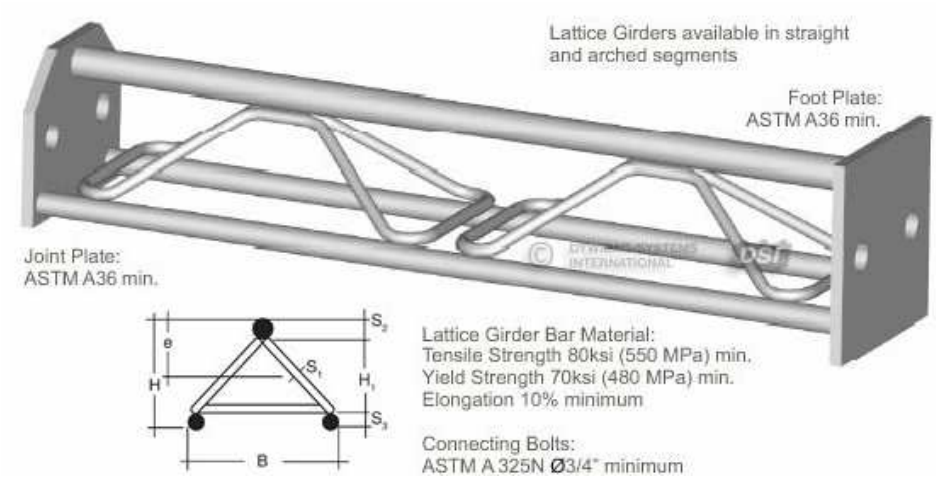
Σχήμα 3.20: Τοποθέτηση δευτερεύοντος τμήματος πλαισίου ΗΕΒ, κατά τη διάνοιξη της Β' φάσης εκσκαφής.

3.4.2 Δικτυωτά πλαίσια

Η τάση για εφαρμογή ελαφρύτερης επένδυσης, οδήγηση στην κατασκευή και χρήση των πλαισίων δικτυωμάτων. Τα δικτυώματα είναι οικονομικότερα (ως ελαφρύτερα) και παρέχουν μεγαλύτερη ευκολία κατά την κατασκευή, μεταφορά και τοποθέτησή τους. Επιπλέον επιτρέπουν την εφαρμογή ελαφρύτερης στρώσης σκυροδέματος στα τοιχώματα των σηράγγων.

Οι πιο συνήθης τύποι δικτυωτών πλαισίων είναι τα πλαίσια lattice girder τριών και τεσσάρων δοκών με πιο συνηθισμένο τον δεύτερο τύπο. Ο τελευταίος αποτελείται από ένα σύστημα τριών δοκών σε σχήμα ισοσκελούς τριγώνου. Η μια δοκός είναι μεγαλύτερης διατομής (Φ25-40mm), ενώ οι άλλες δύο έχουν μικρότερη διατομή (20-32mm). Οι δοκοί βρίσκονται στις κορυφές του τριγώνου. Οι δοκοί με την ίδια διατομή, ενώνονται με την τρίτη μέσω μικρότερων ράβδων (Φ10-12mm), ημιτονοειδούς διάταξης (Komselis et al., 2000)

Τα δικτυώματα Lattice Girder μπορεί να είναι είτε κλειστού είτε ανοιχτού τύπου (Σχήμα 3.21, Σχήμα 3.22, αντίστοιχα) :



Σχήμα 3.21: Lattice Girder κλειστού τύπου (www.dsigroundsupport.com).

Σχήμα 3.22: Lattice Girder ανοιχτού τύπου (www.devoran-metals.co.uk).

3.5 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Βασικό στοιχείο της προσωρινής υποστήριξης μιας σήραγγας αλλά και της τελικής επένδυσης, είναι η ρίψη εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα τοιχώματα και στο δάπεδο του ανοίγματος. Διακρίνονται δύο είδη σκυροδέματος, ανάλογα με το αν περιέχουν ή όχι πρόσθετα υλικά ενίσχυσης: α) απλό σκυρόδεμα και β) ενισχυμένο σκυρόδεμα.

3.5.1 Απλό σκυρόδεμα

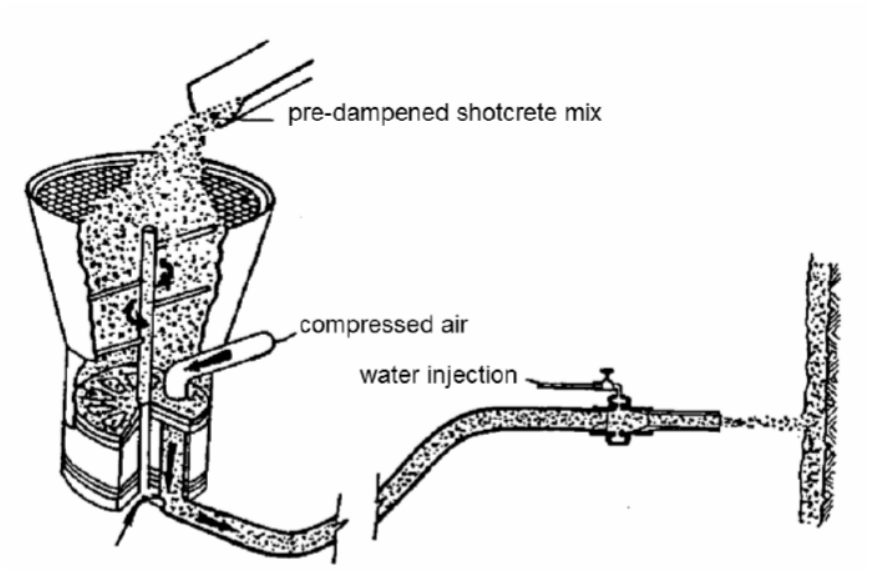
Σε γενικές γραμμές το απλό σκυρόδεμα αποτελείται από τσιμέντο, άμμο και ένα μίγμα από λεπτομερή αδρανή υλικά. Ανάλογα με τον τρόπο ανάμιξης τον επιμέρους συστατικών του, διακρίνονται δύο κατηγορίες σκυροδέματος:

Σκυρόδεμα τύπου Dry mix

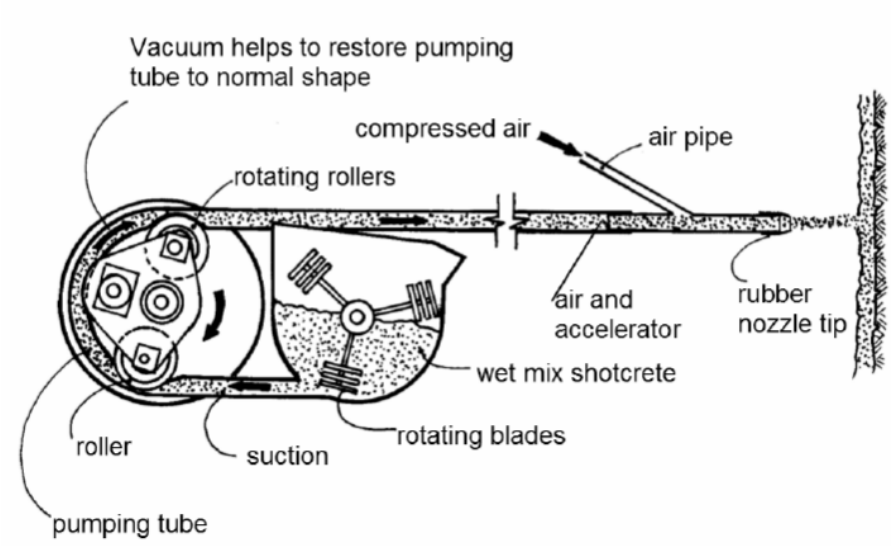
Τα ξηρά συστατικά του σκυροδέματος, αφού πρώτα υγρανθούν ελαφρώς για την αποφυγή σκόνης, εισάγονται σε μια δεξαμενή συνεχούς ανάδευσης. Με την εισροή πεπιεσμένου αέρα μέσω ενός αγωγού, το υλικό οδηγείται στη μάνικα εξόδου. Το νερό προστίθεται στο ακροφύσιο της μάνικας και το μίγμα νερού και υλικών εκτινάσσεται με πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας (Σχήμα 3.23).

Σκυρόδεμα τύπου Wet mix

Σε αυτόν τον τύπο τα ξηρά συστατικά και το νερό, αναμιγνύονται σε μια δεξαμενή και έπειτα το μίγμα οδηγείται με άντληση στην μάνικα εξόδου, όπου γίνεται εισροή αέρα με πίεση λίγο πριν το ακροφύσιο (Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23: Τυπικό σύστημα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος τύπου dry mix (Hoek et al., 1995, από Mahar et al., 1975).



Σχήμα 3.24: Τυπικό σύστημα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος τύπου wet mix (Hoek et al., 1995, από Mahar et al., 1975).

3.5.2 Ενισχυμένο σκυρόδεμα

Η ανάπτυξη της έρευνας γύρω από το σκυρόδεμα ανέδειξε δύο σημαντικές τεχνολογίες ενίσχυσης των μηχανικών του ιδιοτήτων: α) την παραγωγή σκυροδέματος με πρόσμιξη πυριτικής αιθάλης και, β) το ινοπλισμένο με μεταλλικές ίνες, σκυρόδεμα.

Η πυριτική αιθάλη είναι ένα ποζολανικό υλικό που παρουσιάζει πολύ ισχυρές ιδιότητες κατά την τσιμεντοποίηση της. Όταν προστίθεται σε αναλογία 8-13% του βάρους του τσιμέντου, μπορεί να προσδώσει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, διπλάσια ή και τριπλάσια της τιμής του απλού σκυροδέματος (Hoek et al., 1995). Μεταξύ άλλων, το υλικό αυτό αυξάνει την καμπτική αντοχή του σκυροδέματος και την ικανότητά του να «κολλάει» καλύτερα στην βραχομάζα.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει γίνει αρκετά δημοφιλές από τις αρχές της δεκαετίας του ’70 και σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται έναντι της ενίσχυσης με δομικά πλέγματα (wire mesh reinforcement) (Hoek et al., 1995). Κύριος σκοπός του είναι να προσδώσει πλαστικές ιδιότητες σε ένα βασικά ψαθυρό υλικό, όπως είναι το σκυρόδεμα.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μελέτη της ευστάθειας σηράγγων και η κατασκευή αυτών, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί όσο το δυνατόν ακριβέστερους υπολογισμούς για την πρόβλεψη των παραμέτρων (τάσεων, παραμορφώσεων κ.α.) που αποτελούν το εκάστοτε πρόβλημα. Για το λόγο αυτό, οι μελετητές κατά καιρούς έχουν επιστρατεύσει διάφορες υπολογιστικές μεθόδους που συνοπτικά μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Αναλυτικές μέθοδοι, που βασίζονται στην επίλυση εξισώσεων της ελαστικής θεωρίας και οδηγούν σε λύσεις κλειστού τύπου πχ. Μέθοδος οριακής ευστάθειας. Οι μέθοδοι αυτές είναι αρκετά πρακτικές σε προβλήματα που δεν απαιτούν συναρτήσεις υψηλής τάξης, δηλαδή σε μονοδιάστατα ή δισδιάστατα προβλήματα, προβλήματα που αφορούν ομογενή και ισότροπα μέσα, γραμμικά προβλήματα απλής σχετικά γεωμετρίας.
- Εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται σε παρατηρήσεις των μελετητών πάνω σε προηγούμενα παρόμοια προβλήματα και χρησιμοποιούν μετρήσεις για την εδραίωση μαθηματικών εμπειρικών τύπων (πχ. Panet 1995, Chern, 998). Οι λύσεις αυτού του τύπου οδηγούν σε μητρώα με τις τιμές των παραμέτρων που διερευνώνται προσεγγίζοντας την πραγματική λύση. Μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι δίνουν προσεγγιστικές λύσεις που εμπεριέχουν πολλές παραδοχές και περιορισμούς όσον αφορά στη γεωμετρία του προβλήματος και στο εύρος των τιμών της κάθε μεταβλητής και δεν δίνουν ακριβείς λύσεις, επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύπλοκα γεωτεχνικά προβλήματα.
- Αριθμητικές μέθοδοι οι οποίες αποτελούν προσεγγιστικούς αλγορίθμους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τα πολλαπλά προβλήματα γεωμηχανικής. Η ανάπτυξη και ευρύτατη εφαρμογή τους οφείλεται στην παράλληλη εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης των υπολογιστών και η δυναμικότητά τους εξαρτάται από την υπολογιστική ισχύ και χωρητικότητα. Σήμερα θεωρούνται σχεδόν μονόδρομος για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων γεωμηχανικής γιατί παρέχουν τη δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης της ανομοιομορφίας του εδάφους, της ανελαστικής

συμπεριφοράς των υλικών και της πολύπλοκης γεωμετρίας των γεωτεχνικών προβλημάτων. Οι αριθμητικές υπολογιστικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με των τρόπο που προσεγγίζεται η εκάστοτε λύση: α) διαφορικές και β) ολοκληρωτικές. Στις διαφορικές μεθόδους, ανήκουν οι παρακάτω κατηγορίες:

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method).
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method).
- Μέθοδος διακριτών στοιχείων (Discrete Element Method), ενώ στις ολοκληρωτικές μεθόδους ανήκει η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method).

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί και υβριδικές μέθοδοι που αποτελούν συνδυασμούς δύο ή και περισσότερων από τις παραπάνω τεχνικές.

Όλες οι τεχνικές αριθμητικής προσέγγισης βασίζονται στην αρχή της διακριτοποίησης κατά την οποία το αρχικό πρόβλημα υποδιαιρείται (διακριτοποιείται) σε μικρότερες ισοδύναμες μονάδες, υποσύνολα ή στοιχεία αποτελούμενα από κόμβους. Έτσι η διαδικασία επίλυσης βασίζεται σε αριθμητικές προσεγγίσεις των λύσεων των κυρίαρχων εξισώσεων του προβλήματος, (διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας, σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης), όπως γίνεται στις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (ΜΠΔ). Εναλλακτικά η επίλυση μπορεί να προκύπτει από προσεγγίσεις των εξισώσεων στους συνδετικούς κόμβους των στοιχείων και στην συνέχεια των τάσεων και μετατοπίσεων μεταξύ των στοιχείων, όπως γίνεται στις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), (Brady & Brown, 2004). Η βασική διαφορά των δύο προηγούμενων μεθόδων έγκειται στον τρόπο διακριτοποίησης του προβλήματος: Στην ΜΠΔ διακριτοποιείται η κυρίαρχη εξίσωση, ενώ στην ΜΠΣ διακριτοποιείται το ίδιο το μέσον (Desai & Christian, 1977).

4.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Σε αντίθεση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών η οποία βασίστηκε σε ένα ήδη γνωστό μαθηματικό υπόβαθρο, η ΜΠΣ αρχικά βασίστηκε σε ένα μαθηματικό υπόβαθρο το οποίο δεν είχε εδραιωθεί πλήρως και ακόμη και σήμερα αναπτύσσεται παράλληλα με αυτήν.

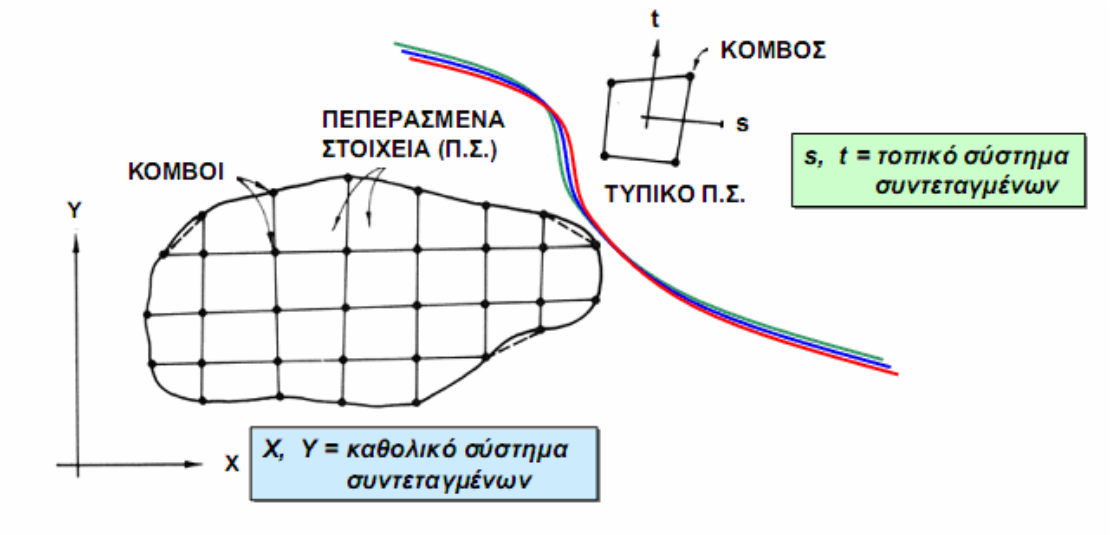
Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η διαίρεση του πεδίου σε ένα σύστημα μικρότερων μονάδων (στοιχεία) και η κατανομή της ζητούμενης μεταβλητής σε αυτά. Η μεταβλητή σε κάθε στοιχείο, θεωρείται ότι επιδρά με έναν προκαθορισμένο τρόπο τέτοιον ώστε η γενική κατανομή της μεταβλητής σε ολόκληρο το σώμα ή πεδίο που μελετάται να προσεγγίζεται επαρκώς από τον συνδυασμό όλων των στοιχειωδών εκφράσεων της (Fagan, 1992). Αφού διακριτοποιηθεί το πρόβλημα, ορίζονται οι κυρίαρχες εξισώσεις για κάθε στοιχείο και αθροίζονται για να δώσουν ένα σύνολο εξισώσεων για ολόκληρο το σύστημα. Αυτό γίνεται με μετασχηματισμό των συντεταγμένων από επίπεδο στοιχείου σε καθολικό επίπεδο. Οι εξισώσεις αυτές που περιγράφουν την συμπεριφορά του μέσου, για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν σταθερή μορφή:

$$[K]\{U\} = \{F\} \tag{4.1}$$

Όπου $[K]$, είναι το μητρώο ακαμψίας του υλικού, $\{U\}$ το διάνυσμα της άγνωστης μεταβλητής (πχ. μετατόπιση) και $\{F\}$ το διάνυσμα των εφαρμοζόμενων δυνάμεων στους κόμβους.

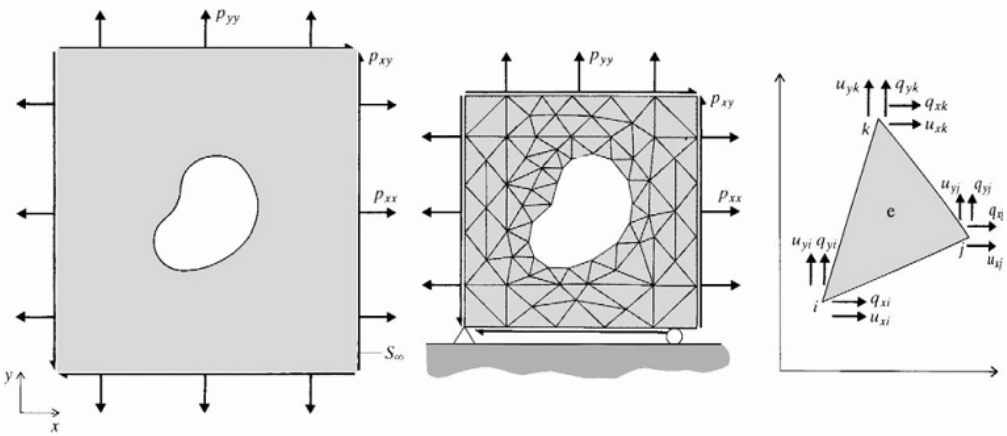
4.2 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση σε προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων αναφέρεται στη διαίρεση του συνεχούς μέσου σε ένα ισοδύναμο σύστημα μικρότερων διακριτών, αλληλεπιδρώντων στοιχείων (πεπερασμένων στοιχείων), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία (κόμβους) (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε πεπερασμένα στοιχεία (Μπουκοβάλας, 2006).

Τα στοιχεία αυτά μπορούν να πάρουν διάφορα σχήματα, τρίγωνα, τετράγωνα, πολύγωνα με ευθείες ή και καμπύλες γραμμές (για δισδιάστατες αναλύσεις) και τετράεδρα, εξάεδρα, πολύεδρα (για τρισδιάστατες αναλύσεις). Οι κόμβοι των στοιχείων μπορεί να βρίσκονται είτε στις κορυφές είτε πάνω στις πλευρές των στοιχείων. Η επιλογή του αριθμού των στοιχείων, του σχήματος αυτών αλλά και του αριθμού των κόμβων ορίζεται κάθε φορά από των χρήστη και εξαρτάται από την γεωμετρία, πολυπλοκότητα αλλά και την ακρίβεια που απαιτείται στο προς επίλυση πρόβλημα. Ένα παράδειγμα διακριτοποίησης με τριγωνικά στοιχεία παρουσιάζεται παρακάτω (σχήμα 4.2). Να σημειωθεί ότι όσο πιο πυκνή είναι η διακριτοποίηση, τόσο περισσότερος ο υπολογιστικός χρόνος αλλά και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την επίλυση των αλγορίθμων.



Σχήμα 4.2: Διακριτοποίηση του πεδίου γύρω από υπόγειο άνοιγμα ακανόνιστου σχήματος, με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία (Brady & Brown, 2004).

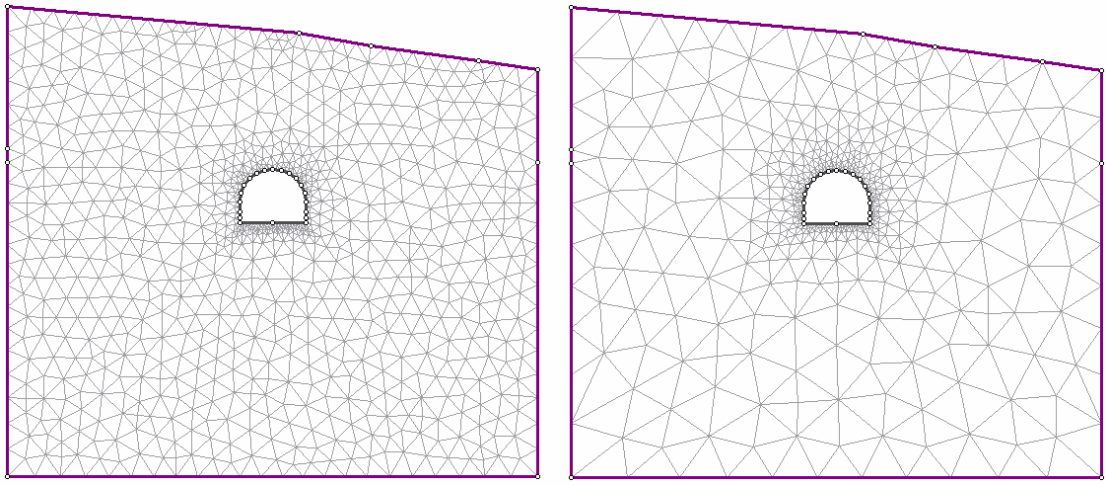
Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι το κάθε στοιχείο αναλύεται ξεχωριστά και καταχωρούνται σε αυτό οι φυσικές και δομικές του ιδιότητες και διαμορφώνεται η εξίσωση ακαμψίας που το χαρακτηρίζει. Στη συνέχεια τα στοιχεία συναθροίζονται για την εξαγωγή των εξισώσεων της συνολικής δομής του πεδίου. Αυτή η διαδικασία «συνάθροισης» γίνεται υπό ορισμένες συνθήκες που έχουν να κάνουν με την συμβατικότητα του μοντέλου (Desai & Christian, 1977). Ουσιαστικά σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο και αποτέλεσμα (πχ. τάση-μετατόπιση). Τα μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας συνάρτησης (συνάρτηση μορφής) που θα ικανοποιεί την τελική διαφορική εξίσωση συμπεριφοράς του υλικού και η οποία ορίζεται ανεξάρτητα μέσα σε κάθε Π.Σ. συναρτήσει των τιμών που παίρνει στους κόμβους του στοιχείου. Η επίλυση της τελικής διαφορικής εξίσωσης ανάγεται σε ένα σύστημα εξισώσεων πλήθους ίσο με τον αριθμό των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχούν στο σώμα.

4.3 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου.

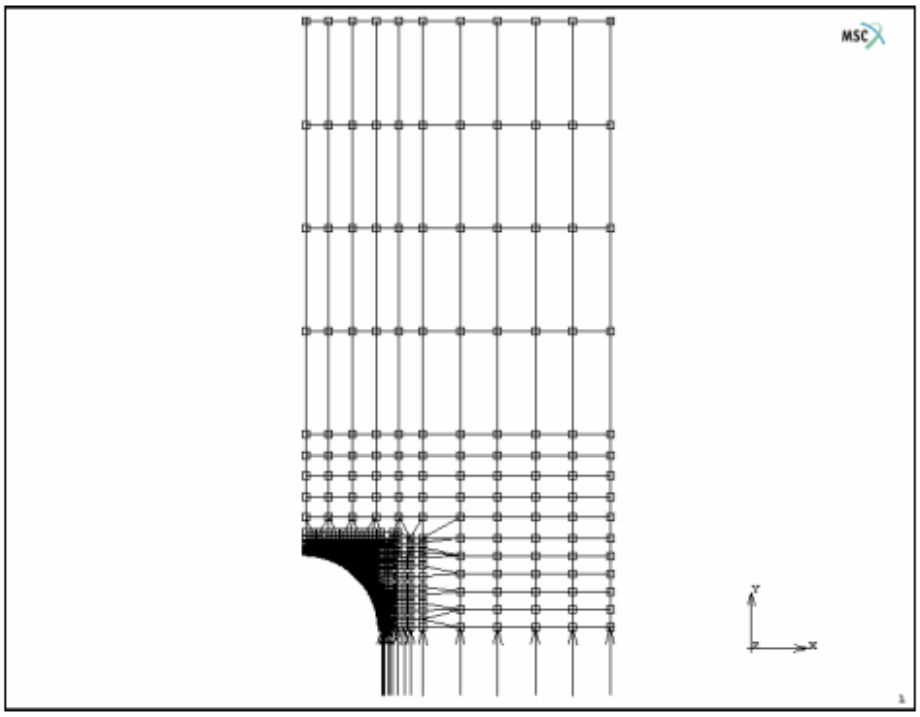
Για την επιτυχή μοντελοποίηση ενός προβλήματος με την ΜΠΣ, είναι απαραίτητη η κατάλληλη διαίρεση του πεδίου στα επιμέρους στοιχεία. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- ✓ την επιλογή του αριθμού των κόμβων των στοιχείων επομένως και των βαθμών ελευθερίας του κάθε στοιχείου.
- ✓ την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου.
- ✓ την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου (Σχήμα 4.3).

Η βασική αρχή της ορθής επιλογής της γεωμετρίας και του αριθμού των στοιχείων είναι ότι επιλέγεται μικρότερο μέγεθος στοιχείων (άρα πυκνότερος κάνναβος), στα σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια ή αναμένονται έντονες μεταβολές του ζητούμενου μεγέθους. Στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου είναι προτιμότερο να επιλέγονται μεγαλύτερα στοιχεία με πιο αραιό κάνναβο για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χώρου και χρόνου (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3: Αυτόματη διακριτοποίηση πεδίου με μικρότερα στοιχεία (τριγωνικά) στα όρια του ανοίγματος στο λογισμικό Π.Σ. Phase2. αριστερά: επίπεδο διαβάθμησης καννάβου 0.1 δεξιά: επίπεδο διαβάθμησης καννάβου 0.05.

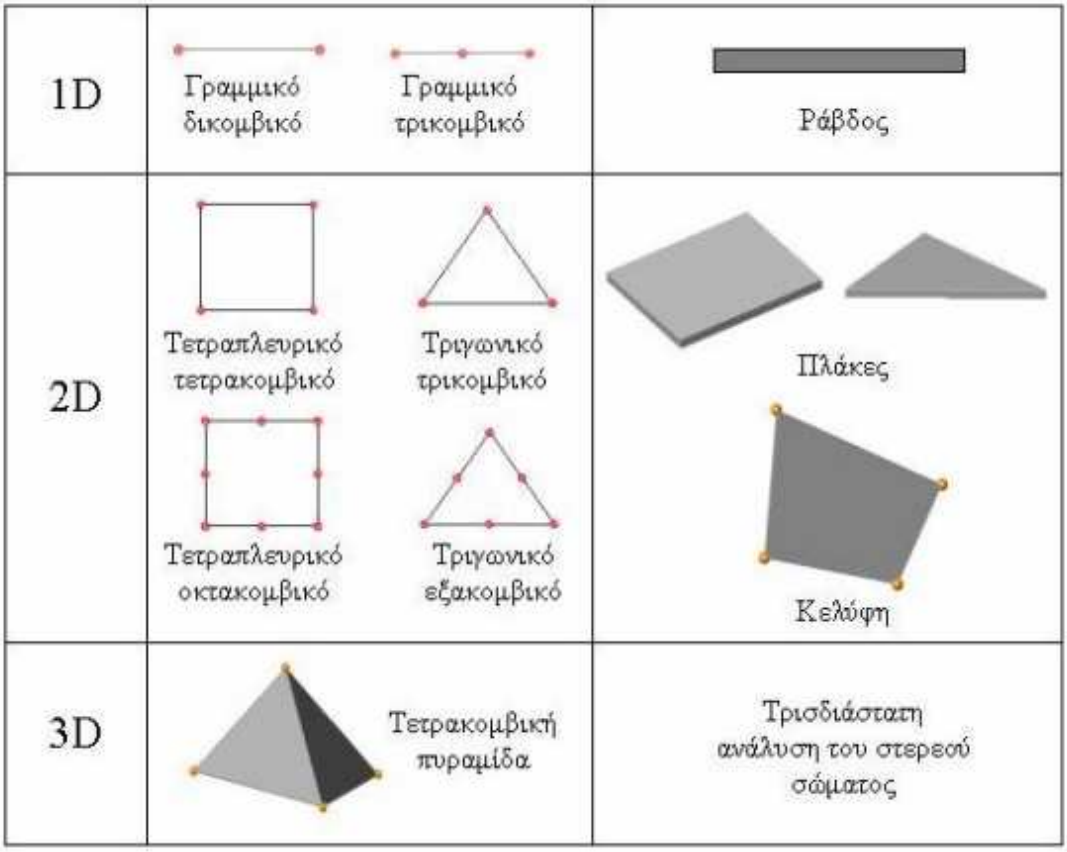


Σχήμα 4.4: Διακριτοποίηση μεταβαλλόμενης γεωμετρίας στοιχείων (τριγωνικών και τετραγωνικών) από τον χρήστη στο λογισμικό Π.Σ.Marc-Mentat (Βιόπουλος, 2006).

4.4 Είδη στοιχείων

Σε μονοδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται γραμμικά στοιχεία, ενώ σε δισδιάστατα γεωτεχνικά προβλήματα (επίπεδης τάσης, επίπεδης παραμόρφωσης), συνηθίζονται τα τριγωνικά ή τετράπλευρα στοιχεία. Αν και τα τριγωνικά στοιχεία

θεωρούνται πιο απλοϊκά άρα και λιγότερο ακριβή κατά την ανάλυση, εξακολουθούν να είναι πιο προσαρμόσιμα σε δισδιάστατα προβλήματα πολλαπλής γεωμετρίας. Σε τρισδιάστατες αναλύσεις χαρακτηριστικά είναι τα πυραμιδοειδή ή πρισματικά. Στην πιο απλή τους μορφή τα στοιχεία έχουν αριθμό κόμβων ίσο με των αριθμό των πλευρών τους (πχ. τριγωνικά-τρικομβικά), ενώ σε κάποιες περιπτώσεις όπου απαιτείται χρησιμοποιούνται στοιχεία με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων (πχ. τριγωνικά-εξακομβικά, τετραπλευρικά-οκτακομβικά). Χαρακτηριστικοί τύποι στοιχείων για διάφορες διαστάσεις παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Τύποι στοιχείων για κάθε διάσταση (Λιαράκος, 2005).

Σε δισδιάστατα προβλήματα πεδίου (πχ. προβλήματα τάσης-παραμόρφωσης), η μεταβλητή ορίζεται σε κάθε κόμβο του πεδίου με δύο συνιστώσες, δηλαδή ο κάθε κόμβος έχει δύο βαθμούς ελευθερίας. Έτσι για κάθε στοιχείο του πεδίου ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων ορίζονται και οι βαθμοί ελευθερίας του. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι σε προβλήματα που εμπεριέχουν ροπές οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο αυξάνονται κατά έναν για δισδιάστατες αναλύσεις ή κατά τρεις σε

τρισδιάστατες αναλύσεις. Η επιλογή του είδους των στοιχείων εξαρτάται από το είδος του προβλήματος που αναλύεται και τη διαστασιολόγηση του προβλήματος (Fagan,1992).

Ένα πρόβλημα που συναντάται συνήθως κατά την διακριτοποίηση ενός καννάβου είναι η διατήρηση του κανονικού σχήματος των στοιχείων για να αποφεύγεται η «διαστροφή» τους. Όσο αυξάνεται η διαστροφή των στοιχείων τόσο αυξάνονται και τα σφάλματα κατά την ανάλυση. Ο βαθμός διαστροφής των στοιχείων μετριέται ως ο λόγος της μεγαλύτερης προς την μικρότερη πλευρά του στοιχείου, ενώ μια άλλη μέθοδος είναι ο έλεγχος των εσωτερικών γωνιών των στοιχείων. Σε ένα κανονικό τρίγωνο οι γωνίες πρέπει να είναι όσο πιο κοντά στις 60° ενώ σε ένα κανονικό τετράπλευρο κοντά στις 90°. Αρκετά λογισμικά πακέτα (όπως το Phase2), εφαρμόζουν ελέγχους των στοιχείων ώστε να αποφεύγονται σημαντικά σφάλματα κατά την ανάλυση .

4.5 Επιλογή των προσεγγιστικών συναρτήσεων

Οι προσεγγιστικές συναρτήσεις (ή συναρτήσεις μορφής), περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η άγνωστη μεταβλητή (πχ. μετατόπιση), σε κάθε σημείο του πεδίου, συναρτήσει των τιμών της στους κόμβους. Οι συναρτήσεις αυτές εκφράζονται με την μορφή πολυωνύμων και μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι συναρτήσεων μορφής για δισδιάστατα επίπεδα στοιχεία. Συνήθως σε περιπτώσεις στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους εφαρμόζονται γραμμικές συναρτήσεις, ενώ για περιπτώσεις όπου οι κόμβοι ξεπερνούν σε αριθμό τις ακμές των στοιχείων εφαρμόζονται μη γραμμικές (Αγιουτάντης, 2002).

Συνάρτηση Παρεμβολής	Πλήθος Κόμβων [n]	Στοιχείο
$u(x,y) = a_1 + a_2 x + a_3 y$	3	
$u(x,y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy + a_5 x^2 + a_6 y^2$	6	
$u(x,y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy$	4	

Σχήμα 4.6: Συναρτήσεις μορφής για δισδιάστατα επίπεδα στοιχεία (Λιαράκος, 2005 από Fagan, 1992).

Έστω ότι η μετατόπιση για οποιοδήποτε σημείο ενός στοιχείου με *n* κόμβους εκφράζεται με τη γενική μορφή:

$$u = \sum_{i=1}^{n} u_i N_i \tag{4.2}$$

η συνάρτηση N_i ονομάζεται συνάρτηση μορφής και πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να δίνει κατάλληλες κομβικές μετατοπίσεις ανάλογα με τις συντεταγμένες των κόμβων (Zienkiewics et al., 2005).

4.5.1 Συναρτήσεις μορφής σε δύο διαστάσεις για τρικομβικό τρίγωνο.

Οι γραμμικές συναρτήσεις των μετατοπίσεων στην περίπτωση ενός τριγώνου με τρεις κόμβους στις κορυφές του όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7 είναι:

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 y = [1 \;\; x \;\; y \;\; xy] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \tag{4.3}$$

$$v = a_4 + a_5 x + a_6 y = [1 \;\; x \;\; y \;\; xy] \begin{Bmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} \tag{4.4}$$

Όπου u η οριζόντια μετατόπιση και v η κατακόρυφη. Για την οριζόντια μετατόπιση αν αντικατασταθούν τα διανύσματα u, x, y στους κόμβους i, j,k στην σχέση (4.3) με τις επιμέρους συνιστώσες (x_i,y_i),(x_j,y_j), (x_k,y_k) προκύπτει:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 + a_2 x_i + a_3 y_{i1} \\ u_2 &= a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j \\ u_3 &= a_1 + a_2 x_k + a_3 y_k \end{aligned} \Rightarrow \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \tag{4.5}$$

Εάν οι τιμές της *u* σε κάθε κόμβο είναι u_i, u_j, u_k, οι αντίστοιχες τιμές των σταθερών α_1, α_2, α_3 προκύπτουν ως:

$$a_1 = (a_i u_i + a_j u_j + a_k u_k)/2A \tag{4.6}$$

$$a_2 = (b_i u_i + b_j u_j + b_k u_k)/2A \tag{4.7}$$

$$a_3 = (c_i u_i + c_j u_j + c_k u_k)/2A \tag{4.8}$$

Όπου A το εμβαδόν τριγώνου με $2A = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix}$

(4.91)

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.6)-(4.8) στην (4.3) προκύπτει η εξίσωση:

$$u = N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k = [N]\{U\} \tag{4.9}$$

Όπου:

$$N_i = (a_i + b_i x + c_i y)/2A \tag{4.10}$$

$$N_j = (a_j + b_j x + c_j y)/2A \tag{4.11}$$

$$N_k = (a_k + b_k x + c_k y)/2A \tag{4.12}$$

Είναι οι συναρτήσεις μορφής σε δύο διαστάσεις για ένα τρικομβικό στοιχείο.

4.6 Καταστατική συμπεριφορά των υλικών

Η σχέση αιτίου-αποτελέσματος που περιγράφει την επίδραση μιας εξωτερικής δύναμης σε ένα σώμα, εκφράζεται από την εξίσωση τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και είναι της μορφής:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \tag{4.13}$$

Ανάλογα με τις παραμέτρους που την επηρεάζουν η καταστατική συμπεριφορά των υλικών χαρακτηρίζεται ως (Αγιουτάντης, 2002) :

- ✓ ελαστική, όταν οι τάσεις εξαρτώνται μόνο από τις παραμορφώσεις.
- ✓ πλαστική, όταν οι τάσεις εξαρτώνται και από τον τρόπο φόρτισης.
- ✓ βισκοελαστική όταν οι τάσεις εξαρτώνται και από την ταχύτητα φόρτισης.

4.6.1 Ελαστική συμπεριφορά σε τρεις διαστάσεις

Η καταστατική εξίσωση ελαστικής συμπεριφοράς σε τρεις διαστάσεις περιγράφεται από τον γενικευμένο νόμο του Hooke:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{4.14}$$

Όπου c_{ijkl}, είναι το μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του σώματος. Για ένα ομοιογενές, ελαστικό και ισότροπο υλικό το μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων εκφράζεται συναρτήσει των σταθερών λ, μ (σταθερές του Lamé), οι οποίες περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των δύο ελαστικών σταθερών ενός υλικού, του λόγου Poisson (ν) που ορίζεται από τον λόγο της εγκάρσιας προς την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση και του μέτρου ελαστικότητας του Young (E) που ορίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, όπου:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{4.15}$$

Με:

$$\nu = -\varepsilon_x / \varepsilon_y \text{ και } E = d\sigma / d\varepsilon \tag{4.16}$$

Σημειώνεται ότι η σταθερά μ ταυτίζεται με το μέτρο διάτμησης ή ακαμψίας που συμβολίζεται με το γράμμα G και ακολούθως θα χρησιμοποιείται αυτό. Σε επίπεδο κυρίων τάσεων ο νόμος του Hooke παίρνει την μορφή (Jaeger et al., 2007):

$$\sigma_1 = (\lambda + 2G)\varepsilon_1 + \lambda\varepsilon_2 + \lambda\varepsilon_3 \tag{4.17}$$

$$\sigma_2 = \lambda\varepsilon_1 + (\lambda + 2G)\varepsilon_2 + \lambda\varepsilon_3 \tag{4.18}$$

$$\sigma_3 = \lambda\varepsilon_1 + \lambda\varepsilon_2 + (\lambda + 2G)\,\varepsilon_3 \tag{4.19}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ογκομετρική παραμόρφωση ισούται με το άθροισμα των κύριων συνιστωσών:

$$\varepsilon_\nu = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \tag{4.20}$$

οι εξισώσεις (4.17)-(4.19) παίρνουν την μορφή:

$$\sigma_1 = \lambda\varepsilon_\nu + 2G\varepsilon_1 \tag{4.21}$$

$$\sigma_2 = \lambda\varepsilon_\nu + 2G\varepsilon_2 \tag{4.22}$$

$$\sigma_3 = \lambda\varepsilon_\nu + 2G\varepsilon_3 \tag{4.23}$$

Αθροίζοντας κατά μέλη τις σχέσεις (4.21-4.23) προκύπτει:

$$3\tau_\nu = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\lambda\varepsilon_\nu + 2G\varepsilon_\nu \Leftrightarrow \tau_\nu = \frac{3\lambda + 2G}{3}\varepsilon_\nu = K\varepsilon_\nu \tag{4.24}$$

όπου K είναι το μέτρο συμπίεσης. Με την χρήση της εξίσωσης (4.24), οι εξισώσεις (4.21)-(4.23) αντιστρέφονται ως:

$$\varepsilon_1 = \frac{\lambda + G}{G(3\lambda + 2G)}\sigma_1 - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)}\sigma_2 - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)}\sigma_3 \tag{4.25}$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)}\sigma_1 + \frac{\lambda + G}{G(3\lambda + 2G)}\sigma_2 - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)}\sigma_3 \tag{4.26}$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2\mu)}\sigma_1 - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2\mu)}\sigma_2 + \frac{\lambda + G}{G(3\lambda + 2G)}\sigma_3 \tag{1.28}$$

Αντίστοιχα οι σχέσεις των δευτερεύουσων (διατμητικών) συνιστωσών λαμβάνουν την μορφή:

$$\tau_{xy} = 2G\varepsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2G\varepsilon_{yz}, \quad \tau_{zx} = 2G\varepsilon_{zx} \tag{4.29}$$

Σε κατάσταση καθαρής διάτμησης όπου η τ_{xy} είναι η μόνη μη μηδενική τάση, προκύπτει ότι η $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ είναι η μόνη μη μηδενική παραμόρφωση.

4.6.2 Ελαστική συμπεριφορά σε δύο διαστάσεις

Η μελέτη της εντατικής κατάστασης ενός σώματος είναι συνήθως ένα δυσεπίλυτο τρισδιάστατο πρόβλημα. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις, χάριν απλοποίησης του προβλήματος, είναι εφικτό να γίνει η ανάλυση του σε δύο μόνο διαστάσεις. Η δυνατότητα μιας τέτοιας ανάλυσης εξαρτάται από την γεωμετρία του μέσου που μελετάται και από τον τρόπο φόρτισής του. Ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται κάθε φορά ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύεται, η δυσδιάστατη ανάλυση γίνεται με την θεώρηση επίπεδης τάσης (plane stress) ή με τη θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

Θεώρηση επίπεδης τάσης

Η θεώρηση αυτή γίνεται σε προβλήματα όπου η τρίτη διάσταση ενός σώματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις άλλες δύο και τα φορτία που δέχεται το σώμα ανήκουν στο επίπεδο των δύο σημαντικών διαστάσεων (Αγιουτάντης, 2002). Επομένως θεωρείται ότι οι συνιστώσες τάσης στην τρίτη διάσταση είναι μηδενικές. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν οι σχέσεις:

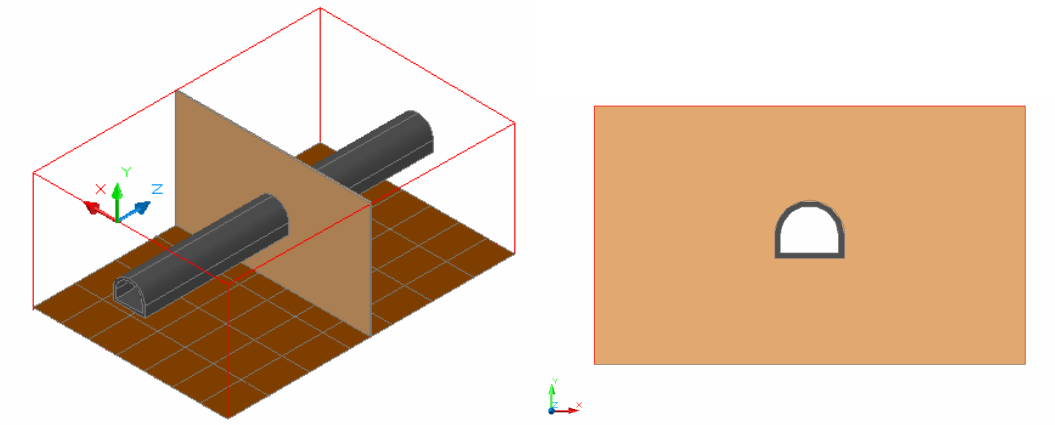
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4.30}$$

$$\sigma_x \neq 0, \quad \sigma_y \neq 0, \quad \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \tag{4.31}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \quad \varepsilon_z = \frac{-\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \tag{4.32}$$

Θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης

Η θεώρηση αυτή γίνεται στην περίπτωση όπου η τρίτη διάσταση ενός σώματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις δύο άλλες διαστάσεις και τα φορτία δρουν στο επίπεδο των δύο αυτών διαστάσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αυτής της θεώρησης είναι κατά την μελέτη της εντατικής κατάστασης γύρω από μία σήραγγα (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση της θεώρησης επίπεδης παραμόρφωσης κατά την μελέτη εντατικής κατάστασης σήραγγας.

Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι η μετατοπίσεις άρα και οι παραμορφώσεις στην τρίτη διάσταση είναι αμελητέες ποσότητες. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4.33}$$

$$\varepsilon_x \neq 0, \quad \varepsilon_y \neq 0, \quad \varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \tag{4.34}$$

$$\sigma_x = (\lambda + 2G)\,\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y, \quad \sigma_y = (\lambda + G)\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_x, \quad \sigma_z = \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \tag{4.35}$$

Αξονοσυμμετρική θεώρηση

Το δισδιάστατο στοιχείο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.5.1 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αξονοσυμμετρικών προβλημάτων. Η διαφορά είναι ότι η ανάλυση αντί να γίνεται στο επίπεδο x-y, γίνεται στο επίπεδο r-z, με z τον

άξονα συμμετρίας του προβλήματος και r την ακτινική απόσταση από αυτόν. Τα αξονοσυμμετρικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι έχουν σταθερή τιμή της μεταβλητής που διερευνείται προς όλες τις κατευθύνσεις στο επίπεδο r-z. επομένως η εξίσωση για την κατανομή της μετατόπισης στο στοιχείο γράφεται ως:

$$U = a_1 + a_2 r + a_3 z \tag{4.36}$$

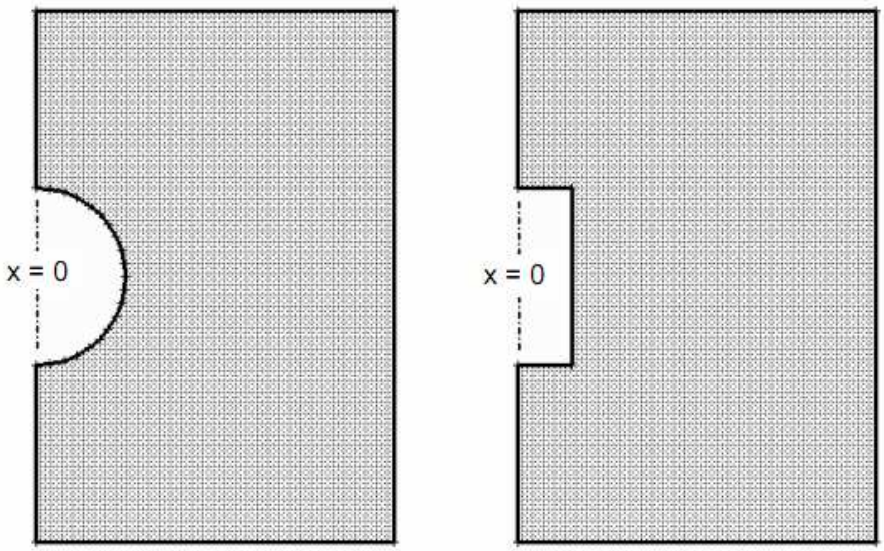
Υπολογίζοντας τις σταθερές *α* με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.5.1 προκύπτει η εξίσωση :

$$u = N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k \tag{4.37}$$

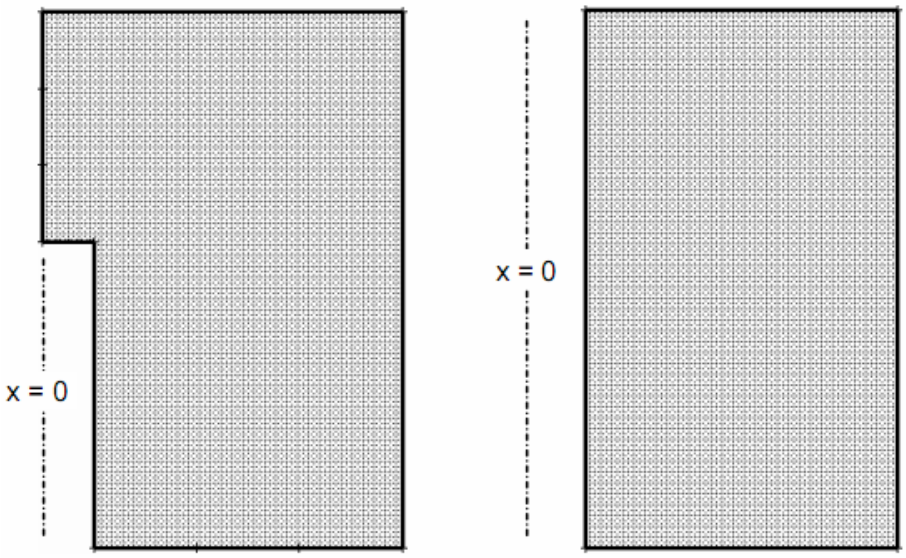
Όπου η γενική μορφή της συνάρτησης μορφής είναι :

$$N_x = (a_x + b_x r + c_x z)/2A \qquad x = i, j, k \tag{4.38}$$

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αξονοσυμμετρικού προβλήματος είναι αυτό της μελέτης της κατανομής των τάσεων και μετατοπίσεων κατά μήκος μιας σήραγγας κυκλικής διατομής. Σε αυτήν την περίπτωση ο επιμήκης άξονας, είναι και ο άξονας συμμετρίας του προβλήματος ενώ η ανάλυση αυτού χρήζει μόνο την μοντελοποίηση ενός τεταρτημορίου του προβλήματος, λόγω αξονικής συμμετρίας. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται μερικά συνήθη παραδείγματα αξονικής συμμετρίας.



α) Σφαίρα β) Κύλινδρος



γ) Ανοιχτός κύλινδρος δ) Άπειρος κύλινδρος

Σχήμα 4.8: Θεώρηση αξονικής συμμετρίας ως προς τον άξονα x για διάφορες μορφές υπογείων ανοιγμάτων.

4.7 Επίλυση σε επίπεδο στοιχείου

Εφαρμόζοντας την αρχή της υπέρθεσης, το μοντέλο ενός σώματος κάτω από ορισμένες συνθήκες φόρτισης, επιλύεται για να αποδώσει τις κομβικές μετατοπίσεις και ακολούθως τις παραμορφώσεις και τις τάσεις (Fagan, 1992). Αυτό γίνεται μετατρέποντας τη διαφορική εξίσωση που διέπει το πρόβλημα σε ένα σύστημα εξισώσεων σε επίπεδο πεπερασμένου στοιχείου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται βασίζονται κυρίως σε μία από τις δύο επικρατέστερες θεωρίες :

- ✓ Η θεωρία των μεταβολών (theory of variations ή variational formulation) με ποιο διαδεδομένη την μέθοδο Rayleigh-Ritz.
- ✓ Η θεωρία των σταθμισμένων υπολοίπων (theory of weighted residuals) με ποιο διαδεδομένη την μέθοδο Galerkin.

4.7.1 Η θεωρία των μεταβολών

Για τη διαμόρφωση του μητρώου ακαμψίας ενός στοιχείου με τη μέθοδο αυτή στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της δυναμικής ενέργειας του συστήματος. Σε ένα συντηρητικό σύστημα μια μικρή μεταβολή στην μετατόπιση οδηγεί σε μια

ανακατανομή του συστήματος τέτοια ώστε να ικανοποιούνται οι εξισώσεις ισορροπίας και να σταθεροποιείται η δυναμική του ενέργεια (Cook et al., 1989).

Η δυναμική ενέργεια ενός συστήματος ισούται με την εσωτερική ενέργεια (που ταυτίζεται με την ενέργεια παραμόρφωσης) μείον το έργο των εξωτερικών δυνάμεων:

$$\Pi = \Lambda - W \tag{4.39}$$

Για ένα στοιχείο όγκου *dv* η ενέργεια παραμόρφωσης ισούται:

$$d\Lambda = \frac{1}{2}\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\} - \frac{1}{2}\{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\} \tag{4.40}$$

Επομένως η ολική ενέργεια παραμόρφωσης ενός πεπερασμένου όγκου προκύπτει ολοκληρώνοντας την εξίσωση (4.40):

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2}\left(\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\} - \{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}}\{\sigma\}\right) dV \tag{4.41}$$

Για μία δισδιάστατη ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης:

$$\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\} \tag{4.42}$$

$$\{\sigma\}^{\mathrm{T}} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\} \tag{4.43}$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon_0\} \tag{4.44}$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{4.45}$$

Αντικαθιστώντας την (4.44) στην (4.41) προκύπτει:

$$\Lambda = \frac{1}{2}\int_V \left(\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}[D]\{\varepsilon\} - 2\{\varepsilon\}^{\mathrm{T}}[D]\{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon_0\}^{\mathrm{T}}[D]\{\varepsilon_0\}\right) dV \tag{4.46}$$

Για ένα τρισδιάστατο πρόβλημα οι σχέσεις παραμόρφωσης-μετατόπισης είναι της μορφής:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{4.47}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \qquad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \qquad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \tag{4.48}$$

Εάν εκφραστούν οι παραπάνω σχέσεις με μορφή διανυσμάτων προκύπτει μια σχέση της μορφής:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \tag{4.49}$$

Όπου $[B]$ είναι πίνακας με στοιχεία που προκύπτουν από την κατάλληλη διαφόριση των συναρτήσεων μορφής και $\{U\}$ το διάνυσμα των μετατοπίσεων. Επομένως σύμφωνα με την σχέση (4.49) η εξίσωση (4.46) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2}\int_{V^{(e)}} \left(\{U^{(e)}\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}][B^{(e)}]\{U^{(e)}\} - 2\{U^{(e)}\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}]\{\varepsilon_0{}^{(e)}\} + \right.$$
$$\left. + \{\varepsilon_0{}^{(e)}\}^T [D^{(e)}]\{\varepsilon_0{}^{(e)}\} \right) dV \tag{4.50}$$

Επομένως η ενέργεια παραμόρφωσης ολόκληρου του σώματος μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας τις επιμέρους ενέργειες όλων των στοιχείων.

Το συνολικό έργο που εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο αποτελείται από τρία σκέλη:
το έργο των δυνάμεων αδράνειας του σώματος :

$$W_B^e = \int_{V^e} \{U^{(e)}\}^T [N^{(e)}]^T \{F^{(e)}\} dV \tag{4.51}$$

όπου $\{F^{(e)}\}$ το διάνυσμα των δυνάμεων αδράνειας του σώματος.

Το έργο των κατανεμημένων δυνάμεων σε μία επιφάνεια *S* του στοιχείου:

$$W_P^{(e)} = \int_{S^{(e)}} \{U^{(e)}\}^T [N^{(e)}]^T \{P^{(e)}\} dS \tag{4.52}$$

όπου $\{P^{(e)}\}$ το διάνυσμα των φορτίων.

το έργο των σημειακών φορτίων στους κόμβους:

$$W_C^{(e)} = \{U^{(e)}\}^T \{T^{(e)}\} \tag{4.53}$$

όπου $\{T^{(e)}\}$ το διάνυσμα των σημειακών φορτίων.

Εάν από την ενέργεια παραμόρφωσης αφαιρεθούν τα έργα που εφαρμόζονται στο σώμα, δηλαδή από την εξίσωση (4.50) αφαιρεθούν οι εξισώσεις (4.51)-(4.53) τότε προκύπτει η δυναμική ενέργεια του στοιχείου:

$$\Pi^{(e)} = \Lambda^{(e)} - W_B^{(e)} - W_P^{(e)} - W_C^{(e)} \tag{4.54}$$

Για να βρίσκεται το σώμα σε ισορροπία πρέπει σύμφωνα με την αρχή ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας, η ενέργεια αυτή να ισούται με το μηδέν σε κάθε κόμβο και επομένως σε όλο το σώμα:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U_s\}} = 0 \tag{4.55}$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.50)-(4.53) στην σχέση (4.54) και διαφορίζοντας προκύπτει :

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \Pi}{\partial \{U_s\}} = \sum_{e=1}^{E}\left[\int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}][B^{(e)}]dV\right]\{U_S\} \\
&-\sum_{e=1}^{E}\left[\int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}]\{\varepsilon_0{}^{(e)}\}dV + \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T \{F^{(e)}\}dV\right. \\
&\left.+\int_{S^{(e)}} [N^{(e)}]^T \{P^{(e)}\}dS\right] - \{T^{(e)}\} = 0
\end{aligned} \tag{4.56}$$

Η εξίσωση (4.56) είναι της μορφής

$$\{F\} = [K]\{U_S\} \tag{4.57}$$

Όπου:

$$[K] = \sum_{e=1}^{E}\left[\int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}][B^{(e)}]dV\right] = \sum_{e=1}^{E}[k^{(e)}] \tag{4.58}$$

το μητρώο ακαμψίας του σώματος.

Η εσωτερική ενέργεια (ή ενέργεια παραμόρφωσης) γράφεται και ως:

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2}\{\sigma\}\{\varepsilon\}dV = \int_V \frac{1}{2}\langle\varepsilon\rangle^T [D]\{\varepsilon\}dV = \frac{h}{2}\iint [B]^T \{U\}^T [D][B]\{U\}dxdy =$$
$$\frac{h}{2}\{U\}^T \iint [B]^T [D][B]\, dxdy\, \{U\} = \frac{1}{2}\{U\}^T [K]\{U\} \tag{4.59}$$

Όπου:

$$[K] = h\iint_A [B]^T [D][B]dxdy \tag{4.60}$$

Και h είναι το πάχος του στοιχείου, A η επιφάνεια του στοιχείου. Σημειώνεται ότι σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης το πάχος h ισούται με τη μονάδα.

4.7.2 Η θεωρία των σταθμισμένων υπολοίπων

Έστω μια διαφορική εξίσωση της μορφής:

$$\frac{d^2\varphi}{dx} - F = 0 \tag{4.61}$$

Σύμφωνα με την θεωρία των σταθμισμένων υπολοίπων, η λύση προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας μια προσεγγιστική τιμή της φ που δεν μηδενίζει την κυρίαρχη διαφορική εξίσωση αλλά αφήνει ένα υπόλοιπο R.

Για παράδειγμα, έστω μια προσέγγιση $\varphi(x)$, όπου:

$$\varphi(x) = \sum N_i \varphi_i \qquad i = 1,2,\ldots,n \tag{4.62}$$

με, φ_i σταθερές και N_i ανεξάρτητες συναρτήσεις του x, η εξίσωση (4.61), γράφεται ως:

$$\frac{d^2\varphi}{dx} - F = R \neq 0 \tag{4.63}$$

Το υπόλοιπο R πολλαπλασιάζεται με μια συνάρτηση βάρους W και το ολοκλήρωμα του γινομένου αναμένεται να είναι μηδέν στο πεδίο r, όπου ο αριθμός των συναρτήσεων W είναι ίσος με τον αριθμό των συντελεστών N της υποτιθέμενης λύσης.

$$\int_r W_i R\, dx = 0 \tag{4.64}$$

Είναι δυνατόν να επιλεχθούν διάφορες συναρτήσεις-βάρη, όμως σύμφωνα με την μέθοδο Galerkin που χρησιμοποιείται συχνότερα, οι συναρτήσεις αυτές ταυτίζονται

με τις συναρτήσεις-συντελεστές τις προσεγγιστικής εξίσωσης. Έτσι η (4.64) γράφεται ως:

$$\int_r N_i \, R \, dx = 0 \tag{4.65}$$

Για ένα σύστημα πεπερασμένων στοιχείων με *n* κόμβους ο αριθμός των συναρτήσεων βαρών ισούται με τον αριθμό των κόμβων. Έτσι το άθροισμα των ολοκληρωμάτων για κάθε στοιχείο δίνει τη λύση για ολόκληρο το σύστημα (Fagan,1992):

$$\sum_{e=1}^{E} \int_{V^{(e)}} \left[N^{(e)}\right]^T R^{(e)} dV = \sum_{e=1}^{E} \left\{G^{(e)}\right\} = 0 \tag{4.66}$$

4.8 Μετασχηματισμός συντεταγμένων

Για την εξαγωγή του τελικού μητρώου ακαμψίας του σώματος, γίνεται υπέρθεση των επιμέρους πινάκων κάθε στοιχείου. Οι πίνακες αυτοί είναι ορισμένοι σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων για κάθε στοιχείο, έτσι ώστε οι συναρτήσεις μορφής να εξαρτώνται μόνο από την σχετική γεωμετρία του στοιχείου και όχι από την θέση του στο χώρο. Με αυτόν τον τρόπο απλοποιείται η διαδικασία υπολογισμού του μητρώου για κάθε στοιχείο. Τελικά, για να γίνει η υπέρθεση σε καθολικό επίπεδο είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των πινάκων από τοπικό σε ολικό σύστημα συντεταγμένων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην εξίσωση

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \tag{4.67}$$

ο πίνακας $[B]$ περιέχει τα διαφορικά των συναρτήσεων μορφής N_i που περιγράφουν την γεωμετρία του στοιχείου. Για ένα τριγωνικό τρικομβικό στοιχείο ο πίνακας είναι (Desai & Christian, 1977):

$$[B] = \left[\, [B_1] \quad [B_2] \quad [B_3] \,\right] \tag{4.68}$$

Και γενικά $[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$ (4.69)

Οι ολικές με τις τοπικές συντεταγμένες συνδέονται μέσω της Ιακωβιανής J ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{Bmatrix} \tag{4.70}$$

Όπου:

$$[J]^{-1} = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial t} & -\frac{\partial y}{\partial s} \\ -\frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial x}{\partial s} \end{bmatrix} \tag{4.71}$$

και $|J|$ η ορίζουσα του πίνακα $[J]$ με:

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_i \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} \frac{\partial N_j}{\partial t} - \frac{\partial N_i}{\partial t} \frac{\partial N_j}{\partial s} \right) y_j \tag{4.72}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω το μητρώο ακαμψίας κάθε στοιχείου σε τοπικές συντεταγμένες γράφεται ως:

$$\left[K^{(e)}\right] = h \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} [B]^T [D][B] |J| \, ds dt \tag{4.73}$$

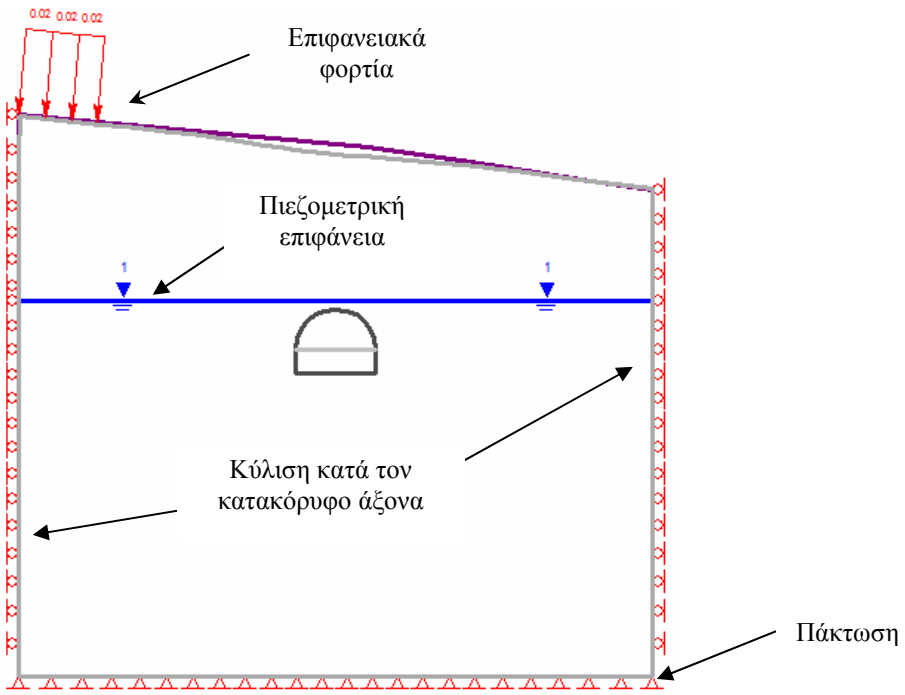
Από την επίλυση των εξισώσεων σε επίπεδο στοιχείου προκύπτει μια σχέση της μορφής:

$$[K^{(e)}] \{U^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} \tag{4.74}$$

Με υπέρθεση των επιμέρους εξισώσεων γίνεται η επίλυση του τελικού γραμμικού συστήματος.

4.9 Συνοριακές συνθήκες

Για να είναι δυνατή η επίλυση του τελικού συστήματος είναι απαραίτητο να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες (σχήμα 4.9). Πρακτικά η σημασία των συνοριακών συνθηκών σε ένα μοντέλο είναι ότι ένα σώμα κάτω από ορισμένο πεδίο τάσεων θα υπόκειται σε συνεχή κίνηση εκτός εάν εφαρμοστούν σε αυτό δυνάμεις που περιορίζουν την κίνηση αυτή προς κάποιες κατευθύνσεις και επιφέρουν στο σώμα ισορροπία (Fagan, 1992).



Σχήμα 4.9: Συνοριακές συνθήκες για την μελέτη εντατικής κατάστασης γύρω από σήραγγα.

Μια συνοριακή συνθήκη μπορεί να είναι η τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής (ή της παραγώγου αυτής), στο όριο μιας περιοχής ενδιαφέροντος. Από τη στιγμή που η βασική διαφορική εξίσωση του προβλήματος μπορεί να ικανοποιηθεί από ένα πλήθος λύσεων θα χρειαστούν κάποιοι επιπλέον περιορισμοί ώστε να επιτευχθεί η μοναδικότητα της λύσης. Οι περιορισμοί αυτοί αποτελούν τις συνοριακές συνθήκες

του προβλήματος. Για ένα πρόβλημα που αποτελείται από εξισώσεις ν-οστής τάξης, απαιτούνται ν συνοριακές συνθήκες.

Οι συνοριακές συνθήκες συχνά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

Γεωμετρικές συνοριακές συνθήκες ή συνθήκες Dirichlet. Χαρακτηρίζονται από τον προσδιορισμό της ζητούμενης παραμέτρου (πχ. μετατόπισης) και είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} u_x &= u_o \\ u_y &= v_o \end{aligned} \tag{4.75}$$

Φυσικές συνοριακές συνθήκες ή συνθήκες Neumann. Χαρακτηρίζονται από τον προσδιορισμό της παραγώγου της ζητούμενης παραμέτρου και είναι της μορφής:

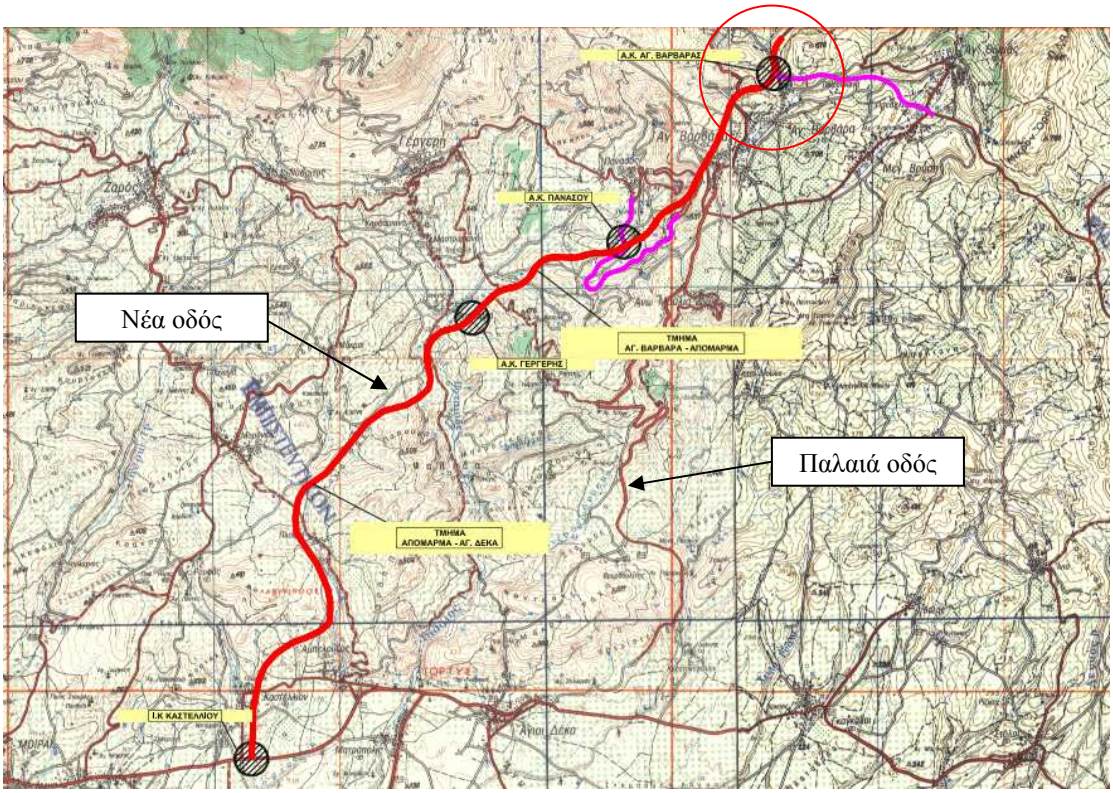
$$\begin{aligned} f_x &= f_o \\ f_y &= w_o \end{aligned} \tag{4.76}$$

Μικτές συνοριακές συνθήκες οι οποίες χαρακτηρίζονται από τον προσδιορισμό και των δύο παραπάνω μεγεθών.

5 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΑΓΙΑΣ ΒΑΡΒΑΡΑΣ

5.1 Γενικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης

Η κατασκευή της σήραγγας στην Αγία Βαρβάρα, Ηρακλείου, αποτελεί κομμάτι της ανάπλασης του Β.Ο.Α.Κ. στον κάθετο οδικό άξονα «Ηράκλειο-Άγιοι Δέκα (Καστέλλι)-Βιάννος-Ιεράπετρα». Συγκεκριμένα, αποτελεί κομμάτι της παράκαμψης του οδικού τμήματος Άγιοι Δέκα-Αγία Βαρβάρα, με κατασκευή νέας οδού από Βόρεια μέσω του Απομαρμά, Ρούβα (σχήμα 5.1). Η θέση της σήραγγας είναι στο υποτμήμα Απομαρμά-Αγία Βαρβάρα, από την Χ.Θ.24+311 έως την Χ.Θ.24+810, έχει διεύθυνση ΝΝΔ-ΒΒΑ και συνολικό μήκος L=499m. Το υπόγειο τμήμα της σήραγγας έχει μήκος 488m, από την Χ.Θ. 24+315 έως την Χ.Θ. 24+803, ενώ στην είσοδο και έξοδο της σήραγγας προβλέπεται η κατασκευή τεχνικών τύπου Cut&Cover μήκους 11m, από την Χ.Θ.24+311 έως την Χ.Θ 24+315 και από την Χ.Θ. 24+803 έως την Χ.Θ.24+810 αντίστοιχα.



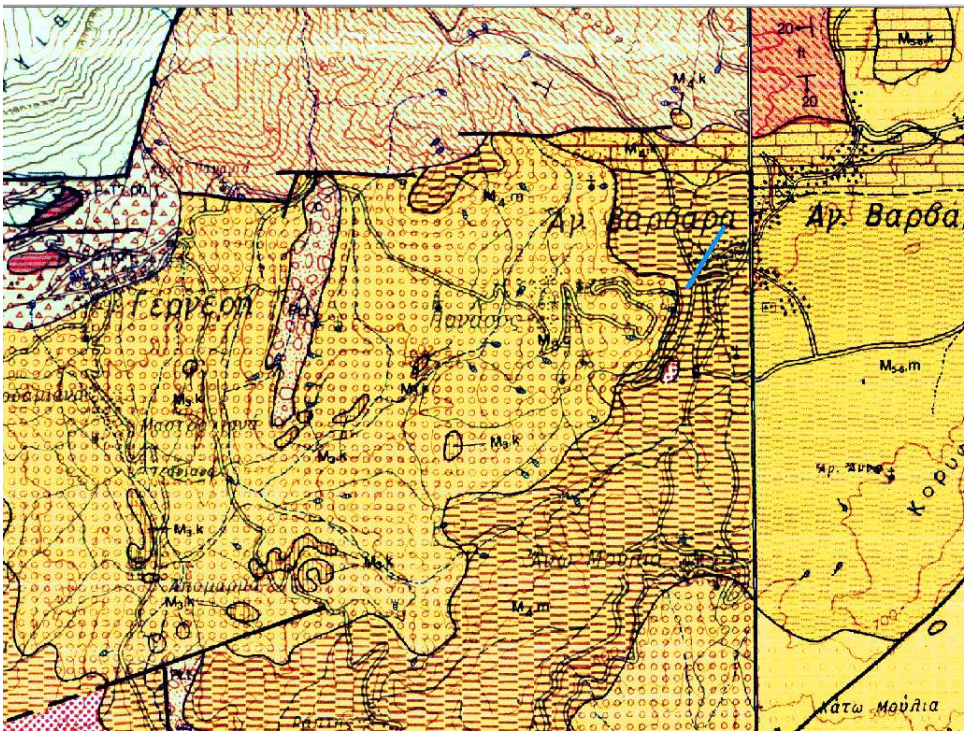
Σχήμα 5.1: Λεπτομέρεια κάθετου οδικού άξονα (τμήμα του Β.Ο.Α.Κ.)

5.2 Μορφολογικά στοιχεία

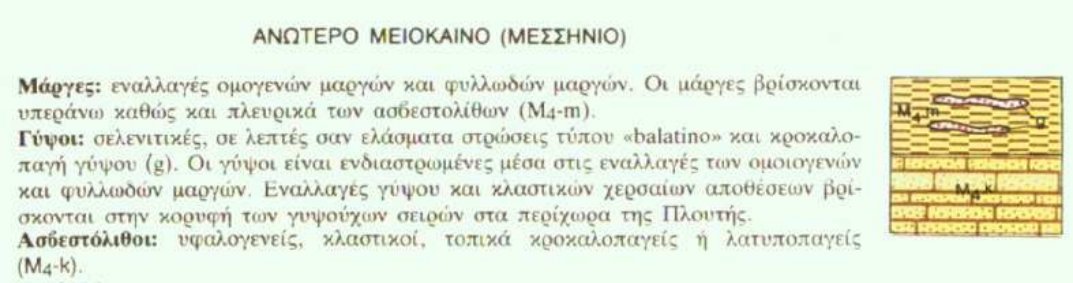
Η περιοχή διέλευσης της σήραγγας χαρακτηρίζεται από λοφώδες ανάγλυφο, με υψομετρικό εύρος από +560-+630m, ενώ το υψόμετρο της ερυθράς κυμαίνεται από +579-+603m. Γενικά επικρατούν ήπιες κλίσεις και μόνο τοπικά σε κάποια σημεία φτάνουν τις 55°. Στα βορειοδυτικά της σήραγγας διέρχεται ρέμα με το όνομα Ποταμίδες. Γενικά το υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται ως πολυσχιδές, λόγω της αργιλικής σύστασης των ανώτερων σχηματισμών του νεογενούς που χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι (Ντούλης, 2008).

5.3 Γεωλογικά στοιχεία

Το έργο αναπτύσσεται σε νεογενή μεταλπικά ιζήματα (αν. μειόκαινο), στα οποία επικάθονται ασύμφωνα, κατά θέσεις πρόσφατα ιζήματα του τεταρτογενούς. Πιο συγκεκριμένα οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή είναι: α) αν. μειόκαινο: μάργες και μαργαϊκά λατυποπαγή με τεμάχη μαργών και μαργαϊκών ασβεστόλιθων και, β) τεταρτογενές: ελουβιακός μανδύας πάχους 0.5-1m, αργιλικά και πλευρικά κορήματα. Παρακάτω (σχήμα 5.2) παρουσιάζεται λεπτομέρεια από γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, κλίμακας 1:50000, στην οποία φαίνεται (με μπλε γραμμή), η διέλευση της σήραγγας και τμήμα από το υπόμνημα του χάρτη, στο οποίο γίνεται περιγραφή του γεωλογικού σχηματισμού που συναντάται στην περιοχή ενδιαφέροντος (σχήμα. 5.3).



Σχήμα 5.2: Λεπτομέρεια γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ (κλίμακα 1:50000).



ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ (ΜΕΣΣΗΝΙΟ)

Μάργες: εναλλαγές ομογενών μαργών και φυλλωδών μαργών. Οι μάργες βρίσκονται υπεράνω καθώς και πλευρικά των ασβεστολίθων (M_4-m).
Γύψοι: σελενιτικές, σε λεπτές σαν ελάσματα στρώσεις τύπου «balatino» και κροκαλοπαγή γύψου (g). Οι γύψοι είναι ενδιαστρωμένες μέσα στις εναλλαγές των ομοιογενών και φυλλωδών μαργών. Εναλλαγές γύψου και κλαστικών χερσαίων αποθέσεων βρίσκονται στην κορυφή των γυψούχων σειρών στα περίχωρα της Πλουτής.
Ασβεστόλιθοι: υφαλογενείς, κλαστικοί, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς (M_4-k).

Σχήμα 5.3: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη του σχήματος 2.2.

5.4 Τεκτονικά στοιχεία

Στην ευρύτερη περιοχή αναπτύσσονται κυρίως ρήγματα με διεύθυνση Β-Ν και Α-Δ καθώς και κάποια νεότερά τους με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και ΒΔ-ΝΑ. Η επίδραση των ρηγμάτων είχε σαν αποτέλεσμα τον κατακερματισμό των πετρωμάτων και τη διαμόρφωση της κατεύθυνσης του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής. Ωστόσο στην στενή περιοχή ενδιαφέροντος δεν εντοπίστηκε κάποιο ρήγμα (Ντούλης, 2008).

5.5 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Οι σχηματισμοί που απαντώνται, χαρακτηρίζονται από μέση έως χαμηλή διαπερατότητα.

Στην περιοχή αναπτύσσεται επικρεμμάμενος υδροφόρος ορίζοντας σε βάθος περίπου 10m και τοποθετείται στο ανώτερο τμήμα των μαργαϊκών σχηματισμών. Σε όλο σχεδόν το μήκος της σήραγγας η στάθμη του υδροφόρου αναμένεται στο επίπεδο της οροφής της σήραγγας έως και 25m υψηλότερα. Λόγω της σημαντικής διαφοράς στα απόλυτα υψόμετρα της στάθμης με βάση τα δεδομένα των ερευνητικών γεωτρήσεων, εκτιμάται ότι δεν αφορούν στην ίδια πιεζομετρική επιφάνεια, ενώ η κύρια υδροφορία συναντάται σε μεγαλύτερα βάθη (περίπου 35m) και ο ορίζοντας χαρακτηρίζεται ως «μερικώς υπό πίεση». Επίσης δεν αποκλείεται να αναπτύσσονται τοπικοί απομονωμένοι υδροφόροι ορίζοντες σε πιο διαπερατές φάσεις των μαργαϊκών σχηματισμών. Τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την παρουσία νερού, προβλέπεται να αντιμετωπιστούν με την διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών, ενώ για την διευκόλυνση της απορροής των υδάτων, η διάνοιξη προτείνεται από την έξοδο προς την είσοδο, δηλαδή ακολούθώντας την κατωφέρεια του εδάφους.

5.6 Μέθοδος διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης

Η διάνοιξη του υπόγειου τμήματος της σήραγγας έχει συνολικό μήκος 488m, ενώ στα στόμια εισόδου και εξόδου θα πραγματοποιηθεί κατασκευή τύπου Cut&Cover συνολικού μήκους 11m. Η ωφέλιμη ακτίνα της σήραγγας είναι 5,5m ενώ το μέγιστο υπερκείμενο ύψος γαιών είναι περίπου 43m.

Στην είσοδο και στο πρώτο μισό τμήμα της, η σήραγγα συναντά το σχηματισμό του μαργαϊκού λατυποπαγούς, ενώ στο δεύτερο μισό τμήμα αλλά και στην έξοδο συναντά το σχηματισμό της μάργας. Η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε με συμβατικά μηχανικά μέσα (υδραυλικό σφυρί ή/και εκσκαπτικός κουβάς) και με εφαρμογή της μεθόδου NATM.

Η NATM (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Σηραγγοποιίας), εφαρμόστηκε αρχικά την δεκαετία του 1960 σε σήραγγες των Αυστριακών Άλπεων. Δεν αποτελεί ουσιαστικά μια συγκεκριμένη μέθοδο αλλά ένα σύνολο τεχνικών που

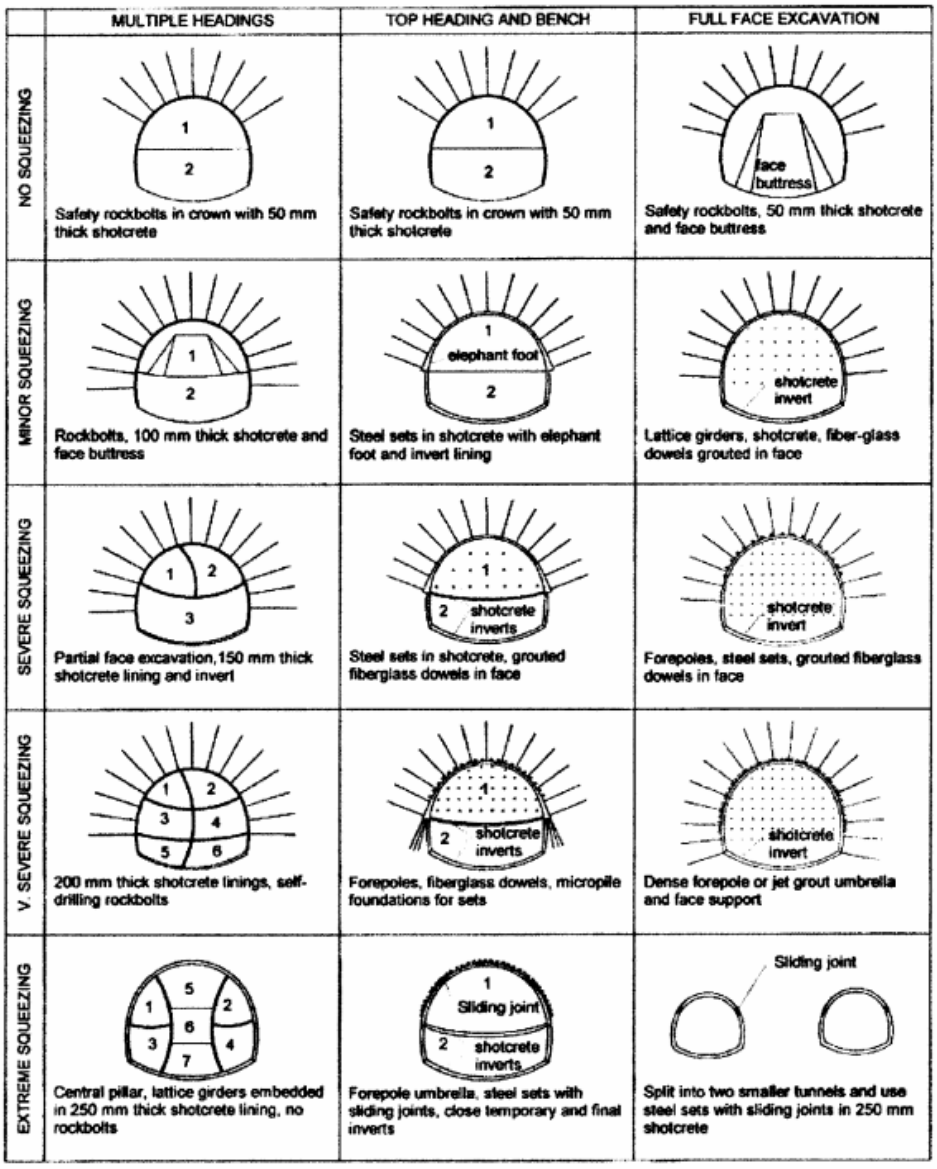
προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες και εναλλάσσονται με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα πχ. ασπίδα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου (Καββαδάς, 2000).

Η προσωρινή υποστήριξη που αποτελεί φέρον στοιχείο της βραχομάζας, συνήθως ακολουθείται μεταγενέστερα από την τελική επένδυση, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί η ίδια την μόνιμη επένδυση της σήραγγας αναλαμβάνοντας εξολοκλήρου τα φορτία.

Η φιλοσοφία της μεθόδου βασίζεται στην ευελιξία της διάνοιξης αλλά και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, κατά την εκσκαφή της σήραγγας. Βασικό χαρακτηριστικό της είναι η επίτευξη της σταθεροποίησης του μετώπου μέσω της ελεγχόμενης εκτόνωσης των τάσεων. Μέσω της εκτόνωσης των τάσεων επιτυγχάνεται η ενεργοποίηση της θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας και η δημιουργία φαινόμενου εγκιβωτισμού (confinement), γύρω από το άνοιγμα. Αυτό γίνεται με την σταδιακή διάνοιξη σε μικρά σχετικά βήματα εκσκαφής, και την εφαρμογή, σχετικά εύκαμπτων μέτρων υποστήριξης, σε κατάλληλο χρόνο εφαρμογής.

Είναι λογικό να σκεφτεί κανείς ότι τα μεγάλα ανοίγματα είναι λιγότερο ευσταθή από τα μικρότερα. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις η διάνοιξη του μετώπου δεν γίνεται σε μία φάση (ολομέτωπη διάνοιξη), αλλά τμηματικά. Αυτό είναι και ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της NATM για την σηραγγοποιία. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι τα μικρότερα τμήματα του μετώπου απαιτούν μικρότερη υποστήριξη και η συνέχεια της διάνοιξης με αυτόν τον τρόπο δημιουργεί ένα ισχυρότερο «κέλυφος» σκυροδέματος στον δακτύλιο της διατομής (Hoek, 2001). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η σημαντική συνολική σύγκλιση του μετώπου που θα προέκυπτε τελικά από την εκσκαφή σε μία μόνο φάση.

Στο σχήμα 5.4 προτείνονται διάφορες κατηγορίες τμηματικής διάνοιξης και υποστήριξης ανάλογα με τις περιβάλλουσες συνθήκες.



Σχήμα 5.4: Μέθοδοι διάνοιξης και στάδια κατασκευής προσωρινής υποστήριξης (Hoek, 2001).

Σύμφωνα με την αρχική μελέτη της σήραγγας που βασίστηκε στην γεωτεχνική αξιολόγηση, την διακύμανση του δείκτη GSI και την κατηγοριοποίηση της βραχομάζας που θα συναντήσει το έργο, σε ομάδες με παρόμοια γεωτεχνική συμπεριφορά, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές τυπικές διατομές και οι αντίστοιχες μέθοδοι υποστήριξης. Λόγω της εφαρμογής της NATM που χαρακτηρίζεται από ευελιξία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης κατά την εκσκαφή, η μελέτη προέβλεπε την αναπροσαρμογή των μέτρων υποστήριξης εάν αυτό κριθεί σκόπιμο ανάλογα με τις συνθήκες που επρόκειτο να συναντηθούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Έτσι, λόγω κυρίως των δυσμενών καιρικών συνθηκών που

αντιμετωπίστηκαν κατά το έτος 2011 (έντονες βροχοπτώσεις), που είχαν σαν αποτέλεσμα την επιβάρυνση του υδροφόρου ορίζοντα με σοβαρές επιπτώσεις στην ευστάθεια του έργου, αποφασίστηκε η εφαρμογή της βαρύτερης κατηγορίας υποστήριξης, σε όλο το σώμα του υπόγειου τμήματος.

Η διάνοιξη έγινε σε δύο φάσεις με εφαρμογή ανάστροφου τόξου στο δάπεδο της σήραγγας (Top heading-Bench+invert). Προηγήθηκε η διάνοιξη της Α' φάσης, ενώ η Β' φάση ακολούθησε μετά την ολοκλήρωση της πρώτης.

5.7 Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού

Οι εργαστηριακές δοκιμές και γενικά όλες οι αναλύσεις που έγιναν για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων, έγιναν σε αστράγγιστες συνθήκες, δηλαδή υπό καθεστώς ενεργών τάσεων. Για την διερεύνηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας, κατά την διάνοιξη της σήραγγας, θεωρήθηκε ότι αυτή συμπεριφέρεται ως ένα ελαστικό-τέλεια πλαστικό υλικό, το οποίο υπακούει στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά-ελαστικά μέχρι το σημείο όπου η αντοχή του υπερβεί το όριο διαρροής με αποτέλεσμα να εμφανιστούν πλαστικές παραμορφώσεις.

Η πλαστική περιοχή που δημιουργείται, αδυνατώντας να αναλάβει επιπλέον φορτία, οδηγεί σε αναδιανομή των τάσεων σε σημεία της ελαστικής περιοχής, με αποτέλεσμα την διεύρυνση της πλαστικής ζώνης, μέχρι να επέλθει ισορροπία. Θεωρώντας ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως τέλεια πλαστικό μετά το όριο διαρροής , οι παραμένουσες τιμές των διατμητικών παραμέτρων c', φ' παρέμειναν σταθερές.

Οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών προέκυψαν από συνδυασμό δεδομένων από γεωτρήσεις, από εργαστηριακές δοκιμές και από βιβλιογραφικές προσεγγίσεις. Οι παράμετροι για τις οποίες υπήρχαν ελλιπή εργαστηριακά δεδομένα, ή αυτά κρίθηκαν αναξιόπιστα έγινε εφαρμογή του γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown, με χρήση του προγράμματος Roclab v.1 και μετατροπή σύμφωνα με το γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb, για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση με την εμπειρική μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης και για τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Σύμφωνα με

την πιο σύγχρονη εκδοχή στο γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (Hoek et al., 2002):

$$\sigma_1^{'} = \sigma_3^{'} + \sigma_{ci}\left[m_b \frac{\sigma_3^{'}}{\sigma_{ci}} + s\right]^a \qquad 5.1$$

Όπου:

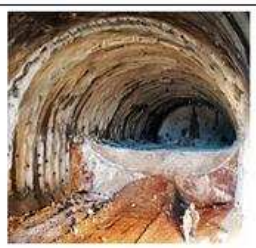
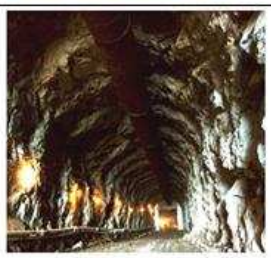
$\sigma_1^{'}$, $\sigma_3^{'}$ είναι οι κύριες ενεργές τάσεις και σ_{ci} η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου.

Η τελευταία τροποποίηση του κριτηρίου αφορά στην αντικατάσταση της σταθεράς m_i με την σταθερά m_b. Η παράμετρος m_b προκύπτει από την σταθερά m_i (σταθερά που αφορά την ποιότητα της βραχομάζας), σύμφωνα με την σχέση:

$$m_b = m_i\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \qquad 5.2$$

με *D*, δείκτης διαταραχής της βραχομάζας ανάλογα με τον τρόπο διάνοιξης. Στην περίπτωση που μελετάται ο δείκτης διαταραχής λήφθηκε ίσος με 0, σύμφωνα με τον πίνακα (5.1):

Πίνακας 5.1: Διακύμανση του δείκτη διαταραχής βραχομάζας για διάφορες περιπτώσεις (Hoek et al. 2002, τροποποιημένο)

Τύπος βραχομάζας	Περιγραφή μεθόδου διάνοιξης	Προτεινόμενη τιμή D
	Ελεγχόμενη ανατίναξη ή εκσκαφή με TBM που επιφέρει μηδαμινή διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας	D=0
	Μηχανική εκσκαφή σε πολύ φτωχής ποιότητας βραχομάζα, δεν προκαλεί διαταραχεί εάν εφαρμοστεί ανάστροφο τόξο στο δάπεδο, ενώ προκαλεί σημαντική διαταραχή στην αντίθετη περίπτωση λόγω ανασηκώματος του δαπέδου.	D=0 D=0.5 (χωρίς εφαρμογή invert)
	Πολύ χαμηλής ποιότητας ανατίναξη σε σκληρά πετρώματα προκαλεί σημαντική διαταραχή που μπορεί να επεκταθεί έως και 2-3m στην περιβάλλοθσα βραχομάζα.	D=0.8
	Μικρής κλίμακας ανατίναξη σε πρανή μπορεί να προκαλέσει από μέτρια έως σημαντική διαταραχή,λόγω εκτόνωσης των πλευρικών τάσεων.	D=0.7 (καλή ανατίναξη), D=1 (κακή ανατίναξη)
	Σημαντική διαταραχή σε εξορύξεις υπαίθριων λατομείων με μεγάληςκλίμακας ανατινάξεις, μέτρια διαταραχή σε εξορύξεις με μηχανικά μέσα (καδοφόρο εκσκαφέα).	D=1 (παραγωγική ανατίναξη), D=0.7 (μηχανική εξόρυξη)

Οι σταθερές *s*, *a* προκύπτουν από τις σχέσεις 5.3 και 5.4, αντίστοιχα:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \qquad 5.3$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \qquad 5.4$$

Ο δείκτης ποιότητας βραχομάζας λήφθηκε συντηρητικά GSI=30, για τον σχηματισμό της μάργας (ms), ενώ θεωρήθηκε εκτός ορίων ταξινόμησης για τον σχηματισμό του λατυποπαγούς (mb), και του αργιλικού μανδύα (sm). Σύμφωνα με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1' = \frac{2c' \cos\phi'}{1-\sin\phi'} + \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\sigma_3' \qquad 5.5$$

Από την μετατροπή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown στο γενικευμένο Mohr-Coulomb, προέκυψαν οι αντίστοιχες σχέσεις για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων c' *(συνοχή)*, ϕ' *(γωνία εσωτερικής τριβής)*, σ'_{cm} *(αντοχή βραχομάζας)*:

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s + (1-a)\,m_b\,\sigma'_{3n}\right](s + m_b\,\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b\,(s+m_b\,\sigma'_{3n})^{a-1})/(1+a)(2+a)}} \qquad 5.6$$

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b\,(s+m_b\,\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b\,(s+m_b\,\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \qquad 5.7$$

$$\sigma_{cm}' = \sigma_{ci}\frac{(m_b + 4s - a\,(m_b - 8s))(m_b/4+s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \qquad 5.8$$

Από τον συνδυασμό των εργαστηριακών και βιβλιογραφικών δεδομένων αλλά και από τις εμπειρικές σχέσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού για κάθε σχηματισμό που συναντάται στην περιοχή του υπόγειου έργου.

Πίνακας 5.2: Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού

ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΕΡΓΟΥ	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	φ (^{o})	c (kPa)	σ_{cm} (MPa)	E(MPa)	γ (kN/m^3)	v
ΤΜΗΜΑ Χ.Θ.24+315 ΕΩΣ 24+590	Αργιλικά Κορήματα (sm)*	28	10	-	6	19	0.3
	Μαργαϊκό λατυποπαγές (mb)	29	20	0.05	45	20	0.35
ΤΜΗΜΑ Χ.Θ.24+590 ΕΩΣ 24+803	Μάργα (ms)	34	60	0.46	150	17.2	0.25

*Για τον σχηματισμό αυτόν, δεδομένου του μικρού πάχους που έχει σαν αποτέλεσμα την πολύ μικρή επιροοή του σχηματισμου στις αναλύσεις, δεν υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα και έτσι οι παράμετροι σχεδιασμού, λαμβάνονται με βάση τις προτεινόμενες τιμές από την τεχνική μελέτη της σήραγγας (Ντούλης, 2008).

5.8 Πρόβλεψη των συγκλίσεων σε ανυποστήρικτη σήραγγα.

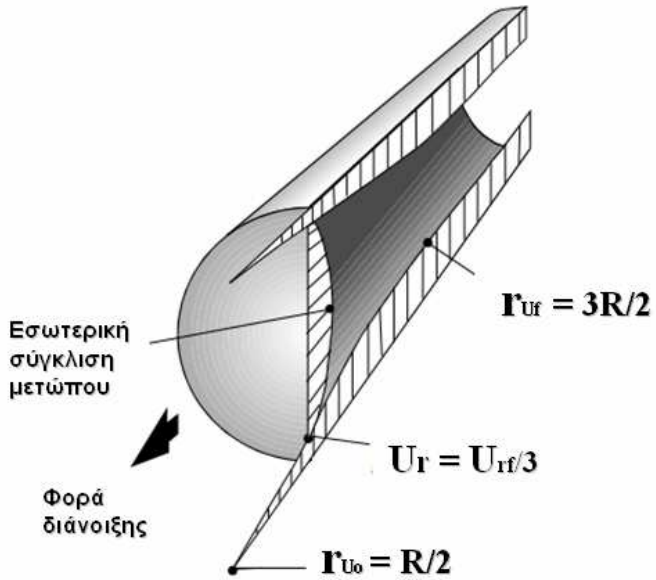
5.8.1 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά

Η συμπίεση γύρω από ένα υπόγειο άνοιγμα, λαμβάνει χώρα εξαιτίας της αστοχίας της περιβάλλουσας βραχομάζας λόγω της επιρροής της τάσης των υπερκείμενων γαιών και λόγω τεκτονικών τάσεων. Η ζώνη της βραχομάζας γύρω από το άνοιγμα, αστοχεί στο σημείο όπου η εφαπτομενική τάση υπερβαίνει την θλιπτική αντοχή της βραχομάζας στο σημείο αυτό.

Η αστοχία αυτή διευρύνεται ακτινικά γύρω από το άνοιγμα όσο δημιουργούνται νέες επιφάνειες ολίσθησης. Αυτή η διαδικασία επιφέρει τελικώς την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας. Η σύγκλιση αυτή ως ένα βαθμό είναι ακαριαία αλλά, σε ένα μεγάλο ποσοστό είναι χρονικά εξαρτώμενη. Αυτήν την χρονικά εξαρτώμενη σύγκλιση καλείται να εμποδίσει σημαντικά το σύστημα της προσωρινής υποστήριξης, αναλαμβάνοντας τα φορτία που την προκαλούν (Singh & Goel, 2006).

Στην διεύθυνση του άξονα της σήραγγας η μετατόπιση της βραχομάζας αρχίζει να εμφανίζεται σε απόσταση ίση με το μισό της ακτίνας, μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Από αυτό το σημείο και πίσω, η μετατόπιση αυξάνεται

σταδιακά φτάνοντας στο ένα τρίτο περίπου της μέγιστης τιμής της, ακριβώς στο επίπεδο που βρίσκεται το μέτωπο, ενώ παίρνει τελικά την μέγιστη τιμή σε απόσταση ίση με μιάμιση φορά την ακτίνα της σήραγγας (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Ανάπτυξη συγκλίσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας (Hoek, 1998, τροποποιημένο)

Βασική αρχή για την προσομοίωση ενός τρισδιάστατου εντατικού-παραμορφωσιακού πεδίου στις δύο διαστάσεις, είναι η θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) λαμβάνοντας όμως υπόψη και την επιρροή (εφόσον υπάρχει) της τρίτης διάστασης.

Στην πραγματικότητα κατά την διάνοιξη της σήραγγας, σε κάθε βήμα εκσκαφής δημιουργείται μια νέα ελεύθερη επιφάνεια που επιτρέπει την εκτόνωση των τάσεων της βραχομάζας που αρχικά ήταν περιορισμένη, μέσω της παραμόρφωσής της προς την κατεύθυνση του μετώπου και επομένως της «χαλάρωσης» αυτής. Έτσι λοιπόν πραγματοποιείται σταδιακή αποτόνωση της βραχομάζας σε κάθε βήμα εκσκαφής, πριν προλάβουν να τοποθετηθούν και να ενεργοποιηθούν πλήρως τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Επομένως θα πρέπει να θεωρηθεί μια παράμετρος που να εκφράζει αυτήν τη σταδιακή αποτόνωση που λαμβάνει χώρα κατά μήκος της εκσκαφής και να συσχετίζεται με την απόσταση από το μέτωπο (Singh & Goel, 2006).

Για τον λόγο αυτό, γίνεται ανάλυση του εντατικοπαραμορφωσιακού πεδίου γύρω από ανυποστήρικτη σήραγγα, ώστε να εκτιμηθούν: α) το εύρος της πλαστικής

ζώνης γύρω από το άνοιγμα, β) οι συγκλίσεις που θα υποστούν τα τοιχώματα της σήραγγας, γ) η επιτρεπόμενη τάση που δέχεται το άνοιγμα ώστε να ευσταθεί και η αντίστοιχη πίεση υποστήριξης που θα πρέπει να εφαρμοστεί.

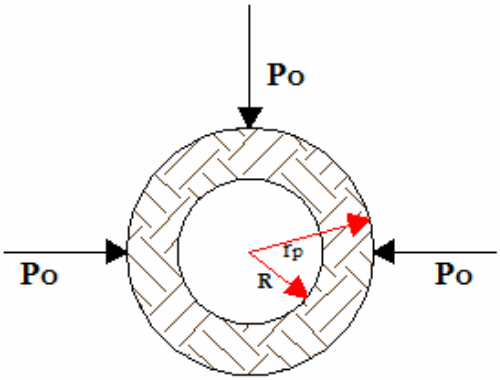
Για τον προσδιορισμό του βαθμού αποτόνωσης θεωρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας στο εσωτερικό της σήραγγας πριν την πλήρη εκσκαφή, απομειώνεται σταδιακά μέχρι την πλήρη αποτόνωση και την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης. Για την εκτίμηση του βαθμού αποτόνωσης, έγινε εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου του Chern (Chern et al, 1998).

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, εφαρμόζεται ελαστοπλαστική ανάλυση των τάσεων, θεωρώντας υδροστατικό τασικό πεδίο γύρω από σήραγγα συμμετρικής διατομής (κυκλική) (σχήμα), αφού βασίζεται στην αξονοσυμμετρική ανάλυση των μοντέλων. Αρχικά, θεωρείται ότι η εσωτερική πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας είναι ίση με την γεωστατική τάση λόγω υπερκείμενων γαιών. Η πίεση αυτή μειώνεται σταδιακά σε διαδοχικά βήματα, μέχρι να φτάσει την συνοριακή συνθήκη δηλαδή μέχρι να μηδενιστεί. Με τον τρόπο αυτόν εκτιμάται σε κάθε βήμα το εύρος της πλαστικής ζώνης αλλά και η ακτινική παραμόρφωση, γύρω από το άνοιγμα. Μέσα από αυτήν τη διαδικασία εξάγονται καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και αξονικής μετατόπισης συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο (Longitudinal Displacement Profiles).

5.8.2 Εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου

Παραδοχές

Θεωρείται σήραγγα κυκλικής διατομής με ακτίνα R. Λόγω της αξονοσυμμετρικής ανάλυσης, γίνεται θεώρηση ισότροπης γεωστατικής πίεσης ίσης με $P_o=\gamma H$, επομένως $\partial / \partial \theta = 0$ και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ακτινικές μεταβολές (Καββαδάς, 2000). Λόγω της γεωστατικής τάσης αναπτύσσεται πλαστική ζώνη γύρω από το άνοιγμα σε ακτίνα r_p από τον άξονα της σήραγγας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6:



Σχήμα 5.6:Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από υπόγειο κυκλικό άνοιγμα.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι γεωτεχνικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση.

Λόγω της ανάπτυξης πλαστικής ζώνης γύρω από το άνοιγμα, η βραχομάζα υφίσταται ογκομετρική διεύρυνση, δ (διασταλτικότητα) που σχετίζεται με την γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού και ορίζεται ως:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_{vol}}{\varepsilon_{shear}} = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_\theta}{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta} > 0 \qquad 5.10$$

Συνήθεις τιμές διασταλτικότητας είναι:

- Χαλαρά εδάφη : δ = 0 ÷ φ/5
- Μέτριας πυκνότητας : δ = φ/5 ÷ φ/4
- Πυκνά εδάφη : δ = φ/4 ÷ φ/3

Με βάση τα παραπάνω ορίζεται ο συντελεστής διασταλτικότητας, ως:

$$K_\delta = \frac{1+\tan\delta}{1-\tan\delta} \qquad 5.11$$

Ενώ ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων που ορίζεται ως $K_p = \sigma_\theta / \sigma_r$, δίνεται από την σχέση:

$$K_p = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \qquad 5.12$$

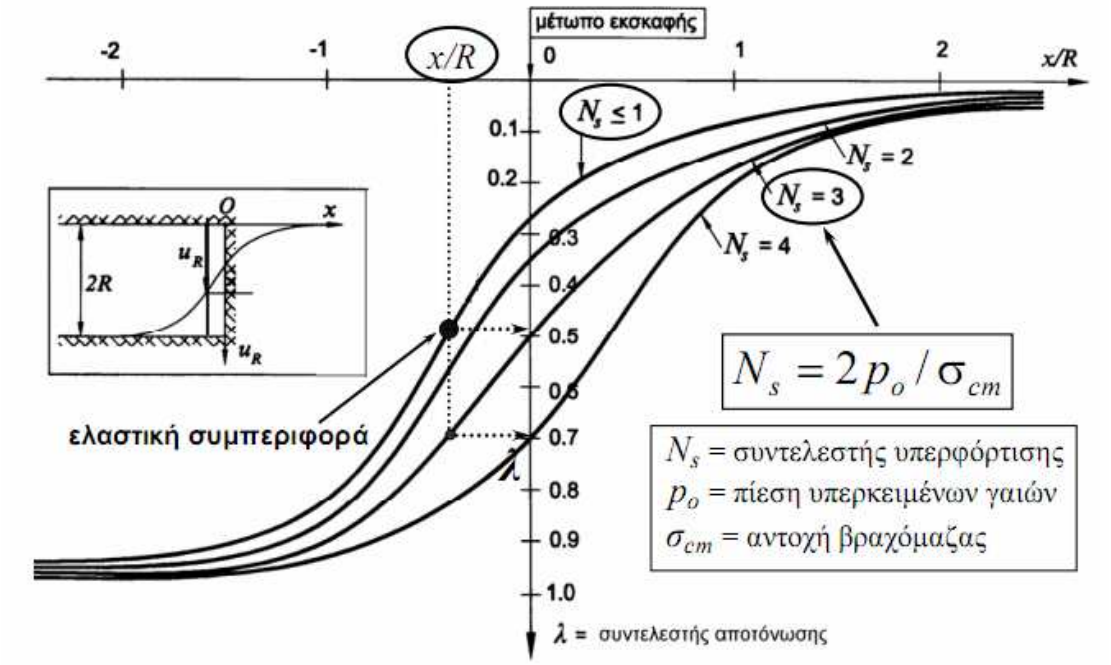
Δύο ακόμη βασικά μεγέθη που πρέπει να οριστούν πριν την ανάλυση, είναι ο συντελεστής υπερφόρτισης, N_s και ο κρίσιμος λόγος αποτόνωσης, λ_{cr}. Η τιμή του συντελεστή υπερφόρτισης είναι κρίσιμης σημασίας για την ευστάθεια του μετώπου και τον υπολογισμό της πίεσης της υποστήριξης που πρέπει να εφαρμοστεί, ενώ η τιμή του κρίσιμου λόγου αποτόνωσης είναι αυτή που προσδιορίζει τελικά την απόσταση από τον άξονα της σήραγγας που θα αναπτυχθεί η πλαστική ζώνη. Έτσι ορίζονται (Καββαδάς, 2000):

$$N_s = \frac{2P_o}{\sigma_{cm}} \qquad 5.13$$

όπου σ_{cm}, η θλιπτική αντοχή της βραχομάζας, όπως αυτή προκύπτει από την σχέση (5.8) και

$$\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1+K_p}\right)\left(\frac{N_s - 1}{N_s}\right) \qquad 5.14$$

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η σχέση του λόγου αποτόνωσης και του συντελεστή υπερφόρτισης συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο.



Σχήμα 5.7: Διακύμανση του συντελεστή λ κατά μήκος σήραγγας, για διάφορες τιμές του N_s (Καββαδας, 2000, από AFTES, 1986)

Υπολογισμοί

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για να υπάρχει ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα πρέπει ο κρίσιμος λόγος αποτόνωσης, λ_{cr} να είναι μικρότερος από την μονάδα και επομένως ο συντελεστής υπερφόρτισης, N_s μεγαλύτερος από την μονάδα. Σε αντίθετη περίπτωση, η αντοχή της βραχομάζας είναι τέτοια που δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το όριο διαρροής για δεδομένη γεωστατική πίεση P_o και επομένως παραμένει στην ελαστική περιοχή.

Στην περίπτωση όπου $\lambda_{cr}<1$ και $N_s>1$, τα σημεία του υλικού για τα οποία ισχύει $\lambda<\lambda_{cr}$, βρίσκονται στην ελαστική ζώνη ενώ σε αντίθετη περίπτωση βρίσκονται στην πλαστική (Καββαδάς, 2000).

Η πλαστική περιοχή της βραχομάζας ξεκινάει ακριβώς πάνω από το όριο της σήραγγας ή σε απόσταση από το μέτωπο ίση με την ακτίνα της σήραγγας, $r \geq R$ (δηλαδή για $\lambda \geq \lambda_{cr}$) μέχρι μια απόσταση r_p, όπου ξεκινάει η ελαστική ζώνη και δεν λαμβάνουν χώρα πλέον πλαστικές παραμορφώσεις (δηλαδή έχει γίνει πλήρης αποτόνωση και λ=1). Επομένως ο λόγος r_p/R=1, για το όριο της σήραγγας και

$$r_p/R=\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)\cdot\frac{N_s+\frac{2}{k-1}}{(1-\lambda)\cdot N_s+\frac{2}{k-1}}\right]^{\frac{1}{k-1}} \qquad 5.15$$

για την πλαστική περιοχή.

Με βάση τα προηγούμενα γίνεται ο υπολογισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων για την ελαστική και την πλαστική περιοχή για $K_p \neq 1 \Rightarrow \phi \neq 0$.

Οι τάσεις στην πλαστική περιοχή , υπολογίζονται ως:

$$\frac{\sigma_r}{p_o}=\left[(1-\lambda)+\frac{2}{(K_p-1)N_s}\right]\left(\frac{r}{R}\right)^{K_p-1}-\frac{2}{(K_p-1)N_s} \qquad 5.16$$

και από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\sigma_\theta = K_p\,\sigma_r+\sigma_{cm} \Rightarrow \frac{\sigma_\theta}{p_o}=K_p\frac{\sigma_r}{p_o}+\frac{2}{N_s} \qquad 5.17$$

Ενώ οι τάσεις στην ελαστική περιοχή υπολογίζονται ως:

$$\frac{\sigma_r}{p_o} = 1 - \lambda \left(\frac{R}{r} \right)^2 \qquad 5.18$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_o} = 1 + \lambda \left(\frac{R}{r} \right)^2 \qquad 5.19$$

Για την πλαστική περιοχή η τελική τιμή της μετατόπισης είναι συνάρτηση της ελαστικής και της πλαστικής συνιστώσας. Έτσι, η πλαστική μετατόπιση ορίζεται από την σχέση:

$$\frac{u_p}{R} = \frac{r_p}{R} \cdot \left(\frac{P_o}{2 \cdot G} \right) \cdot \left(1 - \frac{2}{k+1} \right) \cdot \left(1 + \frac{2}{(k-1) \cdot N_s} \right) \qquad 5.20$$

Και τελικά η συνολική μετατόπιση για την πλαστική ζώνη προκύπτει ως:

$$\frac{u_r}{R} = \frac{u_p}{R} \cdot \left(\frac{r_p}{R} \right)^{K\delta} \qquad 5.21$$

Στην ελαστική περιοχή δεν υφίστανται πλαστικές παραμορφώσεις u_p, επομένως ο λόγος u_p/R δεν ορίζεται.

Έτσι η συνολική μετατόπιση στην ελαστική περιοχή προκύπτει ως :

$$\frac{u_r}{R} = \lambda \cdot \frac{P_o}{2 \cdot G} \qquad 5.22$$

Το προτεινόμενο βήμα *x/R* εκσκαφής προκύπτει από το ποσοστό της μετατόπισης κατά το οποίο το μέτωπο ευσταθεί. Η εμπειρική σχέση του Chern κάνει εκτίμηση του λόγου *x/R* ως εξής (Chern et al., 1998):

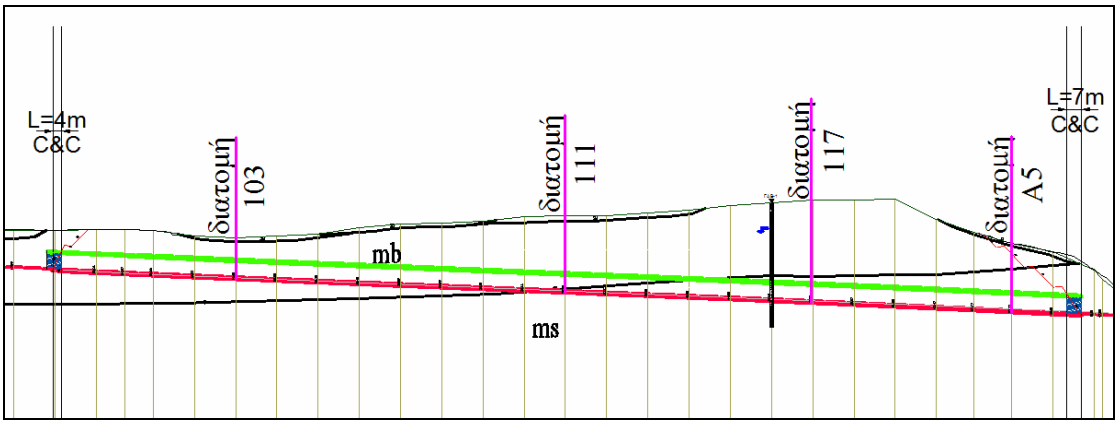
$$\frac{u_r}{u_{rf}} = \left[1 + \exp\left(0.91 \cdot \frac{x}{R} \right) \right]^{-1.7} \Leftrightarrow \frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln\left[\left(\frac{u_r}{u_{rf}} \right)^{-0.588} - 1 \right] \qquad 5.23$$

Τέλος, προκύπτει ο λόγος απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας σε κάθε βήμα εκσκαφής E/E_o, που είναι το ζητούμενο μέγεθος που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και στις δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις κατά τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος χαλάρωσης της βραχομάζας (strain-softening), για την προσομοίωση της διάνοιξης σε πολλαπλά στάδια.

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(1-2\nu)\cdot(p/p_o)}{2\cdot(1-\nu)-(p/p_0)} = \frac{(1-2\nu)\cdot(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda} \qquad 5.24$$

5.8.3 Αποτελέσματα

Η διερεύνηση των συγκλίσεων έγινε για το υπόγειο τμήμα της σήραγγας. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η κατανομή των μετατοπίσεων κατά μήκος της σήραγγας, για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις και για τις δύο φάσεις της εκσκαφής κάθε φορά. Σε κάθε περίπτωση η γεωμετρία και το γεωστατικό πεδίο προσομοιώνει τις τέσσερις διατομές ελέγχου που επιλέχθησαν από την μηκοτομή της σήραγγας, με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο φάσμα των διαφορετικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά την διάνοιξη (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Θέση των διατομών ελέγχου, στη μηκοτομή της σήραγγας.

Για την θεώρηση κυκλικής διατομής της σήραγγας, υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες ακτίνες κύκλου για τις δύο φάσεις, ανάλογα με το εμβαδόν της διατομής σε κάθε φάση (A), σύμφωνα με τον τύπο:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \qquad 5.25$$

Έτσι, δεδομένου ότι σε όλο το μήκος της η σήραγγα έχει ίδια γεωμετρία, υπολογίστηκαν:

- Για την Α’ φάση: *R=5m*
- Για την Β’ φάση:*R=4m*

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού που μετρήθηκαν για κάθε διατομή, ενώ στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα μεγέθη που υπολογίστηκαν από τις προηγούμενες παραμέτρους, με μαθηματικές σχέσεις.

Από τις αναλύσεις που έγιναν για τις τέσσερις διατομές ελέγχου και για τις δύο φάσεις, προέκυψαν τα αποτελέσματα για απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής, ίση με το βήμα προχώρησης που επιλέχθηκε ως:

- x=1m→x/R= -0.2, για την Α’ φάση
- x=2m→ x/R= 0.5, για την Β’ φάση.

Το πρόσημα μπροστά από το βήμα εκσκαφής, υποδηλώνει την διεύθυνση, δεδομένου ότι το σημείο ακριβώς στο μέτωπο τίθεται x=0m. Για την Α’ φάση, διερευνήθηκε το ανυποστήρικτο τμήμα πίσω από το μέτωπο μέχρι να εγκατασταθούν τα μέτρα υποστήριξης. Δεδομένου ότι το η εκσκαφή της Β’ φάσης ξεκινάει μετά την ολοκλήρωση της Α’ φάσης ή όταν το μέτωπο αυτής βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, το άνω τμήμα της σήραγγας είναι ήδη υποστηριγμένο, επομένως η επισφαλής περιοχή αναμένεται στο τμήμα που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο (συγκλίσεις λόγω παθητικών ωθήσεων), και μέχρι αυτό να υποστηριχθεί πλήρως.

Πίνακας 5.3: Τυπικές διατομές ελέγχου-Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού

Διατομή	**103**	**111**	**117**	**A5**
Χ.Θ.	**24+340**	**24+560**	**24+680**	**24+776**
Περιγραφή	μέσα στον σχηματισμό mb με υπερκείμενο τον ίδιο σχηματισμό.	στην διεπιφάνεια των σχηματισμών ms/mb, με υπερκείμενο τον σχηματισμό mb	μέσα στο σχηματισμό ms, με υπερκείμενο τον σχηματισμό mb	μέσα στο σχηματισμό ms, με υπερκείμενο 50% ms και 50% mb.
Ύψος υπερκειμένων H(m)	11	28	40	25
Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m^3)	20	20	20	17.2-20
Γωνία εσωτερικής τριβής φ(^{o})	29	29	34	34
Διασταλτικότητα δ(^{o})	7.25	7.25	8.5	8.5
Δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI	30	30	30	30
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci} (MPa)	0.3	0.3	5	5
Λόγος Poisson ν	0.35	0.35	0.25	0.25
Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	45	45	150	150

Πίνακας 5.4: Τυπικές διατομές ελέγχου-Χαρακτηριστικά μεγέθη

Διατομή	**103**	**111**	**117**	**A5**
Συντελεστής παθητικών ωθήσεων K_p	2.9	2.9	3.5	3.5
Συντελεστής διασταλτικότητας K_δ	1.3	1.3	1.4	1.4
Τάση υπερκειμένων p_o (MPa)	0.22	0.56	0.8	0.47
Αντοχή βραχομάζας σ_{cm} (Mpa)	0.050	0.05	0.46	0.46
Συντελεστής υπερφόρτισης N_s	8.8	22.4	3.5	2.1
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	16.7	16.7	60	60
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης λ_{cr}	0.543	0.508	0.685	0.775

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εκάστοτε διατομή και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Διατομή ελέγχου 103

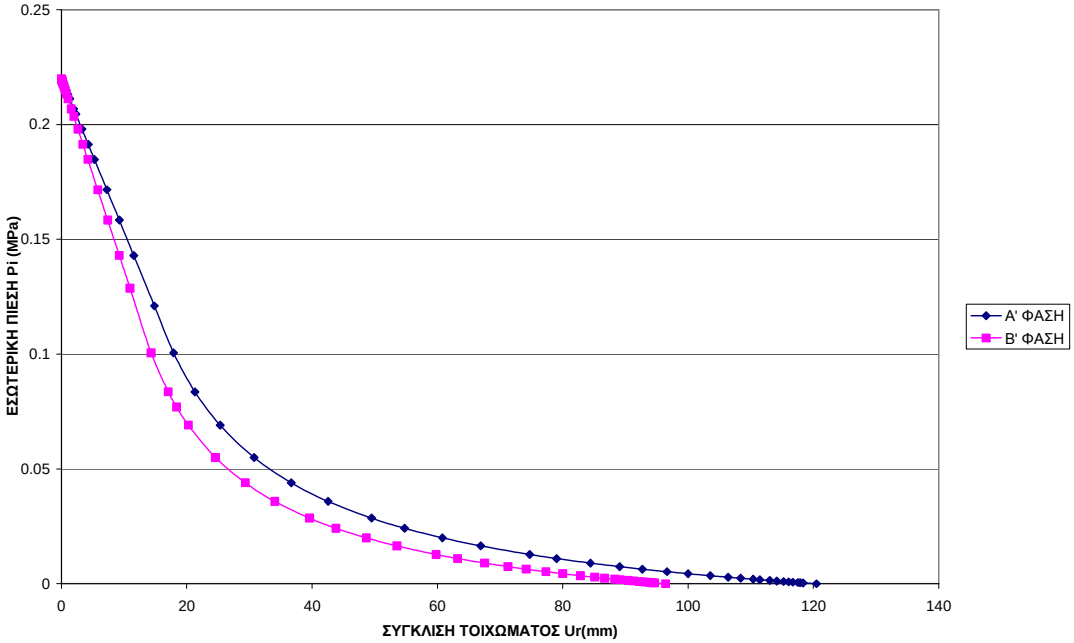
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ελαστοπλαστικής ανάλυσης διατομής 103

Φάση	**A'**	**B'**
λ	0.837	0.650
plastic	YES	YES
r_p/R	1.46	1.12
uR/R	0.009	0.005
u_R/u_{Rf}	0.35	0.19
x/R	-0.2	0.5
E/E_o	0.043	0.111

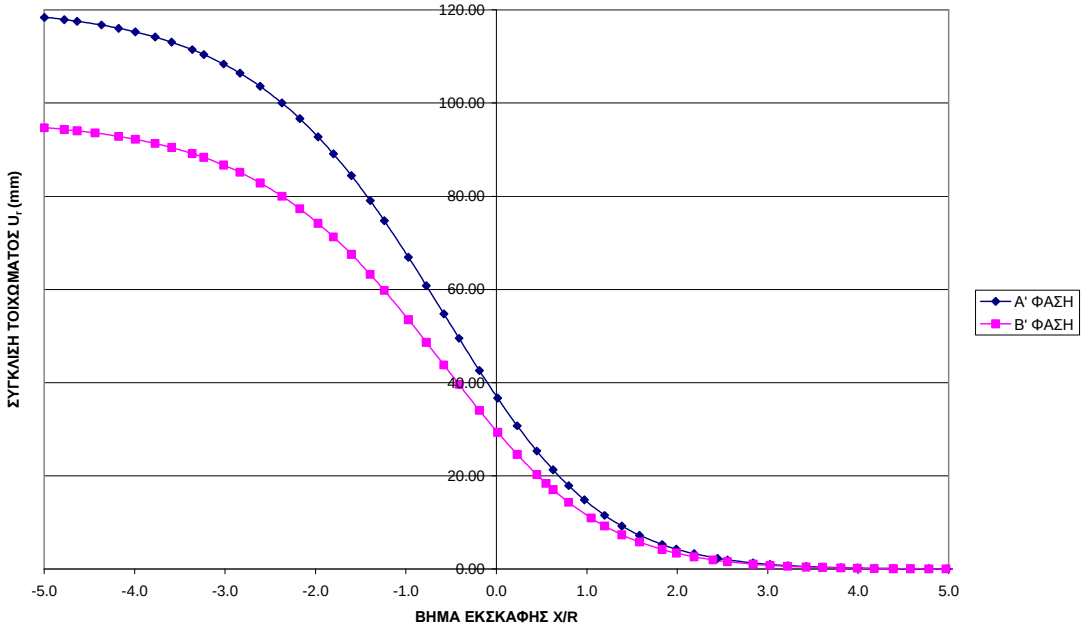
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα (5.5) προκύπτει ότι και για τις δύο φάσεις εκσκαφής $\lambda>\lambda_{cr}$, επομένως το μέτωπο βρίσκεται στην πλαστική περιοχή. Οι απόλυτες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, της σύγκλισης αλλά και η τελική τιμή της σύγκλισης μέχρι την πλήρη αποτόνωση, είναι:

- **Για την Α' φάση: E = 2MPa, U_r=42.6mm, U_{rf} =120.5mm.**
- **Για την Β' φάση: E= 5MPa, U_r=18.4mm, U_{rf} =96.4mm.**

Στα Σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και η κατανομή των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDPs).



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης για την διατομή 103.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα LDP για την διατομή 103

Διατομή ελέγχου 111

Η συγκεκριμένη διατομή ελέγχου χαρακτηρίζεται από την εξής ιδιομορφία: Επειδή η διατομή τέμνει την διεπιφάνεια των σχηματισμών μάργας-λατυποπαγούς, έγιναν τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις για να καλυφθούν όλες οι υποπεριπτώσεις. Κατά

την Α' φάση της εκσκαφής η διατομή βρίσκεται κατά 95% στο σχηματισμό του λατυποπαγούς (mb) και κατά 5% στο σχηματισμό της μάργας (ms), ενώ κατά την Β' φάση της εκσκαφής συμβαίνει το αντίθετο. Επομένως, για την εκτίμηση των συγκλίσεων οι υπολογισμοί έγιναν με βάση το μεγαλύτερο ποσοστό, ενώ για την εκτίμηση του λόγου E/E_o, οι υπολογισμοί έγιναν σε όλες τις υποπεριπτώσεις, για την ορθότερη προσομοίωση του πεδίου με τις αριθμητικές αναλύσεις που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.6):

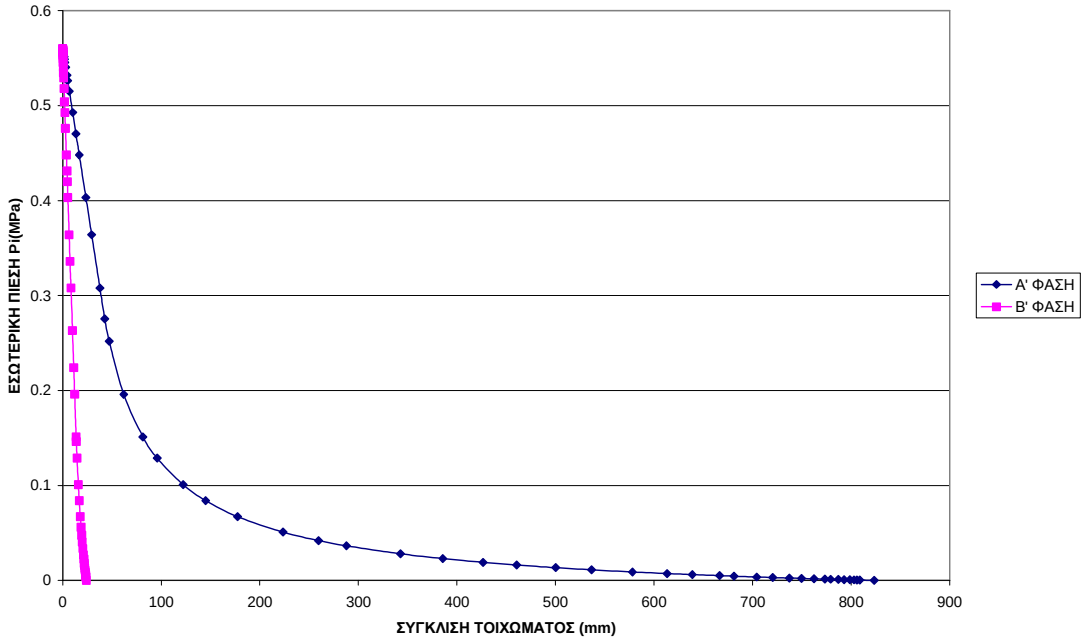
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ελαστοπλαστικής ανάλυσης διατομής 111

Φάση	**A' (σχηματισμός mb)**	**B' (σχηματισμός ms)**
λ	0.935	0.250
plastic	YES	NO
r_p/R	2.3	1
uR/R	0.058	0.001
u_R/u_{Rf}	0.35	0.15
x/R	-0.2	0.5
E/E_o	0.016 / 0.289	0.5 / 0.033

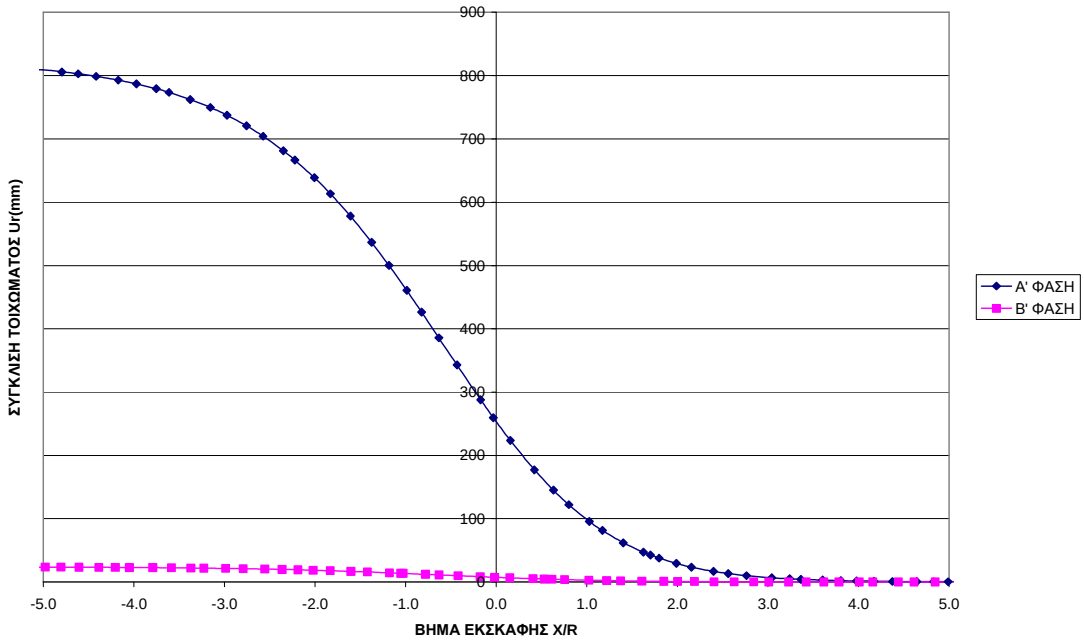
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.6 προκύπτει ότι κατά την διάνοιξη της Α' φάσης $\lambda>\lambda_{cr}$, επομένως το μέτωπο βρίσκεται στην πλαστική περιοχή, ενώ για την Β' φάση $\lambda<\lambda_{cr}$, επομένως το μέτωπο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Οι απόλυτες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, της σύγκλισης αλλά και η τελική τιμή της σύγκλισης μέχρι την πλήρη αποτόνωση, είναι:

- **Για την Α' φάση: E = 0.71MPa** για την περίπτωση που θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό mb και **E=43.42MPa** για την περίπτωση που θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό ms**. U_r=288mm, U_{rf} =823mm.**
- **Για την Β' φάση: E= 75MPa** για την περίπτωση που θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό ms και **E=1.5MPa** για την περίπτωση που θεωρείται ότι η σήραγγα βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό mb**. U_r=4.7mm, U_{rf} =23.9mm.**

Στα Σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και η κατανομή των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDPs).



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης για την διατομή 111



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα LDP για την διατομή 111.

Διατομή ελέγχου 117

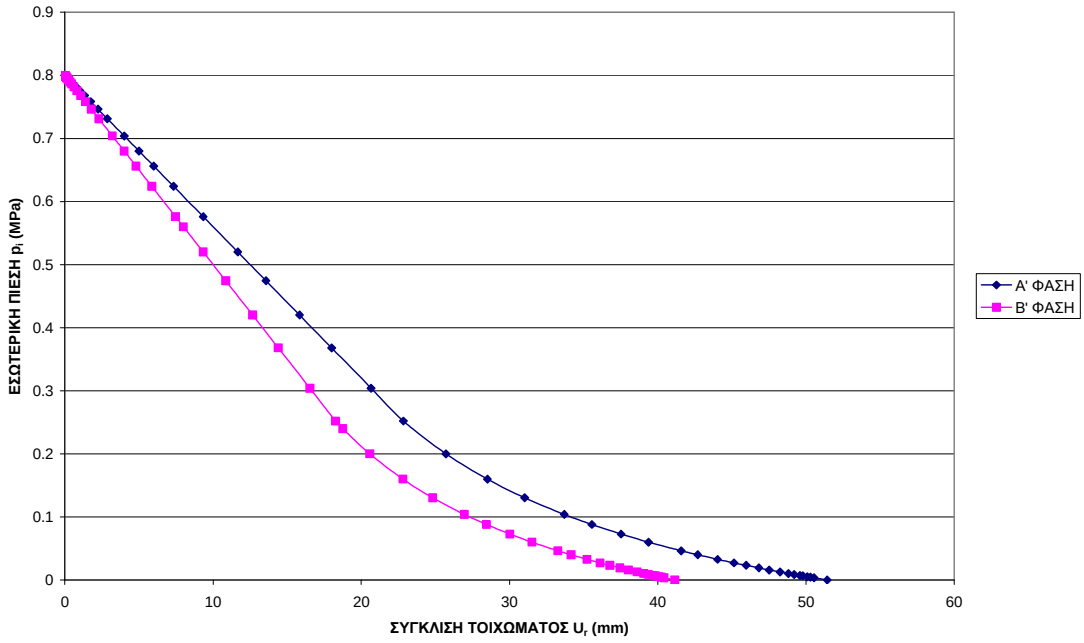
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα ελαστοπλαστικής ανάλυσης διατομής 111

Φάση	**A'**	**B'**
λ	0.540	0.3
plastic	NO	NO
r_p/R	1	1
uR/R	0.004	0.002
u_R/u_{Rf}	0.35	0.19
x/R	-0.2	0.5
E/E_o	0.22	0.438

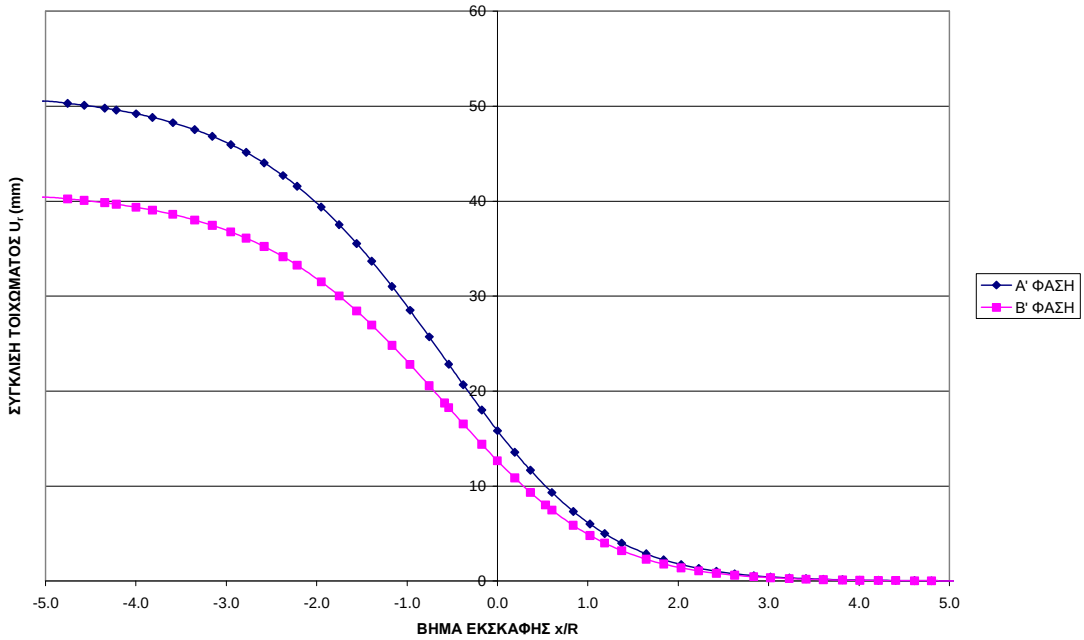
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.7 προκύπτει ότι κατά την διάνοιξη και των δύο φάσεων το μέτωπο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή επομένως δεν αναμένονται σημαντικές συγκλίσεις σε όλο το μήκος της σήραγγας. Συγκεκριμένα, οι απόλυτες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, της σύγκλισης αλλά και η τελική τιμή της σύγκλισης μέχρι την πλήρη αποτόνωση, είναι:

- **Για την A' φάση: E = 33MPa, U_r=18 mm, U_{rf} =51.4mm.**
- **Για την B' φάση: E=65.6MPa, U_r=8mm, U_{rf} =41mm.**

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για αυτήν τη διατομή παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.13- 5.14).



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης για την διατομή 117



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα LDP για την διατομή 117

Διατομή ελέγχου Α5

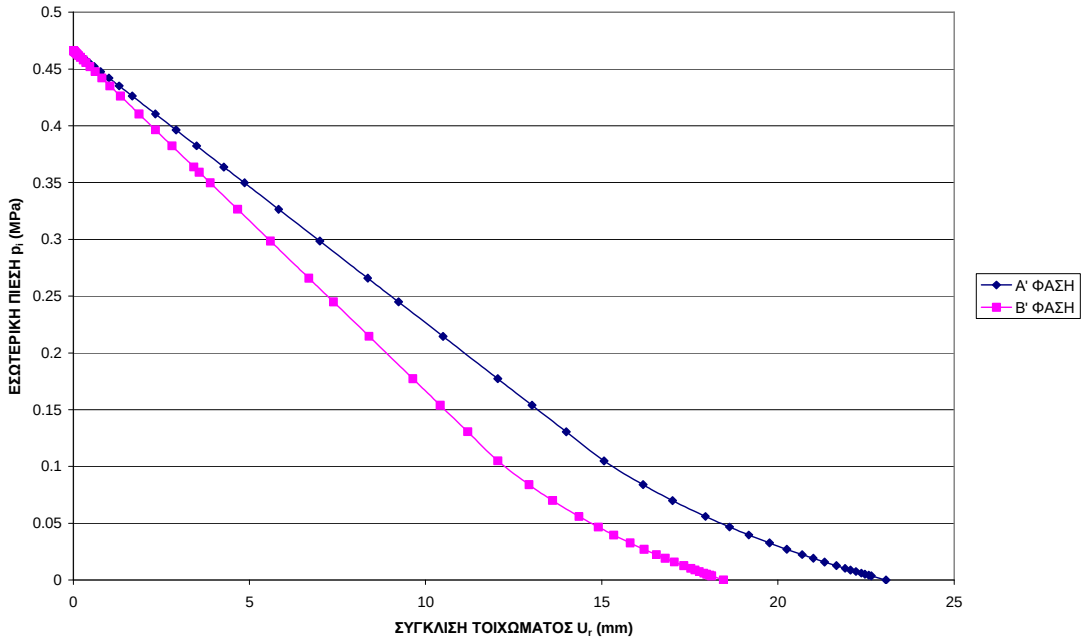
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ελαστοπλαστικής ανάλυσης διατομής Α5

Φάση	**Α'**	**Β'**
λ	0.43	0.23
plastic	NO	NO
r_p/R	1	1
uR/R	0.002	0.001
u_R/u_{Rf}	0.36	0.19
x/R	-0.2	0.5
E/E_o	0.306	0.527

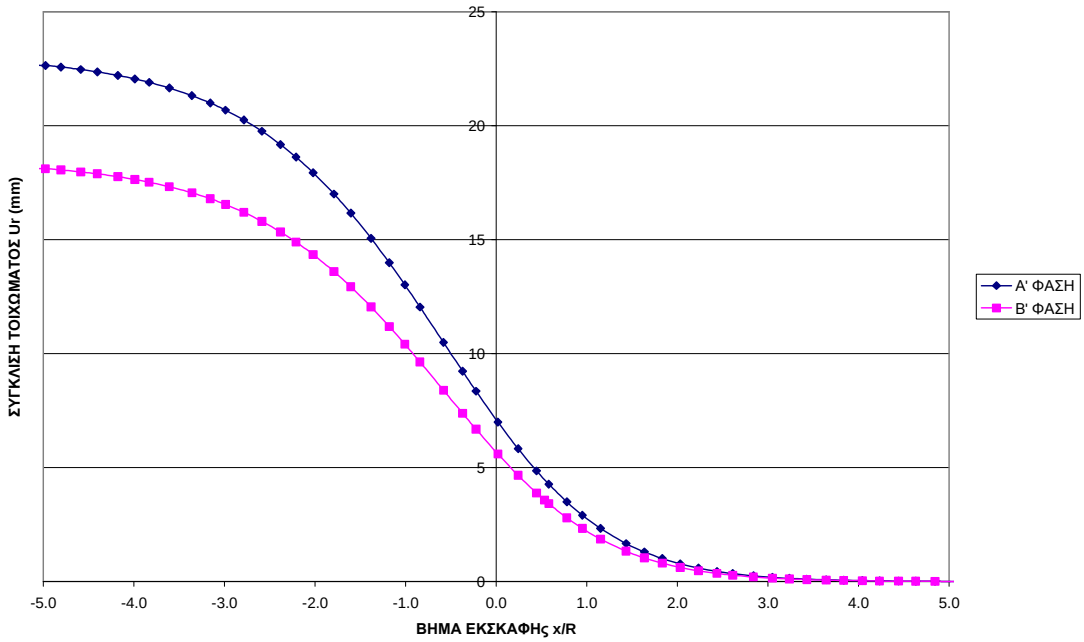
Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι και σε αυτήν την διατομή δεν δημιουργείται πλαστική περιοχή για όλο το μήκος της σήραγγας. Οι απόλυτες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, της σύγκλισης αλλά και η τελική τιμή της σύγκλισης μέχρι την πλήρη αποτόνωση, είναι:

- **Για την Α' φάση: E = 46MPa, U_r=8.4 mm, U_{rf} =23mm.**
- **Για την Β' φάση: E=79 MPa, U_r=3.8mm, U_{rf} =18.5mm.**

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για αυτήν τη διατομή παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.15-5.16).



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης για την διατομήΑ5

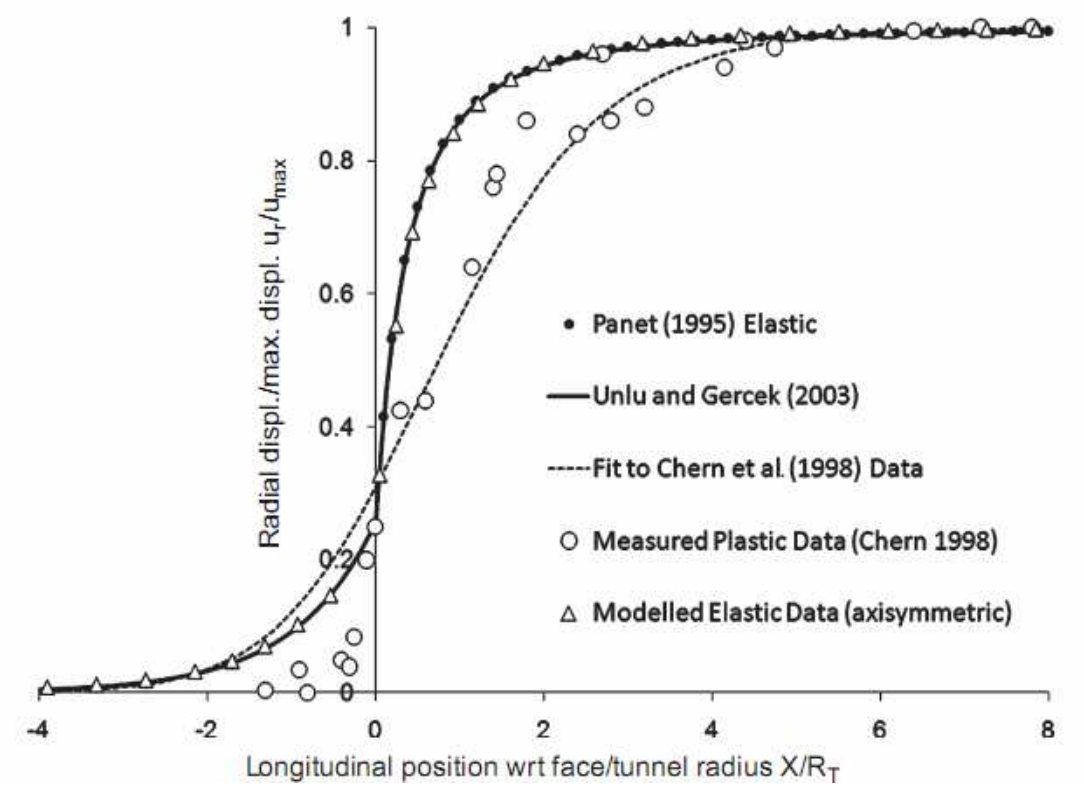


Σχήμα 5.16: Διάγραμμα LDP για την διατομή Α5.

5.9 Αξονοσυμμετρικές αναλύσεις με το πρόγραμμα Phase2

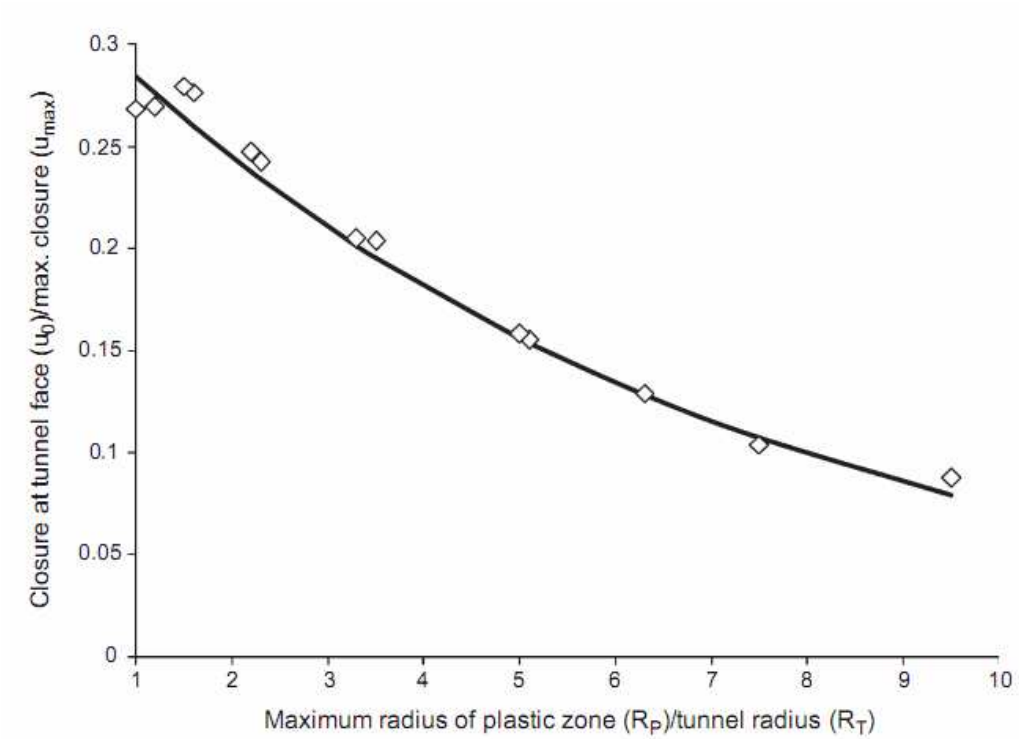
Για την ελαστοπλαστική επίλυση των αξονοσυμμετρικών μοντέλων ανυποστήρικτης σήραγγας, εκτός από τη αναλυτική λύση με την εμπειρική μέθοδο του Chern πραγματοποιήθηκαν και αριθμητικές αναλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις αυτές, είναι για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και ορθότερη εκτίμηση των συγκλίσεων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, γίνονται συνεχώς προσπάθειες σύγκρισης των δύο μεθόδων, για διαφορετικές μελέτες περίπτωσης όπου χρησιμοποιούνται και γεωτεχνικές μετρήσεις ανυποστήρικτων ανοιγμάτων με σκοπό να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή των εμπειρικών σχέσεων στις πραγματικές συνθήκες. Χαρακτηριστικά σε άρθρο των Vlachopoulos & Diederichs (2009), γίνεται σύγκριση καμπυλών LDP, που εξήχθησαν από διάφορους αναλυτές μέσω ελαστικών (Panet 1995, Unlu & Gercec 2003), αλλά και ελαστοπλαστικών αναλύσεων (Carranza-Torres & Fairhurst 2000, Chern 1998) (Σχήμα 5.17).



Σχήμα 5.17: Σύγκριση LDPs με διαφορετικές εμπειρικές μεθόδους ανάλυσης (Vlachopoulos & Diederichs, 2009)

Οι αναλυτές εφαρμόζοντας την μέθοδο που προτείνεται από τους Carranza-Torres & Fairhurst (2000) με ελαστοπλαστική λύση, προτείνουν ένα διορθωμένο μοντέλο εξαγωγής της καμπύλης LDP, θεωρώντας ότι η κανονικοποιημένη σύγκλιση U_r/U_{rf} δεν επηρεάζεται από τον συντελεστή υπερφόρτισης ή από άλλες ιδιότητες της βραχομάζας αλλά είναι άμεση συνάρτηση της ακτίνας της πλαστικής ζώνης (Σχήμα 5.18).



Σχήμα 5.18: Σύγκλιση τοιχώματος συναρτήσει της ακτίνας της πλαστικής ζώνης (Vlachopoulos & Diederichs, 2009).

5.9.1 Παραδοχές

Όπως και στην εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου, έτσι και στην αριθμητική ανάλυση των αξονοσυμμετρικών μοντέλων, θεωρείται ανυποστήρικτο άνοιγμα κυκλικής διατομής, σε υδροστατικό πεδίο τάσεων.

Η αντιστοιχία των τάσεων μεταξύ των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης και των αξονοσυμμετρικών μοντέλων υπακούει στην εξής σύμβαση (Πίνακας 5.9):

Πίνακας 5.9: Αντιστοιχία μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης με αξονοσυμμετρικά μοντέλα.

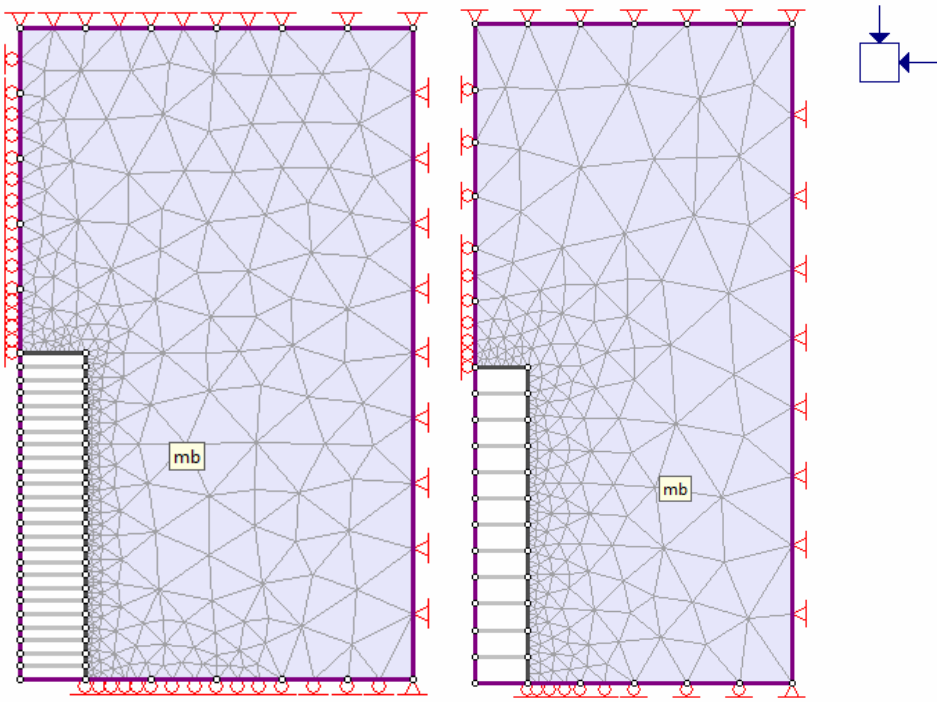
Plane strain	Axisymmetric
Sigma 1 (in-plane)	‘Horizontal' stress
Sigma 3 (in-plane)	‘Horizontal' stress
Sigma z (out-of-plane)	‘Vertical' stress

Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για όλες τις διατομές ελέγχου και για τις δύο φάσεις.

Η ανάλυση των μοντέλων που κατασκευάστηκαν, έγινε για διαφορετικό αριθμό σταδίων εκσκαφής κάθε φορά. Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της βραχομάζας σε σημαντική απόσταση από το μέτωπο, κατασκευάστηκαν μοντέλα με μήκος σήραγγας ίσο με L= ±5R, όπου R η ακτίνα της σήραγγας. Συγκεκριμένα:

- για 1 στάδιο εκσκαφής: Το μοντέλο προσομοιώνει το γεωστατικό πεδίο με δεδομένο ότι προϋπάρχει το υπόγειο άνοιγμα και η ανάλυση γίνεται ακαριαία.
- για 2 στάδια: Το μοντέλο προσομοιώνει το γεωστατικό πεδίο σε δύο φάσεις: α) Στο πρώτο στάδιο προσομοιώνεται το αρχικό πεδίο τάσεων πριν την εκσκαφή, και β) προσομοιώνεται το γεωστατικό πεδίο μετά την εκσκαφή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό των μετατοπίσεων αφαιρώντας την αρχική μετατόπιση εξαιτίας του ιδίου βάρους του εδάφους.
- Για πολλαπλά στάδια: Η ανάλυση σε πολλαπλά στάδια έγινε με διαφορετικό αριθμό σταδίων για τις δύο φάσεις, εφόσον η Α’ φάση πραγματοποιείται με βήμα εκσκαφής 1m, ενώ η Β’ φάση πραγματοποιείται με βήμα εκσκαφής 2m. Το μοντέλο προσομοιώνει σε πρώτη φάση το αρχικό πεδίο τάσεων (1° στάδιο) και έπειτα προσομοιώνεται η σταδιακή διάνοιξη της σήραγγας ανά βήμα εκσκαφής. Για την Α’ φάση: Με R=5m, x=1m και L=±25m ,κατασκευάστηκαν (L/x)+1=26 στάδια. Για την Β’ φάση: Με R=4m, x=2m και L=±24m, κατασκευάστηκαν (L/x)+1=13 στάδια.

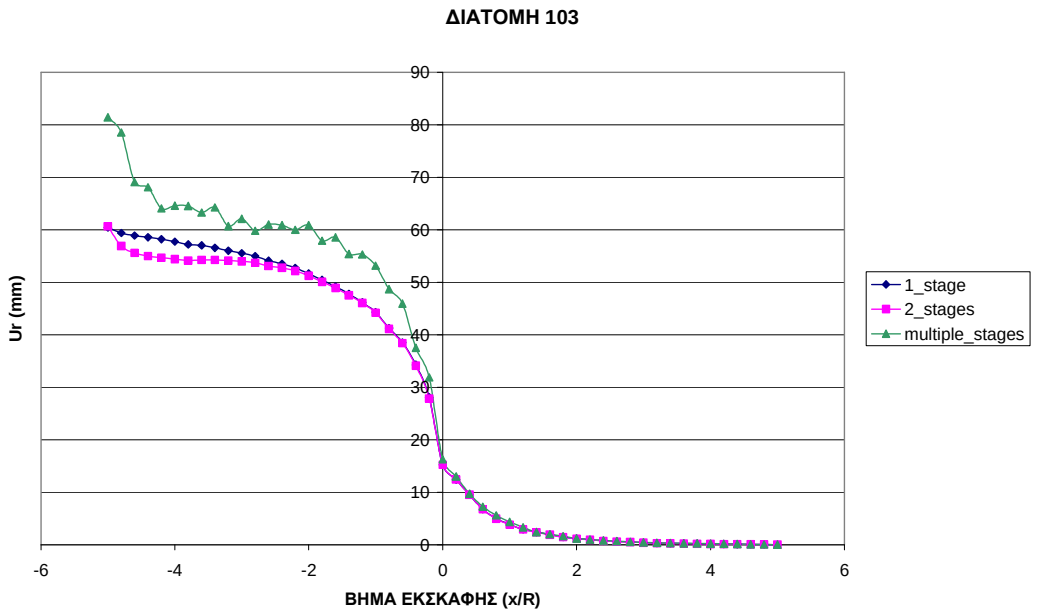
Το Σχήμα 5.19 παρουσιάζει ενδεικτικά την μοντελοποίηση της διάνοιξης για την διατομή 103 και για τις δύο φάσεις.



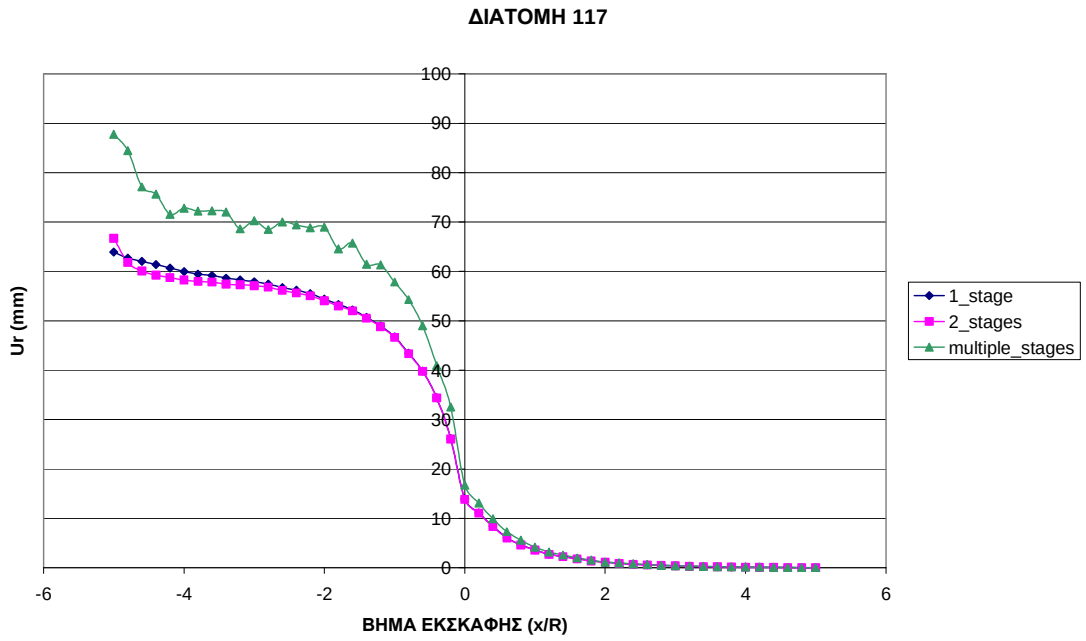
Σχήμα 5.19: Γεωτεχνικό προσομοίωμα διατομής 103 με σταδιακή διάνοιξη. Αριστερά: Α' φάση, δεξιά: Β' φάση.

5.9.2 Αποτελέσματα

Τα σχήματα 5.20 και 5.21 παρουσιάζουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες για την κατανομή των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDP), για τις διατομές ελέγχου 103 και 117, αντίστοιχα, ενώ στους Πίνακες 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέγιστων συγκλίσεων για την Α' φάση και για την Β΄φάση εκσκαφής αντίστοιχα.



Σχήμα 5.20: LDP διατομής 103, με προσομοίωση διάνοιξης: α) σε ένα στάδιο, β) σε δύο στάδια, γ) σε πολλαπλά στάδια.



Σχήμα 5.21: LDP διατομής 117, με προσομοίωση διάνοιξης: α) σε ένα στάδιο, β) σε δύο στάδια, γ) σε πολλαπλά στάδια.

Πίνακας 5.10: Μέγιστες τιμές συγκλίσεων (cm) κατά μήκος της σήραγγας για την Α' φάση εκσκαφής.

Διατομές / **Στάδια**	**103**	**111**	**117**	**A5**
1	60.5	264.3	63.9	30.4
2	60.7	227.3	66.7	33.5
26	81.5	362.7	87.7	34.9

Πίνακας 5.11: Μέγιστες τιμές συγκλίσεων (cm) κατά μήκος της σήραγγας για την Β' φάση εκσκαφής

Διατομές / **Στάδια**	**103**	**111**	**117**	**A5**
1	52.3	30.4	52.7	23.2
2	51.9	31.5	51.9	24.8
26	64.3	35.9	67.9	27.

Οι αναλύσεις που έγιναν σε ένα στάδιο εκσκαφής δίνουν σχετικά μεγαλύτερες συγκλίσεις από ότι αυτές που έγιναν σε δύο στάδια. Αυτό είναι λογικό εφόσον στην πρώτη περίπτωση δεν λαμβάνεται υπόψη το αρχικό τασικό πεδίο, επομένως δεν αφαιρούνται οι μετατοπίσεις λόγω ιδίου βάρους.

Όσον φορά τις αναλύσεις που έγιναν σε πολλαπλά στάδια, αναμενόταν αυτές να δώσουν ακόμη μικρότερες συγκλίσεις, εφόσον το μοντέλο ισορροπεί έπειτα από κάθε στάδιο εκσκαφής. Εντούτοις, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα αλλά και από τις καμπύλες LDP οι συγκλίσεις αυτές είναι μεγαλύτερες. Μία εξήγηση που μπορεί να δοθεί, είναι ότι στις αναλύσεις σε πολλαπλά στάδια, είναι μεγαλύτερη η επιρροή των συνοριακών συνθηκών. Ωστόσο για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, απαιτείται η εκτενέστερη ανάλυση των μοντέλων αυτών για τον έλεγχο ευαισθησίας του προγράμματος.

5.9.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων αξονοσυμμετρικών και εμειρικών αναλύσεων

Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των συγκλίσεων που προέκυψαν από τις εμπειρικές και τις αξονοσυμμετρικές αναλύσεις, για την Α' φάση εκσκαφής.

Πίνακας 5.12: Μέγιστες τιμές συγκλίσεων (cm), για την Α' φάση εκσκαφής.

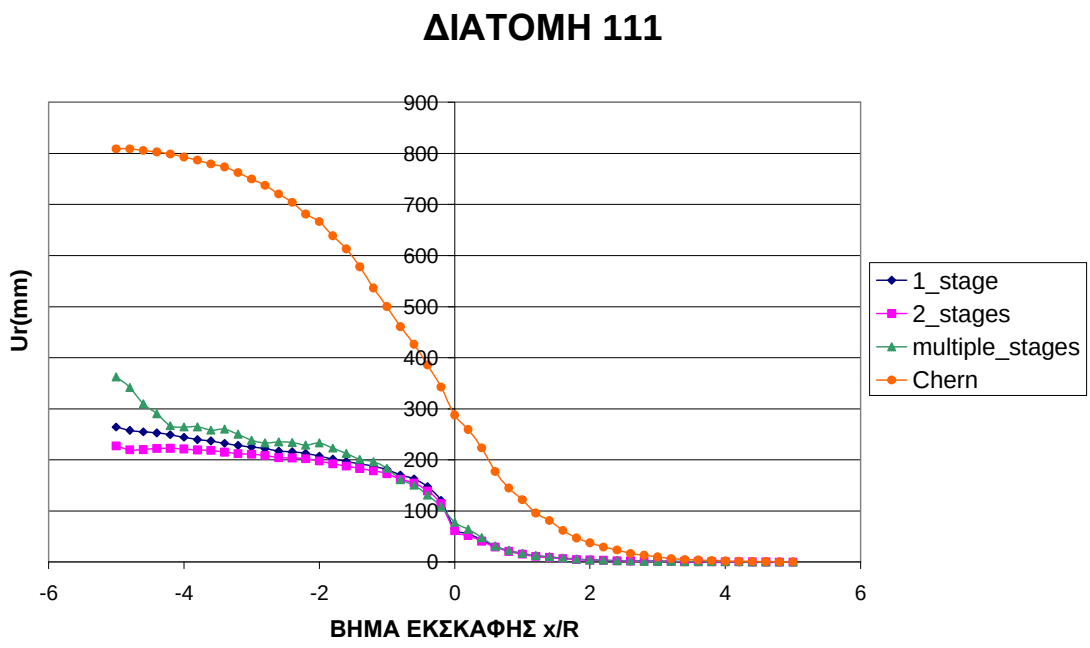
διατομές	103	111	117	A5
Chern	120.5	823	51.4	23
Axis-mstage	81.5	362.7	87.7	34.9
Axis-2stage	60.7	227.3	66.7	33.5
Axis-1stage	60.5	264.3	63.9	30.4

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των συγκλίσεων που προέκυψαν από τις εμπειρικές και τις αξονοσυμμετρικές αναλύσεις, για την Β' φάση εκσκαφής.

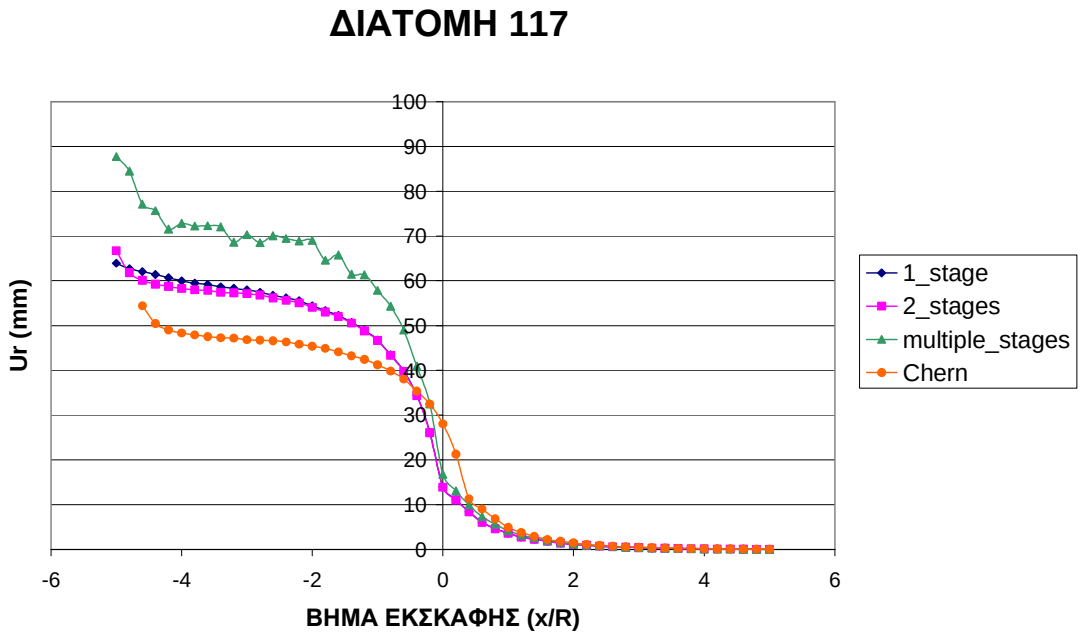
Πίνακας 5.13: Μέγιστες τιμές συγκλίσεων (cm), για την Β' φάση εκσκαφής.

διατομές	103	111	117	A5
Chern	96.4	23.9	41	18.5
Axis-mstage	64.3	35.9	67.9	27.3
Axis-2stage	51.9	31.5	51.9	24.8
Axis-1stag	52.3	30.4	52.7	23.2

Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις όπου η διατομή βρίσκεται στον σχηματισμό του λατυποπαγούς, οι εμπειρικές αναλύσεις δίνουν μεγαλύτερες συγκλίσεις από αυτές των αξονοσυμμετρικών αναλύσεων (πχ. Α' φάση της διατομής 111, Α' και Β' φάση της διατομής 103). Ενώ για τις διατομές που βρίσκονται μέσα στον σχηματισμό της μάργας, δίνουν μικρότερες συγκλίσεις (Α' και Β' φάση των διατομών 117 και Α5). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στα σχήματα (5.22) και (5.23) τα συγκριτικά διαγράμματα της Α' φάσης των διατομών 111 και 117 που είναι αντιπροσωπευτικές για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 5.22: LDP διατομής 111, σύγκριση εμπειρικής ανάλυσης (Chern), με αξονοσυμμετρικές αναλύσεις.



Σχήμα 5.23: LDP διατομής 117, σύγκριση εμπειρικής ανάλυσης (Chern), με αξονοσυμμετρικές αναλύσεις.

5.10 Αναλύσεις επίπεδης-παραμόρφωσης με το πρόγραμμα Phase2

5.10.1 Παραδοχές

Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις επίπεδης-παραμόρφωσης με χρήση του προγράμματος Phase2 για την μοντελοποίηση της υποστήριξης σε όλες τις διατομές. Οι αναλύσεις αυτές αποσκοπούν στον έλεγχο ευστάθειας του μετώπου με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που προβλέπει η γεωτεχνική μελέτη. Συγκεκριμένα η μελέτη προέβλεπε εφαρμογή της ίδιας κατηγορίας υποστήριξης σε όλο το υπόγειο τμήμα της σήραγγας με τα μέτρα υποστήριξης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14. Τα δισδιάστατα μοντέλα κατασκευάστηκαν προσομοιώνοντας την πραγματική διατομή της σήραγγας. Η ακτίνα της διατομής είναι 6.55m και το ύψος της είναι 8.28m (απόσταση από την ερυθρά). Μετά και την εφαρμογή της τελικής επένδυσης η ωφέλιμη ακτίνα της σήραγγας προβλέπεται να είναι 5.5m. Στο σχήμα 5.24 παρουσιάζεται μια τυπική διατομή εφαρμογής της προσωρινής υποστήριξης.

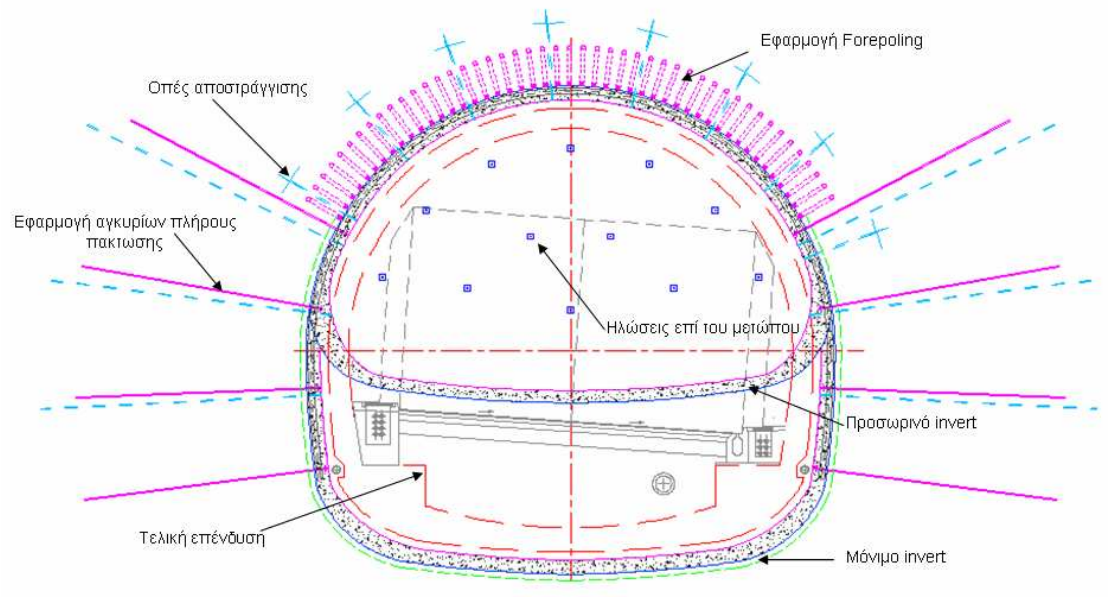
Δεδομένου ότι η διάνοιξη του μετώπου της σήραγγας έγινε σε δύο φάσεις (Top heading-Bench), η επίλυση των μοντέλων έγινε σε πολλαπλά στάδια (staged tunneling) με την μέθοδο διαδοχικής χαλάρωσης της βραχομάζας ανάμεσα από τα στάδια εκσκαφής (strain-softening). Σύμφωνα με την μέθοδο strain-softening πριν από κάθε στάδιο εκσκαφής, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που βρίσκεται μέσα στον δακτύλιο, μειώνεται ως προς το αρχικό με ένα συντελεστή που υπολογίζεται με εμπειρικές μεθόδους. Στην παρούσα μελέτη, ο λόγος μείωσης του μέτρου ελαστικότητας E/E_o υπολογίστηκε σύμφωνα με την μέθοδο που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο (5.9). Τα στάδια που περιλαμβάνονται στην προσομοίωση περιγράφονται παρακάτω:

- **Στάδιο 1 (Initial pressures):** Προσομοίωση του αρχικού πεδίου τάσεων.
- **Στάδιο 2 (loose top):** Μερική αποτόνωση της βραχομάζας στην Α’ φάση.
- **Στάδιο 3 (excavate top):** Εκσκαφή της Α’ φάσης (πλήρης αποτόνωση) και ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης.
- **Στάδιο 4 (loose bench):** Μερική αποτόνωση της βραχομάζας στην Β’ φάση.

- **Στάδιο 5 (excavate bench):** Εκσκαφή της Β’ φάσης (πλήρης αποτόνωση) και ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης.
- **Στάδιο 6 (Final support):** Πλήρης ενεργοποίηση της αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (τελική σκλήρυνση, με αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας).

Πίνακας 5.14: Αναλυτική περιγραφή εργασιών και μέτρων υποστήριξης.

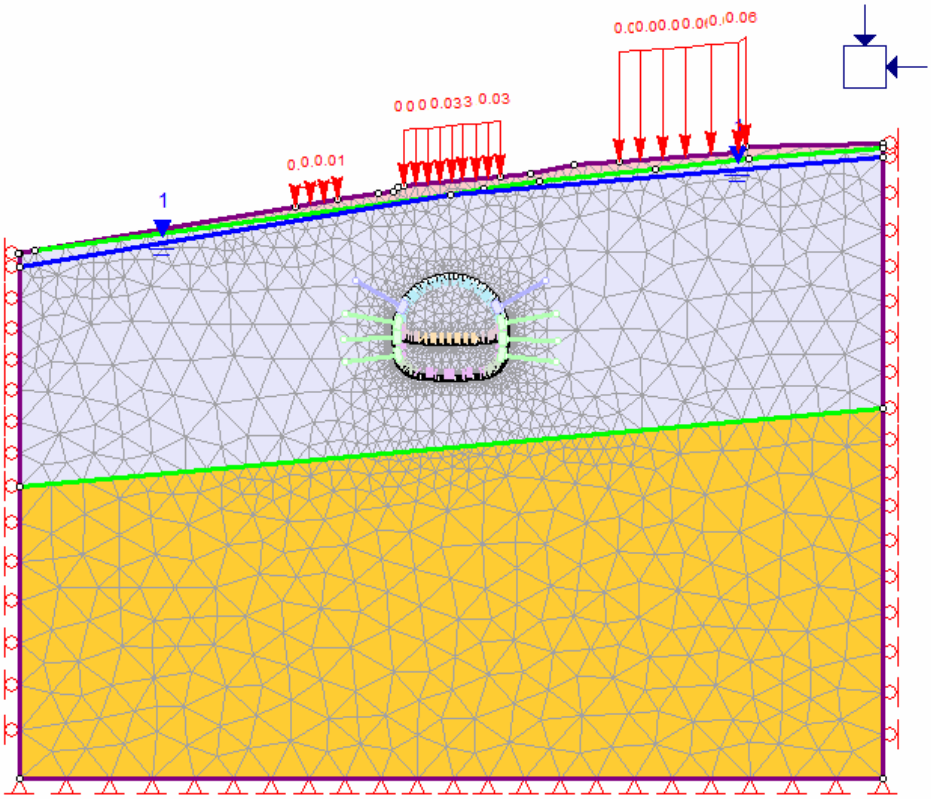
Διαδοχή εργασιών		Α' φάση	Β' φάση
1. Πρόδρομες εργασίες	1.1	Εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling) 47 δοκοί Φ140mm, t=7mm, L=9m, σε διάταξη ομπρέλας (γωνία 120ο) και σε αποστάσεις 30cm, εντός οπής διαμέτρου 180mm και υπό γωνία 6ο ως προς την οριζόντιο.	Εκσκαφή μετώπου με ήπια ηχανικά μέσα σε βήμα 2m
	1.2	Εφαρμογή ινοπλισμένου σκτροδέματος επί του μετώπου πάχους 5-7 cm	Ρίψη σφραγιστικής στρώσης ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm
	1.3	Τοποθέτηση ηλώσεων σταθεροποίησης τύπου Fiber-Glass μήκους L=9m σε ακτίνες 1, 3, 5m και	
	1.4	Εκσκαφή μετώπου διατομής με ήπια μηχανικά μέσα σε βήμα 1m	
	1.5	Διάτρηση κεκλιμένων αποστραγγιστικών οπών στη στέψη της σήραγγας σε γωνία 30ο ως προς	
	1.6	Ρίψη σφραγιστικής στρώσης ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm	
2. Εφαρμογή άμεσων μέτρων υποστήριξης	2.1	Τοποθέτηση πλέγματος T377	Τοποθέτηση πλέγματος T377
	2.2	Τοποθέτηση χαλύβδινου πλαισίου τύπου HEB140 ανά 1m μήκους	Συνέχιση του πλαισίου τύπου HEB140 ανά 1m μήκους στα τοιχώματα της Β' φάσης
	2.3	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 8cm	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 8cm
	2.4	Τοποθέτηση 4 αγκυρίων βράχου πλήρους πακτωσης με τσιμεντένεμα, διαμέτρου Φ25 και μήκους 6m εντός οπής 56-76mm σε κάναβο 2m x 1m	Τοποθέτηση εκατέρωθεν 4 αγκυρίων βράχου πλήρους πακτωσης με τσιμεντένεμα, διαμέτρου Φ25 και μήκους 6m εντός οπής 56-76mm σε κάναβο 2m x 1m
	2.5	Ρίψη σφραγιστικής στρώσης ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 9cm και τοποθέτηση πλέγματος T377
	2.6	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm στο θόλο και στις παρειές	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm
	2.7	Ρίψη άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 3cm στο θόλο και στις παρειές	Ρίψη άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 3cm στις παρειές
	2.8	Διάτρηση συστηματικών αποστραγγιστικών οπών μήκους 7m ανά 1m μήκους σήραγγας σε κάναβο 2m x 1m	Διάτρηση συστηματικών αποστραγγιστικών οπών μήκους 7m ανά 1m μήκους σήραγγας σε κάναβο 2m x 1m
3. Ακόλουθες εργασίες	3.1	Διαμόρφωση προσωρινού δαπέδου	Διαμόρφωση μόνιμου ανάστροφου δαπέδου
	3.2	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm
	3.3	Τοποθέτηση πλέγματος T377	Τοποθέτηση πλέγματος T377
	3.4	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15cm και τοποθέτηση πλέγματος T377	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm
	3.5	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm	Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm και τοποθέτηση πλέγματος T377
	3.6		Ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm



Σχήμα 5.24: Τυπική διατομή υποστήριξης.

5.10.2 Κατασκευή μοντέλων

Το σχήμα 5.25 παρουσιάζει ενδεικτικά το γεωτεχνικό προσομοίωμα της διατομής 103. Ο σχηματισμός της μάργας χαρακτηρίζεται από το κίτρινο χρώμα, ενώ ο σχηματισμός του λατυποπαγούς χαρακτηρίζεται από γκρι χρώμα. Η μπλε γραμμή δηλώνει το ύψος της πιεζομετρικής επιφάνειας, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε ισορροπία, ενώ τα κόκκινα βέλη στο πάνω μέρος του μοντέλου δηλώνουν τα φορτία επιφάνειας λόγω δόμησης.

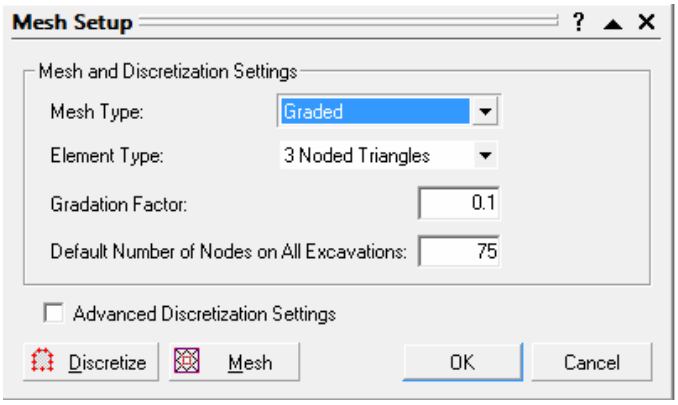


Σχήμα 5.25: Γεωτεχνικό προσομοίωμα διατομής 103.

Το εξωτερικό πλαίσιο του μοντέλου ορίστηκε σε απόσταση από τον άξονα της εκσκαφής τέτοια ώστε να μην επηρεάζει την ανάλυση λόγω συνοριακών συνθηκών. Οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν ως:

- Κύλιση στον άξονα y στις πλευρικές επιφάνειες του μοντέλου.
- Πάκτωση στην επιφάνεια που υπόκειται του μοντέλου.

Για την διακριτοποίηση του πεδίου χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων. Το πρόγραμμα δίνει την επιλογή αυτόματης διακριτοποίησης με κατάλληλη προσαρμογή από τον χρήστη. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε βαθμωτή διακριτοποίηση (πύκνωση του κανάβου γύρω από την εκσκαφή και σταδιακή αραίωση μέχρι τις εξωτερικές πλευρές του μοντέλου). Ο συντελεστής διαβάθμισης ορίστηκε ως 0.1 (Σχήμα 5.26).



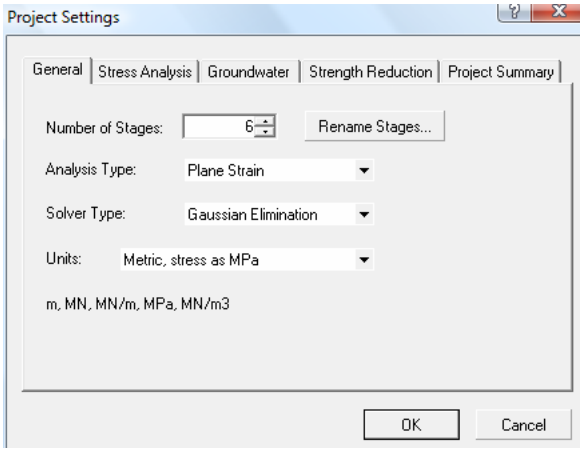
Σχήμα 5.26: Ρύθμιση κανάβου διακριτοποίησης

Μετά την διακριτοποίηση εφαρμόστηκε έλεγχος του κανάβου για την εκτίμηση της ποιότητας των στοιχείων. Οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ώστε τα στοιχεία να θεωρούνται καλής ποιότητας είναι:

- max μήκος πλευράς/min μήκος πλευράς<10
- min εσωτερική γωνία>20°
- max εσωτερική γωνία <120°

Αφού πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ποιότητας των στοιχείων, τα στοιχεία ή οι περιοχές που παρουσίασαν πρόβλημα διορθώθηκαν χειροκίνητα.

Η επίλυση των μοντέλων εφαρμόστηκε σε έξι στάδια με την θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης και για την επίλυση των μητρώων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απαλοιφής του Gauss. Η ανάλυση των τάσεων έγινε για τα έξι στάδια με μεταβλητό αριθμό βημάτων επίλυσης για κάθε στάδιο ενώ ορίστηκε ως ανώτατο όριο επαναλήψεων για κάθε βήμα 500 επαναλήψεις (Σχήμα 5.27).



Σχήμα 5.27: Γενικές ρυθμίσεις επίλυσης μοντέλων

Η σύγκλιση για κάθε στοιχείο γίνεται με ελαχιστοποίηση της απόλυτης δυναμικής ενέργειας του σύμφωνα με την σχέση:

$$\left\| \frac{\Delta U_{(i)}^{T}\left(P_{(n)} - F_{(i)}\right)}{\Delta U_{(0)}^{T}\left(P_{(n)} - F_{(0)}\right)} \right\| < 0.001 \qquad 5.26$$

Όπου, ΔU^T η μεταβολή της μετατόπισης ανάμεσα σε δύο επαναλήψεις, $P_{(n)}$ ο διάνυσμα των επιβαλλόμενων φορτίων, $F_{(o)}$το διάνυσμα των εσωτερικών δυνάμεων του στοιχείου πριν την επιβολή τάσεων $F_{(i)}$ το διάνυσμα των εσωτερικών δυνάμεων του στοιχείου μετά την επιβολή τάσεων.

5.10.3 Προσομοίωση του γεωστατικού πεδίου

Η μοντελοποίηση της επιφάνειας του εδάφους αλλά και της διεπιφάνειας των σχηματισμών, έγινε με βάση τα υψόμετρα της γεωτεχνικής μηκοτομής αλλά και των ισοϋψών καμπυλών της γενικής οριζοντιογραφίας της σήραγγας.

Στην προσομοίωση λήφθηκαν υπόψη και τα φορτία επιφάνειας λόγω δόμησης. Για κτίρια λήφθηκε τάση επιβολής 10kPa, για οδική κυκλοφορία 20kPa, ενώ για πλατείες 50kPa (Ντούλης, 2008).

Για την προσομοίωση του υδροφόρου ορίζοντα θεωρήθηκε ότι, μέσω της εφαρμογής των αποστραγγιστικών οπών, αυτός ταπεινώνεται κάθε φορά στο επίπεδο του δαπέδου της εκσκαφής. Το έδαφος θεωρείται κορεσμένο σε νερό μέχρι το ύψος της πιεζομετρικής γραμμής και λαμβάνεται υπόψη το μοναδιαίο βάρος του νερού.

Όσον αφορά το τασικό πεδίο γύρω από την σήραγγα, με βάση την οριστική μελέτη της σήραγγας (Ντούλης, 2008), ο λόγος πλευρικών ωθήσεων εκτιμήθηκε K_o= 0.2-0.87 (για ελαστικό και ισότροπο υλικό), σύμφωνα με τη σχέση (Sheorey, 1994):

$$K_o = 0.25 + 7E_h\left(0.001 + \frac{1}{z}\right) \tag{5.27}$$

Όπου:

z(m), το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους

E_h(GPa), για ισότροπο υλικό E_h=E, με E το μέτρο ελαστικότητας .

Ωστόσο για τον ορθολογικότερο σχεδιασμό του τεχνικού έργου, επιλέχθηκε σταθερή τιμή K_o=0.6. Στην πραγματικότητα όμως, ο συντελεστής αυτός αναμένεται να είναι μεγαλύτερος λόγω της επίδρασης διαφόρων παραγόντων (πχ. σεισμική δράση).

Με βάση τα προηγούμενα, τελικά οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο τιμές του K_o: α) για K_o=0.6 και β) για K_o=1. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της αλλαγής του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ήταν αμελητέα (λόγω του μικρού βάθους της κατασκευής και επομένως της μικρής γεωστατικής τάσης). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν με την θεωρητικά χειρότερη περίπτωση, δηλαδή για K_o=1.

5.10.4 Προσομοίωση μέτρων υποστήριξης

Αγκύρια

Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν, είναι παθητικά αγκύρια βράχου πλήρους πρόσφυσης. Η προσομοίωσή τους με το phase2, έγινε με την επιλογή «Plain Strand Cable» που παρέχει το πρόγραμμα. Ο λόγος που έγινε αυτή η επιλογή είναι ότι δίνει την δυνατότητα εφαρμογής πλάκας έδρασης στην επιφάνεια της βραχομάζας, ενώ εναλλακτικά η επιλογή «Fully bonded» δεν παρέχει αυτήν την δυνατότητα.

Η θεώρηση του προγράμματος για αυτόν τον τύπο αγκυρίου, είναι ότι το αγκύριο συμπεριφέρεται μεν σαν ενιαίο στοιχείο ακαμψίας, αλλά χωρίζεται σε επιμέρους στοιχεία ανάλογα με τα σημεία τομής του με τον κάνναβο των πεπερασμένων στοιχείων και η συμπεριφορά κάθε στοιχείου επηρεάζει άμεσα τα γειτονικά του. Σε αντίθεση στα αγκύρια «Fully bonded», θεωρείται ότι τα επιμέρους

στοιχεία τους δρουν ανεξάρτητα χωρίς να επηρεάζουν τα γειτονικά τους. Με τον τρόπο αυτό στα αγκύρια που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση, επιτρέπεται η μεταφορά των εφελκυστικών φορτίων, από τη βραχομάζα στο σώμα του αγκυρίου.

Σκυρόδεμα

Στην προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντικός ο ρεαλιστικός προσδιορισμός της ακαμψίας του, μέσω του μέτρου ελαστικότητας. Για να γίνει ορθή προσομοίωση το εκτοξευόμενου σκυροδέματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτό εφαρμόστηκε ως ινοπλισμένο σε συνδυασμό με ένα σύστημα πλεγμάτων και πλαισίων που θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην μοντελοποίηση.

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος τέτοιας μοντελοποίησης, είναι η θεώρηση σύμμικτης διατομής με ιδιότητες ισοδύναμες με αυτές των επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν. Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, γίνεται μοντελοποίηση της διατομής αυτής θεωρώντας ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας, σε δύο φάσεις:

α) Σύστημα σκυροδέματος + ίνες + πλέγματα

β) το προηγούμενο σύστημα + μεταλλικά πλαίσια.

Για την περίπτωση (α), λήφθηκε βιβλιογραφικά Μέτρο Ελαστικότητας, E=5000MPa (για νωπό σκυρόδεμα) με σταδιακή σκλήρυνσή του στα 20000MPa σύμφωνα με τον Πίνακα 5.15 (Οριστική μελέτη σήραγγας Αγ. Βαρβάρας, 2008, από Max, 2003):

Πίνακας 5.15: Διακύμανση μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος διάφορων τύπων ανάλογα με τις συνθήκες της βραχομάζας.

Σύνθεση σκυροδέματος & οπλισμός ενίσχυσης	Αργός ρυθμός αναδιανομής των τάσεων στην βραχομάζα (πλαστική συμπεριφορά και μικρός ρυθμός διάνοιξης)	Γρήγορος ρυθμός αναδιανομής των τάσεων στην βραχομάζα (ψαθυρή συμπεριφορά και μεγάλος ρυθμός διάνοιξης)
Αντοχή σε μια μέρα< 10MPa Ελαφριά ενίσχυση	1000-3000 MPa	1500-3000 MPa
Αντοχή σε μια μέρα> 10MPa Μέτρια ενίσχυση	3000-5000 MPa	3500-6000 MPa
Αντοχή σε μια μέρα>10MPa Σημαντική ενίσχυση / ίνες	4000-6000 MPa	4500-7500 MPa

Για την (β) περίπτωση έγινε εφαρμογή της σχέσης (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006):

$$\frac{F_{shot}\,E_{shot} + F_{HEB}\,E_{HEB}}{F_{shot} + F_{HEB}} \qquad 5.27$$

Με F_{shot} εμβαδόν σκυροδέματος, F_{HEB} εμβαδόν πλαισίου, E_{shot} μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος με ενίσχυση (όπως υπολογίστηκε κατά την α περίπτωση, E_{HEB} μέτρο ελαστικότητας χάλυβα.

Για E_{shot}=5GPa (νωπό σκυρόδεμα):

$$E_{eq} = \frac{(0.35 - 0.0043)\cdot 5 + (0.0043\cdot 200)}{0.35} = 7.4GPa:$$

Για E_{shot}=20GPa (σκυρόδεμα μετά από σκλήρυνσή του):

$$E_{eq} = \frac{(0.35 - 0.0043)\cdot 20 + (0.0043\cdot 200)}{0.35} = 22.2GPa$$

Επομένως η τελική τιμή του μέτρου ελαστικότητας υπολογίστηκε σε εύρος E_{eq}=7400-22200GPa.

Οι υπόλοιπες γεωτεχνικές παράμετροι του σκυροδέματος εκτιμήθηκαν ως:
Λόγος Poisson, v=0.20.
Θλιπτική αντοχή, σ_c=20MPa.

Η σταδιακή σκλήρυνση του σκυροδέματος, προσομοιώθηκε με την επιλογή «Stage Liner Properties».

<u>Δοκοί προπορείας</u>

Η προσομοίωση των δοκών προπορείας, έγινε έπειτα από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η ιδανική περίπτωσης διερεύνησης μιας υποστήριξης με σύστημα δοκών προπορείας, είναι η προσομοίωση του με τρισδιάστατα μοντέλα (Παπαχρήστος, 2011).

Στην περίπτωση δισδιάστατων εφαρμογών, οι αναλυτές προτείνουν βασικά δύο κύριες μεθόδους για προσομοίωση συστηματικών αγκυρώσεων γύρω από μια σήραγγα. Η πρώτη μέθοδος προτείνει την μοντελοποίηση της επιφάνειας εφαρμογής των αγκυρίων, ως μια ζώνη με αυξημένες γεωτεχνικές ιδιότητες, ανάλογα με την ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους στοιχείων (χάλυβας, τσιμεντένεμα) (πχ. Grasso

et al., 1989). Η δεύτερη μέθοδος, η οποία και εφαρμόστηκε στην παρούσα διερεύνηση, προτείνει την εφαρμογή ομοιόμορφης εσωτερικής πίεσης στον θόλο της σήραγγας, ισοδύναμης με την επιβαλλόμενη τάση που δέχεται η σήραγγα στη στέψη της (πχ. Bischoff & Smart, 1975). Οι Oreste & Peila (1996) προτείνουν για την εκτίμηση της τάσης σε απόσταση r από τον άξονα της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης, την αναδιατύπωση της εξίσωσης ισορροπίας, ως:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} + \frac{dT}{dr} \cdot \frac{r_{in}}{S_L S_{T_0}} \cdot \frac{1}{r} \qquad 5.28$$

Όπου:

S_L την απόσταση των αγκυρίων κατά μήκος του άξονα

S_{T0} την απόσταση των αγκυρίων στο επίπεδο της διατομής

r την απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

T την αξονική εφελκυστική τάση στο αγκύριο, σε απόσταση r

Εφαρμόζοντας την σχέση (5.28) για την κορυφή της σήραγγας δεδομένου ότι στο σημείο αυτό $\sigma_r=0$ και $\sigma_\theta=-\sigma_v$, τελικά προκύπτει:

$$\sigma_v = -\frac{T}{S_L S_{T_0}} \qquad 5.29$$

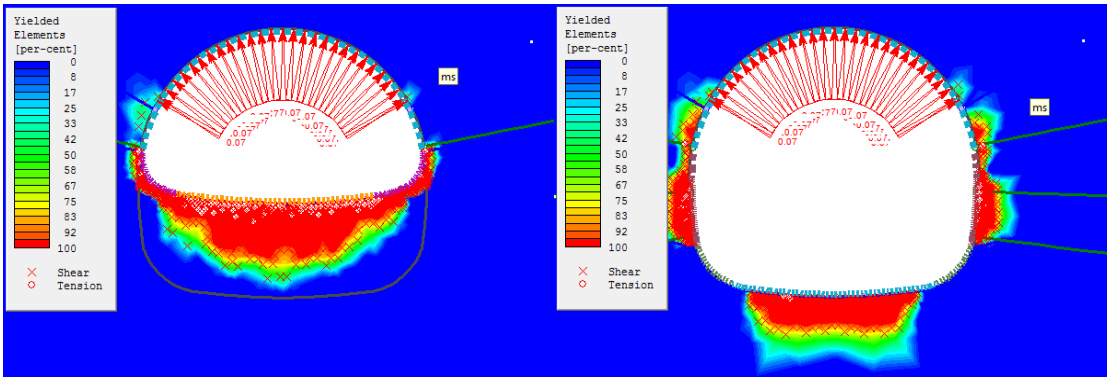
Δηλαδή για να ευσταθεί το όριο πρέπει να εφαρμοστεί μια πίεση ίση και αντίθετη από την θλιπτική τάση λόγω υπερκειμένων. Με την παραδοχή ότι η δοκός θεωρείται αμφιέρειστη εδραζόμενη στα μεταλλικά πλαίσια, με φέρουσα ικανότητα $T= 100kN$ και αναλαμβάνει φορτίο τέτοιο ώστε να εξαντλεί την φέρουσα ικανότητά της, η πίεση αυτή υπολογίστηκε ως:

$$p_i = \frac{100}{5 \cdot 0.03} = 66kPa$$

5.10.5 Αποτελέσματα

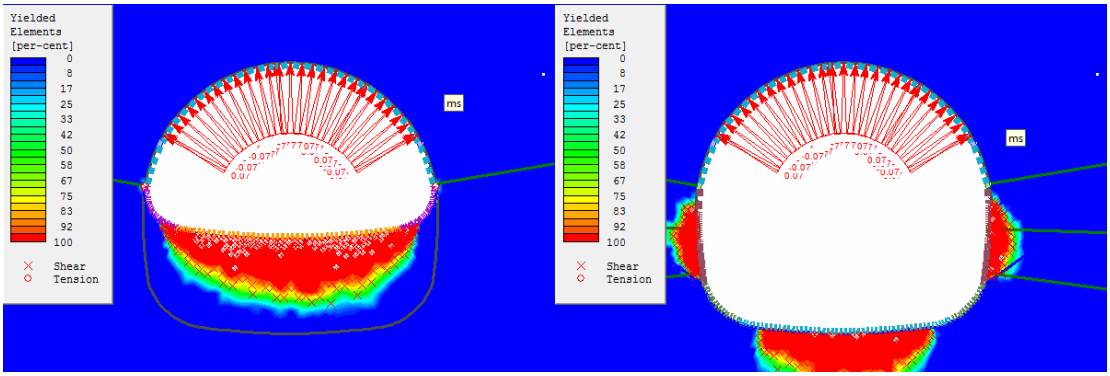
<u>Εκτίμηση πλαστικής ζώνης</u>

Στα σχήματα (5.28)-(5.31) παρουσιάζεται η ανάπτυξη πλαστικών ζωνών γύρω από τη σήραγγα, για τις τέσσερις διατομές ελέγχου και για τις δυο φάσεις εκσκαφής.



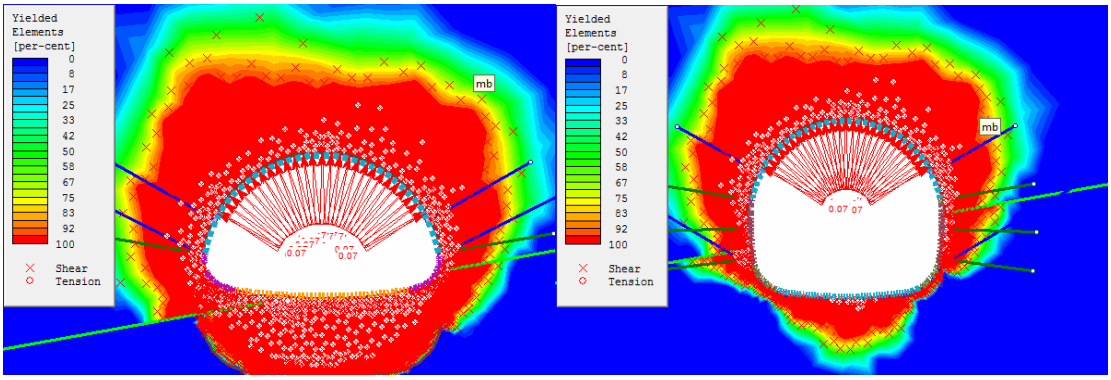
Σχήμα 5.28: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στην διατομή Α5. Αριστερά: Α' φάση, δεξιά: Β' φάση

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.28 στη διατομή Α5, δεν παρουσιάζεται ανάπτυξη πλαστικής ζώνης πάνω από την οροφή της σήραγγας, παρά μόνο στις παρειές και στο δάπεδο. Η μη ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στην οροφή οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής υπερφόρτισης για την διατομή αυτή είναι σχετικά μικρός (N_s=2.1), ενώ η ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στο κάτω μέρος οφείλεται στην αναθόλωση του δαπέδου.



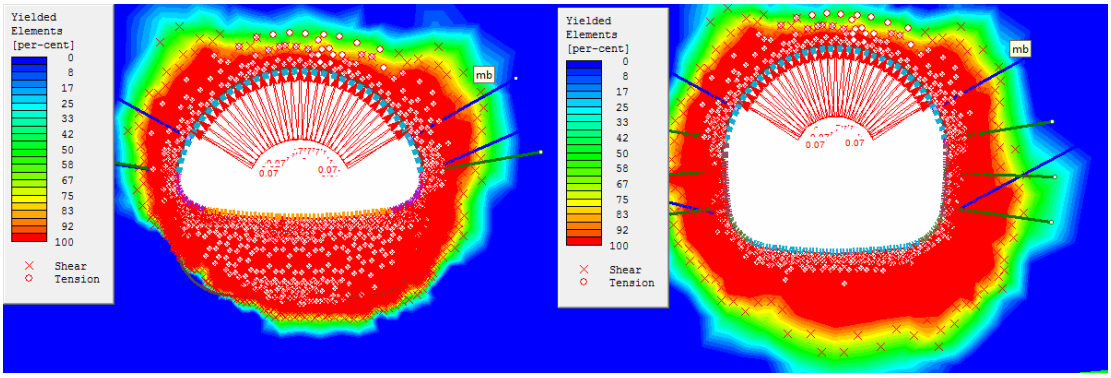
Σχήμα 5.29: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στην διατομή 117. Αριστερά: Α' φάση, δεξιά: Β' φάση

Όπως και στην προηγούμενη διατομή, έτσι και εδώ,(Σχήμα 5.29) η πλαστικής ζώνη δεν αναπτύσσεται στην οροφή αφού N_s=3.5. Παρομοίως στο κάτω μέρος λαμβάνει χώρα αναθόλωση του δαπέδου.



Σχήμα 5.30: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στην διατομή 111. Αριστερά: Α' φάση, δεξιά: Β' φάση

Στην διατομή αυτή (Σχήμα 5.30), η εμφάνιση της πλαστικής ζώνης είναι αρκετά έντονη περιμετρικά της σήραγγας και εκτείνεται σε αρκετά μεγάλη ακτίνα (r_p>2R). Αυτό το φαινόμενο είναι λογικό αφού N_s=22.4.



Σχήμα 5.31: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στην διατομή 103. Αριστερά: Α' φάση, δεξιά: Β' φάση

Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ (Σχήμα 5.31) υπάρχει έντονη ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, σε μικρότερη όμως ακτίνα. Ο συντελεστής υπερφόρτισης για την διατομή αυτή είναι N_s=8.8.

Στον πίνακα (5.16), παρουσιάζονται οι τιμές για την κατακόρυφη μετατόπιση (κατά απόλυτη τιμή) στον άξονα συμμετρίας της σήραγγας, σε τρεις κόμβους ελέγχου: α) στην οροφή, β) στο προσωρινό δάπεδο, γ) στο μόνιμο δάπεδο.

Πίνακας 5.16: Συγκλίσεις στα όρια των διατομών

Διατομές	Στάδια	Κατακόρυφη μετατόπιση (cm)		
		Οροφή	Προσωρινό δάπεδο	Μόνιμο δάπεδο
A5	loose Top	1.16	2.2	1.48
	excavate top	1.72	4.43	2.74
	loose bench	1.91	6.62	3.07
	excavate bench	1.04	(-)	4.12
17	loose Top	0.05	0.2	0.1
	excavate top	2.01	5.71	3.47
	loose bench	2.75	10.5	4.15
	excavate bench	1.12	(-)	5.85
111	loose Top	17.6	5.65	3.16
	excavate top	18.2	7.19	4.13
	loose bench	18.1	11.8	4.28
	excavate bench	16.5	(-)	5.51
103	loose Top	3.94	6.54	3.32
	excavate top	4.36	9.41	4.92
	loose bench	4.73	12.2	9.76
	excavate bench	3.7	(-)	10

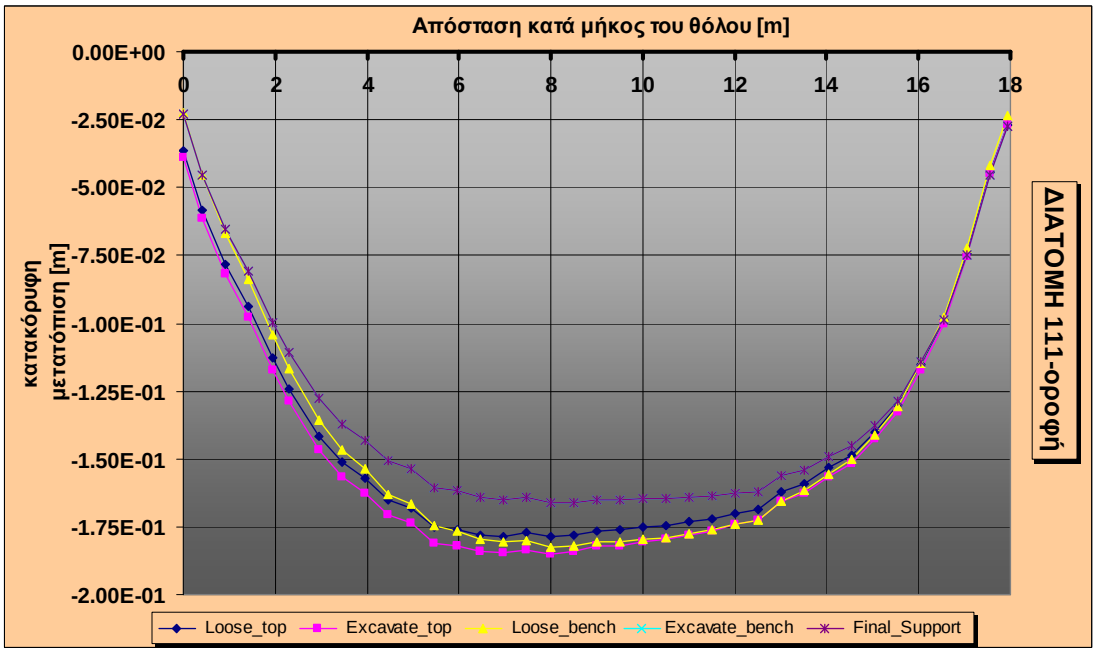
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις δεν παρουσιάζονται απαραίτητα στους κόμβους ελέγχου, που θεωρητικά αποτελούν τα πιο επισφαλή σημεία. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω της κλίσης της επιφάνειας αλλά και της επιρροής της διεπιφάνειας των σχηματισμών (για την διατομή 111). Ένας άλλος λόγος που οι συγκλίσεις δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή είναι η επιρροή των γειτονικών μέτρων υποστήριξης (κυρίως των αγκυρίων), στα σημεία ελέγχου.

Για την εκτίμηση των συγκλίσεων του τοιχώματος της σήραγγας στις παρειές, δεν εξετάστηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι ελέγχου, διότι η διακύμανση της μετατόπισης στις παρειές είναι ευμετάβλητη στα διάφορα στάδια. Ωστόσο παρουσιάζεται η διακύμανση της οριζόντιας μετατόπισης στις παρειές σε ακόλουθα διαγράμματα.

Συγκλίσεις οροφής

Όπως φαίνεται και από τις τιμές του πίνακα 5.16, η μέγιστη σύγκλιση της οροφής της σήραγγας λαμβάνει χώρα στη διατομή ελέγχου 111, με τιμή στον κόμβο ελέγχου 18.2

cm. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.32 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας για την διατομή ελέγχου 111.



Σχήμα 5.32: Διατομή 111, συγκλίσεις οροφής.

Από τα διαγράμματα συγκλίσεων οροφής (βλ. παράρτημα), προκύπτει ότι το πιο επισφαλές στάδιο είναι το στάδιο “Loose Bench”. Στο στάδιο αυτό, μοντελοποιείται η χαλάρωση της βραχομάζας, έπειτα από την εκσκαφή της Α’ φάσης και πριν την εκσκαφή της Β’ φάσης. Οι συγκλίσεις στο στάδιο αυτό είναι μεγάλες, εφόσον η υποστήριξη της Α’ φάσης καλείται να αναλάβει τα επιπρόσθετα φορτία που προκαλεί η χαλάρωση του δαπέδου (bench) μετά την εκσκαφή, η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι πολύ μεγάλη, με μέτρο ελαστικότητας E < 10MPa.

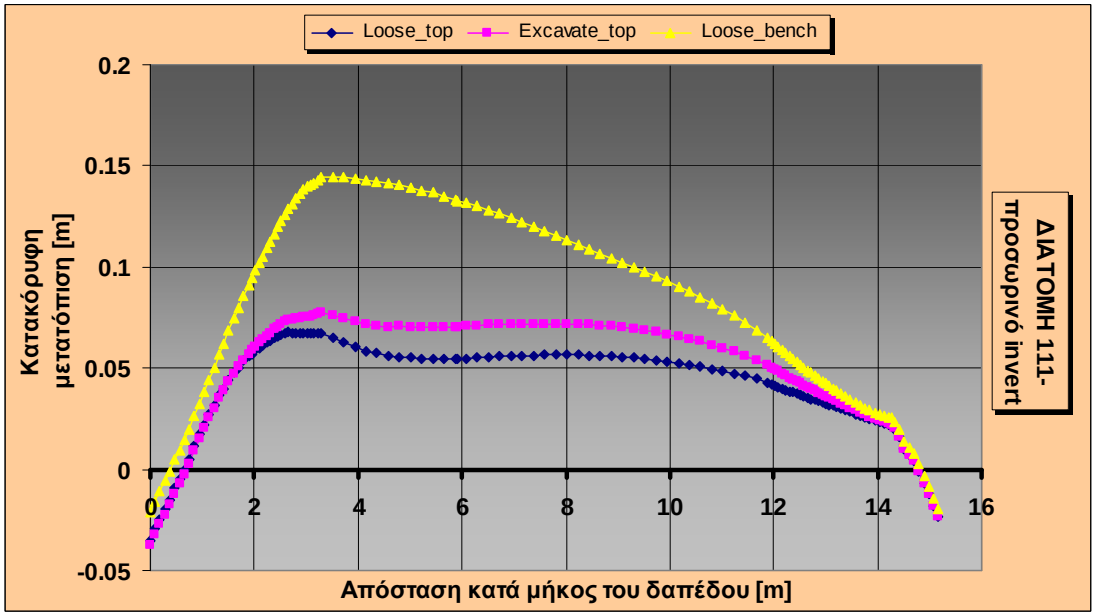
Στις περιπτώσεις των διατομών 103, 117 και A5, οι μέγιστες τιμές είναι αρκετά ανεκτές αφού απέχουν πολύ από τα όρια των μέγιστων επιτρεπτών συγκλίσεων που ορίζονται από τις γραμμές ελάχιστης εκσκαφής της σήραγγας. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο σύγκλισης έχει εκτιμηθεί στα 20cm, όπως ορίζει η τεχνική μελέτη της σήραγγας.

Ωστόσο στην περίπτωση της διατομής 111 (σχήμα 5.29), οι συγκλίσεις της οροφής αγγίζουν το μέγιστο επιτρεπτό όριο σύγκλισης. Η διατομή 111, τέμνει την διεπιφάνεια των στρωμάτων. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η Α’ φάση της διατομής κατά το μεγαλύτερο ποσοστό βρίσκεται στον σχηματισμό του

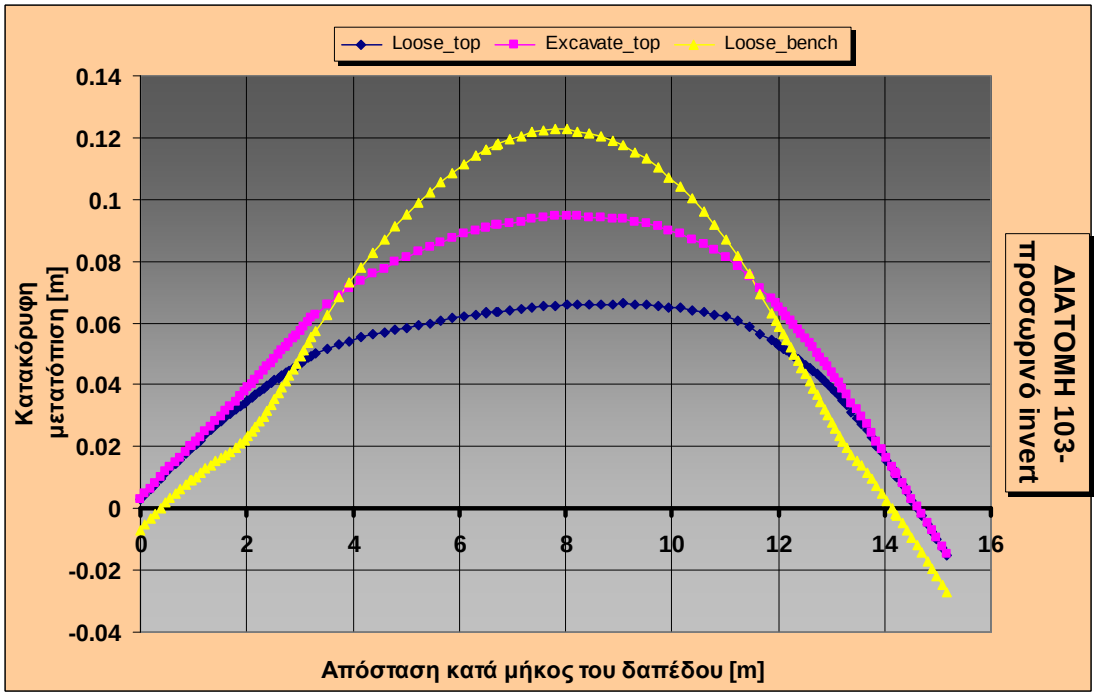
λατυποπαγούς, ενώ και ένα μικρό ποσοστό της Β' φάσης βρίσκεται μέσα στον σχηματισμό αυτόν. Οι τιμή του μέτρου ελαστικότητας που προκύπτει από την χαλάρωση, για τα εδαφικά τμήματα που βρίσκονται μέσα στον σχηματισμό αυτόν, είναι 0.71MPa, για την Α' φάση και 1.5MPa για την Β' φάση. Επομένως αυτά τα εδαφικά στοιχεία έχουν μηδενικό χρόνο αυτοϋποστήριξης και αμελητέα αντίσταση σε παραμόρφωση.

Αναθόλωση δαπέδου

Η μεγαλύτερη αναθόλωση του προσωρινού δαπέδου (στον κόμβο ελέγχου), παρατηρείται στην διατομή 103 με τιμή 12.2 cm, ενώ ακολουθεί η διατομή 111 με 11.8cm. Στα επόμενα διαγράμματα (σχήματα 5.33-5.34) παρουσιάζεται η κατανομή των συγκλίσεων για το προσωρινό δάπεδο ανάστροφου τόξου για τις διατομές 111 και 103 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.33:Διατομή 111, συγκλίσεις προσωρινού δαπέδου

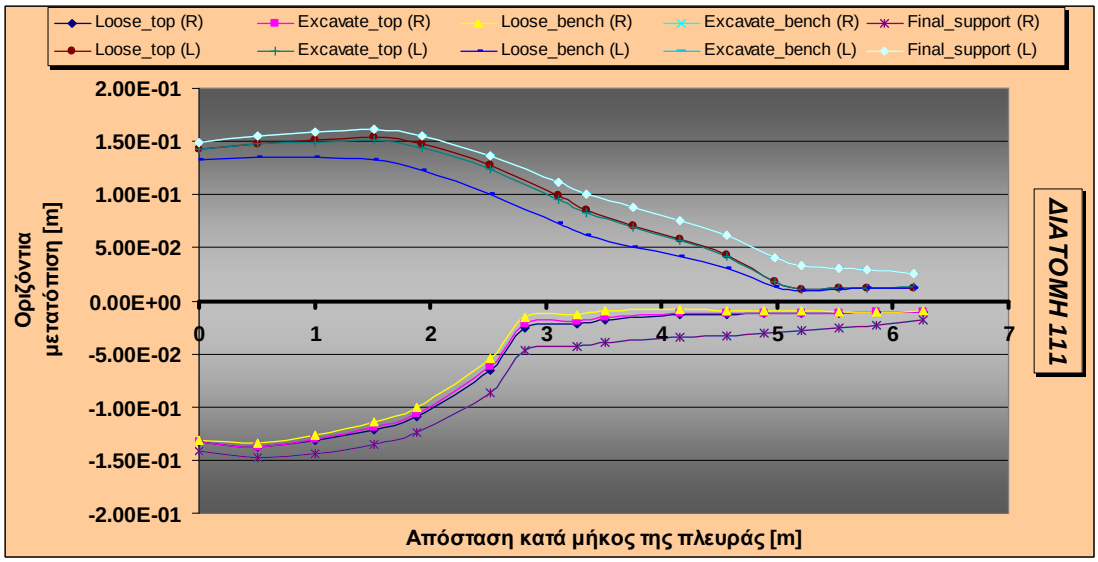


Σχήμα 5.34: Διατομή 103, συγκλίσεις προσωρινού δαπέδου.

Σε όλο το μήκος εφαρμογής, ανάμεσα από τις δύο αυτές διατομές, εκτείνεται ο σχηματισμός του λατυποπαγούς. Η αναθόλωση του δαπέδου λαμβάνει χώρα αφού δημιουργείται μία ελεύθερη επιφάνεια, λόγω της εκσκαφής της Α' φάσης. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας παίρνει πολύ μικρές τιμές, το δάπεδο υφίσταται πολύ μεγάλες μετατοπίσεις.

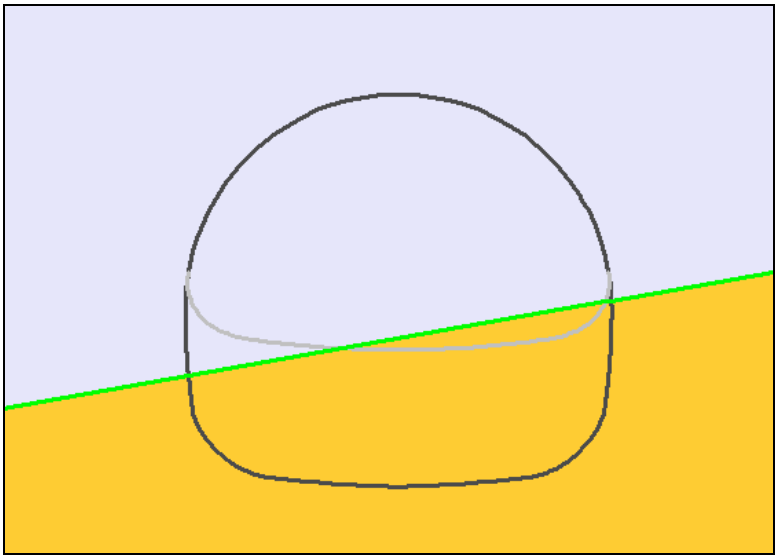
Συγκλίσεις στις παρειές

Ακολούθως παρουσιάζονται οι συγκλίσεις στις παρειές της διατομής 111, όπου και παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές της οριζόντιας μετατόπισης. (Σχήμα 5.35).



Σχήμα 5.35: Διατομή 111, συγκλίσεις τοιχωμάτων στις παρειές

Στο παραπάνω σχήμα οι αρνητικές τιμές προσδιορίζουν τις συγκλίσεις της δεξιάς πλευράς της διατομής ενώ οι θετικές τιμές, τις συγκλίσεις της αριστερής. Είναι εμφανής η απότομη αλλαγή της καμπύλης λόγω επιρροής της διεπιφάνειας των σχηματισμών, που βρίσκεται στο μισό περίπου της δεξιάς πλευράς, ενώ βρίσκεται λίγο πριν το τελείωμα της αριστερής πλευράς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα (5.36).



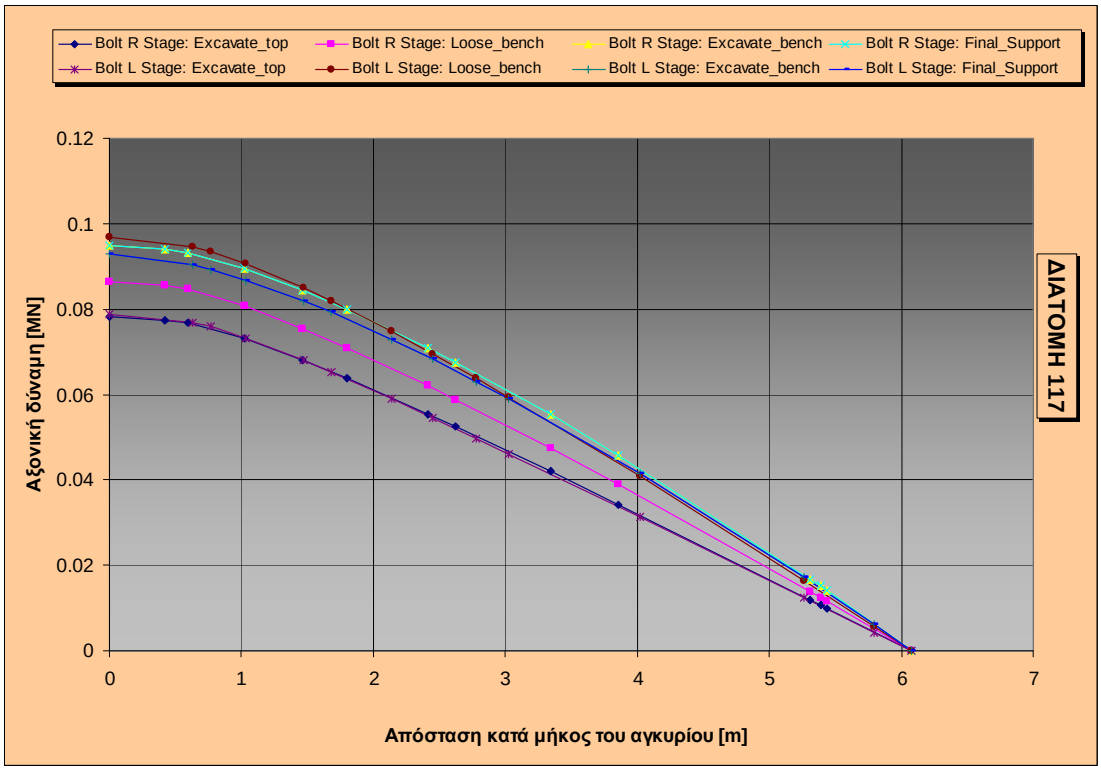
Σχήμα 5.36: Διεπιφάνεια σχηματισμών (πράσινη γραμμή), στην διατομή 111.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα του σχήματος, αλλά και στα υπόλοιπα διαγράμματα των οριζόντιων μετατοπίσεων (παράρτημα), γίνεται σαφής διαχωρισμός του τελικού σταδίου “Final support”, από αυτό του “Excavate bench”. Στο τελικό

στάδιο γίνεται προσομοίωση της τελικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος, με αύξηση του μέτρου ελαστικότητάς του και ενεργοποίηση του για την αποφυγή επιπρόσθετων πλαστικών παραμορφώσεων.

Εκτίμηση αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια

Από την εκτίμηση της κατανομής της αξονικής δύναμης των αγκυρίων, προκύπτει ότι για όλα τα αγκύρια η αξονική δύναμη που επιβάλλεται δεν υπερβαίνει το μισό της φέρουσας ικανότητας του αγκυρίου που ορίστηκε 200kN για τα μονά αγκύρια και 400kN για τα διπλά. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο σχήμα 5.37 η κατανομή της αξονικής δύναμης για την διατομή 117.

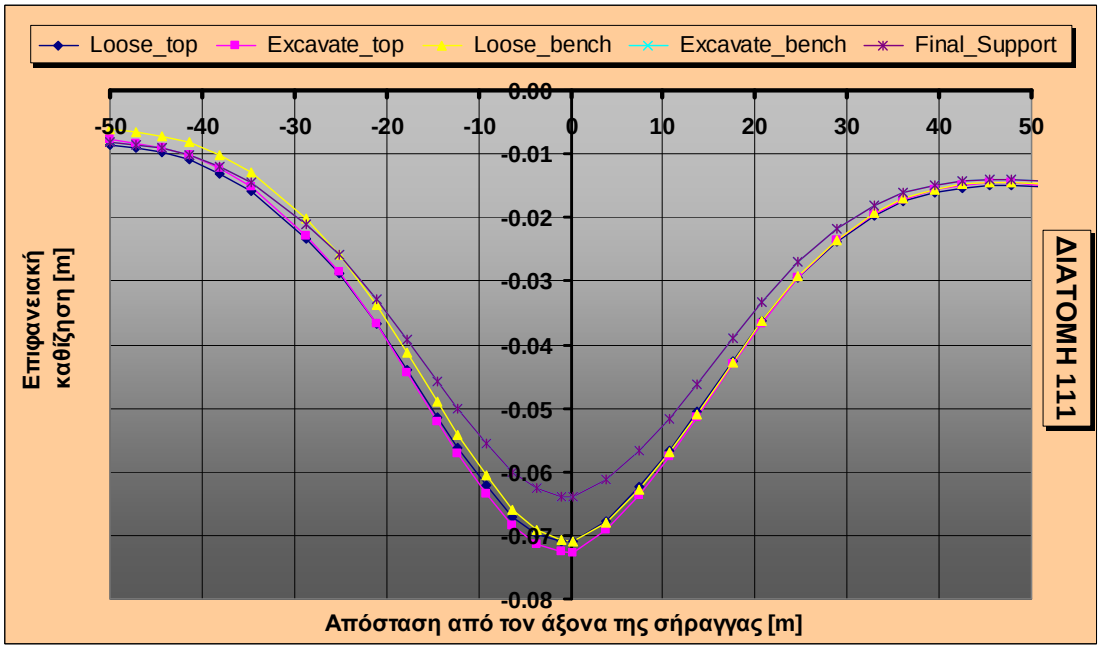


Σχήμα 5.37: Κατανομή της αξονικής δύναμης κατά μήκος των μονών αγκυρίων δεξιά και αριστερά του θόλου.

Εκτίμηση επιφανειακών καθιζήσεων

Όσον αφορά τις καθιζήσεις επιφάνειας, αυτές δεν ξεπέρασαν τα επιτρεπτά όρια. Οι μεγαλύτερες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων παρατηρήθηκαν στη διατομή ελέγχου 111 παρά το γεγονός ότι η διατομή με το μικρότερο ύψος υπερκείμενων

γαιών είναι η 103. Το σχήμα 5.38 παρουσιάζει τις επιφανειακές καθιζήσεις συναρτήσει της απόστασης από τον άξονα της σήραγγας για την διατομή 111.



Σχήμα 5.38: Διατομή 111, επιφανειακή καθίζηση.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Με βάση το γεωλογικό αλλά και υδρογεωλογικό καθεστώς που επικρατεί στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας της Αγίας Βαρβάρας, είναι προφανές ότι αντιμετωπίστηκαν πολύ δυσμενείς συνθήκες κατά την εκσκαφή και εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης αυτής.

Οι συνθήκες αυτές αφορούν κυρίως στον πολύ φτωχής ποιότητας σχηματισμό του μαργαϊκού λατυποπαγούς, γεγονός που αποτελεί την κύρια αιτία για την εφαρμογή της προπασσάλωσης της οροφής, αφού ο σχηματισμός αυτός έχει πολύ μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης. Δεύτερος αλλά εξίσου καταλυτικός παράγοντας που επιβάρυνε την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης, αποτελεί το γεγονός ότι η σήραγγα συναντά την διεπιφάνεια δύο σχηματισμών με σχετικά διαφορετική υδροπερατότητα. Ο υδροφόρος ορίζοντας που αναπτύσσεται στην περιοχή χαρακτηρίζεται μερικώς υπό πίεση, ενώ αναπτύσσονται και επικρεμμάμενοι υδροφόροι ορίζοντες σε πιο διαπερατές φάσεις των μαργαϊκών σχηματισμών. Η υψηλή βροχόπτωση που παρατηρήθηκε κατά το χρονικό διάστημα διάνοιξης του κύριου σώματος της Α’ φάσης της σήραγγας (Άνοιξη- Καλοκαίρι, 2011), επιβάρυνε τις υπάρχουσες συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η πολύ καλή πρόβλεψη των περιβαλλόντων συνθηκών για την κατασκευή ενός υπόγειου έργου, είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία δεδομένου ότι το υπόγειο πεδίο παρουσιάζει μια δυναμική εξέλιξη στο χώρο και στο χρόνο (κλιματολογικές συνθήκες, ερπυσμός, τεκτονισμός). Για το λόγο αυτόν, είναι σημαντικό πριν από οποιαδήποτε εκτίμηση να γίνεται μια συντηρητική προσέγγιση των ιδιοτήτων της βραχομάζας. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βαθμός αποτόνωσης της βραχομάζας πρέπει να προσεγγίζεται ρεαλιστικά πριν από οποιαδήποτε προσπάθεια για πρόβλεψη τάσεων ή συγκλίσεων κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, ώστε να μην γίνει υποτίμηση ή υπερτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

- Η εμπειρική μέθοδος του Chern βασίζεται στην ελαστοπλαστική ανάλυση του πεδίου, για την εκτίμηση του λόγου αποτόνωσης και βήματος εκσκαφής έναντι άλλων μεθόδων ελαστικής ανάλυσης που οδηγούν σε υπερτίμηση των τελικών συγκλίσεων. Από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει ότι οι τελικές συγκλίσεις ανυποστήρικτου ανοίγματος στις διατομές 103, 117 και A5 είναι σε ανεκτά επίπεδα, έναντι της διατομής 111 για την οποία υπολογίστηκε τελική σύγκλιση 823mm.

- Σε αντίθεση με την εμπειρική μέθοδο, η αξονοσυμμετρική ανάλυση δίνει σχετικά μεγαλύτερες συγκλίσεις όταν αυτές κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα (πχ. διατομή A5), ενώ δίνει πολύ μικρότερες συγκλίσεις, όταν αυτές βρίσκονται σε πολύ υψηλά επίπεδα (πχ. διατομή 111). Πριν από την προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για το γεγονός αυτό, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο διαφορετικός ορισμός των συνοριακών συνθηκών των δύο μεθόδων, η διαφορετική εισαγωγή δεδομένων αλλά και η ευαισθησία των αριθμητικών μοντέλων στην γεωμετρία, στη διακριτοποίηση και στην επιρροή των συνοριακών συνθηκών. Η διερεύνηση σε αυτήν την κατεύθυνση χρήζει εκτενέστερης ανάλυσης.

- Όσον αφορά τις αριθμητικές αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης, το πρόγραμμα Phase2 v.6, δίνει την δυνατότητα εφαρμογής σταδιακής εκσκαφής σε μία ανάλυση, χωρίς να χρειάζεται η κατασκευή μεμονωμένων μοντέλων και εφαρμογή ξεχωριστών αναλύσεων. Επιπλέον το πρόγραμμα παρέχει αρκετά προεπιλεγμένα εργαλεία που προσομοιώνουν τα αγκύρια, και τις επενδύσεις ως ξεχωριστά στοιχεία. Συγκεκριμένα για την μοντελοποίηση των αγκυρίων παρέχονται πέντε διαφορετικοί τύποι αγκυρίων μηχανικών και συμβατικών και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει τις ρυθμίσεις που αφορούν την αγκύρωση, την προένταση αλλά και την εφαρμογή πλακών έδρασης ανάλογα με τις απαιτήσεις της υποστήριξης. Όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών, παρέχεται μεγάλη ποικιλία στα μοντέλα των υλικών άλλα και στα κριτήρια αστοχίας που υπακούουν.

- Η μοντελοποίηση των δοκών προπορείας με την εφαρμογή της μεθόδου των Oreste & Peila, κρίνεται αρκετά επαρκής δεδομένου ότι προηγήθηκε μοντελοποίηση των δοκών προπορείας με τρισδιάστατες αναλύσεις με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών Flac 3d, 2009 και τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα.

6.2 Προτάσεις

- Για την πιο ρεαλιστική εκτίμηση της αποτόνωσης και του ποσοστού σύγκλισης κατά μήκος της σήραγγας, προτείνεται η εκτενέστερη διερεύνηση και σύγκριση των διαφορετικών εμπειρικών μεθόδων που εφαρμόζονται κατά καιρούς (πχ. Panet, Chern, Unlu & Gercer, Carranza-Torres & Fairhurst, Vlachopoulos & Diederichs).

- Προτείνεται επίσης, ο έλεγχος ευαισθησίας του προγράμματος Phase2 ιδιαίτερα για τα αξονοσυμμετρικά μοντέλα, ώστε να εντοπιστεί η ανοχή του μοντέλου στην αλλαγή των διαστάσεων, την μεταβλητότητα των συνοριακών συνθηκών αλλά και των επιβαλλόμενων φορτίων.

- Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή ανάδρομων αναλύσεων με γεωτεχνικές μετρήσεις τόσο για τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων (με κλισιόμετρα, εκτασιόμετρα) και για την εκτίμηση της διανομής των τάσεων στη βραχομάζα (με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα) αλλά και για τις επιφανειακές καθιζήσεις, εφόσον οι μετρήσεις αυτές είναι προσβάσιμες,

- Στο πεδίο των δισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες προσομοίωσης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, μεμονωμένα για τον έλεγχο επάρκειάς τους. Μια ενδιαφέρουσα διερεύνηση θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ανάλυση για ένα δεδομένο μήκος εφαρμογής, της επένδυσης του σκυροδέματος με ξεχωριστή ανάλυση των μεταλλικών πλαισίων ή/και των δομικών πλεγμάτων, όχι ως σύμμικτη διατομή αλλά με μοντελοποίηση των επιμέρους συμμετεχόντων στοιχείων.

- Το πρόγραμμα Phase2 παρέχει επίσης την ξεχωριστή ανάλυση της υδροφορίας με την επιλογή “Groundwater→Finite element analysis”. Προτείνεται η εφαρμογή τέτοιας ανάλυσης με χρήση δεδομένων από πιεζόμετρα και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά από αναλύσεις με προγράμματα που βρίσκονται σε ευρύτερη χρήση (πχ. Seep).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ.: “Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων”. Εκδόσεις “Ίων”, 2002.

2. Αγιουτάντης, Ζ.: “Στοιχεία Διάτρησης και Ανατίναξης”. Εκδόσεις “Ίων”, 2010.

3. Βιόπουλος, Π.: “Παραμετρική Διερεύνηση Εντατικής Κατάστασης κατά τη Διάνοιξη Σήραγγας με την Μέθοδο Προπασσάλωσης Οροφής”. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο κρήτης, 2006.

4. Δουβής, Π.: “Παραμετρική Ανάλυση Ευστάθειας Σήραγγας που Εξορύσσεται με την μέθοδο της Προπασσάλωσης Οροφής”. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2002.

5. Εξαδάκτυλος, Γ., Σταυροπούλου, Μ.: “Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων”. Ακαδημαϊκές σημειώσεις, 2006.

6. Καββαδάς, Μ.: “Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων”. Ακαδημαϊκές σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2000.

7. Λιαράκος, Ε.: “Σεισμική Ανάλυση Υπόγειων Τεχνικών Έργων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης,2005.

8. Μαραγκός, Χ.: “Τεχνικά Έργα Υποδομής-Κατασκευές στην Επιφάνεια του Βράχου-Υπόγειες Κατασκευές-Φράγματα”. Εκδοτική Όμηρος, 1999.

9. Μπουκοβάλας, Γ.: “Υπολογιστικές Μέθοδοι στη Γεωτεχνική”. Ακαδημαϊκές σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.

10. Ντούλης, Γ.: “Οριστική Μελέτη Τεχνικών Έργων: Σήραγγα Αγίας Βαρβάρας”, 2008.

11. Παπαχρήστος, Ε.: “Τρισδιάστατη Αριθμητική Διερεύνηση Εντατικοπαραμορφωσιακού Πεδίου σε Ημίσκληρα Πετρώματα”. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011.

12. Σοφιανός, Α.: “Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων”. Ακαδημαϊκές σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.

Διεθνής βιβλιογραφία

1. Aksoy, C.O., Onargan, T.: "The Role of Umbrella Arch and Face Bolt as Deformation Preventing Support System in Preventing Building Damages". Tunnelling and Underground Space Technology 25, 553-559, Elsevier, 2010.

2. Brandy B. H. G and E. T. Brown: "Rock Mechanics – For Underground Mining", Third Edition. Kluwer Academic Publishers, 2004.

3. Carranza-Torres, C., Fairhurst, C.: "Application of The Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that satisfy the Hoek_Brown Failure Criterion". Tunnelling and Underground Space Technology 15, pp.187-213, Elsevier Science Ltd., 2000.

4. Chern, J.C., Hsiao, F.Y., zyu, C.W.: "An Empirical Criterion for Tunnel Construction". Proceedings og Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, pp. 222-227, 1998.

5. Cook, R.D., Malkus D.S., Plesha, M.E.: "Concepts and Applications of Finite Element Analysis". Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.

6. Desai, C.S., Christian, J.T.: "Numerical Methods in Geotechnical Engineering". McGraw-Hill, 1977.

7. Fagan, M. J.: "Finite Element Analysis – Theory and Practice". Longman Group, 1996.

8. Heiniö, M.: "Rock Excavation Handbook". Copyright Sandvik Tamrock Corp., 1999.

9. Hoek, E.: "Tunnel Support inWeak Rock". Proceedings of Regional Symposium of Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 1998.

10. Hoek, E.: “Big Tunnels in Bad Rock-Thirty-Sixth Karl Terzaghi Lecture”. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, No.9, 2001.

11. Hoek, E.: “Practical Rock Engineering”. Notes, Evert Hoek Consulting Engineering Inc., 2007.

12. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B.: “Hoek-Brown Failure Criterion, 2002-Edition”. Documentation, Rocscience Inc., 2002.

13. Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F.: “ Support of Underground Excavations in Hard Rock”. A.A. Balkema Publishers, 1995.

14. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W.,Zimmerman, R.W.: “Fundamentals of Rock Mechanics”. Fourth Edition, Blackwell Publishing, 2007.

15. Johansen, J., Mathiesen, C.F.: “Modern Trends in Tunnelling and Blast Design”. A.A. Balkema Publishers, 2000.

16. Kavvadas, M.: “Numerical Analysis in the Design of Urban Tunnels”. Keynote lecture, National Technical University of Athens, 2005.

17. Kolymbas, D.: “Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling”. Rational Tunnelling Summerschool, “Logos” Verlag Berlin, 2003.

18. Kolymbas, D.: “Tunnelling and Tunnel Mechanics-A Rational Approach to Tunnelling”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

19. Kosmelis, C., Blayney, N., Hindle, D.: “The Use of Lattice Girders in the Construction of Tunnels”.

20. Lunardi, P.: “Design and Construction of Tunnels”, Springer, 2008.

21. Max, J.: “Factors of Shotcrete Lining Design”. Tunnels and Tunneling International, 2003.

22. Oreste, P., Peila, D.: “Radial Passive Rockbolting in Tunnelling Design with a New Convergence-Confinement Model”. International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics, Volume 33, pp. 443-454, Elsevier Science Ltd., 1996.

23. Peila, D., Oggeri, C.: “Tunnel Engineering-Various Excavation & Auxiliary Methods in Tunnelling”. ITA/AITES Training Course, 2006.

24. Peila, D., oreste, P., Rabajoll, G. Trabucco, E.: “The Pretunnel Method, A New Italian Technology for Full-face Tunnel Excavation: A Numerical Approach to Design”. Tunnelling and Underground Space Technology 10, pp. 367-375, Elsevier Science Ltd., 1995.

25. Singh, B., Goel, R.K.: “Tunneling in Weak Rocks”. Elsevier Geoengineering Book Series, Volume 5, 2006.

26. Tonon, F.: “ADECO Full-face Tunnel Excavation of two 260m^2 tubes in clays with sub-horizontal jet-grouting under minimal urban cover”. Tunnelling and Underground Space Technology 26, pp. 252-266, 2011.

27. Tonon, F., A. Mammino, D. Vanni, P. G. Borghi and A. Bertero: “Pretunnel technology: applications and design methods”, Geotechnical and Geological Engineering 23, No 5, pp. 487-518, 2005.

28. Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S.: “Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels”. Springer-Verlag, 2009.

29. Volkmann, G.M., Schubert, W., Button, E.A.: “A Contribution to the Design of Tunnels Supported by a Pipe Roof”. Proceedings of 41st Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, 2006.

30. Zienkiewicz, O.C., Taylor R.L., Zhu, J.Z.: “The Finite Element Method-Its Basis and Fundamentals”. Sixth Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

Δικτυακοί τόποι

1. ec.europa.eu
2. www.engineering.com
3. w3.krtco.tw
4. www.lotsberg.net
5. www.magmineserv.com
6. www.rocscience.com
7. www.tunnelseis.de

Φωτογραφικό υλικό

Έμυ Γιαλύτη, J&P Αβαξ, Εργοτάξιο σήραγγας, Αγία Βαρβάρα, Ηράκλειο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 103- Α' φάση
σήραγγα μέσα στο λατυποπαγές (mb), με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	29	0.506145
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	7.25	0.126536
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	-	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	0.3	
Λόγος poisson	ν=	0.35	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	11	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.22	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	5.00	
Απόσταση	r(m)=	5	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	2.882
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.292
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.050
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	8.800
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	45.000
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	16.667
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.543

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	45.00	-	0	1.000	1.000	0	0.22
0.99837	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00045	5.0	0.993	44.68	-	0.000269	0.998	1.002	0.05379	0.219641
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00060	4.8	0.991	44.57	-	0.000363	0.998	1.002	0.0726	0.219516
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00082	4.6	0.987	44.42	-	0.000495	0.997	1.003	0.099	0.21934
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00003	0.00110	4.4	0.983	44.23	-	0.00066	0.996	1.004	0.132	0.21912
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00004	0.00151	4.2	0.977	43.95	-	0.000907	0.995	1.006	0.1815	0.21879
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00005	0.00200	4.0	0.969	43.61	-	0.001205	0.993	1.007	0.2409	0.218394
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00006	0.00263	3.8	0.960	43.19	-	0.001584	0.990	1.010	0.3168	0.217888
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00009	0.00356	3.6	0.946	42.57	-	0.002145	0.987	1.013	0.429	0.21714
0.983	0.017	NO	1.000	-	0.00011	0.00466	3.4	0.930	41.86	-	0.002805	0.983	1.017	0.561	0.21626
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00015	0.00630	3.2	0.907	40.83	-	0.003795	0.977	1.023	0.759	0.21494
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00020	0.00835	3.0	0.880	39.60	-	0.005033	0.970	1.031	1.0065	0.21329
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00026	0.01095	2.8	0.847	38.12	-	0.0066	0.960	1.040	1.32	0.2112
0.940	0.060	NO	1.000	-	0.00040	0.01643	2.6	0.783	35.25	-	0.0099	0.940	1.060	1.98	0.2068
0.930	0.070	NO	1.000	-	0.00046	0.01917	2.4	0.754	33.93	-	0.01155	0.930	1.070	2.31	0.2046
0.900	0.100	NO	1.000	-	0.00066	0.02738	2.2	0.675	30.38	-	0.0165	0.900	1.100	3.3	0.198
0.870	0.130	NO	1.000	-	0.00086	0.03560	2.0	0.607	27.31	-	0.02145	0.870	1.130	4.29	0.1914
0.840	0.160	NO	1.000	-	0.00106	0.04382	1.8	0.548	24.65	-	0.0264	0.840	1.160	5.28	0.1848
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00145	0.06025	1.6	0.450	20.25	-	0.0363	0.780	1.220	7.26	0.1716
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00185	0.07668	1.4	0.372	16.76	-	0.0462	0.720	1.280	9.24	0.1584
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00231	0.09585	1.2	0.300	13.50	-	0.05775	0.650	1.350	11.55	0.143
0.550	0.450	NO	1.000	-	0.00297	0.12323	1.0	0.220	9.90	-	0.07425	0.550	1.450	14.85	0.121
0.457	**0.543**	NO	1.000	-	0.00358	0.14870	0.8	0.163	7.32	-	0.089595	0.457	1.543	17.919	0.10054
0.380	0.620	YES	1.079	0.003868	0.00427	0.17697	0.6	0.124	5.58	5.3930442	-	0.380	1.322	21.32579	0.0836
0.314	0.686	YES	1.163	0.00417	0.00507	0.21020	0.4	0.096	4.30	5.8136299	-	0.314	1.132	25.33024	0.06908
0.250	0.750	YES	1.265	0.004538	0.00615	0.25517	0.2	0.071	3.21	6.3269272	-	0.250	0.948	30.7498	0.055

0.200	0.800	YES	1.367	0.004901	0.00734	0.30439	0.0	0.055	2.45	6.8331451	-	0.200	0.804	36.68113	0.044
0.163	**0.837**	YES	1.459	0.005231	0.00852	**0.35338**	**-0.2**	**0.043**	**1.94**	7.2929495	-	0.163	0.697	**42.58461**	**0.03586**
0.130	0.870	YES	1.558	0.005586	0.00990	0.41079	-0.4	0.033	1.50	7.7881137	-	0.130	0.602	49.50255	0.0286
0.110	0.890	YES	1.628	0.005838	0.01095	0.45454	-0.6	0.028	1.25	8.1397748	-	0.110	0.544	54.77459	0.0242
0.091	0.909	YES	1.704	0.006111	0.01216	0.50467	-0.8	0.023	1.02	8.5200109	-	0.091	0.490	60.81557	0.02002
0.075	0.925	YES	1.777	0.006371	0.01338	0.55533	-1.0	0.018	0.83	8.8831999	-	0.075	0.443	66.92037	0.0165
0.058	0.942	YES	1.865	0.006686	0.01495	0.62028	-1.2	0.014	0.63	9.322507	-	0.058	0.394	74.7474	0.01276
0.050	0.950	YES	1.910	0.006851	0.01581	0.65584	-1.4	0.012	0.54	9.5520811	-	0.050	0.371	79.03266	0.011
0.041	0.959	YES	1.966	0.007051	0.01688	0.70054	-1.6	0.010	0.44	9.830882	-	0.041	0.345	84.41856	0.00902
0.034	0.966	YES	2.013	0.007219	0.01782	0.73930	-1.8	0.008	0.36	10.0647	-	0.034	0.325	89.09033	0.00748
0.029	0.971	YES	2.048	0.007346	0.01854	0.76947	-2.0	0.007	0.31	10.241871	-	0.029	0.311	92.72499	0.00638
0.024	0.976	YES	2.086	0.007479	0.01933	0.80195	-2.2	0.006	0.25	10.428339	-	0.024	0.296	96.63907	0.00528
0.020	0.980	YES	2.117	0.007592	0.02000	0.82978	-2.4	0.005	0.21	10.584765	-	0.020	0.285	99.99306	0.0044
0.016	0.984	YES	2.150	0.007709	0.02071	0.85942	-2.6	0.004	0.17	10.74815	-	0.016	0.273	103.5653	0.00352
0.013	0.987	YES	2.175	0.0078	0.02128	0.88295	-2.8	0.003	0.14	10.87557	-	0.013	0.265	106.4003	0.00286
0.011	0.989	YES	2.193	0.007863	0.02167	0.89929	-3.0	0.003	0.12	10.962976	-	0.011	0.259	108.37	0.00242
0.009	0.991	YES	2.210	0.007927	0.02208	0.91620	-3.2	0.002	0.09	11.052436	-	0.009	0.253	110.4072	0.00198
0.008	0.992	YES	2.220	0.00796	0.02229	0.92487	-3.4	0.002	0.08	11.097963	-	0.008	0.250	111.4521	0.00176
0.007	0.994	YES	2.233	0.008009	0.02261	0.93816	-3.6	0.002	0.07	11.167277	-	0.006	0.246	113.0536	0.00143
0.006	0.995	YES	2.243	0.008043	0.02283	0.94722	-3.8	0.001	0.06	11.214186	-	0.005	0.243	114.1448	0.00121
0.005	0.996	YES	2.252	0.008077	0.02305	0.95643	-4.0	0.001	0.05	11.261667	-	0.004	0.240	115.2553	0.00099
0.004	0.996	YES	2.259	0.008101	0.02321	0.96298	-4.2	0.001	0.04	11.295251	-	0.004	0.238	116.0444	0.000836
0.003	0.997	YES	2.265	0.008122	0.02335	0.96866	-4.4	0.001	0.03	11.324268	-	0.003	0.236	116.7287	0.000704
0.003	0.998	YES	2.272	0.008147	0.02351	0.97536	-4.6	0.001	0.03	11.358393	-	0.002	0.234	117.5363	0.00055
0.002	0.998	YES	2.275	0.008157	0.02358	0.97826	-4.8	0.001	0.02	11.37311	-	0.002	0.234	117.8856	0.000484
0.002	0.998	YES	2.279	0.008171	0.02367	0.98215	-5.0	0.000	0.02	11.392818	-	0.002	0.232	118.3542	0.000396
0.000	1.000	YES	2.297	0.008236	0.02410	1.00000	-10.0	0.000	0.00	11.482736	-	0.000	0.227	120.5057	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 103- Β' φάση
σήραγγα μέσα στο λατυποπαγές (mb), με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	29	0.506145
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	7.25	0.126536
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	-	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	0.3	
Λόγος poisson	v=	0.35	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	11	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.22	
Ισοδύναμη ακτίνα	r(m)=	4.00	
Απόσταση	R(m)=	4	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	2.882
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.292
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.050
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	8.800
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	45
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	16.667
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.543

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	9.9	1.000	45.00	-	0	1.000	1.000	0	0.22
0.99835	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00045	5.0	0.993	44.68	-	0.005345	0.998	1.002	0.04356	0.219637
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00060	4.8	0.991	44.57	-	0.007126	0.998	1.002	0.05808	0.219516
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00082	4.6	0.987	44.42	-	0.009717	0.997	1.003	0.0792	0.21934
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00003	0.00110	4.4	0.983	44.23	-	0.012957	0.996	1.004	0.1056	0.21912
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00004	0.00151	4.2	0.977	43.95	-	0.017815	0.995	1.006	0.1452	0.21879
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00005	0.00200	4.0	0.969	43.61	-	0.023646	0.993	1.007	0.19272	0.218394
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00006	0.00263	3.8	0.960	43.19	-	0.031096	0.990	1.010	0.25344	0.217888
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00009	0.00356	3.6	0.946	42.57	-	0.042109	0.987	1.013	0.3432	0.21714
0.983	0.017	NO	1.000	-	0.00011	0.00466	3.4	0.930	41.86	-	0.055065	0.983	1.017	0.4488	0.21626
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00015	0.00630	3.2	0.907	40.83	-	0.0745	0.977	1.023	0.6072	0.21494
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00020	0.00835	3.0	0.880	39.60	-	0.098794	0.970	1.031	0.8052	0.21329
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00026	0.01095	2.8	0.847	38.12	-	0.129566	0.960	1.040	1.056	0.2112
0.940	0.060	NO	1.000	-	0.00040	0.01643	2.6	0.783	35.25	-	0.194348	0.940	1.060	1.584	0.2068
0.925	0.075	NO	1.000	-	0.00050	0.02054	2.4	0.740	33.30	-	0.242936	0.925	1.075	1.98	0.2035
0.900	0.100	NO	1.000	-	0.00066	0.02738	2.2	0.675	30.38	-	0.323914	0.900	1.100	2.64	0.198
0.870	0.130	NO	1.000	-	0.00086	0.03560	2.0	0.607	27.31	-	0.421088	0.870	1.130	3.432	0.1914
0.840	0.160	NO	1.000	-	0.00106	0.04382	1.8	0.548	24.65	-	0.518263	0.840	1.160	4.224	0.1848
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00145	0.06025	1.6	0.450	20.25	-	0.712611	0.780	1.220	5.808	0.1716
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00185	0.07668	1.4	0.372	16.76	-	0.906959	0.720	1.280	7.392	0.1584
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00231	0.09585	1.2	0.300	13.50	-	1.133699	0.650	1.350	9.24	0.143
0.585	0.415	NO	1.000	-	0.00274	0.11365	1.0	0.245	11.05	-	1.344243	0.585	1.415	10.956	0.1287
0.457	**0.543**	NO	1.000	-	0.00358	0.14870	0.8	0.163	7.32	-	1.758853	0.457	1.543	14.3352	0.10054
0.380	0.620	YES	1.079	0.003868	0.00427	0.17697	0.6	0.124	5.58	4.3144353	-	0.380	0.535	17.06063	0.0836
0.350	**0.650**	YES	1.115	0.003997	0.00460	**0.19079**	**0.5**	**0.111**	**4.97**	4.4584073	-	0.350	0.496	**18.39342**	**0.077**

0.314	0.686	YES	1.163	0.00417	0.00507	0.21020	0.4	0.096	4.30	4.650904	-	0.314	0.450	20.2642	0.06908
0.250	0.750	YES	1.265	0.004538	0.00615	0.25517	0.2	0.071	3.21	5.0615418	-	0.250	0.367	24.59984	0.055
0.200	0.800	YES	1.367	0.004901	0.00734	0.30439	0.0	0.055	2.45	5.4665161	-	0.200	0.303	29.3449	0.044
0.163	0.837	YES	1.459	0.005231	0.00852	0.35338	-0.2	0.043	1.94	5.8343596	-	0.163	0.255	34.06769	0.03586
0.130	0.870	YES	1.558	0.005586	0.00990	0.41079	-0.4	0.033	1.50	6.2304909	-	0.130	0.212	39.60204	0.0286
0.110	0.890	YES	1.628	0.005838	0.01095	0.45454	-0.6	0.028	1.25	6.5118199	-	0.110	0.187	43.81967	0.0242
0.091	0.909	YES	1.704	0.006111	0.01216	0.50467	-0.8	0.023	1.02	6.8160088	-	0.091	0.162	48.65246	0.02002
0.075	0.925	YES	1.777	0.006371	0.01338	0.55533	-1.0	0.018	0.83	7.10656	-	0.075	0.141	53.5363	0.0165
0.058	0.942	YES	1.865	0.006686	0.01495	0.62028	-1.2	0.014	0.63	7.4580056	-	0.058	0.119	59.79792	0.01276
0.050	0.950	YES	1.910	0.006851	0.01581	0.65584	-1.4	0.012	0.54	7.6416648	-	0.050	0.109	63.22613	0.011
0.041	0.959	YES	1.966	0.007051	0.01688	0.70054	-1.6	0.010	0.44	7.8647056	-	0.041	0.097	67.53485	0.00902
0.034	0.966	YES	2.013	0.007219	0.01782	0.73930	-1.8	0.008	0.36	8.05176	-	0.034	0.088	71.27227	0.00748
0.029	0.971	YES	2.048	0.007346	0.01854	0.76947	-2.0	0.007	0.31	8.1934968	-	0.029	0.082	74.17999	0.00638
0.024	0.976	YES	2.086	0.007479	0.01933	0.80195	-2.2	0.006	0.25	8.3426712	-	0.024	0.075	77.31125	0.00528
0.020	0.980	YES	2.117	0.007592	0.02000	0.82978	-2.4	0.005	0.21	8.4678118	-	0.020	0.070	79.99445	0.0044
0.016	0.984	YES	2.150	0.007709	0.02071	0.85942	-2.6	0.004	0.17	8.5985198	-	0.016	0.065	82.85222	0.00352
0.013	0.987	YES	2.175	0.0078	0.02128	0.88295	-2.8	0.003	0.14	8.7004563	-	0.013	0.061	85.12025	0.00286
0.011	0.989	YES	2.193	0.007863	0.02167	0.89929	-3.0	0.003	0.12	8.7703805	-	0.011	0.059	86.69602	0.00242
0.009	0.991	YES	2.210	0.007927	0.02208	0.91620	-3.2	0.002	0.09	8.8419492	-	0.009	0.056	88.32573	0.00198
0.008	0.992	YES	2.220	0.00796	0.02229	0.92487	-3.4	0.002	0.08	8.8783704	-	0.008	0.055	89.16166	0.00176
0.007	0.994	YES	2.233	0.008009	0.02261	0.93816	-3.6	0.002	0.07	8.9338219	-	0.006	0.053	90.44291	0.00143
0.006	0.995	YES	2.243	0.008043	0.02283	0.94722	-3.8	0.001	0.06	8.9713488	-	0.005	0.052	91.31584	0.00121
0.005	0.996	YES	2.252	0.008077	0.02305	0.95643	-4.0	0.001	0.05	9.0093337	-	0.004	0.050	92.20424	0.00099
0.004	0.996	YES	2.259	0.008101	0.02321	0.96298	-4.2	0.001	0.04	9.0362006	-	0.004	0.049	92.83554	0.000836
0.003	0.997	YES	2.267	0.008129	0.02339	0.97056	-4.4	0.001	0.03	9.0671901	-	0.003	0.048	93.56672	0.00066
0.003	0.998	YES	2.272	0.008147	0.02351	0.97536	-4.6	0.001	0.03	9.0867148	-	0.002	0.048	94.02906	0.00055
0.002	0.998	YES	2.275	0.008157	0.02358	0.97826	-4.8	0.001	0.02	9.0984879	-	0.002	0.047	94.30846	0.000484
0.002	0.998	YES	2.279	0.008171	0.02367	0.98215	-5.0	0.000	0.02	9.114254	-	0.002	0.047	94.68336	0.000396
0.000	1.000	YES	2.297	0.008236	0.02410	1.00000	-10.0	0.000	0.00	9.1861886	-	0.000	0.044	96.40453	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 111-Α' φάση

σήραγγα στη διεπιφάνεια ms/mb, με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).

διερεύνυση mb

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	29	0.506145
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	7.25	0.126536
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	-	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	0.3	
Λόγος poisson	ν=	0.35	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	28	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.56	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	5.00	
Απόσταση	r(m)=	5	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	2.882
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.292
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(MPa)=	0.050
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	22.400
Μέτρο ελαστικότητας	E(MPa)=	45.000
Μέτρο διάτμησης	G(MPa)=	16.667
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.508

Υπολογισμοί

-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E(Mpa)	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	45.00	-	0	1.000	1.000	0	0.56
0.9957	0.004	NO	1.000	-	0.00007	0.00044	5.0	0.982	44.17	-	0.001806	0.996	1.004	0.3612	0.557592
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00009	0.00056	4.8	0.977	43.95	-	0.00231	0.995	1.006	0.462	0.55692
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00012	0.00074	4.6	0.969	43.61	-	0.003066	0.993	1.007	0.6132	0.555912
0.989	0.011	NO	1.000	-	0.00018	0.00112	4.4	0.954	42.93	-	0.00462	0.989	1.011	0.924	0.55384
0.985	0.015	NO	1.000	-	0.00025	0.00153	4.2	0.938	42.21	-	0.0063	0.985	1.015	1.26	0.5516
0.980	0.020	NO	1.000	-	0.00034	0.00204	4.0	0.919	41.34	-	0.0084	0.980	1.020	1.68	0.5488
0.974	0.026	NO	1.000	-	0.00044	0.00265	3.8	0.896	40.33	-	0.01092	0.974	1.026	2.184	0.54544
0.965	0.035	NO	1.000	-	0.00059	0.00357	3.6	0.864	38.89	-	0.0147	0.965	1.035	2.94	0.5404
0.950	0.050	NO	1.000	-	0.00084	0.00510	3.4	0.814	36.64	-	0.021	0.950	1.050	4.2	0.532
0.940	0.060	NO	1.000	-	0.00101	0.00612	3.2	0.783	35.25	-	0.0252	0.940	1.060	5.04	0.5264
0.920	0.080	NO	1.000	-	0.00134	0.00816	3.0	0.726	32.68	-	0.0336	0.920	1.080	6.72	0.5152
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00202	0.01224	2.8	0.629	28.29	-	0.0504	0.880	1.120	10.08	0.4928
0.840	0.160	NO	1.000	-	0.00269	0.01632	2.6	0.548	24.65	-	0.0672	0.840	1.160	13.44	0.4704
0.800	0.200	NO	1.000	-	0.00336	0.02040	2.4	0.480	21.60	-	0.084	0.800	1.200	16.8	0.448
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00470	0.02856	2.2	0.372	16.76	-	0.1176	0.720	1.280	23.52	0.4032
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00588	0.03570	2.0	0.300	13.50	-	0.147	0.650	1.350	29.4	0.364
0.550	0.450	NO	1.000	-	0.00756	0.04590	1.8	0.220	9.90	-	0.189	0.550	1.450	37.8	0.308
0.450	0.550	YES	1.044	0.008908	0.00942	0.05720	1.6	0.159	7.15	5.2210254	-	0.450	1.386	47.10075	0.252
0.350	0.650	YES	1.176	0.010037	0.01238	0.07517	1.4	0.111	4.97	5.882261	-	0.350	1.098	61.90163	0.196
0.270	0.730	YES	1.326	0.01131	0.01628	0.09883	1.2	0.079	3.54	6.6283826	-	0.270	0.867	81.38563	0.1512
0.230	0.770	YES	1.424	0.012149	0.01918	0.11644	1.0	0.064	2.90	7.1201073	-	0.230	0.752	95.88833	0.1288
0.180	0.820	YES	1.583	0.013501	0.02443	0.14831	0.8	0.048	2.17	7.913009	-	0.180	0.608	122.136	0.1008
0.150	0.850	YES	1.706	0.014555	0.02902	0.17619	0.6	0.039	1.76	8.5306528	-	0.150	0.522	145.0909	0.084
0.120	0.880	YES	1.862	0.015887	0.03547	0.21534	0.4	0.031	1.37	9.3113533	-	0.120	0.435	177.3323	0.0672
0.091	0.909	YES	2.060	0.017577	0.04471	0.27145	0.2	0.023	1.02	10.301477	-	0.091	0.352	223.5398	0.05096

0.075	0.925	YES	2.199	0.018762	0.05192	0.31524	0.0	0.018	0.83	10.996128	-	0.075	0.305	259.5955	0.042
0.065	**0.935**	YES	2.301	0.019631	0.05759	**0.34970**	**-0.2**	**0.016**	**0.71**	11.505363	-	0.065	0.277	**287.9716**	0.0364
0.050	0.950	YES	2.483	0.021183	0.06856	0.41630	-0.4	0.012	0.54	12.414818	-	0.050	0.233	342.8163	0.028
0.041	0.959	YES	2.614	0.022302	0.07715	0.46843	-0.6	0.010	0.44	13.070833	-	0.041	0.207	385.7505	0.02296
0.034	0.966	YES	2.731	0.023301	0.08530	0.51790	-0.8	0.008	0.36	13.656227	-	0.034	0.187	426.4894	0.01904
0.029	0.971	YES	2.825	0.024099	0.09214	0.55944	-1.0	0.007	0.31	14.123794	-	0.029	0.173	460.6931	0.01624
0.024	0.976	YES	2.928	0.024981	0.10005	0.60747	-1.2	0.006	0.25	14.640686	-	0.024	0.158	500.2446	0.01344
0.020	0.980	YES	3.019	0.025757	0.10732	0.65162	-1.4	0.005	0.21	15.095843	-	0.020	0.147	536.5995	0.0112
0.016	0.984	YES	3.119	0.026608	0.11561	0.70198	-1.6	0.004	0.17	15.594321	-	0.016	0.135	578.0716	0.00896
0.013	0.987	YES	3.200	0.027301	0.12264	0.74463	-1.8	0.003	0.14	16.00092	-	0.013	0.127	613.1932	0.00728
0.011	0.989	YES	3.258	0.027794	0.12777	0.77577	-2.0	0.003	0.12	16.289582	-	0.011	0.121	638.8382	0.00616
0.009	0.991	YES	3.319	0.028313	0.13330	0.80937	-2.2	0.002	0.09	16.59378	-	0.009	0.115	666.5061	0.00504
0.008	0.992	YES	3.350	0.028583	0.13623	0.82718	-2.4	0.002	0.08	16.752146	-	0.008	0.112	681.1722	0.00448
0.007	0.994	YES	3.400	0.029003	0.14086	0.85527	-2.6	0.002	0.07	16.998077	-	0.006	0.108	704.3049	0.00364
0.006	0.995	YES	3.434	0.029293	0.14411	0.87498	-2.8	0.001	0.06	17.167929	-	0.005	0.105	720.5361	0.00308
0.005	0.996	YES	3.469	0.029591	0.14749	0.89553	-3.0	0.001	0.05	17.342766	-	0.004	0.102	737.4617	0.00252
0.004	0.996	YES	3.494	0.029805	0.14995	0.91045	-3.2	0.001	0.04	17.468249	-	0.004	0.100	749.7462	0.002128
0.003	0.997	YES	3.519	0.030024	0.15248	0.92583	-3.4	0.001	0.03	17.596386	-	0.003	0.098	762.4085	0.001736
0.003	0.998	YES	3.542	0.030215	0.15472	0.93939	-3.6	0.001	0.03	17.7084	-	0.002	0.096	773.5757	0.0014
0.002	0.998	YES	3.553	0.030312	0.15585	0.94630	-3.8	0.001	0.02	17.765183	-	0.002	0.096	779.2716	0.001232
0.002	0.998	YES	3.568	0.030442	0.15740	0.95567	-4.0	0.000	0.02	17.841716	-	0.002	0.094	786.9859	0.001008
0.002	0.999	YES	3.580	0.030541	0.15857	0.96281	-4.2	0.000	0.02	17.899743	-	0.001	0.094	792.8635	0.00084
0.001	0.999	YES	3.592	0.030641	0.15976	0.97004	-4.4	0.000	0.01	17.958318	-	0.001	0.093	798.8216	0.000672
0.001	0.999	YES	3.600	0.030708	0.16057	0.97492	-4.6	0.000	0.01	17.997676	-	0.001	0.092	802.8391	0.00056
0.001	0.999	YES	3.605	0.030759	0.16118	0.97861	-4.8	0.000	0.01	18.027359	-	0.001	0.092	805.8764	0.000476
0.001	0.999	YES	3.611	0.03081	0.16179	0.98232	-5.0	0.000	0.01	18.057182	-	0.001	0.091	808.9348	0.000392
0.000	1.000	YES	3.640	0.031051	0.16470	1.00000	-10.0	0.000	0.00	18.198265	-	0.000	0.089	823.4909	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 111- Β' φάση
σήραγγαστη διεπιφάνεια ms/mb, με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).
διερεύνυση mb

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	29	0.506145
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	7.25	0.126536
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	-	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(MPa)=	0.3	
Λόγος poisson	v=	0.35	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	28	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(kN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(MPa)=	0.56	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	4.00	
Απόσταση	r(m)=	4	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	2.882
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.292
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.050
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	22.400
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	45
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	16.667
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.508

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.1	1.000	45.00	-	0	1.000	1.000	0	0.56
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00007	0.00041	5.0	0.983	44.23	-	0	1.000	1.000	0.2688	0.55776
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00009	0.00056	4.8	0.977	43.95	-	0.001075	0.996	1.004	0.3696	0.55692
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00012	0.00074	4.6	0.969	43.61	-	0.001478	0.995	1.006	0.49056	0.555912
0.989	0.011	NO	1.000	-	0.00018	0.00112	4.4	0.954	42.93	-	0.001962	0.993	1.007	0.7392	0.55384
0.985	0.015	NO	1.000	-	0.00025	0.00153	4.2	0.938	42.21	-	0.002957	0.989	1.011	1.008	0.5516
0.980	0.020	NO	1.000	-	0.00034	0.00204	4.0	0.919	41.34	-	0.004032	0.985	1.015	1.344	0.5488
0.975	0.025	NO	1.000	-	0.00042	0.00255	3.8	0.900	40.50	-	0.005376	0.980	1.020	1.68	0.546
0.965	0.035	NO	1.000	-	0.00059	0.00357	3.6	0.864	38.89	-	0.00672	0.975	1.025	2.352	0.5404
0.955	0.045	NO	1.000	-	0.00076	0.00459	3.4	0.830	37.37	-	0.009408	0.965	1.035	3.024	0.5348
0.940	0.060	NO	1.000	-	0.00101	0.00612	3.2	0.783	35.25	-	0.012096	0.955	1.045	4.032	0.5264
0.920	0.080	NO	1.000	-	0.00134	0.00816	3.0	0.726	32.68	-	0.016128	0.940	1.060	5.376	0.5152
0.890	0.110	NO	1.000	-	0.00185	0.01122	2.8	0.651	29.30	-	0.021504	0.920	1.080	7.392	0.4984
0.840	0.160	NO	1.000	-	0.00269	0.01632	2.6	0.548	24.65	-	0.029568	0.890	1.110	10.752	0.4704
0.800	0.200	NO	1.000	-	0.00336	0.02040	2.4	0.480	21.60	-	0.043008	0.840	1.160	13.44	0.448
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00470	0.02856	2.2	0.372	16.76	-	0.05376	0.800	1.200	18.816	0.4032
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00588	0.03570	2.0	0.300	13.50	-	0.075264	0.720	1.280	23.52	0.364
0.550	0.450	NO	1.000	-	0.00756	0.04590	1.8	0.220	9.90	-	0.09408	0.650	1.350	30.24	0.308
0.492	**0.508**	YES	1.000	0.008533	0.00853	0.05182	1.7	0.183	8.22	4.0007517	0.12096	0.550	1.450	34.13947	0.27552
0.457	0.543	YES	1.036	0.008842	0.00926	0.05623	1.6	0.163	7.32	4.145923	-	0.492	1.507	37.04492	0.25592
0.350	0.650	YES	1.176	0.010037	0.01238	0.07517	1.4	0.111	4.97	4.7058088	-	0.457	1.406	49.5213	0.196
0.280	0.720	YES	1.304	0.011125	0.01567	0.09517	1.2	0.082	3.71	5.2160347	-	0.350	1.098	62.69561	0.1568
0.220	0.780	YES	1.452	0.012388	0.02005	0.12176	1.0	0.061	2.75	5.8082781	-	0.280	0.896	80.21708	0.1232
0.180	0.820	YES	1.583	0.013501	0.02443	0.14831	0.8	0.048	2.17	6.3304072	-	0.220	0.723	97.70877	0.1008
0.140	0.860	YES	1.754	0.014963	0.03091	0.18770	0.6	0.036	1.63	7.0156179	-	0.180	0.608	123.6556	0.0784
0.130	**0.870**	YES	1.806	0.015405	0.03305	**0.20066**	**0.5**	**0.033**	**1.50**	7.2229952	-	0.140	0.493	**132.1919**	0.0728

0.120	0.880	YES	1.862	0.015887	0.03547	0.21534	0.4	0.031	1.37	7.4490827	-	0.130	0.464	141.8658	0.0672
0.091	0.909	YES	2.060	0.017577	0.04471	0.27145	0.2	0.023	1.02	8.2411817	-	0.120	0.435	178.8319	0.05096
0.075	0.925	YES	2.199	0.018762	0.05192	0.31524	0.0	0.018	0.83	8.7969022	-	0.091	0.352	207.6764	0.042
0.065	0.935	YES	2.301	0.019631	0.05759	0.34970	-0.2	0.016	0.71	9.2042906	-	0.075	0.305	230.3773	0.0364
0.050	0.950	YES	2.483	0.021183	0.06856	0.41630	-0.4	0.012	0.54	9.9318545	-	0.065	0.277	274.2531	0.028
0.041	0.959	YES	2.614	0.022302	0.07715	0.46843	-0.6	0.010	0.44	10.456667	-	0.050	0.233	308.6004	0.02296
0.034	0.966	YES	2.731	0.023301	0.08530	0.51790	-0.8	0.008	0.36	10.924982	-	0.041	0.207	341.1915	0.01904
0.029	0.971	YES	2.825	0.024099	0.09214	0.55944	-1.0	0.007	0.31	11.299035	-	0.034	0.187	368.5545	0.01624
0.024	0.976	YES	2.928	0.024981	0.10005	0.60747	-1.2	0.006	0.25	11.712549	-	0.029	0.173	400.1957	0.01344
0.020	0.980	YES	3.019	0.025757	0.10732	0.65162	-1.4	0.005	0.21	12.076674	-	0.024	0.158	429.2796	0.0112
0.016	0.984	YES	3.119	0.026608	0.11561	0.70198	-1.6	0.004	0.17	12.475457	-	0.020	0.147	462.4573	0.00896
0.013	0.987	YES	3.200	0.027301	0.12264	0.74463	-1.8	0.003	0.14	12.800736	-	0.016	0.135	490.5545	0.00728
0.011	0.989	YES	3.258	0.027794	0.12777	0.77577	-2.0	0.003	0.12	13.031666	-	0.013	0.127	511.0706	0.00616
0.009	0.991	YES	3.319	0.028313	0.13330	0.80937	-2.2	0.002	0.09	13.275024	-	0.011	0.121	533.2049	0.00504
0.008	0.992	YES	3.350	0.028583	0.13623	0.82718	-2.4	0.002	0.08	13.401717	-	0.009	0.115	544.9378	0.00448
0.007	0.994	YES	3.400	0.029003	0.14086	0.85527	-2.6	0.002	0.07	13.598461	-	0.008	0.112	563.4439	0.00364
0.006	0.995	YES	3.434	0.029293	0.14411	0.87498	-2.8	0.001	0.06	13.734343	-	0.006	0.108	576.4289	0.00308
0.005	0.996	YES	3.469	0.029591	0.14749	0.89553	-3.0	0.001	0.05	13.874213	-	0.005	0.105	589.9693	0.00252
0.004	0.996	YES	3.494	0.029805	0.14995	0.91045	-3.2	0.001	0.04	13.974599	-	0.004	0.102	599.7969	0.002128
0.003	0.997	YES	3.523	0.030055	0.15285	0.92806	-3.4	0.001	0.03	14.09193	-	0.004	0.100	611.3994	0.00168
0.003	0.998	YES	3.542	0.030215	0.15472	0.93939	-3.6	0.001	0.03	14.16672	-	0.003	0.098	618.8605	0.0014
0.002	0.998	YES	3.553	0.030312	0.15585	0.94630	-3.8	0.001	0.02	14.212146	-	0.002	0.096	623.4173	0.001232
0.002	0.998	YES	3.568	0.030442	0.15740	0.95567	-4.0	0.000	0.02	14.273373	-	0.002	0.096	629.5888	0.001008
0.002	0.999	YES	3.580	0.030541	0.15857	0.96281	-4.2	0.000	0.02	14.319795	-	0.002	0.094	634.2908	0.00084
0.001	0.999	YES	3.592	0.030641	0.15976	0.97004	-4.4	0.000	0.01	14.366655	-	0.001	0.094	639.0573	0.000672
0.001	0.999	YES	3.600	0.030708	0.16057	0.97492	-4.6	0.000	0.01	14.398141	-	0.001	0.093	642.2713	0.00056
0.001	0.999	YES	3.605	0.030759	0.16118	0.97861	-4.8	0.000	0.01	14.421887	-	0.001	0.092	644.7011	0.000476
0.001	0.999	YES	3.611	0.03081	0.16179	0.98232	-5.0	0.000	0.01	14.445746	-	0.001	0.092	647.1478	0.000392
0.000	1.000	YES	3.640	0.031051	0.16470	1.00000	-10.0	0.000	0.00	14.558612	-	0.001	0.091	658.7927	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 111-Α' φάση
σήραγγα στη διεπιφάνεια ms/mb, με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).
διερεύνυση ms

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	28	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.56	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	5.00	
Απόσταση	r(m)=	5	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	2.456
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150.000
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60.000
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.739

Υπολογισμοί															
p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERNx/R	E/Eo	E(Mpa)	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150.00	-	0	1.000	1.000	0	0.56
0.99945	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00043	5.0	0.998	149.75	-	6.42E-05	0.999	1.001	0.012833	0.559692
0.9993	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00055	4.8	0.998	149.69	-	8.17E-05	0.999	1.001	0.016333	0.559608
0.999	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00078	4.6	0.997	149.55	-	0.000117	0.999	1.001	0.023333	0.55944
0.9987	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00101	4.4	0.996	149.42	-	0.000152	0.999	1.001	0.030333	0.559272
0.998	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00156	4.2	0.994	149.10	-	0.000233	0.998	1.002	0.046667	0.55888
0.998	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00195	4.0	0.993	148.88	-	0.000292	0.998	1.003	0.058333	0.5586
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00273	3.8	0.990	148.44	-	0.000408	0.997	1.004	0.081667	0.55804
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00002	0.00351	3.6	0.987	147.99	-	0.000525	0.996	1.005	0.105	0.55748
0.994	0.006	NO	1.000	-	0.00003	0.00468	3.4	0.982	147.33	-	0.0007	0.994	1.006	0.14	0.55664
0.992	0.008	NO	1.000	-	0.00004	0.00624	3.2	0.976	146.46	-	0.000933	0.992	1.008	0.186667	0.55552
0.989	0.011	NO	1.000	-	0.00005	0.00857	3.0	0.968	145.16	-	0.001283	0.989	1.011	0.256667	0.55384
0.986	0.014	NO	1.000	-	0.00007	0.01091	2.8	0.959	143.87	-	0.001633	0.986	1.014	0.326667	0.55216
0.981	0.019	NO	1.000	-	0.00009	0.01481	2.6	0.945	141.76	-	0.002217	0.981	1.019	0.443333	0.54936
0.974	0.026	NO	1.000	-	0.00012	0.02027	2.4	0.926	138.88	-	0.003033	0.974	1.026	0.606667	0.54544
0.965	0.035	NO	1.000	-	0.00016	0.02728	2.2	0.902	135.28	-	0.004083	0.965	1.035	0.816667	0.5404
0.955	0.045	NO	1.000	-	0.00021	0.03508	2.0	0.876	131.42	-	0.00525	0.955	1.045	1.05	0.5348
0.945	0.055	NO	1.000	-	0.00026	0.04287	1.8	0.851	127.70	-	0.006417	0.945	1.055	1.283333	0.5292
0.925	0.075	NO	1.000	-	0.00035	0.05846	1.6	0.804	120.65	-	0.00875	0.925	1.075	1.75	0.518
0.900	0.100	NO	1.000	-	0.00047	0.07795	1.4	0.750	112.50	-	0.011667	0.900	1.100	2.333333	0.504
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00056	0.09353	1.2	0.710	106.45	-	0.014	0.880	1.120	2.8	0.4928
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00070	0.11692	1.0	0.654	98.08	-	0.0175	0.850	1.150	3.5	0.476
0.800	0.200	NO	1.000	-	0.00093	0.15589	0.8	0.571	85.71	-	0.023333	0.800	1.200	4.666667	0.448
0.770	0.230	NO	1.000	-	0.00107	0.17927	0.6	0.527	79.11	-	0.026833	0.770	1.230	5.366667	0.4312
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00131	0.21825	0.4	0.462	69.23	-	0.032667	0.720	1.280	6.533333	0.4032
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00163	0.27281	0.2	0.382	57.35	-	0.040833	0.650	1.350	8.166667	0.364

0.600	0.400	NO	1.000	-	0.00187	0.31178	0.0	0.333	50.00	-	0.046667	0.600	1.400	9.333333	0.336
0.550	**0.450**	NO	1.000	-	0.00210	**0.35075**	**-0.2**	**0.289**	**43.42**	-	0.0525	0.550	1.450	**10.5**	0.308
0.470	0.530	NO	1.000	-	0.00247	0.41311	-0.4	0.228	34.22	-	0.061833	0.470	1.530	12.36667	0.2632
0.400	0.600	NO	1.000	-	0.00280	0.46767	-0.6	0.182	27.27	-	0.07	0.400	1.600	14	0.224
0.350	0.650	NO	1.000	-	0.00303	0.50664	-0.8	0.152	22.83	-	0.075833	0.350	1.650	15.16667	0.196
0.270	0.730	NO	1.000	-	0.00341	0.56900	-1.0	0.110	16.46	-	0.085167	0.270	1.730	17.03333	0.1512
0.261	**0.739**	YES	1.000	0.003448	0.00345	0.57606	-1.1	0.105	15.80	5.0011364	-	0.261	1.737	17.24471	0.14616
0.230	0.770	YES	1.022	0.003523	0.00363	0.60604	-1.2	0.091	13.58	5.1102126	-	0.230	1.628	18.14218	0.1288
0.180	0.820	YES	1.061	0.003658	0.00396	0.66190	-1.4	0.068	10.23	5.3054752	-	0.180	1.451	19.8145	0.1008
0.150	0.850	YES	1.087	0.003748	0.00420	0.70089	-1.6	0.056	8.33	5.4361968	-	0.150	1.345	20.98166	0.084
0.120	0.880	YES	1.116	0.003846	0.00446	0.74498	-1.8	0.043	6.52	5.5790734	-	0.120	1.239	22.30144	0.0672
0.100	0.900	YES	1.136	0.003917	0.00466	0.77773	-2.0	0.036	5.36	5.682084	-	0.100	1.168	23.28179	0.056
0.085	0.915	YES	1.153	0.003974	0.00482	0.80433	-2.2	0.030	4.51	5.763929	-	0.085	1.115	24.07803	0.0476
0.072	0.928	YES	1.168	0.004025	0.00496	0.82896	-2.4	0.025	3.78	5.8383485	-	0.072	1.069	24.81542	0.04032
0.060	0.940	YES	1.182	0.004075	0.00511	0.85313	-2.6	0.021	3.13	5.9101557	-	0.060	1.027	25.53908	0.0336
0.048	0.952	YES	1.197	0.004126	0.00526	0.87882	-2.8	0.017	2.48	5.9851877	-	0.048	0.984	26.30803	0.02688
0.040	0.960	YES	1.207	0.004162	0.00537	0.89686	-3.0	0.014	2.05	6.0371262	-	0.040	0.956	26.848	0.0224
0.032	0.968	YES	1.218	0.004199	0.00548	0.91568	-3.2	0.011	1.63	6.0906949	-	0.032	0.927	27.41154	0.01792
0.028	0.972	YES	1.224	0.004218	0.00554	0.92541	-3.4	0.010	1.43	6.1181183	-	0.028	0.913	27.70264	0.01568
0.023	0.977	YES	1.231	0.004242	0.00562	0.93787	-3.6	0.008	1.17	6.1530204	-	0.023	0.896	28.07568	0.01288
0.019	0.981	YES	1.236	0.004262	0.00568	0.94809	-3.8	0.006	0.96	6.1814553	-	0.019	0.881	28.38172	0.01064
0.015	0.985	YES	1.242	0.004282	0.00574	0.95855	-4.0	0.005	0.76	6.2103606	-	0.015	0.867	28.69478	0.0084
0.013	0.987	YES	1.245	0.004292	0.00577	0.96387	-4.2	0.004	0.66	6.2249938	-	0.013	0.860	28.85402	0.00728
0.011	0.989	YES	1.248	0.004302	0.00580	0.96925	-4.4	0.004	0.55	6.2397497	-	0.011	0.853	29.0151	0.00616
0.009	0.991	YES	1.251	0.004312	0.00584	0.97469	-4.6	0.003	0.45	6.2546301	-	0.009	0.846	29.17807	0.00504
0.008	0.993	YES	1.253	0.00432	0.00586	0.97882	-4.8	0.003	0.38	6.2658732	-	0.007	0.841	29.30155	0.0042
0.006	0.994	YES	1.255	0.004326	0.00588	0.98187	-5.0	0.002	0.32	6.2741637	-	0.006	0.837	29.3928	0.003584
0.000	1.000	YES	1.265	0.004359	0.00599	1.00000	-10.0	0.000	0.00	6.3231817	-	0.000	0.814	29.93562	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 111- Β' φάση
σήραγγα στη διεπιφάνεια ms/mb, με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).
διερεύνυση ms

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	28	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.56	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	4.00	
Απόσταση	r(m)=	4	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	2.456
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150.000
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60.000
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.739

Υπολογισμοί															
p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERNx/R	E/Eo	E(Mpa)	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150.00	-	0	1.000	1.000	0	0.56
0.99945	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00043	5.0	0.998	149.75	-	4.11E-05	0.999	1.001	0.010267	0.559692
0.9993	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00055	4.8	0.998	149.69	-	5.23E-05	0.999	1.001	0.013067	0.559608
0.999	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00078	4.6	0.997	149.55	-	7.47E-05	0.999	1.001	0.018667	0.55944
0.9987	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00101	4.4	0.996	149.42	-	9.71E-05	0.999	1.001	0.024267	0.559272
0.998	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00156	4.2	0.994	149.10	-	0.000149	0.998	1.002	0.037333	0.55888
0.998	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00195	4.0	0.993	148.88	-	0.000187	0.998	1.003	0.046667	0.5586
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00273	3.8	0.990	148.44	-	0.000261	0.997	1.004	0.065333	0.55804
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00002	0.00351	3.6	0.987	147.99	-	0.000336	0.996	1.005	0.084	0.55748
0.994	0.006	NO	1.000	-	0.00003	0.00468	3.4	0.982	147.33	-	0.000448	0.994	1.006	0.112	0.55664
0.992	0.008	NO	1.000	-	0.00004	0.00624	3.2	0.976	146.46	-	0.000597	0.992	1.008	0.149333	0.55552
0.989	0.011	NO	1.000	-	0.00005	0.00857	3.0	0.968	145.16	-	0.000821	0.989	1.011	0.205333	0.55384
0.986	0.014	NO	1.000	-	0.00007	0.01091	2.8	0.959	143.87	-	0.001045	0.986	1.014	0.261333	0.55216
0.981	0.019	NO	1.000	-	0.00009	0.01481	2.6	0.945	141.76	-	0.001419	0.981	1.019	0.354667	0.54936
0.974	0.026	NO	1.000	-	0.00012	0.02027	2.4	0.926	138.88	-	0.001941	0.974	1.026	0.485333	0.54544
0.965	0.035	NO	1.000	-	0.00016	0.02728	2.2	0.902	135.28	-	0.002613	0.965	1.035	0.653333	0.5404
0.955	0.045	NO	1.000	-	0.00021	0.03508	2.0	0.876	131.42	-	0.00336	0.955	1.045	0.84	0.5348
0.945	0.055	NO	1.000	-	0.00026	0.04287	1.8	0.851	127.70	-	0.004107	0.945	1.055	1.026667	0.5292
0.925	0.075	NO	1.000	-	0.00035	0.05846	1.6	0.804	120.65	-	0.0056	0.925	1.075	1.4	0.518
0.900	0.100	NO	1.000	-	0.00047	0.07795	1.4	0.750	112.50	-	0.007467	0.900	1.100	1.866667	0.504
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00056	0.09353	1.2	0.710	106.45	-	0.00896	0.880	1.120	2.24	0.4928
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00070	0.11692	1.0	0.654	98.08	-	0.0112	0.850	1.150	2.8	0.476
0.800	0.200	NO	1.000	-	0.00093	0.15589	0.8	0.571	85.71	-	0.014933	0.800	1.200	3.733333	0.448
0.770	0.230	NO	1.000	-	0.00107	0.17927	0.6	0.527	79.11	-	0.017173	0.770	1.230	4.293333	0.4312
0.750	**0.250**	NO	1.000	-	0.00117	**0.19486**	**0.5**	**0.500**	**75.00**	-	0.018667	0.750	1.250	**4.666667**	0.42
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00131	0.21825	0.4	0.462	69.23	-	0.020907	0.720	1.280	5.226667	0.4032

0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00163	0.27281	0.2	0.382	57.35	-	0.026133	0.650	1.350	6.533333	0.364
0.600	0.400	NO	1.000	-	0.00187	0.31178	0.0	0.333	50.00	-	0.029867	0.600	1.400	7.466667	0.336
0.550	0.450	NO	1.000	-	0.00210	0.35075	-0.2	0.289	43.42	-	0.0336	0.550	1.450	8.4	0.308
0.470	0.530	NO	1.000	-	0.00247	0.41311	-0.4	0.228	34.22	-	0.039573	0.470	1.530	9.893333	0.2632
0.400	0.600	NO	1.000	-	0.00280	0.46767	-0.6	0.182	27.27	-	0.0448	0.400	1.600	11.2	0.224
0.350	0.650	NO	1.000	-	0.00303	0.50664	-0.8	0.152	22.83	-	0.048533	0.350	1.650	12.13333	0.196
0.270	0.730	NO	1.000	-	0.00341	0.56900	-1.0	0.110	16.46	-	0.054507	0.270	1.730	13.62667	0.1512
0.261	**0.739**	YES	1.000	0.003448	0.00345	0.57606	-1.1	0.105	15.80	4.0009091	-	0.261	1.737	13.79577	0.14616
0.230	0.770	YES	1.022	0.003523	0.00363	0.60604	-1.2	0.091	13.58	4.08817	-	0.230	1.628	14.51374	0.1288
0.180	0.820	YES	1.061	0.003658	0.00396	0.66190	-1.4	0.068	10.23	4.2443802	-	0.180	1.451	15.8516	0.1008
0.150	0.850	YES	1.087	0.003748	0.00420	0.70089	-1.6	0.056	8.33	4.3489575	-	0.150	1.345	16.78532	0.084
0.120	0.880	YES	1.116	0.003846	0.00446	0.74498	-1.8	0.043	6.52	4.4632587	-	0.120	1.239	17.84116	0.0672
0.100	0.900	YES	1.136	0.003917	0.00466	0.77773	-2.0	0.036	5.36	4.5456672	-	0.100	1.168	18.62543	0.056
0.085	0.915	YES	1.153	0.003974	0.00482	0.80433	-2.2	0.030	4.51	4.6111432	-	0.085	1.115	19.26243	0.0476
0.072	0.928	YES	1.168	0.004025	0.00496	0.82896	-2.4	0.025	3.78	4.6706788	-	0.072	1.069	19.85234	0.04032
0.060	0.940	YES	1.182	0.004075	0.00511	0.85313	-2.6	0.021	3.13	4.7281246	-	0.060	1.027	20.43126	0.0336
0.048	0.952	YES	1.197	0.004126	0.00526	0.87882	-2.8	0.017	2.48	4.7881501	-	0.048	0.984	21.04642	0.02688
0.040	0.960	YES	1.207	0.004162	0.00537	0.89686	-3.0	0.014	2.05	4.8297009	-	0.040	0.956	21.4784	0.0224
0.032	0.968	YES	1.218	0.004199	0.00548	0.91568	-3.2	0.011	1.63	4.8725559	-	0.032	0.927	21.92923	0.01792
0.028	0.972	YES	1.224	0.004218	0.00554	0.92541	-3.4	0.010	1.43	4.8944947	-	0.028	0.913	22.16211	0.01568
0.023	0.977	YES	1.231	0.004242	0.00562	0.93787	-3.6	0.008	1.17	4.9224163	-	0.023	0.896	22.46054	0.01288
0.019	0.981	YES	1.236	0.004262	0.00568	0.94809	-3.8	0.006	0.96	4.9451643	-	0.019	0.881	22.70537	0.01064
0.015	0.985	YES	1.242	0.004282	0.00574	0.95855	-4.0	0.005	0.76	4.9682885	-	0.015	0.867	22.95582	0.0084
0.013	0.987	YES	1.245	0.004292	0.00577	0.96387	-4.2	0.004	0.66	4.9799951	-	0.013	0.860	23.08321	0.00728
0.011	0.989	YES	1.248	0.004302	0.00580	0.96925	-4.4	0.004	0.55	4.9917998	-	0.011	0.853	23.21208	0.00616
0.009	0.991	YES	1.251	0.004312	0.00584	0.97469	-4.6	0.003	0.45	5.0037041	-	0.009	0.846	23.34246	0.00504
0.008	0.993	YES	1.253	0.00432	0.00586	0.97882	-4.8	0.003	0.38	5.0126985	-	0.007	0.841	23.44124	0.0042
0.006	0.994	YES	1.255	0.004326	0.00588	0.98187	-5.0	0.002	0.32	5.0193309	-	0.006	0.837	23.51424	0.003584
0.000	1.000	YES	1.265	0.004359	0.00599	1.00000	-10.0	0.000	0.00	5.0585453	-	0.000	0.814	23.9485	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 117-Α' φάση

σήραγγα μέσα στην μάργα (ms), με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	40	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.80	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	5.00	
Απόσταση	r(m)=	5	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	3.509
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.685

Υπολογισμοί

											c2	σr/Po	σθ/Po		
p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp				ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150	-	0	1.000	1.000	0	0.8
0.99935	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00042	5.0	0.998	149.7078798	-	0	1.000	1.000	0.021667	0.79948
0.9991	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00058	4.8	0.997	149.5957277	-	0.000108	0.999	1.001	0.03	0.79928
0.9988	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00078	4.6	0.996	149.4612929	-	0.00015	0.999	1.001	0.04	0.79904
0.99835	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00107	4.4	0.995	149.2599422	-	0.0002	0.999	1.001	0.055	0.79868
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00143	4.2	0.993	149.0143369	-	0.000275	0.998	1.002	0.073333	0.79824
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00194	4.0	0.991	148.6580517	-	0.000367	0.998	1.002	0.1	0.7976
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00003	0.00259	3.8	0.988	148.2142857	-	0.0005	0.997	1.003	0.133333	0.7968
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00004	0.00356	3.6	0.984	147.5519288	-	0.000667	0.996	1.004	0.183333	0.7956
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00005	0.00473	3.4	0.978	146.7622708	-	0.000917	0.995	1.006	0.243333	0.79416
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00006	0.00622	3.2	0.972	145.7613815	-	0.001217	0.993	1.007	0.32	0.79232
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00009	0.00842	3.0	0.962	144.2982456	-	0.0016	0.990	1.010	0.433333	0.7896
0.983	0.017	NO	1.000	-	0.00011	0.01102	2.8	0.951	142.6015474	-	0.002167	0.987	1.013	0.566667	0.7864
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00015	0.01490	2.6	0.934	140.1051625	-	0.002833	0.983	1.017	0.766667	0.7816
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00020	0.01976	2.4	0.914	137.0640905	-	0.003833	0.977	1.023	1.016667	0.7756
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00027	0.02592	2.2	0.889	133.3333333	-	0.005083	0.970	1.031	1.333333	0.768
0.948	0.052	NO	1.000	-	0.00035	0.03369	2.0	0.859	128.8043478	-	0.006667	0.960	1.040	1.733333	0.7584
0.933	0.067	NO	1.000	-	0.00045	0.04341	1.8	0.823	123.4126984	-	0.008667	0.948	1.052	2.233333	0.7464
0.914	0.086	NO	1.000	-	0.00057	0.05573	1.6	0.780	116.9795222	-	0.011167	0.933	1.067	2.866667	0.7312
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00080	0.07776	1.4	0.710	106.4516129	-	0.014333	0.914	1.086	4	0.704
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00100	0.09720	1.2	0.654	98.07692308	-	0.02	0.880	1.120	5	0.68
0.820	0.180	NO	1.000	-	0.00120	0.11664	1.0	0.603	90.44117647	-	0.025	0.850	1.150	6	0.656
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00147	0.14255	0.8	0.542	81.25	-	0.03	0.820	1.180	7.333333	0.624
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00187	0.18143	0.6	0.462	69.23076923	-	0.036667	0.780	1.220	9.333333	0.576
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00233	0.22679	0.4	0.382	57.35294118	-	0.046667	0.720	1.280	11.66667	0.52

0.593	0.407	NO	1.000	-	0.00271	0.26372	0.2	0.327	49.03528115	-	0.058333	0.650	1.350	13.56667	0.4744
0.525	0.475	NO	1.000	-	0.00317	0.30779	0.0	0.269	40.38461538	-	0.067833	0.593	1.407	15.83333	0.42
0.460	**0.540**	NO	1.000	-	0.00360	**0.34991**	**-0.2**	**0.221**	**33.17307692**	-	0.079167	0.525	1.475	**18**	0.368
0.380	0.620	NO	1.000	-	0.00413	0.40174	-0.4	0.170	25.44642857	-	0.09	0.460	1.540	20.66667	0.304
0.315	**0.685**	YES	1.000	0.004566	0.00457	0.44388	-0.5	0.133	19.93670886	5.0006466	0.103333	0.380	1.620	22.83437	0.252
0.250	0.750	YES	1.052	0.004803	0.00514	0.49995	-0.8	0.100	15	5.2601093	-	0.315	1.684	25.71855	0.2
0.200	0.800	YES	1.099	0.005018	0.00570	0.55428	-1.0	0.077	11.53846154	5.496018	-	0.250	1.454	28.51341	0.16
0.163	0.837	YES	1.139	0.005202	0.00621	0.60314	-1.2	0.061	9.143605086	5.6970811	-	0.200	1.277	31.02711	0.1304
0.130	0.870	YES	1.180	0.005388	0.00674	0.65498	-1.4	0.047	7.116788321	5.9004018	-	0.163	1.147	33.69392	0.104
0.110	0.890	YES	1.207	0.005512	0.00711	0.69118	-1.6	0.040	5.935251799	6.0369459	-	0.130	1.030	35.55614	0.088
0.091	0.909	YES	1.236	0.005641	0.00751	0.72966	-1.8	0.032	4.843860894	6.1776356	-	0.110	0.959	37.53536	0.0728
0.075	0.925	YES	1.261	0.005758	0.00788	0.76569	-1.9	0.026	3.947368421	6.3055977	-	0.091	0.892	39.38924	0.06
0.058	0.942	YES	1.290	0.005892	0.00832	0.80828	-2.2	0.020	3.016643551	6.4524319	-	0.075	0.835	41.58006	0.0464
0.050	0.950	YES	1.305	0.005959	0.00854	0.83008	-2.4	0.017	2.586206897	6.5258631	-	0.058	0.775	42.70132	0.04
0.041	0.959	YES	1.322	0.006038	0.00881	0.85611	-2.6	0.014	2.107607951	6.6121224	-	0.050	0.747	44.0404	0.0328
0.034	0.966	YES	1.336	0.006101	0.00903	0.87756	-2.8	0.012	1.739427012	6.6820804	-	0.041	0.715	45.14391	0.0272
0.029	0.971	YES	1.347	0.006149	0.00919	0.89358	-3.0	0.010	1.478585996	6.7336873	-	0.034	0.690	45.96802	0.0232
0.024	0.976	YES	1.357	0.006197	0.00936	0.91022	-3.2	0.008	1.219512195	6.7867321	-	0.029	0.673	46.82405	0.0192
0.020	0.980	YES	1.366	0.006237	0.00951	0.92400	-3.4	0.007	1.013513514	6.8302504	-	0.024	0.655	47.53312	0.016
0.016	0.984	YES	1.375	0.006277	0.00965	0.93823	-3.6	0.005	0.808625337	6.8747721	-	0.020	0.641	48.26488	0.0128
0.013	0.987	YES	1.382	0.006308	0.00977	0.94920	-3.8	0.004	0.655682582	6.908846	-	0.016	0.627	48.82927	0.0104
0.011	0.989	YES	1.386	0.006329	0.00984	0.95666	-4.0	0.004	0.55406313	6.9318969	-	0.013	0.616	49.21322	0.0088
0.009	0.991	YES	1.391	0.006351	0.00992	0.96425	-4.2	0.003	0.452716298	6.9552221	-	0.011	0.609	49.6035	0.0072
0.008	0.992	YES	1.393	0.006362	0.00996	0.96809	-4.3	0.003	0.402144772	6.9669894	-	0.009	0.602	49.80106	0.0064
0.007	0.994	YES	1.397	0.006378	0.01002	0.97391	-4.6	0.002	0.326414463	6.9847732	-	0.008	0.598	50.10049	0.0052
0.006	0.995	YES	1.399	0.006389	0.01006	0.97783	-4.8	0.002	0.276012044	6.9967186	-	0.006	0.593	50.3022	0.0044
0.004	0.996	YES	1.402	0.006402	0.01011	0.98258	-5.0	0.001	0.215618105	7.011149	-	0.005	0.589	50.54649	0.00344
0.000	1.000	YES	1.413	0.00645	0.01029	1.00000	-10.0	0.000	0	7.0637366	-	0.004	0.585	51.4425	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή 117-Β' φάση
σήραγγα μέσα στην μάργα (ms), με υπερκείμενο λατυποπαγές(mb).

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων	H(m)=	40	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού	γ(KN/m3)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.80	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	4.00	
Απόσταση	r(m)=	4.00	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	3.509
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.685

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150	-	0	1.000	1.000	0	0.8
0.99935	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00042	5.0	0.998	149.7078798	-	0	1.000	1.001	0.017333	0.79948
0.9991	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00058	4.8	0.997	149.5957277	-	6.93E-05	0.999	1.001	0.024	0.79928
0.9988	0.001	NO	1.000	-	0.00001	0.00078	4.6	0.996	149.4612929	-	9.6E-05	0.999	1.001	0.032	0.79904
0.99835	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00107	4.4	0.995	149.2599422	-	0.000128	0.999	1.001	0.044	0.79868
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00143	4.2	0.993	149.0143369	-	0.000176	0.998	1.002	0.058667	0.79824
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00002	0.00194	4.0	0.991	148.6580517	-	0.000235	0.998	1.002	0.08	0.7976
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00003	0.00259	3.8	0.988	148.2142857	-	0.00032	0.997	1.003	0.106667	0.7968
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00004	0.00356	3.6	0.984	147.5519288	-	0.000427	0.996	1.004	0.146667	0.7956
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00005	0.00473	3.4	0.978	146.7622708	-	0.000587	0.995	1.006	0.194667	0.79416
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00006	0.00622	3.2	0.972	145.7613815	-	0.000779	0.993	1.007	0.256	0.79232
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00009	0.00842	3.0	0.962	144.2982456	-	0.001024	0.990	1.010	0.346667	0.7896
0.983	0.017	NO	1.000	-	0.00011	0.01102	2.8	0.951	142.6015474	-	0.001387	0.987	1.013	0.453333	0.7864
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00015	0.01490	2.6	0.934	140.1051625	-	0.001813	0.983	1.017	0.613333	0.7816
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00020	0.01976	2.4	0.914	137.0640905	-	0.002453	0.977	1.023	0.813333	0.7756
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00027	0.02592	2.2	0.889	133.3333333	-	0.003253	0.970	1.031	1.066667	0.768
0.948	0.052	NO	1.000	-	0.00035	0.03369	2.0	0.859	128.8043478	-	0.004267	0.960	1.040	1.386667	0.7584
0.933	0.067	NO	1.000	-	0.00045	0.04341	1.8	0.823	123.4126984	-	0.005547	0.948	1.052	1.786667	0.7464
0.914	0.086	NO	1.000	-	0.00057	0.05573	1.6	0.780	116.9795222	-	0.007147	0.933	1.067	2.293333	0.7312
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00080	0.07776	1.4	0.710	106.4516129	-	0.009173	0.914	1.086	3.2	0.704
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00100	0.09720	1.2	0.654	98.07692308	-	0.0128	0.880	1.120	4	0.68
0.820	0.180	NO	1.000	-	0.00120	0.11664	1.0	0.603	90.44117647	-	0.016	0.850	1.150	4.8	0.656
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00147	0.14255	0.8	0.542	81.25	-	0.0192	0.820	1.180	5.866667	0.624
0.720	0.280	NO	1.000	-	0.00187	0.18143	0.6	0.462	69.23076923	-	0.023467	0.780	1.220	7.466667	0.576
0.700	**0.300**	NO	1.000	-	0.00200	**0.19439**	**0.5**	**0.438**	**65.625**	-	0.029867	0.720	1.280	**8**	0.56
0.650	0.350	NO	1.000	-	0.00233	0.22679	0.4	0.382	57.35294118	-	0.032	0.700	1.300	9.333333	0.52

0.593	0.407	NO	1.000	-	0.00271	0.26372	0.2	0.327	49.03528115	-	0.037333	0.650	1.350	10.85333	0.4744
0.525	0.475	NO	1.000	-	0.00317	0.30779	0.0	0.269	40.38461538	-	0.043413	0.593	1.407	12.66667	0.42
0.460	0.540	NO	1.000	-	0.00360	0.34991	-0.2	0.221	33.17307692	-	0.050667	0.525	1.475	14.4	0.368
0.380	0.620	NO	1.000	-	0.00413	0.40174	-0.4	0.170	25.44642857	-	0.0576	0.460	1.540	16.53333	0.304
0.315	**0.685**	YES	1.000	0.004566	0.00457	0.44388	-0.5	0.133	19.93670886	4.0005173	0.066133	0.380	1.620	18.2675	0.252
0.300	0.700	YES	1.011	0.004617	0.00469	0.45563	-0.6	0.125	18.75	4.0452127	-	0.315	1.684	18.75103	0.24
0.250	0.750	YES	1.052	0.004803	0.00514	0.49995	-0.8	0.100	15	4.2080874	-	0.300	1.631	20.57484	0.2
0.200	0.800	YES	1.099	0.005018	0.00570	0.55428	-1.0	0.077	11.53846154	4.3968144	-	0.250	1.454	22.81072	0.16
0.163	0.837	YES	1.139	0.005202	0.00621	0.60314	-1.2	0.061	9.143605086	4.5576649	-	0.200	1.277	24.82169	0.1304
0.130	0.870	YES	1.180	0.005388	0.00674	0.65498	-1.4	0.047	7.116788321	4.7203215	-	0.163	1.147	26.95514	0.104
0.110	0.890	YES	1.207	0.005512	0.00711	0.69118	-1.6	0.040	5.935251799	4.8295567	-	0.130	1.030	28.44491	0.088
0.091	0.909	YES	1.236	0.005641	0.00751	0.72966	-1.8	0.032	4.843860894	4.9421085	-	0.110	0.959	30.02829	0.0728
0.075	0.925	YES	1.261	0.005758	0.00788	0.76569	-1.9	0.026	3.947368421	5.0444782	-	0.091	0.892	31.51139	0.06
0.058	0.942	YES	1.290	0.005892	0.00832	0.80828	-2.2	0.020	3.016643551	5.1619455	-	0.075	0.835	33.26405	0.0464
0.050	0.950	YES	1.305	0.005959	0.00854	0.83008	-2.4	0.017	2.586206897	5.2206905	-	0.058	0.775	34.16105	0.04
0.041	0.959	YES	1.322	0.006038	0.00881	0.85611	-2.6	0.014	2.107607951	5.2896979	-	0.050	0.747	35.23232	0.0328
0.034	0.966	YES	1.336	0.006101	0.00903	0.87756	-2.8	0.012	1.739427012	5.3456643	-	0.041	0.715	36.11513	0.0272
0.029	0.971	YES	1.347	0.006149	0.00919	0.89358	-3.0	0.010	1.478585996	5.3869498	-	0.034	0.690	36.77442	0.0232
0.024	0.976	YES	1.357	0.006197	0.00936	0.91022	-3.2	0.008	1.219512195	5.4293857	-	0.029	0.673	37.45924	0.0192
0.020	0.980	YES	1.366	0.006237	0.00951	0.92400	-3.4	0.007	1.013513514	5.4642003	-	0.024	0.655	38.02649	0.016
0.016	0.984	YES	1.375	0.006277	0.00965	0.93823	-3.6	0.005	0.808625337	5.4998177	-	0.020	0.641	38.61191	0.0128
0.013	0.987	YES	1.382	0.006308	0.00977	0.94920	-3.8	0.004	0.655682582	5.5270768	-	0.016	0.627	39.06342	0.0104
0.011	0.989	YES	1.386	0.006329	0.00984	0.95666	-4.0	0.004	0.55406313	5.5455175	-	0.013	0.616	39.37057	0.0088
0.009	0.991	YES	1.391	0.006351	0.00992	0.96425	-4.2	0.003	0.452716298	5.5641777	-	0.011	0.609	39.6828	0.0072
0.008	0.992	YES	1.393	0.006362	0.00996	0.96809	-4.3	0.003	0.402144772	5.5735915	-	0.009	0.602	39.84085	0.0064
0.007	0.994	YES	1.397	0.006378	0.01002	0.97391	-4.6	0.002	0.326414463	5.5878185	-	0.008	0.598	40.08039	0.0052
0.006	0.995	YES	1.399	0.006389	0.01006	0.97783	-4.8	0.002	0.276012044	5.5973749	-	0.006	0.593	40.24176	0.0044
0.004	0.996	YES	1.402	0.006402	0.01011	0.98258	-5.0	0.001	0.215618105	5.6089192	-	0.005	0.589	40.43719	0.00344
0.000	1.000	YES	1.413	0.00645	0.01029	1.00000	-10.0	0.000	0	5.6509893	-	0.004	0.585	41.154	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ
Διατομή Α5- Α' φάση
σήραγγα μέσα στην μάργα (ms), με υπερκείμενο μαργας (ms) και λατυποπαγ (mb)

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων (m)	H(ms)=	12	
	H(mb)=	13	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού (kN/m^3)	γ(ms)=	17.2	
	γ(mb)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.47	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	5.00	
Απόσταση	r(m)=	5.00	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	2.046
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.775

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150	-	0	1.000	1.000	0	0.4664
0.9995	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00042	5.0	0.999	149.7752248		4.86E-05	1.000	1.001	0.009717	0.466167
0.99935	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00055	4.8	0.998	149.7078798	-	6.32E-05	0.999	1.001	0.012632	0.466097
0.9991	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00076	4.6	0.997	149.5957277	-	8.75E-05	0.999	1.001	0.01749	0.46598
0.9988	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00101	4.4	0.996	149.4612929	-	0.000117	0.999	1.001	0.02332	0.46584
0.99835	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00139	4.2	0.995	149.2599422	-	0.00016	0.998	1.002	0.032065	0.46563
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00185	4.0	0.993	149.0143369	-	0.000214	0.998	1.002	0.042753	0.465374
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00001	0.00253	3.8	0.991	148.6580517	-	0.000292	0.997	1.003	0.0583	0.465001
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00002	0.00337	3.6	0.988	148.2142857	-	0.000389	0.996	1.004	0.077733	0.464534
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00002	0.00463	3.4	0.984	147.5519288	-	0.000534	0.995	1.006	0.106883	0.463835
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00003	0.00615	3.2	0.978	146.7622708	-	0.000709	0.993	1.007	0.141863	0.462995
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00004	0.00809	3.0	0.972	145.7613815	-	0.000933	0.990	1.010	0.18656	0.461923
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00005	0.01095	2.8	0.962	144.2982456	-	0.001263	0.987	1.013	0.252633	0.460337
0.982	0.018	NO	1.000	-	0.00007	0.01516	2.6	0.948	142.1814672	-	0.001749	0.982	1.018	0.3498	0.458005
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00009	0.01938	2.4	0.934	140.1051625	-	0.002235	0.977	1.023	0.446967	0.455673
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00012	0.02570	2.2	0.914	137.0640905	-	0.002964	0.970	1.031	0.592717	0.452175
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00016	0.03370	2.0	0.889	133.3333333	-	0.003887	0.960	1.040	0.777333	0.447744
0.948	0.052	NO	1.000	-	0.00020	0.04381	1.8	0.859	128.8043478	-	0.005053	0.948	1.052	1.010533	0.442147
0.933	0.067	NO	1.000	-	0.00026	0.05645	1.6	0.823	123.4126984	-	0.00651	0.933	1.067	1.302033	0.435151
0.914	0.086	NO	1.000	-	0.00033	0.07245	1.4	0.780	116.9795222	-	0.008356	0.914	1.086	1.671267	0.42629
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00047	0.10110	1.2	0.710	106.4516129	-	0.01166	0.880	1.120	2.332	0.410432
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00058	0.12637	1.0	0.654	98.07692308	-	0.014575	0.850	1.150	2.915	0.39644
0.820	0.180	NO	1.000	-	0.00070	0.15165	0.8	0.603	90.44117647	-	0.01749	0.820	1.180	3.498	0.382448
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00086	0.18535	0.6	0.542	81.25	-	0.021377	0.780	1.220	4.275333	0.363792
0.750	0.250	NO	1.000	-	0.00097	0.21062	0.4	0.500	75	-	0.024292	0.750	1.250	4.858333	0.3498
0.700	0.300	NO	1.000	-	0.00117	0.25275	0.2	0.438	65.625	-	0.02915	0.700	1.300	5.83	0.32648

0.640	0.360	NO	1.000	-	0.00140	0.30330	0.0	0.372	55.81395349	-	0.03498	0.640	1.360	6.996	0.298496
0.570	**0.430**	NO	1.000	-	0.00167	**0.36227**	**-0.2**	**0.306**	**45.96774194**	-	0.041782	0.570	1.430	**8.356333**	0.265848
0.525	0.475	NO	1.000	-	0.00185	0.40018	-0.4	0.269	40.38461538	-	0.046154	0.525	1.475	9.230833	0.24486
0.460	0.540	NO	1.000	-	0.00210	0.45494	-0.6	0.221	33.17307692	-	0.05247	0.460	1.540	10.494	0.214544
0.380	0.620	NO	1.000	-	0.00241	0.52234	-0.8	0.170	25.44642857	-	0.060243	0.380	1.620	12.04867	0.177232
0.330	0.670	NO	1.000	-	0.00260	0.56447	-1.0	0.141	21.15384615	-	0.065102	0.330	1.670	13.02033	0.153912
0.280	0.720	NO	1.000	-	0.00280	0.60659	-1.2	0.115	17.21311475	-	0.06996	0.280	1.720	13.992	0.130592
0.225	**0.775**	YES	1.000	0.003012	0.00301	0.65298	-1.4	0.088	13.23529412	5.0010273	-	0.225	1.774	15.06192	0.10494
0.180	0.820	YES	1.031	0.003104	0.00323	0.70101	-1.6	0.068	10.22727273	5.1542914	-	0.180	1.614	16.16989	0.083952
0.150	0.850	YES	1.053	0.003171	0.00340	0.73735	-1.8	0.056	8.333333333	5.2662571	-	0.150	1.508	17.00799	0.06996
0.120	0.880	YES	1.077	0.003244	0.00359	0.77783	-2.0	0.043	6.52173913	5.3873293	-	0.120	1.402	17.94176	0.055968
0.100	0.900	YES	1.095	0.003296	0.00373	0.80749	-2.2	0.036	5.357142857	5.4737588	-	0.100	1.331	18.62595	0.04664
0.085	0.915	YES	1.108	0.003337	0.00384	0.83133	-2.4	0.030	4.505300353	5.541908	-	0.085	1.278	19.17583	0.039644
0.070	0.930	YES	1.123	0.00338	0.00395	0.85668	-2.6	0.024	3.671328671	5.6131565	-	0.070	1.225	19.76057	0.032648
0.058	0.942	YES	1.135	0.003416	0.00405	0.87815	-2.8	0.020	3.016643551	5.6725539	-	0.058	1.183	20.25578	0.027051
0.048	0.952	YES	1.145	0.003447	0.00414	0.89691	-3.0	0.017	2.479338843	5.7237905	-	0.048	1.147	20.68862	0.022387
0.041	0.959	YES	1.152	0.003469	0.00420	0.91055	-3.2	0.014	2.107607951	5.7606474	-	0.041	1.123	21.00323	0.019122
0.034	0.966	YES	1.160	0.003492	0.00427	0.92463	-3.4	0.012	1.739427012	5.7983578	-	0.034	1.098	21.32796	0.015858
0.027	0.973	YES	1.167	0.003515	0.00433	0.93917	-3.6	0.009	1.374745418	5.836956	-	0.027	1.073	21.66331	0.012593
0.022	0.978	YES	1.173	0.003532	0.00438	0.94985	-3.8	0.007	1.116373478	5.86509	-	0.022	1.056	21.90964	0.010261
0.019	0.981	YES	1.176	0.003542	0.00441	0.95638	-4.0	0.006	0.962187711	5.8822025	-	0.019	1.045	22.06025	0.008862
0.016	0.984	YES	1.180	0.003553	0.00444	0.96300	-4.2	0.005	0.808625337	5.899493	-	0.016	1.034	22.21303	0.007462
0.013	0.987	YES	1.183	0.003563	0.00447	0.96972	-4.4	0.004	0.655682582	5.9169646	-	0.013	1.024	22.36803	0.006063
0.011	0.989	YES	1.186	0.00357	0.00449	0.97425	-4.6	0.004	0.55406313	5.9287146	-	0.011	1.017	22.47262	0.00513
0.009	0.991	YES	1.188	0.003577	0.00452	0.97883	-4.8	0.003	0.452716298	5.9405475	-	0.009	1.010	22.57823	0.004198
0.008	0.992	YES	1.190	0.003582	0.00453	0.98183	-5.0	0.003	0.386986531	5.9482838	-	0.008	1.005	22.64743	0.003591
0.000	1.000	YES	1.199	0.00361	0.00461	1.00000	-10.0	0.000	0	5.9948497	-	0.000	0.978	23.06653	0

ΣΥΓΚΛΙΣΗ - ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ

Διατομή Α5-Β'φάση

σήραγγα μέσα στην μάργα (ms), με υπερκείμενο μαργας (ms) και λατυποπαγ (mb)

Γεωτεχνικές παράμετροι

Γωνία εσωτερικής τριβής	φ(RL)=	34	0.593412
Συντελεστής διασταλτικότητας	δ (φ/4)=	8.5	0.148353
Δείκτης γεωλογικής αντοχής	GSI=	30	
Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου	σci(Mpa)=	5	
Λόγος poisson	v=	0.25	
Ύψος υπερκειμένων (m)	H(ms)=	12	
	H(mb)=	13	
Μοναδιαίο βάρος σχηματισμού (kN/m^3)	γ(ms)=	17.2	
	γ(mb)=	20	
Αρχική γεωστατική τάση	Po(Mpa)=	0.47	
Ισοδύναμη ακτίνα	R(m)=	4.00	
Απόσταση	r(m)=	4.00	

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Συντελεστής παθητικών ωθήσεων	k=	3.537
Συντελεστής διασταλτικότητας	K=	1.351
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σcm(RL)(Mpa)=	0.456
Συντελεστής υπερφόρτισης	Ns=	2.046
Μέτρο ελαστικότητας	E(Mpa)=	150
Μέτρο διάτμησης	G(Mpa)=	60
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης	λcr=	0.775

Υπολογισμοί

p/po	λ	Plastic Region?	rp/R	up/R	uR/R	uR/uRf	CHERN x/R	E/Eo	E	rp	c2	σr/Po	σθ/Po	ur(mm)	pi (MPa)
1	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00000	10.0	1.000	150	-	0	1.000	1.000	0	0.4664
0.9995	0.000	NO	1.000	-	0.00000	0.00042	5.0	0.999	149.7752248		3.11E-05	1.000	1.001	0.007773	0.466167
0.99935	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00055	4.8	0.998	149.7078798	-	4.04E-05	0.999	1.001	0.010105	0.466097
0.9991	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00076	4.6	0.997	149.5957277	-	5.6E-05	0.999	1.001	0.013992	0.46598
0.9988	0.001	NO	1.000	-	0.00000	0.00101	4.4	0.996	149.4612929	-	7.46E-05	0.999	1.001	0.018656	0.46584
0.99835	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00139	4.2	0.995	149.2599422	-	0.000103	0.998	1.002	0.025652	0.46563
0.9978	0.002	NO	1.000	-	0.00001	0.00185	4.0	0.993	149.0143369	-	0.000137	0.998	1.002	0.034203	0.465374
0.997	0.003	NO	1.000	-	0.00001	0.00253	3.8	0.991	148.6580517	-	0.000187	0.997	1.003	0.04664	0.465001
0.996	0.004	NO	1.000	-	0.00002	0.00337	3.6	0.988	148.2142857	-	0.000249	0.996	1.004	0.062187	0.464534
0.9945	0.005	NO	1.000	-	0.00002	0.00463	3.4	0.984	147.5519288	-	0.000342	0.995	1.006	0.085507	0.463835
0.9927	0.007	NO	1.000	-	0.00003	0.00615	3.2	0.978	146.7622708	-	0.000454	0.993	1.007	0.113491	0.462995
0.990	0.010	NO	1.000	-	0.00004	0.00809	3.0	0.972	145.7613815	-	0.000597	0.990	1.010	0.149248	0.461923
0.987	0.013	NO	1.000	-	0.00005	0.01095	2.8	0.962	144.2982456	-	0.000808	0.987	1.013	0.202107	0.460337
0.982	0.018	NO	1.000	-	0.00007	0.01516	2.6	0.948	142.1814672	-	0.001119	0.982	1.018	0.27984	0.458005
0.977	0.023	NO	1.000	-	0.00009	0.01938	2.4	0.934	140.1051625	-	0.00143	0.977	1.023	0.357573	0.455673
0.970	0.031	NO	1.000	-	0.00012	0.02570	2.2	0.914	137.0640905	-	0.001897	0.970	1.031	0.474173	0.452175
0.960	0.040	NO	1.000	-	0.00016	0.03370	2.0	0.889	133.3333333	-	0.002487	0.960	1.040	0.621867	0.447744
0.948	0.052	NO	1.000	-	0.00020	0.04381	1.8	0.859	128.8043478	-	0.003234	0.948	1.052	0.808427	0.442147
0.933	0.067	NO	1.000	-	0.00026	0.05645	1.6	0.823	123.4126984	-	0.004167	0.933	1.067	1.041627	0.435151
0.914	0.086	NO	1.000	-	0.00033	0.07245	1.4	0.780	116.9795222	-	0.005348	0.914	1.086	1.337013	0.42629
0.880	0.120	NO	1.000	-	0.00047	0.10110	1.2	0.710	106.4516129	-	0.007462	0.880	1.120	1.8656	0.410432
0.850	0.150	NO	1.000	-	0.00058	0.12637	1.0	0.654	98.07692308	-	0.009328	0.850	1.150	2.332	0.39644
0.820	0.180	NO	1.000	-	0.00070	0.15165	0.8	0.603	90.44117647	-	0.011194	0.820	1.180	2.7984	0.382448
0.780	0.220	NO	1.000	-	0.00086	0.18535	0.6	0.542	81.25	-	0.013681	0.780	1.220	3.420267	0.363792
0.770	**0.230**	NO	1.000	-	0.00089	**0.19377**	**0.5**	**0.527**	**79.10958904**	-	0.014303	0.770	1.230	**3.575733**	0.359128
0.750	0.250	NO	1.000	-	0.00097	0.21062	0.4	0.500	75	-	0.015547	0.750	1.250	3.886667	0.3498

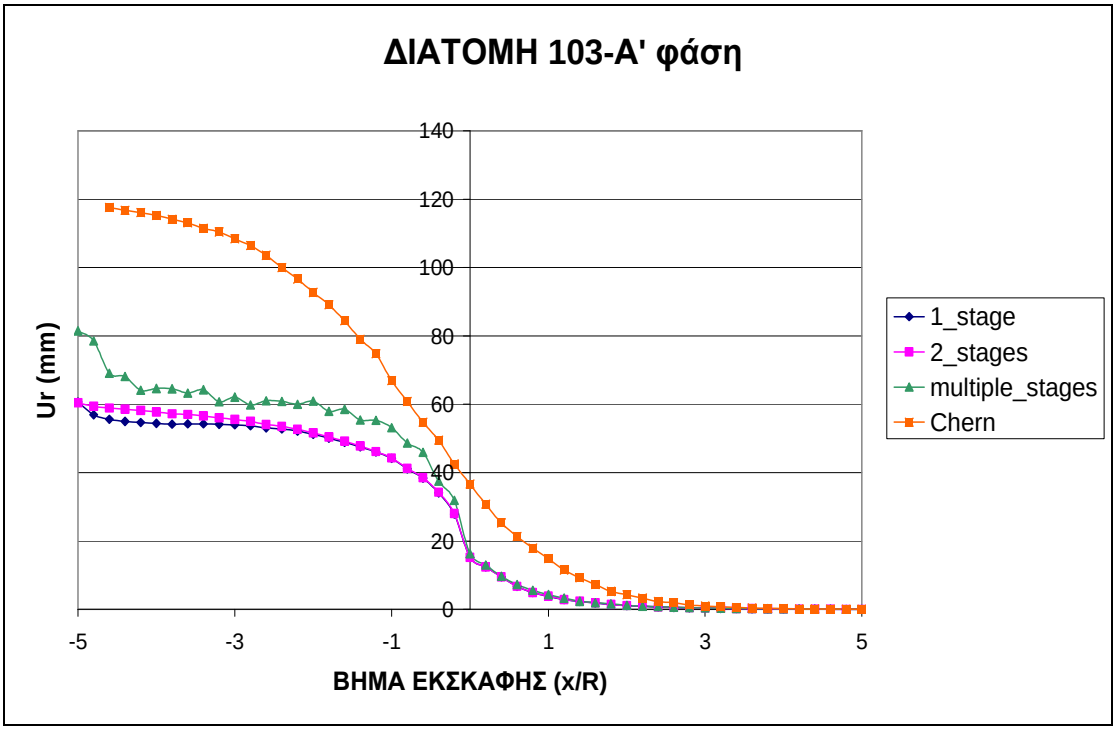
0.700	0.300	NO	1.000	-	0.00117	0.25275	0.2	0.438	65.625	-	0.018656	0.700	1.300	4.664	0.32648
0.640	0.360	NO	1.000	-	0.00140	0.30330	0.0	0.372	55.81395349	-	0.022387	0.640	1.360	5.5968	0.298496
0.570	0.430	NO	1.000	-	0.00167	0.36227	-0.2	0.306	45.96774194	-	0.02674	0.570	1.430	6.685067	0.265848
0.525	0.475	NO	1.000	-	0.00185	0.40018	-0.4	0.269	40.38461538	-	0.029539	0.525	1.475	7.384667	0.24486
0.460	0.540	NO	1.000	-	0.00210	0.45494	-0.6	0.221	33.17307692	-	0.033581	0.460	1.540	8.3952	0.214544
0.380	0.620	NO	1.000	-	0.00241	0.52234	-0.8	0.170	25.44642857	-	0.038556	0.380	1.620	9.638933	0.177232
0.330	0.670	NO	1.000	-	0.00260	0.56447	-1.0	0.141	21.15384615	-	0.041665	0.330	1.670	10.41627	0.153912
0.280	0.720	NO	1.000	-	0.00280	0.60659	-1.2	0.115	17.21311475	-	0.044774	0.280	1.720	11.1936	0.130592
0.225	**0.775**	YES	1.000	0.003012	0.00301	0.65298	-1.4	0.088	13.23529412	4.0008218	-	0.225	1.774	12.04954	0.10494
0.180	0.820	YES	1.031	0.003104	0.00323	0.70101	-1.6	0.068	10.22727273	4.1234331	-	0.180	1.614	12.93591	0.083952
0.150	0.850	YES	1.053	0.003171	0.00340	0.73735	-1.8	0.056	8.333333333	4.2130057	-	0.150	1.508	13.60639	0.06996
0.120	0.880	YES	1.077	0.003244	0.00359	0.77783	-2.0	0.043	6.52173913	4.3098634	-	0.120	1.402	14.35341	0.055968
0.100	0.900	YES	1.095	0.003296	0.00373	0.80749	-2.2	0.036	5.357142857	4.379007	-	0.100	1.331	14.90076	0.04664
0.085	0.915	YES	1.108	0.003337	0.00384	0.83133	-2.4	0.030	4.505300353	4.4335264	-	0.085	1.278	15.34066	0.039644
0.070	0.930	YES	1.123	0.00338	0.00395	0.85668	-2.6	0.024	3.671328671	4.4905252	-	0.070	1.225	15.80845	0.032648
0.058	0.942	YES	1.135	0.003416	0.00405	0.87815	-2.8	0.020	3.016643551	4.5380431	-	0.058	1.183	16.20462	0.027051
0.048	0.952	YES	1.145	0.003447	0.00414	0.89691	-3.0	0.017	2.479338843	4.5790324	-	0.048	1.147	16.55089	0.022387
0.041	0.959	YES	1.152	0.003469	0.00420	0.91055	-3.2	0.014	2.107607951	4.6085179	-	0.041	1.123	16.80259	0.019122
0.034	0.966	YES	1.160	0.003492	0.00427	0.92463	-3.4	0.012	1.739427012	4.6386862	-	0.034	1.098	17.06237	0.015858
0.027	0.973	YES	1.167	0.003515	0.00433	0.93917	-3.6	0.009	1.374745418	4.6695648	-	0.027	1.073	17.33065	0.012593
0.022	0.978	YES	1.173	0.003532	0.00438	0.94985	-3.8	0.007	1.116373478	4.692072	-	0.022	1.056	17.52771	0.010261
0.019	0.981	YES	1.176	0.003542	0.00441	0.95638	-4.0	0.006	0.962187711	4.705762	-	0.019	1.045	17.6482	0.008862
0.016	0.984	YES	1.180	0.003553	0.00444	0.96300	-4.2	0.005	0.808625337	4.7195944	-	0.016	1.034	17.77043	0.007462
0.013	0.987	YES	1.183	0.003563	0.00447	0.96972	-4.4	0.004	0.655682582	4.7335717	-	0.013	1.024	17.89442	0.006063
0.011	0.989	YES	1.186	0.00357	0.00449	0.97425	-4.6	0.004	0.55406313	4.7429716	-	0.011	1.017	17.97809	0.00513
0.009	0.991	YES	1.188	0.003577	0.00452	0.97883	-4.8	0.003	0.452716298	4.752438	-	0.009	1.010	18.06258	0.004198
0.008	0.992	YES	1.190	0.003582	0.00453	0.98183	-5.0	0.003	0.386986531	4.7586271	-	0.008	1.005	18.11794	0.003591
0.000	1.000	YES	1.199	0.00361	0.00461	1.00000	-10.0	0.000	0	4.7958797	-	0.000	0.978	18.45322	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β-ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΈΛΑ

ΔΙΑΤΟΜΗ 103-Α' φάση

LOCATION		1STAGE		2STAGE		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.05379
49	4.8	2.53E-05	0.025289	2.81E-05	0.028149	4.02E-05	0.040227	0.0726
48	4.6	5.06E-05	0.050577	5.63E-05	0.056298	8.05E-05	0.080453	0.099
47	4.4	7.59E-05	0.075866	8.44E-05	0.084447	0.000123	0.123323	0.132
46	4.2	0.000101	0.101154	0.000113	0.112596	0.000169	0.169302	0.1815
45	4	0.000132	0.132463	0.000146	0.146141	0.000198	0.198481	0.2409
44	3.8	0.000169	0.169353	0.000185	0.184996	0.000228	0.227661	0.3168
43	3.6	0.000206	0.206244	0.000224	0.22385	0.000257	0.257108	0.429
42	3.4	0.000243	0.243135	0.000263	0.262705	0.000303	0.303222	0.561
41	3.2	0.00028	0.280026	0.000302	0.301559	0.00035	0.349537	0.759
40	3	0.000388	0.387594	0.000412	0.411781	0.000421	0.421156	1.0065
39	2.8	0.000499	0.498688	0.000526	0.525564	0.000527	0.52729	1.32
38	2.6	0.000578	0.577522	0.000606	0.606032	0.000672	0.672035	1.98
37	2.4	0.000716	0.716084	0.000746	0.746407	0.000817	0.81678	2.31
36	2.2	0.000919	0.919307	0.000952	0.951652	0.000962	0.961525	3.3
35	2	0.001123	1.12253	0.001157	1.1569	0.001186	1.18625	4.29
34	1.8	0.001413	1.41309	0.001449	1.44937	0.001633	1.63267	5.28
33	1.6	0.001888	1.88755	0.001926	1.92565	0.002002	2.00168	7.26
32	1.4	0.002362	2.36201	0.002402	2.40192	0.002371	2.37069	9.24
31	1.2	0.002885	2.88497	0.002927	2.92685	0.003313	3.31264	11.55
30	1	0.00382	3.82023	0.003865	3.86529	0.004342	4.34193	14.85
29	0.8	0.004929	4.92944	0.004972	4.97186	0.005595	5.59521	17.919
28	0.6	0.006729	6.72874	0.006758	6.75774	0.007249	7.24917	21.32579
27	0.4	0.00951	9.51005	0.009511	9.51088	0.00971	9.70964	25.33024
26	0.2	0.01243	12.4303	0.012414	12.4142	0.012999	12.9994	30.7498
25	0	0.015229	15.2289	0.015209	15.209	0.016269	16.2688	36.68113
24	-0.2	0.027865	27.8649	0.028058	28.0582	0.031895	31.8949	42.58461
23	-0.4	0.034099	34.0989	0.034281	34.2807	0.037517	37.517	49.50255
22	-0.6	0.038399	38.3994	0.038521	38.521	0.045949	45.9492	54.77459
21	-0.8	0.041125	41.1253	0.04126	41.2604	0.048685	48.6847	60.81557
20	-1	0.044177	44.1772	0.0443	44.2996	0.053183	53.1834	66.92037
19	-1.2	0.046072	46.0721	0.046178	46.1776	0.05531	55.3104	74.7474
18	-1.4	0.047526	47.5264	0.047773	47.7734	0.055407	55.4066	79.03266
17	-1.6	0.048912	48.9118	0.049216	49.2158	0.058552	58.5524	84.41856
16	-1.8	0.050083	50.0828	0.050443	50.443	0.05793	57.9303	89.09033
15	-2	0.051236	51.2358	0.051652	51.6518	0.060896	60.8957	92.72499
14	-2.2	0.052171	52.1706	0.052725	52.725	0.060018	60.018	96.63907
13	-2.4	0.052768	52.7677	0.053542	53.5424	0.060882	60.8818	99.99306
12	-2.6	0.05311	53.11	0.054111	54.1107	0.061033	61.0332	103.5653
11	-2.8	0.053725	53.7252	0.054973	54.9728	0.059822	59.8216	106.4003
10	-3	0.054006	54.0064	0.055563	55.5628	0.062096	62.0957	108.37
9	-3.2	0.054155	54.1545	0.056011	56.0105	0.060722	60.7216	110.4072
8	-3.4	0.054252	54.2518	0.05658	56.5803	0.064276	64.2762	111.4521

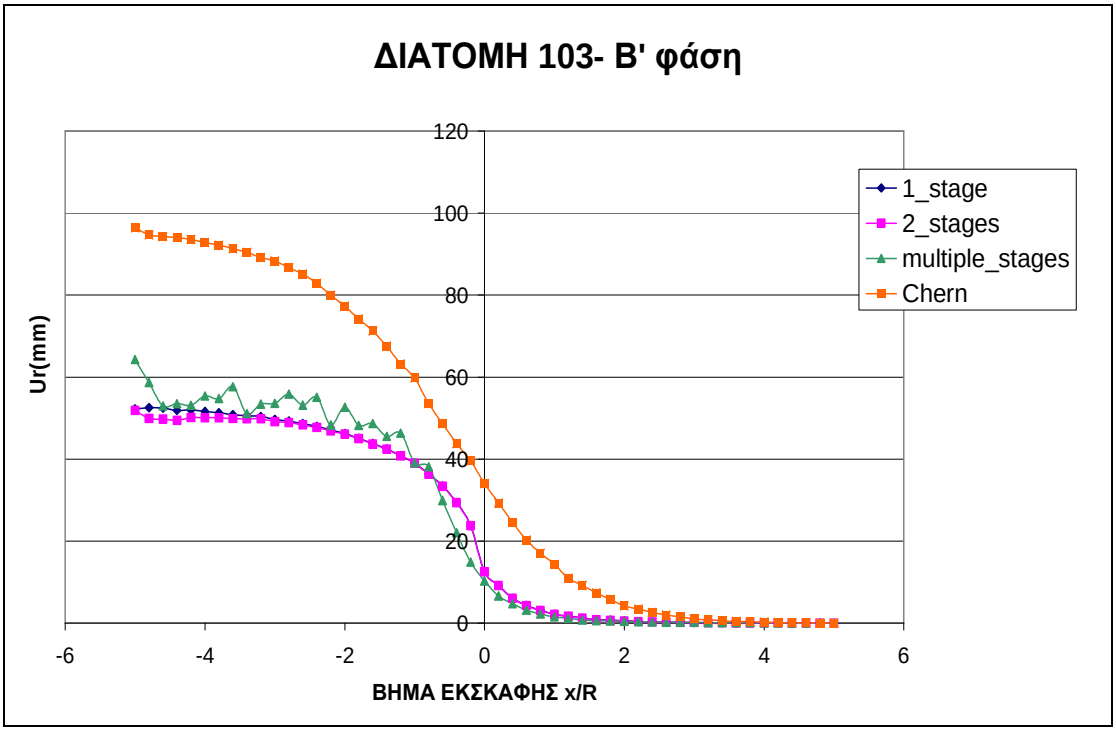
7	-3.6	0.054264	54.264	0.057042	57.0424	0.063292	63.2923	113.0536
6	-3.8	0.05416	54.16	0.05722	57.2197	0.064557	64.5569	114.1448
5	-4	0.054418	54.4178	0.057757	57.757	0.064623	64.6226	115.2553
4	-4.2	0.054683	54.6827	0.058212	58.2124	0.06409	64.0899	116.0444
3	-4.4	0.054993	54.9929	0.05857	58.5702	0.068109	68.1091	116.7287
2	-4.6	0.055601	55.601	0.058903	58.9027	0.069091	69.0914	117.5363
1	-4.8	0.056929	56.9292	0.059407	59.4071	0.078547	78.5471	118.3542
0	-5	0.060674	**60.6736**	0.060461	**60.461**	0.081474	**81.4737**	**120.5057**



ΔΙΑΤΟΜΗ 103-Β' φάση

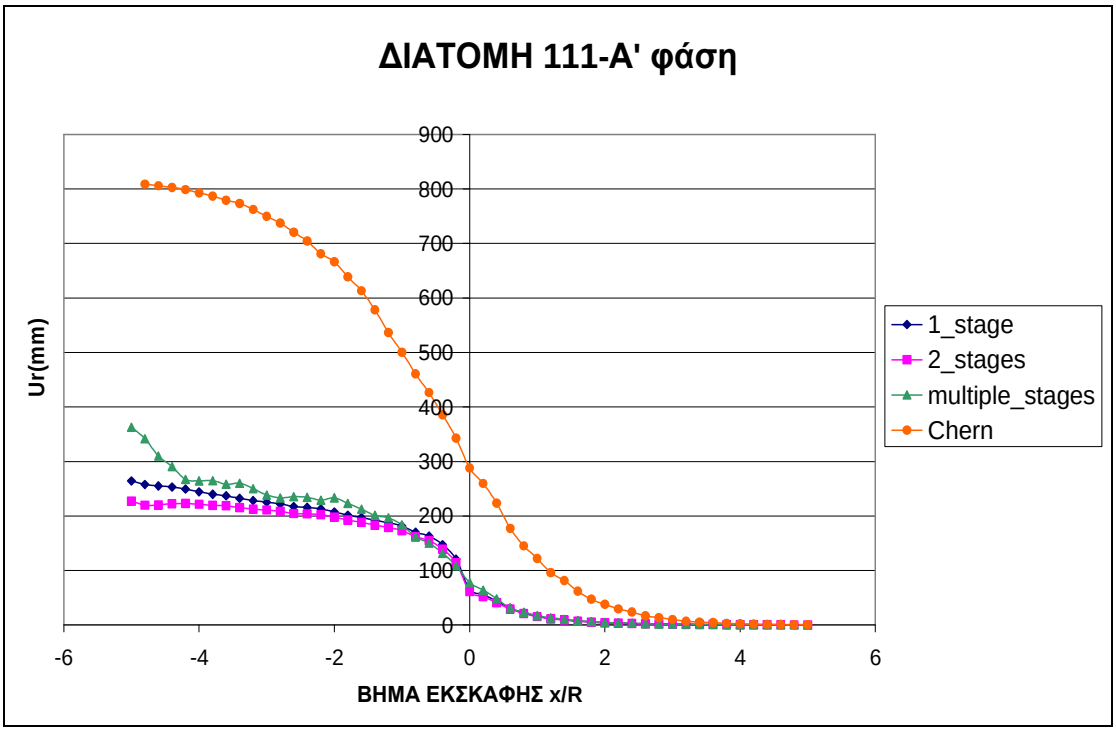
LOCATION		1STAGE		2STAGE		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.05808
49	4.8	1.29E-05	0.012912	1.15E-05	0.011534	1.91E-05	0.019136	0.0792
48	4.6	2.58E-05	0.025825	2.31E-05	0.023069	3.83E-05	0.038272	0.1056
47	4.4	3.87E-05	0.038737	3.46E-05	0.034603	5.74E-05	0.057408	0.1452
46	4.2	5.11E-05	0.051121	4.57E-05	0.045665	7.65E-05	0.076544	0.19272
45	4	5.31E-05	0.053063	4.75E-05	0.047524	9.45E-05	0.094481	0.25344
44	3.8	6.45E-05	0.0645	5.85E-05	0.058477	0.000107	0.106704	0.3432
43	3.6	8.51E-05	0.085142	7.83E-05	0.078305	0.000119	0.118927	0.4488
42	3.4	0.000106	0.105784	9.81E-05	0.098134	0.000131	0.13115	0.6072
41	3.2	0.00013	0.130346	0.000122	0.121802	0.000149	0.149392	0.8052
40	3	0.000167	0.16692	0.000157	0.157184	0.000177	0.176753	1.056
39	2.8	0.00023	0.23048	0.000219	0.218828	0.000215	0.215056	1.584
38	2.6	0.000287	0.287339	0.000275	0.274535	0.000253	0.25336	1.98
37	2.4	0.000341	0.340571	0.000327	0.32703	0.000292	0.291663	2.64
36	2.2	0.000404	0.403884	0.00039	0.389608	0.000339	0.339265	3.432
35	2	0.000574	0.574129	0.000558	0.558294	0.000435	0.434701	4.224
34	1.8	0.000719	0.71885	0.000702	0.701844	0.000527	0.52684	5.808
33	1.6	0.000865	0.865387	0.000847	0.84733	0.000619	0.618979	7.392
32	1.4	0.00127	1.26987	0.00125	1.24996	0.000791	0.791071	9.24
31	1.2	0.001685	1.68505	0.001663	1.66305	0.001165	1.16463	10.956
30	1	0.002172	2.17236	0.002149	2.1489	0.001515	1.51544	14.3352
29	0.8	0.003121	3.12118	0.003095	3.09533	0.002238	2.23847	17.06063
28	0.6	0.004338	4.33787	0.004309	4.3087	0.00315	3.15014	20.2642
27	0.4	0.006108	6.1078	0.006076	6.07568	0.004774	4.77423	24.59984
26	0.2	0.009197	9.19724	0.009165	9.16517	0.00666	6.66028	29.3449
25	0	0.012547	12.547	0.012509	12.5087	0.010342	10.3421	34.06769
24	-0.2	0.023825	23.825	0.023761	23.7608	0.014925	14.9245	39.60204
23	-0.4	0.029425	29.4252	0.029375	29.3752	0.022086	22.0861	43.81967
22	-0.6	0.033455	33.4549	0.033409	33.4085	0.029924	29.9243	48.65246
21	-0.8	0.036378	36.3782	0.036322	36.3224	0.038167	38.1665	53.5363
20	-1	0.039036	39.0356	0.038969	38.9693	0.039117	39.1172	59.79792
19	-1.2	0.040865	40.8645	0.040795	40.7952	0.046394	46.3936	63.22613
18	-1.4	0.042501	42.5013	0.042418	42.4183	0.045535	45.5351	67.53485
17	-1.6	0.043819	43.8191	0.043709	43.709	0.048665	48.6646	71.27227
16	-1.8	0.045103	45.1026	0.044972	44.9722	0.048243	48.2434	74.17999
15	-2	0.046255	46.2552	0.046091	46.0909	0.052688	52.6879	77.31125
14	-2.2	0.047056	47.0564	0.04685	46.8496	0.048343	48.3426	79.99445
13	-2.4	0.048007	48.0067	0.047748	47.7478	0.055122	55.1216	82.85222
12	-2.6	0.048665	48.6653	0.048342	48.3421	0.05319	53.1904	85.12025
11	-2.8	0.049276	49.2755	0.048906	48.9058	0.055862	55.8615	86.69602
10	-3	0.049679	49.6792	0.049175	49.175	0.053611	53.6108	88.32573
9	-3.2	0.050397	50.3974	0.049835	49.835	0.05343	53.4302	89.16166
8	-3.4	0.050587	50.587	0.049815	49.8146	0.051079	51.0793	90.44291
7	-3.6	0.05085	50.85	0.049896	49.8961	0.057696	57.6959	91.31584

6	-3.8	0.05131	51.3103	0.050098	50.0977	0.054743	54.7432	92.20424
5	-4	0.051649	51.6494	0.050102	50.1016	0.055374	55.3739	92.83554
4	-4.2	0.052028	52.0278	0.050144	50.1441	0.05313	53.13	93.56672
3	-4.4	0.051868	51.8684	0.049437	49.4369	0.053559	53.5594	94.02906
2	-4.6	0.052415	52.4152	0.049768	49.7677	0.052982	52.9819	94.30846
1	-4.8	0.052558	52.5583	0.049933	49.9329	0.058654	58.654	94.68336
0	-5	0.052265	**52.265**	0.051877	**51.8773**	0.064285	**64.2854**	**96.40453**



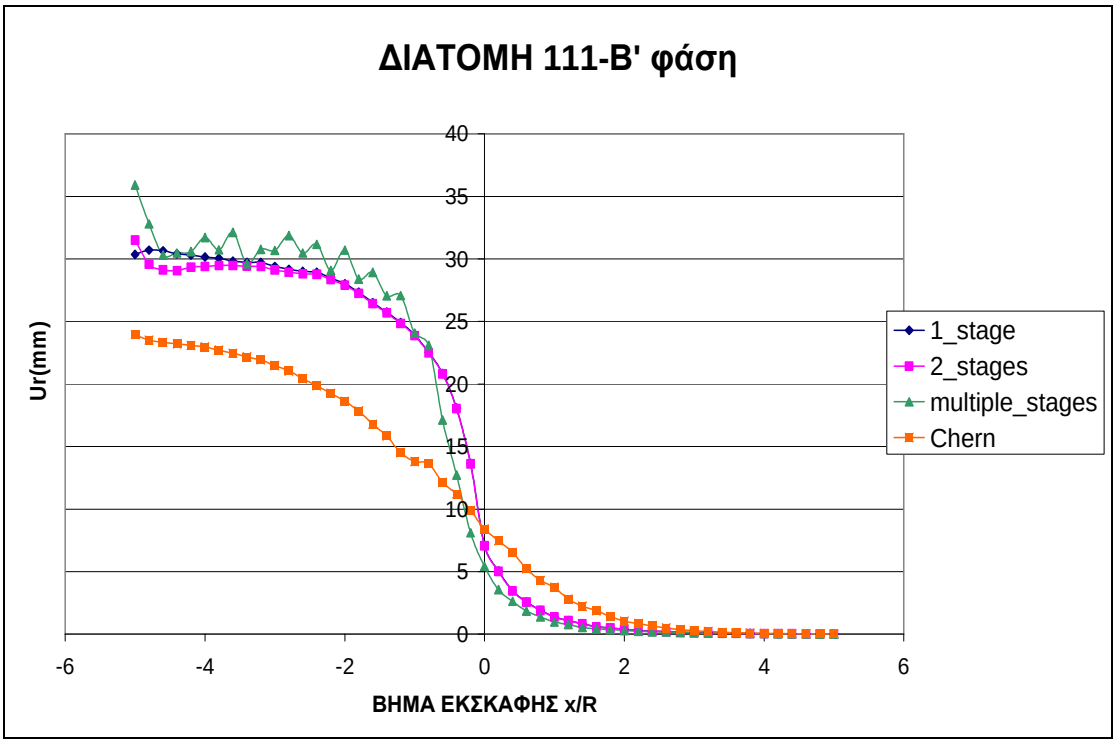
ΔΙΑΤΟΜΗ 111-Α' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGE		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.3612
49	4.8	9.47E-05	0.09465	8.09E-05	0.080921	0.000125	0.124615	0.462
48	4.6	0.000189	0.189301	0.000162	0.161843	0.000249	0.24923	0.6132
47	4.4	0.000284	0.283951	0.000243	0.242764	0.000423	0.423322	0.924
46	4.2	0.000379	0.378601	0.000324	0.323685	0.00053	0.530216	1.26
45	4	0.000503	0.502907	0.000435	0.435002	0.000637	0.63711	1.68
44	3.8	0.000654	0.654184	0.000573	0.57295	0.000744	0.744004	2.184
43	3.6	0.000805	0.80546	0.000711	0.710899	0.00092	0.919568	2.94
42	3.4	0.000957	0.956737	0.000849	0.848848	0.001133	1.13314	4.2
41	3.2	0.001108	1.10801	0.000987	0.986796	0.001347	1.34673	5.04
40	3	0.00151	1.51028	0.001361	1.36101	0.00156	1.56032	6.72
39	2.8	0.001925	1.92506	0.001747	1.74701	0.001806	1.80595	10.08
38	2.6	0.002201	2.2005	0.002005	2.00468	0.002494	2.49423	13.44
37	2.4	0.0027	2.70008	0.002475	2.47508	0.003093	3.09326	16.8
36	2.2	0.003443	3.44263	0.003176	3.17602	0.003692	3.69229	23.52
35	2	0.004185	4.18518	0.003877	3.87695	0.004341	4.34059	29.4
34	1.8	0.005357	5.35737	0.00498	4.98028	0.006073	6.07282	37.8
33	1.6	0.007443	7.44341	0.00694	6.93954	0.007805	7.80505	47.10075
32	1.4	0.009529	9.52946	0.008899	8.8988	0.010323	10.3234	61.90163
31	1.2	0.011872	11.8719	0.011102	11.1017	0.013023	13.0231	81.38563
30	1	0.016394	16.3937	0.015375	15.3754	0.017061	17.0612	95.88833
29	0.8	0.022289	22.289	0.020994	20.9938	0.023044	23.0437	122.136
28	0.6	0.030974	30.9741	0.029242	29.2424	0.030787	30.7869	145.0909
27	0.4	0.043722	43.7219	0.041038	41.0383	0.04813	48.1295	177.3323
26	0.2	0.055542	55.5423	0.051983	51.9833	0.064119	64.1192	223.5398
25	0	0.065582	65.582	0.061349	61.3486	0.077775	77.7751	259.5955
24	-0.2	0.120525	120.525	0.11418	114.18	0.108734	108.734	287.9716
23	-0.4	0.147344	147.344	0.138946	138.946	0.131425	131.425	342.8163
22	-0.6	0.162916	162.916	0.154647	154.647	0.150395	150.395	385.7505
21	-0.8	0.17033	170.33	0.161921	161.921	0.161281	161.281	426.4894
20	-1	0.181314	181.314	0.173075	173.075	0.183507	183.507	460.6931
19	-1.2	0.187463	187.463	0.17857	178.57	0.196434	196.434	500.2446
18	-1.4	0.19225	192.25	0.183219	183.219	0.200991	200.991	536.5995
17	-1.6	0.197127	197.127	0.18802	188.02	0.212601	212.601	578.0716
16	-1.8	0.201449	201.449	0.192424	192.424	0.223085	223.085	613.1932
15	-2	0.20742	207.42	0.197954	197.954	0.233214	233.214	638.8382
14	-2.2	0.212936	212.936	0.202324	202.324	0.228967	228.967	666.5061
13	-2.4	0.215621	215.621	0.203857	203.857	0.234149	234.149	681.1722
12	-2.6	0.21733	217.33	0.204499	204.499	0.235435	235.435	704.3049
11	-2.8	0.222027	222.027	0.208445	208.445	0.233117	233.117	720.5361
10	-3	0.225436	225.436	0.210926	210.926	0.238537	238.537	737.4617
9	-3.2	0.228137	228.137	0.212442	212.442	0.250152	250.152	749.7462
8	-3.4	0.232406	232.406	0.215194	215.194	0.260112	260.112	762.4085
7	-3.6	0.237031	237.031	0.218689	218.689	0.258109	258.109	773.5757
6	-3.8	0.239761	239.761	0.219466	219.466	0.264973	264.973	779.2716
5	-4	0.244318	244.318	0.221509	221.509	0.264434	264.434	786.9859
4	-4.2	0.249341	249.341	0.222747	222.747	0.26679	266.79	792.8635

3	-4.4	0.253078	253.078	0.222277	222.277	0.290603	290.603	798.8216
2	-4.6	0.255032	255.032	0.220261	220.261	0.309729	309.729	802.8391
1	-4.8	0.257652	257.652	0.219742	219.742	0.341821	341.821	805.8764
0	-5	0.26429	**264.29**	0.227322	**227.322**	0.362661	**362.661**	**808.9348**



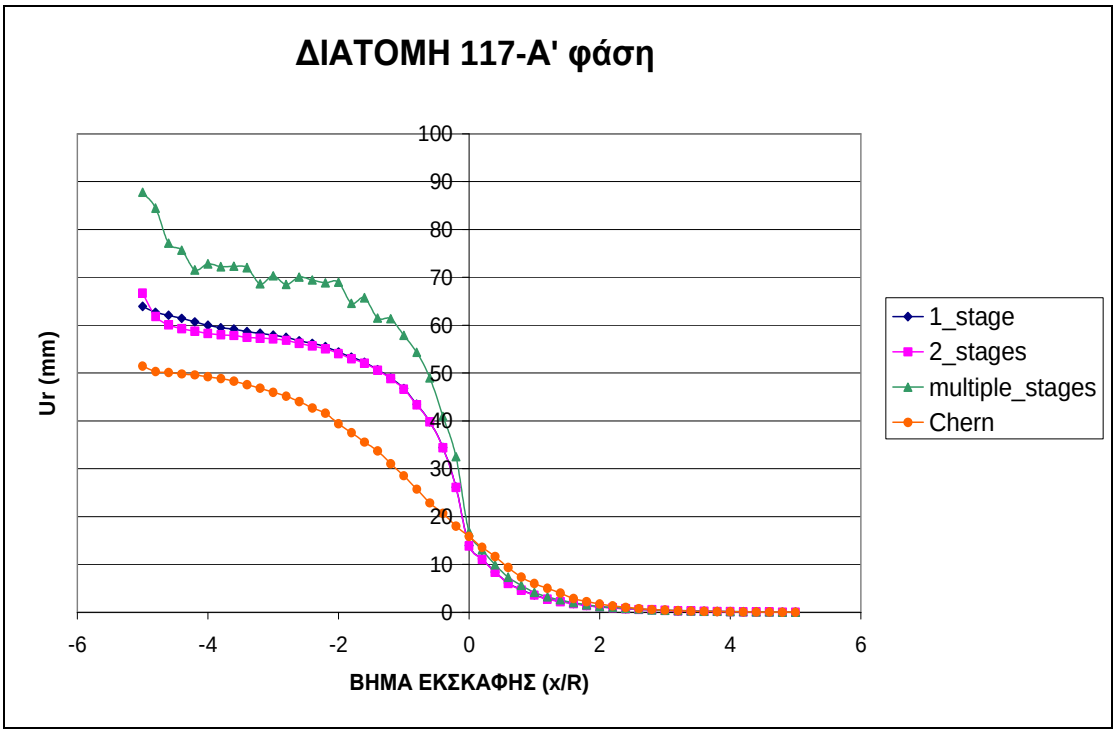
ΔΙΑΤΟΜΗ 111-Β' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGES		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.013067
49	4.8	8.62E-06	0.008615	7.78E-06	0.007782	8.39E-06	0.008394	0.018667
48	4.6	1.72E-05	0.017231	1.56E-05	0.015565	1.68E-05	0.016789	0.024267
47	4.4	2.58E-05	0.025846	2.33E-05	0.023347	2.52E-05	0.025183	0.037333
46	4.2	3.41E-05	0.034109	3.08E-05	0.030811	3.36E-05	0.033578	0.046667
45	4	3.58E-05	0.035801	3.24E-05	0.032437	4.20E-05	0.041986	0.065333
44	3.8	4.55E-05	0.045471	4.17E-05	0.041725	5.05E-05	0.05046	0.084
43	3.6	6.08E-05	0.060802	5.65E-05	0.056465	5.89E-05	0.058934	0.112
42	3.4	7.61E-05	0.076133	7.12E-05	0.071206	6.74E-05	0.067408	0.149333
41	3.2	9.28E-05	0.092838	8.73E-05	0.087332	7.94E-05	0.079412	0.205333
40	3	0.000116	0.116142	0.00011	0.109932	9.90E-05	0.098983	0.261333
39	2.8	0.000157	0.156902	0.00015	0.149522	0.00013	0.129606	0.354667
38	2.6	0.000197	0.196687	0.000189	0.18856	0.00016	0.160228	0.485333
37	2.4	0.000236	0.235946	0.000227	0.227298	0.000191	0.19085	0.653333
36	2.2	0.000282	0.281551	0.000272	0.272319	0.000227	0.226973	0.84
35	2	0.000395	0.394903	0.000385	0.384543	0.000292	0.292172	1.026667
34	1.8	0.000492	0.491561	0.00048	0.480362	0.000357	0.357144	1.4
33	1.6	0.000588	0.588396	0.000576	0.576444	0.000422	0.422116	1.866667
32	1.4	0.000836	0.835998	0.000823	0.822784	0.000533	0.53334	2.24
31	1.2	0.00109	1.09042	0.001076	1.07557	0.000761	0.761108	2.8
30	1	0.001381	1.38065	0.001364	1.36446	0.000976	0.975706	3.733333
29	0.8	0.00191	1.90956	0.001891	1.8914	0.00137	1.36953	4.293333
28	0.6	0.002575	2.57465	0.002554	2.55393	0.00185	1.84968	5.226667
27	0.4	0.003478	3.47758	0.003453	3.45284	0.002622	2.62236	6.533333
26	0.2	0.005047	5.04679	0.005016	5.01581	0.003552	3.55221	7.466667
25	0	0.007096	7.096	0.007058	7.05789	0.005415	5.41458	8.4
24	-0.2	0.013653	13.6533	0.013617	13.6167	0.008103	8.10255	9.893333
23	-0.4	0.018069	18.069	0.018031	18.031	0.012726	12.7255	11.2
22	-0.6	0.020849	20.8487	0.020808	20.8077	0.01712	17.1195	12.13333
21	-0.8	0.02254	22.5398	0.022488	22.4884	0.023097	23.0966	13.62667
20	-1	0.023935	23.9348	0.023879	23.8791	0.024074	24.0743	13.79577
19	-1.2	0.024911	24.9106	0.024845	24.845	0.027075	27.0747	14.51374
18	-1.4	0.025751	25.7505	0.025675	25.6751	0.02706	27.0597	15.8516
17	-1.6	0.026514	26.5138	0.026427	26.427	0.028924	28.9242	16.78532
16	-1.8	0.027345	27.3449	0.027243	27.243	0.028396	28.3959	17.84116
15	-2	0.028025	28.0252	0.027908	27.9075	0.030713	30.7132	18.62543
14	-2.2	0.028482	28.4817	0.028342	28.3423	0.029079	29.0787	19.26243
13	-2.4	0.028934	28.9338	0.028768	28.7682	0.031173	31.1727	19.85234
12	-2.6	0.029014	29.0138	0.028818	28.8183	0.03048	30.4796	20.43126
11	-2.8	0.029174	29.1738	0.028942	28.9421	0.031869	31.8692	21.04642
10	-3	0.029399	29.3986	0.029119	29.1188	0.03068	30.6797	21.4784
9	-3.2	0.029715	29.7151	0.029403	29.4027	0.03077	30.7697	21.92923
8	-3.4	0.029722	29.7217	0.029416	29.4158	0.029619	29.6185	22.16211
7	-3.6	0.029832	29.8324	0.029478	29.4784	0.032121	32.1214	22.46054
6	-3.8	0.030056	30.056	0.029478	29.4779	0.030734	30.7343	22.70537
5	-4	0.030155	30.1548	0.029404	29.4044	0.031727	31.7274	22.95582

4	-4.2	0.0303	30.2995	0.029352	29.3522	0.030584	30.5842	23.08321
3	-4.4	0.030415	30.4149	0.029068	29.0683	0.030481	30.4811	23.21208
2	-4.6	0.030656	30.6556	0.029129	29.1285	0.030304	30.3044	23.34246
1	-4.8	0.030713	30.713	0.029582	29.5816	0.032805	32.8052	23.51424
0	-5	0.030363	**30.363**	0.031508	**31.5081**	0.035909	**35.9092**	**23.9485**



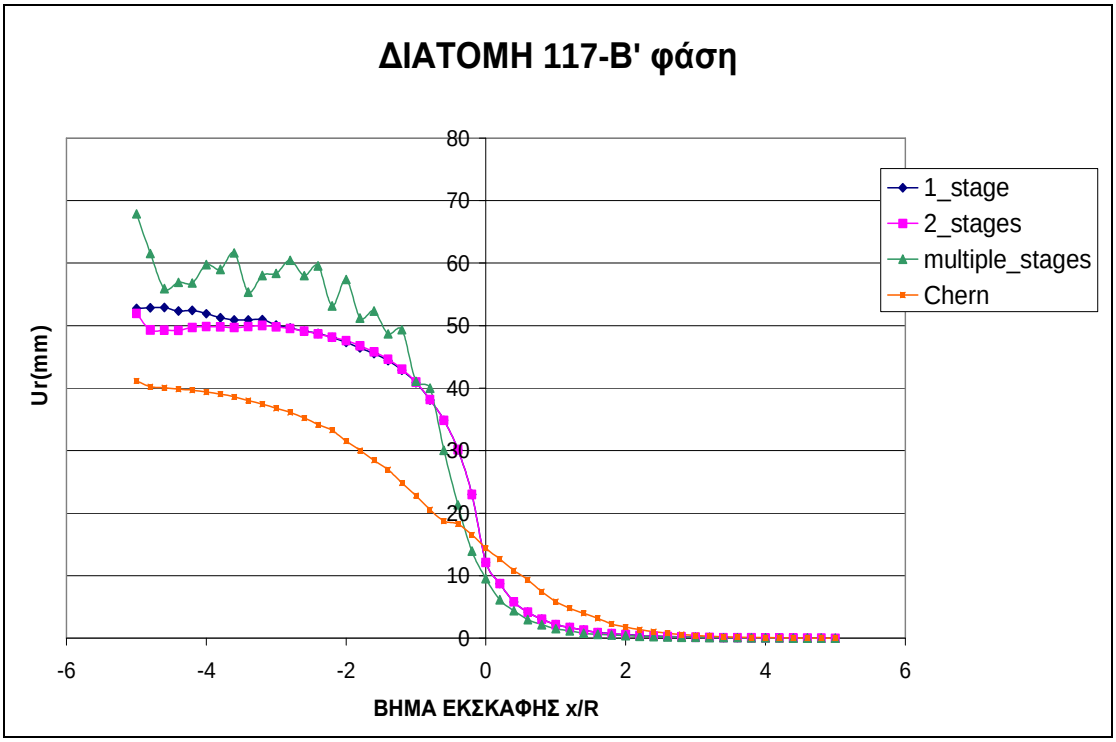
ΔΙΑΤΟΜΗ 117-Α' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGES		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.021667
49	4.8	2.40E-05	0.024028	2.17E-05	0.021743	2.78E-05	0.027806	0.03
48	4.6	4.81E-05	0.048055	4.35E-05	0.043486	5.56E-05	0.055612	0.04
47	4.4	7.21E-05	0.072082	6.52E-05	0.065229	9.38E-05	0.093787	0.055
46	4.2	9.61E-05	0.09611	8.70E-05	0.086972	0.000123	0.122738	0.073333
45	4	0.000129	0.129167	0.000118	0.118117	0.000152	0.151689	0.1
44	3.8	0.00017	0.169731	0.000157	0.156899	0.000181	0.180641	0.133333
43	3.6	0.00021	0.210296	0.000196	0.19568	0.000227	0.227398	0.183333
42	3.4	0.000251	0.25086	0.000234	0.234461	0.000288	0.288468	0.243333
41	3.2	0.000291	0.291424	0.000273	0.273242	0.00035	0.349975	0.32
40	3	0.000402	0.402054	0.000381	0.381473	0.000411	0.411483	0.433333
39	2.8	0.000516	0.516179	0.000493	0.49317	0.00048	0.479567	0.566667
38	2.6	0.000594	0.594494	0.00057	0.570054	0.000658	0.657648	0.766667
37	2.4	0.000731	0.730807	0.000705	0.704566	0.000816	0.815612	1.016667
36	2.2	0.00093	0.929987	0.000902	0.901531	0.000974	0.973575	1.333333
35	2	0.001129	1.12917	0.001099	1.0985	0.001143	1.14315	1.733333
34	1.8	0.001404	1.40437	0.001371	1.37105	0.001568	1.56805	2.233333
33	1.6	0.00184	1.84037	0.001803	1.8034	0.001993	1.99296	2.866667
32	1.4	0.002276	2.27638	0.002236	2.23574	0.002585	2.58535	4
31	1.2	0.002758	2.75811	0.002714	2.71361	0.003216	3.21612	5
30	1	0.003629	3.62858	0.003579	3.57854	0.004164	4.16441	6
29	0.8	0.004658	4.65815	0.004604	4.60439	0.00562	5.61954	7.333333
28	0.6	0.006098	6.09781	0.006039	6.03898	0.007319	7.3194	9.333333
27	0.4	0.008421	8.42125	0.008356	8.3558	0.009913	9.91295	11.66667
26	0.2	0.011134	11.1344	0.011061	11.0609	0.01309	13.0899	13.56667
25	0	0.013953	13.953	0.013871	13.8705	0.016767	16.7669	15.83333
24	-0.2	0.026149	26.1488	0.026066	26.0658	0.03253	32.53	**18**
23	-0.4	0.034426	34.4264	0.034382	34.3817	0.040955	40.9551	20.66667
22	-0.6	0.039827	39.827	0.039776	39.7757	0.049001	49.0013	22.83437
21	-0.8	0.043449	43.4493	0.043333	43.3328	0.054306	54.3061	25.71855
20	-1	0.04678	46.7798	0.046646	46.6456	0.057856	57.8562	28.51341
19	-1.2	0.048963	48.9629	0.048807	48.807	0.061334	61.3337	31.02711
18	-1.4	0.050708	50.7076	0.05055	50.5501	0.061467	61.4671	33.69392
17	-1.6	0.052232	52.2324	0.052026	52.0264	0.065744	65.7442	35.55614
16	-1.8	0.053328	53.3281	0.052997	52.9971	0.064578	64.578	37.53536
15	-2	0.054404	54.4036	0.054066	54.0659	0.068998	68.9975	39.38924
14	-2.2	0.055516	55.5159	0.055053	55.0526	0.068862	68.8615	41.58006
13	-2.4	0.056209	56.2086	0.055636	55.6356	0.069434	69.4338	42.70132
12	-2.6	0.056751	56.7507	0.056174	56.1742	0.070043	70.0425	44.0404
11	-2.8	0.057442	57.4421	0.056818	56.8176	0.068494	68.4936	45.14391
10	-3	0.057931	57.931	0.057129	57.129	0.070296	70.2957	45.96802
9	-3.2	0.058306	58.3056	0.057287	57.2865	0.068623	68.6226	46.82405
8	-3.4	0.058649	58.6486	0.057418	57.4176	0.072021	72.0214	47.53312
7	-3.6	0.059169	59.1689	0.057834	57.8335	0.072298	72.2977	48.26488
6	-3.8	0.059464	59.4636	0.057974	57.9735	0.072224	72.2243	48.82927
5	-4	0.059984	59.9844	0.058269	58.269	0.072818	72.8184	49.21322
4	-4.2	0.0607	60.6996	0.058748	58.7484	0.071556	71.5559	49.6035
3	-4.4	0.061417	61.417	0.059246	59.246	0.075669	75.6692	49.80106

2	-4.6	0.062057	62.0573	0.060091	60.0907	0.077113	77.1133	50.10049
1	-4.8	0.062714	62.7138	0.061827	61.8269	0.084474	84.4741	50.3022
0	-5	0.063925	**63.925**	0.066697	**66.6972**	0.087746	**87.7459**	**51.4425**



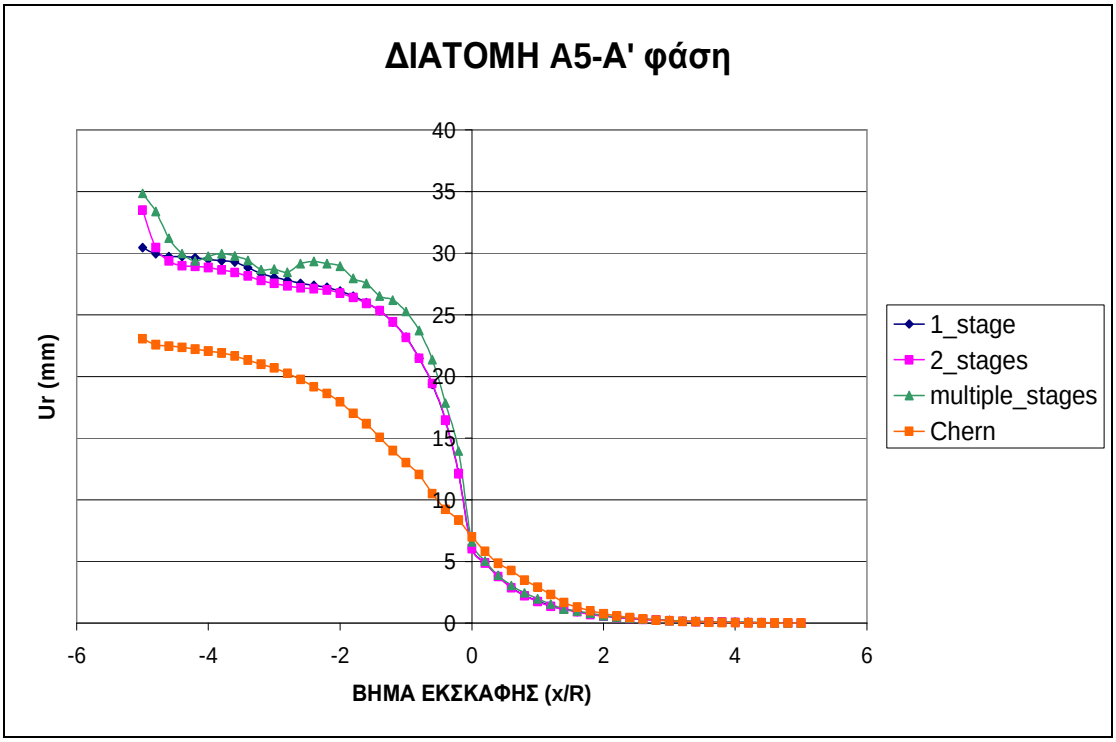
ΔΙΑΤΟΜΗ 117-Β' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGES		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.024
49	4.8	1.23E-05	0.012294	1.10E-05	0.011016	1.22E-05	0.012196	0.032
48	4.6	2.46E-05	0.024588	2.20E-05	0.022032	2.44E-05	0.024391	0.044
47	4.4	3.69E-05	0.036883	3.30E-05	0.033048	3.66E-05	0.036587	0.058667
46	4.2	4.87E-05	0.048673	4.36E-05	0.043612	4.88E-05	0.048783	0.08
45	4	5.12E-05	0.051223	4.61E-05	0.046064	6.10E-05	0.061036	0.106667
44	3.8	6.59E-05	0.065874	6.02E-05	0.060158	7.36E-05	0.073566	0.146667
43	3.6	8.97E-05	0.089721	8.32E-05	0.083172	8.61E-05	0.086097	0.194667
42	3.4	0.000114	0.113569	0.000106	0.106186	9.86E-05	0.098627	0.256
41	3.2	0.00014	0.139519	0.000131	0.13133	0.000117	0.116897	0.346667
40	3	0.000176	0.175746	0.000167	0.166592	0.000146	0.146284	0.453333
39	2.8	0.000239	0.239286	0.000229	0.228545	0.000191	0.191156	0.613333
38	2.6	0.0003	0.300249	0.000288	0.288487	0.000236	0.236028	0.813333
37	2.4	0.00036	0.359816	0.000347	0.347341	0.000281	0.2809	1.066667
36	2.2	0.000432	0.431722	0.000419	0.418567	0.000335	0.335245	1.386667
35	2	0.00061	0.610217	0.000596	0.595874	0.000439	0.438641	1.786667
34	1.8	0.000763	0.762577	0.000747	0.747393	0.000539	0.539382	2.293333
33	1.6	0.000915	0.915274	0.000899	0.899394	0.00064	0.640123	3.2
32	1.4	0.001303	1.30288	0.001286	1.28638	0.000816	0.816313	4
31	1.2	0.001715	1.71459	0.001698	1.69752	0.001183	1.18262	4.8
30	1	0.00219	2.18998	0.002174	2.1737	0.001525	1.52479	5.866667
29	0.8	0.003069	3.06941	0.003058	3.05761	0.002175	2.17512	7.466667
28	0.6	0.004183	4.18314	0.004177	4.17731	0.002987	2.98702	9.333333
27	0.4	0.005826	5.82568	0.005826	5.82637	0.004405	4.40458	10.85333
26	0.2	0.008747	8.74734	0.008745	8.74484	0.006158	6.15796	12.66667
25	0	0.012137	12.137	0.012119	12.1185	0.009541	9.54144	14.4
24	-0.2	0.023026	23.0258	0.023007	23.0071	0.013955	13.9546	16.53333
23	-0.4	0.03018	30.1798	0.030169	30.1686	0.021333	21.3327	18.2675
22	-0.6	0.034865	34.8652	0.034869	34.8691	0.030073	30.0729	18.75103
21	-0.8	0.038128	38.1284	0.038175	38.1745	0.039995	39.9951	20.57484
20	-1	0.040876	40.8758	0.04098	40.9799	0.041091	41.0914	22.81072
19	-1.2	0.042881	42.8808	0.043037	43.0369	0.049343	49.3434	24.82169
18	-1.4	0.044421	44.4206	0.044641	44.6408	0.048672	48.6715	26.95514
17	-1.6	0.045526	45.5262	0.045784	45.7838	0.052334	52.3338	28.44491
16	-1.8	0.046424	46.4238	0.046764	46.7643	0.051223	51.2232	30.02829
15	-2	0.047327	47.3266	0.047621	47.6205	0.057392	57.3922	31.51139
14	-2.2	0.048114	48.1139	0.048175	48.1752	0.053172	53.1718	33.26405
13	-2.4	0.048774	48.774	0.048677	48.6767	0.059551	59.5506	34.16105
12	-2.6	0.049114	49.1136	0.049118	49.1175	0.058003	58.0033	35.23232
11	-2.8	0.049631	49.6311	0.049543	49.5431	0.060452	60.4519	36.11513
10	-3	0.050092	50.0918	0.049809	49.8093	0.058363	58.363	36.77442
9	-3.2	0.050962	50.962	0.050032	50.0324	0.058035	58.0346	37.45924
8	-3.4	0.050926	50.9264	0.049852	49.8516	0.055376	55.3757	38.02649
7	-3.6	0.050902	50.9018	0.049692	49.6923	0.061644	61.644	38.61191
6	-3.8	0.051284	51.2835	0.04981	49.8102	0.058995	58.9945	39.06342
5	-4	0.051909	51.9088	0.049837	49.8374	0.059752	59.7524	39.37057
4	-4.2	0.052451	52.4507	0.04972	49.7199	0.056824	56.8241	39.6828
3	-4.4	0.052334	52.3344	0.049254	49.2537	0.056931	56.9307	39.84085

2	-4.6	0.052893	52.8926	0.049281	49.2812	0.055914	55.914	40.08039
1	-4.8	0.052871	52.8712	0.04932	49.3196	0.061529	61.5293	40.24176
0	-5	0.05274	**52.74**	0.051947	**51.9473**	0.067892	**67.8915**	**41.154**



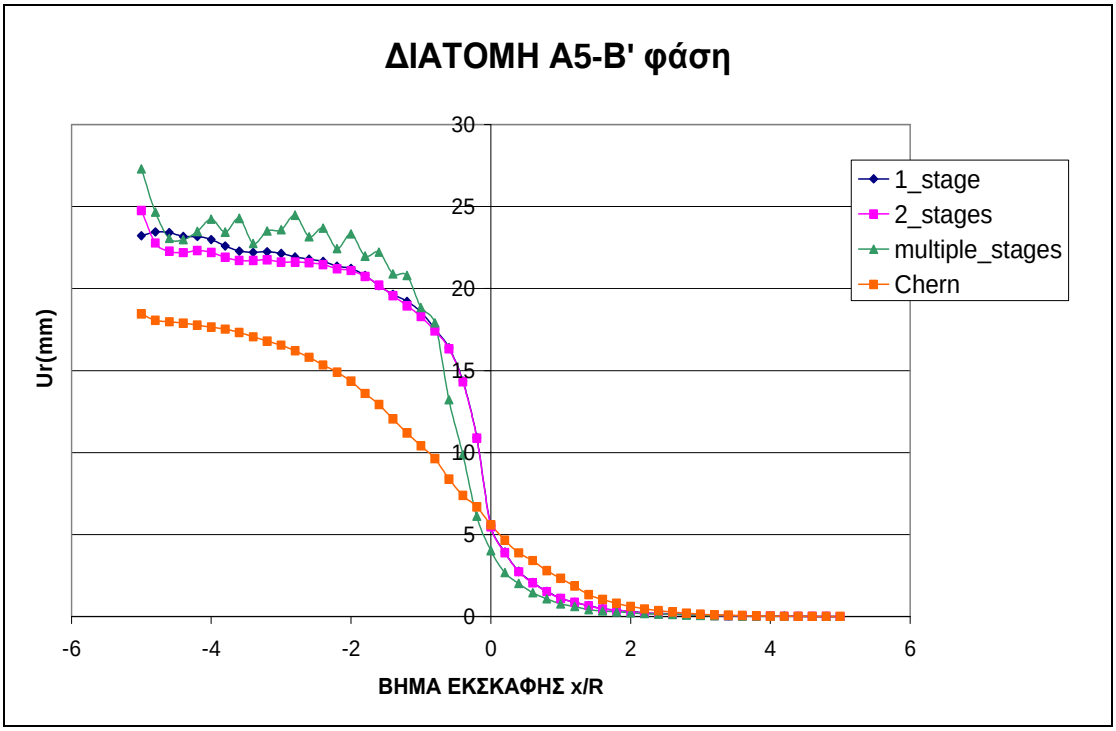
ΔΙΑΤΟΜΗ Α5-Α' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGES		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.009717
49	4.8	1.37E-05	0.013723	1.23E-05	0.012325	1.88E-05	0.018806	0.012632
48	4.6	2.74E-05	0.027445	2.46E-05	0.02465	3.76E-05	0.037612	0.01749
47	4.4	4.12E-05	0.041168	3.70E-05	0.036975	5.75E-05	0.057484	0.02332
46	4.2	5.49E-05	0.054891	4.93E-05	0.0493	8.10E-05	0.081031	0.032065
45	4	7.25E-05	0.072545	6.58E-05	0.065789	9.70E-05	0.096974	0.042753
44	3.8	9.36E-05	0.093591	8.58E-05	0.085752	0.000113	0.112917	0.0583
43	3.6	0.000115	0.114636	0.000106	0.105714	0.000129	0.129014	0.077733
42	3.4	0.000136	0.135681	0.000126	0.125676	0.000155	0.154677	0.106883
41	3.2	0.000157	0.156726	0.000146	0.145638	0.00018	0.180428	0.141863
40	3	0.000214	0.214058	0.000202	0.201509	0.000217	0.217284	0.18656
39	2.8	0.000273	0.2732	0.000259	0.259172	0.000273	0.273329	0.252633
38	2.6	0.000314	0.314153	0.000299	0.299264	0.000351	0.350838	0.3498
37	2.4	0.000384	0.384163	0.000368	0.368224	0.000428	0.428347	0.446967
36	2.2	0.000486	0.485675	0.000468	0.468471	0.000506	0.505856	0.592717
35	2	0.000587	0.587187	0.000569	0.568718	0.000612	0.611812	0.777333
34	1.8	0.000725	0.724921	0.000705	0.704979	0.000813	0.812523	1.010533
33	1.6	0.000939	0.938782	0.000917	0.916866	0.000982	0.981696	1.302033
32	1.4	0.001153	1.15264	0.001129	1.12875	0.001151	1.15087	1.671267
31	1.2	0.001387	1.38653	0.001361	1.36052	0.001551	1.55052	2.332
30	1	0.001791	1.79066	0.001761	1.76125	0.001979	1.97866	2.915
29	0.8	0.002261	2.26098	0.002229	2.22943	0.002453	2.45312	3.498
28	0.6	0.002901	2.90124	0.002866	2.86635	0.003054	3.05447	4.275333
27	0.4	0.003821	3.82135	0.003786	3.78561	0.003886	3.88563	4.858333
26	0.2	0.004913	4.91348	0.004879	4.87938	0.005038	5.03764	5.83
25	0	0.006083	6.0834	0.006052	6.05227	0.006601	6.60084	6.996
24	-0.2	0.012148	12.1475	0.012119	12.1186	0.013949	13.9493	8.356333
23	-0.4	0.016427	16.4272	0.016455	16.455	0.01785	17.8499	9.230833
22	-0.6	0.019375	19.375	0.01942	19.4195	0.021366	21.3663	10.494
21	-0.8	0.021481	21.4808	0.021482	21.4824	0.023734	23.7341	12.04867
20	-1	0.023192	23.1922	0.023165	23.165	0.025268	25.2675	13.02033
19	-1.2	0.024396	24.3964	0.024419	24.4189	0.0262	26.2004	13.992
18	-1.4	0.025338	25.3384	0.025345	25.3445	0.026527	26.5271	15.06192
17	-1.6	0.025982	25.9823	0.025928	25.9276	0.027544	27.5441	16.16989
16	-1.8	0.026515	26.5148	0.0264	26.3995	0.02795	27.9499	17.00799
15	-2	0.026918	26.9182	0.026758	26.7578	0.028949	28.9492	17.94176
14	-2.2	0.027226	27.2263	0.027021	27.0206	0.02915	29.1498	18.62595
13	-2.4	0.027395	27.3947	0.027122	27.1223	0.029323	29.3232	19.17583
12	-2.6	0.027556	27.556	0.027185	27.1854	0.029146	29.1456	19.76057
11	-2.8	0.027809	27.8086	0.02734	27.3396	0.028453	28.4529	20.25578
10	-3	0.028038	28.0382	0.02754	27.5396	0.028706	28.7055	20.68862
9	-3.2	0.028345	28.3452	0.027786	27.7857	0.028669	28.6691	21.00323
8	-3.4	0.028818	28.8183	0.028142	28.1421	0.029402	29.402	21.32796
7	-3.6	0.029278	29.2775	0.028439	28.4388	0.029776	29.7764	21.66331
6	-3.8	0.029374	29.3735	0.028638	28.6383	0.029947	29.947	21.90964
5	-4	0.029493	29.4934	0.028837	28.837	0.029764	29.7638	22.06025
4	-4.2	0.029632	29.632	0.028921	28.921	0.029365	29.3654	22.21303
3	-4.4	0.029725	29.7253	0.028968	28.9682	0.029963	29.963	22.36803

2	-4.6	0.029728	29.7278	0.029367	29.3672	0.031216	31.2157	22.47262
1	-4.8	0.029946	29.9461	0.030457	30.4569	0.033384	33.3844	22.57823
0	-5	0.030441	30.441	0.033487	33.4873	0.03485	34.8502	23.06653



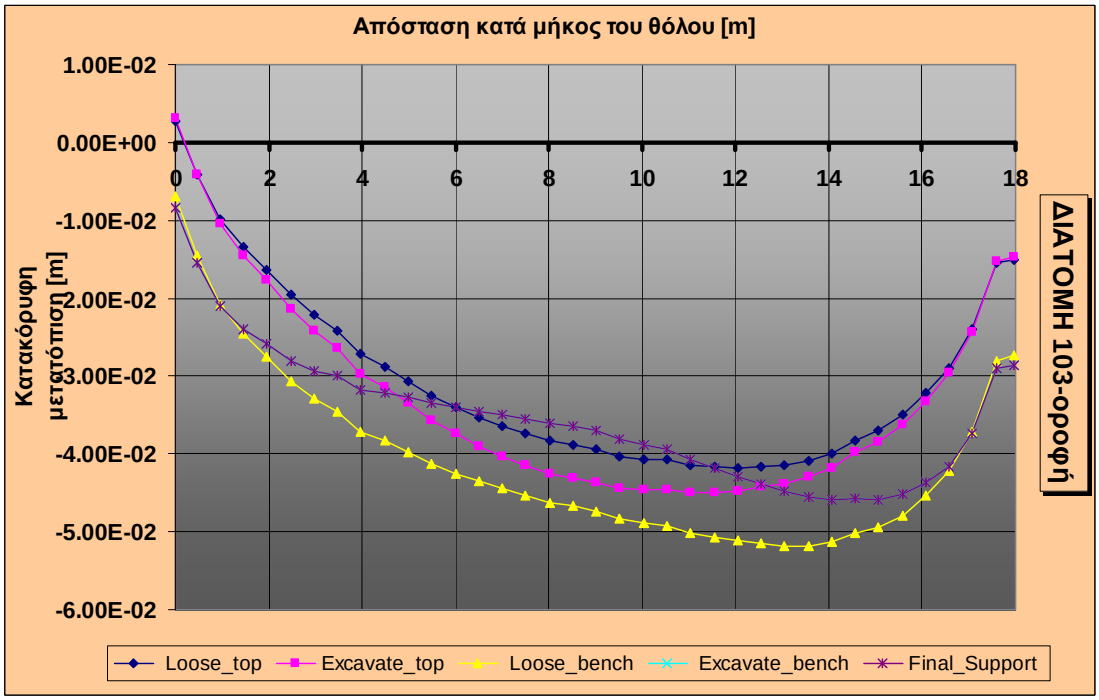
ΔΙΑΤΟΜΗ Α5-Β' φάση								
LOCATION		1STAGE		2STAGES		MULTI-STAGED		CHERN
x	x/R	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(m)	U(mm)	U(mm)
50	5	0	0	0	0	0	0	0.007773
49	4.8	7.23E-06	0.007226	6.50E-06	0.006503	7.00E-06	0.007001	0.010105
48	4.6	1.45E-05	0.014453	1.30E-05	0.013007	1.40E-05	0.014003	0.013992
47	4.4	2.17E-05	0.021679	1.95E-05	0.01951	2.10E-05	0.021004	0.018656
46	4.2	2.86E-05	0.02861	2.57E-05	0.025748	2.80E-05	0.028006	0.025652
45	4	3.00E-05	0.03	2.71E-05	0.027078	3.50E-05	0.035005	0.034203
44	3.8	3.79E-05	0.037925	3.47E-05	0.034666	4.20E-05	0.041992	0.04664
43	3.6	5.04E-05	0.050365	4.66E-05	0.046581	4.90E-05	0.048979	0.062187
42	3.4	6.28E-05	0.062806	5.85E-05	0.058495	5.60E-05	0.055966	0.085507
41	3.2	7.64E-05	0.076388	7.16E-05	0.07156	6.57E-05	0.065738	0.113491
40	3	9.54E-05	0.095358	8.99E-05	0.089894	8.17E-05	0.081736	0.149248
39	2.8	0.000129	0.128514	0.000122	0.121992	0.000107	0.106991	0.202107
38	2.6	0.000161	0.161016	0.000154	0.153816	0.000132	0.132246	0.27984
37	2.4	0.000193	0.193163	0.000185	0.185494	0.000158	0.157501	0.357573
36	2.2	0.00023	0.23	0.000222	0.221779	0.000187	0.186955	0.474173
35	2	0.000322	0.321921	0.000313	0.312614	0.000239	0.238791	0.621867
34	1.8	0.0004	0.400224	0.00039	0.390101	0.000291	0.290849	0.808427
33	1.6	0.000479	0.478643	0.000468	0.467785	0.000343	0.342907	1.041627
32	1.4	0.00068	0.679972	0.000668	0.667881	0.000431	0.431263	1.337013
31	1.2	0.000885	0.884782	0.000871	0.871056	0.000611	0.611083	1.8656
30	1	0.001117	1.11746	0.001102	1.10232	0.00078	0.780239	2.332
29	0.8	0.001543	1.54325	0.001526	1.52594	0.001087	1.08689	2.7984
28	0.6	0.002078	2.07811	0.002058	2.05793	0.001456	1.45646	3.420267
27	0.4	0.00276	2.76022	0.002734	2.73429	0.002022	2.02247	3.886667
26	0.2	0.003938	3.93793	0.003904	3.90438	0.002682	2.68227	4.664
25	0	0.005522	5.5222	0.00548	5.47974	0.004029	4.02928	5.5968
24	-0.2	0.010925	10.9254	0.010883	10.8825	0.006121	6.12088	6.685067
23	-0.4	0.014369	14.3687	0.014321	14.3208	0.009876	9.87622	7.384667
22	-0.6	0.016397	16.3968	0.016336	16.3356	0.013229	13.229	8.3952
21	-0.8	0.017541	17.541	0.017429	17.4294	0.017906	17.9061	9.638933
20	-1	0.018575	18.5752	0.018294	18.2935	0.018849	18.8491	10.41627
19	-1.2	0.019218	19.218	0.018946	18.9458	0.020794	20.7935	11.1936
18	-1.4	0.019653	19.6528	0.019559	19.5589	0.020894	20.8938	12.04954
17	-1.6	0.020176	20.1764	0.020217	20.2168	0.022227	22.2274	12.93591
16	-1.8	0.020807	20.8074	0.020742	20.7417	0.021984	21.9835	13.60639
15	-2	0.021225	21.2248	0.0211	21.0996	0.023329	23.3289	14.35341
14	-2.2	0.021367	21.3671	0.021212	21.2123	0.022432	22.4315	14.90076
13	-2.4	0.021655	21.6549	0.021465	21.4649	0.023689	23.6887	15.34066
12	-2.6	0.021795	21.7953	0.021574	21.5739	0.02317	23.1703	15.80845
11	-2.8	0.021931	21.9308	0.021617	21.6166	0.024475	24.4748	16.20462
10	-3	0.022144	22.1436	0.02162	21.6203	0.02359	23.5895	16.55089
9	-3.2	0.02225	22.2499	0.021761	21.7606	0.023507	23.5072	16.80259
8	-3.4	0.022212	22.2116	0.021704	21.7043	0.022751	22.7509	17.06237
7	-3.6	0.022284	22.2838	0.02172	21.7195	0.024283	24.2827	17.33065
6	-3.8	0.022598	22.598	0.021913	21.9128	0.023442	23.4423	17.52771
5	-4	0.022995	22.9952	0.022209	22.2091	0.02424	24.2399	17.6482
4	-4.2	0.023173	23.1734	0.022321	22.3209	0.023481	23.4812	17.77043
3	-4.4	0.02318	23.1802	0.022191	22.1905	0.022987	22.9867	17.89442

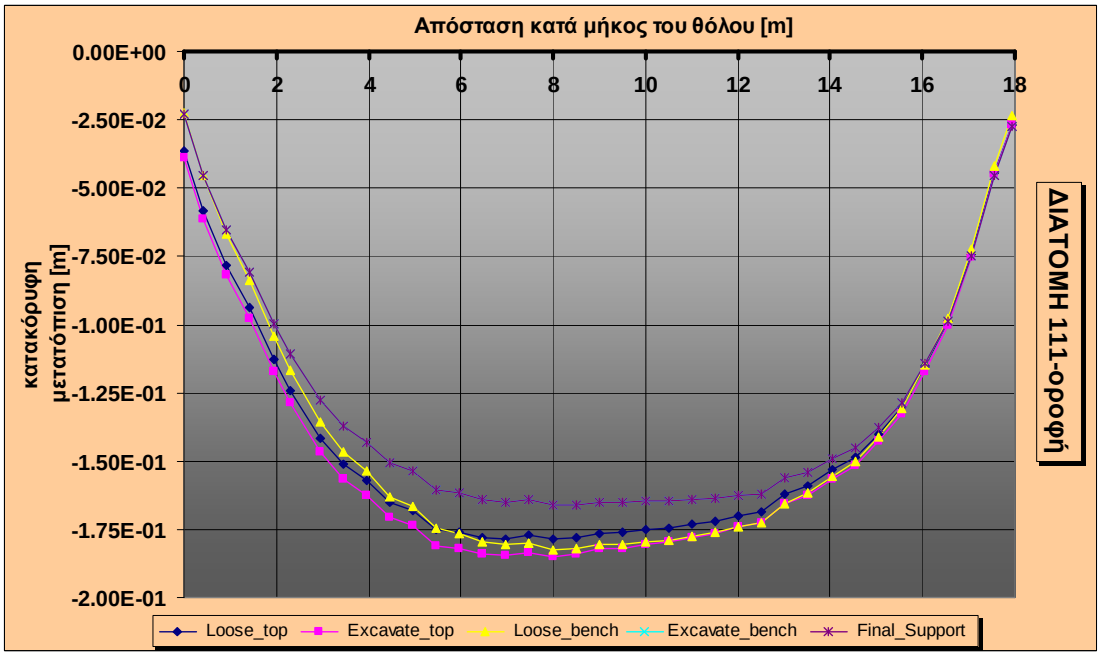
2	-4.6	0.023421	23.4211	0.022275	22.2745	0.023055	23.055	17.97809
1	-4.8	0.023456	23.4557	0.022774	22.7736	0.024663	24.6631	18.06258
0	-5	0.023229	**23.229**	0.024759	**24.7591**	0.027303	**27.3027**	**18.45322**

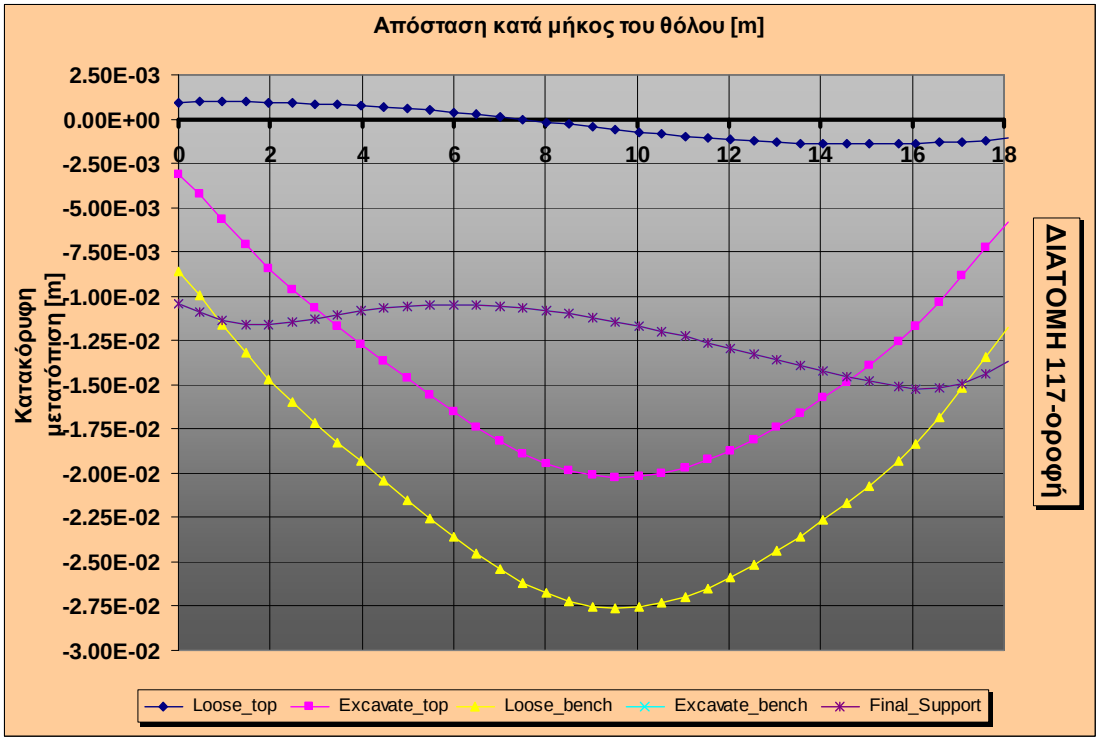


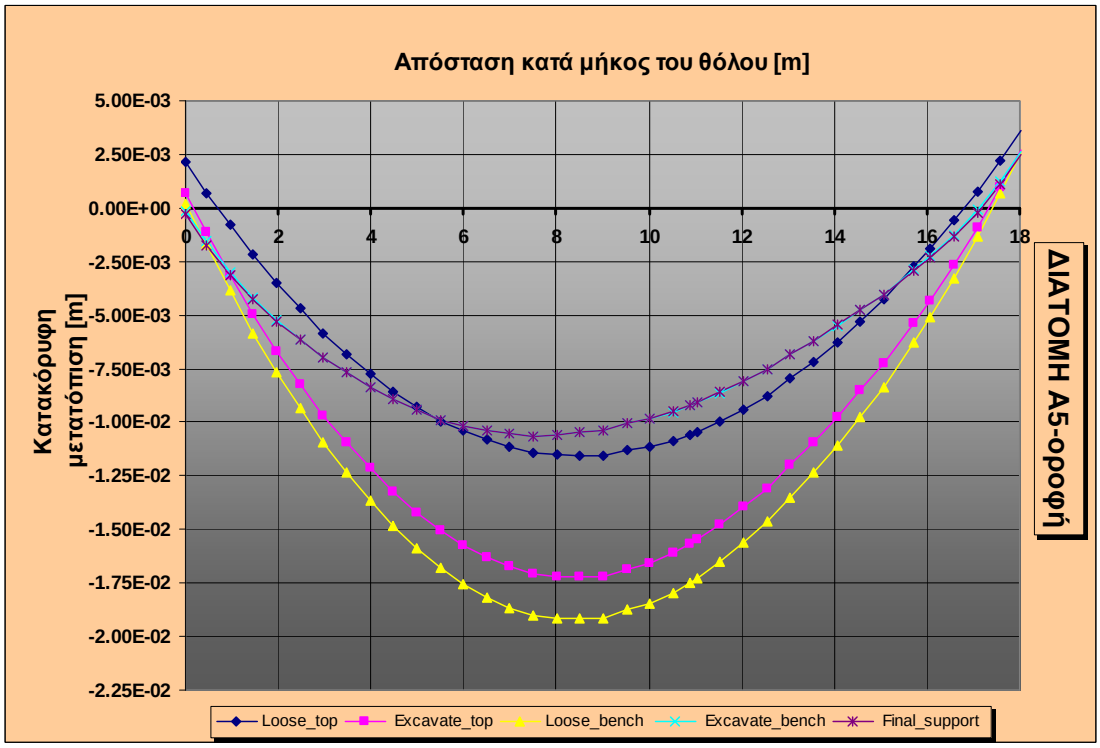
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ-ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ)

ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΟΡΟΦΗΣ

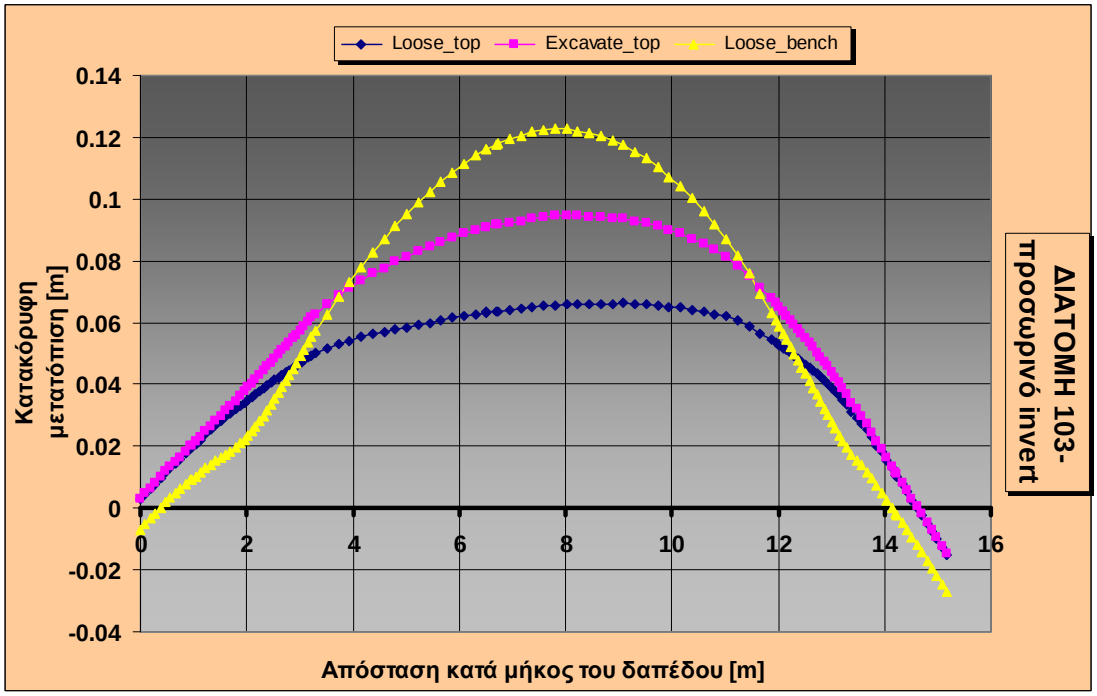


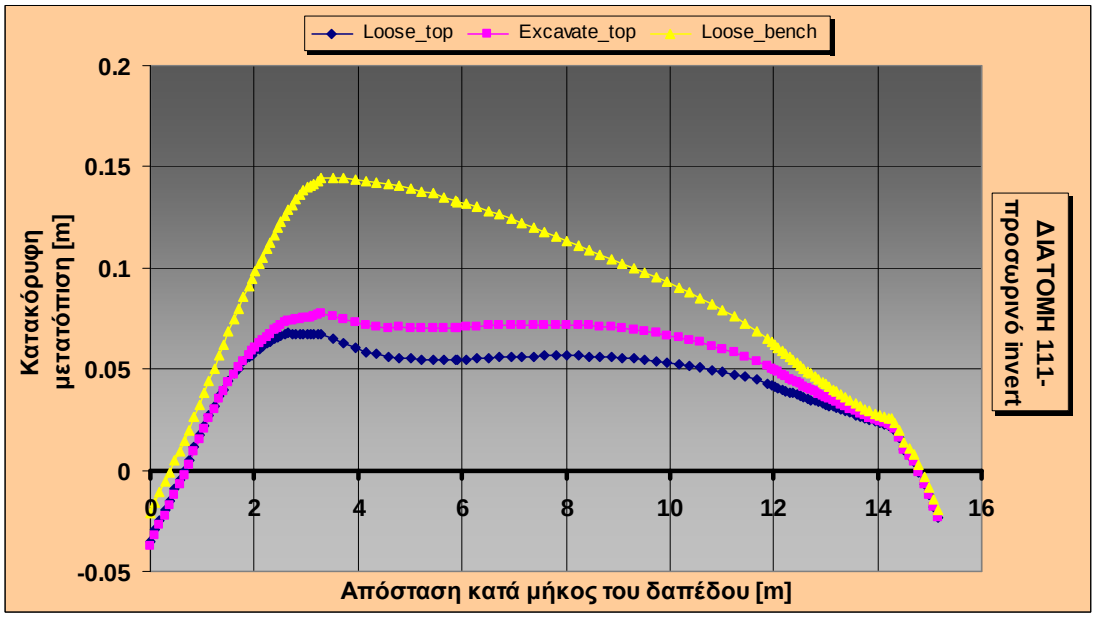


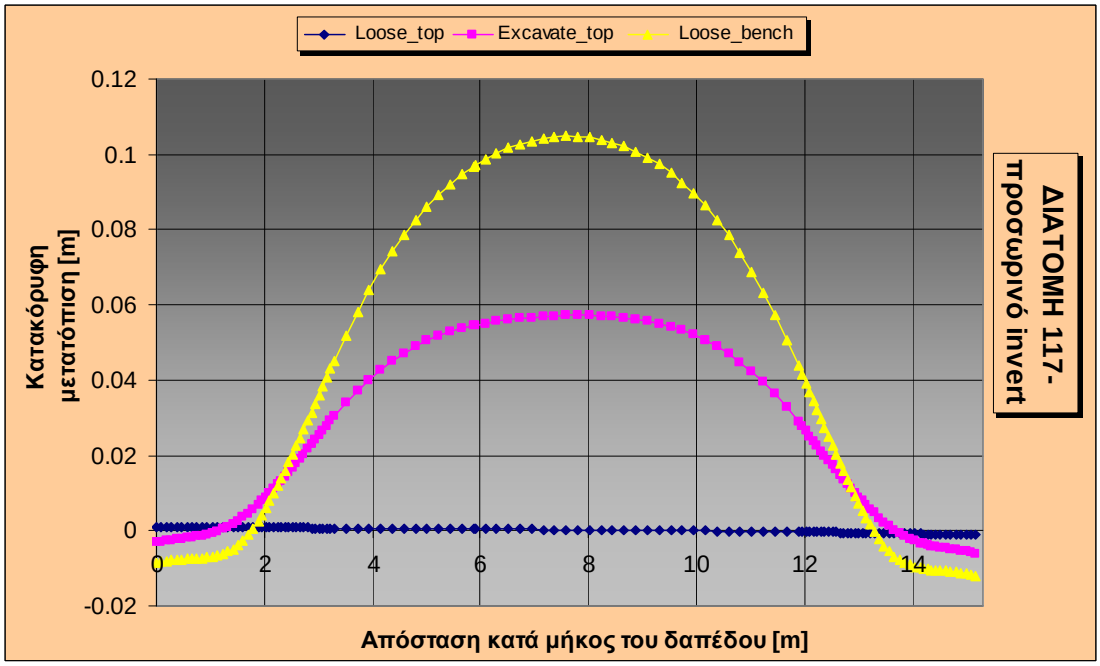

Απόσταση κατά μήκος του θόλου [m]
Κατακόρυφη μετατόπιση [m]
2.50E-03
0.00E+00
-2.50E-03
-5.00E-03
-7.50E-03
-1.00E-02
-1.25E-02
-1.50E-02
-1.75E-02
-2.00E-02
-2.25E-02
-2.50E-02
-2.75E-02
-3.00E-02
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
ΔΙΑΤΟΜΗ 117-οροφή
Loose_top
Excavate_top
Loose_bench
Excavate_bench
Final_Support

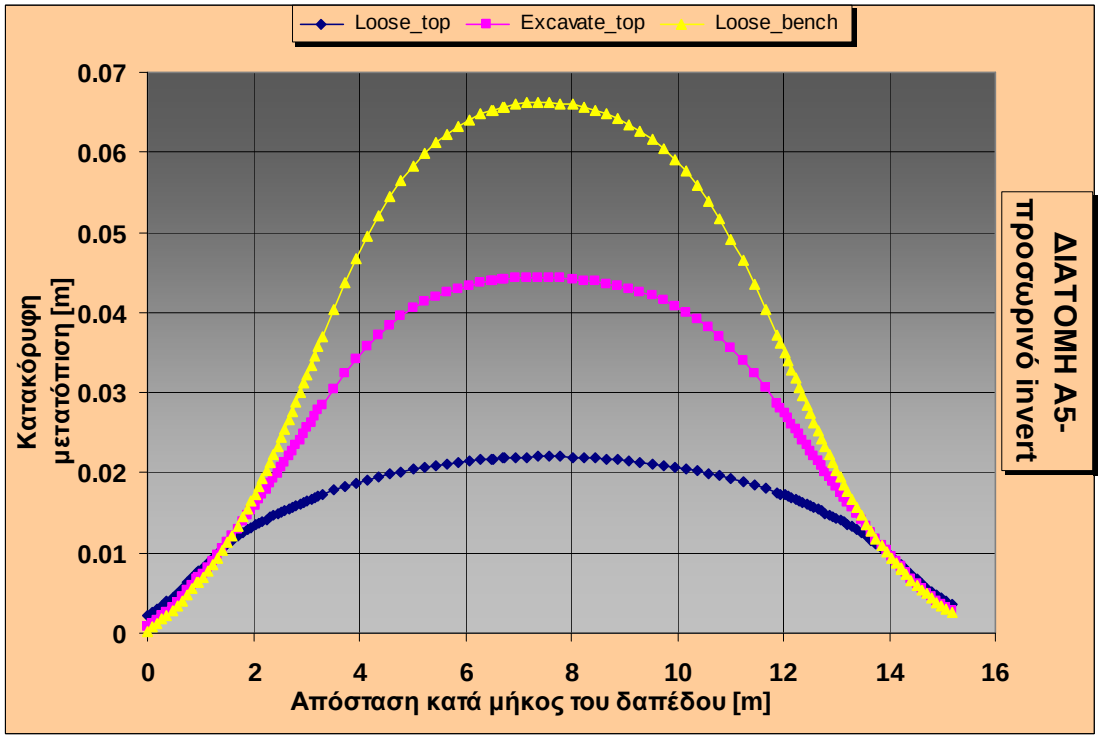

Απόσταση κατά μήκος του θόλου [m]
Κατακόρυφη μετατόπιση [m]
5.00E-03
2.50E-03
0.00E+00
-2.50E-03
-5.00E-03
-7.50E-03
-1.00E-02
-1.25E-02
-1.50E-02
-1.75E-02
-2.00E-02
-2.25E-02
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
ΔΙΑΤΟΜΗ Α5-οροφή
Loose_top
Excavate_top
Loose_bench
Excavate_bench
Final_support

ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ

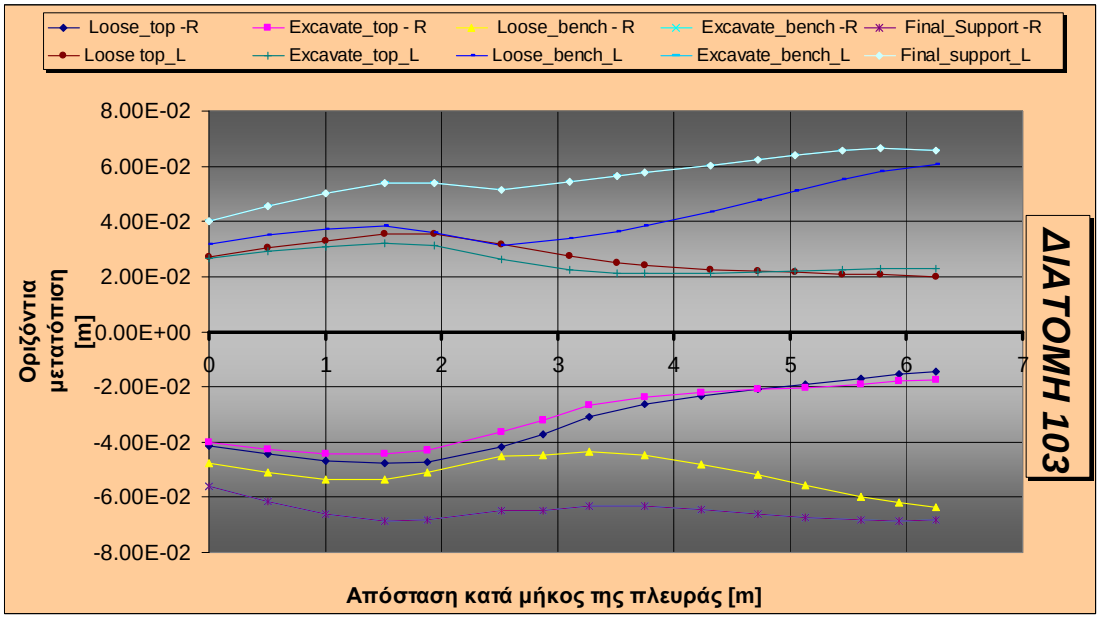


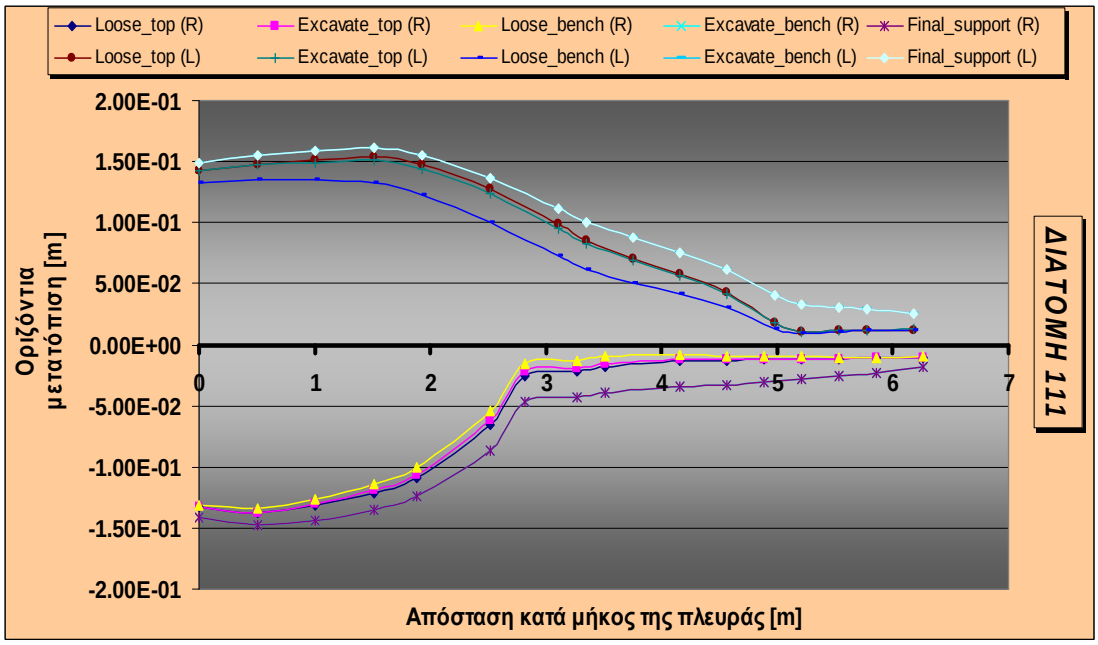


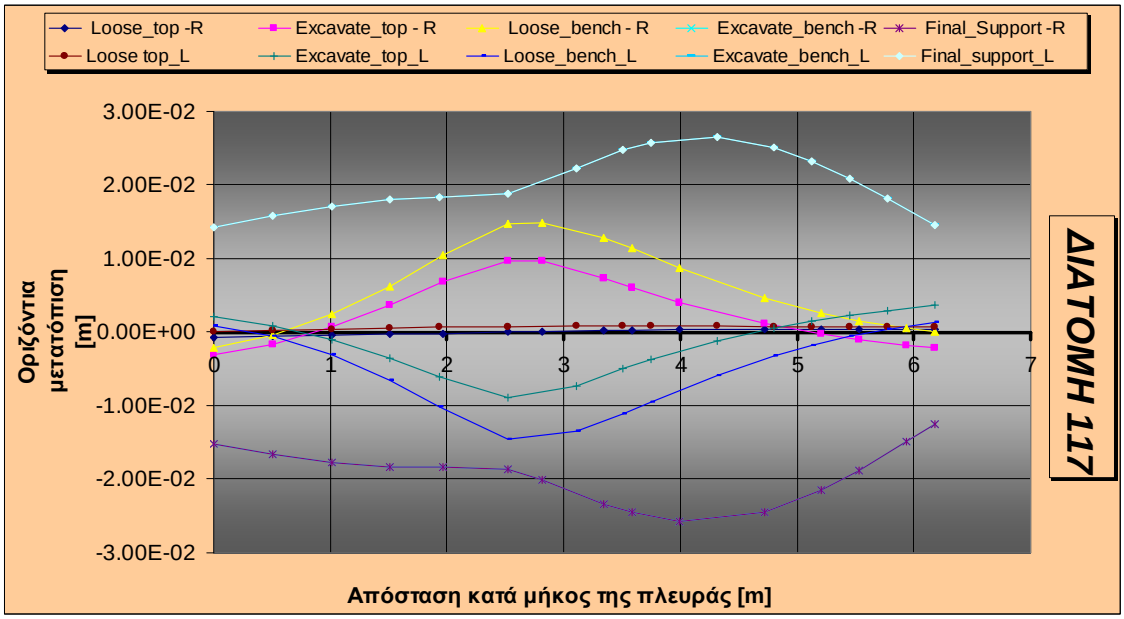

Loose_top
Excavate_top
Loose_bench
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
0
2
4
6
8
10
12
14
Κατακόρυφη μετατόπιση [m]
Απόσταση κατά μήκος του δαπέδου [m]
ΔΙΑΤΟΜΗ 117-προσωρινό invert

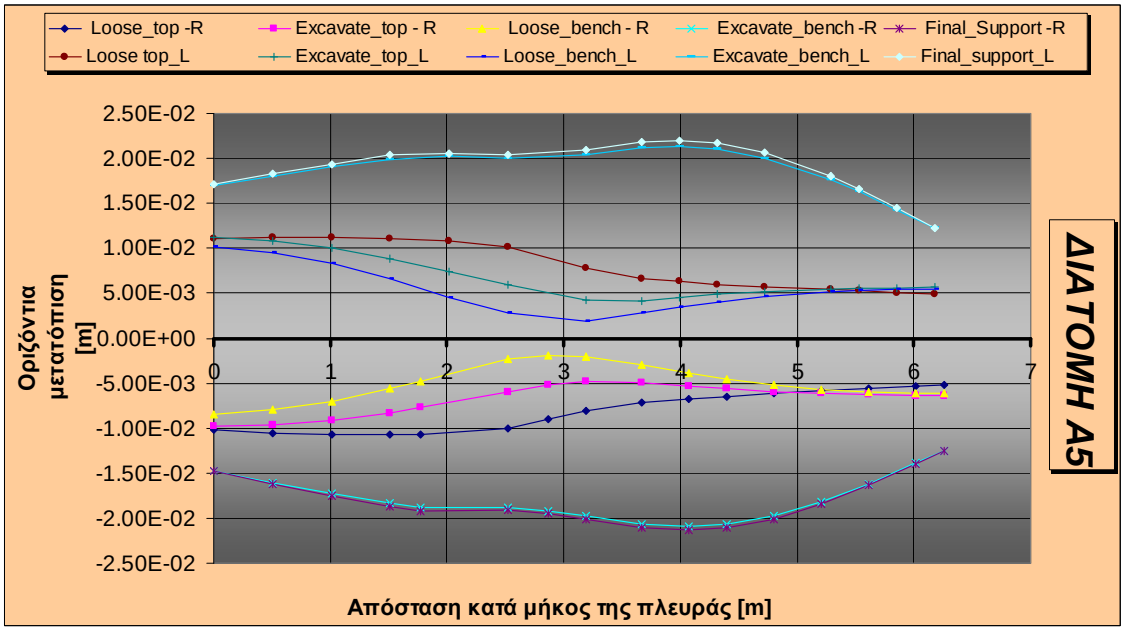

Loose_top
Excavate_top
Loose_bench
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
Κατακόρυφη μετατόπιση [m]
Απόσταση κατά μήκος του δαπέδου [m]
ΔΙΑΤΟΜΗ Α5-προσωρινό invert

ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΕΙΕΣ






Loose_top -R
Excavate_top - R
Loose_bench - R
Excavate_bench -R
Final_Support -R
Loose top_L
Excavate_top_L
Loose_bench_L
Excavate_bench_L
Final_support_L
3.00E-02
2.00E-02
1.00E-02
0.00E+00
-1.00E-02
-2.00E-02
-3.00E-02
0
1
2
3
4
5
6
7
Οριζόντια μετατόπιση [m]
Απόσταση κατά μήκος της πλευράς [m]
ΔΙΑΤΟΜΗ 117


Loose_top -R
Excavate_top - R
Loose_bench - R
Excavate_bench -R
Final_Support -R
Loose top_L
Excavate_top_L
Loose_bench_L
Excavate_bench_L
Final_support_L
2.50E-02
2.00E-02
1.50E-02
1.00E-02
5.00E-03
0.00E+00
-5.00E-03
-1.00E-02
-1.50E-02
-2.00E-02
-2.50E-02
0
1
2
3
4
5
6
7
Οριζόντια μετατόπιση [m]
Απόσταση κατά μήκος της πλευράς [m]
ΔΙΑΤΟΜΗ Α5