



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΒΑΣΕΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Μωραΐτης Σωκράτης

Επιβλέπων : Παύλος Νομικός, καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΒΑΣΕΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Μωραΐτης Σωκράτης

Επιβλέπων : Παύλος Νομικός, καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

Καθηγητής ΕΜΠ Παύλος Νομικός (Υπογραφή)

Καθηγητής ΕΜΠ Ανδρέας Μπερνάρδος..... (Υπογραφή)

Καθηγητής ΕΜΠ Ιωάννης Ζευγώλης..... (Υπογραφή)

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας, η οποία κατορθώνει και εισχωρεί, όλο και περισσότερο, στην ζωή των ανθρώπων, προκαλώντας τεράστιες αλλαγές σ'όλους τους τομείς. Συνεπώς, λογικό επόμενο, ήταν αυτό το κύμα εξέλιξης, να επηρεάσει και τον κατασκευαστικό – εξορυκτικό τομέα, καθώς πολλά επιτεύγματα έχουν αναβαθμίσει τον κλάδο τις τελευταίες δεκαετίες μετατρέποντάς τον σε πιο αποτελεσματικό, ασφαλή, γρήγορο και οικονομικό.

Σήμερα αποτελεί γεγονός ότι όλο και περισσότεροι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων σχεδιάζονται διαρκώς, ούτως ώστε να αντιμετωπίζονται τα όποια γεωτεχνικά προβλήματα εμφανίζονται. Τα περισσότερα έργα (αν όχι όλα), στις μέρες μας, σχεδιάζονται και αναλύονται με αριθμητικά μοντέλα.

Είναι σημαντικό, λοιπόν, να υπάρχει σαφής εικόνα στις διαφορές που υφίστανται μεταξύ των παραδοσιακών, εμπειρικών μεθόδων και των αριθμητικών προγραμμάτων. Συνεπώς και στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται αρχικά οι προτάσεις διάνοιξης – υποστήριξης σπράγγων των ευρέως χρησιμοποιούμενων εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης και εξετάζεται η διαφορά των αποτελεσμάτων ανάμεσα στην αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης και τις εμπειρικές μεθόδους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Παύλο Νομικό, καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την επίβλεψη και την υποστήριξή του όλο αυτό το διάστημα.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη και την κατανόηση που έδειξε σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου, όπως επίσης και την Σία, για την βοήθεια, που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα που είμαστε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται εκτενώς οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες εμπειρικές και αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων. Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εμπειριστατωμένη ανάπτυξη αυτών των μεθόδων, καθώς και η τεκμηριωμένη αξιολόγησή τους, ώστε αρχικά να αναδειχθεί το πεδίο εφαρμογής τους και κατά δεύτερον να επισημανθούν τα κρίσιμα στοιχεία και οι παράμετροι που αφορούν την αξιοπιστία τους.

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε χρήση του προγράμματος διδιάστατης προσομοίωσης με πεπερασμένα “RS2”, για την υποστήριξη υπόγειων έργων και συγκρίθηκε με τα εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης RMR, GSI, Q και RMi.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται αναλυτικά οι κυριότεροι μέθοδοι εμπειρικής ταξινόμησης όπως είναι το RMR, GSI, Q και RMi και εν συνεχεία έλαβε χώρα στην εργασία, αναλυτική παράθεση όλων των στοιχείων που συντάσσουν τις εν λόγω εμπειρικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, έγινε αναφορά πάνω στην ιστορική τους εξέλιξη, στην διαδικασία δημιουργίας τους και έμπνευσής τους, στους μαθηματικούς τύπους που απαιτούνται για τους υπολογισμούς, το πεδίο εφαρμογής τους, αλλά και στα μέτρα υποστήριξης και την διαδικασία προχώρησης που προτείνουν.

Ακολουθεί θεωρητική παρουσίαση αναφορικά με την βραχομάζα (αντοχή και παραμόρφωση) στο **τέταρτο** κεφάλαιο και έπειτα, στο **έβδομο** κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά της θεωρητικής βάσης του προγράμματος “RS2”, όσο και του πεδίου εφαρμογής του, και μια περιγραφή του τρόπου δημιουργίας ενός μοντέλου για προσομοίωση στο εν λόγω πρόγραμμα.

Στα τελευταία κεφάλαια γίνεται ανάλυση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή των συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας, αντίστοιχα.

ABSTRACT

In this thesis, the most widely used empirical and numerical methods of tunnel analysis are presented in detail. The purpose of this specific paper is the thorough development of these methods, as well as their documented evaluation, so that, firstly, the scope of the methods and, secondly, the critical elements and parameters concerning their reliability are highlighted.

Therefore, the 2-Dimension simulation program “RS2”, was studied with finite elements, for the support of underground projects and was compared with the empirical classification systems RMR, GSI, Q and Rmi.

In the third chapter, the main methods of empirical classifications such as RMR, GSI, Q and Rmi initially shown in detail, and then, in this paper, an analytical listing of all the elements that compose the specific empirical methods are presented. More specifically, reference was made to their historical development, their creation process and their inspiration, the mathematical formulas required for the calculations, their scope, but also to the support measures and the progress process that they recommend.

This is followed by a theoretical presentation regarding the rock mass (strength and deformation) in the fourth chapter and later, in the seventh chapter, in addition to an extensive bibliographic research of both the theoretical basis of the "RS2" program and its field of application, a description of how to create a model for simulation in the said program is reported.

In the last chapters the results are analyzed and explained and the conclusions of this thesis are drawn, respectively.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	14
1. Εισαγωγή.....	15
2. Το πρόγραμμα RS2 Rock and soil 2-dimensional analysis program.....	17
3. Συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας.....	19
3.1 Γενικά.....	19
3.2 Σύστημα ταξινόμησης RMR.....	21
3.2.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (RMR).....	26
3.2.2 Τροποποιήσεις του RMR.....	27
3.3 Σύστημα Q (NGI).....	28
3.3.1 Προτεινόμενη μεθοδολογία υποστήριξης (Q).....	35
3.4 Σύστημα GSI.....	36
3.4.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (GSI) σε συσχέτιση με την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας.....	39
3.5 Σύστημα RMi.....	39
3.5.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (RMi).....	42
4. Βραχομάζα.....	44
4.1 Τυπικές δομές βραχομάζας σύμφωνα με τους Marinos & Hoek.....	44
4.2 Αντοχή βραχομάζας.....	45
4.3 Παραμορφωσιμότητα.....	48
4.4 Μέτρα σταθεροποίησης της γεωμάζας.....	49
5. Συνοπτική ανάλυση του προς μελέτη έργου.....	51
5.1 Διατομή σήραγγας.....	51
6. Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής.....	53
6.1 Βάση του συστήματος RMR.....	53
6.1.1 1 ^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 50.....	53
6.1.2 2 ^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 50.....	53

6.1.3 1 ^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 30.....	53
6.1.4 2 ^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 30.....	54
6.2 Υπολογισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας	54
6.3 Εκσκαφή και μέτρα υποστήριξης	54
7. Αριθμητική μέθοδος ανάλυσης με το πρόγραμμα RS2.....	56
7.1 Εξέλιξη του προγράμματος ανα τα χρόνια.....	56
7.2 Παράμετροι βραχομάζας	56
7.2.1 Για RMR = 50	56
7.2.2 Για RMR = 30	57
7.3 Προσομοίωση φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης	57
7.3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα	58
7.3.2 Ιδιότητες υλικών	58
7.3.3 Τάσεις πεδίου	58
7.4 Προσομοίωση.....	59
7.3.1 Δημιουργία μοντέλου	59
7.3.2 Γεωμετρία σήραγγας	59
7.3.3 Ιδιότητες υλικού και στάδια εκσκαφής.....	62
7.3.4 Loading	63
7.3.5 Διακριτοποίηση και δημιουργία πεπερασμένων.....	72
7.3.6 Υποστήριξη σήραγγας.....	74
7.3.7 Υπόγεια ύδατα.....	78
7.3.8 Συνοριακές συνθήκες	78
8. Αποτελέσματα αναλύσεων με το RS2.....	78
8.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 30 μέτρων (RMR 50)	79
8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 100 μέτρων (RMR 50)	82
8.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 250 μέτρων (RMR 50)	85
8.3.1 Αναζήτηση κατάλληλης υποστήριξης για τη σήραγγα 250 μέτρων (RMR 50).....	89
8.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 500 μέτρων (RMR 50)	89
8.4.1 Αναζήτηση κατάλληλης υποστήριξης για τη σήραγγα 500 μέτρων (RMR 50).....	92
8.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 30 μέτρων (RMR 30)	93
8.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 100 μέτρων (RMR 30)	96
8.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 250 μέτρων (RMR 30)	99
8.8 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 500 μέτρων (RMR 30)	102
8.9 Συμπεράσματα προσομοιώσεων	105
9. Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων	107
9.1 Υπολογισμός του βαθμού αποτόνωσης	107

9.1.1	Induced stress load (RMR 50).....	107
9.1.2	Induced stress load (RMR 30).....	107
9.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων	108
9.2.1	Αποτελέσματα αβαθούς σήραγγας με RMR 50	108
9.2.2	Αποτελέσματα σήραγγας 100 μέτρων με RMR 50.....	109
9.2.3	Αποτελέσματα σήραγγας 250 μέτρων με RMR 50.....	110
9.2.4	Αποτελέσματα σήραγγας 500 μέτρων με RMR 50.....	111
9.2.5	Αποτελέσματα αβαθούς σήραγγας με RMR 30	112
9.2.6	Αποτελέσματα σήραγγας 100 μέτρων με RMR 30.....	113
9.2.7	Αποτελέσματα σήραγγας 250 μέτρων με RMR 30.....	114
9.2.8	Αποτελέσματα σήραγγας 500 μέτρων με RMR 30.....	115
9.3	Συμπέρασμα	116
10.	Προτεινόμενη μεθοδολογία υποστήριξης βασή του Q.....	117
10.1	Συσχετισμός του συστήματος RMR με το Q.....	117
10.2	Προτεινόμενη υποστήριξη βάση του συστήματος Q.....	117
10.3	Παρατηρήσεις	118
11.	Συμπεράσματα	119
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	121

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1 Συστήματα ταξινόμησης (πηγή 4).....	20
Πίνακας 3-2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη – Δείκτης R1 (πηγή 4).....	22
Πίνακας 3-3 Δείκτης κερματισμού (RQD) - Δείκτης R2 (πηγή 4).....	22
Πίνακας 3-4 Απόσταση ασυνεχειών - Δείκτης R3 (πηγή 4).....	22
Πίνακας 3-5 Κατάσταση των επιφανειών ασυνεχειών - Δείκτης R4 (πηγή 4).....	23
Πίνακας 3-6 Παρουσία υπόγειου νερού - Δείκτης R5 (πηγή 4).....	23
Πίνακας 3-7 Προσανατολισμός ασυνεχειών σχετικά με κατεύθυνση διάνοιξης - Δείκτης R6 (πηγή 4).....	23
Πίνακας 3-8 Προσαρμογή της βαθμολόγησης βάση του προσανατολισμού των ασυνεχειών (πηγή 4).....	24
Πίνακας 3-9 Κατηγορία βραχομάζας – Δείκτης RMR (πηγή 4).....	24
Πίνακας 3-10 Πιθανές τιμές του δείκτη RMR (πηγή 4).....	25
Πίνακας 3-11 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης RMR (πηγή 4).....	26
Πίνακας 3-12 Προτεινόμενη εκσκαφή RMR (πηγή 4).....	27
Πίνακας 3-13 Δείκτης ποιότητας – RQD (πηγή 4).....	28
Πίνακας 3-14 Τιμές του Jn (πηγή 4).....	29
Πίνακας 3-15 Τιμές του Jr – 1 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	29
Πίνακας 3-16 Τιμές του Jr – 2 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	30
Πίνακας 3-17 Τιμές του Ja – 1 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	30
Πίνακας 3-18 Τιμές του Ja – 2 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	31
Πίνακας 3-19 Τιμές του Ja – 3 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	31
Πίνακας 3-20 Τιμές του Jw (πηγή 4).....	32
Πίνακας 3-21 Τιμές του SRF – 1 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	33
Πίνακας 3-22 Τιμές του SRF – 2 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	33
Πίνακας 3-23 Τιμές του SRF – 3 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	34
Πίνακας 3-24 Τιμές του SRF – 4 ^η περίπτωση (πηγή 4).....	34
Πίνακας 3-26 Εκτίμηση συντελεστή ESR (πηγή 4).....	34
Πίνακας 3-27 Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης ανάλογα με την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας (πηγή 4).....	39
Πίνακας 3-28 Τιμές του D σε συνάρτηση του συντελεστή jC (πηγή 4).....	41
Πίνακας 3-29 Ταξινόμηση σύμφωνα με το Rmi (πηγή 4).....	41
Πίνακας 4-4-1 Τυπικές δομές βραχομάζας.....	44
Πίνακας 4-4-2 Εκτίμηση της συνοχής και της γωνίας τριβής.....	45
Πίνακας 4-4-3 Εσωτερικά μέτρα στήριξης.....	49
Πίνακας 4-4-4 Εξωτερικά μέτρα στήριξης.....	49
Πίνακας 34 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σήραγγας.....	60
Πίνακας 7-2 Διαστάσεις εξωτερικών ορίων.....	61
Πίνακας 36 Τιμές Αποτόνωσης για RMR 50.....	69
Πίνακας 37 Τιμές Αποτόνωσης για RMR 30.....	70

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Ορυχείο «Μρονεng», Ν. Αφρική	15
Εικόνα 2.1 Εμφάνιση ζωνών απόδοσης μοντέλου σε πιθανολογική ανάλυση.....	17
Εικόνα 2.2 Προβολή στοιχείων αστοχίας σε ανάλυση SSR στο RS2	18
Εικόνα 3.1 Υποστήριξη βάση RMi.....	42
Εικόνα 3.2 Εκτίμηση υποστήριξης σε συνεχείς βραχώμαζες	42
Εικόνα 3.3 Συνιστώμενη εφαρμογή των δύο διαγραμμάτων υποστήριξης.....	43
Εικόνα 5.5.1 Τυπική διατομή σήραγγας (πηγή:)	51
Εικόνα 7.1 Αρχική σελίδα του RS2.....	59
Εικόνα 7.2 Διατομή σήραγγας	60
Εικόνα 7.3 Εξωτερικά όρια.....	61
Εικόνα 7.4 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού.....	62
Εικόνα 7.7 Παράμετροι Rocsupport	65
Εικόνα 7.8 Αποτελέσματα του Rocsupport	67
Εικόνα 7.9 Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης	67
Εικόνα 7.15 Εύρεση αποτόνωσης για την αβαθή σήραγγα (RMR 50).....	68
Εικόνα 7.16 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 100 μέτρων (RMR 50).....	68
Εικόνα 7.17 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 250 μέτρων (RMR 50).....	69
Εικόνα 7.18 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 500 μέτρων (RMR 50).....	69
Εικόνα 7.25 Προσθήκη του παράγοντα «λ» (βαθμός αποτόνωσης)	71
Εικόνα 7.26 Loading.....	72
Εικόνα 7.27 Ρύθμιση του πλέγματος	73
Εικόνα 7.28 Φόρτωση του πεδίου	73
Εικόνα 7.29 Καθορισμός της επένδυσης	74
Εικόνα 7.30 Ρύθμιση αγκυρίων	76
Εικόνα 7.31 Περιορισμοί	78
Εικόνα 8.1 Compute	79
Εικόνα 8.2 Effective sigma 1 (30m, RMR 50)	79
Εικόνα 8.3 Total displacement (geostatic) (30m, RMR 50)	80
Εικόνα 8.4 Total displacement (support a) (30m, RMR 50)	80
Εικόνα 8.5 Total displacement (support b) (100m, RMR 50)	81
Εικόνα 8.6 Yielded elements (30m, RMR 50).....	81
Εικόνα 8.7 Support capacity plots (30m, RMR 50).....	82
Εικόνα 8.8 Effective sigma 1 (100m, RMR 50)	82
Εικόνα 8.9 Total displacement (geostatic) (100m, RMR 50).....	83
Εικόνα 8.10 Total displacement (support a) (100m, RMR 50)	83
Εικόνα 8.11 Total displacement (support b) (100m, RMR 50)	84
Εικόνα 8.12 Yielded elements (100m, RMR 50).....	84
Εικόνα 8.13 Support capacity plots (100m, RMR 50).....	85
Εικόνα 8.14 Effective sigma 1 (250m, RMR 50)	85
Εικόνα 8.15 Total displacement (geostatic) (250m, RMR 50).....	86
Εικόνα 8.16 Total displacement (support a) (250m, RMR 50)	87
Εικόνα 8.17 Total displacement (support b) (250m, RMR 50)	87
Εικόνα 8.18 Yielded elements (250m, RMR 50).....	88
Εικόνα 8.19 Support capacity plots (250m, RMR 50).....	88
Εικόνα 8.20 Support capacity plots (250m, RMR 50) πάχος σκυροδέματος 130mm.89	89
Εικόνα 8.21 Effective sigma 1 (500m, RMR 50)	89
Εικόνα 8.22 Total displacement (geostatic) (500m, RMR 50).....	90
Εικόνα 8.23 Total displacement (support a) (500m, RMR 50)	90
Εικόνα 8.24 Total displacement (support b) (500m, RMR 50)	91

Εικόνα 8.25 Yielded elements (500m, RMR 50).....	91
Εικόνα 8.26 Support capacity plots (500m, RMR 50).....	92
Εικόνα 8.27 Support capacity plots (500m, RMR 50) πάχος σκυροδέματος 500mm.	93
Εικόνα 8.28 Effective sigma 1 (30m, RMR 30)	93
Εικόνα 8.29 Total displacement (geostatic) (30m, RMR 30).....	94
Εικόνα 8.30 Total displacement (support a) (30m, RMR 30)	94
Εικόνα 8.31 Total displacement (support b) (30m, RMR 30)	95
Εικόνα 8.32 Yielded elements (30m, RMR 30).....	95
Εικόνα 8.33 Support capacity plots (30m, RMR 30).....	96
Εικόνα 8.34 Effective sigma 1 (100m, RMR 30)	96
Εικόνα 8.35 Total displacement (geostatic) (100m, RMR 30).....	97
Εικόνα 8.36 Total displacement (support a) (100m, RMR 30)	97
Εικόνα 8.37 Total displacement (support b) (100m, RMR 30).....	98
Εικόνα 8.38 Yielded elements (100m, RMR 30).....	98
Εικόνα 8.39 Support capacity plots (100m, RMR 30).....	99
Εικόνα 8.40 Effective sigma 1 (250m, RMR 30)	99
Εικόνα 8.41 Total displacement (geostatic) (250m, RMR 30).....	100
Εικόνα 8.42 Total displacement (support a) (250m, RMR 30)	100
Εικόνα 8.43 Total displacement (support b) (250m, RMR 30).....	101
Εικόνα 8.44 Yielded elements (250m, RMR 30).....	101
Εικόνα 8.45 Support capacity plots (250m, RMR 30).....	102
Εικόνα 8.46 Effective sigma 1 (500m, RMR 30)	102
Εικόνα 8.47 Total displacement (geostatic) (500m, RMR 30).....	103
Εικόνα 8.48 Total displacement (support a) (500m, RMR 30)	103
Εικόνα 8.49 Total displacement (support b) (500m, RMR 30).....	104
Εικόνα 8.50 Yielded elements (500m, RMR 30).....	104
Εικόνα 8.51 Support capacity plots (500m, RMR 30).....	105
Εικόνα 9.1 Total displacement (30m RMR 50) second model.....	108
Εικόνα 9.2 Yielded elements (30m RMR 50) second model	108
Εικόνα 9.3 Support capacity plots (30m RMR 50) second model.....	108
Εικόνα 9.4 Total displacement (100m RMR 50) second model.....	109
Εικόνα 9.5 Yielded elements (100m RMR 50) second model	109
Εικόνα 9.6 Support capacity plots (100m RMR 50) second model.....	109
Εικόνα 9.7 Total displacement (250m RMR 50) second model.....	110
Εικόνα 9.8 Yielded elements (250m RMR 50) second model	110
Εικόνα 9.9 Support capacity plots (250m RMR 50) second model.....	110
Εικόνα 9.10 Total displacement (500m RMR 50) second model.....	111
Εικόνα 9.11 Yielded elements (500m RMR 50) second model	111
Εικόνα 9.12 Support capacity plots (500m RMR 50) second model.....	111
Εικόνα 9.13 Support capacity plots (500m RMR 50) second model (500mm).....	112
Εικόνα 9.14 Total displacement (30m RMR 30) second model.....	112
Εικόνα 9.15 Yielded elements (30m RMR 30) second model	112
Εικόνα 9.16 Support capacity plots (30m RMR 30) second model.....	113
Εικόνα 9.17 Total displacement (100m RMR 30) second model.....	113
Εικόνα 9.18 Yielded elements (100m RMR 30) second model	113
Εικόνα 9.19 Support capacity plots (100m RMR 30) second model.....	114
Εικόνα 9.20 Total displacement (250m RMR 30) second model.....	114
Εικόνα 9.21 Yielded elements (250m RMR 30) second model	114
Εικόνα 9.22 Support capacity plots (250m RMR 30) second model.....	115
Εικόνα 9.23 Total displacement (500m RMR 30) second model.....	115

Εικόνα 9.24 Yielded elements (500m RMR 30) second model	115
Εικόνα 9.25 Support capacity plots (500m RMR 30) second model.....	116

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3-1 Διάγραμμα προσδιορισμού της κατηγορίας υποστήριξης βάση του δείκτη Q.....	36
Σχήμα 3-2 Διάγραμμα γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Η βαθμονόμηση προκύπτει από την δομή και την ποιότητα των ασυνεχειών.....	38

1. Εισαγωγή

Ο άνθρωπος από τα πρώτα χρόνια της εμφάνισής του πάνω στην γη, αλληλεπιδρά διαρκώς με το περιβάλλον, καθώς και με τα εδάφη και τα πετρώματα του φλοιού της γης, προκειμένου να καλύψει βασικές του ανάγκες. Μέσα από τις κατασκευαστικές του δραστηριότητες, στην διάρκεια της ιστορίας του, συλλέγει εμπειρίες και συγκρίνει συνεχώς μεθόδους με στόχο να αναπτύσσει και να βελτιώνει την τεχνογνωσία που διαθέτει. Ειδικά τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί “άλματα” στην πρόοδο των τεχνικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, αλλά και των συνθηκών εργασίας. Ταυτόχρονα η βαθύτερη γνώση και η καλύτερη αντίληψη στο κομμάτι της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων και σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας του εξοπλισμού έχουν συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου που απαιτεί ένα έργο.

Η ανάπτυξη σε τόσους πολλούς τομείς σήμερα, δίνει την δυνατότητα σε πολλές εταιρείες να αναζητούν πολύτιμες και σπάνιες πρώτες ύλες όλο και πιο βαθιά μέσα στην γη. Το “ρεκόρ” κατέχει το ορυχείο χρυσού “Mponeng” (εικόνα 1.1) στην Νότιο Αφρική, το οποίο εκτείνεται σε βάθος 4.200 μέτρων, που ακόμα και στις μέρες μας φαντάζει ασύλληπτο.



(Πηγή 15)

Εικόνα 1.1 Ορυχείο «Mponeng», Ν. Αφρική

Η διάνοιξη ενός υπόγειου έργου δεν προϋποθέτει, μόνο, κατάλληλη μέθοδο προχώρησης αλλά χρειάζεται, ταυτόχρονα, και τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης, ώστε να είναι ασφαλής και κατά συνέπεια λειτουργική. Συνεπώς για την επίτευξη τόσο των κατάλληλων μεθόδων διάνοιξης και αναγκαίων μέτρων αντιστήριξης, όσο και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, απαιτείται η πραγματοποίηση αρκετών μελετών, βάση των οποίων γίνεται αποτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας αλλά και των αναμενόμενων πιέσεων που θα αναπτυχθούν στο χώρο της εκσκαφής. Η σταθεροποίηση μπορεί να επιτευχθεί με φυσικές μεθόδους, ή μέσω της τοποθέτησης φορέων ανάληψης φορτίων εκ του πετρώματος ή με βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της ίδιας της βραχομάζας ή αλλιώς μέσω του συνδυασμού των παραπάνω.

Επομένως, η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του πετρώματος γύρω από τον χώρο του ανοίγματος αποτελεί, αναφαίρετα, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της

κατασκευής υπόγειων έργων. Ενώ, ευρέως γνωστό είναι το γεγονός ότι η εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς, μέσω των εργαστηριακών δοκιμών σε δείγματα, προφανώς δεν γίνεται να αντιπροσωπεύουν ολόκληρη την βραχομάζα. Οπότε για την καλύτερη προσέγγιση χρησιμοποιούνται είτε οι εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης, είτε οι αριθμητικές και στοχεύουν στο συσχετισμό των συνθηκών της βραχομάζας με τις τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής.

Οι εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης, έχουν τις βάσεις τους στις παρατηρήσεις - εμπειρίες, που έχουν σημειωθεί και ταξινομηθεί από παλαιότερες κατασκευές υπόγειων έργων και στις οποίες μέσω στατιστικής επεξεργασίας έχουν εξαχθεί συμπεράσματα περί της συμπεριφοράς της βραχομάζας και των μηχανικών ιδιοτήτων της. Τα συγκεκριμένα δεδομένα έχουν οργανωθεί από εμπειρογνώμονες συγκροτώντας κανόνες βαθμολόγησης των χαρακτηριστικών της βραχομάζας, οι οποίες συνυπολογίζονται για την εξαγωγή ενός τελικού βαθμού, ο οποίος και απεικονίζει την ποιότητα της. Η όλη διαδικασία ονομάζεται γεωτεχνική ταξινόμηση, με βάση την οποία αναλύονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και υποδεικνύεται η κατάλληλη μέθοδος διάνοιξης, τα αναγκαία μέτρα αντιστήριξης και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του έργου.

Οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης λειτουργούν με βάση την ορθολογική επαγωγή και με την συνεισφορά των μαθηματικών μεθόδων δημιουργούν ένα ομοίωμα συμπεριφοράς. Βάση του, εν λόγω, ομοιώματος κατασκευάζεται ένα μοντέλο, το οποίο προσφέρει την δυνατότητα επεξεργασίας του μεγέθους των παραμέτρων και εξάγει συμπεράσματα από την αναμενόμενη συμπεριφορά της βραχομάζας.

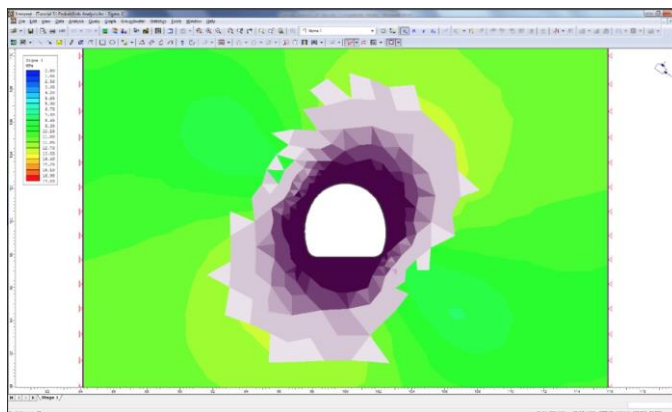
Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις έχουν το πλεονέκτημα της απλής, και ταυτόχρονα, γρήγορης βαθμολόγησης της ποιότητας του περιβάλλοντος πετρώματος άλλα δεν προσφέρει αρκετή γνώση όσον αφορά όλες τις παραμέτρους που επιδρούν στην ευστάθεια. Από την άλλη οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης, γίνονται με την χρήση υπολογιστών, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια σε αριθμητικές πράξεις των ορισμένων παραμέτρων και παρέχουν πολύ μεγάλο όγκο πληροφορίας, ενώ επίσης επιδέχονται εύκολα τροποποιήσεις πάνω στις συνθήκες σχεδιασμού, ούτως ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στον αντίποδα όμως για τις αναλυτικές μεθόδους, απαιτούν έναν αρκετά μεγάλο όγκο παραμέτρων που δεν δίνεται να συμπληρωθούν και κατά συνέπεια να οδηγούν σε απλούστερες παραδοχές.

Καθώς ο γεωλογικός παράγοντας έχει καθοριστική σημασία στην μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, η δυνατότητα μίας, όσο τον δυνατόν καλύτερης και πιο αντιπροσωπευτικής, πρόβλεψης της επίδρασης ενός έργου στο γύρω πέτρωμα, αποτελεί προνόμιο του κατασκευαστικού τομέα και αυξάνει την αξιοπιστία του στην λειτουργικότητα και την ασφάλεια των έργων.

2. Το πρόγραμμα RS2 Rock and soil 2-dimensional analysis program

Το πρόγραμμα **RS2** είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων σε υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές σε εδάφη και βράχους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα έργων που περιλαμβάνουν: τον σχεδιασμό εκσκαφών, την ευστάθεια πρανών, την ροή υπόγειων υδάτων, πιθανοτικές αναλύσεις γεωτεχνικών έργων, δυναμικές αναλύσεις, κλπ.

Με την χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος πολύπλοκα και πολλαπλών σταδίων έργα μπορούν πολύ εύκολα, γρήγορα και με αρκετά μειωμένο κόστος, να σχεδιαστούν και να αναλυθούν, με ένα ευρύ φάσμα υποστηρικτικών επιλογών μοντελοποίησης και διάφορα μοντέλα υλικών, όπως είναι τα «Mohr Coulomb», «Generalized Hoek-Brown» και «Cam-Clay». Όπως για παράδειγμα σήραγγες (εικόνα 2.1) σε ασθενή ή ρωγματομένα πετρώματα, υπόγειοι θάλαμοι ηλεκτροπαραγωγής, επιφανειακά ορυχεία και πρανή, επιχώματα και πολλές άλλες κατασκευές. Η προοδευτική αποτυχία, η αλληλεπίδραση υποστήριξης-γεωυλικού και διάφορα άλλα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν.



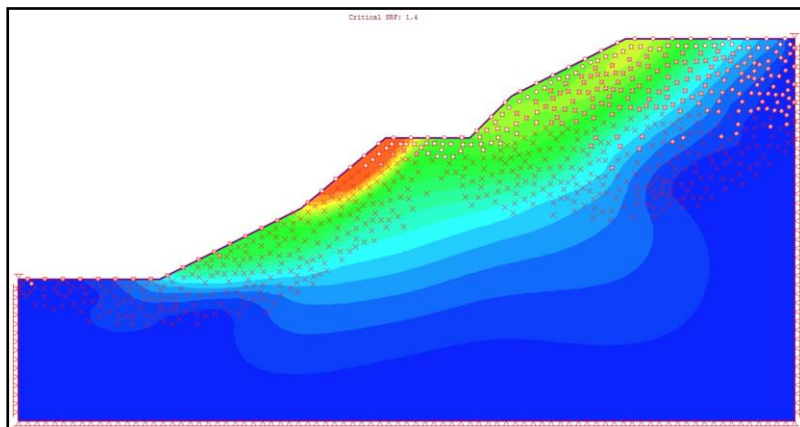
(πηγή 16)

Εικόνα 2.1 Εμφάνιση ζωνών απόδοσης μοντέλου σε πιθανολογική ανάλυση

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προγράμματος είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση της ευστάθειας πρανούς με πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής. Περιλαμβάνει επίσης ανάλυση ροής υπόγειων υδάτων σταθερής κατάστασης, με πεπερασμένα στοιχεία, η οποία είναι ενσωματωμένη στο πρόγραμμα. Δίνεται η δυνατότητα καθορισμού της πίεσης των πόρων, καθώς επίσης της υδραυλικής κλίσης και της ροής, με βάση τις καθορισμένες από τον χρήστη συνθήκες υδραυλικών ορίων και την

περατότητα του υλικού. Τα αποτελέσματα της πίεσης των πόρων ενσωματώνονται αυτόματα στην εντατική ανάλυση.

Το “RS2” προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογών μοντελοποίησης της υποστήριξης των υπογείων έργων. Τα στοιχεία επένδυσης μπορούν να εφαρμοστούν για τη μοντελοποίηση συστημάτων σκυροδέματος, χάλυβα, πασσάλων, πολυστρωματικών σύνθετων επενδύσεων, γεωφασμάτων και άλλων. Οι τύποι ηλώσεων περιλαμβάνουν αγκυρωμένου άκρου, πλήρως συγκολλημένους ήλους, ήλους καλωδίων, κλπ.



Εικόνα 3. View failed elements and failure tyre in an SSR analysis in RS2

Μτφρ. Προβολή στοιχείων αστοχίας σε ανάλυση SSR στο RS2.

Εικόνα 2.2 Προβολή στοιχείων αστοχίας σε ανάλυση SSR στο RS2

(πηγή 16)

3. Συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας

3.1 Γενικά

Στην βραχομηχανική υπάρχει σαφής διάκριση αναφορικά με το άρρηκτο πέτρωμα και τη βραχομάζα. Ως βραχομάζα ορίζουμε το ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο, ως επί τον πλείστον, είναι αρκετά σύνθετο, και αποτελείται από βραχώδες υλικό και διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες. Ενώ ως άρρηκτο πέτρωμα ονομάζουμε το υλικό του πετρώματος, που αντιπροσωπεύεται από τον πυρήνα γεώτρησης και δεν έχει δομικές ασυνέχειες. Η φύση αλλά και η χωρική κατανομή αυτών των δομικών χαρακτηριστικών στην βραχομάζα επιδρά, με καθοριστικό ρόλο, στην απόκρισή της στην διάρκεια της κατασκευής υπόγειων έργων.

Πολύ σημαντικό και καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό έργων σε πετρώματα, έχει η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας, η οποία, δυστυχώς, είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί. Ταυτόχρονα η πραγματοποίηση επιτόπου δοκίμων σε πολύ μεγάλη κλίμακα είναι ανέφικτη, καθώς εκτινάσσει το κόστος της μελέτης, αλλά σημειώνει και μεγάλη αύξηση τεχνικών δυσκολιών. Επίσης στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι εργαστηριακές δοκιμές, που γίνονται στα δείγματα, δεν αντιπροσωπεύουν την μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της βραχομάζας.

Για την επίτευξη της, όσο τον δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικής, εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων μιας βραχομάζας, γίνεται περιγραφή και ταξινόμησή της σε κατηγορίες, ώστε στην πορεία να μπορεί να εκτιμηθεί βάσει των παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις.

Για την ταξινόμηση της βραχομάζας γίνεται χρήση των εξής παραμέτρων:

1. Της μηχανικής αντοχής
2. Του δείκτη κερματισμού της
3. Των ασυνεχειών και των χαρακτηριστικών τους
4. Της παρουσίας υπόγειων υδάτων

Σημαντική είναι η προσφορά της επιτόπου ταξινόμησης της βραχομάζας στο στάδιο του σχεδιασμού, καθώς συμβάλλει στην επιλογή της κατάλληλης διατομής της μελέτης του έργου.

Η πρώτη προσπάθεια ταξινόμησης έγινε το 1879 από τον ελβετό πολιτικό μηχανικό Karl Wilhelm Ritter, ο οποίος επιχείρησε να προσεγγίσει εμπειρικά τον σχεδιασμό

σηράγγων και τον προσδιορισμό της κατάλληλης μεθόδου υποστήριξης. Επίσης το 1884 για την διάνοιξη του καναλιού του Παναμά, έγινε μία προσπάθεια να συγκροτηθεί ένα σύστημα ταξινόμησης, το οποίο αφορούσε τις ιδιότητες της βραχομάζας.

Ακολουθούν αρκετές αξιοσημείωτες προσπάθειες όπως του αυστριακού μηχανολόγου μηχανικού Karl von Terzaghi, ο οποίος το 1946 προτείνει την μέθοδο “Rock load classification method” ή αλλιώς ταξινόμηση του βραχώδους φορτίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος εστιάζει στην ανάπτυξη των φορτίων περιμετρικά του ανοίγματος και έχει στόχο τον υπολογισμό των προδιαγραφών των χαλύβδινων πλαισίων της υποστήριξης.

Επίσης το 1958 ο Harald Lauffer προτείνει την μέθοδο ταξινόμησης “stand up time”, η οποία είναι βασισμένη πάνω στον χρόνο της ευστάθειας του υπόγειου ανοίγματος. Ειδικότερα αναφέρει ότι ο χρόνος ευστάθειας ενός υπόγειου τμήματος χωρίς αντιστήριξη συνδέεται με την ποιότητα της βραχομάζας, τον προσανατολισμό του άξονα της σήραγγας και την διατομή της, αλλά και των μεθόδων εκσκαφής και υποστήριξης. Έπειτα από συνεχείς τροποποιήσεις που έλαβε από αυστριακούς μηχανικούς, οδήγησε τελικά στην διαμόρφωση μιας νέας μεθόδου γνωστής ως “NATM”.

Η πρώτη, όμως, ποιοτική προσέγγιση περιγραφής της βραχομάζας, αρχίζει την δεκαετία του 60, από τον αμερικανό μηχανικό γεωλόγο Don U. Deere και αφορά το “rock quality designation” (RQD) ή αλλιώς δείκτης ποιότητας πετρώματος. Ο εν λόγω δείκτης αναφέρεται στην ποσοτική εκτίμηση του βαθμού κερματισμού των τεμαχών του πυρήνα γεώτρησης και εκφράζεται σε ποσοστό επι τοις εκατό.

Τέλος ακολουθούν τα πλέον πιο γνωστα συστήματα ταξινόμησης RMR, Q, GSI και RMI τα οποία αναλύονται στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.

(πηγή 4,5)

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας είναι τα εξής:

Πίνακας 3-1 Συστήματα ταξινόμησης (πηγή 4)

Συστήματα ταξινόμησης	Εφαρμογές
<u>Φόρτιση πετρώματος (Terzaghi 1946)</u>	Εφαρμόζεται μόνο για σήραγγες.
<u>Χρόνος αυτοϋποστήριξης (Lauffer 1958)</u>	Εφαρμόζεται μόνο για σήραγγες.
<u>RQD Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος (Deere 1967)</u>	Εφαρμόζεται μόνο για σήραγγες.
<u>Σύστημα RSR (Wickham 1972)</u>	Εφαρμόζεται μόνο για σήραγγες.

Συστήματα ταξινόμησης	Εφαρμογές
<u>Σύστημα RMR (Bieniawski 1973)</u>	Εφαρμόζεται για σήραγγες, μεταλλεία, βραχώδη πρανή και θεμελιώσεις.
<u>Σύστημα Q (NGI) (Barton 1974)</u>	Εφαρμόζεται για σήραγγες και υπόγειες εκσκαφές.
<u>Αντοχή, Μέγεθος τμημάτων πετρώματος (Franklin 1975)</u>	Εφαρμόζεται για σήραγγες και υπόγειες εκσκαφές.
<u>Γεωτεχνική ταξινόμηση (ISRM 1981)</u>	Έχει εφαρμογή σε γενικά θέματα.
<u>Τροποποίηση του συστήματος RMR (M-RMR) (Unal & Ozkan 1990)</u>	Εφαρμόζεται μόνο για ορυχεία.
<u>Σύστημα GSI (Hoek & Brown 1994)</u>	Εφαρμόζεται για σήραγγες και βραχώδη πρανή.
<u>Σύστημα RMi (Palmstorm 1995)</u>	Εφαρμόζεται για σήραγγες, ενώ επίσης χρησιμοποιείται και για τον χαρακτηρισμό βραχομάζας.

3.2 Σύστημα ταξινόμησης RMR

Το γεωμηχανικό σύστημα ταξινόμησης «Rock Mass Rating» συγκροτήθηκε από τον Πολωνό μηχανικό Z. T. Bieniawski¹ το 1989, και παρουσιάζει μια κλίμακα αξιολόγησης της βραχομάζας με 6 παραμέτρους, από τις οποίες έκαστη βαθμολογείται ανάλογα.

Όσον αφορά τις παραμέτρους, έχουμε:

- Αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη
- Δείκτης κερματισμού της βραχομάζας
- Απόσταση ασυνεχειών
- Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
- Υδρογεωλογικές συνθήκες
- Προσανατολισμός των ασυνεχειών

¹ Οι πρώτες βάσεις για το γεωτεχνικό σύστημα ταξινόμησης RMR δόθηκαν από τον Bieniawski στις αρχές της δεκαετίας του 70 στην Νότιο Αφρική. Το 2014 προτάθηκε και το RMR₁₄ έχοντας προσαρμόσει νέες εμπειρίες .

1) Αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μοναξονική θλίψη (σσι)

Πίνακας 3-2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη – Δείκτης R1 (πηγή 4)

Αντοχή σσι (MPa)	Δείκτης R1
>250	15
100-259	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

2) Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)

Πίνακας 3-3 Δείκτης κερματισμού (RQD) - Δείκτης R2 (πηγή 4)

RQD (%)	Δείκτης R2
>90	20
75-90	17-20
50-75	13-17
25-50	8-13
<25	3

3) Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Πίνακας 3-4 Απόσταση ασυνεχειών - Δείκτης R3 (πηγή 4)

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.6 - 2	15-20
0.2 - 0.6	10-15
0.06 - 0.2	8-10
<0.06	5

4) Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

Πίνακας 3-5 Κατάσταση των επιφανειών ασυνεχειών - Δείκτης R4 (πηγή 4)

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, με υλικό πλήρωσης < 1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, με υλικό πλήρωσης < 1mm	20
Λείες με υλικό πλήρωσης από 1 μέχρι 5 mm	10
Υλικό πλήρωσης με πάχος > 5 mm	0

5) Παρουσία υπόγειου νερού

Πίνακας 3-6 Παρουσία υπόγειου νερού - Δείκτης R5 (πηγή 4)

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Ξηρές συνθήκες	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Ροή υπόγειου νερού	0

6) Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Πίνακας 3-7 Προσανατολισμός ασυνεχειών σχετικά με κατεύθυνση διάνοιξης - Δείκτης R6 (πηγή 4)

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευνοϊκή	0

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Ευνοϊκή	-2
Αδιάφορη	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Αξίζει να σημειωθεί για τον συγκεκριμένο δείκτη (στις περιπτώσεις σήραγγας), ότι λαμβάνεται υπόψη η κυριότερη ομάδα ασυνεχειών και υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3-8 Προσαρμογή της βαθμολόγησης βάσει του προσανατολισμού των ασυνεχειών (πηγή 4)

Παράταξη	Κλίση	Περιγραφή	Βαθμολογία
Κάθετη στον άξονα της σήραγγας Κλίση προς το μέτωπο	45-90	Πολύ ευνοϊκή	0
	20-45	Ευνοϊκή	-2
Κάθετη στον άξονα της σήραγγας Κλίση προς το μέτωπο	45-90	Μέτρια	-5
	20-45	Δυσμενής	-10
Παράλληλη του άξονα της σήραγγας	45-90	πολύ δυσμενής	-5
	20-45	Μέτρια	-12
Ανεξάρτητη παράταξη	0-20	Αδιάφορος	-5

Ο υπολογισμός του RMR επιτυγχάνεται μέσω του αθροίσματος των έξι παραπάνω παραμέτρων και στην πορεία κατηγοριοποιείται ως εξής :

Πίνακας 3-9 Κατηγορία βραχομάζας – Δείκτης RMR (πηγή 4)

Κατηγορία βραχομάζας	Τιμές δείκτη RMR
Πολύ καλή	81-100
Καλή	61-80
Μέτρια	41-60

Κατηγορία βραχομάζας	Τιμές δείκτη RMR
Πτωχή	21-40
Πολύ πτωχή	0-20

Αξίζει να σημειωθεί η γενική θεώρηση ότι το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης είναι αποδοτικό για βραχομάζες με καλή ποιότητα (τυπικά μεγαλύτερες του 40), ενώ στην αντίθετη περίπτωση (μικρότερες του 40) δεν εμφανίζεται τόσο αποδοτική λόγω του ανεπαρκούς εύρους τιμών, όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω πίνακα 3-10.

Αναφορικά του εύρους για τις πιθανές τιμές για τις πτωχής ποιότητας βραχομάζες.

Πίνακας 3-10 Πιθανές τιμές του δείκτη RMR (πηγή 4)

Παράμετρος	Τιμές	Πιθανές τιμές του δείκτη
Αντοχή	<5 MPa	0, 1, 2
RQD	<25%	3
Απόσταση ασυνεχειών	<15 cm	5, 8, 9
Κατάσταση ασυνεχειών	Με υλικό πλήρωσης	0, 10
Παρουσία νερού	Υγρές - Στάγδην	4, 7
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Αδιάφορος	-5

Συνεπώς οι πιθανές τιμές του RMR είναι μεταξύ του (7) και του (26). Επιπρόσθετα, συνυπολογίζεται στην τιμή του δείκτη RMR ο τέταρτος δείκτης ο οποίος έχει πιθανό εύρος από 0 μέχρι 10 στις περιπτώσεις που το υλικό πλήρωσης είναι πάχους μεγαλύτερου ή μικρότερου των 5mm (δηλαδή η τιμή του RMR υφίσταται αλλαγή 10 μονάδων όταν μεταβάλλεται το υλικό πλήρωσης, αναφορικά με το πάχος, και από 4.9mm γίνεται 5.1mm). Λόγω, όμως, της σημαντικής αβεβαιότητας στην εκτίμηση του πάχους θεωρείται υπερβολική η συγκεκριμένη αλλαγή.

Αξιολόγηση συστήματος

Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η ευκολία στην χρήση της, ενώ σαν μειονέκτημα εμφανίζεται το γεγονός ότι δεν απεικονίζονται εύκολα οι όποιες

μικρές αλλαγές στην ποιότητα της βραχομάζας. Επίσης κρίνεται ανεπαρκές στις περιπτώσεις πτωχής ποιότητας βραχομάζας και για μαλακά πετρώματα, καθώς δεν περιλαμβάνει επαρκές εύρος τιμών.

[πηγή 4]

3.2.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (RMR)

Πίνακας 3-11 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης RMR (πηγή 4)

Τιμές δείκτη RMR	Υποστήριξη		
	Ηλώσεις - αγκυρώσεις	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Χαλύβδινα πλαίσια
81-100	Συνήθως δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης, πέρα από περιστασιακές αγκυρώσεις βράχου.		
61-80	Τοπικές αγκυρώσεις στην οροφή 3m ανά 2,5m .	50mm όπου χρειάζεται στην οροφή.	Δεν γίνεται χρήση χαλύβδινων πλαισίων.
41-60	Αγκυρώσεις μήκους 4m ανά 1.5-2m στην οροφή και στα τοιχώματα. Μεταλλικό πλέγμα στην οροφή.	50-100mm στην οροφή και 30mm στα τοιχώματα.	Δεν συνηθίζεται να γίνεται χρήση χαλύβδινων πλαισίων.
21-40	Αγκυρώσεις μήκους 4-5m ανά 1-1.5m στην οροφή και στα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στα τοιχώματα.	Ελαφρά πλαίσια ανά 1,5m όπου είναι απαραίτητο.
<20	Αγκυρώσεις μήκους 5-6m ανά 1-1.5m στην οροφή και τα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα. Αγκύρωση δαπέδου ανεστραμμένου θόλου	150-200mm στην οροφή, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο.	Μέτρια ως βαριά πλαίσια ανά 75cm και σύνδεση μεταξύ τους και δοκοί προπορείας.

Πίνακας 3-12 Προτεινόμενη εκσκαφή RMR (πηγή 4)

Τιμές δείκτη RMR	Εκσκαφή / Προχώρηση
81-100	Ολομέτωπη, προχώρηση 3 μέτρα.
61-80	Ολομέτωπη, μέχρι 1,5 μέτρα προχώρηση. Πλήρης υποστήριξη 20 μέτρα πριν από το μέτωπο
41-60	Προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα από 1,5 μέχρι 3 μέτρα. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη και πλήρης υποστήριξη 10 μέτρα πριν το μέτωπο.
21-40	Προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα από 1 μέχρι 1,5 μέτρα. Εγκατάσταση υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή 10 μέτρα πριν το μέτωπο.
<20	Πολλαπλά τμήματα προχώρησης, στο ανώτερο τμήμα γίνεται με βήμα 0,5 με 1,5 μέτρα. Εγκατάσταση υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αμέσως μετά την ανατίναξη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω πίνακες 3-11 και 3-12 αντιστοιχίζονται σε σήραγγα με διάμετρο 10 μέτρων, κατακόρυφες τάσεις μικρότερες των 25 MPa και με πεταλοειδή διατομή.

[πηγή 4]

3.2.2 Τροποποιήσεις του RMR

Το σύστημα ταξινόμησης RMR έχει δεχτεί αρκετές τροποποιήσεις, έτσι ώστε να γίνει πιο συμβατό και με το κομμάτι των εξορύξεων. Αξιοσημείωτες περιπτώσεις αποτελούν το M-RMR “Modified rock mass rating” από τους Unal και Ozkan (1990²) και το SMR “Slope mass rating” από τον Romana (1985).

Όσον αφορά το σύστημα M-RMR, προσδιορίζεται ένας δείκτης ποιότητας M-RMR. Συμπληρώνεται όμως και από καινούργια χαρακτηριστικά για την βελτίωση της περιγραφής μεγάλου εύρους συνθηκών της βραχομάζας και συμπεριλαμβάνονται οι ασθενείς, στρωματοποιημένες και ανισοτροπικές βραχομάζες.

Παρομοίως στο δεύτερο σύστημα “SMR”, υπολογίζεται ο δείκτης SMR χρησιμοποιώντας τέσσερις διορθωτικούς παράγοντες του αρχικού συστήματος “RMR”, οι οποίοι εξαρτώνται από την σχέση μεταξύ των ασυνεχειών που επηρεάζουν την βραχομάζα.

[πηγή 4,8]

² Το σύστημα ταξινόμησης M-RMR βασίστηκε πάνω σε έρευνες που έγιναν σε πέντε ορυχεία (βόρακα, άνθρακα, χαλκού-ψευδαργύρου και χρυσού).

3.3 Σύστημα Q (NGI)

Αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο από τους Nick Barton (1974), Lien Re and Lunde J³. το 2015 και είχε ως στόχο τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη "μέθοδο NMT".

Το εν λόγω σύστημα ταξινόμησης θεμελιώνεται πάνω στον υπολογισμό του παρακάτω δείκτη :

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

RQD (δείκτης κερματισμού της βραχομάζας)

Πίνακας 3-13 Δείκτης ποιότητας – RQD (πηγή 4)

RQD (επί τις εκατό)	Δείκτης ποιότητας
90-100	Άριστη
75-90	Καλή
50-75	Μετρία
25-50	Πτωχή
0-25	Πολύ πτωχή

*Για τις περιπτώσεις, στις οποίες η τιμή του παραπάνω συντελεστή είναι μικρότερη του 10, συμβατικά θεωρείται ότι ισούτε με την τιμή «10».

³ Αρχικά παρουσιάστηκε από τον Barton (1974) και Grimstad & Barton (1993), αλλά στη πορεία αναπτύχθηκε βάση της εμπειρίας λόγω της κατασκευής πολλών υπόγειων έργων στη Νορβηγία.

J_n (δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών)

Πίνακας 3-14 Τιμές του J_n (πηγή 4)

Συστήματα ασυνεχειών	J _n
Συμπαγές πέτρωμα, χωρίς ή με λίγες διακλάσεις	0.5 - 1.0
Μια οικογένεια ασυνεχειών	2
Μια οικογένεια ασυνεχειών και μερικές τυχαίες διακλάσεις	3
Δυο οικογένειες ασυνεχειών	4
Δυο οικογένειες και μερικές τυχαίες διακλάσεις	6
Τρεις οικογένειες ασυνεχειών	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες διακλάσεις	12
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Γίνεται τριπλάσια η τιμή του παραπάνω δείκτη σε διασταυρώσεις σηράγγων και διπλάσια σε στόμια.

J_r (βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών)

Χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις :

α) Βραχώμαζα με ασυνέχειες χωρίς ή με υλικό πλήρωσης με μικρό πάχος.

Πίνακας 3-15 Τιμές του J_r – 1^η περίπτωση (πηγή 4)

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	J _r
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Ολισθηρές, κυματώδεις	1.5

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Jr
Τραχιείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1.5
Ομαλές επίπεδες	1
Ολισθηρές επίπεδες	0.5

β) Βραχόμαζα χωρίς επαφή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (ακόμα και μετά από σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας).

Πίνακας 3-16 Τιμές του Jr – 2^η περίπτωση (πηγή 4)

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

*Αύξηση του συγκεκριμένου δείκτη κατά ένα όταν η μέση απόσταση των ασυνεχειών ξεπερνάει τα τρία μέτρα

*Το Jr = 0,5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις με επίπεδες ολισθηρές διακλάσεις, με προσανατολισμένες γραμμώσεις, και με διεύθυνση της ελάχιστης αντοχής.

Ja (βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών)

Τρεις περιπτώσεις:

α) Βραχόμαζα όπου υπάρχει επαφή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας του πετρώματος.

Πίνακας 3-17 Τιμές του Ja – 1^η περίπτωση (πηγή 4)

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Ja
Υγρή και πλήρως "επουλωμένα" τοιχώματα	0.75

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Ja
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1.0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (όχι αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2.0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3.0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm	4.0

β) Βραχόμαζα όπου υπάρχει υλικό πλήρωσης με μικρό πάχος (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10 cm).

Πίνακας 3-18 Τιμές του Ja – 2^η περίπτωση (πηγή 4)

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

γ) Βραχόμαζα όπου δεν υπάρχει επαφή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας του πετρώματος (ακόμα και αν σημειωθεί σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας).

Πίνακας 3-19 Τιμές του Ja – 3^η περίπτωση (πηγή 4)

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Ja
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλοαμμώδες υλικό	5

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνχειών	Ja
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος	6 - 24

Jw (συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού)

Πίνακας 3-20 Τιμές του Jw (πηγή 4)

Παρουσία Υπογείων Υδάτων	Jw
Ξηρές συνθήκες στην εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 lt/min	1.0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης	0.50
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού βαθμιαίως μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	0.2 - 0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0.05 - 0.1

*Αυξάνεται η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή στην περίπτωση αποστράγγισης.

*Ειδικά προβλήματα λόγω σχηματισμού πάγου δεν έχουν ληφθεί υπόψιν.

Stress Reduction Factor (συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων)

Τέσσερις περιπτώσεις:

α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων - από ασθενείς ζώνες, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας.

Πίνακας 3-21 Τιμές του SRF – 1^η περίπτωση (πηγή 4)

Περίπτωση	SRF
Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για όλα τα βάθη)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος μικρότερο των 50m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος μεγαλύτερο των 50m)	2.5
Άφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για όλα τα βάθη)	7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος μικρότερο των 50m)	5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος μεγαλύτερο των 50m)	2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για όλα τα βάθη)	5

β) Πέτρωμα με ικανή αντοχή από σχετικά υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων .

Πίνακας 3-22 Τιμές του SRF – 2^η περίπτωση (πηγή 4)

Περίπτωση	σc / σl	σθ/σl	SRF
Χαμηλές τάσεις, επιφανειακές, ανοιχτές ασυνέχειες	>200	>13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1.0
Υψηλές τάσεις, πολύ “σφιχτή” δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
Μέτρια "εκτίναξη" σκληρού πετρώματος, μετά 1 ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη “έκρηξη” και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20

γ) Συνθλίβον πέτρωμα, με έντονα πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας πολύ υψηλών τάσεων.

Πίνακας 3-23 Τιμές του SRF – 3^η περίπτωση (πηγή 4)

Περίπτωση	SRF
Μέτριας πίεσης λόγω συμπίεσης	5-10
Μεγάλης πίεσης λόγω συμπίεσης	10-20

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

Πίνακας 3-24 Τιμές του SRF – 4^η περίπτωση (πηγή 4)

Περίπτωση	SRF
Μέτριας πίεσης λόγω διόγκωσης	5-10
Μεγάλης πίεσης λόγω διόγκωσης	10-15

* Σημειώνεται ότι οι τιμές του SRF μειώνονται από 25% έως και 50%, στην περίπτωση όπου οι ζώνες διάτμησης δεν τέμνουν την εκσκαφή, όμως την επηρεάζουν.

* Δεν διατίθενται στοιχεία από ρεαλιστικές καταστάσεις σε περιπτώσεις, όπου η σήραγγα βρίσκεται σ' ένα βάθος μικρότερο του εύρους της και προτείνεται αύξηση του SRF από 2,5 σε 5.

Σύμφωνα με τον Barton (1974)

Σύμφωνα με το σύστημα Q, για τον υπολογισμό των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης, συνυπολογίζεται η ποιότητα της βραχομάζας με το ισοδύναμο άνοιγμα της σήραγγας (ως ισοδύναμο άνοιγμα θεωρούμε το πλάτος ή ύψος της σήραγγας προς του συντελεστή σπουδαιότητας ESR).

Συντελεστής σπουδαιότητας (ESR) ανα κατηγορία έργου.

Πίνακας 3-25 Εκτίμηση συντελεστή ESR (πηγή 4)

	Κατηγορία εκσκαφής	ESR
A	Προσωρινές μεταλλευτικές διανοίξεις.	3-5

	Κατηγορία εκσκαφής	ESR
B	Μόνιμες μεταλλευτικές διανοίξεις, σήραγγες υδροηλεκτρικών έργων, σήραγγες οδηγοί, εγκάρσια ανοίγματα, άνω τμήματα μεγάλων εκσκαφών.	1.6
C	Χώροι αποθήκευσης, εργοστάσια επεξεργασίας νερού, δευτερεύουσες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, χώροι υπερχειλίσης, σήραγγες προσπέλασης.	1.3
D	Υδροηλεκτρικοί σταθμοί, κύριες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, καταφύγια, στόμια διασταυρώσεις.	1.0
E	Υπόγεια πυρηνικοί σταθμοί, σιδηροδρομικοί σταθμοί, αθλητικές και κοινόχρηστες εγκαταστάσεις, εργοστάσια.	0.8

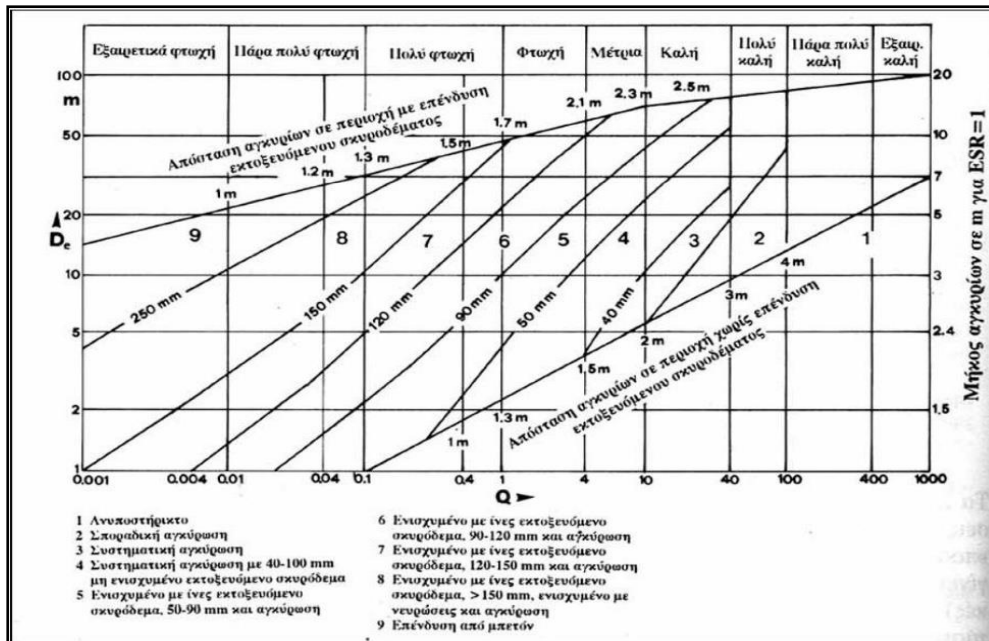
Σύμφωνα με τον Barton (1974)

Η τελευταία παράμετρος, που απαιτείται να υπολογιστεί, για την εύρεση της εκτιμώμενης μεθοδολογίας υποστήριξης είναι η Ισοδύναμη Διάσταση της εκσκαφής (De), σύμφωνα με τον Barton (1974) :

$$De = \frac{\text{Διάμετρος ή ύψος ανοίγματος}}{ESR}$$

3.3.1 Προτεινόμενη μεθοδολογία υποστήριξης (Q)

Η επιλογή της προτεινόμενης υποστήριξης γίνεται με το παρακάτω σχήμα 3-1 (Σύμφωνα με τον Barton 1993).



Σχήμα 3-1 Διάγραμμα προσδιορισμού της κατηγορίας υποστήριξης βάση του δείκτη Q

Το μέγιστο ανυποστήρικτο άνοιγμα υπολογίζεται ως εξής: $W = 2\chi ESR \chi Q^{0.4}$

Αξιολόγηση συστήματος

Σε αντίθεση με το προηγούμενο σύστημα, τα πλεονεκτήματα του συστήματος Q εντοπίζονται στην ευκολία απεικόνισης ακόμη και των πολύ μικρών αλλαγών στην δομή της βραχομάζας, με ιδιαίτερα μεγάλη λεπτομέρεια και επίσης παρέχει επαρκή στοιχεία για τα μέτρα υποστήριξης.

Από την άλλη πλευρά οι Palmstrom και Broch το 2006, σημειώνουν ότι το (J_W / SRF) δεν αποτελεί σημαντικό μέτρο υπολογισμού εντατικών καταστάσεων και το (RQD / J_n) δεν αποτελεί σημαντικό μέτρο για τον υπολογισμό του μεγέθους των τεμαχών.

[πηγή 4,14]

3.4 Σύστημα GSI

Τα θεμέλια του συστήματος γεωλογικής ταξινόμησης GSI, “Geological Strength Index”, έβαλαν οι Hoek, Woods και Shah το 1992 στον Καναδά και αφορούσε μόνο τα σκληρά ρωγματομένα πετρώματα. Στην πορεία έλαβε πολλές βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos & Benissi (1998 και το 2000 αντίστοιχα), έτσι ώστε να συμπεριλάβει τις ασθενείς και ετερογενείς βραχομάζες. Φτάνοντας στην πλέον τελική του μορφή, στην οποία δίνεται αρκετή έμφαση, στα σχετικά πτωχής ποιότητας εδάφη (με RMR < 40) αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Αυτού του

τύπου βραχομάζες συναντώνται πολύ συχνά στον ελλαδικό χώρο και συνεπώς έχουν πολύ μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Ο δείκτης αντοχής GSI αποτελεί σημαντικό κομμάτι για την επίλυση του κριτηρίου θραύσης των Hoek & Brown, καθώς βοηθούν στον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού έργων σε περιβάλλον με ρωγματομένους βράχους.

Το σύστημα GSI έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για τις βραχομάζες με $RMR > 40$ (δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR).

Το σύστημα GSI παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση για βραχομάζες με $RMR < 40$, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, και ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Οι δύο παράμετροι, στις οποίες το εν λόγω σύστημα έχει τις βάσεις του είναι οι εξής:

(α) Η δομή της βραχομάζας (η οποία χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών).






(β) Η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών (η οποία χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους).

Αρχικά γίνεται οπτική εξέταση, ούτως ώστε να διαπιστωθούν τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας περί της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών και έπειτα βαθμονομούνται συγκρίνοντάς τα με τις τυπικές περιγραφές και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Η αξιολόγηση των παραμέτρων και τις αντίστοιχες τιμές του συγκεκριμένου δείκτη απεικονίζονται στο παραπάνω πίνακα. Το σύστημα ταξινόμησης GSI βρίσκει εφαρμογή σε βραχομάζες μικρού ποσοστού συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά <20% από τον συνολικό όγκο της βραχομάζας).

Στις βραχομάζες με αξιόλογο ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού, στις οποίες η αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών είναι από περιορισμένη μέχρι ανύπαρκτη, γίνεται να χρησιμοποιηθεί η τροποποίηση της ταξινόμησης του συστήματος GSI.

Το εν λόγω σύστημα έχει, πλέον, καθιερωθεί διεθνώς για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας, ειδικά για την κατασκευή σηράγγων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, πως έχει εισέλθει και στον ελλαδικό χώρο τις τρεις τελευταίες δεκαετίες.

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

Σχήμα 3-2 Διάγραμμα γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Η βαθμονόμηση προκύπτει από την δομή και την ποιότητα των ασυνεχειών.

Σύμφωνα με τους Hoek & Marinos (2000)

Αξιολόγηση συστήματος

Σύμφωνα με τους Marinos και Hoek, για την ορθότητα των τιμών, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί κατά την εφαρμογή του δείκτη.

1. Αρχικά το κριτήριο των Hoek και Brown έχει ως προϋπόθεση ότι την ισότροπη συμπεριφορά της βραχομάζας χωρίς να έχει προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας, συνεπώς περιορίζεται η χρήση του συστήματος ανάλογα.
- 2.
3. Δεν συνίσταται ο συσχετισμός, για τις πτωχές ή τις ετερογενείς βραχομάζες, του δείκτη GSI με άλλους δείκτες.

[πηγή 4]

3.4.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (GSI) σε συσχέτιση με την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας

Πίνακας 3-26 Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης ανάλογα με την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας (πηγή 4)

Παραμόρφωση	Περιγραφή	Υποστήριξη
>1%	Λίγα προβλήματα αστάθειας (απλές συνθήκες)	Χρήση αγκυριών ή και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
1-2.5 %	Εμφάνιση μικρών προβλημάτων αστάθειας.	Χρήση αγκυριών και εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μερικές φορές ελαφριά πλαίσια ή και δικτυωτά.
2.5-5 %	Η αστάθεια στο μέτωπο δεν αποτελεί, συνήθως, ιδιαίτερο πρόβλημα και σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων.	Γρήγορη τοποθέτηση υποστήριξης και χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
5-10 %	Προβλήματα ευστάθειας μετώπου και σοβαρές συγκλίσεις.	Χρήση, ορισμένων φορών, δοκών προπορείας και ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
<10 %	Σοβαρά προβλήματα ευστάθειας του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις.	Χρήση δοκών προπορείας και ενίσχυση του μετώπου και χρήση κλασικών πλαισίων και σε ακραίες καταστάσεις χρήση μέχρι και ολισθαίνοντων πλαισίων.

(πηγή 4, 18)

3.5 Σύστημα RMI

Το σύστημα ταξινόμησης RMI (Rock Mass index) συγκροτήθηκε από τον A. Palmstrom το 1995 και βασίζεται στον συνδυασμό παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας και αποσκοπούν στον χαρακτηρισμό της

θλιπτικής αντοχής. Η χρήση της ταξινόμησης RMi δεν περιορίζεται μόνο στον εμπειρικό προσδιορισμό της παραμορφωσιμότητας και αντοχής της βραχομάζας, αλλά δύναται να χρησιμοποιείται και στην εκτίμηση της υποστήριξης σηράγγων.

Ο δείκτης RMi υπολογίζεται από την ταξινόμηση της βραχομάζας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$RMi = C_0 \times JP$$

Όπου:

Το (C_0) = αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη .

Το (JP) *jointing parameter* = συντελεστής μείωσης της αντοχής⁴

Υπολογίζεται απο την εξής σχέση:

$$JP = 0.2\sqrt{jC} \times V_b^D$$

Το (V_b) = όγκος των τεμάχων του άρρηκτου πετρώματος.

Το (jC) = συντελεστής για την κατάσταση των επιφανειών των διακλάσεων.

Υπολογίζεται απο την εξής σχέση :

$$jC = jL \times (jA/jR)$$

Το (jL) = συντελεστής για την εμμονή των ασυνεχειών της βραχομάζας.

Το (jR) και το (jA) = συντελεστές για την τραχύτητα και την εξαλλοίωση των τοιχωμάτων των διακλάσεων.

$$D = 0.37jC^{-0.2}$$

Το (D) είναι μία παράμετρος, η οποία υπολογίζεται απο την παρακάτω σχέση ως συνάρτηση του (jC) .

Οι τιμές του (D) συναρτήσει του (jC) , παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

⁴ Εξαρτάται άμεσα απο τα μεγέθη των τεμαχών και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών. Οι τιμές που λαμβάνει βρίσκονται μεταξύ του 0, για θρυμματισμένα πετρώματα, και 1, για άρρηκτα.

Πίνακας 3-27 Τιμές του D σε συνάρτηση του συντελεστή jC (πηγή 4)

jC	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4	6	9	12	16	20
D	0,586	0,488	0,425	0,392	0,370	0,341	0,322	0,308	0,297	0,28	0,259	0,238	0,225	0,213	0,203

Palmstrom (1995)

Σύμφωνα με το σύστημα RMI, διακρίνεται η βραχομάζα, σε κατηγορίες βάση της αντοχής, σύμφωνα με την τιμή του RMI. Επομένως για RMI μικρότερο των 0,001 MPa χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ασθενής η αντοχή της βραχομάζας, ενώ αντιθέτως χαρακτηρίζεται εξαιρετικά ισχυρή για RMI μεγαλύτερο των 100 MPa.

Με βάση την τιμή του δείκτη RMI, η βραχομάζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 3-28 Ταξινόμηση σύμφωνα με το Rmi (πηγή 4)

Τιμή RMI (MPa)	Κατηγορία βραχομάζας
<0,001	Εξαιρετικά αδύναμη
0,001-0,01	Πολύ αδύναμη
0,01-0,1	Αδύναμη
0,1-1	Μέτρια ισχυρή
1-10	Ισχυρή
10-100	Πολύ ισχυρή
>100	Εξαιρετικά ισχυρή

Palmstrom (1995)

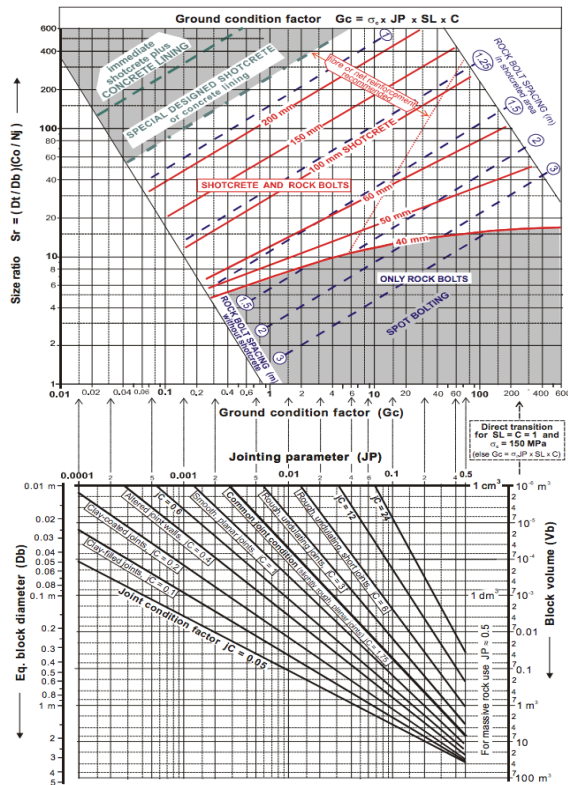
Αξιολόγηση συστήματος

Επειδή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα από την μεταβλητότητα της βραχομάζας, έχει την δυνατότητα για ευρύτερη εφαρμογή, σε αντίθεση με άλλα συστήματα ταξινόμησης. Επιπλέον η χρήση των παραμέτρων του συστήματος, μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση των δεδομένων άλλων συστημάτων.

Όμως το εν λόγω σύστημα ταξινόμησης εκφράζει τα κύρια χαρακτηριστικά της βραχομάζας και δεν γίνεται να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις, που χρειάζονται πιο συγκεκριμένες αναλύσεις.

[πηγή 4,6]

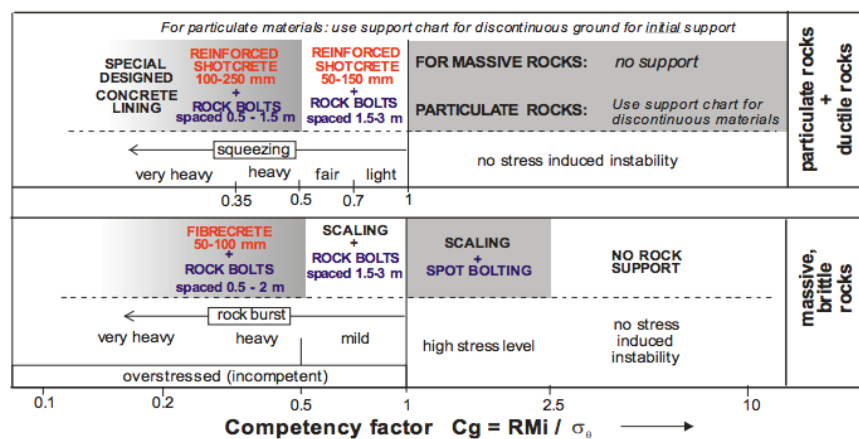
3.5.1 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (RMi)



Όπως ακριβώς φαίνεται στην εικόνα 3.1, στα διαγράμματα υποστήριξης υποδεικνύονται τα εκτιμώμενα ποσά και οι τύποι της συνολικής υποστήριξης.

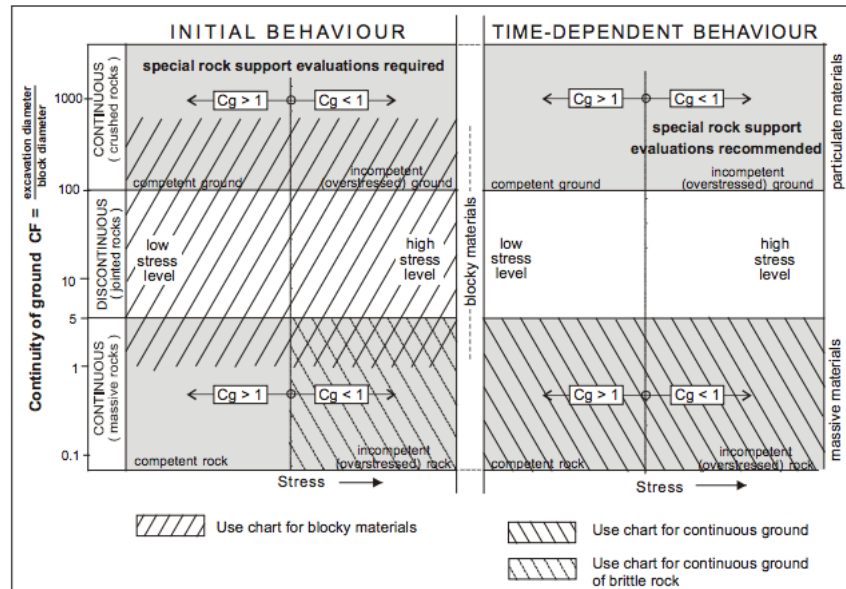
Εικόνα 3.1 Υποστήριξη βάση RMi

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 3.2), εκτιμάται η στήριξη σε συνεχείς βραχώμαξες.



Εικόνα 3.2 Εκτίμηση υποστήριξης σε συνεχείς βραχώμαξες

Στο επόμενο διάγραμμα (εικόνα 3.3) υποδεικνύεται πότε πρέπει να χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα της εικόνας 3.1 και πότε της εικόνας 3.2.



Εικόνα 3.3 Συνιστώμενη εφαρμογή των δύο διαγραμμάτων υποστήριξης

Η κατανόηση των γεωλογικών συνθηκών επί τόπου είναι απαραίτητη για έναν καλό χαρακτηρισμό της βραχομάζας και τις συνθήκες της, αλλά και στην επιλογή των κατάλληλων τιμών εισόδου για τους υπολογισμούς.

Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι ένα διάγραμμα υποστήριξης βασίζεται σε στατιστικά στοιχεία, επομένως δεν μπορεί ποτέ να αναπαραστήσει με ακρίβεια τις γεωτεχνικές συνθήκες στο χώρο. Οι πολλές παραλλαγές στη σύνθεση και τις ιδιότητες των πετρωμάτων, καθώς και στη γεωμετρία, την πυκνότητα και τη δομή των ασυνεχειών σε μια θέση καθιστά πολύ δύσκολο τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας με έναν ή με ένα στενό εύρος αριθμών.

Η μέθοδος υποστήριξης που προτείνει το RMi περιλαμβάνει, ωστόσο, περισσότερες παραμέτρους για τις συνθήκες της βραχομάζας και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε μια τοποθεσία από τα περισσότερα άλλα συστήματα ταξινόμησης.

(πηγή 17)

4. Βραζομάζα

4.1 Τυπικές δομές βραχομάζας σύμφωνα με τους Marinos & Hoek

Πίνακας 4-4-1 Τυπικές δομές βραχομάζας

Δομή βραχομάζας	Περιγραφή
Άρρηκτη	Λίγες αραιές ασυνέχειες
Τεμαχισμένη	Αδιατάρακτη, αρκετά καλά συμπεπλεγμένα κυβικά τεμάχια, σχηματισμένα από τρία ορθογώνια τεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών.
Πολυ τεμαχισμένη	Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα, με πολύπλευρα γωνιώδη συμπεπλεγμένα τεμάχια, που σχηματίζονται από 4 ή περισσότερα σύνολα ασυνεχειών.
Κερματισμένη ή διαταραγμένη ή στρωματώδης	Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια, που σχηματίζονται από πολλά αλληλοτεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας.
Αποδομημένη	Κατακερματισμένη αποδιοργανωμένη βραχομάζα με ανεπαρκώς συμπεπλεγμένα γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια.
Φυλλώδης ή διατμημένη	Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία τεμαχίων λόγω πυκνής σχιστότητας ή επιπέδων διάτμησης.

Marinos & Hoek

Είναι απαραίτητο, όμως, να σημειωθεί ότι οι τυπικές δομές που αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα 4-4-1 δεν γίνεται να καλύπτουν όλες τις υπάρχουσες περιπτώσεις βραχομάζας, καθώς οι συνδυασμοί των δομικών τους χαρακτηριστικών είναι τόσο πολλοί που καταστούν κάθε βραχομάζα στην φύση μοναδική.

[πηγή 5]

4.2 Αντοχή βραχομάζας

Για τον υπολογισμό της αντοχής της βραχομάζας, χρησιμοποιούνται συνήθως δύο κριτήρια αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος, το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb “M-C” (1989) και το μη γραμμικό των Hoek & Brown “H-B⁵” (1980).

Στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί μόνο το κριτήριο Mohr-Coulomb.

1^ο κριτήριο M-C :

$$\sigma_1 = k_m \sigma_3 + c_{om} \quad (\text{σχέση 1.0})$$

Όπου (σ_1) είναι η μέγιστη κύρια τάση, (σ_3) είναι η ελάχιστη κύρια τάση, (c_{om}) είναι η αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη και (k_m) είναι η κλίση της ευθείας του κριτηρίου M-C σε διάγραμμα αξόνων με (σ_1, σ_3) και σχετίζεται με την γωνία τριβής (φ_m) μέσω της σχέσης :

$$k_m = (1 + \sin(\varphi_m)) / (1 - \sin(\varphi_m)) \quad (\text{σχέση 1.1})$$

Η αντοχή (c_o) σχετίζεται με την γωνία τριβής και τη συνοχή της βραχομάζας μέσω της σχέσης :

$$c_{om} = (2c_m * \cos(\varphi_m)) / (1 - \sin(\varphi_m)) \quad (\text{σχέση 1.2})$$

Σύμφωνα με τον Bieniawski (1989), εκτιμάται το εύρος τιμών της συνοχής και της γωνίας τριβής της βραχομάζας ανάλογα με την τιμή του δείκτη RMR, ως εξής :

Πίνακας 4-4-2 Εκτίμηση της συνοχής και της γωνίας τριβής

RMR	C _m (kPa)	φ _m (°)
0-20	<100	<15
21-40	100-200	15-25
41-60	200-300	25-35
61-80	300-400	35-45
81-100	>400	>45

Bieniawski (1989)

⁵ Κατά τους Hoek & Brown (H-B) η περιβάλλουσα αντοχή του πετρώματος δεν είναι γραμμική. Το συγκεκριμένο κριτήριο, όμως, δεν θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Σύμφωνα με τον Bieniawski (2011) δίνονται οι εξής σχέσεις για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής και της συνοχής της βραχομάζας :

$$\varphi_m = 20 + 0.25 \text{ RMR} \quad (\text{σχέση 1.3})$$

και

$$c_m = \frac{C_{0m}(1 - \sin \varphi_m)}{2 \cos \varphi_m} = \frac{C_0 e^{(RMR-100)/24}(1 - \sin \varphi_m)}{2 \cos \varphi_m} \quad (\text{σχέση 1.4})$$

Όπου C_0 είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και σύμφωνα με τους Kalamaras και Bieniawski (1995) ισχύει ότι :

$$C_{0m} = C_0 e^{(RMR-100)/24} \quad (\text{σχέση 1.5})$$

2^ο κριτήριο H-B :

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο κριτήριο η περιβάλλουσα αντοχή της βραχομάζας θεωρείται μη γραμμική.

Το αρχικό κριτήριο H-B (1980) για την βραχομάζα περιγράφεται με την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$\frac{\sigma_1}{C_0} = \frac{\sigma_3}{C_0} + \sqrt{m_b \frac{\sigma_3}{C_0} + s} \quad (\text{σχέση 1.6})$$

Σύμφωνα, λοιπόν, με την παραπάνω σχέση συσχετίζονται η μέγιστη με την ελάχιστη κύρια τάση κατά την κορυφαία αντοχή, ενώ τα (m_b) και (s) είναι δύο παράμετροι αντοχής της βραχομάζας και εξαρτώνται από τις ιδιότητες του πετρώματος και τον βαθμό ρωγμάτωσης.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων (m_b) και (s), οι Hoek-Brown (1988) ανέπτυξαν τις εξής εμπειρικές σχέσεις βάση της ταξινόμησης RMR :

1) Για αδιατάρακτη βραχομάζα

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad (\text{σχέση 1.7})$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right) \quad (\text{σχέση 1.8})$$

Όπου το (m_i) είναι μία σταθερά του κριτηρίου Hoek-Brown για το άρρηκτο πέτρωμα.

2) Για διαταραγμένη βραχομάζα

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right) \quad (\text{σχέση 1.9})$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right) \quad (\text{σχέση 2.0})$$

Έπειτα, όμως, από ορισμένες τροποποιήσεις του αρχικού κριτηρίου σύμφωνα με τον Hoek (2002) σχηματίστηκε το γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown :

$$\frac{\sigma_1}{C_0} = \frac{\sigma_3}{C_0} + \left(m_b \frac{\sigma_3}{C_0} + s\right)^\alpha \quad (\text{σχέση 2.1})$$

Στην παραπάνω σχέση υπεισέρχεται και η παράμετρος (α), η οποία εξαρτάται από τον βαθμό ρωγμάτωσης της βραχομάζας.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής του γενικευμένου κριτηρίου χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις του Hoek (2002), βάση του δείκτη GSI :

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (\text{σχέση 2.2})$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (\text{σχέση 2.3})$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right] \quad (\text{σχέση 2.4})$$

Όπου το (D) είναι ένας συντελεστής εξαρτώμενος από τον βαθμό διαταραχής της βραχομάζας, εξαιτίας ανατινάξεων και πιθανής χαλάρωσης.

[πηγή 5]

4.3 Παραμορφωσιμότητα

Η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας εξαρτάται και από την παραμορφωσιμότητα του άρρηκτου πετρώματος και των ασυνεχειών της. Συνήθως εκτιμάται εμπειρικά, με την χρήση των συστημάτων ταξινόμησης.

Οπότε σύμφωνα με τον Bieniawski (1978) μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας (E_m), βάση της ταξινόμησης RMR, ως εξής :

$$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (\text{σχέση 2.5}), \quad \text{για τιμές RMR} > 50 .$$

Οι Serafim και Pereira (1983) για τον υπολογισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας προτείνουν την εξής σχέση :

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (\text{σχέση 2.6})$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις παραπάνω σχέσεις δεν λαμβάνεται υπόψη η παραμορφωσιμότητα του άρρηκτου πετρώματος. Καθώς η εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας προκύπτει από εμπειρικές συσχετίσεις, συνεπώς υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας, οπότε για τον καλύτερο σχεδιασμό έργων προτιμάται η εκτίμηση του από επιτόπου δοκιμές.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι υπολογισμού του μέτρου παραμορφωσιμότητας, όπως:

Του Barton βάση του δείκτη Q (2002),

$$E_m = 10 Q_c^{1/3} \quad (\text{σχέση 2.7})$$

Των Hoek και Brown βάση του δείκτη GSI (1997),

$$E_m = \sqrt{\frac{C_0}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (\text{σχέση 2.8})$$

Των Hoek και Diederichs (2006), οι οποίοι κάνουν εκτίμηση και του μέτρου παραμορφωσιμότητας σε σχέση με τον δείκτη GSI, αλλά και του μέτρου ελαστικότητας και τέλος των Zhang και Einstein (2004), οι οποίοι με βάση τον δείκτη RQD κάνουν εκτίμηση ενός πιθανού εύρους τιμών του μέτρου παραμορφωσιμότητας. Οι Nicholson και Bieniawski (1990), υπολογίζουν το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος (E_i), όπως και αντίστοιχα οι Lawson και Bieniawski (2013) για $RMR > 56$.

[πηγή 5]

4.4 Μέτρα σταθεροποίησης της γεωμάζας

Αναφορικά με τα μέτρα σταθεροποίησης, όπως παρουσιάζονται και παρακάτω στους πίνακες 4-4-3 και 4-4-4, διακρίνονται ανάλογα με τον χώρο τοποθέτησής τους (δηλαδή αν βρίσκονται εσωτερικά ή εξωτερικά της βραχομάζας) και τις διαστάσεις δράσης τους (δηλαδή σε μονοδιάστατης, διδιάστατης και τριδιάστατης δράσης). Παλαιότερα υπήρχε η διάκριση προσωρινών και μόνιμων μέτρων, καθώς γινόταν αρχικά υποστήριξη με δομική ξυλεία και στην πορεία γινόταν η εγκατάσταση των μόνιμων μέτρων στήριξης, κατά κύριο λόγο από αψιδόλιθους. Σήμερα προτιμάται περισσότερο η μόνιμη λειτουργία των μέτρων, για τους προφανείς λόγους, και συνεπώς τα μέτρα, όσον αφορά το χρόνο δράσης τους, διακρίνονται σε άμεσα και τελικά μέτρων.

[πηγή 1]

Τα μέτρα στήριξης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, σε εξωτερικά (πίνακας 3-4) και εσωτερικά (πίνακας 3-3)⁶ και έχουν ως εξής :

Πίνακας 4-4-3 Εσωτερικά μέτρα στήριξης

ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ		
Στήριξη		
Υποστήριξη	Αντιστήριξη	
Μονοδιάστατα	Διδιάστατα	Τρισδιάστατα
Ορθοστάτες αντηρίδες	Χαλύβδινα πλαίσια	Κέλυφος επένδυσης

Πίνακας 4-4-4 Εξωτερικά μέτρα στήριξης

ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ		
Στήριξη		Βελτίωση
Προένταση	Οπλισμός	
Μονοδιάστατα		Τρισδιάστατα
Αγκύρια , τένοντες	Ήλοι , βλήτρα	Ενέσεις, ψύξη

⁶ Διάκριση μέτρων σταθεροποίησης σε εξωτερικά και εσωτερικά βάση Jeremic 1987.

Ανάλογα με τον τρόπο ενεργοποίησής τους, τα μέτρα, επίσης, διακρίνονται σε ενεργητικά και σε παθητικά. Τα ενεργητικά μέτρα υποστήριξης εφαρμόζονται σ'ένα συγκεκριμένο φορτίο στην διάρκεια της εφαρμογής τους. Τα παθητικά μέτρα υποστήριξης (ονομάζονται αλλιώς και οπλισμός) αναπτύσσουν φορτίο συμπαρασυρόμενα από μετατόπιση της βραχομάζας, με την οποία βρίσκονται σε επαφή. Πέρα, όμως, της επιλογής των απαραίτητων μέτρων υποστήριξης του υπόγειου ανοίγματος, κατέχουν, επίσης, σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια και η κατάλληλη γεωμετρία και το μέγεθος του έργου, η διεύθυνση της εκσκαφής, η αλληλουχία των φάσεων εξόρυξης, και η εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου ανατινάξεων.

[πηγή 1]

Η διατομή αντιστοιχεί στην τυπική διατομή της σήραγγας Αγίας Κυριακής, όπως παρουσιάζεται από τους Ντουνιά κ.α. (2006).

[πηγή 22]

6. Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής

Τα πιο πολυχρησιμοποιημένα συστήματα για την γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας είναι το RMR₈₉ (Bieniawski 1989) και ο δείκτης ποιότητας βραχομάζας Q (Barton 1974). Ανάμεσά τους παρατηρούνται πολλές ομοιότητες, καθώς γίνεται χρήση ίδιων ή και παρόμοιων παραμέτρων για τον υπολογισμό του δείκτη ποιότητας.

6.1 Βάση του συστήματος RMR

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι βραχομάζες, στις οποίες θα σχεδιαστούν οι σήραγγες, είναι κατηγορίας RMR 3 και 4, και πιο συγκεκριμένα 30 και 50. Σημειώνεται επίσης, ότι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη θεωρείται ίση με $C_0 = 50 \text{ MPa}$.

6.1.1 1^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 50

Σύμφωνα με τον 1^ο συνδυασμό για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής, της συνοχής και της γωνίας τριβής δηλαδή, επιτυγχάνεται βάση του Bieniawski (1989) μέσω του πίνακα 3-2. Όπου αναφέρεται ότι για RMR μεταξύ των τιμών 41-60, εκτιμάται το εύρος των τιμών της συνοχής και της γωνίας τριβής μεταξύ των τιμών 200-300 (kPa) και 25-35 (°) αντίστοιχα.

Συνεπώς και καταλήγουμε στις εξής τιμές :

1) $C_m = 250 \text{ kPa}$

2) $\varphi_m = 30^\circ$

6.1.2 2^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 50

Σύμφωνα με τον 2^ο συνδυασμό για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής, γίνεται, ξανά, βάση του Bieniawski (2011), μέσω των σχέσεων (1.3) και (1.4), όπως αυτοί αναγράφονται παραπάνω :

1) $\varphi_m = 20 + 0.25 \text{ RMR} = 32,5^\circ$

2) $C_m = \frac{C_0 \cdot e^{(RMR-100)/24} (1 - \sin(\varphi_m))}{2 \cos(\varphi_m)} = 1,7 \text{ MPa}$

6.1.3 1^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 30

Αντίστοιχα για τις βραχομάζες με RMR = 30 και σύμφωνα με τον Bieniawski (1989) μέσω του πίνακα 3-2, αναφέρεται ότι για RMR μεταξύ των τιμών 21-40, εκτιμάται το εύρος των τιμών της συνοχής και της γωνίας τριβής μεταξύ των τιμών 100-200 (kPa) και 15-25 (°) αντίστοιχα.

Συνεπώς και καταλήγουμε στις εξής τιμές :

1) $C_m=150 \text{ kPa}$

2) $\varphi_m=20^\circ$

6.1.4 2^{ος} συνδυασμός υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για RMR 30

Επίσης, αντίστοιχα πάλι, για τις βραχομάζες με $RMR = 30$, για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής, χρησιμοποιούνται οι τύποι του Bieniawski (2011), οι σχέσεις, δηλαδή, (1.3) και (1.4), όπως αυτοί αναγράφονται παραπάνω :

1) $\varphi_m = 20 + 0.25 RMR = 27,5^\circ$

2) $C_m = \frac{C_0 \cdot e^{(RMR-100)/24} (1-\sin(\varphi_m))}{2\cos(\varphi_m)} = 0,8 \text{ MPa}$

6.2 Υπολογισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας

Για τον υπολογισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.6), που προτείνουν οι Serafim και Pereira και η οποία για $RMR= 50$ και $RMR= 30$ συνεπάγεται τα εξής:

Για RMR= 50

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} = 10 \text{ GPa}$$

Για RMR= 30

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} = 3,16 \text{ GPa}$$

6.3 Εκσκαφή και μέτρα υποστήριξης

Για RMR= 50

Για την εκσκαφή της σήραγγας συνιστάται, βάση του συστήματος ταξινόμησης RMR, προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα κατά 2,25 μέτρα, έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη και πλήρης υποστήριξη 10 μέτρα πριν το μέτωπο.

Η υποστήριξη πρέπει να περιλαμβάνει πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες⁷ 75 mm στην οροφή και 30mm στα τοιχώματα και αγκύρια μήκους 4 μέτρα ανα 1,75 μέτρα στην οροφή και στα τοιχώματα.

Για RMR= 30

Για την εκσκαφή της σήραγγας σε βραχώμαζα με RMR = 30, συνιστάται, προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα κατά 1,25 μέτρα, εγκατάσταση υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή και πλήρης υποστήριξη 10 μέτρα πριν το μέτωπο.

Η υποστήριξη πρέπει να περιλαμβάνει πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες 125 mm στην οροφή και 100mm στα τοιχώματα, αγκύρια μήκους 4,5 μέτρα ανα 1,25 μέτρα στην οροφή και στα τοιχώματα και ελαφρά πλαίσια ανά 1,5 μέτρα, όπου είναι απαραίτητο.

⁷ Οι μεταλλικές ίνες προστίθενται έτσι ώστε να προσδώσουν δυσθραυστότητα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

7. Αριθμητική μέθοδος ανάλυσης με το πρόγραμμα RS2

7.1 Εξέλιξη του προγράμματος ανα τα χρόνια

Οι αρχικές βάσεις της σύστασης του προγράμματος «RS2» δόθηκαν στον Καναδά το 1992 και πιο συγκεκριμένα από το πανεπιστήμιο του Τορόντο. Η αρχική του μορφή περιελάμβανε ένα υβριδικό πρόγραμμα πεπερασμένων - οριακών στοιχείων για προσομοίωση υπόγειων έργων σε βραχομάζα και έφερε το όνομα «Phase» (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support).

Στα μέσα της δεκαετίας του 90, όμως, η «Rockscience» παίρνει τα δικαιώματα και αναπτύσσει μία καινούργια έκδοση του λογισμικού, το «Phase 2». Στον νέο αλγόριθμο, ο οποίος αποτέλεσε και την βάση για τις νεότερες εκδόσεις, προστέθηκαν καινούργια μοντέλα υποστήριξης, βελτιώσεις διεπαφών, καθώς και καλύτερη υποστήριξη για επιφανειακές εκσκαφές.

Στην αρχή του 21^{ου} αιώνα γίνεται μία νέα ενημέρωση του προγράμματος και αποκτάει πιέσεις πόρων και ενεργών τάσεων για την εκτίμηση της αστοχίας, καινούργια μοντέλα υποστήριξης και μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών σε στάδια.

Το 2014 αναβαθμίζεται και καταλαμβάνει την τελική του μορφή έως και σήμερα και μετονομάζεται σε «RS2» (Rock and soil 2-dimensional analysis program). Πλέον περιλαμβάνει πλήρως την συζευγμένη επίλυση, σύμφωνα με την θεωρία «Biot⁸», δυνατότητες δυναμικής ανάλυσης, παροδικής ανάλυσης ροής υπόγειων υδάτων και διάφορες λοιπές καινοτομίες.

[Πηγή 9]

7.2 Παράμετροι βραχομάζας

Οι παράμετροι της ισότροπης βραχομάζας (isotropic rock mass) του κριτηρίου αστοχίας «Mohr-Coulomb», που είναι απαραίτητες για τις αναλύσεις των σηράγγων, φέρνουν τα εξής χαρακτηριστικά:

7.2.1 Για RMR = 50

Σύμφωνα με τον πίνακα 4-4-2 του Bieniawski (1989) υπολογίζονται η γωνία τριβής και η συνοχή :

- 1) Γωνία τριβής $\phi_m = 30^\circ$
- 2) Συνοχή $C_m = 250 \text{ kPa}$

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας υπολογίζεται από την σχέση 2.6 :

- 3) $E_m = 10 \text{ GPa}$
- 4) Δείκτης poisson $\nu = 0.3$
- 5) Ειδικό βάρος $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$
- 6) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $C_o = 50 \text{ MPa}$

⁸Θωρία Biot, υδρομηχανική σύζευξη για ενοποιημένη ανάλυση.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας υπολογίζεται από την σχέση 1.5, σύμφωνα με τους Kalamaras και Bieniawski (1995) :

$$7) C_{om} = 6.25 \text{ MPa}$$

[πηγή 19,20]

7.2.2 Για RMR = 30

Σύμφωνα με τον πίνακα 4-4-2 του Bieniawski (1989) υπολογίζονται η γωνία τριβής και η συνοχή :

- 1) Γωνία τριβής $\varphi_m = 20^\circ$
- 2) Συνοχή $C_m = 150 \text{ kPa}$

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας υπολογίζεται από την σχέση 2.6 :

- 3) $E_m = 3,16 \text{ GPa}$
- 4) Δείκτης poisson $\nu = 0.3$
- 5) Ειδικό βάρος $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$
- 6) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $C_o = 50 \text{ MPa}$

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας υπολογίζεται από την σχέση 1.5, σύμφωνα με τους Kalamaras και Bieniawski (1995) :

$$7) C_{om} = 2,7 \text{ MPa}$$

7.3 Προσομοίωση φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης

Με την χρήση του προγράμματος «RS2» πραγματοποιείται σταδιακή προσομοίωση των φάσεων της εκσκαφής και της υποστήριξης. Κατά την διάρκεια των σταδίων δίνεται η δυνατότητα αφαίρεσης των στοιχείων της γεωμάζας, της αλλαγής των ιδιοτήτων τους και της αρχικής φόρτισής τους, επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή η αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους, όπως επίσης υπάρχει και η δυνατότητα προσθαφαίρεσης της εξωτερικής φόρτισης.

[Πηγή 9,10]

7.3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα

Η αρχική λειτουργία του προγράμματος περιλαμβάνει την επεξεργασία του μοντέλου. Το RS2 διαθέτει μεγάλη ποικιλία εργαλείων για την κατασκευή του προσομοιώματος και του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα περιέχεται ένα πρόγραμμα επεξεργασίας του μοντέλου, το οποίο χρησιμεύει στην εισαγωγή και τροποποίηση των ορίων, της υποστήριξης, τις επί τόπου τάσεις, τις οριακές συνθήκες, τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και για την δημιουργία του πλέγματος.

[Πηγή 9,11]

7.3.2 Ιδιότητες υλικών

Για την επίτευξη της προσομοίωσης των υλικών της γεωμάζας, τα στοιχεία μπορούν να συμπεριφέρονται είτε πλαστικά είτε ελαστικά. Για την ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών το πρόγραμμα «RS2» κάνει χρήση του κριτηρίου «Mohr-Coulomb⁹», με δυνατότητα ανάλυσης δύο ειδών:

- 1) Ελαστικά και τελείως πλαστικά υλικά
- 2) Ψαθυρά υλικά

[Πηγή 9,11]

7.3.3 Τάσεις πεδίου

Στο πρόγραμμα, οι τάσεις του πεδίου, (για πρακτικούς λόγους) έχουν σταθερές τιμές για τις εκσκαφές σε μεγάλα βάθη, καθώς και η επίδραση της βαρύτητας στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης είναι αμελητέα σε σύγκριση με το μέγεθος των επί τόπου τάσεων. Στις εκσκαφές, όμως, που λαμβάνουν χώρα σε μικρό βάθος, ορίζεται ένα εντατικό πεδίο, εξαιτίας των υπερκειμένων, και λαμβάνεται υπόψιν και η επίδραση της βαρύτητας.

Συνεπάγονται οι εξής σχέσεις:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h \quad (\text{σχέση 2.9}),$$

όπου (σ_v) η κατακόρυφη τάση, (γ) το βάρος των υπερκειμένων και (h) το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

$$\sigma_h = K_o \sigma_v \quad (\text{σχέση 3.0}),$$

όπου (σ_h) η οριζόντια κύρια τάση και (K_o) ο συντελεστής πλευρικής ώθησης.

Οι αβαθείς εκσκαφές, ενδέχεται να επηρεάζονται από επιφανειακά φορτία, όπως κτίρια, λεωφόροι κλπ, για την ακριβέστερη προσομοίωση, λοιπόν, υπεισέρχεται ο εν λόγω παράγοντας, μέσω του προγράμματος, στους υπολογισμούς. Συνεπώς, γίνεται να ορισθούν δυνάμεις κάθετες ή παράλληλες ως προς κάποιο εσωτερικό ή εξωτερικό σύνορο, αλλά και επικόμβιες δυνάμεις, στους κόμβους των στοιχείων σε κατακόρυφη ή και οριζόντια διεύθυνση.

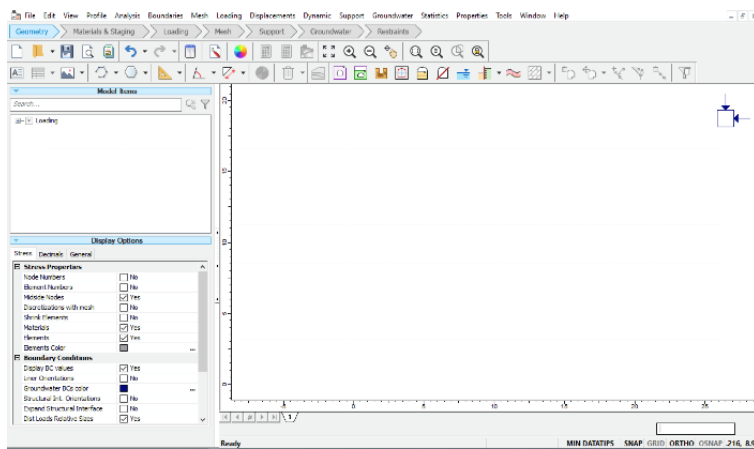
[Πηγή 9,11]

⁹ Το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι ένα μοντέλο αστοχίας σύμφωνα με το οποίο η συμπεριφορά του εδάφους αντιμετωπίζεται ως γραμμική ελαστική – πλαστική.

7.4 Προσομίωση

7.3.1 Δημιουργία μοντέλου

Οι προσομοιώσεις, που θα λάβουν χώρα στο πρόγραμμα RS2, θα αφορούν μία αβαθή σήραγγα βάθους 30 μέτρα, και μία βαθιά σήραγγα (με υπερκείμενα 100 m), με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και των οποίων θα γίνει η εκσκαφή σε έναν παρόμοιο σχηματισμό με στόχο την μελέτη των μετακινήσεων της σήραγγας και την αποτελεσματικότητα των μέτρων υποστήριξης. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις προσομοιώσεων των σηράγγων θα χρησιμοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

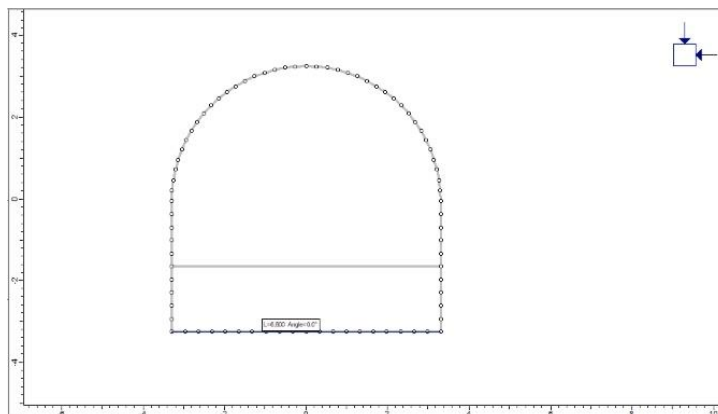


Εικόνα 7.1 Αρχική σελίδα του RS2

Στην παραπάνω εικόνα 7.1, στην οποία απεικονίζεται η αρχική σελίδα του RS2, μπορούμε να διακρίνουμε ότι στο πρόγραμμα ακολουθείται μία λογική σειρά για την κατασκευή του μοντέλου. Ξεκινώντας από την γεωμετρία της σήραγγας, έπειτα ακολουθεί ο καθορισμός του υλικού και των ιδιοτήτων του, μαζί με τα στάδια της εκσκαφής, η προσθήκη των τάσεων, το Mesh και η δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων, η υποστήριξη της σήραγγας, η ύπαρξη υπόγειων υδάτων και τέλος οι περιορισμοί ή αλλιώς οι συνοριακές συνθήκες.

7.3.2 Γεωμετρία σήραγγας

Αρκετές φορές προτιμάται από τους χρήστες να σχεδιάζουν την σήραγγα (και γενικότερα για οποιοδήποτε τεχνικό έργο μελετάνε) σε εξειδικευμένα λογισμικά σχεδιασμού (όπως είναι για παράδειγμα το autocad).



Εικόνα 7.2 Διατομή σήραγγας

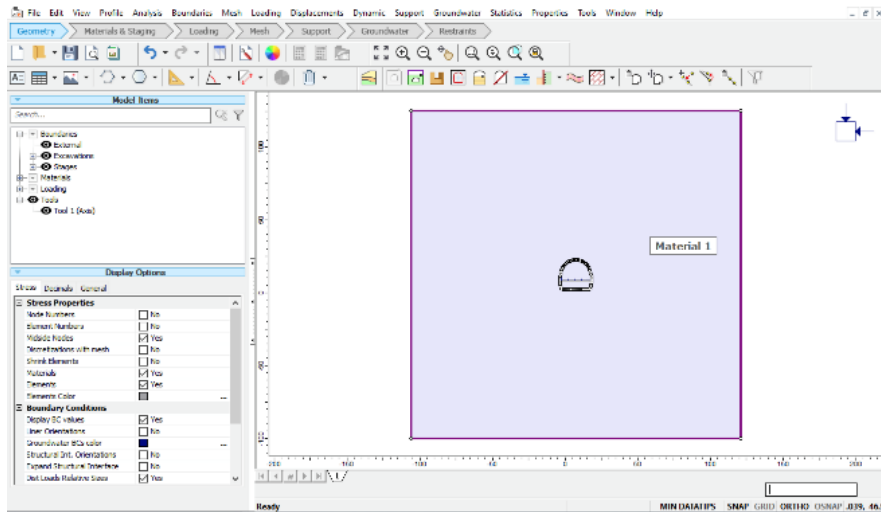
Το RS2 παρόλα αυτά δίνει την δυνατότητα του σχεδιασμού της διατομής όχι μόνο χειροκίνητα, αλλά διαθέτει, επίσης, και επτά (7) σύνηθες γεωμετρίες σηράγγων για μεγαλύτερη ευκολία (εικόνα 7.2).

Όπως ακριβώς έχει αναφερθεί και παραπάνω για την γεωμετρία (geometry) της σήραγγας, θα χρησιμοποιηθεί η τυπική διατομή, όπως ακριβώς φαίνεται και στις εικόνες 5.1 και 7.2 με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σήραγγας

Πλάτος	10,2 m
Ύψος διατομής	9,6 m
Ακτίνα	5 m

Επίσης θεωρούμε ότι η εκσκαφή (excavation) θα γίνει σε δύο φάσεις και για τον λόγο αυτόν, έχει σχεδιαστεί η γραμμή (stage) εντός της διατομής, όπου η πρώτη φάση της εκσκαφής λαμβάνει χώρα άνω ημιδιατομή και η δεύτερη φάση συνεχίζεται στην βαθμίδα.



Εικόνα 7.3 Εξωτερικά όρια

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των εξωτερικών ορίων¹⁰ (external boundaries), όπως ακριβώς φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα 7.3, περιμετρικά της διατομής.

Τα αριθμητικά προσομοιώματα που υλοποιήθηκαν είχαν τα εξής εξωτερικά όρια:

Πίνακας 7-6 Διαστάσεις εξωτερικών ορίων

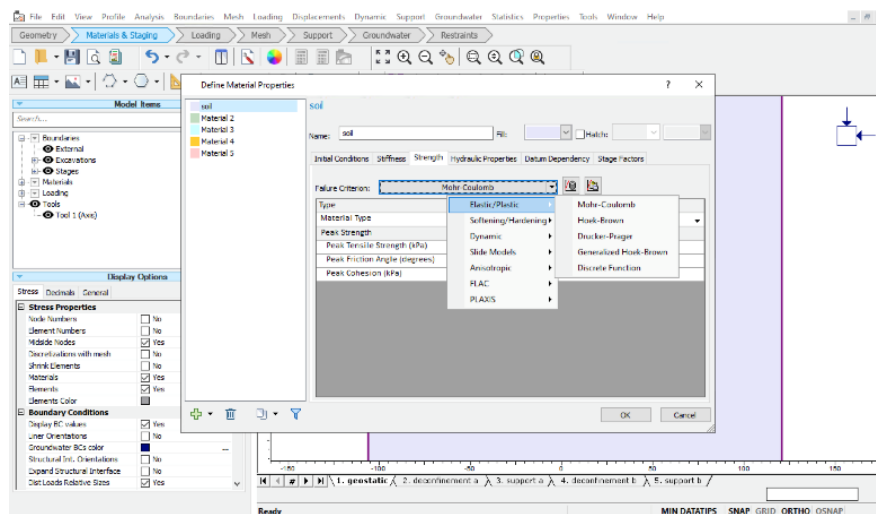
	Αβαθής σήραγγα	Σήραγγα (100μέτρα)	Σήραγγα (250μέτρα)	Σήραγγα (500μέτρα)
Κάτω όρια (από τον άξονα της σήραγγας)	30 μέτρα	30 μέτρα	30 μέτρα	30 μέτρα
Πλευρικά όρια (από τον άξονα της σήραγγας)	60 μέτρα	60 μέτρα	60 μέτρα	60 μέτρα
Άνω όρια (από τον άξονα της σήραγγας, ανάλογα του ύψους των υπερκειμένων)	30 μέτρα	100 μέτρα	250 μέτρα	500 μέτρα

Τα πλευρικά και τα κάτω όρια ορίστηκαν στις συγκεκριμένες αποστάσεις, με σκοπό να αποφευχθούν τα φαινόμενα επιρροής συνόρων (Boundary effect)¹¹.

¹⁰ Υποστηρίζεται από ολόκληρη μαθηματική λογική (τις εξισώσεις του Kirt) σύμφωνα με την οποία συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση μίας κυκλικής διατομής, υπάρχει μία ζώνη αλληλεπίδρασης της τάξης των 4-5 διαμέτρων περίξ αυτής.

¹¹ Το “boundary effect”, μπορεί να παρουσιαστεί λόγω της απώλειας γειτονικού υλικού σε αναλύσεις, που εξαρτώνται από τις τιμές του γειτονικού υλικού.

7.3.3 Ιδιότητες υλικού και στάδια εκσκαφής



Εικόνα 7.4 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού

Στο αμέσως επόμενο βήμα ακολουθεί ο καθορισμός των ιδιοτήτων του γεωυλικού, μέσα στο οποίο σχεδιάζουμε την σήραγγα. Το πρόγραμμα RS2 προσφέρει την δυνατότητα να ρυθμίσουμε πολλές από τις παραμέτρους αντοχής του υλικού (material), με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση της προσομοίωσης (εικόνα 7.4).

Οι ιδιότητες του υλικού, όπως ρυθμίστηκαν για κάθε περίπτωση της προσομοίωσης των παραπάνω συνθηκών ξεκινούν από την αρχική κατάσταση (initial conditions) και το ειδικό βάρος (unit weight), όπου ορίστηκε ως 0.027 MN/m^3 ¹².

Συνεπώς ανά περίπτωση έχουμε :

1^η περίπτωση σήραγγας σε βραχομάζα με RMR = 50

Αρχικά θεωρούμε ότι έχουμε ισότροπο υλικό¹³ και καθορίζεται στον πίνακα της ακαμψίας (stiffness) ο λόγος “Poisson” (Poisson’s Ratio) 0.3, ενώ το μέτρο παραμορφωσιμότητας (Young’s Modulus) ρυθμίζεται στα 10 GPa.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην συμπλήρωση του πίνακα «strength» επιλέγεται το κριτήριο αστοχίας (failure criterion) «Mohr – Coulomb», από τα κριτήρια τύπου ελαστικά/πλαστικά (Elastic/Plastic).

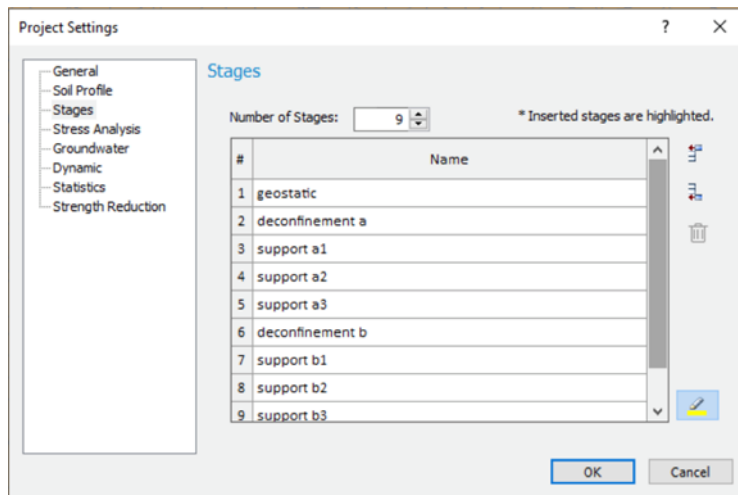
¹² Το RS2 δίνει, επίσης, την δυνατότητα επιλογής των μονάδων μέτρησης, όπου συνηθίζεται στις περιπτώσεις ενασχόλησης με βραχομάζες να επιλέγονται μονάδες τύπου «MPa», καθώς αναπτύσσονται πολύ μεγάλες τάσεις.

¹³ Δηλαδή ολόκληρο το υλικό θα παραμορφωθεί ομοιόμορφα, ως προς οποιονδήποτε άξονα.

2^η περίπτωση σήραγγας σε βραχομάζα με RMR = 30

Θεωρούμε και πάλι, ότι έχουμε ισότροπο υλικό και προσδιορίζουμε, τον λόγο “Poisson” (Poisson’s Ratio) στο 0.3, ενώ το μέτρο παραμορφωσιμότητας (Young’s Modulus) ρυθμίζεται στα 3,16 GPa.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην συμπλήρωση του πίνακα «strength» επιλέγεται το κριτήριο αστοχίας (failure criterion) «Mohr – Coulomb».



Εικόνα 7.5 Στάδια εκσκαφής

Τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού ακολουθεί ο καθορισμός των σταδίων (stages) της εκσκαφής, η οποία θα γίνει σε δύο φάσεις και θα προσομοιωθεί σε 5 στάδια, όπως ακριβώς φαίνεται και στην εικόνα 7-5. Ως αρχικό στάδιο ορίζουμε το γεωστατικό, το οποίο λαμβάνει χώρα πριν την έναρξη της εκσκαφής και έχει στόχο τον έλεγχο της ισορροπίας του μοντέλου (δηλαδή ότι έχει μηδενικές μετακινήσεις, σωστές τάσεις κλπ).

Από το επόμενο στάδιο αρχίζει η πρώτη φάση της εκσκαφής και η αποτόνωσή της (deconfinement), δηλαδή, επί της ουσίας, ασκείται μία ισοδύναμη εσωτερική πίεση σε συνάρτηση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ).

Στο τρίτο στάδιο ξεκινάει η υποστήριξη του ανοίγματος, της πρώτης φάσης της εκσκαφής.

Αντίστοιχα με τα δύο στάδια της αποτόνωσης και υποστήριξης της πρώτης φάσης της εκσκαφής, κυμαίνονται και τα επακόλουθα δύο στάδια για την δεύτερη φάση της εκσκαφής.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στα αντίστοιχα στάδια, δηλαδή στις αποτονώσεις (α) και (β) [deconfinement (a) and (b)], ορίζουμε στο πρόγραμμα ότι θα γίνουν αντίστοιχα οι φάσεις των εκσκαφών (α) και (β).

7.3.4 Loading

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της προσομοίωσης είναι η προσθήκη των τάσεων (loading) στο μοντέλο. Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας η εξωτερική φόρτιση του μοντέλου ήταν γεωστατική, δηλ. καθορίζεται από το ύψος των υπερκειμένων.

Για την εν λόγω προσομοίωση, στο στάδιο της αποτόνωσης έγινε προσθήκη του επαγόμενου φορτίου καταπόνησης (induced stress load) το οποίο υπολογίστηκε κάθε φορά με τη χρήση του διαμήκους προφίλ μετατοπίσεων (Longitudinal Displacement Profile, LDP) και του βαθμού αποτόνωσης (λ)¹⁴.

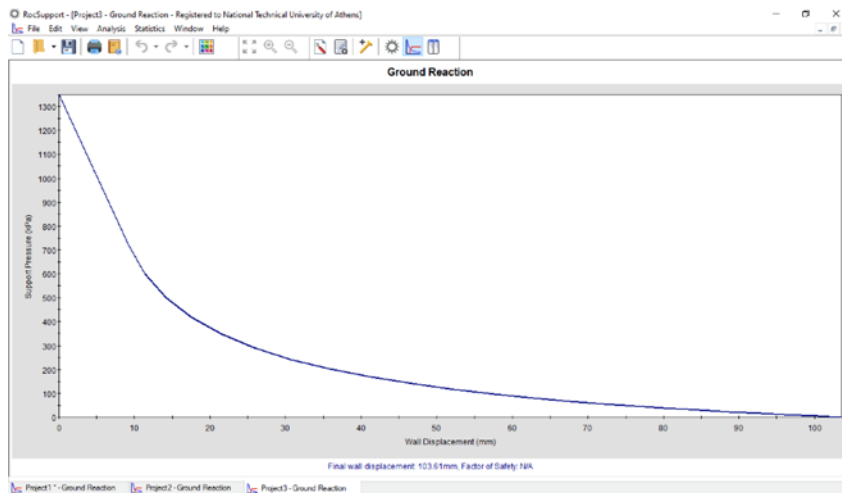
Το LDP είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την προσδιορισμό του μεγέθους της μετατόπισης των τοιχωμάτων της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο σήραγγας. Αρκετές από τις χρήσιμες συνθέσεις για τον υπολογισμό του LDP έχουν προκύψει στη βάση δεδομένων παρακολούθησης επί τόπου ή από τρισδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις. Σημειώνεται, επίσης, ότι οι εξισώσεις που παρουσιάζονται βασίζονται στις διαστάσεις της σήραγγας και στην διαφορετική ποιότητα της βραχομάζας και επομένως προκύπτει ένα μοναδικό LDP. Η μη χρήση του κατάλληλου Longitudinal Displacement Profile μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα για την κατάλληλη εγκατάσταση της υποστήριξης και στην πορεία σε αστοχία της προσωρινής υποστήριξης.

7.3.4.1 Ανάλυση με το Rocsupport

Στην παρούσα προσομοίωση ο βαθμός αποτόνωσης υπολογίζεται με την χρήση του λογισμικού Rocsupport (εικόνα 7.6), μετά από την μορφοποίηση της καμπύλης σύγκλισης- αποτόνωσης με την μέθοδο «Duncan – Fama» (1993)¹⁵.

¹⁴ Η σύγκλιση της βραχομάζας πριν από την εγκατάσταση της υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχομάζας και στην μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης.

¹⁵ Η μέθοδος Duncan – Fama (1993), βασίζεται στη συμπεριφορά του εδάφους, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (M-C).



Εικόνα 7.6 Αρχική σελίδα του Rocsupport

Για την επακόλουθη ανάλυση του λογισμικού χρειάζονται οι εξής παράμετροι (εικόνα 7.7) :

- 1) ακτίνα σήραγγας (R)
- 2) γεωστατικές τάσεις (p_0)
- 3) μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_m)
- 4) μηχανικές παράμετροι εδάφους (c, φ)
- 5) μηχανικές βραχομάζας (m_b, a, s)

Εικόνα 7.5 Παράμετροι Rocsupport

Εν συνεχεία σχηματίζεται η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης και εξάγεται σε υπολογιστικό φύλλο “Excel”. Από εκεί προσδιορίζεται η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης, η σύγκλιση και ο βαθμός αποτόνωσης (λ).

Επίσης επιτρέπεται η προσομοίωση της προσωρινής υποστήριξης, έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι τελικές συγκλίσεις με την επίδραση των μέτρων υποστήριξης.

Όσον αφορά την εισαγωγή των μέτρων υποστήριξης στο Rocsupport ακολουθείται παρόμοιος τρόπος με την εισαγωγή των μέτρων υποστήριξης στο πρόγραμμα «RS2». Εν συντομία, με την απαιτούμενη υποστήριξη που εισήχθη στο πρόγραμμα έχουμε τα εξής :

- Για RMR = 50

- 1) Αγκύρια (rockbolts)

Διάμετρος: 25 mm

Μέτρο ελαστικότητας 200 GPa

Φορτίο θραύσης σε εφελκυσμό 0.27 MN

Βήμα προχώρησης 1.5 m

Μήκος αγκυρίων 4m

- 2) Πλαίσια (steelsets)

Κανένα.

- 3) Σκυρόδεμα (stocrete)

Πάχος: 35 mm

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή : 30 MPa

Μέτρο ελαστικότητας : 20000 MPa

Poisson ratio : 0.2

- Για RMR = 30

- 1) Αγκύρια (rockbolts)

Διάμετρος: 25 mm

Μέτρο ελαστικότητας 200 GPa

Φορτίο θραύσης σε εφελκυσμό 0.27 MN

Βήμα προχώρησης 1 m

Μήκος αγκυρίων 4,5 m

- 2) Πλαίσια (steelsets)

Σχήμα : I-beam

Τύπος : HE Europe

Περιγραφή : HE 140 B

Βήμα προχώρησης : 1,5 m

- 3) Σκυρόδεμα (stocrete)

Πάχος: 100 mm

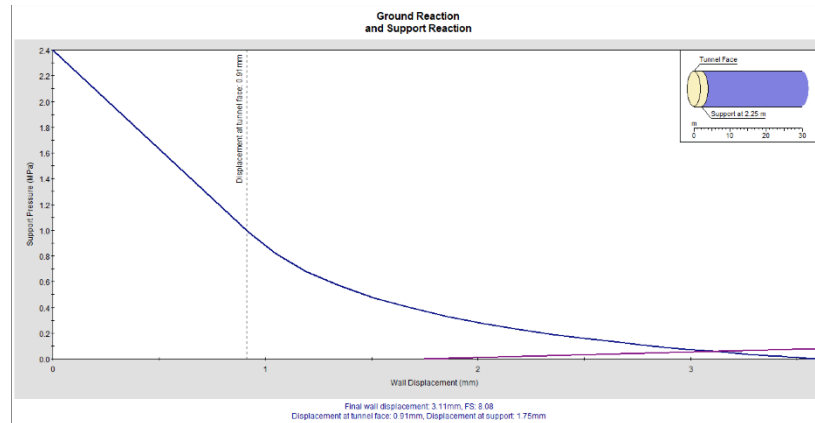
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή : 30 MPa

Μέτρο ελαστικότητας : 20000 MPa

Poisson ratio : 0.2

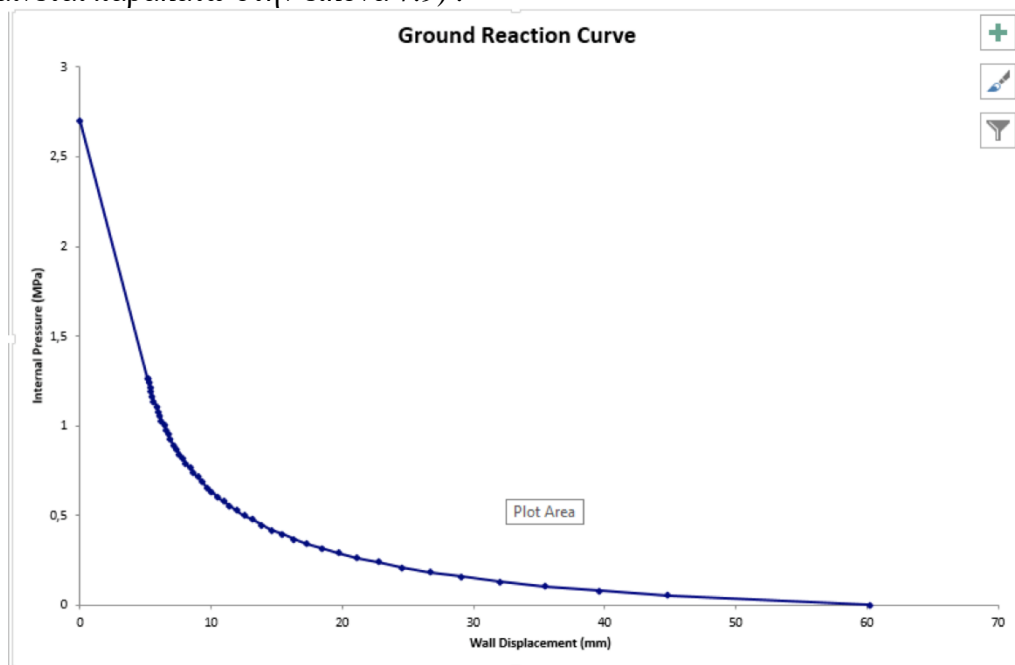
Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η υποστήριξη ξεκινάει στα 2.25 μέτρα από το μέτωπο στην 1^η περίπτωση και 1,25 μέτρα στην 2^η. Εκτενέστερη αναφορά, για τα μέτρα υποστήριξης, θα γίνει παρακάτω στην ενότητα 7.3.6.

Αφού τρέξει το πρόγραμμα και αναλύσει τα δεδομένα, στην συνέχεια παρουσιάζει την καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, μαζί με την αντίδραση της υποστήριξης :



Εικόνα 7.6 Αποτελέσματα του Rocsupport

Το Rocsupport, επίσης, μπορεί να εξάγει υπολογιστικό φύλλο στο “Excel”, το οποίο περιέχει, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, την καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, (φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 7.9) :



Εικόνα 7.7 Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης

Για τον υπολογισμό της αποτόνωσης (λ) ακολουθείται ο εξής τύπος:

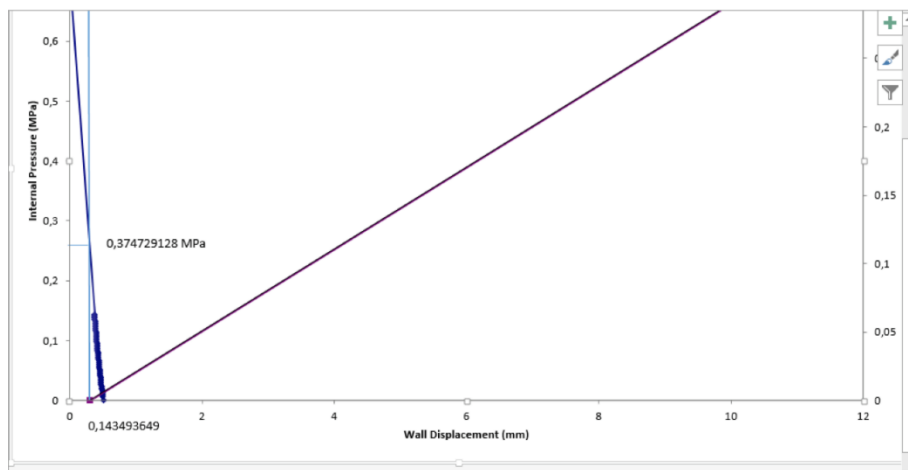
$$\lambda = 1 - P_i/P_0 \quad (\text{σχέση 3.1})$$

Όπου το (P_0) είναι η τάση του φυσικού εντατικού πεδίου και το (P_i) είναι η εσωτερική πίεση (Internal Pressure).

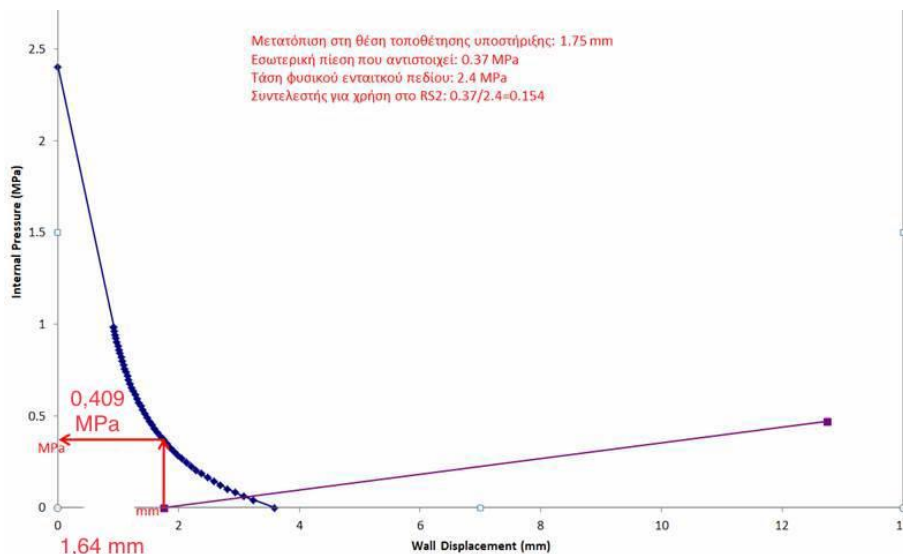
Ο υπολογισμός της αποτόνωσης και της εσωτερικής πίεσης που πρέπει να ασκηθεί στο εσωτερικό της διατομής σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται για βραχομάζα με RMR = 50, για τα βάθη 30, 100, 250 και 500 μέτρα και στην συνέχεια για βραχομάζα με RMR = 30 και τα αντίστοιχα βάθη (30, 100, 250 και 500 μέτρα).

Επίσης όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες 7.11, 7.12, 7.13 και 7.14 τα αρχικά στοιχεία που υπολογίστηκαν μέσω του Rocsupport είναι η p_0 και η εσωτερική πίεση (p_i) (internal pressure) και στην πορεία υπολογίστηκε η αποτόνωση (λ) μέσω του προαναφερθέντος τύπου.

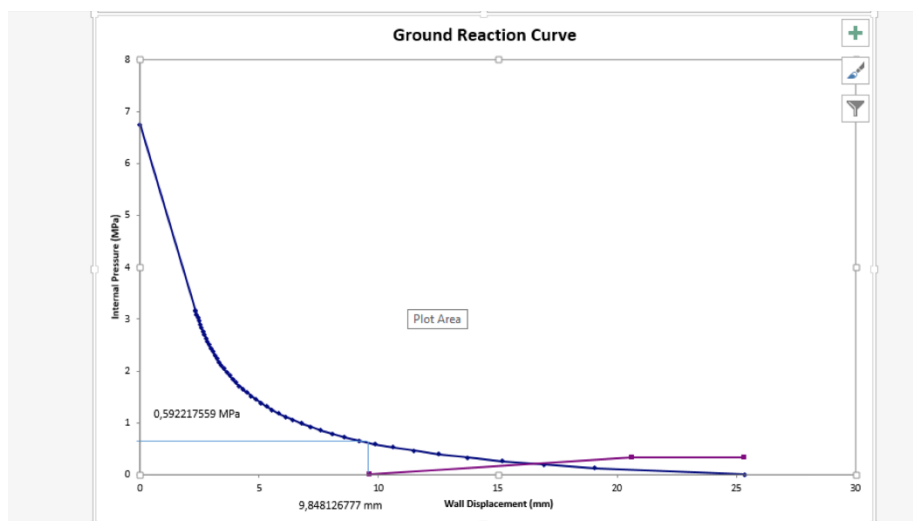
Η ζητούμενη τιμή της αποτόνωσης, βρίσκεται ακριβώς στην έναρξη της εγκατάστασης της υποστήριξης (φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 7.13, 7.14 και στις εικόνες 7.15 και 7.16 στις μαρκαρισμένες περιοχές).



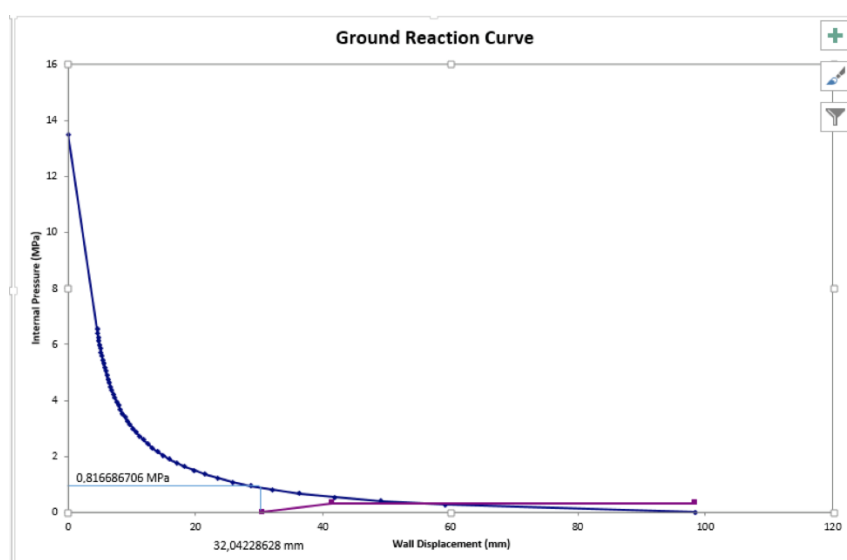
Εικόνα 7.8 Εύρεση αποτόνωσης για την αβαθή σήραγγα (RMR 50)



Εικόνα 7.9 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 100 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 7.10 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 250 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 7.11 Εύρεση αποτόνωσης για την σήραγγα των 500 μέτρων (RMR 50)

Συνεπώς καταλήγουμε στις εξής τιμές αποτόνωσης (λ) για κάθε περίπτωση σήραγγας:

Πίνακας 7 Τιμές Αποτόνωσης για RMR 50

	Αβαθής σήραγγα 30 m	Σήραγγα 100 μέτρων	Σήραγγα 250 μέτρων	Σήραγγα 500 μέτρων
Τάση πεδίου (MPa)	0.81	2.7	6.75	13.5
Εσωτερική πίεση κατά την τοποθέτηση της υποστήριξης (MPa)	0.37	0.41	0.59	0.82

ρ_i/ρ_0	0.46	0.15	0.09	0.06
Βαθμός αποτόνωσης λ	0.54	0.85	0.91	0.94

Αντίστοιχα γίνεται και η εύρεση του συντελεστή αποτόνωσης (λ) και για τις σήραγγες σε βραχομάζα με RMR = 30. Υπολογίζονται αρχικά όλες οι αποτονώσεις και επιλέγονται τα (λ) που υπάρχουν την στιγμή της έναρξης της εγκατάστασης της υποστήριξης.

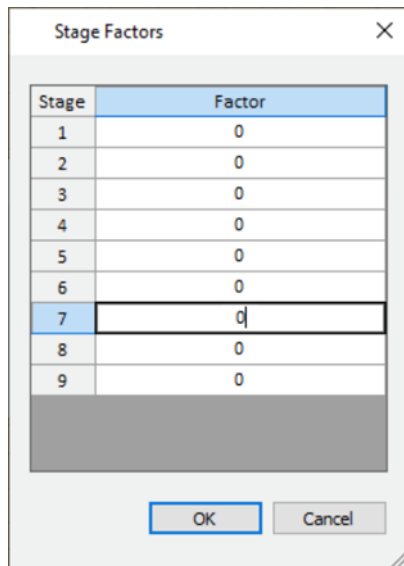
Στον πίνακα 37 αναγράφονται όλες οι επιζητούμενες αποτονώσεις (λ) για τις σήραγγες στα εκάστοτε βάθη (30, 100, 250 και 500 μέτρα).

Πίνακας 8 Τιμές Αποτόνωσης για RMR 30

	Αβαθής σήραγγα 30 m	Σήραγγα 100 μέτρων	Σήραγγα 250 μέτρων	Σήραγγα 500 μέτρων
Τάση πεδίου (MPa)	0.81	2.7	6.75	13.5
Εσωτερική πίεση κατά την τοποθέτηση της υποστήριξης (MPa)	0.24	0.44	0.9	1.9
ρ_i/ρ_0	0.30	0.16	0.13	0.14
Βαθμός αποτόνωσης λ	0.70	0.84	0.87	0.86

7.3.4.4 Ρύθμιση του βαθμού αποτόνωσης στα στάδια εκσκαφής

Επιλέγοντας από την στήλη «Loading», το επαγόμενο φορτίο «Induced Loads» και στην συνέχεια «Add Induced Stress Load», μας ανοίγει το εξής παράθυρο (εικόνα 7.14), μέσω του οποίου, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα ρύθμισης της αποτόνωσης στα απαιτούμενα στάδια της εκσκαφής.



Εικόνα 7.12 Προσθήκη του παράγοντα «λ» (βαθμός αποτόνωσης)

Συνεπώς ο βαθμός αποτόνωσης ρυθμίζεται ως εξής. Αρχικά είναι μηδενικός σε όλα τα στάδια της πρώτης φάσης της εκσκαφής πέραν του δευτέρου σταδίου, αυτού της αποτόνωσης (deconfinement).

Ο επιπρόσθετος παράγοντας καταπόνησης φορτίου, που εισέρχεται στο δεύτερο στάδιο, με την μορφή:

(1-λ) και για κάθε περίπτωση σήραγγας υπολογίζεται ως εξής:

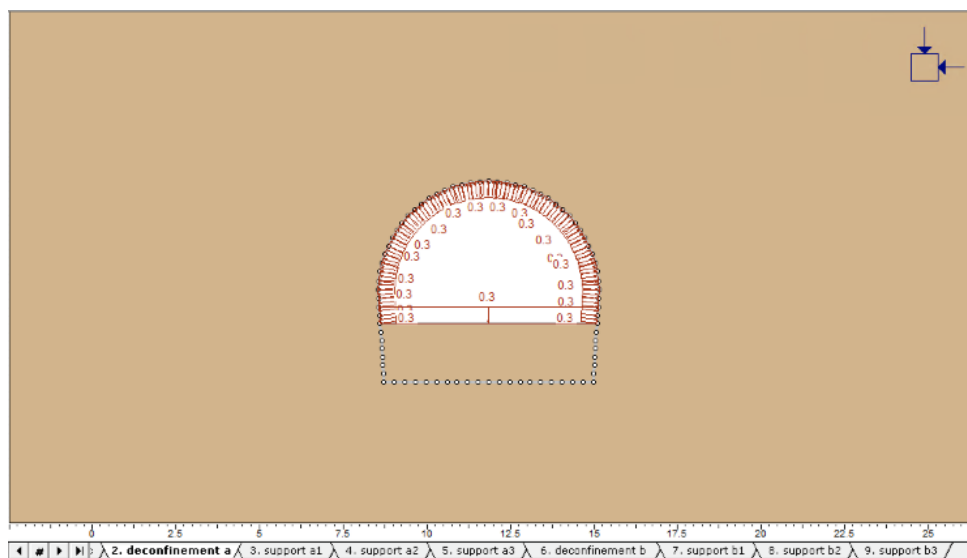
7.3.4.4.1 Induced stress load (RMR 50)

- 1) αβαθής σήραγγα : $\lambda=0,54$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,46$
- 2) Σήραγγα 100 μέτρων : $\lambda= 0,85$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,15$
- 3) Σήραγγα 250 μέτρων : $\lambda= 0,91$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,09$
- 4) Σήραγγα 500 μέτρων : $\lambda= 0,94$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,06$

7.3.4.4.2 Induced stress load (RMR 30)

- 1) αβαθής σήραγγα : $\lambda=0,47$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,53$
- 2) Σήραγγα 100 μέτρων : $\lambda= 0,55$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,45$
- 3) Σήραγγα 250 μέτρων : $\lambda= 0,76$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,24$
- 4) Σήραγγα 500 μέτρων : $\lambda= 0,84$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,16$

Στην συνέχεια μαρκάρεται εσωτερικά όλο το άνοιγμα της πρώτης φάσης της εκσκαφής, όπως ενδεικτικά απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα 7.26.



Εικόνα 7.13 Loading

Αντίστοιχη είναι η διαδικασία, που ακολουθείται και για την δεύτερη φάση της εκσκαφής. Με τον παράγοντα καταπόνησης φορτίου να λαμβάνει τις ίδιες τιμές για τα στάδια 4 (deconfinement b) της κάθε περίπτωσης σήραγγας.

7.3.5 Διακριτοποίηση και δημιουργία πεπερασμένων

Η διακριτοποίηση και η δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης του πλέγματος (mesh setup).

Και γίνονται οι εξής επιλογές:

- για τους τύπους πλέγματος (mesh type)¹⁶, η ανάπτυξη να γίνεται βαθμιδωτά (graded),
- για τους τύπους πεπερασμένων στοιχείων (element type)¹⁷ να είναι τριγωνικοί τρικωμβικοί (3 noded triangles).

¹⁶ Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι πλέγματος:

α) graded

β) uniform

γ) radial, συνήθίζεται να χρησιμοποιείται η βαθμιδωτή ανάπτυξη, σε ορισμένες, όμως, περιπτώσεις ενδείκνυται το ομοιόμορφο πλέγμα και σε ειδικές καταστάσεις το ακτινωτό.

¹⁷ Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι πεπερασμένων στοιχείων:

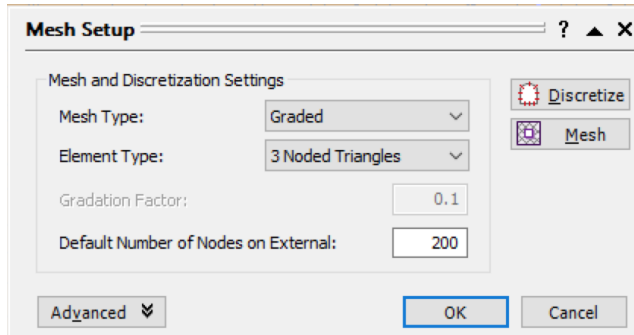
α) 3 noded triangle

β) 6 noded triangle

γ) 4 noded quadrilateral

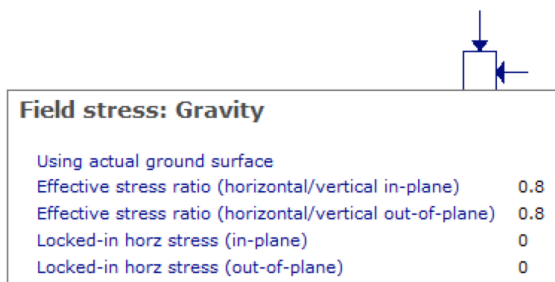
δ) 8 noded quadrilateral.

Επίσης ακολουθεί ο παράγοντας διαβάθμισης (gradation factor), ο οποίος έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να αυξάνεται κατά 10% καθώς απομακρύνετε από το άνοιγμα, δηλαδή στην τιμή 0.1 και τέλος καθορίζεται ο αριθμός των κόμβων εξωτερικά της εκσκαφής (default number of nodes on external) σε 200 στοιχεία (εμπειρική προσέγγιση). Παρουσιάζεται στην διπλανή εικόνα 7.27.



Εικόνα 7.14 Ρύθμιση του πλέγματος

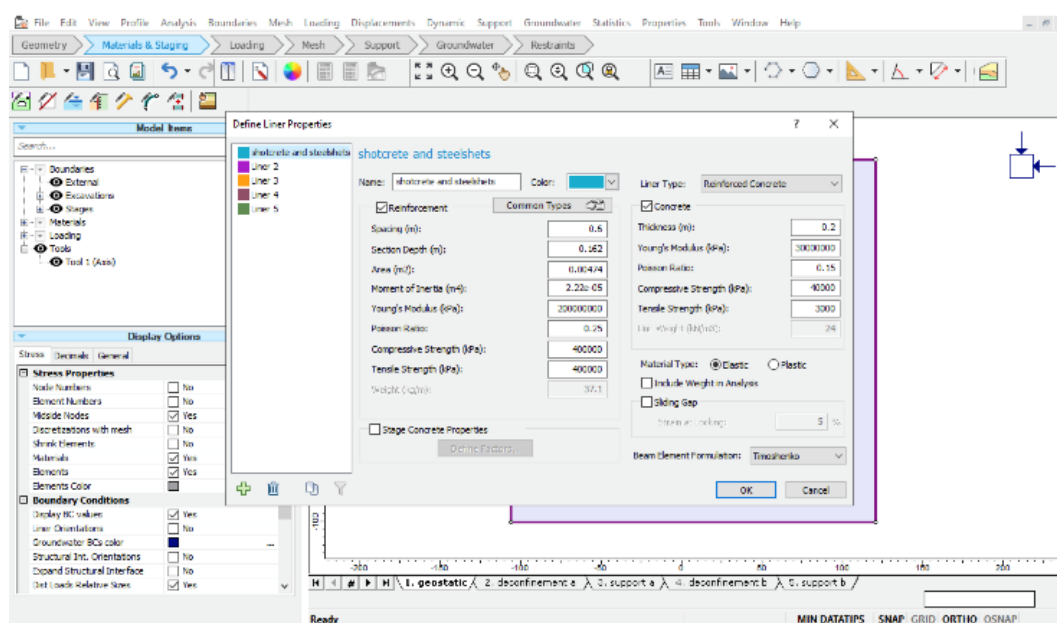
Τέλος ρυθμίζεται η καταπόνηση του πεδίου φόρτωσης (loading field stress) να επιτυγχάνεται βαρυτικά. Και επίσης ρυθμίζουμε τα :



- effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane) 0.8
- effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane) 0.8

Εικόνα 7.15 Φόρτωση του πεδίου

7.3.6 Υποστήριξη σήραγγας



Εικόνα 7.16 Καθορισμός της επένδυσης

Η υποστήριξη της σήραγγας αποτελεί και το βασικότερο μέρος του μοντέλου, καθώς είναι και το εξεταζόμενο στοιχείο της προσομοίωσης. Το πρόγραμμα RS2 διακρίνει τα μέτρα υποστήριξης σε δύο κατηγορίες, στα αγκύρια (bolts) και τα υπόλοιπα μέτρα επένδυσης (liners). Τα μέτρα υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν είναι στην προσομοίωση είναι τα μέτρα που προτείνονται βάση του συστήματος RMR, σύμφωνα με τον Bieniawski.

7.3.6.1 Υποστήριξη για βραχομάζα με RMR 50

Συνεπώς για RMR 50, όπως αναφέρεται και στον πίνακα 3-11, προτείνεται η εξής υποστήριξη :

1) Ηλώσεις – αγκυρώσεις

Αγκυρώσεις μήκους 4m ανά 1.75 m στην οροφή και στα τοιχώματα. Μεταλλικό πλέγμα στην οροφή.

2) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Σκυρόδεμα 50-100mm στην οροφή και 30mm στα τοιχώματα.

3) Χαλύβδινα πλαίσια

Κανένα.

*Προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα κατά 2,25 μέτρα.

Αναφορικά με τον καθορισμό των επενδύσεων (define liner properties) θα γίνει με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος (reinforced concrete) για την οροφή και τις παρειές της α φάσης εκσκαφής, ενώ για την προσωρινή επιφάνεια θα χρησιμοποιηθεί απλό

οπλισμένο σκυρόδεμα και αντίστοιχα θα καθοριστούν οι επενδύσεις και για την δεύτερη φάση της εκσκαφής (εικόνα 7.11).

Ειδικότερα για τα παραπάνω:

1. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) (Α φάσης εκσκαφής), ρυθμίζουμε τα εξής:

Σκυρόδεμα:

Πάχος 0.075 m
Μέτρο ελαστικότητας 20 GPa
Poisson ratio 0.2
Θλιπτική αντοχή (compressive strength) 30 MPa
Εφελκυστική αντοχή (tensile strength) 2 MPa

2. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) (Β φάσης εκσκαφής), ρυθμίζουμε τα εξής:

Σκυρόδεμα:

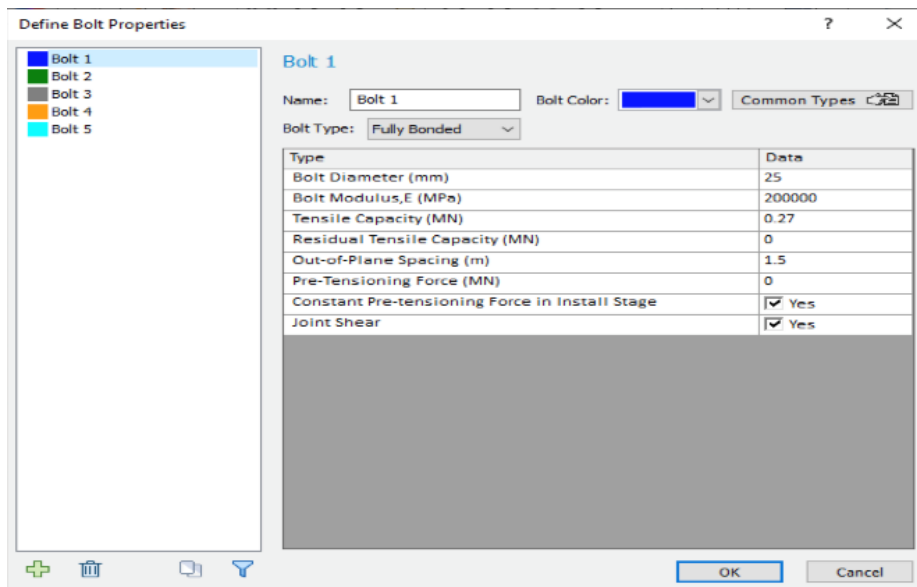
Πάχος 0.075m
Μέτρο ελαστικότητας 20 GPa
Poisson ratio 0.2
Θλιπτική αντοχή (compressive strength) 30 MPa
Εφελκυστική αντοχή (tensile strength) 2 MPa

Ακολουθεί η ρύθμιση των χαρακτηριστικών των αγκυρίων που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη της σήραγγας.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 7.30 θα γίνει χρήση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded)¹⁸, με τα εξής χαρακτηριστικά

- Διάμετρο 25 mm
- Μέτρο ελαστικότητας 200 GPa
- Φορτίο θραύσης σε εφελκυσμό 0.27 MN
- Βήμα προχώρησης 1.5 m
- Μήκος αγκυρίων 4m

¹⁸ Μέσω του προγράμματος RS2, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης έως και 100 διαφορετικών τύπων αγκυρίων. Τα διαθέσιμα μοντέλα είναι τα εξής α) end anchored β) fully bonded γ) plain strand cable δ) swellex/split-sets ε) tieback.



Εικόνα 7.17 Ρύθμιση αγκυρίων

7.3.6.2 Υποστήριξη για βραχομάζα με RMR 30

Για την βραχομάζα με RMR 30, όπως αναφέρεται, επίσης, στον πίνακα 3-11, προτείνεται η εξής υποστήριξη :

1) Ηλώσεις – αγκυρώσεις

Αγκυρώσεις μήκους 4.5 m ανά 1.25 m στην οροφή και στα τοιχώματα. Μεταλλικό πλέγμα στην οροφή.

2) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Σκυρόδεμα 125 mm στην οροφή και 100mm στα τοιχώματα.

3) Χαλύβδινα πλαίσια

Ελαφρά πλαίσια ανά 1,5 μέτρα, όπου είναι απαραίτητο.

*Προχώρηση αρχικά στο ανώτερο τμήμα κατά 1,25 μέτρα.

Η τοποθέτηση των αγκυρίων θα γίνει στα τέταρτο και στο όγδοο στάδιο (στα πρώτα στάδια της υποστήριξης κάθε φάσης εκσκαφής) και εγκαθίστανται περιμετρικά του ανοίγματος εξαιρουμένου των διαπέδων (του προσωρινού και του τελικού).

Ειδικότερα για τα παραπάνω:

3. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) (Α φάσης εκσκαφής), ρυθμίζουμε τα εξής:

Σκυρόδεμα:

Πάχος 0.125 m
Μέτρο ελαστικότητας 20 GPa
Poisson ratio 0.2
Θλιπτική αντοχή (compressive strength) 30 MPa
Εφελκυστική αντοχή (tensile strength) 2 MPa

4. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) (B φάσης εκσκαφής), ρυθμίζουμε τα εξής:

Σκυρόδεμα:

Πάχος 0.125 m
Μέτρο ελαστικότητας 20 GPa
Poisson ratio 0.2
Θλιπτική αντοχή (compressive strength) 30 MPa
Εφελκυστική αντοχή (tensile strength) 2 MPa

Ακολουθεί η ρύθμιση των χαρακτηριστικών των αγκυρίων που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη της σήραγγας.

Αγκύρια:

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 7.13 θα γίνει χρήση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded)¹⁹, με τα εξής χαρακτηριστικά

- Διάμετρο 25 mm
- Μέτρο ελαστικότητας 200 GPa
- Φορτίο θραύσης σε εφελκυσμό 0.27 MN
- Βήμα προχώρησης 1,2 m
- Μήκος αγκυρίων 4,5 m

Χαλύβδινα πλαίσια:

- Σχήμα : I-beam
- Τύπος : HE Europe
- Περιγραφή : HE 140 B
- Βήμα προχώρησης : 1,5 m

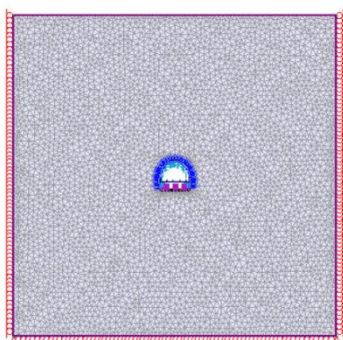
¹⁹ Μέσω του προγράμματος RS2, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης έως και 100 διαφορετικών τύπων αγκυρίων. Τα διαθέσιμα μοντέλα είναι τα εξής α) end anchored β) fully bonded γ) plain strand cable δ) swellex/split-sets ε) tieback.

7.3.7 Υπόγεια ύδατα

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, θεωρήθηκε ότι επικρατούν ξηρές συνθήκες, και για τον λόγο αυτόν δεν υπάρχουν υδροστατικές πιέσεις.

7.3.8 Συνοριακές συνθήκες

Τελευταίο κομμάτι για την ολοκλήρωση του μοντέλου είναι η ρύθμιση των συνοριακών συνθηκών. Πρέπει να οριστούν οι κυλίσεις πλευρικά και στον πυθμένα, ώστε να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το άνω όριο παραμένει ελεύθερο, καθώς είναι η φυσική επιφάνεια του εδάφους.



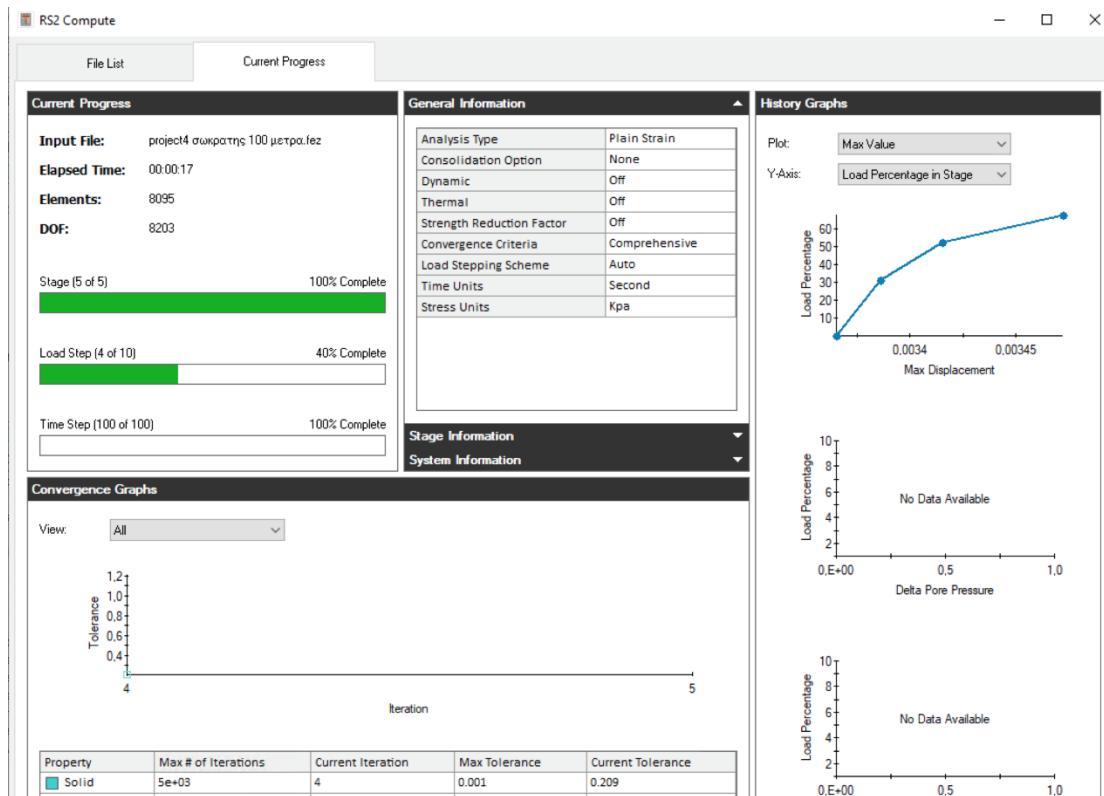
Πλευρικά τοποθετούνται κυλίσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα, ενώ αντίθετα στον πυθμένα κατά τον οριζόντιο. Στις δύο κάτω γωνίες τοποθετούνται αρθρώσεις, για να μην είναι ασταθής (εικόνα 7.31).

Εικόνα 7.18 Περιορισμοί

8. Αποτελέσματα αναλύσεων με το RS2

Μόλις ολοκληρωθεί η ρύθμιση και η διαμόρφωση του μοντέλου στο «RS2», ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού μέσω του προγράμματος (compute) (εικόνα 8.1), το οποίο ‘τρέχει’ την προσομοίωση και αφού ολοκληρωθεί, μετά γίνεται χρήση του ενσωματωμένου «interpret»²⁰, για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων.

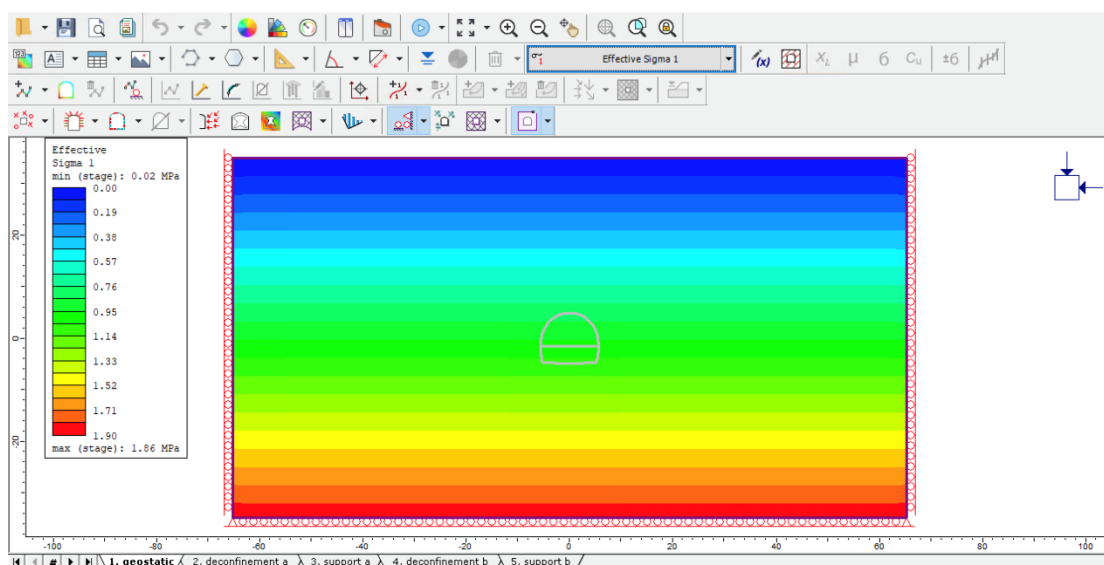
²⁰ Το «Interprete» επί της ουσίας οπτικοποιεί τα αποτελέσματα του υπολογισμού του προγράμματος RS2.



Εικόνα 8.1 Compute

Θα γίνει ξεχωριστά η ανάλυση κάθε σήραγγας, δηλαδή για τα βάθη των 30, 100, 250 και 500 μέτρων για κάθε περίπτωση βραχομάζας (RMR 30 και 50).

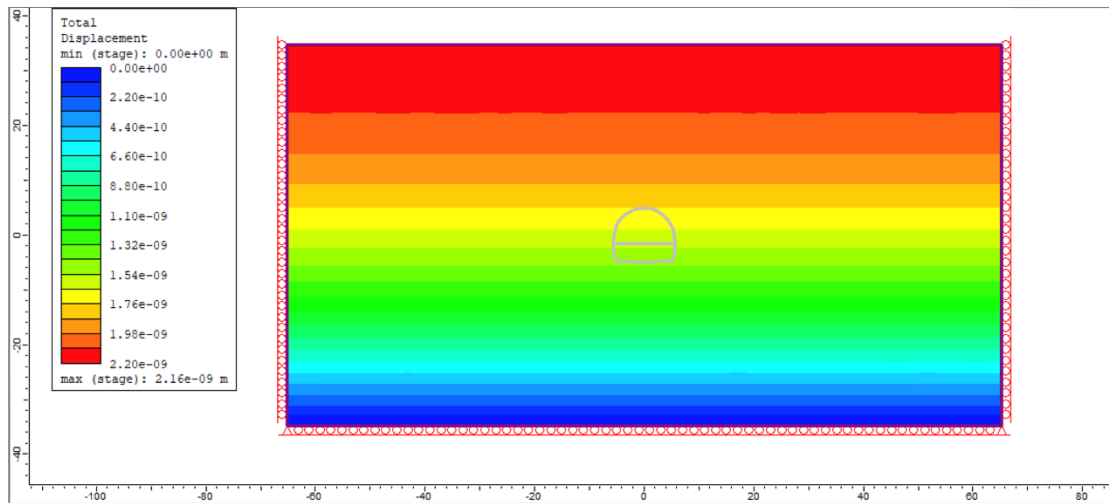
8.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 30 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 8.2 Effective sigma 1 (30m, RMR 50)

Το πρώτο διάγραμμα που εμφανίζεται είναι οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1), όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.2. Καθώς η συγκεκριμένη σήραγγα βρίσκεται σε μικρό, σχετικά, βάθος, συνεπώς ήταν αναμενόμενες και οι σχετικά μικρές γεωστατικές τάσεις.

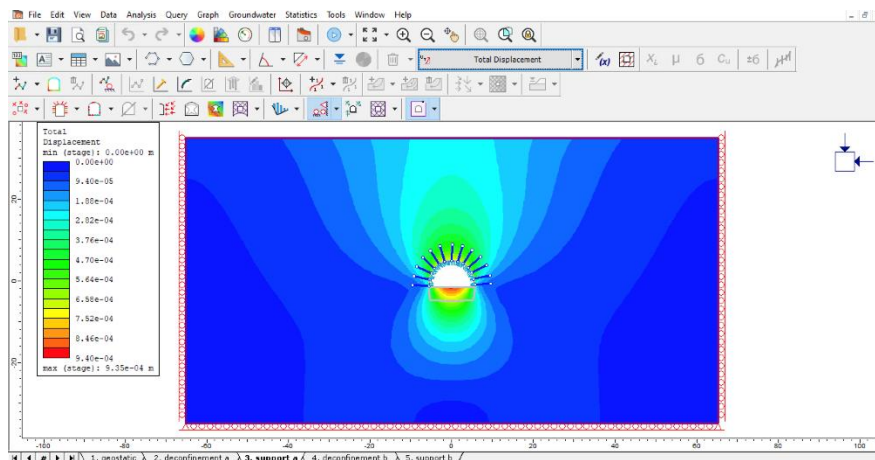
Στην συνέχεια, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



Εικόνα 8.3 Total displacement (geostatic) (30m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

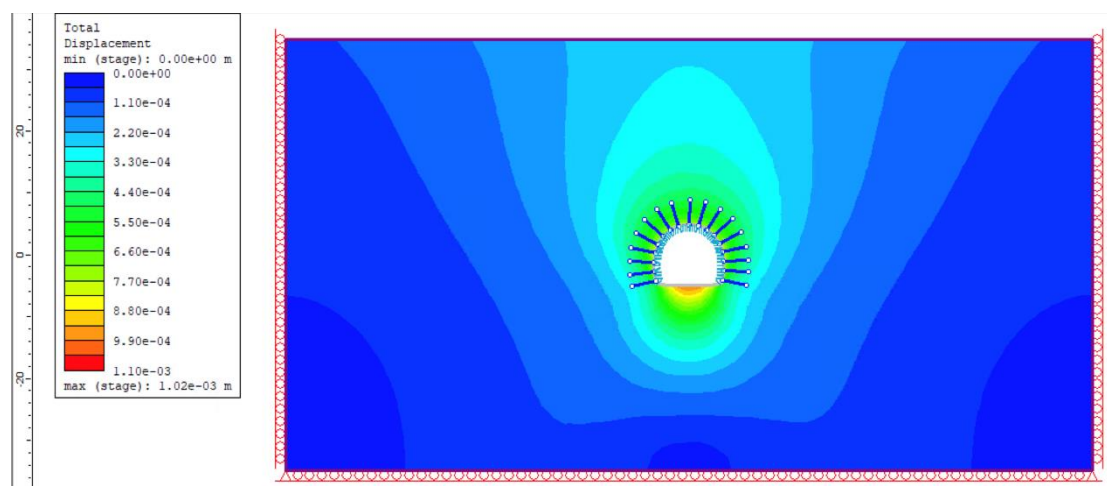
Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.3) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.4 Total displacement (support a) (30m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Διακρίνεται εύκολα (εικόνα 8.4), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις και στον πυθμένα, αλλά και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

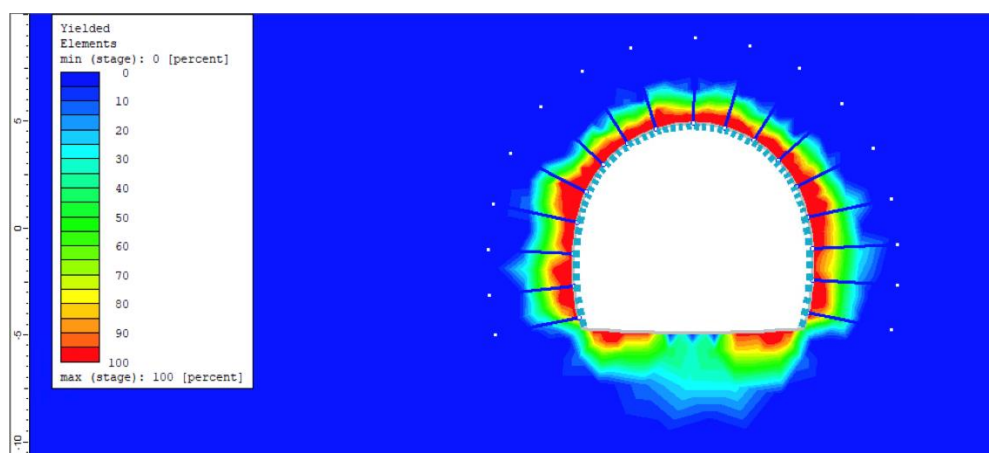


Εικόνα 8.5 Total displacement (support b) (100m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Επίσης, διακρίνεται εύκολα (εικόνα 8.5), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις και στον πυθμένα, αλλά και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

Επίσης είναι απαραίτητο να ελεγχθεί και η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

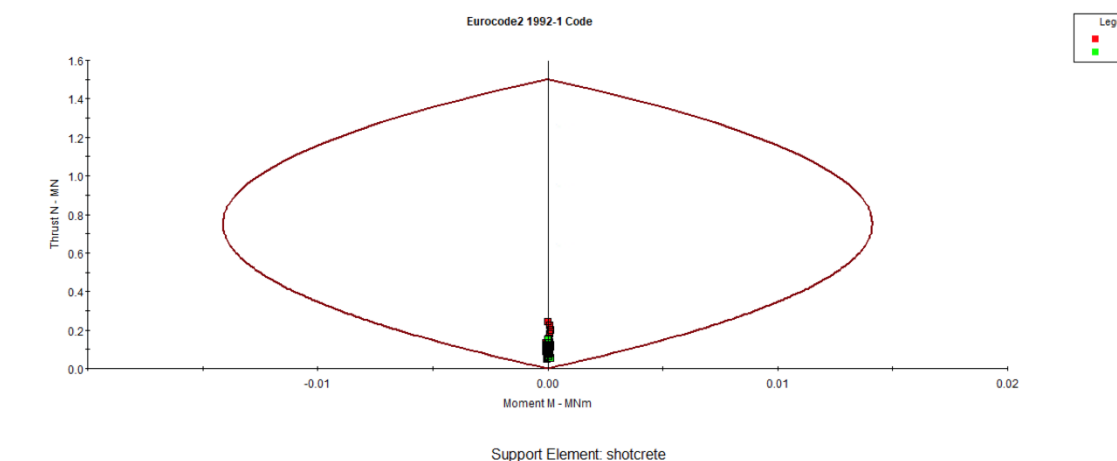


Εικόνα 8.6 Yielded elements (30m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.6 , ενώ δημιουργείται μία μικρή πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής, δεν επηρεάζει καθόλου την ευστάθεια της σήραγγας, καθώς όλα τα αγκύρια, πιάνουν εκτός αυτής.

Τέλος, πρέπει να εξεταστεί το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.

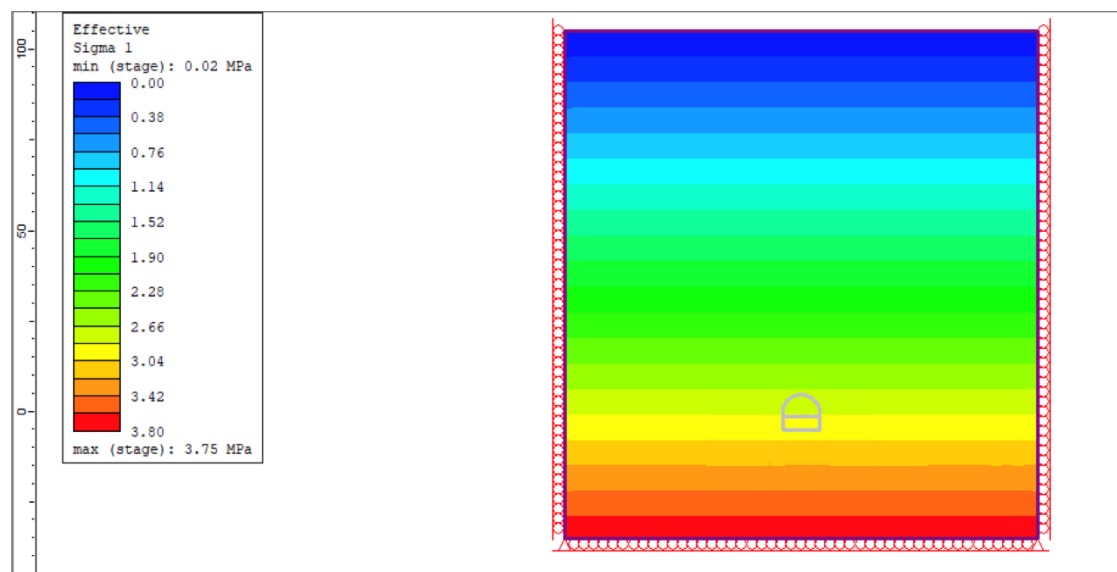


Εικόνα 8.7 Support capacity plots (30m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.7, όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας καμπτικών ροπών – αξονικών δυνάμεων (M-N), το οποίο αλλιώς μεταφράζεται ότι η υποστήριξη είναι αποτελεσματική και δεν αστοχεί.

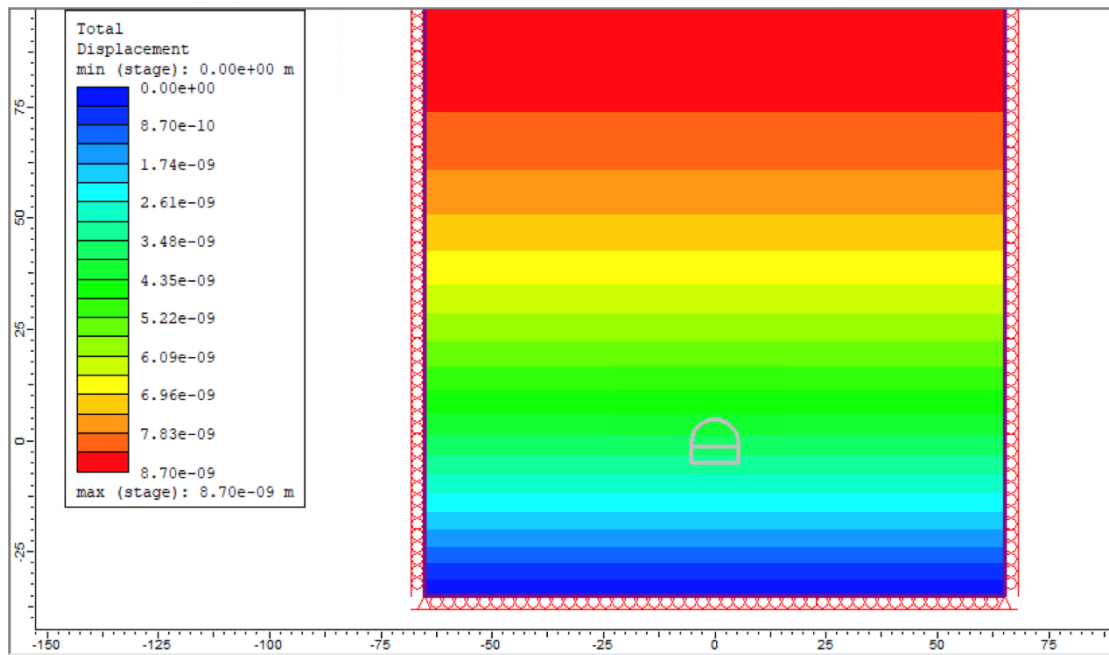
8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 100 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 8.8 Effective sigma 1 (100m, RMR 50)

Οι κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις (σ_1) της βαθιάς σήραγγας (εικόνα 8.8), όπως ήταν αναμενόμενο, είναι αισθητά μεγαλύτερες της σήραγγας των 30 μέτρων (εικόνα 8.2), λόγω του αρκετά μεγαλύτερου βάθους.

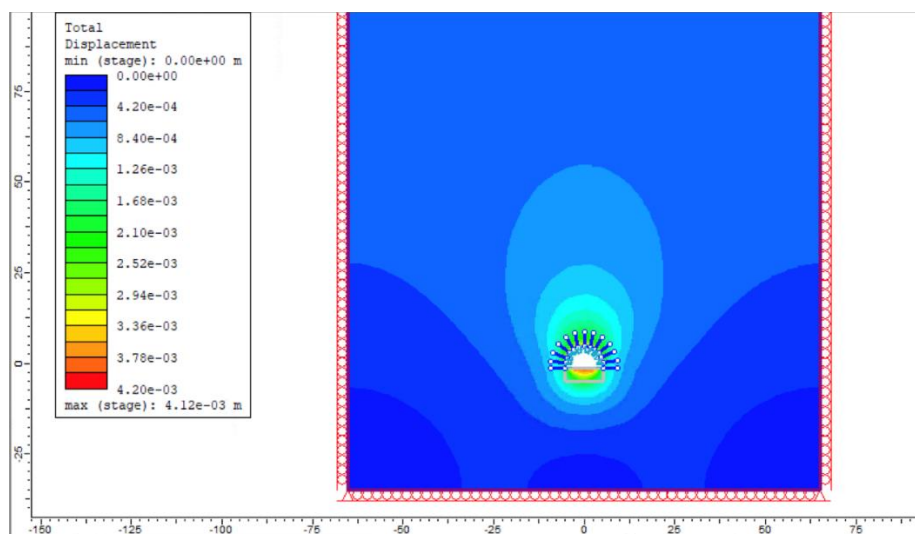
Όπως και προηγουμένως στην περίπτωση της αβαθούς σήραγγας, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία τα στάδια της εκσκαφής και πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



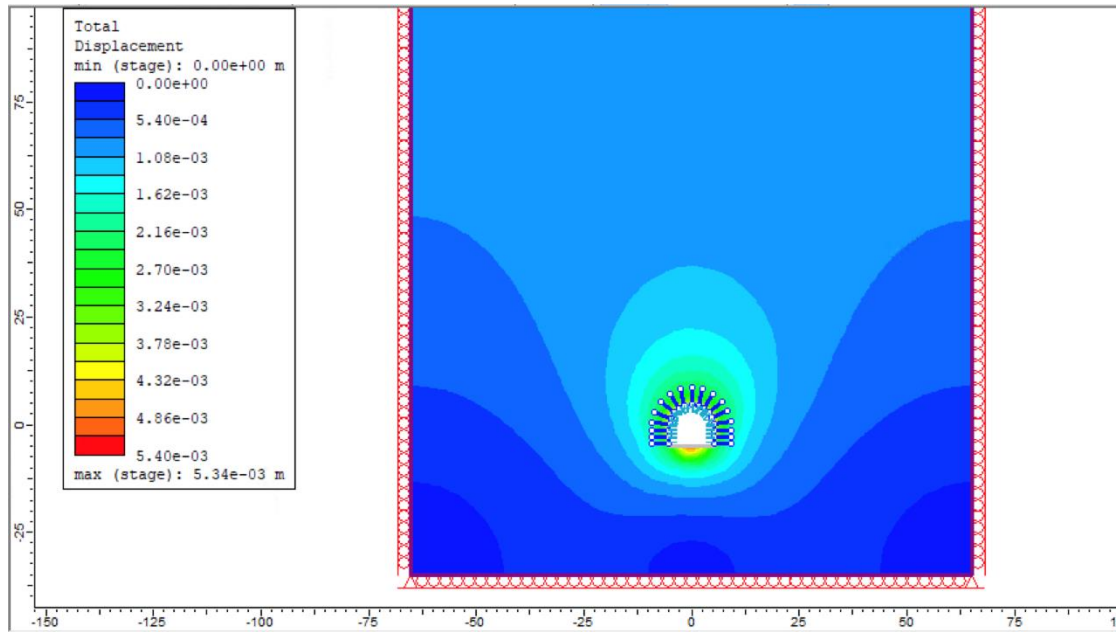
Εικόνα 8.9 Total displacement (geostatic) (100m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.9) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.10 Total displacement (support a) (100m, RMR 50)

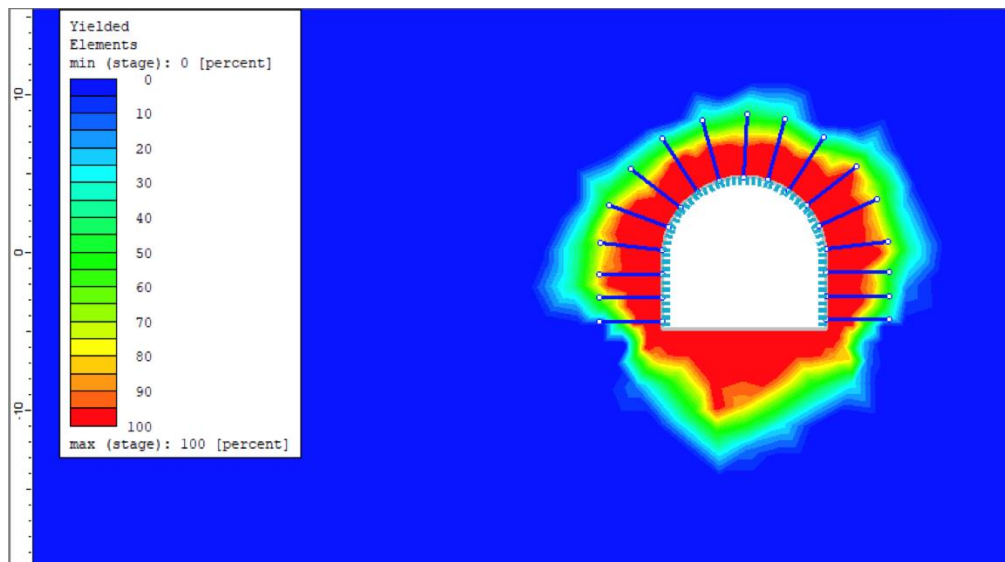


Εικόνα 8.11 Total displacement (support b) (100m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Επίσης όπως και στην περίπτωση της ρηχής σήραγγας, μπορεί εύκολα να διακριθεί (εικόνες 8.10 και 8.11), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις και στον πυθμένα, αλλά και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

Ακολουθεί ο έλεγχος της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

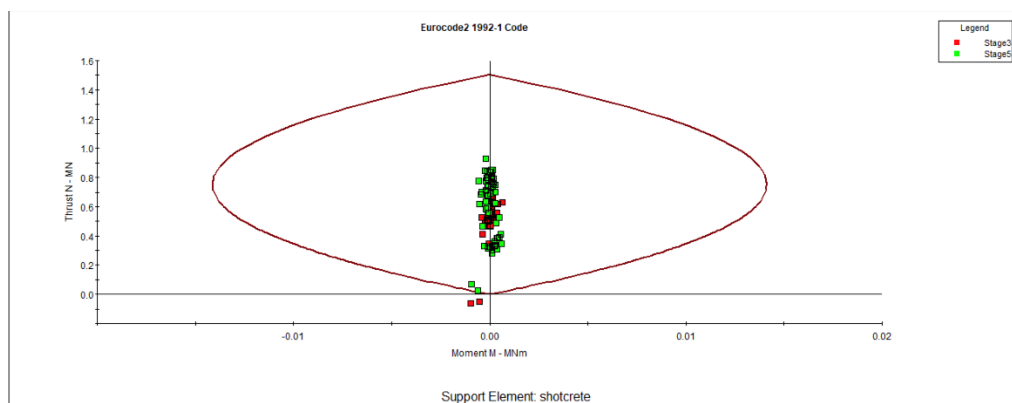


Εικόνα 8.12 Yielded elements (100m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται στην παραπάνω στην εικόνα 8.12, δημιουργείται μία πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής, αρκετά μεγαλύτερη της ρηχής σήραγγας (εικόνα 8.6).

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των αγκυριών πιάνει στην άκρη της ζώνης (περίπου 30-60%).

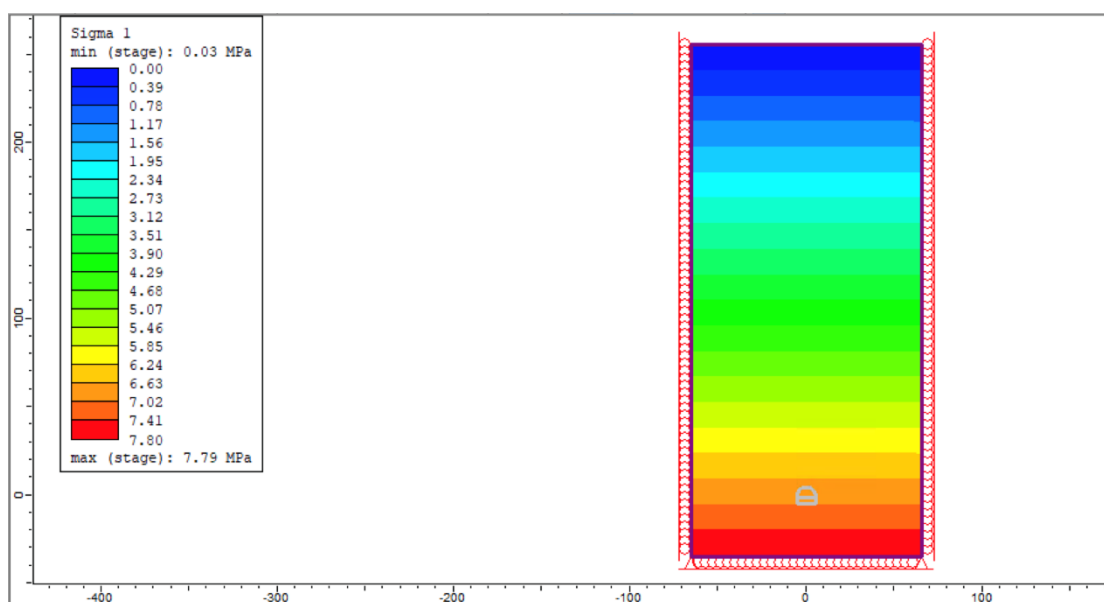


Εικόνα 8.13 Support capacity plots (100m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.13, όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο αλλιώς μεταφράζεται ότι η υποστήριξη δεν αστοχεί.

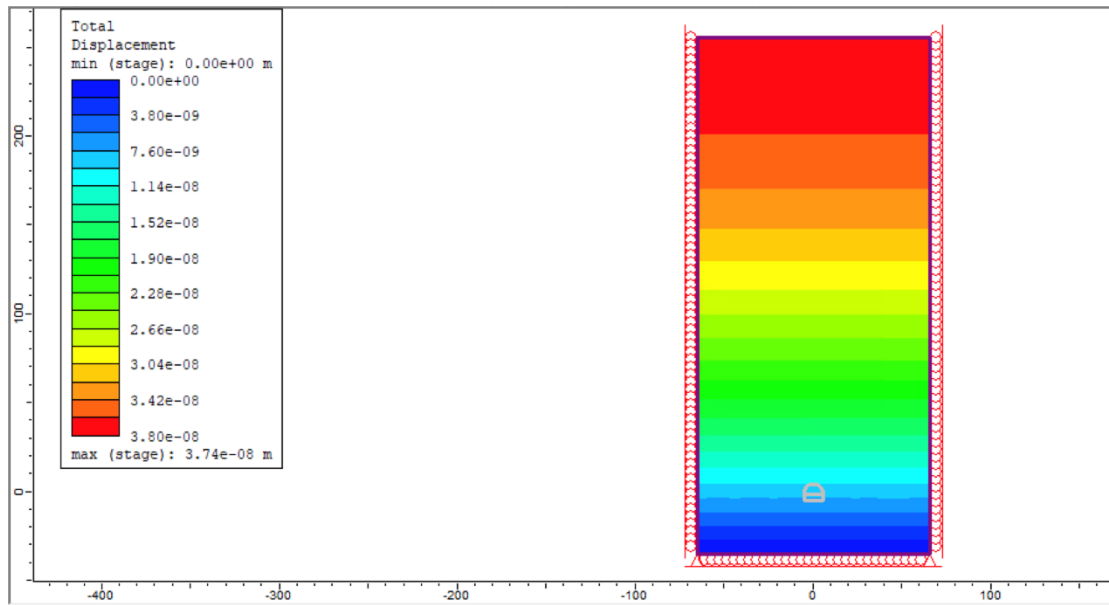
8.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 250 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 8.14 Effective sigma 1 (250m, RMR 50)

Στο πρώτο διάγραμμα εμφανίζονται οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1), όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.14. Παρατηρείται αισθητή αύξηση των γεωστατικών τάσεων, συγκριτικά με τις προηγούμενες σήραγγες, καθώς σε αυτήν την περίπτωση η σήραγγα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος.

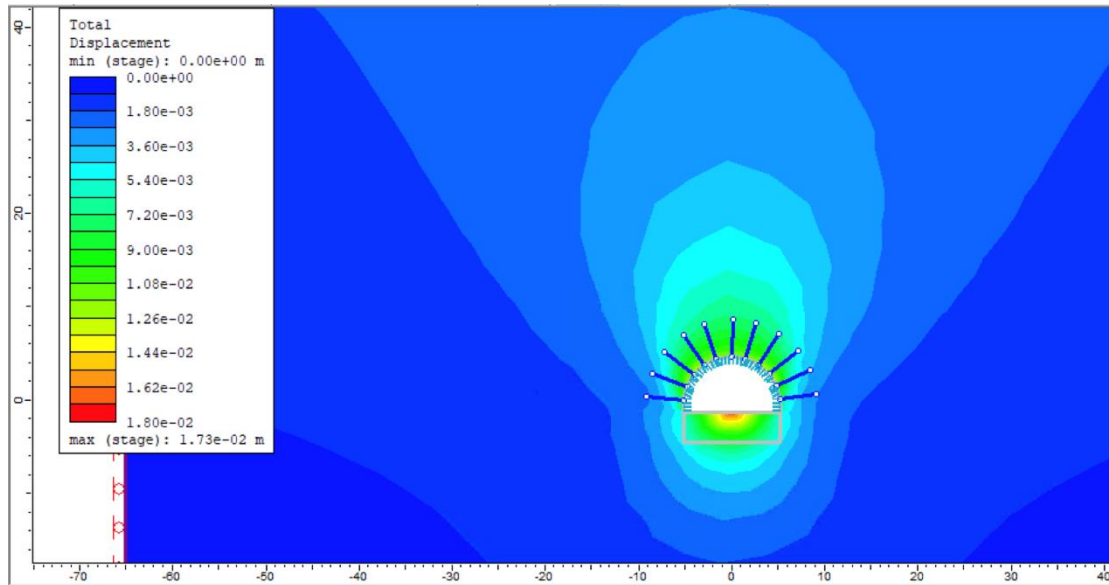
Στην συνέχεια, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



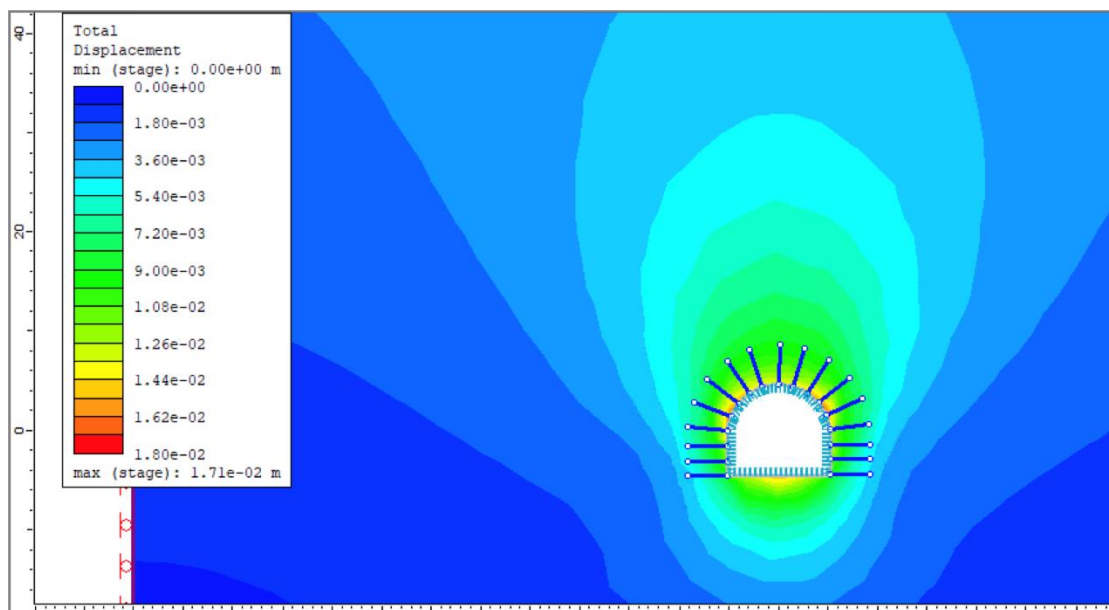
Εικόνα 8.15 Total displacement (geostatic) (250m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως ήταν, και πάλι, αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.15) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.16 Total displacement (support a) (250m, RMR 50)

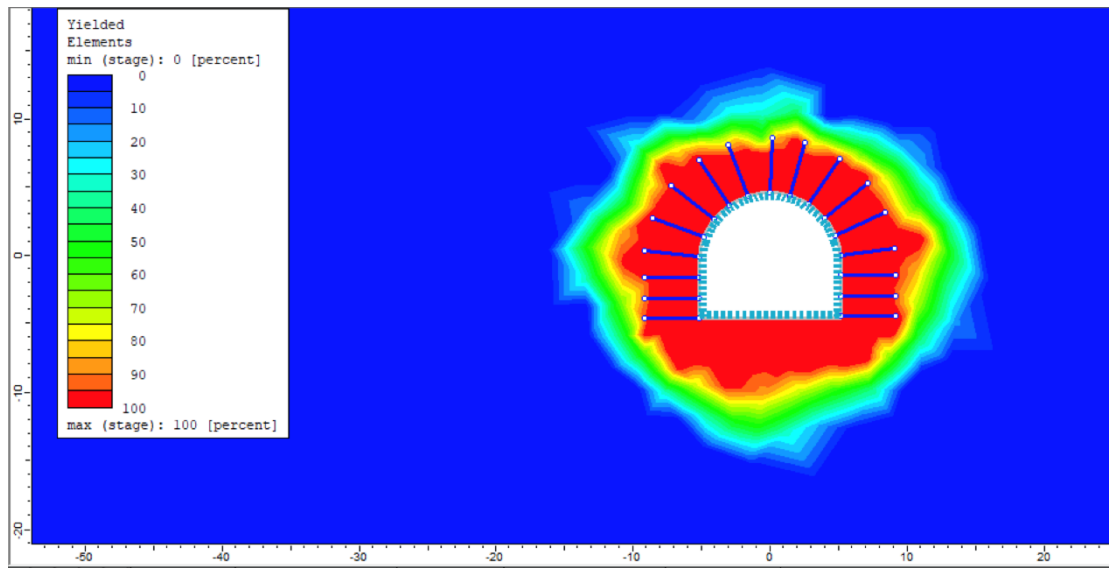


Εικόνα 8.17 Total displacement (support b) (250m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Επίσης, διακρίνεται εύκολα (εικόνες 8.16 και 8.17), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις στον πυθμένα και στην οροφή, οι οποίες και σε αυτήν την περίπτωση, παραμένουν πάρα πολύ μικρές.

Ελέγχεται εν συνεχεία η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

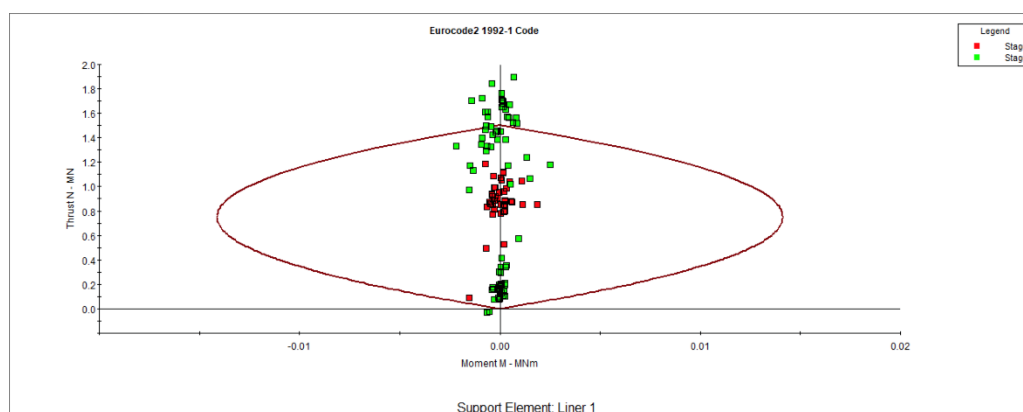


Εικόνα 8.18 Yielded elements (250m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.18, δημιουργείται μία έντονη πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής, και παρατηρούμε ότι όλα τα αγκύρια βρίσκονται εντός της έντονα πλαστικής ζώνης (κόκκινο χρώμα).

Τέλος, πρέπει να εξεταστεί το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.



Εικόνα 8.19 Support capacity plots (250m, RMR 50)

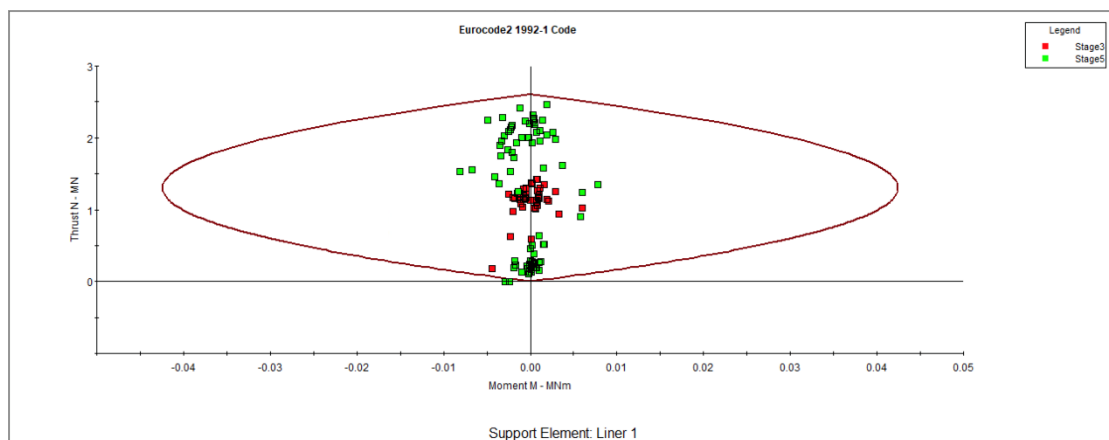
Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.19, παρατηρούμε ότι αρκετά σημεία βρίσκονται εκτός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο συνεπάγεται ότι η υποστήριξη δεν επαρκεί για τη συγκεκριμένη ανάλυση.

8.3.1 Αναζήτηση κατάλληλης υποστήριξης για τη σήραγγα 250 μέτρων (RMR 50)

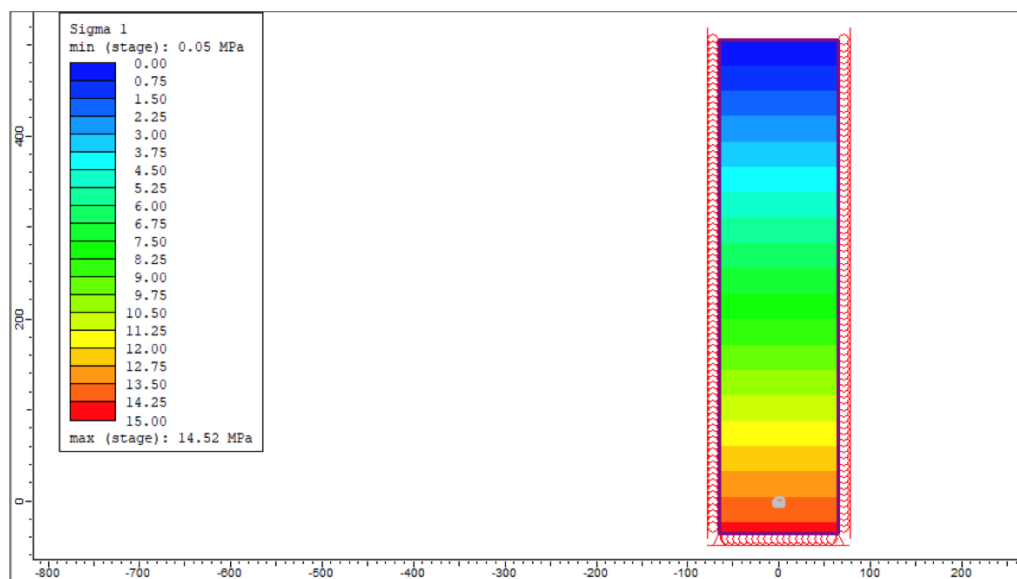
Για την εύρεση της βέλτιστης υποστήριξης της σήραγγας έγιναν δοκιμές στο μοντέλο, αυξάνοντας κάθε φορά το πάχος του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο πάχος σκυροδέματος, που προτείνεται από το σύστημα RMR για την συγκεκριμένη κατηγορία (100 mm) δεν επαρκεί.

Συνεπώς, ύστερα από μερικές δοκιμές, εκτιμήθηκε ως επαρκής η υποστήριξη της σήραγγας των 250 μέτρων, αφού αυξήθηκε το πάχος του σκυροδέματος στα 130mm. Όπως ακριβώς φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 8.20) αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b).



Εικόνα 8.20 Support capacity plots (250m, RMR 50) πάχος σκυροδέματος 130mm

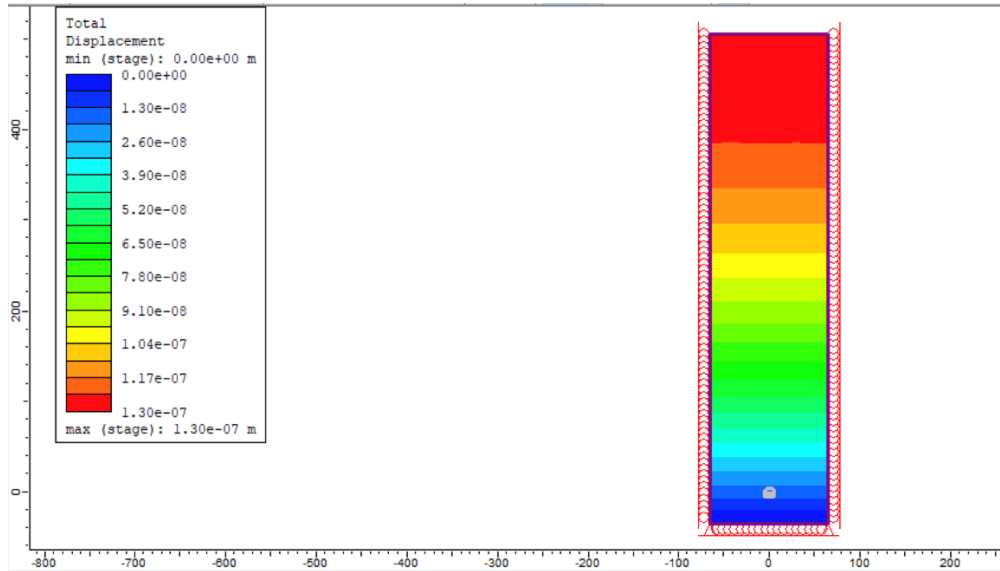
8.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 500 μέτρων (RMR 50)



Εικόνα 8.21 Effective sigma 1 (500m, RMR 50)

Στο πρώτο διάγραμμα που εμφανίζεται (εικόνα 8.21) οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1), παρουσιάζονται ακόμα υψηλότερες από την προηγούμενη σήραγγα των 250 μέτρων, καθώς υπήρξε επιπλέον αύξηση του βάθους της σήραγγας.

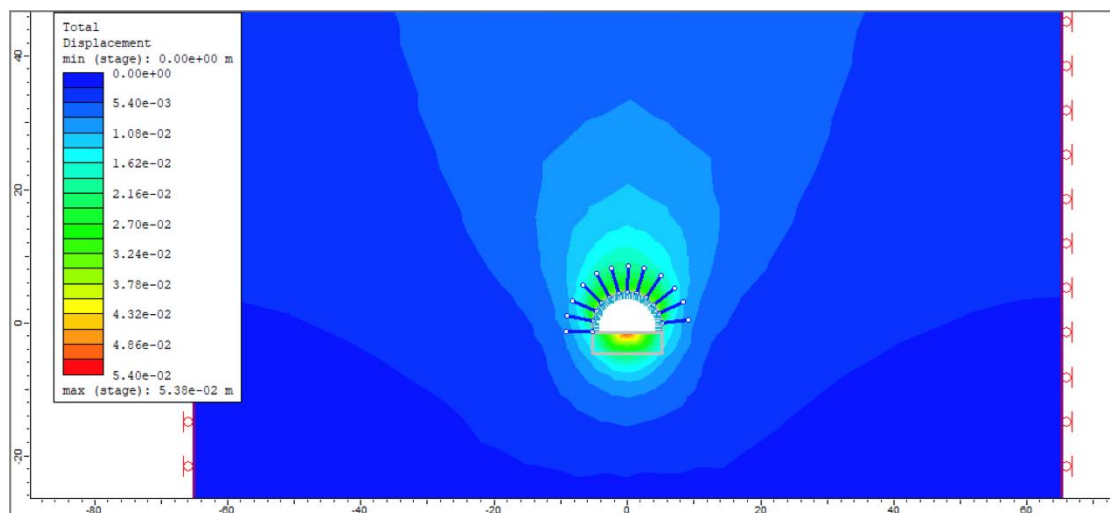
Ελέγχονται, επίσης, οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



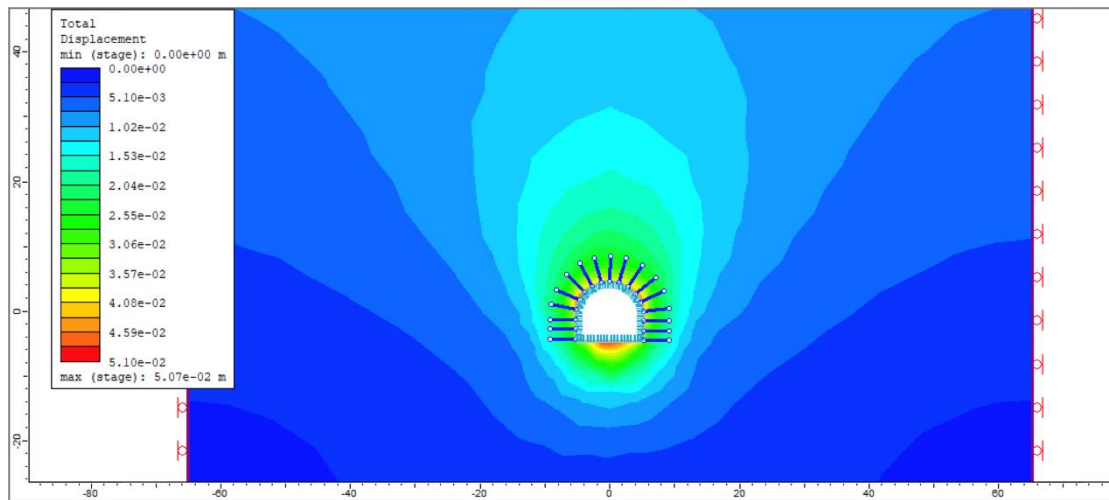
Εικόνα 8.22 Total displacement (geostatic) (500m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.22) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.23 Total displacement (support a) (500m, RMR 50)

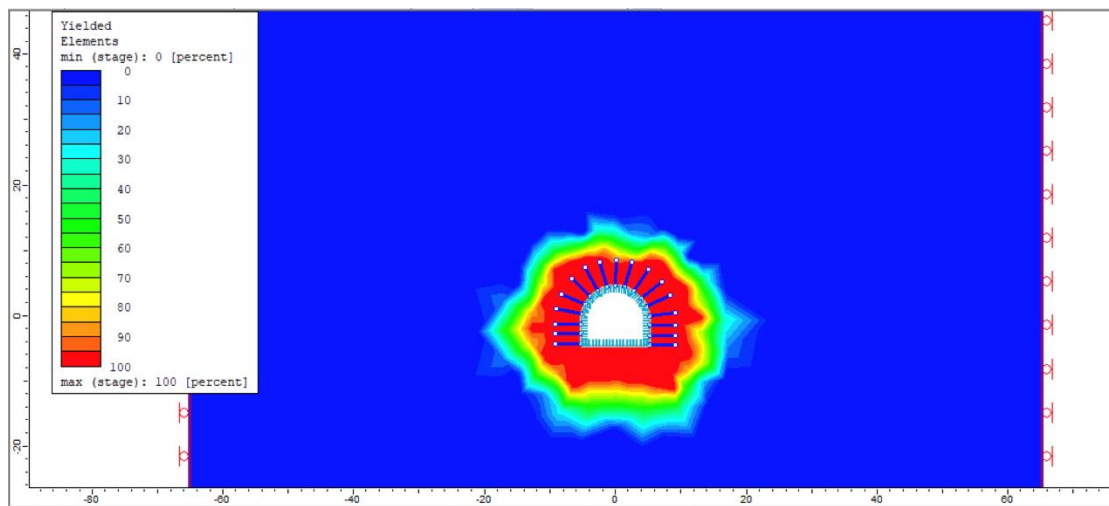


Εικόνα 8.24 Total displacement (support b) (500m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται (εικόνα 8.23 και 8.24), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις στον πυθμένα και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές.

Ελέγχεται και η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

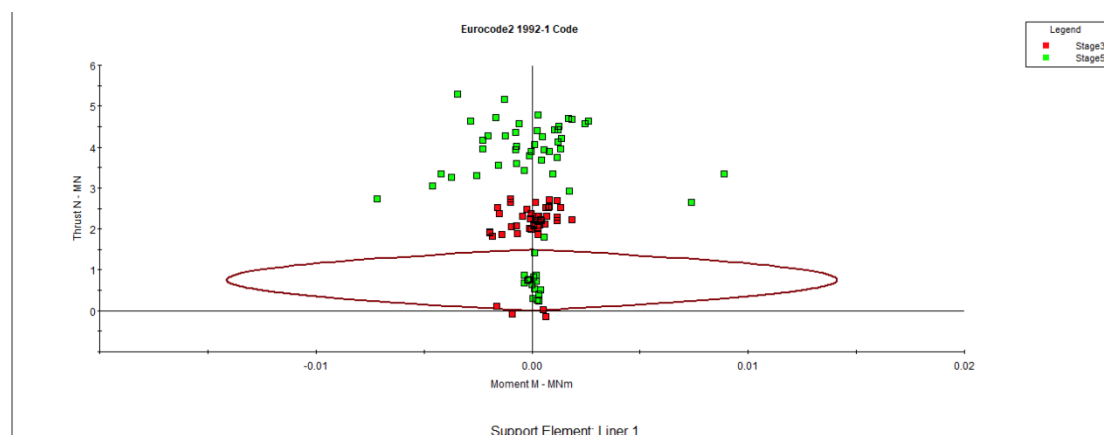


Εικόνα 8.25 Yielded elements (500m, RMR 50)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.25, δημιουργείται μία έντονη πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής, και παρατηρούμε ότι όλα τα αγκύρια βρίσκονται εντός της έντονα πλαστικής ζώνης (κόκκινο χρώμα).

Τέλος, πρέπει να εξεταστεί το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.



Εικόνα 8.26 Support capacity plots (500m, RMR 50)

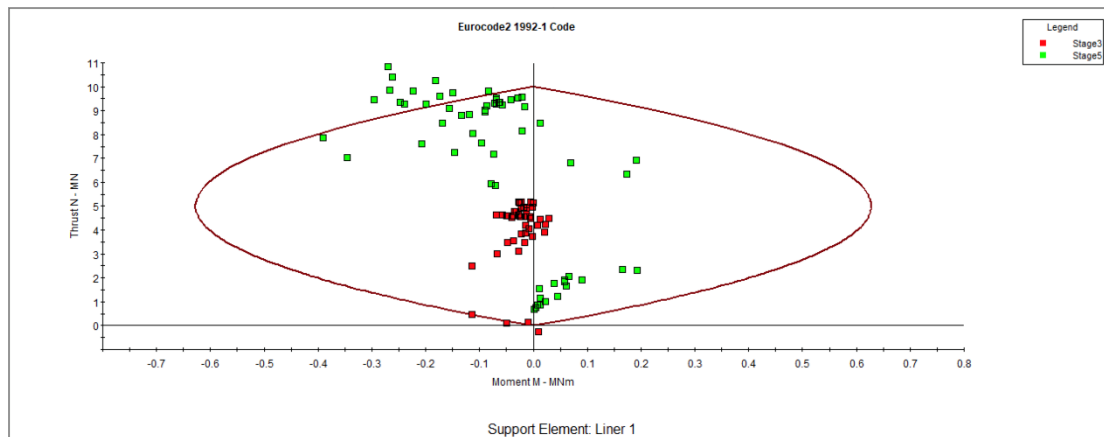
Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.26, παρατηρούμε ότι ακόμα περισσότερα (σχετικά με την προηγούμενη προσομοίωση) σημεία βρίσκονται εκτός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο συνεπάγεται ότι η υποστήριξη αστοχεί.

8.4.1 Αναζήτηση κατάλληλης υποστήριξης για τη σήραγγα 500 μέτρων (RMR 50)

Για την εύρεση της βέλτιστης υποστήριξης της σήραγγας έγιναν δοκιμές στο μοντέλο, αυξάνοντας κάθε φορά το πάχος του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε ότι με το μέγιστο πάχος σκυροδέματος, που προτείνεται από το σύστημα RMR για την συγκεκριμένη κατηγορία (100 mm) η υποστήριξη συνεχίζει να αστοχεί.

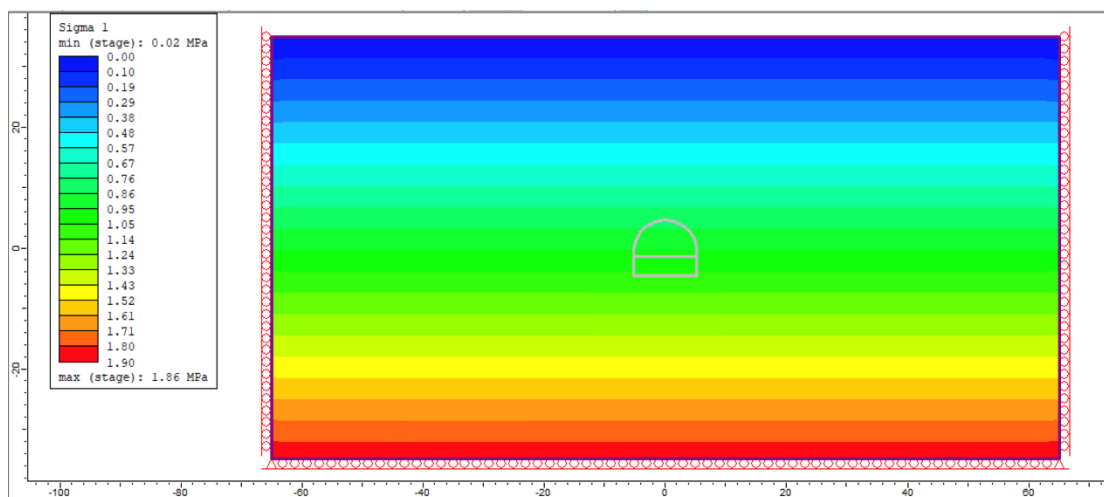
Συνεπώς, ύστερα από τις περαιτέρω δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, και καθώς παρατηρήθηκε το γεγονός ότι η υποστήριξη της σήραγγας των 500 μέτρων, συνεχίζει να αστοχεί, ακόμα και μετά την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος στα 500 mm, (όπως ακριβώς φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα [εικόνα 8.27] της αλληλεπίδρασης της υποστήριξης [support capacity plots], για τα δύο στάδια υποστήριξης [support a και b]) εξήχθει το συμπέρασμα ότι οι παράμετροι αντοχής είναι εξαιρετικά ασθενείς και δεν εξυπηρετεί τον σκοπό της εργασίας η συνέχιση των δοκιμών για εύρεση της επαρκούς υποστήριξης.



Εικόνα 8.27 Support capacity plots (500m, RMR 50) πάχος σκυροδέματος 500mm

Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί σε θεωρητικό πλαίσιο, ότι για την υποστήριξη της σήραγγας, θα έπρεπε να προστεθεί ένα ακόμα στάδιο, κατά το οποίο θα μειωνόταν η έναρξη υποστήριξης από το μέτωπο, επίσης θα έπρεπε να προστεθούν στην υποστήριξη εκτός από πλαίσια (steelsets) και ανάστροφο τόξο και στο προσωρινό δάπεδο αλλά και στο μόνιμο.

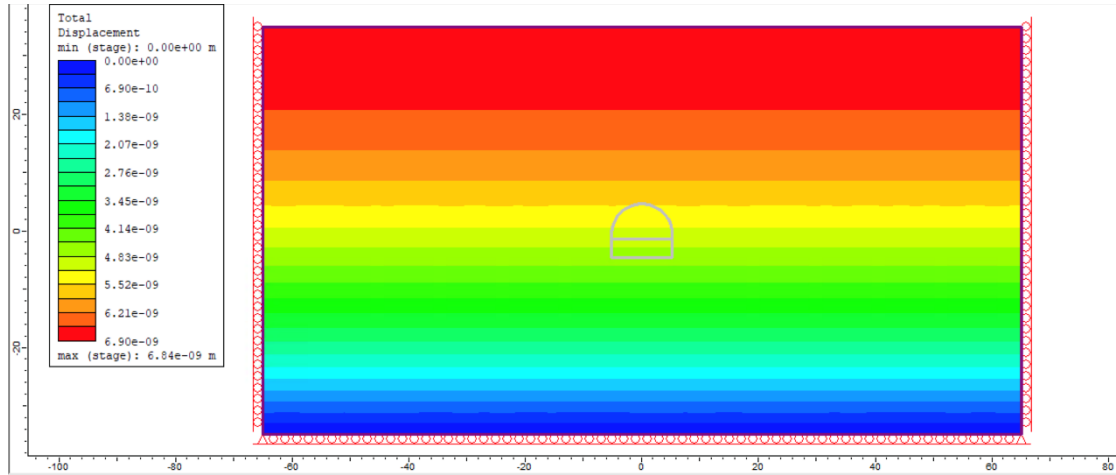
8.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 30 μέτρων (RMR 30)



Εικόνα 8.28 Effective sigma 1 (30m, RMR 30)

Το πρώτο διάγραμμα που εμφανίζεται είναι οι κατακόρυφες τάσεις (sigma 1), όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.28. Καθώς η συγκεκριμένη σήραγγα βρίσκεται σε μικρό, σχετικά, βάθος, συνεπώς ήταν αναμενόμενες και οι σχετικά μικρές γεωστατικές τάσεις.

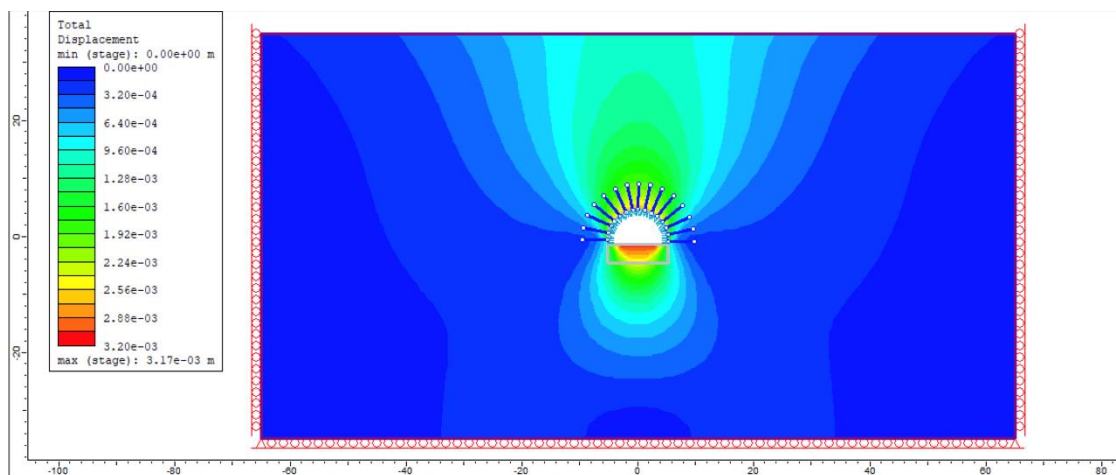
Στην συνέχεια, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



Εικόνα 8.29 Total displacement (geostatic) (30m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

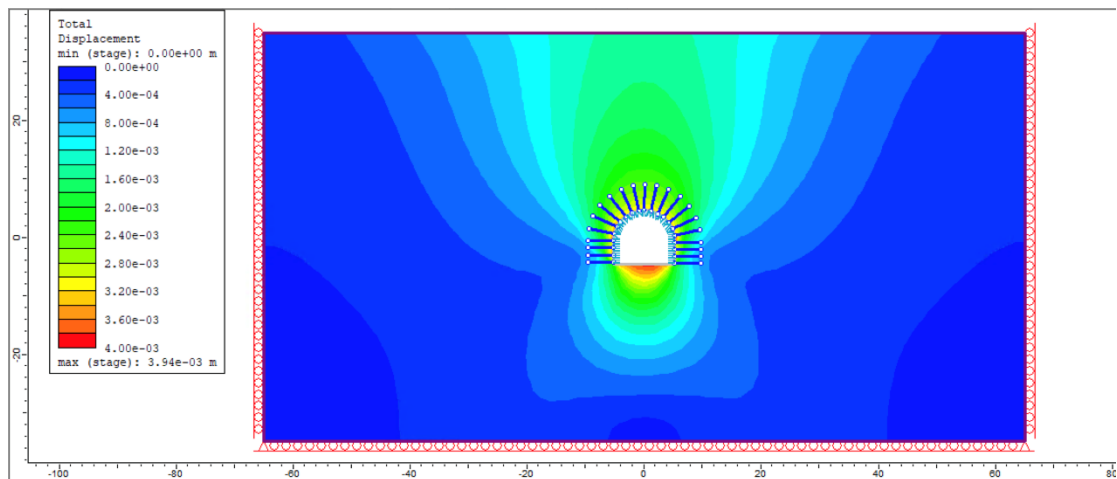
Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.29) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.30 Total displacement (support a) (30m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Διακρίνεται εύκολα (εικόνα 8.30), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις στον πυθμένα, αλλά και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

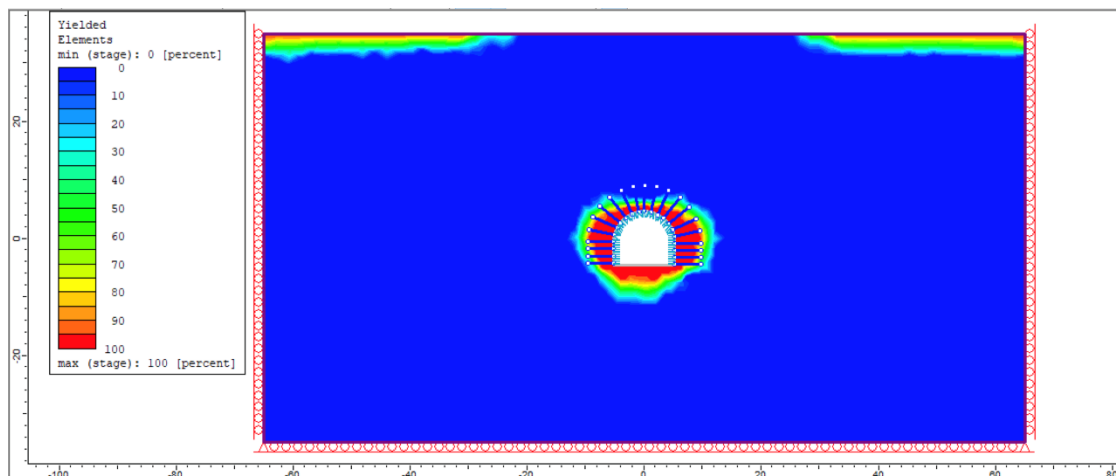


Εικόνα 8.31 Total displacement (support b) (30m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Επίσης, διακρίνεται εύκολα (εικόνα 8.31), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις και στον πυθμένα, αλλά και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

Ελέγχεται και η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

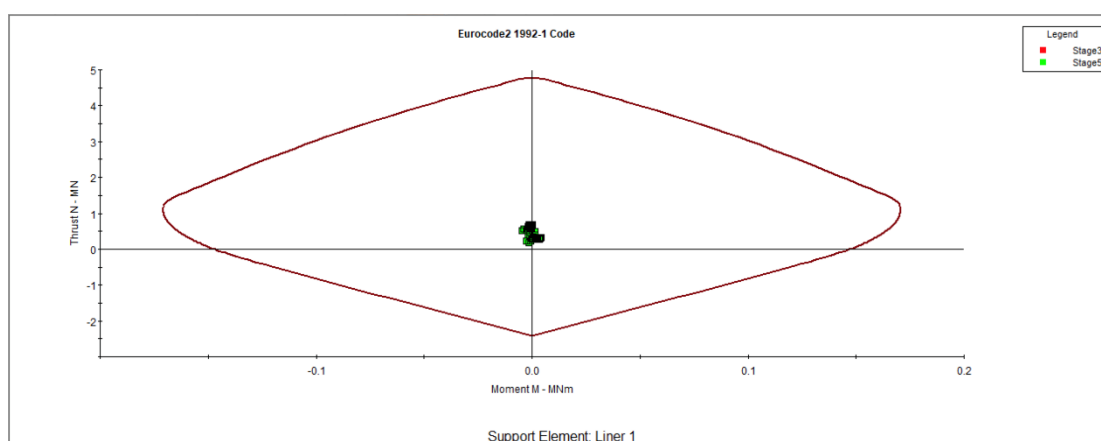


Εικόνα 8.32 Yielded elements (30m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.32 , δημιουργείται μία πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής, τα περισσότερα αγκύρια, όμως βρίσκονται εκτός της έντονα πλαστικής ζώνης και συνεπώς δεν φαίνεται να επηρεάζει την ευστάθεια της σήραγγας.

Εξετάζεται, επίσης, το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.

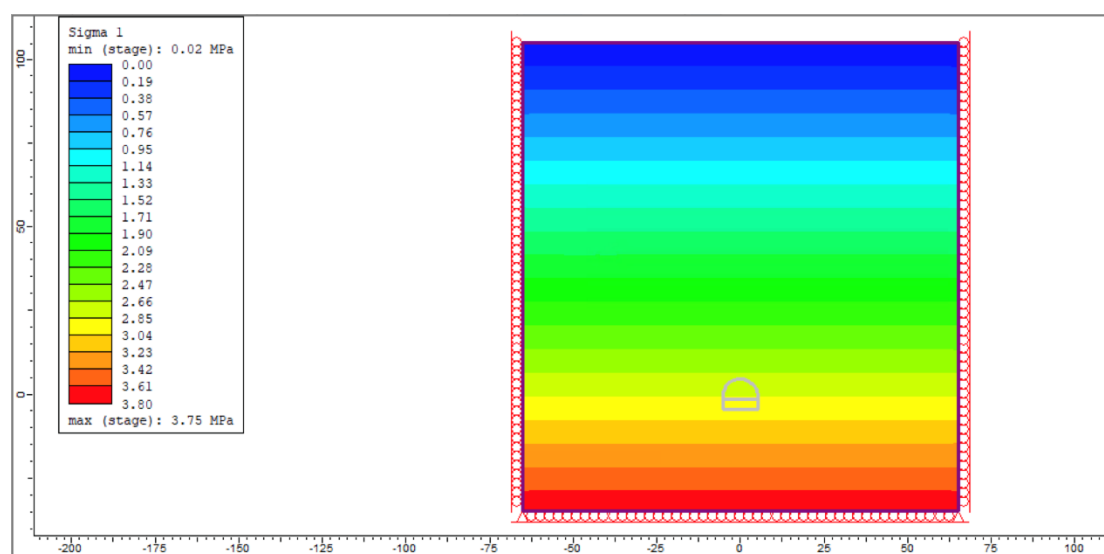


Εικόνα 8.33 Support capacity plots (30m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.33, όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο αλλιώς μεταφράζεται ότι η υποστήριξη δεν αστοχεί.

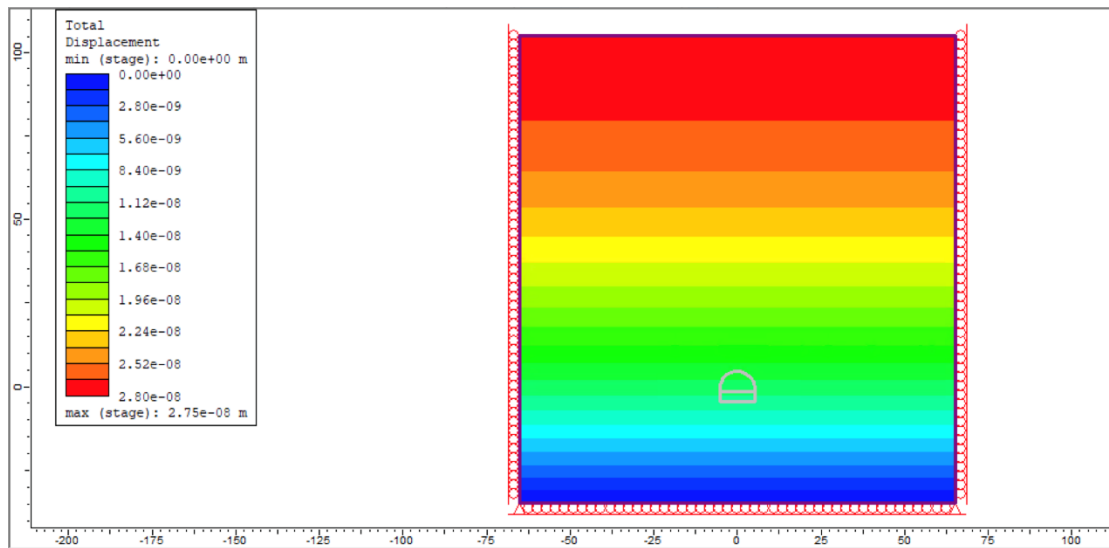
8.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 100 μέτρων (RMR 30)



Εικόνα 8.34 Effective sigma 1 (100m, RMR 30)

Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1) (εικόνα 8.34). Οι γεωστατικές τάσεις, που αναπτύσσονται είναι οι αναμενόμενες σε χέση και με το βάθος της σήραγγας.

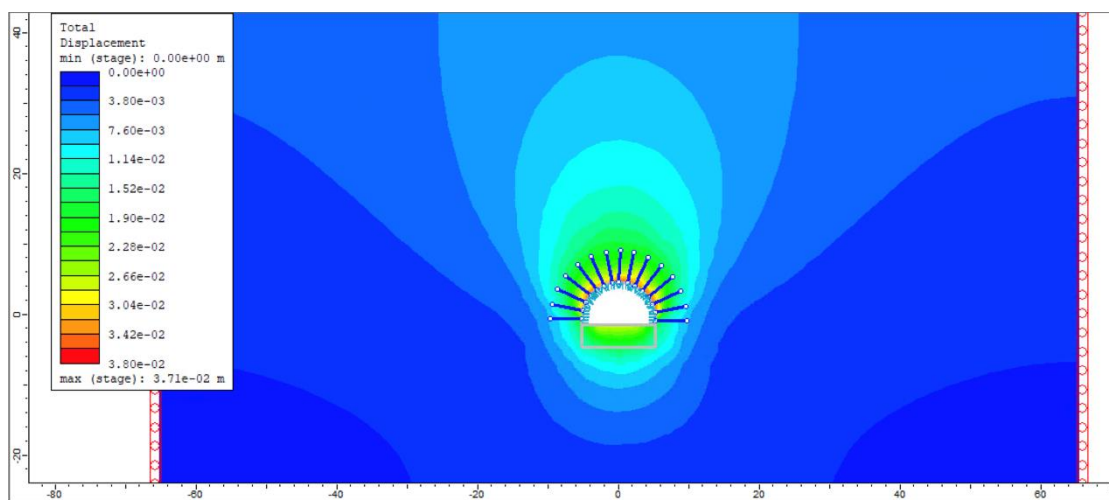
Στην συνέχεια, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



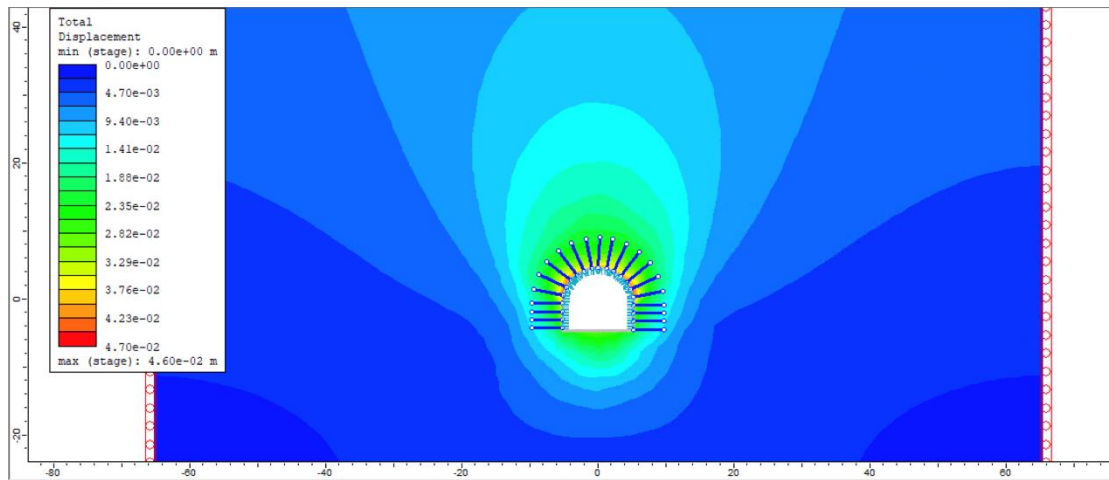
Εικόνα 8.35 Total displacement (geostatic) (100m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.35) οι μετακινήσεις είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.36 Total displacement (support a) (100m, RMR 30)

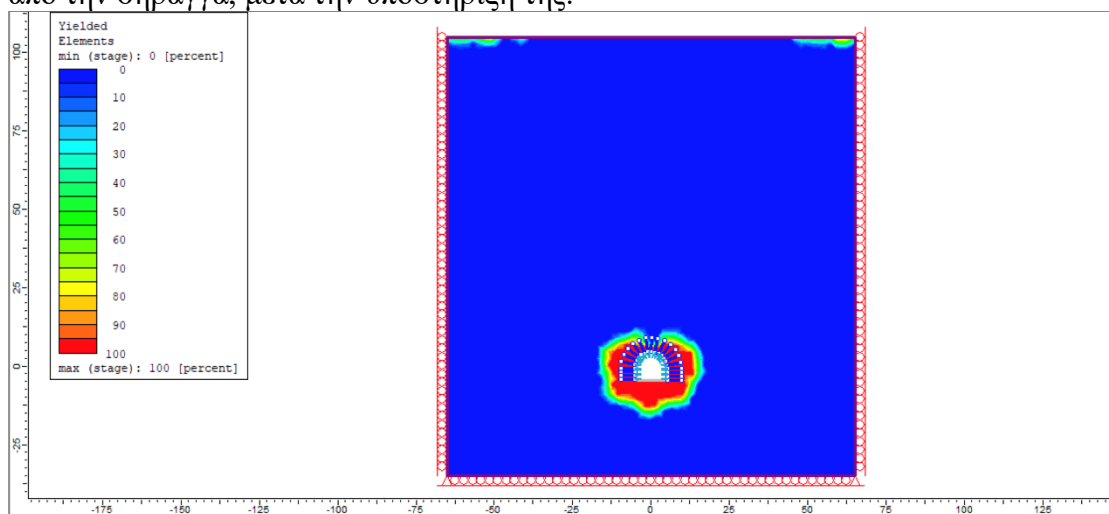


Εικόνα 8.37 Total displacement (support b) (100m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Διακρίνεται εύκολα (εικόνες 8.36 και 8.37), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις στον πυθμένα και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές.

Επίσης είναι απαραίτητο να ελεγχθεί και η πλαστική ζώνη, που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

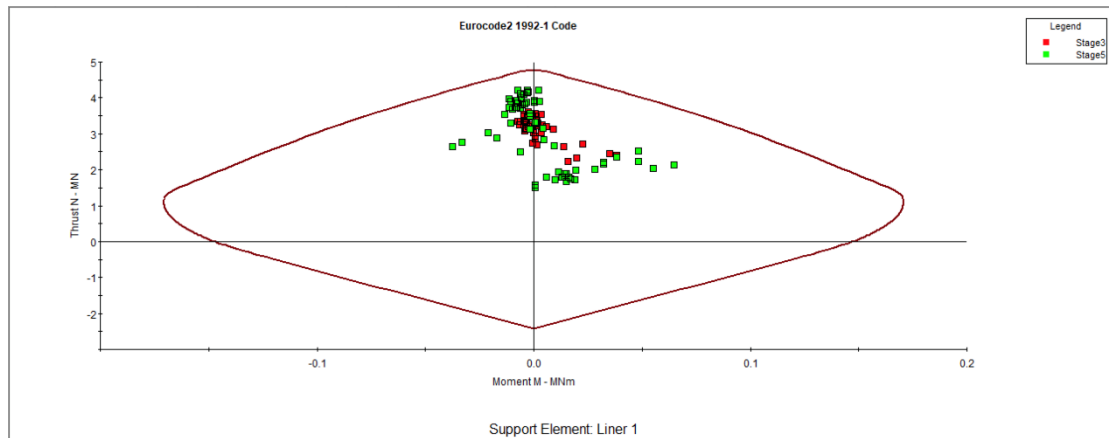


Εικόνα 8.38 Yielded elements (100m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.38, δημιουργείται μία αρκετά έντονη πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής και όλα τα αγκύρια βρίσκονται εντός αυτής.

Τέλος, πρέπει να εξεταστεί το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.

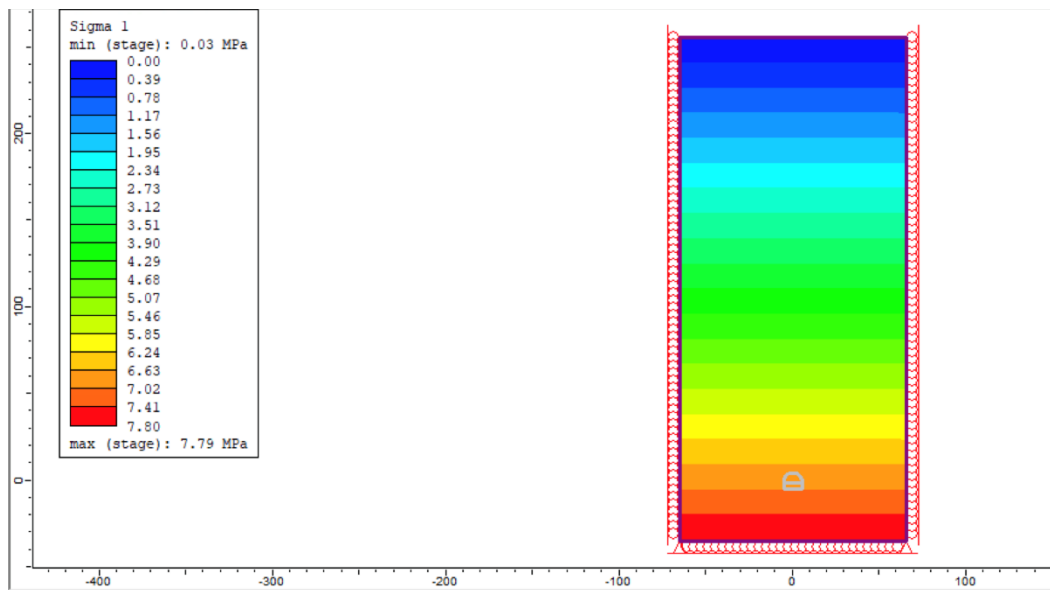


Εικόνα 8.39 Support capacity plots (100m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.39, όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο σημαίνει ότι η υποστήριξη δεν αστοχεί.

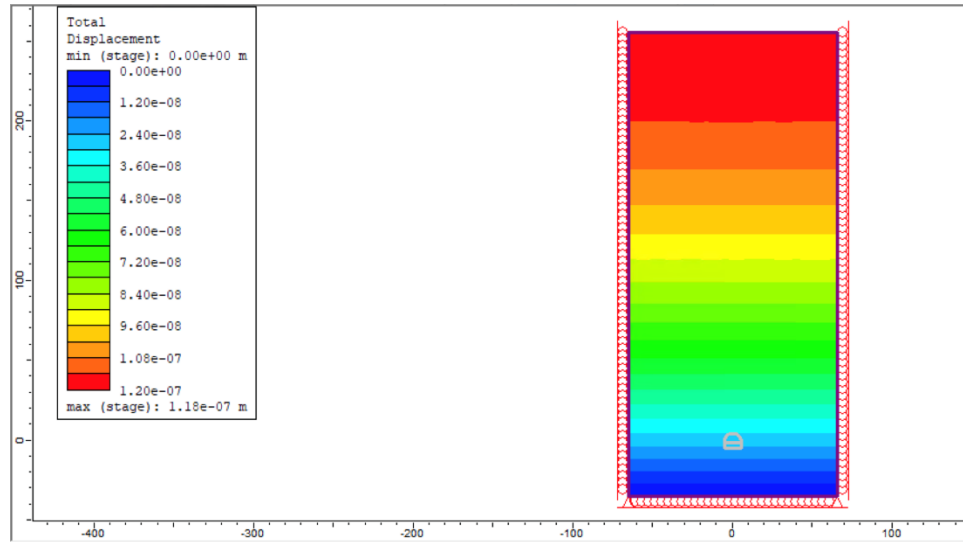
8.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 250 μέτρων (RMR 30)



Εικόνα 8.40 Effective sigma 1 (250m, RMR 30)

Στο πρώτο διάγραμμα που εμφανίζονται οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1) (εικόνα 8.40), παρατηρείται, ξανά η ανάλογη σχέση του βάθους με τις γεωστατικές τάσεις.

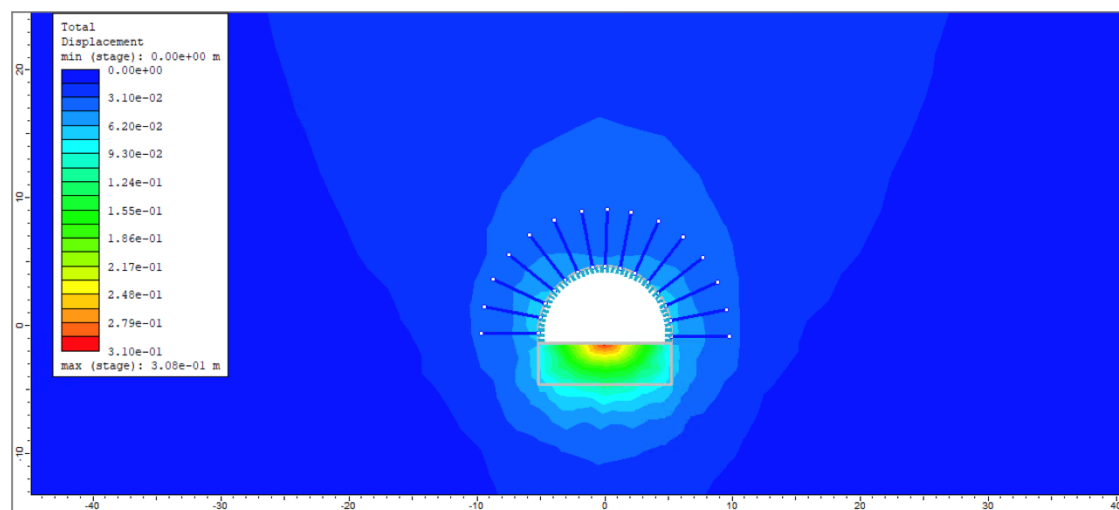
Επίσης, ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



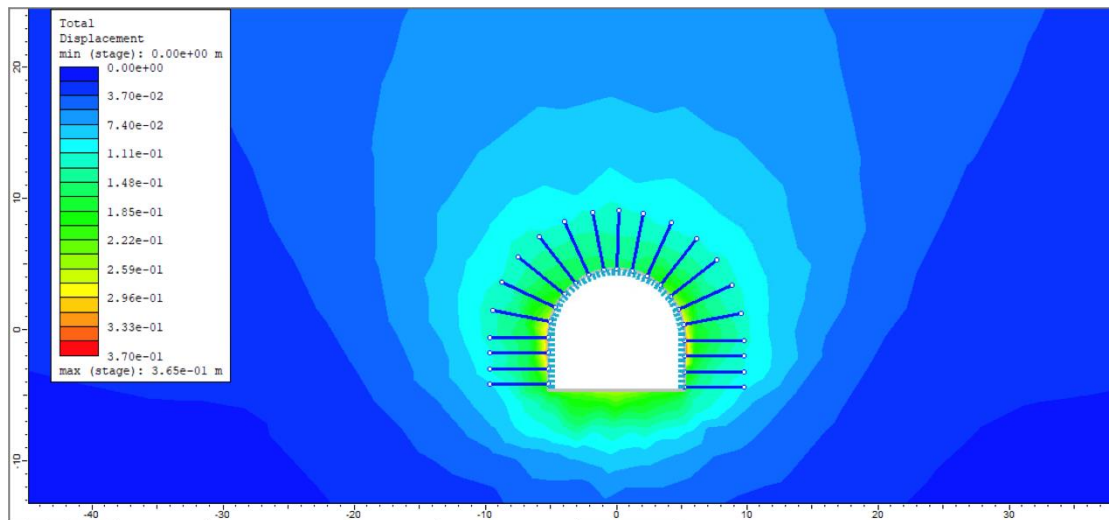
Εικόνα 8.41 Total displacement (geostatic) (250m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.41) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.42 Total displacement (support a) (250m, RMR 30)

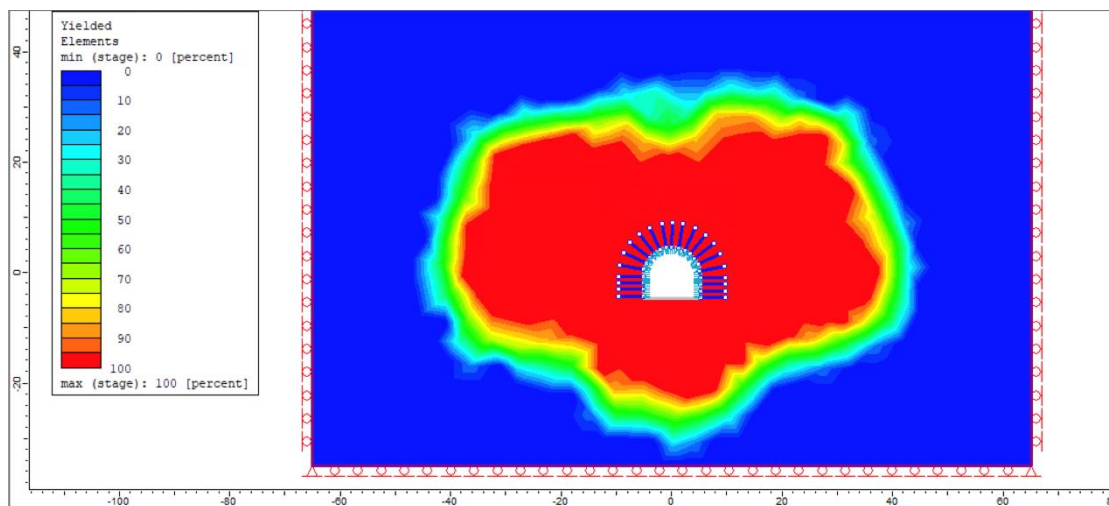


Εικόνα 8.43 Total displacement (support b) (250m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται (εικόνες 8.42 και 8.43), το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί, κυρίως, μετακινήσεις στον πυθμένα και ακόμα εντονότερα στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές.

Ελέγχεται η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

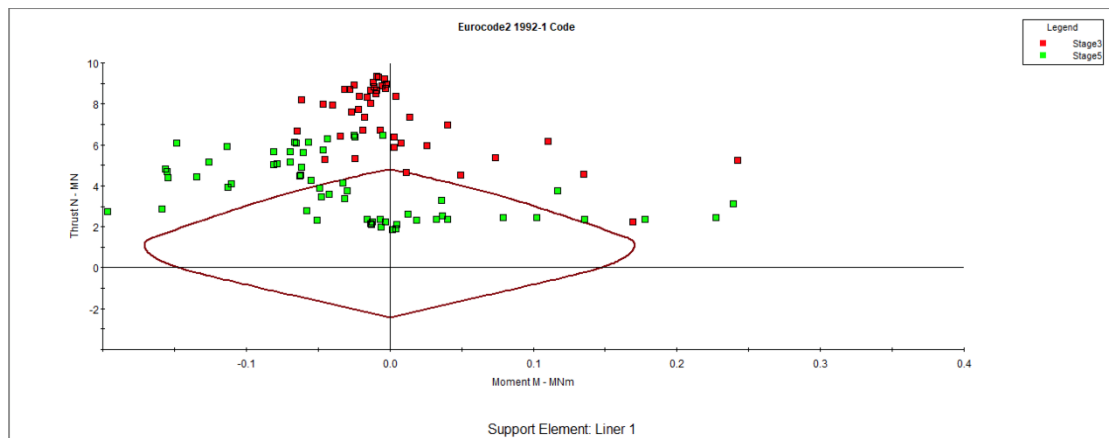


Εικόνα 8.44 Yielded elements (250m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως φαίνεται παραπάνω στην εικόνα 8.44, δημιουργείται μία πολλή έντονη και καθόλου αμελητέα πλαστική ζώνη περιμετρικά της εκσκαφής.

Εξετάζεται, επίσης, το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.

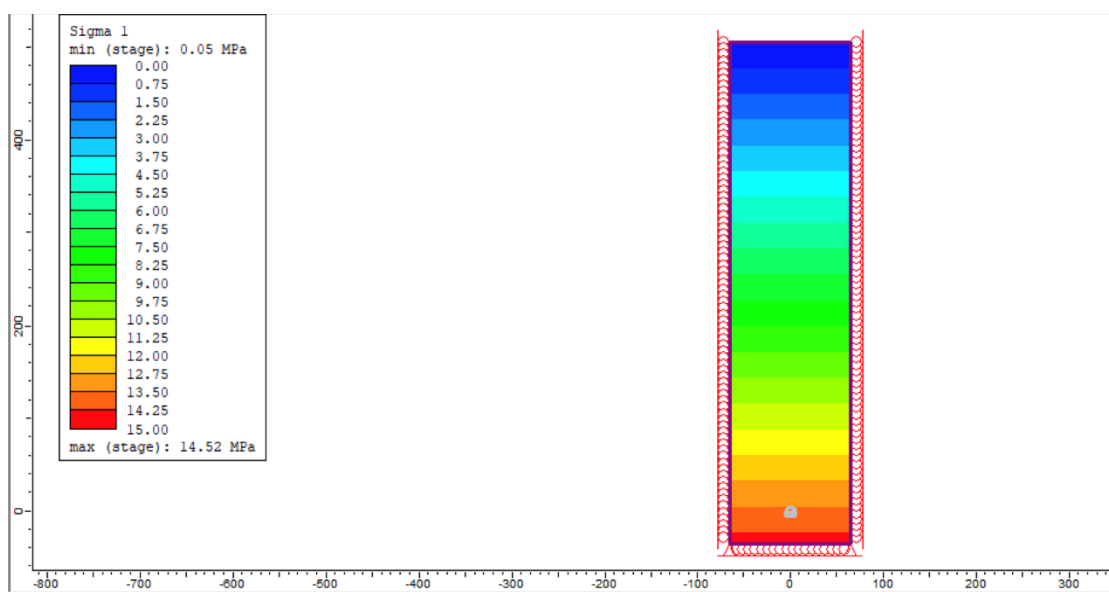


Εικόνα 8.45 Support capacity plots (250m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.45, πολλά σημεία βρίσκονται εκτός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο συνεπάγεται ότι η υποστήριξη δεν επαρκεί για τη συγκεκριμένη ανάλυση. Συνεπώς εξήχθη και πάλι το συμπέρασμα (όπως και στην περίπτωση της σήραγγας στα 500 μέτρα και με RMR 50) ότι οι παράμετροι αντοχής είναι πολύ ασθενείς και δεν εξυπηρετεί τον σκοπό της εργασίας η πραγματοποίηση δοκιμών για την εύρεση της επαρκούς υποστήριξης.

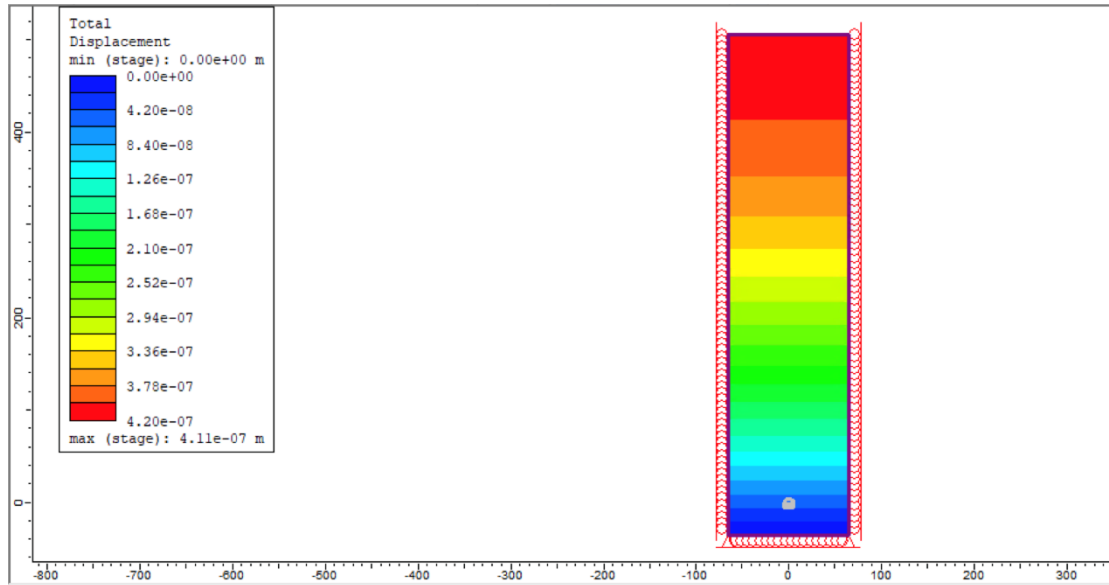
8.8 Ανάλυση αποτελεσμάτων σήραγγας 500 μέτρων (RMR 30)



Εικόνα 8.46 Effective sigma 1 (500m, RMR 30)

Στο πρώτο διάγραμμα (εικόνα 8.46) οι κατακόρυφες τάσεις (σ_1) που εμφανίζονται είναι ακόμα μεγαλύτερες από τις προηγούμενες σήραγγες.

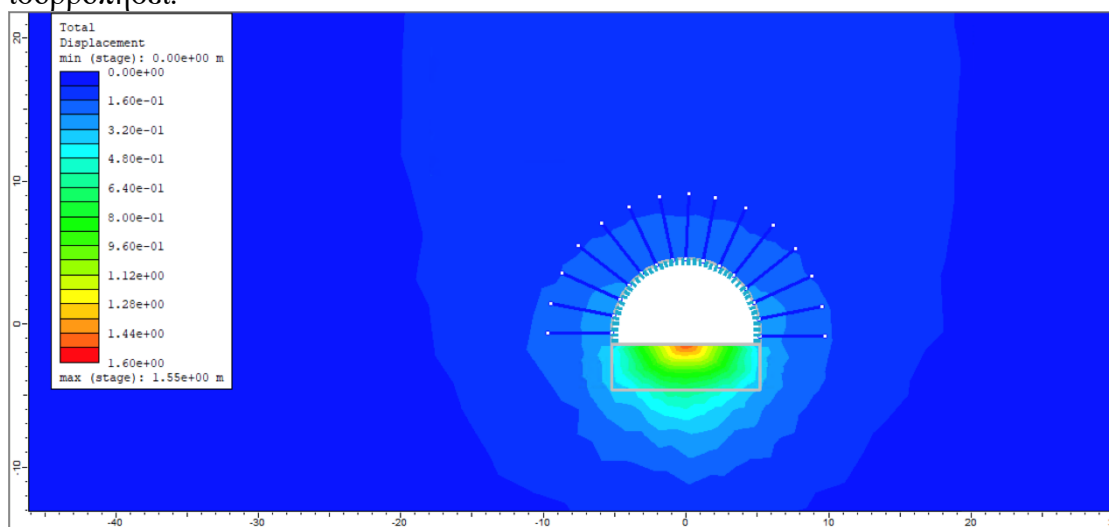
Ελέγχονται παρακάτω οι συνολικές μετατοπίσεις (total displacement), για τρία στάδια της εκσκαφής, πιο συγκεκριμένα για το πρώτο στάδιο (geostatic) και για τα δύο στάδια της υποστήριξης, δηλαδή το τρίτο και το πέμπτο (support a και b).



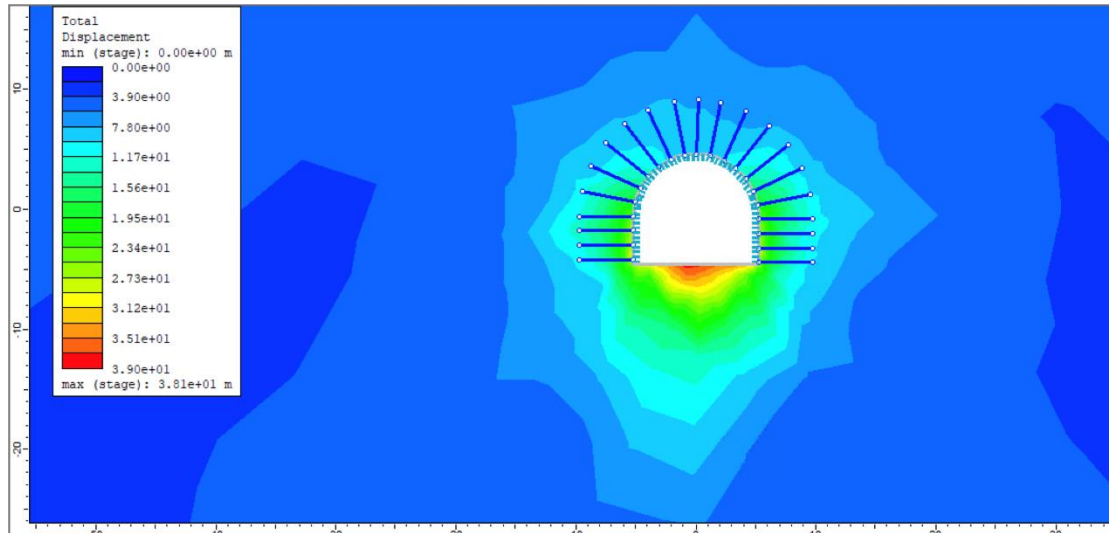
Εικόνα 8.47 Total displacement (geostatic) (500m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο (εικόνα 8.47) είναι απειροελάχιστες, σχεδόν μηδενικές, καθώς δεν έχει προκληθεί καμία διαταραχή στη βραχομάζα, στο συγκεκριμένο στάδιο και το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο έχει ισορροπήσει.



Εικόνα 8.48 Total displacement (support a) (500m, RMR 30)

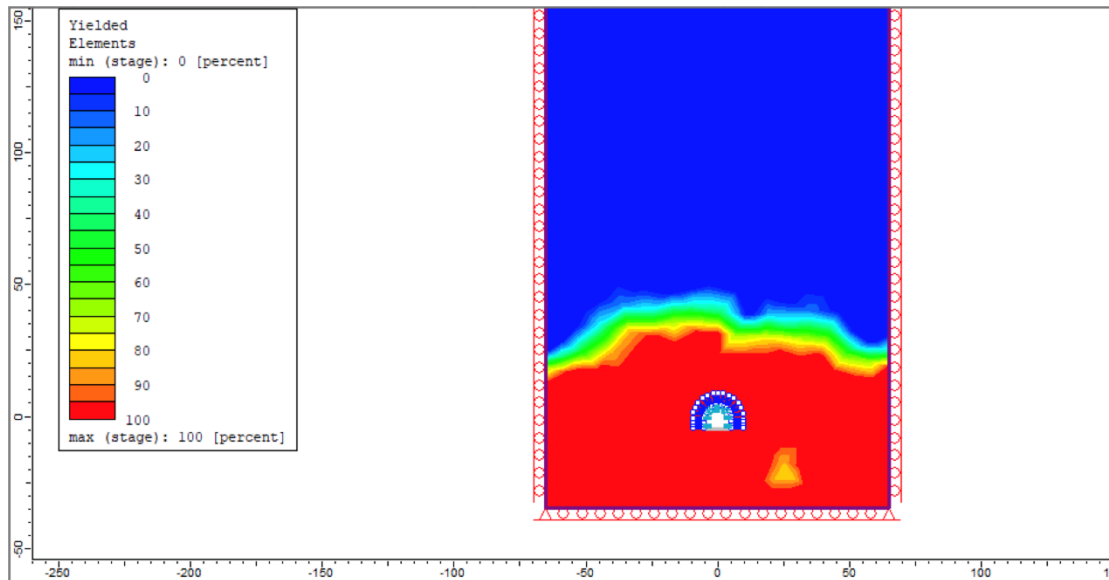


Εικόνα 8.49 Total displacement (support b) (500m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται (εικόνες 8.48 και 8.49), μόνο το γεγονός ότι αναπτύσσονται κατα κανόνα τάσεις στον πυθμένα και στην οροφή, οι οποίες όμως είναι πάρα πολύ μικρές.

Ελέγχεται η πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από την σήραγγα, μετά την υποστήριξή της.

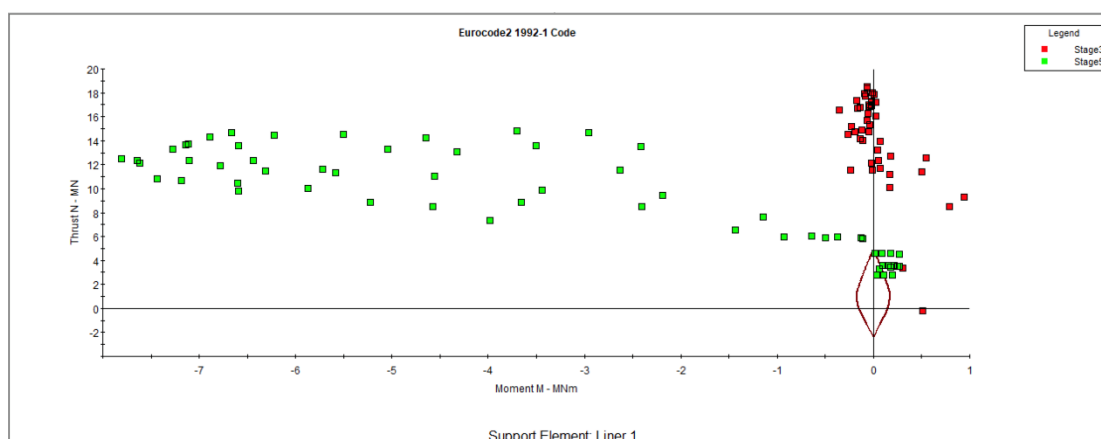


Εικόνα 8.50 Yielded elements (500m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Πάρα πολύ έντονη πλαστική ζώνη, περιμετρικά της σήραγγας (εικόνα 8.50).

Τέλος, εξετάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots), για τα δύο στάδια υποστήριξης (support a και b). Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε ο τύπος φακέλου (envelope type) : “Eurocode 2 EN 1992-1”.



Εικόνα 8.51 Support capacity plots (500m, RMR 30)

Παρατηρήσεις

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8.51, παρατηρούμε ότι όλα τα σημεία βρίσκονται εκτός της περιβάλλουσας (M-N), το οποίο συνεπάγεται ότι η υποστήριξη αστοχεί. Συνεπώς εξήχθη και πάλι το συμπέρασμα (όπως και στις περιπτώσεις των σήραγγων στα 250 μέτρα και με RMR 30 και στα 500 μέτρα και με RMR 50) ότι οι παράμετροι αντοχής είναι εξαιρετικά ασθενείς και δεν εξυπηρετεί τον σκοπό της εργασίας η πραγματοποίηση δοκιμών για την εύρεση της επαρκούς υποστήριξης.

8.9 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

Συμπερασματικά έγινε η παρατήρηση, ότι σε τέσσερις περιπτώσεις εμφανίστηκαν επιπλοκές στο κομμάτι των παραμέτρων αντοχής εκτροχιάζοντας το μοντέλο σε εξαιρετικά δυσμενείς βραχομάζες, και κατά συνέπεια, όχι μόνο οδήγησαν σε αστοχία την προτεινόμενη υποστήριξη, αλλά σε δύο εξ'αυτών απαιτούσαν και πολύ δραστικά μέτρα για την επίτευξη της υποστήριξης τους.

Βάση των παραπάνω παρατηρήσεων, αρχικά σημειώνεται το γεγονός ότι οι τιμές των παραμέτρων αντοχής προήλθαν μέσω του πίνακα του Bieniawski (1989) και επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις προσομοιώσεις όσο αυξάνεται το βάθος μειώνεται η αντιπροσωπευτικότητα των τιμών των παραμέτρων αντοχής. Αναφορικά με την προτεινόμενη υποστήριξη, στις σήραγγες μέχρι 100 μέτρα φαίνεται να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά, αντιθέτως στα μεγαλύτερα βάθη θα γίνει

σχολιασμός παρακάτω, καθώς εν προκειμένω δεν μπορεί να γίνει εμπειριστατωμένη αξιολόγηση, αφού εμφανίζονται, κατά πολύ, υποδεέστερες οι βραχομάζες.

Για την επίτευξη πιο εμπειριστατωμένης άποψης θα επαναληφθούν οι προσομοιώσεις, με την χρήση των παραμέτρων αντοχής που προήλθαν από τις σχέσεις του Bieniawski (2011).

9. Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων

Οι χρησιμοποιούμενοι παράμετροι αντοχής, προέρχονται από τις σχέσεις του Bieniawski (2011) και είναι οι εξής :

1) RMR 50

$$\varphi = 32.5^\circ$$
$$C = 1.7 \text{ MPa}$$

2) RMR 30

$$\varphi = 27.5^\circ$$
$$C = 0.8 \text{ MPa}$$

Πέραν της αποτόνωσης, η οποία θα υπολογιστεί εκ νέου για κάθε μοντέλο, οι υπόλοιποι παράμετροι της βραχομάζας, καθώς και η υποστήριξη παραμένουν ίδια με την προηγούμενη προσομοίωση.

9.1 Υπολογισμός του βαθμού αποτόνωσης

Όπως έγινε στις προηγούμενες προσομοιώσεις, συνεπώς και στην προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί τό πρόγραμμα Rocsupport για τον υπολογισμό των βαθμών αποτόνωσης κάθε σήραγγας και στην πορεία θα εκτιμάται ο επιπρόσθετος παράγοντας καταπόνησης φορτίου (induced stress load) από την σχέση (1-λ).

9.1.1 Induced stress load (RMR 50)

- 1) αβαθής σήραγγα : $\lambda=0,67$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,33$
- 2) Σήραγγα 100 μέτρων : $\lambda= 0,64$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,36$
- 3) Σήραγγα 250 μέτρων : $\lambda= 0,70$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,30$
- 4) Σήραγγα 500 μέτρων : $\lambda= 0,82$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,18$

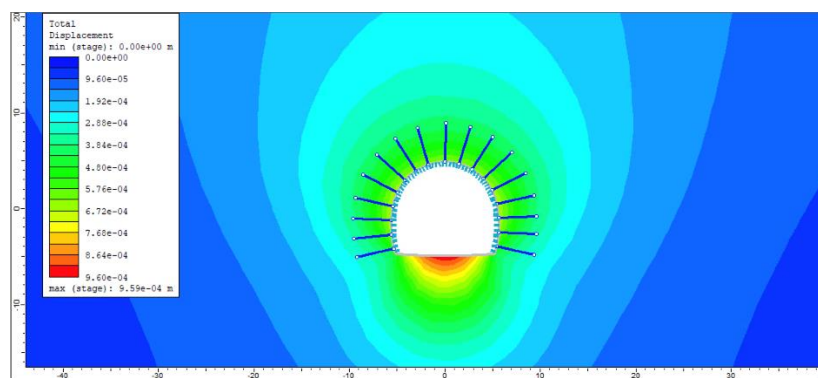
9.1.2 Induced stress load (RMR 30)

- 1) αβαθής σήραγγα : $\lambda=0,52$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,48$
- 2) Σήραγγα 100 μέτρων : $\lambda= 0,56$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,44$
- 3) Σήραγγα 250 μέτρων : $\lambda= 0,76$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,24$
- 4) Σήραγγα 500 μέτρων : $\lambda= 0,84$, το οποίο συνεπάγεται $1-\lambda = 0,16$

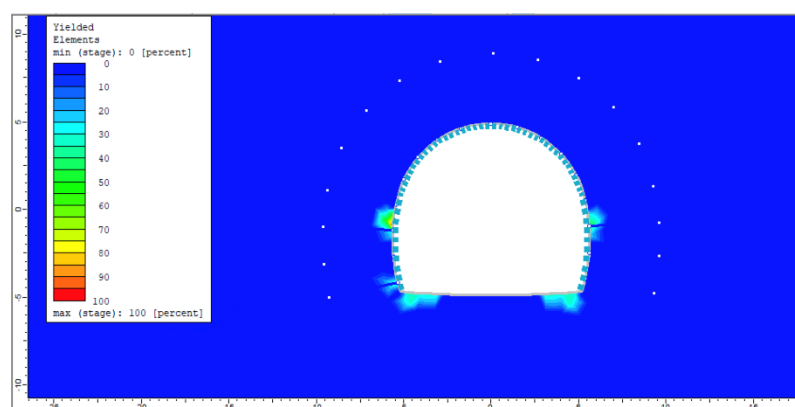
9.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Αναμένονται να υπάρχουν αρκετές διαφορές στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταξύ των δύο σειρών, εξαιτίας της αρκετά μεγάλης διαφοράς της συνοχής των βραχομάζων.

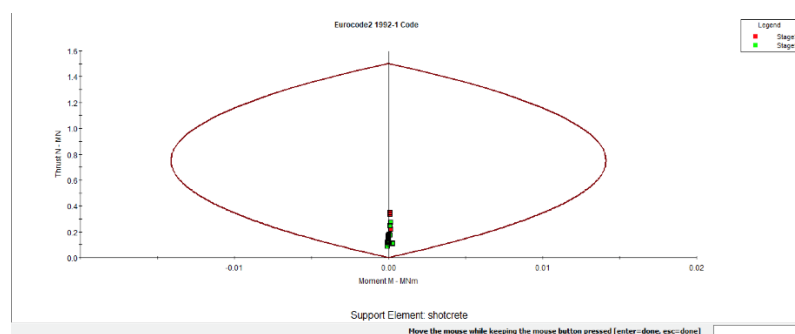
9.2.1 Αποτελέσματα αβαθούς σήραγγας με RMR 50



Εικόνα 9.1 Total displacement (30m RMR 50) second model



Εικόνα 9.2 Yielded elements (30m RMR 50) second model

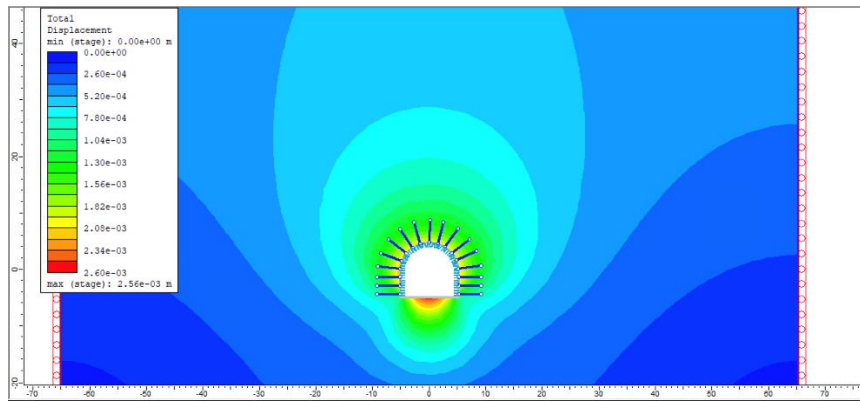


Εικόνα 9.3 Support capacity plots (30m RMR 50) second model

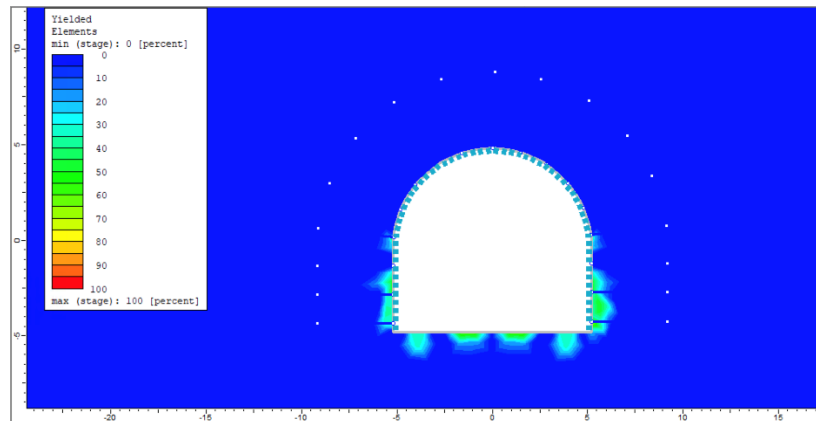
Παρατηρήσεις

Το μοντέλο, όπως και στην προηγούμενη σειρά, ισορροπεί, παρατηρούνται όμως μικρές διαφορές στη βραχομάζα.

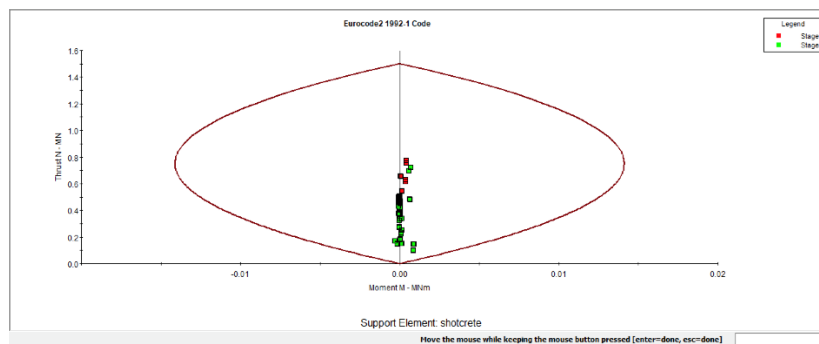
9.2.2 Αποτελέσματα σήραγγας 100 μέτρων με RMR 50



Εικόνα 9.4 Total displacement (100m RMR 50) second model



Εικόνα 9.5 Yielded elements (100m RMR 50) second model

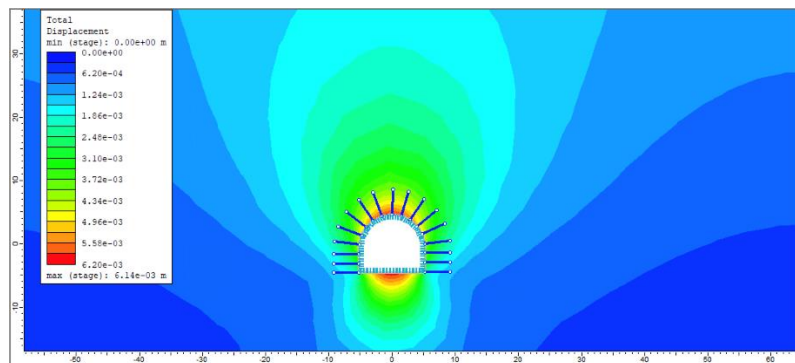


Εικόνα 9.6 Support capacity plots (100m RMR 50) second model

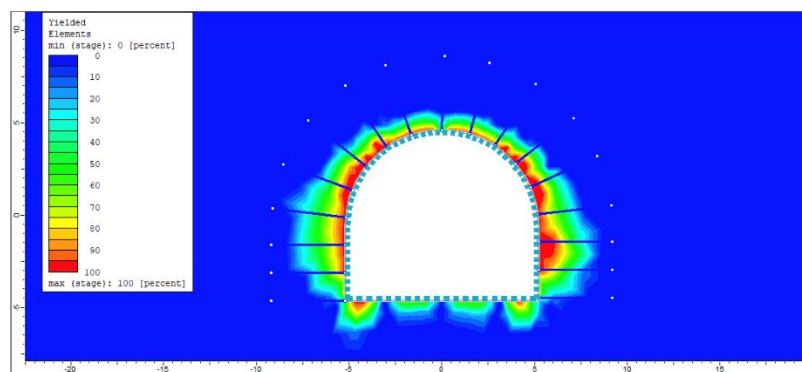
Παρατηρήσεις

Το μοντέλο, όπως και στην προηγούμενη σειρά, ισορροπεί, παρατηρούνται όμως και πάλι μικρές διαρροές στη βραχομάζα.

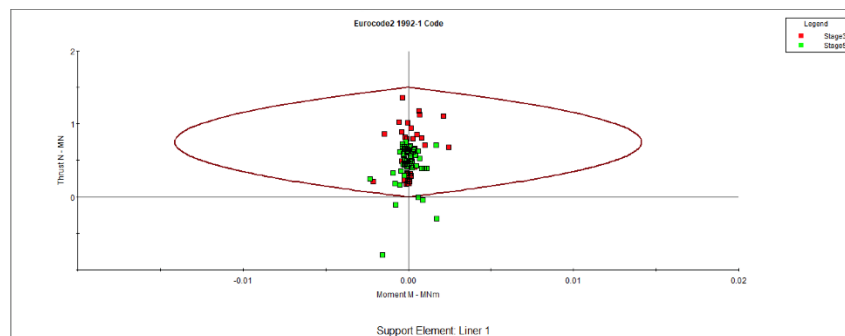
9.2.3 Αποτελέσματα σήραγγας 250 μέτρων με RMR 50



Εικόνα 9.7 Total displacement (250m RMR 50) second model



Εικόνα 9.8 Yielded elements (250m RMR 50) second model

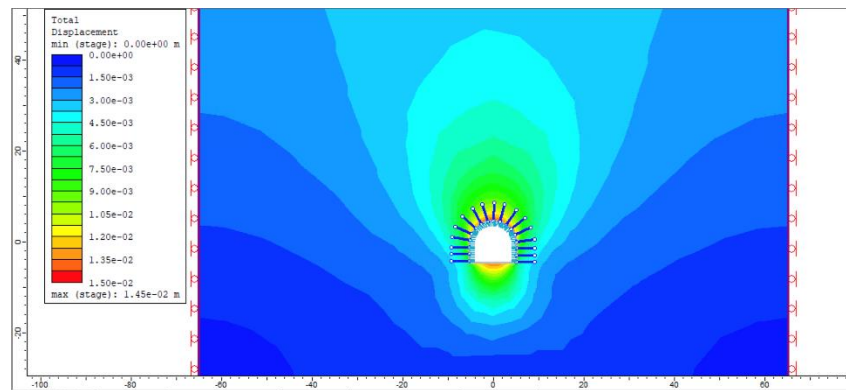


Εικόνα 9.9 Support capacity plots (250m RMR 50) second model

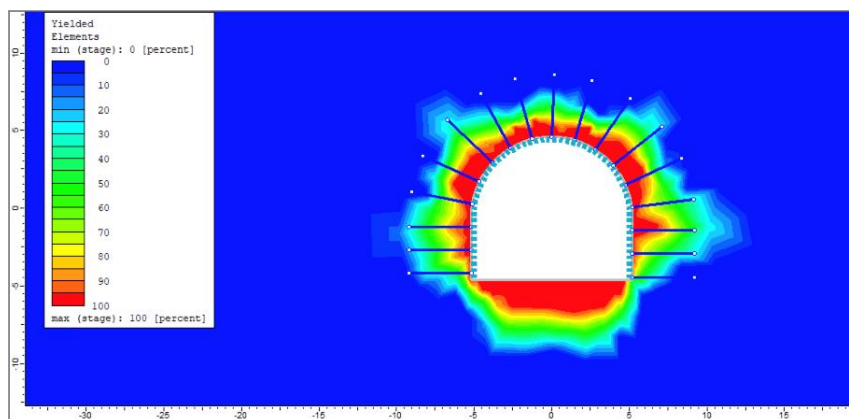
Παρατηρήσεις

Οι διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων των δύο σειρών γίνονται πολύ εύκολα αντιληπτές στα παραπάνω διαγράμματα, καθώς, αρχικά, η πλαστική ζώνη είναι κατά πολύ μικρότερη της πρώτης σειράς προσομοιώσεων, ενώ κατά η υποστήριξη δεν αστοχεί, σύμφωνα με το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots).

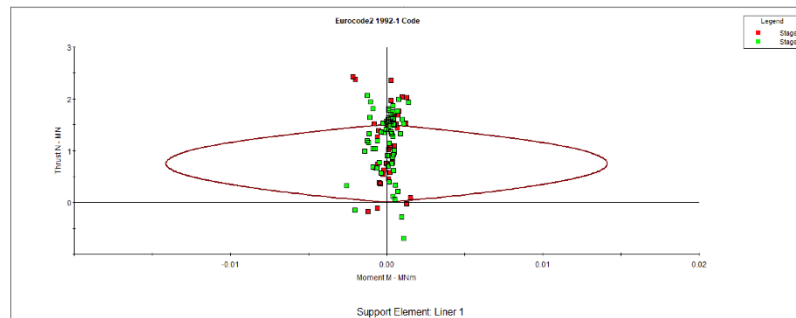
9.2.4 Αποτελέσματα σήραγγας 500 μέτρων με RMR 50



Εικόνα 9.10 Total displacement (500m RMR 50) second model



Εικόνα 9.11 Yielded elements (500m RMR 50) second model

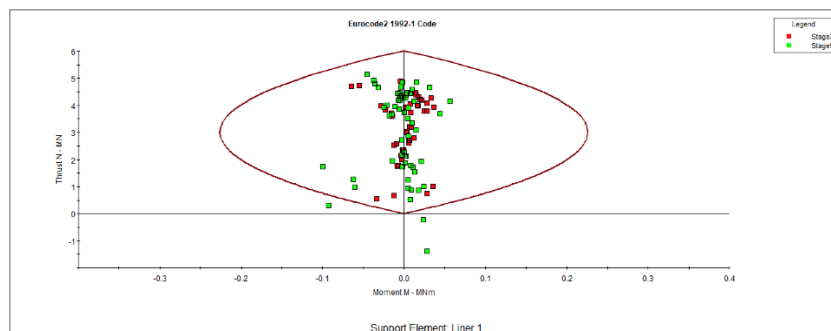


Εικόνα 9.12 Support capacity plots (500m RMR 50) second model

Παρατηρήσεις

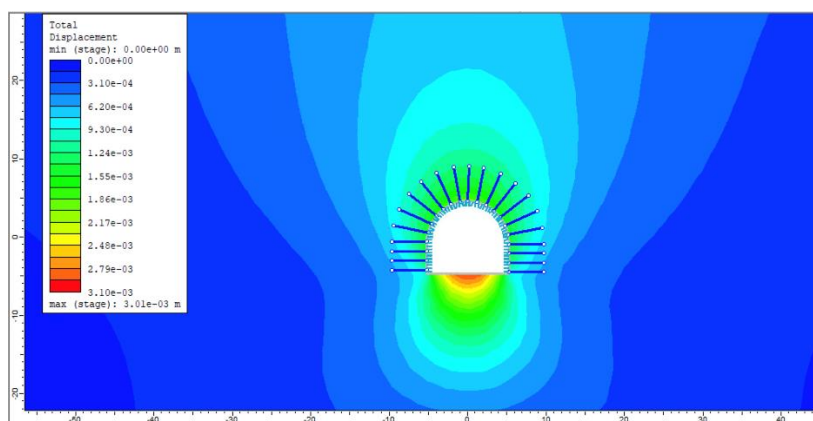
Οι διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων των δύο σειρών γίνονται πολύ εύκολα αντιληπτές στα παραπάνω διαγράμματα, καθώς, αρχικά, η πλαστική ζώνη είναι κατά πολύ μικρότερη της πρώτης σειράς προσομοιώσεων, ενώ κατά δεύτερον παρόλο που επίσης αστοχεί η υποστήριξη, παρουσιάζεται αρκετά βελτιωμένο το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots).

Επίσης, μετά από αύξηση του πάχους του σκυροδέματος στα 300mm, παρατηρείται ότι η υποστήριξη επαρκεί και δεν αστοχεί, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, καθώς όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας (M-N).

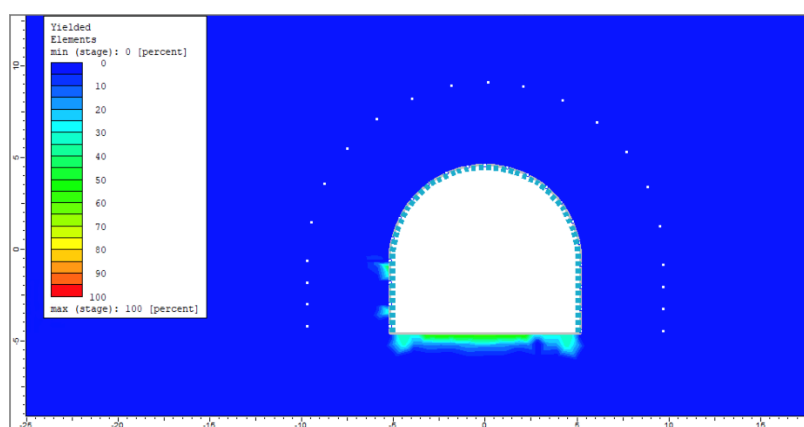


Εικόνα 9.13 Support capacity plots (500m RMR 50) second model (500mm)

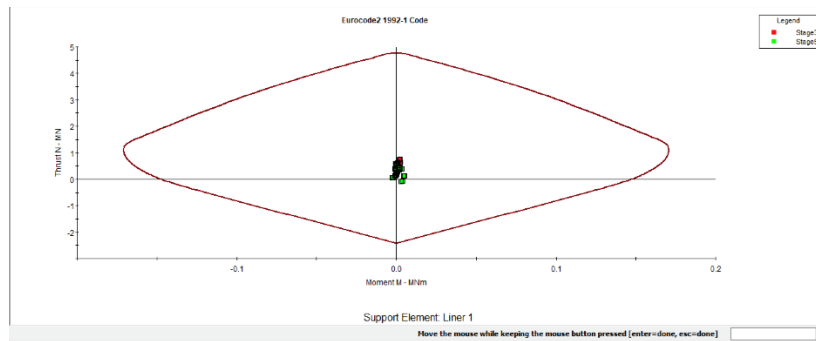
9.2.5 Αποτελέσματα αβαθούς σήραγγας με RMR 30



Εικόνα 9.14 Total displacement (30m RMR 30) second model



Εικόνα 9.15 Yielded elements (30m RMR 30) second model

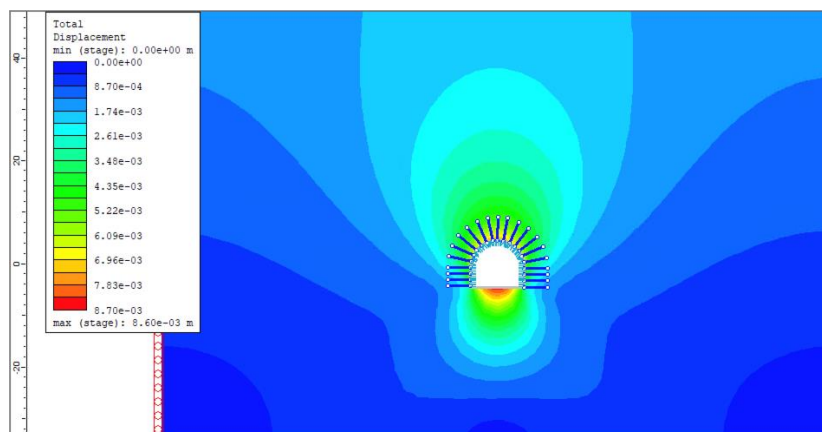


Εικόνα 9.16 Support capacity plots (30m RMR 30) second model

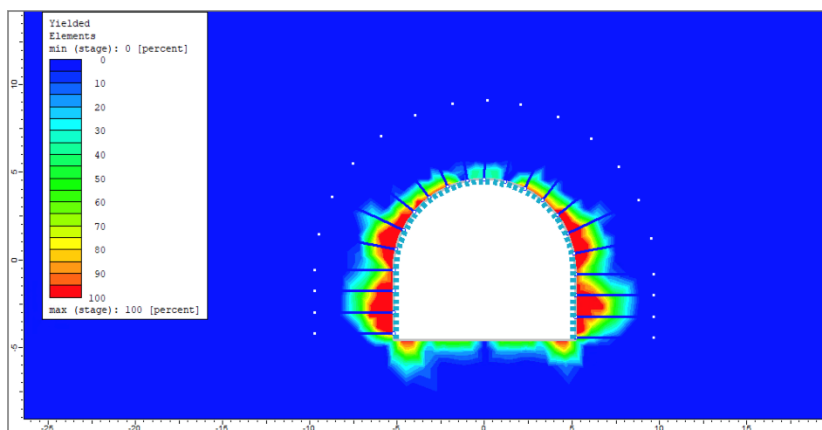
Παρατηρήσεις

Το μοντέλο, όπως και στην προηγούμενη σειρά, ισορροπεί, παρατηρούνται όμως μικρές διαρροές στην βραχομάζα.

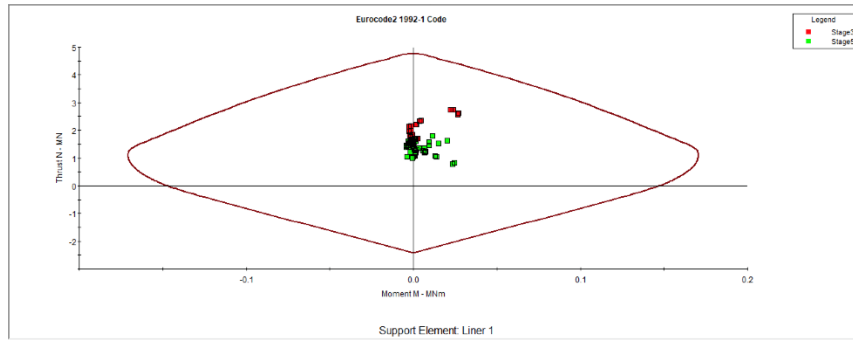
9.2.6 Αποτελέσματα σήραγγας 100 μέτρων με RMR 30



Εικόνα 9.17 Total displacement (100m RMR 30) second model



Εικόνα 9.18 Yielded elements (100m RMR 30) second model

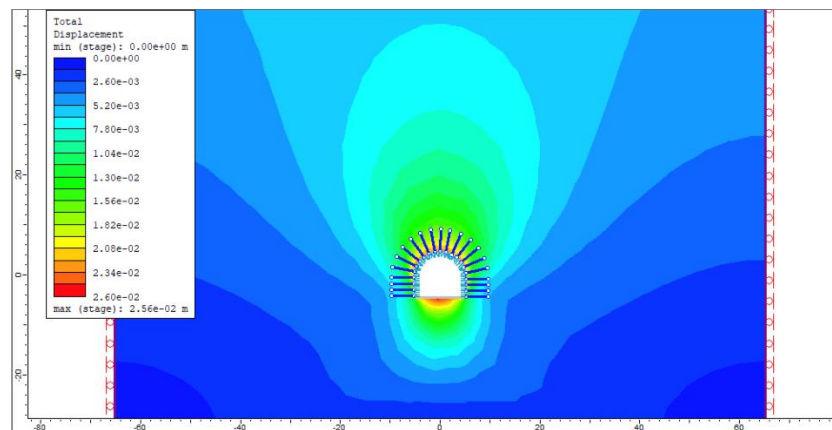


Εικόνα 9.19 Support capacity plots (100m RMR 30) second model

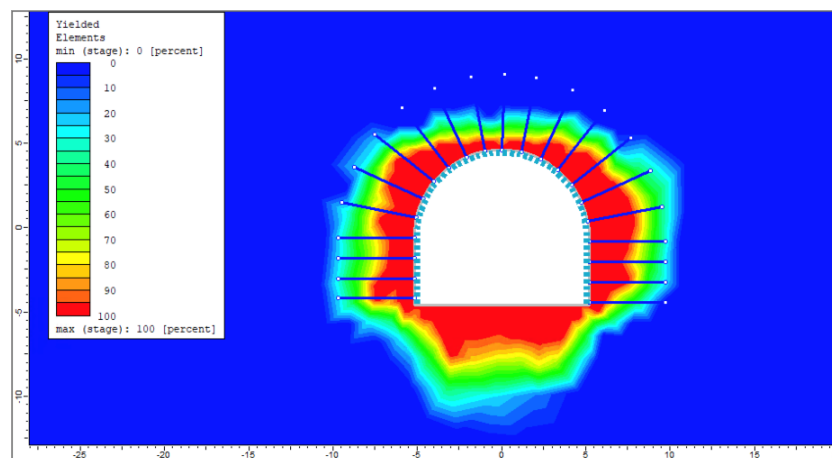
Παρατηρήσεις

Το μοντέλο, όπως και στην προηγούμενη σειρά, ισορροπεί, παρατηρούνται όμως διαρροές στη βραχομάζα.

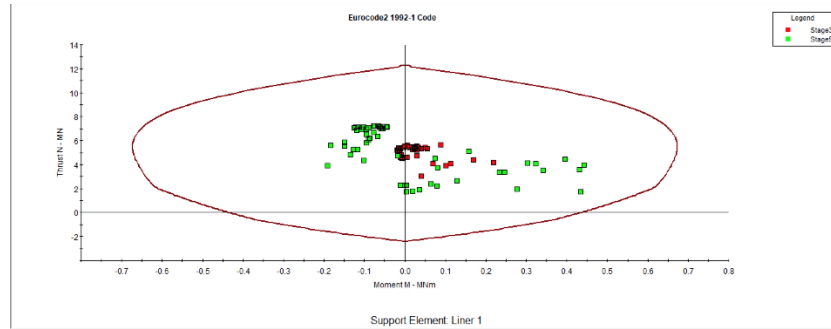
9.2.7 Αποτελέσματα σήραγγας 250 μέτρων με RMR 30



Εικόνα 9.20 Total displacement (250m RMR 30) second model



Εικόνα 9.21 Yielded elements (250m RMR 30) second model

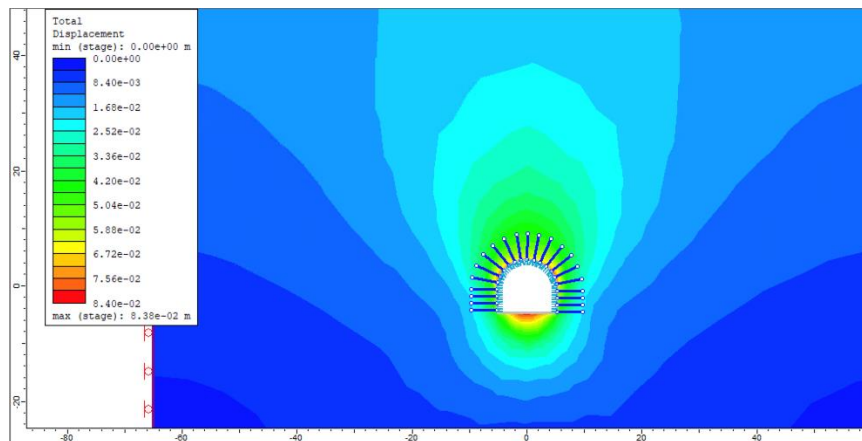


Εικόνα 9.22 Support capacity plots (250m RMR 30) second model

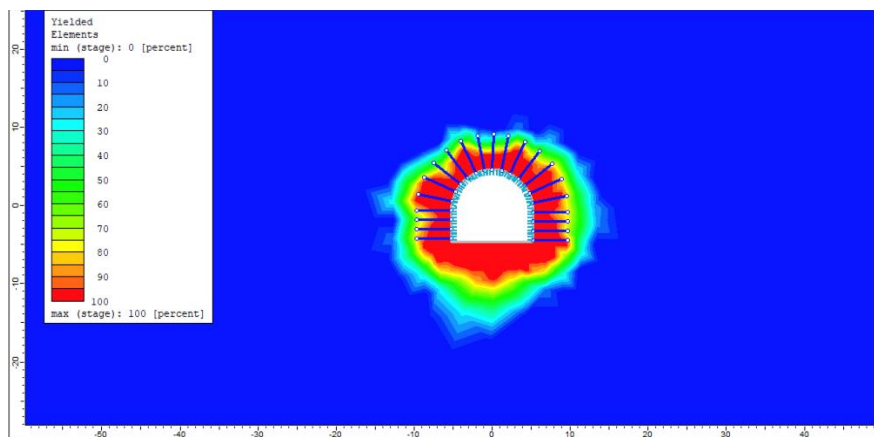
Παρατηρήσεις

Το μοντέλο, σε αντίθεση με την προηγούμενη σειρά, ισορροπεί, παρατηρείται όμως διαφορά και στην πλαστικοποιημένη ζώνη γύρω από το άνοιγμα.

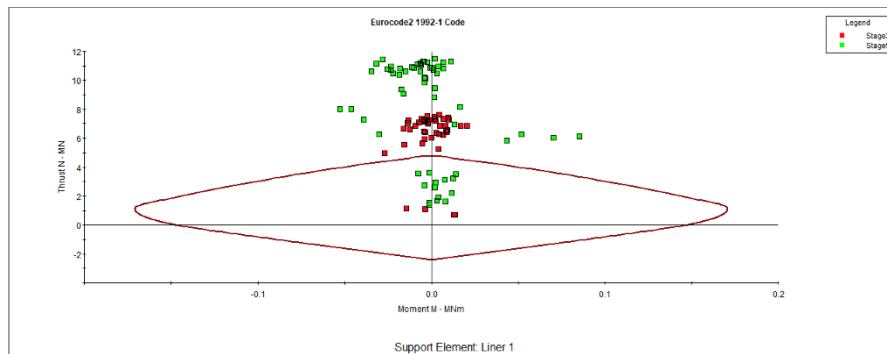
9.2.8 Αποτελέσματα σήραγγας 500 μέτρων με RMR 30



Εικόνα 9.23 Total displacement (500m RMR 30) second model



Εικόνα 9.24 Yielded elements (500m RMR 30) second model



Εικόνα 9.25 Support capacity plots (500m RMR 30) second model

Παρατηρήσεις

Οι διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων των δύο σειρών γίνονται, και πάλι, πολύ εύκολα αντιληπτές στα παραπάνω διαγράμματα, καθώς η πλαστικοποιημένη ζώνη είναι κατά πολύ μικρότερη της πρώτης σειράς προσομοιώσεων, και επίσης, παρόλο που αστοχεί εκ νέου η υποστήριξη, παρουσιάζεται αρκετά βελτιωμένο το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της υποστήριξης (support capacity plots).

9.3 Συμπέρασμα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μεγάλες διαφορές στην συνοχή και γωνία τριβής των βραχομαζών έκριναν τις προσομοιώσεις, οι οποίες, σημειώνεται ότι πηγάζουν από τους δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής. Στην δεύτερη σειρά προσομοιώσεων όλα τα μοντέλα παρουσιάστηκαν αισθητά βελτιωμένα, όσον αφορά τις βραχομάζες και κατά συνέπεια η υποστήριξη πλησίασε περισσότερο στα προβλεπόμενα μέτρα του συστήματος ταξινόμησης RMR.

Ωστόσο υπογραμμίζεται το γεγονός ότι στα μεγαλύτερα βάθη η υποστήριξη αστοχεί και σε αυτές τις περιπτώσεις. Στα 250 μέτρα βάθος οριακά αστοχεί στην βραχομάζα με RMR 50, ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση με RMR 30 η υποστήριξη επαρκεί. Στα 500 μέτρα βάθος σε κάθε περίπτωση η υποστήριξη που προτείνεται, δεν επαρκεί και οδηγείται σε αστοχία.

10.Προτεινόμενη μεθοδολογία υποστήριξης βάση του Q

10.1 Συσχετισμός του συστήματος RMR με το Q

Για τον συσχετισμό των δύο συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q, έχουν παρουσιαστεί αρκετές προτάσεις ανά τα χρόνια, οι οποίες έχουν τις βάσεις τους στην ανάλυση κατασκευασμένων έργων. Μεταξύ άλλων προτάσεων εμπειρικών σχέσεων διακρίνονται αυτές των Bieniawski (1976) και του Barton (1995).

Bieniawski 1976

$$\text{RMR} = 9\ln Q + 44 \quad (\text{σχέση 3.7})$$

Barton 1995

$$\text{RMR} = 15\log Q + 50 \quad (\text{σχέση 3.8})$$

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί η εμπειρική σχέση του Barton, καθώς παρουσιάζεται περισσότερο ασφαλής σε σχέση με την σχέση του Bieniawski.

Συνεπώς, σύμφωνα με τον Barton (σχέση 3.8), το Q παίρνει τις εξής τιμές :

- Για RMR 50 : Q = 1.0
- Για RMR 30 : Q = 0.05

10.2 Προτεινόμενη υποστήριξη βάση του συστήματος Q

Αρχικά αναφορικά με τον συντελεστή σπουδαιότητας (ESR) εκτιμάτε ότι οι σήραγγες ανήκουν στην τέταρτη κατηγορία (D) με τιμή (1.0).

Κατά δεύτερον υπολογίζεται η Ισοδύναμη Διάσταση της εκσκαφής (De), σύμφωνα με τον Barton (1974). Συνεπώς ισχύει ότι :

$$De = \frac{\text{Διάμετρος ή ύψος ανοίγματος}}{ESR} = \frac{9.6}{1.0} = 9.6$$

Και τέλος από το σχήμα 3-1, γίνεται η παρακάτω εκτίμηση όσον αφορά την υποστήριξη που απαιτείται για τις σήραγγες.

Σύμφωνα με τον Barton, συνεπώς, έχουμε :

Για RMR 50 και Q 1.00

- Το έδαφος κρίνεται ως πτωχό (κατηγορία 4)
Απαιτείται :
- εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες πάχους 90 mm
- αγκύρια μήκους 3 m και με βήμα 1.7 m

Επιτρεπόμενο ανυποστήρικτο άνοιγμα $W = 2.0$ m.

Για RMR 30 και Q 0.05

- Το έδαφος κρίνεται ως πάρα πολύ πτωχό (κατηγορία 2)
Απαιτείται :
- εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες πάχους 160 mm και ενισχυμένο με νευρώσεις
- αγκύρια μήκους 3 m και με βήμα 1.2 m

Επιτρεπόμενο ανυποστήρικτο άνοιγμα $W = 0.6$ m.

10.3 Παρατηρήσεις

Αξίζουν να σημειωθούν οι διαφορές στην προτεινόμενη υποστήριξη, οι οποίες επηρεάζονται, βέβαια, και από τις εμπειρικές συσχετίσεις. Είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι στο πρώτο σύστημα προτείνεται μικρότερο πάχος σκυροδέματος με μεγαλύτερα αγκύρια, σε αντίθεση με το σύστημα Q, που αυξάνει το πάχος σκυροδέματος αλλά μειώνει το μέγεθος των αγκυρίων.

Σημαντική διαφορά αποτελεί, επίσης και η λαμβάνουσα, από το σύστημα Q, παράμετρος SRF, για τις επιτόπου τάσεις, στις περιπτώσεις συμπαγών πετρωμάτων, αλλά και για ασθενείς ζώνες διάτμησης και ρηγμάτων. Από την άλλη πλευρά όμως, επίσης για το σύστημα Q, δεν λαμβάνονται συντελεστές για τη αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και για τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

11.Συμπεράσματα

Τα εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης, έχουν γίνει αναπόσπαστα εργαλεία για τις κατασκευές σε βραχομάζα, όπως είναι η διάνοιξη σήραγγων και άλλων υπόγειων έργων. Κυρίως, όμως, έχουν απήχηση στα πρώιμα στάδιά των έργων, δηλαδή στον σχεδιασμό τους.

Η αξία τους εμφανίζεται στην πολύ γρήγορη, εύκολη και εύστοχη ικανότητά τους να:

- 1) ταξινομούν «επί τόπου» τις βραχομάζες,
- 2) χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά τους
- 3) εκτιμούν τις επικρατούσες συνθήκες
- 4) προεκτιμούν τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης

Όσο, όμως, και να επεκταθούν, να βελτιωθούν και να τροποποιηθούν τα συστήματα ταξινόμησης, ποτέ δεν θα είναι εφικτό να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες ενός υπόγειου έργου, καθώς βασίζονται στην αποδοχή πολλών απλοποιητικών παραδοχών. Στην πράξη τις περισσότερες φορές, για την κατασκευή ενός υπόγειου έργου περιπλέκονται πολύ περισσότερο οι καταστάσεις, με σύνθετα γεωτεχνικά προβλήματα, όπως υφιστάμενά γειτονικά έργα (επιφανειακά και υπόγεια) και άλλες σύνθετες δομές (υπόγειοι σταθμοί), κάνοντας την χρήση των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης μονόδρομο.

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών υπολογιστών προσφέρουν σήμερα στην βραχομηχανική την πολυτέλεια της ανάπτυξης σύνθετων μοντέλων, με σκοπό την επαρκή προσομοίωση κάθε μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. Όπως πολύ εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί στην εργασία, μέσω της αριθμητικής ανάλυσης υπολογίζονται, προσομοιώνονται και συλλέγονται πολύ περισσότερες πληροφορίες για την κατασκευή του υπόγειου έργου. Ο μηχανικός πλέον έχει την δυνατότητα να βρίσκει γρήγορες και οικονομικές λύσεις σε δύσκολα γεωτεχνικά προβλήματα και το σημαντικότερο εξασφαλίζοντας την ασφάλεια κάθε πτυχής του έργου.

Από τις προσομοιώσεις, που έλαβαν χώρα, στην συγκεκριμένη διπλωματική παρουσιάζεται η διαφαινόμενη διαφορά στην αξιοπιστία των μέτρων υποστήριξης μεταξύ των προτεινόμενων εκ των εμπειρικών μεθόδων και αυτών που εκτιμώνται με την χρήση του προγράμματος RS2. Ειδικότερα στα μεγάλα βάθη των 250 και 500 μέτρων παρατηρούμε πολύ μεγάλες αποκλίσεις, καθώς οι προσομοιώσεις με την προτεινόμενη υποστήριξη από το σύστημα RMR δείχνουν ότι τα μέτρα υποστήριξης, και ειδικότερα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υποβάλλονται σε πολύ σημαντικά φορτία, κάνοντας εμφανή την σημασία των αριθμητικών μοντέλων ανάλυσης. Ειδικότερα για το εκτοξευόμενο σκυροδόδεμα, εάν ελεγχθεί με βάση τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 2, προκύπτει ότι για τις ασκούμενες αξονικές δυνάμεις και ροπές απαιτούνται πολύ μεγαλύτερα πάχη από αυτά που προτείνει το RMR. Ωστόσο, σημειώνεται ότι με την αριθμητική προσομοίωση του σκυροδέματος ως συνεχή ελαστική δοκό, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν όλες οι βασικές δράσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ούτε και πλήρως η μηχανική του συμπεριφορά. Επιπλέον, οι διαφορές που προκύπτουν σχετίζονται και με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, και συγκεκριμένα στην εφαρμογή ενός σταδίου αποτόνωσης για την προσομοίωση της κατασκευαστικής ακολουθίας της υποστήριξης. Προτείνεται συνεπώς να εμπλουτιστούν οι αριθμητικές αναλύσεις και με πολυσταδιακά μοντέλα που θα λαμβάνουν πλήρως υπόψη όλες τις φάσεις της τοποθέτησης της υποστήριξης κατά την διάνοιξη της σήραγγας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σοφιανός, Α. (2015). *Εισαγωγή στην Υποστήριξη Υπογείων Έργων* [Κεφάλαιο]. Στο Σοφιανός, Α. 2015. *Υποστήριξη υπόγειων έργων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. κεφ 1. <http://hdl.handle.net/11419/3458>
2. Μ. Καββαδάς, ScD, Μάρτιος (2005), έκδοση Ε. Μ. Πολυτεχνείου “*Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων*”
<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Tunneling/ch-1.pdf>
3. Τζάμος Στέργιος (2007) Ε. Μ. Πολυτεχνείο “*Εκτίμηση της υποστήριξης υπόγειων έργων με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης*”
<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/16286#page/8/mode/2up>
4. Κοργιαλάς - Καρύδας Νικόλαος - Παναγιώτης, Μάιος (2021), πτυχιακή εργασία “*Συγκριτική μελέτη συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας σε υπόγεια έργα*” <http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle>
5. Νομικός Π. (2015) «*Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων*», [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
<http://hdl.handle.net/11419/3983>
6. A. Palmstör̄m (N.G.I). (1996), "RMI – a system for characterising rock mass strength for use in rock engineering".
7. Z.T. Bieniawski, (1989), "Engineering Rock Mass Classification (A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering)".
8. Romana et al., (2015), "Slope Mass Rating (SMR) Geomechanics Classification: Thirty Years Review".
9. G. Marinos Ph.D., V. Marinos, E. Hoek Ph.D. (1994) “The geological strength index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses”
10. Αγγελόπουλος Γεώργιος, Οκτώβριος (2020), Ε.Μ.Π., διπλωματική εργασία «*Διερεύνηση ευστάθειας σήραγγας σε σεισμό*»
11. Παναγιώτης Στέφανος Ζαχαρίας, Οκτώβριος (2016), Ε.Μ.Π., διπλωματική εργασία: «*Αριθμητική προσομοίωση της μεθόδου πρότμησης στο μέτωπο αβαθών σηράγγων*»
12. Ιστοσελίδες που επισκέφτηκα τον Απρίλιο (2021):
https://www.rocscience.com/help/rs2/tutorials/rs2_3d_tunnel_simulation.htm
https://www.rocscience.com/help/rs2/theory/theory_overview.htm
13. Ιστοσελίδα που επισκέφτηκα τον Μάιο (2021):
<https://www.geoengineer.org/software/rs2>
14. N. Barton and E. Grimstad (2014), “Tunnel and cavern support selection in Norway, based on rock mass classification with the Q-system”
15. Gracon LLC «*The deepest gold mine in the world: Mponeng mine*»
<https://graconllc.com/deepest-gold-mine-in-the-world/>
16. Rocscience “RS2”, 2D Finite Element Analysis
<https://www.rocscience.com/software/rs2> (15/05/2021)
17. A. Palmstör̄m P.h.D. (1996), "Recent developments in rock support estimates by the RMI", Publied in journal of rock Mechanics and tunneling technology, vol 6, no 1, May 2000.
https://rockmass.net/ap/66_Palmstrom_on_Recent_developments_RMI.pdf

18. Hoek E. and Marinos P., "Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses", Tunnels and Tunnelling International, Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000
19. Γεώργιος Τσιαμπάος, αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π (Ιανουάριος 2009): «Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων»
20. E. Hoek and E.T. Brown, "Practical estimates of rock mass strength", published in the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (1997)
21. Φεσσα Αλεξία (Μάρτιος 2021), πτυχιακή εργασία: «Διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής σηράγγων»
22. Μελέτη και κατασκευή της σήραγγας Αγίας Κυριακής στην Ε.Ο. Άρτας – Τρικάλων
23. Ιωάννης Νταλιακουρας, ΤΕΙ Αθήνας (2016) «Εφαρμογή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων στον υπολογισμό και στο σχεδιασμό σηράγγων»