



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Γεωτεχνικής

«ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΔΡΙΣΚΟΥ: Αξιολόγηση των συγκλίσεων»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντοπούλου Ειρήνη

Επιβλέπων : ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β.
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Γεωτεχνικής

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

« Σήραγγα του Δρίσκου: Αξιολόγηση των συγκλίσεων»

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

Κοντοπούλου Ειρήνη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Παπαδόπουλος Β. , Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:

2010-2011

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Παπαδόπουλο Β. για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της σήραγγας του Δρίσκου, μιας εκ των σηράγγων της Εγνατίας Οδού. Κυρίως, εξετάστηκαν τα φαινόμενα αστοχίας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης κατά τη διάνοιξή της στον Ιόνιο φλύσχη της περιοχής. Ο φλύσχος, αποτελούμενος από εναλλαγές στρώσεων ψαμμίτη και ιλυόλιθου, έντονα πτυχωμένων, χαρακτηρίστηκε ως μέσης και χαμηλής έως πολύ χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα. Η εμφάνιση αστοχιών στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, οδήγησε στην αναθεώρηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας και συνεπώς στην αναθεώρηση, μέσω ανάδρομων αναλύσεων, των μέτρων, όπως αυτά είχαν προβλεφθεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Ωστόσο, παρά τις αλλαγές που εφαρμόστηκαν, παρουσιάστηκαν εκ νέου προβλήματα σε άλλες χιλιομετρικές θέσεις κατά την προχώρηση του μετώπου, όπως στη Χ.Θ. 8+657. Το γεγονός αυτό έκανε επιτακτική την ανάγκη επανεξέτασης του σχεδιασμού και εφαρμογής μέτρων θεραπείας. Με σκοπό να αξιολογηθούν οι συγκλίσεις που αναπτύχθηκαν στα τοιχώματα της σήραγγας κατά την εκσκαφή της, εκτελέστηκαν αναλύσεις με τη χρήση του τριδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D Tunnel v2.4. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η διατομή του αριστερού κλάδου της σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657, θεωρώντας τρεις διαφορετικές ποιότητες βραχώμαζας (διαφορετικοί συνδυασμοί GSI, σ_{ci} και m_i) και δύο συντελεστές οριζόντιων πιέσεων $K_0=0,5$ και $K_0=0,8$. Βάσει των αποτελεσμάτων των επιλύσεων, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των συγκλίσεων (κατακόρυφων και οριζόντιων) για τους διάφορους συνδυασμούς γεωτεχνικών παραμέτρων, με τη χρήση των καμπύλων $\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} - \frac{x}{R}$ και $\frac{u_x}{u_y} - \frac{x}{R}$ που προέκυψαν. Συγκρίθηκαν, ακόμη, οι μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας με τις θεωρητικές καμπύλες συγκλίσεων Chern και Panet. Επιχειρήθηκε, τέλος, σύγκριση των κατακόρυφων και οριζόντιων συγκλίσεων που υπολογίστηκαν, με τις πραγματικές συγκλίσεις, όπως αυτές δόθηκαν από τις οργανομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

ABSTRACT

In this diploma thesis, the case of Driskos tunnel, one of Egnatia's Highway tunnels, was considered. Especially, the failures of primary support system, which occurred during the excavation of the tunnel through the Ionian flysch of the area, were examined. This flysch, consisting of repeated layers of sandstone and siltstone, with intense plait, was characterized as a rock mass of medium and low to very low quality. Observation of support system's failures, lead to reconsideration of flysch's geotechnical properties and therefore, reconsideration of primary support system as it was defined in the initial design pattern. This procedure was achieved by means of back analysis. However, despite the changes which were applied, new failure problems appeared during top heading advance, at other chainages along the tunnel, such as chainage 8+657. This fact made imperative the need of reconsideration on the initial design and also, application of remedies to support system. In order to evaluate the developed deformations of tunnel's walls during excavation, the three-dimensional finite element package Plaxis 3D Tunnel v2.4 was used to perform calculations. Specifically, the excavation of the left bore of tunnel at chainage 8+657 was simulated, assuming three different qualities of rock mass (different combination of GSI, σ_{ci} and m_i) two values for horizontal to vertical stress ratio $K_o=0,5$ and $K_o=0,8$. Based on calculation's results, convergences (vertical and horizontal) were compared for different geotechnical parameters' combinations, using curves such as $\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} - \frac{x}{R}$ and $\frac{u_x}{u_y} - \frac{x}{R}$ which came of the results. Displacements of tunnel's crown were likewise compared to theoretical convergences curves Chern and Panet. Finally, comparisons were attempted between calculated vertical and horizontal deformations and those measured at specific targets during tunnel excavation.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

1.1 Γενικά	2
1.2 Εμπειρικές μέθοδοι ταξινόμησης της βραχώμαζας	2
1.2.1 Μονοπαραμετρικές εμπειρικές μέθοδοι.....	2
1.2.1.1 Ταξινόμηση Terzaghi.....	2
1.2.1.2 Δείκτης ποιότητας βράχου RQD	3
1.2.2 Πολυπαραμετρικές εμπειρικές μέθοδοι	3
1.2.2.1 Ταξινόμηση κατά Bieniawski	3
1.2.2.2 Ταξινόμηση κατά Barton et al (N.G.I)	7
1.2.3 Ταξινόμηση με το γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI)	17
1.3 Μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας	24
1.3.1 Κριτήριο Hoek-Brown για άρρηκτο βράχο.....	24
1.3.2 Γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown για βραχώμαζα.....	27
1.3.3 Συσχέτιση Mohr-Coulomb και Hoek-Brown – Ισοδύναμες παράμετροι	28
1.4 Εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσης της βραχώμαζας.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: - ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ - ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

2.1 Συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας κατά την εκσκαφή	38
2.2 Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλική σήραγγα	39
2.2.1 Αρχική εντατική κατάσταση.....	39
2.2.2 Τάσεις και παραμορφώσεις γύρω από τη σήραγγα κατά τη διάνοιξη	40
2.3 Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης.....	49
2.3.1 Ανυποστήρικτη σήραγγα.....	49
2.3.2 Υποστηριζόμενη σήραγγα.....	53
2.3.2.1 Επιρροή της προσωρινής υποστήριξης.....	55
2.4 Εκτίμηση προβλημάτων σύνθλιψης.....	57
2.4.1 Εκτίμηση της κρίσιμης παραμόρφωσης κατά Sakurai.....	57
2.4.2 Εκτίμηση των συγκλίσεων από το λόγο σ_{cm}/p_o	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΔΡΙΣΚΟΥ

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της σήραγγας.....	65
3.2 Αρχική μελέτη της σήραγγας.....	65
3.2.1 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες.....	65
3.2.2 Αρχικός σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης.....	67
3.2.3 Εκτίμηση των αναγκών υποστήριξης βάσει παραμορφώσεων.....	79
3.3 Προβλήματα κατά την κατασκευή της σήραγγας.....	80
3.4 Αναθεώρηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του φλύσχη.....	83
3.5 Ανάδρομες αναλύσεις.....	84
3.6 Μέτρα θεραπείας για τις δυσχερείς περιοχές του έργου.....	88
3.7 Αναθεώρηση σχεδιασμού για το μη διανοιχθέν τμήμα.....	91
3.8 Προβλήματα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας μετά την εφαρμογή των νέων μέτρων υποστήριξης.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PLAXIS 3D TUNNEL v2.4

4.1 Εισαγωγή.....	101
4.2 Προσομοίωση της σήραγγας με το Plaxis 3D Tunnel v2.4.....	101
4.2.1 Προσομοίωμα εδάφους.....	101
4.2.1.1 Γεωτεχνικές παράμετροι της βραχώμαζας.....	103
4.2.1.2 Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb.....	103
4.2.1.3 Αντοχή βραχώμαζας.....	104
4.2.1.4 Μέτρο παραμόρφωσης της βραχώμαζας.....	104
4.2.1.5 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων.....	105
4.2.2 Διατομή της σήραγγας.....	105
4.2.3 Δημιουργία τριδιάστατου μοντέλου.....	107
4.2.4 Στάδια προσομοίωσης της εκσκαφής και της υποστήριξης της σήραγγας.....	108
4.2.5 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	109
4.2.5.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μεταλλικά πλαίσια.....	109
4.2.5.2 Αγκύρια.....	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 Εισαγωγή	114
5.2 Αποτελέσματα υπολογισμών συγκλίσεων.....	114
5.2.1 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y	115
5.2.1.1 Κατακόρυφες συγκλίσεις στο σημείο A.....	115
5.2.1.2 Κατακόρυφες συγκλίσεις στο σημείο B.....	131
5.2.2 Οριζόντιες συγκλίσεις στο σημείο B	146
5.2.2.1 $K_0=0,5$	146
5.2.2.2 $K_0=0,8$	153
5.3 Σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων	161
5.4 Σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων στέψης με τις θεωρητικές καμπύλες.....	169
5.4.1 Καμπύλη Chern.....	169
5.4.2 Καμπύλη Panet	171
5.4.3 Σύγκριση των διαγραμμάτων συγκλίσεων στέψης με τις καμπύλες Panet και Chern	173
5.5 Σύγκριση με τις μετρηθείσες συγκλίσεις.....	176
5.6 Έλεγχος ακυρίων	186
5.7 Έλεγχος ζώνης πλαστικοποίησης.....	187
5.8 Αντιπροσωπευτικές εικόνες των επιλύσεων του προγράμματος.....	191
5.8.1 Κατανομή κατακόρυφων συγκλίσεων κατά μήκος της οροφής της άνω ημιδιατομής της σήραγγας	191
5.8.2 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στην οροφή της άνω ημιδιατομής στο επίπεδο N.....	194
5.8.3 Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων στην οροφή της άνω ημιδιατομής στο επίπεδο N	197
5.8.3 Κατανομή κυρίων τάσεων στο επίπεδο N.....	200

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Γενικά συμπεράσματα	204
-------------------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	209
--------------------------	------------

Κεφάλαιο 10

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για το σχεδιασμό και την ανάλυση μιας σήραγγας, βασική προϋπόθεση είναι η εκτίμηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας. Αυτό περιλαμβάνει:

- την περιγραφή και την ταξινόμηση της βραχώμαζας με τη χρήση διάφορων μεθόδων ποιοτικών ή ποσοτικών
- τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας όπως είναι η αντοχή της σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας κλπ
- τα προβλήματα που αναμένεται να εμφανιστούν ανάλογα με τις παραμορφώσεις που προκύπτουν για την βραχώμαζα κατά τη διάνοιξη, καθώς και μια πρώτη προσέγγιση των μέτρων αντιμετώπισης αυτών.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να εκτιμηθεί η ποιότητα της βραχώμαζας είναι είτε αναλυτικές, είτε εμπειρικές, είτε ημιεμπειρικές που δανείζονται χαρακτηριστικά και των δύο προηγούμενων μεθόδων. Η χρήση των εμπειρικών μεθόδων είναι προτιμότερη καθώς συνήθως δεν είναι εφικτό να υπάρξουν οι απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να διαμορφωθεί και να τροφοδοτηθεί ένα μαθηματικό προσομοίωμα συμπεριφοράς. Επομένως, θα εξεταστούν παρακάτω μόνο οι εμπειρικές μέθοδοι ταξινόμησης.

1.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Διακρίνονται σε ποιοτικές όπως είναι η μέθοδος Terzaghi και ποσοτικές (μονοπαραμετρικές ή πολυπαραμετρικές) όπως ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας RQD, η ταξινόμηση κατά Bieniawski, κατά Barton et al (NGI) και κατά GSI.

1.2.1 ΜΟΝΟΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

1.2.1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ TERZAGHI

Ο Terzaghi ταξινόμησε τα πετρώματα ανάλογα με τις διακλάσεις και την αντοχή τους σε 9 κατηγορίες. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμάται το μέγιστο ύψος της ζώνης που φορτίζει την αγκύρωση της οροφής της σήραγγας σε συνάρτηση με το ύψος της h ορθογώνιας εκσκαφής και το τελικό εύρος της b. Το ελάχιστο ύψος των υπερκείμενων γαιών υπολογίζεται από τη σχέση $1,5*(b+h)$. Οι τιμές που αναφέρονται στον πίνακα που ακολουθεί προϋποθέτουν ότι η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Σε αντίθετη περίπτωση οι τιμές για τις κατηγορίες 4-6 μειώνονται κατά 50%.

A/A	Κατηγορία πετρώματος	Ύψος φορτίου
1	Συμπαγές σκληρό	0
2	Σκληρό σε στρώσεις ή σχιστολιθικό	$0 \div 0,5 * b$
3	Συμπαγές μέτρια διακλασμένο	$0 \div 0,25 * b$
4	Μέτρια διακλασμένο	$0,25 * b \div 0,35 * (b+h)$
5	Πολύ διακλασμένο	$0,35 * (b+h) \div 1,1 * (b+h)$
6	Εντελώς θραυσμένο	$1,1 * (b+h)$
7	Συμπιεστό σε μέσο βάθος	$1,1 * (b+h) \div 2,1 * (b+h)$
8	Συμπιεστό σε μεγάλο βάθος	$2,1 * (b+h) \div 4,5 * (b+h)$
9	Διογκούμενο	μέχρι 80m ανεξαρτήτως ύψους και πλάτους σήραγγας

Πίνακας 1.1 Ταξινόμηση κατά Terzaghi

1.2.1.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΥ RQD

Πρόκειται για μια μονοπαραμετρική ανάλυση της βραχόμαζας που ορίζεται με βάση τις αποστάσεις τεμαχισμού του πυρήνα του δείγματος από τη γεώτρηση. Σε πυρήνα μήκους l επιλέγονται τα τμήματα άρρηκτου βράχου με μήκος $l_i > 10$ cm.

Ως δείκτης RQD ορίζεται ο λόγος $\Sigma l_i / l$ (%)

Με αυτόν τον δείκτη, σύμφωνα με τη μέθοδο Deere et al. γίνεται για τις σήραγγες μια αρχική εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης και των πιέσεων που αναλαμβάνουν.

Η σχετική βαθμονόμηση της βραχόμαζας είναι:

RQD (%)	Ποιότητα Βραχόμαζας
$0 \div 25$	Πολύ πτωχή
$25 \div 50$	Πτωχή
$50 \div 75$	Μέση
$75 \div 90$	Καλή
$90 \div 100$	Εξαιρετική

Πίνακας 1.2 Βαθμονόμηση βραχόμαζας βάσει του RQD

1.2.2 ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

1.2.2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ BIENIAWSKI

Ο Bieniawski πρότεινε μια πολυπαραμετρική ανάλυση που θα μπορούσε να περιγράψει ποσοτικά σε ικανοποιητικό βαθμό τη συμπεριφορά της βραχόμαζας για την ανάγκη κατασκευής μιας σήραγγας. Οι παράμετροι που απαιτούνται μπορούν εύκολα να μετρηθούν στο ύπαιθρο και είναι οι εξής:

- η ανεμπόδιστη θλίψη του υλικού του πετρώματος (μέσω της απλής φορητής συσκευής της δοκιμής των φορτίων αιχμής)
- ο δείκτης RQD που υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως
- η συχνότητα και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, σχιστότητα) του πετρώματος
- η κατάσταση των ασυνεχειών από πλευράς εύρους του κενού που δημιουργούν, συνέχειας, τραχύτητας των επιφανειών τους και του υλικού πλήρωσης του κενού τους
- το υπόγειο νερό που μειώνει την αντοχή και την ευστάθεια της βραχώμαζας.

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας με τη χρήση των παραπάνω παραμέτρων και η βαθμονόμηση αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

A. Παράμετροι ταξινόμησης και βαθμονόμησή τους									
1	Αντοχή συμπαγούς πετρώματος	Δείκτης αντοχής φόρτισης αιχμής (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προτιμάται η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης		
		Αντοχή στην ανεμπόδιση ή θλίψη (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Βαθμός	15	12	7	4	2	1	0	
2	Ποιότητα πυρήνα RQD(%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Βαθμός		20	17	13	8	3		
3	Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών(m)		>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06		
	Βαθμός		20	15	10	8	5		
4	Κατάσταση διακλάσεων		Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά πετρώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm Σκληρά πετρώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm Μαλακά πετρώματα	Επιφάνεια ολίσθησης ή υλικό πλήρωσης <5mm ή διακλάσεις ανοικτές 1-5mm Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοιχτές >5mm. Συνεχείς διακλάσεις		
	Βαθμός		30	25	20	10	0		
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10m μήκους σήραγγας	καμία	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Τιμή κλάσματος πίεσης νερού διακλάσεων δια της μέγιστης κύριας τάσης	ή 0	ή 0,0-0,1	ή 0,0-0,2	ή 0,2-0,5	ή >0,5		

		Γενικές συνθήκες	ή εντελώς στεγνό	ή λίγο νερό	ή υγρό μόνο	ή νερό κάτω από μέτρια πίεση	ή Σοβαρά προβλήματα νερού
		Βαθμός	15	10	7	4	0
B. Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών							
Διεύθυνση και κλίση διακλάσεων		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	
Βαθμός	Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12	
	Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25	
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60	
Γ. Ταξινόμηση και βαθμολογία της βραχώμαζας							
Κατηγορία	I	II	III	IV	V		
Χαρακτηρισμός	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή		
Βαθμολογία	81-100	61-80	41-60	21-40	<20		
Δ. Τεχνική σημασία της ταξινόμησης							
Κατηγορία	I	II	III	IV	V		
Μέσος χρόνος διατήρησης της διατομής	10 χρόνια για άνοιγμα 15m	6 μήνες για 8m άνοιγμα	1 εβδομάδα για 5m άνοιγμα	10 ώρες για 2,5m άνοιγμα	30min για 1m άνοιγμα		
Συνοχή βραχώμαζας (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Γωνία τριβής βραχώμαζας	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°		

Πίνακας 1.3 Βαθμονόμηση κατά Bieniawski

Ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών αν είναι ευνοϊκές ή όχι δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ανεξάρτητα από παράταξη	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
0-20°	Δυσμενής
Παράταξη παράλληλη στον άξονα της σήραγγας	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
45-90°	Πολύ δυσμενής
20-45°	Μέτρια
Παράταξη κάθετη στον άξονα της σήραγγας	
Διάνοιξη σύμφωνα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
45-90°	Πολύ ευνοϊκή
20-45°	Ευνοϊκή
Διάνοιξη αντίθετα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
45-90°	Μέτρια
20-45°	Δυσμενής

Πίνακας 1.4 Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών στη βαθμονόμηση

Ο Bieniawski συσχετίζει τις κλάσεις βραχομάζας της ταξινόμησής του με τα συστήματα υποστήριξης που εφαρμόζονται σε σήραγγα μικρού βάθους, πεταλοειδούς διατομής, διαμέτρου 10m που διανοίγεται με συμβατικό τρόπο (διατρήματα-εκρηκτικά). Ο πίνακας που δίνει τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης έχει συνταχθεί βάσει εμπειριών που αντιπροσωπεύουν τις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές σε Ευρώπη, Αμερική και Ν.Αφρική. Ωστόσο πρέπει να γίνονται επί τόπου δοκιμές κατά τη διάρκεια της κατασκευής γιατί μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη η μέθοδος για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

<i>Σχήμα: Πεταλοειδής. Μέση διάμετρος εκσκαφής: 10m. Κατακόρυφες τάσει:<25Μρα (βάθος<900m).Μέθοδος διάνοιξης: διάτρηση και ανατίναξη.</i>				
		Εναλλακτικά συστήματα υποστήριξης σε κατασκευή με συμβατικά μέσα		
Ποιότητα βραχομάζας	Μέθοδος εκσκαφής	Ηλώσεις (διάμετρος 20mm με πλήρη πάκτωση)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Μεταλλικά πλαίσια
I	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 3m.	Δεν απαιτείται καμία υποστήριξη εκτός από περιπτωσιακές σημειακές επί τόπου αγκυρώσεις.		
II	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 1-1,5m. Ολοκλήρωση υποστήριξης 20m από το μέτωπο.	Τοπικά, ηλώσεις στην οροφή μήκους 3m με αραιώση 2,5m και κατά περίπτωση πλέγμα.	50mm στην οροφή όπου χρειάζεται.	Κανένα
III	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδας, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1,5-3m. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4m, με αραιώση 1,5-2m στην οροφή και τους τοίχους και πλέγμα στην οροφή.	50-100mm στην οροφή και 30mm στις πλευρές.	Κανένα
IV	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδας, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1-1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4-5m, με αραιώση 1-1,5m στην οροφή και τους τοίχους με πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στις πλευρές.	Ελαφρά προς μέσα πλαίσια με αραιώση 1,5m όπου απαιτείται.
V	Τμηματική εκσκαφή πολλαπλών φάσεων. Βήμα εκσκαφής στο ανώτερο τμήμα 0,5-	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 5-6m, με αραιώση 1-1,5m στην	150-200mm στην οροφή, 150mm στις πλευρές και	Μέσα προς βαριά, με αραιώση 0,75m με επικάλυψη λαμαρίνας και στήριξη του

	1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνων με την εκσκαφή. Εφαρμογή σκυροδέματος όσο το δυνατόν γρηγορότερα μετά από κάθε ανατίναξη.	οροφή και τους τοίχους και χαλύβδινο πλέγμα. Ήλωση του ανάστροφου τόξου.	50mm στο μέτωπο.	μετώπου. Κλείσιμο του αντίστροφου τόξου.
--	--	--	------------------	--

Πίνακας 1.5 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης και μέθοδος εκσκαφής ανάλογα με την κατηγορία της βραχώμαζας

1.2.2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ BARTON ET AL (N.G.I)

Με αυτήν τη μέθοδο δίνεται περισσότερη βαρύτητα σε παραμέτρους όπως είναι η τραχύτητα των ασυνεχειών, τα χαρακτηριστικά αντοχής του υλικού πλήρωσης και το γεωστατικό φορτίο. Η ποιότητα της βραχώμαζας προκύπτει από τον συνδυασμό 6 παραμέτρων ως:

$$Q=(RQD/J_n)*(J_r/J_a)*(J_w/SRF) \text{ (Εξ. 1.1)}$$

όπου, J_n : αριθμός που χαρακτηρίζει τον αριθμό των οικογενειών των ασυνεχειών (στρώσεις, σχιστότητα, διακλάσεις)

J_r : αριθμός τραχύτητας των ασυνεχειών

J_a : αριθμός εξαλλοίωσης ασυνεχειών

J_w : συντελεστής αναγωγής νερού των ασυνεχειών

SRF: συντελεστής αναγωγής τάσεων

Η ελάχιστη τιμή RQD που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό είναι 10 και μια ακρίβεια $\pm 5\%$ θεωρείται ικανοποιητική.

Η περιγραφή της βραχώμαζας και η βαθμολόγηση των παραπάνω παραμέτρων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

A. Αριθμός οικογενειών των ασυνεχειών J_n			
1.	Συμπαγές, χωρίς ή με λίγες διακλάσεις		0,5-1,0
2.	Ένα σύστημα διακλάσεων		2,0
3.	Ένα σύστημα διακλάσεων και επί πλέον τυχαίες		3,0
4.	Δύο συστήματα διακλάσεων		4,0
5.	Δύο συστήματα διακλάσεων και επί πλέον τυχαίες		6,0
6.	Τρία συστήματα διακλάσεων		9,0
7.	Τρία συστήματα διακλάσεων και επί πλέον τυχαίες		12,0
8.	Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα διακλάσεων, τυχαίες, ισχυρά διακλασμένο, «κύβοι ζάχαρης», κτλ.		15,0
9.	Κονιορτοποιημένο πέτρωμα με μορφή εδαφικού σχηματισμού		20,0
	* Για διασταυρώσεις: $3J_n$		
	* Για εισόδους: $2J_n$		

B. Τραχύτητα των ασυνεχειών Jr			
1.	Ασυνεχείς διακλάσεις		4,0
2.	Τραχείες ή κυματώδεις, ακανόνιστες		3,0
3.	Λείες, κυματώδεις		2,0
4.	Τραχείες, επίπεδες/ολισθηρές, κυματώδεις		1,5
5.	Λείες, επίπεδες		1,0
6.	Ολισθηρές, επίπεδες		0,5
7.	Ζώνη με ορυκτά άργιλου πάχους αρκετού ώστε να μην εφάπτονται τα τοιχώματα		1,0
	*Προστίθεται 1,0 αν η μέση απόσταση του κύριου συστήματος διακλάσεων είναι μεγαλύτερη από 3m		
Γ. Υλικό πλήρωσης και αποσάθρωση τοιχωμάτων πετρώματος Ja			
	(α) Χωρίς ουσιαστικό υλικό πλήρωσης, επαφή τοιχωμάτων	Φ (ένδειξη)	
1.	«Επουλωμένες» υγιείς	-	0,75
2.	«Λεκιασμένα» τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάθρωση	(25°-35°)	1,0
3.	Αμμώδης υμένας/ ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	(25°-30°)	2,0
4.	Ιλυοαργιλικός υμένας (στιφρός)	(20°-25°)	3,0
5.	Υμένας από αργιλικά (μαλακά) ή ορυκτά μικρή φ (τάλκης, χλωρίτης, γύψος) ασυνεχείς υμένες 1-2mm πάχους	(8°-16°)	4,0
	(β) Με υλικό πλήρωσης, τοιχώματα σε επαφή 10cm πριν από διάτμηση		
6.	Από άμμο ή κονιορτοποιημένο πέτρωμα	(25°-30°)	4,0
7.	Από στιφρή άργιλο < 5mm πάχους (συνεχείς)	(16°-24°)	6,0
8.	Από μαλακή άργιλο < 5mm πάχους (συνεχείς)	(12°-16°)	8,0
9.	Από διογκούμενη άργιλο < 5mm) πάχους (συνεχείς) * Οι τιμές του Ja εξαρτώνται από το ποσοστό του μεγέθους των διογκούμενων αργιλικών κόκκων και την πρόσβαση σε νερό.	(6°-12°)	8,0-12,0
10.	Ζώνες ή τμήματα από αποσυντετημένο ή θρυμματισμένο πέτρωμα και άργιλο (ανάλογα με τον τύπο του αργιλικού υλικού, βλέπε G,H,J)	(6°-12°)	6,0, 8,0 ή 8,0-12,0
11.	Ζώνες ή τμήματα από ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο, μικρή ποσότητα μη μαλακής άργιλου		5,0
12.	Από στιφρή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς		10,0
13.	Από μαλακή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς		13,0
14.	Από διογκούμενη άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς		13,0-20,0
Δ. Κατάσταση από πλευράς υδάτων Jw			
1.	Στεγνό πέτρωμα ή λίγο νερό (τοπικά <5 l/min)		1,0
2.	Μέση εισροή νερού/μέση πίεση (1-2,5 kg/cm ²)		0,66
3.	Μεγάλη παροχή ή υψηλή πίεση σε ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης		0,5
4.	Μεγάλη παροχή ή υψηλή πίεση (ρωγμές με υλικό πλήρωσης που αποπλένεται σημαντικά)		0,33
5.	Υψηλή παροχή ή πίεση με προοδευτική μείωση (10 kg/cm ²)		0,2-0,1
6.	Υψηλή συνεχής παροχή		0,1-0,05

	*Αύξηση J_w αν υπάρχει αποστράγγιση.		
E. Συντελεστής αναγωγής τάσεων SRF			
	(α) Ασθενούς αντοχής ζώνες που τέμνουν την εκσκαφή και που μπορούν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας κατά την διάνοιξη της σήραγγας ¹ .		
1.	Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)		10
2.	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)		5,0
3.	Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος σήραγγας > 50m)		2,5
4.	Άφθονες διατημημένες ζώνες σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)		7,5
5.	Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)		5,0
6.	Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50m)		2,5
7.	Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος) ²		5,0
	(β) Σκληρό πέτρωμα, κατάσταση τάσεων	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
8.	Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια ³	>200	>13
9.	Μέσες τάσεις	200-10	13-0,66
10.	Υψηλές τάσεις, πολύ «σφιχτή» δομή	10-5	0,66-0,33
11.	Μαλακή «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	5-2,5	0,33-0,16
12.	Έντονη «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	<2,5	<0,16
	(γ) Συμπιεστό πέτρωμα, πλαστική ροή όλκιμου πετρώματος κάτω από υψηλές τάσεις		
13.	Μέτρια πίεση από τη συμπίεστικότητα		5-10
14.	Μεγάλη πίεση από τη συμπίεστικότητα		10-20
	(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, «χημική» διόγκωση σε συνάρτηση με την πίεση του νερού		
15.	Μέτρια πίεση από διόγκωση		5-10
16.	Μεγάλη πίεση από διόγκωση		10-15
	<p>1. Οι τιμές του SRF μειώνονται κατά 25-50% όταν οι ασθενείς ζώνες διάτμησης δεν τέμνουν την εκσκαφή αλλά απλώς την επηρεάζουν.</p> <p>2. Σε έντονα ανισότροπο πεδίο (αν μετρηθεί): α) όταν $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 < 10$ μειώνεται η σ_c και σ_t κατά 20%, β) όταν $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ μειώνεται η σ_c και σ_t κατά 40%, όπου σ_c: αντοχή στη μονοαξονική θλίψη, σ_t: αντοχή στον εφελκυσμό (φόρτιση αιχμής), σ_1 και σ_3: μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση</p> <p>Η σ_c και σ_t πρέπει να αντιστοιχούν στη διεύθυνση που είναι δυσμενής για την ευστάθεια σε περίπτωση ανισότροπου πετρώματος.</p> <p>3. Οι συγγραφείς δεν έχουν στοιχεία από πραγματικές περιπτώσεις όταν η σήραγγα βρίσκεται σε βάθος μικρότερο από το εύρος της, προτείνουν τότε μια αύξηση του SRF από 2,5 σε 5 (βλέπε Η).</p>		

Πίνακας 1.6 Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη Q

Ανάλογα με την τιμή του Q προκύπτει η ταξινόμηση της βραχόμαζας ως εξής:

Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχόμαζας για σήραγγες
<0,01	Εξαιρετικά πτωχή
0,01-0,1	Πάρα πολύ πτωχή
0,1-1,0	Πολύ πτωχή
1,0-4,0	Πτωχή
4,0-10,0	Μέτρια
10,0-40,0	Καλή
40,0-100,0	Πολύ καλή
100,0-400,0	Πάρα πολύ καλή
>400,0	Εξαιρετικά καλή

Πίνακας 1.7 Ταξινόμηση της βραχόμαζας κατά Barton et al.

Κατά Barton et al. προτείνεται η σχέση της φόρτισης υποστήριξης P σε συνάρτηση με την ποιότητα της βραχόμαζας Q και την τραχύτητα των ασυνεχειών J_r ως εξής:

$$P_{οροφής} = (2,0/J_r) * Q^{-1/3} \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

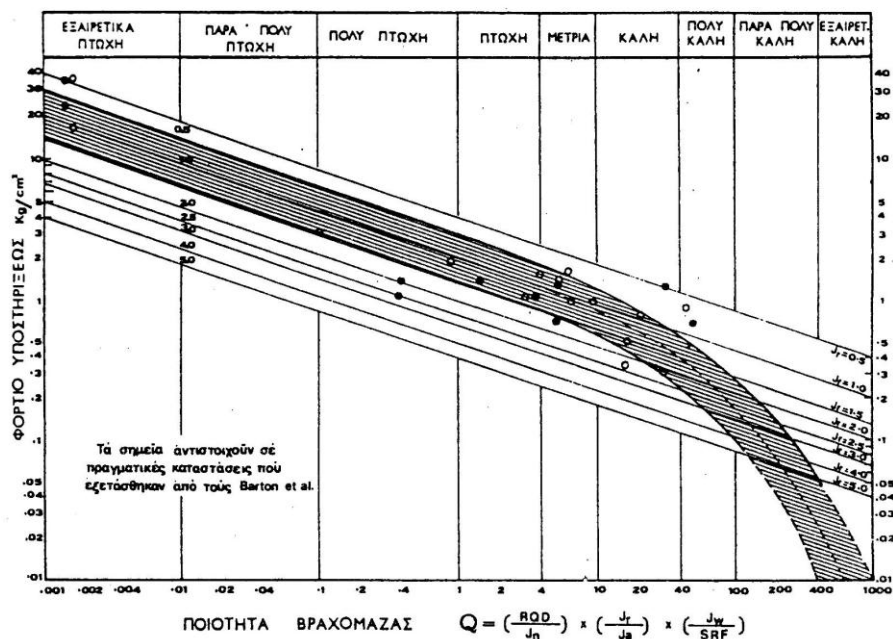
όπου P: η μόνιμη πίεση υποστήριξης οροφής (kg/cm^2)

J_r : ο αριθμός τραχύτητας των ασυνεχειών

Προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν και ο αριθμός των οικογενειών η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_{οροφής} = 2 * J_n^{1/2} * Q^{-1/3} / (3 * J_r) \quad (\text{Εξ. 1.3})$$

Για την πρώτη σχέση φορτίου οροφής προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 1.1:



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα φορτίου υποστήριξης-ποιότητας βραχώμαζας

Οι Barton et al. προτείνουν τον κατάλληλο τύπο υποστήριξης της σήραγγας ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας Q και την ισοδύναμη διάσταση De. Αυτή ισούται με το λόγο του ανοίγματος της σήραγγας (m) προς τον δείκτη ESR όπως αυτός δίνεται στον παρακάτω πίνακα ανάλογα με τον τύπο εκσκαφής.

a/a	ΤΥΠΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	ESR
A	Προσωρινά ανοίγματα μεταλλείων κλπ.	3-5
B	Κατακόρυφα φρέατα κυκλικής διατομής ορθογωνικής/τετραγωνικής διατομής	2,5 2,0
C	Μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα, σήραγγες νερού για υδροηλεκτρικά έργα (εκτός από υψηλές πιέσεις) διερευνητικές σήραγγες κλπ	1,6
D	Μικρές οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, στοές προσπελάσεων, αποθηκευτικοί θάλαμοι κλπ.	1,3
E	Μεγάλες οδικές σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι ενεργειακών σταθμών, καταφύγια πολιτικής άμυνας διασταυρώσεις, πύλες (αρχικά ανοίγματα σηράγγων)	1,0
F	Σταθμοί σιδηροδρόμων, εργοστάσια, υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί	0,8

Πίνακας 1.8 Παράμετρος ESR

Τελικά ο τύπος υποστήριξης ανάλογα με τον τύπο και το άνοιγμα της εκσκαφής και την ποιότητα της βραχώμαζας δίνεται από τους παρακάτω πίνακες:

Κατηγορία ύποστηριξης	O	Περιοριστικοί παράγοντες		De(m)	P (kg/cm ² (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος ύποστηριξης	Παρατηρήσεις
		RQD	Jr Ja					
1*	1000-400	-	-	-	<0.01	20-40	sb(utg)	-
2*	1000-400	-	-	-	<0.01	30-60	sb(utg)	-
3*	1000-400	-	-	-	<0.01	46-80	sb(utg)	-
4*	1000-400	-	-	-	<0.01	65-100	sb(utg)	-
5*	400-100	-	-	-	0.05	12-30	sb(utg)	-
6*	400-100	-	-	-	0.05	19-45	sb(utg)	-
7*	400-100	-	-	-	0.05	30-65	sb(utg)	-
8*	400-100	-	-	-	0.05	48-88	sb(utg)	-
9	100-40	≧20	-	-	0.25	8.5-19	sb(utg)	-
		<20	-	-			B(utg) 2.5-3m	-
10	100-40	≧30	-	-	0.25	14-30	B(utg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(utg) 1.5-2m	-
							+clm	-
11*	100-40	≧30	-	-	0.25	23-48	B(tg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(tg) 1.5-2m+clm	-
12*	100-40	≧30	-	-	0.25	40-72	B(tg) 2-3m	-
		<30	-	-			B(tg) 1.5-2+clm	-
13	40-10	≧10	≧1.5	-	0.5	5-14	sb(utg)	I
		≧10	<1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
		<10	≧1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
		<10	<1.5	-			B(utg) 1.5-2m	I
							+ S 2-3cm	
14	40-10	≧10	-	≧15	0.5	9-23	B(tg) 1.5-2m	I, II
		<10	-	≧15			+clm	
							B (tg) 1.5-2m	I, II
				<15			+S (mr) 5-10cm	
							B (utg) 1.5-2m	I, III
							+clm	
15	40-10	>10	-	-	0.5	15-40	B (tg) 1.5-2m	I, II, IV
		≧10	-	-			+clm	
							B (tg) 1.5-2m	I, II, IV
							+S (mr) 5-10cm	
16*	40-10	>15	-	-	0.5	30-65	B (tg) 1.5-2m	I, V, VI
							+clm	
Πλέκ XII		≧15	-	-			B (tg) 1.5-2m	I, V, VI
							+S (mr) 10-15cm	

Πίνακας 1.9.α Μέτρα υποστήριξης για βραχώμαζες εξαιρετικής, πάρα πολύ καλής και καλής ποιότητας

Κατηγορία υποστηρίξεως	Q	Περιοριστικοί παράγοντες P			De(m)	Τύπος ύψοστηρίξεως	Παρατηρήσεις	
		RQD Jn	Jr Ja	De(m)				
17	10-4	>30	-	-	1.0	3.5-9	sb(utg) B (utg) 1-1.5m B (utg) 1-1.5m +S 2-3cm	I I I
		≥10, ≤30	-	-				
		<10	-	≥6m				
18	10-4	<10	-	<6m	1.0	7-15	B (tg) 1-1.5m +clm B (utg) 1-1.5m +clm B (tg) 1-1.5m +S 2-3cm	I, III I I, III I
		>5	-	≥10m				
		≥5	-	≥10m				
		≤5	-	<10m				
19	10-4	-	-	≥20m	1.0	12-29	B (tg) 1-2m +S (mr) 10-15cm	I, II, IV I, II
		-	-	<20m				
20*	10-4	-	-	≥35m	1.0	24-52	B (tg) 1-2m +S (mr) 20-25cm	I, V, VI I, II, IV
		-	-	<35m				
βλ. XII	4-1	≥12.5	≤0.75	-	1.5	2.1-6.5	B (utg) 1m +S 2-3cm	I I
		<12.5	≤0.75	-				
22	4-1	-	>0.75	-	1.5	4.5-11.5	B (utg) 1m S 2.5-7.5cm	I I
		>10, <30	>1.0	-				
		≤10	>1.0	-				
23	4-1	<30	≤1.0	-	1.5	8-24	B (utg) 1m +S (mr) 2.5-5cm B(utg) 1m	I I, II, IV VII
		-	-	≥15m				
24*	4-1	-	-	≥15m	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5m +S (mr) 5-10m	I, V, VI I
		-	-	<15m				
βλ. XII	4-1	-	-	≥30m	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5m +S (mr) 15-30cm	I, V, VI I, II, IV
		-	-	<30m				
βλ. XII	4-1	-	-	≥30m	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5m +S (mr) 10-15cm	I, V, VI I, II, IV
		-	-	<30m				

Πίνακας 1.9.β Μέτρα υποστήριξης για μέτριας και πτωχής ποιότητας βραχώμαζας

Κατηγορία ύψοστηρί- ξης	Q	Περιοριστικοί παρά- γοντες		De(m)	P kg/cm ² (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος ύψοστη- ρίξης	Παρατηρήσεις
		RQD Jn	Jr Ja					
25	1.0-0.4	>10 ≤10	>0.5 ≤0.5	- -	2.25	1.5-4.2	B (utg) 1 m+mr ή cm 1 B (utg) 1 m+S (mr) 5 cm 1 B (tg) 1 m+S (mr) 5 cm 1	
26	1.0-0.4	-	-	-	2.25	3.2-7.5	B (tg) 1 m +S (mr) 5-7.5 cm B (utg) 1 m+S 2.5-5 cm 1	VII, X, XI I, IX
27	1.0-0.4	-	-	≥12m <12m >12m <12m	2.25	6-18	B (tg) 1 m +S (mr) 7.5-10 cm B (utg) 1 m +S (mr) 5-7.5 cm CCA 20-40 cm +B (tg) 1 m S (mr) 10-20 cm +B (tg) 1 m	I, IX I, IX VIII, X, XI VIII, X, XI
28*	1.0-0.4	-	-	≥30m	2.25	15-38	B (tg) 1 m +S (mr) 30-40cm	I, IV, V, IX
βλέπ. XII		-	-	≥20, <30 <20m			B (tg) 1 m +S (mr) 20-30 cm B (tg) 1 m +S (mr) 15-20 cm CCA (sr) 30-100cm +B (tg) 1 m	I, II, IV, IX I, II, IX IV, VIII, X, XI
29*	0.4-0.1	>5 ≤5	>0.25 ≤0.25	- -	3.0	1.0-3.1	B (utg) 1 m+S 2-3cm B (utg) 1 m+S (mr) 5cm B (tg) 1 m+S (mr) 5cm	- -
30	0.4-0.1	≥5 ≤5	- -	- -	3.0	2.2-6	B (tg) 1 m+S 2.5-5cm S (mr) 5-7.5cm B (tg) 1 m +S (mr) 5-7.5cm	IX IX VIII, X, XI
31	0.4-0.1	≥4 ≤4 ≥1.5 ≤1.5	- -	- -	3.0	4-14.5	B (tg) 1 m +S (mr) 5-12.5cm S (mr) 7.5-25cm CCA 20-40cm +B (tg) 1 m CCA (sr) 30-50cm +B (tg) 1 m	IX IX IX, XI VIII, X, XI
32	0.4-0.1	-	-	≥20m <20m	3.0	11-34	B (tg) 1 m +S (mr) 40-60cm B (tg) 1 m +S (mr) 20-40cm CCA (sr) 40-120cm +B (tg) 1 m	II, IV, IX, XI III, IV, IX, XI IV, VIII, X, XI

Πίνακας 1.9.γ Μέτρα υποστήριξης για βραχώμαζες πολύ πτωχής ποιότητας

Κατηγορία υποστήρι- ξεως	Q	Περιοριστικοί παρά- γοντες RQD		P kg/cm ² (προσέγγιση)	De(m)	De(m)	Τύπος υποστή- ριξεως	Παρατηρήσεις
		I _n	I _a					
33*	0.1-0.01	≥2	-	-	6	1.0-3.9	B (tg) 1m	IX
		<2	-	-			+S (mr) 2.5-5cm	
34	0.1-0.01	≥2	≥0.25	-	6	2.0-11	S (mr) 5-10cm	IX, X
		<2	≥0.25	-			B (tg) 1m	
		-	<0.25	-			+S (mr) 5-7.5cm	
		-	-	-			S (mr) 7.5-15cm	
35	0.1-0.01	-	-	≥15m	6	6.5-28	S (mr) 15-25cm	IX
		-	-	<15m			CCA (sr) 20-60cm	
		-	-	<15m			+B (tg) 1m	
		-	-	<15m			B (tg) 1m	
		-	-	<15m			+S (mr) 30-100cm	
36*	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-2.0	CCA (sr) 60-200cm	VIII, X, XI, II
		-	-	-			+B (tg) 1m	
37	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-6.5	B (tg) 1m	IX, XI, III
		-	-	-			+S (mr) 20-75cm	
38	0.01-0.001	-	-	≥10m	12	4.0-20	CCA (sr) 40-150cm	VIII, X, XI, III
		-	-	≥10m			+B (tg) 1m	
XIII		-	-	<10m			S (mr) 10-20cm	IX
		-	-	<10m			S (mr) 10-20cm	

Πίνακας 1.9.δ Μέτρα υποστήριξης για βραχώμαζες πάρα πολύ πτωχής και εξαιρετικά πτωχής

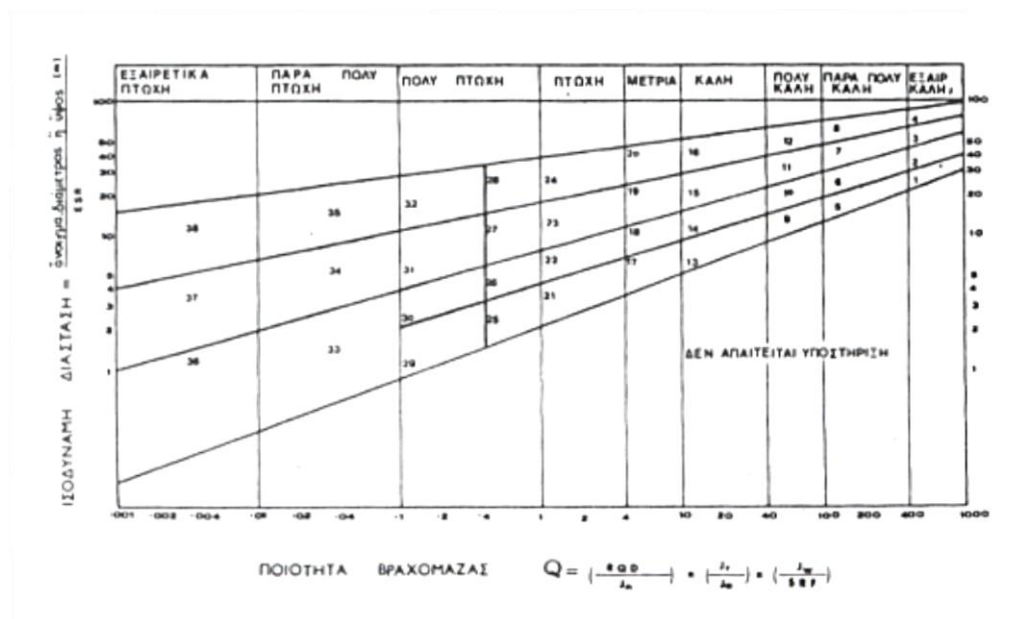
Παρατηρήσεις:

1. Ο τύπος υποστήριξης που προτείνεται από τους συγγραφείς προέκυψε από εκτιμήσεις τους καθώς δεν υπήρχε ικανοποιητικός αριθμός πραγματικών καταστάσεων.
2. Για τους τύπους 1-8 ανάλογα με την τεχνική ανατίναξης μπορεί και να μη χρειαστεί υποστήριξη
3. Για μεγάλες οδικές σήραγγες ως ισοδύναμη διάσταση λαμβάνεται η διάμετρος της σήραγγας.

4. Συμβολισμοί :

- Sb: σημειακές κοχλιώσεις
B: συστηματικές κοχλιώσεις
(utg): χωρίς τάση, με ένεμα
(tg): με τάση
S: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
(mr): ενίσχυση με πλέγμα
clm: αλυσιδωτό πλέγμα
CCA: τόξο από έγχυτο σκυρόδεμα
(Sr): ενίσχυση με σπλισμό
I: Για έντονες εκτινάξεις πετρωμάτων χρησιμοποιούνται κοχλιώσεις με προένταση και διευρυμένες φέρουσες πλάκες σε απόσταση περίπου 1 m
II: Χρησιμοποίηση διαφορετικού μήκους κοχλιών (3,5,7m)
III: Χρησιμοποίηση διαφορετικού μήκους κοχλιών (2,3,4m)
IV: Αγκύρια με προένταση ως συμπλήρωση της κοχλίωσης. Απόσταση αραίωσης 2-4 m
V: Όπως η II πχ 6,8,10m
VI: Όπως η IV με 4-6m αποστάσεις
VII: Μόνιμη υποστήριξη με σημειακές κοχλιώσεις και περιοχές αλυσιδωτού πλέγματος και τόξου ελευθέρου ανοίγματος από σκυρόδεμα (25-40cm)
VIII: Διαμόρφωση χώρου εντόνωσης πίσω από την υποστήριξη. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις διογκούμενων σχηματισμών σε συνδυασμό με την αποστράγγιση.
IX: Περιπτώσεις που δεν αφορούν συμπιεστά ή διογκούμενα πετρώματα
X: Συμπιεστά πετρώματα. Χρησιμοποίηση βαριάς και άκαμπτης υποστήριξης
XI: Η υποστήριξη με κοχλιώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται για $RQD/Jn > 1,5$. Διαφορετικά η υποστήριξη αποτελείται από περισσότερες εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (συστηματική κοχλίωση με προένταση, ένεμα πριν την προένταση και ήλωση)
XII-XIII: Εφαρμόζεται η μέθοδος υποστήριξης multiple drift.

Οι παραπάνω πίνακες μπορούν να παρασταθούν συνοπτικά από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.2 Κατηγορία υποστήριξης ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας και τον τύπο και άνοιγμα της εκσκαφής

1.2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)







Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής έχει καθιερωθεί διεθνώς για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας της βραχώμαζας. Εισήχθη από τους Hoek, Kaiser και Bawden το 1995 λόγω της ανεπάρκειας της χρήσης του RMR για βραχώμαζες πολύ πτωχής ποιότητας. Επεκτάθηκε για ασθενείς βραχώμαζες από τους Hoek, Marinos και Benissi το 1998 και Marinos και Hoek το 2000. Το 2002 έγινε ειδική ταξινόμηση για το φλύσχη από τους Marinos και Hoek. Εκτός από την ταξινόμηση εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών της βραχώμαζας ανάλογα με τη ρηγματώση. Βασίζεται στην εκτίμηση της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών της βραχώμαζας, δηλαδή βασίζεται περισσότερο σε γεωλογικές παρατηρήσεις και λιγότερο σε νούμερα σε αντίθεση με την ταξινόμηση κατά Bieniawski και Barton.

Συντάσεις και περιορισμοί για την εφαρμογή του GSI:

- Δεν πρέπει να περιορίζεται η χρήση του διαγράμματος στα εικονίδια που υπάρχουν αλλά πρέπει να διαβάζονται οι περιγραφές και να επιλέγεται αυτή που ταιριάζει καλύτερα στην κάθε περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί και να βρίσκεται κάποια βραχώμαζα ανάμεσα σε δύο περιγραφές.
- Η χαλάρωση της βραχώμαζας αξιολογείται από την παράμετρο διαταραχής D του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown της βραχώμαζας λόγω χρήσης

ανατινάξεων ή λόγω χαλάρωσης (0 για αδιατάρακτη έως 1 για πολύ διαταραγμένη βραχώμαζα) και όχι μέσω του δείκτη GSI.

- Η ύπαρξη ασυνεχειών με υλικό πλήρωσης περιγράφεται με την πτωχή κατάσταση ασυνεχειών στον πίνακα GSI ενώ αν είναι συστηματικό και παχύ συνίσταται η χρήση του πίνακα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (φλύσχης).
- Το κριτήριο Hoek-Brown προϋποθέτει ότι η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά και δεν υπάρχουν προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Σε περίπτωση που η αστοχία ελέγχεται από συγκεκριμένες διακριτές ασυνέχειες όπως πχ στην ολίσθηση σφήνας, τότε ο πίνακας GSI δεν μπορεί να εφαρμοστεί.
- Σε πολύ μεγάλα βάθη υπάρχει τόσο σφιχτή δομή που πλησιάζει το πέτρωμα τη συμπεριφορά άρρηκτου βράχου. Τότε η τιμή GSI πρέπει να μετακινείται αριστερά και πάνω. Αυτό δεν ισχύει αν υπάρχει μεγάλη τεκτονική καταπόνηση.
- Αν υπάρχει παρουσία νερού στο πέτρωμα ή στο υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών τότε η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται. Αυτό αναφέρεται στις τρεις τελευταίες στήλες του πίνακα. Σε αυτήν την περίπτωση συνίσταται η μετακίνηση προς τα δεξιά.
- Ο δείκτης εξάγεται από την οπτική εξέταση της βραχώμαζας σε επιφανειακές εμφανίσεις εκσκαφές, μέτωπα σήραγγων ή πυρήνες γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα στις σήραγγες πρέπει να εκτιμάται η βραχώμαζα που θα φέρει τα φορτία, έστω μια ζώνη μέχρι περίπου μια διάμετρο. Η συνεκτίμηση μικρών ή μεγάλων αλλαγών στη βραχώμαζα έξω από το ορατό μέτωπο είναι θέμα κρίσης. Αν εκτιμάται ότι πιο πτωχής ποιότητας βραχώμαζα είναι σημαντικά παρούσα ή βρίσκεται σε θέσεις συγκέντρωσης τάσεων τότε η τιμή GSI συνίσταται να αντιστοιχεί σε αυτή. Αν είναι αδύνατη η εκτίμηση του GSI στο βάθος της σήραγγας και η εκτίμηση γίνει από τις επιφανειακές εμφανίσεις τότε συνίσταται η μετακίνηση προς τα πάνω στο διάγραμμα κα ίσως ελαφρά προς τα αριστερά. Αυτή η μετακίνηση όμως δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (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 βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΟΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΟΧΗ
		Πολύ τραχιές, μη αποσπασθείσες επιφάνειες	Τραχιές, ελαφρά αποσπασθείσες και εξομαλυσμένες επιφάνειες	Λείες, μετρίου αποσπασθείσες και εξομαλυσμένες επιφάνειες	Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθείσες με σημαντική επιφάνεια ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθείσες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
	BLOCKY - Αδιάταρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			40	30	
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων				20	
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων					10
		← ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ				
		N/A	N/A			

Πίνακας 1.10 Πίνακας Γεωλογικού δείκτη GSI

ΠΕΔΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ:

Τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά κάθε πετρώματος ελέγχουν τους συνδυασμούς των δύο παραμέτρων του GSI και δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη δομών που να αντιστοιχούν σ' όλες τις περιοχές του διαγράμματος. Παρουσιάζονται λοιπόν τα πιο πιθανά πεδία του GSI για τις βραχόμαζες μίας σειράς πετρωμάτων από τα πλέον συνήθη στην Ελλάδα. Τα πεδία αυτά δίνονται περιγραφικά με αναφορά στο βασικό διάγραμμα GSI ή στο διάγραμμα GSI για φλύσχη και έχουν χαρακτήρα προσανατολισμού. Αποκλίσεις ασφαλώς υπάρχουν αλλά πρόκειται για εξαιρέσεις.

Ψαμμίτες-Κροκαλοπαγή: Όχι στην τελευταία σειρά και όχι στις δύο τελευταίες στήλες.

Ιλυόλιθοι, Αργιλικό Σχιστόλιθοι, Αργιλόλιθοι: Όχι στις δύο πρώτες στήλες. Αν δεν είναι διατμημένοι, προβάλλονται κυρίως στην 4η σειρά αλλιώς στην τελευταία.

Ασβεστόλιθοι: Κινούνται σε όλες τις σειρές εκτός από την τελευταία και σε όλες τις κολώνες εκτός από τις δύο τελευταίες. Αν εναλλάσσεται με πηλικά στρώματα συνίσταται η χρήση του διαγράμματος GSI για ετερογενείς βραχόμαζες (φλύσχη) (π.χ. τύπος B ή C)

Φλύσχη: Βλέπε πίνακα 1.11. Το διάγραμμα έχει ευρύτατα χρησιμοποιηθεί από την πρώτη εφαρμογή του (Marinos and Hoek, 2000 και 2002) στην Ελλάδα, αλλά επίσης και διεθνώς. Η χρήση του δοκιμάστηκε επιτυχώς με την κατασκευή των έργων στον σχεδιασμό των οποίων η εισαγωγή των παραμέτρων σχεδιασμού στηρίχθηκε στο GSI. Μία παρατήρηση χρήσιμη είναι ότι από την εφαρμογή του πίνακα στην πράξη φαίνεται ότι στην περίπτωση του τύπου G είναι δυνατόν η ανάπτυξη βραχόμαζας φλύσχη με λίγες ασυνέχειες στα επίπεδα των στρωμάτων του ιλυόλιθου και η ανάπτυξη πιο συνεχούς βραχόμαζας. Στην περίπτωση αυτή συνιστάται μια μετακίνηση, ίσως σημαντική (π.χ. κατά 10 μονάδες)

Μολάσσα: Η δομή της είναι πολύ πιο ήρεμη από αυτή του φλύσχη. Αν τα στρώματα-μέλη είναι παχυπλακώδη χωρίς εναλλαγές προτείνεται να αξιολογείται στο κανονικό διάγραμμα. Αν υπάρχουν συχνές εναλλαγές ψαμμιτικών με πηλικά στρώματα και αυτές είναι εκπεφρασμένες με διακριτές ασυνέχειες στα επίπεδα στρώσης, μπορεί να χρησιμοποιείται το διάγραμμα του φλύσχη εκτός από τις περιοχές F,H. Για τις περιοχές C,D,E συνίσταται μια μικρή μετακίνηση προς τα αριστερά (όχι πάντως πάνω από 5 μονάδες). Η κατάσταση αυτή είναι συνηθισμένη στα επιφανειακά τμήματα της βραχόμαζας. Σε βάθος, λόγω της ήρεμης γεωλογικής εξέλιξης της βραχόμαζας, οι στρώσεις αυτές μπορεί να μη διακρίνονται και να είναι «παγιδευμένες» μόνο στη μνήμη της βραχόμαζας (Hoek, et al., 2004).

Κερατόλιθοι: Σπάνια συναντώνται μόνοι τους. Αν εναλλάσσονται με ασβεστόλιθους ή η βραχόμαζα έχει ψαθυρή συμπεριφορά μπορεί να αξιολογηθούν στο κανονικό διάγραμμα GSI στην περιοχή της 4ης σειράς και στη 2η με 3η στήλη. Αν οι

κερατόλιθοι εναλλάσσονται με αργλικούς σχιστόλιθους τότε το σύστημα μπορεί να αξιολογηθεί από το διάγραμμα τύπου φλύσχη.

Μεταλλικές μάργες: Συνίσταται η διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών για την επιλογή των γεωτεχνικών παραμέτρων. Οι όποιες ασυνέχειες είναι αραιές και δεν έχουν παρά ασήμαντη επίδραση στην ίδια την βραχόμαζα (εκτός για τυχόν τοπική κινηματική αστοχία)

Γρανιτικά πετρώματα: Όταν είναι υγρή αξιολογούνται στις τρεις πρώτες σειρές και δύο πρώτες στήλες. Αν είναι αποσαθρωμένα ο δείκτης μετακινείται προς τα δεξιά και φυσικά αλλάζει και το m_i και το σ_{ci} . Αν είναι αρκετά αποσαθρωμένα αλλά όχι πλήρως τότε το υλικό μπορεί να ταξινομηθεί στην προτελευταία σειρά και δεξιά. Αν είναι εντελώς αποσαθρωμένα τότε είναι εκτός της λογικής του GSI.

Βασικά-Υπερβασικά πετρώματα: Όταν είναι υγρή βαθμονομούνται στις τρεις πρώτες σειρές και τρεις πρώτες στήλες. Αν είναι ιδιαίτερα αποσαθρωμένα, η βραχόμαζα κινείται αναλόγως με την αποσάθρωση στην προτελευταία σειρά και στο δεξιό της τμήμα. Αν η αποσαθρωμένη βραχόμαζα είναι και διατμημένη προβάλλεται στη τελευταία σειρά και στις δύο τελευταίες στήλες.

Ηφαιστειακά: Κινούνται στις τρεις πρώτες γραμμές του διαγράμματος εφόσον δεν είναι κατακερματισμένα και στις τρεις πρώτες στήλες εφόσον δεν είναι αποσαθρωμένα



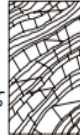
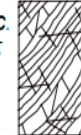

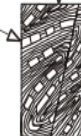


Γνεύσιος: Ο δείκτης κινείται κατ' αναλογία με το γρανίτη.

Σχιστόλιθοι: Κινούνται στη 3η ή 4η σειρά. Οι ισχυροί σχιστόλιθοι (π.χ. μαρμαρυγακοί) τοποθετούνται αριστερά ενώ οι ασθενείς προς τα δεξιά. Στους τελευταίους αν είναι και διατμημένοι (π.χ. διατμημένοι φυλλίτες), ο δείκτης μετακινείται στην τελευταία σειρά και στις δύο τελευταίες στήλες.

Χαλαζίτες: Όπως οι ψαμμίτες αλλά ο δείκτης GSI περιορίζεται στις δύο πρώτες στήλες.

Μάρμαρο: Όπως ο ασβεστόλιθος.

Εναλλαγές χαλαζιτών-φυλλιτών: Ο δείκτης κινείται κατά τη λογική του διαγράμματος του φλύσχη. Λόγω όμως της ισχυροποιημένης κατάστασης των πετρογραφικών μελών και συνεπώς και της καλύτερης κατάστασης των ασυνεχειών συνίσταται μετακίνηση, π.χ. 5 μονάδες, προς τα αριστερά αλλά βέβαια μόνο για τις περιπτώσεις C,D,E,G.

GSI ΣΕ ΕΤΕΡΕΓΟΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ ΦΛΥΣΧΗΣ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ (κυρίως επίπεδα στρώσης)						
<p>Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επιλέγεται κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επιλέξτε την θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek-Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες και όταν οιασδήποτε επιπέδου επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας.</p> <p style="text-align: center;">Marinos & Hoek, 2001</p> <p>ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ</p>		<p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσπασθριμμένες επιφάνειες</p>	<p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθριμμένες επιφάνειες</p>	<p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθριμμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, ενίοτε επιφάνειες ολίθωσης με συμπαγή επιφλοιομάτα ή υλικό πλήρωσης με γωνιακά θραύσματα</p>	<p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες επιφάνειες ολίθωσης πολύ αποσπασθριμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>		
 <p>ΤΥΠΟΣ Α. Παχυστρωματώδης, μερικής διαταραγμένης ψαμμίτης. Η επιρροή πολύ λεπτών πληθικών ενστρώσεων είναι περιορισμένη. Σε αβαθείς σήραγγες ή πρανή αν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης και τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI.</p>		70	60	A				
 <p>ΤΥΠΟΣ Β. Ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ C. Ψαμμίτης και ιλυόλιθος σε κανονική αναλογία</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ D. Ιλυόλιθος ή ιλυολιθικός σχιστόλιθος με στρώσεων με ψαμμίτη</p>	 <p>Ε. Ασθενής ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με στρώσεις ψαμμίτη</p>		50	40	B C D E	
		 <p>ΤΥΠΟΣ F. Τεκτονικώς παραμορφωμένος διατηρημένος αργ. σχιστόλιθος ή ιλυόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα στρώματα ψαμμίτη σε χαοτική δομή</p>				30	20	F
 <p>ΤΥΠΟΣ Γ. Πρακτικά αδιατάρακτος ιλυολιθικός ή αργιλικός σχιστόλιθος με ή χωρίς την παρουσία πολύ λεπτών ενστρώσεων ψαμμίτη</p>		 <p>ΤΥΠΟΣ Η. Τεκτονικώς διατηρημένος αργιλικός σχιστόλιθος σε χαοτική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα έχουν μετατραπεί σε πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια</p>		N/A	N/A		G H ¹⁰	

Πίνακας 1.11 Πίνακας GSI για ετερογενείς βραχώμαζες

Ταξινόμηση συμπεριφοράς βραχώμαζας για σήραγγες

Διακρίνονται 3 ζώνες GSI :

- **Ζώνη I:** Παρουσιάζεται αστάθεια της βραχώμαζας κάτω από πολύ υψηλές τάσεις με τη μορφή εκτινάξεων πετρώματος (rock burst). Αυτό αντιμετωπίζεται με περιορισμό της συγκέντρωσης των τάσεων.
- **Ζώνη II:** Παρουσιάζεται αστάθεια λόγω δομικών ασυνεχειών όπως σφήνες για υψηλό λόγο σ_{cm}/p_o που αντιμετωπίζεται με περιορισμό της χαλάρωσης και αποδιοργάνωσης της μάζας και συγκράτηση των διακριτών ασταθών τεμαχών. Για χαμηλές τιμές του λόγου έχουμε αστάθεια λόγω τασικού πεδίου. Αντιμετωπίζεται με περιορισμό της χαλάρωσης και αποδιοργάνωσης της μάζας. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλές πολύ πυκνές ασυνέχειες παρουσιάζεται καταρροή της βραχώμαζας που για χαμηλές τάσεις μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλά μέτρα υποστήριξης.

- **Ζώνη III:** Παρουσιάζονται προβλήματα παραμορφώσεων για υψηλές τιμές του λόγου σ_{cm}/p_0 ενώ για χαμηλές τιμές του λόγου εμφανίζονται φαινόμενα ισχυρής σύνθλιψης (πολύ μεγάλες παραμορφώσεις) που απαιτούν ενέργειες συγκράτησής τους.

Οι ζώνες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα GSI:



Πίνακας 1.12 Ζώνες GSI για σήραγγες

1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

1.3.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK-BROWN ΓΙΑ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΟ

Οι Hoek και Brown το 1980 δημοσίευσαν το αρχικό κριτήριο αστοχίας ξεκινώντας με τις παραμέτρους του άρρηκτου βράχου και στη συνέχεια μειώνοντας τις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Δίνεται από τη σχέση μεταξύ των κύριων τάσεων ως εξής:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_i \cdot \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^{0.5} \quad (\text{Εξ. 1.4})$$

Αντικαθιστώντας το s με 1 διαμορφώθηκε το αρχικό κριτήριο αστοχίας για άρρηκτο βράχο ως εξής:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_i \cdot \sigma'_3 / \sigma_{ci} + 1)^{0.5} \quad (\text{Εξ. 1.5})$$

όπου σ'_1 και σ'_3 είναι η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα κύρια τάση στην αστοχία
 σ_{ci} είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του άθικτου βράχου
 m_i είναι μια σταθερά υλικού για τον άθικτο βράχο

Σε περίπτωση που δεν διατίθενται εργαστηριακά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της σταθεράς m_i η τιμή της μπορεί να ληφθεί από τον πίνακα 1.13:

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ Λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιοδίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

Πίνακας 1.13 Τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο

* Το m_i των κροκαλοπαγών και λατυποπαγών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού και το βαθμό συγκόλλησης. Έτσι η τιμή του μπορεί να κυμαίνεται από αυτήν που αντιστοιχεί στους ψαμμίτες (17±4) έως αυτήν των λεπτόκοκκων ιζημάτων (μικρότερη του 10)

** Οι τιμές του m_i αναφέρονται για δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάστηκαν κάθετα στη στρώση ή τη σχιστότητα. Το m_i μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές εάν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

Ο πίνακας 1.14 δίνει τις εκτιμήσεις πεδίου της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του βράχου:

ΒΑΘΜΟ-ΝΟΜΗΣΗ	ΟΡΟΣ	ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ
R6	Εξαιρετικά σκληρό	>250	>10	Το βραχώδες υλικό απολεπίζεται κάτω από επαναλαμβανόμενα χτυπήματα του γεωλογικού σφυριού.	Φρέσκος βασάλτης, διαβάσης, γνεύσιος, γρανίτης, χαλαζίτης
R5	Πολύ σκληρό	100-250	4-10	Απαιτούνται πολλά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί για να σπάσουν τμήματα του άθικτου βράχου.	Αμφιβαλίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάβρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ρυόλιθος, τόφρος
R4	Σκληρό	50-100	2-4	Κομμάτια μεγέθους γροθιάς αφαιρούνται με ένα μόνο χτύπημα του γεωλογικού σφυριού.	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, φυλλίτης, ψαμμίτης, σχιστόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος
R3	Μέτρια σκληρό	25-50	1-2	Με δυνατό χτύπημα το γεωλογικό σφυρί χαράσσει το βράχο μέχρι 5mm, το μαχαίρι ξύνει την επιφάνεια	Αργιλόλιθος, κάρβουνο, σκυρόδεμα, σχιστόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
R2	Ασθενές	5-25	...	Το μαχαίρι κόβει το δείγμα αλλά δύσκολη η μόρφωση δοκιμίου τριαξονικής δοκιμής	Τάλκης, ορυκτό αλάτι, ποτάσα
R1	Πολύ ασθενές	1-5	...	Το υλικό καταρρέει άτω από δυνατά χτυπήματα με τη μύτη του γεωλογικού σφυριού, μπορεί να μορφοποιηθεί με μαχαίρι	Πολύ αποσπασμένο ή μεταμορφωμένο πέτρωμα
R0	Εξαιρετικά ασθενές	0,25-1	...	Χαράσσεται με το νύχι	Αργιλικό υλικό πλήρωσης ρήγματος

Πίνακας 1.14 Εκτίμηση πεδίου της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής

* Όλοι οι τύποι των βράχων παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος αντοχής σε μονοαξονική θλίψη το οποίο αναπαριστά την ετερογένεια στη σύνθεση και την ανισοτροπία στη δομή. Οι σκληροί βράχοι χαρακτηρίζονται από καλό κλείδωμα των κρυσταλλικών ιών και λίγα κενά.
 ** Οι βράχοι με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κάτω από 25MPa παρέχουν μη αξιόπιστα αποτελέσματα στη δοκιμή σημειακής φόρτισης.

Για την περίπτωση βραχώμαζας που είναι ετερογενής όπως ο φλύσχης εκτός από τον διαφορετικό πίνακα GSI προτείνονται και διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους σ_{ci} και m_i , ανάλογα με τον τύπο του φλύσχης, όπως αυτές φαίνονται στον πίνακα 1.15.

Τύπος φλύσχη	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_{ci} και m_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση των παραμέτρων του φλύσχη ανάλογα με τον τύπο του
A & B	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
C	Μειώστε τις τιμές του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου
D	Μειώστε τις τιμές του ψαμμίτη κατά 40% και χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου
E	Μειώστε τις τιμές του ψαμμίτη κατά 40% και χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου
F	Μειώστε τις τιμές του ψαμμίτη κατά 60% και χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου
G	Χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου ή του αργίλικού σχιστόλιθου
H	Χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές του ιλυολίθου ή του αργίλικού σχιστόλιθου

Πίνακας 1.15 Προτεινόμενες αναλογίες για τις παραμέτρους σ_{ci} και m_i των λιθολογικών μελών για εκτίμηση των παραμέτρων του φλύσχη ανάλογα με τον τύπο του.

1.3.2 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK-BROWN ΓΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

Δημοσιεύτηκε το 1995 από τους Hoek, Kaiser και Bawden συνοψίζοντας το αρχικό κριτήριο (1980) και το τροποποιημένο (1992). Το τροποποιημένο που εισήχθη από τους Hoek, Wood και Shah έλαβε υπόψη τη μηδενική εφελκυστική αντοχή για πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες και εισήγαγε το συντελεστή α στο κριτήριο αστοχίας το οποίο πλέον στη θέση του εκθέτη 0,5 του αρχικού κριτηρίου είχε το α .

Το γενικευμένο κριτήριο τελικά πήρε την παρακάτω μορφή:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} * (m_b * \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^\alpha \quad (\text{Εξ. 1.6})$$

όπου s, α είναι σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας

σ_{ci} είναι η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη του άρρηκτου βράχου
 m_b είναι η τιμή της σταθεράς του κριτηρίου m για τη βραχώμαζα
 σ'_1, σ'_3 είναι οι κύριες ενεργές τάσεις κατά την αστοχία

Οι παραπάνω τρεις σταθερές μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του RMR ή GSI ως εξής:

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \quad (\text{Εξ. 1.7})$$

Για $GSI > 25$: $\alpha = 0,5$ και $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$ (Εξ. 1.8)

Για $GSI < 25$: $\alpha = 0,65 - \frac{GSI}{200}$ και $s = 0$ (Εξ. 1.9)

Δηλαδή για τιμές GSI άνω των 25 χρησιμοποιείται το αρχικό κριτήριο ενώ για κάτω των 25 το τροποποιημένο.

Για να εκτιμηθεί η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας (για $\sigma_1 = \sigma_{cm}$ και $\sigma_3 = 0$) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{25,5}\right) \quad (E\zeta. 1.10)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{52,63} \exp\left(\frac{GSI}{20}\right) \quad (E\zeta. 1.11)$$

Η εφελκυστική αντοχή που αντανακλά την αλληλεμπλοκή των βραχωδών τεμαχών όταν αυτά δεν μπορούν να διασταλούν δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m_b \sqrt{4s + m_b^2}) \quad (E\zeta. 1.12)$$

Το 2002 οι Hoek, Carranza-Torres και Corkum τροποποίησαν το γενικευμένο κριτήριο προκειμένου να συμπεριλάβουν και την επίδραση του συντελεστή διαταραχής της βραχώμαζας D. Επομένως οι παράμετροι m_b , s και a εκτός από το GSI εξαρτώνται και από το D:

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (E\zeta. 1.13)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (E\zeta. 1.14)$$

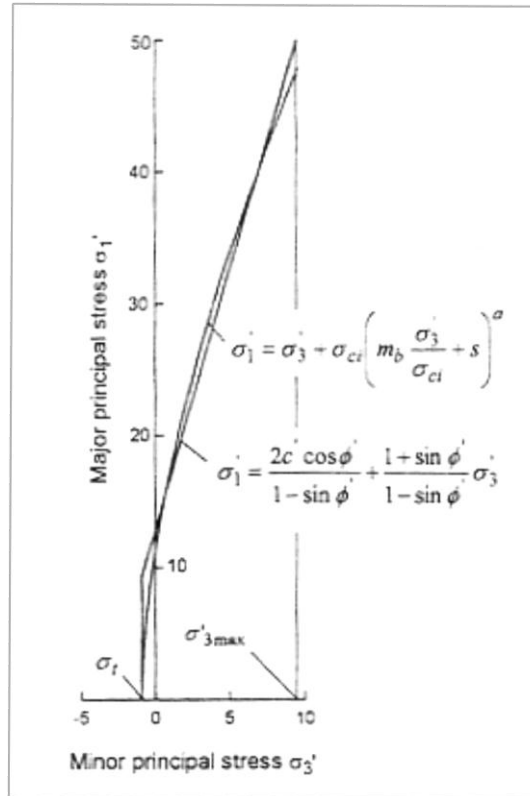
$$a = 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (E\zeta. 1.15)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι τα παραπάνω κριτήρια αναφέρονται σε ομογενή και ισότροπη βραχώμαζα και δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις που η αστοχία ελέγχεται από την ανισότροπη συμπεριφορά της βραχώμαζας όπως μπορεί να συμβαίνει για παράδειγμα στην ανάλυση πρηνών.

1.3.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ MOHR-COULOMB ΚΑΙ HOEK-BROWN - ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Από τη στιγμή που δημοσιεύτηκε το κριτήριο Hoek-Brown ήταν αναγκαία η εύρεση κάποιας σχέσης μεταξύ των μη γραμμικών παραμέτρων της m και a , και των παραμέτρων c και ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb, αφού μέχρι και σήμερα τα περισσότερα προγράμματα που χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές εφαρμογές βασίζονται στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται γραμμική περιβάλλουσα Mohr-Coulomb και η καμπύλη που προκύπτει από

το γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown για διάφορες τιμές της σ_3' μεταξύ της σ_t και της $\sigma'_{3\max}$.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα κυρίων τάσεων σ_1 και σ_3 για τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb

Προσαρμόζοντας την καμπύλη στην ευθεία, με εξίσωση των τμημάτων άνω και κάτω της ευθείας M-C προκύπτουν οι εξισώσεις για την ισοδύναμη συνοχή c' και γωνία τριβής ϕ' :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (Eξ. 1.16)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \quad (Eξ. 1.17)$$

όπου $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci}$

Οι παραπάνω σχέσεις δίνονται για την τελευταία έκδοση του γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown του 2002.

Για να υπολογιστούν οι ισοδύναμες παράμετροι είναι απαραίτητη η γνώση της $\sigma'_{3\max}$ η οποία διαφέρει ανάλογα με την κατασκευή όπου εφαρμόζεται. Για σήραγγες δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,94} \quad (Eξ. 1.18)$$

όπου γ είναι το ειδικό βάρος της βραχώμαζας, H το ύψος των υπερκειμένων και σ'_{cm} είναι η αντοχή της βραχώμαζας όπως προκύπτει βάσει των ισοδύναμων παραμέτρων c' και ϕ' :

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (Eξ. 1.19)$$

και συγκεκριμένα για $\sigma_1 < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$:

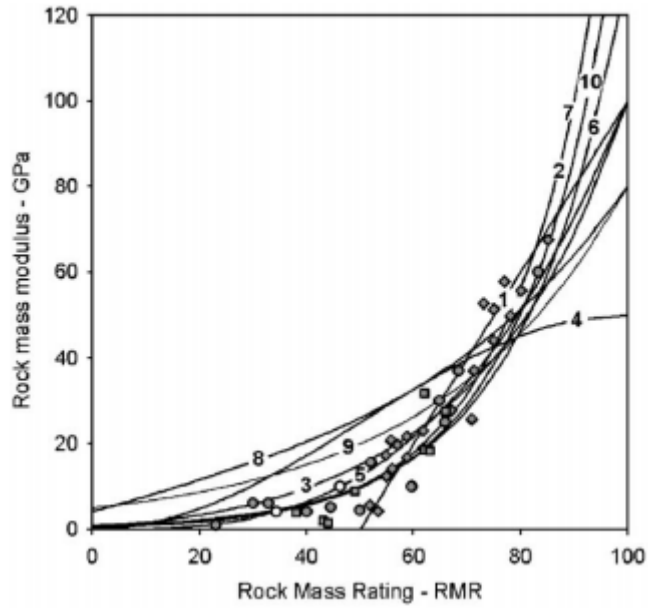
$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (Eξ. 1.20)$$

1.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Το μέτρο παραμόρφωσης της βραχώμαζας αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για αναλύσεις βραχώμαζας που περιλαμβάνουν παραμορφώσεις, όπως συμβαίνει για το σχεδιασμό της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης μιας σήραγγας. Ωστόσο, οι επί τόπου μετρήσεις για αυτό το μέτρο εκτός του υψηλού κόστους και του χρόνου που απαιτούν για να διεξαχθούν, πολλές φορές δίνουν αμφισβητήσιμα αποτελέσματα. Γι' αυτόν το λόγο πολλοί συγγραφείς έχουν προτείνει εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης για ισότροπη βραχώμαζα βασισμένες σε συστήματα κατάταξης όπως το RMR, το Q και το GSI όπως έχουν περιγραφεί πιο πάνω. Οι πιο γνωστές εμπειρικές σχέσεις παρατίθενται παρακάτω. Το διάγραμμα 1.4 απεικονίζει αυτές τις σχέσεις και τις συγκρίνει με τα αποτελέσματα μετρήσεων πεδίου των Serafim and Pereira, Bieniawski και Stephens and Banks (σημεία στο διάγραμμα).

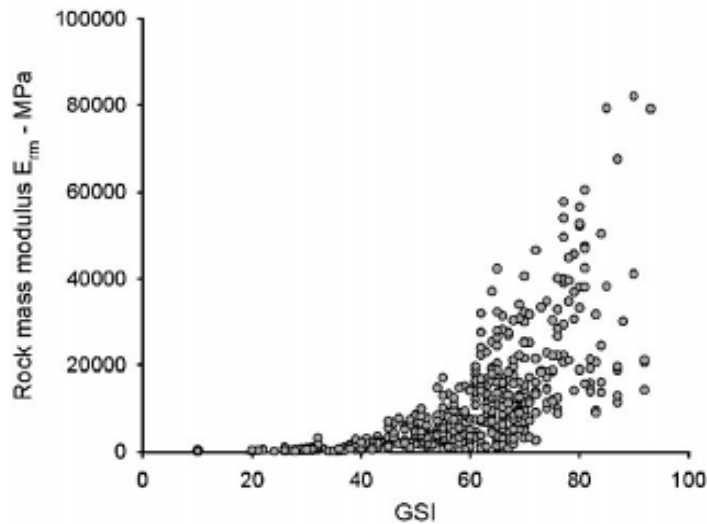
1. $E_{rm} = 2RMR - 100$ *Bieniawski*
2. $E_{rm} = 10^{((RMR-10)/40)}$ *Serafim and Pereira*
3. $E_{rm} = E_i/100(0,0028RMR^2 + 0,9 \exp(RMR/22,85))$, $E_i=50\text{GPa}$ *Nicholson and Bieniawski*
4. $E_{rm} = E_i(0,5(1 - \cos(\pi RMR/100)))$, $E_i=50\text{GPa}$ *Mitri et al.*
5. $E_{rm} = 0,1(RMR/10)^3$ *Read et al.*
6. $E_{rm} = 10Q_c^{1/3}$, $Q_c=Q\sigma_{ci}/100$, $\sigma_{ci}=100\text{MPa}$ *Barton*
7. $E_{rm} = (1-D/2) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{((RMR-10)/40)}$, $D=0$, $\sigma_{ci}=100\text{MPa}$ *Hoek et al.*
8. $E_{rm} = E_i(s^a)^{0,4}$, $E_i=50\text{GPa}$, $s=\exp((GSI-100)/9)$, $GSI=RMR$,
 $a=1/2+1/6(\exp(-GSI/15)-\exp(-20/3))$ *Sonmez et al.*
9. $E_{rm} = E_i s^{1/4}$, $E_i=50\text{GPa}$, $s=\exp((GSI-100)/9)$ *Carvalho*
10. $E_{rm} = 7(\pm 3)\sqrt{Q'}$, $Q'=10((RMR-44)/21)$ *Diederichs and Kaiser*

όπου το E_{rm} είναι σε GPa και το σ_{ci} είναι σε MPa και E_i είναι το μέτρο παραμόρφωσης του άρρηκτου βράχου.



Σχήμα 1.4 Εμπειρικές σχέσεις εκτιμήσεις του μέτρου παραμόρφωσης της βραχώμαζας σε σχέση με δεδομένα από μετρήσεις

Το 2006 δημοσιεύτηκαν από τους Hoek και Diederichs δύο νέες εξισώσεις για την εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσης για ισότροπη βραχώμαζα βασισμένες στα αποτελέσματα αναλύσεων από επί τόπου μετρήσεις για το μέτρο παραμόρφωσης για διάφορους τύπους βράχου στην Κίνα και στην Ταϊβάν. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνονται τα αποτελέσματα αυτά συναρτήσει του δείκτη GSI.



Σχήμα 1.5 Μέτρο παραμόρφωσης της βραχώμαζας όπως αυτό μετρήθηκε σε Κίνα και Ταϊβάν σε σχέση με το μέτρο GSI

Οι Hoek και Diederichs έκαναν τις εξής υποθέσεις αναλύοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων:

- ✓ Το άνω όριο των μετρήσεων αντιστοιχεί σε βραχώμαζες συμπαγείς και αδιατάρακτες όπως αυτές που συναντώνται σε μεγάλα βάθη.
- ✓ Η μείωση του μέτρου παραμόρφωσης για διαταραγμένες βραχώμαζες εξαρτάται από τον συντελεστή διαταραχής D.
- ✓ Προκειμένου να περιγραφεί η αύξηση του μέτρου παραμόρφωσης καθώς αυξάνεται το GSI χρησιμοποιήθηκε ως η συνάρτηση:

$$y = c + \frac{a}{1 + e^{-((x-x_0)/b)}}$$

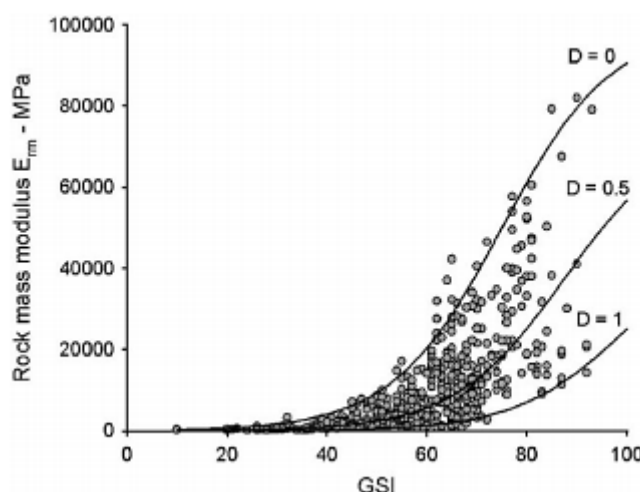
Βάσει, λοιπόν, των παραπάνω υποθέσεων προέκυψε η απλοποιημένη εξίσωση των Hoek και Diederichs:

$$E_{rm} = 100.000 \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{75 + 25D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad (\text{Εξ. 1.21})$$

όπου το E_{rm} δίνεται σε MPa

Για $D=0$ (αδιατάρακτη βραχώμαζα) προκύπτει το άνω όριο ενώ για $D=1$ (πλήρως διαταραγμένη) προκύπτει το κάτω όριο.

Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η εξίσωση αυτή για $D=0$, $D=0,5$ και $D=1$ παράλληλα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε Κίνα και Ταϊβάν.



Σχήμα 1.6 Απλοποιημένη εξίσωση Hoek και Diederichs σε σχέση με τα δεδομένα των μετρήσεων από Κίνα και Ταϊβάν.

Η απλοποιημένη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν υπάρχουν δεδομένα για το δείκτη GSI της βραχώμαζας (ή RMR ή Q). Στην περίπτωση που υπάρχουν

εκτιμήσεις για το μέτρο παραμόρφωσης του άρρηκτου βράχου ή για την αντοχή του μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αναλυτική εξίσωση των Hoek και Diederichs:

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad (E\zeta. 1.22)$$

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν απευθείας εκτιμήσεις για το μέτρο παραμόρφωσης του άρρηκτου βράχου E_i , που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση, αυτό μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση :

$$E_i = MR * \sigma_{ci} \quad (E\zeta. 1.23)$$

Ο συντελεστής MR δίνεται κατά Deere από τον πίνακα 1.16:

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300-400	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400	Claystones 200-300
			Breccias 230-350		Greywackes 350	Shales 150-250 ^a Marls 150-200
	Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400-600	Sparitic limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b	
Organic					Chalk 1000+	
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750 ^a	
	Foliated ^a			Schists 250-1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300-800 ^a	Slates 400-600 ^a
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300-550 Granodiorite ^c 400-450	Diorite ^c 300-350		
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600	Volcanic breccia (500) ^b	Tuff ^c 200-400	

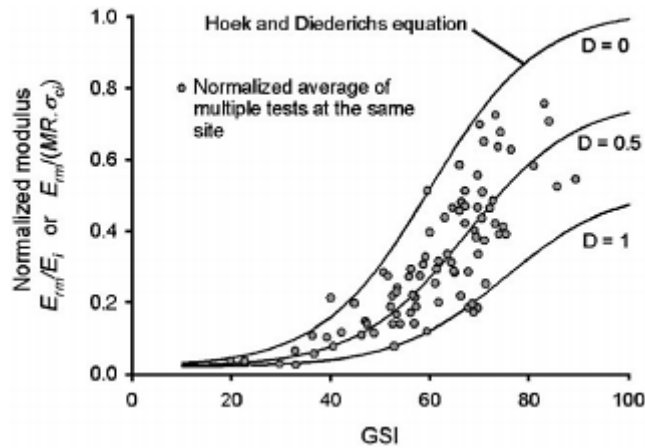
^aHighly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.

^bNo data available, estimated on the basis of geological logic.

^cFelsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

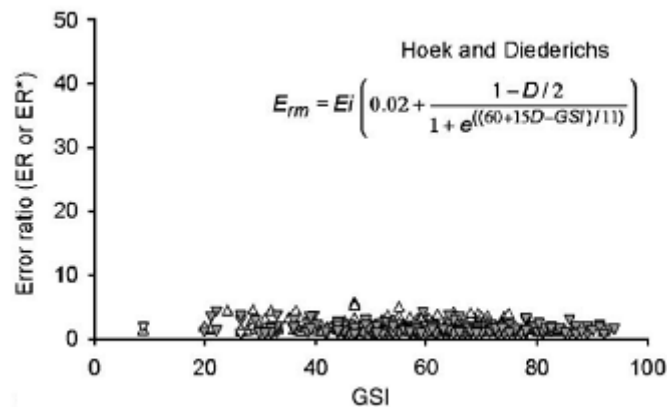
Πίνακας 1.16 Επιλογή του συντελεστή MR ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος κατά Deere και Palmstrom και Singh

Η σχέση του λόγου του μέτρου παραμόρφωσης της βραχώμαζας προς αυτό του άρρηκτου βράχου για $D=0$, $D=0,5$ και $D=1$, βάσει της εξίσωσης 1.22 και σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε Κίνα και Ταϊβάν δίνεται στο διάγραμμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Κανονικοποιημένο διάγραμμα του μέτρου παραμόρφωσης της βραχώμαζας σε σχέση με το GSI όπως προκύπτει από την εξίσωση των Hoek και Diederichs σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε Κίνα και Ταϊβάν




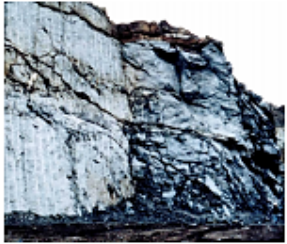

Η εξίσωση 1.22 δίνει αρκετά ακριβείς εκτιμήσεις για το μέτρο παραμόρφωσης της βραχώμαζας σε περισσότερες περιπτώσεις έργων του μηχανικού. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα του λόγου ER του υπολογιζόμενου μέτρου E_{rm} προς το μετρούμενο για διάφορες τιμές του GSI, αφού κυμαίνεται κοντά στη μονάδα.



Σχήμα 1.8 Σχέση μεταξύ του υπολογιζόμενου και του μετρούμενου μέτρου παραμόρφωσης για διάφορες τιμές του GSI (για $D=0,5$)

Ο συντελεστής διαταραχής D που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις των Hoek και Diederichs είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς. Η τιμή του διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο εκσκαφής και τη συχνότητα του φορτίου σε κάθε κατασκευή. Για παράδειγμα, υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στην κατασκευή ενός θεμελίου και μια σήραγγας, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον μηχανικό. Δεν υπάρχει ακόμα

τρόπος να ποσοτικοποιηθούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαταραχή γύρω από την εκσκαφή, ωστόσο με βάση την εμπειρία και τις αναλύσεις από διάφορες περιπτώσεις έργων δίνονται οι παρακάτω οδηγίες για την εκτίμηση του συντελεστή D.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Πίνακας 1.17 Οδηγίες για την εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής D

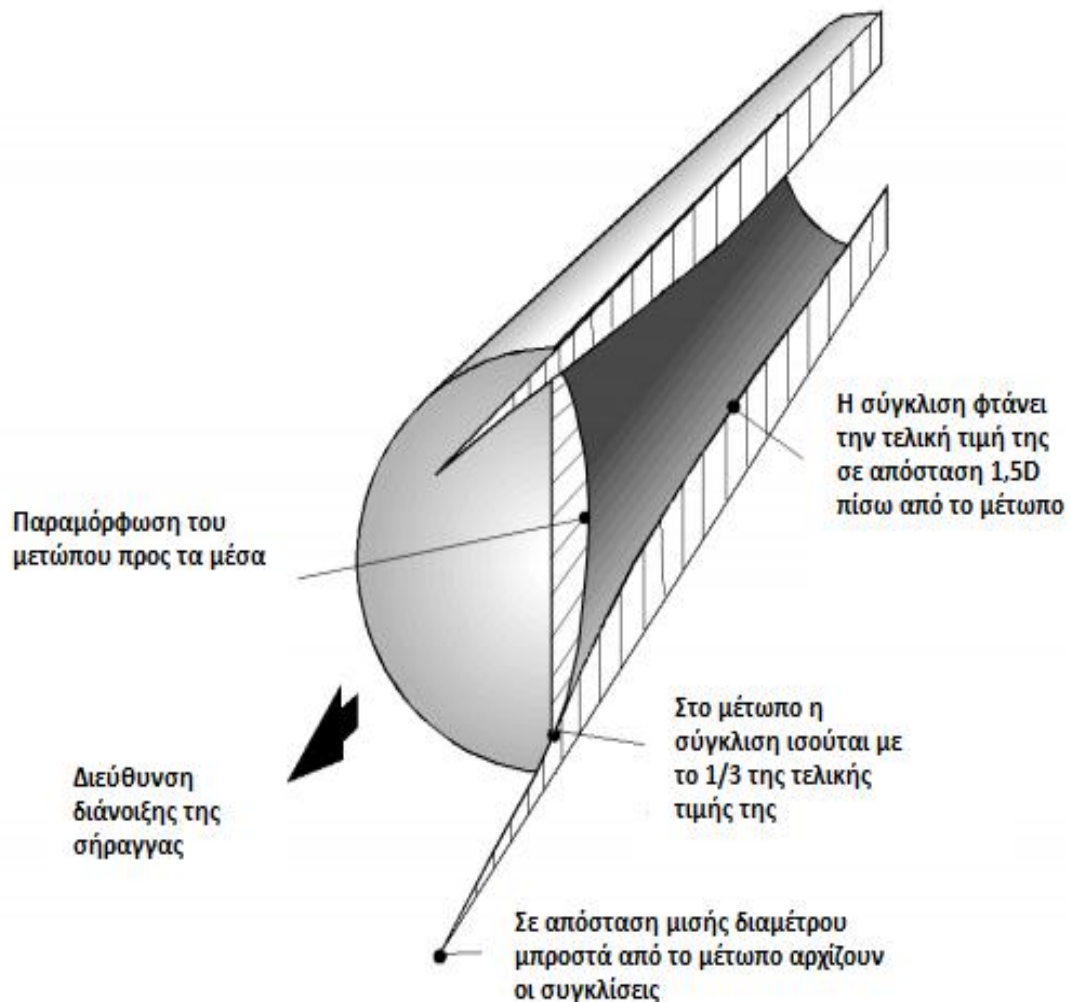


Κεφάλαιο 2ο

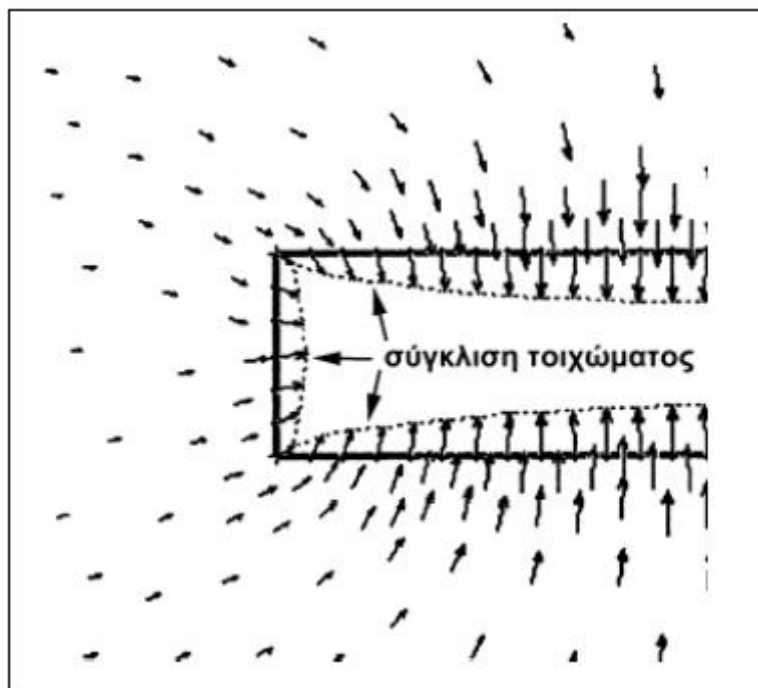
-ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ
ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ
-ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

2.1 ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ

Οι συγκλίσεις αρχίζουν σε απόσταση $0,5-0,75D$ (D :διάμετρος της σήραγγας) μπροστά από το μέτωπο και ολοκληρώνονται σε απόσταση περίπου $1,5D$ πίσω από αυτό. Στο μέτωπο έχει πραγματοποιηθεί περίπου το 25-35% της συνολικής σύγκλισης. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των συγκλίσεων γύρω από τη σήραγγα φαίνονται στο σχήμα 2.1. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία της παραμόρφωσης της βραχώμαζας που περιβάλλει μια κυκλική σήραγγα που διανοίγεται σε ασθενή βράχο. Ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας σ_{cm} προς τις τάσεις πεδίου p_0 καθορίζει το κατά πόσο θα επηρεάσουν αυτές οι συγκλίσεις την ευστάθεια της σήραγγας.



Σχήμα 2.1 Κατανομή των παραμορφώσεων της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη κυκλικής σήραγγας



Σχήμα 2.2 Διανύσματα μετακινήσεων της περιβάλλουσας βραχώμαζας και σχήμα παραμορφωμένης διατομής της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της μέσω τριδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

2.2 ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

2.2.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας η εντατική κατάσταση τυχαίου σημείου στην περιοχή της διάνοιξης και σε βάθος h από την φυσική επιφάνεια του εδάφους δίνεται από τις ενεργές τάσεις, κατακόρυφες και οριζόντιες αντίστοιχα:

$$\sigma_v' = \gamma * h - u_o \quad (Eξ 2.1)$$

$$\sigma_h' = k_o * \sigma_v \quad (Eξ 2.2)$$

όπου γ : το ειδικό βάρος των υπερκείμενων γαιών

u_o : η υδροστατική πίεση πόρων που υπολογίζεται ως το γινόμενο του ειδικού βάρους του νερού $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ επί το πιεζομετρικό ύψος $z(m)$

k_o : ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης

2.2.2 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ

Κατά την εκσκαφή μεταβάλλεται η εντατική κατάσταση με κύριο χαρακτηριστικό τη σημαντική μεταβολή των κυρίων τάσεων. Αυτή η αλλαγή περιγράφεται από το συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων δηλαδή του λόγου της νέας τάσης προς αυτήν πριν την εκσκαφή. Αυτός εξαρτάται από:

- τη μορφή της σήραγγας
- τη σχέση των διαστάσεων της διατομής
- την αρχική εντατική κατάσταση
- τη θέση του θεωρούμενου σημείου
- τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας
- γεωλογικούς παράγοντες όπως ασυνέχειες

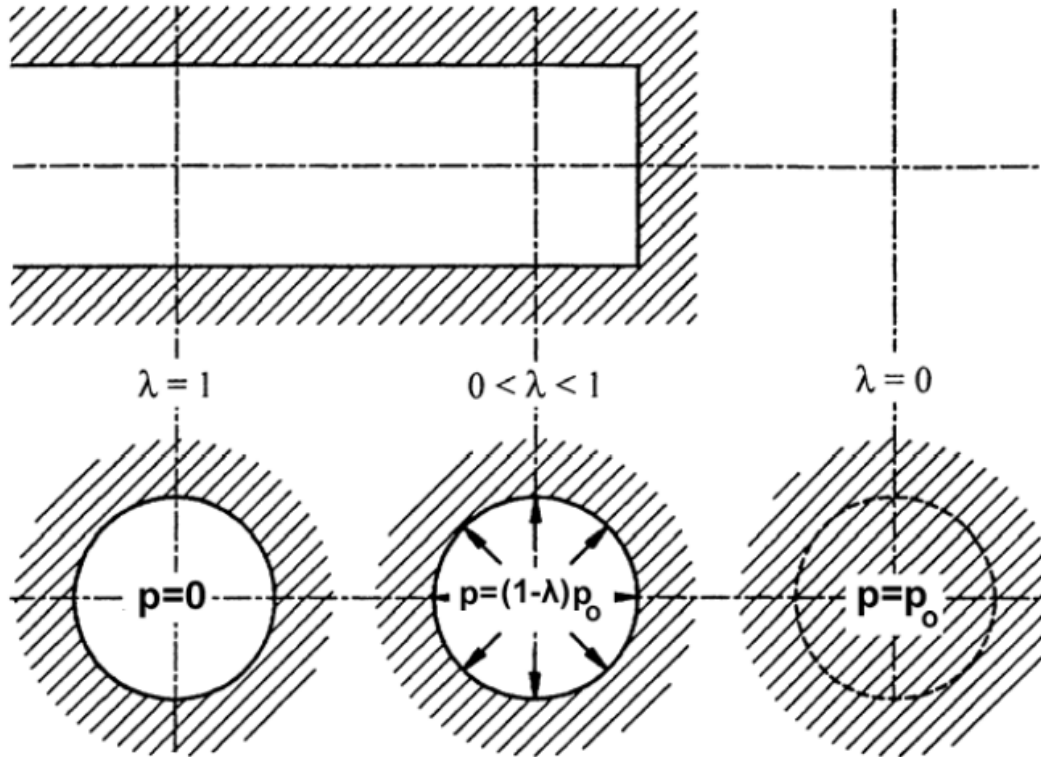
Προκειμένου να υπολογιστούν οι τάσεις γύρω από κυκλική σήραγγα ακτίνας R σε μεγάλο βάθος όπως φαίνεται παρακάτω γίνεται η παραδοχή ισότροπης αρχικής γεωστατικής έντασης ($\sigma_{vo} = \sigma_{ho} = p_o$), της επίπεδης παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα z και ότι το έδαφος είναι ελαστικό-απολύτως πλαστικό ενώ η αστοχία γίνεται κατά Mohr-Coulomb με τις ισοδύναμες παραμέτρους αντοχής c, φ ως εξής:

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + k \cdot \sigma_3' \quad (E\xi 2.3)$$

όπου $\sigma_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)}$ (Eξ 2.4) και $k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ (Eξ 2.5)

Καθώς η εκσκαφή της σήραγγας προχωράει η αρχική εσωτερική πίεση (p_o) που ισούται με την αρχική γεωστατική ένταση μειώνεται βαθμιαία σε p και τελικά μηδενίζεται όταν επέλθει η πλήρης αποτόνωση της εσωτερικής πίεσης. Ορίζεται, επομένως, ο συντελεστή αποτόνωσης λ για τον οποίο ισχύει:

$$\lambda = 1 - p / p_o \quad (E\xi 2.6)$$



Σχήμα 2.3 Αποτόνωση των πιέσεων κατά την προώθηση της σήραγγας

Επιπλέον, ορίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης:

$$N_s = 2 p_o / \sigma_{cm} \quad (\text{Εξ } 2.7)$$

Αρχικά η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ελαστικά, αλλά όσο προχωράει το μέτωπο και μειώνεται η εσωτερική πίεση επέρχεται πλαστικοποίηση του εδάφους γύρω από το τοίχωμα της σήραγγας. Για να παραμείνει το έδαφος ελαστικό η ελάχιστη εσωτερική πίεση είναι:

$$p_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1+k} \quad (\text{Εξ } 2.8)$$

και ο αντίστοιχος κρίσιμος συντελεστής αποτόνωσης είναι δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1+k} \right) \left(\frac{N_s - 1}{N_s} \right) \quad (\text{Εξ } 2.9)$$

Επομένως το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά δηλαδή δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη εάν $\lambda_{cr} \geq 1$ ή εάν $\lambda \leq \lambda_{cr} < 1$

Μια ακόμη συνθήκη για να παραμείνει το έδαφος ελαστικό μέχρι και την πλήρη αποτόνωση της εσωτερικής πίεσης είναι: $N_s \leq 1$

Διακρίνουμε δηλαδή δύο περιπτώσεις:

A. Το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά για κάθε λ εάν $N_s \leq 1$ και για $\lambda < \lambda_{cr}$, εάν $N_s > 1$ και επομένως δεν σχηματίζεται πλαστική ζώνη:

Η ακτινική τάση σε αυτήν την περίπτωση σε απόσταση r από το κέντρο κυκλικής σήραγγας ακτίνας R δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_r = p_o * [1 - \lambda (\frac{R}{r})^2] \quad (\text{Εξ } 2.10)$$

ενώ η εφαπτομενική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\theta = p_o * [1 + \lambda (\frac{R}{r})^2] \quad (\text{Εξ } 2.11)$$

Η ακτινική παραμόρφωση δίνεται από τον τύπο:

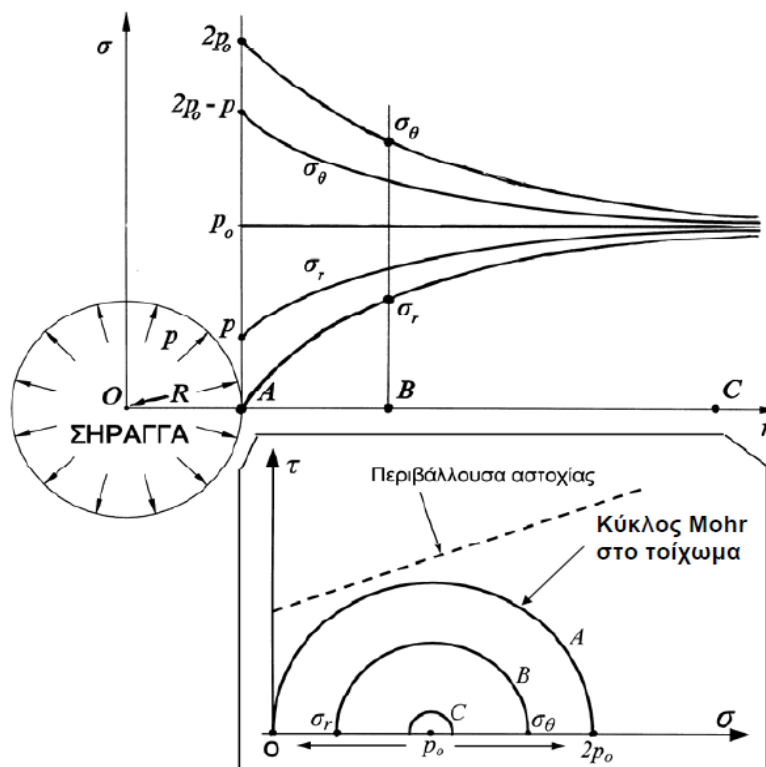
$$u = \lambda * R * (\frac{p_o}{2G}) * (\frac{R}{r}) \quad (\text{Εξ } 2.12)$$

όπου G το μέτρο διάτμησης: $G = \frac{E}{2(\nu+1)}$

Συγκεκριμένα, στο τοίχωμα της σήραγγας (για $r=R$) :

$$u_R = \lambda * R * (\frac{p_o}{2G}) \quad (\text{Εξ } 2.13)$$

ενώ οι τάσεις είναι $\sigma_r = p_o * (1 - \lambda) = p$ και $\sigma_\theta = p_o * (1 + \lambda)$ (Εξ 2.14)



Σχήμα 2.4 Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική σήραγγα σε γραμμικώς ελαστική βραχώμαζα

B. Το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά, δηλαδή αναπτύσσεται πλαστική ζώνη για $\lambda > \lambda_{cr}$ και για $N_s > 1$:

Στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ακτίνα της πλαστικής ζώνης (r_p). Ανάλογα με την τιμή της γωνίας τριβής (άρα και του συντελεστή k) η ακτίνα υπολογίζεται όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

- Εάν $\varphi \neq 1$ δηλαδή $k \neq 1$ τότε:

$$\frac{r_p}{R} = \left\{ \left(\frac{2}{k+1} \right) \left[\frac{2+N_s(k-1)}{2+N_s(k-1)(1-\lambda)} \right] \right\}^{\frac{1}{k-1}} \quad (\text{Eξ 2.15})$$

για την πλήρη αποτόνωση ($\lambda=1$) ισχύει:

$$\frac{r_{p\infty}}{R} = \left\{ \left(\frac{1}{k+1} \right) [2 + N_s(k-1)] \right\}^{\frac{1}{k-1}} \quad (\text{Eξ 2.16})$$

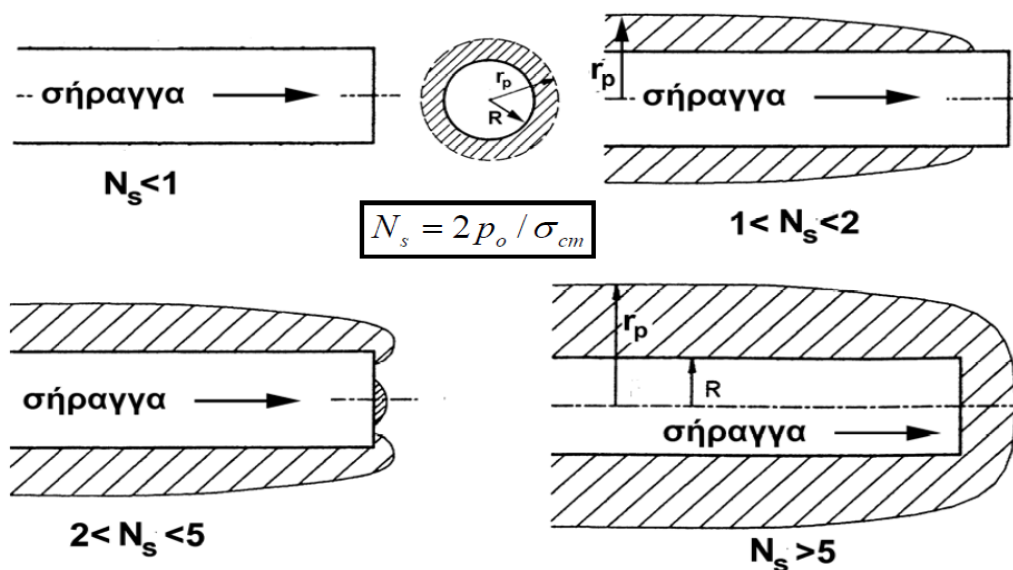
- Εάν $\varphi=0$ δηλαδή $k=1$ τότε:

$$\frac{r_p}{R} = \exp \left[\frac{1}{2} (N_s \lambda - 1) \right] \quad (\text{Eξ 2.17})$$

και για την πλήρη αποτόνωση ($\lambda=1$) ισχύει:

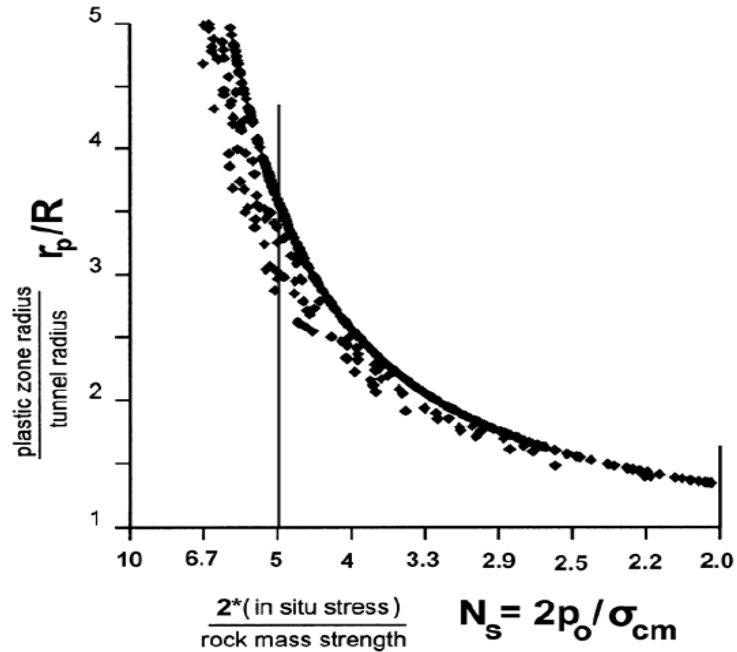
$$\frac{r_{p\infty}}{R} = \exp \left[\frac{1}{2} (N_s - 1) \right] \quad (\text{Eξ 2.18})$$

Όπως προαναφέρθηκε όταν $N_s \leq 1$ τότε το έδαφος παραμένει ελαστικό μέχρι και την πλήρη αποτόνωση της εσωτερικής πίεσης. Ωστόσο όσο αυξάνεται περαιτέρω ο συντελεστής υπερφόρτωσης τόσο αυξάνεται και το εύρος της πλαστικής ζώνης (r_p) γύρω από τη σήραγγα όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.

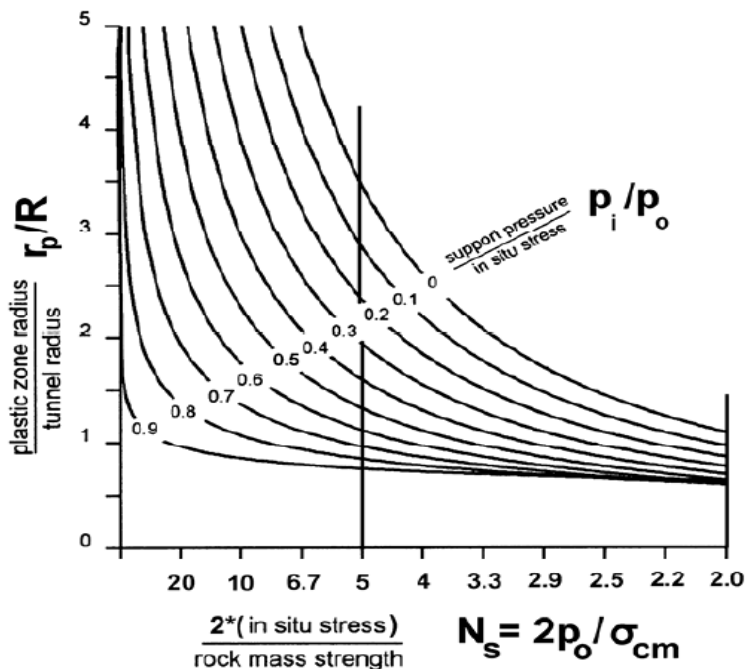


Σχήμα 2.5 Εύρος πλαστικής ζώνης (r_p) γύρω από τη σήραγγα

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η εξάρτηση της ακτίνας πλαστικής ζώνης από το συντελεστή υπερφόρτωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα, ενώ στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το εύρος πλαστικής ζώνης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτωσης και με το λόγο της πίεσης υποστήριξης προς την αρχική γεωστατική τάση $\frac{p_i}{p_o}$



Σχήμα 2.6 Εύρος πλαστικής ζώνης (r_p) σε ανυποστήρικτη σήραγγα



Σχήμα 2.7 Εύρος πλαστικής ζώνης (r_p) σε υποστηριζόμενη σήραγγα

Οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα για την περίπτωση που πραγματοποιείται πλαστικοποίηση υπολογίζονται ως εξής:

➤ Τάσεις εντός της πλαστικής ζώνης (για $R \leq r \leq r_p$)

✓ Για $\varphi \neq 0$ και $k \neq 1$:

η ακτινική τάση είναι:

$$\sigma_r = \left[(1 - \lambda)p_o + \left(\frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right) \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{k-1} - \left(\frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right) \quad (E\xi 2.19)$$

ενώ η εφαπτομενική τάση δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_\theta = k\sigma_r + \sigma_{cm} \quad (E\xi 2.20)$$

✓ Για $\varphi = 0$ και $k = 1$:

η ακτινική τάση υπολογίζεται ως:

$$\sigma_r = (1 - \lambda)p_o + \sigma_{cm} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \quad (E\xi 2.21)$$

ενώ η εφαπτομενική τάση είναι:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_{cm} \quad (E\xi 2.22)$$

➤ Τάσεις εκτός της πλαστικής ζώνης (για $r > r_p$) δηλαδή στην ελαστική περιοχή:

✓ Για $\varphi \neq 0$ και $k \neq 1$:

η ακτινική τάση είναι:

$$\frac{\sigma_r}{p_o} = 1 - \frac{c_2}{R^2} \frac{1}{(p_o/2G)} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \quad (E\xi 2.23)$$

$$\text{όπου } c_2 = r_p^2 \left(\frac{p_o}{2G} \right) \left(1 - \frac{2}{k+1} \right) \left[1 + \frac{2}{(k-1)N_s} \right]$$

ενώ η εφαπτομενική τάση είναι:

$$\frac{\sigma_\theta}{p_o} = 1 + \left(\frac{c_2}{R^2} \right) \left(\frac{1}{(p_o/2G)} \right) \left(\frac{R}{r} \right)^2 \quad (E\xi 2.24)$$

✓ Για $\varphi = 0$ και $k = 1$:

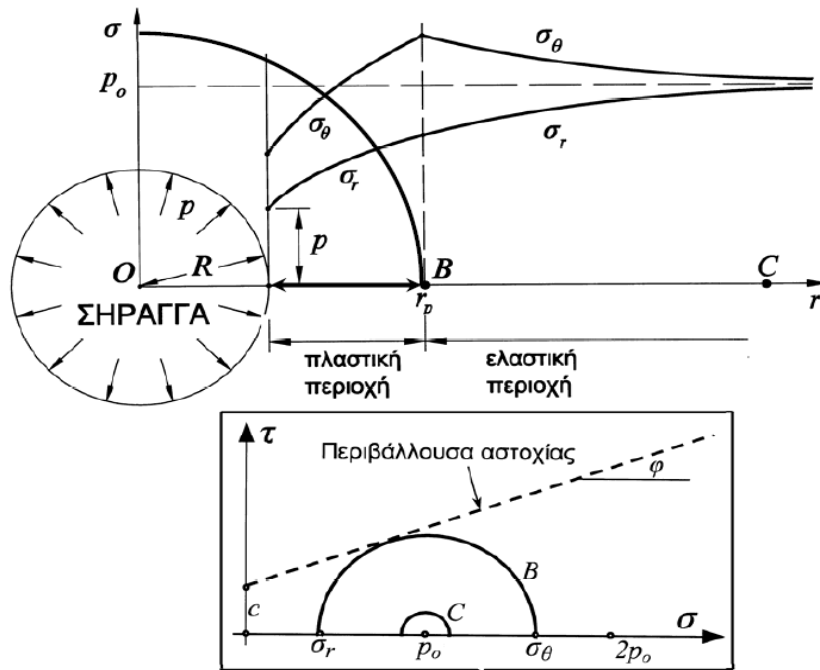
η ακτινική τάση είναι:

$$\sigma_r = p_o - c_2 \frac{2G}{r^2} = p_o \left[1 - \frac{1}{N_s} \left(\frac{r_p}{r} \right)^2 \right] \quad (\text{Eξ 2.25})$$

και η εφαπτομενική τάση είναι:

$$\sigma_\theta = p_o + c_2 \frac{2G}{r^2} = p_o \left[1 + \frac{1}{N_s} \left(\frac{r_p}{r} \right)^2 \right] \quad (\text{Eξ 2.26})$$

$$\text{αφού } c_2 = r_p^2 \left(\frac{p_o}{2G} \right) \frac{1}{N_s}$$



Σχήμα 2.8 Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική σήραγγα σε ελαστοπλαστική βραχώμαζα

Εκτός από το εύρος της πλαστικής ζώνης και τις τάσεις είναι σημαντικό να γνωρίζουμε και τις μετακινήσεις εντός και εκτός της πλαστικής ζώνης καθώς και στο όριο ελαστικής και πλαστικής ζώνης:

- Μετακίνηση (u_p) στο όριο της πλαστικής ζώνης (για $r=r_p$)

✓ Για $\varphi \neq 0$ και $k \neq 1$:

$$u_p = r_p \left(\frac{p_o}{2G} \right) \left(1 - \frac{2}{k+1} \right) \left[1 + \frac{2}{(k-1)N_s} \right] \quad (\text{Eξ 2.27})$$

✓ Για $\varphi = 0$ και $k = 1$:

$$u_p = r_p \left(\frac{p_o}{2G} \right) \frac{1}{N_s} \quad (\text{Eξ 2.28})$$

- Μετακίνηση (u) εκτός της πλαστικής ζώνης (για $r > r_p$)

✓ Για $\varphi \neq 0$ και $k \neq 1$:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_p \left(\frac{r_p}{r} \right) = \frac{r_p^2}{r} \left(\frac{p_o}{2G} \right) \left(1 - \frac{2}{k+1} \right) \left[1 + \frac{2}{(k-1)N_s} \right] \quad (Eξ 2.29)$$

✓ Για $\varphi = 0$ και $k = 1$:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_p \left(\frac{r_p}{r} \right) = \frac{r_p^2}{r} \left(\frac{p_o}{2G} \right) \frac{1}{N_s} \quad (Eξ 2.30)$$

- Μετακίνηση (u) εντός της πλαστικής ζώνης (για $R \leq r \leq r_p$)

Δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{u}{R} = \frac{u_p}{R} \left(\frac{r_p}{r} \right)^K \quad (Eξ 2.31)$$

όπου K είναι ο συντελεστής διασταλτικότητας και είναι ίσος με:

$$K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta} \quad (Eξ 2.32)$$

Οι συνήθεις τιμές της διασταλτικότητας δ είναι για:

- ✓ Χαλαρά εδάφη: $0 \div \varphi/5$
- ✓ Μέτριας πυκνότητας: $\varphi/5 \div \varphi/4$
- ✓ Πυκνά εδάφη: $\varphi/4 \div \varphi/3$

Σε περίπτωση που η βραχόμαζα παραμορφώνεται υπό σταθερό όγκο τότε $\varepsilon_{vol} = 0$ επομένως $K = 1$ και $\delta = 0$

Από τον τύπο 2.31 προκύπτει η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας δηλαδή για $r = R$:

$$\frac{u_R}{R} = \frac{u_p}{R} \left(\frac{r_p}{R} \right)^K$$

- Μετακίνηση ($u_{R\infty}$) στο τοίχωμα της σήραγγας για πλήρη αποτόνωση:

Για $\lambda = 1$ (πλήρης αποτόνωση) ισχύει:

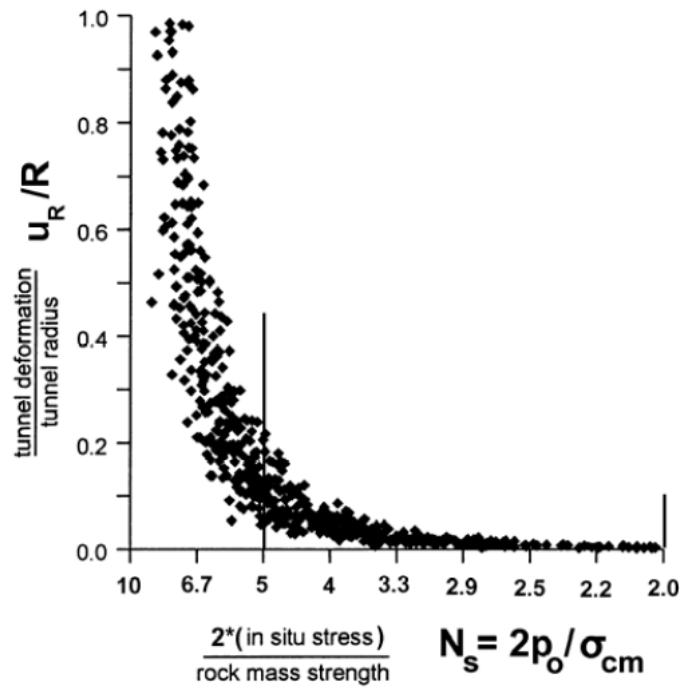
✓ Για $\varphi \neq 0$ και $k \neq 1$:

$$\frac{u_{R\infty}}{R} = \frac{1}{N_s} \left(\frac{p_o}{2G} \right) \left(\frac{N_s(k-1)+2}{k+1} \right)^{\frac{K+k}{k-1}} \quad (Eξ 2.33)$$

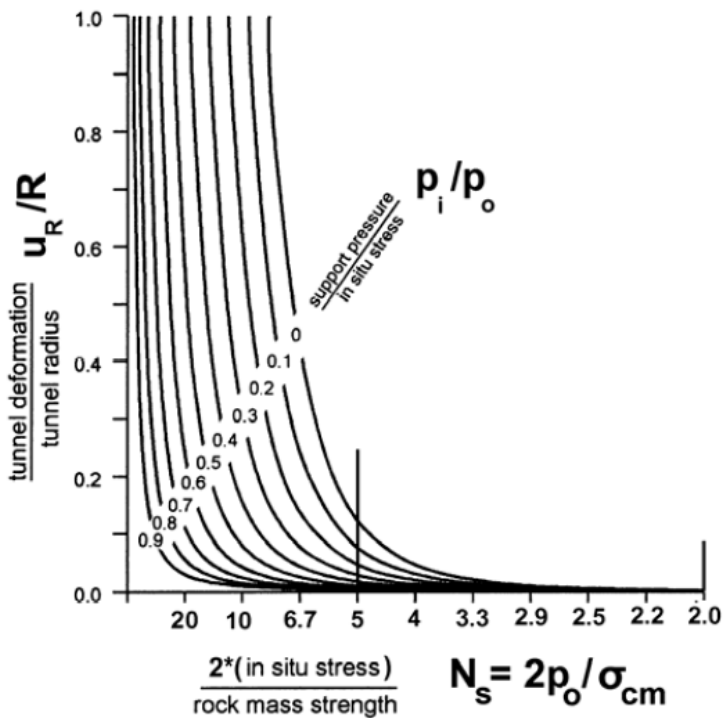
✓ Για $\varphi = 0$ και $k = 1$:

$$\frac{u_{R\infty}}{R} = \frac{1}{N_s} \left(\frac{p_o}{2G} \right) \exp \left[\frac{1}{2} (N_s - 1)(K + 1) \right] \quad (Eξ 2.34)$$

Στα διαγράμματα 2.9 και 2.10 φαίνεται η επίδραση του συντελεστή υπερφόρτωσης N_s σε ανυποστήρικτη και υποστηριζόμενη σήραγγα αντίστοιχα στη μετακίνηση (u_R) του τοιχώματος της:



Σχήμα 2.9 Μετακίνηση του τοιχώματος (u_R) ανυποστήρικτης σήραγγας



Σχήμα 2.10 Μετακίνηση του τοιχώματος (u_R) υποστηριζόμενης σήραγγας

Παρατηρούμε ότι οι συγκλίσεις για $N_s > 5$ αυξάνουν σημαντικά ενώ αντίθετα με τη χρήση υποστήριξης παρουσιάζεται σημαντική μείωση των συγκλίσεων.

Λόγω της αβεβαιότητας που υπάρχει πολλές φορές για την τιμή της διασταλτικότητας και του συντελεστή K , μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τύποι (ισχύουν για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $k_o=1$) για να υπολογιστούν οι μετακινήσεις στην πλαστική ζώνη. Συγκεκριμένα ισχύει:

➤ Εντός της πλαστικής ζώνης για πλήρη αποτόνωση:

Η μετακίνηση στο όριο της πλαστικής ζώνης είναι:

$$u_p = r_p \frac{(1+\nu)}{k+1} \left(\frac{\sigma_{cm} + p_o(k-1)}{E} \right) \quad (Eξ 2.35)$$

Ενώ η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας για πλήρη αποτόνωση είναι:

$$u_{R\infty} = R - \sqrt{R^2 - u_p(2r_p - u_p)} \quad (Eξ 2.36)$$

Όλες οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν στην περίπτωση που θεωρούμε τη βραχόμαζα ισότροπη δηλαδή ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων ισούται με 1. Σε περίπτωση που συμπεριφέρεται ανισότροπα δηλαδή $k_o \neq 1$ τότε η μορφή και η έκταση της πλαστικής ζώνης αλλάζουν και κυρίως για $k_o < 0,5$.

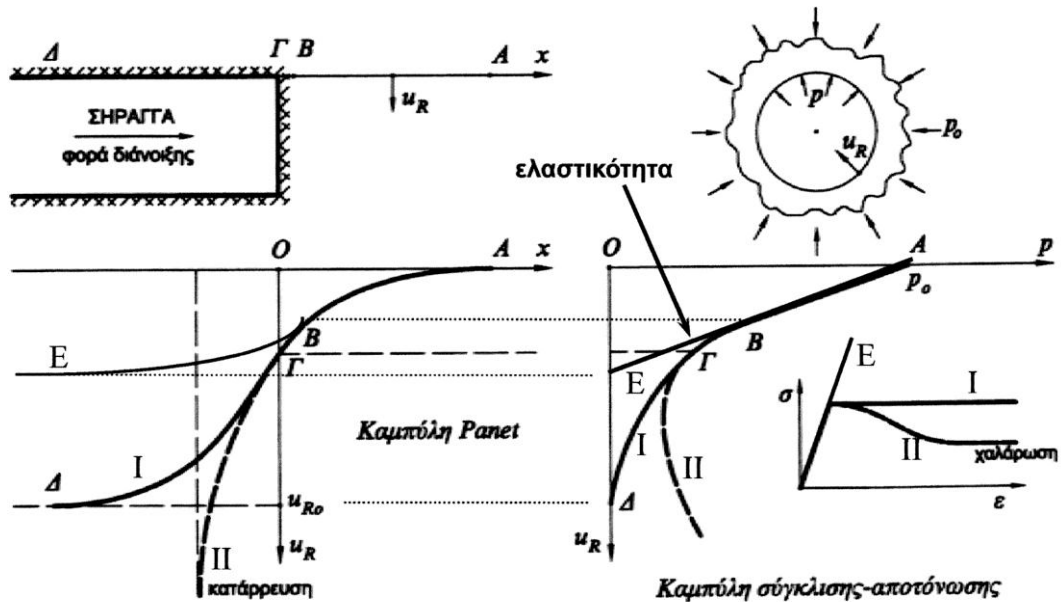
2.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

2.3.1 ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας οι παραμορφώσεις αρχίζουν αρκετά μπροστά από το μέτωπο της. Σε κάθε θέση (x) όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11 αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή σύγκλισης (u_R) και σε αυτή αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη τιμή εσωτερικής πίεσης (p) μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση (p_o). Όσο η σύγκλιση αυξάνει η αρχική εσωτερική πίεση μειώνεται βαθμιαία έως τον τελικό μηδενισμό της όταν έχει επέλθει η πλήρης αποτόνωση και η σύγκλιση έχει πάρει την τελική τιμή της μακριά από το μέτωπο. Αυτή η σχέση σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας και αποτόνωσης των πιέσεων παρουσιάζεται μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2.11 για ανυποστήρικτη σήραγγα. Η γνώση της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης για τη βραχόμαζα όπου πρόκειται να διανοιχθεί η σήραγγα αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο βοήθημα για το σχεδιασμό της και τον υπολογισμό της απαιτούμενης υποστήριξης. Ο συνδυασμός των καμπύλων αυτών σε συνδυασμό με άλλες καμπύλες όπως η Panet και Chern που θα περιγραφούν παρακάτω δίνει τη δυνατότητα της γνώσης του συντελεστή αποτόνωσης λ σε κάθε θέση κατά μήκος το άξονα της σήραγγας, κάτι που βρίσκει εφαρμογή στις αναλύσεις μέσω αριθμητικών μοντέλων για τον

υπολογισμό των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης καθώς και για τον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων γύρω από τη σήραγγα.

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται η σχέση της απόστασης (x) από το μέτωπο και σύγκλισης (u_R) σε κάθε θέση μέσω της καμπύλης Panet επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος πριν εφαρμοστεί η προσωρινή υποστήριξη.



Σχήμα 2.11 Καμπύλη Panet και καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ανυποστηρίκτης σήραγγας

Οι καμπύλες Panet προκύπτουν ως εξής:

- Εάν δεν υπάρχει πλαστική ζώνη ισχύει για $x < 0$:

$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{x}{R} \right)} \right]^2 \right\} \quad (Eξ 2.37)$$

- Εάν υπάρχει πλαστική ζώνη:

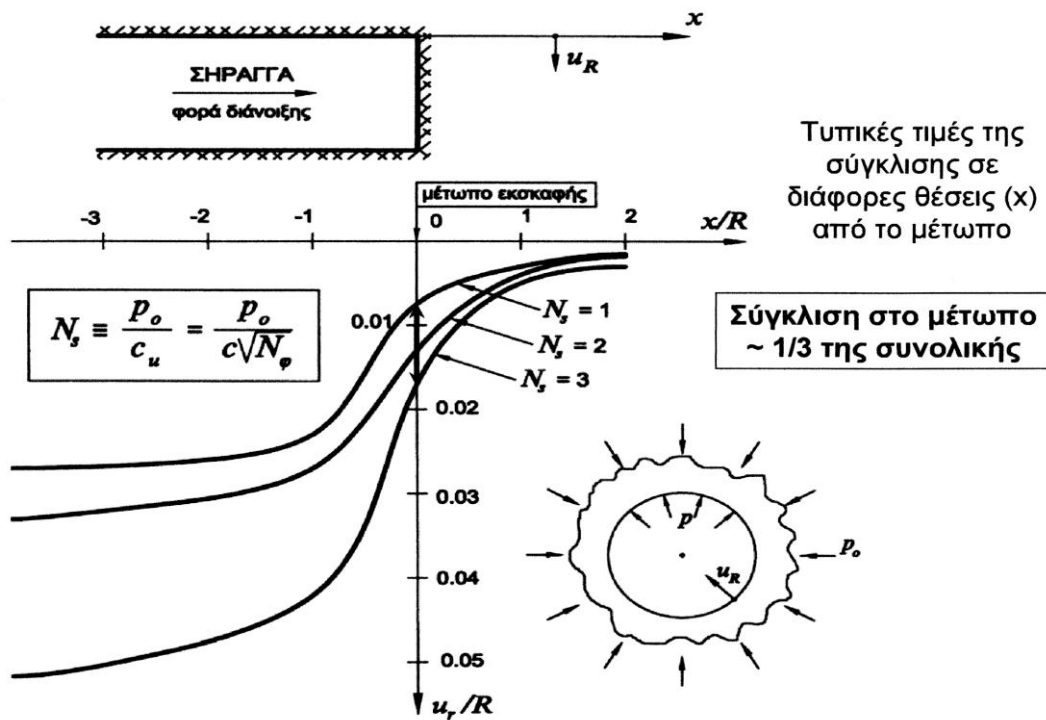
$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{x}{R} \right) \xi} \right]^2 \right\} \quad (Eξ 2.38)$$

- ✓ Για $\phi \neq 0$ ισχύει:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{u_{R\infty}}{u_{R\infty,e}} = \frac{1}{N_s} \left[\frac{(k-1)N_s + 2}{k+1} \right]^{\frac{K+k}{k-1}} \quad (Eξ 2.39)$$

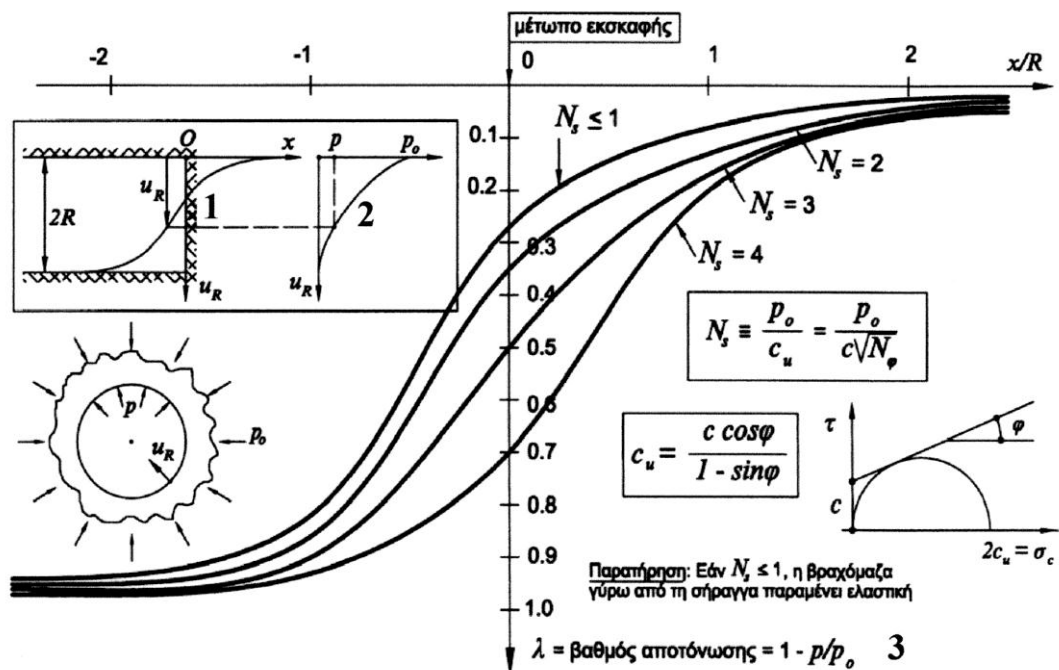
- ✓ Για $\phi = 0$ ισχύει:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{u_{R\infty}}{u_{R\infty,e}} = \frac{1}{N_s} \exp \left[\frac{1}{2} (N_s - 1)(K + 1) \right] \quad (Eξ 2.40)$$



Σχήμα 2.12 Καμπύλες Panet σύγκλισης-θέσης

Από τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και σύγκλισης-θέσης υπολογίζονται οι καμπύλες λ-χ. Αυτές οι καμπύλες Panet συσχετίζουν την απόσταση x με το συντελεστή αποτόνωσης λ σε αυτή τη θέση ανάλογα με το συντελεστή N_s .



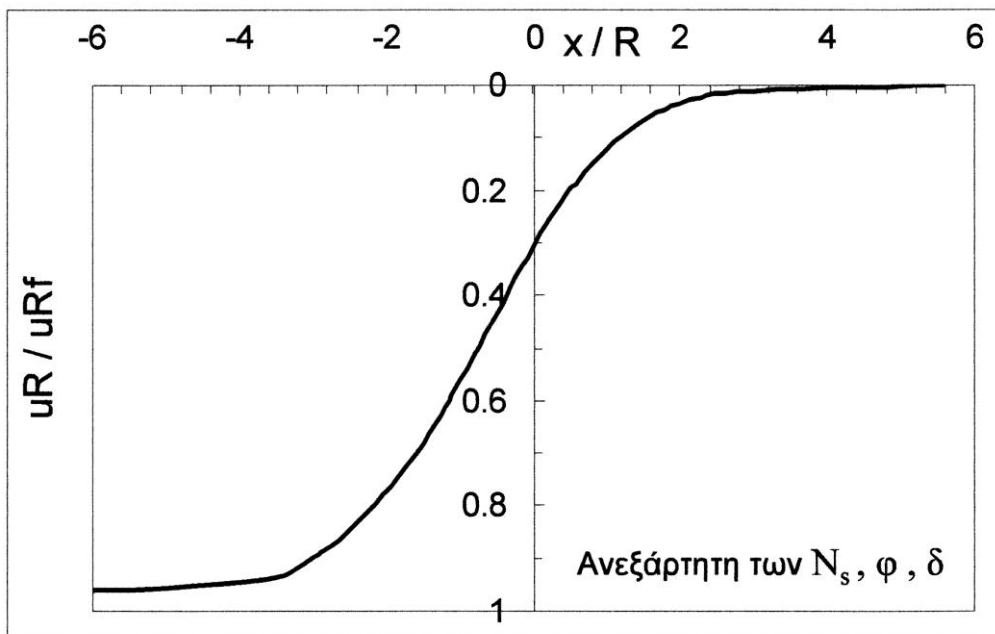
Σχήμα 2.13 Καμπύλες Panet (x-λ)

Η καμπύλη Chern δίνει τη σύγκλιση του τοιχώματος $u_R(x)$ ανυποστήρικτης σήραγγας στη θέση (x) από το μέτωπο $(x=0)$ μέσω της εξίσωσης:

$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = \left[1 + \exp\left(0,91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1,7} \quad (\text{Εξ } 2.41)$$

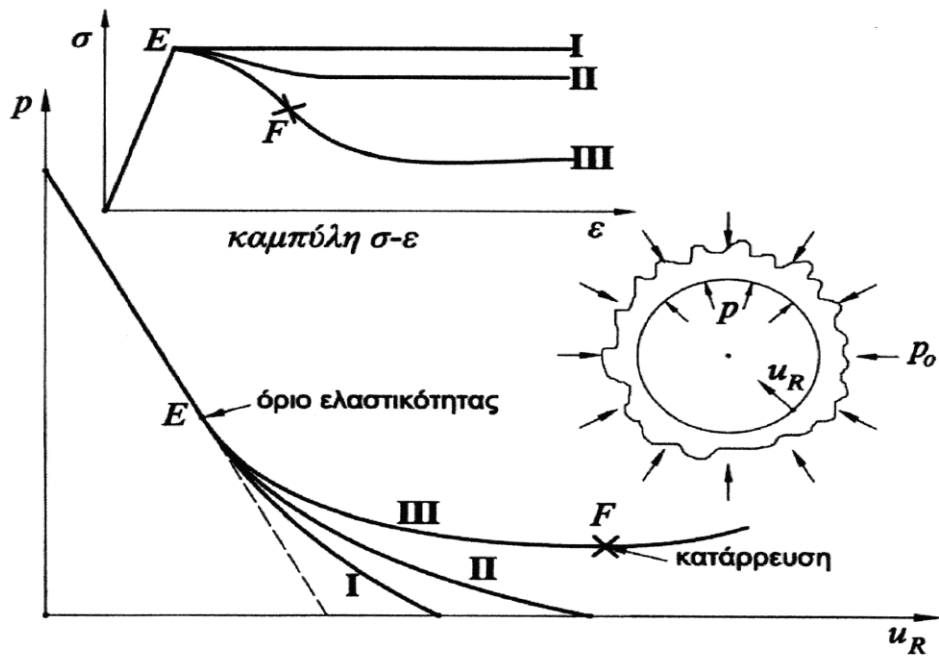
$$\frac{x}{R} = 1,10 \ln \left[\left(\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} \right)^{-0,588} - 1 \right] \quad (\text{Εξ } 2.42)$$

όπου $u_{R\infty}$ είναι η τελική σύγκλιση του τοιχώματος σε μεγάλη απόσταση πίσω από το μέτωπο



Σχήμα 2.14 Καμπύλη Chern

Στο σχήμα 2.15 φαίνεται η επιρροή της μορφής της καμπύλης σ-ε στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Χαλάρωση της βραχώμαζας λόγω μεγάλων παραμορφώσεων οδηγεί στη μείωση της αντοχής και σε καμπύλες τύπου III.



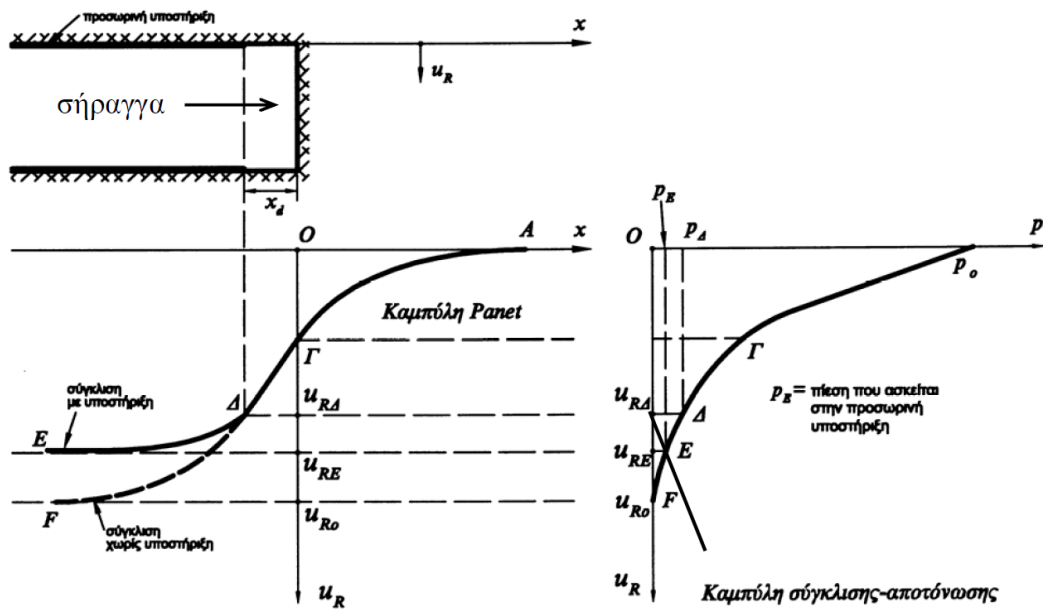
Σχήμα 2.15 Επιρροή της καμπύλης σ - ϵ στην καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης

2.3.2 ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και η καμπύλη Panet για διατομή σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Παρατηρούμε ότι η τελική σύγκλιση (u_{RE}) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της ανυποστήρικτης (u_{RO}). Η πίεση που δέχεται η προσωρινή υποστήριξη είναι αυτή που αντιστοιχεί στην τελική κατάσταση E δηλαδή η p_E . Εάν Δ είναι η κατάσταση τη στιγμή της τοποθέτησης της προσωρινής υποστήριξης σε απόσταση x_Δ από το μέτωπο και p_Δ η αντίστοιχη ισοδύναμη εσωτερική δύναμη τότε ο βαθμός αποτόνωσης είναι:

$$\lambda = 1 - \frac{p_\Delta}{p_o}$$

Στο σχήμα 2.16 φαίνεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα καθώς και η αντίστοιχη για προσωρινή υποστήριξη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.16 Καμπύλη Panet και καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για υποστηριζόμενη σήραγμα

Μέθοδος αποτόνωσης

Ο βαθμός αποτόνωσης λ που μπορεί να υπολογιστεί για κάθε θέση μέσω των καμπύλων Panet είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της εσωτερικής πίεσης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη θέση τοποθέτησης της προσωρινής υποστήριξης. Η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγgas γίνεται σε 2 φάσεις:

- Η εσωτερική πίεση μειώνεται από p_o σε p και η σύγκλιση που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.
- Στη συνέχεια τοποθετούνται τα μέτρα υποστήριξης και η πίεση μειώνεται περισσότερο και από p φτάνει να μηδενίζεται. Λόγω αυτής της μείωσης προκαλείται περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων υποστήριξης.

Όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τελική σύγκλιση του τοιχώματος και τόσο λιγότερο το φορτίο που θα αναλάβει η υποστήριξη.

Μέθοδος χαλάρωσης

Η αρχή αυτής της μεθόδου είναι ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας στο εσωτερικό της διατομής της σήραγgas προκαλεί σύγκλιση της σήραγgas και επομένως ισοδυναμεί με μείωση της εσωτερικής πίεσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοσθεί και για μη κυκλικές σήραγγες, για ανισότροπη γεωστατική κατάσταση και για όλα τα προγράμματα πεπερασμένων

στοιχείων. Η αντιστοιχία του συντελεστή χαλάρωσης $\frac{E}{E_0}$ με το συντελεστή αποτόνωσης λ είναι:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda} \quad (E\xi 2.43)$$

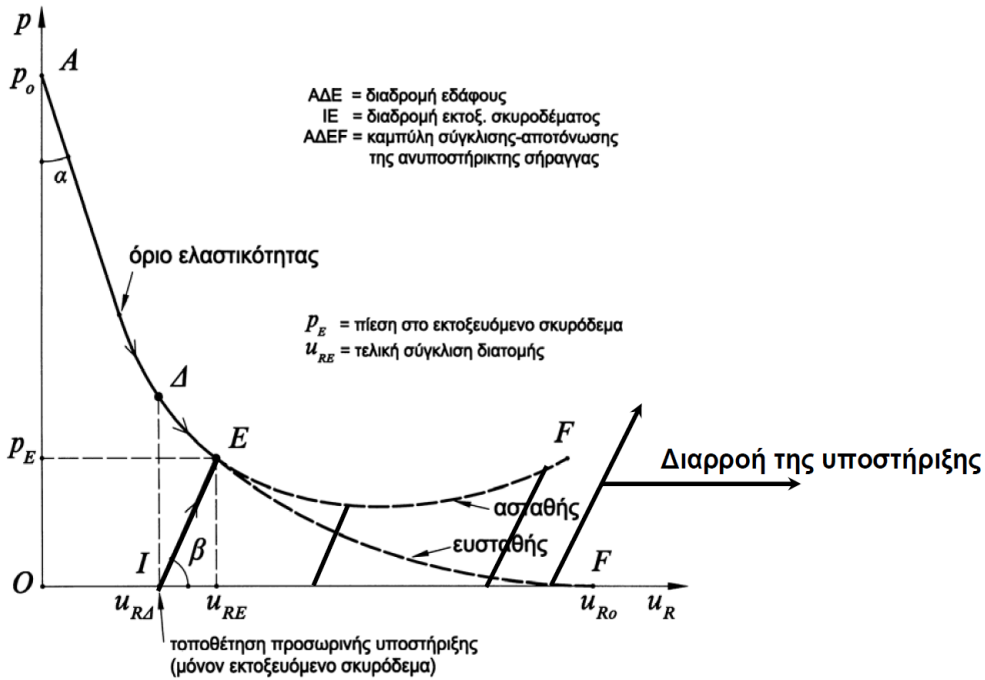
Τα βήματα που ακολουθούνται στη μέθοδο χαλάρωσης είναι:

- Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης $N_s = 2 p_0 / \sigma_{cm}$
- Από την αντίστοιχη καμπύλη Panet για τη θέση (x) υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης (λ) και στη συνέχεια η μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E)
- Προσομοιώνεται η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας από E_0 σε E πχ με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και υπολογίζονται οι συγκλίσεις και οι εντάσεις που αντιστοιχούν στη θέση εφαρμογής της υποστήριξης.
- Στη συνέχεια τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται από E έως να μηδενιστεί και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη της υποστήριξης.

2.3.2.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

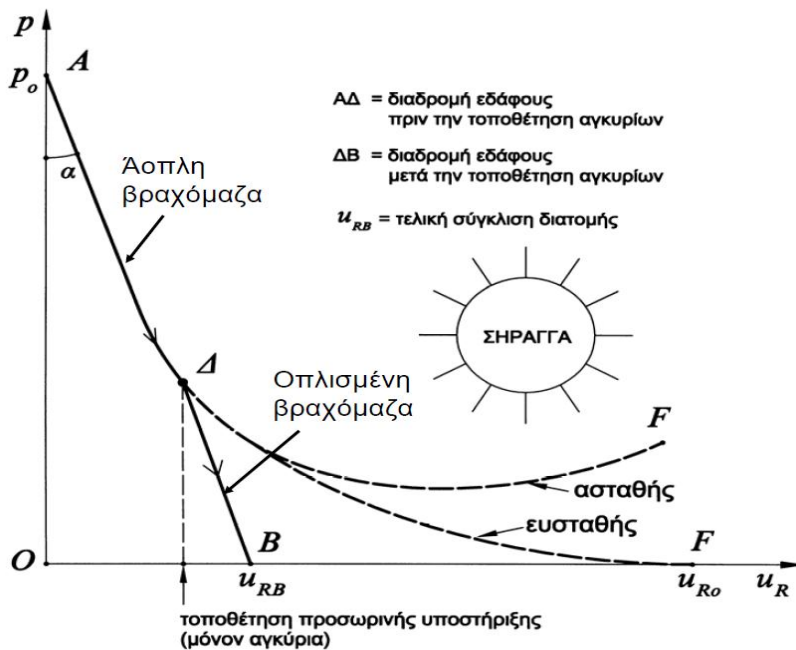
Σκοπός της τοποθέτησης της των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής για συμπεριφορά τύπου χαλάρωσης και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών. Τα μέτρα αυτά μπορεί να είναι εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ. Η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε κάθε περίπτωση ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ και όχι τη ΔF της ανυποστήρικτης, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της τελικής σύγκλισης.

Στο σχήμα 2.17 φαίνεται η επιρροή προσωρινής υποστήριξης μόνο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Όταν αυτή τοποθετείται (σημείο Δ) έχει ήδη πραγματοποιηθεί σήραγγα ίση με u_{RD} . Στην αρχή το σκυρόδεμα είναι αφόρτιστο. Καθώς το μέτωπο συνεχίζει να προωθείται, οι εσωτερικές πιέσεις μειώνονται περαιτέρω και η διατομή τείνει να συγκλίνει περισσότερο. Ωστόσο, στην σύγκλιση αυτά αντιστέκεται ο δακτύλιος σκυροδέματος που αναλαμβάνει φορτία. Η σύγκλιση αυξάνεται και πάλι αλλά σε μικρότερο βαθμό, λόγω της συμπίεσης του δακτυλίου. Το έδαφος ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ, ενώ το σκυρόδεμα την ΙΕ. Στο σημείο Ε επιτυγχάνεται κατάσταση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε πίεση p_E και σε τελική σύγκλιση u_{RE} .



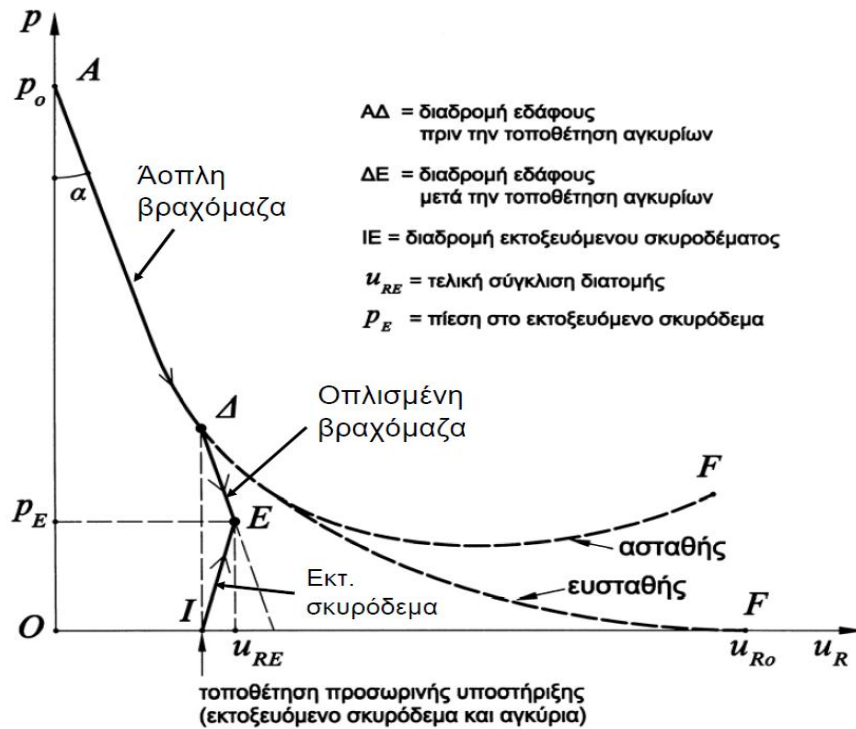
Σχήμα 2.17 Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Στην περίπτωση που τοποθετηθούν μόνο αγκύρια η εξέλιξη της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18. Μετά την τοποθέτηση των αγκυριών ακολουθείται η διαδρομή ΔΒ που αντιστοιχεί στη σύγκλιση u_{RB} που είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της ανυποστήρικτης.



Σχήμα 2.18 Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη μόνο από αγκύρια

Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με αγκύρια. Η τελική κατάσταση ισορροπίας και η σύγκλιση που αντιστοιχεί σε αυτήν προκύπτει από το σημείο τομής των διαδρομών IE και ΔΒ μόνο για σκυρόδεμα και μόνο για αγκύρια αντίστοιχα.



Σχήμα 2.19 Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενα αγκύρια και σκυρόδεμα

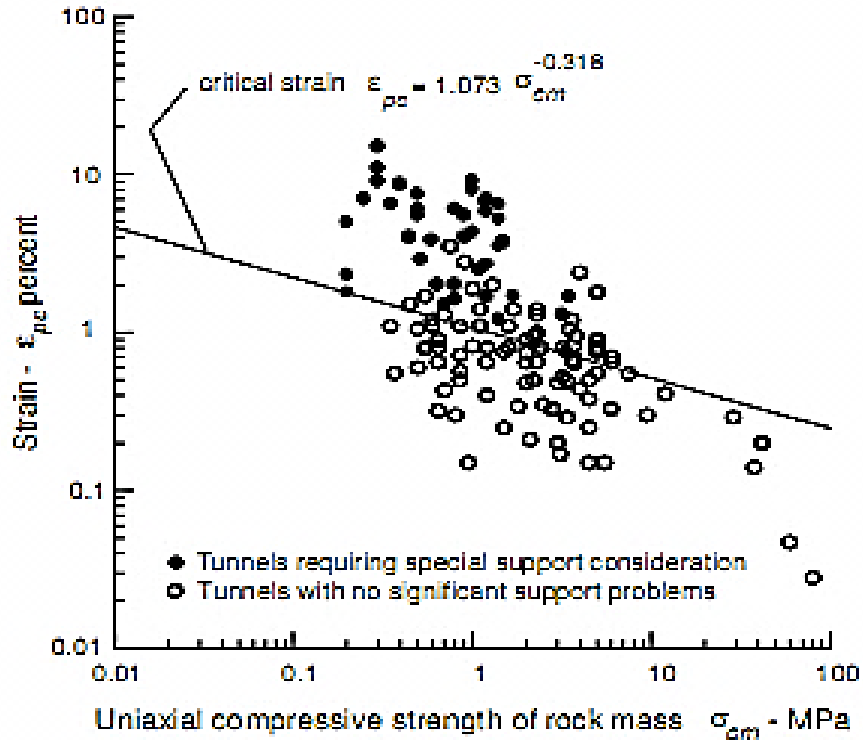
2.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ

Η πρόγνωση αυτή των συνθηκών και του μεγέθους της σύνθλιψης σε ασθενή βραχώμαζα δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση μέθοδο τελικού σχεδιασμού μιας σήραγγας και τρόπος υπολογισμού των μέτρων υποστήριξης που θα τοποθετηθούν σε αυτή. Δίνεται όμως μια πρώτη εκτίμηση των αναμενόμενων προβλημάτων που θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας καθώς και μια προσέγγιση των διάφορων λύσεων για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αστάθειας.

2.4.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΤΑ SAKURAI

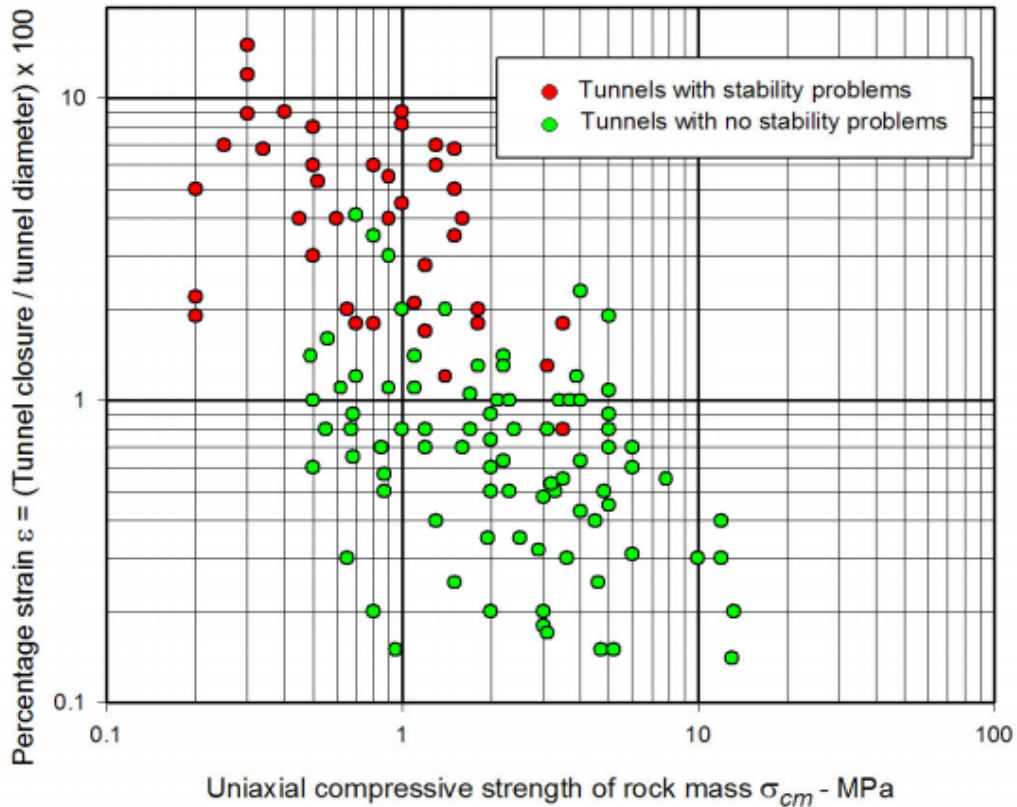
Ο Sakurai το 1983 πρότεινε την εκτίμηση της ευστάθειας ή αστάθειας της σήραγγας ανάλογα με την παραμόρφωση της βραχώμαζας που την περιβάλλει. Η παραμόρφωση αυτή ισούται με τον ποσοστιαίο λόγο της σύγκλισης της σήραγγας προς τη διάμετρο της. Αυτό το ποσοστό παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί από μια σχέση της μορφής $e_{pc} = A\sigma_{cm}^B$ όπου σ_{cm} είναι η αντοχή της βραχώμαζας και A,B είναι

σταθερές. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2.20 που δημιουργήθηκε από τις παραμορφώσεις που έχουν παρατηρηθεί κατά την κατασκευή σήραγγων στη Ταϊβαν, η ευθεία που ορίζει η παραπάνω εξίσωση δίνει ένα όριο ανάμεσα στις ασταθείς και ευσταθείς σήραγγες. Οι πρώτες βρίσκονται πάνω από αυτή την ευθεία και χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή ως προς την υποστήριξή τους ενώ οι δεύτερες δεν χρειάζονται κάτι παραπάνω από την ελάχιστη υποστήριξη.



Σχήμα 2.20 Τυπικές τιμές από σήραγγες στην Ταϊβαν

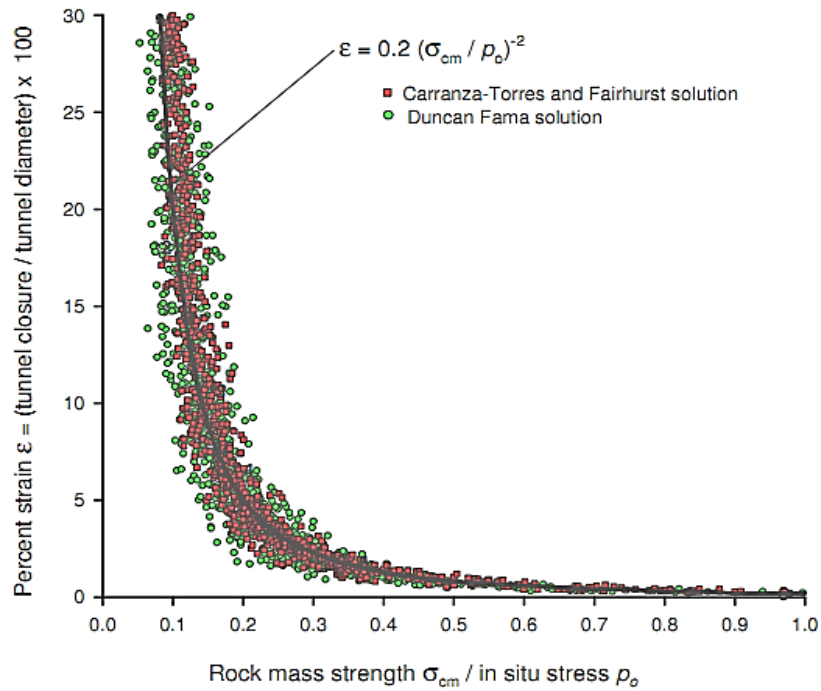
Ο Chern το 1998 μετά από παρατηρήσεις έδειξε ότι για τις ίδιες σήραγγες στην Ταϊβαν τα προβλήματα αστάθειας παρουσιάστηκαν όταν η παραμόρφωση υπερβαίνει το 1%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 2.21:



Σχήμα 2.21 Παρατηρήσεις από τον Chern το 1998 για σήραγγες στην Taiwan

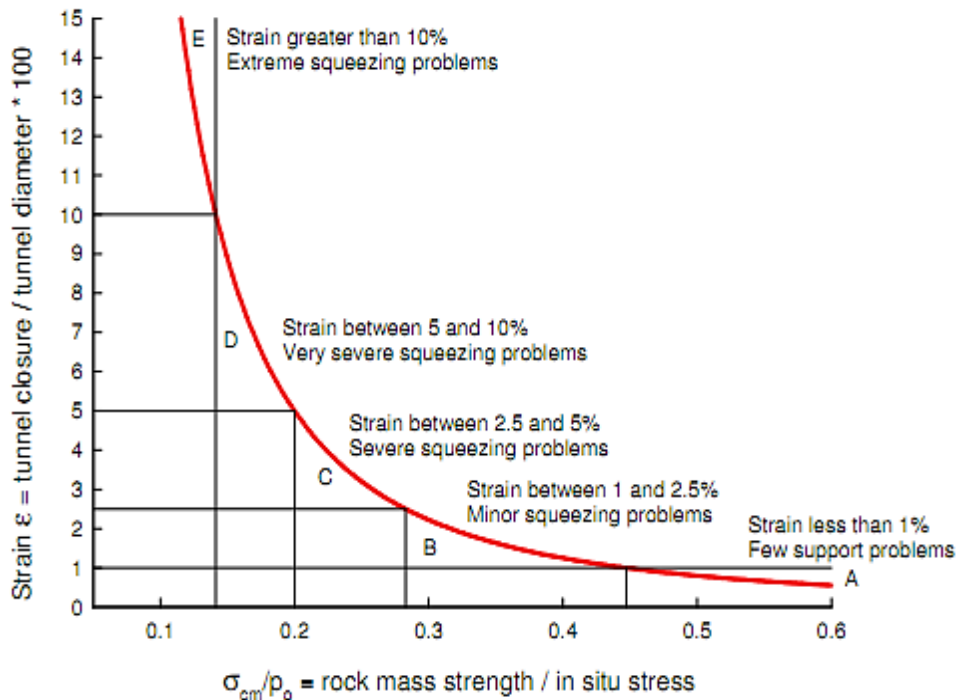
2.4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΟ σ_{cm}/p_o

Το 1999 δημοσιεύτηκαν από το Hoek τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης που έδειχνε ότι ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς την αρχική γεωστατική τάση σ_{cm}/p_o μπορεί να αποτελέσει δείκτη για την ύπαρξη ή μη προβλημάτων σύνθλιψης σε μια σήραγγα. Τα αποτελέσματα της μελέτης σε ανυποστήρικτη κυκλική σήραγγα υπό υδροστατικές πιέσεις που δημοσιεύτηκαν Duncan Fama (1993) και Carranza-Torres και Fairhurst (1999) παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.22 και δίνουν τη σχέση του λόγου σ_{cm}/p_o και της παραμόρφωσης με την εξίσωση $\epsilon = 0,2(\sigma_{cm}/p_o)^{-2}$.



Σχήμα 2.22 Σχέση παραμόρφωσης κα λόγου σ_{cm}/p_o

Οι Hoek και Marinos το 2000 πρότειναν το παρακάτω διάγραμμα για την εκτίμηση των συγκλίσεων σε μια βραχώμαζα ανάλογα με το λόγο σ_{cm}/p_o για ανυποστήρικτη σήραγγα. Με βάση αυτό μπορεί να γίνει και μια εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης που απαιτούνται ανάλογα με τη σύγκλιση που αναμένεται.

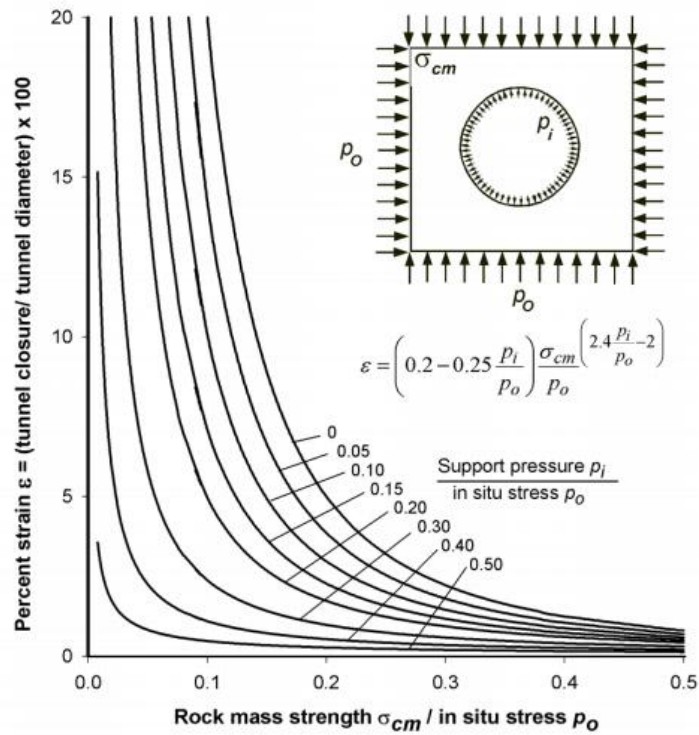


Σχήμα 2.22 Σχέση της παραμόρφωσης με τα προβλήματα σύνθλιψης για ανυποστήρικτη σήραγγα

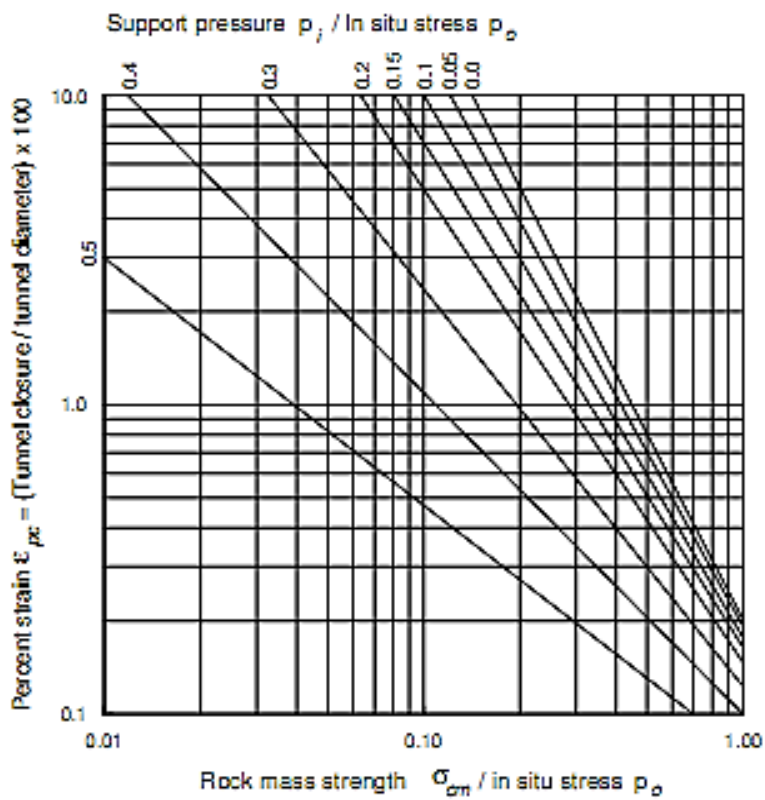
	<i>Παραμόρφωση (%)</i>	<i>Γεωτεχνική θεώρηση</i>	<i>Τύπος υποστήριξης</i>
A	Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχώμαζας	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυρίων ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική.
B	1 έως 2,5	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη σχηματισμού πλαστικής ζώνης στη βραχώμαζα που περιβάλλει τη σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για πρόσθετη ασφάλεια
C	2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και τη διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικώς επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
D	5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προπορείας ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
E	Μεγαλύτερη από 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στη σήραγγα δημιουργούν ένα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις.

Πίνακας 2.1 Εκτίμηση μέτρων υποστήριξης με βάση την αναμενόμενη σύγκλιση

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για ανυποστήρικτες σήραγγες. Το διάγραμμα 2.23 δίνει τη σχέση της παραμόρφωσης όχι μόνο σε σχέση με το λόγο σ_{cm}/p_o αλλά και με το λόγο της πίεσης υποστήριξης προς τη αρχική τάση πεδίου p_i/p_o . Η ίδια σχέση απεικονίζεται και στο σχήμα 2.24 σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 2.23 Σχέση παραμορφώσεων και λόγου αντοχής βραχώμαζας προς γεωστατικές τάσεις για υποστηριζόμενη σήραγγα για διάφορες τιμές της πίεσης υποστήριξης



Σχήμα 2.24 Εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης για διάφορες τιμές παραμορφώσεων για κυκλική σήραγγα σε ισοστατικό πεδίο

Στην περίπτωση αυτή, της υποστηριζόμενης σήραγγας μπορούν να εκτιμηθούν η έκταση της πλαστικής ζώνης και οι συγκλίσεις στη σήραγγα από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{d_p}{d_o} = \left(1,25 - 0,625 \frac{p_i}{p_o}\right) \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \left(\frac{p_i}{p_o} - 0,57\right) \quad (E\zeta \ 2.44)$$

$$\frac{\delta_i}{d_o} = \left(0,002 - 0,0025 \frac{p_i}{p_o}\right) \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \left(2,4 \frac{p_i}{p_o} - 2\right) \quad (E\zeta \ 2.45)$$

όπου d_p : η διάμετρος της πλαστικής ζώνης

d_o : η διάμετρος της σήραγγας

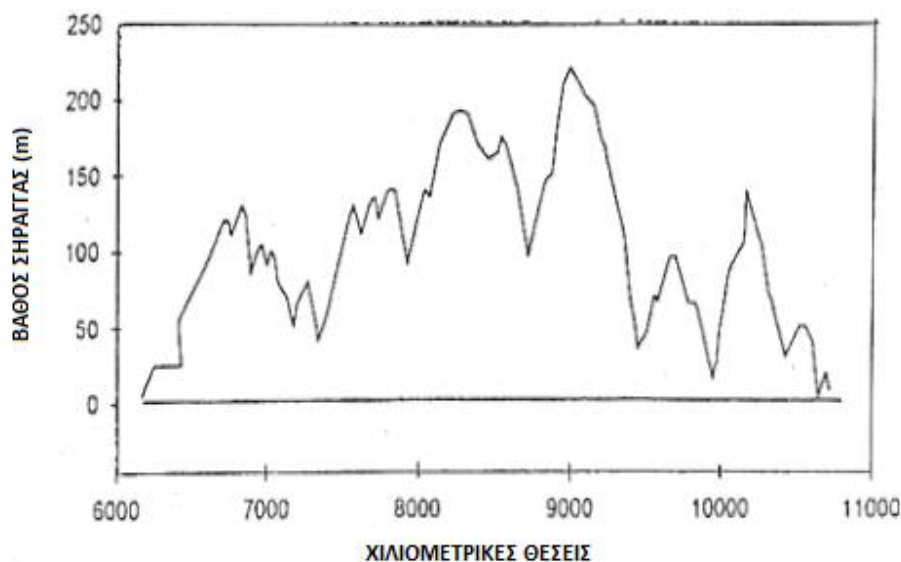
δ_i : η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας

Κεφάλαιο 3ο

Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΔΡΙΣΚΟΥ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η δίδυμη σήραγγα του Δρίσκου αποτελεί τη μεγαλύτερη σε μήκος σήραγγα της Εγνατίας Οδού. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε στο τμήμα «Δροσοχώρι – Ποταμός Αραχθός» της Εγνατίας Οδού από τη χιλιομετρική θέση 6+160.21 έως 10+637. Αποτελείται από 2 ανεξάρτητες σήραγγες ουσιαστικά, σε κάθε μια από τις οποίες διέρχεται ο αντίστοιχος κλάδος του αυτοκινητοδρόμου. Ο αριστερός κλάδος έχει μήκος 4563,94m (από τη Χ.Θ. 6+166.06 έως τη Χ.Θ. 10+730) και ο δεξιός 4476,79m (από τη Χ.Θ. 6+160.21 έως Χ.Θ. 10+637). Η διατομή της σήραγγας που έχει επιλεγεί είναι πεταλοειδούς μορφής, με ημικυκλικό θόλο ακτίνας εσωραχίου τελικής επένδυσης 5,50m και μέγιστο ελεύθερο πλάτος 11,00m, σύμφωνα με την τυπική διατομή της ΕΟΑΕ. Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων που συναντήθηκε είναι τα 220m ενώ στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται το βάθος της σήραγγας σε κάθε χιλιομετρική θέση.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ύψους υπερκειμένων συναρτήσει της χιλιομετρικής θέσης

Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται η γεωτεχνική μηκοτομή στην περιοχή που διανύει η σήραγγα.

3.2 ΑΡΧΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

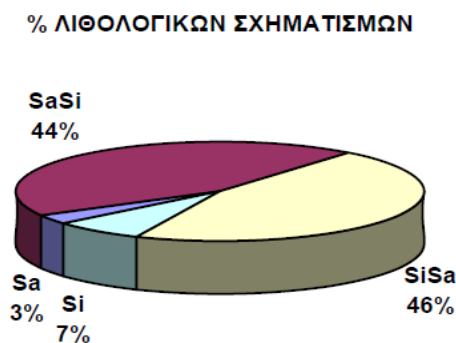
3.2.1 ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η σήραγγα του Δρίσκου επρόκειτο να διανοιχθεί σε διάφορους σχηματισμούς Ιονίου Φλύσχη, οι κυριότεροι από τους οποίους, με βάση τις αρχικές εκτιμήσεις, είναι:

- ✓ ιλυόλιθοι με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών (Si)
- ✓ λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών (SiSa)

- ✓ μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων (SaSi)
- ✓ παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων (Sa)

Τα ποσοστά των παραπάνω σχηματισμών που ήταν αναμενόμενο να συναντηθούν παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2

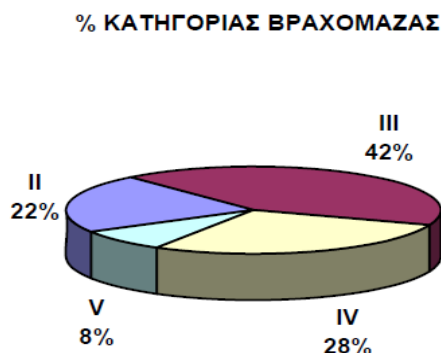


Σχήμα 3.2 Ποσοστά των λιθολογικών σχηματισμών στην περιοχή της σήραγγας

Κυρίως, όμως, στην περιοχή της διάνοιξης της σήραγγας οι σχηματισμοί αποτελούνται από μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες της τάξης των 30-70cm σε εναλλαγή με λεπτοστρωματώδεις ιλυολίθους. Οι στρώσεις αυτές χαρακτηρίζονται από περίπου παραοριζόντια κλίση, σε σχέση με τη διεύθυνση της σήραγγας, στο 60% της μηκοτομικής διάνοιξης (από το νότιο μέτωπο) και από περίπου παρακατακόρυφη κλίση για το υπόλοιπο της σήραγγας. Η περιοχή διέλευσης της σήραγγας παρουσιάζεται έντονα πτυχωμένη. Επιπλέον, διακλάσεις εμφανίζονται στις ψαμμιτικές, κυρίως, στρώσεις, οι οποίες ωστόσο, δεν μπορούν παρά να θεωρηθούν δευτερευούσης σημασίας σε σχέση με την επιρροή των επιφανειών στρώσης στις γεωλογικές συνθήκες της βραχώμαζας. Οι διακλάσεις σε ορισμένες περιπτώσεις επεκτείνονται και στις στρώσεις ιλυολίθου πάχους 10-40cm με εναλλαγές μεταξύ τους από 1 έως 5cm. Κοντά σε περιοχές ρηγμάτων, οι επιφάνειες στρώσης κυρίως στα ιλυολιθικά μέρη των μεσο-παχυστρωματωδών ψαμμιτών/ιλυολίθων, αποτελούν διατμημένες επιφάνειες, προκαλώντας δυσμενείς συνθήκες για την ευστάθεια της προσωρινής υποστήριξης. Η επίδραση των επιφανειών στρώσης δεν σταματά εδώ, καθώς η γωνιακή σχέση της διεύθυνσης της παράταξης των σχηματισμών και της διεύθυνσης της σήραγγας σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης των επιφανειών στρώσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποσφηνώσεις στην περίμετρο εκσκαφής της σήραγγας, με τη μορφή αποκολλήσεων πλακών από την οροφή ή αποτεμαχισμό τεμάχων ψαμμίτη στις παρειές. Οι διαφορικές καθιζήσεις που αποτελούν χαρακτηριστικό του φλύσχη έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του ιλυολίθου. Ειδικά, στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας τα αποτελέσματα από την εξέταση πυρήνων γεωτρήσεων επιβεβαίωσαν την αποδιοργάνωση του ιλυολίθου χωρίς ωστόσο να μπορεί να θεωρηθεί χαοτικό, όπως περιγράφεται στην έκθεση των Hoek και Marinos το 1999. Στην ίδια έκθεση τονίστηκε και η

αναμενόμενη εμφάνιση ροής νερού κατά τη διάνοιξη της σήραγγας λόγω των υψηλών επιπέδων υπογείου νερού.

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί, τελικά, διακρίθηκαν σε μέσης, χαμηλής και πολύ χαμηλής αντοχής. Τα ποσοστά στα οποία αναμενόταν να συναντηθεί κάθε κατηγορία βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

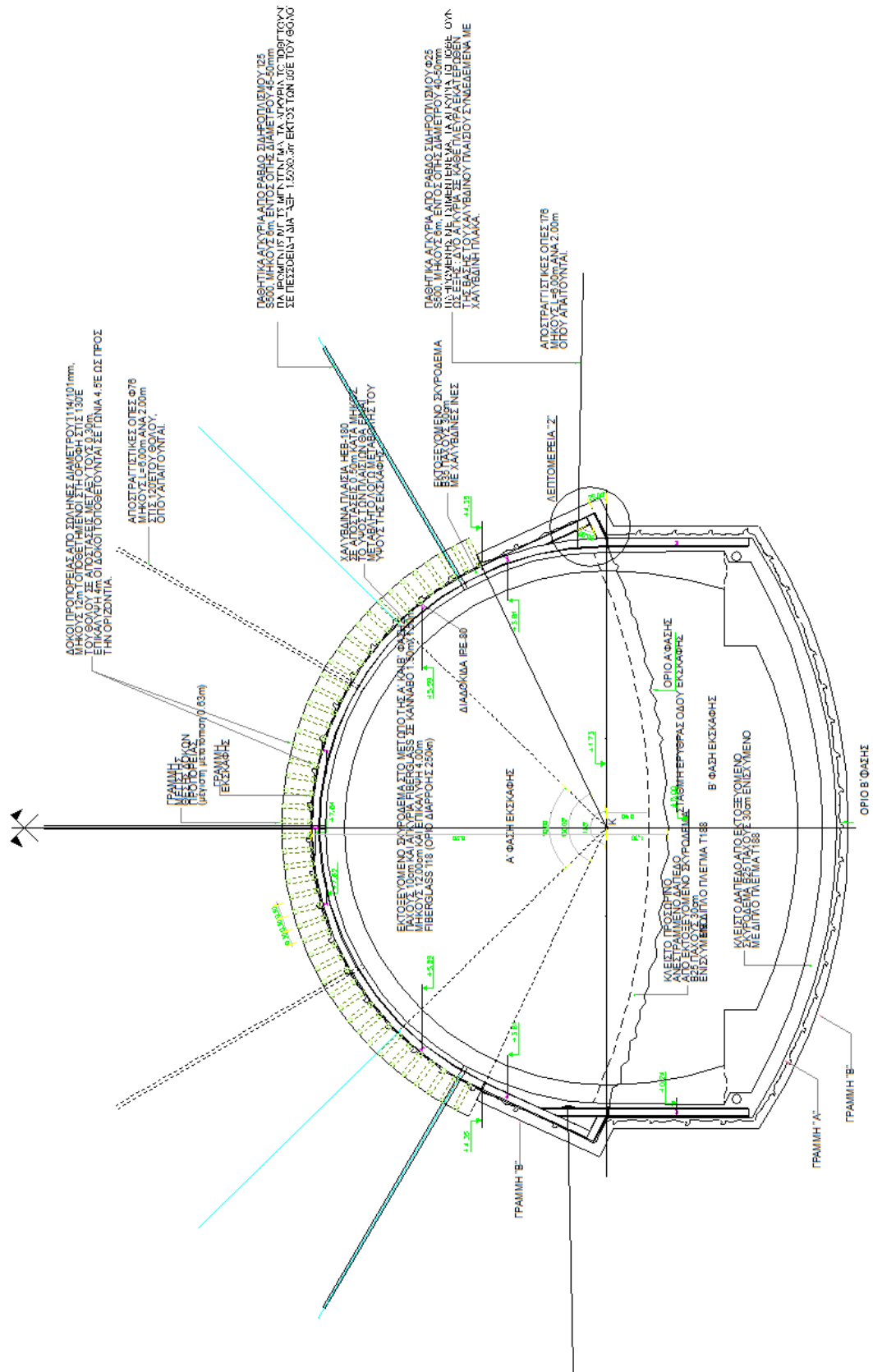


Σχήμα 3.3 Ποσοστά ποιοτήτων βραχώμαζας που συναντώνται στην περιοχή της σήραγγας

Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 είναι αρκετά έντονο και το ύψος της υπερκείμενης βραχώμαζας ξεπερνά σε κάποια σημεία τα 200m.

3.2.2 ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος διακύμανσης της ποιότητας της βραχώμαζας, τον αντίστοιχο λιθολογικό σχηματισμό και το ύψος των υπερκειμένων πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες αριθμητικές αναλύσεις τάσεων-παραμορφώσεων με τις οποίες έγινε έλεγχος επάρκειας του φορτίου των αγκυρίων ή της έκτασης της τοπικής αστοχίας για την περίπτωση υπέρβασης του φορτίου, του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των πλαισίων, καθώς και έλεγχος επάρκειας για το μήκος των αγκυρίων με βάση το εύρος χαλάρωσης της βραχώμαζας. Διαστασιολογήθηκαν με αυτόν τον τρόπο 5 τυπικές διατομές εκσκαφής και μέτρων προσωρινής υποστήριξης (II, III, IV, Va, Vb). Για τις κατηγορίες II και III προβλεπόταν εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με κάνναβο αγκυρίων μήκους 3-4m. Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων και αγκυρίων μήκους 4-6m είχε επιλεγεί για την κατηγορία IV ενώ για τις κατηγορίες Va και Vb συνδυασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χαλύβδινων πλαισίων τύπου HEA160 ή HEB180, αγκυρίων μήκους 5-6m και κλείσιμο του πυθμένα. Επιπλέον, για την κατηγορία Vb θα χρησιμοποιούνταν δοκοί προπορείας και θα έπρεπε να κλείσει ο πυθμένας της άνω ημιδιατομής με διαμόρφωση ανάστροφου τόξου. Πρέπει να τονιστεί ότι η αντιστοιχία της κατηγορίας μέτρων υποστήριξης και της ποιότητας της βραχώμαζας δεν ήταν μονοσήμαντη λόγω της διαφοροποίησης των γεωλογικών σχηματισμών, της ποιότητας της βραχώμαζας και του πάχους των υπερκειμένων σε



Σχήμα 3.4-3.8 Κατηγορίες μέτρων υποστήριξης II, III, IV, Va, Vb

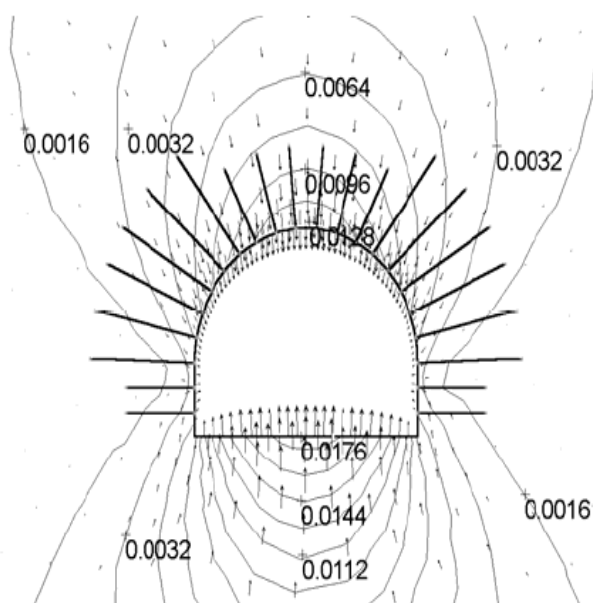
Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα προσωρινά μέτρα υποστήριξης που επιλέχθηκαν για κάθε κατηγορία, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό:

	Φάσεις Εκσκαφής	Προχώρηση top heading	Απόσταση πλήρως υποστηριγμένης διατομής από το μέτωπο	Μέτρα υποστήριξης				Πρόσθετα
				Χρόνος εφαρμογής	Αγκυρώσεις	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πλαίσια	
II	2: -top heading -benching	<2,25m	6m	18 ώρες από την ανατίναξη	Αγκύρια μήκους 3.0 m σε διάταξη 1.50 x 2.0 m στον θόλο (180°) και σποραδικά στις παρειές	180° του θόλου 10 cm με πλέγμα στις παρειές 5 cm	-	Αποστράγγιση εφόσον απαιτηθεί
III	2: -top heading -benching	<1,50m	3m	12 ώρες από την ανατίναξη	Αγκύρια μήκους 3.0 m σε διάταξη 1.30 x 1.30 m στις 120° του θόλου, μήκους 4.0 m στον υπόλοιπο θόλο, και μήκους 3.0 m στις παρειές	180° του θόλου 15 cm με πλέγμα στις παρειές 10 cm	-	Αποστράγγιση εφόσον απαιτηθεί
IV	3: -2 top heading -benching	<1,0m	2m	Κατά την διάρκεια της εκσκαφής	Αγκύρια μήκους 4.0 m σε διάταξη 1.20 x 1.00 m στις 50° του θόλου, μήκους 6.0 m στον υπόλοιπο θόλο, και μήκους 4.0 m στις παρειές Αγκύρια τύπου Swellex, μήκους 4 m σε κάναβο 2.0 x 2.0 m, στο μέτωπο, εφόσον απαιτηθεί.	20 cm με πλέγμα στον θόλο και τις παρειές 10 cm στο μέτωπο του top heading	Lattice girder τύπου 95 / D26 Σε αποστάσεις 1.0 m	Αποστράγγιση εφόσον απαιτηθεί
V	4: -2 top heading -2 bench	<1,0m	2m	Κατά την διάρκεια της εκσκαφής	Αγκύρια μήκους 6.0 m σε διάταξη 1.5 x 1.0 m στον θόλο, στις παρειές και 4 m στον πυθμένα Αγκύρια τύπου Swellex, μήκους 4 m σε κάναβο 2.0 x 2.0 m, στο μέτωπο	20 cm με ίνες σε όλη την επιφάνεια της εκσκαφής τελευταία στρώση πάχους 5 cm χωρίς ίνες 10 cm στο μέτωπο του top heading	Μεταλλικά πλαίσια HEA 160 Σε αποστάσεις 1.0 m	Δοκοί Προπορείας εφόσον απαιτηθεί Αποστράγγιση εφόσον απαιτηθεί

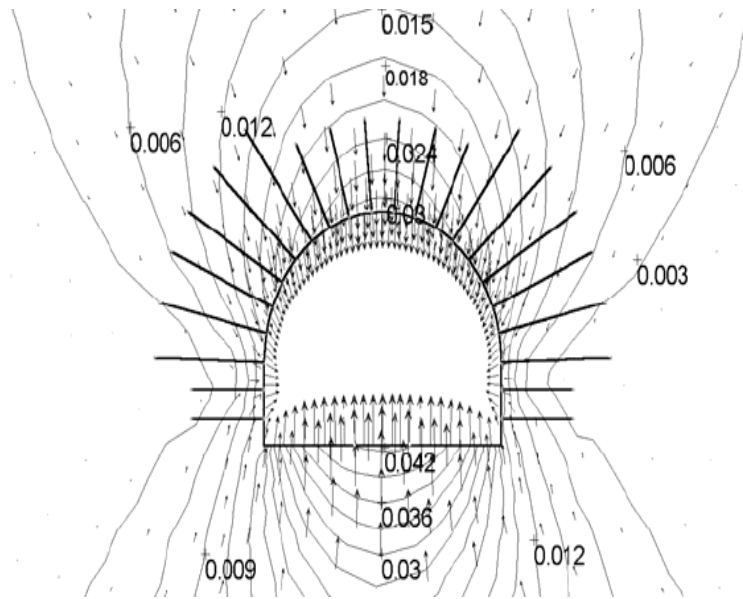
Πίνακας 3.1 Προσωρινά μέτρα υποστήριξης για κάθε κατηγορία

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μέγιστες επιτρεπόμενες μετακινήσεις στην κλείδα για κάθε κατηγορία υποστήριξης, οι οποίες κυμαίνονταν από 7,5mm για την κατηγορία II έως 8cm για την κατηγορία V_b.

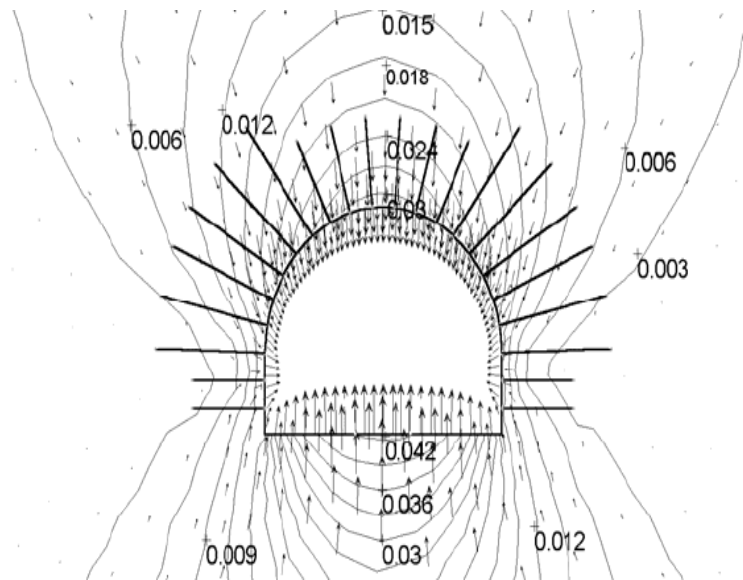
Προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη κατηγορία υποστήριξης για κάθε χιλιομετρική θέση της σήραγγας, χρησιμοποιούνται οι καμπύλες μεταβολής της μέγιστης μετακίνησης στην κλείδα ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων και το είδος του lithολογικού σχηματισμού μαζί με τις μέγιστες επιτρεπόμενες μετακινήσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.12. Το κριτήριο επομένως για την επιλογή της κατηγορίας υποστήριξης είναι οι μετακινήσεις καθώς είναι ένα μέγεθος που εύκολα, άμεσα και αξιόπιστα μπορεί να μετρηθεί, ενώ συμπεριλαμβάνει όλους τους ελέγχους επάρκειας. Ακολουθεί ένα παράδειγμα για τον τρόπο εφαρμογής της παραπάνω μεθόδου. Ενδεικτικά, δίνονται στα σχήματα 3.9, 3.10, 3.11 οι ισοΰψεις των μετακινήσεων για ποιότητα βραχώμαζας IV και για ύψος υπερκειμένων 100,170 και 220m αντίστοιχα, με εφαρμογή υποστήριξης κατηγορίας IV. Είναι εμφανές ότι για ύψος υπερκειμένων 100 και 170 που οι μετακινήσεις είναι 1,3 και 2,25 c m στην κλείδα, μικρότερες από τη μέγιστη ανεκτή για αυτήν την κατηγορία που είναι 2,5cm, επαρκεί η χρήση αυτών των μέτρων υποστήριξης. Αντίθετα, για υπερκείμενα ύψους 220m η μετακίνηση στην κλείδα είναι 3cm, μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη. Επομένως, απαιτούνται μέτρα υποστήριξης κατηγορίας V καθώς δεν επαρκεί η κατηγορία υποστήριξης IV.



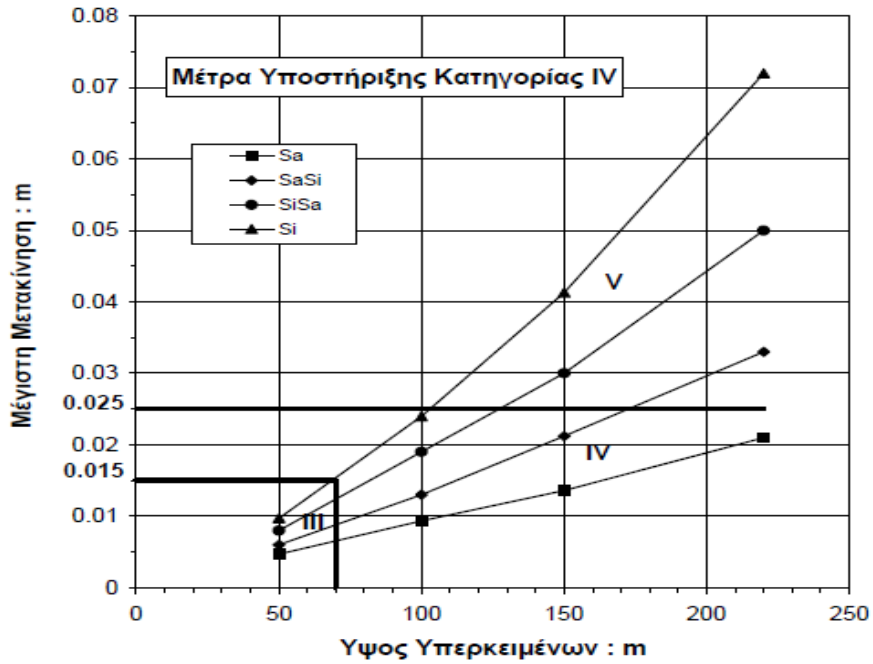
Σχήμα 3.9 Ισοΰψεις των μετακινήσεων για ύψος υπερκειμένων 100m



Σχήμα 3.10 Ισοϋψείς των μετακινήσεων για ύψος υπερκειμένων 170m



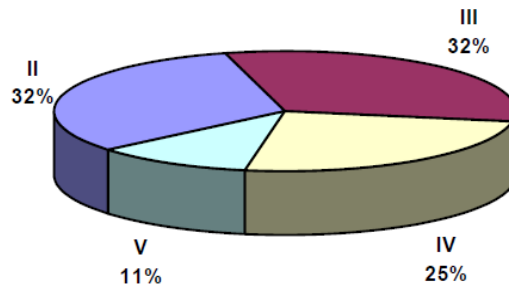
Σχήμα 3.11 Ισοϋψείς των μετακινήσεων για ύψος υπερκειμένων 220m



Σχήμα 3.12 Κατηγορία μέτρων υποστήριξης ανάλογα με τις μέγιστες μετακινήσεις και το ύψος των υπερκειμένων

Με βάση, λοιπόν, την παραπάνω μεθοδολογία, η ποσοστιαία κατανομή των μέτρων υποστήριξης κατά μήκος της σήραγγας προέκυψε ως εξής:

% ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ



Σχήμα 3.13 Ποσοστιαία κατανομή των μέτρων υποστήριξης κατά μήκος της σήραγγας

Στο πίνακα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατηγορίες υποστήριξης που επιλέχθηκαν για κάθε λιθολογικό σχηματισμό, ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας (δείκτης GSI) και το ύψος των υπερκειμένων.

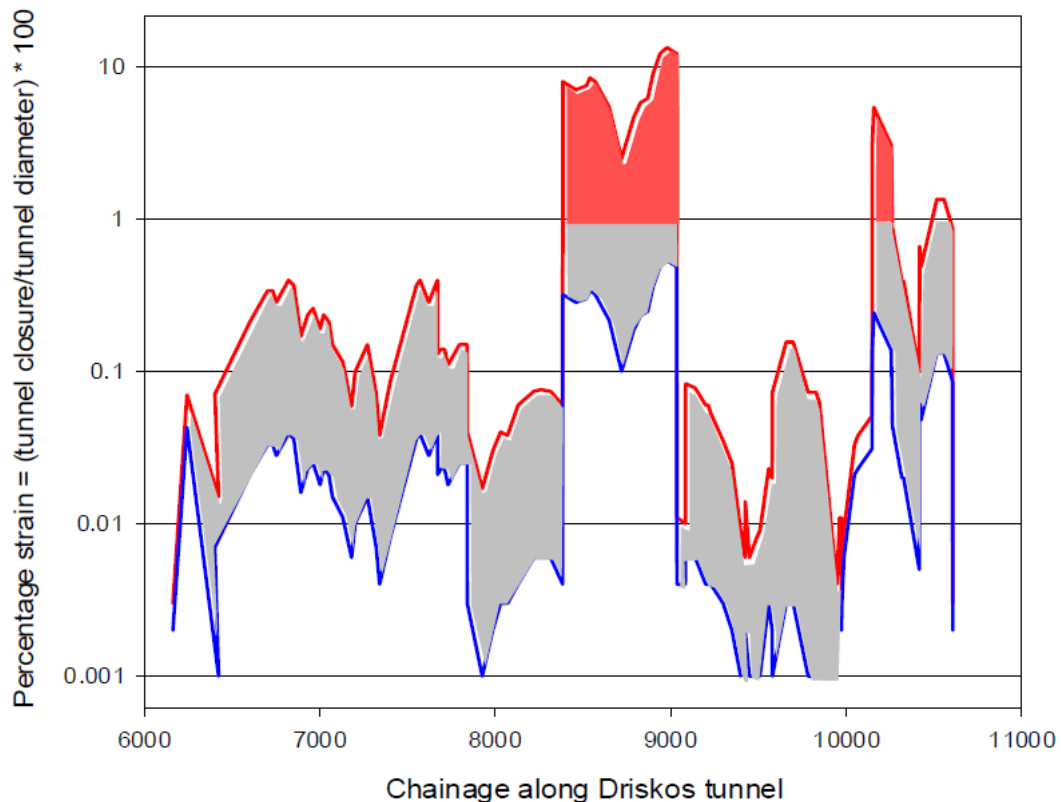
Λιθολογικός σχηματισμός	GSI	Ύψος υπερκειμένων (m)	Κατηγορία εκσκαφής και υποστήριξης
<i>Ψαμμίτης (Sa)</i>	15÷19	15÷60	IV
		>60	V
	20÷29	15÷60	III
		60÷120	IV
		>120	V
	30÷39	15÷70	III
		>70	IV
	40÷49	15÷150	II
		>150	III
	50÷59	15÷150	II
>150		III	
≥60	>15	II	
<i>Ιλλολιθικός Ψαμμίτης (SaSi)</i>	15÷19	15÷50	IV
		>50	V
	20÷29	15÷45	III
		45÷110	IV
		>110	V
	30÷39	15÷50	III
		50÷170	IV
		>170	V
	40÷49	15÷130	II
		>130	III
50÷59	15÷130	II	
	>130	III	
≥60	>15	II	
<i>Ψαμμούχος Ιλόλιθος (SiSa)</i>	15÷19	15÷40	IV
		>40	V
	20÷29	15÷40	III
		40÷100	IV
		>100	V
	30÷39	15÷45	III
		45÷150	IV
		>150	V
	40÷49	15÷110	II
110÷200		III	
>200		IV	

	50÷59	15÷110	II
		>110	III
	≥60	>15	II
<i>Γλοόλιθος (Si)</i>	15÷19	>15	V
	20÷29	15÷40	IV
		>40	V
	30÷39	15÷40	III
		40÷60	IV
		>60	V
	40÷49	15÷45	II
		45÷120	III
		>120	IV
	50÷59	15÷45	II
		45÷190	III
		>190	IV
	≥60	>15	II

Πίνακας 3.2 Επιλογή κατηγορίας υποστήριξης για κάθε λιθολογικό σχηματισμό, ανάλογα με το ύψος υπερκειμένων και την ποιότητα της βραχώμαζας

3.2.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΑΣΕΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

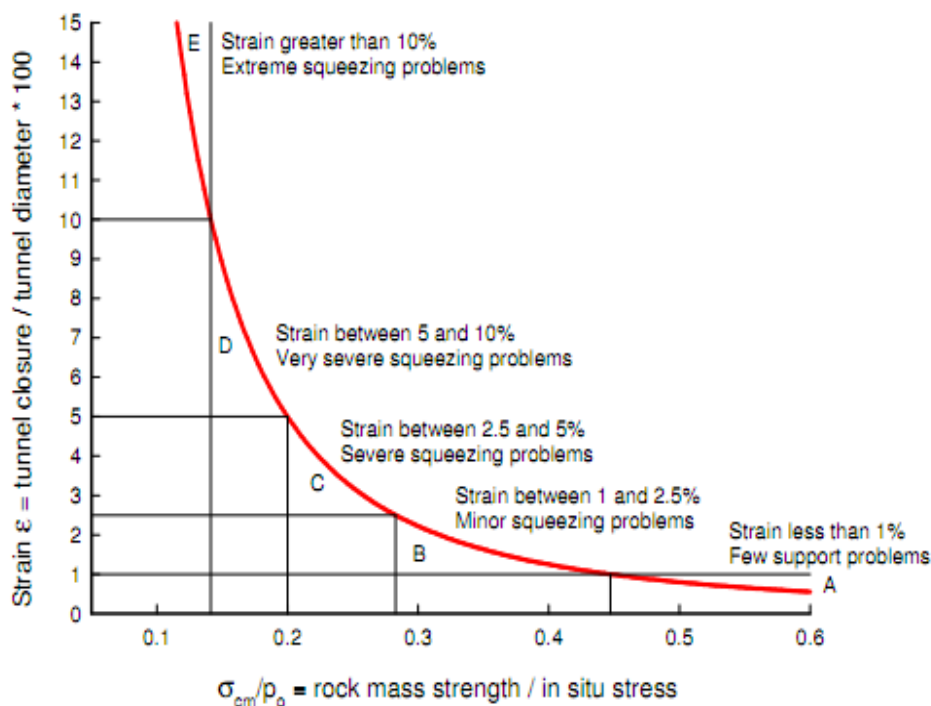
Οι Hoek και Marinos με έκθεση τους το 1999, εκτίμησαν τις ανάγκες υποστήριξης της σήραγγας του Δρίσκου, χρησιμοποιώντας το κριτήριο της κρίσιμης παραμόρφωσης κατά Sakurai. Συγκεκριμένα, για τη βραχόμαζα στην οποία επρόκειτο να διανοιχθεί η σήραγγα, η κρίσιμη παραμόρφωση κατά Sakurai είναι 1%. Δηλαδή για παραμορφώσεις άνω του 1% η σήραγγα χαρακτηρίζεται ως μη ευσταθής και χρειάζεται ειδική προσοχή στην επιλογή των μέτρων υποστήριξης, ενώ για κάτω από 1% αρκεί η ελάχιστη υποστήριξη. Στο διάγραμμα 3.14 παρουσιάζεται το ποσοστό παραμόρφωσης ((σύγκλιση σήραγγας/διάμετρο)*100) για κάθε χιλιομετρική θέση. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση το ύψος των υπερκειμένων σε κάθε θέση για τη μέγιστη και την ελάχιστη αντοχή βραχόμαζας σε κάθε θέση. Η διαγραμμισμένη περιοχή δείχνει το εύρος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.14 Κατανομή ποσοστού παραμόρφωσης κατά μήκος της σήραγγας

Επομένως, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για τις μέγιστες αντοχές βραχόμαζας, σε καμία θέση δεν υπερβαίνει η παραμόρφωση την κρίσιμη 1%, ενώ για τις ελάχιστες αντοχές, μόνο στις θέσεις 8385-9035, 10150-10260 και 10520-10560, η παραμόρφωση ξεπερνάει το 1%. Ακόμα, δηλαδή, και στο χειρότερο σενάριο για την αντοχή της βραχόμαζας, μόνο το 15% της σήραγγας θα αντιμετωπίσει σοβαρά προβλήματα.

Εκτός από την κρίσιμη παραμόρφωση, για την εκτίμηση των αναγκών υποστήριξης της σήραγγας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το διάγραμμα 3.15 της παραμόρφωσης σε ανυποστήρικτη σήραγγα σε σχέση με το λόγο της αντοχής της βραχώμαζας προς την τάση πεδίου (γινόμενο του ύψους των υπερκειμένων και του ειδικού βάρους της βραχώμαζας).



Σχήμα 3.15 Σχέση παραμόρφωσης και λόγου αντοχής βραχώμαζας προς γεωστατική τάση

3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Αν και η πρόοδος κατά τα πρώτα στάδια διάνοιξης της σήραγγας ήταν αρκετά ικανοποιητική, κάποια προβλήματα προέκυψαν λόγω της υπερεκτίμησης της ποιότητας και της αντοχής της βραχώμαζας κατά τη φάση μελέτης. Το ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν αφορά αστοχίες των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας. Εμφανίστηκαν ρωγμές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, παραμορφώσεις στα αγκύρια και συγκεκριμένα στις πλάκες αγκύρωσης (face plate), και κάποια μεταλλικά πλαίσια είχαν παρουσιάσει τοπικό λυγισμό. Παρακάτω δίνονται κάποιες εικόνες ενδεικτικές των μορφών αστοχίας της προσωρινής υποστήριξης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας.



Σχήμα 3.16 Ανάπτυξη των ρωγμών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω ημιδιατομής



Σχήμα 3.17 Ρηγμάτωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος γύρω από δικτυωτό πλαίσιο



Σχήμα 3.18 Παραμορφωμένη πλάκα αγκυρίου (face plate) λόγω αστοχίας της υποστήριξης

Η εμφάνιση αυτών των αστοχιών αποδεικνύει την ανεπάρκεια των μέτρων υποστήριξης όπως είχαν επιλεγεί κατά την αρχική μελέτη, για τη συγκεκριμένη βραχόμαζα λόγω των υψηλών υπερκειμένων σε συνδυασμό με την χαμηλή αντοχή του φλύσχη, η οποία ήταν σαφώς χαμηλότερη από την αρχικά εκτιμηθείσα. Στις περιπτώσεις που αστόχησαν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν ήταν εμφανώς μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες και δεν σταθεροποιήθηκαν με την πάροδο του χρόνου, επιβεβαιώνοντας τη λανθασμένη εκτίμηση για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Ένα δεύτερο πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διάνοιξη σχετίζεται με τις μετακινήσεις στο τοίχωμα της σήραγγας. Σε σημεία που δεν αστόχησαν τα μέτρα της προσωρινής υποστήριξης, οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν ήταν μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Η αιτία για αυτές τις μετακινήσεις είναι η ανεπαρκής υποστήριξη της βάσης του κελύφους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω ημιδιατομής (top heading). Αυτό το κέλυφος, που είναι ενισχυμένο με δικτυωτά πλαίσια, έχει ελάχιστη ή καθόλου ενεργή επαφή με το δάπεδο της άνω ημιδιατομής, με αποτέλεσμα να υποχωρεί λόγω της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Επομένως, για να μπορέσει να φτάσει τη μέγιστη αντοχή σχεδιασμού του το κέλυφος, θα έπρεπε να έχει εκσκαφτεί πρώτα ο πυθμένας και να έχει τοποθετηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στον πυθμένα και να έχει εγκατασταθεί το κάτω μέρος του κελύφους.

3.4 ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΦΛΥΣΧΗ

Η εμφάνιση αστοχιών των μέτρων προσωρινών υποστήριξης σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της σήραγγας καθώς και οι μεγάλες μετακινήσεις λόγω υποχώρησης του κελύφους, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω, οδήγησε στην ανάγκη λήψης μέτρων θεραπείας για το ήδη διανοιχθέν τμήμα και υπολογισμού νέων διατομών για την υπόλοιπη σήραγγα. Τα μέτρα θεραπείας αποσκοπούν στη μείωση στο ελάχιστο ή στην ανάσχεση της αύξησης των συγκλίσεων και στην αποφυγή περαιτέρω επιφόρτισης των ήδη εφαρμοσθέντων μέτρων. Για να γίνουν τα παραπάνω, έπρεπε να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες που συναντήθηκαν και με βάση τις μετρήσεις των συγκλίσεων να καθοριστούν εκ νέου οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχόμαζας. Προκειμένου να επιτευχθούν όλοι οι παραπάνω στόχοι, διενεργήθηκαν ανάδρομες αναλύσεις ώστε να προσδιοριστούν οι νέες αυτές παράμετροι, αλλά και να ελεγχθεί η επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης όπως προβλέπονται από την οριστική μελέτη, στις διατομές που έχει ήδη γίνει υπέρβαση των επιτρεπόμενων συγκλίσεων. Η μέθοδος των ανάδρομων αναλύσεων θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Ένας από τους λόγους υποβάθμισης της βραχόμαζας είναι η παρουσία νερού. Τα φύλλα αποτύπωσης των μετώπων, αποδεικνύουν την ύπαρξη νερού με μορφή υγρασίας έως ροής υπό μέτρια πίεση σε όλες σχεδόν τις θέσεις του μετώπου. Εμφανής είναι και η παρουσία παρακατακόρυφων ρηγμάτων πληρωμένων με μυλονιτωμένο υλικό, χαμηλών αντοχών. Επιπλέον, η αντοχή του φλύσχη μειώθηκε τοπικά λόγω της ύπαρξης υψηλότερων συγκεντρώσεων τάσεων από τις κανονικές, όταν οι παραοριζόντιες στρώσεις διατέμνονται από ομάδες ρηγμάτων. Για τον υπολογισμό, επομένως, των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του φλύσχη, θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της παρουσίας υπογείων νερών. Αυτή είναι αρνητική και για τις παραμέτρους (m_i και σ_{ci}) του άρρηκτου πετρώματος.

Η εφαρμογή ανεπαρκών μέτρων υποστήριξης στο διανοιχθέν τμήμα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζώνης χαλάρωσης γύρω από την εκσκαφή και οδήγησε στη μείωση του βαθμού αλληλεμπλοκής των τεμάχων της βραχόμαζας και στη διεύρυνση του ανοίγματος των ασυνεχειών που διασχίζουν τη βραχόμαζα. Ως αποτέλεσμα αυτού, η τιμή του δείκτη GSI μειώθηκε. Η παρουσία ζώνης χαλάρωσης μεγαλύτερου εύρους από το προβλεπόμενο επιβεβαιώθηκε και από τις γεωτεχνικές οργανομετρήσεις με χρήση μηκυσιομέτρων

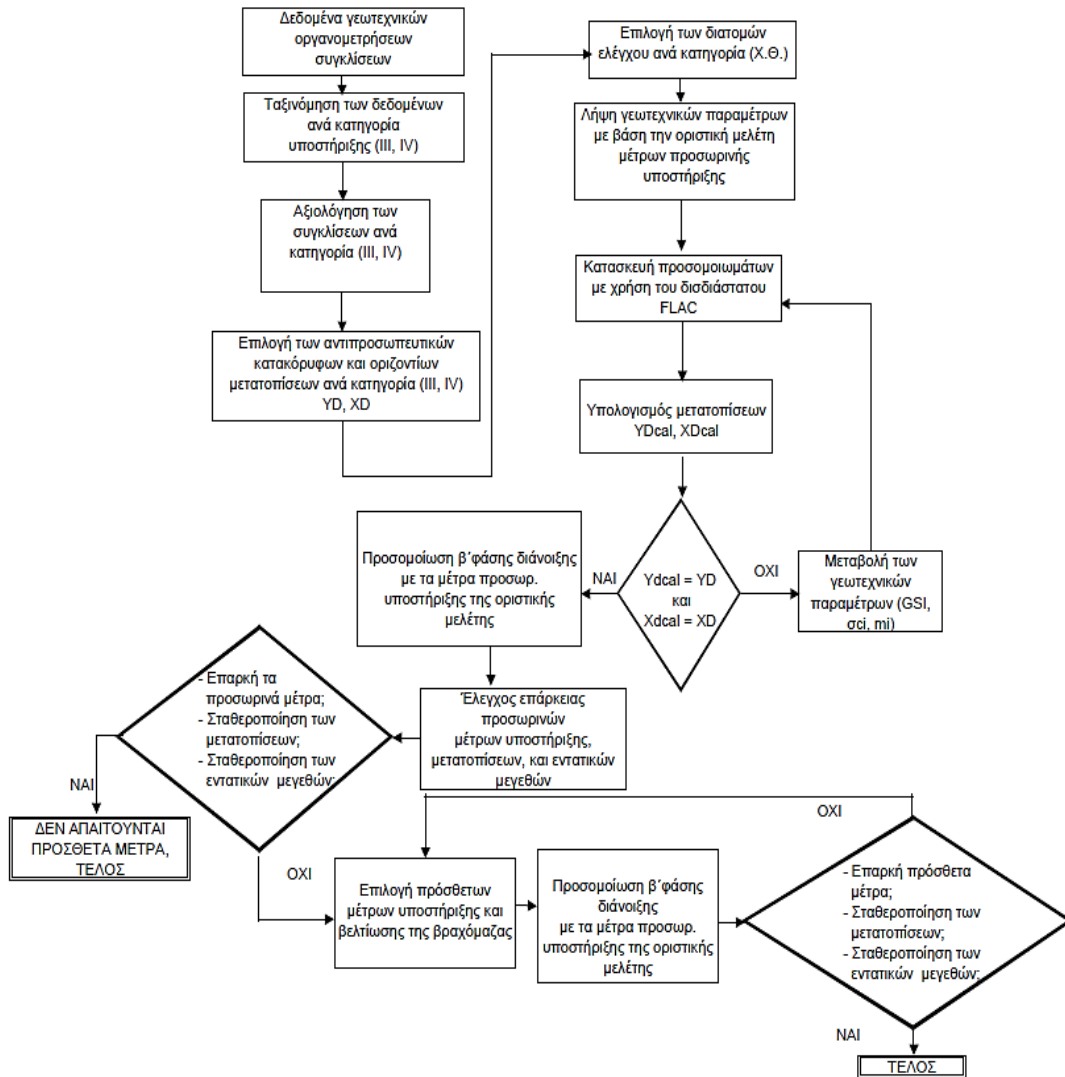
Στον πίνακα GSI, επομένως, οι υπολογισθείσες τιμές του δείκτη θα έπρεπε να μετατοπιστούν προς τα δεξιά για να ληφθεί υπόψη παρουσία νερού. Επειδή δεν υπάρχουν ποσοτικές εκτιμήσεις για τη μείωση των τιμών των GSI, m_i και σ_{ci} , ως κριτήριο χρησιμοποιήθηκαν οι μετρηθείσες συγκλίσεις και συγκεκριμένα για το m_i τα όρια που προτείνει η βιβλιογραφία για το φλύσχη, δηλαδή 5 έως 21. Οι τιμές, δηλαδή, του m_i μειώθηκαν έως η υπολογιζόμενη κατακόρυφη μετατόπιση να προσεγγίσει τη μετρηθείσα. Για τον υπολογισμό των ισοδύναμων παραμέτρων

αντοχής c και ϕ εφαρμόστηκε το κριτήριο Hoek-Brown σε συνδυασμό με το εύρος διακύμανσης του ύψους των υπερκειμένων.

Για το δυσμενέστερο συνδυασμό αρχικού εντατικού πεδίου και ποιότητας βραχόμαζας για τις κατηγορίες III, IV, Va, Vb εκτελέστηκαν αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω γεωλογικές συνθήκες και το γεγονός ότι το τμήμα που έπρεπε να διανοιχθεί στη συνέχεια βρισκόταν σε περιοχή με υψηλότερα υπερκείμενα από το ήδη διανοιχθέν, προκειμένου να αναπροσαρμοστούν οι κατηγορίες αυτές. Για την επιλογή του δυσμενέστερου συνδυασμού υπερκειμένου σε κάθε κατηγορία χρησιμοποιήθηκε ο λόγος της αντοχής της βραχόμαζας προς τη γεωστατική τάση σ_{cm}/p_o . Κάθε τυπική διατομή όπως είχε υπολογιστεί στον αρχικό σχεδιασμό αντιστοιχούσε σε ένα συγκεκριμένο εύρος συνδυασμών ποιότητας βραχόμαζας και ύψους υπερκειμένων. Για αυτό και για τη διαστασιολόγηση των νέων διατομών ήταν απαραίτητο κάθε μια από αυτές να έχει το ίδιο περίπου εύρος εφαρμογής με την αντίστοιχη αρχική, λαμβάνοντας υπόψη μικρή απομείωση των παραμέτρων σ_{ci} και m_i . Η απομείωση του δείκτη GSI λαμβάνεται υπόψη για την κατηγοριοποίηση της βραχόμαζας, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη διατομή. Η διαστασιολόγηση των νέων διατομών, επομένως, έγινε για το δυσμενέστερο συνδυασμό ποιότητας βραχόμαζας και ύψους υπερκειμένων, όπως έχει υπολογιστεί για κάθε κατηγορία μέτρων υποστήριξης στον αρχικό σχεδιασμό.

3.5 ΑΝΑΔΡΟΜΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Η εμπειρία από την πρώτη φάση εκσκαφής της σήραγγας, δηλαδή οι γεωλογικές συνθήκες που συναντήθηκαν και τα προβλήματα που προέκυψαν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη εκτίμηση του σχεδιασμού του έργου. Με την εκτέλεση ανάδρομων αναλύσεων, λοιπόν, γίνεται επανεκτίμηση του αρχικού σχεδιασμού, ώστε να αποφευχθούν παρόμοια προβλήματα στο τμήμα της σήραγγας που δεν έχει διανοιχθεί έως τότε. Παρακάτω παρουσιάζεται με μορφή διαγράμματος ροής η διαδικασία εκτέλεσης των ανάδρομων αναλύσεων και η επιλογή των μέτρων θεραπείας. Συγκεκριμένα, αφορά τα τμήματα της σήραγγας στα οποία είχε εφαρμοσθεί κατηγορία III ή IV προσωρινής υποστήριξης και είχε παρουσιαστεί υπέρβαση των μέγιστων επιτρεπόμενων μετατοπίσεων.



Σχήμα 3.19 Διάγραμμα ροής εκτέλεσης ανάδρομων αναλύσεων και υπολογισμού μέτρων θεραπείας

Οι γεωτεχνικές παράμετροι για κάθε κατηγορία για τον αρχικό σχεδιασμό ήταν οι εξής:

Κατηγορία	GSI	m_i	σ_{ci}	γ (kN/m³)
III	40	11	30	27
IV	32	8	25	27

Πίνακας 3.3 Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για τον αρχικό σχεδιασμό

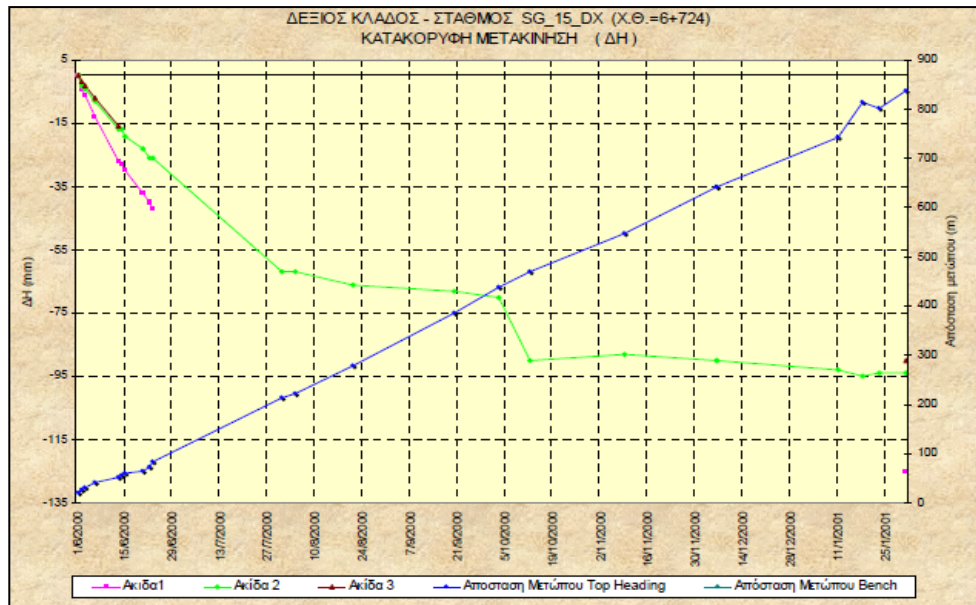
Ως παράδειγμα για τη μέθοδο των ανάδρομων αναλύσεων θα χρησιμοποιηθεί η κατηγορία III. Εκτελέστηκαν υπολογισμοί, διαφοροποιώντας κάθε φορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους της βραχώμαζας, και επαναλήφθηκαν μέχρι η υπολογιζόμενη κατακόρυφη μετατόπιση να προσεγγίσει τη μέγιστη μετρηθείσα που

ήταν 34mm, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη ήταν 15mm. Οι λόγοι που χρησιμοποιείται η μετατόπιση ως κύριο κριτήριο είναι ότι αποτελεί το πλέον εύκολα μετρούμενο μέγεθος, παρουσιάζει τη μικρότερη πιθανότητα σφάλματος από πλευράς οργανομετρήσεων και είναι το κυριότερο μέγεθος από άποψη λειτουργικότητας της σήραγγας.

Διατηρώντας σταθερά τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, εκτελέστηκαν υπολογισμοί μεταβάλλοντας μόνο τις παραμέτρους GSI, σ_{ci} και m_i του πετρώματος. Με χρήση των καμπύλων Panet για δεδομένες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων, ακτίνας εκσκαφής και πάχους υπερκειμένων, εκτιμήθηκε η αρχική αποτόνωση τη στιγμή που εγκαταστάθηκε το πρώτο μέτρο δηλαδή εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 5cm. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο ωρίμανσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε σχέση με την προχώρηση του μετώπου, προσομοιώθηκε η άφάση εκσκαφής σε 11 στάδια. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για διάφορους συνδυασμούς γεωτεχνικών παραμέτρων καθώς και το διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου και της απόστασης από μέτωπο στη Χ.Θ. 6+724.

Παράμετροι			Κατακόρυφη μετατόπιση (mm)		Οριζόντια μετατόπιση (mm)		Εύρος ζώνης πλαστικοποίησης (mm)	
GSI	m_i	σ_{ci}	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος
40	11	30	10,8	10,8	2,8	2,8	1,0	1,0
32	8	25	15,5	15,6	5,3	5,6	2,0	2,0
25	8	20	33,8	33,3	8,9	9,2	3,5	3,5

Πίνακας 3.4 Μετατοπίσεις και εύρος ζώνης πλαστ/σης για τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων ανάδρομων αναλύσεων για κατηγορία III



Σχήμα 3.20 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης στη Χ.Θ. 6+724 σε σχέση με το χρόνο και την απόσταση από το μέτωπο

Επειδή έχουν ήδη συμβεί αστοχίες σε αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τον υπολογισμό των μέτρων θεραπείας για την κατηγορία III, επιλέγεται ο συνδυασμός GSI 25, σ_{ci} 20 και m_i 8, που δίνει κατακόρυφη μετατόπιση που προσεγγίζει την μετρηθείσα. Με ανάλογη διαδικασία εκτελούνται ανάδρομες αναλύσεις για την κατηγορία IV, για μετρηθείσα κατακόρυφη μετατόπιση 80mm και μέγιστη επιτρεπόμενη 25mm. Οι συνδυασμοί τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων και τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι			Κατακόρυφη μετατόπιση (mm)		Οριζόντια μετατόπιση (mm)		Εύρος ζώνης πλαστικοποίησης (mm)	
GSI	m_i	σ_{ci}	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος	Δεξιός κλάδος	Αριστ. κλάδος
32	11	25	10,2	10,2	4,2	4,2	0,5-1,5	0,5-1,5
25	8	20	32,2	32,2	9,7	9,8	1-2,5	1-2,5
20	8	15	69,7	69,8	27,0	27,2	4-6	4-6

Πίνακας 3.5 Μετατοπίσεις και εύρος ζώνης πλαστ/σης για τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων ανάδρομων αναλύσεων για κατηγορία IV

Επιλέγεται ο τρίτος συνδυασμός που προσεγγίζει περισσότερο τη μετρηθείσα μετατόπιση.

3.6 ΜΕΤΡΑ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΣΧΕΡΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

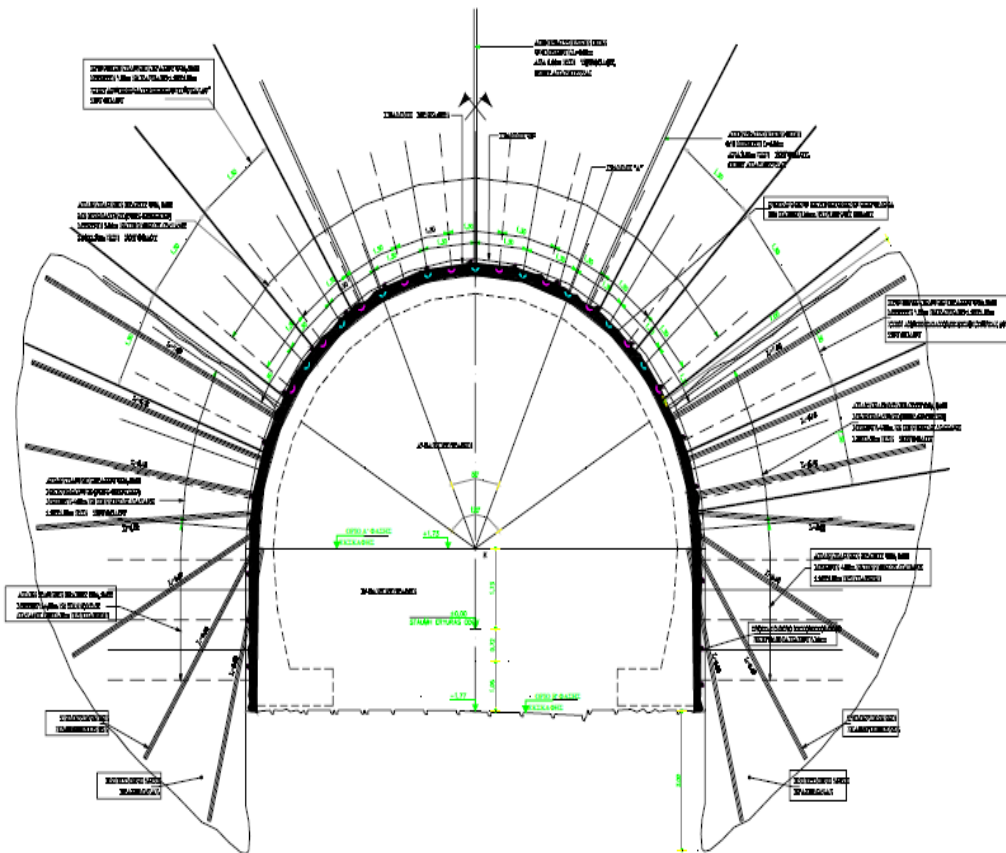
Η επιλογή των μέτρων θεραπείας για τις περιοχές της σήραγγας όπου εμφανίστηκαν προβλήματα, έγινε με βάση τα εξής κριτήρια:

- ✓ να μειωθεί στο ελάχιστο ή αν είναι δυνατόν να μηδενιστεί η περαιτέρω αύξηση των συγκλίσεων και το εύρος της ζώνης πλαστικοποίησης όταν ολοκληρωθεί και η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής
- ✓ να μην επιφορτιστούν περισσότερο τα ήδη εφαρμοσθέντα μέτρα προσωρινής υποστήριξης όταν ολοκληρωθεί και η β' φάση εκσκαφής (κάτω ημιδιατομή)
- ✓ να είναι επαρκή τα μέτρα υποστήριξης της β' φάσης

Για την κατηγορία III προτάθηκαν 3 συνδυασμοί. Σε όλους προβλεπόταν αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από 10cm σε 15cm. Επιπλέον:

- ο συνδυασμός Α πρότεινε την εφαρμογή αγκυρίων 7m σε κάνναβο 1,3mX1,3m στις παρειές της άνω ημιδιατομής και τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης μέσου μήκους 5m στις παρειές της άνω και κάτω ημιδιατομής.
- ο συνδυασμός Β πρότεινε την εφαρμογή αγκυρίων 7m σε κάνναβο 1,3mX1,3m στις παρειές της άνω ημιδιατομής και τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης μέσου μήκους 3m στις παρειές της κάτω ημιδιατομής.
- ο συνδυασμός Γ πρότεινε την εφαρμογή αγκυρίων πλήρους πάκτωσης μήκους 7m σε κάνναβο 1,3mX1,3m στις παρειές της άνω ημιδιατομής.

Συγκρίνοντας τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη της υποστήριξης και τις μετατοπίσεις για τους 3 συνδυασμούς, απορρίπτεται ο συνδυασμός Γ καθώς δεν δίνει καμία ουσιαστική βελτίωση. Ο συνδυασμός Α κρίθηκε ως καταλληλότερος, αλλά ήταν αναγκαίο να εφαρμοσθούν τα μέτρα της άνω ημιδιατομής πριν την εκσκαφή της β' φάσης. Ακόμη κρίθηκε απαραίτητη η αύξηση του μήκους των αγκυρίων της β' φάσης από 3 σε 4m γιατί το εύρος της πλαστικής ζώνης είχε υπερβεί τα 3m. Στο σχήμα 3.21 φαίνεται η διάταξη των πρόσθετων μέτρων για την άνω και κάτω ημιδιατομή.



Σχήμα 3.21 Πρόσθετα μέτρα υποστήριξης άνω και κάτω ημιδιατομής για την κατηγορία III

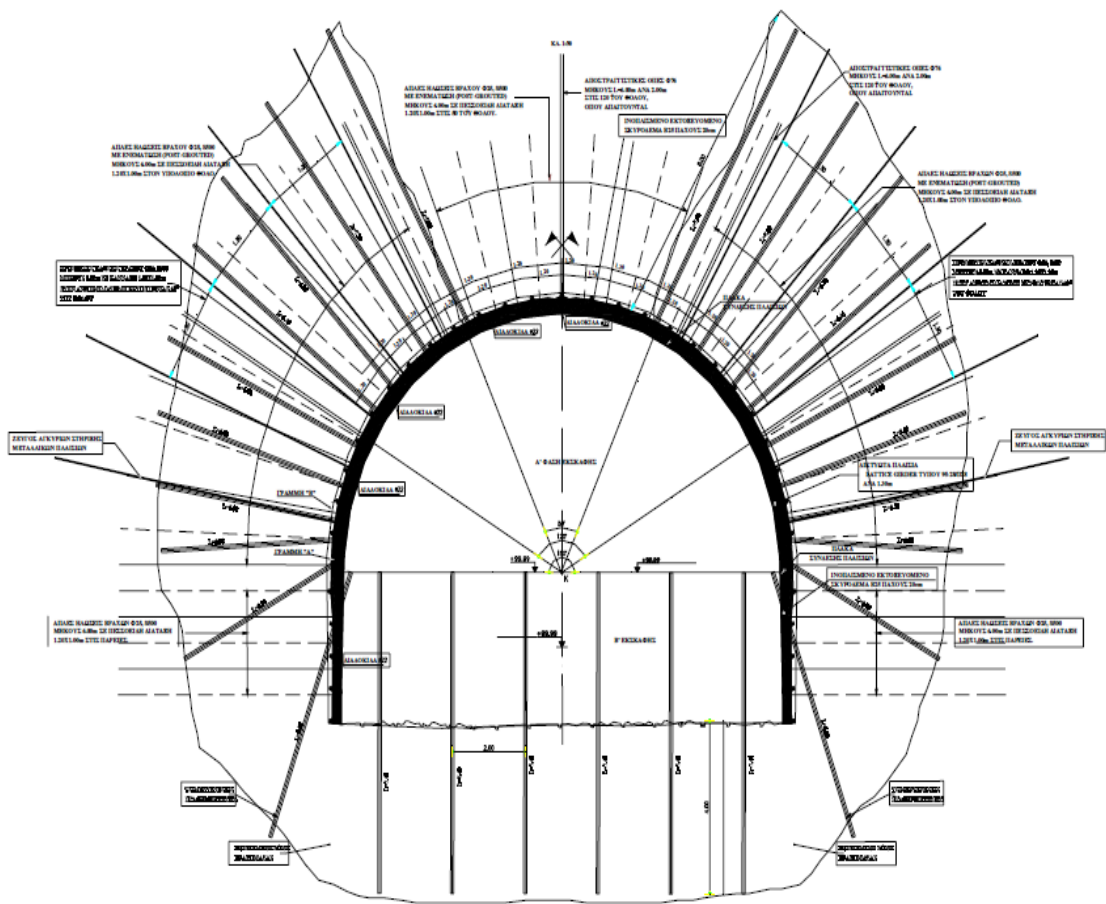
Για την κατηγορία IV εξετάστηκαν 2 συνδυασμοί μέτρων θεραπείας. Και στους 2 προβλεπόταν αύξηση του μήκους των αγκυρίων της β' φάσης από 4m σε 6m λόγω πλαστικοποίησης της βραχώμαζας. Επιπλέον:

- ❖ ο συνδυασμός Α προέβλεπε την εφαρμογή αγκυρίων μήκους 8m σε κάρναβο 1,3mX1,3m στις παρειές της άνω ημιδιατομής και τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης μέσου μήκους 5m, στις παρειές της άνω και κάτω φάσης.
- ❖ ο συνδυασμός Β πρότεινε την εφαρμογή αγκυρίων μήκους 8m σε κάρναβο 1,3mX1,3m στις παρειές της άνω φάσης και τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης στις παρειές της άνω και κάτω φάσης αλλά και κάτω από το δάπεδο της σήραγγας μέχρι 3m βάθος.

Από αναλύσεις προέκυψε ότι η καλύτερη λύση είναι ο συνδυασμός Β. Συγκριμένα, το μήκος των 8m για τα αγκύρια των παρειών της άνω ημιδιατομής κρίθηκε απαραίτητο για να αγκυρωθούν εκτός πλαστικής ζώνης. Οι τσιμεντενέσεις μήκους 5-8m γύρω από την εκσκαφή δεν χρειάζονται μόνο για την περιοχή των 50° του θόλου.

Η συγκεκριμένη επιλογή τσιμεντενέσεων δηλαδή και κάτω από τον πυθμένα της εκσκαφής, επιλέχθηκε γιατί δίνει μικρότερες μετατοπίσεις και εύρος ζώνης πλαστικοποίησης.

Οι εργασίες για την άνω ημιδιατομή θα πρέπει να ολοκληρώνονται πριν την εκσκαφή της κάτω γιατί οι ρωγμές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσουν αφετηρία εκκίνησης γενικευμένης αστοχίας της επένδυσης της κάτω ημιδιατομής. Αν υπάρχει υπόγειο νερό, απαραίτητη είναι η διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών για την αποτόνωση των αναπτυσσόμενων πιέσεων στην προσωρινή υποστήριξη. Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται τα πρόσθετα μέτρα θεραπείας για την κατηγορία IV:



Σχήμα 3.22 Πρόσθετα μέτρα υποστήριξης για άνω και κάτω ημιδιατομή και για πυθμένα, για κατηγορία IV

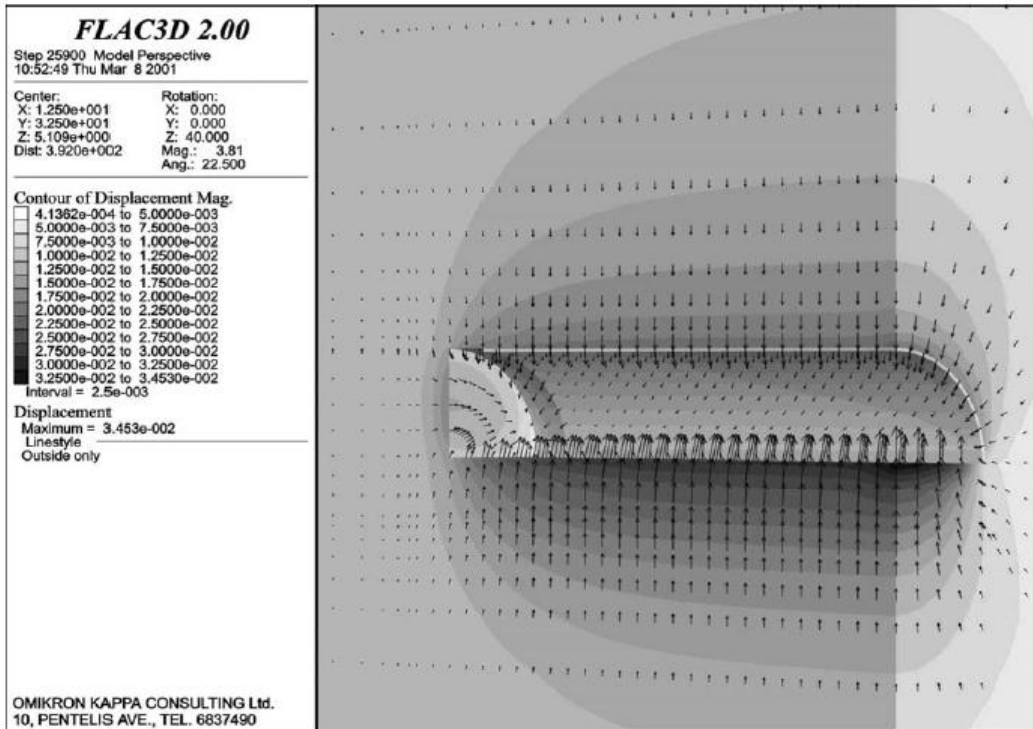
3.7 ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗ ΔΙΑΝΟΙΧΘΕΝ ΤΜΗΜΑ

Με βάση τις ελάχιστες τιμές του λόγου σ_{cm}/p_o για κάθε κατηγορία σύμφωνα με τον αρχικό συνδυασμό, επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων για κάθε κατηγορία μέτρων υποστήριξης, όπως φαίνονται στον πίνακα 3.6, με μικρή απομείωση των σ_{ci} και m_i ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του νερού και της δυσμενούς στρωσιγένειας στο τμήμα που δεν έχει διανοιχθεί.

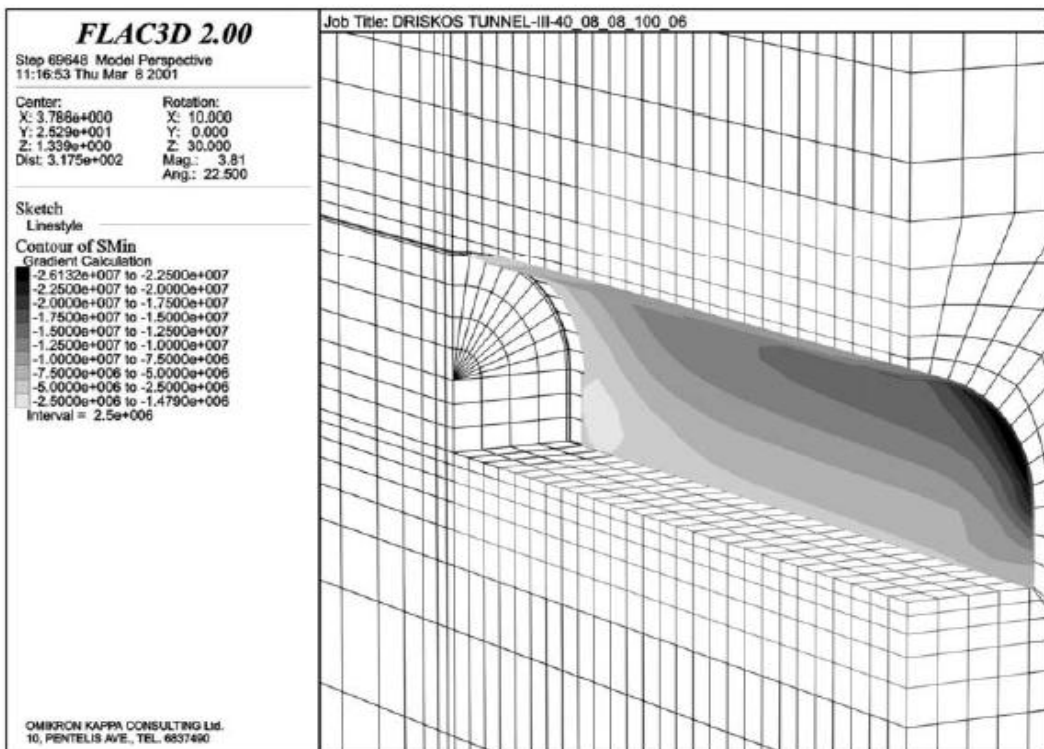
Τυπική διατομή	III	IV	Va	Vb
Λιθ. σχηματισμός	Ιλυόλιθος	Ιλυόλιθος	SiSa/Si + SaSi	SiSa/Si + SaSi
GSI	40	40	25	25
σ_{ci} (MPa)	8	8	14	14
m_i	8	8	11	11
σ_{cm} (MPa)	0,86	0,86	1,02	1,09
Ύψος υπερκ. (m)	100	150	150	220
P_o (MPa)	2,70	4,05	4,05	5,94

Πίνακας 3.6 Τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων και των υπερκειμένων για την διαστασιολόγηση του μη διανοιχθέντος τμήματος

Οι υπολογισμοί για την διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης έγιναν με χρήση του τρισδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων FLAC3D, προσομοιώνοντας μόνο το μισό της σήραγγας λόγω συμμετρίας. Προσομοιώθηκε πρώτα η α' φάση και μετά την ολοκλήρωσή της, προσομοιώθηκε και η εκσκαφή της β' φάσης. Τα αγκύρια τοποθετήθηκαν σε κάρναβο πεσσοειδούς διάταξης, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ως ελαστικό μέσο μεταβαλλόμενου μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με απόσταση από το μέτωπο και τα πλαίσια προσομοιώθηκαν ως ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Ακόμη, προσομοιώθηκε η διεύρυνση elephant foot για τη θεμελίωση της άνω ημιδιατομής και οι επάλληλες στρώσεις τοποθέτησης του σκυροδέματος. Προκειμένου οι μετατοπίσεις να λαμβάνουν τη μέγιστη υπολογιζόμενη τελική τιμή τους, προσομοιώθηκαν 40m εκσκαφής, δηλαδή περισσότερο από 2n διαμέτρους. Δίνονται παρακάτω ενδεικτικά κάποια διαγράμματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις με τη χρήση του FLAC. Έγιναν υπολογισμοί για λόγο $K=0,6$ και για $K=0,9$. Για έλεγχο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εξετάστηκαν οι αναπτυσσόμενες κύριες τάσεις στο κέλυφος.



Σχήμα 3.23 Κατανομή μετατοπίσεων κατά μήκος της σήραγγας για κατηγορία III και $K=0,9$



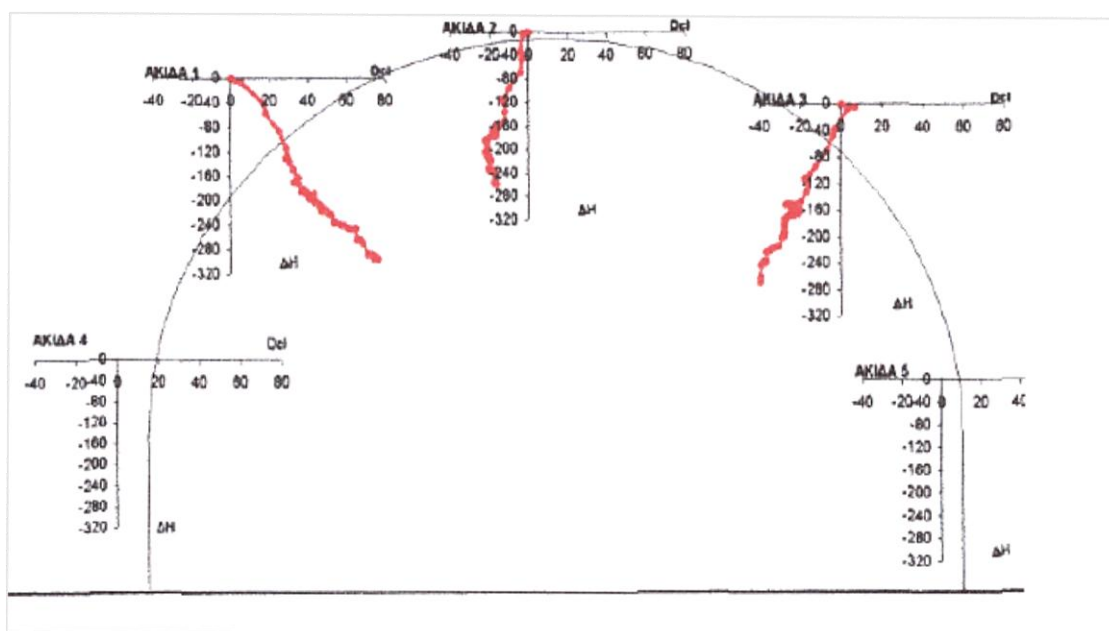
Σχήμα 3.24 Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων στο κέλυφος μετά το πέρας της εκσκαφής για κατηγορία III και $K=0,6$

Η διαστασιολόγηση των νέων διατομών βασίστηκε στις διατομές όπως είχαν προβλεφθεί από τον αρχικό σχεδιασμό, με κάποιες διαφοροποιήσεις. Για όλες τις διατομές αυξήθηκε το εύρος της γραμμής Α, δηλαδή της γραμμής που καθορίζει το όριο της εκσκαφής βάσει της απαιτούμενης γεωμετρίας της διατομής και των αναμενόμενων συγκλίσεων και κατασκευαστικών ανοχών. Οι διαφοροποιήσεις για κάθε κατηγορία ήταν οι εξής:

- ✓ Για την κατηγορία III: Αυξήθηκε το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά 5cm και το μήκος των αγκυρίων από 3 σε 4m και από 5 σε 6m αντίστοιχα, και ο κάρναβος από 1,3mX1,3m έγινε 1,3mX1,5m. Το βήμα προχώρησης άνω και κάτω ημιδιατομής αυξήθηκε από 1,3m και 2,6m αντίστοιχα σε 1,5m και 3,0m.
- ✓ Για την κατηγορία IV: Αυξήθηκε το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά 5cm. Αντικαταστάθηκαν τα δικτυωτά πλαίσια που τοποθετούνταν ανά 1m με μεταλλικά πλαίσια τύπου HEB140 ανά 1,30m και αυξήθηκε το μήκος των αγκυρίων τόσο στο θόλο της διατομής όσο και στις παρειές της β' φάσης από 4 σε 6m, και ο κάρναβος από 1,2mX 1,0m έγινε 1,2mX1,3m. Το βήμα προχώρησης άνω και κάτω ημιδιατομής αυξήθηκε από 1,0m και 2,0m αντίστοιχα σε 1,3m και 2,6m. Εφαρμόστηκε επιπλέον διεύρυνση της θεμελίωσης (elephant foot) των πλαισίων της άνω ημιδιατομής για αντιμετώπιση καθιζήσεων.
- ✓ Για την κατηγορία Va: Αντικαταστάθηκαν τα πλαίσια τύπου HEA με πλαίσια τύπου HEB160 μεγαλύτερης ακαμψίας και πυκνώθηκε ο κάρναβος των αγκυρίων από 1,5mX1,0m σε 1,2mX1,0m με ταυτόχρονη αύξηση της φέρουσας ικανότητας των αγκυρίων. Εφαρμόστηκε προσωρινό ανάστροφο τόξο και διεύρυνση elephant foot για τη θεμελίωση των πλαισίων της άνω ημιδιατομής. Αφαιρέθηκαν τα αγκύρια του πυθμένα της β' φάσης και διαφοροποιήθηκε η γεωμετρία του τελικού ανάστροφου τόξου.
- ✓ Για την κατηγορία Vb: Άλλαξε η γεωμετρία του τελικού ανάστροφου τόξου και αυξήθηκε η απόσταση των πλαισίων από 0,50m σε 0,80m. Το βήμα προχώρησης άνω και κάτω ημιδιατομής αυξήθηκε από 0,5m και 1,0m αντίστοιχα σε 0,8m και 1,6m.

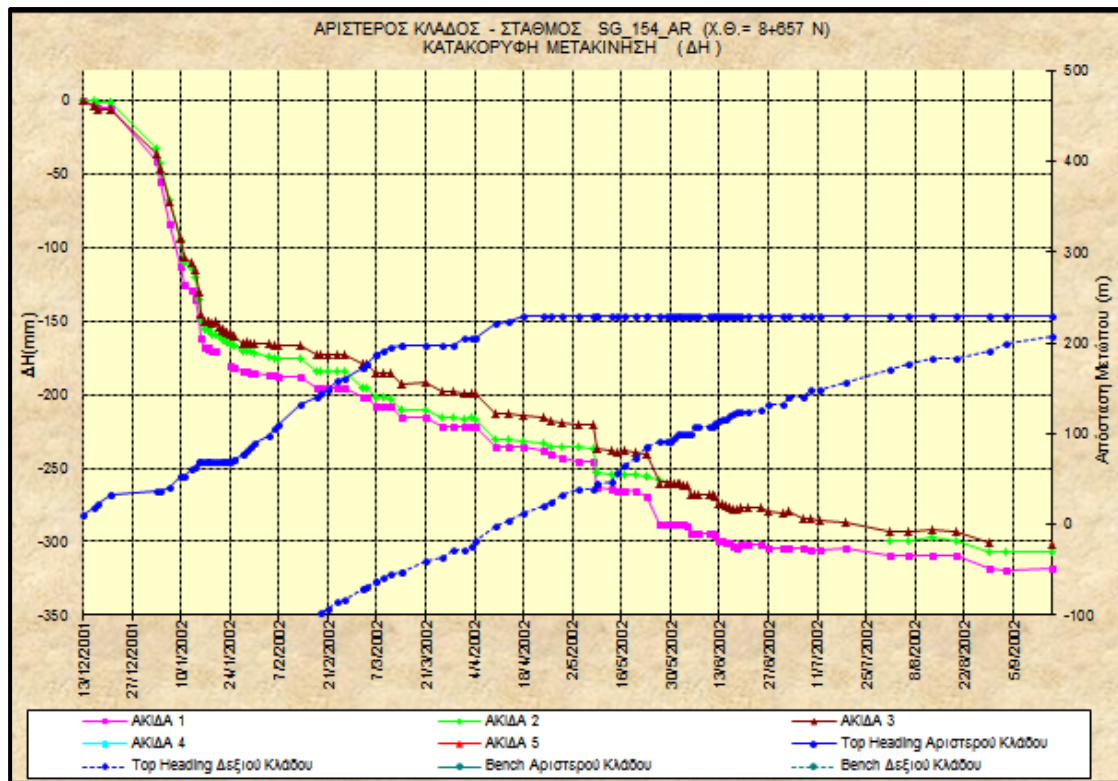
3.8 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Παρά την εφαρμογή των πρόσθετων μέτρων όπως αυτά προέκυψαν από τις ανάδρομες αναλύσεις, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν ξανά προβλήματα αστοχίας της προσωρινής υποστήριξης. Συγκεκριμένα, αστόχησε το κέλυφος της άνω ημιδιατομής σε διατομές ανάμεσα στις Χ.Θ. 8+500 και 8+800 στον αριστερό κλάδο και στις Χ.Θ. 8+700 και 8+800 στο δεξί κλάδο της δίδυμης σήραγγας. Στο σχήμα 3.25 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στη στέψη της αριστερής σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657.



Σχήμα 3.25 Μετακινήσεις στην άνω ημιδιατομή της αριστερής σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657

Οι μετακινήσεις αυτές είναι αναμενόμενες για μια σήραγγα που υπόκειται σε συνθήκες σύνθλιψης λόγω υψηλών υπερκειμένων και χαμηλής αντοχής της βραχώμαζας. Η σχέση των μετακινήσεων με το χρόνο, που φαίνεται στο σχήμα 3.26 για την ίδια χιλιομετρική θέση, φανερώνει την αύξηση των μετακινήσεων με την πάροδο του χρόνου με ένα ρυθμό 12mm το μήνα. Αφού, λοιπόν, δεν σταθεροποιήθηκαν οι μετακινήσεις είναι εμφανές ότι η βραχώμαζα γύρω από το μέτωπο έχει αστοχήσει.



Σχήμα 3.26 Διάγραμμα μετακινήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο στον αριστερό κλάδο στη X.Θ. 8+657

Εκτός από τις μετακινήσεις που μετρήθηκαν, ενδείξεις για την αστοχία της προσωρινής υποστήριξης, ήταν και ο τοπικός λυγισμός και η στρέψη των χαλύβδινων πλαισίων καθώς και η εμφάνιση ρωγμών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Σύμφωνα με την έκθεση των Marinos και Hoek, ο έλεγχος αυτής της συνεχούς παραμόρφωσης έγινε με την εγκατάσταση καλωδίων μήκους 18m στις προβληματικές περιοχές. Συγκεκριμένα, αποτελούνταν από ένα ζεύγος καλωδίων διαμέτρου 15mm, ενσωματωμένο σε ένα αγκύριο μήκους 6m, ενώ το ελεύθερο μήκος του αγκυρίου ήταν 12m. Το ζεύγος καλωδίων με αντοχή 40t έχει προενταθεί με 20t. Η εφαρμογή των αγκυρίων αυτών αποδείχτηκε επιτυχής στη σταθεροποίηση των συγκλίσεων στις περισσότερες από τις προβληματικές περιοχές, εκτός από ορισμένα μόνο τμήματα όπως η X.Θ. 8+657.

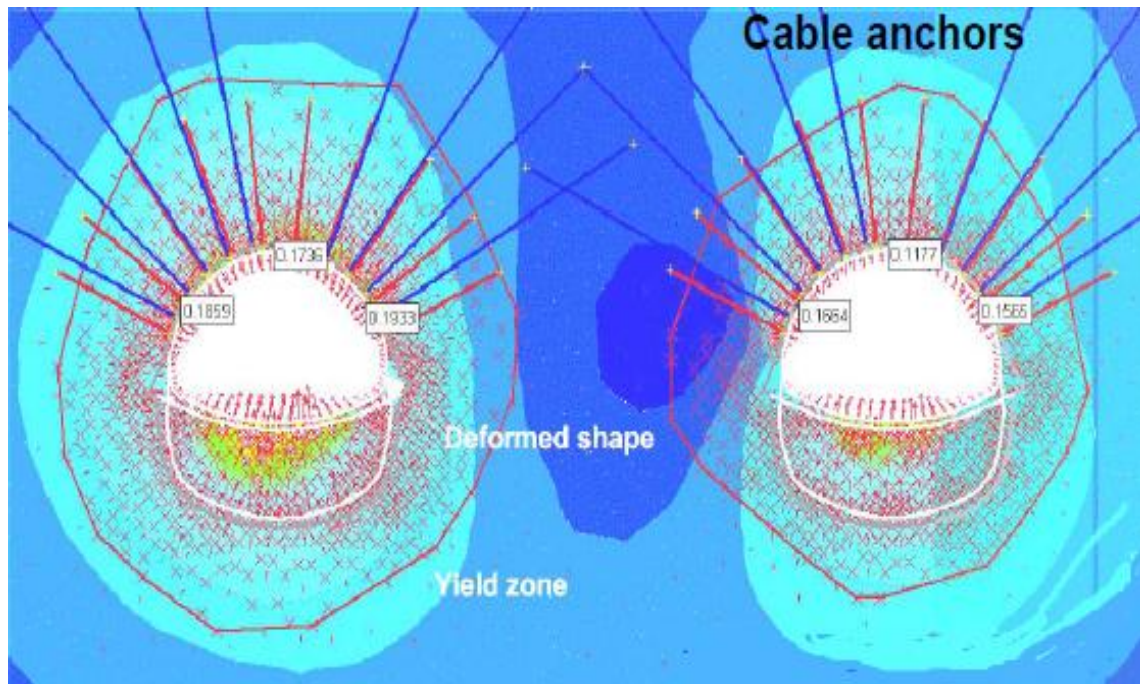
Επίσης, επειδή δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί ακριβώς στο συγκεκριμένο στάδιο ο βαθμός παραβίασης του περιτυπώματος λόγω της υποεκτίμησης της απαραίτητης υπερεκσκαφής, προστέθηκε στο σχεδιασμό επιπλέον εκσκαφή 15cm, αφού στις περισσότερες περιοχές οι μετακινήσεις είναι της τάξης των 15cm με εξαίρεση ορισμένα τμήματα όπως η X.Θ. 8+657, όπου φτάνουν τα 20-30cm.

Μέτρα Θεραπείας

Με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Phase2, οι Marinou και Hoek πραγματοποίησαν αναλύσεις, με στόχο τα μέτρα που θα εφαρμοστούν να μην απαιτούν την κατεδάφιση του υπάρχοντος κελύφους. Τα βήματα εκσκαφής κατά την ανάλυση είναι τα εξής:

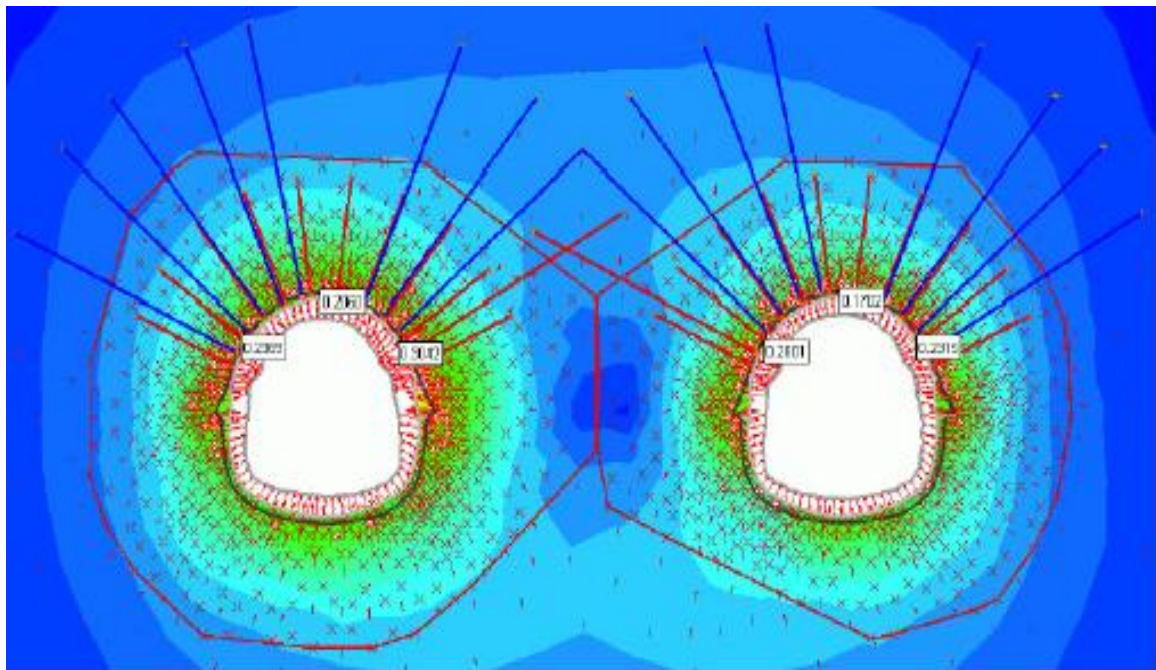
- Η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής για την αριστερή σήραγγα προχώρησε 2m και τοποθετήθηκε το κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια μήκους 6m. Αυτό προσεγγίστηκε αριθμητικά με μείωση του μέτρου παραμόρφωσης της βραχώμαζας κατάλληλα.
- Το μαλακό υλικό στη συνέχεια απομακρύνθηκε για να προσομοιωθεί περαιτέρω προώθηση του της σήραγγας.
- Τα ίδια βήματα ακολουθήθηκαν και για τη δεξιά σήραγγα.
- Εγκαταστάθηκαν, έπειτα, τα καλώδια 18m της άνω ημιδιατομής και εντάθηκαν στους 20t.
- Η κάτω ημιδιατομή της αριστερής σήραγγας προχώρησε 2m, ο προσωρινός πυθμένας αφαιρέθηκε και τοποθετήθηκε ο τελικός πυθμένας από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Το υλικό που απέμεινε απομακρύνθηκε για να προσομοιωθεί η πρόοδος της σήραγγας.
- Τα δύο παραπάνω βήματα ακολουθήθηκαν και για τη δεξιά σήραγγα.

Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζεται το στάδιο εκσκαφής όταν παρουσιάστηκαν τα προβλήματα, δηλαδή για εκσκαφή μόνο της άνω ημιδιατομής, σε συνδυασμό με την εφαρμογή των καλωδίων 18m και για τις 2 σήραγγες. Τα αγκύρια 6m έχουν όλα αστοχήσει. Φαίνονται επίσης οι μετακινήσεις, η παραμορφωμένη διατομή και το εύρος της ζώνης πλαστικοποίησης.



Σχήμα 3.27 Μοντέλο εκσκαφής της άνω ημιδιατομής στην κρίσιμη περιοχή όπως παρατίθεται στην έκθεση των Marinou και Hoek

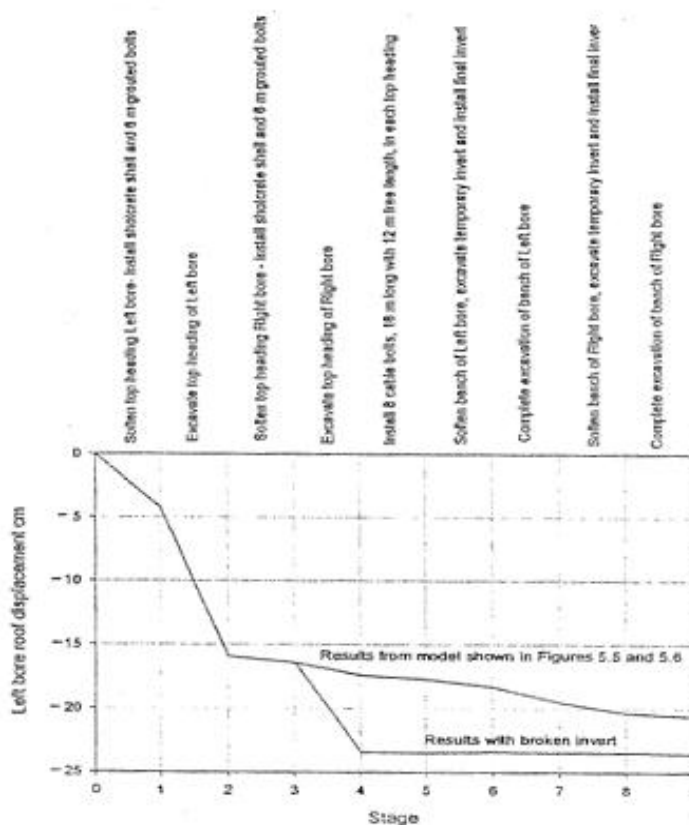
Μετά την εκσκαφή και της κάτω ημιδιατομής τόσο οι μετακινήσεις όσο και το εύρος της πλαστικής ζώνης αυξήθηκαν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.28



Σχήμα 3.28 Μοντέλο της πλήρους εκσκαφής στην κρίσιμη περιοχή όπως παρατίθεται στην έκθεση των Marinou και Hoek

Παρατηρούμε ότι τα 2 καλώδια στην περιοχή ανάμεσα στις 2 σήραγγες αστόχησαν. Για αυτό το λόγο έγινε περαιτέρω ανάλυση με εφαρμογή 2 επιπλέον σειρών αγκυριών στην οροφή και την εγκατάσταση μικροπασσάλων ανάμεσα στα χαλύβδινα πλαίσια.

Μια ακόμη ανάλυση που έγινε βασίστηκε στη θεώρηση ότι η σύνδεση ανάμεσα στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής και του προσωρινού πυθμένα είχε σπάσει. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.29 μαζί με το αντίστοιχο της πρώτης ανάλυσης (σχ. 3.28). Παρατηρούμε ότι σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει μια απότομη αύξηση στη μετακίνηση που φτάνει τα 23cm. Όμως, η μετακίνηση παραμένει σχεδόν σταθερή μετά από αυτήν την μεγάλη αύξηση, γεγονός που αποδεικνύει ότι η εκσκαφή του υλικού της κάτω ημιδιατομής ελάχιστα επηρεάζει τις μετακινήσεις.



Σχήμα 3.29 Θεωρητικές μετακινήσεις στην κλείδα της αριστερής σήραγγας

Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής δεν επιφέρει μεγάλες πρόσθετες μετακινήσεις. Οι περισσότερες παραμορφώσεις που ήταν αναμενόμενες, έχουν ήδη συμβεί και σε συνδυασμό με την εγκατάσταση των καλωδίων η προσωρινή υποστήριξη της άνω ημιδιατομής επαρκεί για να διατηρηθεί η ευστάθεια της σήραγγας κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής που έχει παραμείνει, στον αριστερό κλάδο, ώστε το κλείσιμο του πυθμένα να γίνει όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Για αυτό το λόγο και εγκαταστάθηκαν οι 2 σειρές αγκυριών

στην οροφή και οι μικροπάσσαλοι, όπως προαναφέρθηκαν. Επιπλέον, προτάθηκε η εγκατάσταση πλέγματος στην οροφή και στα πλαϊνά τοιχώματα πάνω από την περιοχή της κάτω ημιδιατομής, που μπορεί να είναι πλέγμα τύπου αλυσίδας ή συγκολλητό πλέγμα, ανοιγμάτων 100mm, και πάχους σύρματος 4mm που είναι είτε συνδεδεμένο στα καλώδια είτε είναι καρφωμένο με πρόσθετα κοντά αγκύρια τύπου Swellex. Αυτό αποσκοπεί στην εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών εργασίας για το προσωπικό και στην αποφυγή αποκοπής τμημάτων από το κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η μόνιμη υποστήριξη, έτσι, θα τοποθετηθεί στην πλήρη εκσκαφή της διατομής, χωρίς να χρειαστεί να εκσκαφτεί εκ νέου η κρίσιμη διατομή και να επανατοποθετηθεί η προσωρινή υποστήριξη. Λόγω, όμως, των μετακινήσεων που έχουν ήδη συμβεί η γεωμετρία της διατομής της σήραγγας άλλαξε, για αυτό και χρειάζεται τοπικά αντιστάθμιση για να αυξηθεί ο χώρος που απαιτείται για την τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να μειωθεί η ερυθρά για να μειωθούν οι εσωτερικές διαστάσεις της σήραγγας ή να μειωθεί το πάχος της μόνιμης επένδυσης με χρήση σκυροδέματος υψηλότερης αντοχής και με ενίσχυση. Σε κάθε περίπτωση πάντως θεωρείται ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η υποστήριξη που προσφέρει η προσωρινή επένδυση.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΗΚΟΤΟΜΗ

Κεφάλαιο 4ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PLAXIS 3D TUNNEL 2.4

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που επιλέχθηκαν κατά τον αρχικό σχεδιασμό, καθώς και οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτά στη συνέχεια λόγω αστοχιών που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας. Ωστόσο, παρά τον πρώτο επαναπροσδιορισμό των μέτρων, νέα προβλήματα παρουσιάστηκαν στην άνω ημιδιατομή τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού κλάδου ανάμεσα στις Χ.Θ. 8+500 έως 8+800. Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσομοιωθεί η εκσκαφή και η υποστήριξη της σήραγγας για τη Χ.Θ. 8+657 με χρήση του Plaxis 3D Tunnel 2.4. Πρόκειται για ένα γεωτεχνικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ειδικά σχεδιασμένο για την τρισδιάστατη ανάλυση της παραμόρφωσης και της σταθερότητας για έργα διάνοιξης σηράγγων. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στοχεύουν στην παρακολούθηση των συγκλίσεων του τοιχώματος της σήραγγας για διάφορους συνδυασμούς των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων της περιβάλλουσας βραχώμαζας, καθώς και στη σύγκριση αυτών τόσο με τις μετρηθείσες συγκλίσεις, όσο και με τις θεωρητικές.

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΤΟ PLAXIS 3D TUNNEL 2.4

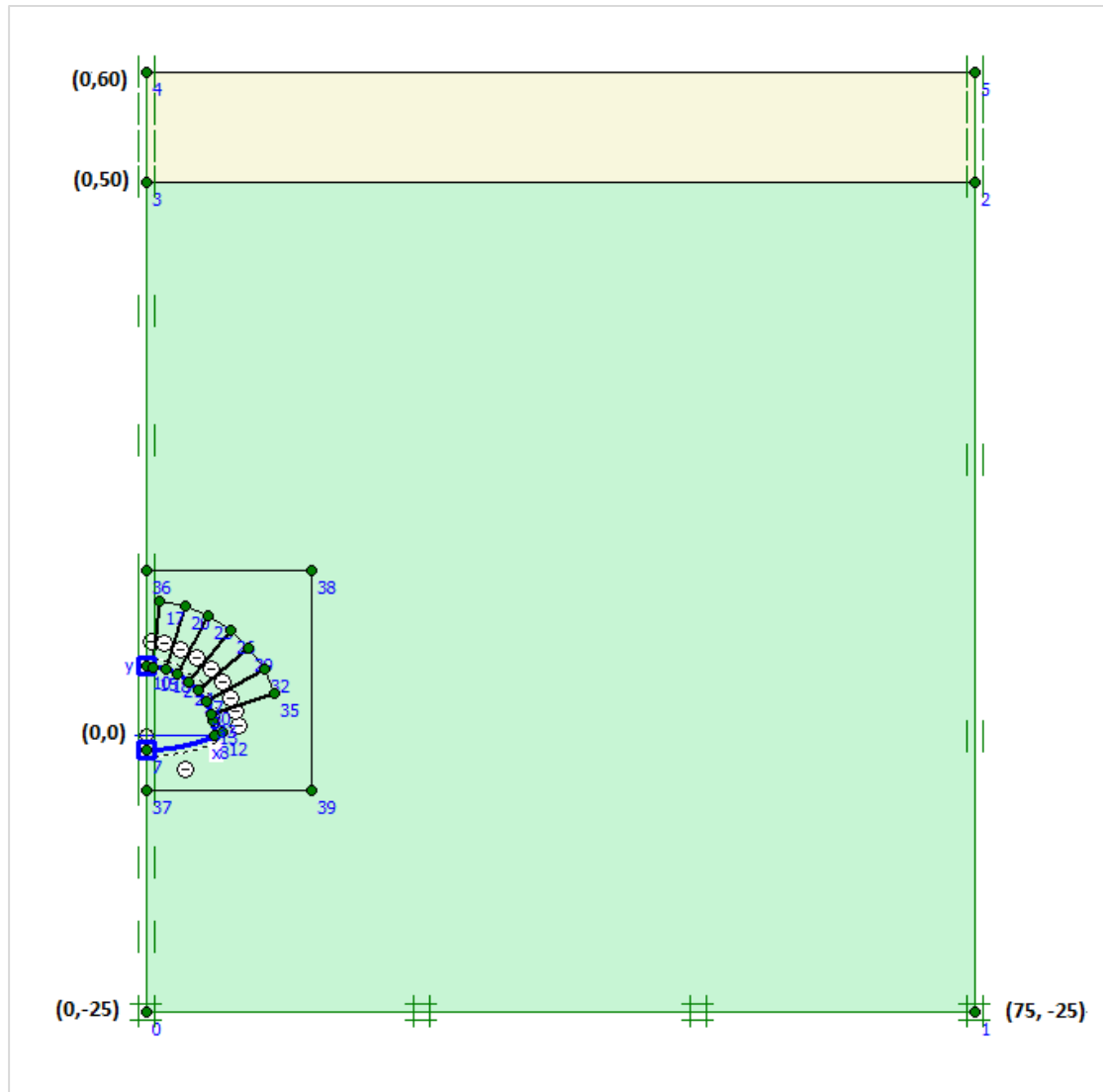
Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί ένα τρισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων 15 κόμβων από ένα δισδιάστατο. Αρχικά, επομένως δημιουργήθηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο του εδάφους και της σήραγγας, και στη συνέχεια μετατράπηκε σε τρισδιάστατο με τον ορισμό επιπέδων στη διεύθυνση του άξονα z.

4.2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΕΛΑΦΟΥΣ

Εκμεταλλεζόμενοι τη συμμετρία της σήραγγας, χρησιμοποιούμε τη μισή διατομή ώστε το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων να είναι πολύ μικρότερο διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία του προγράμματος και μειώνοντας τον υπολογιστικό χρόνο. Επομένως, το ένα όριο του μοντέλου είναι ο άξονας συμμετρίας της διατομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Στη Χ.Θ. 8+657 το ύψος των υπερκειμένων φτάνει τα 150m. Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί ένας τόσο εκτενής κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων θεωρούμε ότι το ύψος των υπερκειμένων είναι 50m. Η αντικατάσταση της διαφοράς ΔH των υπερκειμένων δηλαδή των 100m, με ένα ομοιόμορφα κατανομημένο επιφανειακό φορτίο $q = \gamma \cdot \Delta H$ θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα καθώς κατά τον υπολογισμό των οριζόντιων τάσεων το φορτίο αυτό θα πολλαπλασιαζόταν με συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων $k_o = \frac{\nu}{1-\nu}$, αντί του k_o που έχουμε ορίσει για το έδαφος. Για αυτόν το λόγο, θεωρήθηκε μια πυκνή στρώση φλύσχη πάχους 10m με ειδικό βάρος γ πολύ μεγαλύτερο από αυτό του φλύσχη. Συγκεκριμένα, για ειδικό βάρος φλύσχη $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$ που έχει επιλεγθεί, προκύπτει για το πυκνό στρώμα:

$$\gamma_{\text{πυκνό}} = \frac{23 \text{ kN/m}^3 * 100\text{m}}{10\text{m}} = 230 \text{ kN/m}^3$$

Τα υπόλοιπα όρια επεκτείνονται σε επαρκή απόσταση γύρω από τη σήραγγα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα στα αποτελέσματα των υπολογισμών λόγω επίδρασης των συνοριακών συνθηκών.



Σχήμα 4.1 Δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της σήραγγας και του εδάφους

Το πλαίσιο γύρω από την ημιδιατομή της σήραγγας, αποσκοπεί στην πύκνωση του καννάβου στην περιοχή αυτή σε σχέση με το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για το υπόλοιπο μοντέλο. Παρατηρούμε επίσης ότι οι οριακές συνθήκες που επιλέγονται είναι κυλίσεις στα πλευρικά όρια και αρθρώσεις στη βάση του προσομοιώματος.

4.2.1.1 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας που συναντάται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Ήδη, οι αστοχίες που εκδηλώθηκαν σε διάφορες θέσεις κατά την κατασκευή της σήραγγας απέδειξαν την εσφαλμένη εκτίμηση των τιμών των διάφορων γεωτεχνικών παραμέτρων. Προκειμένου, λοιπόν να εξεταστούν οι συγκλίσεις στη συγκεκριμένη διατομή που μελετήθηκε, επιλέχθηκαν 3 συνδυασμοί γεωτεχνικών παραμέτρων, εντός βέβαια των ορίων για τις συγκεκριμένες συνθήκες στη Χ.Θ. 8+657. Έτσι, ξεκινώντας από μια χαμηλής αντοχής βραχώμαζα, με αύξουσα ποιότητα, επιλέχθηκαν οι εξής συνδυασμοί:

- **Rock 1**:
GSI = 20
 $m_i = 7$
 $\sigma_{ci} = 8 \text{ MPa}$

- **Rock 2**:
GSI = 25
 $m_i = 8$
 $\sigma_{ci} = 10 \text{ MPa}$

- **Rock 3**:
GSI = 30
 $m_i = 8$
 $\sigma_{ci} = 15 \text{ MPa}$

Για όλους τους συνδυασμούς, όπως προαναφέρθηκε θεωρήθηκε ειδικό βάρος φλύσχη $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι ο λόγος Poisson είναι $\nu = 0,25$.

4.2.1.2 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟHR-COULOMB

Με χρήση του γεωτεχνικού προγράμματος Roclab, για καθέναν από τους παραπάνω συνδυασμούς υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες παράμετροι c (συνοχή) και φ (γωνία τριβής). Σημειώνεται ότι κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα, θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής διαταραχής D είναι ίσος με το μηδέν. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.

- ✓ **Rock 1**:
 $c = 156 \text{ kPa}$
 $\varphi = 20,81^\circ$

- ✓ **Rock 2** :
c = 206 kPa
φ = 24,94°

- ✓ **Rock 3**:
c = 272 kPa
φ = 29,48°

4.2.1.3 ANTOXH BPAΧΟΜΑΖΑΣ

Με το πρόγραμμα Roclab, που βασίζεται στην εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown, εκτός των ισοδύναμων παραμέτρων, υπολογίστηκε και η αντοχή σ_{cm} για κάθε τύπο βραχώμαζας ως εξής:

- **Rock 1**: $\sigma_{cm} = 536$ kPa
- **Rock 2**: $\sigma_{cm} = 848$ kPa
- **Rock 3**: $\sigma_{cm} = 1466$ kPa

4.2.1.4 ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος που δίνεται κατά Hoek αλλά και αυτός που δημοσιεύτηκε από τους Hoek και Diederichs:

1. Hoek: $E_{rm} = (1-D/2) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{((GSI-10)/40)}$ (σ_{ci} σε MPa και E_{rm} σε GPa)
2. Hoek and Diederichs: $E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right)$, $E_i = MR * \sigma_{ci}$
(σ_{ci} σε MPa και E_{rm} σε MPa)

Και στους 2 τύπους θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής διαταραχής είναι $D = 0$.

Για τον υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης άρρηκτου βράχου E_i που απαιτείται για τον τύπο των Hoek and Diederichs, επιλέχθηκε συντελεστής $MR = 250$.

Από τον συνδυασμό των 2 μέτρων παραμόρφωσης που προκύπτουν για κάθε βραχώμαζα, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα σε αυτό που προκύπτει από τη σχέση των Hoek and Diederichs, υπολογίστηκε το τελικό μέτρο παραμόρφωσης ως εξής:

$$E_{rm} = \frac{E_{Hoek} + 2 * E_{Hoek-Diederichs}}{3}$$

Βάσει, λοιπόν, των παραπάνω, τα μέτρα παραμόρφωσης για κάθε συνδυασμό γεωτεχνικών παραμέτρων είναι:

- **Rock 1**: $E_{rm} = 228,553 \text{ MPa}$
- **Rock 2**: $E_{rm} = 349,724 \text{ MPa}$
- **Rock 3**: $E_{rm} = 611,706 \text{ MPa}$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα παραπάνω μεγέθη για κάθε τύπο εδάφους:

	Rock 1	Rock 2	Rock 3
GSI	20	25	30
$\sigma_{ci} \text{ (MPa)}$	8	10	15
m_i	7	8	8
$c \text{ (kPa)}$	156	206	272
φ	20,81°	24,94°	29,48°
$\sigma_{cm} \text{ (kPa)}$	536	848	1466
$E_{rm} \text{ (Mpa)}$	228,553	349,724	611,706

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη για κάθε τύπο εδάφους

4.2.1.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΥΔΕΤΕΡΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ

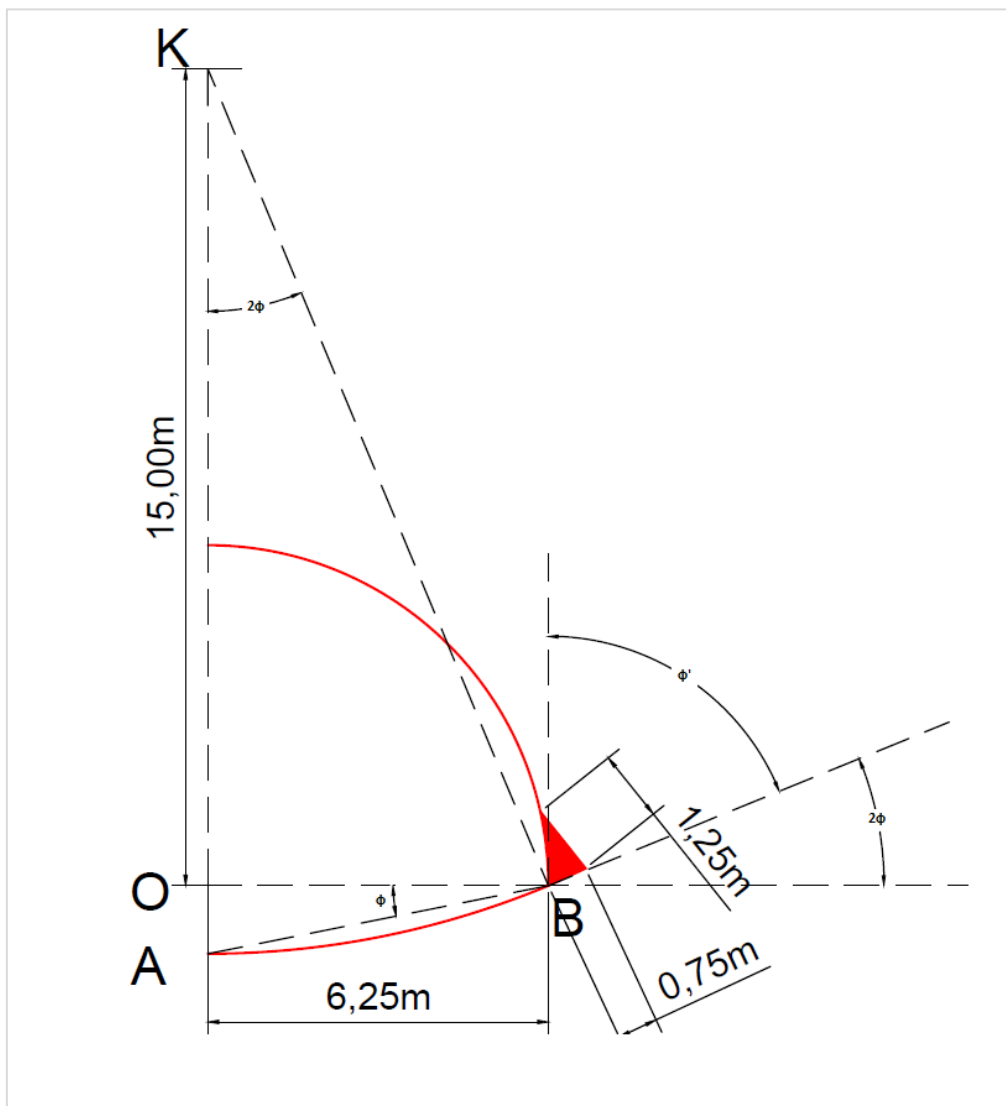
Ο λόγος k_0 των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες τάσεις, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ακρίβεια. Για αυτόν το λόγο θεωρούμε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,5 έως 0,8. Στην παρούσα εργασία, εκτελέστηκαν υπολογισμοί τόσο για το άνω όσο και για το κάτω όριο. Δηλαδή επιλέχθηκαν:

- $k_0 = 0,5$
- $k_0 = 0,8$

4.2.2. ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Οι αστοχίες των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας εμφανίστηκαν στο τμήμα της άνω ημιδιατομής (top heading) της εκσκαφής. Επομένως, αρκεί η προσομοίωση της άνω ημιδιατομής της σήραγγας για την παρακολούθηση της εκσκαφής και της υποστήριξης της. Υπενθυμίζουμε ότι στη Χ.Θ. 8+657 η κατηγορία υποστήριξης που εφαρμόστηκε είχε υποστεί τις αλλαγές που επέβαλλε η πρώτη αναθεώρηση των μέτρων υποστήριξης για το μη διανοιχθέν τμήμα, λόγω αστοχιών

κατά τα πρώτα μέτρα διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε προσωρινό ανάστροφο τόξο στον πυθμένα της άνω ημιδιατομής καθώς και διεύρυνση τύπου elephant foot για καλύτερη στήριξη των χαλύβδινων πλαισίων. Στο σχήμα 4.2 που απεικονίζει την ημιδιατομή της σήραγγας, διακρίνονται οι διαστάσεις της, καθώς και οι τιμές των μεγεθών που χρειάστηκαν για τον σχεδιασμό της στο πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2 Γεωμετρία άνω ημιδιατομής

Η ακτίνα του άνω ημικυκλίου της διατομής είναι $(OB) = 6,25\text{m}$, ενώ η απόσταση (OA) είναι $(OA) = 1,25\text{m}$. Επομένως, η γωνία φ προκύπτει ως εξής:

$$\tan\varphi = \frac{(OA)}{(OB)} = 0,20 \Rightarrow \varphi = 11,31^\circ \Rightarrow 2\varphi = 22,62^\circ \Rightarrow \varphi' = 90^\circ - 2\varphi = 67,38^\circ$$

Η ακτίνα του ημικυκλίου που σχηματίζει ο ανάστροφος πυθμένα είναι:

$$R = (OK)+(OA)$$

$$\text{Αλλά, } (OK) = \frac{(OB)}{\tan 2\varphi} = 15\text{m}$$

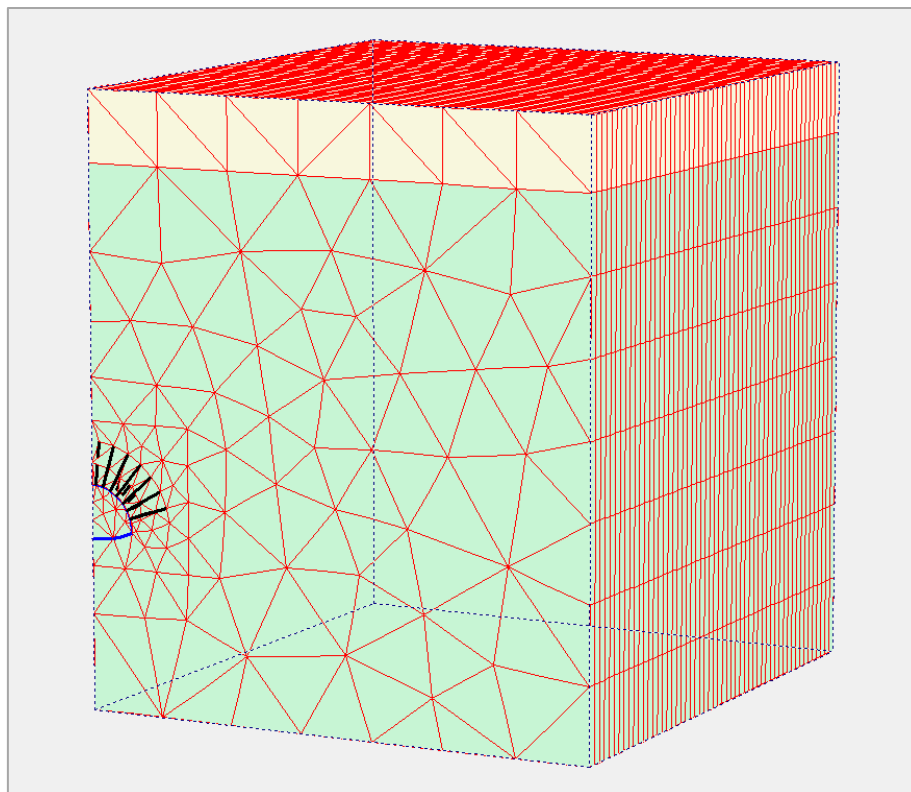
$$\text{Οπότε } R = 15 + 1,25 = 16,25 \text{ m}$$

Κατά το σχεδιασμό της σήραγγας στο Plaxis 3D Tunnel, τα στοιχεία της γεωμετρίας της εισάγονται με συγκεκριμένη σειρά, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- I. $R = 16,25\text{m}$ και γωνία $22,62^\circ$
- II. Γωνία $\varphi' = 67,38^\circ$
- III. Προκύπτει $(OB) = 6,25\text{m}$ και γωνία 90°

4.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αφού δημιουργηθεί ο διδιάστατος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων, εισάγονται οι συντεταγμένες κατά τον άξονα z των επιπέδων κατά μήκος της σήραγγας ώστε να προκύψει το τριδιάστατο προσομοίωμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε συνολικό μήκος σήραγγας που έχει εκσκαφτεί ίσο με 60m που αρκεί ώστε να ολοκληρωθούν οι συγκλίσεις για τη διατομή ελέγχου (plane N) σε απόσταση 21m από το front plane. Επιπλέον, έχει προβλεφθεί ένα τμήμα μήκους 21m χωρίς εκσκαφή αμέσως μετά το πέρας της σήραγγας ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα από το όριο της εκσκαφής. Όλα τα επίπεδα απέχουν 1,5m το ένα από το άλλο δημιουργώντας λωρίδες (slices) ίδιου πάχους. Δημιουργήθηκε έτσι ο τρισδιάστατος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

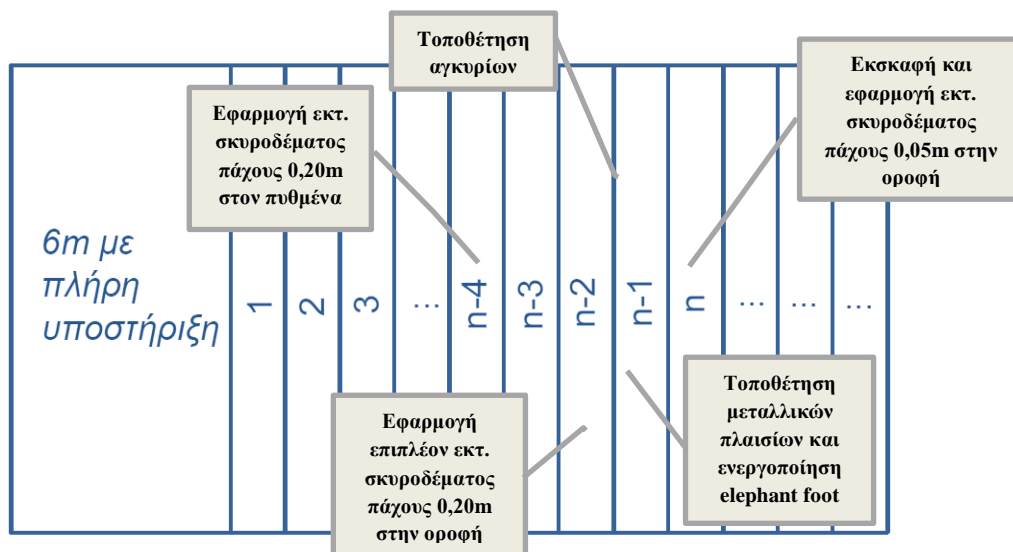


Σχήμα 4.3 Τρισδιάστατος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων

4.2.4 ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Το πρόγραμμα Plaxis 3D Tunnel δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθεί η εκσκαφή της σήραγγας μέσω σταδίων κατασκευής (stage construction). Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται τμηματικά η εκσκαφή κατά μήκος της σήραγγας, ενώ διαχωρίζονται τα στάδια τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σε κάθε φάση. Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, θεωρήσαμε ότι η εκσκαφή και η προσωρινή υποστήριξη ακολουθούν μια συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων. Υποθέτοντας ότι σε κάποια φάση της εκσκαφής το μέτωπο βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τη λωρίδα n (slice n), τότε τα βήματα που ακολουθούνται είναι:

- **Βήμα 1^ο**: Εκσκαφή της slice n και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 0,05m στην οροφή της άνω ημιδιατομής.
- **Βήμα 2^ο**: Ενεργοποίηση των αγκυριών στο επίπεδο $n-1$ και των μεταλλικών πλαισίων και ενεργοποίηση του elephant foot για τη λωρίδα $n-1$
- **Βήμα 3^ο**: Τοποθέτηση πρόσθετου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 0,20m στην οροφή στη slice $n-2$ (τώρα το σύνολο της υποστήριξης της οροφής είναι ενεργοποιημένο)
- **Βήμα 4^ο**: Καμία τροποποίηση στη slice $n-3$
- **Βήμα 5^ο**: Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 0,20m στο ανάστροφο τόξο του σκυροδέματος στη slice $n-4$



Σχήμα 4.4 Βήματα εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας

Το πρόγραμμα «αντιλαμβάνεται» τα διάφορα στάδια της τοποθέτησης της υποστήριξης με ενεργοποίηση υλικών διαφορετικών χαρακτηριστικών (material sets), όπως αυτά θα οριστούν παρακάτω.

Σημείωση: Όπως φαίνεται και το σχήμα 4.4, θεωρήσαμε ότι η εκσκαφή των πρώτων 6m της σήραγγας έχει ολοκληρωθεί και παράλληλα έχει τοποθετηθεί η προσωρινή υποστήριξη στο σύνολο της σε αυτό το μήκος. Επομένως, στην πρώτη φάση ξεκινάμε εφαρμόζοντας το 1^ο βήμα στην πρώτη λωρίδα μετά τα 6m.

4.2.5 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

4.2.5.1 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Οροφή άνω ημιδιατομής

Η προσωρινή υποστήριξη της οροφής της διατομής αποτελείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χαλύβδινα πλαίσια που ενσωματώνονται σε αυτό. Πρόκειται, επομένως για μια σύνθετη διατομή που πρέπει, όμως να προσομοιωθεί με στοιχεία δοκού με ιδιότητες ενιαίου στοιχείου. Για το σκοπό αυτόν, υπολογίστηκε πρώτα η δυστένεια EA και η ακαμψία EI για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και το πλαίσιο ξεχωριστά και στη συνέχεια αθροίστηκαν για να προκύψουν τα αντίστοιχα μεγέθη της σύνθετης διατομής. Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν:

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:
Για την οροφή επιλέχθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Gunitite πάχους 0,25m και μέτρου ελαστικότητας 15 GPa.
- Μεταλλικά πλαίσια:
Χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινα πλαίσια διατομής HEB160 τοποθετημένα 1/m. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 200 GPa, ενώ η συγκεκριμένη διατομή έχει εμβαδόν $A_s = 54,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ και ροπή αδρανείας $I_s = 2490 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$

Υπολογίζονται τα μεγέθη EA και EI ως εξής:

- ✓ Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:

$$E_b A_b = 15 \cdot 10^6 \cdot 0,25 = 3750000 \text{ kN/m}$$
$$E_b I_b = 15 \cdot 10^6 \cdot 0,25^3 / 12 = 19531 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

- ✓ Για τα μεταλλικά πλαίσια:

$$E_s A_s = 200 \cdot 10^6 \cdot 54,3 \cdot 10^{-4} = 1086000 \text{ kN/m}$$
$$E_s I_s = 200 \cdot 10^6 \cdot 2490 \cdot 10^{-8} = 4980 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Επομένως, για τη **σύνθετη διατομή** ισχύει:

$$EA = 3750000 + 1086000 = 4836000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 19531 + 4980 = 24511 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Επειδή η ανάλυση είναι ελαστοπλαστική, είναι απαραίτητη η γνώση των οριακών μεγεθών αντοχής, δηλαδή της ροπής κάμψης διαρροής M και της αξονικής δύναμης διαρροής N . Προκύπτουν:

- Για το σκυρόδεμα:

$$M_b = 150 \text{ kNm/m}$$

$$N_b = 6250 \text{ kN/m}$$

- Για τα πλαίσια:

$$M_s = 158 \text{ kNm/m}$$

$$N_s = 2000 \text{ kN/m}$$

Για τη **σύνθετη διατομή** υπολογίζονται τα μεγέθη διαρροής με τη χρήση του προσεγγιστικού μειωτικού συντελεστή $2/3$:

$$M_y = 2/3 * (150 + 158) = 205 \text{ kNm/m}$$

$$N_y = 2/3 * (6250 + 2000) = 5500 \text{ kN/m}$$

Η τιμή του ειδικού βάρους w υπολογίστηκε 7 kN/m

Επειδή όπως προαναφέρθηκε η εκσκαφή και η υποστήριξη της διατομής, γίνονται σταδιακά, τα παραπάνω μεγέθη αντιστοιχούν στο στάδιο όπου έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της οροφής (*βήμα 3^ο*).

Χρειάζεται όμως να υπολογιστούν και τα μεγέθη για τα στάδια πριν την ολοκλήρωση της υποστήριξης, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Τα τελικά αποτελέσματα, παρατίθενται παρακάτω.

- ❖ **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $0,05\text{m}$ (βήμα 1^ο)**

$$EA = 750000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 156,25 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

- ❖ **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $0,05\text{m}$ και μεταλλικά πλαίσια (βήμα 2^ο):**

$$EA = 1836000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 5136,25 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Elephant foot

Όταν ενεργοποιούνται τα μεταλλικά πλαίσια, ενεργοποιούνται και οι διευρύνσεις τύπου elephant foot, στη βάση αυτών (βήμα 2^ο). Στο πρόγραμμα προσομοιώθηκαν ως clusters με ιδιότητες σκυροδέματος. Θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά και έχει ειδικό βάρος $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, δηλαδή όσο και του σκυροδέματος.

Πυθμένας άνω ημιδιατομής (βήμα 5^ο)

Το ανάστροφο τόξο του πυθμένα αποτελείται μόνο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0,20m και έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην οροφή. Επομένως, με χρήση των τύπων που εφαρμόστηκαν παραπάνω για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που προσομοιώνεται με στοιχεία ενιαίας δοκού προκύπτει για πάχος σκυροδέματος 0,20m και για λωρίδα πάχους 1,5m:

$$EA = 3000000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 10000 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Το ειδικό βάρος είναι $w = 5 \text{ kN/m}$, ενώ τα οριακά μεγέθη αντοχής είναι:

$$M = 65 \text{ kNm/m}$$

$$N = 3300 \text{ kN/m}$$

4.2.5.2 ΑΓΚΥΡΙΑ

Στην οροφή της άνω ημιδιατομής τοποθετήθηκαν αγκύρια διαμέτρου $\Phi 32$ S400, μήκους 6m σε κάρναβο 1,2m x 1,0m. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 200 GPa, προέκυψε για τα αγκύρια:

$$EA = 200 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 3,2^2 \cdot 10^{-4} / 4 = 160850 \text{ kN}$$

Η οριακά δύναμη κάθε αγκυρίου υπολογίστηκε ως εξής:

$$T_{op} = f_y \cdot A = 400 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 3,2^2 \cdot 10^{-4} / 4 = 320 \text{ kN}$$

Ωστόσο επειδή τα αγκύρια είναι τοποθετημένα ανά 1m, αλλά τα βήματα εκσκαφής έχουν μήκος 1,5m, πολλαπλασιάζουμε τα παραπάνω μεγέθη των αγκυρίων με 1,5:

$$EA = 1,5 \cdot 160850 = 241275 \text{ kN}$$

$$T_{op} = 1,5 \cdot 320 = 480 \text{ kN}$$

Συντεταγμένες των κόμβων των αγκυρίων

Προκειμένου να προσομοιωθούν τα αγκύρια στο input του προγράμματος επιλέχθηκε ο τύπος αγκυρίου «node-to-node anchor». Έτσι, ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός των συντεταγμένων αρχής και τέλους για κάθε αγκύριο. Αρχή των αξόνων (0,0) θεωρήθηκε το κέντρο του ημικυκλίου της άνω ημιδιατομής. Γνωρίζουμε ότι τα αγκύρια είναι τοποθετημένα σε κάρναβο 1,2m x 1,0m, οπότε στο επίπεδο της διατομής, απέχουν ανά δύο 1,2m επί της υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Συνολικά. Τοποθετήθηκαν 7 αγκύρια, για καθένα από τα οποία υπολογίστηκε η επίκεντρη γωνία ω από τον κατακόρυφο άξονα, θεωρώντας ότι η προέκταση κάθε αγκυρίου διέρχεται από το (0,0). Οι υπολογισμοί των συντεταγμένων έγιναν με χρήση των παρακάτω τύπων:

Το μήκος τόξου δίνεται από τη σχέση : $S = \omega * R \rightarrow \omega = S/R$

Για τον υπολογισμό της γωνίας ω που είναι κοινή για τον κόμβο αρχής και τέλους :

$$R = 6,25m$$

Οι συντεταγμένες (x,y) των κόμβων υπολογίζονται από τους τύπους:

$$x = R * \sin \omega$$

$$y = R * \cos \omega$$

όπου $R = 6,25m$ για τον υπολογισμό των κόμβων αρχής και $R = 6,25 + 1_{αγκ} = 6,25 + 6 = 12,25m$ για τον κόμβο τέλους.

Τελικά, οι συντεταγμένες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

αγκύριο	S (m)	ω (rad)	X _{αρχής}	Y _{αρχής}	X _{τέλους}	Y _{τέλους}
1	0,6	0,096	0,599	6,221	1,174	12,194
2	1,8	0,288	1,775	5,993	3,479	11,745
3	3	0,480	2,886	5,544	5,657	10,866
4	4,2	0,672	3,891	4,891	7,626	9,587
5	5,4	0,864	4,753	4,059	9,315	7,955
6	6,6	1,056	5,44	3,077	10,662	6,031
7	7,8	1,248	5,927	1,983	11,617	3,886

Πίνακας 4.2 Συντεταγμένες κόμβων αρχής και τέλους αγκυρίων

Κεφάλαιο 50

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με τον τρισδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D Tunnel 2.4 είχαν ως σκοπό την παρακολούθηση των μετακινήσεων στο τοίχωμα της σήραγγας, για τους διάφορους συνδυασμούς γεωμετρικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν στο επίπεδο (plane) N (απόσταση 21m από το front plane) δύο σημεία για τον έλεγχο των συγκλίσεων, ίδια με αυτά στα οποία έγινε η μέτρηση των μετακινήσεων κατά την εκσκαφή της σήραγγας με χρήση ειδικών οργάνων. Επιλέχθηκαν, επομένως, ένα σημείο A στη στέψη της σήραγγας για τον έλεγχο των κατακόρυφων μετακινήσεων και ένα σημείο B στο τοίχωμα της σήραγγας υπό γωνία περίπου 45° ως προς την κατακόρυφο που διέρχεται από τη στέψη, για τον έλεγχο κυρίως των οριζόντιων αλλά και των κατακόρυφων μετακινήσεων. Η γνώση των συγκλίσεων σε αυτά τα σημεία επιτρέπει τη σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές αλλά και με τις θεωρητικές καμπύλες, όπως αυτές θα υπολογιστούν παρακάτω. Επιπλέον, υπολογίστηκε η αξονική δύναμη που αναπτύχθηκε στα αγκύρια και ελέγχθηκε εάν έχουν υπερβεί το όριο αντοχής τους. Το output του προγράμματος μάς παρέχει, ακόμη, τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε την έκταση της πλαστικής ζώνης μέσω της απεικόνισης των σημείων πλαστικοποίησης (plastic points).

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ

Οι μετακινήσεις κατακόρυφες ή οριζόντιες για καθένα από τα σημεία A ή B, παρακολουθήθηκαν μέσω των καμπύλων (curves) που παράγει το πρόγραμμα. Σε αυτές παρουσιάζεται η μετακίνηση στο συγκεκριμένο σημείο για κάθε φάση των υπολογισμών, δηλαδή για κάθε θέση του μετώπου ως προς το σημείο αυτό. Βάσει, λοιπόν, των παραπάνω, υπολογίστηκαν οι καμπύλες $u_y(x)-x/R$. Τονίζουμε ότι επειδή η διατομή της σήραγγας δεν είναι κυκλική, θεωρήθηκε προσεγγιστικά μια ισοδύναμη ακτίνα $R=5m$. Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει η σύγκριση για τους διαφορετικούς τύπους εδαφών, τα διαγράμματα συγκλίσεων κανονικοποιήθηκαν, διαιρέθηκε δηλαδή η σύγκλιση σε κάθε σημείο $u_y(x)$ με την τελική σύγκλιση $u_{y\infty}$ σε μεγάλη απόσταση πίσω από το μέτωπο. Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα $u_x/u_y-x/R$ για το σημείο B, για τον έλεγχο των οριζόντιων μετακινήσεων.

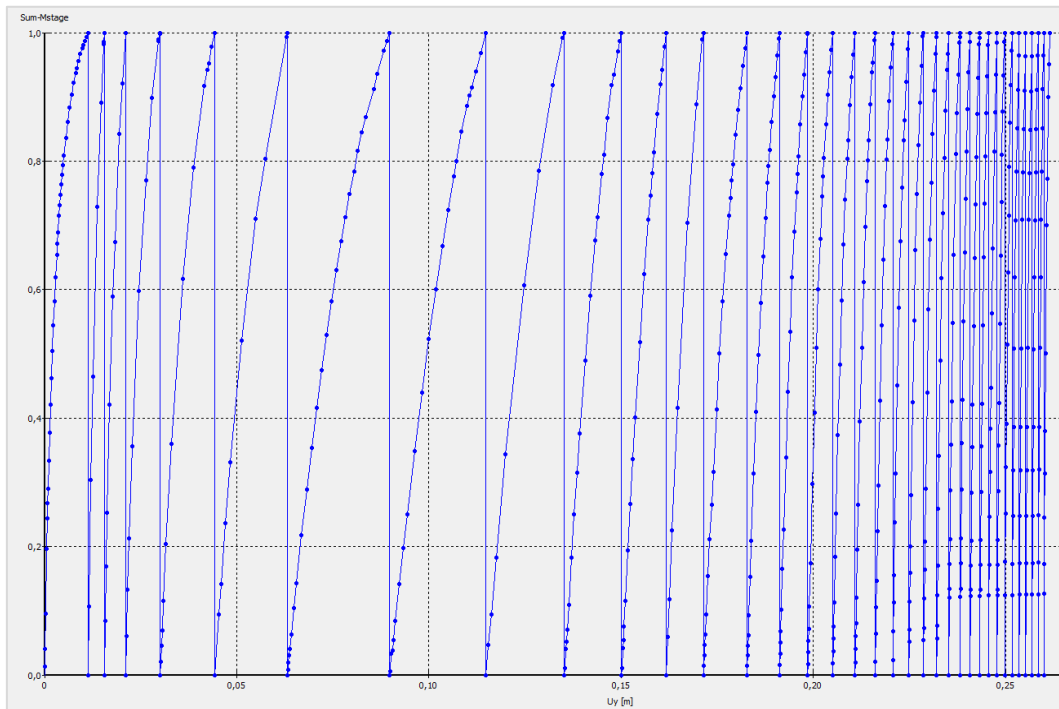
5.2.1 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ u_y

5.2.1.1 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ A

5.2.1.1.1 $K_0=0,5$

❖ Rock 1

Η καμπύλη των κατακόρυφων μετακινήσεων στο σημείο A σε σχέση με τη φάση επίλυσης δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_0=0,5$ και Rock 1

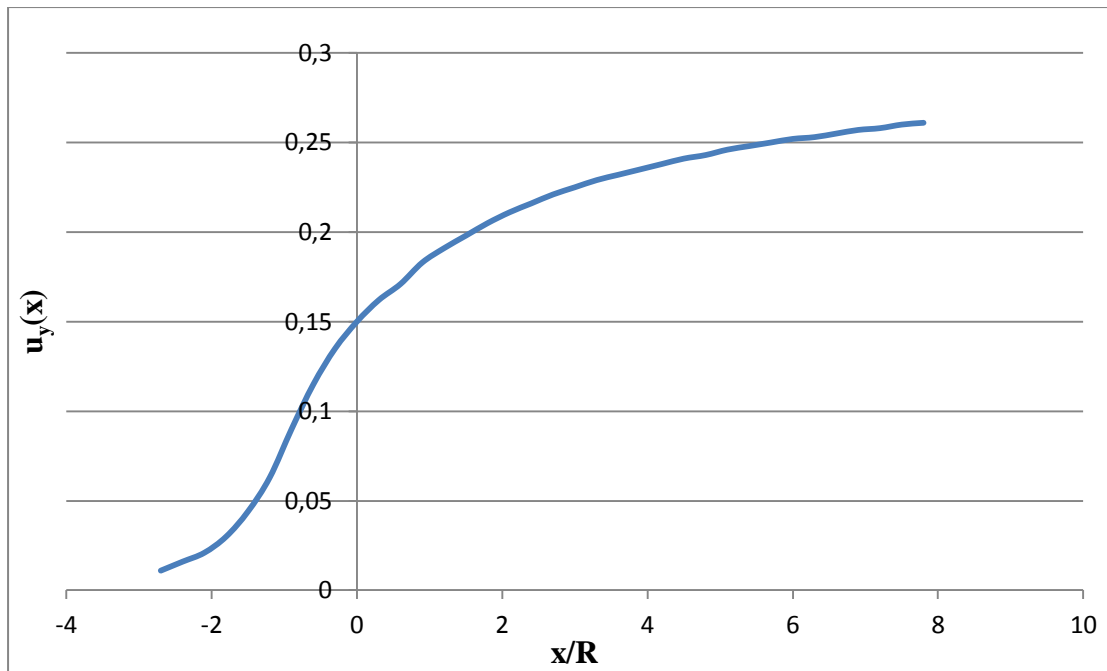
Η κατακόρυφη μετακίνηση στο σημείο A για κάθε απόσταση x του μετώπου από τη διατομή N, δίνεται στον πίνακα 5.1, καθώς και ο λόγος $u_y(x)/u_{y\infty}$.

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,011	0,04215
-12	-2,4	0,016	0,06130
-10,5	-2,1	0,021	0,08046
-9	-1,8	0,030	0,11494
-7,5	-1,5	0,044	0,16858
-6	-1,2	0,063	0,24138
-4,5	-0,9	0,090	0,34483
-3	-0,6	0,115	0,44061
-1,5	-0,3	0,135	0,51724

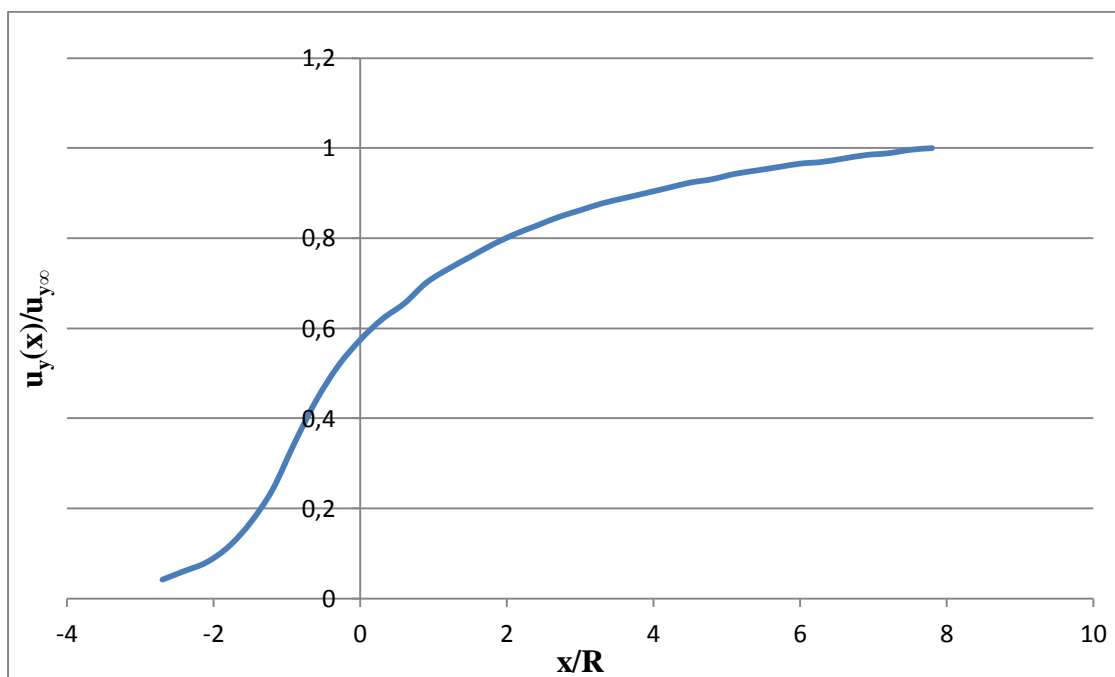
0	0	0,150	0,57471
1,5	0,3	0,162	0,62069
3	0,6	0,171	0,65517
4,5	0,9	0,183	0,70115
6	1,2	0,191	0,73180
7,5	1,5	0,198	0,75862
9	1,8	0,205	0,78544
10,5	2,1	0,211	0,80843
12	2,4	0,216	0,82759
13,5	2,7	0,221	0,84674
15	3	0,225	0,86207
16,5	3,3	0,229	0,87739
18	3,6	0,232	0,88889
19,5	3,9	0,235	0,90038
21	4,2	0,238	0,91188
22,5	4,5	0,241	0,92337
24	4,8	0,243	0,93103
25,5	5,1	0,246	0,94253
27	5,4	0,248	0,95019
28,5	5,7	0,250	0,95785
30	6	0,252	0,96552
31,5	6,3	0,253	0,96935
33	6,6	0,255	0,97701
34,5	6,9	0,257	0,98467
36	7,2	0,258	0,98851
37,5	7,5	0,260	0,99617
39	7,8	0,261	1,00000

Πίνακας 5.1 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,5$ και Rock 1

Τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν για τη χάραξη των διαγραμμάτων u_y-x/R και $u_y/u_{y\infty}-x/R$:



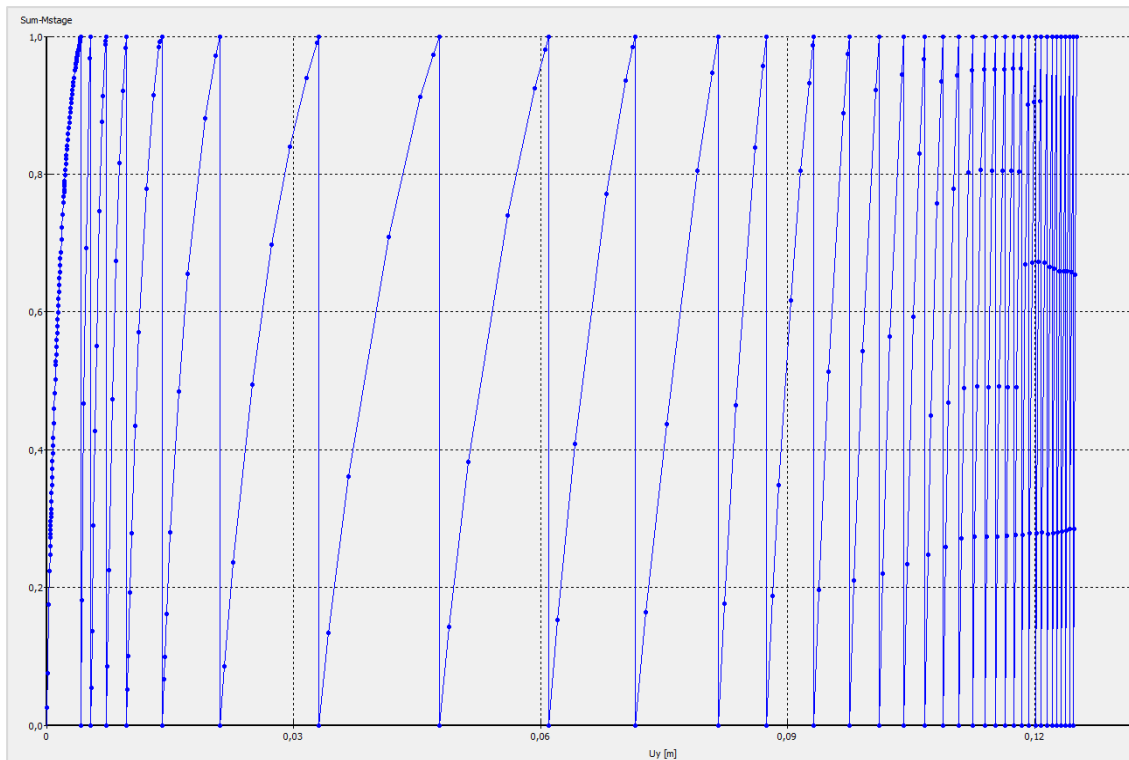
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,5$ και *Rock 1*



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,∞}$ στο σημείο A , συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,5$ και *Rock 1*

Ομοίως χαραχτήκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα και για τους υπόλοιπους τύπους εδάφους, αφού καταγράφηκαν οι συγκλίσεις, και τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.

❖ Rock 2

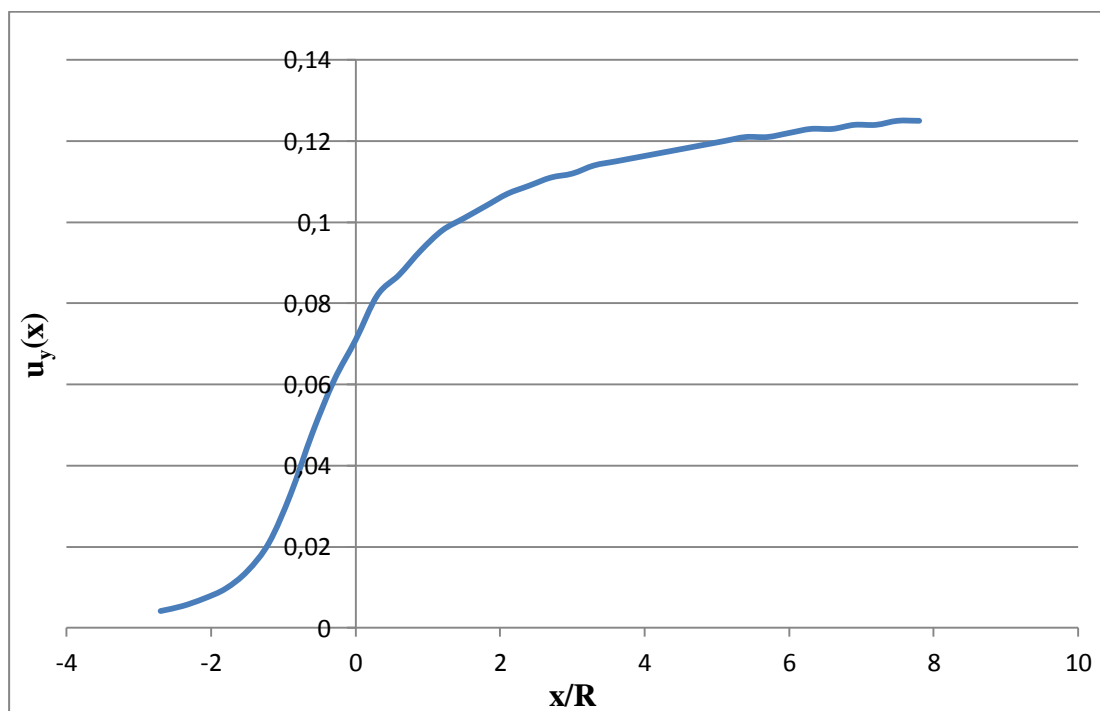


Σχήμα 5.4 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_o=0,5$ και Rock 2

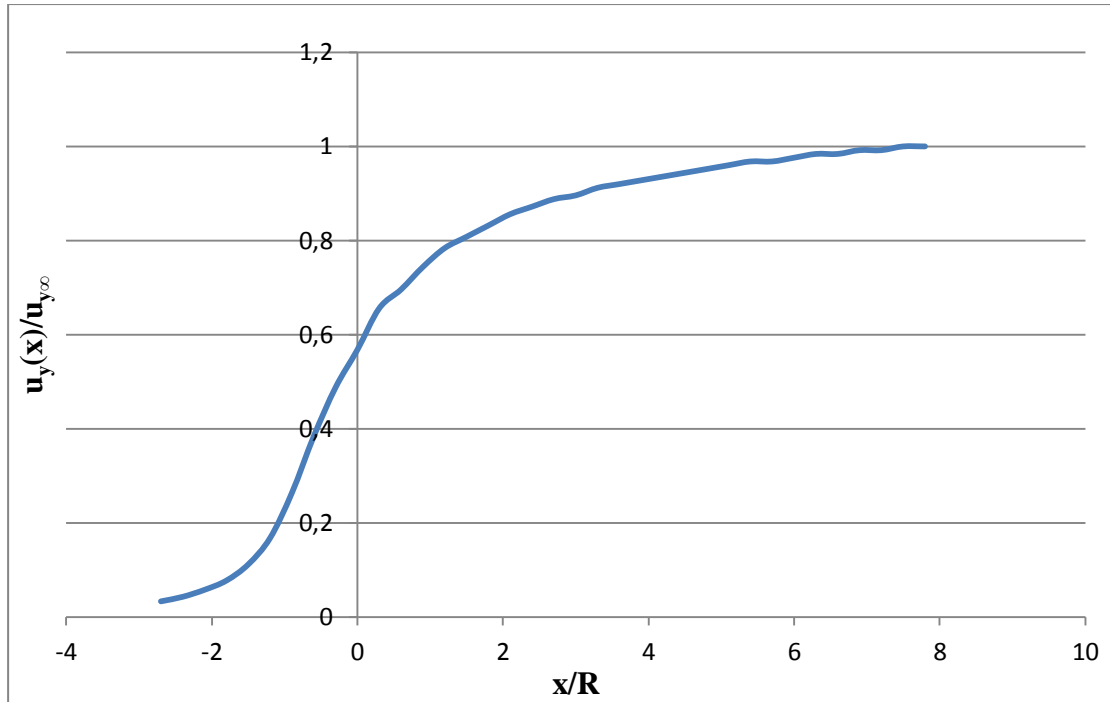
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,004184	0,03347
-12	-2,4	0,005394	0,04315
-10,5	-2,1	0,007253	0,05802
-9	-1,8	0,009705	0,07764
-7,5	-1,5	0,014000	0,11200
-6	-1,2	0,021000	0,16800
-4,5	-0,9	0,033000	0,26400
-3	-0,6	0,048000	0,38400
-1,5	-0,3	0,061000	0,48800
0	0	0,071000	0,56800
1,5	0,3	0,082000	0,65600
3	0,6	0,087000	0,69600
4,5	0,9	0,093000	0,74400
6	1,2	0,098000	0,78400
7,5	1,5	0,101000	0,80800
9	1,8	0,104000	0,83200
10,5	2,1	0,107000	0,85600
12	2,4	0,109000	0,87200
13,5	2,7	0,111000	0,88800
15	3	0,112000	0,89600

16,5	3,3	0,114000	0,91200
18	3,6	0,115000	0,92000
19,5	3,9	0,116000	0,92800
21	4,2	0,117000	0,93600
22,5	4,5	0,118000	0,94400
24	4,8	0,119000	0,95200
25,5	5,1	0,120000	0,96000
27	5,4	0,121000	0,96800
28,5	5,7	0,121000	0,96800
30	6	0,122000	0,97600
31,5	6,3	0,123000	0,98400
33	6,6	0,123000	0,98400
34,5	6,9	0,124000	0,99200
36	7,2	0,124000	0,99200
37,5	7,5	0,125000	1,00000
39	7,8	0,125000	1,00000

Πίνακας 5.2 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,5$ και Rock 2

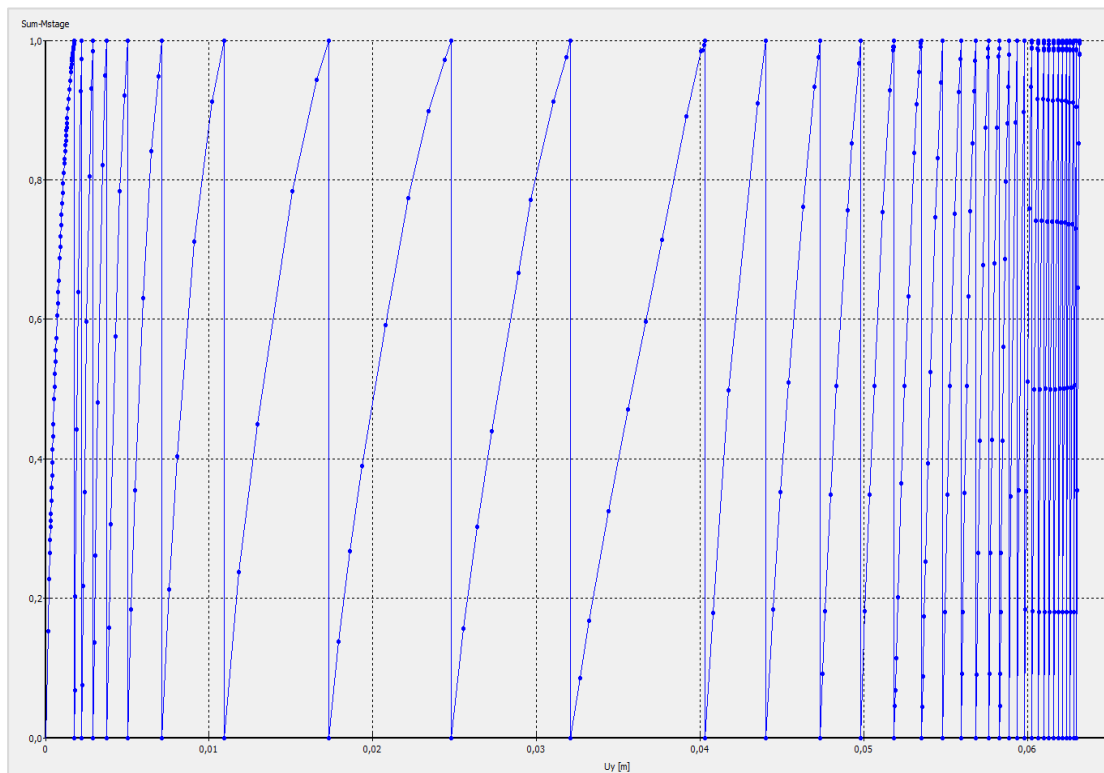


Σχήμα 5.5 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 2



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο A , συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 2

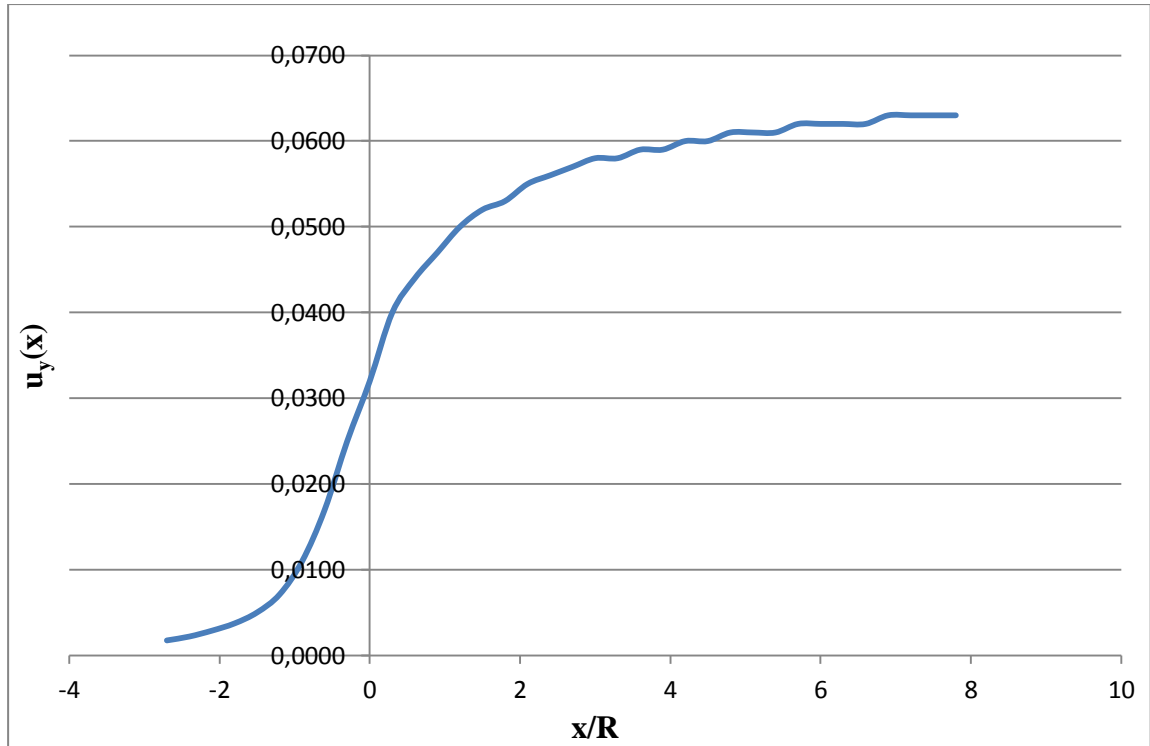
❖ Rock 3



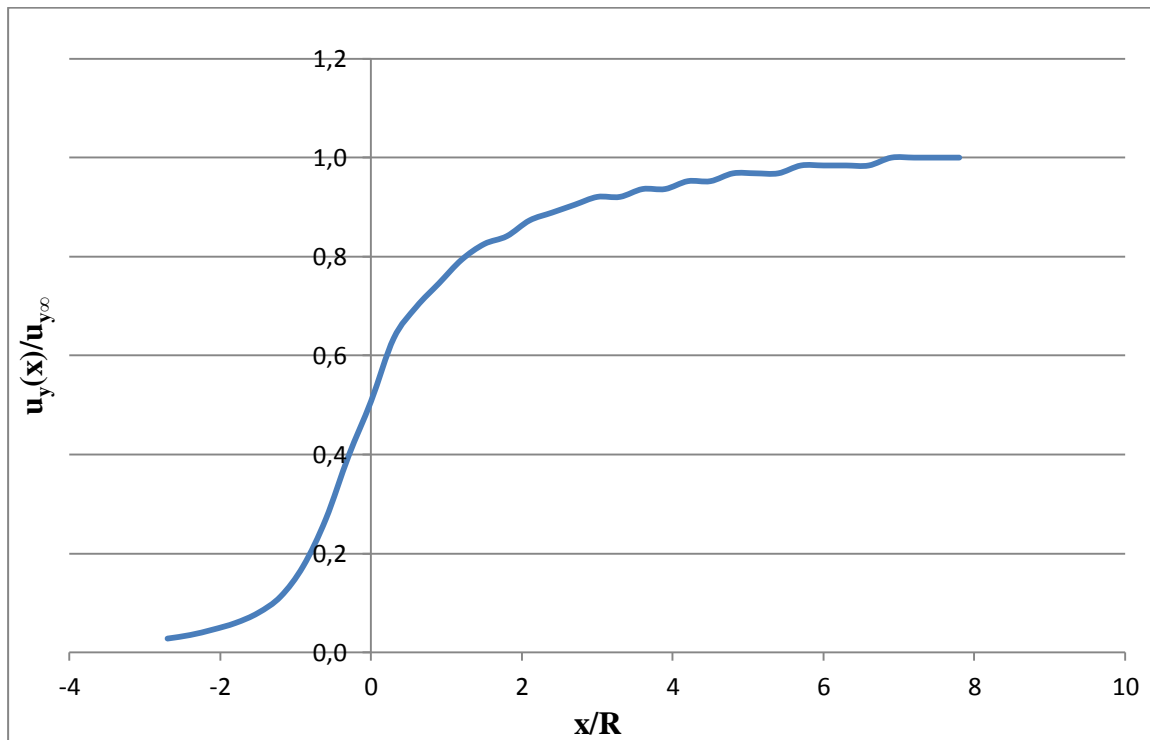
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_o=0,5$ και Rock 3

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,001774	0,02816
-12	-2,4	0,002227	0,03535
-10,5	-2,1	0,002914	0,04625
-9	-1,8	0,003755	0,05960
-7,5	-1,5	0,005035	0,07992
-6	-1,2	0,007127	0,11313
-4,5	-0,9	0,011000	0,17460
-3	-0,6	0,017000	0,26984
-1,5	-0,3	0,025000	0,39683
0	0	0,032000	0,50794
1,5	0,3	0,040000	0,63492
3	0,6	0,044000	0,69841
4,5	0,9	0,047000	0,74603
6	1,2	0,050000	0,79365
7,5	1,5	0,052000	0,82540
9	1,8	0,053000	0,84127
10,5	2,1	0,055000	0,87302
12	2,4	0,056000	0,88889
13,5	2,7	0,057000	0,90476
15	3	0,058000	0,92063
16,5	3,3	0,058000	0,92063
18	3,6	0,059000	0,93651
19,5	3,9	0,059000	0,93651
21	4,2	0,060000	0,95238
22,5	4,5	0,060000	0,95238
24	4,8	0,061000	0,96825
25,5	5,1	0,061000	0,96825
27	5,4	0,061000	0,96825
28,5	5,7	0,062000	0,98413
30	6	0,062000	0,98413
31,5	6,3	0,062000	0,98413
33	6,6	0,062000	0,98413
34,5	6,9	0,063000	1,00000
36	7,2	0,063000	1,00000
37,5	7,5	0,063000	1,00000
39	7,8	0,063000	1,00000

Πίνακας 5.3 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,5$ και Rock 3



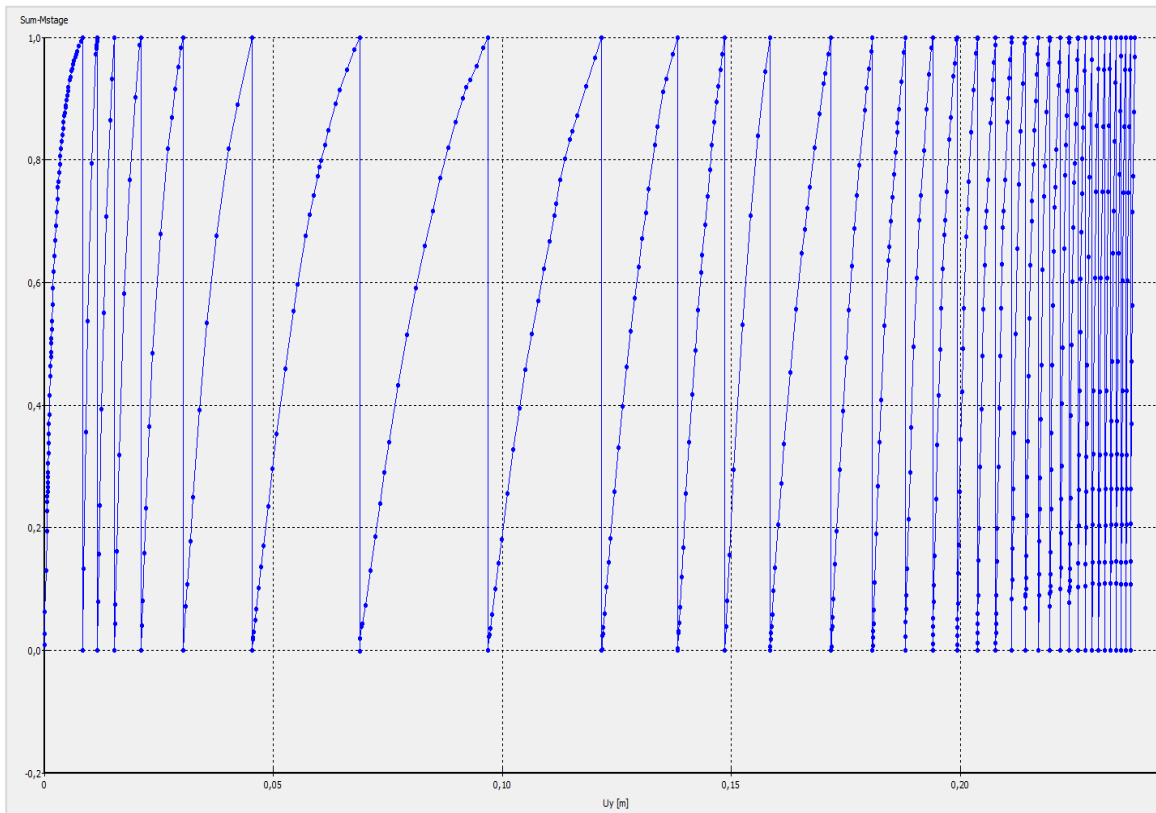
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και $Rock\ 3$



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο A , συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και $Rock\ 3$

5.2.1.1.2 $K_o=0,8$

❖ Rock 1

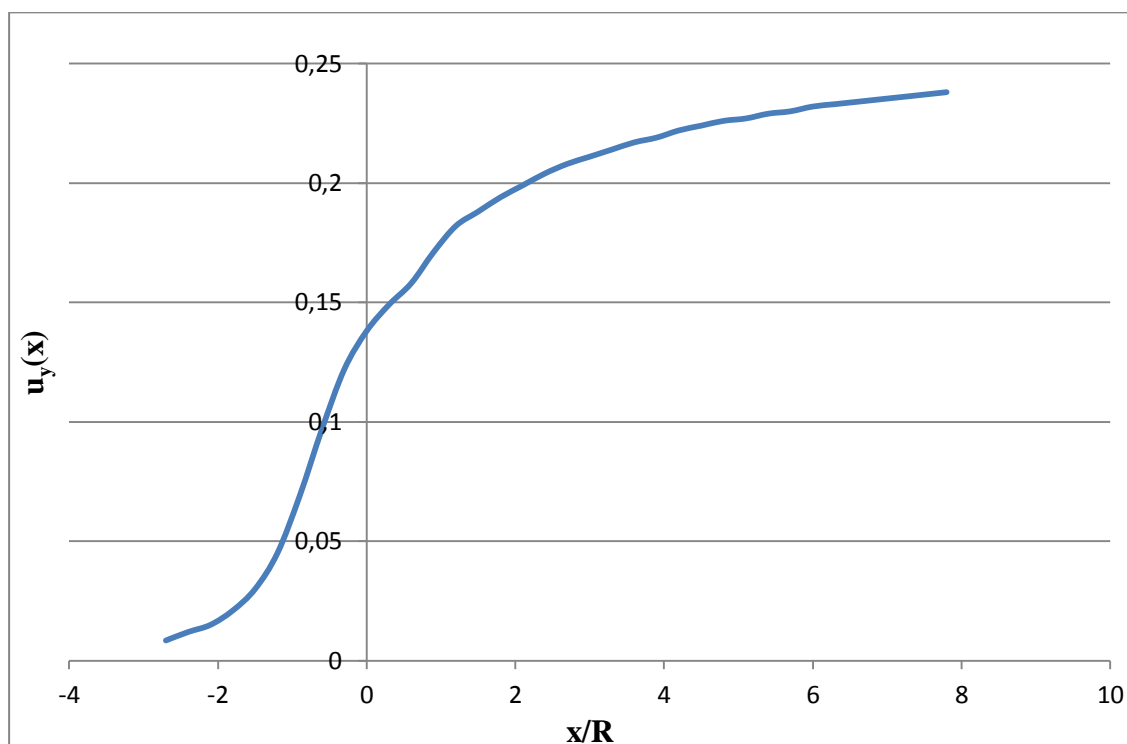


Σχήμα 5.10 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_o=0,8$ και Rock 1

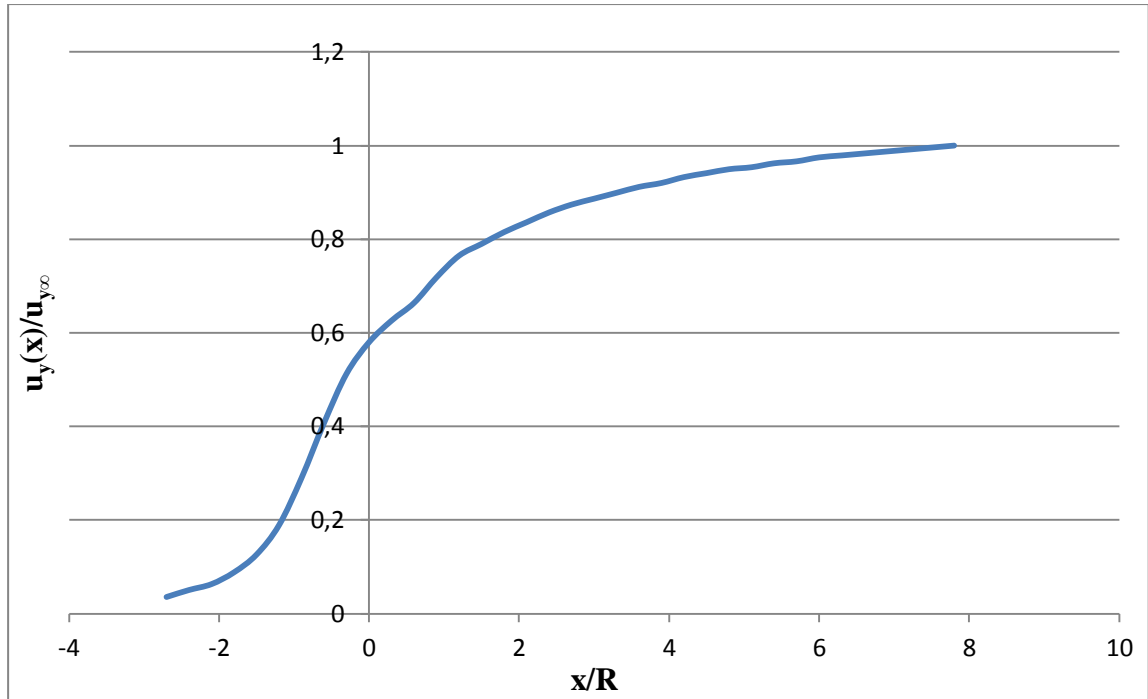
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,008	0,03551
-12	-2,4	0,012	0,05042
-10,5	-2,1	0,015	0,06303
-9	-1,8	0,021	0,08824
-7,5	-1,5	0,030	0,12605
-6	-1,2	0,045	0,18908
-4,5	-0,9	0,069	0,28992
-3	-0,6	0,097	0,40756
-1,5	-0,3	0,122	0,51261
0	0	0,138	0,57983
1,5	0,3	0,149	0,62605
3	0,6	0,158	0,66387
4,5	0,9	0,171	0,71849
6	1,2	0,182	0,76471
7,5	1,5	0,188	0,78992
9	1,8	0,194	0,81513

10,5	2,1	0,199	0,83613
12	2,4	0,204	0,85714
13,5	2,7	0,208	0,87395
15	3	0,211	0,88655
16,5	3,3	0,214	0,89916
18	3,6	0,217	0,91176
19,5	3,9	0,219	0,92017
21	4,2	0,222	0,93277
22,5	4,5	0,224	0,94118
24	4,8	0,226	0,94958
25,5	5,1	0,227	0,95378
27	5,4	0,229	0,96218
28,5	5,7	0,230	0,96639
30	6	0,232	0,97479
31,5	6,3	0,233	0,97899
33	6,6	0,234	0,98319
34,5	6,9	0,235	0,98739
36	7,2	0,236	0,99160
37,5	7,5	0,237	0,99580
39	7,8	0,238	1,00000

Πίνακας 5.4 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,8$ και Rock 1

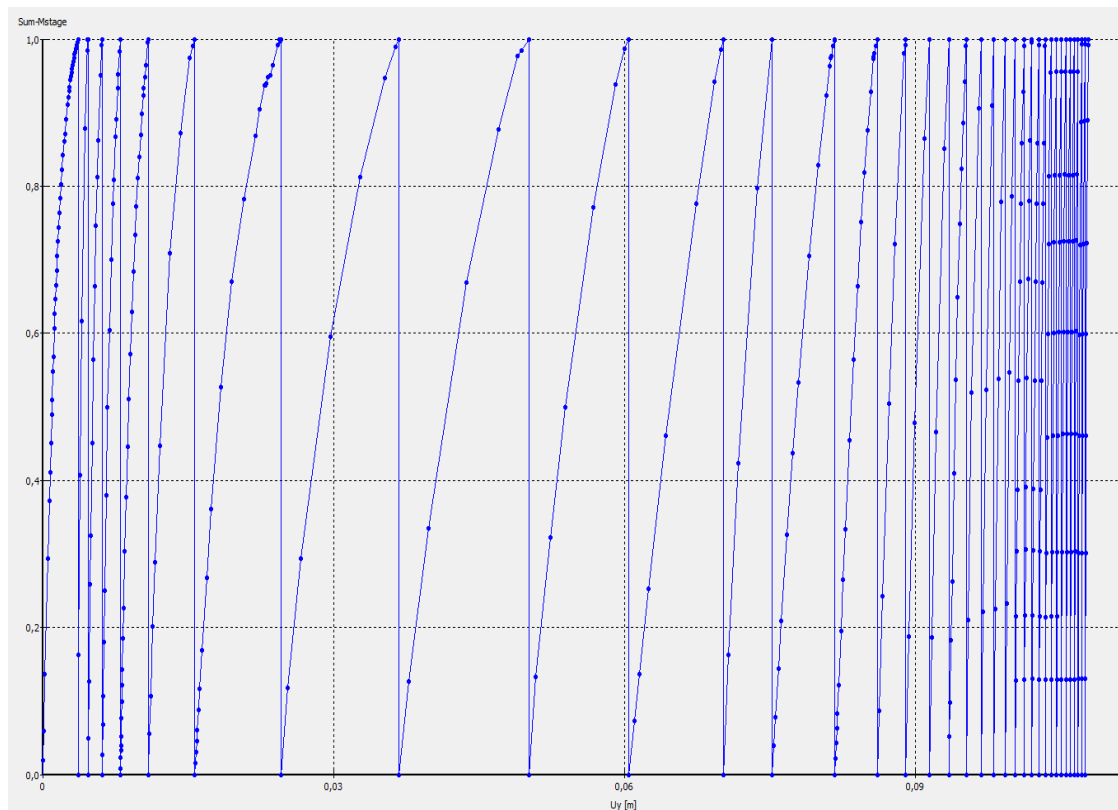


Σχήμα 5.11 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 1



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο A , συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και *Rock 1*

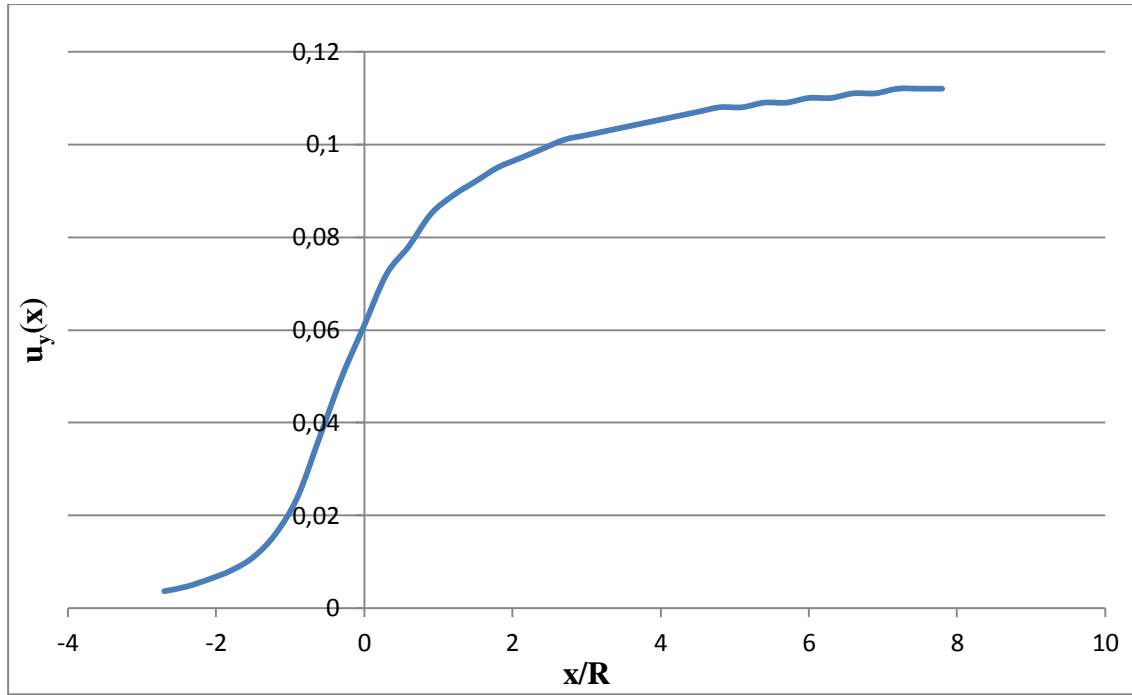
❖ **Rock 2**



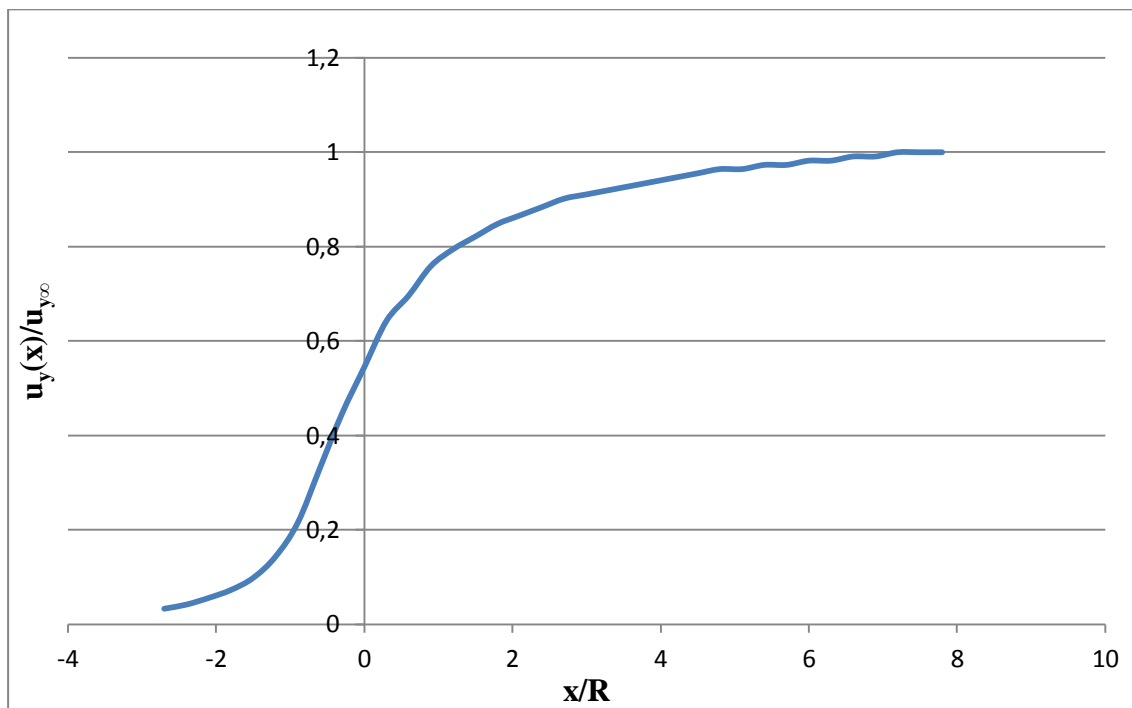
Σχήμα 5.13 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_o=0,8$ και *Rock 2*

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,003695	0,03299
-12	-2,4	0,004677	0,04176
-10,5	-2,1	0,006249	0,05579
-9	-1,8	0,008140	0,07268
-7,5	-1,5	0,011000	0,09821
-6	-1,2	0,016000	0,14286
-4,5	-0,9	0,024000	0,21429
-3	-0,6	0,037000	0,33036
-1,5	-0,3	0,050000	0,44643
0	0	0,061000	0,54464
1,5	0,3	0,072000	0,64286
3	0,6	0,078000	0,69643
4,5	0,9	0,085000	0,75893
6	1,2	0,089000	0,79464
7,5	1,5	0,092000	0,82143
9	1,8	0,095000	0,84821
10,5	2,1	0,097000	0,86607
12	2,4	0,099000	0,88393
13,5	2,7	0,101000	0,90179
15	3	0,102000	0,91071
16,5	3,3	0,103000	0,91964
18	3,6	0,104000	0,92857
19,5	3,9	0,105000	0,93750
21	4,2	0,106000	0,94643
22,5	4,5	0,107000	0,95536
24	4,8	0,108000	0,96429
25,5	5,1	0,108000	0,96429
27	5,4	0,109000	0,97321
28,5	5,7	0,109000	0,97321
30	6	0,110000	0,98214
31,5	6,3	0,110000	0,98214
33	6,6	0,111000	0,99107
34,5	6,9	0,111000	0,99107
36	7,2	0,112000	1,00000
37,5	7,5	0,112000	1,00000
39	7,8	0,112000	1,00000

Πίνακας 5.5 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,8$ και Rock 2

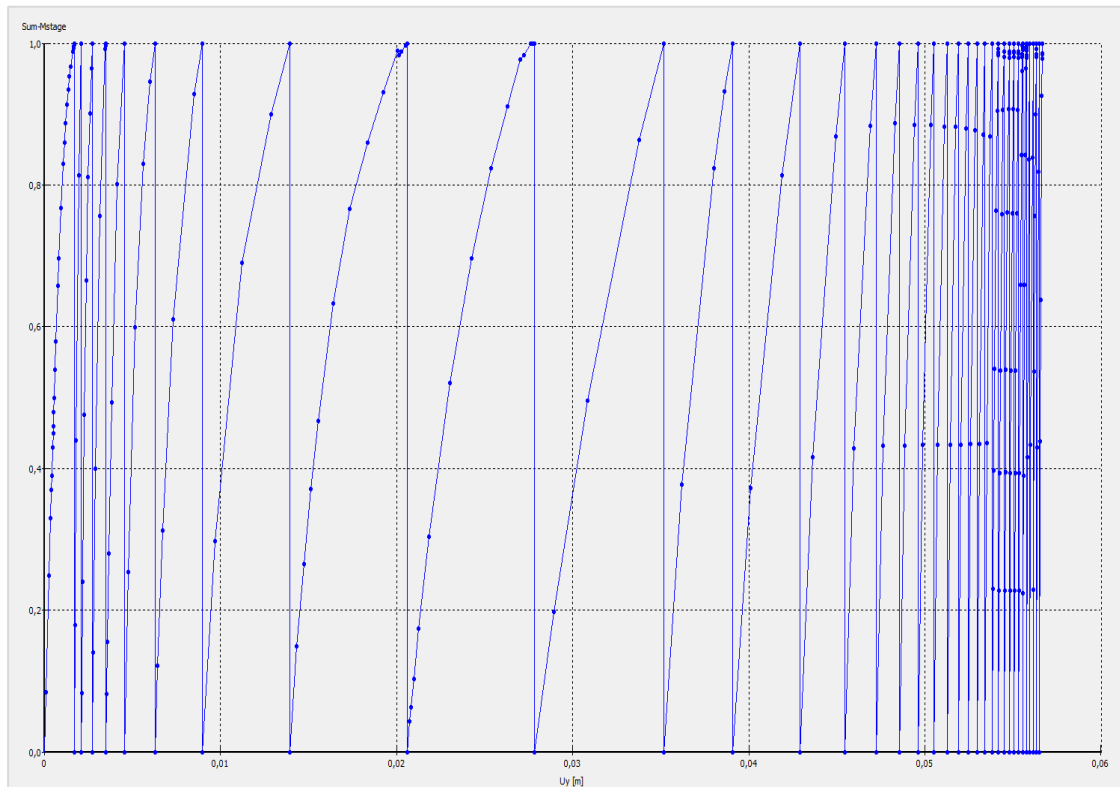


Σχήμα 5.14 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 2



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,∞}$ στο σημείο A, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 2

❖ Rock 3

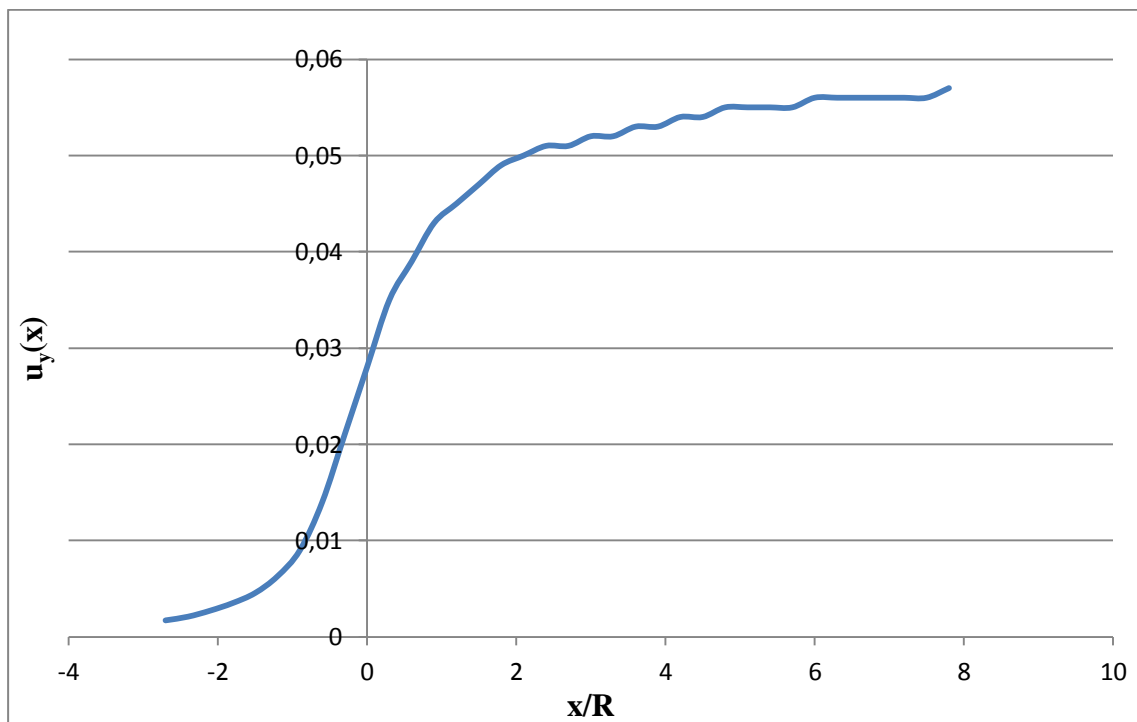


Σχήμα 5.16 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο A για $k_o=0,8$ και Rock 3

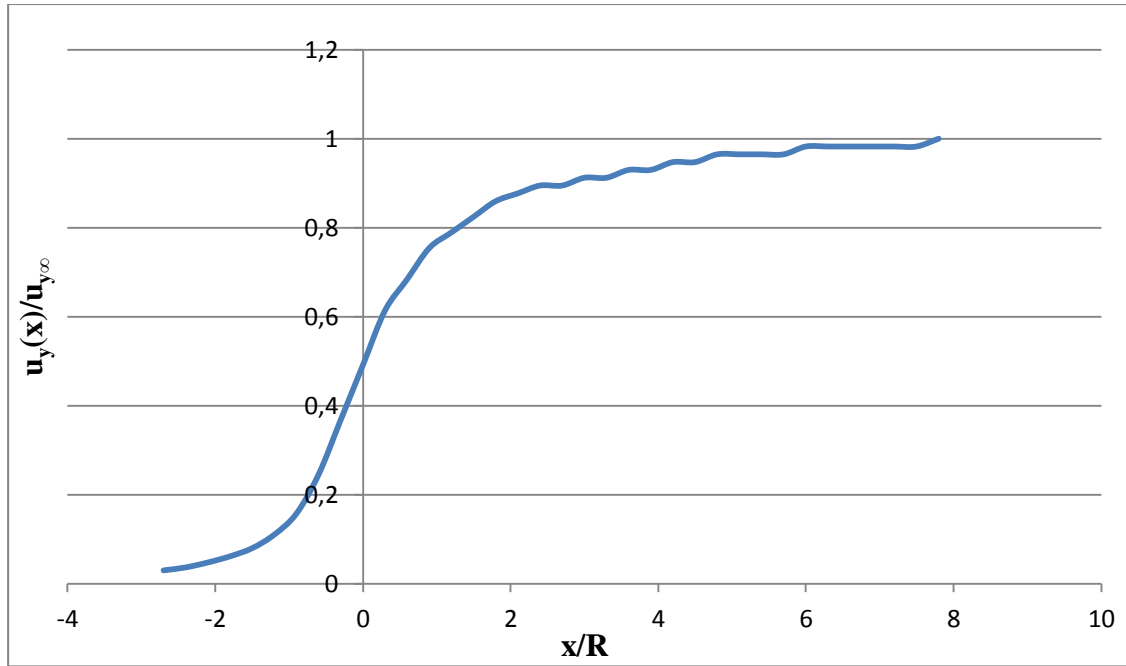
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο A u_{yA} (m)	$\frac{u_{yA}}{u_{y\infty A}}$
-13,5	-2,7	0,001722	0,03021
-12	-2,4	0,002103	0,03689
-10,5	-2,1	0,002734	0,04796
-9	-1,8	0,003520	0,06175
-7,5	-1,5	0,004561	0,08002
-6	-1,2	0,006299	0,11051
-4,5	-0,9	0,008993	0,15777
-3	-0,6	0,014000	0,24561
-1,5	-0,3	0,021000	0,36842
0	0	0,028000	0,49123
1,5	0,3	0,035000	0,61404
3	0,6	0,039000	0,68421
4,5	0,9	0,043000	0,75439
6	1,2	0,045000	0,78947
7,5	1,5	0,047000	0,82456
9	1,8	0,049000	0,85965
10,5	2,1	0,050000	0,87719
12	2,4	0,051000	0,89474

13,5	2,7	0,051000	0,89474
15	3	0,052000	0,91228
16,5	3,3	0,052000	0,91228
18	3,6	0,053000	0,92982
19,5	3,9	0,053000	0,92982
21	4,2	0,054000	0,94737
22,5	4,5	0,054000	0,94737
24	4,8	0,055000	0,96491
25,5	5,1	0,055000	0,96491
27	5,4	0,055000	0,96491
28,5	5,7	0,055000	0,96491
30	6	0,056000	0,98246
31,5	6,3	0,056000	0,98246
33	6,6	0,056000	0,98246
34,5	6,9	0,056000	0,98246
36	7,2	0,056000	0,98246
37,5	7,5	0,056000	0,98246
39	7,8	0,057000	1,00000

Πίνακας 5.6 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο A για $k_o=0,8$ και Rock 3



Σχήμα 5.17 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο A συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 3

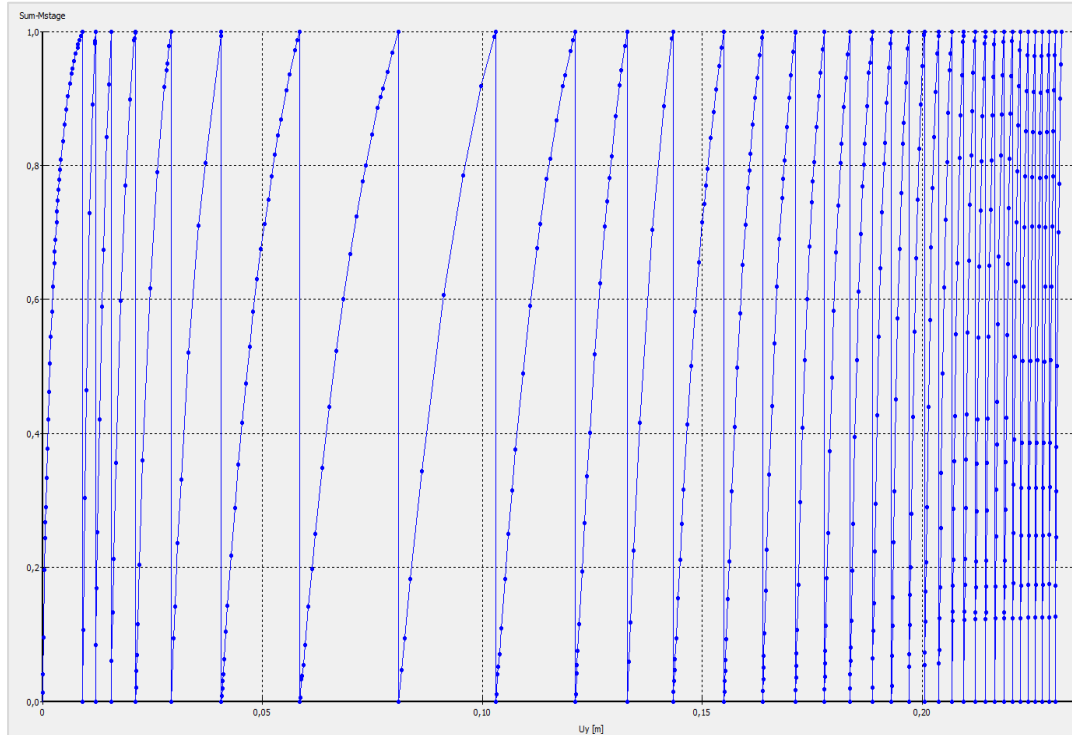


Σχήμα 5.18 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,\infty}$ στο σημείο A , συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και $Rock\ 3$

5.2.1.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Β

5.2.1.2.1 $K_0=0,5$

❖ Rock 1

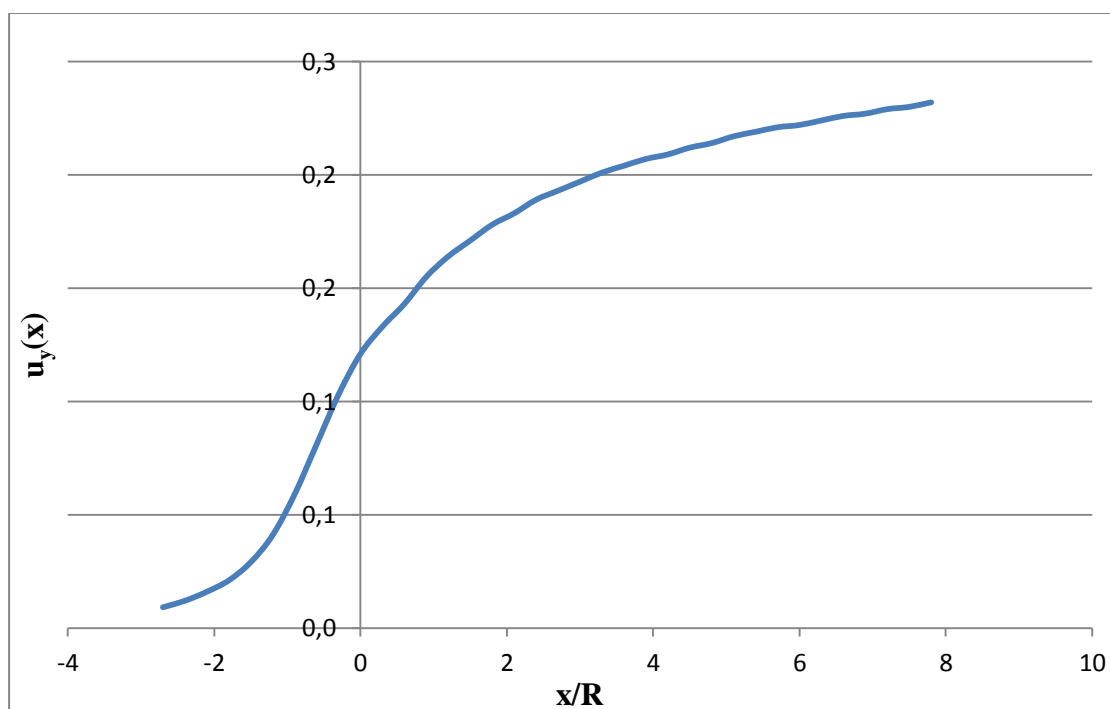


Σχήμα 5.19 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο Β για $k_0=0,5$ και Rock 1

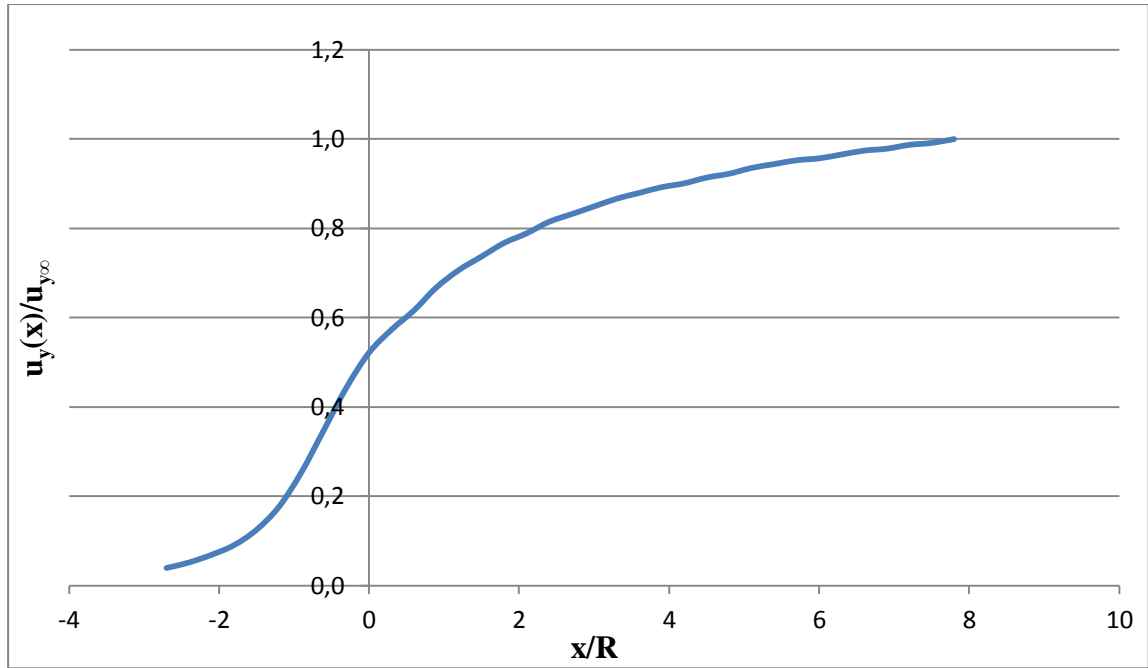
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο Β u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,009	0,02933
-12	-2,4	0,012	0,03586
-10,5	-2,1	0,016	0,04527
-9	-1,8	0,021	0,05551
-7,5	-1,5	0,029	0,06963
-6	-1,2	0,041	0,09098
-4,5	-0,9	0,059	0,12929
-3	-0,6	0,081	0,21569
-1,5	-0,3	0,103	0,33333
0	0	0,121	0,45098
1,5	0,3	0,133	0,58824
3	0,6	0,143	0,66667
4,5	0,9	0,155	0,72549
6	1,2	0,164	0,76471
7,5	1,5	0,171	0,80392
9	1,8	0,178	0,84314

10,5	2,1	0,183	0,86275
12	2,4	0,189	0,88235
13,5	2,7	0,193	0,90196
15	3	0,197	0,90196
16,5	3,3	0,201	0,92157
18	3,6	0,204	0,92157
19,5	3,9	0,207	0,94118
21	4,2	0,209	0,94118
22,5	4,5	0,212	0,96078
24	4,8	0,214	0,96078
25,5	5,1	0,217	0,96078
27	5,4	0,219	0,98039
28,5	5,7	0,221	0,98039
30	6	0,222	0,98039
31,5	6,3	0,224	0,98039
33	6,6	0,226	1,00000
34,5	6,9	0,227	1,00000
36	7,2	0,229	1,00000
37,5	7,5	0,230	1,00000
39	7,8	0,232	1,00000

Πίνακας 5.7 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock I

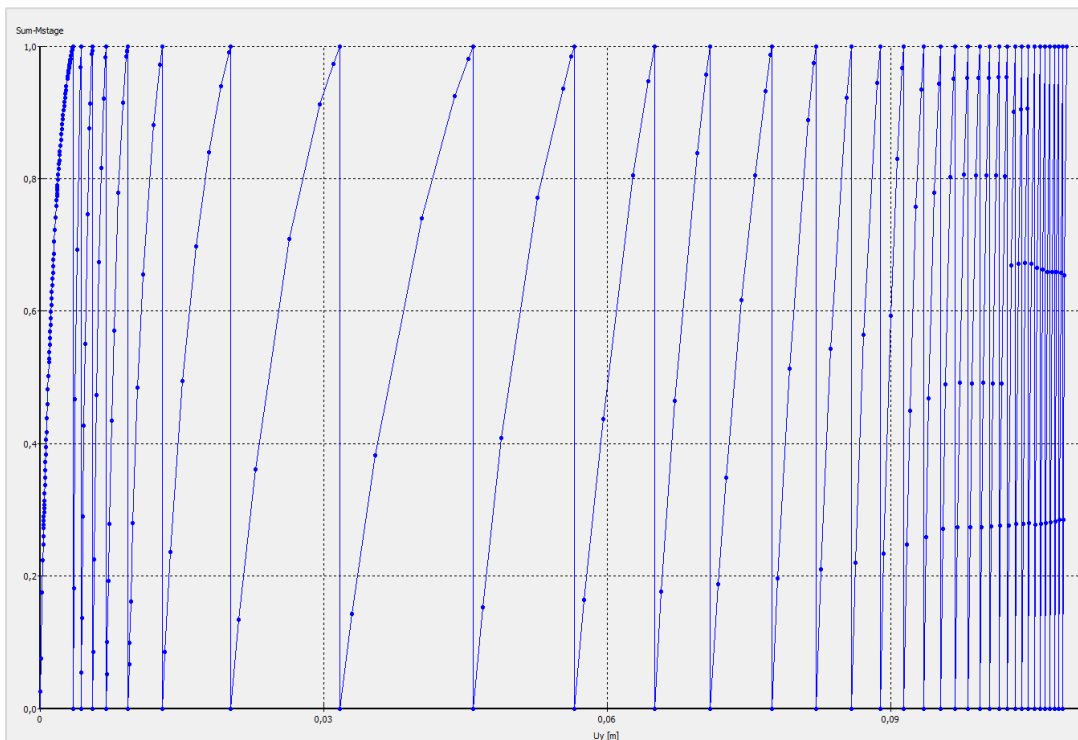


Σχήμα 5.20 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock I



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 1

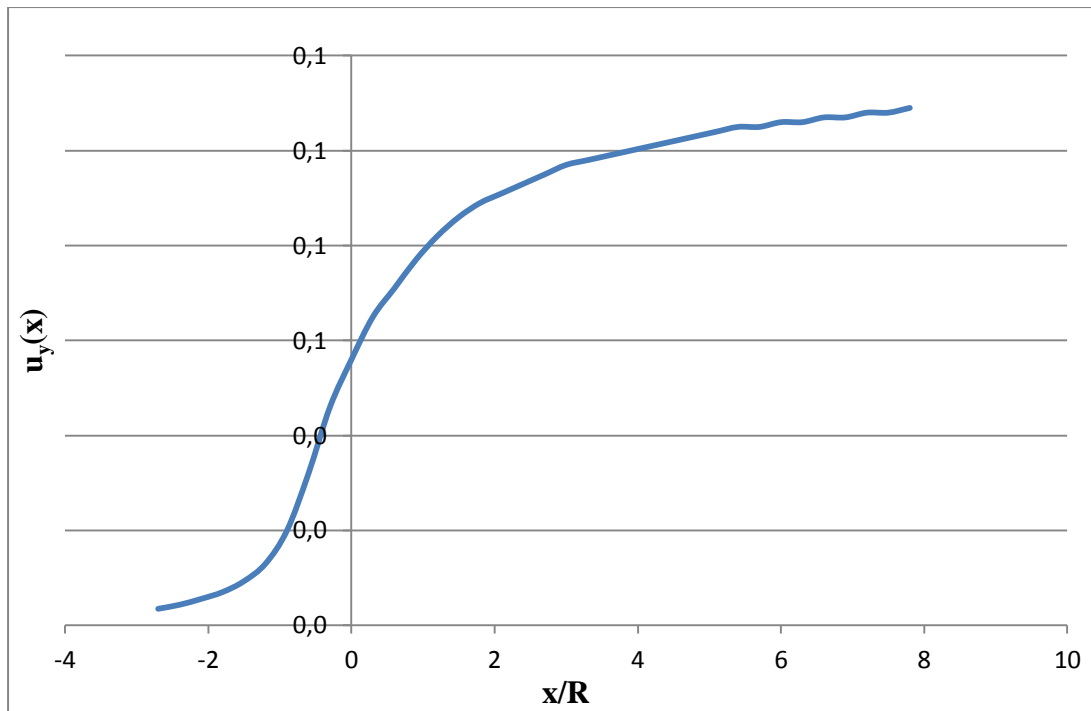
❖ **Rock 2**



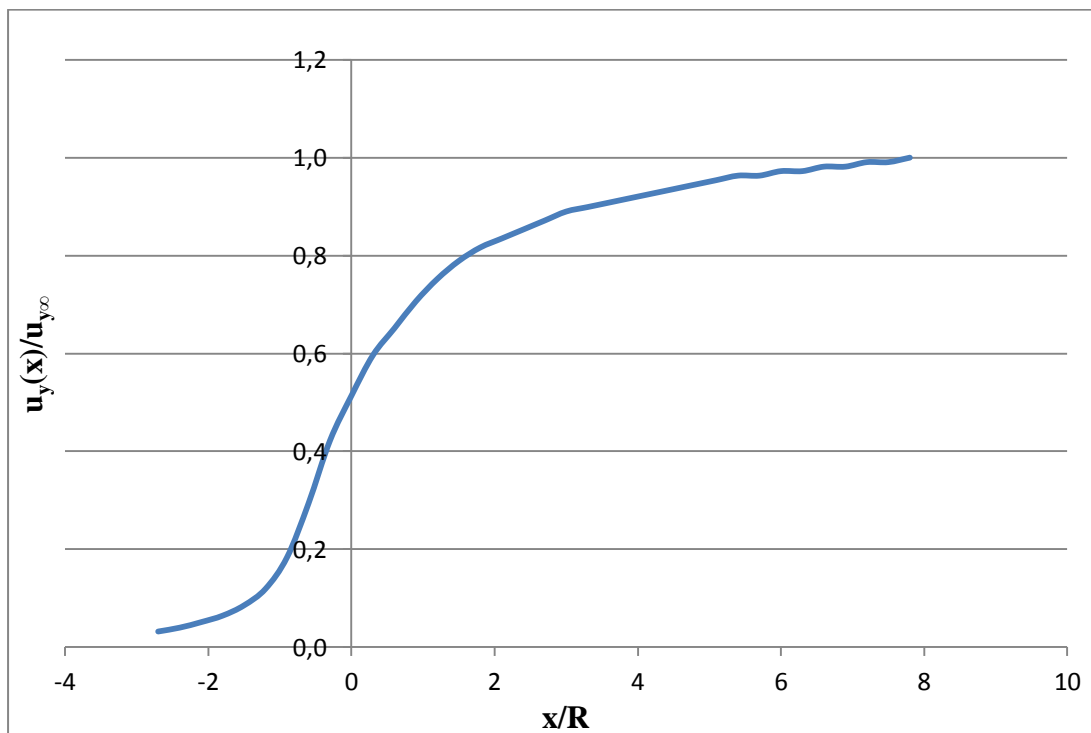
Σχήμα 5.22 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 2

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,003488	0,03200
-12	-2,4	0,004343	0,03984
-10,5	-2,1	0,005571	0,05111
-9	-1,8	0,007013	0,06434
-7,5	-1,5	0,009315	0,08546
-6	-1,2	0,013000	0,11927
-4,5	-0,9	0,020000	0,18349
-3	-0,6	0,032000	0,29358
-1,5	-0,3	0,046000	0,42202
0	0	0,056000	0,51376
1,5	0,3	0,065000	0,59633
3	0,6	0,071000	0,65138
4,5	0,9	0,077000	0,70642
6	1,2	0,082000	0,75229
7,5	1,5	0,086000	0,78899
9	1,8	0,089000	0,81651
10,5	2,1	0,091000	0,83486
12	2,4	0,093000	0,85321
13,5	2,7	0,095000	0,87156
15	3	0,097000	0,88991
16,5	3,3	0,098000	0,89908
18	3,6	0,099000	0,90826
19,5	3,9	0,100000	0,91743
21	4,2	0,101000	0,92661
22,5	4,5	0,102000	0,93578
24	4,8	0,103000	0,94495
25,5	5,1	0,104000	0,95413
27	5,4	0,105000	0,96330
28,5	5,7	0,105000	0,96330
30	6	0,106000	0,97248
31,5	6,3	0,106000	0,97248
33	6,6	0,107000	0,98165
34,5	6,9	0,107000	0,98165
36	7,2	0,108000	0,99083
37,5	7,5	0,108000	0,99083
39	7,8	0,109000	1,00000

Πίνακας 5.8 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 2

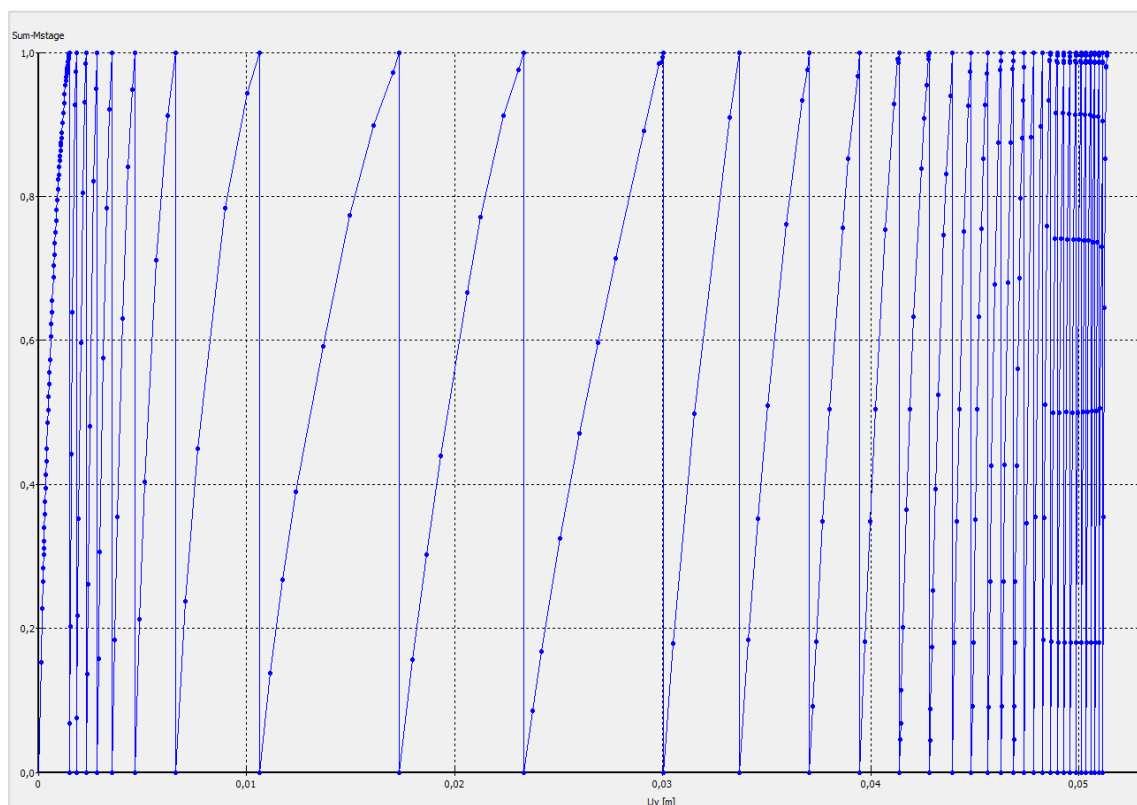


Σχήμα 5.23 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,5$ και Rock 2



Σχήμα 5.24 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,5$ και Rock 2

❖ Rock 3

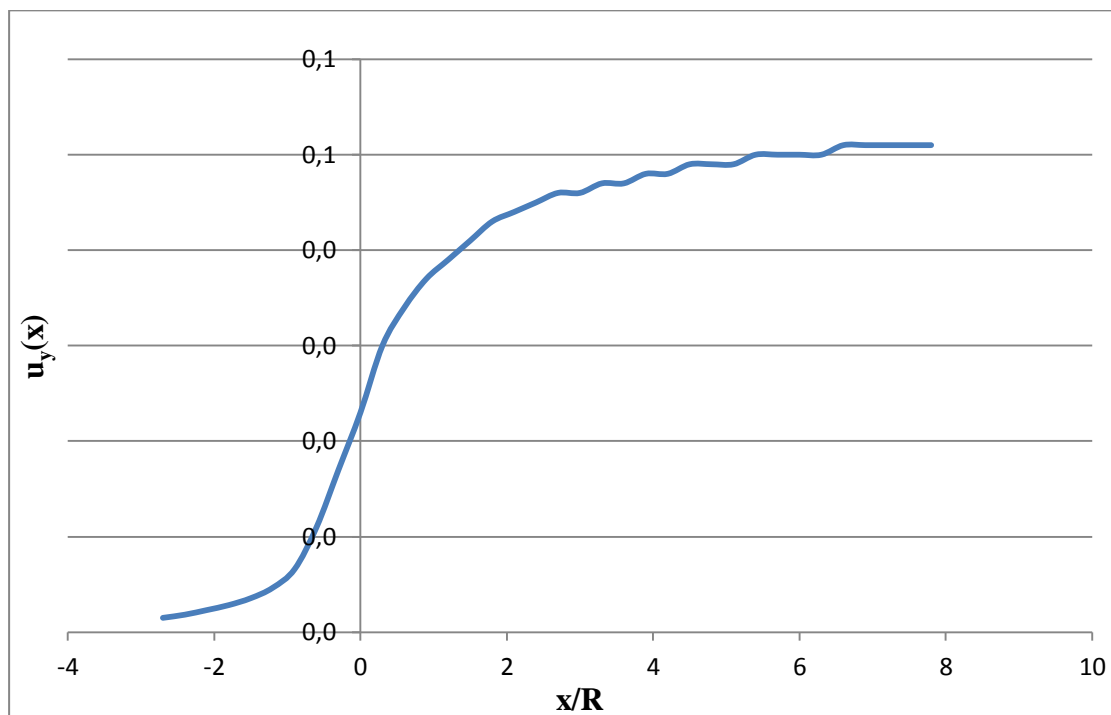


Σχήμα 5.25 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 3

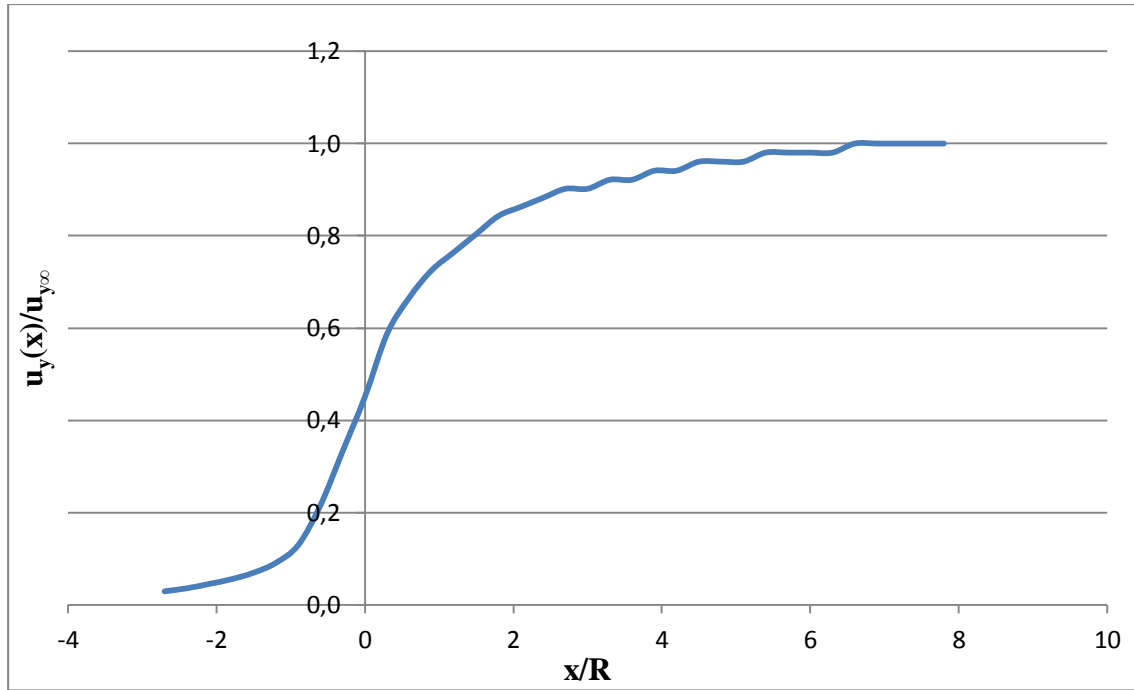
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,001496	0,02933
-12	-2,4	0,001829	0,03586
-10,5	-2,1	0,002309	0,04527
-9	-1,8	0,002831	0,05551
-7,5	-1,5	0,003551	0,06963
-6	-1,2	0,004640	0,09098
-4,5	-0,9	0,006594	0,12929
-3	-0,6	0,011000	0,21569
-1,5	-0,3	0,017000	0,33333
0	0	0,023000	0,45098
1,5	0,3	0,030000	0,58824
3	0,6	0,034000	0,66667
4,5	0,9	0,037000	0,72549
6	1,2	0,039000	0,76471
7,5	1,5	0,041000	0,80392
9	1,8	0,043000	0,84314
10,5	2,1	0,044000	0,86275
12	2,4	0,045000	0,88235

13,5	2,7	0,046000	0,90196
15	3	0,046000	0,90196
16,5	3,3	0,047000	0,92157
18	3,6	0,047000	0,92157
19,5	3,9	0,048000	0,94118
21	4,2	0,048000	0,94118
22,5	4,5	0,049000	0,96078
24	4,8	0,049000	0,96078
25,5	5,1	0,049000	0,96078
27	5,4	0,050000	0,98039
28,5	5,7	0,050000	0,98039
30	6	0,050000	0,98039
31,5	6,3	0,050000	0,98039
33	6,6	0,051000	1,00000
34,5	6,9	0,051000	1,00000
36	7,2	0,051000	1,00000
37,5	7,5	0,051000	1,00000
39	7,8	0,051000	1,00000

Πίνακας 5.9 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 3



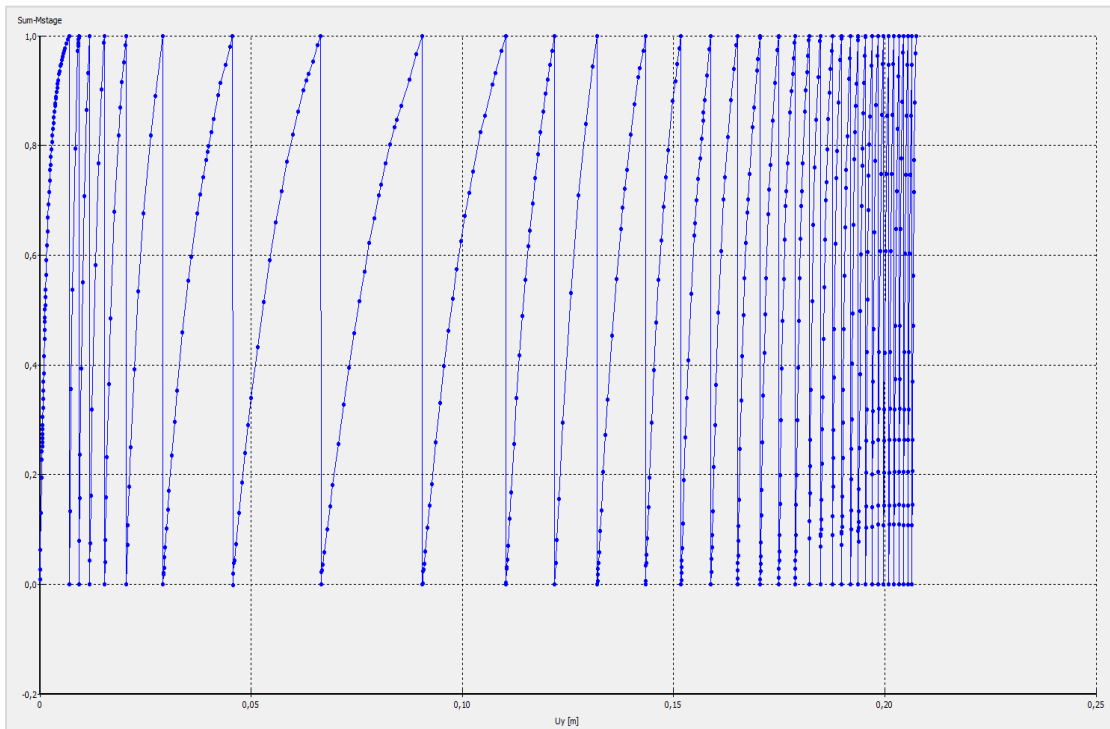
Σχήμα 5.26 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 3



Σχήμα 5.27 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 3

5.2.1.2.2 $Ko=0,8$

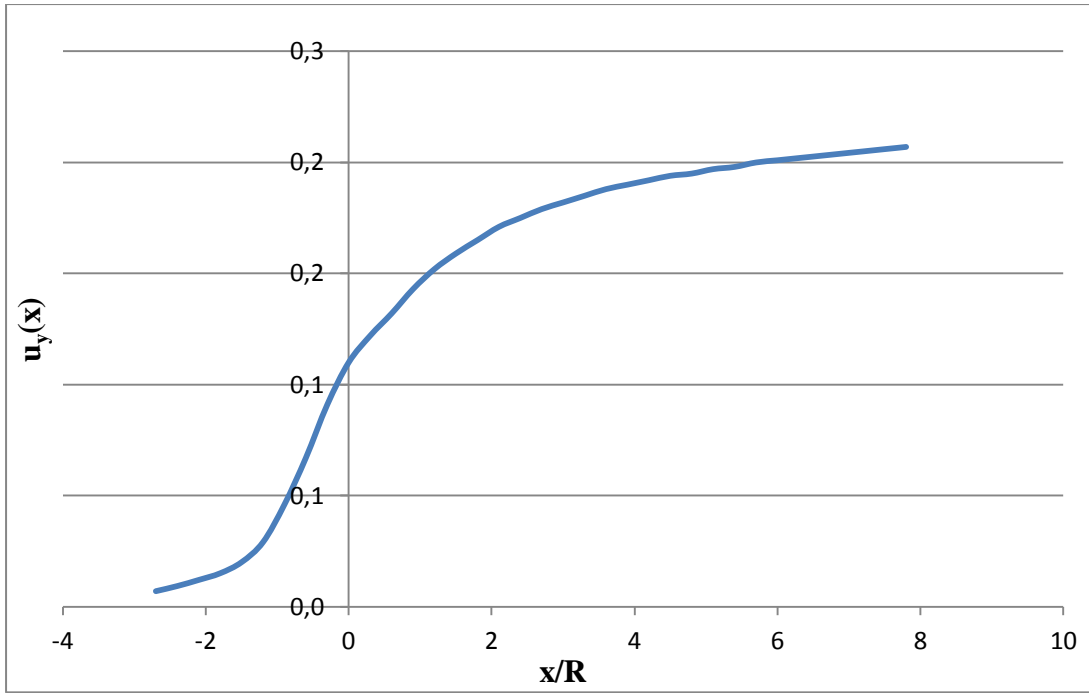
❖ Rock 1



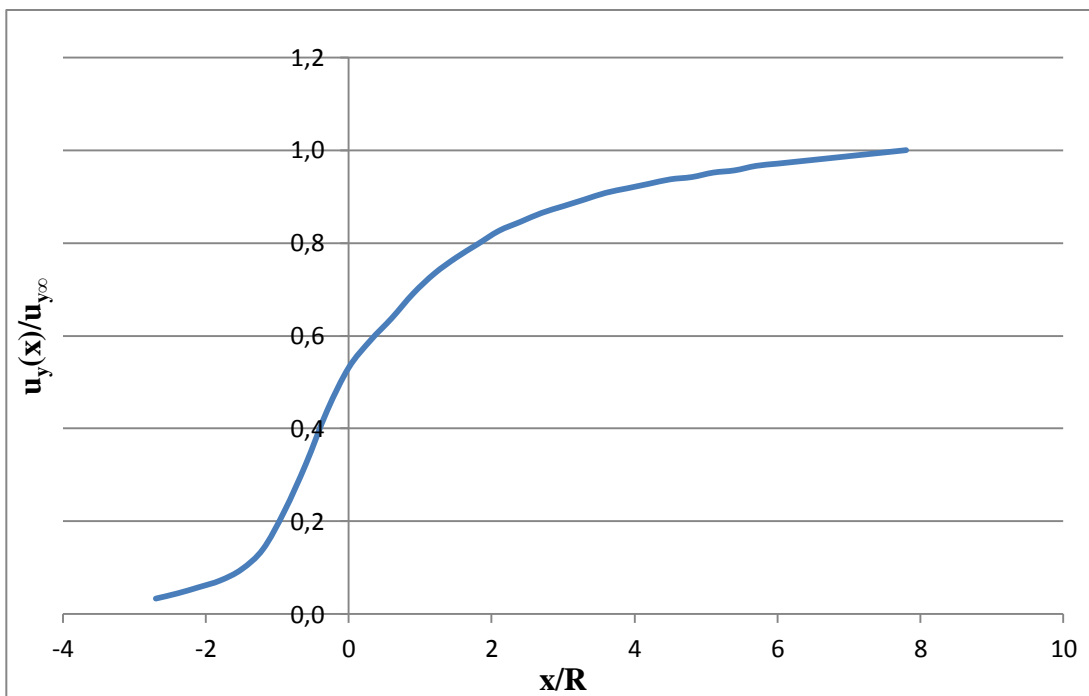
Σχήμα 5.28 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 1

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,007	0,03353
-12	-2,4	0,009	0,04466
-10,5	-2,1	0,012	0,05797
-9	-1,8	0,015	0,07246
-7,5	-1,5	0,020	0,09662
-6	-1,2	0,029	0,14010
-4,5	-0,9	0,046	0,22222
-3	-0,6	0,067	0,32367
-1,5	-0,3	0,091	0,43961
0	0	0,110	0,53140
1,5	0,3	0,122	0,58937
3	0,6	0,132	0,63768
4,5	0,9	0,143	0,69082
6	1,2	0,152	0,73430
7,5	1,5	0,159	0,76812
9	1,8	0,165	0,79710
10,5	2,1	0,171	0,82609
12	2,4	0,175	0,84541
13,5	2,7	0,179	0,86473
15	3	0,182	0,87923
16,5	3,3	0,185	0,89372
18	3,6	0,188	0,90821
19,5	3,9	0,190	0,91787
21	4,2	0,192	0,92754
22,5	4,5	0,194	0,93720
24	4,8	0,195	0,94203
25,5	5,1	0,197	0,95169
27	5,4	0,198	0,95652
28,5	5,7	0,200	0,96618
30	6	0,201	0,97101
31,5	6,3	0,202	0,97585
33	6,6	0,203	0,98068
34,5	6,9	0,204	0,98551
36	7,2	0,205	0,99034
37,5	7,5	0,206	0,99517
39	7,8	0,207	1,00000

Πίνακας 5.10 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 1

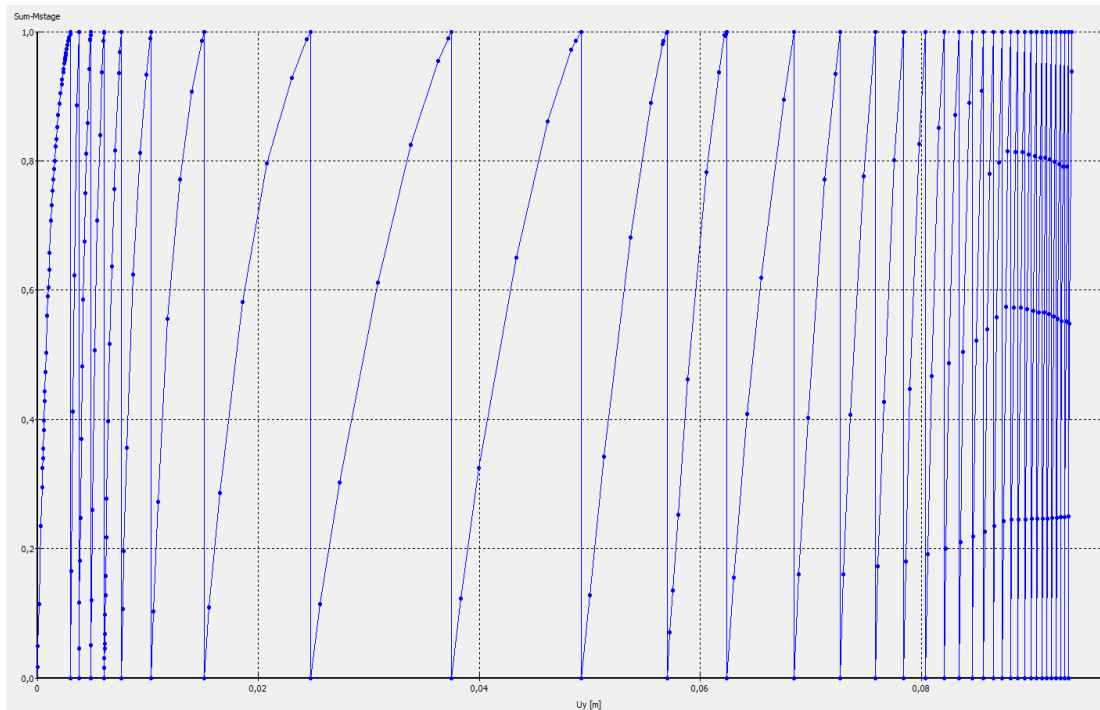


Σχήμα 5.29 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 1



Σχήμα 5.30 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 1

❖ Rock 2

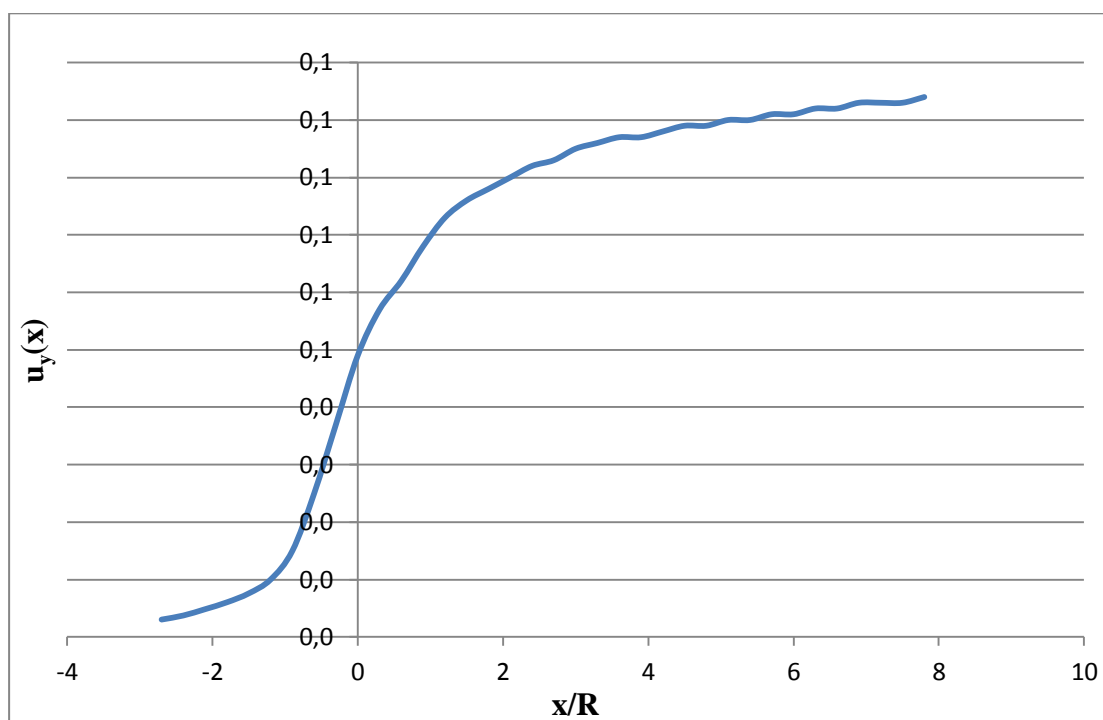


Σχήμα 5.31 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 2

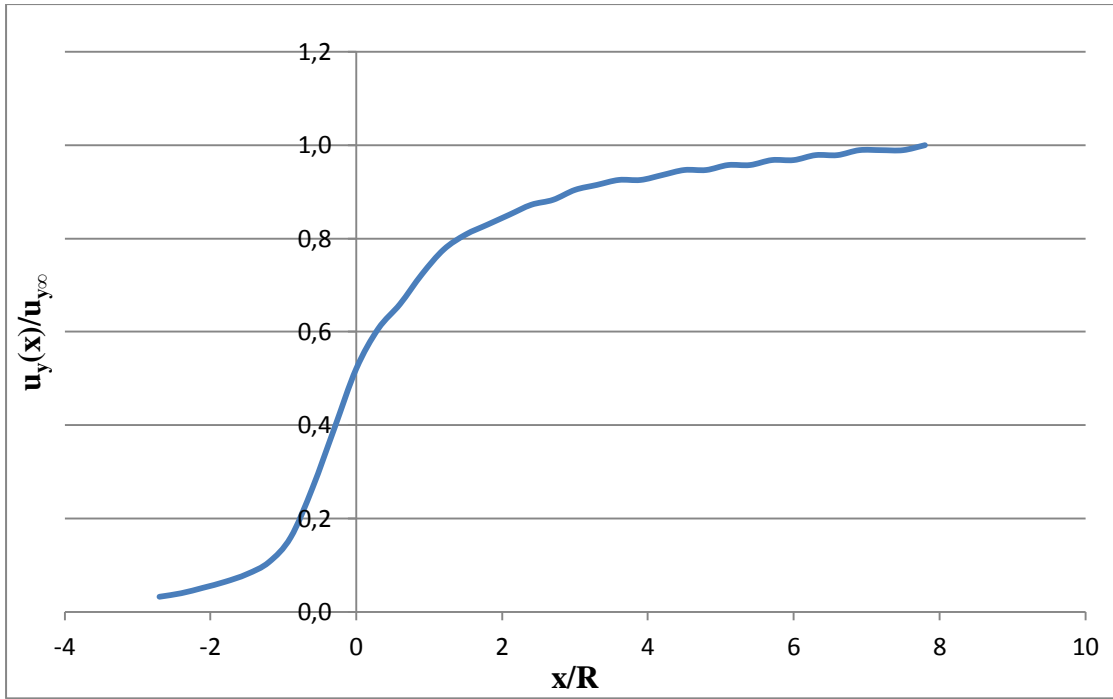
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,003043	0,03237
-12	-2,4	0,003758	0,03998
-10,5	-2,1	0,004858	0,05168
-9	-1,8	0,006053	0,06439
-7,5	-1,5	0,007601	0,08086
-6	-1,2	0,010000	0,10638
-4,5	-0,9	0,015000	0,15957
-3	-0,6	0,025000	0,26596
-1,5	-0,3	0,037000	0,39362
0	0	0,049000	0,52128
1,5	0,3	0,057000	0,60638
3	0,6	0,062000	0,65957
4,5	0,9	0,068000	0,72340
6	1,2	0,073000	0,77660
7,5	1,5	0,076000	0,80851
9	1,8	0,078000	0,82979
10,5	2,1	0,080000	0,85106
12	2,4	0,082000	0,87234
13,5	2,7	0,083000	0,88298
15	3	0,085000	0,90426

16,5	3,3	0,086000	0,91489
18	3,6	0,087000	0,92553
19,5	3,9	0,087000	0,92553
21	4,2	0,088000	0,93617
22,5	4,5	0,089000	0,94681
24	4,8	0,089000	0,94681
25,5	5,1	0,090000	0,95745
27	5,4	0,090000	0,95745
28,5	5,7	0,091000	0,96809
30	6	0,091000	0,96809
31,5	6,3	0,092000	0,97872
33	6,6	0,092000	0,97872
34,5	6,9	0,093000	0,98936
36	7,2	0,093000	0,98936
37,5	7,5	0,093000	0,98936
39	7,8	0,094000	1,00000

Πίνακας 5.11 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 2

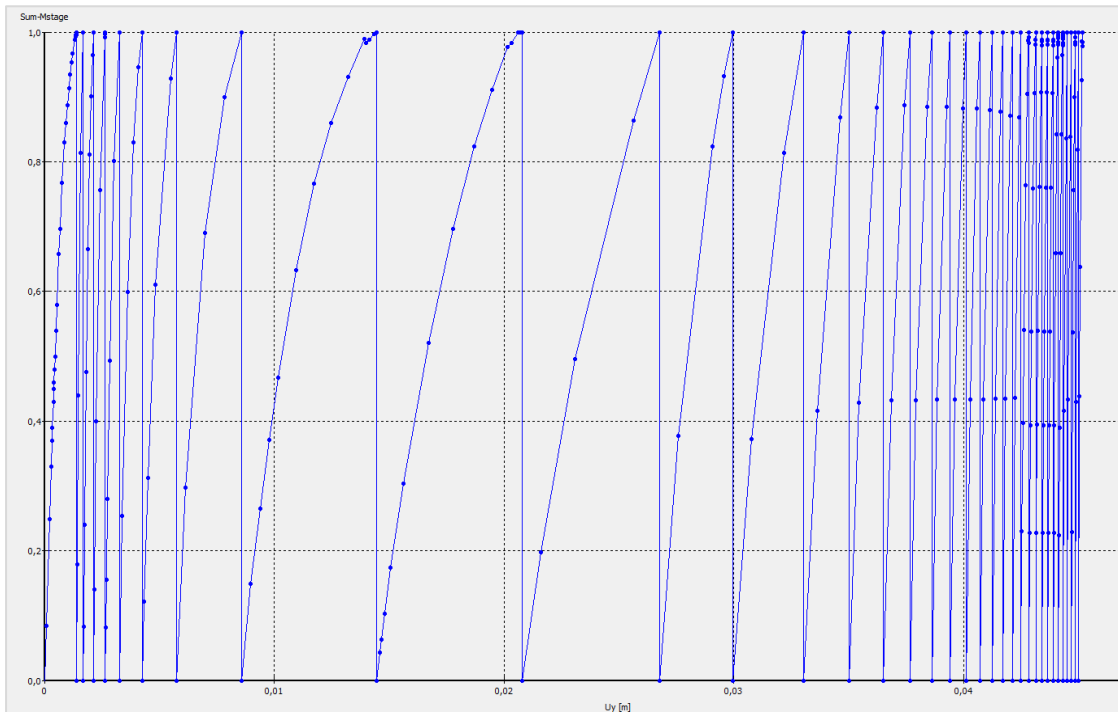


Σχήμα 5.32 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 2



Σχήμα 5.33 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 2

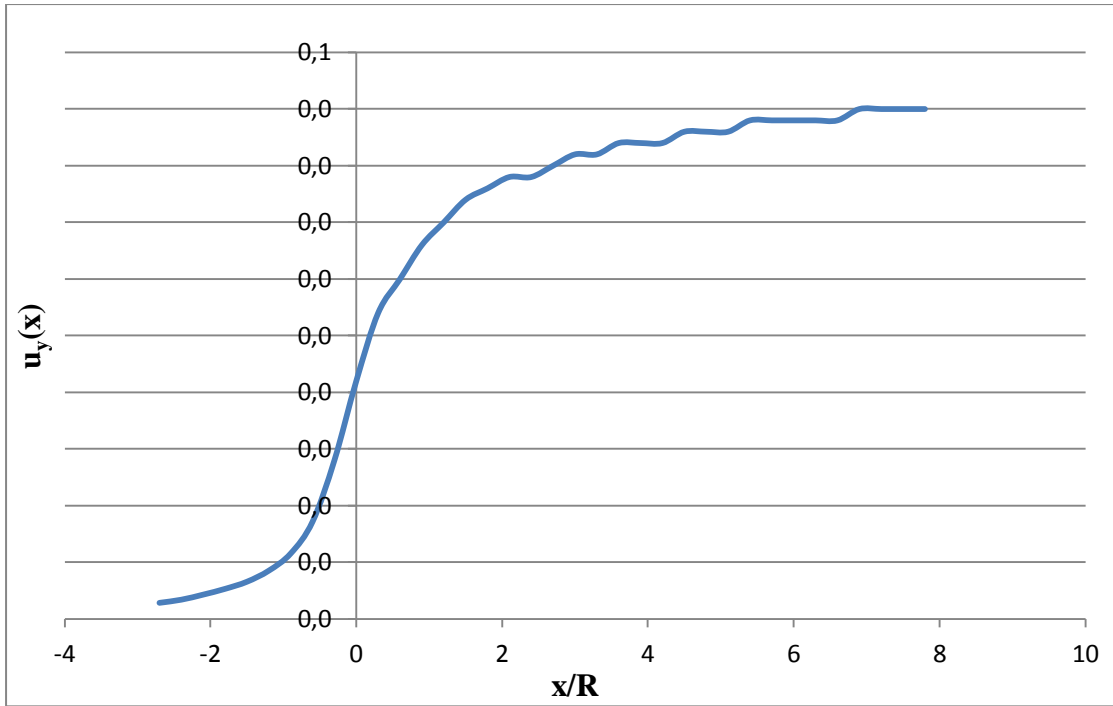
❖ **Rock 3**



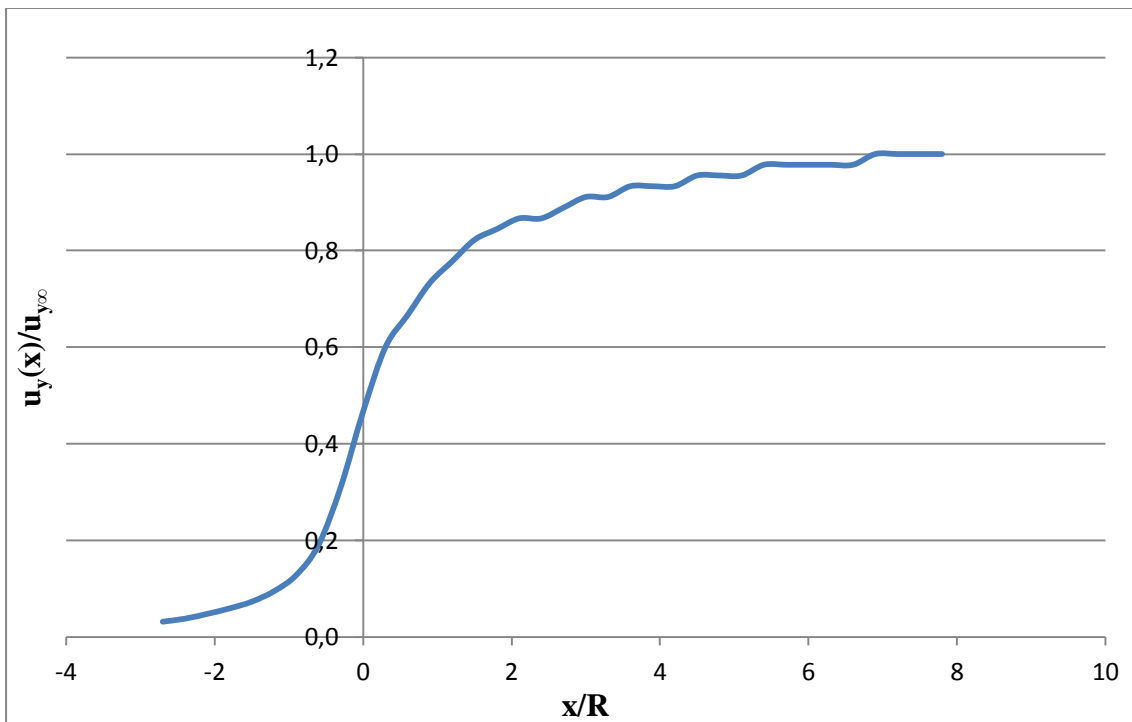
Σχήμα 5.34 Διάγραμμα u_y -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 3

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	$\frac{u_{yB}}{u_{y\infty B}}$
-13,5	-2,7	0,001413	0,03140
-12	-2,4	0,001692	0,03760
-10,5	-2,1	0,002140	0,04756
-9	-1,8	0,002649	0,05887
-7,5	-1,5	0,003277	0,07282
-6	-1,2	0,004255	0,09456
-4,5	-0,9	0,005766	0,12813
-3	-0,6	0,008577	0,19060
-1,5	-0,3	0,014000	0,31111
0	0	0,021000	0,46667
1,5	0,3	0,027000	0,60000
3	0,6	0,030000	0,66667
4,5	0,9	0,033000	0,73333
6	1,2	0,035000	0,77778
7,5	1,5	0,037000	0,82222
9	1,8	0,038000	0,84444
10,5	2,1	0,039000	0,86667
12	2,4	0,039000	0,86667
13,5	2,7	0,040000	0,88889
15	3	0,041000	0,91111
16,5	3,3	0,041000	0,91111
18	3,6	0,042000	0,93333
19,5	3,9	0,042000	0,93333
21	4,2	0,042000	0,93333
22,5	4,5	0,043000	0,95556
24	4,8	0,043000	0,95556
25,5	5,1	0,043000	0,95556
27	5,4	0,044000	0,97778
28,5	5,7	0,044000	0,97778
30	6	0,044000	0,97778
31,5	6,3	0,044000	0,97778
33	6,6	0,044000	0,97778
34,5	6,9	0,045000	1,00000
36	7,2	0,045000	1,00000
37,5	7,5	0,045000	1,00000
39	7,8	0,045000	1,00000

Πίνακας 5.12 Κατακόρυφες συγκλίσεις u_y στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 3



Σχήμα 5.35 Διάγραμμα κατακόρυφης σύγκλισης u_y στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 3

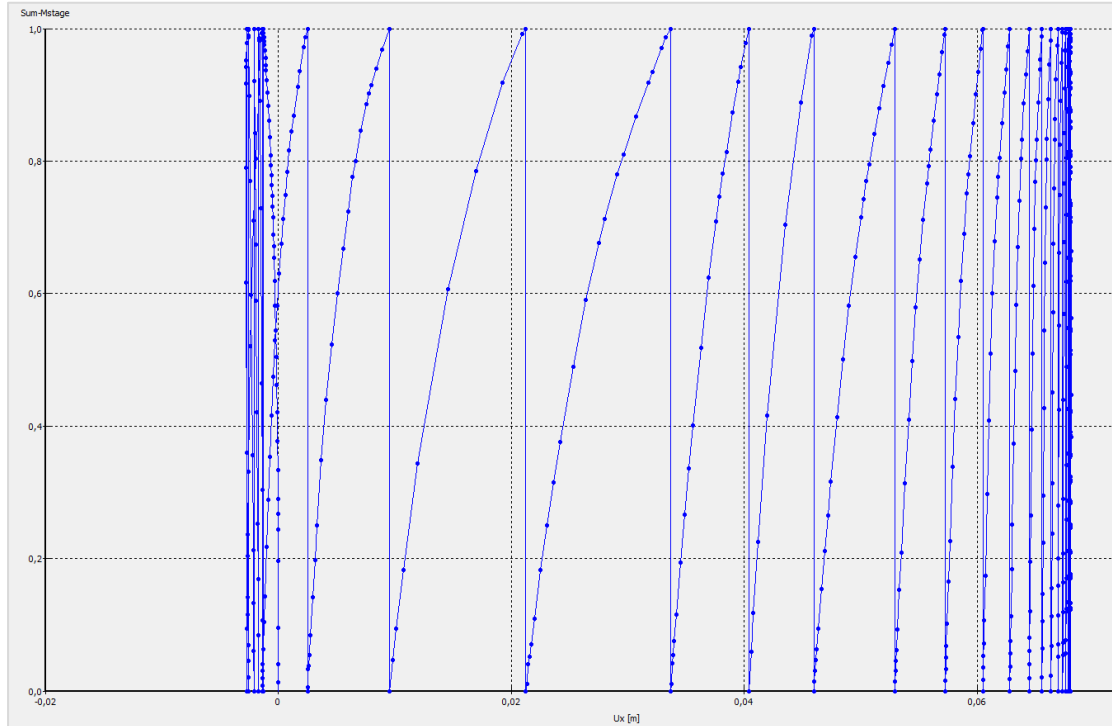


Σχήμα 5.36 Διάγραμμα του λόγου της σύγκλισης σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική $u_y(x)/u_{y,\infty}$ στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_0=0,8$ και Rock 3

5.2.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Β

5.2.2.1 $K_0=0,5$

❖ Rock 1

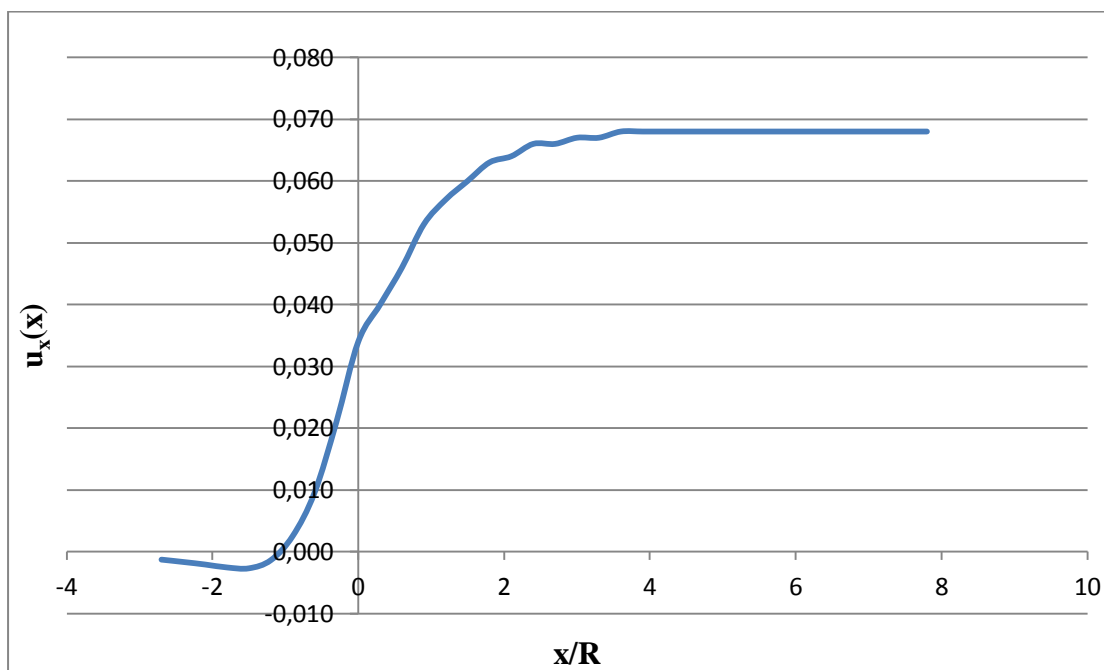


Σχήμα 5.37 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο Β για $k_0=0,5$ και Rock 1

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο Β u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο Β u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,009	-0,001292	-0,14111
-12	-2,4	0,012	-0,001675	-0,13958
-10,5	-2,1	0,016	-0,002086	-0,13038
-9	-1,8	0,021	-0,002562	-0,12200
-7,5	-1,5	0,029	-0,002699	-0,09307
-6	-1,2	0,041	-0,001384	-0,03376
-4,5	-0,9	0,059	0,002520	0,04271
-3	-0,6	0,081	0,009551	0,11791
-1,5	-0,3	0,103	0,021000	0,20388
0	0	0,121	0,034000	0,28099
1,5	0,3	0,133	0,040000	0,30075
3	0,6	0,143	0,046000	0,32168
4,5	0,9	0,155	0,053000	0,34194
6	1,2	0,164	0,057000	0,34756
7,5	1,5	0,171	0,060000	0,35088
9	1,8	0,178	0,063000	0,35393

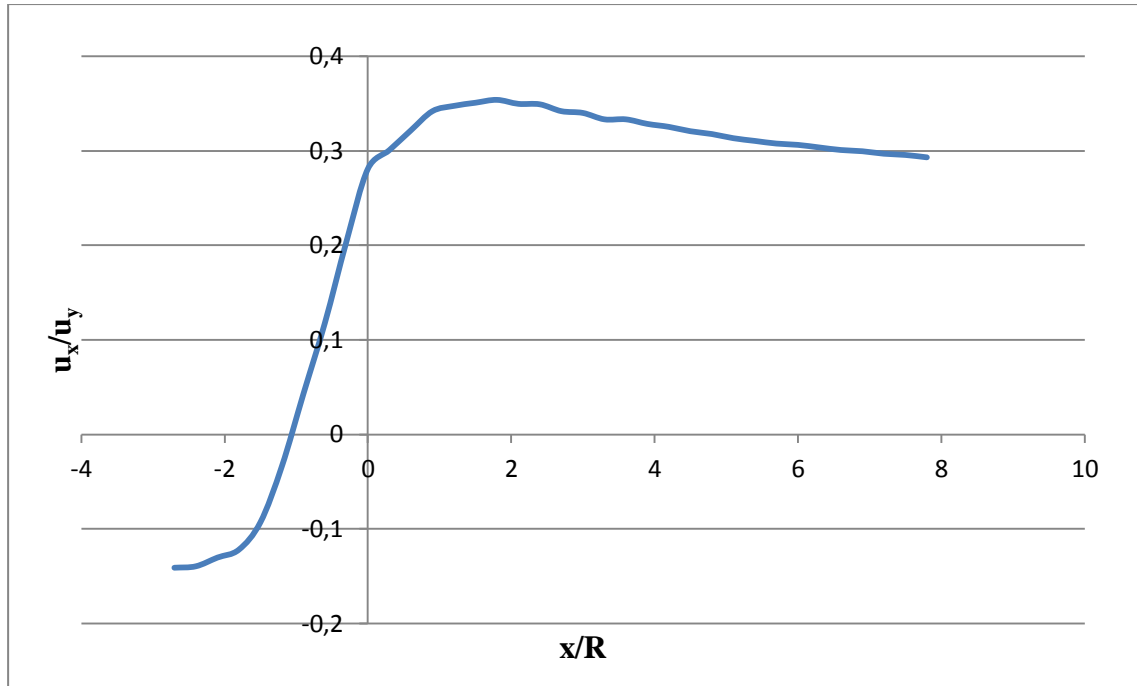
10,5	2,1	0,183	0,064000	0,34973
12	2,4	0,189	0,066000	0,34921
13,5	2,7	0,193	0,066000	0,34197
15	3	0,197	0,067000	0,34010
16,5	3,3	0,201	0,067000	0,33333
18	3,6	0,204	0,068000	0,33333
19,5	3,9	0,207	0,068000	0,32850
21	4,2	0,209	0,068000	0,32536
22,5	4,5	0,212	0,068000	0,32075
24	4,8	0,214	0,068000	0,31776
25,5	5,1	0,217	0,068000	0,31336
27	5,4	0,219	0,068000	0,31050
28,5	5,7	0,221	0,068000	0,30769
30	6	0,222	0,068000	0,30631
31,5	6,3	0,224	0,068000	0,30357
33	6,6	0,226	0,068000	0,30088
34,5	6,9	0,227	0,068000	0,29956
36	7,2	0,229	0,068000	0,29694
37,5	7,5	0,230	0,068000	0,29565
39	7,8	0,232	0,068000	0,29310

Πίνακας 5.13 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock I



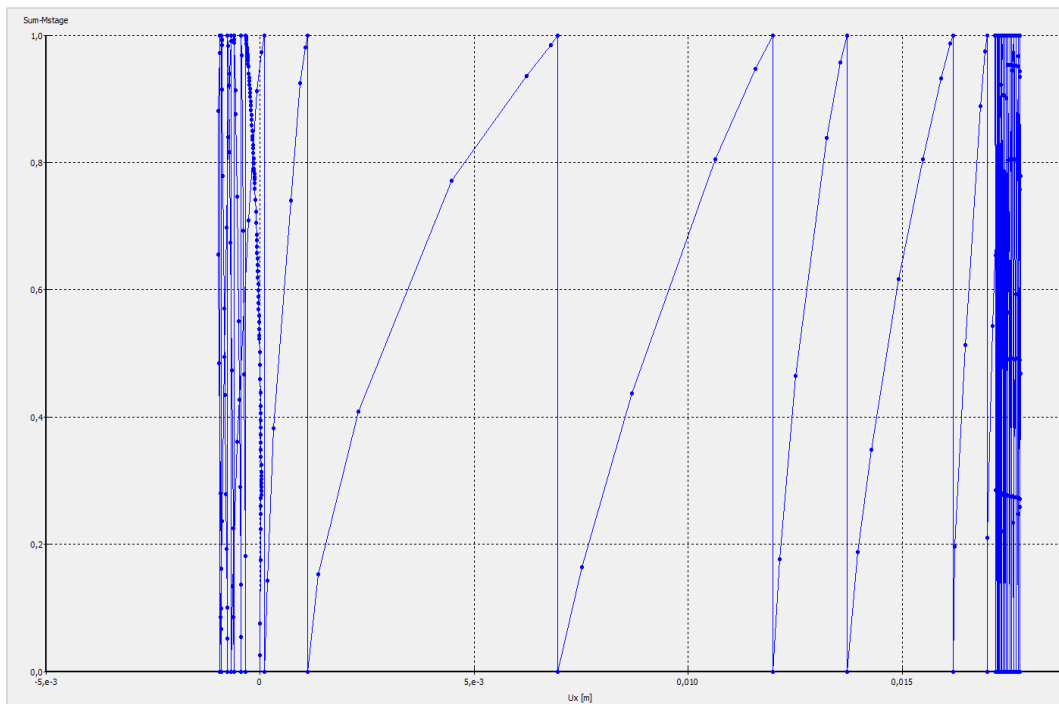
Σχήμα 5.38 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock I

Επιπλέον, παραθέτουμε και το διάγραμμα του λόγου των οριζόντιων μετακινήσεων προς τις κατακόρυφες συναρτήσει του λόγου x/R :



Σχήμα 5.39 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 1

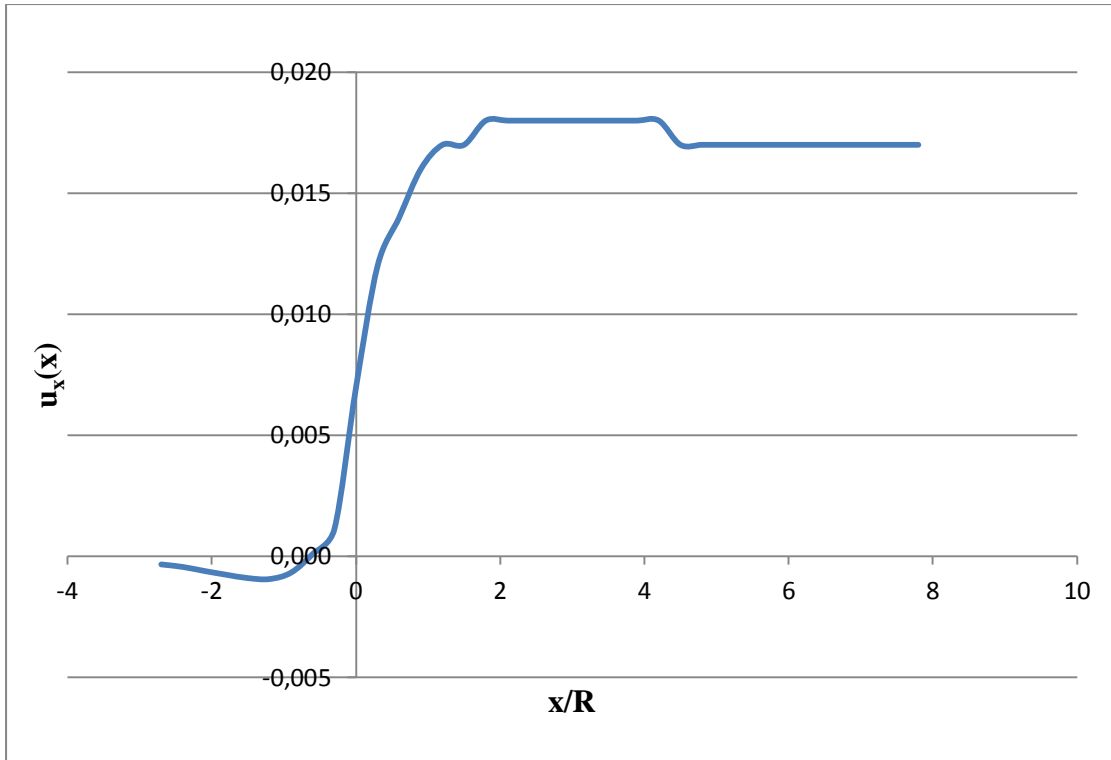
❖ **Rock 2**



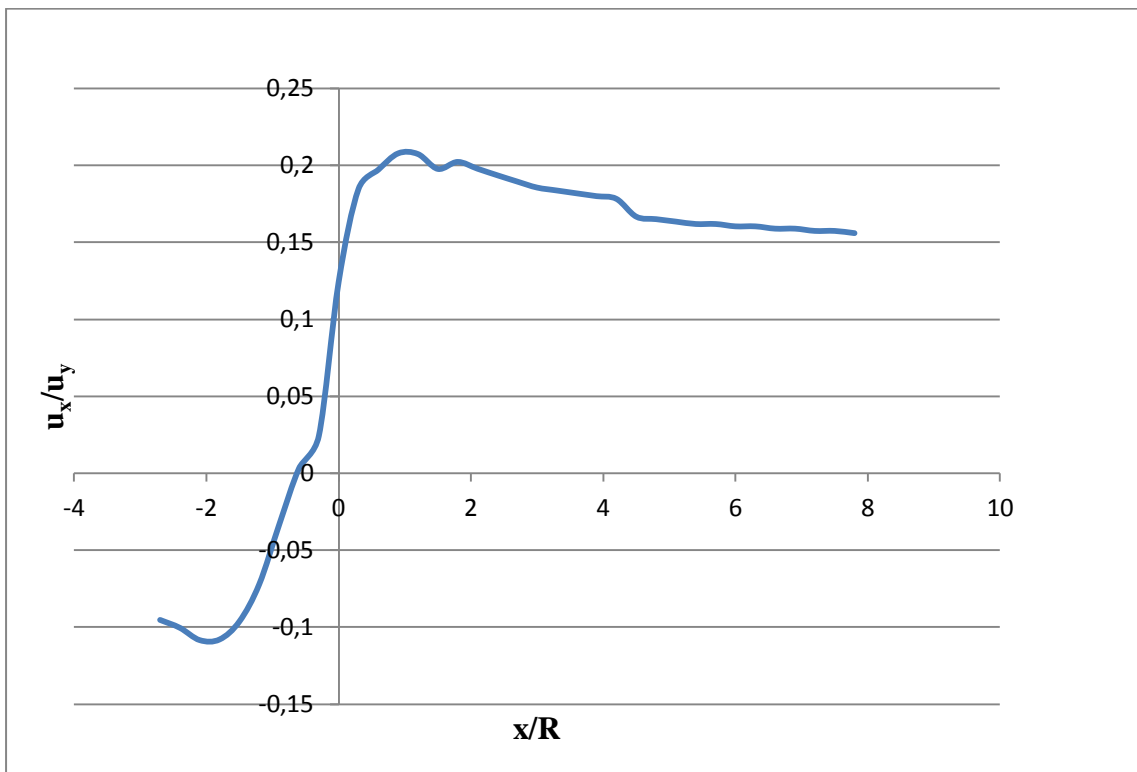
Σχήμα 5.40 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 2

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο B u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,003488	-0,000332	-0,09530
-12	-2,4	0,004343	-0,000436	-0,10044
-10,5	-2,1	0,005571	-0,000604	-0,10844
-9	-1,8	0,007013	-0,000757	-0,10799
-7,5	-1,5	0,009315	-0,000897	-0,09626
-6	-1,2	0,013000	-0,000937	-0,07206
-4,5	-0,9	0,020000	-0,000671	-0,03354
-3	-0,6	0,032000	0,000099	0,00310
-1,5	-0,3	0,046000	0,001112	0,02417
0	0	0,056000	0,006958	0,12425
1,5	0,3	0,065000	0,012000	0,18462
3	0,6	0,071000	0,014000	0,19718
4,5	0,9	0,077000	0,016000	0,20779
6	1,2	0,082000	0,017000	0,20732
7,5	1,5	0,086000	0,017000	0,19767
9	1,8	0,089000	0,018000	0,20225
10,5	2,1	0,091000	0,018000	0,19780
12	2,4	0,093000	0,018000	0,19355
13,5	2,7	0,095000	0,018000	0,18947
15	3	0,097000	0,018000	0,18557
16,5	3,3	0,098000	0,018000	0,18367
18	3,6	0,099000	0,018000	0,18182
19,5	3,9	0,100000	0,018000	0,18000
21	4,2	0,101000	0,018000	0,17822
22,5	4,5	0,102000	0,017000	0,16667
24	4,8	0,103000	0,017000	0,16505
25,5	5,1	0,104000	0,017000	0,16346
27	5,4	0,105000	0,017000	0,16190
28,5	5,7	0,105000	0,017000	0,16190
30	6	0,106000	0,017000	0,16038
31,5	6,3	0,106000	0,017000	0,16038
33	6,6	0,107000	0,017000	0,15888
34,5	6,9	0,107000	0,017000	0,15888
36	7,2	0,108000	0,017000	0,15741
37,5	7,5	0,108000	0,017000	0,15741
39	7,8	0,109000	0,017000	0,15596

Πίνακας 5.14 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 2

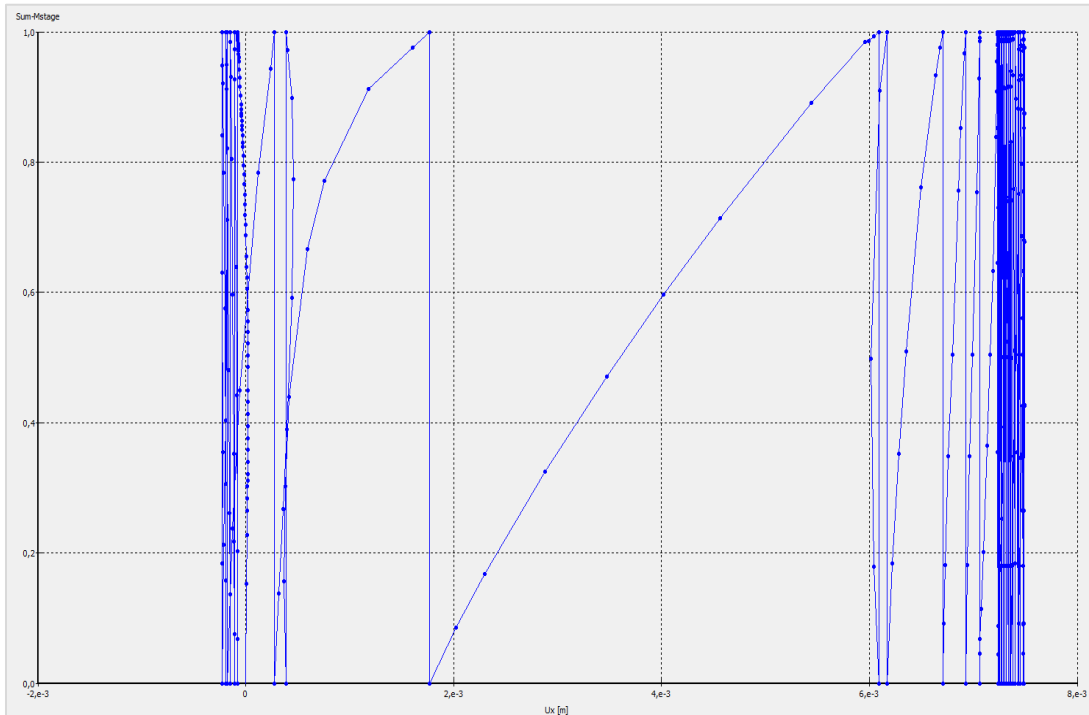


Σχήμα 5.41 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 2



Σχήμα 5.42 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 2

❖ Rock 3

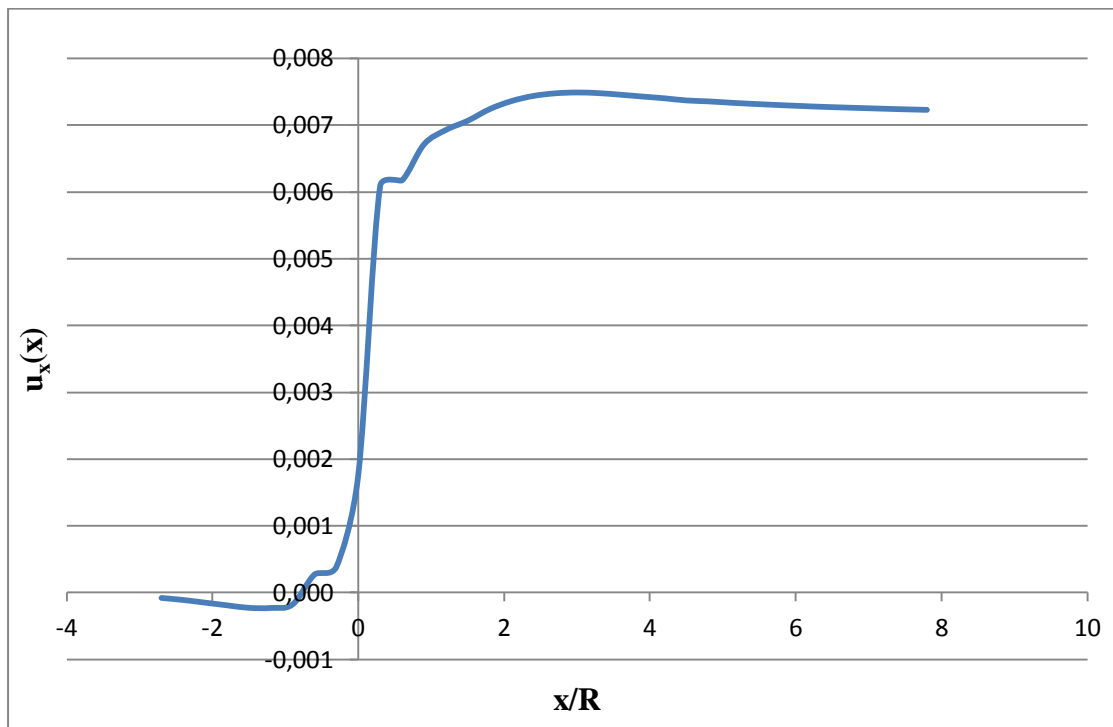


Σχήμα 5.43 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,5$ και Rock 3

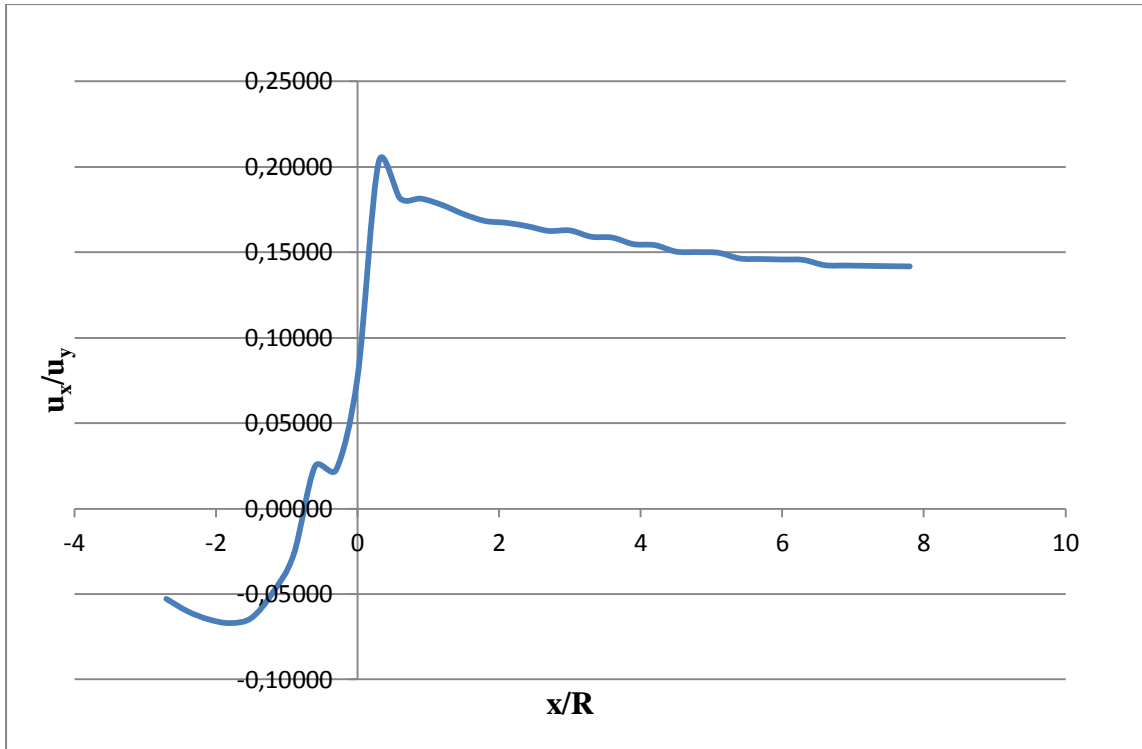
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο B u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,001496	-0,000079	-0,05283
-12	-2,4	0,001829	-0,000110	-0,06009
-10,5	-2,1	0,002309	-0,000150	-0,06483
-9	-1,8	0,002831	-0,000190	-0,06697
-7,5	-1,5	0,003551	-0,000227	-0,06398
-6	-1,2	0,004640	-0,000229	-0,04929
-4,5	-0,9	0,006594	-0,000175	-0,02657
-3	-0,6	0,011000	0,000272	0,02475
-1,5	-0,3	0,017000	0,000388	0,02284
0	0	0,023000	0,001768	0,07687
1,5	0,3	0,030000	0,006089	0,20297
3	0,6	0,034000	0,006173	0,18156
4,5	0,9	0,037000	0,006711	0,18138
6	1,2	0,039000	0,006927	0,17762
7,5	1,5	0,041000	0,007065	0,17232
9	1,8	0,043000	0,007239	0,16835
10,5	2,1	0,044000	0,007360	0,16727
12	2,4	0,045000	0,007437	0,16527
13,5	2,7	0,046000	0,007476	0,16252
15	3	0,046000	0,007489	0,16280

16,5	3,3	0,047000	0,007479	0,15913
18	3,6	0,047000	0,007455	0,15862
19,5	3,9	0,048000	0,007428	0,15475
21	4,2	0,048000	0,007402	0,15421
22,5	4,5	0,049000	0,007370	0,15041
24	4,8	0,049000	0,007356	0,15012
25,5	5,1	0,049000	0,007336	0,14971
27	5,4	0,050000	0,007319	0,14638
28,5	5,7	0,050000	0,007304	0,14608
30	6	0,050000	0,007290	0,14580
31,5	6,3	0,050000	0,007277	0,14554
33	6,6	0,051000	0,007266	0,14247
34,5	6,9	0,051000	0,007256	0,14227
36	7,2	0,051000	0,007246	0,14208
37,5	7,5	0,051000	0,007237	0,14190
39	7,8	0,051000	0,007229	0,14175

Πίνακας 5.15 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,5$ και $Rock\ 3$



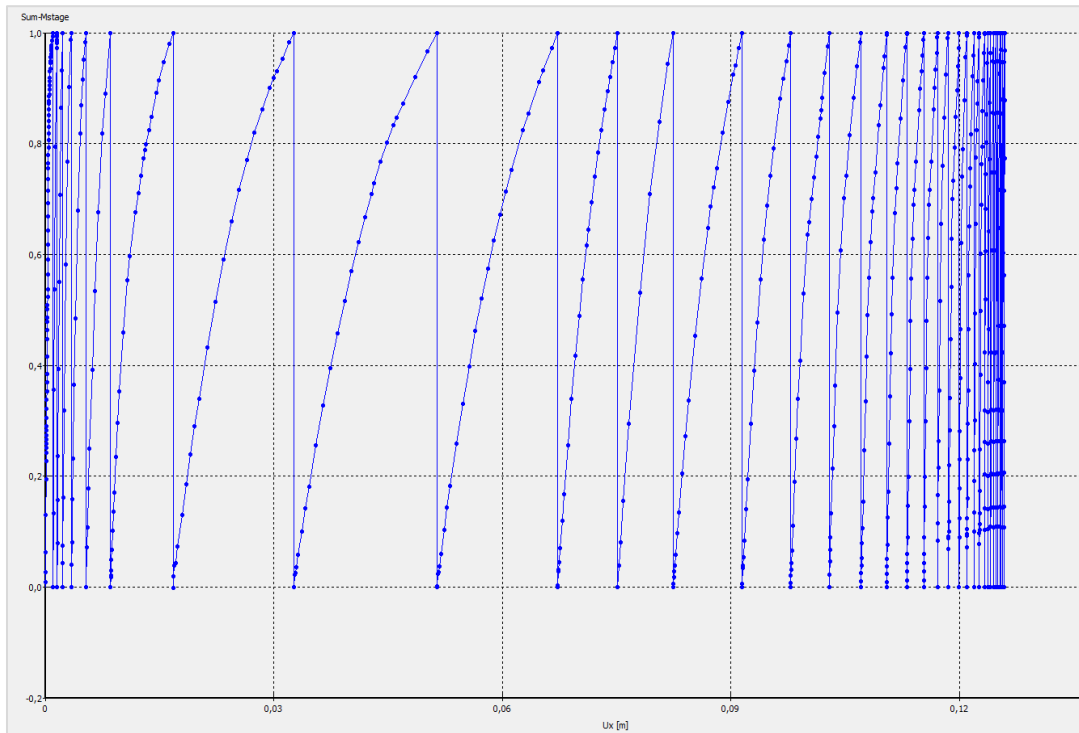
Σχήμα 5.44 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και $Rock\ 3$



Σχήμα 5.45 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,5$ και Rock 3

5.2.2.2 $Ko=0,8$

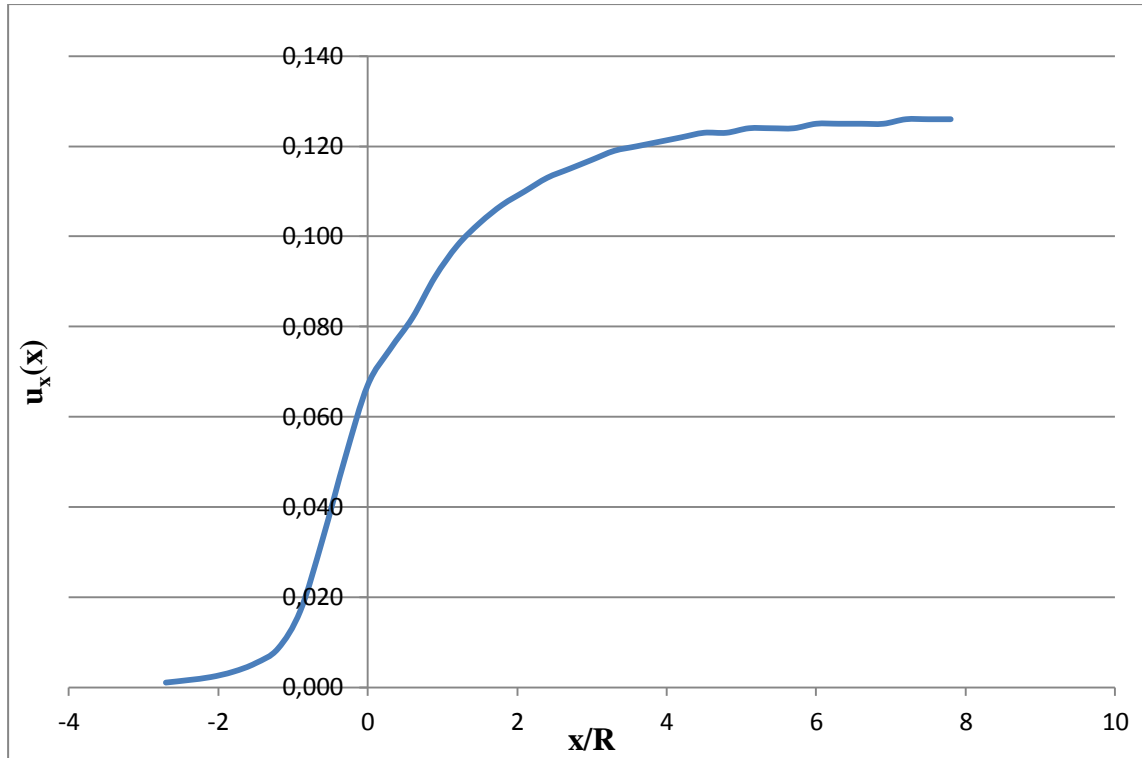
❖ Rock 1



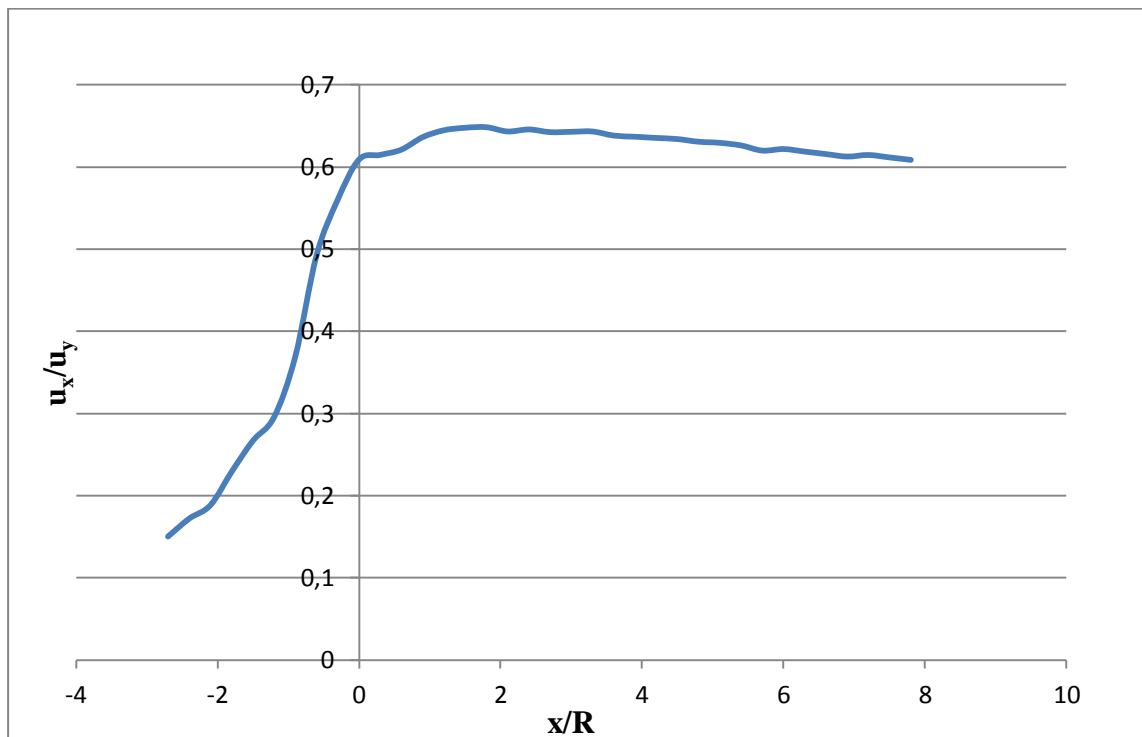
Σχήμα 5.46 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 1

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο B u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,007	0,001043	0,15027
-12	-2,4	0,009	0,001591	0,17209
-10,5	-2,1	0,012	0,002261	0,18842
-9	-1,8	0,015	0,003437	0,22913
-7,5	-1,5	0,020	0,005337	0,26685
-6	-1,2	0,029	0,008575	0,29569
-4,5	-0,9	0,046	0,017000	0,36957
-3	-0,6	0,067	0,033000	0,49254
-1,5	-0,3	0,091	0,051000	0,56044
0	0	0,110	0,067000	0,60909
1,5	0,3	0,122	0,075000	0,61475
3	0,6	0,132	0,082000	0,62121
4,5	0,9	0,143	0,091000	0,63636
6	1,2	0,152	0,098000	0,64474
7,5	1,5	0,159	0,103000	0,64780
9	1,8	0,165	0,107000	0,64848
10,5	2,1	0,171	0,110000	0,64327
12	2,4	0,175	0,113000	0,64571
13,5	2,7	0,179	0,115000	0,64246
15	3	0,182	0,117000	0,64286
16,5	3,3	0,185	0,119000	0,64324
18	3,6	0,188	0,120000	0,63830
19,5	3,9	0,190	0,121000	0,63684
21	4,2	0,192	0,122000	0,63542
22,5	4,5	0,194	0,123000	0,63402
24	4,8	0,195	0,123000	0,63077
25,5	5,1	0,197	0,124000	0,62944
27	5,4	0,198	0,124000	0,62626
28,5	5,7	0,200	0,124000	0,62000
30	6	0,201	0,125000	0,62189
31,5	6,3	0,202	0,125000	0,61881
33	6,6	0,203	0,125000	0,61576
34,5	6,9	0,204	0,125000	0,61275
36	7,2	0,205	0,126000	0,61463
37,5	7,5	0,206	0,126000	0,61165
39	7,8	0,207	0,126000	0,60870

Πίνακας 5.16 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock I

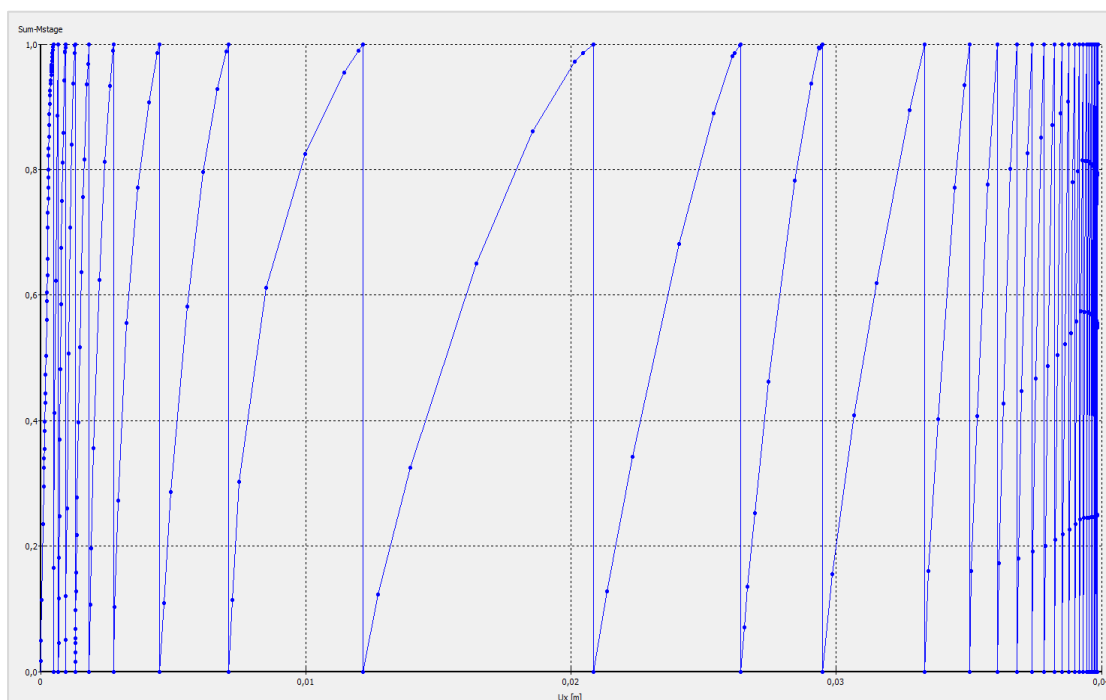


Σχήμα 5.47 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 1



Σχήμα 5.48 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 1

❖ Rock 2

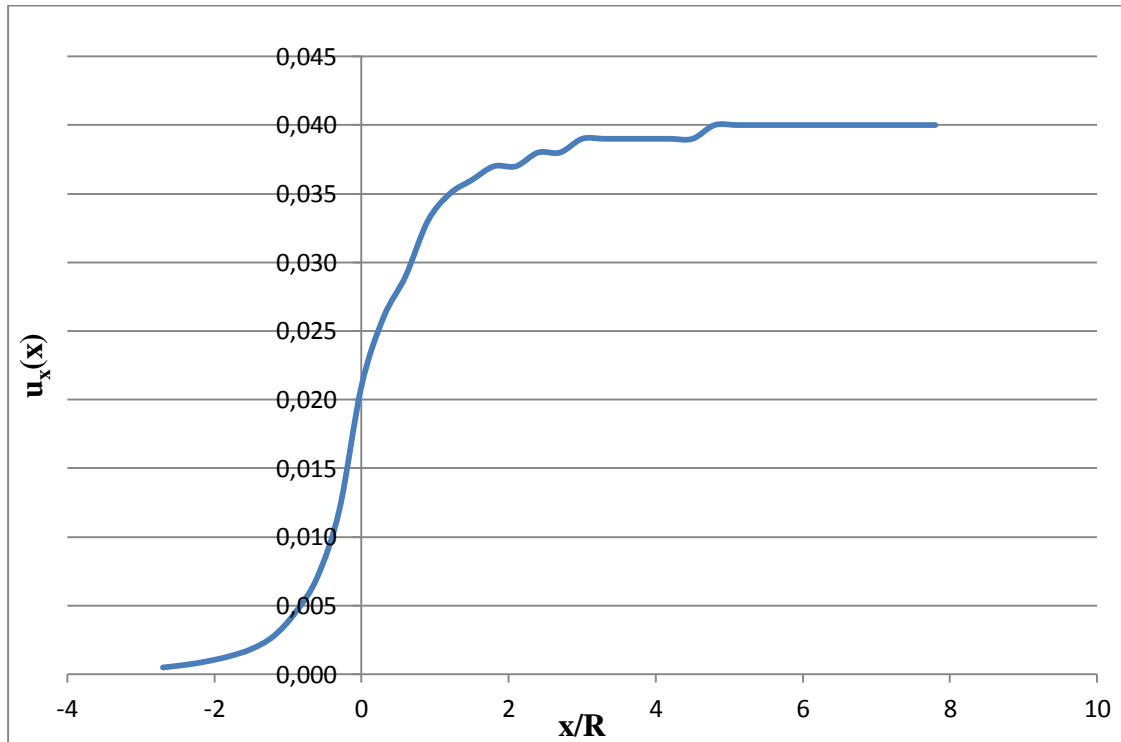


Σχήμα 5.49 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 2

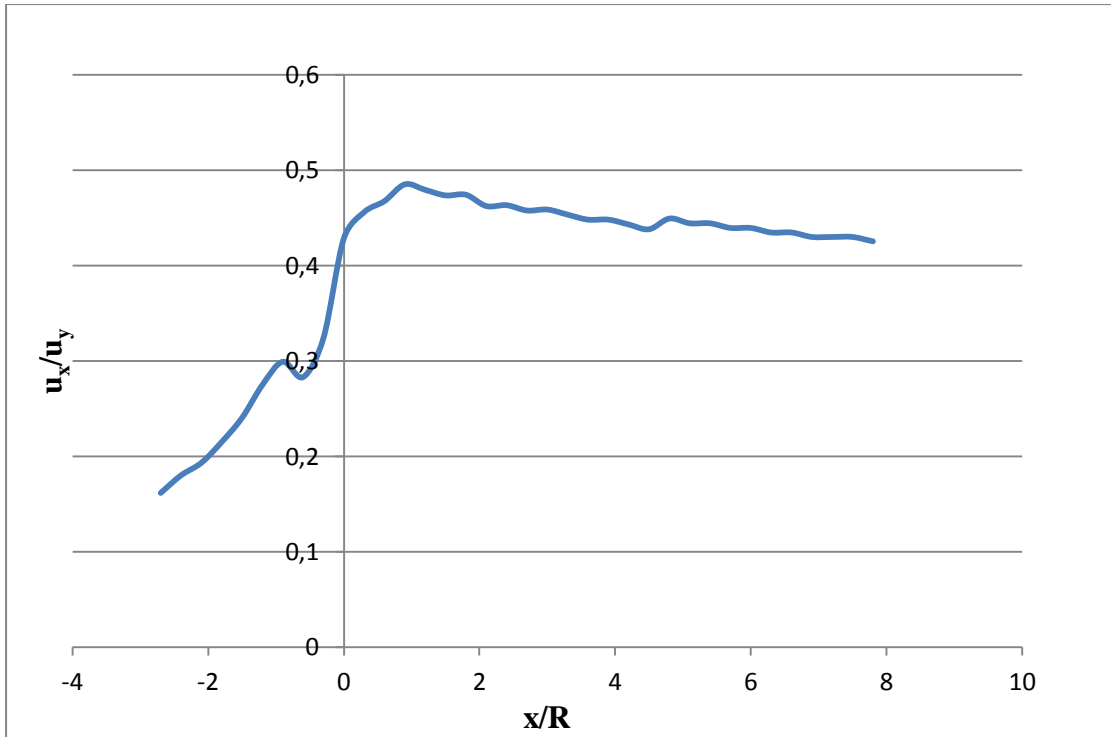
Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο B u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,003043	0,000493	0,16185
-12	-2,4	0,003758	0,000678	0,18028
-10,5	-2,1	0,004858	0,000940	0,19345
-9	-1,8	0,006053	0,001303	0,21527
-7,5	-1,5	0,007601	0,001829	0,24063
-6	-1,2	0,010000	0,002751	0,27510
-4,5	-0,9	0,015000	0,004490	0,29933
-3	-0,6	0,025000	0,007081	0,28324
-1,5	-0,3	0,037000	0,012000	0,32432
0	0	0,049000	0,021000	0,42857
1,5	0,3	0,057000	0,026000	0,45614
3	0,6	0,062000	0,029000	0,46774
4,5	0,9	0,068000	0,033000	0,48529
6	1,2	0,073000	0,035000	0,47945
7,5	1,5	0,076000	0,036000	0,47368
9	1,8	0,078000	0,037000	0,47436
10,5	2,1	0,080000	0,037000	0,46250
12	2,4	0,082000	0,038000	0,46341
13,5	2,7	0,083000	0,038000	0,45783
15	3	0,085000	0,039000	0,45882
16,5	3,3	0,086000	0,039000	0,45349

18	3,6	0,087000	0,039000	0,44828
19,5	3,9	0,087000	0,039000	0,44828
21	4,2	0,088000	0,039000	0,44318
22,5	4,5	0,089000	0,039000	0,43820
24	4,8	0,089000	0,040000	0,44944
25,5	5,1	0,090000	0,040000	0,44444
27	5,4	0,090000	0,040000	0,44444
28,5	5,7	0,091000	0,040000	0,43956
30	6	0,091000	0,040000	0,43956
31,5	6,3	0,092000	0,040000	0,43478
33	6,6	0,092000	0,040000	0,43478
34,5	6,9	0,093000	0,040000	0,43011
36	7,2	0,093000	0,040000	0,43011
37,5	7,5	0,093000	0,040000	0,43011
39	7,8	0,094000	0,040000	0,42553

Πίνακας 5.17 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 2

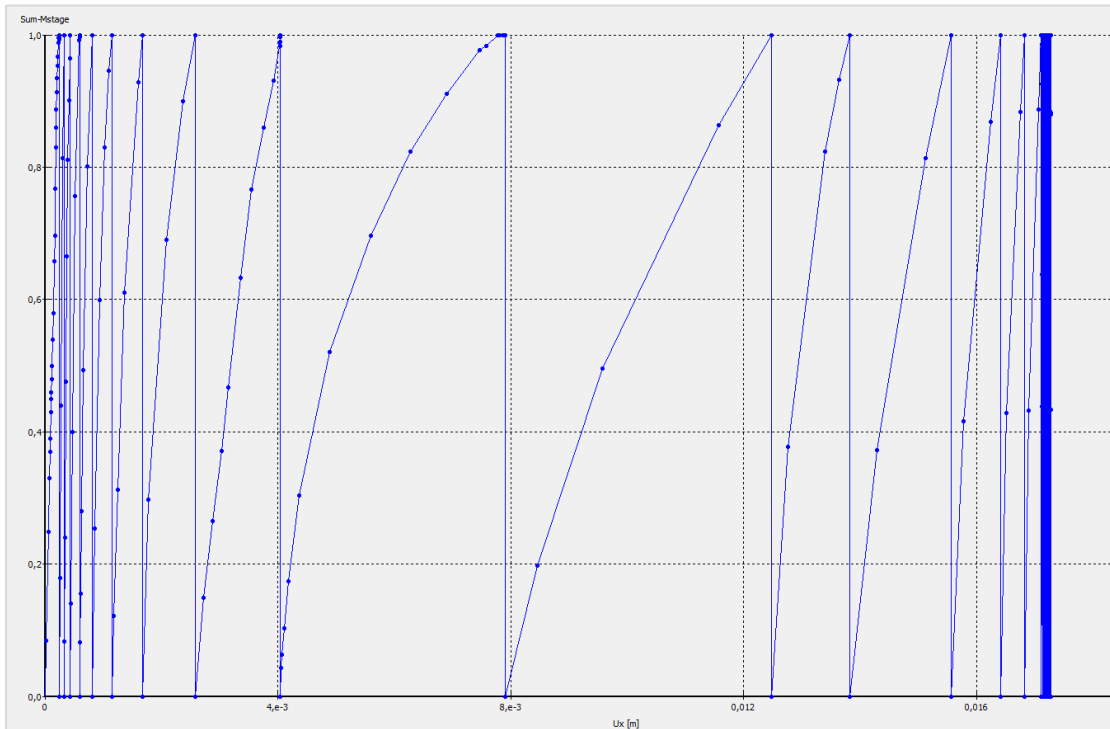


Σχήμα 5.50 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 2



Σχήμα 5.51 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 2

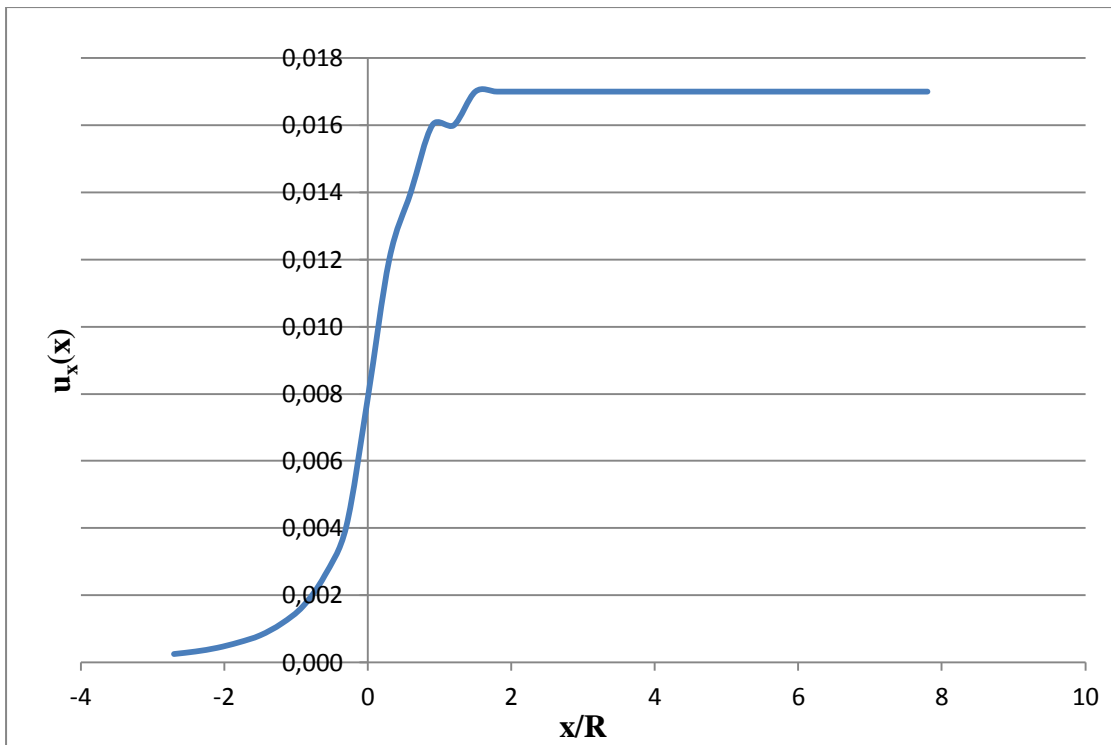
❖ **Rock 3**



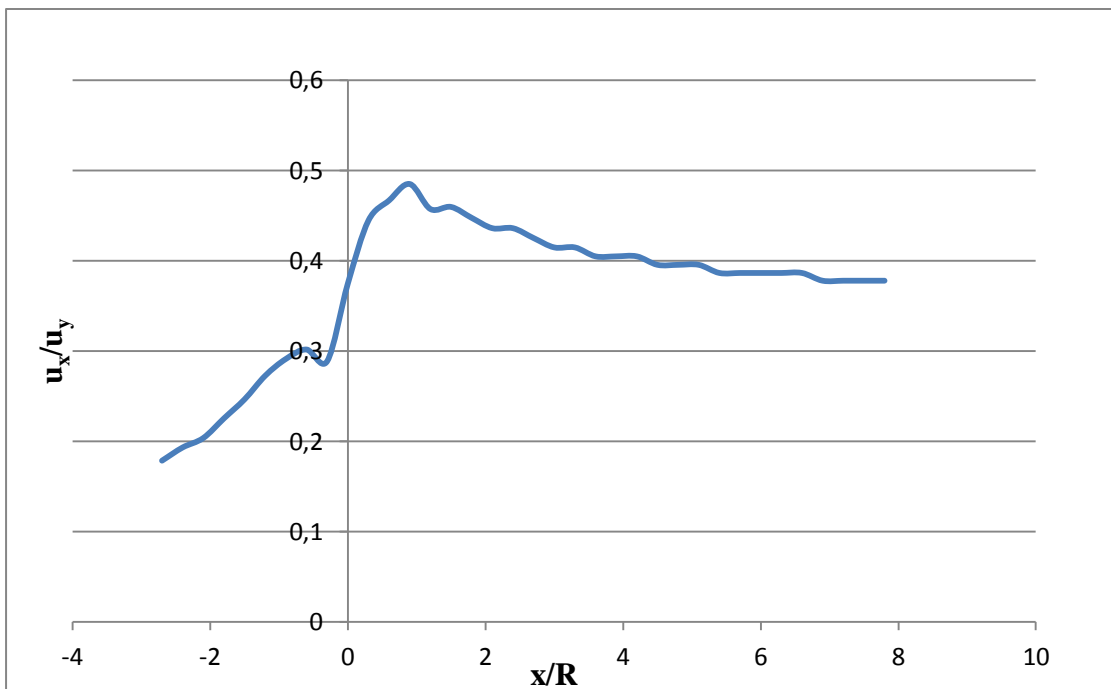
Σχήμα 5.52 Διάγραμμα u_x -SumMstage για το σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 3

Απόσταση x της διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	Κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο B u_{yB} (m)	Οριζόντια μετατόπιση στο σημείο B u_{xB} (m)	$\frac{u_{xB}}{u_{yB}}$
-13,5	-2,7	0,001413	0,000252	0,17856
-12	-2,4	0,001692	0,000327	0,19320
-10,5	-2,1	0,002140	0,000436	0,20364
-9	-1,8	0,002649	0,000597	0,22537
-7,5	-1,5	0,003277	0,000808	0,24648
-6	-1,2	0,004255	0,001160	0,27262
-4,5	-0,9	0,005766	0,001679	0,29119
-3	-0,6	0,008577	0,002587	0,30162
-1,5	-0,3	0,014000	0,004041	0,28864
0	0	0,021000	0,007864	0,37448
1,5	0,3	0,027000	0,012000	0,44444
3	0,6	0,030000	0,014000	0,46667
4,5	0,9	0,033000	0,016000	0,48485
6	1,2	0,035000	0,016000	0,45714
7,5	1,5	0,037000	0,017000	0,45946
9	1,8	0,038000	0,017000	0,44737
10,5	2,1	0,039000	0,017000	0,43590
12	2,4	0,039000	0,017000	0,43590
13,5	2,7	0,040000	0,017000	0,42500
15	3	0,041000	0,017000	0,41463
16,5	3,3	0,041000	0,017000	0,41463
18	3,6	0,042000	0,017000	0,40476
19,5	3,9	0,042000	0,017000	0,40476
21	4,2	0,042000	0,017000	0,40476
22,5	4,5	0,043000	0,017000	0,39535
24	4,8	0,043000	0,017000	0,39535
25,5	5,1	0,043000	0,017000	0,39535
27	5,4	0,044000	0,017000	0,38636
28,5	5,7	0,044000	0,017000	0,38636
30	6	0,044000	0,017000	0,38636
31,5	6,3	0,044000	0,017000	0,38636
33	6,6	0,044000	0,017000	0,38636
34,5	6,9	0,045000	0,017000	0,37778
36	7,2	0,045000	0,017000	0,37778
37,5	7,5	0,045000	0,017000	0,37778
39	7,8	0,045000	0,017000	0,37778

Πίνακας 5.18 Οριζόντιες συγκλίσεις u_x στο σημείο B για $k_o=0,8$ και Rock 3



Σχήμα 5.53 Διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης u_x στο σημείο B συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 3



Σχήμα 5.54 Διάγραμμα του λόγου της οριζόντιας σύγκλισης u_x προς την κατακόρυφη u_y στο σημείο B, συναρτήσει του λόγου x/R για $k_o=0,8$ και Rock 3

5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ

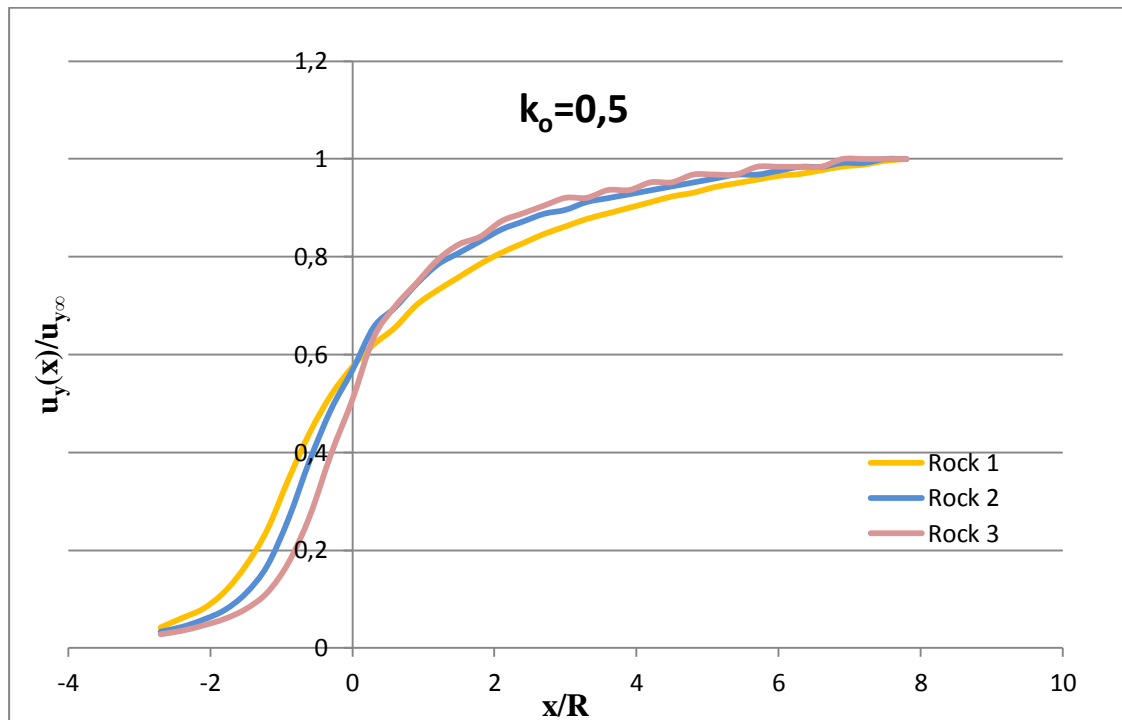
Όπως έγινε φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα, η διαφοροποίηση των γεωτεχνικών παραμέτρων (GSI , m_i , σ_{ci}) καθώς και του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων k_o οδηγεί σε διαφοροποίηση των τιμών των συγκλίσεων, οριζόντιων ή κατακόρυφων. Για αυτό το λόγο θα ακολουθήσει σύγκριση των διαγραμμάτων, ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του εδάφους σε συνδυασμό με την προσωρινή υποστήριξη, ανάλογα με την ποιότητα του εδάφους.

- **Κατακόρυφες συγκλίσεις**

✓ Σημείο A:

Θεωρώντας σταθερό τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων προκύπτει:

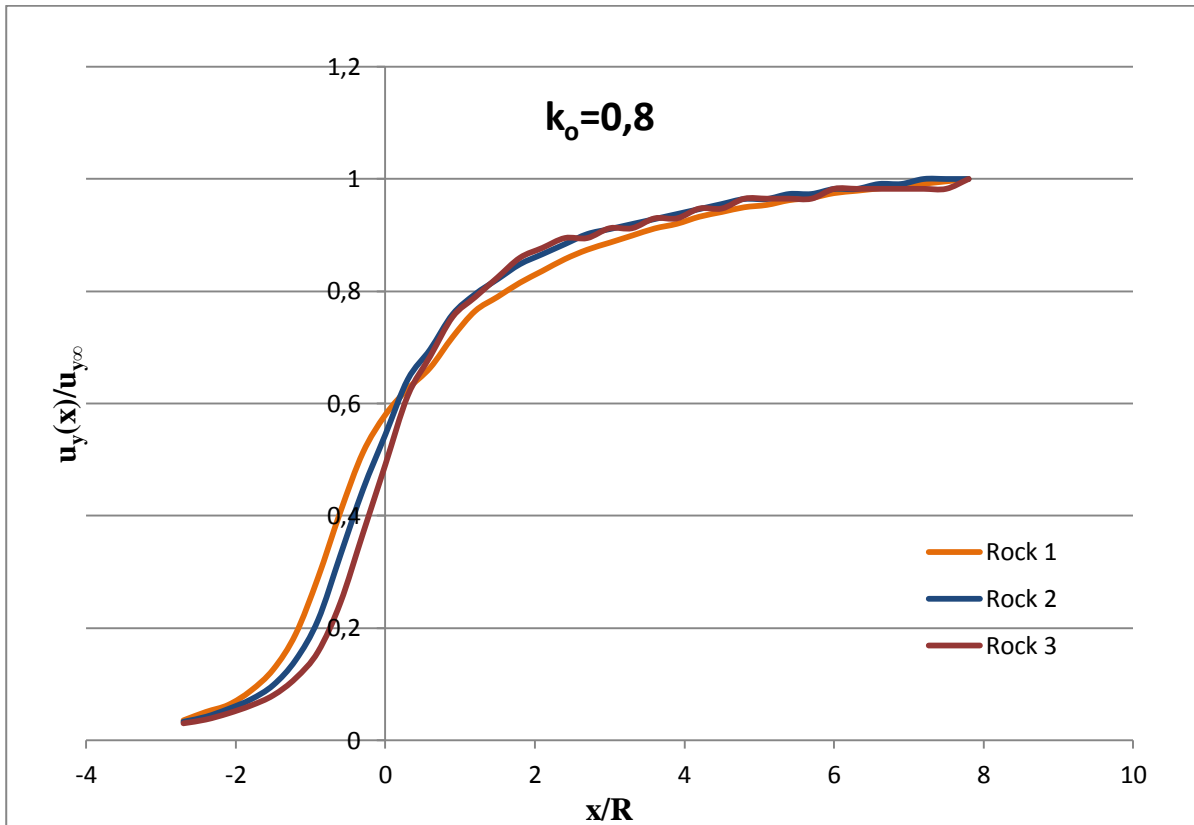
➤ για $k_o=0,5$:



Σχήμα 5.55 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y,\infty}$ για $k_o=0,5$ για το σημείο A

Παρατηρούμε ότι ο λόγος της σύγκλισης προς την τελική στο μέτωπο, δηλαδή για $x/R=0$, είναι αρκετά μικρότερος για την καλύτερη ποιότητα εδάφους Rock 3. Συγκεκριμένα, ενώ για Rock 3 το ποσοστό της τελικής σύγκλισης που έχει συμβεί στο μέτωπο είναι περίπου 50%, για τις βραχώμαζες χαμηλότερης αντοχής περίπου 58%.

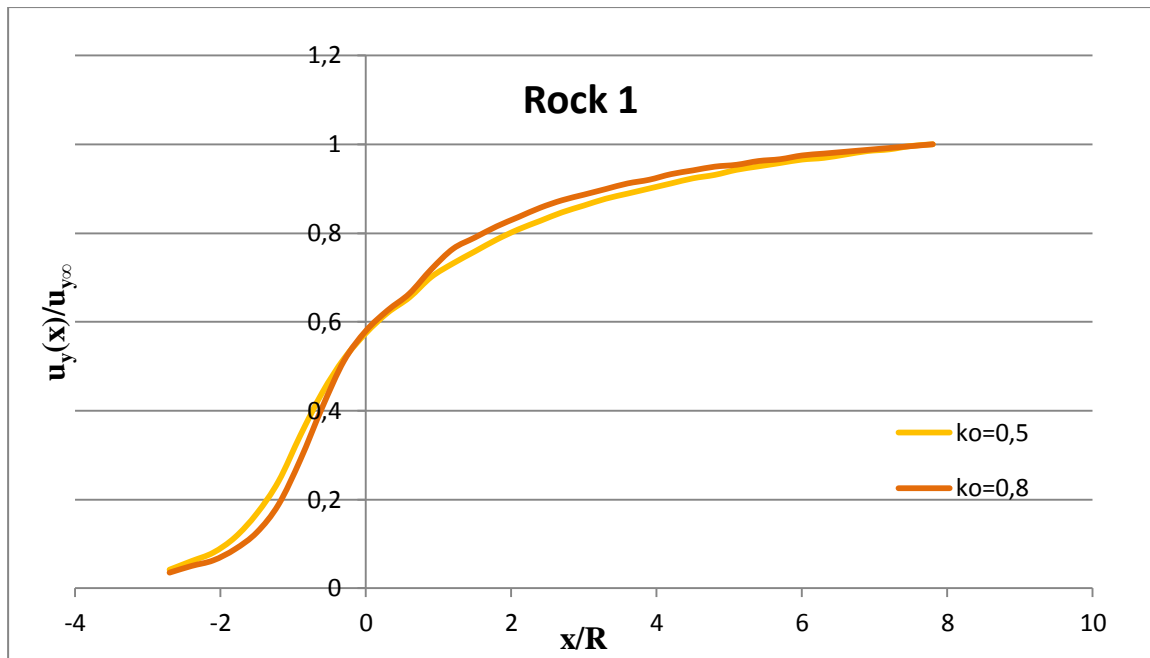
➤ για $k_o=0,8$:



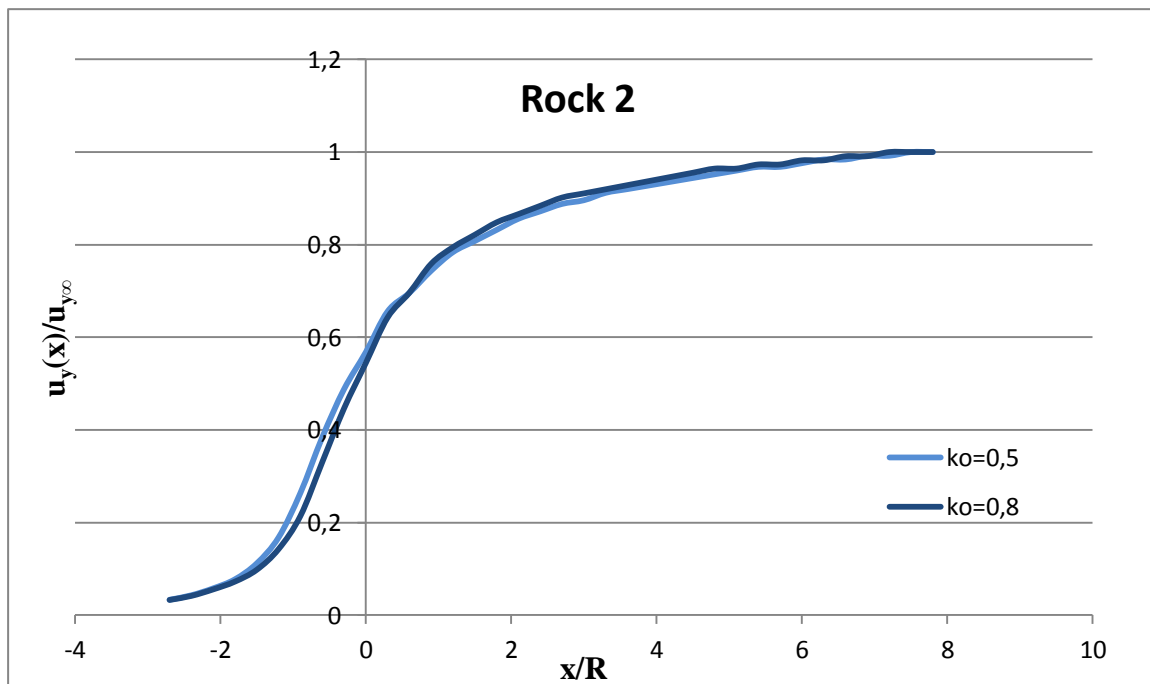
Σχήμα 5.56 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για $k_o=0,8$ για το σημείο A

Ομοίως, παρατηρούμε ότι και για $k_o=0,8$ ο λόγος της σύγκλισης στο μέτωπο προς την τελική σύγκλιση είναι μικρότερος για την καλύτερη ποιότητα βραχώμαζας, ενώ όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας και η αντοχή της, τόσο αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, ο λόγος αυτός.

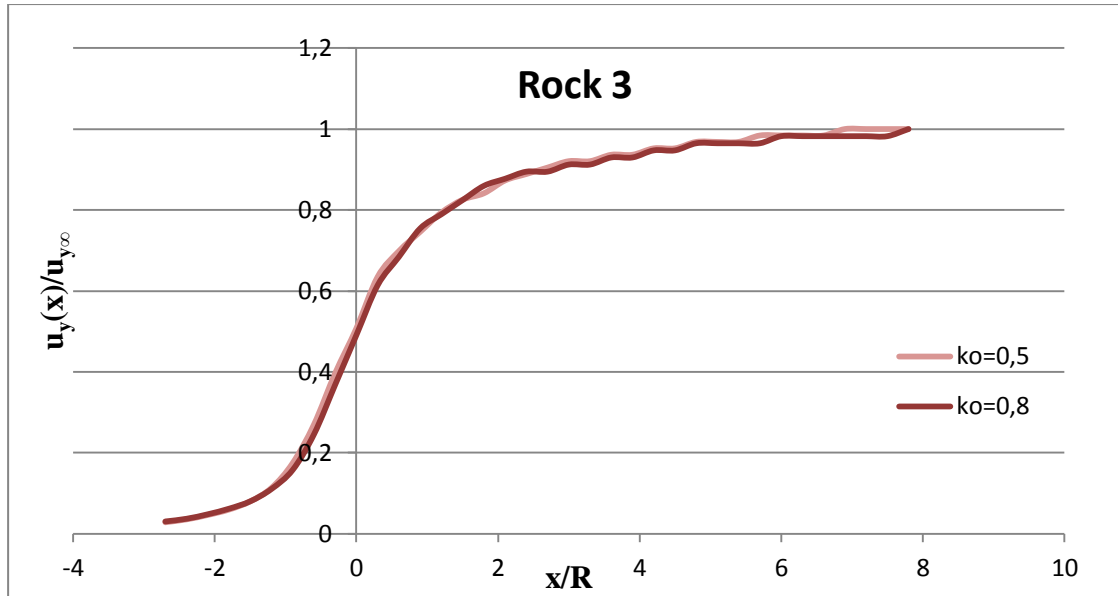
Προκειμένου να γίνει φανερή η επιρροή του συντελεστή k_o στην τιμή του λόγου $u_y(x)/u_{y\infty}$, γίνεται στη συνέχεια η σύγκριση των διαγραμμάτων συγκλίσεων, για κάθε ποιότητα βραχώμαζας, με διαφοροποίηση μόνο του k_o .



Σχήμα 5.57 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για βραχόμαζα Rock 1 για το σημείο A



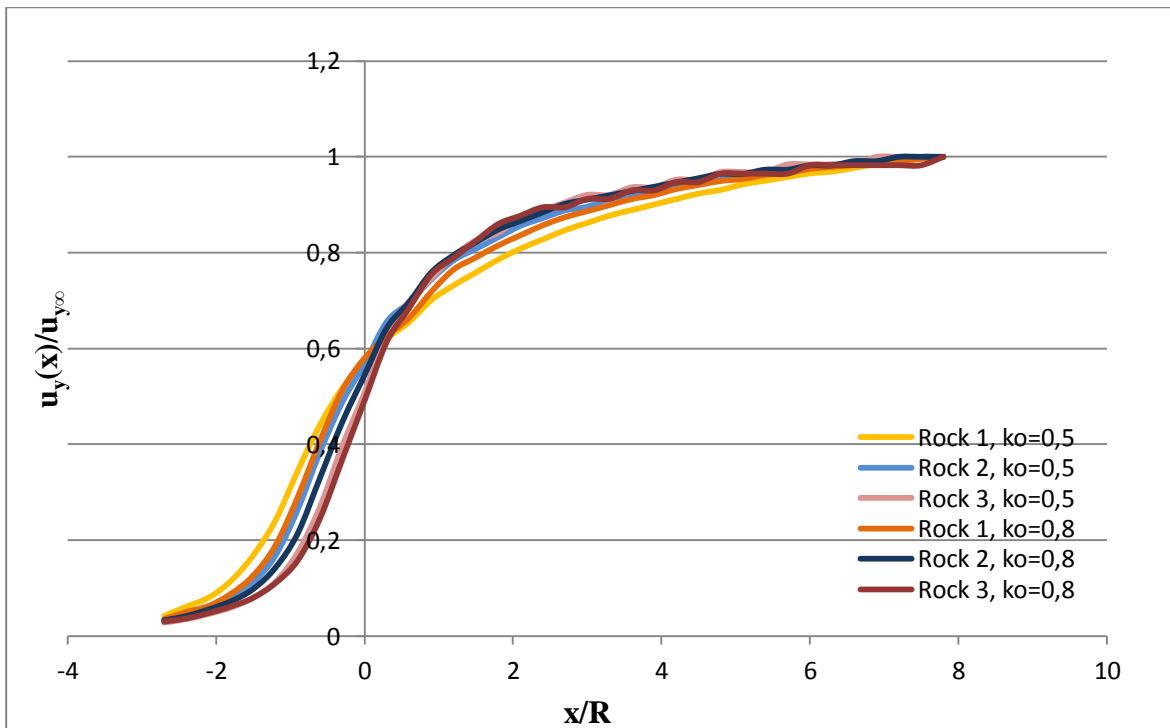
Σχήμα 5.58 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για βραχόμαζα Rock 2 για το σημείο A



Σχήμα 5.59 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για βραχώμαζα Rock 3 για το σημείο A

Παρατηρούμε ότι και για τις 3 ποιότητες βραχώμαζας, η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων από 0,5 σε 0,8 επηρεάζει ελάχιστα την τιμή του λόγου της σύγκλισης στο μέτωπο προς την τελική. Συγκεκριμένα, προκαλεί πολύ μικρή μείωση του λόγου για τις Rock 2 και Rock 3, και μια πολύ μικρή αύξηση για τη χειρότερη ποιότητα βραχώμαζας Rock 1.

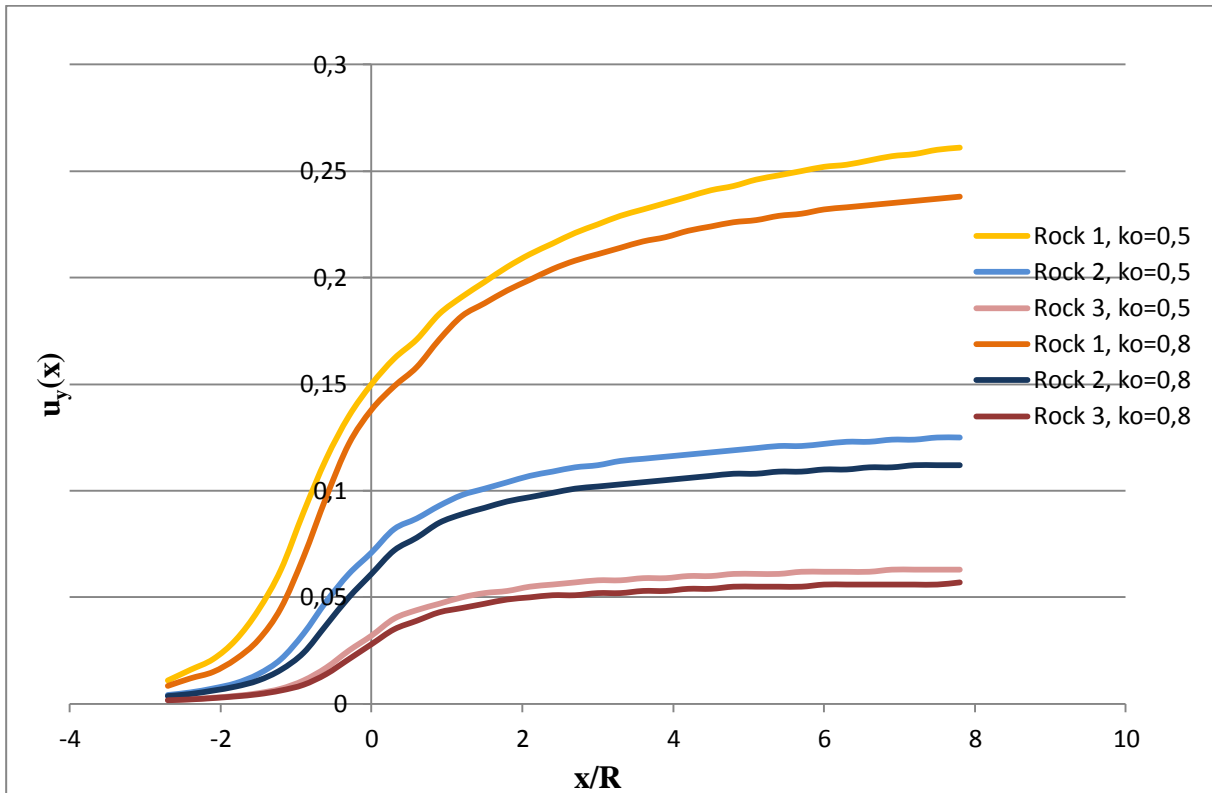
Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω διαγράμματα έχουμε:



Σχήμα 5.60 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για το σημείο A

Στο διάγραμμα 5.54, παρατηρούμε ότι ο λόγος $u_y/u_{y\infty}$ στο μέτωπο λαμβάνει τη μικρότερη τιμή του για Rock 3 και $k_o=0,8$ και τη μεγαλύτερη τιμή του για Rock 1 και $k_o=0,8$.

Παρατίθενται, επίσης, τα διαγράμματα κατακόρυφων μετακινήσεων συναρτήσει του λόγου x/R , για όλους τους συνδυασμούς τύπου εδάφους και συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων:

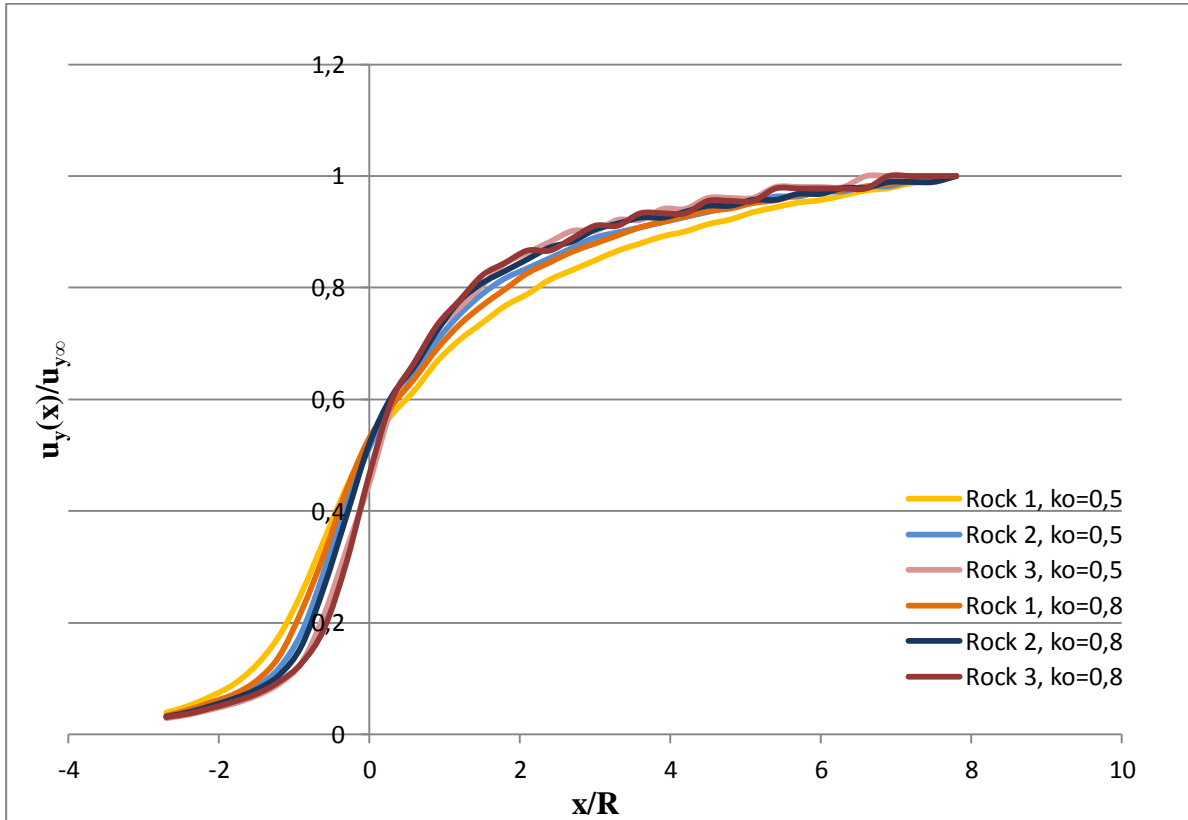


Σχήμα 5.61 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων μετακινήσεων u_y για το σημείο A

Η μεγαλύτερη τελική σύγκλιση σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο παρατηρείται για την χειρότερη περίπτωση βραχώμαζας Rock 1 και για $k_o=0,5$ και φτάνει τα 261mm. Όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας, τόσο μειώνονται οι κατακόρυφες συγκλίσεις, ενώ η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων προκαλεί μια μικρή μείωση στις συγκλίσεις.

✓ Σημείο B

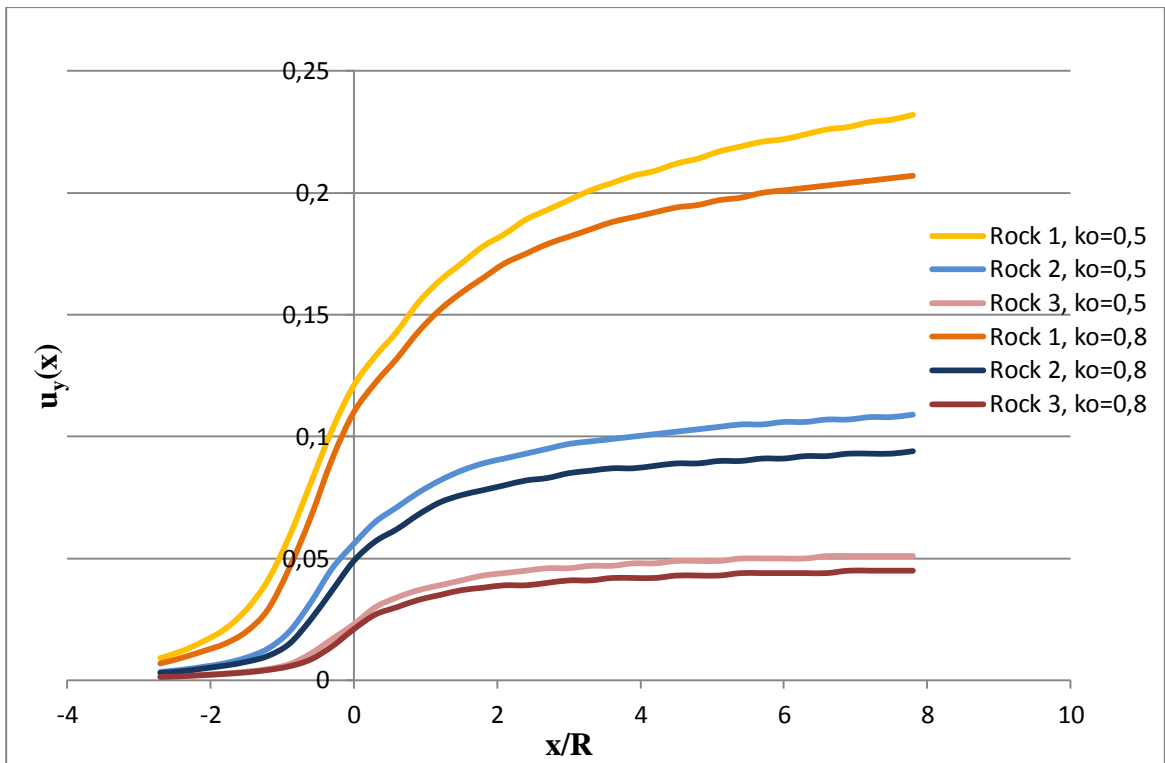
Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι κατακόρυφες μετακινήσεις στο σημείο B. Η μοναδική διαφορά είναι ότι οι τιμές των συγκλίσεων είναι σχετικά μικρότερες από τις αντίστοιχες της στέψης. Παραθέτουμε, επομένως, μόνο το συγκεντρωτικό διάγραμμα $u_y(x)/u_{y\infty} - x/R$ για όλους τους τύπους εδαφών:



Σχήμα 5.62 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων $u_y(x)/u_{y\infty}$ για το σημείο B

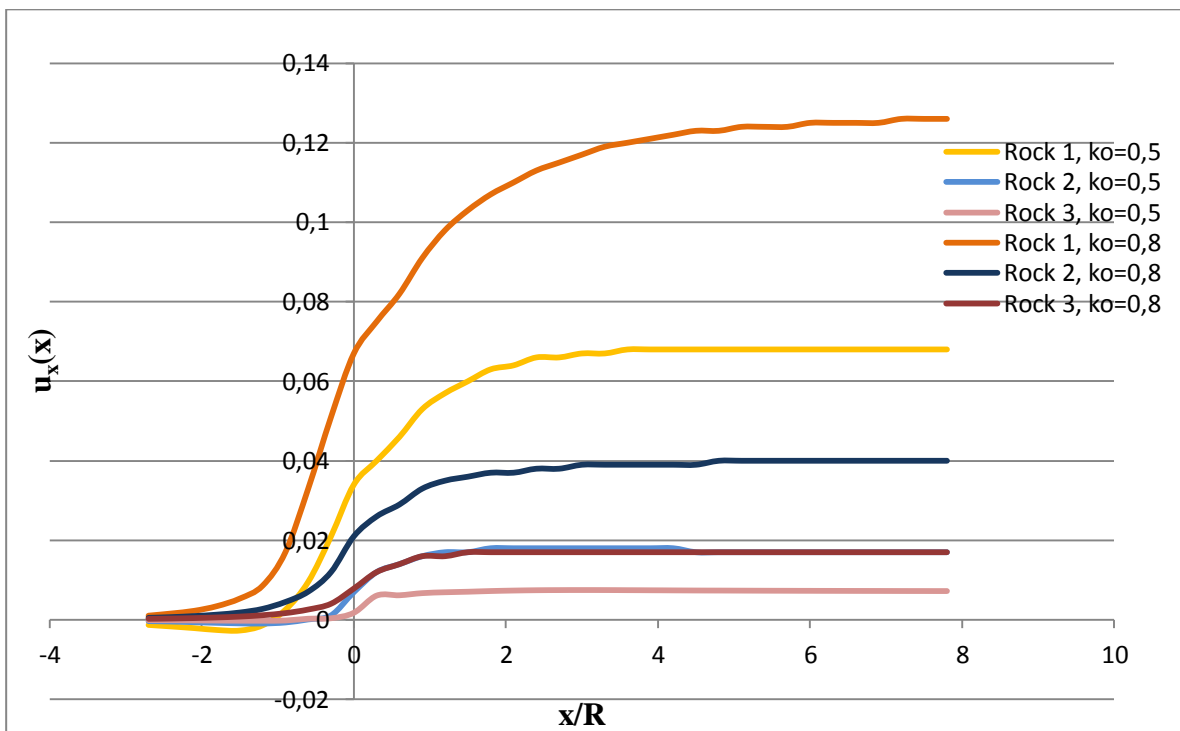
Για $x/R=0$, η τιμή του λόγου $u_y(x)/u_{y\infty}$ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για Rock 1 και $k_0=0,8$, και την ελάχιστη για Rock 3 και $k_0=0,5$.

Στο σχήμα 5.63 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις στο B συναρτήσει του λόγου x/R . Όπως και στη στέψη, η μεγαλύτερη τιμή της σύγκλισης προκύπτει για Rock 1 και $k_0=0,5$ και φτάνει τα 232mm.

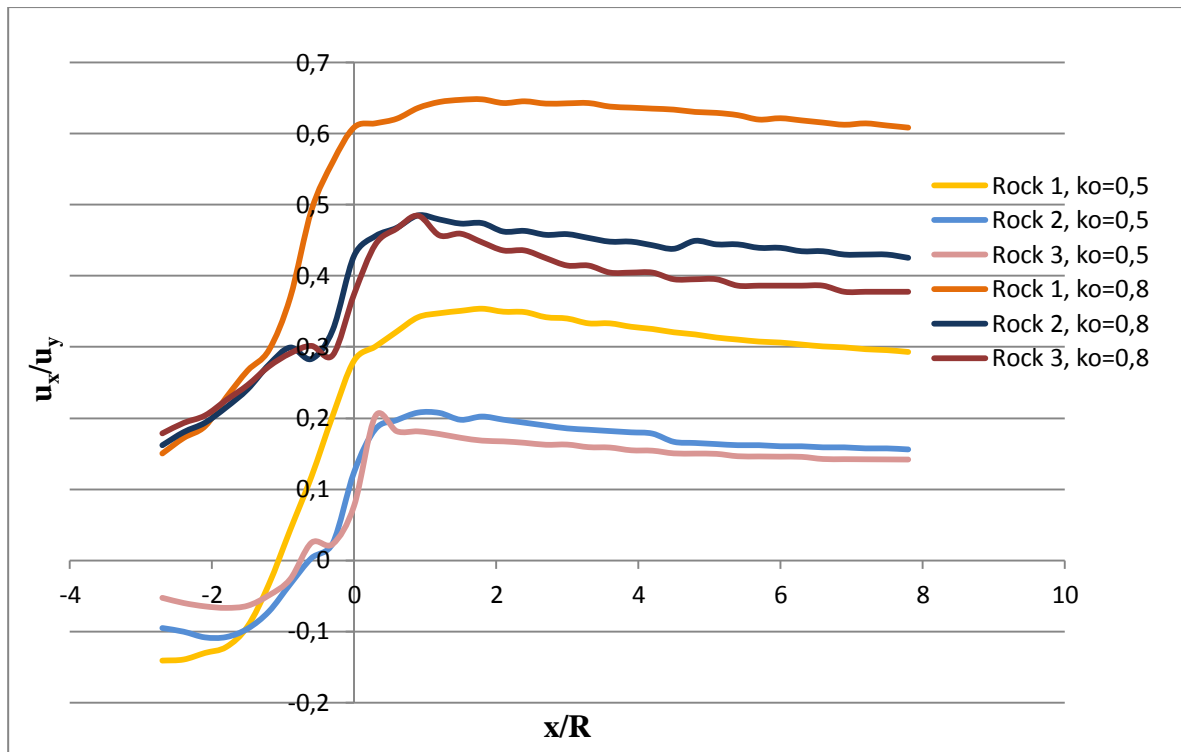


Σχήμα 5.63 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων μετακινήσεων u_y για το σημείο B

• Οριζόντιες συγκλίσεις



Σχήμα 5.64 Σύγκριση διαγραμμάτων οριζόντιων μετακινήσεων u_x για το σημείο B



Σχήμα 5.65 Σύγκριση διαγραμμάτων λόγου μετακινήσεων u_x/u_y για το σημείο B

Στα διαγράμματα 5.64 και 5.65 συγκρίνονται οι καμπύλες οριζόντιων συγκλίσεων $u_x(x)$ συναρτήσεως του λόγου x/R για κάθε τύπο εδάφους και του λόγου των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες μετακινήσεις $u_x(x)/u_y(x)$ συναρτήσεως του x/R , αντίστοιχα, για το σημείο B. Σε αντίθεση με τις κατακόρυφες μετακινήσεις, οι οριζόντιες επηρεάζονται αρκετά από την τιμή του συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του k_0 από 0,5 σε 0,8 προκαλεί σημαντική αύξηση στην τιμή της οριζόντιας σύγκλισης για κάθε ποιότητα βραχώμαζας. Μάλιστα, όσο ασθενέστερη είναι η βραχώμαζα, τόσο περισσότερο επηρεάζεται από την αλλαγή του συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων. Επίσης, όπως ακριβώς και στις κατακόρυφες μετακινήσεις, η μείωση των γεωτεχνικών παραμέτρων GSI, m_i και σ_{ci} , για σταθερό k_0 επιφέρει αύξηση στις οριζόντιες συγκλίσεις. Όσο αυξάνεται η αντοχή της βραχώμαζας, τόσο οι μετακινήσεις σταθεροποιούνται σε μικρότερη απόσταση πίσω από το μέτωπο, δηλαδή δεν χρειάζεται να προχωρήσει πολύ το μέτωπο για να λάβουν την τελική τιμή τους. Παρατηρούμε ότι για $k_0=0,5$ όταν η διατομή που εξετάζουμε βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο, οι οριζόντιες συγκλίσεις λαμβάνουν αρνητική τιμή. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι θετικές τιμές έχουν οι μετακινήσεις προς το εσωτερικό της σήραγγας, στην περίπτωση αυτή, εμφανίζονται μετακινήσεις πολύ μικρού μεγέθους προς τα έξω. Η αύξηση του k_0 επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και το λόγο u_x/u_y . Η τιμή του λόγου στο μέτωπο για $k_0=0,8$ ξεπερνάει το διπλάσιο της αντίστοιχης τιμής για $k_0=0,5$. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε ότι για σταθερές γεωτεχνικές παραμέτρους η αύξηση του συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων προκάλεσε αύξηση στις οριζόντιες μετακινήσεις και μικρή μείωση στις κατακόρυφες.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΕΨΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν μέσω του Plaxis, με τις θεωρητικά αναμενόμενες συγκλίσεις υπολογίστηκαν οι θεωρητικές καμπύλες Chern και Panet. Αυτές οι καμπύλες, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, προσδιορίζουν τη σχέση του λόγου $u_R(x)/u_{R\infty}$ της κατακόρυφης σύγκλισης στη στέψη της σήραγγας σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική σύγκλιση σε μεγάλη απόσταση πίσω από το μέτωπο, σε σχέση με το λόγο x/R .

5.4.1 ΚΑΜΠΥΛΗ CHERN

Θεωρώντας ότι μπροστά από το μέτωπο $x < 0$, ενώ πίσω από το μέτωπο $x > 0$, ισχύει η σχέση:

$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = \left[1 + \exp\left(-0,91 \frac{x}{R}\right) \right]^{-1,7}$$

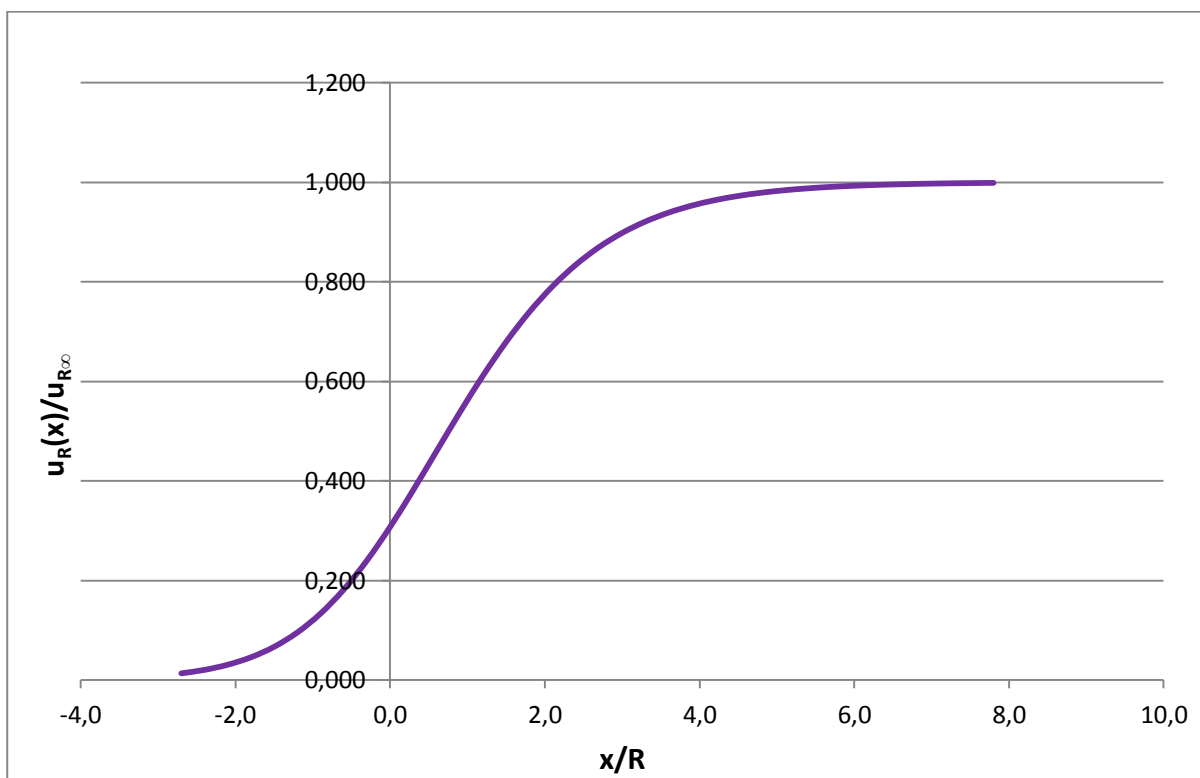
Η σχέση αυτή ισχύει για ανυποστήρικτη σήραγγα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και για υποστηριζόμενη σήραγγα. Για τις διάφορες θέσεις του μετώπου σε σχέση με τη διατομή N , της οποίας τις συγκλίσεις μελετάμε εφαρμόζουμε την παραπάνω σχέση:

Απόσταση διατομής N από το μέτωπο (m)	x/R	$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}$
-13,5	-2,7	0,01334
-12,0	-2,4	0,02036
-10,5	-2,1	0,03071
-9,0	-1,8	0,04566
-7,5	-1,5	0,06673
-6,0	-1,2	0,09553
-4,5	-0,9	0,13356
-3,0	-0,6	0,18177
-1,5	-0,3	0,24022
0,0	0,0	0,30779
1,5	0,3	0,38209
3,0	0,6	0,45986
4,5	0,9	0,53745
6,0	1,2	0,61148
7,5	1,5	0,67933
9,0	1,8	0,73938
10,5	2,1	0,79094
12,0	2,4	0,83412
13,5	2,7	0,86956

15,0	3,0	0,89816
16,5	3,3	0,92094
18,0	3,6	0,93891
19,5	3,9	0,95295
21,0	4,2	0,96387
22,5	4,5	0,97231
24,0	4,8	0,97881
25,5	5,1	0,98381
27,0	5,4	0,98764
28,5	5,7	0,99057
30,0	6,0	0,99281
31,5	6,3	0,99452
33,0	6,6	0,99583
34,5	6,9	0,99682
36,0	7,2	0,99758
37,5	7,5	0,99816
39,0	7,8	0,99860

Πίνακας 5.19 Υπολογισμός σχέσης $u_R(x)/u_{R\infty}$ και x/R κατά Chern

Από αυτές τις τιμές δημιουργήθηκε η καμπύλη Chern για τη σήραγγα που μελετάμε:



Σχήμα 5.66 Καμπύλη Chern

Όπως είναι φανερό και από τον ίδιο τον τύπο του Chern, ο λόγος της κατακόρυφης σύγκλισης στη στέψη της σήραγγας σε απόσταση x από το μέτωπο προς την τελική σύγκλιση, εξαρτάται αποκλειστικά από τη θέση x και την ακτίνα R . Συνεπώς, η καμπύλη Chern που προέκυψε ισχύει για κάθε τύπο εδάφους.

5.4.2 ΚΑΜΠΥΛΗ PANET

Στην περίπτωση που σχηματίζεται πλαστική ζώνη γύρω από τη σήραγγα, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2, ο λόγος της σύγκλισης $u_R(x)$ στη στέψη της σήραγγας για απόσταση x πίσω από το μέτωπο προς την τελική σύγκλιση $u_{R\infty}$ σε πολύ μεγάλη απόσταση από το μέτωπο, σύμφωνα με τη μέθοδο Panet δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}} = 1 - 0,75 \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{4}{3}\right) \left(-\frac{x}{R}\right) \xi} \right]^2$$

Ο παραπάνω τύπος ισχύει μόνο εντός της σήραγγας, δηλαδή για $x > 0$ αφού θεωρήσαμε ότι πίσω από το μέτωπο είναι θετικό το x .

Ο συντελεστής ξ της εξίσωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{u_{R\infty}}{u_{R\infty,el}}$$

όπου $u_{R\infty,el}$ είναι η τελική σύγκλιση που προκύπτει από ελαστική ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Επειδή η σήραγγα δεν είναι ανυποστήρικτη, προκειμένου να υπολογιστεί ο συντελεστής ξ , χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν και πραγματοποιήθηκε, επιπλέον, με χρήση του Plaxis, ελαστική ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας για τον υπολογισμό της $u_{R\infty,el}$.

Για $k_0=0,5$ (οι διαφορές για $k_0=0,8$ είναι ελάχιστες, οπότε αρκεί ο υπολογισμός της καμπύλης για αυτόν τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων) και για κάθε τύπο εδάφους, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τις τελικές συγκλίσεις και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή ξ :

		$u_{R\infty}$	$u_{R\infty,el}$	ξ
$k_0=0,5$	Rock 1	0,261	0,102	0,3908
	Rock 2	0,125	0,071	0,5680
	Rock 3	0,063	0,044	0,6984

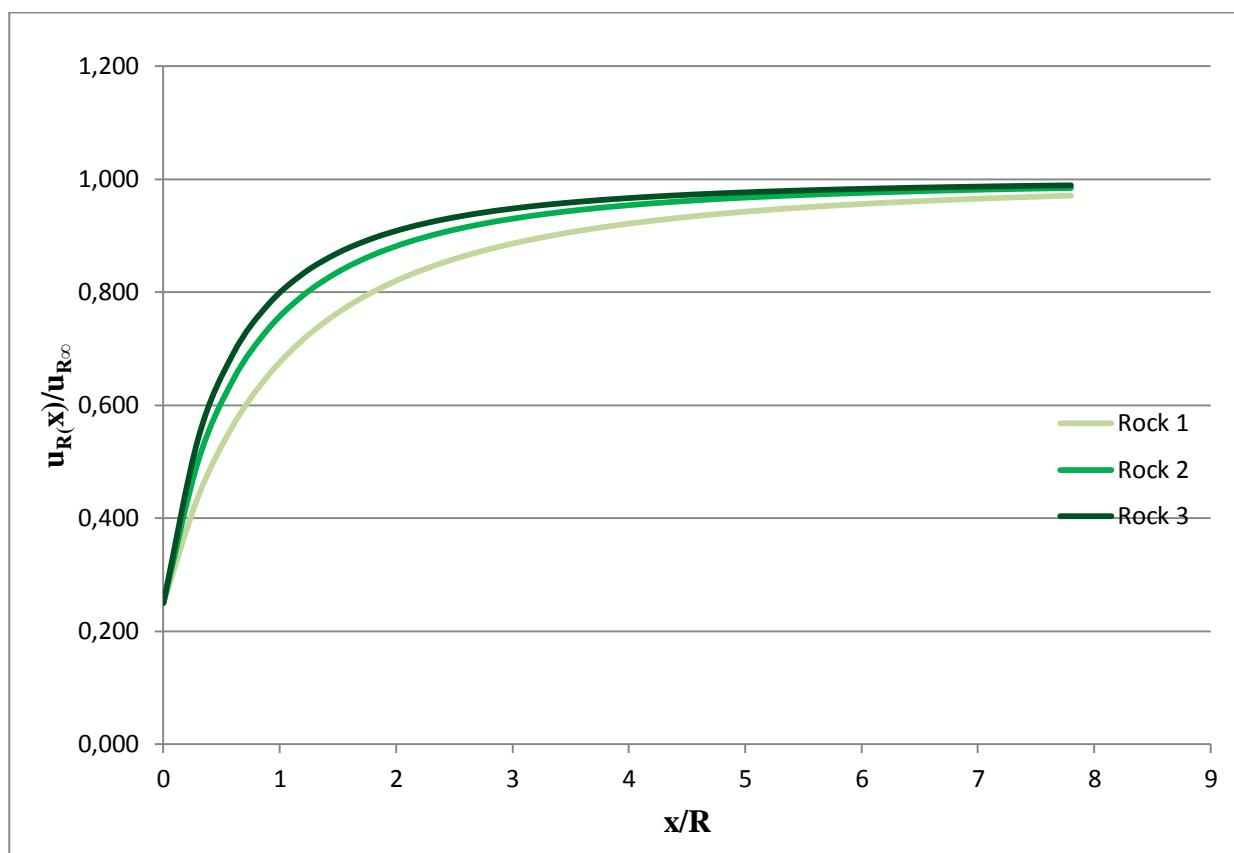
Πίνακας 5.20 Υπολογισμός συντελεστή ξ

Προκύπτει, λοιπόν, βάσει των παραπάνω, ο πίνακας 4.5:

	$ko=0,5$		
	Rock 1	Rock 2	Rock 3
x/R	$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}$	$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}$	$\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}$
0,0	0,25000	0,25000	0,25000
0,3	0,43907	0,50200	0,54178
0,6	0,56472	0,64544	0,69131
0,9	0,65243	0,73477	0,77801
1,2	0,71607	0,79415	0,83272
1,5	0,76371	0,83562	0,86944
1,8	0,80029	0,86570	0,89528
2,1	0,82900	0,88823	0,91414
2,4	0,85193	0,90553	0,92833
2,7	0,87053	0,91910	0,93927
3,0	0,88584	0,92995	0,94789
3,3	0,89859	0,93875	0,95479
3,6	0,90932	0,94599	0,96041
3,9	0,91843	0,95202	0,96504
4,2	0,92623	0,95709	0,96890
4,5	0,93296	0,96140	0,97216
4,8	0,93881	0,96509	0,97493
5,1	0,94393	0,96828	0,97731
5,4	0,94844	0,97105	0,97936
5,7	0,95242	0,97347	0,98115
6,0	0,95595	0,97560	0,98272
6,3	0,95911	0,97748	0,98409
6,6	0,96194	0,97916	0,98531
6,9	0,96448	0,98065	0,98640
7,2	0,96678	0,98199	0,98737
7,5	0,96886	0,98319	0,98823
7,8	0,97076	0,98428	0,98902

Πίνακας 5.21 Υπολογισμός σχέσης $u_R(x)/u_{R\infty}$ και x/R κατά Panet

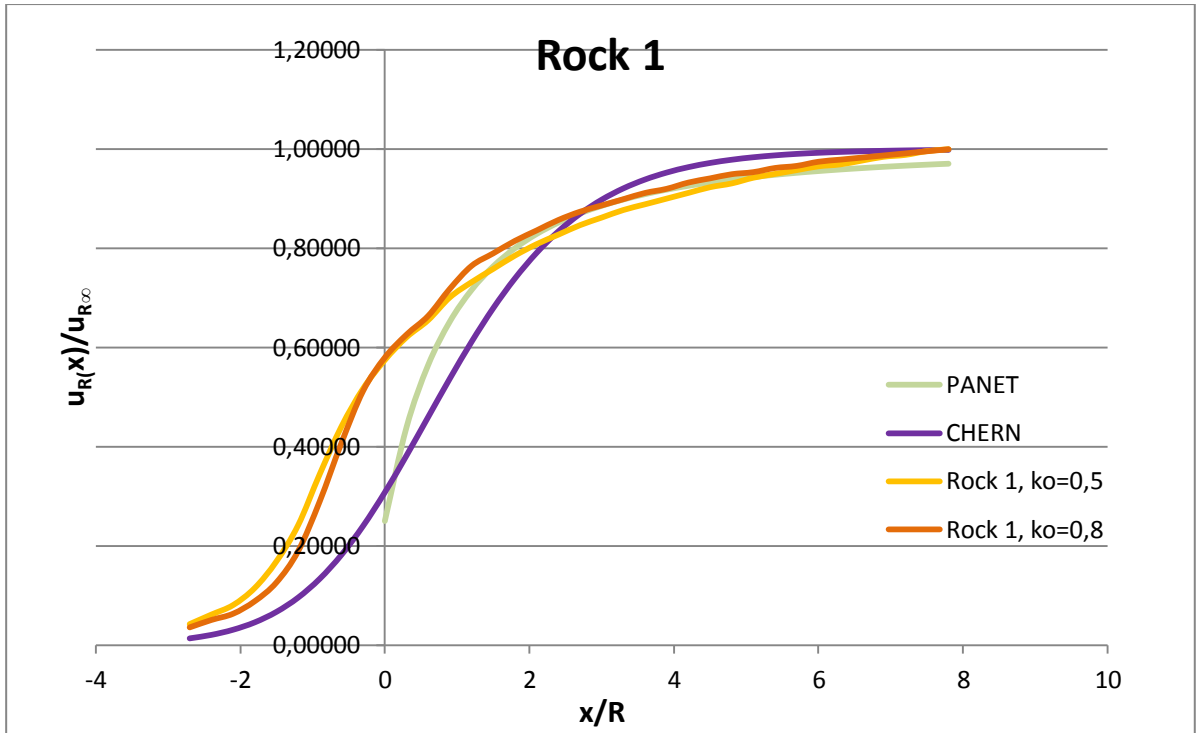
Από τις τιμές αυτές προέκυψαν οι καμπύλες Panet για κάθε τύπο εδάφους που θεωρήσαμε, για την υποστηριζόμενη σήραγγα που μελετάμε:



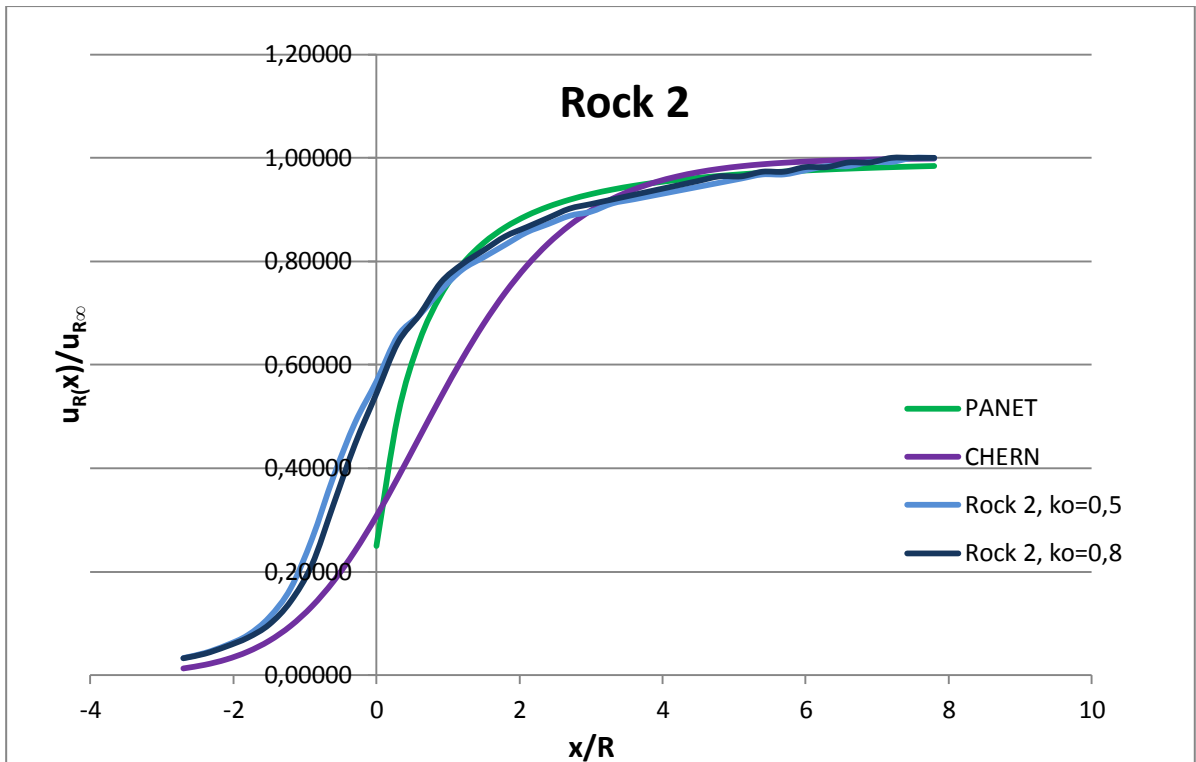
Σχήμα 5.67 Καμπύλες Panet

5.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΕΨΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ PANET ΚΑΙ CHERN

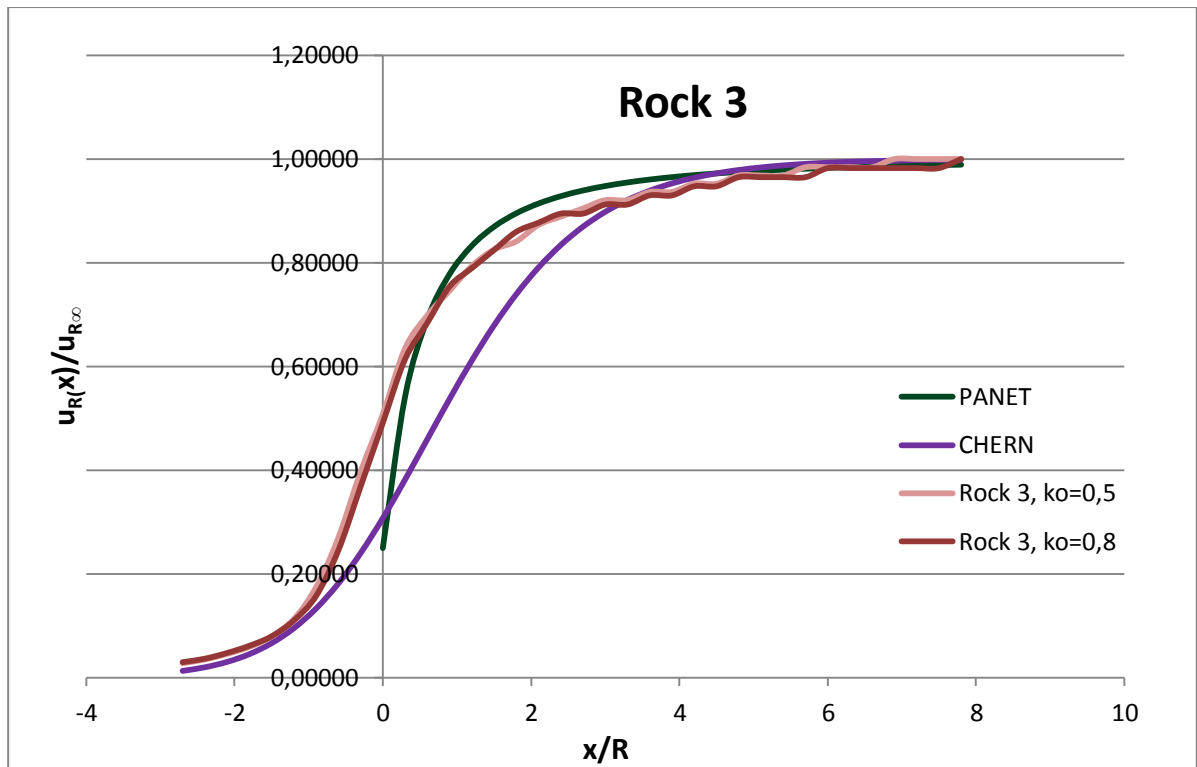
Όπως προαναφέρθηκε, η καμπύλη Chern αφορά όλους τους τύπους βραχώμαζας αφού εξαρτάται μόνο από τον λόγο της απόστασης x από το μέτωπο προς την ισοδύναμη ακτίνα R , και ισχύει ακόμα και όταν η διατομή που εξετάζουμε βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο. Η καμπύλη Panet, ωστόσο, είναι διαφορετική για κάθε ποιότητα βραχώμαζας και ισχύει μόνο όταν για σημεία πίσω από το μέτωπο δηλαδή για $x > 0$. Στα σχήματα 5.68 έως 5.70 γίνεται η σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων που υπολογίστηκαν με το Plaxis με τις θεωρητικές καμπύλες, για κάθε τύπο εδάφους.



Σχήμα 5.68 Σύγκριση διαγράμματος $u_y(x)/u_{y\infty}-x/R$ όπως υπολογίστηκε με το Plaxis, με τις καμπύλες Panet και Chern, για τη βραχώμαζα Rock 1



Σχήμα 5.69 Σύγκριση διαγράμματος $u_y(x)/u_{y\infty}-x/R$ όπως υπολογίστηκε με το Plaxis, με τις καμπύλες Panet και Chern, για τη βραχώμαζα Rock 2

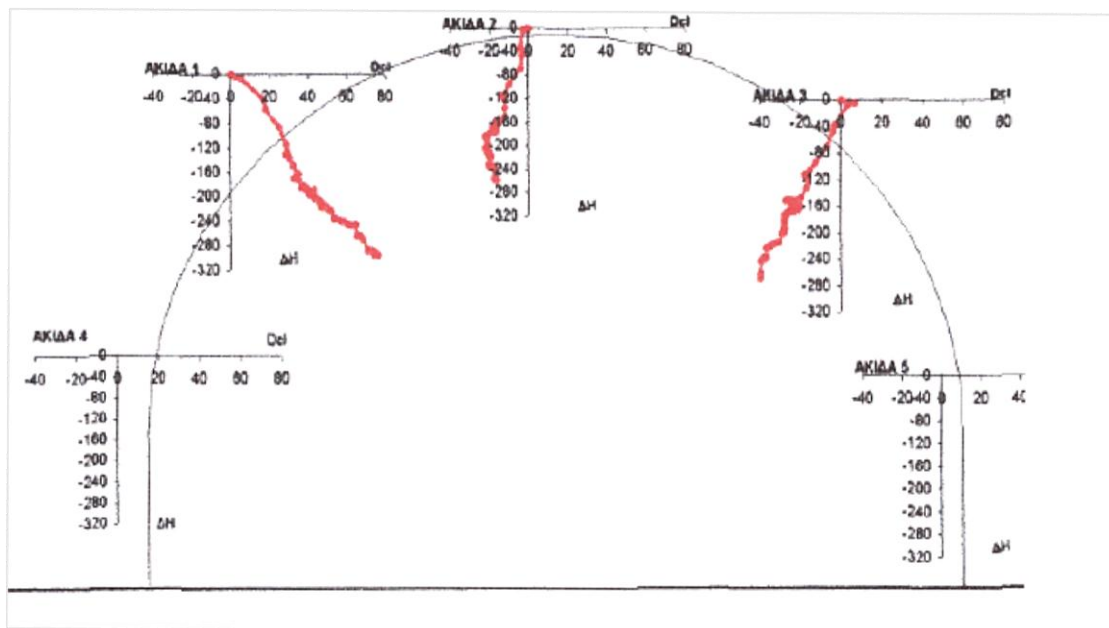


Σχήμα 5.70 Σύγκριση διαγράμματος $u_y(x)/u_{y\infty}-x/R$ όπως υπολογίστηκε με το *Plaxis*, με τις καμπύλες *Panet* και *Chern*, για τη βραχώμαζα *Rock 3*

Σε κάθε περίπτωση εδάφους, οι καμπύλες συγκλίσεων που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προγράμματος, προσεγγίζονται καλύτερα από την καμπύλη *Panet* όταν το μέτωπο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη της μίας διαμέτρου R μπροστά από την διατομή που ελέγχουμε. Όταν το μέτωπο προχωρήσει αρκετά, τότε και η καμπύλη *Chern* προσεγγίζει τις καμπύλες που υπολογίστηκαν. Ωστόσο, κοντά στο μέτωπο καμία από τις δύο θεωρητικές καμπύλες δεν προσεγγίζει τα διαγράμματα συγκλίσεων, καθώς και οι δύο προβλέπουν ότι ο λόγος της σύγκλισης στο μέτωπο προς την τελική, είναι αρκετά μικρότερος από αυτόν που υπολογίστηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ

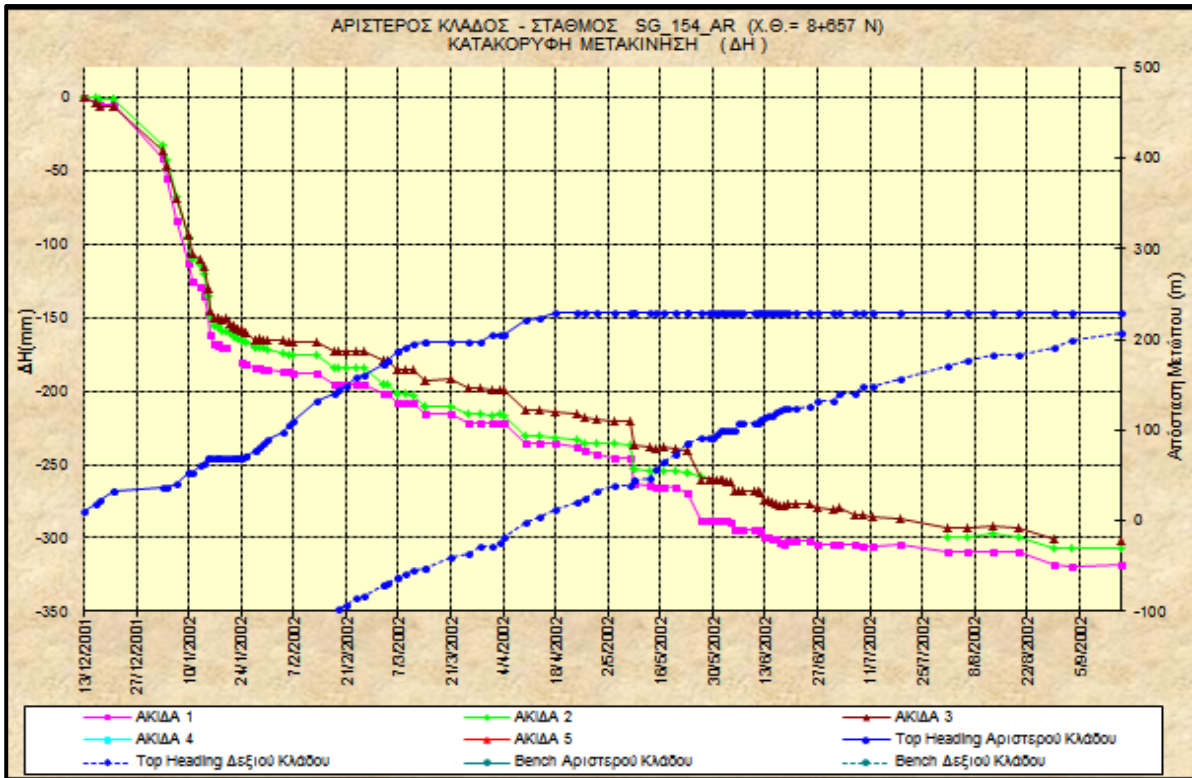
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ορισμένες διατομές ώστε να εξεταστούν οι μετακινήσεις που αναπτύχθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία του τοιχώματος της σήραγγας. Υπενθυμίζουμε ότι οι ακίδες μέτρησης των μετακινήσεων τοποθετήθηκαν στην διατομή στη Χ.Θ. 8+657 του αριστερού κλάδου της σήραγγας ως εξής:



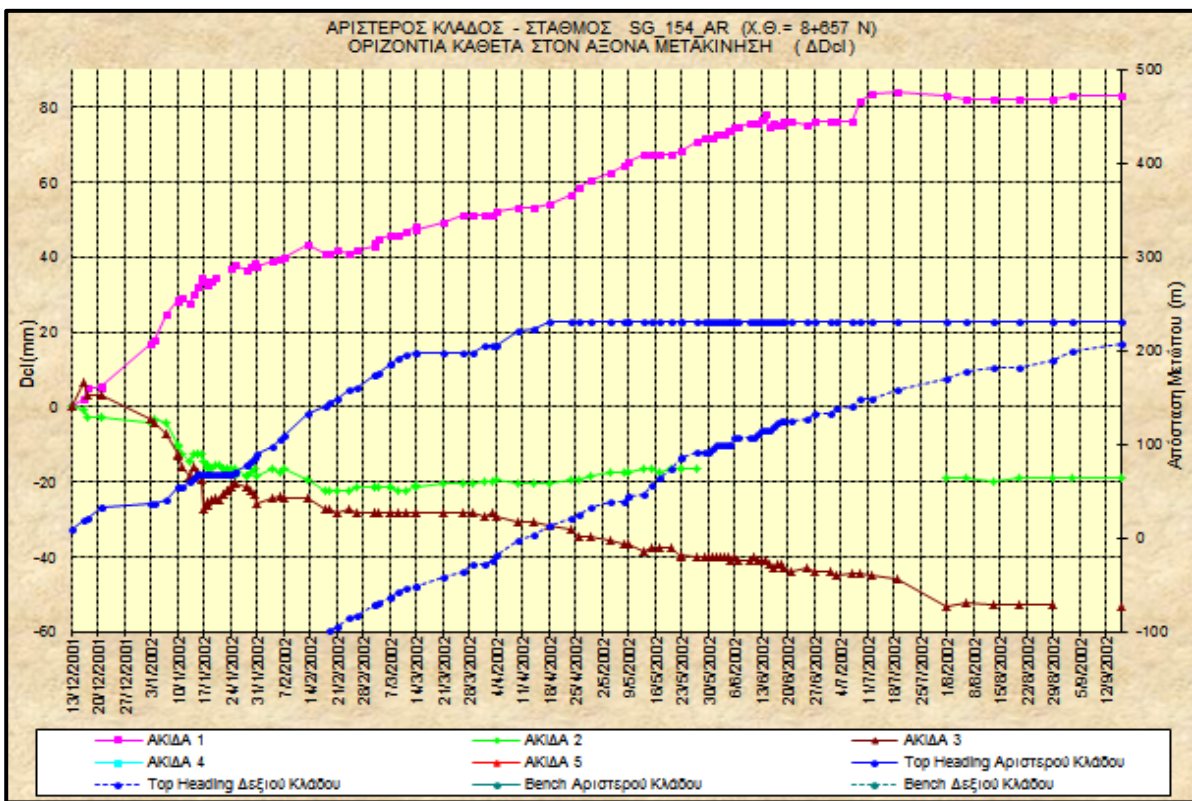
Σχήμα 5.71 Μετακινήσεις στην άνω ημιδιατομή της αριστερής σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657

Η ακίδα 2 βρίσκεται στη στέγη της σήραγγας και αντιστοιχεί στο σημείο Α στο προσομοίωμα της διατομής στο Plaxis. Στο σημείο Β όπως έχει επιλεγθεί στο πρόγραμμα, αντιστοιχεί είτε η ακίδα 1 είτε η ακίδα 3. Παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις που καταγράφονται στις 2 ακίδες διαφέρουν αρκετά, ενώ στο Plaxis, λόγω συμμετρίας θεωρείται ότι συμπίπτουν. Θεωρήθηκε λοιπόν ότι το σημείο Β αντιστοιχεί τελικά στην ακίδα 1 που δίνει και τις μεγαλύτερες μετακινήσεις, άρα είναι δυσμενέστερο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις οργανομετρήσεις για τις κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις για την άνω ημιδιατομή (top heading) δίνονται από τα σχήματα 5.72 και 5.73 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.72 Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άνω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου της σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657



Σχήμα 5.73 Οριζόντιες μετακινήσεις στην άνω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου της σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657

Μελετώντας το διάγραμμα των κατακόρυφων μετακινήσεων, παρατηρούμε ότι και για τα 3 σημεία σημεία, οι μετακινήσεις συνεχίζουν να αυξάνονται ακόμα και όταν το μέτωπο του top heading βρίσκεται 230m μπροστά από τη διατομή και μάλιστα συνεχίζουν να αυξάνονται ενώ έχει σταματήσει να προχωράει αυτό. Ένα τέτοιο γεγονός αποδεικνύει την εμφάνιση αστοχιών στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που έχει πραγματοποιηθεί. Για μια σήραγγα στην οποία δεν έχουν συμβεί αστοχίες, οι συγκλίσεις θα έπρεπε να έχουν σταθεροποιηθεί για πολύ μικρότερη απόσταση του μετώπου από τη διατομή σε σχέση με τα 230m. Στο προσομοίωμα της σήραγγας που υπολογίστηκε με το Plaxis θεωρήθηκε ότι οι συγκλίσεις σταθεροποιούνται σε απόσταση περίπου 40m πίσω από το μέτωπο. Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα του προγράμματος με τις μετρηθείσες τιμές, συντάχθηκε ο παρακάτω πίνακας, βάσει του σχήματος 5.72, εξετάζοντας τις τιμές των συγκλίσεων μέχρι το μέτωπο του top heading να φτάσει σε απόσταση 78m, όπου θα έπρεπε αν δεν υπήρχαν αστοχίες, να έχουν σταθεροποιηθεί οι συγκλίσεις.

Ομοίως μελετήθηκε και το διάγραμμα των οριζόντιων μετακινήσεων. Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα εμφανίστηκαν οριζόντιες μετακινήσεις και στη στέψη της σήραγγας σε αντίθεση με τους υπολογισμούς του προγράμματος, όπου θεωρείται ότι λόγω συμμετρίας οι οριζόντιες μετακινήσεις στο Α είναι μηδενικές. Οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις κατακόρυφες καθώς συνεχίζουν να αυξάνονται καθώς προχωράει το μέτωπο ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, γεγονός που αποδεικνύει πάλι, την αστοχία της προσωρινής υποστήριξης.

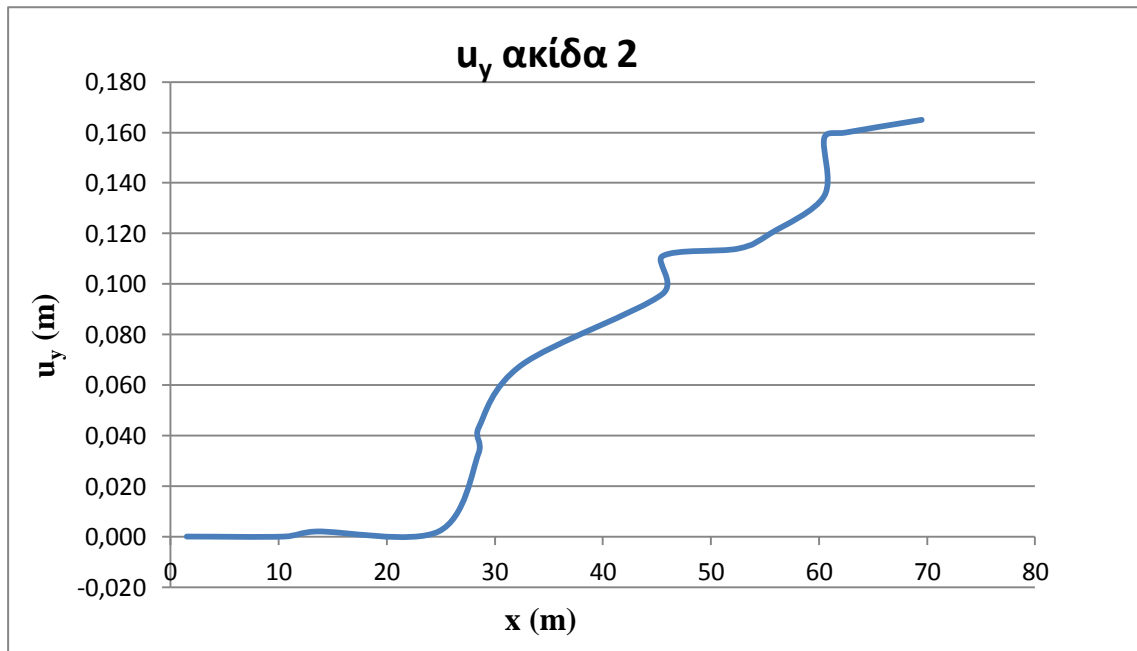
Στον πίνακα 5.22 φαίνονται συγκεντρωτικά οι μετρηθείσες συγκλίσεις. Σημειώνεται ότι επειδή θεωρούμε κατά την προσομοίωση στο Plaxis ότι οι ακίδες μέτρησης τοποθετούνται (ένδειξη 0) όταν το μέτωπο βρίσκεται 1,5m μπροστά από τη διατομή που μελετάμε, ανάγουμε καταλλήλως τα αποτελέσματα των μετρήσεων ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση. Αφού, λοιπόν, η μηδενική ένδειξη λαμβάνεται για απόσταση μετώπου 10m αφαιρούμε 8,5 από όλες τις θέσεις του μετώπου για τις πραγματικές μετρήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι για απόσταση του μετώπου έως 78m ο δεξιός κλάδος δεν έχει φτάσει ακόμα στη Χ.Θ. 8+657.

Απόσταση μετώπου (m)	u _y ακίδα 2 (m)	u _y ακίδα 1 (m)	u _x ακίδα 1 (m)	u _x /u _y ακίδα 1
1,5	0,000	0,000	0,000000	-
10,5	0,000	0,004	0,001973	0,49325
13,5	0,002	0,006	0,005261	0,87683
24,8	0,002	0,006	0,005291	0,88183
28,5	0,033	0,042	0,017004	0,40486
28,5	0,043	0,056	0,017900	0,31964
32,5	0,068	0,084	0,024792	0,29514
45,5	0,096	0,113	0,028348	0,25087
45,5	0,111	0,125	0,028920	0,23136
52,5	0,114	0,129	0,027769	0,21526

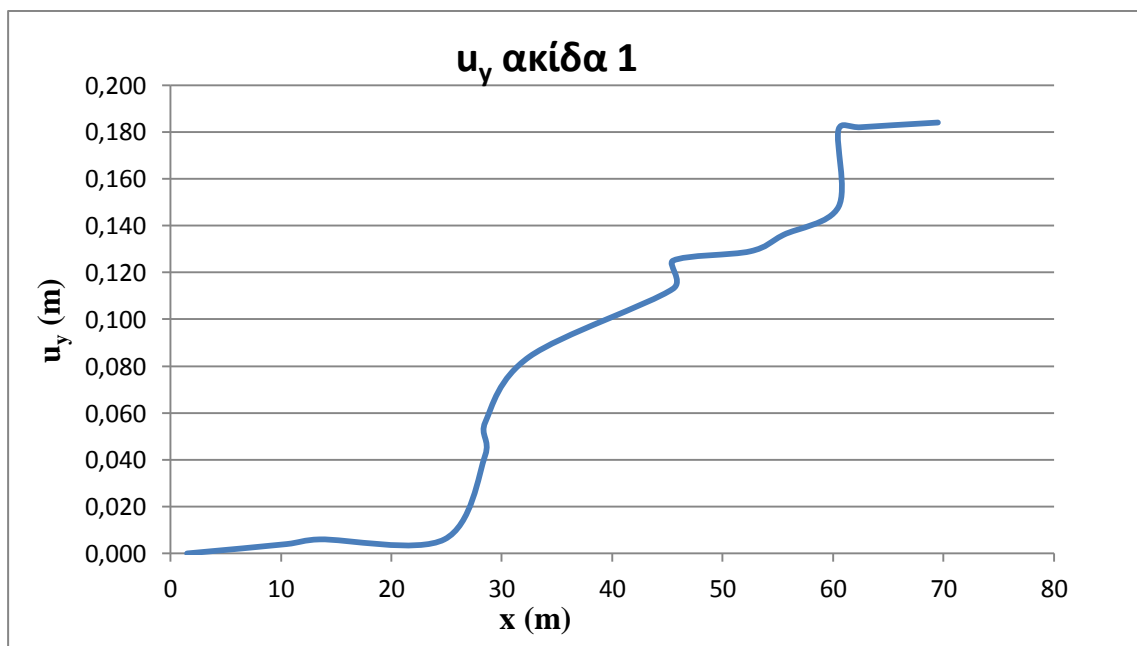
55,5	0,120	0,136	0,030071	0,22111
60,5	0,135	0,148	0,031879	0,21540
60,5	0,167	0,181	0,036810	0,20337
62,5	0,171	0,182	0,037961	0,20858
69,5	0,171	0,184	0,036645	0,19916

Πίνακας 5.22 Μετρηθείσες συγκλίσεις στον αριστερό κλάδο της σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657

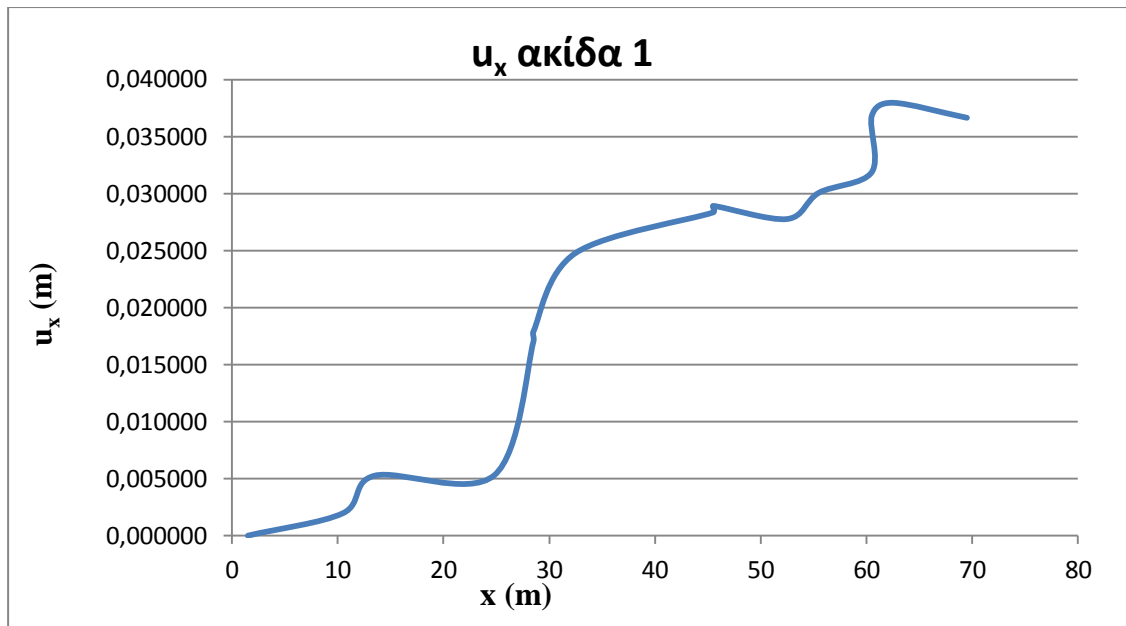
Βάσει, λοιπόν, των παραπάνω δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα πραγματικών συγκλίσεων συναρτήσει της απόστασης του μετώπου.



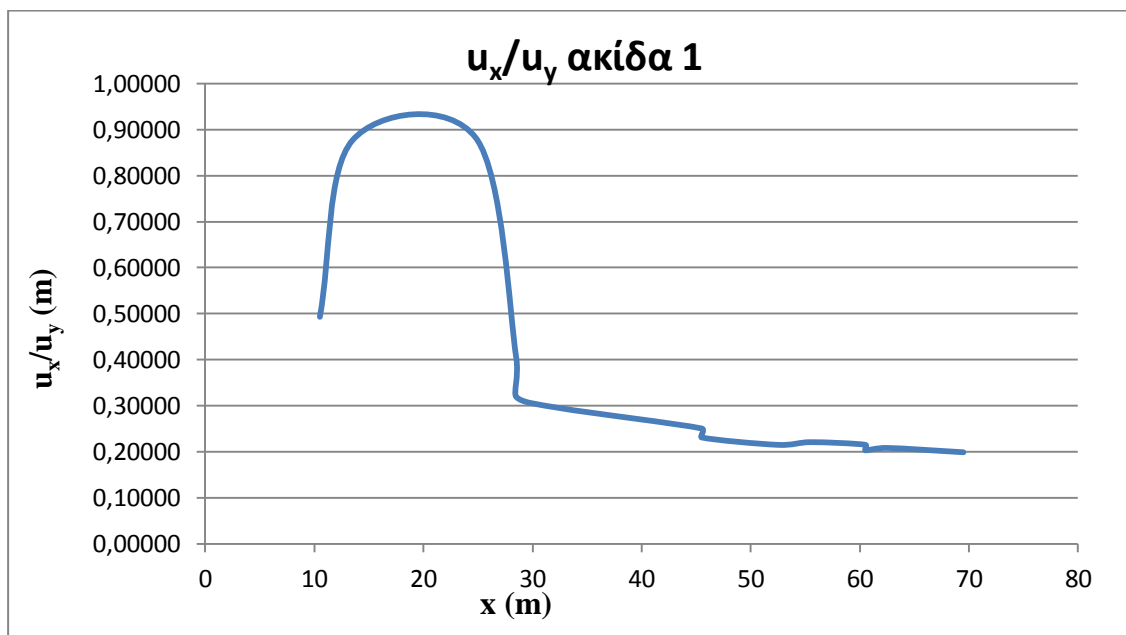
Σχήμα 5.74 Διάγραμμα κατακόρυφων συγκλίσεων u_y - x για την ακίδα 2



Σχήμα 5.75 Διάγραμμα κατακόρυφων συγκλίσεων u_y - x για την ακίδα 1



Σχήμα 5.76 Διάγραμμα οριζόντιων συγκλίσεων u_x - x για την ακίδα 1



Σχήμα 5.77 Διάγραμμα οριζόντιων συγκλίσεων προς τις κατακόρυφες u_x/u_y - x για την ακίδα 1

Με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών που διεξήχθησαν με το Plaxis με τις μετρήσεις, θεωρώντας ότι οι μετρήσεις θα άρχιζαν όταν το μέτωπο θα βρισκόταν 1,5m μπροστά από τη διατομή N, αφαιρώντας την ένδειξη που αντιστοιχεί σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες για τις υπολογισμένες συγκλίσεις. Λόγω της χαμηλής ποιότητας της βραχόμαζας, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και από τις αστοχίες, η σύγκριση που θα ακολουθήσει αφορά τις χειρότερες περιπτώσεις βραχόμαζας που εξετάστηκαν δηλαδή τις Rock 1 και Rock 2.

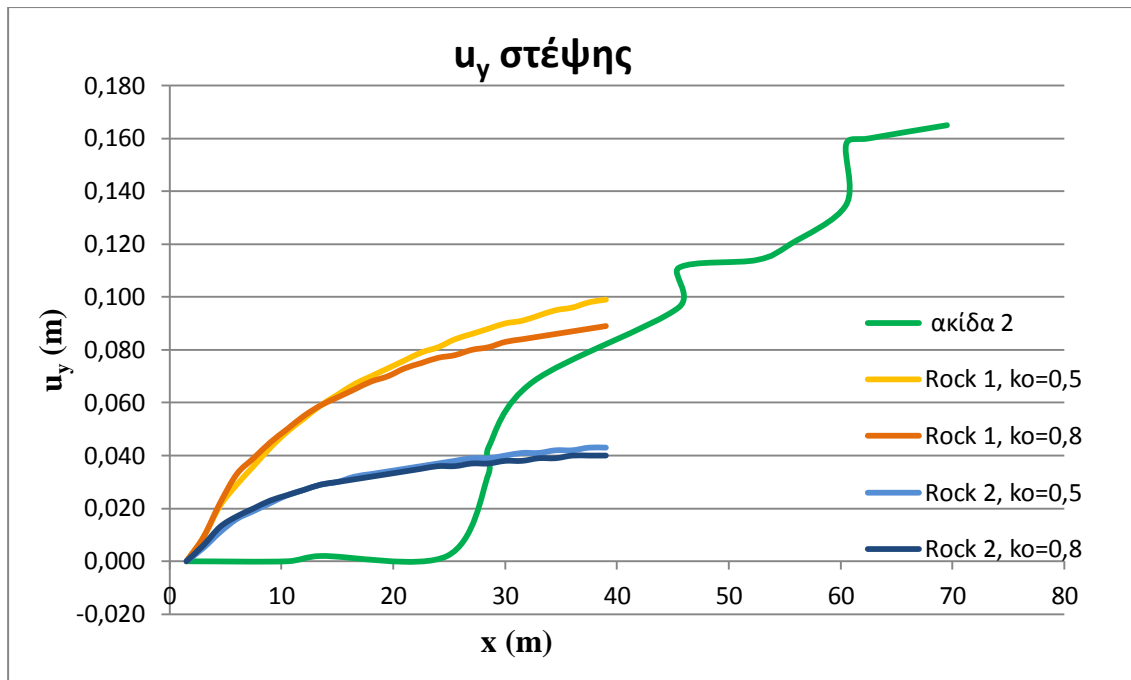
x(m)	Rock 1							
	k ₀ =0,5				k ₀ =0,8			
	u _{vA}	u _{vB}	u _{xB}	u _{xB} /u _{vB}	u _{vA}	u _{vB}	u _{xB}	u _{xB} /u _{vB}
1,5	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	-
3,0	0,009	0,010	0,006	0,60000	0,009	0,010	0,007	0,70000
4,5	0,021	0,022	0,013	0,59091	0,022	0,021	0,016	0,76190
6,0	0,029	0,031	0,017	0,54839	0,033	0,030	0,023	0,76667
7,5	0,036	0,038	0,020	0,52632	0,039	0,037	0,028	0,75676
9,0	0,043	0,045	0,023	0,51111	0,045	0,043	0,032	0,74419
10,5	0,049	0,050	0,024	0,48000	0,050	0,049	0,035	0,71429
12,0	0,054	0,056	0,026	0,46429	0,055	0,053	0,038	0,71698
13,5	0,059	0,060	0,026	0,43333	0,059	0,057	0,040	0,70175
15,0	0,063	0,064	0,027	0,42188	0,062	0,060	0,042	0,70000
16,5	0,067	0,068	0,027	0,39706	0,065	0,063	0,044	0,69841
18,0	0,070	0,071	0,028	0,39437	0,068	0,066	0,045	0,68182
19,5	0,073	0,074	0,028	0,37838	0,070	0,068	0,046	0,67647
21,0	0,076	0,076	0,028	0,36842	0,073	0,070	0,047	0,67143
22,5	0,079	0,079	0,028	0,35443	0,075	0,072	0,048	0,66667
24,0	0,081	0,081	0,028	0,34568	0,077	0,073	0,048	0,65753
25,5	0,084	0,084	0,028	0,33333	0,078	0,075	0,049	0,65333
27,0	0,086	0,086	0,028	0,32558	0,080	0,076	0,049	0,64474
28,5	0,088	0,088	0,028	0,31818	0,081	0,078	0,049	0,62821
30,0	0,090	0,089	0,028	0,31461	0,083	0,079	0,050	0,63291
31,5	0,091	0,091	0,028	0,30769	0,084	0,080	0,050	0,62500
33,0	0,093	0,093	0,028	0,30108	0,085	0,081	0,050	0,61728
34,5	0,095	0,094	0,028	0,29787	0,086	0,082	0,050	0,60976
36,0	0,096	0,096	0,028	0,29167	0,087	0,083	0,051	0,61446
37,5	0,098	0,097	0,028	0,28866	0,088	0,084	0,051	0,60714
39,0	0,099	0,099	0,028	0,28283	0,089	0,085	0,051	0,60000

Πίνακας 5.23 Κατακόρυφες και οριζόντιες συγκλίσεις όπως υπολογίστηκαν με το Plaxis για Rock 1

x(m)	Rock 2							
	k ₀ =0,5				k ₀ =0,8			
	u _{vA}	u _{vB}	u _{xB}	u _{xB} /u _{vB}	u _{vA}	u _{vB}	u _{xB}	u _{xB} /u _{vB}
1,5	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	-
3,0	0,005	0,006	0,002	0,33333	0,006	0,005	0,003	0,60000
4,5	0,011	0,012	0,004	0,33333	0,013	0,011	0,007	0,63636
6,0	0,016	0,017	0,005	0,29412	0,017	0,016	0,009	0,56250
7,5	0,019	0,021	0,005	0,23810	0,020	0,019	0,010	0,52632
9,0	0,022	0,024	0,006	0,25000	0,023	0,021	0,011	0,52381
10,5	0,025	0,026	0,006	0,23077	0,025	0,023	0,011	0,47826
12,0	0,027	0,028	0,006	0,21429	0,027	0,025	0,012	0,48000
13,5	0,029	0,030	0,006	0,20000	0,029	0,026	0,012	0,46154
15,0	0,030	0,032	0,006	0,18750	0,030	0,028	0,013	0,46429
16,5	0,032	0,033	0,006	0,18182	0,031	0,029	0,013	0,44828
18,0	0,033	0,034	0,006	0,17647	0,032	0,030	0,013	0,43333
19,5	0,034	0,035	0,006	0,17143	0,033	0,030	0,013	0,43333
21,0	0,035	0,036	0,006	0,16667	0,034	0,031	0,013	0,41935
22,5	0,036	0,037	0,005	0,13514	0,035	0,032	0,013	0,40625
24,0	0,037	0,038	0,005	0,13158	0,036	0,032	0,014	0,43750
25,5	0,038	0,039	0,005	0,12821	0,036	0,033	0,014	0,42424
27,0	0,039	0,040	0,005	0,12500	0,037	0,033	0,014	0,42424
28,5	0,039	0,040	0,005	0,12500	0,037	0,034	0,014	0,41176
30,0	0,040	0,041	0,005	0,12195	0,038	0,034	0,014	0,41176
31,5	0,041	0,041	0,005	0,12195	0,038	0,035	0,014	0,40000
33,0	0,041	0,042	0,005	0,11905	0,039	0,035	0,014	0,40000
34,5	0,042	0,042	0,005	0,11905	0,039	0,036	0,014	0,38889
36,0	0,042	0,043	0,005	0,11628	0,040	0,036	0,014	0,38889
37,5	0,043	0,043	0,005	0,11628	0,040	0,036	0,014	0,38889
39,0	0,043	0,044	0,005	0,11364	0,040	0,037	0,014	0,37838

Πίνακας 5.24 Κατακόρυφες και οριζόντιες συγκλίσεις όπως υπολογίστηκαν με το Plaxis για Rock 2

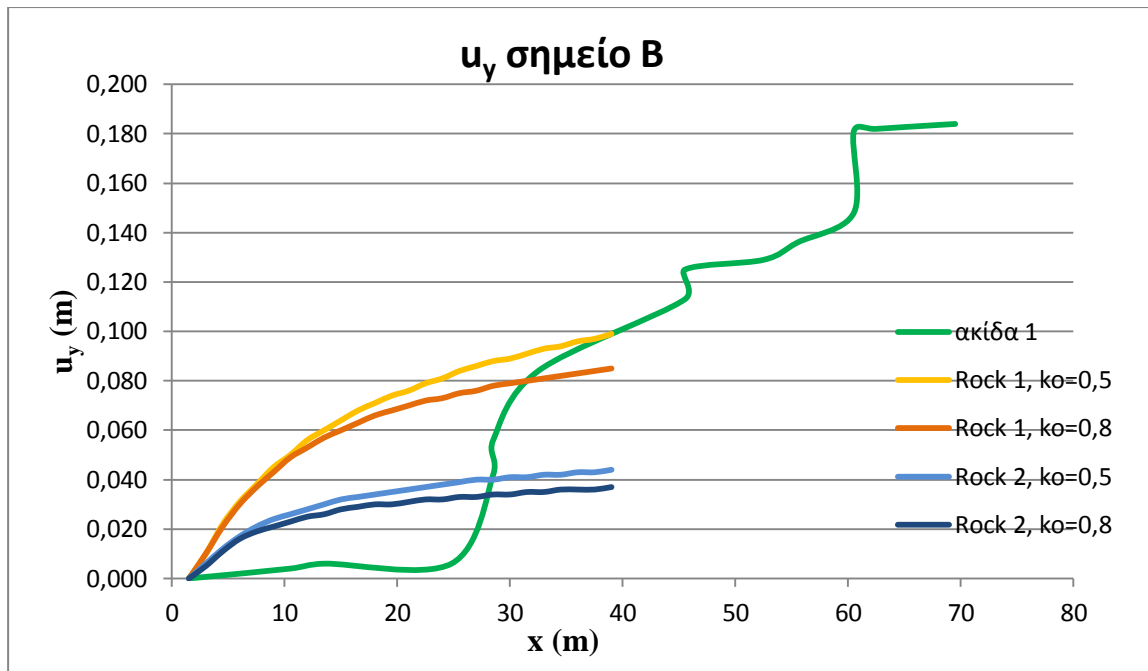
Από τους πίνακες αυτούς προέκυψαν τα διαγράμματα συγκλίσεων που συγκρίθηκαν με αυτά των συγκλίσεων που μετρήθηκαν, όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



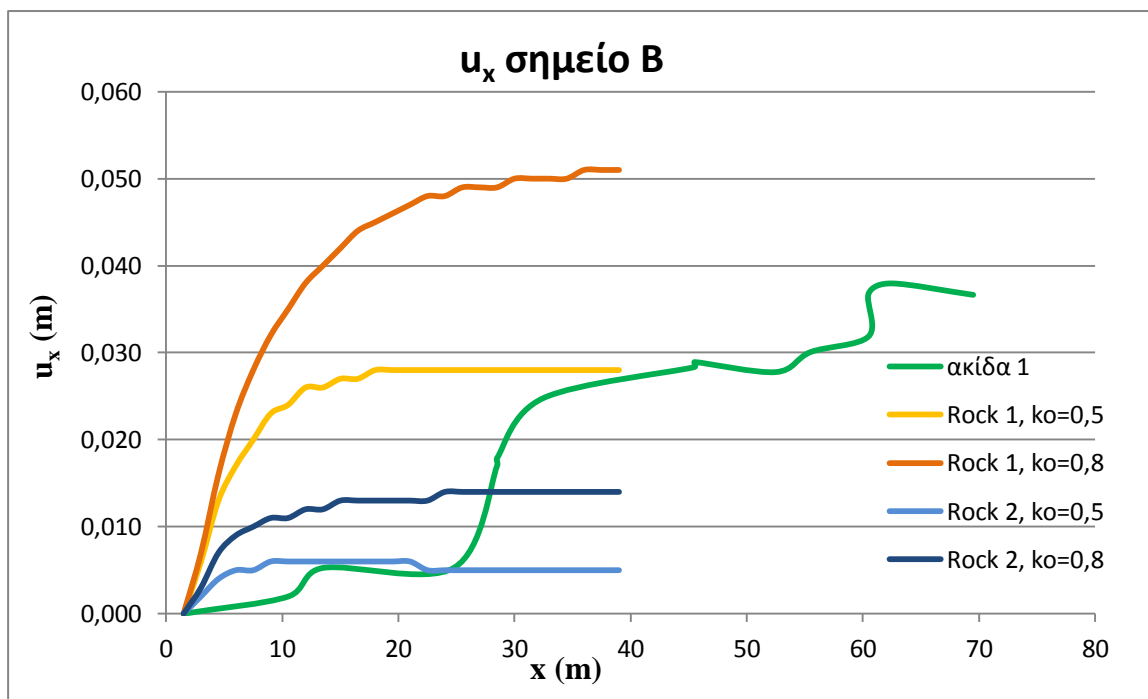
Σχήμα 5.78 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων u_y , στη στέψη

Παρατηρούμε ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις όπως δίνονται από τις μετρήσεις, παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές για απόσταση έως και 25m πίσω από το μέτωπο. Κάτι τέτοιο έρχεται σε αντίθεση με την αναμενόμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και υποδεικνύει ίσως την παρουσία κάποιου σφάλματος στις μετρήσεις. Αρχικά, φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη των μετρηθείσων συγκλίσεων η καμπύλη της βραχώμαζας Rock 2. Ωστόσο, για απόσταση μεγαλύτερη των 30m περίπου πίσω από το μέτωπο η καμπύλη Rock 2 υποεκτιμά τις συγκλίσεις. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση η χειρότερη περίπτωση εδάφους προσεγγίζει την πραγματικότητα. Επαναλαμβάνουμε ότι η επιρροή του συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων στις κατακόρυφες συγκλίσεις είναι ελάχιστη. Όπως προαναφέρθηκε, οι κατακόρυφες συγκλίσεις που μετρήθηκαν συνεχίζουν να αυξάνουν και δεν σταθεροποιούνται όπως συνέβη με τις υπολογισμένες συγκλίσεις, λόγω της αστοχίας της προσωρινής υποστήριξης.

Ανάλογη συμπεριφορά ακολουθούν και οι κατακόρυφες συγκλίσεις στο σημείο B, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.79 που ακολουθεί. Μάλιστα, σε αυτό το σημείο η θεώρηση εδάφους Rock 1, προσεγγίζει ακόμη καλύτερα την παρατηρηθείσα συμπεριφορά της βραχώμαζας.



Σχήμα 5.79 Σύγκριση διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων u_y στο σημείο B

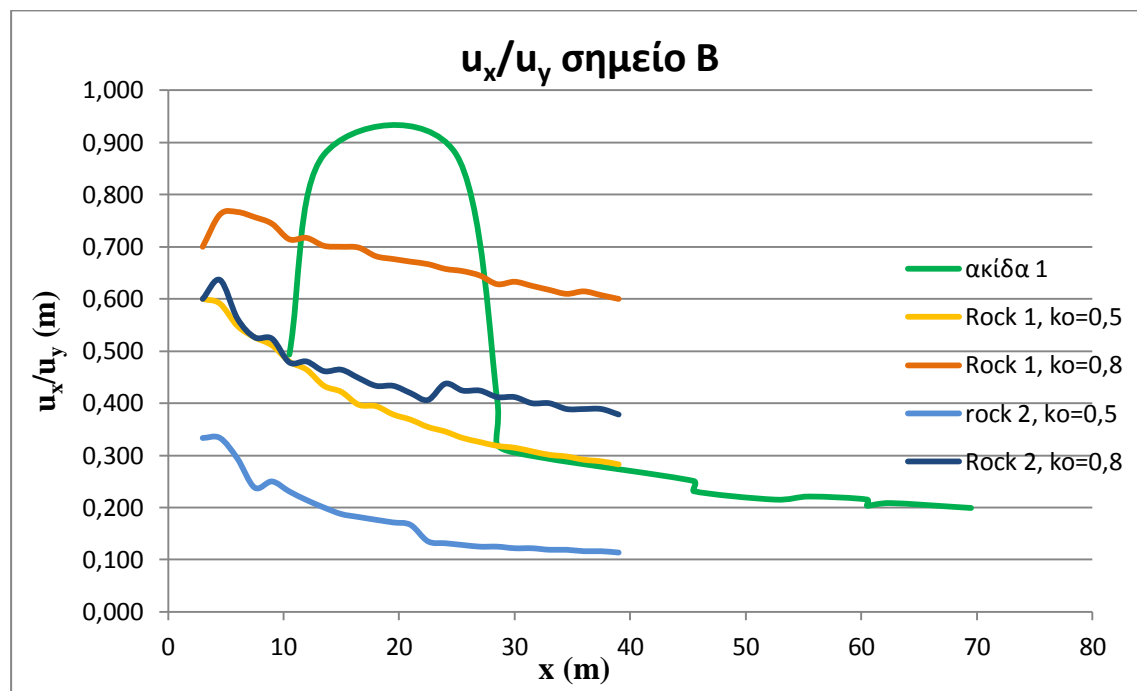


Σχήμα 5.80 Σύγκριση διαγραμμάτων οριζόντιων συγκλίσεων u_x στο σημείο B

Όπως οι κατακόρυφες συγκλίσεις, έτσι και οι οριζόντιες ακολουθούν πολύ χαμηλό ρυθμό αύξησης κατά τα πρώτα μέτρα προώθησης του μετώπου, δηλαδή περίπου μέχρι τα 25m. Έτσι αρχικά προσεγγίζεται καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το διάγραμμα οριζόντιων συγκλίσεων για Rock 2 και $k_0=0,5$. Ωστόσο, μετά τα 25m παρουσιάζεται σημαντική αύξηση των συγκλίσεων μέχρι να φτάσει το μέτωπο στα 40m, όπου και αρχίζουν να σταθεροποιούνται σχεδόν οι οριζόντιες συγκλίσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, καταλληλότερη για να

προσομοιώσει τις πραγματικές συγκλίσεις φαίνεται να είναι η υπόθεση της βραχώμαζας Rock 1 και συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων $k_o=0,5$. Η αύξηση που παρατηρείται όταν το μέτωπο έχει φτάσει περίπου στα 60m, είναι ενδεικτική της αστοχίας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Τέλος, παρατίθεται στο σχήμα 5.81 η σύγκριση των διαγραμμάτων u_x/u_y συναρτήσει της απόστασης του μετώπου:



Σχήμα 5.81 Σύγκριση διαγραμμάτων λόγου των οριζοντίων προς τις κατακόρυφες συγκλίσεις u_x/u_y στο σημείο B

Όπως παρατηρήθηκε στα προηγούμενα διαγράμματα, οι τιμές των οριζόντιων και κατακόρυφων συγκλίσεων που μετρήθηκαν στα τοιχώματα της σήραγγας στη Χ.Θ. 8+657, ήταν πολύ μικρές για απόσταση μετώπου έως 25m περίπου. Όσο, επομένως, πλησιάζουν οι τιμές των οριζόντιων και κατακόρυφων συγκλίσεων, ο λόγος τους αυξάνεται πλησιάζοντας τη μονάδα. Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι έως τα 25m, οι τιμές του λόγου είναι πολύ μεγάλες και προσεγγίζονται περισσότερο από τη χειρότερη περίπτωση βραχώμαζας Rock 1 και $k_o=0,8$. Καθώς, όμως, το μέτωπο προχωράει, οι μετρηθείσες οριζόντιες συγκλίσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν, ενώ οι κατακόρυφες αυξάνονται, γεγονός που προκαλεί μείωση στο λόγο u_x/u_y . Επομένως, για μεγαλύτερη απόσταση του μετώπου από 30m η καμπύλη για Rock 1 και $k_o=0,5$ ταυτίζεται με την πραγματική καμπύλη.

5.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

Το output του προγράμματος Plaxis 3D Tunnel, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να γνωρίζει την ένταση του κάθε αγκυρίου. Γνωρίζοντας, επομένως, την αξονική δύναμη που αναπτύχθηκε σε κάθε αγκύριο, είναι εφικτός ο έλεγχος αστοχίας των αγκυριών. Όπως έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η οριακή δύναμη διαρροής για το συγκεκριμένο τύπο αγκυρίου (S400, Φ32) που χρησιμοποιήθηκε στη διατομή σήραγγας που μελετήθηκε είναι 480 kN. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές της αξονικής δύναμης που αναπτύχθηκε σε κάθε αγκύριο του επιπέδου N (plane N), όταν δηλαδή το μέτωπο έχει προχωρήσει αρκετά, ώστε να ελεγχθεί ποια αγκύρια και για ποιους συνδυασμούς βραχόμαζας και συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων, φτάνουν την οριακή δύναμη και αστοχούν. Υπενθυμίζεται ότι τα αγκύρια αριθμούνται από τη στέψη της σήραγγας προς τον πυθμένα με αύξουσα σειρά.

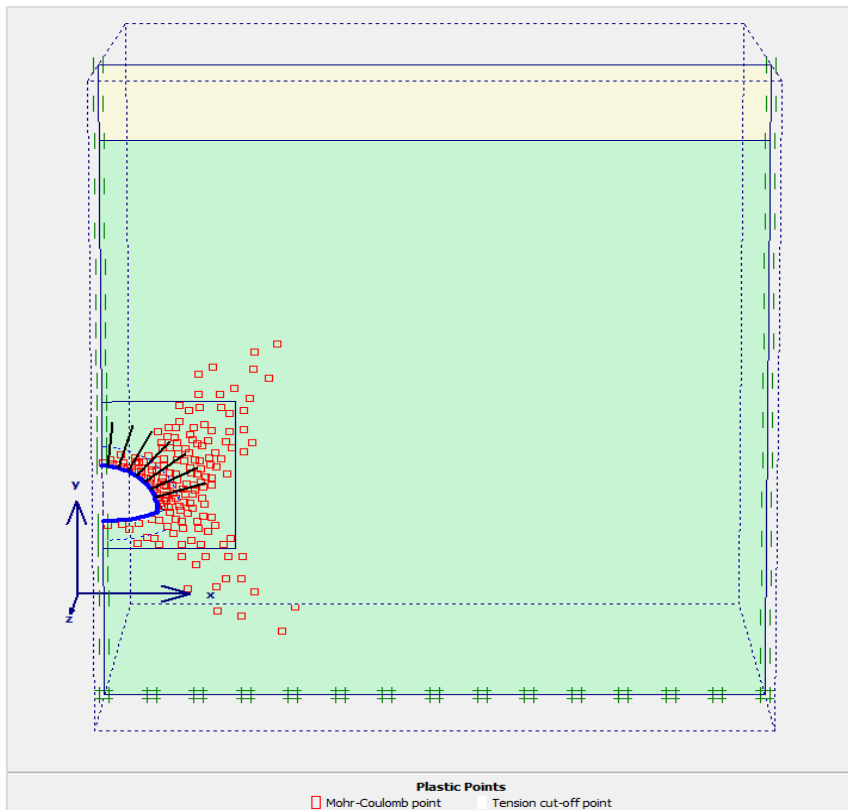
	$k_0=0,5$			$k_0=0,8$		
	Rock 1	Rock 2	Rock 3	Rock 1	Rock 2	Rock 3
Αγκύριο	$F_{αγκ}$ (kN)	$F_{αγκ}$ (kN)	$F_{αγκ}$ (kN)	$F_{αγκ}$ (kN)	$F_{αγκ}$ (kN)	$F_{αγκ}$ (kN)
1	211,60	106,80	96,44	404,00	250,70	159,20
2	249,00	127,90	102,40	480,00	276,20	156,50
3	347,70	190,70	121,00	480,00	325,00	159,30
4	426,20	281,70	167,50	480,00	392,10	187,80
5	480,00	414,20	220,10	480,00	459,00	206,70
6	480,00	480,00	263,10	480,00	480,00	240,30
7	480,00	480,00	254,10	480,00	480,00	238,70

Πίνακας 5.25 Αξονικές δυνάμεις που αναπτύχθηκαν στα αγκύρια στο επίπεδο N

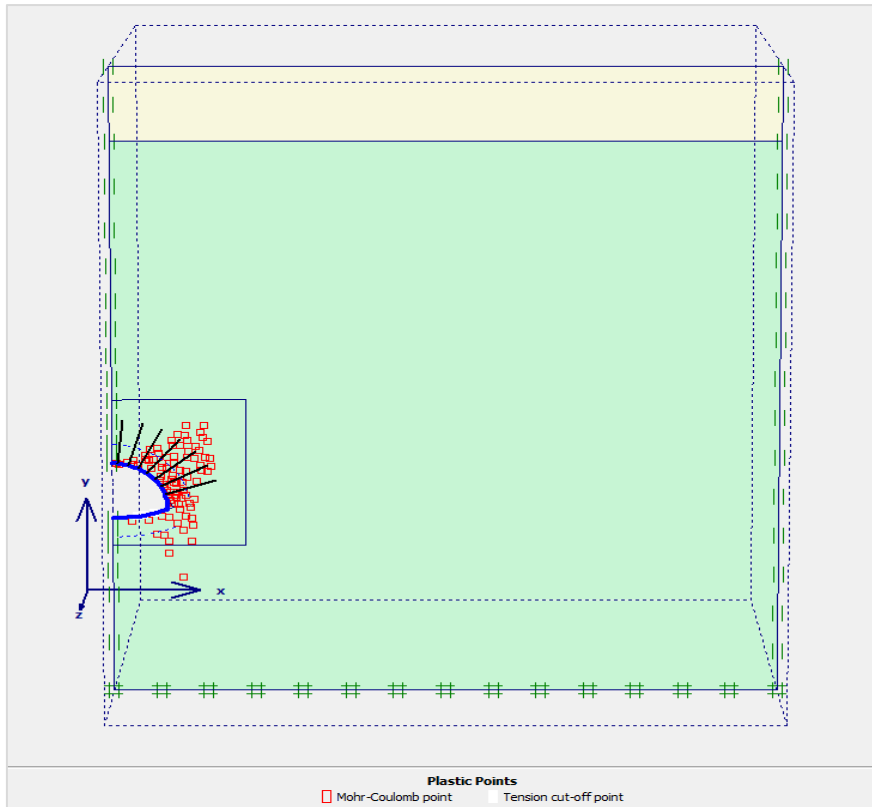
Για την καλύτερη ποιότητα βραχόμαζας Rock 3, τόσο για $k_0=0,5$ όσο και για $k_0=0,8$ κανένα αγκύριο δεν διαρρέει. Στην περίπτωση της βραχόμαζας Rock 3, τα αγκύρια 6 και 7 δηλαδή αυτά που είναι πλησιέστερα στον πυθμένα αστοχούν για $k_0=0,5$ αλλά και 0,8. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τη συγκέντρωση τάσεων που παρατηρείται γύρω από τη γωνία που σχηματίζεται από την οροφή του top heading και του πυθμένα, και τη συγκέντρωση σημείων πλαστικοποίησης, όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω. Για τη χειρότερη περίπτωση βραχόμαζας Rock 3 και για $k_0=0,5$ αστοχούν τα 3 αγκύρια 5, 6 και 7 κοντά στον πυθμένα. Όμως, για Rock 3 και $k_0=0,8$ αστοχούν όλα τα αγκύρια πλην του πρώτου. Κατά την κατασκευή της σήραγγας, στη Χ.Θ. 8+657, όλα τα αγκύρια μήκους 6m αστόχησαν. Επομένως, η συμπεριφορά των αγκυριών προσεγγίστηκε καλύτερα από την χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα και το συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων 0,8.

5.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

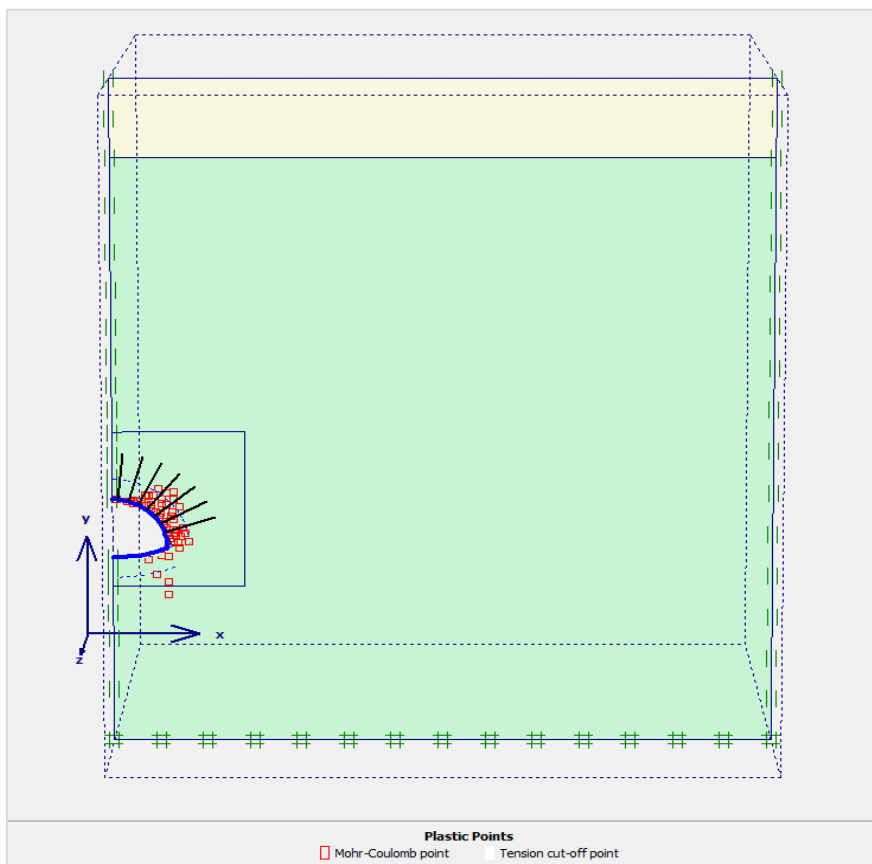
Η έκταση και η μορφή της ζώνης πλαστικοποίησης επηρεάζεται από την ποιότητα της βραχώμαζας αλλά και το συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων. Στα σχήματα που ακολουθούν παρακολουθούμε τα σημεία πλαστικοποίησης που αναπτύχθηκαν για κάθε τύπο εδάφους, όπως αυτά αποδόθηκαν από το output του Plaxis.



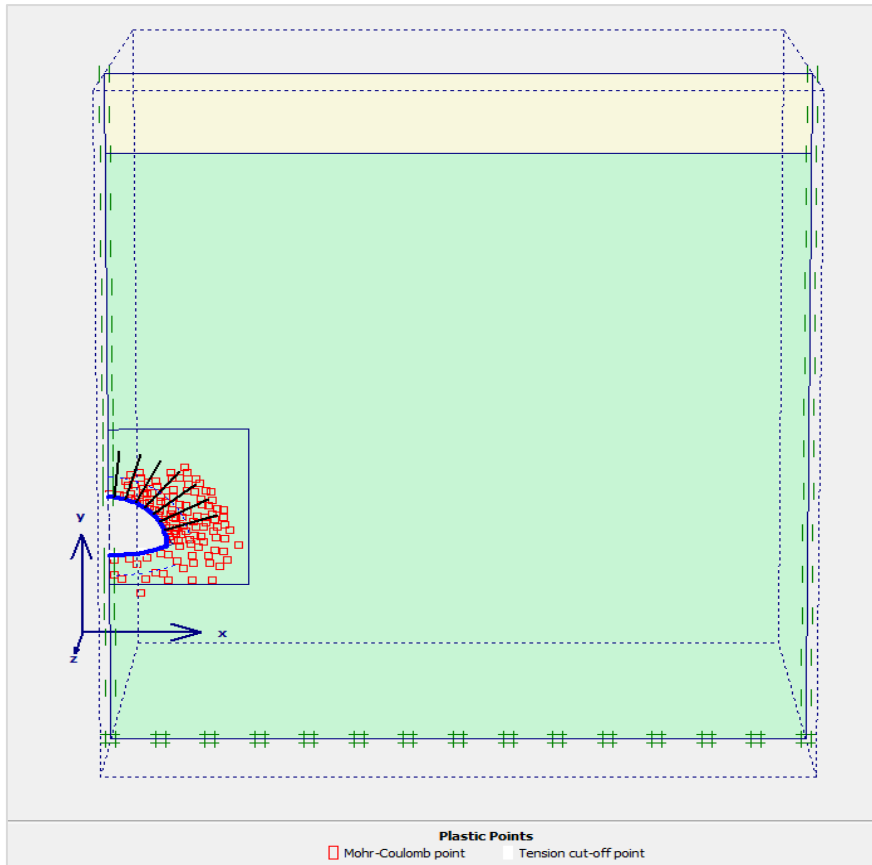
Σχήμα 5.82 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 1 και $k_0=0,5$



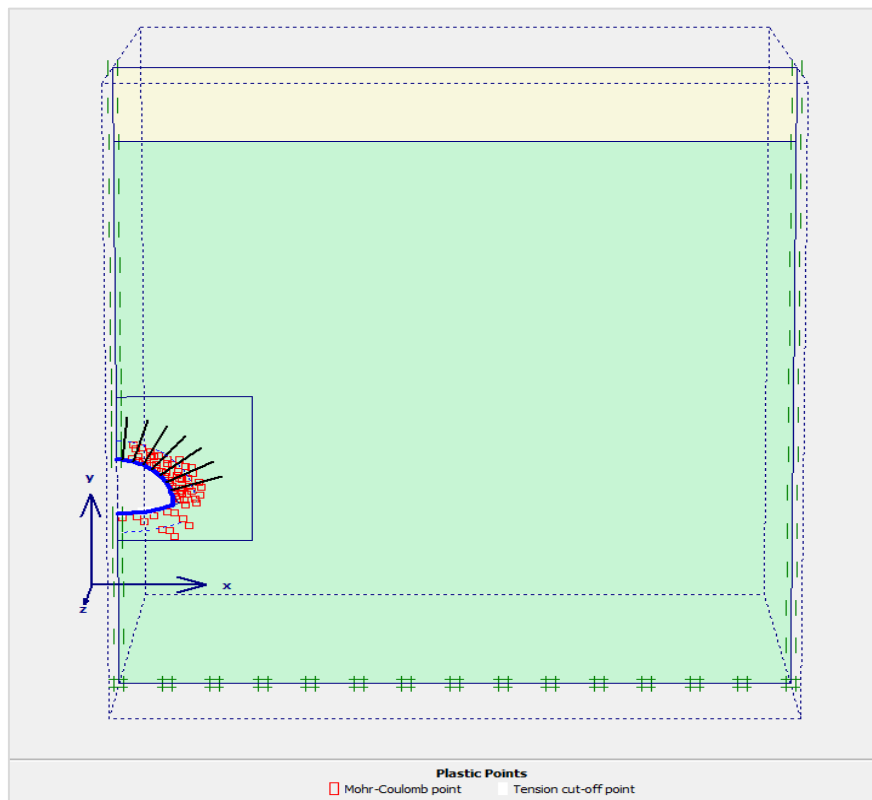
Σχήμα 5.83 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 2 και $k_o=0,5$



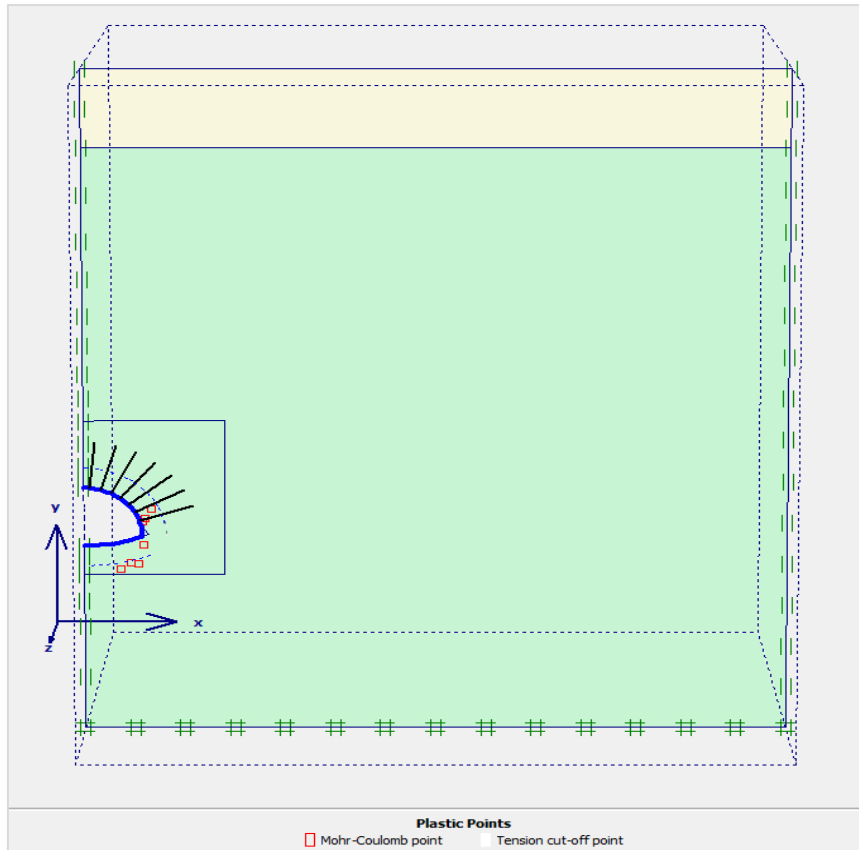
Σχήμα 5.84 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 3 και $k_o=0,5$



Σχήμα 5.85 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 1 και $k_0=0,8$



Σχήμα 5.86 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 2 και $k_0=0,8$

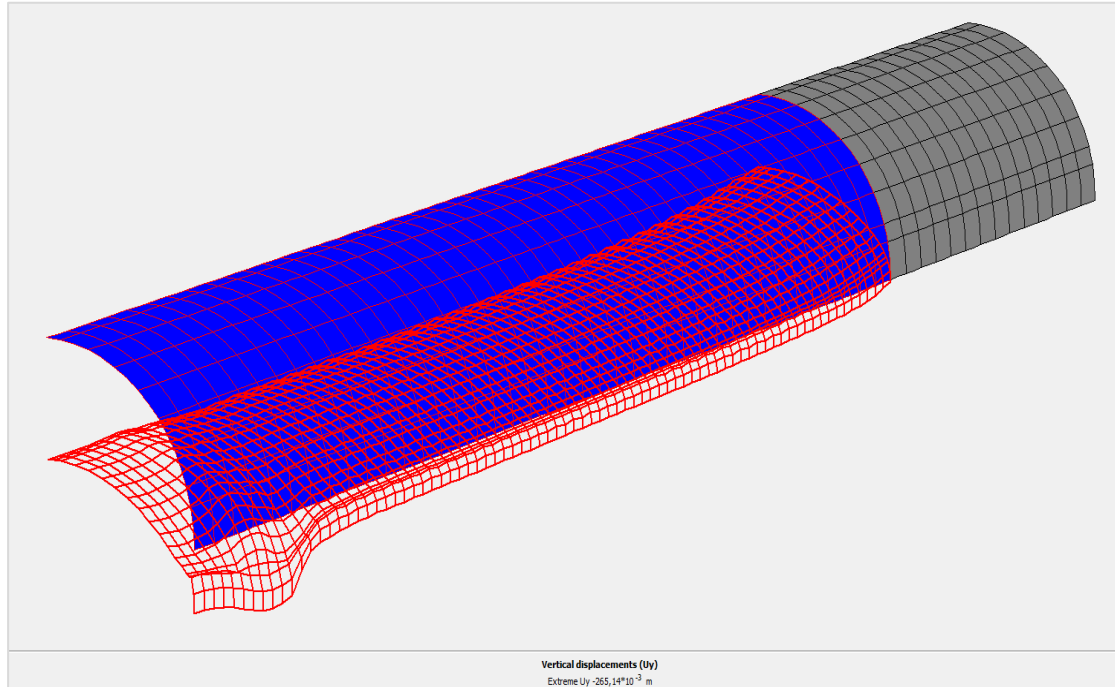


Σχήμα 5.87 Σημεία πλαστικοποίησης για Rock 3 και $k_0=0,8$

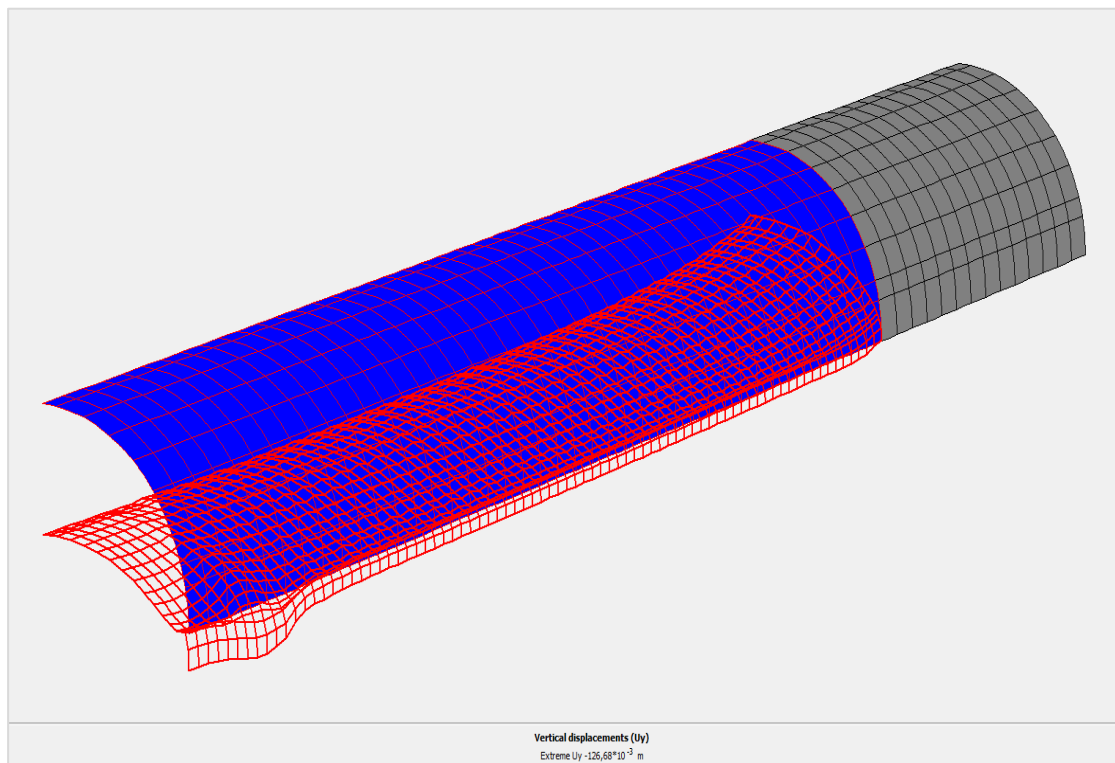
Η σύγκριση των σχημάτων για σταθερό συντελεστή k_0 αποδεικνύει ότι όσο μειώνονται οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων GSI, m_i και σ_{ci} , η έκταση της πλαστικής ζώνης αυξάνεται. Η αλλαγή του συντελεστή οριζοντίων ωθήσεων επηρεάζει κυρίως τη μορφή της ζώνης πλαστικοποίησης. Όταν πλησιάζει τη μονάδα, δηλαδή για $k_0=0,8$, η κατανομή των σημείων πλαστικοποίησης γύρω από τη σήραγγα, τείνει να πάρει κυκλικό σχήμα. Αυτό το γεγονός εξηγεί γιατί αστόχησαν σχεδόν όλα τα αγκύρια στην περίπτωση της βραχώμαζας Rock 1 για $k_0=0,8$, αφού η κατανομή της πλαστικής ζώνης είναι πιο ομοιόμορφη καλύπτοντας έτσι και την περιοχή κοντά στη στέψη. Όταν, όμως, μειώνεται ο συντελεστής σε $k_0=0,5$, η κατανομή των σημείων πλαστικοποίησης γίνεται ανομοιόμορφη και παίρνει μια πεταλοειδή μορφή, που οδηγεί στην εμφάνιση σημείων πλαστικοποίησης σε αρκετή απόσταση από τα όρια της σήραγγας (βλ. σχ. 5.71).

5.8 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

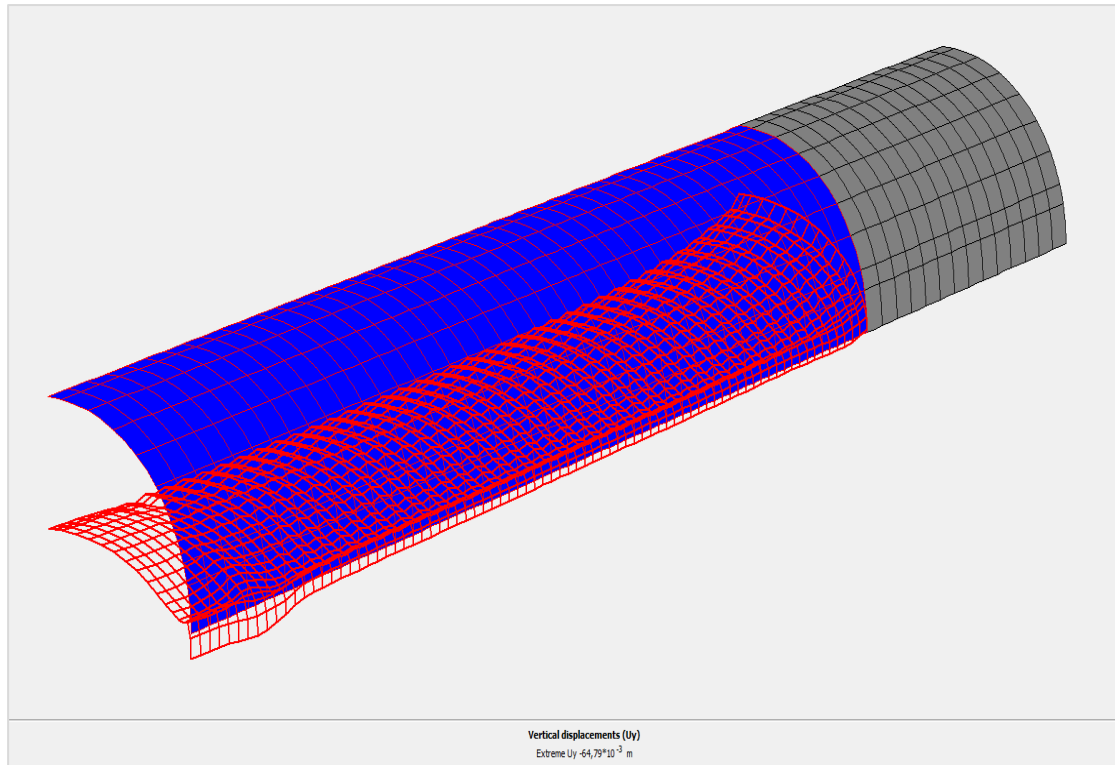
5.8.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΟΡΟΦΗΣ ΤΗΣ ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



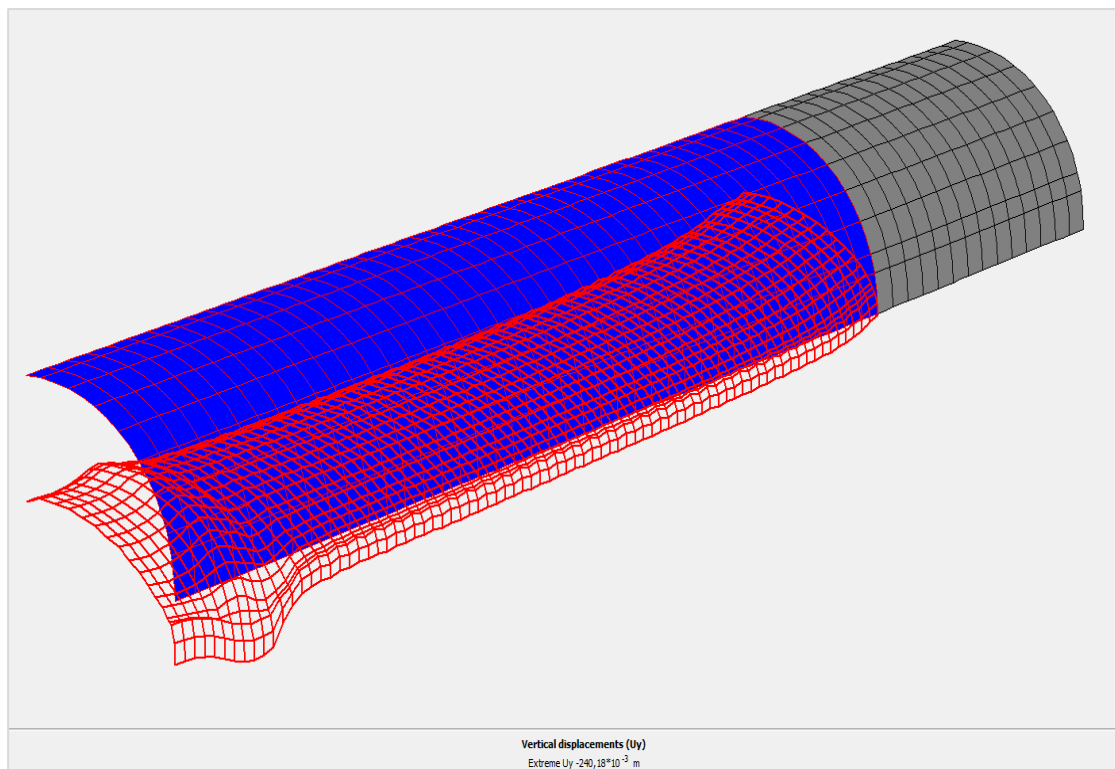
Σχήμα 5.88 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 1 και $k_0=0,5$



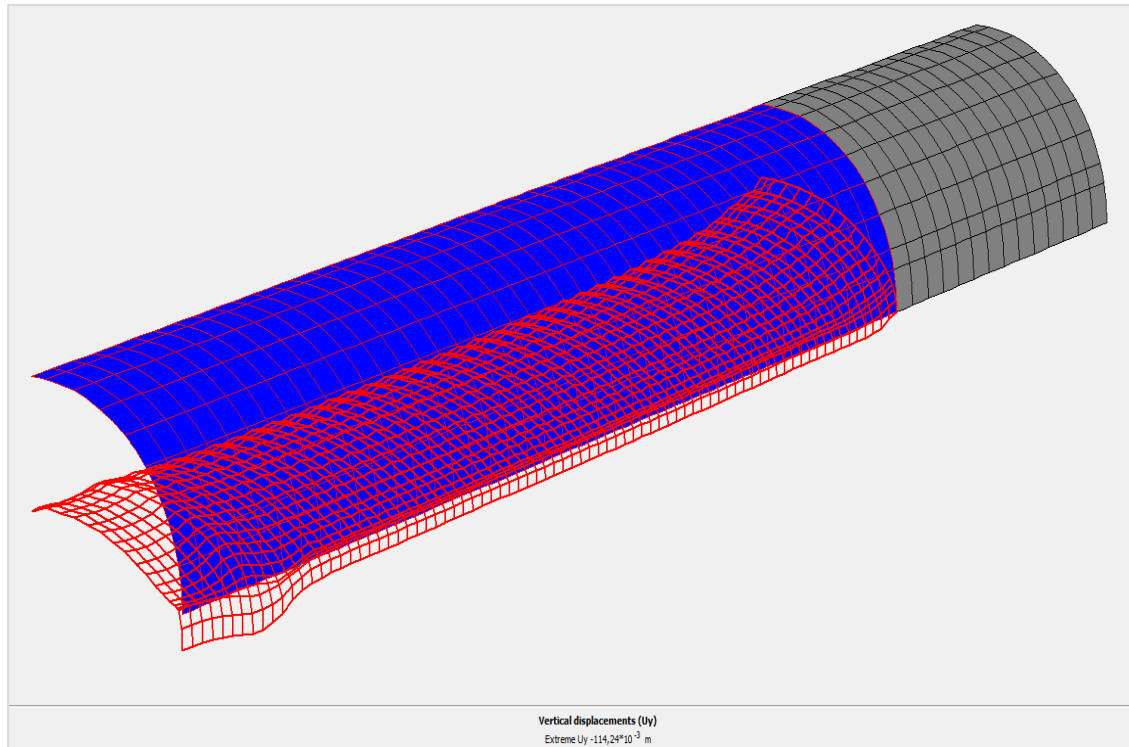
Σχήμα 5.89 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 2 και $k_0=0,5$



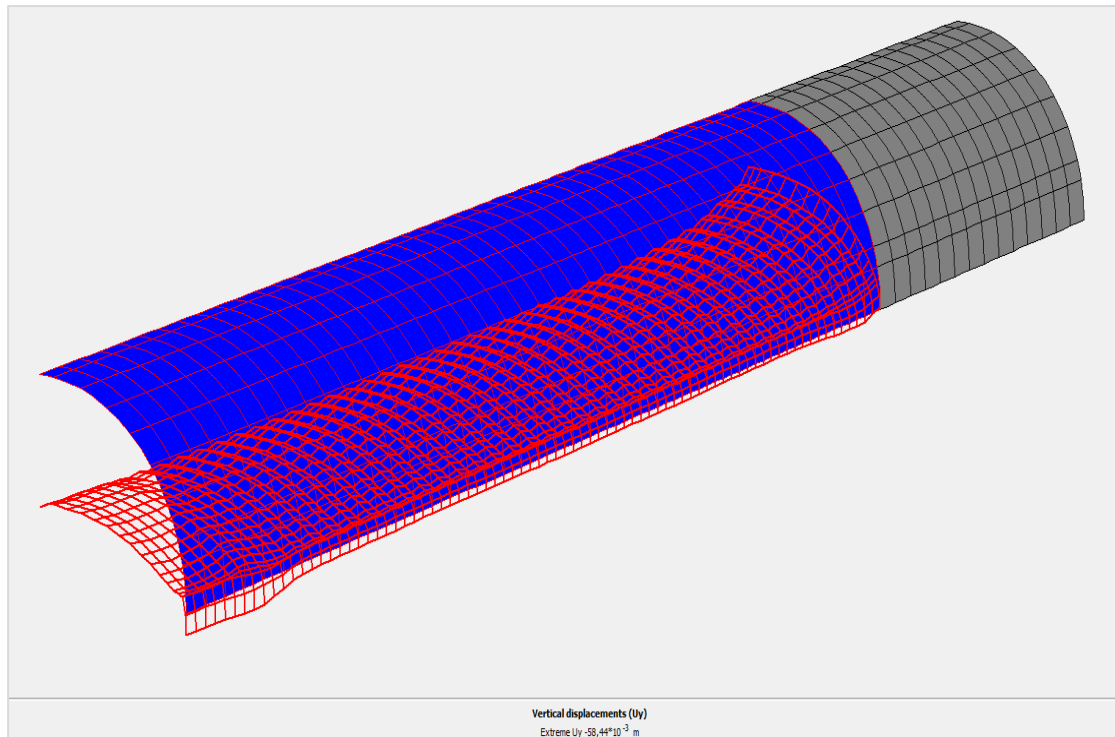
Σχήμα 5.90 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 3 και $k_0=0,5$



Σχήμα 5.91 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 1 και $k_0=0,8$

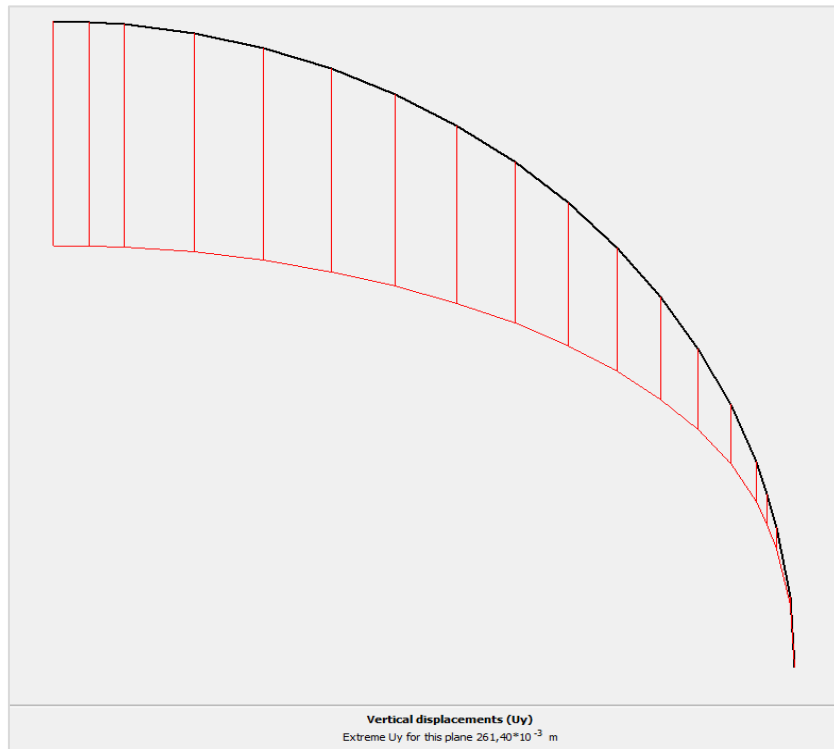


Σχήμα 5.92 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 2 και $k_o=0,8$

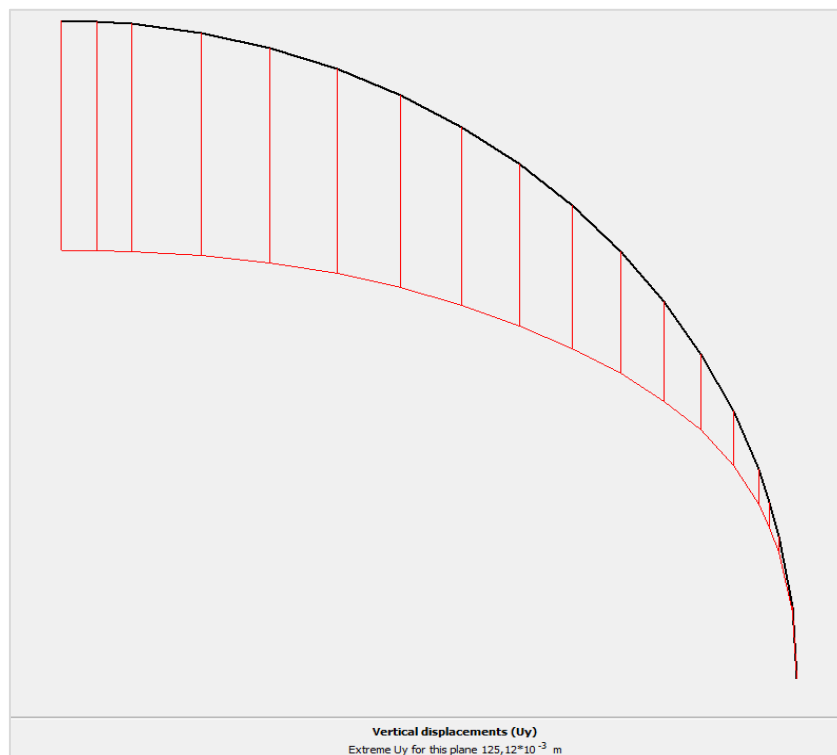


Σχήμα 5.93 Κατανομή συγκλίσεων οροφής για Rock 3 και $k_o=0,8$

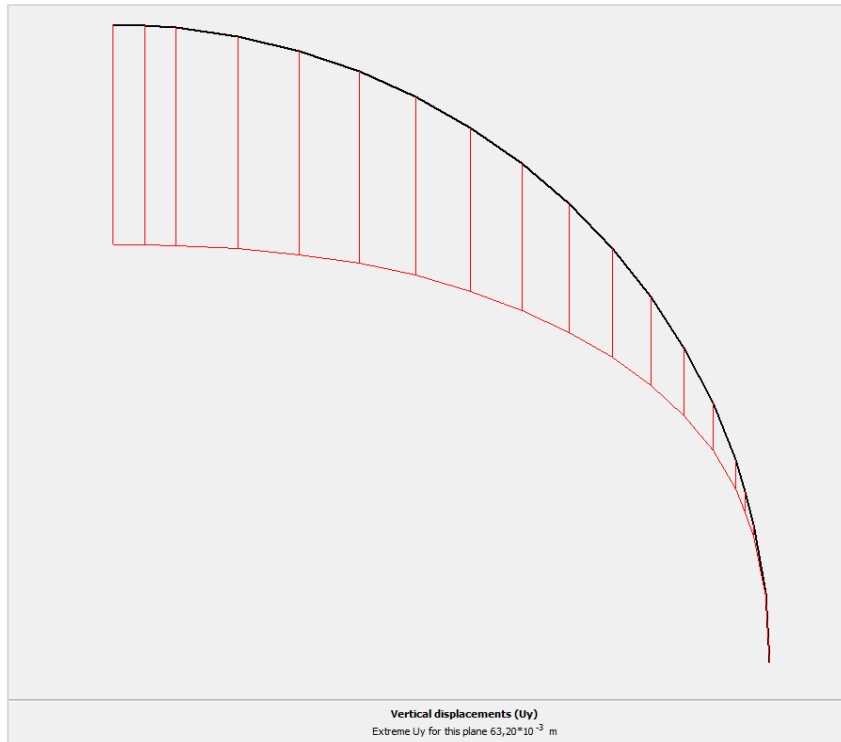
5.8.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΗΣ ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ N



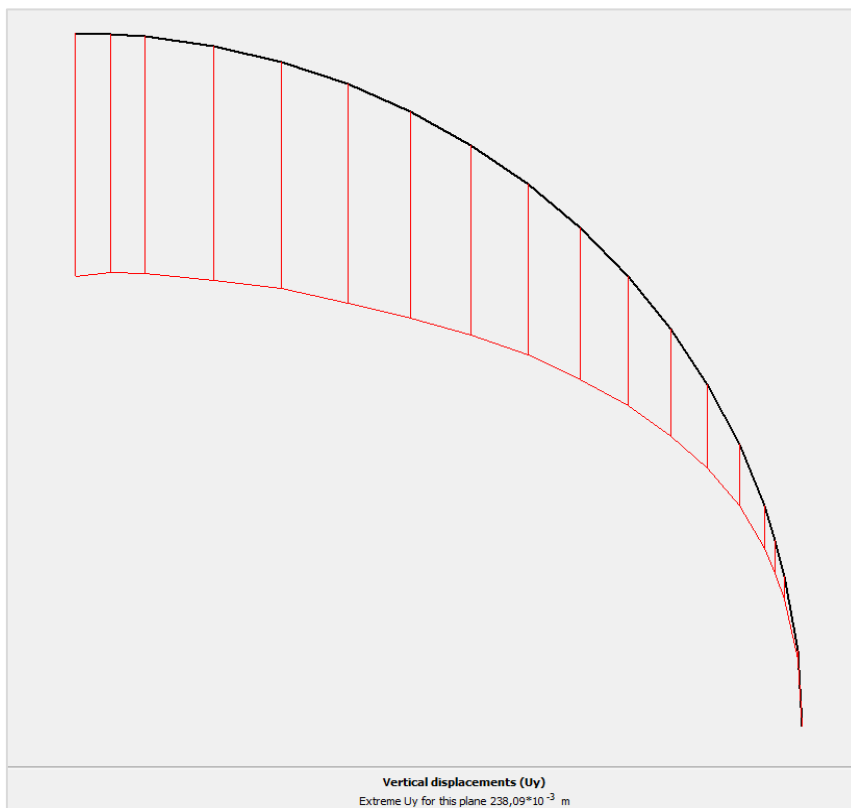
Σχήμα 5.94 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 1 και $k_o=0,5$



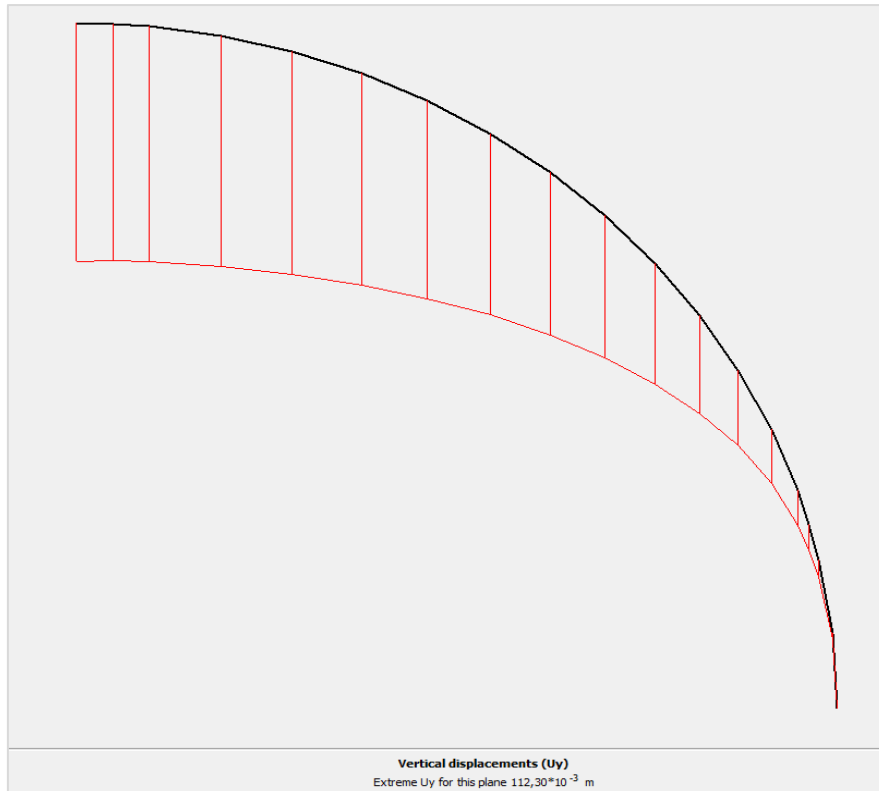
Σχήμα 5.95 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 2 και $k_o=0,5$



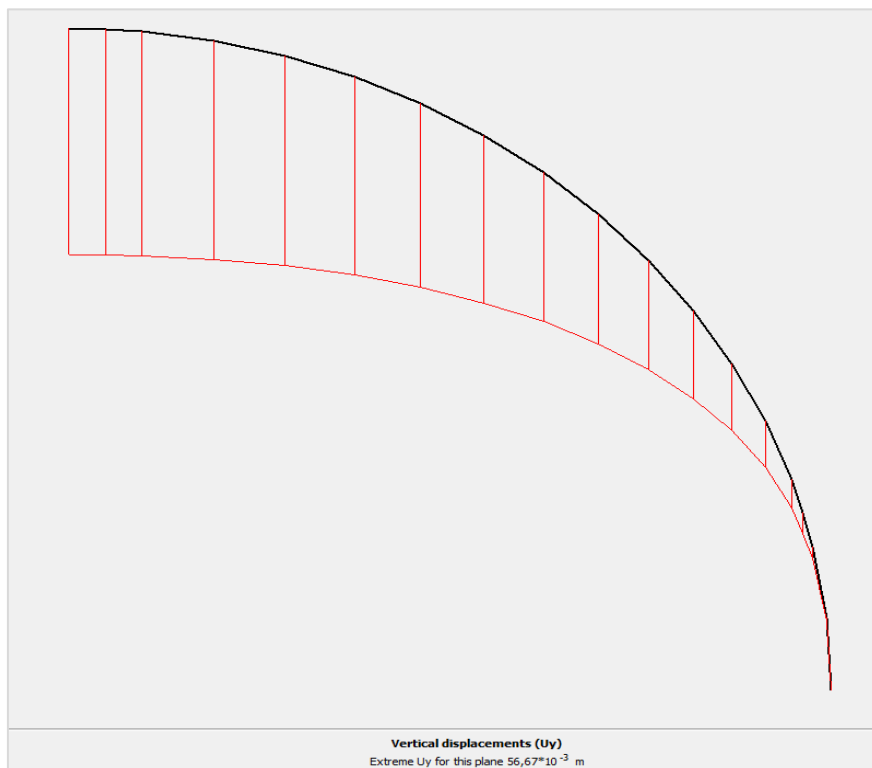
Σχήμα 5.96 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,5$



Σχήμα 5.97 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 1 και $k_o=0,8$

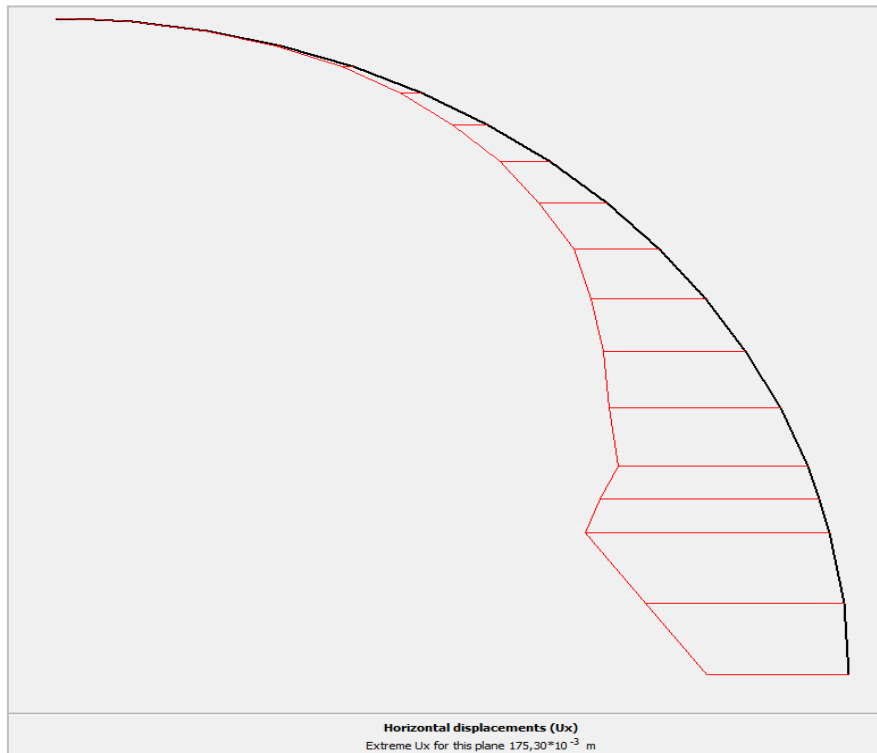


Σχήμα 5.98 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 2 και $k_o=0,8$

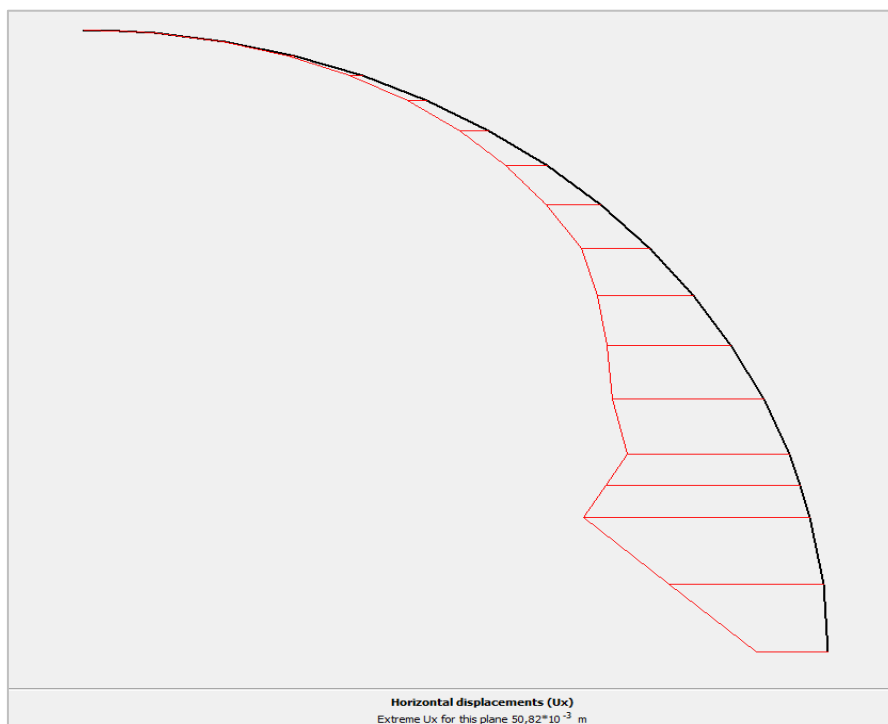


Σχήμα 5.99 Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,8$

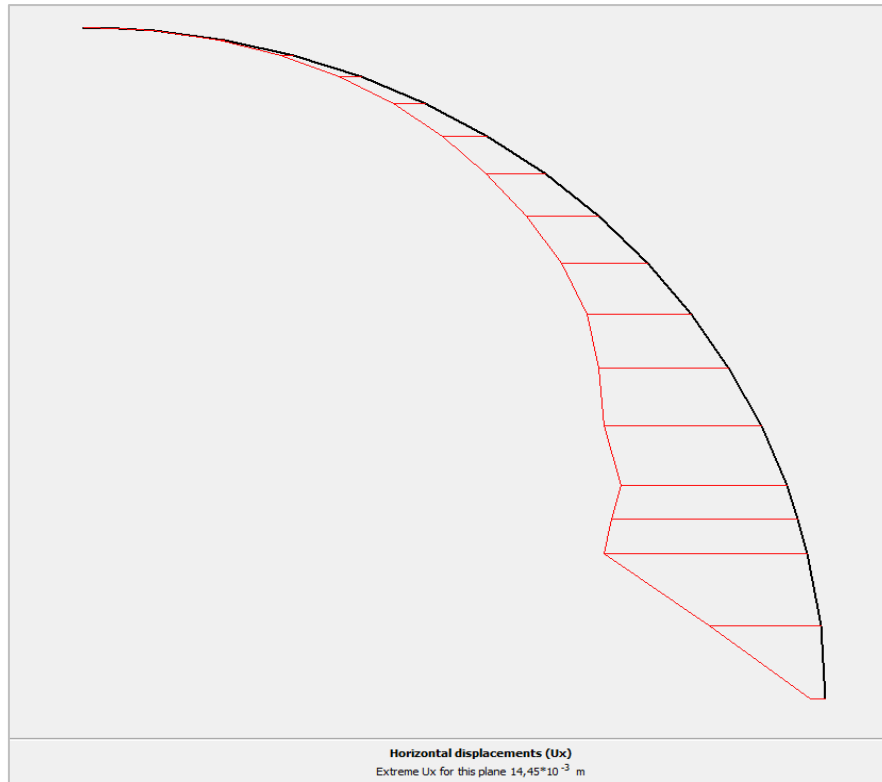
5.8.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΤΗΣ ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ N



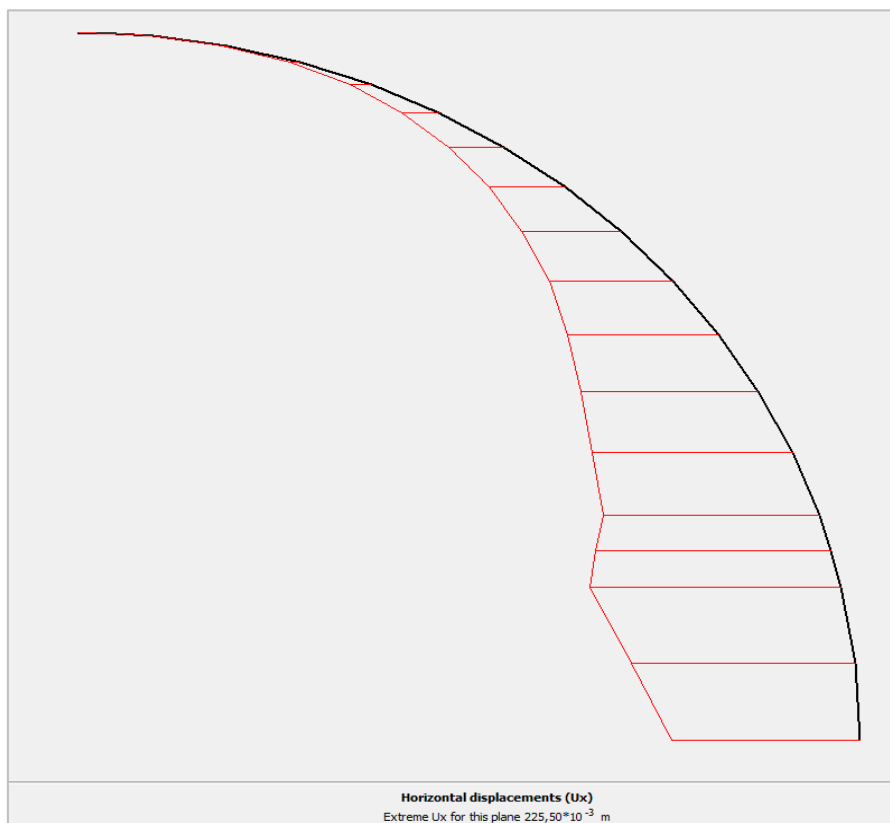
Σχήμα 5.100 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 1 και $k_o=0,5$



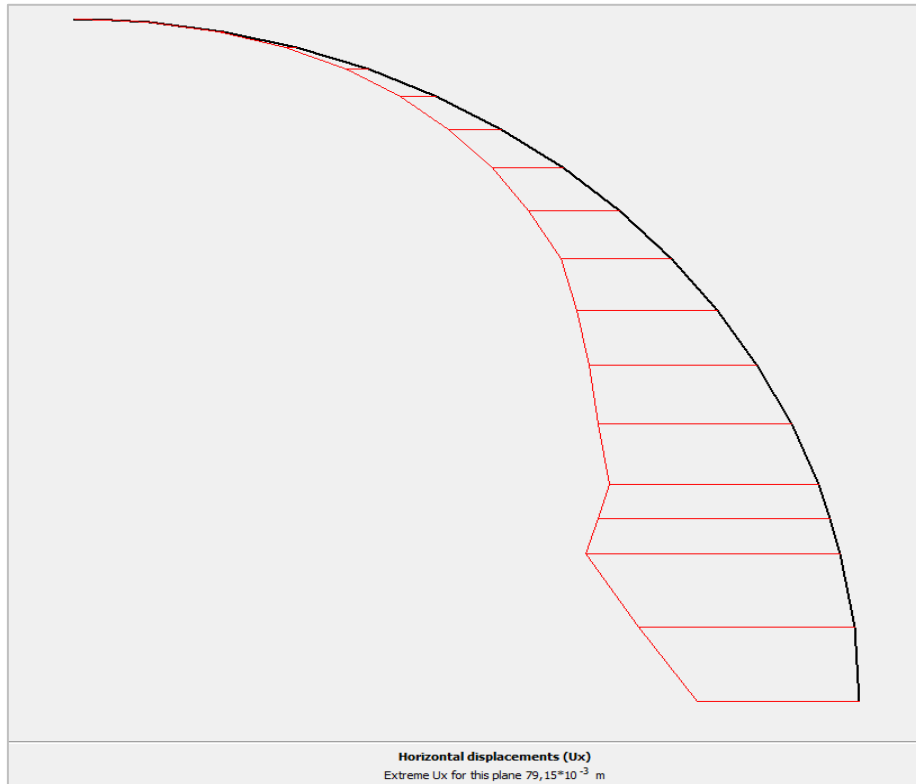
Σχήμα 5.101 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 2 και $k_o=0,5$



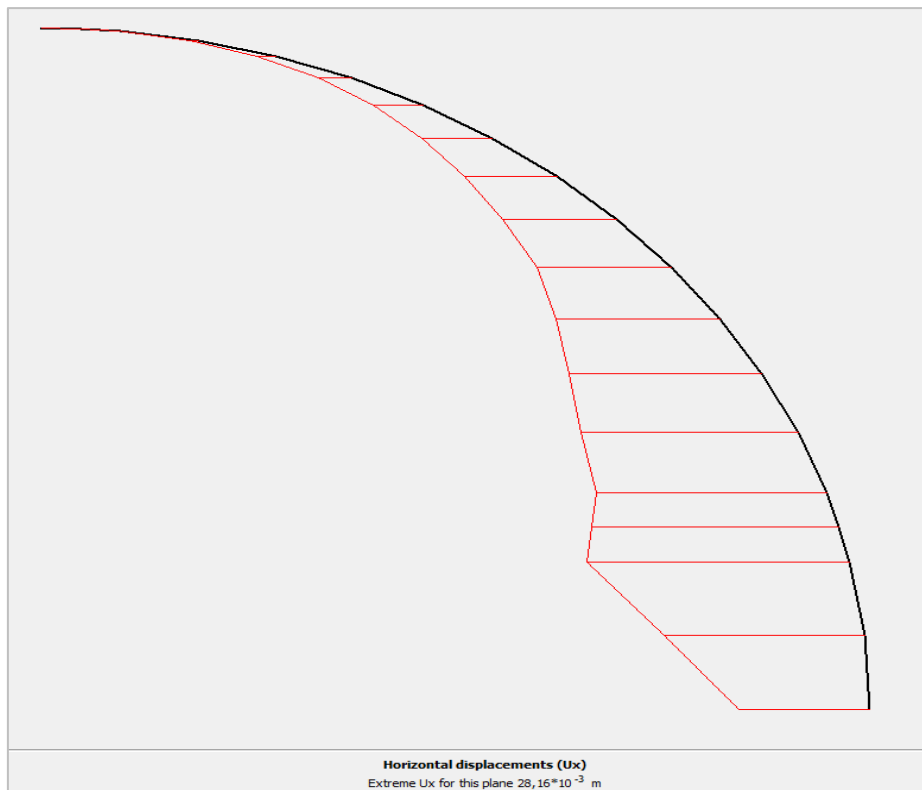
Σχήμα 5.102 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,5$



Σχήμα 5.103 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 1 και $k_o=0,8$

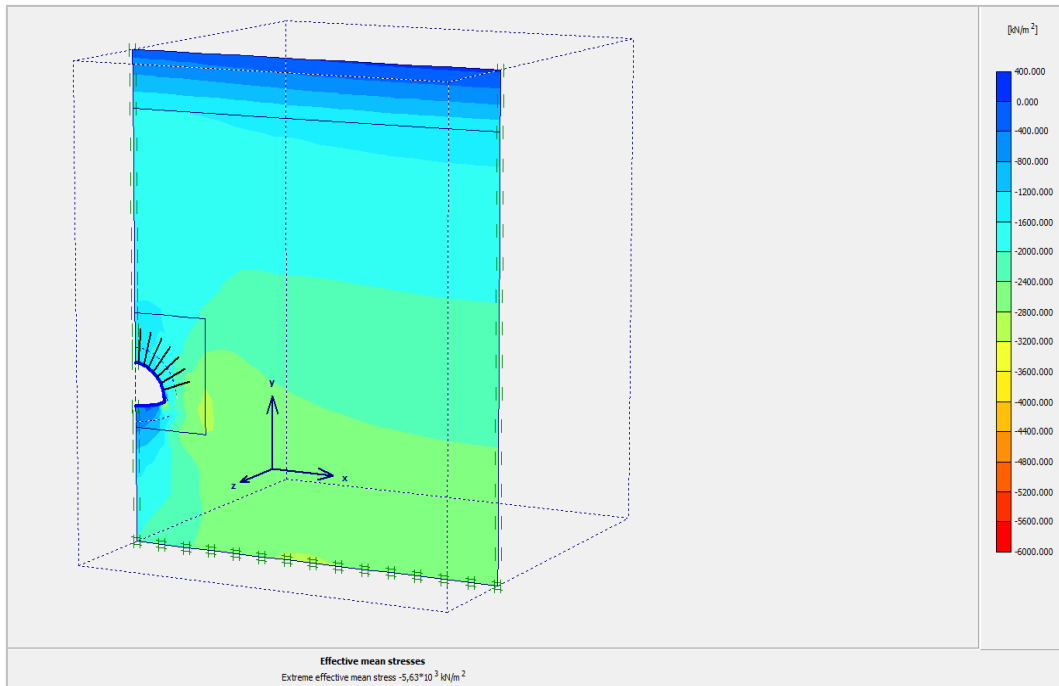


Σχήμα 5.104 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 2 και $k_o=0,8$

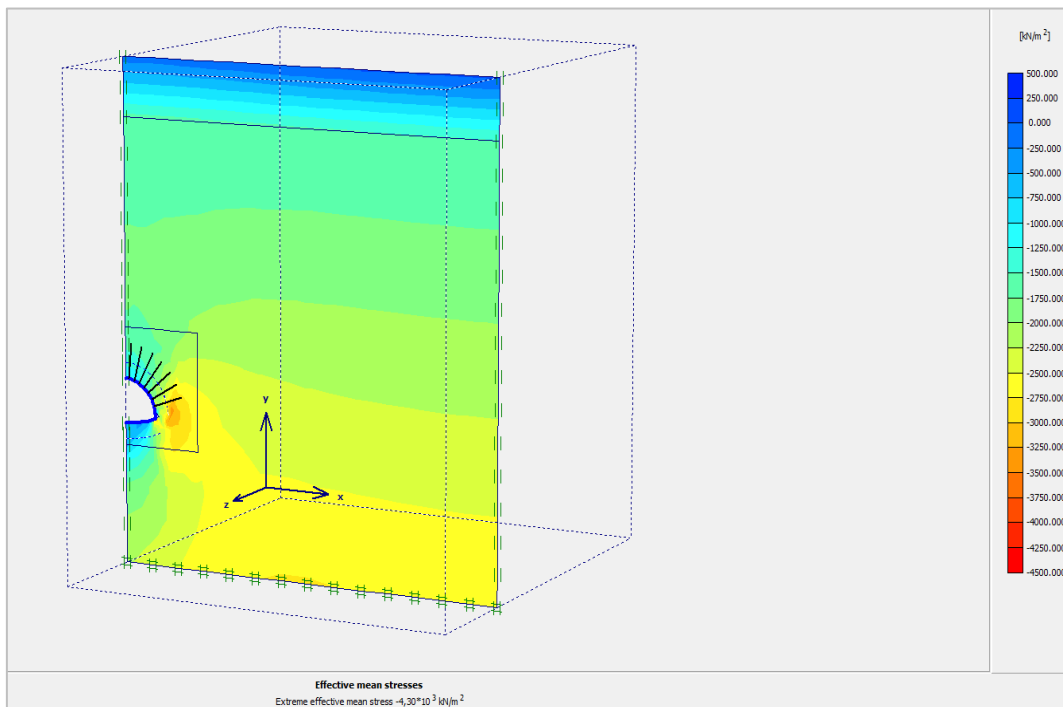


Σχήμα 5.105 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων οροφής στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,8$

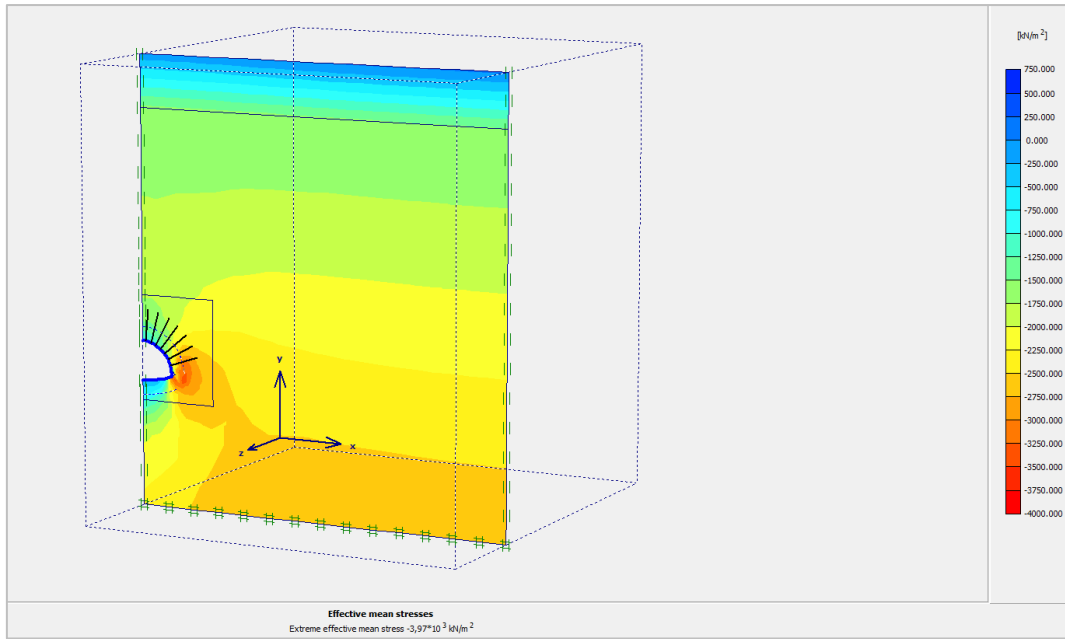
5.8.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΥΡΙΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ Ν



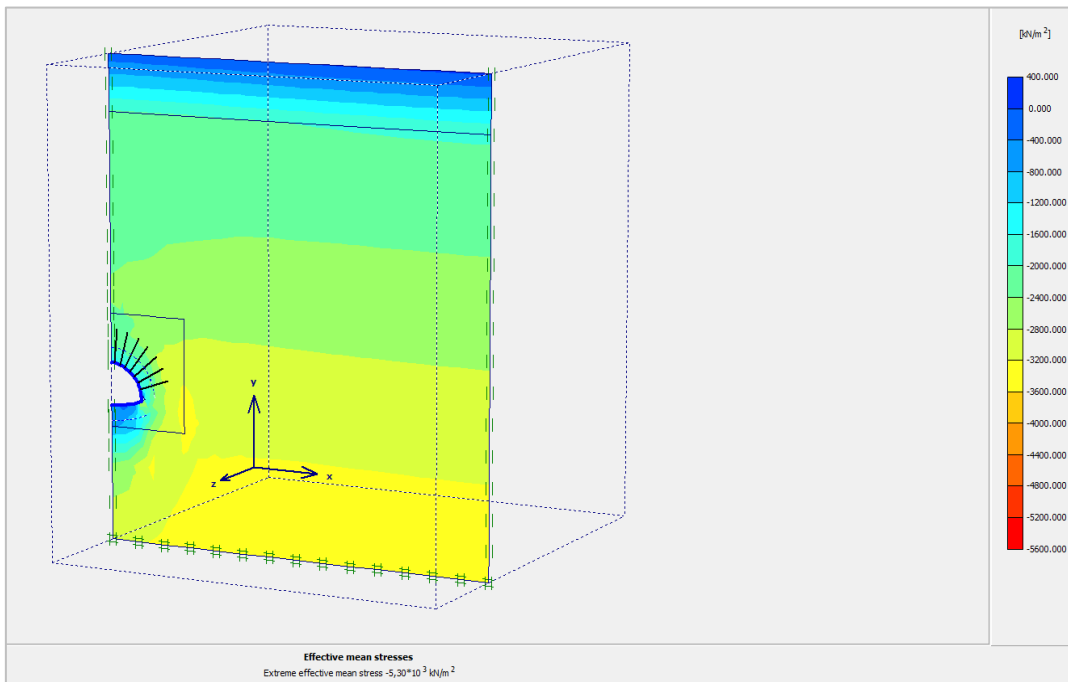
Σχήμα 5.106 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο Ν για Rock 1 και $k_o=0,5$



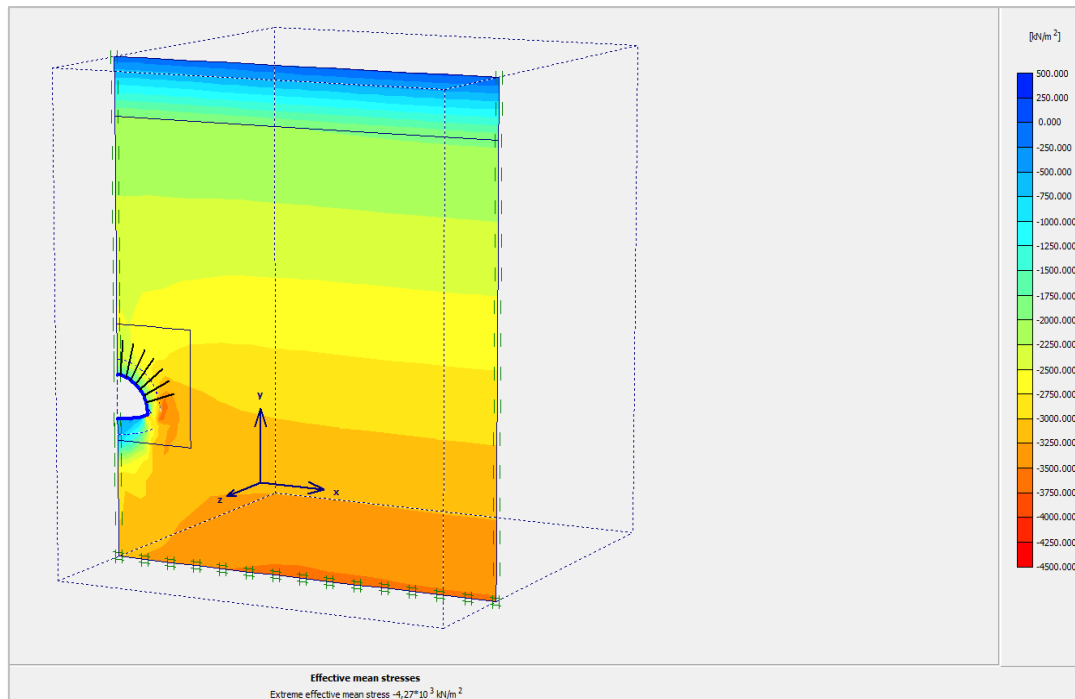
Σχήμα 5.107 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο Ν για Rock 2 και $k_o=0,5$



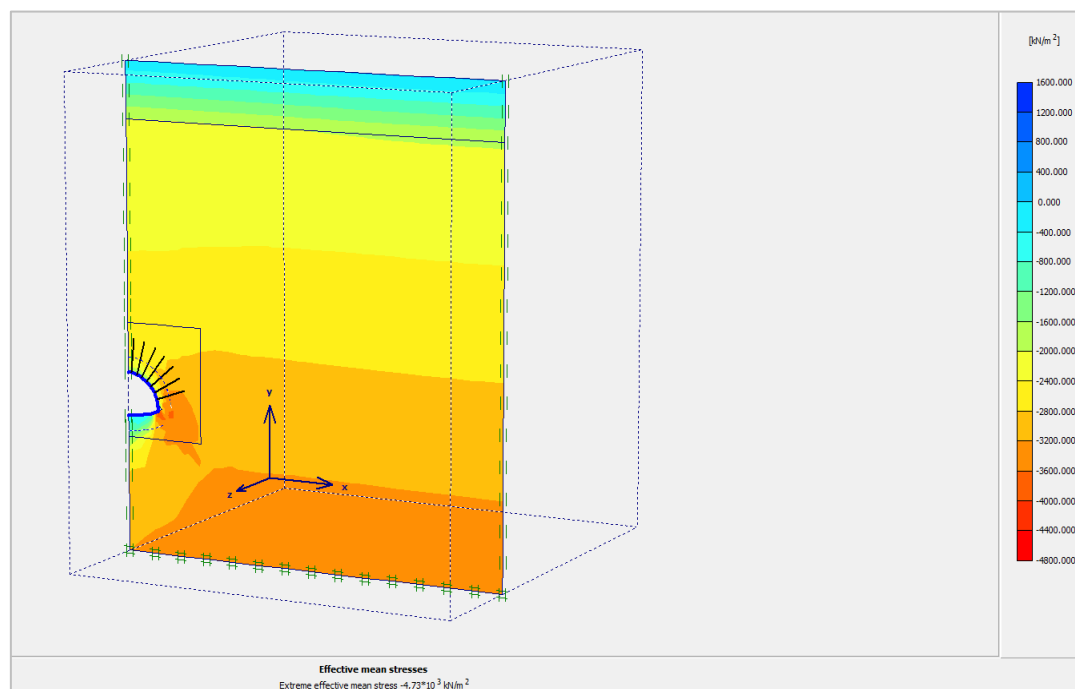
Σχήμα 5.108 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,5$



Σχήμα 5.109 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο N για Rock 1 και $k_o=0,8$



Σχήμα 5.110 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο N για Rock 2 και $k_o=0,8$



Σχήμα 5.111 Κατανομή τάσεων στο επίπεδο N για Rock 3 και $k_o=0,8$

Κεφάλαιο 6ο

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα συμπεράσματα στα οποία οδήγησε η ανάλυση της σήραγγας με το Plaxis 3D Tunnel και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω σύγκρισης των καμπύλων συγκλίσεων, που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

- Συγκρίνοντας τις κατακόρυφες μετακινήσεις τόσο στη στέψη (σημείο Α) όσο και στο σημείο Β, και τις καμπύλες $u_R(x)/u_{R\infty} - x/R$ για τις διάφορες ποιότητες βραχώμαζας και για διαφορετικό συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_o , εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:
 - ✓ Για την ίδια ποιότητα βραχώμαζας η αύξηση του συντελεστή K_o από 0,5 σε 0,8 οδήγησε σε μείωση των συγκλίσεων. Ο λόγος $u_R(x)/u_{R\infty}$ στο μέτωπο επηρεάζεται ελάχιστα από την αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων, ενώ παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μεταβολής του λόγου αυξάνεται, δηλαδή η σύγκλιση φτάνει την τελική τιμή της σε σχετικά μικρότερη απόσταση από το μέτωπο.
 - ✓ Για σταθερό συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_o , η βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας (αύξηση GSI, σ_{ci} , m_i) είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά η κατακόρυφη μετακίνηση. Αντίστοιχα, μειώθηκε και ο λόγος της σύγκλισης στο μέτωπο προς την τελική σύγκλιση, η οποία όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας, επιτυγχάνεται για μικρότερη απόσταση από το μέτωπο.
 - ✓ Για τη σήραγγα στη Χ.Θ. 8+657 η μεγαλύτερη τελική σύγκλιση στη στέψη, όπως υπολογίστηκε από το πρόγραμμα, είναι 261mm και προκύπτει για Rock 1 και $K_o=0,5$, ενώ για το σημείο Β είναι 232mm για τον ίδιο συνδυασμό.
- Συγκρίνοντας τις οριζόντιες μετακινήσεις στο σημείο Β, και τις καμπύλες $u_x/u_y - x/R$ για τις διάφορες ποιότητες βραχώμαζας και για διαφορετικό συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_o , εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:
 - ✓ Για την ίδια ποιότητα βραχώμαζας η αύξηση του συντελεστή K_o από 0,5 σε 0,8 επηρέασε αρνητικά τις οριζόντιες μετακινήσεις προκαλώντας σημαντική αύξηση σε αυτές. Παρατηρείται, μάλιστα, μεγαλύτερη αύξηση, όσο ασθενέστερη είναι η βραχώμαζα. Επιπλέον, όταν το μέτωπο δεν έχει φτάσει ακόμα στο σημείο που εξετάζεται, εμφανίζονται συγκλίσεις πολύ μικρού μεγέθους, αρνητικές, δηλαδή προς τα έξω, όταν $K_o=0,5$.
 - ✓ Για σταθερό συντελεστή ωθήσεων, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των κατακόρυφων μετακινήσεων, οι οριζόντιες αυξάνονται καθώς μειώνεται η

ποιότητα της βραχόμαζας. Η βελτίωση όμως, της ποιότητας του εδάφους, φαίνεται να οδηγεί σε σταθεροποίηση των οριζόντιων συγκλίσεων σε αρκετά μικρότερη απόσταση από το μέτωπο.

- ✓ Στο διάγραμμα των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες μετακινήσεις $u_x/u_y - x/R$, είναι εμφανής η σημαντική αύξηση λόγω της αύξησης του συντελεστή K_0 . Όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας, ο λόγος u_x/u_y αυξάνεται στη θέση του μετώπου για $x/R=0$, καθώς οι τιμές των u_x και u_y πλησιάζουν.
- Συγκρίνοντας την καμπύλη κατακόρυφων συγκλίσεων $u_R(x)/u_{R\infty} - x/R$ στη στέψη της σήραγγας με τις θεωρητικές καμπύλες Chern και Panet, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:
 - ✓ Η καμπύλη Chern δεν επηρεάζεται από τη διαφοροποίηση των γεωτεχνικών παραμέτρων καθώς εξαρτάται μόνο από το λόγο x/R . Κοντά στο μέτωπο, υποεκτιμά αρκετά τις συγκλίσεις καθώς, παρατηρούμε ότι για κάθε ποιότητα βραχόμαζας δίνει μικρότερη τιμή του λόγου $u_R(x)/u_{R\infty}$. Συγκεκριμένα στο μέτωπο, προβλέπεται ότι έχει πραγματοποιηθεί το 31% της σύγκλισης, ενώ ακόμα και στην καλύτερη περίπτωση (Rock 3, $K_0=0,8$) το ποσοστό είναι 49%. Επιπλέον, σύμφωνα με την καμπύλη Chern, η σύγκλιση σταθεροποιείται σε μικρότερη απόσταση από το μέτωπο σε σχέση με τις καμπύλες που υπολογίστηκαν, δηλαδή ο ρυθμός εκδήλωσης των συγκλίσεων είναι μεγαλύτερος. Για αυτόν το λόγο προσεγγίζει καλύτερα τις καμπύλες για την καλύτερη ποιότητα βραχόμαζας Rock 3.
 - ✓ Η καμπύλη Panet διαφοροποιείται ανάλογα με την ποιότητα της βραχόμαζας. Επομένως, συγκρίθηκαν οι καμπύλες για κάθε τύπο βραχόμαζας με την αντίστοιχη καμπύλη Panet. Όπως η καμπύλη Chern, και η καμπύλη Panet αδυνατεί να προσεγγίσει επαρκώς τις συγκλίσεις πολύ κοντά στο μέτωπο, καθώς τις υποεκτιμά αρκετά. Συγκεκριμένα στο μέτωπο, σε κάθε περίπτωση προβλέπει ότι μόνο το 25% της τελικής σύγκλισης θα αναπτυχθεί, ποσοστό ακόμα μικρότερο και από αυτό που προβλέπει η Chern. Ωστόσο, όταν προωθηθεί λίγο το μέτωπο, δηλαδή για απόσταση μεγαλύτερη της μισής διαμέτρου, η καμπύλη Panet προσεγγίζει ικανοποιητικά τις καμπύλες που παρήχθησαν από τα αποτελέσματα του Plaxis. Και σε αυτήν την περίπτωση όμως, υπερεκτιμά και τον ρυθμό εκδήλωσης της τελικής σύγκλισης, θεωρώντας ότι επιτευχθεί σε μικρότερη απόσταση πίσω από το μέτωπο.

- Συγκρίνοντας τις κατακόρυφες και οριζόντιες συγκλίσεις με τις πραγματικές που μετρήθηκαν στη Χ.Θ. 8+657, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:
 - ✓ Στην καμπύλη των μετρηθείσων κατακόρυφων συγκλίσεων παρατηρούμε ότι για μεγάλη απόσταση του μετώπου από τη διατομή στην οποία βρίσκονται οι ακίδες μέτρησης, οι συγκλίσεις συνεχίζουν να αυξάνονται. Μάλιστα, ακόμα και όταν σταματάει η προχώρηση του μετώπου δεν σταθεροποιούνται οι συγκλίσεις. Η συμπεριφορά αυτή, που ισχύει και για την ακίδα 2 στη στέψη αλλά και για την ακίδα 1, είναι ενδεικτική της πιθανής αστοχίας και της μεγάλης έκτασης της πλαστικής ζώνης. Η εξέλιξη των συγκλίσεων με την πάροδο του χρόνου φανερώνει την έντονη επιρροή των ερπυστικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται, επίσης, ότι ενώ στο Plaxis λόγω συμμετρίας της διατομής θεωρείται ότι οι συγκλίσεις στις ακίδες 1 και 3 αριστερά και δεξιά ημιδιατομή αντίστοιχα, είναι ίσες, στην πραγματικότητα διαφέρουν αρκετά τα μεγέθη των συγκλίσεων
 - ✓ Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των διαγραμμάτων κατακόρυφων συγκλίσεων στη στέψη για τις δύο χειρότερες ποιότητες βραχώμαζας Rock 1 και Rock 2 και για $K_0=0,5$ και $K_0=0,8$ με το διάγραμμα των πραγματικών συγκλίσεων, το οποίο δημιουργήθηκε εξετάζοντας τις συγκλίσεις για απόσταση μετώπου έως 78m, καθώς περαιτέρω αυξήσεις των συγκλίσεων οφείλονται αποκλειστικά στην αστοχία. Παρατηρήθηκε ότι για απόσταση μετώπου έως 25m περίπου οι συγκλίσεις που μετρήθηκαν είναι πάρα πολύ μικρές, γεγονός που ίσως υποδεικνύει την παρουσία κάποιου σφάλματος. Ωστόσο, έως τα 30m μπορούμε να πούμε ότι η βραχώμαζα Rock 2, προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική καμπύλη. Όσο όμως προχωρά το μέτωπο του top heading, καλύτερη προσέγγιση προσφέρει η Rock 1. Σε κάθε περίπτωση, η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων είναι πολύ μικρή. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι κατακόρυφες συγκλίσεις στην ακίδα 1 (σημείο B).
 - ✓ Οι καμπύλες των μετρηθείσων οριζόντιων συγκλίσεων, απέδειξαν ομοίως, την παρουσία φαινομένων αστοχίας, καθώς δεν σταθεροποιούνται ενώ το μέτωπο έχει προχωρήσει αρκετά μέτρα. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι εμφανίστηκαν οριζόντιες συγκλίσεις και στη στέψη, ενώ στο πρόγραμμα θεωρήθηκαν μηδενικές οριζόντιες συγκλίσεις λόγω συμμετρίας της διατομής.
 - ✓ Συγκρίνοντας τα διαγράμματα οριζόντιων συγκλίσεων που δημιουργήθηκαν από τα αποτελέσματα του Plaxis με την καμπύλη των μετρηθείσων συγκλίσεων, παρατηρούμε ότι για απόσταση μετώπου έως 25m περίπου, η καμπύλη για Rock 2 και $K_0=0,5$, προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική,

λόγω των χαμηλών τιμών που παρουσιάζει. Καθώς προχωράει το μέτωπο, οι συγκλίσεις αυξάνουν περισσότερο και τείνουν να σταθεροποιηθούν όταν αυτό φτάσει τα 40m. Επομένως, η συμπεριφορά της σήραγγας συμφωνεί περισσότερο με την θεώρηση της βραχώμαζας Rock 1 και για $K_0=0,5$.

- ✓ Σύγκριση πραγματοποιήθηκε και για τα διαγράμματα του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη σύγκλιση u_x/u_y συναρτήσει της απόστασης του μετώπου x . Λόγω των μικρών τιμών των κατακόρυφων συγκλίσεων που μετρήθηκαν στα πρώτα 25m, ο λόγος u_x/u_y λαμβάνει ιδιαίτερα μεγάλη τιμή που τείνει προς τη μονάδα. Για περαιτέρω προχώρηση του μετώπου, οι κατακόρυφες συγκλίσεις αυξάνονται σημαντικά, με αποτέλεσμα να μειωθεί ο λόγος. Έτσι, για απόσταση μεγαλύτερη των 25m περίπου, η καμπύλη για Rock 1 και $K_0=0,5$ σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική καμπύλη.
- Από τον έλεγχο της αξονικής δύναμης που αναπτύχθηκε στα αγκύρια για κάθε διαφορετική ποιότητα βραχώμαζας συμπεραίνουμε ότι:
 - ✓ Όσο μειώνεται η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχώμαζας, για σταθερό συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων, ο αριθμός των αγκυρίων που φτάνουν την οριακή δύναμη διαρροής αυξάνεται.
 - ✓ Για τη χαμηλότερη ποιότητα βραχώμαζας Rock 1, η αύξηση του συντελεστή K_0 από 0,5 σε 0,8, προκάλεσε αύξηση στον αριθμό των αγκυρίων που διέρρησαν, ενώ για τις κατηγορίες Rock 2 και Rock 3 καμία επιρροή δεν παρατηρήθηκε.
 - ✓ Σε κάθε περίπτωση που υπήρξαν αγκύρια που αστόχησαν τότε αυτά ήταν κοντά στον πυθμένα και όχι στην στέψη.
 - ✓ Στην πραγματικότητα σχεδόν όλα τα αγκύρια στην X.Θ. 8+657 αστόχησαν, συμπεριφορά που προσεγγίζεται καλύτερα για Rock 1 και $K_0=0,8$.
- Από τον έλεγχο της έκτασης και της μορφής της ζώνης πλαστικοποίησης για τους διάφορους συνδυασμούς γεωτεχνικών παραμέτρων εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:
 - ✓ Για σταθερό συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_0 , η μείωση των παραμέτρων GSI, σ_{ci} και m_i της βραχώμαζας αυξάνει την έκταση της ζώνης πλαστικοποίησης.
 - ✓ Για την ίδια ποιότητα βραχώμαζας, η αλλαγή του συντελεστή K_0 διαφοροποιεί τη μορφή της ζώνης σημείων πλαστικοποίησης. Συγκεκριμένα, για $K_0=0,8$ καθώς δηλαδή πλησιάζει τη μονάδα, η πλαστική ζώνη τείνει να

πάρει κυκλικό σχήμα. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται ότι σχεδόν όλα τα αγκύρια αστοχούν για Rock 3 και $K_0=0,8$. Για $K_0=0,5$, το σχήμα της ζώνης πλαστικοποίησης μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο ως πεταλοειδές. Είναι επομένως, περισσότερο ομοιόμορφη η κατανομή των σημείων πλαστικοποίησης όσο ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων πλησιάζει τη μονάδα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Grasso P., Scotti G., Blasini G., Pescara M., Floria V., Kazilis N.*, Successful application of the observational design method to difficult tunnel conditions – Driskos tunnel
2. *Hoek E.*, Tunnel support in weak rock, Keynote address, Symposium of Sedimentary Rock Engineering, Tapei, Taiwan, November 20-22, 1998
3. *Hoek E.*, Support for very weak rock associated with faults and shear zones. Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on rock support and reinforcement practice in mining, Kalgoorlie, Australia 14-19 March 1999
4. *Hoek E., Carranza-Torres C. and Corzum B.*, Hoek-Brown criterion-2002 edition, Proc Narms-Tac conference, Toronto 2002
5. *Hoek E. and Diederichs M.S.*, Empirical estimation of rock mass modulus, International journal of rock mechanics and mining, 2006
6. *Hoek E. and Marinos P.*, Απόσπασμα έκθεσης, Egnatia Highway Geotechnical and Tunneling Panel of Experts Sixth report, 1999
7. *Hoek E. and Marinos P.*, Απόσπασμα έκθεσης, Egnatia Highway Geotechnical and Tunneling Panel of Experts Tenth report, 2000
8. *Hoek E. and Marinos P.*, Predicting tunnel squeezing, Tunnels and Tunnelling International, Part 1 November 2000, Part 2 December 2000
9. *Hoek E. and Marinos P.*, Απόσπασμα έκθεσης για τη σήραγγα του Δρίσκου, 2002
10. *Hoek E. and Marinos P.*, A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion, November 2007
11. *Hoek E. and Marinos P.*, Tunnelling in overstressed rock, 2009
12. *Καββαδάς Μ.*, Σχεδιασμός Υπογείων Έργων, Εκδόσεις ΕΜΠ
13. *Μαρίνος Π.*, Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998
14. *Marinos P.*, The tunnels of Egnatia Highway. Design and construction in a variety of rock masses under difficult conditions, Cross Canada lecture tour, May 13 2005

15. *Marinos P. and Hoek E.*, GSI- A geologically friendly tool for rock mass estimation. Proc GeoEng conference, Melbourne 2000
16. *Marinos P. and Hoek E.*, Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bulletin of engineering geology and environment, 2001
17. *Marinos V, Marinos P and Hoek E.*, The geological strength index: applications and limitations, Bull. Eng. Geol. Environ.
18. *Μελέτη σχεδιασμού*
19. *Μπουρνάζος Ι., Δελαπόγλου Π. και Κοντοθανάσης Π.*, Σήραγγα Δρίσκου – Μελέτες, εμπειρίες, πρόοδος εργασιών, στοιχεία κατασκευής. Δημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού» , Ιωάννινα 7-8/12/2001
20. *Παρηγόρης Γ., Στάρα-Γκαζέτα Ε.* Σήραγγα Δρίσκου – Σχεδιασμός της προσωρινής υποστήριξης και τελικής επένδυσης σήραγγας σε φλύσχη. Δημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού» , Ιωάννινα 15-16/10/1999
21. *Παπαδόπουλος Β.*, Στοιχεία του μαθήματος «Βραχομηχανική και σήραγγες», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007