



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ–ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΠΡΟΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΑΒΑΘΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ–ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΠΡΟΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΑΒΑΘΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .../.../....

Αλέξανδρος Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Πάυλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την Αριθμητική προσομοίωση της μεθόδου πρότμησης στο μέτωπο αβαθών σηράγγων και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σοφιανό Αλέξανδρο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. για την ανάθεση του θέματος, την άψογη συνεργασία μας, την επιστημονική του καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Γιούτα-Μήτρα Παρασκευή, Μεταλλειολόγο Μηχανικό, ΜΔΕ Ε.Μ.Π., για τη συνεχή καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υπομονή και την στήριξή της σε όλη τη διάρκεια συγγραφής αυτής της εργασίας και στο συνολικό διάστημα φοίτησής μου στο Ε.Μ.Π. που στάθηκε δίπλα μου στις εύκολες και στις δύσκολες στιγμές της ζωής μου. Τέλος ευχαριστώ τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου με το ενδιαφέρον τους και τη διάθεσή τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Διαφορές μεταλλευτικών και τεχνικών υπόγειων έργων.....	2
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	4
2.1. Ιστορική εξέλιξη των σηράγγων	4
2.2. Προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων.....	6
2.3. Απαιτήσεις ανάλυσης και σχεδιασμού των σηράγγων.....	7
2.4. Βασικές αρχές της ανάλυσης και του σχεδιασμού των σηράγγων.....	10
2.5. Επιδράσεις της επιτόπου εντατικής κατάστασης κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων ..	15
2.5.1. Ανάλυση του αρχικού εντατικού πεδίου	15
2.5.2. Ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων γύρω από τη διάνοιξη του υπόγειου ανοίγματος.....	20
2.5.3. Μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.....	23
2.6. Μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού των σηράγγων.....	27
2.6.1. Εμπειρικές και ημι-εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού	28
2.6.2. Αναλυτικές μέθοδοι σχεδιασμού.....	37
2.6.3. Αριθμητικές μέθοδοι σχεδιασμού	42
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	46
3.1. Εκσκαφή Σηράγγων	46
3.1.1. Κοπή και Επίχωση.....	48
3.1.2. Μέθοδοι σημειακής κοπής	51
3.1.3. Εκσκαφή με σφύρες	54
3.2. Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής	56
3.2.1. TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης.....	57
3.2.2. TBM με ασπίδα	58
3.2.3. TBM χωρίς ασπίδα.....	59
3.3. Εκσκαφή σε Κατοικημένες περιοχές ή κοντά στην Επιφάνεια.....	60
3.3.1. Ασπίδες πεπιεσμένου αέρα.....	61
3.3.2. Ασπίδες πολφού (slurry).....	61
3.3.3. Ασπίδες αντιστάθμισης πίεσης με λάσπη (EPB).....	64
3.4. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ «N.A.T.M».....	65
3.4.1. Χαρακτηριστικά της μεθόδου N.A.T.M.....	66

4. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	72
4.1. Γενικά.....	72
4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του μετώπου	74
4.3. Τρόποι ενίσχυσης της ευστάθειας του μετώπου.....	76
4.4. Μηχανισμοί αστοχίας.....	79
4.4.1. Μηχανισμοί αστοχίας Leca and Dormieux.....	79
4.4.2. Οριακή ισορροπία σφήνας Anagnostou and Kovari	82
5. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ	84
5.1. Υποστήριξη και ενίσχυση του Πετρώματος.....	84
5.2. Μέθοδοι ενίσχυσης.....	85
5.2.1. Οριζόντια αγκύρια μετώπου(fiberglass).....	85
5.2.2. Αποστράγγιση υδάτων	88
5.2.3. Κατακόρυφα αγκύρια.....	89
5.2.4. Πάγωμα εδάφους (freezing)	90
5.3. ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	91
5.3.1 Δοκοί προπορείας.....	92
5.3.2. Εδαφοπάσσαλοι με ένεμα υψηλής πίεσης(jet grouting columns)	92
5.3.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete).....	94
5.3.4. Περιφερειακή πρότμηση (precutting).....	97
5.3.5. Περιφερειακή πρότμηση με χρήση της τεχνικής pre tunnel.....	104
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PHASE ²	117
6.1. Εισαγωγή.....	117
6.2. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase ²	117
6.3. Προετοιμασία προσομοιώματος.....	118
6.3.1. Στάδια εκσκαφής-υποστήριξης	118
6.3.2. Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης.....	118
6.3.3. Ιδιότητες υλικών γεωμάζας	118
6.3.4. Τάσεις πεδίου-Φορτίσεις.....	119
6.4. Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase ²	119
6.5. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.....	120
6.6 Μοντέλο προσομοίωσης.....	121
6.6.1 Ρυθμίσεις (Project Settings)	122
6.6.2 Entering Boundaries	122

6.6.3 Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize).....	122
6.6.4 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing).	123
6.6.5 Τασικό πεδίο (Field Stress).....	123
6.6.6 Καθορισμός γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών.....	123
6.6.7 Υποστήριξη	123
6.6.8 Καθορισμός ιδιοτήτων κελύφους.....	124
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	128
7.1 Παρουσίαση των αναλύσεων στο πρόγραμμα Phase ²	128
7.2. Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2α	129
7.3. Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2β.....	151
7.4 Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2γ.....	172
7.5. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών.....	192
7.5.1. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών	197
7.6. Περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου πρότμησης.....	203
7.6.1. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών.....	213
7.6.2. Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών.....	217
7.6.3. Σύγκριση των εντατικών μεγεθών με προϋποστήριξη του «βραχώδη» σχηματισμού με τον εδαφικό σχηματισμό 9.2γ.....	219
7.7. Σύγκριση των ολικών μετατοπίσεων και των κυρίων τάσεων του «βραχώδη» σχηματισμού με τους εδαφικούς σχηματισμούς 9.2α, 9.2β, 9.2γ.....	222
7.7.1. Συνολικές παρατηρήσεις μετά την τοποθέτηση προϋποστήριξη και της μεμονωμένης χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete).....	230
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	233
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	235

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ραγδαίοι ρυθμοί της αστικής ανάπτυξης οδήγησαν σε αυξημένες απαιτήσεις διάνοιξης σήραγγων για την εξυπηρέτηση διαφόρων έργων υποδομής, όπως τα δίκτυα κοινής ωφέλειας και τα συγκοινωνιακά δίκτυα.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, την εμπειρία των προηγούμενων ετών και μετά από πλήθος ερευνών, έχει πλέον καταστεί δυνατή η διάνοιξη σήραγγων σε συνθήκες οι οποίες τα προηγούμενα χρόνια θεωρούνταν απαγορευτικές. Σε αυτό συνέβαλε η κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας και η εφαρμογή βοηθητικών μεθόδων ενίσχυσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η παρουσίαση των μεθόδων υποστήριξης και ενίσχυσης της βραχώμαζας κατά την φάση εκσκαφής και αφετέρου η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας μίας μεθόδου περιφερειακής προϋποστήριξης μετώπου σε διάφορους εδαφικούς σχηματισμούς. Αρχικά, διερευνάται ο συνδυασμός αυτής της προϋποστήριξης με την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος, συνδυασμός ο οποίος δύναται να θεωρηθεί μία «σύνθετη επένδυση», και στη συνέχεια, συγκρίνεται αυτή η «σύνθετη επένδυση» με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Οι αναλύσεις έγιναν με το διδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων “Phase²”. Με την βοήθεια του προγράμματος αυτού, σε πρώτο στάδιο υπολογίστηκαν αριθμητικά και γραφικά οι κύριες τάσεις και οι μειώσεις των εξωθήσεων του μετώπου και των ακτινικών μετατοπίσεων κατά τη φορά διάνοιξης της σήραγγας και σε δεύτερο στάδιο, μελετήθηκαν τα εντατικά μεγέθη. Και στα δύο στάδια, όλα τα μεγέθη προσδιορίστηκαν τόσο στην περίπτωση εφαρμογής της «σύνθετης επένδυσης», όσο και στην περίπτωση της μεμονωμένης εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τελικά, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η περιφερειακή προϋποστήριξη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου έναντι της μεμονωμένης εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ακόμα και για χαμηλότερης ποιότητας εδάφη.

ABSTRACT

The rapid pace of urban development has led to increased tunnel construction requirements to accommodate various infrastructure projects.

Thanks to the evolution of technology, the experience of previous years after numerous researches, it has now become possible to construct tunnels under conditions which in previous years were considered too difficult to deal with. The problems that arose by these conditions were solved thanks to the understanding of failure mechanisms as well as the application of auxiliary strengthening methods concerning the surrounding rock mass.

The purpose of this thesis is the presentation of rock mass supporting and strengthening methods during excavation phase on the one hand and the study of the effectiveness of a preliminary tunnel face support method, when applied in different soil formations, on the other. The above-mentioned method applied in combination with the application of shotcrete form a “composite liner” which is then compared to the individual use of shotcrete.

Analyses were performed with the “Phase²” two-dimensional finite elements code. The use of this code enabled the numerical and graphical calculations of the main stresses and the reductions of the tunnel face displacements and of the radial displacements. The code was also used to calculate the axial forces, shear forces and bending moments. All calculations were made assuming two cases: application of the “composite liner” and application of the shotcrete alone. The solutions analysis showed that the tunnel preliminary support is greatly effective in reducing face displacements in comparison to the application of the shotcrete alone, even for low quality grounds.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Ως σήραγγες ορίζονται οι οριζόντιες ή παραοριζόντιες τεχνητά σκαμμένες υπόγειες δίοδοι (Σοφριανός, 2015). Είναι συνήθως δύσκολα τεχνικά έργα που διανοίγονται σε μικρά βάθη (30-50m όπως η κατασκευή του Μετρό) ή σε πολύ μεγάλα βάθη(π.χ. 3000m), πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης δόθηκε η ευκαιρία στους ανθρώπους να κατασκευάζουν στις μέρες μας υπόγεια έργα τα οποία στους προηγούμενους αιώνες ήταν αδύνατον με τα μέσα που διέθεταν να τα κατασκευάσουν. Τα υπόγεια έργα γενικά διακρίνονται σε **μεταλλευτικά** και σε **τεχνικά**, επομένως καταλαβαίνουμε ότι είναι αντικείμενο μελέτης και των μεταλλειολόγων μηχανικών και των πολιτικών μηχανικών. Μεταλλευτικά έργα (εικόνα1.1) είναι τα μεταλλεία, τα ορυχεία και τα λατομεία. Πρόκειται δηλαδή για υπόγεια έργα που κατασκευάζονται προσωρινά με σκοπό την εξόρυξη κοιτασμάτων χρήσιμων για την μεταλλευτική βιομηχανία.



Εικόνα 1.1:Ορυχείο χρυσού στη Νότια Αφρική

Τα τεχνικά έργα (εικόνα 1.2), που διακρίνονται σε πολιτικά και στρατιωτικά είναι μόνιμα έργα υπόγειων χώρων τα οποία εξυπηρετούν ανθρώπινες κυρίως δραστηριότητες.



Εικόνα 1.2: Μετρό Θεσσαλονίκης, επέκταση γραμμής Καλαμαριάς (Σοφιανός, 2015)

1.2. Διαφορές μεταλλευτικών και τεχνικών υπόγειων έργων

Στα μεταλλευτικά έργα κατασκευάζονται φρέατα, ράμπες, στοές, και χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη και αποκόμιση του μεταλλεύματος κατά τη λειτουργία του μεταλλείου ενώ η μορφή τους προσαρμόζεται στις επί τόπου ανάγκες και συνθήκες.

Αντίθετα τα τεχνικά έργα εξυπηρετούν ανάγκες της πολιτείας, για κάθε μία από τις οποίες προδιαγράφεται αυστηρά η μορφή τους (διατομή, μηκοτομή). Ανάλογα, λοιπόν με την χρήση τους διακρίνονται σε:

- Συγκοινωνιακά, όπως σήραγγες σιδηροδρομικές, αστικής μαζικής μεταφοράς (Μετρό), οδικές, πεζών, ναυσιπλοΐας, κλπ.

- Μεταφοράς, όπως οι σήραγγες ύδρευσης, αποχέτευσης, εκτροπής, εκκένωσης πυθμένα, προσαγωγής, φυγής καλωδίων, εκτόνωσης πίεσης, μεταφοράς υγρών ή αερίων, κλπ.
- Στάθμευσης, όπως πολυώροφα υπόγεια γκαράζ.
- Αποθήκευσης υλικών.
- Διαμονής, όπως τα καταφύγια, τα υπόγεια αθλητικά κέντρα, κλπ.
- Παραγωγής, όπως οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, χώροι μετασχηματισμών, κλπ.
- Φρέατα , όπως προσπέλασης και αερισμού.
- Βοηθητικά, τσιμεντενέσεων, αποστραγγίσεων, κλπ. (Σοφιανός, 2011)

Οι αστικές σήραγγες (Μετρό) είναι αβαθείς κατασκευές που εξυπηρετούν χιλιάδες επιβάτες καθημερινά και απαιτείται υψηλό κόστος για την δημιουργία τους. Η κατασκευή τους είναι μία πολύπλοκη διαδικασία που εμπεριέχει αβεβαιότητες και είναι απαραίτητη η προσεκτική μελέτη και η έρευνα των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στις περιοχές εκτέλεσης των εργασιών, προκειμένου να εξεταστεί ποια μέθοδος εκσκαφής θα επιλεγεί, τι υποστήριξη (αρχική και τελική) θα χρησιμοποιηθεί, με ποιο μηχανολογικό εξοπλισμό θα γίνουν οι εκσκαφές και η τοποθέτηση της υποστήριξης και γενικά όλες οι φάσεις κατασκευής, ώστε οι μηχανικοί να πετύχουν την μέγιστη ασφάλεια εργασιών, την ασφαλή λειτουργία του έργου μετά την αποπεράτωσή του με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης των σηράγγων εξαρτάται από το γεωλογικό υλικό και την ύπαρξη υπόγειων νερών. Όταν το υλικό είναι έδαφος, άργιλος, άμμος, χαλίκια, αποσαθρωμένο πέτρωμα, δηλαδή όταν οι τιμές της αντοχής του υλικού είναι πολύ χαμηλές επιλέγεται η μηχανική μέθοδος εκσκαφής και η τοποθέτηση ‘‘προσωρινής’’ υποστήριξης. Όταν όμως είναι πέτρωμα (βράχος) δεν γίνεται μηχανική εκσκαφή και μπορεί να απαιτούνται ελάχιστα μέσα υποστήριξης.

Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζεται η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου υλικού. Αυτή καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα από ασθενή ιζηματογενή πετρώματα με αντοχή 10-40Μρα έως τα ισχυρά πυριγενή πετρώματα με αντοχή 150-300Μρα.

Μία κατάσταση που δημιουργεί προβλήματα κατά τη μηχανική εκσκαφή και την τοποθέτηση της υποστήριξης είναι η περίπτωση του μικτού μετώπου. Πρόκειται για μία κατάσταση στην οποία το μέτωπο της σήραγγας διέρχεται ένα διαχωριστικό

ορίζοντα του βράχου με το έδαφος με αποτέλεσμα ένα τμήμα του μετώπου να βρίσκεται μέσα στο έδαφος και το υπόλοιπο να βρίσκεται σε σκληρό πέτρωμα. Για την αντιμετώπιση τέτοιων δυσμενών καταστάσεων είναι απαραίτητη η μελέτη των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. (Σοφιανός, 2011).

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

2.1. Ιστορική εξέλιξη των σηράγγων

Τα υπόγεια έργα είναι αποτέλεσμα συνδυασμού της επιστήμης, της τεχνολογίας και της ευφυΐας των ανθρώπων. Ωστόσο δεν είναι σύγχρονα κατασκευαστικά επιτεύγματα της εφαρμοσμένης μηχανικής. Δημιουργήθηκαν χιλιάδες χρόνια πριν από τις κοινωνίες σε μικρότερη βέβαια κλίμακα, αφού βασίστηκαν στην εμπειρία και στα ελάχιστα τεχνολογικά μέσα που διέθεταν για να εξυπηρετήσουν διάφορους σκοπούς τους, όπως θρησκευτικούς, μεταλλευτικούς, μεταφοράς, ύδρευσης κ.α. καθώς είχαν συνειδητοποιήσει την ανάγκη κατασκευής των υπόγειων έργων για να επιτύχουν την πολιτισμική και τεχνολογική ανάπτυξή τους.

Μερικά παραδείγματα υπογείων έργων που συναντάμε από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα είναι τα εξής:

- Στη Μάλτα και στην Αίγυπτο εντοπίζονται οι πρώτες υπόγειες δίοδοι οι οποίες κατασκευάστηκαν για θρησκευτικούς σκοπούς και χρονολογούνται μεταξύ 3000 και 1000 π.Χ.
- Στον Ευφράτη ποταμό συναντάται η πρώτη υπόγεια διάβαση με μήκος 1km προκειμένου να συνδεθούν τα βασιλικά ανάκτορα της Βαβυλώνας με τον λατρευτικό ναό.
- Στο Λαύριο το 2000 π.Χ. οι αρχαίοι μεταλλωρύχοι δημιούργησαν υπόγειες οδούς για να εκμεταλλευτούν τα κοιτάσματα της περιοχής.
- Στην Σάμο τον 6^ο αιώνα π.Χ. κατασκευάστηκε το περίφημο Ευπαλίνειο (εικόνα 2.1) όρυγμα με μήκος περίπου 1036 m για την εξασφάλιση παροχής ύδατος στο Πυθαγόρειο.



Εικόνα 2.1: Ευπαλίνειο όρυγμα στη Σάμο (Σοφινός, 2011)

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ήταν ότι ανοίχθηκε ταυτόχρονα και από τις δύο πλευρές του βουνού. Οι σήραγγες συναντήθηκαν περίπου στο μέσον με αξιοθαύμαστη ακρίβεια σημαντικό επίτευγμα για τα τεχνολογικά δεδομένα της εποχής.

- Στη Ρωμαϊκή περίοδο κατασκευάστηκαν οι εντυπωσιακές για την εποχή σήραγγες όπως και η οδική σήραγγα στο Pausilippo κοντά στη Νάπολη το 36 π.Χ. με μήκος 1450m, πλάτος 7,5m και ύψος 9m.
- Στην εποχή της Αναγέννησης συναντάμε κατασκευή εξαιρετικών τεχνικών έργων όπως της διώρυγας στη θέση Malpas το 1679 επί Λουδοβίκου XIV όπου κατασκευάστηκε μέσα σε τόφρους (δηλαδή πυροκλαστικά πετρώματα τα οποία προέρχονται από υλικά που εκτινάσσονται από τα ηφαίστεια) με μήκος 157m και διατομή 6,5m x 8m. Για την διάνοιξη της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά πυρίτιδα.
- Κατά το 17ο και 18ο αιώνα κατασκευάστηκαν διάφορες σήραγγες, κυρίως για διευκόλυνση των μεταφορών σε χώρες με ορεινούς όγκους (Ελβετία, Αυστρία κ.ά.).
- Σήραγγες για διέλευση σιδηροδρόμων κάτω από βουνά κατασκευάστηκαν στο διάστημα 1826-1830 μεταξύ Λίβερπουλ – Μάντσεστερ στην Αγγλία και στο διάστημα 1837-1839 μεταξύ Λειψίας και Δρέσδης στη Γερμανία.
- Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής κατασκευάστηκαν οι δύο πρώτες σήραγγες στη διώρυγα Union της Pennsylvania στις θέσεις Schuylkill και Lebanon το 1818 και το 1826 αντίστοιχα.

- Στην Ευρώπη ολοκληρώθηκε το 1994 η σήραγγα της Μάγχης μετά από πολλές προσπάθειες έναρξης κατά τον 19^ο και 20^ο αιώνα λόγω οικονομικών, τεχνικών, πολιτικών λόγων. Πρόκειται, ουσιαστικά για τρεις σήραγγες παράλληλες μεταξύ τους μήκους 50km (Σοφιανός, 2011).

2.2. Προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων

Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων συναντώνται προβλήματα αστοχίας κυρίως στα στόμια, στο μέτωπο εκσκαφής και σε διατομές πίσω από το μέτωπο σε απόσταση μεγαλύτερη από δύο φορές περίπου την διάμετρο της σήραγγας.

Η **αστάθεια στα στόμια** της υπόγειας εκσκαφής εκδηλώνεται συνήθως με ρωγμές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μικρομετακινήσεις μαζών στις παρειές αλλά και γενικευμένη αστοχία, με σημαντικές κατολισθήσεις στα πρανή στην είσοδο της σήραγγας.

Η ευστάθεια των στομίων κατά την διάνοιξη της σήραγγας αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση μελέτης επειδή οι θεωρήσεις, όσο αφορά την δυναμική του εντατικού γεωστατικού πεδίου, είναι διαφορετικές σε σχέση με τις αντίστοιχες στην ανάλυση της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την κύρια εκσκαφή.

Συγκεκριμένα, η βραχώμαζα στην είσοδο της σήραγγας είναι συνήθως αποσαθρωμένη και εξαλλοιωμένη, λόγω γεινίασης με την επιφάνεια του εδάφους ενώ και οι αρχικές συνθήκες δεν είναι γεωστατικές. Υπάρχουν σημαντικές αρχικές διατμητικές τάσεις λόγω της κλίσης του φυσικού ή τεχνητού πρανούς, με άμεση συνέπεια τις ιδιαίτερες απαιτήσεις στον έλεγχο των συνθηκών ευστάθειας και τον σχεδιασμό μεθόδων επέμβασης για την ασφαλή διαμόρφωση των στομίων της σήραγγας.

Η **αστοχία στο μέτωπο** κατά την προχώρηση της εκσκαφής της σήραγγας, μπορεί να επέλθει με εισροή χαλαρού υλικού ή εκτίναξη τεμαχίων πετρώματος, σφήνες, λόγω ύπαρξης υψηλών τάσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα. Στις περισσότερες περιπτώσεις μάλιστα που η βραχομάζα είναι έντονα ρηγματωμένη, με σημαντικές επιφάνειες ασυνεχειών, ενδέχεται να εκδηλωθούν απότομες και ανεξέλεγκτες καταπτώσεις υλικού με πιθανές εκτεταμένες εισροές υδάτων στο μέτωπο που

οφείλονται στον εγκλωβισμό τεράστιων ποσοτήτων νερού υπό πίεση μεταξύ των αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ενδεχόμενη είναι επίσης, η αστάθεια της οροφής κατά την προχώρηση του μετώπου με υπερεκσκαφή ή κατάρρευση υλικού. Ο έλεγχος αυτής της συμπεριφοράς απαιτεί από τον σχεδιασμό της άμεσης υποστήριξης τόσο την επάρκεια του συστήματος που θα τοποθετηθεί, όσο και την κατάλληλη διαδικασία και τον χρόνο στον οποίο θα τοποθετηθεί το σύστημα υποστήλωσης.

Αστοχία πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής, κατά την διάνοιξη των σηράγγων σε συνθλίβονται εδάφη, και συνήθως σε απόσταση μεγαλύτερη από δύο διαμέτρους, παρατηρούνται έντονα φαινόμενα μεγάλων και χρονικά εξελισσόμενων συγκλίσεων των παρειών, βύθιση της οροφής και ανύψωση του πυθμένα της σήραγγας, τα οποία μπορεί να ολοκληρώνονται κατά την κατασκευή ή να συνεχίζονται. Το μέγεθος των φαινομένων αυτών, οφειλόμενων στον συνδυασμό του υφιστάμενου εντατικού πεδίου και των ιδιοτήτων του πετρώματος, αλλά και στην αρνητική συμβολή του υπόγειου νερού, είναι εξαρτώμενο της αλληλουχίας της εκσκαφής και των μεθόδων της τεχνικής υποστήριξης.

Αποτέλεσμα της ανάπτυξης των μεγάλων παραμορφώσεων είναι οι αστοχίες στα εφαρμοζόμενα συστήματα υποστήλωσης, όπως διαμήκεις ή εγκάρσιες ρωγμές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μετώπου των τοιχωμάτων της εκσκαφής της σήραγγας, βύθιση των βάσεων των τόξων των χαλύβδινων πλαισίων και πιθανή ολική καταστροφή τους, χρονικά εξελισσόμενες υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους, που μπορεί να απειλήσουν την λειτουργικότητα και την στατικότητα των υφιστάμενων επιφανειακών δομημάτων.

2.3. Απαιτήσεις ανάλυσης και σχεδιασμού των σηράγγων

Ο σκοπός της ανάλυσης της διάνοιξης και της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων σε δυσμενείς γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες, όπως οι περιοχές έντονου τεκτονισμού και μικρού υπερκειμένου, είναι:

- Έλεγχος της ευστάθειας των στομιών, του μετώπου και της διατομής σε κάθε φάση της εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και ο έλεγχος της δυνατότητας των μέτρων υποστήριξης να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας.

Τα προηγούμενα χρόνια, κατά την διάνοιξη σηράγγων σε περιοχές με μικρό υπερκείμενο, η ευστάθεια του μετώπου δεν απασχολούσε ιδιαίτερα τους μηχανικούς, αφού τις παραμορφώσεις μικρής κλίμακας που ενδεχομένως αναπτυσσόταν, μπορούσαν να τις περιορίσουν με τη χρήση διάφορων πρακτικών μεθόδων στις περιπτώσεις που ήταν απαραίτητο. Ωστόσο, όπως επιβεβαιώνει και η εμπειρία στη διάνοιξη σηράγγων σε δυσμενείς γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες η αύξηση του μεγέθους και του βάθους τους από την επιφάνεια του εδάφους καθιστά την ευστάθεια του μετώπου σοβαρή παράμετρο ελέγχου για την εξασφάλιση των απαραίτητων ασφαλών συνθηκών εργασίας και της δυνατότητας της περαιτέρω προχώρησης της εκσκαφής.

- Ο έλεγχος των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας, των παραμορφώσεων της περιβάλλουσας βραχώμαζας και των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους.

Τα επιτρεπτά όρια των παραμορφώσεων αυτών καθορίζονται από την απαίτηση να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, να ενεργοποιηθεί η αντοχή της σε ικανοποιητικό βαθμό και να μην απειλείται η στατική και η λειτουργικότητα των επιφανειακών δομημάτων στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας. Οι παραπάνω απαιτήσεις συνδέονται άμεσα με το μέγεθος των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας, για αυτό ενδιαφέρει η εκτίμηση και η παρακολούθησή τους κατά την διάρκεια της κατασκευής αλλά και μετά την ολοκλήρωσή της.

- Ο προσδιορισμός του κατάλληλου συνδυασμού της διαδικασίας εκσκαφής και του συστήματος της άμεσης υποστήριξης με κριτήρια την ικανοποιητική ασφάλεια και το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Η επιλογή της τεχνικής διάνοιξης και υποστήλωσης που θα χρησιμοποιηθεί θα εξαρτάται ασφαλώς από τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού στον οποίο θα εφαρμοστεί, αλλά και την ισορροπία ανάμεσα στο κόστος της επέμβασης και την αποτελεσματικότητά της.

Η ανάλυση της διάνοιξης και της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων δεν μπορεί να γίνει με κάποια συμβατικά φορτία επειδή τα πραγματικά φορτία εξαρτώνται από τις ιδιότητες της βραχώμαζας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας αλλά και την εφαρμοζόμενη τεχνική διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης. Οι μέθοδοι εκτίμησης

των φορτίων, όπως η μέθοδος Terzaghi και NGI , οι οποίες λαμβάνουν υπόψη ως κύριες παραμέτρους τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και τη γεωμετρία της εκσκαφής, βασίζονται σε ποικίλες παραδοχές για τον τρόπο διάνοιξης και υποστήριξης των σηράγγων, δίνοντας έτσι σημαντικά διαφοροποιημένα φορτία σχεδιασμού μεταξύ τους. Οι μέθοδοι αυτοί αναπτύχθηκαν πριν από την εφαρμογή των σύγχρονων αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες εκτός από τις ιδιότητες της βραχώμαζας, λαμβάνουν υπόψη το υφιστάμενο εντατικό πεδίο, τη στατική συμπεριφορά του συστήματος υποστήλωσης, την αλληλεπίδρασή του με την περιβάλλουσα βραχώμαζα και την διαδικασία κατασκευής του έργου και παρέχουν ακριβείς και σημαντικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό, μέσω της προσομοίωσης όλων των σταδίων εκσκαφής και υποστήλωσης μίας σήραγγας.

Η άμεση υποστήριξη, η οποία αναφέρθηκε εξασφαλίζει την προσωρινή ευστάθεια της εκσκαπτόμενης διατομής και περιορίζει τις παραμορφώσεις, ακολουθείται συνήθως από την κατασκευή της τελικής επένδυσης. Η τελική επένδυση κατασκευάζεται μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας της διατομής και την ολοκλήρωση πρακτικώς των συγκλίσεων των τοιχωμάτων. Σκοπός της είναι η ανάληψη των μακροχρόνιων και υδραυλικών φορτίων, η στεγανότητα και η αισθητική του εσωραχίου της σήραγγας. Αρχικά είναι αφόρτιστη, αλλά σταδιακά, επειδή τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης παύουν να αναλαμβάνουν ποσοστό των φορτίων τους, η τελική επένδυση σχεδιάζεται για την ανάληψη των εξής ορίων:

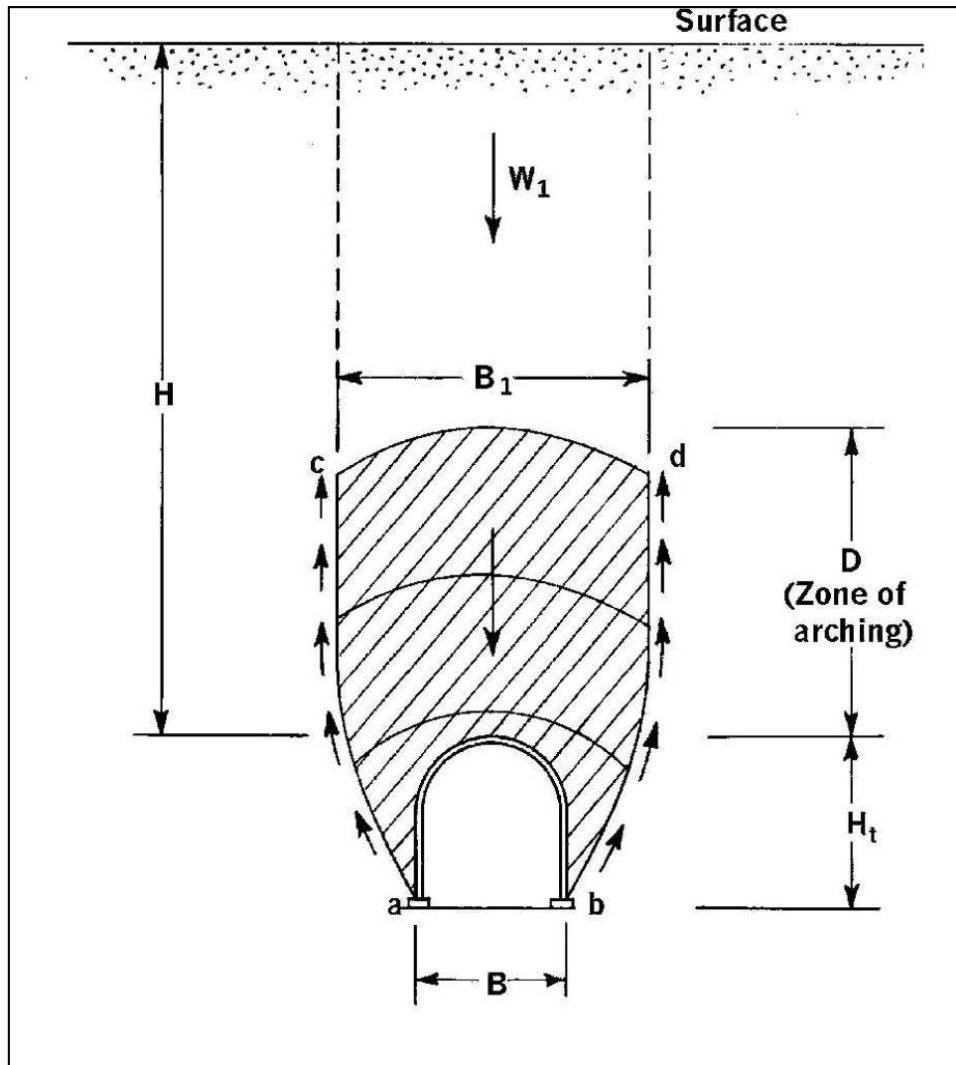
- Τα φορτία που αρχικά να λαμβάνουν τα αγκύρια, τα οποία με την πάροδο του χρόνου είτε διαβρώνονται, είτε λόγω της κατασκευής της τελικής επένδυσης παρεμποδίζεται η κεφαλή τους, και σε περίπτωση βραχώμαζας με έντονη ερπυστική συμπεριφορά, έρπουν και χάνουν την λειτουργικότητά τους.
- Μέρος του φορτίου που αναλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής υποστήριξης, το οποίο έχει μεγαλύτερο ερπυσμό από τον έγχυτο της μόνιμης επένδυσης, με αποτέλεσμα να μεταβιβάζει τα φορτία του στο τελευταίο. Ο βαθμός απομείωσης της ακαμψίας του εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά και την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται αρχικά.

Πέρα από κάποιο ποσοστό των φορτίων που αρχικώς αναλαμβάνει το σύστημα της άμεσης υποστήλωσης, η τελική επένδυση σχεδιάζεται να αναλάβει επιπλέον:

- Τα αυξημένα φορτία της ίδιας της βραχώμαζας, λόγω του ερπυσμού στον οποίο υπόκειται με την πάροδο του χρόνου. Λόγω αυτού του φαινομένου, φορτία που αναλαμβάνονταν από τον «εδαφικό θόλο», μεταφέρονται στον εδαφικό σκελετό. Το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων εξαρτάται από το είδος του εδάφους που περιβάλλει την σήραγγα.
- Τυχόν υδατικές πιέσεις, λόγω πλημελλούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης,
- Τα φορτία από μελλοντικές κατασκευές στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας,
- Και τέλος, τα φορτία ενδεχόμενης σεισμικής επιφόρτισης της σήραγγας. Τα υπόγεια έργα θεωρούνται γενικώς ασφαλέστερα από ότι οι επιφανειακές κατασκευές έναντι σεισμικών δράσεων, με εξαίρεση τις σήραγγες που διασχίζουν ενεργά ρήγματα και τις περιπτώσεις όπου το περιβάλλον έδαφος χάνει σημαντικό μέρος της αντοχής του κατά τη σεισμική διέγερση. Στις περιπτώσεις αυτές ο σχεδιασμός της μόνιμης επένδυσης θα πρέπει να γίνεται μέσω της πρόβλεψης επαρκούς πλαστιμότητας ώστε να απορροφηθούν οι επιβαλλόμενες σεισμικές παραμορφώσεις, χωρίς απώλεια της ικανότητας της επένδυσης να φέρει τα στατικά επιβαλλόμενα φορτία εκ του περιβάλλοντος εδάφους (Καββαδάς, 2005).

2.4. Βασικές αρχές της ανάλυσης και του σχεδιασμού των σιηράγγων

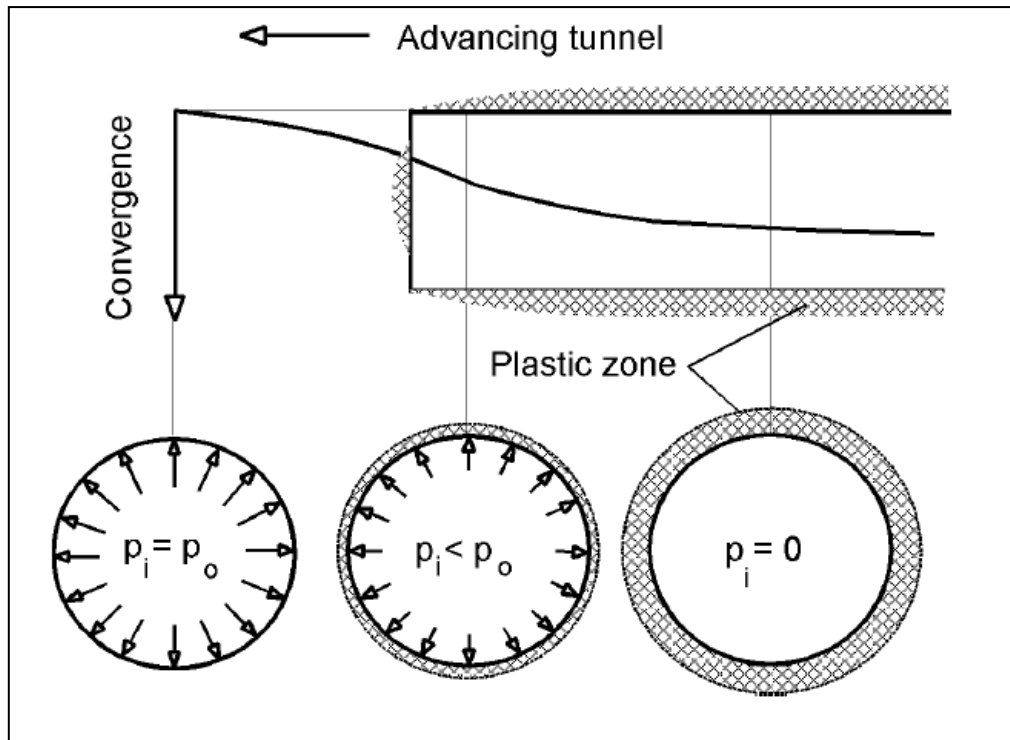
Ο Terzaghi αναφέρθηκε στα μέσα υποστήριξης των σιηράγγων τα οποία ήταν τα μεταλλικά πλαίσια και σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν το φορτίο της χαλαρωμένης, εξαιτίας της εκσκαφής, βραχώμαζας. Η θεωρία Terzaghi για τον σχηματισμό του εδαφικού θόλου φαίνεται στο σχήμα 2.1: (Hoek, 2000).



Σχήμα 2.1: Η θεωρία του Terzaghi για σχηματισμό εδαφικού θόλου (Hoek, 2000)

Μία εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων αναπτύχθηκε στην Ευρώπη και παρουσιάστηκε σε άρθρο του Fener το 1938. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάπτυξη «πλαστικής ζώνης» στην περιβάλλουσα βραχώμαζα της εκσκαφής, μιας ζώνης δηλαδή γύρω από τα όρια της εκσκαφής της σήραγγας όπου η βραχώμαζα είναι πολύ αποσαθρωμένη και αναπτύσσει σημαντικές παραμορφώσεις. Ο Fener λοιπόν, συσχέτισε τον υπολογισμό της σύγκλισης των τοιχωμάτων της σήραγγας με την ανάπτυξη αυτής της «πλαστικής ζώνης» που περιβάλλει τα όρια εκσκαφής.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου ανάλυσης συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας, απεικονίζεται στο σχήμα 2.2, από το οποίο φαίνεται ότι το μέγεθος της πλαστικής ζώνης εξαρτάται από το μέγεθος της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_i .

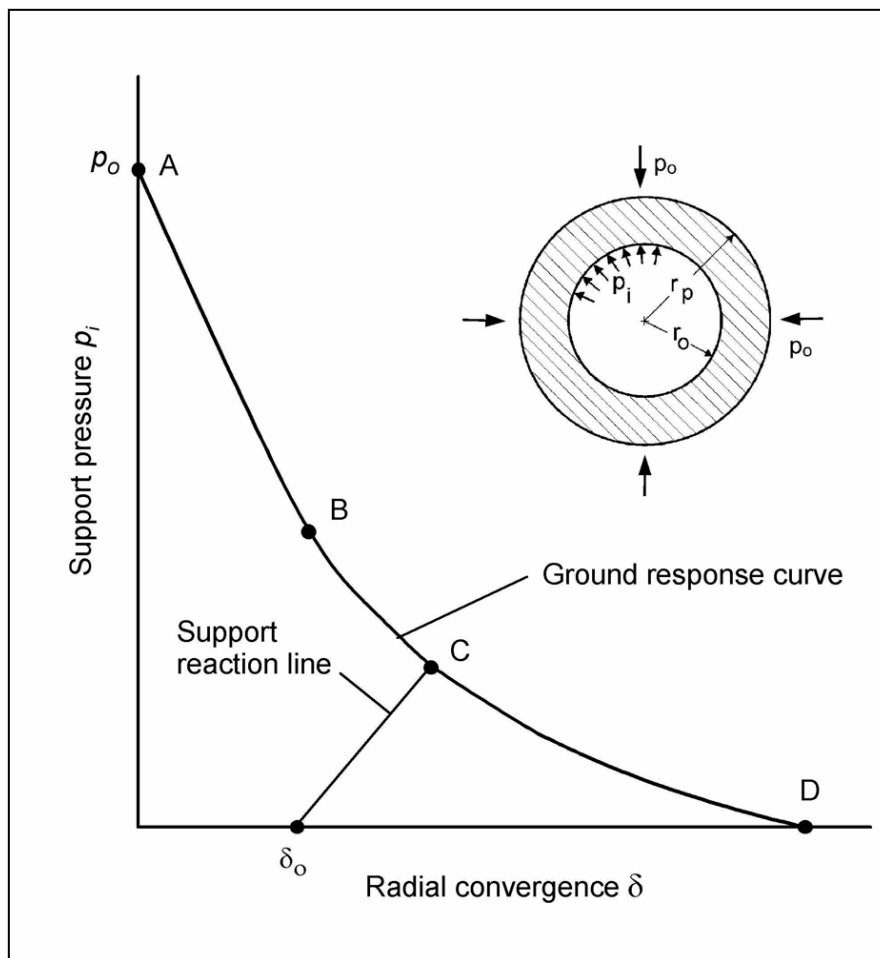


Σχήμα 2.2: Ισοδύναμη εσωτερική πίεση p_i σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της σήραγγας σε σχέση με το μέτωπο διάνοιξης (Hoeek, 1999)

Η πίεση p_i , είναι μικρότερη της πίεσης p_o και ονομάζεται «ισοδύναμη εσωτερική πίεση» επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτή που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. Σε μία ανυποστήρικτη σήραγγα, με την αύξηση της απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής, η τιμή της πίεσης μειώνεται σε σχέση με την αρχική γεωστατική πίεση p_o , μέχρι τον μηδενισμό της. (Hoeek, 1999)

Η διάνοιξη μίας σήραγγας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την αναίρεση αρχικών γεωστατικών πιέσεων p_o , ονομαζόμενη ως αποσυμπίεση, γεγονός που δημιουργεί ανακατανομή των τάσεων και ανάπτυξη παραμορφώσεων στον σχηματισμό που περιβάλλει την εκσκαφή. Το κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές δημιουργούν προβλήματα ευστάθειας κατά την εκσκαφή εξαρτάται από τον λόγο της αντοχής της βραχώμαζας προς το επιτόπου πεδίο τάσεων. Στην περίπτωση της διάνοιξης σήραγγας σε υγιείς και μεγάλης αντοχής βράχους, οι παραπάνω παραμορφώσεις στα τοιχώματα της σήραγγας, είναι γενικά μικρές. Ωστόσο, σε πολύ ασθενή πετρώματα οι τιμές τους μπορεί να είναι πολύ υψηλές, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα παραμορφώσεων κατά την εκσκαφή.

Πιο αναλυτικά, σε απόσταση περίπου μιας διαμέτρου μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, η περιβάλλουσα βραχόμαζα δεν επηρεάζεται από την διάνοιξη της σήραγγας και η ισοδύναμη εσωτερική πίεση p_i είναι ίση με την αρχική γεωστατική πίεση p_o . Αντιστοιχεί δε, στο σημείο A της καμπύλης σύγκλισης –αποτόνωσης σύμφωνα με το σχήμα 2.3. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ονομάζεται η καμπύλη που απεικονίζει την σχέση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_i με την ακτινική παραμόρφωση (σύγκλιση) των τοιχωμάτων της σήραγγας, δ (Καββαδάς, 2005).



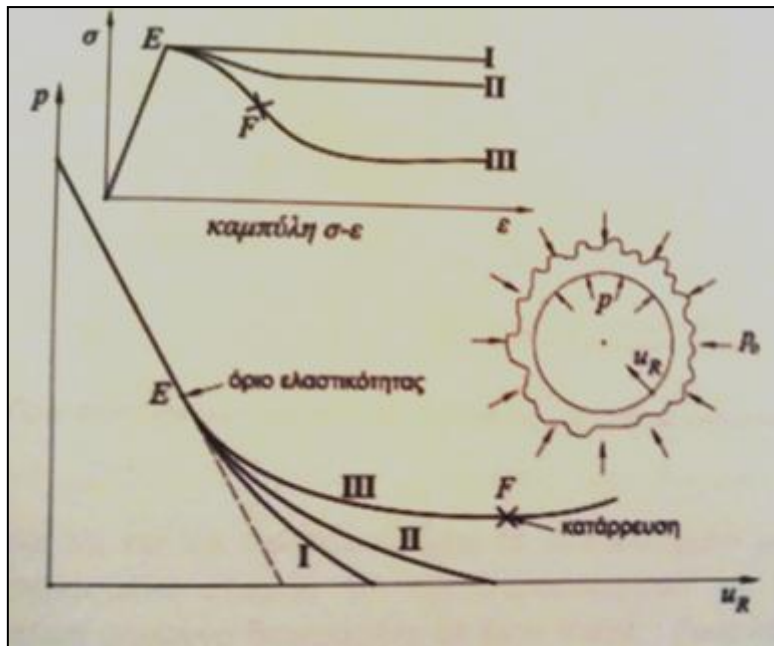
Σχήμα 2.3: Μοντέλο εδάφους και καμπύλης σύγκλισης –αποτόνωσης της περιβάλλουσας βραχόμαζας (Hoek, 2000)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2, στη θέση του μετώπου της εκσκαφής έχει ήδη πραγματοποιηθεί το ένα τρίτο περίπου της συνολικής ακτινικής παραμόρφωσης της σήραγγας, γεγονός οφειλόμενο στην τριδιάστατη ανακατανομή των τάσεων λόγω της ύπαρξης του άσκαπτου τμήματος μπροστά από το μέτωπο. Η απότομη κλίση της καμπύλης των παραμορφώσεων στη συγκεκριμένη θέση, θα απαιτούσε τρισδιάστατες

αναλύσεις για τον σχεδιασμό των σηράγγων αν η επιρροή της προχώρησης του μετώπου δεν μειωνόταν γρήγορα με την αύξηση της απόστασης. Ωστόσο, στις περιπτώσεις που οι αναμενόμενες συνθήκες διάνοιξης είναι πολύ δυσμενείς ο σχεδιασμός θα πρέπει να περιλαμβάνει οπωσδήποτε πιο πολύπλοκες αναλύσεις από τις δισδιάστατες και θα πρέπει να εξετάζεται ιδιαίτερα η επισφαλής περιοχή του μετώπου. Η εφαρμογή δε κάποιας από τις τεχνικές επέμβασης στη συγκεκριμένη περιοχή είναι σχεδόν επιβεβλημένη.

Με την προχώρηση του μετώπου εκσκαφής η πίεση p_i μειώνεται και η βραχόμαζα παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι το σημείο B, (σχήμα 2.3), από όπου ξεκινάει πλέον η πλαστική συμπεριφορά του σχηματισμού με την ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από τα όρια εκσκαφής. Η ακτίνα της πλαστικής ζώνης r_p και η σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας δ αυξάνουν σημαντικά με την περαιτέρω απομείωσή της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_i , όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.2 και τελικά, σε απόσταση περίπου δύο διαμέτρων της σήραγγας πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής, η πίεση p_i μηδενίζεται και η ακτινική παραμόρφωση δ παίρνει την μέγιστη τιμή της.

Όταν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης, δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση, τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει. Στην περίπτωση αυτή, η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της βραχόμαζας έχει την μορφή του σχήματος 2.4 (Καββαδάς, 2005).



Σχήμα 2.4: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης για διάφορους τύπους συμπεριφοράς τάσεων – παραμορφώσεων της βραχώμαζας. Στην περίπτωση έντονης χαλάρωσης προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας (Καββαδάς, 2005).

2.5. Επιδράσεις της επιτόπου εντατικής κατάστασης κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων

Οι μεταβολές των τάσεων και παραμορφώσεων κατά την κατασκευή υπογείων έργων έχουν ως αποτέλεσμα μετατοπίσεις των σημείων των επιφανειών κατασκευής.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού υπογείων ανοιγμάτων (π.χ. στοών, σηράγγων, κλπ) σε κάποιο πέτρωμα, ανάγεται ουσιαστικά στον προσδιορισμό των μέγιστων τάσεων που θα δημιουργηθούν στο πέτρωμα μετά την όρυξη ή γενικότερα στην κατανομή των τάσεων γύρω από ένα όρυγμα. Οι μέγιστες αυτές τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες εξόρυξης, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ανοίγματος (Αγιουτάντης, 2000).

2.5.1. Ανάλυση του αρχικού εντατικού πεδίου

Σε αντίθεση με τις επίγειες δομικές κατασκευές (εκτός από το ίδιο το βάρος τους) θα δεχτούν φορτία μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους, η κατασκευή ενός υπόγειου έργου αποτελεί μια δραστική επέμβαση σε ένα υλικό το οποίο βρίσκεται ήδη υπό την επίδραση ενός πλήρως ανεπτυγμένου τασικού πεδίου. Το αρχικό-πριν από την κατασκευή του έργου-αυτό πεδίο, ο προσανατολισμός του (οι διευθύνσεις

των κύριων ορθών τάσεων) δηλαδή και η έντασή του είναι τα μεγέθη τα οποία μαζί με τη γεωμετρία του έργου, τη φύση και τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υλικού θα καθορίσουν τα προβλήματα τα οποία θα εμφανιστούν και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή.

Ο προσδιορισμός του αρχικού τασικού πεδίου δεν είναι εύκολος. Σε τεκτονικά ήρεμες περιοχές, η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη γεωστατική τάση, σ_v που ενεργεί στο βάθος στο οποίο πρόκειται να γίνει η εκσκαφή (Μαραγκός, 1997).

Αυτή η τάση υπολογίζεται από την σχέση (Hoek et al, 1995):

$$\sigma_v = \gamma \times z$$

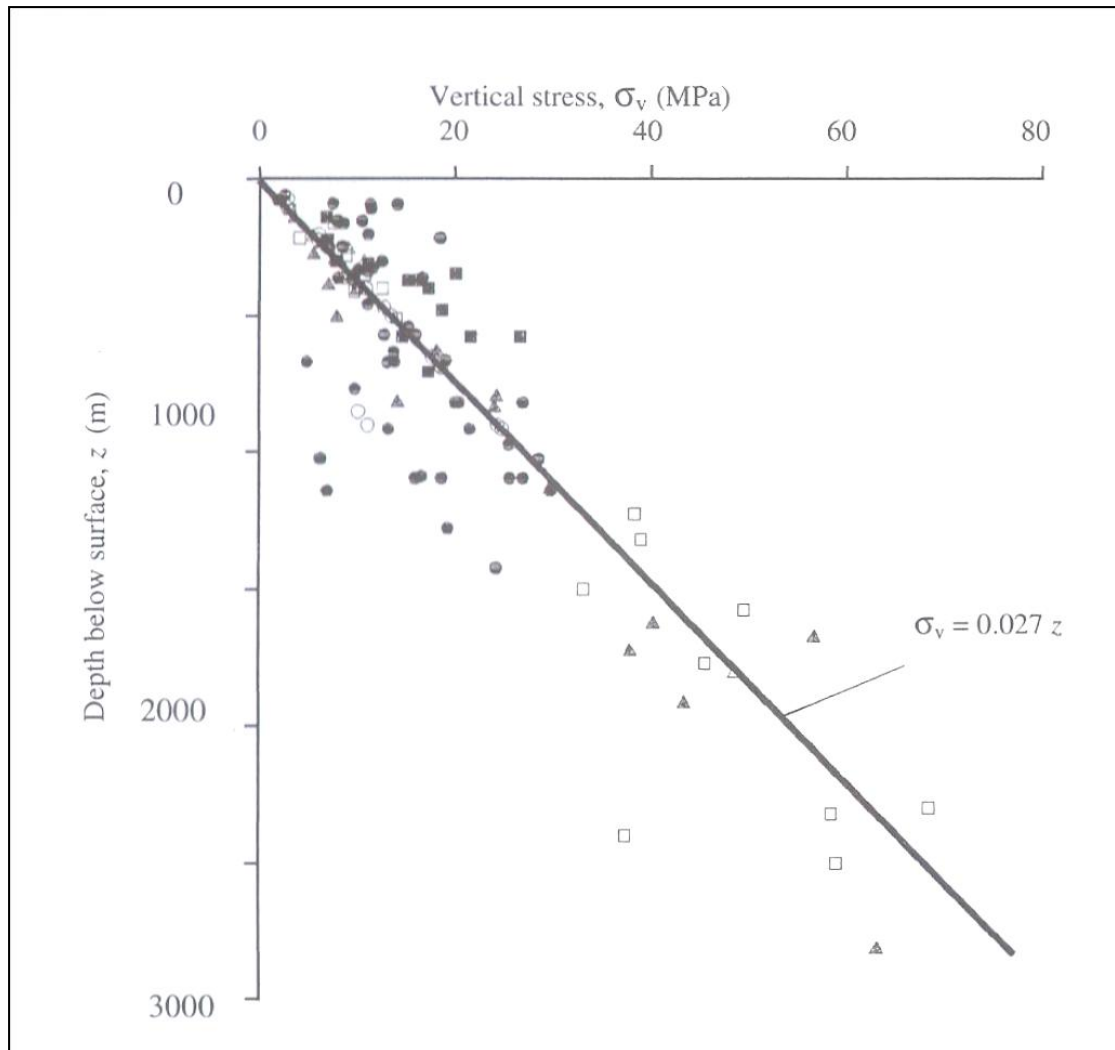
Όπου:

σ_v = κατακόρυφη κύρια τάση

z =το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

γ = το ειδικό βάρος της βραχώμαζας

Το ειδικό βάρος της βραχώμαζας κυμαίνεται περίπου στα 0,027MN/m³. Μετρήσεις της κατακόρυφης κύριας τάσης σε διάφορες εξορύξεις και σε άλλα υπόγεια έργα, επιβεβαιώνουν ότι αυτή η σχέση ισχύει (σχήμα 2.5) και υπάρχει μία σημαντική ποσότητα διασποράς κατά τις μετρήσεις.



Σχήμα 2.5: Μετρήσεις της κάθετης τάσης από διάφορα υπόγεια έργα ανά τον κόσμο (Hoek et al, 1999)

Ο υπολογισμός της οριζόντιας κύριας τάσης που ενεργεί στη βραχώμαζα σε ένα βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους είναι πιο δύσκολος σε σχέση με την κατακόρυφη κύρια τάση. Συνήθως με k συμβολίζεται ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη κύρια τάση:

$$\sigma_h = k \sigma_v = k \gamma z$$

Οι Terzaghi και Richard (1952) θεώρησαν ότι σε μία βαρυντικά φορτισμένη, βραχώμαζα χωρίς πλευρική παραμόρφωση, η τιμή του k είναι ανεξάρτητη του βάθους και δίνεται από την σχέση:

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

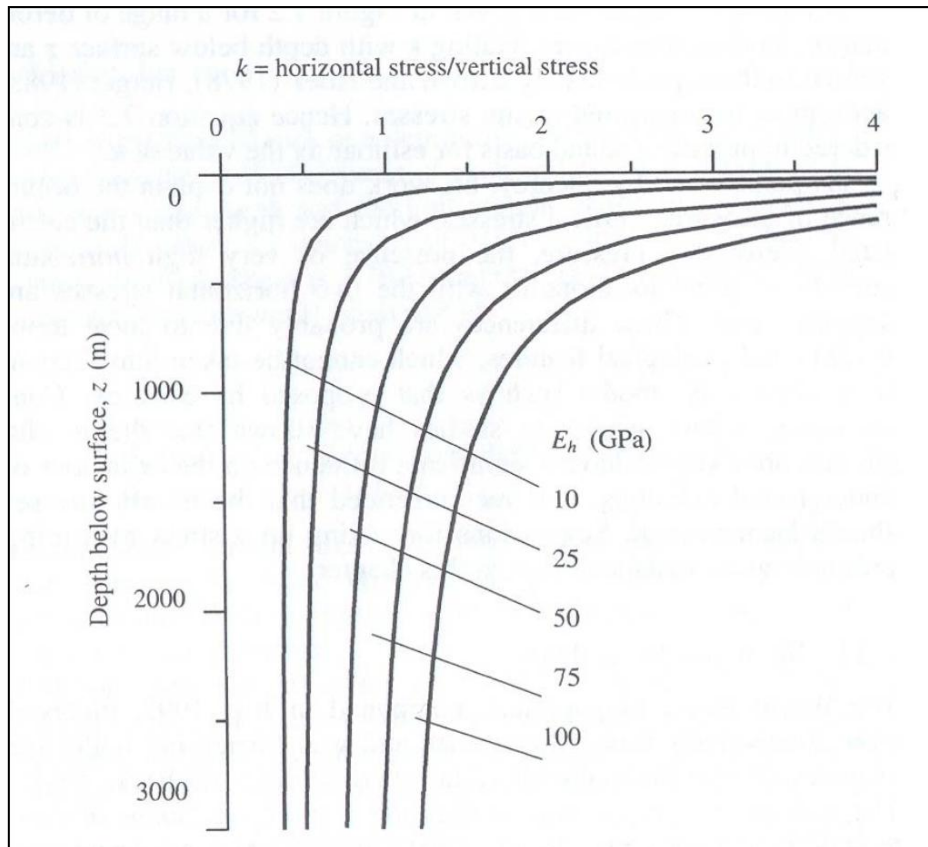
όπου ν είναι ο λόγος Poisson της βραχώμαζας. Αυτή σχέση χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα πρώτα στάδια της μελέτης της μηχανικής των πετρωμάτων, αλλά αποδείχτηκε ότι είναι ανακριβής και σήμερα χρησιμοποιείται σπανίως.

Μετρήσεις οριζόντιων τάσεων σε τεχνικά έργα ανά τον κόσμο δείχνουν ότι ο λόγος k τείνει να είναι υψηλός σε ρηχά βάθη ενώ μειώνεται κατά την αύξηση του βάθους (Brown and Hoek, 1978, Herget, 1988). Για να καταλάβουμε τους λόγους μεταβολής των οριζόντιων τάσεων είναι απαραίτητο να ανάγουμε το πρόβλημα σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση με ένα περιορισμένο πεδίο. (Hoek et al, 1999)

Ο Sheory (1994) ανέπτυξε ένα ελαστοπλαστικό θερμικό μοντέλο της γης. Αυτό το μοντέλο θεωρεί καμπυλότητα του φλοιού (crust) του εδάφους και μεταβολές των ελαστικών σταθερών, όπως η πυκνότητα και συντελεστών θερμικής διαστολής διαστολής μεταξύ φλοιού και mantle. Η εξίσωση του Sheory που φαίνεται από την παρακάτω σχέση εκτιμάει το λόγο k μεταξύ της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης. Η εξίσωση είναι:

$$k = 0.25 + 7Eh(0.001 + \frac{1}{z})$$

όπου $z(m)$ είναι το βάθος ανάμεσα στην επιφάνεια και $Eh(GPa)$ είναι ο μέσος όρος παραμόρφωσης του σταθερού συντελεστή του ανώτερου τμήματος του φλοιού της γης μετρημένος κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αυτή η διεύθυνση μέτρησης είναι σημαντική ειδικά σε προσχωσιγενείς πέτρωμα του οποίου η παραμόρφωση μπορεί να είναι διαφορετική σε κάθε διεύθυνση. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται χαρακτηριστικά μία σειρά από σταθερές παραμορφώσεις (deformation moduli).



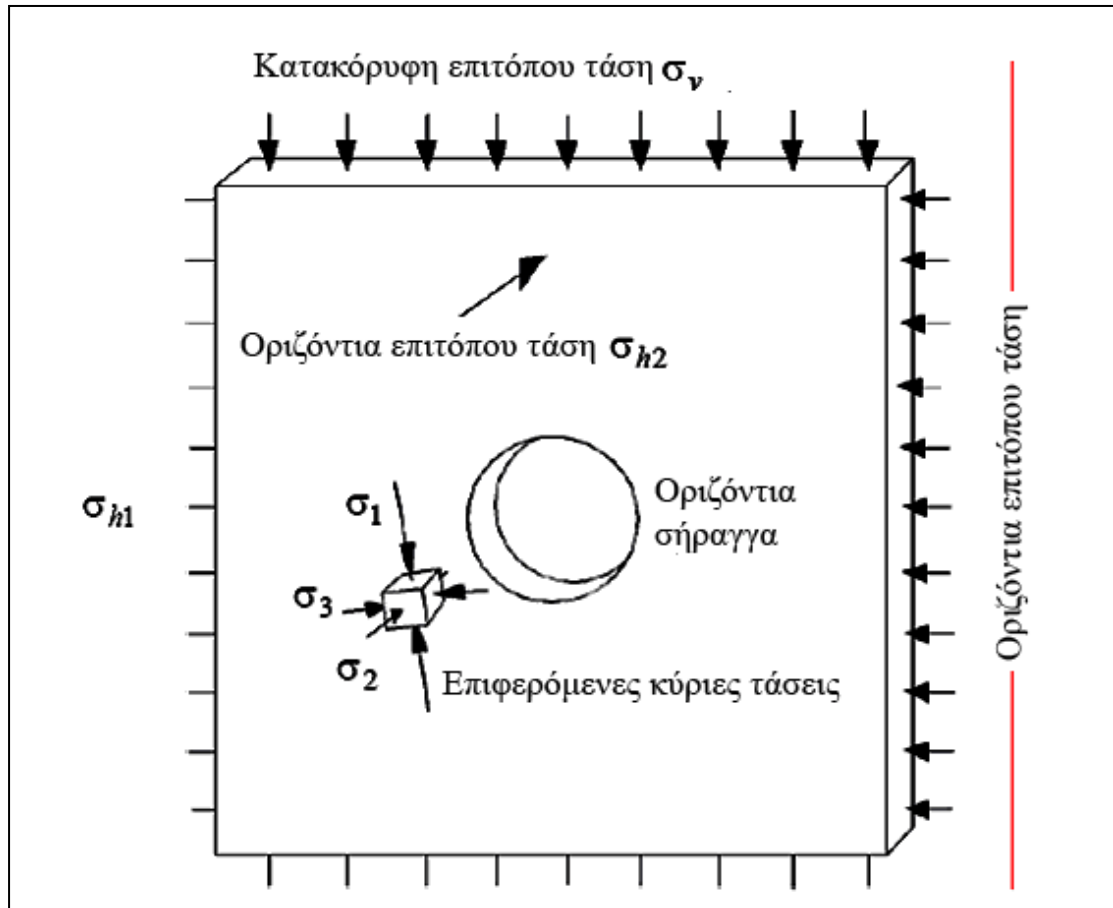
Σχήμα 2.6: Ο λόγος της οριζόντιας προς την κάθετη τάση για διαφορετικές σταθερές βασισμένος στην εξίσωση Sheorey (Hoek et al, 1999)

Συνεπώς όταν οι συγκεκριμένες μελέτες δείχνουν ότι η επί τόπου εντατική κατάσταση επιδρά σημαντικά στην συμπεριφορά του υπόγειου ανοίγματος, τότε συνιστάται η μέτρηση της επί τόπου εντατικής κατάστασης.

Η μόνη πρακτική μέθοδος για μέτρηση των επί τόπου τάσεων είναι η υδρορωγμάτωση (hydrofracturing), στην οποία χρησιμοποιείται η απαιτούμενη υδραυλική πίεση για το άνοιγμα ήδη υπάρχουσών ρωγμών για την εκτίμηση των επιπέδων των επιτόπου τάσεων. Όταν η πρόσβαση στο έδαφος είναι επιτρεπτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές overcoring (overcoring techniques) για επιτόπου μέτρηση και δεδομένου ότι δίνεται η δέουσα προσοχή κατά τη λήψη των μετρήσεων, τα αποτελέσματα είναι συνήθως επαρκή για σχεδιαστικούς σκοπούς. (Hoek et al, 1999)

2.5.2. Ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων γύρω από τη διάνοιξη του υπόγειου ανοίγματος

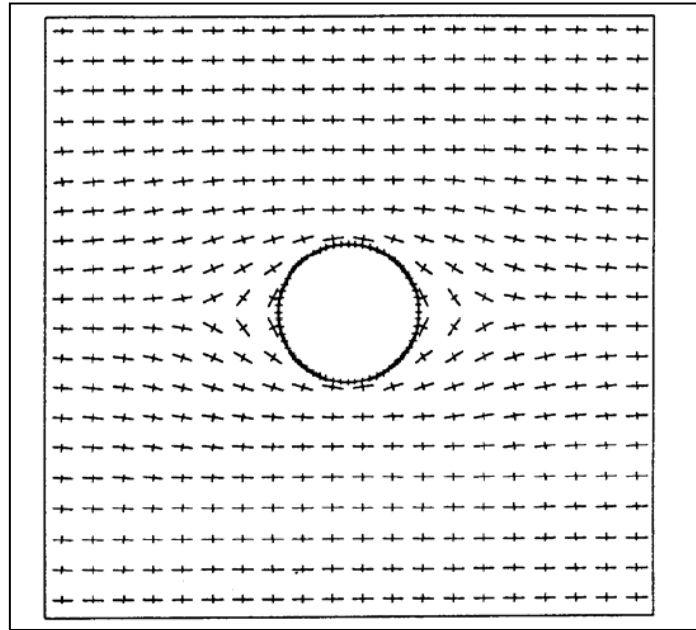
Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, το εντατικό πεδίο ανακατανέμεται τοπικά και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται στο περιβάλλον πέτρωμα του ανοίγματος.



Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση των επιφερόμενων κύριων τάσεων σε ένα στοιχείο πετρώματος κοντά σε οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε κατακόρυφη επιτόπου τάση σ_v σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} σε επίπεδο κάθετο του άξονα της σήραγγας και σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h2} σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας. (Hoek et al, 1999)

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας οι επιτόπου τάσεις σ_v (κατακόρυφη τάση), σ_{h1} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας) και σ_{h2} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας) κατανέμονται ομοιόμορφα στο τμήμα του πετρώματος που έχει θεωρηθεί (σχήμα 2.8). Μετά την απομάκρυνση του πετρώματος για τη δημιουργία του ανοίγματος οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα αλλάζουν και προκύπτουν νέες τάσεις. Στο σχήμα

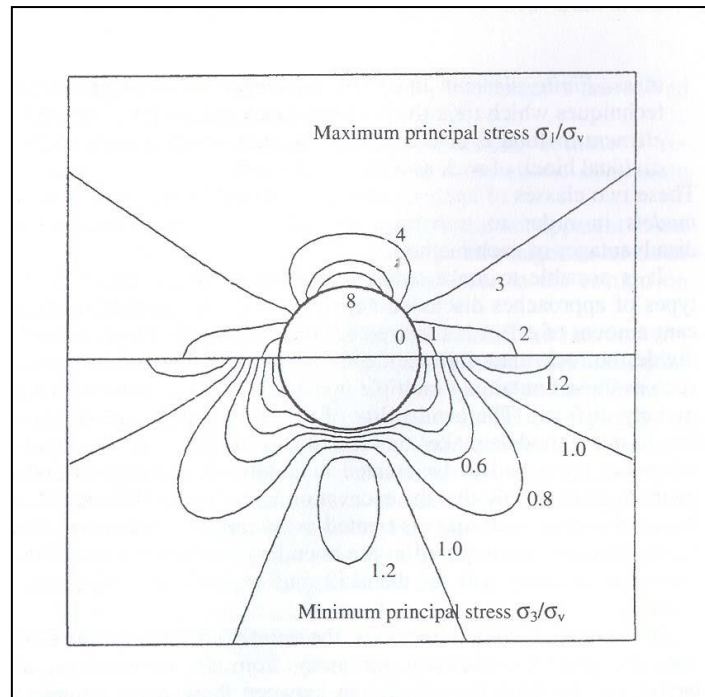
φαίνονται οι επιφερόμενες κύριες τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα σε μία κατακόρυφη τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 2.8: Διευθύνσεις κύριων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} ίση με $3\sigma_v$ η κατακόρυφη επιτόπου τάσης. (Hoek et al, 1999)

Οι τρεις κύριες τάσεις είναι κάθετες μεταξύ τους, αλλά μπορεί να βρίσκονται υπό κλίση κατά τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης επιτόπου τάσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται στο σχήμα που δείχνει τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μία οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} ίση με $3\sigma_v$ όπου σ_v η κατακόρυφη επιτόπου τάση. Οι μεγαλύτερες παύλες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης, ενώ οι μικρότερες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της ελάχιστης κύριας τάσης σε κάθε σημείο.

Οι τιμές ισοκατανομής της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 και της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 φαίνονται στο σχήμα 2.9. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται ότι η ανακατανομή των τάσεων είναι συγκεντρωμένη στα πετρώματα που είναι πολύ κοντά στην εκσκαφή και ότι σε απόσταση ίση με τρεις φορές την ακτίνα της κυκλικής σήραγγας η ανακατανομή του επιτόπου τασικού πεδίου είναι αμελητέα.



Σχήμα 2.9: Περιβάλλουσες των μέγιστων και ελάχιστων μεγεθών των κύριων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε κατακόρυφη κύρια τάση σ_v και επιτόπου οριζόντια κύρια τάση $3 \sigma_v$ (Hoek et al, 1999)

Ο Kirsch (1898) έχει υπολογίσει αναλυτικές λύσεις για την κατανομή των τάσεων σε μία ελαστική πλάκα υπό πίεση που έχει μία κυκλική οπή και αυτές αποτέλεσαν τις βάσεις για πολλές μελέτες της βραχυδούς συμπεριφοράς γύρω από σήραγγες και φρέατα. (Hoek et al, 1999)

Οι σχέσεις που ανέπτυξε ο Kirsch (σε πολικές συντεταγμένες) δίνουν την εφαπτομενική τάση σ_θ την ακτινική σ_r και τη διατμητική $\sigma_{r\theta}$, μετά τη δημιουργία του ανοίγματος σε ομογενές και ισότροπο πέτρωμα με κατακόρυφες τάσεις ίσες με το βάρος των υπερκειμένων. Οι σχέσεις του Kirsch φαίνονται στο σχήμα 2.10 (Sinha, 1989)

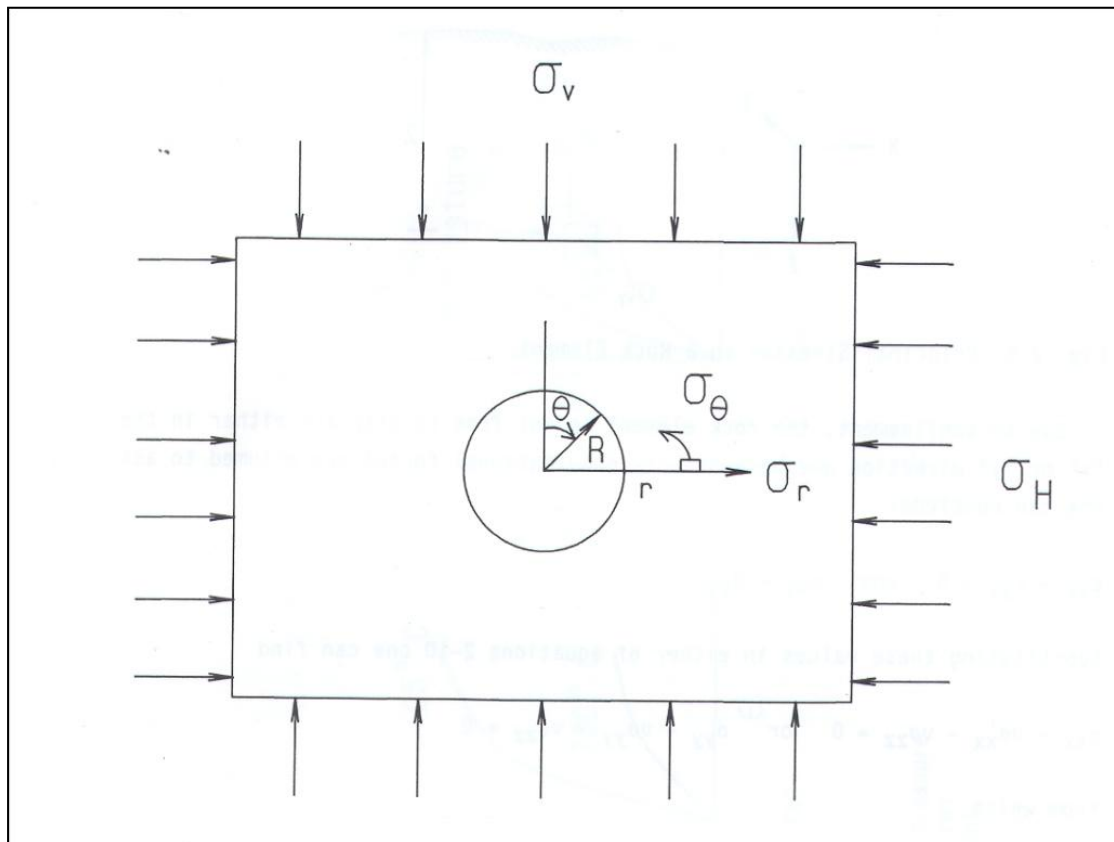
$$\sigma_\theta = \sigma_v \left[\left(\frac{1+k}{2} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \left(\frac{1-k}{2} \right) \left(1 - 4 \frac{r^2}{R^2} + 3 \frac{r^4}{R^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

όπου $k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$

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

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_v \left[\left(\frac{1-k}{2} \right) \left(1 + 2 \frac{r^2}{R^2} - 3 \frac{r^4}{R^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

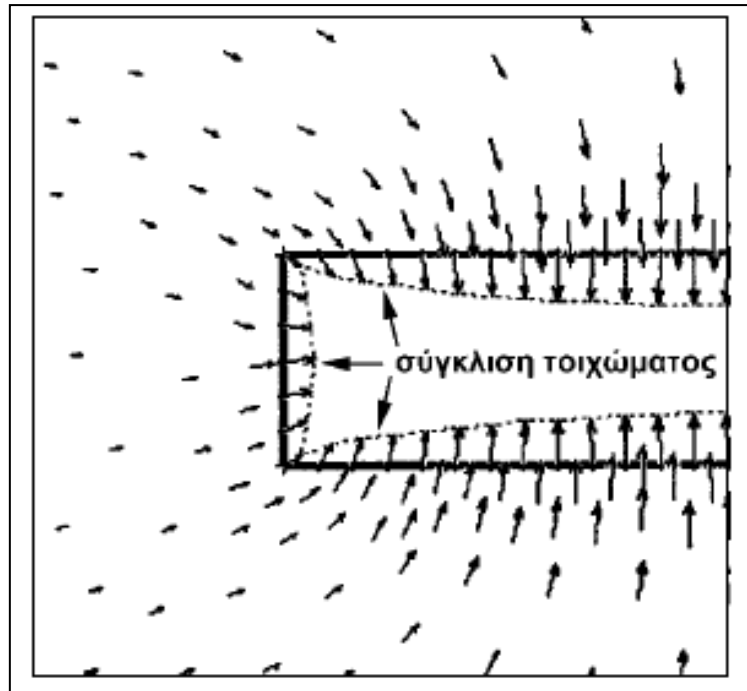
Στο σχήμα 2.10 το πέτρωμα υπόκειται σε κατακόρυφη τάση σ_v και οριζόντια σ_h και οι δύο τάσεις εφαρμόζονται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο της κυκλικής σήραγγας ακτίνας R .



Σχήμα 2.10: Πέτρωμα γύρω από κυκλική οπή (Sinha, 1989)

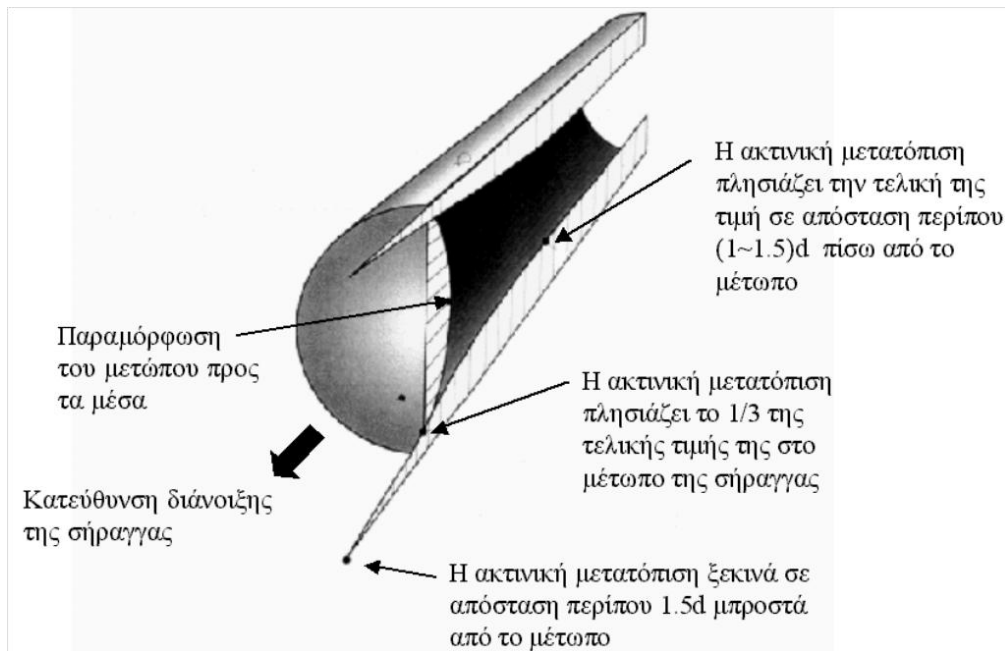
2.5.3. Μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας

Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Στο σχήμα φαίνεται η παραμόρφωση της βραχώμαζας κατά την προώθηση μιας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο ($K=1$) που βρίσκει εφαρμογή σε κατακόρυφο φρέαρ και σε διάνοιξη σε έντονα ανάγλυφο, μέσω μίας τριδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σήραγγας. Στο σχήμα 2.11 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ανάλυσης (Σακελλαρίου, 2005).



Σχήμα 2.11: Διανύσματα της μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 2000)

Η παραμόρφωση της βραχώμαζας ξεκινά σε απόσταση περίπου $1.5d$ μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου d είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου $(1-1.5)d$ μπροστά από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το $1/3$ περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα μέσα, όπως φαίνεται στα σχήματα. Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραγγα εξαρτάται από τον βαθμό αντοχής της βραχώμαζας στο επίπεδο των επί τούτου τάσεων. Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δε ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει (Σακελλαρίου, 2005).



Σχήμα 2.12:Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχώμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα. (Hoek, 2000)

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ), τοποθετούνται συνήθως σε κάποια (μικρή) απόσταση πίσω από τον μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής(στην περίπτωση συμπεριφοράς τύπου χαλάρωσης) καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών.

Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη. Η τελική επένδυση της σήραγγας σχεδιάζεται για να αναλάβει μέρος(ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

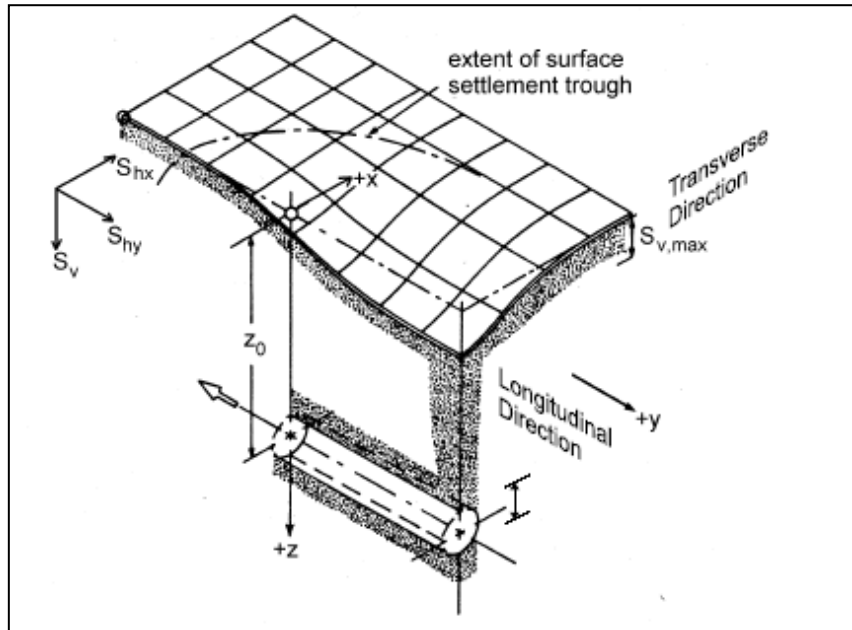
Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας προκαλείται καθίζηση και το σχήμα δείχνει την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη κατασκευή μιας σήραγγας. Οι όροι που καθορίζουν την γεωμετρία, την καθίζηση και το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται καθορίζονται στο σχήμα (Σακελλαρίου, 2005).

Ο Peck(1969) αναφέρει ότι η κατανομή των καθιζήσεων εγκάρσια στο διαμήκη άξονα της σήραγγας μπορεί να περιγραφεί από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη Gauss)και αυτή η μαθηματική περιγραφή έχει γίνει

ευρέως αποδεκτή από τότε. Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η καθίζηση στην εγκάρσια διεύθυνση δίνεται από την εξίσωση:

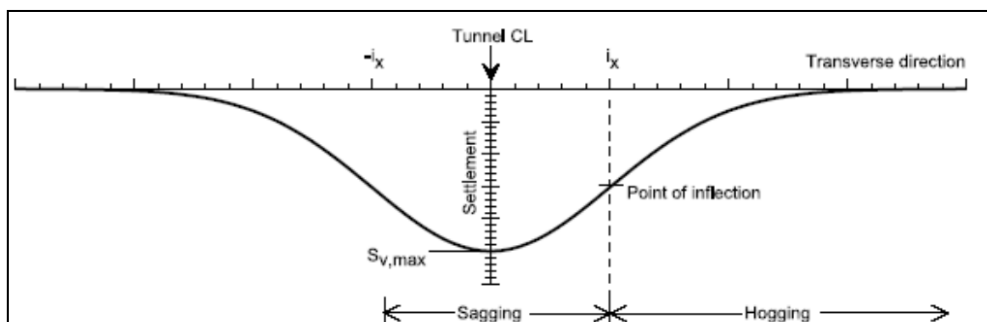
$$S_v(x) = S_{v,max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}}$$

όπου το $S_{v,max}$ είναι η μέγιστη καθίζηση που μετρείται πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Η παράμετρος i_x (παράμετρος πλάτους της καμπύλης), αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων.



Σχήμα 2.13: Καμπύλη των καθιζήσεων που προκαλούνται από τη διάνοιξη σήραγγας (Attewell, 1896).

Μία χαρακτηριστική εγκάρσια καμπύλη καθιζήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14. Όπως φαίνεται, η καμπύλη εμφανίζει τη μέγιστη κλίση της στο σημείο καμπής (point of inflection) που βρίσκεται σε απόσταση i_x από τον άξονα της σήραγγας (tunnel centre line). Το σημείο καμπής είναι κρίσιμο για τον καθορισμό των κριτηρίων παραμόρφωσης των κτιρίων (sagging zone) από τη ζώνη εφελκυσμού (hogging zone) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14 (Σακελλαρίου, 2005).



Σχήμα 2.14: Επιφανειακές καθιζήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Πηγή: Franzius, 2003).

2.6. Μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού των σηράγγων

Ως γεωμηχανικά προβλήματα ορίζονται τα προβλήματα που εξετάζουν τη συμπεριφορά των γεωυλικών κάτω από διάφορες επιδράσεις, όπως οι μεταβολές του εντατικού ή και του παραμορφωσιακού πεδίου, ροή υγρών, θραύση (Αγιουτάντης, 2000).

Ένα από τα συνηθισμένα γεωμηχανικά προβλήματα είναι η μελέτη της ευστάθειας των γεωλογικών σχηματισμών λόγω μεταβολής του εντατικού πεδίου. Οι μεταβολές αυτές δημιουργούνται από ανακατανομή των φορτίων στο έδαφος και στο υπέδαφος λόγω φυσικών αιτιών (όπως η κίνηση των ρευστών σε πορώδη μέσα) αλλά και λόγω τεχνητών αιτιών (όπως η όρυξη σηράγγων). Για λόγους απλοποίησης τα προβλήματα που προσδιορίζουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις γύρω από μία εκσκαφή μεταφέρονται σε δύο διαστάσεις, με τη παραδοχή ότι υπάρχει μία συμμετρία ως προς κάποιο επίπεδο ή άξονα. Για την καλύτερη προσέγγιση, όμως αυτών των προβλημάτων σε πραγματικές συνθήκες είναι η επίλυση των γεωμηχανικών προβλημάτων σε τρεις διαστάσεις καθώς οι διαταραχές που δημιουργούνται από την ύπαρξη ενός ανοίγματος επηρεάζονται από την παρουσία γειτονικών ανοιγμάτων καθώς και άλλου τύπου ασυνέχειες όπως ρήγματα ή διακλάσεις (Αγιουτάντης, 2000).

Με το πέρασμα των χρόνων η εξέλιξη της τεχνολογίας, της επιστήμης και η εμπειρία από προηγούμενα υπόγεια έργα διαμόρφωσαν κάποιες μεθόδους σχεδιασμού και ανάλυσης των σηράγγων οι οποίες χρησιμοποιούνται ως οδηγός για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των νέων σηράγγων. Οι μέθοδοι διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Εμπειρικές και ημι-εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού
- Αναλυτικές μέθοδοι
- Αριθμητικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι προϋποθέτουν την ύπαρξη μίας ικανής βάσης εμπειρικών δεδομένων σχετικά με το πρόβλημα. Οι αναλυτικές μέθοδοι των προβλημάτων προϋποθέτουν την ύπαρξη αναλυτικής λύσης των διαφορικών εξισώσεων ή των απλών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα (καταστατικές εξισώσεις) για τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες, ενώ οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογίζουν με σχετική ακρίβεια τις παραμορφώσεις και τα εντατικά μεγέθη ενός δεδομένου προσομοιώματος.

2.6.1. Εμπειρικές και ημι-εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού

Οι μηχανικοί τα προηγούμενα χρόνια πριν την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας και των υπολογιστικών προγραμμάτων, για την κατασκευή των σηράγγων αλλά και οποιοδήποτε άλλων υπόγειων έργων βασιζόνταν στην εμπειρία και στην παρατήρηση της συμπεριφοράς των γεωϋλικών κατά την φάση κατασκευής του εκάστοτε έργου. Για τον λόγο αυτό φτιάχτηκαν τα συστήματα ταξινόμησης του ακέραιου πετρώματος και της βραχώμαζας.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά από τα κύρια συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται σήμερα σε όλο τον κόσμο

Όνομα Συστήματος ή Κύρια Παράμετρος	Προέλευση	Εφαρμογή
Φορτία στο Πέτρωμα	Terzaghi,1946(ΗΠΑ)	Σήραγγες
Χρόνος Ζωής Ανοίγματος	Lauffer,1958(Αυστρία)	Σήραγγες
Δείκτης Ποιότητας(RQD)	Deere1964(ΗΠΑ)	Γεωτρήσεις, Σήραγγες
Αντοχή ακέραιου Πετρώματος(ΗΠΑ)	Deere & Miller,1966(ΗΠΑ)	Κοινή βάση συνεννόησης
Ταξινόμηση πετρωμάτων για τη Μηχανική Πετρωμάτων	Patcjing and Coates ,1969	Κοινή βάση συνεννόησης
Ενοποιημένη ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων	Deere και άλλοι,1969(ΗΠΑ)	Κοινή βάση συνεννόησης
Σύστημα RSR	Wickham κ.α.,1972(ΗΠΑ)	Σήραγγες
Γεωμηχανική Ταξινόμηση(CSIR) ή ΣύστημαRMR	Bieniawski ,1973(N.Αφρική και ΗΠΑ)	Σήραγγες, Μεταλλεία, Θεμελιώσεις
Σύστημα NGI ή ΣύστημαQ	Barton κ.α.,1974 (Νορβηγία)	Σήραγγες,ανοίγματα
Αντοχή ,Μέγεθος Τμημάτων Πετρώματος	Franklin ,1975 (Καναδάς)	Σήραγγες
Ενοποιημένη Ταξινόμηση πετρωμάτων	Williamson,1980	Κοινή βάση συνεννόησης
Γεωτεχνική Ταξινόμηση	ISRM,1981 (Διεθνής)	Γενικά θέματα
Δείκτης GSI	Hoek,1994 (Διεθνής)	Σχεδιασμός υποστήριξης
Δείκτης Βραχώμαζας (RMI)	Palmstrom, 1955	Γενική ταξινόμηση, σχεδιασμός υποστήριξης

Πίνακας 2.1: Μερικά από τα κύρια συστήματα ταξινόμησης (Αγιουτάντης, 2000)

Τα κύρια συστήματα ταξινόμησης διακρίνονται σε **ποιοτικές** και **ποσοτικές μεθόδους** ταξινόμησης της βραχομάζας.

Ποσοτικές μέθοδοι είναι:

Σύστημα Bieniawski (RMR)

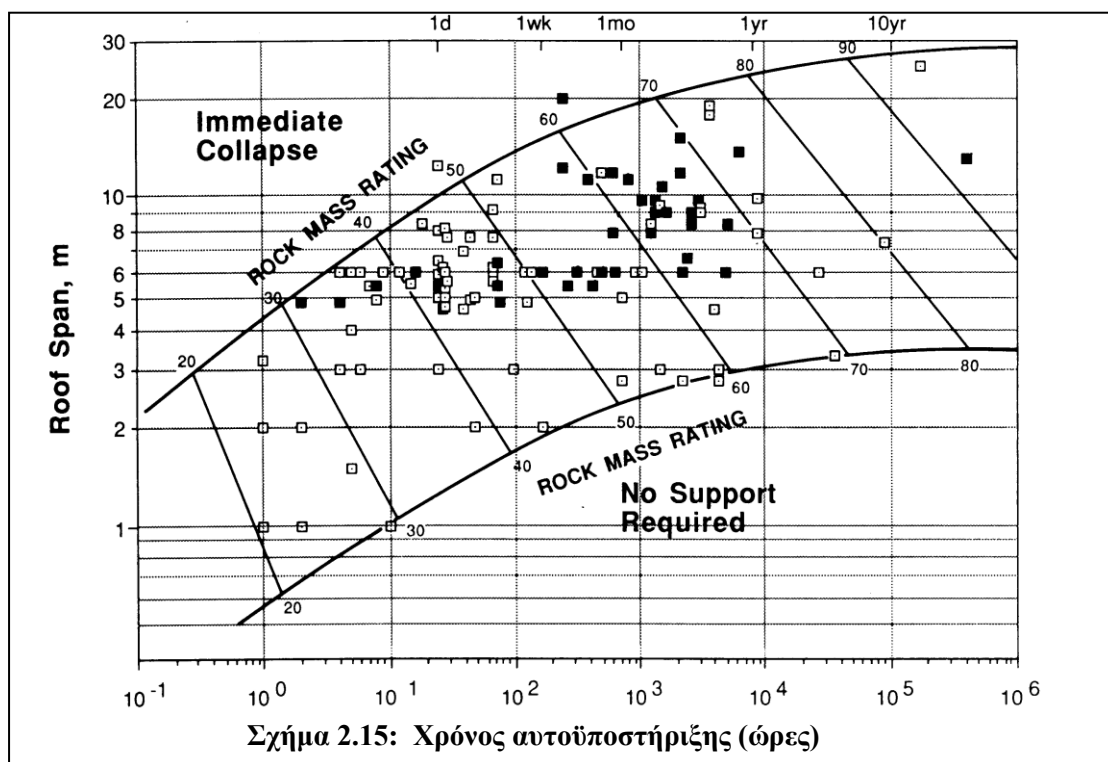
Το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης (Σύστημα RMR) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1973 και έλαβε την τελική του μορφή το 1979 και παρουσιάστηκε χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις το 1989. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μετρηθούν επί τόπου ή να υπολογισθούν από πυρήνες γεωτρήσεων. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος
- ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD)
- η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- η κατάσταση των ασυνεχειών
- η επίδραση των υπογείων νερών
- ο προσανατολισμός των ασυνεχειών

Κατηγορία	RMR	Ποιότητα βραχομάζας	Συνοχή c	Γωνία εσωτερικής τριβής φ	Μέτρο Ελαστικότητας E
I	61-80	Πολύ καλή	0.3-0.4	35° -45°	20-60
II	41-60	Καλή	0.2-0.3	25°-35°	5.6-20
IV	21-40	Μέτρια	0.1-0.2	15°-25°	1.8-5.6
V	<20	Πολύ πτωχή	<0.1	<15°	<1.8

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση της βραχομάζας και παράμετροι σχεδιασμού κατά Bieniawski(1989)

Α. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥΣ									
1	Αντοχή συμπαγούς πετρώματος	Δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προσπάται η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη		
		Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Βαθμός		15	12	7	4	2	1	0
2	Ποιότητα πυρίτινα (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 τραχιές επιφάνειες. Ασυνεχής. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχιές επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχιές επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Μαλακά τοιχώματα	Επιφάνεια ολίσθησης ή υλικό πλήρωσης <5mm ή διακλάσεις ανοικτές 1 – 5mm. Συνεχής διακλάσεις	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοικτές > 5mm. Συνεχής διακλάσεις		
	Βαθμός		30	25	20	10	0		
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10m μήκους της σήραγγας	Καμιά	< 10lt/min	10-25lt/min	25-125lt/min	>125lt/min		
		Τμή κλάσματος πίεσης νερού διακλάσεων δια της μέγιστης κύριας τάσης	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Γενικές συνθήκες		Εντελώς στεγνά	Λίγα υγρά	Υγρά	Νερό υπό μέτρια πίεση	Σοβαρά προβλήματα νερού		
	Βαθμός		15	10	7	4	0		
Β. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ									
Διεύθυνση και κλίση διακλάσεων			Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής		
Βαθμός	Σήραγγες		0	-2	-5	-10	-12		
	Θεμελιώσεις		0	-2	-7	-15	-25		
	Προσκή		0	-5	-25	-50	-60		
Γ. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ									
Κατηγορία			I	II	III	IV	V		
Χαρακτηρισμός			Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή		
Βαθμολογία			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		
Δ. ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ									
Κατηγορία			I	II	III	IV	V		
Μέσος χρόνος διατηρήσεως τομής			10 έτη για άνοιγμα 15m	6 μήνες για άνοιγμα 8m	1 εβδομάδα για άνοιγμα 5m	10 ώρες για άνοιγμα 2.5m	30 λεπτά για άνοιγμα 1m		
Συνολική βραχώμαζας			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Γωνία τριβής βραχώμαζας			>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°		



Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της σήραγγας	
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση κάθετα προς την κλίση			
Κλίση 45 ^o -90 ^o	Κλίση 20 ^o -45 ^o	Κλίση 45 ^o -90 ^o	Κλίση 20 ^o -45 ^o	Κλίση 45 ^o -90 ^o	Κλίση 20 ^o -45 ^o
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Κλίση 0 ^o -20 ^o : Δυσμενής ανεξάρτητα από την κατεύθυνση					

Πίνακας 2.3: Πίνακας βαθμονόμησης της βραχόμαζας σύμφωνα με το σύστημα Beniawsky (RMR)

Το σύστημα ταξινόμησης NGI ή Q

Η ταξινόμηση NGI (Norwegian Geotechnical Institute) ή ο δείκτης ποιότητας Q αναπτύχθηκε στη Νορβηγία το 1974 από τους Barton, Lien και Lunde και χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους που συνδυάζονται στην παρακάτω σχέση για τον προσδιορισμό της ποιότητας Q του πετρώματος:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

RQD=ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος

J_n =δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών (joint set number)

J_r =δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας(joint alteration number)

J_a =δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες (joint water reduction number)

SRF=συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος(ή συντελεστής απομείωσης τάσεων-stress reduction factor)

Σημειώνεται ότι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών λαμβάνεται έμμεσα υπόψη, καθώς οι τιμές των παραμέτρων J_r και J_a θεωρούνται για τις χειρότερες συνθήκες.

Ο λόγος (RQD/J_n) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν τη βραχόμαζα. Ο δεύτερος λόγος (J_r/J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας και ο τρίτος λόγος (J_w/SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχόμαζα. Η παράμετρος RQD εξ ορισμού λαμβάνει τιμές 0-100, αλλά στις περιπτώσεις όπου $RQD < 10$ λαμβάνεται $RQD = 10$. Οι τιμές που λαμβάνουν οι υπόλοιπες παράμετροι παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

A. ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Jn	
Συμπαγείς ή λίγες ασυνεχείες		0.5-1.0	
Μια οικογένεια		2.0	
Δύο οικογένειες	Για διασταυρώσεις 3jn	4.0	
Τρεις οικογένειες	Για εισόδους 2jn	9.0	
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες, πολύ διακλασμένο πέτρωμα		15.0	
Κονιορτοποιημένο πέτρωμα (σαν εδάφος)		20.0	
Σε περίπτωση εμφάνισης και τυχαίων οικογενειών ασυνεχειών γίνεται παρεμβολή			
B. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Jr	
Ασυνεχείς διακλάσεις		4.0	
Τραχείες, κυματοειδείς, ακανόνιστες		3.0	
Ομαλές, κυματοειδείς		2.0	
Τραχείες επίπεδες / ολισθηρές κυματοειδείς		1.5	
Ομαλές επίπεδες		1.0	
Ολισθηρές επίπεδες		0.5	
Ασυνεχείς με παχύ υλικό πλήρωσης χωρίς όμως να εφάπτονται τα τοιχώματα		0	
Όταν η μέση συχνότητα των κύριων οικογενειών διακλάσεων ξεπερνά τα 3m προστίθεται η τιμή 1			
Γ. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		Ja	
α	Χωρίς υλικό πλήρωσης	Φ (ενδεικτική τιμή)	
	Επιουλωμένες διακλάσεις	25°-30°	0.75
	Ιχνη αποσαθρώσεως στις παρειές («λεκιασμένες»)	25°-30°	1.0
	Αμμώδης υμένος – ελαφρά αποσαθρωμένες παρειές	20°-25°	2.0
	Ιλλιοαργιλικός υμένος («σιφρός»)	8°-16°	3.0
	Υμένος από ορυκτά αργιλικά ή μικρής γωνίας φ (τάλκης, χλωρίτης, γύψος)		4.0
	Υμένος πάχους 1-2mm		
β	Με υλικό πλήρωσης		
	Από άμμο ή κονιορτοποιημένο πέτρωμα	25°-30°	4.0
	Από σφιγγή αργίλο πάχους <5mm (συνεχείς)	16°-24°	6.0
	Από μαλακή αργίλο πάχους <5mm (συνεχείς)	12°-16°	8.0
	Από διογκούμενη αργίλο πάχους <5mm (συνεχείς) (η τιμή εξαρτάται από το ποσοστό του διογκούμενου υλικού)	6°-12°	8.0-12.0
	Ζώνες από αποσυντεθειμένο πέτρωμα και αργίλο (ανάλογα με το είδος του υλικού)		6.0-8.0 ή 8.0-12.0
	Ζώνες από ιλυώδη ή αμμώδη αργίλο, ληή μη μαλακή αργίλος		5.0
	Από σφιγγή αργίλο >5mm πάχους		10.0
	Από μαλακή αργίλο >5mm		13.0
Από διογκούμενη αργίλο >5mm		13.0-20.0	
Δ. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ		Jw	
Στεγνό πέτρωμα ή λίγο νερό (τοπικά S _{limin})		1.0	
Μέτρια εισροή νερού / μέση πίεση 1-2.5kg/cm ²		0.66	
Μεγάλη παροχή ή πίεση (ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης)		0.5	
Μεγάλη παροχή ή πίεση (ρωγμές με υλικό πλήρωσης που αποπλένεται)		0.33	
Υψηλή παροχή ή πίεση (10atm) με προοδευτική μείωση υψηλή συνεχής παροχή		0.2-0.1	
Αύξηση του συντελεστή Jw εφόσον υπάρχει αποστράγγιση			

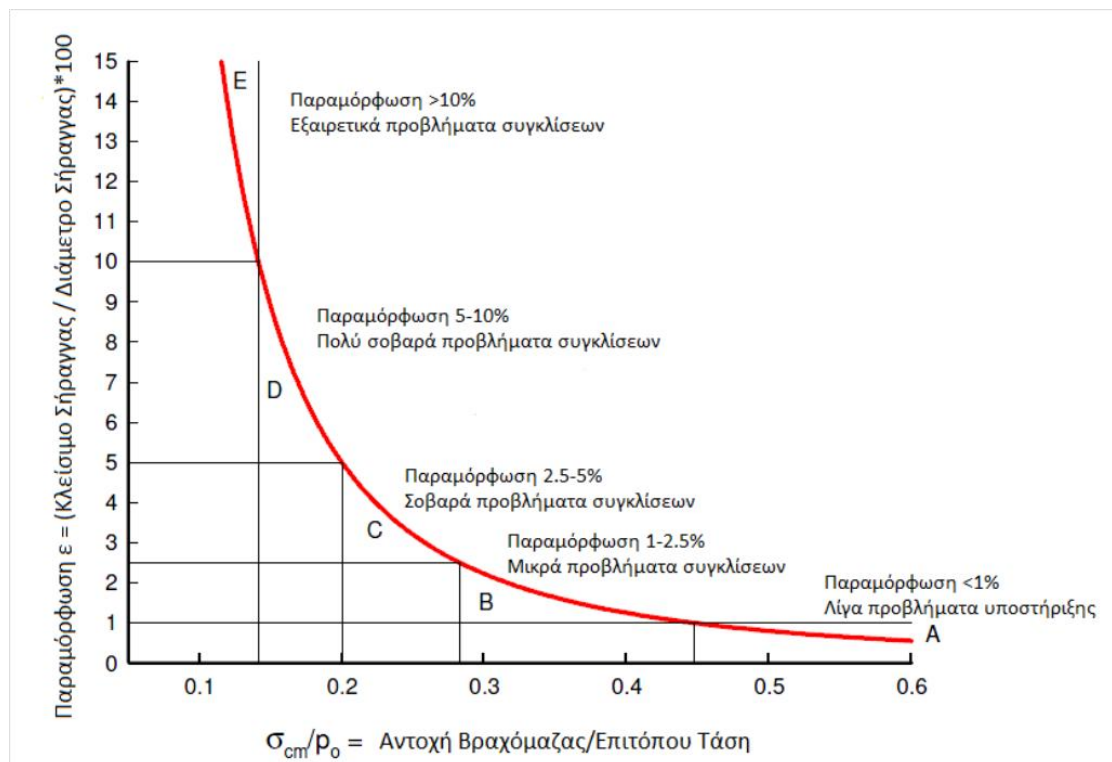
Ε. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΓΩΓΗΣ ΤΑΣΕΩΝ			SRF	
α	Ασθενείς ζώνες που τέμνουν ή μπορούν να χαλαρώσουν τη βραχώμαζα με την κατασκευή της σήραγγας. Οι τιμές του SRF μειώνονται κατά 25-50% όταν οι κατατμημένες ζώνες δεν τέμνουν το έργο αλλά απλώς το επηρεάζουν			
	Αφθονές ασθενείς ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσπασθωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα για οποιοδήποτε βάθος		10	
	Μειονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος σήραγγας <50m)		5.0	
	Μειονωμένες ασθενείς ζώνες (βάθος σήραγγας >50m)		2.5	
	Αφθονές κατατμημένες ζώνες σε σκληρό πέτρωμα χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον υλικό για οποιοδήποτε βάθος		7.5	
	Μειονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος σήραγγας <50m)		5.0	
	Μειονωμένες ασθενείς ζώνες (βάθος σήραγγας >50m)		2.5	
	Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες έντονα διακλασμένη μάζα σε οποιοδήποτε βάθος		5.0	
β	Σκληρό πέτρωμα, κατάσταση τάσεων	σ_1/σ_3	σ_1/σ_3	
	Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	>200	>13	2.5
	Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1
	Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
	Μαλακή «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	5-2.5	0.33-0.16	5-10
	Έντονη «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20
γ	Συμπίεστο πέτρωμα, πλαστική ροή όγκιμου πετρώματος κάτω από υψηλές τάσεις			
	Μέτρια πίεση από τη συμπίεστικότητα		5-10	
	Μεγάλη πίεση από τη συμπίεστικότητα		10-20	
δ	Διογκούμενο πέτρωμα, χημική διογκωση σε συνάρτηση με την πίεση του νερού			
	Μέτρια πίεση		5-10	
	Μεγάλη πίεση		10-15	

Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχώμαζας 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 1.4:Χαρακτηρισμός ποιότητας της βραχώμαζας για σήραγγες κατά Barton et al (σύστημα Q) (Ιατράκης, 2011)

Μέθοδος Hoek & Μαρίνος(2000):Η ταξινόμηση αυτή αναπτύχθηκε από τους Hoek και Μαρίνο για την εκτίμηση της πιθανότητας πρόκλησης προβλημάτων και αστάθειας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με βάση το διάγραμμα της παραμόρφωσης (ποσοστιαίας) των τοιχωμάτων της σήραγγας συναρτήσει του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επιτόπου γεωστατικές τάσεις. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και αφορά ανυποστήρικτες σήραγγες Ως παραμόρφωση ϵ , ορίζεται

ο λόγος της αξονικής παραμόρφωσης στα τοιχώματα της σήραγγας προς τη διάμετρό της.



Σχήμα 2.16: Εκτίμηση των συνθηκών διάνοιξης της σήραγγας από πλευράς παραμορφώσεων (Ιατράκης, 2011)

Ανάλογα με το ποσοστό παραμόρφωσης και την πιθανότητα πρόκλησης αστάθειας στα τοιχώματα της σήραγγας προτείνουν τα ανάλογα μέτρα υποστήριξης. Αυτά φαίνονται παρακάτω:

	Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος υποστήριξης
A	Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορούν 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 του σχηματισμού της 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 σκυροδέμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρα πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για πρόσθετη ασφάλεια.
C	2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διεύστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μετώπο 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 σκυροδέμα.
D	5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και, αν και γενικώς χρησιμοποιείται διεύστατη 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 σκυροδέμα.
E	Μεγαλύτερη του 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμα αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνουντα πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων.

Πίνακας 1.5: Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης με βάση την αναμενόμενη σύγκλιση της σήραγγας (Ιατράκης, 2011)

Για παραμορφώσεις $\epsilon < 1\%$ έχουμε μικρά προβλήματα αστάθειας ενώ τα μέτρα υποστήριξης μπορούν να περιοριστούν στη χρήση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για παραμορφώσεις 1-2,5% αναμένονται μικρά προβλήματα συγκλίσεων, με πιθανή ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, τα οποία να αντιμετωπίζονται με τη χρήση αγκυρίων, εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ενδεχομένως ελαφρών πλαισίων για πρόσθετη ασφάλεια. Για παραμορφώσεις από 2,5% έως 5% αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων αλλά όχι τόσο σημαντικά στην ευστάθεια του μετώπου. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών ενώ επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Όταν οι παραμορφώσεις κυμαίνονται 5% έως 10% αναμένονται πολύ σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων και ευστάθειας μετώπου για την αντιμετώπιση των οποίων απαιτούνται δοκοί προπορείας, ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Τέλος για παραμορφώσεις που υπερβαίνουν το 10% τα προβλήματα των συγκλίσεων και ευστάθειας μετώπου επιδεινώνονται σημαντικά και για την αντιμετώπισή τους χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας, αγκύρια για την ενίσχυση του μετώπου και ενδεχομένως ολισθαίνοντα πλαίσια έναντι των κλασικών πλαισίων. Στην τελευταία περίπτωση η οποία είναι και δυσμενέστερη σημαντικ

ρόλο στην έγκαιρη αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων ,παίζει και η εμπειρία των μελετητών.

Ποιοτική μέθοδος ταξινόμησης:

Η πιο γνωστή ποιοτική μέθοδος είναι η μέθοδος Terzaghi κατά την οποία κριτήρια εντάξεως σε κατηγορίες αποτελούν αφενός η γεωλογική δομή της βραχώμαζας και αφετέρου η εισροή ύδατος.

Ο Terzaghi το 1946 πρότεινε έναν τρόπο υπολογισμού των φορτίων που δέχεται ένα άνοιγμα (σχήμα 2.1), με σκοπό τον υπολογισμό των χαλύβδινων ανιδών που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη του ανοίγματος αυτού.

Σύμφωνα με το σύστημα αυτό διακρίνονται εννέα χαρακτηριστικές καταστάσεις του πετρώματος και σε κάθε κατηγορία αντιστοιχεί ένα φορτίο στήλης πετρώματος που υπολογίζεται σε ύψος υλικού ως συνάρτηση του πλάτους (B) και του ύψους(H_1) της σήραγγας. Επομένως η κατακόρυφη τάση στην οροφή της σήραγγας, λόγω του ύψους των υπερκειμένων μαζών (H_u), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_u = H_u \gamma$$

Στόχος ταξινόμησης των πετρωμάτων

Στόχος των εμπειρικών μεθόδων δηλαδή της ταξινόμησης των πετρωμάτων είναι :

- να διαιρέσουν μία ορισμένη μάζα πετρώματος σε ομάδες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά
- να βοηθήσουν στην κατανόηση των χαρακτηριστικών ομάδων πετρωμάτων
- να εκφράσουν την μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με ποσοτικούς δείκτες που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό τεχνικών έργων
- να θεσπίσουν μία κοινή βάση συνεννόησης και ανταλλαγής πληροφοριών για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. (Ιατράκης, 2011)

2.6.2. Αναλυτικές μέθοδοι σχεδιασμού

Στις αναλυτικές μεθόδους σχεδιασμού σηράγγων επιχειρείται ο αναλυτικός υπολογισμός, με μαθηματικά μοντέλα και εξισώσεις, της παραμορφωσιακής

συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχόμαζας όπως και των μεταβολών των τάσεων κατά την προώθηση και εκσκαφής της σήραγγας. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη σύγκλιση $u_R(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση x (με $x > 0$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής είναι του Panet και δίνεται από την σχέση:

$$u_R(x) = u_R(0) + [u_{R\infty} - u_R(0)] \left\{ 1 - \left[\frac{m}{m + \xi \left(\frac{x}{R} \right)} \right]^2 \right\}$$

όπου:

$u_{R\infty}$ = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ($x = -\infty$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

R = η ακτίνα της σήραγγας

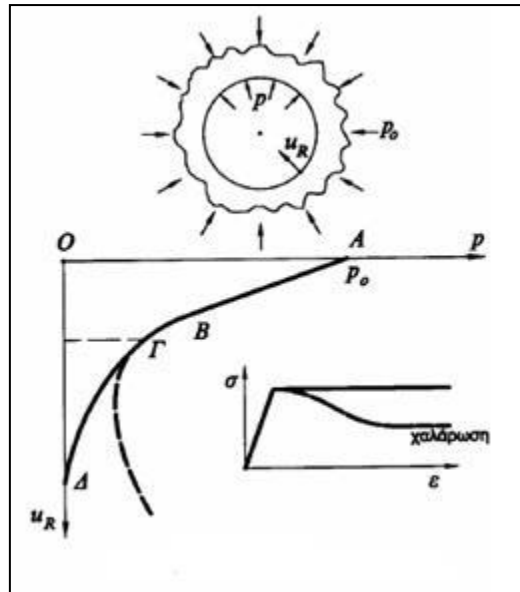
$u_R(0)$ = σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση $x=0$).

m = συντελεστής που εξαρτάται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχόμαζας $N_s = 2p_o / \sigma_{cm}$.

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

$$u_{R\infty}^e = \frac{p_0}{2G} R$$

Τα διαγράμματα αποτόνωσης τάσεων-συγκλίσεων προκύπτουν από τις επιλύσεις τέτοιων μαθηματικών σχέσεων και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τελικών συγκλίσεων, της πιθανότητας εμφάνισης της πλαστικής ζώνης, αλλά και των αναγκαίων μέτρων υποστήριξης, ώστε να αποφευχθεί η πλαστικοποίηση γύρω από τη σήραγγα.



Σχήμα 2.17: Τυπική καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης (Καβαδδός, 2005)

Πάνω σε τέτοιες καμπύλες συγκλίσεων-αποτόνωσης στηρίχτηκαν και οι καμπύλες Panet και Chern που απεικονίζουν την κατανομή των συγκλίσεων σε συνάρτηση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.

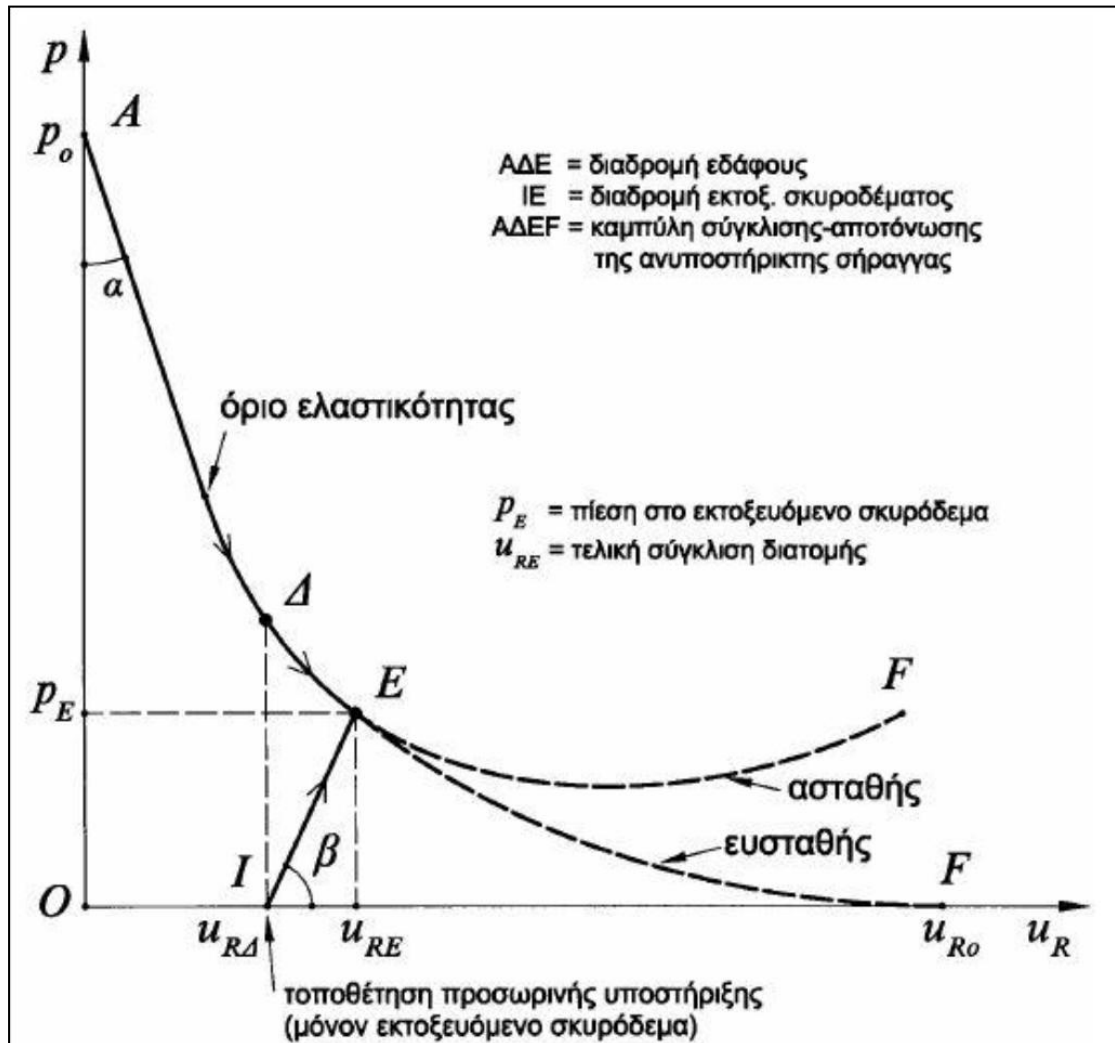
Σύμφωνα με τις καμπύλες οι συγκλίσεις ξεκινούν εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης(προσύγκλιση), ενώ στη θέση του μετώπου ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης, της τάξεως του 30%-35%, έχει ήδη συμβεί(για ανυποστήρικτη σήραγγα). Οι καμπύλες αυτές στηρίζονται σε σχέσεις ελαστικών και ανελαστικών παραμορφώσεων με κύρια χαρακτηριστικά το μέτρο ελαστικότητας, E , του εδάφους και το λόγο Poisson, ν . Επίσης από την καμπύλη σύγκλισης –αποτόνωσης παρατηρούμε ότι με την έναρξη των συγκλίσεων αρχίζει παράλληλα και η αποτόνωση των εφαπτομενικών τάσεων που ασκούνται στα τοιχώματα της σήραγγας.

Στις αναλυτικές μεθόδους για την προσομοίωση αυτής ακριβώς της αποτόνωσης των τάσεων χρησιμοποιείται η ισοδύναμη εσωτερική πίεση, p_i , η οποία προφανώς για ένα συγκεκριμένο σημείο πριν από την έναρξη των συγκλίσεων και τη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ισούται με τις επί τόπου γεωστατικές τάσεις, p_o . Με την πρόοδο της διάνοιξης της σήραγγας και επομένως της αύξησης των παραμορφώσεων, η εσωτερική πίεση σταδιακά μειώνεται έως ότου φτάσουμε σε συνθήκες πλήρους αποτόνωσης όπου και μηδενίζεται σχήμα 2.18

Με χρήση των παραπάνω καμπυλών μπορεί να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης όπως και η εσωτερική πίεση τη

στιγμή εκείνη αλλά και η τελική πίεση στην υποστήριξη στη κατάσταση ισορροπίας. Για την εκτίμηση των παραπάνω είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του βαθμού αποτόνωσης των εδαφικών τάσεων, λ . Αν υποθέσουμε ότι η εσωτερική πίεση τη στιγμή της εγκατάστασης της προσωρινής υποστήριξης είναι p_{Δ} (σχήμα 2.18) τότε ο βαθμός αποτόνωσης εκείνη την στιγμή είναι:

$$\lambda = 1 - \frac{p_{\Delta}}{p_0}$$



Σχήμα 2.18: Καμπύλη αποτόνωσης με βάση την οποία εκτιμώνται τάσεις στην προσωρινή επένδυση κατά την εφαρμογή και στην κατάσταση ισορροπίας (Καβαδδάς, 2005)

όπου p_0 : οι αρχικές γεωστατικές τάσεις.

Δηλαδή ο βαθμός αποτόνωσης εκφράζει τη μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή, p_0 , σε μία μικρότερη τιμή p .

Η προσομοίωση της διάνοιξης και της υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις στις αναλυτικές μεθόδους.

1. Η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p₀) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.
2. Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δοκίδες προπορείας) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p) στο μηδέν. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα υποστήριξης τόσο μικρότερη πίεση θα ασκείται πάνω τους στην κατάσταση πλήρους αποτόνωσης και τόσο μεγαλύτερο ποσοστό συγκλίσεων θα έχει ήδη εκδηλωθεί. Οπότε η σωστή επιλογή της χρονικής στιγμής για την τοποθέτηση της υποστήριξης, είναι ένα πολύ κρίσιμο ζήτημα. Πιο συγκεκριμένα εάν γίνει με καθυστέρηση η τοποθέτηση τους (στο σημείο B3) ίσως να έχει ως συνέπεια τη δημιουργία πλαστικής ζώνης μεγάλης έκτασης, την αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και τον κίνδυνο κατάρρευσης (σχήμα). Αντίθετα η βιαστική τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης (σημείο B1) αφενός δεν θα εκδηλωθούν συγκλίσεις, αφετέρου θα εκδηλωθούν υψηλές πιέσεις πάνω στην επένδυση (Καββαδάς, 2005).

Οι αναλυτικές μέθοδοι αν και δίνουν μία ικανοποιητική εικόνα για την εξέλιξη των συγκλίσεων πριν και μετά το μέτωπο συναρτήσκει της αποτόνωσης των τάσεων, παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Δεν λαμβάνουν υπόψη τις ειδικές γεωτεχνικές συνθήκες όπως η κλίση των στρωμάτων του βράχου ή πιθανή ύπαρξη σφηνών ενώ επιλύονται και με πολλές άλλες απλές παραδοχές. Οι αναλυτικές μέθοδοι συγκλίνουν ικανοποιητικά για τις παραδοχές ότι η σήραγγα είναι κυκλικής διατομής και κατασκευάζεται σε μεγάλο βάθος όπου το εντατικό πεδίο θεωρείται ισότροπο. Λαμβάνουν υπόψη μόνο την προσωρινή υποστήριξη και όχι την τελική. Επειδή οι αναλυτικές μέθοδοι δεν προβλέπουν την ακριβή εξέλιξη των παραμορφώσεων σε μία σήραγγα, δεν χρησιμοποιούνται πλέον από τους μελετητές, γιατί επιλέγονται οι αριθμητικοί μέθοδοι που προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. (Καβαδάς, 2005)

2.6.3. Αριθμητικές μέθοδοι σχεδιασμού

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των υπολογιστών η χρήση αριθμητικών μεθόδων βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε προβλήματα ευστάθειας και ελέγχου της συμπεριφοράς των γεωυλικών. Κάθε αριθμητική μέθοδος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όσον αφορά στην εφαρμογή της σε συγκεκριμένο πρόβλημα, για αυτό και δεν διακρίνεται μία βέλτιστη μέθοδος, η οποία να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλα τα προβλήματα ανάλυσης της εντατικής κατάστασης φυσικών σχηματισμών.

Τρεις είναι οι βασικότερες κατηγορίες των αριθμητικών μεθόδων οι οποίες αναφέρονται παρακάτω:

Αξονοσυμμετρική αριθμητική μέθοδος

Στη συγκεκριμένη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ένα επίπεδο της σήραγγας και των μέτρων ενίσχυσης και ολόκληρο το προσομοίωμα κατασκευάζεται με περιστροφή του τεταρτοκύκλιου γύρω από τον άξονα. Η προσομοίωση των αγκυρίων και των δοκών προπορείας δεν είναι εφικτή καθώς προσομοιώνονται ως συνεχόμενα κυκλικά κελύφη γύρω από την σήραγγα και όχι ως στοιχεία δοκών ή εφελκυστικές ράβδοι. Στη περίπτωση που το μέτωπο είναι ενισχυμένο η μέθοδος αυτή δείχνει την μείωση στις εξωθήσεις του πυρήνα καθώς και στις συγκλίσεις και στις προσυγκλίσεις. Οι εξωθήσεις και οι προσυγκλίσεις μπορούν να ελεγχθούν και μεταβάλλοντας την δυσκαμψία της επένδυσης αλλά και την απόσταση από το μέτωπο στην οποία θα τοποθετηθούν. Επομένως είναι αδύνατον να επιδιορθωθεί ότι έχει συμβεί μπροστά από το μέτωπο μόνο με την επένδυση της σήραγγας πίσω από το μέτωπο. (Ιατράκης, 2011)

Διδιάστατη αριθμητική μέθοδος

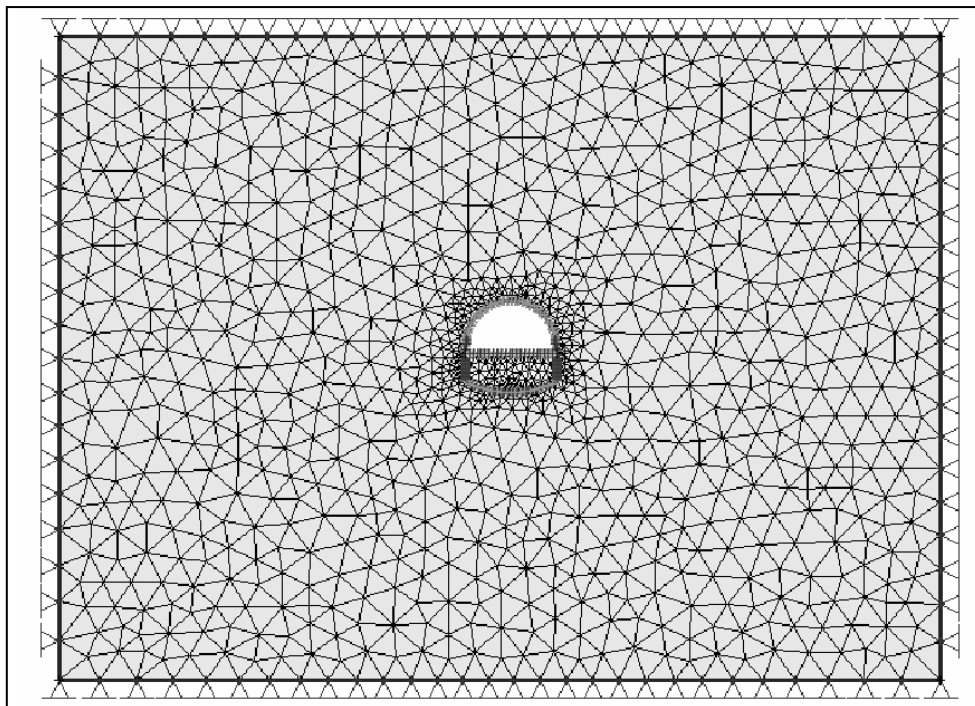
Για την ανάλυση της διάνοιξης και της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων μέχρι και πριν λίγα χρόνια χρησιμοποιούταν η διδιάστατη αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι η παραμόρφωση είναι επίπεδη. Στην μέθοδο αυτή προσομοιώνονται τα διαδοχικά στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας καθώς και η χρονική υστέρηση στην τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης μετά την εκσκαφή κάποιας φάσης.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Υπολογίζονται οι παραμορφώσεις του τοιχώματος της σήραγγας, η έκταση της πλαστικής ζώνης στη βραχώμαζα γύρω από τη σήραγγα και η ένταση των μέτρων άμεσης υποστήριξης όπως είναι τα αγκύρια και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ προσομοιώνονται και οι εντατικές καταστάσεις που δεν είναι μόνο υδροστατικού τύπου.
- Ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος για κάθε ανάλυση καθώς έχουμε ένα επίπεδο (έναντι των τρισδιάστατων αναλύσεων).
- Στις περιπτώσεις που δεν επιτρέπεται (από προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων δισδιάστατης ανάλυσης) η απομείωση των εσωτερικών τάσεων κατά τον βαθμό αποτόνωσης, λ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά η μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχώμαζας στο εσωτερικό της σήραγγας (ground loosening method). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η μείωση του μέτρου Ελαστικότητας (E_0) σε μία μικρότερη τιμή (E) σε μία περιοχή της βραχώμαζας (συγκεκριμένα στην περιοχή όπου πρόκειται να εκσκαφτεί η σήραγγα προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή (p_0) σε μία μικρότερη τιμή (p).

Μειονέκτημα της μεθόδου

- Επιλύει ένα πρόβλημα που είναι τρισδιάστατο σε δύο διαστάσεις
- Υπολογίζει παραμορφώσεις κάθε φορά μόνο σε μία διατομή της σήραγγας αγνοώντας τις προσυγκλίσεις και συγκλίσεις πίσω από το μέτωπο για την εκτίμηση των οποίων χρησιμοποιούνται οι καμπύλες Panet.
- Αδυνατεί να προσομοιάσει την επίδραση του μετώπου στη συμπεριφορά της σήραγγας και της ακαμψίας αυτού στην εξέλιξη των παραμορφώσεων (συγκλίσεων-προσυγκλίσεων).



Σχήμα 2.19: Μοντέλο προσομοίωσης με διδιάστα πεπερασμένα στοιχεία (Ιατράκης, 2011)

Τριδιάστατη αριθμητική μέθοδος

Είναι η πιο ολοκληρωμένη μέθοδος ανάλυσης των σηράγγων, καθώς προσομοιώνει το εδαφικό μέσο προώθησης και την σήραγγα με τριδιάστατα μοντέλα ενώ εισάγει την πραγματική γεωμετρία του έργου στους υπολογισμούς, αποδίδοντας την διαμήκη διάσταση αυτού, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πρέπει αναγκαστικά να είναι κυκλική. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να υπολογιστούν παραμορφώσεις και εντατικά μεγέθη και κατά τη διαμήκη διάσταση της σήραγγας, δηλαδή συγκλίσεις, προσυγκλίσεις, επιφανειακές καθιζήσεις αλλά και ροπές και τάσεις σε τρεις διαστάσεις. Η τριδιάστατη αριθμητική μέθοδος (όπως και η δισδιάστατη) μπορεί να θεωρήσει εντατικές καταστάσεις, που δεν είναι υδροστατικού τύπου οι οποίες λαμβάνουν υπόψη βαρυτικά φορτία, και που υπολογίζουν την επίδραση διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων στη στατική λειτουργία της σήραγγας.

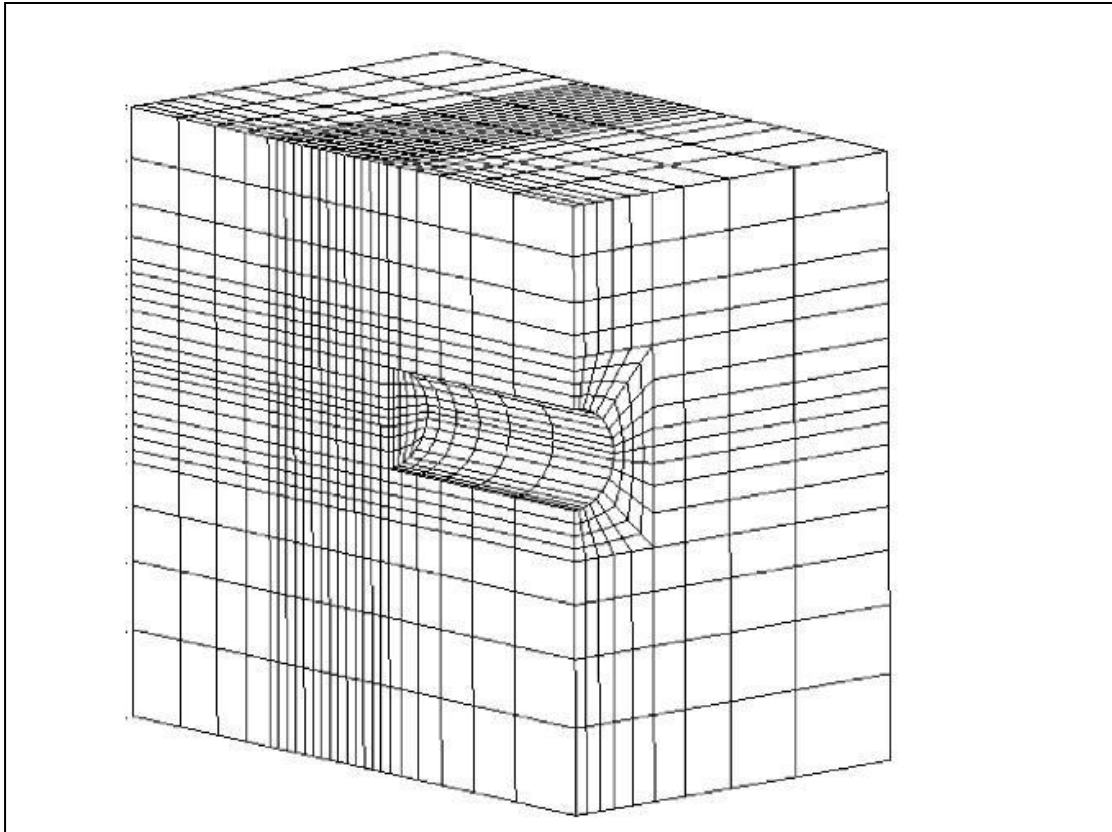
Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Είναι δυνατή η επίβλεψη και ο έλεγχος της εξέλιξης των τάσεων και των μετακινήσεων σε κάθε βήμα της ανάλυσης, σε οποιοδήποτε σημείο της σήραγγας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας αλλά και η εξαγωγή αποτελεσμάτων που αναγκαστικά απαιτούν τριδιάστατη θεώρηση όπως είναι η οριζόντια εξώθηση μετώπου και οι ροπές των δοκών προπορείας.

- Τα αποτελέσματα που εξάγει γενικώς συμφωνούν ικανοποιητικά με πειραματικά δεδομένα τόσο ως προς τις μετακινήσεις όσο και τις τάσεις στην επένδυση της σήραγγας.

Μειονέκτημα της μεθόδου

- Απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και είναι ανάλογος με την ζητούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.20: Μοντέλο προσομοίωσης με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Ιατράκης, 2011)

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι αριθμητικές μέθοδοι αποτελούν σήμερα το πιο χρήσιμο και απαραίτητο μέσο στην ανάλυση της διάνοιξης και της κατασκευής των σηράγγων με σημαντικό πλεονέκτημα ότι συμφωνούν κατά πολύ με τις πειραματικές παρατηρήσεις τόσο ως προς τις παραμορφώσεις (εξωθήσεις, συγκλίσεις και προσυγκλίσεις) όσο και ως προς τις τάσεις στην προσωρινή και στην τελική επένδυση (Ιατράκης, 2011)

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

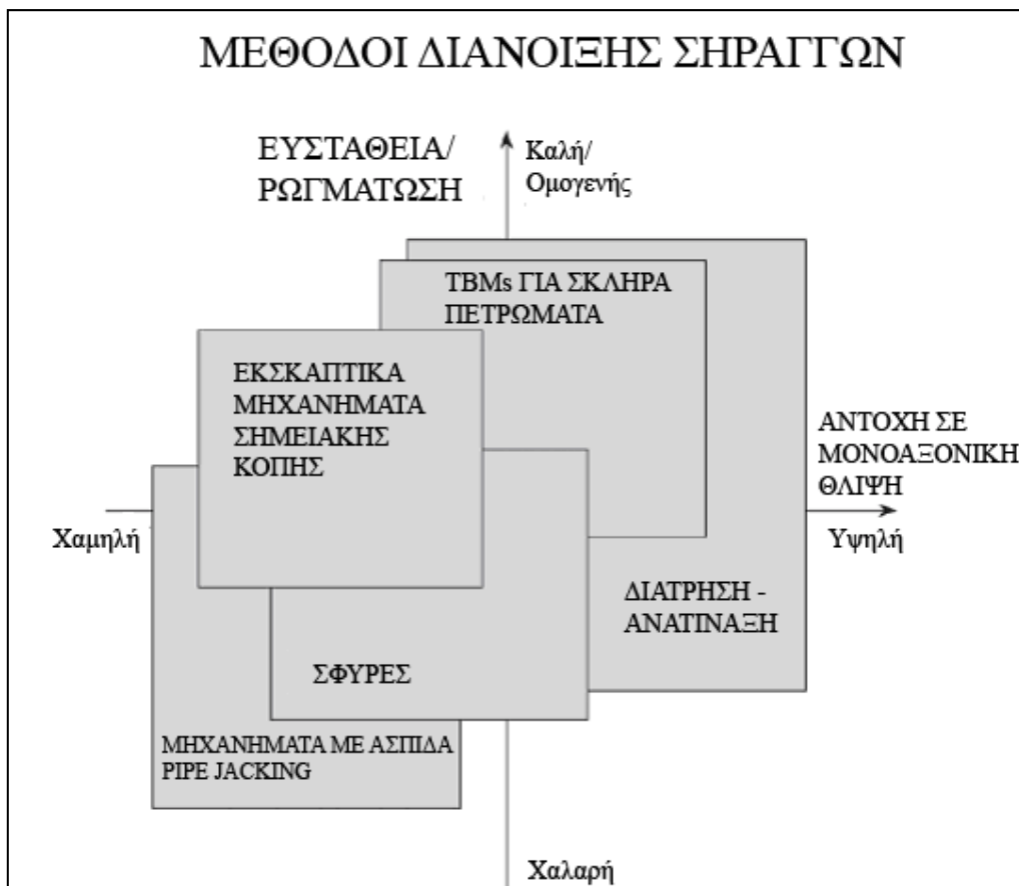
3.1. Εκσκαφή Σηράγγων

Στις σύγχρονες εκσκαφές σηράγγων υπάρχει μεγάλη ποικιλία για την επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου εκσκαφής.

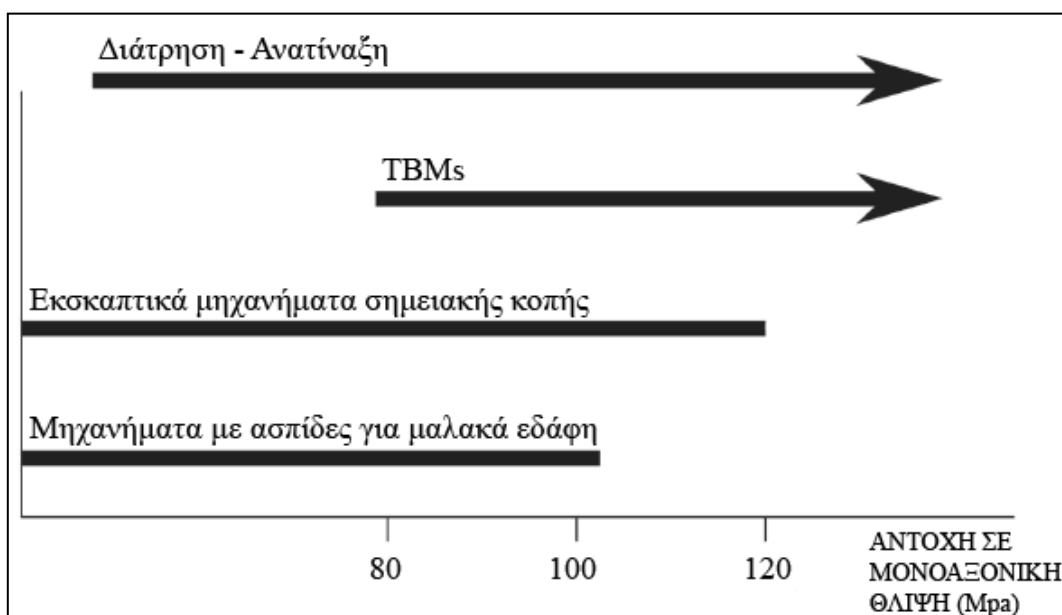
Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής μιας σήραγγας, είναι οι ακόλουθοι:

- Οι διαστάσεις των σηράγγων
- Η γεωμετρία των σηράγγων
- Το μήκος των σηράγγων και ο συνολικός όγκος εκσκαφής
- Οι γεωλογικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος
- Το επίπεδο υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η αναμενόμενη εισροή υδάτων
- Οι περιορισμοί των δονήσεων
- Οι επιτρεπόμενες καθιζήσεις της επιφανείας

Οι μέθοδοι εκσκαφής μπορούν να χωριστούν σε διάτρηση – ανατίναξη και σε μηχανική εκσκαφή. Οι μηχανικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε σημειακής κοπής (π.χ. roadheaders, σφύρες, εκσκαφείς) και ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine – TBM, ασπίδας, pipe-jacking, microtunneling) (Heiniö, 1999).



Σχήμα 3.1:Επιλογή κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες πετρώματος/εδάφους (Παπαντώνη, 2007 από Heiniö, 1999)



Σχήμα 3.2:Εύρος των μεθόδων ανάλογα με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος/εδάφους (Παπαντώνη, 2007 από Heiniö, 1999)

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής υπογείων έργων:

- ανοιχτού τύπου
- κλειστού τύπου.

Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον **ανοικτό τύπο** κατασκευής, αναφέρεται στη εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος εκσκαφής είναι γνωστή ως μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover method).

Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον **κλειστό τύπο** κατασκευής αφορά την υπόγεια εκσκαφή και οι μέθοδοι εκσκαφής για τις κατασκευές κλειστού τύπου χωρίζονται σε μεθόδους ανατίναξης και μηχανικής όρυξης (Παπαντώνη, 2007)

1. Μέθοδοι Διάτρησης – Ανατίναξης (Drill and Blast)
2. Μέθοδοι Μηχανικής Όρυξης
 - Μέθοδοι Σημειακής Κοπής (Roadheaders, Hammers)
 - Μέθοδοι Ολομέτωπης Κοπής (TBMs, Pipe Jacking)
3. Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method – NATM)

3.1.1. Κοπή και Επίχωση

Η μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover) εντάσσεται στις μεθόδους ανοικτού τύπου, όπου η εκσκαφή γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους, θεωρείται συνήθως ως εκσκαφή τάφρων σε μαλακό έδαφος και αφορά έργα μικρού βάθους. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την εγκατάσταση προσωρινών τοίχων αντιστήριξης για υποστήριξη των παρειών της εκσκαφής, ένα σύστημα στήριξης, έλεγχο των υδάτων του εδάφους και υποστήριξη των γειτονικών κατασκευών όπου είναι απαραίτητο (Saglamer, 2005). Η μέθοδος κοπής και επίχωσης εφαρμόζεται με διαφορετικό τρόπο σε ακατοίκητες και σε κατοικημένες περιοχές. Στις ακατοίκητες περιοχές, δεν συναντώνται ιδιαίτερα προβλήματα κατά την εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται σε όλο το εύρος της, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο. Δεν κρίνεται απαραίτητη η αντιστήριξη των πρανών της εκσκαφής, διότι αυτές διαμορφώνονται σύμφωνα με την κλίση που επιτρέπουν οι εκάστοτε συνθήκες του εδάφους.

Δυσκολίες παρουσιάζονται σε κατοικημένες περιοχές όπου η κατασκευή δεν πρέπει να προκαλέσει προβλήματα στη κυκλοφορία και αφετέρου ζημιές στις γειτονικές κατασκευές όπως οικοδομές, υπόγειους αγωγούς, υπόγεια καλώδια κ.α. Ανάλογα με τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα γίνει το έργο εφαρμόζεται αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη ή διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης. Στην αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη κατασκευάζεται αρχικά η μισή διατομή ώστε να είναι δυνατή η κυκλοφορία στο άλλο ήμισυ της οδού. Η εκσκαφή αντιστηρίζεται (με διαφραγματικούς τοίχους ή πασσαλοσανίδες) ώστε να αποφευχθούν ζημιές στις γειτονικές κατασκευές. Προσοχή χρειάζεται στη σύνδεση των δυο τμημάτων της διατομής. Στην διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης, κατασκευάζεται αρχικά η αντιστήριξη (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλοσανίδες, πασσαλοσυστοιχίες) πάνω στην οποία τοποθετείται προσωρινή κάλυψη ή μόνιμη πλάκα κάλυψης για τη γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας. Η εκσκαφή γίνεται υπό την προστασία της κάλυψης. Η φύση της μεθόδου διάτρησης-ανατίναξης απαιτεί πολύ καλή οργάνωση στο πεδίο. Οι δονήσεις και ο θόρυβος των ανατινάξεων περιορίζει επίσης τη χρήση της μεθόδου αυτής σε αστικές περιοχές.

Ο τυπικός κύκλος εκσκαφής των τεχνικών ανατίναξης εκτελείται με τα ακόλουθα βήματα:

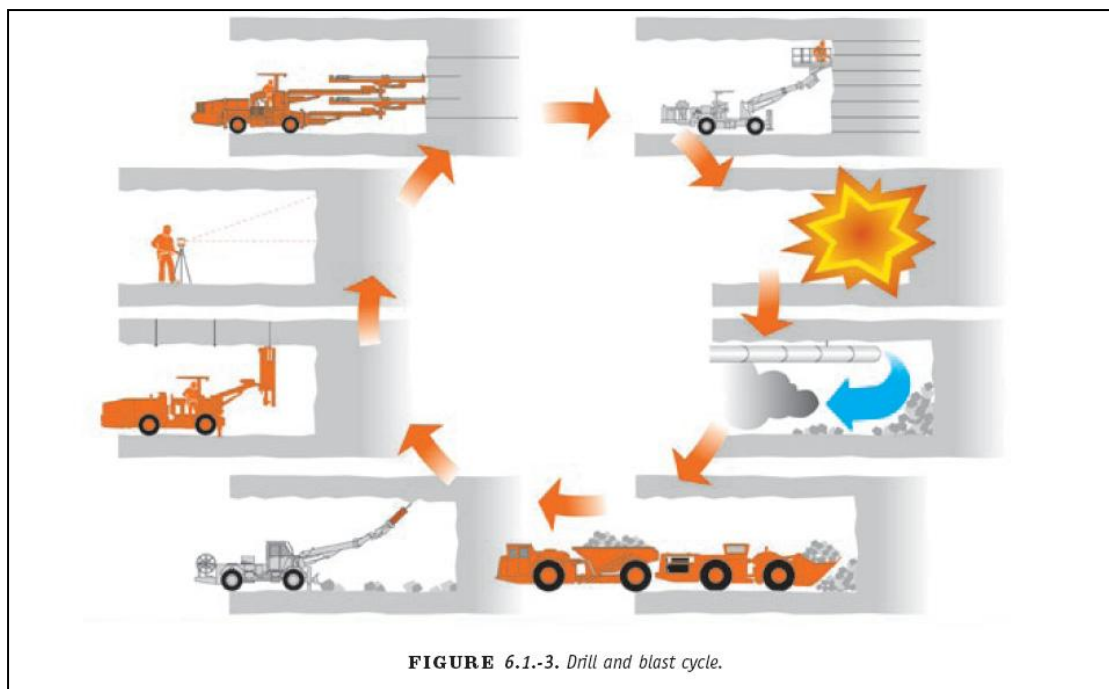
- Άνοιγμα διατρημάτων ανατίναξης και γόμωσή τους με εκρηκτικά
- Έναυση για εκτέλεση της έκρηξης, ακολουθούμενη από αερισμό για την απομάκρυνση των αερίων της έκρηξης
- Απομάκρυνση του εξορυσσόμενου πετρώματος (mucking)
- Απομάκρυνση χαλαρών τμημάτων πετρώματος από τη στέψη και τα τοιχώματα (scaling)
- Εγκατάσταση αρχικής υποστήριξης

Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει τον κύκλο της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης. Οι περισσότερες σήραγγες ορύσσονται με τη μέθοδο ολομέτωπης εκσκαφής, όπου όλο το μέτωπο ανατινάσσεται με μια ανατίναξη. Ωστόσο, η ανατίναξη του μετώπου σε φάσεις είναι μερικές φορές πιο πρακτική ή μπορεί και να απαιτείται από τις συνθήκες του εδάφους ή από περιορισμούς του εξοπλισμού. Η πιο κοινή μέθοδος τμηματικής

εκσκαφής είναι η «heading and bench», κατά την οποία το επάνω τμήμα του μετώπου (heading) ανατινάσσεται πρώτο, σε όλο του το πλάτος, και ακολουθεί μετά η ανατίναξη του κάτω μέρους (bench). Το κάτω τμήμα του μετώπου μπορεί να εκσκαφτεί με οριζόντια διατρήματα ή με κατακόρυφα διατρήματα (όμοια με των επιφανειακών ανατινάξεων). Υπάρχουν κι άλλες παραλλαγές της τμηματικής ανατίναξης, όπως ένα κεντρικό άνοιγμα στη στέψη (center crown drift), ακολουθούμενο από δύο πλευρικά ανοίγματα (crown side drifts) και στη συνέχεια από την όρυξη του κάτω τμήματος του μετώπου σε ένα, δύο ή τρία στάδια.

Η τμηματική ανατίναξη προτιμάται στις εξής περιπτώσεις:

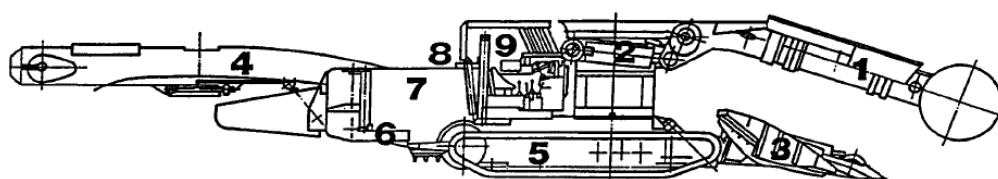
- α) όταν η διατομή είναι πολύ μεγάλη για ένα υπόγειο διατρητικό συγκρότημα (Jumbo),
- β) όταν το μέγεθος της έκρηξης σχετιζόμενο με το βάρος των εκρηκτικών πρέπει να είναι περιορισμένο για περιορισμό των δονήσεων και
- γ) όταν το έδαφος είναι τόσο φτωχό που το πλήρες πλάτος εκσκαφής ίσως δεν είναι σταθερό για αρκετό διάστημα που να επιτρέπει την εγκατάσταση της αρχικής υποστήριξης (Παπαντώνη, 2007 από USACE, 1997).



Σχήμα 3.3: Ο κύκλος της μεθόδου διάτρησης - ανατίναξης (Heiniö, 1999)

3.1.2. Μέθοδοι σημειακής κοπής

Τα πρώτα μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders) χρησιμοποιήθηκαν για διάνοιξη σηράγγων τη δεκαετία του 60. Τα βασικά τμήματα ενός εκσκαπτικού μηχανήματος σημειακής κοπής φαίνονται στο σχήμα 3.4. Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται εκσκαπτικό μηχανήμα ανοικτής ασπίδας. (Εξαδάκτυλος, 2006)

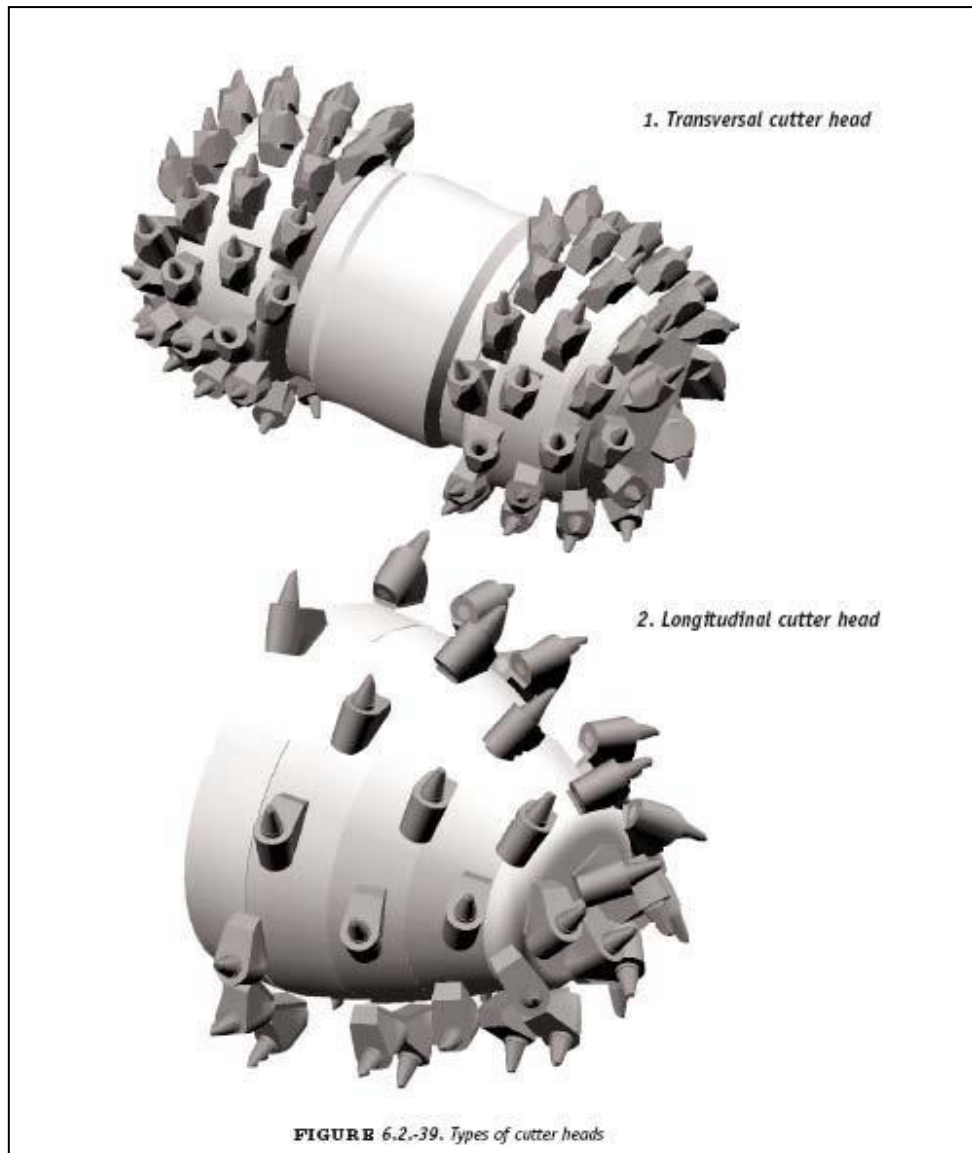


- | | |
|---------------------------|-------------------|
| 1. Cutter Boom | 6. Base Frame |
| 2. Turret | 7. Electrics |
| 3. Loading Device | 8. Hydraulics |
| 4. Chain Conveyor | 9. Operator's Cab |
| 5. Crawler Track Assembly | |

Σχήμα 3.4: Τα βασικά τμήματα ενός Roadheader (Εξαδάκτυλος, 2006)



Εικόνα 3.5: Εκσκαπτικό μηχάνημα ανοικτής ασπίδας Roadheader (Εξαδάκτυλος, 2006)



Εικόνα 3.6: Τύποι περιστροφικών κεφαλών με κοπτικά άκρα (Εξαδάκτυλος, 2006)

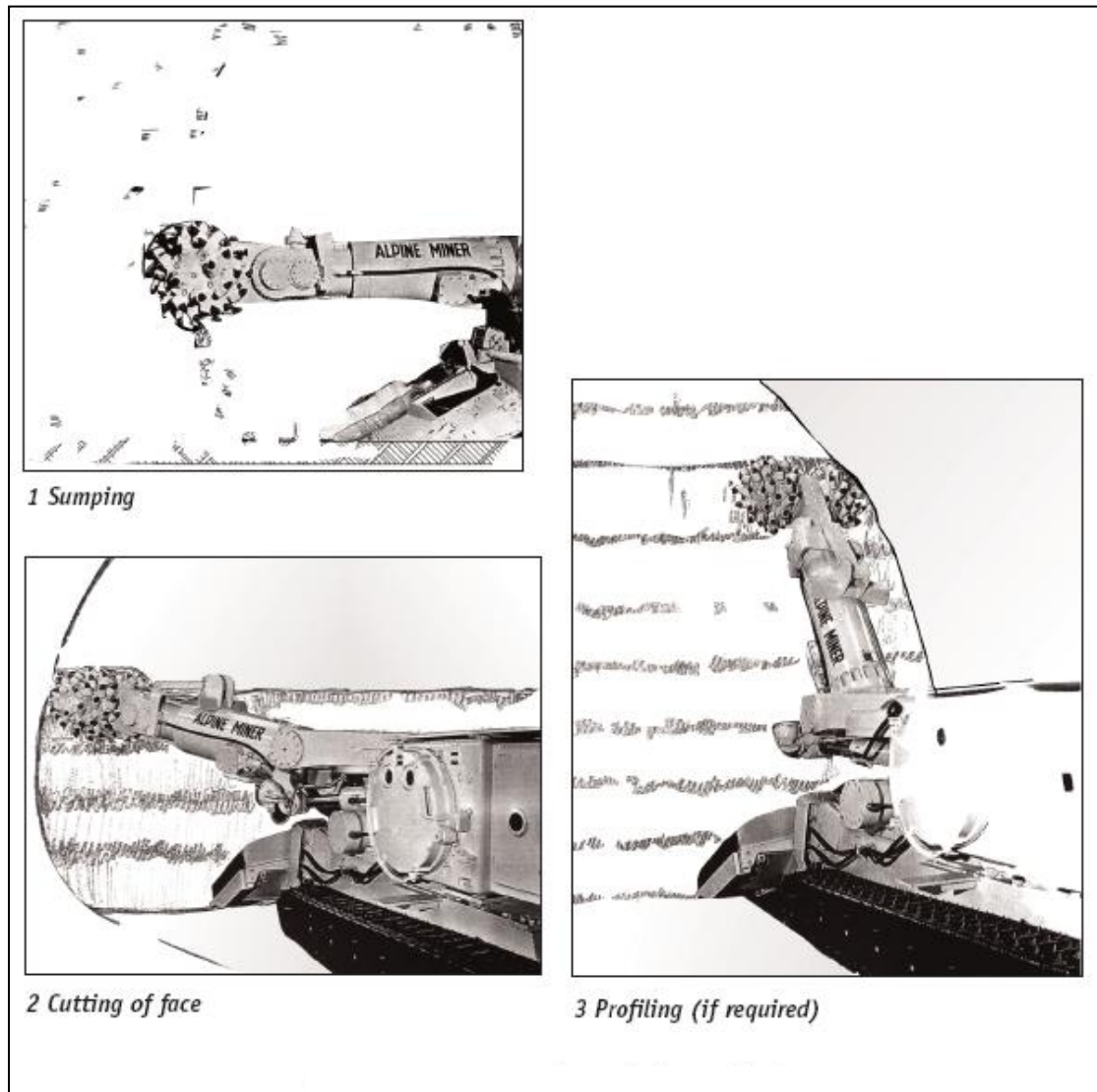
Οι κοπτικοί βραχίονες αποτελούν το εργαλείο προσβολής του μετώπου. Τα βασικά του τμήματα είναι η μηχανή του βραχίονα και οι κοπτικές κεφαλές. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κοπτικών κεφαλών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6:

- Οι διαμήκεις, οι οποίες περιστρέφονται παράλληλα με τον άξονα του βραχίονα.
- Οι εγκάρσιες, οι οποίες περιστρέφονται κάθετα με τον άξονα του βραχίονα.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος σημειακής κοπής σε τρεις φάσεις:

- Διείσδυση
- κοπή μετώπου

- διαμόρφωση προφίλ μετώπου



Σχήμα 3.7: Τρόποι λειτουργίας ενός roadheader (1. διείδυση, 2. κοπή μετώπου, 3. διαμόρφωση προφίλ μετώπου) (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.1.3. Εκσκαφή με σφύρες

Η εκσκαφή σήραγγας με σημειακή κοπή (hammer tunneling) μέσω υδραυλικών σφυρών (hydraulic hammer hammers) σχήμα 3.8 αποτελούν ένα συνδυασμό συνεχούς μεθόδου με χαμηλό κόστος εξοπλισμού. Δε θέτουν περιορισμούς στη γεωμετρία του μετώπου της σήραγγας και είναι αποδοτικές σε βραχώμαζα με χαμηλή έως μέση αντοχή σε θλίψη. Σε σκληρή βραχώμαζα η χρήση τους δεν συνίσταται, λόγω περιορισμένου ρυθμού παραγωγής.



Εικόνα 3.8:Κρουστική υδραυλική σφύρα (www.komatsu.com)

Η μέθοδος εργασίας που εφαρμόζεται εξαρτάται από το μέγεθος της σήραγγας. Έτσι σε σήραγγες με εμβαδό διατομής από $30-70\text{m}^2$, μπορεί να χωρέσει μόνο μία σφύρα, οπότε η διαδικασία εξόρυξης διενεργείται σε πέντε φάσεις:

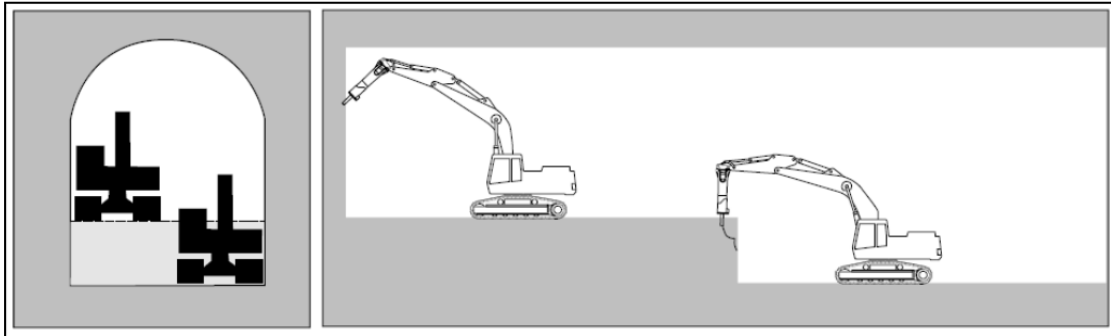
- Εκσκαφή
- Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού
- Απομάκρυνση των επισφαλών όγκων
- Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού που προήλθε από επισφαλείς όγκους
- Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

Σε σήραγγες με εμβαδό διατομής μεγαλύτερο από 70m^2 , η εξόρυξη και η μεταφορά του υλικού μπορεί να γίνει ταυτόχρονα γιατί σε σήραγγες τέτοιου μεγέθους μπορούν να εργαστούν ταυτόχρονα μία σφύρα, ένας φορτωτής και ένα φορτηγό. Έτσι η διαδικασία εξόρυξης διενεργείται σε δύο φάσεις:

- Εκσκαφή (και απομάκρυνση επισφαλών όγκων) και μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού
- Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

Σε σήραγγες με ύψος μεγαλύτερο από 7m είναι αδύνατο ένας εκσκαφέας να εξορύξει υλικό από τόσο ψηλά και η διαδικασία γίνεται σε δύο στάδια:

- Εκσκαφή της σήραγγας από τον εκσκαφέα με τη σφύρα μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος (μικρότερο των 7m).
- Ένας ακόμη συνδυασμός εκσκαφέα-σφύρας ξεκινά περίπου 150m πίσω από τον πρώτο εκσκαφέα και μεγαλώνει με το βάθος της σήραγγας μέχρι αυτή να αποκτήσει το επιθυμητό ύψος.



Σχήμα 3.9: Εκσκαφή σήραγγας σε δύο φάσεις με δύο σφύρες (Εξαδάκτυλος, 2006)

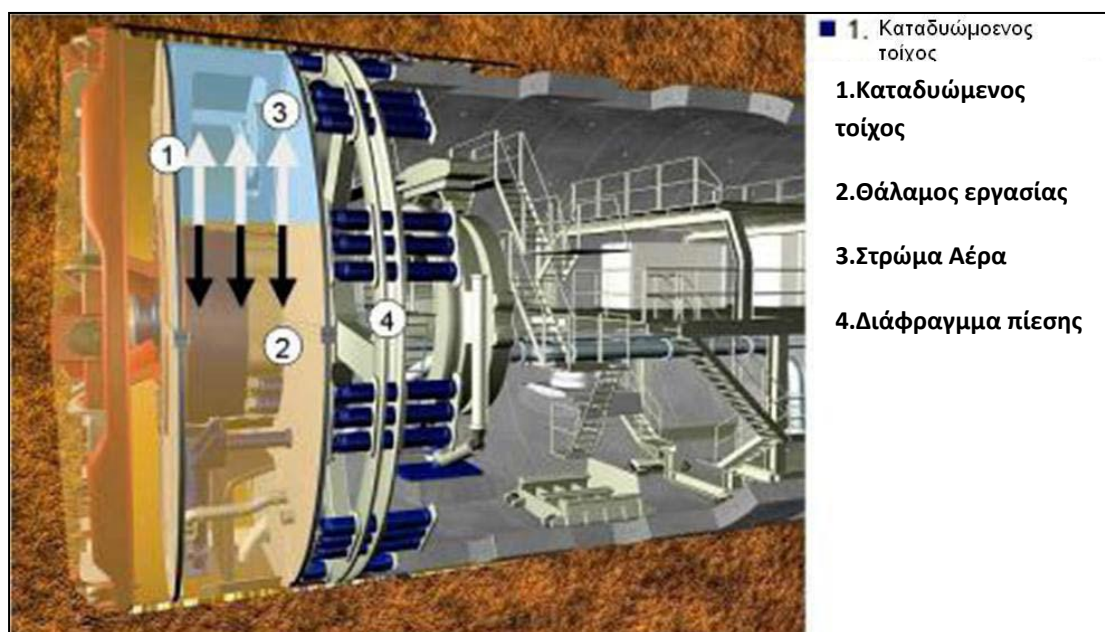
3.2. Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων μέσα σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν το ίδιο αποτελεσματικά για τη διάνοιξη μέσα από σκληρά ή χαλαρά πετρώματα ή εδάφη. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1 έως και 15m (με τάση να φτάσουν τα 19m) και οι ταχύτητες προσχώρησης ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες από μερικά cm/βδομάδα έως και 130m/βδομάδα. (Εξαδάκτυλος, 2006)

Ένα TBM συνήθως αποτελείται από ένα ή δύο ασπίδες, μεταλλικούς κυλίνδρους και από συστήματα υποστήριξης. Στο ένα άκρο της ασπίδας τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από τη κοπτική κεφαλή υπάρχει ένας θάλαμος στον οποίο, ανάλογα το τύπο κοπτικού, τα θραύσματα κοπής ανακατεύονται με πολφό, ή μένουν ως έχουν και μεταφέρονται στην έξοδο της σήραγγας. Η επιλογή της κοπτικής επαφής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Πίσω από θάλαμο βρίσκονται μία σειρά από υδραυλικοί γρύλοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση του μηχανήματος. Οι γρύλοι τοποθετούνται στην επένδυση της σήραγγας που βρίσκονται πίσω από το μηχανήμα και εν συνεχεία το ωθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η κοπτική κεφαλή του TBM περιστρέφεται με γωνιακές ταχύτητες από 1 έως 10rpm. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες καθώς και

από τις δυνατότητες του μηχανήματος. Ανάλογα με τη γεωλογία μπορεί η σήραγγα να υποστηριχθεί ή να αφηθεί ανυποστήρικτη. Η υποστήριξη γίνεται με την εισαγωγή προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος οι οποίοι τοποθετούνται στη θέση τους καθώς το μηχάνημα προωθείται προς τα εμπρός.



Εικόνα 3.10: Τμήματα ενός TBM (Εξαδάκτυλος, 2006)

Η επιλογή μονής ή διπλής ασπίδας εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής καθώς και από την ταχύτητα προχώρησης. Διπλές ασπίδες χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη ή ρηγματομένες ζώνες όπου απαιτείται μεγάλη ταχύτητα προχώρησης. Αντίστοιχα η μονή ασπίδα χρησιμοποιείται σε σκληρά, συμπαγή πετρώματα. (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.2.1. TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης

Ένα gripper TBM είναι κατάλληλο για εξόρυξη βραχομαζών που η ευστάθεια του μετώπου και του ανυποστήλωτου τμήματος της σήραγγας μπορεί να επιτευχθεί με προσωρινά μέσα υποστήλωσης όπως κοχλίες, μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το gripper TBM αποτελείται από τέσσερα σύνολα συστημάτων:

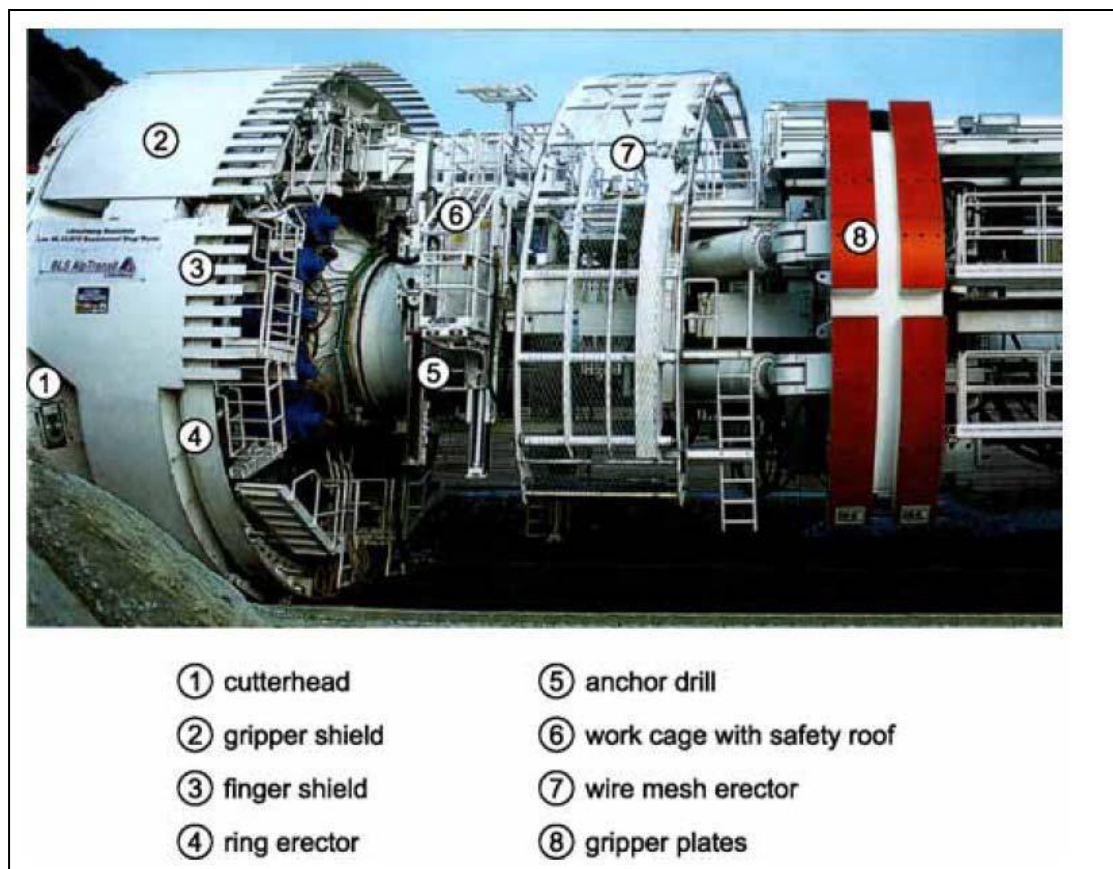
- σύστημα διάτρησης
- σύστημα προώθησης και πλευρικής αντιστήριξης(gripper)
- σύστημα υποστήλωσης και τοποθέτησης των προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος
- σύστημα μεταφορικής ταινίας

Το σύστημα διάτρησης αποτελείται από την κοπτική κεφαλή, τους δίσκους κοπής, το σύστημα μετάδοσης κίνησης της κεφαλής και το σύστημα οδήγησης. Η κοπτική κεφαλή προωθείται και οδηγείται με ηλεκτρουδραυλικό σύστημα κινητήρων.

3.2.2. TBM με ασπίδα

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η βραχώμαζα λόγω της μικρής της αντοχής δεν μπορεί παραλάβει τις δυνάμεις στήριξης της μηχανής TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης, που είναι απαραίτητες για την μετάδοση των δυνάμεων πρόωσης. Μία μηχανή TBM τύπου ασπίδας χωρίς μηχανισμό υποστήριξης του μετώπου μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί αν το περίγραμμα της σήραγγας δεν είναι ευσταθές με συνέπεια να επισυμβούν καταπτώσεις. Το κέλυφος της ασπίδας που καλύπτει όλο το μηχάνημα χρησιμεύει ως προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας.

Η μόνιμη επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος. Τα στοιχεία υποστήλωσης τοποθετούνται κάτω από την προστασία του ουραίου τμήματος της ασπίδας που ονομάζεται tail-skin.



Εικόνα 3.11: TBM με πλευρικούς grippers (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.2.3. TBM χωρίς ασπίδα

Οι μηχανές της συγκεκριμένης αυτής της κατηγορίας δεν έχουν ασπίδα , δηλαδή είναι ανοιχτές, εφόσον δεν απαιτείται η τοποθέτηση δακτυλίων αντιστηρίξεως στο πέτρωμα. Το μηχάνημα στηρίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας με υδραυλικά έμβολα και η προώθηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται από μια ή περισσότερες σειρές τηλεσκοπικών κυλίνδρων.



Εικόνα 3.12: Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής με ασπίδα (www.ametro.gr)



Εικόνα 3.13: Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα (www.ametro.gr)

3.3. Εκσκαφή σε Κατοικημένες περιοχές ή κοντά στην Επιφάνεια

Η κατασκευή του Μετρό και γενικότερα των αστικών αβαθών σήραγγων είναι μία ιδιαίτερη περίπτωση υπογείου έργου, καθώς η εκσκαφή γίνεται σε κατοικημένη περιοχή πράγμα που σημαίνει ότι η ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να μείνει όσο είναι δυνατό ανεπηρέαστη. Για να συμβεί αυτό πρέπει η εδαφική πίεση στο βάθος της εκσκαφής να μένει σταθερή τόσο κατά τη διάρκεια του έργου όσο και μετά την ολοκλήρωσή του. Είναι γεγονός ότι κατά την κατασκευή τέτοιων έργων πολλές φορές παρατηρείται η παρουσία δύο τύπων εδάφους στο μέτωπο, για παράδειγμα η παρουσία υψηλής αντοχής και συνοχής στο πόδι της σήραγγας και η παρουσία ενός πιο χαλαρού υλικού (διαβρωμένο υλικό ή άμμος) στη στέψη της σήραγγας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη κοπή υλικού που είναι και αιτία καθιζήσεων. Άρα το μέτωπο είναι ιδιαίτερα ασταθές, και για την ευστάθειά του δεν αρκεί η πίεση στη γεωμάζα που ασκείται απευθείας από την κοπτική κεφαλή, αλλά απαιτείται ασπίδα κλειστού μετώπου. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων επιλέγονται μηχανήματα των εξής τύπων:

- Ασπίδες πεπιεσμένου αέρα

- Ασπίδες πολφού (slurry)
- Ασπίδες αντιστάθμισης πίεσης με λάσπη(EPB)

3.3.1. Ασπίδες πεπιεσμένου αέρα

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκσκαφής εφαρμόζεται τόσο σε συνεκτικά όσο και μη συνεκτικά εδαφικά υλικά, κατά κύριο λόγο κορεσμένα όπου η αποστράγγιση δεν είναι εφικτή, και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή της. Έχει ιδιαίτερα αυξημένο κόστος κατασκευής και τυχόν απώλεια πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές αστοχίες.

Στόχος της μεθόδου είναι η εφαρμογή στο μέτωπο διάνοιξης της απαραίτητης διαφοράς πίεσης, της ατμοσφαιρικής στο θάλαμο εκσκαφής σε σχέση με την πίεση των πόρων του σχηματισμού, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία της σφήνας του μετώπου και να αποφευχθεί η αστοχία στην περιοχή του μετώπου. Εάν υπάρχει υπόγειο νερό στο μέτωπο, και δεν μπορεί να απομακρυνθεί με ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα τότε αυτό απομακρύνεται με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Στο πεπιεσμένο αέρα υποβάλλεται ολόκληρη η σήραγγα, είτε μόνο το κοπτικό μηχανήμα, το οποίο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλα διαφράγματα έτσι, ώστε μόνο ο θάλαμος εργασίας να βρίσκεται υπό πίεση.

3.3.2. Ασπίδες πολφού (slurry)

Κατά την εκσκαφή των σήραγγων με τις μηχανές “slurry”, ο θάλαμος εκσκαφής γεμίζει με αιώρημα μπετονίτη και η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο διάνοιξης ελέγχεται μέσω συστήματος στην άνω περιοχή του θαλάμου. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος τύπων εδαφών. Ωστόσο, έχει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως οι τεράστιες και ακριβές εγκαταστάσεις για την ανακύκλωση του μίγματος εδαφικού υλικού και μπετονίτη σε περιοχή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους.

Στις ασπίδες αυτές το μίγμα μπετονίτη-εδάφους μεταφέρεται υδραυλικά μέσω ενός σωλήνα. Το ρευστό και στερεό του μίγματος μπετονίτη-εδάφους διαχωρίζονται από έναν διαχωριστή που βρίσκεται έξω από την σήραγγα. Μηχανές ολομέτωπης κοπής αυτού του τύπου εφαρμόζονται στις εξής περιπτώσεις:

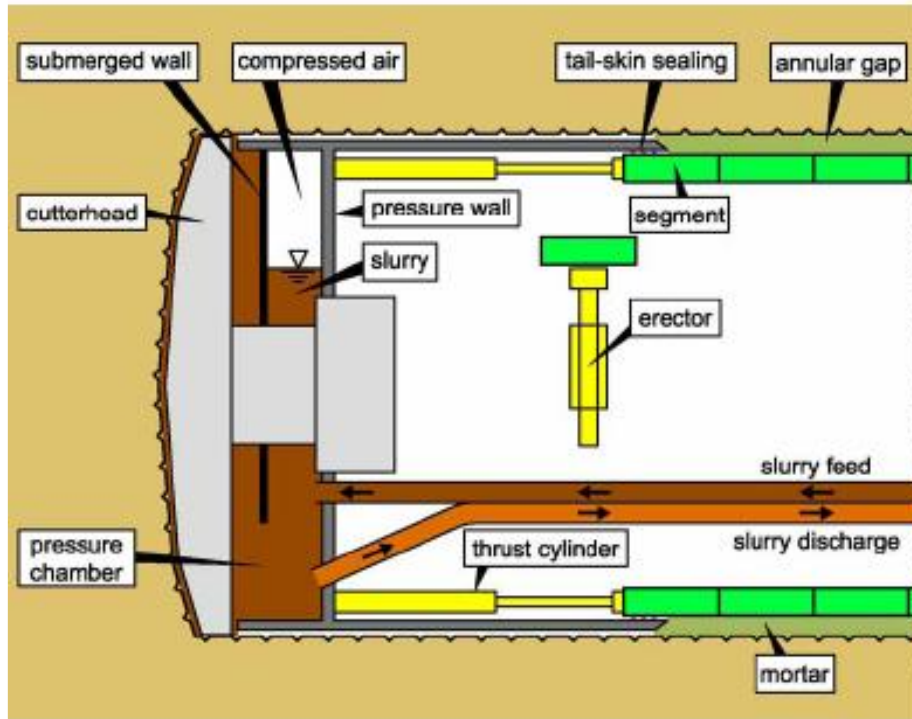
- Αν το έδαφος που περιβάλλει την εκσκαφή και το μέτωπο πρέπει να υποστηρίζεται ή
- Αν σε έναν πολύ υδατοπερατό έδαφος πρέπει να αποφευχθεί η εισροή ύδατος στην εκσκαφή.

Ο θάλαμος εκσκαφής που ονομάζεται θάλαμος πίεσης , βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή και σφραγίζεται από την σήραγγα με έναν τοίχο πίεσης(σχήμα 3.14 α) (Εξαδάκτυλος, 2006)

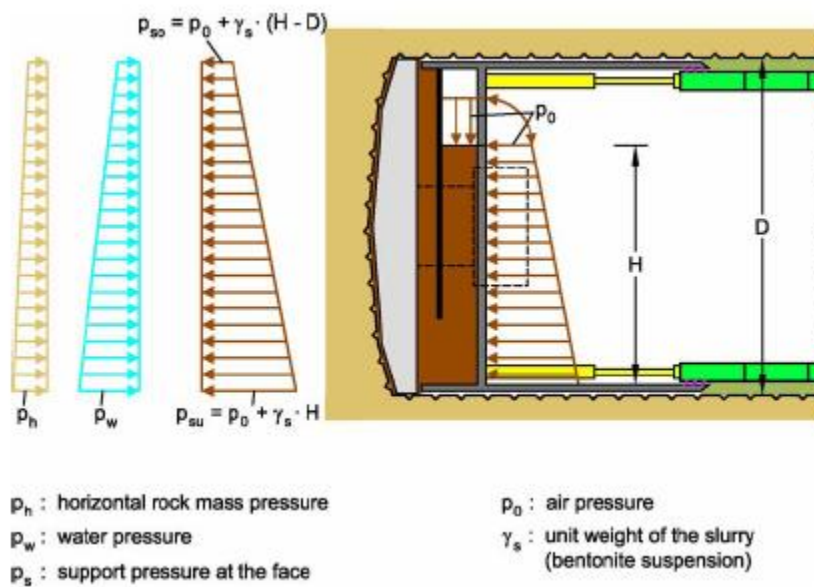
Η πίεση υποστήριξης p_s πρέπει να εξισορροπεί τουλάχιστον την οριζόντια πίεση του εδάφους p_h καθώς και την πίεση του ύδατος p_w (σχήμα 3.14α).Οι μηχανές ασπίδας διακρίνονται σε ασπίδες πολφού και ασπίδες ύδατος ή μικτές ασπίδες. Στην ασπίδα πολφού η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απευθείας αντλώντας τον πολφό μέσα ή έξω από τον θάλαμο εκσκαφής. Στην περίπτωση της ασπίδας ύδατος ή μικτής ασπίδας, η πίεση υποστήριξης ρυθμίζεται με βαλβίδα πεπεισμένου αέρα που βρίσκεται στον θάλαμο πίεσης πίσω από τον τοίχο που είναι βυθισμένος στο νερό.

Εξαιτίας του ίδιου του βάρους του πολφού, η πίεση που εξασκείται στο μέτωπο αυξάνει γραμμικά με το βάθος(σχήμα 3.14 β)

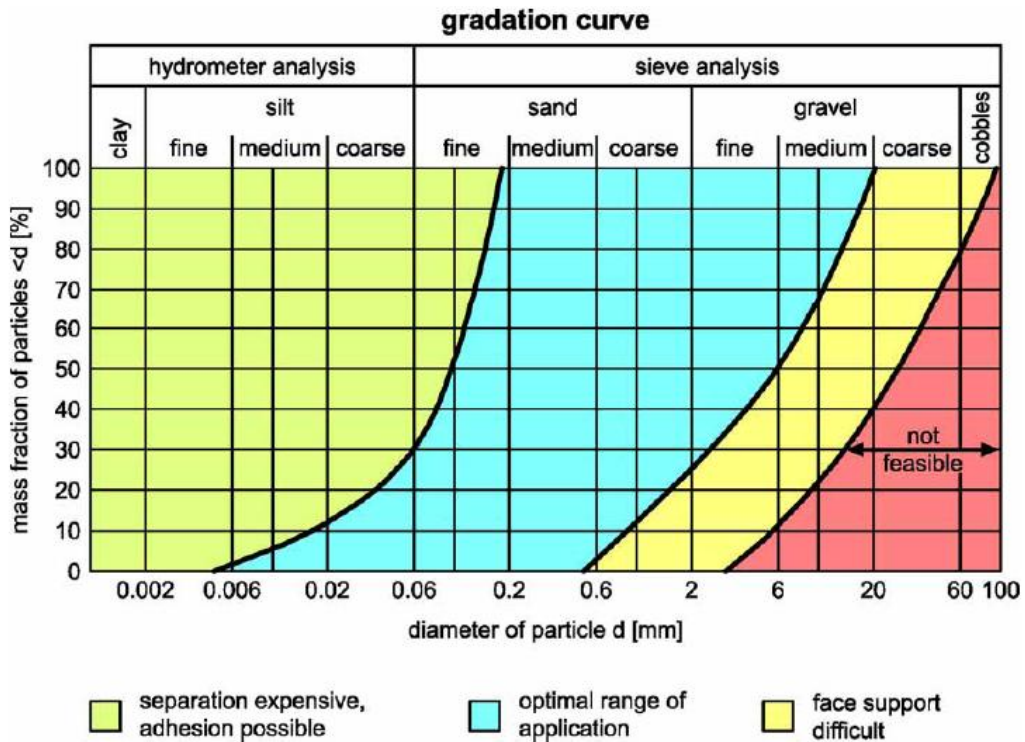
Σύμφωνα με τον Krause (1987), το πεδίο εφαρμογής των ασπίδων πολφού περιλαμβάνει κοκκομετρίες εδαφών που χαρακτηρίζονται σαν άμμοι και λεπτομερή χαλίκια. Το ποσοστό ιλύος με μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους κόκκων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 30%.Στην περίπτωση εδαφών με ποσοστά συνεκτικών κόκκων μεγαλύτερα από αυτό υπάρχει το ρίσκο της επικόλλησης στην κοπτική κεφαλή ή στον θάλαμο εκσκαφής. Επίσης τα συνεκτικά εδάφη απαιτούν μεγαλύτερο έργο διαχωρισμού του μίγματος μπετονίτη-εδάφους. (Σχήμα 3.14 γ) (Εξαδάκτυλος, 2006)



(α)



(β)

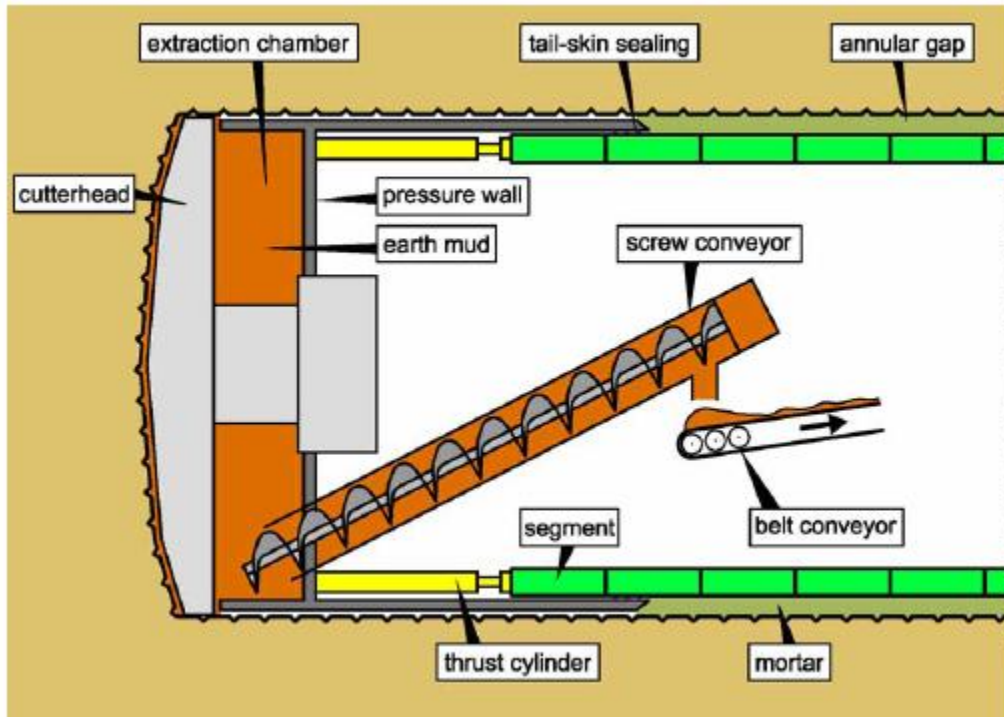


(γ)

Σχήμα 3.14: (α) Ασπίδα με χρήση πολφού ή νερού (β) αρχή της μεθόδου υποστήριξης του μετώπου (γ) πεδίο εφαρμογής των ασπίδων πολφού ανάλογα με την κοκομετρία των εδαφών (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.3.3. Ασπίδες αντιστάθμισης πίεσης με λάσπη (EPB)

Στις ασπίδες αυτές το μέτωπο συγκρατείται με τη χρήση του εδάφους ή του πετρώματος που εξορύσσεται και έχει λάβει την μορφή λάσπης. Ο έλεγχος της πίεσης της λάσπης του χώρου του μετώπου γίνεται από έναν ρυθμιζόμενο εκκενωτή στο άκρο ενός ατέρμονα κοχλίου. Όταν τα εδάφη που εκσκάπτονται είναι αμμώδη, τότε προστίθεται σε αυτά αφρώδες υλικό (γλοιός-additive) για να τους προσδώσει ρευστότητα μέσα στο θάλαμο πίεσης και στον ατέρμονα κοχλία. Ο απλούστερος τύπος αυτής της μηχανής δε χρησιμοποιεί πρόσθετα υλικά και στο μέτωπο ασκεί την ώση της μηχανής. Η μηχανή αυτή είναι κατάλληλη για τη διάνοιξη εδαφών που έχουν άργιλο ή αμμώδη άργιλο.



Σχήμα 3.15: Ασπίδες με ισορροπία γαιών (EPB's) (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.4. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ «N.A.T.M.»

Γενικά

Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων δεν αποτελεί μέθοδο, αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης των σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά την διάνοιξη των σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου N.A.T.M. είναι η διάνοιξη της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.

Η βασική αρχή της μεθόδου N.A.T.M. είναι, ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας σε ικανοποιητικό βαθμό για την μείωση των πιέσεων επί του συστήματος της άμεσης υποστήριξης, όχι όμως τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο της κατάρρευσης. Επιτρέπεται στην ουσία, η ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχώμαζας προς το εσωτερικό της σήραγγας ώστε να αναπτυχθεί το φαινόμενο «θόλου» η, δηλαδή θλιπτική ένταση της βραχώμαζας κατά την περιφέρεια της σήραγγας, δεδομένου ότι η

πίεση της βραχόμαζας στην άμεση υποστήριξη δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη, αλλά εξαρτάται από την τεχνική διάνοιξης και υποστήριξης. Τυπικά, όσο πιο γρήγορα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και όσο πιο ανένδοτη είναι, τόσο μεγαλύτερα φορτία αναλαμβάνει, υπό την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης δεν θα προκαλέσει υπερβολική χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχόμαζας.

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, είτε απλό, είτε ινοπλισμένο, είτε οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα, είτε ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους.

Επίσης η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνο με αγκύρια, χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου N.A.T.M. Η ως άνω άμεση υποστήριξη ακολουθείται συνήθως από την κατασκευή, σε μεταγενέστερο χρόνο, της «τελικής επένδυσης» της σήραγγας, η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση, αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

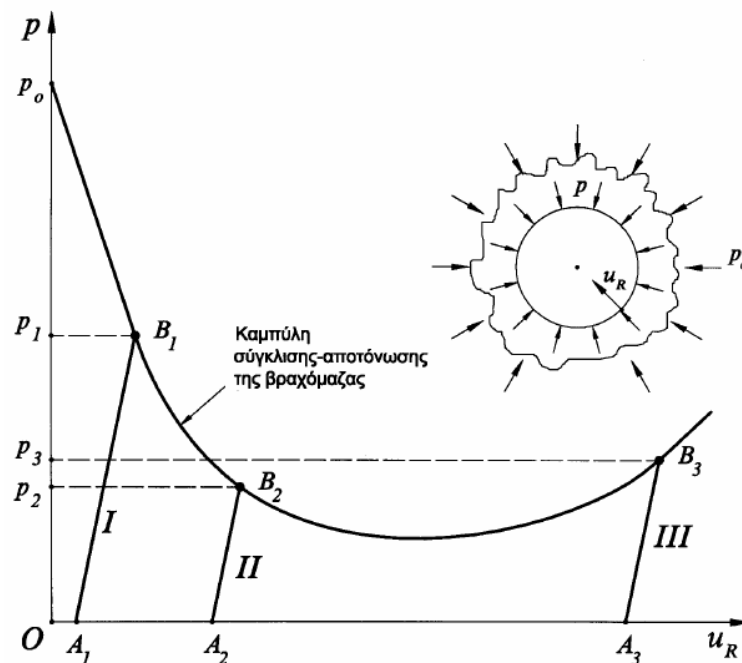
3.4.1. Χαρακτηριστικά της μεθόδου N.A.T.M.

Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση, και επιπλέον ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχόμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα σε αυτό.

Οι έξι βασικότερες αρχές στις οποίες βασίζεται η «μέθοδος» είναι:

- Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας γίνεται συνήθως σε δύο ή περισσότερες της μίας φάσεις. Τέτοιες περιπτώσεις φαίνονται στα σχήματα 2.13 2.14 2.15. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος.

- Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής σε μικρή απόσταση από το μέτωπο, ώστε να προσδιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση της σήραγγας και να αποφευχθεί η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας. Αυτό επιτυγχάνεται με την προχώρηση της κάθε φάσης σε μικρά βήματα, της τάξεως των 1-2 μέτρων, αναλόγως την ποιότητα της βραχώμαζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας είναι ταχύτερη).



Σχήμα 3.16: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Καββαδάς, 2005).

- I. πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p) είναι πολύ μεγάλη.
- II. κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) έχει μειωθεί σημαντικά
- III. πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης χαλάρωσης της βραχώμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης.

- Το σύστημα της άμεσης υποστήριξης θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα, ώστε να προσδιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του

τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή, επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα, αλλά και επειδή έχει μικρό χρόνο πήξεως.

- Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κánaβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας του τόξου στην βραχώμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχώμαζας αν παραμορφωθεί προκαλεί την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και κατά συνέπεια, θλίψης στον σχηματισμό, αυξάνοντας της αντοχή και μειώνοντας την παραμορφωσιμότητά του.
- Ολοκλήρωση δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής, δηλαδή και στο δάπεδο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα, ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχώμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ο δακτύλιος.
- Στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχώμαζες με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθης η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου εκσκαφής. Τα φαινόμενα αυτά, προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας, με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως η αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής, διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς το κατακόρυφο, ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους ή δοκούς προπορείας, κατασκευή τσιμεντετενέσεων, επένδυση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ. (Καββαδάς, 2005).

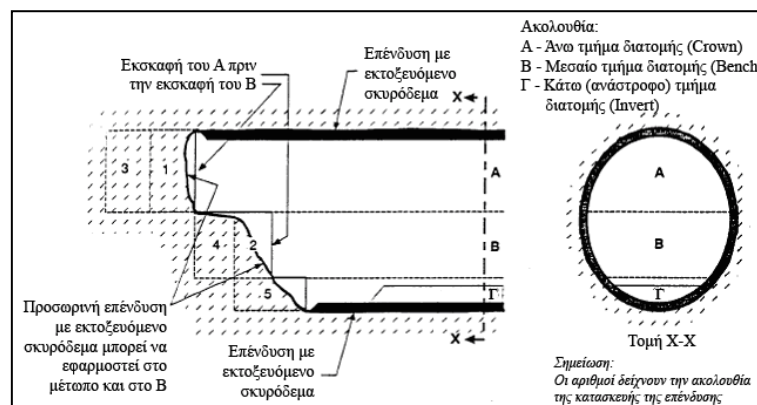
Η πυκνότητα των μέτρων της άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται στις επιτόπου συνθήκες. Ειδικότερα, η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις της συμπεριφοράς του τμήματος της σήραγγας που έχει ήδη διανοιχτεί, όπως μετρήσεις της σύγκλισης του τοιχώματος, της πίεσης της βραχώμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της θλιπτικής τάσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε απόκλιση από την προηγούμενη συμπεριφορά θα πρέπει να αξιολογείται και να

ερμηνεύεται και στη συνέχεια να αντιμετωπίζεται με κατάλληλη προσαρμογή των μέτρων της άμεσης υποστήριξης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η άμεση υποστήριξη της σήραγγας ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης, η οποία αναλαμβάνει μέρος ή το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η τελική επένδυση κατασκευάζεται συνήθως μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας, αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισοροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων και των εντάσεων.

Η εκσκαφή των σήραγγων με τη μέθοδο N.A.T.M. συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μίας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

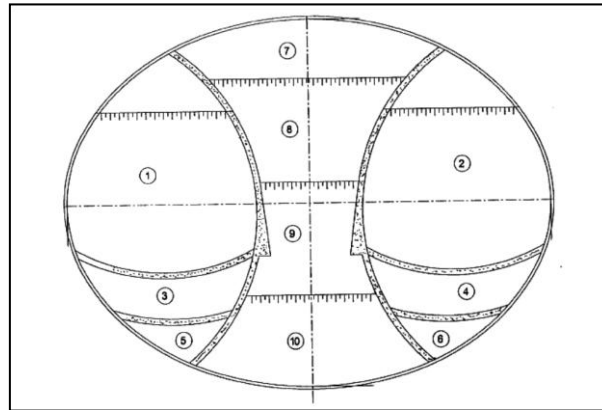
Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφθεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα πιλότο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παραλλαγή της μεθόδου με τρεις φάσεις περιγράφεται στο σχήμα 3.17



Σχήμα 3.17: Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading –bench-invert) (Καββαδάς, 2005).

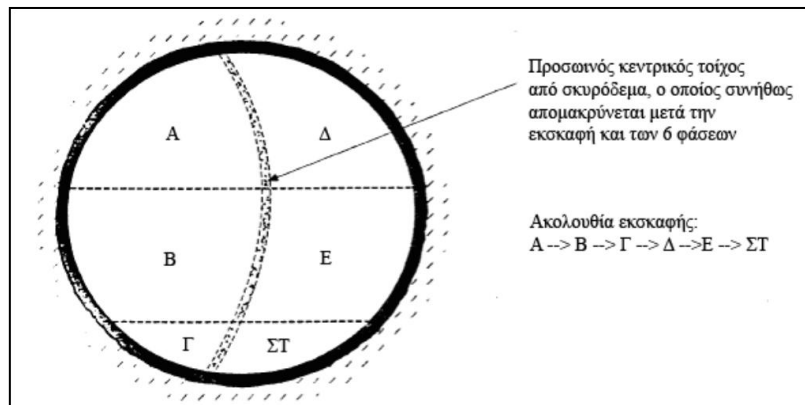
Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικά πτωχά χαρακτηριστικά ή και στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος

(π.χ. σε βαστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής και το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μίας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δύο πλευρικές στοές και ενδιάμεσως (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας (Σχήμα 3.18)



Σχήμα 3.18: Διάνοιξη σήραγγας με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Καββαδάς, 2005).

Μία άλλη μέθοδος είναι η διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13



Σχήμα 3.19: Διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος) (Καββαδάς, 2005).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της «μεθόδου» NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους, όπως η διάνοιξη με TBM, είναι τα εξής:

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες.

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μη κυκλικών διατομών.
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικά μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγας μικρού μήκους.
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη, η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης (Καβαδάς, 2005).

4. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

4.1. Γενικά

Κατά την κατασκευή υπογείων έργων οποιοσδήποτε τύπος εδαφικής μάζας ή βραχομάζας – εκτός από την κινούμενη άμμο-αναπτύσσει «φυσικό θόλο» στην γειτονιά αυτών. Αυτή η ιδιότητα των γεωυλικών είναι που επιτρέπει την όρυξη ανοιγμάτων σε αυτά. Η κατασκευή των σηράγγων βασίζεται στην μικρότερη δυνατή διαταραχή αυτού του τόξου κατά την εξόρυξη και στην πρόβλεψη των τάσεων και των μετατοπίσεων με μέτρα υποστήριξης. (Εξαδάκτυλος, 2006)

Με την συστηματική κατασκευή μεγάλων σε μέγεθος υπογείων έργων άρχισαν να διεξάγονται αναλυτικές και εξειδικευμένες έρευνες στην σχέση ανάμεσα στη μεταβολή και ανακατανομή των τάσεων λόγω της προώθησης μιας σήραγγας μέσα σε ένα εδαφικό μέσο και στις επακόλουθες παραμορφώσεις της σήραγγας και άρχισε να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής. Έτσι, φαινόμενα που δεν ήταν κατανοητά και εμφανή, άρχισαν να ερμηνεύονται και να αιτιολογούνται, ενώ νέες έννοιες όπως ο πυρήνας εδάφους από το μέτωπο, η εξώθηση μετώπου και οι προσυγκλίσεις άρχισαν να εισάγονται στην ανάλυση της ευστάθειας των σηράγγων.

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι η κατανόηση της συμπεριφοράς του μετώπου δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την συνολική ευστάθεια της σήραγγας. Η ευστάθεια του μετώπου και η ενίσχυσή του έγιναν θέματα μεγάλης σημασίας σε κάθε νέα κατασκευή σήραγγας, καθώς όπως αποδείχθηκε, σε πολλές περιπτώσεις για την ευστάθεια ολόκληρης της διατομής της σήραγγας αρκούσε η επέμβαση στο μέτωπο εκσκαφής. Παράλληλα έγιναν προσπάθειες να καθοριστούν οι παράγοντες που παίζουν τον κυριότερο ρόλο στην ευστάθεια του μετώπου.

Για την καλύτερη κατανόηση της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου σε σχέση με την εξέλιξη της αποτόνωσης των τάσεων κατά την προώθηση της σήραγγας δίνονται οι παρακάτω ορισμοί:

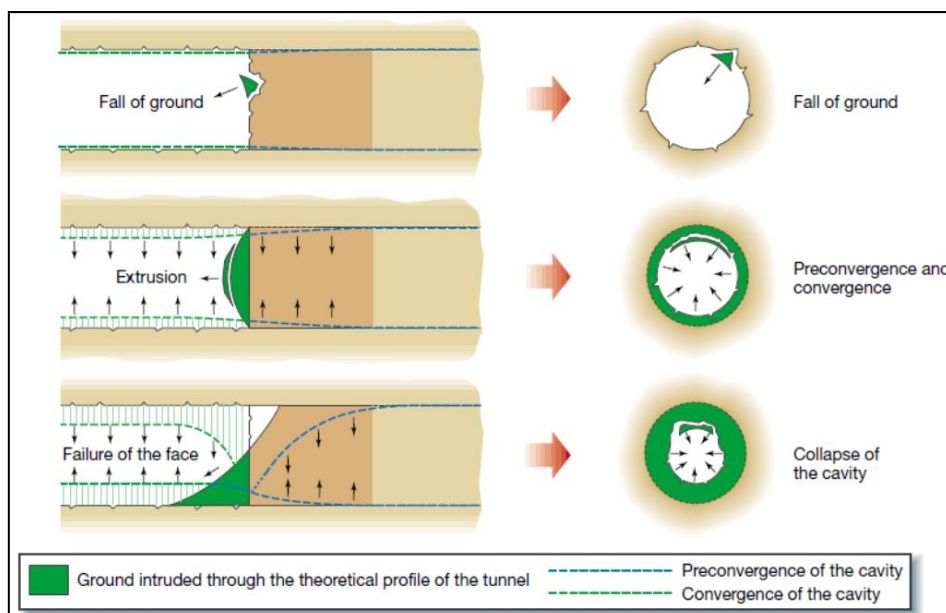
Πυρήνας προώθησης: Ορίζεται ως ο όγκος εδάφους μπροστά από το μέτωπο με πρακτικά κυλινδρικό σχήμα με μήκος και διάμετρο πρακτικά ίδια με αυτά της

σήραγγας. Στην ουσία δηλαδή αποτελεί νοητή προέκταση της σήραγγας μπροστά από το μέτωπο που πρόκειται να εκσκαφτεί.

Εξώθηση μετώπου: Αποτελεί το κυριότερο μέγεθος της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς και απόκρισης του μετώπου εκσκαφής, στην εκσκαφή και προώθηση της σήραγγας. Εξαρτάται κυρίως από την αντοχή και τις παραμορφωσιακές ιδιότητες του εδαφικού μέσου του πυρήνα προώθησης και από το αρχικό εντατικό πεδίο στο οποίο υποβαλλόταν. Η εξώθηση εκδηλώνεται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας και η γεωμετρία της είναι, είτε λιγότερο είτε περισσότερο συμμετρική ως προς αυτόν τον άξονα ανάλογα και με το σχήμα της διατομής της σήραγγας.

Προσύγκλιση της εκσκαφής: είναι κατά βάση το θεωρητικό προφίλ της σύγκλισης που ξεκινάει μπροστά από το μέτωπο και συνεπώς δεν είναι άμεσα ορατή. Εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη σχέση ανάμεσα στην αντοχή και τις παραμορφωσιακές ιδιότητες του πυρήνα προώθησης, με την αρχική εντατική κατάσταση (πριν την διαταραχή της βραχώμαζας από την εκσκαφή της σήραγγας).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά όπως και οι πιο ευσταθείς μορφές τους απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα(PietroLunardi-2000).



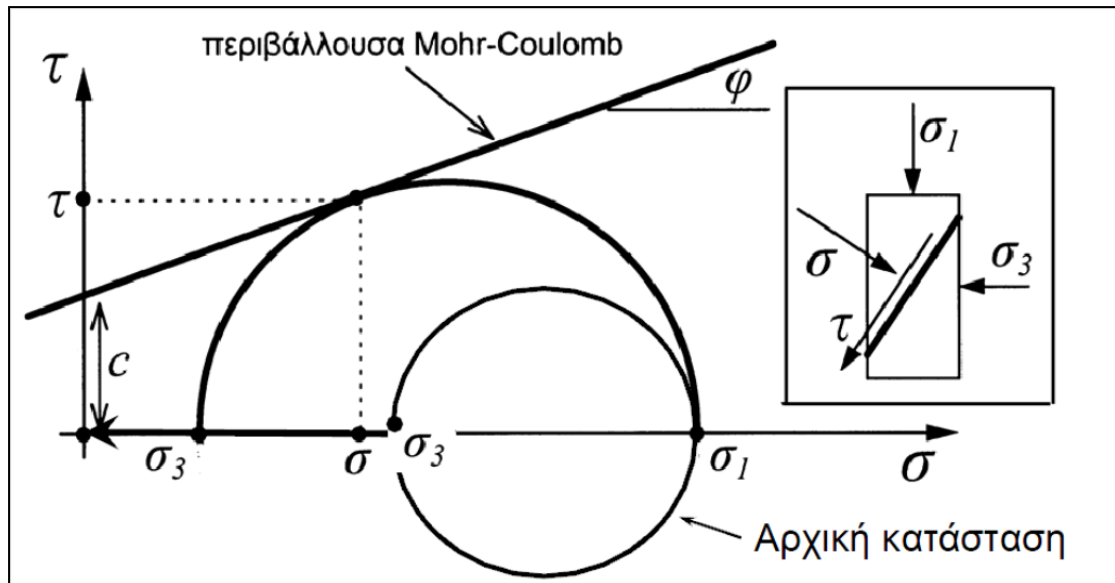
Σχήμα 4.1:Χαρακτηριστικές παραμορφώσεις πυρήνα, μετώπου και τοιχωμάτων σήραγγας (Ιατράκης, 2011)

Φαίνεται λοιπόν ότι η αστοχία της σήραγγας μπορεί να γίνει στην ουσία με δύο τρόπους(Pietro Lunardi-2000):

- Αστοχία του μετώπου στο οποίο παρατηρούνται υπερβολικά μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις, με διεύθυνση παράλληλη στον διαμήκη άξονα της σήραγγας, ως την πλαστικοποίηση. Εκδηλώνεται με θρυμματισμό και αποκόλληση του εδάφους από το μέτωπο, με την αστοχία να ξεκινάει μέσα στον πυρήνα προώθησης και να προχωράει ως την επιφάνεια του μετώπου.
- Αστοχία λόγω υπερβολικών συγκλίσεων των τοιχωμάτων που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πλαστικής ζώνης μεγάλου εύρους και συνεπώς την πλήρη αποδιοργάνωση της βραχώμαζας. Εκδηλώνεται με την αποκόλληση και πτώση του εδάφους από την οροφή και τα τοιχώματα της σήραγγας, ως την πλήρη κατάρρευσή της (Ιατράκης, 2011).

4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του μετώπου

Καθώς εκσκάπτεται η σήραγγα, οι οριζόντιες τάσεις μπροστά από το μέτωπο τείνουν να μειωθούν, μέχρι να μηδενιστούν πράγμα που θα οδηγήσει σε κατάρρευση του μετώπου. Χαράζοντας ένα κύκλο Mohr μπορούμε να κατανοήσουμε την περίπτωση αστοχίας κατά ένα συγκεκριμένο επίπεδο, παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η οριζόντια τάση, σ_3 , η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται σημαντικά(για μία σταθερή τιμή της οριζόντιας τάσης, σ_1) καθώς ο κύκλος Mohr πλησιάζει στην περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb και για μία κρίσιμη τιμή της σ_3 αυτός εφάπτεται με την περιβάλλουσα, οπότε έχουμε όντως αστοχία μετώπου κατά το επίπεδο αυτό. Η περίπτωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

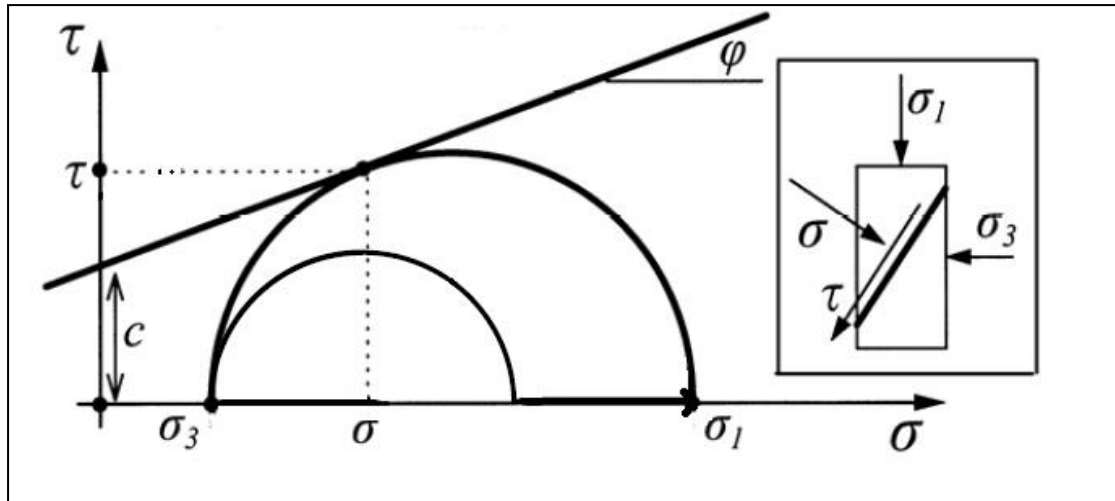


Σχήμα 4.2: Αύξηση πιθανότητας αστοχίας με μείωση των οριζόντιων τάσεων σ_3
(Ιατράκης, 2011)

Έτσι οι παράγοντες που αυξάνουν τον κίνδυνο τασικής αστοχίας (και όχι αστοχίας λόγω πτώσης μεμονομένων σφηνών ή τεμαχών βραχόμαζας δηλαδή βαρυτικών αστοχιών) σε συνδυασμό με την μείωση των οριζόντιων τάσεων, σ_3 , είναι:

- η μείωση του σ_{cm} , δηλαδή της αντοχής της βραχόμαζας
- Η αύξηση του βάθους της σήραγγας που έχει ως συνέπεια και την αύξηση των κατακόρυφων τάσεων σ_1
- Το εμβαδό της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής. Προφανώς όσο μεγαλύτερο είναι αυτό τόσο πιο δυσμενώς λειτουργεί
- Η ύπαρξη νερού και πολύ περισσότερο η υδραυλική κλίση της ροής του προς το μέτωπο εκσκαφής

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ένα παράδειγμα αστοχίας λόγω αύξησης των κατακόρυφων τάσεων σ_1 :

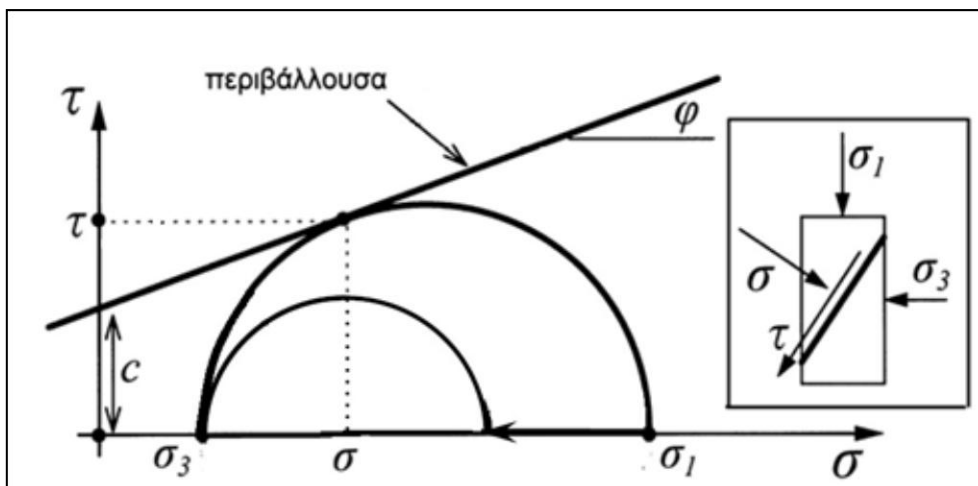


Σχήμα 4.3: Αύξηση πιθανότητας αστοχίας με αύξηση των κατακόρυφων τάσεων σ_1 .
(Ιατράκης, 2011)

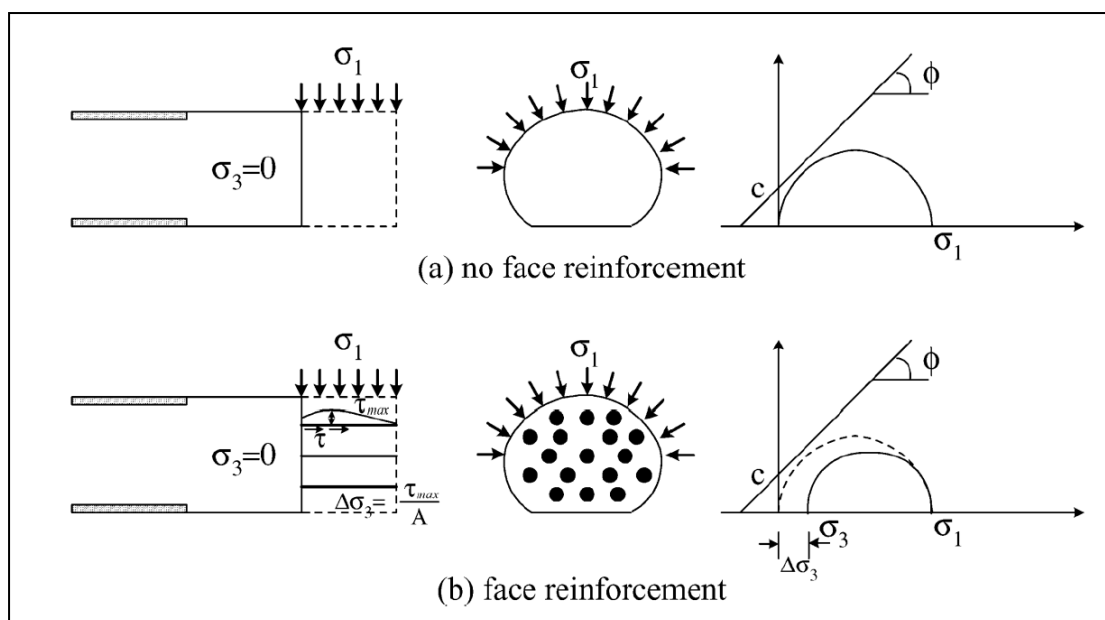
4.3. Τρόποι ενίσχυσης της ευστάθειας του μετώπου

Για την ενίσχυση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής πρέπει να γίνουν μερικές από τις παρακάτω ενέργειες:

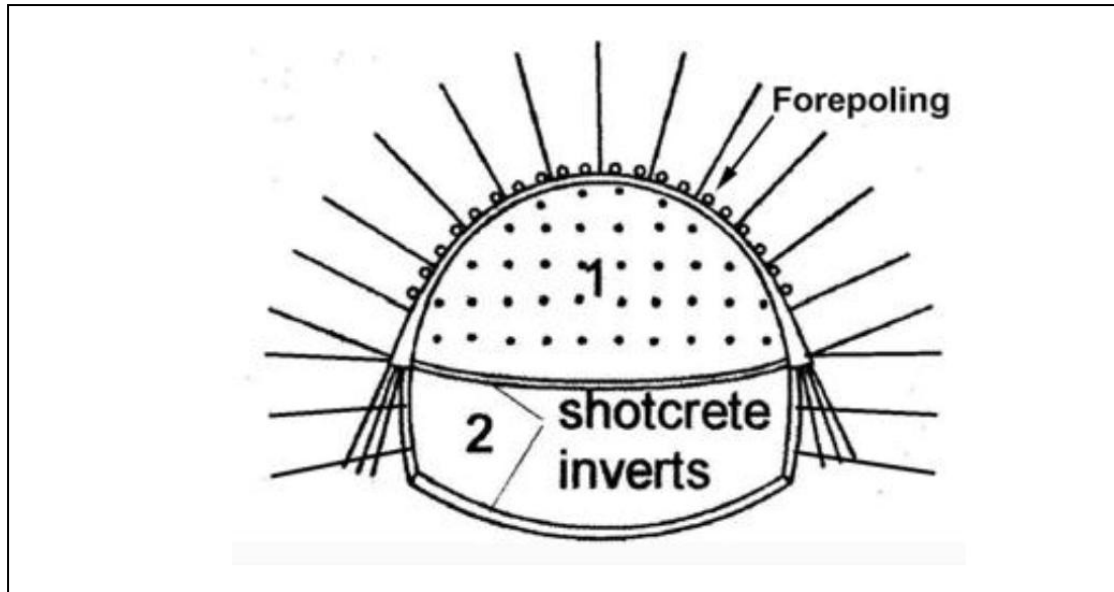
- Βελτίωση με τεχνητά μέσα των μηχανικών χαρακτηριστικών της περιβάλλουσας βραχώμαζας, που θα επιτύχει αύξηση της συνοχής, c , και της γωνίας τριβής, ϕ .
- Μείωση των κατακόρυφων τάσεων, σ_1 (σχήμα 4.4)
- Διατήρηση σε υψηλά επίπεδα των πλευρικών τάσεων, σ_3 , που θα λειτουργήσει υπέρ της μείωσης της εξώθησης (σχήμα 4.5)
- Μείωση της συνολικής επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής με κατασκευή σήραγγας σε δύο ή περισσότερες φάσεις (σχήμα 4.6)
- Αποτόνωση των υδατικών πιέσεων με συστήματα αποστράγγισης, όπου επίσης θα μειώσει την εξώθηση του μετώπου.



Σχήμα 4.4:Βελτίωση ευστάθειας μετώπου με μείωση των τάσεων σ_1 (Ιατράκης, 2011)



Σχήμα 4.5:Μέτωπο χωρίς αγκύρια με μειωμένες οριζόντιες τάσεις (a) και μέτωπο με αγκύρια με διατήρηση των οριζόντιων τάσεων σε υψηλότερα επίπεδα (b) (Ιατράκης, 2011)



Σχήμα 4.6: Εκσκαφή μετώπου σε δύο φάσεις (Ιατράκης, 2011)

4.4. Μηχανισμοί αστοχίας

Μερικές από τις συνηθέστερες συνθήκες όρυξης υπογείων ανοιγμάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία είναι εξής:

- Σε περιπτώσεις κερματισμένων πετρωμάτων, τα προβλήματα σταθερότητας των τοιχωμάτων συνδέονται με αποκολλήσεις τεμαχίων. Οι αποκολλήσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε απλές πτώσεις, λόγω βαρύτητας ή σε ολίσθηση τμημάτων όταν βρίσκονται σε κατάλληλη γωνία ως προς τα τοιχώματα του ανοίγματος. Σε μικρά βάθη το επί τόπου εντατικό πεδίο είναι χαμηλό και συνήθως δεν υπεισέρχεται σ' αυτού του τύπου τις αστοχίες.
- Σε μικρά βάθη, όταν η εκσκαφή γίνεται σε εδαφικό υλικό ή σε έντονα αποσαθρωμένο πέτρωμα, ο χρόνος ζωής των ανοιγμάτων (ο χρόνος για τον οποίο ένα ανυποστήρικτο άνοιγμα παραμένει ανοικτό) είναι πολύ μικρός και επιπλέον το σύστημα υποστήριξης πρέπει να αντιμετωπίσει ένα ρέον υλικό.
- Οι εκσκαφές που γίνονται σε μη αποσαθρωμένα συμπαγή πετρώματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά λίγες ασυνέχειες, συνήθως δεν έχουν προβλήματα σταθερότητας, ιδιαίτερα όταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος είναι τουλάχιστον πενταπλάσια της μέγιστης τάσης του περιβάλλοντος εντατικού πεδίου.

Καθώς το βάθος αυξάνει ή καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των ανοιγμάτων που βρίσκονται το ένα κοντά στο άλλο (όπως στη μέθοδο εκμετάλλευσης με θαλάμους και στύλους), αυξάνει το εντατικό πεδίο που δέχονται τα πετρώματα, με συνέπεια την ενδεχόμενη αστοχία. Η αστοχία αυτή μπορεί να κυμαίνεται από πλευρική απολέπιση έως την ολοκληρωτική καταστροφή ενός όγκου πετρώματος (Αγιουτάντης, 2000).

4.4.1. Μηχανισμοί αστοχίας Leca and Dormieux

Το έτος 1990 οι Leca & Dormieux, χρησιμοποίησαν την θεωρία οριακής ισορροπίας πρίσματος προκειμένου να εκτιμήσουν την ευστάθεια του μετώπου διάνοιξης σηράγγων. Στο σχήμα 4.7 απεικονίζονται τρεις κύριοι μηχανισμοί αστοχίας που μπορούν παρατηρηθούν στις αβαθείς σήραγγες, που βρίσκονται μέσα σε σαθρό, χαλαρό εδαφικό υλικό το οποίο παρουσιάζει μικρή έως καθόλου συνεκτικότητα.

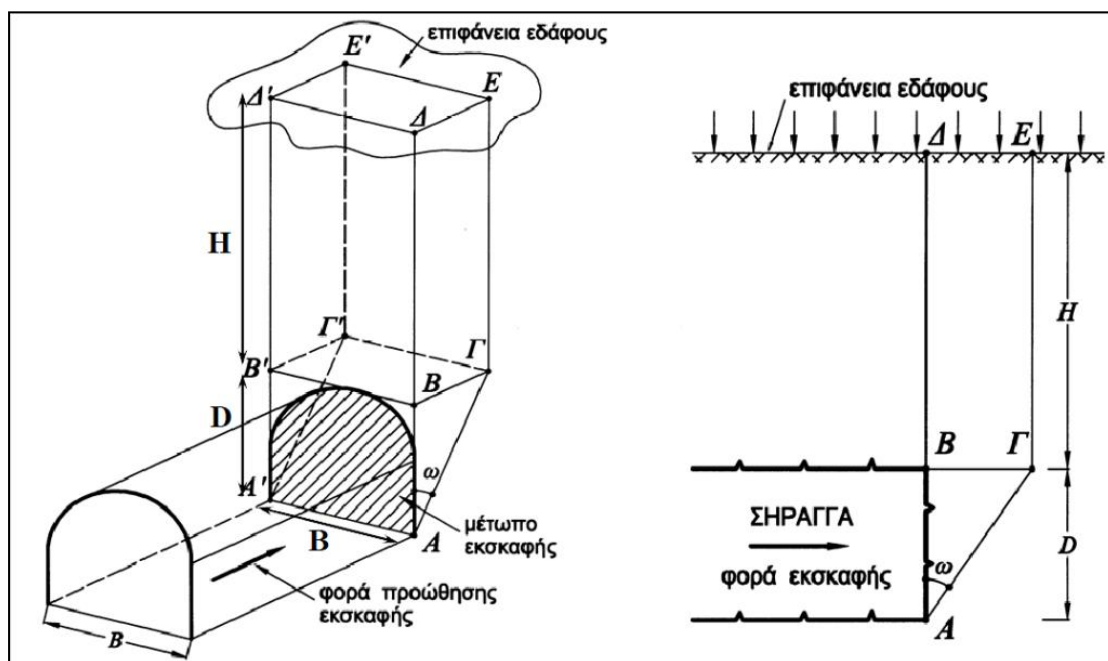
Οι μηχανισμοί τύπου (α) και (β) επισυμβαίνουν όταν παρατηρείται κατάρρευση μετώπου της σήραγγας (ενεργητική φόρτιση) ενώ ο μηχανισμός (γ) παρατηρείται όταν η πίεση στο μέτωπο είναι μεγαλύτερη από την πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα στρώματα στη σήραγγα (παθητική φόρτιση).

Αστοχία λόγω καθιζήσεων παρατηρείται λόγω της δημιουργίας ενός κόλουρου κώνου (σχήμα α) και δύο κώνων (σχήμα β) παρόλο που οι μηχανισμοί (α) και (β) είναι πιο πιθανοί κατά την διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας, ο μηχανισμός (γ) δεν πρέπει να παραβλέπεται ειδικότερα όταν η σήραγγα διανοίγεται σε πολύ μικρά βάθη, σε χαλαρά ή αποσαθρωμένα εδάφη όπου η τάση που εφαρμόζεται στο μέτωπο, για την συγκράτηση του εδάφους, είναι τόσο μεγάλη που μπορεί το έδαφος μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής να ανυψωθεί. Φαινόμενα αυτού του είδους έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν (Clough et al., 1983).

4.4.2. Οριακή ισορροπία σφήνας Anagnostou and Kovari

Κατά την δισδιάστατη ανάλυση της διάνοιξης σηράγγων εξετάζεται η ευστάθεια της οροφής, αλλά δεν εξετάζεται η ευστάθεια του μετώπου, επειδή αφορά την Τρίτη διάσταση. Αρχικά, το 1961 προτάθηκε από τον Horn και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τους Anagnostou and Kovari (1991-1996) μία απλοποιημένη μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας μετώπου εκσκαφής μιας σήραγγας, η οποία βασίζεται στην στερεοστατική ισορροπία ενός πρίσματος στο μέτωπο της σήραγγας.

Το τρισδιάστατο κινηματικό μοντέλο αστοχίας μετώπου σήραγγας φαίνεται στο σχήμα 4.8. Με τη βοήθεια τέτοιου μοντέλου μπορεί να υπολογισθεί η απαιτούμενη πίεση που πρέπει να εξασκείται επί του μετώπου κατά την όρυξη σηράγγων με ασπίδες τύπου πολφού ή ισορροπίας γαιών (EPB). Θεωρούμε ένα μέτωπο στο οποίο εφαρμόζεται κάθετη δύναμη P (προσομοίωση των οριζόντιων τάσεων σ_3) και ότι αυτό αστοχεί κατά ένα επίπεδο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Το έδαφος θεωρείται εξιδανικευμένα ως ένα άκαμπτο-πλαστικό υλικό το οποίο υπακούει στο κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb και έχει συνοχή, c , και γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ .



Σχήμα 4.8: Μηχανισμός αστοχίας κατά Kovari-Anagnostou (Iatroukakis, 2011)

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πέτρωμα είναι το ίδιο το βάρος του (W), οι πιέσεις υπερκειμένων (R), τριβή στην παρειά (T_s) και τριβή στη βάση (T) και η κάθετη δύναμη P .

Ο συντελεστής ασφαλείας λοιπόν προκύπτει από την σχέση:

$$F = \frac{[(R + W)\sin\omega + P\cos\omega]\tan\varphi + c(A'A\Gamma\Gamma) + 2tf(AB\Gamma)}{(R + W)\cos\omega - P\sin\omega}$$

Όπου: $\omega = 45 - \varphi/2$

$tf = c = K\sigma_v \tan\varphi$

$P = \sigma_3(ABB'A'O)$

$R = \sigma_v(B'B\Gamma\Gamma')$

$\sigma_v = (1 - \lambda)\rho_0$

Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων οριακής ισορροπίας για την «σφήνα» προκύπτει η δύναμη υποστήριξης για έναν δεδομένο μηχανισμό αστοχίας με συγκεκριμένη τιμή της γωνίας κλίσης ω της επιφάνειας ολίσθησης $A'A\Gamma\Gamma$. Η κρίσιμη κλίση ω_{cr} προσδιορίζεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι την μεγιστοποίηση της απαιτούμενης δύναμης υποστήριξης, ή για δεδομένη δύναμη υποστήριξης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι την ελαχιστοποίηση του συντελεστή ασφαλείας. Οι διατμητικές τάσεις εξαρτώνται ουσιαστικά από τις οριζόντιες τάσεις που δρουν πάνω στις κατακόρυφες επιφάνειες ολίσθησης.

5. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΙΟΥ

5.1. Υποστήριξη και ενίσχυση του Πετρώματος

Ο όρος υποστήριξη χρησιμοποιείται ευρέως, για να περιγράψει τις διαδικασίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, για να βελτιώσουν τη σταθερότητα και να διατηρήσουν την ικανότητα παραλαβής φορτίων του πετρώματος κοντά στα τοιχώματα (όρια) των υπογείων ανοιγμάτων. Επομένως όρος υποστήριξη με την ευρεία έννοια έχει δύο αντικειμενικούς σκοπούς(Brady and Brown ,1985):

- να ενισχύσει (reinforce)το πέτρωμα με την ενεργοποίηση και τη διατήρηση της προϋπάρχουσας αντοχής της βραχώμαζας (mobilized strength)
- να υποστηρίξει(support) το φορτίο μεμονομένων τμημάτων της οροφής και των τοιχωμάτων που έχουν αποκολληθεί από τη βραχώμαζα.

Παλαιότερα η υποστήριξη χαρακτηριζόταν ως προσωρινή (temporary) ή μόνιμη (permanent).Η προσωρινή υποστήριξη είναι η υποστήριξη ή η ενίσχυση που εφαρμόζεται προκειμένου να εξασφαλισθούν ασφαλείς συνθήκες εργασίας, και για πολλούς αιώνες αυτό επιτυγχανόταν με ξύλινη υποστήριξη. Όταν όμως το άνοιγμα πρέπει να διατηρηθεί ανοιχτό για μεγάλο χρονικό διάστημα όπως συμβαίνει με τα τεχνικά έργα, τότε επιβάλλεται η εγκατάσταση της μόνιμης υποστήριξης. Συχνά,για την εγκατάσταση της μόνιμης υποστήριξης είναι απαραίτητη η μερική ή ολική απομάκρυνση της προσωρινής υποστήριξης.

Στις μέρες μας η υποστήριξη ή ενίσχυση του πετρώματος χαρακτηρίζεται ως πρωτογενής (primary) ή δευτερογενής (secondary).Η πρωτογενής υποστήριξη πρέπει να αποτελεί, είτε ένα μέρος, είτε ένα σύνολο της απαιτούμενης υποστήριξης. Η πρόσθετη υποστήριξη ή ενίσχυση αποτελεί τη δευτερογενή υποστήριξη(Brady and Brown).

Η πρωτογενής υποστήριξη εφαρμόζεται συγχρόνως ή αμέσως μετά την εκσκαφή, με σκοπό:

- να διατηρήσει ασφαλείς συνθήκες εργασίας

- να ενεργοποιήσει τη διαδικασία της διατήρησης της προϋπάρχουσας αντοχής του πετρώματος με την ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων των τοιχωμάτων του ανοίγματος.

Η υποστήριξη ή ενίσχυση ενός ανοίγματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενεργητική (active) ή παθητική (passive) υποστήριξη. Η ενεργητική υποστήριξη εξασκεί ένα προκαθορισμένο φορτίο στην επιφάνεια του πετρώματος, κατά τη στιγμή της εφαρμογής της. Η ενεργητική υποστήριξη μπορεί να εφαρμοστεί με ποικίλα μέσα, όπως οι προεντεταμένοι κοχλίες ή συρματόσχοινα, οι μηχανικοί ή υδραυλικοί ορθοστάτες, η διογκούμενη υποστήριξη από σκυρόδεμα. Η ενεργητική υποστήριξη είναι συνήθως απαραίτητη, όταν πρέπει να υποστηριχθούν βαρυντικά φορτία που προκύπτουν από χαλαρωμένα τμήματα του πετρώματος.

Η παθητική υποστήριξη δεν εφαρμόζεται με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο αλλά αναπτύσσεται σταδιακά καθώς παραμορφώνεται η βραχώμαζα. Τα συστήματα με τα οποία εφαρμόζεται η παθητική υποστήριξη περιλαμβάνουν τις χαλύβδινες αψίδες, τη ξύλινη υποστήριξη, τους μη προεντεταμένους κοχλίες (Αγιουτάντης, 2000).

5.2. Μέθοδοι ενίσχυσης

Χρησιμοποιούνται τόσο για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και των παραμορφωσιακών ιδιοτήτων της βραχώμαζας του πυρήνα όσο και στην διατήρηση των οριζόντιων τάσεων, σ_3 , μέσα στο πυρήνα προώθησης, σε υψηλά επίπεδα μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες αστοχίας. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση των παραμορφώσεων που συμβαίνουν μέσα στον πυρήνα, και τελικά η μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής. Στις μεθόδους ενίσχυσης συγκαταλέγονται τα οριζόντια αγκύρια μετώπου, τα κατακόρυφα αγκύρια, οι τσιμεντενέσεις (jet-grouting) μέσα στον πυρήνα προώθησης, η αποστράγγιση υδάτων και τέλος σε πιο σπάνιες περιπτώσεις η ψύξη του εδάφους γύρω από την εκσκαφή.

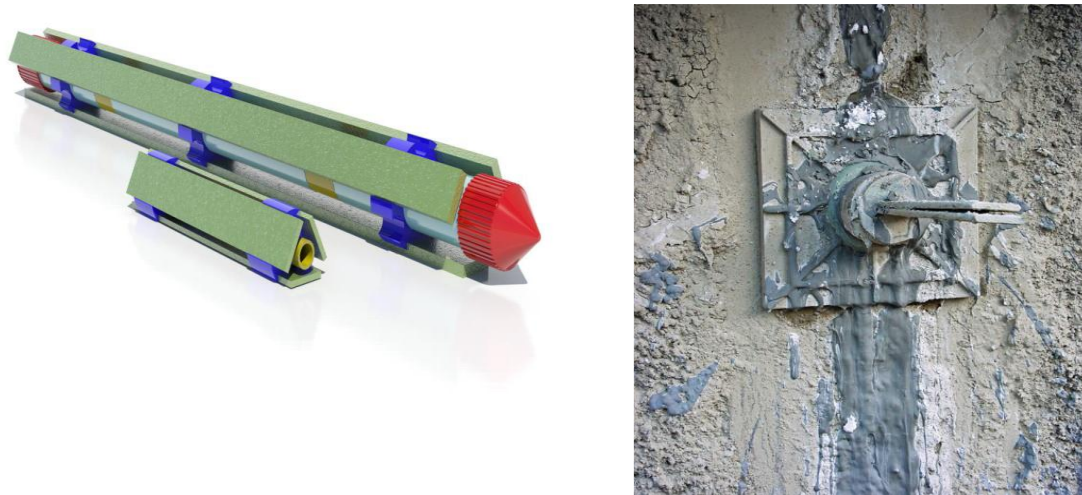
5.2.1. Οριζόντια αγκύρια μετώπου (fiberglass)

Εφαρμόζονται στην περίπτωση ασθενών εδαφικών σχηματισμών σε διάφορες διατάξεις, ανάλογα κάθε φορά ποια κρίνεται κατάλληλη για τον εκάστοτε εδαφικό σχηματισμό. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του πυρήνα μπροστά από το

μέτωπο, προσδίδοντας, έτσι εφελκυστική και διατμητική αντοχή σε αυτό αποτρέποντας τις οριζόντιες τάσεις, σ_3 , από το να μειωθούν. Συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των παραμορφώσεων του πυρήνα προώθησης ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε συνδυασμό με άλλα μέτρα υποστήριξης είτε μόνα τους. Το στέλεχος (εικόνας 5.1 α) από υαλονήματα πακτώνεται με τσιμεντένεμα σε όλο το μήκος του μέσα σε διάτρημα. Το εσωτερικό του άκρο διαμορφώνεται κατάλληλα προκειμένου να εισέρχεται ευκολότερα στη γεώτρηση(εικόνας 5.1β). Το εξωτερικό άκρο του στερεώνεται σε ίδιου υλικού πλάκα διανομής (εικόνας 5.1γ). Στην εικόνα 5.2 φαίνεται η τοποθέτηση των ήλων αυτών στο μέτωπο της σήραγγας. Το σύνηθες μήκος τους είναι 12-14m, και μπορεί να φθάσει τα 24m(1.5 ως 2 φορές τη διάμετρο της σήραγγας). Όταν συνδυάζονται με δοκούς προπορείας,(εικόνα 5.3) τα μήκη τους ταυτίζονται. Έχουν μεγάλη αντοχή (περίπου 1000Mpa), ενώ επιτρέπουν την εύκολη κοπή τους κατά την εκσκαφή.



α



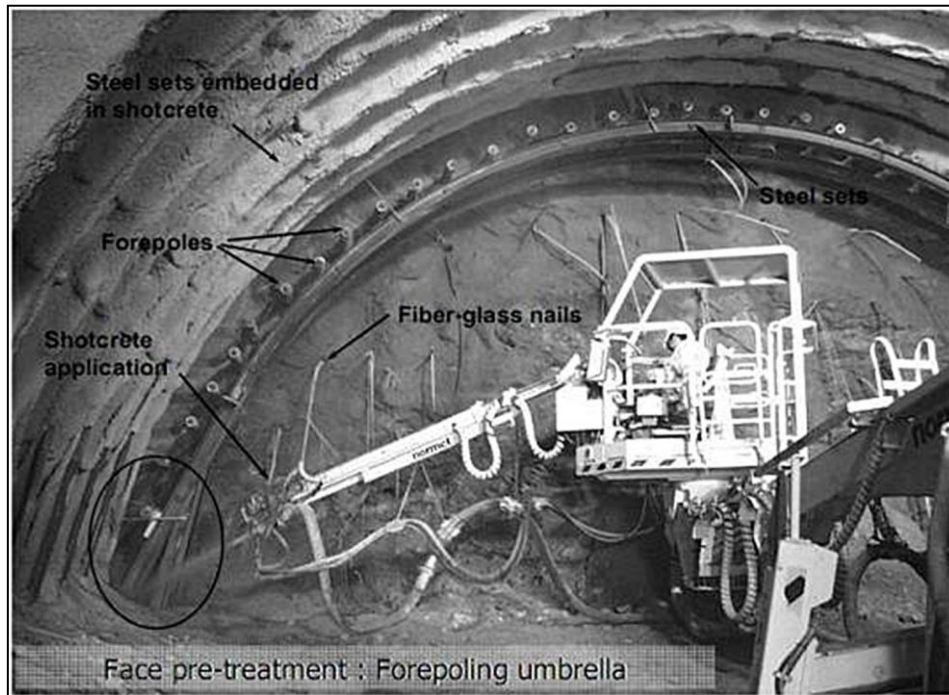
β

γ

Εικόνα 5.1:(α) Στοιχεία αγκύρωσης υαλονημάτων,(β) Άκρο στοιχείου ήλωσης από μέτωπο, (γ) Πλάκα αγκύρωσης (Σοφιανός, 2015)



Εικόνα 5.2:Νέος γύρος τοποθέτησης ύλων μετώπου από υαλονήματα (Σοφιανός, 2015)

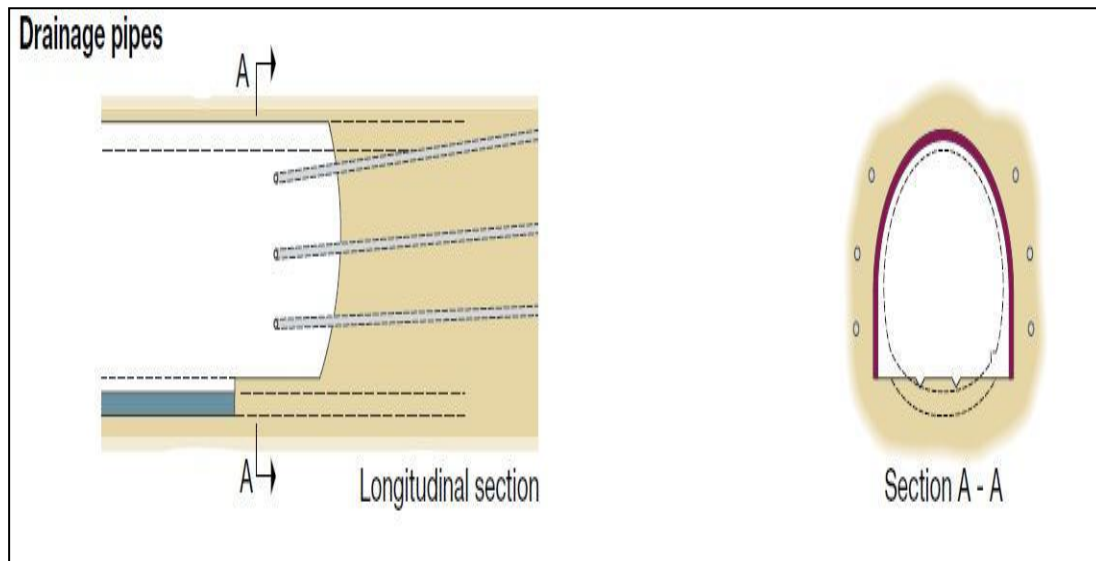


Εικόνα 5.3: Σκυροδέτηση έδρασης πλακιδίου κάτω από την προστασία νέας σειράς δοκών προπορείας και ήλων μετώπου (Σοφιανός, 2015)

5.2.2. Αποστράγγιση υδάτων

Στο μέτωπο της σήραγγας διανοίγονται οπές οι οποίες χαρακτηρίζονται ως αποστραγγιστικές και αποσκοπούν στην μείωση των υδατικών πιέσεων που δημιουργούν ροή προς το μέτωπο με δυσμενή υδραυλική κλίση (σχήμα 5.1). Στην περίπτωση που η σήραγγα κατασκευάζεται κάτω από ποταμό υφίσταται μία μόνιμη υπόγεια ροή, με άμεση συνέπεια την ανάπτυξη δυνάμεων διήθησης επί της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Οι δυνάμεις αυτές κατέχουν ένα σημαντικό ποσοστό των συνολικών δυνάμεων που ασκούνται στο μέτωπο διάνοιξης και θα πρέπει συνεπώς να ληφθούν υπόψη τόσο στον σχεδιασμό της τελικής επένδυσης, όσο και στον σχεδιασμό του συστήματος των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της διατομής και του μετώπου εκσκαφής. Το αποστραγγιστικό σύστημα είναι απαραίτητο και για την ευστάθεια του μετώπου κατά την φάση κατασκευής αλλά για την αποφυγή των υδατικών πιέσεων πάνω στην τελική επένδυση της σήραγγας. Επίσης, μέσω των συγκεκριμένων οπών δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν πληροφορίες για τις συναντόμενες συνθήκες στα επόμενα βήματα προχώρησης της διάνοιξης και να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις εντός της περιοχής εκσκαφής από ξαφνική

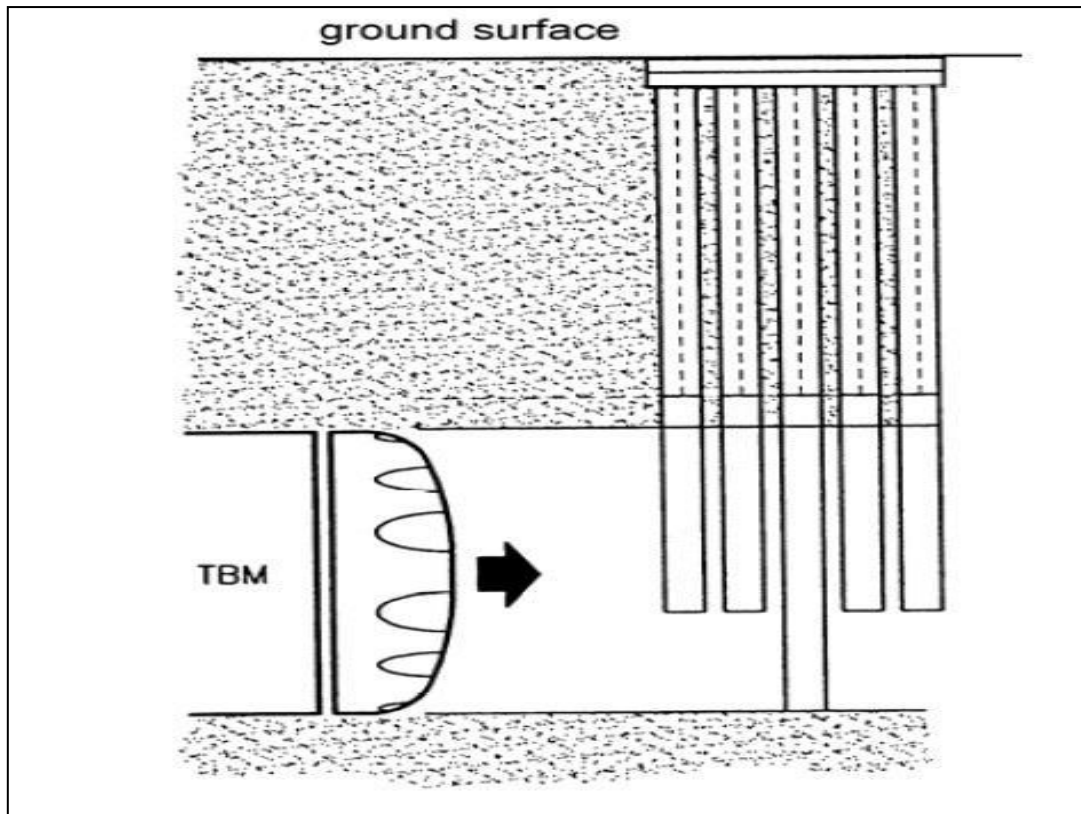
ανακούφιση υδατικών πιέσεων εξαιτίας εγκλωβισμένων υδάτων μεταξύ αδιαπέραστων σχηματισμών.



Σχήμα 5.1: Εγκατάσταση σωλήνων αποστράγγισης γύρω από τον πυρήνα προώθησης (Ιατράκης, 2011)

5.2.3. Κατακόρυφα αγκύρια

Σε αβαθείς σήραγγες επειδή οι επιφανειακές καθιζήσεις περιμένουμε να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις καθιζήσεις που υφίστανται οι σήραγγες σε μεγαλύτερα βάθη για την μείωση αυτών χρησιμοποιούνται τα κατακόρυφα αγκύρια. Τα κατακόρυφα αγκύρια μειώνουν τις επιφανειακές καθιζήσεις αλλά προστατεύουν και τον πυρήνα μπροστά από το μέτωπο μειώνοντας τις κατακόρυφες τάσεις, σ_1 . Έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε σήραγγες που κατασκευάζονται σε αστικό περιβάλλον, όπως το μετρό όπου οι επιφανειακές καθιζήσεις είναι μεγάλες και πρέπει να αποφευχθούν οι ζημιές στις ανωδομές που δημιουργούνται κατά την εκσκαφή τέτοιων υπόγειων έργων. Η δράση αυτών των αγκυρίων βασίζεται στην εφελκυστική τους αντοχή και για αυτό είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, ενώ αναρτώνται από την επιφάνεια του εδάφους και συνδέονται με μία ισχυρή πλάκα σκυροδέματος (σχήμα 5.2)



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση κατακόρυφων αγκυρίων μπροστά από το μέτωπο εγκατεστημένων από την επιφάνεια του εδάφους (Ιατράκης, 2011)

5.2.4. Πάγωμα εδάφους (freezing)

Όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και των παραμορφωσιακών ιδιοτήτων της βραχώμαζας του πυρήνα με άλλα μέσα ενίσχυσης επιλέγεται το πάγωμα του εδάφους, δηλαδή η ψύξη των σχηματισμών σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 0°C. Είναι το πιο ακριβό μέσο ενίσχυσης αλλά και η μοναδική λύση στην περίπτωση των εδαφών με χαμηλή συνεκτικότητα δηλαδή για κορεσμένα εδάφη χαμηλής διατμητικής αντοχής.

Η μέθοδος επιτυγχάνεται με την εισαγωγή σωλήνων με ψυκτικό υγρό στο έδαφος της περιοχής ενδιαφέροντος, είτε με την κατάψυξη και την σταθεροποίηση του νερού που υπάρχει ήδη στους πόρους του κορεσμένου σχηματισμού. Ο πάγος αποτελεί συνδετικό μέσο των κόκκων του εδαφικού υλικού και καθιστά τον σχηματισμό αδιαπέραστο στο νερό. Η ζώνη ψύξης υπολογίζεται με τη βοήθεια προσομοιωμάτων συνεχούς μέσου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η φέρουσα ικανότητα κορεσμένου, ψυγμένου εδάφους χαρακτηρίζεται από τη μηχανική συμπεριφορά των κόκκων του εδάφους και του παγωμένου νερού που βρίσκεται στους πόρους του.

Συνέπεια της ψύξης είναι το ψυγμένο έδαφος διαθέτει ένα μεγάλο αρχικό μέτρο ελαστικότητας και μεγάλη δυσκαμψία σε βραχυχρόνιες φορτίσεις ενώ ταυτόχρονα μετατρέπεται σε ένα αδιαπέραστο σχηματισμό. Οι βελτιωμένες ιδιότητες του παγωμένου σχηματισμού, όπως η υψηλότερη αντοχή και η μηδενική διαπερατότητα, συμβάλλουν στην ασφαλέστερη διάνοιξη κάτω από σταθερότερες γεωλογικές συνθήκες. Μετά την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης της σήραγγας η διαδικασία ψύξης σταματάει.

Σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι οι ερπυστικές παραμορφώσεις του ψυγμένου εδάφους κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της μεθόδου, το υψηλό κόστος, και τέλος οι μεγάλες καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα μετά την απόψυξη του εδάφους λόγω μείωσης του όγκου τους κατά 9%, δημιουργώντας προβλήματα στην λειτουργικότητα των γειτονικών επιφανειακών δομημάτων.

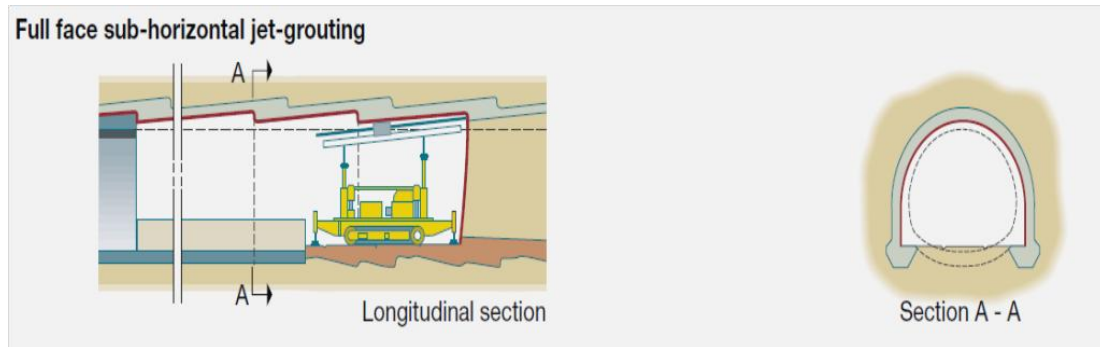


Εικόνα 5.4: Σύστημα σωληνώσεων ψύξης από εκσκαφή για την σταθεροποίηση του εδάφους (Ιατράκης, 2011)

5.3. ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

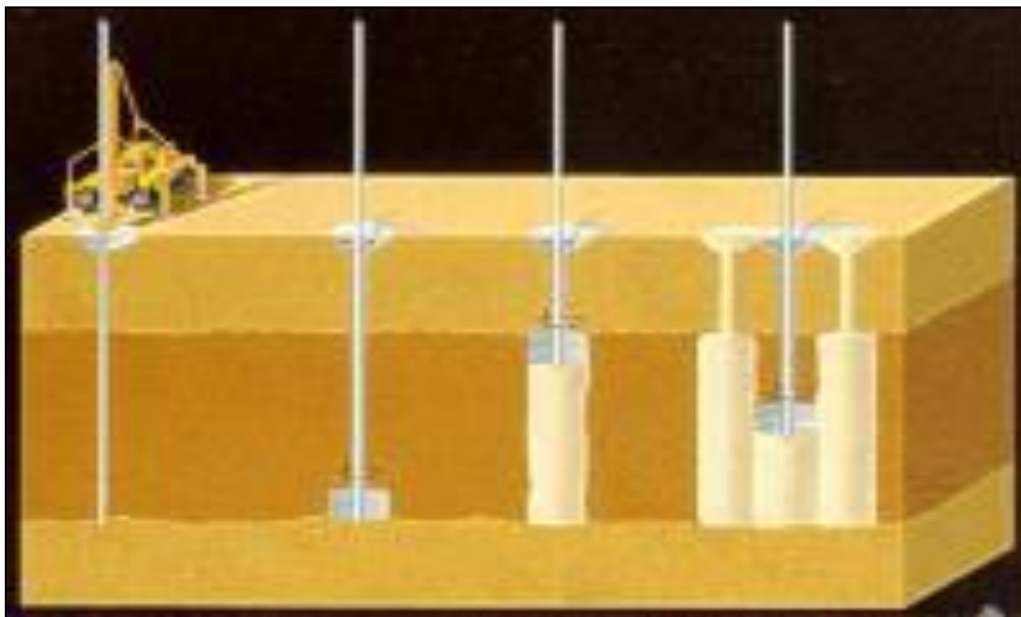
Για τη διατήρηση των κατακόρυφων τάσεων, σ1 στον πυρήνα προώθησης και κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, σε χαμηλά επίπεδα και για την ανακατανομή των τάσεων γύρω από την εκσκαφή, ενεργοποιώντας τεχνητά βοηθητικούς μηχανισμούς όπως το φαινόμενο του θόλου χρησιμοποιούνται οι προστατευτικές οι μέθοδοι. Με την

γεωϋλικό πρέπει αυτό να διαθέτει μεσαία έως μεγάλη περατότητα, ώστε να προκύψει συνεχής ζώνη από ενισχυμένο υλικό.



Σχήμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση οριζόντιας εφαρμογής ενέματος γύρω από τον πυρήνα προώθησης (Ιατράκης, 2011)

Εάν το γεωϋλικό δεν διαθέτει την απαιτούμενη περατότητα χρησιμοποιείται η μέθοδος jet-grounding στο μέτωπο κατά την οποία το ένεμα εισπίζεται από ένα στέλεχος το οποίο έχει τη δυνατότητα περιστροφής και εισχώρησης εντός της βραχώμαζας. Έτσι δημιουργούνται στήλες ενισχυμένου υλικού οι οποίες επικαλύπτονται και δημιουργούν μια ισχυρή ομπρέλα προστασίας στο μέτωπο η οποία ενισχύει την ακαμψία του πυρήνα προόδου και κατ' επέκταση μειώνει την προσύγκλιση και την αποδιοργάνωση του υλικού μπροστά και πάνω από το μέτωπο της εκσκαφής.



Σχήμα 5.5: Κατασκευή εδαφοπασσάλων ενέματος από την επιφάνεια του εδάφους. (Ιατράκης, 2011)

5.3.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Ο όρος shotcrete δόθηκε για πρώτη φορά το 1930 από την Αμερικανική Ένωση Σιδηροδρόμων. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα (ή κονίαμα) που μεταφέρεται μέσα από σωλήνες και εκτοξεύεται υπό την πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα επάνω σε μία επιφάνεια. Παλαιότερα χρησιμοποιούταν και ο όρος «gunit» ο οποίος προερχόταν από σχετική κατοχύρωση ευρεσιτεχνίας. Η αποτελεσματικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην αποφυγή της χαλάρωσης του πετρώματος πιστοποιήθηκε σε μία πληθώρα γεωλογικών συνθηκών, είναι δε ιδιαίτερα ενδεδειγμένη σε χαλαρό πέτρωμα και σε μη ομοιόμορφες διατομές εκσκαφής. (Σοφιανός, 2015)

Το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται από το ακροφύσιο σε μία τραχεία επιφάνεια πετρώματος, αρχικά γεμίζει τα κενά, όπως ρωγμές, σχισμές ή διακλάσεις, συνδέοντας τα χαλαρά ή μερικά στηριζόμενα θραύσματα, και παρεμποδίζει την περαιτέρω αποσύνθεση. Η συγκόλληση εξαρτάται από την πλέξη των σωματιδίων του σκυροδέματος με κόκκους της επιφάνειας του πετρώματος. Αρχικά σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με κόκκους άμμου μικρότερους από 0,2mm. Αυτό το λεπτόκοκο υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μία βάση για την εκτόξευση και συμπύκνωση του υπολοίπου πάχους. Κατά τη δημιουργία του αρχικού στρώματος τα χονδρόκοκκα αδρανή αναπηδούν και πέφτουν στο δάπεδο. Η πρόσφυση είναι προφανώς καλύτερη σε πρόσφατα θραυσμένο, καθαρισμένο, τραχύ πέτρωμα, παρά σε λεία επιφάνεια πλαστικού ή μετάλλου. Διαβρωμένα, θραυόμενα, εύθρυπτα λασπώδη ή αργιλικά πετρώματα έχουν φτωχή πρόσφυση. Ο καθαρισμός της επιφάνειας του πετρώματος μπορεί να γίνει με ψεκασμό μείγματος νερού και πιεσμένου αέρα από το ακροφύσιο του εκτοξευτήρα. Ζημιά στο σκυρόδεμα μπορεί να προκληθεί από τη διήθηση νερού, που για αυτό θα πρέπει να παρακαμφθεί, όπως π.χ. με τη διάτρηση οπών και τοποθέτηση σωλήνων συνδεδεμένων με το σύστημα στράγγισης. Η εκτόξευση σκυροδέματος γίνεται συχνά αμέσως μετά τη δημιουργία της νέας επιφάνειας. Για την εξασφάλιση της γρήγορης πήξης χρησιμοποιούνται επιταχυντικά πρόσθετα στο μείγμα. Η απώλεια που προκαλείται στην τελική αντοχή αντισταθμίζεται από την αυξημένη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Οι βασικοί λόγοι χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σαν επένδυση είναι:

- Η παρεμπόδιση ή ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων του χαλαρωμένου πετρώματος με την ισχυροποίηση της μάζας της οποίας γεμίζονται τα κενά, με τη μεταφορά του φορτίου του πετρώματος σε γειτονικό ευσταθές πέτρωμα με δυνάμεις διάτμησης ή συγκόλλησης και με λειτουργία φορέα μεμβράνης.
- Σε οξειδωμένο ή χαλαρούμενο πέτρωμα, η στεγάνωσή του που παρεμποδίζει την περαιτέρω χαλάρωση λόγω της έκθεσης του πετρώματος σε υγρό αέρα ή υπόγεια νερά.
- Ο έλεγχος της δημιουργίας νερού και πάγου, με την ανακατεύθυνση, τη στράγγιση ή το σταμάτημα της ροής.



Εικόνα 5.6:Μηχανή εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε υπόγειο έργο. Η απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και της επιφάνειας του πετρώματος είναι περίπου στο 1 m. (Σοφιανός, 2015)

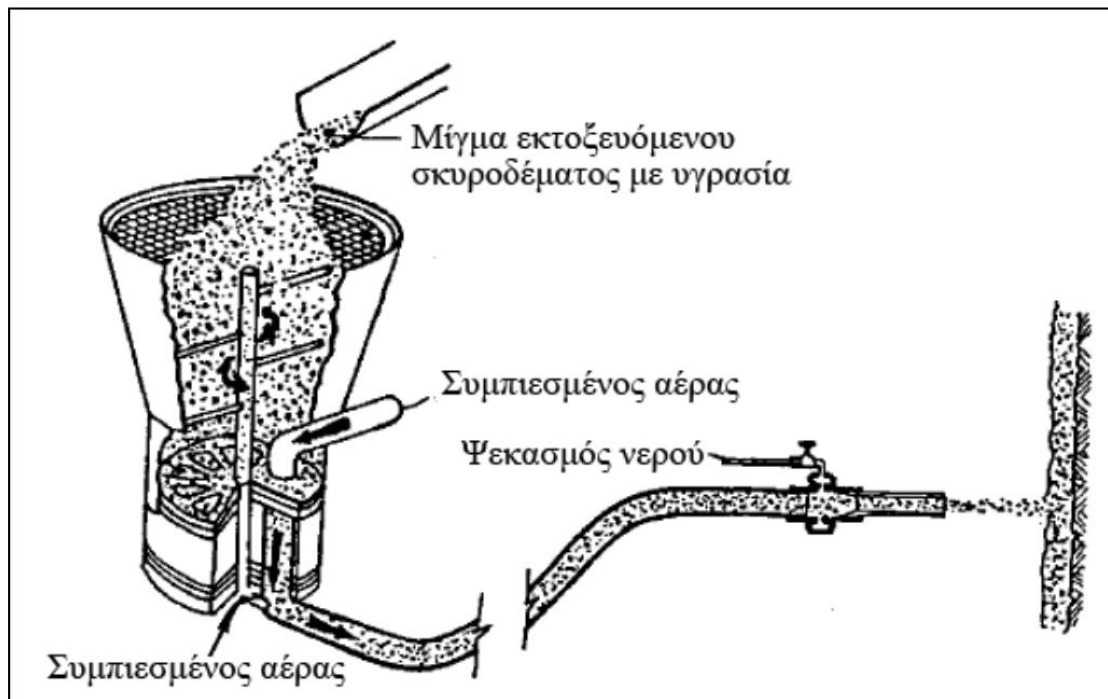
Οι τεχνικές εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι αφ' ενός του ξηρού μίγματος και αφ' ετέρου του υγρού μίγματος. Επειδή και οι δύο διαδικασίες είναι σύμφωνες με τις συνήθεις απαιτήσεις ποιότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η επιλογή της μεθόδου γίνεται βασικά με κριτήρια πρακτικότητας και οικονομικότητας. (Σοφιανός, 2015)

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η απλοποιημένη απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης. Συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται μέσω ενός περιστρεφόμενου

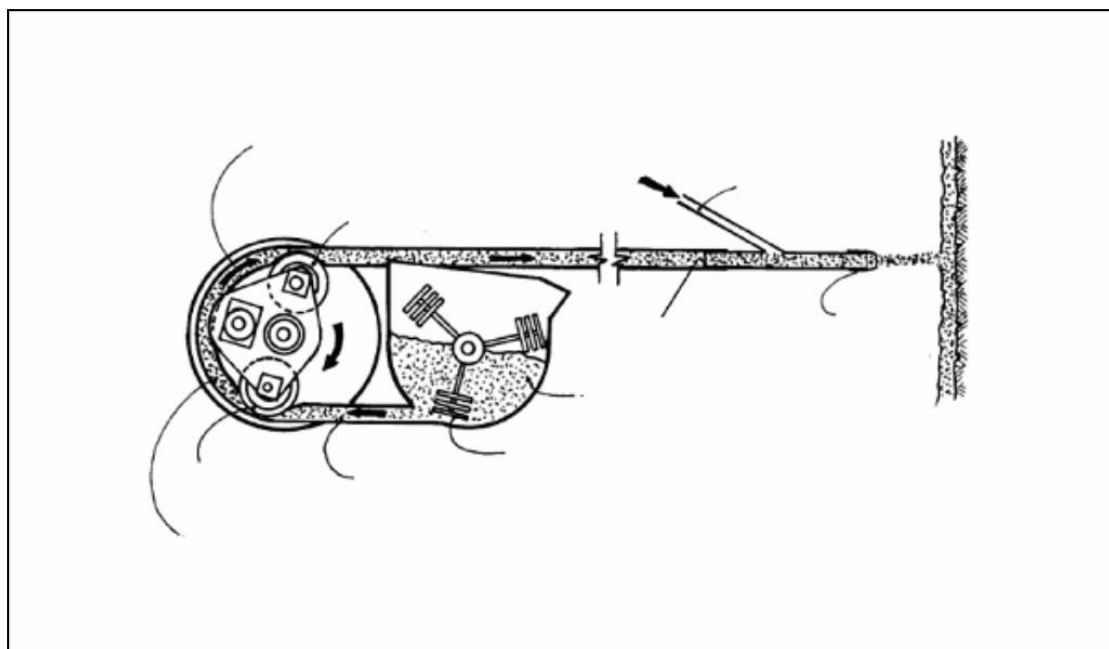
κυλίνδρου για να προωθήσει το μίγμα μέσω σωληνώσεων στο ακροφύσιο. Το νερό για την ενυδάτωση προστίθεται υπό πίεση στο ακροφύσιο πριν την εκτόξευση.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η τυπική απεικόνιση συστήματος υγρής μίξης. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται ανάμειξη αδρανών, τσιμέντου και νερού. Το μίγμα τροφοδοτεί την αντλία μέσω της οποίας μεταφέρεται και προωθείται στο ακροφύσιο όπου και ψεκάζεται στο τοίχωμα.

Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι το ίδιο και για τις δύο μεθόδους. Η μέθοδος της ξηρής μίξης χρησιμοποιείται συχνότερα σήμερα γιατί ο εξοπλισμός είναι ελαφρύτερος και οικονομικότερος. Τα ξερά υλικά μπορούν να μεταφερθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι μηχανές υγρής μίξης δεν μπορούν να μεταφερθούν σε προβληματικές περιοχές που απαιτείται γρήγορη επέμβαση.



Σχήμα 5.5: Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek et al, 1995)



Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος υγρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek et al, 1995)

5.3.4. Περιφερειακή πρότμηση (precutting)

Η περιφερειακή πρότμηση (**mechanical precut**) είναι μία μέθοδος προϋποστήριξης στην οποία κόβεται περιφερειακά ο θόλος της σήραγγας μπροστά από το μέτωπο και εισπύζεται ένεμα από ινοπλισμένο (με χαλύβδινες ίνες) σκυρόδεμα στο κενό. Η μέθοδος αυτή συνήθως βρίσκει εφαρμογή σε μαλακά πετρώματα καθώς και σε μαλακές έως μέτρια σκληρές αργίλους. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο της περιφερειακής πρότμησης φαίνεται στην εικόνα 5.7. Σε μία αλυσίδα κοπής, εφαρμόζεται μια λεπίδα η οποία εισέρχεται μέσα στο έδαφος περιφερειακά της σήραγγας και τέμνει ένα στρώμα από το έδαφος ίσο με το πλάτος της λεπίδας. Κατόπιν το κενό που αφήνει η λεπίδα καθώς κινείται στην περίμετρο της σήραγγας, καλύπτεται με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Με αυτή την υποστήριξη δημιουργείται ένα συνεχές κέλυφος προϋποστήριξης σε σχήμα κόλουρου κώνου με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά, που προεκτείνεται σε σημαντική απόσταση μπροστά από το μέτωπο παρέχοντας ακτινική περίσφιξη του περιβάλλοντος πετρώματος που επαρκεί για την αποτροπή της χαλάρωσης της βραχομάζας. Το σχήμα του κόλουρου κώνου επιτρέπει την διαδοχική έγχυση κελυφών που επικαλύπτονται μερικώς στην περιοχή που ο κώνος στενεύει. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα πρακτικώς συνεχές τόξο σκυροδετημένης επένδυσης. Κατά την εκσκαφή σταθεροποιείται άμεσα με την έγχυση σκυροδέματος στα πλευρά και στο ανάστροφο τόξο.

Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου περιλαμβάνει μαλακά πετρώματα σε αργιλώδη εδάφη και ιλυώδη –αμμώδη εδάφη, συμπεριλαμβανομένων των ετερογενών εδαφών και των υδροφόρων οριζόντων, με την προϋπόθεση ότι η τομή δύναται να παραμείνει ανοιχτή, έστω και με λίγη τεχνητή βοήθεια, για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την έγχυση του σκυροδέματος. (Pietro Lunardi, 2008)

Σημαντικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι τα εξής:

- η σχεδόν ολοκληρωτική εξάλειψη των υπερεκσκαφών με συνέπεια την αισθητή μείωση της ανάγκης για πλήρωση των κενών μεταξύ της υποστήριξης και του εδάφους
- μείωση της ποσότητας της πρωταγενής υποστήριξης που τοποθετείται επειδή το κέλυφος της υποστήριξης αναλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό των πιέσεων.
- η μηχανοποίηση της εκσκαφής.
- το έγχυτο σκυρόδεμα της προυποστήριξης μπορεί να λειτουργήσει ως μέρος της μόνιμης υποστήριξης με την προϋπόθεση ότι πληροί τις προδιαγραφές



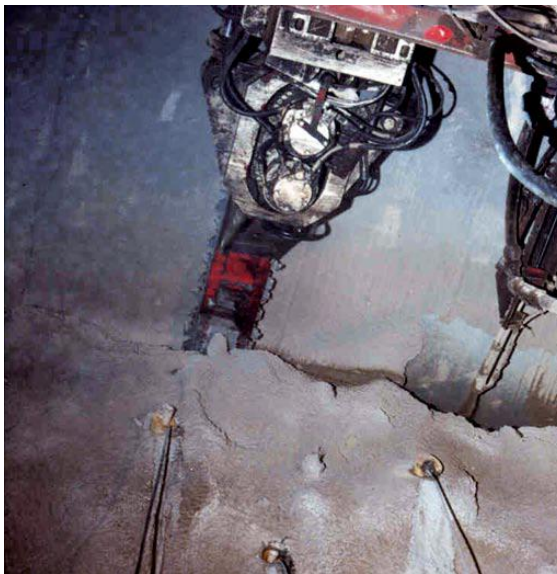
Εικόνα 5.7 Μηχανή πρότμησης που χρησιμοποιήθηκε για την εκσκαφή σηράγγων της σιδηροδρομικής γραμμής στο Sibari-Cosenza(1985) (Pietro Lunardi, 2008)



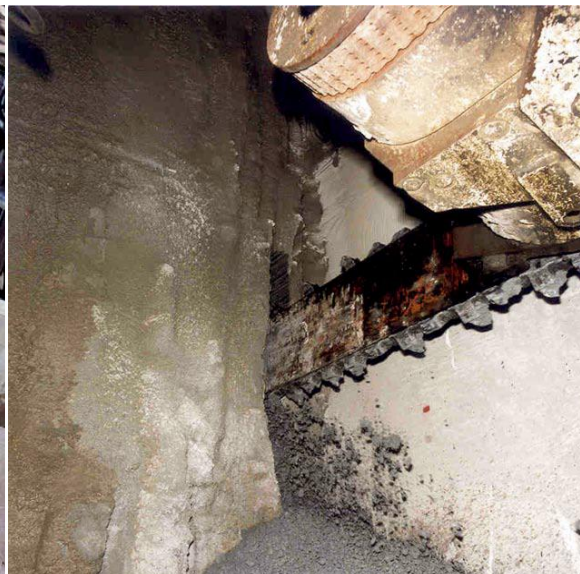
Εικόνα 5.8: Ολομέτωπη κοπή της σιδηροδρομικής γραμμής από την μηχανή πρότμησης (Sibari-Cosenza, 1985, έδαφος: άργιλος και λάσπη, μέγιστο ύψος υπερκειμένων: 110m) (Pietro Lunardi, 2008)



α



β



γ

Εικόνα 5.9(α,β,γ):Ολομέτωπη κοπή από την μηχανή πρότμησης(σιδηροδρομικής γραμμής υψηλών ταχυτήτων Μιλάνο-Ρώμη-Νάπολη μεταξύ Νότιο Arezzo και Figline Valdarno,1999, έδαφος: αργιλώδης λάσπη, μέγιστο ύψος υπερκείμενων: ~ 90 m) (Pietro Lunardi, 2008)

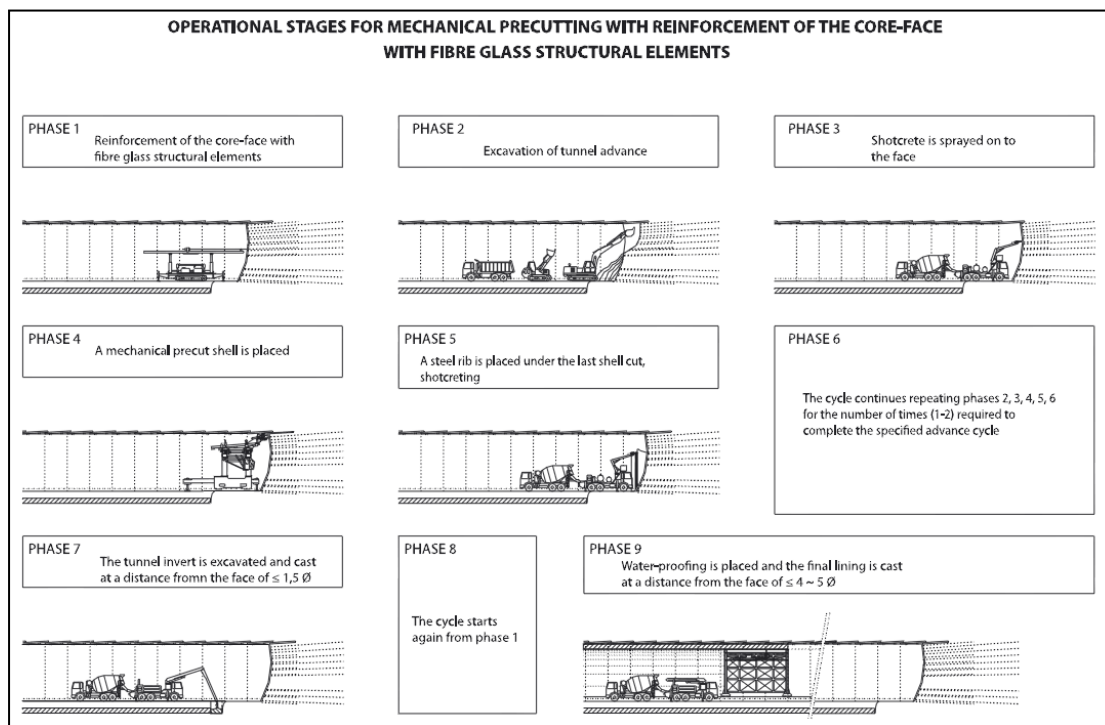
Η καλή σταθερότητα του πυρήνα του μετώπου είναι καθοριστική για την επιτυχία του έργου. Εάν η προστασία που παρέχεται από το κέλυφος της προυποστήριξης δεν είναι επαρκής για να διασφαλιστεί αυτό, τότε είναι απαραίτητο να ενισχυθεί από πριν ο πυρήνας, όπως για παράδειγμα με την τοποθέτηση fiberglass. Είναι σημαντική η συστηματική αποστράγγιση μπροστά από το μέτωπο. Όταν βρισκόμαστε κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα έτσι διατηρείται η ακεραιότητα του μετώπου του πυρήνα.

Η δυνατότητα της μηχανικής πρότμησης (mechanical precutting) εξελίχθηκε σημαντικά από τότε που χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά. Η σύγχρονη τεχνολογία για την κοπή του εδάφους και την πλήρωση της τομής με σκυρόδεμα είναι σε θέση να φτάσει σε βάθος άνω των 4,5m για πάχος 24cm, ενώ από πλευράς διαμέτρου της σήραγγας το σύστημα έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε ανοίγματα της τάξης των 21,5m.

Από άποψη κατασκευής είναι σημαντικό να περιοριστεί το μέγεθος της εντομής έτσι ώστε αυτή να υποστηρίξει τον εαυτό της για το διάστημα που απαιτείται για να τοποθετηθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου κάθε κέλυφος πρέπει να τοποθετείται σε ξεχωριστά τμήματα ανάλογα με την διάμετρο της σήραγγας και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που θα κοπεί. Η κοπή ανά τμήμα πρέπει να πληρωθεί αμέσως με τσιμεντένεμα. Είναι σημαντικό να μην ξεκινήσει μία νέα εντομή έως ότου η προηγούμενη τομή έχει πληρωθεί εντελώς.

Αν συναντηθούν δυσκολίες στην εντομή λόγω της σποραδικής ύπαρξης μη συνεκτικών υλικών είναι δυνατόν να ενισχυθεί το έδαφος με τσιμεντενέσεις ώστε να αποκτήσει την συνοχή που απαιτείται για να δεχτεί την εντομή

Με την δημιουργία του κάθε κελύφους ακολουθεί η εκσκαφή του αντίστοιχου τμήματος του μετώπου για το οποίο η ευστάθεια εξασφαλίζεται από την προυποστήριξη. Η εκσκαφή πραγματοποιείται με την χρήση roadheaders ή εκσκαφείς υπό τον άμεσο έλεγχο κάποιου εργοδηγού για να αποφευχθεί ο κίνδυνος να καταστραφεί το κέλυφος που μόλις τοποθετήθηκε και θα πρέπει η εκσκαφή να προχωρήσει σε βάθος που είναι μικρότερο από το βάθος του κελύφους προκειμένου να διασφαλισθεί ότι το μέτωπο είναι πάντα προστατευμένο. Ένα νέο κέλυφος τοποθετείται έπειτα πριν την νέα εκσκαφή και πρέπει να αλληλοεπικαλύπτεται με το προηγούμενο κέλυφος τουλάχιστον μισό μέτρο.



Σχήμα 5.7: Περιφερειακή πρότμηση με τοποθέτηση υαλονημάτων στο μέτωπο (Pietro Lunardi, 2008)

Οι θεωρητικές μελέτες και η επί τόπου εμπειρία έδειξαν ότι η διατομή πρέπει να είναι όσον το δυνατόν κυκλική ώστε οι τάσεις να διοχετεύονται ομοιόμορφα γύρω από τον θόλο χωρίς τοπικές συγκεντρώσεις αυτών.

Όπως συμβαίνει με όλες τις εργασίες κατασκευής καλό είναι να εκτελεστούν έλεγχοι ποιότητας για να εξασφαλιστεί ότι το έργο πληροί τις προδιαγραφές σχεδιασμού.

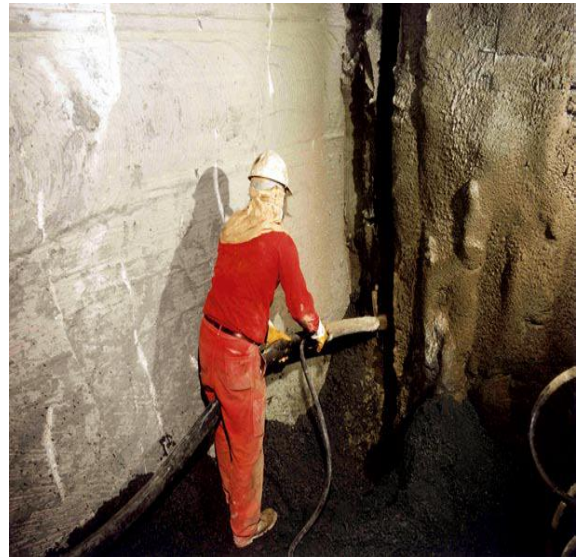
Οι ακόλουθοι έλεγχοι θα πρέπει να εκτελούνται κανονικά με την μηχανική εντομή:

- η θλίψη και η αντοχή στην κάμψη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να ελέγχεται. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να εκτελούνται δοκιμές ελέγχου ποιότητας σε τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε σε ένα γράφημα να μπορούν να χαράσσονται οι τιμές αντοχής με την πάροδο του χρόνου, η οποία αντοχή να ξεκινάει από τη στιγμή τοποθέτησης και συνεχίζεται μέχρι την πλήρη ωρίμανση ώστε να είναι εφικτές οι συγκρίσεις με τις προδιαγραφές σχεδιασμού όσον αφορά την αύξηση της αντοχής του υλικού που πρέπει να επιτευχθεί.

- Η παρακολούθηση της ποιότητας του σκυροδέματος του θόλου λαμβάνεται με δειγματοληπτικούς πυρήνες, κομμένες με ιδιαίτερη προσοχή στα σημεία σύνδεσης των τμημάτων σκυροδέματος
- παρακολούθηση της ολκιμότητας εάν το εκτοξευόμενο σκυροδέμα, είναι ινοπλισμένο



α



β

Εικόνα 5.10:(α) Ολομέτωπη κοπή από την μηχανή πρότμησης (β) χειροκίνητη πλήρωση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα(σιδηροδρομική γραμμής υψηλών ταχυτήτων Μιλάνο-Ρώμη-Νάπολη μεταξύ Νότιο Arezzo και Figline Valdarno,1999, έδαφος: αργιλώδης λάσπη, μέγιστο ύψος υποεκείμενων: ~ 90 m) (Pietro Lunardi, 2008)

5.3.5. Περιφερειακή πρότμηση με χρήση της τεχνικής pre tunnel

Η καινοτόμος τεχνική pretunnel μπορεί να θεωρηθεί επέκταση της precutting και ένας συμβιβασμός μεταξύ της προχώρησης με TBM και της τεχνικής περιφερειακής προυποστήριξης. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της της πρώτης και της τελευταίας.

Η καινοτομία της έγκειται στην δυνατότητα κατασκευής της επένδυσης της σήραγγας πριν από την εκσκαφή, χωρίς την ανάγκη για προκαταρτική βελτίωση και ενίσχυση του εδάφους γύρω από τη διατομή που πρόκειται να εκσκαφθεί, και στην τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης με χαλύβδινα πλαίσια και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Όπως η precutting που έχει ήδη περιγραφεί, η pretunnel τεχνική περιλαμβάνει την εκ των προτέρων δημιουργία ενός κόλουρου κώνου σκυροδέματος (εικόνα 5.11)

μπροστά από το μέτωπο, το οποίο μπορεί να αποτελέσει αναπόσπαστο τμήμα της τελικής επένδυσης σήραγγας ή ακόμα και να την αντικαταστήσει εξ ολοκλήρου, ανάλογα με το πάχος που εγκρίθηκε και τις αποφάσεις του σχεδιασμού. (Pietro Lunardi, 2008)

Η τεχνολογία pre tunnel διαφέρει ουσιαστικά από την τεχνολογία pre cutting στα παρακάτω:

- το πάχος του κελύφους κυμαίνεται από (40-80cm αντί 18-24cm) και το μήκος του είναι (8-10m αντί 3-4m)
- χρήση σκυροδέματος αντί εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή κονιάματος για την πλήρωση
- δυνατότητα εκσκαφής κατά τη διάρκεια έγχυσης του σκυροδέματος
- ο δακτύλιος του κελύφους της σήραγγας κλείνει αμέσως με ένα προσωρινό ανάστροφο τόξο από σκυρόδεμα ή χάλυβα.

Τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν από αυτή την τεχνολογία είναι τα εξής:

- εξαιρετική προστασία του μετώπου, χάρη στην εκ των προτέρων τοποθέτηση του κελύφους από σκυρόδεμα και ως εκ τούτου η καλύτερη ευστάθεια της εκσκαφής.



Εικόνα 5.11: Εφαρμογή pretunnel σε σιδηροδρομική γραμμή υψηλών ταχυτήτων (Ρώμη-Νάπολη Castello 1 σήραγγα) (Pietro Lunardi, 2008)



α

β

Εικόνα 5.12: Ολομέτωπη κοπή από την μηχανή πρότμησης (γραμμή Α του μετρό της Ρώμης, Baldo degli Σταθμός Ubaldi, 1996, έδαφος: πηλός με στρώματα άμμου, ύψος υπερκειμένων: ~ 18 m) (Pietro Lunardi, 2008)

- μέγιστη ασφάλεια για το προσωπικό που εργάζεται υπό την προστασία του κελύφους που είναι ενεργό.
- σημαντική εξάλειψη των φαινομένων εξώθησης και σύγκλισης.
- δραστική μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, στην περίπτωση σηράγγων με μικρό ύψος υπερκειμένων, χάρη στη φέρουσα ικανότητα και την ακαμψία του σκυροδέματος που τοποθετείται στον θόλο.

Μπορεί επίσης να είναι πιο ανταγωνιστική από τις συμβατικές μεθόδους όσον αφορά τους χρόνους κατασκευής και από άποψη κόστους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς στις συμβατικές μεθόδους εκσκαφής απαιτείται η δαπανηρή βελτίωση του εδάφους.

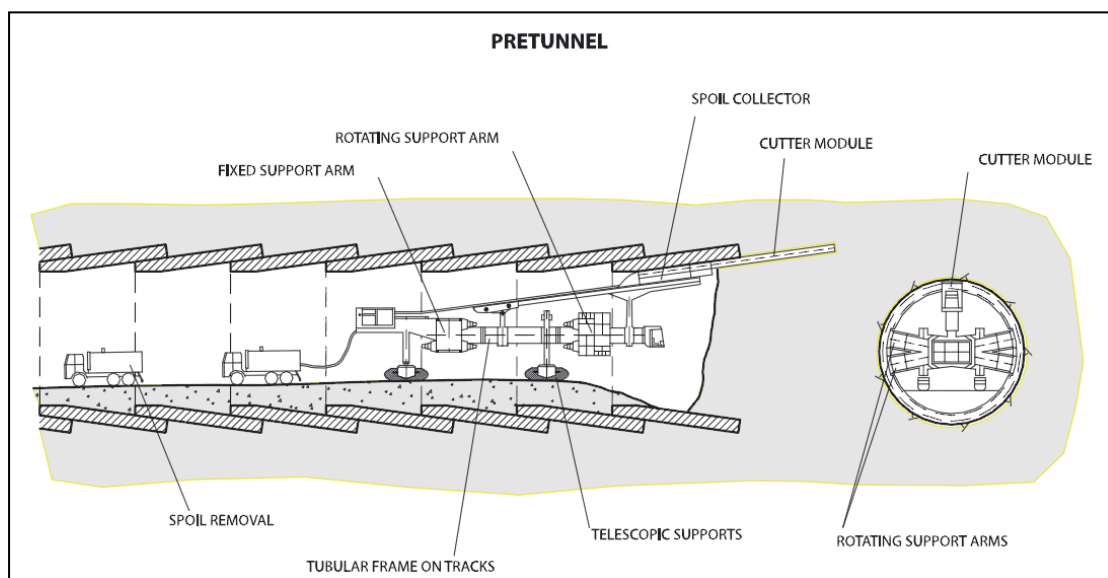
Με την τεχνική pre tunnel η κατασκευή της σήραγγας επιτυγχάνεται με μία αλληλουχία που δεν υπερβαίνει τις τέσσερις φάσεις:

- ενίσχυση του μετώπου εάν είναι απαραίτητο με την χρήση fiberglass
- κατασκευή του κελύφους σκυροδέματος εκ των προτέρων

- εκσκαφή του μετώπου που περικλείεται από το κέλυφος σκυροδέματος που κατασκευάστηκε
- δημιουργία ενός προσωρινού αναστροφου τόξου στο κάτω μέρος του κελύφους για κλείσει ο δακτύλιος της επένδυσης

Ως εκ τούτου η προχώρηση της σήραγγας συμβαίνει απλά με την αφαίρεση του εδάφους που περικλείεται στο κέλυφος σκυροδέματος που έχει κατασκευασθεί και το οποίο λειτουργεί ως επένδυση. Η προχώρηση γίνεται για μήκος που είναι μικρότερο από την επιμήκη διάσταση του κελύφους προκειμένου να επιτραπεί μεταξύ των συνεχόμενων κελυφών η επικάλυψη αυτών και για να δοθεί ένα περιθώριο ασφαλείας σε ότι αφορά στην ευστάθεια του μετώπου η οποία όπως και στην περίπτωση της μηχανικής εντομής, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεση της τεχνολογίας pretunnel.

Η τεχνολογία pretunnel συνδέεται άμεσα με τον εξοπλισμό για την εκτέλεση αυτής της εργασίας. Αποτελείται από ένα αυτοπροωθούμενο σωληνωτό πλαίσιο στο οποίο είναι τοποθετημένοι δύο τηλεσκοπικοί περιστροφικοί βραχίονες ικανοί να περιστρέφονται κατά 270° (σχήμα 5.8 και εικόνα 5.11). Οι βραχίονες λειτουργούν ως στηρίγματα για την μπούμα.



Σχήμα 5.8: Μηχανή εφαρμογής της τεχνικής pretunnel σε λειτουργία (Pietro Lunardi, 2008)



(α)

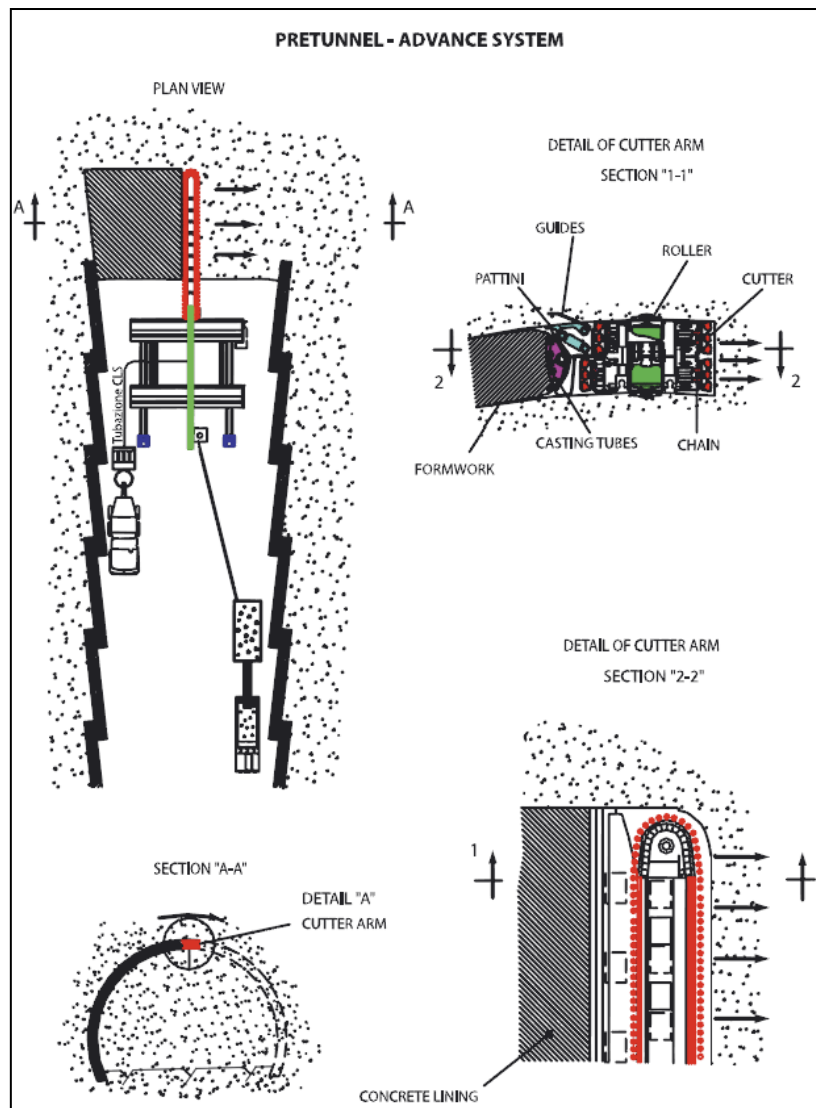


(β)

Εικόνα 5.13: Μηχανή pretunnel (α, β) (Pietro Lunardi, 2008)

Η μηχανή κινείται σε δύο τροχιές και συνδέεται με πλαίσιο ενώ ασφαρίζεται στην θέση της κατά την διάρκεια των διάφορων λειτουργικών φάσεων με τους ειδικούς τηλεσκοπικούς σταθεροποιητές.

Η μονάδα κοπής αποτελείται από δύο αλυσίδες που έχουν συναρμολογηθεί σε έναν άκαμπτο βραχίονα τετραγωνικού σχήματος στο οποίο οι κοπτικοί δίσκοι τοποθετούνται ανάλογα με τις αναμενόμενες συνθήκες εκσκαφής με ρυθμιζόμενη γεωμετρία και γωνία κλίσης (σχήμα 5.9). Οι αλυσίδες μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικές ταχύτητες και να

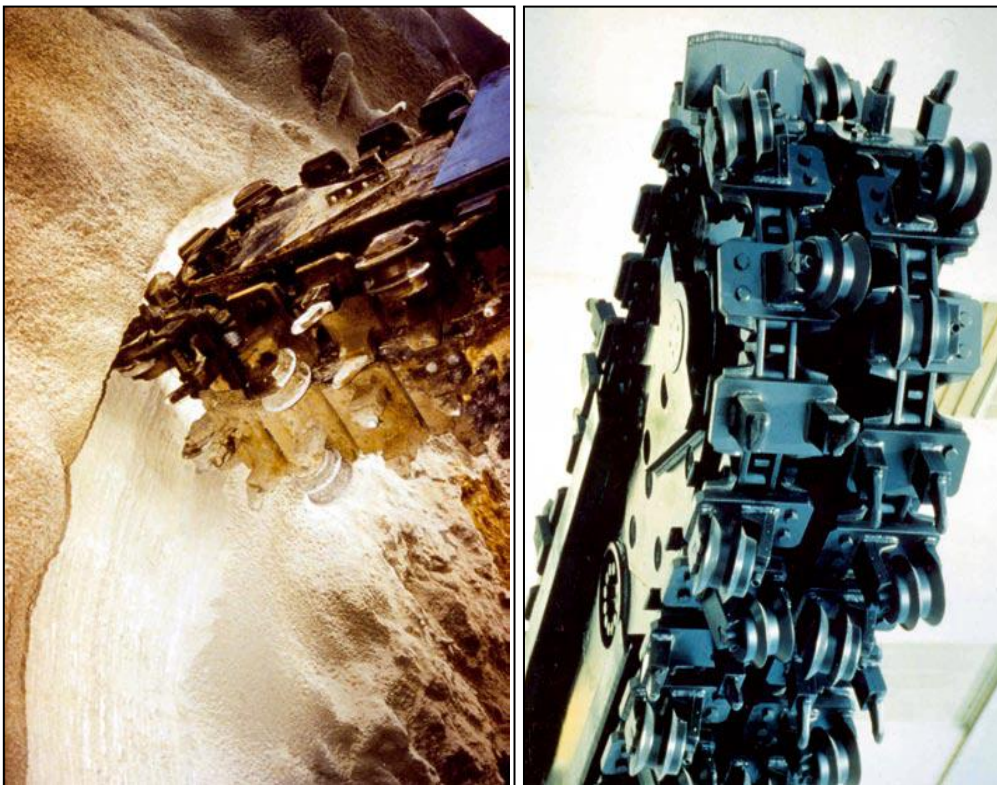


Σχήμα 5.9: Τρόπος λειτουργίας μονάδας κοπής(Pietro Lunardi, 2008)

περιστρέφονται σε αντίθετη φορά για κοπή τύπου διάτρησης και να είναι συγχρονισμένες για την συνεχή εκσκαφή. Αυτό επιτρέπει στην μηχανή να προσαρμοστεί στην εκσκαφή όλων των υλικών συμπεριλαμβανομένων και των ανομοιογενών (π.χ. εδάφη με μπλοκ/ή ακανόνιστα πετρώματα, εναλλασσόμενα στρώματα πετρωμάτων κ.α).



Εικόνα 5.14: Περιοχή δοκιμής pretunnel (1996) (Pietro Lunardi, 2008)



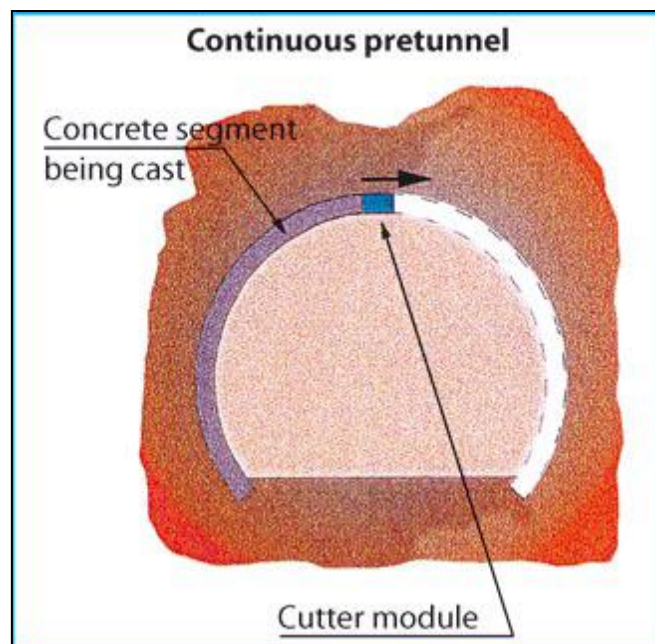
Εικόνα 5.15: Στοιχεία κοπτικής κεφαλής(Pietro Lunardi, 2008)

Τέλος ένα μεταλλότυπο είναι στερεωμένο στο πίσω μέρος της μονάδας κοπής και (ακολουθεί) την μονάδα και ταυτοχρόνως διοχετεύει σκυρόδεμα μέσω ειδικών σωλήνων κατά την επιμήκη διάσταση του κελύφους για να πληρωθεί το τμήμα που έχει εκσκαφθεί.

Από λειτουργική άποψη η ακριβής τοποθέτηση της μηχανής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία επειδή μόλις η περιστροφή της κοπτικής μονάδας ρυθμιστεί όπως καθορίζεται από τους περιστρεφόμενους τηλεσκοπικούς βραχίονες η εργασία γίνεται από την περιστροφική κίνηση αυτών γύρω από τον άξονά τους ώστε η πορεία που θα ακολουθήσει ο κοπτικός βραχίονας να είναι εκείνη ενός κόλουρου κώνου.

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την σταθεροποίηση του μηχανήματος μπροστά στο μέτωπο χρησιμοποιώντας τα τηλεσκοπικά στηρίγματα έτσι ώστε ο άξονας περιστροφής του εξοπλισμού να αντιστοιχεί στον άξονα του κόλουρου κώνου εκσκαφής. Η μπούμα που μεταφέρει την μονάδα κοπής τοποθετείται ρυθμίζοντας την προέκταση και την διαμήκη κλίση έτσι ώστε στο τέλος κάθε φάσης το εξωράχιο της νέας εκσκαφής να συμπίπτει με το εσωράχιο της προηγούμενης.

Δύο διαφορετικές μέθοδοι λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία του κελύφους σκυροδέματος. Με την (α) **συνεχή τεχνική pretunnel** (σχήμα 5.10) αυτό γίνεται μετά από το άνοιγμα μίας κατάλληλης εντομής στο έδαφος με τη χρήση του βραχίονα κοπής. Για να εκτελεστεί αυτό το εργαλείο κοπής πρώτα διαπερνά το έδαφος κατά μήκος και στη συνέχεια εφόσον η διείδυση έχει ολοκληρωθεί μετακινείται στα πλάγια ακολουθώντας την περίμετρο της διατομής.



Σχήμα 5.10: Συνεχής pretunnel (Pietro Lunardi, 2008)



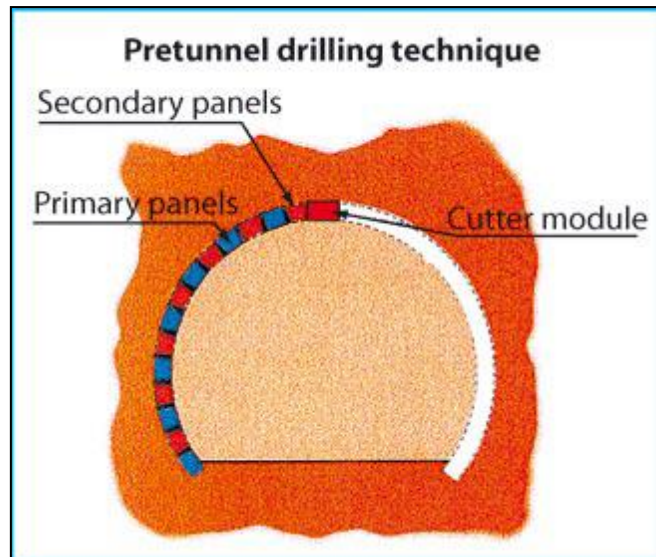
α

β

Εικόνα 5.16: Έναρξη της εκσκαφής με την τεχνική pretunnel (Castello 1 σήραγγα, υψηλής ταχύτητας / υψηλής χωρητικότητας Ρώμη-Νάπολη σιδηροδρομική γραμμή, 1996, έδαφος: ηφαιστειακή τέφρα, μέγιστος ύψος υπερκείμενων: 9 m) (Pietro Lunardi, 2008)

Η εντομή πληρώνεται με σκυρόδεμα το οποίο διοχετεύεται πίσω από τις αλυσίδες των κοπτικών ενώ ταυτόχρονα και κατά την αντίθετη κατεύθυνση συνεχίζει να πραγματοποιείται η κοπή. Δηλαδή, το σκυρόδεμα εκτοξεύεται προς την πλευρά που έχει πραγματοποιηθεί η εντομή, η δε, πίεση εκτόξευσής του λειτουργεί ως πίεση προώθησης για την κοπτική αλυσίδα. Η πίεση αυτή εξασφαλίζει και την ομοιόμορφη πλήρωση με σκυρόδεμα.

Με την (β) τεχνική **pretunnel drill** (σχήμα 5.11) το κέλυφος κατασκευάζεται με τη δημιουργία συνεχόμενων τμημάτων τα οποία αλληλεπικαλύπτονται εγκάρσια.



Σχήμα 5.11: Τεχνική pretunnel drill (Pietro Lunardi, 2008)

Το έδαφος κόβεται αποκλειστικά από την κοπτική αλυσίδα η οποία ωθείται κάθετα στην μεγαλύτερη διάστασή της η οποία φέρει και τα κοπτικά. Η ακολουθία της λειτουργίας συνίσταται από τη δημιουργία πρωτογενών ανοιχτών τμημάτων και στη συνέχεια δευτερευόντων κλειστών τμημάτων τα οποία εν μέρει αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους για να εξασφαλισθεί η κατασκευαστική συνέχεια του θόλου.

Το μέγιστο βάθος κοπής κυμαίνεται από 8,50 έως 10m, ανάλογα με το μήκος της μονάδας κοπής. Δύο τύποι μονάδων κοπτικών έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα το ένα με πάχος 80cm και το άλλο με 45cm και η ελάχιστη εσωτερική ακτίνα μπορεί να ποικίλει από 5,75 έως 7,40m ανάλογα με τη διατομή της σήραγγας. Μόλις περάσει ο απαραίτητος χρόνος για να ωριμάσει το σκυρόδεμα μία νέα προχώρηση της σήραγγας ξεκινάει. Αυτή πρέπει να είναι μεταξύ 6,50 έως 8m για να επιτρέπει επαρκή επικάλυψη μεταξύ των συνεχόμενων θόλων γύρω στα 1,50 με 2m.

Η κατασκευαστική συνέχεια της τεχνικής pre tunnel πρέπει να εξασφαλίζεται δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη συνένωση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων και κυρίως με τα τελευταία τμήματα που κλείνουν το τόξο. Είναι σημαντικό το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε να έχει σωστά χαρακτηριστικά, ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα πληροί τις προδιαγραφές του σχεδιασμού για τη συνέχεια, την αδιαπερατότητα και την αντοχή.

Οι συνήθεις έλεγχοι ποιότητας για την παραγωγή ινοπλισμένου σκυροδέματος περιλαμβάνουν όχι μόνο δοκιμές αντοχής σε θλίψη αλλά και δοκιμές για κάμψη και διάτμηση(punching).

Τα δείγματα που λαμβάνονται κατά σκυροδέτηση ελέγχονται για την τήρηση των προδιαγραφών σχεδιασμού.

Μπορεί να είναι χρήσιμο να σχεδιαστεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος ως συνάρτηση του χρόνου, γιατί, όπως ειπώθηκε, η προχώρηση της σήραγγας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι ο θόλος με την τεχνική pretunnel να έχει ωριμάσει αρκετά ώστε να εγγυάται η απόλυτη ασφάλεια για την εκσκαφή.

Μόλις ολοκληρωθεί το κέλυφο, το καλύτερο είναι να ληφθούν δειγματοληπτικοί πυρήνες να ελεγχθεί η ποιότητα και η σύνδεση του σκυροδέματος με το έδαφος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο της ποιότητας και στην αντοχής του κελύφους στις συνδέσεις των τμημάτων χύτευσης.

Τα ηλεκτρονικά όργανα που τοποθετούνται στο μηχάνημα pretunnelling επιτρέπουν την παρακολούθηση, α) των γεωμετρικών παραμέτρων που ρυθμίζονται από την μηχανή και β) των γεωμετρικών παραμέτρων της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο και παρέχουν τις πληροφορίες που απαιτούνται για να ληφθούν διορθωτικά μέτρα σε περίπτωση που θεωρηθεί απαραίτητο κατά την κατασκευή του θόλου.

Όλα τα δεδομένα που μεταδίδονται από τον εξοπλισμό ελέγχου και μετρήσεων συλλέγονται και αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό σύστημα απόκτησης δεδομένων, ώστε να μπορεί ακολούθως να γίνει επανεπεξεργασία και ανάκτηση των φάσεων κατασκευής των pretunnel αποτελώντας έτσι εγγύηση για την ποιότητα των εργασιών που εκτελούνται.



Εικόνα 5.17: Το μηχάνημα Pretunnel σε λειτουργία (υψηλής ταχύτητας / υψηλής χωρητικότητας σιδηροδρομική γραμμή Ρώμη-Νάπολη, Castello 1 σήραγγα, 1996, έδαφος: ηφαιστειακή τέφρα, μέγιστο ύψος υπερκείμενων: 9 m) (Pietro Lunardi, 2008)

Η εμπειρία που αποκτήθηκε από τον τομέα των κατασκευών θόλου με pretunnel και πάχος 80 εκατοστά έχει επιβεβαιώσει όχι μόνο την εγκυρότητα της μεθόδου τεχνικά και κατασκευαστικά, αλλά και την μεγάλη πολυπλοκότητα του έργου με επιπτώσεις στους χρόνους κατασκευής και στα κόστη.

Η κατασκευή των θόλων με πάχος έως 45-50 εκατοστά είναι πολύ λιγότερο απαιτητική και πιθανώς ανταποκρίνεται πιο πολύ στις πραγματικές ανάγκες, καθώς αποτελεί μια εναλλακτική λύση σε πολλές περιπτώσεις από άποψη ανταγωνισμού. Στην περίπτωση αυτή η μονάδα κοπής αποτελείται από μία μόνο αλυσίδα. Με βάση το μειωμένο πάχος της εκσκαφής, ο εξοπλισμός είναι σε θέση να κόψει το έδαφος με τη δύναμη από τους υδραυλικούς κινητήρες και, επομένως, δεν απαιτείται η πίεση

από το σκυρόδεμα όπως απαιτείται για τομές μεγαλύτερου πάχους. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό επιτρέπει οι εργασίες εκσκαφής και η χύτευση να γίνονται ξεχωριστά. Έτσι μειώνεται ταυτόχρονα η επιχειρησιακή και υλικοτεχνική πολυπλοκότητα της εκτέλεσης.

Αν χρησιμοποιείται αυτό το σύστημα είναι επομένως απαραίτητο για το έδαφος που θα εκσκαφθεί να έχει επαρκή συνοχή για να εξασφαλιστεί ότι το διάκενο της τομής θα στηρίζεται τουλάχιστον μέχρι η τομή να πληρωθεί με σκυρόδεμα. Θέλουμε ταυτοχρόνως να μειωθεί ο χρόνος αυτουποστήριξης και η πιθανότητα αστοχίας, οπότε μία καλή πρακτική είναι να κοπεί ο κόλυρος κώνος σε φάσεις από πέντε έως επτά, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το μήκος και την ακτίνα της σήραγγας. Αυτή η μέθοδος λειτουργίας απλοποιεί τα συστήματα για την εφαρμογή και την τοποθέτηση του. (Pietro Lunardi, 2008)

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PHASE²

6.1. Εισαγωγή

Με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου pre cutting στην ευστάθεια του μετώπου αβαθών σηράγγων πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Phase².

6.2. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase²

Το πρόγραμμα Phase² είναι ένας διδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα phase² είναι τα εξής:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού(με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων)

Η επίλυση του εκάστοτε μοντέλου στο Phase² και σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με τις δύο κύριες τάσεις στο επίπεδο της διατομής ανάλυσης και μία κύρια τάση κάθετα προς αυτό. Επίσης η διατομή θεωρείται σταθερή κατά μήκος του άξονα της ενώ η εκσκαφή θεωρείται ότι έχει άπειρο μήκος κάθετα προς το επίπεδο της ανάλυσης. (www.rockscience.com)

6.3. Προετοιμασία προσομοιώματος

Η προετοιμασία του προσομοιώματος στο πρόγραμμα Phase² πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με την εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόνομα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξι κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο βάρος των στοιχείων είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

6.3.1. Στάδια εκσκαφής-υποστήριξης

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας προσομοιώνονται στο Phase² μέσω σταδίων προσομοίωσης στα οποία είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους (π.χ. χαλάρωση υλικού), και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης.

6.3.2. Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης

Το πρόγραμμα είναι προορισμένο για τον σχεδιασμό υπογείων εκσκαφών και παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των στοιχείων υποστήριξης της σήραγγας.

6.3.3. Ιδιότητες υλικών γεωμάζας

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο. Για πλαστική συμπεριφορά των υλικών διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας είναι τα κριτήρια Mohr-Coulomb και Hoek-Brown. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

- ελαστικά-τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές,

- ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ελάττωση της εκσκαφής σε στάδια.

6.3.4. Τάσεις πεδίου-Φορτίσεις

Στο phase² οι τάσεις πεδίου καθορίζονται να έχουν σταθερές τιμές στις περιπτώσεις εκσκαφών σε μεγάλα βάθη, όταν η επίδραση της βαρύτητας στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης είναι αμελητέα συγκρινόμενη με το μέγεθος των επί τόπου τάσεων. Προκειμένου για εκσκαφές σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να ορισθεί ένα εντατικό πεδίο λόγω υπερκειμένων γαιών λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma_v = \gamma \times h$, όπου γ είναι το ίδιο το βάρος των γεωυλικών και h το βάθος από την επιφάνεια. Η οριζόντια κύρια τάση, υπολογίζεται από την σχέση $\sigma_h = K_o \sigma_v$, όπου K_o ο συντελεστής πλευρικής ώθησης.

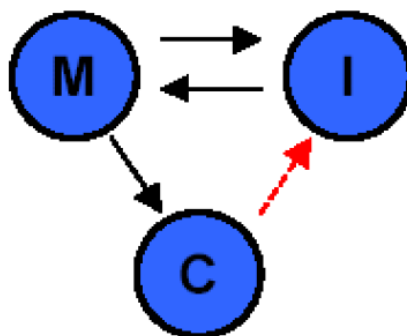
Παράλληλα με τις τάσεις πεδίου, μπορούν να ορισθούν δυνάμεις κάθετα ή παράλληλα προς κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό σύνορο του προσομοιώματος, όπως και επικόμβιες δυνάμεις στους κόμβους των στοιχείων του προσομοιώματος κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Η εφαρμογή τέτοιων δυνάμεων είναι απαραίτητη στην περίπτωση αβαθών εκσκαφών όπου υπεισέρχονται στους υπολογισμούς επιφανειακά φορτία, λόγω βάρους υφισταμένων κτιρίων ή φορτία κυκλοφορίας υπερκείμενης οδού.

6.4. Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase²

Με το πρόγραμμα Phase² εύκολα δημιουργείται ένα μοντέλο και κατασκευάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα γίνεται ανάλυση των τάσεων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτά γίνονται με τη χρήση των τριών προγραμμάτων από τα οποία αποτελείται το phase² και είναι: το μοντέλο(MODEL), ο υπολογιστής(COMPUTE) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET). Το μοντέλο (MODEL) είναι ένα πρόγραμμα προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και τροποποίηση των ορίων του προσομοιώματος, την υποστήριξη, τις επί τόπου τάσεις, τις οριακές συνθήκες, για την ανάθεση των ιδιοτήτων των υλικών

και για τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το phase² δίνει τη δυνατότητα εύκολης κατασκευής του προσομοιώματος με διάφορα εργαλεία. Η εκσκαφή, τα σύνορα των υλικών και των σταδίων καθορίζονται με τη βοήθεια εργαλείων σχεδίασης ή απλά με την εισαγωγή συντεταγμένων. Επίσης μπορεί να γίνει προσομοίωση των ασυνεχειών του πετρώματος. Ο χρήστης μπορεί να συμπεριλάβει πίεση πόρων στην ανάλυση ενεργών τάσεων, οριζόντιους υδροφόρους ορίζοντες, πιεζομετρικές επιφάνειες κλπ.

Το Μοντέλο(MODEL), ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET) λειτουργούν και ως ανεξάρτητα προγράμματα. Μπορούν επίσης να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται στο (σχήμα 6.1)



Σχήμα 6.1:Ο συσχετισμός των τριών προγραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμα phase² (www.rockscience.com)

6.5. Αξονοσυμμετρικό μοντέλο

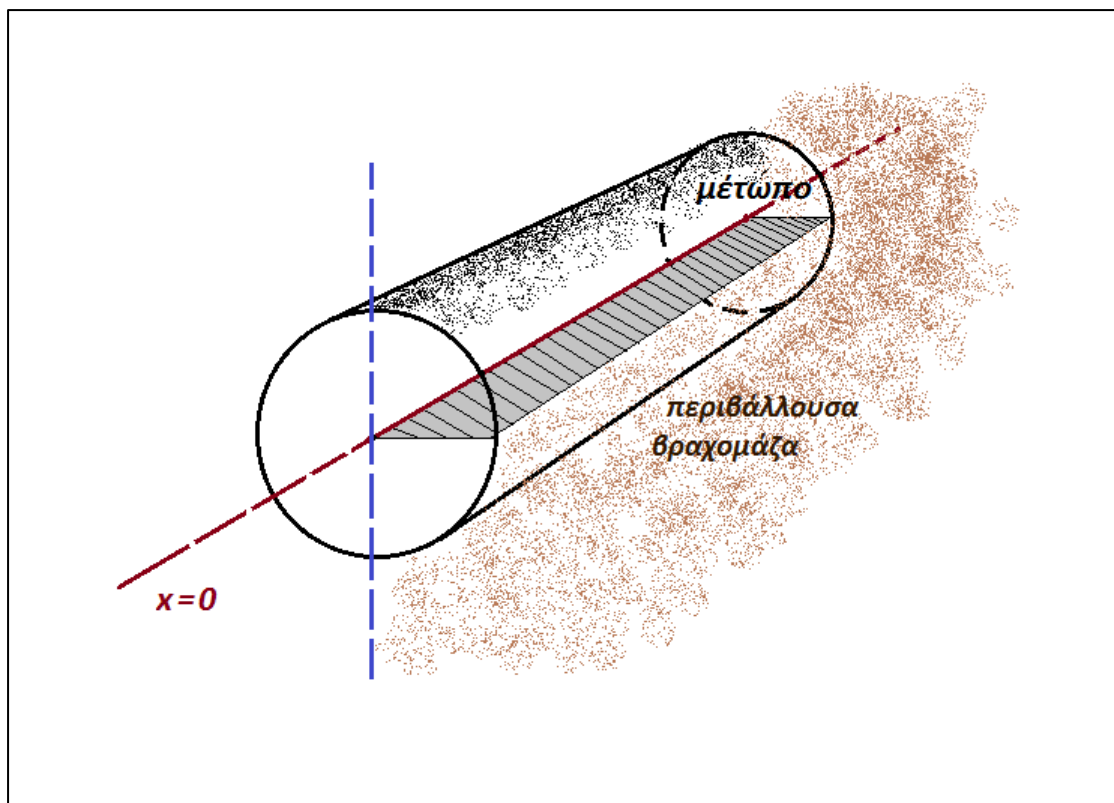
Το αξονοσυμμετρικό μοντέλο δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει την τριδιάστατη εκσκαφή μίας σήραγγας σε δύο διαστάσεις. Λόγω της συμμετρίας αυτό που βλέπουμε στο μοντέλο είναι το περιβάλλον πέτρωμα της σήραγγας και ένα επίπεδο (αντιπροσωπεύει την διανοιχθείσα σήραγγα) του οποίου το οριζόντιο τμήμα ισούται με την ακτίνα της σήραγγας(μέτωπο εκσκαφής) και το κάθετο τμήμα του, ισούται με το μήκος της σήραγγας. Για να δημιουργηθεί το αξονοσυμμετρικό μοντέλο καθορίζονται μόνο τα εξωτερικά όρια, καθώς η εκσκαφή καθορίζεται από το σχήμα και την θέση των εξωτερικών ορίων.

Υπάρχουν περιορισμοί με την χρήση του αξονοσυμμετρικού μοντέλου όπως:

- ο άξονας περιστροφής είναι πάντα ο κατακόρυφος άξονας ($x=0$). Ανεξάρτητα από τον πραγματικό προσανατολισμό της εκσκαφής το μοντέλο πρέπει να αποτυπωθεί, ώστε να ισχύσει η σύμβαση για τον κατακόρυφο άξονα
- το τασικό πεδίο είναι αξοσυμμετρικό και ευθυγραμμισμένο κατά τον κατακόρυφο άξονα με ακτινικές διευθύνσεις
- ως μέτρα υποστήριξης δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αγκύρια αλλά μόνο liners
- όλα τα υλικά πρέπει να έχουν ισοτροπικές ελαστικές ιδιότητες

6.6 Μοντέλο προσομοίωσης

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$ ολομέτωπης διάνοιξης (σχήμα 6.1) με την χρήση του αξοσυμμετρικού μοντέλου. Στις αναλύσεις μας προσομοιώνουμε την συνεχή τεχνική pretunnel.



Σχήμα 6.1: Διανοιγόμενη σήραγγα (η γκρίζα επιφάνεια φαίνεται στα διαγράμματα κάτοψης του αξοσυμμετρικού μοντέλου)

6.6.1 Ρυθμίσεις (Project Settings)

Για την δημιουργία του αξοσυμμετρικού μοντέλου επιλέγουμε από το Project Settings το General και στην συνέχεια επιλέγουμε:

- Analysis type → Axisymmetric

6.6.2 Entering Boundaries

Για να καθοριστεί ένα αξονοσυμμετρικό πρόβλημα RS2 απαιτούνται μόνο τα εξωτερικά όρια.

Επιλέγουμε Boundaries → Add External

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν έχουν τις εξής διαστάσεις: 50 μέτρα πλάτος (5D) και 80 μέτρα μήκος (8D). Τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία προέκυψαν λαμβάνοντας τους εξής περιορισμούς:

- Το μοντέλο πρέπει να έχει αρκετά μεγάλες διαστάσεις, ώστε τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούν τα παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη γύρω από τη σήραγγα και το μέτωπό της, να μην επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες που ισχύουν στα όρια του μοντέλου.
- Η πυκνότητα του κανάβου στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη, ώστε τα αποτελέσματα που αυξάνονται από την περιοχή αυτή να είναι αντιπροσωπευτικά για την εκεί παραμορφωσιακή συμπεριφορά.
- Το μοντέλο δεν θα πρέπει να έχει διαστάσεις μεγαλύτερες από τις απαραίτητες ούτως ώστε να ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν ο υπολογιστικός χρόνος και ο όγκος των αποτελεσμάτων.
- Η απόσταση της σήραγγας από το πλευρικό όριο και το κάτω όριο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε η κατανομή των τάσεων στα δύο αυτά όρια να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο, γεγονός που θα δηλώνει ότι τα όρια αυτά δεν επηρεάζονται από την παρουσία της εκσκαφής.

6.6.3 Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize)

Πριν την παραγωγή του πλέγματος καθορίζονται οι διάφοροι παράμετροι δημιουργίας του. Στην αναλύσεις των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν εξάκομβα τριγωνικά στοιχεία.

6.6.4 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing).

Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται με βάση τη διακριτοποίηση που έχει γίνει.

6.6.5 Τασικό πεδίο (Field Stress)

Στις αναλύσεις προσομοιώνεται υδροστατικό πεδίο ($K=1$) με τις τάσεις να έχουν τις εξής τιμές: $\sigma_1 = 0.027(\text{MN}/\text{m}^3) \times 40\text{m} = 1.08\text{MPa}$ και $\sigma_3 = 1 \times 1.08\text{MPa} = 1.08\text{MPa}$ για τους εδαφικούς σχηματισμούς 9.2α, 9.2β, 9.2γ και $\sigma_1 = \sigma_3 = 0.027(\text{MN}/\text{m}^3) \times 76\text{m} = 2,052\text{MPa}$ για τον «βραχώδη» σχηματισμό.

6.6.6 Καθορισμός γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών

Για την κατασκευή του προσομοιώματος εισάγονται οι ιδιότητες και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχώμαζας βάσει των γεωλογικών – γεωτεχνικών στοιχείων που λήφθηκαν από την Τεχνική Έκθεση της εταιρείας ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε.-SIEMENS AG-VINCI Construction Grands Projects. Πρόκειται για το μεσοδιάστημα 6,5 της επέκτασης της γραμμής 2 Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό.

Χρησιμοποιήθηκαν 4 τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού των σχηματισμών των μεσοδιαστημάτων 6 και 5

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ 6 ΚΑΙ 5		
	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ: ΑΘΗΝΑΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ		
	9.2α	9.2β	9.2γ
c(KPa)	170	60	40
$\varphi(^{\circ})$	45	36	35
N	0,25	0,25	0,30

Πίνακας 6.1: Οι εδαφικοί σχηματισμοί και οι γεωτεχνικοί παράμετροί τους

6.6.7 Υποστήριξη

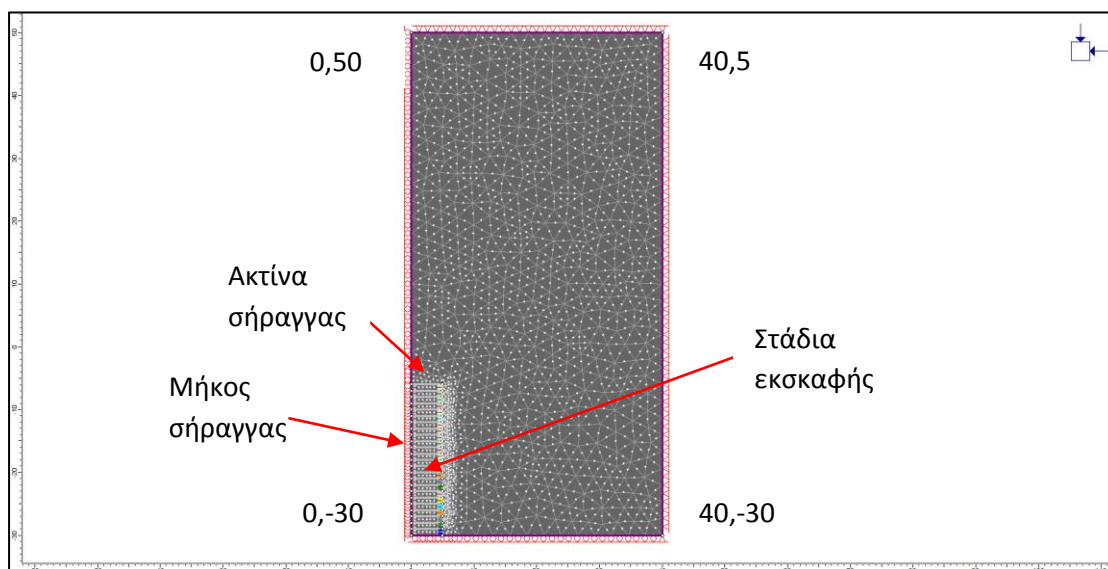
Ως μέτρο υποστήριξης σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιήσαμε την προϋποστήριξη που αποτελείται από το κέλυφος και από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επίσης

δημιουργήθηκαν άλλα 4 μοντέλα με εκσκαφή ανά 1 μέτρο στα οποία στα τοποθετήσαμε μόνο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

6.6.8 Καθορισμός ιδιοτήτων κελύφους

Στα προσομοιώματα με προϋποστήριξη τοποθετείται κέλυφος το οποίο έχει τις ιδιότητες σκυροδέματος C25/30, με μέτρο Ελαστικότητας $E=31000\text{MPa}$ και λόγο poisson $\nu=0.2$. Επίσης θα τοποθετηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως δεύτερο στοιχείο υποστήριξης για τα 4 πρώτα προσομοιώματα. Το σκυρόδεμα θα τοποθετηθεί ανά 1m εκσκαφής και οι ιδιότητές του είναι ίδιες με του κελύφους, δηλαδή θεωρήθηκε σκυρόδεμα C25/30. Το στατικό του πάχος είναι 40cm και το μέτρο ελαστικότητας είναι $E=31000\text{MPa}$ με λόγο poisson $\nu=0.2$.

Τα προσομοιώματα αποτελούνται συνολικά από 25 στάδια, όπου κάθε στάδιο αντιπροσωπεύει ένα μέτρο εκσκαφής, με εξαίρεση το πρώτο στάδιο το οποίο είναι γεωστατικό. Στα προσομοιώματα με προϋποστήριξη θα τοποθετηθούν συνολικά 3 σειρές κελύφους με μήκος 10 μέτρα το κάθε κέλυφος, μήκος επικάλυψης τα 3 μέτρα και σε κάθε εκσκαφή μήκους ενός μέτρου τοποθετήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κάνοντας συνολικά 24 εκσκαφές. Επίσης στα προσομοιώματα. Τα στάδια εκσκαφής με την προϋποστήριξη φαίνονται χαρακτηριστικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.1: Τυπική μορφή ενός προσομοιώματος (σε κάτοψη) με σύνθετη υποστήριξη και ανά ένα μέτρο εκσκαφή.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ενέργειες που εκτελούνται στα 25 στάδια και είναι ίδιες και για τα τέσσερα προσομοιώματα που εξετάζονται.

Προσομοιώματα: 9.2α, 9.2β, 9.2γ, «βραχώδης» σηματισμός	Τύπος υποστήριξης: Προϋποστήριξη(προϋποστήριξη κελύφους και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά ένα μέτρο εκσκαφής)	Τύπος υποστήριξης: Μεμονωμένη τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
1 ^ο στάδιο	Γεωστατικό	Γεωστατικό
2 ^ο στάδιο	τοποθέτηση 1 ^{ου} κελύφους 10 μέτρων, εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
3 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
4 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
5 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
6 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
7 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
8 ^ο στάδιο	τοποθέτηση 2 ^{ου} κελύφους 10 μέτρων ,εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
9 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση

		εκτοξευόμενου σκυροδέματος
10 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
11 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
12 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
13 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
14 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
15 ^ο στάδιο	τοποθέτηση 3 ^ο κελύφους 10 μέτρων εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
16 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
17 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
18 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου

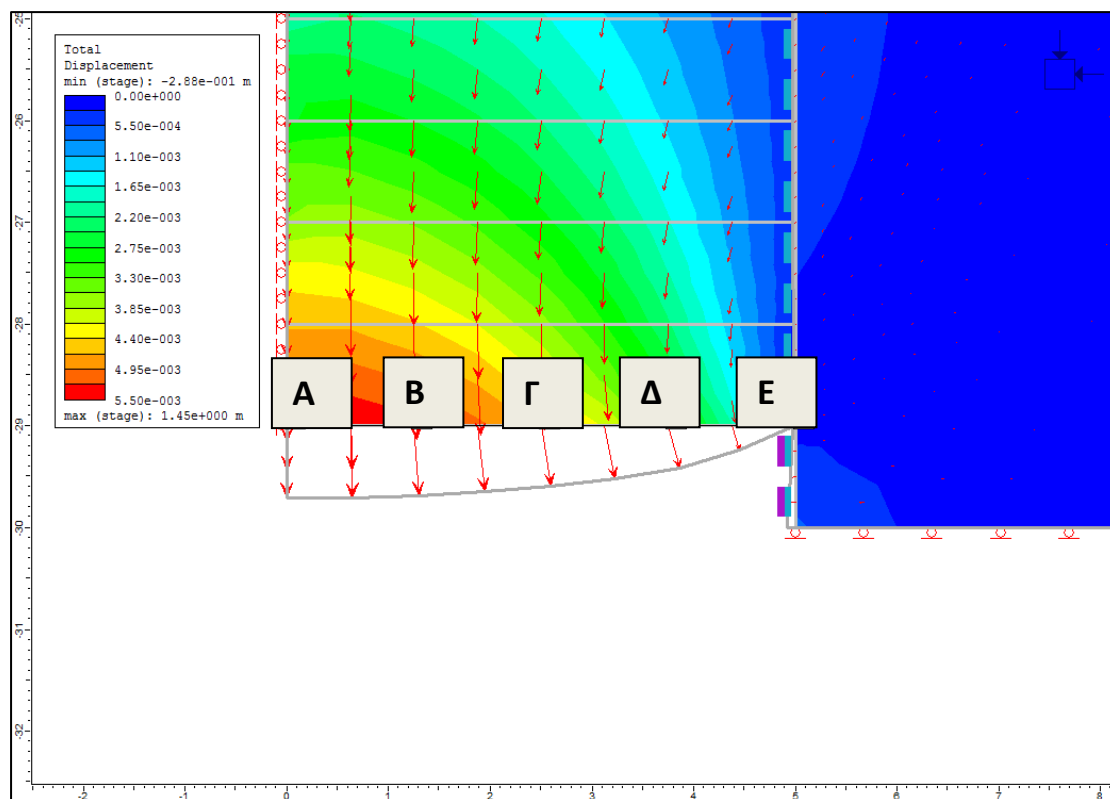
		σκυροδέματος
19 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
20 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
21 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
22 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
23 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
24 ^ο στάδιο	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος
25 ^ο στάδιο	τελευταίο στάδιο εκσκαφής ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	εκσκαφή ενός μέτρου και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Πίνακας 6.2: Αναλυτική περιγραφή των εργασιών που γίνονται σε όλα τα στάδια

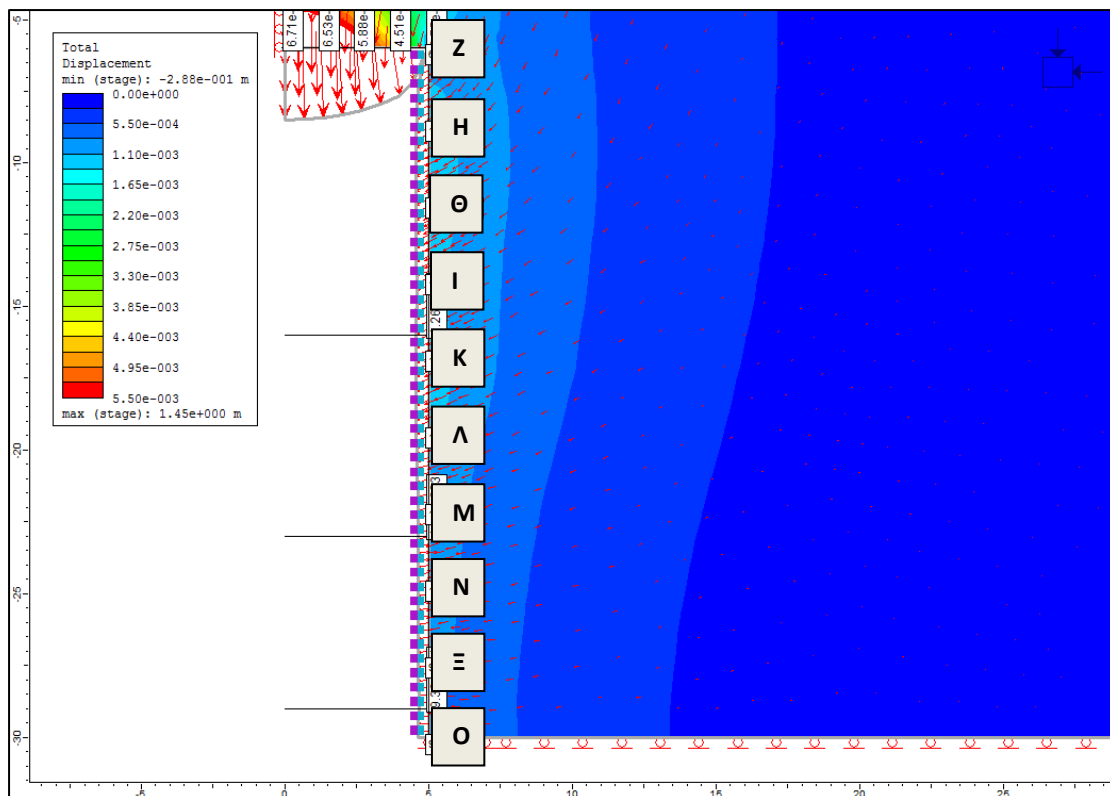
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

7.1 Παρουσίαση των αναλύσεων στο πρόγραμμα Phase²

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αναλύσεις των μοντέλων προσομοίωσης για τέσσερα στάδια το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο για πέντε σημεία πάνω στο μέτωπο και για δέκα σημεία πλευρικά της σήραγγας. Στις εικόνες που ακολουθούν δίνονται ενδεικτικά οι θέσεις των πέντε σημείων που εξετάζονται στο μέτωπο με συντεταγμένες (0,y), (1.25,y), (2.5,y), (3.75,y), (5,y) με σταθερή απόσταση 1,25m και των δέκα σημείων πλευρικά της σήραγγας με συντεταγμένες (5,-30), (5,-27,6), (5,-25,3), (5,-23), (5,-20,6), (5,-18,3), (5,-16), (5,-13,6), (5,-11,3), (5,-9) και είναι σταθερές για όλα τα εξεταζόμενα στάδια.



Εικόνα 7.1: Οι θέσεις των πέντε σημείων στον μέτωπο της σήραγγας



Εικόνα 7.2:Οι θέσεις των δέκα σημείων πλευρικά της σήραγγας

7.2. Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2α

Στον πίνακα 7.1 που ακολουθεί δίνονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων σ_1, σ_3 , ολικές μετατοπίσεις που προκύπτουν για ανυποστήρικτο μέτωπο, μέτωπο υποστηριγμένο με προϋποστήριξη και μέτωπο υποστηριγμένο με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τον εδαφικό σχηματισμό 9.2α για τα στάδια 2, 8, 15, 22.

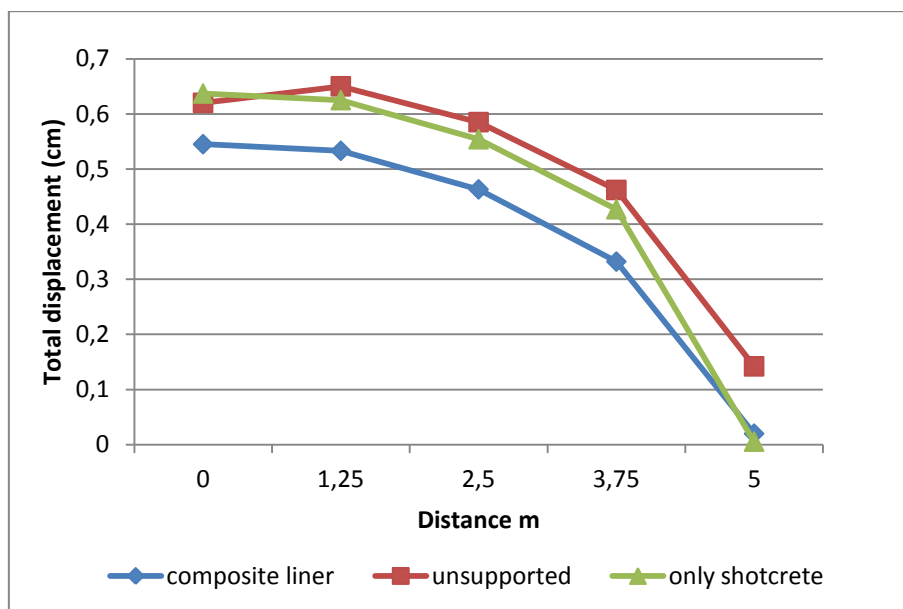
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2α με προϋποστήριξη (μέγιστες τιμές) για το 2 ^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	2,14
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	1,05
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,545
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2α only shotcrete (μέγιστες τιμές) 2 ^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	2,93
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	1,92
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,637
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2α unsupported μέγιστες τιμές 2 ^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	3,58
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	0,99

(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις(cm)	0,662
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	1,95
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,01
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,587
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a only shotcrete μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	2,45
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,45
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (m)	0,709
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a unsupported μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ 1 (Mpa)	3,68
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,14
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις(cm)	0,658
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	1,94
(5,-16)	σ3 (Mpa)	0,97
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,604
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a only shotcrete (μέγιστες τιμές) 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	2,31
(5,-16)	σ3 (Mpa)	0,83
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,738
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a unsupported μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	3,62
(5,-16)	σ3 (Mpa)	1,18
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις(cm)	0,658
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 22^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	1,94
(5,-9)	σ3 (Mpa)	0,97
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	0,613
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a only shotcrete (μέγιστες τιμές) 22^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	2,31
(5,-9)	σ3 (Mpa)	0,83
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις	0,75

	(cm)	
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2a unsupported	μέγιστες τιμές 22° στάδιο
(5,-9)	σ1 (Mpa)	3,77
(5,-9)	σ3 (Mpa)	1,24
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις(cm)	0,66

Πίνακας 7.1:Μέγιστες τιμές σ1,σ3 ,ολικές μετατοπίσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο και μέτωπο υποστηριγμένο για τον σχηματισμό 9.2a και για τα στάδια 2 ,8 ,15, 22.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τάσεων σ1,σ3, ολικές μετατοπίσεις με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2a για το 2°, 8°, 15° και 22° στάδιο. Επίσης δίνονται οι πίνακες μετατόπισης για σύγκριση του ανυποστήρικτου μετώπου με το υποστηριγμένο.



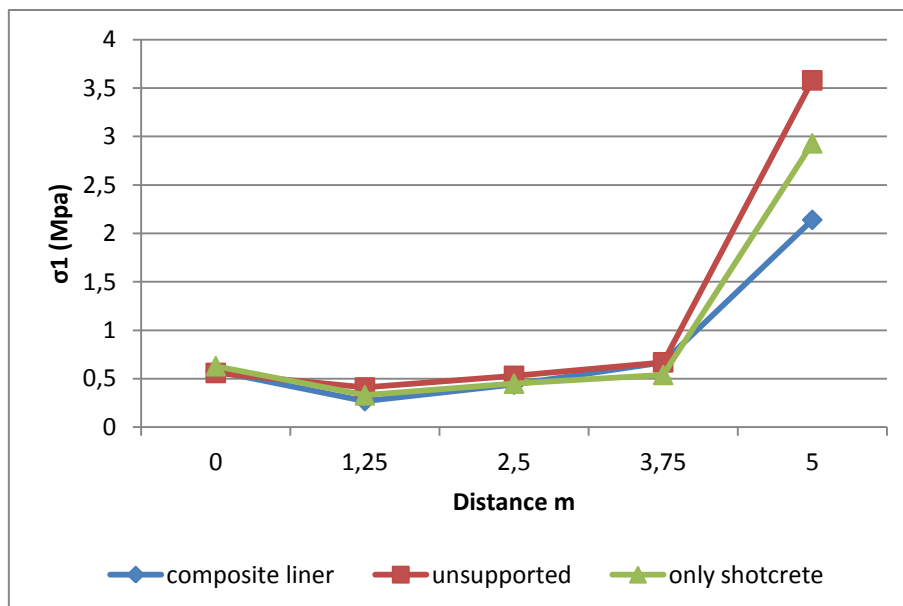
Διάγραμμα 7.1: Διαγράμματα μετατοπίσεων, με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2a για το 2° στάδιο

Συντεταγμένες σημείων (x,y)	Un-supported (cm)	Only shotcrete(cm m)	Προϋποστ ήριξη (cm)	Ποσο-στιαία μεταβολ ή % Un-Προϋπ	Ποσο-στιαία μεταβολ ή% Un-Shot
(0,-29)	0,62	0,637	0,545	12,09677	-40,7419

(1.25,-29)	0,65	0,625	0,533	18	-31,1538
(2.5, -29)	0,585	0,554	0,463	20,8547	-36,2009
(3.75,-29)	0,462	0,427	0,332	28,13853	-46,2242
(5,-29)	0,142	0,00544	0,0199	85,98592	10,36901

Πίνακας 7.3: Μετατοπίσεις με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.3 οι μετατοπίσεις χωρίς υποστήριξη είναι μικρές στο 2^ο στάδιο, μικρότερες του ενός εκατοστού. Έτσι με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης παρατηρούμε μείωση των μετατοπίσεων σε όλα τα σημεία, ενώ με μεμονωμένη εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρούμε αύξηση στα περισσότερα σημεία εκτός από το σημείο (5,-29), όπου βλέπουμε μείωση.



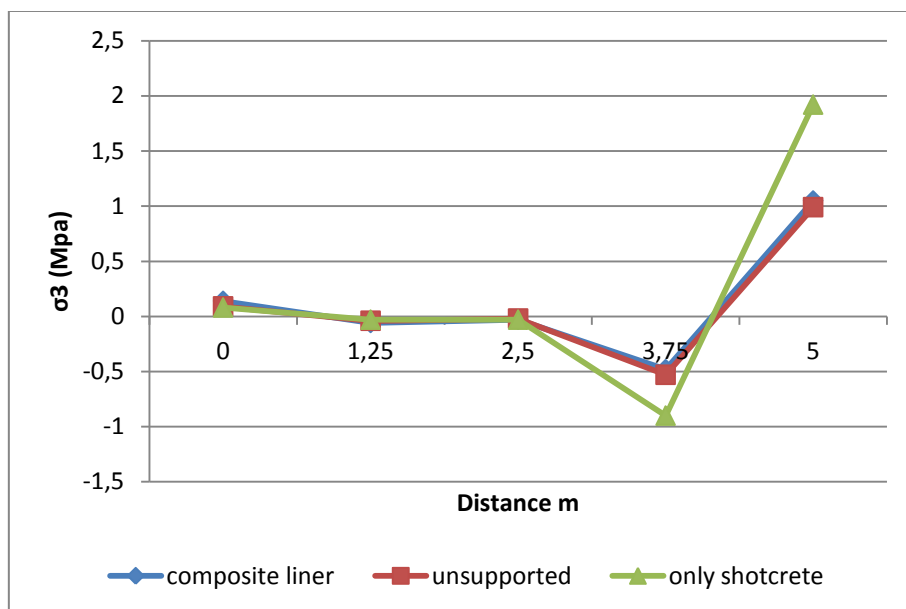
Διάγραμμα 7.2: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή τάσεων σ_1 % (MPa) Un- Προϋπ	Μεταβολ ή τάσεων σ_1 % (MPa) Un- Shotc
(0,-29)	0,56	0,63	0,58	-3,57143 ⁱ	-12,5

(1.25,-29)	0,41	0,33	0,27	34,14634	19,5122
(2.5, -29)	0,53	0,45	0,44	16,98113	15,09434
(3.75,-29)	0,67	0,54	0,67	0	19,40299
(5,-29)	3,58	2,93	2,14	40,22346	19,40299

Πίνακας 7.4:Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.4 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης έχουμε μείωση των τάσεων σ1 στα σημεία(1.25,-29), (2.5, -29), (5,-29) εκτός από το σημείο (0,-29) όπου έχουμε μία μικρή αύξηση και στο σημείο (0,-29) όπου παραμένουν σταθερές.Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχουμε μείωση των τάσεων σε όλα τα σημεία εκτός από το σημείο (0,-29) όπου έχουμε αύξηση.

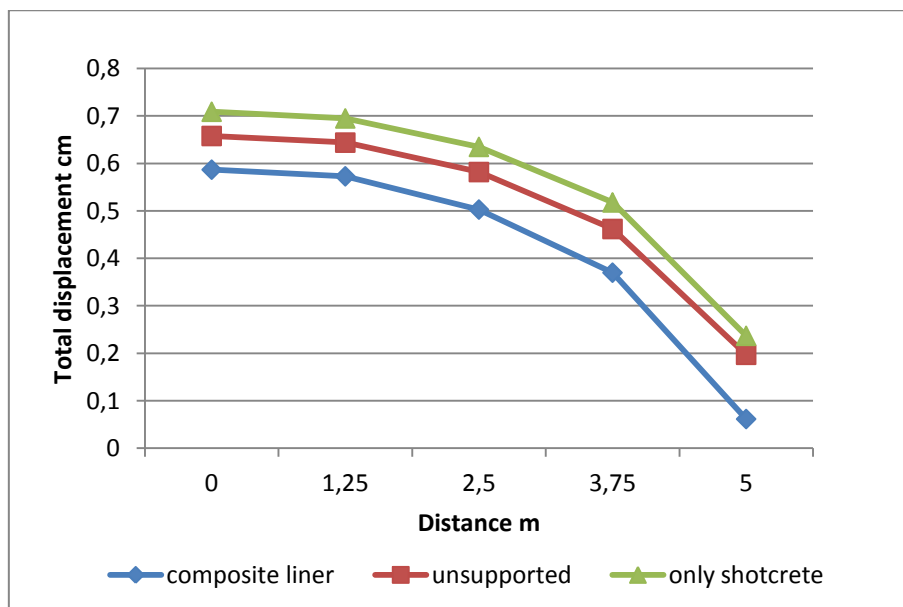


Διάγραμμα 7.3:Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	unsupported	Only shotcrete (MPa)	Προϋποστήριξη	Ποσοστιαία μείωση % Un-sh	Ποσοστιαία μείωση % Un-Προϋπ
(0,-29)	0,09	0,08	0,14	11,11111	-55,5556
(1.25,-29)	-0,04	-0,03	-0,06	25	-50
(2.5, -29)	-0,02	-0,03	-0,03	-50	-50
(3.75,-29)	-0,53	-0,9	-0,48	-69,8113	9,433962
(5,-29)	0,99	1,92	1,05	-93,9394	-6,06061

Πίνακας 7.5:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη,με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα για το 2^ο στάδιο έχουμε μικρή αύξηση των τάσεων σ_3 σχεδόν σε όλα τα σημεία με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης με εξαίρεση το σημείο (3.75,-29) όπου έχουμε μείωση. Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχουμε αύξηση των τάσεων σ_3 σχεδόν σε όλα τα σημεία εκτός από τα σημεία (0,-29), (1.25,-29), όπου έχουμε μείωση. Το αρνητικό πρόσημο στις τιμές των τάσεων υποδηλώνει ότι οι τάσεις έχουν αρνητική διεύθυνση, ενώ το αρνητικό πρόσημο στις ποσοστιαίες μειώσεις σημαίνει αύξηση.



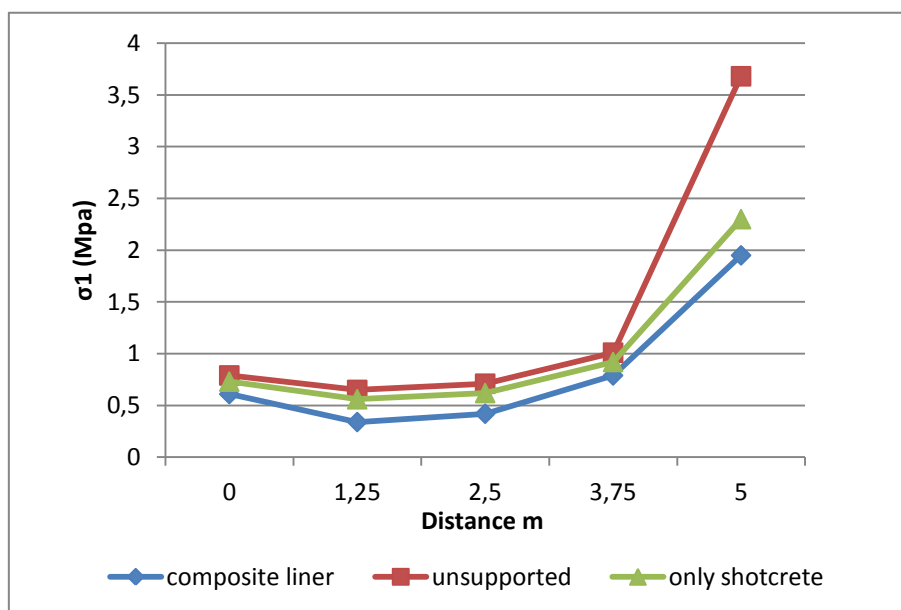
Διάγραμμα 7.4: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη και χωρίς για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupporte d (cm)	Only shotcret e (cm)	Προϋποσ τήριξη (cm)	Μείωση μετατοπίσεω ν (cm)	Ποσοστιαία μεταβολή %	Ποσοστιαία μεταβολή %
(0,-23)	0,658	0,709	0,587	0,071	10,79027	-7,75076
(1.25,-23)	0,644	0,695	0,573	0,071	11,02484	-7,91925
(2.5, -23)	0,582	0,635	0,503	0,079	13,57388	-9,10653
(3.75,-23)	0,462	0,518	0,370	0,092	19,91342	-12,1212
(5,-23)	0,197	0,237	0,0617	0,1353	68,6802	-20,3046

Πίνακας 7.6: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.6 για το 8^ο στάδιο οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από την εκσκαφή είναι μικρότερες του ενός εκατοστού, έτσι με την χρήση της

προϋποστήριξης μειώνονται σε όλα τα σημεία, ενώ με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνονται σε όλα τα σημεία.

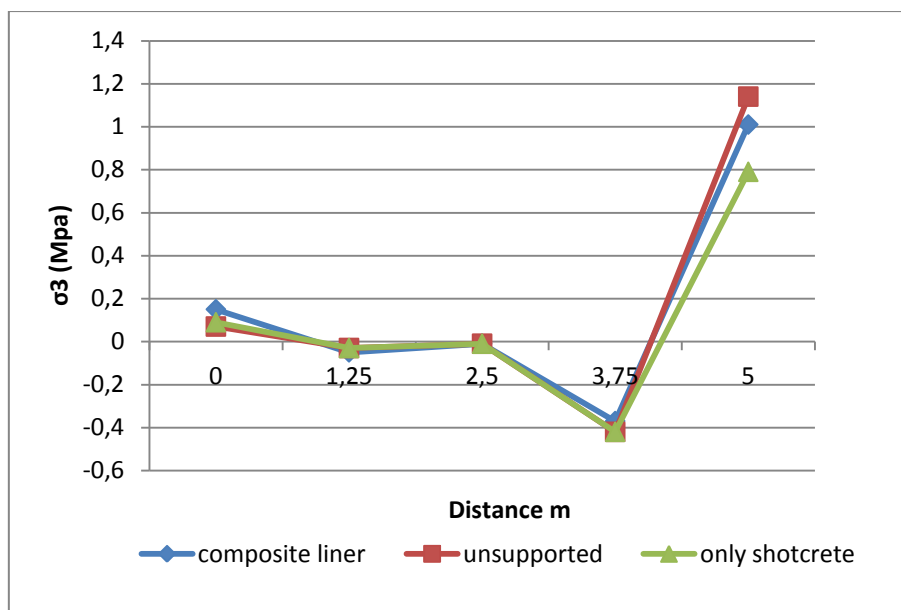


Διάγραμμα 7.5 : Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέ νες σημείων(x,y)	Unsupport ed (Mpa)	Only shotcrete(M Pa)	προϋποστήριξη(M Pa)	Μείωσ η % Un- Προϋπ	Μείωσ η % Un- Shotc
(0,-23)	0,79	0,73	0,61	22,784 81	7,5949 37
(1.25,-23)	0,65	0,56	0,34	47,692 31	13,846 15
(2.5, -23)	0,71	0,62	0,42	40,845 07	12,676 06
(3.75,-23)	1,01	0,92	0,79	21,782 18	8,9108 91
(5,-23)	3,68	2,3	1,95	47,010 87	37,5

Πίνακας 7.7: Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Στο 8^ο στάδιο με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης έχουμε μείωση των τάσεων σ_1 σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (1.25,-23), όπως και με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ_1 μειώνονται σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (5,-23).

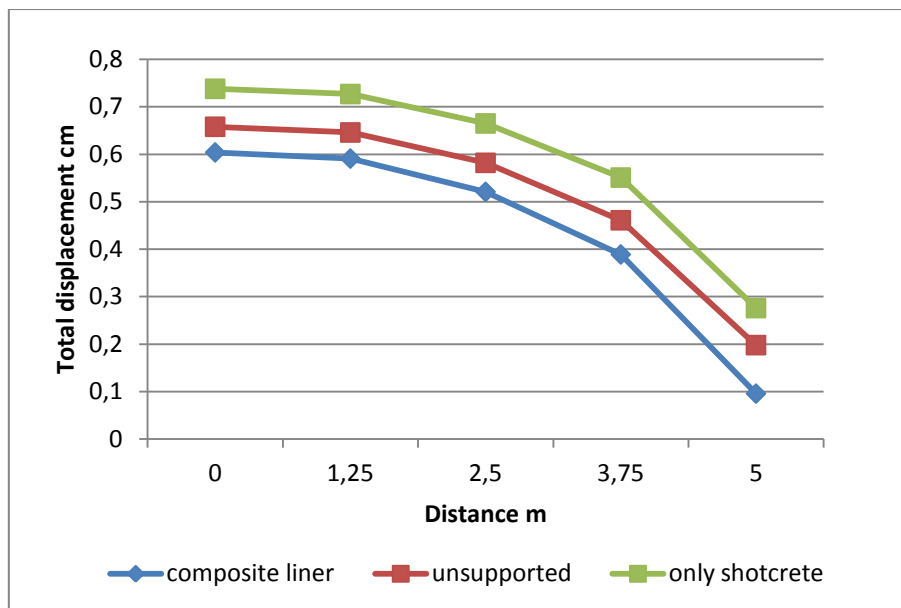


Διάγραμμα 7.6: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμ ένες σημείων(x, y)	Unsuppor ted (MPa)	Only shotcrete(M Pa)	Προϋποστήριξη(MPa)	Ποσοστι αία μεταβολ ή % Un- Προϋπ	Ποσοστι αία μεταβολ ή % Un- Shotc
(0,-23)	0,07	0,09	0,15	-114,286	-28,5714
(1.25,-23)	-0,03	-0,03	-0,05	-66,6667	0
(2.5, -23)	-0,01	-0,01	-0,01	0	0
(3.75,-23)	-0,42	-0,42	-0,37	11,90476	0
(5,-23)	1,14	0,79	1,01	11,40351	30,70175

Πίνακας 7.8: Μεταβολή τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 8^ο στάδιο

Σύμφωνα με το παραπάνω πίνακα 7.8 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης έχουμε αύξηση των τάσεων σ_3 στα σημεία (0,-23), (1.25,-23), εκτός από το σημείο (2.5, -23) που παραμένουν σταθερές και στα σημεία (3.75,-23) (5,-23) όπου μειώνονται. Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ_3 αυξάνονται στο σημείο (0,-23) παραμένουν σταθερές στα σημεία (1.25,-23), (2.5, -23), (3.75,-23) και στο σημείο (5,-23) μειώνονται.

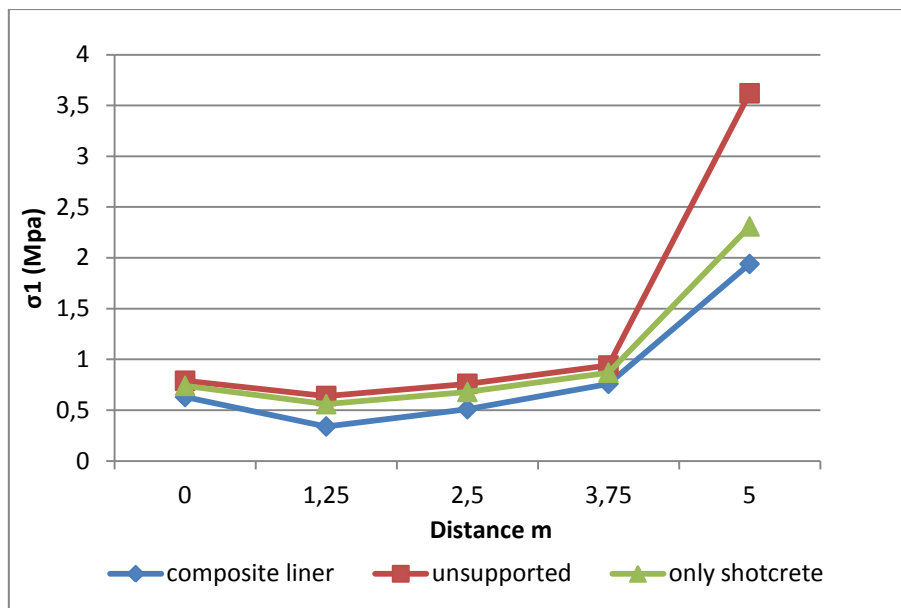


Διάγραμμα 7.7: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (cm)	Only shotcrete (cm)	Προϋποστήριξη (cm)	Ποσοστιαία μεταβολή %	Ποσοστιαία μεταβολή %
(0,-16)	0,658	0,738	0,604	8,2067	-12,1581
(1.25,-16)	0,646	0,727	0,591	8,5139	-12,5387
(2.5, -16)	0,582	0,665	0,521	10,481	-14,2612
(3.75,-16)	0,461	0,551	0,389	15,618	-19,5228
(5,-16)	0,198	0,276	0,0958	51,616	-39,3939
Μέσες τιμές	0,509	0,5914	0,44016	18,88722	-19,574927

Πίνακας 7.9: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.9 στο 15^ο στάδιο οι μετατοπίσεις του ανυποστηρίκτου τμήματος είναι μικρές. Με την χρήση της προϋποστήριξης οι μετατοπίσεις μειώνονται σε όλα τα σημεία που εξετάζονται, ενώ με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνονται σε όλα τα σημεία.

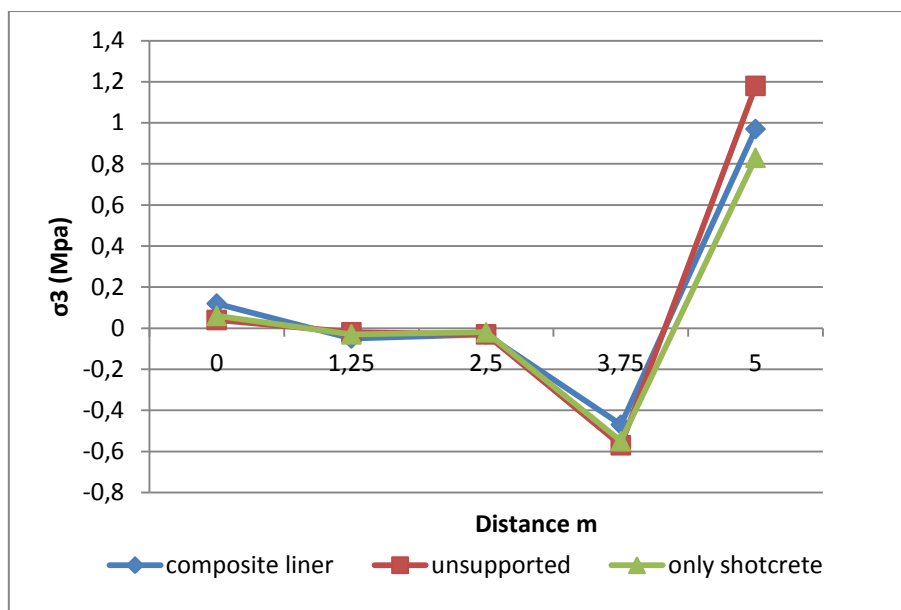


Διάγραμμα 7.8: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupport ed σ_1 (MPa)	Only shotcrete σ_1 (MPa)	Προϋποστήριξη σ_1 (MPa)	Μεταβολή % τάσεων των σ_1 Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων σ_1 % Un-Shotc
(0,-16)	0,79	0,74	0,63	20,253	6,329
(1.25,-16)	0,64	0,56	0,34	46,875	12,5
(2.5, -16)	0,76	0,68	0,51	32,894	10,526
(3.75,-16)	0,94	0,87	0,76	19,148	7,446
(5,-16)	3,62	2,31	1,94	46,408	36,187

Πίνακας 7.10 : Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.10 έχουμε μείωση των **τάσεων σ_1** σε όλα τα σημεία με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (5,-16).

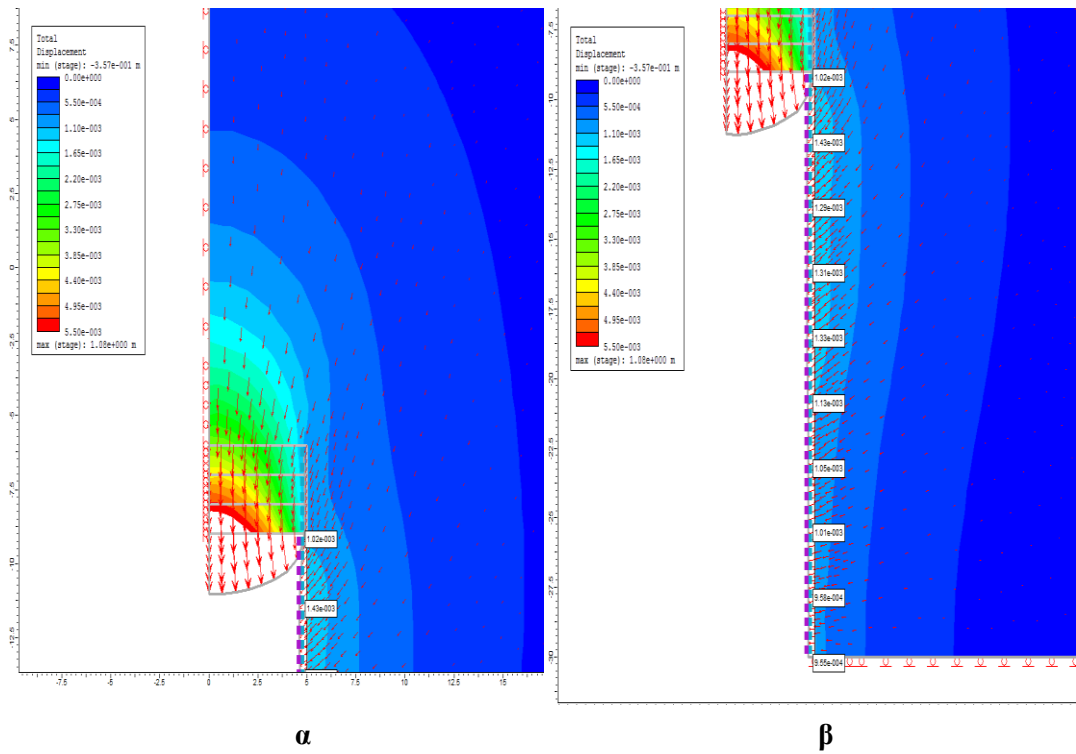


Διάγραμμα 7.9: Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

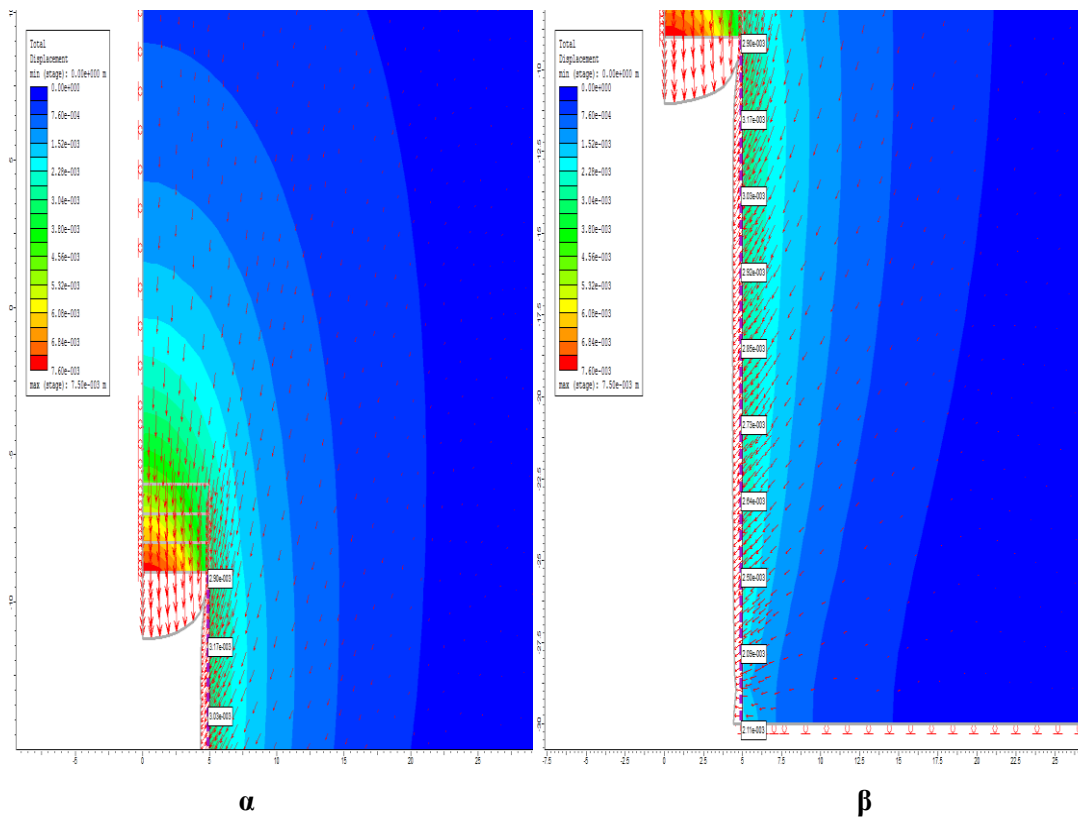
Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ3 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ3 Un- Shotc
(0,-16)	0,04	0,06	0,12	-200	-50
(1,25,-16)	-0,02	-0,03	-0,05	-150	-50
(2.5, -16)	-0,03	-0,02	-0,03	0	33,33333
(3.75,-16)	-0,57	-0,55	-0,47	17,54386	3,508772
(5,-16)	1,18	0,83	0,97	17,79661	29,66102

Πίνακας 7.11: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 15^ο στάδιο

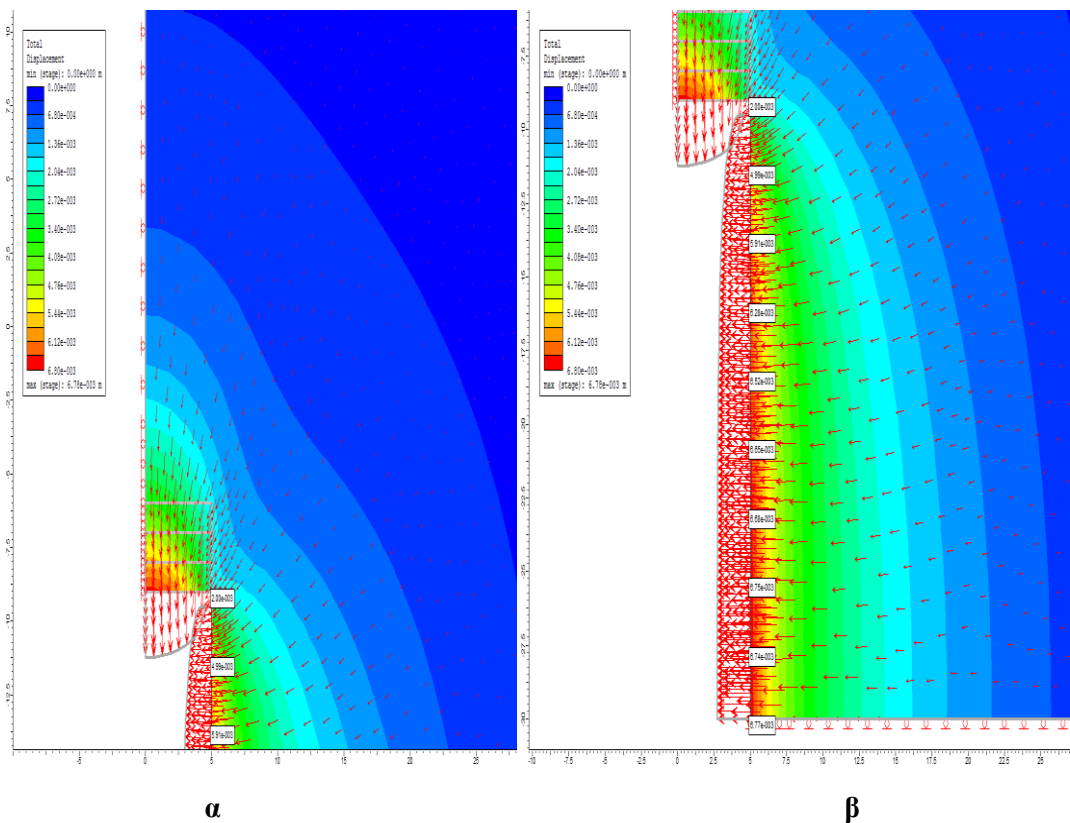
Σύμφωνα με τον πίνακα 7.11 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης έχουμε αύξηση των **τάσεων σ3** στα σημεία (0,-16), (1,25,-16) εκτός από το σημείο (2.5, -16), όπου παραμένουν σταθερές και στα σημεία (3.75,-16) (5,-16), όπου μειώνονται. Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 αυξάνονται στα σημεία (0,-16), (1,25,-16) ενώ μειώνονται στα σημεία (2.5, -16), (3.75,-16) (5,-16).



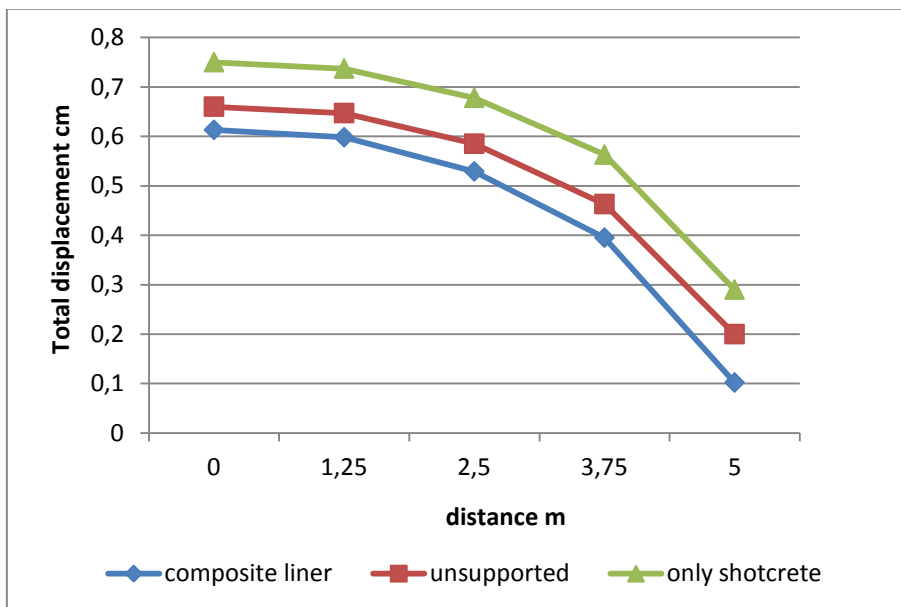
Εικόνα 7.3 (α, β):Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.5:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.5:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α χωρίς υποστήριξη

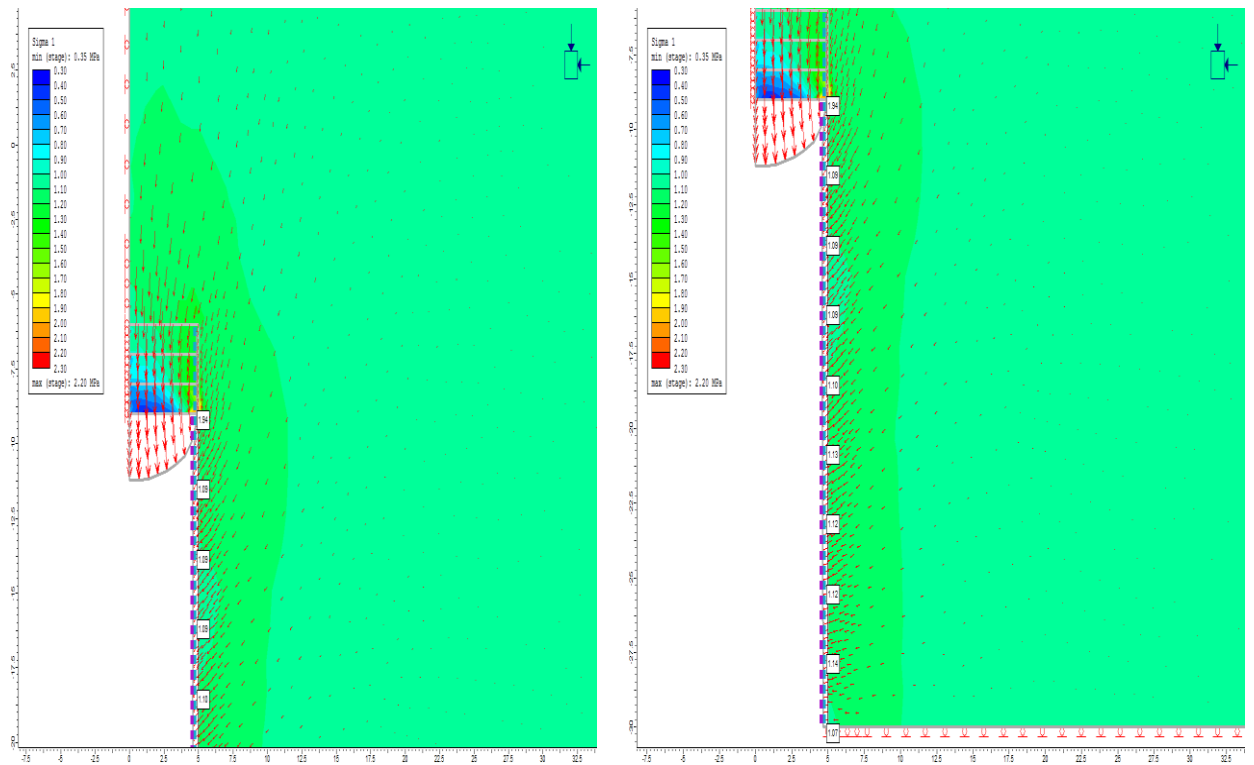


Διάγραμμα 7.10: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsup ported (cm)	Only shotcrete(c m)	Προϋπ οστήρι ξη (cm)	Ποσοστια ία μεταβολή % Un- Προϋπ	Ποσο στιαία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-9)	0,66	0,75	0,613	7,121	-13,636
(1.25,-9)	0,647	0,737	0,598	7,573	-13,910
(2.5, -9)	0,585	0,678	0,529	9,572	-15,897
(3.75,-9)	0,463	0,563	0,395	14,686	-21,598
(5,-9)	0,2	0,29	0,102	49	-45
Μέσες τιμές	0,511	0,6036	0,4474	17,590	-22,00

Πίνακας 7.12: Μετατοπίσεις με προϋποστήριξη, με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

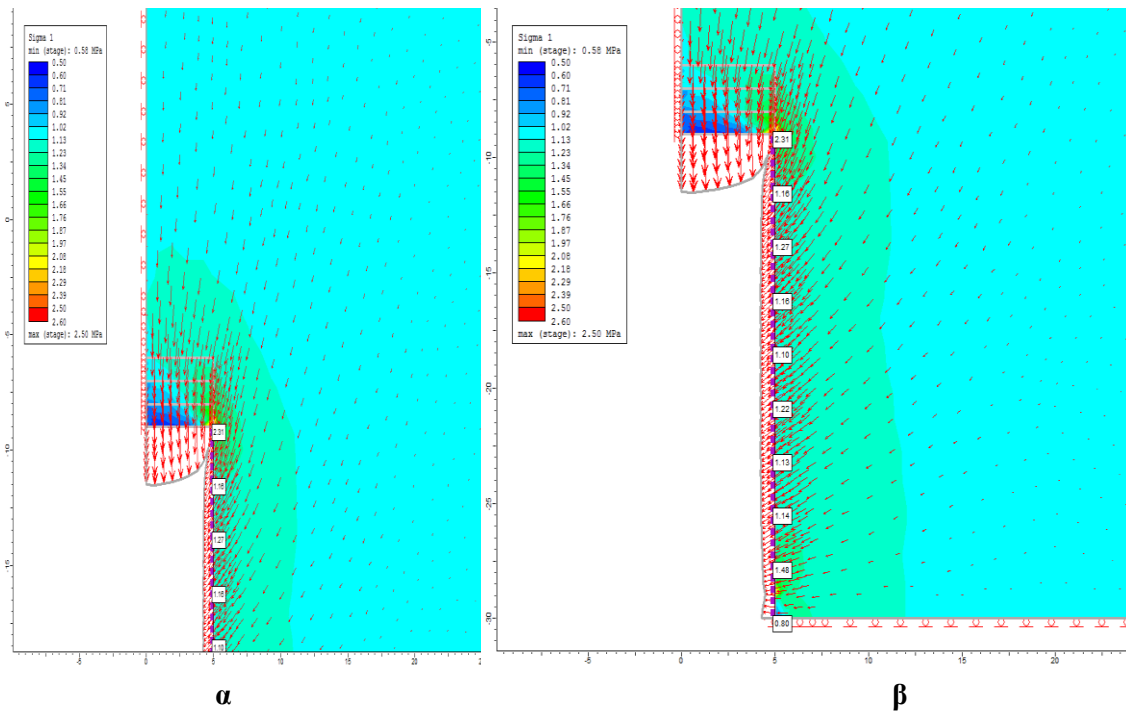
Σύμφωνα με τον πίνακα 7.12 στο 22^ο στάδιο έχουμε μείωση των μετατοπίσεων με την χρήση της προϋποστήριξης σε όλα τα σημεία, ενώ με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων σε όλα τα σημεία.



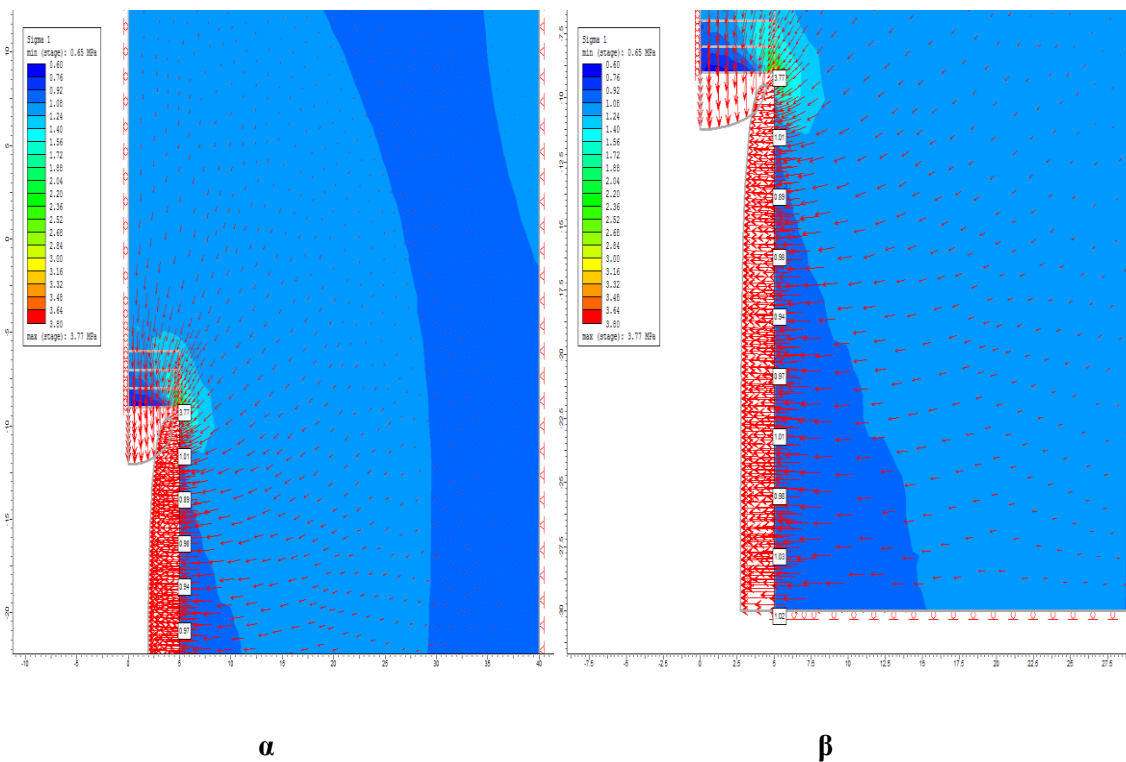
α

β

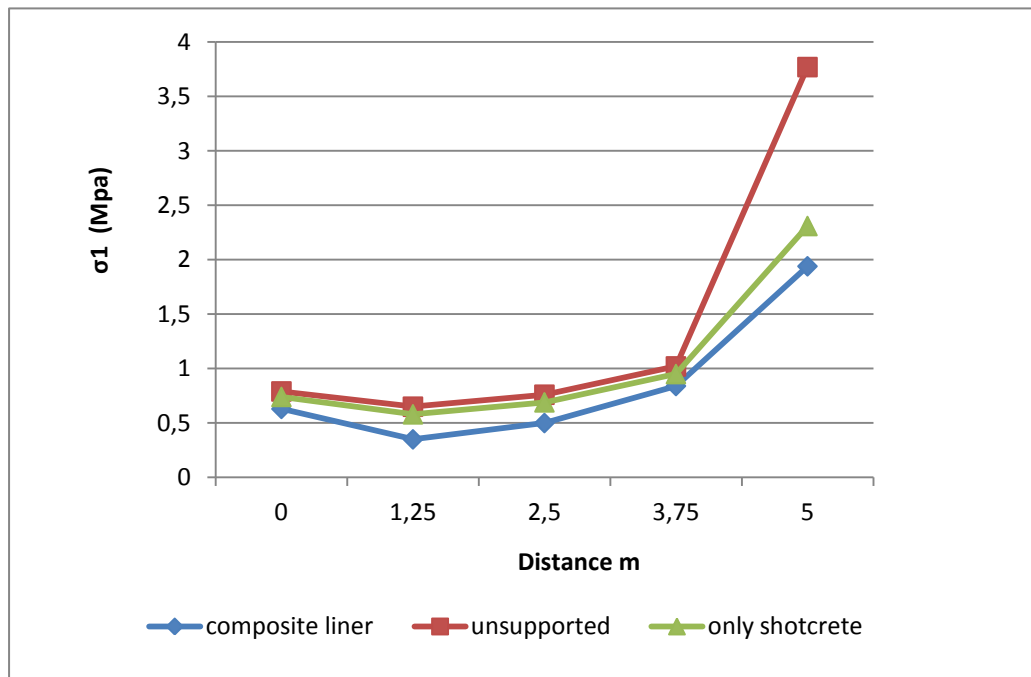
Εικόνα 7.6:(α,β)Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.7:(α,β)Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.8:(α,β)Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α χωρίς υποστήριξη

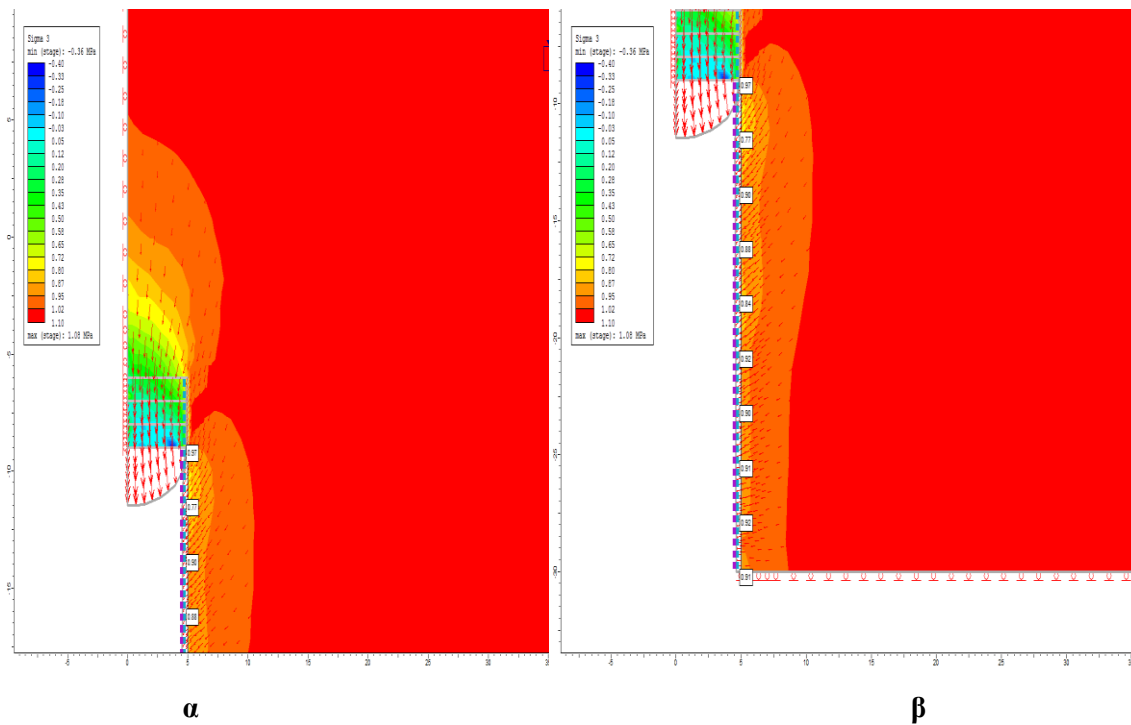


Διάγραμμα 7.11: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

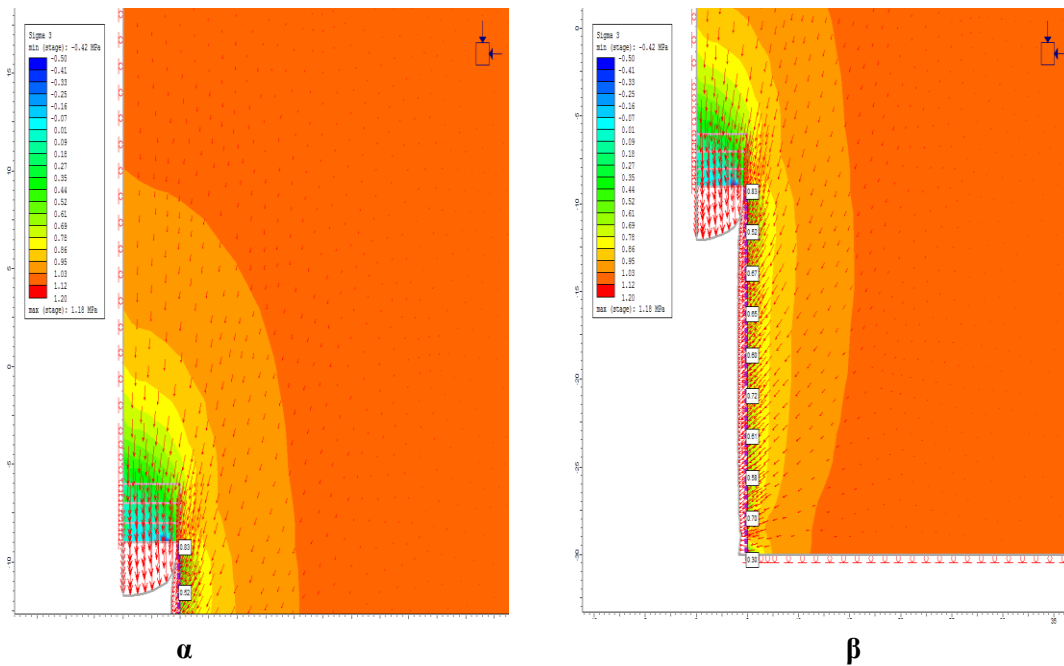
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupporte d (MPa)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Μεταβολή % των τάσεων σ_1 Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων σ_1 Un-Shote
(0,-9)	0,79	0,74	0,63	20,253	6,329
(1.25,-9)	0,65	0,58	0,35	46,153	10,769
(2.5, -9)	0,76	0,69	0,5	34,21	9,210
(3.75,-9)	1,02	0,95	0,84	17,647	6,862
(5,-9)	3,77	2,31	1,94	48,541	38,726
Μέσες τιμές	1,398	1,054	0,852	33,361	14,3796

Πίνακας 7.13: Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

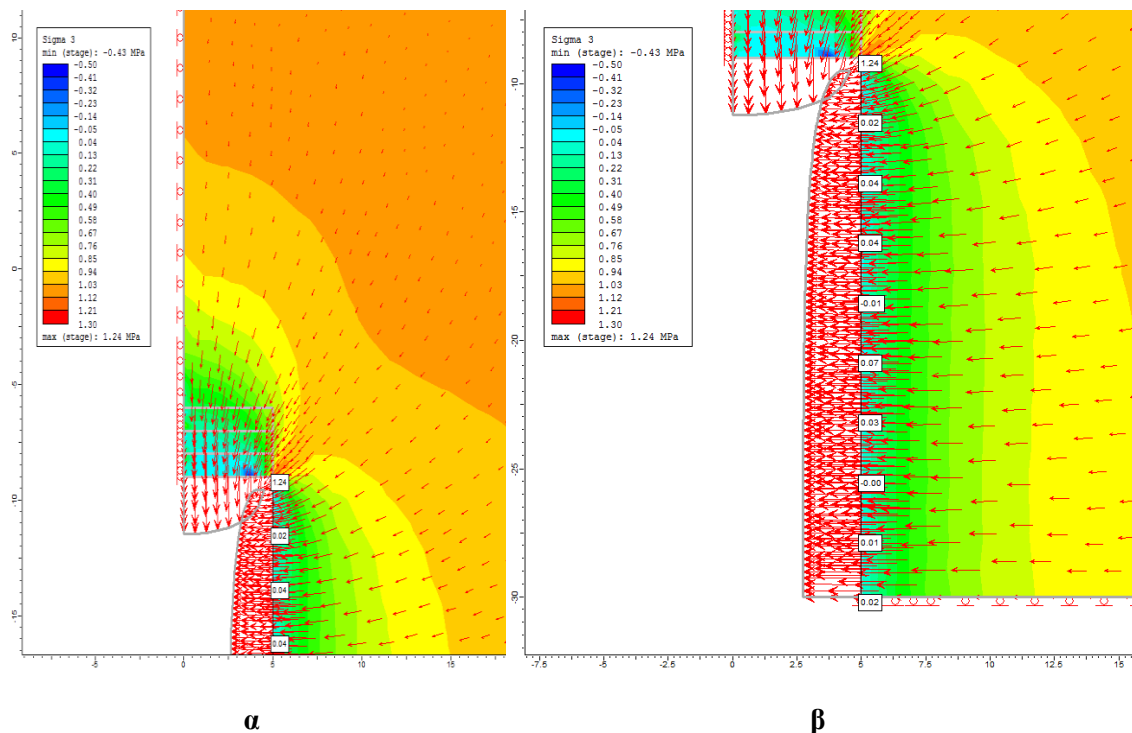
Από το πίνακα 7.13 βλέπουμε ότι σε όλα τα σημεία έχουμε μείωση των **τάσεων σ_1** με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ενώ στο σημείο (5,-9) εντοπίζεται η μεγαλύτερη μείωση.



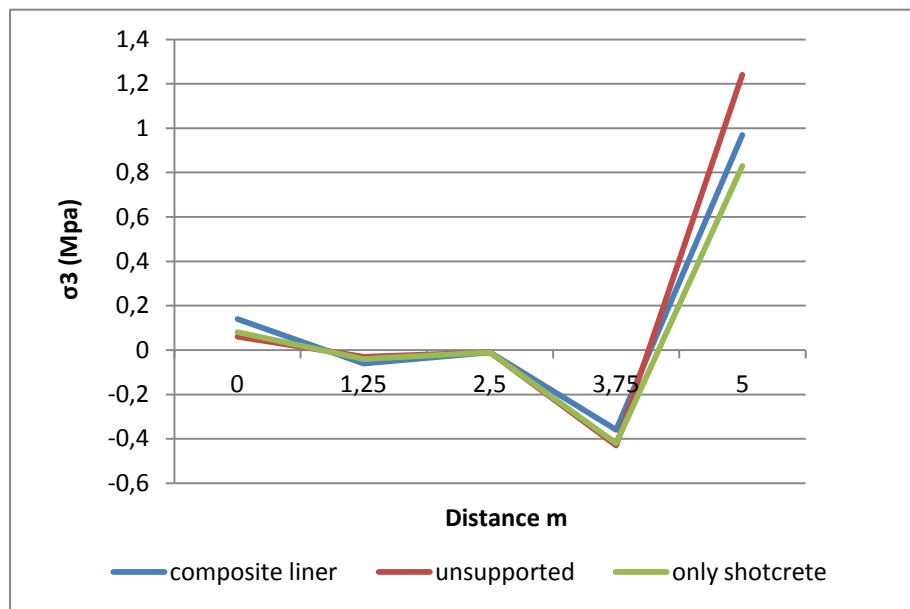
Εικόνα 7.9:(α,β) Τάσεις σ_3 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α



Εικόνα 7.10:(α,β) Τάσεις σ_3 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α



Εικόνα 7.11:(α,β)Τάσεις σ_3 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α χωρίς υποστήριξη



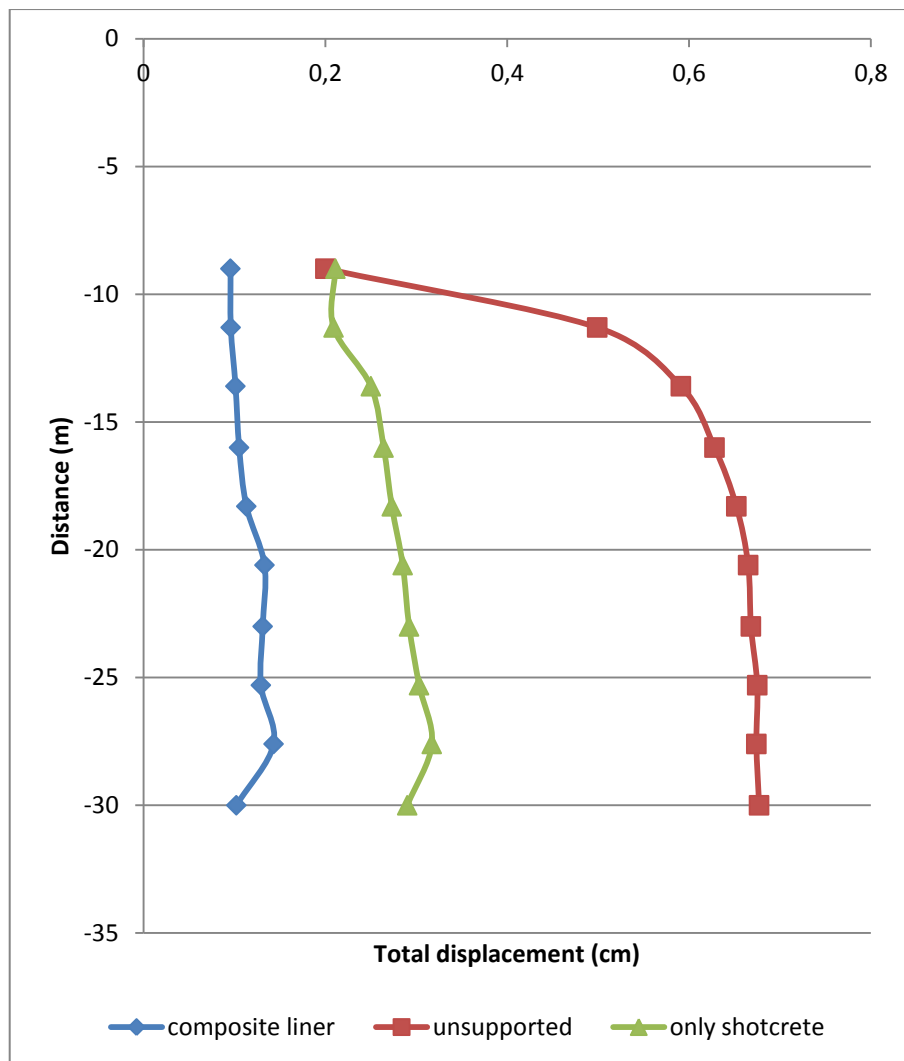
Διάγραμμα 7.12: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (MPa)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Μεταβολή % των τάσεων σ3 Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων των σ3 Un-Shotc
(0,-9)	0,06	0,08	0,14	-133,333	-33,333
(1.25,-6)	-0,03	-0,04	-0,06	-100	-33,333
(2.5, -6)	-0,01	-0,01	-0,01	0	0
(3.75,-6)	-0,43	-0,42	-0,36	16,279	2,325
(5,-9)	1,24	0,83	0,97	21,774	33,064

Πίνακας 7.14:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.14 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης στο 22^ο στάδιο οι τάσεις σ3 αυξάνονται στα σημεία (0,-9) (1.25,-9) στο σημείο (2,5,-9) μένουν σταθερές και στα σημεία (3.75,-9) , (5,-9) μειώνονται. Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 αυξάνονται στο σημείο (0,-9), (1.25,-9) μένουν σταθερές στα σημεία (2.5,-9) και στα σημεία(3.75,-9),(5,-9) μειώνονται.

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα και ο πίνακας με τις τιμές των μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας για το 22^ο στάδιο του σχηματισμού 9.2α.



Διάγραμμα 7.13: Διαγράμματα μετατοπίσεων ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων	Unsupporte d (cm)	Only shotcrete(cm)	Προϋποστήριξη (cm)	Ποσοστιαία μείωση % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μείωση % Un-Shotc
(5,-30)	0,677	0,211	0,0954	85,908	68,833
(5,-27,6)	0,674	0,209	0,0958	85,786	68,991
(5,-25,3)	0,675	0,250	0,101	85,037	62,962
(5,-23)	0,668	0,264	0,105	84,28143	60,479

(5,-20,6)	0,665	0,273	0,113	83,007	58,947
(5,-18,3)	0,652	0,285	0,133	79,601	56,288
(5,-16)	0,628	0,292	0,131	79,140	53,503
(5,-13,6)	0,591	0,303	0,129	78,172	48,730
(5,-11,3)	0,499	0,317	0,143	71,342	36,472
(5,-9)	0,2	0,290	0,102	49	-45
Μέσες τιμές	0,5929	0,2694	0,11482	78,127	47,02

Πίνακας 7.15: Μεταβολή ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2α για το 22^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.15 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης στο 22^ο στάδιο έχουμε μία μεγάλη μείωση των μετατοπίσεων και στα 10 σημεία που εξετάζονται με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (0,-30) και να ξεπερνά το 85%. Με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις μειώνονται σχεδόν στο μισό σε σχέση με τη προϋποστήριξη στα περισσότερα σημεία εκτός από το σημείο (0,-9) , όπου έχουμε αύξηση.

7.3. Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2β

Στον πίνακα 7.16 που ακολουθεί δίνονται οι μέγιστες τιμές τάσεων σ_1, σ_3 , ολικές μετατοπίσεις που προκύπτουν για ανυποστήρικτο μέτωπο, μέτωπο υποστηριγμένο με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μέτωπο υποστηριγμένο με προϋποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο , 8^ο , 15^ο , 22^ο στάδιο.

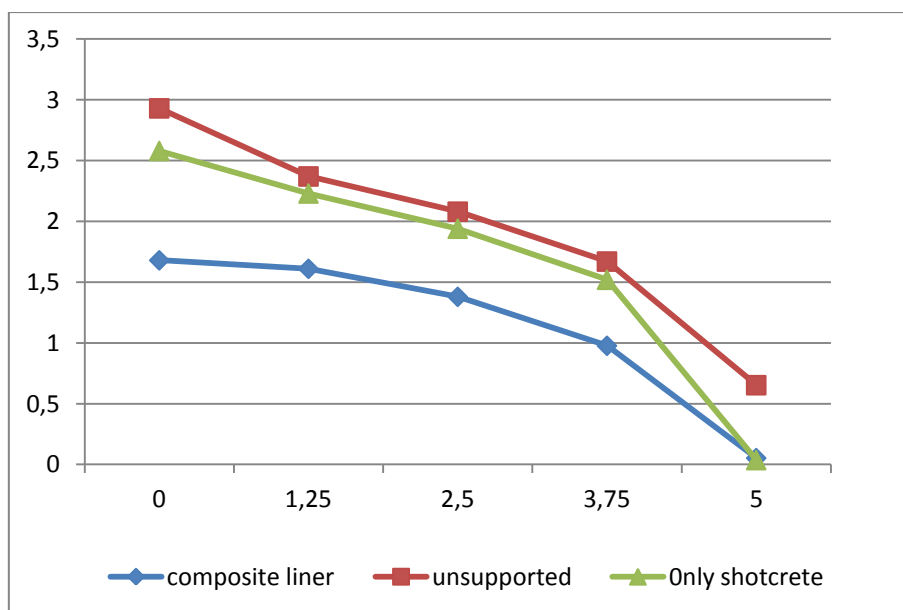
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	1,78
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	1,06
(2,5,-29)	Οριζόντιες (cm)	0,206
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β shotcrete μέγιστες τιμές 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	2,87
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	2,05
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,58

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β unsupported μέγιστες τιμές 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ1 (Mpa)	3,54
(5,-29)	σ3 (Mpa)	1,11
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,93
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	1,67
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,07
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	1,84
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β shotcrete μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	2,08
(5,-23)	σ3 (Mpa)	0,88
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,58
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β unsupported μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	3,59
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,16
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,49
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	1,69
(5,-16)	σ3 (Mpa)	1,01
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,08
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β shotcrete μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	2,03
(5,-16)	σ3 (Mpa)	0,9
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	3,43
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β unsupported μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	3,64
(5,-16)	σ3 (Mpa)	1,24
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	3,41
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 22^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	1,7
(5,-9)	σ3 (Mpa)c	1,02
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,04
Συντεταγμένες	Σχηματισμός 9.2β shotcrete μέγιστες τιμές 22^ο στάδιο	

σημείων(x,y)		
(5,-9)	σ_1 (Mpa)	2,03
(5,-9)	σ_3 (Mpa)	0,88
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,82
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2β unsupported μέγιστες τιμές 22° στάδιο	
(5,-9)	σ_1 (Mpa)	3,8
(5,-9)	σ_3 (Mpa)	1,27
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,55

Πίνακας 7.16: Μέγιστες τιμές σ_1, σ_3 , ολικές μετατοπίσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο και μέτωπο υποστηριγμένο για τον σχηματισμό 9.2β και για τα στάδια 2, 8, 15, 22.

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα και οι πίνακες των τάσεων σ_1, σ_3 και ολικές μετατοπίσεις που προκύπτουν για ανυποστήρικτο μέτωπο και μέτωπο υποστηριγμένο με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τον σχηματισμό 9.2β και για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

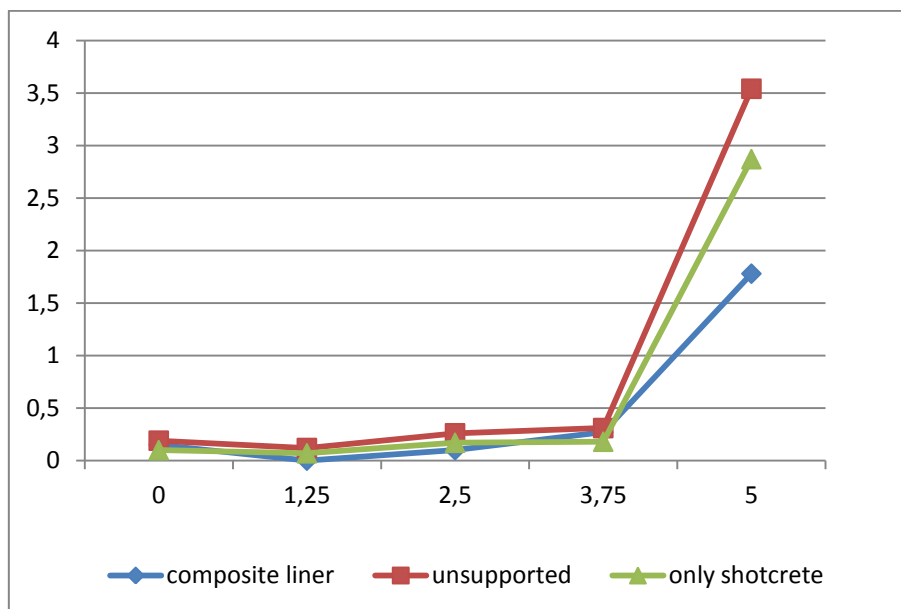


Διάγραμμα 7.14: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2° στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(c m)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστια ία μεταβολή % Un- Προϋπ	Ποσοστια ία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-29)	2,93	2,58	1,68	42,66212	11,94539
(1.25,-29)	2,37	2,23	1,61	32,06751	5,907173
(2.5, -29)	2,08	1,94	1,38	33,65385	6,730769
(3.75,-29)	1,67	1,52	0,977	41,49701	8,982036
(5,-29)	0,653	0,0368	0,0532	91,85299	94,36447

Πίνακας 7.18: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.18 βλέπουμε ότι οι μετατοπίσεις στο 2^ο στάδιο με τις τοποθετήσεις της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (0,-29).

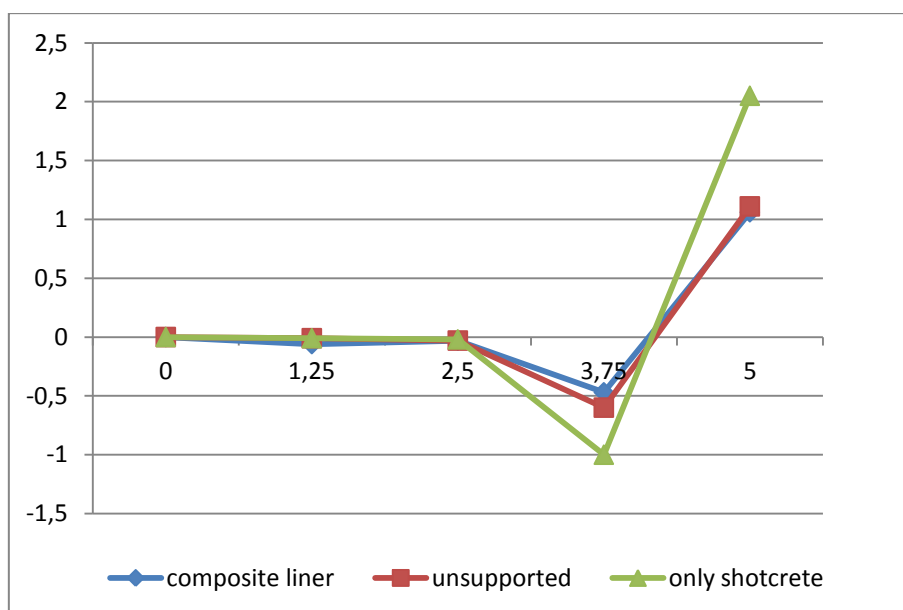


Διάγραμμα 7.15: Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Shotc
(0,-29)	0,19	0,1	0,15	21,05263	47,36842
(1.25,-29)	0,12	0,07	0	100	41,66667
(2.5, -29)	0,26	0,17	0,1	61,53846	34,61538
(3.75,-29)	0,31	0,18	0,27	12,90323	41,93548
(5,-29)	3,54	2,87	1,78	49,71751	18,92655

Πίνακας 7.19:Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.19 οι τάσεις σ1 με την χρήση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία.

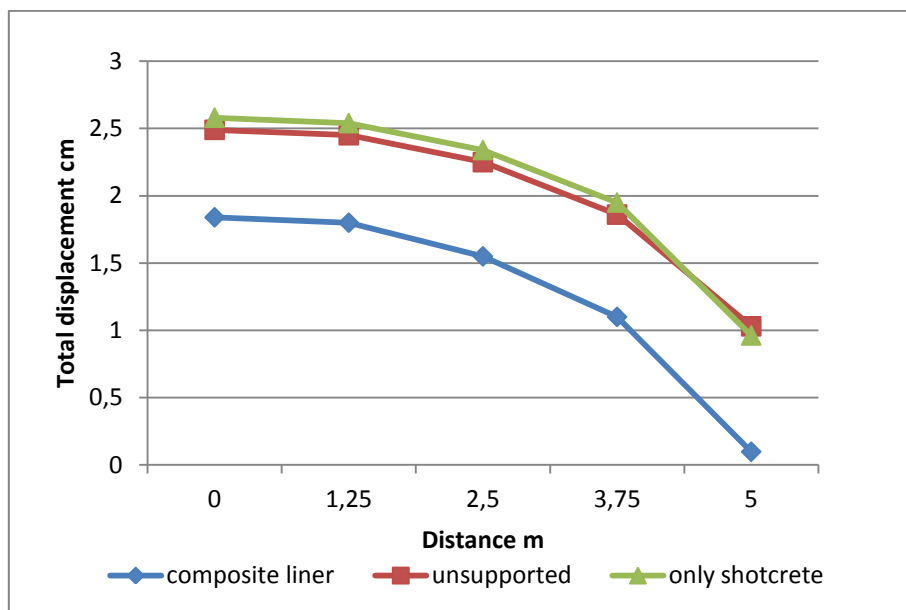


Διάγραμμα 7.16:Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % τω ν τάσεων σ3 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ3 Un- Shotc
(0,-29)	0	0	0	0	0
(1.25,-29)	-0,01	-0,01	-0,06	-500	0
(2.5, -29)	-0,03	-0,02	-0,03	0	33,33333
(3.75,-29)	-0,6	-1	-0,47	21,66667	-66,6667
(5,-29)	1,11	2,05	1,06	4,504505	-84,6847

Πίνακας 7.20: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.20 με την χρήση της προϋποστήριξης οι τάσεις σ3 μένουν σταθερές στα σημεία (0,-29), (2.5, -29) αυξάνονται στο σημείο (1.25,-29) μειώνονται στα σημεία (3.75,-29), (5,-29). Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις μένουν σταθερές στα σημεία (0,-29), (2.5, -29) μειώνονται στο σημείο (3.75,-29) και αυξάνονται στα σημεία (3.75,-29), (5,-29).

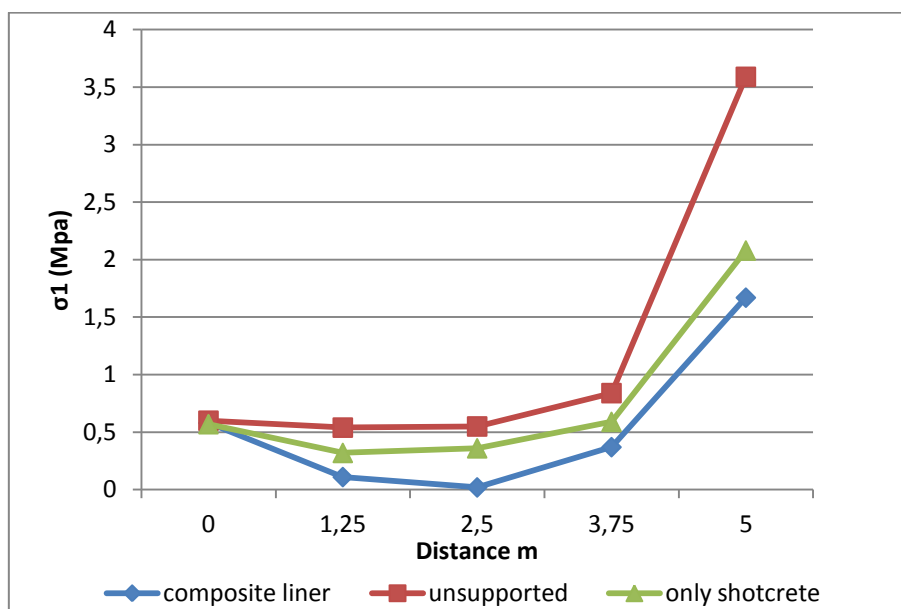


Διάγραμμα 7.17: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcre te (MPa)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστιαία μεταβολή μετατοπίσε ων % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μεταβολή μετατοπίσε ων % Un-Shotc
(0,-23)	2,49	2,58	1,84	26,1	-3,6
(1.25,-23)	2,45	2,54	1,8	25,3	-3,67
(2.5, -23)	2,25	2,34	1,55	31,1	-4
(3.75,-23)	1,86	1,95	1,1	40,8	-4,83
(5,-23)	1,03	0,962	0,0981	90,4	6,60

Πίνακας 7.21: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Σύμφωνα με τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τον πίνακα 7.21 και το διάγραμμα 7.16 οι μετατοπίσεις στο 8^ο στάδιο με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης μειώνονται σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (5,-23). Με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετατοπίσεις αυξάνονται σε όλα τα σημεία.

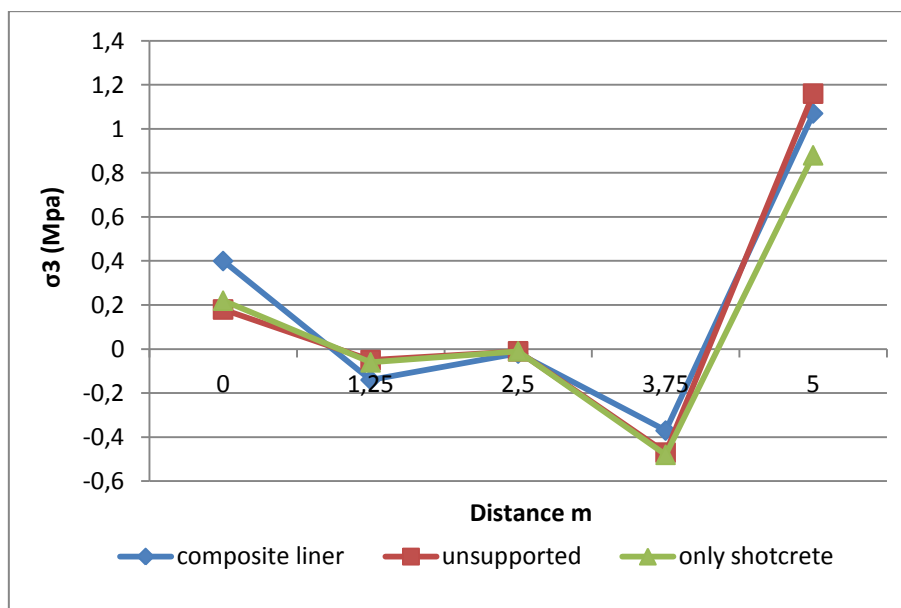


Διάγραμμα 7.18: Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Shotc
(0,-23)	0,6	0,57	0,58	3,333333	5
(1.25,-23)	0,54	0,32	0,11	79,62963	40,74074
(2.5, -23)	0,55	0,36	0,02	96,36364	34,54545
(3.75,-23)	0,84	0,59	0,37	55,95238	29,7619
(5,-23)	3,59	2,08	1,67	53,48189	42,06128

Πίνακας 7.22: Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.22 οι τάσεις σ1 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία.

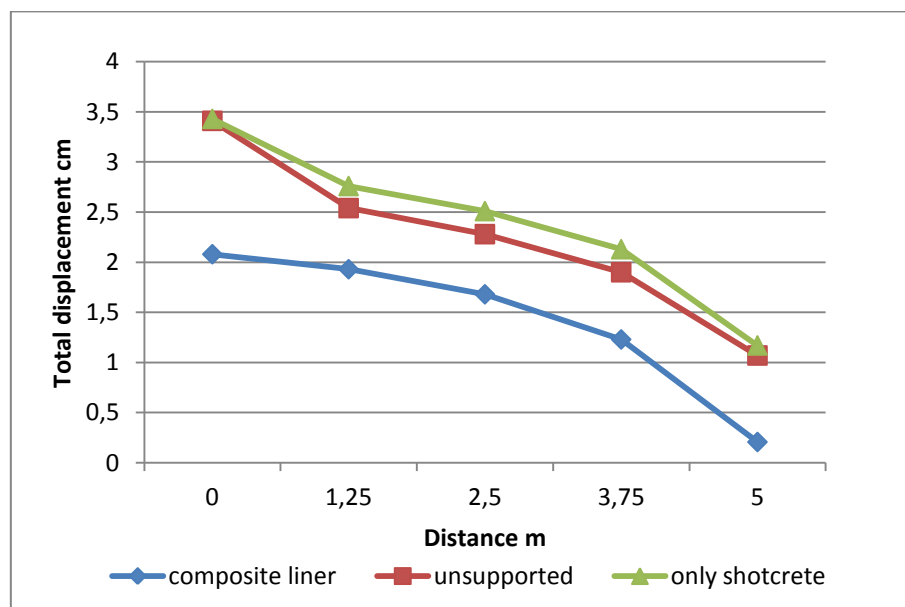


Διάγραμμα 7.19: Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % τάσεων των σ3 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % τάσεων των σ3 Un- Shotc
(0,-16)	0,18	0,22	0,4	-122,222	-22,2222
(1.25,-16)	-0,05	-0,06	-0,14	-180	-20
(2.5, -16)	-0,01	-0,01	-0,02	-100	0
(3.75,-16)	-0,47	-0,48	-0,37	21,2766	-2,12766
(5,-16)	1,16	0,88	1,07	7,758621	24,13793

Πίνακας 7.23:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 8^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.23 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης έχουμε αύξηση των **τάσεων σ3** στα σημεία (0,-16), (1.25,-16), (2.5, -16) και στα υπόλοιπα σημεία έχουμε μείωση. Με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 αυξάνονται στα σημεία (0,-16), (1.25,-16) (3.75,-16) μένουν σταθερές στο σημείο (2.5,-16) και μειώνονται στο σημείο (5,-16).

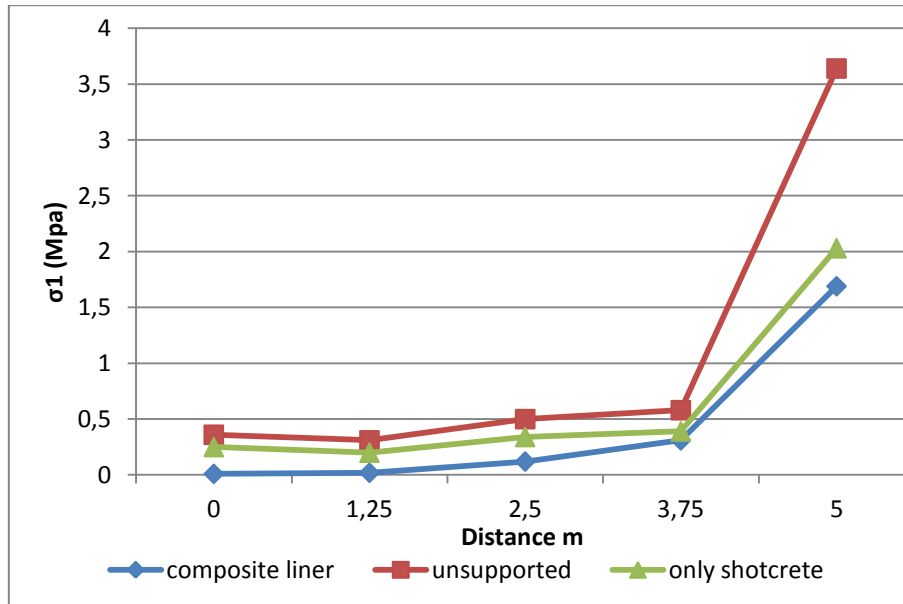


Διάγραμμα 7.20:Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsuppor- ted (cm)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποσ- τήριξη (cm)	Ποσοστιαία μεταβολή μετατοπίσεω v % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μεταβολή μετατοπίσεω v % Un-Shotc
(0,-16)	3,41	3,43	2,08	39,00293	-0,58651
(1.25,-16)	2,54	2,76	1,93	24,01575	-8,66142
(2.5, -16)	2,28	2,51	1,68	26,31579	-10,0877
(3.75,-16)	1,9	2,13	1,23	35,26316	-12,1053
(5,-16)	1,07	1,17	0,207	80,65421	-9,34579
Μέσες τιμές	2,24	2,4	1,4254	41,050368	-8,157344

Πίνακας 7.24: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.24 και το διάγραμμα 7.20 οι μετατοπίσεις στο 15^ο στάδιο μειώνονται με την χρήση της προϋποστήριξης με την μεγαλύτερη μείωση να είναι στο σημείο (5,-16). Με την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις αυξάνονται σε όλα τα σημεία που εξετάζονται.

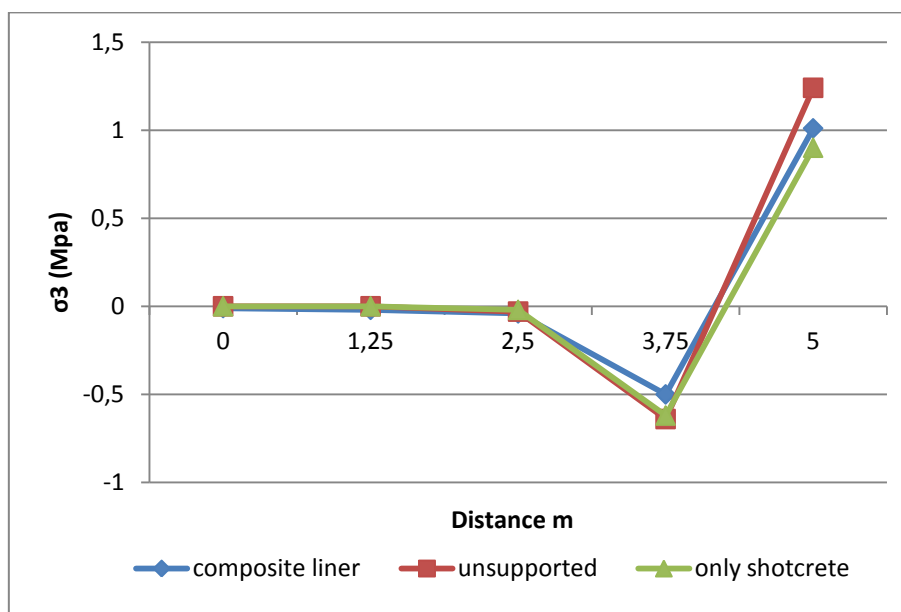


Διάγραμμα 7.21: Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Shotc
(0,-16)	0,36	0,25	0,01	97,22222	30,55556
(1.25,-16)	0,31	0,2	0,02	93,54839	35,48387
(2.5, -16)	0,5	0,34	0,12	76	32
(3.75,-16)	0,58	0,39	0,31	46,55172	32,75862
(5,-16)	3,64	2,03	1,69	53,57143	44,23077

Πίνακας 7.25: Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.25 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ1 μειώνονται σε όλα τα σημεία.

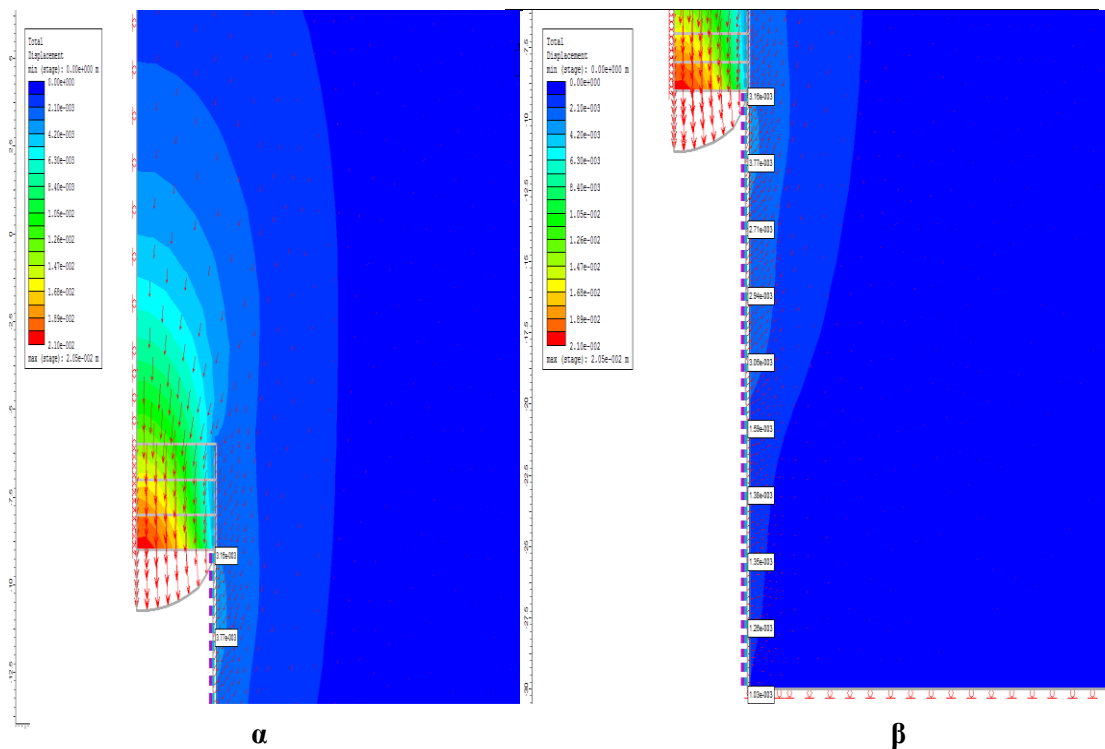


Διάγραμμα 7.22: Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

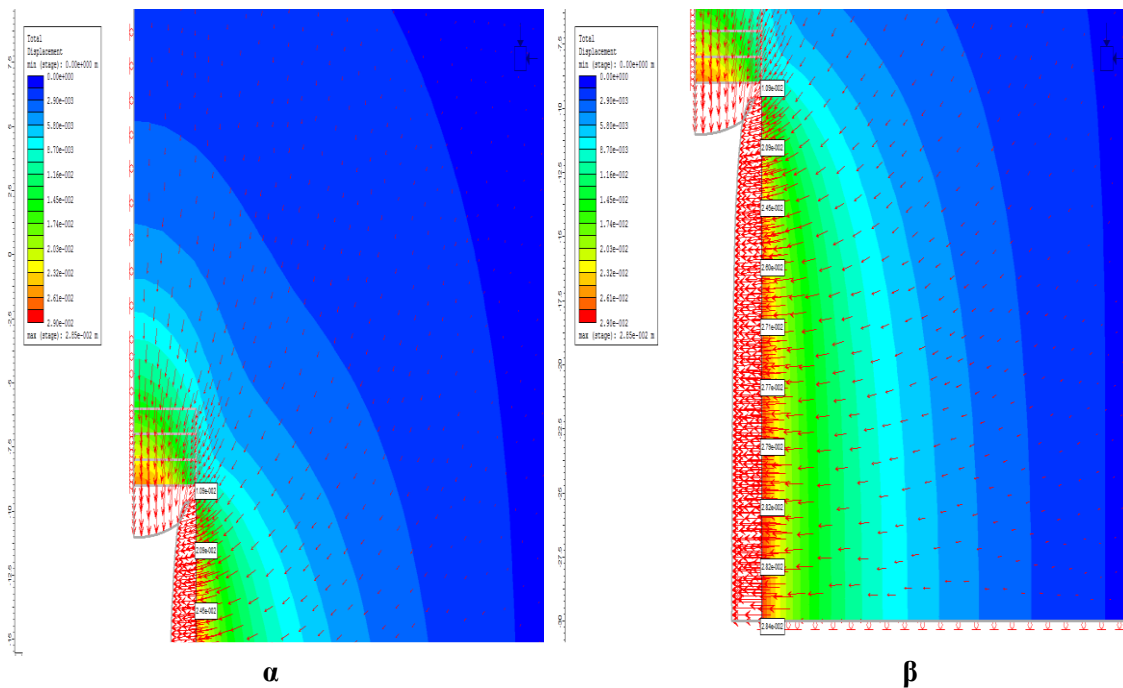
Συντεταγμέ νες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(M Pa)	Προϋποστήριξη(M Pa)	Μείωσ η τάσεω ν των σ3 % μεταξύ Un- Προϋπ	Μείωσ η τάσεω ν των σ3 % μεταξύ Un- Shotc
(0,-16)	0	0	-0,01	-100	0
(1.25,-16)	0	0	-0,02	-100	0
(2.5, -16)	-0,03	-0,02	-0,04	-33,333	-66,636
(3.75,-16)	-0,64	-0,62	-0,5	21,875	-96,235
(5,-16)	1,24	0,9	1,01	18,548	-71,340

Πίνακας 7.26: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 15^ο στάδιο

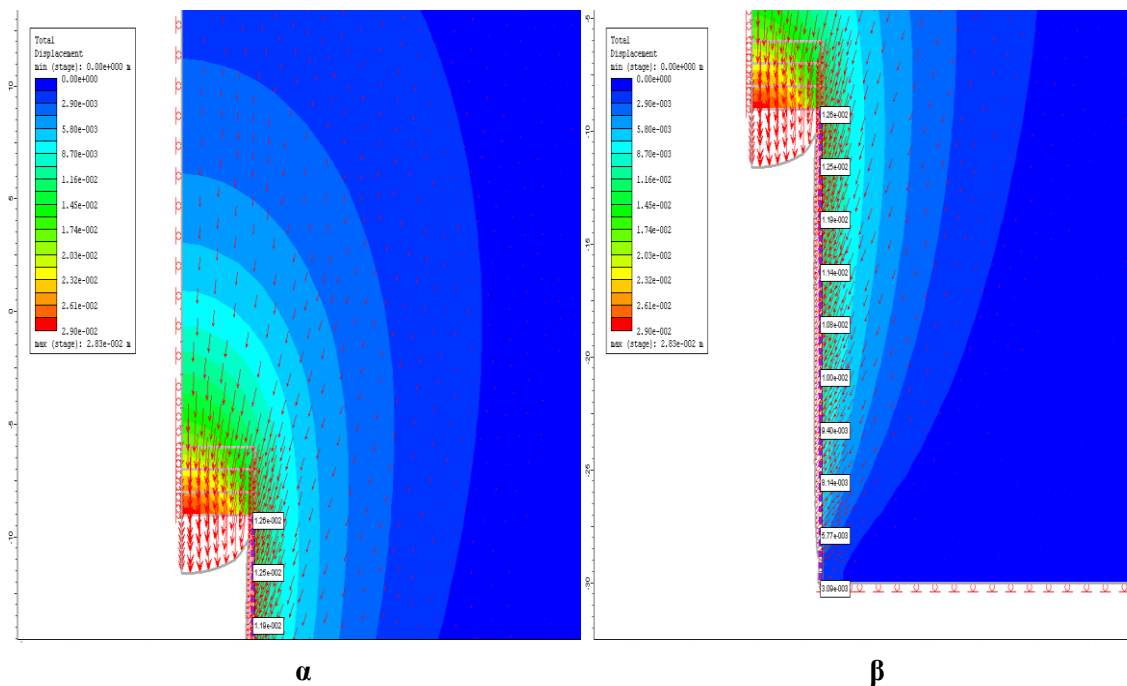
Σύμφωνα με τον πίνακα 7.26 οι τάσεις σ3 με την χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται στα σημεία (3.75 -16), (5,-16) και στα υπόλοιπα σημεία αυξάνονται. Με την χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 μένουν σταθερές στα σημεία (0,-16), (1.25,-16) και αυξάνονται στα σημεία (2.5,-16), (3.75,-16), (5,-16).



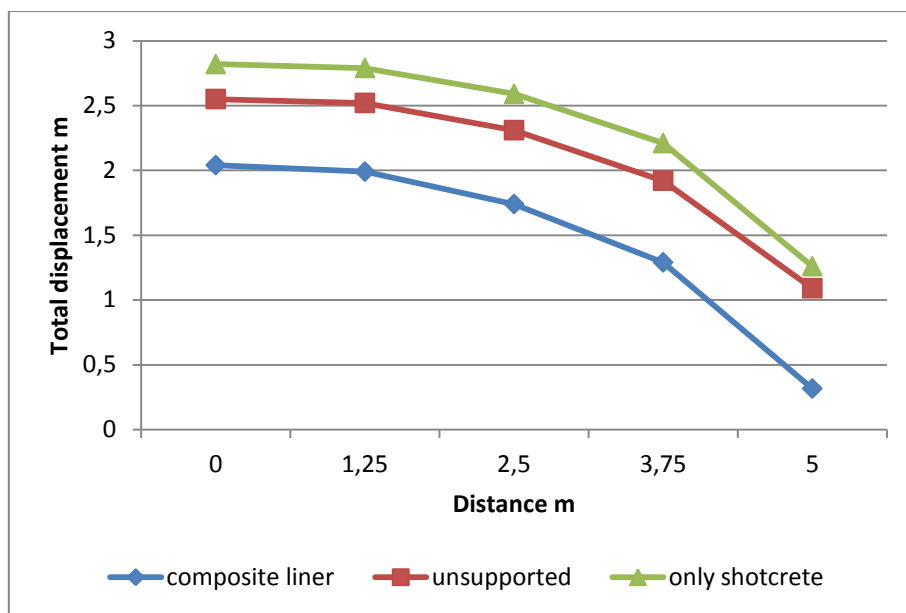
Εικόνα 7.11:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 25^{οο} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.13:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 25^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β χωρίς υποστήριξη



Εικόνα 7.12:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

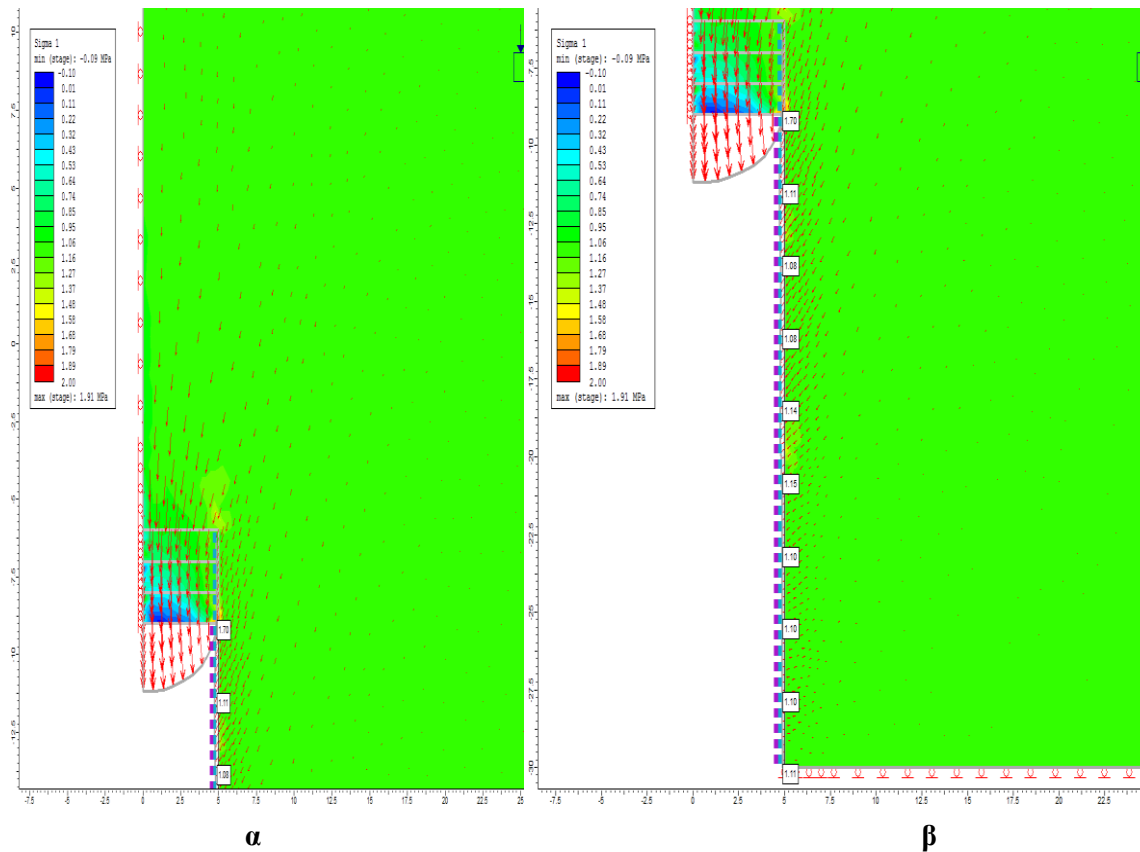


Διάγραμμα 7.23: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

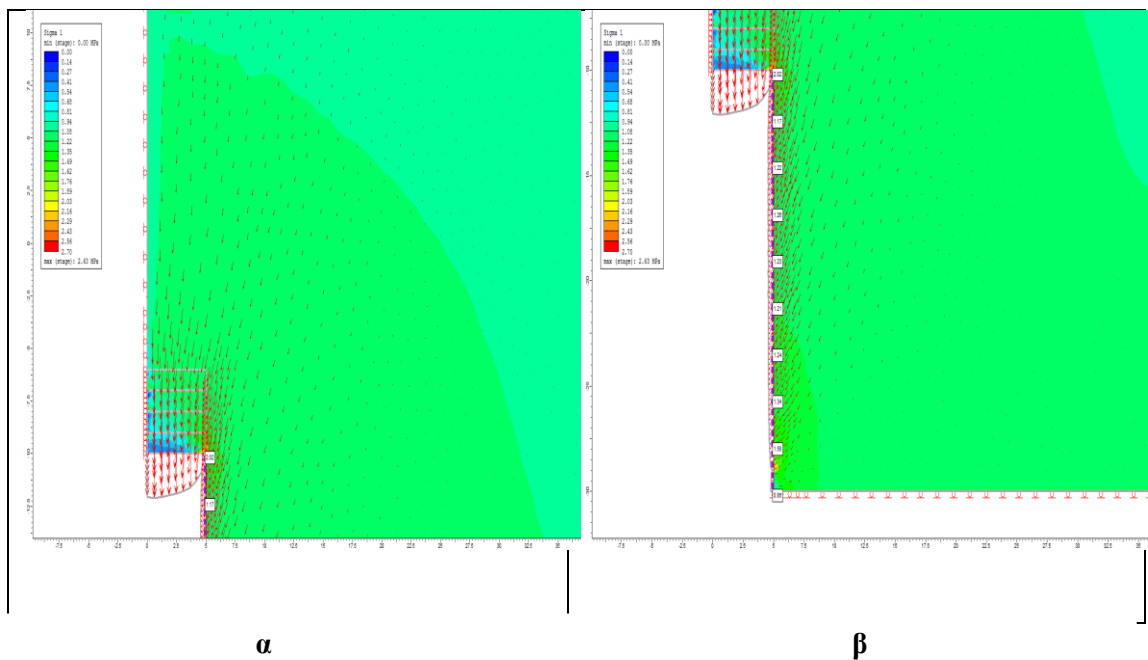
Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστιαί α μεταβολή % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-9)	2,55	2,82	2,04	20	-10,5882
(1.25,-9)	2,52	2,79	1,99	21,031	-10,714
(2.5, -9)	2,31	2,59	1,74	24,6753	-12,121
(3.75,-9)	1,92	2,21	1,29	32,812	-15,104
(5,-9)	1,09	1,26	0,316	71,009	-15,596
Μέσες τιμές	2,078	2,334	1,4752	33,905	-12,824

Πίνακας 7.27: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

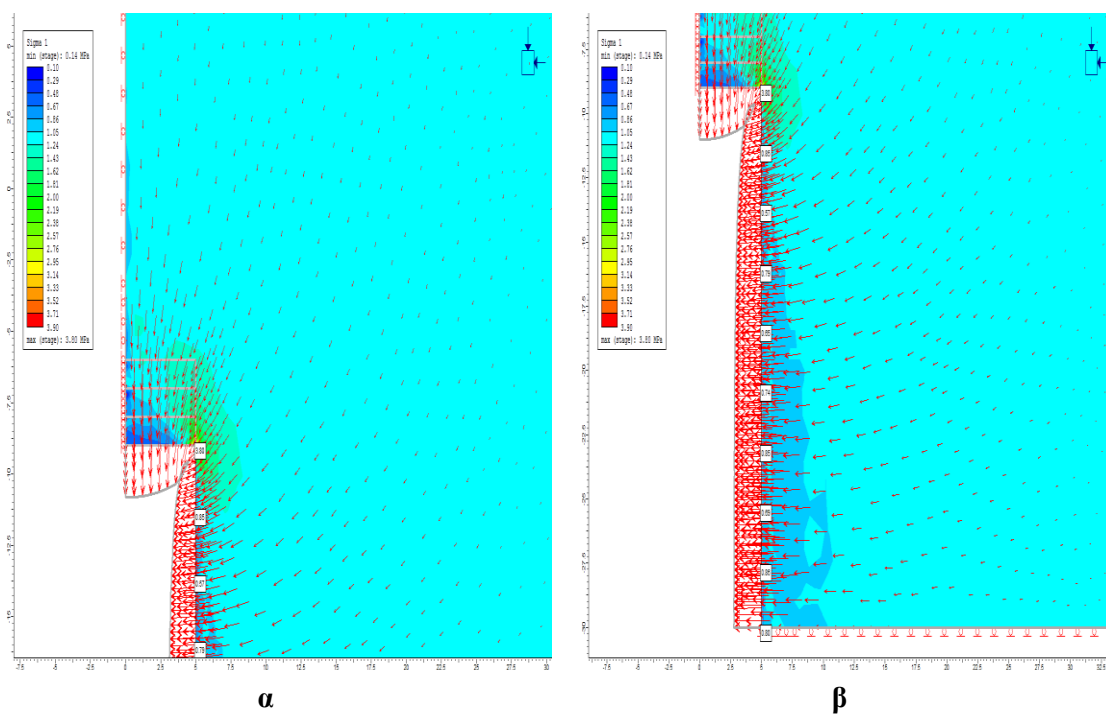
Οι μετατοπίσεις στο 22^ο στάδιο με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης μειώνονται σε όλα τα σημεία και η μεγαλύτερη μείωση που εντοπίζεται είναι στο σημείο (5,-9). Με την μεμονωμένη τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις αυξάνονται σε όλα τα σημεία.



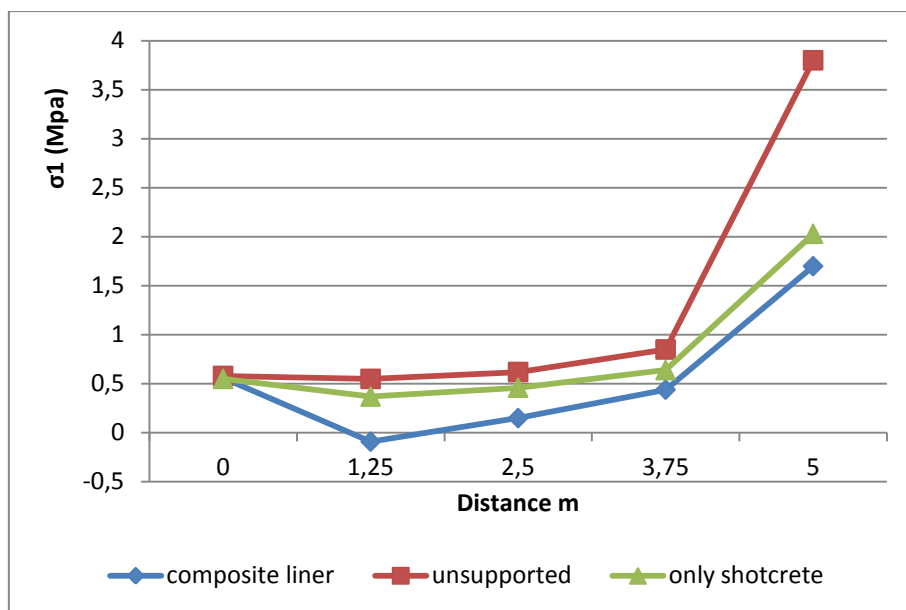
Εικόνα 7.15:(α,β)Τάσεις σ1 25^ο σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με υποστήριξη



Εικόνα 7.15:(α,β)Τάσεις σ1 25° σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.16:(α,β)Τάσεις σ1 25° σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β χωρίς υποστήριξη

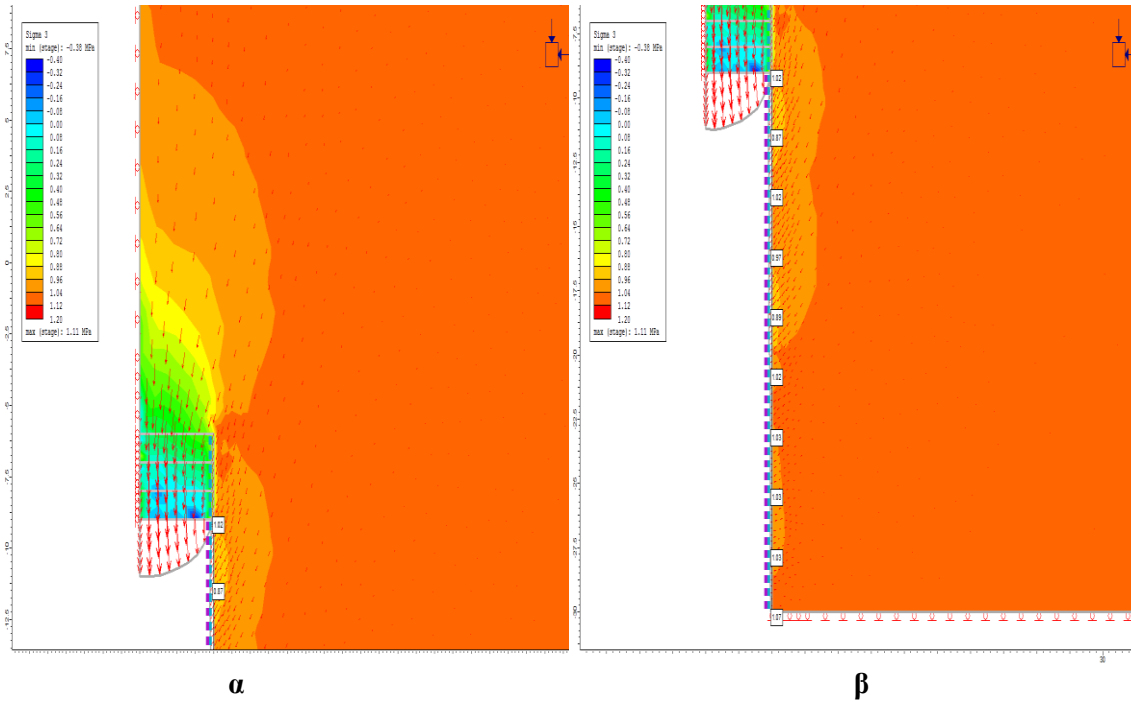


Διάγραμμα 7.24: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

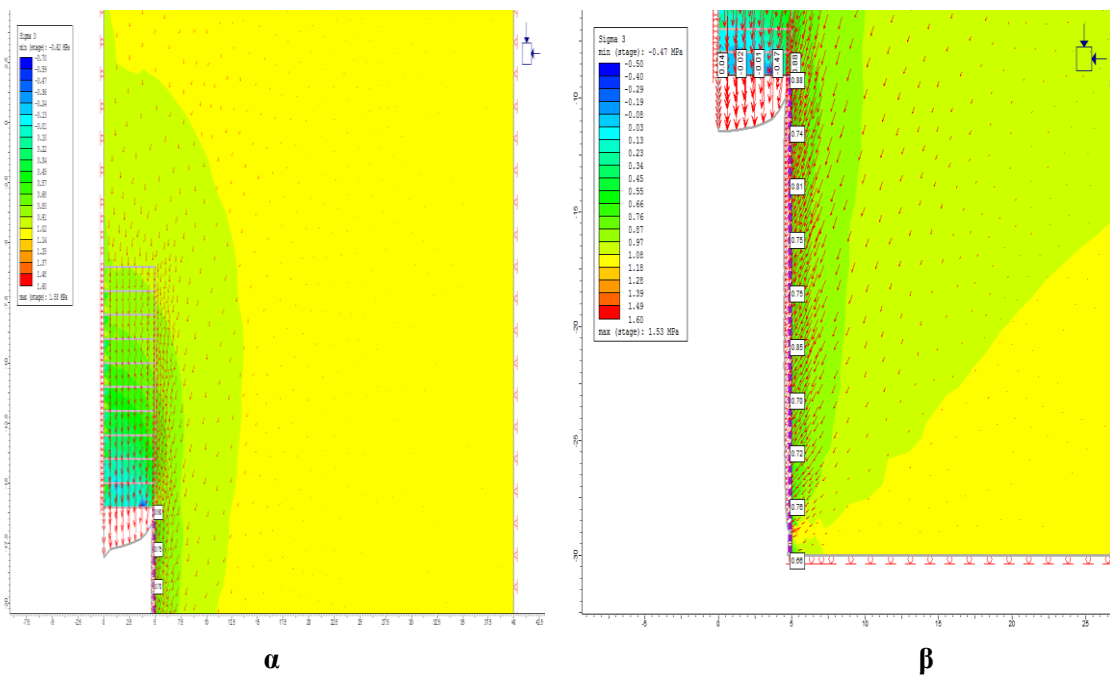
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (MPa)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Μεταβολή % των τάσεων σ_1 Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων σ_1 Un-Shotc
(0,-9)	0,58	0,55	0,56	3,448	5,172
(1.25,-9)	0,55	0,37	-0,09	83,636	32,727
(2.5, -9)	0,62	0,46	0,15	75,806	25,806
(3.75,-9)	0,85	0,64	0,44	48,235	24,705
(5,-9)	3,8	2,03	1,7	55,263	46,578

Πίνακας 7.28: Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

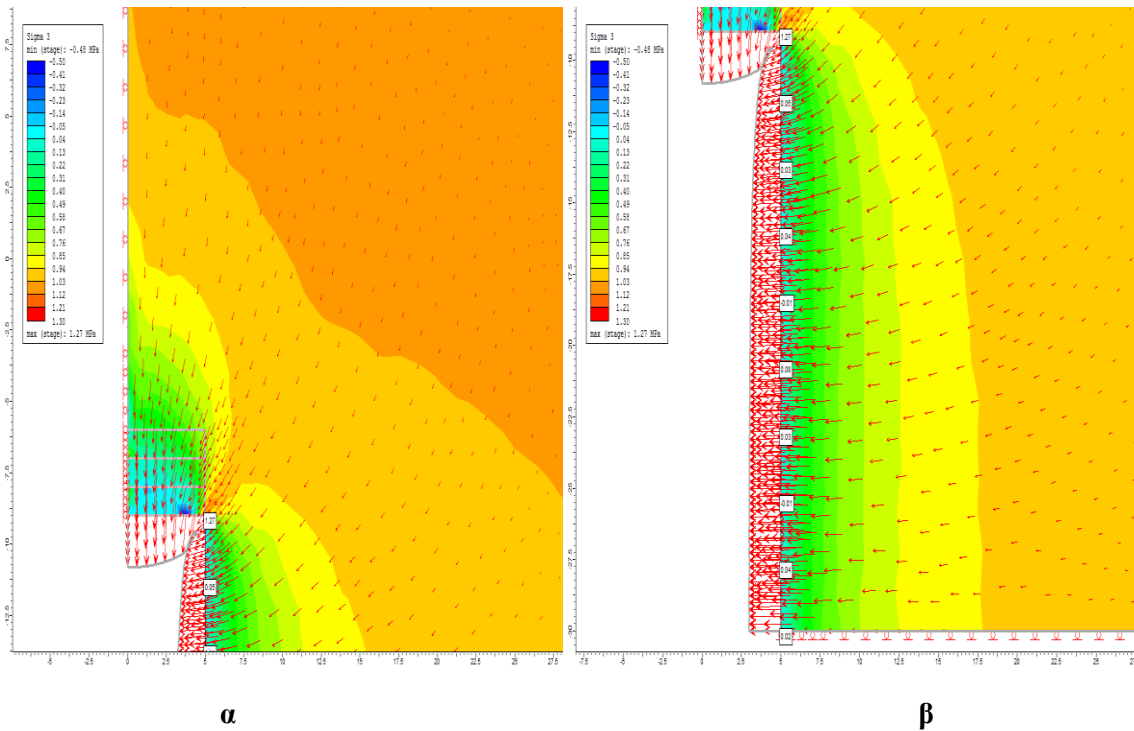
Όσο αφορά τις τάσεις σ_1 για το 22^ο στάδιο με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυτές μειώνονται σε όλα τα σημεία.



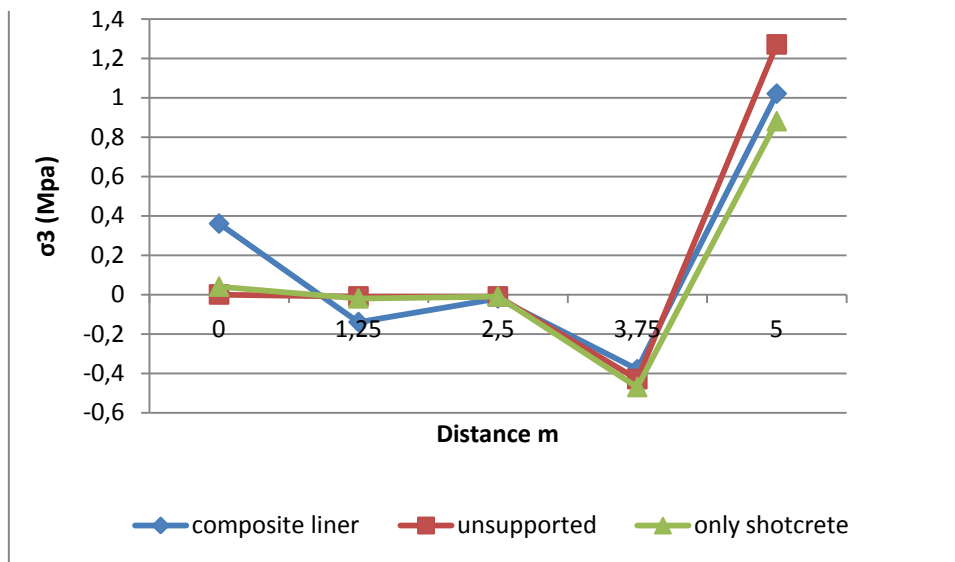
Εικόνα 7.17:(α,β)Τάσεις σ₃ 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.18:(α,β)Τάσεις σ₃ 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.19:(α,β)Τάσεις σ_3 25^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2β χωρίς υποστήριξη



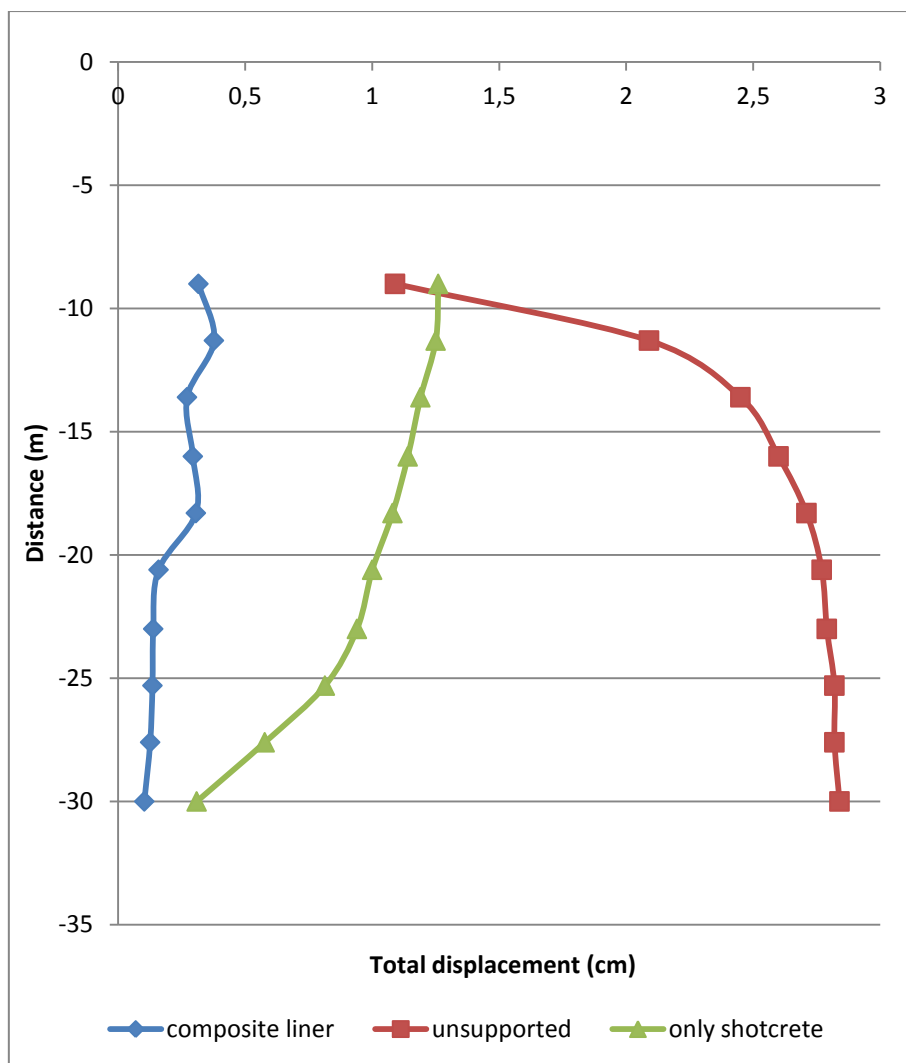
Διάγραμμα 7.25: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupporte d (MPa)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Μεταβολή των τάσεων σ3 % Un-Προϋπ	Μεταβολή των τάσεων σ3 % Un-shotc
(0,-9)	0	0,04	0,36	100	100
(1.25,-9)	-0,01	-0,02	-0,14	-1300	-100
(2.5, -9)	-0,01	-0,01	-0,02	-100	0
(3.75,-9)	-0,48	-0,47	-0,38	20,833	2,08
(5,-9)	1,27	0,88	1,02	19,685	30,708

Πίνακας 7.29:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.29 οι τάσεις σ3 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης αυξάνονται στα σημεία (0,-9), (1.25,-9), (2.5,-9), μειώνονται στα σημεία (3.75,-9) (5,-9). Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 αυξάνονται στο σημείο (0,-9) ,(1.25,-9) στο σημείο (2.5,-9) μένουν σταθερές και μειώνονται στα σημεία (3.75,-9), (5,-9).

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα και ο πίνακας με τις τιμές των μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας για το 22^ο στάδιο του σχηματισμού 9.2β.



Διάγραμμα 7.26: Διάγραμμα ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση άξονα σήραγγας

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(c m)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστια ία μεταβολή % Un- Προϋπ	Ποσοστια ία μεταβολή % Un-Shotc
(5,-30)	2,84	0,309	0,103	96,373	89,119
(5,-27,6)	2,82	0,577	0,126	95,531	79,539
(5,-25,3)	2,82	0,814	0,135	95,212	71,134

(5,-23)	2,79	0,940	0,138	95,053	66,308
(5,-20,6)	2,77	1	0,159	94,259	63,898
(5,-18,3)	2,71	1,08	0,306	88,708	60,147
(5,-16)	2,6	1,14	0,294	88,692	56,153
(5,-13,6)	2,45	1,19	0,271	88,938	51,428
(5,-11,3)	2,09	1,25	0,377	81,961	40,191
(5,-9)	1,09	1,26	0,316	71,009	-15,596
Μέσες τιμές	2,498	0,956	0,2225	89,574	56,232

Πίνακας 7.30: Μεταβολή ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2β για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση άξονα σήραγγας

Με βάση τον πίνακα 7.30 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης για το 22^ο στάδιο έχουμε μία μεγάλη μείωση των μετατοπίσεων και στα 10 σημεία που εξετάζονται με την μεγαλύτερη να εντοπίζεται στο σημείο (0,-30) και να ξεπερνά το 96%. Επίσης με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις μειώνονται σχεδόν σε όλα τα σημεία εκτός από το σημείο (0,-9), όπου σημειώνεται αύξυση.

7.4 Αποτελέσματα αναλύσεων για τον σχηματισμό 9.2γ

Στον πίνακα 7.31, δίνονται οι μέγιστες τιμές τάσεων σ_1, σ_3 , οριζόντιες, κατακόρυφες, ολικές μετατοπίσεις για μέτωπο με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2^ο, 8^ο, 15^ο και 22^ο στάδιο.

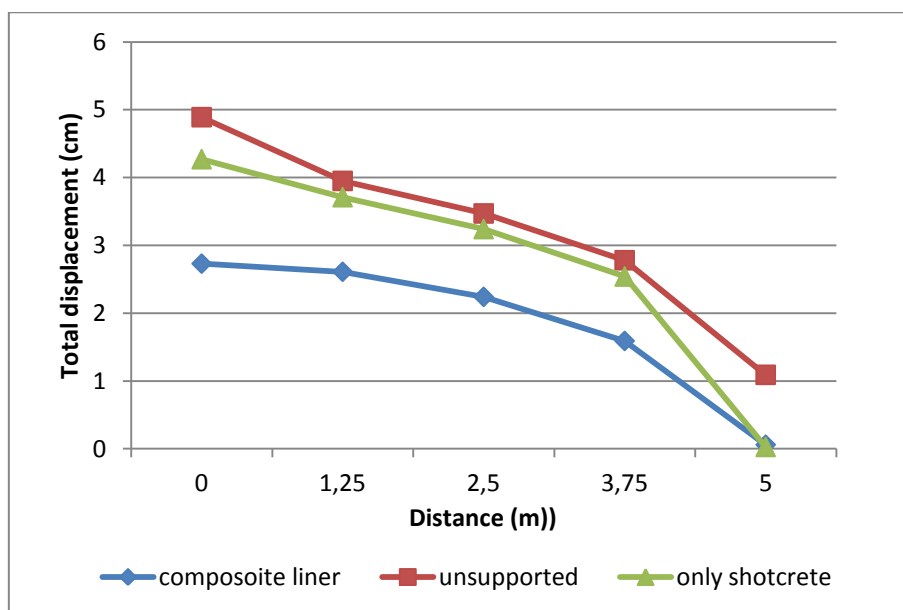
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 2 ^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	1,73
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	1,05
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,73
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ shotcrete μέγιστες τιμές 2 ^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	2,83
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	2,02

(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,27
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ unsupported μέγιστες τιμές 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ1 (Mpa)	3,54
(5,-29)	σ3 (Mpa)	1,11
(0,-29)	Ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,89
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	1,63
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,07
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	3,01
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ shotcrete μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	2,03
(5,-23)	σ3 (Mpa)	0,86
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,32
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ unsupported μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ1 (Mpa)	3,69
(5,-23)	σ3 (Mpa)	1,16
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,16
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	1,66
(5,-16)	σ3 (Mpa)	1,01
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	3,34
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ shotcrete μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	1,97
(5,-16)	σ3 (Mpa)	0,88
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	5,73
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ unsupported μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ1 (Mpa)	3,64
(5,-16)	σ3 (Mpa)	1,24
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	5,69
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 22^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	1,67
(5,-9)	σ3 (Mpa)	1,01
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις	3,35

	(cm)	
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ shotcrete μέγιστες τιμές 22° στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	1,97
(5,-9)	σ3 (Mpa)	0,86
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,75
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός 9.2γ unsupported μέγιστες τιμές 22° στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	3,8
(5,-9)	σ3 (Mpa)	1,27
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	4,26

Πίνακας 7.31: Μέγιστες τιμές σ1,σ3 ,ολικές μετατοπίσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο και μέτωπο υποστηριγμένο για τον σχηματισμό 9.2γ και για τα στάδια 2 ,8 ,15, 22.

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα τάσεων σ1,σ3, ολικές μετατοπίσεις του μετώπου με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2°, 8°, 15° και 22° στάδιο.

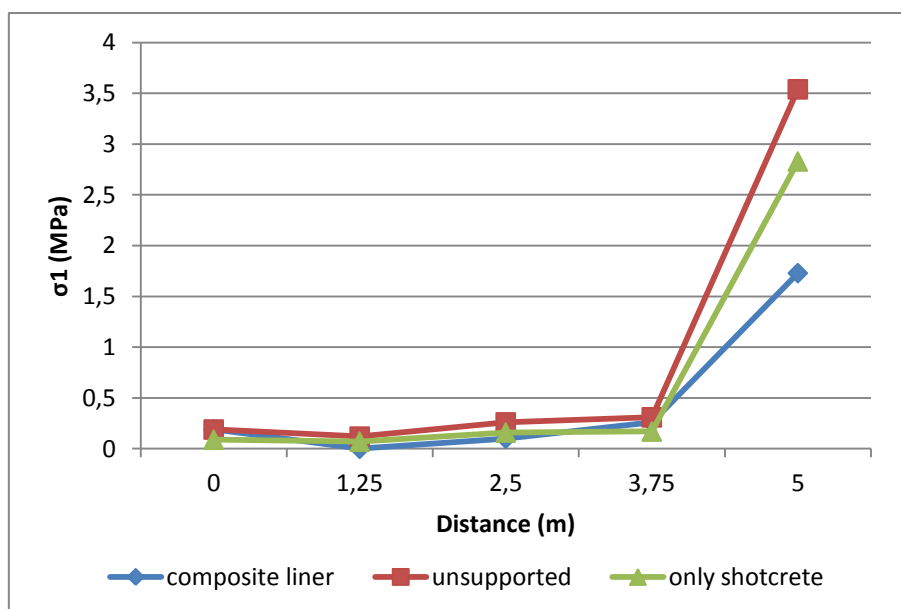


Διάγραμμα 7.27: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2° στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(cm)	Προϋποστήριξη (cm)	Μεταβολή μετατοπίσεων % μεταξύ Un-Προϋπ	Μεταβολή μετατοπίσεων % μεταξύ Un-Shot
(0,-29)	4,89	4,27	2,73	44,171779	12,678937
(1.25,-29)	3,95	3,71	2,61	33,924051	6,0759494
(2.5, -29)	3,47	3,24	2,24	35,446686	6,6282421
(3.75,-29)	2,78	2,54	1,59	42,805755	8,6330935
(5,-29)	1,09	0,0266	0,0594	94,550459	97,559633

Πίνακας 7.33:Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.33 οι μετατοπίσεις με την χρήση της προϋποστήριξης και της μεμονωμένης χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία.

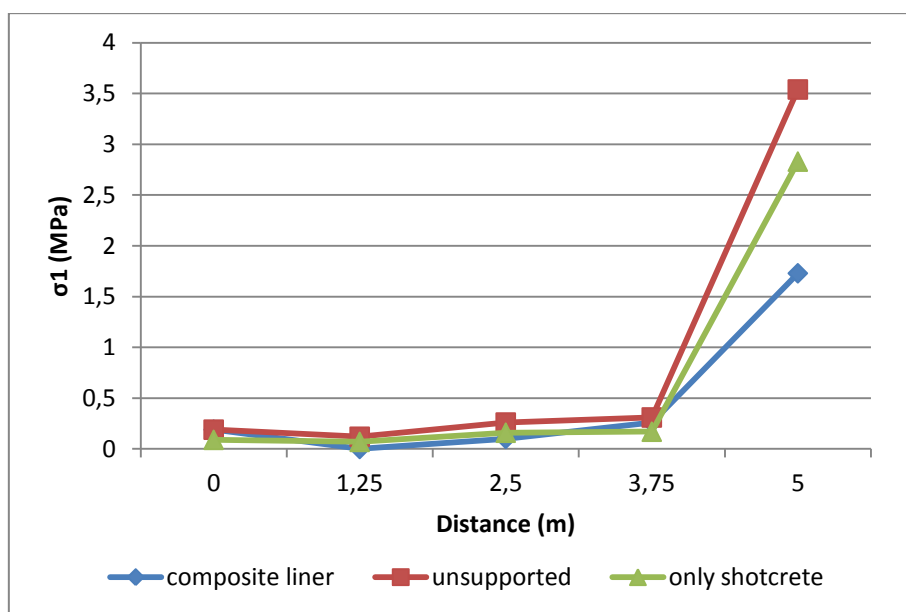


Διάγραμμα 7.28:Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ_1 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ_1 Un- Shotc
(0,-29)	0,19	0,09	0,19	0	52,63158
(1.25,-29)	0,12	0,07	0	100	41,66667
(2.5, -29)	0,26	0,16	0,1	61,53846	38,46154
(3,75,-29)	0,31	0,17	0,26	16,12903	45,16129
(5,-29)	3,54	2,83	1,73	51,12994	20,0565

Πίνακας 7.33: Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.34 οι τάσεις σ_1 μειώνονται σε όλα τα σημεία με την χρήση της προϋποστήριξης και της μεμονωμένης χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

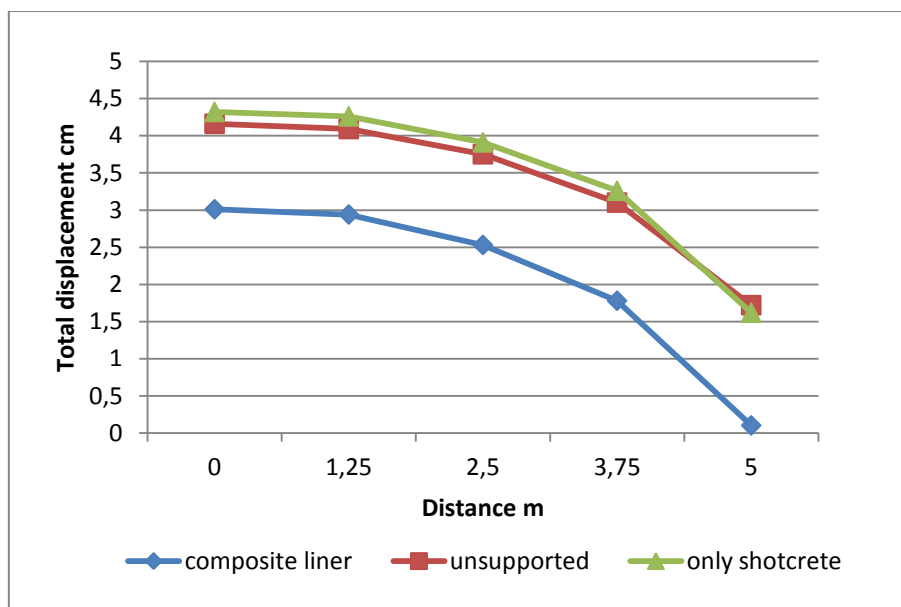


Διάγραμμα 7.29: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ3 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ3 Un- Shotc
(0,-29)	0	0	0	0	0
(1.25,-29)	-0,01	-0,01	-0,08	-700	0
(2.5, -29)	-0,03	-0,02	-0,03	0	33,33333
(3.75,-29)	-0,6	-1	-0,46	23,33333	-66,6667
(5,-29)	1,11	2,02	1,05	5,40540	-81,982

Πίνακας 7.33: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 2^ο στάδιο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.33 οι τάσεις σ3 με την χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται στα σημεία (3.75,-29), (5,-29), στο σημείο(1.25,-29) αυξάνονται, ενώ στα σημεία (0,-29), (2.5,-29) μένουν σταθερές. Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 μένουν σταθερές στα σημεία (0,-29), (1.25,-29) μειώνονται στο σημείο (2.5,-29) και στα σημεία (3.75,-29), (5.25,-29) αυξάνονται

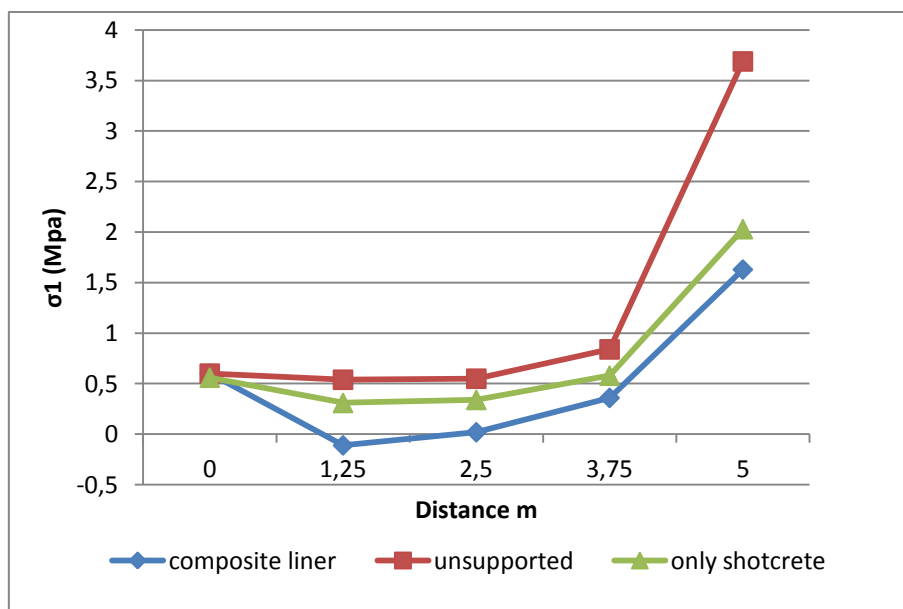


Διάγραμμα 7.30: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(c m)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστια ία μεταβολή % Un- Προϋπ	Ποσοστια ία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-23)	4,16	4,32	3,01	27,64423	-3,84615
(1.25,-23)	4,09	4,26	2,94	28,11736	-4,15648
(2.5, -23)	3,75	3,91	2,53	32,53333	-4,26667
(3.75,-23)	3,1	3,26	1,78	42,58065	-5,16129
(5,-23)	1,72	1,62	0,103	94,01163	5,813953

Πίνακας 7.34:Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Οι μετατοπίσεις για το 8^ο στάδιο μειώνονται σε όλα τα σημεία με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης,ενώ με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται στο σημείο (5,-23),ενώ στα υπόλοιπα σημεία έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων.

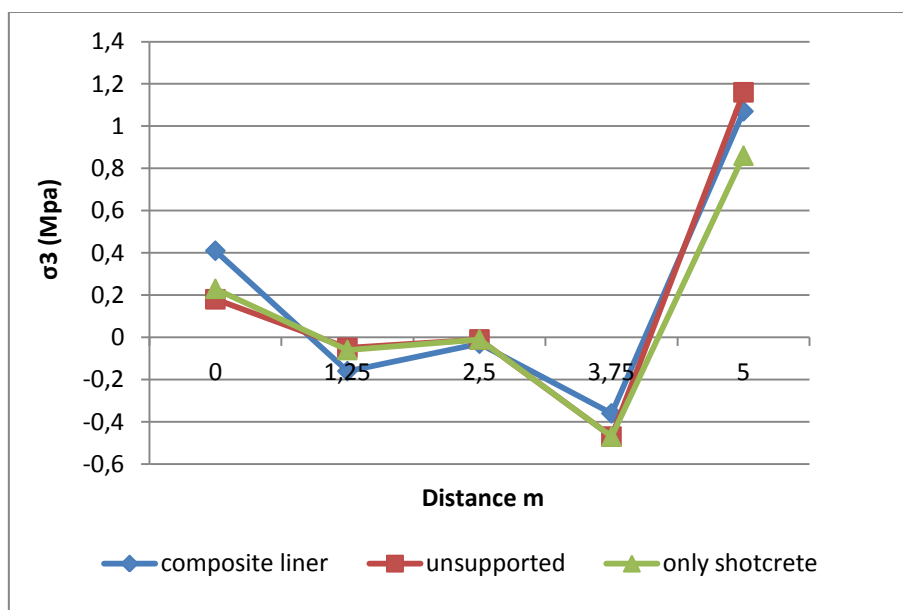


Διάγραμμα 7.31:Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (MPa)	Only shotcrete(MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Μείωση των τάσεων σ1 % Un-Προϋπ	Μείωση των τάσεων σ1 % Un-Shotc
(0,-23)	0,6	0,56	0,6	0	6,666
(1.25,-23)	0,54	0,31	-0,11	79,629	42,592
(2.5, -23)	0,55	0,34	0,02	96,363	38,181
(3.75,-23)	0,84	0,58	0,36	57,142	30,952
(5,-23)	3,69	2,03	1,63	55,826	44,986

Πίνακας 7.35: Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Οι τάσεις σ1 με την χρήση της προϋποστήριξης και της μεμονωμένης χρήσης του του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία.

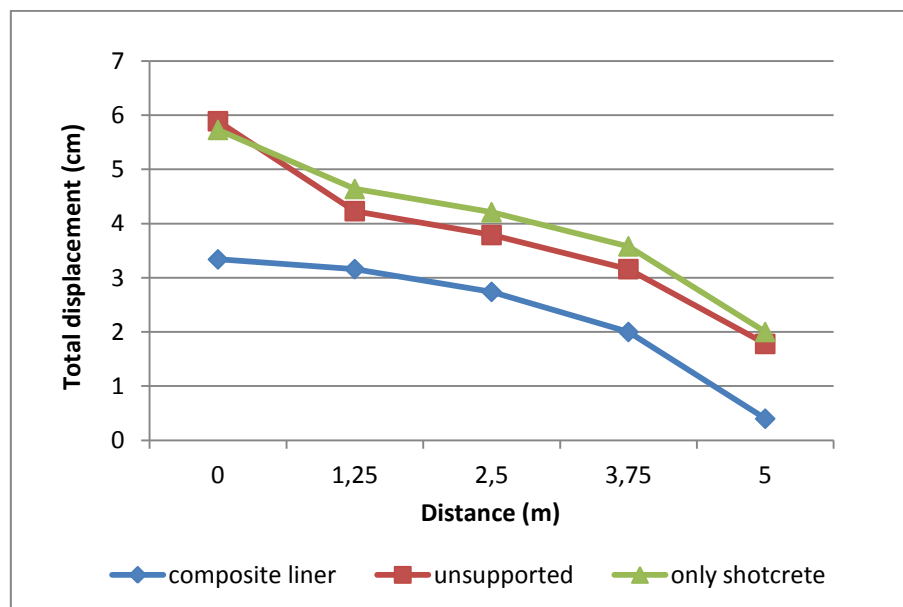


Διάγραμμα 7.32: Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη και χωρίς για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupporte d (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήριξ η (MPa)	Μείωσ η τάσεων των σ3 % Un- Προϋπ	Μείωσ η τάσεων των σ3 % Un- Shotc
(0,-23)	0,18	0,23	0,41	-127,77	-27,777
(1.25,-23)	-0,05	-0,06	-0,16	-220	-20
(2.5, -23)	-0,01	-0,01	-0,03	-200	0
(3.75,-23)	-0,47	-0,47	-0,36	23,404	0
(5,-23)	1,16	0,86	1,07	7,758	25,862

Πίνακας 7.36: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 8^ο στάδιο

Οι τάσεις σ3 με την χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται στα σημεία (3.75,-23),(5,-23), ενώ στα υπόλοιπα σημεία αυξάνονται. Το αρνητικό πρόσημο στις τιμές υποδηλώνει ότι αρνητική διεύθυνση των τάσεων. Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 αυξάνονται στα σημεία (0,-23), (1.25,-23) μένουν σταθερές στα σημεία (2.5,-23), (3.75,-23) και μειώνονται στο σημείο (5,-23).

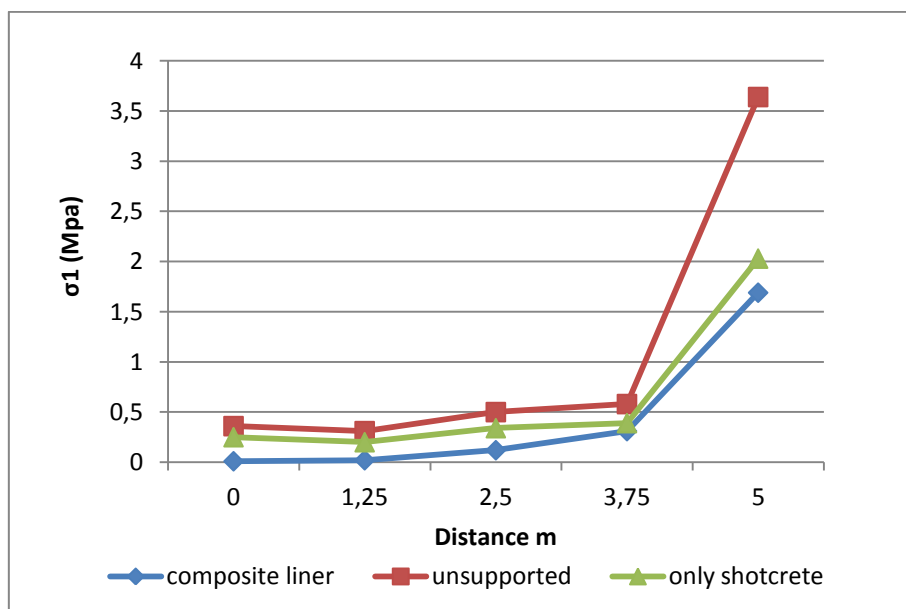


Διάγραμμα 7.33: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(cm)	Προϋποστήρι ξη (cm)	Ποσοστια ία μεταβολή % Un- Προϋπ	Ποσοστια ία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-16)	5,89	5,73	3,34	43,293	2,716
(1.25,-16)	4,23	4,64	3,16	25,295	-9,692
(2.5, -16)	3,79	4,21	2,74	27,704	-11,081
(3.75,-16)	3,16	3,58	2	36,708	-13,291
(5,-16)	1,78	2	0,399	77,58	-12,359
Μέσες τιμές	3,77	4,032	2,81	42,116	-8,741

Πίνακας 7.37:Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

Οι μετατοπίσεις με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης μειώνονται στα περισσότερα σημεία εκτός από το σημείο (5,-16), όπου έχουμε αύξηση.Επίσης με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετατοπίσεις μειώνονται στο σημείο (0,-16) και στα υπόλοιπα σημεία αυξάνονται.

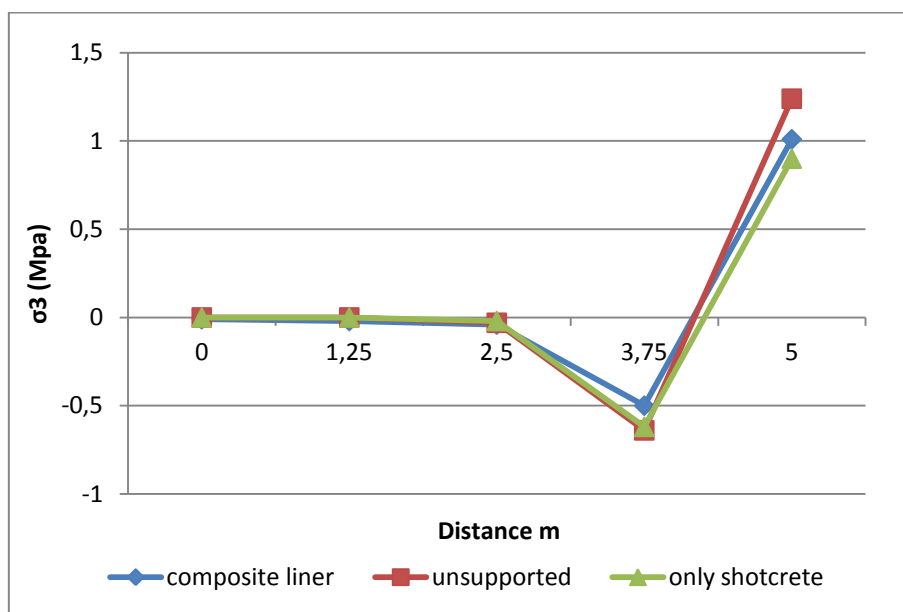


Διάγραμμα 7.34:Διαγράμματα τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (MPa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (MPa)	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων σ1 Un- Shotc
(0,-16)	0,36	0,25	0	100	30,555
(1.25,-16)	0,31	0,19	0,02	93,548	38,709
(2.5, -16)	0,5	0,33	0,11	78	34
(3.75,-16)	0,58	0,38	0,31	46,551	34,482
(5,-16)	3,64	1,97	1,66	54,395	45,879

Πίνακας 7.38:Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

Οι τάσεις σ1 μειώνονται με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όλα τα σημεία.

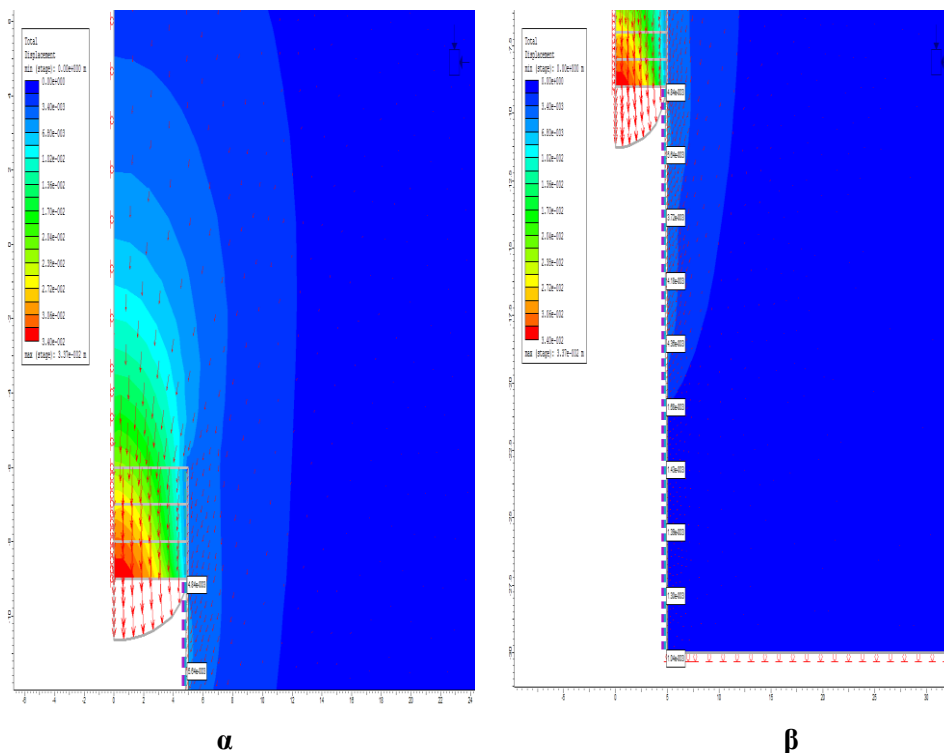


Διάγραμμα 7.35:Διαγράμματα τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

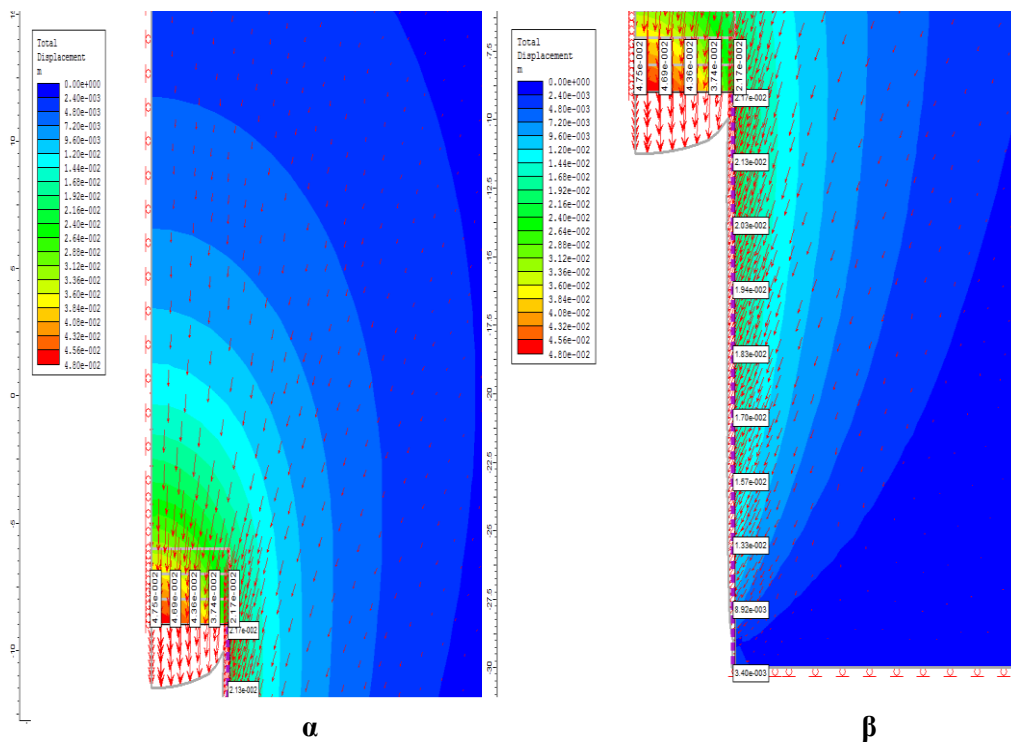
Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupport ed (Mpa)	Only shotcrete(MP a)	Προϋποστήρι ξη (Mpa)	Μεταβολ ή % των τάσεων των σ3 Un- Προϋπ	Μεταβολ ή % των τάσεων των σ3 Un- Shotc
(0,-16)	0	0	-0,02	-100	0
(1.25,-16)	0	0	-0,02	-100	0
(2.5, -16)	-0,03	-0,02	-0,04	-25	33,333
(3.75,-16)	-0,64	-0,6	-0,49	30,612	6,25
(5,-16)	1,24	0,88	1,01	22,772	29,032

Πίνακας 7.39: Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 15^ο στάδιο

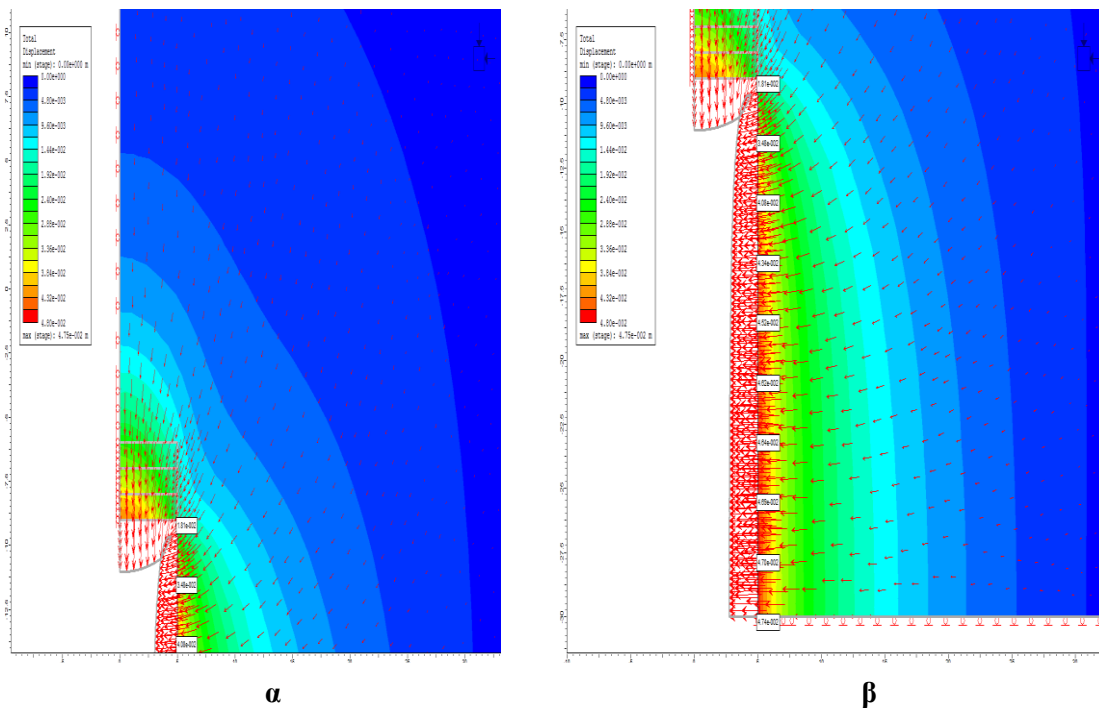
Οι τάσεις σ3 με την χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται στα σημεία (3.75,-16) ,(5,-16) και στα σημεία (0,-16) ,(2.5, -16), (1.25,-16) αυξάνονται. Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι τάσεις σ3 μένουν σταθερές στα σημεία (0,-16) ,(1.25, -16) και στα σημεία (2.5,-16), (3.75,-16) ,(5,-16) μειώνονται.



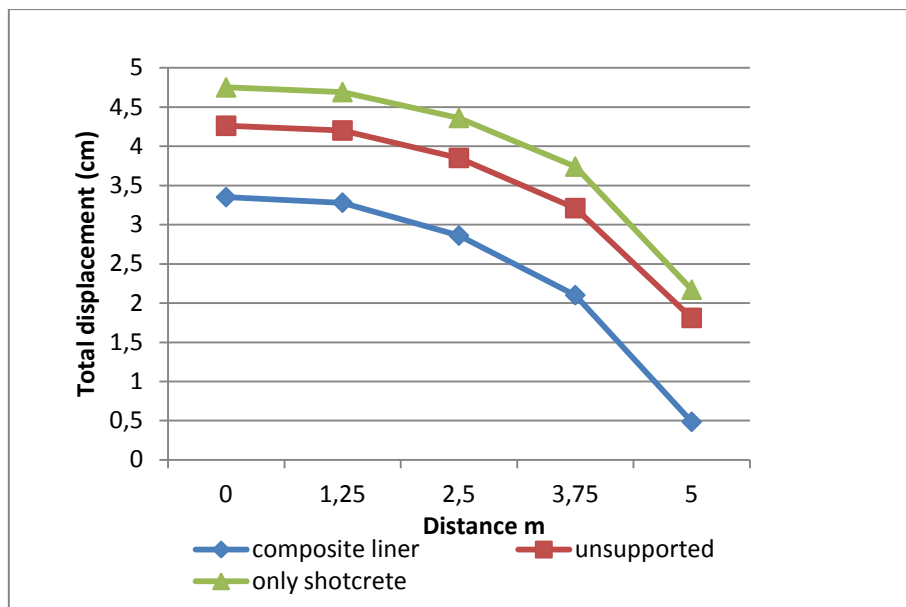
Εικόνα 7.20:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 22^ο σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.21:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 25^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.22:(α,β)Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ χωρίς υποστήριξη

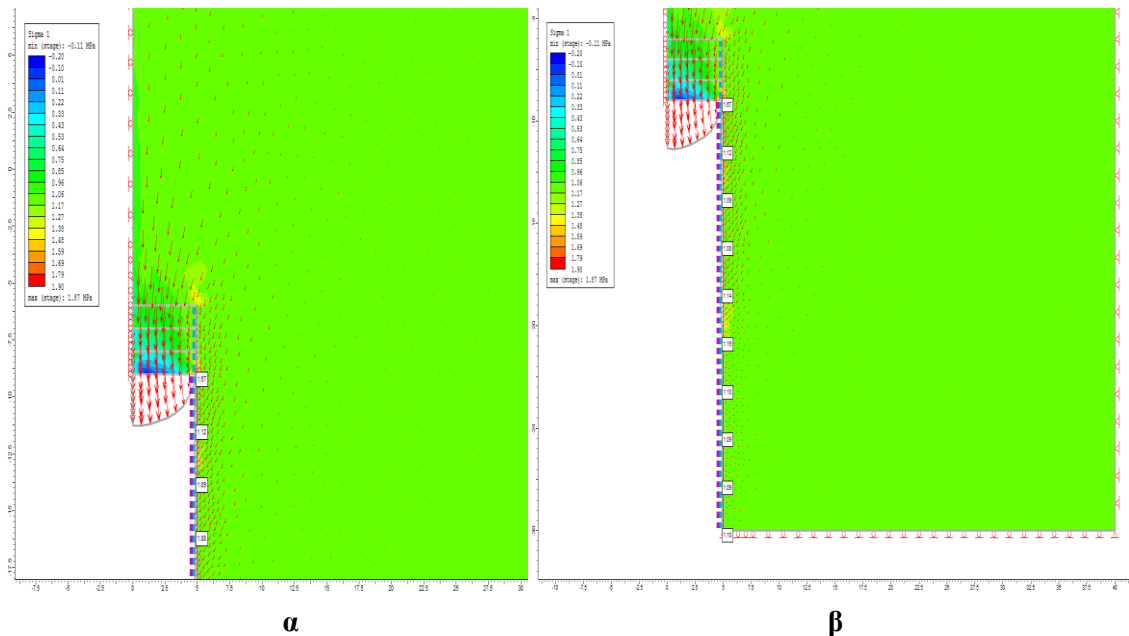


Διάγραμμα 7.36: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

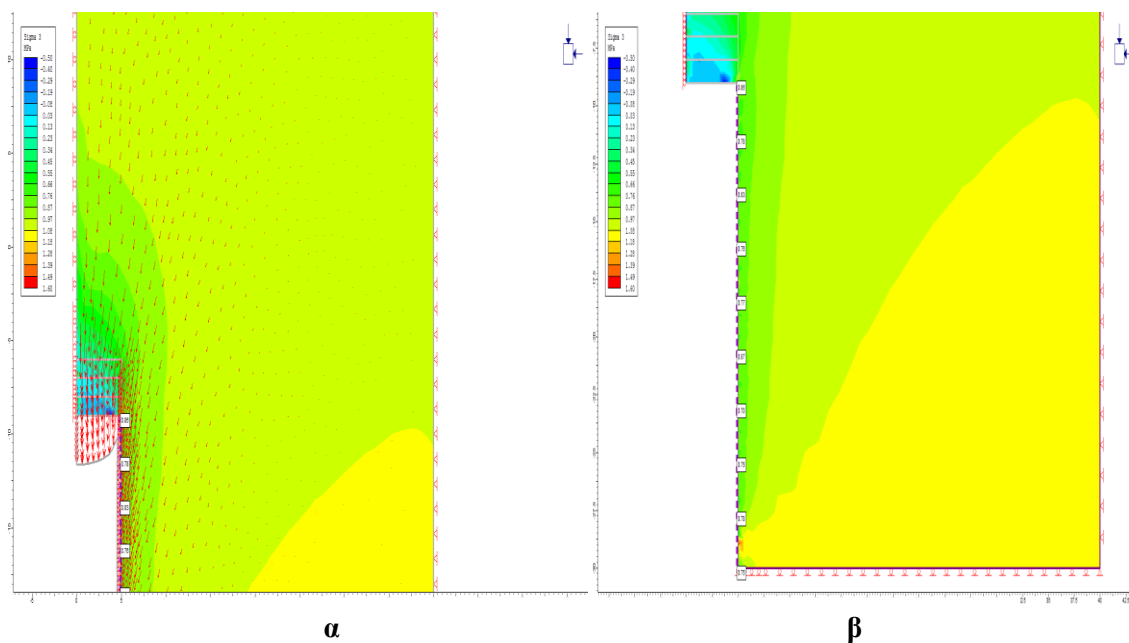
Συντεταγμ ένες σημείων(x, y)	Unsuppor ted (cm)	Only shotcrete(cm)	Προϋποστή ριξη (cm)	Ποσοστιαία μεταβολή % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μεταβολή % Un-Shotc
(0,-9)	4,26	4,75	3,35	21,361	-11,502
(1.25,-9)	4,2	4,69	3,28	21,904	-11,66
(2.5, -9)	3,85	4,36	2,86	25,714	-13,246
(3.75,-9)	3,21	3,74	2,1	34,579	-16,510
(5,-9)	1,81	2,17	0,484	73,259	-19,889
Μέσες τιμές	3,466	3,942	2,4148	35,363	-14,563

Πίνακας 7.40: Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

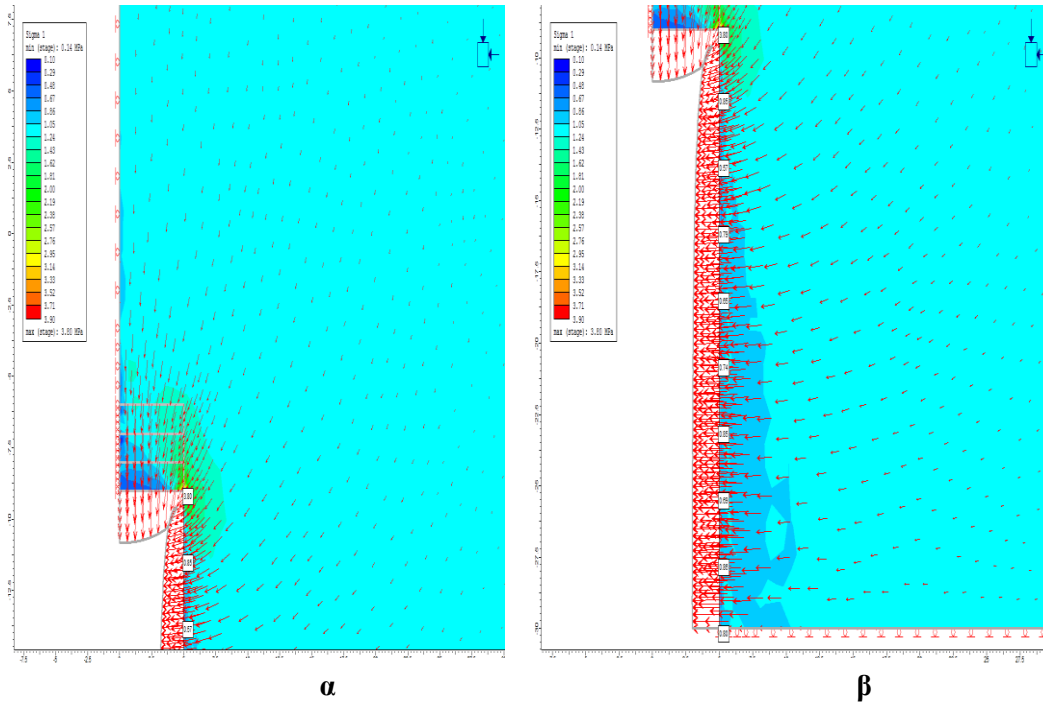
Οι μετατοπίσεις με την χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στο σημείο (5,-9). Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις αυξάνονται σε όλα τα σημεία που εξετάζονται.



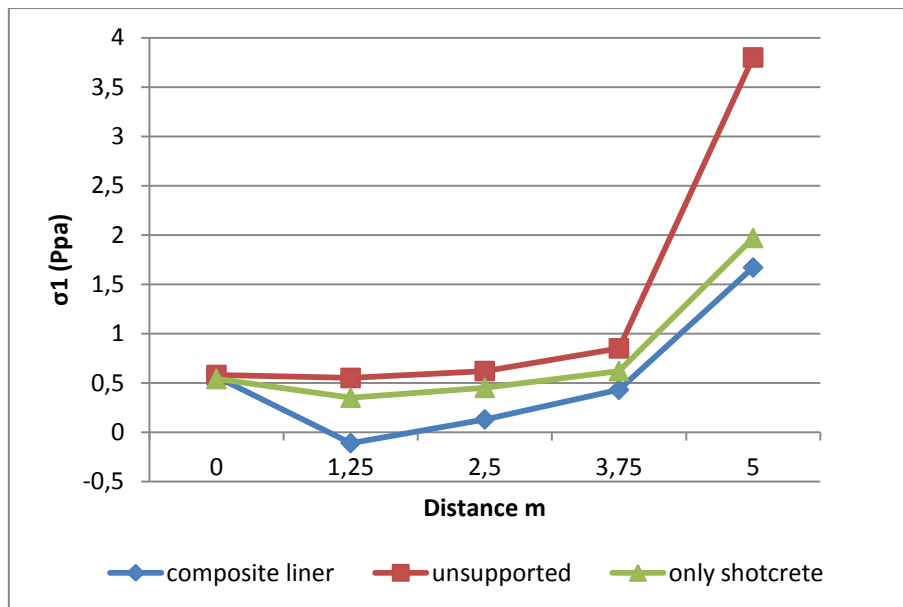
Εικόνα 7.23 : Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.24: Τάσεις σ_1 22^ο σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.25: Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ χωρίς υποστήριξη

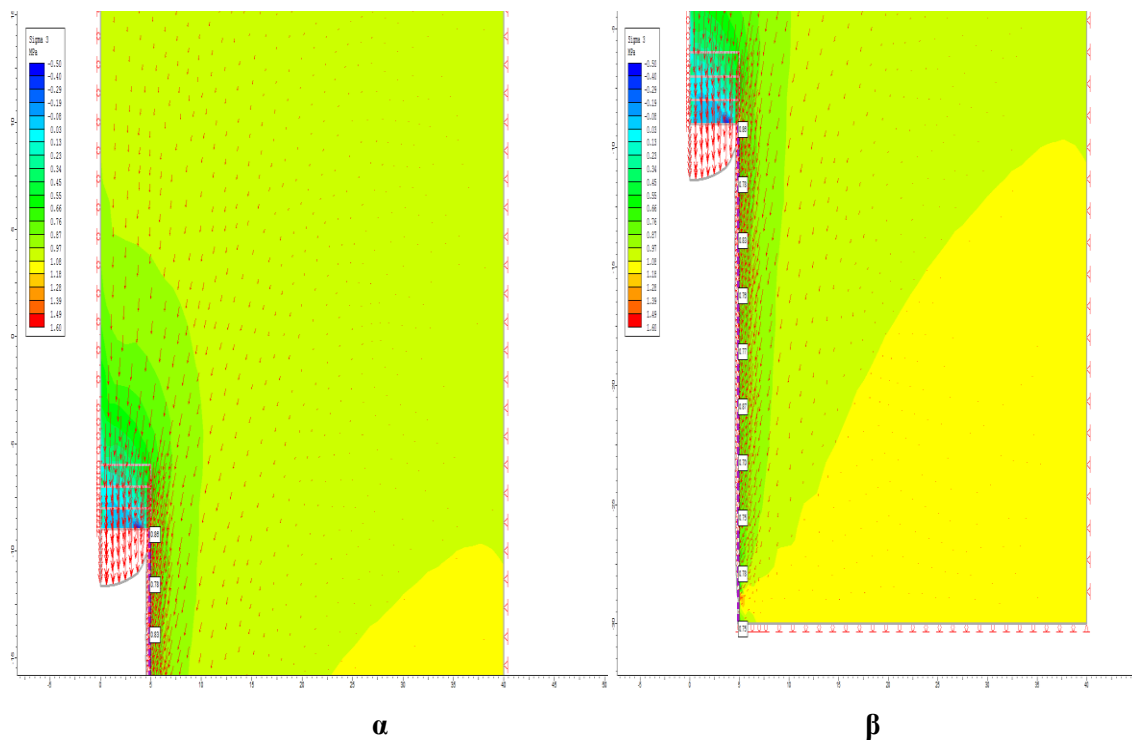


Διάγραμμα 7.37: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

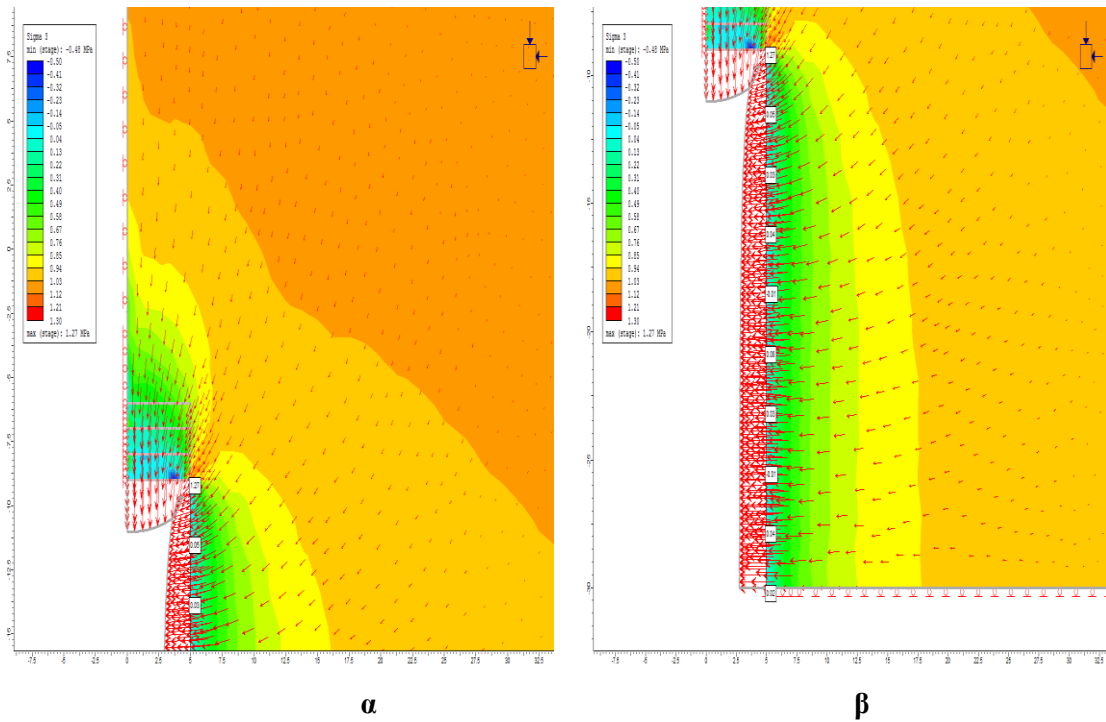
Συντεταγμ ένες σημείων(x, y)	Unsuppor ted (MPa)	Only shotcrete(M Pa)	Προϋποστή ριξη (MPa)	Μεταβολή % των τάσεων σ1 Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων σ1 Un-Shotc
(0,-6)	0,58	0,54	0,56	3,448	6,896
(1.25,-6)	0,55	0,35	-0,11	80	36,363
(2.5, -6)	0,62	0,45	0,13	79,032	27,419
(3.75,-6)	0,85	0,62	0,43	49,411	27,058
(5,-9)	3,8	1,97	1,67	56,052	48,157
Μέσες τιμές	1,28	0,786	0,536	53,588	29,179

Πίνακας 7.41: Μεταβολή τάσεων σ1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

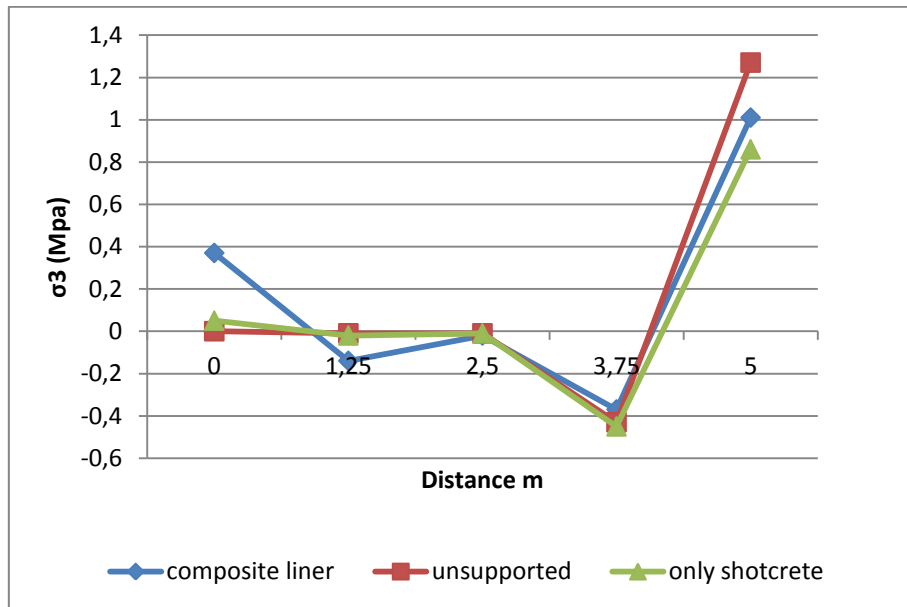
Οι τάσεις σ1 με την χρήση της προϋποστήριξης και της μεμονωμένης χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία που μελετώνται.



Εικόνα 7.27(α,β): Τάσεις σ3 22^ο σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



Εικόνα 7.28(α,β): Τάσεις σ_3 22^ο σταδίου για τον σχηματισμό 9.2γ χωρίς υποστήριξη



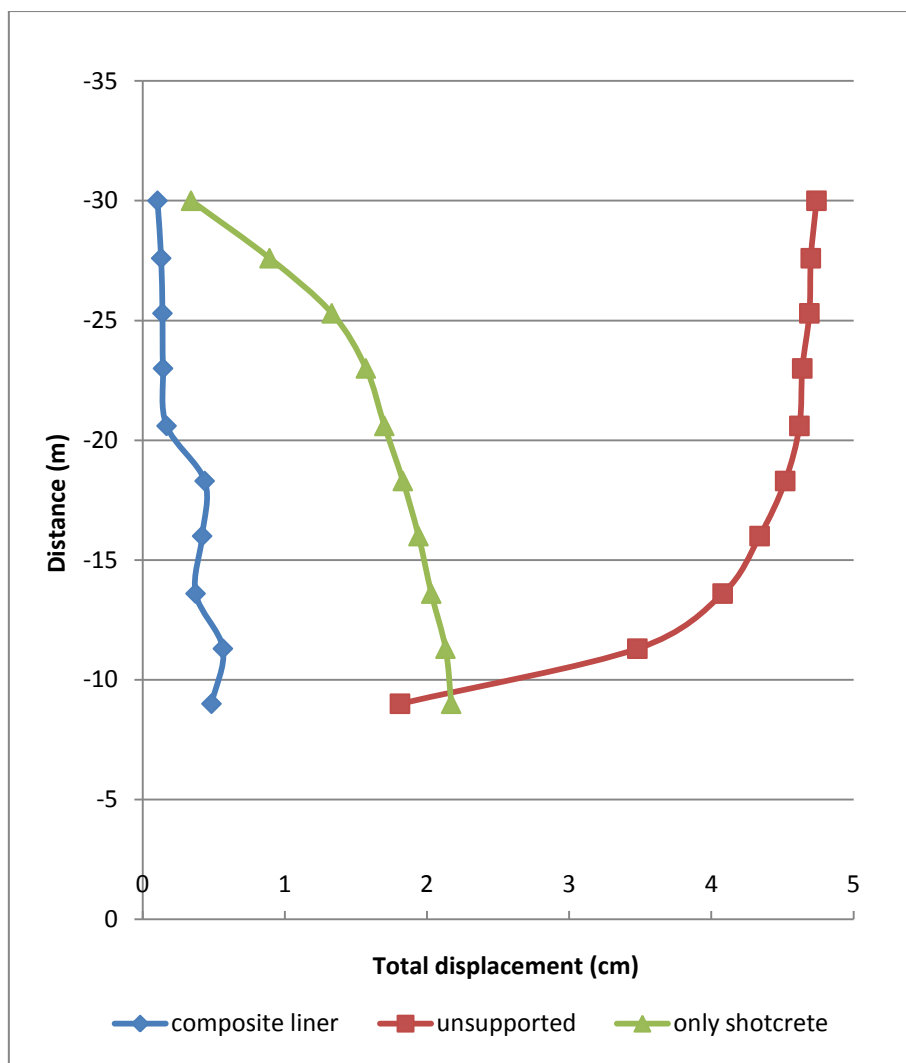
Διάγραμμα 7.38: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (MPa)	Only shotcrete σ3 (MPa)	Προϋποστήριξη σ3 (MPa)	Μεταβολή % των τάσεων σ3 % Un-Προϋπ	Μεταβολή % των τάσεων των σ3 Un-Shotc
(0,-9)	0	0,05	0,37	-100	-100
(1.25,-9)	-0,01	-0,02	-0,14	-1300	-100
(2.5, -9)	-0,01	-0,01	-0,02	-100	0
(3.75,-9)	-0,48	-0,45	-0,37	22,916	6,25
(5,-9)	1,27	0,86	1,01	20,472	32,283

Πίνακας 7.42:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο

Οι **τάσεις σ3** αυξάνονται με την χρήση της προϋποστήριξης αυξάνονται στα σημεία (0,-9), (1.25,-9), (2.5,-9) μειώνονται στα σημεία (3.75,-9), (5,-9). Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι **τάσεις σ3** αυξάνονται στο σημείο (0,-9), (1.25,-9) μένουν σταθερές στο σημείο (2.5,-9) και στα σημεία (3.75,-9), (5,-9) μειώνονται.

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα και ο πίνακας με τις τιμές των μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας για το 22^ο στάδιο του σχηματισμού 9.2γ.



Διάγραμμα 7.39 :Διάγραμμα ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση άξονα σήραγγας

Συντεταγμέ νες σημείων(x,y)	Unsupport ed (cm)	Only shotcrete(c m)	Προϋποστήρ ιξη (cm)	Ποσοστιαία μείωση μετατοπίσεων % Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μείωση μετατοπίσεων % Un-Shotc
(5,-30)	4,74	0,34	0,104	97,8	92,82
(5,-27,6)	4,7	0,892	0,13	97,2	81,02
(5,-25,3)	4,69	1,33	0,139	97,03	71,64
(5,-23)	4,64	1,57	0,143	96,9	66,16

(5,-20,6)	4,62	1,7	0,168	96,36	63,20
(5,-18,3)	4,52	1,83	0,436	90,35	59,51
(5,-16)	4,34	1,94	0,418	90,368	55,29
(5,-13,6)	4,08	2,03	0,372	90,882	50,24
(5,-11,3)	3,48	2,13	0,564	83,793	38,79
(5,-9)	1,81	2,17	0,484	73,259	-19,88
Μέσες τιμές	4,162	1,593	0,295	91,401	55,881

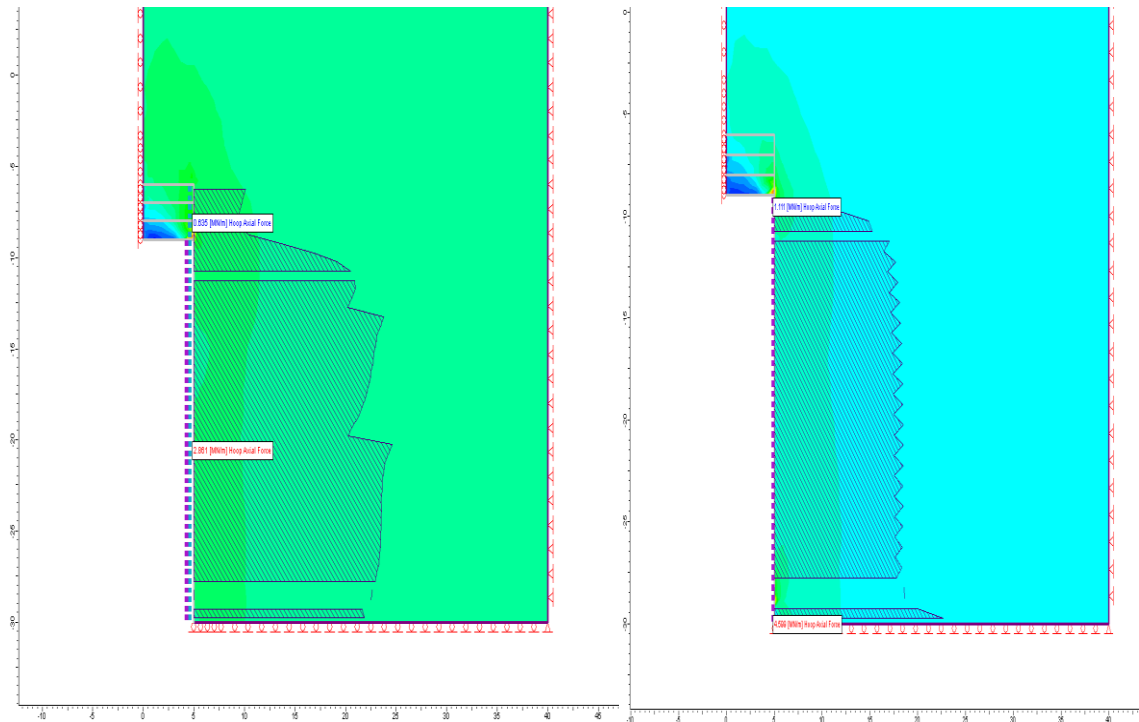
Πίνακας 7.43: Μεταβολή ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον σχηματισμό 9.2γ για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση άξονα σήραγγας

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.43 βλέπουμε ότι μετά την τοποθέτηση της προϋποστήριξης οι μειώσεις των μετατοπίσεων σε όλα τα σημεία είναι μεγάλες με το μεγαλύτερο ποσοστό να φτάνει περίπου το 98% στο σημείο (0,-30). Αντίστοιχα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι μετατοπίσεις μειώνονται σχεδόν σε όλα τα σημεία εκτός από το σημείο (0,-9) όπου αυξάνονται.

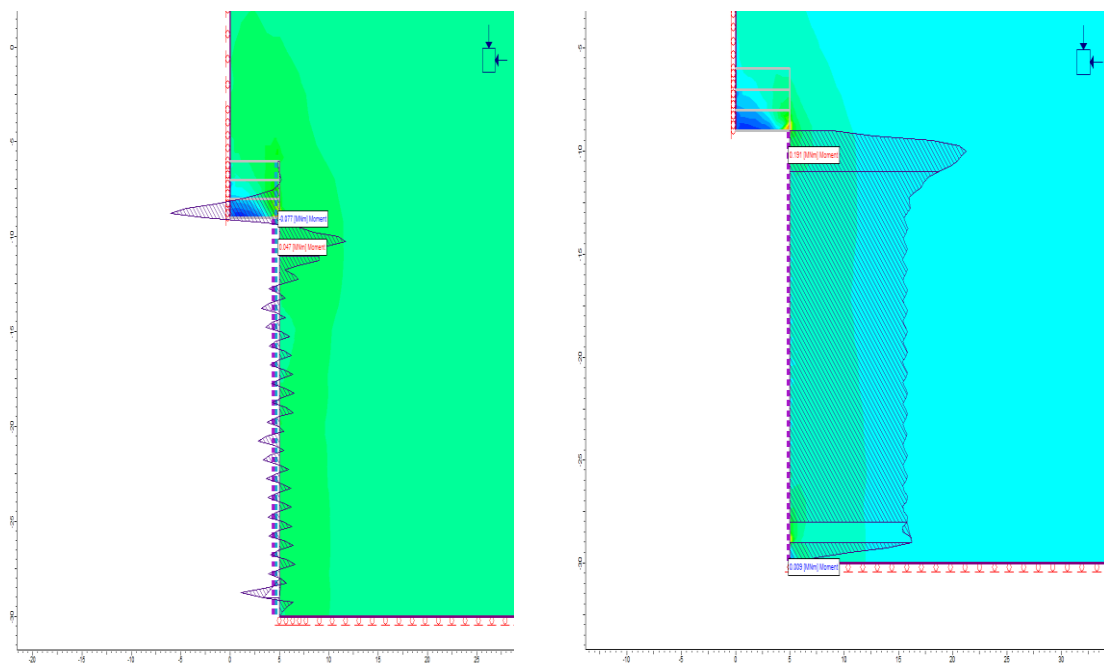
7.5. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται αριθμητικά και γραφικά οι τιμές των εντατικών μεγεθών δηλαδή των αξονικών δυνάμεων, των καμπτικών ροπών, των διατμητικών δυνάμεων και των μετατοπίσεων όλων των μοντέλων προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης.

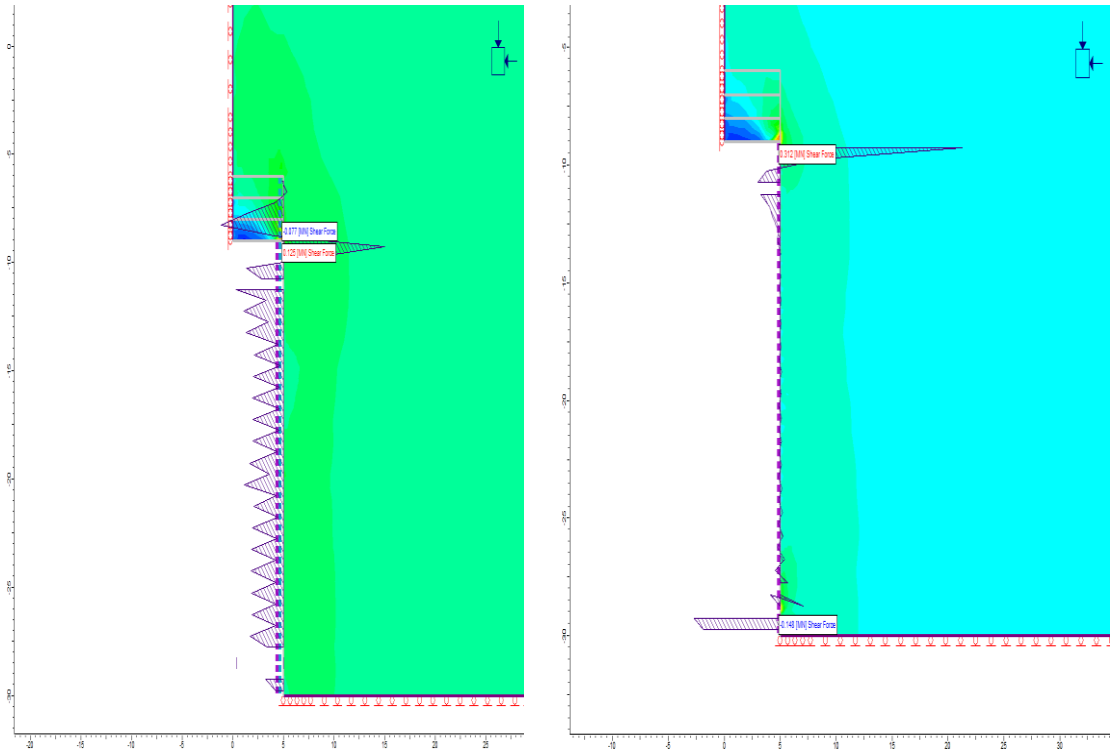
Οι αριθμητικές τιμές των εντατικών μεγεθών για τους σχηματισμούς 9.2α, 9.2β, 9.2γ παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν:



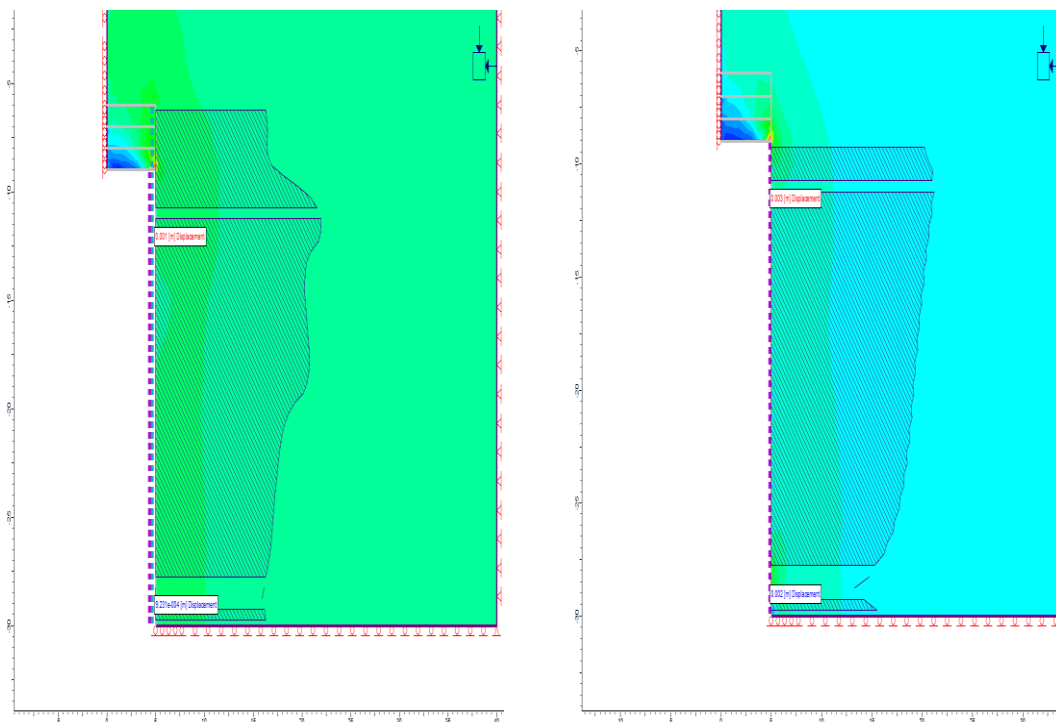
Εικόνα 7.29: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Αξονικών δυνάμεων 22^{ου} σταδίου στο δακτύλιο της επένδυσης για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)



Εικόνα 7.30: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Καμπτικών ροπών 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)



Εικόνα 7.31:Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Διατμητικών δυνάμεων 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)



Εικόνα 7.32: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Μετατοπίσεων 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)

Σχηματισμός 9.2α προϋποστήριξη max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
2,861	-0,077	0,125	0,001
Σχηματισμός 9.2α προϋποστήριξη min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
0,635	0,047	-0,077	9,321*10 ⁻⁴
Σχηματισμός 9.2α shotcrete max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
4,599	0,191	0,312	0,003
Σχηματισμός 9.2α shotcrete min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,111	0,009	-0,148	0,002

Πίνακας 7.44: Τα εντατικά μεγέθη για τον σχηματισμό 9.2α με προϋποστήριξη και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
4,185	-0,072	0,116	0,004
Σχηματισμός 9.2β προϋποστήριξη min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,487	0,047	-0,078	0,001
Σχηματισμός 9.2β shotcrete max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
6,62	0,203	0,318	0,013
Σχηματισμός 9.2β shotcrete min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,686	0,007	-0,173	0,002

Πίνακας 7.45: Τα εντατικά μεγέθη για τον σχηματισμό 9.2β με προϋποστήριξη και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

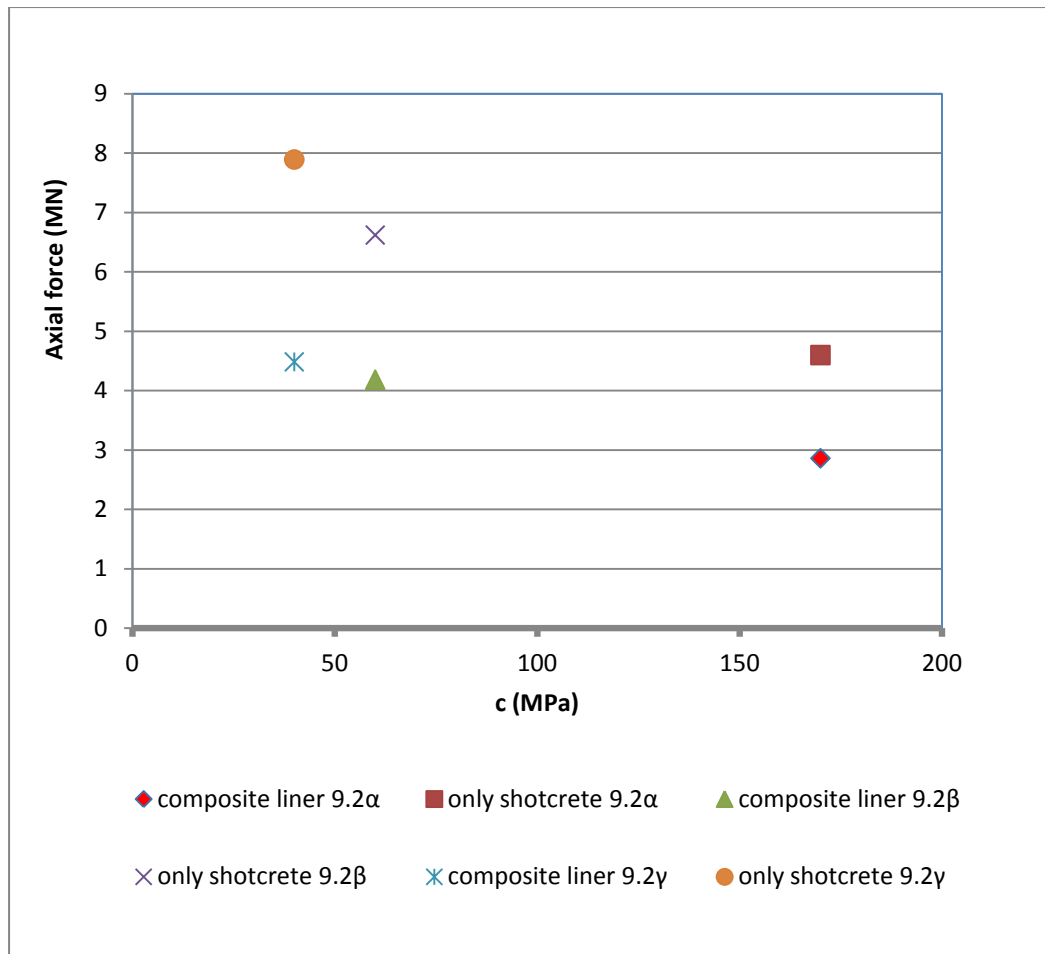
Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
4,485	-0,075	0,118	0,006
Σχηματισμός 9.2γ προϋποστήριξη min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,557	0,048	-0,087	0,001
Σχηματισμός 9.2γ shotcrete max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
7,892	0,201	0,315	0,022
Σχηματισμός 9.2γ shotcrete min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,871	0,007	-0,181	0,003

Πίνακας 7.46: Τα εντατικά μεγέθη για τον σχηματισμό 9.2γ με προϋποστήριξη και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

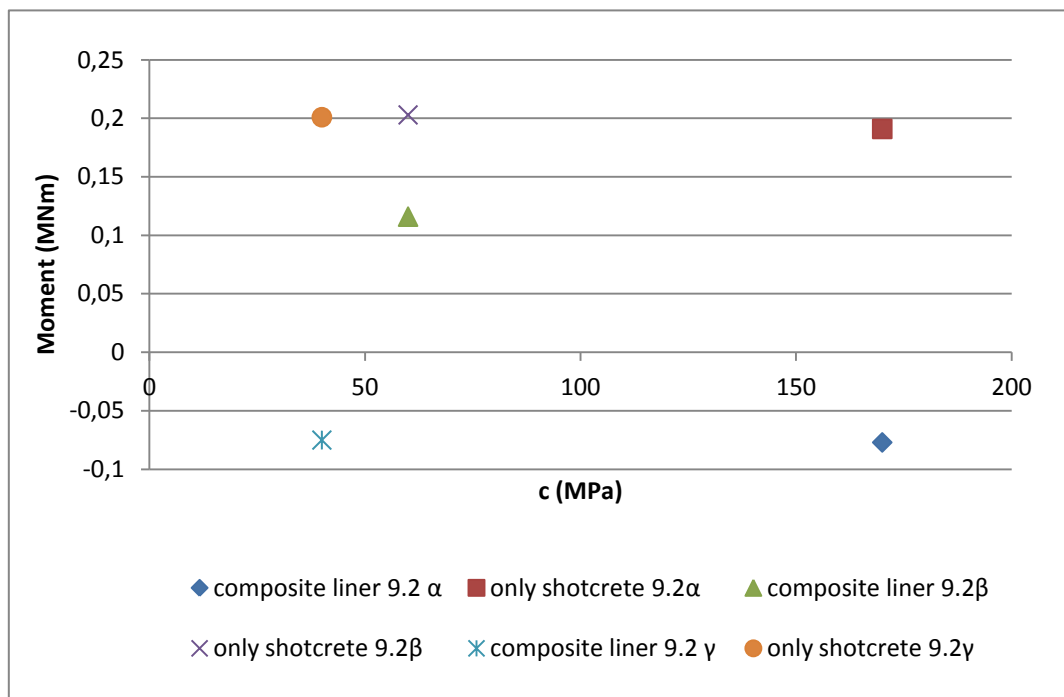
7.5.1. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών

Αξονικές δυνάμεις

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2α για το 22^ο στάδιο, στο δακτύλιο της επένδυσης με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των αξονικών δυνάμεων έχουν τιμή 2,861 (MN/m) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι με τιμή 4,599(MN/m) ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης με τιμή 0,635 και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τιμή 1,111(MN/m) .
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2β για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των αξονικών δυνάμεων είναι με τιμή 4,185 (MN/m) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι με τιμή 6,62 (MN/m), ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι με τιμή 1,487 (MN/m) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι με τιμή 1,686(MN/m).
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2γ για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των αξονικών δυνάμεων είναι 4,485(MN/m) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τιμή 7,892 (MN/m), ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι με τιμή 1,557 και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 1,871 (MN/m).



Διάγραμμα 7.40: Σύγκριση αξονικών δυνάμεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ



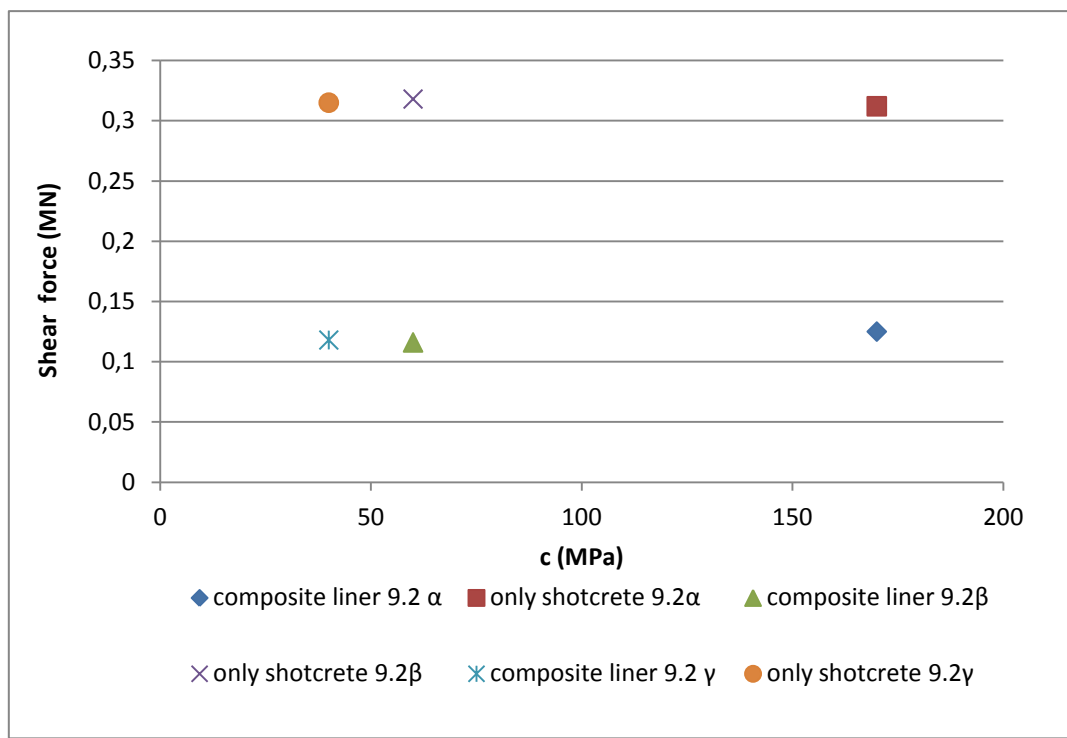
Διάγραμμα 7.41: Σύγκριση καμπτικών ροπών μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ

Καμπτικές ροπές

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2α με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών είναι αρνητικές με τιμή $|-0,077|$ (MNm) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,191 (MNm) ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι θετικές με τιμή 0,047(MNm) και μεγαλύτερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,009 (MNm).
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2β με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών είναι αρνητικές με τιμή $|-0,072|$ (MNm) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,203(MNm), ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι θετικές με τιμή 0,047(MNm) και μεγαλύτερες

*--από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,007 (MNm).

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2γ με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών είναι αρνητικές με τιμή $-0,075$ (MNm) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,201(MNm), ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι θετικές με τιμή 0,048 (MNm) και μεγαλύτερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θετικές με τιμή 0,007 (MNm).



Διάγραμμα 7.42: Σύγκριση διατμητικών δυνάμεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ

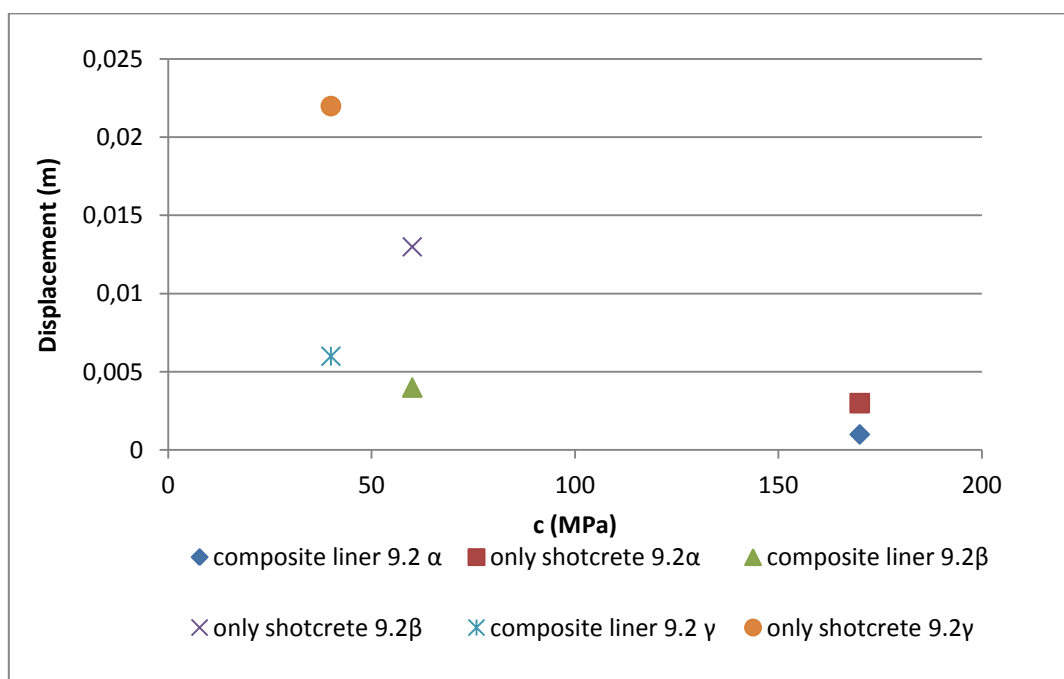
Διατμητικές δυνάμεις

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2α για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των διατμητικών δυνάμεων είναι θλιπτικές με τιμή 0,125 (MN) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θλιπτικές με τιμή 0,312(MN) ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι θλιπτικές με τιμή |-0,077| MN και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι εφελκυστικές με τιμή |-0,148| MN.
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2β για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των διατμητικών δυνάμεων είναι θλιπτικές με τιμή 0,116 (MN) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι θλιπτικές με τιμή 0,318(MN) ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι εφελκυστικές με τιμή |-0,078| MN και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι εφελκυστικές με τιμή |-0,173| MN.
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2γ για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των διατμητικών δυνάμεων είναι θλιπτικές με τιμή 0,118 (MN) και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι εφελκυστικές με τιμή 0,315(MN) ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι εφελκυστικές με τιμή |-0,087| MN και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι εφελκυστικές με τιμή |-0,181| MN.

Μετατοπίσεις

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2α για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων είναι 0,001 m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 0,003 m ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι $9,321 \cdot 10^{-4}$ m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 0,002 m.

- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2β για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων είναι 0,004 m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι εφελκυστικές 0,013 m ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι 0,001 m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 0,002 m
- Συγκρίνοντας τα προσομοιώματα του εδαφικού σχηματισμού 9.2γ για το 22^ο στάδιο με προϋποστήριξη και εκείνα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βλέπουμε ότι με την προϋποστήριξη οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων είναι 0,006 m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 0,022 m ενώ οι ελάχιστες τιμές της προϋποστήριξης είναι 0,001 m και μικρότερες από του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που είναι 0,003 m.



Διάγραμμα 7.43: Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος των σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ

7.6. Περεταίρω διερεύνηση της μεθόδου πρότμησης

Εξετάζεται η συμπεριφορά της σήραγγας σε γεωτεχνικό σχηματισμό διαφορετικό από αυτούς που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, προκειμένου να διερευνηθεί η αποδοτικότητα της μεθόδου πρότμησης σε σχηματισμούς με καλύτερα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά και με μεγαλύτερο ύψος υπερκειμένων. Η μελέτη αφορά «βραχώδη» σχηματισμό που αποτελείται από σχιστόλιθους -κερατόλιθους και λήφθηκαν από την τεχνική έκθεση της σήραγγας T2 του E65. Δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το 22^ο στάδιο. Οι γεωτεχνικοί παράμετροι σχεδιασμού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Σχηματισμός: Σχιστόλιθοι-Κερατόλιθοι					
GSI	Ύψος υπερκειμένων (m)	E (MPa)	ν	c (KPa)	ϕ°
35	76	567	0,35	217	35

Πίνακας 7.47: Γεωτεχνικοί παράμετροι για τον «βραχώδη» σχηματισμό

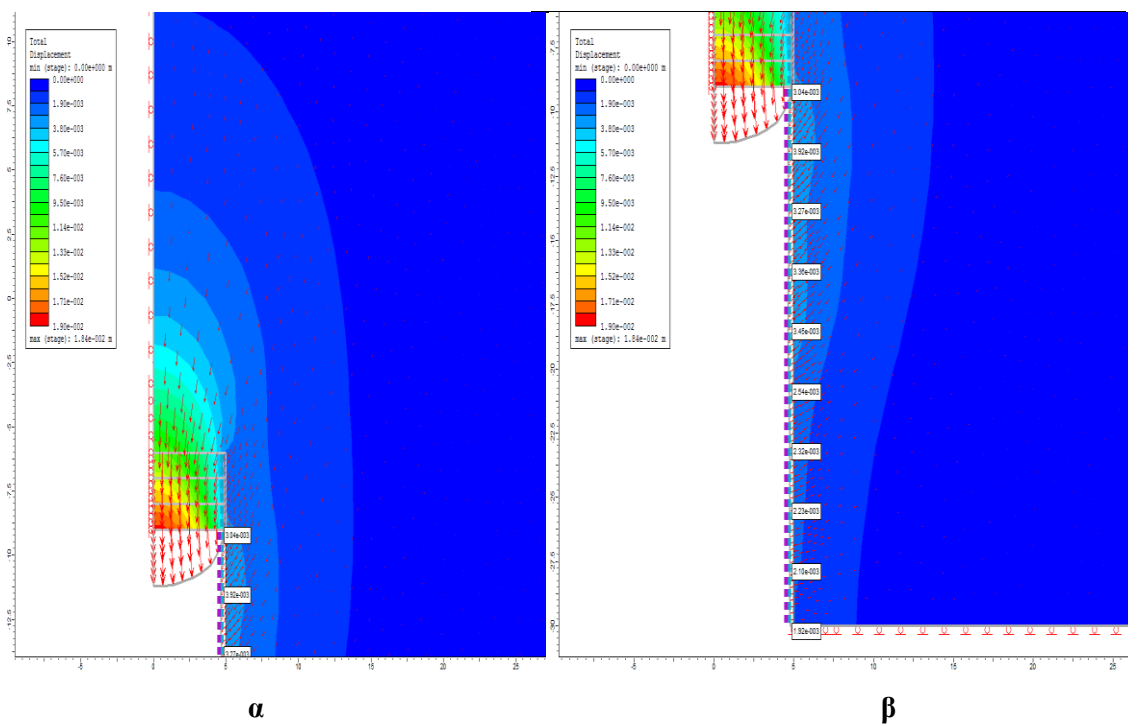
Στον πίνακα 7.63. δίνονται οι μέγιστες τιμές τάσεων σ_1, σ_3 , ολικές μετατοπίσεις της προϋποστήριξης, του σκυροδέματος και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό στο μέτωπο για το 2^ο, 8^ο, 15^ο, 22^ο στάδιο.

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός unsupported 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	6,74
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	2,03
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,04
Συντεταγμένες σημείων(x,y) Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός shotcrete 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	5,55
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	3,85
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις(cm)	2,33
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός προϋποστήριξη 2^ο στάδιο	
(5,-29)	σ_1 (Mpa)	3,72

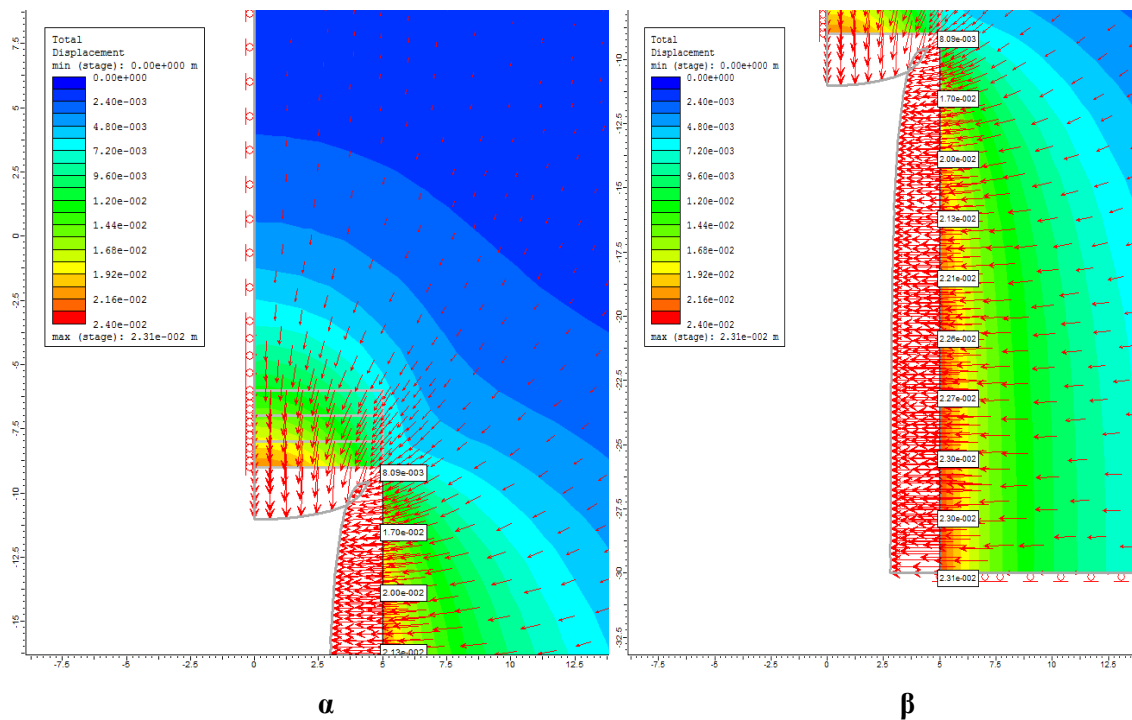
(5,-29)	σ_3 (Mpa)	2,08
(0,-29)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	1,57
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός unsupported 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ_1 (Mpa)	7,02
(5,-23)	σ_3 (Mpa)	2,2
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,09
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός shotcrete 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ_1 (Mpa)	4,13
(5,-23)	σ_3 (Mpa)	1,63
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις(m)	2,79
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 8^ο στάδιο	
(5,-23)	σ_1 (Mpa)	3,44
(5,-23)	σ_3 (Mpa)	2,05
(0,-23)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	1,71
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός unsupported μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ_1 (Mpa)	6,94
(5,-16)	σ_3 (Mpa)	2,34
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,12
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός shotcrete μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ_1 (Mpa)	4,17
(5,-16)	σ_3 (Mpa)	1,71
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,32
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 15^ο στάδιο	
(5,-16)	σ_1 (Mpa)	3,44
(5,-16)	σ_3 (Mpa)	1,94
(0,-16)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	1,79
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	«βραχώδης» σχηματισμός unsupported μέγιστες τιμές 22^ο στάδιο	
(5,-9)	σ_1 (Mpa)	7,23
(5,-9)	σ_3 (Mpa)	2,42
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,13
Συντεταγμένες	«βραχώδης» σχηματισμός shotcrete μέγιστες	

σημείων(x,y)	τιμές 22 ^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	4,13
(5,-9)	σ3 (Mpa)	1,71
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	1,83
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Σχηματισμός :Σχιστόλιθοι-Κερατόλιθοι προϋποστήριξη μέγιστες τιμές 22 ^ο στάδιο	
(5,-9)	σ1 (Mpa)	3,46
(5,-9)	σ3 (Mpa)	1,96
(0,-9)	ολικές μετατοπίσεις (cm)	2,39

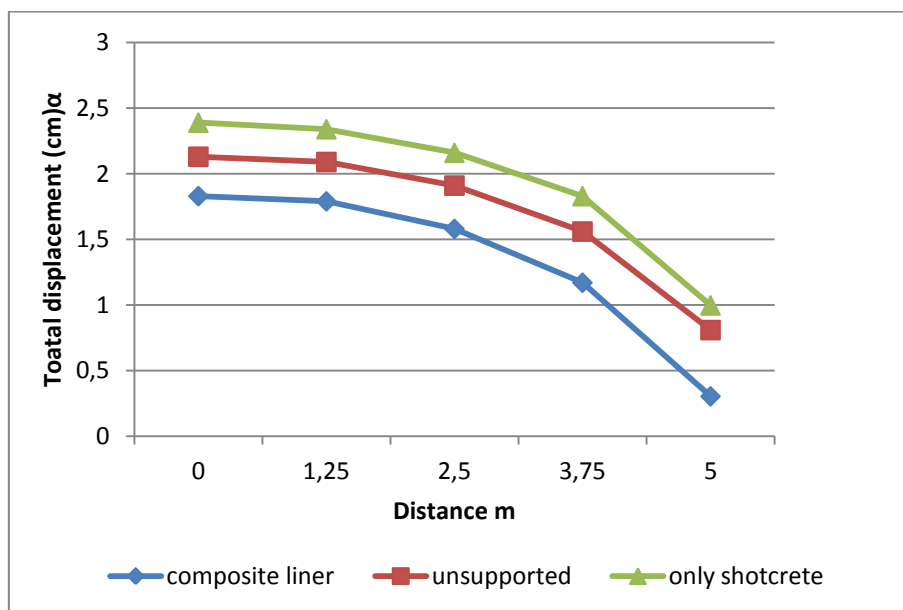
Πίνακας 7.48:Μέγιστες τιμές σ1,σ3,ολικές μετατοπίσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο και μέτωπο υποστηριγμένο για τον «βραχώδη» σχηματισμό και για τα στάδια 2 ,8 ,15, 22.



Εικόνα 7.33: Ολικές μετατοπίσεις 22^ο σταδίου για τον σχηματισμό με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.38: Ολικές μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον σχηματισμό χωρίς υποστήριξη

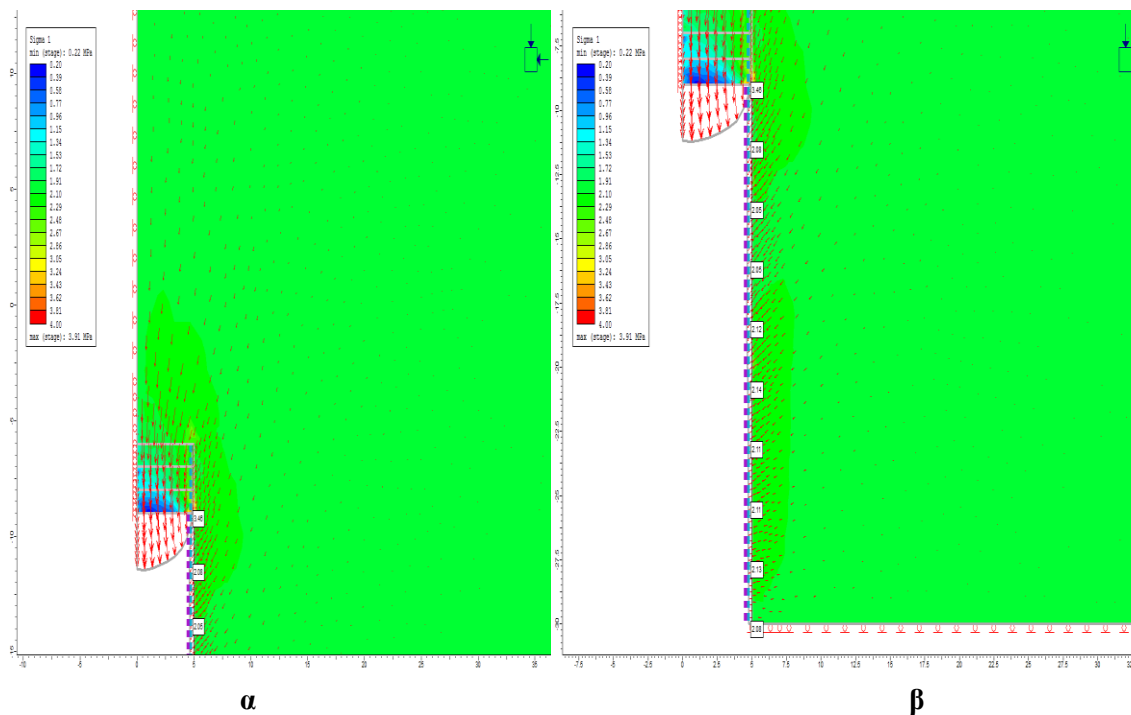


Διάγραμμα 7.44: Διαγράμματα μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

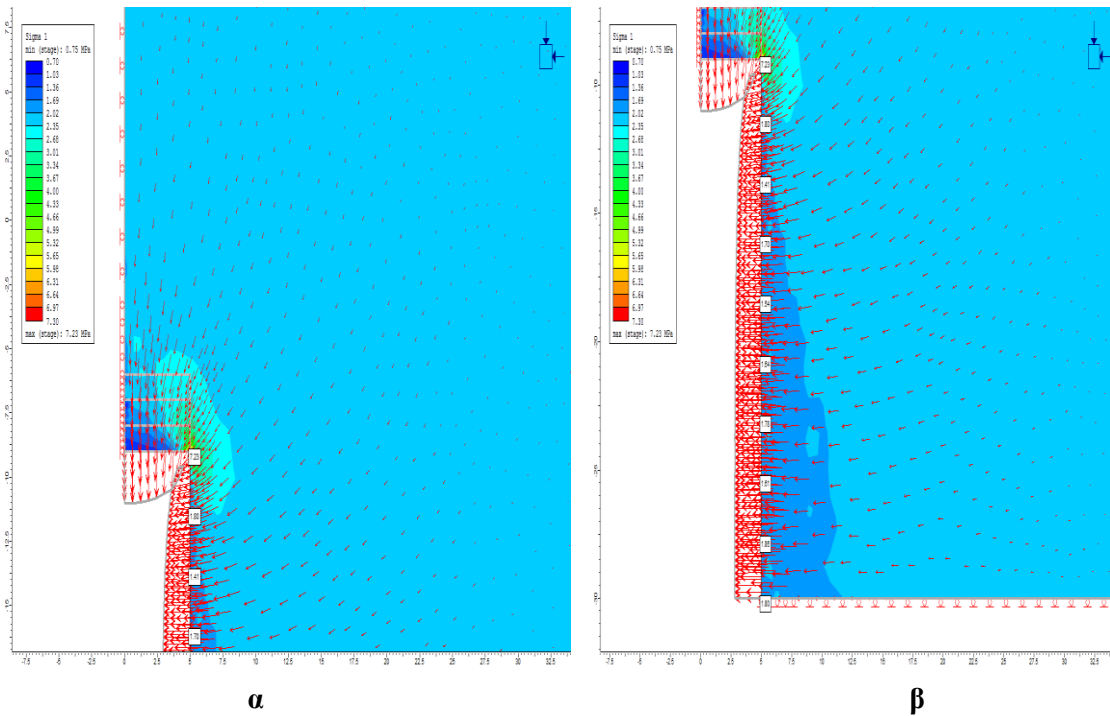
Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (cm)	Προϋποστήριξη (cm)	Only shotcrete (cm)	Ποσοστιαία μείωση % Μεταξύ Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μείωση % Μεταξύ Un-Shotc
(0,-9)	2,13	1,83	2,39	14,084	-12,206
(1.25,-9)	2,09	1,79	2,34	14,354	-11,961
(2.5, -9)	1,91	1,58	2,16	17,277	-13,089
(3.75,-9)	1,56	1,17	1,83	25	-17,307
(5,-9)	0,809	0,304	0,997	62,422	-23,238
Μέσες τιμές	1,6998	1,3348	1,9434	26,627	-15,560

Πίνακας 7.49:Μεταβολή μετατοπίσεων με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

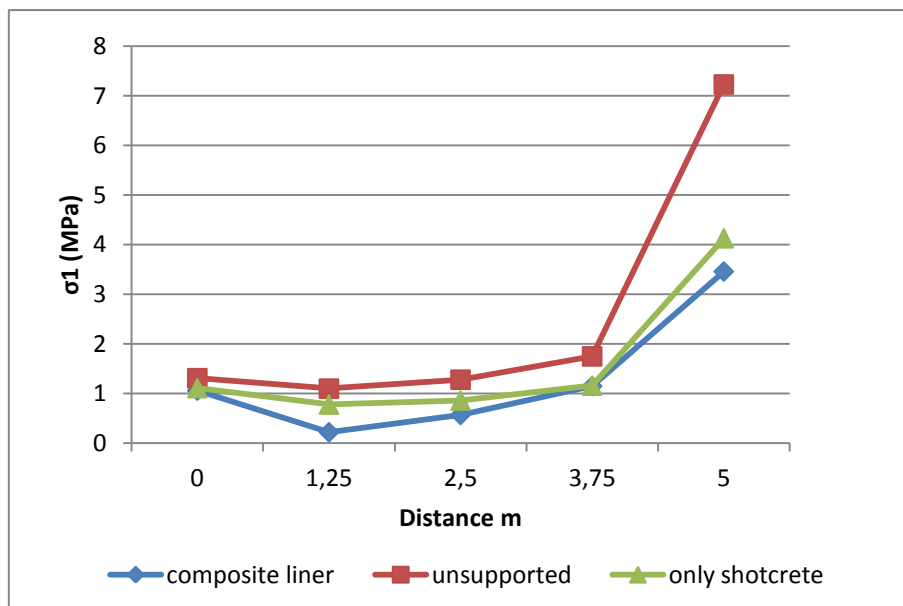
Οι μετατοπίσεις με τη χρήση της προϋποστήριξης μειώνονται σε όλα τα σημεία με την μεγαλύτερη μείωση να εντοπίζεται στο σημείο (5,-9), ενώ με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνονται σε όλα τα σημεία.



Εικόνα 7.34:Τάσεις σ1 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.35: Τάσεις σ_1 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό χωρίς υποστήριξη

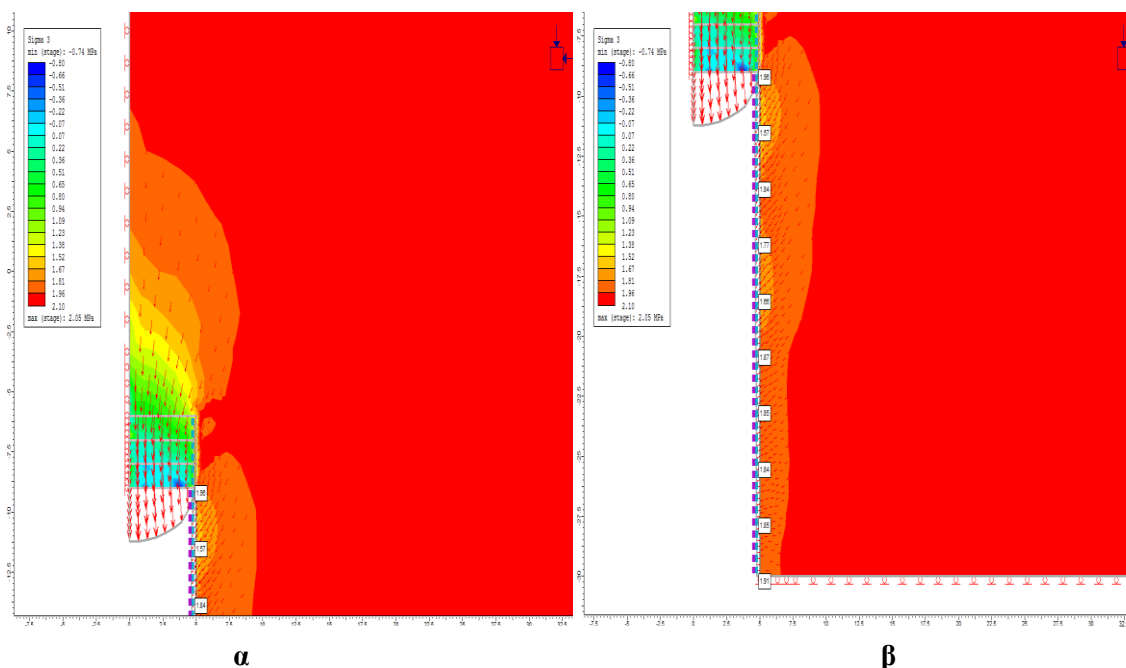


Διάγραμμα 7.45: Διαγράμματα τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

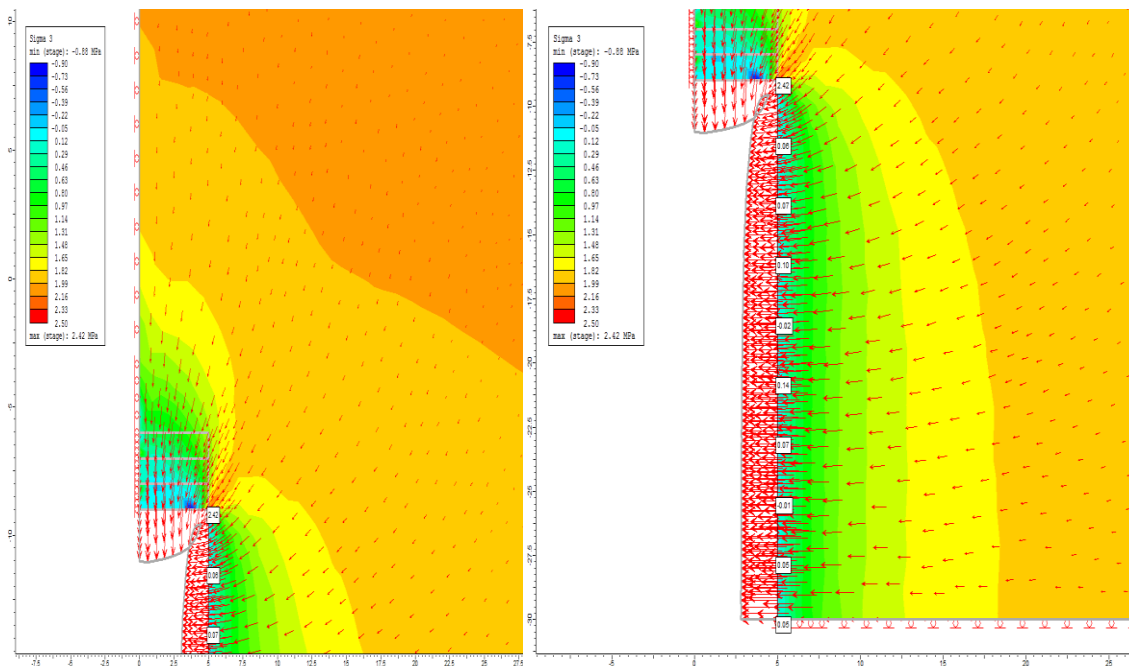
Συντεταγμέν ες σημείων(x,y)	Unsupporte d (MPa)	Προϋποστήριξ η (MPa)	Only shotcret e (MPa)	Ποσοστιαία μεταβολή % Μεταξύ Un- Προϋπ	Ποσοστιαία μεταβολή % Μεταξύ Un- Shotc
(0,-9)	1,31	1,06	1,11	19,083	15,267
(1.25,-9)	1,1	0,22	0,78	80	29,090
(2.5, -9)	1,28	0,57	0,86	55,468	32,812
(3.75,-9)	1,75	1,15	1,16	34,285	33,714
(5,-9)	7,23	3,46	4,13	52,143	42,876
Μέσες τιμές	2,534	1,292	1,608	48,196	30,752

Πίνακας 7.50: Μεταβολή τάσεων σ_1 με προϋποστήριξη, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

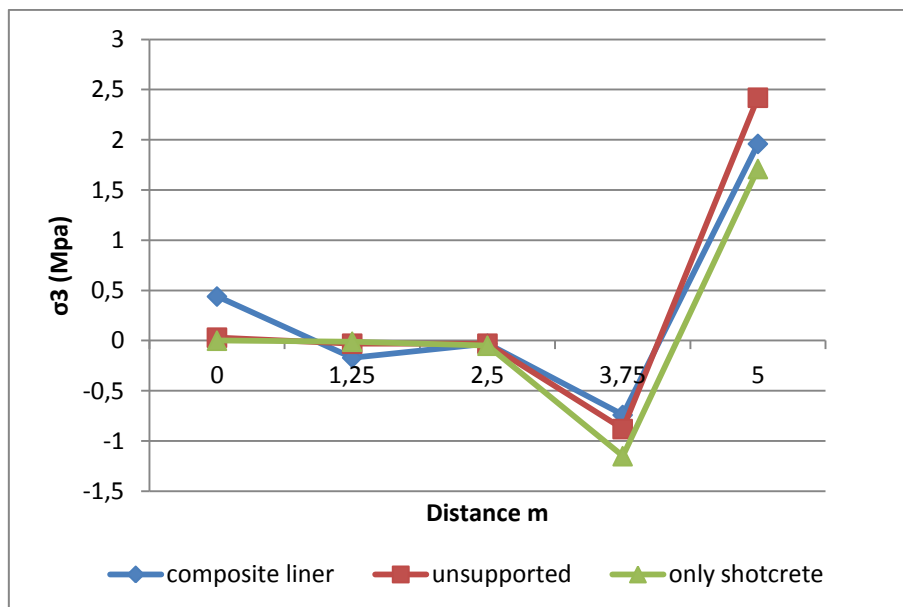
Οι τάσεις σ_1 με την χρήση της προϋποστήριξης και με την χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνονται σε όλα τα σημεία.



Εικόνα 7.36: Τάσεις σ_3 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη



Εικόνα 7.37 Τάσεις σ_3 22^ο σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό χωρίς υποστήριξη



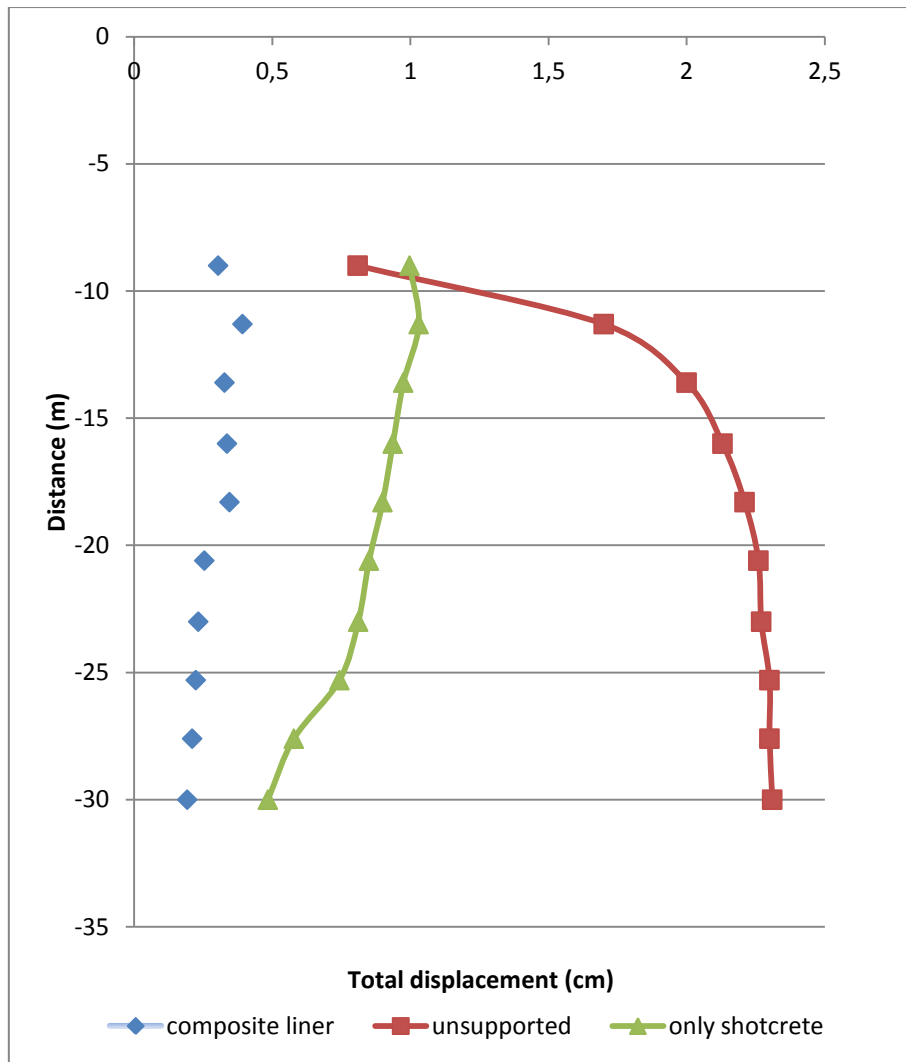
Διάγραμμα 7.46: Διαγράμματα τάσεων σ_3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (MPa)	Προϋποστήριξη (MPa)	Only shotcrete	Ποσοστιαία μεταβολή σ3 % Μεταξύ Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μείωση σ3 % Μεταξύ Un-Shotc
(0,-9)	0,03	0,44	0	-1366,6	100
(1.25,-9)	-0,03	-0,17	-0,01	-466,6	66,6
(2.5,-9)	-0,03	-0,03	-0,05	0	-66,6
(3.75,-9)	-0,88	-0,74	-1,15	15,9	-30,6
(5,-9)	2,42	1,96	1,71	19	29,3

Πίνακας 7.51:Μεταβολή τάσεων σ3 με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο

Οι τάσεις σ3 με την προϋποστήριξη αυξάνονται στα σημεία (0,-9),(1.25,-9) στο σημείο (2.5,-9) μένουν σταθερές και μειώνονται στα σημεία (3.75,-9),(5,-9).

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα και ο πίνακας με τις τιμές των μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας στο 22^ο στάδιο για τον «βραχώδη» σχηματισμό.



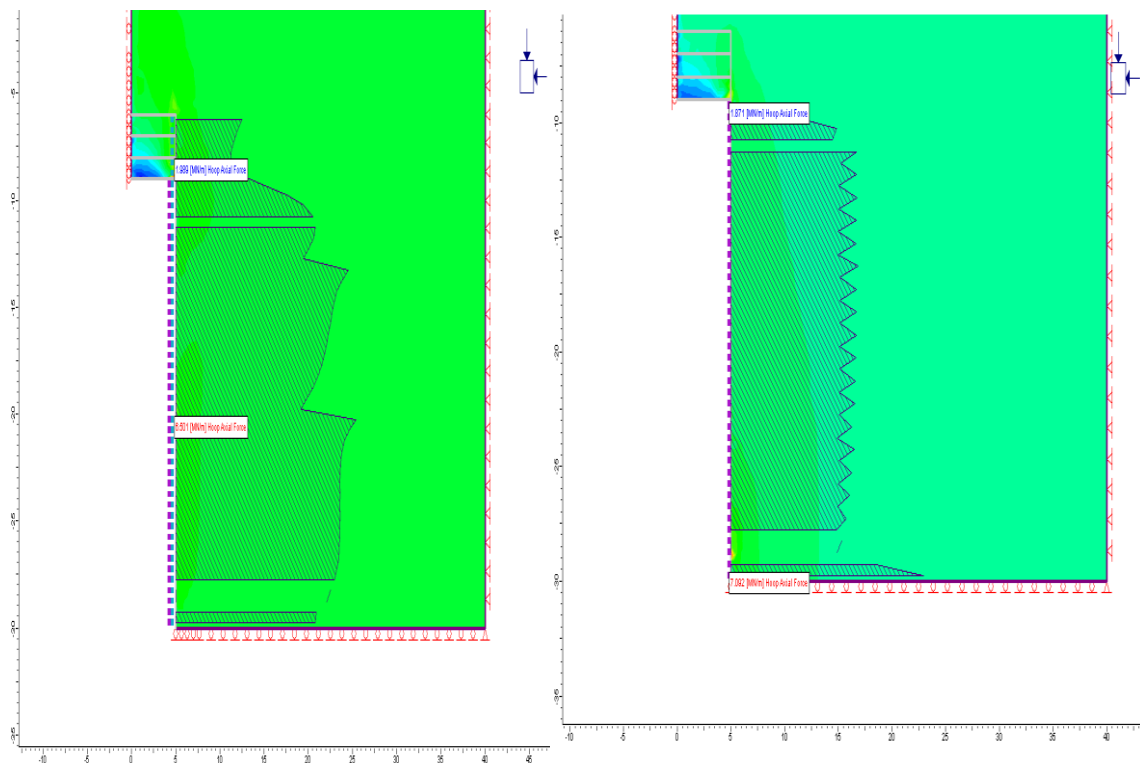
Διάγραμμα 7.47: Διάγραμμα ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση του άξονα σήραγγας

Συντεταγμένες σημείων(x,y)	Unsupported (cm)	Only shotcrete(cm)	Προϋποστήριξη (cm)	Ποσοστιαία μείωση ολικές μετατοπίσεις% Un-Προϋπ	Ποσοστιαία μείωση ολικές μετατοπίσεις% Un-Shotc
(5,-30)	2,31	0,484	0,192	91,688	79,047
(5,-27,6)	2,3	0,578	0,21	90,869	74,869
(5,-25,3)	2,3	0,743	0,223	90,304	67,695
(5,-23)	2,27	0,811	0,232	89,779	64,273
(5,-20,6)	2,26	0,850	0,254	88,761	62,389
(5,-18,3)	2,21	0,899	0,345	84,389	59,321
(5,-16)	2,13	0,936	0,336	84,225	56,056
(5,-13,6)	2	0,974	0,327	83,65	51,3
(5,-11,3)	1,7	1,03	0,392	76,941	39,411
(5,-9)	0,809	0,997	0,304	62,422	-23,238
Μέσες τιμές	2,0289	0,8302	0,2815	84,303	53,112

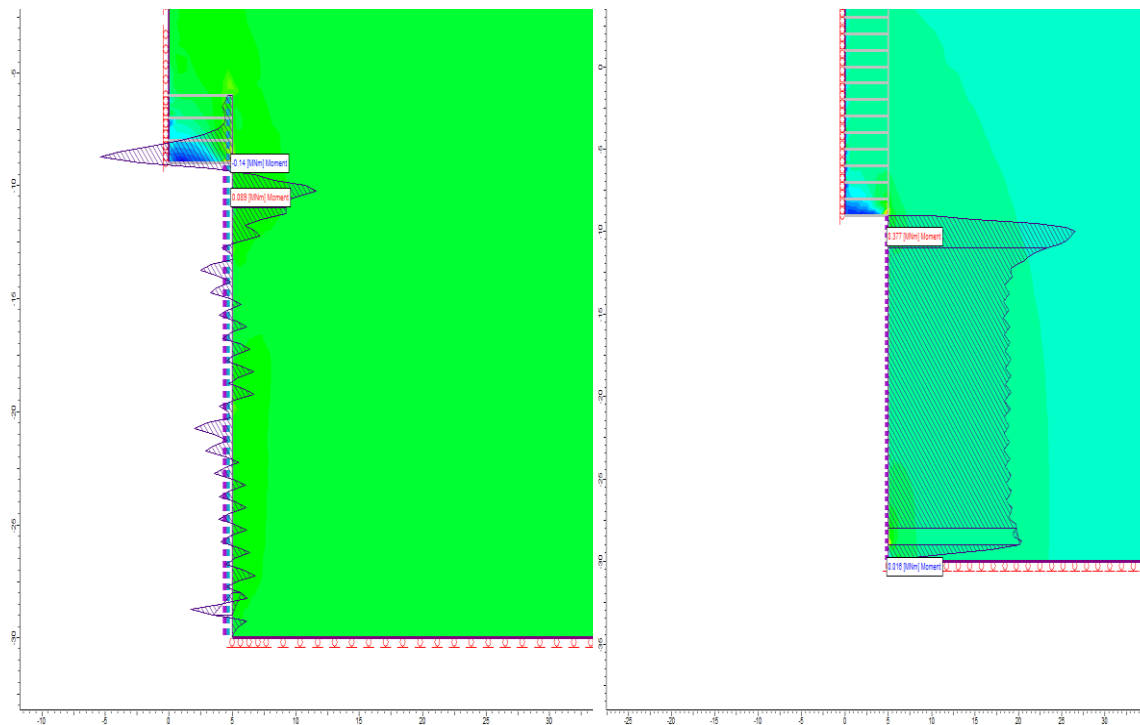
Πίνακας 7.52:Μεταβολή ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας με προϋποστήριξη, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χωρίς υποστήριξη για τον «βραχώδη» σχηματισμό για το 22^ο στάδιο κατά διεύθυνση άξονα σήραγγας

7.6.1. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών

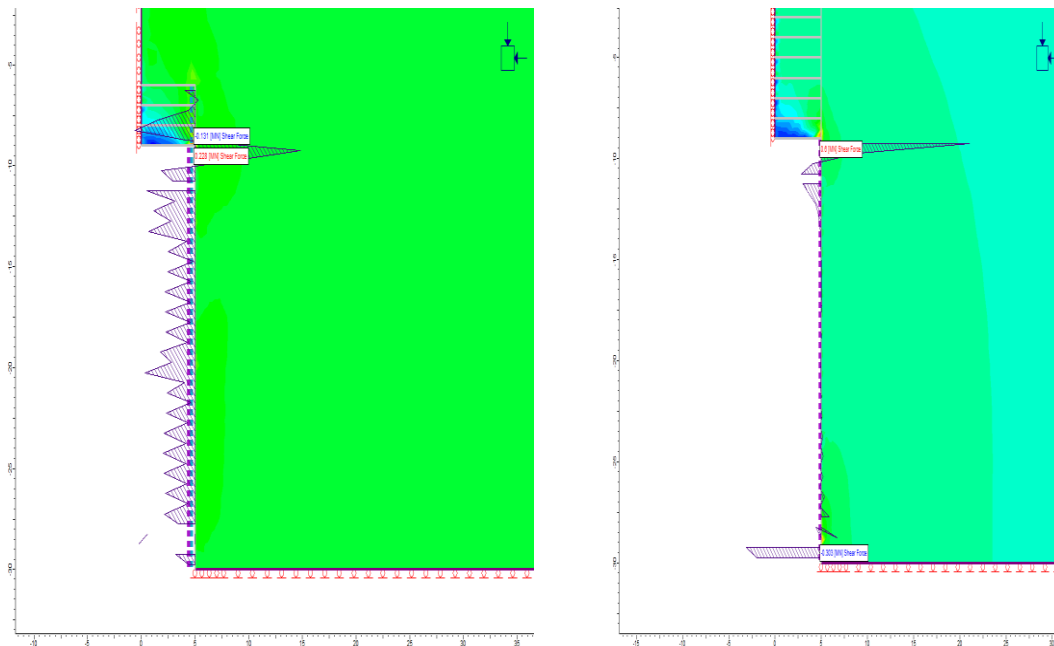
Στη παράγραφο αυτή υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη στο 22^ο στάδιο του «βραχώδη» σχηματισμού.



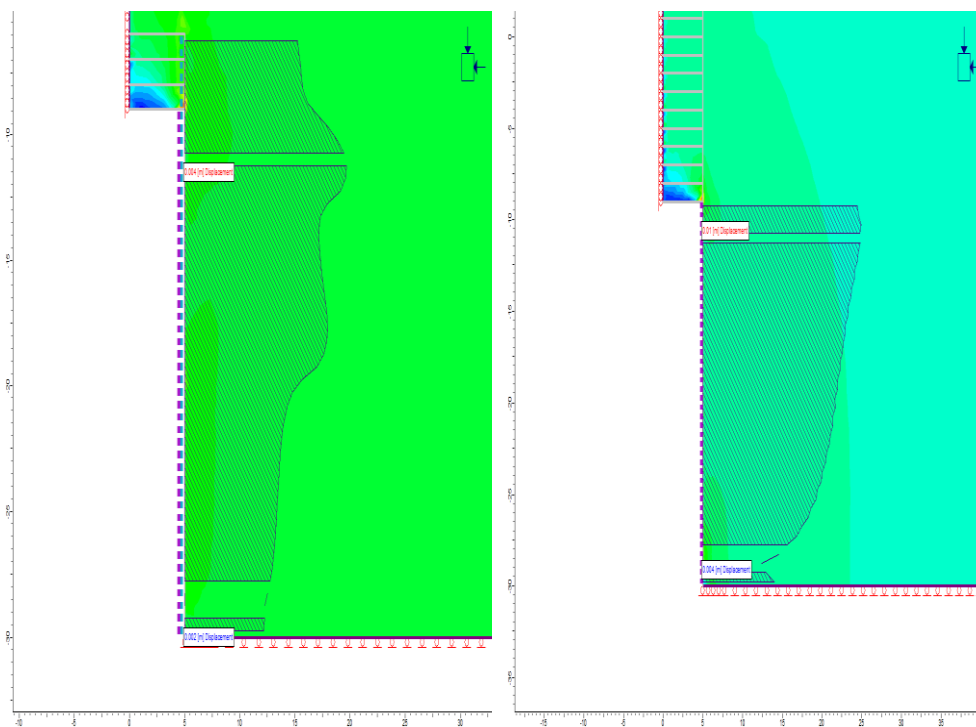
Εικόνα 7.38: Αξονικές δυνάμεις 22^{ου} σταδίου στο δακτύλιο της επένδυσης για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)



Εικόνα 7.39: Καμπτικές ροπές 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)



Εικόνα 7.40: Διατμητικές δυνάμεις 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



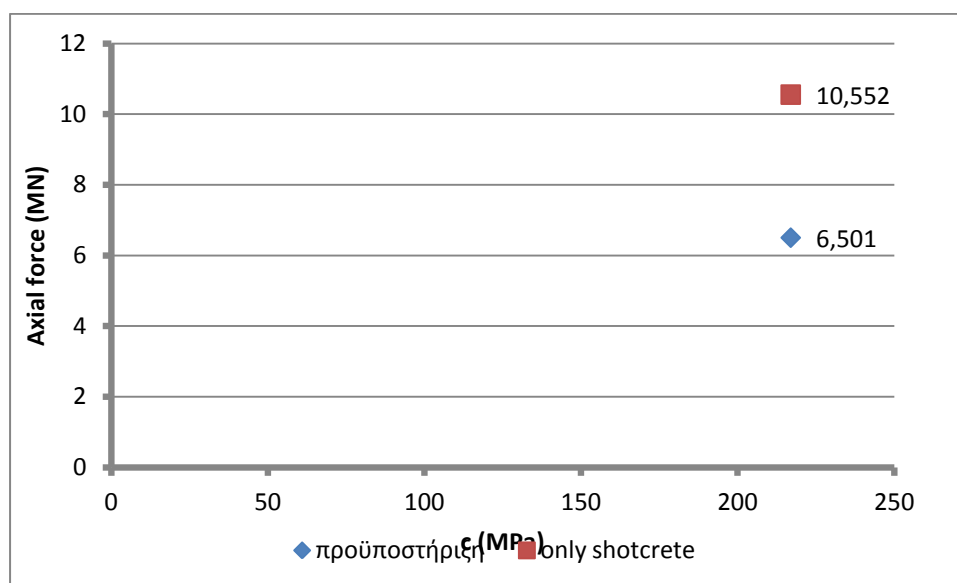
Εικόνα 7.41: Μετατοπίσεις 22^{ου} σταδίου για τον «βραχώδη» σχηματισμό με προϋποστήριξη (αριστερά) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (δεξιά)

Οι αριθμητικές τιμές των εντατικών μεγεθών στο 22^ο στάδιο παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

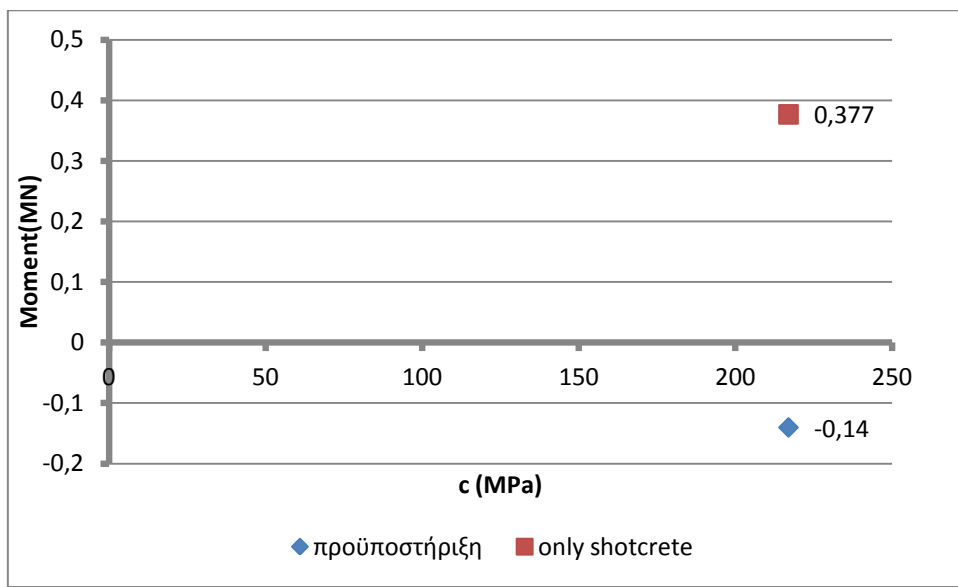
«Βραχώδης» σχηματισμός (Κερατόλιθοι-Σχιστόλιθοι) προϋποστήριξη max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
6,501	-0,14	0,228	0,004
«Βραχώδης» Σχηματισμός (Κερατόλιθοι-Σχιστόλιθοι) προϋποστήριξη min			
Axial force (MN/m)	Moment MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
1,989	0,089	-0,131	0,002
«Βραχώδης» Σχηματισμός (Κερατόλιθοι-Σχιστόλιθοι) shotcrete max			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
10,552	0,377	0,6	0,004
«Βραχώδης» Σχηματισμός (Κερατόλιθοι-Σχιστόλιθοι) shotcrete min			
Axial force (MN/m)	Moment(MNm)	Shear force(MN)	Displacement(m)
2,568	0,016	-0,303	0,01

Πίνακας 7.53: Τα εντατικά μεγέθη για τον «βραχώδη» σχηματισμό» με προϋποστήριξη και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

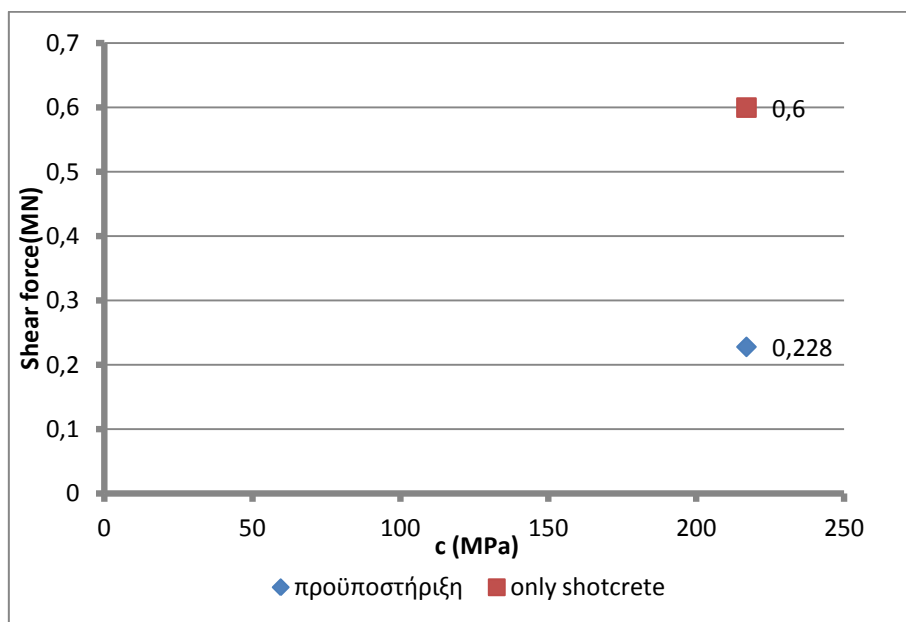
7.6.2.Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών



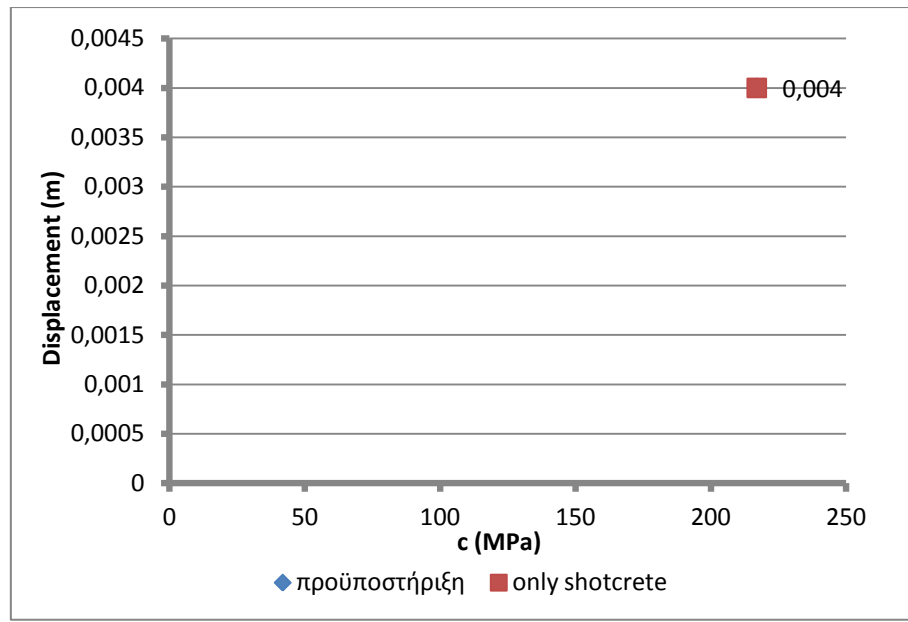
Διάγραμμα 7.52: Σύγκριση αξονικών δυνάμεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος του «βραχώδη» σχηματισμού



Διάγραμμα 7.53: Σύγκριση καμπτικών ροπών μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος του «βραχώδη» σχηματισμού



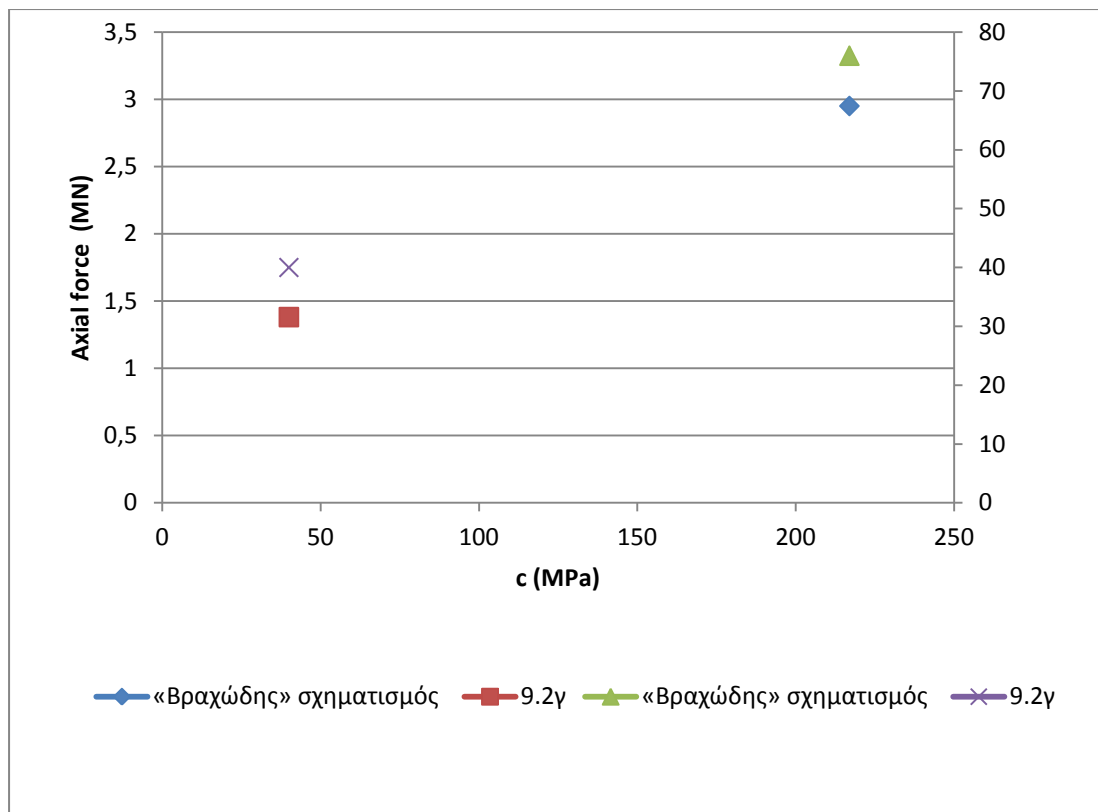
Διάγραμμα 7.54: Σύγκριση διατμητικών δυνάμεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος του «βραχώδη» σχηματισμού



Διάγραμμα 7.55: Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος του «βραχώδη» σχηματισμού

7.6.3. Σύγκριση των εντατικών μεγεθών με προϋποστήριξη του «βραχώδη» σχηματισμού με τον εδαφικό σχηματισμό 9.2γ

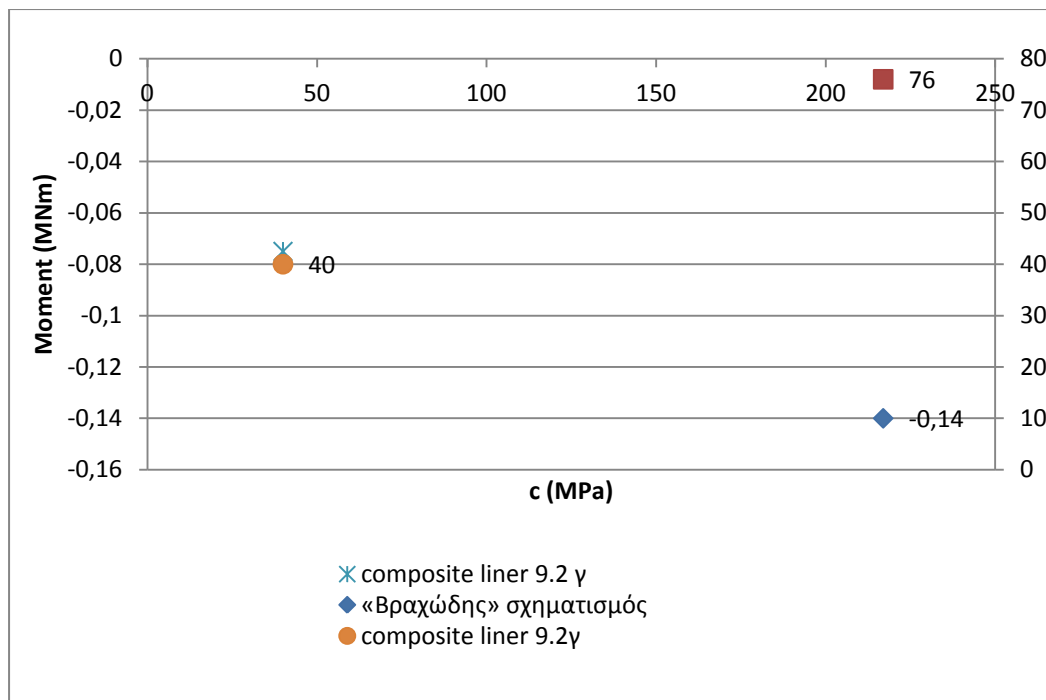
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των εντατικών μεγεθών μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του σχηματισμού 9.2γ που έχει την μικρότερη συνοχή.



Διάγραμμα 7.56: Σύγκριση των Αξονικών δυνάμεων με προϋποστήριξη μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του σχηματισμού 9.2γ.

Αξονικές δυνάμεις

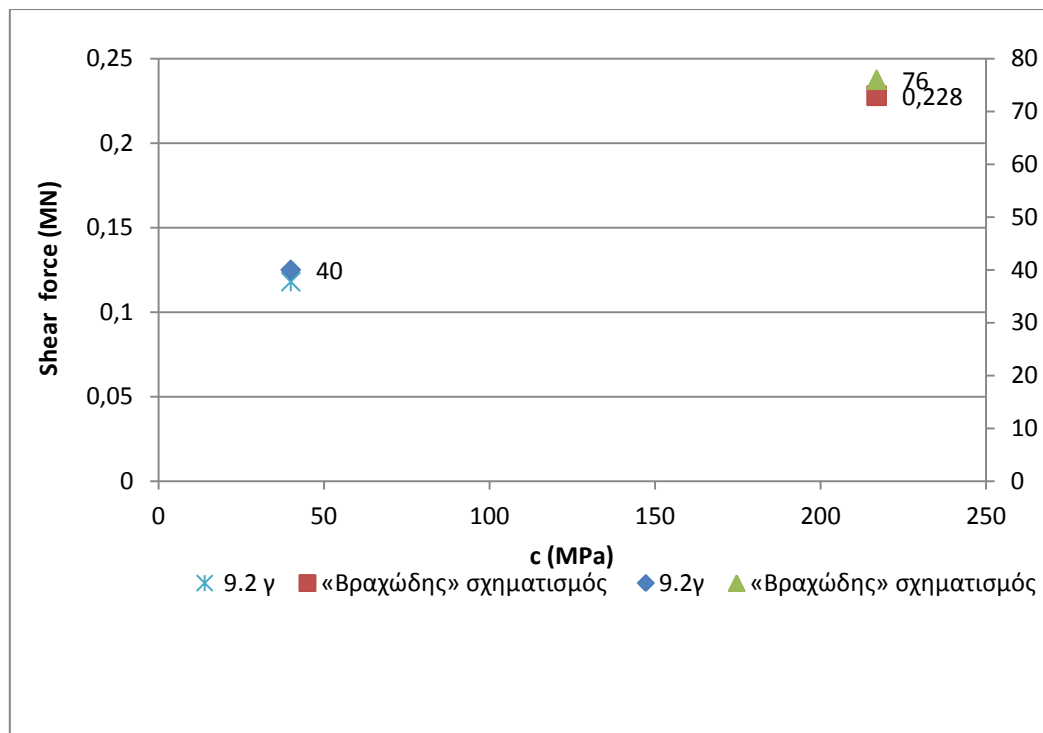
Σύμφωνα με το διάγραμμα 7.56 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης οι μέγιστη τιμή των αξονικών δυνάμεων του «βραχώδη» σχηματισμού είναι 6,501(MN/m) και είναι μικρότερη από του σχηματισμού 9.2γ όπου είναι 10,552 (MN/m).



Διάγραμμα 7.57: Σύγκριση των Κοιτικών ροπών με προϋποστήριξη μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του σχηματισμού 9.2 γ .

Καμπτικές ροπές

Σύμφωνα με το διάγραμμα 7.57 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης η μέγιστη τιμή των καμπτικών ροπών του «βραχώδη» σχηματισμού είναι αρνητική με τιμή -0,14 και είναι μεγαλύτερη από του σχηματισμού 9.2 γ όπου είναι αρνητική με τιμή -0,075.

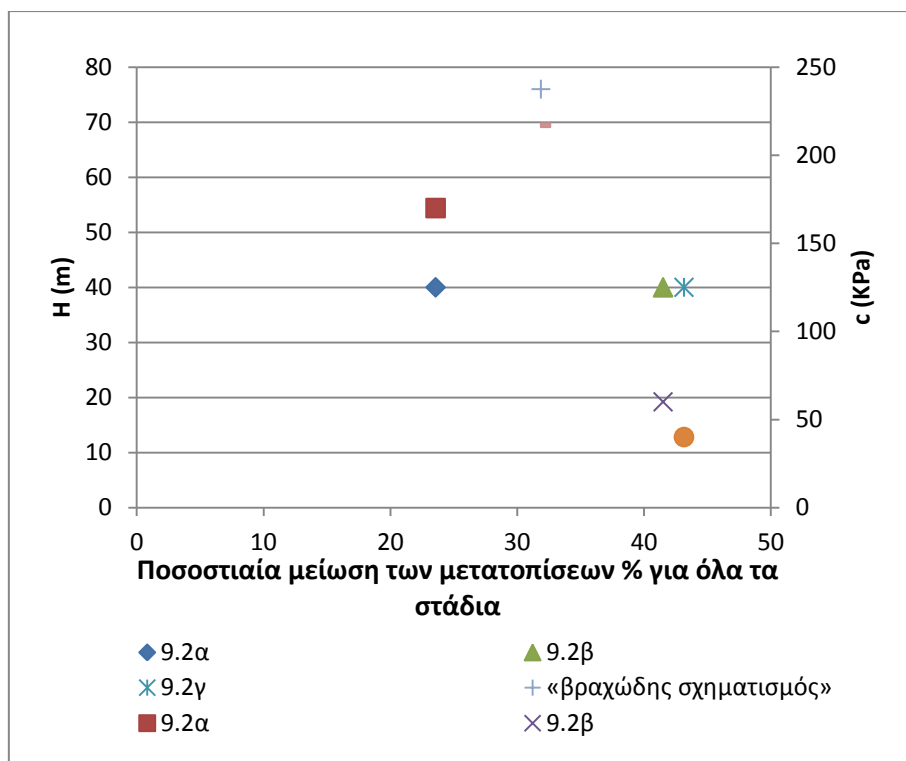


Διάγραμμα 7.58: Σύγκριση των διατμητικών δυνάμεων με προϋποστήριξη μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του σχηματισμού 9.2γ.

Διατμητικές δυνάμεις

Σύμφωνα με το διάγραμμα 7.58 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης η μέγιστη τιμή των διατμητικών δυνάμεων του «βραχώδη» σχηματισμού είναι θλιπτική με τιμή 0,228 και είναι μεγαλύτερη από του σχηματισμού 9.2γ όπου είναι θλιπτική με τιμή 0,118.

7.7. Σύγκριση των ολικών μετατοπίσεων και των κυρίων τάσεων του «βραχώδη» σχηματισμού με τους εδαφικούς σχηματισμούς 9.2α, 9.2β, 9.2γ.

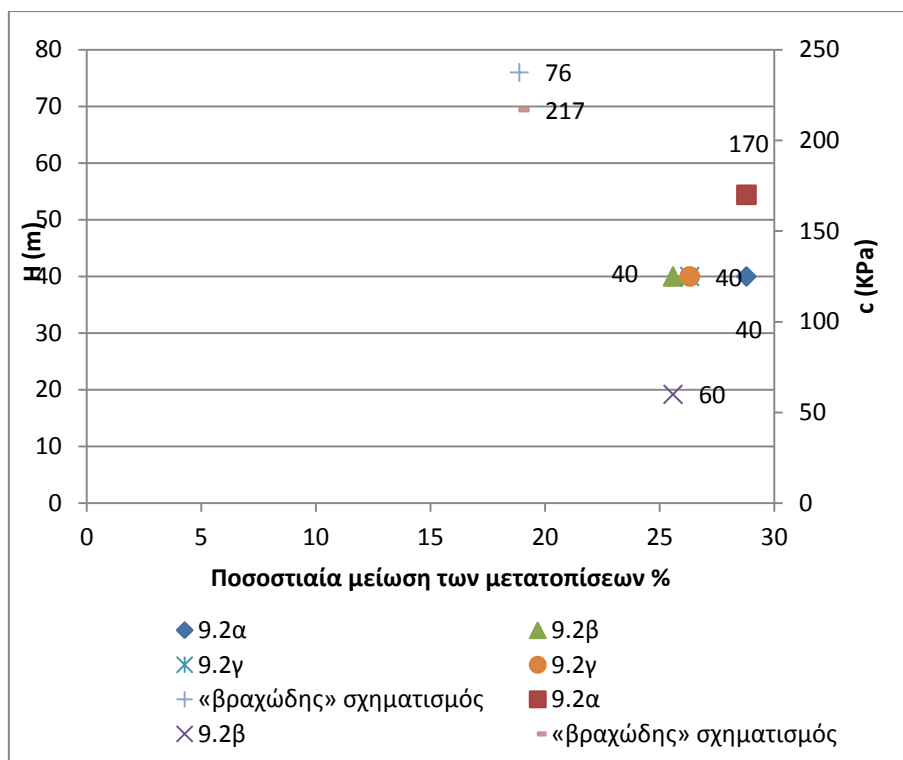
Ολικές μετατοπίσεις

Διάγραμμα 7.59: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με χρήση προϋποστήριξης μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί με χρήση προϋποστήριξης	Μέση μείωση % των μετατοπίσεων του μετώπου στο 2°, 8°, 15°, 22° σταδίου
9.2α	23,572
9.2β	41,510
9.2γ	43,159
«βραχώδης» σχηματισμός	31,876

Πίνακας 7.54: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με χρήση προϋποστήριξης μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.54 η μέση ποσοστιαία μείωση των μετατοπίσεων με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης στο μέτωπο του σχηματισμού 9.2α προκύπτει λαμβάνοντας τις μέσες τιμές των μετατοπίσεων σε όλες τις θέσεις που εξετάστηκαν στο 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο είναι 23,572%. Αντίστοιχα με την ίδια διαδικασία για το 9.2β είναι 41,510% για το 9.2γ 43,159% για τον βραχώδη σχηματισμό είναι 31,876%

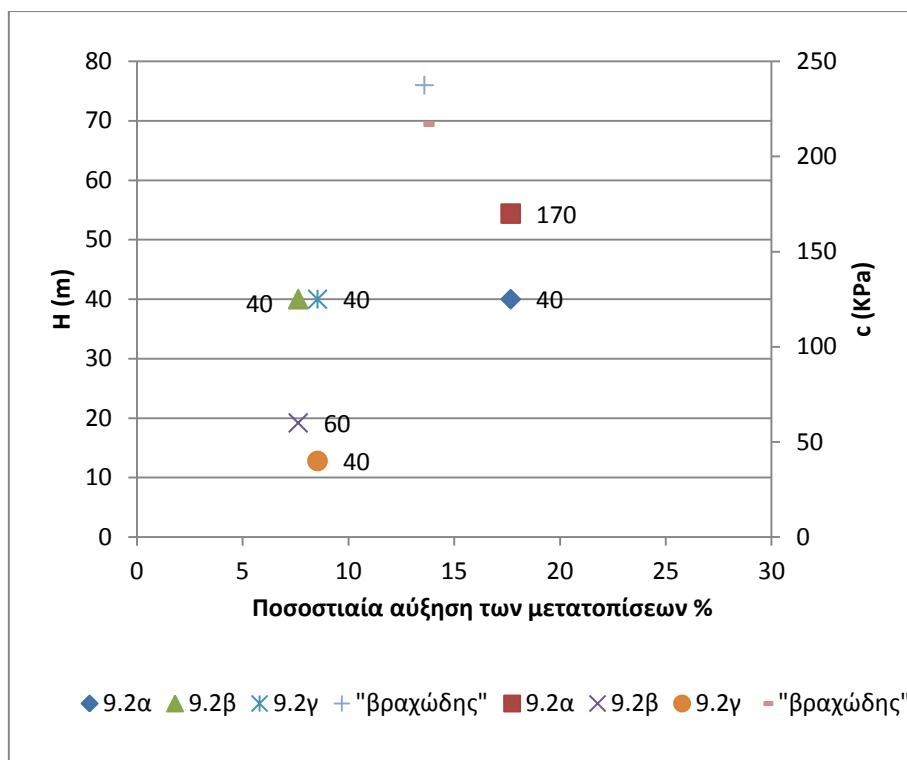


Διάγραμμα 7.60: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2^ο στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Μέση μείωση % ολικές μετατοπίσεις του μετώπου του 2 ^{ου} σταδίου
9.2α	28,790
9.2β	25,585
9.2γ	26,315
«βραχώδης» σχηματισμός	18,879

Πίνακας 7.55: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2^ο στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.55 η μέση ποσοστιαία μείωση των μετατοπίσεων με την μεμονωμένη εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο των σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ και του «βραχώδη» σχηματισμού προκύπτει λαμβάνοντας τις μέσες τιμές των μετατοπίσεων σε όλες τις θέσεις που εξετάστηκαν στο 2^ο στάδιο. Για το 9.2α η μέση τιμή μείωσης των μετατοπίσεων του 2^{ου} σταδίου είναι 28,790% του 9.2β 25,585% του 9.2γ 26,315% του «βραχώδη» σχηματισμού είναι 18,879%

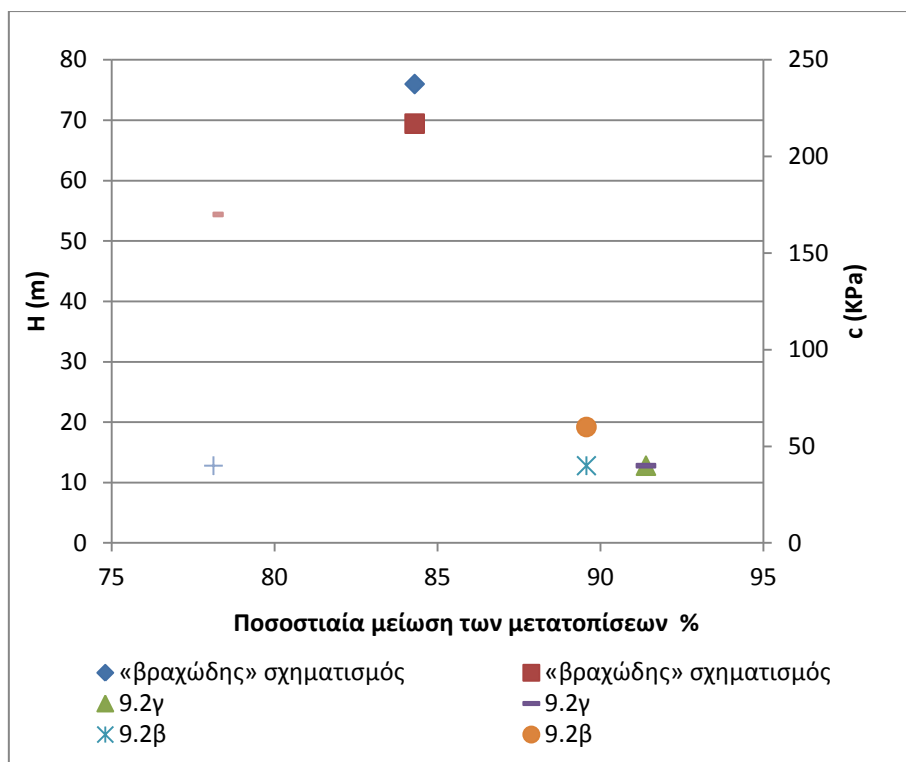


Διάγραμμα 7.61: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας αύξησης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 8°, 15°, 22° στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί με εκτοξευόμενο σκυροδέμα	Μέση ποσοστιαία αύξηση % των μετατοπίσεων του μετώπου στο 8°, 15°, 22° στάδιο
9.2α	17,674
9.2β	7,629
9.2γ	8,542
«βραχώδης» σχηματισμός	13,593

Πίνακας 7.56: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας αύξησης των μετατοπίσεων στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 8°, 15°, 22° στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.56 η μέση ποσοστιαία αύξηση των μετατοπίσεων με την μεμονωμένη εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο είναι για το 9.2^α **17,674 %**, για το 9.2β **7,629%**, για το 9.2γ **8,542%**, για το «βραχώδη» σχηματισμό **13,593%**.

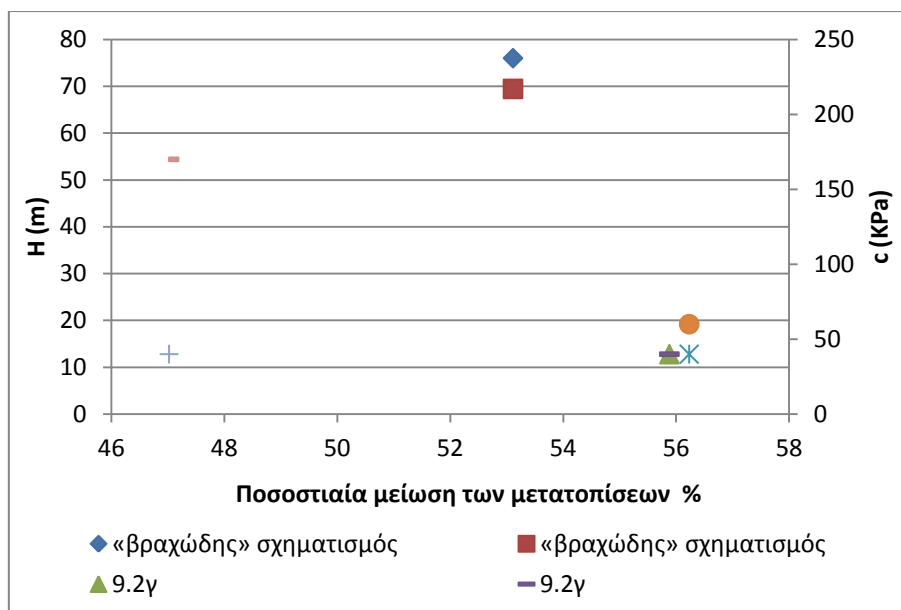


Διάγραμμα 7.62: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων κατά διεύθυνση του άξονα της σήραγγας με χρήση προϋποστήριξης μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 22^ο στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί	Μέση ποσοστιαία μείωση % των μετατοπίσεων του μετώπου στο 2 ^ο , 8 ^ο , 15 ^ο , 22 ^ο στάδιο
9.2α	78,127
9.2β	89,574
9.2γ	91,401
«βραχώδης» σχηματισμός	84,303

Πίνακας 7.57: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων κατά διεύθυνση του άξονα της σήραγγας με χρήση προϋποστήριξης μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 22^ο στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.57 η μέση ποσοστιαία μείωση των μετατοπίσεων με την τοποθέτηση προϋποστήριξης κατά μήκος εκσκαφής της σήραγγας είναι για το 9.2α 78,127%, για το 9.2β 89,574 %, για το 9.2γ 91,401%, για το «βραχώδη» σχηματισμό 84,303 %.



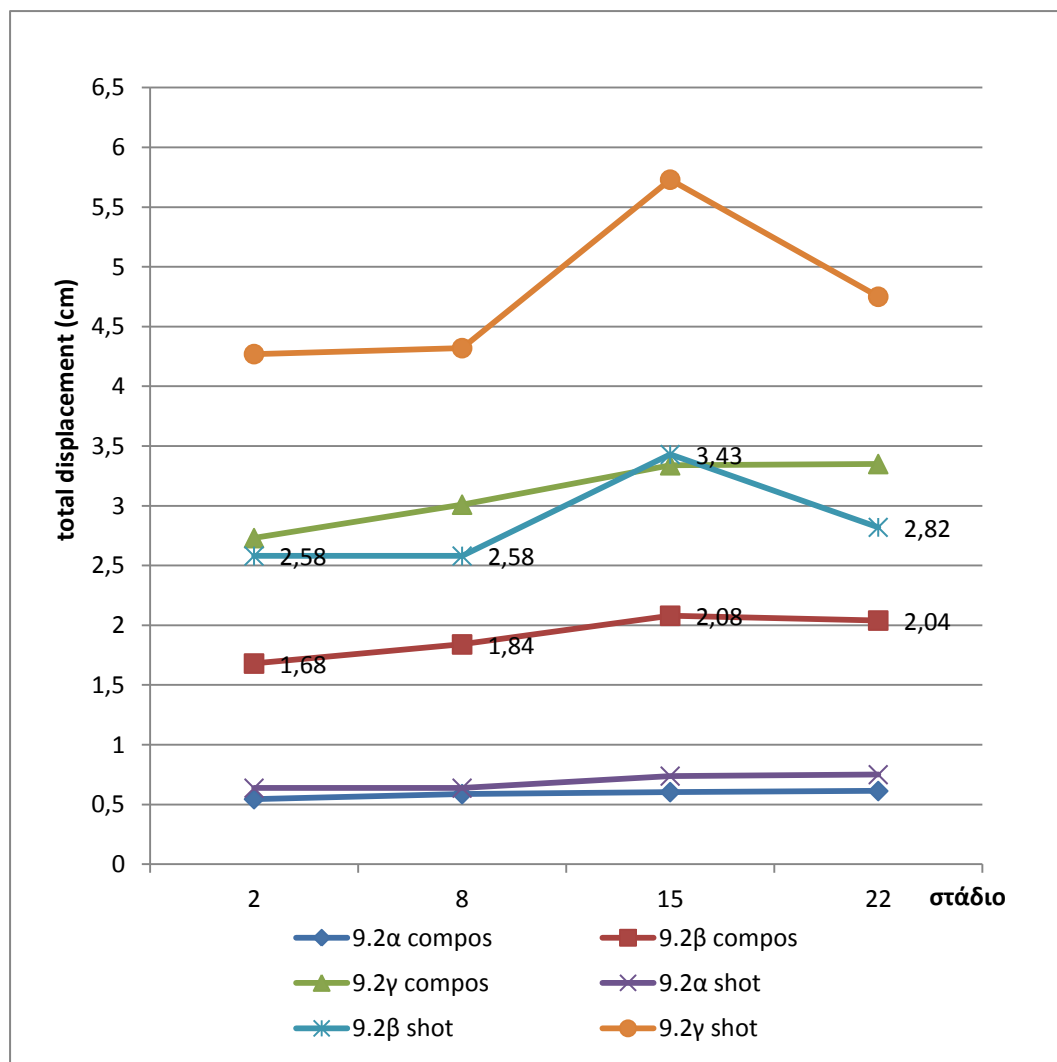
Διάγραμμα 7.63: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων κατά διεύθυνση του άξονα της σήραγγας με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 22° στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί	Μέση ποσοστιαία μείωση % των μετατοπίσεων του μετώπου στο 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο
9.2α	47,020
9.2β	56,232
9.2γ	55,881
«βραχώδης» σχηματισμός	53,112

Πίνακας 7.58: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των μετατοπίσεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας με μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 22° στάδιο.

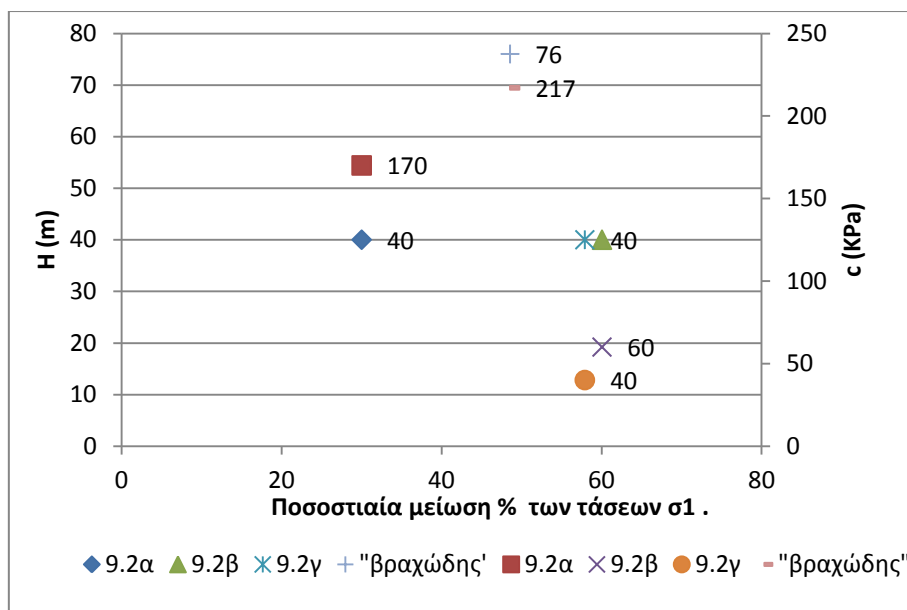
Σύμφωνα με τον πίνακα 7.58 η μέση ποσοστιαία μείωση των μετατοπίσεων με την μεμονωμένη εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά μήκος εκσκαφής της σήραγγας είναι για το 9.2α 47,020%, για το 9.2β 56,232%, για το 9.2γ 55,881%, για το «βραχώδη» σχηματισμό 53,112%.

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα με τις μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων στο κέντρο του μετώπου από την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο για τους σχηματισμούς 9.2α 9.2β 9.2γ και τον «βραχώδη»



Διάγραμμα 7.64: Μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων στο κέντρο του μετώπου από την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο για τους σχηματισμούς 9.2α 9.2β 9.2γ

Με βάση το διάγραμμα 7.64 με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης σε όλους τους σχηματισμούς που εξετάζονται παρατηρείται μία σταθεροποίηση των μετατοπίσεων στο κέντρο του μετώπου έναντι του εκτοξευόμενου σκυροδέματος όπου βλέπουμε μία απότομη αύξηση αυτών στο 15° στάδιο. Επίσης είναι εμφανές ότι με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης οι μετατοπίσεις για όλους σχηματισμούς μειώνονται έναντι της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

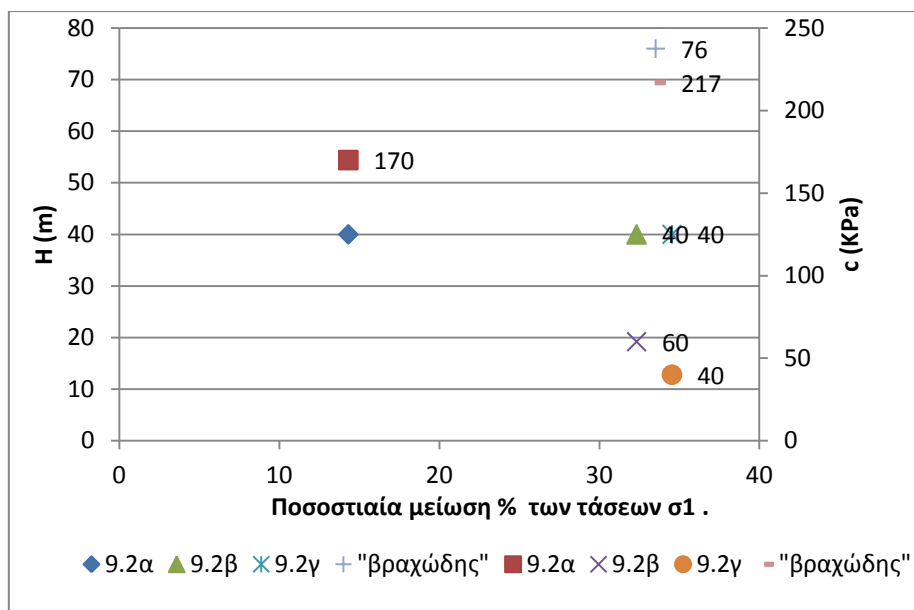
Κύριες τάσεις

Διάγραμμα 7.65: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των τάσεων σ_1 στο μέτωπο με προϋποστήριξη μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί	Μέση ποσοστιαία μείωση % των σ_1 του μετώπου στο 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο με προϋποστήριξη
9.2α	30,014
9.2β	60,057
9.2γ	57,910
«βραχώδης» σχηματισμός	48,561

Πίνακας 7.59: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των τάσεων σ_1 στο μέτωπο με προϋποστήριξη μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.59 η μέση ποσοστιαία μείωση των τάσεων σ_1 με την τοποθέτηση προϋποστήριξης στο μέτωπο για το 9.2α 30,014 % για το 9.2β 60,057 % για το 9.2γ 57,910% για το «βραχώδη» σχηματισμό 48,561%.



Διάγραμμα 7.66: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των τάσεων σ_1 στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Εδαφικοί σχηματισμοί	Μέση μείωση % των σ_1 του μετώπου στο 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο
9.2α	14,316
9.2β	32,332
9.2γ	34,544
«βραχώδης» σχηματισμός	33,523

Πίνακας 7.60: Σύγκριση μέσης ποσοστιαίας μείωσης των τάσεων σ_1 στο μέτωπο με μεμονωμένη χρήση σκυροδέματος μεταξύ του «βραχώδη» σχηματισμού και του εδαφικών σχηματισμών 9.2α, 9.2β, 9.2γ για το 2°, 8°, 15°, 22° στάδιο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.60 η μέση ποσοστιαία μείωση των τάσεων σ_1 με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο είναι: για το 9.2α 14,316%, για το 9.2β 32,332%, για το 9.2γ 34,544 %, για το «βραχώδη» σχηματισμό 33,523%.

7.7.1. Συνολικές παρατηρήσεις μετά την τοποθέτηση προϋποστήριξη και της μεμονωμένης χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete)

Εξετάζοντας τα δεδομένα που λάβαμε από τις αναλύσεις των τεσσάρων εδαφικών σχηματισμών διαπιστώνουμε τα εξής:

Ολικές μετατοπίσεις

- Γενικά και στους τέσσερις εδαφικούς σχηματισμούς που εξετάστηκαν παρατηρήθηκαν μετατοπίσεις στο μέτωπο και πλευρικά της σήραγγας οι οποίες ήταν της τάξης των μερικών εκατοστών λόγω των σχηματισμών και του μικρού ύψους υπερκειμένων. Συγκρίνοντας τα πέντε σημεία όλων των σταδίων των ανυποστήρικτων μετώπων που εξετάστηκαν και από τα οποία λήφθηκαν τα δεδομένα, οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εντοπίζονται στο σημείο Α και οι ελάχιστες μετατοπίσεις στο σημείο Ε (**εικόνα 7.1**).
- Με βάση το **διάγραμμα 7.59** με την εφαρμογή της προϋποστήριξης στους σχηματισμούς που εξετάστηκαν παρατηρείται αρκετά μεγάλη μείωση των εξωθήσεων. Πιο συγκεκριμένα η μέση τιμή μείωσης των εξωθήσεων έναντι του ανυποστήρικτου μετώπου είναι: για το σχηματισμό 9.2α της τάξης του 23,572%, για το «βραχώδη» σχηματισμό 31,876% ,για το σχηματισμό 9.2β 41,510% και για το σχηματισμό 9.2γ 43,159%.Όσο αφορά τις ακτινικές μετατοπίσεις κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας οι μειώσεις έναντι του ανυποστήρικτου είναι αρκετά μεγάλες καθώς για το σχηματισμό 9.2α είναι της τάξης του 78,127%, για το σχηματισμό 9.2β της τάξης του 89,574%, για το σχηματισμό 9.2γ της τάξης του 91,401% και για το «βραχώδη» σχηματισμό φτάνει το 84,303%.Με βάση λοιπόν τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι με την εφαρμογή της προϋποστήριξης μειώνονται οι εξωθήσεις και οι ακτινικές μετατοπίσεις όσο μειώνεται η συνοχή και η γωνία τριβής, δηλαδή με την μείωση της συνοχής η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνεται.
- Με την μεμονωμένη χρήση σκυροδέματος παρατηρείται αύξηση των εξωθήσεων του μετώπου πλην του δεύτερου σταδίου. Πιο συγκεκριμένα για το σχηματισμό 9.2α παρατηρείται αύξηση της τάξης 17,674% για το σχηματισμό 9.2β αύξηση κατά 7,629% για το σχηματισμό 9.2γ αύξηση της τάξης του 8,542% και για το «βραχώδη» σχηματισμό αύξηση της τάξης του 13,593% έναντι του ανυποστήρικτου μετώπου. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στο ότι η σήραγγα υποστηρίζεται μόνο πλευρικά από σκυρόδεμα γεγονός που οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων στα τοιχώματά της και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μέτωπο παραμένει καθ όλη την διάρκεια των εκσκαφών ανυποστήρικτο οδηγεί σε αύξηση της εξώθησης του μετώπου. Όσο αφορά τις ακτινικές μετατοπίσεις κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας

οι μειώσεις έναντι του ανυποστήρικτου είναι αρκετά μεγάλες μικρότερες, όμως από της προϋποστήριξης καθώς για το σχηματισμό 9.2α είναι της τάξης του 47,02%, για το σχηματισμό 9.2β της τάξης του 56,232%, για το σχηματισμό 9.2γ της τάξης του 55,881% και για το «βραχώδη» σχηματισμό φτάνει το 53,112%.

Κύριες τάσεις σ1 και σ3

Οι ελάχιστες τιμές των τάσεων σ1 εντοπίζονται στο σημείο Α ενώ οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται στο σημείο Ε του μετώπου(εικόνα 7.1)

Έτσι με βάση το διάγραμμα 7.65 η μέση τιμή μείωσης με την προϋποστήριξη για το σχηματισμό 9.2α είναι 29,5%, για το σχηματισμού 9.2β 58,5%, για το 9.2γ 58,3% και για το «βραχώδη» 47,3%. Αντίστοιχα με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος η μέση τιμή μείωσης των τάσεων σ1 είναι για το σχηματισμό 9.2α είναι 31,016%, για το σχηματισμού 9.2β 31,589%, για το 9.2γ 34,881% και για το «βραχώδη» 14,544%.

Στη πλειονότητα των σημείων που εξετάστηκαν με την τοποθέτηση της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρήθηκε αύξηση των τάσεων σ3.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση της αποτελεσματικότητας μίας συγκεκριμένης μεθόδου προϋποστήριξης (pretunnel) στην ευστάθεια του μετώπου αβαθούς σήραγγας και στο τρόπο αλληλεπίδρασής της με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επίσης εξετάστηκε η συμπεριφορά της βραχώμαζας με την μεμονωμένη τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος έναντι ανυποστήρικτου μετώπου. Ειδικότερα, μελετήθηκαν οι μεταβολές των τάσεων και των μετατοπίσεων με την εφαρμογή της προϋποστήριξης και εκτοξευόμενου σκυροδέματος αρχικά για τρεις εδαφικούς σχηματισμούς. Τέλος, υπολογίστηκαν τα εντατικά μεγέθη των μέσων υποστήριξης και έγινε περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της προϋποστήριξης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για πιο «βραχώδες» σχηματισμό και μεγαλύτερο ύψος υπερκειμένων.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας είναι τα εξής:

- Η χρήση της προϋποστήριξης στην μείωση των μετατοπίσεων του μετώπου είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς η μέση τιμή μείωσης των εξωθήσεων έναντι του ανυποστήρικτου μετώπου για το σχηματισμό 9.2α ήταν της τάξης του 24%, για το «βραχώδη» σχηματισμό 32%, για το σχηματισμό 9.2β 42% και για το σχηματισμό 9.2γ 43%.
- Όσον αφορά στις ακτινικές μετατοπίσεις κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας, η συνεισφορά της μεθόδου προϋποστήριξης αποδείχθηκε πολύ μεγάλη για τους τέσσερις σχηματισμούς που εξετάστηκαν, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις η ποσοστιαία μείωση των μετατοπίσεων ξεπέρασε το 90%.
- Με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρήθηκε αύξηση των μετατοπίσεων του μετώπου. Το αποτέλεσμα αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι σε όλα τα στάδια της μελέτης η σήραγγα υποστηρίζεται μόνο πλευρικά από σκυρόδεμα, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων στα τοιχώματά της. Όπως είναι αναμενόμενο, με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος είχαμε μείωση των ακτινικών μετατοπίσεων κατά τον επιμήκη άξονα της σήραγγας και οι μειώσεις αυτές έναντι του ανυποστήρικτου μετώπου είναι αρκετά μεγάλες με ποσοστό πάνω από 50 %.

- Όσον αφορά τις τάσεις σ_1 , με την προϋποστήριξη και με την μεμονωμένη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είχαμε μείωση των τάσεων σ_1 για την πρώτη περίπτωση που κυμαίνεται από (30-55) % και για την δεύτερη περίπτωση η μείωση κυμαίνεται από (14-35)%.
- Με την εφαρμογή της προϋποστήριξης και της μεμονωμένης χρήσης σκυροδέματος, οι τάσεις σ_3 αυξήθηκαν σχεδόν σε όλα τα σημεία που εξετάστηκαν για όλους τους σχηματισμούς.
- Ως προς τις αξονικές δυνάμεις φαίνεται ότι με την τοποθέτηση της σύνθετης επένδυσης, όσο μεγαλώνει το μήκος προχώρησης, τόσο οι αξονικές δυνάμεις σταθεροποιούνται, ενώ με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρείται μία ομοιόμορφη κατανομή των αξονικών δυνάμεων για κάθε στάδιο εκσκαφής
- Ως προς τις καμπτικές ροπές και τις διατμητικές δυνάμεις, διαπιστώθηκε ότι με την προϋποστήριξη οι τιμές ήταν μικρότερες σε σχέση με την μεμονωμένη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Σε μελλοντικό χρόνο, προκύπτει ότι θα ήταν σκόπιμο να γίνουν αναλύσεις: α) σε περισσότερους γεωτεχνικούς σχηματισμούς με διαφορετικά ύψη υπερκειμένων και β) μέσω κάποιου τριδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να μπορεί να ερευνηθεί αλληλεπίδραση της μεθόδου προϋποστήριξης με άλλα μέσα υποστήριξης, πέραν του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όπως είναι τα οριζόντια αγκύρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνική βιβλιογραφία

Αγιουτάντης Ζ.(2000), “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις Ίων

Εξαδάκτυλος Γ.(2008) “Κατασκευή και μηχανική των σηράγγων και των υπόγειων έργων”

Ιατράκης Βαρδής (2011), Επιβλέπων Καθηγητής:Μιχαήλ Καββαδάς, Διπλωματική εργασία: “Αριθμητική προσομοίωση της επίδρασης των δοκών προπορείας στην ευστάθεια του μετώπου αβαθών σηράγγων και της αλληλεπίδρασής τους με ακύρια μετώπου fiberglass”

Καββαδάς Μ.,(2005) “Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων” Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου.

Μαραγκός Χ.(1997), “Τεχνικά έργα υποδομής , κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, υπόγειες κατασκευές, φράγματα”.

Σακελλαρίου Μ. (2005), “Καθιζήσεις και συγκλίσεις προκσλούμενες απόν τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων.Αναλυτικές και υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμησης”.2^ο Πανελλήνιο συνέδριο οδοποιίας, Βόλος 18-20 Μαΐου 2005.

Σοφιανός Α.Ι. (2011). “Τεχνικές διάνοιξης σηράγγων”, Αθήνα (Σοφιανός, 2011)

Σοφιανός Α.Ι. (2015) “Υποστήριξη υπόγειων έργων”, Αθήνα (Σοφιανός, 2015)

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Evert Hoek,(2000) “Big tunnels in Bad Rock”, Terzaghi 2000

Evert Hoek, (1999) “Support for Very Weak Rock Associated with Faults and Shear Zones”

Hoek et al, (1995) “Support of underground excavations in hard rock”

Pietro Lunardi, (2008) “Design and construction of tunnels”

Sinha R.S., (1989) “Underground structures, design and instrumentation Elsevier.”

Διαδίκτυο

www.ametro.gr

www.rockscience.com