



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΑΘΙΩΝ  
ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

**ΣΤΟΛΑΚΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019**

### Ευχαριστίες

Η προπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των σπουδών μου στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Γεωτεχνικής. Για τη συνεισφορά τους στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας ευχαριστώ ιδιαίτερα:

- ✓ τον κ. Μ. Καββαδά, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η εποπτεία του και η καθοδήγησή του αποτέλεσαν σημαντική συνεισφορά στην ολοκλήρωσή της.
- ✓ τον κ. Φ. Χόρτη, Υπ. Διδάκτορα Πολιτικό Μηχανικό του ΕΜΠ, MSc, για την καθοριστική και ανεκτίμητη συνεισφορά του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η αμέριστη συμπαράστασή του, η συγκροτημένη καθοδήγησή του και η μεταδοτικότητά του αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες που κατέστησαν τη συνεργασία μας υποδειγματική. Για τον απεριόριστο χρόνο που μου παρείχε και τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα κατά την συνεργασία μας.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	2
2.1. Μηχανική ανάλυση κυκλικής επένδυσης σήραγγας	2
2.2. Ανάλυση πλευρικών ανοιγμάτων σε επένδυση σήραγγας	20
2.3. Αριθμητική προσομοίωση της παραμόρφωσης της βραχομάζας για τον σχεδιασμό της υποστήριξης στην περιοχή τομής των σηράγγων	46
2.4. Οι επιδράσεις της αλλαγής της γωνίας τομής στις διασταυρούμενες σήραγγες.	58
2.5. Μελέτη της συμπεριφοράς παραμόρφωσης στην διασταύρωση κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας σιδηροδρομικής γραμμής.	62
3. Αριθμητικές Αναλύσεις	70
3.1. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus v6.14	70
3.2. Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων	75
3.3. Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων	77
4. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.1. Κατηγορία I: Διάνοξη κύριων σηράγγων και συνδετήριας σήραγγας με κυκλική διατομή. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.2. Κατηγορία I: Διάνοξη κύριων σηράγγων και συνδετήριας με κυκλική διατομή και με διαφορετικές παραμέτρους αντοχής για την άμεση υποστήριξη. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.3. Κατηγορία II: Διάνοξη κύριων σηράγγων με κυκλική διατομή και συνδετήριας σήραγγας με πεταλοειδή διατομή. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.4. Κατηγορία III: Διάνοξη κύριων σηράγγων και συνδετήριας σήραγγας με πεταλοειδή διατομή. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.5. Ενδεικτικά αποτελέσματα κατά τον άξονα των κύριων σηράγγων. <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
4.6. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5. Συμπεράσματα & Προτάσεις	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1. Συμπεράσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.2. Προτάσεις	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η αλληλεπίδραση μεταξύ δίδυμων σηράγγων και συνδετήριας για βαθιές εκσκαφές, που διανοίγονται με συμβατική όρυξη. Η μελέτη γίνεται σε όρους αξονικών δυνάμεων είτε εγκάρσιες και διαμήκειες είτε ακτινικές και εφαπτομενικές, οι οποίες ασκούνται στα μέτρα υποστήριξης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν την ένταση στην παρειά και την στέψη καθώς και την περιφέρεια του ανοίγματος της συνδετήριας σήραγγας. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με την περιοχή επιρροής της κύριας σήραγγας από το άνοιγμα της συνδετήριας. Εξετάζεται η επίδραση ενός σημαντικού εύρους τιμών γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων στο υπό διερεύνηση φαινόμενο, μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η ανάλυση έγινε για τρεις Κατηγορίες I, II, III μελέτης και για δυο μεθόδους εκσκαφής την ολομέτωπη και την εκσκαφή σε δυο φάσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω κανονικοποιημένων διαγραμμάτων (χρονοϊστορίες και λόγοι δυνάμεων, δυνάμεις και λόγοι δυνάμεων που ασκούνται στην διατομή της σήραγγας ). Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα πως η παρειά του ανοίγματος φορτίζεται θλιπτικά και η στέψη αποφορτίζεται και επικρατεί εφελκυσμός. Η ένταση που επικρατεί στην περιφέρεια του ανοίγματος επηρεάζεται και διαφοροποιείται από τον συντελεστή οριζοντίων τάσεων  $K_0$ , τον συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda$ , την αντοχή της βραχομάζας  $\sigma_{cm}/\rho_0$  και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της, το ύψος υπερκείμενων, την μέθοδο εκσκαφής, την αλλαγή διατομών των κύριων σηράγγων και της συνδετήριας, καθώς και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (μέτρο ελαστικότητας  $E$ , πάχος σκυροδέματος  $t$ ).

**Abstract**

This paper investigates the interaction between conventionally bored deep crossing tunnels, in terms of forces acting on the primary support, via 3D numerical analyses with the finite element code Abaqus. The effect of various geotechnical and geometrical parameters is under examination. The results are presented with normalized graphs (time history of forces and forces acting on the section of the tunnel).

## 1. Εισαγωγή

Στην κατασκευή μιας σήραγγας συχνά απαιτείται η ύπαρξη διασταυρούμενων σηράγγων ή διαφόρων «καναλιών» επαφής για λόγους «εξυπηρέτησης» της κύριας σήραγγας. Κατά την διαδικασία κατασκευής μιας διασταυρούμενης σήραγγας θα προκληθούν αλλαγές και ανακατανομή τάσεων γύρω από την βραχομάζα και στην δομή της υποστήριξης της κύριας σήραγγας. Η διάνοιξη δίδυμων σηράγγων είναι η επικρατούσα κανονιστική πρακτική στην συμβατική όρυξη και συνεπάγεται τη διάνοιξη συνδετήριων σηράγγων για λόγους λειτουργικότητας και ασφάλειας. Ωστόσο, οι υφιστάμενες μεθοδολογίες σχεδιασμού σηράγγων επικεντρώνονται στην μελέτη της μεμονωμένης σήραγγας και δεν εξειδικεύονται στην επίδραση που προκαλεί η διάνοιξη της συνδετήριας σήραγγας στις δίδυμες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η αλληλεπίδραση μεταξύ δίδυμων σηράγγων και συνδετήριας διερευνάται κατά βάση με ιδεατά μοντέλα που προσομοιώνουν το πλευρικό «άνοιγμα» στη σήραγγα ως μια άπειρη πλάκα με κυκλικό άνοιγμα και υιοθετούν αναλυτικές επιλύσεις προβλημάτων επίπεδης έντασης. Σε περιορισμένο αριθμό απαντώνται εργασίες που ερευνούν το συγκεκριμένο πρόβλημα, είτε με δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα που ενσωματώνουν απλουστευτικές παραδοχές για την υπέρβαση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας του προβλήματος, είτε με τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα που περιορίζονται στην μοντελοποίηση του πλευρικού ανοίγματος στις δίδυμες σήραγγες χωρίς περαιτέρω διερεύνηση της αλληλεπίδρασης κατά την εξέλιξη της διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας. Ενδεικτική είναι η σχετική εργασία των Spyridis και Bergmeister (2015) που χρησιμοποιεί δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα για την αριθμητική διερεύνηση, αλλά δεν υπερβαίνει τους προαναφερθέντες περιορισμούς.

Υπό το πρίσμα αυτό, η παρούσα εργασία διενεργεί ένα εκτεταμένο αριθμό τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, στοχεύοντας στην ρεαλιστική προσομοίωση του προβλήματος και παρέχοντας τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων που δεν είναι διαθέσιμα λόγω των εγγενών προαναφερθέντων περιορισμών και απλουστεύσεων. Συγκεκριμένα, για διάνοιξη βαθιών σηράγγων με συμβατική όρυξη, διερευνάται η απόκριση των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην περιοχή του κόμβου, όπου διασταυρώνονται οι δίδυμες με την συνδετήρια. Εξετάζεται ένα ευρύ φάσμα τιμών: (i) γεωτεχνικών παραμέτρων (αντοχή βραχομάζας, συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων) και (ii) γεωμετρικών παραμέτρων (ύψος υπερκείμενων, γεωμετρία διατομής σηράγγων). Οι αναλύσεις επικεντρώνονται στην επιρροή των προαναφερθεισών παραμέτρων στην καταπόνηση της άμεσης υποστήριξης των δίδυμων σηράγγων στην περιοχή του ανοίγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω κανονικοποιημένων διαγραμμάτων (χρονοϊστορίες δυνάμεων και δυνάμεις που ασκούνται στην διατομή της σήραγγας).

## 2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 2.1. Μηχανική ανάλυση κυκλικής επένδυσης σήραγγας

Η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως επένδυση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος στην κατασκευή σηράγγων κυκλικής διατομής με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αντοχή της υποστήριξης. Στις κατασκευές σηράγγων το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μοναδικό μέσο υποστήριξης της επένδυσης της σήραγγας ή μπορεί να προκύψει ως μέσο ενίσχυσης της επένδυσης σε τμήματα της σήραγγας, όπου απαιτείται. Δυο διαδεδομένοι τρόποι ενίσχυσης των τμημάτων επένδυσης μια σήραγγας είναι είτε η ενισχυμένη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος είτε η επένδυση με χάλυβα. Η παρουσία του χάλυβα είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις που τα φορτία του εδάφους είναι πολύ μεγάλα και υπάρχουν διαταραχές ή σε περίπτωση πολύ χαλαρού και κρίσιμου εδάφους, που δεν επιτρέπονται εδαφικές παραμορφώσεις. Ο χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν μοναδικός τύπος επένδυσης σε μια κυκλική σήραγγα είτε σε συνδυασμό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως ένας τύπος σύνθετης επένδυσης.

#### 2.1.1. Ελαστική ανάλυση μιας ημικυκλικής επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με το κριτήριο αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής (σύγκλιση - αποτόνωση)

Η εγκατάσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως επένδυση εκτελείται σε δυο στάδια (Εικόνα 2.1). Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εκσκαφή της άνω φάσης της σήραγγας και την τοποθέτηση του σκυροδέματος και το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την προώθηση της σήραγγας, την εκσκαφή του υπόλοιπου κάτω τμήματος της διατομής και την τοποθέτηση του σκυροδέματος. Το κριτήριο αλληλεπίδρασης εδάφους και κατασκευής (σύγκλιση - αποτόνωση) είναι το πιο ρεαλιστικό στον προσδιορισμό των φορτίων που ασκούνται στην επένδυση της σήραγγας (Rabcewicz, 1964; Brown et al., 1983; Carranza-Torres and Fairhurst, 2000; Panet, 1995).



Εικόνα 2.1: Κυκλική σήραγγα αποτελούμενη από σκυρόδεμα και χάλυβα στη Γέφυρα Yacamhu - Quibor στη Βενεζουέλα (2004).

### 2.1.1.1. Προσομοίωμα και μηχανική ανάλυση ημικυκλικής επένδυσης

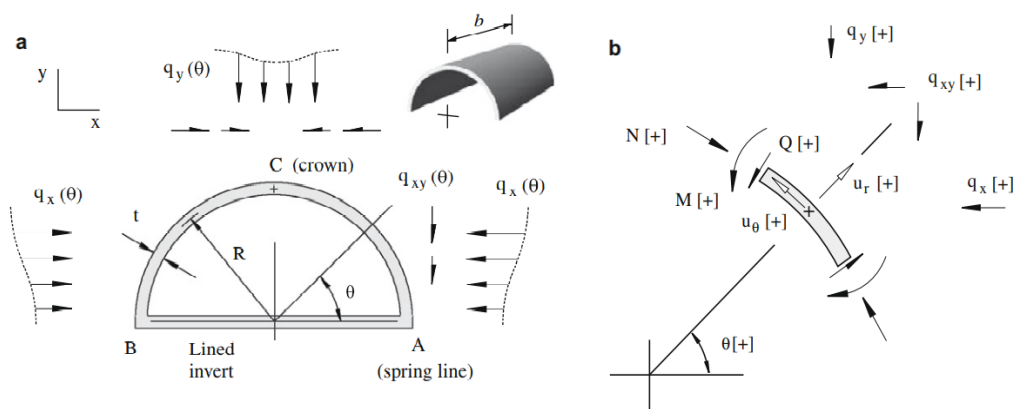
Το ημικυκλικό τμήμα επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά : ακτίνα  $R$ , πάχος στρώσης επένδυσης  $t$  και μήκος  $b$  (Σχήμα 2.1) και θεωρείται ως ένα ομοιογενές, ισότροπο και ελαστικό μέσο με μέτρο ελαστικότητας  $E$  και λόγο Poisson  $\nu$ . Το ημικυκλικό τμήμα επένδυσης κατασκευάζεται σε έδαφος ομοιογενές, ισότροπο και ελαστικό με μέτρο ελαστικότητας  $E_g$  και λόγο Poisson  $\nu_g$ . Πριν την εκσκαφή της σήραγγας (αρχική θέση εδάφους) το έδαφος υπόκειται σε μη ομοιόμορφες επιτόπου καταπονήσεις (τάσεις). Η κατακόρυφη τάση που ασκείται στο έδαφος είναι η  $\sigma_{y,o}$  και η οριζόντια τάση  $\sigma_{x,o}$  με τον μέσο όρο να ισούται με:

$$\sigma_o = \frac{(\sigma_{x,o} + \sigma_{y,o})}{2} \quad (2.1)$$

και η αναλογία οριζόντιας τάσης προς κατακόρυφη τάση να ισούται με:

$$K_g = \frac{\sigma_{x,o}}{\sigma_{y,o}} \quad (2.2).$$

Μετά την εκσκαφή της σήραγγας και της τοποθέτησης του ημικυκλικού τμήματος επένδυσης από σκυρόδεμα, τα φορτία που μεταδίδονται από το έδαφος στην υποστήριξη υπολογίζονται από ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους και υποστήριξης με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και προσομοιάζονται με τις τάσεις  $q_x$ ,  $q_y$  και  $q_{xy}$ . Οι τάσεις  $q_x, q_y, q_{xy}$  είναι σε καρτεσιανό επίπεδο και είναι εκφρασμένες συναρτήσεις της γωνίας  $\theta$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1a. Η γωνία  $\theta$  είναι η αριστερόστροφη γωνία που σχηματίζεται από το κατώτερο τμήμα του ημικυκλικού τόξου ως το σημείο που μελετάται. Οι τάσεις αυτές θεωρούνται ομοιόμορφες στην διαμήκη διεύθυνση (κατά μήκος της απόστασης  $b$ ), οι τρισδιάστατες επιδράσεις στο ημικυκλικό τμήμα αγνοούνται και το ημικυκλικό τόξο λειτουργεί ως μια καμπύλη δοκός πλάτους  $b$ . Με αυτόν τον τρόπο το ημικυκλικό τόξο χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα και λαμβάνονται σε κάθε τμήμα τα εντατικά μεγέθη  $M, Q, N$  καθώς και οι αντίστοιχες ακτινικές  $u_r$  και εφαπτομενικές  $u_\theta$  παραμορφώσεις συναρτήσεις της γωνίας  $\theta$ . Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών εξαρτώνται από τα φορτία του εδάφους  $q_x, q_y, q_{xy}$  και από τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 2.1b).



Σχήμα 2.1: α. Εδαφική φόρτιση ενός ημικυκλικού τμήματος επένδυσης. β. Τμήμα της ημικυκλικής επένδυσης με συμβολισμό της φοράς της αξονικής δύναμης  $N$ , της δύναμης διατμήσεως  $Q$ , ροπή κάμψης  $M$  και ακτινικές και εφαπτόμενες μετατοπίσεις  $u_r$  και  $u_\theta$ , αντίστοιχα.

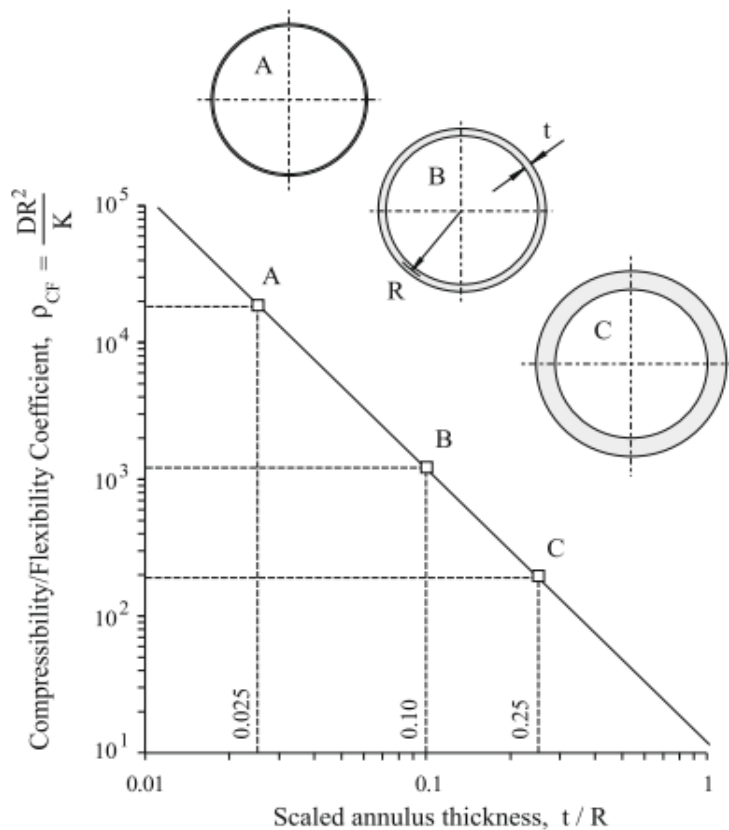


Για το ημικυκλικό τμήμα επένδυσης τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της υποστήριξης εκφράζονται σε όρους μιας μοναδικής αδιάστατης παραμέτρου:

$$\rho_{cF} = \frac{D \times R^2}{K} \quad (2.3), \text{ όπου:}$$

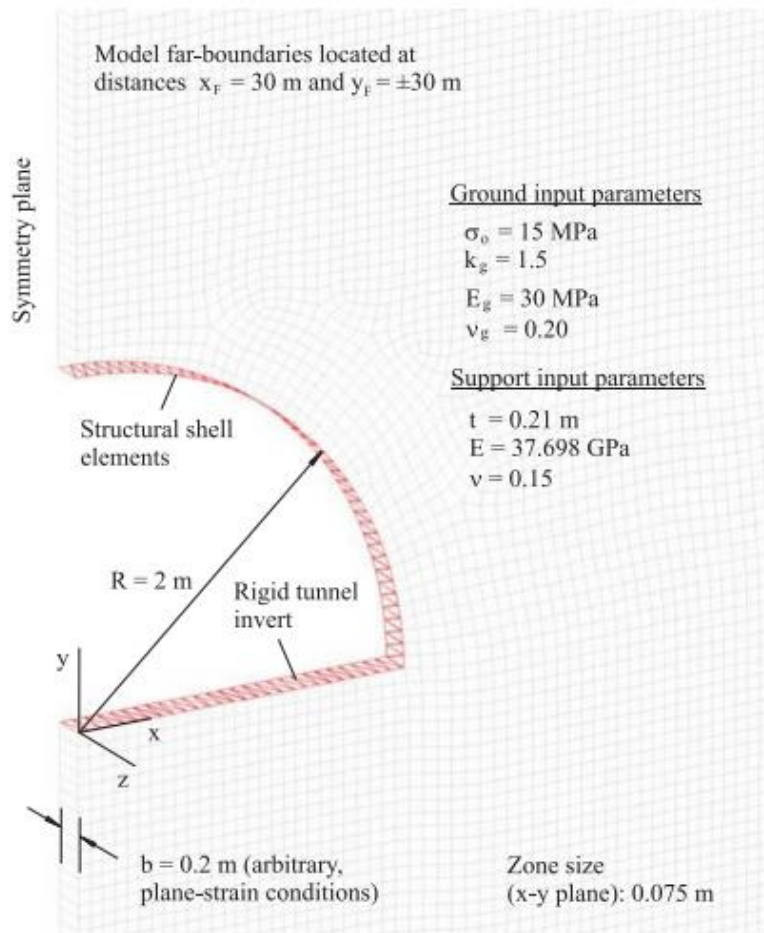
- D ο συντελεστής συμπίεστος που αντιστοιχεί σε ένα τόξο διατομής με εμβαδόν A και μέτρο ελαστικότητας E.
- K συντελεστής ευκαμψίας.

Σύμφωνα με την σχέση (3) και με τον λόγο  $t/R$ , όπου  $t$  είναι το πάχος της επένδυσης και  $R$  η ακτίνα της σήραγγας, μορφώνεται το διάγραμμα στο Σχήμα 2.2 με τρεις βασικές περιπτώσεις επένδυσης τις A,B,C. Οι περιπτώσεις A,C είναι οι δυο ακραίες περιπτώσεις για λεπτή και παχιά επένδυση αντίστοιχα, ενώ η B είναι μια ρεαλιστική περίπτωση πάχους επένδυσης, που χρησιμοποιείται γενικά.



Σχήμα 2.2: Γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ της αδιάστατης παραμέτρου  $\rho_{cF}$  και του πάχους επένδυσης.

Με κατάλληλο λογισμικό μοντέλο FLAC3D (Itasca, 2005) εκτελείται η προαναφερθείσα διαδικασία. Σαν δεδομένα εισόδου έχουν εισαχθεί οι εδαφικές παράμετροι πριν την εκσκαφή ( $\sigma_o, k_g, E_g, \nu_g$ ) καθώς και τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του ημικυκλικού τμήματος επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δηλαδή του μέσου υποστήριξης ( $t, E, \nu$ ). Η απεικόνιση και τα δεδομένα του μοντέλου παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2. Οι αναλύσεις που προκύπτουν από την διαδικασία αυτή προσδιορίζουν τις τάσεις  $q_x, q_y, q_{xy}$  καθώς και τα εντατικά μεγέθη  $M, Q, N$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$ , που ασκούνται στο ημικυκλικό τμήμα επένδυσης της σήραγγας.



Εικόνα 2.2: Αριθμητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της φόρτισης εδάφους και υποστήριξης με το κριτήριο αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής.

### 2.1.1.2. Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης ημικυκλικού τόξου επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης είναι απαραίτητα για τον έλεγχο της επάρκειας της αντοχής της επένδυσης σε μια σήραγγα. Η επένδυση σε μια σήραγγα πρέπει να είναι δομικά και μηχανικά ικανή να αναλάβει τα εδαφικά φορτία, που ασκούνται σε αυτήν με την μορφή των εντατικών μεγεθών  $M, Q, N$ . Η κατασκευή των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης γίνεται με την παραδοχή ότι η υποστήριξη συμπεριφέρεται ελαστικά.

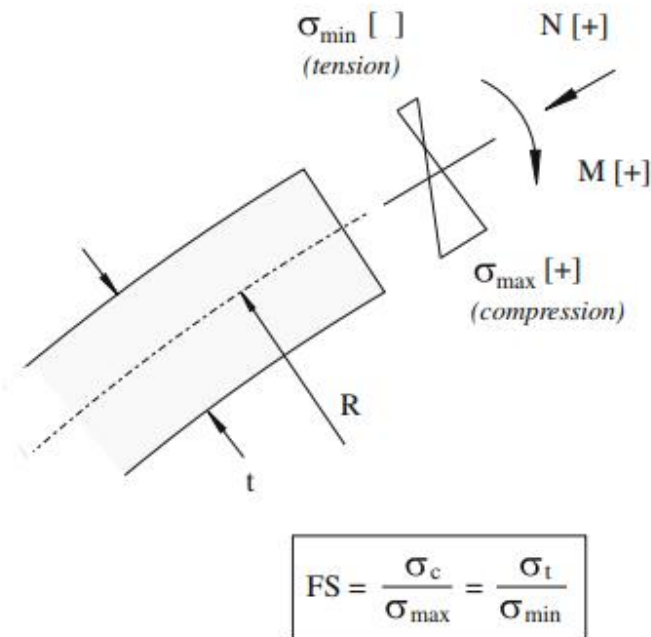
Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα τμήμα του ημικυκλικού τόξου επένδυσης, που έχει υποβληθεί σε αξονική δύναμη  $N$  και ροπή κάμψης  $M$  με προκύπτουσες τάσεις  $\sigma_{\max}$  και  $\sigma_{\min}$ . Ισχύει ότι:

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} t/2 \quad (2.4)$$

- με  $A$  το εμβαδόν της διατομής του ημικυκλικού τόξου,
- $I$  η ροπή αδρανείας του και  $t$  το πάχος επένδυσης του (DenHartog 1961, Timoshenko 1976).

Σύμφωνα με τις τιμές των τάσεων  $\sigma_{\max}$  και  $\sigma_{\min}$  και με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή την αντοχή του σε θλίψη  $\sigma_c$  και σε εφελκυσμό  $\sigma_t$  προσδιορίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ως:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\min}} \quad (2.5)$$



where  $\sigma_c$  is the compressive strength  
and  $\sigma_t$  is the tensile strength

Σχήμα 2.3: Συντελεστής ασφαλείας (FS) ορισμένος ως προς τις μέγιστες και ελάχιστες αξονικές τάσεις σε ένα τμήμα κυκλικής επένδυσης.

Από τις εξισώσεις (2.4) και (2.5) ορίζεται η μέγιστη θλιπτική δύναμη:

$$N = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (2.6)$$

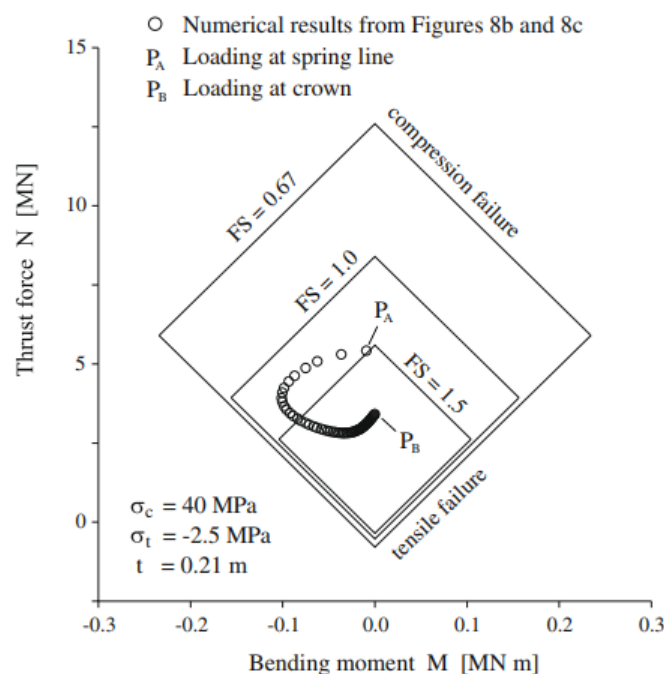
και η μέγιστη εφελκυστική αξονική δύναμη:

$$N = \frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (2.7).$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (6) και (7) ορίζονται οι κρίσιμες τιμές της ροπής κάμψης:

$$M_{cr} \pm \frac{I \sigma_c - \sigma_t}{t} FS \quad (2.8).$$

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης για τρεις τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $FS= 0.67, 1.0, 1.5$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος αντιπροσωπεύει την ροπή κάμψης  $M$  και ο κατακόρυφος την αξονική δύναμη  $N$ . Για ροπή κάμψης  $M=0$  παρουσιάζεται μόνο η επίδραση της αξονικής δύναμης  $N$ , δηλαδή η μέγιστη θλιπτική και η μέγιστη εφελκυστική δύναμη, που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.6) και (2.7). Αντίστοιχα στα άκρα του σχήματος με μορφή «διαμάντι» παρουσιάζονται οι κρίσιμες τιμές της ροπής κάμψης της εξίσωσης (2.8) με την επίδραση της αξονικής δύναμης  $N$ . Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το διάγραμμα αλληλεπίδρασης έχει κατασκευαστεί επιλέγοντας συγκεκριμένες τιμές της αντοχής της θλίψης  $\sigma_c$  και εφελκυσμού  $\sigma_t$  του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και το πάχος επένδυσης, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.4. Στο διάγραμμα έχουν τοποθετηθεί τα ζεύγη τιμών της ροπής κάμψης  $M$  και της ώθησης  $N$  με μορφή κουκκίδας, που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση, με πιο κρίσιμες τις τιμές  $P_A$  στα άκρα του ημικυκλικού τόξου επένδυσης ( $\theta=0^\circ$ ) και  $P_B$  στην στέψη ( $\theta=90^\circ$ ).



Σχήμα 2.4: Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής με ένα διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης.

Από την μελέτη του διαγράμματος αλληλεπίδρασης (Σχήμα 2.4) παρατηρείται πως τα ζεύγη τιμών των εντατικών μεγεθών  $N, M$  (κουκκίδες) είναι εντός του διαγράμματος αλληλεπίδρασης με συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.0$ . Η επένδυση της σήραγγας από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ικανή για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.0$  να αναλάβει τα εδαφικά φορτία, που προκύπτουν μέσω των εντατικών μεγεθών  $N, M$  κατά την εκσκαφή της σήραγγας, χωρίς να υπερβεί το ελαστικό όριο του σκυροδέματος. Σε αντίθετη περίπτωση για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  φαίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.4 πως η επένδυση θα αστοχήσει, αφού οι τιμές των εντατικών μεγεθών  $N, M$  ξεπερνούν τα όρια του αντίστοιχου διαγράμματος αλληλεπίδρασης. Δυο πιθανοί τρόποι για την λύση αυτού του προβλήματος είναι είτε να αυξηθεί το πάχος  $t$  της επένδυσης του σκυροδέματος είτε να αυξηθεί η αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που χρησιμοποιείται. Αν αυτές οι δυο λύσεις δεν μπορούν να ικανοποιήσουν την ορθή παραλαβή των εδαφικών φορτίων από την επένδυση τότε χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση τμήματα χάλυβα. Είναι

σημαντικό να τονιστεί πως έχει γίνει υπόθεση ότι το σκυρόδεμα αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή του για τους διαφορετικούς τρόπους αστοχίας.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα τμήμα του ημικυκλικού τόξου επένδυσης, που έχει υποβληθεί σε αξονική δύναμη  $N$  και τέμνουσα δύναμη  $Q$ , καθώς και η κατανομή των διατμητικών τάσεων  $\tau$  που ασκούνται στο εμβαδόν  $A$  της διατομής του. Η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης  $\tau_{\max}$  εμφανίζεται στον ουδέτερο άξονα του ημικυκλικού τόξου και ισούται με:

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2A} \quad (2.9).$$

Η αξονική ώθηση  $N$  προκαλεί τάση:

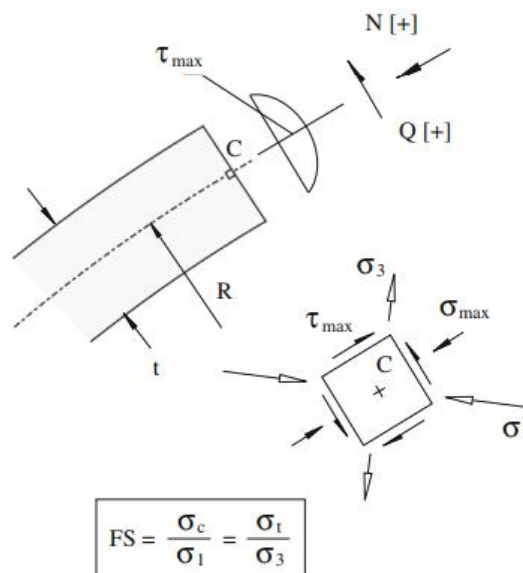
$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} \quad (2.10),$$

όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Έστω το σημείο  $C$  στον ουδέτερο άξονα του ημικυκλικού τόξου στο οποίο ασκούνται οι τάσεις  $\tau_{\max}$  και  $\sigma_{\max}$ . Δημιουργούνται οι κύριες τάσεις  $\sigma_{1,3}$  με τιμή:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma_{\max}}{2}\right]^2 + \tau_{\max}^2} \dots (2.11),$$

όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Σύμφωνα με τις τιμές των κύριων τάσεων  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  και με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή την αντοχή σε θλίψη  $\sigma_c$  και σε εφελκυσμό  $\sigma_t$  προσδιορίζεται ο συντελεστής ασφαλείας:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (2.12).$$



where  $\sigma_c$  is the compressive strength  
and  $\sigma_t$  is the tensile strength

Σχήμα 2.5: Συντελεστής ασφαλείας (FS) ορισμένος ως προς τις κύριες και δευτερεύουσες τάσεις που προκαλούνται από αξονικές και διατμητικές δυνάμεις σε ένα τμήμα ημικυκλικής επένδυσης.

Η τιμή της μέγιστης θλιπτικής αξονικής δύναμης ορίζεται ως:

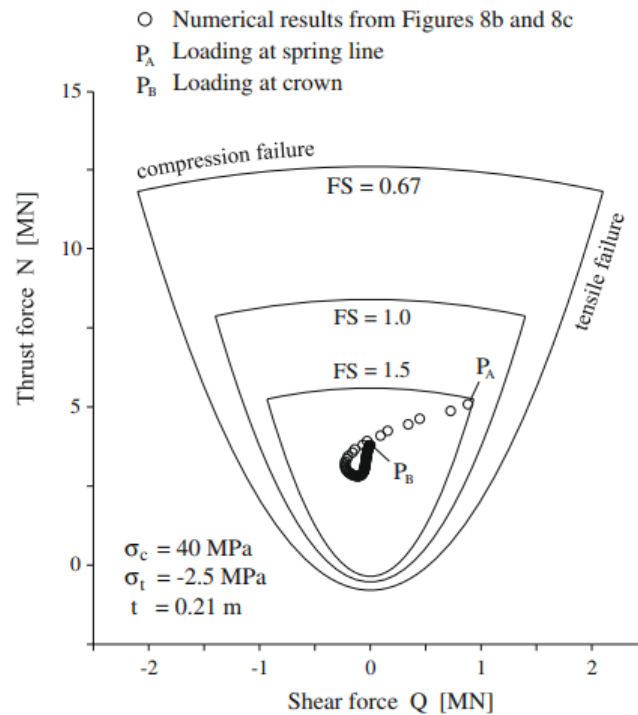
$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9 Q^2 FS}{4 \sigma_c A} \quad (2.13)$$

και η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης ως:

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9 Q^2 FS}{4 \sigma_t A} \quad (2.14).$$

Η κρίσιμη τιμή της τέμνουσας δύναμης προκύπτει ίση με:

$$Q_{cr} \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (2.15).$$



Σχήμα 2.6: Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής με ένα διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης για τρεις τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $FS=0.67, 1.0, 1.5$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος αλληλεπίδρασης αντιπροσωπεύει την δύναμη διάτμησης και ο κατακόρυφος την αξονική φόρτιση  $N$ . Για τέμνουσα δύναμη  $Q=0$  επιδρά μόνο η αξονική δύναμη  $N$ , δηλαδή εφαρμόζεται η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη και η μέγιστη εφελκυστική αξονική δύναμη που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.13) και (2.14). Το δεξί και το αριστερό άνω όριο της καμπύλης ορίζεται από τις κρίσιμες τιμές της τέμνουσας δύναμης  $Q_{cr}$  εξίσωση (2.15). Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το διάγραμμα αλληλεπίδρασης έχει κατασκευαστεί επιλέγοντας συγκεκριμένες τιμές της αντοχής της θλίψης  $\sigma_c$  και εφελκυσμού  $\sigma_t$  του σκυροδέματος καθώς και το πάχος επένδυσης  $t$ , που φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Στο διάγραμμα έχουν τοποθετηθεί τα ζεύγη τιμών της τέμνουσας δύναμης  $Q$  και της ώθησης  $N$  με μορφή κουκκίδας, που προέκυψαν από την



παραπάνω ανάλυση, με πιο κρίσιμες τις τιμές  $P_A$  στα άκρα του ημικυκλικού τόξου επένδυσης ( $\theta=0^\circ$ ) και  $P_B$  στην στέψη ( $\theta=90^\circ$ ).

Από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.6 φαίνεται πως η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  επαρκεί, αφού οι τιμές των εντατικών μεγεθών  $N, Q$  είναι εντός των ορίων του αντίστοιχου διαγράμματος αλληλεπίδρασης, σε αντίθεση με τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  που προκύπτει αστοχία της επένδυσης.

### 2.1.2. Ανάλυση σύνθετης επένδυσης με την προσέγγιση «ισοδύναμου τμήματος»

Ένας τύπος σύνθετης επένδυσης αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα (Εικόνα 2.3). Η σύνθετη επένδυση είναι απαραίτητη σε κατασκευές σήραγγων, στις οποίες το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν επαρκεί ως μοναδικός τρόπος επένδυσης και απαιτείται ενίσχυση στην αντοχή της επένδυσης.



Εικόνα 2.3: Ημικυκλική καμάρα σήραγγας με σύνθετη επένδυση στο έργο Εγνατία οδός, Ελλάδα (2003).

#### 2.1.2.1. Προσομοίωμα και μηχανική ανάλυση «ισοδύναμου τμήματος»

Η ανάλυση της σύνθετης επένδυσης, η οποία αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τμήματα χάλυβα, μελετάται μέσω του μοντέλου «ισοδύναμου τμήματος». Η γεωμετρία του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Αποτελείται από τμήματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανάμεσα σε τμήματα χάλυβα με χαρακτηριστική απόσταση:

$$s = \mathbf{b}/\mathbf{n} \quad (2.16).$$

- $\mathbf{b}$  είναι το μήκος του εξεταζόμενου τμήματος επένδυσης
- $\mathbf{n}$  το πλήθος των τμημάτων χάλυβα σε αυτό το μήκος  $b$

Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από συντελεστή συμπίεστικότητας και συντελεστή ευκαμψίας με συμβολισμό  $\mathbf{D}_2, \mathbf{K}_2$ , ενώ αντίστοιχα ο χάλυβας με  $\mathbf{D}_1, \mathbf{K}_1$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Χρησιμοποιώντας την γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου, εξιδανικεύεται ένα μέρος το οποίο ονομάζεται ισοδύναμο τμήμα. Το ισοδύναμο τμήμα (Σχήμα 2.7b) χαρακτηρίζεται από μήκος  $b$  και από πάχος:

$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (2.17)$$

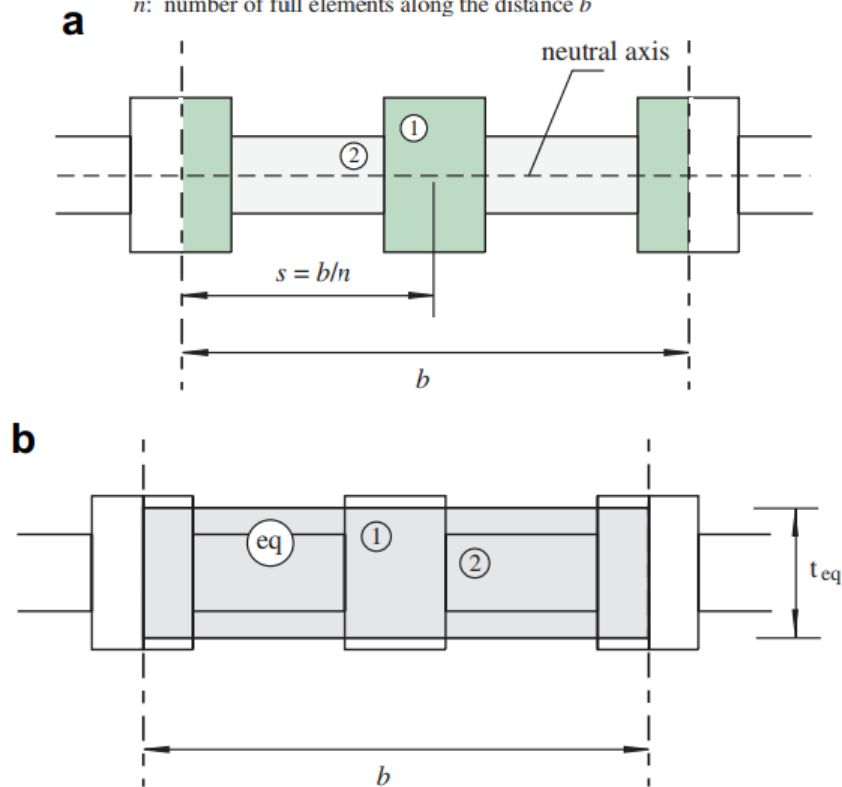
- $\mathbf{D}_2, \mathbf{K}_2$  ο συντελεστής συμπίεστικότητας και ο συντελεστής ευκαμψίας του σκυροδέματος
- $\mathbf{D}_1, \mathbf{K}_1$  ο συντελεστής συμπίεστικότητας και ο συντελεστής ευκαμψίας του χάλυβα

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμου τμήματος συνθέτονται από τα επιμέρους χαρακτηριστικά των τμημάτων του χάλυβα και του σκυροδέματος. Βασικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμου τμήματος είναι το μέτρο συμπίεστικότητας  $D_{eq}$ , το μέτρο ευκαμψίας  $K_{eq}$  και το μέτρο ελαστικότητας:

$$E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{bt_{eq}} \quad (2.18).$$

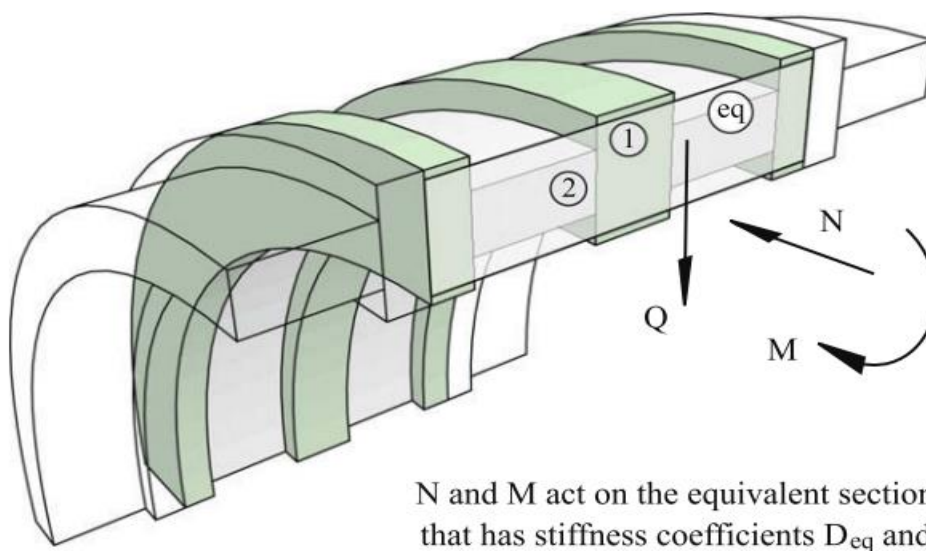


- Each element '1' has stiffness coefficients  $D_1$  and  $K_1$
  - Each element '2' has stiffness coefficients  $D_2$  and  $K_2$
- $n$ : number of full elements along the distance  $b$



Σχήμα 2.7: α. Σχηματική αναπαράσταση ενός τμήματος της επένδυσης που αποτελείται από δυο διαφορετικά υλικά. β. Ισοδύναμο τμήμα για τη σύνθετη επένδυση.

Τα συνολικά εντατικά μεγέθη  $M, Q, N$ , που προκύπτουν από τα εδαφικά φορτία, ασκούνται στο ισοδύναμο τμήμα επένδυσης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



$N$  and  $M$  act on the equivalent section 'eq', that has stiffness coefficients  $D_{eq}$  and  $K_{eq}$

Σχήμα 2.8: Συνολική ροπή κάμψης, αξονική και διατμητική δύναμη που δρουν στο ισοδύναμο που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.

Τα εντατικά μεγέθη αναλύονται σε επιμέρους μεγέθη, που επιδρούν στο κάθε υλικό της σύνθετης επένδυσης διαφορετικά. Η συνολική ροπή  $M$  αναλύεται σε ροπή  $M_1$  και ροπή  $M_2$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9α, με τιμές:

$$M_1 = \frac{MK_1}{n(K_1+K_2)} \quad (2.19) \text{ για το τμήμα του χάλυβα}$$

$$M_2 = \frac{MK_2}{n(K_1+K_2)} \quad (2.20) \text{ για το σκυρόδεμα,}$$

οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάχος και διαστάσεις) του χάλυβα, που χρησιμοποιείται. Η συνολική τέμνουσα δύναμη διαχωρίζεται σε δύναμη  $Q_1$  και δύναμη  $Q_2$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9c, με τιμές:

$$Q_1 = \frac{QK_1}{n(K_1+K_2)} \quad (2.21) \text{ για το τμήμα του χάλυβα}$$

$$Q_2 = \frac{QK_2}{n(K_1+K_2)} \quad (2.22) \text{ για το σκυρόδεμα,}$$

οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάχος και διαστάσεις) του χάλυβα, που χρησιμοποιείται. Όσον αφορά την κατανομή της αξονικής δύναμης υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ δυο περιπτώσεων, λόγω ότι η αξονική δύναμη εξαρτάται από το πάχος και το μέγεθος του χάλυβα, που χρησιμοποιείται, καθώς και από την καμπυλότητα της διατομής της σήραγγας. Για παχύ κέλυφος η συνολική αξονική δύναμη διαχωρίζεται σε δύναμη  $N_1$  και  $N_2$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9b, με τιμές:

$$N_1 = \frac{N}{n} \frac{D_1}{(D_1+D_2)} + \frac{M}{nR} \frac{D_2K_1 - D_1K_2}{(D_1+D_2)(K_1+K_2)} \quad (2.23) \text{ για το τμήμα του χάλυβα}$$

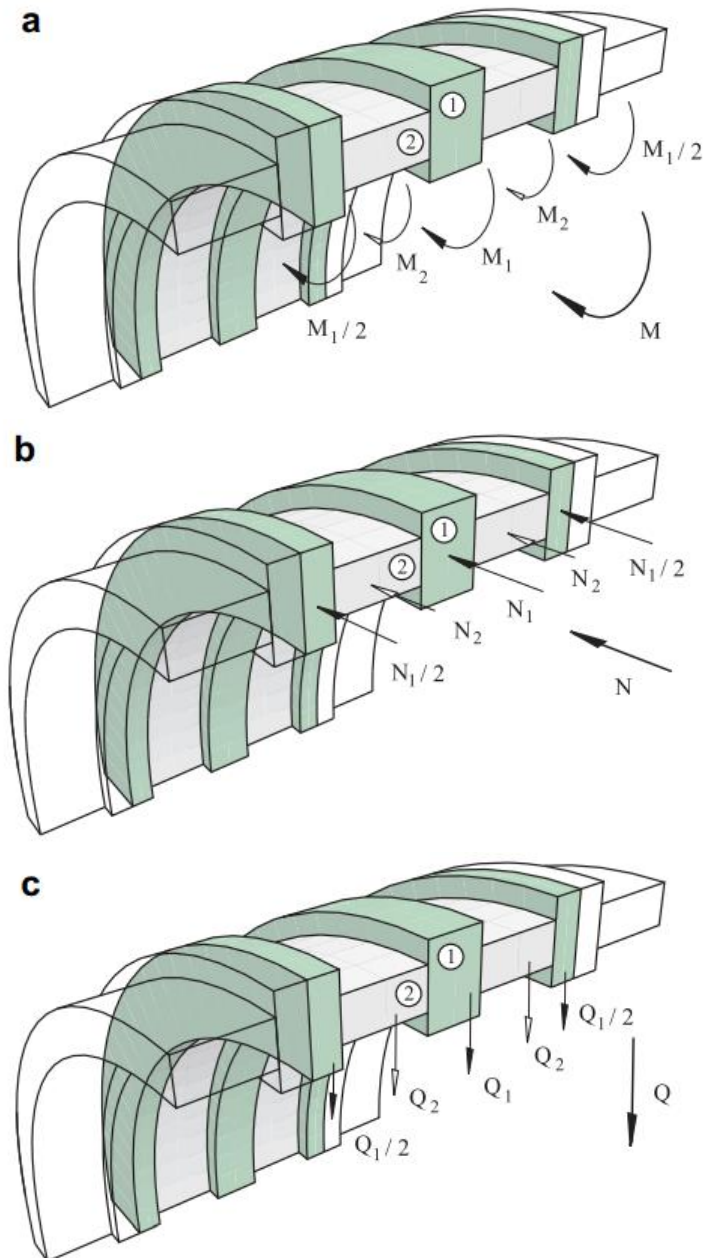
$$N_2 = \frac{N}{n} \frac{D_2}{(D_1+D_2)} + \frac{M}{nR} \frac{D_2K_1 - D_1K_2}{(D_1+D_2)(K_1+K_2)} \quad (2.24) \text{ για το τμήμα του σκυροδέματος.}$$

Αντίστοιχα για λεπτό κέλυφος οι εξισώσεις παίρνουν τιμές:

$$N_1 = \frac{N}{n} \frac{D_1}{(D_1+D_2)} \quad (2.25) \text{ για το τμήμα χάλυβα}$$

$$N_2 = \frac{N}{n} \frac{D_2}{(D_1+D_2)} \quad (2.26) \text{ για το τμήμα του σκυροδέματος.}$$

Για περιπτώσεις επενδύσεων με σχετικά υψηλή καμπυλότητα, δηλαδή όπως σε κυλινδρικές και ημικυκλικές επενδύσεις σήραγγας, οι συγγραφείς της έρευνας θεωρούν πιο κατάλληλες για την κατανομή της αξονικής δύναμης  $N$  στα επιμέρους τμήματα τις εξισώσεις (2.23, 2.24) για παχιά κελύφη επένδυσης. Για υπολογισμούς της κατανομής της συνολικής αξονικής δύναμης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (2.23) και (2.24).



Σχήμα 2.9: Κατανομή των (a) ροπών κάμψης, (b) αξονικής δύναμης και (c) δύναμη διατμήσεως στην σύνθετη επένδυση που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.

Με κατάλληλο λογισμικό μοντέλο FLAC3D (Itasca, 2005) εκτελείται η προαναφερθείσα διαδικασία. Σαν δεδομένα εισόδου έχουν εισαχθεί οι εδαφικές παράμετροι πριν την εκσκαφή ( $\sigma_o, k_g, E_g, \nu_g$ ) καθώς και τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του ημικυκλικού τμήματος επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα. Η απεικόνιση και τα δεδομένα του μοντέλου παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.4 και 2.5. Οι αναλύσεις που προκύπτουν από την διαδικασία αυτή προσδιορίζουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμου τμήματος, τα συνολικά εντατικά μεγέθη  $M, Q, N$  καθώς και τα επιμέρους εντατικά μεγέθη  $M_1, M_2, Q_1, Q_2, N_1, N_2$ , που ασκούνται στο κάθε υλικό επένδυσης ξεχωριστά (Εικόνα 2.5).

- Geometry Data**

$R = 2$  m (arch radius)  
 $b = 1.0$  m (width of composite section)  
 $s = 0.5$  m (spacing between steel sets)  
 $n = b/s = 2$  (number of steel sets along width)  
 Plane strain conditions are assumed.
- W6 × 25 Steel Set Properties**

$t_s = 0.162$  m (height of the section)  
 $A_s = 4.748 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup> (area of the section)  
 $I_s = 2.231 \times 10^{-5}$  m<sup>4</sup> (moment of inertia of the section)  
 $E_s = 200,000$  MPa (Young's Modulus)  
 $\nu_c = 0.25$  (Poisson's ratio)  
 $\sigma_c^s = 500$  MPa (compressive strength)  
 $\sigma_t^s = -500$  MPa (tensile strength)

$n = 2$  (two 'full' W6x25 sections along the width  $b$ )

$0.20$  m

$s = 0.5$  m

$b = 1.0$  m

- Shotcrete Properties**

$t_c = 0.2$  m  
 $E_c = 30,000$  MPa (Young's Modulus)  
 $\nu_c = 0.15$  (Poisson's ratio)  
 $\sigma_c^c = 40$  MPa (compressive strength)  
 $\sigma_t^c = -2.5$  MPa (tensile strength)

Εικόνα 2.4: Δεδομένα εισόδου για την ανάλυση μιας ημικυκλικής επένδυσης αποτελούμενης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα σύμφωνα με την προσέγγιση «ισοδύναμου τμήματος».

- Properties of each unit '1' (steel set)**

$D_1 = E_1 A_1 / (1 - \nu_1^2) = 1.013 \times 10^3$  MN (see equation 5)  
 $K_1 = E_1 I_1 / (1 - \nu_1^2) = 4.759$  MN m<sup>2</sup> (see equation 7)
- Properties of the 'equivalent' section**

$D_{eq} = n(D_1 + D_2) = 7.872 \times 10^3$  MN (see equation B.18)  
 $K_{eq} = n(K_1 + K_2) = 28.61$  MN m<sup>2</sup> (see equation B.7)  
 $t_{eq} = 0.209$  m (see equation 21)  
 $E_{eq} = 37,698$  MPa (see equation 22)
- Mechanical analysis**

$M_a = -0.0092$  MN m  
 $N_a =$  MN  
 $Q_a = 0.882$  MN

$M_b = -0.0134$  MN m  
 $N_b = 3.00$  MN  
 $Q_b = -0.055$  MN

$M_c = 0.0085$  MN m  
 $N_c = 3.79$  MN  
 $Q_c = 0.000$  MN

- Properties of each unit '2' (shotcrete)**

$A_2 = 1/n \times b t_2 - A_1 = 0.095$  m<sup>2</sup> (area)  
 $I_2 = 1/n \times b t_2^3 / 12 - I_1 = 3.11 \times 10^{-4}$  m<sup>4</sup>  
 $D_2 = E_2 A_2 / (1 - \nu_2^2) = 2.923 \times 10^3$  MN (see equation 5)  
 $K_2 = E_2 I_2 / (1 - \nu_2^2) = 9.545$  MN m<sup>2</sup> (see equation 7)

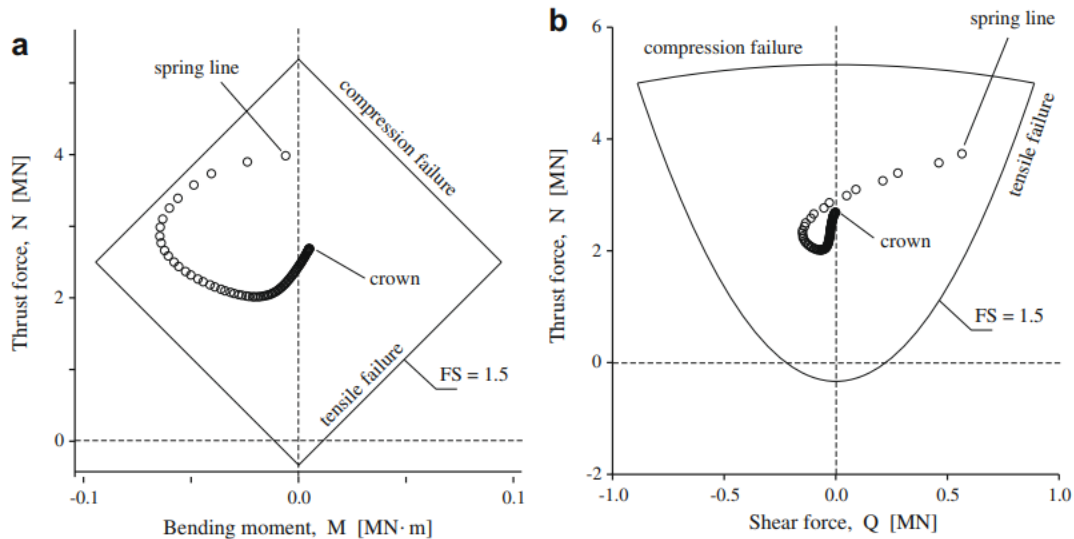
We distribute the bending moments, thrust and shear force values to each unit '1' and each unit '2' using equations (23) & (24), (27) & (28) and (25) & (26) respectively.

$M_{1a} = -0.0015$ MN m	$M_{2a} = -0.0031$ MN m
$N_{1a} = 0.70$ MN	$N_{2a} = 2.01$ MN
$Q_{1a} = 0.147$ MN	$Q_{2a} = 0.294$ MN
$M_{1b} = -0.0020$ MN m	$M_{2b} = -0.0045$ MN m
$N_{1b} = 0.39$ MN	$N_{2b} = 1.11$ MN
$Q_{1b} = 0.009$ MN	$Q_{2b} = -0.018$ MN
$M_{1c} = 0.0014$ MN m	$M_{2c} = 0.0028$ MN m
$N_{1c} = 0.49$ MN	$N_{2c} = 1.41$ MN
$Q_{1c} = 0.000$ MN	$Q_{2c} = 0.000$ MN

Εικόνα 2.5: Βήμα-βήμα η λύση του προβλήματος που περιγράφεται στον Εικόνα 2.4 χρησιμοποιώντας την προσέγγιση «ισοδύναμου τμήματος».

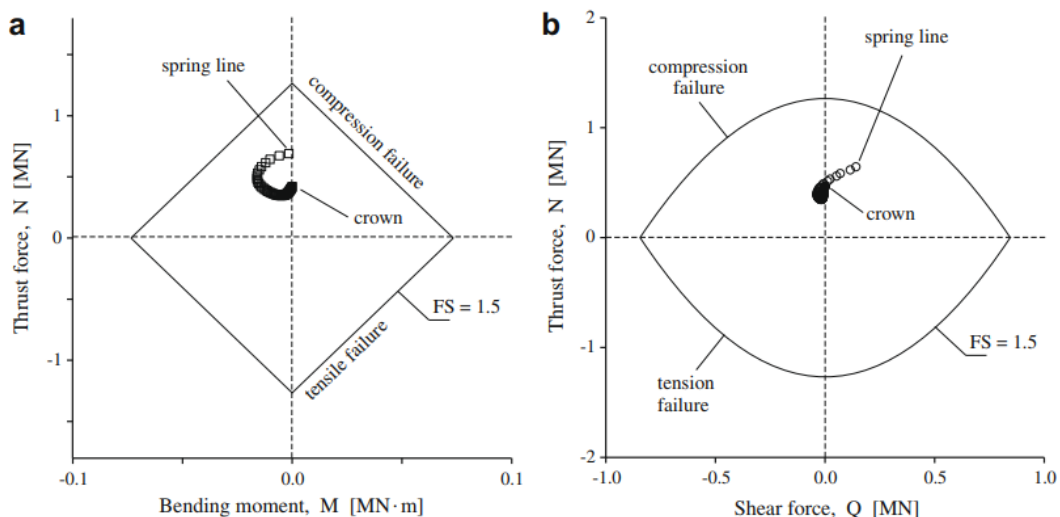
### 2.1.2.2. Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης σύνθετης επένδυσης «ισοδύναμου τμήματος»

Για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  κατασκευάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης και το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης και αξονικής δύναμης, τα οποία αναφέρονται στο τμήμα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της σύνθετης επένδυσης της σήραγγας (Σχήμα 2.10).



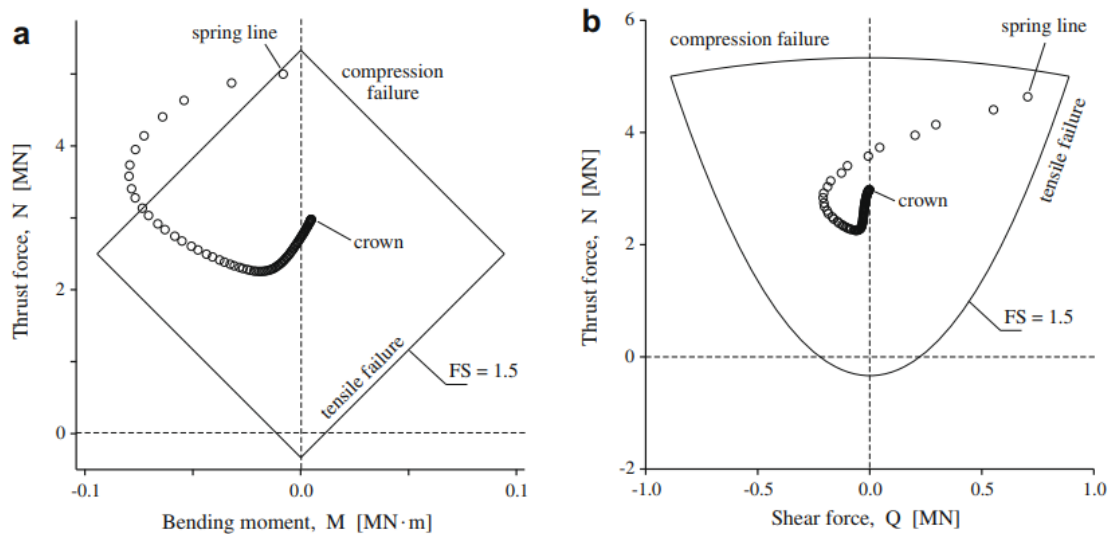
Σχήμα 2.10: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και τέμνουσας δύναμης για το τμήμα του σκυροδέματος στην περίπτωση «ισοδύναμου τμήματος».

Για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  κατασκευάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης και το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας δύναμης και αξονικής δύναμης, τα οποία αναφέρονται στο τμήμα του χάλυβα της σύνθετης επένδυσης της σήραγγας (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και τέμνουσας δύναμης για το τμήμα του χάλυβα στην περίπτωση «ισοδύναμου τμήματος»

Για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  παρατίθενται και τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής και τέμνουσας σε συνδυασμό με την αξονική δύναμη για ένα ημικυκλικό τμήμα απλής επένδυσης με μοναδικό υλικό το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.12:** Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής κάμψης και τέμνουσας δύναμης για μοναδικό μέσο επένδυσης το σκυρόδεμα.

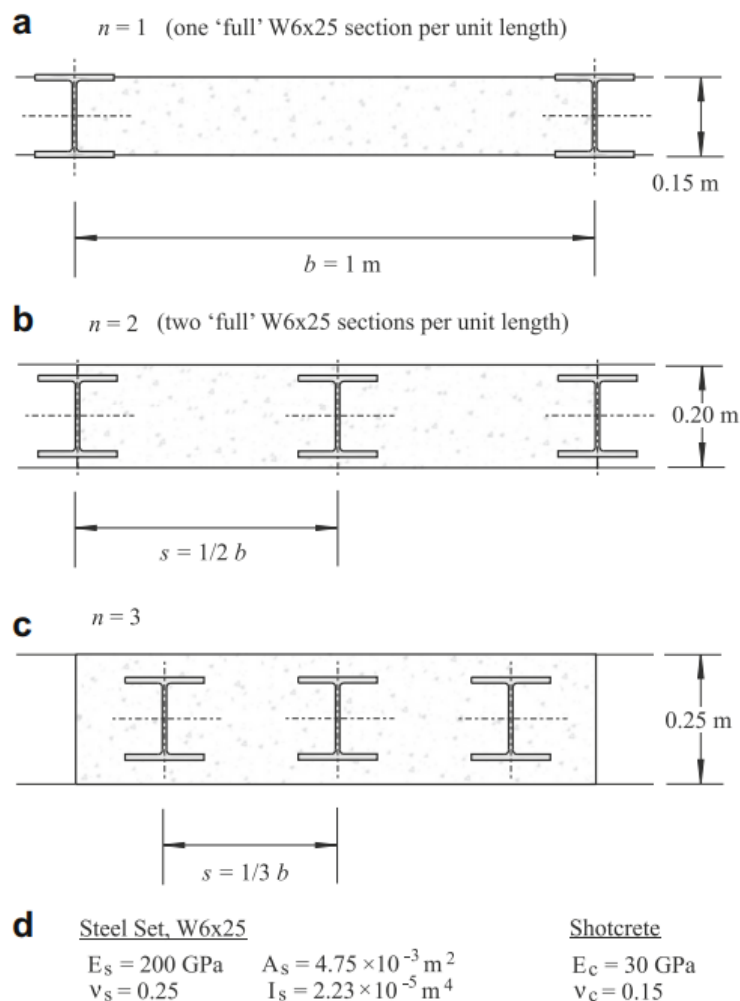
Από τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα για το είδος της επένδυσης που χρησιμοποιείται στην κατασκευή μιας σήραγγας. Μέσω των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης γίνεται σύγκριση μεταξύ μιας απλής επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μιας σύνθετης επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα. Στην περίπτωση της σύνθετης επένδυσης (Σχήμα 2.10) τα εντατικά μεγέθη ροπής-αξονικής δύναμης  $M, N$  και τέμνουσας-αξονικής δύναμης  $Q, N$  είναι εντός των ορίων της καμπύλης για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$ , σε αντίθεση με την περίπτωση που χρησιμοποιείται ως μοναδικό μέσο επένδυσης το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπου τα μεγέθη της ροπής κάμψης στο αντίστοιχο διάγραμμα αλληλεπίδρασης (Σχήμα 2.12) είναι εκτός της καμπύλης ικανότητας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε αυτήν την περίπτωση της απλής επένδυσης χωρίς την παρουσία χάλυβα και για συντελεστή ασφαλείας  $FS=1.5$  πρόκειται να αστοχήσει. Είναι ολοφάνερη η συμβολή του χάλυβα σε αυτήν την περίπτωση, όπου η σύνθετη επένδυση αντέχει πλήρως τα εντατικά φορτία. Επίσης, στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας και αξονικής δύναμης στην απλή επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 2.12b), παρόλο που δεν υπάρχει αστοχία λόγω τέμνουσας δύναμης, τα μεγέθη της τέμνουσας δύναμης είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά της σύνθετης επένδυσης (Σχήμα 2.11b). Στην σύνθετη επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα τα συνολικά εντατικά μεγέθη έχουν διανεμηθεί και στα δυο υλικά της επένδυσης αντίστοιχα, σε αντίθεση με την περίπτωση της απλής επένδυσης που το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λαμβάνει τα συνολικά εντατικά μεγέθη. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται σαφής η σπουδαιότητα της συνεισφοράς του χάλυβα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

### 2.1.2.3. Ανάλυση της μηχανικής συμβολής του χάλυβα και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε ένα σύνθετο τμήμα επένδυσης

Παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα για τρία διαφορετικά μοντέλα ισοδύναμου τμήματος σύνθετης επένδυσης. Χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό μοντέλο FLAC3D (Itasca, 2005) με τα χαρακτηριστικά των υλικών επένδυσης να είναι τα εξής:

- τύπος χάλυβα W6x25 με μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 200 \text{ GPa}$ , εμβαδόν διατομής χάλυβα  $A_s = 4.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , λόγος Poisson  $\nu_s = 0.25$  και ροπή αδρανείας  $I_s = 2.23 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
- εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μέτρο ελαστικότητας  $E_c = 30 \text{ GPa}$  και λόγο Poisson  $\nu_c = 0.15$ .

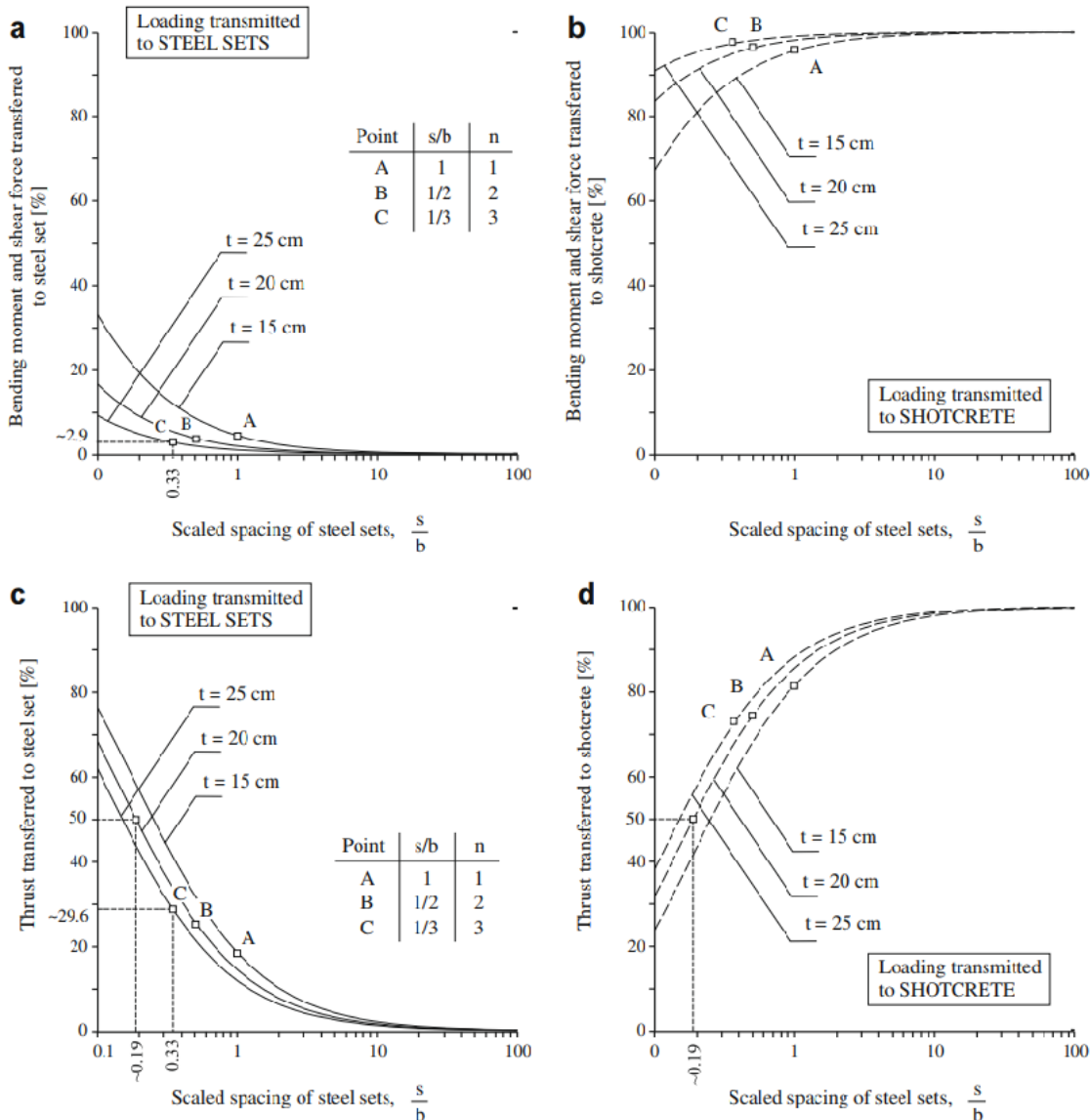
Στο Σχήμα 2.13 αναφέρονται οι τρεις διαφορετικές διατάξεις A,B,C ισοδύναμου τμήματος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χάλυβα για σταθερό πλάτος  $b=1 \text{ m}$ . Στην πρώτη περίπτωση A ο αριθμός των τμημάτων του χάλυβα είναι  $n=1$  με μεταξύ τους απόσταση  $s=1b$  και πάχος ισοδύναμου τμήματος  $t=0.15 \text{ m}$  (Σχήμα 2.13a). Στην δεύτερη περίπτωση B ο αριθμός των τμημάτων του χάλυβα είναι  $n=2$  με μεταξύ τους απόσταση  $s=(1/2)b$  και πάχος  $t=0.20 \text{ m}$  (Σχήμα 2.13b). Τέλος, στην τρίτη περίπτωση C ο αριθμός των τμημάτων του χάλυβα είναι  $n=3$  με απόσταση  $s=(1/3)b$  και πάχος  $t=0.25 \text{ m}$  (Σχήμα 2.13c).



Σχήμα 2.13: Διαφορετικές διαμορφώσεις χάλυβα και σκυροδέματος σχήματα (a), (b) και (c) και (d) οι ιδιότητες του χάλυβα και του σκυροδέματος που εξετάζονται στο παράδειγμα.



Από την παραπάνω ανάλυση των τριών διαφορετικών διατάξεων ισοδύναμου τμήματος A,B,C κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα δυνάμεων συναρτήσει της απόστασης  $s/b$  των τμημάτων του χάλυβα και του πάχους του σκυροδέματος. Τα Σχήματα 2.14 a και b αναφέρονται αντίστοιχα στο τμήμα του χάλυβα και στο τμήμα του σκυροδέματος με τον κατακόρυφο άξονα να ορίζει τα ποσοστά της συνολικής ροπής κάμψης και της συνολικής διάτμησης, που ασκούνται στην σύνθετη επένδυση, και με τον οριζόντιο άξονα να είναι η απόσταση μεταξύ των τμημάτων χάλυβα. Τα Σχήματα 2.14 c και d αναφέρονται αντίστοιχα στο τμήμα του χάλυβα και στο τμήμα του σκυροδέματος με τον κατακόρυφο άξονα να ορίζει το ποσοστά της συνολικής αξονικής δύναμης και με τον οριζόντιο άξονα να δείχνει την απόσταση μεταξύ των τμημάτων χάλυβα.



Σχήμα 2.14: Το ποσοστό επί της συνολικής ροπής κάμψης και της διατμητικής δύναμης που προκαλείται επί των (a) χαλύβδινων τμημάτων και (b) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του ποσοστού της συνολικής αξονικής δύναμης που προκαλείται επί των (c) χαλύβδινων συνόλων και (d) στα σύνθετα τμήματα του σχήματος 2.13.

Από την ανάλυση των διαγραμμάτων του Σχήματος 2.14 προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για την μέθοδο της σύνθετης επένδυσης ισοδύναμου τμήματος. Τα τμήματα του χάλυβα είναι πιο αποτελεσματικά στην παραλαβή των αξονικών φορτίων από ότι στην κάμψη και την διάτμηση (Σχήμα 2.14a,c). Για την περίπτωση A της διάταξης του ισοδύναμου τμήματος ο χάλυβας δέχεται



μεγαλύτερο ποσοστό αξονικών δυνάμεων (Σχήμα 2.14c) σε σχέση με το ποσοστό καμπτικών και διατμητικών δυνάμεων (Σχήμα 2.14a). Επίσης, από την ανάλυση των διαγραμμάτων του Σχήματος 2.14 c και d προκύπτει πως για το ποσοστό 50% της αξονικής δύναμης και για τον χάλυβα και για το σκυρόδεμα απαιτείται τουλάχιστον απόσταση μεταξύ των τμημάτων του χάλυβα ίση με 0.19 m, δηλαδή πρέπει να τοποθετηθούν τουλάχιστον  $n=5$  τμήματα χάλυβα στο πλάτος ένα μέτρο  $b=1$  m.

## 2.2. Ανάλυση πλευρικών ανοιγμάτων σε επένδυση σήραγγας

Οι κύριες σήραγγες πλέον αποτελούνται από διασταυρώσεις με άλλες δευτερεύουσες σήραγγες, γεγονός που απαιτεί προσοχή στην μελέτη του σχεδιασμού τους. Μια χαρακτηριστική περίπτωση σηράγγων με πολλά ανοίγματα είναι η δίδυμη σήραγγα Brenner BaseTunnel στις Ανατολικές Άλπεις με 200 διασταυρώσεις (δηλ. 400 ανοίγματα), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Σήραγγα Brenner BaseTunnel στις Ανατολικές Άλπεις.

Ιδιαίτερη έμφαση πραγματοποιείται στην κατασκευή της περιοχής της διασταύρωσης των σηράγγων σε θέματα που αφορούν τον τρόπο επένδυσης καθώς και στην γεωμετρία που θα επιλεγεί στην ένωση των δυο σηράγγων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη και η σύγκριση 2-D και 3-D μοντέλων διασταυρώσεων σηράγγων με σκοπό την καθοδήγηση στον σχεδιασμό και στην κατασκευή των ανοιγμάτων της σήραγγας. Η παρακάτω μελέτη αφορά κυκλικές σήραγγες (κύρια και δευτερεύουσα) με συνεχή ιστροπική επένδυση και με μικρό βάθος εδάφους, που παρουσιάζεται σε ρηχές σήραγγες. Το έδαφος και το υλικό επένδυσης της σήραγγας έχουν ελαστική συμπεριφορά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη επικεντρώνεται στην επίδραση της γεωμετρίας μεταξύ των διασταυρώσεων δυο σηράγγων και των ελαστικών χαρακτηριστικών του εδάφους (κυρίως μέτρο Young's modulus). Ο πλευρικός συντελεστής πίεσης στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει οριστεί ως  $K_0=1$ . Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $K_0$  επιδρούν στο έδαφος και επηρεάζουν σημαντικά την μελέτη της γεωμετρίας της διασταύρωσης των σηράγγων, παρόλο που λαμβάνεται ως μια σταθερή τιμή στην παρακάτω ανάλυση.

Ο τρόπος κατασκευής δυο διασταυρούμενων σηράγγων παρουσιάζεται παρακάτω. Αρχικά, σκάβονται οι κύριες σήραγγες και τοποθετείται σε αυτές η επένδυση, που απαιτείται. Αφού το

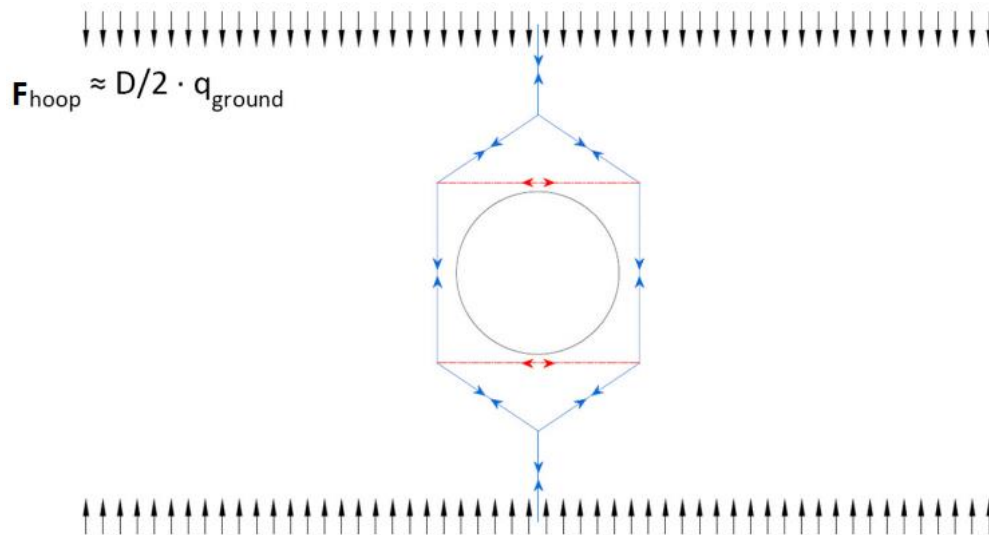
μέτωπο εκσκαφής έχει προωθηθεί σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή, που θα γίνει η διασταύρωση των σηράγγων, και τα φορτία στην επένδυση των κύριων σηράγγων έχουν σταθεροποιηθεί τότε γίνεται η εκσκαφή από την κύρια στην δευτερεύουσα σήραγγα και ακολουθεί η επένδυση της. Η επένδυση της κύριας σήραγγας στις περιοχές των διασταυρώσεων πρέπει να είναι επαρκής ώστε κατά την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας να μην υπάρξει αστοχία. Για τον λόγο αυτόν τις περισσότερες φορές γίνεται ενίσχυση στην επένδυση των κύριων σηράγγων στις περιοχές, που παρουσιάζονται τα ανοίγματα αυτά.

### **2.2.1. Αναλυτικές προσεγγίσεις και θεωρίες για την μελέτη των διασταυρώσεων στις σήραγγες**

Σε βάθος χρόνου έχουν γίνει διάφορες αναλυτικές προσεγγίσεις όσον αφορά την εκτίμηση της γεωμετρίας και των εντατικών μεγεθών μεταξύ των διασταυρούμενων σηράγγων. Μια χαρακτηριστική αναλυτική λύση είναι του Kirsch που αφορά κύριες κυκλικές σήραγγες με επένδυση και κυκλικό άνοιγμα στην διασταύρωση των σηράγγων. Θεωρείται ότι ασκείται μια επίπεδη καταπόνηση στο κυκλικό άνοιγμα της κύριας σήραγγας από απειρομήκες διαμήκες ελαστικό φορτίο. Η λύση του Kirschδεν είναι πλήρως εφαρμόσιμη για την μελέτη και κατασκευή των διασταυρώσεων των σηράγγων για τους παρακάτω λόγους:

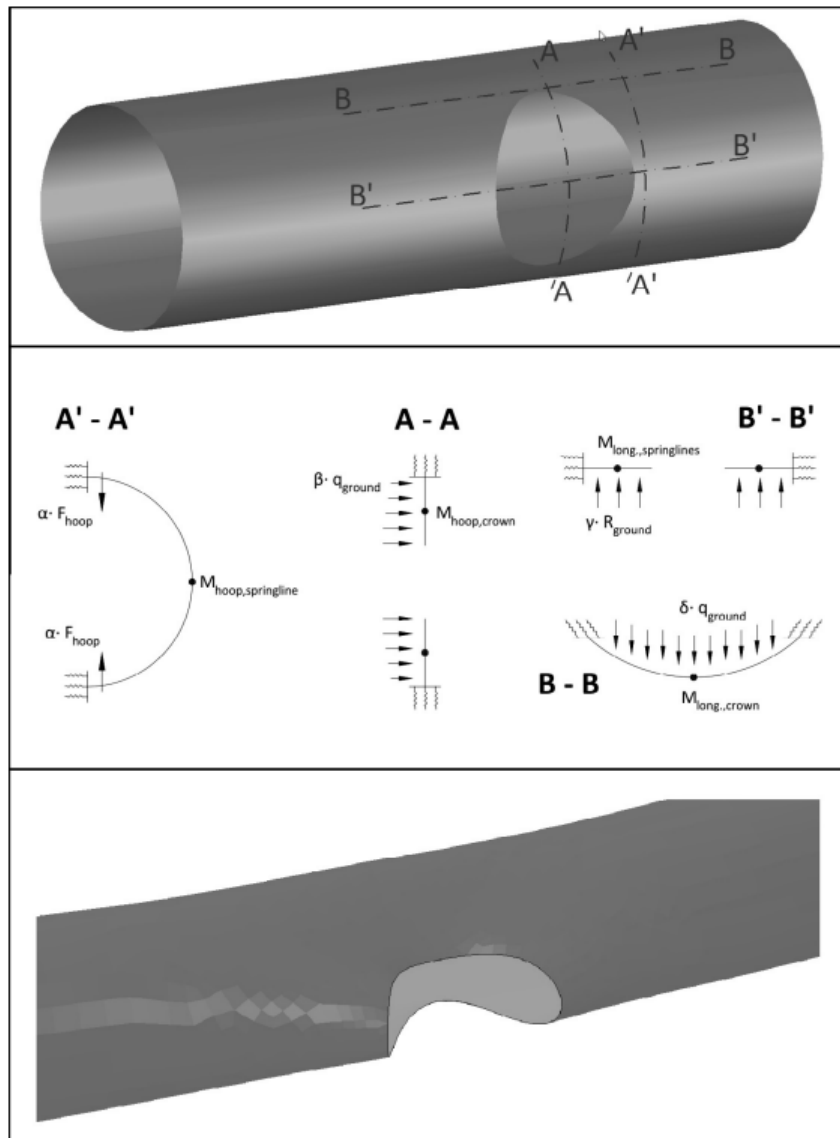
- Η προσέγγιση γίνεται σε δισδιάστατα μοντέλα και όχι σε τρισδιάστατα.
- Λαμβάνει υπόψη μόνο κυκλικές διατομές σηράγγων.
- Δεν αναλύει την γεωμετρία της ένωσης μεταξύ της κύριας και της δευτερεύουσας σήραγγας.
- Θεωρεί τα φορτία ως απειρομήκη, γεγονός μη ρεαλιστικό και εφικτό.

Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15, (Bergmeister et al. 1993). Στο σχήμα φαίνεται μια τομή της αρχής του ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας. Απεικονίζεται το φορτίο τους εδάφους κατά μήκος της κύριας σήραγγας, που εφαρμόζεται στο άνοιγμα, με την δύναμη  $F_{hoop} = D/(2\alpha_{ground})$ , όπου  $D$  η διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας και  $\alpha_{ground}$  η τάση του εδάφους. Με τα βέλη παρουσιάζεται η εντατική κατάσταση (εφελκυσμός – θλίψη), που δημιουργείται γύρω από την δευτερεύουσα σήραγγα. Αριστερά και δεξιά πλευρικά της κυκλικής διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας κατά την διάνοιξη της αναπτύσσεται θλίψη, ενώ αντίθετα στην στέψη και την κορυφή της διατομής δημιουργείται εφελκυσμός.



**Σχήμα 2.15:** Μοντέλο προσομοίωσης Bergmeister et al. 1993.  $F_{hoop}$  είναι η δύναμη κάθετη στο επίπεδο,  $q_{ground}$  είναι η ομοιόμορφη πίεση (προσομοίωση της γεωστατικής πίεσης ή των φορτίων εδάφους).

Στην συνέχεια στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται μια αναλυτική λύση βασισμένη σε 3-D μοντέλο. Γίνεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση της κύριας σήραγγας με το άνοιγμα της δευτερεύουσας. Στην διασταύρωση αυτή λαμβάνονται τα τμήματα A-A, A'-A', B-B, B'-B' χαρακτηριζόμενα ως τόξα. Μέσω των τμημάτων αυτών γίνεται προσομοίωση με αναλυτικές λύσεις των φορτίσεων και της εντατικής κατάστασης που δημιουργείται σε αυτές τις θέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Απλοποίηση/εξιδανίκευση στατικών μοντέλων που ανταποκρίνονται στις αλληλεπιδράσεις του εδάφους και της κατασκευής για χαρακτηριστικά τμήματα της σήραγγας.

### 2.2.2. Υπολογιστικά μοντέλα για την μελέτη των διασταυρώσεων στις σήραγγες

Στην κατασκευή διασταυρώσεων στις σήραγγες είναι απαραίτητη μια καλή προσέγγιση του μοντέλου των σηράγγων, που θα μελετηθεί. Σκοπός είναι να περιγραφεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά η γεωμετρία του μοντέλου των σηράγγων, τα υλικά της επένδυσης και το μοντέλο του εδάφους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται υπολογιστικές λύσεις μέσω τρισδιάστατου 3-D μοντέλου (Hsiao et al. 2009) με μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή:

- Βοηθά στην εύρεση των παραμορφώσεων της πλαστικής ζώνης.
- Ευνοεί στον σωστό καθορισμό των μέτρων υποστήριξης στις διασταυρώσεις, καθώς ο τύπος υποστήριξης εξαρτάται από την περιβάλλουσα πίεση του εδάφους στην σήραγγα και την συμπίεσσή της βραχομάζας.
- Εστιάζει στην επιλογή πρόσθετης υποστήριξης στην κρίσιμη περιοχή της διασταύρωσης της σήραγγας με την χρήση υπολογιστικών μοντέλων.

Σύμφωνα με τρισδιάστατες αναλύσεις που έγιναν σε διασταυρώσεις σηράγγων προέκυψε από τον Tsuchiyama et al. (1988) πως η περιοχή επιρροής κατά μήκος της κύριας σήραγγας είναι 1 έως 3 διαμέτρους της διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας, δεξιά και αριστερά από την διασταύρωση. Επίσης, σύμφωνα με ανάλυση των Moon and Lee (1991) and Jones (2007) προέκυψαν μεγάλες διαφορές μεταξύ 2-D και 3-D μοντέλων με το συμπέρασμα πως η δισδιάστατη ανάλυση (είτε με αναλυτική είτε με υπολογιστική λύση) υπερεκτιμά τον συντελεστή ασφαλείας στην διασταύρωση των σηράγγων σε αντίθεση με την τρισδιάστατη ανάλυση.

Ο Walter (2009) τονίζει την σημασία των υπολογιστικών τρισδιάστατων μοντέλων και αναλύσεων, αφού υπάρχουν δεδομένα (data) που αναφέρονται και μπορούν να αντιπροσωπεύσουν επαρκώς τις διαφορετικές κάθε φορά περιπτώσεις εδάφους και γεωμετρίας, να προσομοιάσουν τα υλικά επένδυσης (όπως το σκυρόδεμα ή το χάλυβα κλπ.) και τις μηχανικές ιδιότητες τους και να βοηθήσουν στην δημιουργία του πιο ρεαλιστικού γεωμετρικού μοντέλου προσομοίωσης των σηράγγων. Σκοπός είναι ο σωστός, επαρκής και οικονομικός σχεδιασμός σε κάθε περίπτωση σηράγγων. Παρόλα αυτά μπορούν να γίνουν πολλές απλουστεύσεις στην μεθοδολογία και τον τρόπο μοντελοποίησης των διαφόρων παραγόντων. Μια ευρεία συζήτηση για τις προσεγγίσεις μοντελοποίησης και τη συμπεριφορά των διασταυρώσεων σήραγγας παρουσιάζεται από τον Jones (2007). Υποστηρίζει πως οι υπολογιστικές μέθοδοι μπορούν να προσομοιάσουν πολύ καλύτερα την γεωμετρία και τις διάφορες παραμέτρους για την περίπτωση διασταυρούμενων σηράγγων και να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αλλά και πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα στην μελέτη σε αντίθεση με τις αναλυτικές λύσεις. Είναι ακόμη σημαντικό να αναφερθεί πως από την σύγκριση αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από μελέτη διασταυρούμενων σηράγγων με 2-D και 3-D μοντέλα, διαπιστώθηκε πως τα 3-D μοντέλα είναι πιο αντιπροσωπευτικά σε σχέση με τα 2-D σε αυτήν την περίπτωση διασταυρούμενων σηράγγων.

### 2.2.3. Προσέγγιση δισδιάστατου μοντέλου (2-D) και τρισδιάστατου μοντέλου (3-D) και μέθοδος Kirsch

Είναι σημαντικό να γίνει ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών αυτών προσεγγίσεων, δηλαδή προσέγγιση δισδιάστατου και τρισδιάστατου μοντέλου και μεθόδου Kirsch. Το τρισδιάστατο μοντέλο και η ανάλυση του γίνεται με κατάλληλο λογισμικό FEM [software: Abaqus CAE (Dassault Systèmes, 2011)] με χρήση των κατάλληλων τύπων πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την πιο ρεαλιστική και καλύτερη προσέγγιση όλων των παραμέτρων (έδαφος, επένδυση, γεωμετρία κλπ.).

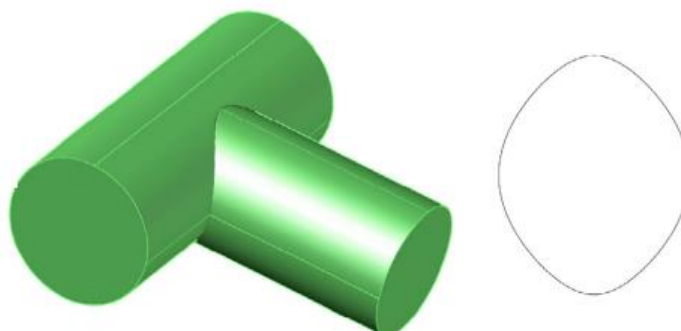
Τα δεδομένα εισόδου των τριών μεθόδων παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 2.7. Το φορτίο που χρησιμοποιείται για το μοντέλο Kirsch είναι της τάξης των 2.85 MPa πριν και μετά το άνοιγμα της δευτερεύουσας σήραγγας. Για την ανάλυση με 3-D μοντέλο λαμβάνονται υπόψη διάφορες τιμές της εδαφικής δυσκαμψίας από 25 έως 100 MPa, προσομοιάζοντας μαλακό έδαφος, και λόγος Poisson=0.2. Και στις τρεις μεθόδους η πυκνότητα του εδάφους ισούται με 200 kg/m<sup>3</sup> και ο συντελεστής πλευρικών τάσεων είναι ίσος με  $K_0=1$  σταθερά. Για το σκυρόδεμα ως υλικό επένδυσης θεωρείται ο λόγος Poisson=0.2, η δυσκαμψία του ίση με 15 GPa (Karakus 2007 and Röttler 1990) και πάχος επένδυσης ίσο με 350 mm. Η διάμετρος της κύριας σήραγγας είναι ίση με  $D=10$  m και το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους ως την κορυφή της σήραγγας αντιστοιχεί σε 1,2 ή 3 διαμέτρους της αντίστοιχα. Η δευτερεύουσα σήραγγα ελέγχεται για τρεις διαφορετικές διαμέτρους, δηλ.  $d=6$  m, 7.5 m και 9 m και σχηματίζονται και οι λόγοι  $d/D = 0.6, 0.75$  και 0.9.

Sr.Nr	Type	Poisson's ratio for the soil	E-modulus Soil [Mpa]	Depth of tunnel axis (H) [m]	Depth (H) / Diameter (D)	Child / Parent Diameter
1	S.J.B.	0.2	25	35	3.5	0.9
2	S.J.B.	0.2	50	35	3.5	0.9
3	S.J.B.	0.2	100	35	3.5	0.9
4	S.J.B.	0.2	25	25	2.5	0.9
5	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.9
6	S.J.B.	0.2	100	25	2.5	0.9
7	S.J.B.	0.2	25	15	1.5	0.9
8	S.J.B.	0.2	50	15	1.5	0.9
9	S.J.B.	0.2	100	15	1.5	0.9
10	S.J.B.	Averaged normalised values from 3D model				0.9
11	2D-plstress	N.A.	N.A.	15	1.5	0.9
12	2D-Kirsch	N.A.	N.A.	35	3.5	0.9
13	S.J.B.	0.2	25	35	3.5	0.75
14	S.J.B.	0.2	50	35	3.5	0.75
15	S.J.B.	0.2	100	35	3.5	0.75
16	S.J.B.	0.2	25	25	2.5	0.75
17	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.75
18	S.J.B.	0.2	100	25	2.5	0.75
19	S.J.B.	0.2	25	15	1.5	0.75
20	S.J.B.	0.2	50	15	1.5	0.75
21	S.J.B.	0.2	100	15	1.5	0.75
22	S.J.B.	Averaged normalised values from 3D model				0.75
23	2D-plstress	N.A.	N.A.	15	1.5	0.75
24	2D-Kirsch	N.A.	N.A.	35	3.5	0.75
25	S.J.B.	0.2	25	35	3.5	0.6
26	S.J.B.	0.2	50	35	3.5	0.6
27	S.J.B.	0.2	100	35	3.5	0.6
28	S.J.B.	0.2	25	25	2.5	0.6
29	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.6
30	S.J.B.	0.2	100	25	2.5	0.6
31	S.J.B.	0.2	25	15	1.5	0.6
32	S.J.B.	0.2	50	15	1.5	0.6
33	S.J.B.	0.2	100	15	1.5	0.6
34	S.J.B.	Averaged normalised values from 3D model				0.6
35	2D-plstress	N.A.	N.A.	15	1.5	0.6
36	2D-Kirsch	N.A.	N.A.	35	3.5	0.6

Εικόνα 2.7: Δεδομένα και παράμετροι εισόδου για τις τρεις μεθόδους μελέτης 3-D, 2-D μοντέλο και μοντέλο Kirsch.

### 2.2.3.1. Δισδιάστατο μοντέλο ανάλυσης (2-D)

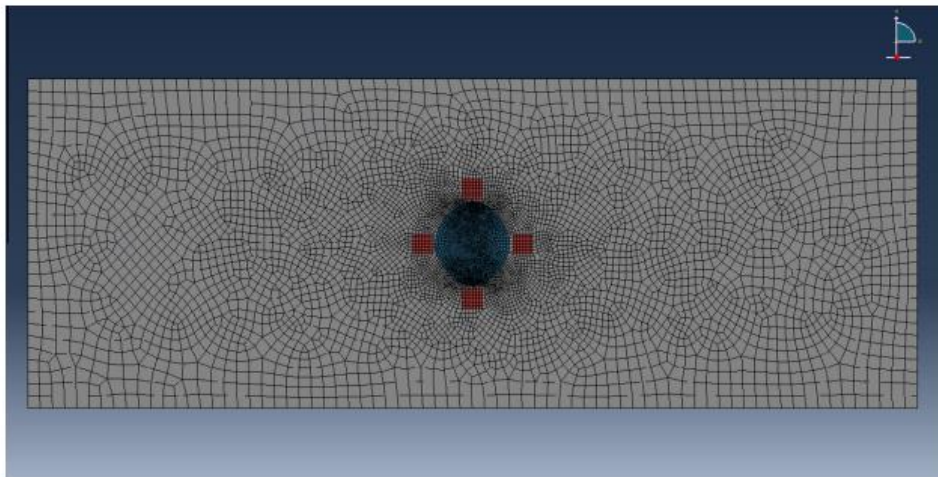
Στο δισδιάστατο μοντέλο το προσομοίωμα αποτελείται από την διασταύρωση των σηράγγων και της διατομή της δευτερεύουσας σήραγγας, που βρίσκεται υπό την τάση του εδάφους. Η διατομή που δημιουργείται στην διασταύρωση των σηράγγων έχει την μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: 3-D γεωμετρία της διασταύρωσης της σήραγγας (αριστερό σχήμα) και η προβολή της (δεξί σχήμα).

Η γεωμετρία και η δομή του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 2.17 για την περίπτωση Sr.Nr. 23 της Εικόνας 2.7 με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της περίπτωσης αυτής. Η προσομοίωση γίνεται με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπου το έδαφος προσομοιάζεται σαν ένα «κουτί» γύρω από το άνοιγμα της δευτερεύουσας σήραγγας. Το ύψος του «κουτιού» είναι 31.4 m και το πλάτος 90 m. Τα πεπερασμένα στοιχεία γύρω από το άνοιγμα είναι πιο πυκνά και έχουν μέγεθος 0.35 m με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια στην μελέτη της εντατικής κατάστασης στην διασταύρωση των σηράγγων, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα έχουν μέγεθος 1.25 m. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τριγωνικά και τετράπλευρα γραμμικά στοιχεία κελύφους με στελέχη πεπερασμένων μεμβρανών, που ορίζονται ως S4 (R) και S3 στη βιβλιοθήκη πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (Dassault Systèmes, 2011). Για κάθε μοντέλο 2D το «πλέγμα» περιλάμβανε περίπου 10.000 στοιχεία. Για τον έλεγχο των μοντέλων τα 2-D αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση συγκρίθηκαν με λύσεις του Kirsch και είχαν πολύ καλή ακρίβεια μεταξύ τους (<3%). Δυο βήματα που προγραμματίστηκαν για αυτό το μοντέλο 2-D είναι:

- Η αρχική φόρτιση στην περιοχή της διατομής.
- Το «σπάσιμο» στο άνοιγμα της διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας.



Σχήμα 2.17: Προσομοίωμα 2-D μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία.

### 2.2.3.2. Τρισδιάστατο μοντέλο ανάλυσης (3-D)

Το τρισδιάστατο μοντέλο ανάλυσης απαιτεί περισσότερα δεδομένα εισόδου σε σχέση με την δισδιάστατη ανάλυση με σκοπό την πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της κατασκευής. Με το 3-D μοντέλο γίνεται ανάλυση των ελαστικών επιδράσεων και καταγράφονται οι πιέσεις και οι παραμορφώσεις στο άνοιγμα της δευτερεύουσας σήραγγας και πριν και μετά το «σπάσιμο» της. Η γεωμετρία του 3-D μοντέλου παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.18, 2.19, 2.20 και ισχύει για την περίπτωση Nr.17: (3D-50-25-075), που φαίνεται στην Εικόνα 2.7. Οι διαστάσεις του «κουτιού» που προσομοιάζει το έδαφος είναι 100, 100 και 40 έως 60 μέτρα στους άξονες x, y και z αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Τα όρια του εδαφικού μοντέλου της κύριας σήραγγας είναι σε απόσταση από το άνοιγμα της δευτερεύουσας σήραγγας τέτοια ώστε να μην προκαλούνται αλλαγές στην κατανομή των τάσεων λόγω του ανοίγματος. Όπως απεικονίζεται, ο όγκος του εδάφους χωρίζεται στα δύο πρώτα στρώματα, με πάχος 10 μέτρων με σκοπό να γίνεται πιο εύκολη η διαδικασία μοντελοποίησης για τις διαφορετικές φορτίσεις, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.7 και για τις αναλύσεις με 10 και 20 μέτρα υπερκείμενου εδάφους.



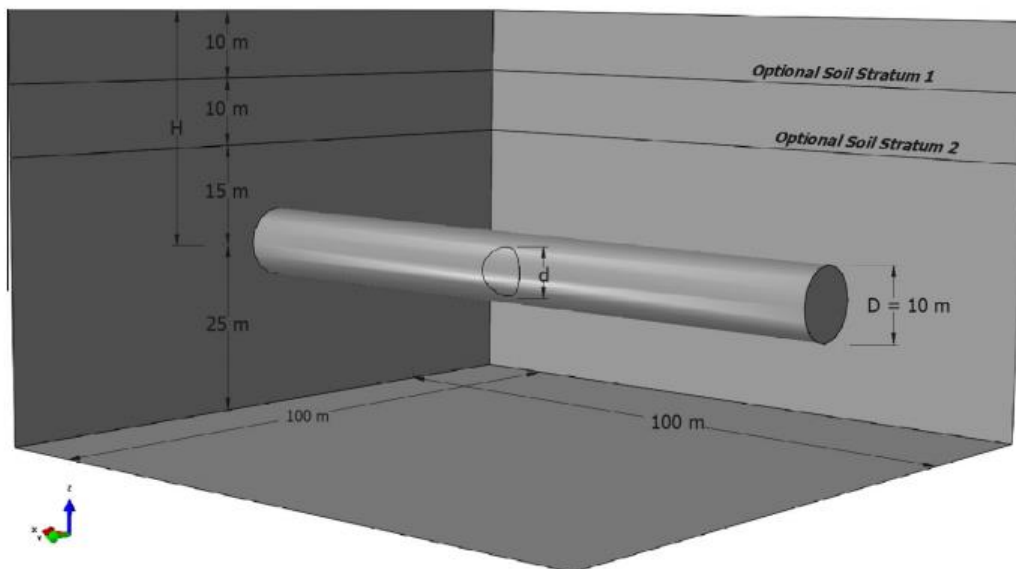
Στο Σχήμα 2.20, η επένδυση της σήραγγας επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα. Το μήκος της ίδιας της σήραγγας είναι 90 μέτρα και όπως απεικονίζεται δεν εκτείνεται στα όρια του εδάφους αφήνοντας ένα πάχος εδάφους 5 μέτρων σε κάθε πλευρά. Η επένδυση προσομοιώνεται ως ένα τρισδιάστατο κέλυφος στο όριο των εκσκαφών. Σχετικά με τις περιοχές εστίασης γύρω από το χαρακτηριστικό άνοιγμα, οι περιγραφές που παρέχονται για τα μοντέλα 2D ισχύουν επίσης και για τα τρισδιάστατα μοντέλα.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για το προσομοίωμα του εδάφους ήταν της τάξης των 8 μέτρων. Για την επένδυση χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία της τάξης των 2 μέτρων με έμφαση στις περιοχές κοντά στο άνοιγμα, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία τάξης 0.35 μέτρων (ίσο με το πάχος του κελύφους). Ο τύπος του πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιείται για το κέλυφος της σήραγγας είναι σύμφωνα με τα μοντέλα 2D που περιγράφηκαν παραπάνω, ενώ τα στοιχεία του εδάφους είναι τετραεδρικά γραμμικά στερεά στοιχεία τετραδικών τετραγώνων που καθορίστηκαν ως C3D4 στη βιβλιοθήκη στοιχείων Abaqus. Για κάθε μοντέλο 3D το «πλέγμα» περιλάμβανε περίπου 55.000 στερεά (εδαφικά) στοιχεία και 6000 στοιχεία επένδυσης.

Στο μοντέλο η αρχική κατάσταση του εδάφους προσδιορίστηκε ως ένα γεωστατικό πεδίο τάσεων. Η τιμή του συντελεστή της πλευρικής πίεσης θεωρείται ίση με  $K_0=1$ . Οι εδαφικές πιέσεις υπολογίστηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τα δεδομένα εισόδου της πυκνότητας του εδάφους και το μέγεθος της βαρύτητας  $g=10 \text{ m/s}^2$ .

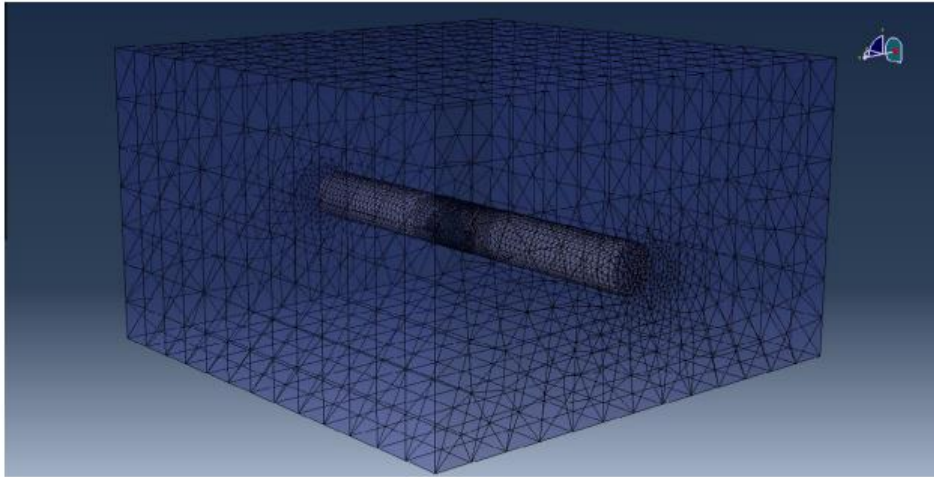
Τρία βήματα που προγραμματίστηκαν για αυτό το μοντέλο είναι:

- Ο υπολογισμός της γεωστατικής τάσης και η ισορροπία των τάσεων.
- Εκσκαφή της κύριας σήραγγας και τοποθέτηση της επένδυσης (άμεση επένδυση)
- Αφαίρεση του «σπασίματος» του ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας και η ανακατανομή των τάσεων γύρω από αυτήν την περιοχή.

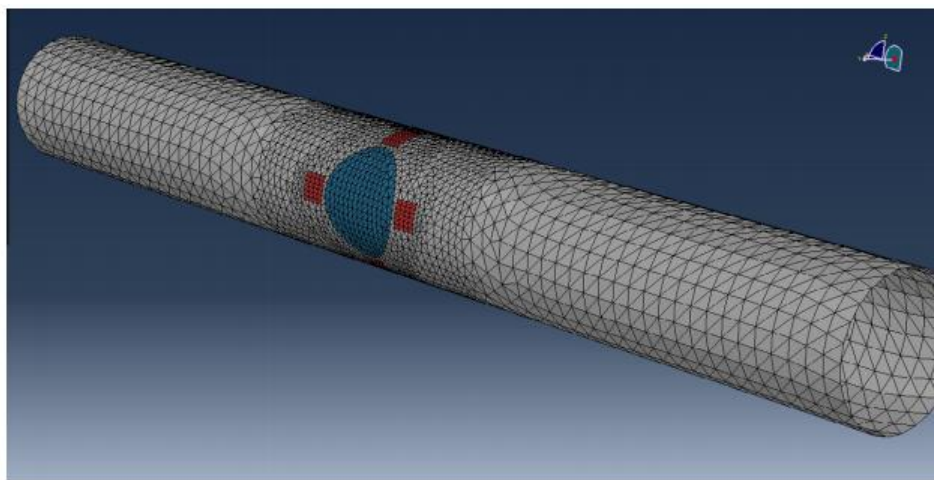


Σχήμα 2.18: Ορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων τρισδιάστατου μοντέλου (d: διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας, D: διάμετρος της κύριας σήραγγας, H: βάθος του άξονα της σήραγγας)





Σχήμα 2.19: Προσομοίωμα 3-D μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία.

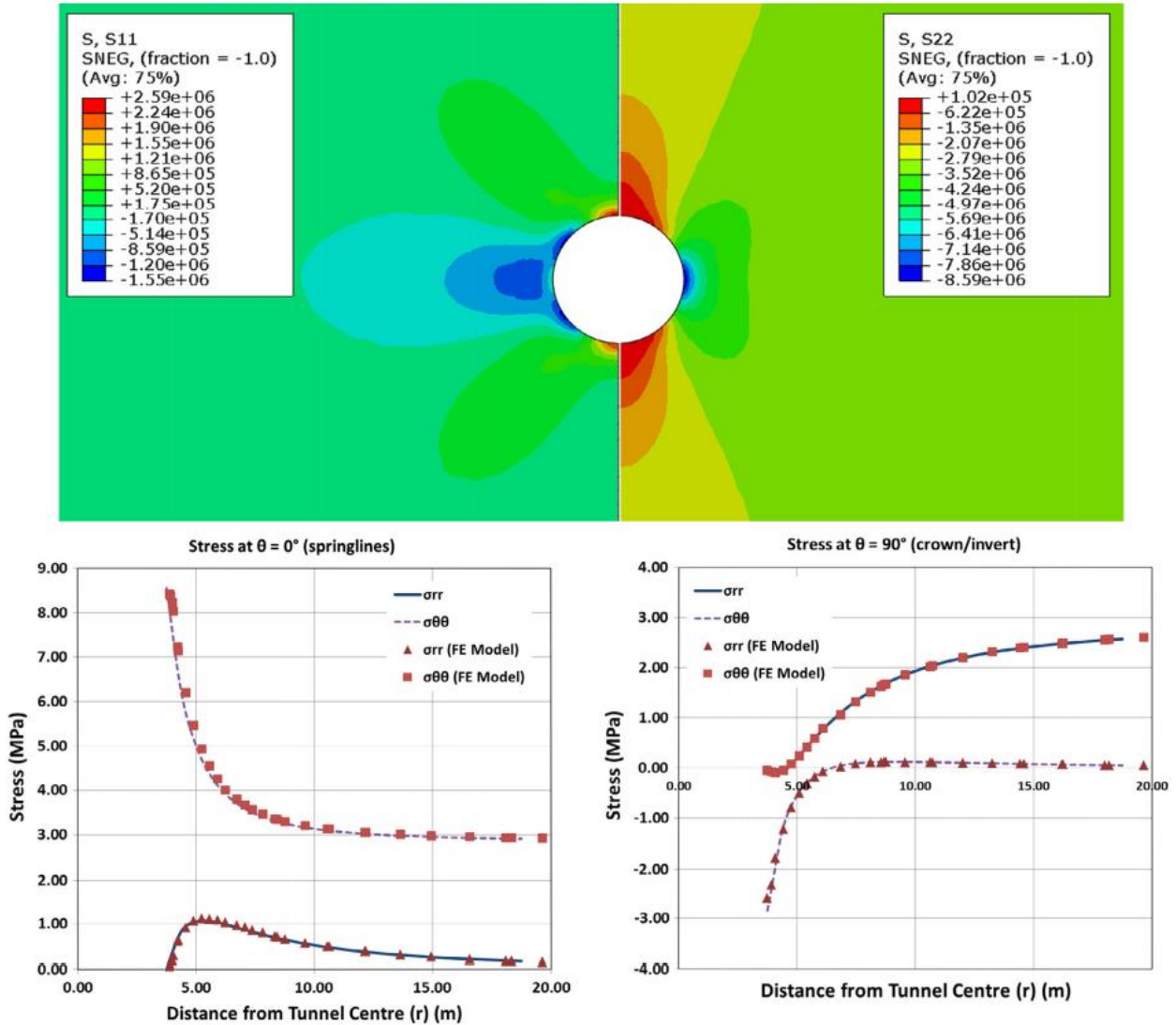


Σχήμα 2.20: Προσομοίωμα της επένδυσης της σήραγγας σε 3-D μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία.

### 2.2.3.3. Μοντέλο επαλήθευσης έναντι αναλυτικών λύσεων

Έχει γίνει ανάλυση με ένα μοντέλο επαλήθευσης 2-D. Η λύση του Kirsch συγκρίνεται με ένα μοντέλο 2-D FEA, το οποίο είναι έχει απειρομήκες φορτίο και κυκλικό άνοιγμα διατομής της σήραγγας. Τα αποτελέσματα του τασικού πεδίου, που προκύπτουν από τις αναλύσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.21.

P. Spyridis, K. Bergmeister/Tunnelling and Underground Space Technology 50 (2015) 376–395



Σχήμα 2.21: Επαλήθευση μοντέλου Kirsch έναντι αναλυτικών λύσεων. Σύγκριση τασικού πεδίου στις δυο κάθετες διευθύνσεις.

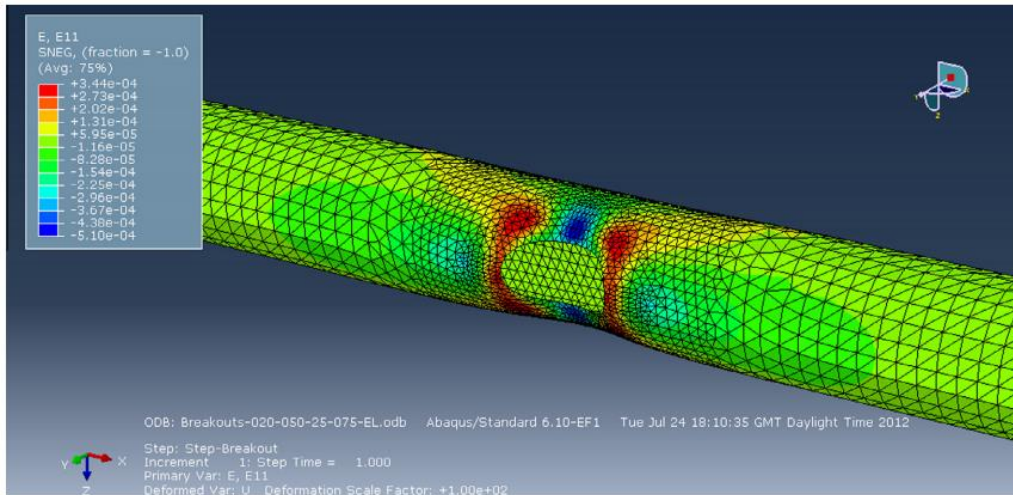
### 2.2.4. Αποτελέσματα των αναλύσεων και ερμηνεία

Τα αποτελέσματα εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι:

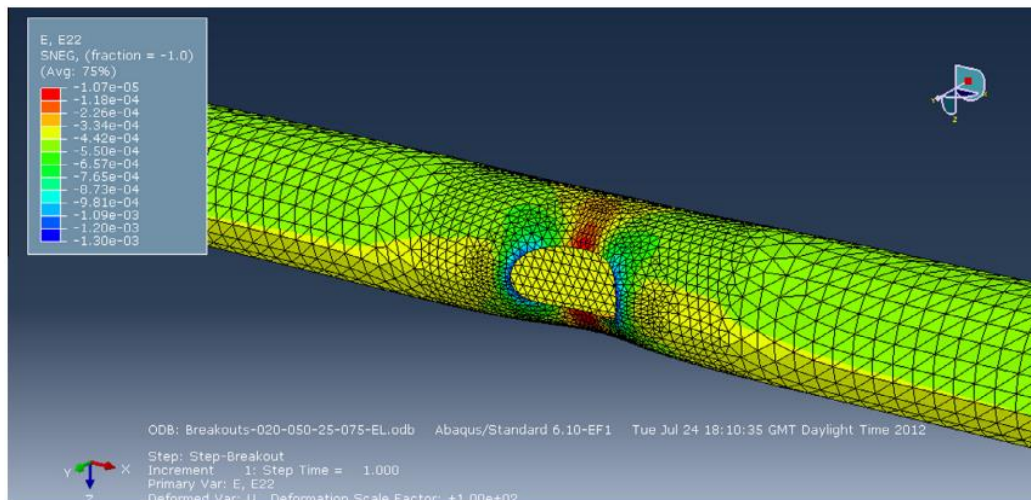
- A. Τα φορτία στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση (hoop & longitudinal) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και στην εγκατάσταση της επένδυσης με τις οριακές δυνάμεις στην περιοχή της διασταύρωσης των σηράγγων.
- B. Κατά την διάρκεια κατασκευής του ανοίγματος και της δευτερεύουσας σήραγγας καταγράφηκαν τα φορτία στην εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση (μέγιστες και ελάχιστες τιμές) σε τέσσερα σημεία της διατομής της σήραγγας: στην κορυφή, στην βάση και δεξιά και αριστερά πλευρικά (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20 με κόκκινο χρώμα).

Λόγω των σχεδόν συμμετρικών επιδράσεων και για λόγους ευκολίας στα συμπεράσματα, τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται για τις θέσεις της κορυφής και της βάσης. Τα αποτελέσματα της κατάστασης στην βάση της διατομής κανονικοποιούνται διαιρώντας με τη μέση δύναμη της κορυφής (Jones 2007).

Επιλεγμένα γραφήματα των αποτελεσμάτων δίνονται για τα μοντέλα No.17: (3D-50-25-075) (Σχήματα 2.22 έως 2.28) και No.23: (2D-075) (Εικόνες 2.29 και 2.30), έτσι ώστε να παρέχεται μια μέση ενδεικτική εικόνα της δομικής συμπεριφοράς της διασταύρωσης μεταξύ των σηράγγων και το μοντέλο κατανομής του φορτίου, σύμφωνα με τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα φαίνονται ολοκληρωμένα για όλες τις περιπτώσεις στις Εικόνες 2.9 και 2.10.

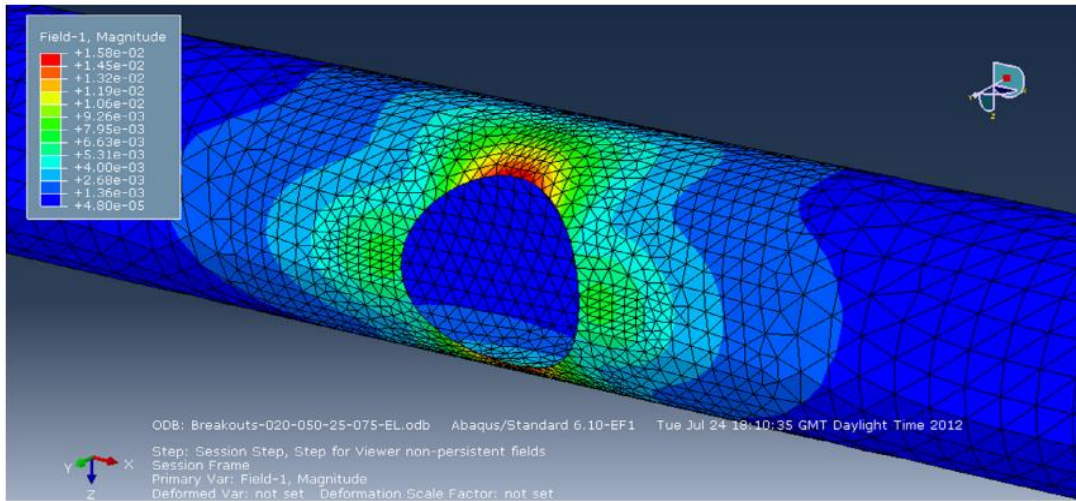


Σχήμα 2.22: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; E11: παραμορφώσεις του ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας για τις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (θετική για τον εφελκυσμό).

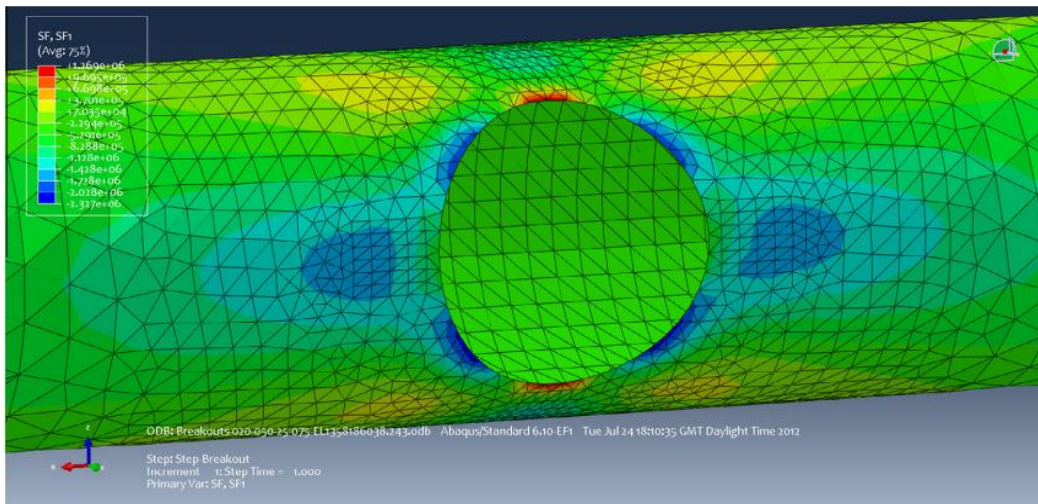


Σχήμα 2.23: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; E22: παραμορφώσεις του ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας για τις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (θετική για τον εφελκυσμό).

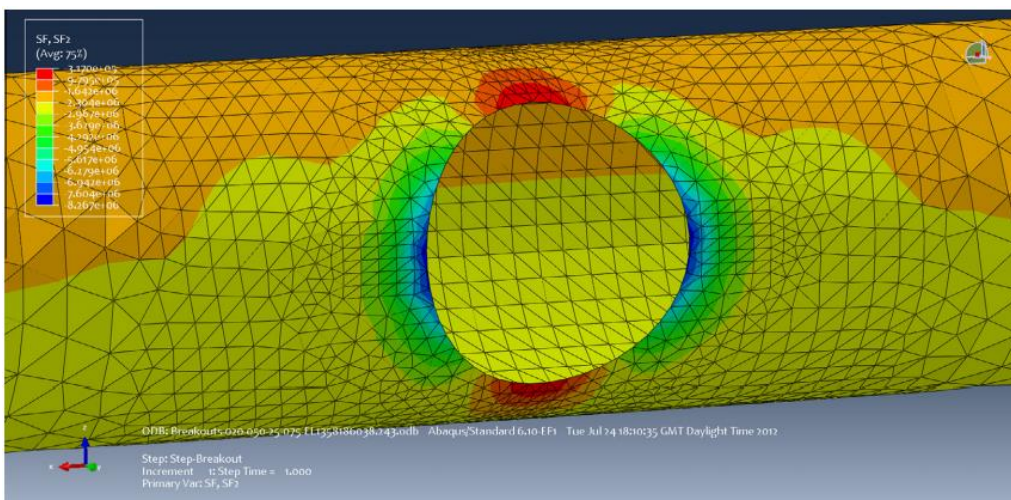




Σχήμα 2.24: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; U: Σχετικές μετατοπίσεις (πριν και μετά το «σπάσιμο» για το άνοιγμα της σήραγγας).

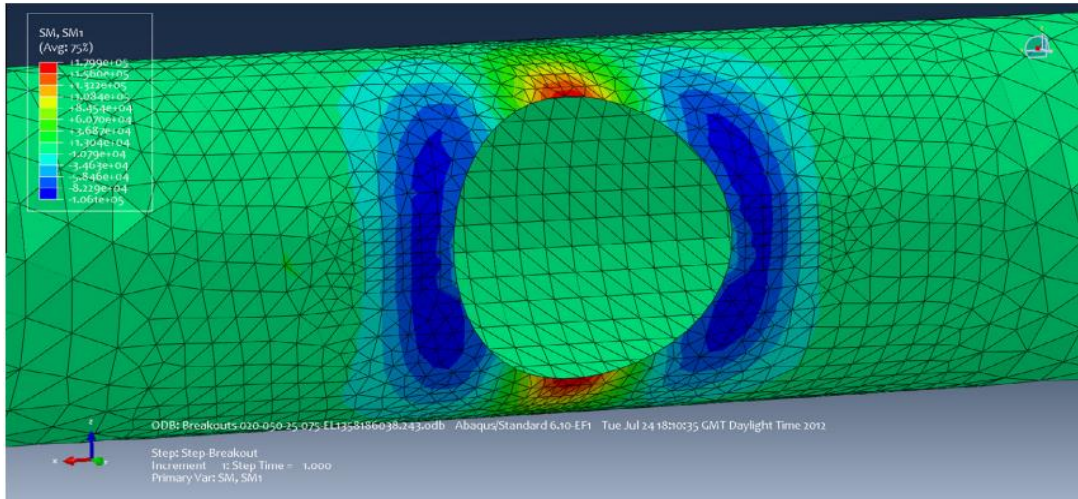


Σχήμα 2.25: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; SF1: Δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (θετική για τον εφελκυσμό).

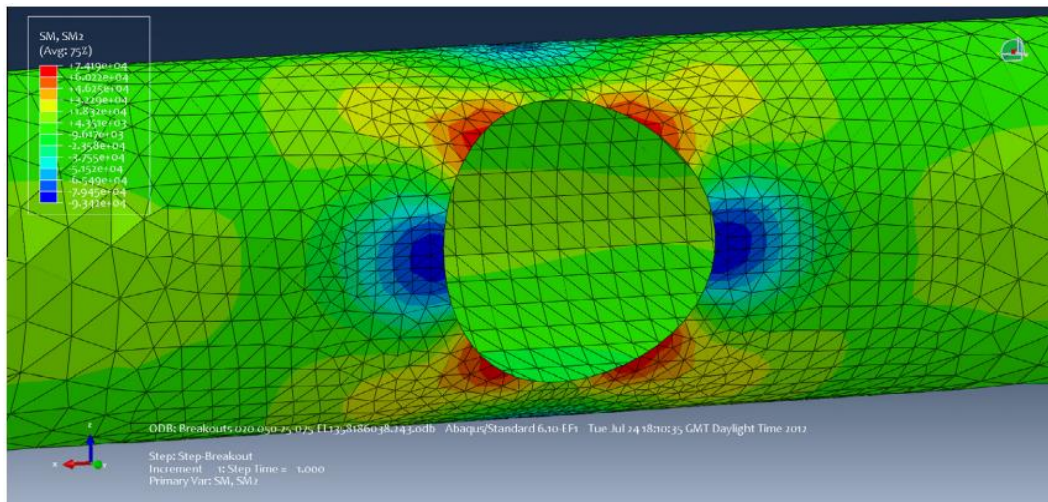


Σχήμα 2.26: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; SF2: Δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (θετική για τον εφελκυσμό).

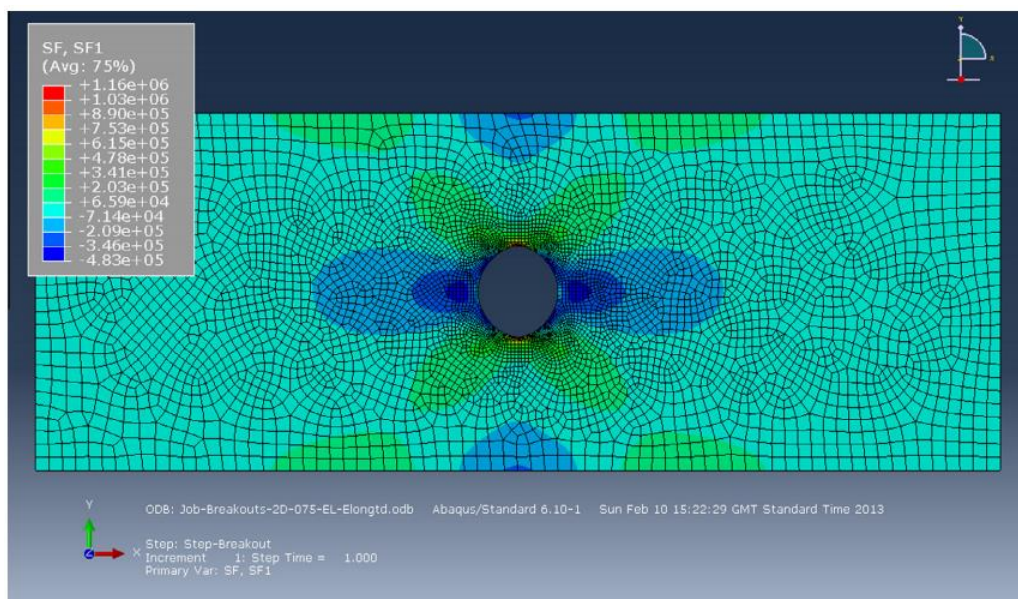




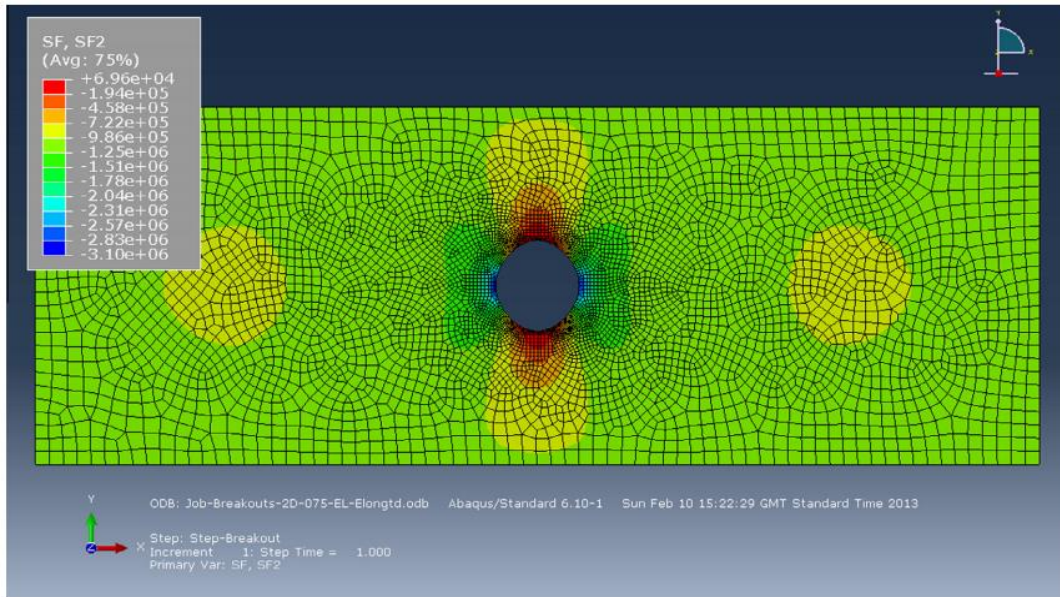
Σχήμα 2.27: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; SM1: Ροπές στην διαμήκη διεύθυνση (θετικές για ένταση στο εσωτερικό).



Σχήμα 2.28: Μοντέλο No.17: 3D-50-25-075; SM1: Ροπές στην εγκάρσια διεύθυνση (θετικές για ένταση στο εσωτερικό).



Σχήμα 2.29: Μοντέλο Nr.23: 2D-075; SF1: Δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (θετικές για εφελκυσμό).



Σχήμα 2.30: Μοντέλο Nr.23: 2D-075; SF1: Δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (θετικές για εφελκυσμό).

Sr.Nr	Avg. Hoop Force at Ring Closure [kN]	Avg. Longitudinal Force at Ring Closure [kN]	Max. Hoop Force Crown/invert [kN]	Min Hoop Moment Crown/invert [kNm]	Max Longitudinal Force Crown/invert [kN]	Max Longitudinal Moment Crown/invert [kNm]	Min Hoop Force Springlines [kN]	Min. Hoop Moment Springlines [kNm]	Max Longitudinal Force Springlines [kN]	Min. Longitudinal Moment Springlines [kNm]
			SF2	SM2	SF1	SM1	SF2	SM2	SF1	SM1
1	-3404	-719	-856	-111	-483	306	-10180	-188	-1254	-183
2	-3340	-706	-817	-75	-560	205	-9506	-105	-1096	-153
3	-3212	-679	-772	-41	-469	121	-8405	-56	-911	-116
4	-2433	-466	-500	-83	481	230	-7253	-127	-879	-130
5	-2387	-340	-504	-55	132	153	-6766	-71	-765	-109
6	-2383	-381	-508	-20	-59	97	-6638	-57	-707	-92
7	-1444	-175	-275	-60	414	139	-4174	-58	-493	-74
8	-1414	-192	-275	-39	141	93	-3896	-33	-431	-62
9	-1364	-214	-272	-21	-5	55	-3445	-19	-358	-47
10		≠ 0								
11	-1000	0	87	N.A.	882	N.A.	-2870	N.A.	-163	N.A.
12	-1000	0	41	N.A.	682	N.A.	-2543	N.A.	-180	N.A.
13	-3410	-471	-736	-98	1163	360	-10330	-246	-1414	-178
14	-3350	-526	-756	-70	667	241	-9568	-139	-1236	-143
15	-3222	-555	-750	-41	319	141	-8453	-69	-1018	-106
16	-2390	-383	-519	-77	836	256	-7266	-162	-995	-124
17	-2430	-342	-519	-53	480	172	-6731	-93	-867	-100
18	-2300	-406	-515	-31	230	101	-5950	-46	-713	-75
19	-1435	-192	-276	-59	530	149	-4136	-74	-564	-69
20	-1408	-214	-277	-39	307	101	-3833	-44	-488	-56
21	-1360	-231	-276	-22	151	60	-3393	-22	-402	-42
22		≠ 0								
23	-1000	0	57	N.A.	734	N.A.	-2680	N.A.	-183	N.A.
24	-1000	0	41	N.A.	632	N.A.	-2648	N.A.	-205	N.A.
25	-3375	-378	-773	-60	1424	383	-10340	-280	-1595	-187
26	-3354	-526	-741	-48	852	265	-9490	-169	-1387	-146
27	-3212	-536	-708	-31	420	159	-8338	-88	-1145	-105
28	-2385	-291	-532	-48	1028	272	-7293	-188	-1119	-132
29	-2639	-317	-508	-37	612	189	-6694	-115	-974	-103
30	-2288	-378	-486	-23	301	113	-5883	-60	-804	-74
31	-1420	-162	-287	-36	650	159	-4191	-92	-634	-75
32	-1393	-201	-272	-26	382	111	-3847	-58	-553	-59
33	-1342	-218	-260	-16	188	67	-3386	-31	-458	-42
34		≠ 0								
35	-1000	0	35	N.A.	581	N.A.	-2490	N.A.	-218	N.A.
36	-1000	0	40	N.A.	564	N.A.	-2365	N.A.	-238	N.A.

Εικόνα 2.9: Σύνοψη των αποτελεσμάτων από τις διάφορες αναλύσεις (επίσης ανατρέξτε στην Εικόνα 2.7).



Sr.Nr	Hoop Force Crown/invert	Hoop Moment Crown/invert	Longitudinal Force Crown/invert	Longitudinal Moment Crown/invert	Hoop Force Springlines	Hoop Moment Springlines	Longitudinal Force Springlines	Longitudinal Moment Springlines
1	0.251	0.033	0.142	-0.090	2.991	0.055	0.368	0.054
2	0.245	0.022	0.168	-0.061	2.846	0.031	0.328	0.046
3	0.240	0.013	0.146	-0.038	2.617	0.017	0.284	0.036
4	0.206	0.034	-0.198	-0.095	2.981	0.052	0.361	0.053
5	0.211	0.023	-0.055	-0.064	2.835	0.030	0.320	0.046
6	0.213	0.008	0.025	-0.041	2.786	0.024	0.297	0.039
7	0.190	0.042	-0.287	-0.096	2.891	0.040	0.341	0.051
8	0.194	0.028	-0.100	-0.066	2.755	0.023	0.305	0.044
9	0.199	0.015	0.004	-0.040	2.526	0.014	0.262	0.034
10	0.217	0.024	-0.017	-0.066	2.803	0.032	0.319	0.045
11	-0.087	N.A.	-0.882	N.A.	2.870	N.A.	0.163	N.A.
12	-0.041	N.A.	-0.682	N.A.	2.543	N.A.	0.180	N.A.
13	0.216	0.029	-0.341	-0.106	3.029	0.072	0.415	0.052
14	0.226	0.021	-0.199	-0.072	2.856	0.041	0.369	0.043
15	0.233	0.013	-0.099	-0.044	2.624	0.021	0.316	0.033
16	0.217	0.032	-0.350	-0.107	3.040	0.068	0.416	0.052
17	0.214	0.022	-0.198	-0.071	2.770	0.038	0.357	0.041
18	0.224	0.013	-0.100	-0.044	2.587	0.020	0.310	0.033
19	0.192	0.041	-0.369	-0.104	2.882	0.052	0.393	0.048
20	0.197	0.028	-0.218	-0.072	2.722	0.031	0.347	0.040
21	0.203	0.016	-0.111	-0.044	2.495	0.016	0.296	0.031
22	0.213	0.024	-0.221	-0.074	2.778	0.040	0.358	0.041
23	-0.045	N.A.	-0.734	N.A.	2.680	N.A.	0.183	N.A.
24	-0.041	N.A.	-0.632	N.A.	2.468	N.A.	0.205	N.A.
25	0.229	0.018	-0.422	-0.113	3.064	0.083	0.473	0.055
26	0.221	0.014	-0.254	-0.079	2.829	0.050	0.414	0.044
27	0.220	0.010	-0.131	-0.050	2.596	0.027	0.356	0.033
28	0.223	0.020	-0.431	-0.114	3.058	0.079	0.469	0.055
29	0.192	0.014	-0.232	-0.072	2.537	0.044	0.369	0.039
30	0.212	0.010	-0.132	-0.049	2.571	0.026	0.351	0.032
31	0.202	0.025	-0.458	-0.112	2.951	0.065	0.446	0.053
32	0.195	0.019	-0.274	-0.080	2.762	0.042	0.397	0.042
33	0.194	0.012	-0.140	-0.050	2.523	0.023	0.341	0.031
34	0.210	0.016	-0.275	-0.080	2.766	0.049	0.402	0.043
35	-0.036	N.A.	-0.581	N.A.	2.490	N.A.	0.218	N.A.
36	-0.040	N.A.	-0.564	N.A.	2.365	N.A.	0.238	N.A.

Εικόνα 2.10: Σύνοψη των κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων από τις διάφορες αναλύσεις (ανατρέξτε στην Εικόνα 2.7 και 2.9)

#### 2.2.4.1. Ερμηνεία και συμπεράσματα διαδιάστατων μοντέλων 2-D.

Όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.9 και 2.10 τα αποτελέσματα από το 2-D μοντέλο για τα κυκλικά ανοίγματα δεν είναι ακριβώς ίδια με τις αναλυτικές λύσεις του Kirsch. Οι λύσεις του Kirsch είναι πιο «συντηρητικές» από τα υπολογιστικά μοντέλα FEA, άλλα δεν επαρκούν και τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά για την μελέτη της περιοχής της διασταύρωσης της σήραγγας λόγω ότι θεωρείται κυκλική διατομή στο άνοιγμα της. Σύμφωνα με την αναλυτική λύση του Kirsch οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (hoop) στην κορυφή και στην βάση της διασταύρωσης έχουν υποτιμηθεί έως και 50%. Η λύση του Kirsch για τα κυκλικά ανοίγματα υπερεκτιμούν τις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (long) στα πλευρικά όρια της διασταύρωσης έως και 10% σε σύγκριση με τιμές του FEA, ενώ τόσο στο 2-D μοντέλο όσο και στο 2-D μοντέλο επαλήθευσης με αναλυτικές λύσεις δεν παρουσιάζονται εφελκυστικές τάσεις σε αυτές τις θέσεις. Επίσης, η αναλυτική λύση Kirsch φαίνεται να υπερεκτιμά τις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (long) έως και 20% στην κορυφή και την βάση της διατομής του ανοίγματος. Άρα ένα σχέδιο ενίσχυσης που βασίζεται στον μέθοδο Kirsch για τις θέσεις της κορυφής και της βάσης μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον ενίσχυση, που δεν χρειάζεται, και να θέσει σε κίνδυνο την δόμηση και την ασφάλεια της κατασκευής. Γενικά, οι αποκλίσεις μεταξύ την αναλυτικής και της υπολογιστικής λύσης διαφέρουν ανάλογα την γεωμετρία της διασταύρωσης των σηράγγων (Εικόνα 2.10).

### 2.2.4.2. Ερμηνεία και συμπεράσματα τρισδιάστατου μοντέλου 3-D.

Από τα Σχήματα 2.31 έως 2.44 φαίνεται πως οι δυνάμεις αλλάζουν αναλόγως της δυσκαμψίας του εδάφους καθώς και αναλόγως του λόγου  $d/D$  (διάμετρος δευτερεύουσας σήραγγας/ διάμετρος κύριας σήραγγας). Οι τιμές, που παρουσιάζονται στα σχήματα, αφορούν τις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (hoop) και τις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (longitudinal) για τις περιοχές της βάσης, της κορυφής και των πλευρικών ορίων της διασταύρωσης.

Τα αποτελέσματα του 3-D μοντέλου ποικίλουν και αλλάζουν αναλόγως της δυσκαμψίας του εδάφους και του λόγου  $d/D$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επίσης, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται σε σχέση με το βάθος της σήραγγας, επειδή το βάθος είναι κατά προσέγγιση ανάλογο με την δύναμη στην κορυφή της διατομής πριν το άνοιγμα της διασταύρωσης. Αυτό επιβεβαιώνεται επίσης από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 2.10, δεδομένου ότι η διακύμανση των κανονικοποιημένων τιμών είναι γενικά πολύ χαμηλή καθώς το βάθος ποικίλλει. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό συμβαίνει όταν θεωρείται σταθερή ομοιόμορφη τάση και για επαρκή βάθη. Στις περιπτώσεις που παρουσιάζονται εδώ δεν είναι απολύτως αυτή η περίπτωση, αλλά υποτίθεται ότι γίνεται απλούστευση στην μελέτη των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, κάποια μη γραμμικότητα μπορεί να προκύπτει για το βάθος της σήραγγας και να ελέγχεται ως παράμετρος επιρροής της μελέτης.

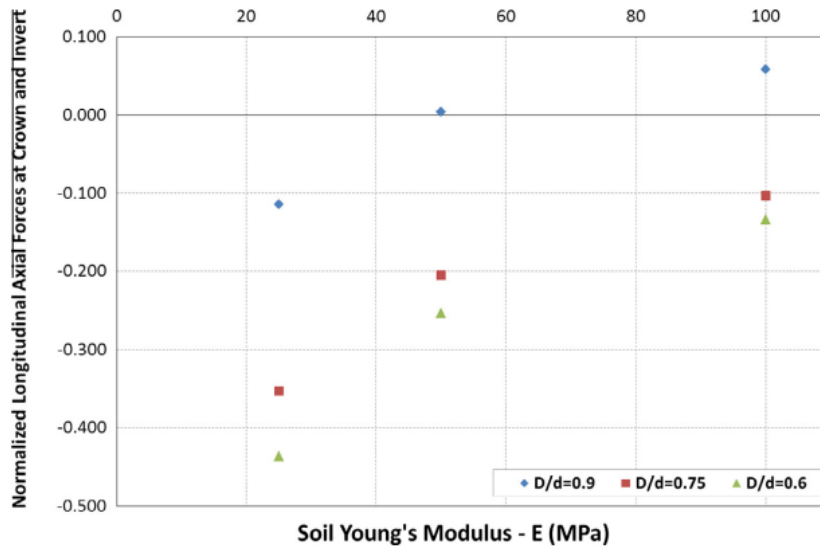
Η ακαμψία του περιβάλλοντος εδάφους της σήραγγας είναι ένας συνδυασμός του είδους του εδάφους (ειδικό βάρος  $\gamma$  και μέτρο ελαστικότητας  $E$ ) και της γεωμετρίας του στον χώρο γύρω από την κατασκευή. Έτσι για ρηχή σήραγγα, τα αποτελέσματα εξαρτώνται λιγότερο από το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του εδάφους και περισσότερο από το υπερκείμενο έδαφος, που προκύπτει (δηλ. το βάθος του εδάφους πάνω από την κατασκευή), καθώς και από τον συντελεστή πλευρικών τάσεων εδάφους, όπου σε αυτήν την περίπτωση είναι ίσος με  $K_0=1$  και δεν προκύπτουν αλλαγές. Με βάση τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.31 έως 2.44, μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και την βάση της διασταύρωσης είναι συνήθως εφελκυστικές και μειώνονται (κατά απόλυτη τιμή) με την αύξηση της ακαμψίας του εδάφους ή με την μείωση του μεγέθους της δευτερεύουσας σήραγγας (Σχήμα 2.31 και 2.32).
- Οι δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στο δεξί και αριστερό πλευρικό όριο είναι θλιπτικές και μειώνονται (κατά απόλυτη τιμή) με την αύξηση της ακαμψίας του εδάφους ή με την μείωση του μεγέθους της δευτερεύουσας σήραγγας (Σχήμα 2.33 και 2.34).
- Οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (hoop) στην κορυφή και την βάση της διασταύρωσης δεν επηρεάζονται τόσο από τις αλλαγές των παραμέτρων εισόδου (Εικόνα 2.10).
- Οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (hoop) στα πλευρικά όρια προκαλούν συγκέντρωση μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων.
- Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους προκαλεί μείωση στην αξονική δύναμη στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια της διασταύρωσης (Σχήμα 2.35 και 2.36).
- Οι δυνάμεις της ροπής στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και την βάση της διασταύρωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την δυσκαμψία του εδάφους και λιγότερο από το μέγεθος της δευτερεύουσας σήραγγας. (Σχήμα 2.37 και 2.38).
- Οι δυνάμεις της ροπής στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια της διασταύρωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την δυσκαμψία του εδάφους. (Σχήμα 2.39 και 2.40).

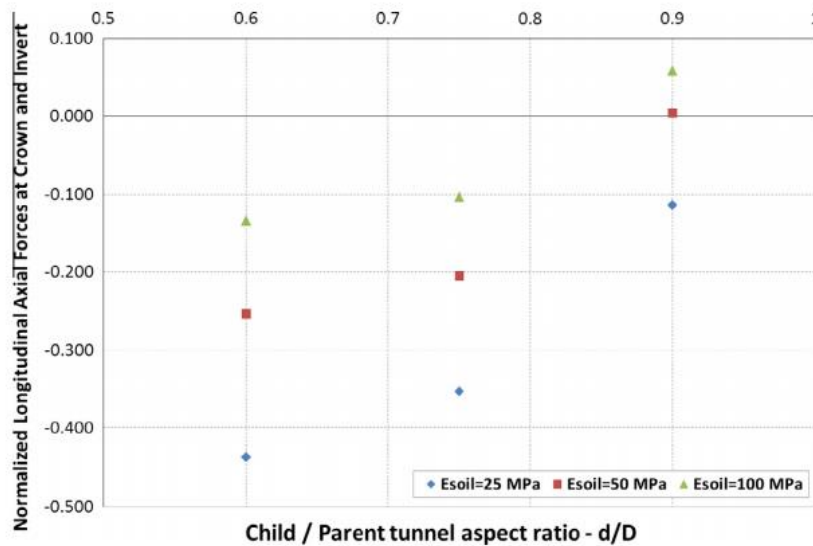


- Οι δυνάμεις της ροπής στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και την βάση της διασταύρωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την δυσκαμψία του εδάφους και λιγότερο από το μέγεθος της δευτερεύουσας σήραγγας. (Σχήμα 2.41 και 2.42).
- Οι δυνάμεις της ροπής στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια της διασταύρωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την δυσκαμψία του εδάφους και από το μέγεθος της δευτερεύουσας σήραγγας. (Σχήμα 2.43 και 2.44).

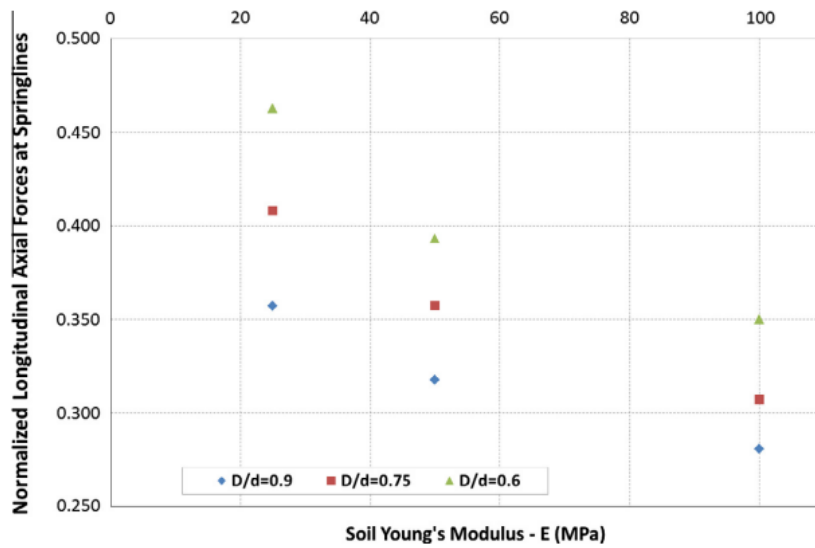
Στην Εικόνα 2.11 συνοψίζονται οι επιδράσεις των παραμέτρων εισόδου γραφικά.



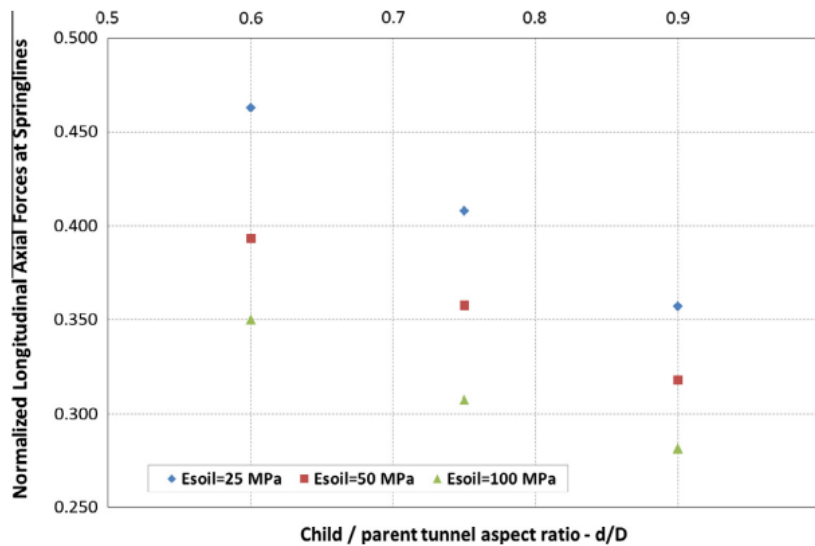
Σχήμα 2.31: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



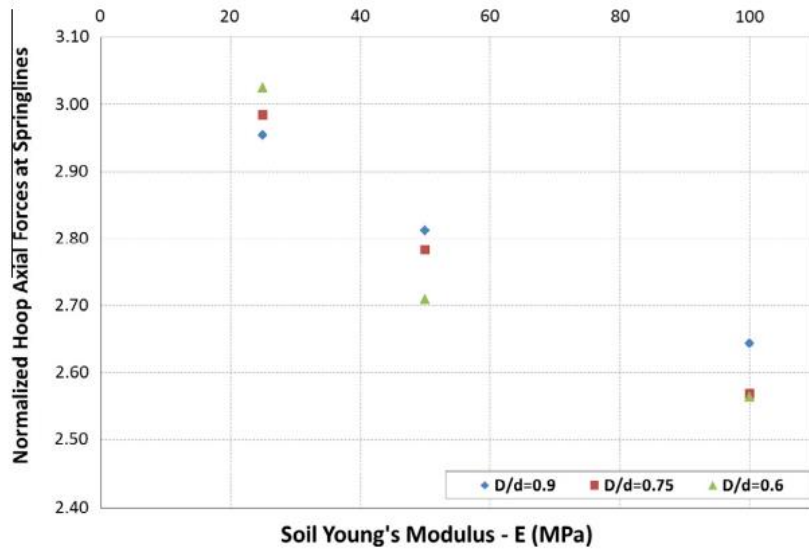
Σχήμα 2.32: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



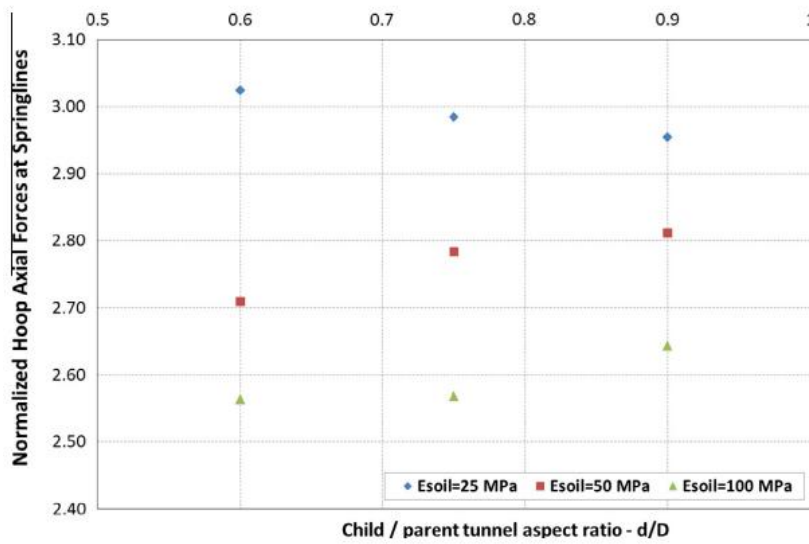
Σχήμα 2.33: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



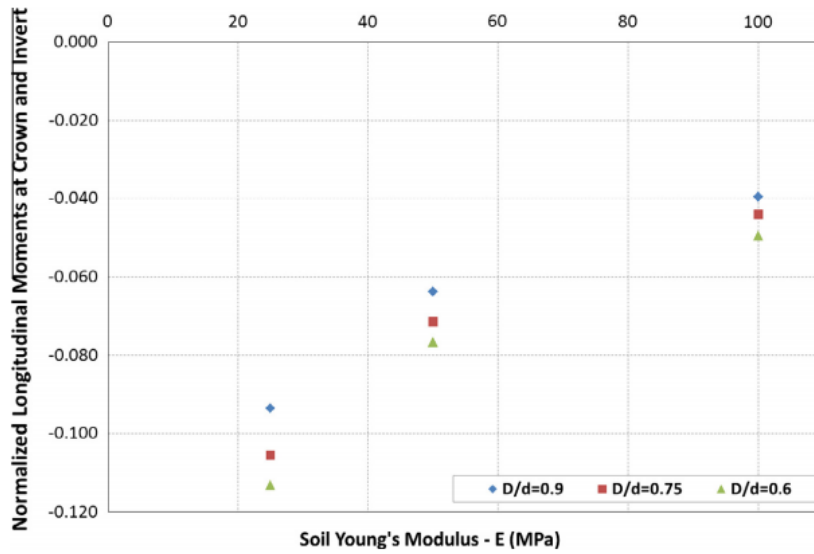
Σχήμα 2.34: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



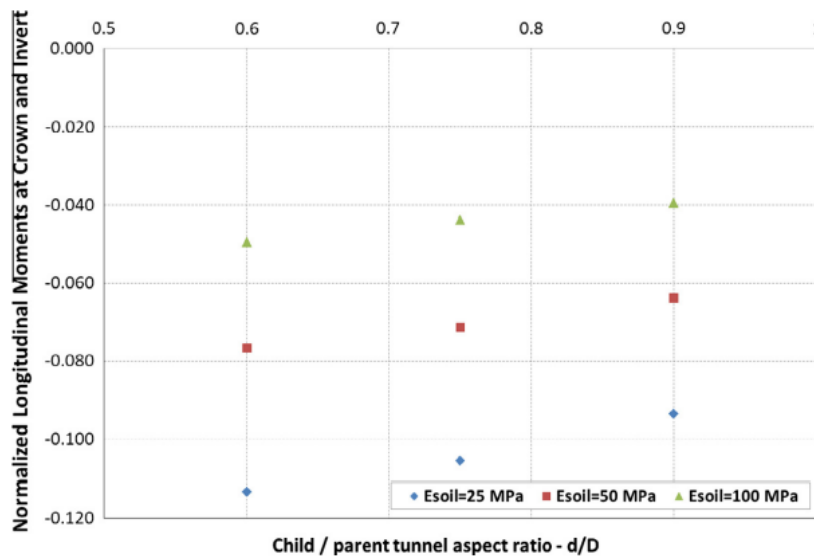
Σχήμα 2.35: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



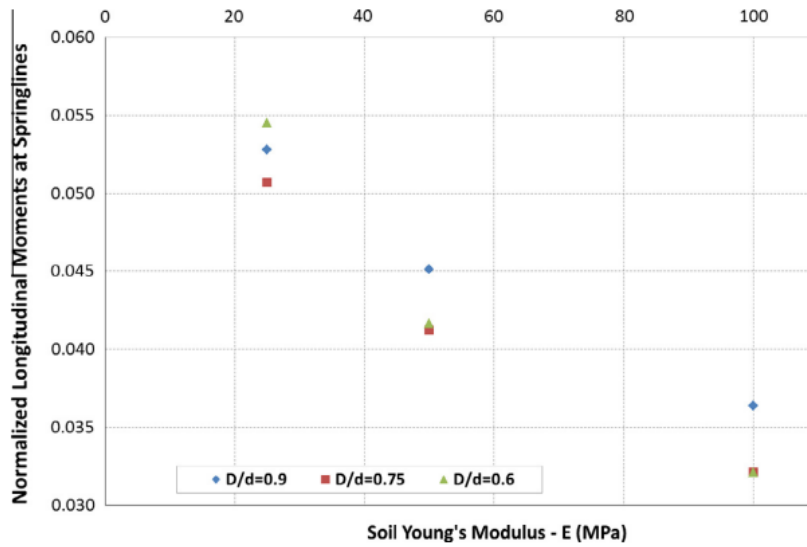
Σχήμα 2.36: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



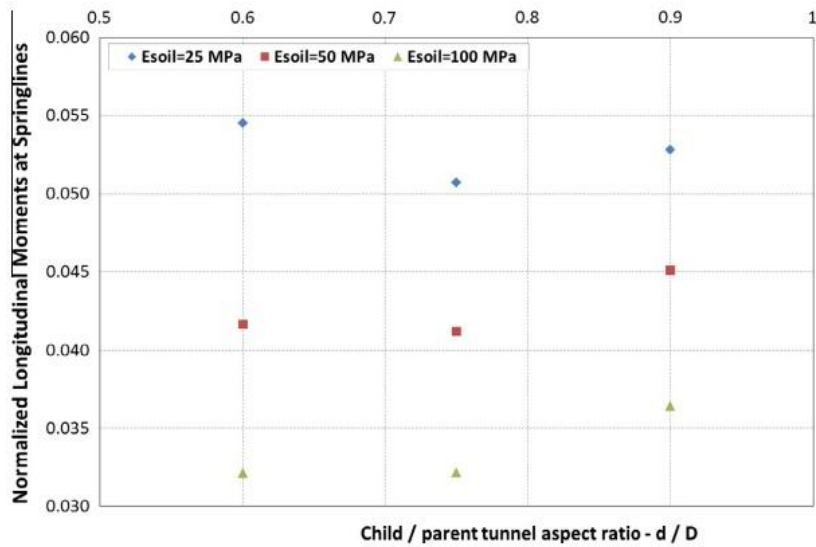
Σχήμα 2.37: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



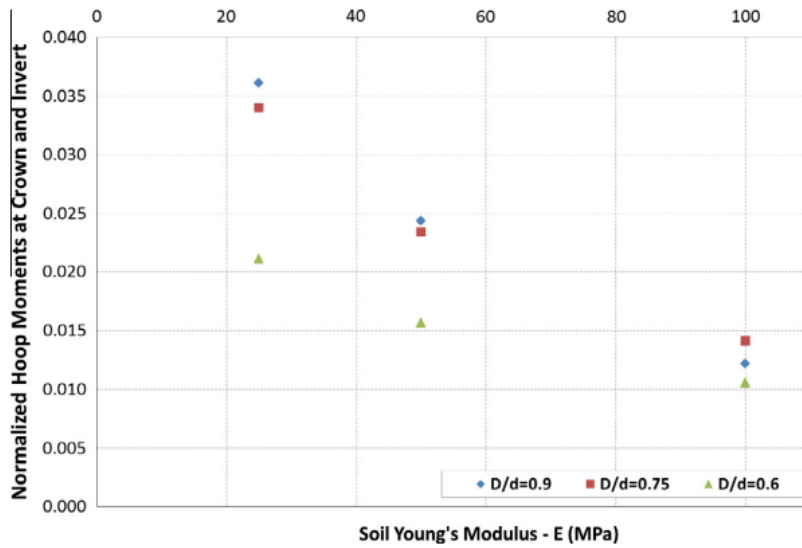
Σχήμα 2.38: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



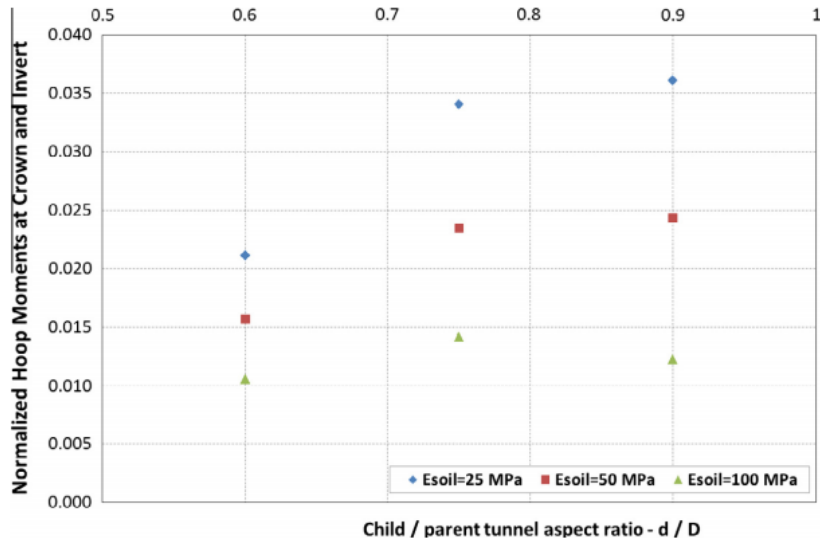
Σχήμα 2.39: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



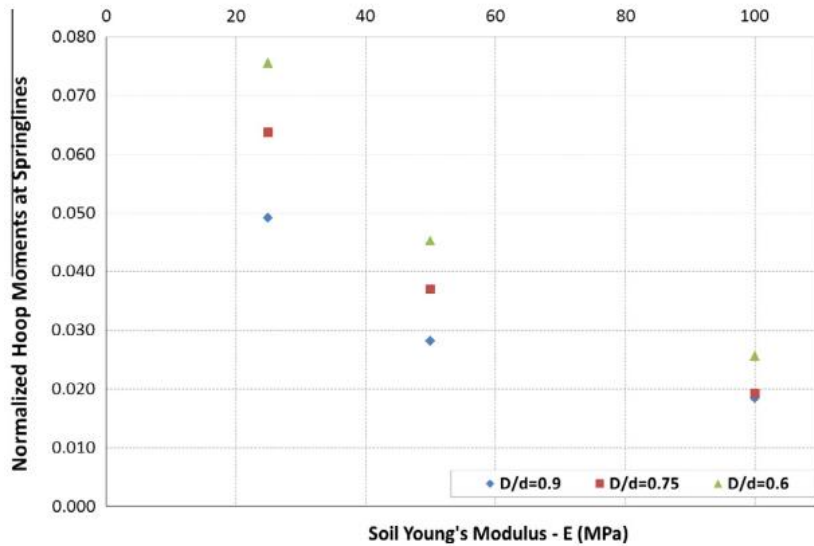
Σχήμα 2.40: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



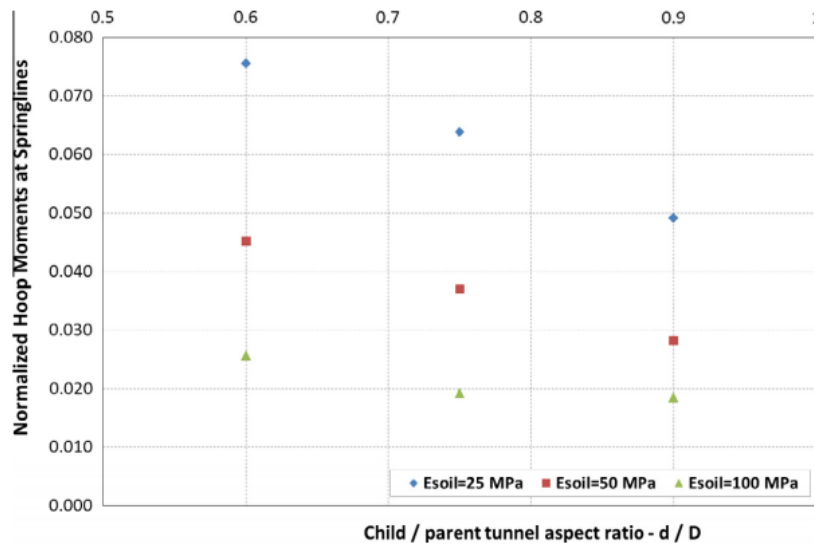
Σχήμα 2.41: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



Σχήμα 2.42: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



Σχήμα 2.43: Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους Young στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).



Σχήμα 2.44: Επιρροή του λόγου των διαμέτρων d/D στις δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος (κατά μέσο όρο για όλα τα βάθη των αξόνων της σήραγγας, H = 15, 25, 35 m).

	Hoop Force Crown/inver t	Hoop Moment Crown/inver t	Longitudinal Force Crown/inver t	Longitudinal Moment Crown/inver t	Hoop Force Springlines	Hoop Moment Springlines	Longitudinal Force Springlines	Longitudinal Moment Springlines
E-modulus of Soil	-	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Child/Parent tunnel diameter (d/D)	-	↗	↘	↘	-	↘	↘	-

Εικόνα 2.11: Γραφική σύνοψη των επιδράσεων των διαφόρων παραμέτρων.

2.2.4.3. Συγκρίσεις λύσεων 2-D και 3-D μοντέλων

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα, όχι μόνο μεταξύ μιας ανάλυσης 2D και 3D, αλλά ακόμη και μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων για τις ίδιες τις 2D αναλύσεις. Φυσικά το κυριότερο και το πιο εύκολα εμφανές ζήτημα είναι ότι οι 2D αναλύσεις δεν μπορούν να παρέχουν καμία πληροφορία σχετικά με την κάμψη των περιοχών επιρροής γύρω από τα ανοίγματα. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα από τα τρισδιάστατα μοντέλα (βλ. Εικόνα 2.9)



παρουσιάζουν σημαντικές τιμές της κάμψης που μπορούν να καθορίσουν τον σχεδιασμό της κατασκευής και δεν υπολογίζονται από 2D αναλύσεις.

Και για τα τις δυο περιπτώσεις 2D αποτελεσμάτων, δηλαδή για το υπολογιστικό μοντέλο FEA και για τους αναλυτικούς υπολογισμούς, οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση ( $hoor$ ) στις πλευρές του ανοίγματος βρίσκονται εντός του εύρους 2,5-3 φορές μεγαλύτερες από τις αρχικές δυνάμεις ( $hoor$ ) πριν από τη διάνοιξη. Αυτό συμβαίνει παρόμοια και για τα μοντέλα 3D με κάποιες αποκλίσεις πάνω από 20% σε μοντέλα με λόγο διαστάσεων  $d / D = 0.6$ .

Όσον αφορά στην συσχέτιση των αποτελεσμάτων των τριών προσεγγίσεων, δηλαδή της αναλυτικής λύσης με την παραδοχή των κυκλικών ανοιγμάτων, του 2-D υπολογιστικού μοντέλου και του 3-D υπολογιστικού μοντέλου, εμφανίζονται αποκλίσεις. Η λύση του Kirsch φαίνεται να είναι πιο συντηρητική σε σχέση με τις δυο άλλες 2-D λύσεις, αλλά αποδίδει μικρότερες θλιπτικές δυνάμεις στα πλευρικά όρια του ανοίγματος, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό της κατασκευής. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως αυτό προκύπτει λόγω της γεωμετρίας που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της διασταύρωσης στην μέθοδο Kirsch και δεν μπορεί να ληφθεί ως κριτήριο για την σύγκριση των δυο λύσεων γενικά.

Ταυτόχρονα, από τα 3-D μοντέλα προκύπτουν μικρότερες εφελκυστικές δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και στην βάση της διασταύρωσης (επίσης κρίσιμες για τον σχεδιασμό) και λίγο μεγαλύτερες θλιπτικές δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στα πλευρικά όρια. Ακόμη, παρέχονται και οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στην κορυφή και στην βάση του ανοίγματος, καθώς και τιμές της ροπής κάμψης της διασταύρωσης. Έτσι φαίνεται πως τα τρισδιάστατα μοντέλα ενδέχεται να προσομοιώσουν την εντατική κατάσταση γύρω από τα ανοίγματα της σήραγγας πιο ρεαλιστικά σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.

#### 2.2.4.4. Ανάλυση «ευαισθησίας» στα 3-D μοντέλα

Προκειμένου να εκτιμηθούν προκαταρκτικά οι επιπτώσεις των διαφόρων παραμέτρων εισόδου στο 3-D μοντέλο, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση «ευαισθησίας», λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις του δείκτη Poisson του εδάφους, τον πλευρικό συντελεστή πίεσης του εδάφους και την πλαστιμότητα του εδάφους. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την ανάλυση «ευαισθησίας» είναι το μοντέλο No.17: (3D-50-25-075), δηλ. με δυσκαμψία εδάφους 50 MPa, υπερκείμενη επιφάνεια 25 μέτρα από την επιφάνεια έως τον άξονα της σήραγγας και με λόγο  $d/D$  διαμέτρων σηράγγων ίσο με 0,75. Οι διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.12 και τα αποτελέσματα του αναλύσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.13 και 2.14.

Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα, μια αύξηση του λόγου Poisson του εδάφους (μείωση της συμπιεστότητας του εδάφους) με τιμή ίση με 0,45 μπορεί να οδηγήσει σε κάποιες θλιπτικές δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση στα πλευρικά όρια του ανοίγματος και σε δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση στην κορυφή και στα πλευρικά όρια, που έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικρότερων παραμορφώσεων στην επένδυση γύρω από το άνοιγμα της σήραγγας. Η μείωση του λόγου Poisson του εδάφους από 0,2 έως 0,1 φαίνεται να οδηγεί σε μείωση της δύναμης στην διαμήκη διεύθυνση, ταυτόχρονα όμως δεν έχει παρατηρηθεί να προκαλεί κάποια άλλη σημαντική επιρροή σε κάποιο αποτέλεσμα. Η μείωση του συντελεστή πλευρικής πίεσης  $K_0$ , και περαιτέρω και η μείωση της επένδυσης, οδηγεί σε μερικές σημαντικές μεταβολές στην εντατική κατάσταση γύρω από το τμήμα του ανοίγματος, δηλ. υψηλότερες συγκεντρώσεις θλιπτικών δυνάμεων στα πλευρικά όρια του ανοίγματος και υψηλότερες τιμές ροπών κάμψεων στην περιοχή γύρω από τα ανοίγματα. Τέλος, φαίνεται πως η πλαστικότητα του εδάφους επηρεάζει και προκαλεί αλλαγές στην κρίσιμη περιοχή γύρω από το άνοιγμα της δευτερεύουσας σήραγγας, χωρίς όμως να έχει γίνει περαιτέρω ανάλυση.

Sr.Nr	Type	Poisson's ratio of Soil	E-modulus Soil [Mpa]	Depth of tunnel axis (H) [m]	Depth (H) / Diameter (D)	Child / Parent Diameter	Constitutive model Soil
17	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.75	elastic
S-1	S.J.B.	0.1	50	25	2.5	0.75	elastic
S-2	S.J.B.	0.45	50	25	2.5	0.75	elastic
S-3	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.75	elastic, Ko=0.5
S-4	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.75	Mohr Coulomb $\phi=0$ , $c'=50$ kPa
S-5	S.J.B.	0.2	50	25	2.5	0.75	Mohr Coulomb $\phi=25$ , $c'=0.5$ kPa

Εικόνα 2.12: Παράμετροι και δεδομένα εισόδου για την ανάλυση του μοντέλου «ευαισθησίας» Νο.17: (3D-50-25-075)

Sr.Nr	Avg. Hoop Force at Ring Closure [kN]	Avg. Longitudinal Force at Ring Closure [kN]	Max. Hoop Force Crown/invert [kN]	Min Hoop Moment Crown/invert [kNm]	Max Longitudinal Force Crown/invert [kN]	Max Longitudinal Moment Crown/invert [kNm]	Min Hoop Force Springlines [kN]	Min. Hoop Moment Springlines [kNm]	Max. Longitudinal Force Springlines [kN]	Min. Longitudinal Moment Springlines [kNm]
			SF2	SM2	SF1	SM1	SF2	SM2	SF1	SM1
17	-2430	-342	-519	-53	480	172	-6731	-93	-867	-100
S-1	-2384	-427	-520	-50	395	162	-6558	-88	-875	-95
S-2	-2381	-226	-572	-60	613	179	-7320	-91	-733	-119
S-3	-1689	-215	-182	24	412	162	-6222	-197	-802	-105
S-4	-2448	-186	-529	-99	561	348	-6524	-310	-675	-163
S-5	-2389	-380	-424	-63	21	205	-6991	-145	-645	-99

Εικόνα 2.13: Σύνοψη αποτελεσμάτων από τις διάφορες αναλύσεις.

Sr.Nr	Hoop Force Crown/invert	Hoop Moment Crown/invert	Longitudinal Force Crown/invert	Longitudinal Moment Crown/invert	Hoop Force Springlines	Hoop Moment Springlines	Longitudinal Force Springlines	Longitudinal Moment Springlines
17	0.214	0.022	-0.198	-0.071	2.770	0.038	0.357	0.041
S-1	0.218	0.021	-0.166	-0.068	2.751	0.037	0.367	0.040
S-2	0.240	0.025	-0.257	-0.075	3.074	0.038	0.308	0.050
S-3	0.108	-0.014	-0.244	-0.096	3.684	0.117	0.475	0.062
S-4	0.216	0.040	-0.229	-0.142	2.665	0.127	0.276	0.067
S-5	0.177	0.026	-0.009	-0.086	2.926	0.061	0.270	0.041

Εικόνα 2.14: Σύνοψη των κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων από τις διάφορες αναλύσεις.

## 2.2.5. Συμπεράσματα

Με βάση τις έρευνες που αναφέρθηκαν παραπάνω, συνοψίζονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος και οι λύσεις του Kirsch (ή άλλες παρόμοιες) αποδεικνύονται ελλιπείς για τις περιπτώσεις μη κυκλικών ανοιγμάτων, καθώς παρέχουν λιγότερη θλίψη στα πλευρικά όρια του ανοίγματος και μεγαλύτερες τιμές στις άλλες θέσεις και περιπτώσεις.
2. Οι δισδιάστατες αναλύσεις 2-D δεν επαρκούν πλήρως στην μελέτη διασταυρώσεων σηράγγων, αλλά γενικά είναι μια καλή προσέγγιση σε σχέση με τις αναλυτικές λύσεις. Η χρήση των 2-D μοντέλων για την προσέγγιση των αναλυτικών λύσεων θα πρέπει να δίνεται μια όσο το δυνατόν πιο ακριβή προσέγγιση γίνεται της γεωμετρίας του ανοίγματος. Για μικρούς λόγους διαμέτρων  $d/D$  (δευτερεύουσας  $d$  / κύριας σήραγγας  $D$ ) τα

αποτελέσματα, που προκύπτουν από την υπολογιστική μέθοδο με 2-D μοντέλο και από τις αναλυτικές λύσεις (Kirsch), έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους.

3. Παρουσιάζονται διάφορες επιρροές στην εντατική κατάσταση στην περιοχή του ανοίγματος, που σχετίζονται με τις παραμέτρους του προβλήματος, όπως για παράδειγμα το βάθος των διασταυρούμενων σηράγγων, ο λόγος των διαμέτρων των σηράγγων  $d/D$ , το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους και του σκυροδέματος. Αυτές οι επιρροές φαίνονται στα παραπάνω αποτελέσματα. Από την ανάλυση, που προηγήθηκε, φαίνεται πως οι δυνάμεις γύρω από τα ανοίγματα διαμορφώνονται ως εξής:

- Αναπτύσσονται σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις στην διαμήκη διεύθυνση (long) στην κορυφή και την βάση του ανοίγματος.
  - Αναπτύσσονται σημαντικές θλιπτικές δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση (hoop) στα πλευρικά όρια του ανοίγματος. Για τις περιοχές αυτές μπορεί να γίνει ενίσχυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την περιοχή κοντά στην διασταύρωση των σηράγγων.
  - Στην κύρια σήραγγα πιο μακριά από το άνοιγμα ενδέχεται να εμφανιστούν εφελκυστικές τάσεις, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό των σηράγγων.
  - Οι περιοχές με απόσταση μιας περίπου διαμέτρου  $d$  (διάμετρος δευτερεύουσας σήραγγας) δεξιά και αριστερά του ανοίγματος επηρεάζονται άμεσα από την ανακατανομή των τάσεων κατά την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας.
4. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την τρισδιάστατη ανάλυση 3-D, δείχνουν ότι το μέγεθος της διαμέτρου των σηράγγων και η δυσκαμψία του εδάφους παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανακατανομή των δυνάμεων, που γίνεται μετά τον σχηματισμό του ανοίγματος.
5. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι υπάρχουν επιρροές στην επένδυση πριν και μετά την διάρρηξη του ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας, καθώς η δύναμη στην εγκάρσια διεύθυνση είναι ανάλογη των παραμορφώσεων, που προκαλούνται. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό ότι το περιβάλλον υλικό της σήραγγας επηρεάζει την κατανομή των τάσεων, όπως η ακαμψία του εδάφους καθώς και το υπερκείμενο βάθος.
6. Επίσης, θα πρέπει να μελετώνται οι μέθοδοι κατασκευής, που χρησιμοποιούνται για την διάρρηξη του ανοίγματος και η επιρροή που προκαλεί το άνοιγμα στην κύρια σήραγγα. Σημαντικό είναι επίσης να μελετηθούν και άλλοι τρόποι σύνδεσης των σηράγγων ως προς το σχήμα της διασταύρωσης, καθώς και μέθοδοι για την ενίσχυση των περιοχών, όπου απαιτείται.

## 2.3. Αριθμητική προσομοίωση της παραμόρφωσης της βραχομάζας για τον σχεδιασμό της υποστήριξης στην περιοχή τομής των σηράγγων

Οι δευτερεύουσες σήραγγες, που κατασκευάζονται επιπλέον και διασταυρώνονται με τις κύριες σήραγγες, χρησιμοποιούνται συνήθως για την επείγουσα πρόσβαση και τον εξαερισμό σε μεγάλες σήραγγες. Η αύξηση του φορτίου υποστήριξης και η πρόσθετη παραμόρφωση της σήραγγας μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα της κατά τη διάρκεια της κατασκευής των διασταυρούμενων σε αυτήν σηράγγων. Για να γίνει κατανοητή η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας στην περιοχή της διασταύρωσης των σηράγγων μελετήθηκαν 75 περιπτώσεις τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης. Οι αναλύσεις αυτές διεξήχθησαν υπό διάφορες συνθήκες και παραμέτρους μελέτης της σήραγγας, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής της βραχομάζας, του υπερβολικού φορτίου του εδάφους, του βάθους και της γωνίας που δημιουργήθηκε στην διασταύρωση των σηράγγων. Μετά τα αποτελέσματα της ανάλυσης, αναλύθηκε ένα κριτήριο για την αξιολόγηση της επίδρασης των γωνιών της διασταύρωσης των σηράγγων και μελετήθηκαν τρεις κατηγορίες προτάσεων σχεδιασμού της υποστήριξης των διασταυρούμενων σηράγγων για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες.

### 2.3.1. Εισαγωγή

Οι περισσότερες από τις προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά των σηράγγων στην περιοχή διασταύρωσης τους διεξήχθησαν σύμφωνα με την θεωρία ελαστικότητας μέσω της μελέτης συγκέντρωσης τάσεων. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν από τον Riely (1964) και την Pant (1971). Στην συνέχεια χάρη στην ταχεία ανάπτυξη τεχνικών μοντελοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν ευρύτερα 3D αναλύσεις από ερευνητές, όπως η Thareja et al. (1980, 1985) και Takino et al. (1985), και μελετήθηκαν θέματα που αφορούν τις μετατοπίσεις και τις τάσεις της επένδυσης, που συγκεντρώνονται στην περιοχή της τομής των σηράγγων, για διαφορετικές ιδιότητες της βραχομάζας και για διαφορετικές γωνίες των διασταυρούμενων σηράγγων.

Όσον αφορά στον σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης, ο Tsuchiyama et al. (1988) εξέτασε μέσω μιας τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης την εκσκαφή μιας δευτερεύουσας σήραγγας που να έχει πρόσβαση στην υπάρχουσα σήραγγα με γωνία τομής 45 μοιρών. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι η «πληγείσα» περιοχή κατά μήκος της κύριας σήραγγας που απαιτεί επιπλέον υποστήριξη είναι της τάξης περίπου μιας διαμέτρου σήραγγας για γωνίες τομής άνω των 90 μοιρών και περίπου τρεις διαμέτρους σήραγγας για γωνίες μικρότερες των 90 μοιρών. Η μέθοδος που υιοθετήθηκε από την JNC (Japan Nuclear Development Institute, 1999) απαιτεί να εγκατασταθεί πρόσθετη ενίσχυση στην περιοχή τομής των σηράγγων της τάξης τεσσάρων διαμέτρων σήραγγας σε οξείες γωνίες και σε αμβλείες γωνίες. Πιο πρόσφατα, για την χονδρική εκτίμηση της απαίτησης υποστήριξης προτάθηκε η τοποθέτηση πρόσθετης ενίσχυσης όπου κρίνεται απαραίτητη [Nonomura et al (2004)]. Οι Chen et al. (2002) και Hsiao et al. (2004) πραγματοποίησαν τρισδιάστατη ελαστοπλαστική ανάλυση για την συμπεριφορά των σηράγγων στην περιοχή της διασταύρωσης τους. Ωστόσο, οι μελέτες αυτές περιορίστηκαν μόνο σε ερευνητικό πεδίο και όχι για εφαρμογή στην πράξη.

Ενώ είναι αδύνατο να υπάρχουν προτάσεις σχεδίασης για διασταυρούμενες σήραγγες κάτω από διάφορες γεωλογικές και γεωμετρικές συνθήκες, οι διασταυρούμενες σήραγγες γίνονται πράξη και κατασκευάζονται κανονικά υποβαθμίζοντας την ποιότητα της βραχομάζας και την υποστήριξη των σηράγγων στην περιοχή της διασταύρωσης τους. Παρ' όλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις στην Ταιβάν παρατηρήθηκε απρόσμενο «κλείσιμο» της διατομής των σηράγγων και αστοχία της

υποστήριξης τους στην διασταυρούμενη περιοχή. Για αυτόν τον λόγο κρίνεται απαραίτητα μια πιο αυστηρή μέθοδος σχεδιασμού τέτοιου είδους σηράγγων.

### 2.3.2. Αριθμητική Μελέτη

Για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας στην περιοχή της διασταύρωσης των σηράγγων έγινε μια σειρά τρισδιάστατων αναλύσεων [Hsiao et al. (2005)]. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν υπό διάφορες συνθήκες και παραμέτρους των σηράγγων, όπως της αντοχής των πετρωμάτων, της ποιότητας της βραχομάζας και της γωνία τομής μεταξύ των διασταυρούμενων σηράγγων, οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.15. Το άνοιγμα της κύριας σήραγγας είναι της τάξης των 12 μέτρων και το άνοιγμα της οπής της δευτερεύουσας σήραγγας της τάξης των 8 μέτρων. Αναλύθηκαν 75 αριθμητικές περιπτώσεις με διαφορετικές παραμέτρους μελέτης των σηράγγων, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 2.16. Η διαδικασία εκσκαφής και υποστήριξης των σηράγγων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.17.

Table 1  
Case conditions of tunnel intersection

Rock strength	Soft rock ( $\sigma_c = 100 \text{ kg/cm}^2$ ), medium strength rock ( $\sigma_c = 500 \text{ kg/cm}^2$ ), hard rock ( $\sigma_c = 1000 \text{ kg/cm}^2$ )
Rock mass rating	RMR = 30, 50, 70
Rock covering	100, 400, and 700 m
Lateral stress ratio (k)	0.5, 1.0, 1.5
Intersecting angle	30°, 60°, 90°

Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστικά στοιχεία της βραχομάζας για την μελέτη διασταυρούμενων σηράγγων.

Table 2  
Case number and tunnelling conditions

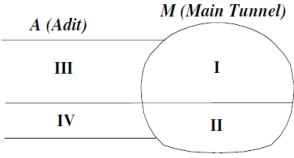
Rock strength	RMR	K = 1			k = 0.5		k = 1.5	
		H = 100 m	H = 400 m	H = 700 m	H = 100 m	H = 400 m	H = 400 m	H = 700 m
Hard rock	50	#1 $\Delta$ 22 $\blacklozenge$ 38	#2 $\Delta$ 23 $\blacklozenge$ 39	#3 $\Delta$ 24 $\blacklozenge$ 40	–	–	#66	#67
	70	#4 $\Delta$ 25 $\blacklozenge$ 41	#5 $\Delta$ 26 $\blacklozenge$ 42	#6 $\Delta$ 27 $\blacklozenge$ 43	–	–	#68	#69
Medium strength rock	30	#7	#8	#9	#54	#55	#70	#71
	50	#10 $\Delta$ 28 $\blacklozenge$ 44	#11 $\Delta$ 29 $\blacklozenge$ 45	#12 $\Delta$ 30 $\blacklozenge$ 46	#56	#57	#72	#73
	70	#13 $\Delta$ 31 $\blacklozenge$ 47	#14 $\Delta$ 32 $\blacklozenge$ 48	#15 $\Delta$ 33 $\blacklozenge$ 49	#58	#59	#74	#75
Soft rock	30	#16	#17	–	#60	#61	–	–
	50	#18 $\Delta$ 34 $\blacklozenge$ 50	#19 $\Delta$ 35 $\blacklozenge$ 51	–	#62	#63	–	–
	70	#20 $\Delta$ 36 $\blacklozenge$ 52	#21 $\Delta$ 37 $\blacklozenge$ 53	–	#64	#65	–	–

#: Case of 90° intersection angle;  $\Delta$ : case of 60° intersection angle;  $\blacklozenge$ : case of 30° intersection angle.

Εικόνα 2.16: Παράμετροι μελέτης σηράγγων για 75 αριθμητικές αναλύσεις.

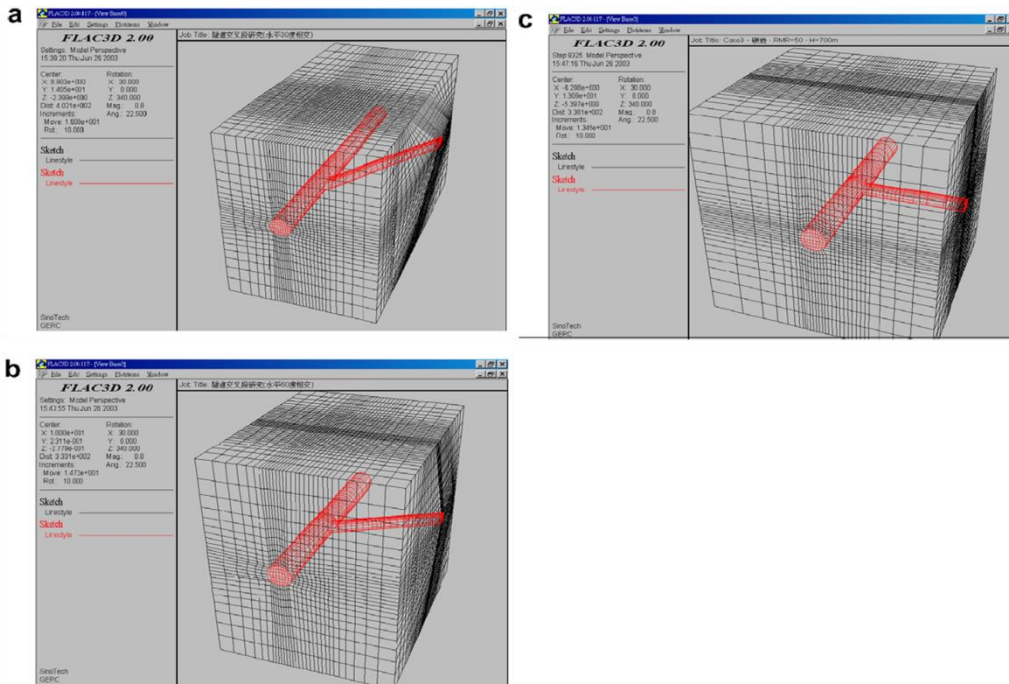
Table 3

Excavation and support design of tunnel intersection

RMR	70	50	30
Excavation process			I → II → III → IV
			
Round length	2.5 m	2.0 m	1.5 m
Shotcrete	M: 15 cm A: 10 cm	M: 20 cm A: 15 cm	M: 25 cm A: 20c
Rock bolt	M: 25 mm Ø, L = 4 m @ 2.0 m × 2.0 m A: 25 mm Ø, L = 4 m @ 2.0 m × 2.0 m	M: 25 mm Ø, L = 4 m @ 1.5 m × 1.5 m A: 25 mm Ø, L = 4 m @ 1.5 m × 1.5 m	M: 25 mm Ø, L = 6 m @ 1.5 m × 1.5 m A: 25 mm Ø, L = 6 m @ 1.5 m × 1.5 m
Steel rib	–	–	M: H150 × 150 @ 1.5 m A: H100 × 100 @ 1.5 m
Forepoling	–	–	M: 32 mm Ø, L = 3 m, @ 1.0 m A: 32 mm Ø, L = 3 m, @ 1.0 m

Εικόνα 2.17: Παράμετροι εκσκαφής και υποστήριξης σηράγγων.

Το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για το προσομοίωμα κατασκευής των σηράγγων είναι το FLAC-3D. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σηράγγων για διάφορες γωνίες τομής τους φαίνονται στην Εικόνα 2.18. Το «πλέγμα» από την κύρια σήραγγα είναι περίπου 4,8 φορές της διαμέτρου της σήραγγας στην οριζόντια κατεύθυνση και περίπου 5,2 φορές της διαμέτρου της σήραγγας στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Το μήκος της κύριας σήραγγας έχει τιμές από 12 έως 15 φορές της διαμέτρου της σήραγγας για διάφορες γωνίες τομής. Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό μοντέλο του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας αξιολογήθηκαν με τις εμπειρικές μεθόδους του Hoek κ.ά. (2002) και Hoek and Brown (1998). Αυτές οι εμπειρικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην πράξη για τον σχεδιασμό σηράγγων και επαληθεύονται από πρακτική ανάλυση των ιστορικών περιπτώσεων στην Ταϊβάν (Chern et al., 2005).



Εικόνα 2.18: Αριθμητικά προσομοιώματα διασταυρούμενων σηράγγων για διάφορες γωνίες τομής : α) 30 μοιρών β) 60 μοιρών και γ) 90 μοιρών.

### 2.3.3. Αποτελέσματα ανάλυσης και εκτιμήσεων

Τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων της σήραγγας και των πλαστικών ζωνών παρουσιάστηκαν σε διαφορετικές θέσεις και στάδια κατασκευής. Τα σύμβολα για τις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στη σήραγγα σε διαφορετικές θέσεις και τα στάδια κατασκευής της εξηγούνται στην Εικόνα 2.19.

Table 4  
Symbols for tunnel displacement at different locations and construction stages

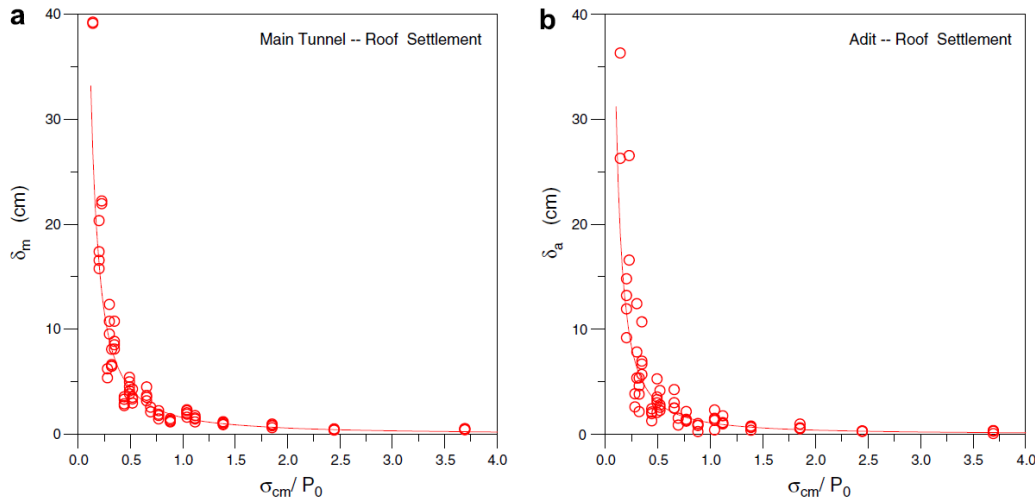
Symbol	Description
$\delta_{m0}$	Roof settlement of main tunnel after main tunnel was excavated
$\delta_m$	Roof settlement of main tunnel after main tunnel and access tunnel were excavated
$\Delta\delta_m$	Additional roof settlement of main tunnel due to the excavation of access tunnel ( $\Delta\delta_m = \delta_m - \delta_{m0}$ )
$\delta_{a0}$	Roof settlement of access tunnel far from the intersection area
$\delta_a$	Roof settlement of access tunnel in the vicinity of intersection area
$\Delta\delta_a$	Additional roof settlement of access tunnel in the intersection area ( $\Delta\delta_a = \delta_a - \delta_{a0}$ )

Εικόνα 2.19: Συμβολισμοί για τις μετατοπίσεις των σηράγγων.

Ο λόγος αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/\rho_0$ ) της βραχομάζας, όπου  $\sigma_{cm}$  είναι η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη της βραχομάζας και  $\rho_0$  είναι οι γεωστατικές τάσεις, βρέθηκε ότι είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την συμπεριφορά της σήραγγας (Chern et al., 1996, Hoek and Marinos, 2000). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η παραμόρφωση της κορυφής της διατομής της



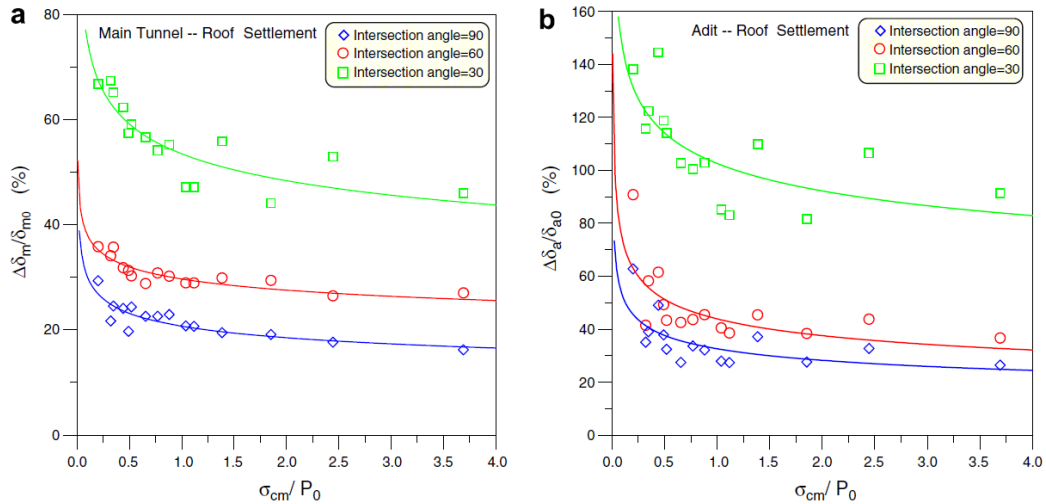
κύριας σήραγγας στην περιοχή τομής των σηράγγων αυξάνεται με την μείωση του λόγου αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/p_o$ ) της βραχομάζας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.45. Όταν η τιμή του λόγου αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/p_o$ ) της βραχομάζας είναι μικρότερη από 0,5 παρουσιάζεται αύξηση των παραμορφώσεων. Ο λόγος αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/p_o$ ) της βραχομάζας χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος για την κατάσταση του βραχομάζας και θα αναλυθεί στην συνέχεια.



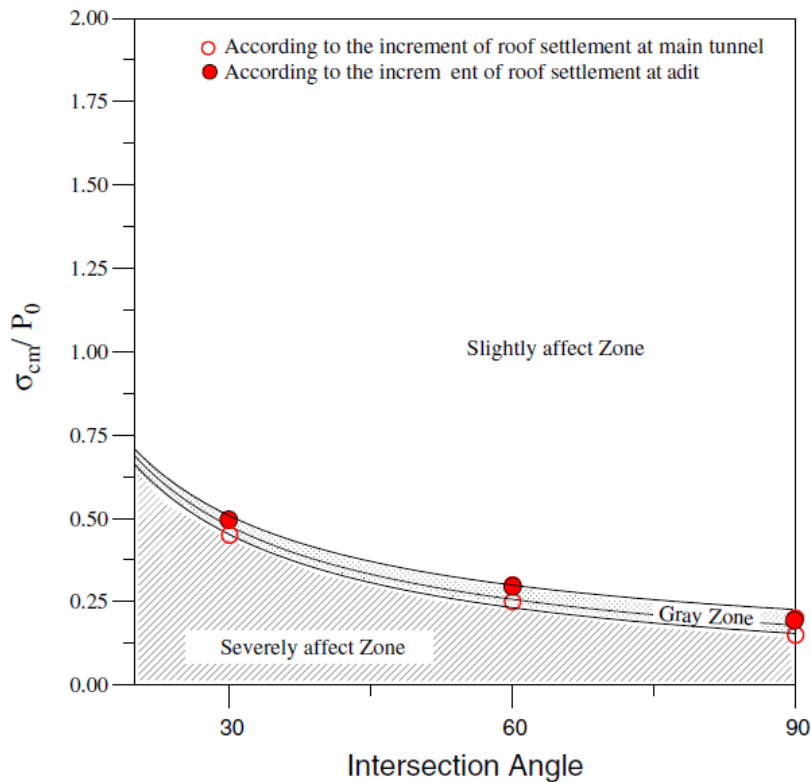
Σχήμα 2.45: Παραμορφώσεις Κύριας και Δευτερεύουσας σήραγγας σε σχέση με τον λόγο αντοχής/τάσης της βραχομάζας.

Στο Σχήμα 2.46 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις της κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας που δημιουργούνται στην κορυφή της διατομής τους σε σχέση με την γωνία τομής τους και τον λόγο  $\sigma_{cm}/p_o$ . Οι παραμορφώσεις ήταν σημαντικά μεγαλύτερες στην περίπτωση που η γωνία τομής είχε τιμή 30 μοιρών σε σχέση με τις γωνίες τομής της τάξης των 60 και 90 μοιρών. Επιπλέον, η αύξηση των τάσεων έγινε εμφανής για όλες τις γωνίες τομής των σηράγγων όταν η τιμή του λόγου αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/p_o$ ) της βραχομάζας ήταν μικρότερη από 0,5.

Στην Εικόνα 2.47 παρουσιάζεται μια καμπύλη που χωρίζει δυο περιοχές: α) την περιοχή που είναι ελαφρά επηρεασμένη από την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας και β) την περιοχή που είναι σοβαρά επηρεασμένη από την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας. Στην σκιασμένη περιοχή της Εικόνας 2.47 η επίδραση της κατασκευής της δευτερεύουσας σήραγγας αναμένεται να είναι σοβαρή, ενώ πάνω από την σκιασμένη περιοχή, δεν παρουσιάζεται σημαντική επίδραση. Στην πράξη η δευτερεύουσα σήραγγα θα βρίσκεται σε καλύτερη ποιότητα βραχομάζας από αυτήν που μελετάται. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αναφέρθηκαν, η καλύτερη διάταξη διασταύρωσης σηράγγων φαίνεται να είναι αυτή όπου η γωνία τομής είναι ίση με 90 μοίρες. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις που οι διασταυρώσεις σηράγγων γίνονται με πολύ μικρή γωνία και απότομη κλίση, η βραχομάζα που θα γίνει η κατασκευή των σηράγγων θα πρέπει να είναι υψηλής αντοχής.



Σχήμα 2.46: Παραμορφώσεις Κύριας και Δευτερεύουσας σήραγγας σε σχέση με τον λόγο αντοχής/τάσης της βραχομάζας.



Σχήμα 2.47: Καμπύλη διαχωρισμού ζωνών επιρροής.

### 2.3.4. Σχεδιασμός Υποστήριξης Σηράγγων

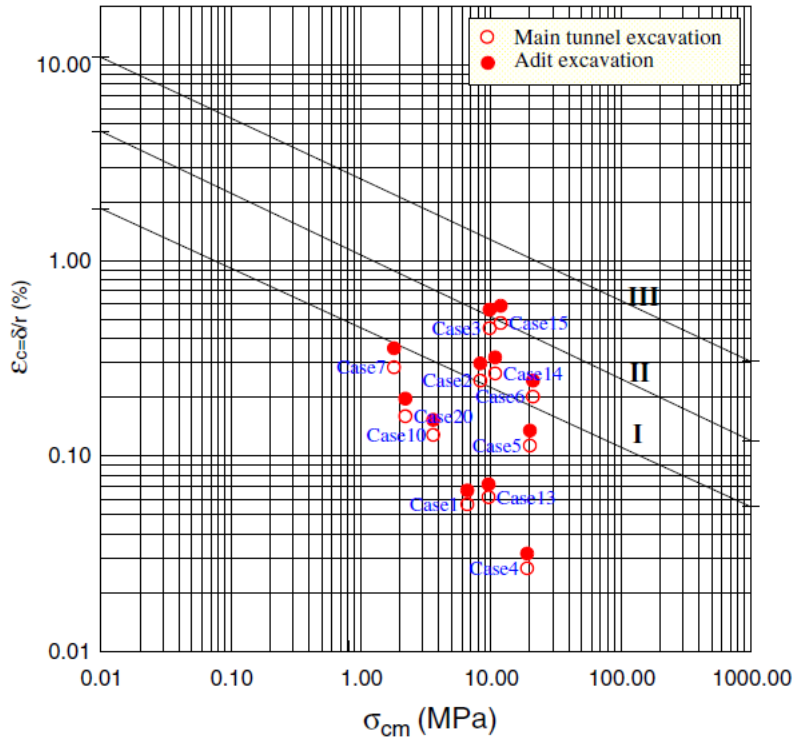
Ένα κρίσιμο ζήτημα για την τομή των σηράγγων είναι ο σχεδιασμός της επιπλέον υποστήριξης στην περιοχή τομής των δυο σηράγγων. Η εμπειρία των μηχανικών και άλλων παλαιότερων περιπτώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων στην πράξη. Ωστόσο, για πολύ σημαντικά και μεγάλα έργα είναι απαραίτητη η πιο εξειδικευμένη μελέτη μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Μέσω της ανάλυσης που έγινε δίνονται προτάσεις και λύσεις για την υποστήριξη των σηράγγων στην περιοχή της διασταύρωσης τους.

### 2.3.4.1. Συμπληρωματικές εργασίες υποστήριξης

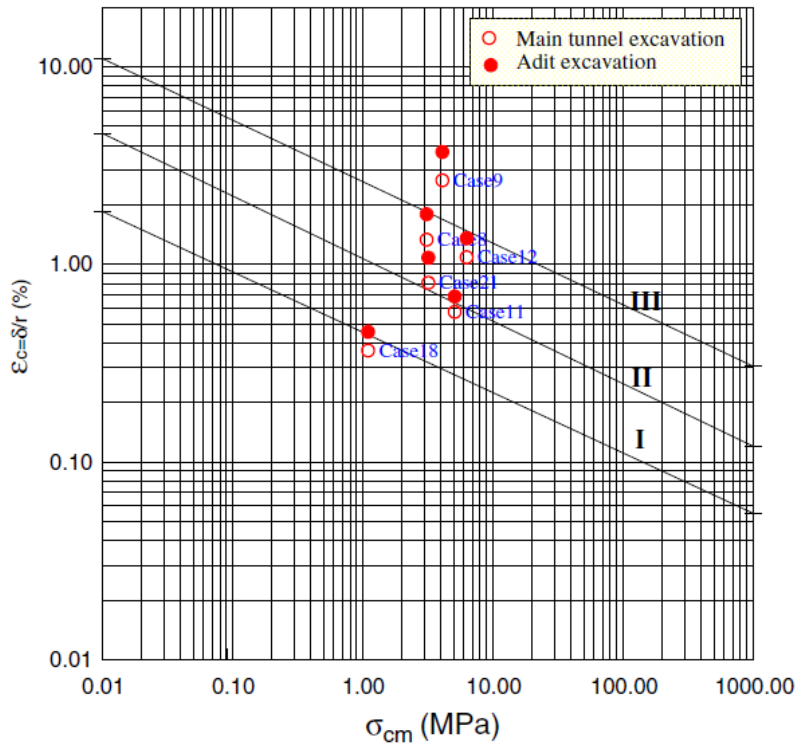
Πρώτα διεξήχθησαν οι εκτιμήσεις για την σταθερότητα των σηράγγων στην περιοχή της διασταύρωσης τους. Για την αξιολόγηση της υποστήριξης και της σταθερότητας των σηράγγων στις αναλύσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκε ένα κριτήριο εμπειρικής ασφάλειας, που προτάθηκε από τον Sakurai (1983, 1993) και με επιτυχία εφαρμόστηκε στην περίπτωση σηράγγων στην Ταϊβάν από τον Chern et al. (1998).

Από την μελέτη των παραμορφώσεων που δημιουργήθηκαν στην κορυφή της διατομής των σηράγγων σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας δημιουργήθηκαν τρία «προειδοποιητικά» επίπεδα I, II, III, τα οποία προτάθηκαν ως εμπειρικό κριτήριο για την εκτίμηση της ασφάλειας και επάρκειας της σήραγγας. Όταν η παραμόρφωση που εξετάζεται πέφτει κάτω από το επίπεδο «προειδοποίησης» II η κατάσταση παραμένει σταθερή και χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα. Αντίθετα, όταν οι παραμορφώσεις ξεπερνούν το επίπεδο «προειδοποίησης» III ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα στην τομή των σηράγγων λόγω του «κλεισίματος» της διατομής, που προκύπτει. Η περιοχή μεταξύ των επιπέδων «προειδοποίησης» II και III είναι μια περιοχή μετάβασης. Μερικά τμήματα της σήραγγας μπορεί να είναι σε σταθερή κατάσταση ενώ σε άλλα να αναπτύσσονται μικρές ζημιές στη στήριξη. Μέσω των αναλύσεων έγινε κατανοητή η περίπτωση τομής των σηράγγων με γωνία 90 μοιρών ως μια πιο ασφαλής και επαρκής λύση. Ακόμα, αξιολογήθηκαν αποτελέσματα για διαφορετικές συνθήκες και είδη βραχομάζας τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 2.48-2.50. Στο Σχήμα 2.48 φαίνεται πως η παραμορφωσιακή κατάσταση των σηράγγων παραμένει σταθερή για ελαφρώς ή μη «συνθλίβουσα» βραχομάζα. Για μέτρια και για «συνθλίβουσα» βραχομάζα, η σήραγγα μπορεί να βρίσκεται σε σταθερή παραμορφωσιακή κατάσταση ή ασταθής, γεγονός που εξαρτάται από την πραγματική κατάσταση του βράχου. Τρεις θεωρίες σχεδιασμού που συνήθως χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό της τομής των σηράγγων είναι οι εξής:

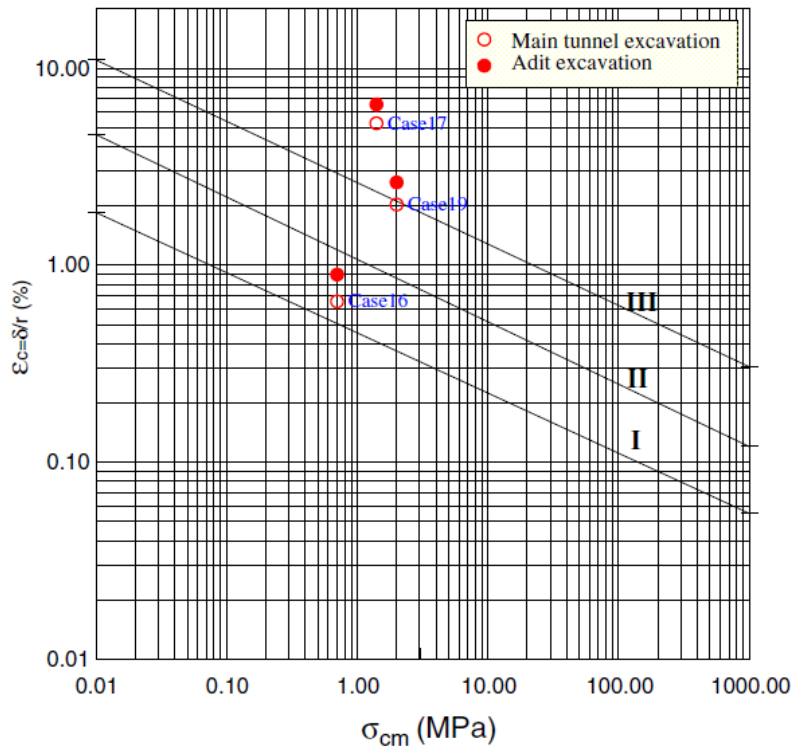
- Η ενίσχυση της υποστήριξης πρέπει να γίνεται κοντά στην διασταύρωση των σηράγγων μέσω είτε αύξηση της αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή του πάχους του ανάλογα την βραχομάζα και τα φορτία που ασκούνται.
- Δεν υπάρχει κάποια διαφορά στον σχεδιασμό της υποστήριξης μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας. Και για τις δυο σήραγγες λαμβάνονται τα ίδια μέτρα υποστήριξης ανάλογα την ποιότητα και το είδος της βραχομάζας και με ιδιαίτερη έμφαση στην διασταύρωση τους.
- Το πιο ισχυρό σύστημα υποστήριξης εφαρμόζεται στην περιοχή της διασταύρωσης των σηράγγων. Για παράδειγμα, το σύστημα υποστήριξης τύπου IV χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του βράχου τύπου III.



Σχήμα 2.48: Εκτίμηση ευστάθειας της σήραγγας  $\sigma_{cm}/\rho_o > 0.5$ .



Σχήμα 2.49: Εκτίμηση ευστάθειας της σήραγγας  $0.25 < \sigma_{cm}/\rho_o < 0.5$ .



Σχήμα 2.50: Εκτίμηση ευστάθειας της σήραγγας  $\sigma_{cm}/\rho_o < 0.25$ .

Η πρώτη φιλοσοφία σχεδίασης οφείλεται στο γεγονός ότι η θέση που θα γίνει η διασταύρωση των σηράγγων επιλέγεται στην λεγόμενη «καλή γεωλογική περιοχή». Σε μια τέτοια περιοχή, δεν αναμένεται σοβαρή παραμόρφωση της σήραγγας. Η ενίσχυση του συστήματος στήριξης αποσκοπεί κυρίως στην αποφυγή κάποιου σφάλματος. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.48 η παραμόρφωση της σήραγγας για την ελαφρώς ή μη «συνθλίβουσα» βραχομάζα ήταν σχεδόν κάτω από το επίπεδο «προειδοποίησης» II. Η σήραγγα θα παραμείνει σε σταθερή κατάσταση χωρίς υπερβολική εσωτερική παραμόρφωση ή πίεση χαλάρωσης εδάφους. Ως εκ τούτου, η πρώτη φιλοσοφία σχεδιασμού για την ελαφρώς ή μη «συνθλίβουσα» βραχομάζα είναι λογική για τον λόγο  $\sigma_{cm}/\rho_o > 0.5$ .

Η δεύτερη και η τρίτη φιλοσοφία σχεδιασμού υιοθετούν το ενισχυμένο σύστημα υποστήριξης για την ενίσχυση του εδάφους γύρω από το σημείο τομής των σηράγγων. Για ελαφρώς ή μη «συνθλίβουσα» βραχομάζα ο τρόπος σχεδιασμού αυτός είναι πολύ συντηρητικός. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού είναι πιο κατάλληλη για μέτρια «συνθλίβουσα» βραχομάζα μειώνοντας τις παραμορφώσεις της σήραγγας των οποίων οι τιμές είναι μεταξύ των επιπέδων «προειδοποίησης» II και III (βλ. Σχήμα 2.49). Για υψηλές συνθήκες σύνθλιψης, η παραμόρφωση της σήραγγας έχει υπερβεί το επίπεδο προειδοποίησης III (βλ. Σχήμα 2.50). Η απλή μείωση της παραμόρφωσης της σήραγγας είναι ανεπαρκής για την ασφάλεια της. Το ενισχυμένο σύστημα υποστήριξης από μόνο του μπορεί να μην είναι επαρκές για εξαιρετικά πολύ ανεπαρκείς βραχομάζες. Πρέπει να χρησιμοποιούνται βοηθητικά μέτρα για την βελτίωση της σταθερότητας της σήραγγας, όπως ειδικός τρόπος εκσκαφής με ή μη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης των σηράγγων. Με βάση τα παραπάνω, οι τρεις κατηγορίες σχεδιασμού της υποστήριξης που προτείνονται για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.20.

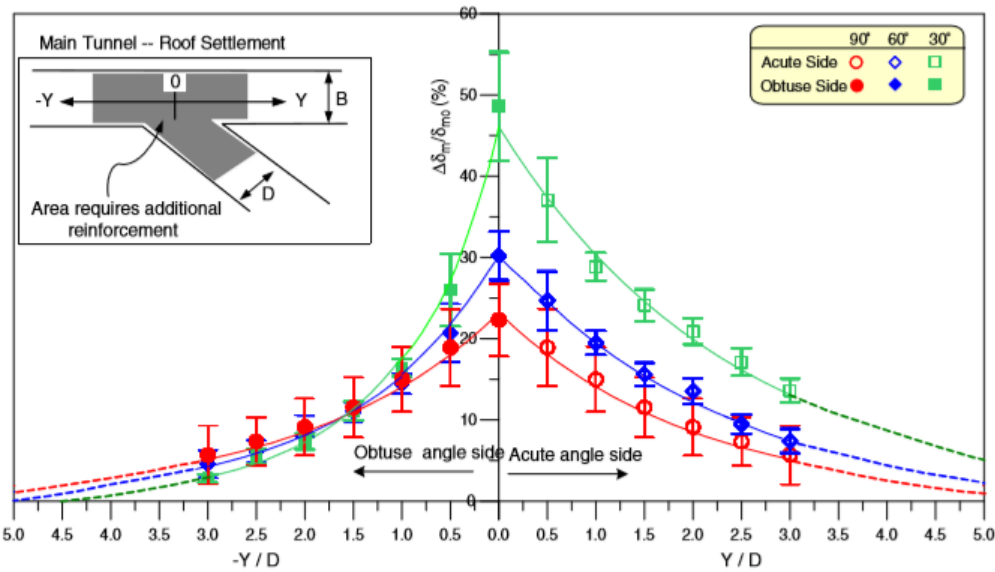
Table 5  
Guidelines for support design in tunnel intersection area

Geological condition	Support design suggestions
Slightly or non-squeezing rock ( $\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Only strengthening support system to prevent potential wedge failure in the intersection area, such as increasing the thickness of shotcrete, and the density or length of rock bolt</li> <li>• Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability</li> </ul>
Moderately squeezing rock ( $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.5$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducing rock mass rating in order to install heavier support work or design a more conservative support system in the intersection area.</li> <li>• Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability. Carry out detailed visual inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency during construction</li> </ul>
Severely squeezing rock ( $\sigma_{cm}/P_0 \leq 0.25$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservative excavation processes and support system should be used in the intersection area. Auxiliary measures, such as ground improvement, should be made if necessary. 3D numerical analysis is suggested to assess the appropriateness of tunnel design.</li> <li>• Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability. Carry out detailed inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency during construction</li> </ul>

Εικόνα 2.20: Κατηγορίες σχεδιασμού της υποστήριξης διασταυρούμενων σηράγγων.

#### 2.3.4.2. Εύρος πρόσθετης ενίσχυσης

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα μελέτης είναι η περιοχή στην οποία απαιτούνται πρόσθετα μέτρα υποστήριξης. Στο Σχήμα 2.51 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της παραμόρφωσης της κορυφής της διατομής της κύριας σήραγγας σε σχέση με την απόσταση που βρίσκεται η διασταυρούμενη σήραγγα. Μέσω αυτού μπορεί να μελετηθούν οι παραμορφώσεις και να αξιολογηθεί που ακριβώς απαιτείται ενίσχυση της υποστήριξης των σηράγγων. Είναι φανερό από το Σχήμα 2.51 πως όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την διασταύρωση των σηράγγων τόσο μειώνονται οι παραμορφώσεις στην κορυφή της διατομής. Στην περίπτωση που η γωνία τομής είναι οξεία τότε υπάρχουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ενώ για αμβλείες γωνίες οι παραμορφώσεις είναι πιο μικρές.



Σχήμα 2.51: Παρακολούθηση παραμορφώσεων διασταυρούμενων σηράγγων με βάση την απόσταση απομάκρυνσης από της διασταύρωσης τους.

Σε εφαρμογές σχεδιασμού διασταυρούμενων σηράγγων στην Ταϊβάν, δόθηκε ενίσχυση της κύριας και της δευτερεύουσας σήραγγας της τάξης της μισής έως μίας διαμέτρου ( $0,5D$  έως  $D$ ) στην περιοχή της διασταύρωσης. Η πρακτική εφαρμογή αυτή είναι κυρίως εμπειρική διαδικασία. Έχουν γίνει προτάσεις από διάφορους ερευνητές (Chen and Chang, 2000, Chen et al., 2002) κατά τις οποίες υποστηρίζεται πως περιοχές με 10% αύξηση της παραμόρφωσης της σήραγγας θα πρέπει να ενισχύονται με πρόσθετη υποστήριξη. Από αυτά που προέκυψαν παραπάνω (Σχήμα 2.51) παρατηρήθηκε αύξηση της παραμόρφωσης 10% με 20%. Για οξεία γωνία τομής η περιοχή που απαιτεί πρόσθετη ενίσχυση είναι πολύ μεγαλύτερη. Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.51, με κριτήριο την γεωλογική κατάσταση του εδάφους, την γωνία τομής της διασταύρωσης και τη θέση στην πλευρά της οξείας γωνίας ή της αμβλείας γωνίας, θεωρήθηκε αναγκαία μια επιπλέον ενίσχυση της τάξης του 10% με 15%. Στην Εικόνα 2.21 παρουσιάζονται οι προτάσεις που έγιναν για την πρόσθετη ενίσχυση στην μελέτη. Οι προτεινόμενες προτάσεις προτίθενται να χρησιμεύσουν μόνο ως προκαταρκτικός οδηγός σχεδιασμού. Είναι απαραίτητο να εκτελεστεί τρισδιάστατη ανάλυση για σημαντικά έργα σηράγγων ή όταν επικρατούν κακές γεωλογικές συνθήκες ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των διασταυρούμενων σηράγγων.



Table 6  
Suggestions for area with additional support

Geological condition	Extent suggestions for additional system support		
Slightly or non-squeezing rock ( $\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$ )	No additional system support need in intersection area, only support in preventing potential wedge failure		
Moderately squeezing rock ( $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.5$ )		Acute angle side	Obtuse angle side
	90°	1.0D*	1.0D
	60°	1.5D	1.0D
	30°	2.5D	1.0D
Severely squeezing rock ( $\sigma_{cm}/P_0 \leq 0.25$ )		Acute angle side	Obtuse angle side
	90°	1.5D	1.5D
	60°	2.5D	1.5D
	30°	3.5D	1.5D

\*D: span of access tunnel.

Εικόνα 2.21: Προτάσεις για πρόσθετη ενίσχυση της υποστήριξης των σηράγγων.

### 2.3.5. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα γίνεται κατανοητό πως ο λόγος αντοχής/τάσης ( $\sigma_{cm}/p_0$ ) της βραχομάζας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά της διατομής της σήραγγας, για αυτό τον λόγο προτάθηκαν κατευθυντήρια βήματα και λύσεις για τον σχεδιασμό της υποστήριξης των διασταυρούμενων σηράγγων για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Παρουσιάζονται τρεις προτάσεις για διαφορετικές συνθήκες της βραχομάζας. Για ελαφρώς ή μη «συνθλίβουσα» βραχομάζα δεν απαιτείται συστηματική πρόσθετη υποστήριξη, ενώ για μέτρια έως «συνθλίβουσα» βραχομάζα απαιτείται μεγαλύτερη υποστήριξη.

Η περιοχή που χρειάζεται πρόσθετη υποστήριξη προτείνεται επίσης με βάση τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογική κατάσταση του εδάφους, την γωνία τομής των διασταυρούμενων σηράγγων και τη θέση της στην περιοχή τομής των σηράγγων. Ωστόσο, οι προτάσεις, που έγιναν, προορίζονται μόνο ως προκαταρκτικός οδηγός σχεδιασμού. Γενικά απαιτείται επανεξέταση της καταλληλότητας του σχεδιασμού υποστήριξης με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης για σημαντικά έργα σε σήραγγες ή για κακές γεωλογικές συνθήκες του εδάφους. Η περαιτέρω παρακολούθηση της περιοχής και ο οπτικός έλεγχος θα αποδειχθεί πολύτιμος για την εξασφάλιση της σταθερότητας της σήραγγας κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

## 2.4. Οι επιδράσεις της αλλαγής της γωνίας τομής στις διασταυρούμενες σήραγγες.

Στην κατασκευή μιας σήραγγας συχνά απαιτείται η ύπαρξη διασταυρούμενων σηράγγων ή διαφόρων «καναλιών» επαφής για λόγους βοήθειας της κύριας σήραγγας. Κατά την διαδικασία κατασκευής μιας διασταυρούμενης σήραγγας θα προκληθούν αλλαγές και ανακατανομή τάσεων γύρω από την βραχομάζα και στην δομή της υποστήριξης της κύριας σήραγγας. Ακόμη, θα υπάρξουν αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και της δομής της υποστήριξης, που έχει τοποθετηθεί. Η μελέτη αυτή έχει βασιστεί στο έργο του μετρό Dalian και αναλύονται περιπτώσεις για γωνίες τομής διασταυρούμενων σηράγγων ίσες με 30 °, 45 ° και 90 °. Για να γίνει η ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος MIDAS / GTS.

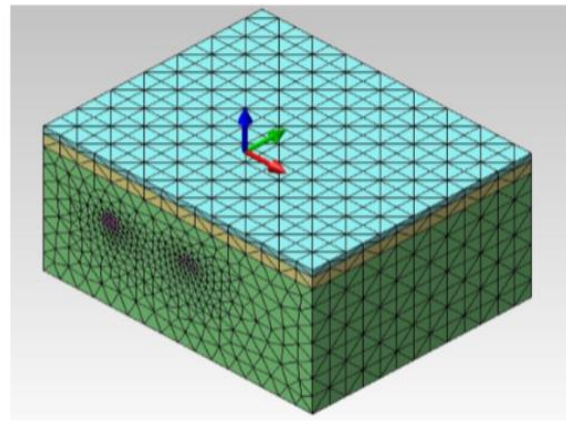
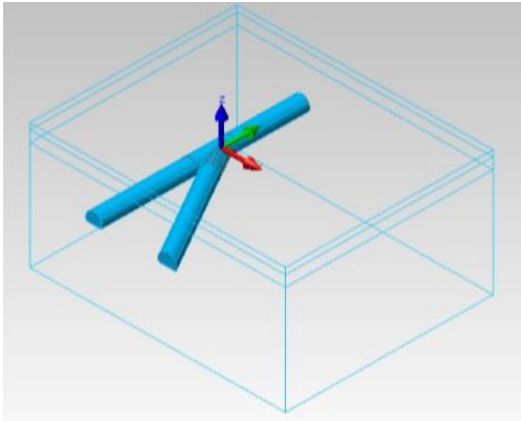
### 2.4.1. Επιλογή παραμέτρων και δημιουργία του μοντέλου

Στο έργο αυτό που μελετάται χρησιμοποιούνται ως μέτρο υποστήριξης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Λόγω της παχιάς στρώσης σκυροδέματος δημιουργείται μια εύκαμπτη, λεπτή και παραμορφώσιμη δομή υποστήριξης. Διάφορες παράμετροι της μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.22.

Project	Bulk density $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus E (MPa)	Cohesive force C (kPa)	Internal friction angle $\phi$ ( <sup>o</sup> )	Poisson ratio $\mu$
Plain fill	17	50	10	8	0.35
Pebble	22	200	5	30	0.3
Full weathered calcareous slate	20	120	30	16	0.33
Shotcrete	25	30000			0.2
Bolt	78	2000000			0.3

Εικόνα 2.22:Παράμετροι και στοιχεία της ανάλυσης που μελετήθηκε.

Η θεωρητική ανάλυση δείχνει ότι η κυκλική διατομή της σήραγγας σε άπειρη ομοιογενή, ελαστική περιοχή είναι μικρότερη από 1% για περιοχή πέντε διαμέτρων (5D) μακριά από την διασταύρωση και μικρότερη 5% όταν είναι 3 φορές μακριά από την διασταύρωση λόγω των αλλαγών στην ανακατανομή των τάσεων και των μετατοπίσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της μηχανικής, τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και το σφάλμα υπολογισμού, ο γενικός υπολογισμός επιλογής της περιοχής επιρροής των διαμέτρων των σηράγγων σε όλες τις διευθύνσεις είναι της τάξης των τριών έως πέντε φορές την διάμετρο (3D έως 5D) των οπών των σηράγγων. Συνολικά το μοντέλο χωρίζεται σε τρία στρώματα, το πάχος κάθε στρώματος είναι αντίστοιχα 2m, 3.5m, 34.5m. Το επιλεγμένο μοντέλο έχει: μήκος 130m, πλάτος 60m, ύψος 40m. Η σήραγγα διέλευσης και ολόκληρο το μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.23.



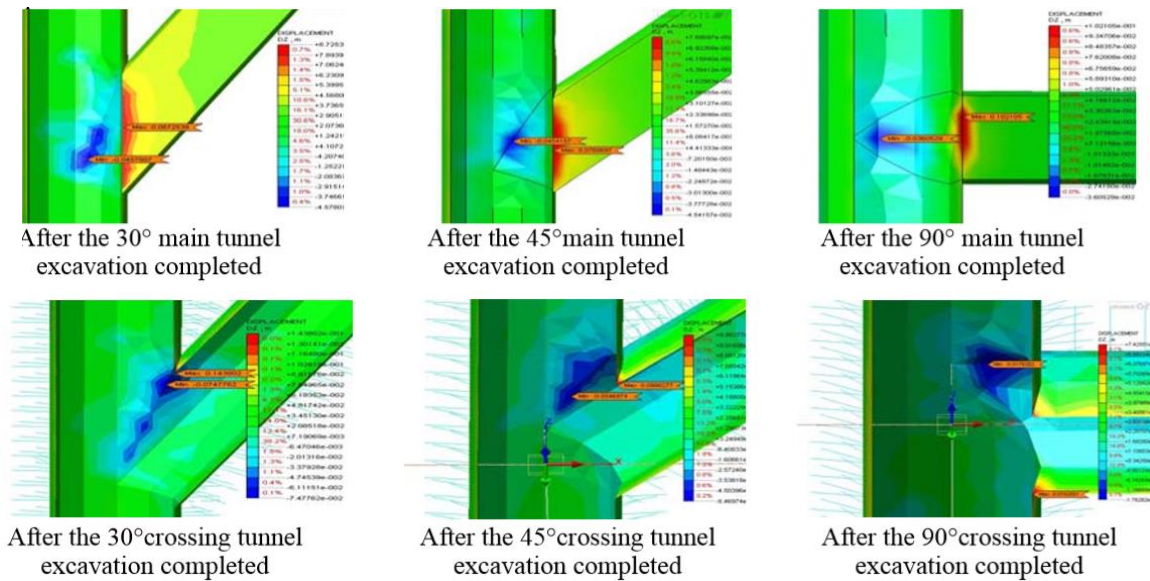
Εικόνα 2.23: Παρουσίαση της γεωμετρίας και της δομής του μοντέλου που μελετήθηκε.

## 2.4.2. Αποτελέσματα

### 2.4.2.1. Ανάλυση επιρροής της διαφορετικής γωνίας τομής στην διασταύρωση των σηράγγων

Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της κύριας σήραγγας και πριν από τη διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας που ανασκάπτεται, παρουσιάζεται καθίζηση στο άνω τμήμα της διατομής και ανύψωση στην βάση της στην ένωση των σηράγγων. Για γωνία τομής  $30^\circ$  η παραμόρφωση στην κορυφή είναι της τάξης των  $-45,78$  mm. Η επιφάνεια ανύψωσης είναι  $87,25$  mm. Για γωνία τομής  $45^\circ$  η παραμόρφωση στην κορυφή είναι  $-35,54$  mm και η επιφάνεια ανύψωσης είναι  $56,87$  mm. Επίσης για γωνία τομής  $90^\circ$  των σηράγγων οι παραμορφώσεις είναι αντίστοιχα  $-36,05$  mm και  $61,10$  mm. Είναι φανερό πως για γωνία τομής  $45^\circ$  οι παραμορφώσεις στην κορυφή της διατομής παίρνουν την μικρότερη τιμή σε σχέση με την περίπτωση της γωνίας τομής των  $30^\circ$  που είναι οι μεγαλύτερες. Οι παραμορφώσεις στην βάση της διατομής είναι μέγιστες για γωνία τομής των  $90^\circ$  και ελάχιστες για γωνία τομής  $45^\circ$ .

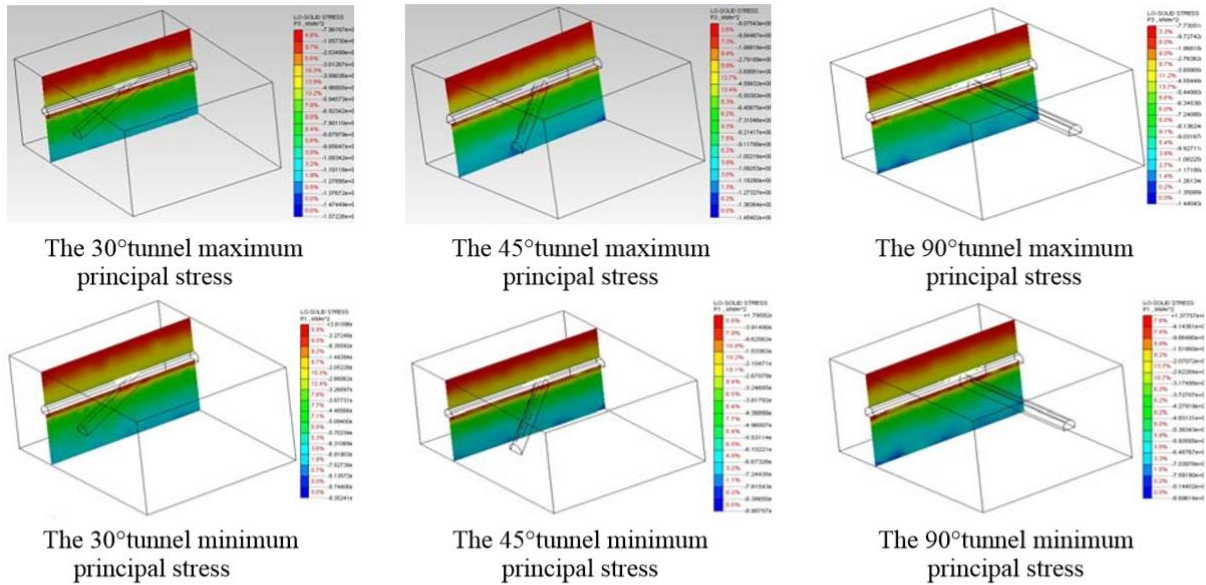
Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας, η παραμόρφωση στην κορυφή για γωνία τομής  $30^\circ$  είναι της τάξης των  $-74,77$  mm και η επιφάνεια ανύψωσης είναι  $143,8$  mm. Για γωνία τομής  $45^\circ$  η παραμόρφωση στην κορυφή είναι  $-54,69$  mm και η επιφάνεια ανύψωσης είναι  $68,82$  mm. Επίσης για γωνία τομής  $90^\circ$  των σηράγγων οι παραμορφώσεις είναι αντίστοιχα  $-67,62$  mm και  $74,25$  mm. Σύμφωνα με τα παραπάνω αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης, η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης της κορυφής της διατομής συνέβη στη διασταύρωση της σήραγγας. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας μαζί με την ανύψωση εδάφους, οι μέγιστες παραμορφώσεις παρουσιάστηκαν στην βάση της διατομής της κύριας σήραγγας.



Εικόνα 2.24: Επιρροή της γωνίας τομής στην διασταύρωση των σηράγγων.

#### 2.4.2.2. Ανάλυση επιρροής των τάσεων στην διασταύρωση των σηράγγων

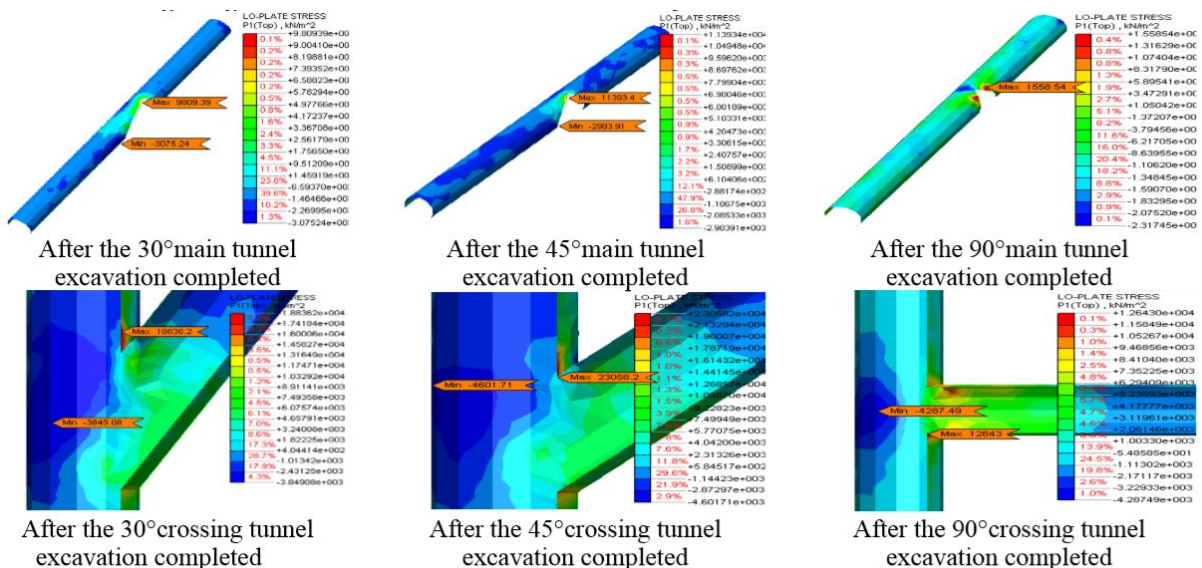
Σε περιοχή 20 μέτρων κοντά στην διασταύρωση της σήραγγας, αναπτύσσεται διαφορετικό τασικό πεδίο. Στις διασταυρώσεις των σηράγγων αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις με την μέγιστη θλιπτική καταπόνηση να παρουσιάζεται στις κορυφές της διατομής της διασταύρωσης των σηράγγων. Οι τάσεις που δημιουργούνται στην κορυφή της διατομής για γωνία τομής 30 ° έχουν μέγιστη τιμή 0,65 MPa και ελάχιστη 0,32 MPa. Για την ίδια γωνία τομής και για την βάση της διατομής οι τάσεις έχουν μέγιστη τιμή 0,038 MPa και ελάχιστη 0,008 MPa. Οι τάσεις που δημιουργούνται στην κορυφή της διατομής για γωνία τομής 45 ° έχουν μέγιστη τιμή 0,63 MPa και ελάχιστη 0,28 MPa. Για την ίδια γωνία τομής και για την βάση της διατομής οι τάσεις έχουν μέγιστη τιμή 0,018 MPa και ελάχιστη 0,0075 MPa. Τέλος, για γωνία τομής 90 ° οι τάσεις στην κορυφή της διατομής έχουν μέγιστη τιμή 0,63 MPa και ελάχιστη 0,31 MPa. Για την ίδια γωνία τομής και για την βάση της διατομής οι τάσεις έχουν μέγιστη τιμή 0,023 MPa και ελάχιστη 0,0077 MPa. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως κατά την διάρκεια της κατασκευής δευτερεύουσας σήραγγας πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην έγκαιρη υποστήριξη της κατασκευής και παρακολούθηση του τασικού προφίλ των σηράγγων για την αποφυγή κινδύνων.



Εικόνα 2.25: Επιρροή του τασικού πεδίου στην διασταύρωση των σηράγγων.

**2.4.2.3. Ανάλυση επιρροής των τάσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην διασταύρωση σηράγγων**

Αντίστοιχα για τις γωνίες τομής των 30 °, 45 ° και 90 °, πριν την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας οι μέγιστες τάσεις που αναπτύχθηκαν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην κορυφή της διατομής της διασταύρωσης έχουν τιμές 12,8 MPa, 9,4 MPa, 11,6 MPa. Οι μέγιστες τάσεις που παρουσιάστηκαν στην βάση της διατομής είναι 3,2 MPa, 2,1 MPa, 2,3 MPa για τις αντίστοιχες γωνίες τομής. Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας οι μέγιστες τιμές των τάσεων στην κορυφή της διατομής είναι 18,8 MPa, 10,2 MPa, 12,6 MPa και στην βάση 3.8 MPa, 2.6 MPa, 4.3 MPa για τις αντίστοιχες γωνίες τομής των σηράγγων.



Εικόνα 2.26: Επιρροή τάσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην διασταύρωση των σηράγγων.

#### 2.4.2.4. Ανάλυση επιρροής των αγκυρίων στην διασταύρωση σηράγγων

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.27 η εφελκυστική και η θλιπτική τάση των αγκυρίων είναι μεγαλύτερες για γωνία τομής των 30° σε αντίθεση με τις τάσεις της γωνίας τομής των 45°. Είναι φανερό πως τα αγκύρια βοηθάνε στην δομή και την σταθερότητα της σήραγγας και εξασφαλίζουν την ασφάλεια της κατασκευής.

Cross Angle	main tunnel excavation(MPa)		Cross tunnel excavation(MPa)	
30°	maximum tensile stress	4.75E+05	maximum tensile stress	8.76E+05
	maximum compressive stress	-3.16E+05	maximum compressive stress	-8.64E+05
45°	maximum tensile stress	3.96E+05	maximum tensile stress	7.81E+05
	maximum compressive stress	-2.15E+05	maximum compressive stress	-5.83E+05
90°	maximum tensile stress	3.76E+05	maximum tensile stress	4.69E+05
	maximum compressive stress	-2.20E+05	maximum compressive stress	-6.26E+05

Εικόνα 2.27: Τάσεις που εμφανίζονται με την εφαρμογή των αγκυρίων στην διασταύρωση των σηράγγων.

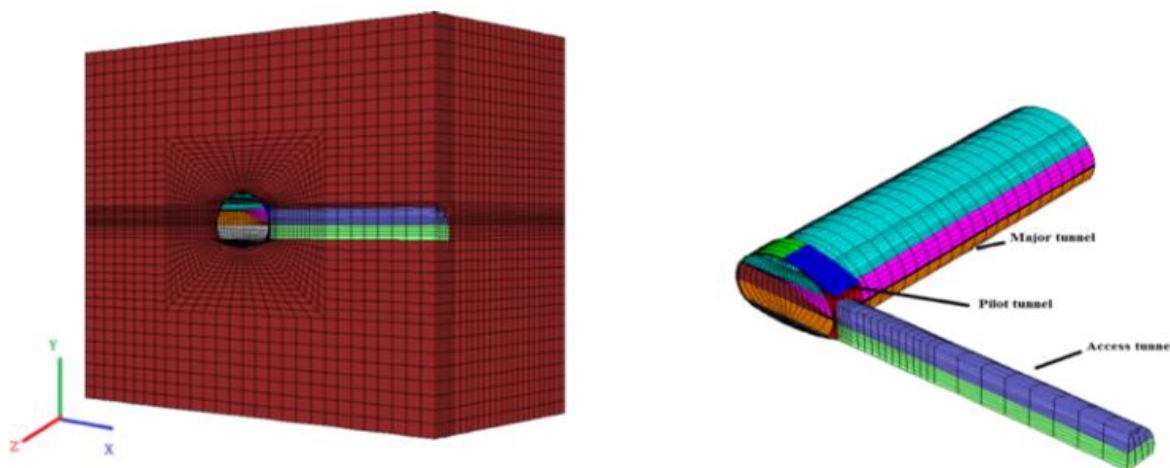
## 2.5. Μελέτη της συμπεριφοράς παραμόρφωσης στην διασταύρωση κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας σιδηροδρομικής γραμμής.

### 2.5.1. Αριθμητική Ανάλυση

#### 2.5.1.1. Περιγραφή Αριθμητικού Μοντέλου

Με βάση την μηχανική μελέτη της σήραγγας WangDeng, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS και στη συνέχεια μεταφέρθηκε στο FLAC3D χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ANSYS FLAC. Η συμμετρία της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της σήραγγας. Η οριζόντια κατεύθυνση (συντεταγμένη Χ), κάθετη κατεύθυνση (συντεταγμένη Υ) και αξονική κατεύθυνση (συντεταγμένη Ζ) έχουν μήκος 96 m, ύψος 84 m και πλάτος 46 m αντίστοιχα. Η βραχομάζα στη σήραγγα έχει πάχος 31,88 m. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 101342 στοιχεία τύπου «hexahedron». Ο όγκος του μικρότερου και του μεγαλύτερου στοιχείου ήταν 0,24 m<sup>3</sup> και 22,04 m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Στις τέσσερις πλευρικές επιφάνειες περιορίστηκε μόνο η κανονική μετατόπιση, ενώ στην κάτω επιφάνεια όλες αυτές οι κατευθύνσεις μετατόπισης περιορίστηκαν. Στην Εικόνα 2.28 φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιείται στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης.





Εικόνα 2.28: Μοντέλο προσομοίωσης διασταυρούμενων σηράγγων.

### 2.5.1.2. Αρχική Γεωστατική Κατάσταση

Η αρχική κατακόρυφη τάση του εδάφους είναι το φορτίο της βραχομάζας. Η οριζόντια τάση ισούται με 0,77 φορές της κατακόρυφης τάσης. Το βάθος του υπερκείμενου όγκου της σήραγγας θεωρήθηκε 115 m, ενώ η κορυφή της διατομής του μοντέλου υιοθετήθηκε ως 31,88 m. Εφαρμόστηκε φορτίο στην επάνω επιφάνεια του αριθμητικού μοντέλου για την προσομοίωση της πραγματικής τάσης.

### 2.5.1.3. Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες

Η συμπεριφορά της βραχομάζας προσομοιώνεται ως ένα ελαστοπλαστικό μέσο, που βασίζεται στο Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb. Για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μορφής «κελύφους». Το στοιχείο «NULL» χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας. Οι φυσικές και μηχανικές παράμετροι της βραχομάζας, του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυριών παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.29.

Parameter	Rocks	Bolt	Shotcrete with no reinforcement	Shotcrete with additional reinforcement
Tensile strength (MPa)	0.2	/	/	/
Elasticity modulus (GPa)	1.1	200	25	35
Passion's ratio	0.32	0.3	0.25	0.25
Friction angle (°)	26	/	/	/
Cohesive force (MPa)	0.1	/	/	/
Density (KN/m <sup>3</sup> )	2250	/	/	/

Εικόνα 2.29: Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες της Βραχομάζας.

### 2.5.1.4. Στοιχεία για την Εκσκαφή των Διασταυρούμενων Σηράγγων

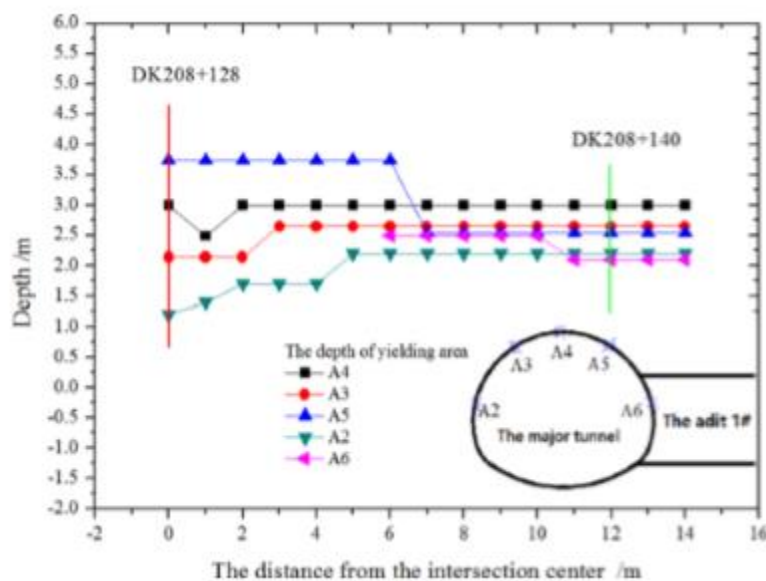
Τα τμήματα της σήραγγας χωρίστηκαν σε δυο τοξωτά τμήματα, στα οποία το ύψος του άνω τόξου είναι 3,65 m και του κάτω τμήματος 3 m αντίστοιχα. Τα τμήματα της κύριας σήραγγας χωρίστηκαν σε τρία τμήματα, με ύψος 3,93 m, με μεσαία στρώση 3,16 m και με το κάτω τμήμα ίσο με 3m. Η κατά μήκος εκσκαφή της κύριας σήραγγας χωρίστηκε σε 23 τμήματα, το μήκος κάθε τμήματος είναι 2 m. Οι συνθήκες υποστήριξης προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία με εφελκυσμό και τα πεπερασμένα στοιχεία «κελύφους» που παρουσιάζονται στο

λογισμικό FLAC3D. Το διάστημα εμβέλειας των στοιχείων με εφελκυσμό κατά μήκος της σήραγγας χρησιμοποιούνται 1 m και 1,2 m στην κατακόρυφη κατεύθυνση με τη σήραγγα. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος με πρόσθετη ενίσχυση και χωρίς οπλισμό είναι 35 GPa και 25 GPa, αντίστοιχα.

## 2.5.2. Αποτελέσματα Ανάλυσης και Αξιολόγηση

### 2.5.2.1. Πλαστική Ζώνη στις περιοχές των σηράγγων

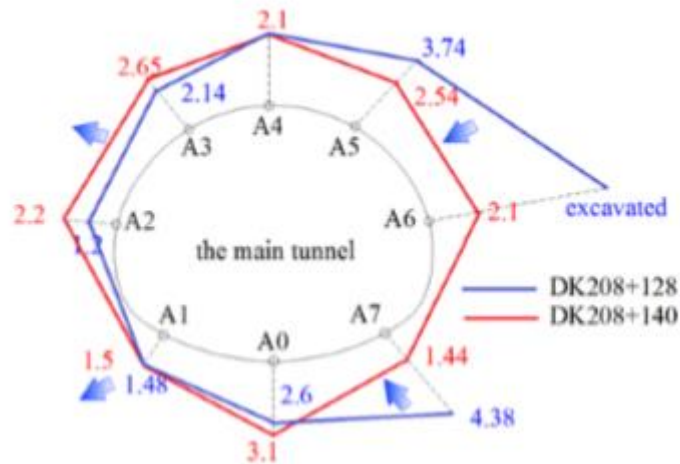
Τα αποτελέσματα των πλαστικών ζωνών των σηράγγων σε διαφορετικές θέσεις λήφθηκαν αρχικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.52. Για την ευκολία της συγκριτικής ανάλυσης, παρουσιάστηκε το βάθος των πλαστικών ζωνών στα σημεία A4, A3, A5, A2, A6. Στο κέντρο διασταύρωσης (DK208 + 128), το βάθος της πλαστικής ζώνης στο A5 ήταν το μέγιστο λόγω της επικάλυψης της πλαστικής ζώνης που προκλήθηκε από την εκσκαφή στην δευτερεύουσα και την κύρια σήραγγα. Με την αύξηση της απόστασης εμφανίστηκε η απότομη μεταβολή στο βάθος των πλαστικών ζωνών στα σημεία A3, A2, A5, A6. Το A3, για παράδειγμα, είναι σε μια σταθερή κατάσταση στη θέση DK208 + 131, το A2 είναι σε σταθερή κατάσταση στη θέση DK208 + 133, το A5 στη θέση DK208 + 135 και το A6 στη θέση DK208 + 139. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η επίδραση της εκσκαφής των επιφανειών στο βάθος της πλαστικής ζώνης στην κύρια σήραγγα είναι περίπου 11 μέτρα, δηλαδή 1,5 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της διατομής της.



Σχήμα 2.52: Περιοχές με πλαστικές παραμορφώσεις.

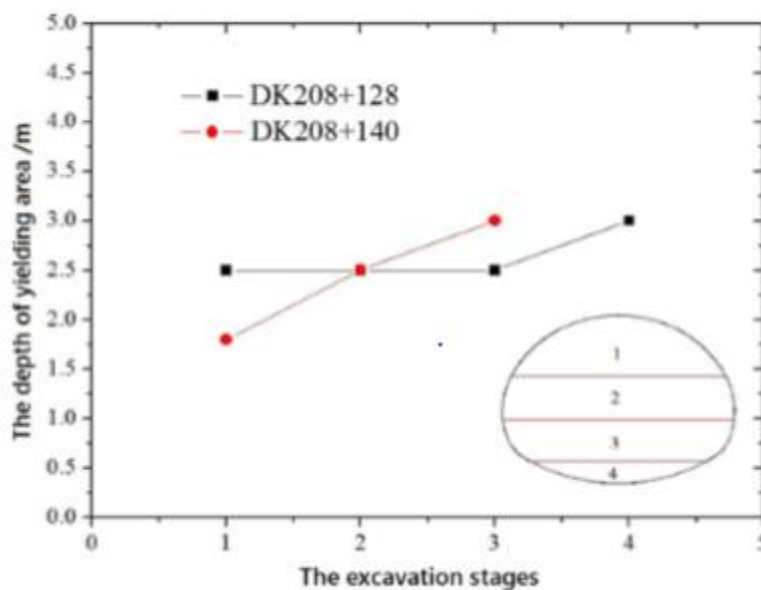
Τα αποτελέσματα των πλαστικών ζωνών σήραγγας στις θέσεις DK208 + 128 και DK208 + 140 συγκρίθηκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.53. Για την ευκολία της συγκριτικής ανάλυσης, παρουσιάζεται το βάθος των πλαστικών ζωνών στα σημεία A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7. Μια συμμετρική κατανομή εμφανίστηκε στη θέση του DK208 + 140, επειδή η εκσκαφή της διατομής δεν είχε καμία επίδραση στο βάθος της πλαστικής ζώνης σε εκείνη τη θέση στην κύρια σήραγγα. Ο σχεδιασμός ενός αγκυρίου μήκους 4 μέτρων ήταν αποτελεσματικός, διότι το μέγιστο βάθος της πλαστικής ζώνης είναι μόνο 3,1 m. Ωστόσο, ήταν διαφορετική στη θέση του DK208 + 128. Κατά την εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας, το βάθος της πλαστικής ζώνης στη δεξιά πλευρά της κύριας σήραγγας αυξήθηκε και το βάθος της πλαστικής ζώνης στην αριστερή πλευρά της κύριας

σήραγγας μειώθηκε. Τέλος, καθώς το μέγιστο βάθος της πλαστικής ζώνης ήταν 4,38 m γίνεται κατανοητό πως ο σχεδιασμός του αγκυρίου μήκους 4 μέτρων δεν είχε κάποια ισχύ.



Σχήμα 2.53: Πλαστικές παραμορφώσεις στις περιοχές DK208+128 & DK208 +140.

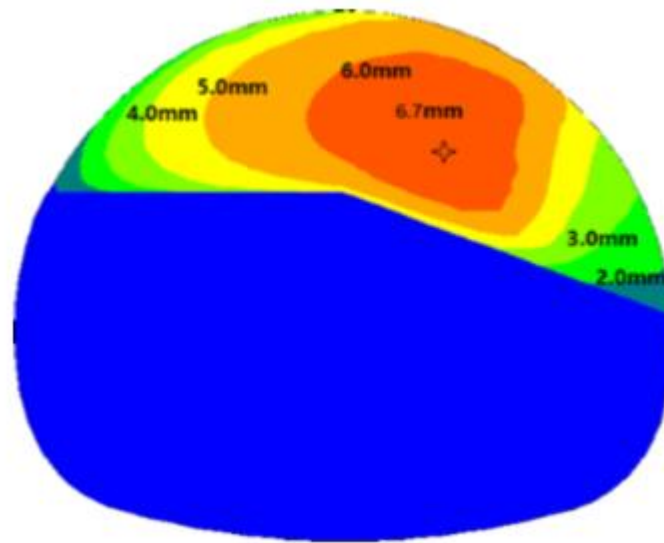
Τα αποτελέσματα της πλαστικής ζώνης της σήραγγας στα διαφορετικά στάδια κατασκευής λήφθηκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.54. Για την ευκολία της συγκριτικής ανάλυσης, παρουσιάστηκε το βάθος της πλαστικής ζώνης στο A4. Στην περιοχή τομής (DK208 + 128 για παράδειγμα), το βάθος της πλαστικής ζώνης δεν άλλαξε στη διαδικασία εκσκαφής στο πάνω τμήμα, στο κεντρικό και στο κάτω τμήμα, ενώ το βάθος της πλαστικής ζώνης είχε μικρή αύξηση στην διαδικασία της εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα πιο επικίνδυνα στάδια κατασκευής είναι η εκσκαφή του άνω τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας. Στις περιοχές που βρίσκονται μακριά από τη διασταύρωση των σιηράγγων (DK208 + 140 για παράδειγμα), το βάθος της πλαστικής ζώνης αυξήθηκε κατά τη διαδικασία της εκσκαφής του άνω, του μεσαίου και του κατώτερου τμήματος της διατομής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κάθε στάδιο εκσκαφής χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για την ασφάλεια κατασκευής των διασταυρούμενων σιηράγγων.



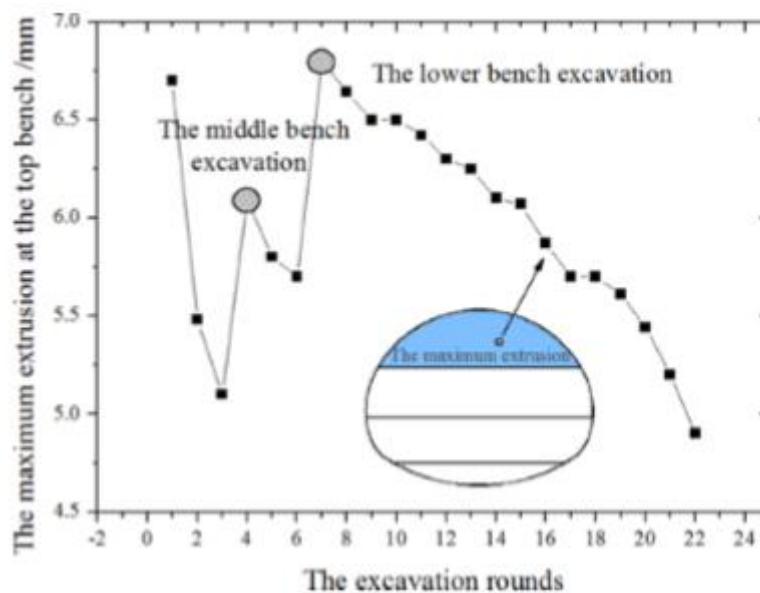
Σχήμα 2.54: Πλαστικές παραμορφώσεις σε διάφορα στάδια εκσκαφής.

### 2.5.2.2. Μέτωπο Εκσκαφής Δευτερεύουσας Σήραγγας

Κατά την εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε προσωρινή υποστήριξη για το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Η μέγιστη μετατόπιση που δημιουργήθηκε στο μέτωπο εκσκαφής είναι 6,70 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.55. Η ελάχιστη μετατόπιση είναι 1,0 mm, εμφανιζόμενη στα δύο άκρα της διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εκσκαφή της διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας επηρεάζουν την περιοχή γύρω από την διασταύρωση των σηράγγων την κύρια σήραγγα και δημιουργούνται παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται στο άνω τμήμα της κύριας σήραγγας στην διασταύρωση των σηράγγων κατά την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας φαίνονται στο Σχήμα 2.56.



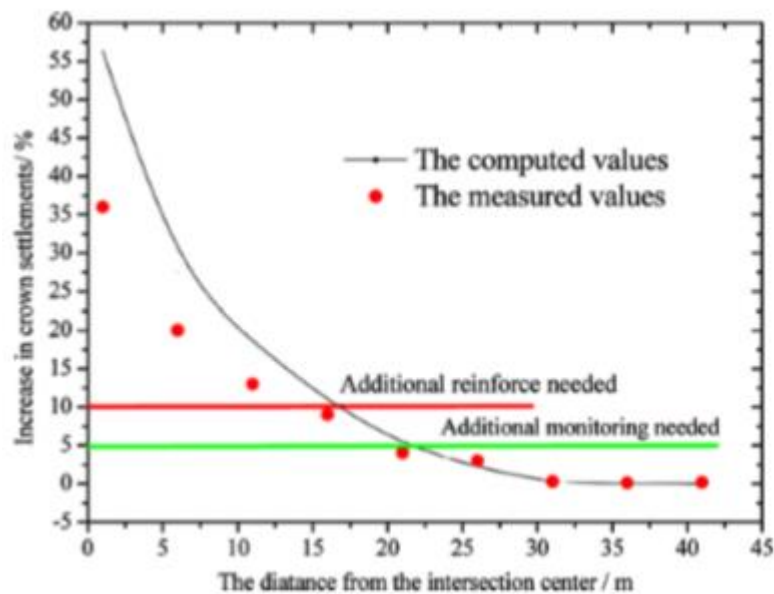
Σχήμα 2.55: Μετατοπίσεις στο μέτωπο Εκσκαφής της Δευτερεύουσας Σήραγγας.



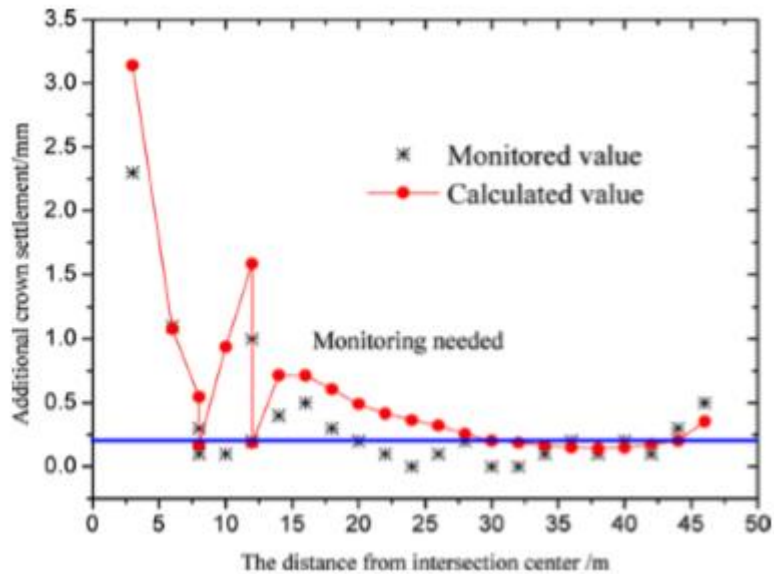
Σχήμα 2.56: Παραμορφώσεις στο ανώτερο τμήμα της κύριας σήραγγας κατά την εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας.

### 2.5.2.3. Μετατοπίσεις Κύριας και Δευτερεύουσας Σήραγγας

Η εκσκαφή της κύριας και της δευτερεύουσας σήραγγας έχουν μεγάλη επίδραση στην διαμόρφωση της βραχομάζας. Παρακάτω αναλύεται η σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων της κορυφής της διατομής της διασταύρωσης των σηράγγων σε σχέση με την απόσταση από την διασταύρωση (Σχήμα 2.57). Οι προτάσεις που παρουσιάστηκαν από διάφορους ερευνητές (Chen and Chang, 2000, Chen et al., 2002) δείχνουν ότι η περιοχή με 10% αύξηση της παραμόρφωσης σήραγγας πρέπει να ενισχυθεί με επιπρόσθετη υποστήριξη. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις παρούσες μελέτες (Σχήμα 2.57), μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι πρέπει να ενισχυθεί η διαμήκης περιοχή 2,2 φορές της διαμέτρου της διατομής μακριά από το κέντρο της διασταύρωσης. Η διατομή HDK0 + 001 επιλέχθηκε για να αποσαφηνίσει τη σχέση μεταξύ επιπρόσθετων παραμορφώσεων στην κορυφή της διατομής και της ανασκαμμένης απόστασης από το κέντρο της διασταύρωσης στην κύρια σήραγγα (βλ. Σχήμα 2.58). Σύμφωνα με την πρόταση που παρουσιάστηκε στον Κινεζικό Τεχνικό Κώδικα για την παρακολούθηση της μέτρησης της Σιδηροδρομικής Σήραγγας (TB10121-2007), θα πρέπει να γίνεται επιπρόσθετη παρακολούθηση όταν η παραμόρφωση της κορυφής της διατομής είναι μεγαλύτερη από 0,2 mm. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παρούσες μελέτες (βλ. Σχήμα 2.57), η παρακολούθηση θα πρέπει να διεξάγεται στη βραχομάζα όταν γίνεται η εκσκαφή της κύριας σήραγγας σε απόσταση 20 m έως 30 m από το κέντρο της διασταύρωσης. Οι μετατοπίσεις των τμημάτων DK208 + 133 έως DK208 + 163 στην κύρια σήραγγα φαίνονται στην Εικόνα 2.30 αναλυτικά.



Σχήμα 2.57: Σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων της κορυφής της διατομής της διασταύρωσης των σηράγγων και με την απόσταση από την διασταύρωση.



Σχήμα 2.58: Σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων στην κορυφή της διατομής της κύριας σήραγγας και της απόστασης από το κέντρο της διασταύρωσης.

Monitoring sections	Monitoring spots	Measured value (mm)	Numerical simulation			Difference ratio
			Pre-deformation (mm)	Final deformation (mm)	Computed value (mm)	
DK208+133	A4	13.6	6	18.9	12.9	5.43%
	A5	6.8	0.5	7.9	7.4	8.11%
	A3	7	0.3	8.1	7.8	10.26%
	A6	5.8	-0.3	5.9	6.2	6.45%
	A2	10.2	1.6	12.6	11	7.27%
	A7	4.5	0.3	5.5	5.2	13.46%
DK208+138	A1	10.7	1.1	11.1	10	7.00%
	A4	14.8	1.7	19.2	17.5	15.43%
	A5	8.3	1.6	10.7	9.1	8.79%
	A3	8	1.1	9.9	8.8	9.09%
	A6	10.2	3.6	15.1	11.5	11.30%
	A2	9.6	3.4	14.1	10.7	10.28%
DK208+143	A7	7.5	5	13.2	8.1	7.41%
	A1	8.8	4.9	12.6	9.6	8.33%
	A4	12.8	2.1	19.8	17.7	27.68%
	A5	8.3	1.7	11.5	9.8	15.31%
	A3	8.5	1.5	11.1	9.6	11.46%
	A6	9.1	4.1	15.6	11.5	20.87%
DK208+163	A2	9.4	4.1	15.2	11.1	15.32%
	A7	3.8	9.9	13.4	3.5	8.57%
	A1	3.7	8.5	13.3	4.8	22.92%
	A4	12.5	3.1	18.4	15.3	18.30%
	A5	8.4	1.8	10.9	9.1	7.69%
	A3	8.5	1.6	11.3	9.7	12.37%
DK208+163	A6	7.6	4.8	13.7	8.9	14.61%
	A2	7.9	4.9	14.7	9.8	19.39%
	A7	2.1	10	11.9	1.9	10.53%
	A1	1.8	9.7	11.4	1.7	5.88%

Εικόνα 2.30: Μετατοπίσεις των τμημάτων DK208 + 133 έως DK208 + 163 στην κύρια σήραγγα.

### 2.5.3. Συμπεράσματα

Σε αυτή την ανάλυση δημιουργήθηκε μια τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση για τη διασταύρωση δυο σηράγγων σε σιδηροδρομική γραμμή με σκοπό την μελέτη και την παρακολούθηση των παραμορφώσεων, που δημιουργούνται. Συγκρίνοντας τα δεδομένα της ανάλυσης, συνοψίζονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:



- Η οπή της διασταύρωσης των σηράγγων έχει μεγάλη επίδραση στην κατανομή των παραμορφώσεων στην κύρια σήραγγα. Αναλυτικά, σε θέσεις μακριά από την διασταύρωση εμφανίζεται μια συμμετρική κατανομή της πλαστικής ζώνης. Ωστόσο, στις περιοχές κοντά στην διασταύρωση με επιρροή από αυτήν, η μη συμμετρική κατανομή της πλαστικής ζώνης οφείλεται στην επίδραση και την συμπεριφορά της βραχομάζας λόγω της εκσκαφής της διασταύρωσης των σηράγγων. Η απόσταση των περιοχών που επηρεάζονται από την διασταύρωση των σηράγγων είναι της τάξης 1,5 φορές της διαμέτρου της δευτερεύουσας σήραγγας. Επιπλέον στην περιοχή τομής των σηράγγων, το βάθος της πλαστικής ζώνης δεν αλλάζει κατά την διαδικασία εκσκαφής του άνω, του μεσαίου και του κατώτερου τμήματος εκσκαφής. Στην θέση όμως χωρίς την επιρροή της διασταύρωσης το βάθος της πλαστικής ζώνης αυξάνεται με κατά την διαδικασία εκσκαφής του άνω, του μεσαίου και του κατώτερου τμήματος εκσκαφής.
- Η οπή της διασταύρωσης των σηράγγων έχει μεγάλη επίδραση στην μετατόπιση του μετώπου εκσκαφής από την κύρια σήραγγα στην δευτερεύουσα. Λόγω της ύπαρξης της διασταύρωσης, οι μετατοπίσεις της διατομής της κύριας σήραγγας στο σημείο της οπής της διασταύρωσης αυξάνονται συνεχώς κατά την εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας. Κατά την διάρκεια εκσκαφής του μετώπου εκσκαφής από την κύρια στην δευτερεύουσα σήραγγα οι μετατοπίσεις που προκαλούνται οφείλονται στην δράση εκσκαφής του άνω, του μεσαίου και του κατώτερου τμήματος εκσκαφής. Κατά τη διαδικασία εκσκαφής, η μετατόπιση μειώνεται σε τρία στάδια. Η επιρροή των μετατοπίσεων στο μέτωπο εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας είναι πολύ πιο σημαντική από την επίδραση της πλαστικής ζώνης στην κύρια σήραγγα.
- Η διασταύρωση των σηράγγων προκαλεί σημαντικές παραμορφώσεις στην κύρια και δευτερεύουσα σήραγγα. Η μη συμμετρική κατανομή των παραμορφώσεων στην κύρια σήραγγα και στο μέτωπο εκσκαφής της δευτερεύουσας σήραγγας εμφανίζεται λόγω της ύπαρξης και της δημιουργίας της διασταύρωσης των σηράγγων. Η δημιουργία της διασταύρωσης των σηράγγων έχει μεγαλύτερη επιρροή στην μη συμμετρική κατανομή των παραμορφώσεων στο μεσαίο και στο κατώτερο τμήμα εκσκαφής της κύριας σήραγγας και μικρότερη στο ανώτερο τμήμα. Η περιοχή επιρροής της κύριας σήραγγας είναι της τάξης 1,5 φορές της διαμέτρου δεξιά και αριστερά της διασταύρωσης. Για τον λόγο αυτό πρέπει να ενισχυθεί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα η περιοχή της κύριας σήραγγας δεξιά και αριστερά της διασταύρωσης με απόσταση κατά 2,2 φορές της διαμέτρου της δευτερεύουσας σήραγγας.

### 3. Αριθμητικές Αναλύσεις

Για τη διερεύνηση της διαφοροποίησης των φορτίων στις διασταυρώσεις των κύριων σηράγγων με την δευτερεύουσα σήραγγα πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Οι τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις προτιμήθηκαν γιατί προσομοιώνουν με επάρκεια τις συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης που επικρατούν στην διασταύρωση της κύριας με την δευτερεύουσα σήραγγα και μέσω αυτών μπορεί να δοθεί καλύτερη εκτίμηση της αλληλεπίδρασης που επικρατεί στην περιοχή κοντά στην διασταύρωση των σηράγγων. Συγκεκριμένα, προσομοιώνουν με επάρκεια την αποτόνωση, την παραμορφωσιακή απόκριση και την ανακατανομή τάσεων του γεωυλικού που πραγματοποιούνται κατά τη διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας και την αλληλεπίδραση των συγκεκριμένων φαινομένων μεταξύ των δυο κύριων σηράγγων και της δευτερεύουσας, που τις ενώνει. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο πρόβλημα που διερευνήθηκε η εκτέλεση τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων θεωρήθηκε επιβεβλημένη, ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της εφαρμογής διάφορων μέτρων υποστήριξης στην κύρια και δευτερεύουσα σήραγγα.

#### 3.1. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus v6.14

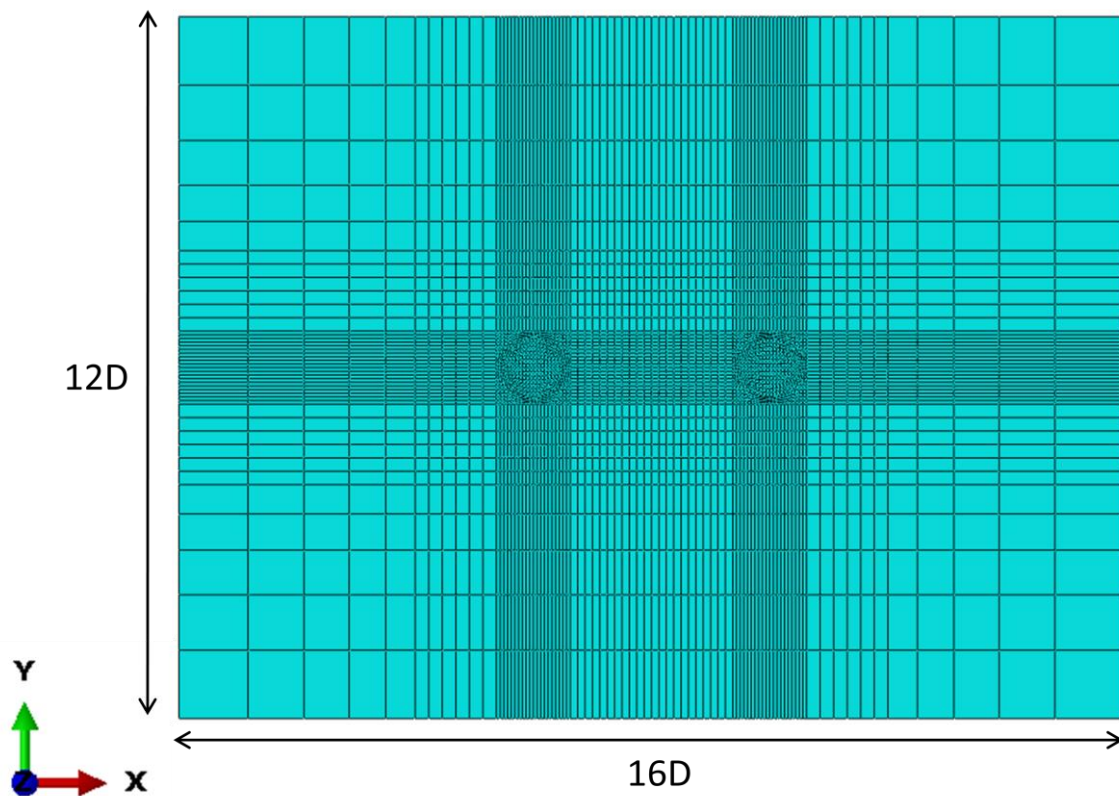
Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.14 χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εκτελεστούν οι τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Θεωρείται ένα από τα πιο εξελιγμένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητες πραγματοποίησης απαιτητικών αναλύσεων και προσομοίωσης πολύπλοκων γραμμικών και μη προβλημάτων που αφορούν στα προβλήματα της επιστήμης του μηχανικού.

Στο συγκεκριμένο λογισμικό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να κλιμακώνει την ιστορία του μοντέλου σε μια αλληλουχία βημάτων (steps). Κάθε βήμα είναι μια περίοδος απόκρισης συγκεκριμένου τύπου, μιας στατικής φόρτισης, μιας δυναμικής απόκρισης κ.τ.λ. Ο προσδιορισμός του βήματος περιλαμβάνει τον τύπο της διαδικασίας (στατική ανάλυση τάσεων, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας κ.τ.λ.), τις παραμέτρους ελέγχου για την χρονική ολοκλήρωση, τις φορτίσεις και γενικά τα αποτελέσματα που ζητείται να εξαχθούν. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η ίδια η ανάλυση μπορεί να επιμεριστεί σε δύο βήματα ή και περισσότερα έτσι ώστε να δίνεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από αυτά.

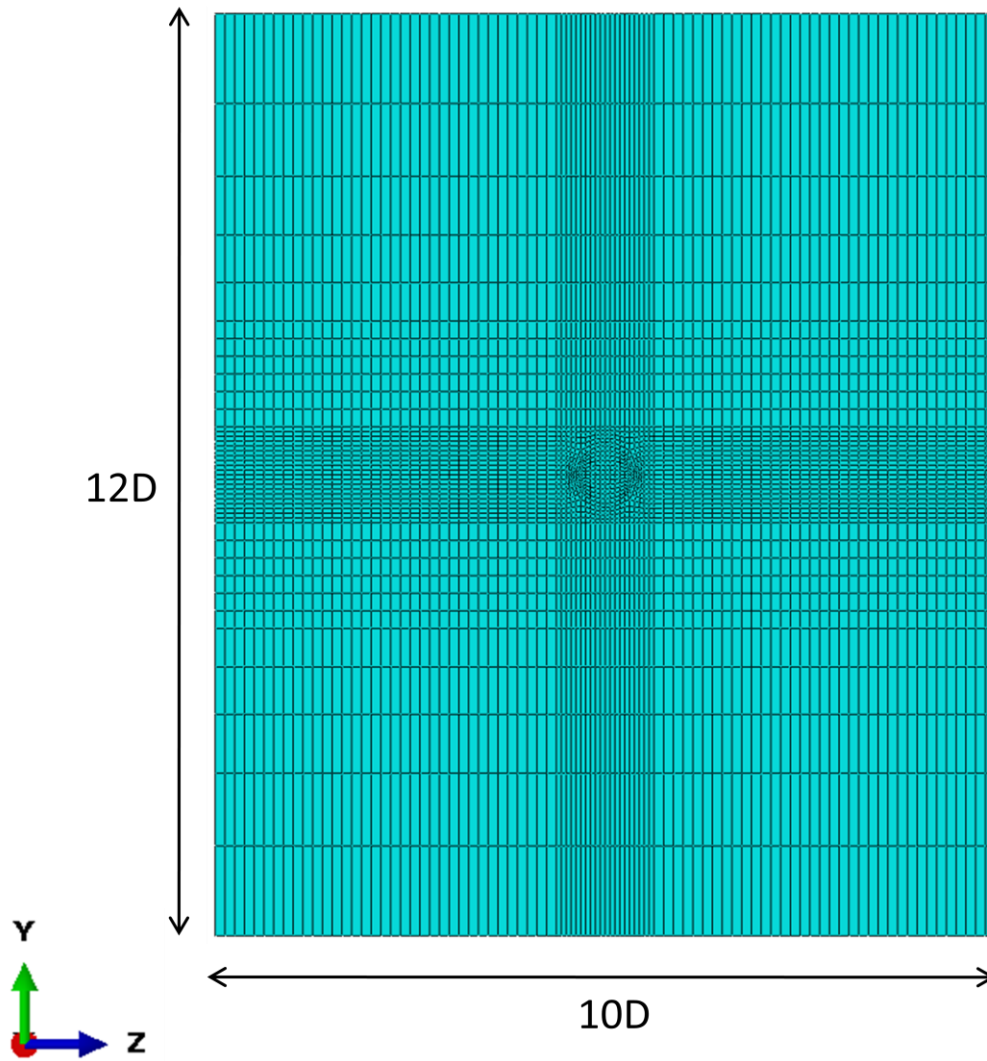
Για την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία: δημιουργήθηκε το αρχείο δεδομένων (input file) το οποίο συγκροτήθηκε με συγκεκριμένη μεθοδολογία, με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Στο αρχείο δεδομένων (input file) πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των κόμβων (nodes), των πεπερασμένων στοιχείων εδάφους, κελύφους (solid elements, shell elements αντίστοιχα), των ιδιοτήτων των γεωυλικών και των άλλων υλικών (material properties), του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου (initial conditions), των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions) και των στοιχείων για τον προσδιορισμό των ζητούμενων (output) και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα ζητούμενα (output) είναι τα εξής: οι μετακινήσεις που προκύπτουν από τα φορτία και την αλληλεπίδραση των σηράγγων (U), τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (SF, SM), οι ελαστικές και οι πλαστικές παραμορφώσεις (E, PE). Επίσης, για αυτά τα μεγέθη εξάχθηκαν τα αποτελέσματα για όλους τους χρόνους και τα στάδια εκσκαφής ούτως ώστε να παρατηρηθεί η εξέλιξη τους καθώς γίνεται η διάνοιξη των δυο κύριων σηράγγων και η εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας, που τις ενώνει.

### 3.1.1. Γεωμετρία και Κάνναβος Προσομοιωμάτων

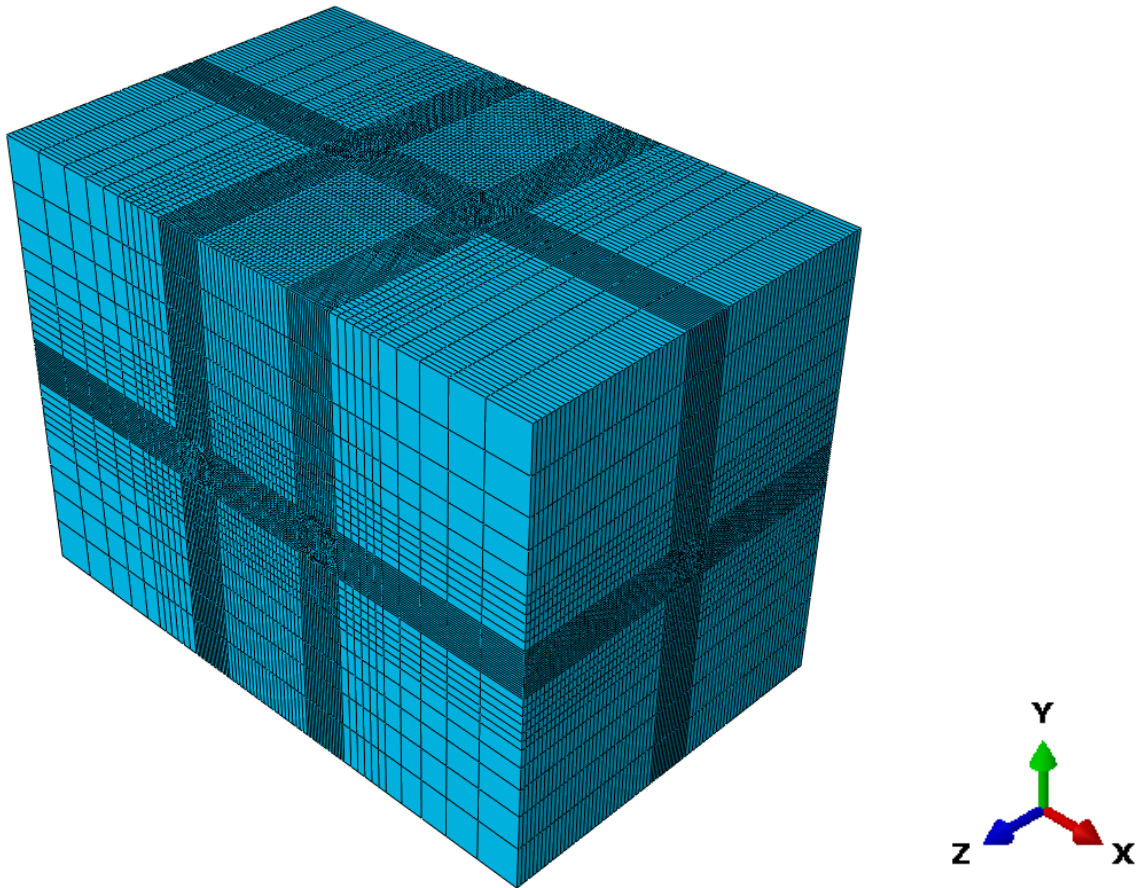
Το γεωμετρικό προσομοίωμα, που δημιουργήθηκε, αποτελείται από τον εξωτερικό όγκο της βραχομάζας, τις δυο κύριες σήραγγες και την δευτερεύουσα συνδετήρια σήραγγα. Ο εξωτερικός όγκος της βραχομάζας κατά τον άξονα X έχει μήκος  $L=16D=128$  m, κατά τον άξονα Y έχει μήκος  $L=12D=96$  m και κατά τον άξονα Z έχει μήκος  $L=10D=80$  m. Οι δυο κύριες σήραγγες είναι παράλληλες μεταξύ τους, έχουν μήκος  $L=10D=80$  m και κυκλική άνοιγμα με ακτίνα  $R=4$  m και κατασκευάζονται παράλληλα με τον άξονα Z, δηλαδή κατά μήκος της πλευράς των 80 m του εξωτερικού όγκου της βραχομάζας. Η δευτερεύουσα συνδετήρια σήραγγα μεταξύ των δυο κύριων σηράγγων σχεδιάζεται παράλληλα με τον άξονα X, έχει κυκλική οπή με ακτίνα  $R=3$  m και μήκος  $L=16D=128$  m. Το συνολικό προσομοίωμα του μοντέλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1 με άξονες X-Y, στην Εικόνα 3.2 με άξονες Z-Y και στην Εικόνα 3.3 με άξονες X-Y-Z. Τέλος, η γεωμετρία των σηράγγων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4.



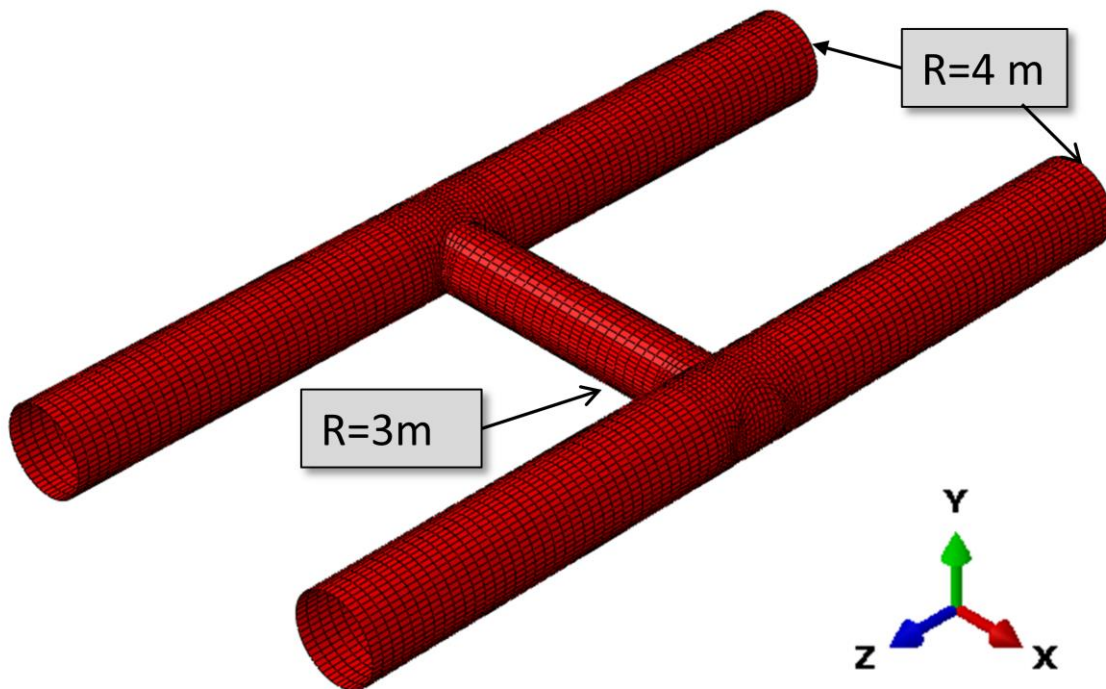
Εικόνα 3.1: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου στο επίπεδο X-Y.



Εικόνα 3.2: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου στο επίπεδο Z-Y.



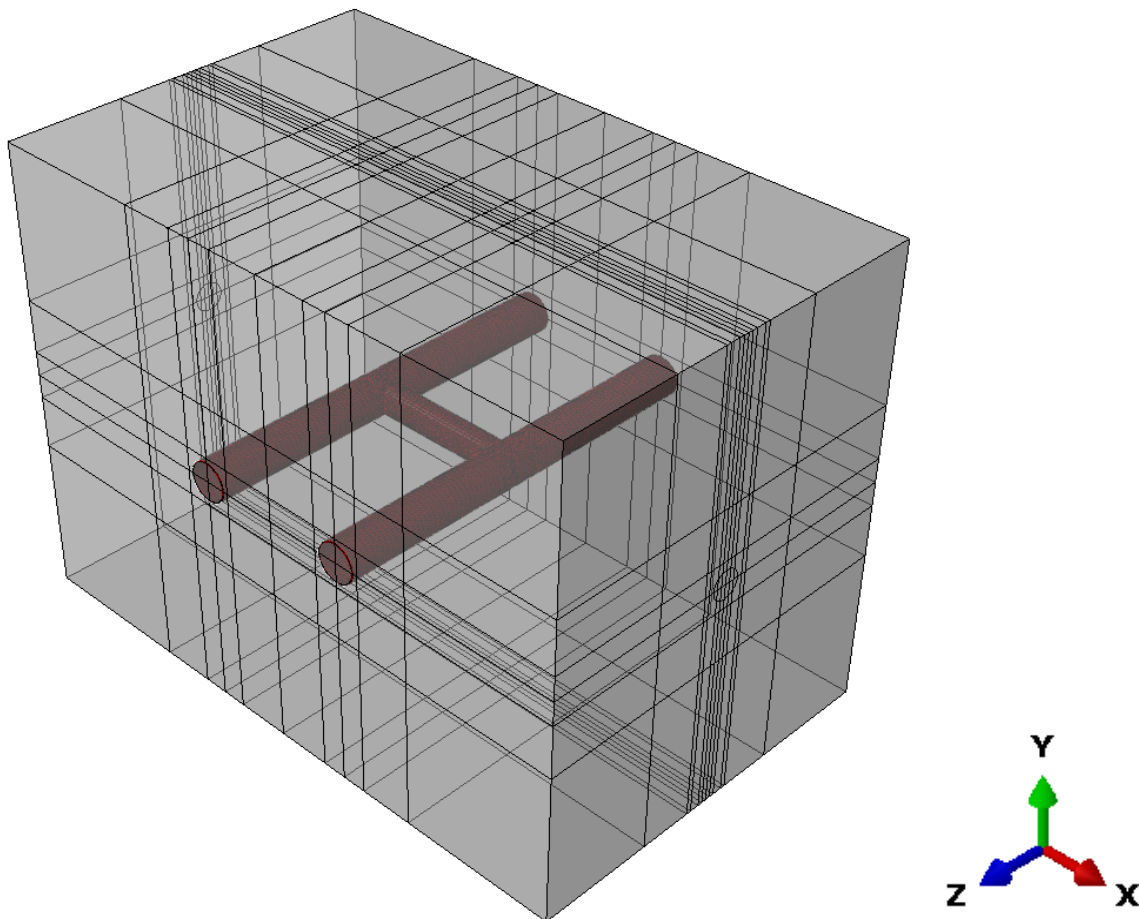
Εικόνα 3.3: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου στο χώρο X-Y-Z.



Εικόνα 3.4: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κύριων σηράγγων και δευτερεύουσας σήραγγας.

### 3.1.2. Διαμόρφωση & Διακριτοποίηση Καννάβων Προσομοιωμάτων

Οι κάνναβοι των προσομοιωμάτων διαμορφώθηκαν με κριτήριο την ενίσχυση της πυκνότητας στις περιοχές εξαγωγής των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πύκνωση των καννάβων στις περιοχές κοντά στις σήραγγες όπου παρουσιάζεται ελαστοπλαστική απόκριση του γεωυλικού, ανακατανομές τάσεων, μετακινήσεις και πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ στις περιοχές μακριά από τις σήραγγες πραγματοποιήθηκε αραιώση των καννάβων, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος για την ολοκλήρωση των αριθμητικών αναλύσεων. Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται η διαμόρφωση των καννάβων. Οι συνοριακές συνθήκες των προσομοιωμάτων που πρέπει να ικανοποιούνται είναι: i) η παρεμπόδιση (δέσμευση) των οριζόντιων μετακινήσεων στα πλευρικά όρια των προσομοιωμάτων καθώς και των κατακόρυφων μετακινήσεων στο άνω και το κάτω όριο των προσομοιωμάτων με την εφαρμογή κυλίσεων και ii) οι σταθερές τάσεις του εδάφους. Οι κάνναβοι των προσομοιωμάτων διαμορφώθηκαν με οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (C3D8) για την προσομοίωση του γεωυλικού και με τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (S4) για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέτρο υποστήριξης των σηράγγων. Το προσομοίωμα αποτελείται συνολικά από 359717 κόμβους (nodes), 344336 πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) και 15381 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements).



Εικόνα 3.5: Διαμόρφωση και Διακριτοποίηση Καννάβων Προσομοιώματος.



### 3.2. Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων

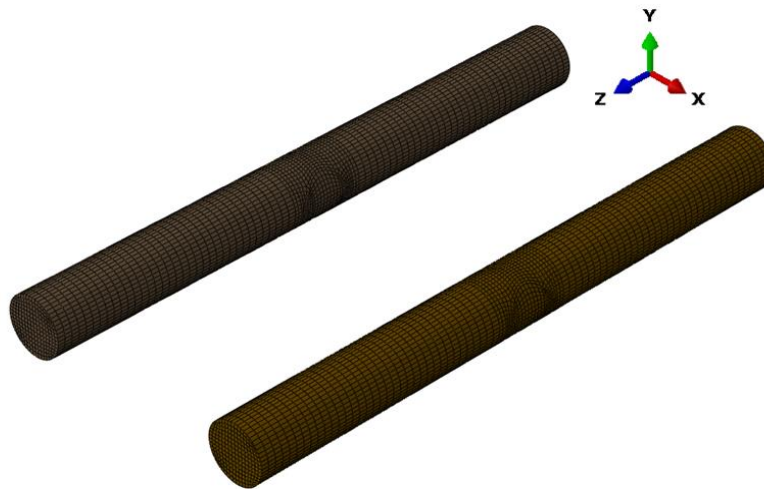
Τα βήματα των αριθμητικών αναλύσεων είναι συνολικά 16 και περιγράφονται παρακάτω.

➤ **Αρχικό βήμα**

Υπολογισμός του αρχικού εντατικού πεδίου και επιβολή τάσεων.

➤ **Βήμα 1<sup>ο</sup>**

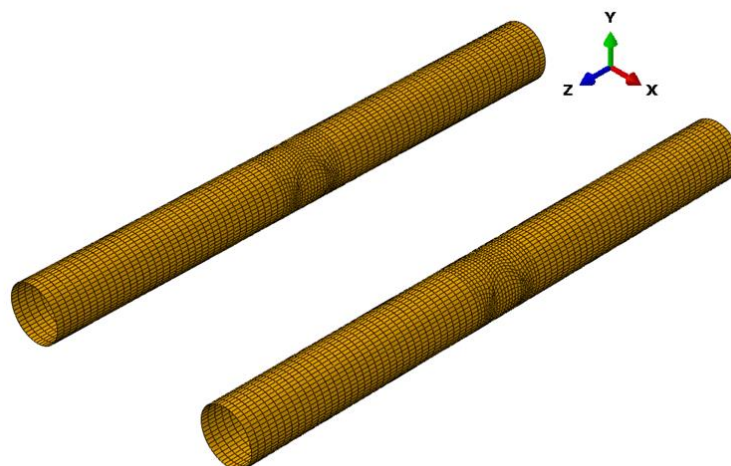
Στο 1<sup>ο</sup> βήμα εκσκάπτονται ταυτόχρονα οι δυο κύριες σήραγγες κυκλικής οπής και ακτίνας  $R=4$  m κατά τον άξονα Z και γίνεται αποτόνωση του αρχικού εντατικού πεδίου.



Εικόνα 3.6: Εκσκαφή Κύριων Σηράγγων.

➤ **Βήμα 2<sup>ο</sup>**

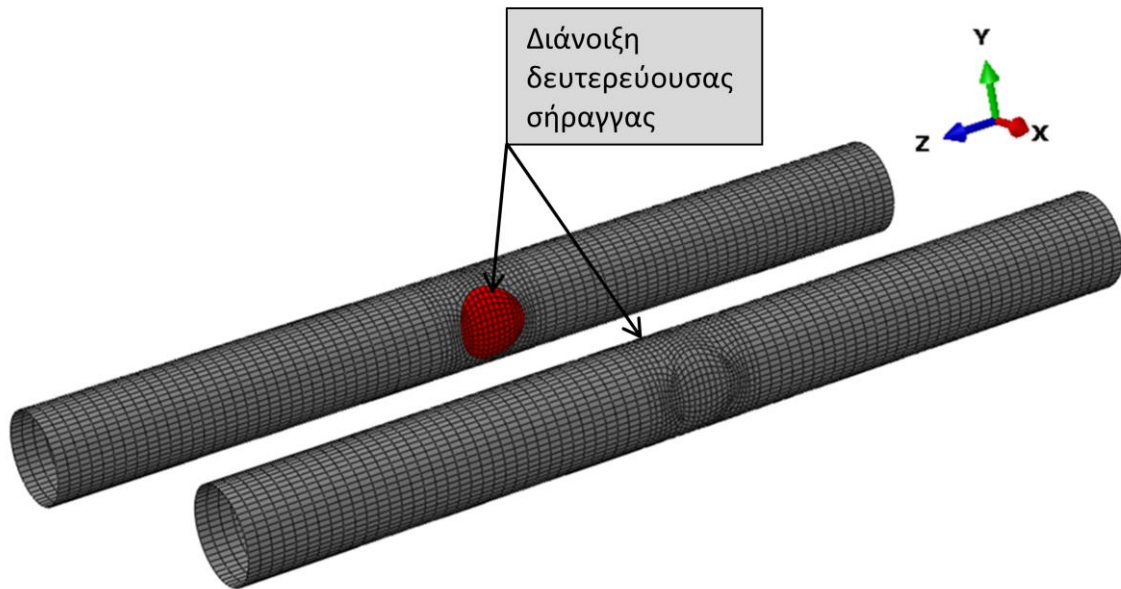
Αφού έχει πραγματοποιηθεί η πλήρης αποτόνωση στις δυο κύριες σήραγγες τοποθετείται σε αυτές το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέτρο υποστήριξης.



Εικόνα 3.7: Υποστήριξη Κύριων Σηράγγων.

➤ Βήμα 3<sup>ο</sup>

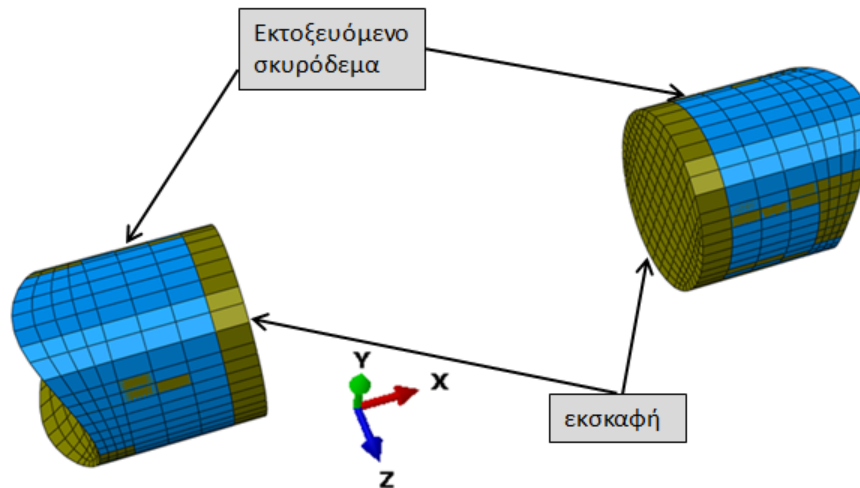
Αφού έχουν κατασκευαστεί οι δυο κύριες σήραγγες και υποστηριχθεί στα προηγούμενα βήματα, στο βήμα 3 γίνεται η διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας ανοίγοντας κυκλικές οπές στο σκυρόδεμα των κύριων σηράγγων κάθετα στον άξονα Z και παράλληλα στον άξονα X. Η διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας γίνεται ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές της μέσω των δυο κύριων σηράγγων.



Εικόνα 3.8: Διάνοιξη Δευτερεύουσας Σήραγγας.

➤ Βήμα 4° έως 16°

Αρχίζει η εκσκαφή και η υποστήριξη της δευτερεύουσας σήραγγας από τις δυο κύριες σήραγγες ταυτόχρονα, δηλαδή και από την δεξιά πλευρά και από την αριστερή πλευρά της. Η εκσκαφή γίνεται κάθε ένα μέτρο και αφού σκάβεται το κάθε τμήμα του ενός μέτρου, υποστηρίζεται στο επόμενο βήμα, καθώς σκάβεται το επόμενο τμήμα. Η διαδικασία σταματάει στο 16° βήμα που έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή της δευτερεύουσας σήραγγας και από τις δυο πλευρές διάνοιξης.



Εικόνα 3.9: Εκσκαφή και Υποστήριξη Δευτερεύουσας Σήραγγας.

### 3.3. Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων

#### 3.3.1. Γεωμετρικές & Κατασκευαστικές Παράμετροι Σηράγγων

- ✓ Διάμετρος Κύριων Σηράγγων ( $D$ ) και Δευτερεύουσας Σήραγγας ( $d$ )

Διερευνήθηκε μία τιμή της διαμέτρου:  $D = 8 \text{ m}$  για τις κύριες σήραγγες και  $d = 6 \text{ m}$  για την δευτερεύουσα σήραγγα.

- ✓ Ύψος Υπερκείμενων ( $H$ )

Το ύψος υπερκείμενων είναι η απόσταση του διαμήκη άξονα των κύριων σηράγγων από το ελεύθερο πεδίο του γεωλικού. Η τιμή του ύψους υπερκείμενων είναι:  $H = 10D = 80 \text{ m}$  και  $H = 20D = 160 \text{ m}$  (για βαθιές σήραγγες).

- ✓ Μήκη Κύριων Σηράγγων ( $L$ ) και η μεταξύ τους Απόσταση ( $W$ )

Το μήκος των κύριων σηράγγων είναι  $L = 10D = 80 \text{ m}$ . Οι άξονες των δυο κύριων σηράγγων απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $W = 3D = 24 \text{ m}$ .

### 3.3.2. Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωυλικού

Η συμπεριφορά της βραχομάζας προσδιορίζεται από το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek-Brown όπως διατυπώθηκε στον γενικευμένο τρισδιάστατο χώρο τάσεων από τους Kanvadas και Kalos(2017) και εισάγεται στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus μέσω υπορουτίνας.

#### ✓ Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά της Βραχομάζας

Στο μοντέλο που μελετάται η μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας παίρνει τιμές:  $\sigma_{ci} = 10, 20, 30$  MPa. Αντίστοιχα, η ποιότητα της βραχομάζας χαρακτηρίζεται από τον δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI με τιμές: **GSI = 10, 20, 30, 40, 50** και από την παράμετρο MR με τιμές: **MR = 350, 400, 500**. Το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας της κάθε βραχομάζας προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$E_i = MR \times \sigma_{ci} \text{ (MPa)}.$$

Η ολική αντοχή της βραχομάζας  $\sigma_{cm}$  προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο Hoek-Brown ως εξής:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \times \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \times [m_b / (4 + s)]^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \text{ με παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown}$$

- $m_i = 7, 10, 12$
- $m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right)$
- $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$
- $\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$ .

#### ✓ Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )

Στο προσομοίωμα του μοντέλου που μελετήθηκε το ειδικό βάρος του γεωυλικού θεωρήθηκε  $\gamma = 25$  KN/ m.

#### ✓ Λόγος Poisson ( $\nu$ )

Ο λόγος του Poisson του γεωυλικού θεωρήθηκε  $\nu = 0.3$ .

#### ✓ Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων ( $K_o$ )

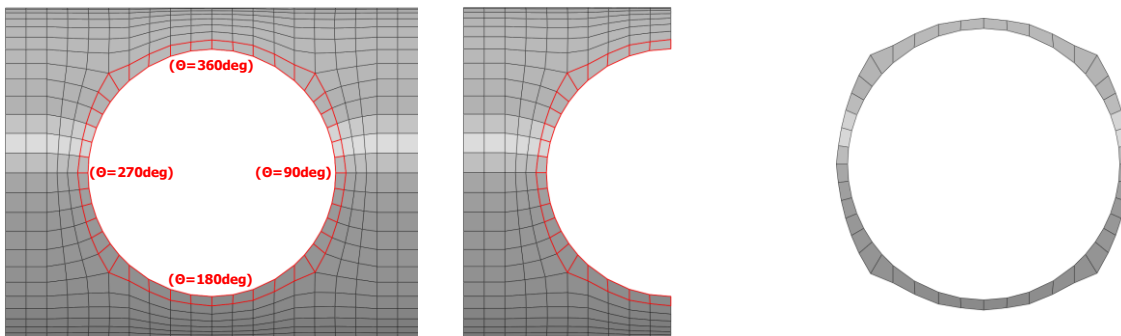
Ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων του γεωυλικού είναι ο λόγος των οριζόντιων τάσεων προς τις κατακόρυφες τάσεις και καθορίζει το γεωστατικό εντατικό πεδίο και επηρεάζει τις διεκτροπικές τάσεις. Διερευνήθηκαν οι παρακάτω τιμές του συντελεστή οριζόντιων τάσεων:  $K_o = 0.5, 1.0, 1.5$ .

✓ **Συντελεστής Αποτόνωσης ( $\lambda$ )**

Ο συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda$  εκφράζει την σύγκλιση της βραχομάζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης. Οι τιμές του συντελεστή αποτόνωσης είναι:  $\lambda = 0.7, 0.6, 0.5$ .

### 3.3.3. Σχήματα Διατομής Σηράγγων

- ✓ **Κατηγορία I:** Κυκλική διατομή για τις δυο κύριες και για την δευτερεύουσα σήραγγα με ολομέτωπη εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας και άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Εικόνα 3.10: Ολομέτωπη εκσκαφή συνδετήριας σήραγγας κυκλικής διατομής.

### 3.3.4. Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης

✓ **Πάχος ( $d_{sh}$ )**

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε  $d_{sh} = 0.4 \text{ m}$ .

✓ **Ειδικό Βάρος ( $\gamma_{sh}$ )**

Το ειδικό βάρος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε  $\gamma_{sh} = 25 \text{ KN/ m}^3$ .

✓ **Μέτρο Παραμορφώσιμότητας ( $E_{sh}$ )**

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε  $E_{sh} = 20 \text{ GPa}$ .

✓ **Λόγος Poisson ( $\nu_{sh}$ )**

Ο λόγος του Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε  $\nu_{sh} = 0.2$ .

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1 Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων**

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές	Μονάδες	
Γεωμετρικές Κατασκευαστικές Παράμετροι Σήραγγας	Διάμετρος Κύριων Σηράγγων	D	8	m
	Διάμετρος Δευτερεύουσας Σήραγγας	d	6	m
	Ύψος Υπερκείμενων	H	80	m
	Μήκος Κύριων Σηράγγων	L	80	m
Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωλικού	Μονοαξονική Αντοχή Βραχομάζας	$\sigma_{ci}$	10, 20, 30	MPa
	Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής	GSI	10, 20, 30, 40, 50	-
	Ειδικό Βάρος	$\gamma$	25	kN/m <sup>3</sup>
	Λόγος του Poisson	$\nu$	0.3	-
	Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων	$K_0$	0.5, 1.0, 1.5	-
	Συντελεστής Αποτόνωσης	$\lambda$	0.7, 0.6, 0.5	-
Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	Πάχος	$d_{sh}$	0.4	m
	Ειδικό Βάρος	$\gamma_{sh}$	25	kN/m <sup>3</sup>
	Μέτρο Παραμορφωσιμότητας	$E_{sh}$	20	GPa
	Λόγος του Poisson	$\nu_{sh}$	0.2	-



### 3.3.5. Αναλύσεις με διαφορετικές παραμέτρους μελέτης

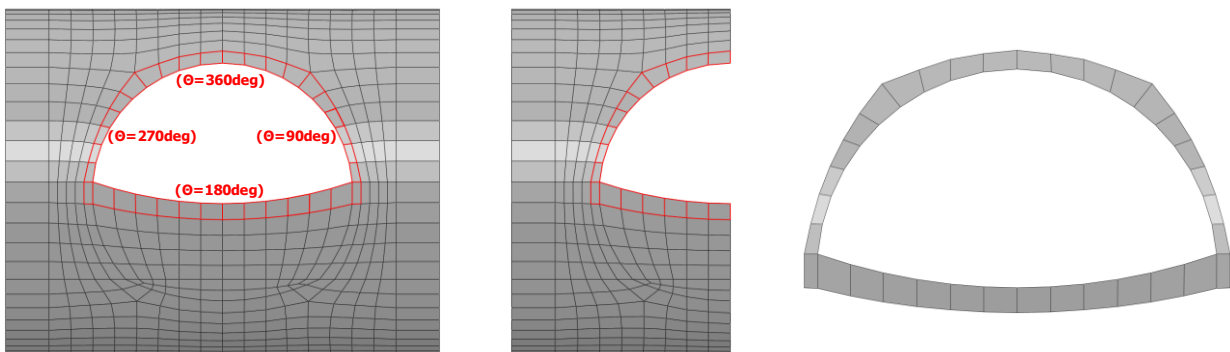
Για την πιο ασθενή βραχομάζα με την μικρότερη ολική αντοχή  $\sigma_{cm}$ , για συντελεστή οριζόντιων τάσεων  $K_0 = 1.0$  και για όλες τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda = 0.7, 0.6, 0.5$  μελετώνται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αναλύσεων, που βασίζονται στην ενίσχυση της υποστήριξης των σηράγγων. Οι τρεις περιπτώσεις είναι οι εξής :

- ✓ Αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όλο το μήκος των κύριων σηράγγων και της δευτερεύουσας σήραγγας από  $d_{sh} = 0.4 \text{ m}$  σε  $d_{sh} = 0.8 \text{ m}$ .
- ✓ Αύξηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όλο το μήκος των κύριων σηράγγων και της δευτερεύουσας σήραγγας από  $E_{sh} = 20 \text{ GPa}$  σε  $E_{sh} = 30 \text{ GPa}$ .
- ✓ Ταυτόχρονη αύξηση του πάχους και του μέτρου παραμορφωσιμότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όλο το μήκος των κύριων σηράγγων και της δευτερεύουσας σήραγγας με τιμές  $d_{sh} = 0.8 \text{ m}$  και  $E_{sh} = 30 \text{ GPa}$ .

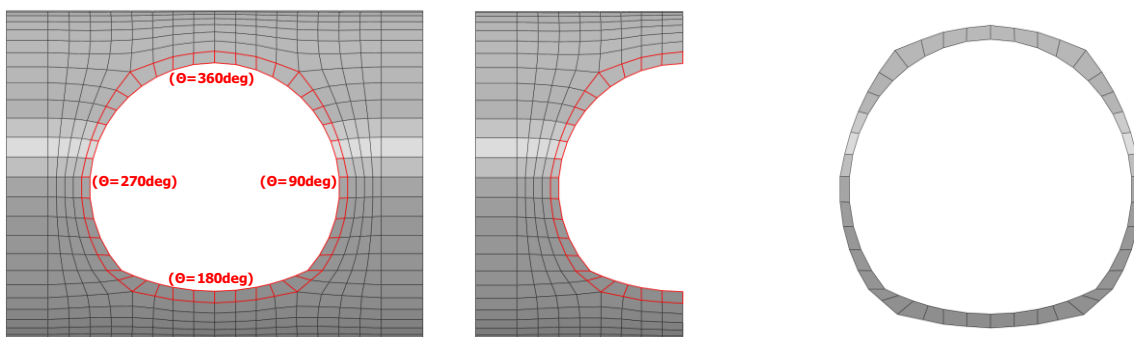
### 3.3.6. Αναλύσεις με γεωμετρικές αλλαγές στο μοντέλο μελέτης

Η γεωμετρία της διατομής των σηράγγων είναι μια παράμετρος που επηρεάζει στην λειτουργία του μοντέλου, που μελετάται. Για τον λόγο αυτό μελετήθηκαν δυο επιπλέον περιπτώσεις με αλλαγή στην διατομή των σηράγγων για την πιο ασθενή βραχομάζα με την μικρότερη ολική αντοχή  $\sigma_{cm}$  και την πιο ισχυρή βραχομάζα με την μεγαλύτερη ολική αντοχή  $\sigma_{cm}$ . Οι δυο αυτές διαφορετικές περιπτώσεις μελετήθηκαν για όλες τις τιμές του για συντελεστή οριζόντιων τάσεων  $K_0 = 0.5, 1.0, 1.5$  και για όλες τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda = 0.7, 0.6, 0.5$ . Ταυτόχρονα με την αλλαγή της γεωμετρίας της διατομής των σηράγγων μελετήθηκε για αυτές τις περιπτώσεις και παραμέτρους, που αναφέρθηκαν, και διαφορετικός τρόπος εκσκαφής και υποστήριξης της δευτερεύουσας σήραγγας. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιπτώσεις αυτές:

- ✓ **Κατηγορία II:** Κυκλική διατομή για τις δυο κύριες σήραγγες και Πεταλοειδής διατομή για την δευτερεύουσα σήραγγα με:
  - i. Ολομέτωπη Εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας και άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
  - ii. Τμηματική Εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας, δηλαδή εκσκαφή του άνω τμήματος της διατομής «up» της δευτερεύουσας σήραγγας και τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στην συνέχεια εκσκαφή του υπόλοιπου κάτω τμήματος της διατομής «down» της δευτερεύουσας σήραγγας και τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

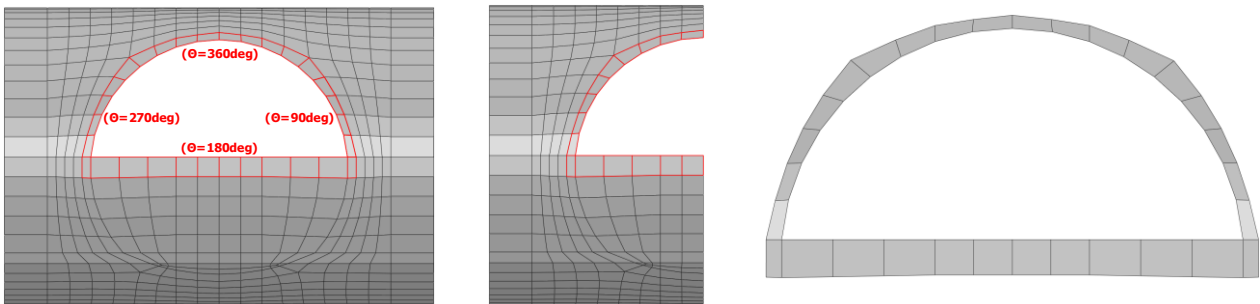


Εικόνα 3.11: Εκσκαφή του άνω τμήματος «up» της πεταλοειδούς διατομής της συνδετήριας σήραγγας.

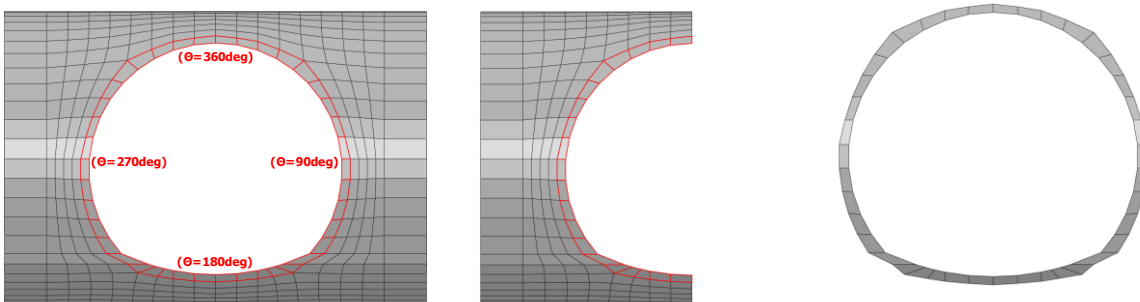


Εικόνα 3.12: Εκσκαφή του κάτω τμήματος «down» και ολοκλήρωση της πεταλοειδούς διατομής της συνδετήριας σήραγγας.

- ✓ **Κατηγορία III:** Πεταλοειδής διατομή για τις δυο κύριες σήραγγες και για την δευτερεύουσα σήραγγα με:
- Ολομέτωπη Εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας και άμεση υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
  - Τμηματική Εκσκαφή της δευτερεύουσας σήραγγας, δηλαδή εκσκαφή του άνω τμήματος της διατομής «up» της δευτερεύουσας σήραγγας και τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στην συνέχεια εκσκαφή του υπόλοιπου κάτω τμήματος της διατομής «down» της δευτερεύουσας σήραγγας και τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Εικόνα 3.13: Εκσκαφή του άνω τμήματος «up» της πεταλοειδούς διατομής της συνδετήριας σήραγγας.



Εικόνα 3.14: Εκσκαφή του κάτω τμήματος «down» και ολοκλήρωση της πεταλοειδούς διατομής της συνδετήριας σήραγγας.

