



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων »

Επίδραση διάνοιξης σήραγγας στα μέτρα στήριξης  
προϋπάρχουσας γειτονικής σήραγγας

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Πριμέτης

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων »

Επίδραση διάνοιξης σήραγγας στα μέτρα στήριξης  
προϋπάρχουσας γειτονικής σήραγγας

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Πριμέτης

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 24/02/2020:

Π. Νομικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Επίδραση διάνοιξης σήραγγας στα μέτρα στήριξης προϋπάρχουσας γειτονικής σήραγγας» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Η διάνοιξη νέων σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, που διέρχονται κάτω από άλλες προϋπάρχουσες, είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όλο και περισσότερο σε όλο τον κόσμο τα τελευταία χρόνια, λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού των πόλεων. Η ανάπτυξη των υπολογιστών των τελευταίων ετών έχει συμβάλει σημαντικά στη μελέτη τέτοιων έργων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η συνέχιση της εύρυθμης λειτουργίας και της κυκλοφορίας στην προϋπάρχουσα σήραγγα, κατά την εξέλιξη του νέου έργου.

Έτσι, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια προσομοίωσης, στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup>, αντίστοιχων περιπτώσεων. Πρώτα, έγιναν προσομοιώσεις απλών μοντέλων σε ελαστική βραχομάζα και στη συνέχεια μίας πραγματικής περίπτωσης, την οποία ακολούθησαν παραμετρικές αναλύσεις. Σκοπός των παραπάνω ήταν να ληφθεί αρχικά μία πρώτη εικόνα για την επίδραση της διάνοιξης μίας νέας σήραγγας σε μία προϋπάρχουσα και στη συνέχεια να εξαχθούν συμπεράσματα που θα είναι χρήσιμα μελλοντικά στο σχεδιασμό και την κατασκευή αντίστοιχων έργων.

Για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή Π. Νομικό για την ουσιαστική συμβολή και καθοδήγησή του.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Επίδραση διάνοιξης σήραγγας στα μέτρα στήριξης προϋπάρχουσας γειτονικής σήραγγας» έγινε προσπάθεια προσομοίωσης διάνοιξης σήραγγας που διέρχεται κάθετα και σε ανισοσταθμία με άλλη προϋπάρχουσα σήραγγα σε αστικό περιβάλλον. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό FLAC<sup>3D</sup>.

Στόχος της εργασίας αποτέλεσε η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση διάφορων παραμέτρων κατά τη διάνοιξη μίας νέας σήραγγας κάθετα σε μία προϋπάρχουσα. Για να συμβεί αυτό, αρχικά, κατασκευάστηκαν αριθμητικά μοντέλα ανεπένδυτων κυκλικών σηράγγων, οι οποίες έχουν διανοιχθεί σε ελαστική γεωμάζα. Σε αυτή την πρώτη φάση αναλύσεων, μεταβάλλεται η ποιότητα της γεωμάζας καθώς και η απόσταση μεταξύ των σηράγγων και εξάγονται τα πρώτα συμπεράσματα.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η δεύτερη φάση αναλύσεων, όπου προσομοιώθηκε η πραγματική περίπτωση διάνοιξη σήραγγας κάτω από προϋπάρχουσα στην περιοχή του Σύδνεϋ της Αυστραλίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με αυτά της μελέτης των Liu και των συνεργατών του (2009) και ύστερα από τη σύγκλισή τους ακολούθησε η τρίτη φάση προσομοιώσεων.

Στην τελευταία φάση αναλύσεων, μεταβλήθηκαν παράμετροι όπως η απόσταση μεταξύ των σηράγγων, το βάθος τους, η σειρά διάνοιξής τους καθώς και η ποιότητας της γεωμάζας και εξετάζεται η συμμετοχή καθεμιάς από αυτές στην επίδραση που έχει μια νέα σήραγγα στην προϋπάρχουσα. Στα εισαγωγικά κεφάλαια γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση περιπτώσεων που σχετίζονται με το θέμα της εργασίας και του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup>. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη διπλωματική εργασία.

# ABSTRACT

In the present thesis, entitled “Effects of tunnelling on support systems of a nearby existing tunnel” there has been an attempt to simulate the construction of a new tunnel undercrossing an existing tunnel. The simulation was completed using the three dimensional finite difference program FLAC<sup>3D</sup>.

The aim of this effort was to draw conclusions about the effect of various parameters when constructing an existing tunnel under- or overcrossing an existing tunnel. For this to happen, numerical models of unsupported, circular tunnels have been developed. In this case, the rock mass is considered as elastic. In this first phase of analyses, Young modulus is changed as well as the distance between the tunnels and the first conclusions are drawn.

Then came the second phase of analyses, which simulated a real case of tunnelling under an existing tunnel in the Sydney area of Australia. The results are compared to those of Liu et al. (2009) study and after that comes the third phase of analyses.

In the last phase of analyses, the effects of parameters such as the distance between the tunnels, their depth, their construction sequence and the quality of rock mass were examined in the case of perpendicular crossing tunnels. At the initial chapters a bibliographic overview of cases related to the subject of this thesis and the program FLAC<sup>3D</sup> is provided. Finally, in the last chapter the conclusions reached during the whole thesis are outlined.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή .....	1
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο της παρούσας.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	5
2.1 Εισαγωγή .....	5
2.2 Η περίπτωση του Μετρό του Πεκίνου.....	5
2.3 Η περίπτωση του Μετρό της Σενζέν .....	12
2.4 Προσέγγιση του προβλήματος με μοντέλα φυγοκέντρησης .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Το λογισμικό προσομοίωσης FLAC <sup>3D</sup> .....	24
3.1 Εισαγωγή .....	24
3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών .....	25
3.3 Το πρόγραμμα FLAC <sup>3D</sup> .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πρώτη φάση προσομοιώσεων – Προσομοίωση κυκλικών ανεπένδυτων σηράγγων .....	31
4.1 Εισαγωγή .....	31
4.2 Αναλύσεις με μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας.....	31
4.2.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων .....	32
4.2.2 Διάνοιξη των σηράγγων .....	33
4.2.3 Αποτελέσματα.....	33
4.3 Αναλύσεις με μεταβολή της απόστασης μεταξύ των σηράγγων .....	37
4.3.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων .....	38
4.3.2 Διάνοιξη των σηράγγων .....	38
4.3.3 Αποτελέσματα.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Δεύτερη φάση προσομοιώσεων – Αριθμητική ανάλυση πραγματικής περίπτωσης .....	42
5.1 Εισαγωγή .....	42
5.2 Η περίπτωση του Σύδνεϋ .....	42
5.2.1 Η επιλογή της περίπτωσης .....	42
5.2.2 Περιγραφή της περίπτωσης.....	43
5.3 Κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου .....	46
5.3.1 Προετοιμασία του μοντέλου .....	46
5.3.2 Διάνοιξη της πρώτης (προϋπάρχουσας) σήραγγας .....	53
5.3.3 Διάνοιξη της δεύτερης (νέας) σήραγγας.....	59

5.4 Αποτελέσματα .....	60
5.4.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας .....	60
5.4.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας.....	71
5.4.3 Μετακινήσεις.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Τρίτη φάση προσομοιώσεων – Παραμετρικές αναλύσεις.....	78
6.1 Εισαγωγή .....	78
6.2 Αύξηση της κάθετης απόστασης μεταξύ των σηράγγων .....	78
6.2.1 Αποτελέσματα.....	79
6.2.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας .....	80
6.2.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας.....	89
6.2.1.3 Μετακινήσεις .....	91
6.3 Μεταβολή του βάθους διάνοιξης των σηράγγων .....	92
6.3.1 Αποτελέσματα.....	93
6.3.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας .....	93
6.3.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας.....	102
6.3.1.3 Μετακινήσεις .....	103
6.4 Μεταβολή του μέτρου Ελαστικότητας της βραχομάζας .....	105
6.4.1 Αποτελέσματα.....	106
6.4.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας .....	107
6.4.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας.....	124
6.4.1.3 Μετακινήσεις .....	126
6.5 Αλλαγή της σειράς διάνοιξης των σηράγγων .....	127
6.5.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας .....	128
6.5.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας.....	136
6.5.3 Μετακινήσεις.....	138
6.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	140



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα.....	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	149

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Σε μεγάλο βαθμό λόγω της ανάγκης να αναπτυχθούν ολοένα πιο αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον υποδομές στις συνωστισμένες αστικές περιοχές, ο αριθμός των σηράγγων που κατασκευάζονται έχει σταδιακά αυξηθεί κατά τη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών. Για το λόγο αυτό, η περίπτωση να χρειαστεί να σχεδιασθούν και να κατασκευαστούν νέες σήραγγες πλησίον ήδη υπάρχουσών σηράγγων, συγκεντρώνει μεγάλες πιθανότητες. Για παράδειγμα, το έργο επέκτασης της γραμμής Τζουμπιλί στο Λονδίνο, περιλάμβανε την κατασκευή τμημάτων με δίδυμες σήραγγες, οι οποίες εκτείνονταν παράλληλα και η μία πάνω από την άλλη (Liu et al., 2009). Σε αυτή την περίπτωση, είναι σημαντικό να διερευνηθούν οι επιδράσεις της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα μέτρα υποστήριξης των υπάρχουσών γειτονικών σηράγγων, έτσι ώστε οι υπάρχουσες σήραγγες να μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν με ασφάλεια τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ σηράγγων που βρίσκονται κοντά έχει μελετηθεί στο παρελθόν με τη χρήση μίας ποικιλίας μεθόδων: Παρατήρηση στο πεδίο, θεωρητική ανάλυση και μέθοδοι εργαστηριακών δοκιμών (Attewell and Woodman 1982, Sagaseta 1987, Loganathan and Poulos 1998, Ye et al. 2015). Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή της ιδέας για κατασκευή σηράγγων κοντά σε προϋπάρχουσες έχει προκαλέσει ευρέως ανησυχία αλλά και ενδιαφέρον λόγω της συνθετότητας του προβλήματος και της δυσκολίας τους. Αρκετές μελέτες, έχουν ερευνήσει την απόδοση υπάρχουσών κατασκευών που επηρεάζονται από την κατασκευή νέων σηράγγων. Οι έρευνες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που έκαναν χρήση: αναλυτικών λύσεων (Attewell et. al 1986, Avramidis and Morfidis 2006, Zhang et. al 2014), αριθμητικών μοντέλων (Migliazza et al. 2009, Liu and Zhang 2011, Liu et. al 2014), και παρατηρήσεων πεδίου (Burland 1995, Cooper et al. 2002, Fang et al. 2015). Από αυτές τις δημοσιευμένες έρευνες, λίγες ήταν αυτές που

εξέτασαν τη συμπεριφορά που είχαν αστικές σήραγγες, λόγω της διάνοιξης νέων υποκείμενων σηράγγων και οι αναφορές σχετικά με τη διάνοιξη πολλαπλών υποκείμενων σηράγγων ήταν ακόμα λιγότερες.

Η μέθοδος παρατήρησης στο πεδίο παραμένει πάντα το κλειδί για την κατανόηση της συμπεριφοράς της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών σηράγγων, αλλά συχνά τα δεδομένα παραμορφώσεων και καθιζήσεων είναι ελλιπή και δεν μπορούν να γίνουν συγκρίσεις με μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου. Επιπλέον, είναι σαφές ότι οι δοκιμές μοντέλων στο εργαστήριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μελέτη περιορισμένων στοιχείων. Οι εμπειρικές / αναλυτικές μέθοδοι που σχετίζονται με πολλαπλές σήραγγες έχουν χρησιμοποιηθεί για να δώσουν λύση, επαλληλίζοντας τα ανεξάρτητα προφίλ εγκάρσιων καθιζήσεων, που έχουν εκτιμηθεί για μία μεμονωμένη εκσκαφή, για να δώσουν το προφίλ των αθροιστικών καθιζήσεων. Έτσι, οι εμπειρικές / αναλυτικές μέθοδοι, ουσιαστικά αγνοούν την παρουσία μίας υπάρχουσας σήραγγας και συνεπώς δεν είναι ρεαλιστικές. Η χρήση ρεαλιστικών αριθμητικών μοντέλων φαίνεται να είναι ο πιο υποσχόμενος τρόπος για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών και κάθετων σηράγγων.

Οι πρώτες αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση του συγκεκριμένου ζητήματος, περιλάμβαναν μία διδιάστατη προσέγγιση, στην οποία θεωρούσαν ένα τμήμα κάθετο στον άξονα της σήραγγας. Παρά όμως το γεγονός ότι οι διδιάστατες αναλύσεις έχουν δώσει καλά αποτελέσματα και έχουν φανεί χρήσιμες στο παρελθόν, παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα που είναι κρίσιμα για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Έπειτα, δε δίνουν πληροφορίες για την περίπτωση της προχώρησης μίας σήραγγας και πιο συγκεκριμένα, για τη συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης και της περιβάλλουσας γεώμαζας κατά την προχώρηση του μετώπου της σήραγγας. Έτσι λοιπόν, καθώς η συμπεριφορά της σήραγγας κατά την προχώρηση είναι ουσιαστικά τριδιάστατο πρόβλημα, είναι αδύνατο να αναπαραχθεί με ακρίβεια σε ένα διδιάστατο μοντέλο. Συνεπώς, είναι εύλογο που τα τελευταία χρόνια η έρευνα για το ζήτημα έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη τριδιάστατων αριθμητικών μοντέλων.

## 1.2 Αντικείμενο της παρούσας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» και το θέμα της αφορά στη μελέτη της επίδρασης που έχει η διάνοιξη μίας νέας σήραγγας στα μέτρα στήριξης μίας προϋπάρχουσας σήραγγας, που εκτείνεται κάθετα και σε ανισοσταθμία με την πρώτη. Για τη διερεύνηση του θέματος πραγματοποιηθήκαν αριθμητικές αναλύσεις σε πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών τριών διαστάσεων. Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το πέτρωμα θεωρείται ως (ισοδύναμο) συνεχές μέσο. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το FLAC<sup>3D</sup> (Version 4.00, Itasca, 2009).

Πραγματοποιήθηκαν τρεις φάσεις προσομοιώσεων ξεκινώντας από τις απλούστερες που είχαν ως στόχο την κατανόηση του προβλήματος και εν συνεχεία ακολούθησαν οι πιο σύνθετες που αποσκοπούσαν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για περιπτώσεις όπου σχεδιάζονται και λαμβάνουν χώρα τέτοιου τύπου έργα.

Αρχικά, γίνεται μία ανασκόπηση σε αντίστοιχες περιπτώσεις του παρελθόντος και που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Αναφέρονται περιπτώσεις από το μετρό πόλεων της Κίνας, μια χώρα που λόγω του μεγάλου πληθυσμού της ήταν από τις πρώτες που κατέφυγε στη λύση των διασταυρούμενων γραμμών στα σιδηροδρομικά δίκτυα των πόλεων της και σημειώνονται οι τρόποι με τους οποίους διαχειρίστηκε το θέμα και αντιμετωπίστηκαν πιθανές δυσκολίες. Επιπλέον, γίνεται λόγος και για έναν ακόμη τρόπο μελέτης του ζητήματος, μέσω εργαστηριακών δοκιμών φυγοκέντρισης.

Στη συνέχεια, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών καθώς και της λειτουργίας του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup> και της FISH, της γλώσσας προγραμματισμού που είναι ενσωματωμένη σε αυτό. Η προσομοίωση γίνεται σε τρεις διαστάσεις και η γεωμάζα προσομοιώνεται ως σύνολο ζωνών πεπερασμένων διαφορών. Στο ίδιο κεφάλαιο, περιγράφεται και ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνονται τα μέτρα στήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Το επόμενο κεφάλαιο αφορά στην πρώτη φάση των αριθμητικών προσομοιώσεων που έγιναν με το FLAC<sup>3D</sup>. Σε αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής και η επίλυση μοντέλων κυκλικών ανεπένδυτων σηράγγων που διανοίχθηκαν σε ελαστική βραχομάζα. Στόχος αυτής της φάσης των προσομοιώσεων ήταν η εξοικείωση με το πρόγραμμα μέσα από την προετοιμασία και την επίλυση απλών μοντέλων. Ωστόσο, μετά το πέρας της προέκυψαν και χρήσιμα συμπεράσματα.

Το κεφάλαιο 5 αφορά στη δεύτερη φάση προσομοιώσεων, η οποία αποτέλεσε το βασικό τμήμα της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε η προσομοίωση μίας πραγματικής περίπτωσης διάνοιξης νέας σήραγγας, η οποία διέρχεται κάθετα, κάτω από άλλη προϋπάρχουσα σήραγγα στην περιοχή του Σύδνεϋ της Αυστραλίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε αυτή τη φάση, συγκρίθηκαν με τα μεγέθη που δόθηκαν από τους Liu et al. (2009) στην αντίστοιχη δημοσίευσή τους. Έτσι, έχοντας ένα βαθμονομημένο μοντέλο ακολούθησε η τρίτη και τελευταία φάση προσομοιώσεων.

Η τελευταία φάση προσομοιώσεων περιλαμβάνει την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων για την πραγματική περίπτωση του Σύδνεϋ που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 5. Στις αναλύσεις αυτές, μεταβλήθηκαν οι τιμές παραμέτρων που φαίνεται να παίζουν ρόλο σε περιπτώσεις τέτοιων έργων και συγκεκριμένα μεταβλήθηκαν η απόσταση μεταξύ των σηράγγων, το βάθος εκσκαφής τους, η σειρά διάνοιξής τους και η κατηγορία της βραχομάζας. Τα αποτελέσματα καθεμιάς από τις προαναφερθείσες αναλύσεις συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της πραγματικής περίπτωσης του κεφαλαίου 5.

Τέλος, ακολουθεί ένα κεφάλαιο που συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

#### 2.1 Εισαγωγή

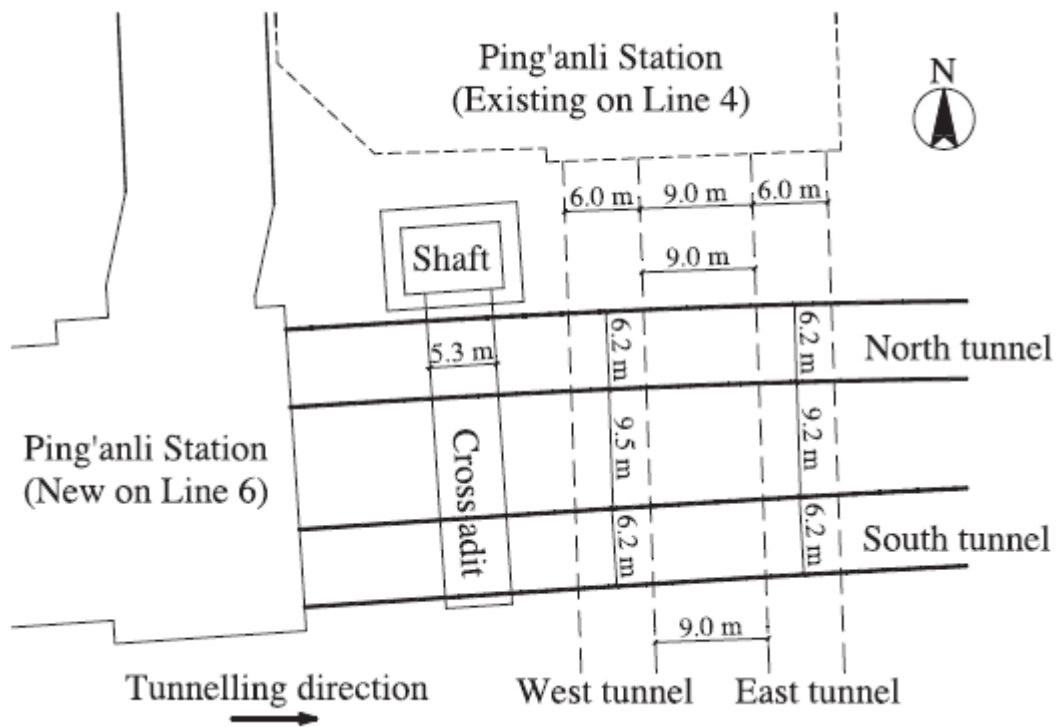
Όπως έχει ήδη αναφερθεί από το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, το φαινόμενο της διάνοιξης νέων σηράγγων κάτω ή και πάνω από προϋπάρχουσες σε αστικό περιβάλλον, είναι σχετικά νέο. Αυτό συμβαίνει καθώς ο πληθυσμός των μεγάλων πόλεων αυξάνεται ολοένα και περισσότερο και μαζί αυξάνονται και οι ανάγκες για γρήγορη, υπόγεια μετακίνηση σε περισσότερα σημεία των πόλεων. Το γεγονός ότι η εμφάνιση του φαινομένου συνέπεσε χρονικά με τη μεγάλη ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης τέτοιων προβλημάτων, οδήγησε τους ερευνητές κατά κανόνα αποκλειστικά, στη χρήση τους για να φέρουν σε πέρας ανάλογες περιπτώσεις. Με σκοπό τόσο την ανάδειξη της σπουδαιότητας του ζητήματος, όσο και των τρόπων μελέτης και αντιμετώπισης αντίστοιχων καταστάσεων, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις διάνοιξης σήραγγας κάτω (ή και πάνω) από προϋπάρχουσα σήραγγα σε αστικό περιβάλλον.

#### 2.2 Η περίπτωση του Μετρό του Πεκίνου

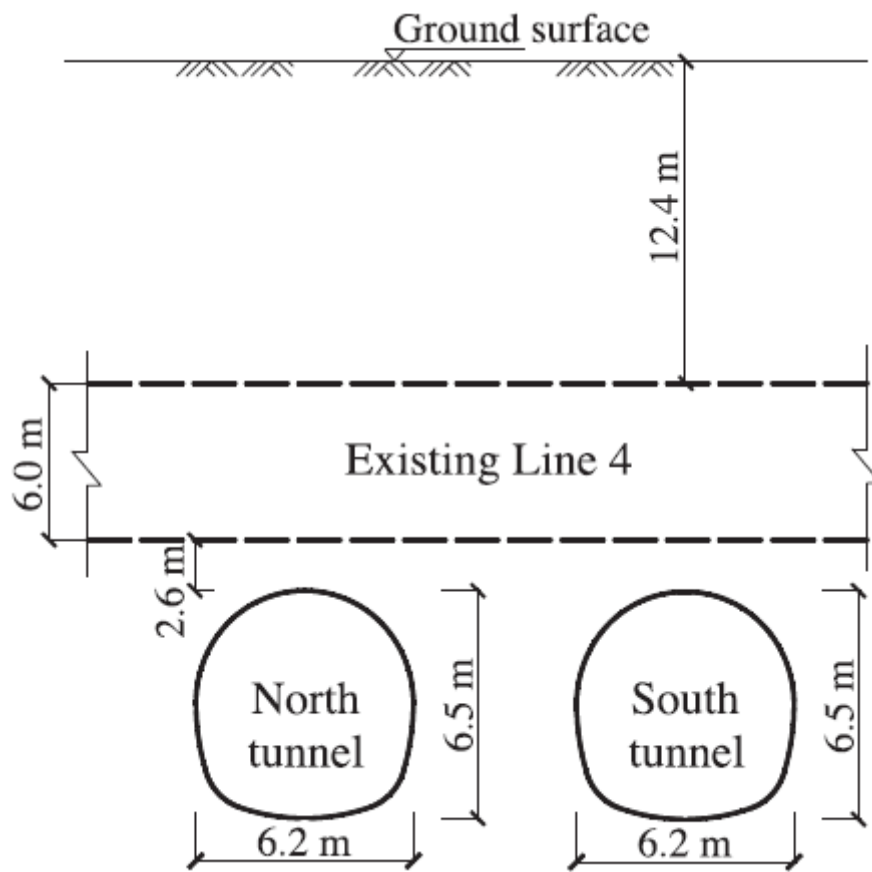
Σε αυτή την περίπτωση μελετήθηκε η εκσκαφή δίδυμων σηράγγων, σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, κάτω από προϋπάρχουσες δίδυμες σήραγγες στην πρωτεύουσα της Κίνας, το Πεκίνο.

Μία κάτοψη και μία τομή των υπαρχουσών και των νέων σηράγγων στο σταθμό Ping'anli του Πεκίνου φαίνονται στα σχήματα 2.1 και 2.2 αντίστοιχα. Οι υπάρχουσες κυκλικές δίδυμες σήραγγες, που διατρέχουν τη διεύθυνση Βορράς – Νότος, είναι τμήματα της γραμμής 4 του υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου του Πεκίνου. Είναι παράλληλες στο οριζόντιο επίπεδο και αναφέρονται ως η «Δυτική Σήραγγα» και η «Ανατολική Σήραγγα». Η οριζόντια απόσταση μεταξύ τους είναι 9 μέτρα. Διανοίχθηκαν με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής τύπου EPB (Earth Pressure Balance). Η εξωτερική και η εσωτερική

διάμετρος των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης είναι 3 μέτρα και 2.7 μέτρα αντίστοιχα. Η επένδυση αποτελείται από 5 στοιχεία με ένα στοιχείο «κλειδί» (σχήμα 2.3). Το μήκος κάθε στοιχείου είναι 1.2 μέτρα. Το ύψος των υπερκειμένων στη θέση των υπαρχουσών σηράγγων είναι περίπου 12.4 μέτρα (Fang et al., 2014).

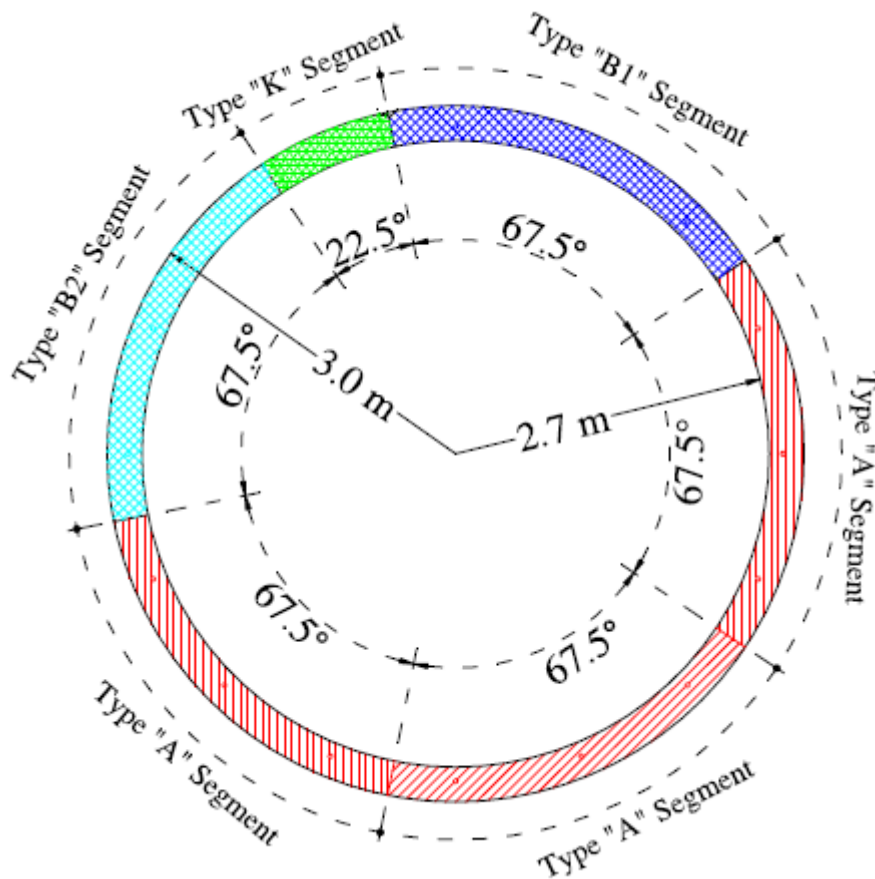


Σχ. 2.1: Κάτοψη του σταθμού Ping'anli (Fang et al., 2014)



Σχ. 2.2: Τομή στο σταθμό Ping'anli (Fang et al., 2014)

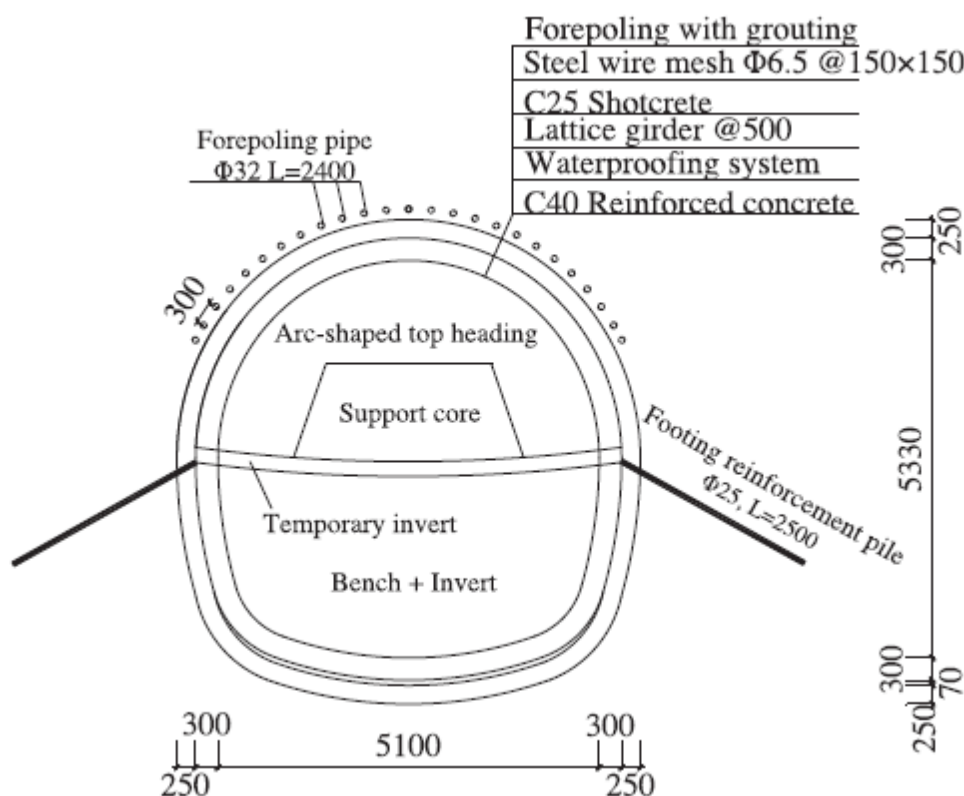




**Σχ. 2.3:** Τομή της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία των υπαρχουσών σήραγγων (Fang et al., 2014)

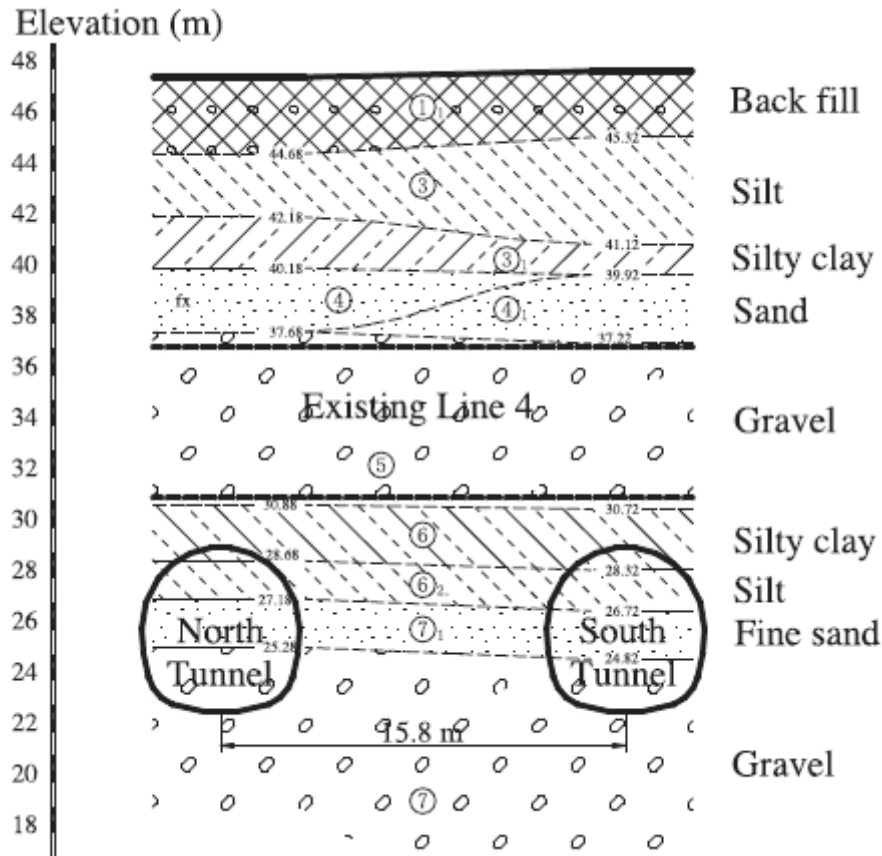
Οι νέες πεταλοειδούς διατομής δίδυμες σήραγγες, που διατρέχουν τη διεύθυνση Ανατολή – Δύση, είναι μέρος της γραμμής 6 του Μετρό του Πεκίνου. Η απόσταση μεταξύ τους είναι περίπου 9.5 μέτρα, η οποία σταδιακά μειώνεται ελαφρά από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι νέες δίδυμες σήραγγες αναφέρονται ως η «Βόρεια Σήραγγα» και η «Νότια Σήραγγα», αντίστοιχα. Διανοίχθηκαν με τη χρήση της μεθόδου της «Ρηχής Σηραγγοποιείας». Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συχνά στην Κίνα, βασίζεται στην εκσκαφή από το εργατικό δυναμικό και σχεδιάζεται ειδικά για μικρού βάθους σήραγγες, κατασκευασμένες σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου NATM και το όνομα δόθηκε από το Υπουργείο Υποδομών της Δημοκρατίας της Κίνας το 1987, ύστερα από την εκτεταμένη εφαρμογή σε πόλεις της χώρας (Fang et al., 2012). Τα πάχη της επένδυσης της πρώτης και της δεύτερης φάσης είναι 250 και 300 χιλιοστά αντίστοιχα (Fang et al., 2014). Ένα σύστημα υδατοστεγάνωσης τοποθετείται

μεταξύ των δύο φάσεων της επένδυσης. Οι νέες δίδυμες σήραγγες διανοίχθηκαν κάτω από τις υπάρχουσες και κάθετα σε αυτές. Η κάθετη απόσταση μεταξύ των νέων και των προϋπάρχουσων σηράγγων είναι μόνο 2.6 μέτρα. Η διάνοιξη των νέων σηράγγων επιλέχθηκε να γίνει σε φάσεις άνω διατομή (με πυρήνα υποστήριξης και προσωρινό ανάστροφο τόξο) – βαθμίδα – ανάστροφο τόξο (σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.4:** Τομή της νέας σήραγγας (διαστάσεις σε mm) (Fang et al., 2014)

Ένα τυπικό γεωλογικό προφίλ της περιοχής του έργου φαίνεται στο σχήμα 2.5. Από αυτό φαίνεται ότι οι υπάρχουσες σήραγγες βρίσκονται κυρίως σε χάλικες, ενώ οι καινούριες σε ιλυώδη άργιλο, ιλύες, λεπτή άμμο και χάλικες. Μερικές μέσες τιμές των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των εδαφών που λήφθηκαν από την έρευνα στο πεδίο παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.



Σχ. 2.5: Τυπικό γεωλογικό προφίλ της περιοχής του έργου (Fang et al., 2014)

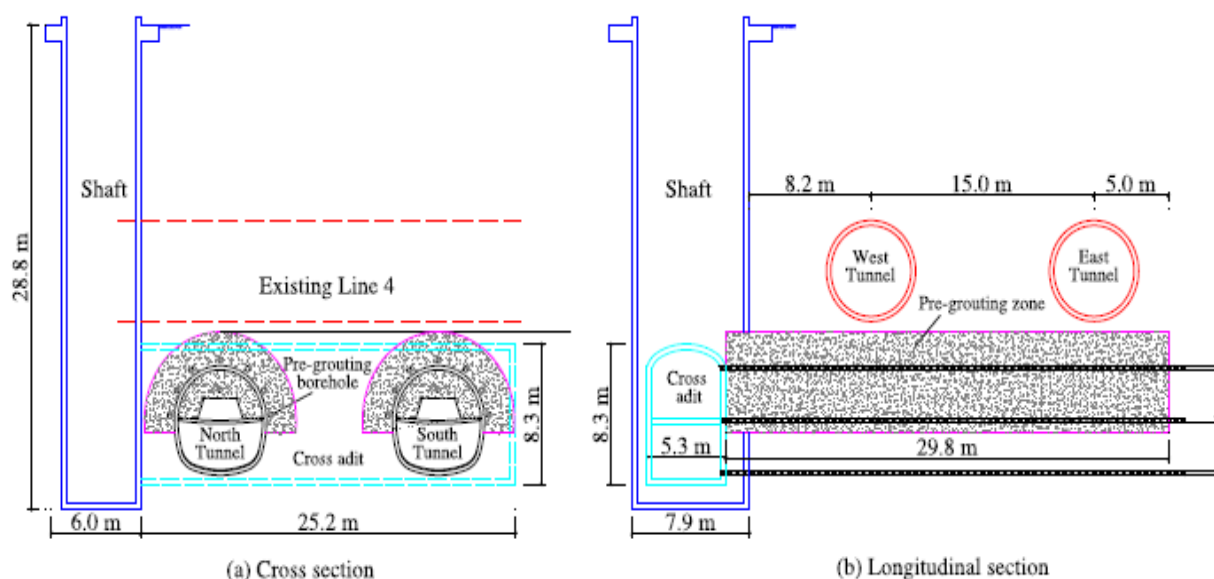
Physical and mechanical properties of soils.

ID	Group	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Water content (%)	Standard (dynamic) penetration test $N_{63.5}$	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
③	Silt	1970	20.85	12	9.4	29.3
③1	Silty clay	1980	24.58	18	23.8	16.0
④	Fine sand	2000	10.63	47	0	32.0
④1	Medium sand	2030	-	53	0	38.0
⑤	Gravel	2120	-	78 (dynamic)	0	45.0
⑥	Silty clay	1980	25.15	12	30.9	17.9
⑥2	Silt	1980	20.92	16	16.7	27.3
⑦1	Fine sand	2030	10.90	58	0	32.0
⑦	Gravel	2150	-	101 (dynamic)	0	45.0

Πίν. 2.1: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφών (Fang et al., 2014)

Σύμφωνα με το σχεδιασμό του έργου, πρώτα διανοίχθηκε ένα ορθογωνικού σχήματος κάθετο φρέαρ. Στη συνέχεια, διανοίχθηκε από το επίπεδο της βάσης του φρέατος, μια πεταλοειδούς διατομής στοά με ανάστροφο τόξο. Έπειτα, οι νέες σήραγγες διανοίχθηκαν κάθετα στις παρειές της στοάς. Πρώτα εκσκάφθηκε η βόρεια σήραγγα και ακολούθησε η νότια με μία συγκεκριμένη καθυστέρηση. Με σκοπό τη διασφάλιση των υπάρχουσών σηράγγων και τη διευκόλυνση της κατασκευής των νέων δίδυμων σηράγγων, έγιναν

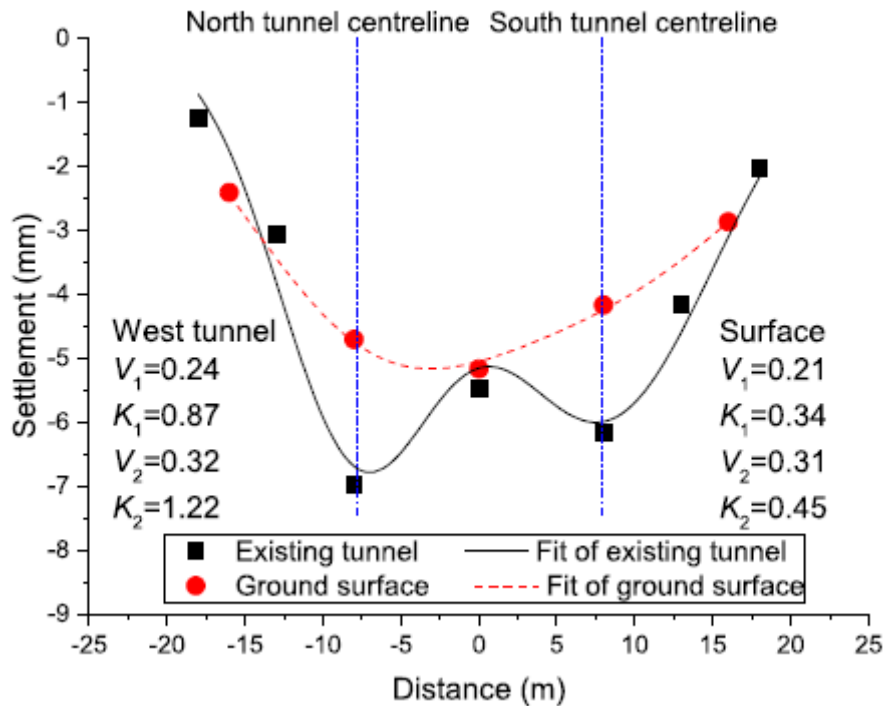
τσιμεντενέσεις μέσα και πάνω από τις νέες σήραγγες. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 8 τσιμεντενέσεις, μήκους 30 μέτρων η καθεμιά από την παρειά της στοάς προσπέλασης. Το ένεμα ήταν ένα μίγμα τσιμέντου τύπου Portland και πυριτικού νατρίου. Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν αντιληπτά μέσω της τομής και της μηκοτομής του σχήματος 2.6. Κατά την κατασκευή των νέων δίδυμων σηράγγων, χρησιμοποιήθηκαν ως βοηθητικά μέτρα δοκοί προπορείας και πάσσαλοι για τη διεύρυνση θεμελίωσης της Α' φάσης (Fang et al., 2014).



**Σχήμα 2.6:** Τσιμεντενέσεις κατά τη διάνοιξη των νέων σηράγγων (Fang et al., 2014)

Τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν τόσο κατά τη μελέτη του έργου όσο και κατά την κατασκευή του, μέσω της ενόργανης παρακολούθησης είναι τα εξής:

1. Το προφίλ των καθιζήσεων στο επίπεδο της υπάρχουσας σήραγγας, λόγω της διάνοιξης των υποκείμενων σηράγγων παρουσιάζει μία μορφή “W”, ενώ το αντίστοιχο προφίλ στην επιφάνεια παρουσιάζει τη μορφή ενός “U” (σχήμα 2.7). Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στο διαφορετικό ύψος υπερκείμενων στην εκάστοτε θέση. Όσο περισσότερο αυξάνεται το βάθος, τόσο πιο ξεκάθαρη θα είναι η μορφή “W” του προφίλ των καθιζήσεων των υπερκείμενων σηράγγων (Fang et al., 2014).



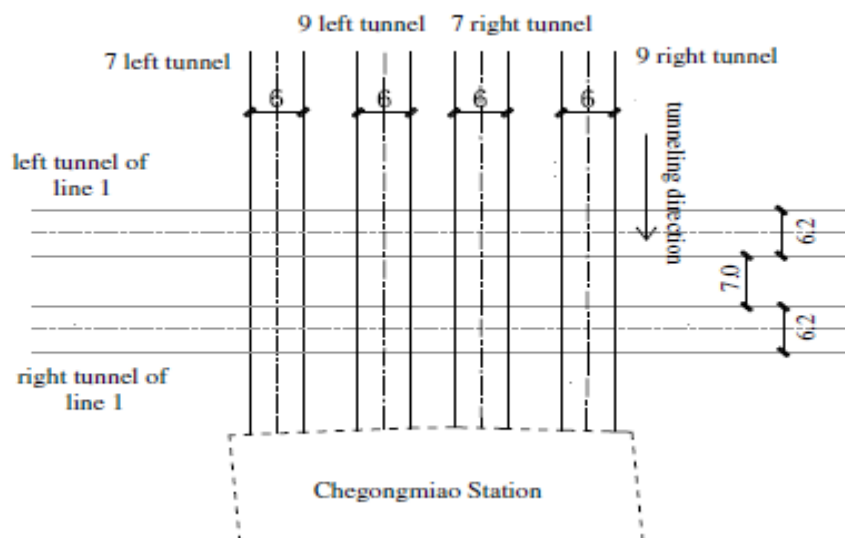
Σχ. 2.7: Προφίλ καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη των σηράγγων (Fang et al., 2014)

## 2.3 Η περίπτωση του Μετρό της Σενζέν

Η περίπτωση αυτή, διαφοροποιείται από την προηγούμενη στο ότι αυτή τη φορά διανοίγονται οι σήραγγες δύο γραμμών κάτω από την υπάρχουσα, δηλαδή τέσσερις σήραγγες.

Ο σταθμός Chegongmiao είναι ο μεγαλύτερος σταθμός μεταφοράς στην Σενζέν. Σύμφωνα με το σχέδιο ανάπτυξης του δικτύου των υπόγειων σιδηροδρόμων, τέσσερις γραμμές Μετρό, η γραμμή 1, η γραμμή 11, η γραμμή 7 και η γραμμή 9 συναντιούνται σε αυτό το σταθμό. Κάτω από τις υπάρχουσες σήραγγες της γραμμής 1, διανοίχθηκαν οι τέσσερις σήραγγες των γραμμών 7 και 9 σε ένα περιορισμένο χώρο (σχήμα 2.8). Οι υπάρχουσες δίδυμες σήραγγες, που εκτείνονται στη διεύθυνση Ανατολή – Δύση, αποτελούν τμήμα της γραμμής 1, η οποία με τη σειρά της αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά του δικτύου μεταφορών ολόκληρης της πόλης. Οι υπάρχουσες πεταλοειδείς σήραγγες κατασκευάστηκαν και ολοκληρώθηκαν το 2004. Η απόσταση μεταξύ τους είναι περίπου 7 μέτρα. Τα πάχη της μόνιμης επένδυσης και της προσωρινής υποστήριξης είναι 400 και 300 χιλιοστά, αντίστοιχα. Το ύψος και το πλάτος των διατομών των σηράγγων είναι 6.60 και

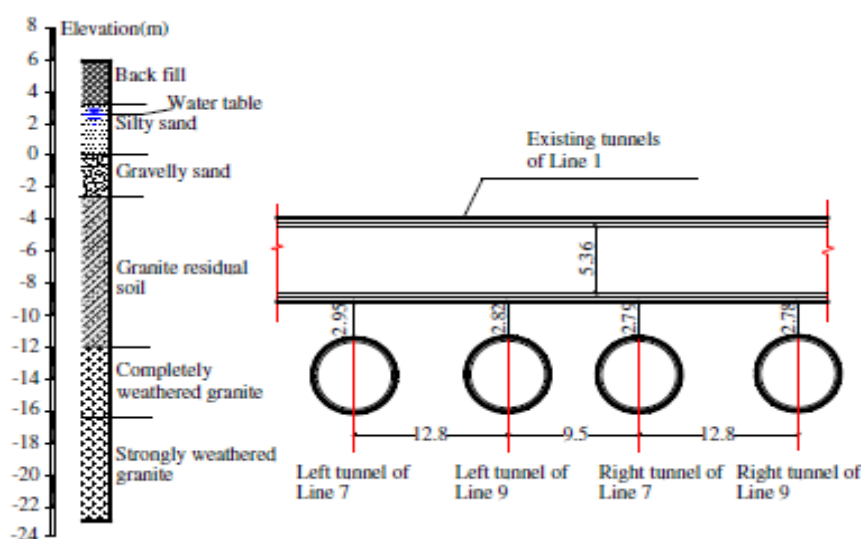
6.85 μέτρα, αντίστοιχα. Στην επιφάνεια, πάνω από τις σήραγγες, βρίσκεται ο πολυσύχναστος δρόμος Shennan, που αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες βασικές οδούς στην Σενζέν (Dalong et al., 2018).



Σχ. 2.8: Κάτοψη των σηράγγων πλησίον του σταθμού Chegongmiao (Dalong et al., 2018)

Οι νέες σήραγγες διανοίχθηκαν κάθετα, κάτω από τις υπάρχουσες δίδυμες σήραγγες με τη χρήση TBM με ασπίδα. Οι σήραγγες αυτές είναι οριζοντίως παράλληλες και αναφέρονται ως η αριστερή σήραγγα της γραμμής 7, η αριστερή σήραγγα της γραμμής 9, η δεξιά σήραγγα της γραμμής 7 και η δεξιά σήραγγα της γραμμής 9. Οι σήραγγες διανοίχθηκαν με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής τύπου EPB. Η εξωτερική και εσωτερική ακτίνα των προκατασκευασμένων στοιχείων υποστήριξης είναι 3 και 2.7 μέτρα, αντίστοιχα. Το πάχος των στοιχείων είναι 300 χιλιοστά και το πάχος του δαχτυλιδιού 1.5 μέτρο. Η επένδυση αποτελείται από πέντε στοιχεία κατασκευασμένα από σκυρόδεμα. Η τομή των νέων και των υπάρχουσών σηράγγων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9 Η απόσταση μεταξύ των νέων σηράγγων ποικίλει από 9.5 έως 12.8 μέτρα. Το ύψος των υπερκειμένων των νέων σηράγγων είναι περίπου 20 μέτρα. Οι κάθετες αποστάσεις των νέων σηράγγων από την προϋπάρχουσα κυμαίνονται από 2.78 έως 2.95 μέτρα (Dalong et al., 2018). Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι στα 2.38 μέτρα, το οποίο είναι πολύ ψηλότερα από τη στέψη της υπάρχουσας σήραγγας (σχήμα 2.9). Τη γεωλογία της περιοχής διαμορφώνουν προσχώσεις, ιλυώδης άμμος, χαλικιώδης άμμος υπολειπόμενο έδαφος από γρανίτη (“granite

residual soil” : τύπος εδάφους που συναντάται στην Νότια Κίνα) και εντελώς και ισχυρά αποσασθρωμένο γρανίτη. Το γεωλογικό προφίλ φανερώνει ότι οι υπάρχουσες σήραγγες έχουν διανοιχθεί σε υπολειπόμενο έδαφος από γρανίτη και οι νέες σήραγγες σε υπολειπόμενο έδαφος από γρανίτη και εντελώς αποσασθρωμένο γρανίτη. Μερικές από τις μέσες τιμές των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των εδαφών που λήφθηκαν από την έρευνα πεδίου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.9: Τομή των σιράγγων των γραμμών 1, 7 και 9 (Dalong et al., 2018)

Soil layer	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$C_{cu}$ (kPa)	$\varphi_{cu}$ (degrees)	$R_f$	$K$	$n$	$w_n$ (%)	$I_p$	$I_l$	SPT-N
Backfill	1,840	0.72	10.0	12.0	0.632	50.2	0.51	21.3	15.6	0.11	4.3
Silty sand	1,780	0.69	15.5	11.0	0.533	25.49	0.69	23.2	—	—	6.2
Gravelly sand	1,950	0.81	0.0	32.0	—	—	—	28.0	—	—	10.0
Granite residual soil	1,830	1.12	12.0	28.0	0.546	30.17	0.35	26.0	12.8	0.80	16.0
Completely weathered granite	1,826	1.05	15.0	31.0	0.593	97.07	0.77	22.0	14.2	0.19	21.0
Strongly weathered granite	1,780	1.02	14.0	32.0	0.682	135.2	0.56	23.8	10.4	0.06	45.5

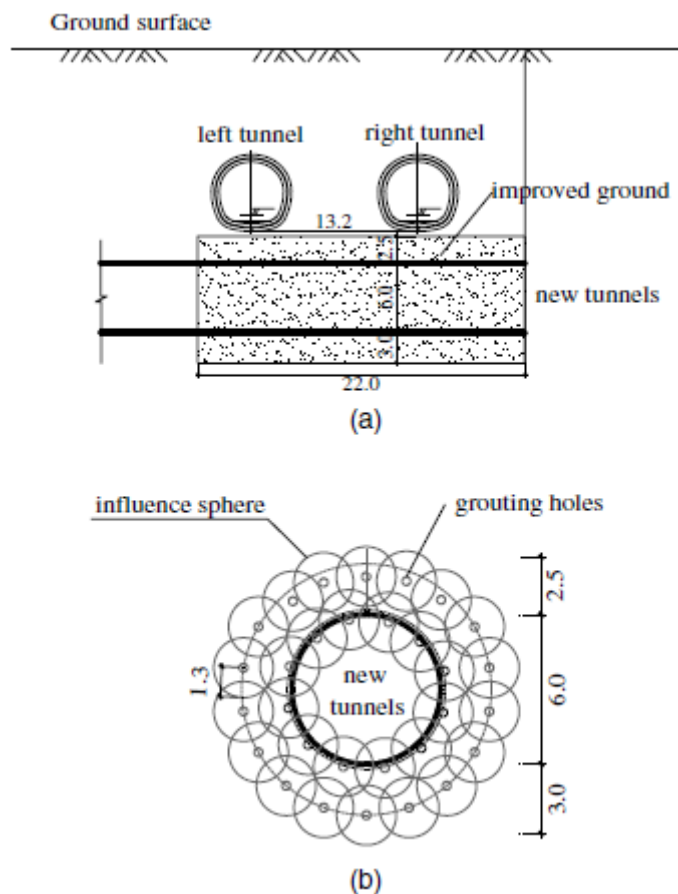
Note:  $\gamma$  = unit weight;  $e_o$  = void ratio;  $C_{cu}$  = cohesion of consolidated undrained triaxial compression test;  $\varphi_{cu}$  = friction angle of consolidated undrained triaxial compression test;  $R_f$  = destruction ratio;  $K$  and  $n$  = test parameters in Duncan-Chang model;  $w_n$  = natural water content;  $I_p$  = liquid index;  $I_l$  = plasticity index; and SPT-N = number of standard penetration test.

Πίν. 2.2: Φυσικές και μηχανικές παράμετροι των εδαφών (Dalong et al., 2018)

Όπως προαναφέρθηκε, στην επιφάνεια πάνω από τη θέση των σιράγγων βρίσκεται ο δρόμος Shennan, στον οποίο η κυκλοφορία είναι πάντα βαριά. Σε αυτή την περίπτωση, δεν ήταν δυνατή η βελτίωση του εδάφους από την επιφάνεια. Έτσι, εφαρμόστηκε μία τεχνολογία οριζόντιας ενεμάτωσης κατά την



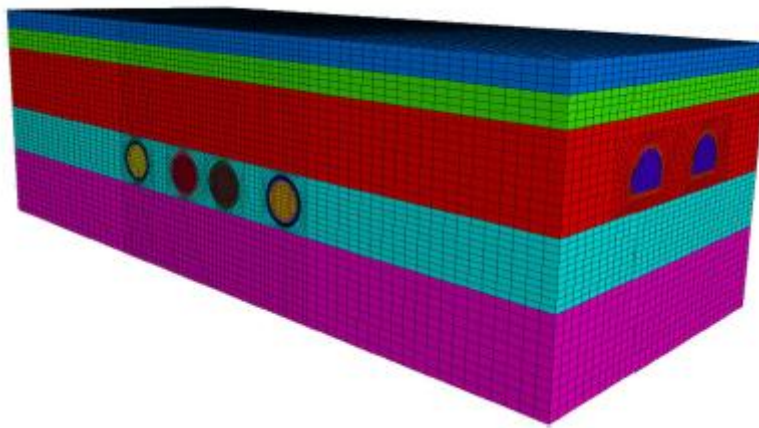
προχώρηση, για να επιτευχθεί σταδιακή βελτίωση της περιβάλλουσας γεώμαζας πριν από την κατασκευή των υποκείμενων σηράγγων (σχήμα 2.10). Το μήκος της περιοχής ενίσχυσης είναι περίπου 22 μέτρα. Διατρήθηκαν 30 διατρήματα ενεμάτωσης γύρω από κάθε σήραγγα και η απόσταση μεταξύ τους είναι περίπου 2 μέτρα. Η διάμετρος των διατρημάτων είναι 90 χιλιοστά. Για να εξασφαλιστεί καλή εργασιμότητα και γρήγορη εφαρμογή, το ένεμα αποτελούνταν από δύο υγρά. Το πρώτο αποτελούνταν κατά βάση από τσιμέντο και το δεύτερο κυρίως από υδρύαλο (Dalong et al., 2018).



**Σχ. 2.10:** Βελτιωμένη γεώμαζα γύρω από την υπάρχουσα σήραγγα (Dalong et al., 2018)

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της διάνοιξης των νέων σηράγγων έγινε χρήση λογισμικού πεπερασμένων διαφορών. Επιπλέον, κατά την πραγματοποίηση του έργου υπήρχε εγκατεστημένο πλήρες πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησης, που τελικά επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.





**Σχ. 2.11:** Μοντέλο στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών (Dalong et al.,2018)

Ύστερα από τα παραπάνω, από τη μελέτη της συγκεκριμένης περίπτωσης, εξήλθαν ορισμένα συμπεράσματα:

1. Η τεχνολογία για βελτίωση του εδάφους μέσω ενεμάτων γύρω από τη νέα σήραγγα, αποδείχθηκε πως ήταν μία καλή λύση για να προστατεύσει τις υπάρχουσες σήραγγες. Μέσω του συστήματος παρακολούθησης, αποδείχθηκε πως λόγω και της βελτίωσης του εδάφους, η μέγιστη καθίζηση της υπάρχουσας σήραγγας ήταν αρκετά μικρότερη από την προκαθορισμένα επιτρεπόμενη. Η καθημερινή λειτουργία του σιδηροδρόμου δεν διακόπηκε κατά τη διάρκεια κατασκευής των νέων σηράγγων κάτω από αυτόν.
2. Η καθίζηση της υπάρχουσας σήραγγας αυξάνονταν εμφανώς κάθε φορά που το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής περνούσε κάτω από αυτή. Η θέση της μέγιστης τελικής καθίζησης εντοπίζεται πάνω από τη κεντρική γραμμή της απόστασης που οριοθετούν οι τέσσερις νέες σήραγγες. Συγκριτικά με την καθίζηση της σήραγγας, η οριζόντια μετακίνηση των υπαρχουσών σηράγγων επηρεάστηκε λιγότερο από την διάνοιξη των υποκείμενων νέων σηράγγων.
3. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαταραχή του εδάφους που προκαλείται από την πολλαπλή διάνοιξη σηράγγων κάτω από τις υπάρχουσες, η ακαμψία του, άλλαζε κατά τη διάρκεια της κατασκευής κάθε νέας σήραγγας, κάτι το οποίο είχε σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά των υπαρχουσών σηράγγων και του περιβάλλοντος πετρώματος. Έτσι,

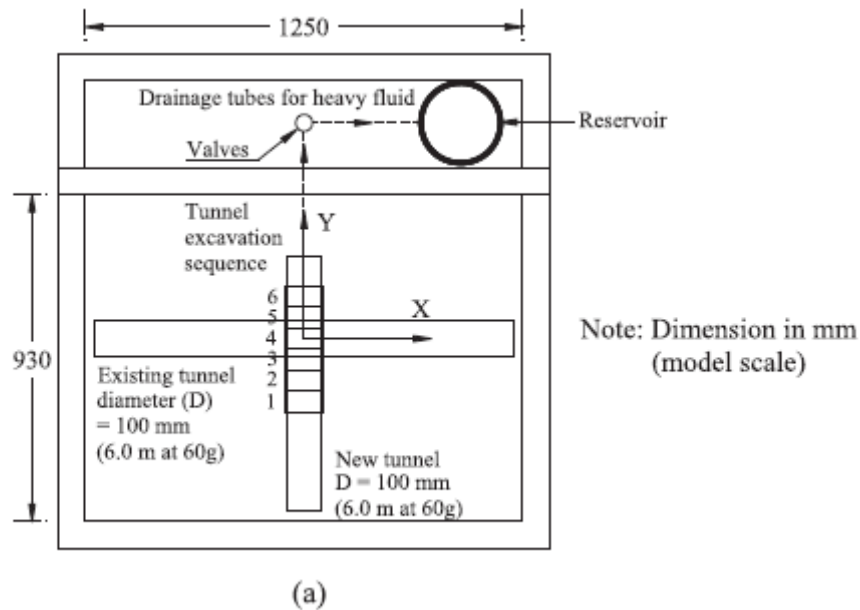
στην αριθμητική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε έγινε χρήση μοντέλου που λαμβάνει υπόψη του την παραπάνω κατάσταση (Duncan – Zhang model), το οποίο εκ του αποτελέσματος επιβεβαιώθηκε από τις οργανομετρήσεις.

4. Η κατασκευή δύο ή περισσότερων σηράγγων, κοντά η μία στην άλλη, θα οδηγήσει σε μία αύξηση της ροπής κάμψης τους, η οποία προκαλείται από διεύρυνση της ζώνης διαταραχής του εδάφους. Συνεπώς, πρέπει να γίνει ο ανάλογος σχεδιασμός και να ενισχυθούν τα μέτρα υποστήριξης. Η ροπή κάμψης μίας νέας σήραγγας που βρίσκεται κάτω από μία υπάρχουσα σήραγγα είναι σχετικά μικρότερη από μίας νέας σήραγγας που δεν έχει από πάνω της προϋπάρχουσα σήραγγα (Dalong et al., 2018).

## **2.4 Προσέγγιση του προβλήματος με μοντέλα φυγοκέντρησης**

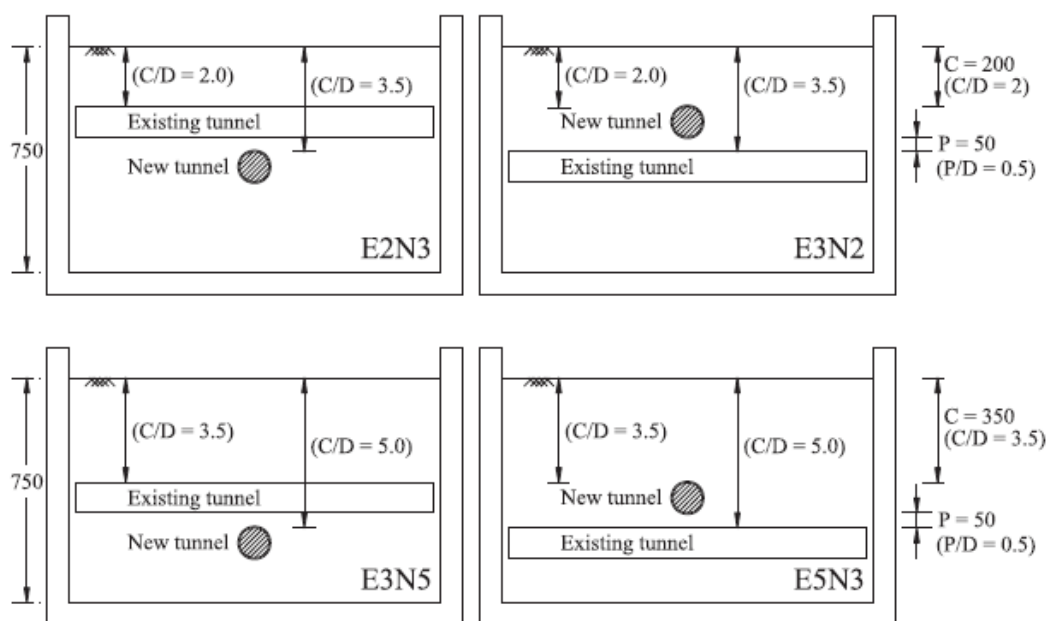
Ως μια τρίτη περίπτωση, που θα δώσει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τους τρόπους προσέγγισης του προβλήματός μας, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η μελέτη των Boonyarak και Charles (2015). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές επέλεξαν να δώσουν απαντήσεις μέσω της εφαρμογής τριδιάστατων μοντέλων φυγοκέντρησης.

Το σχήμα 2.12α δείχνει μια αντιπροσωπευτική πλάγια όψη του μοντέλου φυγοκέντρησης που στήθηκε. Η υπάρχουσα και η νέα σήραγγα είχαν μία εξωτερική διάμετρο (D) ισοδύναμη με 6 μέτρα στην πρωτότυπη κλίμακα σε μία επιτάχυνση φυγοκέντρησης 60 φορές της επιτάχυνσης της βαρύτητας της Γης (g). Η υπάρχουσα σήραγγα κατάφερε να μοντελοποιηθεί ως τέτοια, καθώς ο σωλήνας ήταν άδειος και τα δύο άκρα του ήταν κλειστά, έτσι ώστε να αποτραπεί να εισέλθει έδαφος στο εσωτερικό του. Οι άξονες αναφοράς «X» και «Y» δηλώνουν την επιμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, αντίστοιχα, της υπάρχουσας σήραγγας. Σε καθένα από τα τεστ που πραγματοποιήθηκαν, η νέα σήραγγα εκσκάφτηκε είτε πάνω είτε κάτω από την υπάρχουσα σε 6 στάδια εκσκαφής (Boonyarak and Charles, 2015).



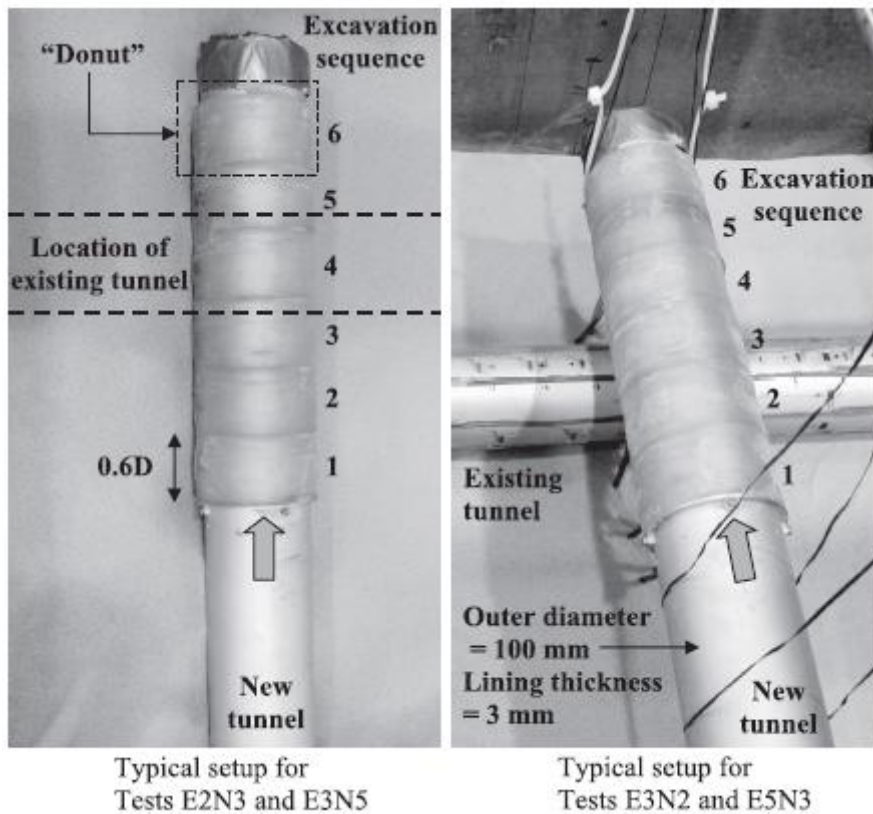
**Σχ. 2.12α:** Τυπική πλάγια όψη του μοντέλου φυγοκέντρισης (Boonyarak and Charles, 2015)

Στη συγκεκριμένη έρευνα, διεξήχθησαν συνολικά τέσσερα τεστ και οι τομές των αντίστοιχων μοντέλων φαίνονται στο σχήμα 2.12β. Όλα τα τεστ πραγματοποιήθηκαν σε έναν γεωτεχνικό φυγοκεντριστή στο Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας του Χονγκ Κονγκ. Στο τεστ E2N3, το οποίο θεωρείται ως το τεστ αναφοράς, η νέα σήραγγα εκσκάφτηκε κάτω από την υπάρχουσα. Η ονομασία κάθε δοκιμής δηλώνει το λόγο C/D κατά προσέγγιση των δύο σηράγγων στη συγκεκριμένη δοκιμή. Για το τεστ αναφοράς E2N3, οι λόγοι C/D της υπάρχουσας και τη νέας σήραγγας είναι 2 (E2) και 3 (N3), αντίστοιχα. Ο λόγος της απόστασης μεταξύ των δύο σηράγγων προς τη διάμετρό τους (P/D) ήταν 0.5 σε όλα τα τεστ. Για να μελετηθεί η επίδραση της σειράς κατασκευής στην αλληλεπίδραση των σηράγγων, η νέα σήραγγα κατασκευάστηκε πάνω από την υπάρχουσα στο τεστ E3N2. Επίσης, τα τεστ E3N5 και E5N3, στα οποία η υπάρχουσα και η νέα σήραγγα είχαν μεγαλύτερους λόγους από ότι στα προηγούμενα, πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση του βάθους στην αλληλεπίδραση των σηράγγων.



**Σχ. 2.12β:** Τομές των μοντέλων των δοκιμών φυγοκέντρισης (Boonyarak and Charles, 2015)

Το σχήμα 2.13 δείχνει πως μοντελοποιείται η νέα σήραγγα και τη διάταξη των μοντέλων για καθεμία από τις δοκιμές. Η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε έξι στάδια χρησιμοποιώντας «ντόνατς». Κάθε «ντόνατ» αποτελείται από μια εξωτερική λαστιχένια μεμβράνη και ένα σωλήνα από κράμα αλουμινίου, που αναπαριστά την επένδυση της σήραγγας και μία εσωτερική λαστιχένια σακούλα. Το μήκος της εκσκαφής σε κάθε στάδιο ήταν  $0.6D$  ή ισοδύναμα 3.6 μέτρα στην πρωτότυπη κλίμακα. Τα άκρα της σήραγγας ήταν κλειστά, ώστε να αποτραπεί το έδαφος να κινηθεί στο εσωτερικό της. Η επένδυση κάθε σήραγγας, αποτελούνταν, όπως προαναφέρθηκε, από έναν σωλήνα από κράμα αλουμινίου με εξωτερική διάμετρο 100 χιλιοστά και πάχος 3 χιλιοστά. Το μοντέλο αυτό προσομοίωνε μία πραγματική σήραγγα διαμέτρου 6 μέτρων. Για να μετατραπεί το πάχος της επένδυσης του μοντέλου στο ισοδύναμο πάχος της επένδυσης από σκυρόδεμα της πραγματικής σήραγγας η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος ( $f'_c$ ) θεωρήθηκε πως ήταν 50 MPa. Έτσι, το μέτρο του Young ( $E_c$ ) υπολογίστηκε πως ήταν 33 GPa. Τέλος, τα ισοδύναμα πάχη της επένδυσης της σήραγγας στην πρωτότυπη κλίμακα ήταν 230 και 420 χιλιοστά, για την εγκάρσια και επιμήκη διεύθυνση αντίστοιχα (Boonyarak and Charles, 2015).



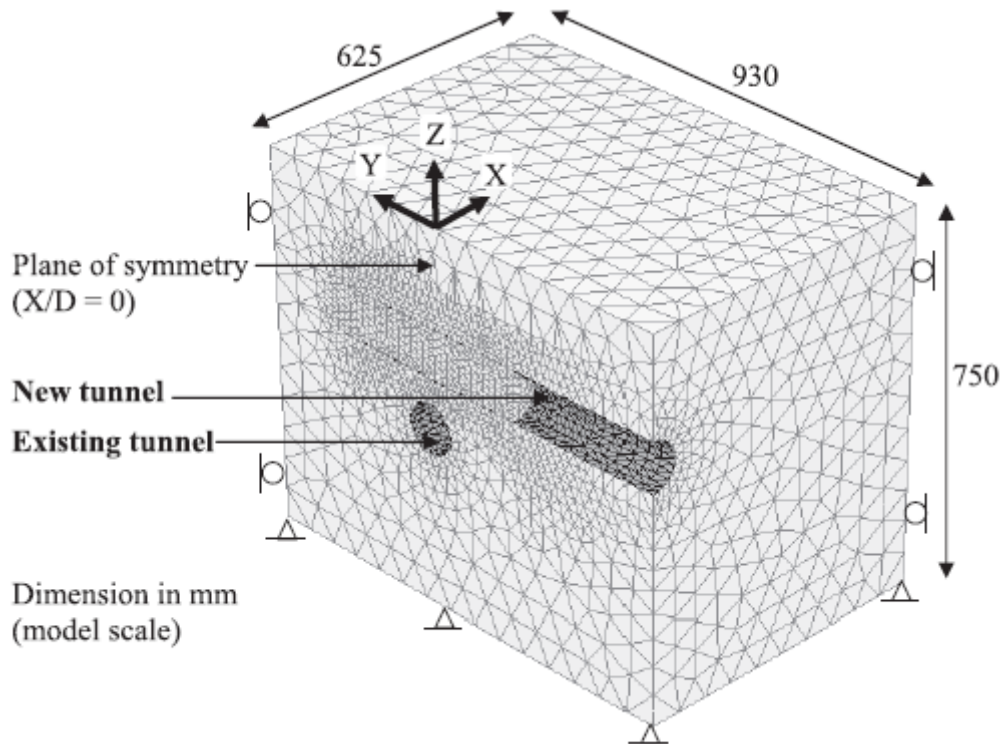
Σχ. 2.13: Τυπικές διατάξεις των τεσσάρων τεστ (Boonyarak and Charles, 2015)

Και τα τέσσερα τεστ διενεργήθηκαν σε ξηρή άμμο Toyoura. Στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, το μέσο μέγεθος κόκκων ( $D_{50}$ ), ο μέγιστος λόγος κενών ( $e_{max}$ ), ο ελάχιστος λόγος κενών ( $e_{min}$ ), η ειδική επιτάχυνση ( $G_s$ ) και η γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση ( $\phi_c$ ) ήταν 0.17mm, 0.977, 0.597, 2.64 και  $30^\circ$  αντίστοιχα. Ο λόγος της διαμέτρου της σήραγγας προς τη μέση διάμετρο των κόκκων θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος από 175 για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στην αλληλεπίδραση σήραγγας – εδάφους. Εδώ, ήταν 588.

Αφού ολοκληρώθηκαν τα πειράματα φυγοκέντρισης, πραγματοποιήθηκε αντίστροφη ανάλυση με τη χρήση τριδιάστατου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Το σχήμα 2.14 δείχνει τον τριδιάστατο κάνναβο πεπερασμένων στοιχείων της εκσκαφής μίας νέας σήραγγας πάνω από μία υπάρχουσα (τεστ E3N2). Οι διαστάσεις του καννάβου και η γεωμετρία των σηράγγων ήταν ταυτόσημες με εκείνες των δοκιμών φυγοκέντρισης. Εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία,

απαιτήθηκε μόνο ο μισός από τον συνολικό κάνναβο. Έτσι, ορίστηκε ένα επίπεδο συμμετρίας στον κεντρικό άξονα της νέας σήραγγας ( $X/D=0$ ). Κυλίσεις και αρθρώσεις εφαρμόστηκαν στις τέσσερις κάθετες πλευρές και στη βάση του καννάβου, αντίστοιχα.



**Σχ. 2.14:** Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων της εκσκαφής μίας νέας σήραγγας πάνω από μία υπάρχουσα (τεστ E3N2) (Boonyarak and Charles, 2015)

Η επένδυση της σήραγγας προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας ένα γραμμικά ελαστικό υλικό. Το μέτρο του Young, η πυκνότητα και ο λόγος Poisson της επένδυσης της σήραγγας, θεωρήθηκαν 69 GPa, 2700 kg/m<sup>3</sup> και 0.33, αντίστοιχα. Το έδαφος προσομοιώθηκε με τη χρήση υποπλαστικού μοντέλου και οι παράμετροι που εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σημειώνονται στον πίνακα 2.3.

Parameter	Value
Critical state friction angle, $\phi_c$ ( $^\circ$ ) <sup>a</sup>	30
Granulates hardness, $h_g$ (GPa) <sup>a</sup>	2.6
Exponent $n^a$	0.27
Minimum void ratio at zero pressure, $e_{do}^a$	0.61
Critical void ratio at zero pressure, $e_{co}^a$	0.98
Maximum void ratio at zero pressure, $e_{io}^a$	1.10
Exponent $\alpha^b$	0.5
Exponent $\beta^b$	3
Parameter controlling initial shear modulus upon 180° strain path reversal and in initial loading, $m_R^b$	8
Parameter controlling the initial shear modulus upon 90° strain path reversal, $m_I^b$	4
Size of the elastic range, $R^b$	0.00 003
Parameter controlling the rate of degradation of stiffness with strain, $\beta_r^b$	0.2
Parameter controlling rate of degradation of stiffness with strain, $\chi^b$	1.0
Coefficient of at-rest earth pressure, $K_0$	0.5

**Πίνακας 2.3:** Σύνοψη των παραμέτρων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (Boonyarak and Charles, 2015)

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων των τεστ φυγοκέντρισης σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα.

1. Η καθίζηση της υπάρχουσας σήραγγας όταν η νέα σήραγγα διανοίχθηκε κάτω από αυτή ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την ανύψωση της υπάρχουσας σήραγγας όταν η νέα διανοίχθηκε πάνω από αυτή. Αυτό συμβαίνει, γιατί η μείωση στην κατακόρυφη τάση που επιδρά στην υπάρχουσα σήραγγα είναι μεγαλύτερη στην πρώτη περίπτωση. Επιπλέον, η διατμητική ακαμψία του εδάφους γύρω από την υπάρχουσα σήραγγα ήταν μικρότερη στην πρώτη κατηγορία των τεστ, ανεξάρτητα του εκάστοτε λόγου C/D.
2. Όταν η νέα σήραγγα εκσκάφτηκε από κάτω, η υπάρχουσα σήραγγα θλίβεται κατακόρυφα. Ωστόσο, η υπάρχουσα σήραγγα επιμηκύνθηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση όταν η κατασκευή της νέας σήραγγας έγινε από πάνω. Αυτό συνέβη, επειδή η μείωση της τάσης που δρα στην υπάρχουσα σήραγγα στην οριζόντια διεύθυνση ήταν μεγαλύτερη από ότι στην κατακόρυφη διεύθυνση όταν η σήραγγα διανοίχθηκε από κάτω. Από την άλλη πλευρά, η μείωση στην τάση που επιδρά στην υπάρχουσα σήραγγα στην κατακόρυφη διεύθυνση ήταν μεγαλύτερη

από ότι στην οριζόντια διεύθυνση εξαιτίας της προχώρησης της νέας σήραγγας από πάνω, ανεξάρτητα από το λόγο C/D των σηράγγων.

3. Η διαφορική καθίζηση της υπάρχουσας σήραγγας που προκλήθηκε από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας από κάτω ήταν μεγαλύτερη από όταν η νέα σήραγγα κατασκευάστηκε από πάνω. Ως εκ τούτου, η εφελκυστική τροπή που προκλήθηκε στο ανάστροφο τόξο και η διατμητική τάση στην επένδυση της υπάρχουσας σήραγγας ήταν μεγαλύτερη στην πρώτη ακολουθία εκσκαφής των σηράγγων από ότι στη δεύτερη. Κάνοντας χρήση της θεωρίας της δοκού, η υπολογιζόμενη θλιπτική τροπή στη στέψη ήταν επίσης μεγαλύτερη στην πρώτη κατηγορία δοκιμών.
4. Η καθίζηση της υπάρχουσας σήραγγας εξαιτίας της εκσκαφής της νέας σήραγγας κάτω από αυτή στο τεστ με τους μεγαλύτερους λόγους C/D ήταν μικρότερη από ότι στο τεστ με τους μικρότερους λόγους C/D. Αυτό συμβαίνει επειδή η διατμητική ακαμψία του εδάφους γύρω από την υπάρχουσα σήραγγα αυξάνεται με το βάθος, ακόμα κι αν η μείωση της κατακόρυφης τάσης στην υπάρχουσα σήραγγα στο τεστ με τους μεγαλύτερους λόγους C/D ήταν μεγαλύτερη από ότι στο τεστ με τους μικρότερους λόγους C/D. Από την άλλη πλευρά, η ανύψωση της υπάρχουσας σήραγγας που προκλήθηκε από την κατασκευή της νέας σήραγγας από πάνω, αυξήθηκε με την αύξηση του λόγου C/D της υπάρχουσας και της νέας σήραγγας εξαιτίας της μεγαλύτερης αποτόνωσης των τάσεων που δρουν στην υπάρχουσα σήραγγα σε μεγαλύτερα από ότι στα μικρότερα βάθη. Επιπλέον, η αύξηση της ανακούφισης των τάσεων κυριάρχησε της αύξησης της διατμητικής ακαμψίας του εδάφους (Boonyarak and Charles, 2015).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Το λογισμικό προσομοίωσης FLAC<sup>3D</sup>

#### 3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί από την εισαγωγή, η απόκριση προϋπάρχουσας σήραγγας κατά τη διάνοιξη νέας γειτονικής, έχει μελετηθεί μέσω μεθόδων παρατήρησης, αναλυτικές λύσεις και αριθμητικές αναλύσεις. Η μεγαλύτερη πρόοδος έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο οι αριθμητικές αναλύσεις. Οι μέθοδοι αυτές, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αποτελούν πλέον τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, καθώς προσφέρουν κατά κανόνα μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα (Hoek et al., 1991). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αριθμητικές αναλύσεις, μέσω κατάλληλα επιλεγμένων κατά περίπτωση προτύπων (μοντέλων), επιτυγχάνουν την καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του επιτόπου πετρώματος, με παρόντα όλα τα δομικά του χαρακτηριστικά.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες δύνανται να διαχωριστούν ως εξής (Αγιουτάντης, 2010):

- Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα ως (ισοδύναμο) συνεχές μέσο.
- Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα, καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας, ως ασυνεχές μέσο συνιστάμενο από ένα σύνολο διακεκριμένων τεμαχίων που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες (Fairhurst et al., 1991).
- Μέθοδοι που συνδυάζουν τις δύο προηγούμενες κατηγορίες και συνιστούν υβριδικές μεθόδους.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – F.E.M.), των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite

Difference Method – F.D.M.) και των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method – B.E.M.). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει η μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method – D.E.M.) και στην τρίτη ανήκουν διάφορες μέθοδοι που συνδυάζουν περισσότερες από μία αριθμητικές μεθόδους, όπως π.χ. εκείνη των Συνοριακών και των Πεπερασμένων Στοιχείων (B.E./F.E.).

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή του λογισμικού προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας (FLAC<sup>3D</sup>).

### **3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών**

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών αποτελεί μία από τις κύριες και πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους. Στη μέθοδο αυτή ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους (nodes), οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε νοητά στοιχεία. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, το πεδίο δε διαιρείται σε στοιχεία, αλλά ορίζονται κόμβοι πάνω σε αυτό, οι οποίοι καλύπτουν όλο το πεδίο ορισμού των ζητούμενων μεγεθών. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των ζητούμενων μεγεθών αυτών σε κάθε κόμβο του πεδίου, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν τα ζητούμενα μεγέθη στους κόμβους του πεδίου.

Στις εφαρμογές της μεθόδου γίνεται συνήθως χρήση της ανάπτυξης μιας συνάρτησης κατά Taylor ή κατά Lagrange. Με την ανάπτυξη αυτή και κάτω από σχετικούς περιορισμούς περί συνέχειας της συνάρτησης, συνέχειας των παραγώγων της συνάρτησης κλπ., μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της συνάρτησης σε σημείο που βρίσκεται κοντά στο σημείο για το οποίο είναι γνωστή η τιμή της συνάρτησης (Itasca, 2009).

### **3.3 Το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup>**

Το FLAC<sup>3D</sup> (Fast Lagrangian Analysis of Continua) είναι ένα τριδιάστατο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, το οποίο

λειτουργεί βάσει της μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών. Κατά τη μέθοδο αυτή το πέτρωμα θεωρείται ότι αποτελεί ένα ισοδύναμο συνεχές μέσο, στο οποίο ενσωματώνονται οι ιδιότητες των ασυνεχειών.

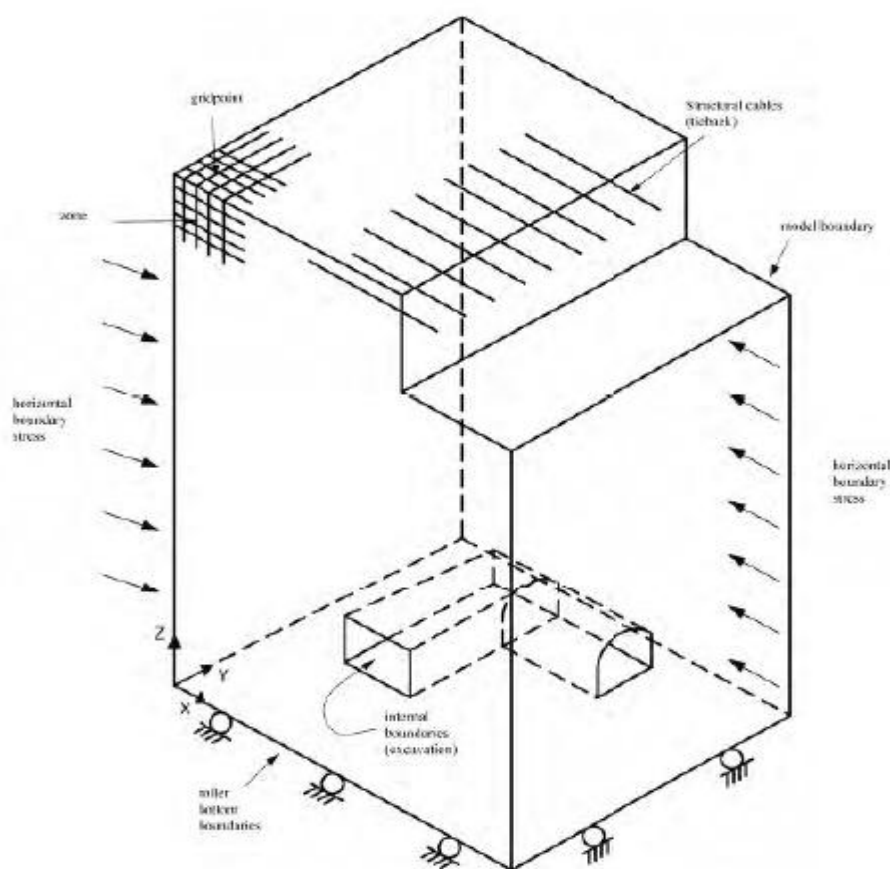
Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη συμπεριφορά κατασκευών ή εκσκαφών σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς ή σε άλλα υλικά που συμπεριφέρονται πλαστικά όταν ξεπεράσουν το όριο διαρροής τους. Τα υλικά αυτά, αναπαριστώνται από στοιχεία ή ζώνες, τα οποία σχηματίζουν έναν κάνναβο που τροποποιείται από τον χρήστη, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η γεωμετρία του προβλήματος που θέλει να μοντελοποιήσει. Το κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται ανάλογα με την ορισμένη γραμμική ή μη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης, αποκρινόμενο στις δρώσες δυνάμεις και στους πλευρικούς περιορισμούς. Το υλικό μπορεί να διαρρεύσει και ο κάνναβος μπορεί να παραμορφωθεί (για μεγάλες παραμορφώσεις) σύμφωνα με τις μετατοπίσεις του υλικού. Ο σαφής σχεδιασμός των υπολογισμών κατά Lagrange και η τεχνική της ανάμικτης διακριτοποίησης των ζωνών που χρησιμοποιείται στο FLAC εξασφαλίζουν ότι η πλαστική αστοχία και διαρροή προσομοιώνονται με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, επειδή το πρόγραμμα δε δημιουργεί μήτρες, μεγάλοι υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν με μικρές σχετικά απαιτήσεις σε μνήμη. Τα μειονεκτήματα της ακρίβειας των υπολογισμών (π.χ. μικρό όριο χρονικού βήματος) καταβάλλονται έως ένα σημείο από την αυτόματη κλιμάκωση της αδράνειας και τις αποσβέσεις που δεν επηρεάζουν το μηχανισμό της αστοχίας.

Το FLAC εμπεριέχει επίσης και τη γλώσσα προγραμματισμού FISH (συντόμευση του FLACish). Με τη χρήση της FISH μπορεί κανείς να γράψει εντολές που δεν είναι προκαθορισμένες από το λογισμικό και με αυτό τον τρόπο να επεκτείνει τη χρησιμότητα του προγράμματος, εφαρμόζοντας είτε π.χ. καθορισμένες από το χρήστη αλλαγές στον κάνναβο (ταυτόχρονη εκσκαφή και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης στην περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σήραγγας) είτε ασυνήθιστες οριακές συνθήκες (Itasca, 2009).

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών που εφαρμόζει το λογισμικό FLAC<sup>3D</sup> είναι παραπλήσια με αυτή του διδιάστατου κώδικα FLAC<sup>2D</sup> της Itasca.

Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές όσο αφορά στην επέκταση του μαθηματικού μοντέλου από τις δύο διαστάσεις στις τρεις. Ο κώδικας μπορεί να αντιμετωπίσει τόσο στατικά, όσο και δυναμικά προβλήματα σε τρεις διαστάσεις. Σημειώνεται ότι στο FLAC<sup>3D</sup> είναι δυνατή η προσομοίωση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης, εφαρμόζοντας κατάλληλες, συνοριακές συνθήκες όπως απαγόρευση της μετατόπισης παράλληλα με τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, σε μοντέλο που προσομοιώνεται με πάχος μίας ζώνης. Άλλωστε, σε τριδιάστατα προβλήματα η επίδραση της τρίτης διάστασης λαμβάνεται υπόψη με άμεσο τρόπο και όχι έμμεσα, όπως συμβαίνει στους διδιάστατους κώδικες.

Με βάση της γεωμετρία της περιβάλλουσας βραχώμαζας, τους εδαφικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό προσομοίωση έργου, κατασκευάζεται πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, αποτελούμενο από τριδιάστατα στοιχεία. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό μοντέλο του FLAC<sup>3D</sup>.



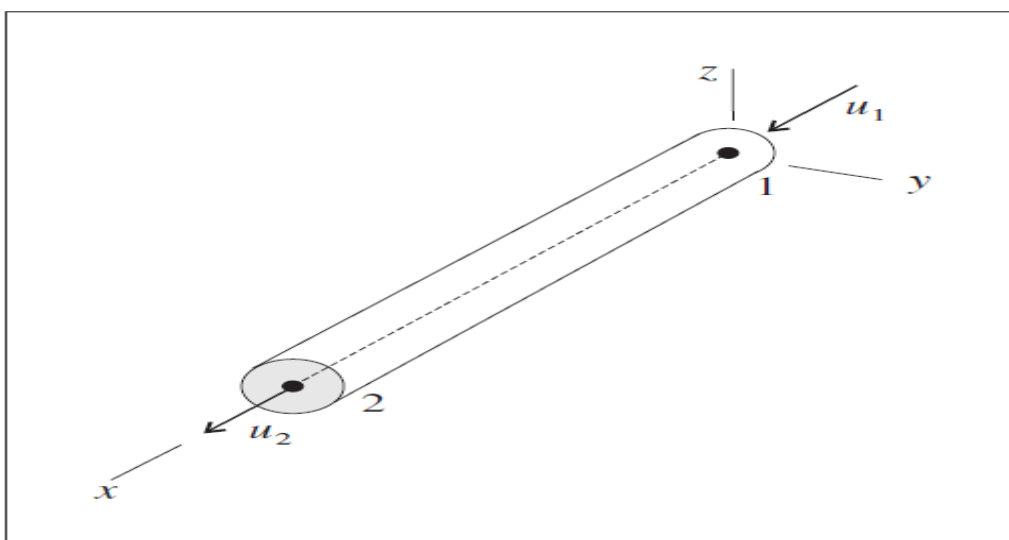
Σχ. 3.1: Τυπικό μοντέλο FLAC<sup>3D</sup> (Itasca,2009)

Παραπάνω, αναφέρθηκε πως το περιβάλλον του έργου προσομοιώνεται από ζώνες, τις οποίες δημιουργούν πρωτεύοντα στοιχεία. Ωστόσο, σε ένα υπόγειο έργο και συγκεκριμένα σε μία σήραγγα συμμετοχή έχουν και τα μέτρα υποστήριξης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση δύο ειδών μέτρων άμεσης υποστήριξης, των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτά προσομοιώνονται ως ραβδωτά στοιχεία (cables) και στοιχεία κελύφους (shell) αντίστοιχα (Itasca, 2009).

### **Ραβδωτά στοιχεία**

Κάθε ραβδωτό στοιχείο υποστήριξης “cable” καθορίζεται από τη γεωμετρία του, το υλικό και τις ιδιότητες του ενέματος. Θεωρείται πως είναι ένα ίσιο στοιχείο που έχει ομοιόμορφες ιδιότητες κατά μήκος του και εκτείνεται μεταξύ δύο κόμβων. Ένα καμπύλο ραβδωτό στοιχείο μπορεί να προσομοιωθεί ως πολλά τεμάχια συνδεδεμένα μεταξύ τους υπό διαφορετικές κλίσεις. Το ραβδωτό στοιχείο συμπεριφέρεται ως ένα ελαστικό, τέλεια πλαστικό υλικό που μπορεί να διαρρεύσει σε εφελκυσμό και θλίψη, αλλά δε μπορεί να υποστεί καμπτική ροπή. Ένα τέτοιο στοιχείο μπορεί να ενεματωθεί έτσι ώστε να αναπτύσσεται δύναμη κατά μήκος του κατ’ αντιστοιχία με τη σχετική κίνηση του στοιχείου και του καννάβου. Το ένεμα συμπεριφέρεται ως ένα ελαστικό, τέλεια πλαστικό υλικό με τη μέγιστη αντοχή του να εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση, χωρίς απώλεια της αντοχής του μετά την αστοχία. Αυτού του τύπου τα στοιχεία είναι κατάλληλα για μέτρα υποστήριξης στα οποία είναι σημαντική η αντοχή σε εφελκυσμό και για τα οποία αναπτύσσεται τριβή μεταξύ αυτών και της γεώμαζας.

Οι δύο ενεργοί βαθμοί ελευθερίας του ραβδωτού στοιχείου φαίνονται στο σχήμα 3.2. Για κάθε αξονική μετατόπιση που φαίνεται στο σχήμα, υπάρχει και μία αντίστοιχη αξονική δύναμη. Η μήτρα ακαμψίας του στοιχείου περιλαμβάνει μόνο αυτό το μοναδικό βαθμό ελευθερίας σε κάθε κόμβο, για να αναπαραστήσει την αξονική λειτουργία ενός αγκυρίου (Itasca, 2009).



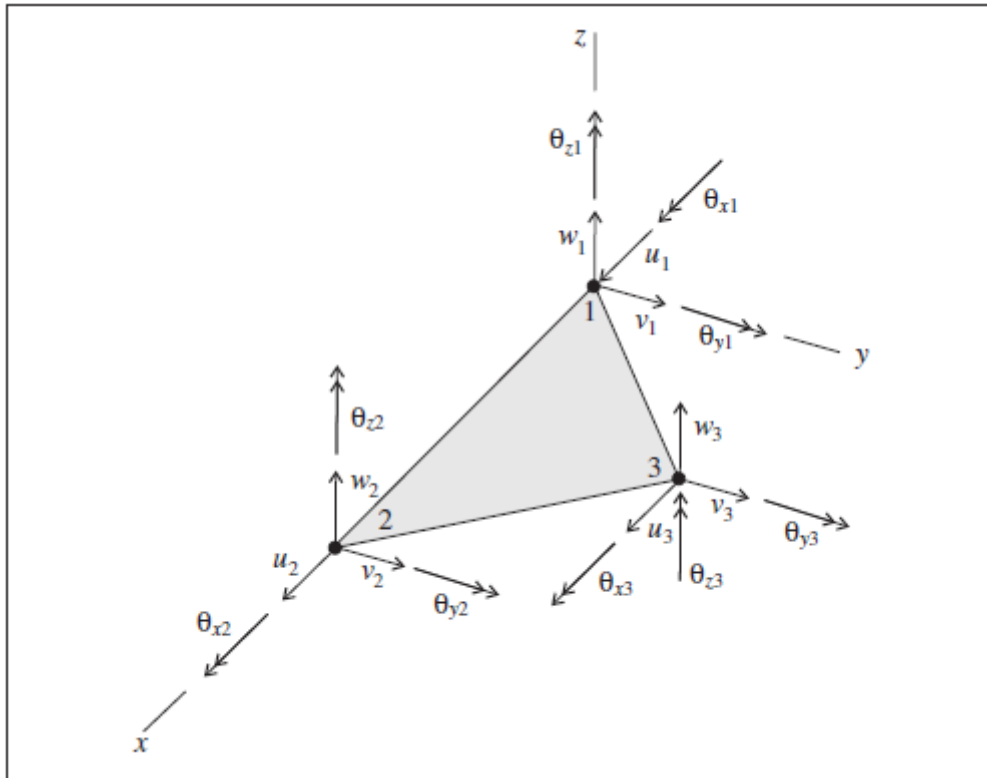
**Σχήμα 3.2:** Το σύστημα συντεταγμένων ενός ραβδωτού στοιχείου και οι 2 ενεργοί βαθμοί ελευθερίας του (Itasca, 2009)

### Στοιχεία κελύφους

Κάθε δομικό στοιχείο κελύφους (shell) καθορίζεται από τη γεωμετρία του και τις ιδιότητες του υλικού του. Ένα δομικό στοιχείο τύπου κελύφους θεωρείται πως είναι ένα τρίγωνο, ομοιόμορφου πάχους που εκτείνεται μεταξύ τριών κόμβων. Ένα καμπύλο κέλυφος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πολύπλευρη επιφάνεια που συντίθεται από πολλά δομικά στοιχεία τύπου κελύφους. Κάθε τέτοιο στοιχείο συμπεριφέρεται ως ένα ισότροπο ή ανισότροπο, γραμμικά ελαστικό υλικό χωρίς όριο αστοχίας. Αυτού του τύπου τα στοιχεία, επειδή είναι λεπτά, είναι κατάλληλα για την προσομοίωση λεπτού κελύφους κατασκευών, στις οποίες οι μετακινήσεις από εφελκυστικές ή διατμητικές παραμορφώσεις μπορούν να αγνοηθούν. Μεγαλύτερου πάχους κατασκευές κελύφους θα έπρεπε να προσομοιώνονται με ζώνες.

Κάθε δομικό στοιχείο τύπου κελύφους έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την εφαρμοζόμενη πίεση. Ένα ξεχωριστό σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ορθότροπες ιδιότητες υλικών και ένα διαφορετικό χρησιμοποιείται για να καταγράψει τις τάσεις. Το σύστημα συντεταγμένων σε αυτού του τύπου τα δομικά στοιχεία καθορίζεται από τη θέση των τριών κόμβων, 1, 2 και 3 όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Το σύστημα αυτό καθορίζεται έτσι ώστε:

1. Το δομικό στοιχείο να βρίσκεται στο επίπεδο  $x - y$ .
2. Ο άξονας  $x$  να έχει κατεύθυνση από τον κόμβο 1 στον κόμβο 2.
3. Ο άξονας  $z$  να είναι κάθετος στο επίπεδο του δομικού στοιχείου και θετικός στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους (Itasca, 2009).



**Σχ. 3.3:** Το σύστημα συντεταγμένων ενός στοιχείου κελύφους και οι 18 ενεργοί βαθμοί ελευθερίας του (Itasca, 2009)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Πρώτη φάση προσομοιώσεων – Προσομοίωση κυκλικών ανεπένδυτων σηράγγων**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Σε αυτή την πρώτη φάση αναλύσεων επιδιώχθηκε η προσομοίωση του προβλήματος των κάθετα διασταυρούμενων σηράγγων σε ανισοσταθμία, μέσω της εφαρμογής απλών μοντέλων. Σκοπός αυτού του σταδίου της παρούσας εργασίας ήταν η εξαγωγή κάποιων αρχικών συμπερασμάτων που θα βοηθούσαν στην καλύτερη κατανόηση του προβλήματος.

Πιο συγκεκριμένα, στα μοντέλα αυτής της φάσης, η γεωμάζα προσομοιώθηκε να έχει ελαστική συμπεριφορά. Επιπλέον, προσομοιώθηκαν κυκλικές σήραγγες, στις οποίες δεν τοποθετήθηκε κανένα μέτρο υποστήριξης. Είναι σαφές, πως μια τέτοια κατάσταση δε σχετίζεται σε καμία περίπτωση με την πραγματικότητα. Ωστόσο, η εύκολη προετοιμασία αυτών των μοντέλων σε συνδυασμό με το σύντομο χρόνο επίλυσης που απαιτούν, τα καθιστούν ιδανικά για την παρούσα φάση της εργασίας.

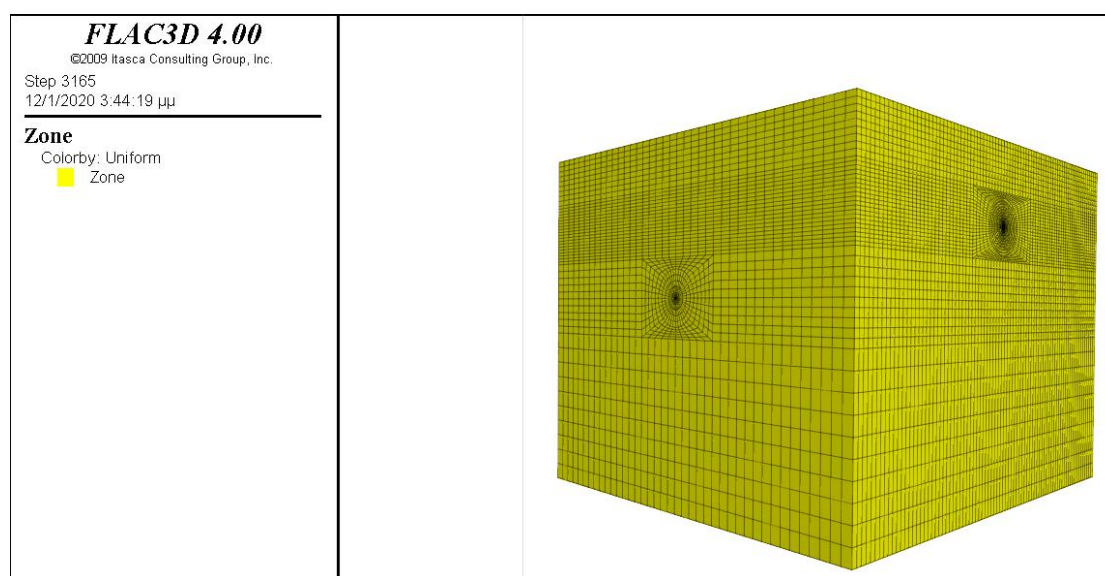
#### **4.2 Αναλύσεις με μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί από την εισαγωγή του κεφαλαίου, τα μοντέλα αυτής της φάσης προσομοιώνουν κυκλικές, ανεπένδυτες σήραγγες που διανοίγονται σε ελαστική γεωμάζα. Επιλέχθηκε να γίνουν δύο σειρές αναλύσεων σε αυτή τη φάση. Στην πρώτη μεταβάλλονταν κάθε φορά το μέτρο ελαστικότητας της γεωμάζας, ενώ στη δεύτερη άλλαζε η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων.



#### 4.2.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Όσο αφορά στην πρώτη σειρά αναλύσεων, πραγματοποιούνται πέντε προσομοιώσεις, στις οποίες το μέτρο ελαστικότητας κάθε φορά ορίζεται ως  $E_1=100$  MPa,  $E_2=250$  MPa,  $E_3=500$  MPa,  $E_4=750$  MPa και  $E_5=1000$  MPa. Ο κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε ήταν κοινός και για τις 5 αναλύσεις και φαίνεται στο σχήμα 4.1. Οι διαστάσεις του είναι 80m x 80m x 65m και αποτελείται από 212800 ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Δύο είναι τα πρότυπα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του καννάβου. Τα στοιχεία τύπου “radcylinder” (αφού έχουμε κυκλικές σήραγγες) και τα στοιχεία τύπου “brick”. Η διάμετρος των σηράγγων ορίστηκε στα 10 μέτρα.



**Σχ. 4.1:** Το μοντέλο με μέτρο ελαστικότητας βραχομάζας 750 MPa πριν τη διάνοιξη των σηράγγων

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του καννάβου, ομαδοποιούνται οι ζώνες που προσομοιώνουν την άνω και την κάτω σήραγγα σε δύο διαφορετικές ομάδες, με σκοπό την ευκολότερη διαχείρισή τους στη συνέχεια της προετοιμασίας του μοντέλου.

Στη συνέχεια, καθορίζεται το μοντέλο, με βάση το οποίο θα γίνει η επίλυση και οι απαιτούμενες ιδιότητες. Συγκεκριμένα, αφού η γεωμάζα προσομοιώνεται ως ελαστική, το μοντέλο που δίνεται είναι το ελαστικό. Οι ιδιότητες που απαιτούνται να δοθούν μετά από αυτό είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και ο λόγος Poisson της γεωμάζας. Αντί αυτών όμως, στο FLAC<sup>3D</sup> καθορίζονται τα

αντίστοιχα μέτρα συστολής (K) και διάτμησης (G). Οι τιμές των μεγεθών αυτών είναι και τα μοναδικά στοιχεία που μεταβάλλονται σε καθεμία από τις αναλύσεις αυτής της πρώτης σειράς που διεξάγονται σε αυτή τη φάση. Επιπλέον, προσδιορίζεται η πυκνότητα της γεωμάζας σε  $2000 \text{ kg/m}^3$  και η επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $9.81 \text{ m/s}^2$  με κατεύθυνση αντίθετη του άξονα z.

Όσο αφορά στο πεδίο των τάσεων, αυτό ορίστηκε ως υδροστατικό. Ορίστηκαν ακόμη και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Στις πλευρές της περιφέρειας θεωρήθηκε πως υπάρχουν κυλίσεις, στο κάτω μέρος του μοντέλου πάκτωση, ενώ η πάνω επιφάνεια αφέθηκε ελεύθερη, προσομοιώνοντας την επιφάνεια της περιοχής που μελετάται. Τέλος, το μοντέλο πραγματοποιεί μία επίλυση, έτσι ώστε να «ισορροπήσει» έπειτα από τις αρχικές συνθήκες που του τέθηκαν.

#### **4.2.2 Διάνοιξη των σηράγγων**

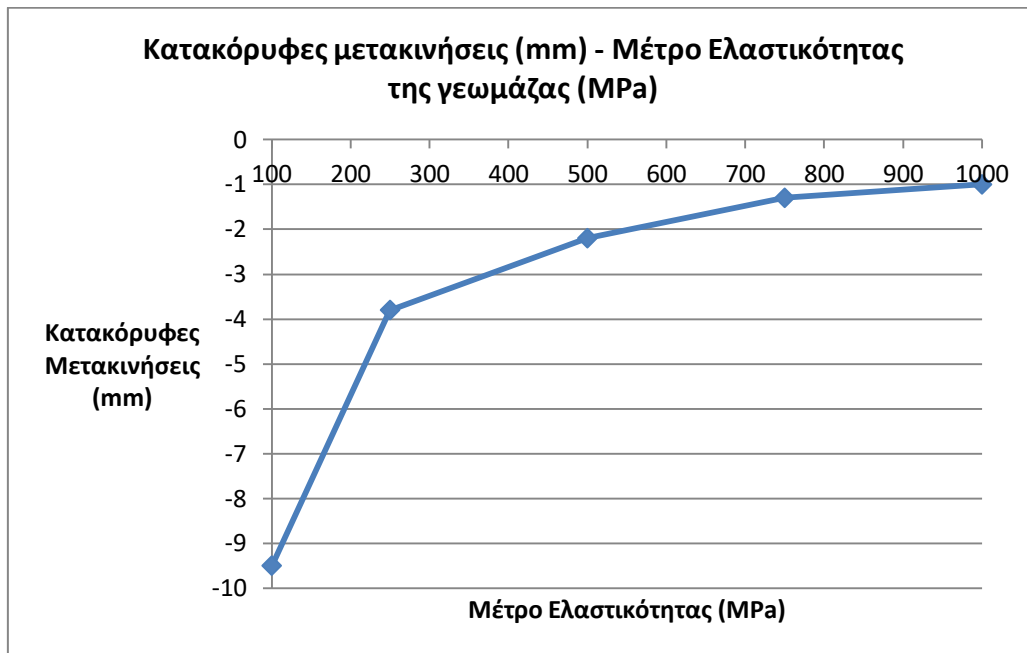
Επόμενο βήμα αποτελεί η διάνοιξη των σηράγγων. Πρώτα, προγραμματίζεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού FISH, μία ρουτίνα, της οποίας η εκτέλεση θα σημάνει την έναρξη της εκσκαφής της άνω σήραγγας, η οποία και παίζει το ρόλο της προϋπάρχουσας. Η εκσκαφή ορίζεται να γίνει ολομέτωπα και το βήμα προχώρησης να είναι 2 μέτρα. Λόγος ύπαρξης αυτού του σταδίου στην ανάλυση είναι το γεγονός πως αν θεωρούσαμε εξ αρχής διανοιγμένη την προϋπάρχουσα σήραγγα, η κατανομή των τάσεων θα ήταν διαφορετική από ότι στην πραγματικότητα. Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση και αυτού του σταδίου, ακολουθεί η διάνοιξη της νέας σήραγγας. Εδώ, η εκσκαφή προσομοιώνεται και πάλι ολομέτωπα και το βήμα προχώρησης ορίζεται στο 1 μέτρο. Μετά και την ολοκλήρωση αυτού του βήματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα.

#### **4.2.3 Αποτελέσματα**

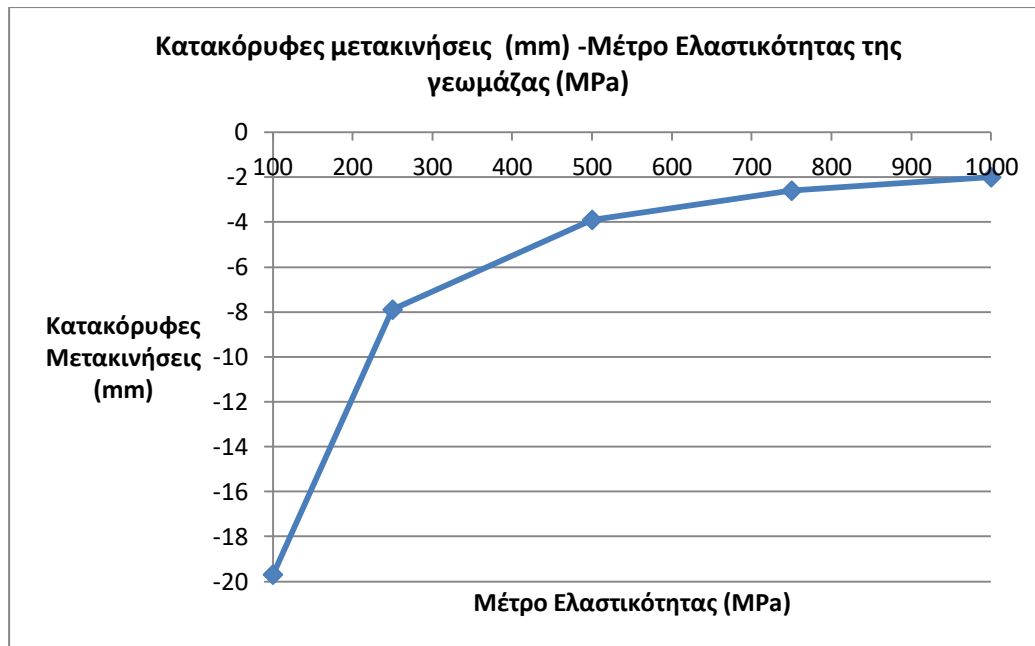
Τα αποτελέσματα στα οποία εστιάστηκε η αξιολόγηση, αφορούν στις μετακινήσεις που προέκυψαν στο μέσο της άνω σήραγγας, δηλαδή στη θέση της διασταύρωσης, κατά τη διαδικασία διάνοιξης της νέας, υποκείμενης σήραγγας. Καθώς στην παρούσα φάση προσομοιώσεων δε χρησιμοποιήθηκαν μέτρα υποστήριξης στις σήραγγες, το μέγεθος που θα μπορούσε να φανερώσει την επίδραση της διάνοιξης μίας νέας σήραγγας σε

μία προϋπάρχουσα είναι οι μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στο μέσο της άνω σήραγγας, καθώς πρόκειται για τη θέση ακριβώς κάτω από την οποία διέρχεται η νέα σήραγγα.

Οι μεγαλύτερες τιμές της κατακόρυφης μετακίνησης συναντήθηκαν στις θέσεις της στέψης και του δαπέδου και είναι αυτές που παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



**Σχ. 4.2:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) λόγω της διάνοιξης της νέας συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της γεωμάζας (MPa)



**Σχ. 4.3:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στο δάπεδο της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) λόγω της διάνοιξης της νέας συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της γεωμάζας (MPa)

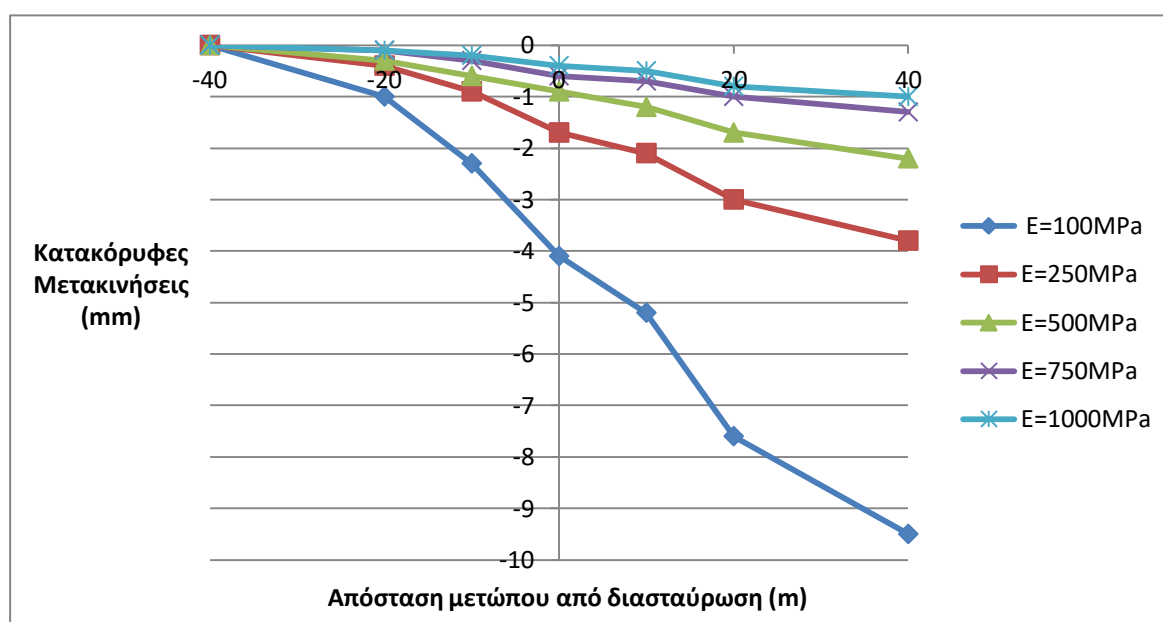
Στα σχήματα 4.2 και 4.3 γίνεται μια παρουσίαση των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων που προκύπτουν στη στέψη και το δάπεδο της άνω σήραγγας και οι οποίες οφείλονται αποκλειστικά στη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Οι μετακινήσεις αυτές, είναι οι τελικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας. Όπως ήταν αναμενόμενο, από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει πως όσο καλύτερη είναι η ποιότητα της γεωμάζας (μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας), τόσο μικρότερες είναι και οι προκύπτουσες μετακινήσεις.

Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τη θέση της στέψης, απ' όπου οι τιμές της μετακίνησης είναι μικρότερες από ότι στο δάπεδο, φαίνεται ότι για μέτρο ελαστικότητας της γεωμάζας  $E_1=100$  MPa, οι μέγιστες καθιζήσεις φτάνουν τα 10 χιλιοστά, ενώ για  $E_2=250$  MPa, οι καθιζήσεις είναι μικρότερες από 4 χιλιοστά. Για μια καλύτερης ποιότητας βραχομάζα με  $E_3=1000$  MPa, οι καθιζήσεις που προκύπτουν είναι περί τα 2 χιλιοστά. Από τις παρούσες αναλύσεις, γίνεται αντιληπτό πως για χαμηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας οι μετακινήσεις που προκαλεί η διάνοιξη της νέας σήραγγας στην προϋπάρχουσα είναι πιο έντονες. Μπορεί η μετακίνηση του 1 εκατοστού που προέκυψε ενίοτε να μην είναι σημαντική, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις η

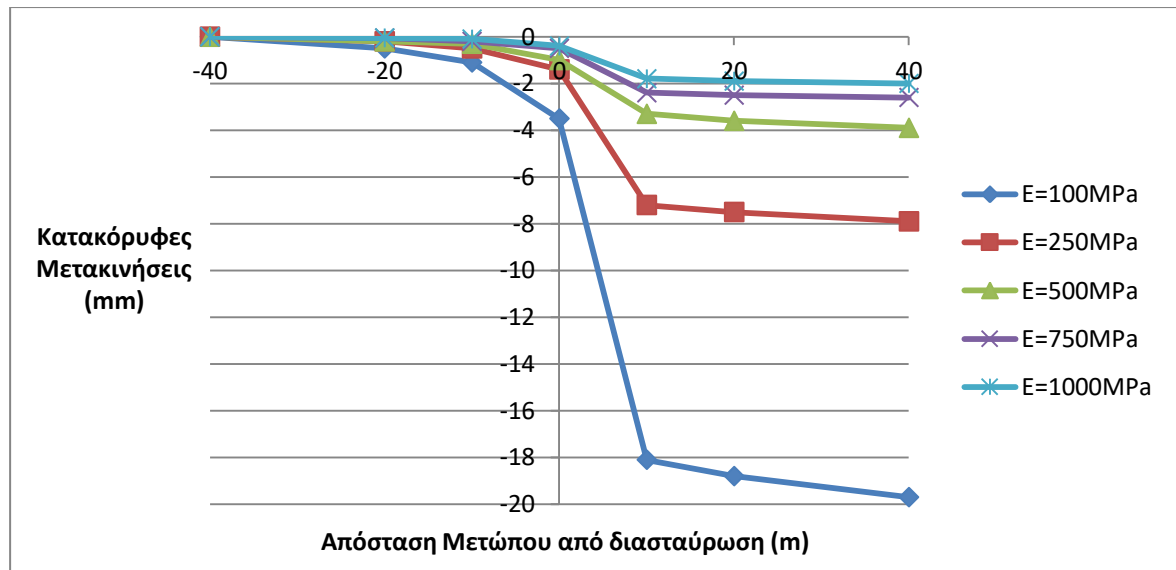
εφαρμογή μέτρων βελτίωσης του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μικρότερες καθιζήσεις.

Αντίστοιχο είναι και το διάγραμμα του σχήματος 4.3 που αφορά το δάπεδο της προϋπάρχουσας σήραγγας. Η μορφή της καμπύλης είναι η ίδια, όμως οι τιμές των μετακινήσεων είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του δαπέδου για χαμηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας, ενώ για μεγαλύτερες τιμές, η φαλίδα αυτή κλείνει. Παρατηρείται ότι για  $E_1=100$  MPa, η καθίζηση είναι 20 χιλιοστά, διπλάσια από ότι στη θέση της στέψης, ενώ για  $E_3=1000$  MPa, είναι 2 χιλιοστά, αντί 1 που είναι στη στέψη.

Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν μόνο την τελική εικόνα των καθιζήσεων, που υφίσταται μετά το πέρας της εκσκαφής της νέας σήραγγας. Στα σχήματα 4.4 και 4.5 που ακολουθούν απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν στις θέσεις της στέψης και του δαπέδου της προϋπάρχουσας σήραγγας κατά τη διαδικασία διάνοιξης της νέας, υποκείμενης σήραγγας.



**Σχ. 4.4:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας από τη θέση διασταύρωσης (m)



**Σχ. 4.5:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στο δάπεδο της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας από τη θέση της διασταύρωσης (m)

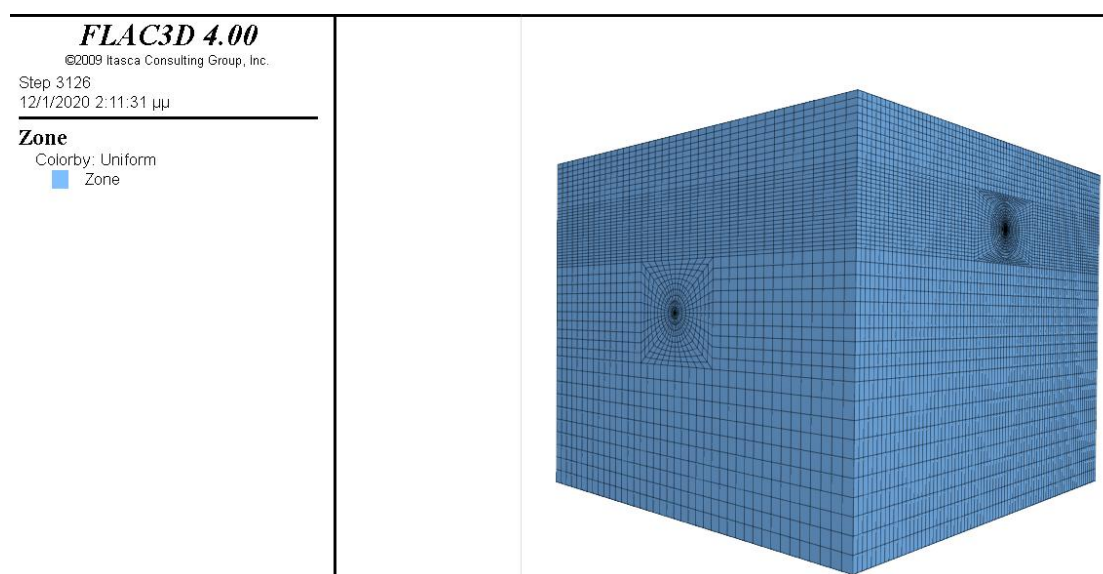
Παρατηρώντας το σχήμα 4.4 που αφορά στη στέψη της άνω σήραγγας, γίνεται αντιληπτό πως οι καθιζήσεις λαμβάνουν χώρα με σχετικά σταθερό ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια διάνοιξης της νέας σήραγγας. Ωστόσο, δε συμβαίνει το ίδιο και στην περίπτωση του δαπέδου, όπου οι μετακινήσεις είναι και μεγαλύτερες. Από το σχήμα 4.5 φαίνεται ότι οι μετακινήσεις αρχίζουν να λαμβάνουν χώρα όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρεθεί μία διάμετρο πριν από τη θέση της διασταύρωσης και αυξάνονται με μέγιστο ρυθμό όταν το μέτωπο βρεθεί ακριβώς κάτω από την προϋπάρχουσα σήραγγα μέχρι και για μία διάμετρο μετά. Σαφώς, όσο καλύτερη είναι η ποιότητα της γεωμάζας, τόσο μικρότερες είναι και οι μετακινήσεις, όμως οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας για τις οποίες συμβαίνουν, παραμένουν ίδιες.

### 4.3 Αναλύσεις με μεταβολή της απόστασης μεταξύ των σηράγγων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προετοιμασία των μοντέλων και η διάνοιξη των σηράγγων, αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην περίπτωση των αναλύσεων όπου μεταβάλλονταν η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σηράγγων.

### 4.3.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Σε αυτή τη δεύτερη σειρά αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν πέντε προσομοιώσεις στις οποίες κάθε φορά η απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων ορίστηκε ως  $d_1=2$  m,  $d_2=3$  m,  $d_3=5$  m,  $d_4=10$  m,  $d_5=20$  m. Ο κάρναβος διέφερε μεταξύ των πέντε μοντέλων, καθώς εδώ, σε αντίθεση με τη σειρά αναλύσεων που αφορούσαν τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, η μεταβολή της απόστασης επηρέαζε και τον κάρναβο. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν και πάλι τα τύπου “radcylinder” και τύπου “brick”.



**Σχ. 4.6:** Το μοντέλο με απόσταση 5 μέτρων μεταξύ των σηράγγων πριν τη διάνοιξή τους

Η διαδικασία που ακολουθείται για την προετοιμασία των μοντέλων είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε για την προετοιμασία των μοντέλων όπου γινόταν μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας. Συγκεκριμένα, οι ομαδοποιήσεις των σηράγγων, η εφαρμογή του μοντέλου επίλυσης, το αρχικό τασικό πεδίο και οι συνοριακές συνθήκες είναι ίδιες. Η διαφορά έγκειται στο ότι το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας δε μεταβάλλεται, και έχει καθοριστεί στα 500 MPa.

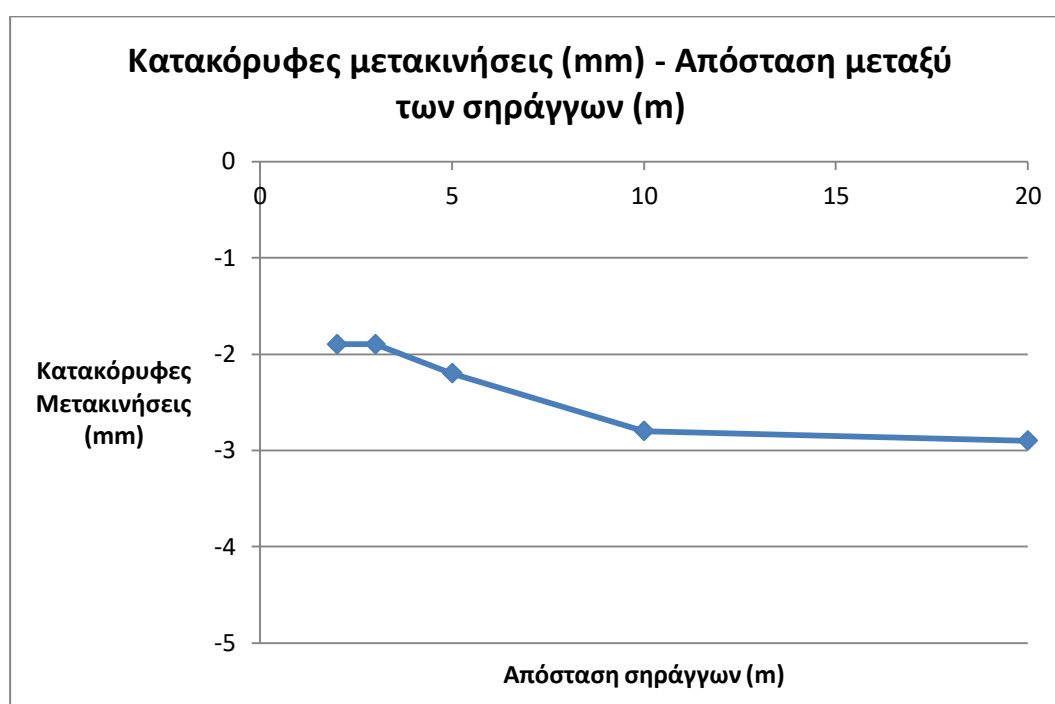
### 4.3.2 Διάνοιξη των σηράγγων

Η διάνοιξη των σηράγγων πραγματοποιείται και πάλι μέσω της εκτέλεσης δύο αρχείων κειμένου, ένα για κάθε σήραγγα, τα οποία περιέχουν μια ρουτίνα της γλώσσας προγραμματισμού FISH. Διαφορές με τις αναλύσεις όπου αλλάζει το μέτρο ελαστικότητας δεν υπάρχουν. Το βήμα προχώρησης κατά τη διάνοιξη

της άνω σήραγγας ορίζεται στα 2 μέτρα, ενώ της νέας υποκείμενης στο 1 μέτρο.

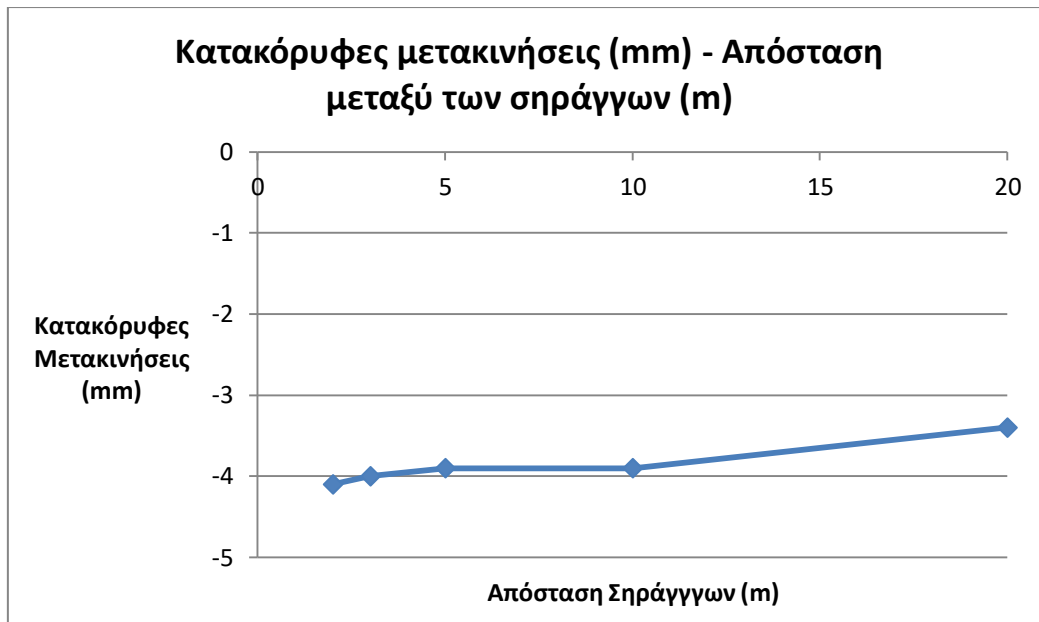
#### 4.3.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω εστιάζουν και πάλι στις κατακόρυφες μετακινήσεις της προϋπάρχουσας σήραγγας και πως αυτές επηρεάζονται από τη διάνοιξη της νέας. Στα δύο επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι καθιζήσεις που προέκυψαν στο μέσο της άνω σήραγγας στις θέσεις της στέψης και του δαπέδου της μετά το πέρας της εκσκαφής της νέας.



**Σχ. 4.7:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) λόγω της διάνοιξης της νέας συναρτήσσει της μεταξύ τους απόσταση (m)

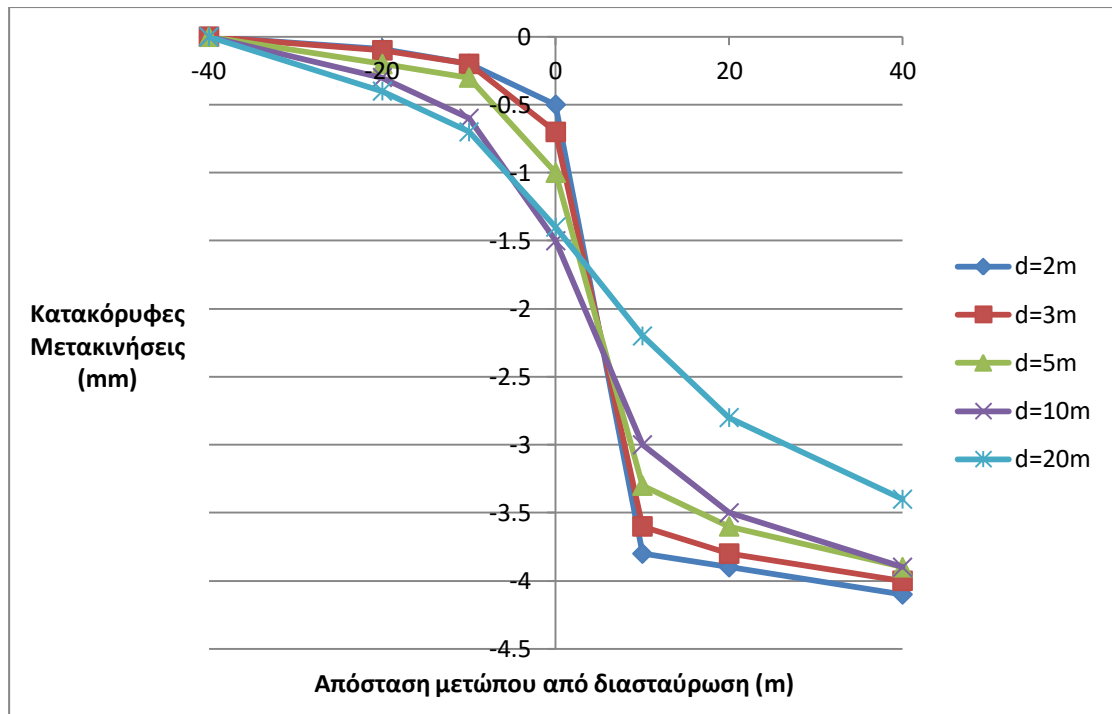




**Σχ. 4.8:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στο δάπεδο της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) λόγω της διάνοιξης της νέας, συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης (m)

Εδώ, σε αντίθεση με την περίπτωση μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας, τα διαγράμματα των σχημάτων 4.7 και 4.8 φανερώνουν πως η μεταβολή στην απόσταση των δύο σηράγγων δεν έχει μεγάλη επίδραση στις μετακινήσεις που θα προκαλέσει η νέα σήραγγα στην προϋπάρχουσα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας τις καθιζήσεις στο δάπεδο, που είναι και ελαφρώς μεγαλύτερες, βλέπει κανείς πως μία απόσταση μεταξύ των σηράγγων της τάξης των 2 μέτρων θα δώσει μεγαλύτερη μετακίνηση κατά λιγότερο από 1 χιλιοστό, από ότι αν η απόσταση των σηράγγων ήταν 20 μέτρα. Βέβαια, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας  $E = 500 \text{ MPa}$ , που δόθηκε στη βραχομάζα σε αυτή τη σειρά αναλύσεων είναι ο λόγος που οι μετακινήσεις είναι ούτως ή άλλως μικρές. Συγκρίνοντας την καθίζηση των 4.1 mm που προκύπτει για απόσταση σηράγγων 2 m, με αυτή των 3.4 mm για απόσταση 20 m, προκύπτει μια διαφορά της τάξης του 17%.

Παρά το γεγονός ότι οι καθιζήσεις που σημειώθηκαν σε όλες τις αναλύσεις αυτής της σειράς ήταν μικρές, το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τον τρόπο με τον οποίο εξελίχθηκαν κατά τη διαδικασία εκσκαφής της νέας σήραγγας.



**Σχ. 4.9:** Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στο δάπεδο της προϋπάρχουσας σήραγγας (mm) σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας από τη θέση της διασταύρωσης (m)

Παρατηρώντας το σχήμα 4.9, γίνεται φανερό πως ακόμα και σε αυτές τις μικρές μετακινήσεις, η μεγαλύτερη μεταβολή συμβαίνει όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται ακριβώς κάτω από την προϋπάρχουσα και για μία διάμετρο μετά. Φυσικά, όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των σηράγγων γίνεται πιο δυσδιάκριτη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Δεύτερη φάση προσομοιώσεων – Αριθμητική ανάλυση πραγματικής περίπτωσης

#### 5.1 Εισαγωγή

Στη δεύτερη φάση αναλύσεων, επιλέχθηκε να γίνει η προσομοίωση μίας πραγματικής περίπτωσης διάνοιξης σήραγγων που πραγματοποιήθηκε στο παρελθόν. Σκοπός της συγκεκριμένης σειράς προσομοιώσεων ήταν η επαφή με τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα πραγματικό έργο διάνοιξης νέας σήραγγας κάθετα και κάτω από προϋπάρχουσα, σε αστικό περιβάλλον, η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων αλλά και η επιβεβαίωση του σωστού τρόπου χρήσης του προγράμματος προσομοίωσης, που προέκυψε τελικά μέσα από τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στο FLAC<sup>3D</sup>, της μελέτης που είχε προηγηθεί του έργου και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ενόργανη, τελικά, παρακολούθησή του κατά τη διάρκεια των εργασιών κατασκευής του.

Πέρα όμως από τους παραπάνω λόγους, η δεύτερη φάση αναλύσεων αποτέλεσε τη βάση για τις αναλύσεις της τρίτης φάσης (Κεφάλαιο 6). Στο πλαίσιο αυτής, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις, έχοντας πάντα ως βάση την ανάλυση της δεύτερης φάσης. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις και εξήχθησαν συμπεράσματα με πρακτική σημασία για το σχεδιασμό σε περιπτώσεις διάνοιξης νέας σήραγγας που διέρχεται κάθετα και σε ανισοσταθμία σε άλλη προϋπάρχουσα σήραγγα.

#### 5.2 Η περίπτωση του Σύδνεϋ

##### 5.2.1 Η επιλογή της περίπτωσης

Η περίπτωση που επιλέχθηκε να αποτελέσει το βασικό σενάριο, με το οποίο μάλιστα θα γίνουν και οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των παραμετρικών

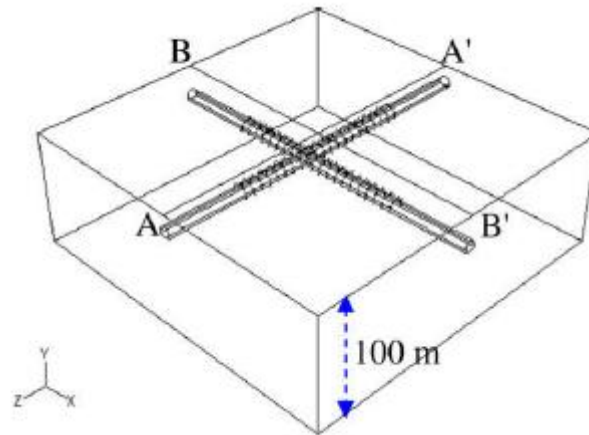
αναλύσεων, αφορά την περιοχή του Σύδνεϋ της Αυστραλίας. Η επιλογή της συγκεκριμένης περίπτωσης βασίζεται σε δύο βασικούς λόγους.

Ο πρώτος έχει να κάνει με το χρόνο κατά τον οποίο έγινε η μελέτη του συγκεκριμένου έργου. Πρόκειται για μια δουλειά των Liu H., Small J., Carter J. Και Williams D. του 2007. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, ξεκίνησε να μελετάται πιο έντονα με την ανάπτυξη των υπολογιστών και κατ' επέκταση των αριθμητικών αναλύσεων. Έτσι, η παραπάνω μελέτη ήταν από τις πρώτες που δημοσιεύθηκαν και αφορούσαν το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Συνεπώς, μέσα από τη συγκεκριμένη επιλογή γίνεται αντιληπτός ο τρόπος εξέλιξης της μεθόδου μελέτης του συγκεκριμένου προβλήματος.

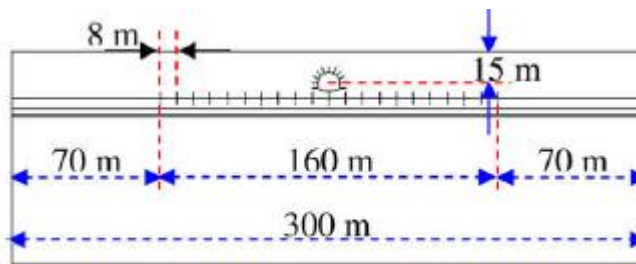
Ο δεύτερος λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περίπτωση της Αυστραλίας σχετίζεται με το γεγονός ότι η διάνοιξη των συγκεκριμένων σηράγγων δεν αποτελεί κλασική περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε αστικό περιβάλλον (π.χ. η διάνοιξη δε γίνεται με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής, αλλά ακολουθείται η «μέθοδος» NATM). Επιπλέον, λόγω των ιδιομορφιών που παρουσιάζει, και οι οποίες θα αναλυθούν στις ακόλουθες παραγράφους, απαιτεί τη χρήση ενός μεγάλου ποσοστού των δυνατοτήτων του FLAC<sup>3D</sup> και συνεπώς συμβάλλει στην αξιοποίησή του.

### **5.2.2 Περιγραφή της περίπτωσης**

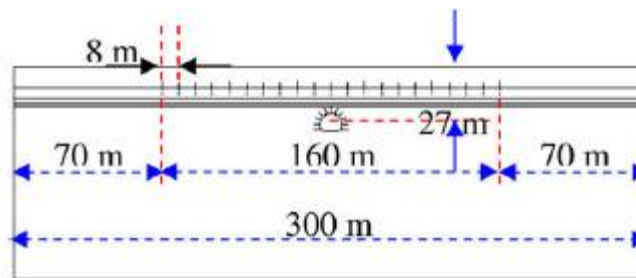
Ένα σχέδιο των κάθετα διερχόμενων σηράγγων απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Η αβαθής σήραγγα βρίσκεται σε βάθος 15 μέτρων (σχήμα 5.2α) και η βαθύτερη σήραγγα σε βάθος 27 μέτρων (σχήμα 5.2β). Έτσι, η κάθετη απόσταση μεταξύ των αξόνων των δύο σηράγγων είναι 12 μέτρα και η καθαρή απόσταση μεταξύ αναστροφου τόξου της άνω και στέψη της βαθύτερης σήραγγας είναι περίπου 3.5 μέτρα. Κάποιες από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της διάταξης, όπως φαίνονται και στο σχήμα 5.3 είναι οι εξής : Η ακτίνα και των δύο σηράγγων είναι 5 μέτρα, το πάχος της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος 250 χιλιοστά, το μήκος των αγκυρίων 3 μέτρα και η διάμετρός τους 20 χιλιοστά (Liu et al., 2009)



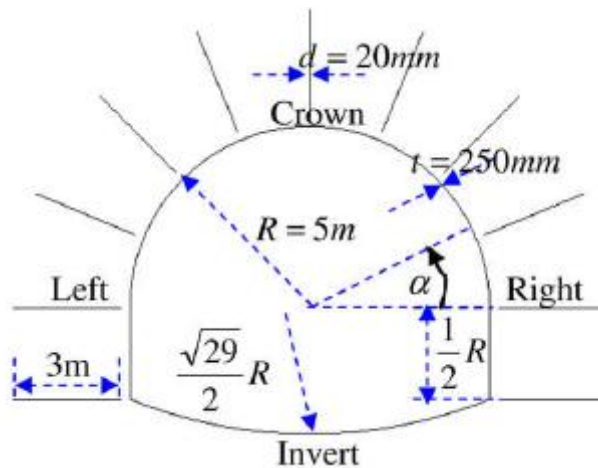
Σχ. 5.1: Τριδιάστατη απεικόνιση της περίπτωσης (Liu et al., 2009)



Σχ. 5.2α: Διδιάστατη απεικόνιση της αβαθούς σήραγγας (Liu et al., 2009)



Σχ. 5.2β: Διδιάστατη απεικόνιση της βαθύτερης σήραγγας (Liu et al., 2009)



Σχ. 5.3: Απεικόνιση της διατομής της σήραγγας (Liu et al., 2009)

Σύμφωνα με έρευνα που έχει διεξαχθεί στην μητροπολιτική περιοχή του Σύδνεϋ, οι περισσότερες από τις σήραγγες κατασκευάζονται εντός του φαμμίτη Hawkesbury, ένα πέτρωμα με αντοχή αρρήκτου σε ανεμπόδιστη θλίψη από 25 έως 45 MPa, εφελκυστική αντοχή από δοκιμή Brazilian 2 έως 3 MPa και μέτρο του Young από 2.5 έως 8 GPa. Ωστόσο, η έντονη καταπόνηση του πετρώματος (ασυνέχειες, διακλάσεις, ρήγματα) στην περιοχή του Σύδνεϋ κάνει τις ιδιότητες της βραχομάζας στην κλίμακα της σήραγγας πολύ χαμηλές. Η εκτίμηση των τιμών που έγινε για αυτές, και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην έρευνα των Liu et al. όσο και στην τριδιάστατη ανάλυση της παρούσας εργασίας ήταν οι εξής: Ειδικό βάρος  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ , μέτρο του Young  $E = 200 \text{ MPa}$ , λόγος Poisson  $\nu = 0.3$ , συνοχή  $c = 0.5 \text{ MPa}$ , γωνία τριβής  $\phi = 38^\circ$  και γωνία διασταλτικότητας  $\psi = 19^\circ$  (Liu et al., 2009)

Όσο αφορά στα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή των σηράγγων, σε αυτά περιλαμβάνονται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Στην αρχική έρευνα δε γίνεται λόγος για τη μόνιμη επένδυση. Θεωρείται πως οι ερευνητές έκαναν την παραδοχή πως η μόνιμη επένδυση παραλαμβάνει τα ίδια φορτία με αυτά που είχε παραλάβει αρχικά η προσωρινή, μετά την απαξίωση των μέτρων της προσωρινής υποστήριξης. Έτσι, λοιπόν, επιστρέφοντας στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν, για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εκτιμήθηκε μέτρο του Young  $E = 35 \text{ GPa}$ , λόγος Poisson  $\nu = 0.25$  και τάση διαρροής  $\sigma_{\text{yield}} = 20 \text{ MPa}$ . Από την άλλη πλευρά τα αγκύρια είχαν μέτρο του Young  $E = 200 \text{ GPa}$ ,

λόγο Poisson  $\nu = 0.3$  και τάση διαρροής  $\sigma_{\text{yield}} = 400 \text{ MPa}$ . Επιπλέον, τα αγκύρια υπόκεινται σε μία αρχική προένταση με εφελκυστικές δυνάμεις της τάξης των 20 έως 60 kN.

Κατά τη μελέτη των γεωστατικών τάσεων στη μητροπολιτική περιοχή του Σύδνεϋ, προέκυψε ότι μπορούν να αποτυπωθούν με τις παρακάτω τρεις εξισώσεις :

- $\sigma_x = \sigma_{\text{NS}} = 1.5 + 1.2\sigma_v \text{ MPa}$
- $\sigma_y = \sigma_{\text{WE}} = 0.5\sigma_x \text{ MPa}$
- $\sigma_z = \sigma_v = 0.024H \text{ MPa}$

Όπου  $\sigma_v$  είναι η κατακόρυφη τάση, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από το ίδιο βάρος της βραχομάζας και το βάθος  $H$  σε κάθε σημείο,  $\sigma_{\text{NS}}$  είναι η οριζόντια τάση που είναι παράλληλη στον άξονα της βαθιάς σήραγγας και  $\sigma_{\text{WE}}$  είναι η οριζόντια τάση παράλληλη στον άξονα της αβαθούς σήραγγας.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η διάνοιξη των σηράγγων πραγματοποιήθηκε με τη «μέθοδο» NATM και το βήμα προχώρησης ήταν  $L = 4$  μέτρα (Liu et al., 2009).

## 5.3 Κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου

### 5.3.1 Προετοιμασία του μοντέλου

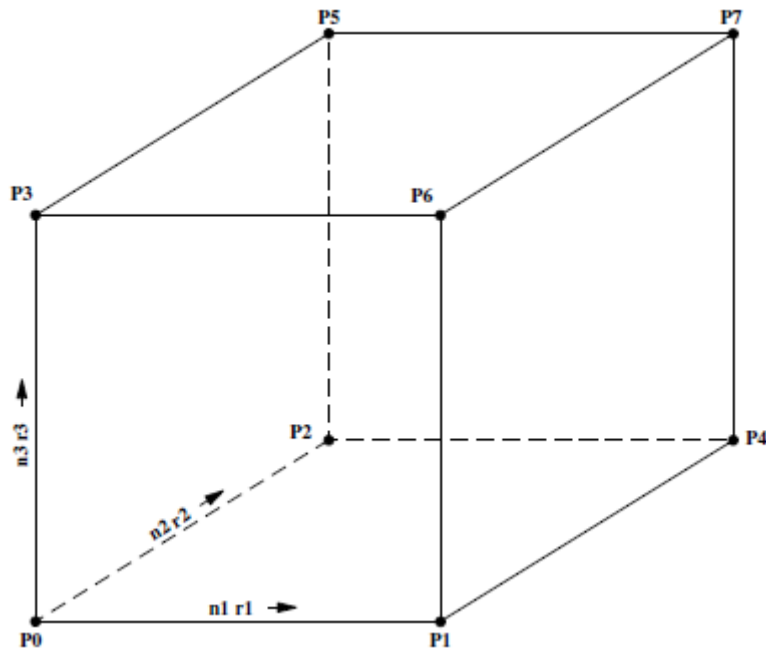
Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά της γεωμάζας και των μέτρων υποστήριξης των σηράγγων, πρέπει να αποτυπωθούν στο τριδιάστατο λογισμικό  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, έτσι ώστε να υπάρξουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτό επιτεύχθηκε με την εισαγωγή στο πρόγραμμα αρχείων κειμένου, τα οποία περιέχουν εντολές του κώδικα  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  και ενίοτε, όποτε κρίθηκε αναγκαίο ρουτίνες της γλώσσας προγραμματισμού FISH. Όπως σε όλες τις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, έτσι και στην ανάλυση της βασικής περίπτωσης, αυτή χωρίστηκε σε τρία στάδια και συνεπώς κατασκευάστηκαν τρία από τα προαναφερθέντα αρχεία κειμένου. Το πρώτο από αυτά περιλαμβάνει τις εντολές για την προετοιμασία του μοντέλου, το δεύτερο για τη διάνοιξη της σήραγγας που στο πρόβλημά μας αποτελεί την

προϋπάρχουσα και τέλος, το τρίτο περιλαμβάνει τις εντολές για τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Η διαδικασία για την κατασκευή του μοντέλου περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Ξεκινώντας η κατασκευή του μοντέλου και κατ' επέκταση στο πρώτο από τα τρία αρχεία κειμένου, προσδιορίζεται ο τίτλος της ανάλυσης. Έπειτα, από αυτό το πρώτο σύντομο βήμα ακολουθεί η πλέον σημαντική διαδικασία κατασκευής του καννάβου του μοντέλου, η οποία στην έκδοση FLAC<sup>3D</sup> 4.00 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, γίνεται κατά βάση με χρήση της εντολής "**generate zone**". Η δημιουργία του καννάβου πραγματοποιείται με τη σύνδεση πολλών προτύπων δομικών στοιχείων. Το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> δίνει τη δυνατότητα χρήσης δεκατριών διαφορετικών τύπων τέτοιων δομικών στοιχείων. Προσδιορίζοντας λοιπόν, με κάθε εντολή τον τύπο των δομικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, μαζί με τις απαραίτητες συντεταγμένες ( $P_0$ ,  $P_1$ , κλπ.) και τα βασικά μεγέθη (*size* –  $n_1$ ,  $n_2$ , κλπ., *ratio* –  $r_1$ ,  $r_2$ , κλπ. και *dimension* –  $d_1$ ,  $d_2$ , κλπ.) δημιουργείται ένα σύνολο ζωνών. Το FLAC<sup>3D</sup> έχει τη δυνατότητα δημιουργίας καννάβων που προκύπτουν από τη συνδυασμένη χρήση διαφορετικών τύπων πρότυπων στοιχείων. Αυτό συνέβη και στη συγκεκριμένη ανάλυση, καθώς το απαιτούσε η γεωμετρία των σηράγγων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρίες "radial tunnel" και "radial cylinder" για την προσομοίωση της βραχόμαζας στην περιοχή των σηράγγων και στοιχεία γεωμετρίας "brick" για την προσομοίωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας. Το μοντέλο που περιγράφεται σε αυτή την παράγραφο αποτελείται από συνολικά 78100 ζώνες πεπερασμένων διαφορών.



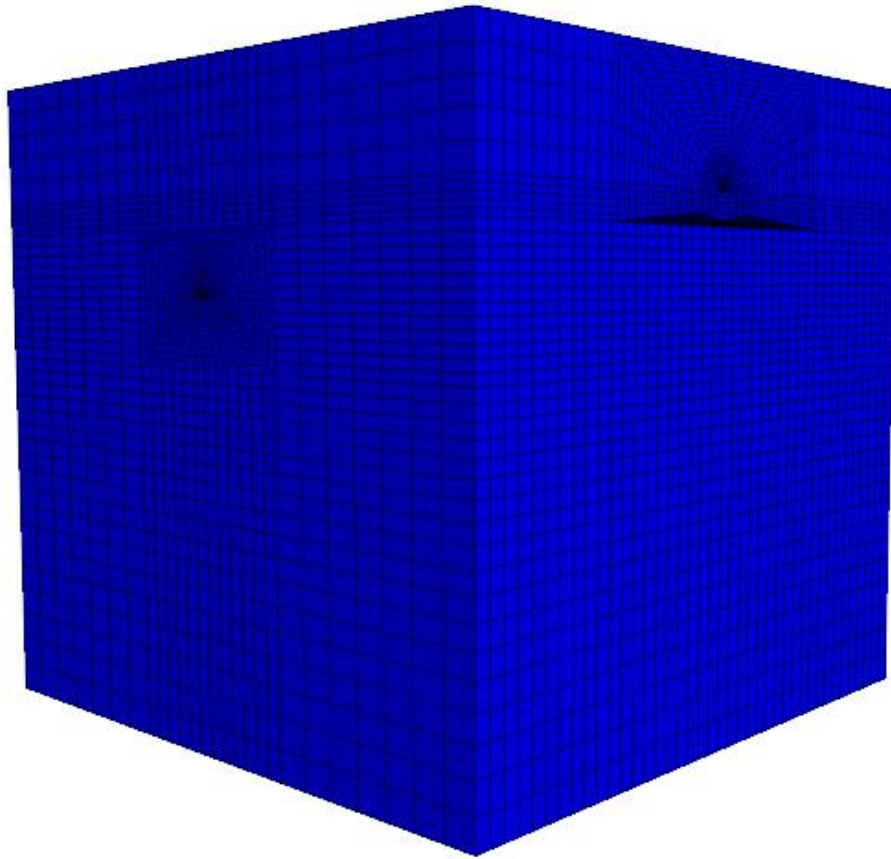




Σχ. 5.4γ

Σχ. 5.4: Τρεις τυπικές γεωμετρίες καννάβου του FLAC<sup>3D</sup>: (α) “Radial Tunnel”, (β) “Radial Cylinder” και (γ) “Brick” (Itasca, 2009)

Στο σχήμα 5.5 απεικονίζεται ο κάρναβος πεπερασμένων διαφορών για την περιοχή, όπου στη συνέχεια θα διανοιχθούν οι σήραγγες. Οι διαστάσεις του είναι 80m x 80m x 80m. Η επιλογή αυτή έγινε, έτσι ώστε οι εξωτερικές πλευρές του καννάβου, στις οποίες στη συνέχεια θα τεθούν αρχικές συνοριακές συνθήκες να απέχουν τουλάχιστον τρεις διαμέτρους από τις σήραγγες και έτσι να μην επηρεάσουν το μοντέλο κατά τη διαδικασία της επίλυσης. Από το ίδιο σχήμα, γίνεται φανερό πως ο κάρναβος στην περιοχή διασταύρωσης των σηράγγων είναι πιο πυκνός, δηλαδή έχουν δημιουργηθεί περισσότερες ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί κοντά στην περιοχή αυτή θέλουμε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση του μοντέλου και συνεπώς να λάβουμε ακριβέστερα αποτελέσματα. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης διακριτοποίησης του καννάβου στην περιοχή της διασταύρωσης, βεβαιώνεται πως θα υπολογιστούν και οι αλλαγές στα μεγέθη που μας αφορούν λόγω της διέλευσης της νέας σήραγγας από εκεί.



**Σχ. 5.5:** Τριδιάστατος κάναβος μοντέλου στο FLAC<sup>3D</sup> πριν τη διάνοιξη των σηράγγων

Σαν επόμενο βήμα στην προετοιμασία του μοντέλου, γίνεται η ομαδοποίηση και η ονομασία ζωνών (με την εντολή **“group zone”**). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μας ομαδοποιούνται οι ζώνες που αντιστοιχούν στις δύο σήραγγες. Αυτό γίνεται με σκοπό τον ευκολότερο και πιο άμεσο προσδιορισμό των ζωνών που θα χρειαστεί να απενεργοποιηθούν στη συνέχεια, όταν θα γίνει η διάνοιξη των σηράγγων. Η ομάδα ζωνών της άνω σήραγγας ονομάζεται “shallow tunnel” και της βαθύτερης σήραγγας “deep1 tunnel”.

Ακολουθώντας, ορίζεται το κριτήριο βάσει του οποίου θα λειτουργήσει το μοντέλο, καθώς και οι απαραίτητες ιδιότητές του. Στην περίπτωση που στο μοντέλο έχουν πραγματοποιηθεί ομαδοποιήσεις, αυτές μπορούν να χρησιμεύσουν, ώστε να οριστεί διαφορετικό κριτήριο στις ζώνες τους. Το

FLAC<sup>3D</sup> δίνει τη δυνατότητα χρήσης δεκατριών μοντέλων, καθένα από τα οποία ταιριάζει περισσότερο να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Στην ανάλυσή μας, για τις ζώνες που θα προσομοιώσουν τη βραχομάζα ορίστηκε να λειτουργήσουν με το κριτήριο “Mohr-Coulomb plasticity”. Το κριτήριο αυτό είναι το πιο συχνά εφαρμοζόμενο για γενικές μελέτες μηχανικής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για υλικά τα οποία διαρρέουν, όταν υπόκεινται σε διατμητικά φορτία, αλλά η τάση διαρροής βασίζεται μόνο στην κύρια και ελάχιστη κύρια τάση (Itasca, 2009). Για αυτό το λόγο μάλιστα, συστήνεται από την Itasca, για χρήση, μεταξύ άλλων, στις εφαρμογές υπόγειων εκσκαφών.

Για να οριστεί το μοντέλο “Mohr-Coulomb plasticity” απαιτείται ο προσδιορισμός έξι παραμέτρων της βραχομάζας. Αυτές είναι το μέτρο συστολής (K, “*bulk*”), το μέτρο διάτμησης (G, “*shear*”), η γωνία εσωτερικής τριβής (“*friction*”), η συνοχή (“*cohesion*”), η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό (“*tension*”) και η γωνία διασταλτικότητας (“*dilation*”). Εντός των παρενθέσεων σημειώνονται οι αντίστοιχες λέξεις κλειδιά που ακολουθούν την εντολή “**property**”. Τα μέτρα συστολής και διάτμησης χρησιμοποιούνται στο FLAC<sup>3D</sup> αντί του μέτρου ελαστικότητας του Young (E) και του λόγου Poisson ν, καθώς θεωρείται πως ανταποκρίνονται σε περισσότερες αρχές της συμπεριφοράς των υλικών. Οι τιμές καθενιάς από τις παραπάνω παραμέτρους, προσδιορίστηκαν ως οι τιμές των παραμέτρων της βραχομάζας που είχαν καθοριστεί από την αρχική μελέτη (Liu et al., 2009) και ήταν 166.67 MPa, 76.92 MPa, 38°, 0.5 MPa, 0.64 MPa και 19°, αντίστοιχα. Τα μέτρα συστολής και διάτμησης υπολογίστηκαν συναρτήσει του γνωστού μέτρου του Young (E = 200MPa) και του λόγου Poisson (ν = 0.3) σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνει η Itasca, για λόγο Poisson όμως, που δεν πλησιάζει το 0.5 (Itasca, 2009). Οι εξισώσεις αυτές είναι :

- $$K = \frac{E}{3*(1-2\nu)}$$

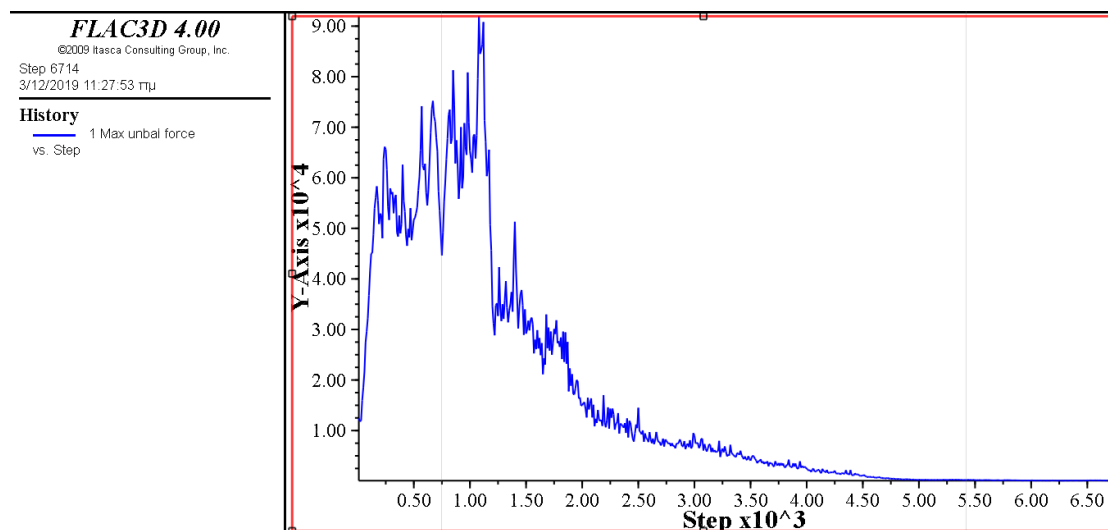
- $$G = \frac{E}{2*(1+\nu)}$$

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως στην αρχική έρευνα θεωρείται πως η βραχομάζα είναι ξηρή και το υπόγειο νερό δε λαμβάνεται υπόψη, κατά συνέπεια το ίδιο συμβαίνει και στην παρούσα ανάλυση.

Στη συνέχεια δίνονται όλα τα αρχικά μεγέθη που πρέπει να ισχύουν είτε σε ολόκληρο το μοντέλο είτε σε συγκεκριμένες ζώνες, καθώς επίσης και οι συνοριακές συνθήκες. Αρχικά, καθορίστηκε η πυκνότητα του πετρώματος σε  $2400 \text{ kg/m}^3$  (εντολή "**initial density**", με σκοπό να καθοριστεί αμέσως μετά η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συγκεκριμένα, καθορίστηκε ως  $9.81 \text{ m/s}^2$  κατά τη διεύθυνση του άξονα z και με φορά προς το κέντρο της Γης (μέσω της εντολής "**set gravity 0 0 -9.81**"). Το αρχικό εντατικό πεδίο καθορίστηκε (μέσω της εντολής "**initial sxx syy szz**") σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνονται στην έρευνα των Liu et. al για το γεωστατικό πεδίο. Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί, πως όπως φαίνεται και από τις προαναφερθείσες εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου, η οριζόντια κύρια τάση είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη. Όσο αφορά στις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου (εντολή "**fix x y z**") θεωρήθηκε πως υπάρχουν κυλίσεις στις πλευρικές επιφάνειες του καννάβου, η κάτω επιφάνεια είναι πακτωμένη ενώ η πάνω επιφάνεια που προσομοιώνει την επιφάνεια του εδάφους αφέθηκε ελεύθερη σε οποιαδήποτε κίνηση.

Έπειτα από όλα τα παραπάνω βήματα, το μοντέλο είναι έτοιμο να πραγματοποιήσει μία επίλυση (μέσω της εντολής "**solve**"), έτσι ώστε να ισορροπήσει έπειτα από τις αρχικές συνθήκες που του τέθηκαν. Η επίλυση στο FLAC<sup>3D</sup> μπορεί να συνδυαστεί με διάφορες περιοριστικές συνθήκες, έτσι ώστε να καθοριστεί το χρονικό σημείο τερματισμού της. Τέτοιες συνθήκες μπορεί να είναι είτε ο αριθμός των βημάτων (εντολή "**cycle**") είτε ο λόγος της μέγιστης μη εξισορροπημένης δύναμης των κόμβων του πλέγματος σε κάθε χρονικό βήμα, προς την αντίστοιχη μέγιστη δύναμη στην αρχή της επίλυσης. Σε όλες τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας και σε όλα τα στάδια, ως περιοριστική συνθήκη χρησιμοποιήθηκε ο προαναφερθείς λόγος (μέσω της εντολής "**solve ratio**"). Η τιμή του λόγου αυτού στην παρούσα φάση ορίστηκε ως  $10^{-7}$ . Η επιλογή της γίνεται σε κάθε περίπτωση, έπειτα από δοκιμές και βάσει του πότε το μοντέλο «ισορροπεί». Αυτό, γίνεται αντιληπτό

από το αντίστοιχο διάγραμμα της «μέγιστης μη εξισορροπημένης δύναμης», όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6. Για να ληφθεί αυτό το διάγραμμα, που ουσιαστικά αποτελεί μία «χρονοϊστορία» της διαδικασίας επίλυσης, έχει ζητηθεί πριν από την έναρξή της, μέσω της εντολής “*history add unbalance*”.



Σχ. 5.6: Διάγραμμα «χρονοϊστορίας» για τη μέγιστη μη εξισορροπημένη δύναμη

### 5.3.2 Διάνοιξη της πρώτης (προϋπάρχουσας) σήραγγας

Αυτό που διερευνάται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η επίδραση της διάνοιξης μίας νέας σήραγγας στα μέτρα υποστήριξης μίας προϋπάρχουσας σήραγγας. Ωστόσο, η σήραγγα που θα παίξει το ρόλο της προϋπάρχουσας δεν μπορεί να προσομοιωθεί ως κατασκευασμένη εξ' αρχής. Αυτό σχετίζεται με την αλληλεπίδραση που έχει με την περιβάλλουσα βραχομάζα κατά τη διαδικασία διάνοιξής της. Κατά συνέπεια, η διάνοιξή της προσομοιώνεται σαν να πρόκειται για μία νέα σήραγγα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής θα θεωρηθούν ως κατάσταση αναφοράς κατά την έναρξη της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας, η οποία και θα παίξει το ρόλο της νέας.

Η διάνοιξη της πρώτης σήραγγας, η οποία στην περίπτωση της βασικής ανάλυσης που εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο είναι αυτή που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος, αποτελεί τη δεύτερη φάση της ανάλυσης και οι εντολές για την πραγματοποίησή της έχουν καταγραφεί σε ένα δεύτερο αρχείο κειμένου. Αυτό το αρχείο κειμένου ξεκινά με τις εντολές που αφορούν το μηδενισμό των μετακινήσεων που έχουν καταγραφεί στο μοντέλο από την προηγούμενη

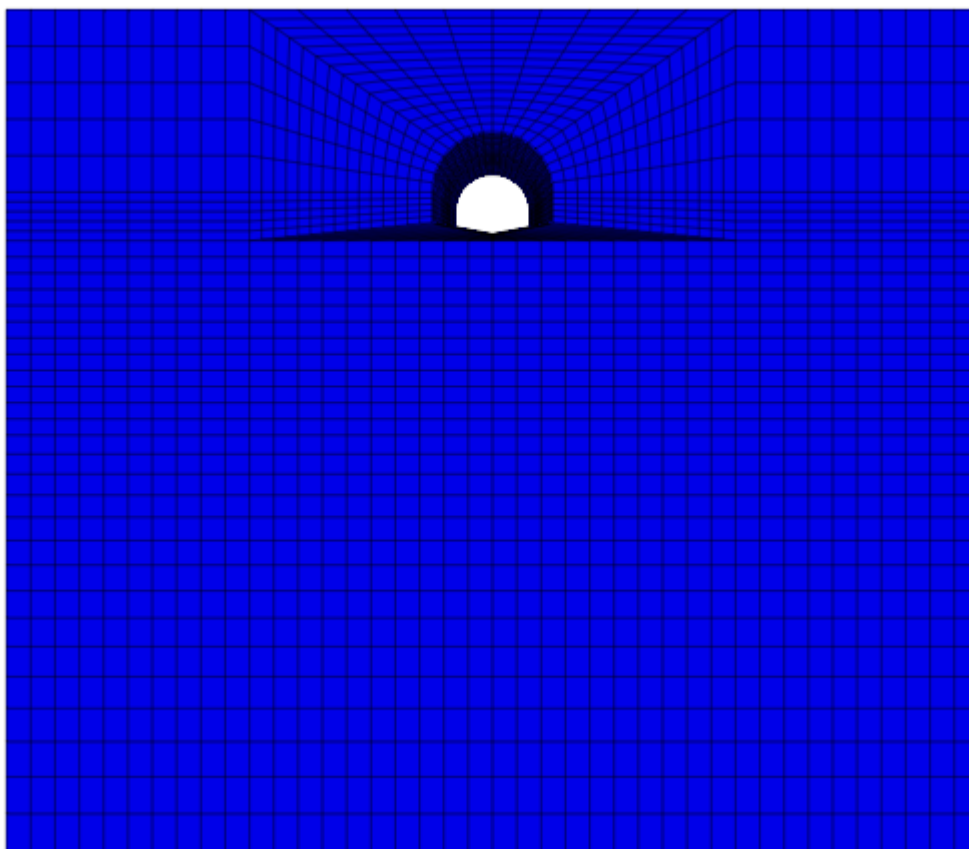
φάση της ανάλυσης. Σκοπός αυτής της ενέργειας είναι να μη ληφθούν υπόψη στη συνέχεια μετακινήσεις που δεν έχουν φυσική σημασία. Κατά την πρώτη φάση, οι μετακινήσεις αυτές προέκυψαν κατά τη διαδικασία ισορρόπησης του μοντέλου, έπειτα από την εφαρμογή των αρχικών συνθηκών και συγκεκριμένα του γεωστατικού πεδίου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η ύπαρξη αυτού του γεωστατικού πεδίου είναι η φυσιολογική κατάσταση και κατά συνέπεια δεν προκαλούνται οι προαναφερθείσες μετακινήσεις. Οι εντολές μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο μηδενισμός είναι "*initial xdisplacement 0*", "*initial ydisplacement 0*" και "*initial zdisplacement 0*".

Στη συνέχεια του αρχείου κειμένου ακολουθεί μία ρουτίνα FISH, η οποία περιλαμβάνει εντολές που αφορούν την εκσκαφή και την υποστήριξη της σήραγγας. Ο βασικός λόγος που έγινε χρήση της γλώσσας προγραμματισμού FISH και δε χρησιμοποιήθηκαν απλά εντολές του κώδικα FLAC<sup>3D</sup> σχετίζεται με την αλληλουχία των εργασιών κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη «μέθοδο» NATM. Δηλαδή, αφού γίνει το πρώτο βήμα προχώρησης, πρέπει να γίνει επίλυση του μοντέλου, στη συνέχεια να γίνει το δεύτερο βήμα προχώρησης και να τοποθετηθεί η υποστήριξη στην περιοχή της σήραγγας που αντιστοιχεί στο πρώτο βήμα προχώρησης, το μοντέλο να επιλυθεί και η διαδικασία αυτή να επαναληφθεί έως ότου να κατασκευαστεί ολόκληρη η σήραγγα. Η διαδικασία αυτή δε γίνεται να προγραμματιστεί εξ' αρχής μόνο με εντολές του κώδικα FLAC<sup>3D</sup>, εκτός και αν ο χρήστης δίνει τις εντολές ύστερα από κάθε βήμα προχώρησης, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρονοβόρο. Έτσι, λοιπόν με τη γλώσσα FISH προγραμματίζεται να επαναλαμβάνεται κάθε φορά η ρουτίνα «εκσκαφή – υποστήριξη – επίλυση» μετά το τέλος της προηγούμενης. Για να φτάσει όμως η έναρξη της ανάλυσης, πρέπει να οριστεί η ρουτίνα μέσω των παραμέτρων για την εκσκαφή και την υποστήριξη αλλά και ο τρόπος με τον οποίο θα εκτελεστεί.

Αρχικά ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων της ρουτίνας μέσω της εντολής "*loop*". Στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνονται 21 επαναλήψεις, μία για κάθε βήμα προχώρησης. Αυτό, γιατί στην προσομοίωση οι σήραγγες θεωρήθηκε ότι έχουν μήκος 80 μέτρα και το βήμα προχώρησης είναι 4 μέτρα. Η μία

επιπλέον επανάληψη αφορά την επίλυση του μοντέλου μετά και την τοποθέτηση του τελευταίου τμήματος της υποστήριξης.

Εν συνεχεία καθορίζονται οι παράμετροι βάσει των οποίων θα γίνεται η εκσκαφή. Ορίζεται ως βήμα προχώρησης τα 4 μέτρα και δίνεται μία εξίσωση που θα δίνει τις θέσεις, ανάμεσα στις οποίες θα δημιουργείται κενός χώρος, προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο την εκσκαφή. Η δημιουργία κενού στο εσωτερικό του καννάβου αποτελεί τύπο μοντέλου του  $FLAC^{3D}$ . Συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή "*model mechanical null*" και το αντίστοιχο εύρος του καννάβου που θα εφαρμοστεί. Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ο κάνναβος του μοντέλου (χωρίς τα μέτρα υποστήριξης), όταν έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή της άνω σήραγγας.



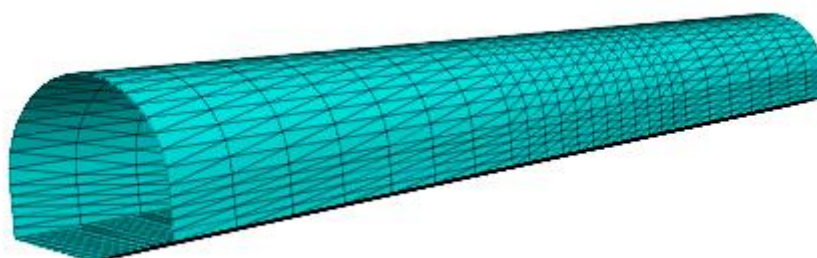
Σχ. 5.7: Ο κάνναβος του μοντέλου μετά την εκσκαφή της άνω σήραγγας

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να εξηγηθεί ο λόγος που το ανάστροφο τόξο σχεδιάστηκε, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7. Το γεγονός της προσομοίωσής του ως δύο κεκλιμένα επίπεδα και όχι σαν τόξο δε σχετίζεται φυσικά με την



πραγματικότητα, αλλά έχει να κάνει με τους περιορισμούς που θέτει το πρόγραμμα στο σχεδιασμό του καννάβου και τη γεωμετρία του συγκεκριμένου προβλήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για το σχεδιασμό του μοντέλου απαιτείται η σύνδεση δύο διαφορετικών καννάβων, έναν για κάθε σήραγγα και η κατακόρυφη ελεύθερη απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων είναι περίπου 3.5 μέτρα. Η σύνδεση των δύο καννάβων επιλέχθηκε να γίνει σε βάθος -20 μέτρων, ενώ το δάπεδο της άνω σήραγγας φτάνει σε βάθος -18.5 μέτρων. Συνεπώς, αν σε εκείνο το σημείο διαμορφώνονταν καμπύλο τμήμα, δε θα ήταν δυνατή η σύνδεση των δύο διαφορετικών τμημάτων του καννάβου.

Το επόμενο βήμα αφορά τον προγραμματισμό της τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης. Ξεκινώντας από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καθορίζονται οι θέσεις τοποθέτησής του μέσω εξισώσεων, συναρτήσεως της επανάληψης της ρουτίνας FISH και στη συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση και δίνονται οι ιδιότητες που θα έχει. Για την προσομοίωσή του χρησιμοποιούνται στοιχεία υποστήριξης τύπου κελύφους (shell), όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3. Συνεπώς, η εντολή με την οποία γίνεται η τοποθέτηση είναι η "**sel shell**" σε συνδυασμό με το εκάστοτε εύρος. Όσο αφορά στις ιδιότητες που θα έχει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αυτές δίνονται με την εντολή "**sel shell property**". Οι λέξεις που ακολουθούν την εντολή αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις ιδιότητες που πρέπει να καθοριστούν. Αρχικά, το υλικό προσδιορίζεται ως ισότροπο (*isotropic*) και κατά συνέπεια πρέπει να οριστούν οι αντίστοιχες ιδιότητες μέτρο του Young (E) και λόγος Poisson ( $\nu$ ). Οι τιμές που δόθηκαν ήταν 35 GPa και 0.25 αντίστοιχα, σε συμφωνία με τις τιμές που έδιναν στην έρευνά τους οι Liu et al. (2009). Τέλος, καθορίστηκε και το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε 25 εκατοστά. Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της πρώτης σήραγγας.

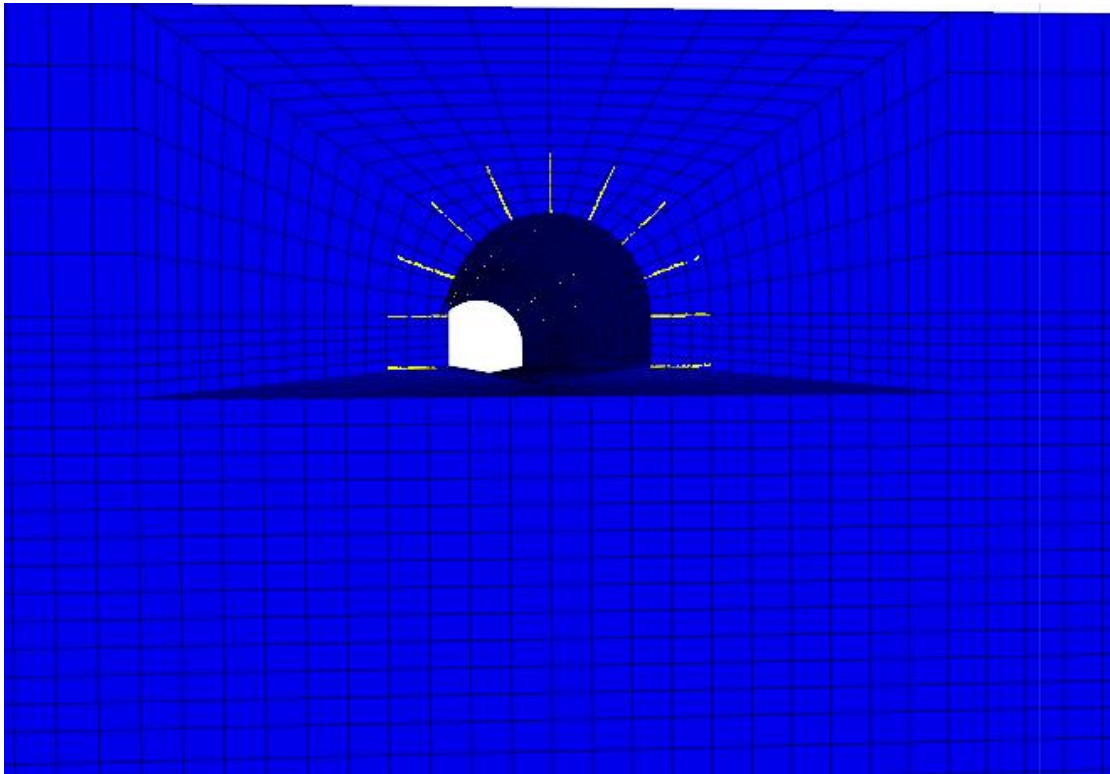


**Σχ. 5.8:** Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που τοποθετήθηκε στην άνω σήραγγα

Στη συνέχεια του δεύτερου αρχείου κειμένου προγραμματίζεται η τοποθέτηση των αγκυρίων και η εισαγωγή των ιδιοτήτων τους. Πρώτα απ' όλα δίνεται ένας αριθμός σε καθένα από αυτά, ως ταυτότητα που θα χρησιμεύσει στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ωστόσο, τα αγκύρια είναι περισσότερα από τα στοιχεία σκυροδέματος, οπότε σε αυτή την περίπτωση η ταυτοποίησή τους κρίνεται απαραίτητη.

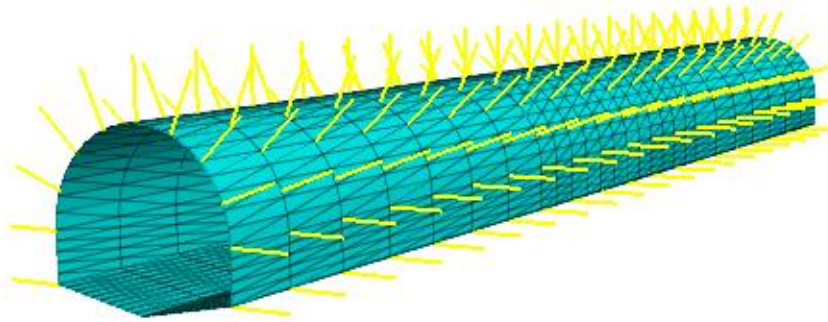
Ακολουθούν οι εντολές για την τοποθέτηση των αγκυρίων. Παρά το γεγονός ότι η αρχική έρευνα παρουσιάζει ότι η τοποθέτηση αγκυρίων έγινε κάθε 8 μέτρα προχώρησης, στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκε να τοποθετηθούν όπως συνηθίζεται στη σηραγγοποιεία, δηλαδή μετά από κάθε βήμα προχώρησης και συγκεκριμένα μία σειρά αγκυρίων στο καθένα. Ήταν 11 στον αριθμό ανά βήμα προχώρησης. Καθώς το λογισμικό  $FLAC^{3D}$  δε δίνει τη δυνατότητα απ' ευθείας σχεδίασης πάνω στον κάρναβο από τον χρήστη, για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των αγκυρίων μήκους τριών μέτρων που τοποθετήθηκαν ανά 2.5 μέτρα μεταξύ τους, έγινε αρχικά η σχεδιάσή τους στο πρόγραμμα Phase2. Από εκεί λήφθηκαν οι συντεταγμένες που σε συνδυασμό με την εντολή "*sel cable*" οδήγησαν στην τοποθέτηση των αγκυρίων. Προχωρώντας προσδιορίστηκαν και οι ιδιότητες των αγκυρίων. Έξι είναι οι ιδιότητες που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα και αφορούν τα αγκύρια, έτσι ώστε να θεωρούνται ενεργά. Η πρώτη αφορά τη διατομή τους (*xcarea*) και προσδιορίστηκε ως  $3.14 \text{ cm}^2$  και με βάση τον τύπο  $A = (\pi * D^2)/4$ , γνωρίζοντας τη διάμετρο των αγκυρίων που δίνεται  $D = 2 \text{ cm}$ . Επιπλέον, προσδιορίζεται το μέτρο του Young για τα αγκύρια (*emod*) στα 200 GPa και οι

δυνάμεις διαρροής σε εφελκυσμό και σε θλίψη (*ytens* και *ycomp* αντίστοιχα). Η δύναμη για την περίπτωση του εφελκυσμού προέκυψε από τη γνωστή τάση διαρροής που είναι 400 MPa και τη διατομή των αγκυρίων με χρήση του τύπου  $\sigma_{yield} = F_{yield}/A$ . Για την αντίστοιχη δύναμη θλίψης χρησιμοποιήθηκε η ίδια τιμή με την περίπτωση του εφελκυσμού, καθώς στην περίπτωση μας αν αστοχήσουν τα αγκύρια, αυτό θα συμβεί σε συνθήκες εφελκυσμού. Οι δύο εναπομείνουσες απαραίτητες ιδιότητες αφορούν το ένεμα και πρόκειται για την αντοχή και την ακαμψία του (*gr\_coh* και *gr\_k* αντίστοιχα). Τέλος, εφαρμόστηκε και προένταση στα αγκύρια τιμής 40 kN με τη χρήση της εντολής “*sel cable pretension*”. Στο σχήμα 5.9 φαίνονται τα τοποθετημένα στην άνω σήραγγα αγκύρια.



**Σχ. 5.9:** Αγκύρια στην άνω σήραγγα

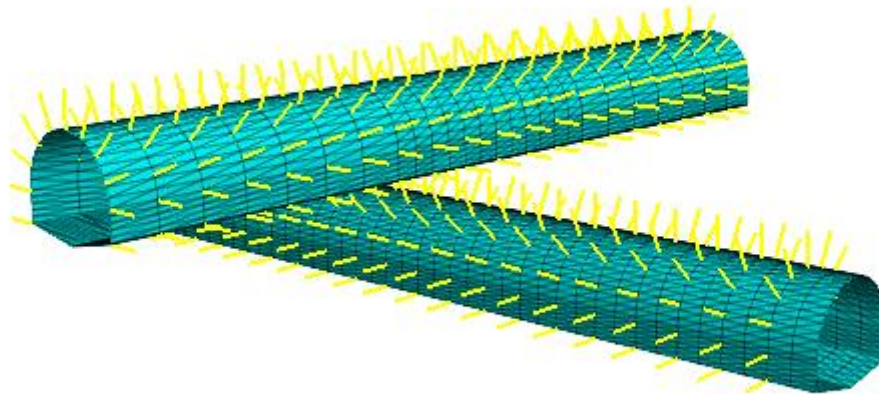
Τα μέτρα υποστήριξης ομαδοποιούνται σε ένα group με σκοπό να τεθεί σε αυτά το ελαστικό μοντέλο (*elastic isotropic*). Το μοντέλο αυτό προτείνεται για ομογενή υλικά, ισότροπα μέσα και για υλικά που παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά τάσης – τροπής. Ύστερα από αυτό το βήμα, δίνεται εντολή για επίλυση του μοντέλου και το δεύτερο αρχείο κειμένου ολοκληρώνεται με την εντολή για εκτέλεση της ρουτίνας «εκσκαφής – υποστήριξης – επίλυσης».



Σχ. 5.10: Η άνω (αβαθής) σήραγγα με τα μέτρα άμεσης υποστήριξης

### 5.3.3 Διάνοιξη της δεύτερης (νέας) σήραγγας

Η διάνοιξη της βαθύτερης σήραγγας έγινε με τη χρήση μιας παρόμοιας ρουτίνας εντολών της γλώσσας FISH. Ουσιαστικές διαφορές δεν υπήρξαν, καθώς το βήμα προχώρησης και οι ιδιότητες των μέτρων υποστήριξης ήταν ίδια με τα αντίστοιχα της προηγούμενης σήραγγας. Δύο ήταν οι διαφορές σε αυτή την περίπτωση. Προγραμματίστηκε να αποθηκευτούν τα μοντέλα πέρα από την τελική κατάσταση, δηλαδή τη φάση ολοκλήρωσης της σήραγγας και σε τέσσερις ακόμη φάσεις. Αυτές ήταν όταν το μέτωπο της σήραγγας θα βρίσκονταν σε απόσταση δύο διαμέτρων και μίας διαμέτρου πριν από τη θέση διασταύρωσης των σήραγγων και σε απόσταση μίας και δύο διαμέτρων μετά τη θέση διασταύρωσης τους. Σκοπός αυτής της ενέργειας είναι να ληφθούν στην επόμενη φάση, αποτελέσματα σε αυτές τις θέσεις, ώστε να γίνει αντιληπτή η εξέλιξη μεταβολής των διαφόρων μεγεθών στην προϋπάρχουσα σήραγγα σε σχέση με τη θέση του μετώπου της νέας σήραγγας. Μία ακόμη αλλαγή έχει να κάνει με την περιοριστική συνθήκη που τέθηκε για την επίλυση του μοντέλου. Σε αυτή τη φάση, υπάρχουν περισσότερα δεδομένα, το σύστημα πρέπει να επιλύσει περισσότερες εξισώσεις, για να «ισοροπηθεί» και κατά συνέπεια ως περιοριστική συνθήκη τίθεται μικρότερος λόγος μέγιστης μη εξισοροπημένης δύναμης των κόμβων του πλέγματος προς την αντίστοιχη μέγιστη δύναμη στην αρχή της επίλυσης.



Σχ. 5.11: Οι σήραγγες μετά το πέρας της ανάλυσης

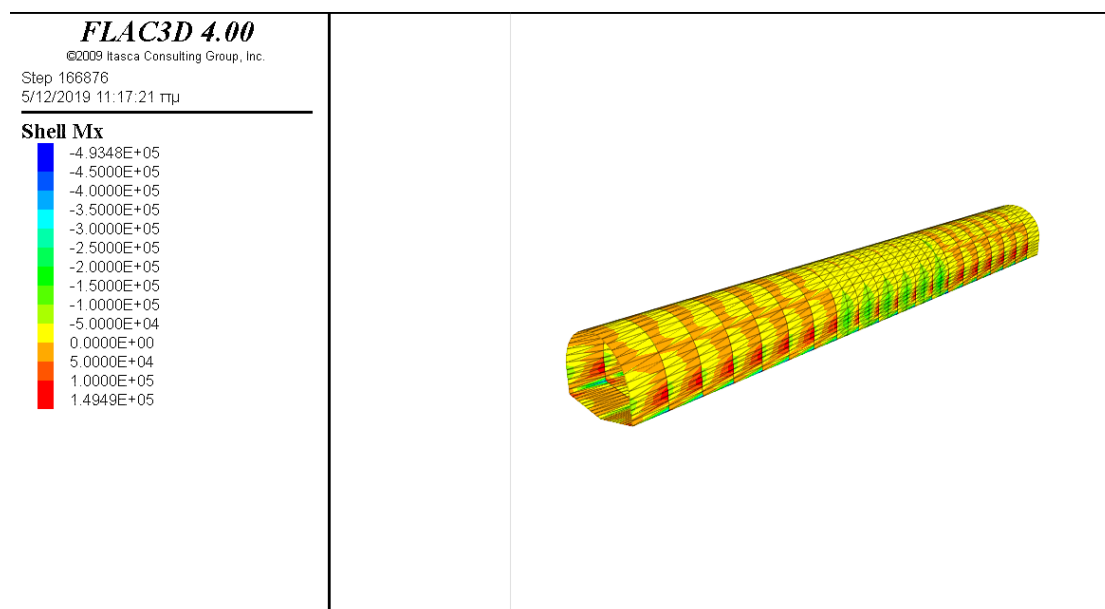
## 5.4 Αποτελέσματα

Μετά το πέρας της προσομοίωσης λήφθηκαν τα αποτελέσματα και έγινε η απαιτούμενη επεξεργασία, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της διάνοιξης νέας σήραγγας που διέρχεται κάθετα κάτω από προϋπάρχουσα, στα μέτρα υποστήριξης της τελευταίας. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν θα αφορούν τόσο στις μετακινήσεις που προκαλούνται στην προϋπάρχουσα σήραγγα όσο και στις μεταβολές σε δυνάμεις και ροπές των μέτρων υποστήριξής της.

### 5.4.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας

Στο πλαίσιο του υπολογισμού των μεγεθών που μας αφορούν στα μέτρα υποστήριξης, παρουσιάζονται αποτελέσματα για το σκυρόδεμα και τα αγκύρια στις διάφορες φάσεις της προσομοίωσης. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας δίνονται υπό μορφή διαγραμμάτων οι τιμές των ροπών και των αξονικών δυνάμεων σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της και για διαφορετικές θέσεις της εκάστοτε τομής. Συγκεκριμένα, τα παραπάνω μεγέθη θα παρουσιαστούν στην αριστερή και δεξιά παρειά της σήραγγας, στη

στέψη και στο δάπεδό της. Οι θέσεις, μάλιστα, στις οποίες θα δοθούν οι τιμές στις παρειές της σήραγγας είναι αυτές που παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή της ροπής.

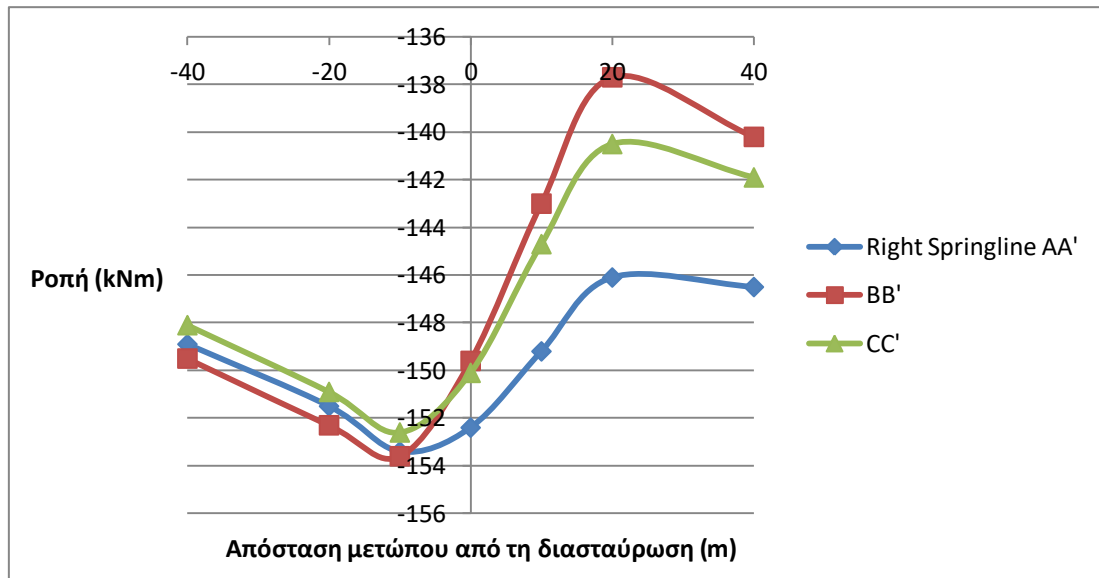


**Σχ. 5.12:** Απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν τη διάνοιξη της νέας

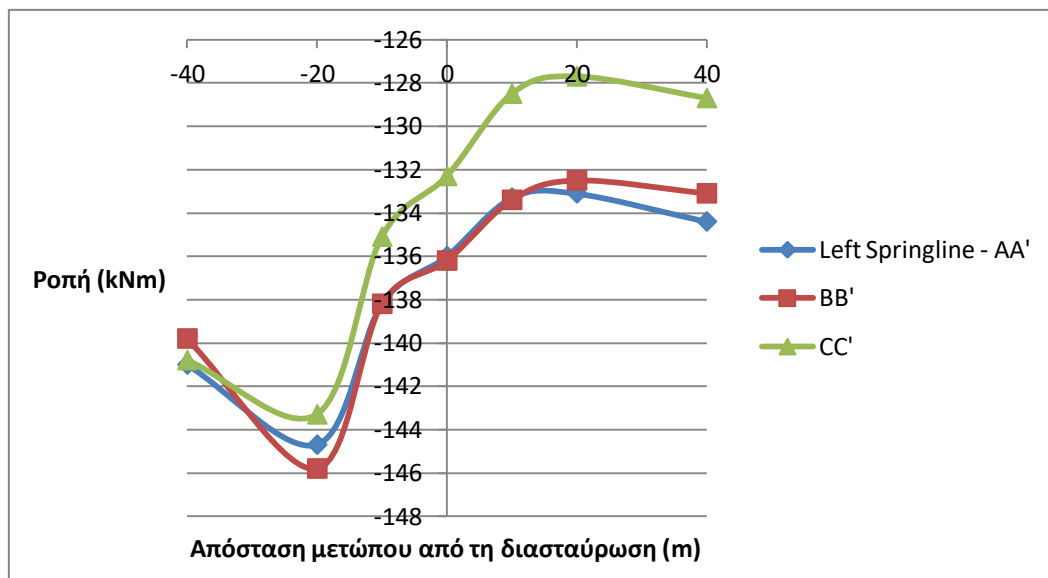
Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η κατανομή των ροπών στο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας, πριν τη διάνοιξη της νέας. Με το κόκκινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές στις οποίες το σκυρόδεμα δέχεται τις μεγαλύτερες τιμές της ροπής. Παρατηρώντας κανείς την περιοχή στο μέσο της σήραγγας, διακρίνει μια διαφοροποίηση στην κατανομή των τιμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην περιοχή εκείνη, ο κάνναβος γίνεται πιο πυκνός, καθώς είναι η περιοχή που μας αφορά και η οποία κατά κύριο λόγο θα επηρεαστεί από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που ακολουθεί, η διαφοροποίηση αυτή έχει ληφθεί υπόψη και επισημαίνεται όπου κρίνεται απαραίτητο.

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι μεταβολές των ροπών στις διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και σε 3 τομές της άνω σήραγγας, για διάφορες θέσεις του μετώπου κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Οι 3 τομές που αναφέρθηκαν γίνονται σε θέσεις μίας διαμέτρου πριν το μέσο, του μέσου και μίας διαμέτρου μετά το μέσο της άνω σήραγγας και ονομάζονται αντίστοιχα

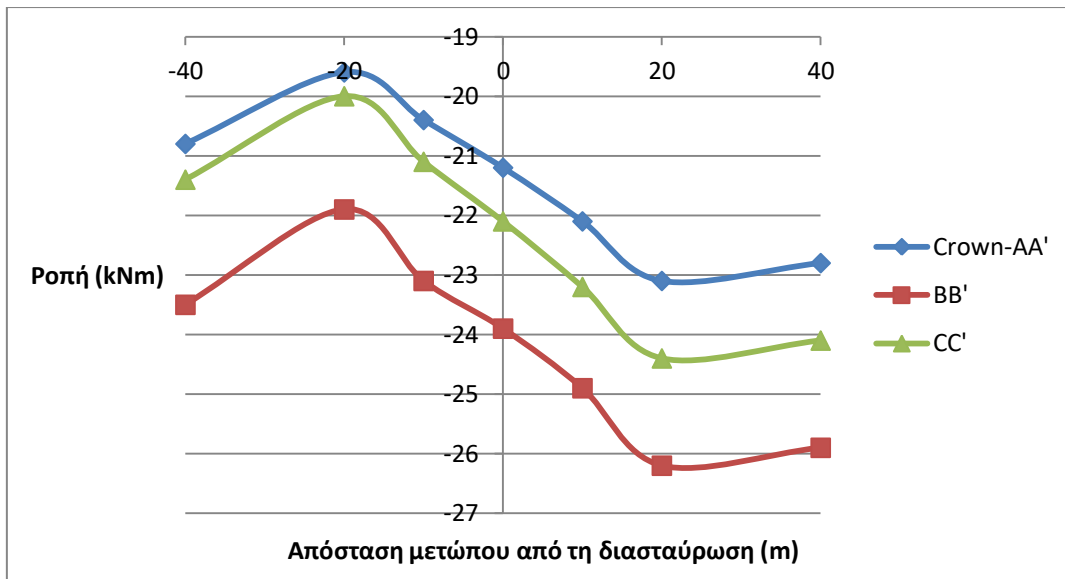
AA', BB' και CC', ενώ οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας, για τις οποίες θα παρουσιαστούν οι μεταβολές αφορούν τις θέσεις στις οποίες το μέτωπο βρίσκεται δύο και μία διάμετρο πριν το σημείο διασταύρωσης των δύο σηράγγων, στο σημείο διασταύρωσης και μία και δύο διαμέτρους μετά από αυτό.



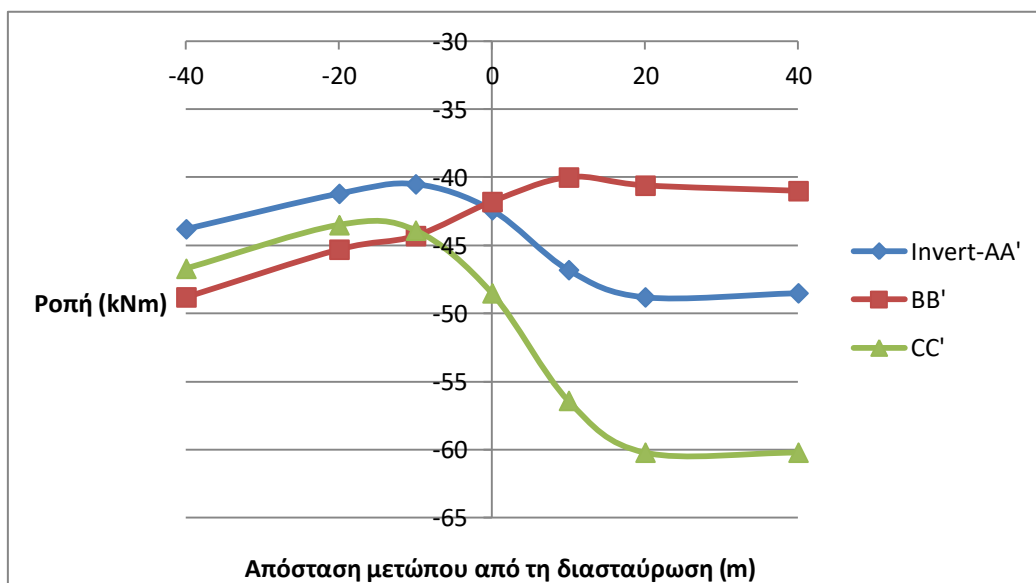
**Σχ. 5.13:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 5.14:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 5.15:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 5.16:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι ροπές σε διάφορες θέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άνω σήραγγας. Αρχικά, η ροπή στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα βρίσκεται σε μία τιμή, η οποία πρόκειται για την τιμή της ροπής που παρέλαβε κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξής της. Στην περίπτωση των παρειών, κατά τη διάνοιξη της υποκείμενης σήραγγας, οι ροπές στο σκυρόδεμα της



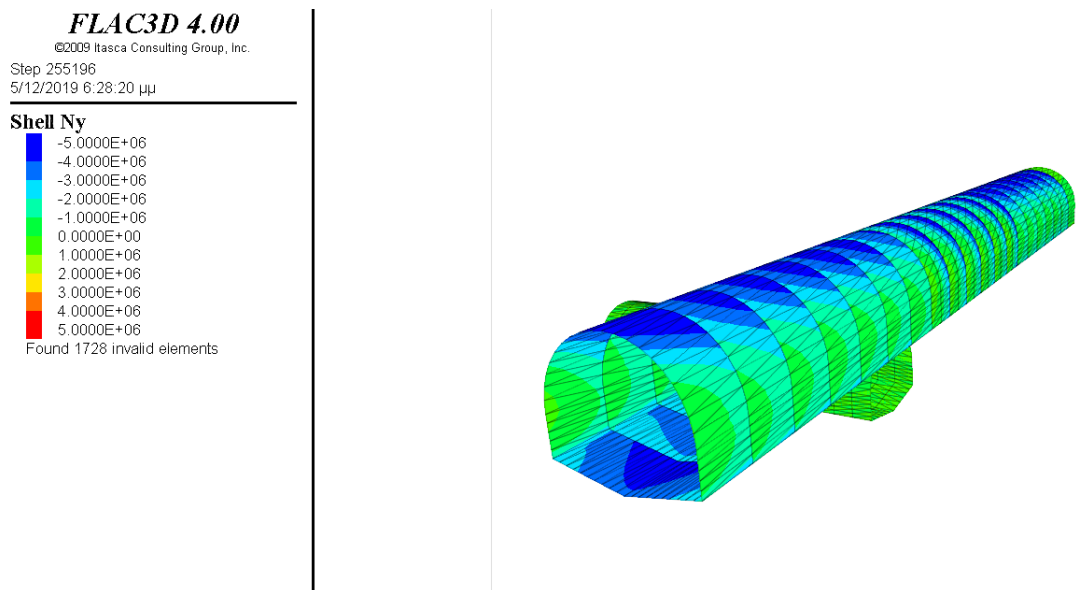
προϋπάρχουσας εμφανίζουν αρχικά μία αύξηση της τιμής τους και στη συνέχεια, λίγο πριν το μέτωπο φτάσει στη διασταύρωση, έχουμε τη μέγιστη τιμή της ροπής. Ακολούθως, η τιμή της ροπής μειώνεται έως ότου φτάσει την ελάχιστη τιμή της, γεγονός που συμβαίνει για απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας δύο διαμέτρων από τη διασταύρωση. Διαφορετικά μεταβάλλεται η ροπή στις περιοχές της στέψης και του δαπέδου της άνω σήραγγας. Αρχικά, και μέχρι για απόσταση περίπου δύο διαμέτρων πριν το μέτωπο της νέας σήραγγας φτάσει στην περιοχή της διασταύρωσης, η τιμή της ροπής μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται έως ότου το μέτωπο βρεθεί δύο διαμέτρους μετά το κέντρο της διασταύρωσης, οπότε και οι ροπές αρχίζουν να ισορροπούν, σε τιμή, ωστόσο μεγαλύτερη της αρχικής.

Όσο αφορά στις τιμές των ροπών, οι μεγαλύτερες συναντώνται στις παρειές της σήραγγας. Το γεγονός αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο αν αναλογιστεί κανείς τις μεγάλες οριζόντιες τάσεις που επικρατούν στην περιοχή. Έτσι, για παράδειγμα στη δεξιά σήραγγα η ροπή φτάνει τη μέγιστη τιμή των 154 kNm. Στο διάγραμμα οι ροπές εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο. Στο λογισμικό FLAC<sup>3D</sup> που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία τα μεγέθη με θετικό πρόσημο δηλώνουν κατεύθυνση ομόρροπη με τους άξονες και με αρνητικό όσα είναι αντίρροπα αυτών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αρνητική ροπή δηλώνει πως η πλευρά του σκυροδέματος που «κοιτάζει» το εσωτερικό της σήραγγας εφελκύεται, ενώ η πλευρά που «κοιτάζει» την περιβάλλουσα βραχομάζα θλίβεται. Οι τιμές της ροπής στη στέψη και στο δάπεδο της σήραγγας είναι σαφώς μικρότερες. Μάλιστα, εάν το δάπεδο είχε σχεδιαστεί με ανάστροφο τόξο, τότε πιθανά οι τιμές της ροπής θα ήταν ακόμη χαμηλότερες.

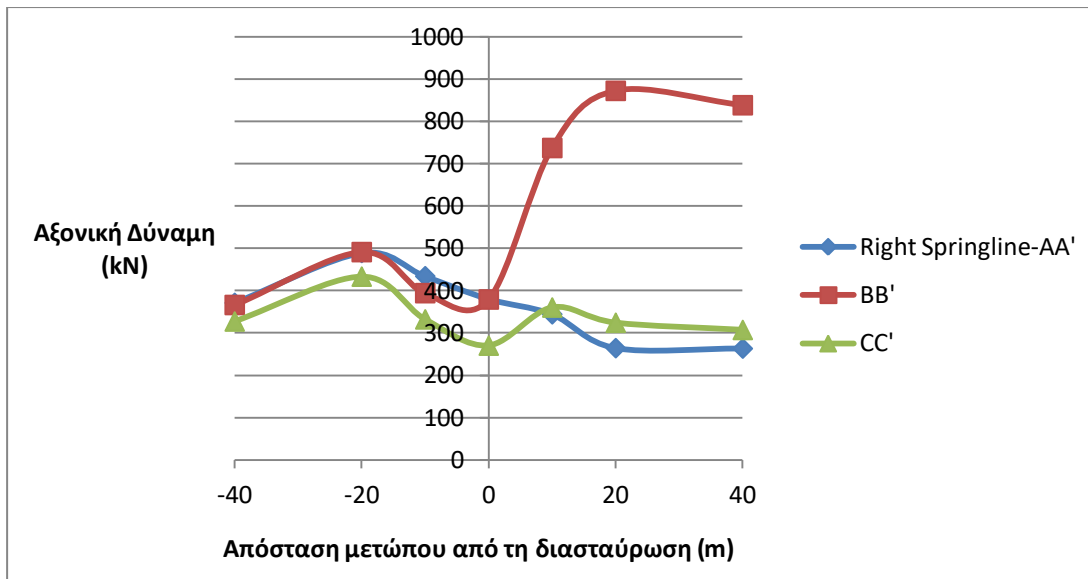
Ένα ακόμη σημαντικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα είναι το μέγεθος της μεταβολής σε καθεμία από τις τομές που θεωρήθηκαν στην άνω σήραγγα. Στα περισσότερα διαγράμματα, φαίνεται πως η καμπύλη BB', που αντιστοιχεί σε θέση που βρίσκεται στο μέσο της άνω σήραγγας, παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος τιμών, κάτι που είναι αναμενόμενο, αν λάβει κανείς υπόψη του πως πρόκειται για τη θέση που επηρεάζεται περισσότερο. Για παράδειγμα, στη δεξιά παρειά της σήραγγας, ακριβώς στο

μέσο της διασταύρωσης (τομή ΒΒ') η ροπή κυμαίνεται από 138 kNm έως 154 kNm, την ίδια στιγμή που τα αντίστοιχα εύρη για μία διάμετρο πίσω και μπροστά είναι μικρότερα.

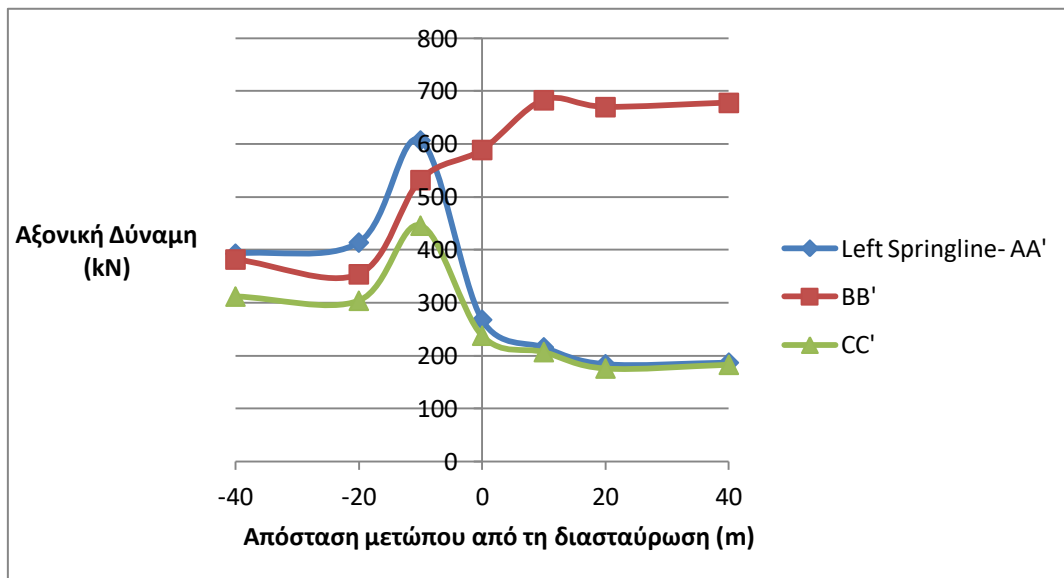
Παρακάτω, ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άνω σήραγγας κατά την προχώρηση του μετώπου της κάθετα υποκείμενης σήραγγας. Στο σχήμα 5.17 απεικονίζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας.



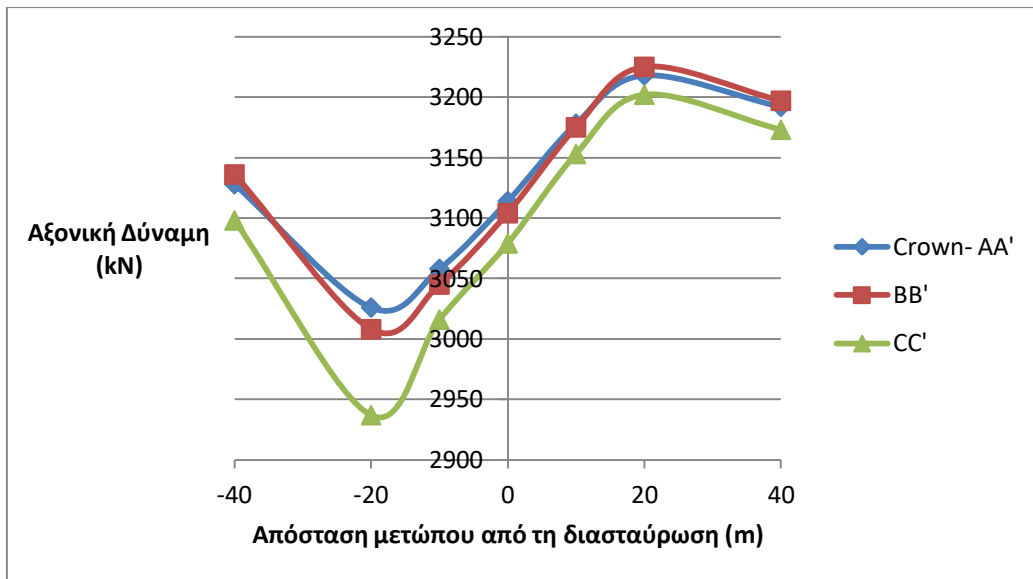
**Σχ. 5.17:** Απεικόνιση αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας



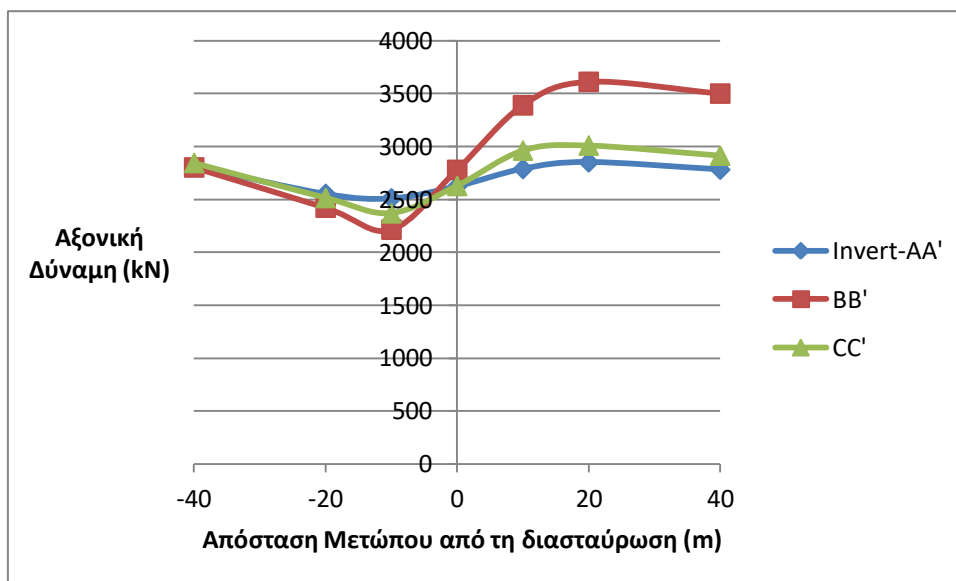
Σχ. 5.18: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



Σχ. 5.19: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 5.20:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



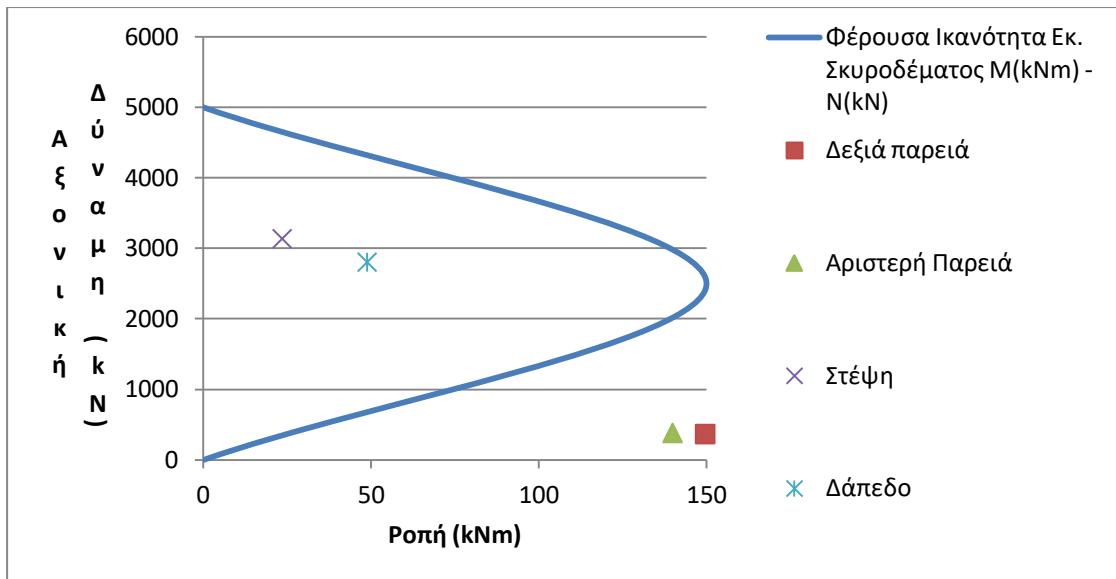
**Σχ. 5.21:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Στο κομμάτι που αφορά τις αξονικές δυνάμεις, οι περιοχές των μέγιστων τιμών φαίνεται να αντιστρέφονται σε σχέση με την περίπτωση των ροπών. Οι αξονικές δυνάμεις στις παρειές της σήραγγας είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στη στέψη και στο δάπεδο. Συγκεκριμένα, πριν ακόμα ξεκινήσει η

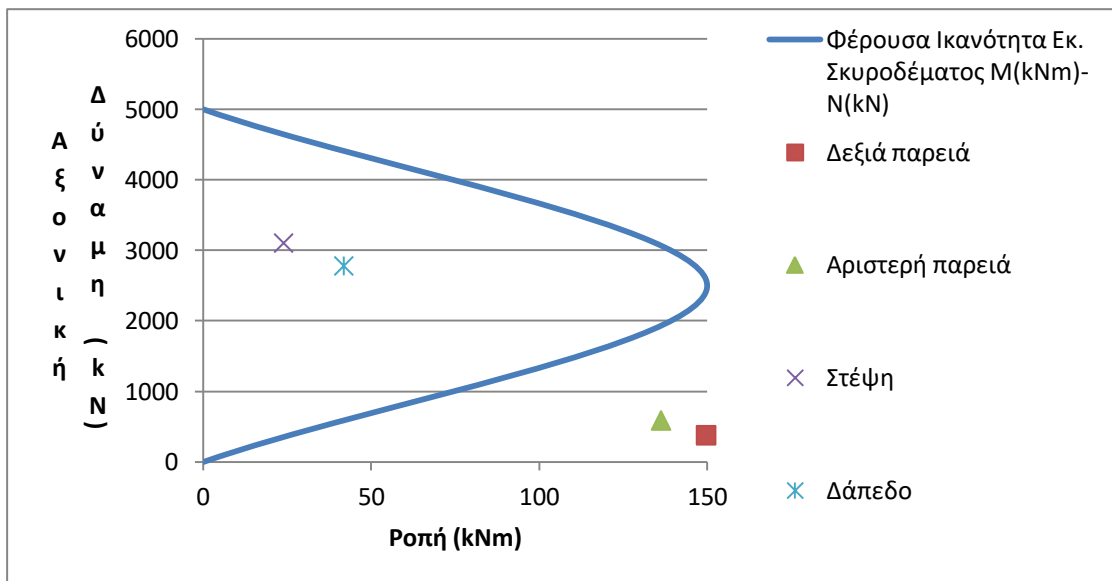
εκσκαφή της νέας σήραγγας οι τιμές της αξονικής δύναμης που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις παρειές της προϋπάρχουσας σήραγγας κυμαίνονται περί τα 400 kN. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, σε όλες τις θέσεις, η τιμή της αξονικής δύναμης αυξάνεται με τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Για παράδειγμα, στην δεξιά παρειά της άνω σήραγγας, από τα 400 kN, αγγίζει έως και τα 900, όταν η το μέτωπο της νέας σήραγγας έχει προχωρήσει κατά δύο διαμέτρους από την περιοχή διασταύρωσης των σηράγγων. Ωστόσο, οι αξονικές δυνάμεις στις θέσεις των παρειών παραμένουν χαμηλές, γεγονός που όπως θα φανεί και στη συνέχεια καθιστούν μη επαρκή τη φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος. Αντίθετα, στη στέψη και στο δάπεδο, οι αξονικές δυνάμεις ξεπερνούν τα 3500 kN.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει και η θέση κατά μήκος της άνω σήραγγας, που επηρεάζεται από τη διάνοιξη της υποκείμενης. Πιο συγκεκριμένα, στα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων, η τομή BB' που αντιστοιχεί στην τομή του μέσου της άνω σήραγγας, παρουσιάζει αισθητά εντονότερες μεταβολές σε σχέση με τις άλλες δύο, που αντιστοιχούν σε θέσεις μίας διαμέτρου πίσω και μπροστά από το μέσο της. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δαπέδου. Εδώ, οι μεταβολές των καμπυλών AA' και CC' στο αντίστοιχο διάγραμμα είναι κάτω από 400 kN, την ίδια στιγμή που το εύρος της καμπύλης BB' ξεπερνά τα 1500 kN. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα που αφορά τη δεξιά παρειά η αύξηση της αξονικής δύναμης στην καμπύλη CC' είναι περίπου 50 kN, την ώρα που στην καμπύλη BB' φτάνει τα 500 kN.

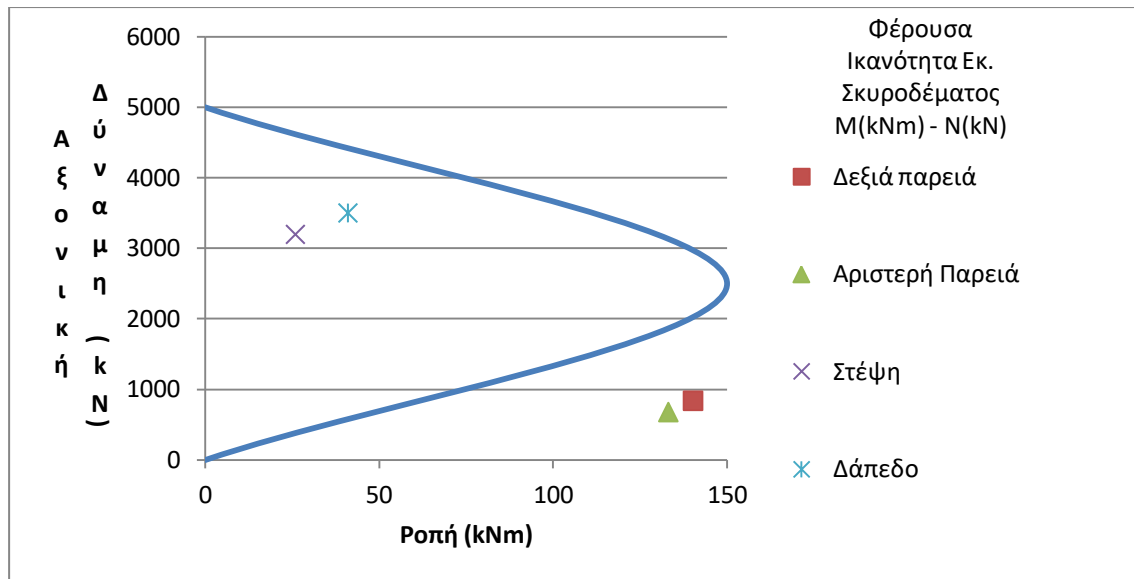
Εν συνεχεία, με βάση τις ροπές και τις αξονικές δυνάμεις που προέκυψαν κατασκευάζεται το διάγραμμα της φέρουσας ικανότητας του σκυροδέματος. Τα μέτρα υποστήριξης στην ανάλυσή μας, προσομοιώθηκαν να συμπεριφέρονται ελαστικά, οπότε με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται αν το σκυρόδεμα θα διαρρεύσει. Η θλιπτική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 20 MPa. Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν την περιοχή της άνω σήραγγας που βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της (τομή BB') και η οποία επηρεάζεται πιο πολύ από τη διάνοιξη της νέας.



Σχ. 5.22: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας

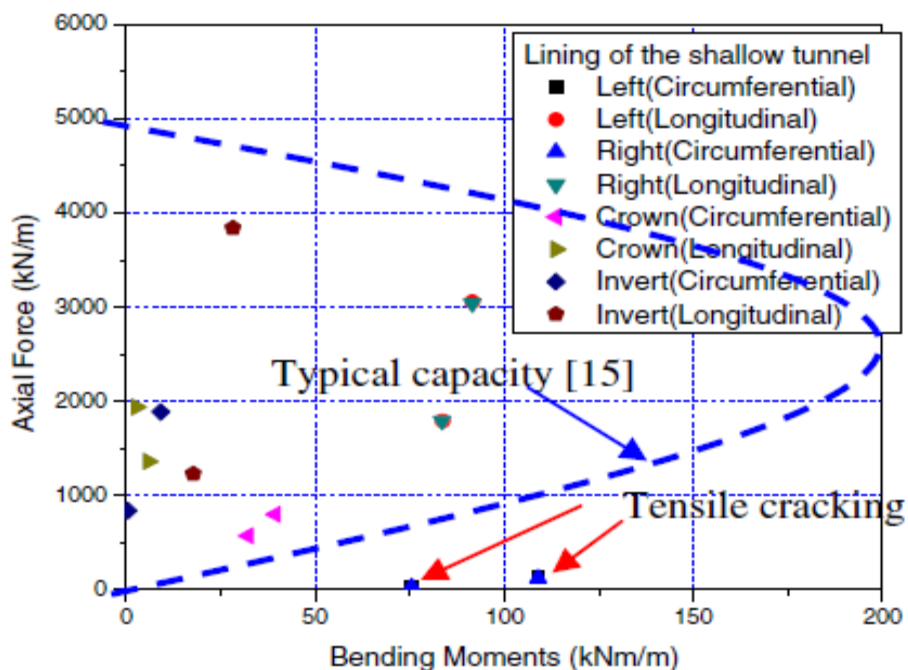


Σχ. 5.23: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης



**Σχ. 5.24:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αστοχεί. Βέβαια, το γεγονός αυτό δεν οφείλεται στη διάνοιξη της νέας σήραγγας, καθώς τα σημεία που αντιστοιχούν στις παρειές της σήραγγας βρίσκονται εκτός της περιοχής που ορίζει η καμπύλη της φέρουσας ικανότητας, από το πρώτο κιάλας διάγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, οι αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται στο σκυρόδεμα σε εκείνες τις θέσεις είναι πολύ χαμηλές και ουσιαστικά αυτός είναι ο λόγος που εκεί αστοχεί σε εφελκυσμό, όπως συμπεραίνεται από τις θέσεις των σημείων στο διάγραμμα. Με την διάνοιξη της νέας σήραγγας, οι αξονικές δυνάμεις στις θέσεις αυτές αυξάνονται, κάτι που οδηγεί προς την κατεύθυνση της μη αστοχίας του σκυροδέματος, όμως δε φτάνουν ποτέ τις τιμές για τις οποίες αυτή δε θα επέρχονταν.



Σχ. 5.25: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων, όπως προέκυψε από την ανάλυση των Liu et al. (2009)

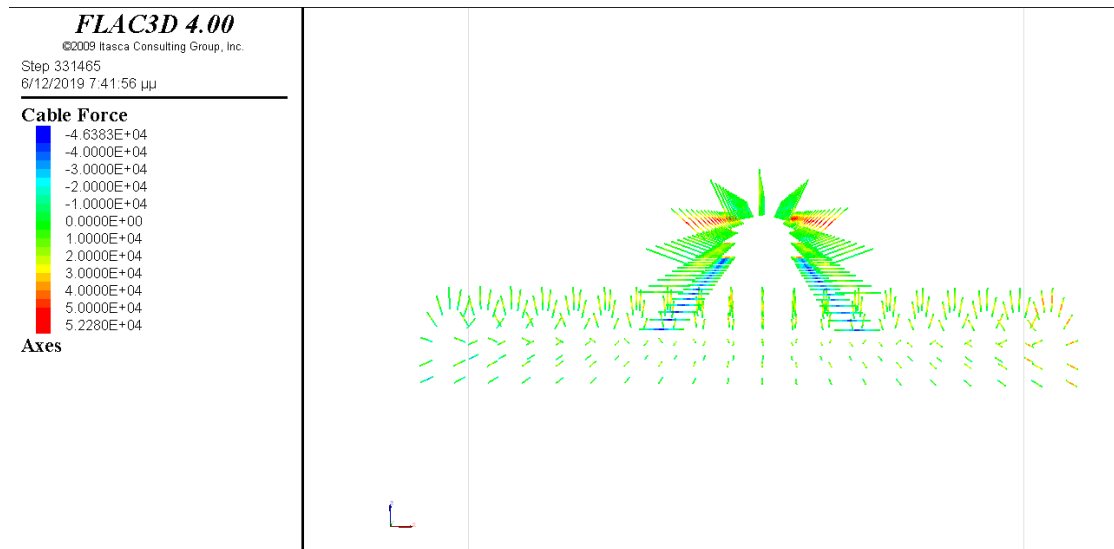
Στο σχήμα 5.25 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα αλληλεπίδρασης που προέκυψε από την ανάλυση των Liu et al. (2009). Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και εδώ φαίνεται πως οι τιμές των αξονικών δυνάμεων του σκυροδέματος είναι αρκετά χαμηλές στην περιοχή των παρειών της σήραγγας και το σκυρόδεμα θα αστοχήσει εφελκυστικά. Σαφώς, υπάρχουν μικροδιαφορές στις τιμές των αξονικών δυνάμεων και των ροπών μεταξύ των δύο αναλύσεων. Οι διαφορές αυτές αναμενόμενες, αν αναλογιστεί κανείς ότι δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση όπου μετρήθηκαν τα παραπάνω μεγέθη από τους Liu et. al, ώστε να γίνει άμεση σύγκριση.

#### 5.4.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας

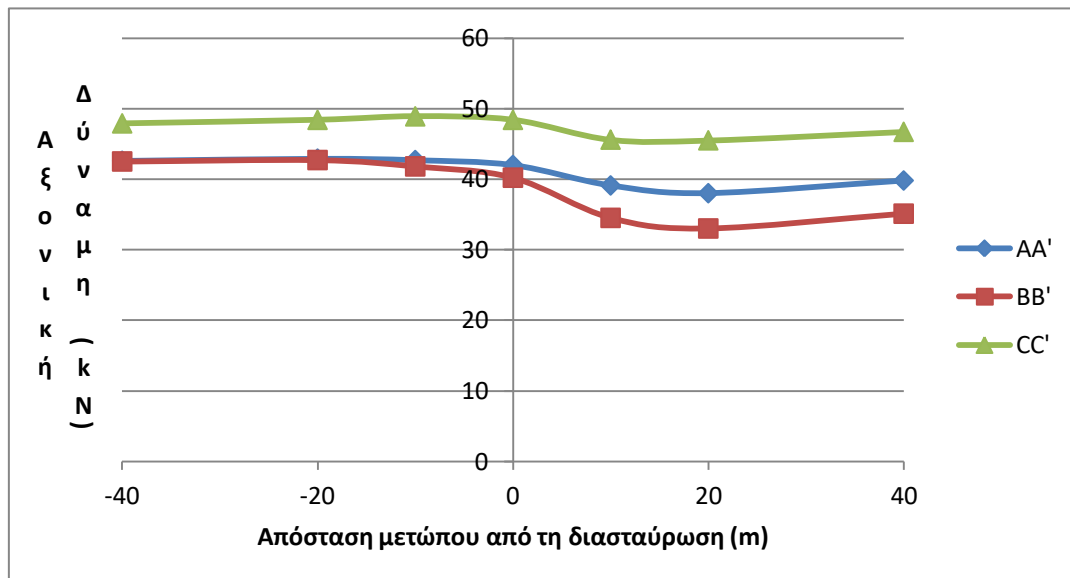
Όσο αφορά στην επίδραση της διάνοιξης νέας σήραγγας, κάθετα υποκείμενης στην προϋπάρχουσα, στα αγκύρια της δεύτερης, εξετάζεται η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων τους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.26 οι μέγιστες αξονικές εφελκυστικές δυνάμεις, ασκούνται στα αγκύρια που βρίσκονται στους



ώμους της εκσκαφής. Έτσι, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι μεταβολές των αξονικών δυνάμεων των αγκυριών που έχουν τοποθετηθεί στο δεξιό ώμο. Παρακάτω ακολουθεί η απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια και τα διαγράμματα μεταβολής τους σε σχέση με τη θέση του μετώπου της νέας σήραγγας.



Σχ. 5.26: Απεικόνιση των δυνάμεων των αγκυριών μετά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας



Σχ. 5.27: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυριών σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης

Όπως και στην παρουσίαση των ροπών και των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα, έτσι και εδώ επιλέχθηκε να δοθούν οι αξονικές δυνάμεις στα

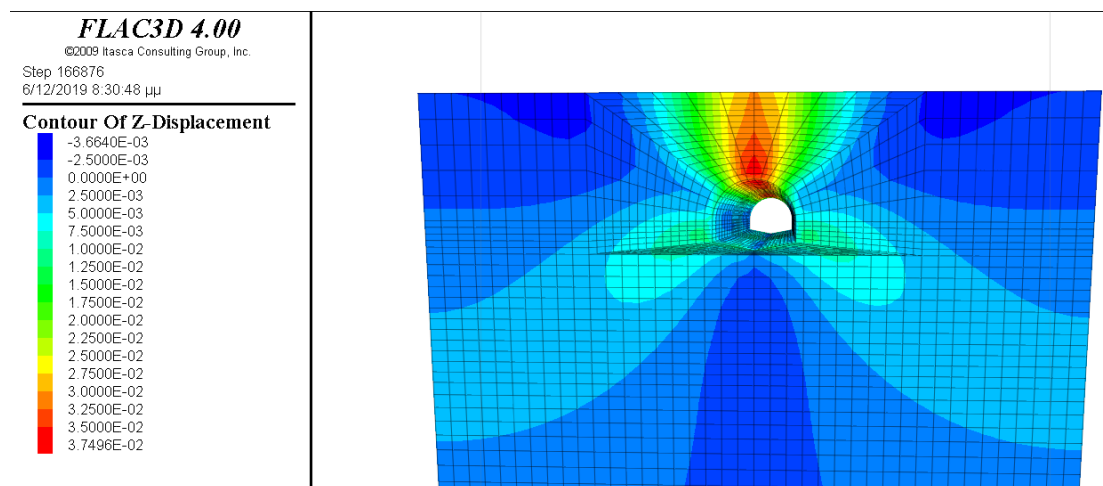
αγκύρια σε τρεις θέσεις κατά μήκος της προϋπάρχουσας σήραγγας. Παρατηρώντας το σχήμα 5.27, γίνεται αντιληπτό πως σε απόσταση μίας διαμέτρου του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, οι τιμές των αξονικών δυνάμεων των αγκυριών μειώνονται έως και όταν το μέτωπο ξεπεράσει κατά δύο διαμέτρους το μέσο της σήραγγας, οπότε και αρχίζουν να ισορροπούν. Όπως θα ήταν αναμενόμενο, η μέγιστη μεταβολή λαμβάνει χώρα στο μέσο της άνω σήραγγας (τομή BB'), καθώς πρόκειται για την περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη επιρροή, όπως αποδείχθηκε και στην περίπτωση του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, από τα περίπου 44 kN που δέχεται το αγκύριο πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας σήραγγας, φτάνει να δέχεται 33 kN, όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας έχει ξεπεράσει τη θέση της διασταύρωσης κατά δύο διαμέτρους, οπότε και συναντάται η μέγιστη τιμή της μεταβολής. Γνωρίζοντας πως η τάση διαρροής των συγκεκριμένων αγκυριών είναι  $\sigma_{\text{yield}} = 400 \text{ MPa}$  και η διάμετρο τους 2 cm, οι παραπάνω τιμές δε φτάνουν σε καμία περίπτωση την τιμή των 125,6 kN, που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής τους.

Κλείνοντας την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του βασικού σεναρίου αυτής της φάσης αναλύσεων, παρατηρούμε πως σε όλα τα μεγέθη που εξετάστηκαν, η καμπύλη CC', που αντιστοιχεί στην τομή της άνω σήραγγας που βρίσκεται μία διάμετρο μετά το μέσο της, εμφανίζει μεγαλύτερες απόλυτες τιμές συγκριτικά με τις άλλες δύο. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο ότι η θέση εκείνη βρίσκεται πολύ κοντά στη θέση όπου αλλάζει η πυκνότητα του καννάβου, γι' αυτό και επηρεάζονται οι απόλυτες τιμές που λαμβάνονται. Ωστόσο, δύναται να αγνοήσουμε αυτή την επιρροή, καθώς στο θέμα που μελετάμε μας ενδιαφέρει το εύρος της μεταβολής που λαμβάνει χώρα στη θέση αυτή σε σχέση με το μέσο της σήραγγας και ο χρόνος που συμβαίνει σε σχέση με την προχώρηση της υποκείμενης κάθετης σήραγγας.

### 5.4.3 Μετακινήσεις

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζονται οι μετακινήσεις που προέκυψαν καθ' όλη τη διαδικασία της ανάλυσης. Γίνεται αναφορά σε κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν στην περιφέρεια της άνω (προϋπάρχουσας) σήραγγας, έπειτα από την ολοκλήρωση της εκσκαφής της και την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

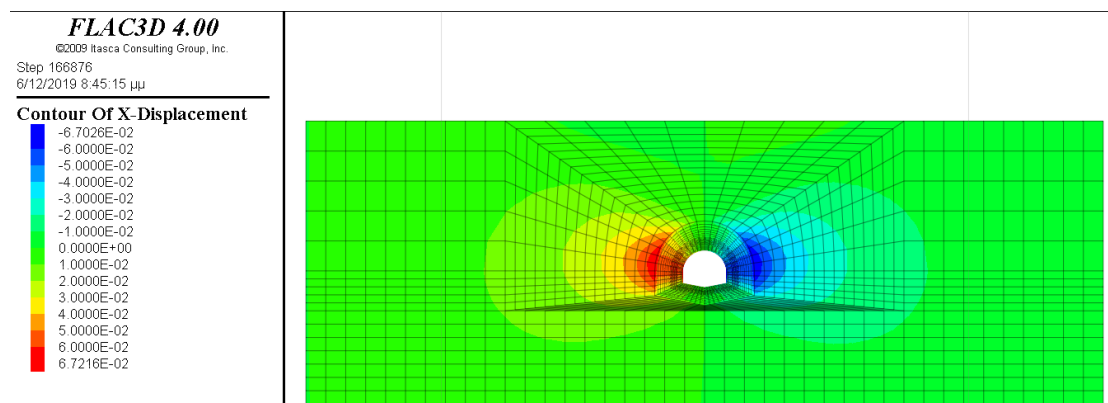


**Σχ. 5.28:** Απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων της άνω σήραγγας που προέκυψαν λόγω της εκσκαφής της

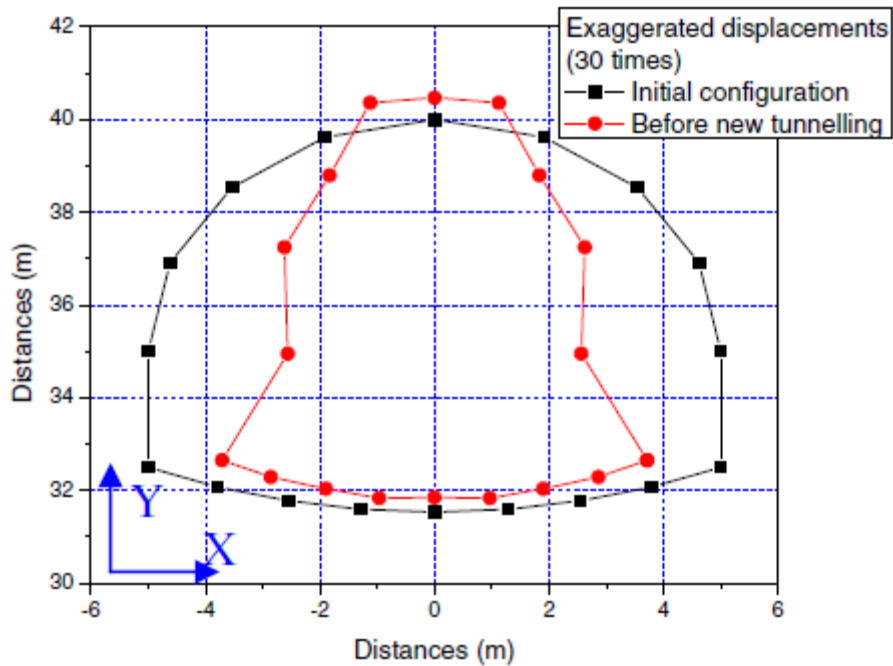
Στο σχήμα 5.28 φαίνεται να υπάρχει στο δάπεδο της άνω σήραγγας μία ανύψωση της τάξης των 5 χιλιοστών και στη στέψη της μία ανύψωση της τάξης των 3.5 εκατοστών. Το να υπάρχει μία ανύψωση τέτοιας τάξης στη στέψη της σήραγγας δεν έχει λογική βάση. Συνεπώς, η περίπτωση ελέγχθηκε με τη χρήση δεύτερου λογισμικού, πεπερασμένων στοιχείων (RS2). Εισάγοντας ακριβώς τα ίδια δεδομένα παρατηρείται και πάλι αντίστοιχη τιμή ανύψωσης στη στέψη της σήραγγας, μόνο όμως όταν τοποθετείται επένδυση στη σήραγγα. Έτσι, συνάγεται το συμπέρασμα πως πρόκειται για υπολογιστικό ζήτημα. Πιο συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στην αδυναμία που παρουσιάζει το μοντέλο Mohr – Coulomb που χρησιμοποιήθηκε, να εισαχθούν διαφορετικές τιμές μεγεθών στη βραχομάζα (π.χ. ακαμψίας) κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση. Ωστόσο, δεν αποφασίστηκε η αλλαγή του, καθώς δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα για την περίπτωση που μελετάται, τα οποία δε θα έδιναν μοντέλα που θα έλυαν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Έτσι, η παραπάνω αιτία σε συνδυασμό με τις υψηλές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις που δρουν στην περιοχή και το χαμηλό βάθος της σήραγγας δίνουν αυτές τις ανυψώσεις. Στην πραγματικότητα, στην

περιοχή της στέψης της σήραγγας μπορεί να πραγματοποιούνται καθιζήσεις ή ανυψώσεις σημαντικά μικρότερης όμως, τιμής. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει ωστόσο, το ζήτημα που μελετά η παρούσα εργασία, καθώς κατά την έναρξη της εκσκαφής της νέας σήραγγας, μηδενίζονται όλες οι έως τότε μετακινήσεις.

Όσο αφορά στις οριζόντιες μετακινήσεις που έχουν λάβει χώρα λόγω της διάνοιξης της προϋπάρχουσας σήραγγας, αυτές παρουσιάζουν τιμές έως και 5.5 εκατοστά στις παρειές της σήραγγας. Οι τιμές αυτές έρχονται σε συμφωνία και με τις αντίστοιχες τιμές της ανάλυσης των Liu et al. (2009), όπως φαίνονται και στο σχήμα 5.30.



**Σχ. 5.29:** Απεικόνιση οριζόντιων μετακινήσεων στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της εκσκαφής της



**Σχ. 5.30:** Η μεταβολή των μετακινήσεων στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξής της, όπως υπολογίστηκαν από τους Liu et al.(2009)

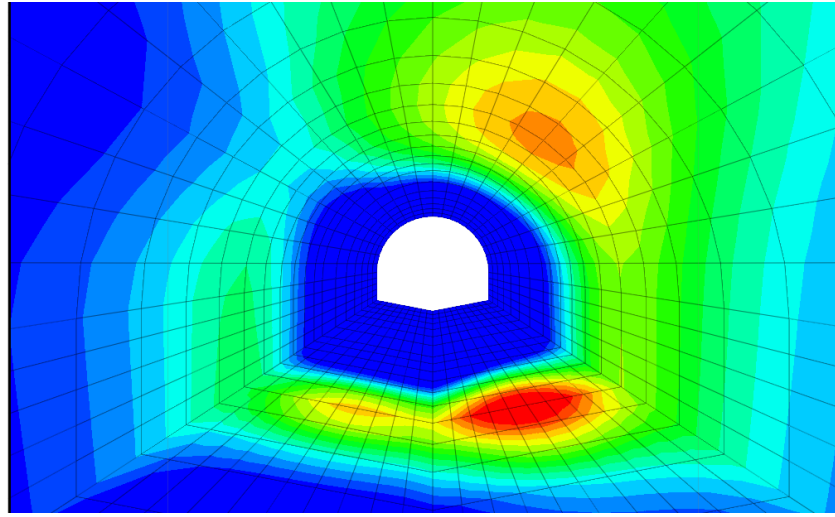
Στο σχήμα 5.31 που ακολουθεί, απεικονίζεται η κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων που υπέστη η άνω σήραγγα μόνο από την ανακατανομή των τάσεων που προκάλεσε η διάνοιξη της νέας, υποκείμενης σε αυτή, σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή, φαίνεται πως η προϋπάρχουσα σήραγγα επηρεάζεται όπως είναι φυσικό μόνο στην περιοχή πάνω από την οποία διέρχεται η νέα, κάθετη σε αυτή σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, ανυψώνεται στην περιοχή αυτή, η μέγιστη ανύψωση εμφανίζεται στο δάπεδο της και είναι της τάξης των 4 χιλιοστών, στη στέψη φτάνει τα 3 χιλιοστά, ενώ στις παρειές είναι 2.5 χιλιοστά. Και αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με την ανάλυση των Liu et al. (2009), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.32.

**FLAC3D 4.00**  
 ©2009 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 331465  
 6/12/2019 9:06:00 μμ

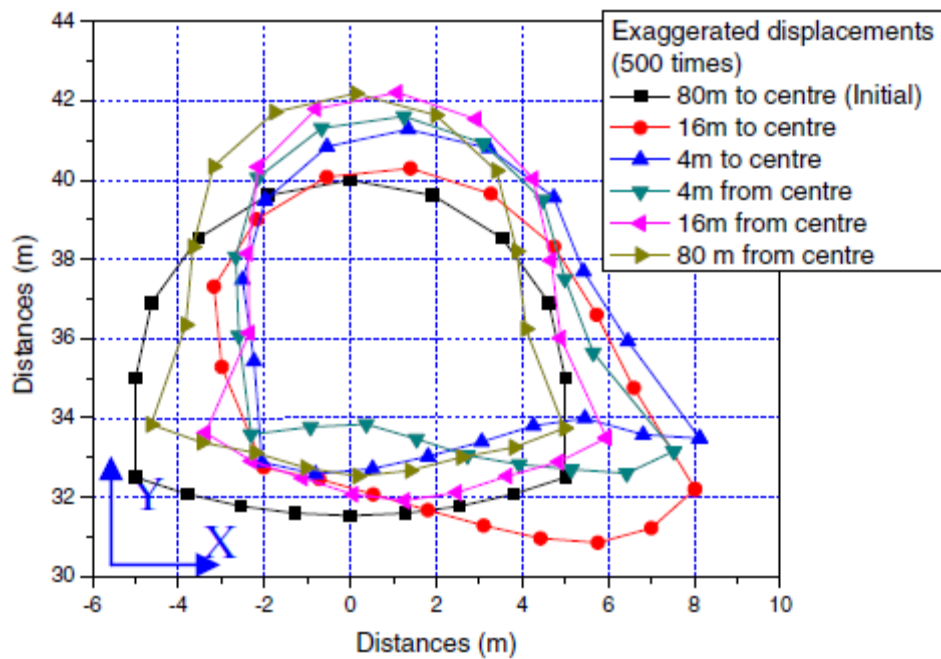
---

**Contour Of Z-Displacement**

0.0000E+00  
 2.5000E-04  
 5.0000E-04  
 7.5000E-04  
 1.0000E-03  
 1.2500E-03  
 1.5000E-03  
 1.7500E-03  
 2.0000E-03  
 2.2500E-03  
 2.5000E-03  
 2.7500E-03  
 3.0000E-03  
 3.2500E-03  
 3.5000E-03  
 3.7500E-03  
 4.0000E-03



**Σχ. 5.31:** Απεικόνιση των κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσο της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξης της νέας σήραγγας



**Σχ. 5.32:** Η μεταβολή των μετακινήσεων στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, όπως υπολογίστηκε από τους Liu et al. (2009)

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βασικής ανάλυσης, καταλήγουμε ότι τα αποτελέσματά της συγκλίνουν σημαντικά με αυτά που είχαν προκύψει από την έρευνα των Liu et al. (2009). Έτσι, έχοντας πλέον ένα βαθμονομημένο μοντέλο, στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας προχωράμε στην εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Τρίτη φάση προσομοιώσεων – Παραμετρικές αναλύσεις

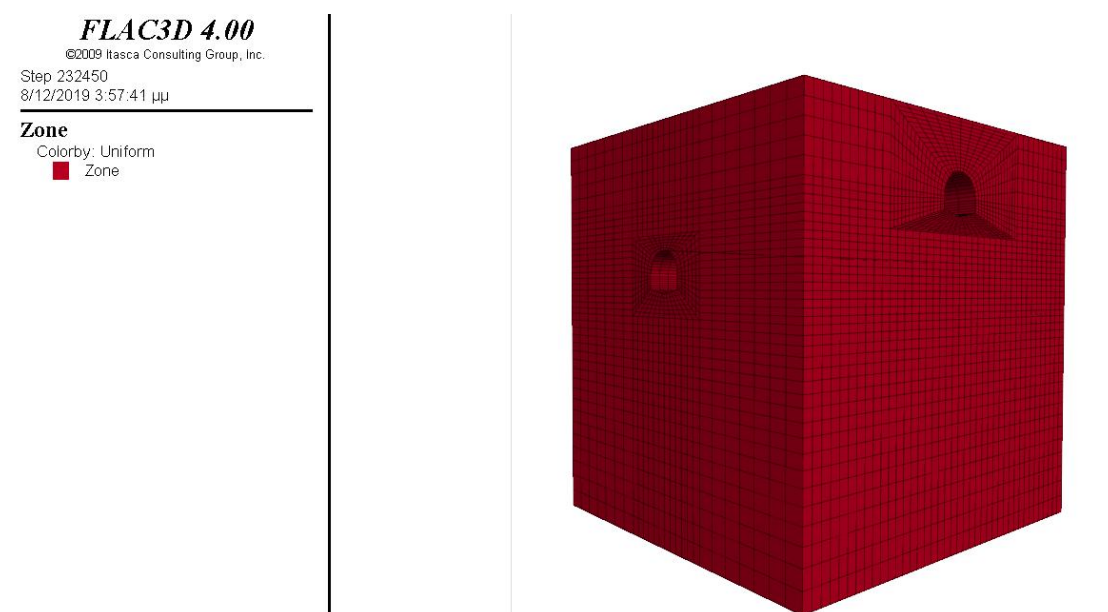
#### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιχειρείται μια τρίτη φάση προσομοιώσεων. Στη φάση αυτή, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις της περίπτωσης που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για το βαθμό επίδρασης καθεμιάς από τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο πρόβλημα που μελετάμε. Τέτοιες παράμετροι είναι η απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων, το βάθος διάνοιξής τους, η σειρά με την οποία διανοίγονται και φυσικά η κατηγορία της βραχομάζας. Έτσι, με βάση τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, που θα βοηθήσουν σημαντικά στο σχεδιασμό έργων αντίστοιχων περιπτώσεων. Τα αποτελέσματα καθεμιάς από αυτές τις αναλύσεις θα συγκρίνονται άμεσα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βασικής περίπτωσης που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 5.

#### 6.2 Αύξηση της κάθετης απόστασης μεταξύ των σηράγγων

Η πρώτη από τις παραμετρικές αναλύσεις που επιλέχθηκε να διεξαχθεί ήταν αυτή που αφορούσε τη μεταβολή στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο κάθετων σηράγγων. Επιλέχθηκε η απόσταση αυτή να οριστεί στα 6.5 μέτρα. Συγκρίνοντας με την απόσταση της βασικής περίπτωσης, που ήταν 3.5 μέτρα, εδώ σχεδόν διπλασιάστηκε. Θα μπορούσε κανείς να ορίσει απόσταση 7 μέτρων. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση θα άλλαζε ο κάρναβος και ο αριθμός των ζωνών του μοντέλου και αυτό θα είχε επίδραση, έστω και μικρή στα αποτελέσματα. Έτσι, το μοντέλο αυτής της ανάλυσης αποτελείται και πάλι από 78100 ζώνες.

Όσο αφορά στη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, αυτή είναι παραπλήσια με εκείνη που οδήγησε στην κατασκευή του μοντέλου του κεφαλαίου 5. Η μόνη διαφορά εδώ, έγκειται στη θέση της νέας σήραγγας. Κρατώντας λοιπόν σταθερή τη θέση της άνω (προϋπάρχουσας) σήραγγας, για να δοθεί η επιθυμητή απόσταση των 6.5 μέτρων, η νέα σήραγγα ορίζεται 3 μέτρα πιο βαθιά, δηλαδή το δάπεδό της είναι περίπου στο βάθος των -33.5 μέτρων και η στέψη της στο βάθος των -25 μέτρων. Επιπλέον, μετακινήθηκε προς τα κάτω κατά 5 μέτρα και το κάτω όριο του μοντέλου, ώστε η επίδραση των συνοριακών συνθηκών να μην επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Σχετικά με τη διαδικασία προσομοίωσης της εκσκαφής και επίλυσης του μοντέλου, αυτή παραμένει ίδια, αλλάζοντας φυσικά και πάλι τις συντεταγμένες που αφορούν τις θέσεις εκσκαφής και τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης της νέας σήραγγας.



Σχ. 6.1: Το μοντέλο με απόσταση σηράγγων 6.5 μέτρα μετά τη διάνοιξη και της νέας σήραγγας

### 6.2.1 Αποτελέσματα

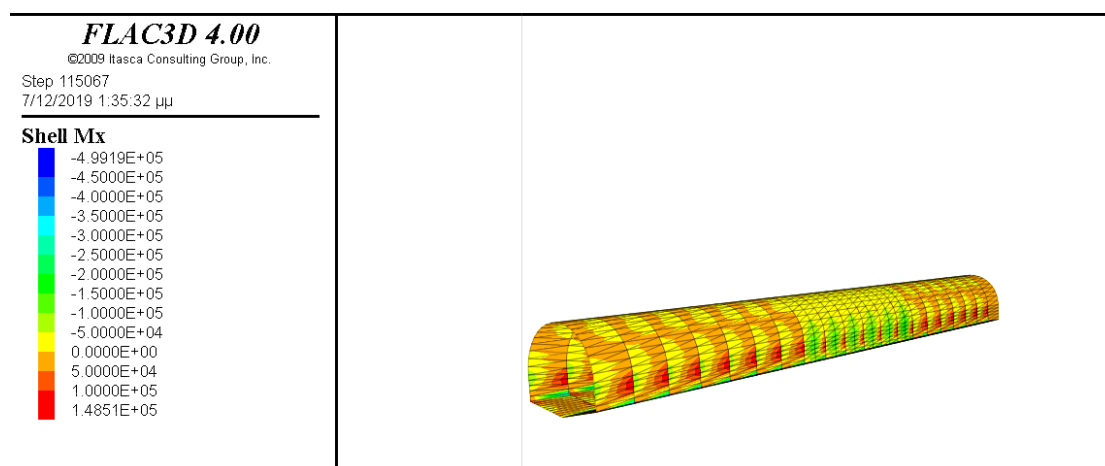
Στα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάζονται παρακάτω συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας μέσω της αξιολόγησης των ροπών και των αξονικών δυνάμεων, οι επιδράσεις στα αγκύρια της άνω σήραγγας και τέλος οι μετακινήσεις που προκλήθηκαν σε αυτή λόγω της



διάνοιξης της νέας, κάθετης σε αυτή υποκείμενης σήραγγας. Εν συνεχεία, γίνεται η σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βασικής περίπτωσης.

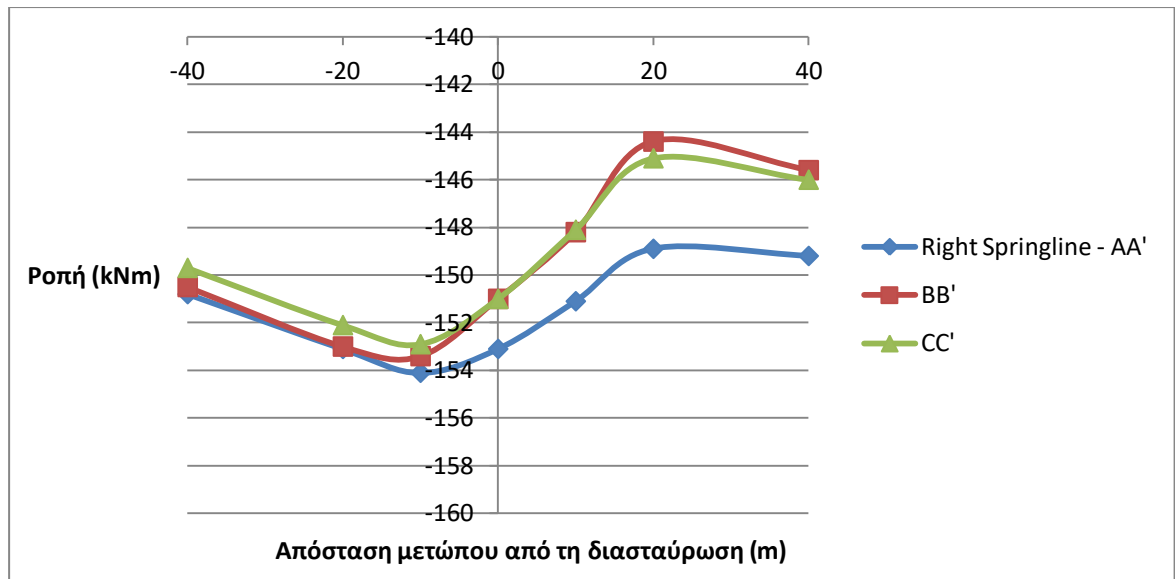
### 6.2.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας

Αντίστοιχα αποτελέσματα με την ανάλυση της βασικής περίπτωσης θα παρουσιαστούν και εδώ. Συγκεκριμένα, για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δίνονται οι ροπές και οι αξονικές δυνάμεις στις ίδιες θέσεις της δεξιάς και αριστερής παρειάς, της στέψης και του δαπέδου της άνω σήραγγας. Στο σχήμα 32 παρουσιάζεται η απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας.

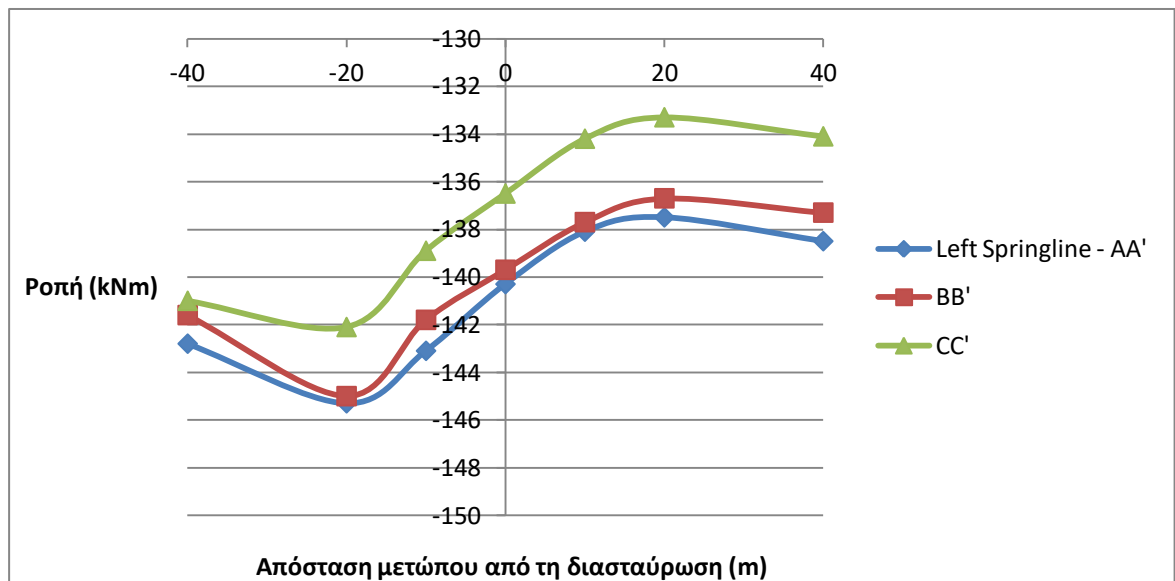


**Σχ. 6.2:** Απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας

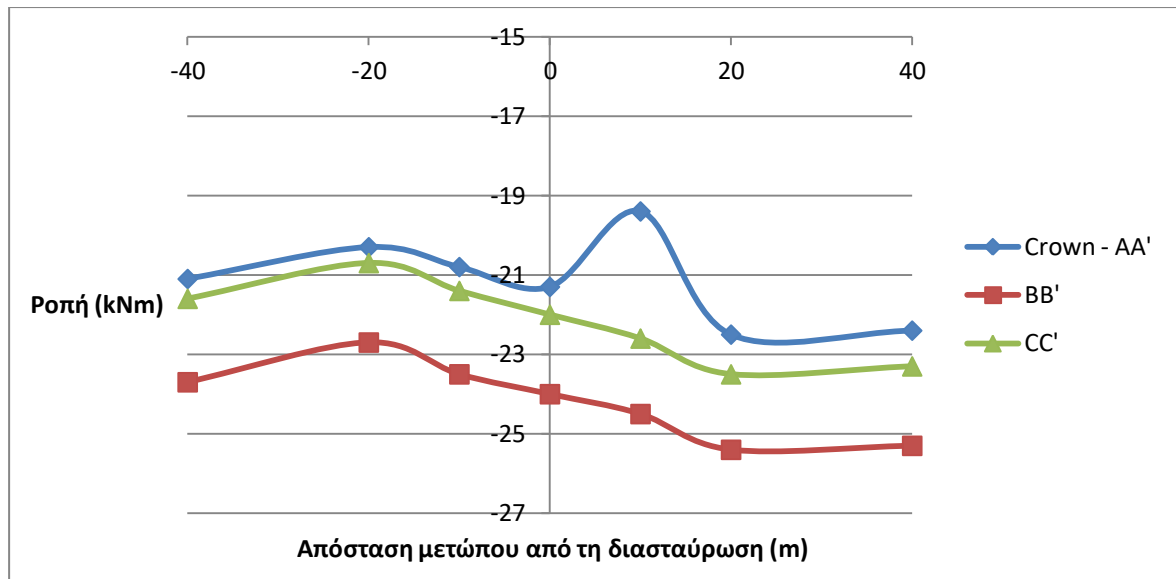
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι μεταβολές των ροπών στις διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και σε 3 τομές της άνω σήραγγας, για διάφορες θέσεις του μετώπου κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Οι 3 τομές που αναφέρθηκαν γίνονται σε θέσεις μίας διαμέτρου πριν το μέσο, του μέσου και μίας διαμέτρου μετά το μέσο της άνω σήραγγας και ονομάζονται αντίστοιχα AA', BB' και CC', ενώ οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας, για τις οποίες θα παρουσιαστούν οι μεταβολές αφορούν τις θέσεις στις οποίες το μέτωπο βρίσκεται δύο και μία διάμετρο πριν το σημείο διασταύρωσης των δύο σηράγγων, στο σημείο διασταύρωσης, και μία και δύο διαμέτρους μετά από αυτό.



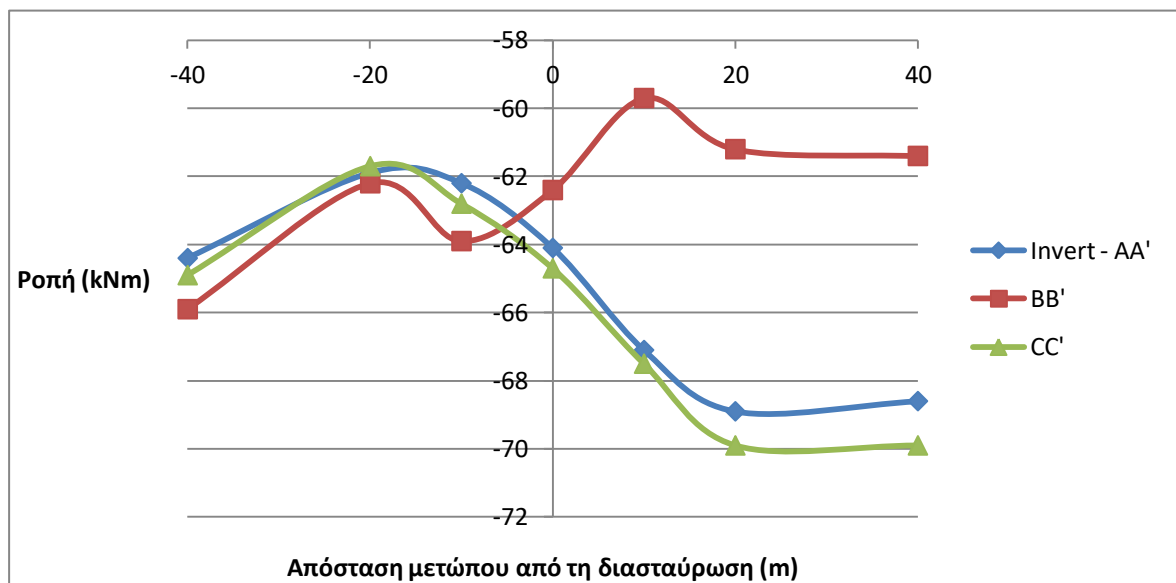
**Σχ. 6.3:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.4:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.5:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



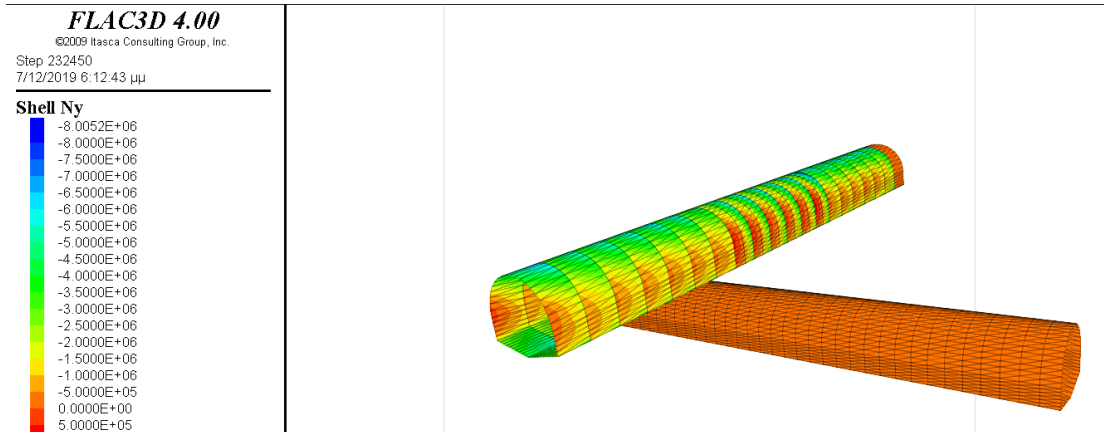
**Σχ. 6.6:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται οι ροπές σε θέσεις του σκυροδέματος της προϋπάρχουσας σήραγγας κατά τη διαδικασία διάνοιξης της νέας σήραγγας που διέρχεται κάθετα από την πρώτη σε κατακόρυφη απόσταση 6.5 μέτρων. Ο τρόπος αυτός παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με τα αντίστοιχα διαγράμματα της

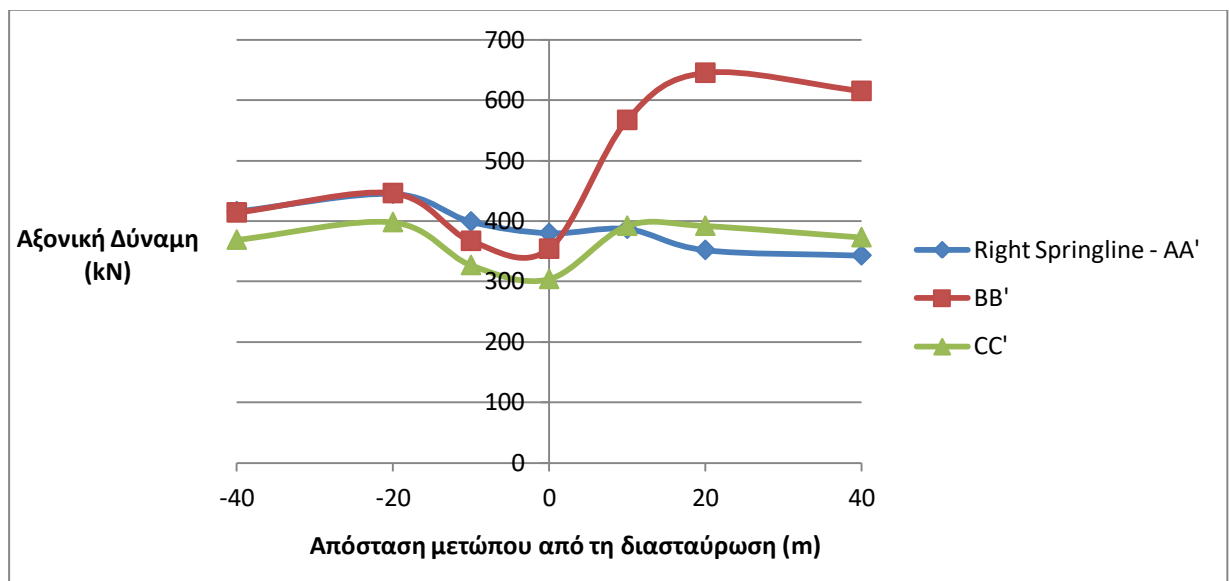
βασικής περίπτωσης του κεφαλαίου 5. Δηλαδή, στην περίπτωση των παρειών της άνω σήραγγας οι ροπές μειώνονται μέχρι το μέτωπο της νέας σήραγγας να φτάσει 1 διάμετρο πριν τη διασταύρωση και στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι και 2 διαμέτρους μετά από αυτή, οπότε και αρχίζει να ισορροπεί και στην περίπτωση της στέψης και του δαπέδου η ροπή που έχει αναλάβει το σκυρόδεμα από τη διάνοιξη της προϋπάρχουσας σήραγγας, αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται έως ότου το μέτωπο της νέας σήραγγας φτάσει 2 διαμέτρους μετά τη θέση της διασταύρωσης.

Η βασική διαφορά στις δύο περιπτώσεις που αφορά τις ροπές στο σκυρόδεμα έγκειται στο μέγεθος της μεταβολής τους κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που οι δύο σήραγγες απείχαν 3.5 μέτρα, στην δεξιά παρειά της προϋπάρχουσας σήραγγας, όπου και συναντήθηκαν οι μέγιστες τιμές της ροπής, η μέγιστη μεταβολή που αντιστοιχούσε στη θέση του μέσου της σήραγγας, ήταν της τάξης των 20 kNm. Αντίθετα, τώρα που οι σήραγγες απέχουν σχεδόν τη διπλάσια απόσταση, η μέγιστη μεταβολή της ροπής στη συγκεκριμένη θέση είναι μικρότερη από 10 kNm, δηλαδή μειώνεται περίπου στο μισό. Αντίστοιχα μικρότερες είναι και οι μεταβολές στις θέσεις της αριστερής παρειάς, της στέψης και του δαπέδου της άνω σήραγγας. Μπορεί η μεταβολή της ροπής να μειώνεται στο μισό, στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, η μεταβολή είναι σχετικά μικρή σε απόλυτες τιμές.

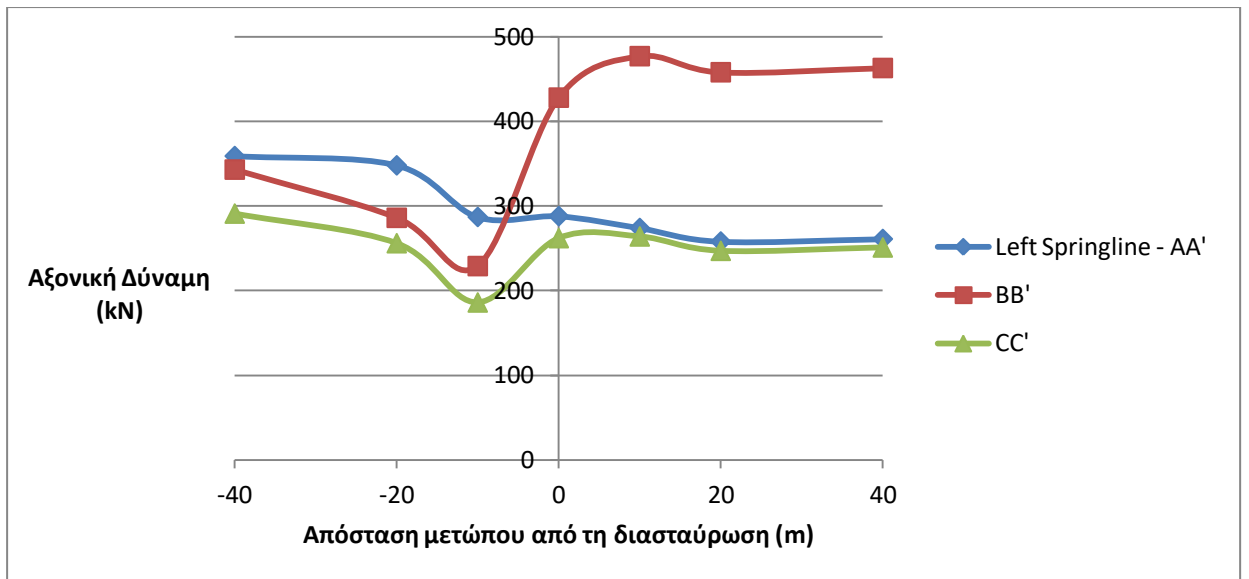
Παρακάτω, ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άνω σήραγγας κατά την προχώρηση του μετώπου της κάθετα υποκείμενης σήραγγας. Στο σχήμα 6.7 απεικονίζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας.



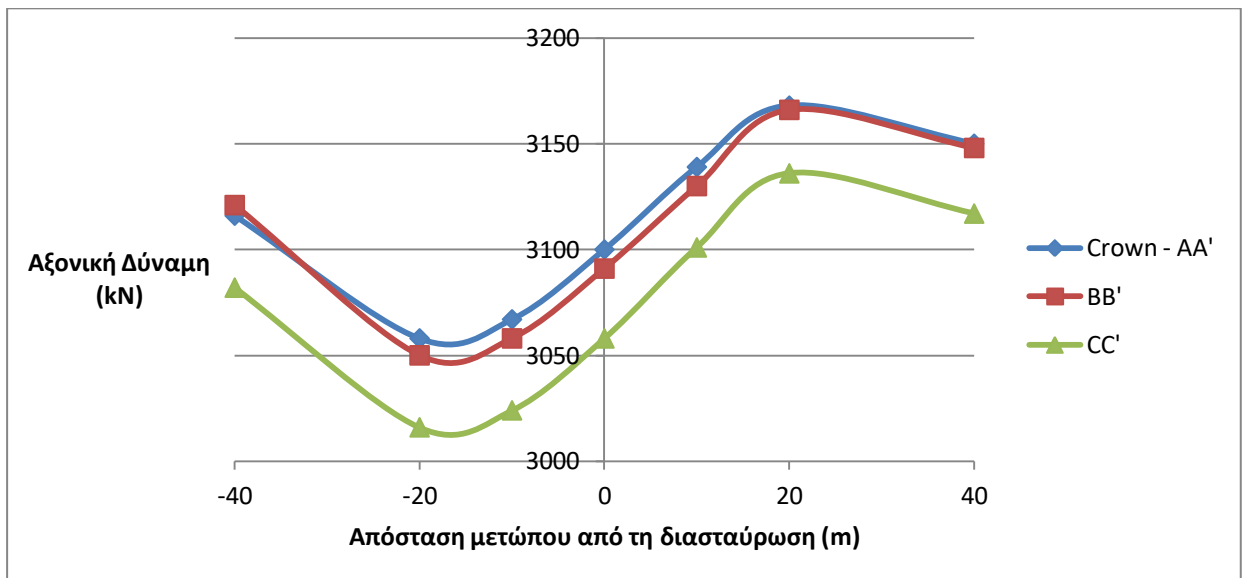
**Σχ. 6.7:** Απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας μετά τη διάνοιξη της νέας



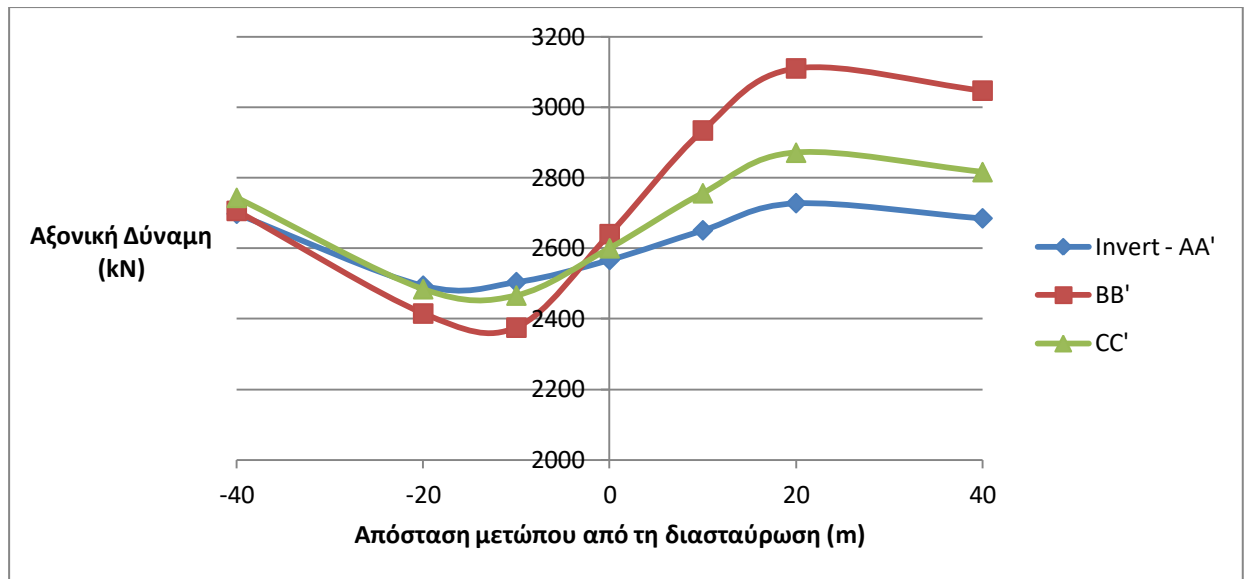
**Σχ. 6.8:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.9:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.10:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



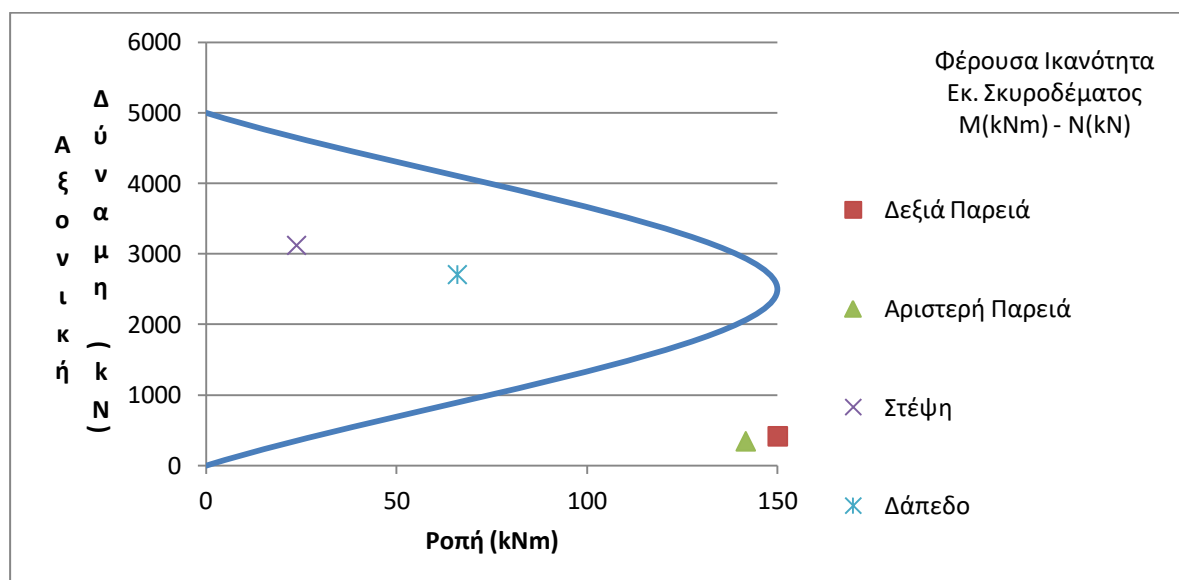
**Σχ. 6.11:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό πως οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα, αυξομειώνονται με τον ίδιο τρόπο κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, όπως και στην περίπτωση όπου η απόσταση μεταξύ των σηράγγων ήταν 3.5 μέτρα. Μάλιστα, και σε αυτή την περίπτωση είναι ξεκάθαρα εμφανής η μεγαλύτερη επίδραση που δέχεται η άνω σήραγγα στο μέσο της, στη θέση δηλαδή της διασταύρωσης, αφού η καμπύλη BB' παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από τις άλλες δύο, ειδικά για τις θέσεις από μία διάμετρο πριν το μέτωπο της νέας σήραγγας φτάσει στο μέσο της έως και δύο διαμέτρους μετά.

Ωστόσο, και στην περίπτωση των αξονικών δυνάμεων του σκυροδέματος γίνεται φανερό πως η αύξηση της κατακόρυφης απόστασης μεταξύ των δύο σηράγγων μειώνει την επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα μέτρα υποστήριξης της προϋπάρχουσας. Γίνεται μία προσπάθεια ποσοτικοποίησης αυτής της μείωσης με τη χρήση του χαρακτηριστικού διαγράμματος που αφορά τις αξονικές δυνάμεις στο δάπεδο της άνω σήραγγας (οι αξονικές δυνάμεις στο δάπεδο και τη στέψη της σήραγγας είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με τις παρειές της). Όταν λοιπόν, η απόσταση των δύο σηράγγων

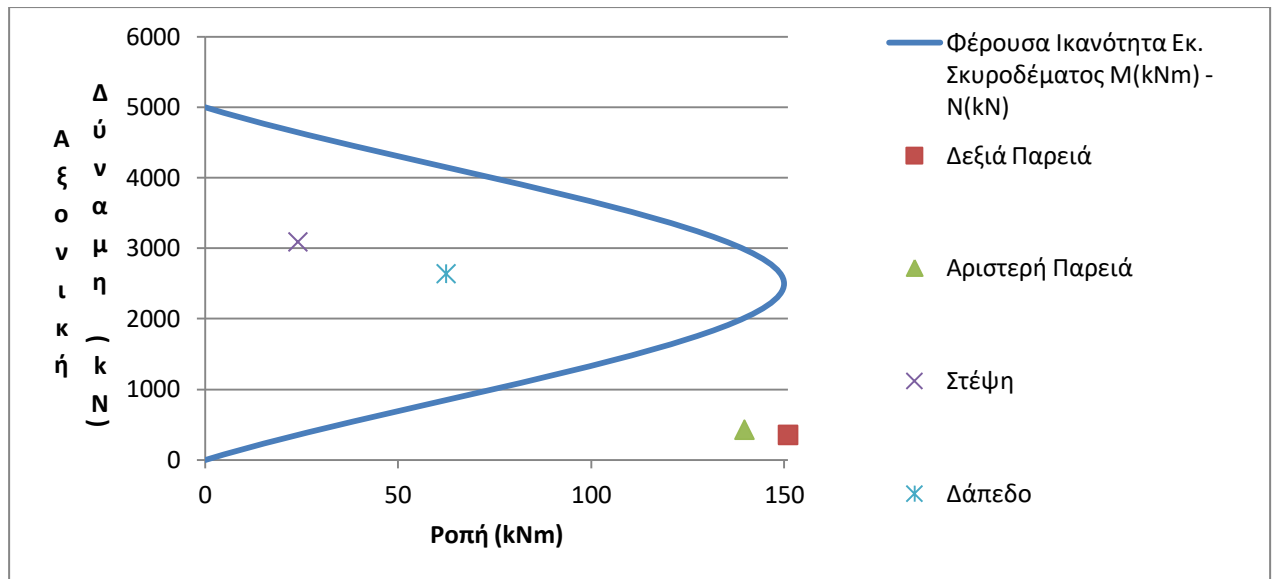
είναι 3.5 μέτρα, η μέγιστη μεταβολή που λαμβάνει χώρα στο δάπεδο της άνω σήραγγας είναι περίπου 1400 kN. Αντίθετα, στην περίπτωση των 6.5 μέτρων, η αντίστοιχη μεταβολή είναι κατά λίγο μεγαλύτερη 700 kN, δηλαδή περίπου η μισή. Αντίστοιχη είναι και η μείωση της μεταβολής και στις υπόλοιπες θέσεις της άνω σήραγγας. Έτσι, αυτά τα αποτελέσματα δίνουν το ερέθισμα για περισσότερες αναλύσεις, οι οποίες θα καταλήξουν πιθανότατα στον να αποδείξουν μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ της επίδρασης της διάνοιξης νέας σήραγγας που διέρχεται κάθετα κάτω από άλλη προϋπάρχουσα, στα μέτρα υποστήριξης της τελευταίας και της μεταξύ τους απόστασης.

Εν συνεχεία, με βάση τις ροπές και τις αξονικές δυνάμεις που προέκυψαν κατασκευάζεται το διάγραμμα της φέρουσας ικανότητας του σκυροδέματος. Τα μέτρα υποστήριξης στην ανάλυσή μας, προσομοιώθηκαν να συμπεριφέρονται ελαστικά, οπότε με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται αν το σκυρόδεμα θα διαρρεύσει. Η τάση διαρροής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι  $\sigma_{yield} = 20 \text{ MPa}$ . Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν την περιοχή της άνω σήραγγας που βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της (τομή ΒΒ') και η οποία επηρεάζεται πιο πολύ από τη διάνοιξη της νέας.

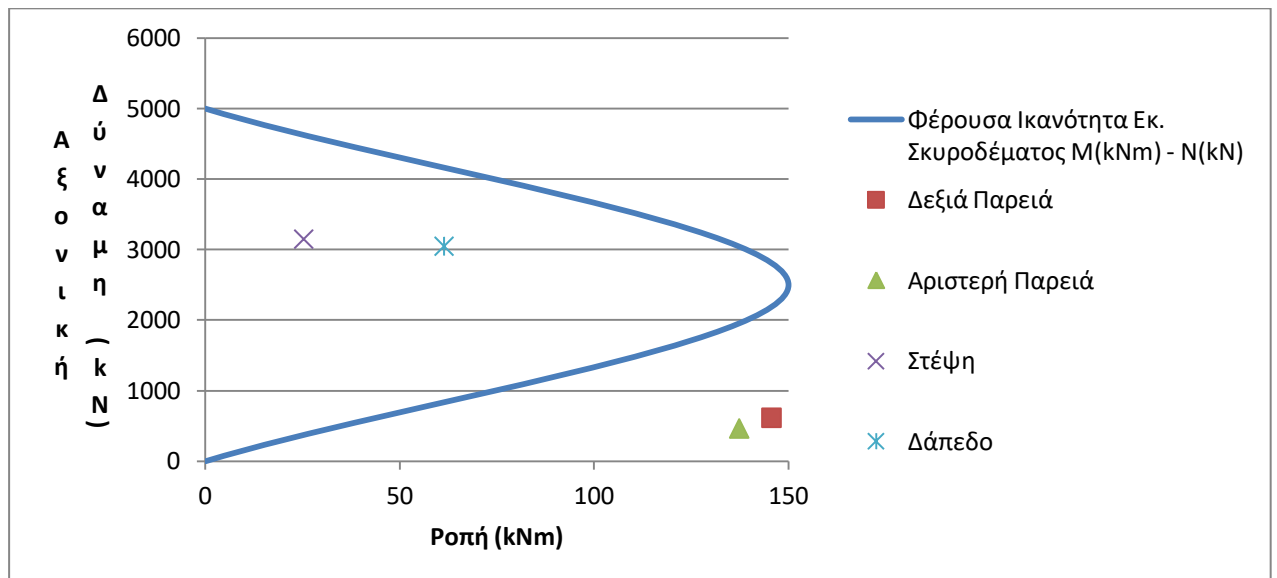


Σχ. 6.12: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας





**Σχ. 6.13:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης



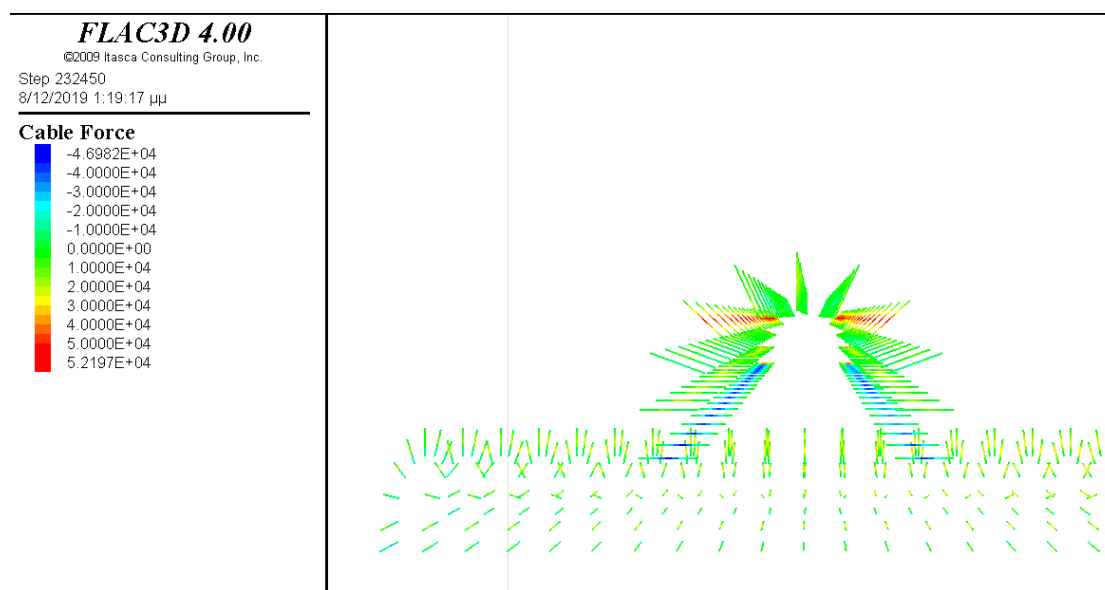
**Σχ. 6.14:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται φανερό πως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διαρρέει στις παρειές, μέσω της δημιουργίας εφελκυστικών ρωγμών, κάτι που οφείλεται στις υψηλές οριζόντιες τάσεις που δρουν στην περιοχή. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στα αντίστοιχα

διαγράμματα της βασικής περίπτωσης, η διαρροή του σκυροδέματος προκύπτει λόγω της διάνοιξης της ίδιας της σήραγγας. Βέβαια, λόγω της μικρότερης μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η θετική επίδραση που είχε η διάνοιξη της νέας σήραγγας ως προς τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, περιορίζεται.

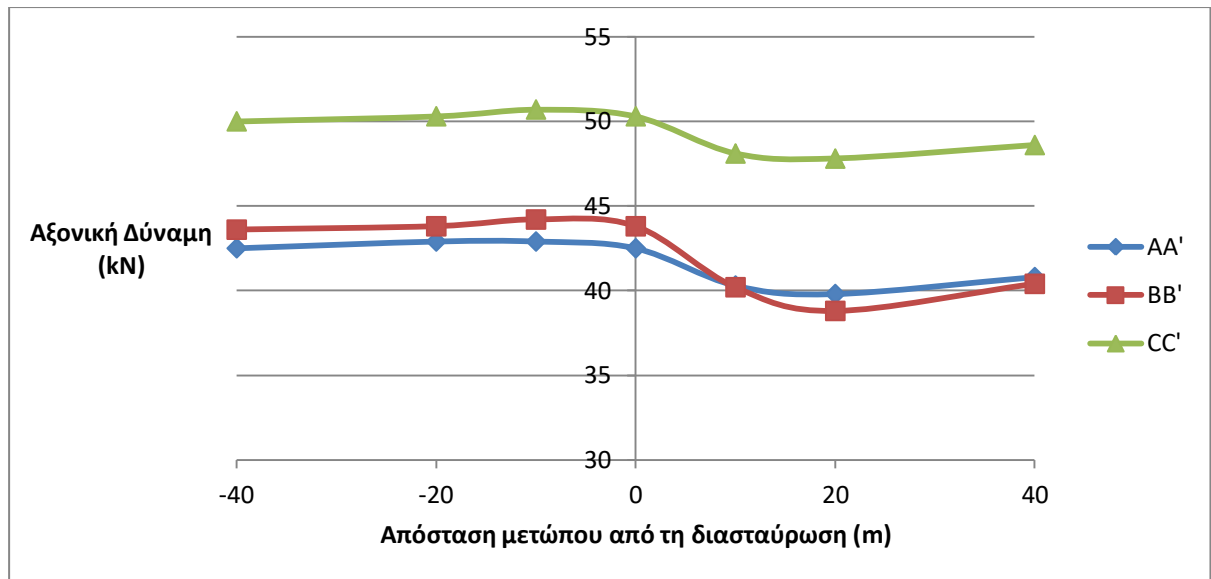
### 6.2.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας

Τα αγκύρια της άνω σήραγγας που δέχονται τις μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις είναι αυτά που βρίσκονται στους ώμους της εκσκαφής της σήραγγας, όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.15. Συνεπώς, είναι και αυτά για τα οποία θα εξεταστεί η μεταβολή των αξονικών τους δυνάμεων κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Οι τιμές των αξονικών δυνάμεων στα υπόλοιπα αγκύρια είναι χαμηλές και οι μεταβολές τους, που είναι επίσης μικρές, δε θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργικότητα των αγκυρίων.



Σχ. 6.15: Απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων μετά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας

Παρακάτω ακολουθεί η απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια και τα διαγράμματα μεταβολής τους σε σχέση με τη θέση του μετώπου της νέας σήραγγας.



**Σχ. 6.16:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης

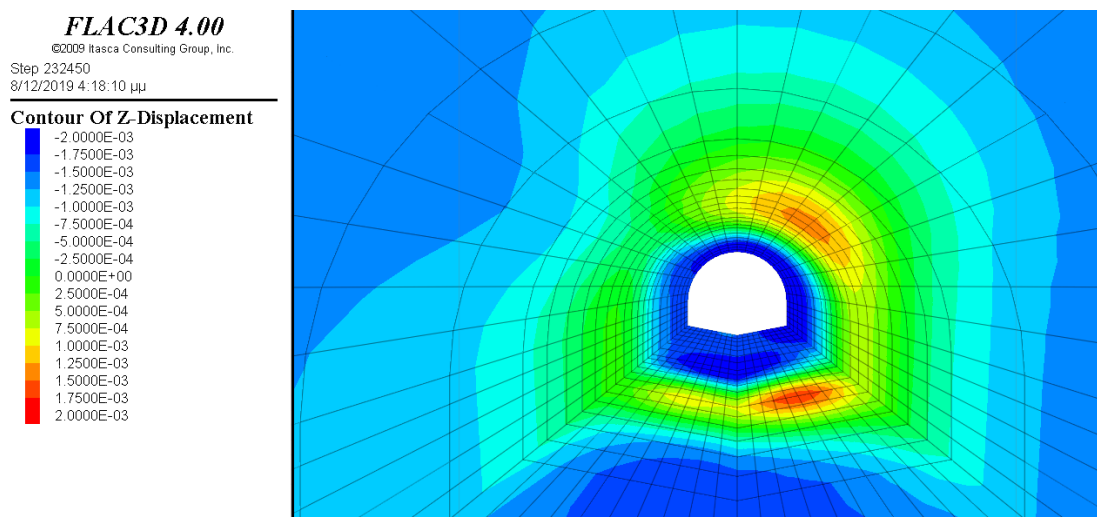
Από το σχήμα 6.16 γίνεται φανερό η επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στις αξονικές δυνάμεις των αγκυρίων της προϋπάρχουσας. Παρατηρείται μία ελαφρά αύξηση των δυνάμεων αυτών μέχρι τη στιγμή που το μέτωπο της νέας σήραγγας φτάνει στη θέση της διασταύρωσης. Στη συνέχεια, οι δυνάμεις μειώνονται μέχρι και για δύο διαμέτρους μετά, και τελικά ισορροπούν σε μία τιμή δύναμης, μικρότερη από την αρχική. Και πάλι, η μέγιστη μεταβολή στο εύρος τιμών παρατηρείται στην καμπύλη BB', κάτι που σημαίνει πως η περιοχή ακριβώς πάνω από τη διασταύρωση είναι αυτή που επηρεάζεται περισσότερο.

Κάνοντας μία σύγκριση με την περίπτωση του βασικού σεναρίου, όπου η καθαρή απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων ήταν 3.5 μέτρα παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά στη μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στην οποία υπόκεινται τα αγκύρια. Στην πρώτη περίπτωση, η μέγιστη μεταβολή που παρατηρείται είναι από 32 έως 42 kN, δηλαδή της τάξης των 10 kN. Στην περίπτωση που η απόσταση σχεδόν διπλασιάζεται, η μέγιστη μεταβολή είναι από 39 έως 44 kN, δηλαδή της τάξης των 5 kN. Κοιτάζοντας αυτές τις δύο τιμές, γίνεται φανερό πως η αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο σηράγγων στη διπλάσια τιμή, μειώνει την επίδραση στις αξονικές δυνάμεις των αγκυρίων στο μισό.

### 6.2.1.3 Μετακινήσεις

Όσο αφορά στις μετακινήσεις που έλαβαν χώρα στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας, είναι ίδιες με αυτές που προέκυψαν από την εκσκαφή της άνω σήραγγας της βασικής ανάλυσης, καθώς δεν υπάρχει διαφοροποίηση στη θέση που διανοίχθηκε. Έτσι, οι κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις της παρούσας ανάλυσης φαίνονται στο σχήμα 5.31.

Σε αυτή την περίπτωση, αυξάνοντας την κατακόρυφη ενδιάμεση απόσταση μεταξύ προϋπάρχουσας και νέας σήραγγας, είναι σημαντικό να ελεγχθεί η επιρροή της διάνοιξης της τελευταίας στις κατακόρυφες μετακινήσεις της πρώτης. Στο σχήμα 6.17 απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που έχει υποστεί η άνω σήραγγα στο τέλος της διάνοιξης της νέας και οφείλονται αποκλειστικά σε αυτή.



**Σχ. 6.17:** Απεικόνιση των κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσο της άνω σήραγγας μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της νέας σήραγγας

Από την παραπάνω απεικόνιση των μετακινήσεων γίνεται αντιληπτό πως η περιοχή που επηρεάστηκε περισσότερο είναι η περιοχή που βρίσκεται στο μέσο της άνω σήραγγας, δηλαδή πάνω από εκεί όπου διέρχεται η νέα σήραγγα. Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις, οι οποίες μάλιστα είναι ανυψώσεις, εντοπίζονται στο δάπεδο και στους ώμους της σήραγγας και είναι της τάξης του 1.5 χιλιοστού, ενώ στις παρειές της σήραγγας είναι αμελητέες (κάτω από μισό χιλιοστό).

Συγκριτικά με τις αντίστοιχες μετακινήσεις της περίπτωσης όπου η απόσταση των σηράγγων ήταν 3.5 μέτρα, οι μετακινήσεις της παρούσας ανάλυσης είναι σαφώς μικρότερες. Πιο συγκεκριμένα, στη θέση του δαπέδου και των ώμων της άνω σήραγγας, φαίνεται να πέφτουν στο μισό, ενώ στις παρειές είναι σχετικά πολύ μικρότερες.

### **6.3 Μεταβολή του βάθους διάνοιξης των σηράγγων**

Συνεχίζοντας τις παραμετρικές αναλύσεις, επιλέχθηκε σε μία από αυτές να μεταβληθεί το βάθος των σηράγγων, τόσο της προϋπάρχουσας όσο και της νέας. Έχοντας εξετάσει στη βασική περίπτωση την επίδραση διάνοιξης νέας σήραγγας της οποίας ο άξονας βρίσκεται σε βάθος 27 μέτρα από την επιφάνεια και διέρχεται κάθετα κάτω από προϋπάρχουσα σήραγγα της οποίας ο άξονας βρίσκεται σε βάθος 15 μέτρα από την επιφάνεια, θελήσαμε να εξετάσουμε το ίδιο πρόβλημα για την περίπτωση που οι σήραγγες θα διανοίγονταν σε 10 μέτρα μεγαλύτερο βάθος. Παρά το γεγονός ότι η ποιότητα της βραχομάζας θα ήταν καλύτερη σε μεγαλύτερα βάθη, στην ανάλυση αυτή δεν άλλαξε και η μόνη παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν το βάθος εκσκαφής των σηράγγων, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδρασή του στο πρόβλημα.

Αναφορικά με την προετοιμασία του μοντέλου, η λογική της διαδικασίας που ακολουθήθηκε παρέμεινε ίδια με των προηγούμενων περιπτώσεων. Ωστόσο, αυτό που άλλαξε εδώ αφορά το πρώτο στάδιό της, δηλαδή την κατασκευή του καννάβου. Πιο συγκεκριμένα, άλλαξαν οι συντεταγμένες που δόθηκαν στα βάθη των σηράγγων, αλλά και των ζωνών που προσομοίωναν την περιβάλλουσα βραχομάζα σε εκείνες τις θέσεις. Ο άξονας της σήραγγας που προσομοιώνει την προϋπάρχουσα σχεδιάστηκε σε βάθος 25 μέτρων και αυτής που προσομοιώνει τη νέα σε βάθος 37 μέτρων. Επιπλέον, το μοντέλο επεκτάθηκε στην κάτω πλευρά του κατά 10 μέτρα στη διεύθυνση του άξονα z, έτσι ώστε να μην αλλάξει η κάθετη απόσταση του κάτω επιπέδου, όπου εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες, από την κάτω σήραγγα.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μοντέλο όπου οι σήραγγες έχουν μεγαλύτερο βάθος κατά 10 μέτρα, πριν τη διάνοιξη τους.

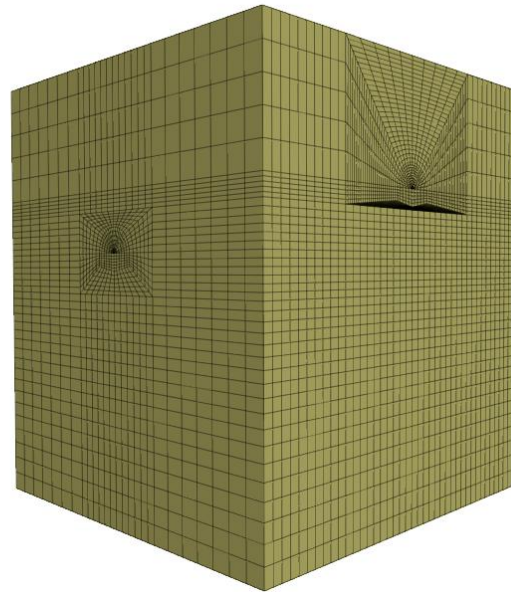
## FLAC3D 4.00

©2009 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 8476  
11/12/2019 10:38:15 πμ

### Zone

Colorby: Uniform  
■ Zone



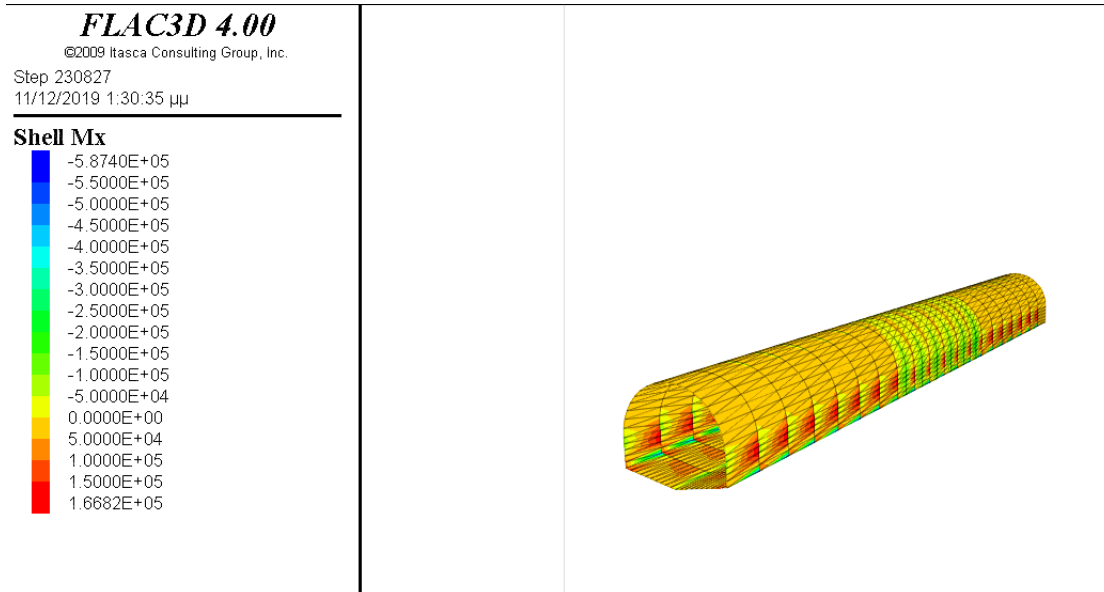
Σχ. 6.18: Το μοντέλο στο οποίο το βάθος των σηράγγων έχει αυξηθεί κατά 10 μέτρα

### 6.3.1 Αποτελέσματα

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάζονται παρακάτω συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας, μέσω της αξιολόγησης των ροπών και των αξονικών δυνάμεων, οι επιδράσεις στα αγκύρια της άνω σήραγγας και τέλος οι μετακινήσεις που προκλήθηκαν σε αυτή λόγω της διάνοιξης της νέας, κάθετης σε αυτή υποκείμενης σήραγγας.

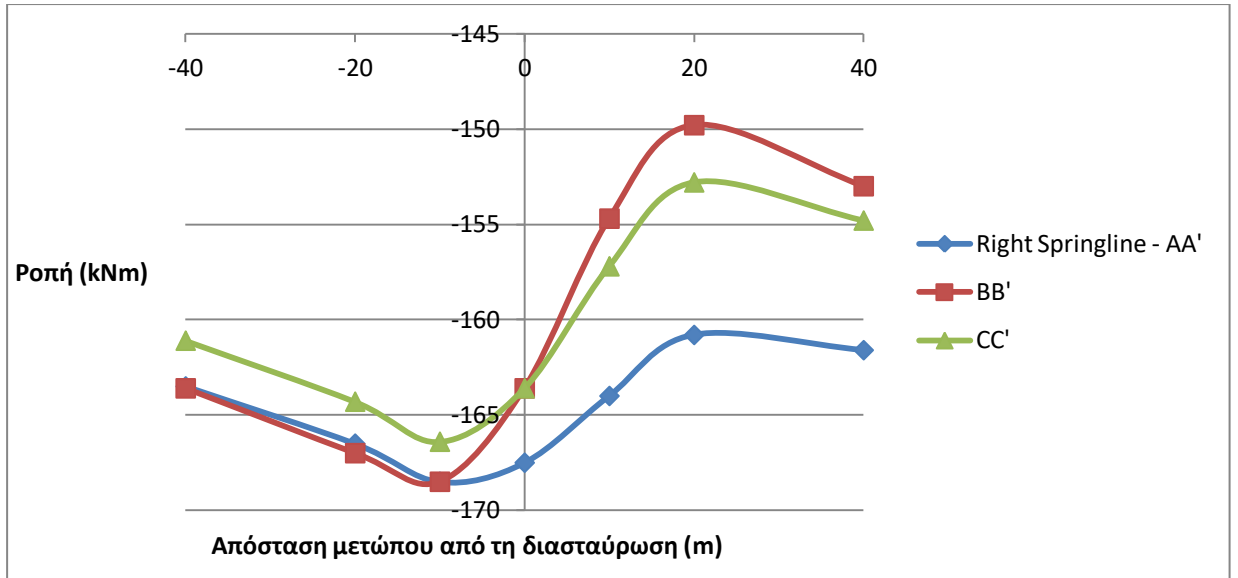
#### 6.3.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν τα αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με την επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τιμές της ροπής και των αξονικών δυνάμεων σε θέσεις της δεξιάς και αριστερής παρειάς, της στέψης και του δαπέδου της προϋπάρχουσας σήραγγας. Η κατανομή των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας για την περίπτωση που οι σήραγγες βρίσκονται σε βάθος 25 και 37 μέτρων, απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.

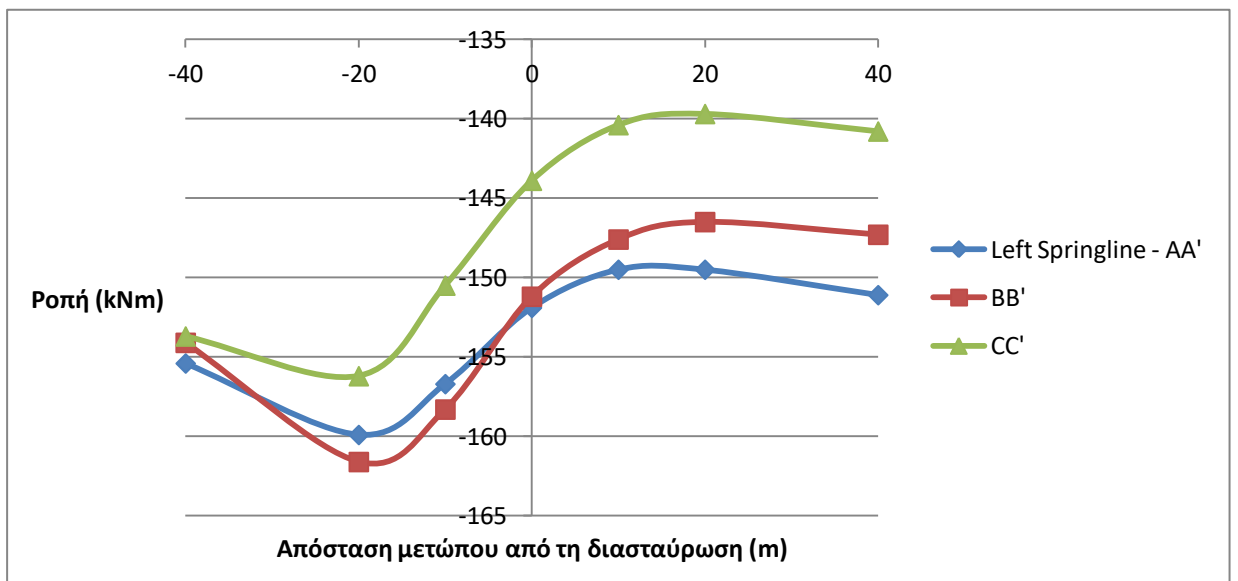


**Σχ. 6.19:** Απεικόνιση ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας πριν τη διάνοιξη της νέας

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι μεταβολές των ροπών στις διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και σε 3 τομές της άνω σήραγγας, για διάφορες θέσεις του μετώπου κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, που προέκυψαν για καθεμιά από τις δύο παραπάνω αναλύσεις. Οι 3 τομές που αναφέρθηκαν γίνονται σε θέσεις μίας διαμέτρου πριν το μέσο, του μέσου και μίας διαμέτρου μετά το μέσο της άνω σήραγγας και ονομάζονται αντίστοιχα AA', BB' και CC', ενώ οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας, για τις οποίες θα παρουσιαστούν οι μεταβολές αφορούν τις θέσεις στις οποίες το μέτωπο βρίσκεται δύο και μία διάμετρο πριν το σημείο διασταύρωσης των δύο σηράγγων, στο σημείο διασταύρωσης, και μία και δύο διαμέτρους μετά από αυτό.

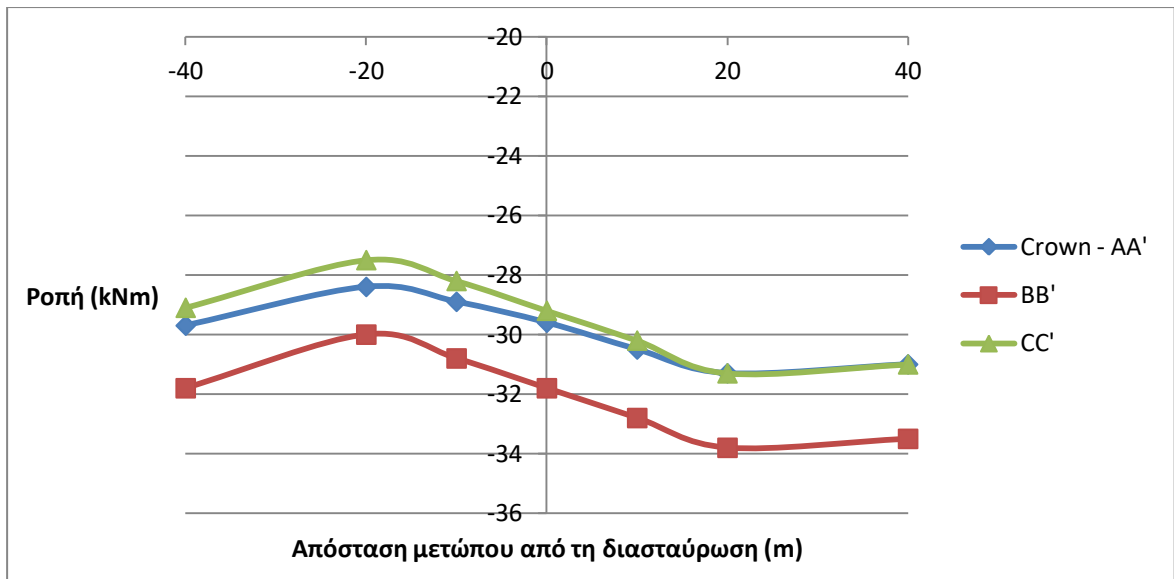


**Σχ. 6.20:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

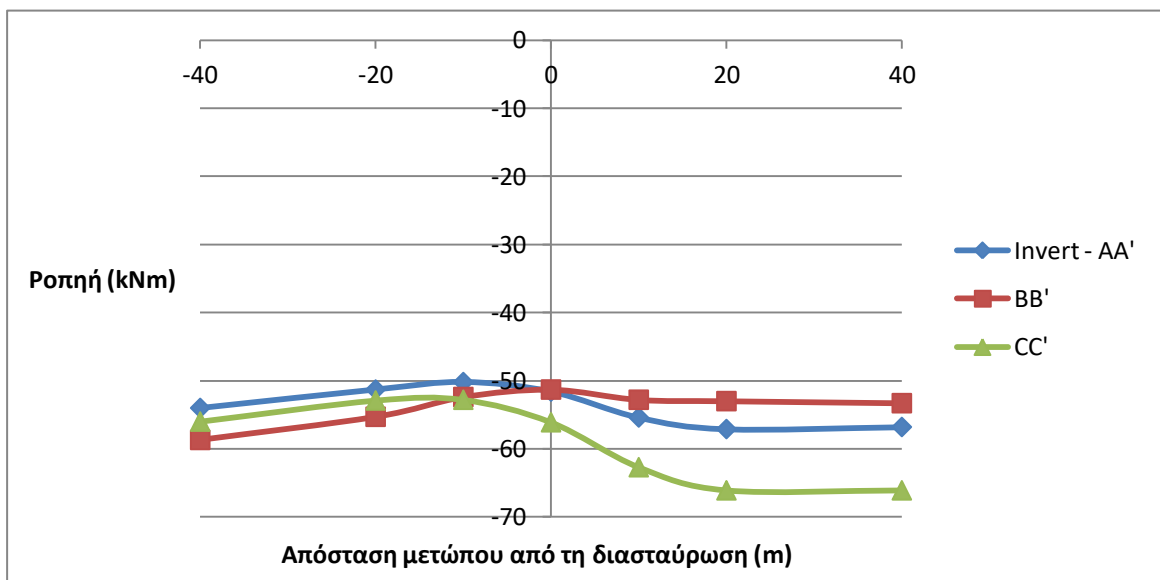


**Σχ. 6.21:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης





**Σχ. 6.22:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



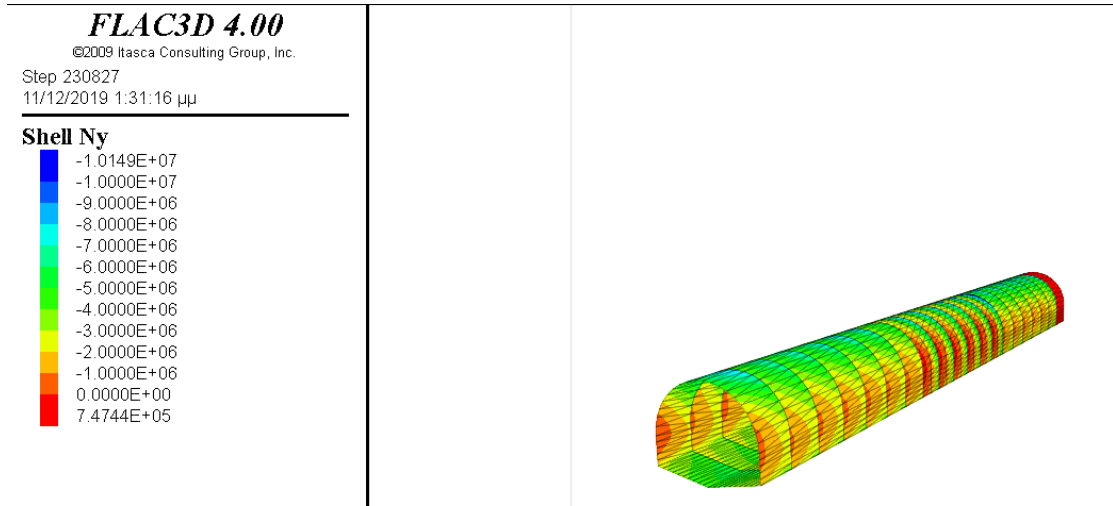
**Σχ. 6.23:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι ροπές σε διάφορες θέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άνω σήραγγας κατά τη διάνοιξη της νέας υποκείμενης σε αυτή σήραγγας. Για μία ακόμη φορά, όπως αναμενόταν, οι μεγαλύτερες τιμές της ροπής συναντώνται στις παρειές της σήραγγας. Στις θέσεις αυτές, ξεκινώντας από

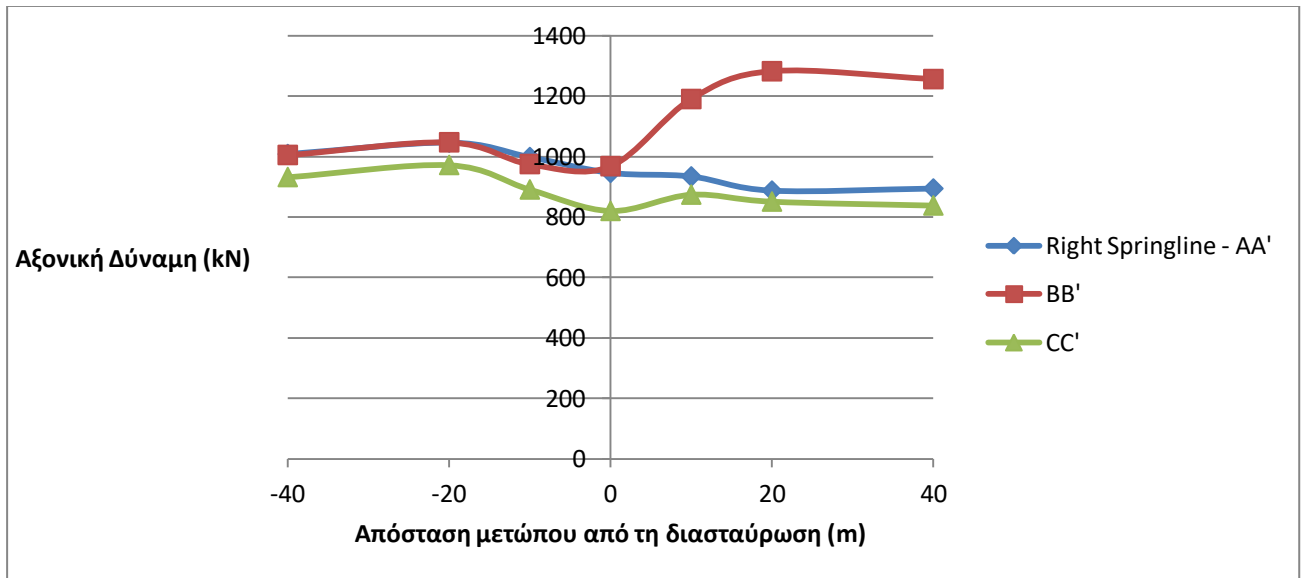
την αρχική τιμή της ροπής (η οποία δρούσε στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμά της μετά τη διάνοιξη της ίδιας της σήραγγας), η ροπή αυξάνεται μέχρι το μέτωπο της νέας σήραγγας να φτάσει μία διάμετρο πριν τη διασταύρωση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι το μέτωπο να περάσει κατά δύο διαμέτρους τη θέση της διασταύρωσης, οπότε και αρχίζει και ισορροπεί. Οι τιμές της ροπής, όπως σε όλες τις έως τώρα αναλύσεις είναι αρνητικές, δηλαδή η πλευρά του σκυροδέματος που «κοιτάζει» το εσωτερικό της σήραγγας εφελκύεται, ενώ η πλευρά που «κοιτάζει» την περιβάλλουσα βραχώμαζα θλίβεται. Επιπρόσθετα, παρατηρείται και πάλι πως το μεγαλύτερο εύρος τιμών παρουσιάζει η καμπύλη BB', δηλαδή το μέσο της άνω σήραγγας αποτελεί τη θέση που επηρεάζεται πιο πολύ από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας.

Όσο αφορά στις τιμές της ροπής και λαμβάνοντας ως μέτρο σύγκρισης την περίπτωση της δεξιάς παρειάς που καταγράφηκαν οι μέγιστες, είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που οι σήραγγες βρίσκονταν σε κατά 10 μέτρα μικρότερο βάθος. Ήδη, πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας σήραγγας, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην παρειά είχε αναλάβει ροπές της τάξης των 163 kNm, την ώρα που η αντίστοιχη τιμή για το μικρότερο βάθος σήραγγων ήταν 148 kNm. Μικρή διαφορά όμως, εντοπίζεται και κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Παρατηρώντας τα διαγράμματα της τομής BB' για τις δύο περιπτώσεις φαίνεται πως όταν οι σήραγγες είχαν μεγαλύτερο βάθος, η μέγιστη μεταβολή της ροπής που σημειώθηκε κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας ήταν 20 kNm ( από 170 σε 150 kNm), ενώ στην προηγούμενη περίπτωση ήταν 15 kNm (από 155 σε 140 kNm).

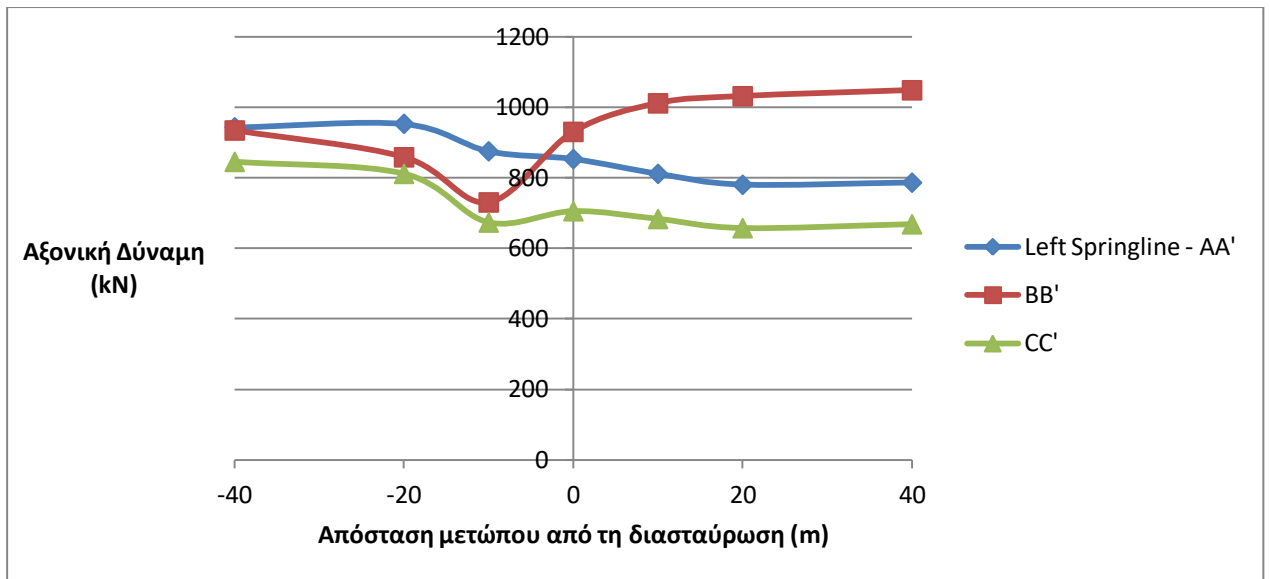
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στις αντίστοιχες θέσεις, ώστε να υπάρξει μια πληρέστερη εικόνα της επίδρασης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας. Στο σχήμα 6.24 παρουσιάζεται η απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας για την περίπτωση που οι σήραγγες βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος.



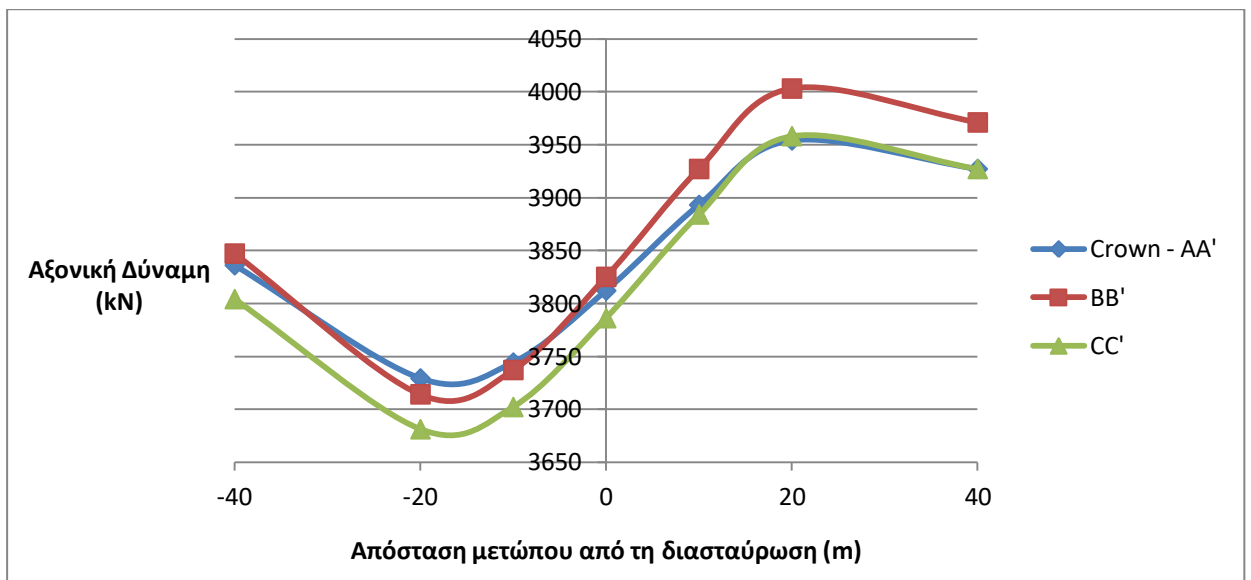
**Σχ. 6.24:** Απεικόνιση η απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας πριν τη διάνοιξη της νέας



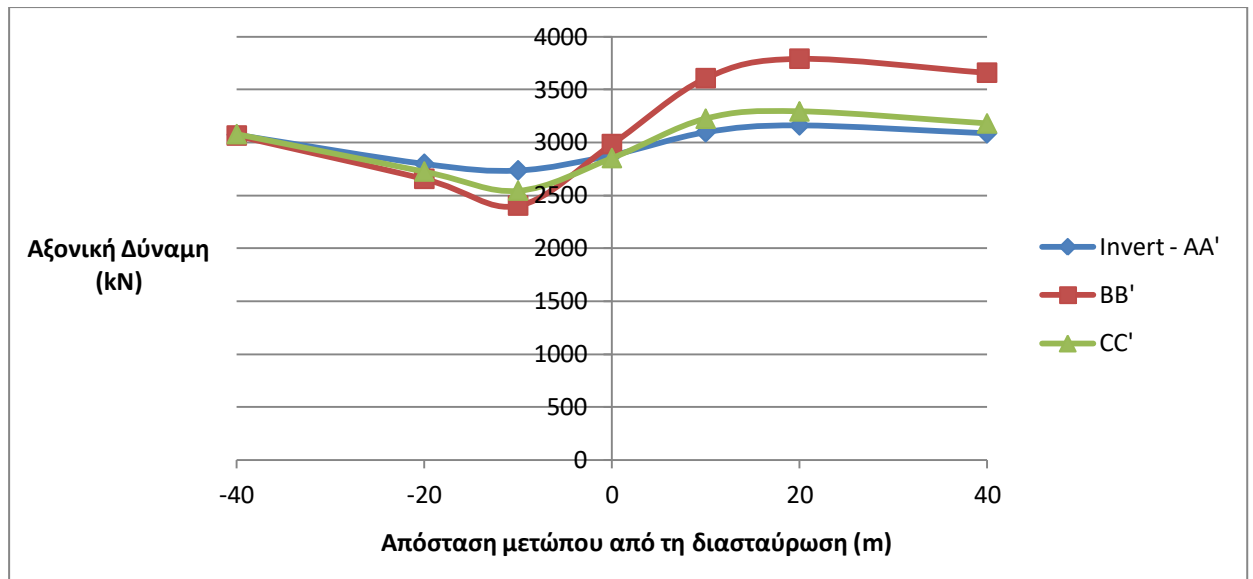
**Σχ. 6.25:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



Σχ. 6.26: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



Σχ. 6.27: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

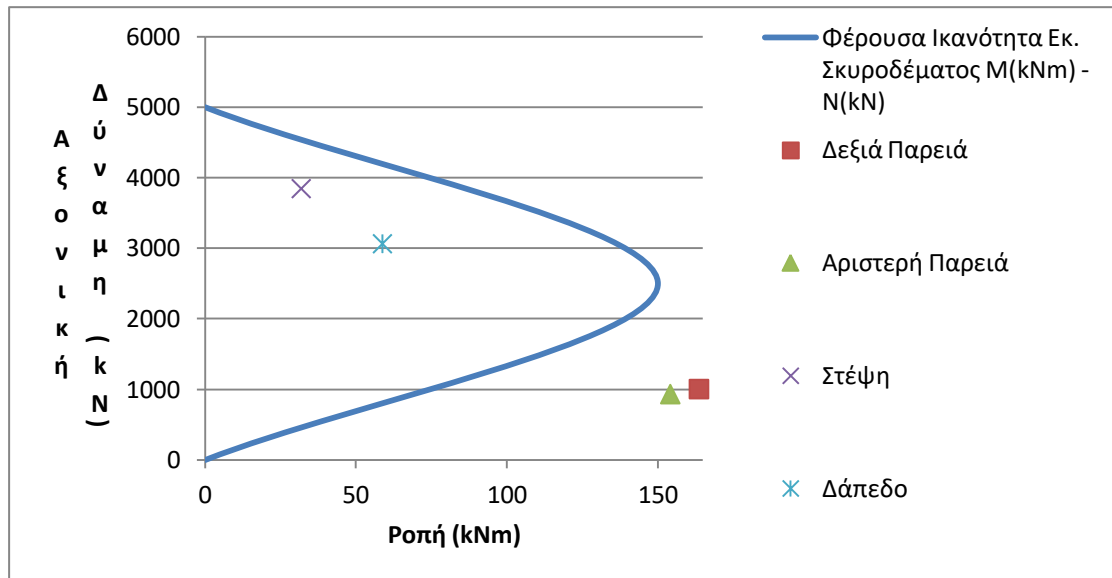


**Σχ. 6.28:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

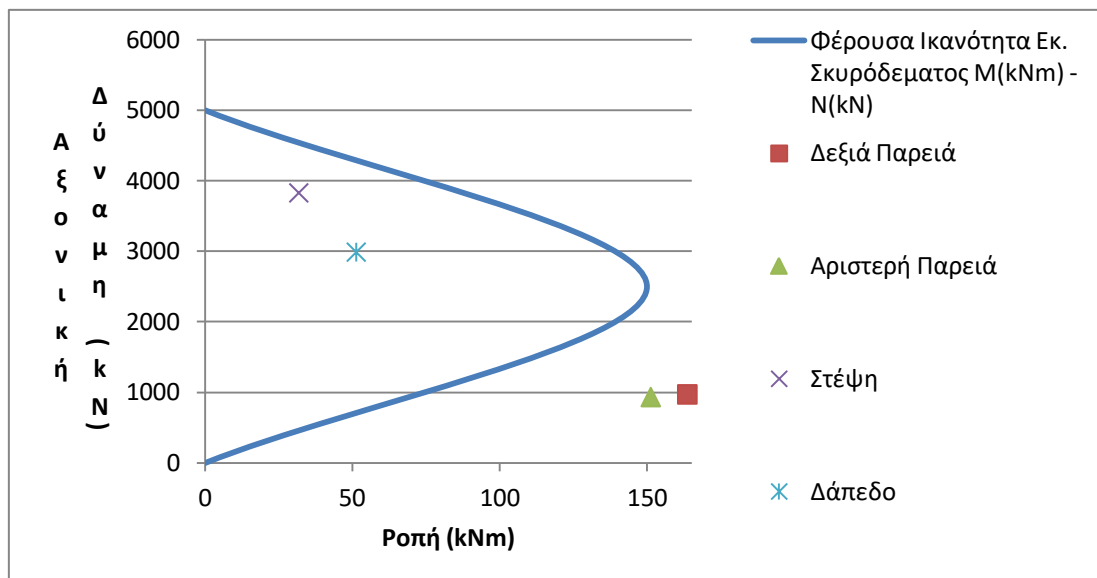
Παρατηρώντας κανείς τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνει ότι οι αξονικές τάσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην παρούσα περίπτωση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης που οι σήραγγες βρίσκονταν σε μικρότερο βάθος. Αναλυτικότερα, οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στις παρειές της σήραγγας. Λόγω της διάνοιξης της νέας σήραγγας, σε αυτές τις θέσεις μπορούν να φτάσουν έως τα 1300 kNm, την ώρα που η αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση του μικρότερου βάθους, δε φτάνει τα 900 kNm. Σημαντική αύξηση σημειώνεται και στη θέση της στέψης της σήραγγας, ενώ στο δάπεδο η αύξηση είναι μικρή.

Ωστόσο, οι μέγιστες μεταβολές που παρατηρούνται κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας είναι αντίστοιχου μεγέθους, ίσως και μικρότερες κατά περίπτωση. Για παράδειγμα, στη δεξιά παρειά της σήραγγας οι αξονικές δυνάμεις μεταβάλλονται από 1000 έως 1300 kN, ενώ στην περίπτωση του μεγαλύτερου βάθους η μεταβολή αυτή είναι από 400 έως περίπου 900 kN. Η θέση που πρέπει να δοθεί προσοχή σε ανάλογες περιπτώσεις, όσο αφορά στις αξονικές δυνάμεις, είναι η στέψη της σήραγγας. Εκεί η μέγιστη μεταβολή τους λόγω της διάνοιξης της νέας σήραγγας είναι διπλάσια από ότι στην περίπτωση που το βάθος ήταν μικρότερο (400 έναντι 200 kN), ενώ η μέγιστη τιμή της αξονικής δύναμης φτάνει τα 4000 kN.

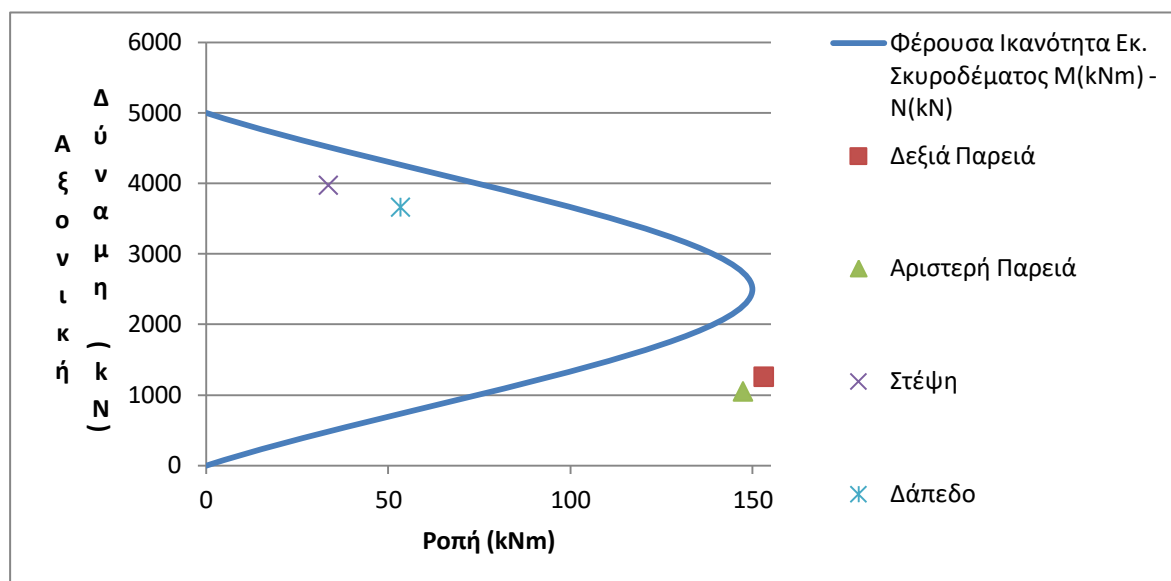
Εν συνεχεία, δίνονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης σε όρους ροπών – αξονικών δυνάμεων που αφορούν το εκτοξευόμενο σκυροδέμα της άνω σήραγγας σε τρεις φάσεις. Πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας σήραγγας, όταν το μέτωπο της βρίσκεται στη θέση της διασταύρωσης και μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της.



**Σχ. 6.29:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας



**Σχ. 6.30:** Διάγραμμα φέρουσας ικανότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης

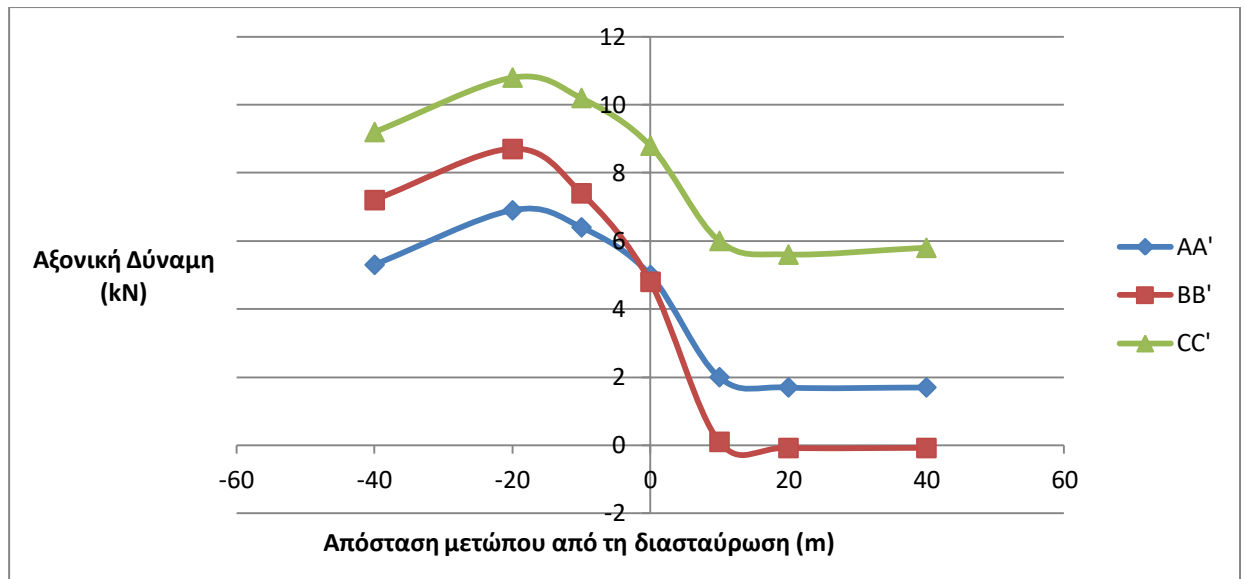


Σχ. 6.31: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αστοχεί και πάλι εφελκυστικά στις παρειές του καθώς οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις θέσεις αυτές είναι χαμηλές. Με τη διάνοιξη της νέας σήραγγας οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται, γεγονός που συμβάλει στη λειτουργικότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο, σε καμία φάση διάνοιξης της νέας σήραγγας τα σημεία που αντιστοιχούν στις παρειές δε βρίσκονται στο εσωτερικό της μπλε καμπύλης, δηλαδή στην περιοχή λειτουργικότητας του σκυροδέματος.

### 6.3.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας

Όσο αφορά στην επίδραση της διάνοιξης νέας σήραγγας, κάθετα υποκείμενης στην προϋπάρχουσα, στα αγκύρια της δεύτερης, εξετάζεται η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων τους. Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις ασκούνται στα αγκύρια που έχουν τοποθετηθεί στους ώμους της εκσκαφής και γι' αυτό το λόγο είναι αυτά που θα παρουσιαστούν. Παρακάτω ακολουθεί η απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια και τα διαγράμματα μεταβολής τους σε σχέση με τη θέση του μετώπου της νέας σήραγγας.



**Σχ. 6.32:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης

Στις αξονικές δυνάμεις των αγκυρίων αυτής της περίπτωσης σημειώνονται σημαντικές διαφορές με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αρχικά, οι εφελκυστικές δυνάμεις που αναλαμβάνουν τα αγκύρια είναι χαμηλές και πολύ χαμηλότερες από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Κατ' επέκταση και η μεταβολή που προκαλεί η διάνοιξη της νέας σήραγγας είναι μικρή.

Η διαφοροποίηση σε αυτή την περίπτωση, έγκειται στο γεγονός ότι έπειτα από τη διέλευση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης των σηράγγων, αρχίζουν να δρουν θλιπτικές δυνάμεις, πολύ μικρής τιμής βέβαια. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί σίγουρα και στην αναθεώρηση της χρήσης των αγκυρίων σε μια τέτοια περίπτωση.

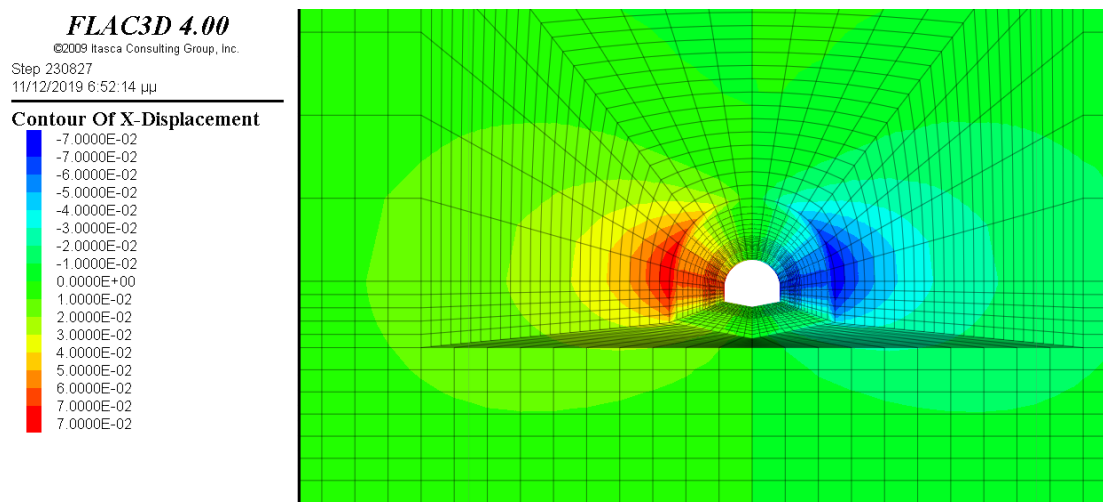
### 6.3.1.3 Μετακινήσεις

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζονται οι μετακινήσεις που προκύπτουν κατά τη διαδικασία επίλυσης του μοντέλου, από τη διάνοιξη της σήραγγας που προσομοιώνει την προϋπάρχουσα, ως και την ολοκλήρωση της εκσκαφής της νέας σήραγγας.

Σε πρώτη φάση, πρέπει να αναφερθεί πως σε ό,τι αφορά τις κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν λόγω της διάνοιξης της άνω σήραγγας, στην περιφέρεια της εμφανίστηκαν και πάλι ανυψώσεις. Ο λόγος για τον οποίο



προέκυψε αυτό το παράδοξο αποτέλεσμα εξηγείται εκτενώς στην αντίστοιχη παράγραφο του κεφαλαίου 5. Στο σχήμα 6.33 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προέκυψαν στην περιφέρεια της άνω σήραγγας λόγω της εκσκαφής της.

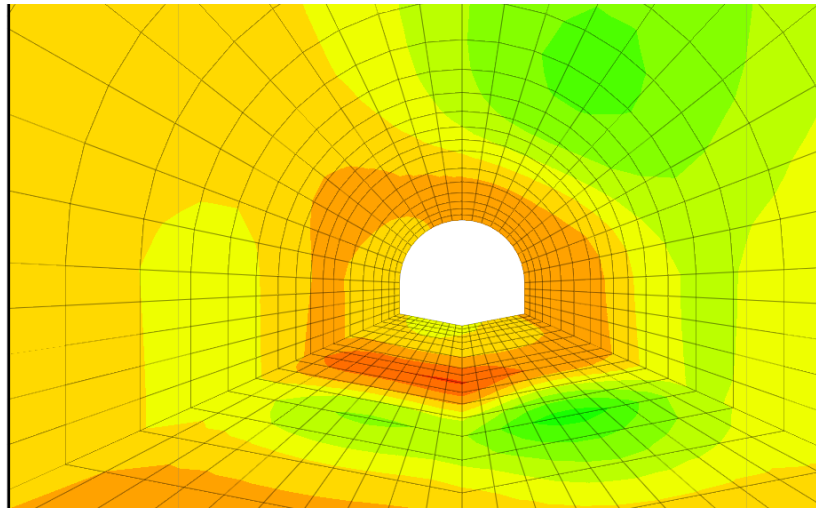
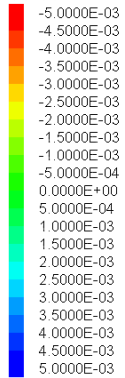


**Σχ. 6.33:** Οριζόντιες μετακινήσεις στην προϋπάρχουσα σήραγγα που προκλήθηκαν κατά την εκσκαφή της

Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις συναντώνται στις παρειές της σήραγγας και είναι της τάξης των 7 εκατοστών , ακόμη μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση που οι σήραγγες βρίσκονταν σε μικρότερο βάθος, καθώς οι οριζόντιες τάσεις είναι ακόμη μεγαλύτερες.

Παρατηρώντας το σχήμα 6.34 που δείχνει τις κατακόρυφες μετακινήσεις που προκλήθηκαν στην άνω σήραγγα λόγω της διάνοιξης της νέας, γίνεται φανερό πως προκύπτουν καθιζήσεις. Σε αντίθεση με την ανάλυση της βασικής περίπτωσης όπου το βάθος των σηράγγων ήταν μικρότερο και η διάνοιξη της νέας σήραγγας έδωσε ανυψώσεις στην προϋπάρχουσα, εδώ εμφανίζονται καθιζήσεις. Οι καθιζήσεις αυτές στο μέσο της άνω σήραγγας είναι της τάξης των 4 χιλιοστών στο δάπεδο και της τάξης των 3 χιλιοστών στις παρειές και στη στέψη της σήραγγας.

Contour Of Z-Displacement



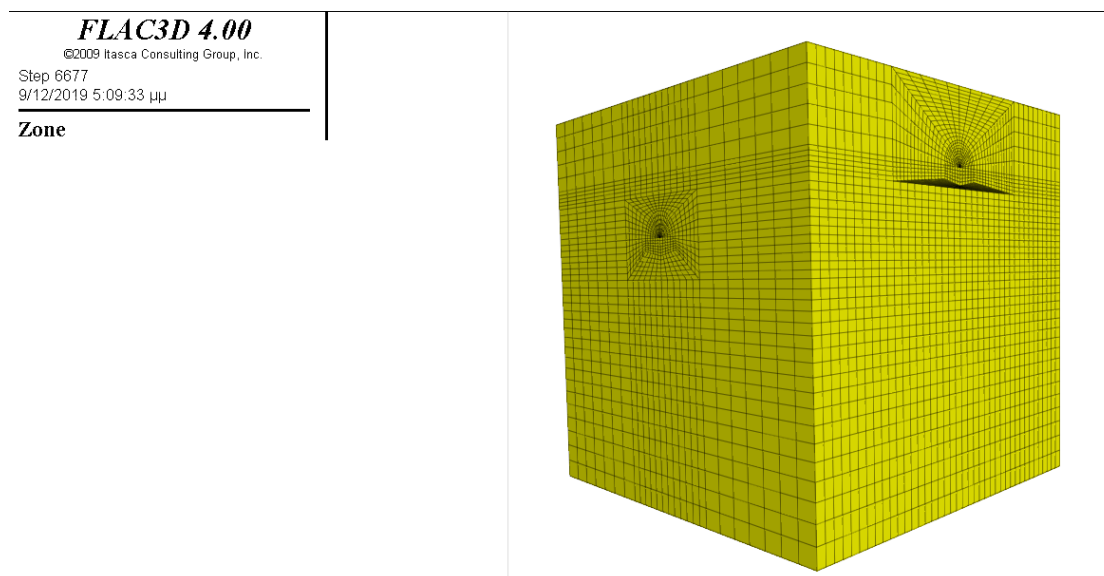
Σχ. 6.34: Απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσο της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξης της νέας σήραγγας

## 6.4 Μεταβολή του μέτρου Ελαστικότητας της βραχομάζας

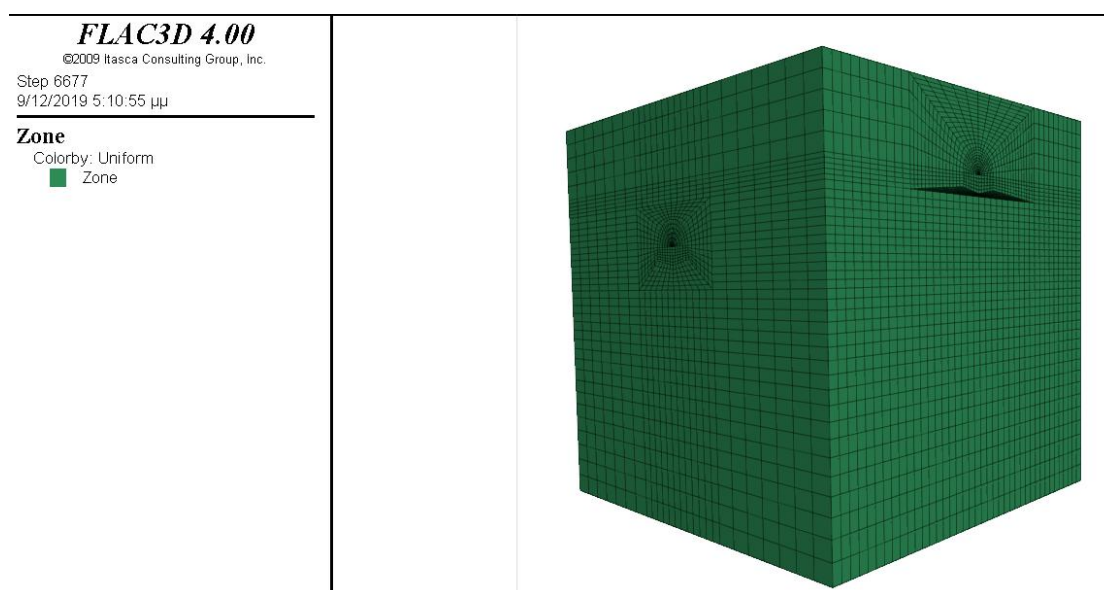
Μία άλλη παράμετρος του μοντέλου που επιλέχθηκε να μεταβληθεί, με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασής της στο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά τη βραχομάζα και πρόκειται για το μέτρο ελαστικότητας. Πραγματοποιώντας ελαστοπλαστικές αναλύσεις, όπως στην περίπτωση αυτής της φάσης προσομοιώσεων (χρήση μοντέλου Mohr – Coulomb), η βασική παράμετρος που καθορίζει τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας είναι το μέτρο του Young.

Όσο αφορά στην προετοιμασία του μοντέλου, η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που οδήγησε στην κατασκευή του μοντέλου της βασικής περίπτωσης που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαφοροποίηση στις αναλύσεις των οποίων τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στην παρούσα παράγραφο, έγκειται στις τιμές που δόθηκαν σε δύο ιδιότητες του μοντέλου και συγκεκριμένα το μέτρο συστολής (*bulk*) και το μέτρο διάτμησης (*shear*) που συνδέονται με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson της βραχομάζας. Έγιναν δύο αναλύσεις έχοντας μεταβάλλει το μέτρο ελαστικότητας. Στην πρώτη δόθηκαν τιμές των παραπάνω ιδιοτήτων που αντιστοιχούν σε μέτρο ελαστικότητας  $E_1 = 100 \text{ MPa}$  και στην άλλη σε μέτρο ελαστικότητας  $E_2 = 300 \text{ MPa}$ , δηλαδή  $\pm 100 \text{ MPa}$  από ότι στην περίπτωση του βασικού σεναρίου.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα μοντέλα για  $E_1 = 100 \text{ MPa}$  και  $E_2 = 300 \text{ MPa}$ , πριν τη διάνοιξη των σηράγγων.



Σχ. 6.35: Το μοντέλο με μέτρο ελαστικότητας γεωμάζας  $E_1=100 \text{ MPa}$



Σχ. 6.36: Το μοντέλο με μέτρο ελαστικότητας γεωμάζας  $E_2=300 \text{ MPa}$

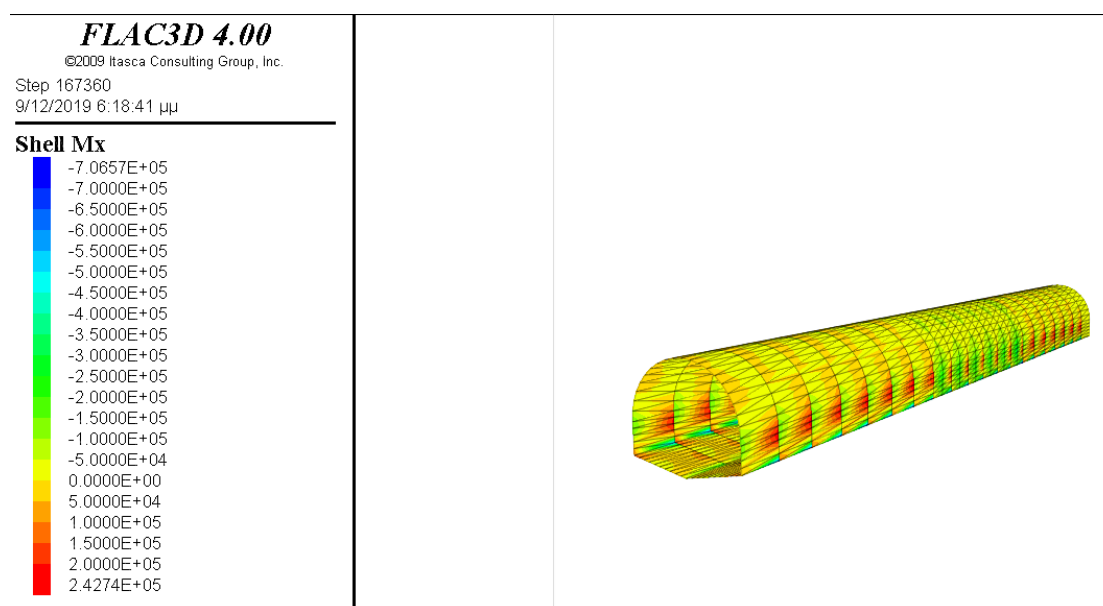
#### 6.4.1 Αποτελέσματα

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάζονται παρακάτω συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας, μέσω της αξιολόγησης των ροπών και των αξονικών δυνάμεων, οι επιδράσεις στα αγκύρια της άνω σήραγγας και τέλος οι μετακινήσεις που προκλήθηκαν σε αυτή λόγω της

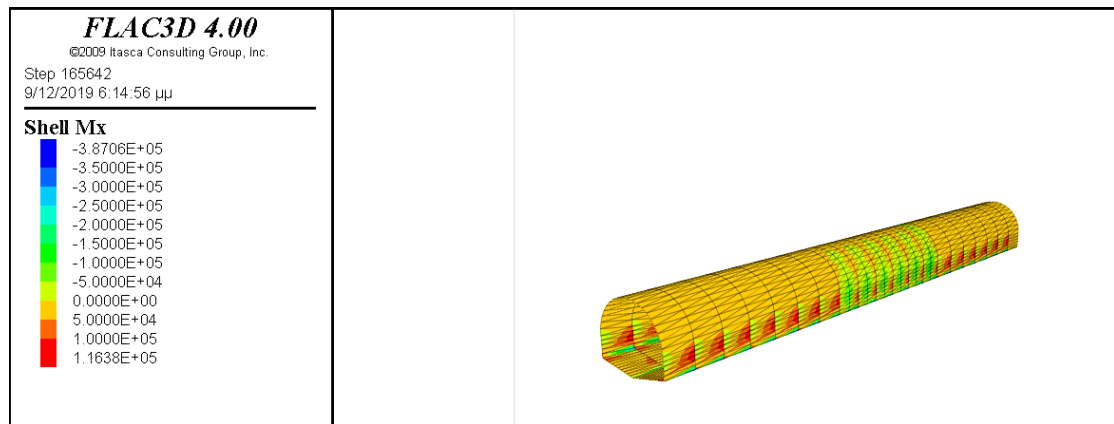
διάνοιξης της νέας, κάθετης σε αυτή υποκείμενης σήραγγας. Εν συνεχεία, γίνεται η σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βασικής περίπτωσης.

#### 6.4.1.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας

Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, έτσι κι εδώ θα παρουσιαστούν αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με την επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τιμές της ροπής και των αξονικών δυνάμεων σε θέσεις της δεξιάς και αριστερής παρειάς, της στέψης και του δαπέδου της προϋπάρχουσας σήραγγας. Η κατανομή των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας για τις περιπτώσεις της βραχομάζας με  $E_1 = 100 \text{ MPa}$  και  $E_2 = 300 \text{ MPa}$  παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

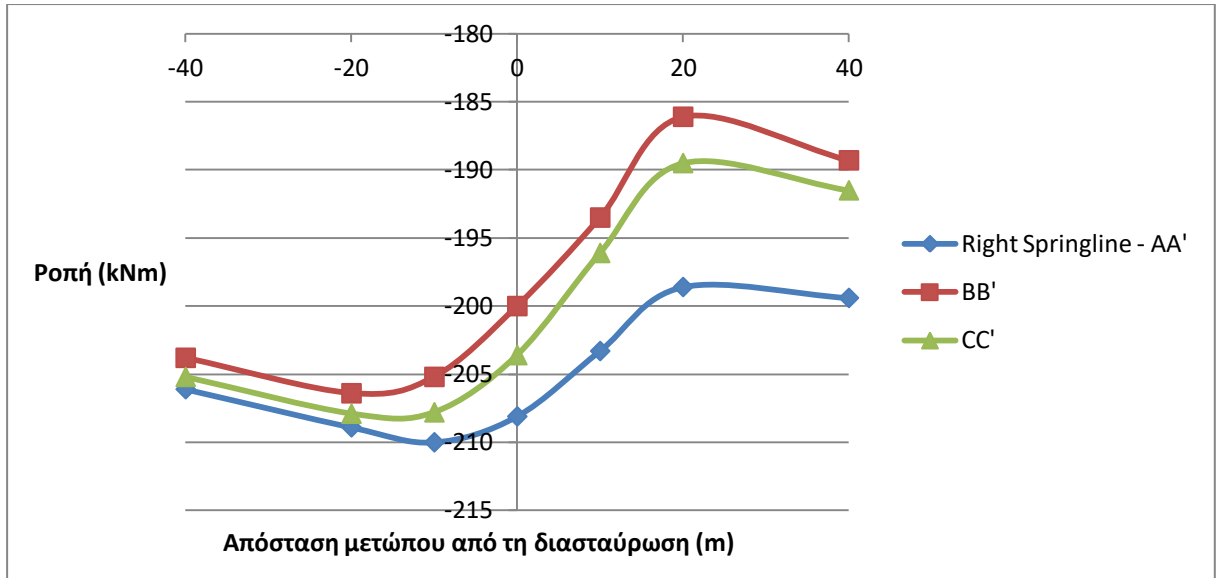


**Σχ. 6.37:** Απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας για την περίπτωση της βραχομάζας με  $E_1=100 \text{ MPa}$

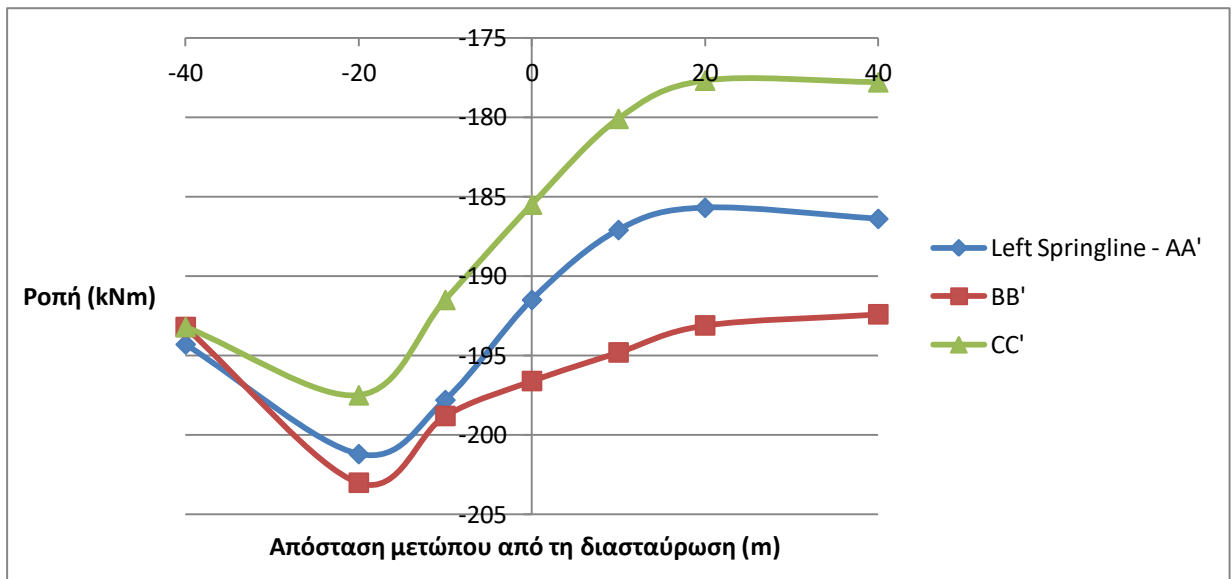


**Σχ. 6.38:** Απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας για την περίπτωση της βραχομάζας με  $E_2=300$  MPa

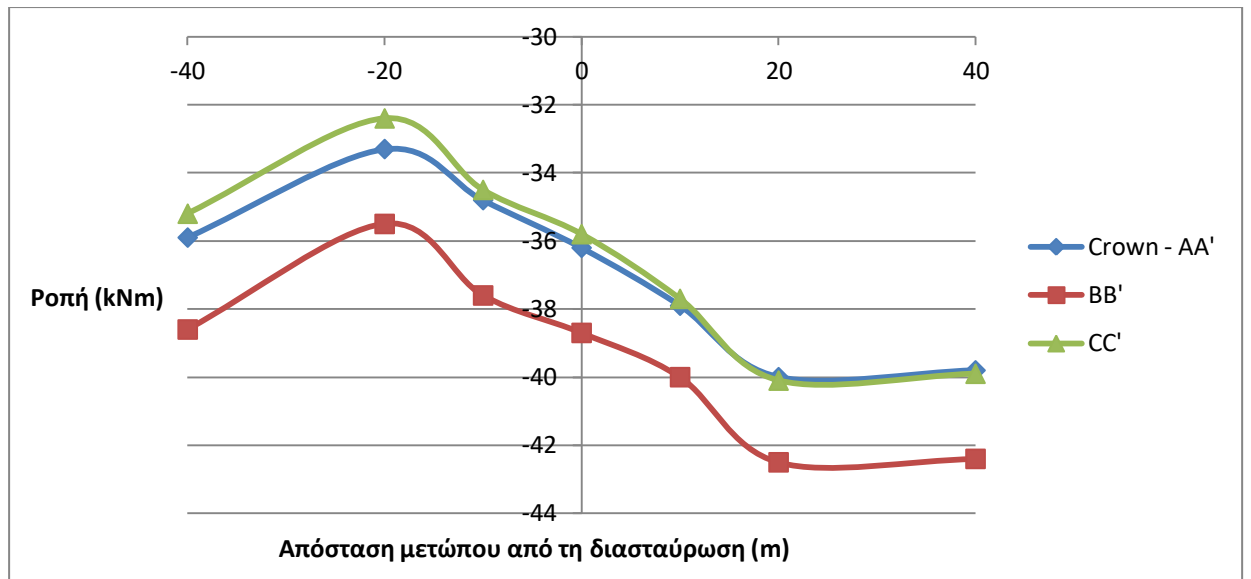
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι μεταβολές των ροπών στις διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και σε 3 τομές της άνω σήραγγας, για διάφορες θέσεις του μετώπου κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, που προέκυψαν για καθεμιά από τις δύο παραπάνω αναλύσεις. Οι 3 τομές που αναφέρθηκαν γίνονται σε θέσεις μίας διαμέτρου πριν το μέσο, του μέσου και μίας διαμέτρου μετά το μέσο της άνω σήραγγας και ονομάζονται αντίστοιχα AA', BB' και CC', ενώ οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας, για τις οποίες θα παρουσιαστούν οι μεταβολές αφορούν τις θέσεις στις οποίες το μέτωπο βρίσκεται δύο και μία διάμετρο πριν το σημείο διασταύρωσης των δύο σηράγγων, στο σημείο διασταύρωσης, και μία και δύο διαμέτρους μετά από αυτό.



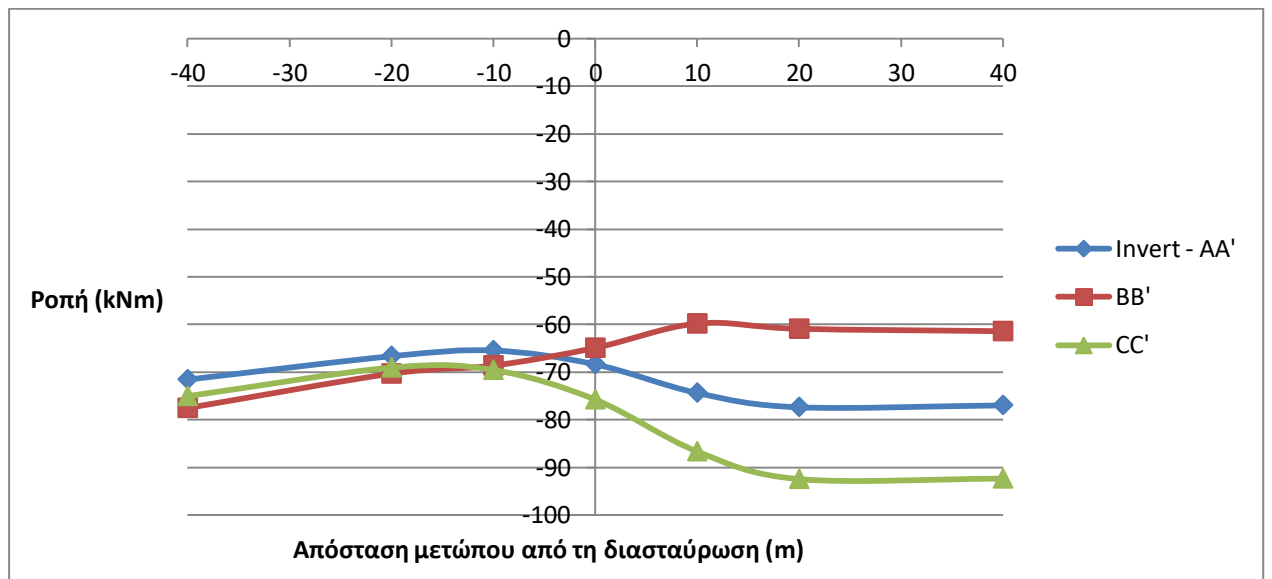
**Σχ. 6.39:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης για  $E_1=100$  MPa.



**Σχ. 6.40:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa



**Σχ. 6.41:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa



**Σχ. 6.42:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa.

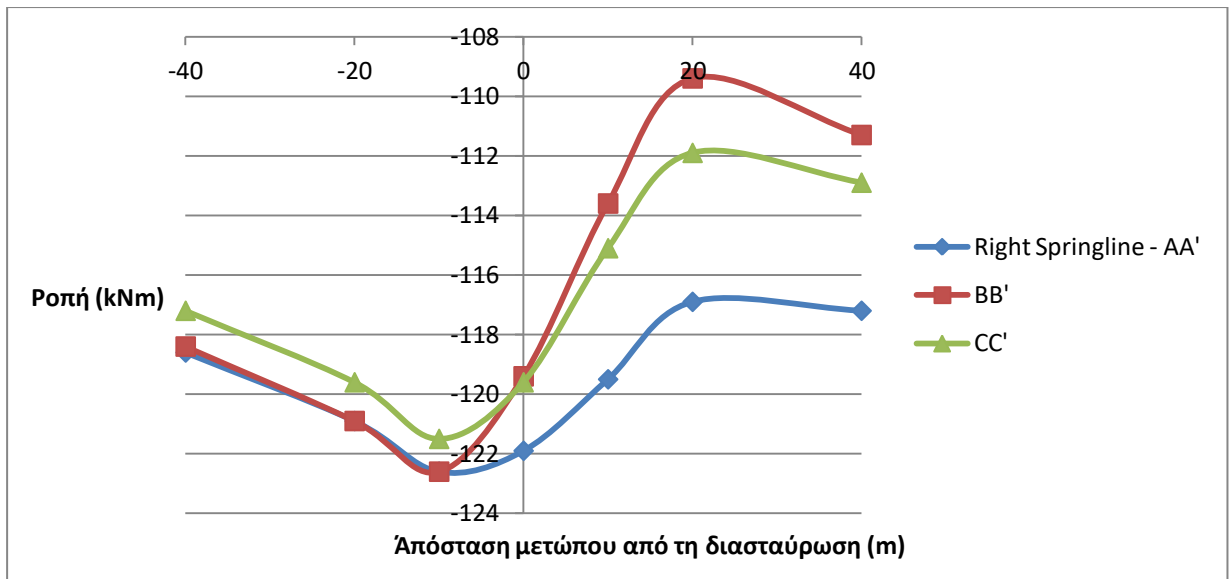
Παρατηρώντας κανείς τα παραπάνω διαγράμματα που αφορούν τη μεταβολή της ροπής στο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας κατά τη διάνοιξη της

υποκείμενης και κάθετης σε αυτή νέας σήραγγας, σε βραχομάζα με μέτρο ελαστικότητας  $E_1=100$  MPa, συμπεραίνει πως η μεταβολή αυτή εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των προηγούμενων αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των παρειών της σήραγγας, όπου απαντώνται και οι μέγιστες ροπές υπάρχει μία αύξηση στην τιμή της ροπής μέχρις ότου το μέτωπο της νέας σήραγγας βρεθεί δύο διαμέτρους πριν από τη διασταύρωση και στη συνέχεια μειώνονται. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της στέψης και του δαπέδου, δηλαδή οι ροπές αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια αυξάνονται. Στην περίπτωση του δαπέδου, μάλιστα είναι εμφανής η μεγαλύτερη επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο μέσο της άνω σήραγγας, δηλαδή στη θέση της διασταύρωσης (τομή BB'). Χαρακτηριστικά φαίνεται πως οι ροπές στις τομές AA' και CC' ξεκινούν να αυξάνονται για θέση του μετώπου της νέας σήραγγας μίας διαμέτρου πριν τη διασταύρωση, ενώ αντίθετα οι ροπές του δαπέδου στο μέσο της άνω σήραγγας συνεχίζονται μέχρι το μέτωπο της νέας να φτάσει μία διάμετρο μετά τη διασταύρωση.

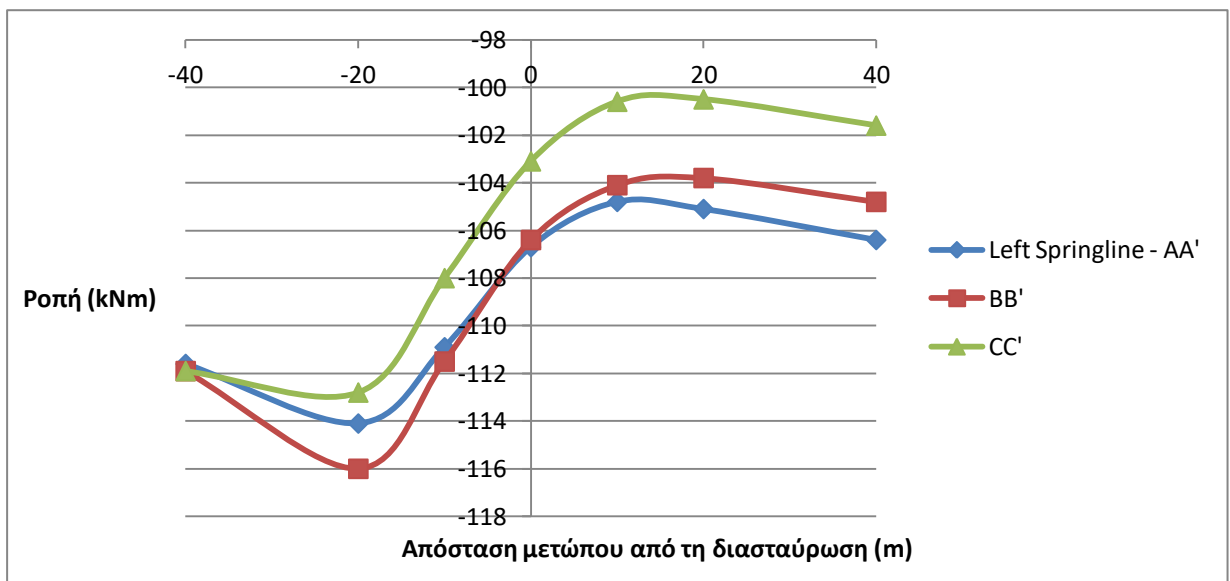
Αξιολογώντας τις τιμές της ροπής στην περίπτωση αυτή που το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας είναι το μισό από ότι στο βασικό σενάριο προσομοίωσης παρατηρείται μια εμφανής αύξηση. Λαμβάνοντας ως μέτρο σύγκρισης τις θέσεις των παρειών όπου συναντώνται οι μέγιστες ροπές, ήδη από πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας η τιμή της ροπής που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι της τάξης των 150 kNm, για μέτρο ελαστικότητας 200 MPa. Αντίθετα, όταν θεωρήθηκε πως η βραχομάζα έχει μέτρο ελαστικότητας 100 MPa, η αντίστοιχη τιμή της ροπής υπολογίστηκε λίγο πάνω από τα 200 kNm. Ανάλογη αύξηση υπολογίστηκε φυσικά, και στις υπόλοιπες θέσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Όσο αφορά στη μέγιστη μεταβολή της ροπής μεταξύ των δύο περιπτώσεων, η οποία δίνει μία ένδειξη για την επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας, αυτή φαίνεται να αυξάνεται (σε απόλυτες τιμές) στην περίπτωση ασθενέστερης βραχομάζας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύονται και από την ανάλυση όπου το μέτρο ελαστικότητας θεωρήθηκε  $E_2 = 300$  MPa. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα που αφορούν τις ροπές της συγκεκριμένης ανάλυσης.

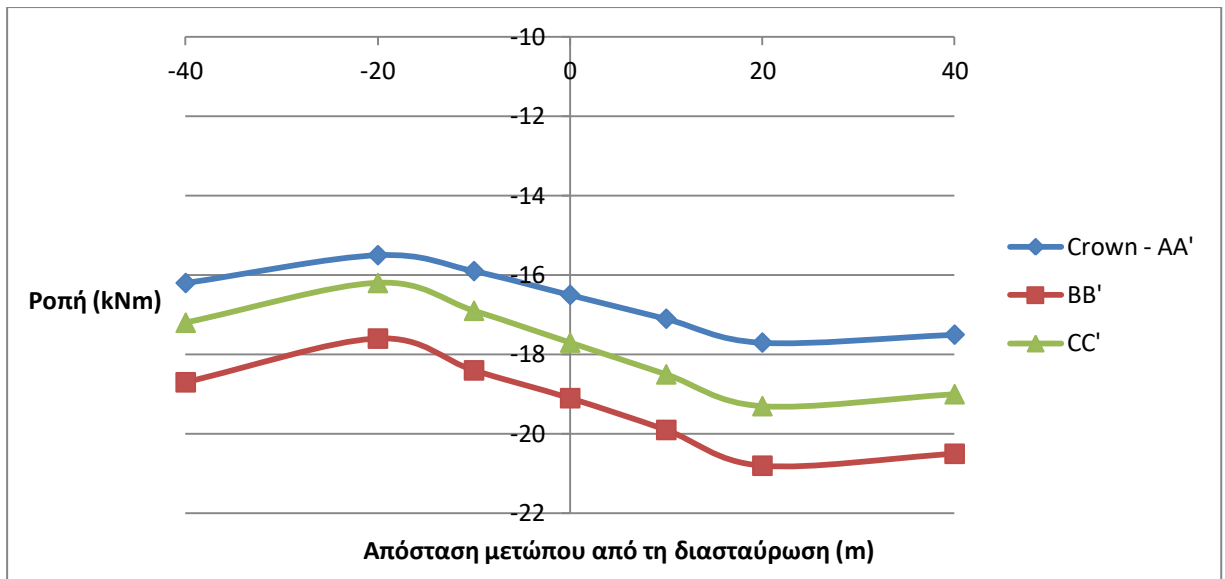




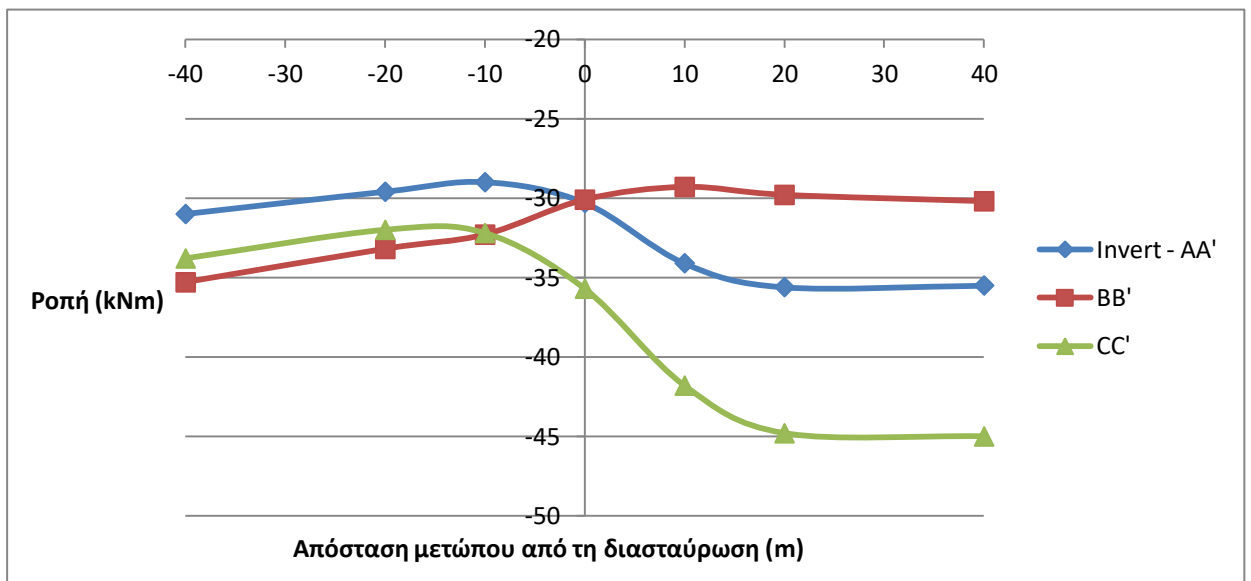
**Σχ. 6.43:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



**Σχ. 6.44:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



**Σχ. 6.45:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



**Σχ. 6.46:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa

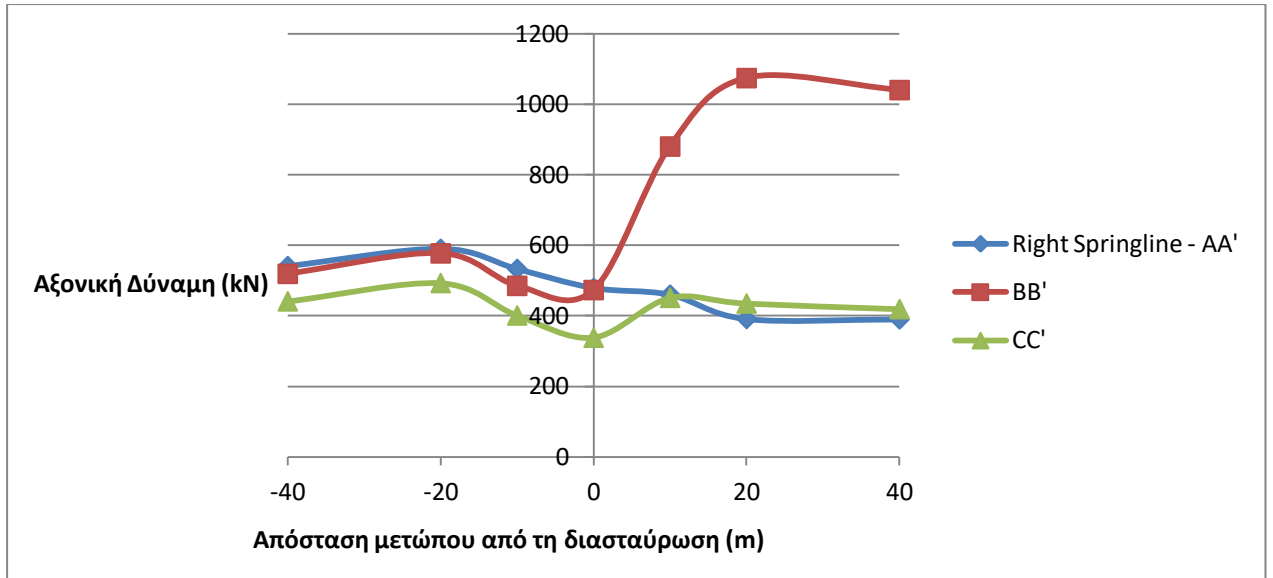
Τα παραπάνω διαγράμματα φανερώνουν πως η συμπεριφορά των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας λόγω της διάνοιξης νέας

υποκείμενης και κάθετης σε αυτής παραμένει ίδιος όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

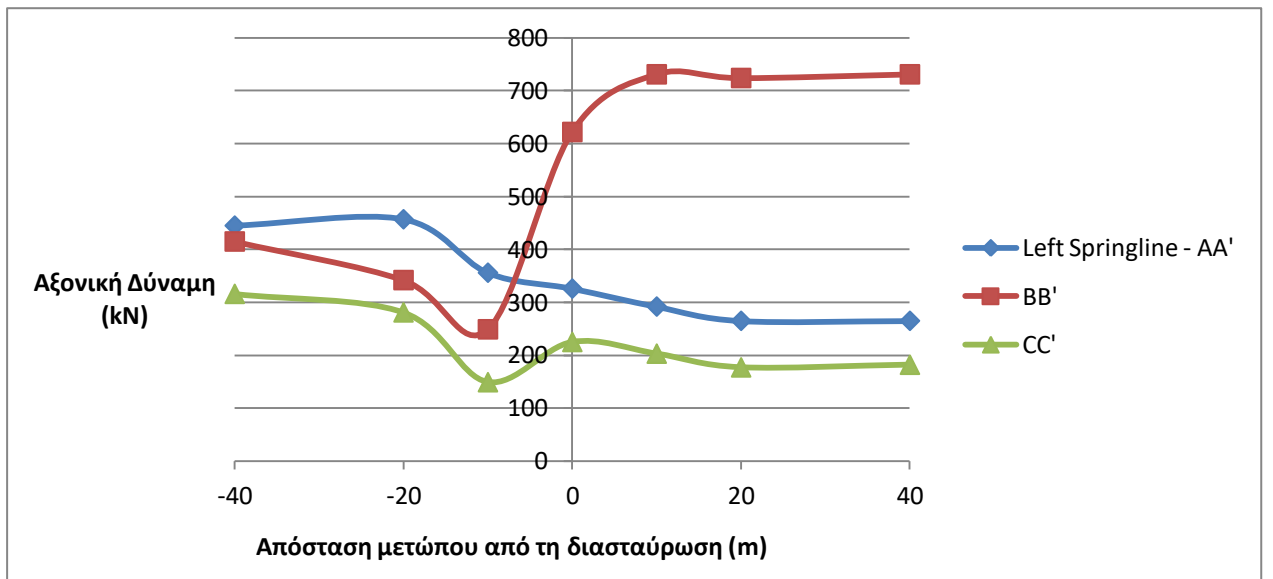
Παρατηρώντας, ωστόσο, τις τιμές των ροπών είναι εμφανές πως είναι μικρότερες από ότι στις άλλες δύο περιπτώσεις όπου το μέτρο ελαστικότητας ήταν μικρότερο. Σαφώς και αυτό δεν έχει να κάνει με τη διάνοιξη της νέας σήραγγας, αλλά με το γεγονός ότι η βραχομάζα εμφανίζει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς η μειωμένη τιμή της ροπής παρατηρείται ήδη πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, παίρνοντας και πάλι ως μέτρο σύγκρισης τη θέση που εμφανίζονται οι μέγιστες ροπές, δηλαδή στις παρειές της σήραγγας, η μέγιστη τιμή της ροπής είναι τα 120 kNm, όταν για μέτρο ελαστικότητας  $E=200$  MPa είναι 150 kNm και για  $E_1=100$  MPa είναι 200 kNm.

Σε αυτή την περίπτωση, έχοντας μία πιο ισχυρή βραχομάζα η μέγιστη μεταβολή κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας είναι μικρότερη. Έτσι, παρά το γεγονός ότι οι διαφορές αυτές στις μεταβολές είναι μικρές, φαίνεται πως υπάρχει μία συσχέτιση της ποιότητας της βραχομάζας με το βαθμό επίδρασης διάνοιξης νέας σήραγγας κάθετα, κάτω από προϋπάρχουσα στο σκυρόδεμα της τελευταίας.

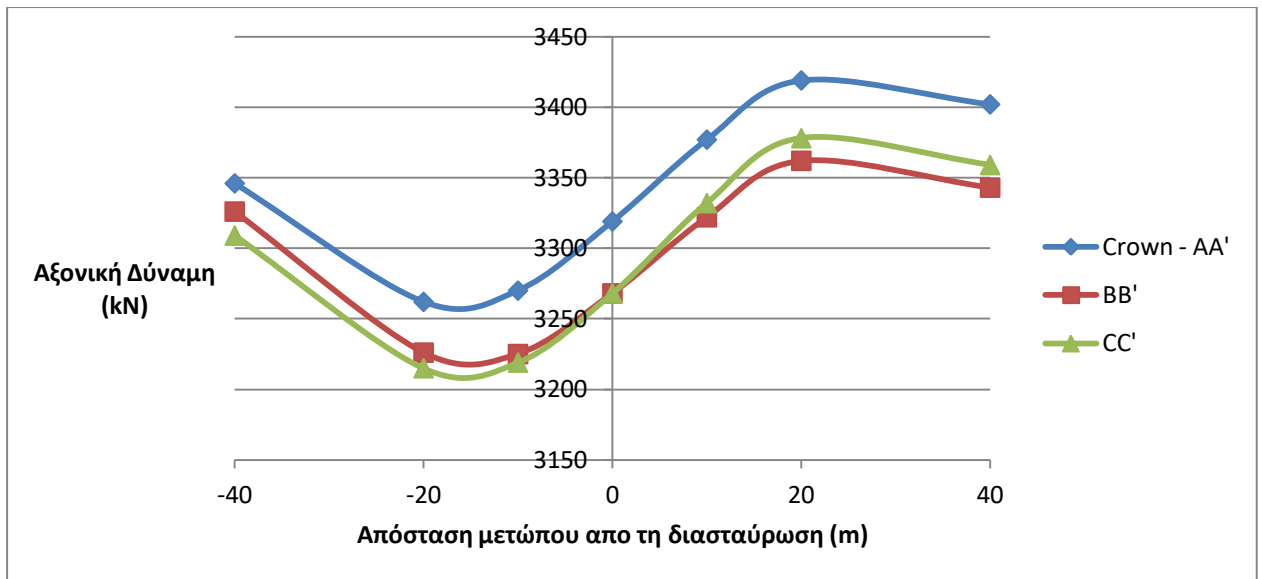
Παρακάτω, ακολουθεί η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας για διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας. Στη συνέχεια, γίνεται η παρουσίαση, μέσω διαγραμμάτων, των αποτελεσμάτων των αξονικών δυνάμεων, που προέκυψαν από τις αναλύσεις με μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας.



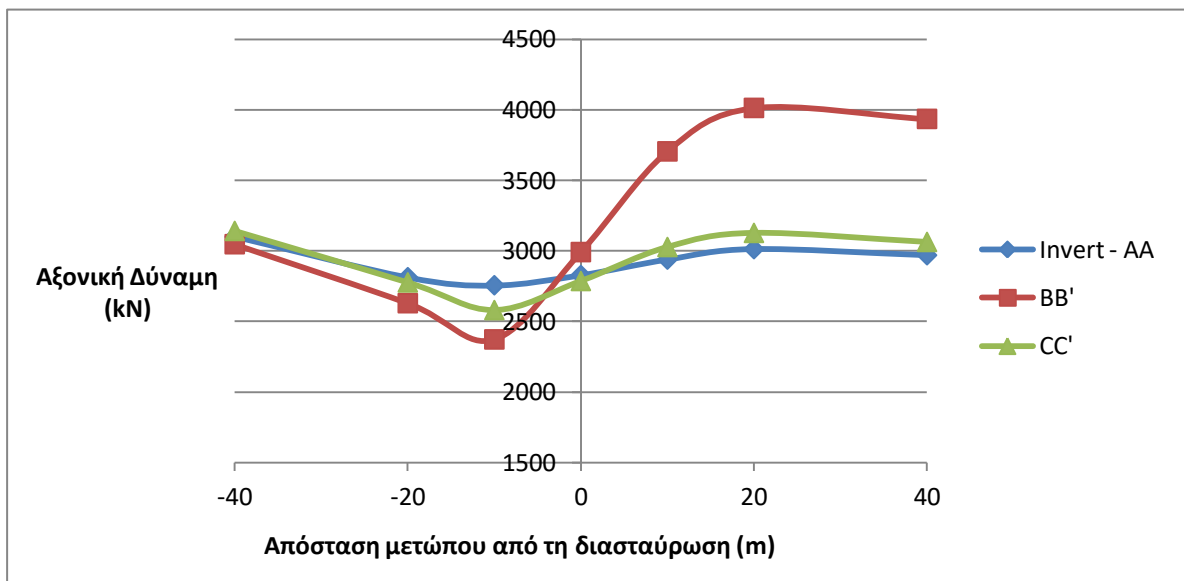
**Σχ. 6.47:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa



**Σχ. 6.48:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa



**Σχ. 6.49:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa



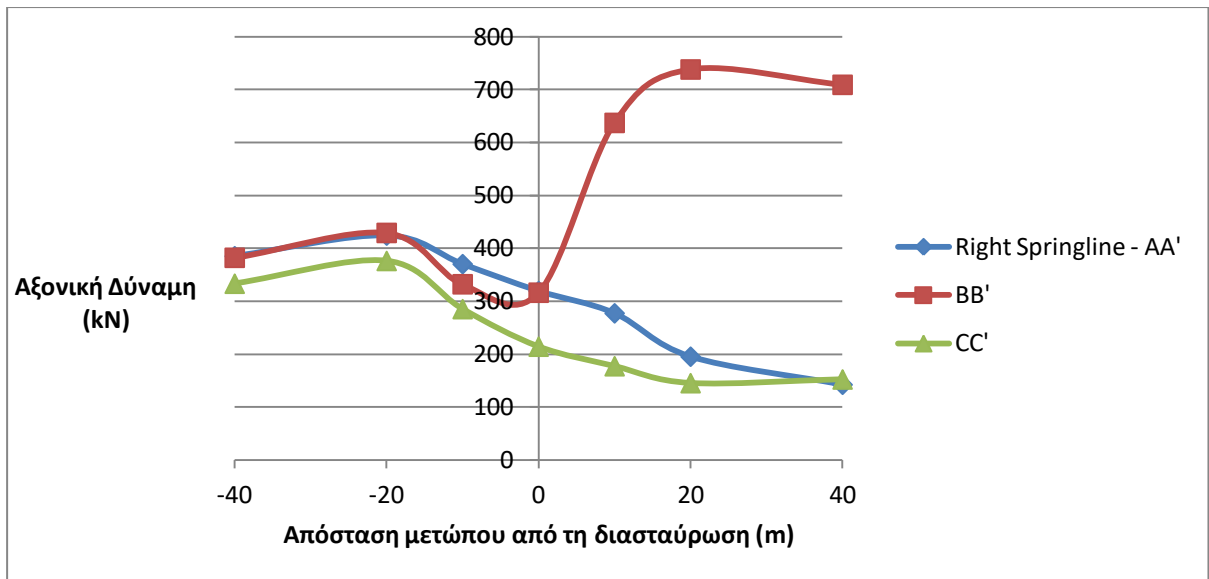
**Σχ. 6.50:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_1=100$  MPa

Τα παραπάνω διαγράμματα, όπως αναφέρεται και στις λεζάντες τους, αφορούν την περίπτωση του μοντέλου στο οποίο το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας έχει οριστεί στα 100 MPa. Τα διαγράμματα ξεκινούν από μία τιμή αξονικής δύναμης που αντιστοιχεί στην τιμή στην οποία έχει ισορροπήσει το

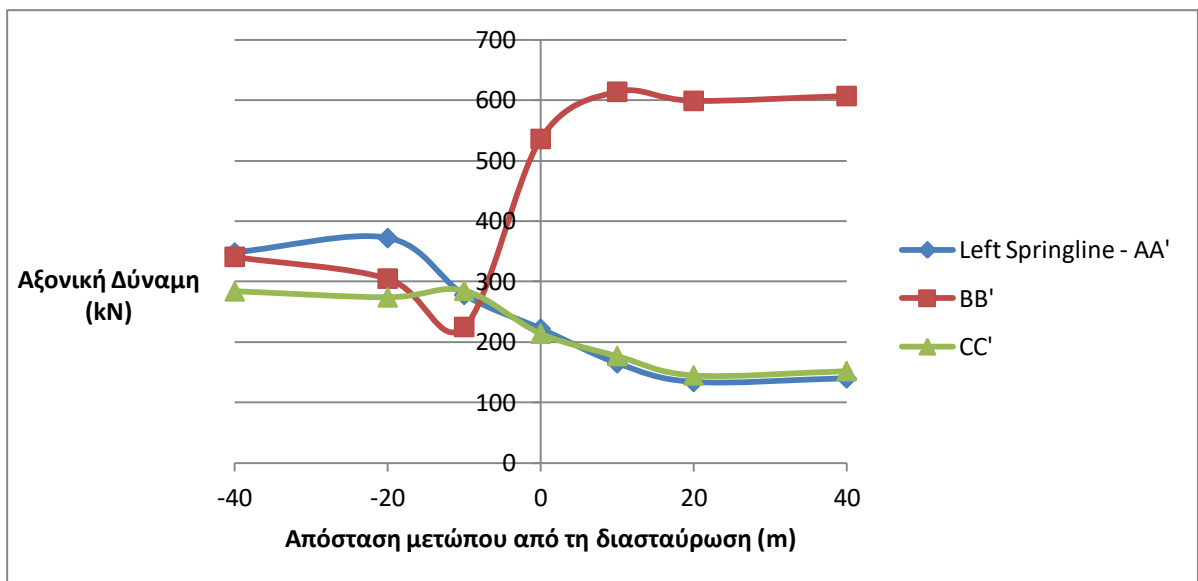
μοντέλο με το πέρας της διάνοιξης της προϋπάρχουσας σήραγγας. Όσο η διάνοιξη της νέας σήραγγας βρίσκεται στην αρχή της, παρατηρείται μια μικρή μείωση στις αξονικές δυνάμεις. Όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρεθεί σε απόσταση μίας διαμέτρου πριν από τη θέση της διασταύρωσης, οι αξονικές δυνάμεις που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άνω σήραγγας, αυξάνονται. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται έως ότου το μέτωπο της νέας σήραγγας φτάσει σε απόσταση δύο διαμέτρων από την περιοχή της διασταύρωσης, οπότε και αρχίζουν να ισορροπούν οι αξονικές δυνάμεις. Παρατηρείται για μία ακόμη φορά, όπως θα ήταν αναμενόμενο, πως το μέσο της άνω σήραγγας, πάνω ακριβώς από εκεί που διέρχεται η νέα σήραγγα, επηρεάζεται περισσότερο, καθώς είναι εμφανής η διαφορά στο εύρος μεταβολής στις καμπύλες BB' από ότι στις άλλες δύο, για όλες τις θέσεις.

Όσο αφορά στις μέγιστες τιμές της αξονικής δύναμης που δέχεται το σκυρόδεμα, δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές με την περίπτωση όπου το μέτρο ελαστικότητας είχε οριστεί  $E=200$  MPa, παρά το γεγονός ότι σε αυτή την ανάλυση έχει δοθεί η μισή τιμή. Το ίδιο ισχύει και για τις μεταβολές των αξονικών δυνάμεων κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των δύο παραπάνω περιπτώσεων, φαίνεται πως υπάρχει μια αύξηση στο εύρος της μεταβολής των αξονικών δυνάμεων, και συνεπώς μεγαλύτερη επίδραση της νέας σήραγγας στο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας, όμως είναι μικρή και δεν επηρεάζει σημαντικά τα μέτρα υποστήριξης.

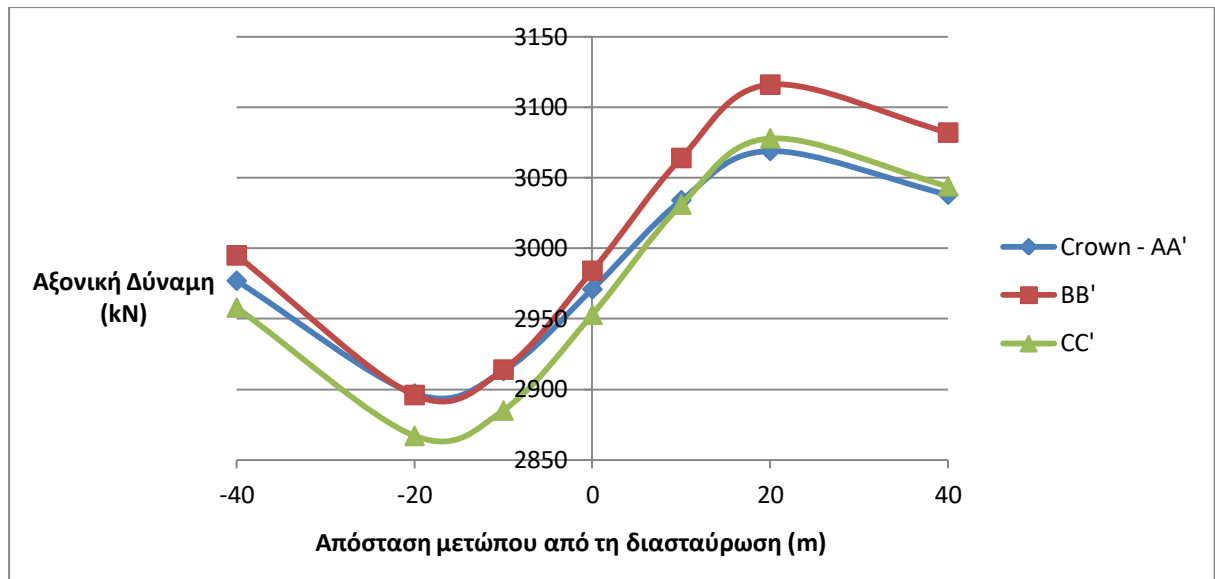
Για την επιβεβαίωση των παραπάνω διαπιστώσεων ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων, που αφορούν στην περίπτωση της ανάλυσης, όπου το μέτρο ελαστικότητας ορίστηκε σε  $E_2=300$  MPa.



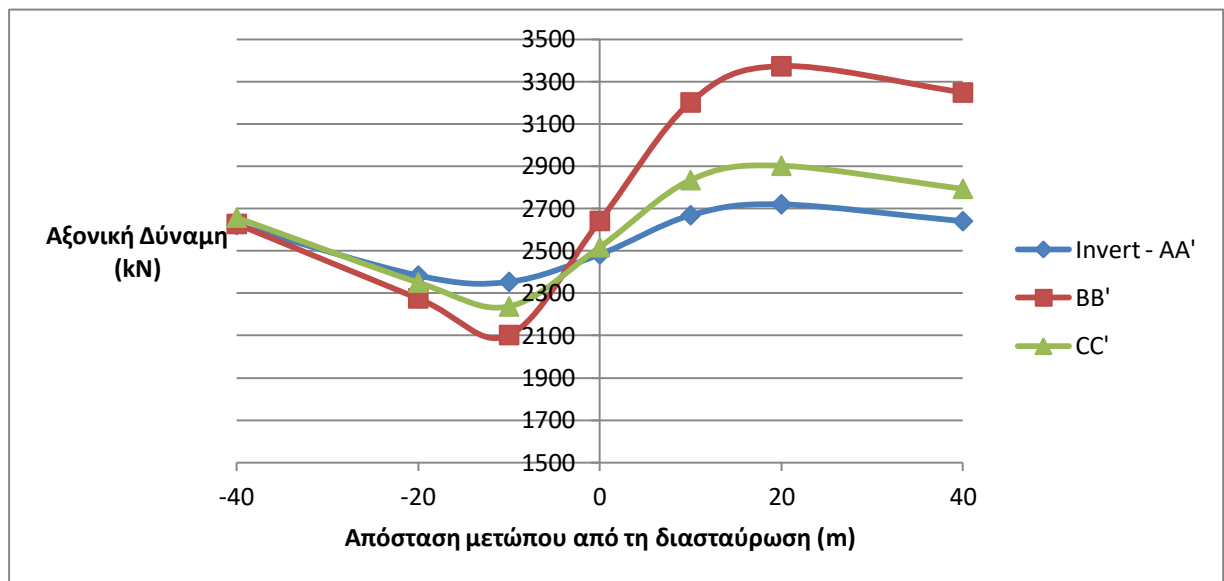
**Σχ. 6.51:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



**Σχήμα 6.52:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



**Σχήμα 6.53:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη στέψη της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa



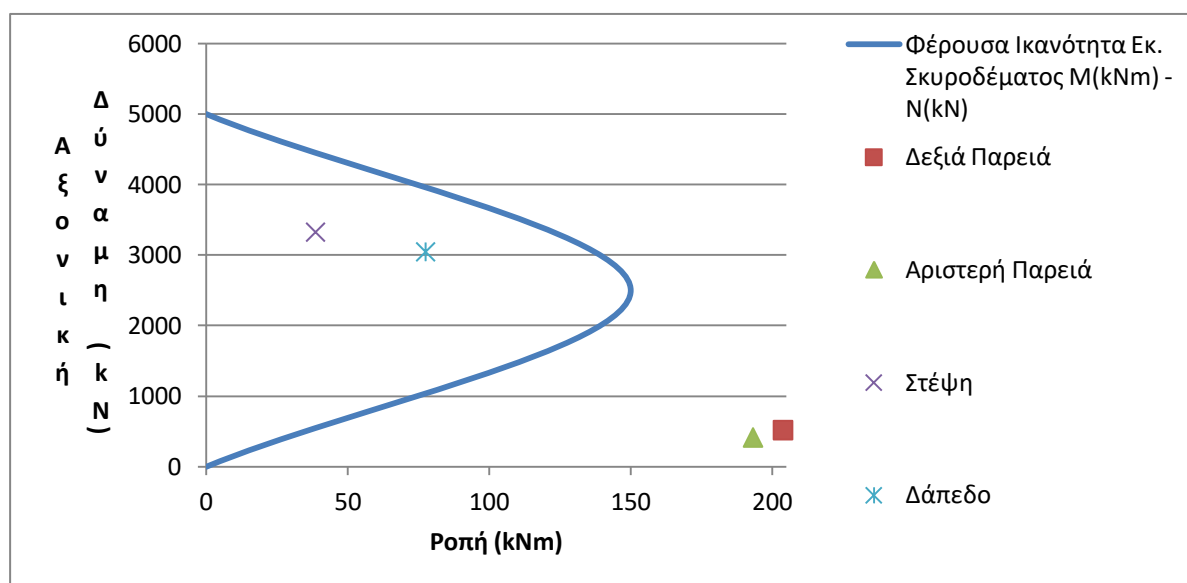
**Σχ. 6.54:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης, για  $E_2=300$  MPa

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό πως η συμπεριφορά του σκυροδέματος ως προς τις αξονικές δυνάμεις δεν αλλάζει ούτε σε αυτή την περίπτωση. Οι μεγαλύτερες τιμές τους εμφανίζονται στη στέψη και στο δάπεδο της σήραγγας, ενώ στις παρειές είναι και πάλι χαμηλές.

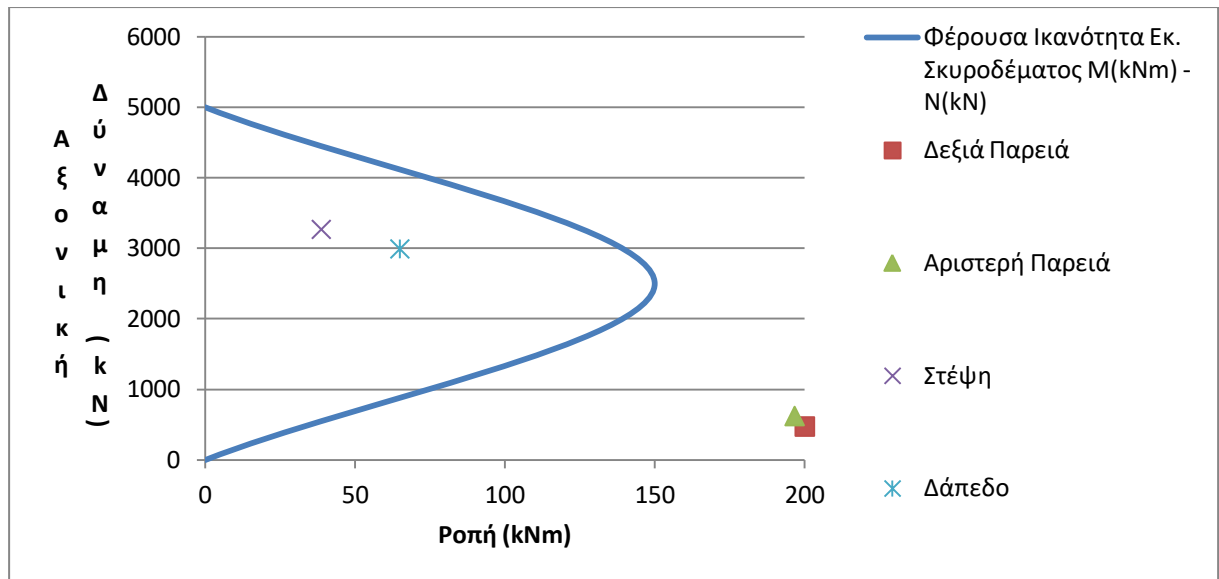


Όσο αφορά στις μέγιστες τιμές των αξονικών δυνάμεων που ασκούνται, φαίνεται πως είναι ελαφρώς χαμηλότερες από ότι στις άλλες δύο, όπου είχαμε μέτρο ελαστικότητας  $E_1=100$  MPa και  $E=200$  MPa. Η μεταβολή που προκύπτει λόγω της διάνοιξης της νέας υποκείμενης σήραγγας παραμένει στα ίδια επίπεδα και συνεπώς φαίνεται ο βαθμός επιρροής του σκυροδέματος προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξης νέας υποκείμενης και κάθετης σε αυτή σήραγγα, να μη σχετίζεται με την ποιότητα της βραχομάζας.

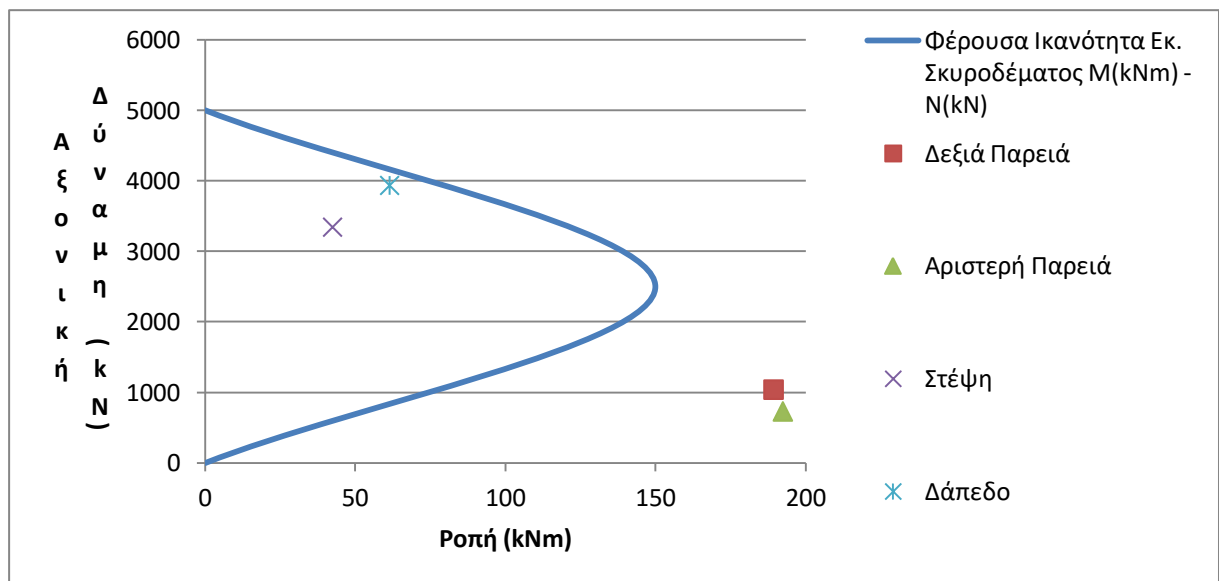
Καθώς τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως υλικά με ελαστική συμπεριφορά παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα για τη φέρουσα ικανότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους αξονικών δυνάμεων – ροπών, για τις δύο τελευταίες αναλύσεις (μέτρα ελαστικότητας  $E_1=100$  MPa και  $E_2=300$  MPa).



**Σχ. 6.55:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας ( $E_1=100$  MPa)



**Σχ. 6.56:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης ( $E_1=100$  MPa)

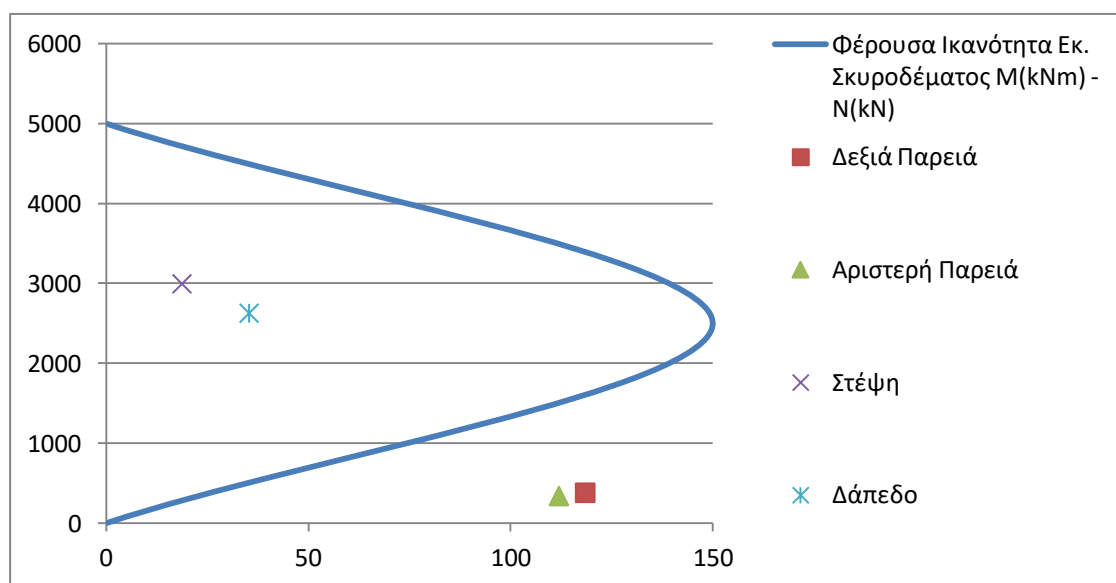


**Σχ. 6.57:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας ( $E_1=100$  MPa)

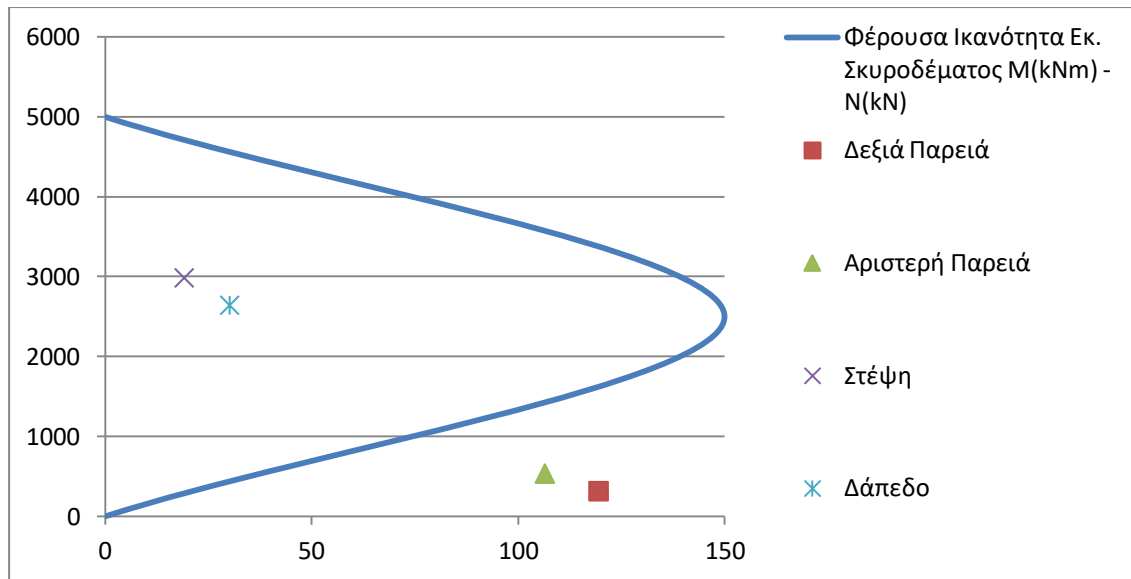
Στην παρούσα περίπτωση, όπου το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας είναι μικρότερο, ήταν αναμενόμενο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να διαρρέει. Οι ροπές ήταν μεγαλύτερες και κατά συνέπεια, εμφανίζεται και πάλι ο εφελκυστικός τρόπος αστοχίας στις παρειές, αυτή τη φορά όχι μόνο λόγω

χαμηλών αξονικών δυνάμεων στις θέσεις αυτές, αλλά και λόγω υψηλών ροπών. Ωστόσο, μέσα από τα τρία παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται πιο καθαρά από τις προηγούμενες περιπτώσεις, λόγω των μεγαλύτερων τιμών, πως η διάνοιξη της νέας σήραγγας συμβάλει θετικά στην κατάσταση του σκυροδέματος. Ουσιαστικά η μικρή μείωση της ροπής και η αύξηση των αξονικών δυνάμεων που προκαλείται λόγω της εκσκαφής της νέας σήραγγας, τείνει να φέρει τα σημεία που αντιστοιχούν στις παρειές της σήραγγας, εντός της καμπύλης της φέρουσας ικανότητας του σκυροδέματος. Ωστόσο, η ανάλογη αύξηση των αξονικών δυνάμεων που επέρχεται στο δάπεδο, τείνει να το οδηγήσει σε θλιπτική, αυτή τη φορά, αστοχία, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.60.

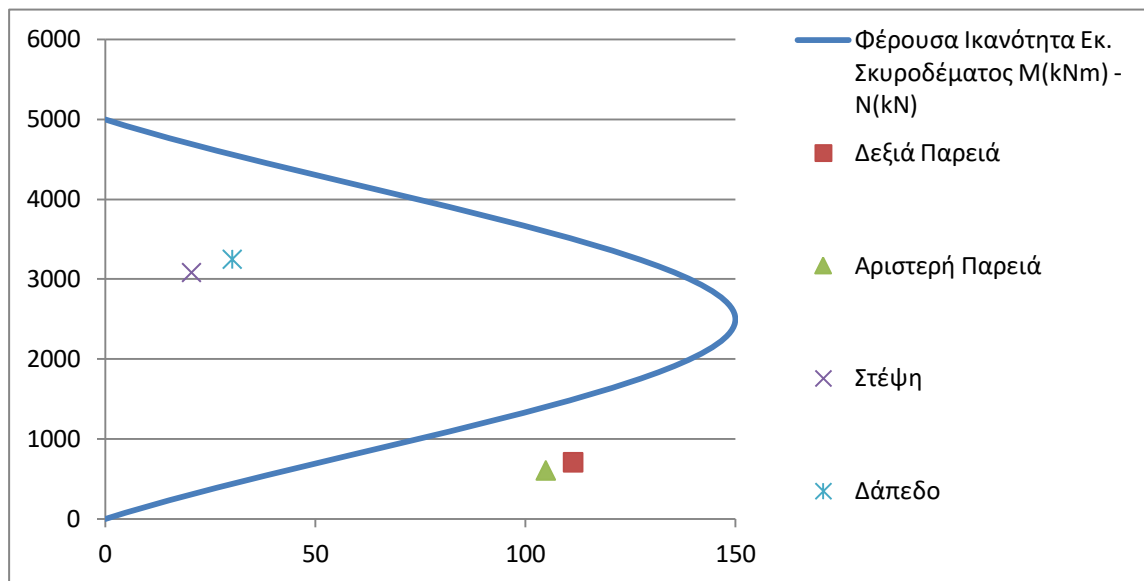
Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για μέτρο ελαστικότητας  $E_2=300$  MPa.



**Σχ. 6.58:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας ( $E_2=300$  MPa)



**Σχ. 6.59:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης ( $E_2=300$  MPa)



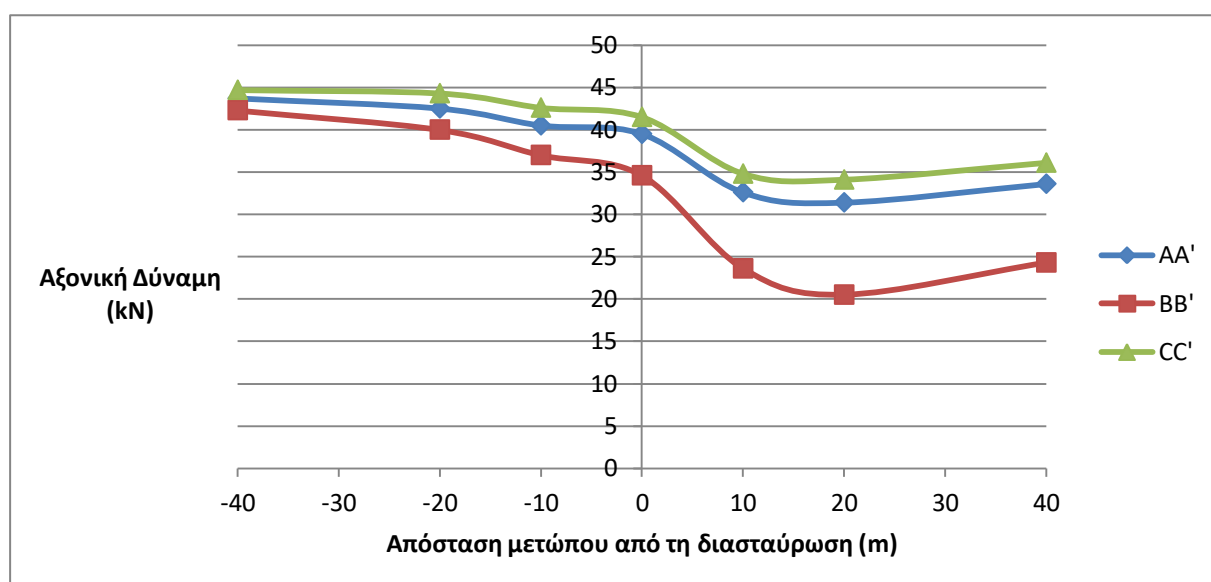
**Σχ. 6.60:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας ( $E_2=300$  MPa)

Σε αυτή την περίπτωση, όπου η ποιότητα της βραχομάζας είναι καλύτερη, οι ροπές που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι μικρότερες. Ωστόσο, οι χαμηλές αξονικές δυνάμεις στις παρειές της σήραγγας οδηγούν και πάλι σε εφελκυστική αστοχία το σκυρόδεμα στην περιοχή των παρειών. Για ακόμη μία φορά, η αύξηση των αξονικών δυνάμεων λόγω της διάνοιξης της νέας

σήραγγας τείνει να φέρει τα σημεία των παρειών στο εσωτερικό της μπλε καμπύλης, συνεπώς συμβάλει θετικά στη λειτουργικότητα του σκυροδέματος στις παρειές. Η αύξηση των αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο και στη στέψη της σήραγγας δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα του σκυροδέματος σε εκείνες τις θέσεις.

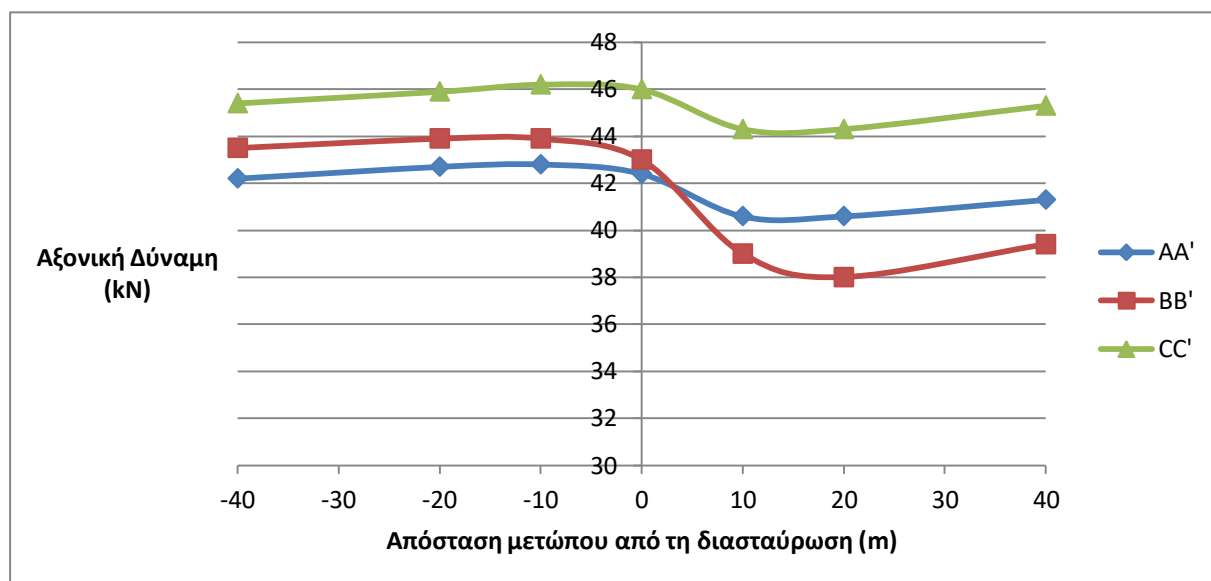
#### 6.4.1.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας

Αφού μελετήθηκε η επίδραση της διάνοιξης νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας, σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση στα αγκύρια. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις ασκούνται στα αγκύρια που έχουν τοποθετηθεί στους ώμους της εκσκαφής. Έτσι, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων αυτών κατά τη διάνοιξη της κάθετης στην προϋπάρχουσα, υποκείμενης σήραγγας.



**Σχ. 6.61:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης ( $E_1=100$  MPa)

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό πως τα αγκύρια που βρίσκονται στο μέσο της άνω σήραγγας είναι αυτά που δέχονται τη μεγαλύτερη επίδραση από της διάνοιξη της νέας, υποκείμενης σε αυτή. Πέρα όμως από αυτή τη διαπίστωση που γίνεται σε όλες τις έως τώρα παραμετρικές αναλύσεις, είναι σημαντικό να σημειωθεί και ο βαθμός της επίδρασης αυτής. Στην περίπτωση, όπου το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας καθορίστηκε στα 200 MPa, η μέγιστη μεταβολή που μετρήθηκε στην τομή BB' ήταν τα 10 kN, καθώς η αξονική δύναμη μεταβάλλονταν από 32 έως 42 kN. Στην προκειμένη περίπτωση, που το μέτρο ελαστικότητας ορίστηκε 100 MPa, υπερδιπλασιάζεται και φτάνει έως και το 50% της αξονικής δύναμης που δέχονταν τα αγκύρια πριν την έναρξη της εκσκαφής της νέας σήραγγας. Μπορεί στην παρούσα περίπτωση η μεταβολή αυτή να μην επηρεάζει τη λειτουργικότητα των αγκυρίων, αλλά η μεγάλη τιμή που εμφανίζει πρέπει να επιστήσει την προσοχή σε αντίστοιχες περιπτώσεις.



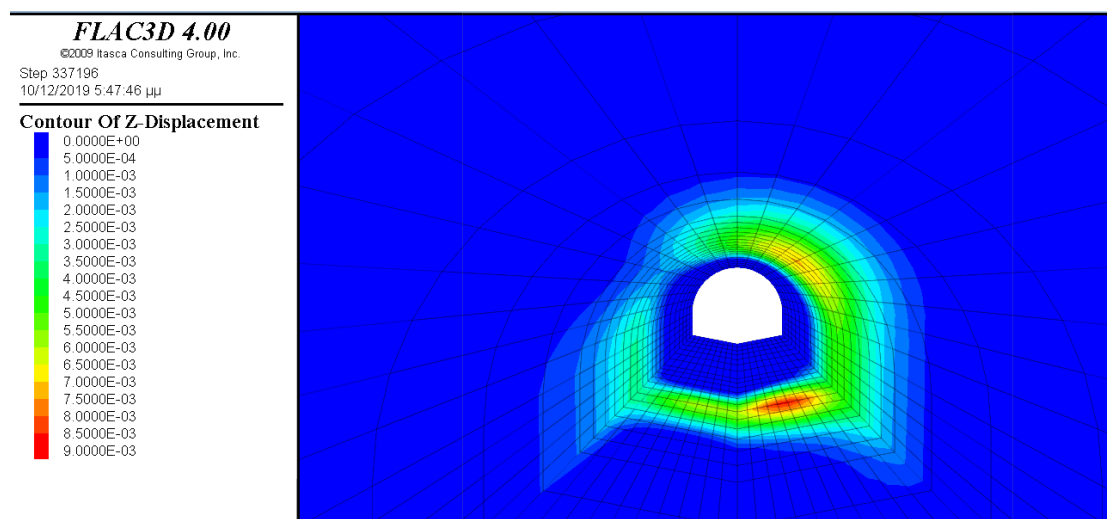
**Σχήμα 6.62:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης ( $E_2=300$  MPa)

Στο σχήμα 6.62 που αφορά την περίπτωση της βραχομάζας με μέτρο ελαστικότητας 300 MPa διακρίνεται καθαρά η διαφοροποίηση στη μεταβολή των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων σε σχέση με τις περιπτώσεις που το

μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερο. Και σε αυτή την περίπτωση, η καμπύλη BB' είναι αυτή που παρουσιάζει το μέγιστο εύρος τιμών, ωστόσο αυτό το εύρος είναι πολύ μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση η διάνοιξη της νέας σήραγγας μεταβάλλει τις αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια έως και 6 kN σε αντίθεση με την περίπτωση όπου το μέτρο ελαστικότητας ήταν 100 MPa και η αντίστοιχη τιμή έφτανε τα 22 kN. Συνεπώς, το μέτρο ελαστικότητας της γεωμάζας φαίνεται να έχει ένα σημαντικό ρόλο στην επίδραση που έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας κάθετα και κάτω από μία προϋπάρχουσα στα αγκύρια της τελευταίας.

### 6.4.1.3 Μετακινήσεις

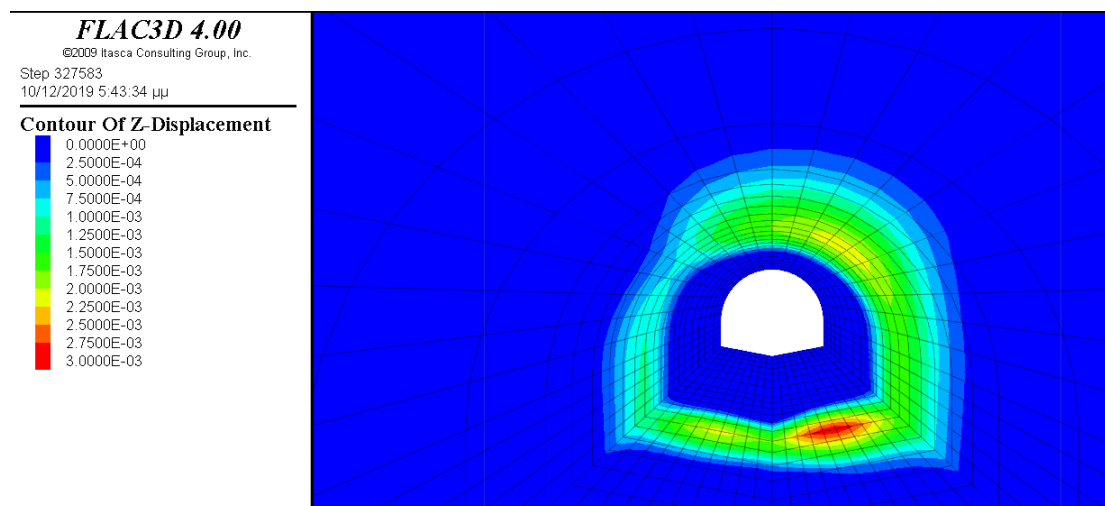
Εξετάζοντας τις μετακινήσεις στην περιφέρεια της άνω σήραγγας διακρίνεται πως για μικρότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.63, για τιμή  $E_1=100$  MPa εμφανίζονται μετακινήσεις από μία ακτίνα πριν έως μία ακτίνα μετά από το μέσο της άνω σήραγγας. Οι τιμές της ανύψωσης που παρατηρούνται σε ενδεικτικές θέσεις της περιφέρειας της σήραγγας είναι 8 χιλιοστά στο δάπεδο, 5 χιλιοστά στις παρειές και 7 χιλιοστά στη στέψη.



**Σχ. 6.63:** Απεικόνιση των μετακινήσεων στο μέσο της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξης της νέας για μέτρο ελαστικότητας γεωμάζας  $E_1=100$  MPa

Στην περίπτωση που έχουμε καλύτερης ποιότητας βραχομάζα, με  $E_2=300$  MPa, οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι μικρότερες όπως αναμένεται. Στο

σχήμα 6.64 φαίνεται και πάλι πως όσο αφορά στις μετακινήσεις, η επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας περιορίζεται σε απόσταση μίας ακτίνας πριν και μετά το μέσο της άνω σήραγγας. Συγκεκριμένα σημειώνονται ανυψώσεις της τάξης των 3 χιλιοστών στο δάπεδο, των 2 χιλιοστών στη στέψη και ενός χιλιοστού στις παρειές της σήραγγας.



**Σχ. 6.64:** Απεικόνιση των μετακινήσεων στο μέσο της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της διάνοιξης της νέας για μέτρο ελαστικότητας γεωμάζας  $E_2=300$  MPa

## 6.5 Αλλαγή της σειράς διάνοιξης των σηράγγων

Η επόμενη παράμετρος που επιλέχθηκε να μεταβληθεί είναι η σειρά με την οποία διανοίχθηκαν οι δύο σήραγγες. Ουσιαστικά, η πιο βαθιά σήραγγα που σε όλες τις έως τώρα προσομοιώσεις έπαιξε το ρόλο της νέας, αυτή τη φορά θα προσομοιώνει την προϋπάρχουσα και η άνω σήραγγα τη νέα, επομένως και θα διανοιχθεί δεύτερη.

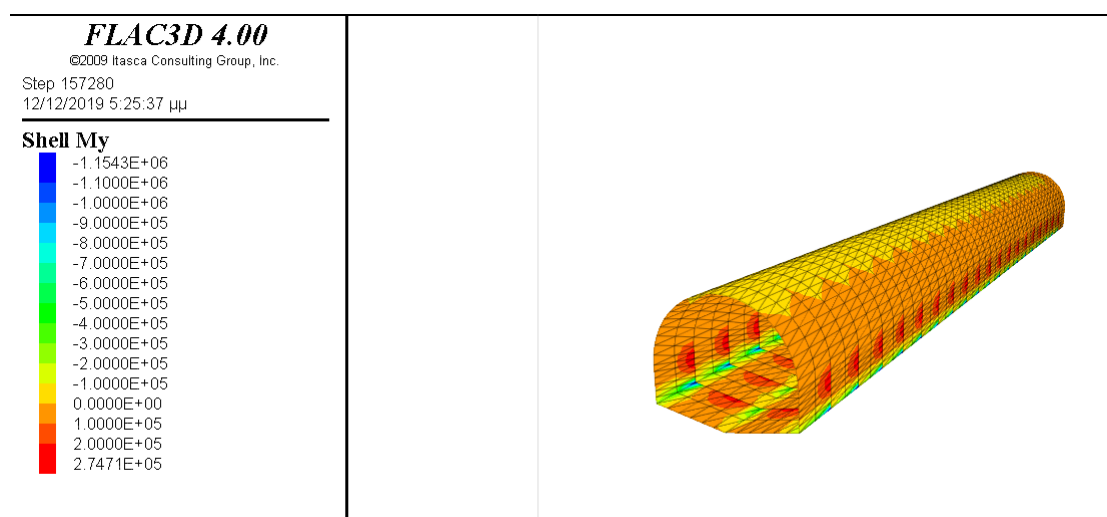
Όσο αφορά στη διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου, δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές με τη βασική περίπτωση του κεφαλαίου 5. Ο κάνναβος ήταν ακριβώς ο ίδιος, όμως άλλαξε η σειρά που «κλήθηκαν» τα αρχεία κειμένου που αφορούν την εκσκαφή και υποστήριξη των σηράγγων. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν και πάλι την προϋπάρχουσα σήραγγα, η σήραγγα αυτή τώρα είναι η βαθύτερη. Και καθώς η διεύθυνσή της είναι κάθετη σε αυτή που ως τώρα παρουσιάζονταν ως προϋπάρχουσα, στα αποτελέσματα εμφανίζονται διαφορετικής τάξης τιμές. Παρ' όλο αυτά, αυτό που εξετάζεται στην παρούσα



εργασία είναι η επίδραση της νέας σήραγγας, συνεπώς αυτό που αξιολογείται είναι η μεταβολή των μεγεθών και σύγκριση στις αρχικές τιμές μεταξύ των αναλύσεων, δεν ωφελεί σε κάποιο σκοπό.

### 6.5.1 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας

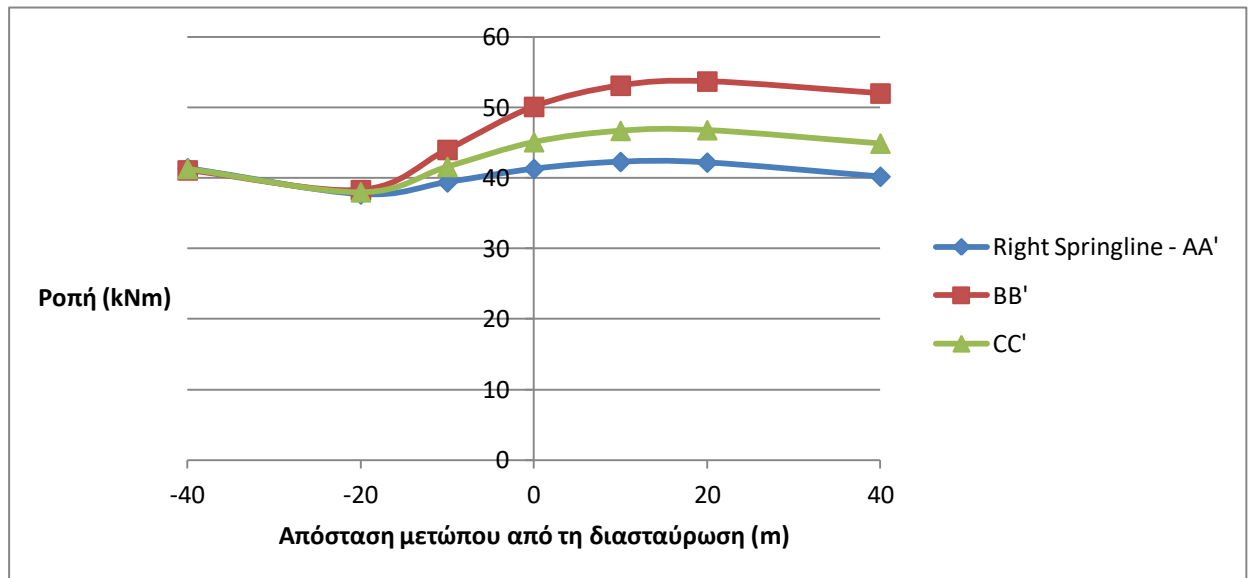
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα μεγέθη που αφορούν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας (βαθύτερης) σήραγγας. Συγκεκριμένα, δίνονται οι τιμές των ροπών και των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά και αριστερή παρειά, στη στέψη και στο δάπεδο της. Στο σχήμα 6.65 παρουσιάζεται η απεικόνιση των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της κάτω σήραγγας πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας.



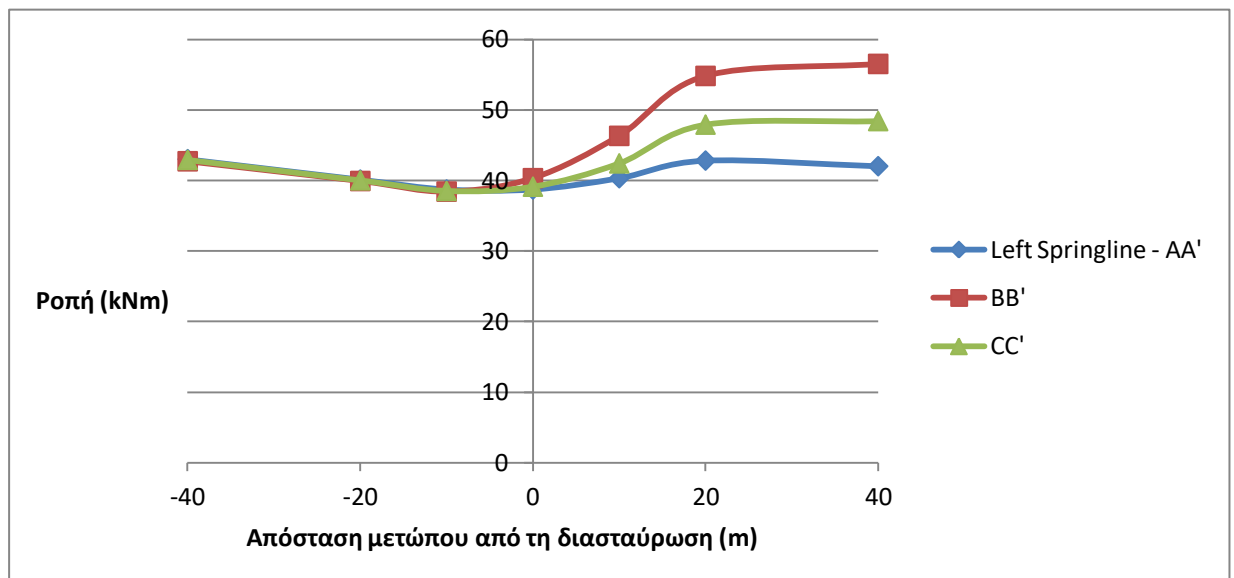
**Σχ. 6.65:** Απεικόνιση των ροπών στην προϋπάρχουσα (κάτω) σήραγγα πριν τη διάνοιξη της νέας (άνω)

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι μεταβολές των ροπών στις διάφορες θέσεις του σκυροδέματος και σε 3 τομές της κάτω σήραγγας, για διάφορες θέσεις του μετώπου κατά τη διάνοιξη της νέας σήραγγας. Οι 3 τομές που αναφέρθηκαν γίνονται σε θέσεις μίας διαμέτρου πριν το μέσο, του μέσου και μίας διαμέτρου μετά το μέσο της κάτω σήραγγας και ονομάζονται αντίστοιχα AA', BB' και CC', ενώ οι θέσεις του μετώπου της νέας σήραγγας, για τις οποίες θα παρουσιαστούν οι μεταβολές αφορούν τις θέσεις στις οποίες το μέτωπο βρίσκεται δύο και μία διάμετρο πριν το σημείο διασταύρωσης των δύο

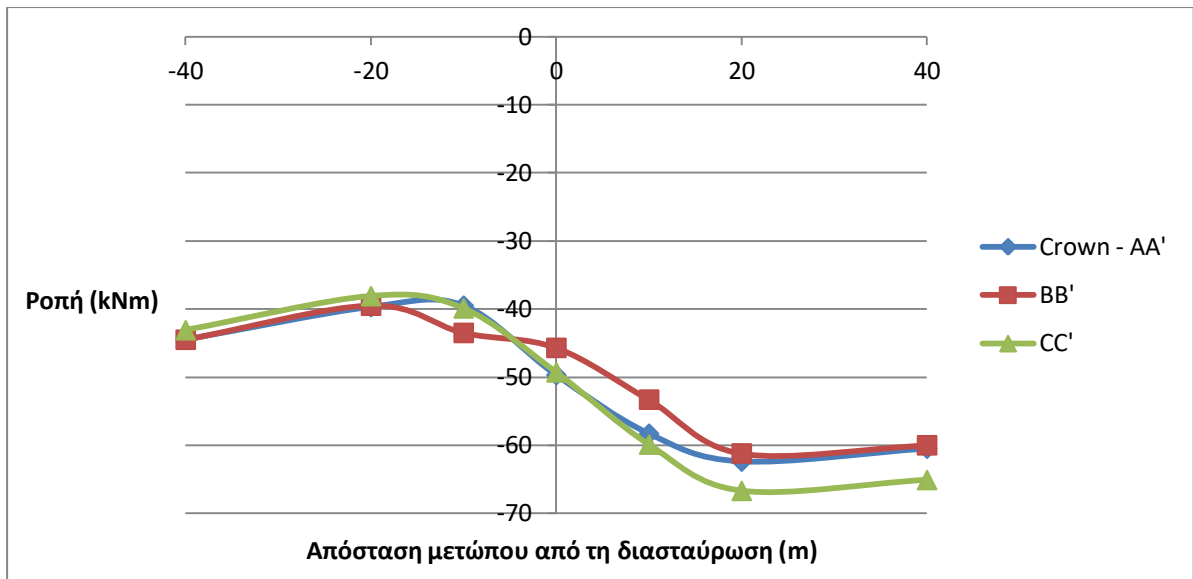
σηράγγων, στο σημείο διασταύρωσης, και μία και δύο διαμέτρους μετά από αυτό.



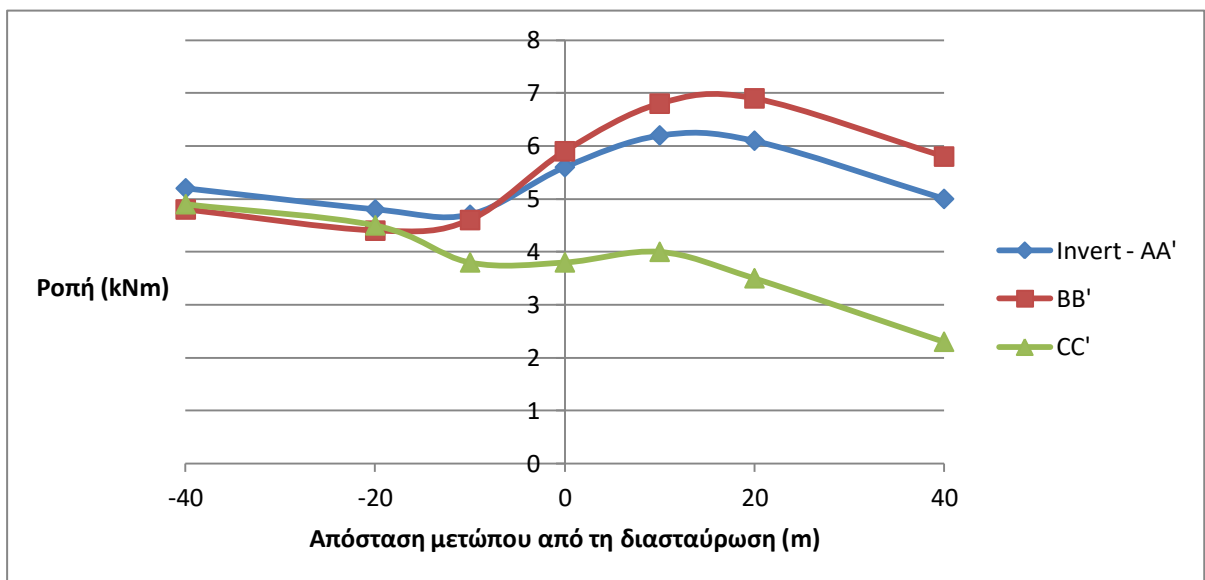
**Σχ. 6.66:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη δεξιά παρειά της κάτω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.67:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στην αριστερή παρειά της κάτω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.68:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της κάτω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



**Σχ. 6.69:** Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στο δάπεδο της άνω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Το πρώτο που παρατηρεί κανείς κοιτώντας τα διαγράμματα των ροπών της προϋπάρχουσας σήραγγας, η οποία σε αυτή την περίπτωση είναι η βαθύτερη, είναι η διαφορά στο πρόσημο των ροπών στο σκυρόδεμα των

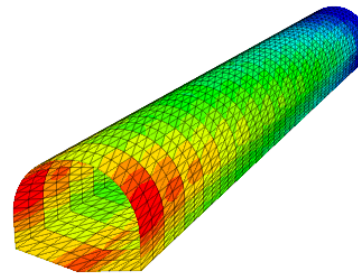
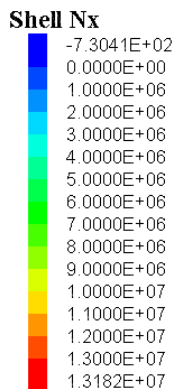
παρειών και του δαπέδου της σήραγγας. Το θετικό πρόσημο των ροπών σημαίνει πως η πλευρά του σκυροδέματος που «κοιτάζει» το εσωτερικό της σήραγγας θλίβεται, ενώ η πλευρά που «κοιτάζει» την περιβάλλουσα βραχώμαζα εφελκύεται. Αυτό οφείλεται σαφώς στη διαφορετική διεύθυνση που έχει η σήραγγα που τώρα θεωρείται ως προϋπάρχουσα. Η ροπή στη στέψη είναι και πάλι αρνητική.

Όσο αφορά στην εξέλιξη των ροπών κατά τη διάνοιξη της νέας υπερκείμενης σήραγγας, έχει ως εξής. Οι τιμές τους παρουσιάζουν μια μικρή μείωση μέχρι το μέτωπο της νέας σήραγγας να φτάσει δύο διαμέτρους πριν τη διασταύρωση, οπότε και αρχίζουν να αυξάνονται. Τη μέγιστη τιμή τους, φτάνουν όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας έχει προσπεράσει τη θέση της διασταύρωσης κατά περίπου δύο διαμέτρους, οπότε και αρχίζουν να ισορροπούν.

Αυτή τη φορά, οι μέγιστες ροπές ασκούνται στη στέψη της σήραγγας και είναι αρνητικές, στις παρειές οι τιμές είναι αντίστοιχες αλλά με θετικό πρόσημο, ενώ οι τιμές της ροπής στο δάπεδο της σήραγγας είναι χαμηλές. Και σε αυτή την περίπτωση, η μεγαλύτερη μεταβολή στο εύρος τιμών συναντάται στις καμπύλες BB' που αντιστοιχούν στο μέσο της κάτω σήραγγας, επομένως και πάλι πρόκειται για τη θέση που επηρεάζεται περισσότερο από τη διάνοιξη της νέας υπερκείμενης σήραγγας.

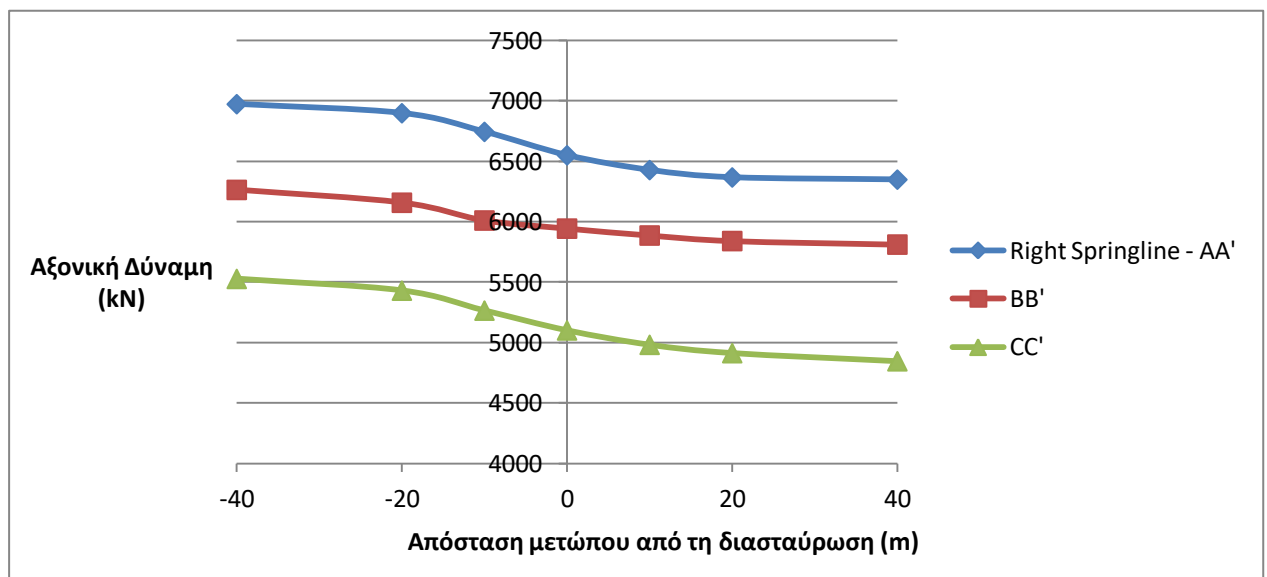
Σχετικά με τη μέγιστη μεταβολή της ροπής των παραπάνω διαγραμμάτων, που μαρτυρά την επίδραση της νέας σήραγγας, αυτή είναι της τάξης των 15 kNm. Αντίστοιχες τιμές μεταβολής των ροπών παρατηρήθηκαν και στην περίπτωση που η άνω σήραγγα διανοίγεται πρώτη. Ωστόσο, εδώ η μέγιστη τιμή της ροπής φτάνει τα 60 kNm, συνεπώς η μεταβολή της ροπής εδώ είναι μεγαλύτερη σε σχετικές τιμές συγκριτικά με τη βασική περίπτωση, όπου οι απόλυτες τιμές της ροπής έφταναν τα 150 kNm.

**FLAC3D 4.00**  
 ©2009 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 157280  
 13/12/2019 5:40:52 μμ

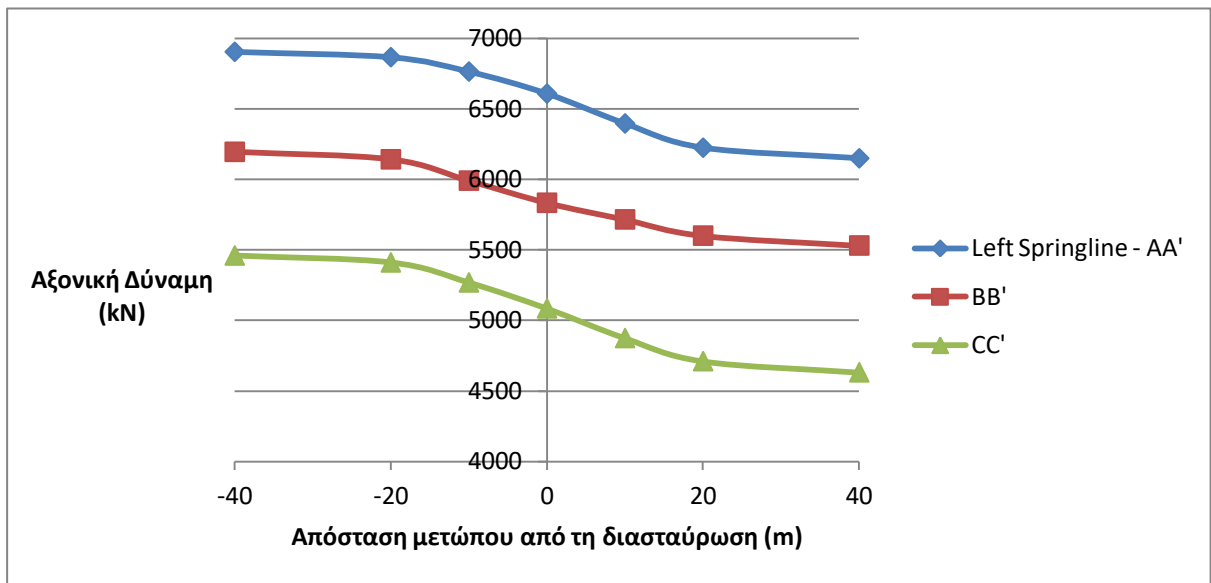


**Σχ. 6.70:** Απεικόνιση των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας (άνω) σήραγγας

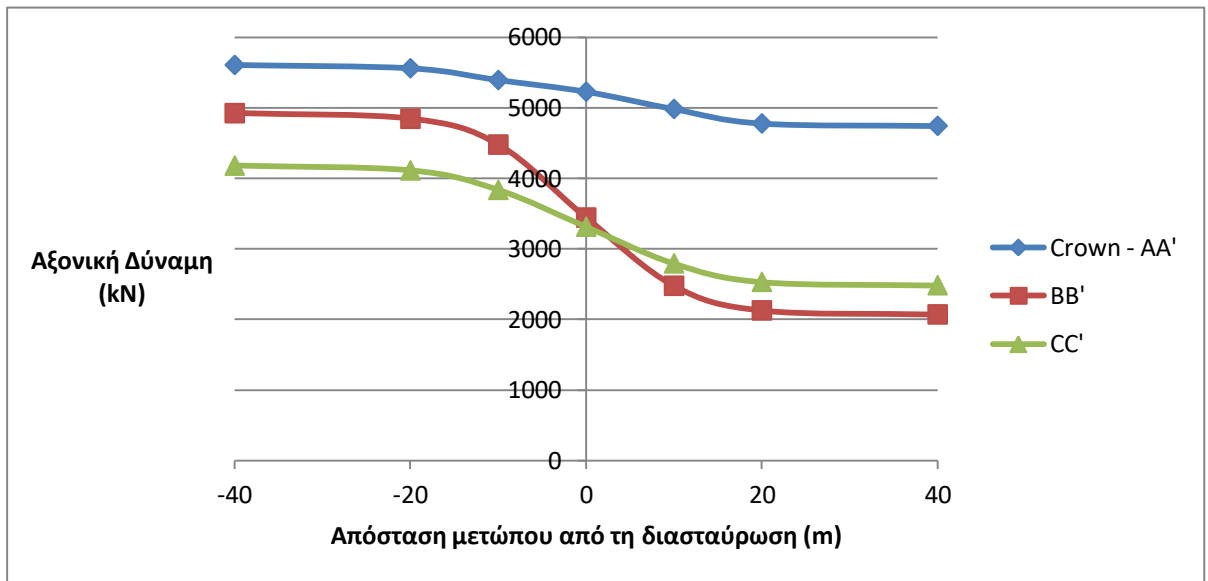
Παρακάτω, ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της κάτω σήραγγας κατά την προχώρηση του μετώπου της κάθετα υπερκείμενης σήραγγας. Στο σχήμα 6.70 απεικονίζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας.



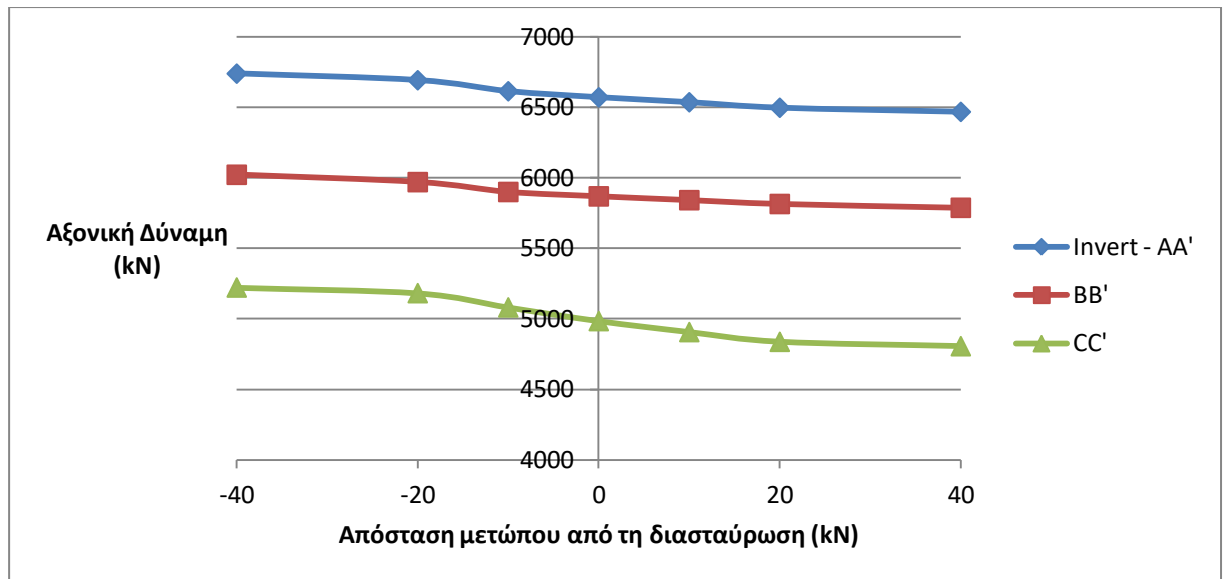
**Σχ. 6.71:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στη δεξιά παρειά της κάτω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



Σχ. 6.72: Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων στην αριστερή παρειά της κάτω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



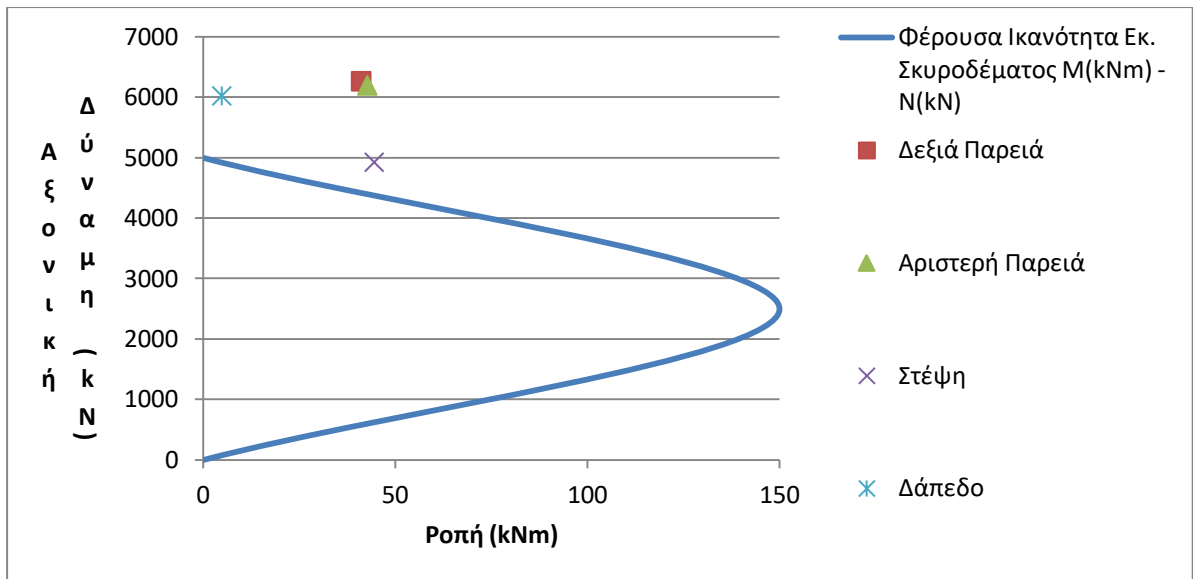
Σχ. 6.73: Διάγραμμα μεταβολής των ροπών στη στέψη της κάτω σήραγγας συναρτήσεως της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης



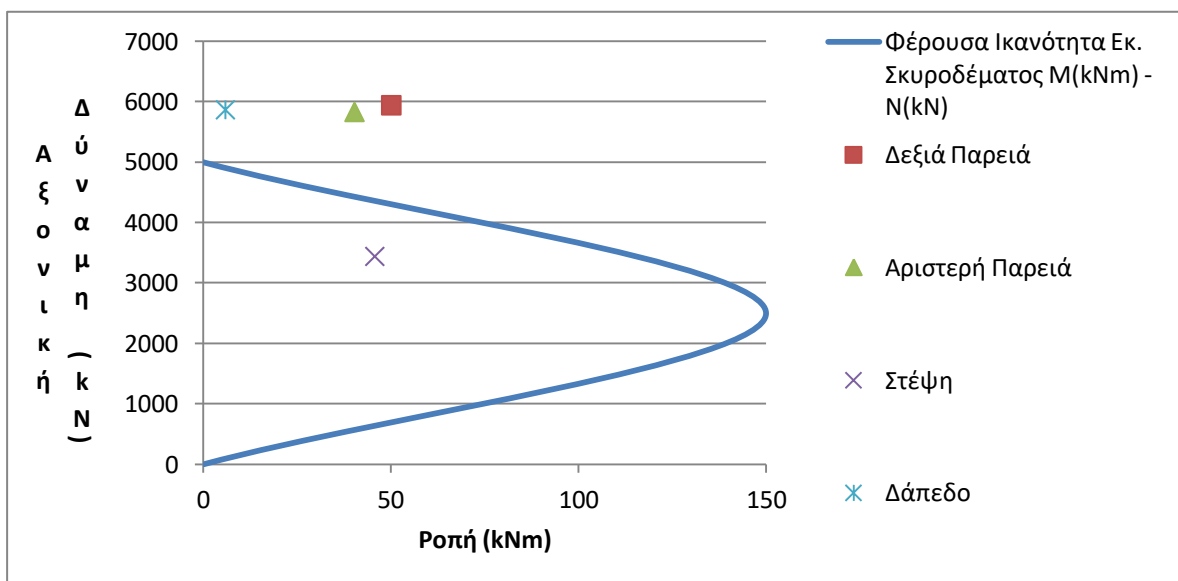
**Σχ. 6.74:** Διάγραμμα μεταβολής των Αξονικών δυνάμεων στο δάπεδο της κάτω σήραγγας συναρτήσει της απόστασης του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή διασταύρωσης

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προϋπάρχουσας σήραγγας, γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη διάνοιξη της νέας υπερκείμενης σήραγγας κάθετα σε αυτή, οι τιμές των δυνάμεων μειώνονται. Οι τιμές αυτές μάλιστα είναι πολύ μεγαλύτερες στην περίπτωση των παρειών της σήραγγας, που φτάνουν έως και τα 7000 kN σε σχέση με την περίπτωση που η προϋπάρχουσα σήραγγα θεωρούνταν η κάθετη υπερκείμενη, όπου οι αντίστοιχες τιμές έφταναν τα 1000 kN.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο διάγραμμα που αφορά τις αξονικές δυνάμεις στη στέψη. Φαίνεται πως πρόκειται για τη θέση της σήραγγας στην οποία υπάρχει η μεγαλύτερη επιρροή της νέας σήραγγας. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη BB' του αντίστοιχου διαγράμματος, υπάρχει μια διαφορά 3000 kN στις τιμές της αξονικής δύναμης. Πριν την έναρξη της εκσκαφής η τιμή είναι της τάξης των 5000 kN και με το πέρας της έχει φτάσει στα 2000 kN. Η διαφοροποίηση αυτή έχει μεγάλη σημασία για τη φέρουσα ικανότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά τη διαδικασία εκσκαφής της νέας σήραγγας, όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα, που αφορούν την περιοχή της κάτω σήραγγας που βρίσκεται ακριβώς στο μέσο της (τομή BB').

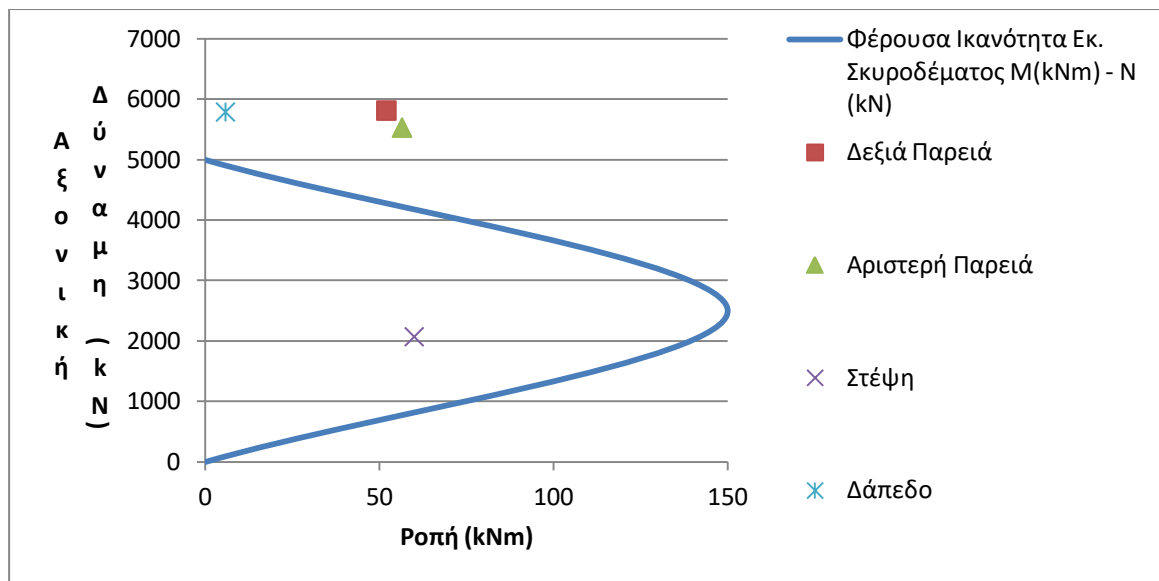


**Σχ. 6.75:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας



**Σχ. 6.76:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων όταν το μέτωπο της νέας σήραγγας βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής της διασταύρωσης





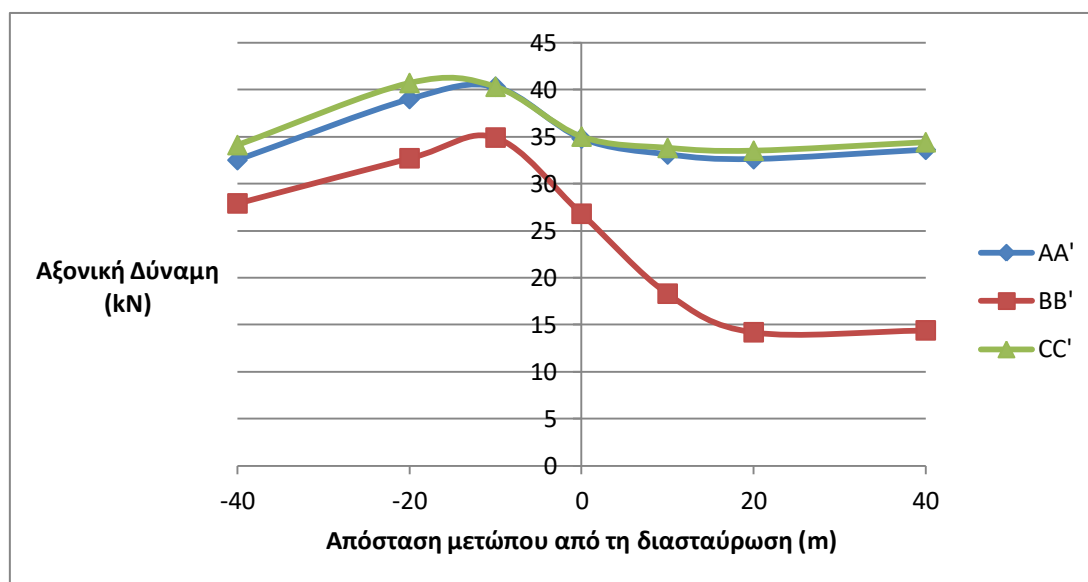
**Σχ. 6.77:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ικανότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε όρους Ροπών – Αξονικών δυνάμεων μετά το πέρας της διάνοιξης της νέας σήραγγας

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.75, που αφορά μόνο την προϋπάρχουσα σήραγγα, φαίνεται πως το σκυρόδεμα που προσομοιώθηκε δεν είναι κατάλληλο για την περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, λόγω των υψηλών αξονικών δυνάμεων το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα φαίνεται να διαρρέει σε όλες τις θέσεις και μάλιστα σε θλίψη, σε αντίθεση με την περίπτωση του κεφαλαίου 5, όπου το σκυρόδεμα στις παρειές διέρρεε σε εφελκυσμό. Κατά την προχώρηση του μετώπου της νέας σήραγγας παρατηρείται μείωση των αξονικών δυνάμεων. Στη θέση της στέψης μάλιστα, η μεγάλη μείωση της αξονικής δύναμης σε συνδυασμό με τη μικρή μεταβολή της ροπής, φέρνει το αντίστοιχο σημείο του διαγράμματος εντός των ορίων λειτουργικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Συνεπώς, φαίνεται πως με την αλλαγή της σειράς διάνοιξης των σηράγγων προκύπτουν μεγαλύτερες μεταβολές των κρίσιμων μεγεθών που αφορούν τα μέτρα υποστήριξης και πρέπει να υπάρξει μεγαλύτερη μέριμνα είτε αυτές δρουν θετικά είτε αρνητικά.

### 6.5.2 Επίδραση της διάνοιξης της νέας σήραγγας στα αγκύρια της προϋπάρχουσας

Όσο αφορά στα αγκύρια, οι μεγαλύτερες δυνάμεις συναντώνται και πάλι στα αγκύρια που βρίσκονται στους ώμους της εκσκαφής. Οι μέγιστες δυνάμεις (37 kN) ωστόσο, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης όπου η

άνω σήραγγα θεωρείται η προϋπάρχουσα. Παρακάτω, ακολουθεί το διάγραμμα που αφορά την εξέλιξη των αξονικών δυνάμεων των αγκυριών κατά την προχώρηση του μετώπου της άνω, νέας σήραγγας.

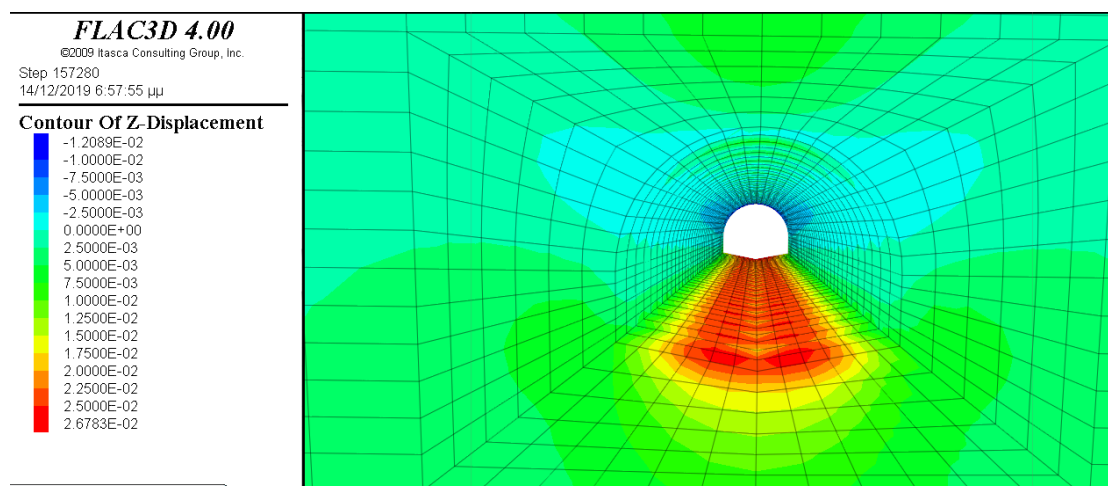


**Σχ. 6.78:** Διάγραμμα μεταβολής των αξονικών δυνάμεων των αγκυριών σε σχέση με την απόσταση του μετώπου της νέας σήραγγας από την περιοχή της διασταύρωσης

Η μεγαλύτερη επίδραση στα αγκύρια της προϋπάρχουσας σήραγγας συναντάται σε αυτά που βρίσκονται στο μέσο της. Μέχρι το μέτωπο της νέας σήραγγας να φτάσει μία διάμετρο πριν από τη θέση της διασταύρωσης οι δυνάμεις που δέχονται τα αγκύρια αυξάνονται. Έκτοτε, και έως το μέτωπο προχωρήσει δύο διαμέτρους από τη διασταύρωση οι δυνάμεις αυτές μειώνονται, οπότε και αρχίζει να ισορροπεί η κατάσταση. Παρατηρώντας την καμπύλη BB' που εμφανίζει τη μεγαλύτερη μεταβολή τιμών φαίνεται πως οι ακραίες τιμές απέχουν κατά περίπου 15 kN (μείωση από 35 σε 20 kN). Η μεταβολή αυτή είναι σημαντική (περίπου 40% της μέγιστης τιμής) και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Η αντίστοιχη μεταβολή στην περίπτωση που οι σήραγγες διανοίχθηκαν με διαφορετική σειρά ήταν της τάξης του 25% (από 30 έως 40 kN).

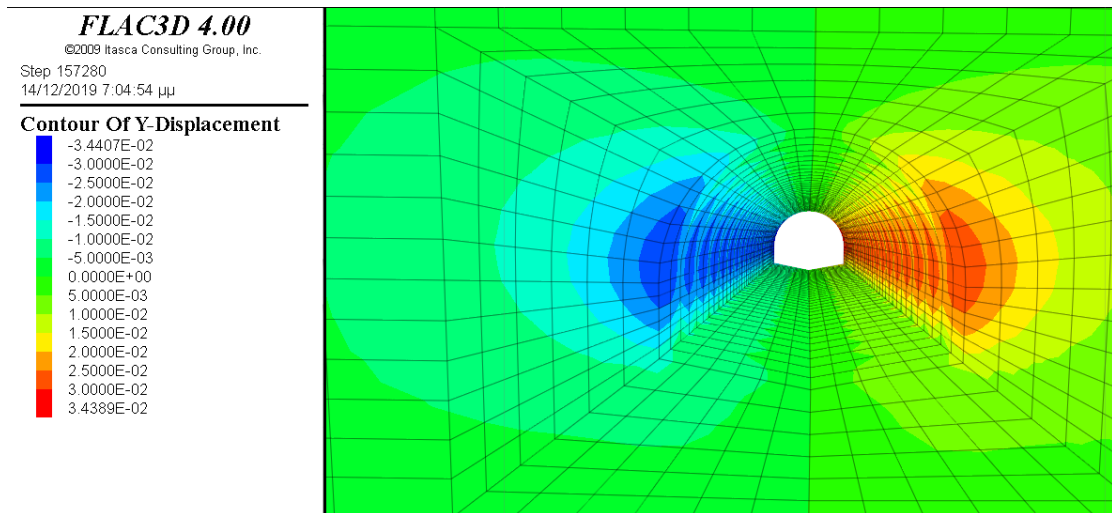
### 6.5.3 Μετακινήσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αρχικά οι μετακινήσεις που προέκυψαν κατά τη διάνοιξη της βαθύτερης σήραγγας που παίζει το ρόλο της προϋπάρχουσας και στη συνέχεια οι μετακινήσεις που προκύπτουν από τη διάνοιξη της νέας, υπερκείμενης και κάθετης σε αυτή σήραγγας.



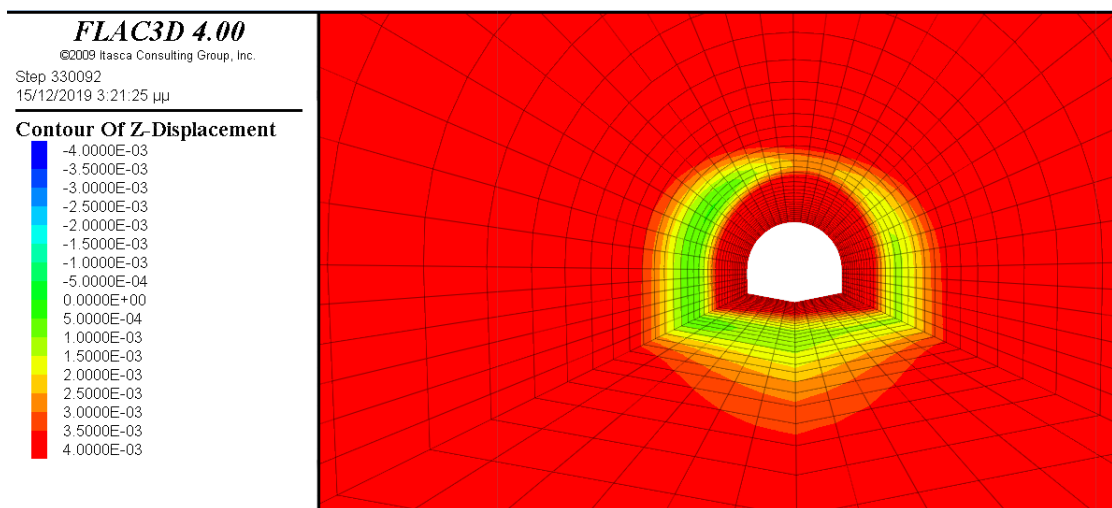
**Σχ. 6.79:** Απεικόνιση των κατακόρυφων μετακινήσεων στην περιφέρεια της προϋπάρχουσας σήραγγας που προέκυψαν κατά τη διαδικασία διάνοιξης της

Πρώτα απ' όλα, στο σχήμα 6.79 φαίνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν στην περιφέρεια της σήραγγας από τη διαδικασία εκσκαφής της. Στην περιφέρεια της σήραγγας δε σημειώνονται σημαντικές κατακόρυφες μετακινήσεις. Συγκεκριμένα, είναι καθιζήσεις της τάξης του 1 χιλιοστού. Το πρόβλημα συναντάται στον πυθμένα της σήραγγας, ο οποίος λόγω των μεγάλων οριζοντίων τάσεων παρουσιάζει ανύψωση της τάξης των 2 εκατοστών. Στην περίπτωση αυτή, δεν παρουσιάζεται το «παράδοξο» της ανύψωσης στη στέψη της σήραγγας που είδαμε στο κεφάλαιο 5. Αυτό συμβαίνει, καθώς τώρα η σήραγγα βρίσκεται στη διεύθυνση της μικρότερης οριζόντιας τάσης και το βάθος είναι μεγαλύτερο.



**Σχ. 6.80:** Οριζόντιες μετακινήσεις στην προϋπάρχουσα (κάτω) σήραγγα πριν τη διάνοιξη της νέας (άνω)

Αντίστοιχα μικρότερες είναι και οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν από τη διάνοιξη της πρώτης σήραγγας. Όπως φαίνεται κι από το σχήμα 6.80 οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις συναντώνται στις παρειές της σήραγγας και είναι της τάξης των 3.5 εκατοστών, δηλαδή περίπου οι μισές από ότι στην ανάλυση της βασικής περίπτωσης του κεφαλαίου 5.



**Σχήμα 6.81:** Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην προϋπάρχουσα (κάτω) σήραγγα λόγω της διάνοιξης της νέας (άνω)

Στο σχήμα 6.81 απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν στη βαθύτερη, προϋπάρχουσα σήραγγα λόγω της διάνοιξης της κάθετης σε αυτής, υπερκείμενης, νέας σήραγγας. Αν εξαιρεθεί το μέσο της σήραγγας και

η περιοχή από μία διάμετρο πριν έως και μία διάμετρο μετά από αυτό (δηλαδή ουσιαστικά η περιοχή της διασταύρωσης) η σήραγγα φαίνεται πως συνεχίζει να υφίσταται ανυψώσεις της τάξης των 4 χιλιοστών λόγω της ανακατανομής των τάσεων που προκαλεί η διάνοιξη της νέας σήραγγας στην περιοχή. Ωστόσο, στην περιοχή της διασταύρωσης όπως ορίστηκε παραπάνω, οι κατακόρυφες μετακινήσεις διαφοροποιούνται. Στην περιοχή αυτή φαίνεται πως υπάρχουν ανυψώσεις που είναι της τάξης του μισού έως ενός χιλιοστού, ανάλογα τη θέση. Στην πραγματικότητα, η νέα σήραγγα προκαλεί καθιζήσεις στην υποκείμενη προϋπάρχουσα στην περιοχή που διέρχεται πάνω από αυτή. Η συνισταμένη των μετακινήσεων δίνει αυτή την ανύψωση του ενός χιλιοστού.

## **6.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα**

Κλείνοντας το κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποιοι πίνακες στους οποίους καταγράφονται συγκεντρωτικά οι μεταβολές που προέκυψαν από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας στις ροπές και τις αξονικές δυνάμεις του σκυροδέματος και στις κατακόρυφες μετακινήσεις της προϋπάρχουσας σήραγγας για καθεμιά από τις θέσεις της στέψης, του δαπέδου και των παρειών.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι οι μεταβολές αυτές αφορούν στη διαφορά της εκάστοτε τιμής που σημειώθηκε πριν την έναρξη της διάνοιξης της νέας σήραγγας και της τιμής που προέκυψε στο τέλος της κατασκευής της. Επιπλέον, είναι άξιο αναφοράς ότι οι απόλυτες τιμές των παραπάνω μεγεθών, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα την ανάλυση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό, ανεξάρτητα από το ότι εδώ παρουσιάζονται οι μεταβολές, με σκοπό να γίνει αντιληπτή η επίδραση κάθε παραμέτρου του προβλήματος. Τέλος, να σημειωθεί ξανά πως όσο αφορά στις ροπές η αρνητική μεταβολή τους δηλώνει πως η πλευρά του σκυροδέματος που «κοιτάζει» το εσωτερικό της σήραγγας εφελκύεται και η πλευρά που «κοιτάζει» την περιβάλλουσα βραχώμαζα θλίβεται, ενώ για τις δυνάμεις και τις μετακινήσεις το θετικό πρόσημο δηλώνει κατεύθυνση ομόρροπη του εκάστοτε άξονα.

<b>ΡΟΠΕΣ Μ</b>						
	<i>Βασική Περίπτωση</i>	<i>Αύξηση απόστασης σηράγγων (από 3.5 → 6.5 m)</i>	<i>Αύξηση βάθους σηράγγων ν (κατά 10m)</i>	<i>Μείωση E (από 200 → 100 MPa)</i>	<i>Αύξηση E (από 200 → 300 MPa)</i>	<i>Αλλαγή σειράς διάνοιξης σηράγγων ν</i>
<i>Στέψη</i>	<b>9.2%</b>	6.3%	5.1%	9%	8.8%	28.2%
<i>Δάπεδο</i>	<b>16%</b>	6.8%	9.2%	20.8%	14.4%	15.5%
<i>Δεξιά Παρειά</i>	<b>6.2%</b>	3%	6.5%	7.1%	6%	20.6%
<i>Αριστερή Παρειά</i>	<b>4.8%</b>	4.3%	4.2%	8%	6.3%	24%

**Πίν. 6.1:** Μεταβολή των ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας σε καθεμιά από τις αναλύσεις

<b>ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ N</b>						
	<i>Βασική Περίπτωση</i>	<i>Αύξηση απόστασης σηράγγων (από 3.5 → 6.5 m)</i>	<i>Αύξηση βάθους σηράγγων ν (κατά 10m)</i>	<i>Μείωση η E (από 200 → 100 MPa)</i>	<i>Αύξηση η E (από 200 → 300 MPa)</i>	<i>Αλλαγή σειράς διάνοιξης σηράγγων ν</i>
<i>Στέψη</i>	<b>1.9%</b>	0.9%	3.1%	2.4%	2.8%	58%
<i>Δάπεδο</i>	<b>18.7%</b>	10%	15.9%	20.2%	18.2%	3.9%
<i>Δεξιά Παρεία</i>	<b>56.3%</b>	32.7%	20%	50.1%	46.1%	7.2%
<i>Αριστερή Παρεία</i>	<b>43.7%</b>	25.9%	10.9%	43.2%	43.8%	10.7%

**Πίν. 6.2:** Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας σε καθεμιά από τις αναλύσεις

<b>ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ (N)</b>						
	<i>Βασική Περίπτωση</i>	<i>Αύξηση απόστασης σηράγγων (από 3.5 → 6.5 m)</i>	<i>Αύξηση βάθους σηράγγων ν (κατά 10m)</i>	<i>Μείωση η E (από 200 → 100 MPa)</i>	<i>Αύξηση η E (από 200 → 300 MPa)</i>	<i>Αλλαγή σειράς διάνοιξης σηράγγων ν</i>
<i>Αγκύρια στους ώμους της εκσκαφή ς</i>	<b>17.4%</b>	<b>7.3%</b>	<b>70%</b>	<b>42.6%</b>	<b>9.4%</b>	<b>48.4%</b>

**Πίν. 6.3:** Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια της προϋπάρχουσας σήραγγας σε καθεμιά από τις αναλύσεις



<b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ (mm)</b>						
	<i>Βασική Περίπτωση</i> <i>η</i>	<i>Αύξηση απόστασης ς σηράγγων (από 3.5 → 6.5 m)</i>	<i>Αύξηση βάθους σηράγγων ν (κατά 10m)</i>	<i>Μείωση η E (από 200 → 100 MPa)</i>	<i>Αύξηση η E (από 200 → 300 MPa)</i>	<i>Αλλαγή σειράς διάνοιξης σηράγγων ν</i>
<i>Στέψη</i>	<b>+3</b>	<b>+1.5</b>	-3	<b>+7</b>	<b>+2</b>	<b>+ &lt;1</b>
<i>Δάπεδο</i>	<b>+4</b>	<b>+1.5</b>	-4	<b>+8</b>	<b>+3</b>	<b>+ &lt;1</b>
<i>Δεξιά Παρεία</i>	<b>+2.5</b>	<b>+ &lt;0.5</b>	-3	<b>+5</b>	<b>+1</b>	<b>+ &lt;1</b>
<i>Αριστερή Παρεία</i>	<b>+2.5</b>	<b>+ &lt;0.5</b>	-3	<b>+5</b>	<b>+1</b>	<b>+ &lt;1</b>

**Πίν. 6.4:** Κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή της προϋπάρχουσας σήραγγας σε καθεμιά από τις αναλύσεις

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η περίπτωση διάνοιξης νέας σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, κάθετα και σε ανισοσταθμία σε μία προϋπάρχουσα και ποια η επίδρασή της στη δεύτερη. Η μελέτη του θέματος έγινε μέσω αριθμητικών αναλύσεων σε τριδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών, το FLAC<sup>3D</sup>.

Η πρώτη προσέγγιση του ζητήματος έγινε με την ανάλυση μοντέλων στα οποία οι σήραγγες ήταν κυκλικές και ανεπένδυτες και η γεωμάζα προσομοιώνονταν ως ελαστική. Παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα σήραγγες σε αστικό περιβάλλον δε θα είναι ποτέ ανεπένδυτες και η συμπεριφορά της γεωμάζας δεν είναι ελαστική, οι παραπάνω αναλύσεις έδωσαν κάποια συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, από τις δύο σειρές παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, με μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της γεωμάζας και της απόστασης μεταξύ των σηράγγων, προέκυψε ότι η πρώτη παράμετρος είναι αυτή που παίζει σημαντικότερο ρόλο στην επιρροή που θα δεχτεί η προϋπάρχουσα σήραγγα. Μάλιστα, στην περίπτωση μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας, η επίδραση έχει σταθερό ρυθμό μεταβολής, αλλά είναι μεγαλύτερος για μικρές τιμές του και μικρός για μεγαλύτερες τιμές. Σε αυτή τη φάση, η διαφορά στις μετακινήσεις που παίρνουμε όταν οι σήραγγες απέχουν 2 και όταν απέχουν 20 μέτρα είναι της τάξης του 17%.

Καθώς, όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις της πρώτης φάσης δεν προσομοίωναν ρεαλιστικές καταστάσεις, στη συνέχεια της εργασίας έγινε η προσομοίωση μίας πραγματικής περίπτωσης διάνοιξης σήραγγας κάτω από προϋπάρχουσα. Το έργο είχε λάβει χώρα στο Σύδνεϋ, όπου το γεωστατικό πεδίο χαρακτηρίζεται από υψηλές οριζόντιες τάσεις. Από τη μελέτη των μέτρων υποστήριξης προέκυψαν κάποια συμπεράσματα. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας, κατά την τοποθέτησή του έλαβε ροπές αρνητικής τιμής, δηλαδή η πλευρά του που «κοιτάζει» στο εσωτερικό

της σήραγγας εφελκύνονταν ενώ αυτή που «κοιτάζει» τη βραχομάζα θλίβονταν. Η διάνοιξη της νέας σήραγγας, ωστόσο, προκάλεσε περαιτέρω εφελκυσμό στις παρειές της σήραγγας, αφού εκεί οι τιμές της ροπής μεταβλήθηκαν προς τις θετικές, ενώ στη στέψη και το δάπεδο θλίψη. Η σημαντική επίδραση της ξεκινούσε όταν το μέτωπό της βρίσκονταν μία διάμετρο πριν από τη θέση «διασταύρωσης» των σηράγγων και έπαυε σε δύο διαμέτρους μετά από αυτή. Οι μεγαλύτερες τιμές της ροπής σημειώθηκαν στις παρειές της σήραγγας ενώ οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις στο δάπεδο και ακολούθως στη στέψη της σήραγγας. Από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης προέκυψε ότι η φέρουσα ικανότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που προσομοιώθηκε στις παρειές, δεν ήταν επαρκής ήδη από πριν τη διάνοιξη της νέας σήραγγας και η διάνοιξή της λειτούργησε προς όφελός της. Στην πράξη, σε μία τέτοια περίπτωση θα έπρεπε να τοποθετηθεί πιο παχύ στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις παρειές. Όσο αφορά στα αγκύρια, τις μεγαλύτερες δυνάμεις ανέλαβαν αυτά που βρίσκονταν στους ώμους της εκσκαφής. Από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας εφελκύνονταν περαιτέρω, όμως η μεταβολή αυτή ήταν μικρή, ακόμα και στο μέσο της άνω σήραγγας, ακριβώς δηλαδή πάνω από τη θέση «διασταύρωσης» των δύο σηράγγων. Σχετικά με τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις που προκαλεί η νέα σήραγγα στην προϋπάρχουσα, παρατηρούνται ανυψώσεις. Η μεγαλύτερη σημειώνεται στο δάπεδο και ακολουθούν η στέψη και οι παρειές. Όλες αυτές οι μετακινήσεις είναι μικρότερες των 5 χιλιοστών και πρέπει να συγκρίνονται με τις αποδεκτές του εκάστοτε σκυροδέματος, ώστε να ελέγχεται αν διατηρείται η λειτουργικότητά του. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν, φαίνεται πως η νέα σήραγγα επιδρά στην προϋπάρχουσα σε απόσταση μίας διαμέτρου πριν και μετά από τη θέση της διασταύρωσης, σημαντικά περισσότερο όμως σε αυτή.

Την τελευταία φάση προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας αποτέλεσαν οι παραμετρικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως βάση την περίπτωση του Σύδνεϋ, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις μεταβάλλοντας κάθε φορά την απόσταση μεταξύ των σηράγγων, το βάθος εκσκαφής τους, τη σειρά διάνοιξής τους αλλά και το μέτρο ελαστικότητας της γεωμάζας, τα

αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της προηγούμενης φάσης και προέκυψαν κάποια συμπεράσματα.

Όσο αφορά στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των σηράγγων διπλασιάστηκε, η συμπεριφορά της επίδρασης παρέμεινε η ίδια, ωστόσο μεταβλήθηκαν τα μεγέθη. Οι μεταβολές των ροπών και των αξονικών δυνάμεων που προκάλεσε η νέα σήραγγα στην προϋπάρχουσα έπεσαν στο μισό, το ίδιο συνέβη και με τη μεταβολή των δυνάμεων στα αγκύρια. Οι μετακινήσεις μειώθηκαν και αυτές σημαντικά. Μειώθηκαν κάτω από το μισό στο δάπεδο της σήραγγας, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις σχεδόν εκμηδενίστηκαν.

Όταν το βάθος εκσκαφής των σηράγγων μεγαλώνει, όπως είναι αναμενόμενο τα μέτρα υποστήριξης δέχονται ροπές και αξονικές δυνάμεις μεγαλύτερης τιμής. Ωστόσο, φαίνεται πως το κέρδος έγκειται στη μείωση του ρίσκου που αναλαμβάνεται κατά τη διάνοιξη μιας νέας σήραγγας, καθώς οι μεταβολές που προκαλεί στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας είναι ίσες ή και μικρότερες. Σε αυτή την περίπτωση, τα αγκύρια έχουν αναλάβει μικρές εφελκυστικές δυνάμεις μετά την εκσκαφή της προϋπάρχουσας σήραγγας, ενώ από τη διάνοιξη της νέας σήραγγας φαίνεται να θλίβονται. Τέλος, λόγω της αύξησης του βάθους, οι κατακόρυφες μετακινήσεις που υπόκεινται στην άνω σήραγγα λόγω της διάνοιξης της νέας, είναι καθιζήσεις, ίδιας τιμής με τις ανυψώσεις που προκύπτουν στη βασική ανάλυση.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που σχετίζονταν με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, προέκυψε ότι πρόκειται για την παράμετρο που επιδρά σημαντικότερα από όλες τις άλλες στην επίδραση που θα έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας σε μία προϋπάρχουσα, κάθετη σε αυτή. Σαφώς, η ποιότητα της βραχομάζας καθορίζει τις τιμές των ροπών και αξονικών δυνάμεων που δέχεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προϋπάρχουσας σήραγγας λόγω της εκσκαφής της. Και στην περίπτωση της διάνοιξης της νέας σήραγγας όμως, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα και της πρώτης και της τρίτης φάσης προσομοιώσεων, η βελτίωση του εδάφους σε μία περίπτωση πολύ ασθενούς γεωμάζας είναι η κίνηση που θα μειώσει πιο αποτελεσματικά την επίδρασή της στην προϋπάρχουσα.

Στην περίπτωση που άλλαξε η σειρά διάνοιξης των σηράγγων και θεωρώντας πως οι διευθύνσεις των σηράγγων παρέμειναν ίδιες, άλλαξε και ο τρόπος αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Λόγω του γεγονότος ότι αυτή τη φορά η προϋπάρχουσα (κάτω) σήραγγα βρίσκεται στη διεύθυνση του μικρότερου γεωστατικού πεδίου, υφίσταται εξ αρχής μικρότερες ροπές και αξονικές δυνάμεις. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αστοχεί αυτή τη φορά θλιπτικά στις παρειές και στο δάπεδο, όπου πρέπει να εφαρμοστεί παχύτερη στρώση του, ενώ η μείωση των αξονικών δυνάμεων που προκαλεί η διάνοιξη της υπερκείμενης, νέας σήραγγας λειτουργεί προς όφελος της φέρουσας ικανότητάς του στη στέψη. Επιπλέον, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κάτω, προϋπάρχουσα σήραγγα, λόγω της διάνοιξης της νέας, υπερκείμενης είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες όταν η νέα σήραγγα βρισκόταν από κάτω. Συνεπώς, η αλληλεπίδραση μεταξύ κάθετων σηράγγων θα πρέπει να ελαχιστοποιείται μέσω της προσεκτικής επιλογής της σειράς διάνοιξης των σηράγγων.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Attewell, P B, and Woodman, J P (1982) Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil, *Ground Eng.* **15**(8), 13.
- Attewell, P B, Yeates, J and Selby, A R (1986) Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, New York : Methuen.
- Avramidis, I E, and Morfidis, K (2006) Bending of beams on threeparameter elastic foundation, *Int. J. Solids Struct.* **43**(2), 357–375.
- Boonyarak, T and Ng, C W (2014) Effects of construction sequence and cover depth on crossing-tunnel interaction, *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(7), 851-867.
- Burland, J B (1995) Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation, *In Proc., 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 155–162.
- Cooper, M L, Chapman, D N, Rogers, C D F and Chan, A H C (2002) Movements in the Piccadilly Line tunnels due to the Heathrow Express construction, *Géotechnique*, **52**(4), 243-257.
- Dalong, J, Dajun, Y, Shuya, L, Xinggao, L and Weiping, L (2018) Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels, *American Society of Civil Engineers*
- Fairhurst, C and Pei, J (1991) A Comparison between the Distinct Element Method and the Finite Element Method for Analysis of the Stability of an Excavation in Jointed Rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **5**(12), 11-117.
- Fang, Q, Zhang, D L and Wong, L N Y (2012) Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **29**, 10-30.

Fang, Q, Zhang, D, Li, Q, Wong, L N Y and Wongb, Y (2015) Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **45**, 128–137.

Hoek, E, Grabinsky, M W and Diederichs, M S (1991) Numerical Modeling for Underground Excavation Design, *Trans. Inst. Min. Metall.*, 100.

Itasca Consulting Group (2009) *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Manual FLAC<sup>3D</sup> Version 4.0*, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA

Liu, H Y, Small, J C, Carter J P and Williams, D J (2009) Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels, *Computers and Geotechnics*, **36**(5), 880-894.

Liu, C and Zhang, Z (2011) Three dimensional simulation of super-large double-line slurry shield tunnelling, Supplement, *Tumu Gongcheng Xuebao China Civ. Eng. J.*, **44**(S2), 118–122.

Liu, C, Zhang, Z and Regueiro, R A (2014) Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield - Case study in Shanghai, Supplement, *Comput. Geotech.*, **59**(S2), 21–43.

Loganathan, N, and Poulos, H G (1998) Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **124**(9), 846–856.

Migliazza, M, Chiorboli M and Giani, G P (2009) Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground, *Comput. Geotech.*, **36**(1–2), 113–124.

Sagaseta, C (1987) Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, *Géotechnique*, **37**(3), 301–320.

Ye, G L, Hashimoto, T, Shen, S L, Zhu, H H and Bai, T H (2015) Lessons learnt from unusual ground settlement during Double-O-Tube tunnelling in soft ground, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 79–91.

Zhang, D M, Xiang Z and Huang, H (2014) Longitudinal deformation of existing tunnel due to underlying shield tunnelling, *Rock Soil Mech.*, **35**(9), 2659–2666.

Αγιουτάντης, Ζ Γ (2010) *Στοιχεία Γεωμηχανικής: Μηχανική Πετρωμάτων*, Χανιά: Εκδόσεις ΙΩΝ.