



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

«Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων»

**«Μελέτη φόρτισης μόνιμης επένδυσης σηράγγων
διπλού κλάδου»**

Στρατηγέας Θεόδωρος

Επιβλέπων: Μ. Καββαδάς Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2010

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επίδραση στις φορτίσεις στη μόνιμη επένδυση μιας σήραγγας της κατασκευής μιας δεύτερης εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης, μέσω κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Μέχρι σήμερα στις μελέτες το πρόβλημα επιλύεται με εμπειρικές και αναλυτικές μεθόδους κυρίως, ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του τι συμβαίνει στη Ελλάδα την τελευταία δεκαετία στον τομέα των υπογείων έργων. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται η προέλευση των φορτίων που ασκούνται στη μόνιμη επένδυση. Αυτά προέρχονται από την περιβάλλουσα βραχώμαζα, την απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, την πίεση των υπογείων υδάτων, την σεισμική δράση, ενώ υπάρχουν ακόμα τα μόνιμα, τα κινητά και τα τυχηματικά φορτία καθώς επίσης και τα φορτία από πιθανές μελλοντικές κατασκευές. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των μεθόδων υπολογισμού φορτίων. Αυτές χωρίζονται σε εμπειρικές (μέσω του δείκτη RMR, μέσω του δείκτη Q και η μέθοδος Terzaghi), αναλυτικές (Terzaghi, Protodyakonov) και αριθμητικές (πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές). Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση του προβλήματος. Η προσομοίωση έγινε για σήραγγες κυκλικής διατομής και διαμέτρου 10 μέτρων. Μελετήθηκαν αξονικές αποστάσεις από 15 μέτρα έως 50 μέτρα (1.5 διάμετροι σήραγγας – 5 διάμετροι σήραγγας), για ύψη υπερκειμένων 100 και 200 μέτρων, για τιμές του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων K 0.5, 1, 1.5, για πλήθος τιμών σ_{cm} / P_0 (δείκτης ποιότητας βραχώμαζας). Στο πέμπτο κεφάλαιο έγινε έλεγχος της αξιοπιστίας των αναλύσεων. Αυτό ήταν σημαντικό, μιας και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αποδοχή μιας τιμής σφάλματος. Στο έκτο κεφάλαιο εξετάστηκε ποιοτικά, η επίδραση της αξονικής απόστασης στις μετατοπίσεις για διάφορες ποιότητες βραχώμαζας. Η αύξηση της αξονικής απόστασης σε συνδυασμό με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας μείωνε την ανάπτυξη παραμορφώσεων. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο έγινε διαγραμματική απεικόνιση της κατανομής της πίεσης στη τελική επένδυση. Η μέγιστη πίεση παρουσιάστηκε στις παρειές των σηράγγων, ενώ οι ελάχιστες στην οροφή. Αυτό συμβαίνει, διότι αφενός στην οροφή είχαμε τις μέγιστες μετατοπίσεις και άρα μεγαλύτερη αποτόνωση, άρα μικρότερες φορτίσεις και αφετέρου η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων δημιούργησε μια ζώνη έντονων παραμορφώσεων, η οποία έστρεψε το σημείο επιβολής της μέγιστης τάσης προς το εσωτερικό της. Η πίεση στη μόνιμη επένδυση αυξάνονταν όσο μειώνονταν η αξονική απόσταση των σηράγγων. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η επιβαλλόμενη πίεση στις παρειές της κάθε σήραγγας ήταν διαφορετική από παρειά σε παρειά. Η ανομοιόμορφη φόρτιση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πολλά

προβλήματα και αστοχίες σε κατασκευές από σκυρόδεμα και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις μελέτες μόνιμης επένδυσης.

Abstract

The purpose of this dissertation is to examine the effect of the construction of a new tunnel inside the interaction zone of an existing tunnel in the loads on the final lining, by using a finite elements code. Until recently, the above case was examined mostly by using empirical and analytical solutions. In the first chapter, there is a description of what had happened in the field of underground works in Greece during the last decade. In the second chapter, the origins and types of the loads in the final lining are described. The loads come from the surrounding rock mass, the degradation of the remedial measures, the underground water pressure, the seismic activity, while there are also permanent, mobile and random loads as well as loads from future constructions. In the third chapter, there is a small presentation of the most known methods to calculate the loads. These are divided in empirical (with the use of RMR or Q and the Terzaghi method), analytical (Terzaghi, Protodyakonov) and numerical (finite elements, finite differences). In the fourth chapter the used model is described. The analysis was made for circular tunnels of 10 meters diameter. The distance between the two tunnels varied from 15 meter to 50 meters, the overburdens' height was 100 and 200 meters, while the values of K that were examined were 0.5, 1, and 1.5, for various values of σ_{cm} / P_0 (rock mass quality index). In the fifth chapter, the credibility of the results was examined. That was very important, since the finite elements methods accepts a small amount of error. In the sixth chapter, the effects of the distance between the two tunnels in the growth of movements were examined for various rock masses. The increase of the distance of the two tunnels, in combination with the improvement of the rock mass quality decreased the movements. Finally, in the seventh chapter, the distribution of the pressure in the final lining was presented in charts. The maximum pressure was in the sides of the tunnel while the maximum was in the roof. That occurred for two reasons. Firstly, the larger amount of movements occurred in the roof, thus leading to a higher confinement, meaning fewer amounts of loads and secondly, the interaction of the two tunnels has created a zone of intense deformations, which tilted the point of appliance of the maximum stress towards the area between the two tunnels. The pressure in the final lining increases while the distance between the two tunnels decreases. It was also observed that, the applied pressure in the two sides of the tunnels was different from side to side. The asymmetric loading can cause many problems and failures in concrete structure and should be taken into consideration in the design of the final lining.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2) ΦΟΡΤΙΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	3
2.1) ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ.....	3
2.2) ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΑΞΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	4
2.2) ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΠΙΕΣΕΙΣ ΥΔΑΤΩΝ.....	4
2.3) ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ	5
2.4) ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	5
2.5) ΚΙΝΗΤΑ ΦΟΡΤΙΑ	5
2.6) ΤΥΧΗΜΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ	5
2.7) ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΤΑΝΑΓΚΑΣΜΟΥ	6
2.8) ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	6
3) ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	7
3.1) ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	7
3.1.1) Μέθοδος μέσω του δείκτη <i>RMR</i>	7
3.1.2) Μέθοδος μέσω του δείκτη <i>Q</i> (<i>Barton</i>).....	8
3.1.3) Μέθοδος <i>Terzaghi</i>	8
3.2) ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	8
3.2.1) Μέθοδος <i>Terzaghi</i>	9
3.2.2) Μέθοδος <i>Protodyakonov</i>	10
3.3) ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	10
4) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	13
4.1) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	13
4.2) ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	15
4.3) ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	17
4.4) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	18
4.4.1) Αξονική απόσταση.....	18
4.4.2) Συντελεστής γεωστατικών πιέσεων <i>K</i>	18
4.4.3) Ύψος υπερκειμένων	19
4.4.4) Ποιότητα βραχώμαζας.....	19
4.5) ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	20
5) ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	25
6) ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	27
6.1) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ <i>U</i>	27
6.1.1) Επίδραση σε μικρής αντοχής βραχώμαζες	27

6.1.2) Επίδραση σε μέτριας αντοχής βραχόμαζες	32
6.1.3) Επίδραση σε υψηλής αντοχής βραχόμαζες	36
6.2) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ (Κ) ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ U	40
6.2.1) Επίδραση του Κ σε μονή σήραγγα	41
6.2.2) Επίδραση του Κ για αξονική απόσταση 15m	43
6.2.3) Επίδραση του Κ για αξονική απόσταση 30m	45
6.2.4) Επίδραση του Κ για αξονική απόσταση 50m	47
6.3) ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ Η ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ U	49
6.3.1) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων Η σε μονή σήραγγα.....	49
6.3.2) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων Η για αξονική απόσταση 15m.....	51
6.3.2) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων Η για αξονική απόσταση 30m.....	52
7) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	55
7.1) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΛΟΓΟ σ_{cm} / P_0	56
7.2) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΛΟΓΟ σ_{cm} / P_0 ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Κ	61
7.3) ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ ΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΛΟΓΩ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ	66
7.4) ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΙΣ ΠΑΡΕΙΕΣ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	73
8) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
9) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	1

1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή υπογείων έργων έχει λάβει τα τελευταία χρόνια μεγάλη έκταση, ιδιαίτερα στη χώρα μας, κυρίως λόγω του ορίου ανάγλυφου, αλλά και της ευνοϊκής συγκυρίας να υπάρχουν, για το σκοπό αυτό, αρκετά διαθέσιμα κοινοτικά κονδύλια. Έτσι, την τελευταία δεκαετία, είχαμε την κατασκευή πολλών σηράγγων, σιδηροδρομικών, οδικών, υδαταγωγών και άλλων. Για αυτό το λόγο η εμπειρία στη μελέτη και στην κατασκευή τέτοιων έργων μεγάλωσε πολύ, με αποτέλεσμα να γίνονται όλο και καλύτερης ποιότητας και μεγαλύτερης ασφάλειας έργα, ενώ παράλληλα με την σιγουριά που υπάρχει λόγω αυτής της εμπειρίας, τα έργα δεν υπερδιαστασιολογούνται, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους, χωρίς, όμως, να μειώνεται η αξιοπιστία της κατασκευής.

Η διάνοιξη των σηράγγων επιτυγχάνεται με την εκσκαφή, την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης για την αποφυγή συγκλίσεων, ή και κατάρρευσης και τέλος την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης. Η επιλογή του τύπου της μόνιμης επένδυσης γίνεται εμπειρικά με βάση την ανάγκη στήριξης της βραχώμαζας, την ποιότητα και τον τύπο του περιβάλλοντος γεωολογικού, την ύπαρξη ή όχι υδάτων, την ικανότητα κατασκευής του συγκεκριμένου τύπου και την οικονομικότητα. Η μόνιμη επένδυση μπορεί να κατασκευαστεί από άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, από προκατασκευασμένα κομμάτια ή ολόκληρους δακτυλίους σκυροδέματος, ή και από μεταλλικούς σωλήνες.

Οι λόγοι, οι οποίοι επιβάλλουν την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης είναι (Γ.Μπακογιάννης 2004):

- Επίτευξη αποδεκτού επιπέδου ασφάλειας για μόνιμη λειτουργία.
- Ανάληψη από την μόνιμη επένδυση των φορτίων του γεωολογικού λόγω απαξίωσης της προσωρινής υποστήριξης, δηλαδή των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εξαιτίας κυρίως ερπυστικών φαινομένων, αλλά και της χαμηλής ανθεκτικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των υλικών κατασκευής των αγκυρίων.
- Ανάληψη δράσεων γεωολογικού που προέρχονται από την μεταβολή μηχανικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας (διόγκωση, ερπυσμός).
- Ικανοποίηση απαιτήσεων τραχύτητας και εμφάνισης της τελικής επιφάνειας της μόνιμης επένδυσης.

- Ανάλυση δράσεων από μελλοντικές κατασκευές που προβλέπονται να γίνουν κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας.
- Δράσεις από τη λειτουργία της σήραγγας, όπως πχ: κυκλοφορία οχημάτων ή συρμών, υδραυλικά φορτία κ.α.
- Σεισμική δράση κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου.
- Ικανοποίηση απαιτήσεων πυραντίστασης – πυρασφάλειας.
- Αντιμετώπιση περιβαλλοντικών επιδράσεων.
- Αντιμετώπιση δράσεων από κατασκευαστικές δραστηριότητες και δράσεις ή καταναγκασμούς από την ίδια την επένδυση.

Παρά το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πάρα πολλά χιλιόμετρα σηράγγων ανά την Ελλάδα, μόλις τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να κατανοηθούν και να προσομοιωθούν τα φορτία που καλείται να παραλάβει η μόνιμη επένδυση. Η κοινή πρακτική στη μελέτη των σηράγγων ήταν να υπολογίζεται διεξοδικά η προσωρινή υποστήριξη, ενώ η μόνιμη αντιμετωπιζόταν μόνο σαν ένα δομοστατικό και όχι και σαν γεωτεχνικό πρόβλημα. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια, σε ερευνητικό ακόμα επίπεδο, να μελετηθούν, να υπολογιστούν και να τυποποιηθούν τα φορτία που ασκούνται στη μόνιμη επένδυση των σηράγγων.

Στα πλαίσια της παραπάνω έρευνας, εκπονείται και η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, σκοπός της οποίας είναι να μελετήσει την επίδραση στις φορτίσεις στη μόνιμη επένδυση μιας σήραγγας, λόγω της κατασκευής μιας δεύτερης εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης. Η ιδέα για την συγκεκριμένη μελέτη προήλθε από το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια, λόγω νομοθεσίας, για λόγους ασφαλείας όλες οι οδικές σήραγγες πρέπει να είναι δίδυμες. Έτσι, είτε έχουμε σύγχρονη κατασκευή και των δύο κλάδων, είτε έχουμε την κατασκευή νέου κλάδου, δίπλα σε παλαιότερο. Η δεύτερη περίπτωση, η οποία προφανώς είναι και η δυσμενέστερη από πλευράς αύξησης των φορτίων στην μόνιμη επένδυση, θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

2) ΦΟΡΤΙΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, τα κυριότερα φορτία που καλείται να αναλαμβάνει η τελική επένδυση είναι:

- Φορτία από την περιβάλλουσα βραχώμαζα, πιθανότατα αυξημένα λόγω ερπυστικών παραμορφώσεων.
- Φορτία από την απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης (αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)
- Πιέσεις υδάτων
- Σεισμική δράση.
- Μόνιμα φορτία.
- Κινητά φορτία.
- Τυχηματικά φορτία.
- Φορτία καταναγκασμού (λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, διόγκωσης κ.α.).
- Φορτία από μελλοντικές κατασκευές.

2.1) Φορτία από την περιβάλλουσα βραχώμαζα

Η φόρτιση της τελικής επένδυσης από το περιβάλλον γεωυλικό, πέραν των φορτίων που αρχικά είχαν αναληφθεί από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, οφείλεται κυρίως σε φαινόμενα διόγκωσης και ερπυσμού του γεωυλικού εξαιτίας των διατμητικών τάσεων από τη διάνοιξη της σήραγγας .

Ερπυσμός είναι το φαινόμενο της συνεχούς αύξησης των παραμορφώσεων του γεωυλικού υπό σταθερό εντατικό πεδίο. Η κατασκευή, όμως, της τελικής επένδυσης παρεμποδίζει την εκδήλωση των μακροχρόνιων παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα τη συνεχή και αυξανόμενη φόρτισή της. Έντονη ερπυστική συμπεριφορά παρουσιάζουν κυρίως τα εδαφικά υλικά και οι μαλακοί ή αποσθρωμένοι βράχοι. Το μέγεθος των φορτίων λόγω ερπυσμού εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού και το ύψος υπερκειμένων, καθώς και το χρόνο κατασκευής της τελικής επένδυσης (Καββαδάς, 2004).

Το φαινόμενο της διόγκωσης παρουσιάζεται σε ορισμένους αργιλικούς εδαφικούς σχηματισμούς ή σε βραχώμαζες με μεγάλη περιεκτικότητα σε ορισμένα αργιλικά ορυκτά. Η εκσκαφή της σήραγγας προκαλεί μείωση της μέσης τάσης στην πλαστική περιοχή και ανάπτυξη αρνητικής πίεσης πόρων με αποτέλεσμα την απορρόφηση ποσότητας ύδατος από

το γεωυλικό και τη διόγκωσή του. Εφόσον η κατασκευή της τελικής επένδυσης δεν επιτρέπει την εξέλιξη του φαινομένου, παρατηρείται ανάπτυξη πιέσεων του γεωυλικού σε αυτή.

2.2) Φορτία από την απαξίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Τα φορτία που αναλαμβάνονται αρχικά από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, όπως είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα αγκύρια και τα μεταλλικά πλαίσια, μεταφέρονται σταδιακά στην τελική επένδυση της σήραγγας μέσα στην τεχνική διάρκεια ζωής του έργου. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από κατασκευής είναι σχεδιασμένο με μικρότερους συντελεστές ασφαλείας, αφού ο σκοπός του είναι βραχυπρόθεσμος. Η απαξίωση του έγκειται στο γεγονός ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη ερπυστική συμπεριφορά, οπότε σταδιακά όλο το φορτίο που κρατάει μεταφέρεται στη μόνιμη επένδυση. Τα αγκύρια από την άλλη απαξιώνονται λόγω της διάβρωσης που υφίστανται τα υλικά κατασκευής τους. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι τα αγκύρια από κατασκευής τους είναι πακτωμένα στη βραχώμαζα. Σταδιακά λόγω ερπυσμού της περιβάλλουσας βραχώμαζας το ένα άκρο μετακινείται προς το άλλο. Έτσι η δράση του αγκυρίου, η οποία βασίζεται στον εφελκυσμό μειώνεται αρκετά. Έτσι σταδιακά όλα τα φορτία που παραλάμβανε η προσωρινή υποστήριξη μεταφέρονται στη μόνιμη και μάλιστα η μόνιμη υποστήριξη καλείται να παραλάβει και φορτία από το ίδιο βάρος των υλικών που αποτελείται η προσωρινή.

2.2) Φορτία από πιέσεις υδάτων

Οι υδατικές πιέσεις στην τελική επένδυση της σήραγγας εξαρτώνται από τη θέση της σήραγγας σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα, από τον τρόπο κατασκευής της και από τη λειτουργία της. Διακρίνονται σε εξωτερικές όταν η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και σε εσωτερικές σε περίπτωση που η σήραγγα λειτουργεί ως αγωγός νερού υπό πίεση. Συνήθως για την αποτόνωση των πολύ υψηλών υδατικών πιέσεων κατασκευάζεται ειδικό σύστημα αποστράγγισης με γεωσυνθετικά υλικά.

2.3) Φορτία από σεισμική δράση

Η συμπεριφορά των σιηράγγων σε σεισμό εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία της σε σχέση με το περιβάλλον γεωυλικό. Συνήθως το περιβάλλον γεωυλικό είναι πολύ «άκαμπτο» σε σχέση με την τελική επένδυση της σιηραγγας, με αποτέλεσμα το έργο να παρακολουθεί την κίνηση του γεωυλικού, χωρίς την ανάπτυξη επιπλέον φορτίων (Καββαδάς, 2005). Συνεπώς, η σεισμική φόρτιση των σιηράγγων ανάγεται σε κινηματική επιβολή των σεισμικών παραμορφώσεων του εδάφους (Κόλιας, 2004), οι οποίες όμως παραλαμβάνονται ευχερώς από τους αρμούς της τελικής επένδυσης.

2.4) Μόνιμα φορτία

Τα μόνιμα φορτία προέρχονται κυρίως από το ίδιο βάρος της επένδυσης, τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και από υπάρχουσες, ή επί πρόσθετες κατασκευές, όπως οι ράγες σε μια σιδηροδρομική σιηραγγα ή το βάρος των υλικών κατασκευής του οδοστρώματος σε μια οδική σιηραγγα.

2.5) Κινητά φορτία

Τα κινητά φορτία που ασκούνται στην τελική επένδυση της σιηραγγας (μόνο για κλειστές διατομές), οφείλονται στο βάρος των οχημάτων σε μια οδική σιηραγγα, είτε στο βάρος των συρμών όταν πρόκειται για σιδηροδρομική.

2.6) Τυχηματικά φορτία

Πρόκειται για φορτία που υπάρχει πιθανότητα να καταπονήσουν την μόνιμη επένδυση, όπως πχ η σύγκρουση δύο οχημάτων σε μια σιηραγγα, ή η περίπτωση πυρκαγιάς.

2.7) Φορτία καταναγκασμού

Ως φορτία καταναγκασμού θεωρούνται η θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς και η συστολή ξήρανσης και ο ερπυσμός του σκυροδέματος της τελικής επένδυσης. Στο σχεδιασμό της τελικής επένδυσης λαμβάνονται υπόψη θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ εσωτερικής παρειάς και εξωραχίου της τελικής επένδυσης και θερμοκρασιακές μεταβολές στο σύνολο του έργου. Η συστολή ξήρανσης, και ο ερπυσμός του σκυροδέματος λαμβάνονται υπόψη ως ισοδύναμη θερμοκρασιακές μεταβολές.

2.8) Φορτία από μελλοντικές κατασκευές

Πρόκειται για πρόσθετα φορτία που μπορούν να επιβληθούν στη μόνιμη επένδυση από επιφανειακές ή υπόγειες κατασκευές που πρόκειται να πραγματοποιηθούν.

3) ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ

Για τον προσδιορισμό των φορτίων που αναφέρονται εφαρμόζονται εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.1) Εμπειρικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές δίνουν το κατακόρυφο και οριζόντιο φορτίο που ασκείται στην τελική επένδυση των σηράγγων μέσω εμπειρικών τύπων, που περιλαμβάνουν ως κύριες παραμέτρους την ποιότητα της βραχώμαζας και τις διαστάσεις της σήραγγας. Ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο γίνονται ορισμένες παραδοχές, οι οποίες αφορούν κυρίως το βάθος της σήραγγας, την ακαμψία της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη των φορτίων με αποτέλεσμα, τα φορτία που υπολογίζουν αυτές οι μέθοδοι να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Σε αυτές τις μεθόδους συγκαταλέγονται η μέθοδος μέσω του δείκτη RMR (Bieniawski), η μέθοδος μέσω του δείκτη Q (Barton) καθώς και η εμπειρική μέθοδος Terzaghi.

3.1.1) Μέθοδος μέσω του δείκτη RMR.

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Unal το 1983 και υπολογίζει την κατακόρυφη και την οριζόντια πίεση στην μόνιμη επένδυση της σήραγγας μέσω του δείκτη RMR. Ο υπολογισμός των πιέσεων γίνεται για σήραγγες εύρους 5 - 10 μέτρων, που διανοίχθηκαν με συμβατικές μεθόδους σε βραχώμαζες με τιμές RMR > 50 και βάθη έως 100 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Τα φορτία που προκύπτουν στην τελική επένδυση είναι σχετικά μικρά λόγω των ανωτέρω παραδοχών.

3.1.2) Μέθοδος μέσω του δείκτη Q (Barton)

Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό των φορτίων στη μόνιμη επένδυση με βάση τον εμπειρικό δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας (Q). Η μέθοδος αφορά την εκτίμηση των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση σήραγγων που έχουν διανοιχθεί με συμβατικές μεθόδους και τα μέτρα υποστήριξης έχουν σχεδιασθεί σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο του NGI. Η μέθοδος κάνει την παραδοχή ότι οι βραχώμαζες είναι σχετικώς καλής ποιότητας ($Q > 0.05$). Για τιμές $Q < 0.05$ προκύπτουν πολύ υψηλές μη ρεαλιστικές τιμές πίεσης στην μόνιμη επένδυση της σήραγγας.

3.1.3) Μέθοδος Terzaghi

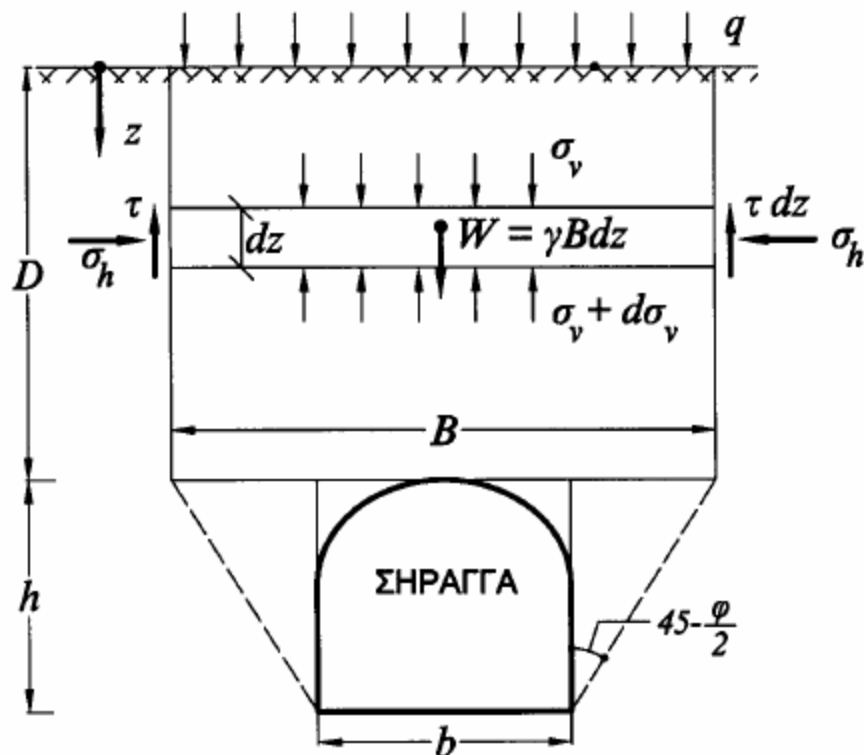
Με τη μέθοδο αυτή, η οποία προτάθηκε από τον Terzaghi τη δεκαετία του 1940, υπολογίζεται η κατακόρυφη πίεση γαιών στην οροφή της σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα της βραχώμαζας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας (εύρος και ύψος). Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι πρώτον ότι εφαρμόζεται μόνο σε σήραγγες που μπορεί να αναπτυχθεί πλήρως το φαινόμενο του θόλου πάνω από τη στέψη της σήραγγας και δεύτερον ότι ισχύει μόνο για σήραγγες με εύρος έως και 5 μέτρα, ενώ η υποστήριξη γίνεται από ξύλινες δοκούς και μεταλλικά πλαίσια, μέθοδος που πλέον έχει εγκαταλειφθεί.

3.2) Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στην εκτίμηση των διαστάσεων μιας εδαφικής μάζας πάνω από τη στέψη της σήραγγας, η οποία φορτίζει την επένδυση. Η τελική φόρτιση προκύπτει μέσω αναλυτικών σχέσεων που προκύπτουν από επίλυση διαφορικών εξισώσεων με κύριες παραμέτρους τα χαρακτηριστικά του γεωυλικού και τις διαστάσεις της σήραγγας. Οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η μέθοδος Terzaghi και η μέθοδος Protodyakonov.

3.2.1) Μέθοδος Terzaghi

Η μέθοδος Terzaghi διακρίνει δύο υποπεριπτώσεις. Η μία είναι για σήραγγες σε μικρά βάθη και η άλλη για σήραγγες σε μεγάλα βάθη. Η βασική αρχή της είναι ότι θεωρεί ένα εδαφικό στρώμα πάνω από τη στέψη τραπεζοειδούς σχήματος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3-1: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση της σήραγγας κατά τη μέθοδο Terzaghi

Σήραγγες σε μικρά βάθη:

Σε αυτή τη περίπτωση γίνεται υπολογισμός των φορτίων από το χαλαρωμένο υπερκείμενο γεωυλικό θεωρώντας ύψος επιρροής 2,5 διαμέτρους της σήραγγας. Η επιρροή της χαλάρωσης φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και έτσι δεν αναπτύσσεται πλήρες εδαφικό τόξο πάνω από την στέψη της σήραγγας.

Σήραγγες σε μεγάλα βάθη

Σε αυτή τη περίπτωση η κατασκευή της σήραγγας δεν επηρεάζει τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις, οι οποίες απλώς φορτίζουν με το ίδιο βάρος τους το εδαφικό τόξο. Έτσι εμφανίζεται φαινόμενο θόλου πάνω από τη στέψη της σήραγγας.

3.2.2) Μέθοδος Protodyakonov

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για την ανάγκες της κατασκευής του μετρό της Μόσχας. Η μέθοδος Protodyakonov αναπτύχθηκε για σήραγγες σε μικρά σχετικά βάθη και βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας ($RMR > 40$). Δεν ενδείκνυται για εφαρμογή σε σήραγγες σε μεγάλα βάθη γιατί υποεκτιμά τις τιμές των φορτίων. Στην μέθοδο αυτή, σε αντίθεση με την μέθοδο Terzaghi, επιλέγεται παραβολική εδαφική μάζα που φορτίζει τη στέψη της σήραγγας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3-2: Εκτίμηση φορτίων στην επένδυση της σήραγγας κατά τη μέθοδο Protodyakonov

3.3) Αριθμητικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της επένδυσης της σήραγγας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας, λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση των

φορτίων της επένδυσης από τον βαθμό ενεργοποίησης της αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανάληψη φορτίων από τις υπερκείμενες γαίες.

Η πλέον διαδεδομένη αριθμητική μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Κατά την μέθοδο αυτή, γίνεται προσομοίωση της πλήρους αλληλουχίας των φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας, οπότε λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ της βραχώμαζας και της επένδυσης. Η προσομοίωση του περιβάλλοντος εδάφους γίνεται με διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και η μόνιμη επένδυση της σήραγγας με στοιχεία δοκού. Η ανάλυση γίνεται με την παρακολούθηση των διαδοχικών σταδίων εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας.

4) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε στην Εισαγωγή, σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να υπολογιστεί η επίδραση στα φορτία που ασκούνται στη μόνιμη επένδυση, λόγω της διάνοιξης μιας δεύτερης εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης. Για τη γεωμετρική απεικόνιση του προβλήματος και το σχεδιασμό του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων MSC Patran και στην συνέχεια η μαθηματική επίλυση και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

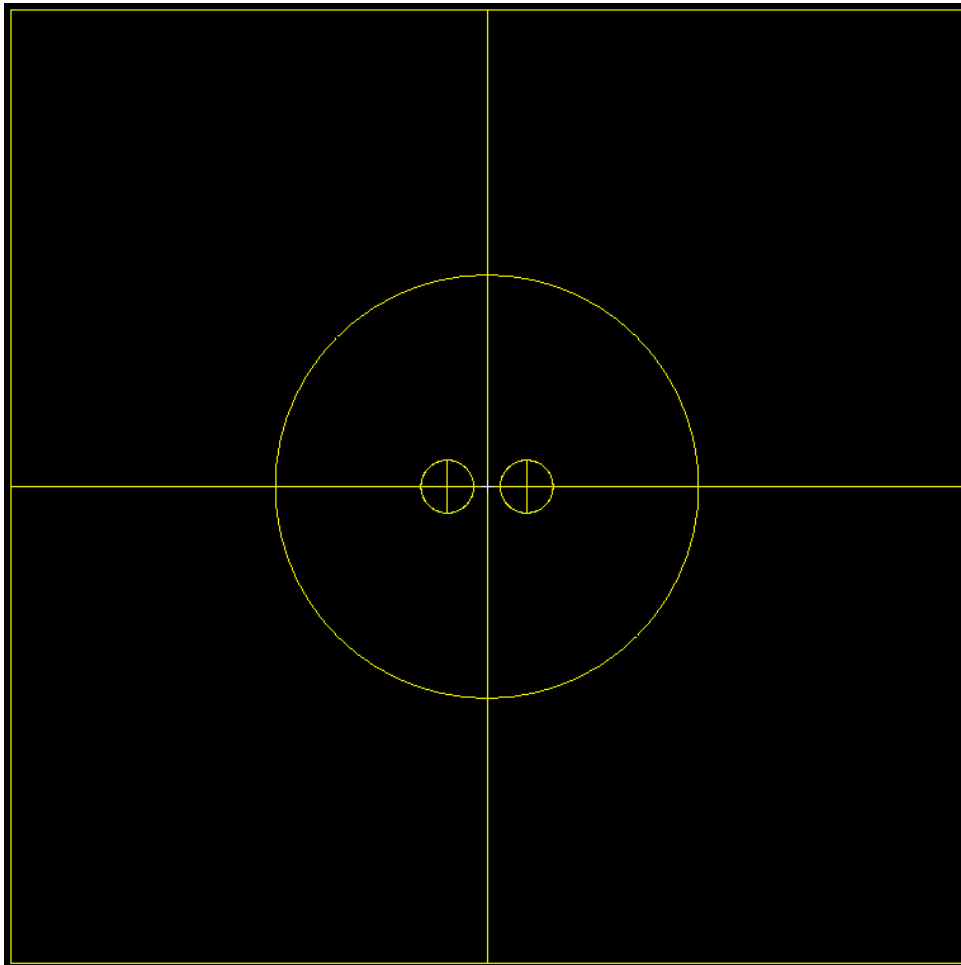
Για την απλοποίηση του μοντέλου μελέτης θεωρήθηκε ότι επικρατούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και κατά συνέπεια το πρόβλημα προσομοιώθηκε ως διδιάστατο και όχι ως τριδιάστατο.

4.1) Προσομοίωση της γεωμετρίας

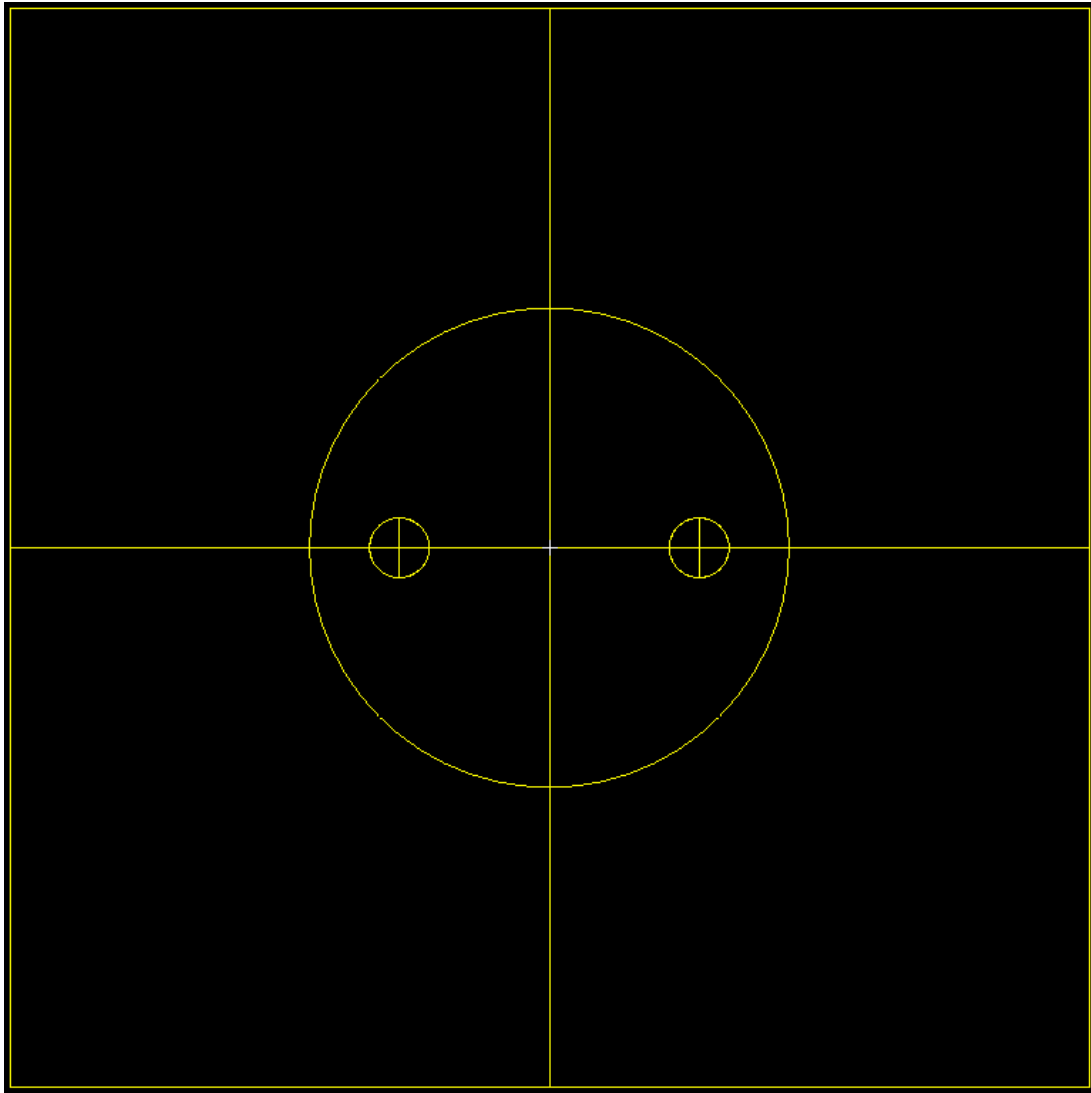
Η προσομοίωση της γεωμετρίας, όπως προαναφέρθηκε, έγινε με τη χρήση του προγράμματος MSC Patran. Οι δύο σήραγγες ήταν κυκλικές, διαμέτρου 10 μέτρων. Η επιλογή του σχήματος έγινε για λόγους γενίκευσης των αποτελεσμάτων και η διάμετρος επιλέχθηκε να είναι 10 μέτρα, καθώς οι περισσότερες οδικές σήραγγες συνήθως απαιτούν τέτοιες διαστάσεις. Οι αξονικές αποστάσεις μεταξύ των δύο σηράγγων επιλέχθηκαν να είναι 15, 20, 30, 40, 50 μέτρα αντίστοιχα. Η επιλογή των αποστάσεων αυτών έγινε για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των σηράγγων από απόσταση που αναμένεται να είναι πολύ έντονη (15 μέτρα), μέχρι την απόσταση που θεωρητικά δεν θα πρέπει να υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση (50 μέτρα, δηλαδή 2.5 D από την κάθε μία). Γύρω από τις δύο σήραγγες σχεδιάστηκε κυκλικός δακτύλιος διαμέτρου 80 μέτρων, μέσα στον οποίο τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν διάσταση 1 μέτρου, ενώ εκτός του δακτυλίου υπάρχει σταδιακή αραιώση του καννάβου, φτάνοντας στα ακραία πεπερασμένα στοιχεία να έχουν διάσταση 3 μέτρα. Η επιλογή έγινε λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, αλλά και την οικονομία χρόνου και χώρου για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ιδιαίτερη σημασία, για την ακρίβεια των αναλύσεων και την οικονομία χρόνου και χώρου για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, έπαιξε και η συνολική διάσταση του μοντέλου. Για να μην υπάρχει σημαντική επιρροή συνόρου στους υπολογισμούς, αλλά ούτε και μεγάλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων, κάτι που θα οδηγούσε στην αύξηση του χρόνου των αναλύσεων και του αποθηκευτικού χώρου που θα καταλάμβανε στο δίσκο, επιλέχθηκαν τα

όρια του μοντέλου να έχουν απόσταση από τον κυκλικό δακτύλιο, που περιβάλλει τις δύο σήραγγες, 50 μέτρα. Αυτές οι διαστάσεις του καννάβου βοηθούν έτσι ώστε να μην υπάρχει επιρροή συνόρου στη μέγιστη αξονική απόσταση, ενώ παράλληλα δεν αυξάνουν υπερβολικά τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων για τις υπόλοιπες αξονικές αποστάσεις. Έτσι η γεωμετρία του προβλήματος για τις δύο ακραίες αξονικές αποστάσεις φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



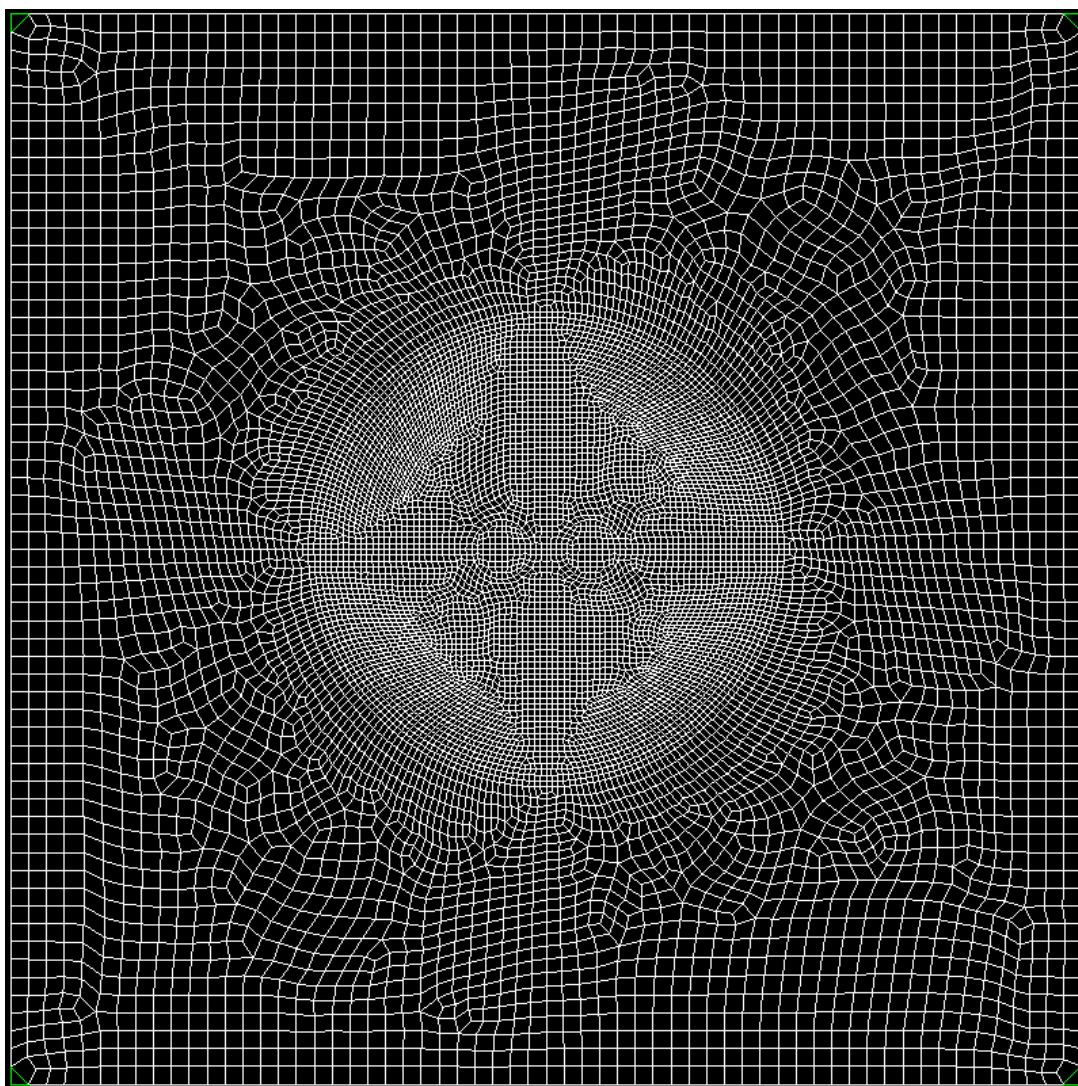
Εικόνα 4-1: Γεωμετρία προβλήματος για αξονική απόσταση 15 μέτρων



Εικόνα 4-2: Γεωμετρία προβλήματος για αξονική απόσταση 50 μέτρων

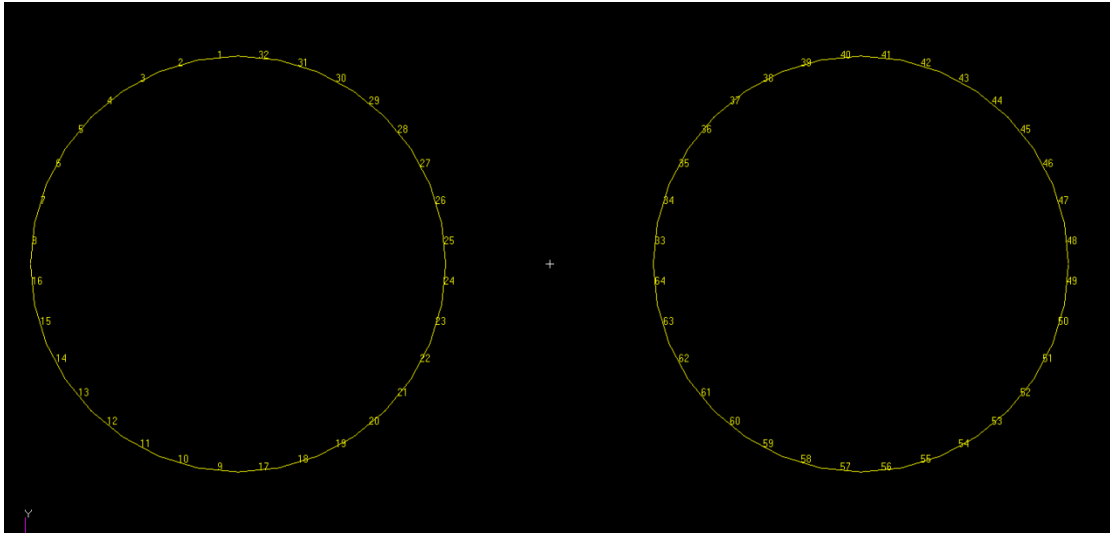
4.2) Διακριτοποίηση του μοντέλου

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία. Σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκαν και τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, λόγω ανάγκης συμπλήρωσης του καννάβου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εντός του κυκλικού δακτυλίου ο κάνναβος είναι πιο πυκνός (με διάσταση πεπερασμένων στοιχείων 1 μέτρο), ενώ εκτός του δακτυλίου υπήρχε σταδιακή αραίωση (με διάσταση πεπερασμένων στοιχείων έως 3 μέτρα). Η διακριτοποίηση του μοντέλου φαίνεται στη παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4-3: Διακριτοποίηση του μοντέλου

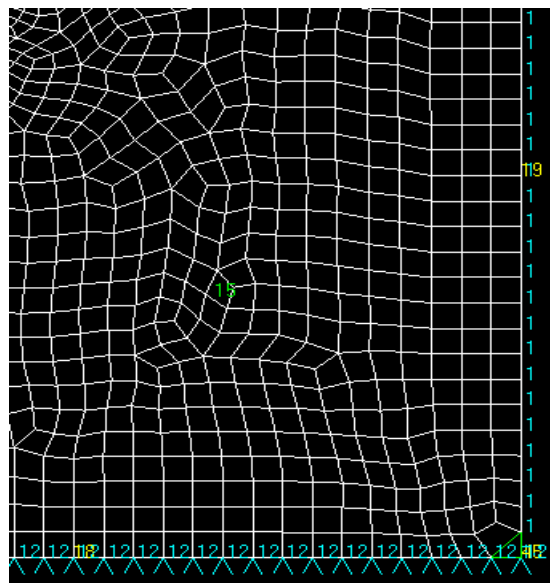
Η μόνιμη επένδυση των δύο σηράγγων προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού διάστασης ενός μέτρου. Συνολικά, στις δύο σήραγγες η μόνιμη επένδυση προσομοιώνεται με 64 στοιχεία δοκού. Η διακριτοποίηση των στοιχείων δοκού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4-4: Προσομοίωση στοιχείων δοκού

4.3) Συνοριακές συνθήκες

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, τοποθετήθηκαν κυλίσεις στα πλευρικά όρια του μοντέλου, ώστε να επιτρέπονται οι μετακινήσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση δίχως την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων και αρθρώσεις στο κάτω όριο του μοντέλου, έτσι ώστε να μην επιτρέπονται μετακινήσεις.



Εικόνα 4-5: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου

4.4) Παράμετροι αναλύσεων

4.4.1) Αξονική απόσταση

Όπως προαναφέρθηκε επιλέχθηκαν 5 αξονικές αποστάσεις. Οι αξονικές αποστάσεις μεταξύ των δύο σηράγγων επιλέχθηκαν να είναι 15, 20, 30, 40, 50 μέτρα αντίστοιχα. Η επιλογή των αποστάσεων αυτών έγινε για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των σηράγγων από μία απόσταση που αναμένεται να είναι πολύ έντονη (15 μέτρα), μέχρι την απόσταση που θεωρητικά δεν θα πρέπει να υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση (50 μέτρα, δηλαδή 2.5 D από την κάθε μία). Επειδή εκτιμήθηκε ότι η αλληλεπίδραση θα μειώνεται εκθετικά με την απόσταση, επιλέχθηκε η πύκνωση των αναλύσεων στις κοντινές αποστάσεις και η αραιώση όσο αυξάνει. Ο σκοπός ήταν να είναι πιο φανερό το σημείο καμπής της καμπύλης που αναμένεται.

4.4.2) Συντελεστής γεωστατικών πιέσεων K

Ο συντελεστής K στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε να πάρει τρεις τιμές. Έτσι έγιναν αναλύσεις για τιμές K 0.5, 1, 1.5. Η επιλογή της τιμής K=0.5 έγινε για να προσομοιώσει εντατικές καταστάσεις, στις οποίες οι κατακόρυφη τάση είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια. Αυτό είναι πολύ συνηθισμένο σε βραχώμαζες σε βάθη που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η επιλογή της τιμής K=1 έγινε για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των σηράγγων σε ομογενές τασικό πεδίο, όπου η κατακόρυφη και η οριζόντια τάση είναι ίσες. Τέλος, η επιλογή της τιμής K=1.5 έγινε για να μελετηθεί το φαινόμενο όταν η οριζόντια τάση είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη. Παρόλο που στα βάθη που μελετώνται στην εργασία αυτή είναι πολύ σπάνιο να συναντηθεί η τιμή του K = 1.5, δεν μπορούμε να παραλείψουμε το γεγονός ότι βρισκόμαστε στον Ελλαδικό χώρο, όπου υπάρχει πολύ έντονη τεκτονική δραστηριότητα. Έτσι, για παράδειγμα στη περίπτωση ενός σύγκλινου είναι πολύ πιθανό ο συντελεστής K να παίρνει την τιμή 1.5.

4.4.3) Ύψος υπερκειμένων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε οι αλληλεπίδραση δύο σήραγγων για βάθη 100 και 200 μέτρων. Τα βάθη επιλέχθηκαν για να μελετηθούν σήραγγες σε μεγάλο βάθος για να μην υπάρχει επίδραση του άνω συνόρου. Επιλέχθηκαν μόνο δύο τιμές καθώς παρατηρήθηκε ότι, παρόλο που υπάρχει αύξηση στην απόλυτη τιμή των πιέσεων στη μόνιμη επένδυση, η αύξηση των πιέσεων από μία σήραγγα σε δύο ήταν σχεδόν η ίδια. Άρα με κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων η επίδραση του ύψους των υπερκειμένων είναι στη πραγματικότητα πολύ μικρή.

4.4.4) Ποιότητα βραχώμαζας

Σε όλες τις αναλύσεις επιλέχθηκε το ειδικό βάρος γ να είναι 25 KN/m^3 , ενώ ο δείκτης Poisson ν επιλέχθηκε να είναι 0.3, αφού στα περισσότερα πετρώματα οι δύο παράμετροι έχουν περίπου αυτές τις τιμές, ενώ οι αλλαγές είναι πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά τις αναλύσεις. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των βραχώμαζων που μελετήθηκαν ποικίλουν. Η κύρια επιλογή ήταν ο λόγος σ_{cm} / p_o , ο οποίος πήρε τιμές από 0.15 έως 1.5. Αναλυτικότερα, για τιμές GSI 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 και m_i 6 και 10 και σ_{ci} 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30 Mpa, μέσω του προγράμματος Roclab υπολογίστηκαν οι τιμές για τις παραμέτρους m , s , a του κριτηρίου Hoek - Brown. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες παράμετροι c και ϕ του κριτηρίου Mohr - Coulomb. Τέλος, υπολογίστηκαν οι παράμετροι β και d του κριτηρίου Drucker - Prager, το οποίο είναι και το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.

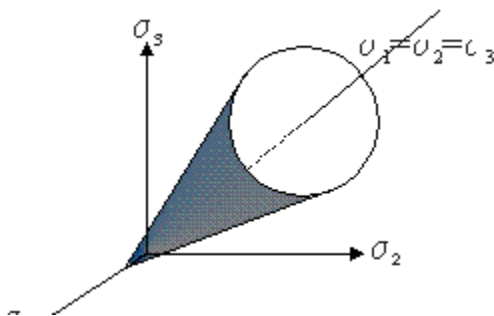
Το κριτήριο αστοχίας Drucker - Prager

Το κριτήριο Drucker-Prager χρησιμοποιείται για να περιγράψει υλικά τα οποία συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την τάση αστοχίας, ενώ για τάσεις μεγαλύτερες από την τάση αστοχίας, τα υλικά παραμορφώνονται πλαστικά (Itasca, 2006). Αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Von Mises, συσχετίζοντας την επιφάνεια διαρροής με την μέση πίεση p_m . Ως παράμετροι αντοχής για τις αναλύσεις λαμβάνονται η γωνία τριβής β και η συνοχή d . Οι

παράμετροι αυτές συσχετίζονται με τις αντίστοιχες παραμέτρους c και ϕ από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb με τις παρακάτω σχέσεις.

$$\tan \beta = \sqrt{3} \sin \phi \quad \text{και} \quad \frac{d}{c} = \sqrt{3} \cos \phi$$

Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ το κριτήριο είναι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα

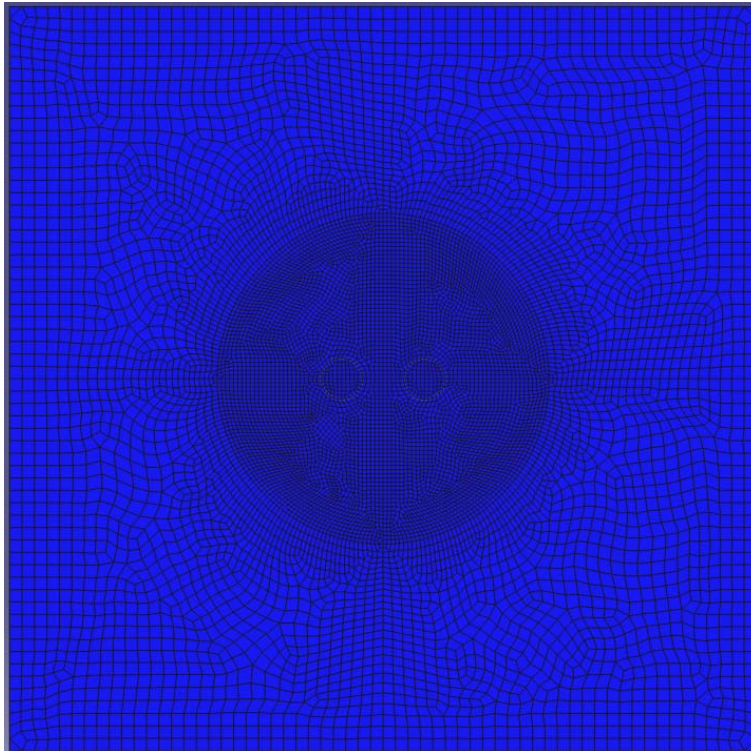


Εικόνα 4.4.4.1: Το κριτήριο αστοχίας Drucker-Prager

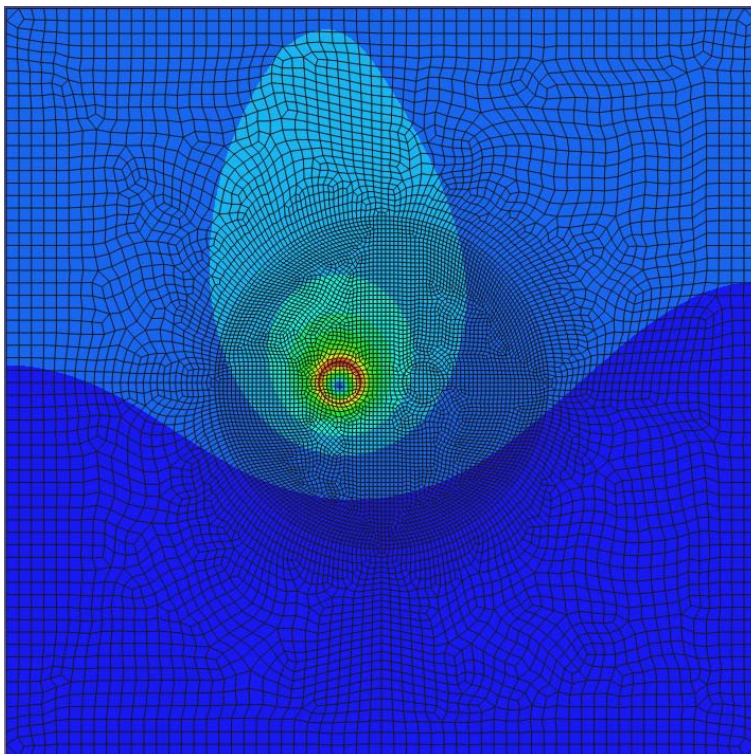
4.5) Στάδια ανάλυσης

Η ανάλυση αποτελείται από πέντε στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το γεωστατικό, δίνεται βάρος στο μοντέλο. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται αποτόνωση του αριστερού κλάδου, ενώ στο τρίτο γίνεται η εκσκαφή του αριστερού κλάδου. Αντίστοιχα, το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει την αποτόνωση του δεξιού κλάδου, ενώ στο πέμπτο γίνεται η εκσκαφή και του δεξιού κλάδου. Η αποτόνωση της βραχόμαζας γίνεται με απομείωση του μέτρου ελαστικότητας με βάση τις καμπύλες *Chern* (*Chern 1999*).

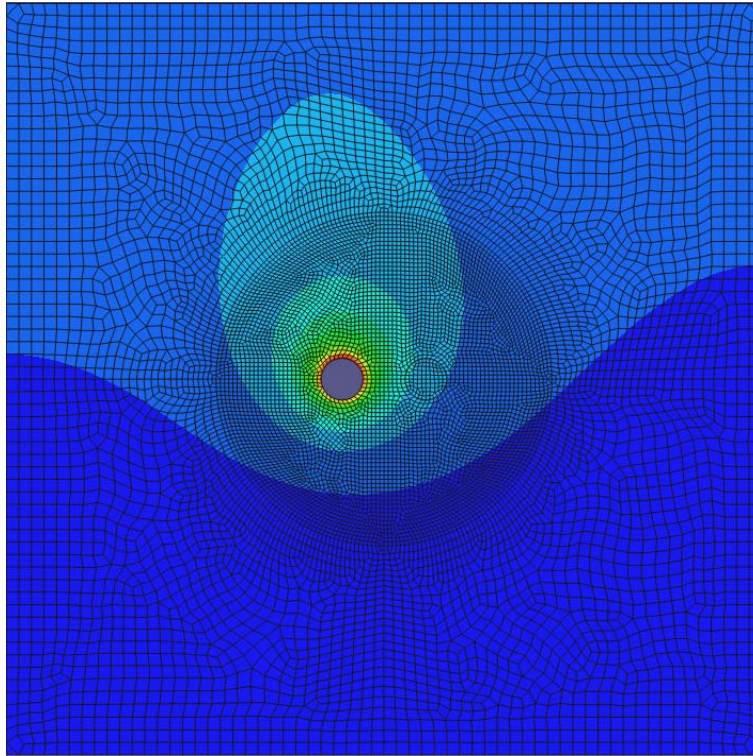
Τα στάδια ανάλυσης φαίνονται στις παρακάτω εικόνες: (Η ανάλυση που φαίνεται είναι για ύψος υπερκειμένων 200 μέτρα και $K = 1$)



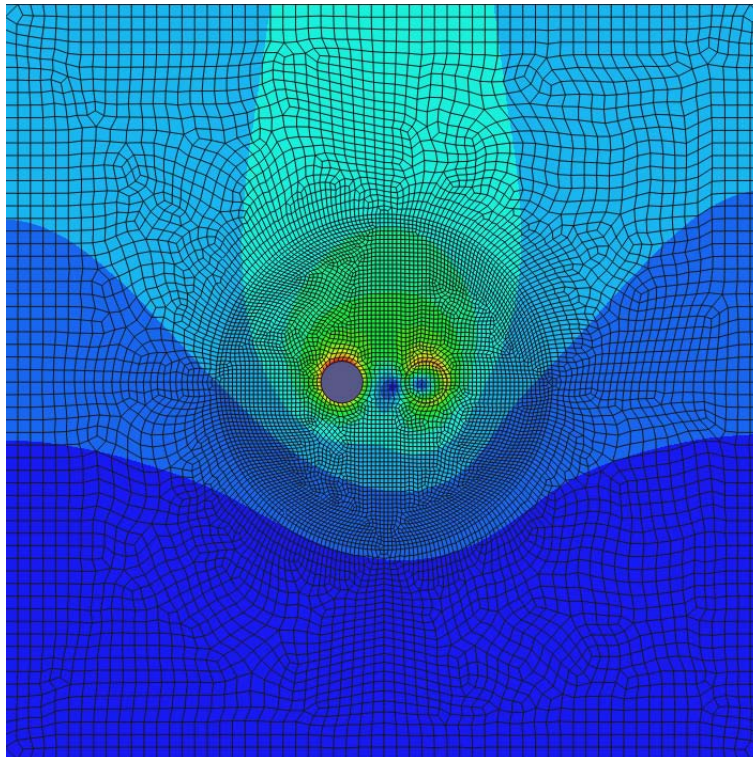
Εικόνα 4.5 1: Στάδιο 1



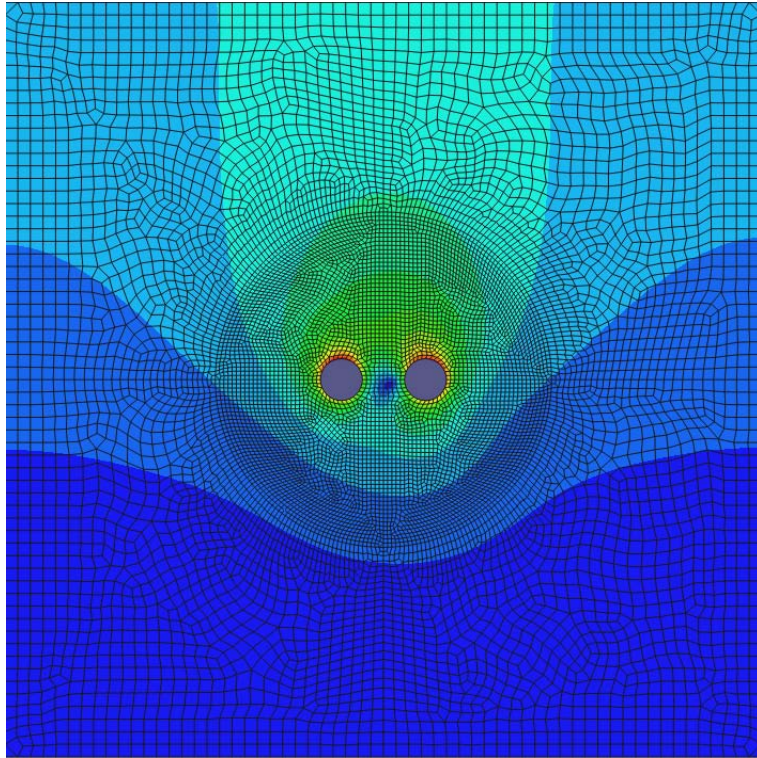
Εικόνα 4.5 2: Στάδιο 2: Χαλάρωση αριστερού κλάδου



Εικόνα 4.5 3: Στάδιο 3: Εκσκαφή αριστερού κλάδου



Εικόνα 4.5 4: Στάδιο 4: Χαλάρωση δεξιού κλάδου

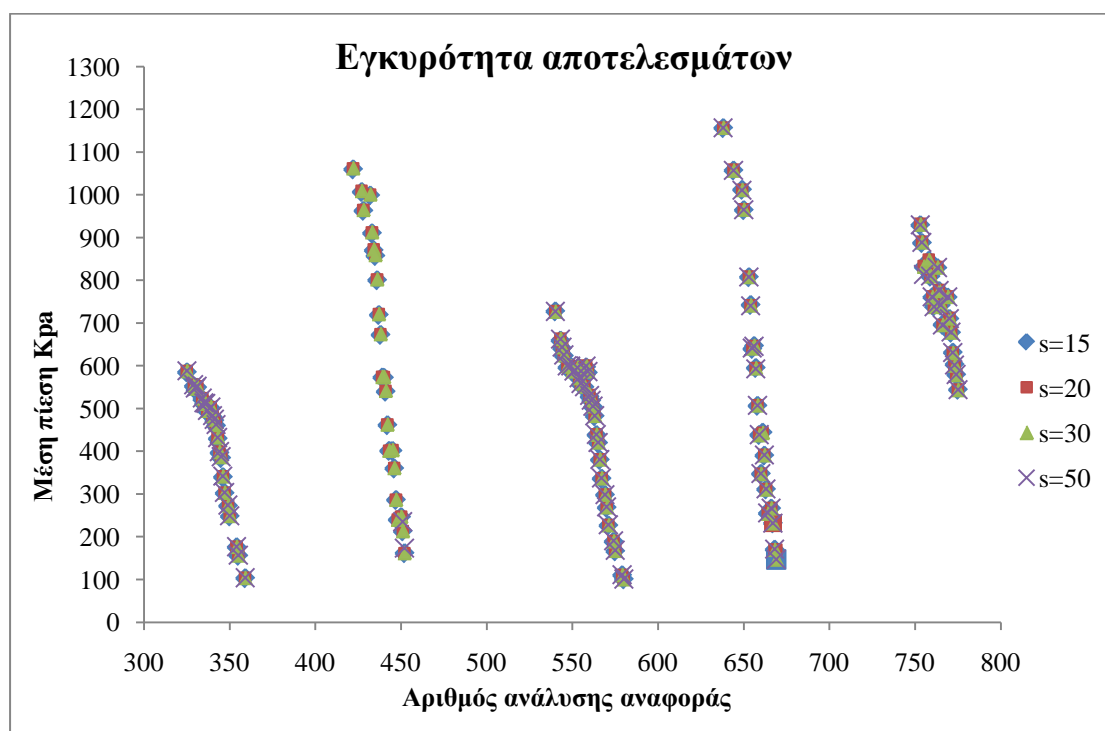


Εικόνα 4.5 5: Στάδιο 5: Εκσκαφή δεξιού κλάδου

5) ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όλες οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν προβλήματα ακρίβειας. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά υπολογίζονται κάποιες τιμές και στη συνέχεια τροποποιούνται για να περιοριστεί το σφάλμα. Έτσι είναι πιθανό, κάθε φορά που τρέχει μία ανάλυση σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα. Στόχος της επιλογής της κάθε μεθόδου είναι να περιορίσουμε την απόκλιση αυτή, μειώνοντας το επιτρεπόμενο σφάλμα ή πυκνώνοντας τον κάρναβο. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται έλεγχος ορθότητας των δεδομένων και των αποτελεσμάτων πριν και μετά από την κάθε ανάλυση. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα είναι εντελώς αυθαίρετα και χωρίς χρησιμότητα.

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για να εξεταστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων θα ελεγχθούν οι πιέσεις που ασκούνται στην μόνιμη επένδυση στο τρίτο στάδιο, δηλαδή μόνο όταν έχει εκσκαφτεί ο πρώτος κλάδος. Κανονικά, για να είναι σωστές οι αναλύσεις, θα πρέπει ανεξάρτητα από την επιλογή της θέσης της σήραγγας, για ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους, ύψους υπερκειμένων και συντελεστή γεωστατικών πιέσεων, η πίεση στη μόνιμη επένδυση να είναι οι ίδια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.1: Εγκυρότητα αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα 5.1, η μέση πίεση της μονής σήραγγας για κάθε ανάλυση με ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους, ύψος υπερκειμένων και συντελεστή γεωστατικών πιέσεων είναι ανεξάρτητη της γεωμετρίας του καννάβου. Συνολικά έγιναν 850 αναλύσεις οι οποίες για διαφορετικούς λόγους μειώθηκαν σε 444. Οι κύριοι λόγοι ήταν οι παρακάτω:

1. Η μέση πίεση στη μονή σήραγγα (3^ο στάδιο) δεν ήταν ίδια για όλες τις αξονικές αποστάσεις και άρα δεν υπήρχε σημείο κοινής αναφοράς.
2. Η μέση πίεση στο 3^ο στάδιο ήταν διαφορετική αν εκσκαπτόταν πρώτα ο δεξιός κλάδος.
3. Οι αναλύσεις για αξονική απόσταση 40 μέτρα απορρίφθηκαν όλες επειδή, κατά το τέταρτο στάδιο, ένα στοιχείο στην περιφέρεια της αριστερής σήραγγας αστοχούσε και εμφάνιζε υπερβολικά αποτελέσματα στις αναλύσεις.
4. Σε βραχόμαζες με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, τα στοιχεία αστοχούσαν από το γεωστατικό βήμα.

6) ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κρατώντας σταθερές κάποιες από τις παραμέτρους και παρατηρώντας την επίδραση αυτών στην ανάπτυξη πλαστικών ζωνών και στην εκδήλωση παραμορφώσεων, καθώς αυξάνει η αξονική απόσταση.

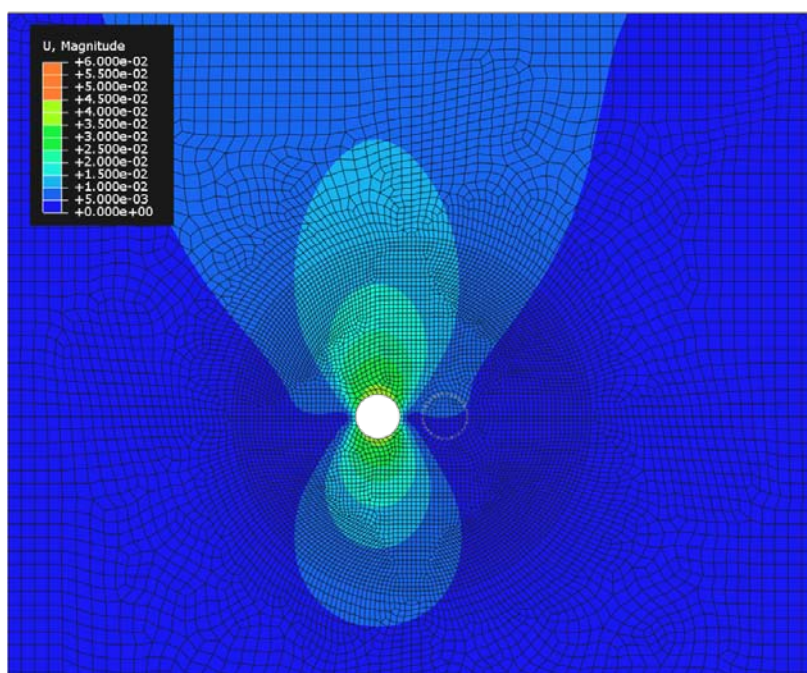
6.1) Επίδραση της αξονικής απόστασης στις μετατοπίσεις u

6.1.1) Επίδραση σε μικρής αντοχής βραχόμαζες

Για την ποιοτική αξιολόγηση της επίδρασης της αξονικής απόστασης σε ασθενείς βραχόμαζες, επιλέχθηκε να εξετασθεί βραχόμαζα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

GSI	m_i	σ_{ci}	K	H
20	6	10Mpa	0.5	100m

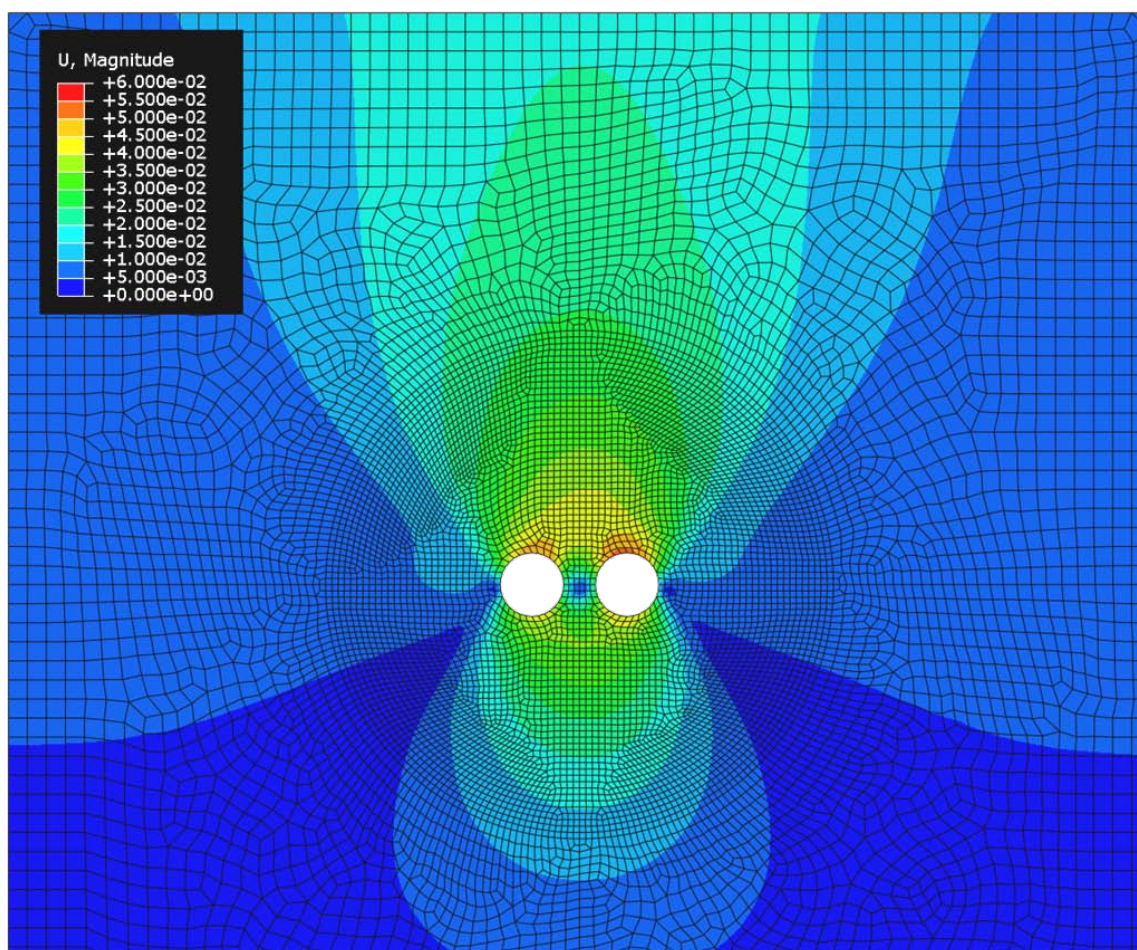
Μετατοπίσεις στη μονή σήραγγα



Εικόνα 6.1: Μετατοπίσεις σε μονή σήραγγα

Όπως παρατηρούμε η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην οροφή και έχει τιμή 4.2cm. Αυτό είναι λογικό από τη στιγμή που η κατακόρυφη τάση είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια.

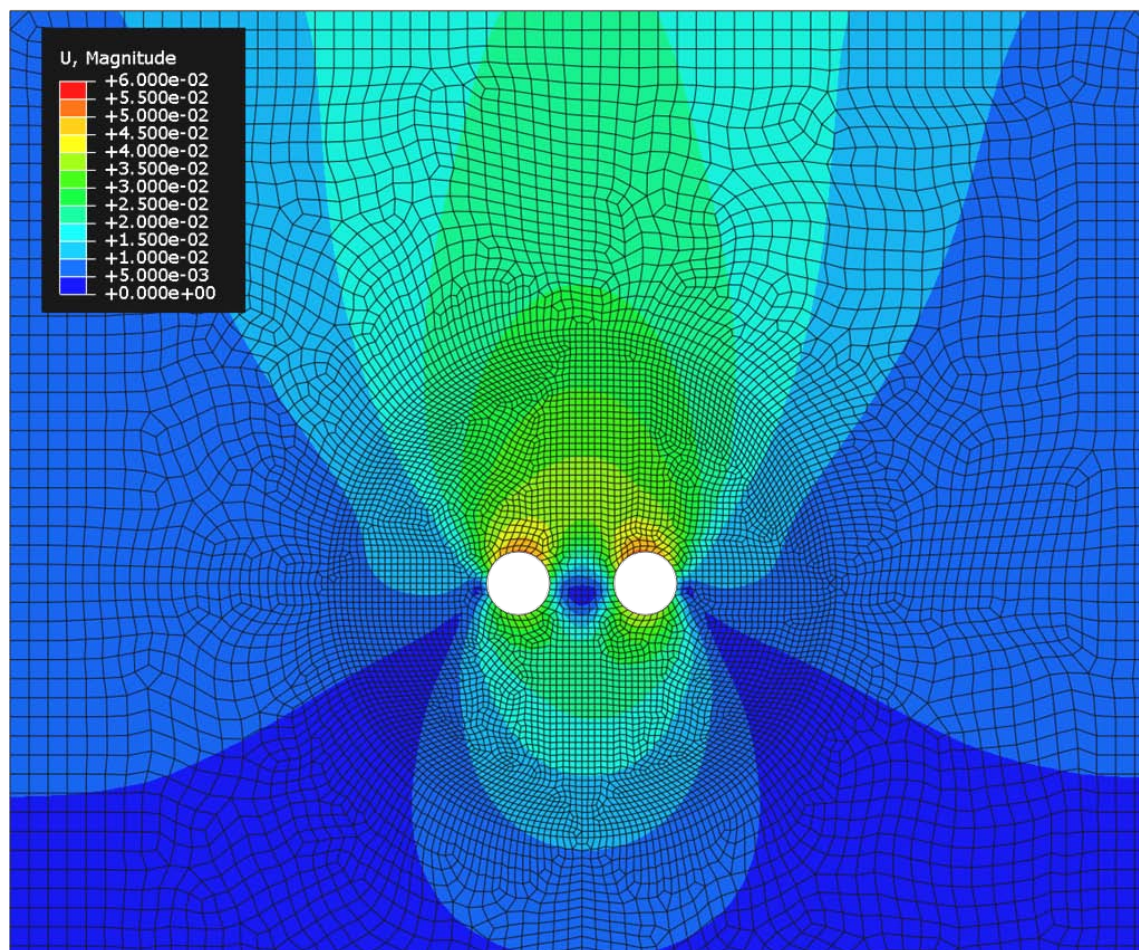
Αξονική απόσταση $s = 15\text{m}$



Εικόνα 6.2: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 15 μέτρα

Όπως φαίνεται η επίδραση της δεύτερης σήραγγας είναι πολύ μεγάλη. Η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται πλέον στα 5.6cm, ενώ φαίνεται ξεκάθαρα ότι δημιουργείται μια ζώνη μεγάλων μετατοπίσεων αρκετά μακριά από τις δύο σήραγγες. Το σχήμα αυτής της ζώνης είναι τέτοιο, από τη στιγμή που η κατακόρυφη τάση είναι μεγαλύτερη της οριζόντιας. Όσο θα μεγαλώνει η οριζόντια τάση, αναμένεται η ζώνη αυτή να μεγαλώνει κατά την οριζόντια και να μικραίνει κατά την κατακόρυφο.

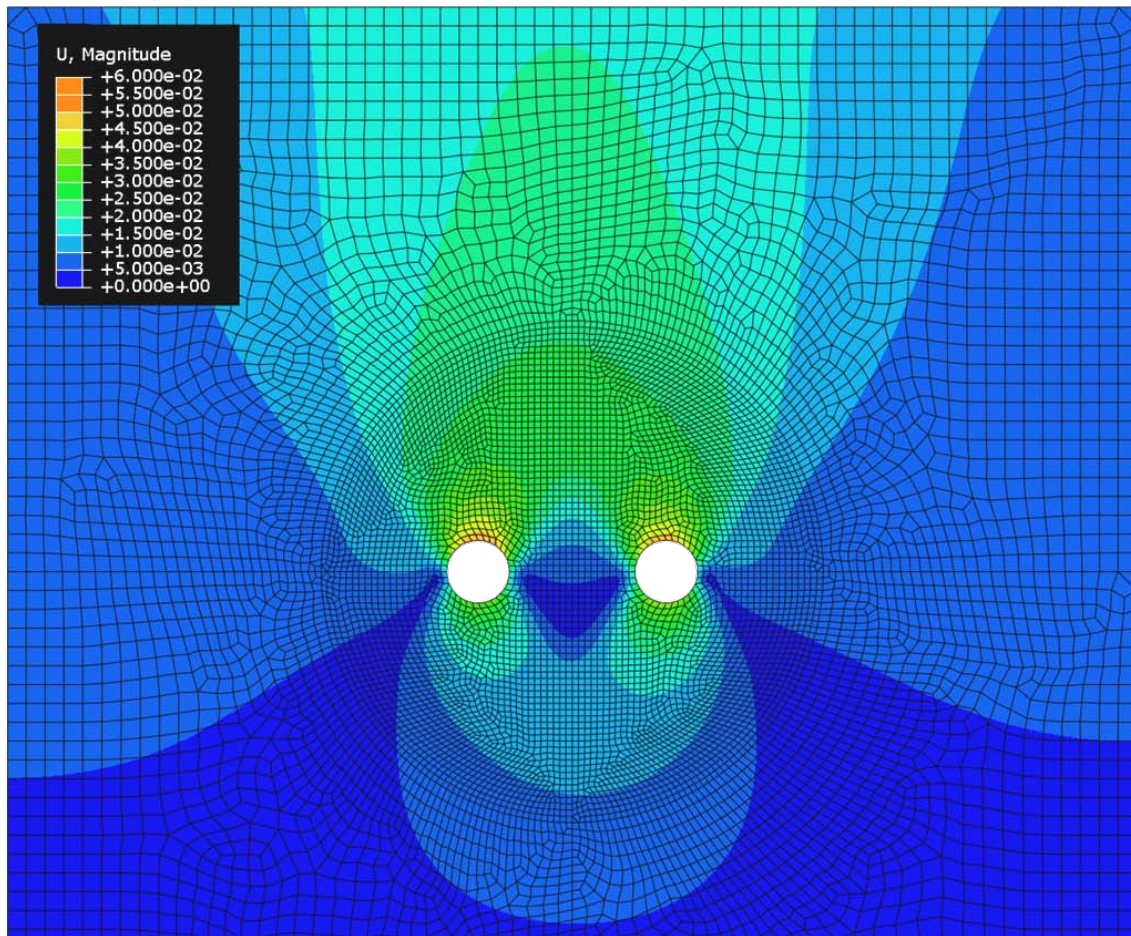
Αξονική απόσταση $s = 20m$



Εικόνα 6.3: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 20 μέτρα

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 6.3), η μικρή αύξηση της αξονικής απόστασης κατά 5 μέτρα έχει αρκετή διαφορά στην ανάπτυξη των μετατοπίσεων. Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην οροφή και έχει μέγεθος 5.15cm. Η αύξηση της απόστασης οδήγησε στη μείωση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων σε κάθε στοιχείο και έτσι επήλθε μείωση της ανάπτυξης των μετατοπίσεων. Επίσης, η ζώνη διαταραχής μεταξύ των δύο σηράγγων είναι σαφώς μικρότερη από την προηγούμενη εικόνα (Εικόνα 6.2). Στις επόμενες εικόνες (Εικόνα 6.4, Εικόνα 6.5), θα παρατηρηθεί δραματική μείωση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων και κατ' επέκταση μείωση στην αύξηση της εκδήλωσης παραμορφώσεων.

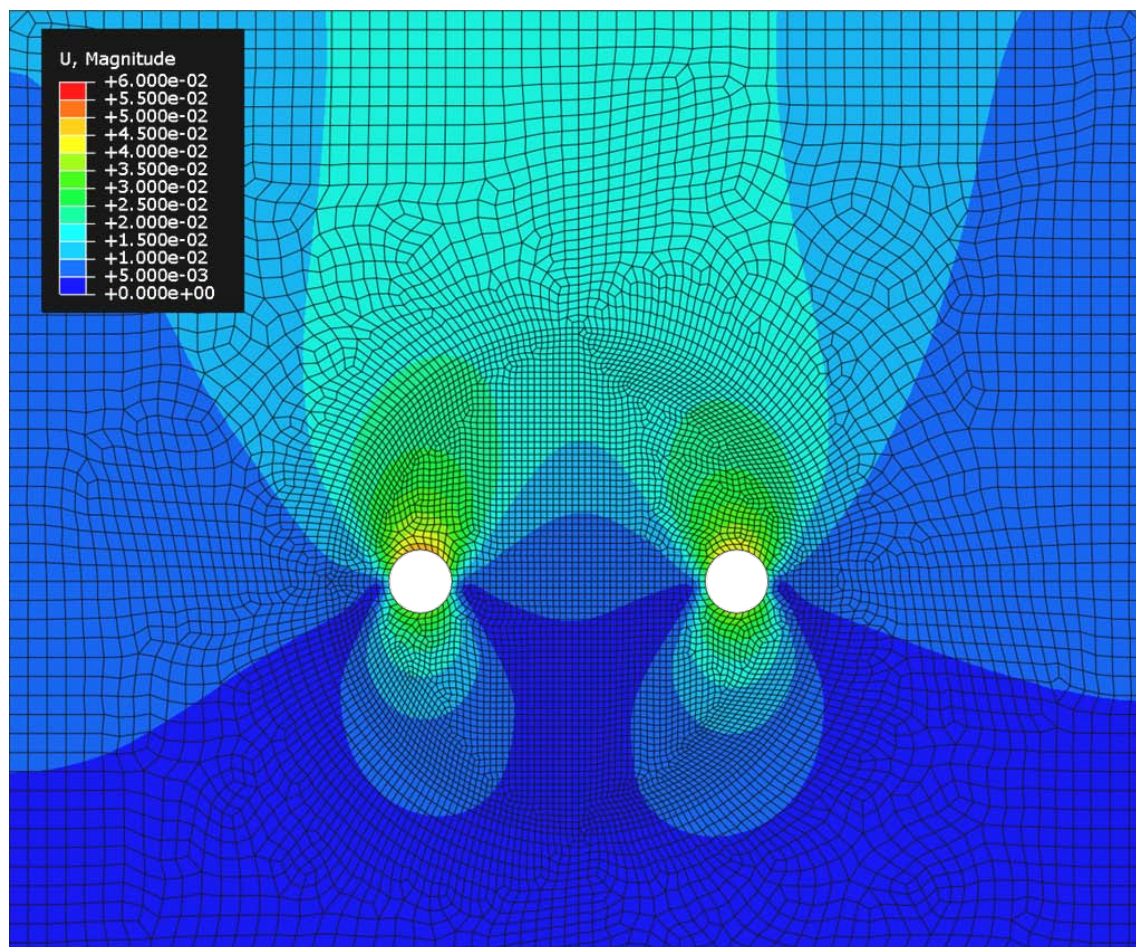
Αξονική απόσταση $s = 30\text{m}$



Εικόνα 6.4: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 30 μέτρα

Στην εικόνα 6.4 παρατηρείται ότι περαιτέρω αύξηση της αξονικής απόστασης κατά 10 μέτρα, οδηγεί στη μείωση της ανάπτυξης μετατοπίσεων, με μέγιστη τα 5.1cm στην οροφή της σήραγγας. Ακόμα παρατηρείται ότι η περιοχή μεταξύ των δύο σηράγγων επηρεάζεται λιγότερο λόγω της διάνοιξης της δεύτερης.

Αξονική απόσταση $s = 50\text{m}$



Εικόνα 6.5: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 50 μέτρα

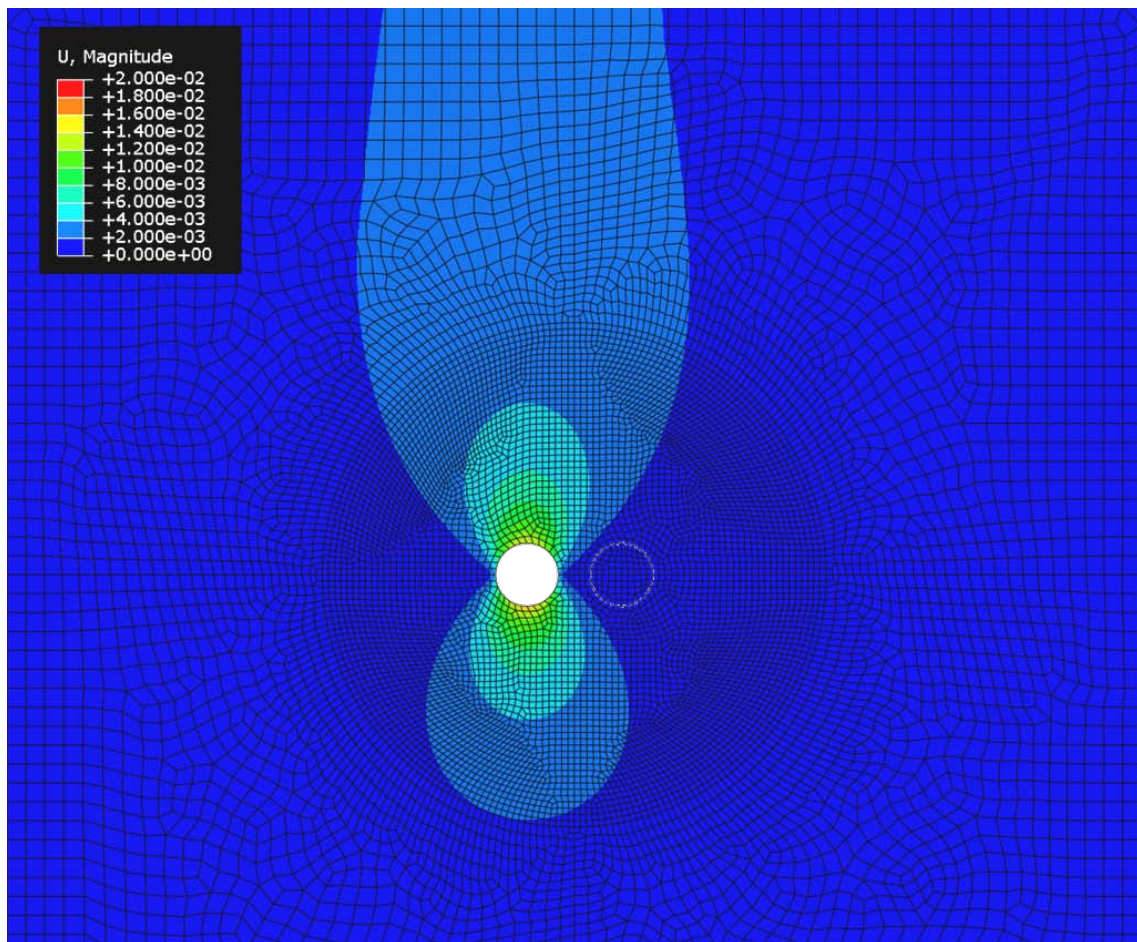
Όπως παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 6.5), για αξονική απόσταση 50 μέτρων, δηλαδή πέντε ακτίνες σήραγγας, η επίδραση της δεύτερης σήραγγας στην ανάπτυξη μετατοπίσεων είναι πολύ μικρή. Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην οροφή και έχει τιμή 4.8cm. Άρα η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας οδήγησε σε αύξηση της μέγιστης μετατόπισης κατά 0.6 εκατοστά. Όσο αφορά την περιοχή μεταξύ των δύο σηράγγων, μπορούμε να πούμε ότι δεν επηρεάζεται δραματικά.

6.1.2) Επίδραση σε μέτριας αντοχής βραχώμαζες

Για την ποιοτική αξιολόγηση της επίδρασης της αξονικής απόστασης σε ασθενείς βραχώμαζες, επιλέχθηκε να εξετασθεί βραχώμαζα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

GSI	m_i	σ_{ci}	K	H
30	6	10Mpa	0.5	100m

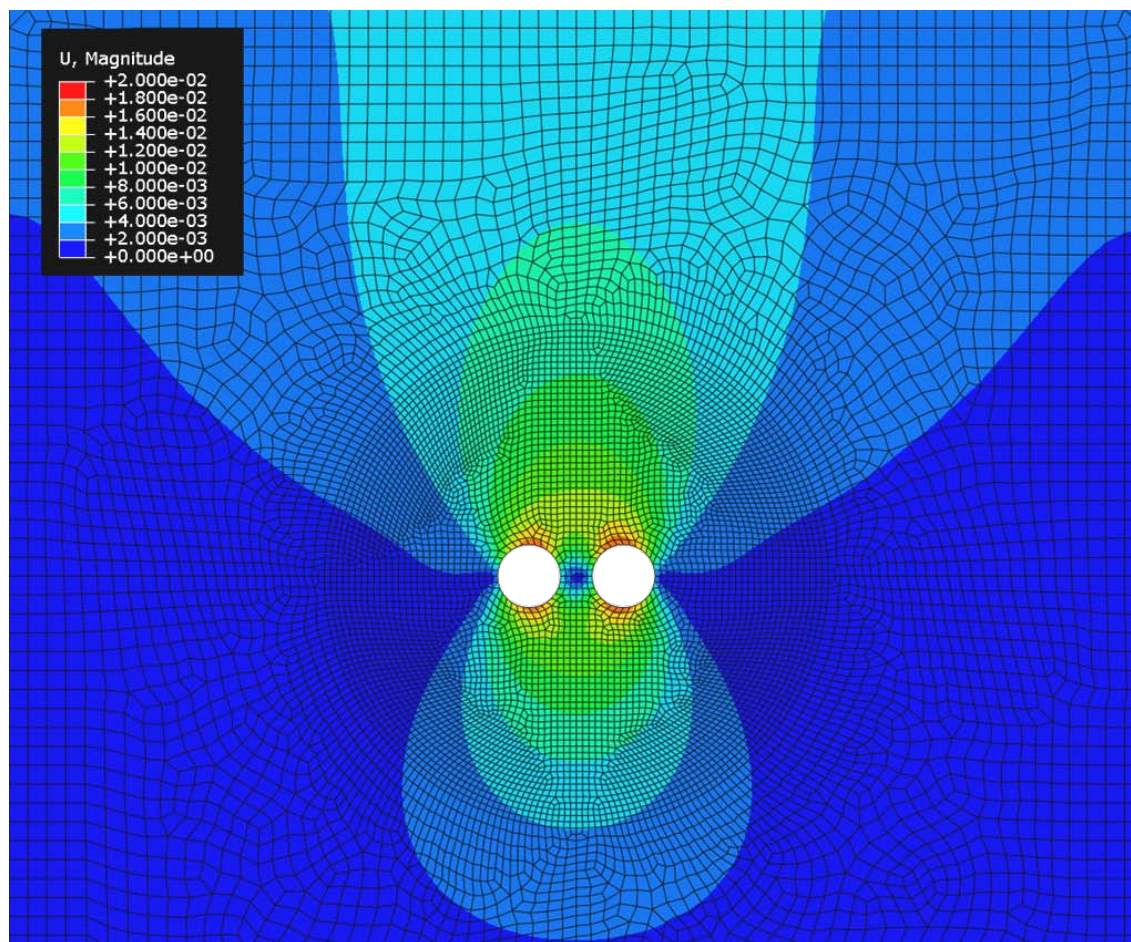
Μετατοπίσεις στη μονή σήραγγα



Εικόνα 6.6: Μετατοπίσεις σε μονή σήραγγα

Στην εικόνα 6.6 εύκολα παρατηρείται ότι η αύξηση της αντοχής της βραχόμαζας, οδηγεί στη μείωση της ανάπτυξης μετατοπίσεων. Έτσι η μέγιστη μετατόπιση στη σήραγγα από 4.2 cm μειώθηκε σε 1.5 cm.

Αξονική απόσταση $s = 15\text{m}$

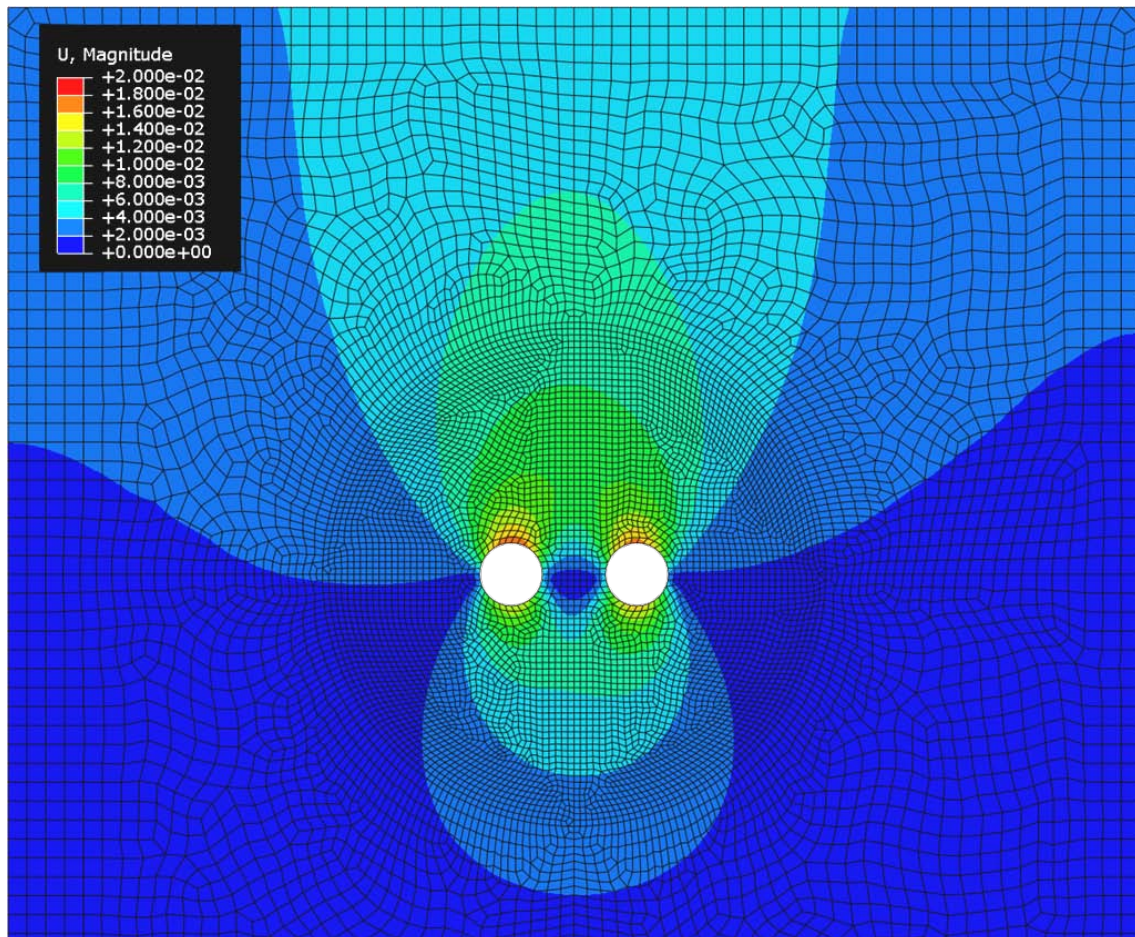


Εικόνα 6.7: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 15 μέτρα

Στην εικόνα 6.7 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι μετατοπίσεις λόγω της διάνοιξης δεύτερης σήραγγας σε αξονική απόσταση 15m, επηρεάζονται, αλλά όχι τόσο όσο επηρεάζονταν στη προηγούμενη περίπτωση με τη πιο ασθενή βραχόμαζα (εικόνα 6.2). Η μέγιστη μετατόπιση είναι 1.85cm, δηλαδή μια αύξηση 0.35cm εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας. Παρατηρείτε επίσης ότι η ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σηράγγων της συγκεκριμένης βραχόμαζας που εξετάζεται, είναι σαφώς πιο περιορισμένη από

την αντίστοιχη που δημιουργήθηκε για τη προηγούμενη ασθενέστερη βραχόμαζα για την ίδια απόσταση.

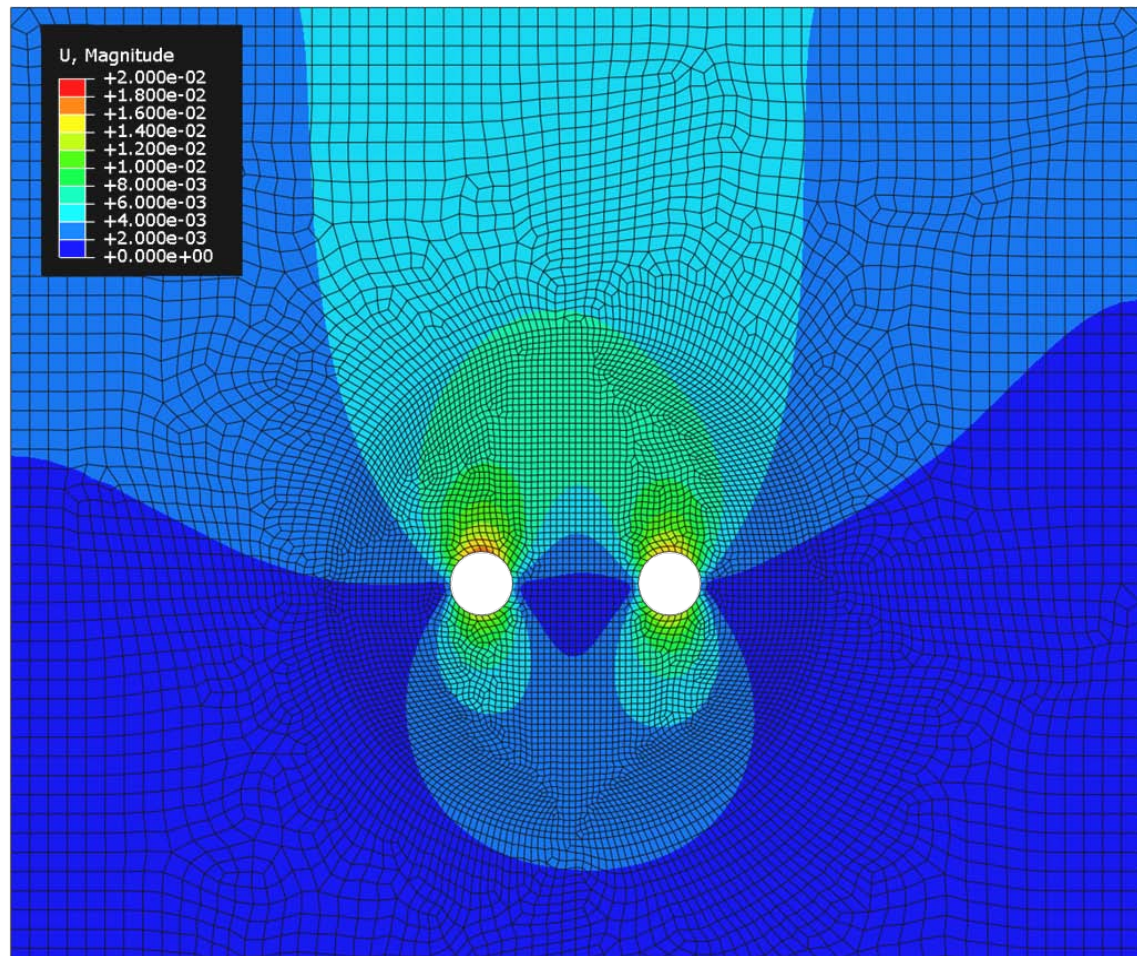
Αξονική απόσταση $s = 20\text{m}$



Εικόνα 6.8: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 20 μέτρα

Η μέγιστη μετατόπιση στη οροφή της σήραγγας έχει τιμή 1.77cm. Λόγω της μείωσης της αξονικής απόστασης κατά 5 μέτρα υπάρχει μείωση της μέγιστης μετατόπισης. Ομοίως με προηγουμένως, η βελτίωση της βραχόμαζας, οδηγεί σε μείωση της τιμής των μετατοπίσεων.

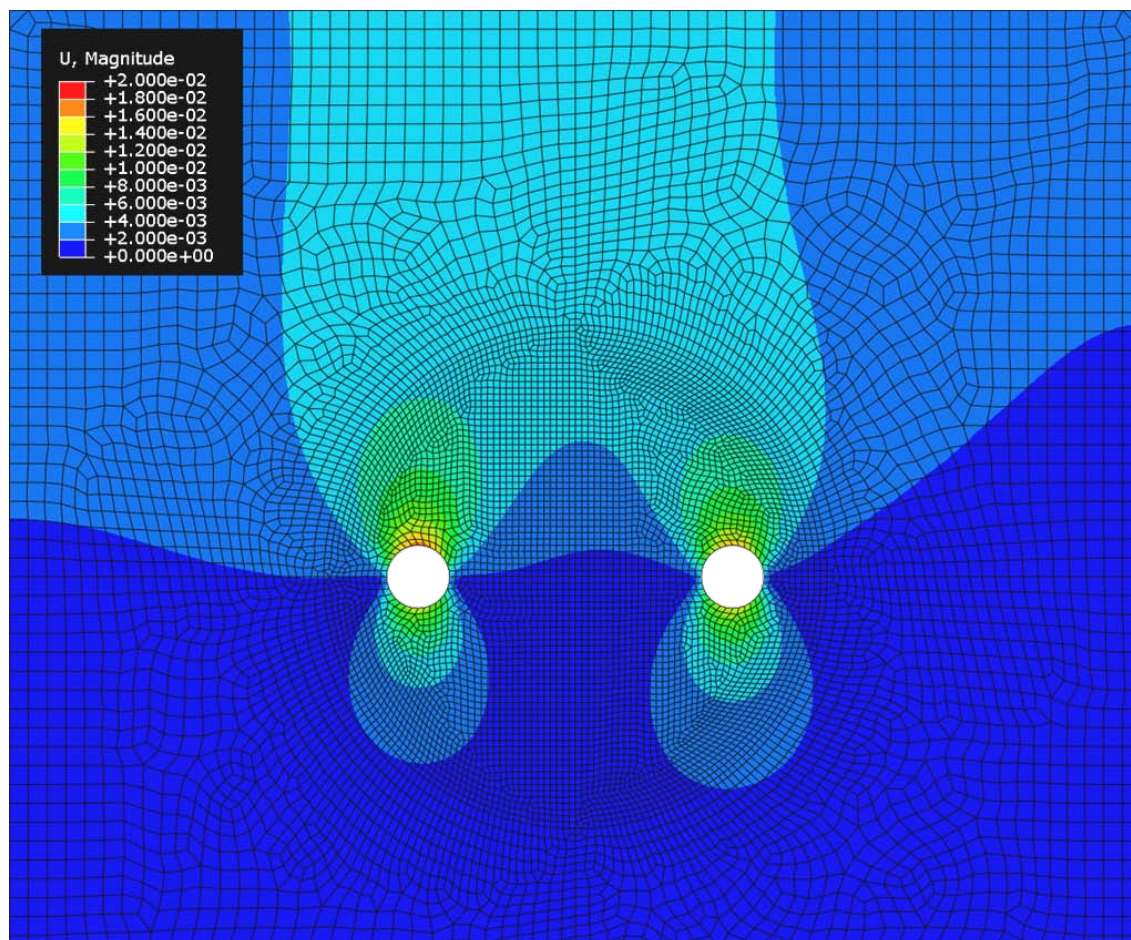
Αξονική απόσταση $s = 30\text{m}$



Εικόνα 6.9: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 30 μέτρα

Η μέγιστη μετατόπιση στη οροφή της σήραγγας έχει τιμή 1.71cm. Λόγω της περεταίρω αύξησης της αξονικής απόστασης κατά 10 μέτρα, υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη μείωση της αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων.

Αξονική απόσταση $s = 50m$



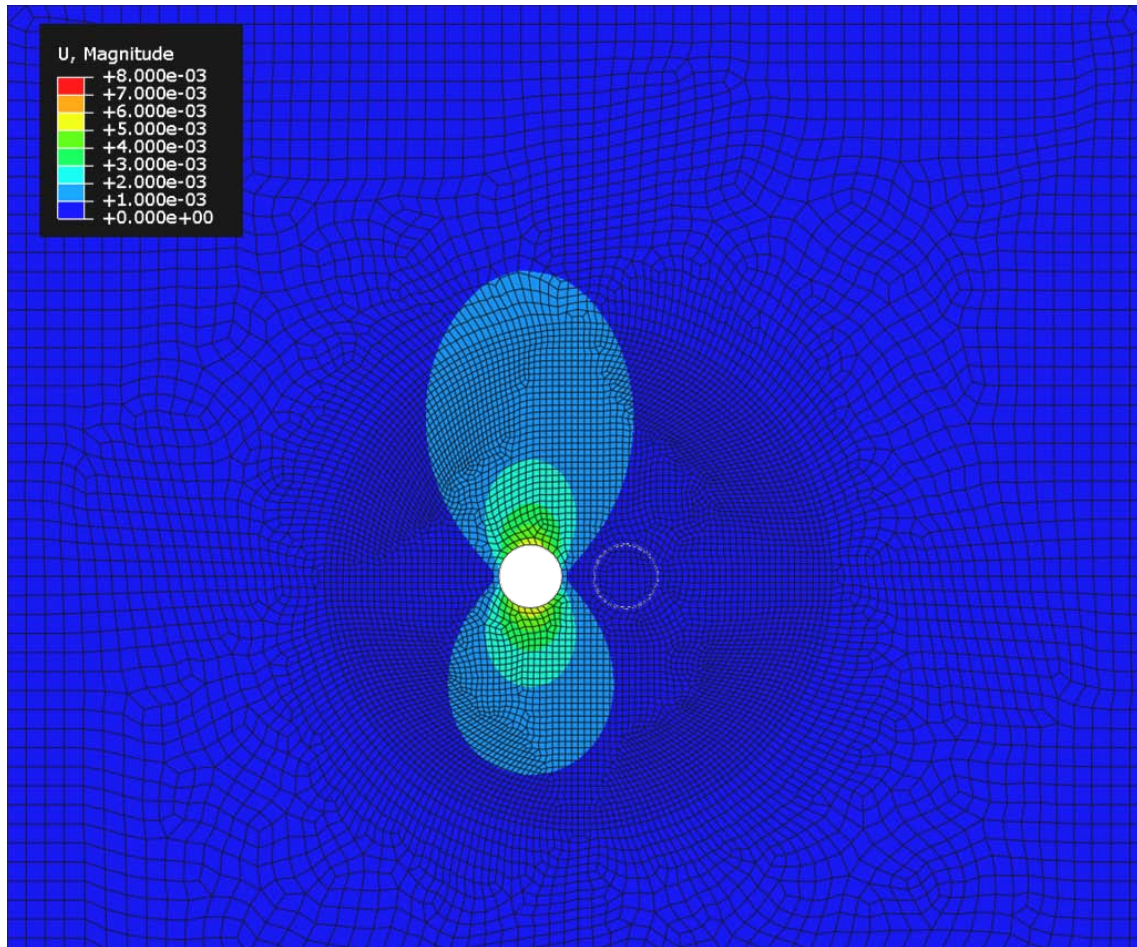
Εικόνα 6.10: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 50 μέτρα

Η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην οροφή της σήραγγας και έχει τιμή 1.69cm. Πρακτικά η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας δεν επηρεάζει το τασικό πεδίο της πρώτης. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.10, δεν υπάρχει δημιουργία ζώνης αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων. Οι καμπύλες ίσης μετατόπισης φαίνεται ότι αναπτύσσονται ξεχωριστά για κάθε σήραγγα.

6.1.3) Επίδραση σε υψηλής αντοχής βραχόμαζες

Για την ποιοτική αξιολόγηση της επίδρασης της αξονικής απόστασης σε ασθενείς βραχόμαζες, επιλέχθηκε να εξετασθεί βραχόμαζα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

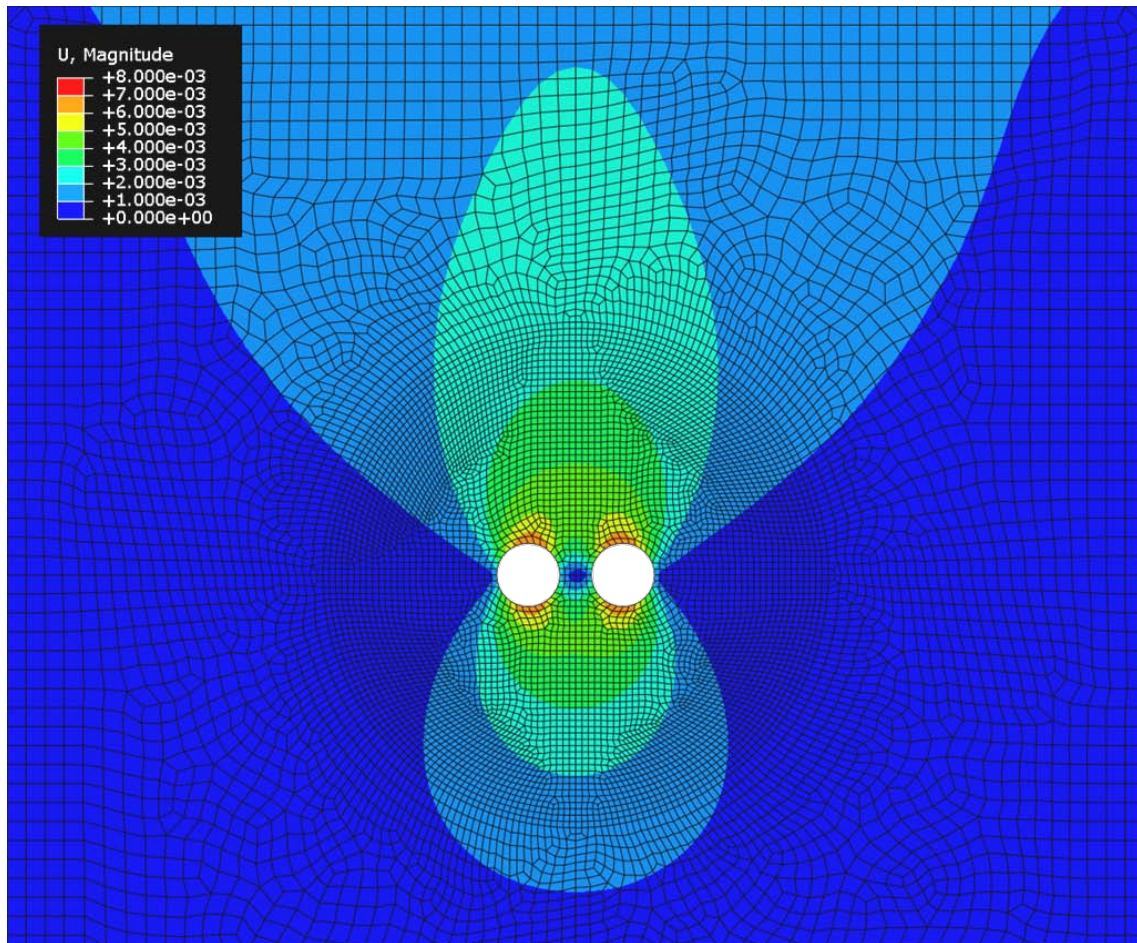
GSI	m_i	σ_{ci}	K	H
50	10	10Mpa	0.5	100m



Εικόνα 6.11: Μετατοπίσεις σε μονή σήραγγα

Η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται στην οροφή και έχει τιμή 6mm. Σε σχέση με τις βραχόμαζες που μελετήθηκαν προηγουμένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες, λόγω αύξησης της ποιότητας του γεωυλικού.

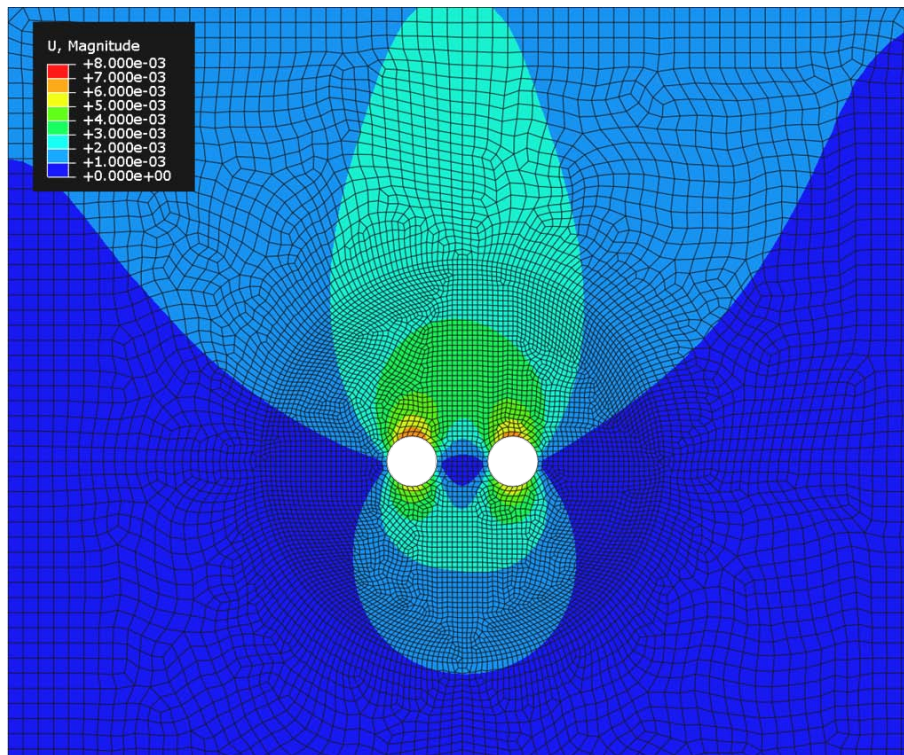
Αξονική απόσταση $s = 15\text{m}$



Εικόνα 6.12: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 15 μέτρα

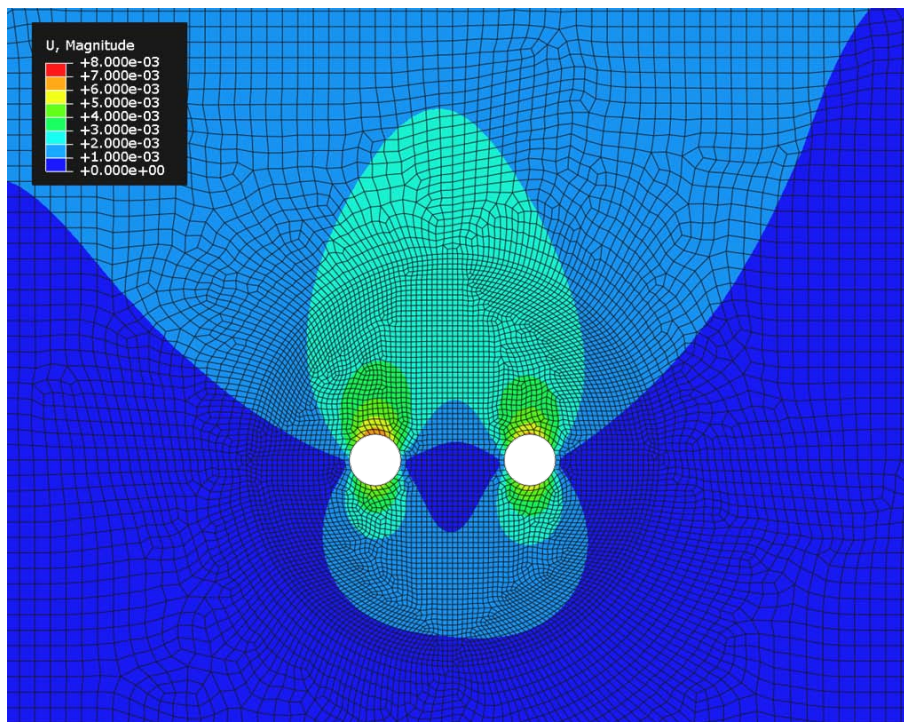
Μετά την εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας (Εικόνα 6.12), δημιουργείται μια περιοχή αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σηράγγων, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, με τη διαφορά ότι σε αυτή τη βραχόμαζα οι μετατοπίσεις να είναι αρκετά περιορισμένες, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στην οροφή της προϋπάρχουσας σήραγγας και να έχει τιμή 7.03mm.

Αξονική απόσταση $s = 20\text{m}$



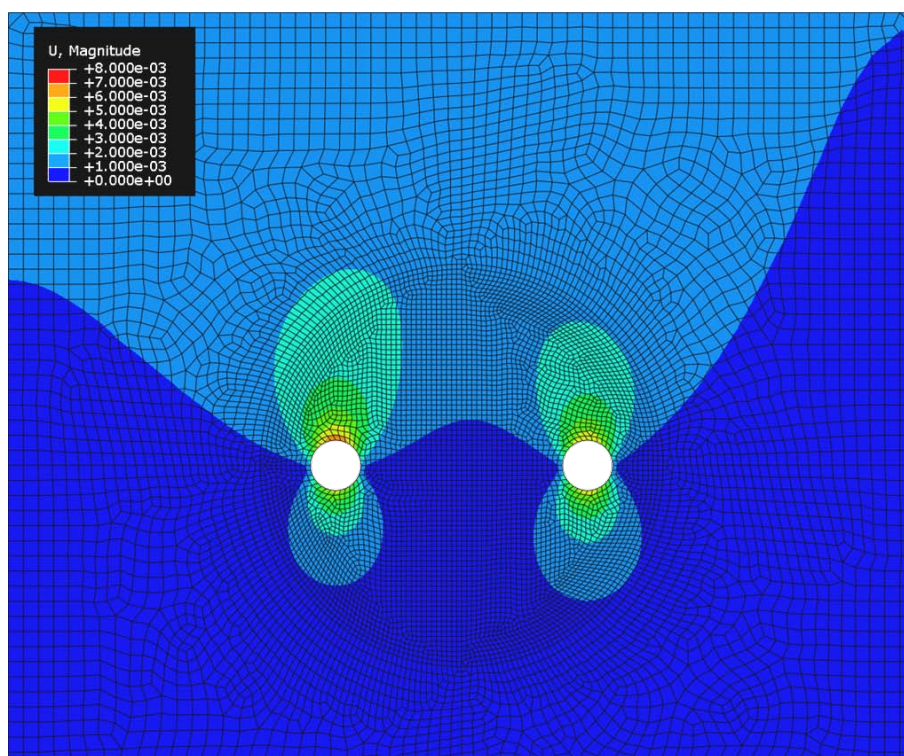
Εικόνα 6.13: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 20 μέτρα

Αξονική απόσταση $s = 30\text{m}$



Εικόνα 6.14: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 30 μέτρα

Αξονική απόσταση $s = 50\text{m}$



Εικόνα 6.15: Μετατοπίσεις σε δίδυμη σήραγγα με αξονική απόσταση 50 μέτρα

Όπως παρατηρείται στις παραπάνω εικόνες (εικόνα 6.13, 6.14, 6.15) όσο αυξάνει η αξονική απόσταση, τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση των σηράγγων και τόσο μειώνονται οι αναπτυσσόμενες μετατοπίσεις. Έτσι, η μέγιστη μετατόπιση για κάθε αξονική απόσταση (20m, 30m, 50m) εμφανίζεται στην οροφή της προϋπάρχουσας σήραγγας και έχει τιμή 7mm, 6,85mm και 6.7mm. αντίστοιχα. Όπως λοιπόν είναι φανερό, όσο βελτιώνονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, τόσο μειώνεται και η επίδραση της αξονικής απόστασης.

6.2) Επίδραση του συντελεστή γεωστατικών πιέσεων (K) στις μετατοπίσεις u

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, μελετήθηκε η επίδραση της ποιότητας του γεωολικού στην ανάπτυξη παραμορφώσεων με την αύξηση της αξονικής απόστασης για τιμή $K=0.5$. Στο παρών κεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση του συντελεστή γεωστατικών ωθήσεων K, δηλαδή τη συσχέτιση οριζοντίων και κατακόρυφων πιέσεων, στην ανάπτυξη παραμορφώσεων καθώς αυξάνει η αξονική απόσταση. Οι τιμές του K που θα μελετηθούν είναι $K=0.5$, $K=1$, $K=1.5$,

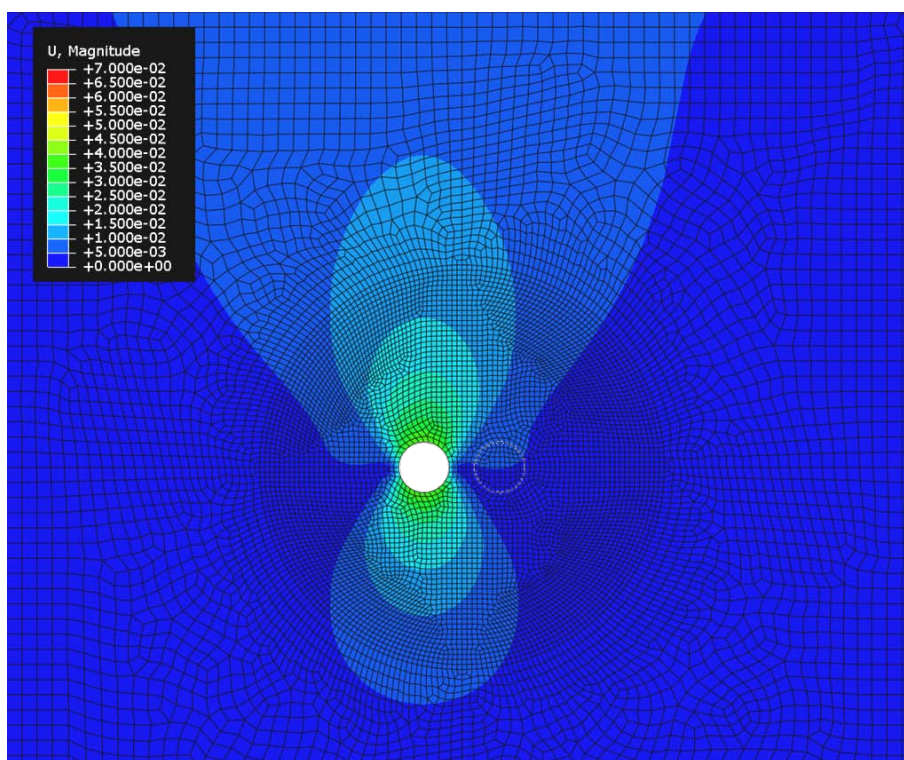
δηλαδή όταν οι σήραγγες βρίσκονται σε γεωστατικό πεδίο όπου οι κατακόρυφες πιέσεις είναι μεγαλύτερες από τις οριζόντιες, σε πεδίο όπου είναι ίσες και σε πεδίο στο οποίο οι οριζόντιες πιέσεις είναι μεγαλύτερες από τις κατακόρυφες.

Για την μελέτη της επίδρασης του K θα χρησιμοποιηθεί βραχόμαζα με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά, διότι όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6.1), η μεγαλύτερη επίδραση της αξονικής απόστασης είναι για χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα. Τα χαρακτηριστικά του γεωυλικού που μελετάται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

GSI	m_i	σ_{ci}	K	H
20	6	10Mpa	0.5, 1, 1.5	100m

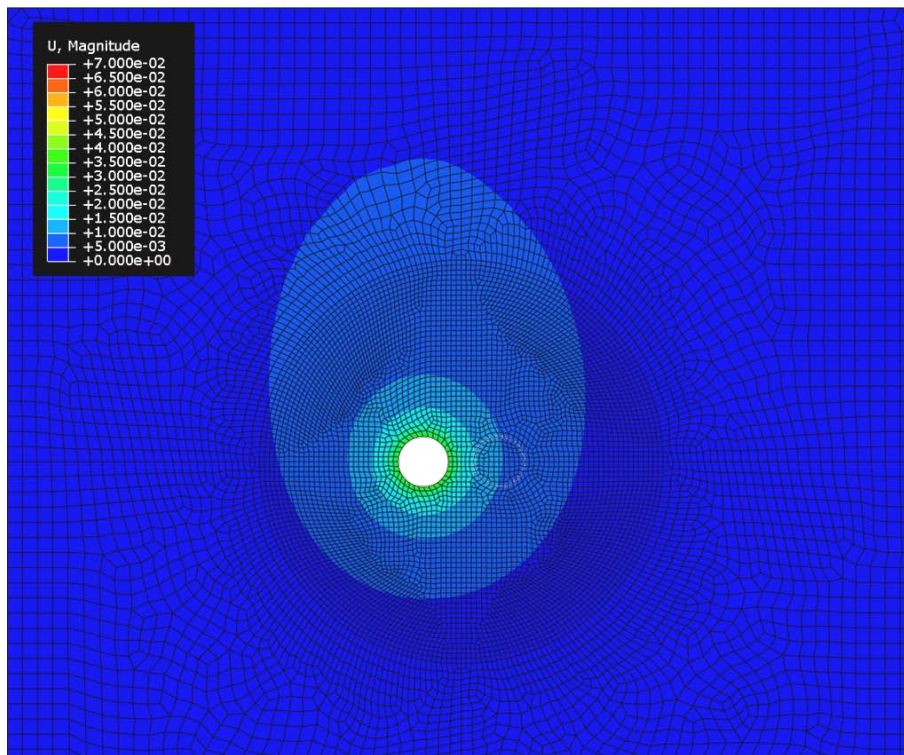
6.2.1) Επίδραση του K σε μονή σήραγγα

$K = 0.5$:



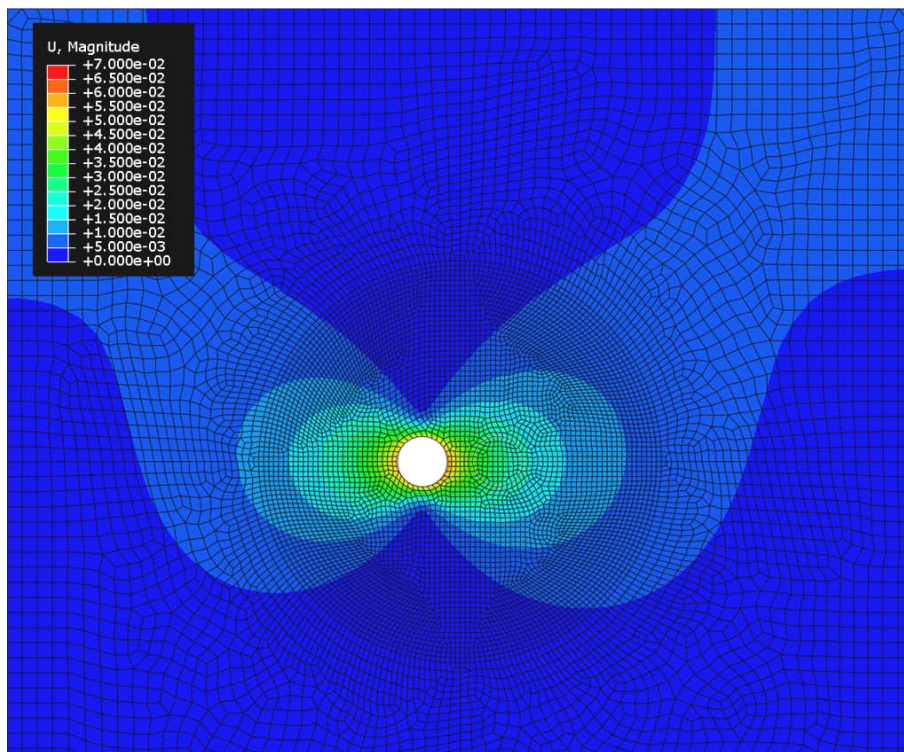
Εικόνα 6.16: Μετατοπίσεις στη σήραγγα για $K=0.5$

$K = 1$:



Εικόνα 6.17: Μετατοπίσεις στη σήραγγα για $K=1$

$K = 1.5$:

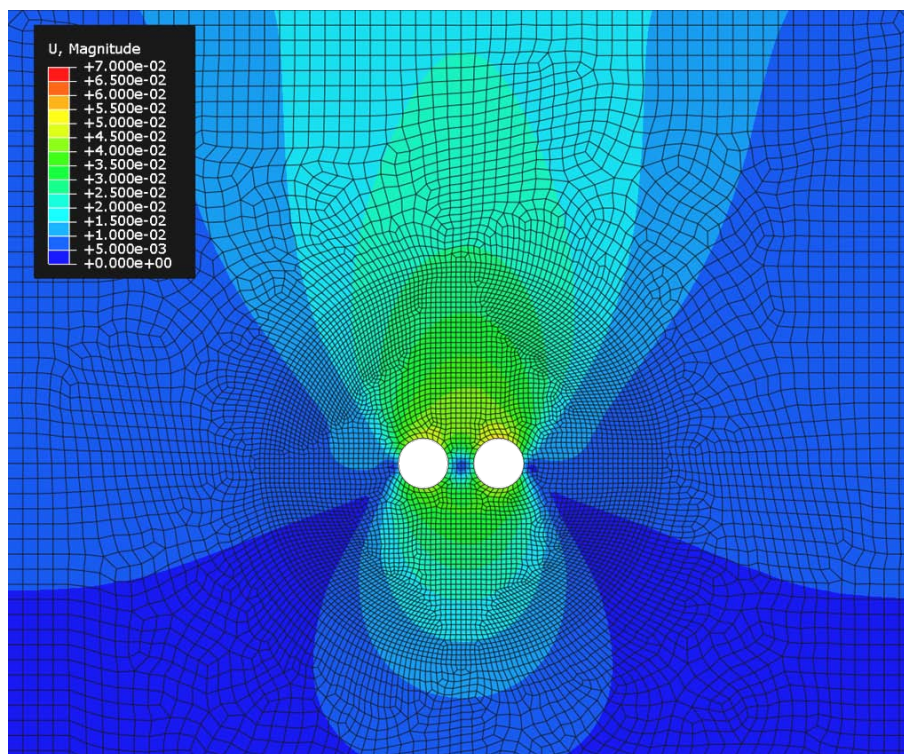


Εικόνα 6.18: Μετατοπίσεις στη σήραγγα για $K=1.5$

Στις παραπάνω εικόνες (Εικόνα 6.16, 6.17, 6.18), παρατηρούμε ότι η αλλαγή του συντελεστή K , επηρεάζει τις μετατοπίσεις όχι μόνο κατά τιμή, αλλά και στο σημείο που παρουσιάζονται. Για $K=0.5$ η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην οροφή και έχει τιμή 4.2cm, για $K=1$ έχει τιμή 3.74cm και εμφανίζεται σε όλη τη περίμετρο της σήραγγας, ενώ για $K = 1.5$ η μέγιστη μετατόπιση έχει τιμή 5.9cm και εμφανίζεται στις παρειές. Η αλλαγή αυτή του σημείου εμφάνισης της μέγιστης μετατόπισης είναι προφανές ότι επηρεάζεται από το μέγεθος της οριζόντιας τάσης σε σχέση με την κατακόρυφη.

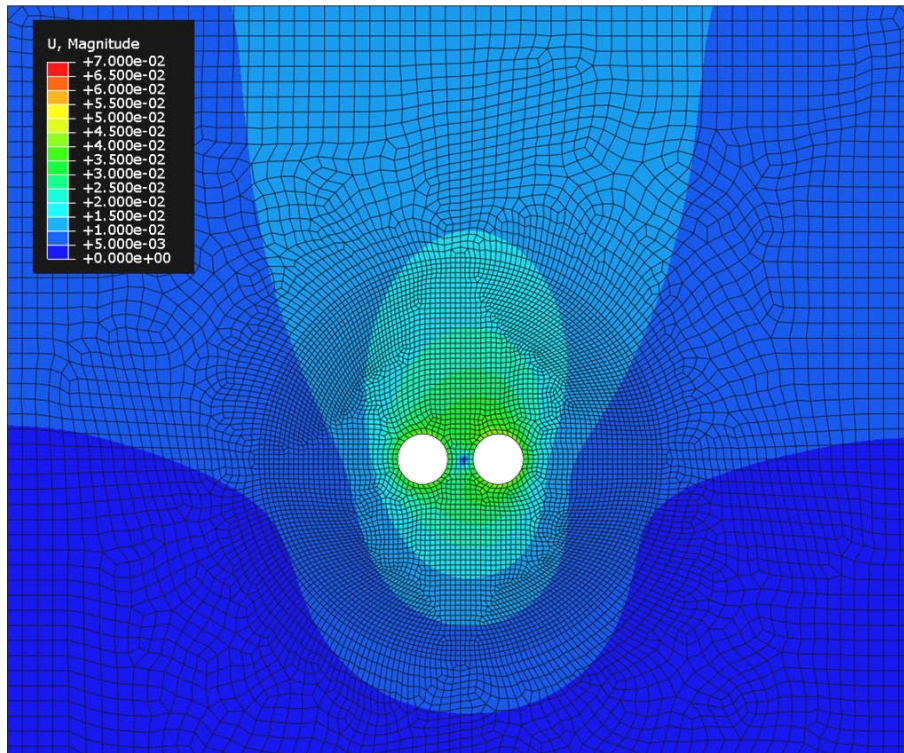
6.2.2) Επίδραση του K για αξονική απόσταση 15m

$K = 0.5$:



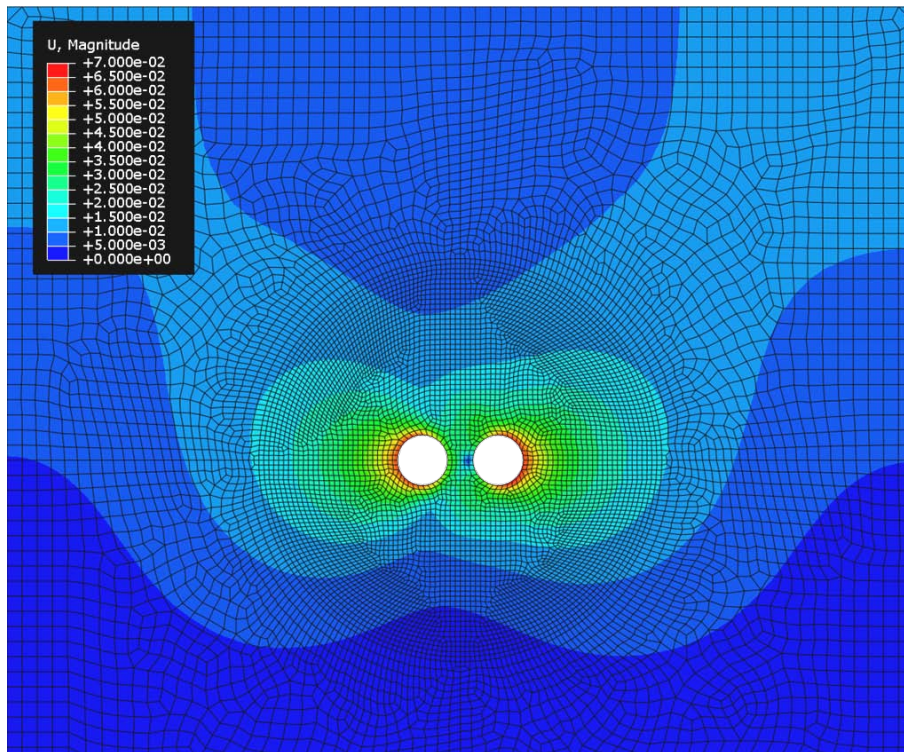
Εικόνα 6.18: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=0.5$

$K = 1$:



Εικόνα 6.19: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=1$

$K = 1.5$:

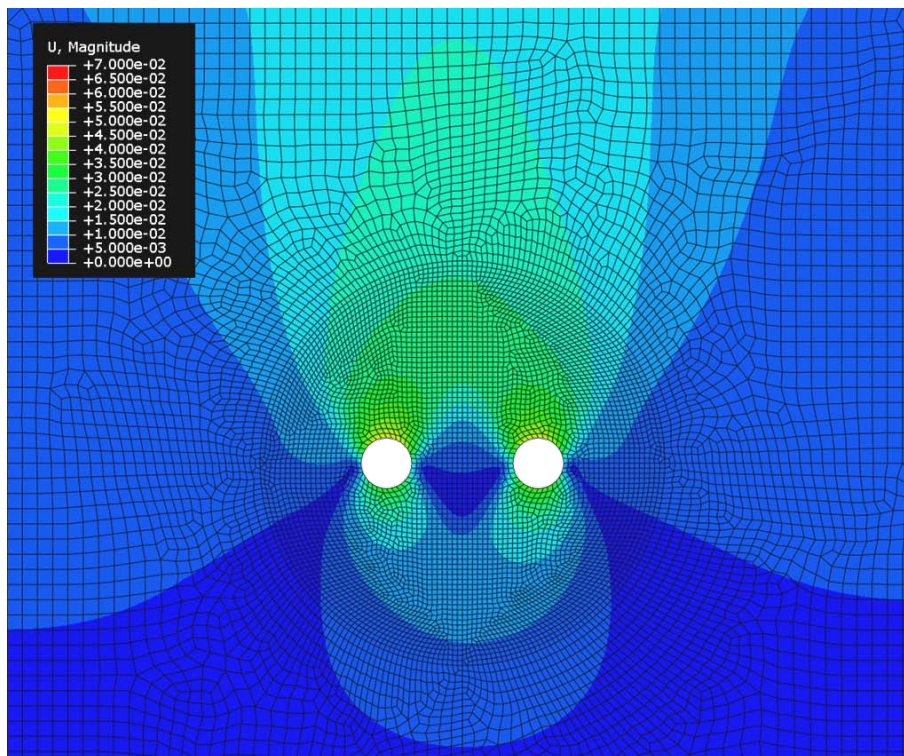


Εικόνα 6.20: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=1.5$

Η μέγιστη μετατόπιση για $K = 0.5$ εμφανίζεται στην οροφή της σήραγγας, αλλά λόγω της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας, η τιμή της αυξάνεται και γίνεται από 4.2cm 5.3cm. Ανάλογα και για $K = 1$ και για $K = 1.5$ η τιμή αυξάνεται και γίνεται 4.5cm και 7cm αντίστοιχα. Για $K = 1$, είναι προφανές ότι η επίδραση της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας στην ανάπτυξη μετατοπίσεων είναι μικρότερη από την επίδραση για $K = 0.5$ και $K = 1.5$.

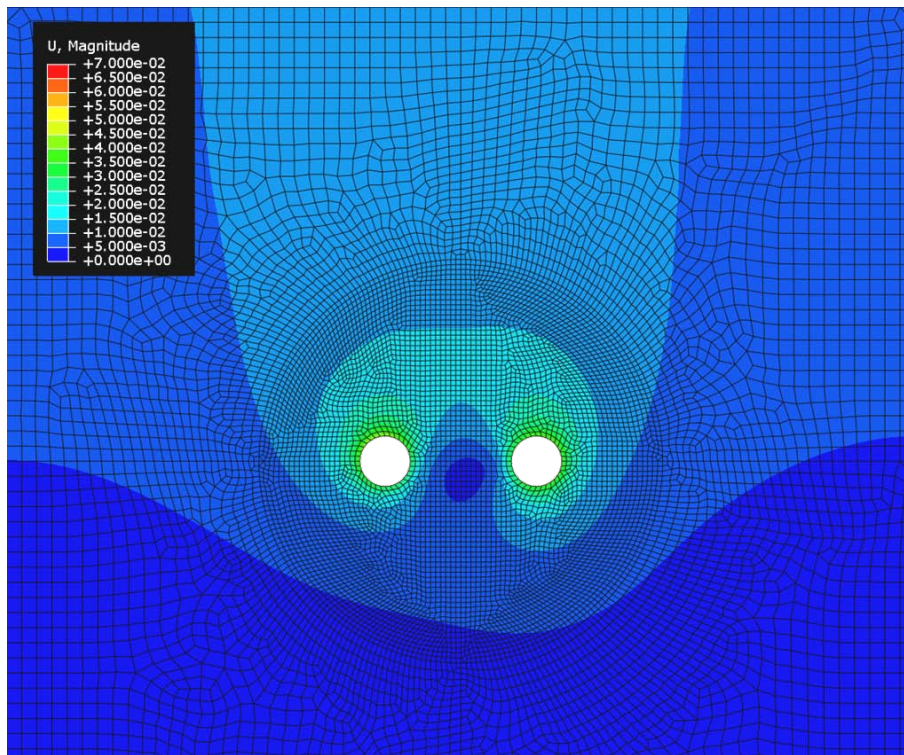
6.2.3) Επίδραση του K για αξονική απόσταση 30m

$K = 0.5$:



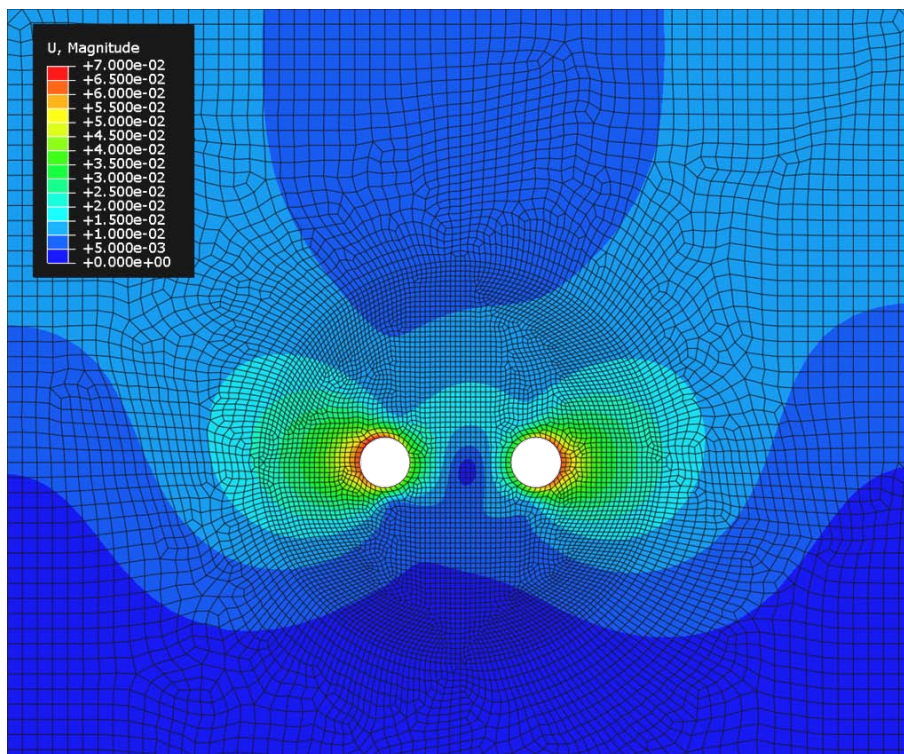
Εικόνα 6.21: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=0.5$

K = 1:



Εικόνα 6.22: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για K=1

K = 1.5:

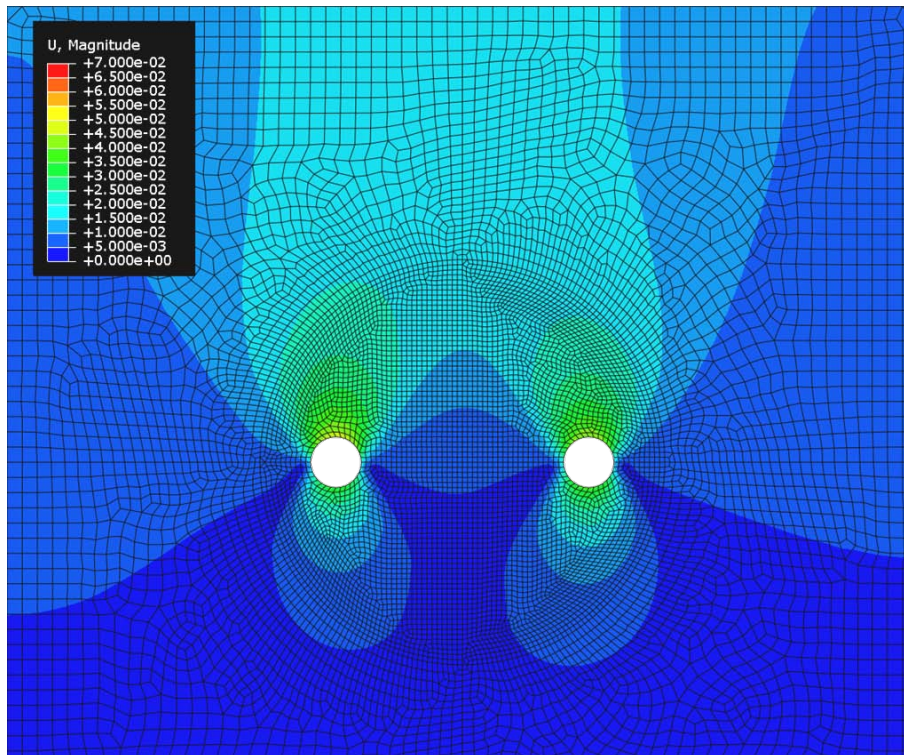


Εικόνα 6.23: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για K=1.5

Στις παραπάνω εικόνες (εικόνα 6.21, 6.22, 6.23) είναι φανερό ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων μειώνεται. Οι μέγιστες μετατοπίσεις για τις 3 τιμές του K 0.5, 1, 1.5 είναι 5cm, 45cm, 6.9cm. Παρόλο που με την αύξηση της αξονικής απόστασης δεν υπήρξε μεγάλη μείωση στις μετατοπίσεις, αναμένεται πως με ταυτόχρονη αύξηση της ποιότητας της βραχόμαζας θα υπάρξει εκθετική μείωση των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων.

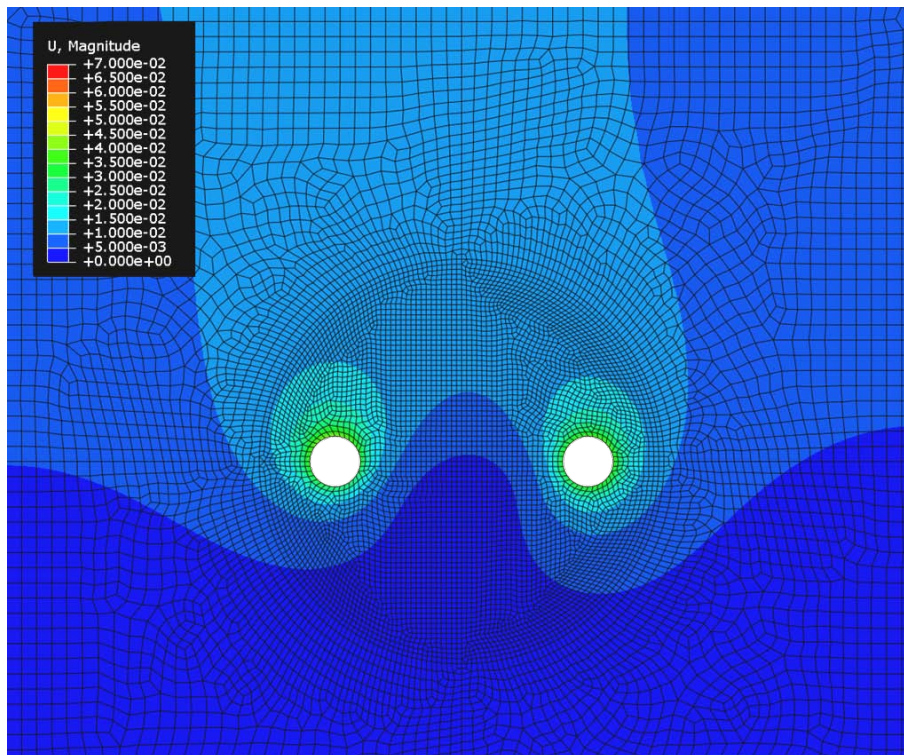
6.2.4) Επίδραση του K για αξονική απόσταση 50m

$K = 0.5$:



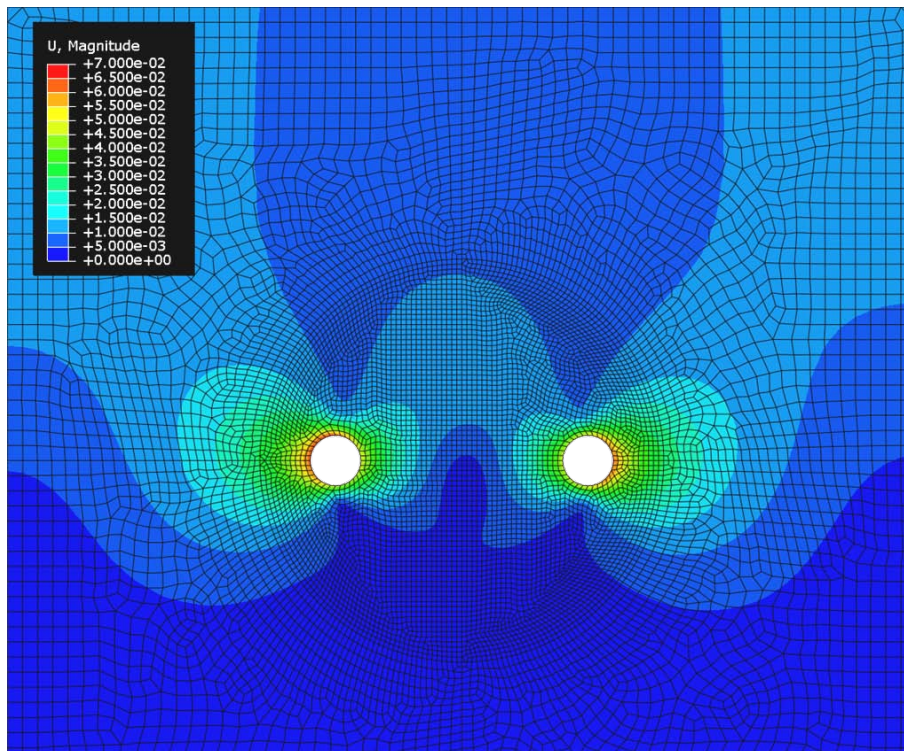
Εικόνα 6.24: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=0.5$

$K = 1$:



Εικόνα 6.25: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=1$

$K = 1.5$:



Εικόνα 6.25: Μετατοπίσεις στις σήραγγες για $K=1.5$

Σε αξονική απόσταση 50 μέτρων, δηλαδή απόσταση ίση με πέντε ακτίνες σήραγγας, η επίδραση των δύο σηράγγων για κάθε τιμή του K έχει μειωθεί.

Από ότι παρατηρήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, η κύρια επίδραση της τιμής του K στις μετατοπίσεις είναι στο σημείο εμφάνισης της μέγιστης τιμής. Για $0.5 < K < 1$ η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στην οροφή, για $1 < K < 1.5$ η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στις παρειές, ενώ για την ειδική περίπτωση $K = 1$, η μέγιστη τιμή των μετατοπίσεων είναι σε όλα τα σημεία στην περίμετρο της σήραγγας. Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι για $K = 1.5$, διότι αυξάνεται η μέση τάση.

6.3) Επίδραση του ύψους των υπερκειμένων H στις μετατοπίσεις u

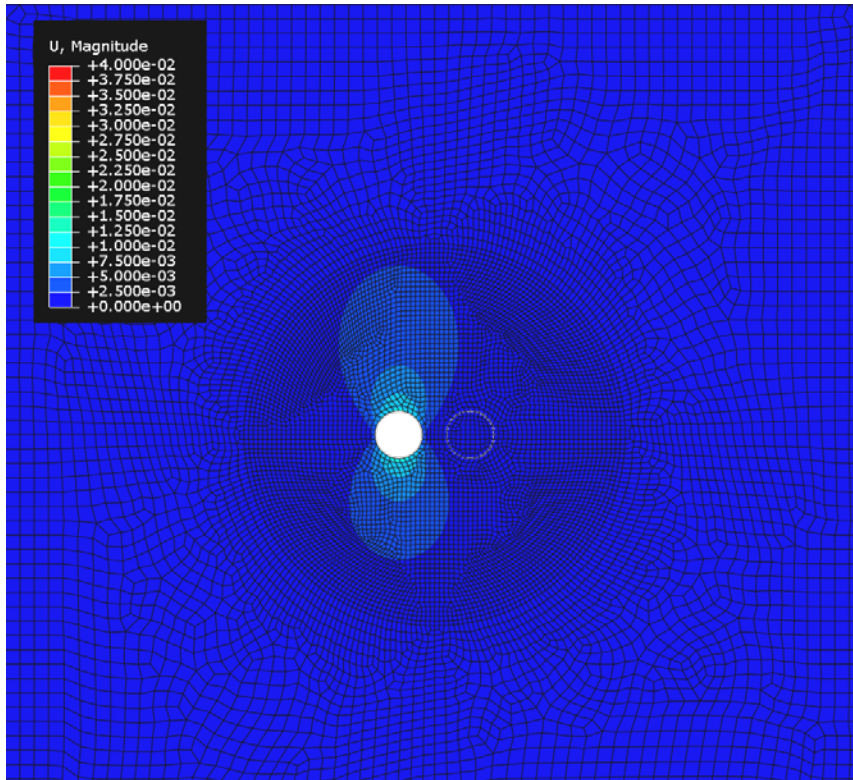
Η αύξηση του ύψους των υπερκειμένων, ουσιαστικά αντιστοιχεί με αύξηση του βάρους του γεωλικού και προσομοιώνεται με αύξηση της γεωστατικής πίεσης p_0 στο βάθος διάνοιξης των δύο σηράγγων. Αυτό που αναμένεται δηλαδή με την αύξηση του ύψους των υπερκειμένων είναι η αύξηση της εκδήλωσης μετατοπίσεων γύρω από τις σήραγγες.

Για την μελέτη της επίδρασης του ύψους του υπερκειμένων H στην ανάπτυξη παραμορφώσεων θα μελετηθεί βραχόμαζα με γεωτεχνικές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Αναλυτικότερα θα μελετηθούν οι μετατοπίσεις που προκαλούνται εξαιτίας της διάνοιξης ενός μόνο κλάδου, δύο κλάδων με αξονική απόσταση 15m και δύο κλάδων με αξονική απόσταση 30m.:

GSI	m_i	σ_{ci}	K	H
40	6	10Mpa	0.5	100m – 200m

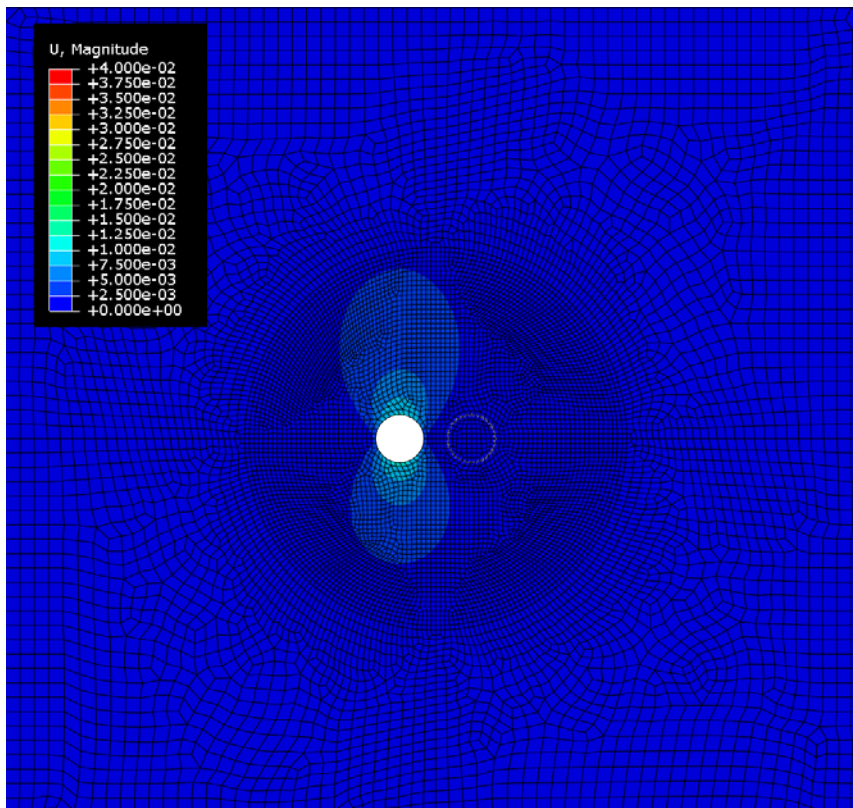
6.3.1) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων H σε μονή σήραγγα

$H = 100m$



Εικόνα 6.26: Μετατοπίσεις στη σήραγγα για H=100m

H = 200m

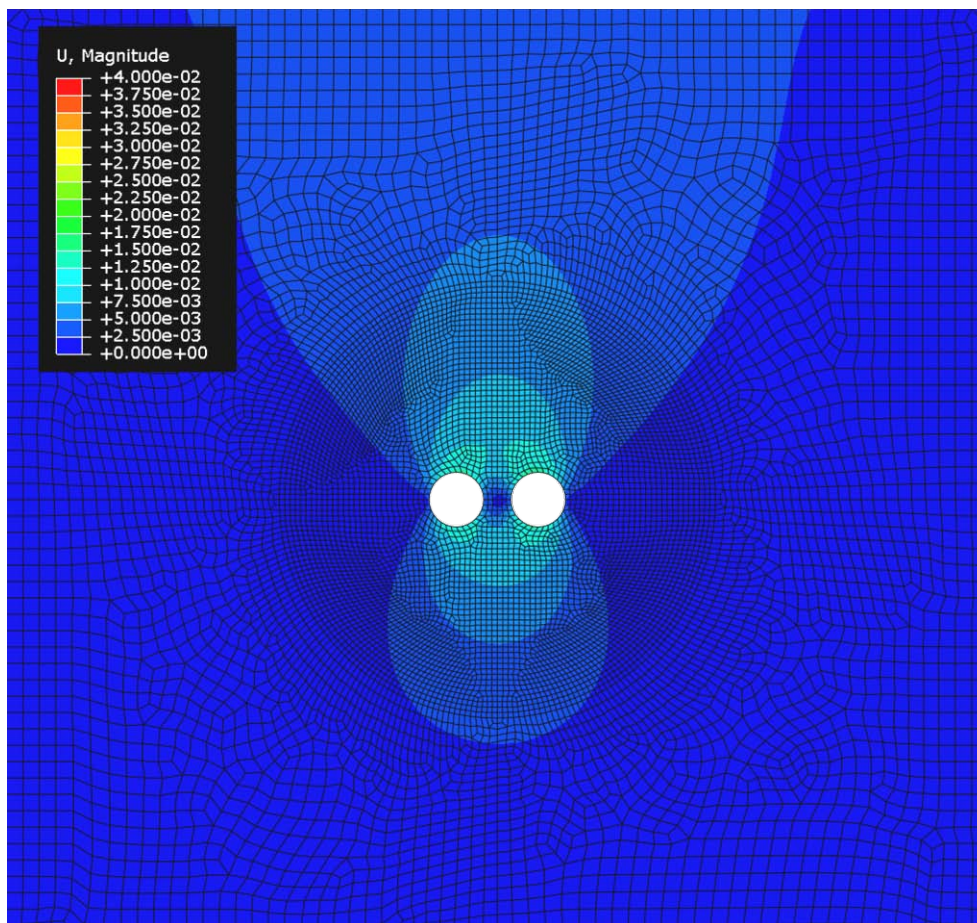


Εικόνα 6.27: Μετατοπίσεις στη σήραγγα για H=200m

Στις δύο παραπάνω εικόνες (εικόνα 6.26, 6.27) είναι φανερό ότι η αύξηση του ύψους των υπερκειμένων κατά 100 μέτρα αυξάνει της εμφανιζόμενες μετατοπίσεις από 1.1cm στα 100m στα 2.84cm στα 200m.

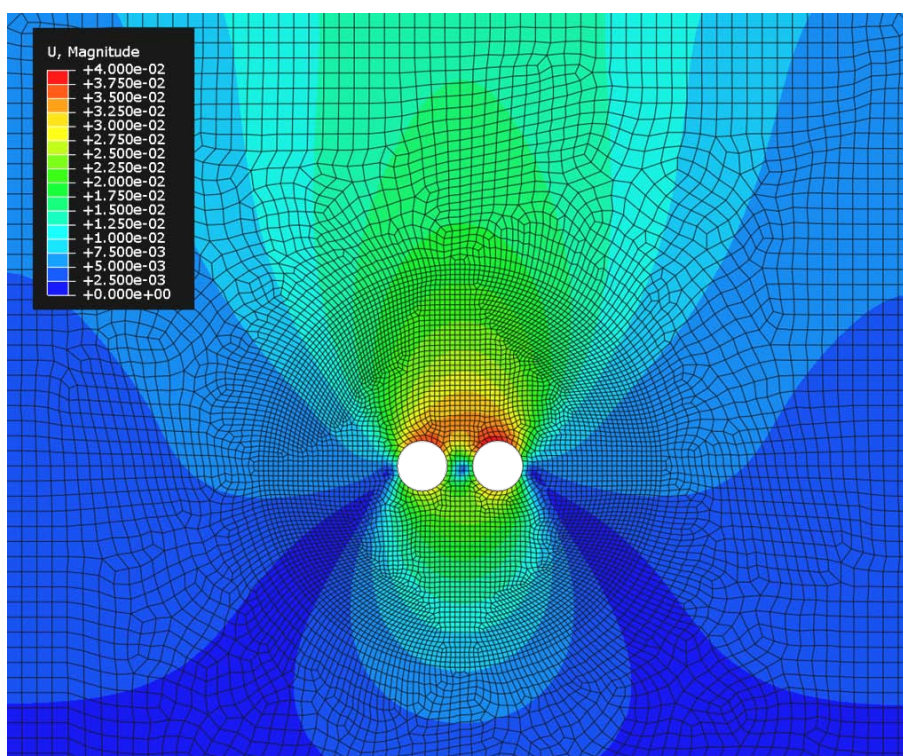
6.3.2) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων H για αξονική απόσταση 15m

H = 100m



Εικόνα 6.28: Μετατοπίσεις σε σήραγγες με αξονική απόσταση 15m για H=100m

H = 200m

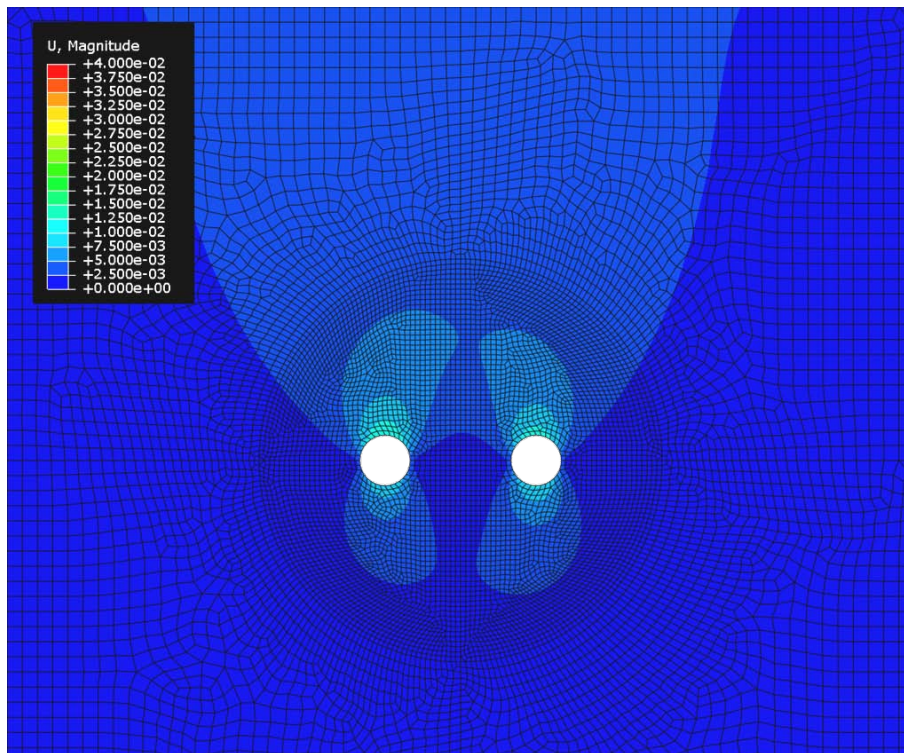


Εικόνα 6.29: Μετατοπίσεις σε σήραγγες με αξονική απόσταση 15m για H=200m

Στις παραπάνω εικόνες (Εικόνα 6.28, 6.29) παρατηρούμε ότι για αξονική απόσταση των δύο σηράγγων ίση με 15 μέτρα και ύψος υπερκειμένων 100 μέτρα, η μέγιστη μετατόπιση έχει τιμή 1,4cm, ενώ για αντίστοιχη αξονική απόσταση αλλά ύψος υπερκειμένων 200 μέτρα, η τιμή της μέγιστης μετατόπισης είναι 3,8cm. Άρα για ύψος υπερκειμένων 100 μέτρα είχαμε αύξηση της μέγιστης μετατόπισης κατά 29%, ενώ για ύψος υπερκειμένων 200 μέτρων είχαμε αύξηση 33%.

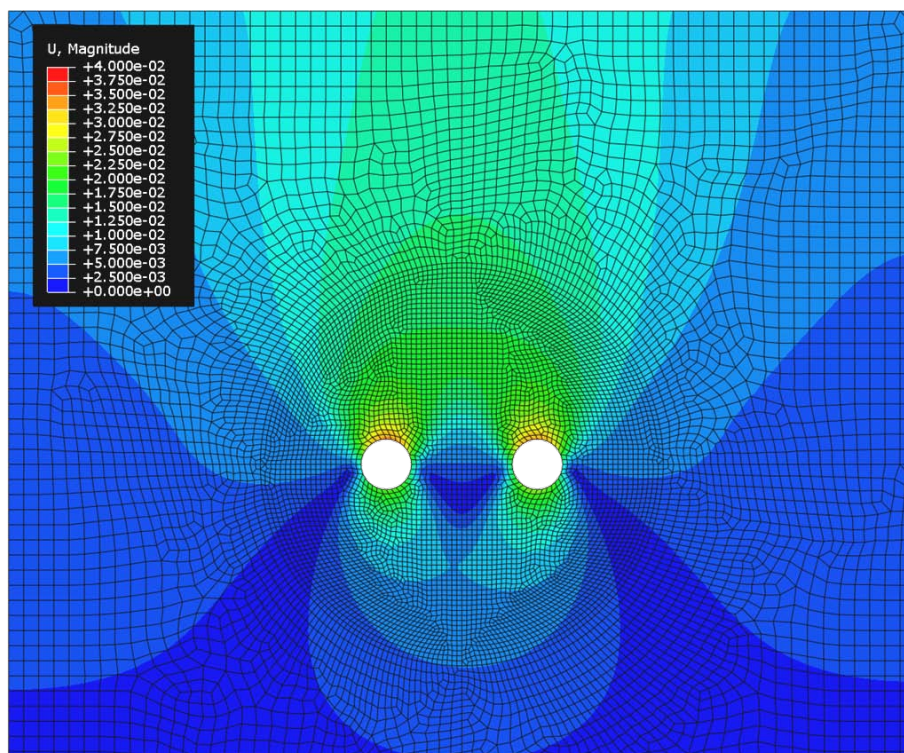
6.3.3) Επίδραση του ύψους υπερκειμένων H για αξονική απόσταση 30m

H = 100m



Εικόνα 6.30: Μετατοπίσεις σε σήραγγες με αξονική απόσταση 30m για H=100m

H = 200m



Εικόνα 6.31: Μετατοπίσεις σε σήραγγες με αξονική απόσταση 30m για H=200m

Στις παραπάνω εικόνες (εικόνα 6.30, 6.31) παρατηρούμε ότι για αξονική απόσταση των δύο σηράγγων ίση με 30 μέτρα και ύψος υπερκειμένων 100 μέτρα, η μέγιστη μετατόπιση έχει τιμή 1.26cm, ενώ για αντίστοιχη αξονική απόσταση αλλά ύψος υπερκειμένων 200 μέτρα, η τιμή της μέγιστης μετατόπισης είναι 3.37cm. Άρα για ύψος υπερκειμένων 100 μέτρα είχαμε αύξηση της μέγιστης μετατόπισης κατά 16%, ενώ για ύψος υπερκειμένων 200 μέτρων είχαμε αύξηση 18%.

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, μείωση της αξονικής απόστασης των δύο σηράγγων με ταυτόχρονη αύξηση του ύψους των υπερκειμένων οδηγεί σε αύξηση της απόλυτης τιμής των μετατοπίσεων, ενώ ο ρυθμός αύξησης παραμένει ο ίδιος.

7) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αξιολογηθούν, μέσω διαγραμμάτων, οι πιέσεις που ασκούνται στη μόνιμη επένδυση των σηράγγων που μελετούνται. Τα μεγέθη πίεσης που θα μελετηθούν είναι η μέγιστη, η μέση και ελάχιστη πίεση και που ασκούνται, η πίεση στην οροφή και οι πίεση στις παρειές.

Η διαγραμματική απεικόνιση των μεγεθών μέγιστη, μέση και ελάχιστη πίεση, ή όπως θα παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν p_{max} , p_{aver} και p_{min} αντίστοιχα θα δείξει πως μεταβάλλονται οι συγκεκριμένες πιέσεις κατά μέγεθος αλλά και κατά θέση, καθώς λαμβάνει χώρα μεταβολή της αξονικής απόστασης των δύο σηράγγων και βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας. Η εξέταση της πίεσης στην οροφή και στις παρειές, οι οποίες στα διαγράμματα που ακολουθούν θα συμβολίζονται με p_{roof} και $p_{παρεια}$, γίνεται για να υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με εκείνα που προκύπτουν από τις μεθόδους υπολογισμού πίεσης στη μόνιμη επένδυση, οι οποίες αναφέρθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να υπολογίσουν τις πιέσεις μόνο σε αυτές τις θέσεις.

Ως δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας θα χρησιμοποιηθεί ο λόγος σ_{cm}/p_0 όπου σ_{cm} είναι η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη και p_0 η μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας. Η επιλογή του λόγου σ_{cm}/p_0 έγινε γιατί μπορεί να ποσοτικοποιήσει τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας όσο και το μέγεθος των φορτίων που αναπτύσσονται, αλλά και να κανονικοποιήσει το πρόβλημα ως προς το ύψος των υπερκειμένων, μειώνοντας τις παραμέτρους του προβλήματος.

Τέλος, σε κάποια διαγράμματα θα χρησιμοποιηθεί ο λόγος E/E_0 , ο οποίος είναι ο λόγος του απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας, που υπολογίστηκε με βάση τις καμπύλες *Chern* (*Chern 1999*) (κεφάλαιο 4.2), με το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας. Ο υπολογισμός του απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας έγινε από τον υπολογισμό του λόγου u_r / u_{r0} με τη μέθοδο *Chern* και εν συνεχεία υπολογίστηκε η αποτόνωση λ . Από εκεί με μαθηματικούς τύπους μπορούμε να φτάσουμε στον υπολογισμό του απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας. Η ανάγκη εισαγωγής του λόγου αυτού έγκειται στο γεγονός ότι η μέθοδος απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας δεν είναι η μοναδική, με αποτέλεσμα οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απομειωμένων μέτρων ελαστικότητας διαφέρουν σημαντικά από μέθοδο σε μέθοδο με αποτέλεσμα να διαφέρει και η τιμή των μέτρων ελαστικότητας που επιλέγονται για την προσομοίωση της χαλάρωσης της βραχόμαζας. Αυτό, οδηγεί στην εκτίμηση διαφορετικών φορτίων που αναπτύσσονται σε κάθε

περίπτωση. Έτσι, η εισαγωγή του λόγου θα κανονικοποιήσει τα διαγράμματα που ακολουθούν (διάγραμμα 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5), ως προς τη μέθοδο απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας και ως προς το είδος και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων αντιστήριξης του μετώπου. Έτσι, θα υπάρχει εξάλειψη της διάσπαρτης κατανομής που παρουσιάζουν τα διαγράμματα αυτά.

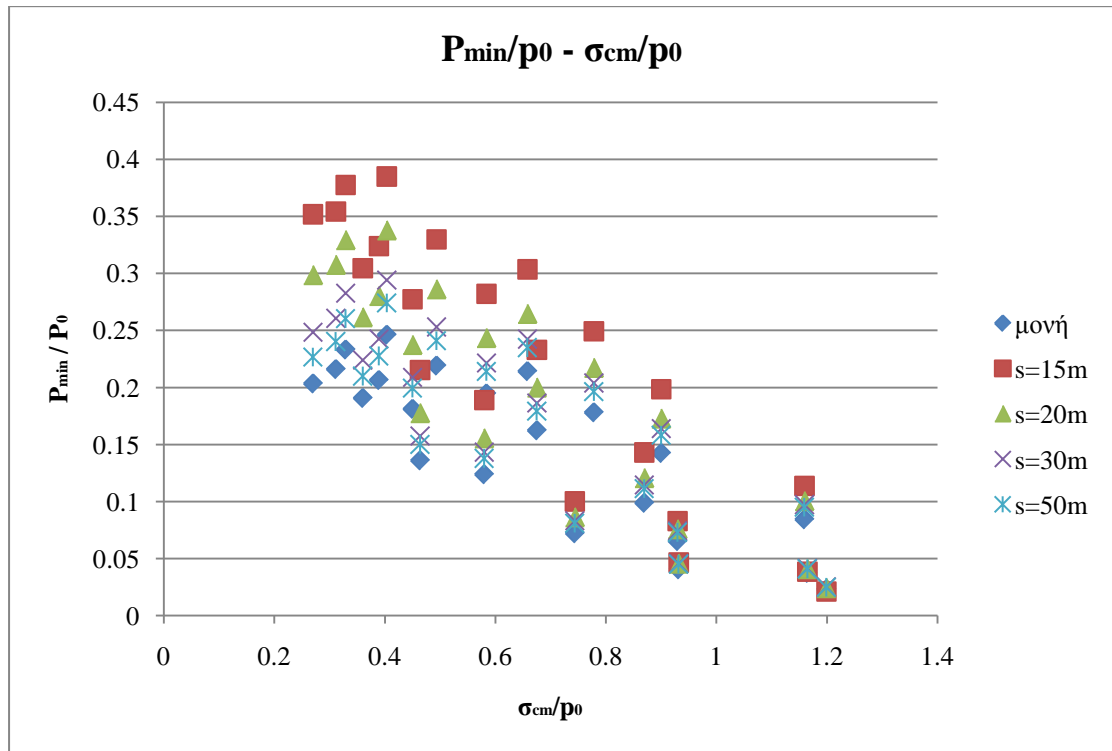
Συνοπτικά, οι συμβολισμοί που θα εμφανιστούν στα διαγράμματα αυτού του κεφαλαίου είναι:

- p_{max} : Η μέγιστη πίεση στη μόνιμη επένδυση
- p_{aver} : Η μέση πίεση στη μόνιμη επένδυση
- p_{min} : Η ελάχιστη πίεση στη μόνιμη επένδυση
- p_{roof} : Η πίεση στην οροφή της σήραγγας
- $p_{\text{παρεια90}}$: Η πίεση στη δεξιά παρειά της σήραγγας
- $p_{\text{παρεια270}}$: Η πίεση στην αριστερή παρειά της σήραγγας
- σ_{cm} : Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας
- p_0 : Η μέση τάση στο επίπεδο της σήραγγας
- E : Το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας
- E_0 : Το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας
- K : Ο συντελεστής συσχέτισης κατακόρυφων και οριζόντιων πιέσεων
- δείκτες s , d , n : Δείκτες που αναφέρονται σε μονό κλάδο, στον υπάρχων κλάδο (αριστερό) και στον καινούριο κλάδο (δεξιό) αντίστοιχα

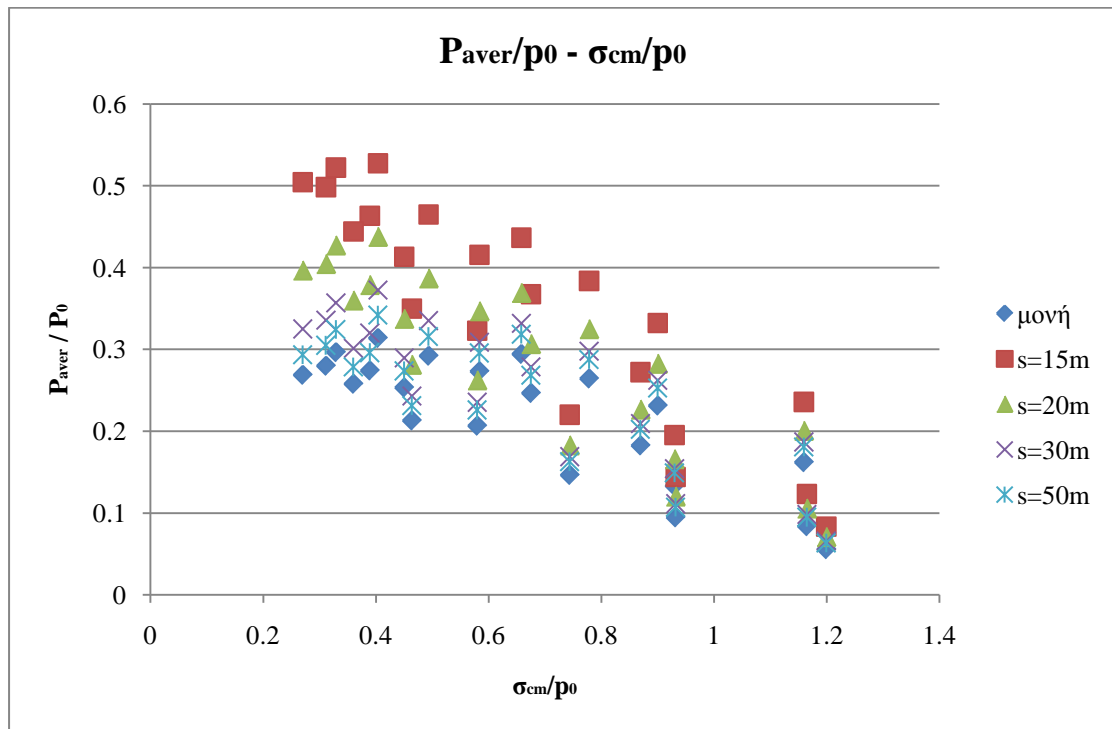
7.1) Κατανομή πιέσεων στην τελική επένδυση ως προς τον λόγο σ_{cm} / p_0

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης, της μέσης και της μέγιστης πίεσης καθώς επίσης και της πίεσης στην οροφή και στις παρειές των σηράγγων, για διάφορες αξονικές αποστάσεις, καθώς αυξάνει η τιμή σ_{cm} / p_0 , δηλαδή βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Ο συντελεστής συσχέτισης της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης K έχει την τιμή 0.5 καθώς στο βάθος μελέτης είναι η πιο αντιπροσωπευτική περίπτωση. Τέλος, στα διαγράμματα λαμβάνονται υπόψη μόνο οι πιέσεις της προϋπάρχουσας (αριστερής) σήραγγας, από τη στιγμή που σε αυτήν αναμένονται μεγαλύτερες τιμές πιέσεων στη μόνιμη επένδυση.

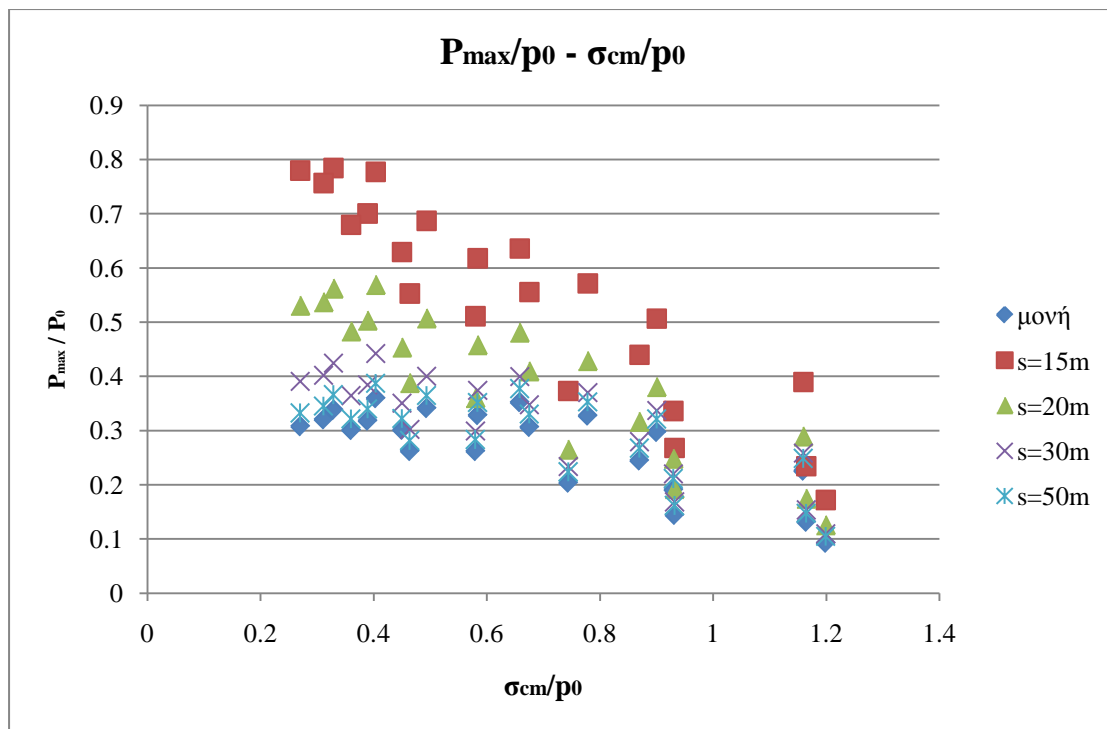
Για $K = 0.5$



Διάγραμμα 7.1: Λόγος ελάχιστων πιέσεων ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

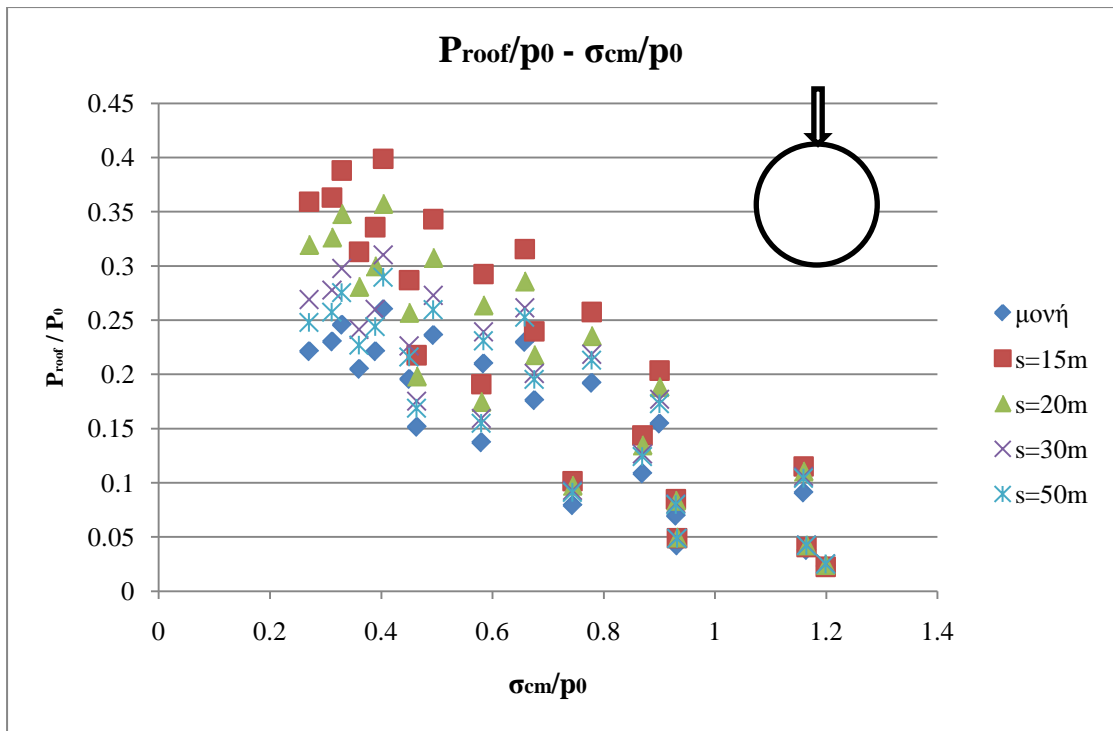


Διάγραμμα 7.2: Λόγος μέσων πιέσεων ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

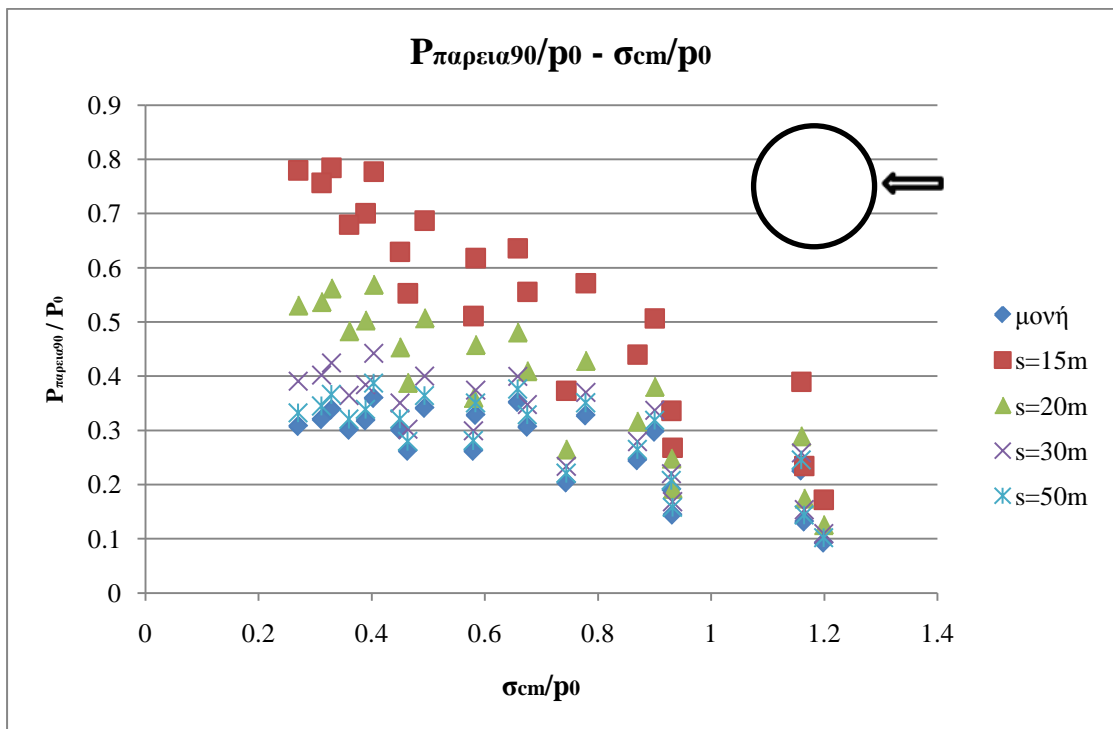


Διάγραμμα 7.3: Λόγος μέγιστων πιέσεων ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

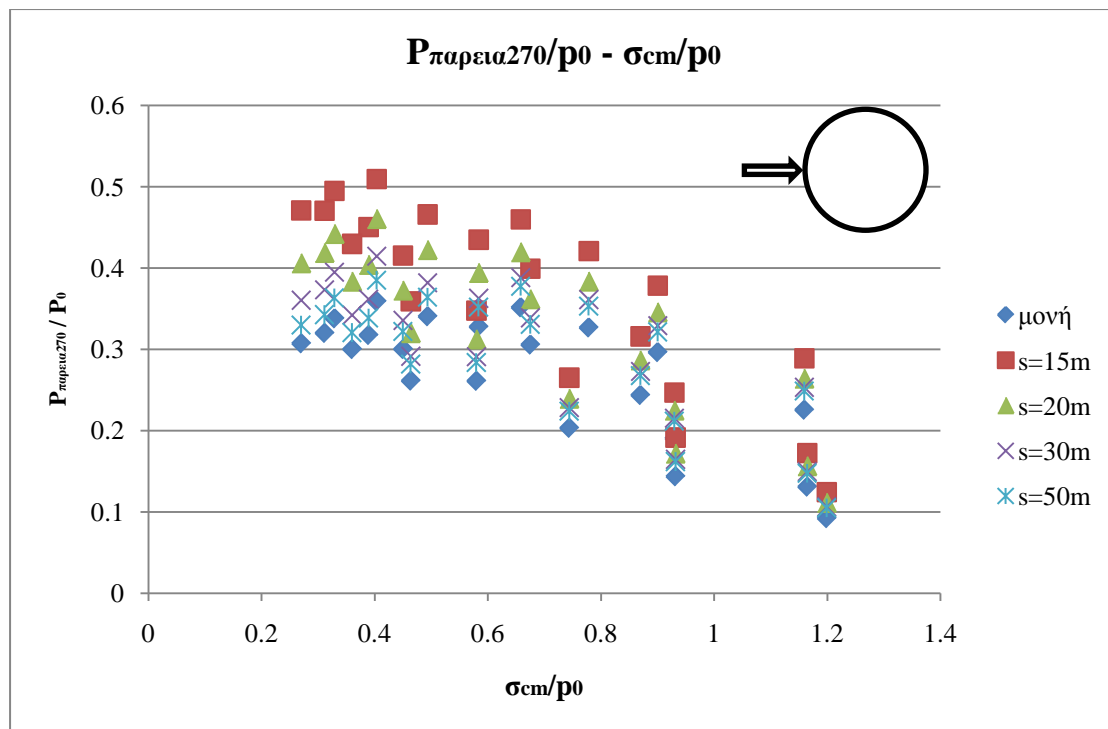
Από τα παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 7.1, 7.2, 7.3) είναι φανερό πως η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας, δηλαδή αύξηση του λόγου σ_{cm} / p_0 , οδηγεί σε μείωση της πίεσης στη μόνιμη επένδυση. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι καθώς αυξάνει η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων, η τιμή της πίεσης στη μόνιμη επένδυση, για συγκεκριμένη ποιότητας βραχώμαζα πλησιάζει εκείνη της μονής σήραγγας. Είναι φανερό ότι η εκσκαφή της δεύτερης σήραγγας στις πάρα πολύ ασθενείς βραχώμαζες οδηγεί σε αύξηση της μέσης πίεσης κατά 10% για αξονική απόσταση 50 μέτρων μέχρι και διπλασιασμό της τιμής της για αξονική απόσταση 15 μέτρων. Η μέγιστη πίεση μπορεί, σημειακά, να φτάσει και την τιμή 0.8 του P_0 για αξονική απόσταση 15 μέτρων. Στις καλές βραχώμαζες η αύξηση της μέσης πίεσης είναι αισθητά μικρότερη και πρακτικά μηδενίζεται για βραχώμαζες με λόγο σ_{cm} / p_0 μεγαλύτερο από 0.8 και αξονική απόσταση μεγαλύτερη από 30 μέτρα. Τέλος, για βραχώμαζες με λόγο σ_{cm} / p_0 μεγαλύτερο από 1.2, μπορούμε να πούμε ότι πρακτικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων, παρά μόνο για την πολύ μικρή αξονική απόσταση των 15 μέτρων. Για αξονική απόσταση 15 μέτρων, δηλαδή μόλις 5 μέτρα γεωυλικό από τη παρειά της μιας σήραγγας μέχρι τη παρειά της άλλης, μπορούμε να υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει απλά αλληλεπίδραση, αλλά επί της ουσίας οι δύο σήραγγες συμπεριφέρονται σαν μία, με διάμετρο το άθροισμα των δύο διαμέτρων των σηράγγων.



Διάγραμμα 7.4: Λόγος πιέσεων στην οροφή ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



Διάγραμμα 7.5: Λόγος πιέσεων στην εσωτερική παρειά ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

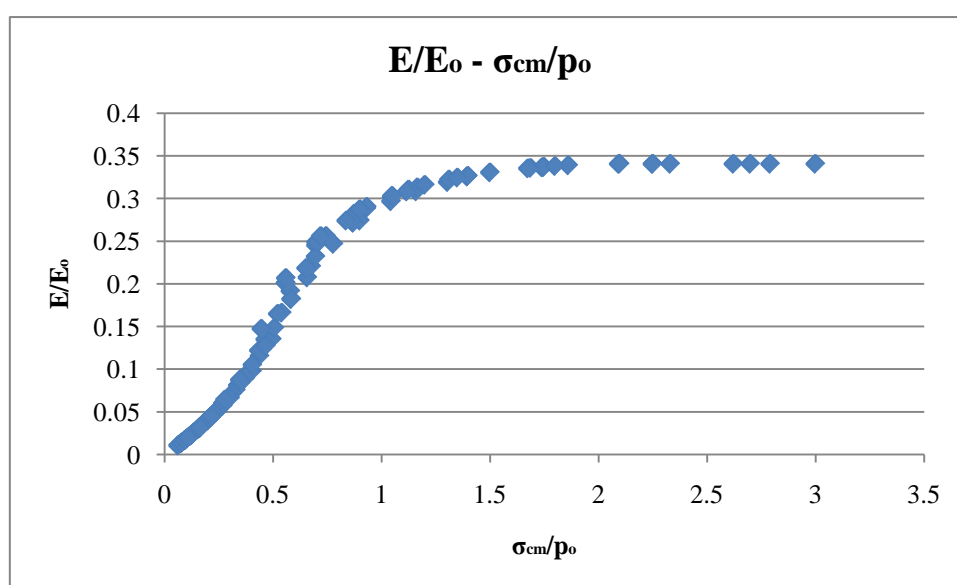


Διάγραμμα 7.6: Λόγος πιέσεων στην εξωτερική παρειά ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Από τα παραπάνω διαγράμματα (Διάγραμμα 7.4, 7.5, 7.6) είναι φανερό πως για μονή σήραγγα οι πιέσεις στη μόνιμη επένδυση έχουν μέγιστη τιμή στην οροφή και ελάχιστη στις παρειές. Αυτό συμβαίνει διότι, για $K = 5$, η κατακόρυφη τάση είναι μεγαλύτερη της οριζόντιας. Έτσι, οι μετατοπίσεις στην οροφή είναι μεγαλύτερη στην οροφή. Περισσότερες μετατοπίσεις, οδηγούν και σε μεγαλύτερο βαθμό αποτόνωσης, κάτι που συνεπάγεται και λιγότερες πιέσεις. Αντίθετα, όσο η απόσταση μεταξύ των δύο σηράγγων μειώνεται, τόσο η θέση που εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της πίεσης στη μόνιμη επένδυση μετατοπίζεται προς την ενδιάμεση ζώνη μεταξύ των δύο σηράγγων. Αυτό συμβαίνει διότι μεταξύ δύο σηράγγων δημιουργείται μια ζώνη έντονων πλαστικών παραμορφώσεων εξαιτίας του φαινομένου της επαλληλίας και ως εκ τούτου η αντοχή της βραχώμαζας εντός της πλαστικής αυτής περιοχής είναι μικρότερη. Έτσι η συγκεκριμένη βραχώμαζα παραλαμβάνει λιγότερα φορτία, με αποτέλεσμα αυτά τα φορτία να καλείται να τα παραλάβει η μόνιμη επένδυση. Το φαινόμενο, όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, εξασθενεί όσο βελτιώνεται ο δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας.

7.2) Κατανομή πιέσεων στην τελική επένδυση ως προς τον λόγο σ_{cm} / p_0 με επίδραση του συντελεστή K

Στα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας παρατηρήθηκε πως οι τιμές είχαν μεγάλη τυπική απόκλιση μεταξύ τους. Αυτό συνέβη διότι, όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχει επίδραση της μεθόδου αποτόνωσης. Η επίδραση της μεθόδου μαθηματικοποιείται με τον λόγο E/E_0 , ο οποίος μεταβάλλεται με το λόγο σ_{cm} / p_0 , όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

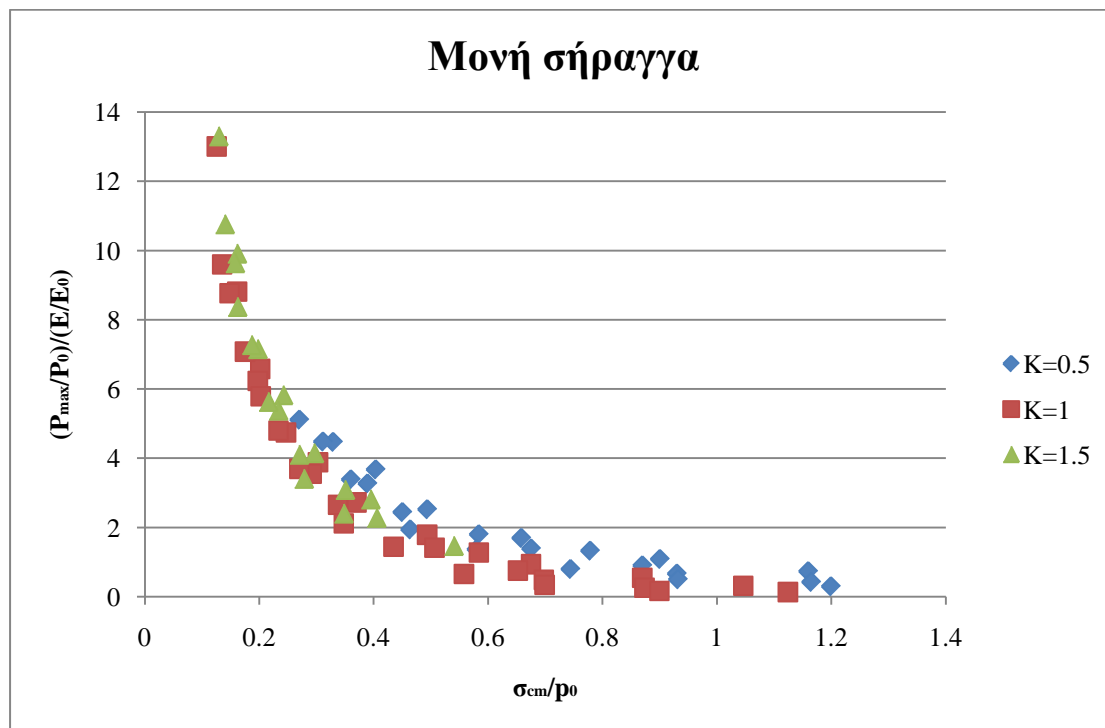


Διάγραμμα 7.7: Επίδραση της μεθόδου απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει, ότι για δυσμενέστερες γεωτεχνικές συνθήκες, δηλαδή για μικρή τιμή του λόγου σ_{cm}/p_0 , ο λόγος E/E_0 αυξάνεται εκθετικά. Αυτό συμβαίνει επειδή στις χαμηλής αντοχής βραχόμαζες η αποτόνωση πραγματοποιείται πολύ γρήγορα κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Όσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζα βελτιώνονται και για λόγο σ_{cm} / p_0 μεγαλύτερο από 0.7, ο λόγος E /E_0 αυξάνει αλλά με μειούμενο ρυθμό, μέχρι να πλησιάσει ασυμπτωτικά τη τιμή 0.35 για βήμα προχώρησης 1 μέτρο. Σε αυτής της ποιότητας τα γεωυλικά η αποτόνωση γίνεται με ποιο αργό ρυθμό. Στις καλύτερης ποιότητας βραχόμαζες η αποτόνωση είναι μεγαλύτερη. Η μεγάλη αποτόνωση οδηγεί και σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης, με

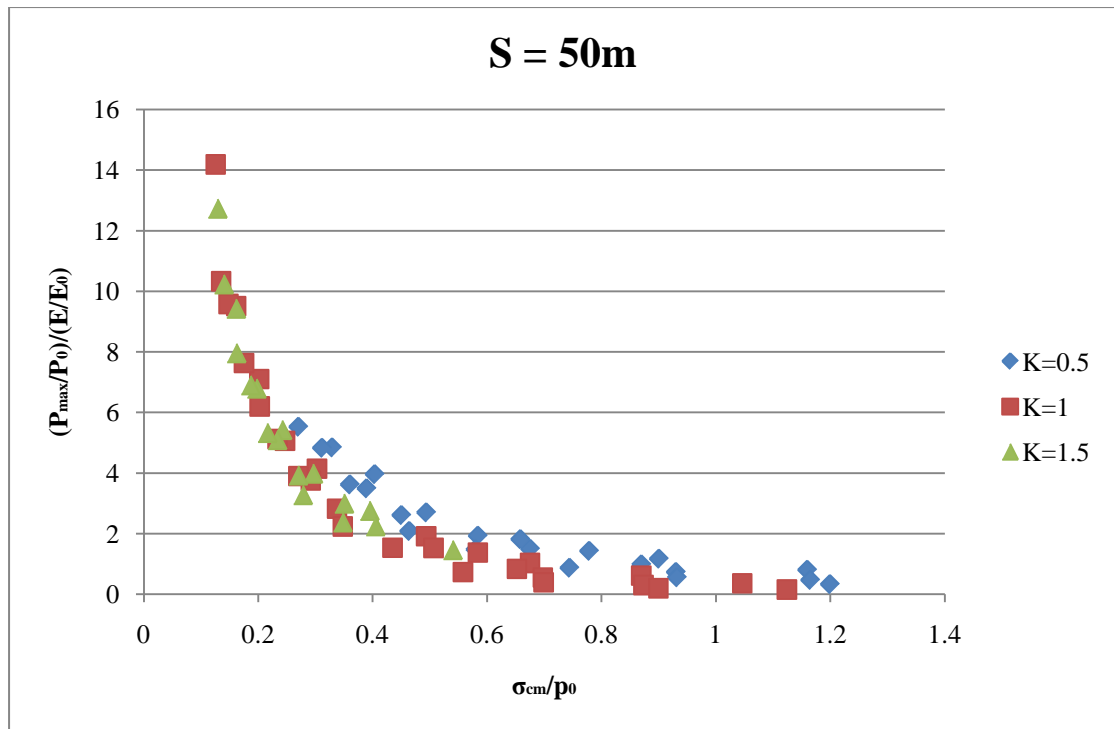
αποτέλεσμα κατά την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης να αναπτύσσονται μικρότερες πιέσεις στην διατομή, εφόσον το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων έχει εκδηλωθεί με την εμφάνιση των μετατοπίσεων κατά τη φάση της εκσκαφής.

Στα παρακάτω διαγράμματα (διάγραμμα 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12), παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή γεωστατικών τάσεων K στο λόγο P_{max} / P_0 καθώς αυξάνεται η ποιότητα της βραχώμαζας (σ_{cm} / p_0) κανονικοποιημένο ως προς την μέθοδο αποτόνωσης με τη χρήση του λόγου E/E_0 .

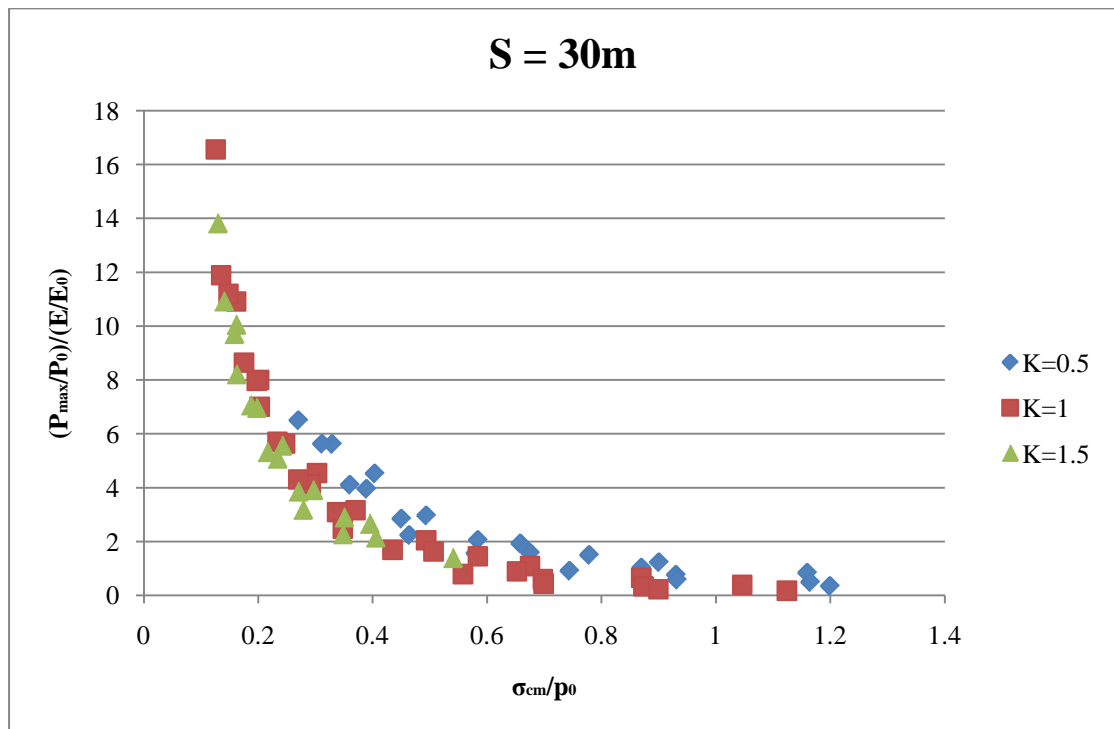


Διάγραμμα 7.8: Επίδραση του συντελεστή K στο λόγο P_{max} / P_0 κανονικοποιημένο ως προς E/E_0 σε μονή σήραγγα

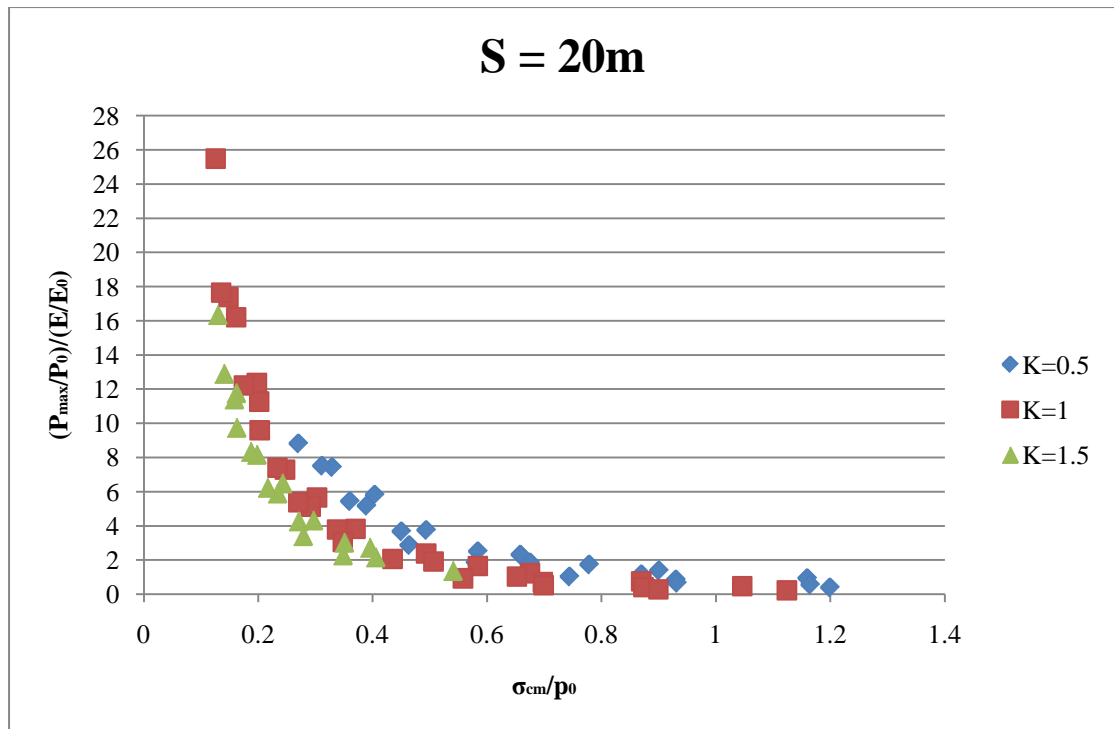
Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 7.8), σε μια σήραγγα, όσο βελτιώνεται η βραχώμαζα, ο λόγος της μέγιστης πίεσης προς την μέση γεωστατική πίεση, για κάθε K , μειώνεται εκθετικά μέχρι ο λόγος σ_{cm} / p_0 να λάβει τη τιμή 0.7, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 0.7, για κάθε τιμή του K υπάρχει πολύ μικρός ρυθμός μείωσης του λόγου $(P_{max}/P_0)/(E/E_0)$. Αυτό συμβαίνει, γιατί όπως παρουσιάστηκε στο διάγραμμα 7.7, για μικρή τιμή του λόγου σ_{cm}/p_0 , ο λόγος E/E_0 αυξάνεται εκθετικά, ενώ για λόγο σ_{cm} / p_0 μεγαλύτερο από 0.7, ο λόγος E / E_0 αυξάνει αλλά με μειούμενο ρυθμό, μέχρι να πλησιάσει ασυμπτωτικά τη τιμή 0.35.



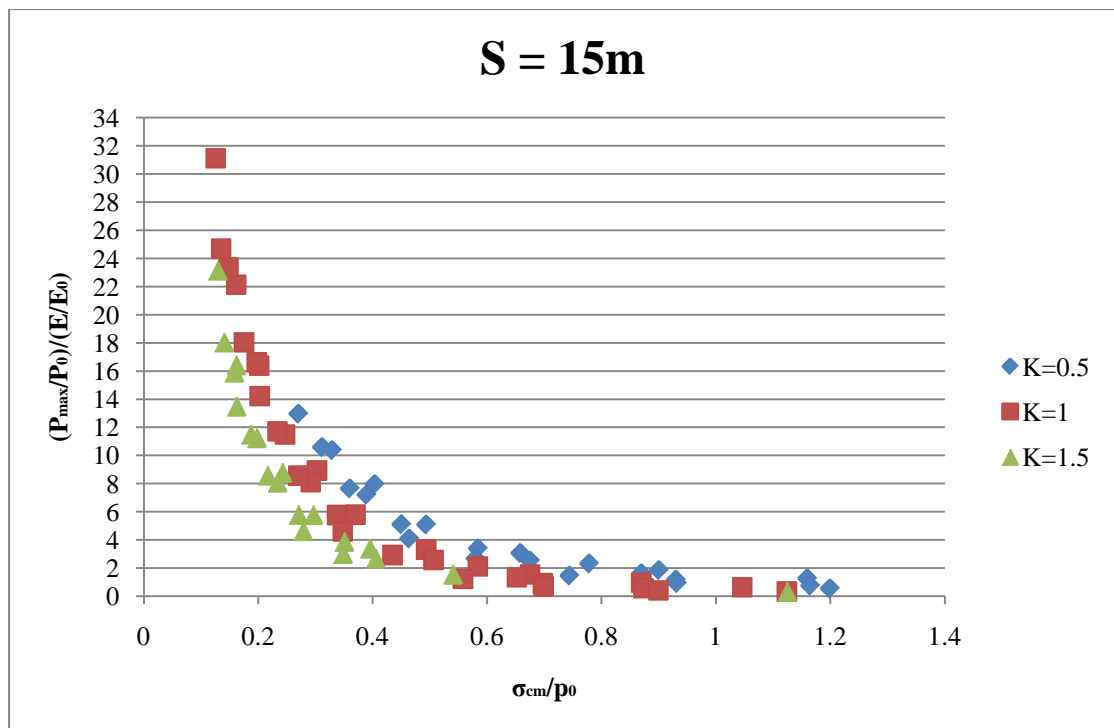
Διάγραμμα 7.9: Επίδραση του συντελεστή K στο λόγο P_{max} / P_0 κανονικοποιημένο ως προς E/E_0 για αξονική απόσταση σηράγγων 50 μέτρα



Διάγραμμα 7.10: Επίδραση του συντελεστή K στο λόγο P_{max} / P_0 κανονικοποιημένο ως προς E/E_0 για αξονική απόσταση σηράγγων 30 μέτρα

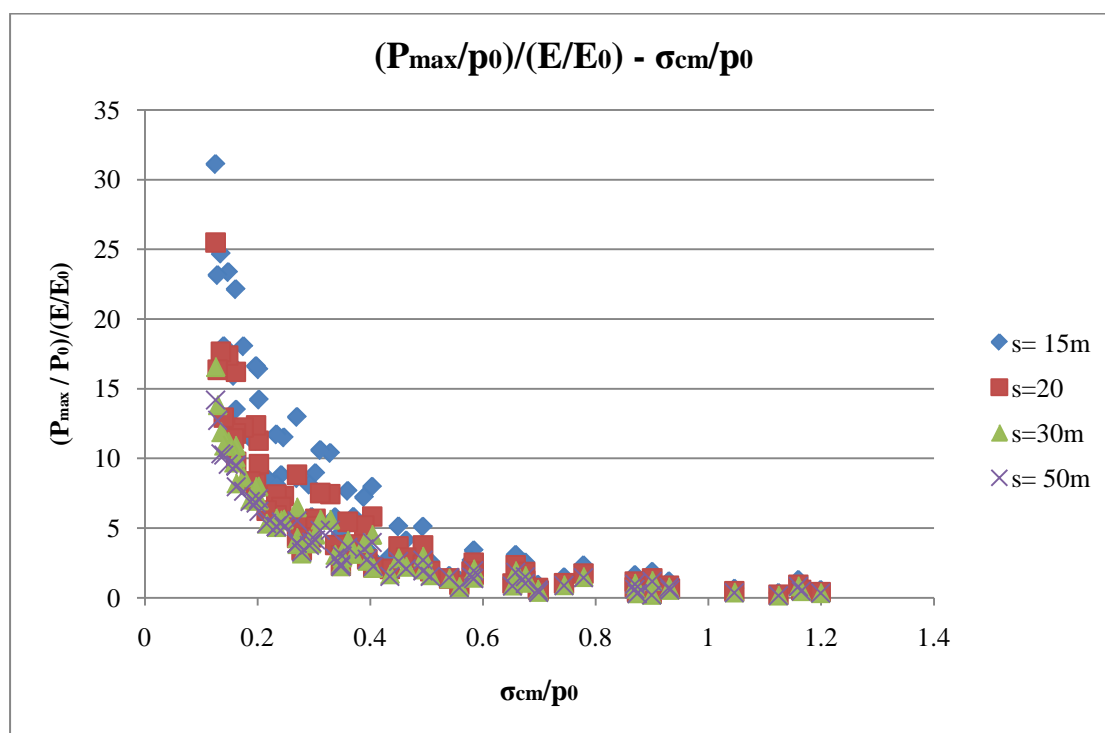


Διάγραμμα 7.11: Επίδραση του συντελεστή K στο λόγο P_{max} / P_0 κανονικοποιημένο ως προς E/E_0 για αξονική απόσταση σηράγγων 20 μέτρα



Διάγραμμα 7.12: Επίδραση του συντελεστή K στο λόγο P_{max} / P_0 κανονικοποιημένο ως προς E/E_0 για αξονική απόσταση σηράγγων 15 μέτρα

Στα διαγράμματα 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, είναι φανερό πως η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια ανεξάρτητα από την αξονική απόσταση. Οι απόλυτες τιμές είναι μεγαλύτερες καθώς μειώνεται η αξονική απόσταση και άρα αυξάνεται η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων, ενώ για τιμή σ_{cm} / ρ_0 μεγαλύτερη του 0.7 παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο με την μονή σήραγγα. Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι απόσταση των τριών καμπυλών μεγαλώνει με την μείωση της αξονικής απόστασης των δύο σηράγγων, ενώ τα σημεία τους πρακτικά τείνουν να συμπέσουν για μεγάλες αποστάσεις. Τέλος μπορεί να παρατηρηθεί πως η καμπύλη για $K = 1.5$ βρίσκεται πιο κάτω από την καμπύλη για $K = 1$ και αυτή με τη σειρά της βρίσκεται πιο κάτω από τη καμπύλη $K = 0.5$. Αυτό συμβαίνει διότι η μέση γεωστατική τάση η οποία διαιρεί τη τιμή της μέσης πίεσης εξαρτάται από το συντελεστή K . Όσο το K μεγαλώνει, τόσο αυξάνει και η τιμή της, άρα μειώνεται ο λόγος P_{max} / P_0 . Στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 7.13) γίνεται αντιληπτό πως η επίδραση της αξονικής απόστασης είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνης του K .

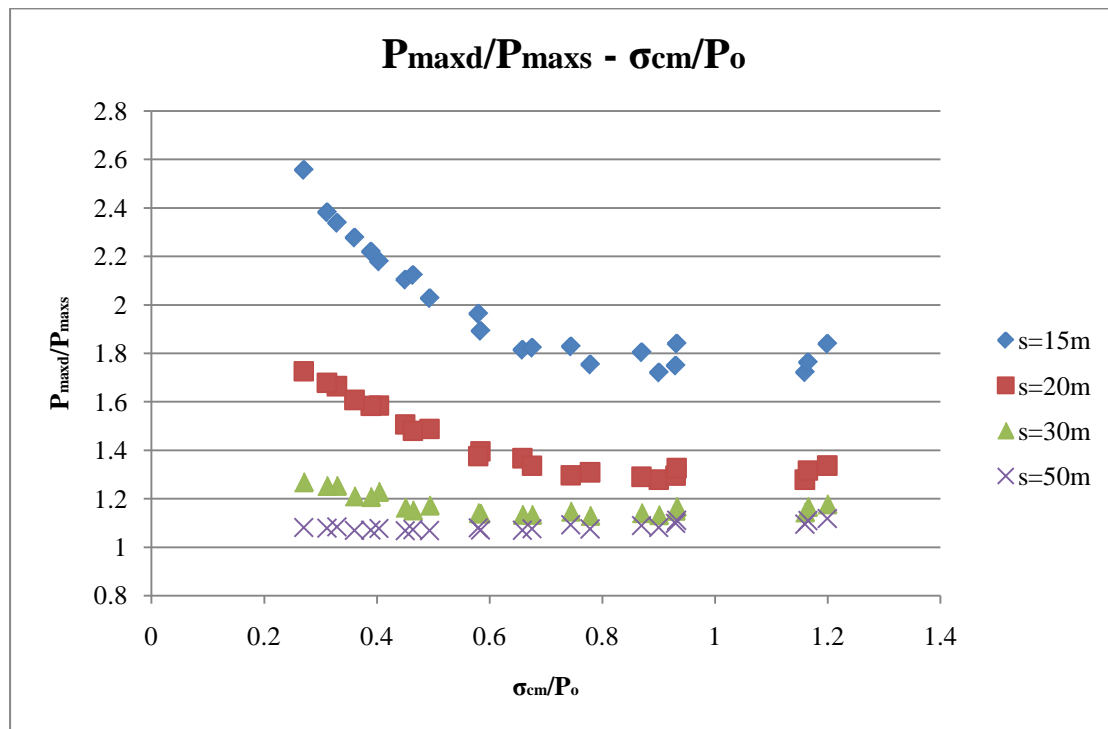


Διάγραμμα 7.13: Λόγος μέγιστων πιέσεων ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών για κάθε τιμή K

7.3) Ποσοστό αύξησης των πιέσεων στις δύο σήραγγες λόγω εκσκαφής του δευτέρου κλάδου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η αύξηση των πιέσεων στη μόνιμη επένδυση των δύο σηράγγων. Για τη σύγκριση θα χρησιμοποιηθεί οι λόγοι P_d / P_s και P_n / P_s , δηλαδή, όπως εξηγήθηκε στην αρχή του κεφαλαίου 7, οι λόγοι της πίεσης στη μόνιμη επένδυση της αριστερής (προϋπάρχουσας) σήραγγας προς τη πίεση στη μόνιμη επένδυση της μονής σήραγγας και της πίεσης της δεξιάς (νέας) προς τη πίεση της μονής αντίστοιχα. Ο συντελεστής γεωστατικών πιέσεων K επιλέχθηκε να είναι ίσος με 0.5. Για $K = 1$ και $K = 1.5$, ο λόγος των πιέσεων επηρεάζεται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

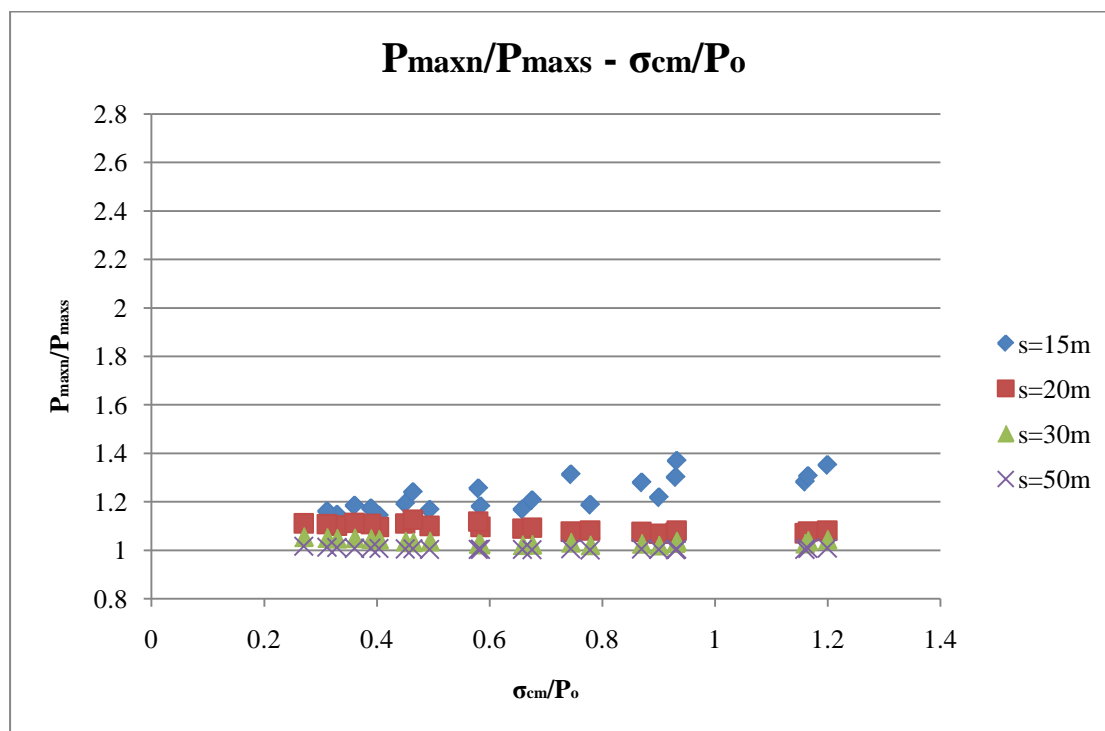
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 7.14) παρουσιάζεται η αύξηση της μέγιστης πίεσης στη μόνιμη επένδυση της αριστερής (προϋπάρχουσα) σήραγγας, σε σχέση με τη πίεση που θα ασκούταν αν ήταν μόνη της.



Διάγραμμα 7.14: Λόγος αύξησης μέγιστων πιέσεων στον αριστερό κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Από το παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 7.14) είναι φανερό πως η βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας μικραίνει την αύξηση των πιέσεων στον αριστερό κλάδο. Παρατηρείται επίσης, πως για καλής ποιότητας βραχώμαζας (από σ_{cm} / P_0 μεγαλύτερο από 0.8) η αύξηση στη μέγιστη πίεση στη μόνιμη επένδυση παραμένει σταθερή και εξαρτάται αποκλειστικά από την αξονική απόσταση. Για αξονική απόσταση 15 μέτρων η αύξηση στη πίεση που εφαρμόζεται στη μόνιμη επένδυση κυμαίνεται από 2.6 φορές παραπάνω από εκείνη που θα ασκούταν αν ήταν μονή η σήραγγα για κακής ποιότητας βραχώμαζας και καταλήγει 1.8 φορές παραπάνω για βραχώμαζες με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά ($\sigma_{cm} / P_0 > 0.8$). Για αξονική απόσταση 20 μέτρων η πίεση αυξάνει από 1.8 φορές για ασθενείς βραχώμαζες, ενώ για καλύτερης ποιότητας βραχώμαζες, η αύξηση φτάνει στο 30%. Για αξονική απόσταση 30 μέτρων η επίδραση λόγω της διάνοιξης της δεύτερης σήραγγας μικραίνει. Έτσι, η αύξηση της μέγιστης πίεσης για ασθενείς βραχώμαζες είναι της τάξης του 25%, ενώ σταδιακά μειώνεται μέχρι 18% για καλής ποιότητας βραχώμαζες. Τέλος, για αξονική απόσταση 50 μέτρων, δηλαδή 5 διαμέτρων της σήραγγας, η αύξηση της μέγιστης πίεσης είναι πρακτικά αμελητέα, αφού είναι περίπου 10%.

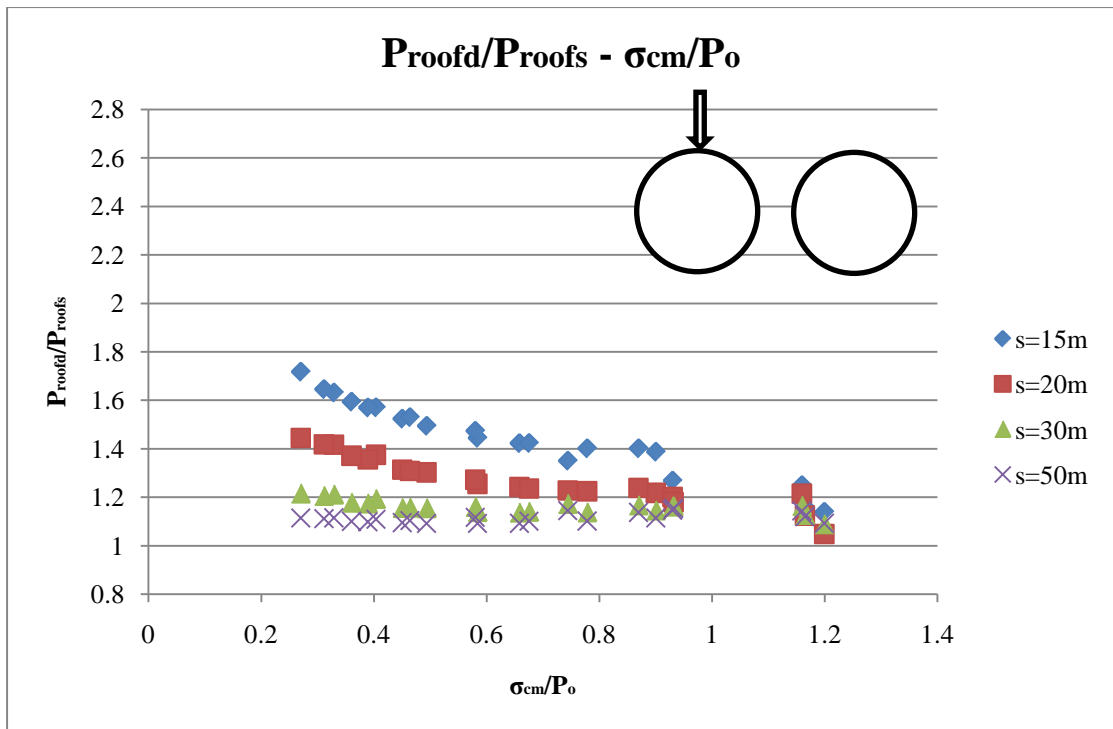
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 7.15) παρουσιάζεται η αύξηση της μέγιστης πίεσης στη μόνιμη επένδυση στην δεξιά (νέα) σήραγγα, σε σχέση με τη πίεση που θα ασκούταν αν ήταν μόνη της.



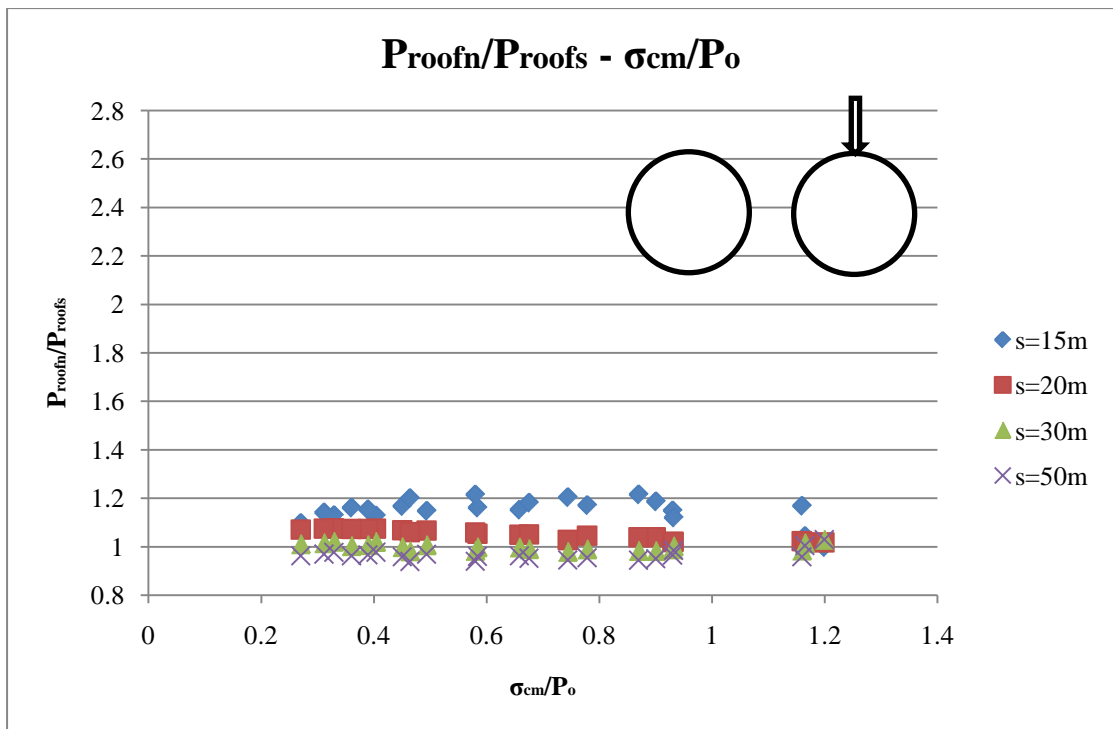
Διάγραμμα 7.15: Λόγος αύξησης μέγιστων πιέσεων στον δεξιό κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Από το παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 7.15), είναι φανερό πως η αύξηση της μέγιστης πίεσης που ασκείται στη μόνιμη επένδυση στον δεξιό (νέο) κλάδο είναι σαφώς μικρότερη από εκείνης του αριστερού. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την εκσκαφή του δεύτερου κλάδου, έχει ήδη αποτονωθεί η βραχόμαζα, λόγω της εκσκαφής του πρώτου κλάδου, με αποτέλεσμα τις περισσότερες πιέσεις να τις παραλαμβάνει ο πρώτος κλάδος. Για αξονικές αποστάσεις πάνω από 30 μέτρα, στον δεξιό κλάδο οι πιέσεις δεν μεγαλώνουν λόγω αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων, ενώ για αξονική απόσταση 20 μέτρων και για πολύ κακής ποιότητας βραχόμαζες, υπάρχει αύξηση της πίεσης στη μόνιμη επένδυση κατά 15%, η οποία, όμως, με μικρή βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του γεωυλικού φτάνει σε τιμές κάτω του 10%, που είναι πρακτικά αμελητέα. Για αξονική απόσταση 15 μέτρα, παρατηρούμε, ότι η μέγιστη πίεση στη μόνιμη επένδυση του δεξιού κλάδου αυξάνει καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας. Αυτό είναι αποτέλεσμα συνδυασμού διαφόρων παραγόντων. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας οδηγεί σε μικρότερες μετατοπίσεις και άρα μικρότερη αποτόνωση, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στις πιέσεις. Ακόμα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια μέθοδος η οποία μπορεί να έχει σφάλματα μικρής έκτασης, ιδιαίτερα στη μελέτη γεωυλικών, τα οποία έχουν πολύ μικρότερες τιμές αντοχών από άλλα υλικά όπως πχ. μέταλλα. Τέλος, η αξονική απόσταση των 15 μέτρων, σημαίνει μόλις 5 μέτρα γεωυλικό από παρειά σε παρειά των σηράγγων. Είναι λογικό, για ασθενείς βραχόμαζες, να αστοχεί πλήρως το ενδιάμεσο αυτό υλικό και ουσιαστικά να αναλύεται το πρόβλημα σαν μία σήραγγα, με ακτίνα όση των δύο σηράγγων.

Στα παρακάτω διαγράμματα (διαγράμματα 7.16, 7.17) παρουσιάζεται η αύξηση της τιμής της πίεσης στην οροφή των δύο σηράγγων, λόγω της εκσκαφής των δύο κλάδων. Στη συνέχεια, στα διαγράμματα 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, παρουσιάζονται οι αλλαγές στη τιμή της πίεσης στη μόνιμη επένδυση στις παρειές των δύο σηράγγων. Ο λόγος που μελετώνται οι συγκεκριμένες θέσεις, είναι ότι στις περισσότερες μελέτες μόνιμης επένδυσης, υπολογίζεται μόνο το φορτίο οροφής και ένα ομοιόμορφο φορτίο στις παρειές. Στα διαγράμματα αυτά θα αποδειχτεί ότι αυτή η πρακτική είναι λανθασμένη στη περίπτωση των δύο σηράγγων, καθώς η εκσκαφή της δεύτερης δημιουργεί μια πλαστική ζώνη μεταξύ των δύο σηράγγων η οποία στρέφει τις μέγιστες πιέσεις προς την εσωτερικό περιοχή των δύο σηράγγων.



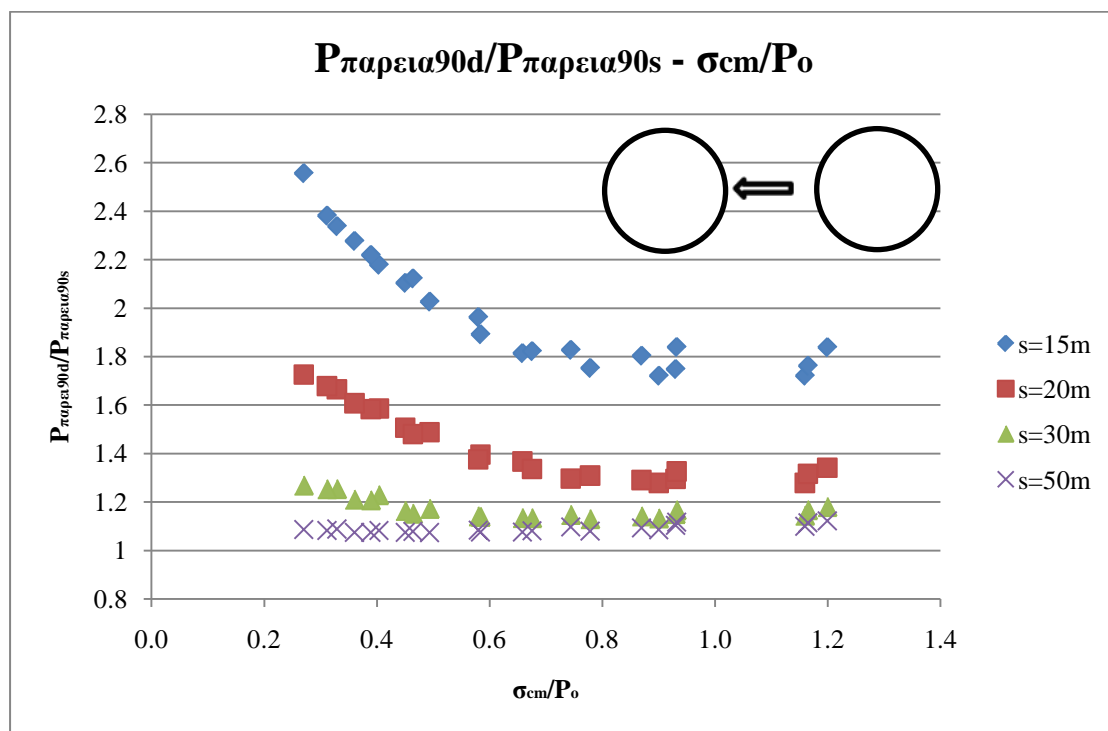
Διάγραμμα 7.16: Λόγος αύξησης πιέσεων οροφής στον αριστερό κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



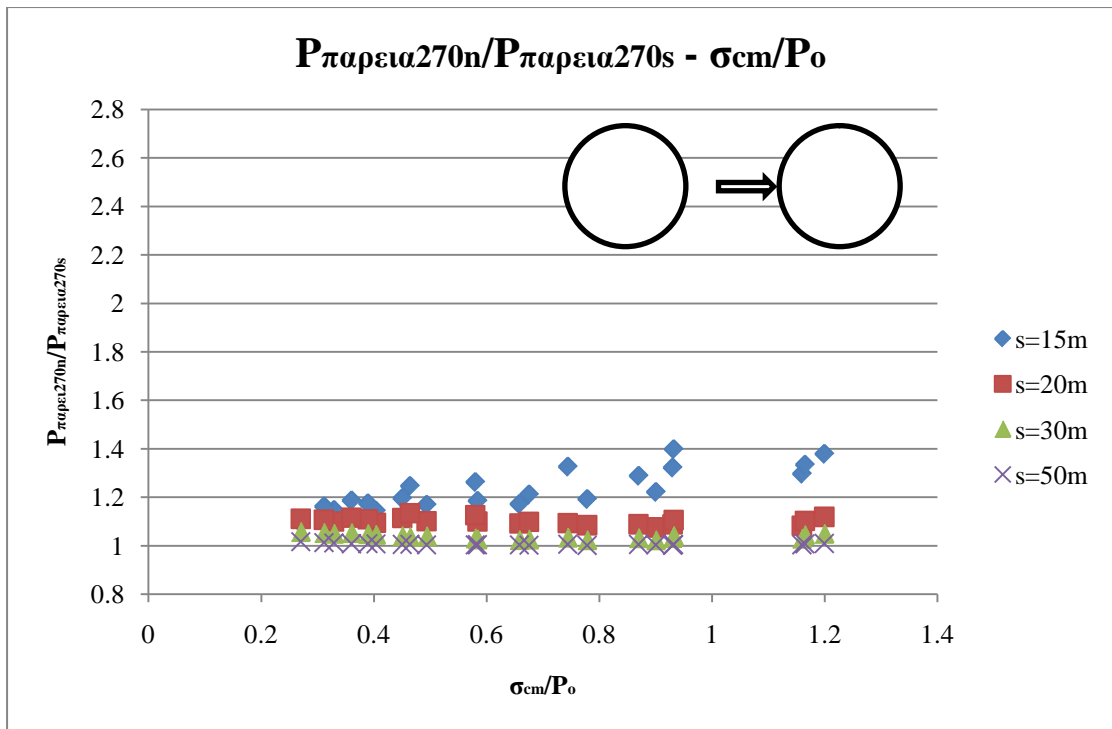
Διάγραμμα 7.17: Λόγος αύξησης πιέσεων οροφής στον δεξιό κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι φανερό πως η αύξηση της πίεσης στην οροφή των σηράγγων δεν συμπίπτει με εκείνη της μέγιστης πίεσης. Αντίθετα, η αύξηση στη πίεση οροφής για αξονική απόσταση των σηράγγων 15 μέτρα ξεκινάει από 1.8 φορές για πολύ ασθενείς βραχόμαζες και μειώνεται εκθετικά μέχρι την τιμή 1.2 για καλής ποιότητας βραχόμαζες. Για αξονική απόσταση 20 μέτρα, η αύξηση αυτή μικραίνει και κυμαίνεται από 1.4 για ασθενείς βραχόμαζες, μέχρι την τιμή 1.2 για καλές. Για μεγαλύτερη αξονική απόσταση, η αύξηση περιορίζεται σε ένα ποσοστό 20% για ασθενείς βραχόμαζες, μέχρι να μην υπάρχει ουσιαστική αύξηση σε καλύτερης ποιότητας βραχόμαζες. Στη δεύτερη σήραγγα (νέα), παρατηρείται ότι οι πιέσεις στην οροφή παρουσιάζουν μικρή αύξηση, που πρακτικά είναι αμελητέα για αξονικές αποστάσεις πάνω από 20 μέτρα, ενώ για αξονική απόσταση μικρότερη των 20 μέτρων η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 10% έως 20%.

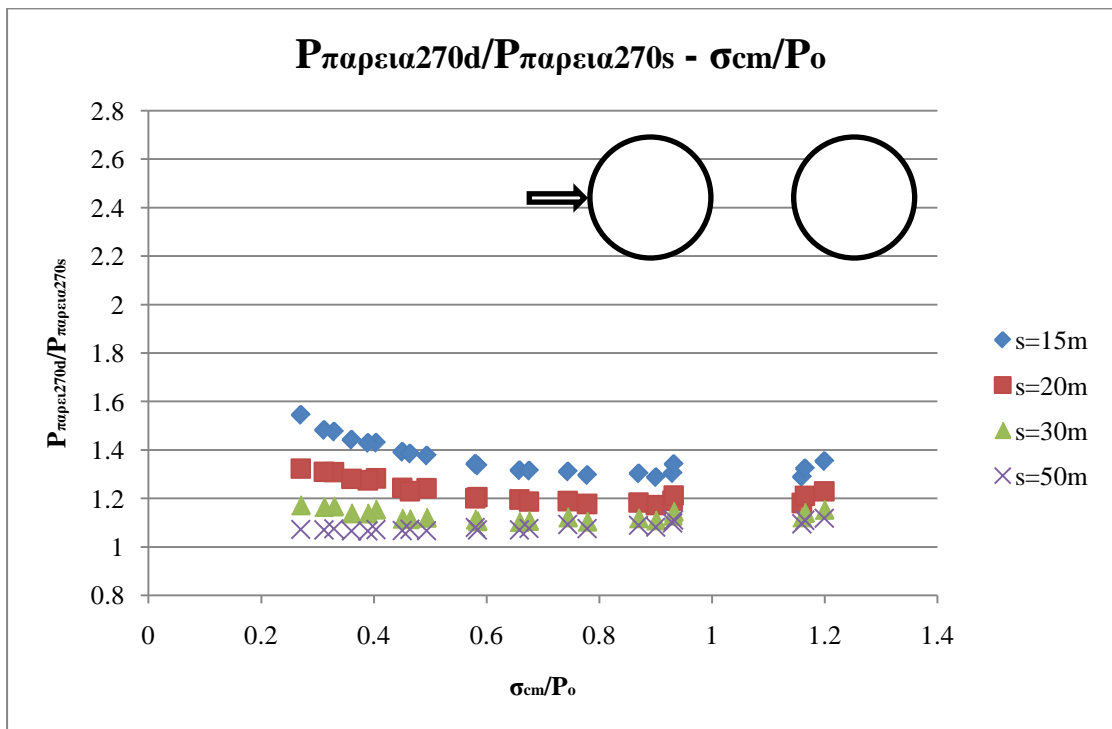
Στα παρακάτω διαγράμματα (διάγραμμα 7.18, 7.19, 7.20, 7.21), παρουσιάζεται η αύξηση της πίεσης στη μόνιμη επένδυση στις παρειές της αριστερής και της δεξιάς σήραγγας.



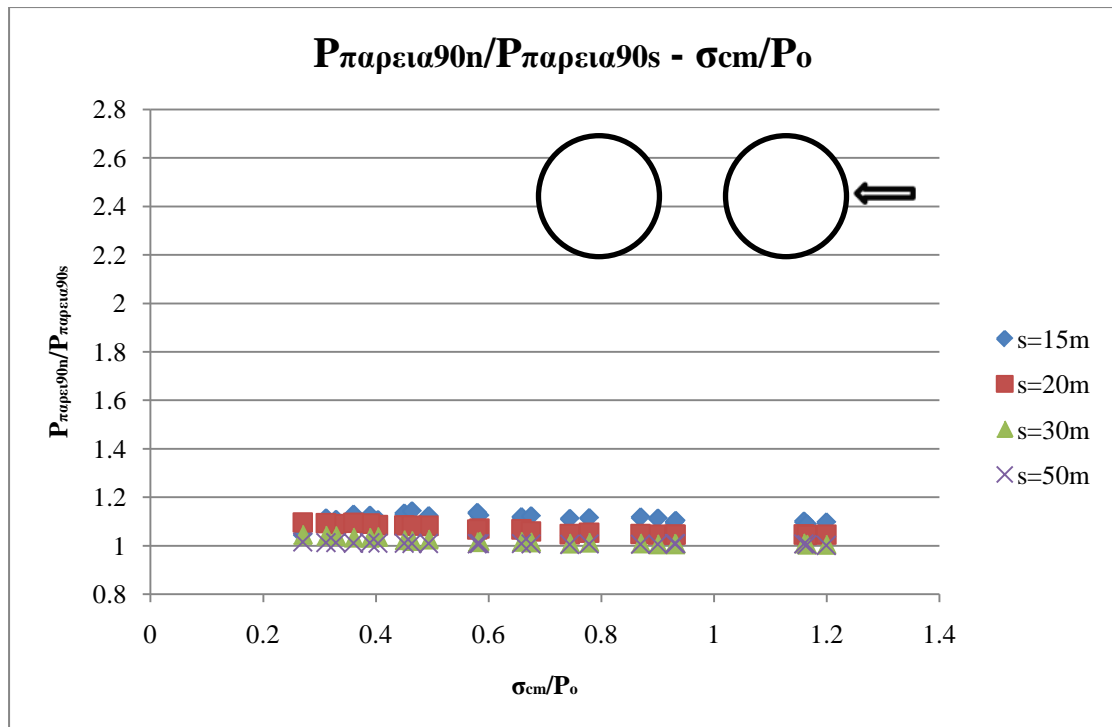
Διάγραμμα 7.18: Λόγος αύξησης πιέσεων στη δεξιά παρεία του αριστερού κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



Διάγραμμα 7.19: Λόγος αύξησης πιέσεων στην αριστερή παρειά του δεξιού κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



Διάγραμμα 7.20: Λόγος αύξησης πιέσεων στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



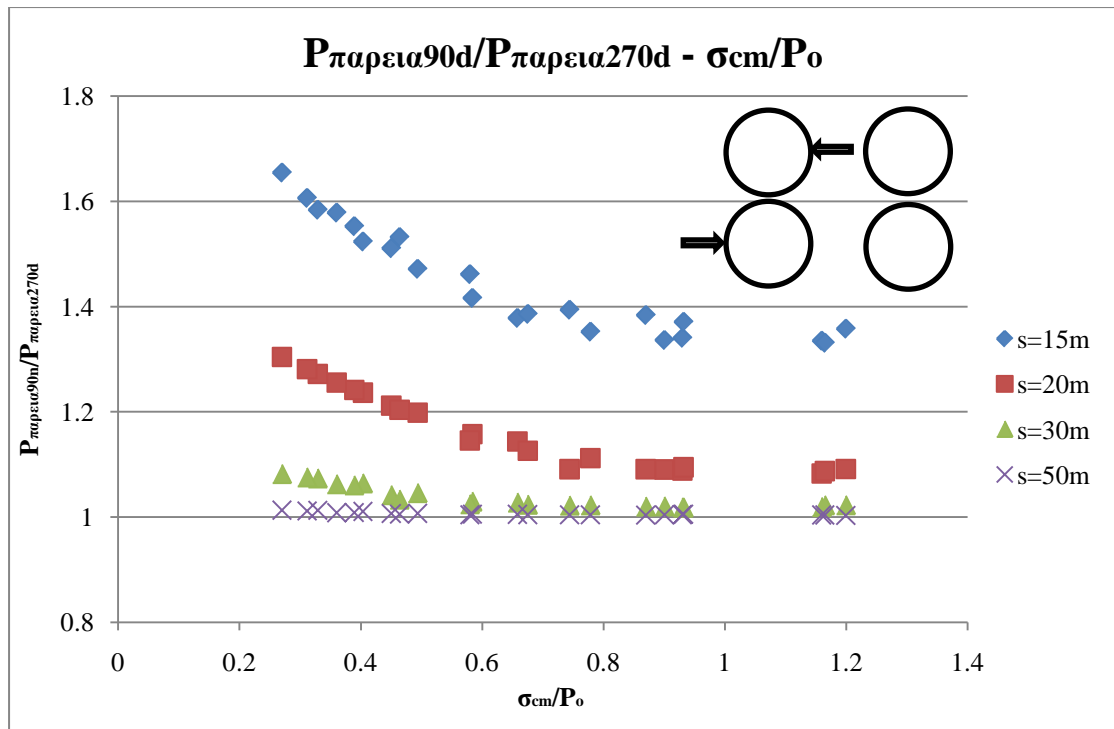
Διάγραμμα 7.21: Λόγος αύξησης πιέσεων στην αριστερή παρειά του δεξιού κλάδο ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Στα παραπάνω διαγράμματα (διάγραμμα 7.18, 7.19, 7.20, 7.21), είναι φανερή η επίδραση της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας εντός της ζώνης επιρροής της πρώτης. Στις παρειές των σηράγγων, οι οποίες βρίσκονται εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης εμφανίζεται και η μέγιστη αύξηση πιέσεων. Χαρακτηριστικό είναι ότι, στη προϋπάρχουσα σήραγγα η πίεση στην παρειά90°, για αξονική απόσταση 15 μέτρα αυξάνει από 180% σε ασθενείς βραχώμαζες, έως 80% για καλής ποιότητας. Για αξονική απόσταση 20 μέτρα η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 75% έως 30%, ενώ για αξονική απόσταση 30 μέτρων η αύξηση της πίεσης μειώνεται και κυμαίνεται από 25% έως 15%. Για αξονική απόσταση 50 μέτρα, δηλαδή 5 ακτίνες σήραγγας, οι δύο σήραγγες αλληλεπιδρούν ελάχιστα, με αποτέλεσμα η αύξηση της πίεσης στη παρειά90° να είναι μόλις 10%. Η διάνοιξη της δεύτερης σήραγγας προκαλεί αύξηση στη πίεση στη μόνιμη επένδυση και στη δεξιά παρειά (παρειά270°). Έτσι για αξονική απόσταση 15 μέτρα, η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 55% για κακής ποιότητας βραχώμαζες, έως 30% για καλής ποιότητας βραχώμαζες. Αύξηση της απόστασης μειώνει την αύξηση της πίεσης και έτσι για αξονική απόσταση 20 μέτρων έχουμε αύξηση από 35% έως 20%, ανάλογα με τη ποιότητα του γεωυλικού, ενώ το ποσοστό αυτό μειώνεται στο 18% για αξονική απόσταση 30 μέτρα και 10% για αξονική απόσταση 50 μέτρα αντίστοιχα.

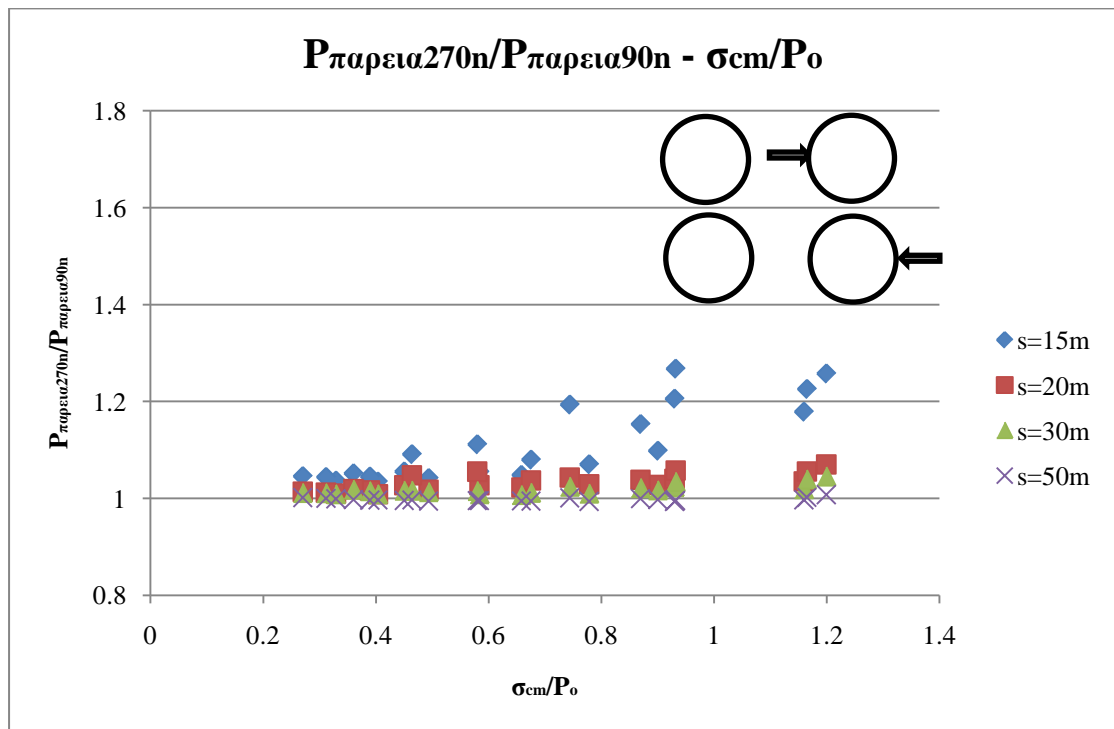
Στη δεξιά σήραγγα (νέος κλάδος), εμφανίζεται επίσης μια αύξηση στις πιέσεις στις παρειές, σε σχέση με το αν θα διανοιγόταν εκτός της ζώνης αλληλεπίδρασης. Η αύξηση είναι μεγαλύτερη στην αριστερή παρειά (παρειά 270°) σε σχέση με τη δεξιά (παρειά 90°). Στη δεξιά παρειά και για αξονική απόσταση 15 μέτρα η αύξηση που παρατηρείται κυμαίνεται από 15% έως 40%. Για αξονική απόσταση 20 μέτρα η αύξηση είναι 15%, για αξονική απόσταση 30 μέτρα η αύξηση αυτή περιορίζεται σε 12%, ενώ για αξονική απόσταση 50 μέτρα δεν παρατηρείται αύξηση στη πίεση στη μόνιμη επένδυση για τη δεξιά παρειά. Στην αριστερή παρειά (παρειά 90°), όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.21, δεν έχουμε πρακτικά αύξηση στη πίεση στη μόνιμη επένδυση, λόγω της κοντινής απόστασης των δύο σηράγγων.

7.4) Ανομοιόμορφη φόρτιση στις παρειές των σηράγγων

Όπως παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πίεση στις παρειές των δύο σηράγγων δεν αυξάνει ομοιόμορφα, λόγω της διάνοιξης τους εντός της ζώνης επιρροής τους. Η ανομοιόμορφη φόρτιση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Στις μελέτες, η συνήθης πρακτική είναι να υπολογίζονται τα φορτία της οροφής και εν συνεχεία να υπολογίζεται ένα φορτίο στις παρειές. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, γίνεται φανερό πως το μεγαλύτερο πρόβλημα στην μόνιμη επένδυση δεν το προκαλεί μόνο η αύξηση της πίεσης εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των σηράγγων, αλλά και η ανομοιόμορφη φόρτιση που δημιουργείται εξαιτίας της καταπόνησης της στήλης γεωυλικού που βρίσκεται εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων. Στα παρακάτω διαγράμματα (διάγραμμα 7.22, 7.23), παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της πίεσης στις δύο παρειές της κάθε σήραγγας.



Διάγραμμα 7.22: Λόγος πιέσεων δεξιάς και αριστερής παρειάς του αριστερού κλάδου ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών



Διάγραμμα 7.23: Λόγος πιέσεων αριστερής και δεξιάς παρειάς του δεξιού κλάδου ως προς το δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών

Στο διάγραμμα 7.22, γίνεται φανερό πως στην αριστερή (προϋπάρχουσα) σήραγγα υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά στη φόρτιση των δύο παρειών. Για αξονική απόσταση των δύο σηράγγων 15 μέτρα και για κακής ποιότητας βραχώμαζας η πίεση στην αριστερή παρειά είναι 65% περισσότερη από εκείνη στη δεξιά παρειά. Με την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών, η διαφορά αυτή μειώνεται και φτάνει το 35% για καλής ποιότητας βραχώμαζα. Για αξονική απόσταση 20 μέτρων, το ποσοστό μειώνεται και κυμαίνεται από 30% για κακής ποιότητας βραχώμαζες μέχρι 10% για καλής ποιότητας. Σταδιακά, με την αύξηση της αξονικής απόστασης των σηράγγων μειώνεται και η διαφορική φόρτιση των παρειών. Έτσι, για αξονική απόσταση 30 μέτρων, η πίεση στην αριστερή παρειά είναι 10% μεγαλύτερη από εκείνη στη δεξιά, ενώ με τη βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας, για λόγο σ_{cm} / p_0 μεγαλύτερο από 0.6, η διαφοροποίηση παύει πρακτικά να υπάρχει. Τέλος, για απόσταση 50 μέτρων η πίεση στις δύο παρειές είναι πρακτικά η ίδια, ανεξάρτητα από τη ποιότητα της βραχώμαζας.

Στη δεξιά (νέος κλάδος) σήραγγα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.23, η φόρτιση στις δύο παρειές για αξονικές αποστάσεις μεγαλύτερες από 20 μέτρα είναι σταθερή. Η διαφοροποίηση που παρατηρείται για αξονική απόσταση 15 μέτρων οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε σε συνδυασμό διαφόρων παραγόντων. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας οδηγεί σε μικρότερες μετατοπίσεις και άρα μικρότερη αποτόνωση, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στις πιέσεις. Ακόμα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια μέθοδος η οποία μπορεί να έχει σφάλματα μικρής έκτασης, ιδιαίτερα στη μελέτη γεωυλικών, τα οποία έχουν πολύ μικρότερες τιμές αντοχών από άλλα υλικά όπως πχ. μέταλλα. Τέλος, η αξονική απόσταση των 15 μέτρων, σημαίνει μόλις 5 μέτρα γεωυλικό από παρειά σε παρειά των σηράγγων. Είναι λογικό, για ασθενείς βραχώμαζες, να αστοχεί πλήρως το ενδιάμεσο αυτό υλικό και ουσιαστικά να αναλύεται το πρόβλημα σαν μία σήραγγα, με ακτίνα όση των δύο σηράγγων.

8) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αυτή έγινε φανερό πως η αύξηση της αξονικής απόστασης των δύο σηράγγων μειώνει εκθετικά την αλληλεπίδρασή τους. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος γεωολογικού, μικραίνει την επίδραση της αξονικής απόστασης των σηράγγων. Έτσι, για παράδειγμα, για δυο σήραγγες που διανοίγονται σε καλής ποιότητας βραχώμαζα σε μικρή αξονική απόσταση η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων είναι παρόμοια με την αλληλεπίδραση δύο σηράγγων, οι οποίες διανοίγονται σε κακής ποιότητας γεωολογικό, αλλά σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο, κατά τη μελέτη διάνοιξης μιας σήραγγας δίπλα σε μια άλλη, θα πρέπει να εξετάζεται η αλλαγή της χάραξης, αν είναι βέβαια εφικτό, παρά να γίνεται βελτίωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ή σχεδιασμός μιας πολύ βαριάς και άρα ακριβής υποστήριξης. Η απόφαση για αλλαγή χάραξης ή για προσπάθεια βελτίωσης της βραχώμαζας μεταξύ των δύο σηράγγων είτε με τσιμεντενέσεις είτε με αγκυρώσεις, είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο είναι οικονομικής φύσεως. Το διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 8.1), μπορεί να δείξει πόσο πρέπει να αυξηθεί η αξονική απόσταση των κλάδων σήραγγας ή πόση πρέπει να είναι η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών για να μην υπάρξει αύξηση του μέσου φορτίου στη προϋπάρχουσα σήραγγα παραπάνω από το επιθυμητό. Έτσι για παράδειγμα, αν πρέπει να γίνει διάνοιξη δεύτερης σήραγγας σε γεωολογικό με δείκτη γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_{cm} / P_0 = 1$, δίπλα σε μια παλαιότερη, της οποίας η επένδυση δεν μπορεί να δεχτεί αύξηση του μέσου φορτίου παραπάνω από 10% τότε η αξονική απόσταση των δύο κλάδων δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 35 μέτρα. Αντίστοιχα, αν η αύξηση της απόστασης των δύο κλάδων είναι ανέφικτη ή αντικοινομική, τότε πρέπει να γίνει βελτίωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ή ενίσχυση της επένδυσης της προϋπάρχουσας σήραγγας.

Η επίδραση του ύψους H των υπερκειμένων είναι μεγάλη, όσο αφορά την απόλυτη τιμή των πιέσεων και των παραμορφώσεων, αλλά η αύξηση των τιμών αυτών που συντελείται σε μια σήραγγα, λόγω της εκσκαφής μια δεύτερης, είναι πολύ μικρή. Έτσι, για παράδειγμα, διπλασιασμός του ύψους των υπερκειμένων μπορεί να αυξάνει τις μετατοπίσεις στη σήραγγα, αλλά το ποσοστό αύξησης των μετατοπίσεων εξαιτίας της διάνοιξης της δεύτερης να είναι περίπου το ίδιο.

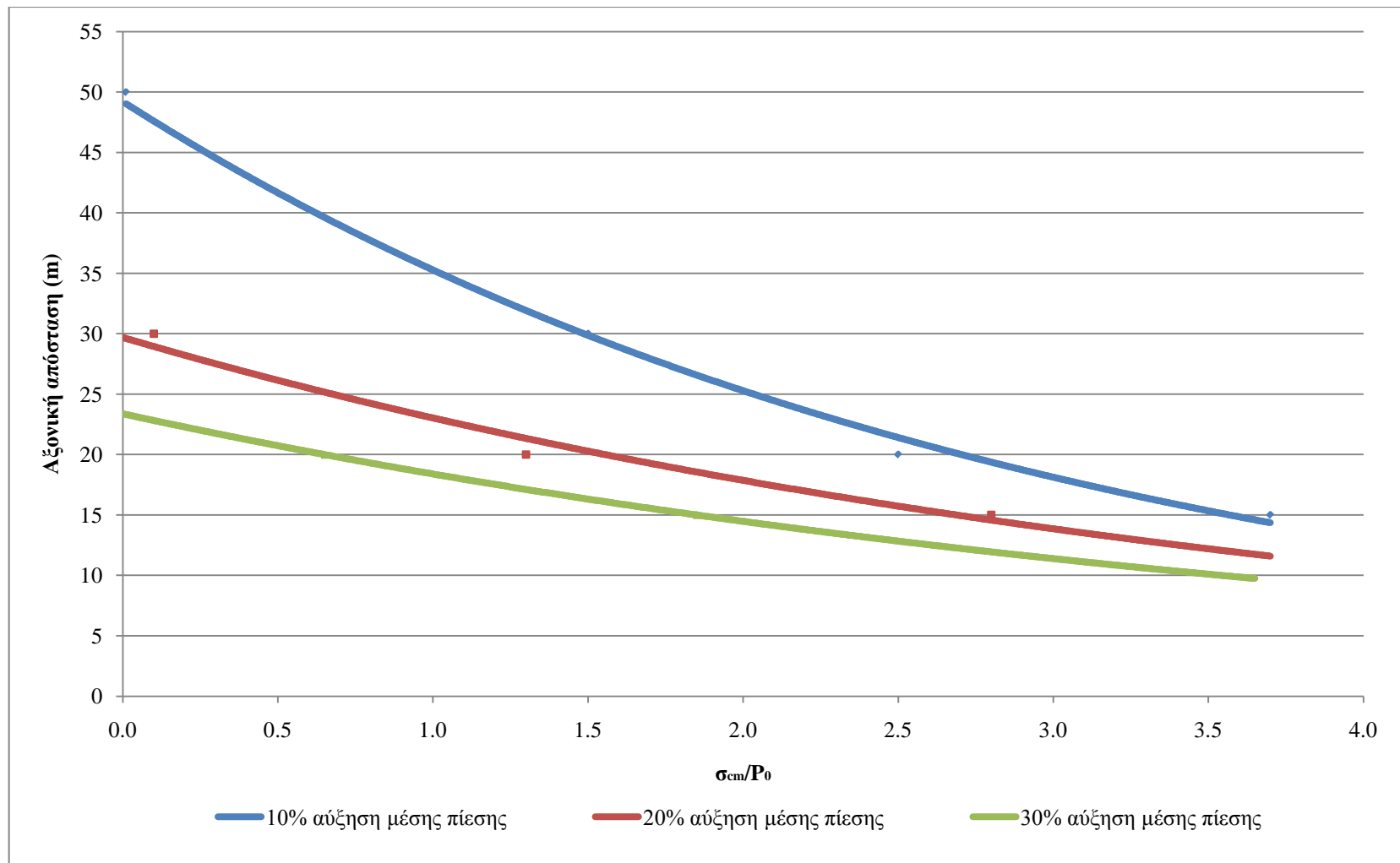
Ο συντελεστής συσχέτισης γεωστατικών τάσεων K , επηρεάζει τον τρόπο φόρτισης, αλλά και τη μέση τάση στο επίπεδο της σήραγγας. Για τιμή $K = 0.5$, η μέση τάση είναι μικρότερη και έχει τιμή 0.75 του P_0 . Για τιμές $K = 1$, $K = 1.5$ η μέση τάση έχει τιμή P_0 και

1.25 P_0 αντίστοιχα. Για αυτό και οι τιμές των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες όσο αυξάνει το K . Εξαιρέση αποτελούν οι βραχύμαζες που αστοχούν. Σε αυτή τη περίπτωση οι μετατοπίσεις για $K = 1$ είναι μικρότερες από τη στιγμή που για αυτή τη τιμή δεν υπάρχει αστοχία. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κύκλος του Mohr για τη περίπτωση $K = 1$ είναι ένα σημείο και είναι πολύ μακριά από την γραμμή αστοχίας. Στις πιέσεις στη μόνιμη επένδυση, η επίδραση του K είναι σημαντική, αλλά από τη στιγμή που μελετήθηκε η αύξηση των πιέσεων από μονή σε διπλή σήραγγα, περιορίστηκε σημαντικά.

Η μέγιστη πίεση παρουσιάστηκε στις παρειές των σηράγγων, ενώ οι ελάχιστες στην οροφή. Αυτό συμβαίνει, διότι αφενός στην οροφή είχαμε τις μέγιστες μετατοπίσεις και άρα μεγαλύτερη αποτόνωση, άρα μικρότερες φορτίσεις και αφετέρου η αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων δημιούργησε μια ζώνη έντονων παραμορφώσεων, η οποία έστρεψε το σημείο επιβολής της μέγιστης τάσης προς το εσωτερικό της.

Στην επεξεργασία των αναλύσεων παρουσιάστηκε το φαινόμενο της ανομοιομορφής φόρτισης στις παρειές των δύο σηράγγων, λόγω της διάνοιξης τους εντός της ζώνης επιρροής τους. Η ανομοιομορφή φόρτιση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Στις μελέτες, η συνήθης πρακτική είναι να υπολογίζονται τα φορτία της οροφής και εν συνεχεία να υπολογίζεται ένα φορτίο στις παρειές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δομικές αστοχίες. Το γεγονός ότι δεν έχει παρατηρηθεί αστοχία σε κάποια σήραγγα μέχρι σήμερα, οφείλεται περισσότερο στο ότι πιθανότατα η μόνιμη επένδυση των σηράγγων υπερδιαστασιολογείται. Αυτό αυξάνει πολύ το κόστος των έργων, χωρίς όμως να σημαίνει ότι τα κάνει και ασφαλέστερα, αφού στη πραγματικότητα η μέθοδοι που χρησιμοποιούνται δεν συνυπολογίζουν την ανομοιομορφή φόρτιση στις παρειές των σηράγγων.

Καταλήγοντας θα πρέπει να τονιστεί, πως οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας, έγιναν με πολλές παραδοχές και για συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας, αλλά και συγκεκριμένο πάχος μόνιμης επένδυσης (20cm) Το οποίο μάλιστα είναι σχετικά μικρό σε σχέση με αυτά που τοποθετούνται στη πράξη. Για τους παραπάνω λόγους, τα ποσοστά αύξησης της πίεσης που υπολογίστηκαν δεν είναι γενικού χαρακτήρα. Σε κάθε περίπτωση, το καλύτερο σε μια μελέτη μόνιμης επένδυσης, είναι να γίνεται πλήρης ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, με ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων και όχι να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα με στατικά προσομοιώματα και εμπειρικές μεθόδους. Οι εμπειρικές και οι αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιούνται για να μας δίνουν μια πρώτη αίσθηση των φορτίων που αναμένονται, ή για τον ποιοτικό έλεγχο της μελέτης από τον κατασκευαστή και όχι για την ίδια τη μελέτη.



Διάγραμμα 8.1: Εκτίμηση αξονικής απόστασης κλάδων σήραγγας ως συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών και της επιτρεπόμενης αύξηση του μέσου φορτίου.

9) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1975. «Estimation of support requirements for underground excavations» Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics, pp. 163-177, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Bieniawski, Z.T., 1989. «Engineering rock mass classification», New York, Wiley.
- Chern, J.C., Shiao, F.Y. and Yu, C.W., 1998. «An empirical safety criterion for tunnel construction». Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, p. 222-227.
- Hoek, E., 2001. Big tunnels in bad rock, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. «Practical estimates of rock mass strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts», Vol.34, p. 1165-1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002. «Hoek - Brown failure criterion-2002 edition». In proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, p. 267-73.
- Marinou, P., Hoek, E., 2000. «GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation». Proceedings of the GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, pp. 1422-1446, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania.
- Marinou, V., Marinou, P., Hoek, E., 2004. «The use of geological strength index GSI. Recommendations, limitations and ranges of values in most common rock types». Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki.
- Unal, E., 1983. «Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs». PhD thesis. The Pennsylvania State University.
- Καββαδάς, Μ., 2004. «Φόρτιση της μόνιμης επένδυσης σηράγγων από περιβάλλον έδαφος, ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων», σελ. 51-78, Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων.
- Καββαδάς, Μ., 2005. «Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Κόλιας, Β., 2004. «Μόνιμη επένδυση σηράγγων, ανάλυση και διαστασιολόγηση στην πράξη, ανάλυση και διαστασιολόγηση μόνιμης επένδυσης σηράγγων», σελ. 79-92, Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων.

- Μπακογιάννης, Γ., 2004. «Δράσεις, μέθοδοι και μοντέλα ανάλυσης μόνιμης επένδυσης σηράγγων», σελ. 25-50, Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων.
- Πανουτσόπουλος, Θ., Μαλακάτας, Ν., 2004. «Δράσεις σχεδιασμού επενδύσεων σηράγγων σύμφωνα με τις νέες οδηγίες (ΟΜΟΕ Σηράγγων) και νεότερες εξελίξεις στον σχεδιασμό μόνιμων επενδύσεων σηράγγων», Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων.
- Φορτσάκης, Μαγκανάς, Καββαδάς. «Μεθοδολογίες και φορτίσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σηράγγων. Παρουσίαση στοιχείων από σήραγγες της Εγνατίας Οδού.»