

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα τέλη του 20ου αιώνα στο διεθνή χώρο, καθώς επίσης και τα τελευταία 40 χρόνια στην Ελλάδα παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα της κατασκευής των υπόγειων έργων. Ο ραγδαίος ρυθμός της αστικής ανάπτυξης έχει οδηγήσει στη συνειδητοποίηση της χρησιμότητας της εκμετάλλευσης του υπογείου χώρου για να δοθούν λύσεις στις σύγχρονες ανάγκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για κατασκευή σηράγγων για την εξυπηρέτηση διάφορων έργων υποδομής, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

- Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, όπως διαβάσεις ορεινών όγκων και παρακάμψεις δυσμενών γεωλογικών συνθηκών (κατολισθήσεις, ρήγματα κλπ.)
- Αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς, όπως το Μετρό
- Έργα αποστράγγισης για τη βελτίωση συνθηκών ευστάθειας πρανών και εκτροπής φραγμάτων
- Υδραυλικά και ηλεκτρικά έργα, όπως έργα αποχέτευσης

Η αμφίβολη όμως γνώση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν καθιστά τη διάνοιξη σηράγγων μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Απαιτείται βελτιστοποίηση της ανάλυσης και του σχεδιασμού τους, τόσο κατά την φάση της προσωρινής όσο και κατά την φάση της μόνιμης υποστήριξής τους

Στην περίπτωση που οι σήραγγες διανοίγονται σε μαλακά ή ασθενή εδάφη με ζώνες έντονης ρηγμάτωσης, κύριο πρόβλημα αστοχίας εμφανίζεται στην περιοχή του μετώπου, με τη μορφή συγκλίσεων από την οροφή και εξωθήσεων από την επιφάνεια του μετώπου. Η αστοχία αυτή εξελίσσεται με πολύ γρήγορο ρυθμό χαλαρώνοντας την περιβάλλουσα βραχώμαζα και μπορεί να φτάσει μέχρι την επιφάνεια, για την περίπτωση αβαθών σηράγγων, προκαλώντας καθιζήσεις και αστοχίες σε παρακείμενες κατασκευές.

Για την εξασφάλιση λοιπόν της ευστάθειας της σήραγγας απαιτούνται μέθοδοι ενίσχυσης και βελτίωσης των χαρακτηριστικών του εδάφους μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Μια από τις ευρέως εφαρμοσμένες μεθόδους είναι η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια τύπου fiberglass λόγω της σχέσης κόστους – αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά σηράγγων ενισχυμένων με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Η πλειονότητα όμως των μελετών αυτών αναφέρεται στην γενική συμπεριφορά του

ενισχυμένου μετώπου και δεν επικεντρώνεται στην επίδραση της κατανομής της ενίσχυσης στο μέτωπο.

Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των αγκυρίων τύπου fiberglass στην εξέλιξη των συγκλίσεων και της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, όσον αφορά την σύγκλιση οροφής και την εξώθηση στο μέτωπο καθώς επίσης και το ποσοστό μείωσης των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο, με βάση αποτελέσματα τριδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

2. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης σηράγγων πρέπει να αντιμετωπιστούν πιθανά πολύπλοκα προβλήματα. Το πιο επικίνδυνο στάδιο, κατά το οποίο η εκσκαφή υπόκειται στις μεγαλύτερες πιέσεις δεν είναι το τελικό στάδιο όπου η σήραγγα έχει ολοκληρωθεί, έχει επέλθει εκ νέου ισορροπία και η τελική επένδυση αναλαμβάνει τα ολικά εξωτερικά φορτία όπως είχαν προβλεφθεί σύμφωνα με το σχεδιασμό, αλλά ένα ενδιάμεσο στάδιο της κατασκευής. Σε αυτό το ενδιάμεσο στάδιο, οι επιδράσεις της διατάραξης που προκλήθηκε από τη διάνοιξη δεν έχουν παραληφθεί ακόμα από την τελική επένδυση και οι προϋπάρχουσες τάσεις, οι οποίες έχουν μεταβληθεί λόγω της εκσκαφής, ανακατανέμονται γύρω από τη σήραγγα δημιουργώντας ζώνες αυξημένων πιέσεων στα τοιχώματα της εκσκαφής, προκαλώντας το «φαινόμενο του θόλου».

2.2. ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ – «ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ»

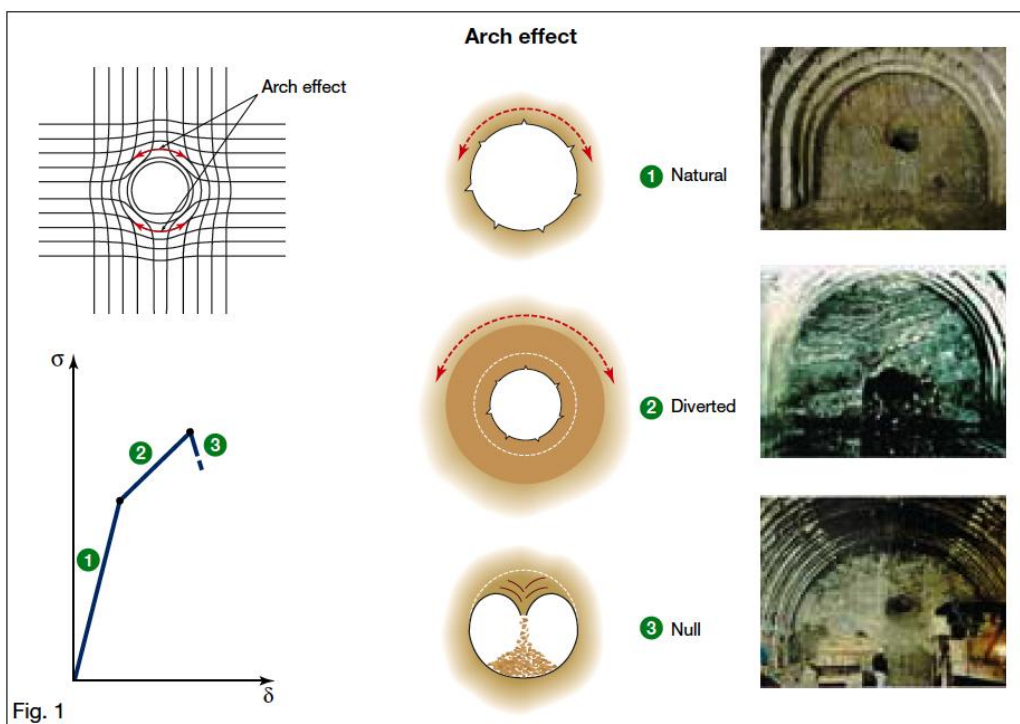
Οι παράγοντες που επιδρούν στην ανακατανομή των τάσεων είναι το αρχικό τασικό πεδίο, οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των εδαφικών υλικών, καθώς επίσης και οι διαστάσεις και το μέγεθος της εκσκαφής. Με βάση τους παραπάνω παράγοντες, όπως αναφέρεται και σε εκτενή μελέτη που πραγματοποίησε ο Lunardi το 2000 σχετικά με την τασική και παραμορφωσιακή συμπεριφορά του μετώπου της σήραγγας, η δυνατότητα ανάπτυξης του «φαινομένου του θόλου» μπορεί να διαχωριστεί στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Ανάπτυξη κοντά στο προφίλ της διατομής όταν οι σχηματισμοί που περιβάλλουν την εκσκαφή μπορούν να ανταποκριθούν στην ανακατανομή των τάσεων **ελαστικά**, όσον αφορά την αντοχή και την παραμορφωσιμότητά τους.
- Ανάπτυξη μακριά από το προφίλ της διατομής, όταν οι σχηματισμοί αδυνατούν να αναλάβουν τις ανακατανεμημένες τάσεις και συμπεριφέρονται **ανελαστικά**, δημιουργώντας πλαστικές ζώνες ανάλογες του όγκου του εδάφους που υπόκειται σε πλαστικοποίηση, αυξάνοντας έτσι τον όγκο που επηρεάζεται από την εκσκαφή. Ο όγκος αυτός μεγαλώνει ακτινικά με αποτέλεσμα η ανακατανομή των τάσεων να λαμβάνει χώρα μακριά από την εκσκαφή μέχρι η τριαξονική κατάσταση

να είναι συμβατή με την αντοχή του εδαφικού σχηματισμού. Τότε το φαινόμενο του θόλου δημιουργείται μακριά από τα τοιχώματα της σήραγγας και παράγεται μόνο με ενίσχυσή της. Το έδαφος που έχει διαταραχθεί περιμετρικά της σήραγγας μπορεί να συνεισφέρει μόνο στην τελική στατική ισορροπία με την παραμένουσα αντοχή του.

- Μηδενική ανάπτυξη της ανακατανομής των τάσεων, όταν το έδαφος περιμετρικά της σήραγγας παρουσιάζεται τελείως ανίκανο να αναλάβει τις ανακατανεμημένες τάσεις και ανταποκρίνεται με **αστοχία**, προκαλώντας την **κατάρρευση** της σήραγγας. Το φαινόμενο του θόλου δεν αναπτύσσεται φυσικά και επομένως απαιτείται να δημιουργηθεί τεχνητά, ενεργώντας βελτιωτικά στον εδαφικό σχηματισμό πριν την εκσκαφή.

Οι τρεις αυτές κατηγορίες ανάπτυξης του «φαινομένου του θόλου» παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες ανάπτυξης «φαινομένου του θόλου» (Lunardi, 2000)

Στόχος του μελετητή είναι ο καθορισμός του αν και πως δημιουργείται το φαινόμενο του θόλου κατά την εκσκαφή και η παρέμβαση με τεχνικές σταθεροποίησης στην περίπτωση που δεν ενεργοποιείται φυσικά, σε συνδυασμό με το τασικό πεδίο που επικρατεί. Για τον στόχο αυτό είναι απαραίτητη η γνώση των τριών παρακάτω παραμέτρων:

- Το **μέσο**, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία επέμβασης. Ο εδαφικός σχηματισμός είναι ένα υλικό ασυνεχές, ανομοιογενές και ανισότροπο.
- Η **«δράση»**, η οποία αποτελεί την ακολουθία των εργασιών που θα πραγματοποιηθούν κατά την εκσκαφή. Εφαρμόζεται καθώς το μέτωπο προωθείται διαμέσου του εδάφους και είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, στο οποίο το μέτωπο μπορεί να προσομοιωθεί με ένα δίσκο που διέρχεται μέσα από τη βραχώμαζα με ταχύτητα v αφήνοντας πίσω του έναν κενό χώρο. Με αυτόν τον τρόπο προκαλείται διαταραχή τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση του εδάφους μεταβάλλοντας έτσι την αρχική κατανομή των τάσεων.

Κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής, το μέγεθος της διαταραγμένης ζώνης καθορίζεται από την ακτίνα επίδρασης του μετώπου R_0 . Η ακτίνα αυτή υποδεικνύει την περιοχή στην οποία ο μελετητής οφείλει να εστιάσει την προσοχή του και εντός της οποίας πραγματοποιείται η μετάβαση από τριαξονική σε επίπεδη κατανομή τάσεων.

- Η **«αντίδραση»**, που αναμένεται να ακολουθήσει την εκσκαφή ως απάντηση στη «δράση», προκαλώντας τις παραμορφώσεις του εδαφικού σχηματισμού. Αρχικά δημιουργείται μπροστά από το μέτωπο, μέσα στην περιοχή που διαταράσσεται, ακολουθώντας τη γενική αύξηση των τάσεων γύρω από την εκσκαφή και εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδαφικού σχηματισμού και τον τρόπο προχώρησης του μετώπου.

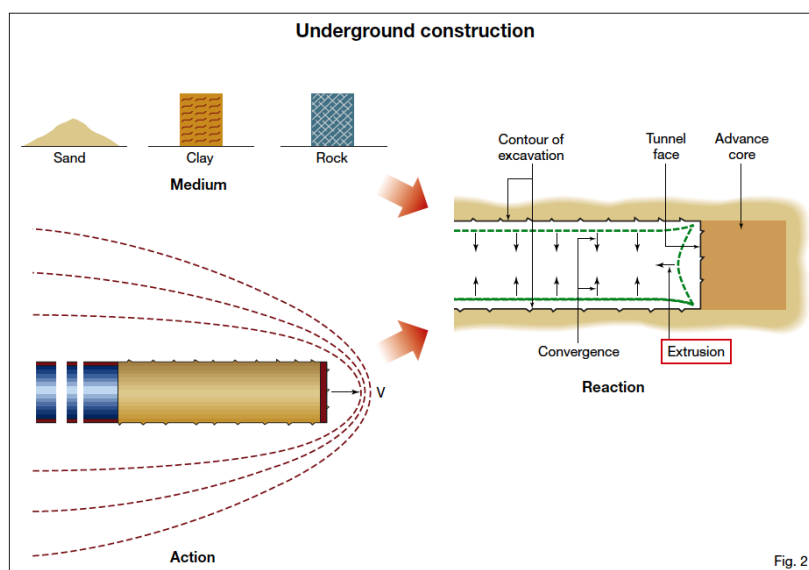
Οι τρεις αυτές παράμετροι του σχεδιασμού παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.2**.

Κατά τη διάρκεια της προχώρησης της σήραγγας, παρουσιάζεται προοδευτική μείωση των τάσεων στο μέτωπο ($\sigma_3 \rightarrow 0$) και μετάβαση από τριαξονική σε επίπεδη συνθήκη τάσεων. Σε αυτή τη περίπτωση, και σε συνδυασμό με την παραπάνω ανάλυση, η προοδευτική μείωση των τάσεων στο μέτωπο μπορεί να προκαλέσει τρεις πιθανές καταστάσεις:

- 1) Δημιουργούνται τάσεις μπροστά από το μέτωπο, οι οποίες είναι μέσα στην ελαστική περιοχή για το εκσκαπτόμενο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, τα τοιχώματα που εκσκάπτονται είναι ευσταθή με αμελητέες παραμορφώσεις.
- 2) Δημιουργούνται τάσεις μπροστά από το μέτωπο, που ανήκουν στην ελαστοπλαστική περιοχή του εκσκαπτόμενου υλικού. Η αντίδραση είναι σημαντική και τα τοιχώματα που εκσκάπτονται καθώς και το μέτωπο τείνουν να

παραμορφωθούν προς το εσωτερικό της εκσκαφής. Αν δεν υπάρξει παρέμβαση, θα προκληθεί πλαστικοποίηση του εδαφικού υλικού γύρω από τη σήραγγα και το «φαινόμενο του θόλου» θα αναπτυχθεί μακριά από τα τοιχώματα της σήραγγας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, απαιτούνται μέτρα σταθεροποίησης.

- 3) Δημιουργούνται τάσεις μπροστά από το μέτωπο, οι οποίες υπερβαίνουν σημαντικά την αντοχή του εδαφικού υλικού. Επομένως και δεν αναπτύσσεται «φαινόμενο του θόλου» και θα προκληθεί αστοχία. Αυτό συμβαίνει σε χαλαρά μη συνεκτικά εδάφη και σε αυτήν την περίπτωση επιβάλλεται η τεχνητή δημιουργία του «φαινομένου του θόλου» με μέτρα ενίσχυσης του υλικού.



Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση του μέσου, της «δράσης» και της «αντίδρασης» (Lunardi, 2000)

2.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Στη σύγχρονη εποχή η κατασκευή των υπογείων έργων και κυρίως των σηράγγων αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι του σύγχρονου συγκοινωνιακού σχεδιασμού. Υπάρχουν όμως περιορισμοί στο σχεδιασμό και την κατασκευή τους, κυρίως κατασκευαστικοί και χωροταξικοί. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι δυνατή η διάνοιξη των σηράγγων πάντοτε σε σχηματισμούς με καλές αντοχές και μεγάλη συνοχή, όπως είναι οι βραχώδεις. Για παράδειγμα, μια οδική ή σιδηροδρομική σήραγγα που περιλαμβάνεται σε ένα εθνικό δίκτυο θα έχει όσο γίνεται πιο ευθύγραμμη χάραξη λόγω περιορισμών στις γωνίες χάραξης της από τους κανονισμούς, και η ποικιλία των εδαφικών σχηματισμών που θα διατρήσει δεν είναι το κύριο κριτήριο.

Για το λόγο αυτό οι μηχανικοί πρέπει να δώσουν λύση σε κάθε πιθανή αλληλουχία διατρηόμενων σχηματισμών, ανεξαρτήτως της δυσκολίας πρόβλεψης και αντιμετώπισης των προβλημάτων που θα συναντηθούν, με κριτήριο πάντα το αποδεκτό κόστος κατασκευής.

Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων, τα κύρια προβλήματα που μπορεί να συναντηθούν ταξινομούνται ως εξής:

- Αστάθεια στα στόμια της σήραγγας (**Εικόνα 2.1**)
- Αστάθεια στο μέτωπο εκσκαφής (**Εικόνα 2.2**)
- Εκτινάξεις τεμαχών (rockburst)
- Ολισθήσεις σφηνών στα τοιχώματα της σήραγγας
- Συγκλίσεις
- Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους (κυρίως στις αβαθείς σήραγγες και στις περιοχές των στομίων των σηράγγων)
- Παρουσία υπόγειων νερών

Σημαντικό κριτήριο για την ταξινόμηση των προβλημάτων είναι η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά του εδάφους (Μαρίνος, 2008).

Στην περιοχή των στομίων της σήραγγας, η βραχώμαζα είναι συνήθως πτωχών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, αποσαθρωμένη και εξαλλοιωμένη λόγω επιφανειακής διάβρωσης και δράσης. Τα προβλήματα εμφανίζονται με τη μορφή ρωγμών στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα της επένδυσης, μετακινήσεων εδαφικών όγκων και γενικευμένης αστοχίας του πρανούς όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 2.1** (Καββαδάς, 2007).



Εικόνα 2.1: Αστοχία του νοτίου στομίου της οδικής σήραγγας παράκαμψης της Πάτρας (Καββαδάς, 2007)

Όσον αφορά το μέτωπο της σήραγγας, μπορεί να επέλθει αστοχία με ταυτόχρονη εκτεταμένη εισροή υδάτων και αστάθεια της οροφής (υπερεκσκαφή ή κατάρρευση) κατά την προώθηση του μετώπου όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 2.2** (Καββαδάς, 2007).



Εικόνα 2.2: Αστοχία μετώπου εκσκαφής σήραγγας εκτροπής φράγματος Αγιονερίου Ν. Λάρισας.

Το φαινόμενο της ψαθυρής θραύσης και της εκτίναξης τεμαχών (rockburst) εμφανίζεται σε βραχώδεις σχηματισμούς μεγάλης αντοχής με αδιατάρακτη δομή, λόγω των υψηλών τάσεων που επικρατούν. Πραγματοποιούνται για υψηλές τιμές του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI και για χαμηλές τιμές του λόγου αντοχής της βραχώμαζας προς τις επιτόπου τάσεις (σ_{cm}/ρ_0).

Οι σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών από την οροφή της σήραγγας λόγω βαρύτητας είναι πιθανές σε βραχώμαζα μέτρια έως αρκετά κερματισμένη που διατρέχεται από οικογένειες ασυνεχειών. Η ολίσθηση εξαρτάται κυρίως από την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, καθώς επίσης και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους σε σχέση με τη διεύθυνση της σήραγγας (κλίση, φορά κλίσης, εμμόνη, απόσταση μεταξύ τους κλπ.) και από την παρουσία υπογείων νερών, η οποία δημιουργεί υδροστατικές πιέσεις στο άνοιγμα των ασυνεχειών.

Η παρουσία υπογείων υδάτων και η ροή νερού μπορεί να προκαλέσει σημαντικές δυσκολίες τόσο στην φάση κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία των σηράγγων. Στη φάση κατασκευής είναι πιθανό να απομακρυνθεί το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών στην περίπτωση που η βραχώμαζα είναι κατακερματισμένη ή αποδιοργανωμένη με μηδενική συνοχή, Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής τους και την καταρροή βραχώμαζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας. Επίσης υπάρχει σημαντικό πρόβλημα διόγκωσης με σημαντικές

παραμορφώσεις, αν η βραχώμαζα αποτελείται από διογκούμενα ορυκτά, όπως ο μοντμοριλονίτης και ο ανυδρίτης,

Τα πιο σημαντικά όμως προβλήματα είναι οι καθιζήσεις και οι παραμορφώσεις, κυρίως σε αβαθείς σήραγγες σε αστικό περιβάλλον. Παρατηρούνται συνήθως σε εδάφη με μικρή αντοχή και μεγάλη συμπιεστότητα σε σχέση με τις επιτόπου τάσεις. Οι καθιζήσεις μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα και αστοχίες τόσο στην ίδια τη σήραγγα όσο και σε παρακείμενες κατασκευές.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι μέθοδοι σχεδιασμού των υπογείων έργων διακρίνονται σε εμπειρικές ή/και ημιεμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές. Στις περισσότερες αναλύσεις σχεδιασμού, αποτελούν το επόμενο βήμα μετά την διαδικασία προσδιορισμού των προβλημάτων που αναμένεται να αντιμετωπιστούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας, η οποία διαδικασία παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνήθως προσδίδουν ποσοτικό χαρακτήρα στην ανάλυση και διαστασιολόγηση της προσωρινής υποστήριξης των σηράγγων.

3.1. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι εμπειρικές και ημιεμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού αποτελούσαν μέχρι και πριν μερικές δεκαετίες τα κύρια εργαλεία για τον σχεδιασμό υπογείων έργων και βασίζονταν αποκλειστικά στην εμπειρία από την κατασκευή προηγούμενων έργων.

Οι **εμπειρικές μέθοδοι** σχετίζονται με τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας. Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας κατηγορίες βραχώμαζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι:

1. Το σύστημα κατάταξης **GSI** κατά Hoek και Μαρίνο (2000)
2. Το σύστημα **Q (NGI)**, που έχει προταθεί από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Γεωλογίας
3. Η εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού του συστήματος υποστήριξης των σηράγγων που σχετίζεται με το σύστημα κατάταξης **Bieniawski (δείκτης RMR)**.

Οι ημιεμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι την επιλογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, η οποία γίνεται με κάποια από τις προαναφερθείσες μεθόδους, ακολουθεί ο έλεγχος της επάρκειάς τους με ορισμένου τύπου στατική ανάλυση. Τα θεωρούμενα φορτία για τον έλεγχο αυτόν λαμβάνονται και πάλι με τη χρήση κάποιων εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού των φορτίων.

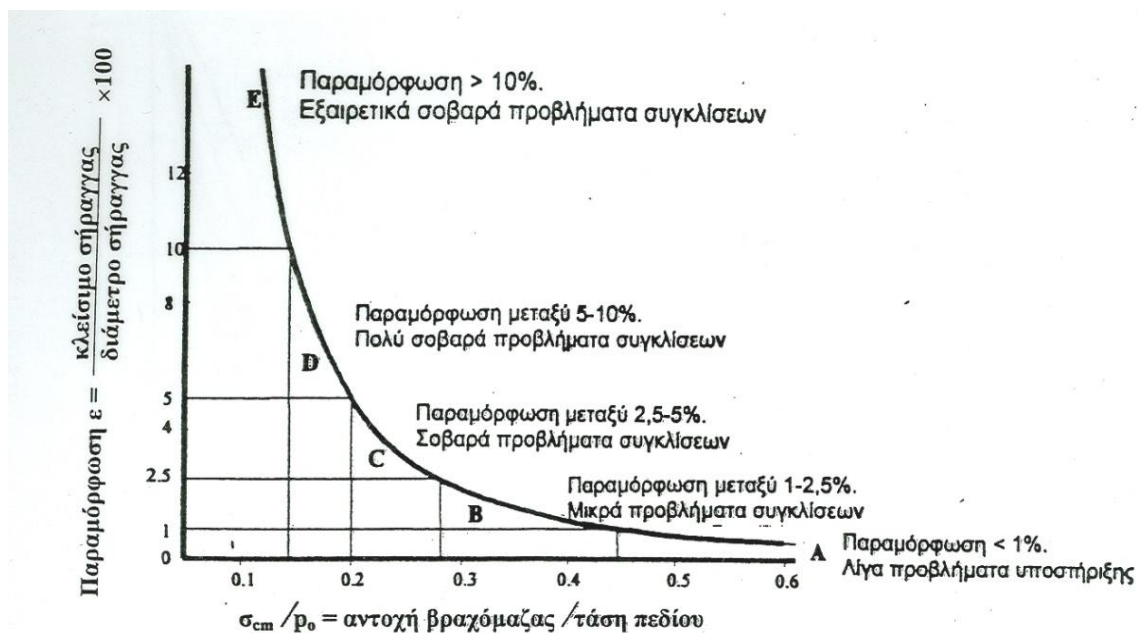
Οι πιο διαδεδομένες εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού των φορτίων είναι:

1. Η μέθοδος **Protodyakonov**
2. Η εκτίμηση των φορτίων κατά **Bieniawski**
3. Η εκτίμηση των φορτίων κατά **Terzaghi**

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται και σήμερα για μια πρώτη εκτίμηση των απαιτήσεων της υποστήριξης μιας προς διάνοιξη σήραγγας.

Το σύστημα κατάταξης GSI κατά Hoek και Marino (2000)

Βάσει του διαγράμματος της ποσοστιαίας παραμόρφωσης ϵ των τοιχωμάτων της σήραγγας σε σχέση με το λόγο της μονοαξονικής αντοχής της βραχώμαζας προς τις επιτόπου τάσεις (σ_{cm}/p_0), μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα ανάπτυξης προβλημάτων αστάθειας κατά τη διάνοιξη, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.1** για την περίπτωση ανυποστήρικτων σηράγγων και για ισότροπη γεωστατική εντατική κατάσταση ($K_0=1$). Η παραμόρφωση ϵ ορίζεται ως το επί τοις εκατό ποσοστό της αξονικής παραμόρφωσης στα τοιχώματα της σήραγγας προς τη διάμετρό της (κλείσιμο σήραγγας/διάμετρο σήραγγας ή σύγκλιση τοιχώματος/ακτίνα σήραγγας).



Σχήμα 3.1: Εκτίμηση και ταξινόμηση συνθηκών σύνθλιψης κατά τη διάνοιξη σήραγγας και συστάσεις αντιμετώπισης

Με βάση το διάγραμμα του Σχήματος 3.1, μπορεί να γίνει μια αρχική εκτίμηση των προβλημάτων σύγκλισης των σηράγγων και τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 3.1**.

Πίνακας 3.1: Γενικές συστάσεις αντιμετώπισης κατηγοριών συμπεριφοράς σήραγγων A-E κατά τις εργασίες διάνοιξης σήραγγας κατά Hoek-Μαρίνος

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

Πιο συγκεκριμένα:

- Για παραμόρφωση $\epsilon \leq 1\%$, αναμένονται λίγα προβλήματα αστάθειας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ απλές μέθοδοι υποστήριξης για τον έλεγχο των τοπικών φαινομένων αστοχίας, όπως η τοποθέτηση αγκυρίων.
- Για παραμόρφωση $1\% < \epsilon \leq 2.5\%$, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι σύγκλισης-αποτόνωσης για τον προσδιορισμό της πλαστικής ζώνης της βραχώμαζας γύρω από τη σήραγγα. Αυτές οι παραμορφώσεις παρατηρούνται κυρίως σε συμπαγή πετρώματα με μικρό υπερκείμενο, όπου τα συνήθη προβλήματα αστάθειας οφείλονται σε πτώσεις τεμαχών πετρώματος. Γι' αυτό το λόγο, κύριος σκοπός της άμεσης υποστήριξης είναι η ασφάλεια των εργαζομένων και συνιστάται η χρήση δικτυωτών πλαισίων ελαφράς διατομής.
- Για παραμόρφωση $2.5\% < \epsilon \leq 5\%$, η έκταση της πλαστικοποιημένης ζώνης είναι σημαντική και αναμένονται σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων. Ο σχεδιασμός των μέτρων προσωρινής υποστήριξης πρέπει να είναι προσεκτικός και απαιτούνται μέτρα ενίσχυσης των συνθηκών ευστάθειας της οροφής και του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας, όπως δοκοί προπορείας και αγκύρια μετώπου.
- Για παραμόρφωση $5\% < \epsilon \leq 10\%$, αναμένονται πολύ σοβαρά προβλήματα αστάθειας τόσο στην διανοιγμένη κοιλότητα όσο και στο μέτωπο εκσκαφής και στον πυρήνα προώθησης. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι η προσωρινή υποστήριξη θα είναι επαρκής σε όλες τις φάσεις της

εκσκαφής και συνιστάται η χρήση δοκών προπορείας βαρέως τύπου και η ενίσχυση των συνθηκών έδρασης των πλαισίων του θόλου (τοποθέτηση μικροπασσάλων βελτίωσης, τσιμεντενέσεις βελτίωσης, κ.α.).

- Για παραμόρφωση $\epsilon > 10\%$, είναι πρακτικά αδύνατη η διατήρηση της ευστάθειας της σήραγγας. Οι λύσεις που εφαρμόζονται βασίζονται στην εμπειρία και αφορούν κυρίως τον συνδυασμό των μεθόδων ενίσχυσης.

Σύστημα Q (N.G.I.)

Όπως αναφέρεται και στις σημειώσεις Παπαδόπουλου (2004), η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα σύστημα βαθμονόμησης για βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας και βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q βάσει της σχέσης:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$$

όπου:

RQD = δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

J_r = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

J_a = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

J_w = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος $\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$ εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχίων που συνιστούν τη βραχώμαζα, ο δεύτερος λόγος $\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$ τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών και ο τρίτος λόγος $\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$ τις τάσεις που επικρατούν στην βραχώμαζα. Οι τιμές των συντελεστών λαμβάνονται από κατάλληλους πίνακες και ανάλογα με την τιμή του Q που προκύπτει, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά καλή έως εξαιρετικά πτωχή. Η ταξινόμηση αυτή των χαρακτηρισμών κατά Q παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.2**.

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση κατά Q (N.G.I.)

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	καλή
4-10	Q-IIIb	μέτρια
1-4	Q-IVa	πτωχή
0.1-1	Q-IVb	πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	εξαιρετικά πτωχή

Σύστημα RMR (Bieniawski)

Όπως επισημαίνει και ο Παπαδόπουλος (2004) στις σημειώσεις του μαθήματος «Βραχομηχανική – Σήραγγες», η συγκεκριμένη μέθοδος σχεδιασμού του συστήματος υποστήριξης αποτελεί σύστημα βαθμονόμησης για βραχώμαζες σχετικά καλής ποιότητας. Η ταξινόμηση πραγματοποιείται με έξι παραμέτρους, το άθροισμα των οποίων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Αυτές οι παράμετροι είναι οι έξι ακόλουθες:

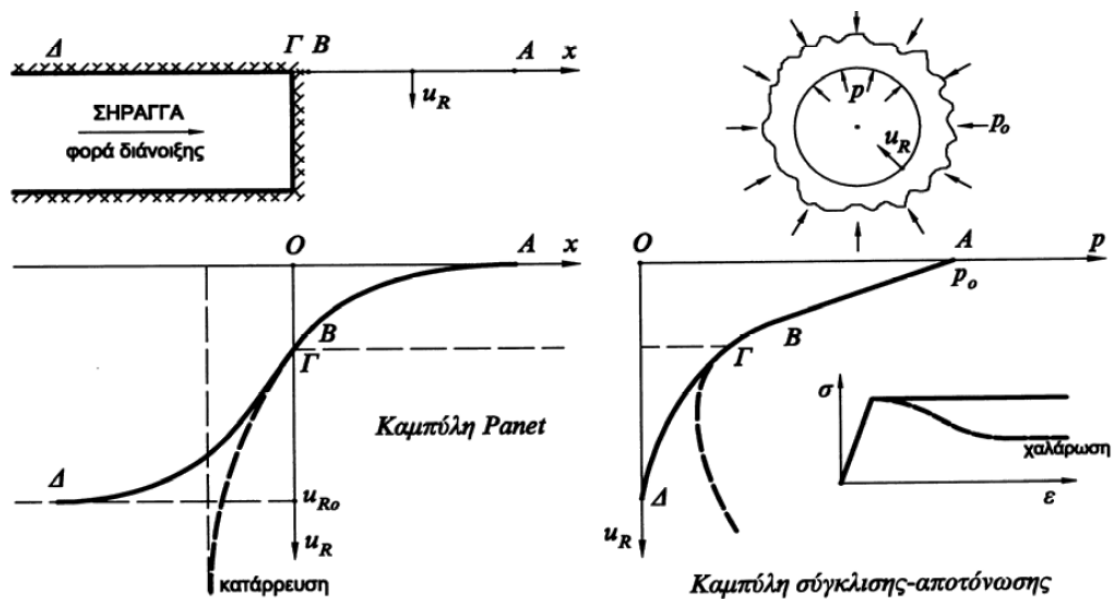
- Αντοχή του "συμπαγούς" πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})
- Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)
- Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
- Παρουσία υπόγειου νερού
- Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Με βάση το άθροισμα των συγκεκριμένων παραμέτρων, η βραχώμαζα κατατάσσεται στις κατηγορίες που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3, οι οποίες κυμαίνονται από πολύ καλής ποιότητας έως πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα.

Εν κατακλείδι, τα **βασικά πλεονεκτήματα** των εμπειρικών αυτών μεθόδων σχεδιασμού είναι η απλότητα, η ευκολία στη χρήση τους καθώς και η ταχύτητα αποτελέσματος. Ωστόσο, έχουν προκύψει από την εμπειρία διάνοιξης σε συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες και με ποικίλες παραδοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα είτε να αγνοούνται οι τυχόν ειδικές γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή του έργου είτε να λαμβάνονται υπόψιν μέσω κάποιας σημαντικής απλοποίησης. Γι' αυτό το λόγο, οι εμπειρικές και ημιεμπειρικές μέθοδοι δεν αποτελούν το μοναδικό εργαλείο σχεδιασμού του συστήματος υποστήριξης και χρησιμοποιούνται μόνο σε απλές γεωτεχνικές συνθήκες ή στα αρχικά στάδια της διαδικασίας της μελέτης, σύμφωνα (Καββαδάς, 2007)

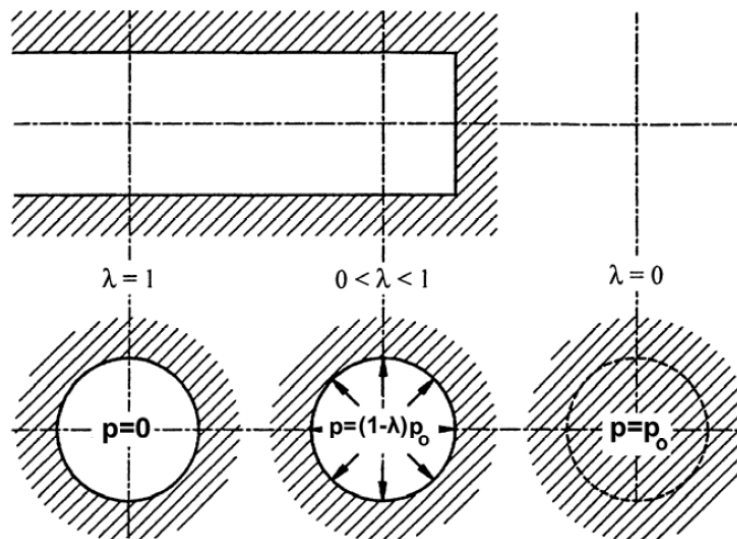
3.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Μέσω των αναλυτικών μεθόδων σχεδιασμού, όπως η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (Σχήμα 3.2), γίνεται εκτίμηση της έκτασης της πλαστικής ζώνης αστοχίας της βραχόμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα και της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης για τον περιορισμό της πλαστικοποιημένης ζώνης και της παραμόρφωσης στα τοιχώματα της σήραγγας. Ο σχεδιασμός ολοκληρώνεται με την πραγματοποίηση ελέγχου για να διαπιστωθεί το κατά πόσον τα μέτρα που έχουν επιλεγεί παρέχουν την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης.



Σχήμα 3.2: Καμπύλες Panet και σύγκλισης - αποτόνωσης σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Καββαδάς, 2007)

Ο Fener το 1938 ανέπτυξε μια αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού της άμεσης υποστήριξης των σηράγγων, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη μιας «πλαστικής ζώνης» στην περιβάλλουσα βραχόμαζα και γύρω από τα όρια της εκσκαφής. Στη ζώνη αυτή, η βραχόμαζα είναι πολύ αποσασθρωμένη και αναπτύσσει σημαντικές παραμορφώσεις. Συσχέτισε λοιπόν την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας με την ανάπτυξη αυτής της ζώνης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μεθόδου ανάλυσης της περιβάλλουσας βραχόμαζας απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3, στο οποίο φαίνεται ότι το μέγεθος της πλαστικής ζώνης εξαρτάται από το μέγεθος της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης p_i .



Σχήμα 3.3: Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p) σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας (Καββαδάς, 2007).

Αρχικά, θεωρείται μια ανυποστήρικτη σήραγγα η οποία έχει διανοιχθεί μέχρι ένα μέτωπο εκσκαφής. Σε μεγάλη απόσταση μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, εντός του πυρήνα προώθησης, η διάνοιξη της σήραγγας δεν έχει αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας. Αυτό μπορεί να προσομοιωθεί με μια εσωτερική πίεση p_i , η οποία ονομάζεται «**ισοδύναμη εσωτερική πίεση**» και είναι ίση και αντίθετη με την αρχική, γεωστατική πίεση p_0 . Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται ουσιαστικά ισορροπία στο σύστημα πυρήνας προώθησης-περιβάλλουσα βραχόμαζα. Όσο η απόσταση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής τείνει να μηδενιστεί, οι ιδιότητες του εδάφους επηρεάζονται με συνέπεια τη μείωση της εσωτερικής πίεσης p_i , ώστε $p_i < p_0$. Σε εκείνο το σημείο, αρχίζουν να λαμβάνουν χώρα οι παραμορφώσεις. Όταν η συγκεκριμένη περιοχή διανοιχθεί και δημιουργηθεί η διανοιγμένη κοιλότητα της σήραγγας, τότε η πίεση αυτή μηδενίζεται με συνέπεια οι παραμορφώσεις να λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους.

Σύμφωνα με τους Atkinson and Mair (1981) σήραγγες που διανοίγονται σε κοκκώδη εδάφη είναι σχεδόν αδύνατο να σταθούν χωρίς υποστήριξη. Γι' αυτό το λόγο χρειάζονται απαραίτητως υποστήριξη στην εκσκαπτόμενη περίμετρό τους έως ότου ανεγερθεί το τελικό σύστημα ενίσχυσής τους. Τα μέτρα αυτά συχνά αναφέρονται και ως «**πίεση υποστήριξης**» ή «**ισοδύναμη εσωτερική πίεση**», που πρέπει να εφαρμοστεί στη σήραγγα, ώστε να διατηρηθεί ο απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας για να μην επέλθει αστοχία (Shin, Choi, Kwon, Lee, 2007).

Για την προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του **συντελεστή αποτόνωσης λ** . Ο συντελεστής αυτός υποδηλώνει τη μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή της σε μια μικρότερη τιμή και υπολογίζεται από τον τύπο (Καββαδάς, 2007):

$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_0}$$

όπου p_0 = η αρχική γεωστατική κατάσταση

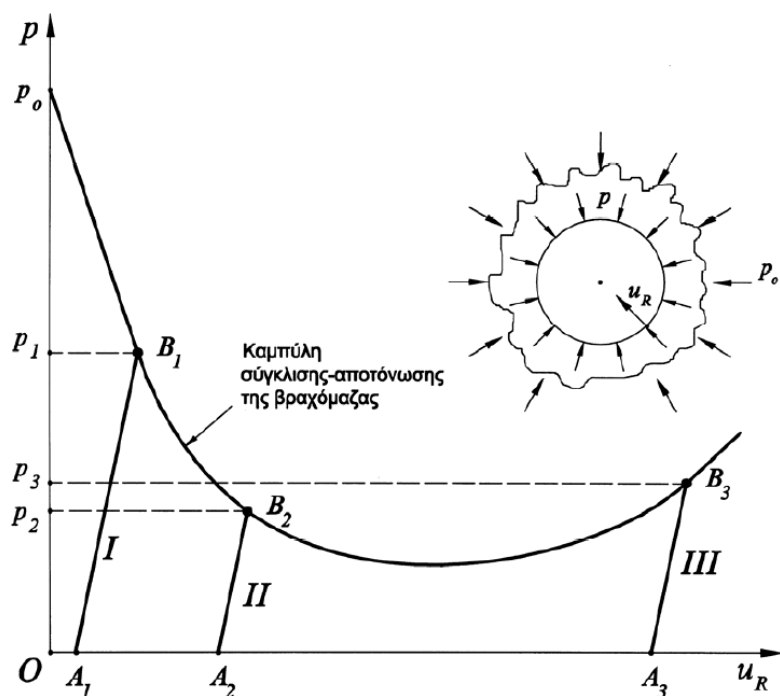
p_i = η ισοδύναμη εσωτερική πίεση στη θέση τοποθέτησης των μέτρων
προσωρινής υποστήριξης

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προσομοίωση της διάνοιξης και της υποστήριξης της σήραγγας σε δύο φάσεις:

1. Η ισοδύναμη εσωτερική πίεση μειώνεται από p_0 σε p . Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει είναι εκείνη που αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.
2. Τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης και μείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης από p σε μηδέν. Η μείωση αυτή προκαλεί περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Φαίνεται λοιπόν ότι πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση της εσωτερικής πίεσης διαδραματίζει ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4**.

Η διάνοιξη λοιπόν της σήραγγας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με αναίρεση των αρχικών γεωστατικών πιέσεων p_0 , ονομαζόμενη ως αποσυμπίεση, γεγονός που δημιουργεί ανακατανομή των τάσεων και ανάπτυξη παραμορφώσεων στο σχηματισμό που περιβάλλει την εκσκαφή. Το πόσο οι παραμορφώσεις αυτές δημιουργούν προβλήματα ευστάθειας κατά την εκσκαφή εξαρτάται από το λόγο της αντοχής της βραχώμαζας προς το επιτόπου τασικό πεδίο. Σε ασθενή πετρώματα, οι παραμορφώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλές και η έκταση της πλαστικής ζώνης είναι σημαντική, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα παραμορφώσεων κατά την εκσκαφή, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν ακόμη και σε αστοχία της κατασκευής.



Σχήμα 3.4: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας.
I: πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p_1) είναι πολύ μεγάλη.
II: κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) έχει μειωθεί σημαντικά.
III: πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης (χαλάρωσης της βραχώμαζας), με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης (Καββαδάς, 2007) .

Το **βασικό πλεονέκτημα** των αναλυτικών μεθόδων σχεδιασμού είναι η απλότητα και επάρκεια των υπολογισμών, κυρίως για απλές γεωτεχνικά συνθήκες και για τα αρχικά στάδια του υπολογισμού σε πιο πολύπλοκες συνθήκες. Όμως λαμβάνουν υπόψιν τους ορισμένες βασικές παραδοχές, οι οποίες είναι οι εξής σύμφωνα με τις σημειώσεις Καββαδά (2007):

- Η διατομή της σήραγγας είναι κυκλική, παραδοχή που είναι αποδεκτή κυρίως για σήραγγες που διανοίγονται με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM και όχι με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης.
- Το επιτόπου εντατικό πεδίο είναι ισότροπο πριν τη διάνοιξη της σήραγγας, παραδοχή που είναι αποδεκτή όταν αφορά σήραγγες που διανοίγονται σε ασθενείς βράχους και σε σημαντικό συνήθως βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

- Θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης κατά τον άξονα z της σήραγγας δηλαδή ανάλυση αρκετά πίσω από το μέτωπο εκσκαφής (όπου οι συνθήκες είναι έντονα τριδιάστατες)

Παρατήρηση

Λόγω της επίπεδης παραμόρφωσης ($\partial/\partial z = 0$), της κυκλικής σήραγγας και της ισότροπης γεωστατικής τάσης ($\partial/\partial \theta = 0$) το αξονοσυμμετρικό (περί τον άξονα z) πρόβλημα γίνεται μονοδιάστατο, με μεταβολές μόνον κατά την ακτίνα (r).

- Το έδαφος είναι ελαστικό-απολύτως πλαστικό.
Ελαστικές ιδιότητες βραχόμαζας :
 G, ν , οπότε το μέτρο ελαστικότητας είναι : $E = 2G(1 + \nu)$
- Λαμβάνουν υπόψιν μόνο την προσωρινή υποστήριξη που εφαρμόζεται αμέσως μετά την εκσκαφή. Η τελική επένδυση που τοποθετείται μετά την σταθεροποίηση της σήραγγας αρκετά μέτρα πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της δεν μπορεί να ενσωματωθεί στο συνολικό σχεδιασμό.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, είναι φανερό ότι οι αναλυτικές μέθοδοι διαχωρίζουν την κατάσταση τάσεων-παραμορφώσεων στο μέτωπο της εκσκαφής και σε απόσταση από αυτό και γι' αυτό είναι αδυνατούν να μεταφέρουν πίσω από το μέτωπο και εντός της διανοιγμένης κοιλότητας όσα λαμβάνουν χώρα μπροστά από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, αδυνατούν να εξάγουν συμπεράσματα τα οποία έχουν αποδειχθεί πειραματικά, όπως η μείωση της ακτίνας της πλαστικής ζώνης r_p και η επακόλουθη μείωση της παραμόρφωσης της διανοιγμένης κοιλότητας, καθώς και το φορτίο που ενεργεί τόσο στην προσωρινή υποστήριξη όσο και στην τελική επένδυση.

3.3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στις αριθμητικές μεθόδους σχεδιασμού, η ανάλυση γίνεται με προσομοίωση, με τη χρήση διάφορων λογισμικών, των διαδοχικών φάσεων εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας, καθώς και της υστέρησης της τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης μετά την εκσκαφή κάποιας φάσης. Η βραχόμαζα και τα στοιχεία άμεσης υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ.) προσομοιώνονται ως ελαστοπλαστικά υλικά με ορισμένα ελαστικά χαρακτηριστικά και ένα κριτήριο αστοχίας που καθορίζει το πέρας της ελαστικής τους συμπεριφοράς και την αστοχία τους. Κάθε στοιχείο χαρακτηρίζεται από μια σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και τις συνοριακές συνθήκες που ισχύουν. Οι αριθμητικές

μέθοδοι επιτυγχάνουν να αναλύσουν ακριβώς τη γεωμετρία της εκσκαφής, η οποία πραγματοποιείται σε δεδομένο εντατικό πεδίο. Για κάθε στοιχείο επιλύονται οι εξισώσεις κίνησης χρησιμοποιώντας την έννοια των διαδοχικών βημάτων για την προσέγγιση της τελικής λύσης. Σε κάθε βήμα, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί κατάλληλη επαναληπτική μέθοδο, θεωρώντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα της προηγούμενης επίλυσης. Αυτό γίνεται μέχρι το μέγεθος της «ανισοτροπίας» των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων να γίνει μικρότερο από κάποιο προκαθορισμένο κλάσμα της αρχικής «ανισοτροπίας» (Καββαδάς, 2007).

Γενικά, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα ευέλικτες και παρέχουν σημαντικές δυνατότητες προσομοίωσης ώστε να λαμβάνουν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό όλα τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης. Σημαντική επίσης παράμετρος είναι η δυνατότητα εποπτείας επί των αποτελεσμάτων σε όλα τα στάδια της προσομοίωσης, καθώς και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όμως, ως η ακριβέστερη μέθοδος, απαιτεί πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Συγχρόνως, ενέχει κίνδυνος λόγω της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, εάν αυτά κριθούν άκριτα ως σωστά, μη λαμβάνοντας υπόψιν τις τεράστιες αβεβαιότητες των γεωτεχνικών έργων ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού και την αλληλουχία της κατασκευής. Συνεπώς, **μεγαλύτερη αξία έχει η παραμετρική επίλυση του προβλήματος**, ανάλογα πάντα με τις αβεβαιότητές του.

Οι βασικότερες κατηγορίες των αριθμητικών μεθόδων είναι, όπως επισημαίνεται και στη μελέτη του Lunardi (2000):

➤ Η αξονοσυμμετρική αριθμητική μέθοδος

Κύριο χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η ανεπάρκειά της να ξεπεράσει τους περιορισμούς των αναλυτικών λύσεων, όπως την θεώρηση απολύτως κυκλικής διατομής της σήραγγας και την ομοιομορφία του εντατικού πεδίου γύρω από την διατομή. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από τη θεώρηση κατά την μέθοδο αυτή ενός μόνο τεταρτοκύκλιου της σήραγγας και μέτρων υποστήριξης. Με περιστροφή των στοιχείων αυτών γύρω από τον άξονα κατασκευάζεται το ολοκληρωμένο προσομοίωμα. Μέσω αυτής της περιστροφής όμως, ορισμένα μέτρα υποστήριξης όπως τα αγκύρια δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια. Ωστόσο η μέθοδος έδειξε ότι η ενίσχυση του εδάφους μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής (πυρήνας προώθησης) προκαλεί διαφορετική κατανομή των τάσεων στο μέτωπο και περιμετρικά της σήραγγας. Μέσω υπολογισμών, διαπιστώθηκε ότι η ενίσχυση προκαλεί μείωση της πλαστικής ζώνης και των παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα, τόσο μπροστά από το μέτωπο όσο και πίσω από αυτό (εξώθηση, σύγκλιση και προσύγκλιση). Παράλληλα, αποδείχτηκε ότι με τη μέθοδο αυτή είναι αδύνατον να ελεγχθεί η εξώθηση και η προσύγκλιση μεταβάλλοντας την ακαμψία των μέτρων υποστήριξης ή/και την απόσταση τοποθέτησης τους πίσω από το μέτωπο. Παρ' όλο όμως που μπορεί να εκτιμήσει την προώθηση της σήραγγας σε όρους ενίσχυσης του πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο, αδυνατεί να προσδιορίσει τα φορτία που ενεργούν τόσο στην προσωρινή υποστήριξη κατά

την προώθηση της σήραγγας όσο και στην τελική επένδυση. Με βάση λοιπόν όλα τα ανωτέρω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη μόνο για μια πρώτη εκτίμηση των παραμορφώσεων.

➤ Η διδιάστατη αριθμητική μέθοδος

Η μέθοδος αυτή εξάγει συμπεράσματα για τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά την προώθηση της σήραγγας. Μελετά τη σήραγγα σε δύο διαστάσεις, ως μία επίπεδη ανάλυση, και εξετάζει κάθε φορά μια συγκεκριμένη διατομή της. **Βασικό μειονέκτημα** της μεθόδου, και ουσιαστικά ο λόγος που κρίνεται αναγκαία η χρήση τριδιάστατων μοντέλων, είναι το γεγονός ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη διατομή εντός της κοιλότητας της σήραγγας, αγνοώντας την επίδραση των τάσεων σε γειτονικές διατομές. Ουσιαστικά, η μέθοδος αυτή ανάγει την εκσκαφή σε πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης ενώ στην πραγματικότητα είναι τριών διαστάσεων. Γνωρίζοντας όμως ότι οι συγκλίσεις αναπτύσσονται τόσο μπροστά (φαινόμενο προσύγκλισης) όσο και πίσω από το μέτωπο, είναι αδύνατον να προκύψουν ολοκληρωμένα συμπεράσματα για ολόκληρη την εκσκαφή. Αποτέλεσμα αυτής της θεώρησης είναι ότι μόνο μέσω των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το μέτωπο της σήραγγας, το οποίο έχει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια όλης της εκσκαφής.

➤ Η τριδιάστατη αριθμητική μέθοδος

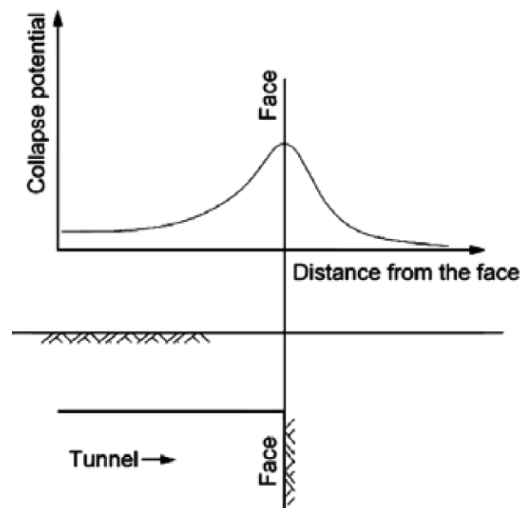
Η επεξεργασία αριθμητικών μεθόδων με τη χρήση μοντέλων τριών διαστάσεων αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη και ακριβέστερη μέθοδο ανάλυσης. Παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης τόσο της πραγματικής γεωμετρίας της σήραγγας όσο και της αλληλουχίας των βημάτων προώθησης της κατασκευής. Το **βασικό πλεονέκτημα** της μεθόδου αυτής είναι ότι θεωρεί τις πραγματικές διαστάσεις της υπό μελέτη σήραγγας και μπορεί να εξάγει συμπεράσματα για κάθε σημείο της γεωμετρίας της σήραγγας και για κάθε εναλλαγή της αλληλουχίας των βημάτων εκσκαφής. Παράλληλα, μπορούν να ληφθούν υπόψιν στο πρόβλημα όλες οι πιθανές εντατικές καταστάσεις του εδαφικού σχηματισμού, όπως ένα μη ισότροπο τασικό πεδίο, καθώς επίσης και το πραγματικό βάθος διάνοιξης της σήραγγας. Επίσης, λόγω της προσωρινής λειτουργίας των μέτρων άμεσης υποστήριξης, καθίσταται αποδεκτή η ανάπτυξη περιορισμένης έκτασης πλαστικών ζωνών στην βραχώμαζα γύρω από τη σήραγγα, καθώς και η λειτουργία ορισμένων αγκυρίων στο φορτίο διαρροής τους. Αυτό επιτρέπεται λόγω της δυνατότητας ανακατανομής των φορτίων και των τάσεων σε παρακείμενες περιοχές της περιβάλλουσας βραχώμαζας και σε γειτονικά αγκύρια.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της μεθόδου, υπολογίζουν την επίδραση που έχουν τα διαδοχικά στάδια διάνοιξης στη στατική συμπεριφορά της κατασκευής, προσομοιώνοντας την ακριβή γεωμετρία των μέτρων υποστήριξης, καθώς επίσης και την απόσταση τοποθέτησης τους πίσω από το μέτωπο. Μέσω αριθμητικών αναλύσεων, μπορεί να μελετηθεί η εξώθηση του μετώπου κι επομένως όλοι οι επακόλουθοι μηχανισμοί αστοχίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις τόσο για τις παραμορφώσεις (εξώθηση, σύγκλιση, προσύγκλιση) όσο και για τις τάσεις που δρουν στα μέτρα ενίσχυσης, οι οποίες είναι μικρότερες στην περίπτωση που ο πυρήνας προώθησης είναι ενισχυμένος, όπως έχει παρατηρηθεί από πειραματικές δοκιμές. Το **μειονέκτημα** της μεθόδου αυτής όμως είναι ότι ο υπολογιστικός φόρτος που δαπανάται για την ολοκλήρωση των απαιτούμενων αναλύσεων είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Παρ' όλων αυτών τον φόρτο όμως, λόγω της ακρίβειας της μεθόδου και των πιο ολοκληρωμένων και ποικίλων αποτελεσμάτων της, προτιμάται ολοένα και περισσότερο στις αναλύσεις.

4. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την κατασκευή σηράγγων, κύρια παράμετρος που απαιτείται για την πρόοδο των εργασιών είναι η γνώση και κατανόηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και η εκτίμηση της αρχικής εντατικής κατάστασης. Η απαίτηση αυτή κρίνεται σκόπιμη επειδή μετά την εκσκαφή προκαλούνται αλλαγές στην κατανομή των εδαφικών τάσεων γύρω από αυτήν. Στην περίπτωση που οι εδαφικές τάσεις ξεπεράσουν κατά πολύ την αντοχή του εδάφους, υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν μεγάλες μετακινήσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν και στην κατάρρευση της σήραγγας. Η κρισιμότερη θέση για τον κίνδυνο κατάρρευσης είναι στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας αμέσως πριν την τοποθέτηση της επένδυσης, όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 4.1**.



Σχήμα 4.1: Κίνδυνός πιθανής κατάρρευσης συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο της εκσκαφής (Shin, Choi, Kwon, Lee, 2007).

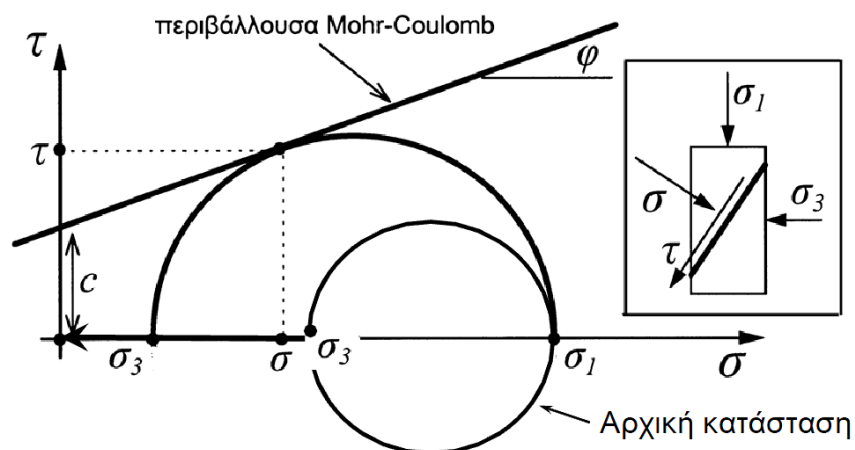
4.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

Επομένως, κύρια παράμετρος για την ολοκλήρωση των εργασιών κατασκευής της σήραγγας είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Η ευστάθεια του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η διαμητρική αντοχή, το βάθος διάνοιξης και επομένως και οι επιτόπου τάσεις, οι διαστάσεις της σήραγγας, η κατασκευαστική αλληλουχία και η παρουσία ύδατος.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την προώθηση της σήραγγας, προκαλείται μείωση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης $\sigma_3 \rightarrow 0$ μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, με πιθανή συνέπεια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, την αστοχία – κατάρρευση του μετώπου (Καββαδάς, 2007). Αν παρουσιάσουμε τη μείωση αυτή σε διαγράμματα κύκλων Mohr, παρατηρούμε ότι κατά τη μείωση αυτή η διάμετρος του κύκλου Mohr μεγαλώνει και υπάρχει κίνδυνος ο κύκλος να εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb, με συνέπεια την αστοχία του μετώπου. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.2**.

Κατά τη μείωση της σ_3 ο κίνδυνος αστοχίας του μετώπου αυξάνει σε συνδυασμό με τις εξής συνθήκες:

- Μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχόμαζας (σ_{cm}), η οποία είναι ανάλογη με τη συνοχή του εδαφικού μας υλικού. Επομένως, η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb μετατοπίζεται προς τα κάτω.
- Αύξηση του βάθους της σήραγγας, κι επομένως της κατακόρυφης τάσης σ_1 . Επομένως, η διάμετρος του κύκλου Mohr μεγαλώνει και πλησιάζει την περιβάλλουσα αστοχίας
- Αύξηση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής
- Μεγάλες τιμές υδραυλικής κλίσης προς το μέτωπο εκσκαφής προκαλώντας ροή και δυνάμεις διήθησης μπροστά από το μέτωπο.



Σχήμα 4.2: Αστοχία στο μέτωπο εκσκαφής λόγω μείωσης της οριζόντιας τάσης σ_3 (Καββαδάς, 2007)

Με βάση τις παραπάνω αναφορές, για την διασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου οι τεχνικές διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης που απαιτούνται βασίζονται στους εξής τρόπους:

- Βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας
- Μείωση της κατακόρυφης τάσης σ_1
- Διατήρηση υψηλής τιμής της οριζόντιας τάσης σ_3
- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της εκσκαφής, μειώνοντας την επιφάνεια του μετώπου
- Αποτόνωση των υδατικών πιέσεων μπροστά από το μέτωπο με αποστράγγιση, γεγονός που μειώνει τη μέγιστη μετακίνηση στο μέτωπο στη μισή περίπου της τιμής της, καθώς επίσης και την έκταση της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο

Με βάση την επίδραση των παραπάνω παραγόντων, και για την περίπτωση μη εφαρμογής οποιασδήποτε μεθόδου άμεσης υποστήριξης, ο **συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου FS_0** δίνεται από τη σχέση:

$$FS_0 = \frac{2}{(1 - \lambda)N_S}$$

όπου N_S ο συντελεστής επιφόρτισης της βραχώμαζας, που ορίζεται ως εξής:

$$N_S = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}}$$

και η αντοχή της σε μονοαξονική θλίψη δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$$

4.3. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Η εκτίμηση των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας σε διάφορες θέσεις ως προς το μέτωπο είναι χρήσιμο εργαλείο στο σχεδιασμό για τους εξής λόγους (Καββαδάς, 2007):

1. Οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων επηρεάζουν τις καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους
2. Με τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων ενεργοποιείται (φορτίζεται) η βραχώμαζα και μειώνονται (συνήθως) τα φορτία που θα αναληφθούν από την προσωρινή υποστήριξη
3. Σε περίπτωση υπέρμετρης σύγκλισης, η βραχώμαζα χαλαρώνει και αυξάνουν τα φορτία που θα αναληφθούν από την προσωρινή υποστήριξη
4. Η σύγκλιση του τοιχώματος αποτελεί τον συνηθέστερο τρόπο ελέγχου των παραδοχών της μελέτης (μέσω σύγκρισης προβλέψεων - μετρήσεων) και προσαρμογής της διάνοιξης και υποστήριξης στις επιτόπου συνθήκες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια εκτενής μελέτη που πραγματοποίησε ο **Lunardi** το 2000 σχετικά με την τασική και παραμορφωσιακή συμπεριφορά του μετώπου της σήραγγας. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει τρία στάδια έρευνας. Κάθε στάδιο καταλήγει σε κάποια αποτελέσματα και συμπεράσματα, τα οποία χρησιμοποιούνται ως βάση για το επόμενο στάδιο της έρευνας.

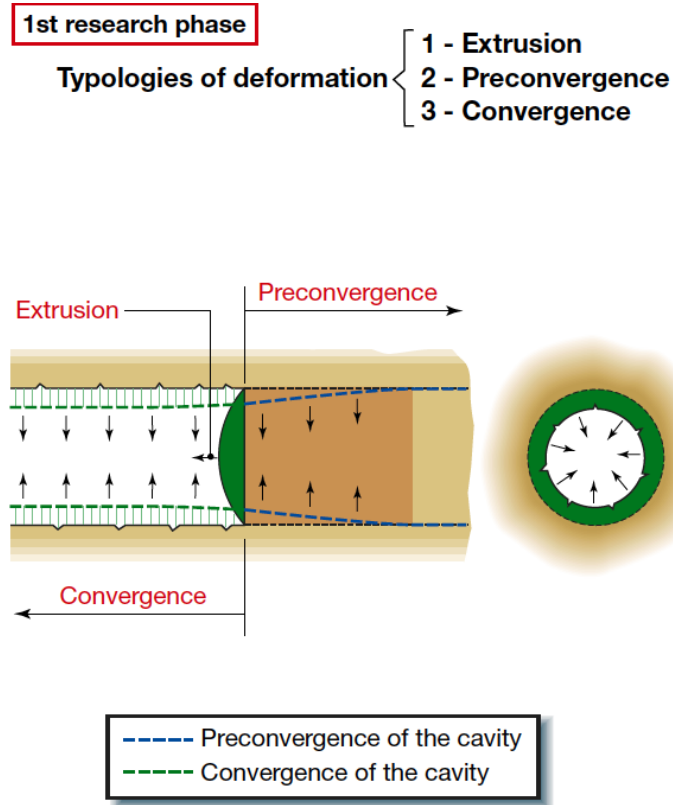
Στο πρώτο στάδιο της έρευνας έγινε συστηματική ανάλυση της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού γύρω από τη σήραγγα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής.

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της αστάθειας του μετώπου, οδήγησε τότε στην χρησιμοποίηση νέων όρων αναφοράς και ταξινόμηση των παραμορφώσεων, όπως περιγράφεται παρακάτω:

- **Πυρήνας προώθησης (advanced core):** Ο όγκος του εδάφους που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας. Είναι κυλινδρικού σχήματος, με ύψος και διάμετρο περίπου ίδιων διαστάσεων με αυτά της σήραγγας.
- **Εξώθηση (extrusion):** Η βασική συνιστώσα της απόκρισης της παραμόρφωσης του σχηματισμού ως αντίδραση στη «δράση» της εκσκαφής. Αναπτύσσεται αρκετά μέσα στον προπορευόμενο πυρήνα. Εξαρτάται από τη αντοχή και τις ιδιότητες παραμορφωσιμότητας του πυρήνα προώθησης, καθώς επίσης και από το αρχικό τασικό πεδίο στο οποίο υπόκειται. Παρατηρείται στην επιφάνεια του μετώπου κατά τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα εκσκαφής και η γεωμετρία της είναι περίπου αξονοσυμμετρική.
- **Προσύγκλιση της σήραγγας (preconvergence):** Η σύγκλιση του θεωρητικού προφίλ μπροστά από το μέτωπο. Είναι αυστηρά εξαρτώμενη από τη σχέση

μεταξύ της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του πυρήνα προώθησης και από το αρχικό τασικό πεδίο. Ως **σύγκλιση** ορίζεται η μείωση του μεγέθους της θεωρητικής διατομής της σήραγγας πίσω από το μέτωπο.

Η ταξινόμηση των παραμορφώσεων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.3**



Σχήμα 4.3: Παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής: Εξώθηση, προσύγκλιση και σύγκλιση (Lunardi, 2000).

Στη συνέχεια μέσω παρατήρησης των παραπάνω φαινομένων, διαπιστώθηκε ότι η αστάθεια του μετώπου εκσκαφής και της περιοχής γύρω από αυτό σχετίζεται με τους ακόλουθους τύπους παραμορφώσεων (όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.4**):

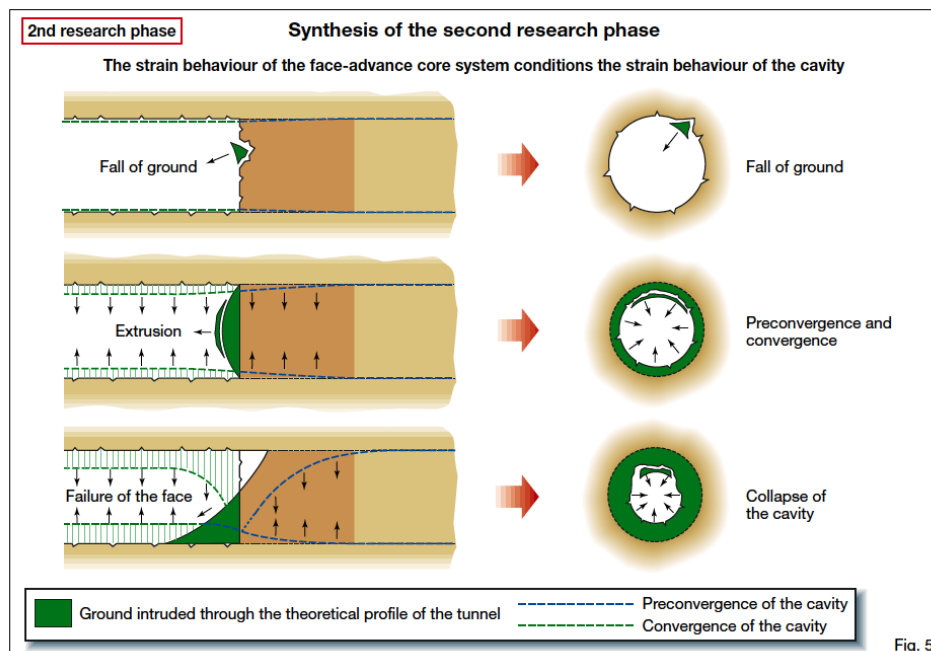
- Καταπτώσεις εδαφικών τεμαχών, αστοχία του πυρήνα προώθησης με επακόλουθα την εξώθηση του υλικού στο μέτωπο εκσκαφής και προσύγκλιση μπροστά από το μέτωπο
- Καταπτώσεις τεμαχών, αστοχία και κατάρρευση της οροφής και των τοιχωμάτων της ήδη διανοιγμένης κοιλότητας λόγω συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο

Στο δεύτερο στάδιο της έρευνας, έγινε ανάλυση των φαινομένων που προκλήθηκαν σε διάφορες περιπτώσεις σήραγγων στην Ιταλία, όπως την σήραγγα του αυτοκινητοδρόμου Fresus (1975), τη σήραγγα του Αγίου Στεφάνου (1984) και τη σήραγγα Tasso (1988). Σκοπός της ανάλυσης αυτής ήταν να βρεθεί σχέση να συνδέει την αντίδραση του συστήματος μετώπου-πυρήνα προώθησης (εξώθηση και προσύγκλιση) με την αντίδραση της διανοιγμένης κοιλότητας (σύγκλιση).

Με βάση αυτή την ανάλυση, κατέληξε στα εξής **συμπεράσματα**:

- Η παραμόρφωση του πυρήνα προώθησης προκαλεί όλη την διαδοχική ακολουθία παραμορφώσεων στο μέτωπο και στην ήδη διανοιγμένη κοιλότητα. Οι παραμορφώσεις ξεκινούν μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας, εντός του πυρήνα προώθησης και διαδίδονται προς το εσωτερικό της κοιλότητας.
- Η αστοχία του πυρήνα και η κατάρρευση της σήραγγας ποτέ δεν εμφανίζονται σαν μεμονωμένα φαινόμενα και συνήθως το δεύτερο ακολουθεί το πρώτο, ακόμα και στη περίπτωση που έχει σταθεροποιηθεί με διάφορα μέτρα υποστήριξης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα του δεύτερου σταδίου της έρευνας σχετικά με την συσχέτιση των παραμορφώσεων στο μέτωπο και στη διανοιγμένη κοιλότητα παρουσιάζονται συνοπτικά στο **Σχήμα 4.4**.



Σχήμα 4.4: Περιπτώσεις αστάθειας στο μέτωπο και στη διανοιγμένη κοιλότητα και συσχέτισή τους (Lunardi, 2000).

Άρα ο πυρήνας προώθησης αποτελεί σημαντικό και αποτελεσματικό εργαλείο τόσο για τη βραχυχρόνια όσο και για την μακροχρόνια ευστάθεια της σήραγγας, ικανό να ρυθμίσει τη συμπεριφορά της κατά τη διέλευση του μετώπου. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την εκσκαφή του εδάφους υπό **ελαστοπλαστικές συνθήκες**, η διατήρηση συνεχών και σταθερών κύκλων εκσκαφής αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποφυγή παραμορφώσεων στον πυρήνα λόγω χρονικών περιθωρίων εξέλιξης. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται τα φαινόμενα της εξώθησης και της προσύγκλισης, τα οποία και θα προκαλέσουν την επακόλουθη σύγκλιση ολόκληρης της κοιλότητας

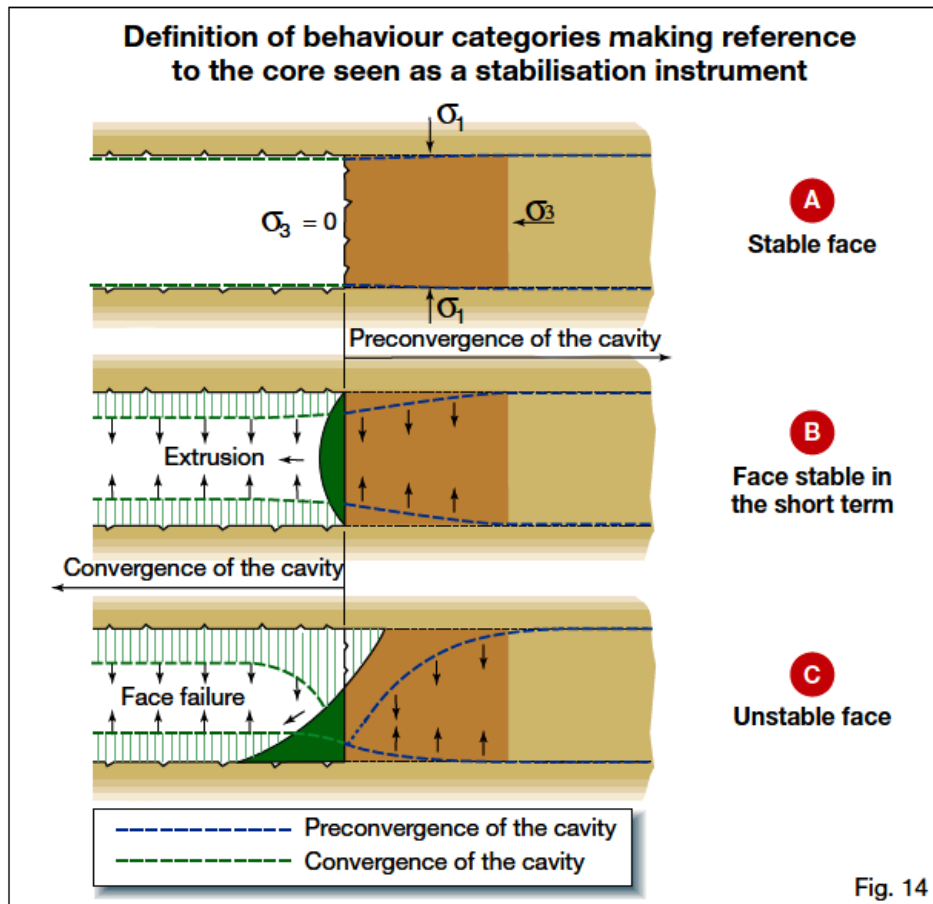
Συνεπώς, η ακαμψία του υλικού του πυρήνα προώθησης παίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια της σήραγγας (του μετώπου εκσκαφής και ακολούθως και της διανοιγμένης κοιλότητας) τόσο βραχυχρόνια όσο και μακροχρόνια.

Με βάση το τελικό συμπέρασμα του δεύτερου σταδίου, **στο τρίτο στάδιο της έρευνας** επιχειρήθηκε να ελεγχθεί πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πυρήνας προώθησης ως εργαλείο ευστάθειας. Αυτό υλοποιήθηκε μέσω πειραμάτων σε δύο τύπους υλικών με διαφορετική ακαμψία. Αποδείχθηκε ότι με τη χρήση μεθόδων επέμβασης, είτε προστατευτικές είτε ενισχυτικές, που επιδρούν στην ακαμψία του πυρήνα προώθησης, γίνεται εφικτός ο έλεγχος των παραμορφώσεων του (εξώθηση και προσύγκλιση), και ως αποτέλεσμα γίνεται εφικτός και ο έλεγχος των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο στο εσωτερικό της σήραγγας. .

Επομένως, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στις ιδιότητες και στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του συστήματος μετώπου-πυρήνα προώθησης. Αναμένονται τρεις πιθανοί τύποι συμπεριφοράς της εκσκαφής (όπως παρουσιάζονται και στο **Σχήμα 4.5**):

- **Ευσταθής συμπεριφορά του μετώπου (κατηγορία Α):** Οι συνθήκες τάσεων στο σχηματισμό του μετώπου και περιμετρικά της εκσκαφής δεν ξεπερνούν την αντοχή του εδάφους. Όσο πιο πολύ προσεγγίζει η θεωρητική διατομή στο θεωρητικό προφίλ, τόσο πιο κοντά στα τοιχώματα της σήραγγας θα αναπτυχθεί το φαινόμενο του θόλου. Η **ευστάθεια** της σήραγγας είναι **εγγυημένη**, ακόμα και αν δεν τοποθετείται οποιαδήποτε επέμβαση σταθεροποίησης στην κοιλότητα.
- **Συμπεριφορά βραχυχρόνιας ευστάθειας του μετώπου (κατηγορία Β):** Οι συνθήκες τάσεων στο σχηματισμό του μετώπου και περιμετρικά της εκσκαφής μπορεί να ξεπεράσουν την αντοχή του σχηματισμού στην ελαστική περιοχή. Το φαινόμενο του θόλου δεν σχηματίζεται κοντά στην περίμετρο της διατομής, παρά μόνο σε μια απόσταση, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της ζώνης του εδάφους που υπόκειται σε πλαστικοποίηση. Για τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε αποδεκτά όρια απαιτούνται **μέτρα προενίσχυσης του μετώπου** εκσκαφής.

- Συμπεριφορά ασταθούς μετώπου (κατηγορία C):** Οι τάσεις στο έδαφος στο μέτωπο και περιμετρικά της διατομής είναι σημαντικά υψηλότερες σε σχέση με την αντοχή των υλικών στη περιοχή του μετώπου . Το φαινόμενο του θόλου δεν μπορεί να σχηματιστεί ούτε στο μέτωπο ούτε περιμετρικά των τοιχωμάτων της σήραγγας, επειδή ο εδαφικός σχηματισμός δεν διαθέτει επαρκή παραμένουσα αντοχή. Καθώς οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται ταχύτατα, λαμβάνοντας τιμές στα όρια της αστοχίας, η **ενίσχυση του πυρήνα προώθησης** κρίνεται **αναγκαία** για τη δημιουργία τεχνητού φαινομένου θόλου.



Σχήμα 4.5: Κατηγορίες συμπεριφοράς της εκσκαφής με βάση τις ιδιότητες του πυρήνα προώθησης (Lunardi, 2000).

4.4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Σκοπός της μελέτης των μηχανισμών αστοχίας του μετώπου είναι η εκτίμηση των συνθηκών ευστάθειας ενός μηχανικού συστήματος, ανεξαρτήτως της συμπεριφοράς του περιβάλλοντος υλικού, προς αποφυγήν της κατάρρευσης και των φαινομένων εξώθησης, σύγκλισης και προσύγκλισης. Η αστοχία πραγματοποιείται με την

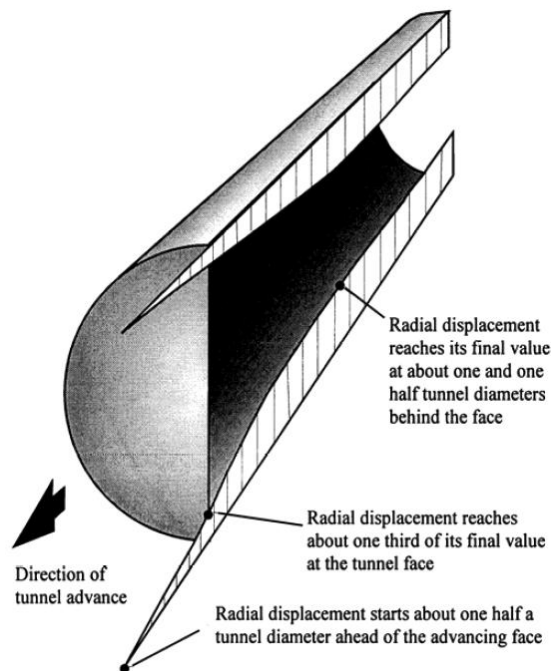
εφαρμογή επιφανειακών φορτίσεων και του ίδιου βάρους, ενώ αποτρέπεται με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής.

Προτού αρχίσει η κατασκευή του έργου, στο έδαφος επικρατούν γεωστατικές συνθήκες με κατακόρυφη ορθή τάση σ_1 και οριζόντιες ορθές τάσεις $\sigma_2 = \sigma_3$, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.6**. Κατά την προώθηση της σήραγγας, η οριζόντια τάση σ_3 του σχηματισμού που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής μπορεί να μειωθεί ή ακόμη και να μηδενιστεί.

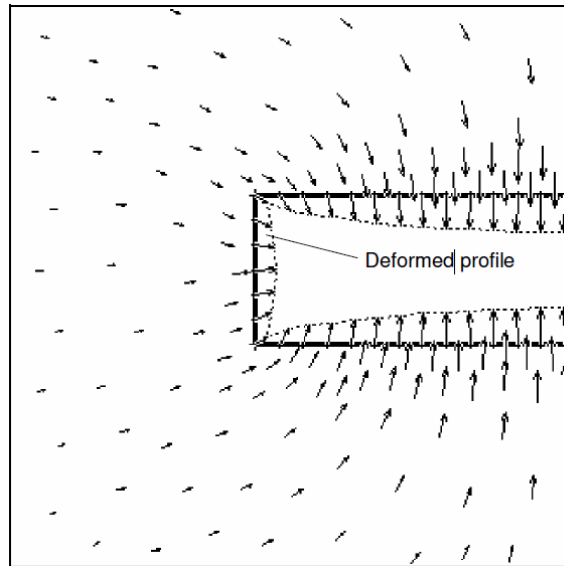


Σχήμα 4.6: Εντατική κατάσταση στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (Καββαδάς, 2007).

Με αυτή τη μεταβολή της εντατικής κατάστασης προκαλούνται οι παραμορφώσεις που φαίνονται στα **Σχήματα 4.7** και **4.8**. Απεικονίζονται τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας και τα παραμορφωμένα όρια της εκσκαφής.



Σχήμα 4.7: Παραμορφώσεις στο μέτωπο και στις παρειές της εκσκαφής (Καββαδάς, 2007).

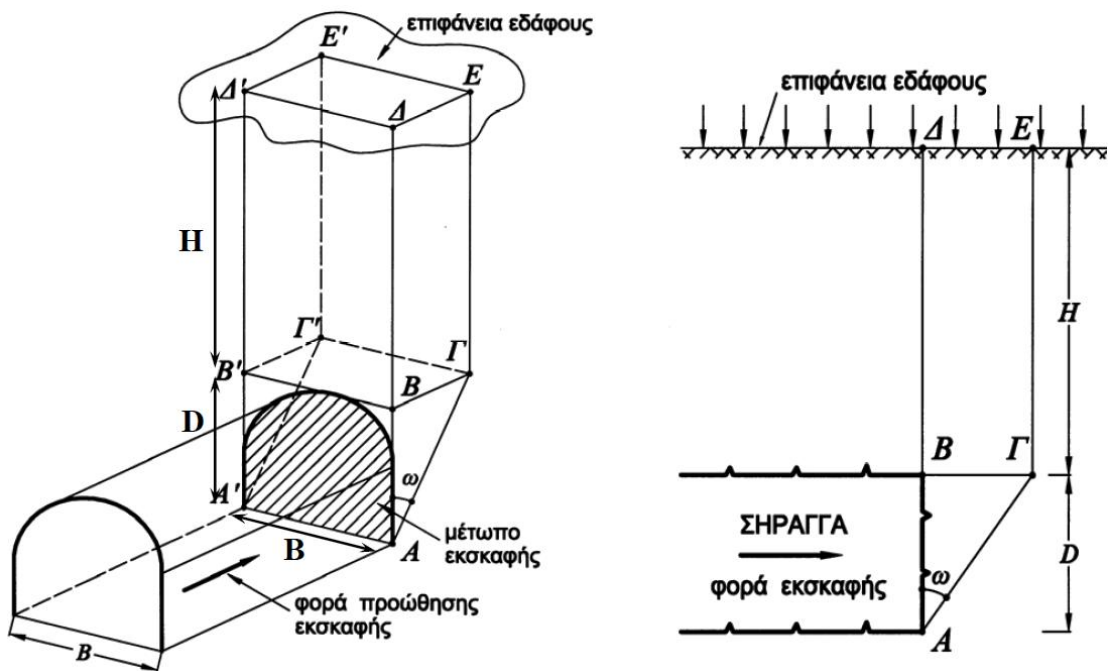


Σχήμα 4.8: Παραμορφωμένα όρια εκσκαφής (Καββαδάς, 2007).

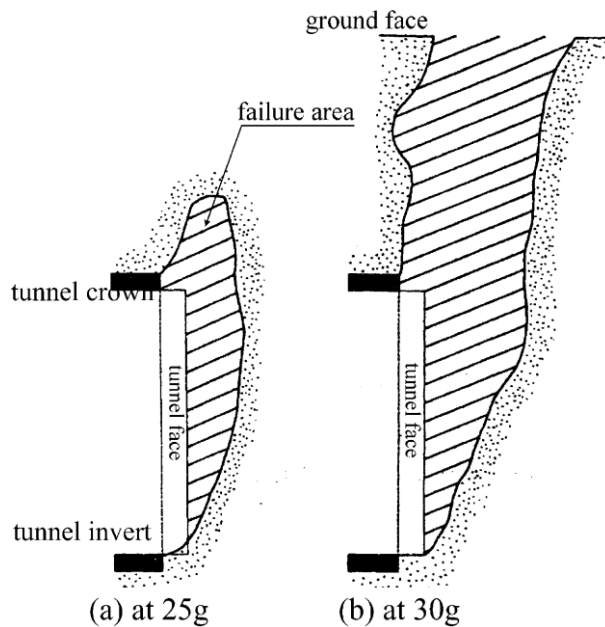
Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί μια κυκλική σήραγγα ακτίνας r_0 , η οποία υπόκειται σε υδροστατική πίεση p_0 και σε ενιαία εσωτερική πίεση υποστήριξης p_i , τότε **σε απόσταση μιας διαμέτρου μπροστά από το μέτωπο**, η περιβάλλουσα βραχόμαζα δεν επηρεάζεται από τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι συγκλίσεις αρχίζουν σε **απόσταση περίπου 0.5-0.75 D εμπρός από το μέτωπο**. Ακριβώς **στο επίπεδο του μετώπου εκσκαφής** παρουσιάζεται το 30% των συνολικών συγκλίσεων, γεγονός που οφείλεται στην τρισδιάστατη ανακατανομή των τάσεων λόγω της ύπαρξης του άκαμπτου τμήματος μπροστά από αυτό. Με την προχώρηση του μετώπου της εκσκαφής, η πίεση p_i μειώνεται και η βραχόμαζα παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι το σημείο όπου ξεκινάει η πλαστική συμπεριφορά του σχηματισμού και η ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από τα όρια της εκσκαφής. Με την περαιτέρω απομείωση της εσωτερικής πίεσης p_i , η ακτίνα της πλαστικής ζώνης r_p και η σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας δ αυξάνουν σημαντικά και τελικά λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους **σε απόσταση δύο περίπου διαμέτρων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής**.

Πολλοί μηχανισμοί αστοχίας του μετώπου έχουν αναπτυχθεί, με σημαντικότερους την οριακή ισορροπία σφήνας κατά Anagnostou και Konari (1994-1996), οι οποίοι θεώρησαν μια στερεοστατική ισορροπία ενός πρίσματος στο μέτωπο της σήραγγας (**Σχήμα 4.9**), και τη μέθοδο των λωρίδων, με καμπύλη ή επίπεδη επιφάνεια αστοχίας. Παράλληλα, οι Atkinson and Potts (1977), Chambon and Corte (1994) και HSE (1996) απέδειξαν ότι ο τυπικός τρόπος αστοχίας μπροστά από το μέτωπο είναι μορφής «καμινάδας». Στη συνέχεια, ως επακόλουθο αυτής της θεωρίας, οι Kamata and Mashimo (2003) μέσω πειραματικών δοκιμών με φυγοκεντριστή σε αμμώδη εδάφη, έδειξαν ότι για επιτάχυνση της βαρύτητας 25g η αστοχία φτάνει σε απόσταση

0,4D πάνω από το μέτωπο, ενώ για 30g η αστοχία έχει μορφή «καμινάδας» και φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.9: Έλεγχος ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής κατά Anagnostou and Kovari – Οριακή ισορροπία σφήνας (Καββαδάς, 2007)



Σχήμα 4.10: Μηχανισμός αστοχίας τύπου «καμινάδας» ανυποστηρίκτων σηράγγων σε κοκκώδη εδάφη (Kamata and Mashimo, 2003).

5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται περιμετρικά της σήραγγας κατά την διάνοιξη της επηρεάζουν δραστικά την ευστάθεια του μετώπου της εκσκαφής, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν να ελεγχθούν και να περιοριστούν σημαντικά με τεχνητή ρύθμιση των ιδιοτήτων παραμορφωσιμότητας του εδαφικού σχηματισμού μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και της ακαμψίας του πυρήνα προώθησης. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση διάφορων τεχνικών ενίσχυσης του εδάφους με σκοπό να δημιουργηθεί με τεχνητό τρόπο φαινόμενο του θόλου μπροστά από το μέτωπο και με τη χρήση τεχνικών περιορισμού της εξώθησης της επιφάνειας του μετώπου εντός της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο σχηματισμός εντείνεται στην ελαστοπλαστική περιοχή:

- Αν οι τάσεις που καλείται να αναλάβει είναι χαμηλές σε σχέση με την αντοχή του, ίσως είναι αρκετή η παρέμβαση μόνο εντός της εκσκαφής με τη χρήση μέτρων άμεσης υποστήριξης. Τα μέτρα αυτά τοποθετούνται κάθετα στον άξονα της σήραγγας, στο επίπεδο της διατομής, χωρίς περαιτέρω διαμήκη μέτρα επέμβασης στον πυρήνα.
- Αν οι συνθήκες τάσεων ξεπεράσουν τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού, καθίσταται απαραίτητη η επέμβαση στον πυρήνα προώθησης ενισχύοντάς τον με διαμήκη μέτρα, χωρίς να απαιτούνται ακτινικά μέτρα υποστήριξης στην διανοιγμένη κοιλότητα μετά το πέρασμα του μετώπου

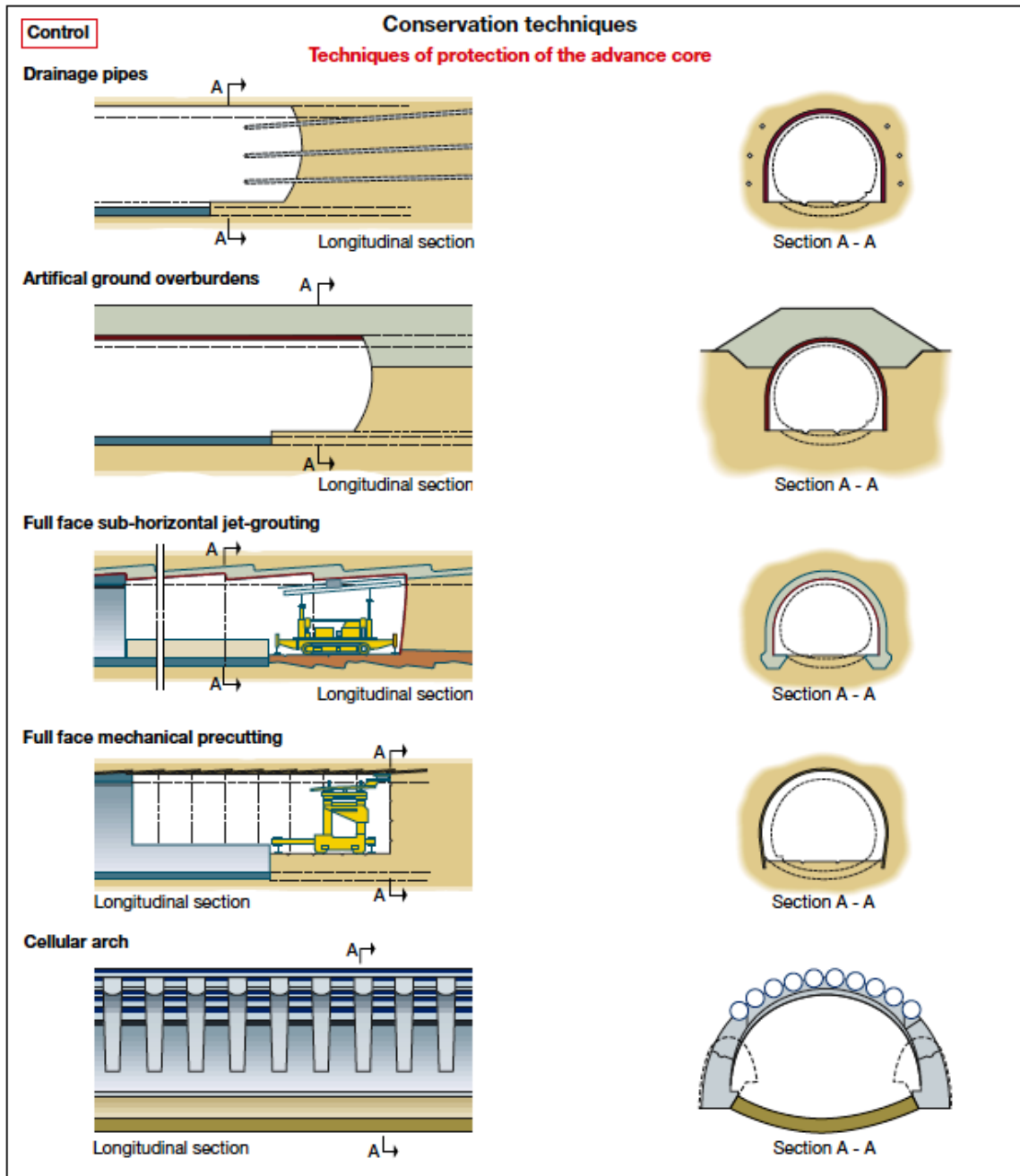
Οι μέθοδοι επέμβασης μπροστά από το μέτωπο με σκοπό την ρύθμιση της ακαμψίας του πυρήνα προώθησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Προστατευτικές μέθοδοι**

Προκαλούν ανακατανομή των τάσεων γύρω από το μέτωπο, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση των φυσικών ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδαφικού σχηματισμού. Παραδείγματα αυτών των μεθόδων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.1** (όπως παρουσιάστηκε στη μελέτη του Lunardi το 2000).

- **Μέθοδοι ενίσχυσης**

Ενεργούν κατευθείαν στη σύσταση του εδαφικού υλικού του πυρήνα προώθησης ενισχύοντας τις φυσικές ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητάς του μέσω κατάλληλων μεθόδων βελτίωσης του εδάφους.



Σχήμα 5.1: Προστατευτικές μέθοδοι

Ο κύριος παράγοντας όμως ταξινόμησης των μεθόδων αυτών είναι ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν στην διασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου, σύμφωνα με τον Καββαδά (2007):

- Διατήρηση υψηλής τιμής της οριζόντιας τάσης σ_3 με τις εξής μεθόδους:
 - Τοποθέτηση αγκυρίων Fiberglass
 - Εκσκαφή με μηχάνημα TBM που ασκεί πίεση στο μέτωπο

- Μείωση της κατακόρυφης τάσης σ_1 με τις εξής μεθόδους:
 - Τοποθέτηση δοκών προπορείας (forepoling) στη στέψη
 - Τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυρίων από την επιφάνεια, στην περίπτωση αβαθών σηράγγων
 - Συνεχείς ομπρέλες jet-grouting

- Βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και της αντοχής της βραχώμαζας με τις εξής μεθόδους:
 - Τσιμεντενέσεις
 - Πάγωμα (ground freezing) του εδαφικού σχηματισμού
 - Αποστράγγιση, αν υπάρχει νερό υπό πίεση

- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της εκσκαφής, μειώνοντας την επιφάνεια του μετώπου με εκσκαφή σε φάσεις με τη μέθοδο NATM

- Αποτόνωση των υδατικών πιέσεων μπροστά από το μέτωπο με αποστράγγιση

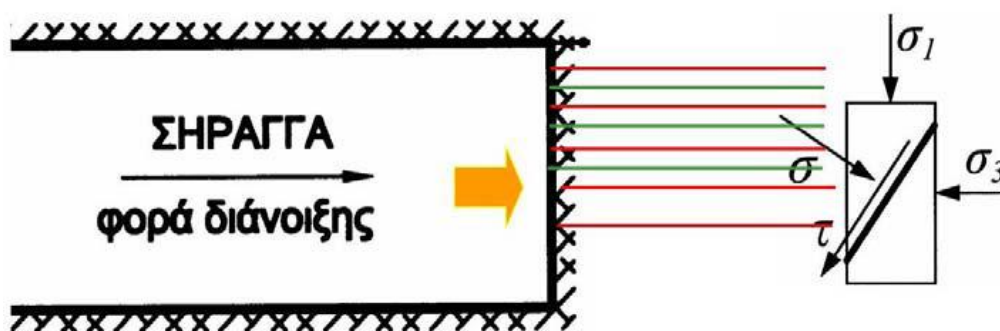
Στη παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στην ενίσχυση του μετώπου με χρήση αγκυρίων fiberglass.

5.2. ΧΡΗΣΗ ΑΓΚΥΡΙΩΝ FIBERGLASS ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ

Η μέθοδος της ενίσχυσης με τοποθέτηση αγκυρίων 'fibreglass' στην επιφάνεια του μετώπου με σκοπό την βελτίωση της ευστάθειάς του (**Εικόνα 5.1**) αποτελεί την συνηθέστερη μέθοδο υποστήριξης του μετώπου διάνοιξης της σήραγγας λόγω της σχέσης του κόστους εφαρμογής της με την επιτυγχανόμενη αποτελεσματικότητά της, όσο και του πλήθους των τεχνικών πλεονεκτημάτων της. Από τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων μετώπου "fibreglass" (**Σχήμα 5.2**) είναι η υψηλή εφελκυστική αξονική αντοχή και ταυτόχρονα η σχετική ψαθυρότητά τους στην κάθετη διεύθυνση, που επιτρέπει την εύκολη σύνθλιψή τους τόσο από τα συμβατικά μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων όσο και από τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής.



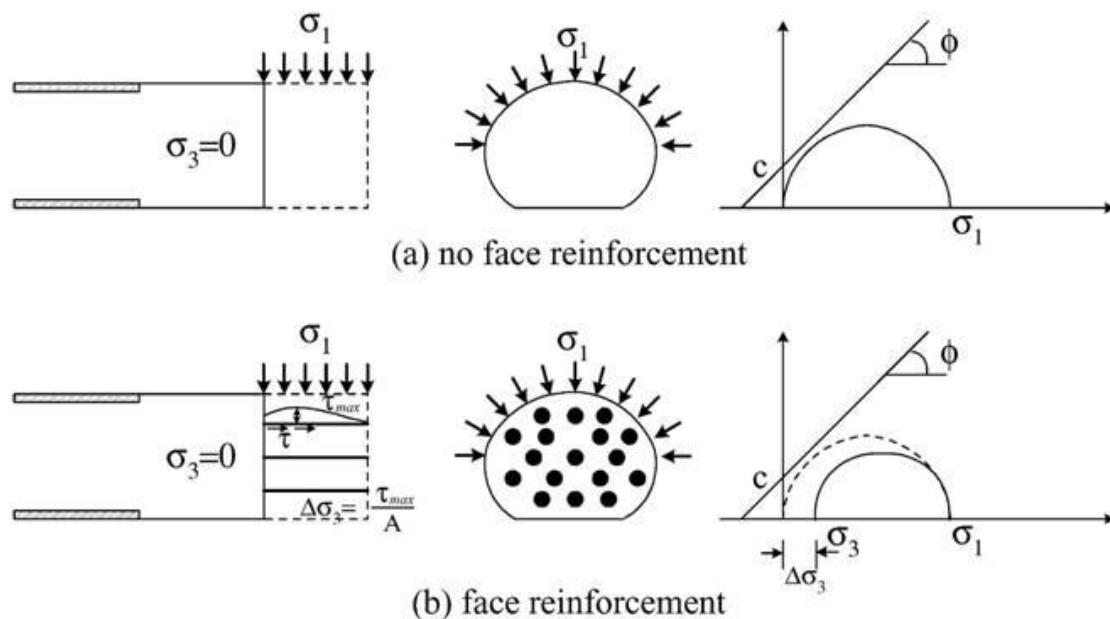
Εικόνα 1: Βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής με την τοποθέτηση αγκυριών fiberglass (Καββαδάς, 2007)



Σχήμα 5.2: Τοποθέτηση οριζόντιων αγκυριών στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας (Καββαδάς, 2007).

Η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής στοχεύει στην διατήρηση υψηλής τιμής της τάσης σ_3 , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.3**, έτσι ώστε να μην επιτραπεί στις γεωτεχνικές παραμέτρους του σχηματισμού να περιέλθουν στις παραμένουσες τιμές τους και να οδηγήσουν σε αστοχία στο μέτωπο, και ο κύκλος του Mohr να διατηρείται μακριά από την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr- Coulomb. Όπως και στην περίπτωση της μεθόδου ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής με την

τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυρίων, έτσι και με την μέθοδο αυτή, ενεργοποιείται η εφελκυστική αντοχή των οριζόντιων αγκυρίων στην κατά μήκος όμως διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας. Οι αρχές του μηχανισμού της μεθόδου ενίσχυσης είναι παρόμοιες με αυτές της ενισχυμένης γης, στην οποία οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις κατά μήκος των μέτρων ενίσχυσης οδηγούν σε ανακατανομή των τάσεων όπως και στο μέτωπο διάνοιξης.



Σχήμα 5.3: Επίδραση στο εντατικό πεδίο της τοποθέτησης οριζόντιων αγκυρίων στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας (Καβαδάς, 2007).

Η τιμή της τάσης σ_3 δίνεται από τον τύπο (Καβαδάς, 2007):

$$\sigma_3 = \frac{P}{A} = \frac{n \cdot F_y}{(FS_F) \cdot A}$$

όπου n = ο αριθμός αγκυρίων στο μέτωπο

F_y = η αντοχή διαρροής του αγκυρίου

FS_F = ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας έναντι διαρροής του αγκυρίου

A = το εμβαδόν διατομής της σήραγγας

Η αντοχή της βραχώμαζας μετά την ενίσχυση θεωρώντας ότι η ενίσχυση του μετώπου είναι «εύκαμπτη» και συνεπώς πρακτικά δεν επηρεάζει την τιμή του συντελεστή αποτόνωσης λ μετατρέπεται σε:

$$\sigma_c = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + \sigma_{cm}$$

ενώ ο συντελεστής ασφαλείας του ενισχυμένου μετώπου είναι ίσος με:

$$FS = FS_0 + \frac{1}{(1 - \lambda)} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

5.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Τα τελευταία χρόνια η χρήση αγκυρίων fiberglass ως μέσο ενίσχυσης του μετώπου της εκσκαφής εφαρμόζεται ευρέως. Με αφορμή το γεγονός αυτό, πραγματοποιήθηκαν διάφορες μελέτες με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα και στην βελτιστοποίηση της μεθόδου αυτής. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν στις μελέτες και αναλύσεις είναι οι επικρατούσες εδαφικές συνθήκες, το βάθος διάνοιξης της σήραγγας και διάφορα χαρακτηριστικά της εφαρμογής των αγκυρίων στο μέτωπο της εκσκαφής, όπως το μήκος, η πυκνότητα και η ακαμψία των αγκυρίων.

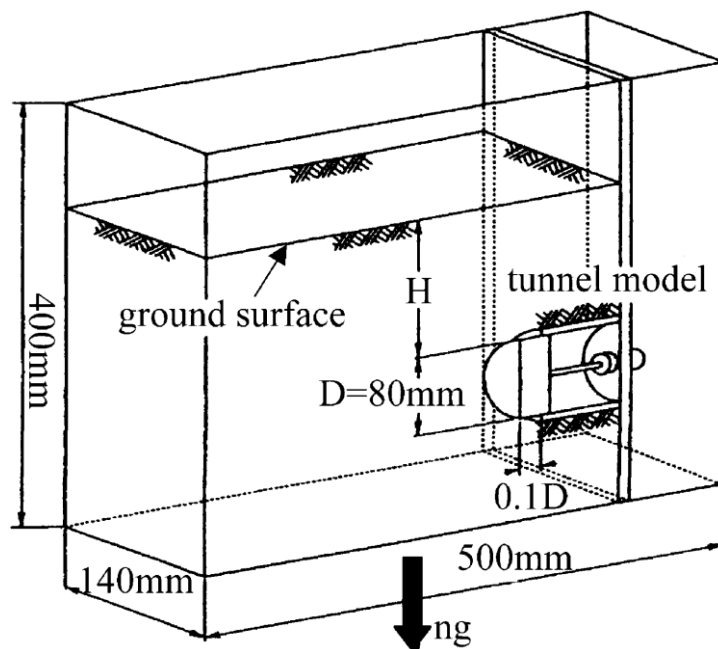
Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες από τις πειραματικές δοκιμές που διενεργήθηκαν τα τελευταία χρόνια και τα αποτελέσματά τους:

5.3.1. Kamata – Mashimo (2003)

Σε άρθρο τους που δημοσιεύτηκε το 2003 στο περιοδικό «Tunneling and Underground Technology» οι Hirohisa Kamata και Hideto Mashimo, παρουσιάζουν μια πειραματική εφαρμογή με χρήση πραγματικού μοντέλου. Σκοπός της πειραματικής αυτής εφαρμογής είναι να εκτιμηθεί η επίδραση των συμβατικών

μεθόδων άμεσης υποστήριξης, όπως είναι τα αγκύρια μετώπου, τα κατακόρυφα αγκύρια μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και οι δοκοί προτοπείας. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν φυγόκεντρες δοκιμές μεταβάλλοντας τη διάταξη και το μήκος των αγκυριών και στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών με τα αναλυτικά αποτελέσματα της διδιάστατης ανάλυσης με διακριτά στοιχεία.

Το εργαστηριακό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.4**. Περιλαμβάνει ένα κιβώτιο διαστάσεων 140x500x400 mm με ένα διαφανές ακρυλικό πάνελ στην μπροστινή πλευρά του για να είναι δυνατή η παρατήρηση των εδαφικών παραμορφώσεων κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Το μοντέλο της σήραγγας κατασκευάστηκε ως ένα ημικυλινδρικό κέλυφος από ακρυλικό πάνελ, διαμέτρου 80mm. Για τον περιορισμό και την υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας τοποθετήθηκε ένα κινητό ημικυκλικό έλασμα αλουμινίου, πάχους 25mm. Για να προσομοιωθούν μάλιστα οι παραμορφώσεις κοντά στο μέτωπο χωρίς υποστήριξη, το κινητό έλασμα τοποθετήθηκε αρχικά σε απόσταση 0,1D από το ακρυλικό κέλυφος. Τέλος, για την μείωση των τριβών, προσκολλήθηκαν φύλλα Teflon στις εσωτερικές πλευρές του κιβωτίου.



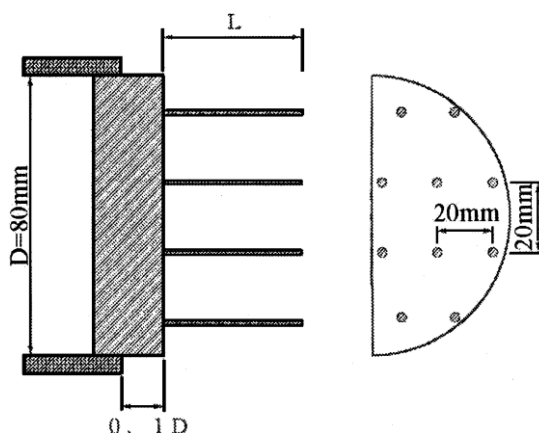
Σχήμα 5.4: Εργαστηριακό προσομοίωμα των Kamata & Mashimo

Για την προσομοίωση του εδάφους, χρησιμοποιήθηκε ακόρεστη άμμος, της οποίας τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**. Το μοντέλο του εδάφους επιτεύχθηκε μέσω ελεγχόμενης ροής της άμμου από κατάλληλο ύψος και συμπύκνωσής της ανά στρώσεις πάχους 2 cm. Ο λόγος του ύψους των υπερκείμενων προς την διάμετρο της σήραγγας ορίστηκε ίσο με $H/D=1$ για όλα τα πειράματα.

Πίνακας 5.1: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφικού προφίλ

Properties of material	
Specific gravity	2,64
Unit weight (kN/m ³)	15,1
Water content (%)	6,5
Cohesion (kPa)	4,6
Friction angle (degrees)	34,5

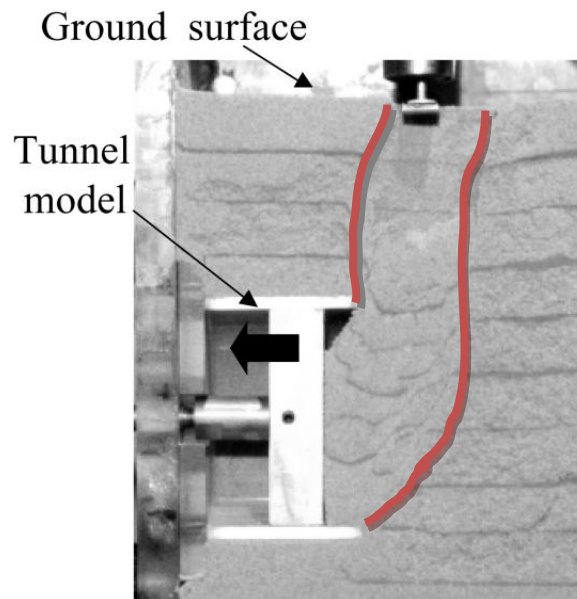
Μετά την ολοκλήρωση διαμόρφωσης του εδαφικού προσομοιώματος, απομακρύνθηκε το έλασμα αλουμινίου, τοποθετήθηκαν τα μέτρα υποστήριξης στο μέτωπο και ανατοποθετήθηκε το έλασμα αλουμινίου. Ως υλικά αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκαν φωσφορούχα μπρούτζινα βλήτρα, τα οποία είχαν επαλειφθεί με άμμο για καλύτερη συνάφεια. Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν, είχαν διάμετρο 1,2 mm, ενώ το μήκος και η διάταξή τους στο μέτωπο διαφοροποιούνταν. Το μήκος τους έλαβε τις τιμές 0.25D, 0.5D, 1.0D και 1.5D. Όσον αφορά την διάταξη τους, τοποθετήθηκαν σε ολόκληρη τη επιφάνεια του μετώπου, μόνο στην πάνω ημιδιατομή ή μόνο στην κάτω ημιδιατομή. Η διάταξη των αγκυριών σε όλη την επιφάνεια του μετώπου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.5**.



Σχήμα 5.5: Διάταξη αγκυριών σε όλη την επιφάνεια του μετώπου

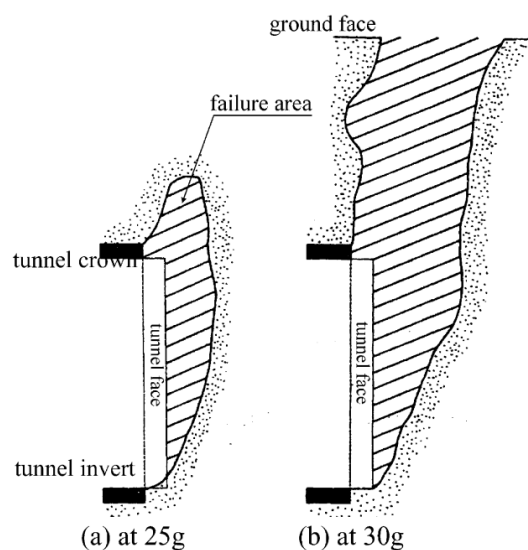
Μετά την τοποθέτηση και των μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο, το προσομοίωμα οδηγήθηκε στον φυγόκεντριστή, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη φυγόκεντρη επιτάχυνση, η οποία ορίστηκε ίση με 25 g και 30 g για τις διάφορες δοκιμές. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αποτόνωση του μετώπου διάνοιξης μέσω ώθησης του ελάσματος αλουμινίου προς το εσωτερικό της σήραγγας και εξετάστηκε η ευστάθεια της εκσκαφής.

Στην **Εικόνα 5.2**, παρουσιάζεται η επιφάνεια αστοχίας του μετώπου εκσκαφής χωρίς την τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης για φυγόκεντρη επιτάχυνση 30g.



Εικόνα 5.2: Επιφάνεια αστοχίας εδάφους στο μέτωπο διάνοιξης στα 30g (Kamata, Mashimo, 2003)

Στο **Σχήμα 5.6** απεικονίζονται αντίστοιχα τα σκαριφήματα των επιφανειών αστοχίας στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας χωρίς την τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης για φυγόκεντρες επιταχύνσεις 25g και 30g. Και στις δύο περιπτώσεις, η αστοχούσα ζώνη ξεκινά από τον πυθμένα της εκσκαφής και εξαπλώνεται προς τον θόλο. Μπροστά από το μέτωπο φτάνει σε απόσταση έως 0,2 – 0,3D, ενώ πάνω από την στέψη της εκσκαφής εξαπλώνεται έως και 0,4D, στα 25g, ενώ στα 30g μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.



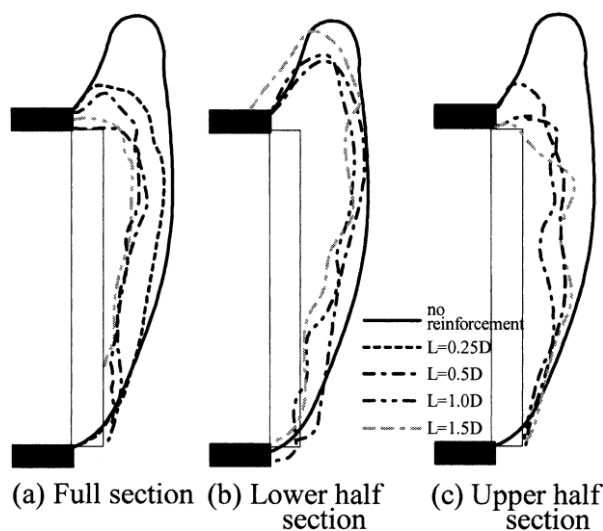
Σχήμα 5.6: Επιφάνεια αστοχίας στο μέτωπο διάνοιξης στα 25g και 30g αντίστοιχα (Kamata, Mashimo, 2003).

Στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζονται οι ζώνες αστοχίας για τις διάφορες διατάξεις των αγκυρίων (σε ολόκληρη την επιφάνεια του μετώπου, μόνο στην πάνω ημιδιατομή ή μόνο στην κάτω ημιδιατομή) και για τις διάφορες τιμές του μήκους τους (0.25D, 0.5D, 1.0D και 1.5D).

Στην περίπτωση που τα αγκύρια τοποθετήθηκαν σε όλη τη διατομή του μετώπου [**Σχήμα 5.7 (a)**], η έκταση της ζώνης αστοχίας ελαχιστοποιήθηκε όταν το μήκος των αγκυρίων ήταν μεγαλύτερο ή ίσο με 0,5D. Όμως, στην περίπτωση μήκους 0,25D, παρόλο που πάνω από τη στέψη της σήραγγας η ζώνη αστοχίας ήταν μικρότερη σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, η ευστάθεια του μετώπου δεν φάνηκε να βελτιώνεται. Το απαραίτητο λοιπόν μήκος για να δράσουν αποτελεσματικά τα αγκύρια θεωρείται ανακριβές στην περίπτωση μήκους 0,25D, λόγω της αστοχίας που παρατηρήθηκε σε απόσταση 0,2-0,3D πριν τοποθετηθεί η ενίσχυση.

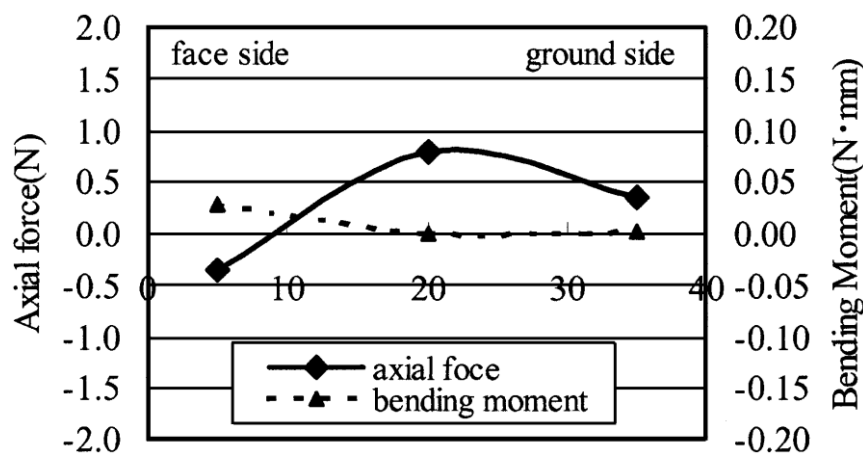
Στα **Σχήματα 5.7 (b) και (c)** παρουσιάζονται οι ζώνες αστοχίας στην περίπτωση τοποθέτησης αγκυρίων στην κάτω και στην πάνω ημιδιατομή αντίστοιχα. Όταν τοποθετήθηκαν στην κάτω ημιδιατομή, παρόλο που παρουσιάζεται μια μείωση της ζώνης αστοχίας του μετώπου στο κάτω τμήμα του με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευστάθεια, η αστοχία της μορφής «καμινάδας» πάνω από τη στέψη συνεχίζει να παρατηρείται σε όλες τις δοκιμές, όπως συνέβαινε και στο ανυποστήρικτο μέτωπο.

Αντιθέτως, όταν τοποθετήθηκαν στην άνω ημιδιατομή, η αστοχία μορφής «καμινάδας» δεν παρατηρήθηκε, παρά τη μικρή έκταση της αστοχίας που αναπτύχθηκε στο κάτω τμήμα του μετώπου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αστοχία προήλθε από το κατώτατο τμήμα του μετώπου κατά την έναρξη των δοκιμών, αλλά τα αγκύρια που είχαν τοποθετηθεί στο άνω τμήμα εμπόδισαν την εξάπλωση της αστοχίας ψηλότερα. Άρα προκύπτει το **συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση στην άνω ημιδιατομή είναι αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη σε σχέση με την κάτω ημιδιατομή.**



Σχήμα 5.7: Ζώνες αστοχίας για τις διάφορες διατάξεις των αγκυρίων και για τις διάφορες τιμές του μήκους τους (Kamata, Mashimo, 2003)

Τέλος, από το **Σχήμα 5.8** διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση τοποθέτησης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου αγκυρίων μήκους $0,5D$, η αξονική τους καταπόνηση εφαρμοζόταν σε όλο το μήκος τους και λάμβανε τη μέγιστη τιμή της στο κέντρο τους (σχεδόν $1,0\text{ N}$). Επίσης η μέγιστη κάμψη, της τάξης των $0,03\text{ N}\cdot\text{mm}$ παρατηρείται κοντά στο μέτωπο, ενώ από το κέντρο και πέρα είναι πρακτικά μηδενική. Επομένως, προκύπτει το **συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την εφελκυστική αξονική αντοχή των αγκυρίων, δηλαδή την ακαμψία τους.**



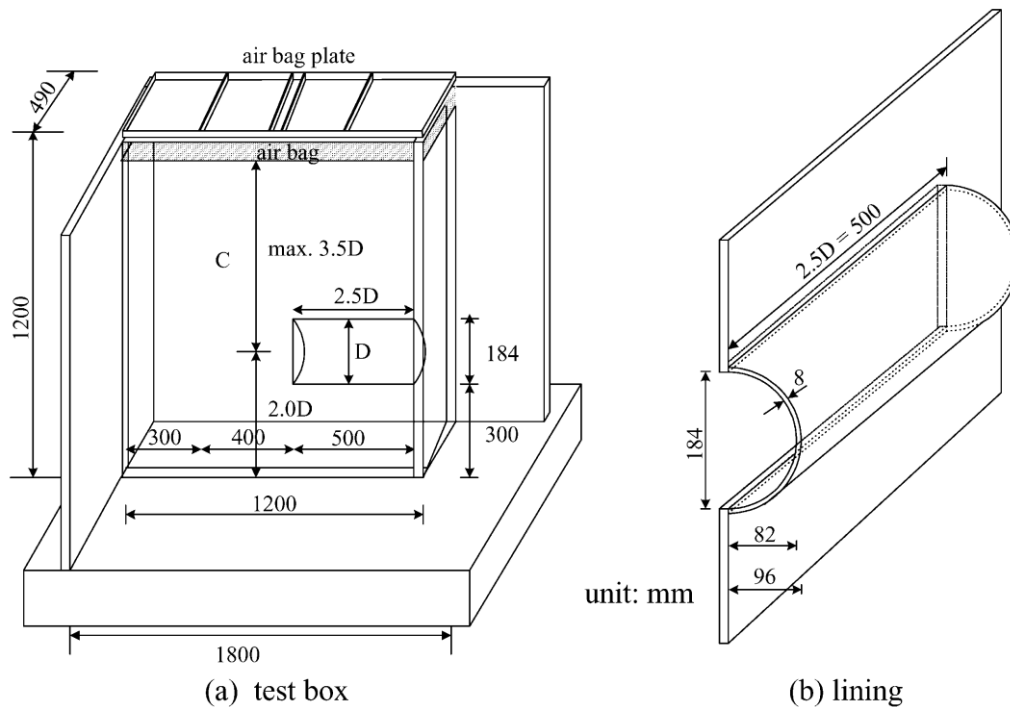
Σχήμα 5.8: Αξονική καταπόνηση και κάμψη αγκυρίων μήκους $0,5D$ (Kamata, Mashimo, 2003)

5.3.2. Yoo – Shin (2003)

Σε άρθρο τους που δημοσιεύτηκε το 2003 στο περιοδικό «Tunneling and Underground Technology», οι Chungsik Yoo και Hyun-Kang Shin παρουσιάζουν την εφαρμογή ενός παρόμοιου πειράματος με χρήση πραγματικού μοντέλου αλλά και την εφαρμογή τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία στο συγκεκριμένο μοντέλο. Σκοπός της έρευνάς αυτής ήταν η εκτίμηση της επίδρασης της τεχνικής ενίσχυσης στην ευστάθεια του μετώπου διάνοιξης. Διεξήχθησαν διάφορες δοκιμές με σκοπό να εξεταστούν οι κρίσιμοι παράγοντες ευστάθειας, με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση της διάταξης των αγκυρίων στη συμπεριφορά του μετώπου.

Το εργαστηριακό προσομοίωμα, που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.9**. Αποτελείται από ένα μεταλλικό κιβώτιο, εσωτερικών διαστάσεων $1.80 \times 1.00 \times 1.00\text{ m}$. Οι τέσσερις πλευρές του κατασκευάστηκαν από διάφανο Plexiglass για να είναι δυνατή η παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδαφικού προσομοιώματος. Στις εσωτερικές του πλευρές τοποθετήθηκαν διαφανή

φύλλα για τον περιορισμό των πιθανών τριβών μεταξύ του μοντέλου και του κιβωτίου, τα οποία ανανεώνονταν σε κάθε δοκιμή λόγω του κινδύνου ύπαρξης τυχόν αμυχών από προηγούμενη δοκιμή. Λόγω της συμμετρίας της σήραγγας, προσομοιώθηκε η μισή μόνο διατομή, με διάμετρο 184mm. Η υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας προσομοιώθηκε με έλασμα από Plexiglass, πάχους 8mm. Στο μέτωπό της σήραγγας τοποθετήθηκε προσωρινά, μέχρι την κατασκευή του εδαφικού προσομοιώματος, ένα έλασμα και πάλι από Plexiglass, πάχους 8mm και μία μεμβράνη από Latex, πάχους 2mm.



Σχήμα 5.9: Εργαστηριακό προσομοίωμα για την εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης με αγκύρια μετώπου: (α) Μεταλλικό κιβώτιο, (β) Επίστρωση για τον περιορισμό των τριβών και για προσομοίωση της υποστήριξης των τοιχωμάτων της σήραγγας (Yoo, Shin, 2003)

Στο συγκεκριμένο πειραματικό μοντέλο, ίσχυε η **βασική παραδοχή** ότι οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εδάφους οφείλονται μόνο στην σύγκλιση του σχηματισμού στο μέτωπο της διάνοιξης και όχι στις αξονικές παραμορφώσεις των τοιχωμάτων σε κάθε διατομή κατά μήκος της σήραγγας. Τέλος, τα αγκύρια προσομοιώθηκαν με ξύλινες ράβδους πάχους 3 mm, μικρής ακαμψίας εξαιτίας της μικρής κλίμακας του φυσικού μοντέλου και κατά συνέπεια των μικρών αναπτυσσόμενων τάσεων.

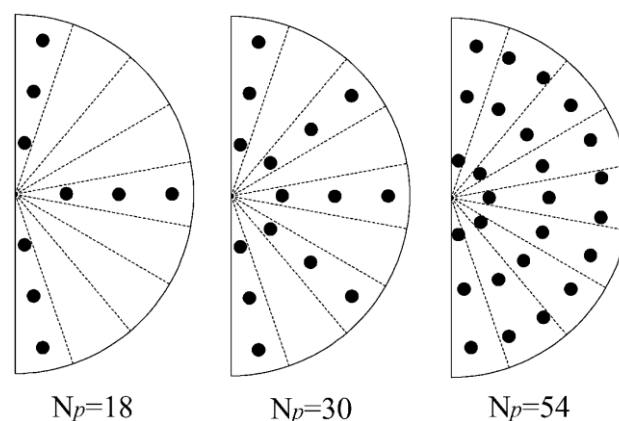
Για το εδαφικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε λεπτόκοκκη άμμος, η οποία τοποθετήθηκε με ειδική διαδικασία διαβροχής σε κατάλληλη ποσότητα και από κατάλληλο ύψος, για την επίτευξη ομοιόμορφης πυκνότητας του μοντέλου. Η παρεχόμενη από το σύστημα διαβροχής ομοιομορφία του ελέγχθηκε με την τοποθέτηση μεταλλικών μικρών δοχείων σε διάφορες θέσεις μέσα στο κιβώτιο, από προηγούμενες δοκιμές. Διεξήχθη

επίσης μια σειρά από δοκιμές διάτμησης, για την εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής του εδάφους, με την εφαρμογή δειγμάτων σε συμπίεση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Τελικώς, επιτεύχθηκε εδαφικό μοντέλο με **ομοιόμορφη σχετική πυκνότητα 50%, ειδικό βάρος 16 kN/m³ και γωνία εσωτερικής τριβής 32°**. Στην διεπιφάνεια του μοντέλου εδάφους και της μπροστινής πλευρά του κιβωτίου τοποθετήθηκαν δείκτες σε καθορισμένα σημεία κατά την κατασκευή του φυσικού μοντέλου, για την παρακολούθηση των μετακινήσεων του εδάφους κατά την εφαρμογή του πειράματος. Στην ίδια πλευρά του κιβωτίου, τοποθετήθηκε μια ψηφιακή κάμερα και με την ανάλυση των εικόνων των μετακινούμενων δεικτών καθορίστηκαν τα διαγράμματα των παραμορφώσεων του εδαφικού μοντέλου σε καθορισμένα στάδια του πειράματος.

Κατά τη διαβροχή του μοντέλου με την λεπτόκοκκη άμμο, για την κατασκευή του εδαφικού μοντέλου, μπροστά στο μέτωπο της σήραγγας ήταν τοποθετημένα το έλασμα από Plexiglass και η μεμβράνη. Όταν η άμμος πλησίαζε την κορυφή της εκσκαφής, εφαρμόστηκε πλευρική πίεση και το έλασμα άρχισε να απομακρύνεται σταδιακά, ώστε να αναπτυχθούν οι αρχικές εντατικές συνθήκες πριν την έναρξη της εκσκαφής. Η διαβροχή της άμμου συνεχίστηκε, αυξάνοντας τις εσωτερικές πιέσεις ταυτοχρόνως ενώ παράλληλα τοποθετήθηκαν και οι ξύλινοι ράβδοι ενίσχυσης.

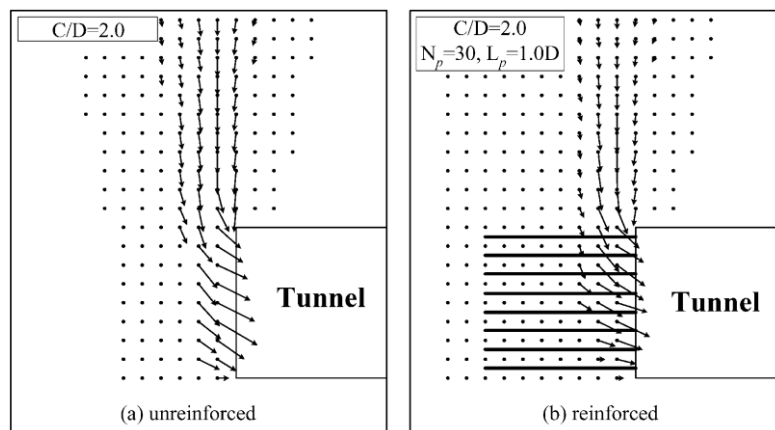
Με την ολοκλήρωση κατασκευής του εδαφικού μοντέλου, η εσωτερική πίεση στο μέτωπο της σήραγγας άρχισε να μειώνεται σταδιακά, προσομοιώνοντας τις φάσεις εκσκαφής..

Οι συνθήκες που εξετάστηκαν στην πειραματική αυτή εφαρμογή περιελάμβαναν περιπτώσεις υποστηριζόμενου και μη υποστηριζόμενου μετώπου της σήραγγας και δύο λόγους βάθους υπερκειμένων προς τη διάμετρο της σήραγγας $C/D=2.0$ και $C/D=3.0$. Στην περίπτωση του υποστηριζόμενου της σήραγγας, η ποσότητα (N_p) και το μήκος (L_p) των μέτρων υποστήριξης διαφοροποιούνταν σε μια κλίμακα από 18 έως 54 και $0,3D-1,0D$, αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 5.10**, απεικονίζονται οι διατάξεις των μέτρων υποστήριξης για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 5.10: Διάφορες μορφές διάταξης των αγκυρίων στο μέτωπο.

Στο **Σχήμα 5.11** απεικονίζονται τα μοντέλα των εδαφικών παραμορφώσεων που προέκυψαν από το φυσικό προσομοίωμα εκσκαφής με ανυποστήρικτο και ενισχυμένο μέτωπο της σήραγγας ($N_p = 30$, $L_p = 1.0D$) με λόγο $C/D=2.0$. Παρατηρείται ότι όταν έχουμε ανυποστήρικτο το μέτωπο, οι παραμορφώσεις είναι σημαντικές σε μια ζώνη περίπου $0.5D$ μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και εξαπλώνεται σχεδόν κατακόρυφα μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, σε περίπτωση εφαρμογής των αγκυριών μετώπου, η ζώνη μεγάλων παραμορφώσεων φαίνεται να μειώνεται αρκετά.



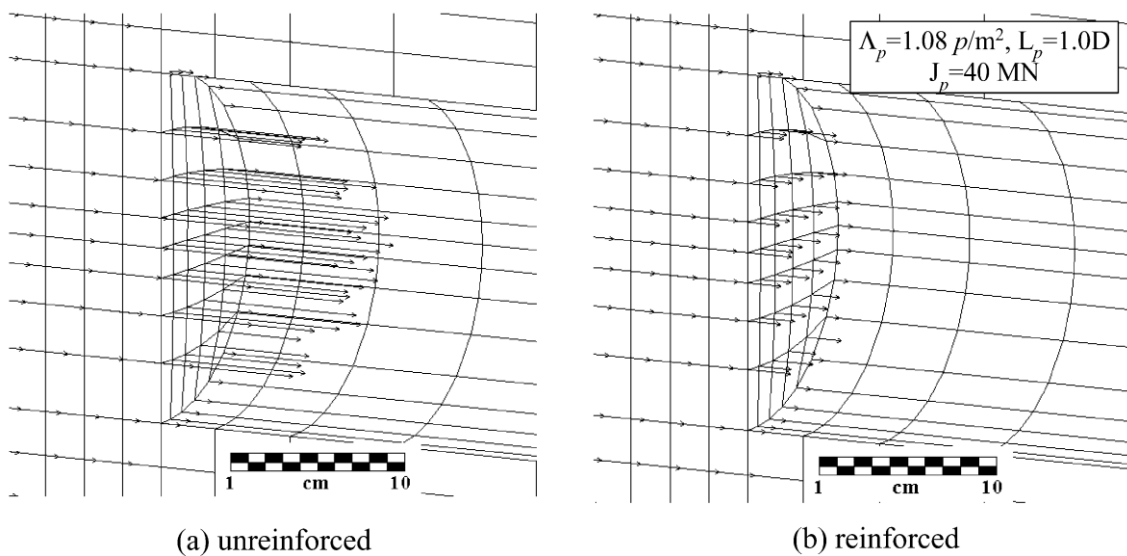
Σχήμα 5.11: Εδαφικές παραμορφώσεις για $C/D=2.0$:

(a) ανυποστήρικτο μέτωπο, (b) ενισχυμένο μέτωπο (Yoo, Shin, 2003)

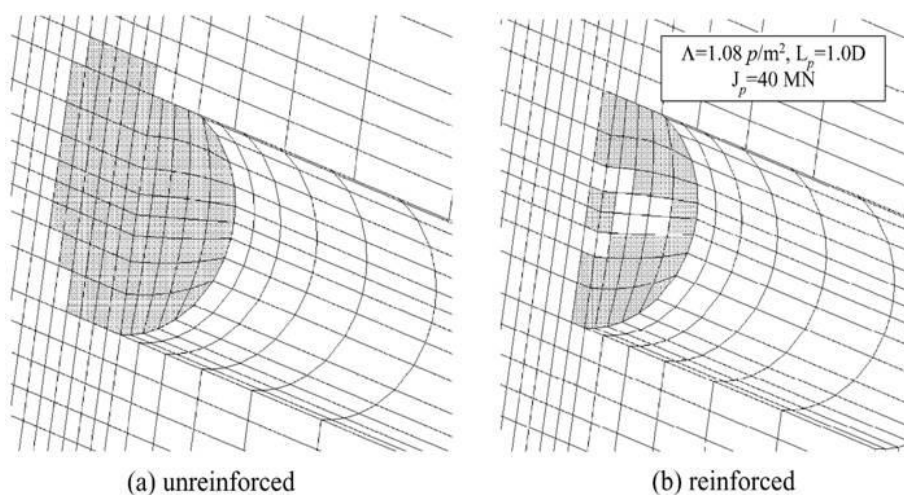
Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών και αριθμητικών δοκιμών και αναλύσεων, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση του ανυποστήρικτου μετώπου, παρατηρείται μια σημαντική παραμόρφωση προς το εσωτερικό της σήραγγας και ιδιαίτερα κοντά στο κεντρικό τμήμα της εκσκαφής του μετώπου. Αντιθέτως, στην περίπτωση του ενισχυόμενου μετώπου, σημειώνεται αξιόλογη μείωση της σύγκλισης και προκύπτει σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων, όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 5.12**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μέτρα ενίσχυσης του μετώπου δρουν ως μια ισότιμη ενιαία πίεση ευστάθειας και συνεπώς προσδίδουν μια ενιαία κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο. Ακολουθώντας, στο **Σχήμα 5,13** παρατηρείται ότι στο ανυποστήρικτο μέτωπο, η έκτασή της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο μπορεί να φτάνει και σε απόσταση μέχρι $0,5D$. Αντίθετα, στο ενισχυμένο μέτωπο η καμπύλη των παραμορφώσεων απεικονίζεται γραμμική, επομένως τα αγκύρια του μετώπου καταφέρνουν να περιορίσουν σε σημαντικό βαθμό την έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από την περιοχή της εκσκαφής. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι επειδή τα μέτρα υποστήριξης του μετώπου είναι προσωρινά, μπορεί να επιτραπεί η ανάπτυξη περιορισμένης έκτασης πλαστικών ζωνών.

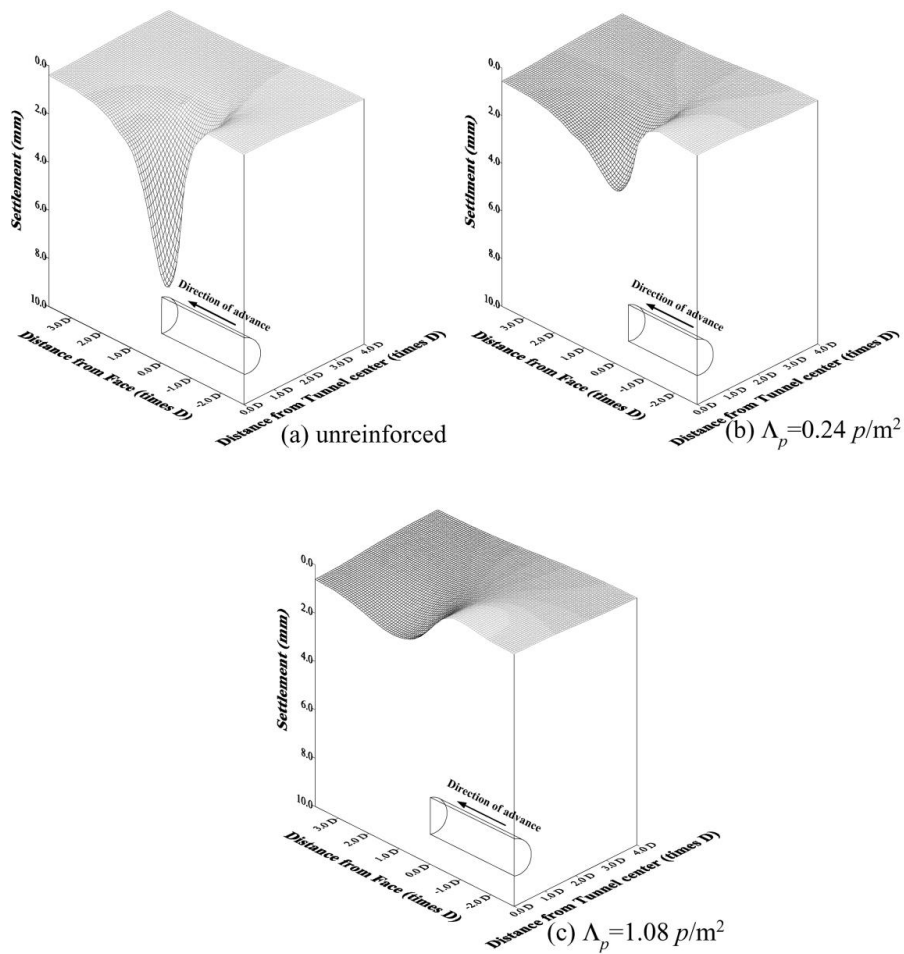
- Από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων αναπτύσσονται στο σημείο ακριβώς πάνω από το μέτωπο της εκσκαφής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.14**. Θεωρήθηκε ότι οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι αποτέλεσμα μόνο των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων στο μέτωπο και όχι των αξονικών παραμορφώσεων των τοιχωμάτων σε κάθε διατομή κατά μήκος της σήραγγας. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός της μείωσης των παραπάνω παραμορφώσεων του εδάφους στην περίπτωση του ανυποστήρικτου μετώπου, κατά 75% σχεδόν με την τοποθέτηση των αγκυριών μετώπου



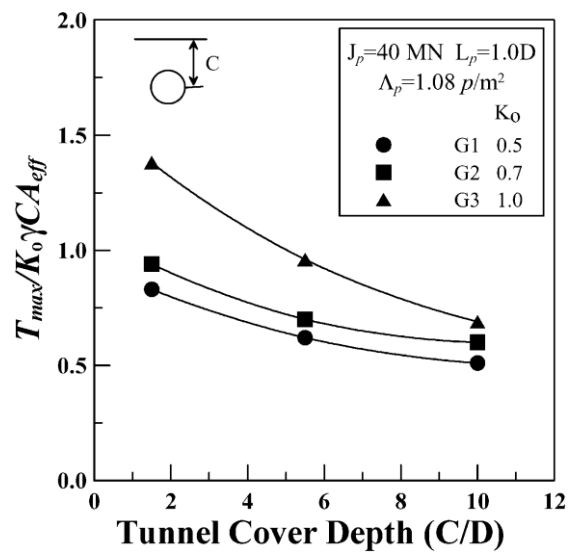
Σχήμα 5.12: Παραμορφώσεις στο μέτωπο διάνοιξης για λόγο $C/D=2.5$, από αριθμητικό προσομοίωμα για: (a) ανυποστήρικτο μέτωπο, (b) ενισχυμένο μέτωπο (Yoo, Shin, 2003)



Σχήμα 5.13: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από την περιοχή εκσκαφής του μετώπου: (a) ανυποστήρικτο μέτωπο, (b) ενισχυμένο μέτωπο (Yoo, Shin, 2003)



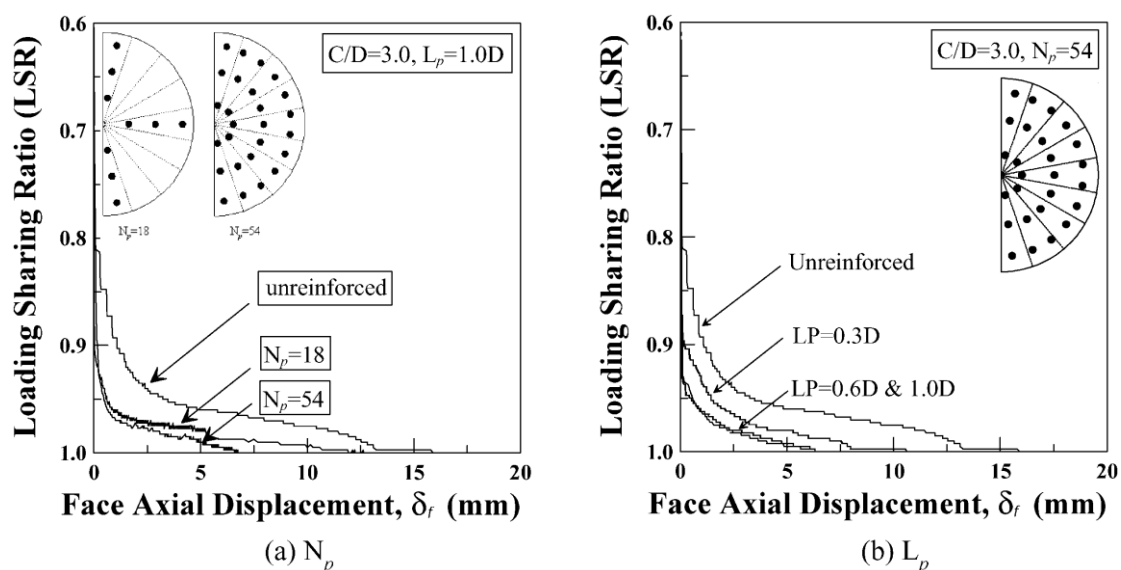
Σχήμα 5.14: Επίδραση της ενίσχυσης του μετώπου στις επιφανειακές καθιζήσεις (Yoo, Shin, 2003)



Σχήμα 5.15: Ανάπτυξη των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος των αγκυριών σε σχέση με το λόγο C/D (Yoo, Shin, 2003)

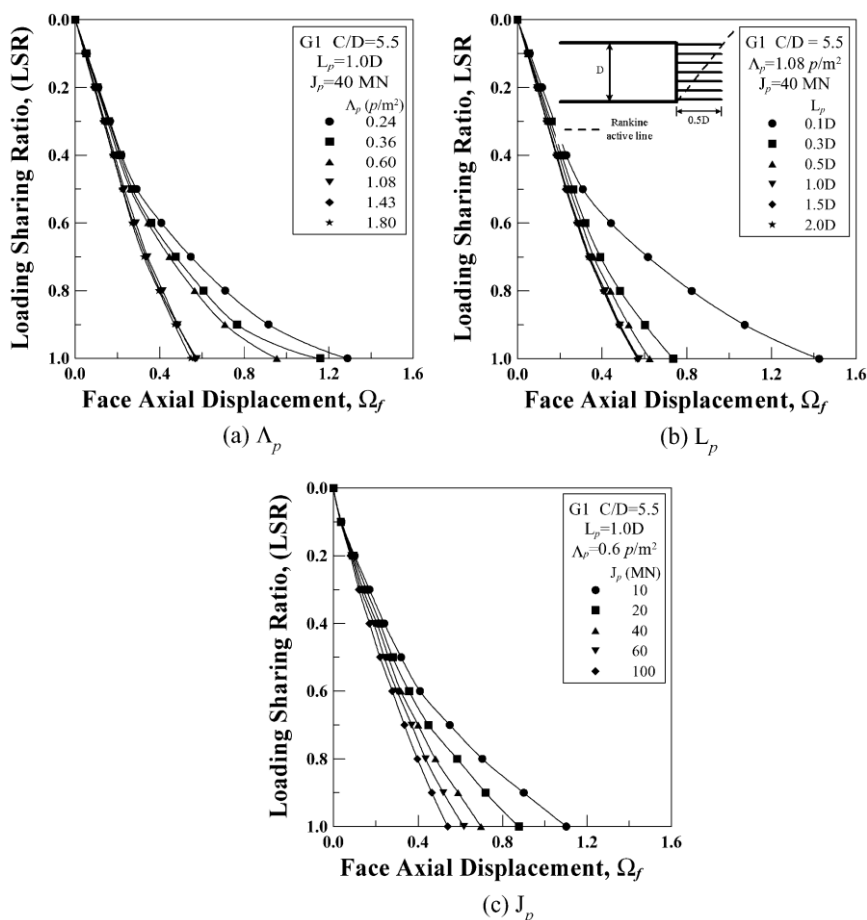
Η κατανομή των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος των οριζόντιων αγκυριών εξαρτάται από τον λόγο C/D και από το K_o . Στο **Σχήμα 5.15** παρουσιάζεται το διάγραμμα των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος των οριζόντιων αγκυριών, ως προς τον λόγο C/D . Παρατηρείται ότι ο λόγος $T_{max} / K_o \gamma C A_{eff}$ έχει την τάση να μειώνεται με την αύξηση του λόγου C/D , με μειούμενο ρυθμό, επομένως για σήραγγες σε μεγάλα βάθη, αρκεί ένα μικρό ποσοστό των αναπτυσσόμενων τάσεων για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των αγκυριών. Επίσης, μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή οριζόντιας πίεσης K_o έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη τιμή του λόγου $T_{max} / K_o \gamma C A_{eff}$ για δεδομένο λόγο C/D , το οποίο έχει σημασία σε αβαθείς σήραγγες.

- Παρά την επίδραση των παραπάνω παραγόντων στον σχεδιασμό των αγκυριών του μετώπου σε διάφορα βάθη εκσκαφής, τον **καθοριστικό ρόλο έχουν η ποσότητα, το μήκος και η ακαμψία των εφαρμοζόμενων μέτρων**. Υπάρχουν **κρίσιμες τιμές** των τριών αυτών παραγόντων, οι οποίες είναι οι οριακές τιμές, περαιτέρω αύξηση των οποίων δεν επιφέρει καμία βελτίωση ως προς τον περιορισμό των παραμορφώσεων στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Άρα οι κρίσιμες τιμές των τριών αυτών μεγεθών είναι οι ελάχιστες απαιτούμενες για τον περιορισμό του κινδύνου ανάπτυξης σημαντικών πλαστικών ζωνών γύρω από το μέτωπο της σήραγγας. Στο **Σχήμα 5.16** απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν ο αριθμός N_p και το μήκος L_p των αγκυριών στην καμπύλη του βαθμού αποτόνωσης LSR ως προς τις παραμορφώσεις (δ_f) του σχηματισμού μπροστά στο μέτωπο, για λόγο $C/D=3.0$, βάσει του φυσικού μοντέλου προσομοίωσης. Τα σημεία των απότομων κλίσεων των καμπυλών υποδηλώνουν τις κρίσιμες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών.



Σχήμα 5.16: Επίδραση της ποσότητας N_p και του μήκους L_p των αγκυριών στο διάγραμμα $LSR-\delta_f$ του φυσικού μοντέλου (Yoo, Shin, 2003)

- Η κρίσιμη τιμή του μήκους των αγκυρίων στο μέτωπο L_p , μπορεί να θεωρηθεί σαν το ελάχιστο μήκος επικάλυψης που απαιτείται μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων ενίσχυσης, ώστε να εξασφαλιστεί ο περιορισμός των εδαφικών παραμορφώσεων στο μέτωπο διάνοιξης. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η κρίσιμη τιμή σχεδιασμού για το μήκος L_p των αγκυρίων μετώπου είναι περίπου $0.5\sim 0.6D$, όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 5.17(b)**. Όταν το μήκος των αγκυρίων φτάσει την κρίσιμη τιμή, τα αγκύρια ξεπερνούν οριακά την θεωρητική ζώνη αστοχίας, με άμεσο αποτέλεσμα την δραστικότερη μείωση των παραμορφώσεων στο μέτωπο διάνοιξης, εξαιτίας των μειωμένων διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στην αστοχούσα μάζα
- Η κρίσιμη πυκνότητα ενίσχυσης Λ_p και ακαμψία J_p δεν επηρεάζονται σημαντικά από το είδος του εδάφους και το βάθος εκσκαφής, σε αντίθεση με το κρίσιμο μήκος των αγκυρίων L_p , το οποίο έχει μεγάλη διαφοροποίηση ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Επηρεάζεται από την γωνία τριβής (φ) του εδαφικού υλικού. Όσο μικρότερη γωνία τριβής φ και μεγαλύτερο συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 έχει ένα εδαφικό υλικό, τόσο μεγαλύτερο προκύπτει το κρίσιμο μήκος των αγκυρίων μετώπου.



Σχήμα 5.17: Επίδραση των παραμέτρων Λ_p , L_p , και J_p των αγκυρίων στο διάγραμμα LSR- Ω_f του αριθμητικού μοντέλου (Yoo, Shin, 2003)

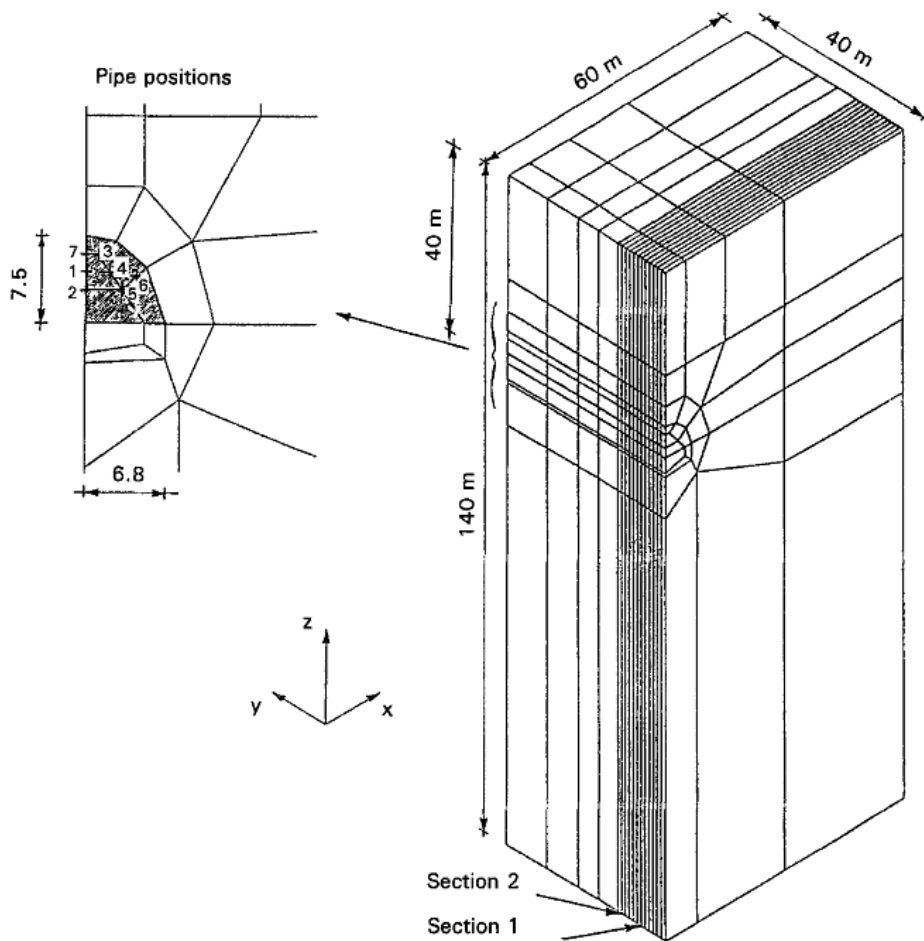
Η ανάλυση του φυσικού και αριθμητικού μοντέλου των Yoo – Shin, για διάφορες τιμές του βάθους εκσκαφής, για διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και διαφορετικές διατάξεις των μέτρων ενίσχυσης του μετώπου διάνοιξης, οδήγησε συνοπτικά στα παρακάτω **συμπεράσματα**:

- Η μέθοδος ενίσχυσης του μετώπου με αγκύρια μπορεί να είναι αποτελεσματική όχι μόνο ως προς τον περιορισμό των παραμορφώσεων στο μέτωπο, αλλά και ως προς τον περιορισμό των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους.
- Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την διάταξη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μέτρων ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, καθοριστικό ρόλο για την ευστάθεια του μετώπου έχουν το πλήθος, το μήκος και η ακαμψία των τοποθετούμενων αγκυρίων.
- Η κατανομή των τάσεων στην κατά μήκος διεύθυνση των αγκυρίων στο μέτωπο εξαρτάται σημαντικά από το λόγο βάθους υπερκειμένων προς τη διάμετρο της σήραγγας (C/D), καθώς επίσης και από τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 για αβαθείς σήραγγες ($C/D < 2,0$).
- Υφίστανται κρίσιμες τιμές για τις παραμέτρους σχεδιασμού των μέτρων υποστήριξης, τις οποίες πρέπει να ξεπερνάμε στον σχεδιασμό μας ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ενίσχυση του μετώπου. Η κρίσιμη πυκνότητα ενίσχυσης Λ_p και ακαμψία J_p δεν επηρεάζονται σημαντικά από το είδος του εδάφους και το βάθος εκσκαφής, ενώ το κρίσιμο μήκος L_p είναι μεγαλύτερο όσο μεγαλώνει ο συντελεστής K_0 .

5.3.3. Peila (1994)

Σε άρθρο του που δημοσιεύτηκε το 1994 παρουσιάζει μια τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που πραγματοποίησε για την εύρεση των μετακινήσεων του εδάφους κατά την ενίσχυση του μετώπου μιας σήραγγας με αγκύρια, προσομοιώνοντας τη μισή μόνο διατομή της υπό μελέτη σήραγγας, λόγω συμμετρίας (**Σχήμα 5.18**). Το έδαφος ήταν ένα μη συνεκτικό μίγμα με φακούς άμμου και αμμώδους αργίλου. Θεωρήθηκε ομογενής σχηματισμός, με μικρή συνοχή (1 kPa) και μικρή γωνία τριβής φ (28^0), και συνεπώς με μικρή ικανότητα αυτοϋποστήριξης που κρίνει απαραίτητη την ενίσχυση του μετώπου για την ευστάθειά του. Τα αγκύρια του μετώπου έχουν τη διάταξη που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.18**. Οι παράμετροι και τα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψιν στην ανάλυση όσον αφορά τη γεωμετρία της

σήραγγας, την υποστήριξη του θόλου, το έδαφος και την υποστήριξη του μετώπου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2**.



Σχήμα 5.18: Τριδιάστατη προσομοίωση του μοντέλου και διάταξη των αγκυρίων στο μέτωπο (Peila, 1994)

Προσομοιώθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- **Περίπτωση 1:** Εκσκαφή χωρίς καμιά υποστήριξη
- **Περίπτωση 2:** Εκσκαφή με ενίσχυση μόνο του μετώπου με αγκύρια
- **Περίπτωση 3:** Εκσκαφή με ενίσχυση μόνο του θόλου, χωρίς τη χρήση αγκυρίων στο μέτωπο
- **Περίπτωση 4:** Εκσκαφή με ενίσχυση του θόλου και του μετώπου με αγκύρια

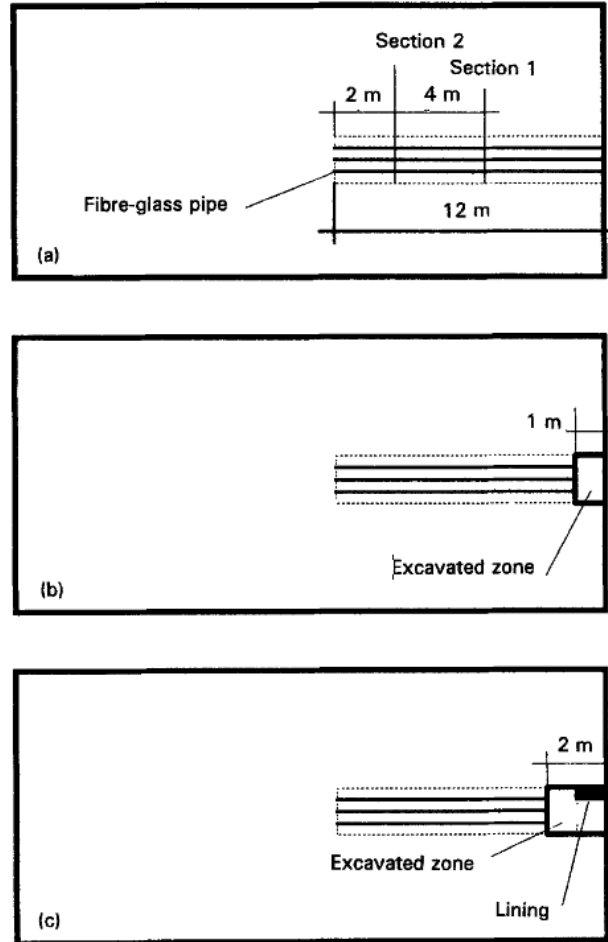
Πίνακας 5.2: Παράμετροι της ανάλυσης

Property	Value
Geometry	
Tunnel overburden [m]	140
Excavation section [m ²]	70
Excavation step [m]	1
Tunnel support	
Thickness [m]	0.3
Elasticity modulus [MPa]	15 000
Poisson ratio	0.18
Ground	
Young's modulus [MPa]	100
Poisson ratio	0.3
Unit weight [kN/m ³]	25
Friction angle, ϕ' [°]	28
Cohesion, c' [MPa]	0.001
Face reinforcement	
Number of pipes in the face	11
Pipe length [m]	12
Pipe inner diameter [mm]	40
Pipe external diameter [mm]	60
Tensile strength [MPa]	450
Shear strength [MPa]	90
Elasticity modulus [MPa]	15 000

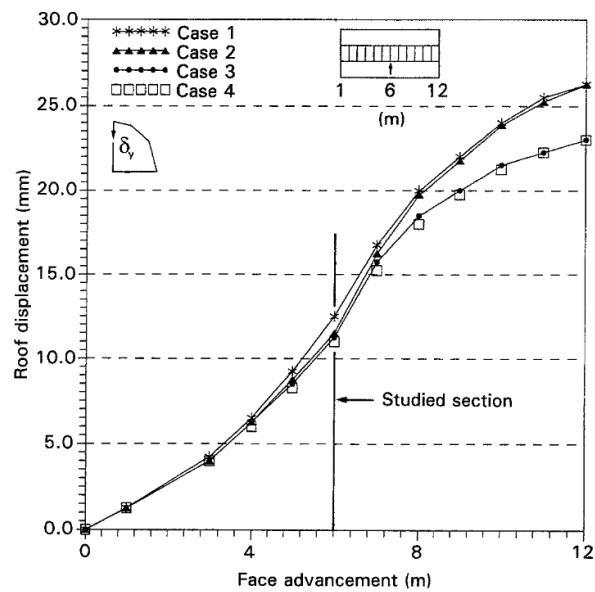
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την προχώρηση της σήραγγας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.19**. Σύμφωνα με αυτήν, η εκσκαφή προωθείται σε κάθε βήμα κατά ένα μέτρο, απενεργοποιώντας το αντίστοιχο μήκος αγκυρίων στο μέτωπο, ενώ στις περιπτώσεις 3 και 4 τοποθετείται και η αντίστοιχη ενίσχυση του θόλου.

Όλα τα αποτελέσματα αναλύθηκαν σε απόσταση 6 m μπροστά από την προχώρηση της σήραγγας (section 1), ενώ οι πλαστικές ζώνες εξετάστηκαν και σε απόσταση 10 m μπροστά από την προχώρηση της σήραγγας (section 2). Αυτό έχει ως σκοπό να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα διάφορων τιμών για το μήκος των αγκυρίων στο μέτωπο, ώστε να προκύψει συμπέρασμα για την σωστή αλληλεπικάλυψη των διαδοχικών θέσεων ενίσχυσης του μετώπου.

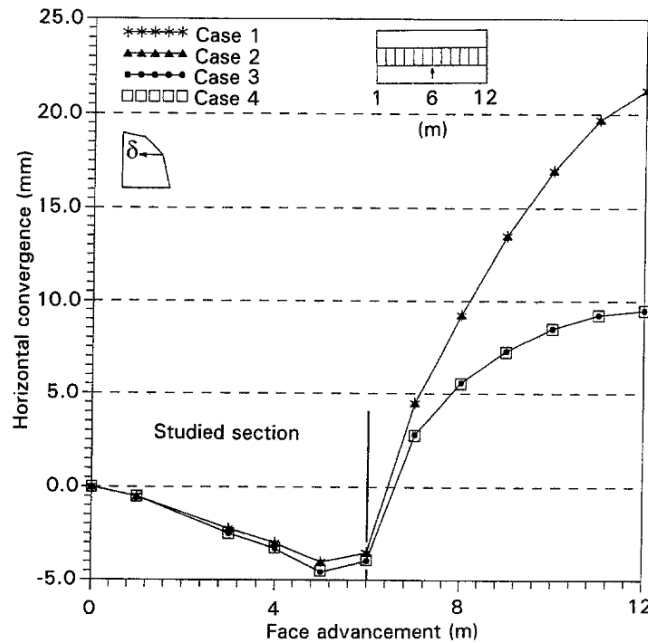
Στα **Σχήματα 5.20** και **5.21** που ακολουθούν, παρουσιάζονται η κατακόρυφη μετατόπιση της σήραγγας στη στέψη της καθώς και η οριζόντια μετατόπιση κατά μήκος της προώθησης.



Σχήμα 5.19: Διαδικασία προχώρησης της σήραγγας (Peila, 1994)



Σχήμα 5.20: Κατακόρυφη μετατόπιση (δ_y) στη στέψη της σήραγγας κατά την προώθηση της σήραγγας στην Περιοχή 1 (Peila, 1994).



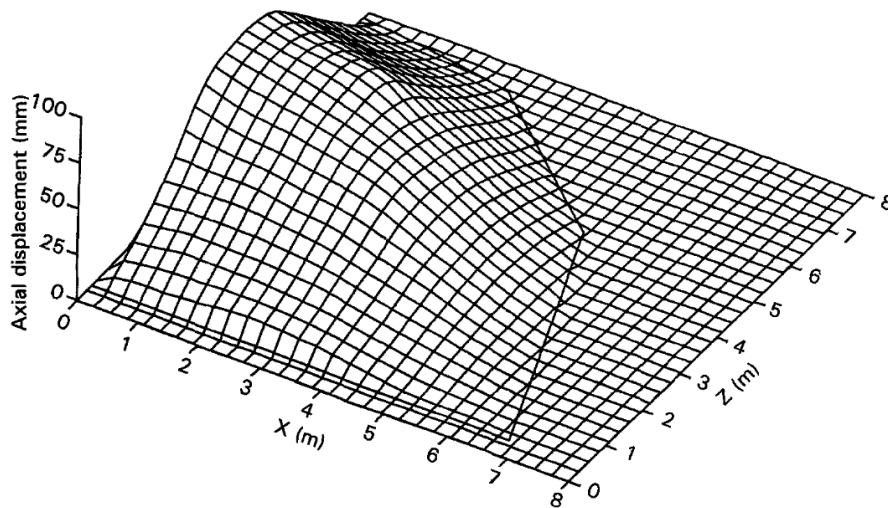
Σχήμα 5.21: Οριζόντια μετατόπιση (2δ) κατά την προώθηση της σήραγγας στην Περιοχή 1 (Peila, 1994).

Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις 1 και 2, όπου δεν εφαρμόζεται υποστήριξη στην οροφή και στα τοιχώματα της σήραγγας, ο μέγιστος βαθμός κατακόρυφης παραμόρφωσης (4,5-5 mm ανά μέτρο προχώρησης) και η συνολική μετατόπιση μετά την προχώρηση κατά 12 m (περίπου 27 mm) είναι παρόμοιου μεγέθους. Παράλληλα, στις περιπτώσεις 3 και 4, όπου έχει εφαρμοστεί υποστήριξη στην οροφή και στα τοιχώματα της σήραγγας, παρατηρείται ότι οι αντίστοιχες τιμές έχουν μειωθεί και η τελική μετατόπιση είναι περίπου 10% μικρότερη. Αντίστοιχη συμπεριφορά διαπιστώνεται και στο διάγραμμα της οριζόντιας σύγκλισης. Στην περίπτωση όμως αυτή, η μείωση είναι της τάξης του 50%. Από την σύγκριση λοιπόν των διαγραμμάτων των 4 περιπτώσεων προκύπτει ότι η ενίσχυση του μετώπου δεν έχει σημαντική επίδραση στις συγκλίσεις της σήραγγας, στις οποίες κύριος παράγοντας επιρροής είναι η υποστήριξη της διατομής της σήραγγας πίσω από το μέτωπο.

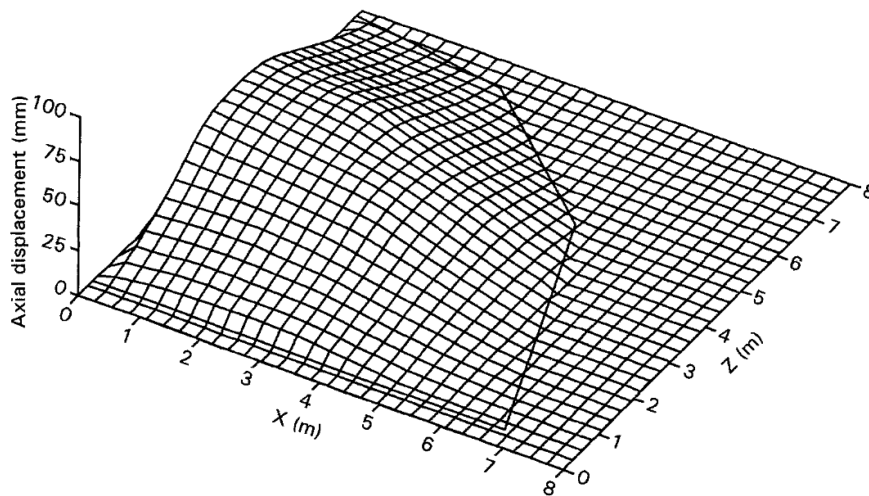
Στη συνέχεια, δίνονται τα **Σχήματα 5.22** και **5.23**, όπου παρουσιάζονται διαγράμματα της παραμόρφωσης του μετώπου εκσκαφής όταν η προχώρηση της σήραγγας φτάσει στη θέση του section 1 για τις περιπτώσεις 1 και 4 αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια μειώνει δραστικά την έκταση της παραμόρφωσης του μετώπου. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση 1, η μέγιστη τελική μετατόπιση ήταν 71 mm, ενώ με την τοποθέτηση των αγκυρίων στο μέτωπο (περίπτωση 2) ήταν 42 mm, μείωση δηλαδή περίπου 40%. Ανάλογη μείωση παρατηρήθηκε και στις περιπτώσεις 3 και 4 (μείωση από 72mm στην περίπτωση ενίσχυσης μόνο της κοιλότητας σε 43 mm αν υπήρχε και ενίσχυση του μετώπου).

Όσον αφορά την εμφάνιση πλαστικών ζωνών, στην περίπτωση 1 η πλαστική περιοχή εκτείνεται σε απόσταση περίπου μισής διαμέτρου μπροστά από το μέτωπο. Ο πόδας της σήραγγας έχει εισέλθει τελείως στην πλαστική περιοχή σε μήκος μιας διαμέτρου, ενώ στη στέψη η έκτασης της ζώνης αυτής είναι μικρότερη. Επίσης, η πλαστική ζώνη αρχίζει να μειώνεται σε απόσταση τριών διαμέτρων μπροστά από το μέτωπο. Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζεται και στην περίπτωση 2, με τη διαφορά ότι παρουσιάζεται διαφορετική η κατάσταση των τάσεων στον πυρήνα προώθησης.

Παρόμοια είναι επίσης η εμφάνιση και η έκταση πλαστικής περιοχής στις περιπτώσεις 3 και 4. Είναι όμως αισθητά μικρότερη σε σύγκριση με τις περιπτώσεις 1 και 2. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή υποστήριξης στα τοιχώματα της σήραγγας περιορίζει την δημιουργία πλαστικής ζώνης. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις δημιουργείται φαινόμενο του θόλου.

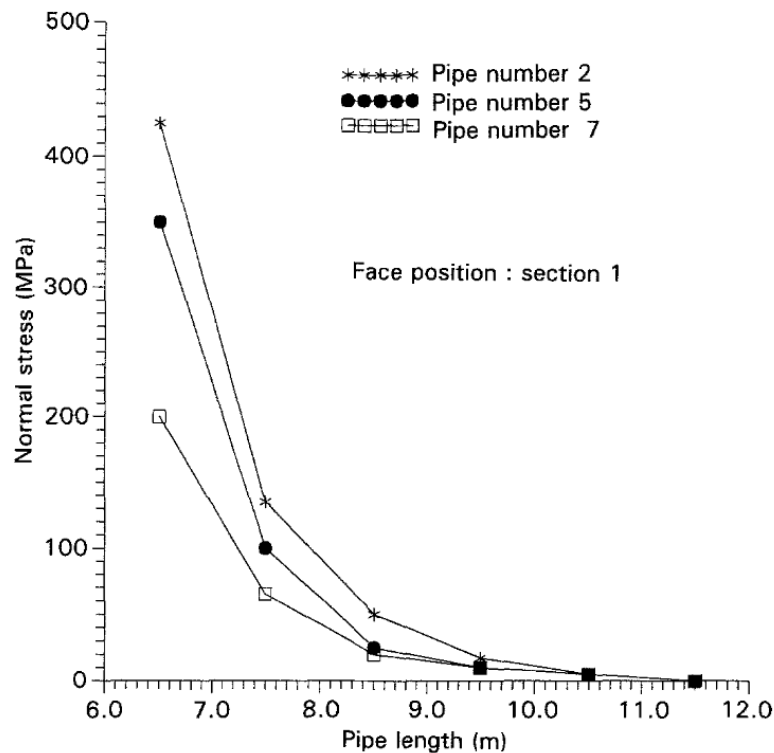


Σχήμα 5.22: Παραμόρφωση του μετώπου της εκσκαφής στην περίπτωση 1 (section 1) (Peila, 1994)



Σχήμα 5.23: Παραμόρφωση του μετώπου της εκσκαφής στην περίπτωση 4 (section 1) (Peila, 1994)

Μεταξύ των περιπτώσεων 1 και 2, παρατηρήθηκαν πολύ μικρές διαφορές όσον αφορά την έκταση της πλαστικής ζώνης. Αυτό οφείλεται πιθανώς στον περιορισμένο αριθμό αγκυρίων που τοποθετήθηκαν στο μέτωπο εκσκαφής. Στο ακόλουθο **Σχήμα 5.24** δίνεται διάγραμμα των τάσεων στα αγκύρια 2, 5 και 7 συναρτήσει του μήκους τους, για την περίπτωση 4. Η τάση που εφαρμόζεται στο αγκύριο 2 είναι η μέγιστη τάση που παρουσιάζουν όλα τα αγκύρια και φτάνει την αντοχή του αγκυρίου fibreglass.



Σχήμα 24: Τάσεις των αγκυρίων 2, 5, 7 συναρτήσει του μήκους τους, για την περίπτωση 4

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το **συμπέρασμα** ότι η κύρια επίδραση των αγκυρίων του μετώπου είναι η μείωση της μετατόπισης του μετώπου (εξώθηση) και η μεταβολή των τάσεων στον πυρήνα προώθησης.

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την διερεύνηση της επίδρασης των αγκυριών fiberglass στην εξέλιξη των συγκλίσεων και της εξώθησης στην περιοχή του μετώπου, διενεργήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις με τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS v6.5.1 και v6.8.1**. Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων πολιτικού μηχανικού και ειδικά υπογείων έργων, καθώς είναι ένα γενικό τριδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αξιόπιστο για απαιτητικές αναλύσεις.

Επειδή για την διακριτοποίηση των μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία και τον σχεδιασμό του αντίστοιχου καννάβου το λογισμικό Abaqus δεν δίνει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας και του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **ANSYS v9.0**. Οι κόμβοι και τα στοιχεία που προέκυπταν από την δημιουργία του προσομοιώματος με το λογισμικό Ansys, αφού μετατρέπονταν σε μορφή συμβατή με το λογισμικό Abaqus μέσω προγράμματος Fortran, ενσωματώνονταν σε αντίστοιχο αρχείο Input για επίλυση με το λογισμικό Abaqus.

6.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αναφέρονταν σε κυκλική σήραγγα διαμέτρου $D=10m$, η οποία διανοίγεται σε βάθος $h=50m$ ($5D$) από την επιφάνεια του εδάφους. Η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα μέσα σε ομογενή σχηματισμό.

Οι παράμετροι που λήφθησαν υπόψιν στην ανάλυση και εξετάστηκαν παραμετρικά στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

6.2.1. Παράμετροι αντοχής του εδαφικού υλικού

Έγιναν αναλύσεις για εδαφικό υλικό που συμπεριφέρεται ελαστικά καθώς επίσης και για εδαφικά υλικά που θεωρήθηκε ότι ακολουθούν τον καταστατικό νόμο Mohr-

Coulomb. Το ελαστικό μοντέλο απαιτεί τον προσδιορισμό δύο ελαστικών παραμέτρων του εδαφικού σχηματισμού, του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν . Τα ελαστοπλαστικά μοντέλα αντίθετα, εκτός από τον προσδιορισμό των δύο ελαστικών παραμέτρων (E, ν) απαιτούν και τον προσδιορισμό της συνοχής c , της γωνίας τριβής ϕ και της γωνίας διαστολικότητας ψ ως πλαστικές παραμέτρους. Ο λόγος Poisson διατηρούσε σταθερή τιμή $\nu=0,3$ για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

6.2.2. Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0

Εξετάστηκε αν ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0 επιδρά όχι μόνο στο μέγεθος των παραμορφώσεων, το οποίο είναι γνωστό, αλλά και στην ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Γι' αυτό το λόγο έγιναν αναλύσεις τόσο για $K_0=0,5$ όσο και για ισότροπο τασικό πεδίο με $K_0=1,0$. Επιλέχθηκε επίσης για ορισμένες γεωτεχνικές παραμέτρους να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση των οριζόντιων τάσεων με αναλύσεις για εύρος τιμών K_0 από 0.5 έως 1.3 [τιμές 0.5, 0.7, 1.0 (ισότροπο τασικό πεδίο) και 1.3]. Θα πρέπει μόνο να παρατηρηθεί ότι σε κάθε ανάλυση, μεταβάλλοντας τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 , το μέτρο ελαστικότητας E δεν μεταβαλλόταν, όπως θα ήταν φυσικά σωστό, αλλά έγινε παραδοχή ότι παρέμενε σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σκοπός των αναλύσεων ήταν αποκλειστικά και μόνο η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων στις παραμορφώσεις του μετώπου της εκσκαφής, και η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας μελετάται ξεχωριστά.

6.2.3. Διάταξη των αγκυριών στο μέτωπο εκσκαφής

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυριών, μια πιο πυκνή και μια πιο αραιή. Σκοπός μας ήταν να διερευνηθεί αν η πυκνότητα των αγκυριών παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των παραμορφώσεων.

6.3. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Κατασκευάστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω περιλαμβάνει κυκλική σήραγγα διαμέτρου $D=10m$, η οποία διανοίγεται σε βάθος $h=50m$ ($5D$) από την επιφάνεια του εδάφους. Η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα μέσα σε ομογενή σχηματισμό. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε, για λόγους συμμετρίας και επίτευξης μείωσης του χρόνου αναλύσεων, να προσομοιωθεί η μισή μόνο σήραγγα με επίπεδο συμμετρίας το κατακόρυφο που διέρχεται από τον άξονά της.

6.3.1. Γεωμετρία προσομοιώματος

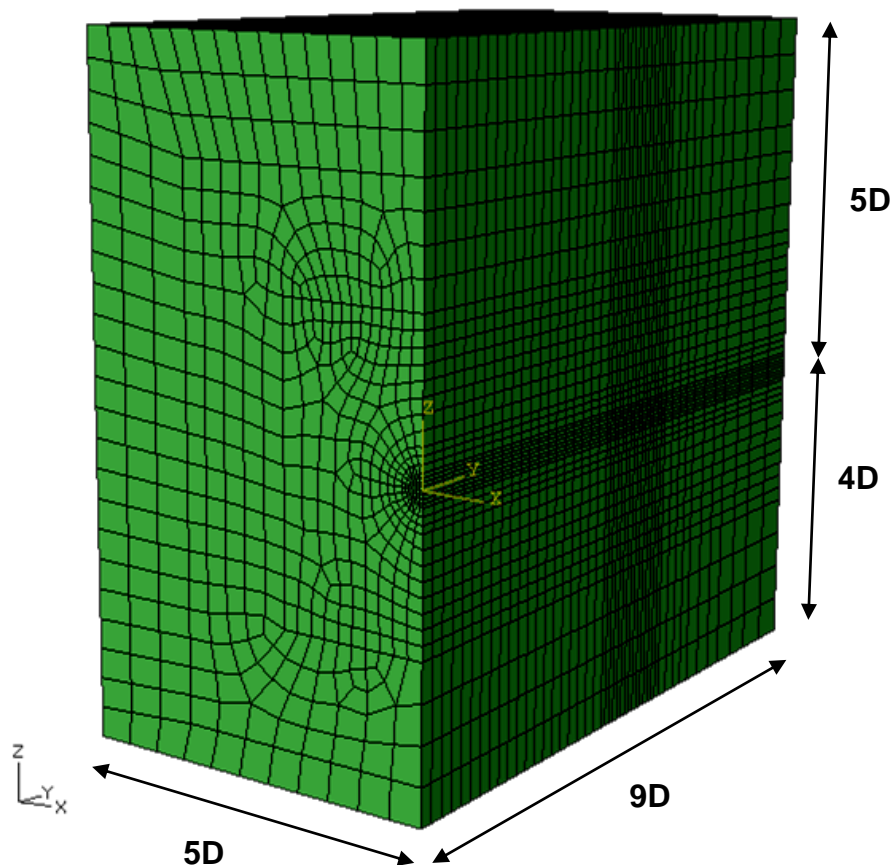
Για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης, έπρεπε να ληφθούν υπόψιν ορισμένες αρχές και περιορισμοί σχετικά με τη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι εξής:

- Όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση των διαστάσεων του μοντέλου, ώστε να περιοριστούν οι μεγάλες χρονικές απαιτήσεις του προβλήματος.
- Επαρκή απόσταση της σήραγγας από τα όρια του προσομοιώματος ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να επηρεαστούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις συνοριακές συνθήκες των ορίων
- Επαρκές μήκος του προσομοιώματος κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας ώστε οι αναλύσεις στη ζώνη του μετώπου εκσκαφής να μην επηρεάζονται από τα πλευρικά όρια
- Ορθή επιλογή της απόστασης της σήραγγας από το κάτω όριο του προσομοιώματος, ώστε η κατανομή των ολικών τάσεων μετά την εκσκαφή να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο
- Ορθή επιλογή της απόστασης από τα πλευρικά όρια ώστε η κατανομή των τάσεων κοντά στα όρια να είναι σχεδόν ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και όσο το δυνατόν μικρότερη για τον περιορισμό των καθιζήσεων, που είναι κύριος στόχος μας.

Το μοντέλο προσομοίωσης που κατασκευάζεται περιλαμβάνει σήραγγα σε βάθος $h=50\text{m}$ (5D) από την επιφάνεια. Επιπλέον, με βάση τους παραπάνω περιορισμούς επιλέγονται οι εξής διαστάσεις του προσομοιώματος:

- Επειδή μας ενδιαφέρει να ελέγξουμε σε μεγαλύτερο μήκος πίσω από το μέτωπο τότε επιτυγχάνεται πλήρης αποτόνωση των τάσεων και ολοκλήρωση των παραμορφώσεων καθώς επίσης και η κατανομή τους στο μήκος αυτό, επιλέγεται το μήκος του μοντέλου κατά την διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας (άξονας y) ίσο με 9D (90m).
- Η απόσταση της σήραγγας από το κάτω όριο θεωρήθηκε ίση με 4D (40m).
- Η απόσταση των πλευρικών ορίων του μοντέλου από το κέντρο της σήραγγας επιλέχθηκε ίση με 5D (50m).

Στη συνέχεια διαμορφώθηκε ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις μας. Για την προσομοίωση του εδαφικού σχηματισμού χρησιμοποιήθηκαν οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία (C3D8R). Επιλέγουμε ο κάρναβος να είναι πιο πυκνός σε μια περιοχή γύρω από τη σήραγγα και ιδιαίτερα στη ζώνη του μετώπου εκσκαφής, διότι σε αυτήν την περιοχή μας ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αντιθέτως στις περιοχές κοντά στα όρια του προσομοιώματος η πυκνότητα του κάρναβου δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματά μας, άρα σχεδιάζεται πιο αραιός. Για το λόγο αυτό, στο προσομοίωμά μας ορίζονται ορθογωνικές επιφάνειες που διαχωρίζουν περιοχές διαφορετικής πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων. Στο μοντέλο που διαμορφώσαμε, ο συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων που προέκυψαν για τις αναλύσεις μας είναι ίσος με 25070 (25490 με τα στοιχεία του κελύφους) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων είναι 27777. Η γεωμετρία και ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο ακόλουθο **Σχήμα 6.1**.



Σχήμα 6.1: Κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων και τυπικές διαστάσεις του προσομοιώματος

6.3.2. Ενισχυτικά μέσα

Όσον αφορά τις αναλύσεις με υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο, θεωρήθηκε κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το οποίο προσομοιώθηκε με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (S4R5). Το κέλυφος αυτό, θεωρείται ελαστικό υλικό με τις εξής ιδιότητες:

- Πάχος στρώσης 20 cm
- Ειδικό βάρος $\gamma = \rho \cdot g = 2.5 \cdot 10 = 25 \text{KN/m}^3$
- Μέτρο ελαστικότητας $E = 15 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0.2$

Σε όλες τις αναλύσεις με ενίσχυση του μετώπου εκσκαφής(με ή χωρίς υποστήριξη πίσω από το μέτωπο), για την ενίσχυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οριζόντια αγκύρια με γραμμικά στοιχεία που παραλαμβάνουν μόνο αξονική δύναμη (Truss Elements – T3D2). Τα στοιχεία αυτά θεωρήθηκαν ελαστικά-απολύτως πλαστικά με τις ακόλουθες ιδιότητες:

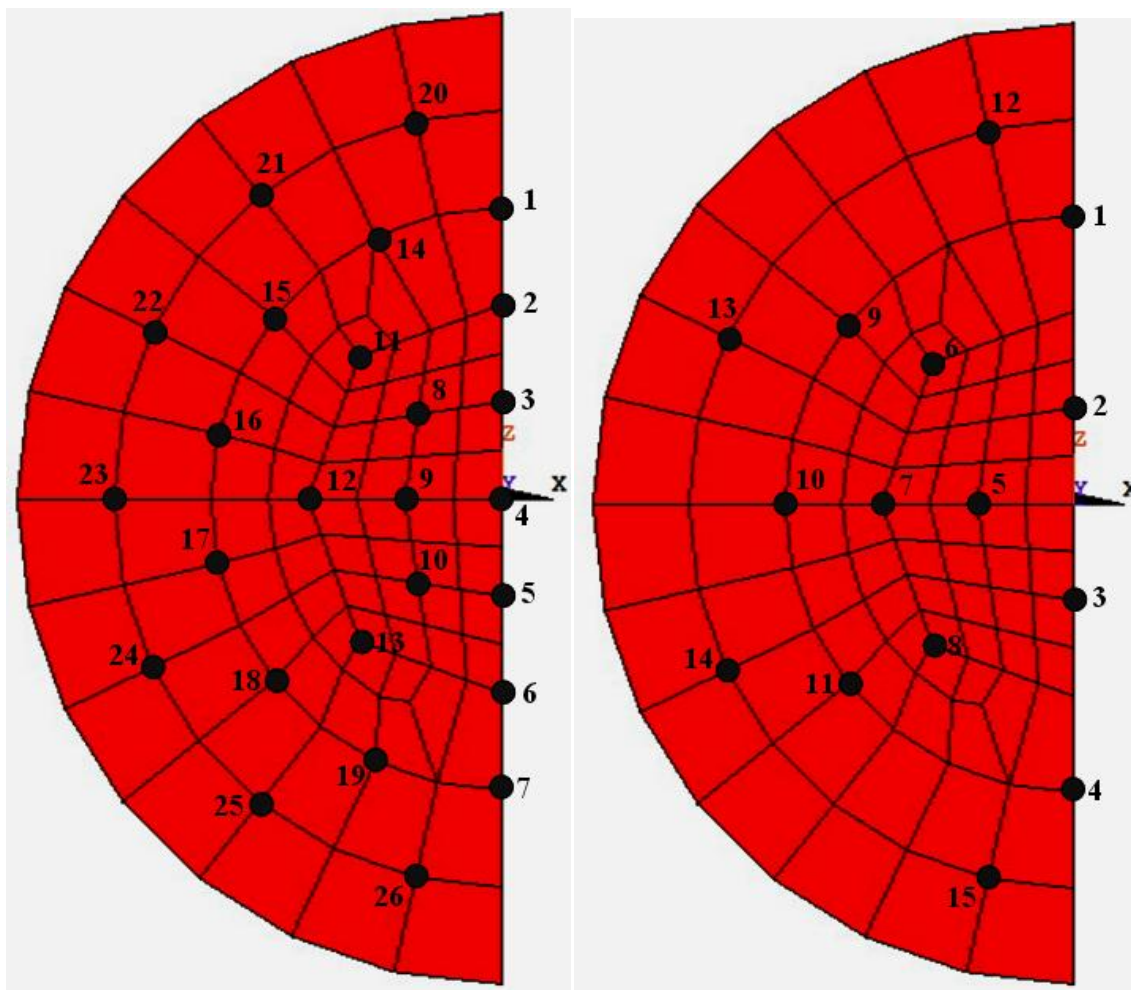
- Διάμετρος $d = 2.5 \text{ cm}$
- Ειδικό βάρος $\gamma = \rho \cdot g = 1.8 \cdot 10 = 18 \text{KN/m}^3$
- Μέτρο ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0.2$
- Τάση διαρροής $\sigma_y = 400 \text{MPa}$

Τα αγκύρια που τοποθετούνται στο μέτωπο, έχουν συνολικό μήκος 50m, έτσι ώστε στο τέλος κάθε ανάλυσης το μέτωπο να εμφανίζεται ανυποστήρικτο.

Προσομοιώθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις αγκυρίων, μια πιο πυκνή και μια πιο αραιή, ώστε να διερευνηθεί αν η πυκνότητα των αγκυρίων παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των παραμορφώσεων. Οι δύο διαφορετικές διατάξεις που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

- **Διάταξη 1:** Η πυκνότερη διάταξη, η οποία αποτελείται από 45 αγκύρια στην διατομή της σήραγγας. Η πυκνότητα των αγκυρίων είναι $0,573 \text{ αγκύρια/m}^2$.
- **Διάταξη 2:** Η πιο αραιή διάταξη, η οποία αποτελείται από 26 αγκύρια στην διατομή της σήραγγας. Η πυκνότητά τους είναι $0,331 \text{ αγκύρια/m}^2$.

Οι δύο αυτές διατάξεις παρουσιάζονται στο ακόλουθο **Σχήμα 6.2**.



Σχήμα 6.2 : Οι δύο διατάξεις αγκυρίων, (α) πυκνότητας 0.573 αγκύρια/ m^2 και (β) πυκνότητας 0.331 αγκύρια/ m^2

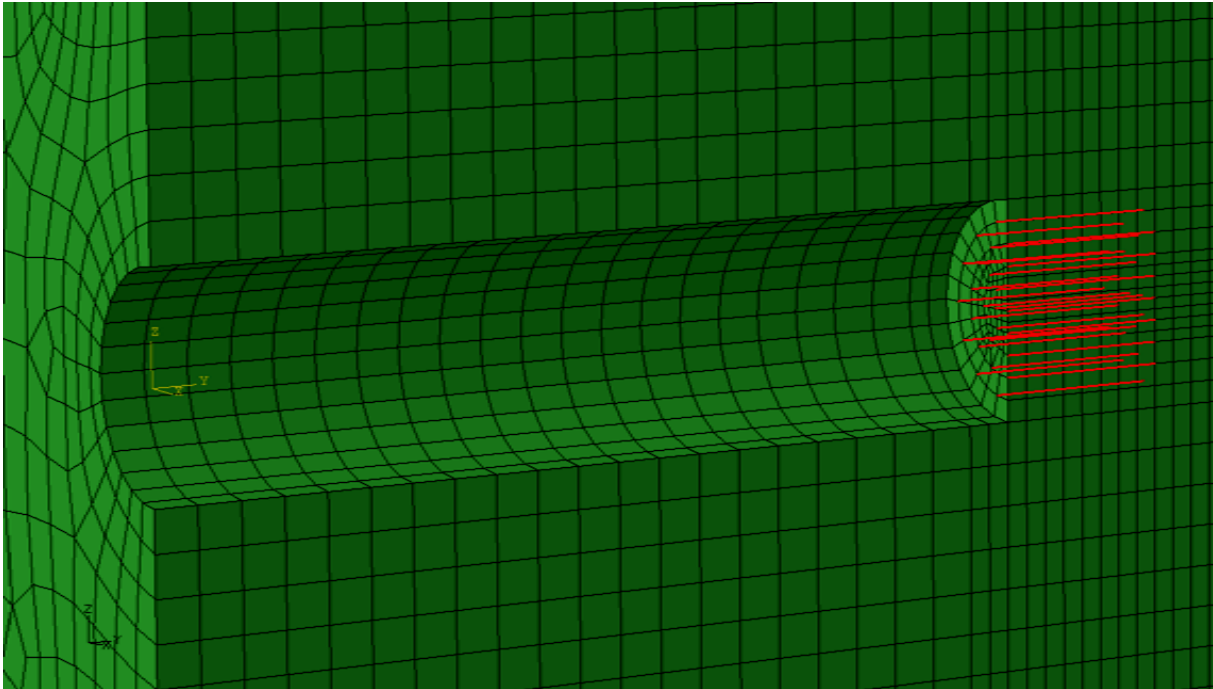
6.4. ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Θεωρήθηκε διάνοιξη κυκλικής σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με ολομέτωπη εκσκαφή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας, τα βήματα που ορίζονται πρέπει να είναι αρκετά ώστε να επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της τιμής της εξώθησης του μετώπου μετά από κάποια μέτρα και κυρίως πριν αρχίσει να αυξάνεται λόγω της μείωσης του διαθέσιμου μήκους των αγκυρίων.

Για το μοντέλο προσομοίωσης της **ανυποστήρικτης σήραγγας** επιλέχθηκε τελικά η προσομοίωση της σήραγγας μήκους $50m$ ($5D$) σε **31 βήματα εκσκαφής**. Αναλυτικότερα τα βήματα εκσκαφής της ανυποστήρικτης σήραγγας είναι τα εξής:

- **Βήμα 1^ο:** Μόνο γεωστατικές συνθήκες. Περιλαμβάνει τον υπολογισμό των αρχικών γεωστατικών τάσεων, πριν την επίδραση της διάνοιξης της σήραγγας.

- **Βήματα 2^ο-21^ο:** Προσομοίωση εκσκαφής μήκους δύο μέτρων της σήραγγας σε κάθε βήμα και ταυτόχρονη αφαίρεση των αγκυρίων από το μήκος αυτό.
- **Βήματα 22^ο-31^ο:** Προσομοίωση εκσκαφής μήκους ενός μέτρου της σήραγγας σε κάθε βήμα και ταυτόχρονη αφαίρεση των αγκυρίων από το μήκος αυτό. Στα τελευταία αυτά βήματα έχουμε πιο πυκνά βήματα εκσκαφής για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην περιοχή αυτή (**Σχήμα 6.3**)..

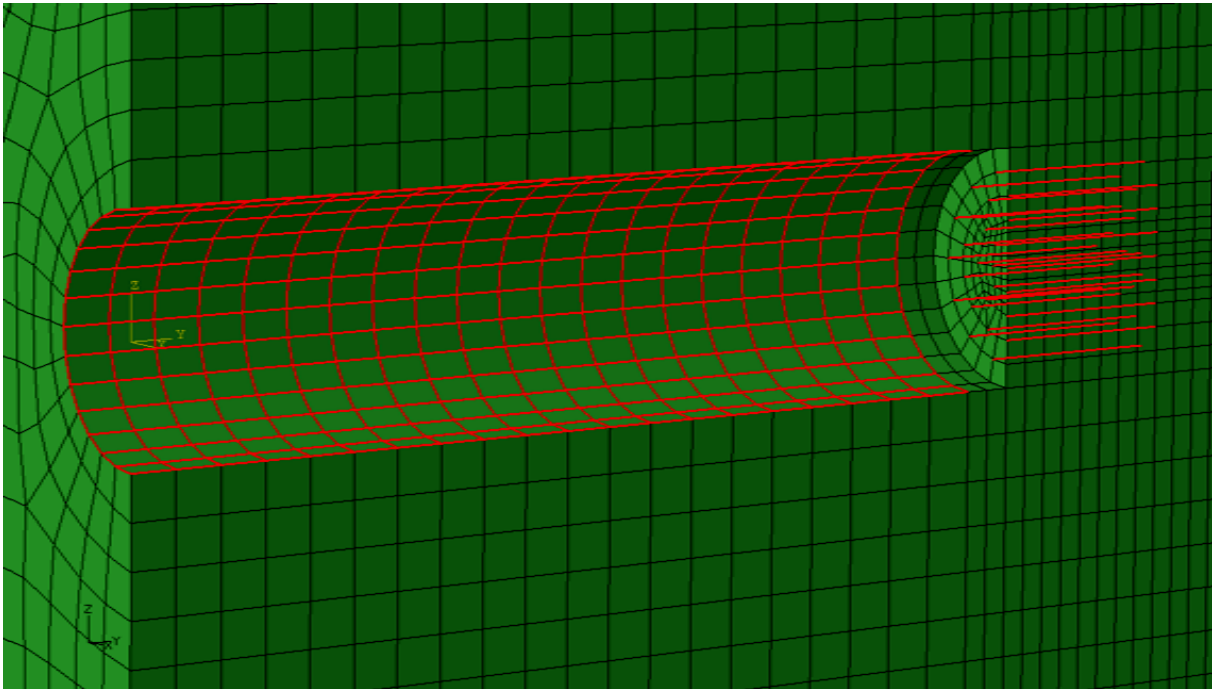


Σχήμα 6.3: Γραφική απεικόνιση του 23^{ου} βήματος της προσομοίωσης , κατά το οποίο έχουν διανοιχθεί 42 m σήραγγας, με παράλληλη αφαίρεση του αντίστοιχου μήκους αγκυρίων.

Για το μοντέλο προσομοίωσης της **σήραγγας με υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας**, επιλέχθηκε τελικά η προσομοίωση της σήραγγας μήκους 50m (5D) σε **25 βήματα εκσκαφής**. Τα βήματα εκσκαφής της σήραγγας με υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο είναι τα εξής:

- **Βήμα 1^ο:** Μόνο γεωστατικές συνθήκες. Περιλαμβάνει τον υπολογισμό των αρχικών γεωστατικών τάσεων, πριν την επίδραση της διάνοιξης της σήραγγας.
- **Βήμα 2^ο:** Προσομοίωση εκσκαφής των πρώτων τεσσάρων μέτρων μήκους της σήραγγας με ταυτόχρονη αφαίρεση των αγκυρίων από το μήκος αυτό και ενεργοποίηση της υποστήριξης των πρώτων δύο μέτρων από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- **Βήματα 3^ο-25^ο:** Προσομοίωση εκσκαφής των επόμενων δύο μέτρων μήκους της σήραγγας σε κάθε βήμα με ταυτόχρονη αφαίρεση των αγκυρίων από το μήκος αυτό και εφαρμογή του κελύφους σκυροδέματος στα προηγούμενα δύο

μέτρα μήκους, δηλαδή στο μήκος εκσκαφής που διανοίχθηκε στο προηγούμενο βήμα προσομοίωσης (**Σχήμα 6.4**).



Σχήμα 6.4: Γραφική απεικόνιση του 21^{ου} βήματος της προσομοίωσης , κατά το οποίο έχουν διανοιχθεί 42 m σήραγγας, με παράλληλη αφαίρεση του αντίστοιχου μήκους αγκυρίων και τοποθέτηση του κελύφους σκυροδέματος στα πρώτα 40m.

6.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

6.5.1. Στόχος διερεύνησης

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις αναλύσεις στα μοντέλα προσομοίωσης αφορούν την αποτελεσματικότητα των αγκυρίων μετώπου και πιο συγκεκριμένα έχουν ως στόχο την ποιοτική και ποσοτική διερεύνηση των παρακάτω επιρροών:

- Συμβολή των αγκυρίων στην γενική ευστάθεια και την παραμορφωσιακή συμπεριφορά του μετώπου της εκσκαφής
- Επίδραση της αντοχής και του τύπου του εδάφους στην αποτελεσματικότητα των αγκυρίων
- Επίδραση της πυκνότητας των αγκυρίων

- Επίδραση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης (μέσω του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0)

6.5.2. Ορισμός αντιπροσωπευτικών μεγεθών

Προτού αρχίσει η παράθεση των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να οριστούν τα μεγέθη που είναι αντιπροσωπευτικά του προβλήματος της ευστάθειας του μετώπου. Κατά τον έλεγχο της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς στην περιοχή του μετώπου τα χαρακτηριστικά μεγέθη που υπολογίζουμε είναι:

6.5.2.1. Συγκλίσεις

Για τον έλεγχο των συγκλίσεων, οι αντιπροσωπευτικές τιμές, από τα διαγράμματα των συγκλίσεων, που λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό, και είναι χρήσιμες για τις εκτιμήσεις μας είναι:

- Η σύγκλιση στο μέτωπο $\mathbf{u}(\mathbf{0})$
- Η σύγκλιση κατά την πλήρη αποτόνωση των τάσεων ($p_i = 0$). Από τις αναλύσεις μας προκύπτει ότι σε απόσταση $6R$ (ίση με $3D$) πίσω από το μέτωπο και πέρα, οι συγκλίσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν. Άρα θεωρούμε ότι σε αυτή τη θέση έχουμε την πλήρη αποτόνωση, και τη μέγιστη σύγκλιση $\mathbf{u}_\infty = \mathbf{u}(-6\mathbf{R})$
- Ο λόγος της σύγκλισης στο μέτωπο προς την σύγκλιση στην πλήρη αποτόνωση των τάσεων, $\frac{\mathbf{u}_r}{\mathbf{u}_\infty} = \frac{\mathbf{u}(\mathbf{0})}{\mathbf{u}(-6\mathbf{R})}$
- Ο λόγος της σύγκλισης στο μέτωπο με αγκύρια προς τη σύγκλιση στο μέτωπο χωρίς αγκύρια, για να εκτιμηθεί η επιρροή των αγκυρίων στη μείωση των συγκλίσεων, $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$

6.5.2.2. Εξωθήσεις

Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της εξώθησης του μετώπου γίνεται μέσω:

- Διαγραμμάτων εξωθήσεων (A_{sum})
- Της παρακάτω αδιαστατοποιημένης μορφής (Κουρεντζής Β., 2008):

A_f : Κανονικοποιημένη τιμή του εμβαδού της επιφάνειας εξώθησης του μετώπου (A_{sum}), η οποία στοχεύει στην κανονικοποίηση διάφορων παραγόντων που

επηρεάζουν το μέγεθος του εμβαδού της εξώθησης αλλά δεν επιδρούν ουσιαστικά στην ευστάθεια του μετώπου. Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν είναι το μέτρο ελαστικότητας E του γεωυλικού, ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0 , το ύψος των υπερκειμένων H και το εμβαδόν του μετώπου εκσκαφής. Δίνεται από τον τύπο:

$$A_f = \frac{A_{sum} \cdot E}{A_{σηρ} \cdot \left(\frac{1 + K_0}{2}\right) \cdot \gamma \cdot H}$$

Όπου:

A_{sum} : το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας εξώθησης, δηλαδή το άθροισμα των δεκατεσσάρων εμβαδών στα οποία χωρίστηκε κάθε καμπύλη εξώθησης.

$A_{σηρ}$: το εμβαδόν του μετώπου εκσκαφής ($A_{σηρ} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 78.54 \text{ m}^2$)

Ο λόγος για τον οποίο κρίθηκε απαραίτητη η χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου ως αντιπροσωπευτικό μέγεθος της εξώθησης, είναι η απαλοιφή των μεταβολών στις μετακινήσεις του μετώπου από κόμβο σε κόμβο. Λόγω της τοποθέτησης των αγκυρίων σε συγκεκριμένους κόμβους, καμιά μετακίνηση σε ένα μόνο κόμβο δεν είναι αντιπροσωπευτική. Πιο συγκεκριμένα, στους κόμβους όπου είναι τοποθετημένα τα αγκύρια, παρατηρείται σημαντικά μικρότερη μετακίνηση σε σχέση με τους γειτονικούς κόμβους. Στην πραγματικότητα όμως, κατά την εκσκαφή, αυτή η διαφορά δεν είναι δυνατό να παρατηρηθεί και η παραμόρφωση προφανώς παρουσιάζεται πιο ομοιόμορφη.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα εργασία επιχειρείται να γίνει ένας έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου μέσω τοποθέτησης αγκυρίων fiberglass τόσο σε ανυποστήρικτη σήραγγα όσο και σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη.

6.5.3. Αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα

Αρχικός σκοπός μας είναι να ερευνηθεί η συμβολή κι η επίδραση της ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια στην ευστάθεια του μετώπου σε σήραγγες χωρίς προσωρινή υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο. Για το λόγο αυτό επιχειρήθηκε ο έλεγχος της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς στην περιοχή του μετώπου (προσύγκλιση, σύγκλιση και εξώθηση).

6.5.3.1. Προσδιορισμός παραμέτρων

a) Παράμετροι αντοχής του εδαφικού υλικού

Αρχικά έγιναν αναλύσεις για εδαφικό υλικό που συμπεριφέρεται ελαστικά. Θεωρήσαμε εδαφικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=200$ MPa. Για τις αναλύσεις προσομοίωσης ελαστοπλαστικών εδαφικών υλικών, θεωρήθηκε ότι τα εδαφικά αυτά υλικά ακολουθούν τον καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb ($\tau = \sigma \cdot \tan\phi + c$). Άρα για τα υλικά αυτά απαιτείται ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων (c,φ) και του μέτρου ελαστικότητας E. Για να μελετήσουμε την επίδραση της αντοχής και του τύπου του εδαφικού υλικού στην αποτελεσματικότητα των αγκυρίων στο μέτωπο, δόθηκαν για ανάλυση τρία ελαστοπλαστικά υλικά με διαφορετική γωνία τριβής ϕ (30° , 35° και 40°). Για καθένα εδαφικό υλικό, η συνοχή του c λήφθηκε η ελάχιστη απαιτούμενη έτσι ώστε να μπορεί το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS v6.5.1** να τρέχει το μοντέλο προσομοίωσης που δίνεται. Επίσης για όλα τα εδαφικά αυτά υλικά, θεωρούμε ειδικό βάρος $\gamma = \rho \cdot g = 2.1 \cdot 10 = 21$ KN/m³ και λόγο Poisson $\nu=0.3$.

Όλες οι γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών αυτών υλικών που δόθηκαν για ανάλυση παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Πίνακα 6.1**.

Πίνακας 6.1: Γεωτεχνικές παράμετροι εδαφικών υλικών για ανάλυση ανυποστήρικτης σήραγγας

Case	Elastic	28	36	46
Γωνία τριβής ϕ	—	30	35	40
Συνοχή c (KPa)	—	50	40	35
Γωνία διαστ/τας ψ	—	5	6	7
Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	200	236	269	303

b) Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0

Για τη μελέτη της επίδρασης των οριζοντίων γεωστατικών τάσεων στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής, έγιναν αναλύσεις με δύο τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 (0.5 και 1.0) για κάθε εδαφικό υλικό. Όπως σημειώνεται και παραπάνω, με την μεταβολή του K_0 θεωρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας E παραμένει σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θέλουμε να εκτιμήσουμε ποιοτικά και ποσοτικά την επίδραση λόγω μεταβολής των οριζόντιων τάσεων και όχι την επιρροή του E.

c) Διάταξη αγκυρίων στο μέτωπο

Για την εκτίμηση της επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο στην μείωση των παραμορφώσεων και στην ευστάθεια του, προσομοιώθηκαν τρεις καταστάσεις για κάθε εδαφικό υλικό:

- Χωρίς αγκύρια στο μέτωπο
- Διάταξη 1: 45 αγκύρια στο μέτωπο, δηλαδή πυκνότητα 0.573 αγκύρια/m²
- Διάταξη 2: 26 αγκύρια στο μέτωπο, δηλαδή πυκνότητα 0.331 αγκύρια/m²

Συνολικά λοιπόν, για ανυποστήρικτη σήραγγα, προσομοιώθηκαν 24 αναλύσεις, οι οποίες παρατίθενται στον ακόλουθο **Πίνακα 6.2**.

Πίνακας 6.2: Οι 24 αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα

α/α	Case	φ	c (kPa)	ψ	E (MPa)	k	n (αγκυρια/m ²)
1	Elastic	—	—	—	200	0.5	0
2	Elastic	—	—	—	200	0.5	0.573
3	Elastic	—	—	—	200	0.5	0.331
4	Elastic	—	—	—	200	1.0	0
5	Elastic	—	—	—	200	1.0	0.573
6	Elastic	—	—	—	200	1.0	0.331
7	28	30	50	5	236	0.5	0
8	28	30	50	5	236	0.5	0.573
9	28	30	50	5	236	0.5	0.331
10	28	30	50	5	236	1.0	0
11	28	30	50	5	236	1.0	0.573
12	28	30	50	5	236	1.0	0.331
13	36	35	40	6	269	0.5	0
14	36	35	40	6	269	0.5	0.573
15	36	35	40	6	269	0.5	0.331
16	36	35	40	6	269	1.0	0
17	36	35	40	6	269	1.0	0.573
18	36	35	40	6	269	1.0	0.331
19	46	40	35	7	303	0.5	0
20	46	40	35	7	303	0.5	0.573
21	46	40	35	7	303	0.5	0.331
22	46	40	35	7	303	1.0	0
23	46	40	35	7	303	1.0	0.573
24	46	40	35	7	303	1.0	0.331

Για την εκτίμηση της επίδρασης των αγκυρίων στο μέτωπο μελετάμε την παραμορφωσιακή συμπεριφορά, τόσο τις προσυγκλίσεις μπροστά από το μέτωπο και τις συγκλίσεις πίσω από το μέτωπο στην ήδη διανοιγμένη κοιλότητα, όσο και την εξώθηση του μετώπου

6.5.3.2. Αποτελέσματα συγκλίσεων

Όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα παρουσιάζονται αναλυτικά με διαγράμματα στο αντίστοιχο παράρτημα που δίνεται στη συνέχεια. Παρουσιάζονται διαγράμματα για κάθε εδαφικό υλικό και για καθεμία τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 , και εκτιμάται η επίδραση της εφαρμογής ακκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή των συγκλίσεων της οροφής.

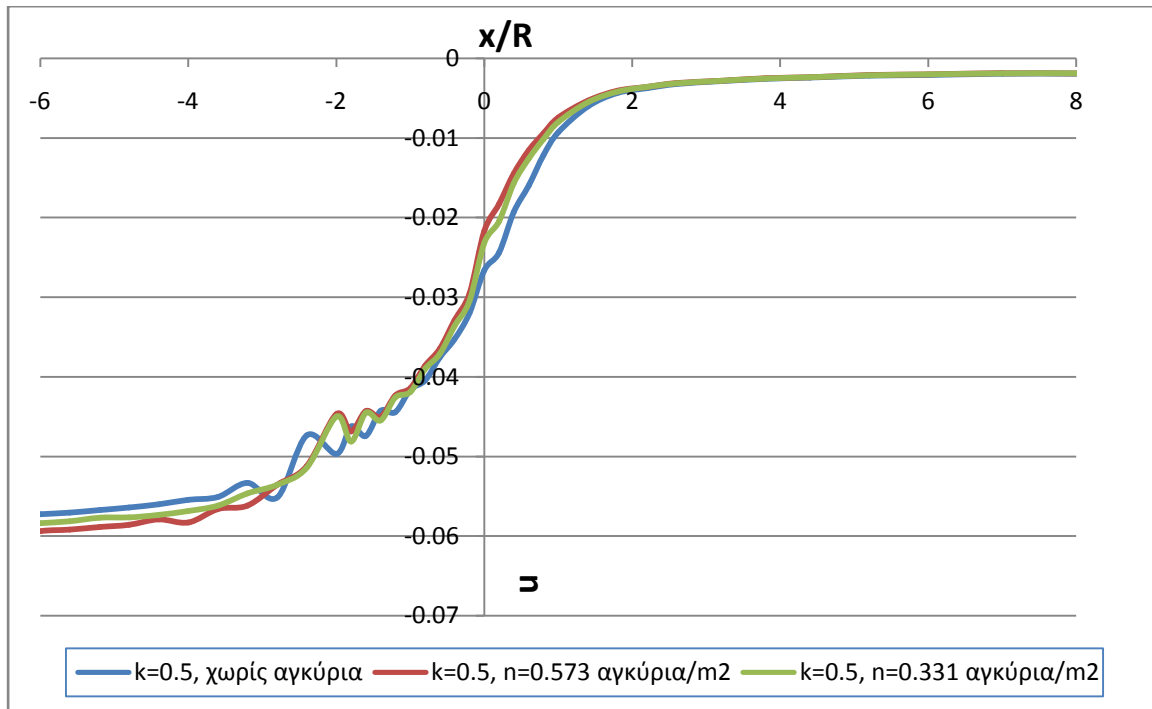
Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των συγκλίσεων όλων των αναλύσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.3**.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα συγκλίσεων και λόγων συγκλίσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα

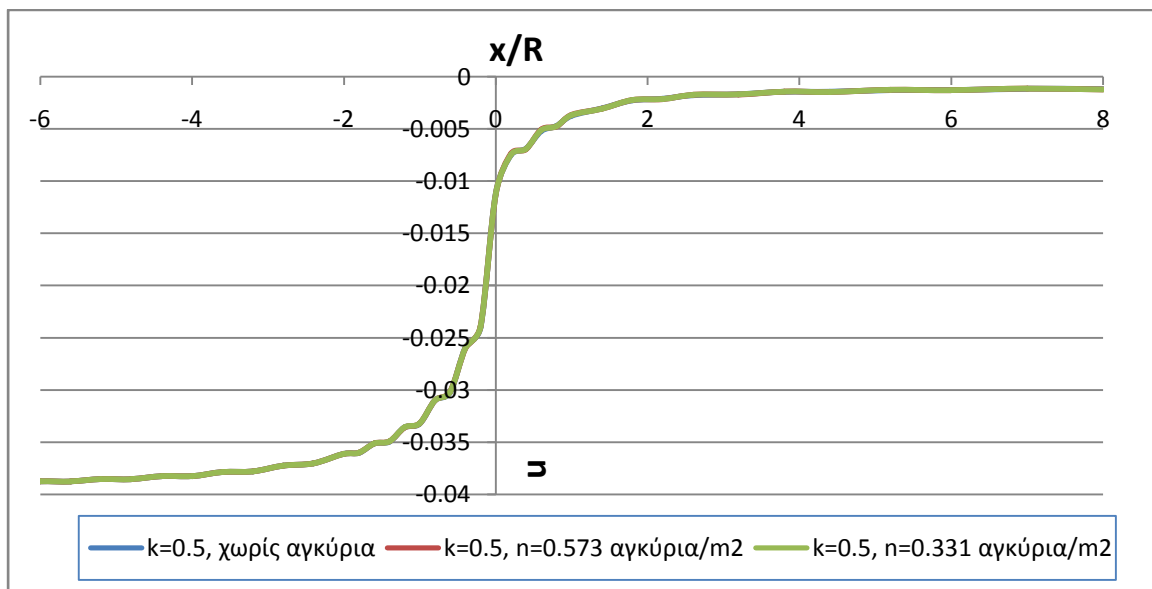
α/α	Case	k	n	u(0)	u(-6R)	u(0)/u(-6R)	u(fiber)/u(no fiber)
1	Elastic	0.5	0	-0.0112	-0.0387	28.79%	-
2	Elastic	0.5	0.573	-0.0112	-0.0387	28.99%	1.007000717
3	Elastic	0.5	0.331	-0.0112	-0.0387	28.84%	1.001747938
4	Elastic	1.0	0	-0.0077	-0.0317	24.20%	-
5	Elastic	1.0	0.573	-0.0078	-0.0317	24.68%	1.01970496
6	Elastic	1.0	0.331	-0.0077	-0.0317	24.33%	1.005238407
7	28	0.5	0	-0.0455	-0.1537	29.63%	-
8	28	0.5	0.573	-0.0384	-0.1547	24.84%	0.843703809
9	28	0.5	0.331	-0.0408	-0.1544	26.41%	0.89542844
10	28	1.0	0	-0.0428	-0.2859	14.98%	-
11	28	1.0	0.573	-0.0311	-0.2840	10.97%	0.727229427
12	28	1.0	0.331	-0.0349	-0.2845	12.27%	0.815318449
13	36	0.5	0	-0.0370	-0.1010	36.64%	-
14	36	0.5	0.573	-0.0278	-0.1025	27.15%	0.751997556
15	36	0.5	0.331	-0.0319	-0.1019	31.28%	0.861200913
16	36	1.0	0	-0.0309	-0.1933	15.98%	-
17	36	1.0	0.573	-0.0231	-0.1923	11.99%	0.746294936
18	36	1.0	0.331	-0.0252	-0.1926	13.09%	0.816017141
19	46	0.5	0	-0.0266	-0.0572	46.47%	-
20	46	0.5	0.573	-0.0217	-0.0594	36.50%	0.815147195
21	46	0.5	0.331	-0.0232	-0.0584	39.67%	0.871046485
22	46	1.0	0	-0.0210	-0.0996	21.11%	-
23	46	1.0	0.573	-0.0150	-0.1006	14.91%	0.713828998
24	46	1.0	0.331	-0.0170	-0.1003	16.97%	0.809734724

Από τον παραπάνω Πίνακα συμπεραίνονται τα εξής:

1. Παρατηρούνται **πολύ μικρές τιμές συγκλίσεων** τόσο στο μέτωπο εκσκαφής όσο και στην θέση πλήρους αποτόνωσης των τάσεων. Αυτό είναι εύλογο, διότι για να μπορεί να τρέχει το πρόγραμμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων Abaqus τα μοντέλα προσομοίωσης ανυποστήρικτης σήραγγας, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, προσομοιώνονται πολύ καλές ιδιότητες εδαφικών υλικών για να μπορούν να αυτοϋποστηρίζονται χωρίς άμεση υποστήριξη στην διανοιγμένη κοιλότητα. Για το λόγο αυτό δεν αναπτύσσονται μεγάλες συγκλίσεις. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι με αύξηση της γωνίας τριβής ϕ , οι συγκλίσεις μειώνονται όλο και περισσότερο, γεγονός που συνάδει με την παραπάνω αιτιολόγηση.
2. Στις περισσότερες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρείται ότι στο μέτωπο, έχει συμβεί πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης. Πιο αναλυτικά, **για αναλύσεις με $k=0.5$** , στο μέτωπο εκσκαφής αναπτύσσεται ένα εύρος ποσοστών της αντίστοιχης συνολικής σύγκλισης της τάξης του 24-46%, ανάλογα και με τις υπόλοιπες γεωτεχνικές παραμέτρους. Τα ποσοστά αυτά τείνουν να προσεγγίσουν την θεώρηση των αναλυτικών μεθόδων που δέχονται ότι στο μέτωπο εκσκαφής συμβαίνει το 25-35% της συνολικής σύγκλισης. **Για αναλύσεις όμως με $k=1.0$** , τα ποσοστά των συνολικών συγκλίσεων που αναπτύσσονται στο μέτωπο εκσκαφής είναι της τάξης του 10-25%, ανάλογα και με τις άλλες γεωτεχνικές παραμέτρους, δηλαδή πολύ μικρά.
3. Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή των αγκυρίων, **οι συγκλίσεις στο μέτωπο τείνουν να μειωθούν κατά ποσοστό 10-30%**, ανάλογα με το εδαφικό υλικό. Πιο αναλυτικά, για κάθε εδαφικό υλικό, παρατηρούμε ότι **η πιο πυκνή διάταξη 1** προκαλεί **μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων** στο μέτωπο σε σχέση με την **πιο αραιή διάταξη 2**. Αυτό είναι λογικό και εύλογο λόγω μεγαλύτερης ποσότητας και πυκνότητας αγκυρίων. Αλλά το εύρος της μείωσης θεωρείται **πολύ μικρό** (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.5**, όπου υπολογίστηκε μάλιστα και η μέγιστη μείωση συγκλίσεων στο μέτωπο, της τάξης του 29%). Αυτό αιτιολογείται διότι, όπως ειπώθηκε και παραπάνω οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αναφέρονται σε πολύ καλές ιδιότητες εδαφικών υλικών. Άρα, ακόμα κι αν τοποθετούνται αγκύρια στο μέτωπο, δεν υπάρχουν οι συνθήκες για να δράσουν τα αγκύρια και να συμβάλλουν δραστικά στην μείωση των (ήδη πολύ μικρών) συγκλίσεων. Επίσης να σημειωθεί ότι στις ελαστικές αναλύσεις τα αγκύρια δεν συμβάλλουν καθόλου σε μείωση των παραμορφώσεων (**Σχήμα 6.6**).



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα συγκλίσεων για εδαφικό υλικό με $\phi=40^\circ$, $c=35$ kPa για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) και αραιής διάταξης 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) αγκυρίων.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα συγκλίσεων σε ελαστικό εδαφικό υλικό για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) και αραιής διάταξης 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) αγκυρίων.

6.5.3.3. Σύγκριση με άλλες μεθόδους σχεδιασμού

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της τριδιάστατης αριθμητικής μεθόδου με άλλη διδιάστατη αριθμητική μέθοδο και με αναλυτικές μεθόδους ανάλυσης.

Πιο αναλυτικά, για τη διδιάστατη αριθμητική μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε το διδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων **Phase 6.0**. Το πρόγραμμα αυτό θεωρεί συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης κατά τον άξονα z της σήραγγας δηλαδή ανάλυση αρκετά πίσω από το μέτωπο εκσκαφής (όπου οι συνθήκες είναι έντονα τριδιάστατες). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία για προβλήματα δύο διαστάσεων.

Σχεδιάζουμε τα προσομοιώματα των αναλύσεων που πραγματοποιήσαμε και με την τριδιάστατη αριθμητική μέθοδο. Για την ανάλυση της σήραγγας το κάθε προσομοίωμα ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις:

- Η αρχική εντατική κατάσταση (γεωστατικές τάσεις)
- Η τελική κατάσταση μετά την εκσκαφή της σήραγγας.

Επίσης έγινε σύγκριση με δύο τύπους αναλυτικών μεθόδων:

- **Μέσω καμπύλων σύγκλισης – αποτόνωσης (Καββαδάς, 2007)**
Ακολουθούνται τα εξής βήματα:

[1] : Ανάπτυξη ή μη πλαστικής ζώνης;

Για $\lambda_{cr} < 1$ και $\lambda > \lambda_{cr}$ τότε αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

Για $\lambda_{cr} < 1$ και $\lambda < \lambda_{cr}$ τότε δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη

[2] : Υπολογισμός λόγου r_p/R (r_p : ακτίνα πλαστικής ζώνης)

Αν δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη:

$$r_p/R = 1$$

Αν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη (για $\varphi \neq 0$):

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

[3]: Υπολογισμός λόγου u_p/R

(u_p η μετακίνηση στο όριο της πλαστικής ζώνης, $u_p = u (r = r_p)$)

Αν δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη τότε ο λόγος u_p/R δεν ορίζεται

Αν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη:

$$\frac{u_p}{R} = \frac{r_p}{R} * \frac{p_0}{2G} * \left(1 - \frac{2}{k+1}\right) * \left[1 + \frac{2}{(k-1)N_s}\right]$$

[4]: Υπολογισμός λόγου u_R/R

(u_R η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας, $u_R = u (r = R)$)

Αν δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη:

$$\frac{u_R}{R} = \lambda * \frac{p_0}{2G}$$

Αν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη:

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

[5]: Υπολογισμός λόγου $u_R/u_{R\infty}$

όπου u_R η μετακίνηση στο όριο της σήραγγας και $u_{R\infty}$ η μετακίνηση στο όριο της σήραγγας στην πλήρη αποτόνωση

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \frac{\frac{u_R}{R}}{\frac{u_R}{R} (\lambda = 1)}$$

[6]: Υπολογισμός λόγου Chern x/R

Αν $\frac{u_R}{u_{R\infty}} > 1$ τότε ο λόγος δεν ορίζεται

$$\text{Αν } \frac{u_R}{u_{R\infty}} < 1 : \frac{x}{R} = \frac{1}{0,91} * \left[\left(\ln \frac{u_R}{u_{R\infty}} \right)^{-1,7} - 1 \right]$$

- **Θεωρία Kastner (Παπαδόπουλος, 2008)**

Βασίζεται στη θεώρηση ισότροπου τασικού πεδίου ($K_0=1.0$). Ακολουθούνται τα βήματα:

[1] Υπολογισμός μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} του εδάφους ως συνάρτηση των παραμέτρων διαμητικής αντοχής c και ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb:

$$\sigma_{cs} = 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

[2] Υπολογισμός συντελεστή

$$K_p = N_\phi = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

[3] : Υπολογισμός ακτίνα πλαστικής ζώνης

$$\frac{r_p}{R} = \left[\frac{2}{1 + K_p} * \frac{\sigma_{cs} + p_0 * (K_p - 1)}{\sigma_{cs}} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}}$$

[4] : Μετατόπιση στο όριο της πλαστικής ζώνης

$$u_p = \left[\frac{1 + \nu^*}{K_p - 1} * \frac{\sigma_{cs} + p_0 * (K_p - 1)}{E} * r_p \right]$$

[5] Μετακίνηση στην άντυγα ($r=R$)

$$u_a = a - \sqrt{a^2 * u_p * (2r_p - u_p)}$$

Από την σύγκριση των παραπάνω μεθόδων προκύπτει ο **Πίνακας 6.4**

Πίνακας 6.4: Σύγκριση τριδιάστατης αριθμητικής μεθόδου, διδιάστατης αριθμητικής μεθόδου και αναλυτικών μεθόδων σχεδιασμού

φ	c (kPa)	k	Συνολικές συγκλίσεις (cm)			
			Abaqus	Phase	Καββαδας	Kastner
30	50	0.5	16.1	12.1	7.08	—
30	50	1.0	31.5	20	12.27	11.98
35	40	0.5	10.4	8	5.41	—
35	40	1.0	20.4	13.4	8.88	8.59
40	35	0.5	5.7	5.2	3.95	—
40	35	1.0	10.2	6.8	6.19	6.04

Από τον **Πίνακα 6.4** προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Με την αύξηση της γωνίας τριβής, όλες οι μέθοδοι δίνουν μικρότερες συνολικές συγκλίσεις
- Οι αναλύσεις για $k=0.5$ δίνουν μικρότερες συγκλίσεις από τις αντίστοιχες για το ίδιο εδαφικό υλικό για $k=1.0$ με όλες τις μεθόδους
- Η διδιάστατη αριθμητική μέθοδος και οι αναλυτικές μέθοδοι δίνουν πολύ μικρότερες συγκλίσεις από αυτές της τριδιάστατης αριθμητικής μεθόδου.** Η βασικότερη αιτιολόγηση για την μεγάλη αυτή απόκλιση των τιμών είναι η διαφορά στην πυκνότητα του καννάβου των μοντέλων που προσομοιώθηκαν με διδιάστατη και τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση καθώς επίσης και οι απλοποιήσεις και οι θεωρήσεις που λαμβάνουν υπόψιν οι αναλυτικές λύσεις.

6.5.3.4. Αποτελέσματα εξωθήσεων

Για να ελέγξουμε τα παραπάνω συμπεράσματα για τη μεταβολή των συγκλίσεων και την γενικότερη παραμορφωσιακή συμπεριφορά, επιλέγουμε να ελέγξουμε και την επιρροή της τοποθέτησης αγκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή της εξώθησης του μετώπου,

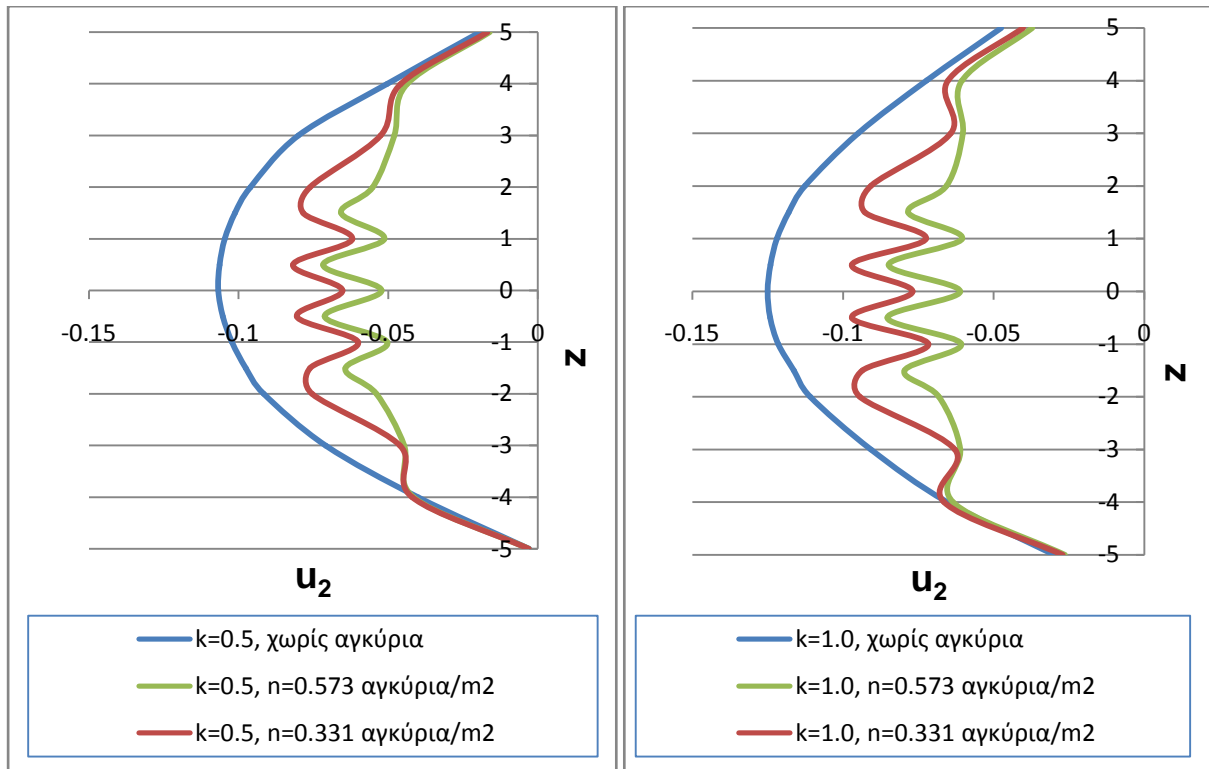
Όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα παρουσιάζονται αναλυτικά με διαγράμματα στο αντίστοιχο παράρτημα που δίνεται στη συνέχεια. Παρουσιάζονται διαγράμματα για κάθε εδαφικό υλικό και για καθεμία τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 , και εκτιμάται η επίδραση της εφαρμογής αγκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας εξώθησης (A_{sum}) και της κανονικοποιημένης τιμής του A_f .

Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των συγκλίσεων όλων των αναλύσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.5**.

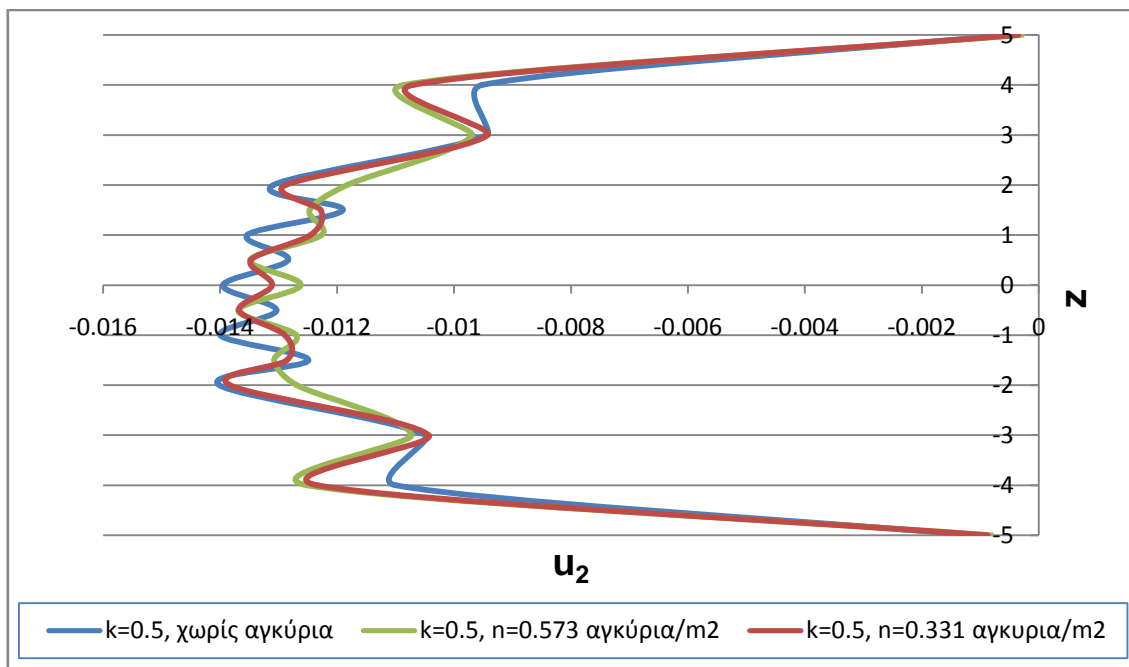
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα εξωθήσεων για αναλύσεις με ανυποστήρικτη σήραγγα

α/α	Case	k	n (αγκυρία/m ²)	A _f	Af (fiber)/Af (no fiber)
1	Elastic	0.5	0	0.347537472	-
2	Elastic	0.5	0.573	0.595403483	100.38%
3	Elastic	0.5	0.331	0.3488676	101.34%
4	Elastic	1.0	0	0.594967514	-
5	Elastic	1.0	0.573	0.352179215	99.93%
6	Elastic	1.0	0.331	0.599870518	100.75%
7	28	0.5	0	2.880281704	-
8	28	0.5	0.573	2.733679545	63.90%
9	28	0.5	0.331	1.840588002	74.42%
10	28	1.0	0	1.810486333	-
11	28	1.0	0.573	2.143618542	66.23%
12	28	1.0	0.331	2.095017261	76.64%
13	36	0.5	0	2.564442338	-
14	36	0.5	0.573	2.300718227	63.57%
15	36	0.5	0.331	1.630136159	73.34%
16	36	1.0	0	1.522942422	-
17	36	1.0	0.573	1.88082131	66.19%
18	36	1.0	0.331	1.75496431	76.28%
19	46	0.5	0	2.145958167	-
20	46	0.5	0.573	1.816261421	62.71%
21	46	0.5	0.331	1.345722808	72.42%
22	46	1.0	0	1.215280203	-
23	46	1.0	0.573	1.554170838	66.91%
24	46	1.0	0.331	1.38493079	76.25%

Από τον Πίνακα αυτόν προκύπτει ότι η μείωση των εξωθήσεων λόγω της επίδρασης των αγκυρίων είναι σε ποσοστό της τάξης του 23-38%, η οποία θεωρείται μικρή. Το κόστος για την εφαρμογή των αγκυρίων στο μέτωπο είναι μεγάλο και επιζητάμε να έχουμε αποτελεσματική μείωση των παραμορφώσεων σε μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις. Παρατηρείται επίσης ότι με την πυκνότερη διάταξη 1 των αγκυρίων επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση των εξωθήσεων (33-38%) σε σχέση με τη διάταξη 2 (23-28%), αλλά όχι σε επιθυμητό βαθμό. Παράλληλα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διαφορά της μείωσης των εξωθήσεων για μεταβολή του K_0 από 0.5 σε 1.0 για κάθε γεωυλικό είναι απειροελάχιστη, της τάξης του 1-4% (όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 6.7**). Επίσης να σημειωθεί ότι στις ελαστικές αναλύσεις τα αγκύρια δεν συμβάλλουν καθόλου σε μείωση των εξωθήσεων (**Σχήμα 6.8**).



Σχήμα 6.7: Διαγράμματα εξωθήσεων για εδαφικό υλικό με $\phi=30^\circ$, $c=50$ kPa για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 ($n=0.573$ αγκύρια/m²) και αραιής διάταξης 2 ($n=0.331$ αγκύρια/m²) αγκυρίων.



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα εξωθήσεων σε ελαστικό εδαφικό υλικό για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 ($n=0.573$ αγκύρια/m²) και αραιής διάταξης 2 ($n=0.331$ αγκύρια/m²) αγκυρίων.

6.5.4. Αναλύσεις για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη

Σκοπός μας είναι να ερευνηθεί η συμβολή κι η επίδραση της ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια στην ευστάθεια του μετώπου σε σήραγγες με προσωρινή υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο. Για το λόγο αυτό επιχειρήθηκε ο έλεγχος της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς στην περιοχή του μετώπου (προσύγκλιση, σύγκλιση και εξώθηση).

6.5.4.1. Προσδιορισμός παραμέτρων

a) Παράμετροι αντοχής του εδαφικού υλικού

Αρχικά έγιναν αναλύσεις για εδαφικό υλικό που συμπεριφέρεται ελαστικά. Θεωρήσαμε εδαφικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=200$ MPa. Για τις αναλύσεις προσομοίωσης ελαστοπλαστικών εδαφικών υλικών, θεωρήθηκε ότι τα εδαφικά αυτά υλικά ακολουθούν τον καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb ($\tau = \sigma \cdot \tan\phi + c$). Άρα για τα υλικά αυτά απαιτείται ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων (c, ϕ) και του μέτρου ελαστικότητας E . Για να μελετήσουμε την επίδραση της αντοχής και του τύπου του εδαφικού υλικού στην αποτελεσματικότητα των αγκυριών στο μέτωπο, δόθηκαν για ανάλυση ελαστοπλαστικά υλικά με διαφορετική γωνία τριβής ϕ ($20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ και 40°) για τον έλεγχο της επιρροής της γωνίας τριβής ϕ , καθώς επίσης και για καθεμία γωνία τριβής ϕ μελετήθηκαν διάφορες τιμές της συνοχής c , για τον έλεγχο της επιρροής της συνοχής c . Επίσης για όλα τα εδαφικά αυτά υλικά, θεωρούμε ειδικό βάρος $\gamma = \rho \cdot g = 2.1 \cdot 10 = 21$ KN/m³ και λόγο Poisson $\nu=0.3$.

b) Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0

Για τη μελέτη της επίδρασης των οριζοντίων γεωστατικών τάσεων στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής, έγιναν αναλύσεις για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 (0.5, 0.7, 1.0 και 1.3) για κάθε εδαφικό υλικό. Όπως σημειώνεται και παραπάνω, με την μεταβολή του K_0 θεωρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας E παραμένει σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θέλουμε να εκτιμήσουμε ποιοτικά και ποσοτικά την επίδραση λόγω μεταβολής των οριζόντιων τάσεων και όχι την επιρροή του E . Πιο αναλυτικά:

- Αρχικός σκοπός των αναλύσεων ήταν να προσομοιωθούν οι συνήθεις τιμές στις γεωτεχνικές έρευνες $K_0=0.5$ και $K_0=1.0$ (ισότροπο τασικό πεδίο), το οποίο εφαρμόστηκε στις αναλύσεις που αφορούσαν τα πιο ασθενή εδαφικά υλικά. (αναλύσεις για εδαφικά υλικά 3b, 5b, 12b, 14b και 22b με γωνία τριβής ϕ από 20° έως 30°).
- Για τα υπόλοιπα εδαφικά υλικά με καλύτερες ιδιότητες (c, ϕ) επιλέχθηκε να ελεγχθεί η επιρροή των οριζοντίων γεωστατικών τάσεων μέσω μόνο μίας τιμής του K_0 , η οποία αποφασίστηκε ίση με $K_0=0.5$.

- Για τον έλεγχο και πιο ευρείας μεταβολής του K_0 αποφασίστηκε να μελετηθεί η μεταβολή του στις αναλύσεις για τα εδαφικά υλικά 12b και 22b από $K_0=0.5$ έως και $K_0=1.3$.

c) Διάταξη αγκυρίων στο μέτωπο

Για την εκτίμηση της επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο στην μείωση των παραμορφώσεων και στην ευστάθεια του, προσομοιώθηκαν τρεις καταστάσεις για κάθε εδαφικό υλικό:

- Χωρίς αγκύρια στο μέτωπο
- Διάταξη 1: 45 αγκύρια στο μέτωπο, δηλαδή πυκνότητα 0.573 αγκύρια/ m^2
- Διάταξη 2: 26 αγκύρια στο μέτωπο, δηλαδή πυκνότητα 0.331 αγκύρια/ m^2

Όλες οι παραπάνω παράμετροι που δόθηκαν για ανάλυση παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Πίνακα 6.6**.

Πίνακας 6.6: Γεωτεχνικές παράμετροι εδαφικών υλικών για ανάλυση σήραγγας με προσωρινή υποστήριξη

Παράμετροι		Εύρος τιμών	Αριθμός τιμών
Γεωτεχνικές παράμετροι	Γωνία τριβής ϕ (°)	20 - 40	5
	Συνοχή c (kPa)	20 - 60	Ανάλογα με τη γωνία τριβής ϕ
	Γωνία διαστολικότητας ψ (°)	3 - 7	5
	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	148 - 303	15
	Συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων K_0	0.5 - 1.3	4
Αγκύρια μετώπου	Πυκνότητα n (αγκύρια/ m^2)	0 - 0.573	3

Συνολικά λοιπόν, για ανυποστήρικτη σήραγγα, προσομοιώθηκαν 62 αναλύσεις, οι οποίες παρατίθενται στον **Πίνακα 6.7** στο Παράρτημα που παρατίθενται στο τέλος της εργασίας αυτής.

6.5.4.2. Αποτελέσματα συγκλίσεων

Όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη παρουσιάζονται αναλυτικά με διαγράμματα στο αντίστοιχο παράρτημα που δίνεται στη συνέχεια. Παρουσιάζονται διαγράμματα για κάθε εδαφικό υλικό και για καθεμία τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 , και εκτιμάται η επίδραση της εφαρμογής αγκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή των συγκλίσεων της οροφής.

Ως κρίσιμο μέγεθος της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής θεωρείται για την ανάλυση αυτή ο λόγος της σύγκλισης οροφής σε μέτωπο με υποστήριξη με αγκύρια προς την αντίστοιχη σε μέτωπο χωρίς αγκύρια μετώπου. Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των λόγων συγκλίσεων των αναλύσεων για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.8** και στο Παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας αυτής..

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα λόγων συγκλίσεων για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο

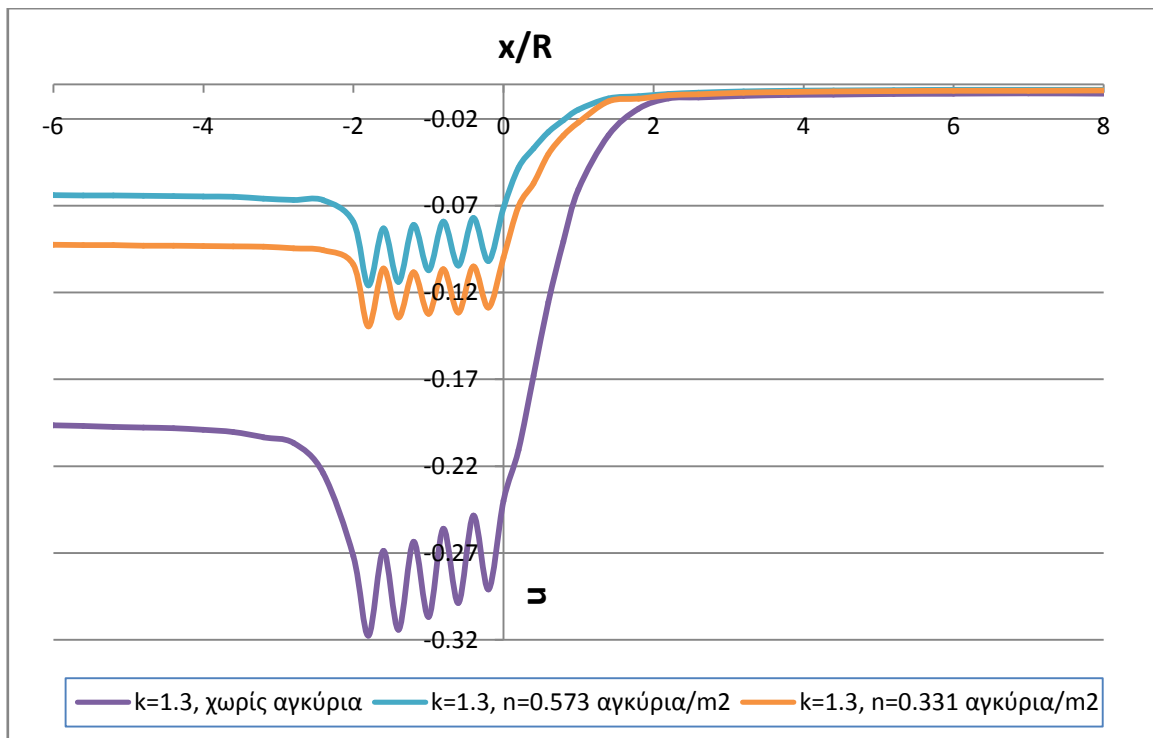
a/a	ϕ (°)	c (kPa)	k	n	u3(fiber)/u3(no fiber)	σ_{cs}
2	20	25	0.5	0.573	36.44%	71.4074
3	20	25	0.5	0.331	47.21%	71.4074
5	20	25	1.0	0.573	31.41%	71.4074
6	20	25	1.0	0.331	43.05%	71.4074
8	20	35	0.5	0.573	59.29%	99.97036
9	20	35	0.5	0.331	70.87%	99.97036
11	20	35	1.0	0.573	52.29%	99.97036
12	20	35	1.0	0.331	65.39%	99.97036
14	25	20	0.5	0.573	36.34%	62.78742
15	25	20	0.5	0.331	47.24%	62.78742
17	25	20	0.7	0.573	34.35%	62.78742
18	25	20	0.7	0.331	45.51%	62.78742
20	25	20	1.0	0.573	33.32%	62.78742
21	25	20	1.0	0.331	43.56%	62.78742
23	25	20	1.3	0.573	29.72%	62.78742
24	25	20	1.3	0.331	41.61%	62.78742
26	25	30	0.5	0.573	63.10%	94.18113
27	25	30	0.5	0.331	72.96%	94.18113
29	25	30	1.0	0.573	55.23%	94.18113
30	25	30	1.0	0.331	68.19%	94.18113
32	30	20	0.5	0.573	52.53%	69.28203
33	30	20	0.5	0.331	62.37%	69.28203
35	30	20	0.7	0.573	50.36%	69.28203
36	30	20	0.7	0.331	57.06%	69.28203
38	30	20	1.0	0.573	47.21%	69.28203
39	30	20	1.0	0.331	57.21%	69.28203
41	30	20	1.3	0.573	41.40%	69.28203
42	30	20	1.3	0.331	52.55%	69.28203
44	30	35	0.5	0.573	81.34%	121.2436
46	30	45	0.5	0.573	86.95%	155.8846
48	30	60	0.5	0.573	87.93%	207.8461
50	35	25	0.5	0.573	81.12%	96.04911
52	35	35	0.5	0.573	83.29%	134.4687
54	35	40	0.5	0.573	84.31%	153.6786
56	35	45	0.5	0.573	86.28%	172.8884
58	40	25	0.5	0.573	80.47%	107.2253
60	40	30	0.5	0.573	83.78%	128.6704
62	40	35	0.5	0.573	85.49%	150.1155

Από τον παραπάνω Πίνακα συμπεραίνονται τα εξής:

1. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρείται ότι στο μέτωπο, έχει υλοποιηθεί ένα επαρκές ποσοστό της συνολικής σύγκλισης. Τα ποσοστά αυτά τείνουν να προσεγγίσουν την θεώρηση των αναλυτικών μεθόδων που δέχονται ότι στο μέτωπο εκσκαφής συμβαίνει το 25-35% της συνολικής σύγκλισης.
2. Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή των αγκυρίων, **οι συγκλίσεις στο μέτωπο τείνουν να μειωθούν κατά μεγάλο ποσοστό**, ανάλογα με το εδαφικό υλικό, το τασικό πεδίο και την πυκνότητα των αγκυρίων στο μέτωπο. Πιο αναλυτικά:
 - Για κάθε εδαφικό υλικό, παρατηρούμε ότι **η πιο πυκνή διάταξη 1** προκαλεί **μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων** στο μέτωπο σε σχέση με την **πιο αραιή διάταξη 2**. Αυτό είναι λογικό και εύλογο λόγω μεγαλύτερης ποσότητας και πυκνότητας αγκυρίων. (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.9**, όπου υπολογίστηκε μάλιστα και η μέγιστη μείωση συγκλίσεων στο μέτωπο, της τάξης του 70%).
 - Για δεδομένη γωνία τριβής φ , η αύξηση της συνοχής c προκαλεί αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} του εδαφικού υλικού κι επιδρά σε μικρότερο βαθμό στη μείωση της σύγκλισης στο μέτωπο. **Για μικρές τιμές της γωνίας φ η επιρροή της μεταβολής της συνοχής είναι μεγάλη** και μειώνει σημαντικά την δράση της ενίσχυσης με αγκύρια. Όσο όμως οι αναλύσεις αφορούν μεγαλύτερες γωνίες τριβής η επίδραση της μειώνεται. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι **για πολύ καλές ιδιότητες** εδαφικού υλικού πέρα από μια κρίσιμη τιμή (ανάλυση 43 και περαιτέρω) η επίδραση στη μείωση των συγκλίσεων στο μέτωπο είναι **ελάχιστη** (σταθερή για οποιαδήποτε συνοχή της τάξης του 12-20%).
 - Με την αύξηση της γωνίας τριβής φ μεταξύ μικρών τιμών (από 20° σε 30°) παρατηρείται μεγάλη μείωση της σύγκλισης της οροφής στο μέτωπο. Όσο όμως προσεγγίζει μεγάλες τιμές (35°-40°) εμφανίζεται πρόσθετη μείωση της σύγκλισης αλλά πολύ μικρότερη αναλογικά.
 - Για δεδομένο εδαφικό υλικό (c , φ), η αύξηση των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων μέσω της αύξησης του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 προκαλεί μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων της οροφής στο μέτωπο.

Παρατήρηση

Η μορφή της καμπύλης των συγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου οφείλεται στην μεγάλη πυκνότητα του καννάβου στην ζώνη αυτή. Αν και τα βήματα προσομοίωσης είναι ανά 2m εκσκαφής, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι ανά 1m, επειδή διατηρήσαμε την ίδια πυκνότητα καννάβου με τις αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα, στις οποίες τα τελευταία 10 βήματα προσομοίωσης ήταν ανά 1m. Σε απόσταση μεγαλύτερη από 10m ($2R=D$) πίσω από το μέτωπο, λόγω αραίωσης του καννάβου έχουμε απότομη μείωση της σύγκλισης οροφής. Η επίδραση της μείωσης της πυκνότητας του καννάβου είναι μεγαλύτερη όσο χαμηλότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά προσομοιώθηκαν.



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα συγκλίσεων για εδαφικό υλικό με $\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0=1.3$, για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 και αραιής διάταξης 2 αγκυρίων

Ακολούθως στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική μελέτη για την επίδραση κάθε παραμέτρου ξεχωριστά στα αποτελέσματα των συγκλίσεων

6.5.4.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων συγκλίσεων ανυποστήρικτης και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγας

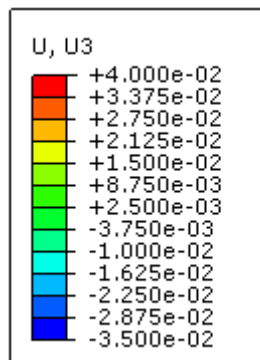
Στο υποκεφάλαιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις συγκλίσεις για τον ίδιο εδαφικό σχηματισμό για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτης και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγας. Οι αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα μελετήθηκαν και επεξεργάστηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο όπου παρουσιάστηκαν και τα αποτελέσματά τους στον **Πίνακα 6.3**. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του **Πίνακα 6.8** για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη. Ως κρίσιμη παράμετρος ευστάθειας επιλέγεται ο λόγος της σύγκλισης οροφής σε ενισχυμένο μέτωπο προς την σύγκλιση οροφής σε ανυποστήρικτο μέτωπο.

Από τη σύγκριση των Πινάκων των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο λόγος $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$

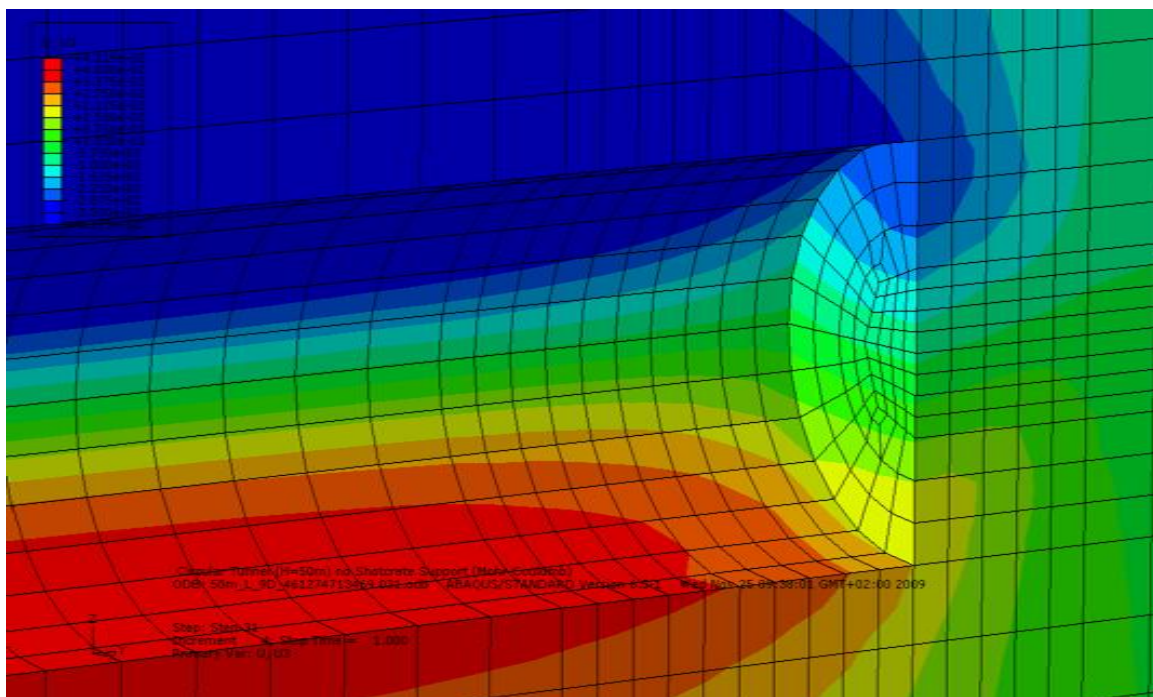
είναι σημαντικά μικρότερος στις αναλύσεις για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη, άρα επιβάλλεται μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι λαμβάνει τιμές από 30% περίπου έως 88% (για τις υψηλές γεωτεχνικές παραμέτρους που αναλύθηκαν). Αντίθετα, στις αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα, ο κρίσιμος λόγος λαμβάνει εύρος τιμών της τάξης του 70-90%, άρα επικρατεί σημαντικά μικρότερη μείωση συγκλίσεων.

Για πιο αναλυτική μελέτη, παρατίθενται το ακόλουθο Σχήμα 6.10 στο οποίο γίνεται σύγκριση των καμπύλων των συγκλίσεων για εδαφικούς σχηματισμούς με ίδια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

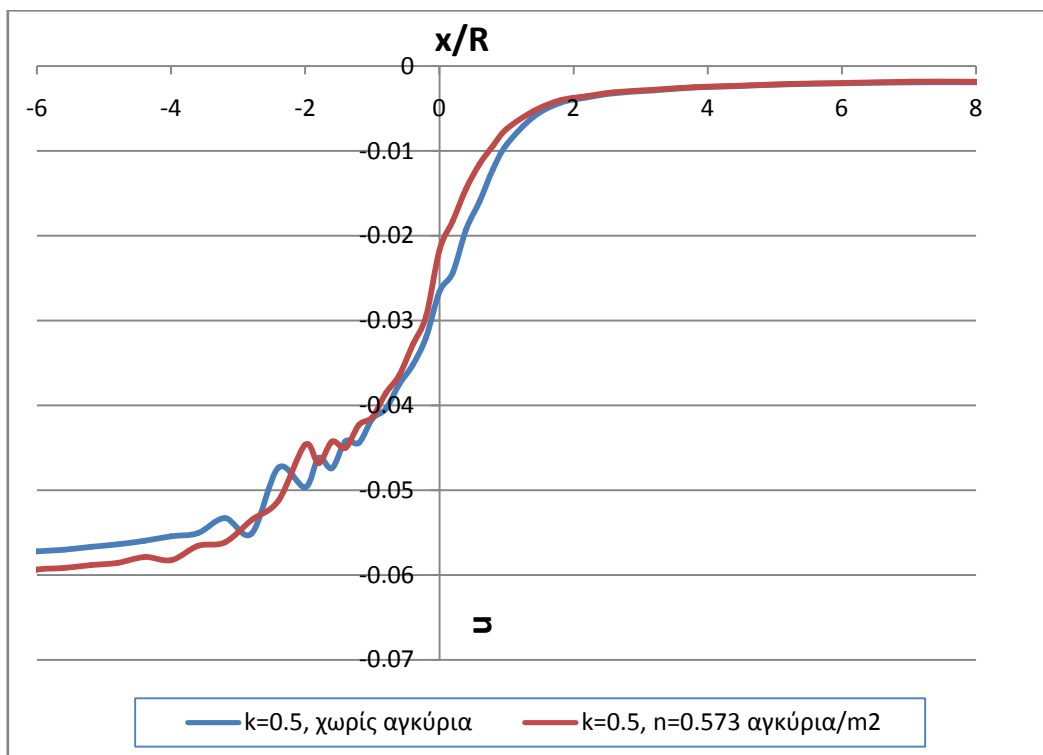
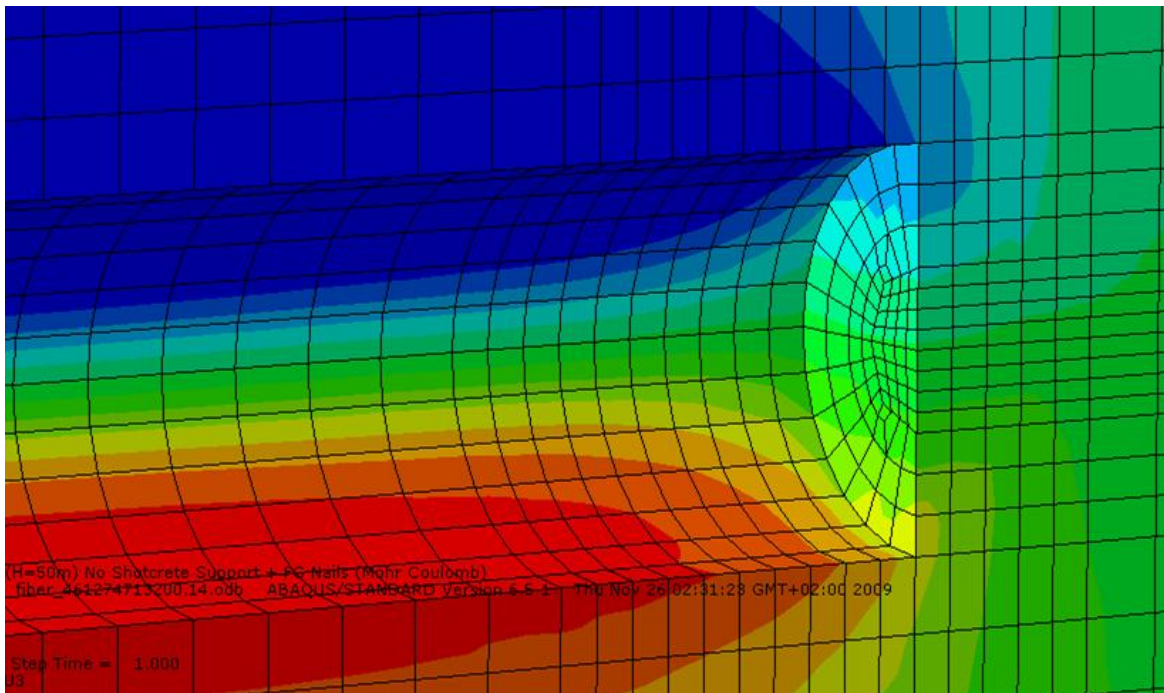
$\phi=40^\circ$, $c=35$ kPa, $k=0.5$ (ανυποστήρικτη σήραγγα)



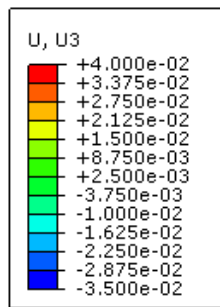
Ανυποστήρικτο μέτωπο - κατακόρυφες μετακινήσεις



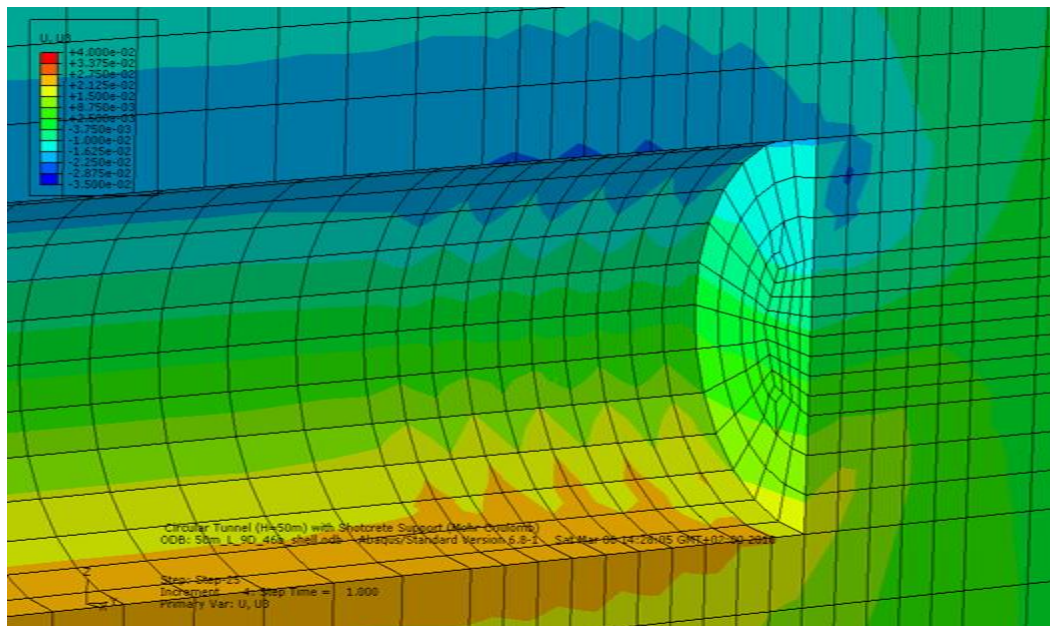
Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) - κατακόρυφες μετακινήσεις



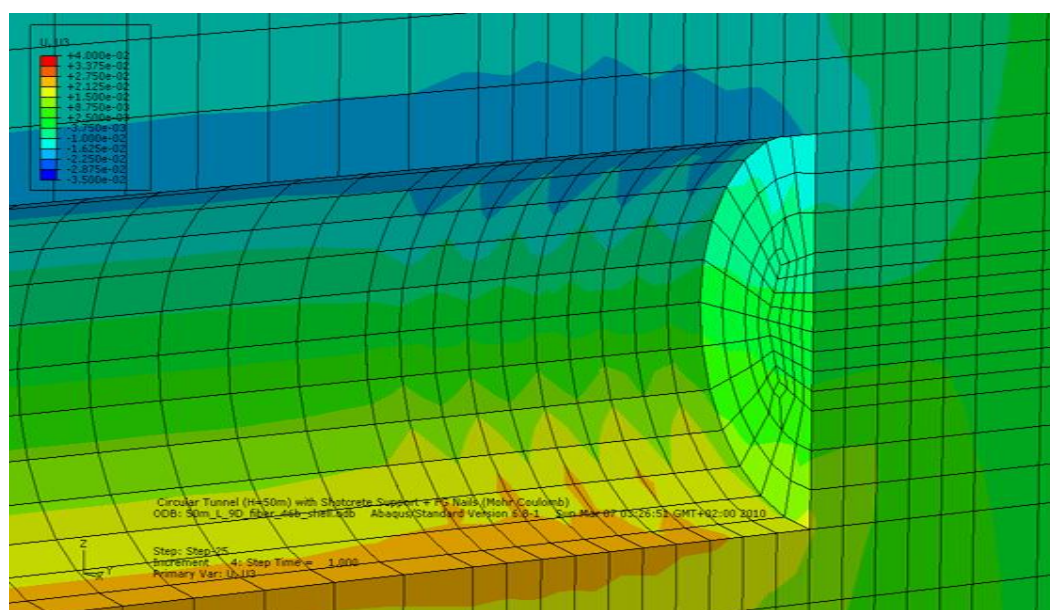
$\phi=40^\circ$, $c=35$ kPa, $k=0.5$ (σήραγμα με προσωρινή υποστήριξη)

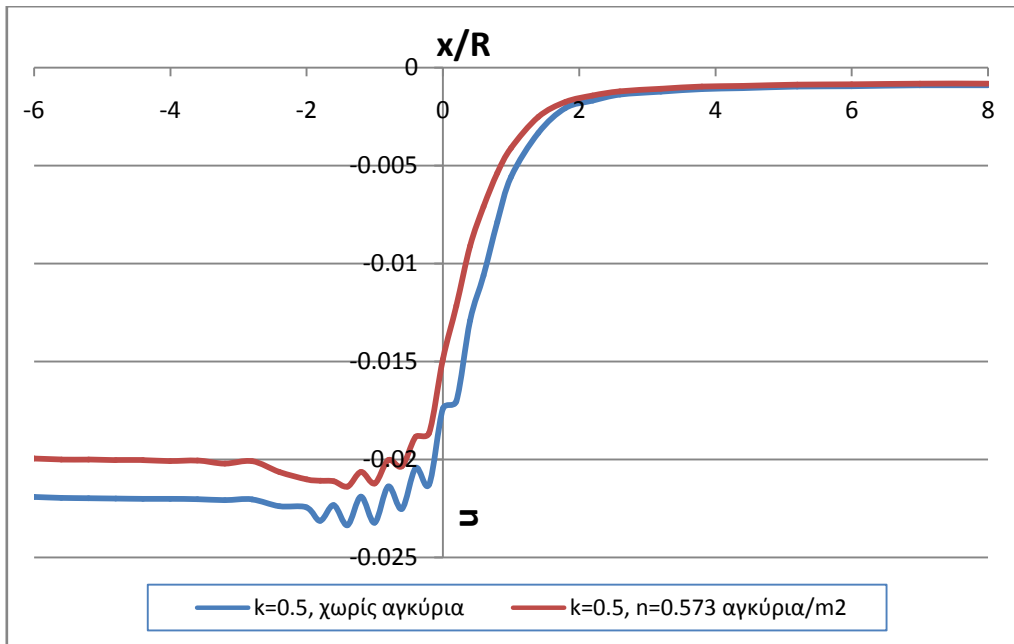


Ανυποστήρικτο μέτωπο - κατακόρυφες μετακινήσεις



Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) - κατακόρυφες μετακινήσεις





Σχήμα 6.10: Σύγκριση γραφικών απεικονίσεων κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχων διαγραμμάτων συγκλίσεων οροφής για ανυποστήρικτη και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

- Για την σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη δημιουργείται μικρότερη σύγκλιση οροφής στο μέτωπο σε σχέση με την ανυποστήρικτη σήραγγα, τόσο για ανυποστήρικτο μέτωπο (1.7 cm έναντι 2.7 cm) όσο και για την πυκνότερη διάταξη αγκυρίων 1 (1.5 cm έναντι 2.2 cm)
- Το ποσοστό μείωσης της σύγκλισης οροφής στο μέτωπο και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται περίπου ίδιο (14% έναντι 18%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αναλύσεις που έγιναν για ανυποστήρικτη σήραγγα έδωσαν μικρές μετακινήσεις, γεγονός που σημαίνει ότι αφορούν εδαφικά υλικά με δυνατότητα αυτοϋποστήριξης και η τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης δεν επιδρά σημαντικά.

6.5.4.4. Αποτελέσματα εξωθήσεων

Για να ελέγξουμε τα παραπάνω συμπεράσματα για τη μεταβολή των εξωθήσεων και την γενικότερη παραμορφωσιακή συμπεριφορά, επιλέγουμε να ελέγξουμε και την

επιρροή της τοποθέτησης αγκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή της εξώθησης του μετώπου.

Όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη παρουσιάζονται αναλυτικά με διαγράμματα στο αντίστοιχο παράρτημα που δίνεται στη συνέχεια. Παρουσιάζονται διαγράμματα για κάθε εδαφικό υλικό και για καθεμία τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 , και εκτιμάται η επίδραση της εφαρμογής αγκυρίων στο μέτωπο στην μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας εξώθησης (A_{sum}) και της κανονικοποιημένης τιμής του A_f .

Οι αντιπροσωπευτικές τιμές των συγκλίσεων όλων των αναλύσεων για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.9** στο Παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας αυτής.

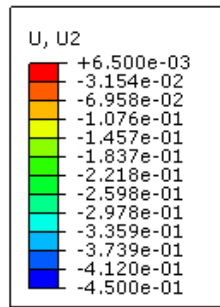
Από τον Πίνακα 6.9 συμπεραίνονται τα εξής:

1. Η πιο πυκνή διάταξη 1 των αγκυρίων του μετώπου προσφέρει μεγαλύτερη μείωση των εξωθήσεων σε σχέση με την πιο αραιή διάταξη 2. Για όλους τους τύπους εδάφους. Η μείωση του εμβαδού των εξωθήσεων γίνεται μέγιστη για την ανάλυση 23 ($\varphi=25^\circ$, $c=20\text{kPa}$) με $K_0=1.3$ και για εφαρμογή της πυκνότερης διάταξης 1 (**Σχήμα 6.11**).

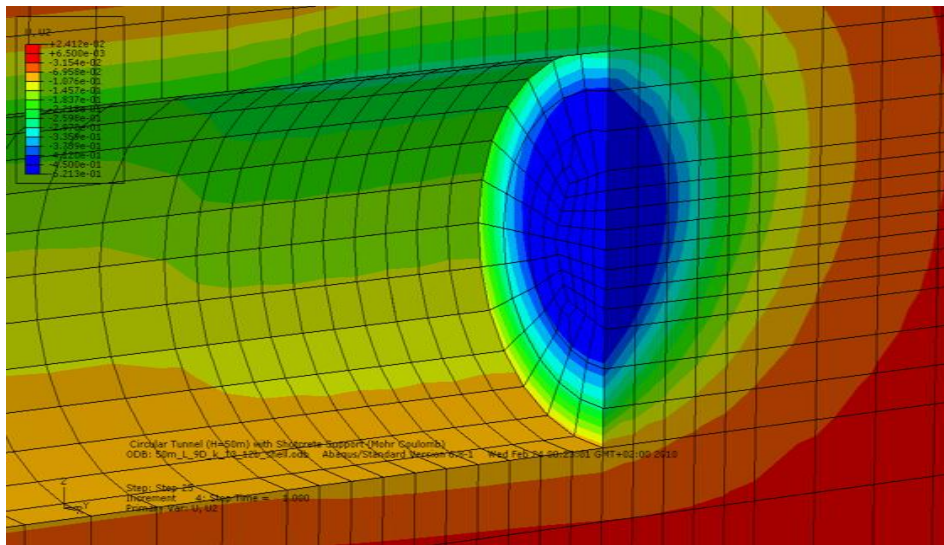
Να σημειωθεί όμως ότι οι αναλύσεις με την πιο αραιή διάταξη 2 δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη μείωση του εμβαδού των εξωθήσεων λόγω της ενίσχυσης του μετώπου. Σε όλες τις αναλύσεις η μείωση ξεπερνά το 40% της αρχικής κανονικοποιημένης τιμής A_f , η οποία επαρκεί στις περισσότερες περιπτώσεις και δεν απαιτείται η πυκνότερη διάταξη αγκυρίων με μεγαλύτερο κόστος.

2. Για δεδομένη γωνία τριβής φ , με αύξηση της συνοχής c παρατηρείται μείωση του εμβαδού της επιφάνειας εξώθησης και της κανονικοποιημένης τιμής A_f , αλλά και μείωση της επίδρασης της ενίσχυσης του μετώπου. Επίσης να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία τριβής φ , τόσο μειώνεται η επίδραση της μεταβολής της συνοχής.
3. Για δεδομένο εδαφικό υλικό, η αύξηση του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_0 προκαλεί ελάχιστη έως μηδαμινή μείωση του εμβαδού της επιφάνειας εξώθησης (A_{sum}) και της A_f καθώς επίσης και μικρή βελτίωση λόγω ενισχυμένου μετώπου. Οι μεταβολές αυτές λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους για μεταβολή από $K_0=1.0$ σε $K_0=1.3$ (μέχρι περίπου 5%).

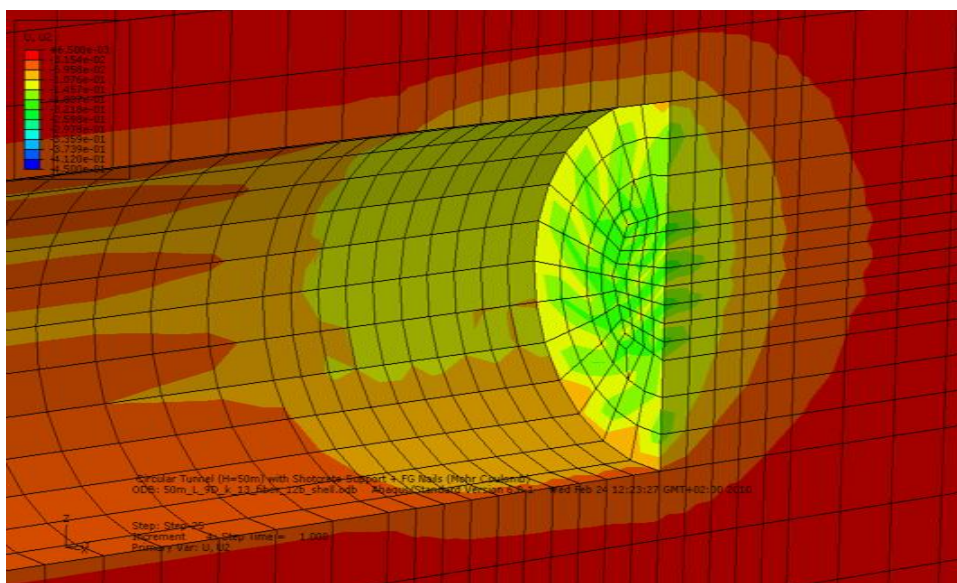
$\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa και $K_0=1.3$



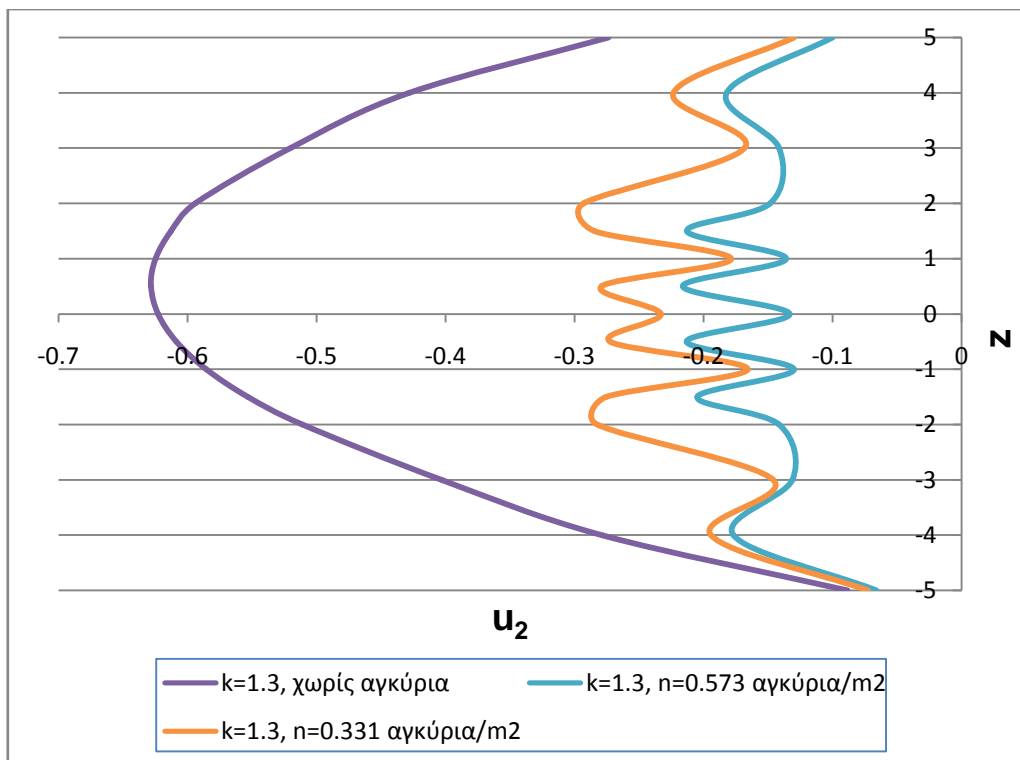
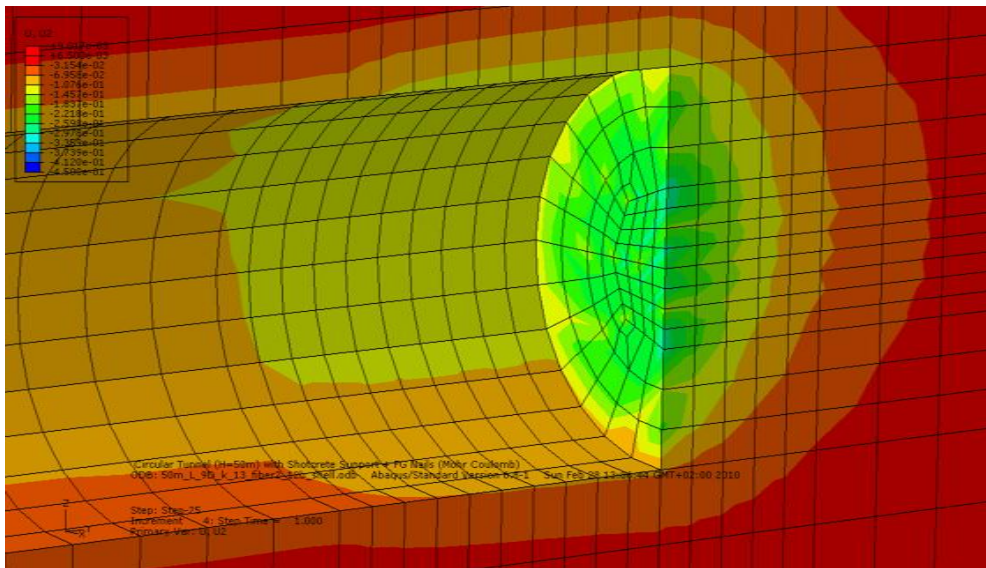
Ανυποστήρικτο μέτωπο - οριζόντιες μετακινήσεις



Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) - οριζόντιες μετακινήσεις



Διάταξη 2 ($n=0.331$ αγκύρια/m²) - οριζόντιες μετακινήσεις



Σχήμα 6.11: Γραφικές απεικονίσεις οριζόντιων μετακινήσεων και αντίστοιχο διάγραμμα εξωθήσεων για εδαφικό υλικό με $\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa και $K_0=1.3$ για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου, πυκνής διάταξης 1 και αραιής διάταξης 2 αγκυρών

Ακολούθως στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική μελέτη για την επίδραση κάθε παραμέτρου ξεχωριστά στα αποτελέσματα των εξωθήσεων.

6.5.4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων εξωθήσεων ανυποστήρικτης και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγας

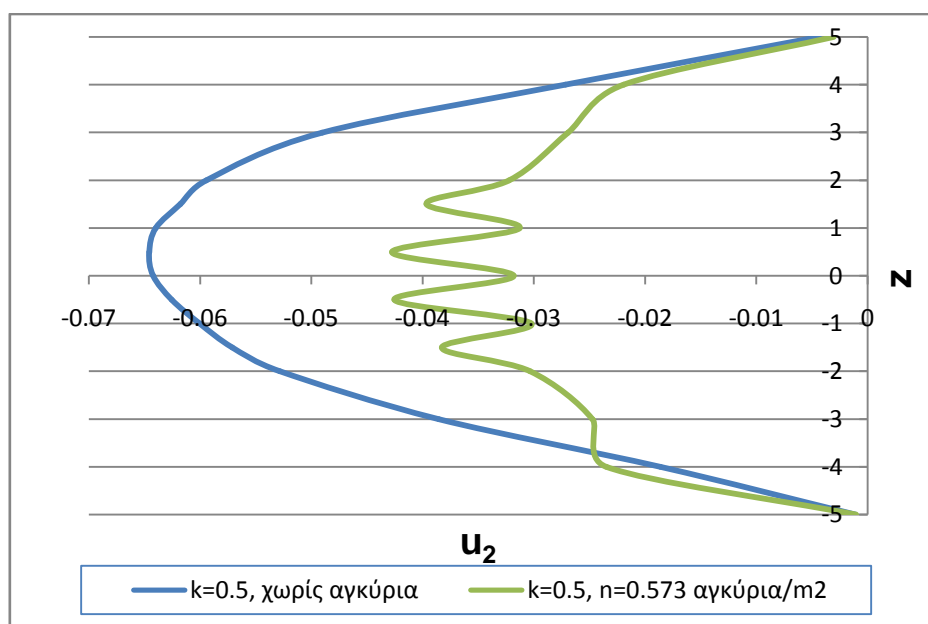
Στο υποκεφάλαιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις εξωθήσεις για τον ίδιο εδαφικό σχηματισμό για τις περιπτώσεις ανυποστήρικτης και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγας. Οι αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα μελετήθηκαν και επεξεργάστηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο όπου παρουσιάστηκαν και τα αποτελέσματά τους στον Πίνακα 6.5. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.9 για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη. Ως κρίσιμη παράμετρος ευστάθειας επιλέγεται ο λόγος της αδιαστατοποιημένης μορφής A_f σε ενισχυμένο μέτωπο προς την αντίστοιχη σε ανυποστήρικο μέτωπο, $\frac{A_f(fiber)}{A_f(no\ fiber)}$

Από τη σύγκριση των Πινάκων των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο λόγος $\frac{A_f(fiber)}{(no\ fiber)}$

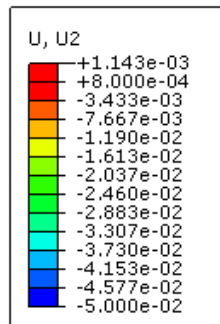
είναι σημαντικά μικρότερος στις αναλύσεις για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη, άρα επιβάλλεται μεγαλύτερη μείωση της εξώθησης στο μέτωπο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι λαμβάνει τιμές από 33% περίπου έως 71%. Αντίθετα, στις αναλύσεις για ανυποστήρικτη σήραγγα, ο κρίσιμος λόγος λαμβάνει εύρος τιμών της τάξης του 63-77%, άρα επικρατεί σημαντικά μικρότερη μείωση συγκλίσεων.

Για πιο αναλυτική μελέτη, παρατίθενται το ακόλουθο Σχήμα 6.12 στο οποίο γίνεται σύγκριση των καμπύλων των εξωθήσεων για εδαφικούς σχηματισμούς με ίδια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και η αντίστοιχη γραφική απεικόνιση αυτών.

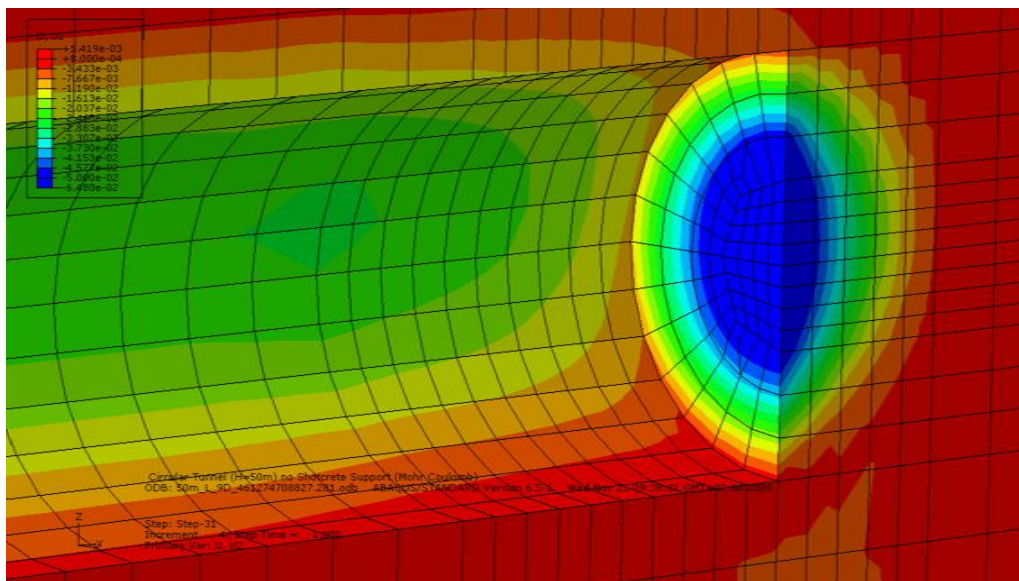
$\phi=40^\circ$, $c=35\text{ kPa}$, $k=0.5$ (ανυποστήρικτη σήραγγα)



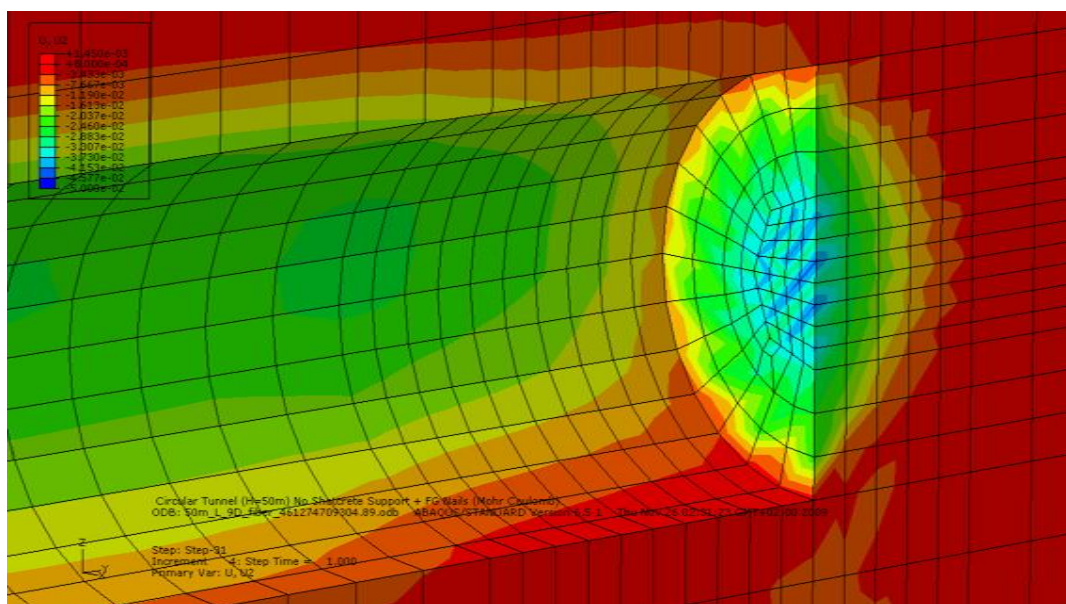
$\phi=40^\circ$, $c=35$ kPa, $k=0.5$ (ανυποστήρικτη σήραγγα)



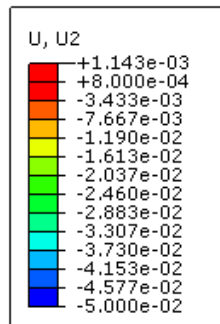
Ανυποστήρικτο μέτωπο – οριζόντιες μετακινήσεις



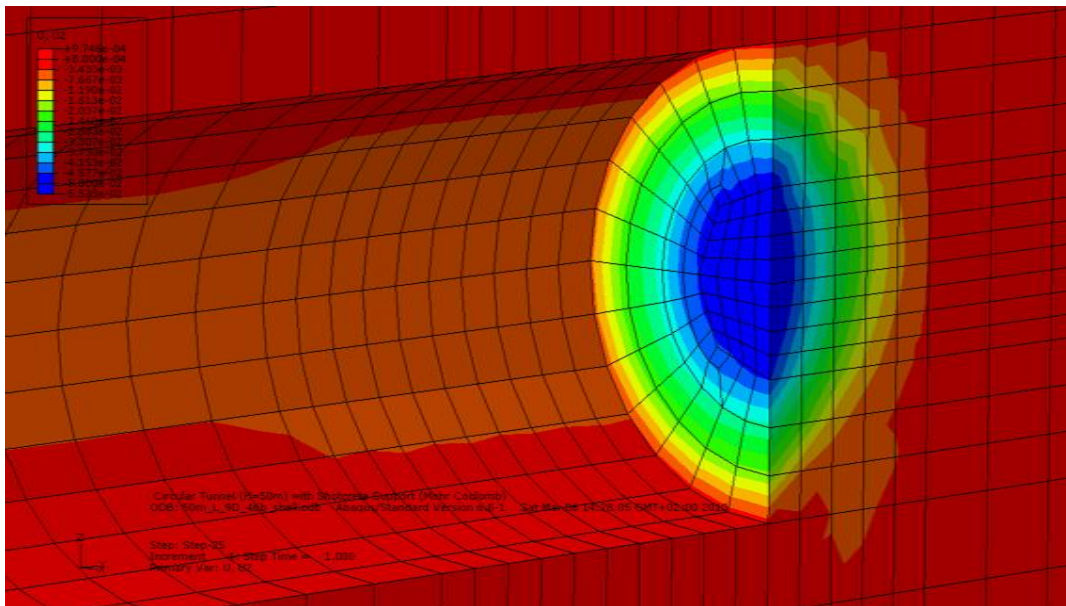
Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) - οριζόντιες μετακινήσεις



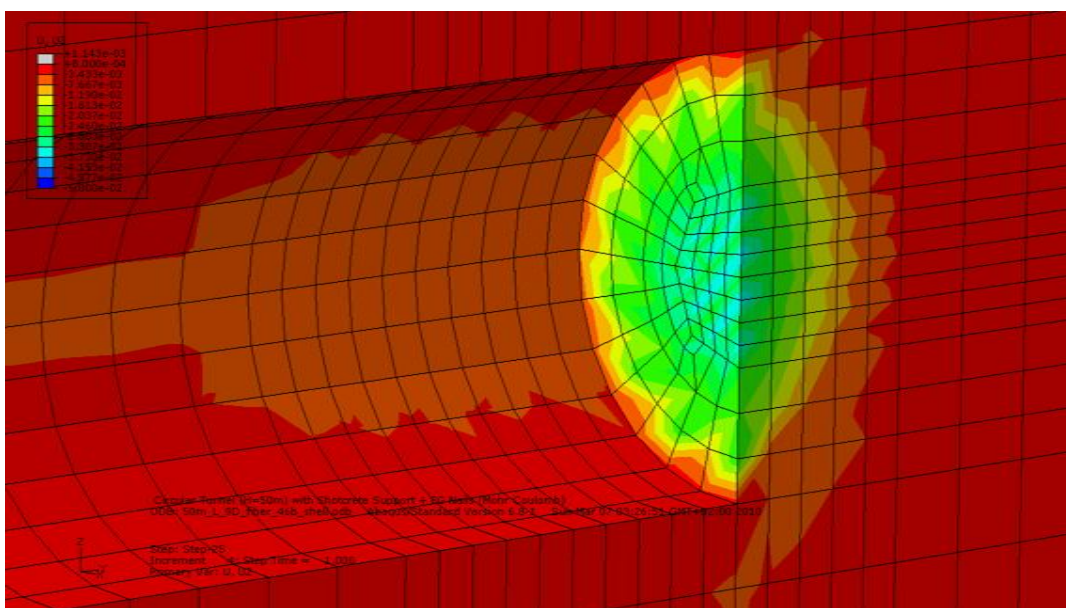
$\phi=40^\circ$, $c=35$ kPa, $k=0.5$ (σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη)

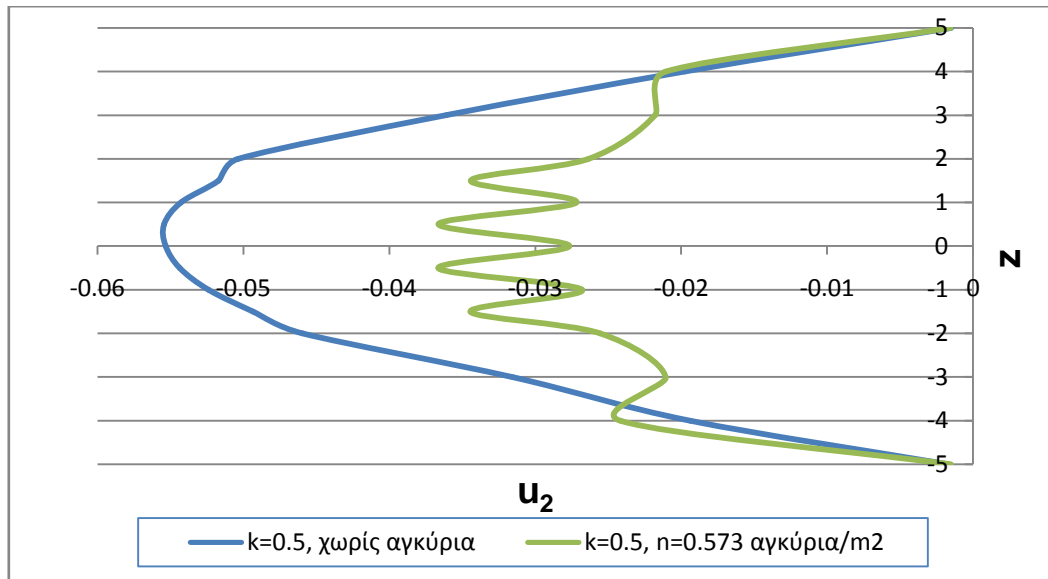


Ανυποστήρικτο μέτωπο - οριζόντιες μετακινήσεις



Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) - οριζόντιες μετακινήσεις





Σχήμα 6.12: Σύγκριση γραφικών απεικονίσεων οριζόντιων μετακινήσεων και καμπυλών εξωθήσεων μετώπου για ανυποστήρικτη και με προσωρινή υποστήριξη σήραγγα για εδαφικό υλικό με $\varphi=40^\circ$ και $c=35$ kPa.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

- Για την σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη δημιουργείται μικρότερη εξώθηση στο μέτωπο σε σχέση με την ανυποστήρικτη σήραγγα, τόσο για ανυποστήρικο μέτωπο (5.5 cm έναντι 6.5 cm) όσο και για την πυκνότερη διάταξη αγκυριών 1
- Το ποσοστό μείωσης της σύγκλισης οροφής στο μέτωπο και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται περίπου ίδιο (35% έναντι 37%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αναλύσεις που έγιναν για ανυποστήρικτη σήραγγα έδωσαν μικρές μετακινήσεις, γεγονός που σημαίνει ότι αφορούν εδαφικά υλικά με δυνατότητα αυτοϋποστήριξης και η τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης δεν επιδρά σημαντικά.
- Παρατηρούμε στις γραφικές απεικονίσεις ότι στην περίπτωση ανυποστήρικτης σήραγγας εμφανίζονται οριζόντιες μετακινήσεις στις παρειές της διανοιγμένης κοιλότητας, οι οποίες περιορίζονται στην υποστηριγμένη σήραγγα μέσω της υποστήριξης πίσω από το μέτωπο.

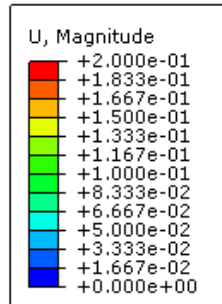
6.5.4.6. Επίδραση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης

Η μεταβολή των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, που εφαρμόζονται στη σήραγγα αυτής της εργασίας σε βάθος $H=50$ m, μέσω της μεταβολής του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 επηρεάζει τις συγκλίσεις στην περιοχή του μετώπου της

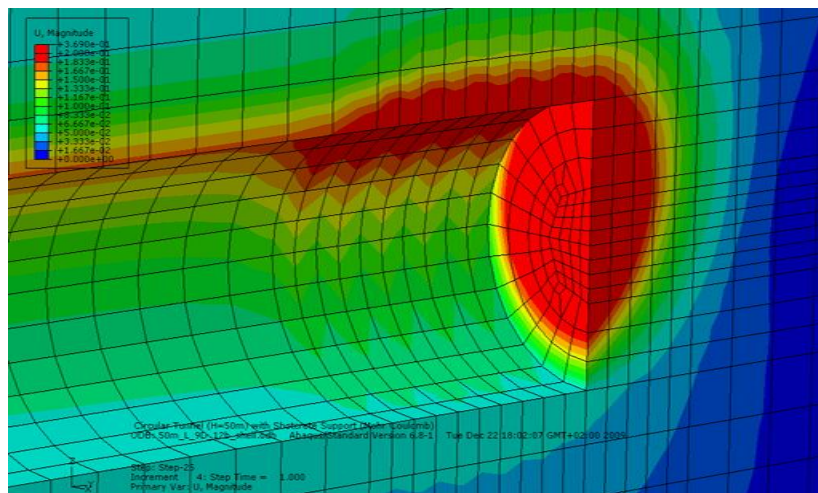
σήραγγας καθώς και την εξώθηση τόσο στα μεγέθη τους όσο και στα ποσοστά μείωσης τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκλίσεων και εξώθησης για διάφορα εδαφικά υλικά και για διάφορες τιμές του K_0 , όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις.

Σχήμα 6.13: Γραφικές απεικονίσεις και αντίστοιχα διαγράμματα συγκλίσεων και εξωθήσεων για $\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa, για $K_0=0.5$ και 1.3.

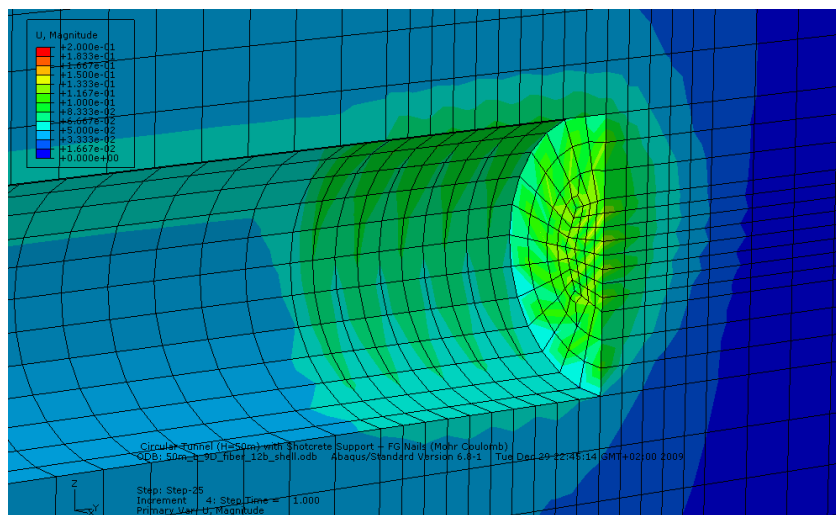
➤ $k=0.5$



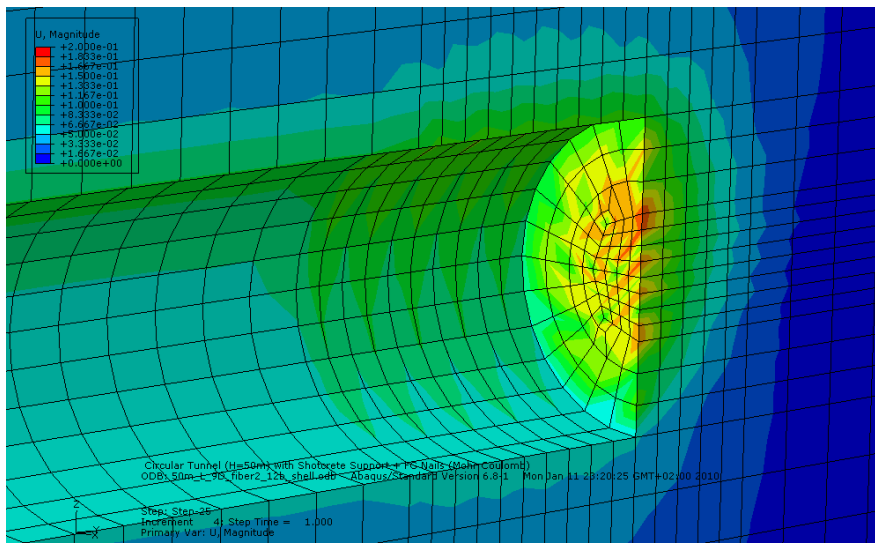
Ανυποστήρικτο μέτωπο – ολικές μετακινήσεις



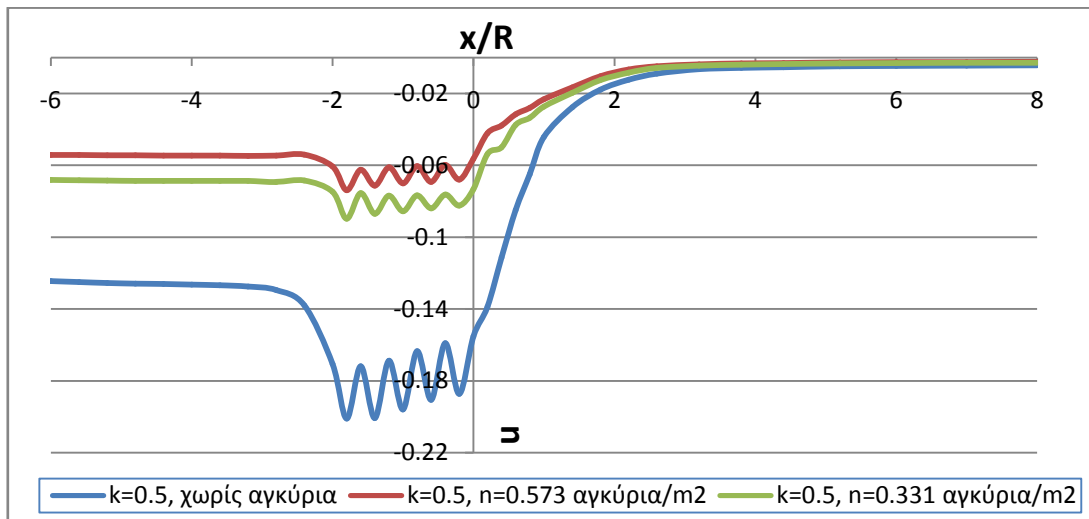
Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) – ολικές μετακινήσεις



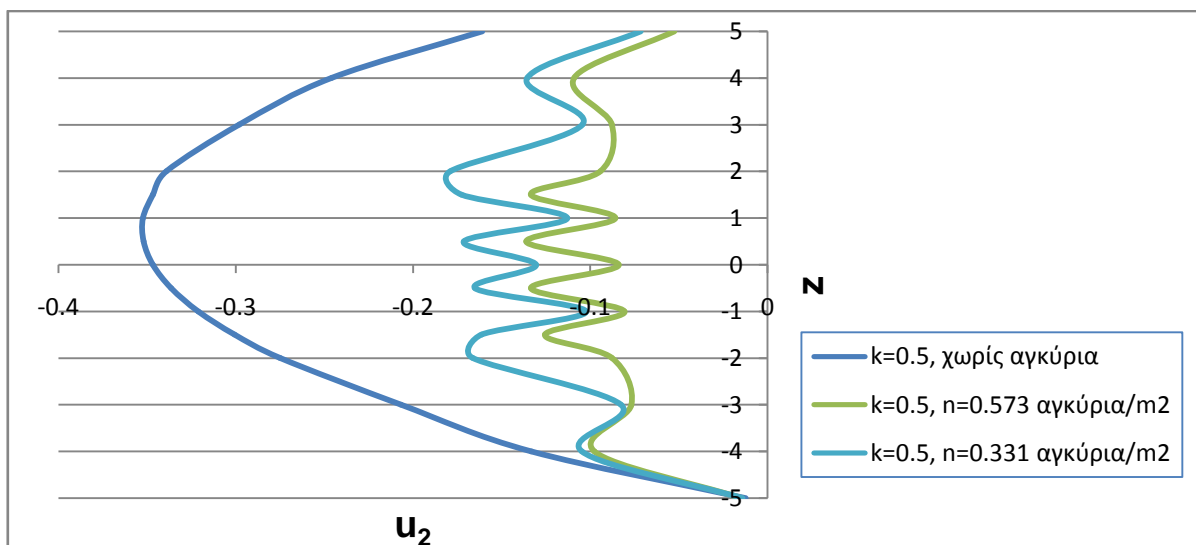
Διάταξη 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) – ολικές μετακινήσεις



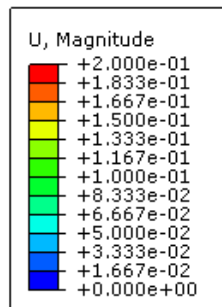
Συγκλίσεις



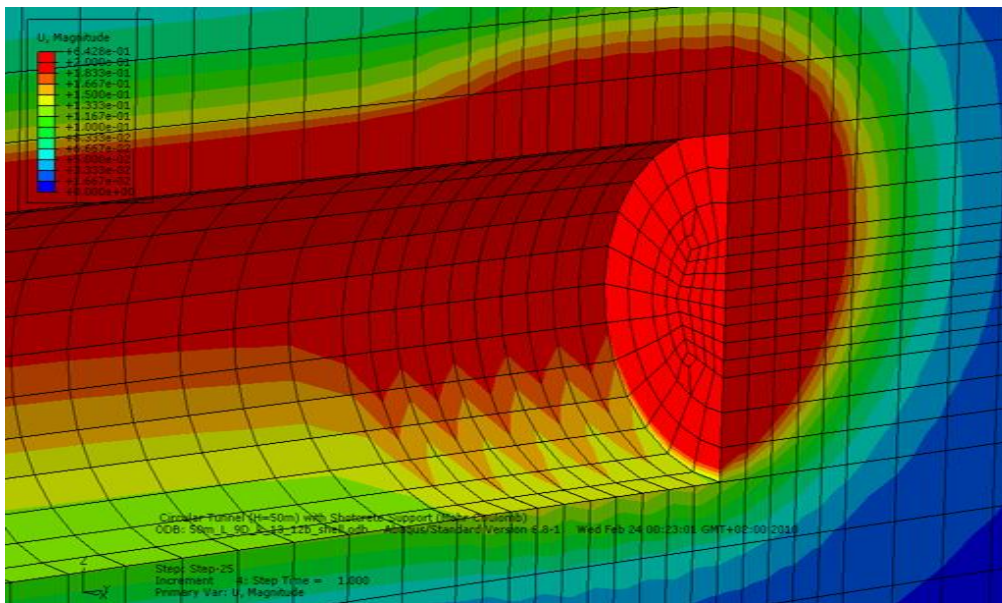
Εξωθήσεις



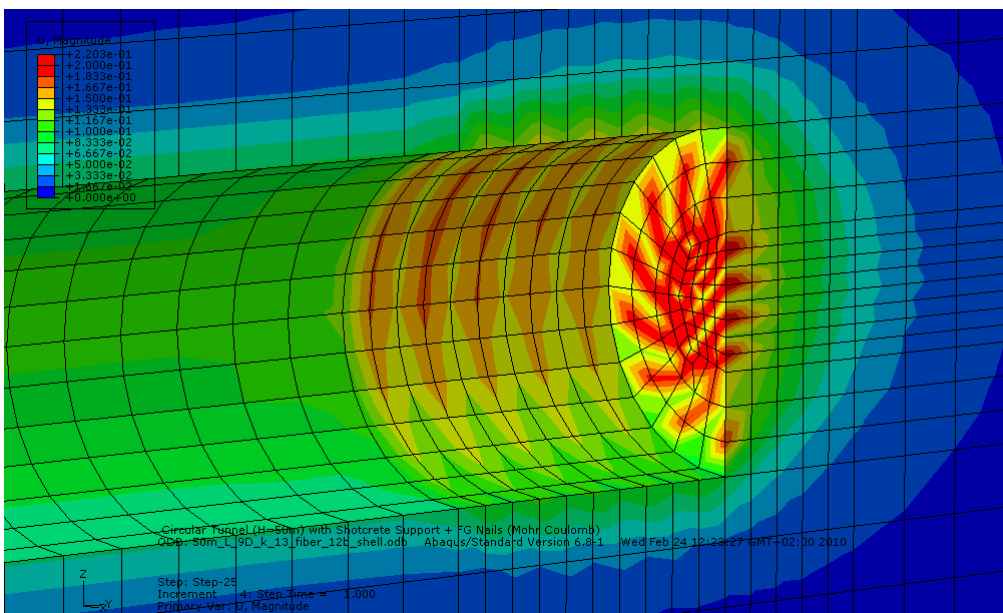
➤ $k=1.3$



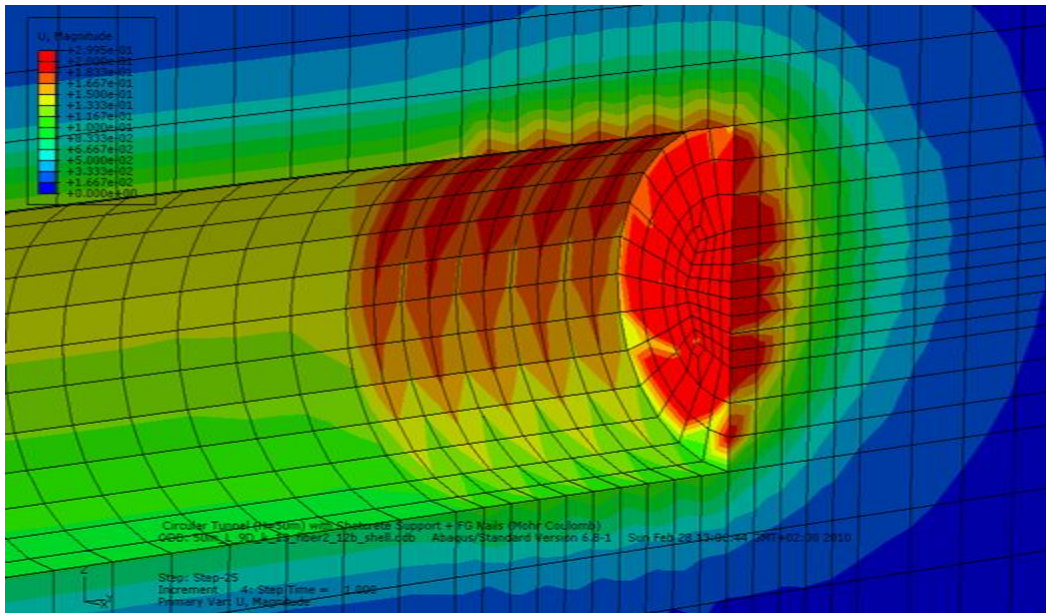
Ανυποστήρικτο μέτωπο – ολικές μετακινήσεις



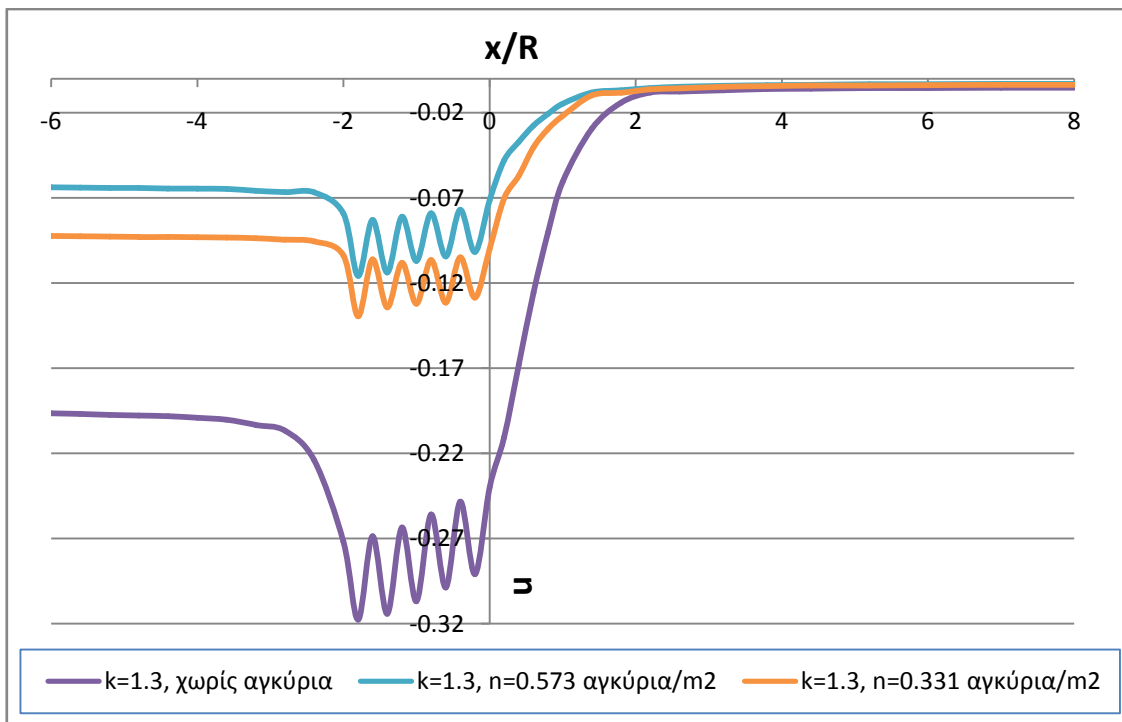
Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) – ολικές μετακινήσεις



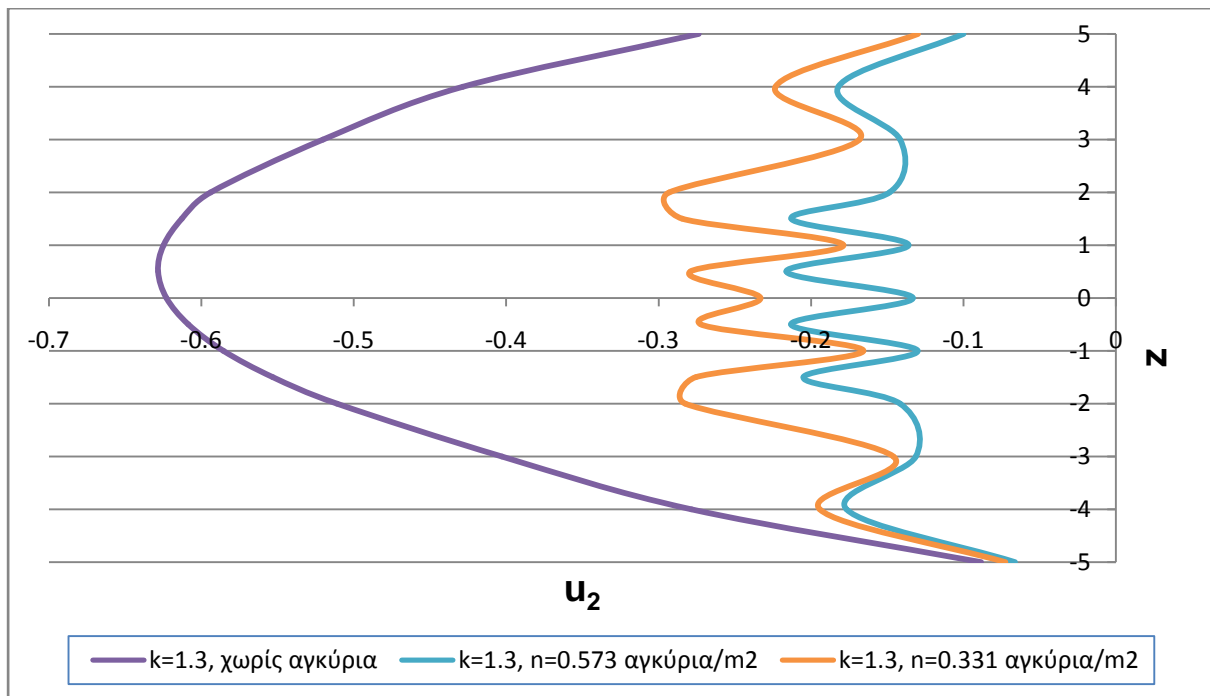
Διάταξη 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) – ολικές μετακινήσεις



Συγκλίσεις



Εξωθήσεις

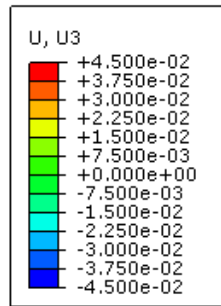


Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι:

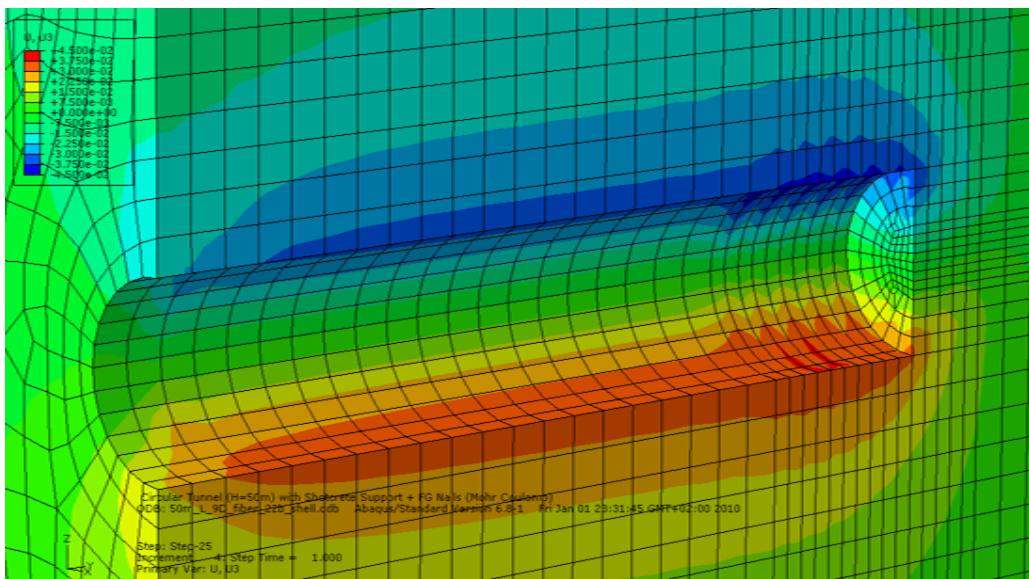
1. Η σύγκλιση της οροφής στο μέτωπο για $K_0=1.3$ είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για $k=0.5$ και εμφανίζεται και μεγαλύτερη μείωση της λόγω εφαρμογής αγκυρίων στο μέτωπο και για τις δύο διατάξεις
2. Ομοίως ισχύει και για τις εξωθήσεις όπου με την αύξηση του K_0 προκύπτει μεγαλύτερη μείωση της επιφάνειας εξώθησης.
3. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η πυκνότητα της διάταξης των αγκυρίων παίζει σημαντικό ρόλο και στη μείωση των συγκλίσεων (ποσοστό μείωσης 29-48%) και των εξωθήσεων (ποσοστό μείωσης 35-48%).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα **Σχήματα 6.14** και **6.15**, όπου παρουσιάζεται μέσω γραφικών απεικονίσεων ολικών και κατακόρυφων μετακινήσεων σε συνδυασμό με διαγράμματα συγκλίσεων οροφής η επίδραση του συντελεστή K_0 στις συγκλίσεις οροφής σε δύο εδαφικά προσομοιώματα, ένα με εφαρμογή πυκνής διάταξης αγκυρίων και το άλλο με αραιή διάταξη αγκυρίων στο μέτωπο εκσκαφής.

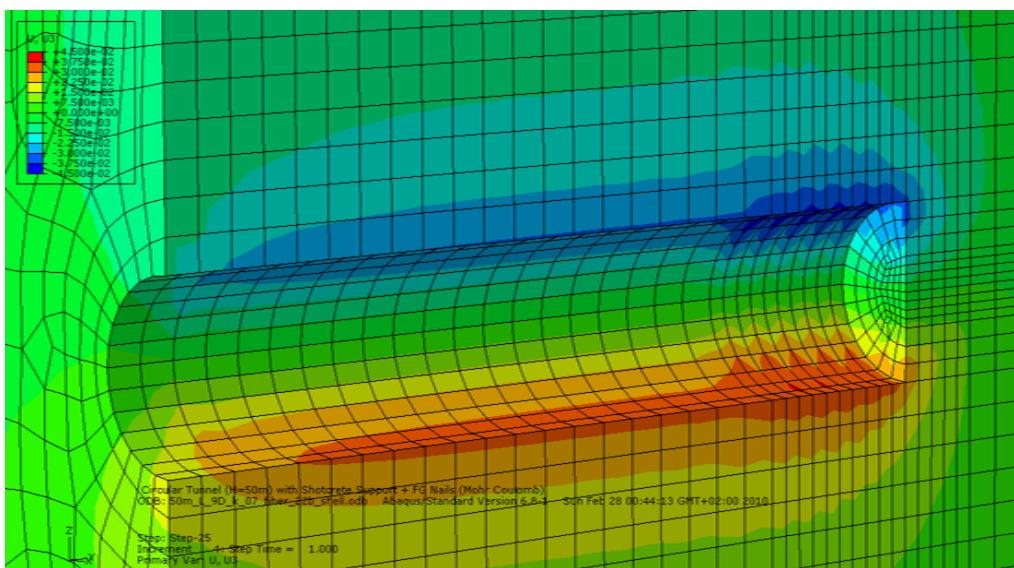
$\phi=30^{\circ}$, $c=20$ kPa, Διάταξη 1 (πυκνή) ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2)



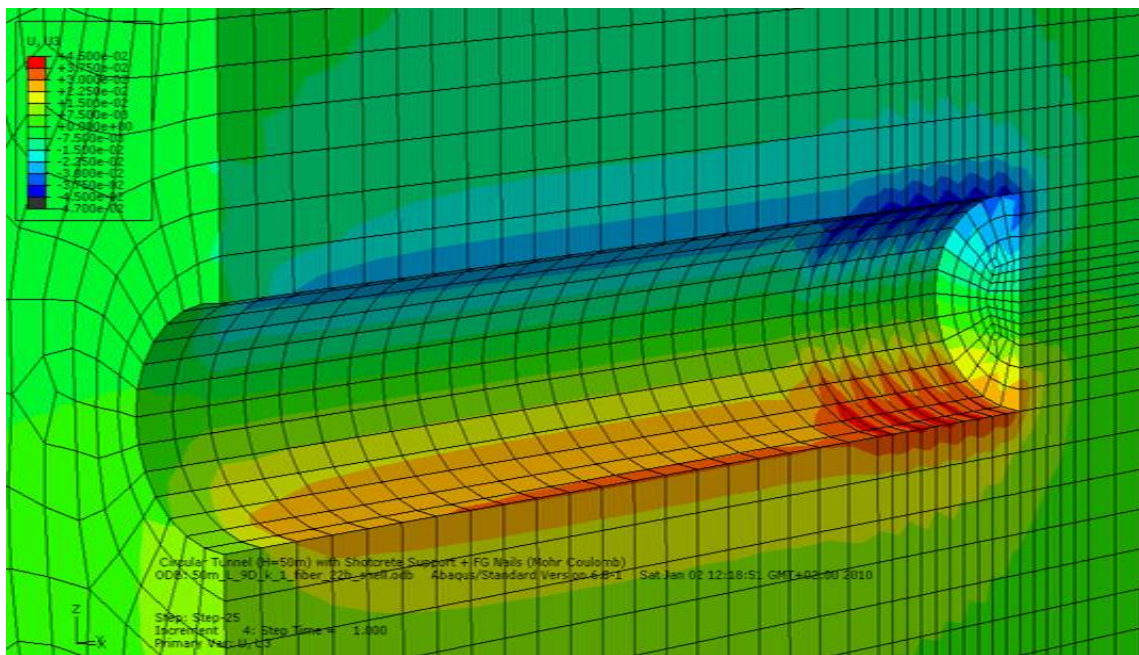
$k=0.5$ – κατακόρυφες μετακινήσεις



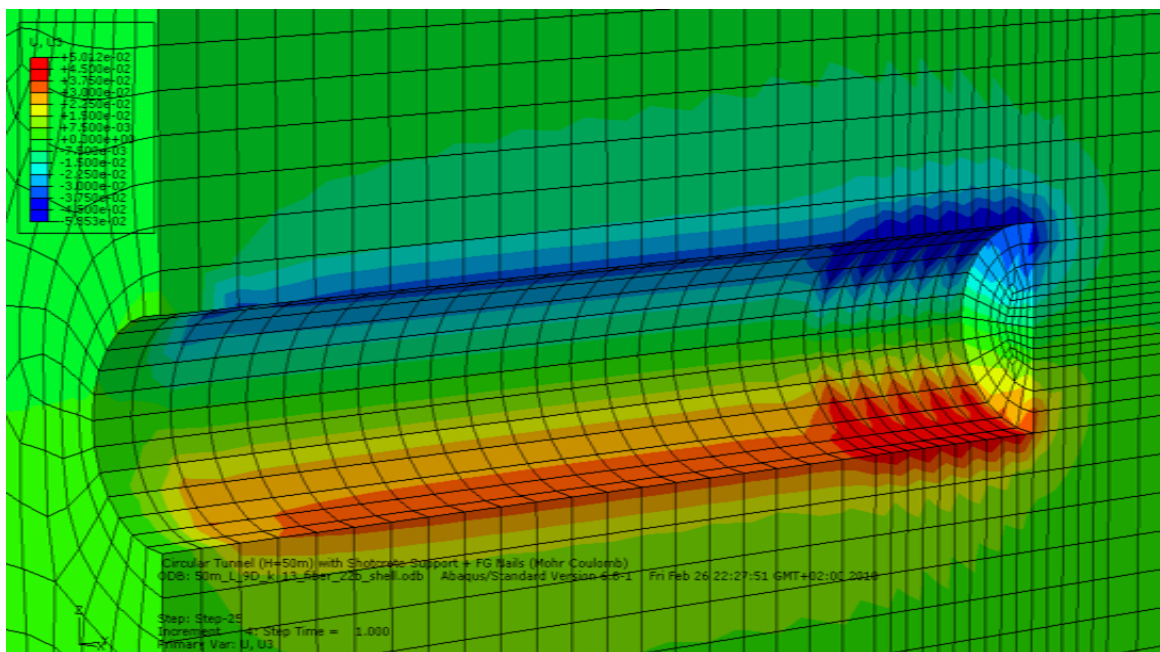
$k=0.7$ – κατακόρυφες μετακινήσεις

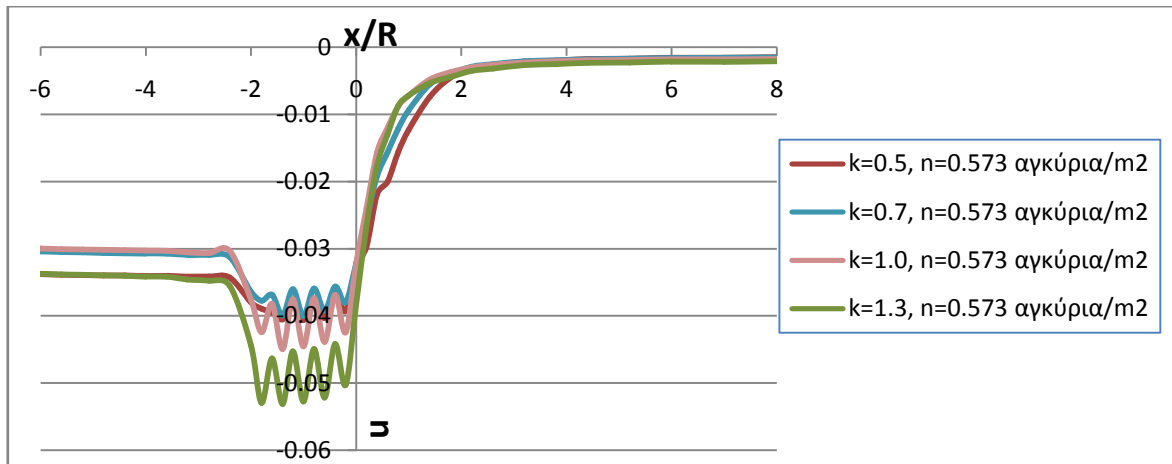


$k=1.0$ – κατακόρυφες μετακινήσεις



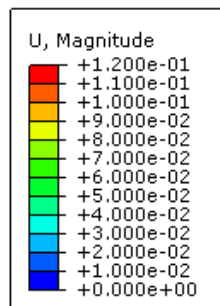
$k=1.3$ – κατακόρυφες μετακινήσεις



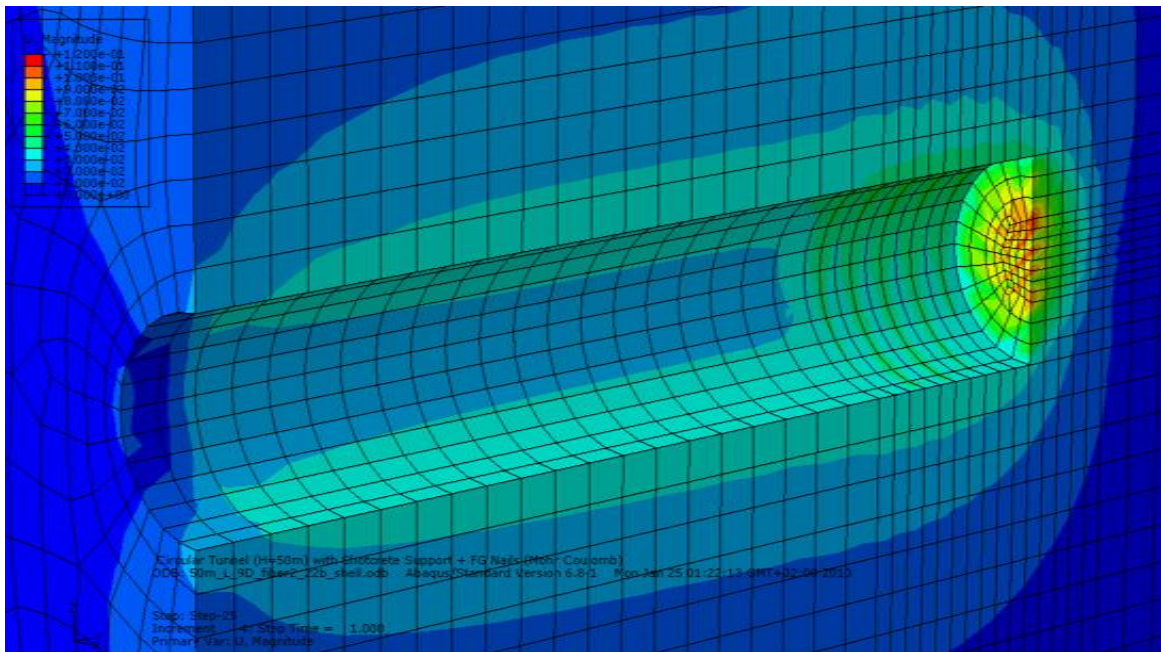


Σχήμα 6.14: Γραφική απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων συναρτήσει του συντελεστή οριζόντιων τάσεων k για την πυκνή Διάταξη αγκυρίων 1 ($n=0.573$ αγκύρια/m²).

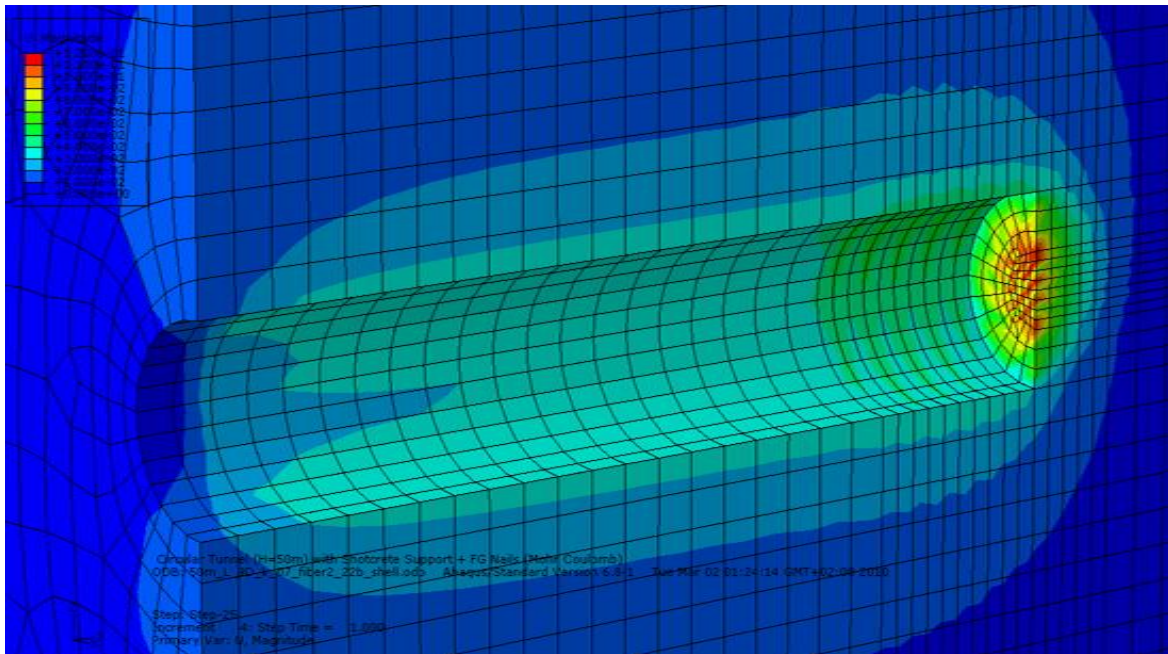
$\phi=30^\circ$, $c=20$ kPa, Διάταξη 2 (αραιή) ($n=0.331$ αγκύρια/m²)



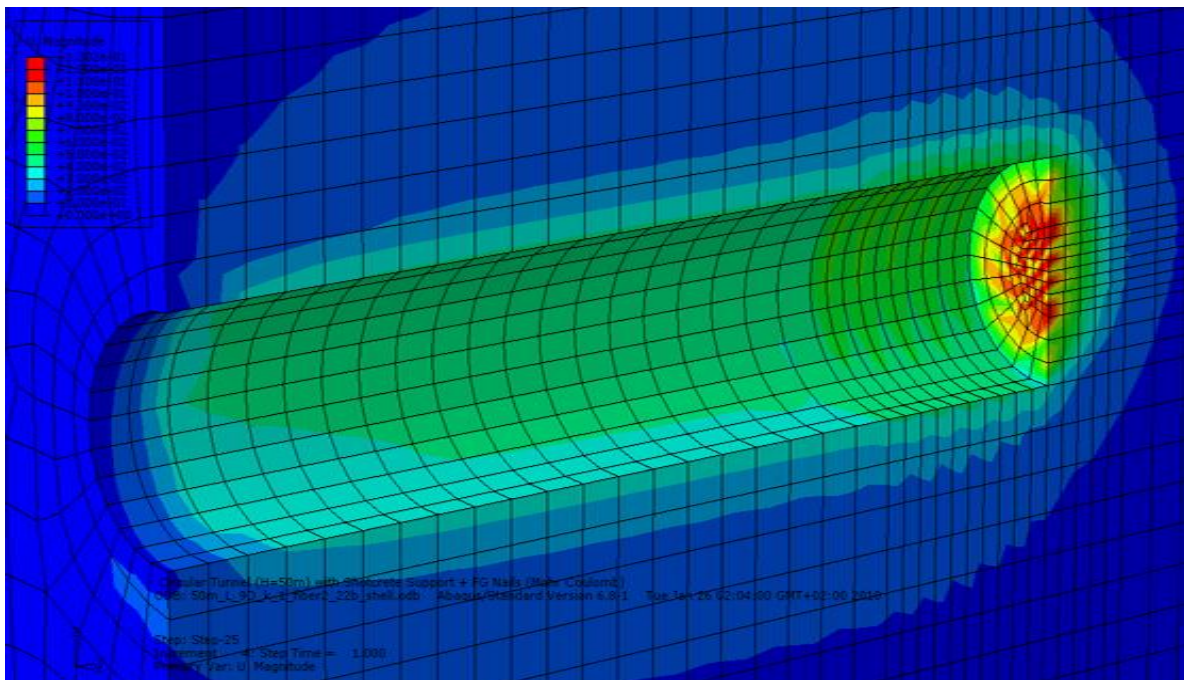
$k=0.5$ – ολικές μετακινήσεις



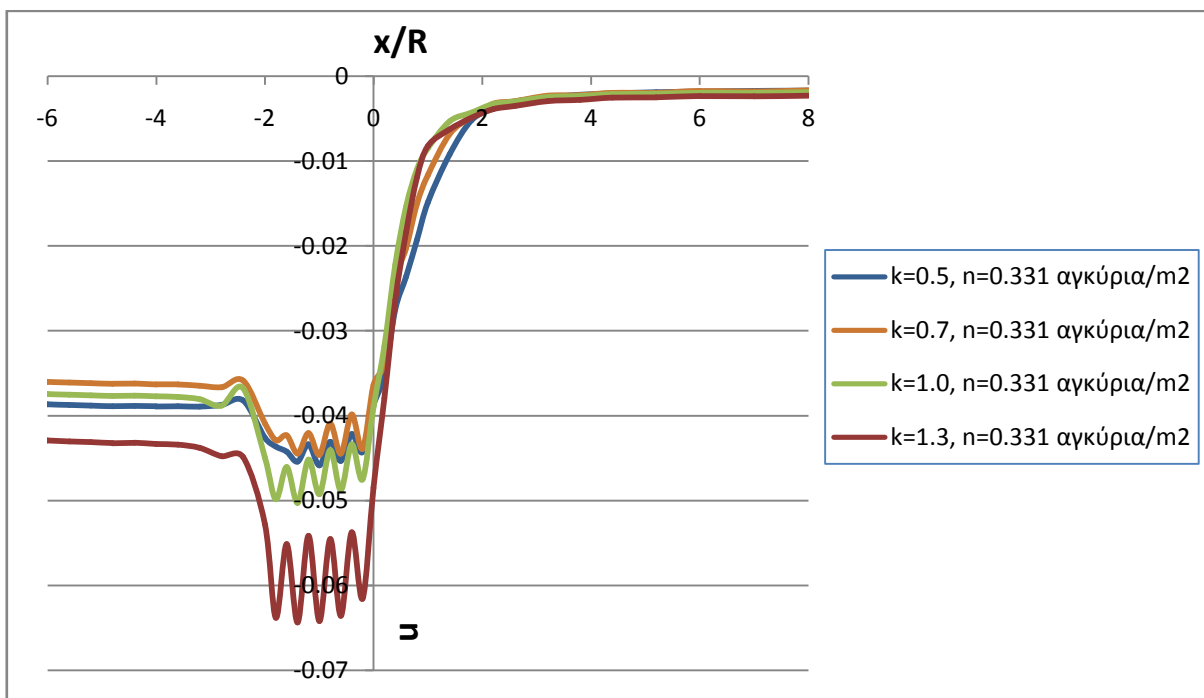
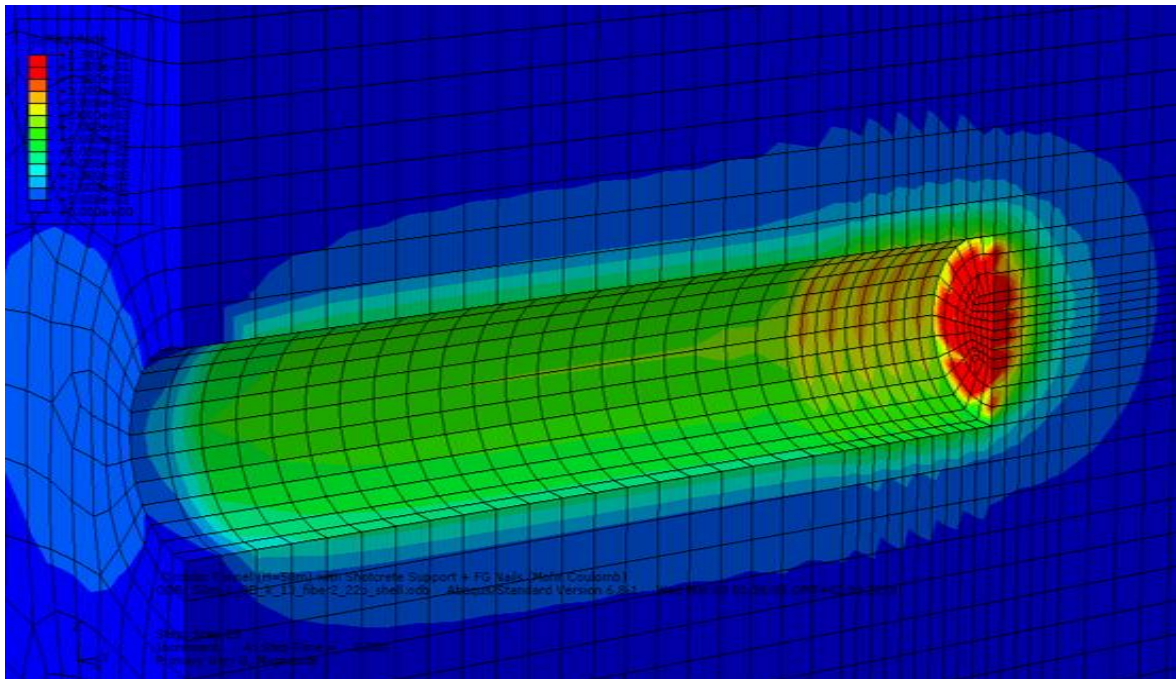
k=0.7 – ολικές μετακινήσεις



k=1.0 – ολικές μετακινήσεις



k=1.3 – ολικές μετακινήσεις

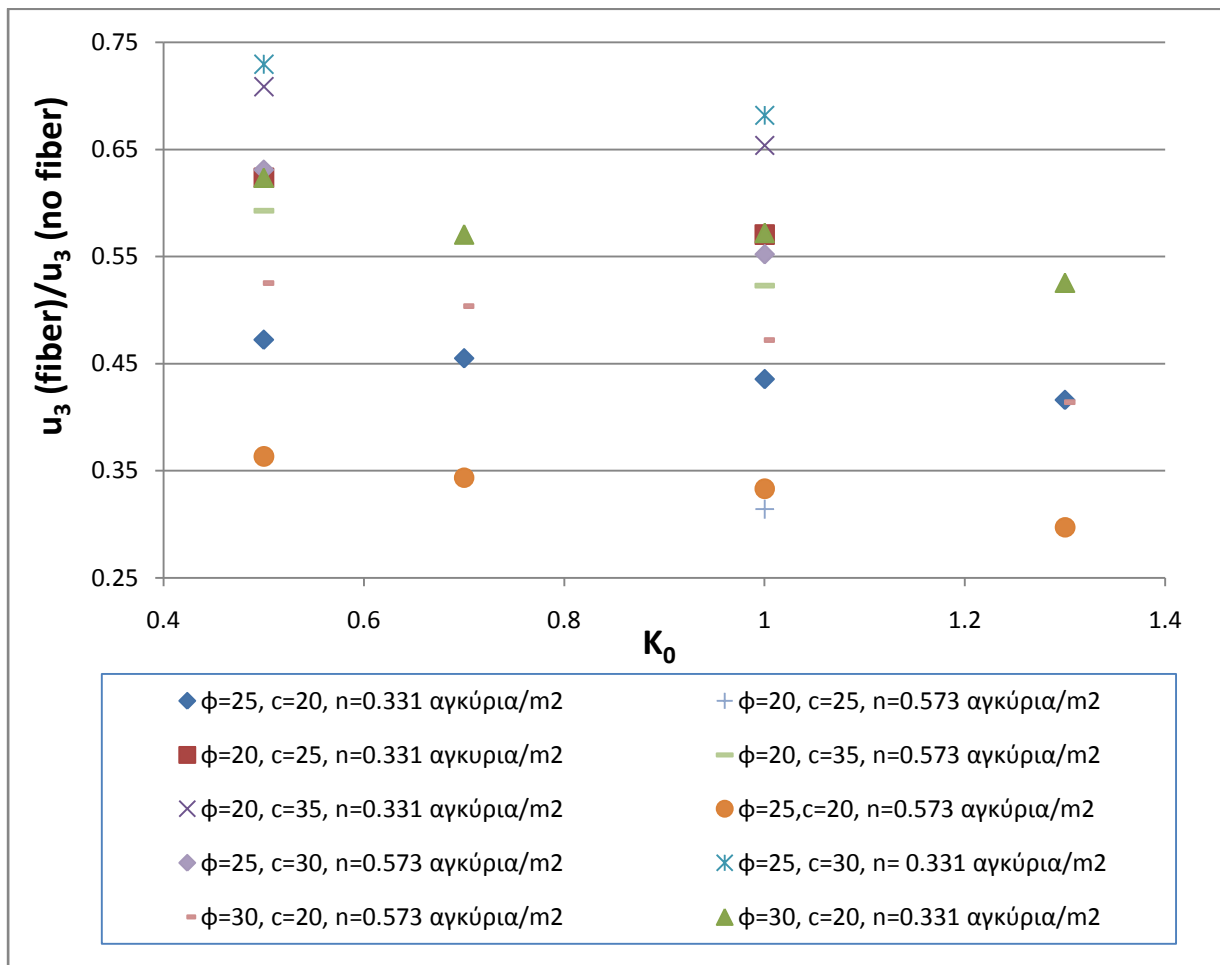


Σχήμα 6.15: Γραφική απεικόνιση ολικών μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων οροφής συναρτήσει του συντελεστή οριζόντιων τάσεων K_0 για την αραιή Διάταξη αγκυρίων 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2). .

Από τα ανωτέρω **Σχήμα 6.14** και **Σχήμα 6.15** παρατηρείται ότι για δεδομένο εδαφικό υλικό ,με μεταβολή μόνο του K_0 , προκύπτει μεταβολή στις συγκλίσεις οροφής μόνο για $K_0 > 1.0$. Η μεταβολή αυτή είναι σημαντικότερη για την πιο αραιή διάταξη 2 και λαμβάνεται υπόψιν στον σχεδιασμό.

Στην συνέχεια επιχειρείται να γίνει έλεγχος της επίδρασης του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων στον κρίσιμο για την εξέλιξη των συγκλίσεων λόγο συγκλίσεων $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$.

Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων το **Σχήμα 6.16** όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα του λόγου συγκλίσεων $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$ όλων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν συναρτήσει του K_0 για διάφορες τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων (c, ϕ) που προσομοιώθηκαν και της πυκνότητας των αγκυριών στο μέτωπο.



Σχήμα 6.16: Διάγραμμα αποτελεσμάτων λόγου συγκλίσεων στο μέτωπο συναρτήσει του K_0

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι:

- Με την αύξηση του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 προκύπτουν μικρότερες τιμές του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no\ fiber)}$, άρα μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο που οδηγεί σε πιο ευσταθή κατάσταση για κάθε εδαφικό σχηματισμό που προσομοιώθηκε (το οποίο είχε παρατηρηθεί και από την μελέτη των αποτελεσμάτων του Πίνακα 6.8.
- Αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του εδαφικού υλικού σ_{cs} προκαλεί αύξηση του κρίσιμου λόγου συγκλίσεων στο μέτωπο, άρα μικρότερη συνεισφορά των αγκυρίων μετώπου στην ευστάθειά του. .

6.5.4.7. Επίδραση της αντοχής και του τύπου του εδάφους στην αποτελεσματικότητα των αγκυρίων

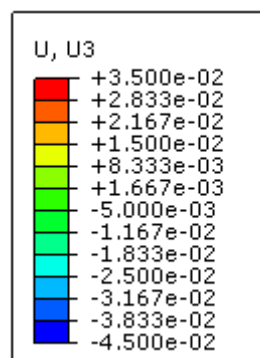
Ο τύπος και η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του εδάφους διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στις συγκλίσεις στην περιοχή του μετώπου όσο και στη επιφάνεια εξώθησης. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{cs} = 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

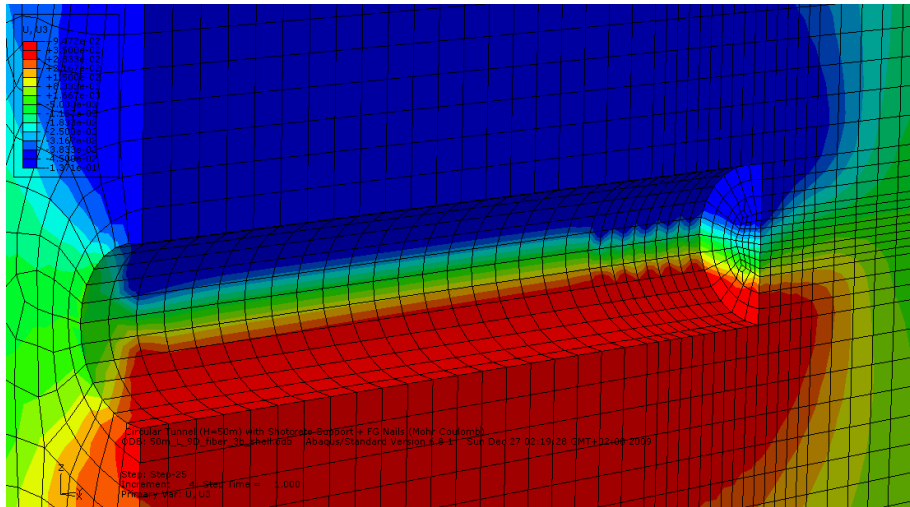
Εξαρτάται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής, από τη γωνία τριβής φ και από τη συνοχή c του εδάφους. Ελέγχεται κάθε παράμετρος χωριστά για την επίδρασή της στις συγκλίσεις και στις εξωθήσεις.

Ξεκινάμε να ελέγξουμε αρχικά την επιρροή της γωνίας φ .

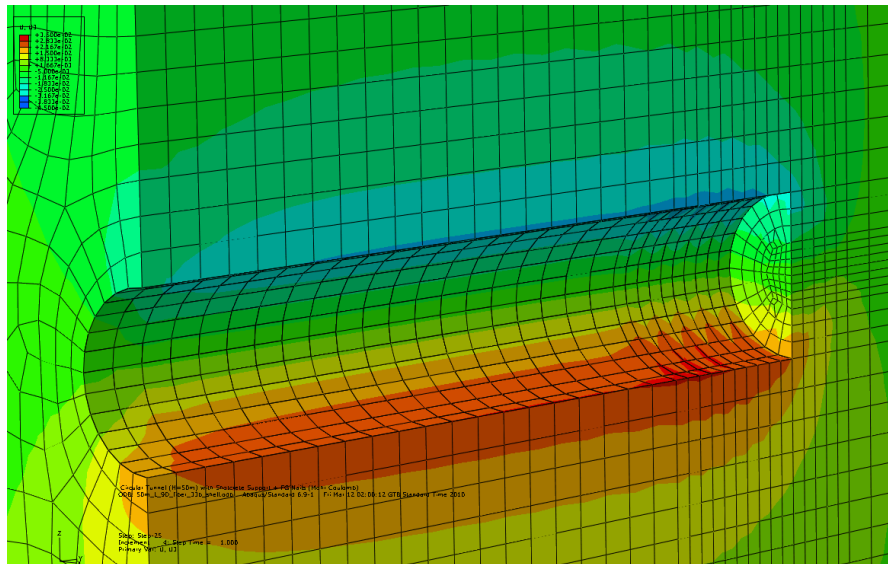
c=25kPa, k=0.5, Διάταξη 1 (n=0.573 αγκύρια/m²)



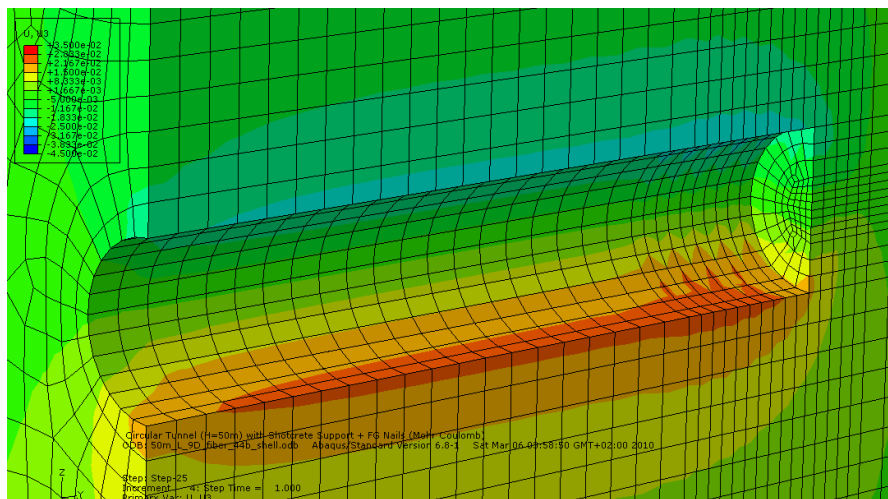
$\phi=20^\circ$ - κατακόρυφες μετακινήσεις

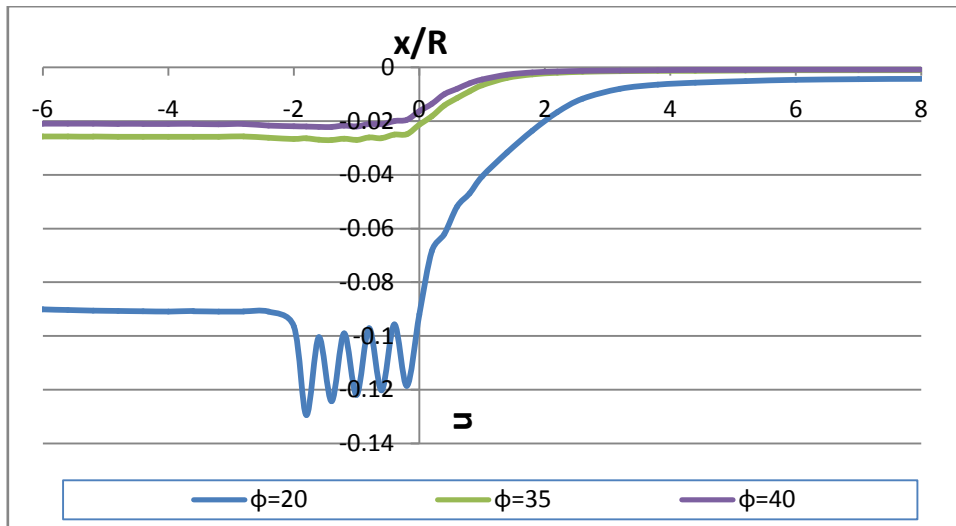


$\phi=35^\circ$ - κατακόρυφες μετακινήσεις



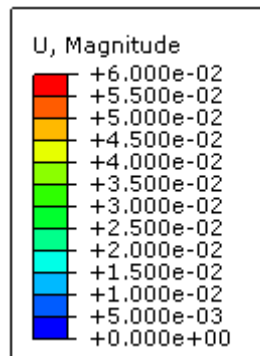
$\phi=40^\circ$ - κατακόρυφες μετακινήσεις



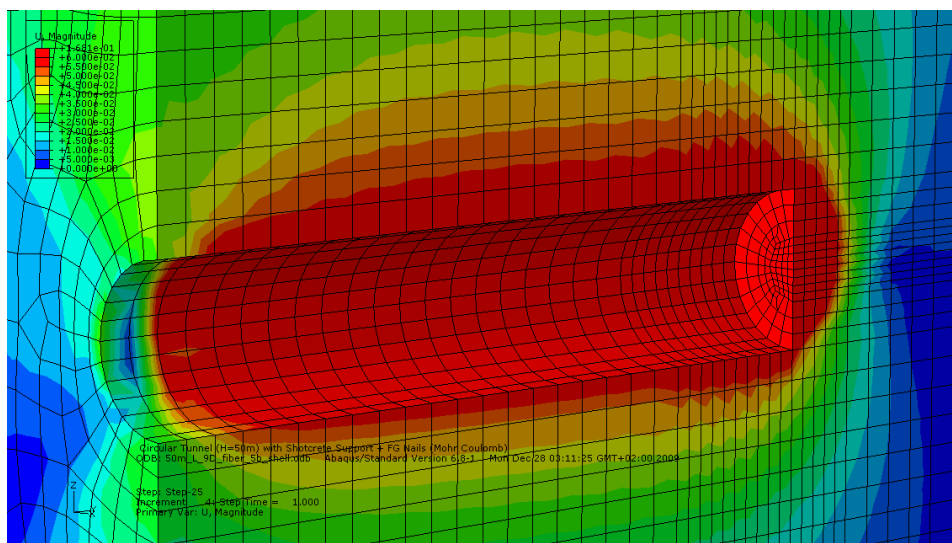


Σχήμα 6.17 : Γραφική απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ του εδάφους

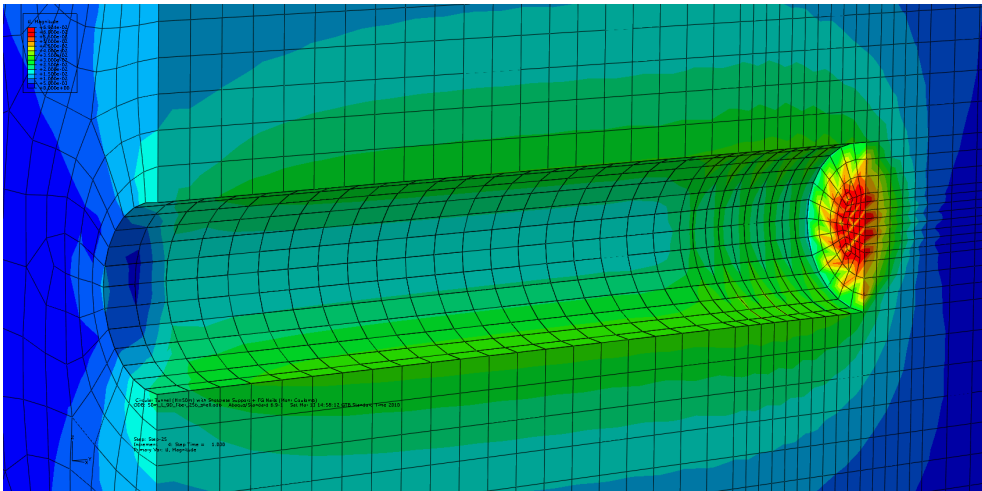
$c=35\text{kPa}$, $k=0.5$, Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2)



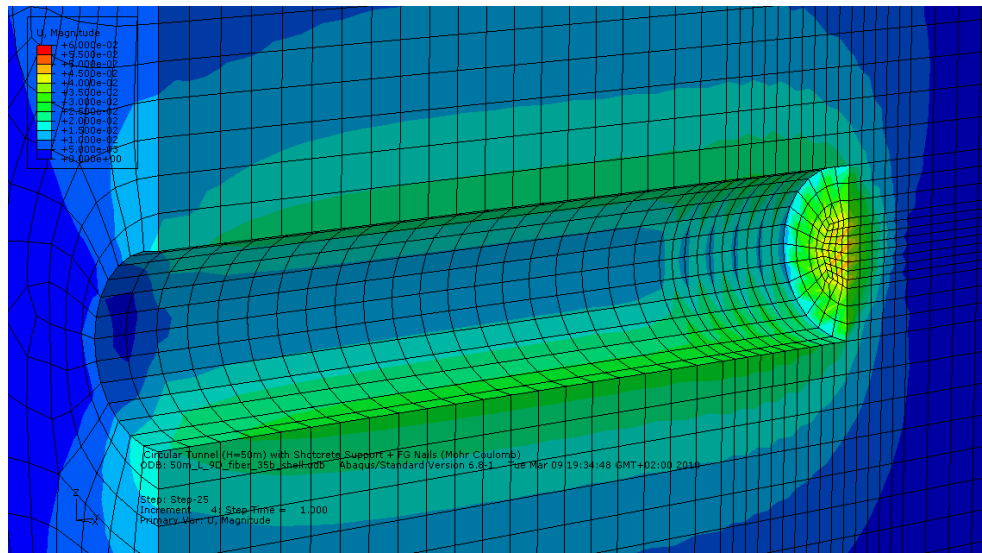
$\phi=20^\circ$ - ολικές μετακινήσεις



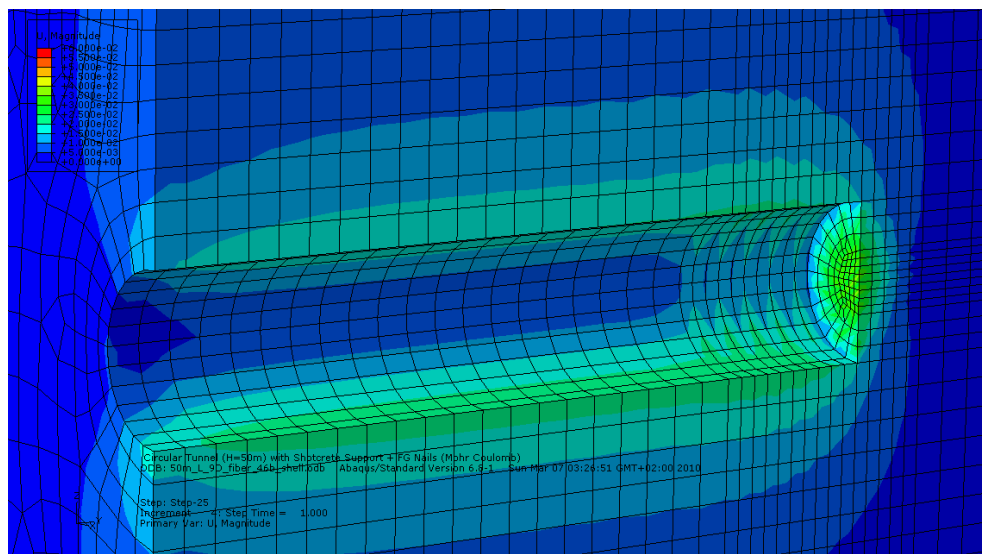
$\varphi=30^\circ$ - ολικές μετακινήσεις

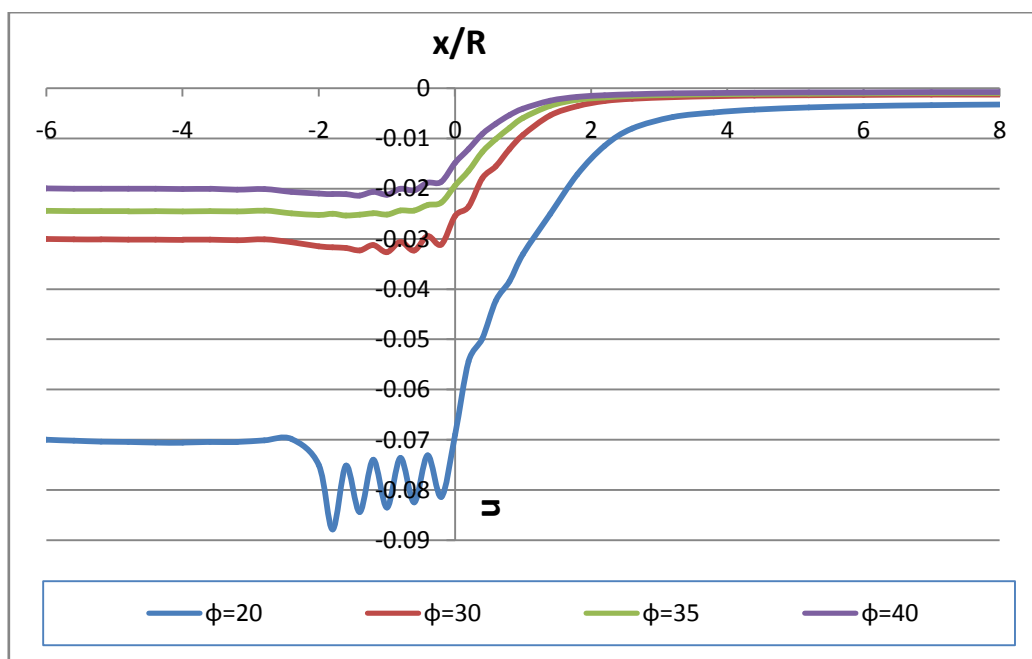


$\varphi=35^\circ$ - ολικές μετακινήσεις



$\varphi=40^\circ$ - ολικές μετακινήσεις





Σχήμα 6.18 : Γραφική απεικόνιση ολικών μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων οροφής συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ του εδάφους.

Τα δύο παραπάνω διαγράμματα συγκλίσεων αναφέρονται σε εδαφικές καταστάσεις σταθερής συνοχής, σταθερού K_0 και εφαρμόζοντας μόνο τη πυκνή διάταξη αγκυρίων 1

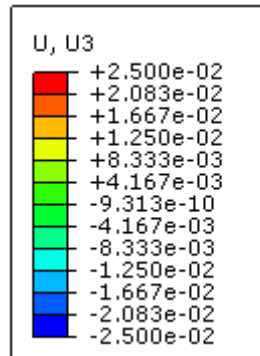
Φαίνεται ότι για παρόμοιες τιμές συνοχής (και μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής), αύξηση της γωνίας τριβής συνεπάγεται μείωση της σύγκλισης οροφής του μετώπου με επακόλουθη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη βασική λειτουργία των αγκυρίων μετώπου που είναι η εφαρμογή θλιπτικών τάσεων στον πυρήνα του μετώπου. Όσο μεγαλύτερη επομένως είναι η γωνία τριβής ϕ του εδάφους (όσο λιγότερο αργιλικό είναι εδαφικό υλικό), τόσο μεγαλύτερη είναι και η αύξηση της διατμητικής αντοχής λόγω της αύξησης των ορθών τάσεων. Εξάλλου και κατασκευαστικά, είναι αναμενόμενο τα αγκύρια μετώπου να είναι πιο αποτελεσματικά σε κοκκώδη εδάφη, επειδή στα εδάφη αυτά είναι πιο αποτελεσματική η δημιουργία συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και εδάφους.

Μελετώντας περαιτέρω τα διαγράμματα προκύπτει ότι μεταβάλλοντας τη γωνία τριβής από 30° μέχρι 40° παρατηρούνται μικρές τιμές συγκλίσεων και δεν αναμένεται σημαντική μεταβολή τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αναλύσεις αυτές αναφέρονται σε πολύ καλές ιδιότητες εδαφικών υλικών. Άρα, έχουν δυνατότητα προσωρινής υποστήριξης και ακόμα κι αν τοποθετούνται αγκύρια στο μέτωπο, δεν υπάρχουν οι συνθήκες για να δράσουν τα αγκύρια και να συμβάλλουν δραστικά στην μείωση των (ήδη μικρών) συγκλίσεων.

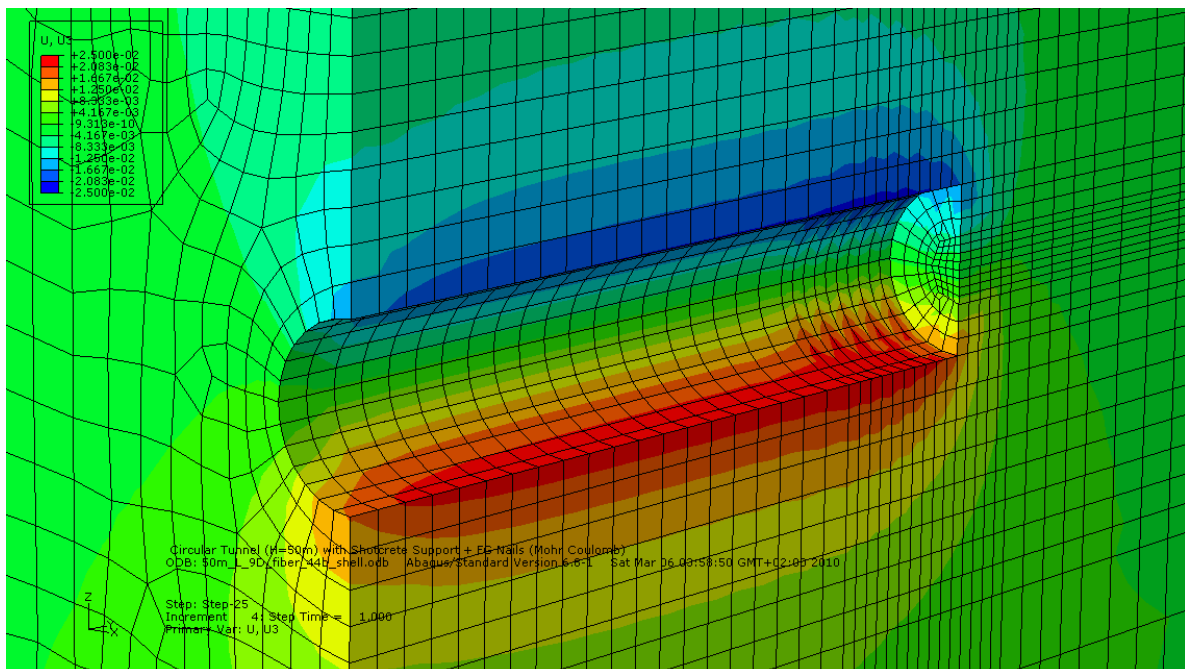
Αντιθέτως όταν προσομοιώνουμε εδάφη με πολύ χαμηλότερη γωνία τριβής ϕ παρατηρούνται πολύ μεγαλύτερες συγκλίσεις στην μείωση των οποίων συντελεί η τοποθέτηση αγκυρίων στο μέτωπο.

Στη συνέχεια μελετάμε την επιρροή της συνοχής c του εδάφους για δεδομένη γωνία ϕ .

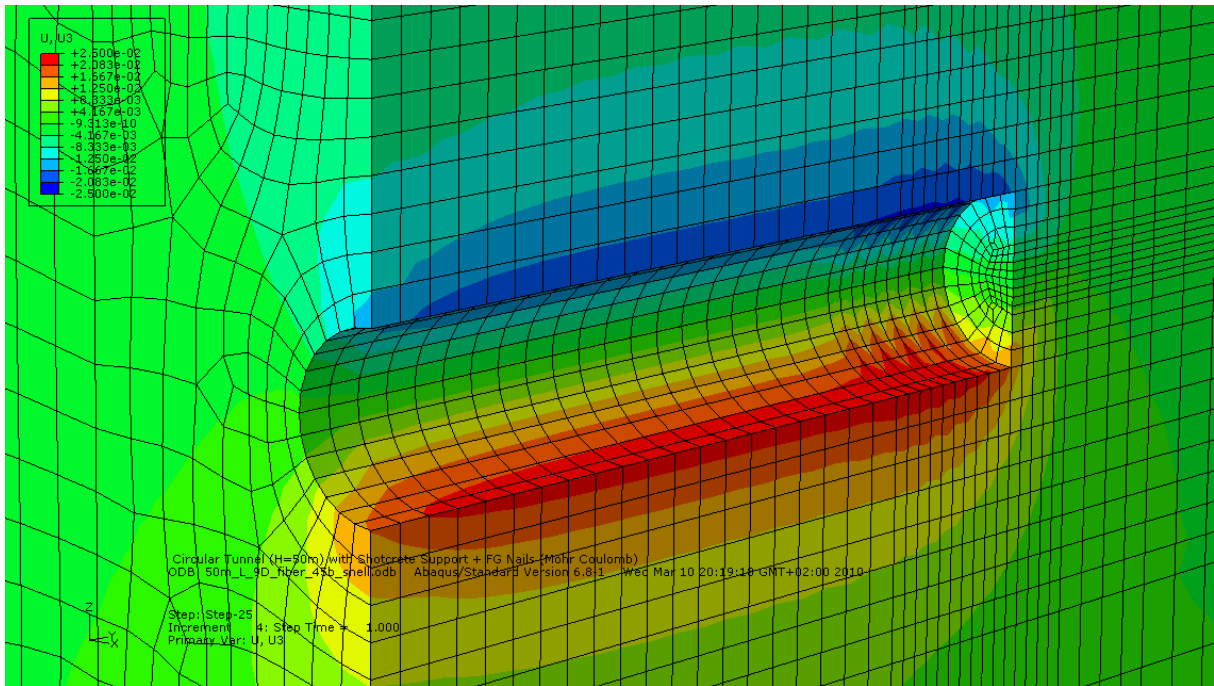
$\phi=40^\circ$, $k=0.5$, Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2)



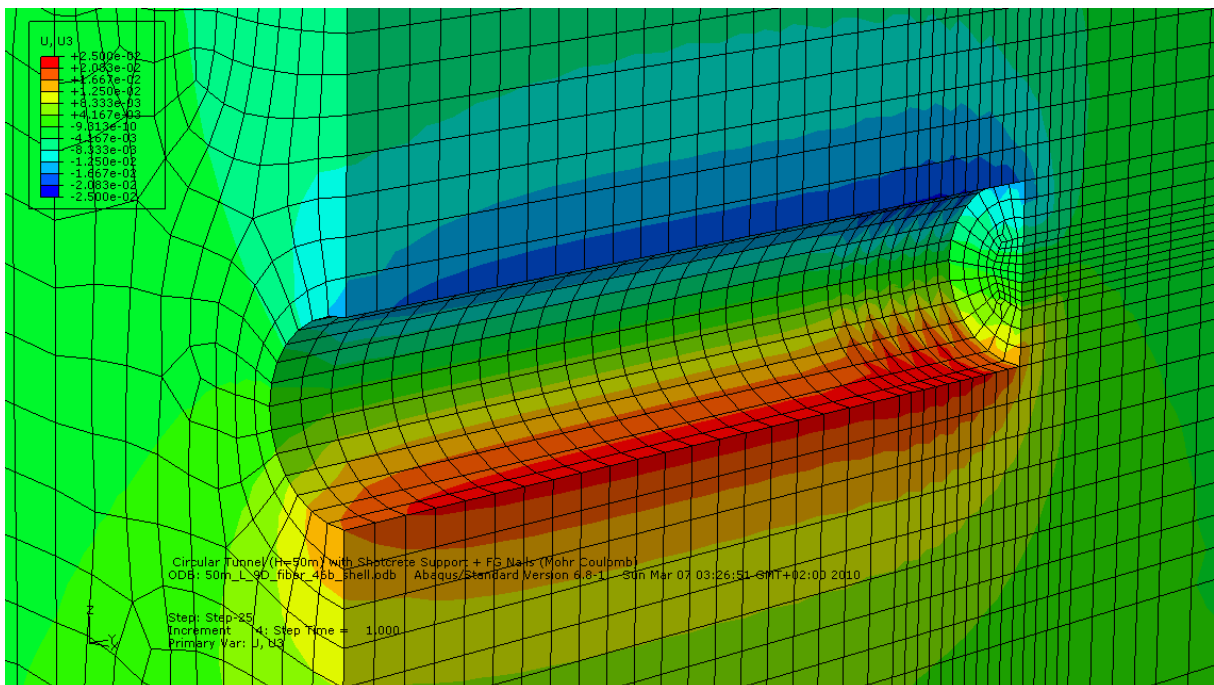
$c=25$ kPa – κατακόρυφες μετακινήσεις

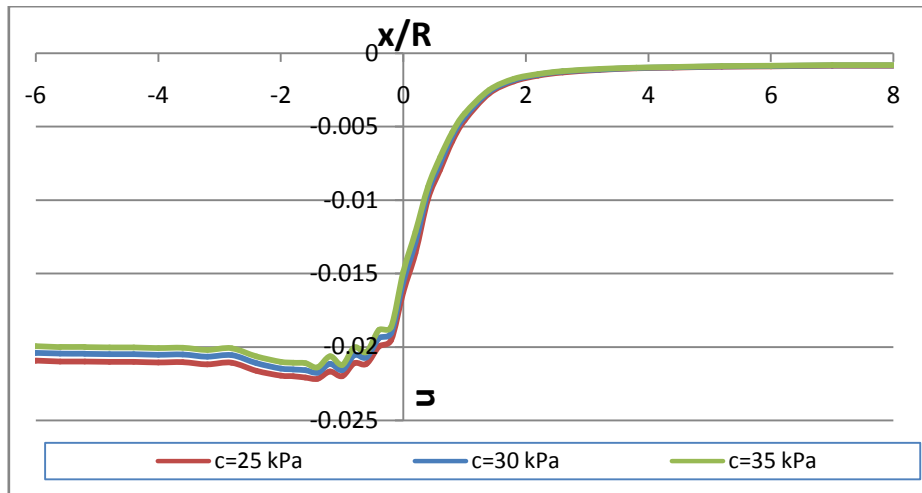


c=30 kPa – κατακόρυφες μετακινήσεις



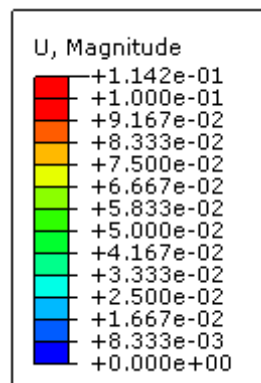
c=35 kPa – κατακόρυφες μετακινήσεις



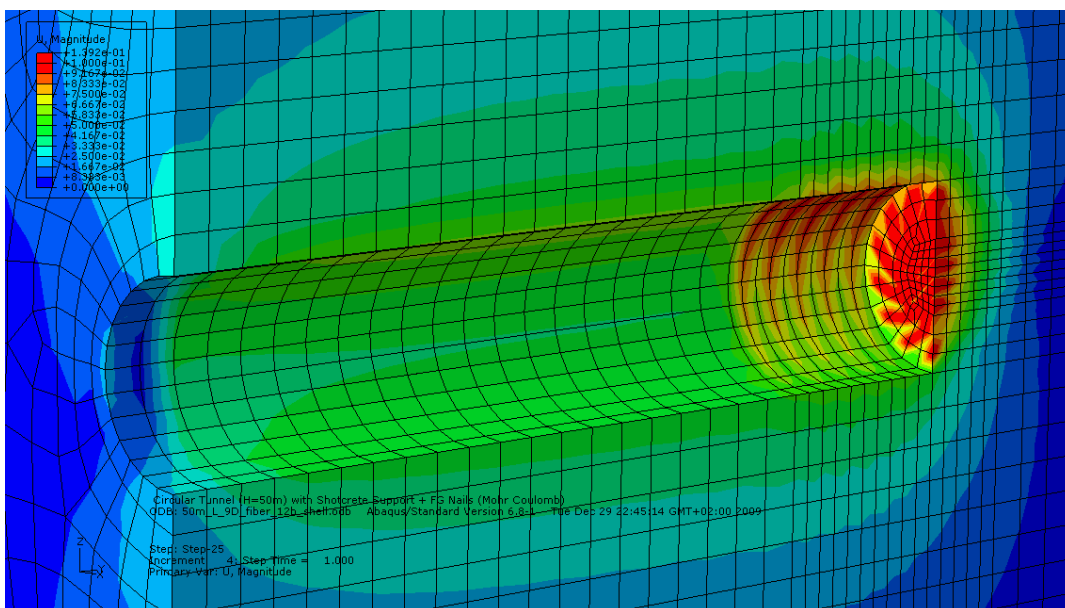


Σχήμα 6.19: Γραφική απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων συναρτήσει της συνοχής c του εδάφους.

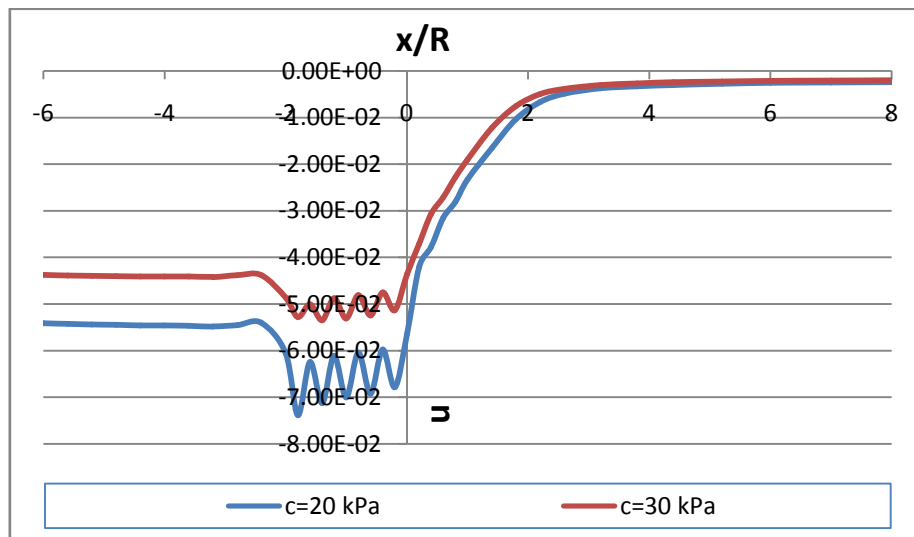
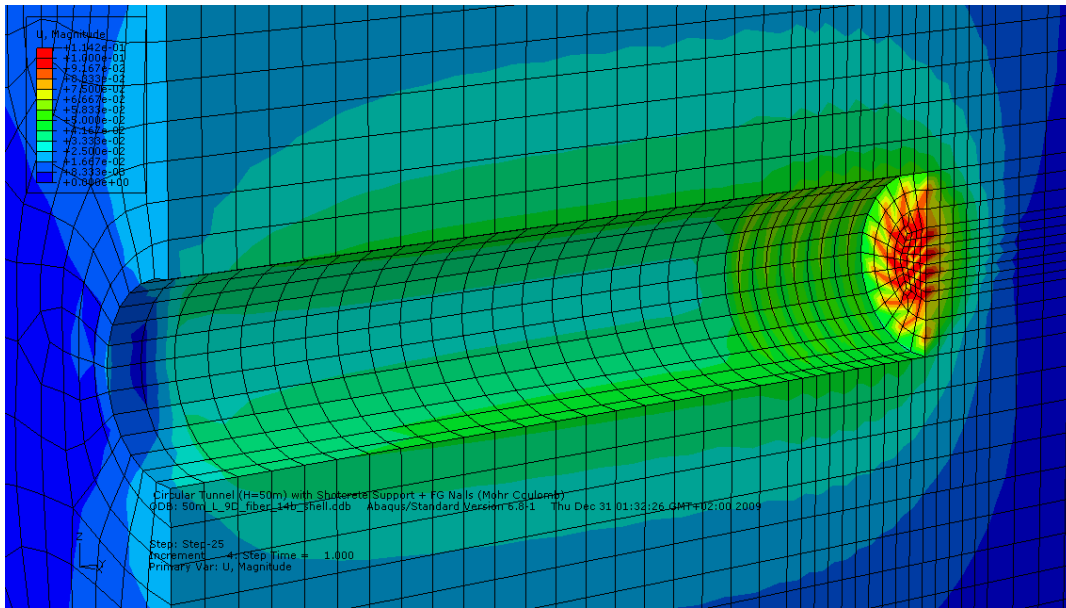
$\phi=25^\circ$, $k=0.5$, Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2)



$c=20$ kPa – ολικές μετακινήσεις



c=30 kPa – ολικές μετακινήσεις

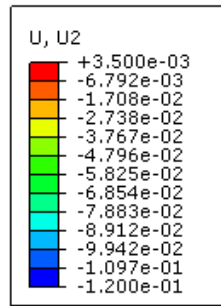


Σχήμα 6.20: Γραφική απεικόνιση ολικών μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων οροφής συναρτήσει της συνοχής c του εδάφους

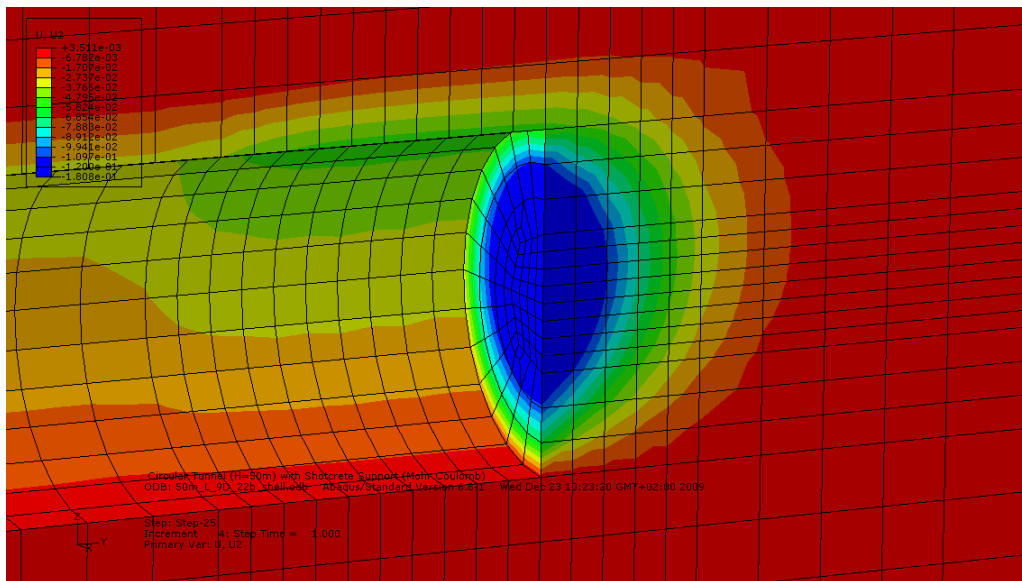
Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι για μικρές τιμές δεδομένης γωνίας τριβής ϕ (20° - 30°) η αύξηση της συνοχής συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των συγκλίσεων στην οροφή της σήραγγας. Όμως για μεγάλες τιμές δεδομένης γωνίας τριβής ϕ (40°) η επιρροή της αύξησης της συνοχής c στη μείωση των συγκλίσεων στην οροφή της σήραγγας και ιδιαίτερα στο μέτωπο είναι αμελητέα.

Αντίστοιχη συμπεριφορά ισχύει και για τις εξωθήσεις. Ακολουθως παρατίθενται δύο διαγράμματα για δεδομένη γωνία τριβής ϕ το καθένα και για $K_0=0.5$.

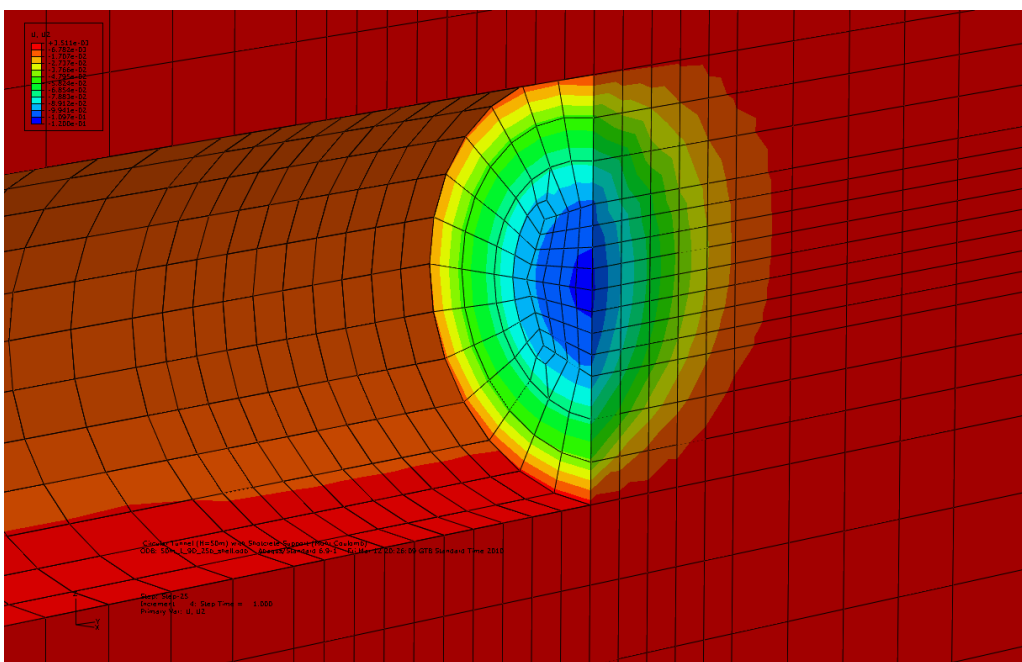
$\phi=30^\circ$, $K_0=0.5$ (ανυποστήρικτο μέτωπο)



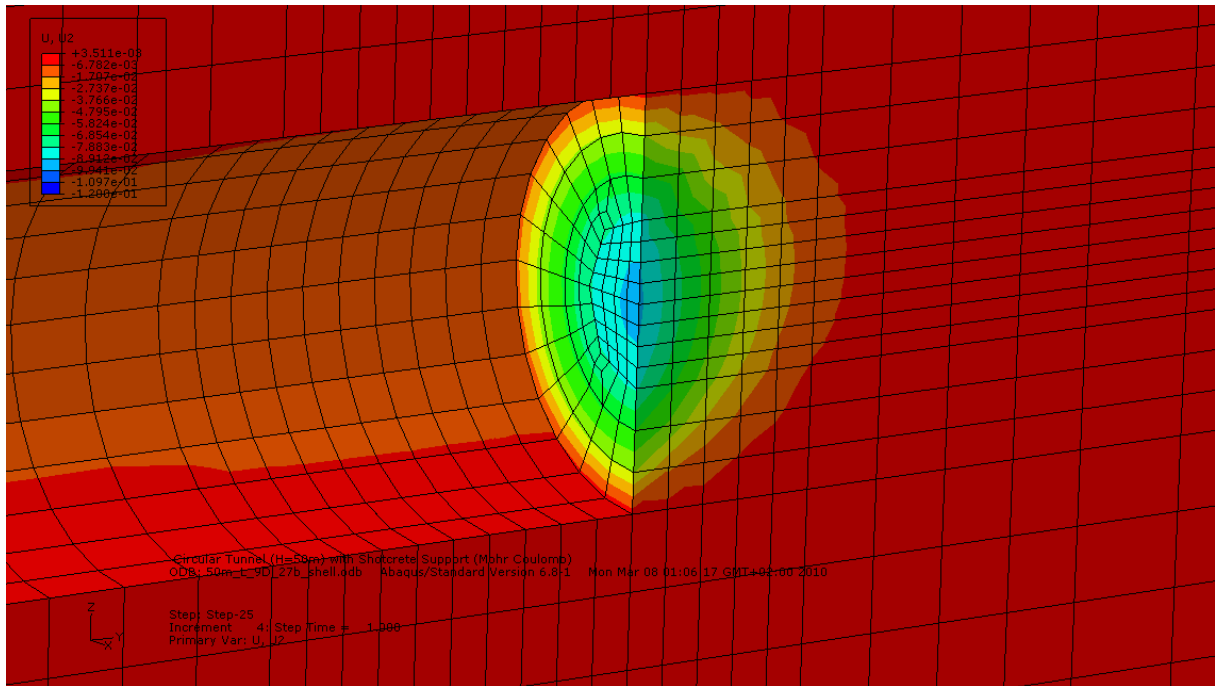
c=20 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων



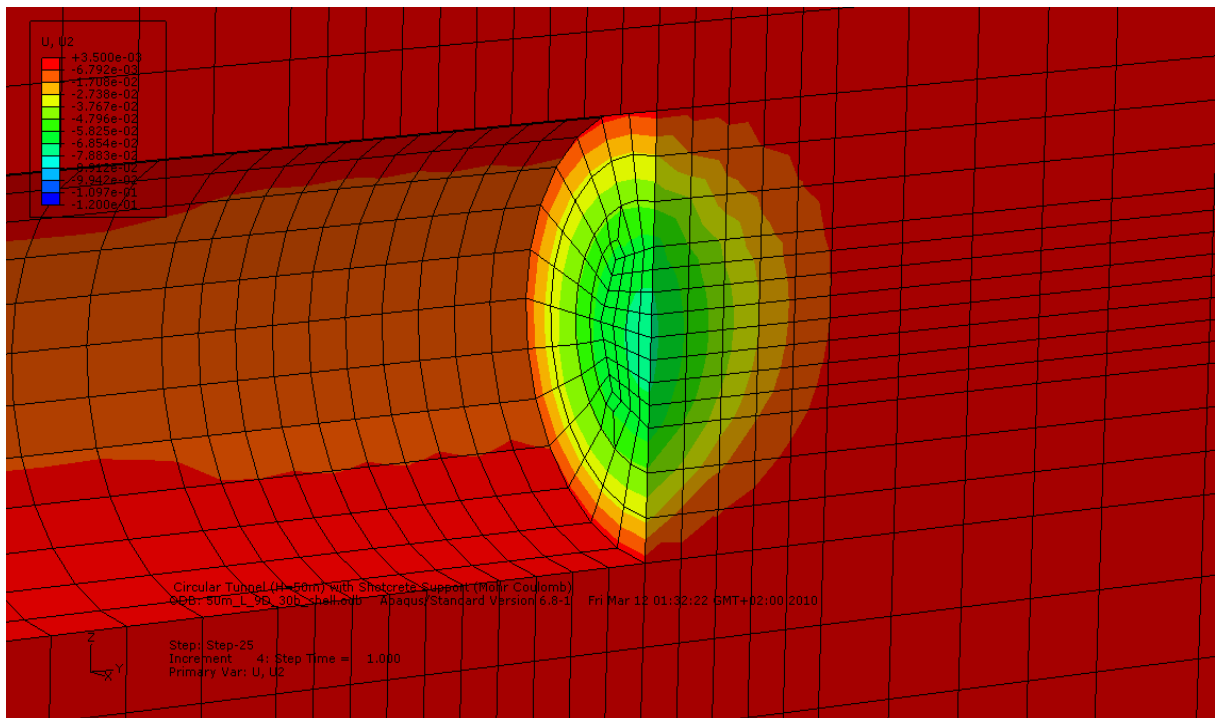
c=35 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων

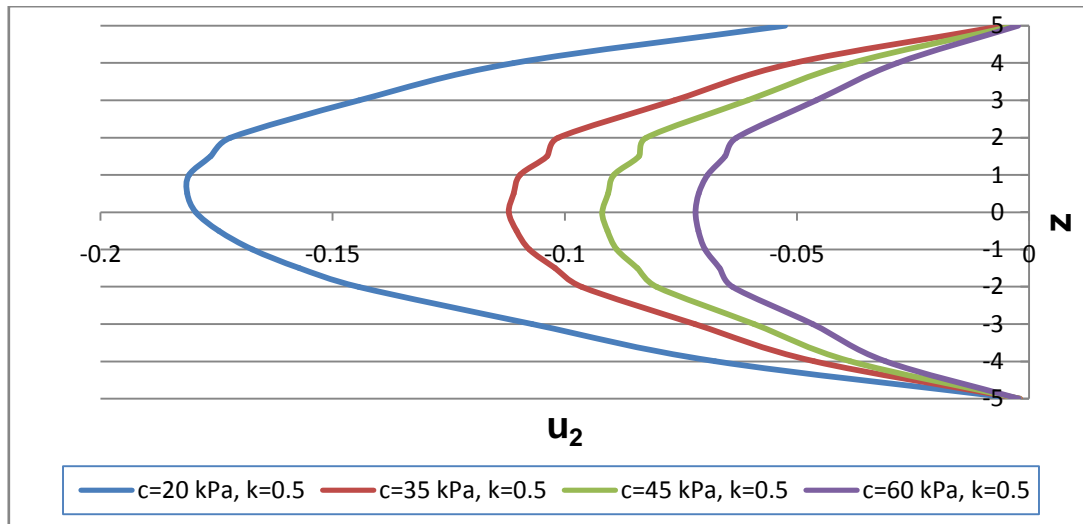


c=45 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων



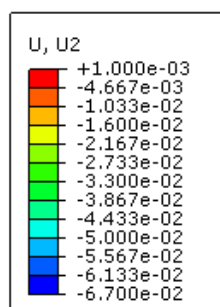
c=60 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων



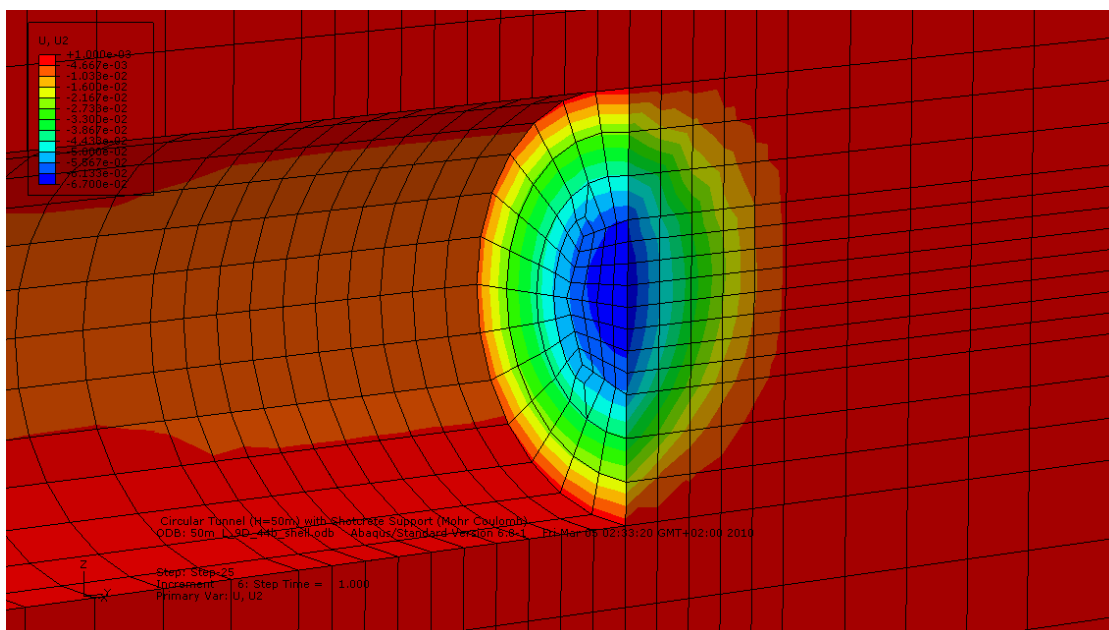


Σχήμα 6.21: Γραφική απεικόνιση οριζόντιων μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής και αντίστοιχα διαγράμματα εξωθήσεων συναρτήσει της συνοχής c για δεδομένη $\phi=30^\circ$

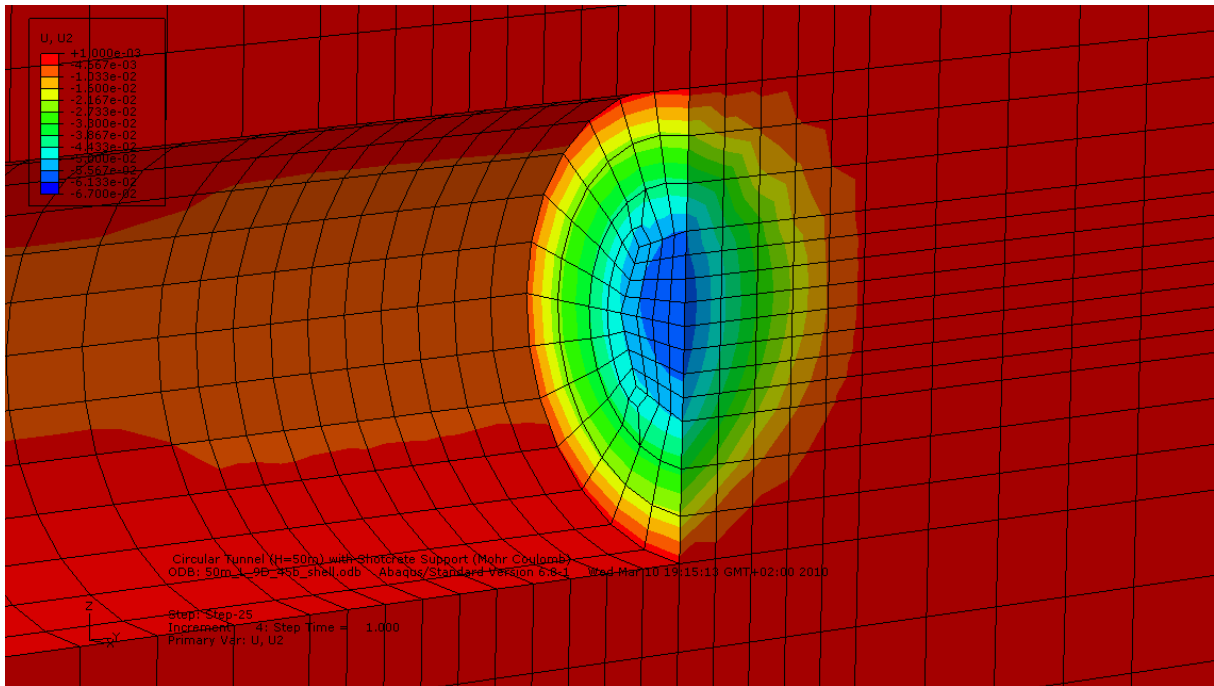
$\phi=40^\circ, K_0=0.5$ (ανυποστήρικτο μέτωπο)



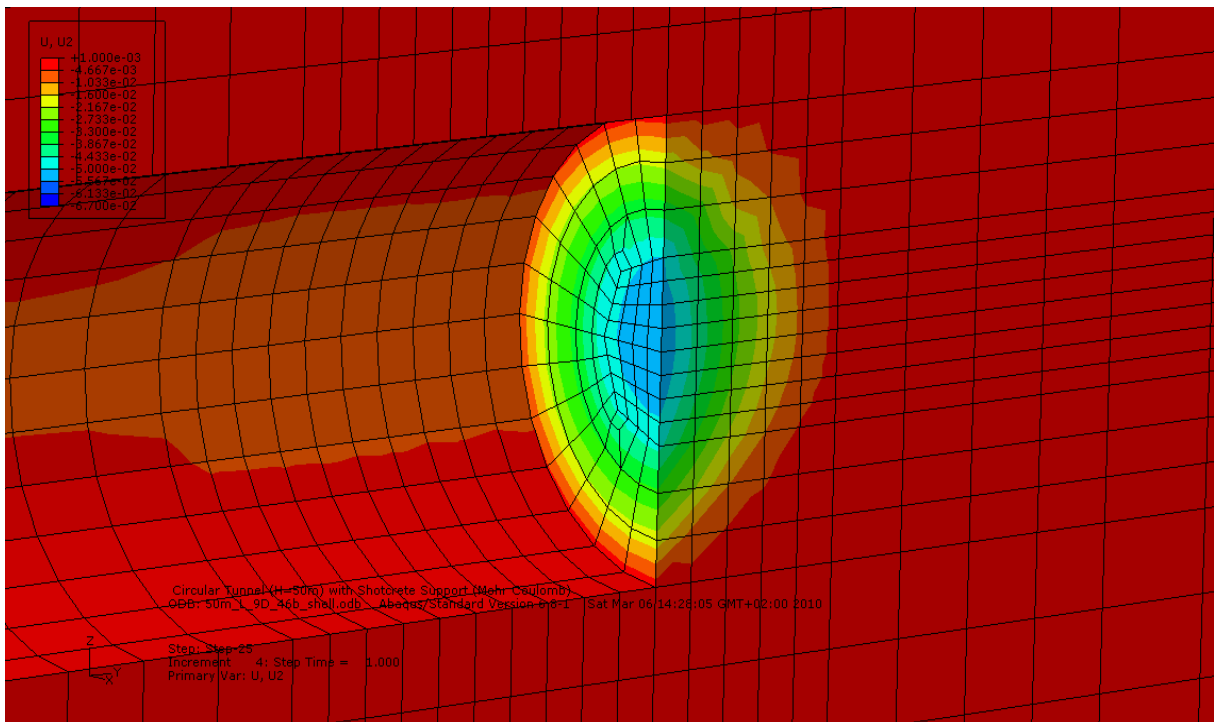
$c=25$ kPa – οριζόντιων μετακινήσεων

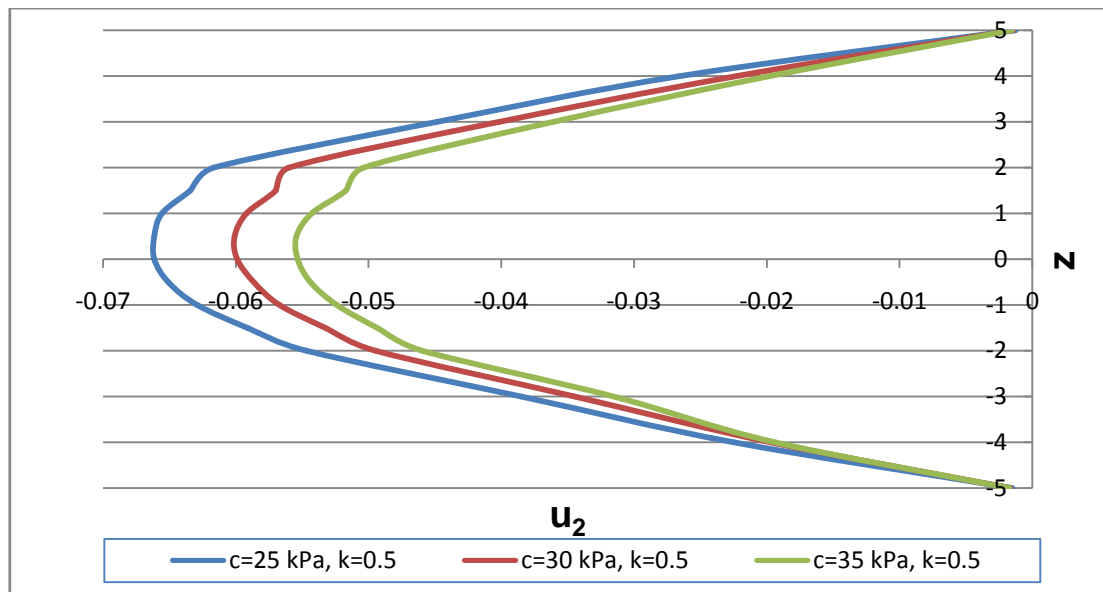


c=30 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων



c=35 kPa – οριζόντιων μετακινήσεων



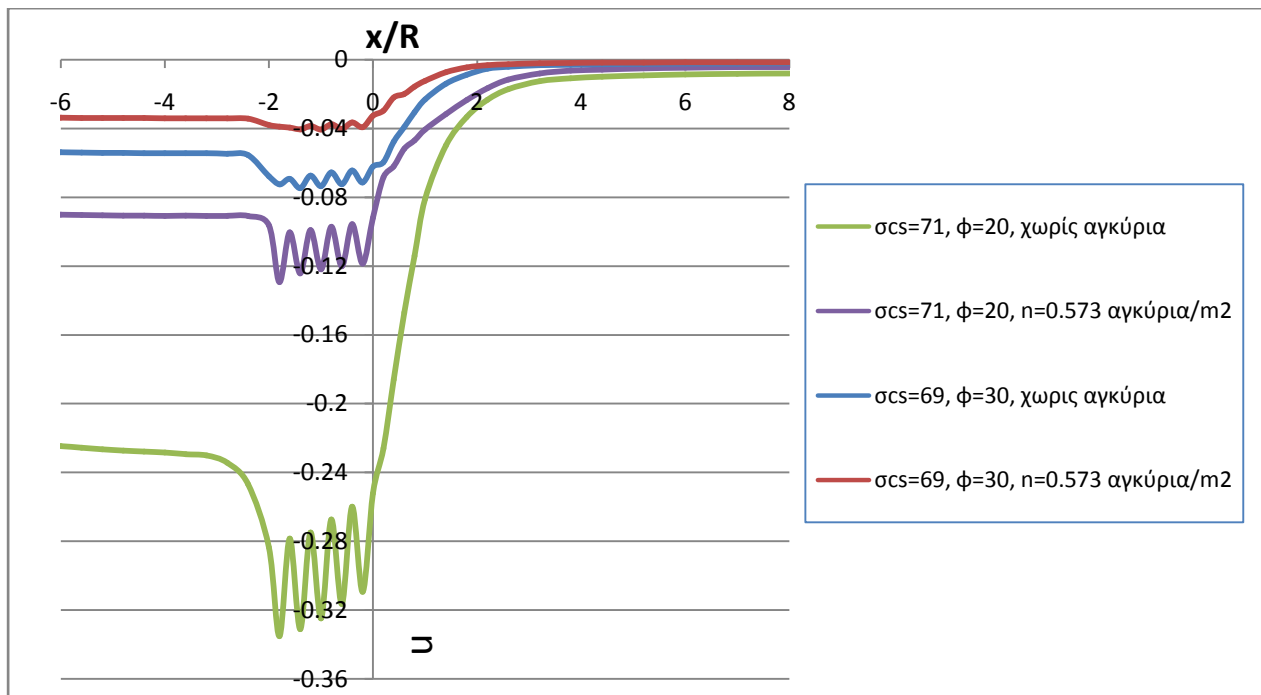


Σχήμα 6.22: Γραφική απεικόνιση οριζόντιων μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής και αντίστοιχα διαγράμματα εξωθήσεων συναρτήσει της συνοχής c για δεδομένη $\varphi=40^\circ$

Από τα διαγράμματα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι όσο αυξάνεται η συνοχή μειώνεται το ποσοστό της σταδιακής μείωσης της επιφάνειας εξώθησης. Επίσης αν τα διαγράμματα αυτά συγκριθούν με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από αναλύσεις σε ανυποστήρικτη σήραγγα θα βεβαιωθεί ότι οι αναλύσεις με προσωρινή υποστήριξη για τις ίδιες ιδιότητες εδάφους δίνουν πολύ μικρότερες παραμορφώσεις και μικρότερη απόκλιση μεταξύ των επιδράσεων των δύο διατάξεων.

Παρατηρείται γενικά λοιπόν ότι τόσο κατά την αύξηση της συνοχής c εδάφους όσο και της γωνίας τριβής φ , η σύγκλιση της οροφής συνεχώς μειώνεται. Όμως δεν φαίνεται να συμβαίνει το ίδιο και με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{cs} . Πιο συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από μελέτη του **Πίνακα 6.8**, αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, δεν συνεπάγεται και ταυτόχρονη μείωση της σύγκλισης στο μέτωπο.

Μελετάται η συμπεριφορά στην εξέλιξη των συγκλίσεων για εδαφικές συνθήκες παρόμοιας μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής. Παρατηρείται ότι για παρόμοιες τιμές της σ_{cs} οι συγκλίσεις είναι μικρότερες όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία τριβής φ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.23 που ακολουθεί. Συνεπώς η γωνία τριβής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των συγκλίσεων από τη συνοχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον τύπο της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του εδάφους λαμβάνεται υπόψιν η εφαιπόμενη της γωνίας φ .

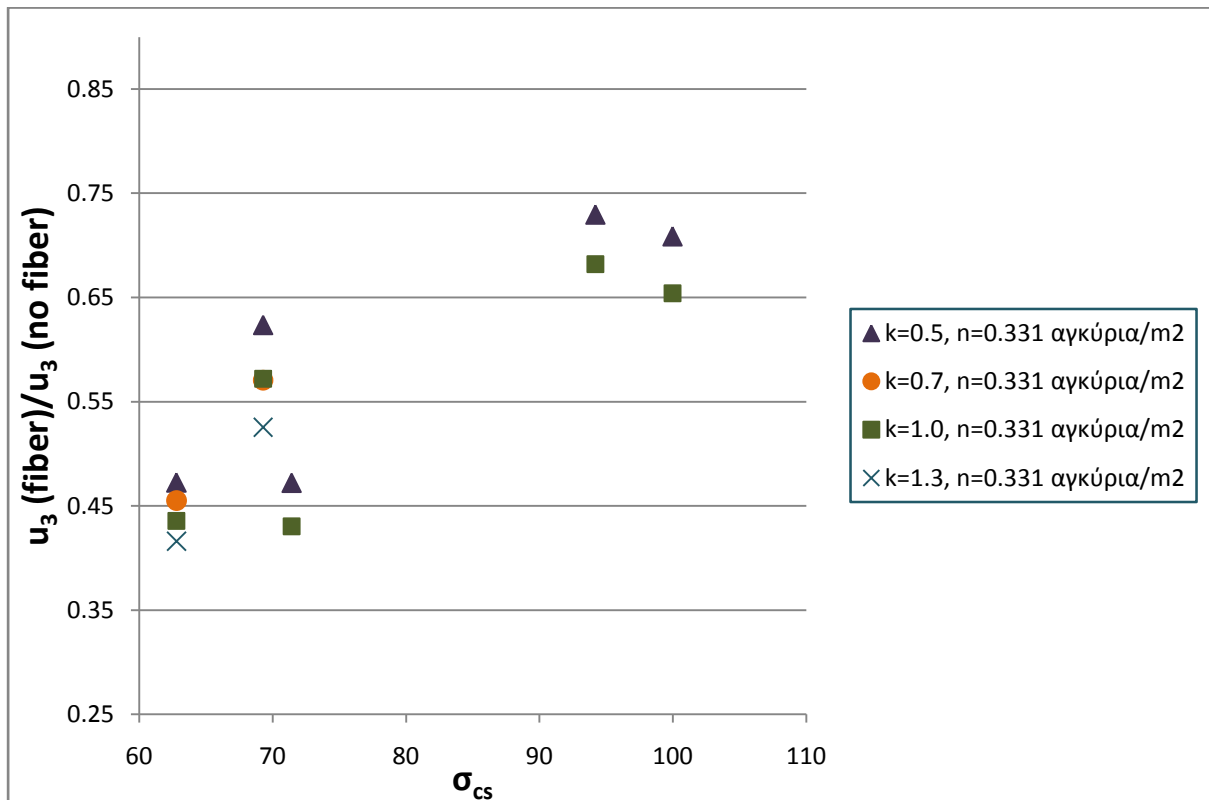


Σχήμα 6.23: Διαγράμματα συγκλίσεων οροφής στη θέση του μετώπου συναρτήσει της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} , για ανυποστήρικτο μέτωπο και πυκνή διάταξη αγκυρίων ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2)

Στην συνέχεια γίνεται προσπάθεια να ελεγχθεί η επίδραση της μονοαξονικής αντοχής σ_{cs} στον κρίσιμο λόγο συγκλίσεων στο μέτωπο ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$). Όλα τα αποτελέσματα του κρίσιμου λόγου που προέκυψαν από τις αναλύσεις μας τίθενται σε συνάρτηση με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή των αντίστοιχων εδαφικών σχηματισμών που προσομοιώθηκαν και διακρίνονται ανάλογα με τον συντελεστή K_0 και την πυκνότητα n των αγκυρίων μετώπου. Στο ακόλουθο διάγραμμα του **Σχήματος 6.24** παρατίθενται τα αποτελέσματα του λόγου των συγκλίσεων οροφής σε ενισχυμένο μέτωπο με αγκύρια fiberglass προς την αντίστοιχη κατάσταση με ανυποστήρικτο μέτωπο σε συνάρτηση με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{cs} των εδαφικών σχηματισμών που προσομοιώθηκαν, στην περίπτωση εφαρμογής της αραιής διάταξης αγκυρίων ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) και για διάφορες τιμές του συντελεστή K_0 .

Παρατηρείται μια απομείωση του λόγου των συγκλίσεων με την αύξηση της τιμής του συντελεστή K_0 για κάθε τιμή της αντοχής του εδάφους. Με την αύξηση όμως της αντοχής σ_{cs} δεν παρατηρείται σταθερή αύξηση του λόγου των συγκλίσεων και αντίστοιχη μείωση της συμβολής της εφαρμογής των αγκυρίων. Ομοίως ισχύει και για την εφαρμογή της πυκνότερης διάταξης αγκυρίων ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2). Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο γεγονός ότι η γωνία τριβής ϕ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συμβολή των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων, σε σχέση με την συμβολή της στην αντοχή του εδαφικού σχηματισμού.

Για το λόγο αυτό πρέπει να βρεθεί μία νέα παράμετρος που να αντιπροσωπεύει αυτή τη σχέση εξάρτησης.



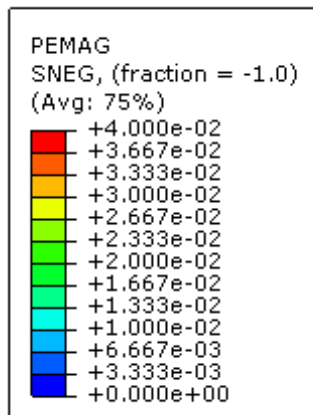
Σχήμα 6.24: Διάγραμμα της επίδρασης των αγκυρίων στη μείωση των συγκλίσεων οροφής στη θέση του μετώπου ($\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$) συναρτήσει της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} , για διάφορες τιμές του συντελεστή K_0 και πυκνότητα αγκυρίων $n=0.331$ αγκύρια/m².

Για επιπλέον τεκμηρίωση της επίδρασης της αντοχής του εδάφους στην παραμορφωσιακή συμπεριφορά στην περιοχή του μετώπου, μελετάται η επίδρασή της στις πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του μετώπου και στην ζώνη γύρω από τη διανοιγμένη κοιλότητα, που παρουσιάζεται μέσω γραφικών απεικονίσεων στα **Σχήματα 6.25** και **6.26** που ακολουθούν. Ελέγχθηκαν οι πλαστικές παραμορφώσεις για εδαφικούς σχηματισμούς με παρόμοια αντοχή ($\sigma_{cs}=69$ kPa, παραμέτρους διατμητικής αντοχής $\phi=30^\circ$ και $c=20$ kPa ο $1^{ος}$ και $\sigma_{cs}=71$ kPa, παραμέτρους διατμητικής αντοχής $\phi=20^\circ$ και $c=25$ kPa ο $2^{ος}$) καθώς και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0=0.5$ και για τους δύο..

Οι πλαστικές παραμορφώσεις εντείνονται και στις δύο περιπτώσεις μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, εντός του πυρήνα προώθησης και γύρω από τη διανοιγμένη κοιλότητα και όχι προς την επιφάνεια λόγω μεγάλου βάθους της σήραγγας.

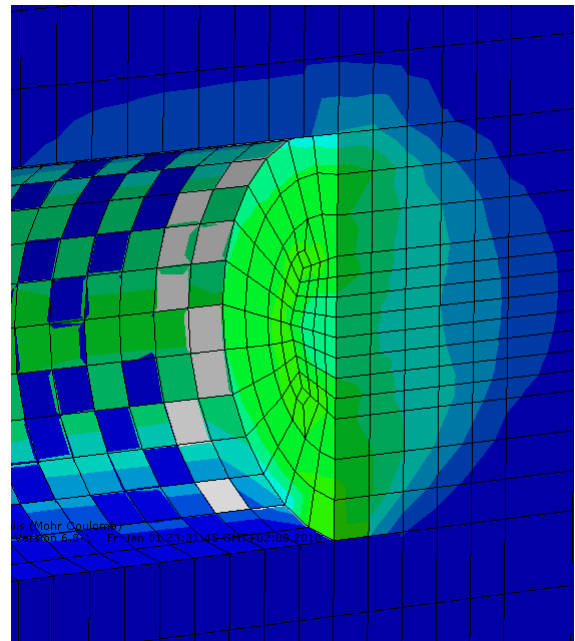
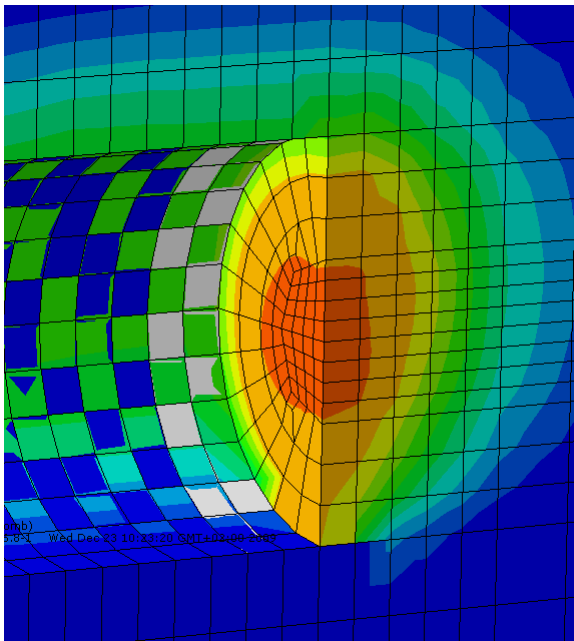
Παρατηρείται ότι για περίπου σταθερή αντοχή σ_{cs} του εδαφικού σχηματισμού η μείωση της γωνίας τριβής φ επιφέρει αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων, τόσο μπροστά από το μέτωπο όσο και γύρω από τα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας. Ομοίως ισχύει και για $K_0=1.0$.

$\sigma_{cs}=69 \text{ kPa}$, $\varphi=30^\circ$, $c=20 \text{ kPa}$, $K_0=0.5$



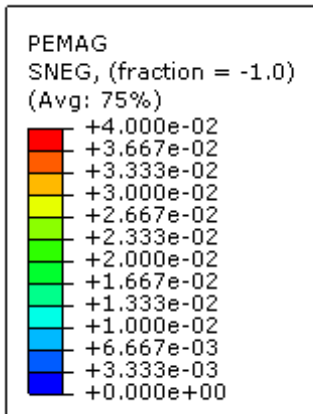
Ανυποστήρικτο μέτωπο

Πυκνότητα αγκυρίων $n=0.573 \text{ αγκύρια/m}^2$



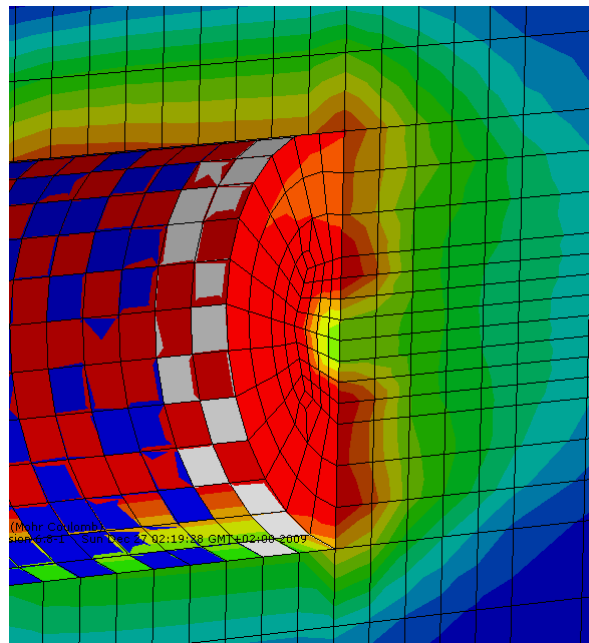
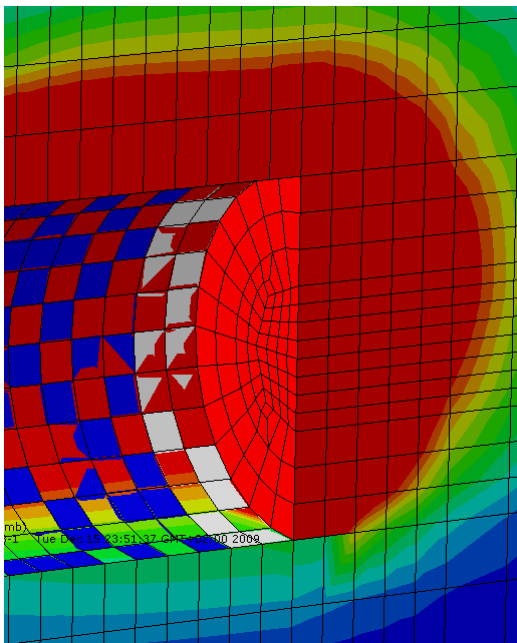
Σχήμα 6.25: Γραφική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων για ανυποστήρικτο μέτωπο και πυκνή διάταξη αγκυρίων

$\sigma_{cs}=71 \text{ kPa}, \varphi=20^\circ, c=25 \text{ kPa}, K_0=0.5$



Ανυποστήρικτο μέτωπο

Πυκνότητα αγκυρίων $n=0.573$ αγκύρια/ m^2



Σχήμα 6.26: Γραφική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων για ανυποστήρικτο μέτωπο και πυκνή διάταξη αγκυρίων

6.5.4.8. Επιρροή συντελεστή ευστάθειας μετώπου F_{FS}

Όπως παρατηρήθηκε και ανωτέρω, η εξάρτηση του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$ από την μονοαξονική θλιπτική αντοχή κρίθηκε ότι δεν είναι άκρως ικανοποιητική και δεν μπορεί να ληφθεί υπόψιν. Αναζητείται λοιπόν ένας νέος συντελεστής που να λαμβάνει υπόψιν την σημαντικότερη επίδραση της γωνίας τριβής φ .

Επιχειρείται να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος ο συντελεστής F_{FS} που προτάθηκε από τους Καββαδά Μ., Προυντζόπουλο Γ. και Τζιβάκο Κ. , ύστερα από εκτενή μελέτη και παραμετρική ανάλυση το 2009. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$F_{FS} = \frac{2 \cdot c \cdot N_{\phi}}{\gamma \cdot H^{0.15} \cdot D^{0.85}}$$

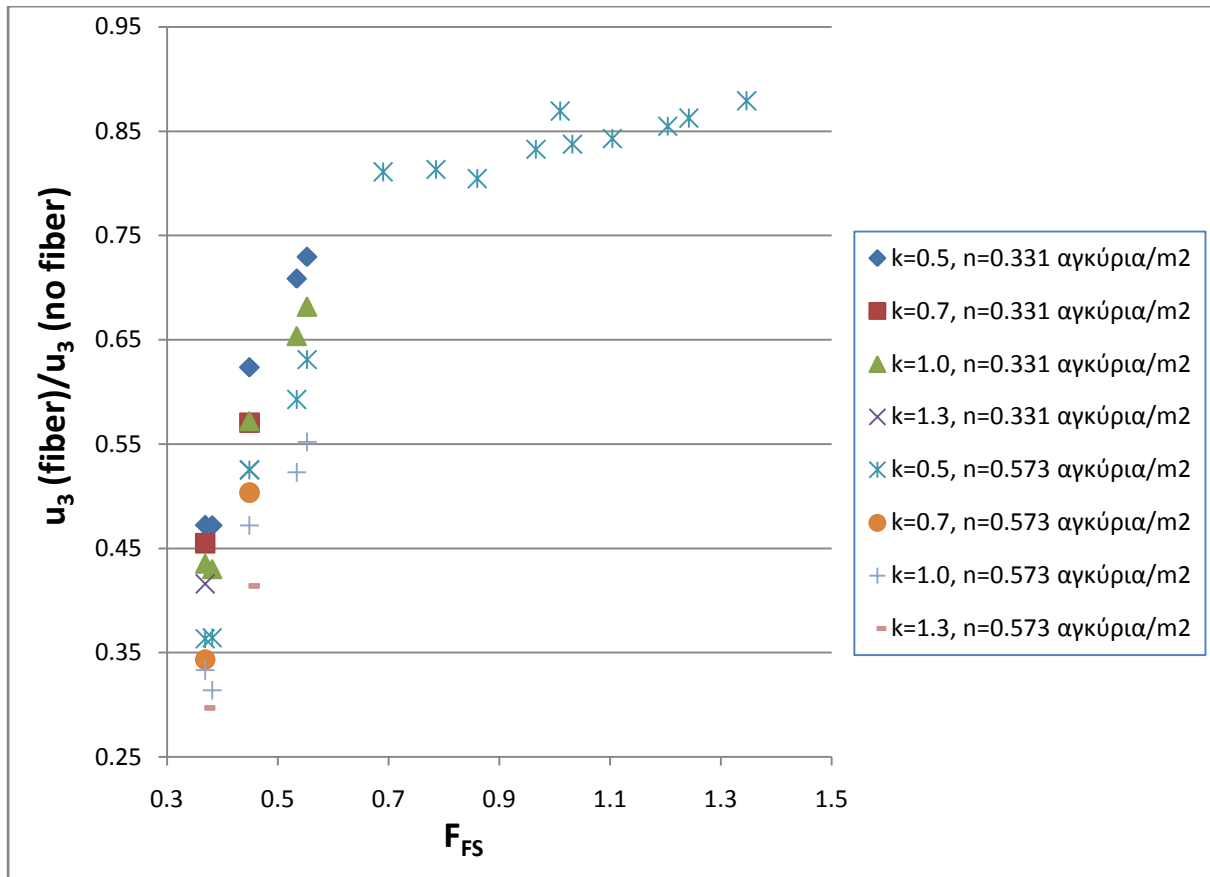
όπου $N_{\phi} = \tan^2(45^{\circ} + \frac{\phi}{2})$

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψιν την συμβολή των γεωτεχνικών παραμέτρων (c,φ) των εδαφικών υλικών που προσομοιώθηκαν, του ειδικού βάρους γ του εδάφους, του ύψους υπερκειμένων H καθώς επίσης και της διαμέτρου της σήραγγας προσομοίωσης D, και δίνει μεγαλύτερη συμβολή της γωνίας τριβής ϕ , όπως παρατηρήθηκε και από τα **Σχήματα 6.23, 6.31 και 6.32**. Το ύψος υπερκειμένων H και η διάμετρος της σήραγγας D, δεν εξετάστηκαν παραμετρικά κατά τη διενέργεια των αναλύσεων στην παρούσα εργασία αλλά τέθηκαν δεδομένες τιμές που επιλέχθηκαν για αυτές τις αναλύσεις (H=50m και D=10m).

Κατά τους Καββαδά Μ., Προυντζόπουλο Γ. και Τζιβάκο Κ. (2009), ο συντελεστής αυτός εφαρμόστηκε ως παράμετρος για την κανονικοποιημένη εξώθηση στο κέντρο του μετώπου Ω_f και για τον έλεγχο των παραμορφώσεων και της ευστάθειας του μετώπου **σε αβαθείς ανυποστήρικτες σήραγγες**.

Παρόλο που δεν ισχύουν οι συνθήκες και τα κριτήρια αρχικής εφαρμογής του συντελεστή F_{FS} , θα γίνει μια προσπάθεια να ελεγχθεί αν ο συντελεστής αυτός επιδρά και στην συμβολή των αγκυριών στην ευστάθεια του μετώπου μέσω μείωσης του λόγου συγκλίσεων $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$.

Όλα τα αποτελέσματα του κρίσιμου λόγου που προέκυψαν από τις αναλύσεις μας τίθενται σε συνάρτηση με τον νέο συντελεστή και διακρίνονται ανάλογα με τον συντελεστή K_0 και την πυκνότητα n των αγκυριών μετώπου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων μας συναρτήσεσι του συντελεστή F_{FS} , παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.27** που ακολουθεί.



Σχήμα 6.27: Διάγραμμα της επίδρασης των αγκυρίων στη μείωση των συγκλίσεων οροφής στη θέση του μετώπου ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$) συναρτήσει της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} , για διάφορες τιμές του συντελεστή K_0 και της πυκνότητας των αγκυρίων n (αγκύρια/ m^2).

Τα συμπεράσματα από τη μελέτη αυτού του διαγράμματος είναι τα εξής:

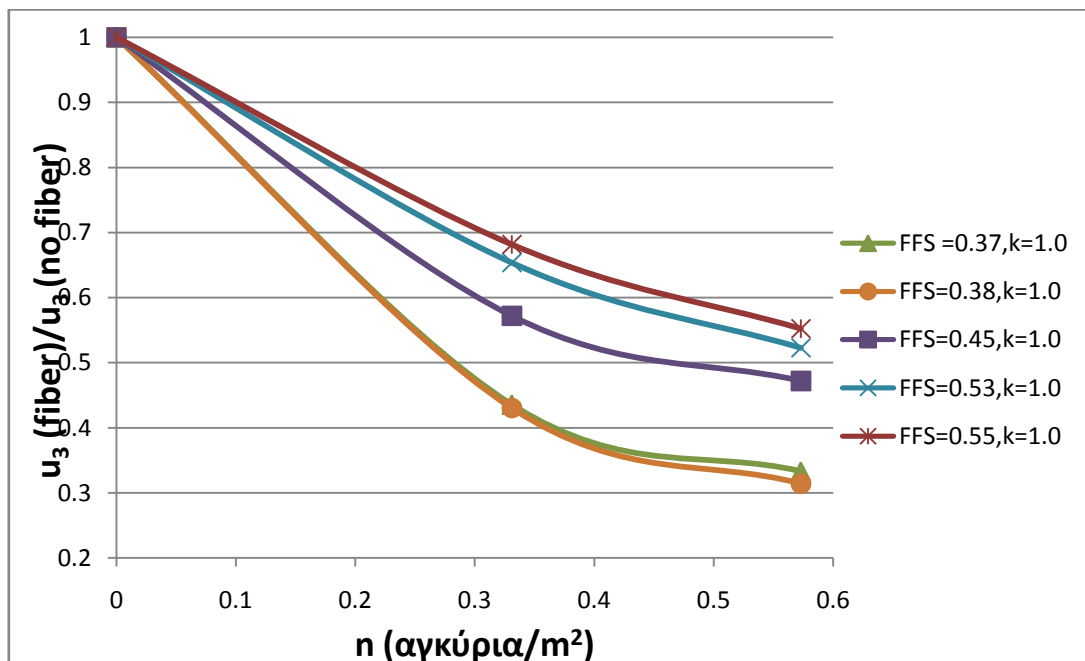
- Παρατηρείται σημαντική επίδραση της αντοχής και των γεωτεχνικών παραμέτρων του εδάφους στην συμβολή των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων.
- Με την αύξηση του συντελεστή F_{FS} , παρατηρείται μείωση της συμβολής των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων και μάλιστα με μειούμενο ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο προσεγγίζουμε εδάφη με καλύτερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και μεγαλύτερη αντοχή, αναπτύσσονται μικρότερες συγκλίσεις στο μέτωπο με αποτέλεσμα τα εδάφη να μπορούν να αυτοϋποστηρίζονται και να μην συμμετέχουν τα αγκύρια στη μείωση αυτών των ήδη μικρών συγκλίσεων.

- Παρατηρείται ομοιόμορφη μεταβολή του κρίσιμου λόγου με την αύξηση του F_{FS} , για οποιαδήποτε τιμή του συντελεστή K_0 ή της πυκνότητας n των αγκυρίων που προσομοιώθηκαν

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι από τον έλεγχο της επίδρασης της αντοχής του εδάφους στην εξέλιξη των συγκλίσεων λόγω εφαρμογής αγκυρίων μετώπου, αποδείχτηκε ότι η αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs} δεν συμβάλλει σταθερά στη συμβολή των αγκυρίων, μέσω σταθερής αύξησης του λόγου των συγκλίσεων $\left(\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}\right)$.

Για το λόγο αυτό γίνεται έλεγχος για την συμβολή του συντελεστή F_{FS} στην σχέση της πυκνότητας των αγκυρίων και της εξέλιξης των συγκλίσεων. Στο **Σχήμα 6.28** που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και αναφέρεται στην επίδραση της πυκνότητας των αγκυρίων στην μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων για τις γεωτεχνικές παραμέτρους που προσομοιώθηκαν με συντελεστή οριζοντίων τάσεων $K_0=1.0$.

Παρατηρείται ότι αύξηση του συντελεστή F_{FS} προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης προς τα πάνω και οδηγεί σε μειωμένη συμβολή των αγκυρίων στην μείωση των συγκλίσεων οροφής, το οποίο σημειώθηκε και παραπάνω και οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή F_{FS} αντιπροσωπεύει καλύτερες εδαφικές ιδιότητες αφού κύριες παράμετροί του είναι οι γεωτεχνικές παράμετροι (c, ϕ). Παράλληλα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή F_{FS} τόσο μικρότερη είναι η μετατόπιση της καμπύλης. Ομοίως συμβαίνει και για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0=0.5$.

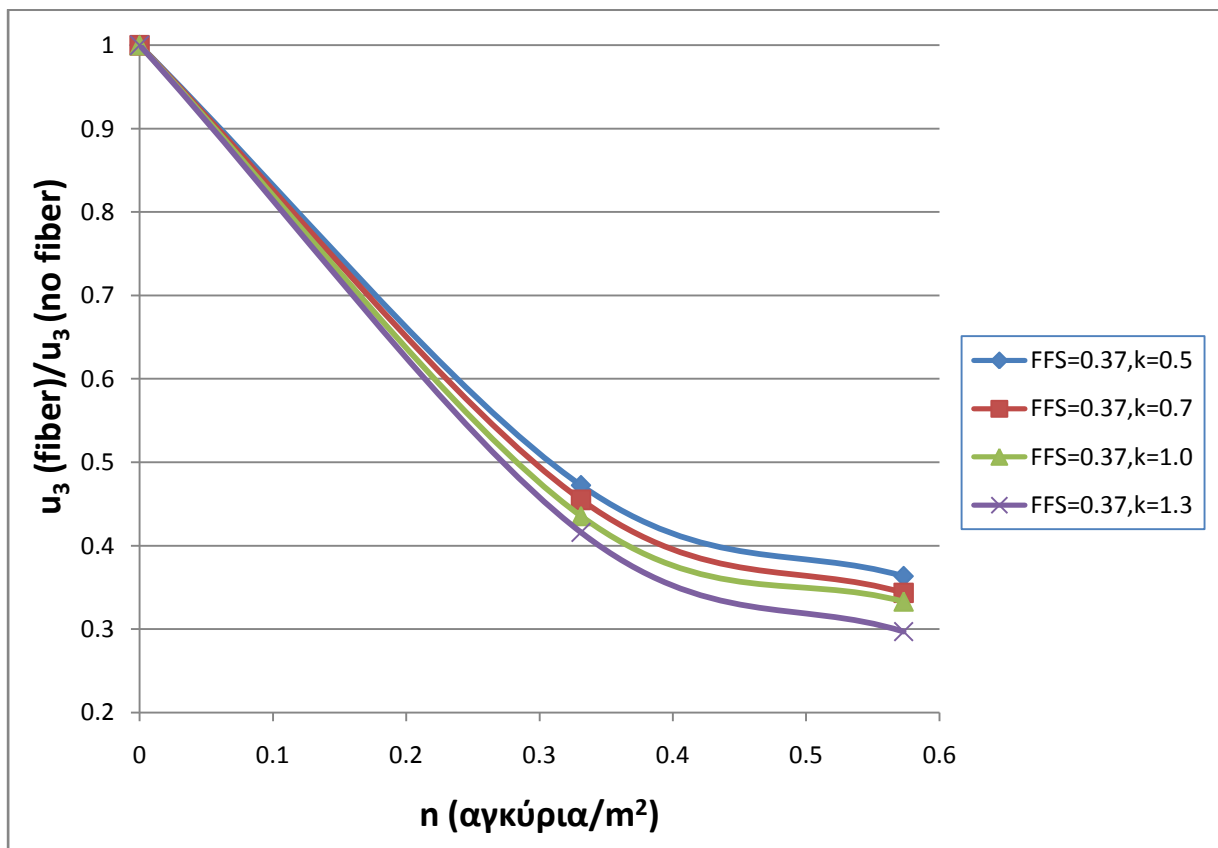


Σχήμα 6.28: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων σε συνάρτηση με τον συντελεστή F_{FS}

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται και το **Σχήμα 6.29**, όπου μελετάται η συμβολή του συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 στην επίδραση των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων, μέσω των αποτελεσμάτων για ορισμένες γεωτεχνικές παραμέτρους εδάφους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε τιμή του συντελεστή F_{FS} που μελετήθηκε και αναλύθηκε, η αύξηση του συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης προς τα κάτω και οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο εκσκαφής λόγω εφαρμογής αγκυρίων μετώπου (μείωση του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$).

Για όλους λοιπόν τους παραπάνω λόγους, θεωρείται ότι ο λόγος συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$) εξαρτάται από τον συντελεστή F_{FS} , ο οποίος λαμβάνεται υπόψιν στο πρόβλημα της παραμετροποίησης της συμβολής των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων.

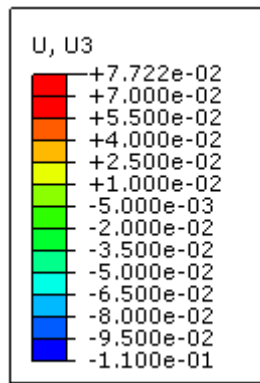


Σχήμα 6.29: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων για ορισμένες τιμές του συντελεστή F_{FS} που προσομοιωθήκαν, σε συνάρτηση με τον συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 .

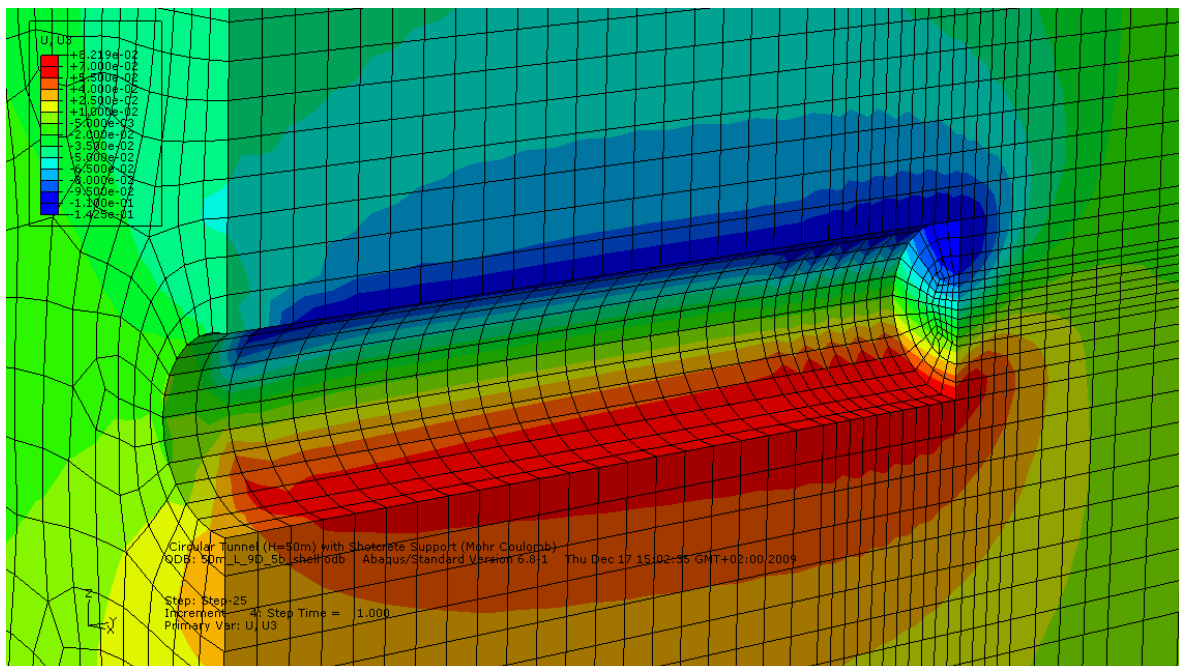
6.5.4.9. Επίδραση της πυκνότητας των αγκυρίων

Για να ελέγξουμε την επίδραση των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων, επιχειρήθηκε η σύγκριση των καμπυλών των συγκλίσεων οροφής και των αντίστοιχων γραφικών απεικονίσεων των κατακόρυφων μετακινήσεων, όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα εδαφικά υλικά που προσομοιωθήκαν. Η σύγκριση ορισμένων από αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζονται ακολούθως.

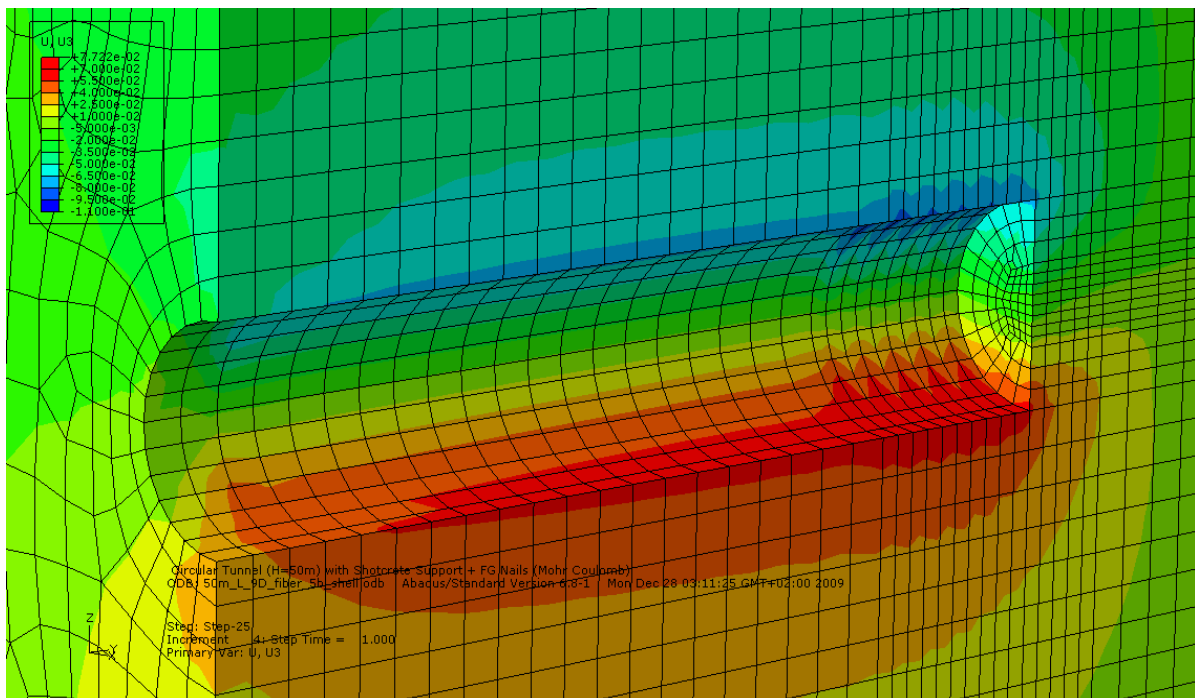
$\phi=20^\circ$, $c=35$ kPa, $k=0.5$



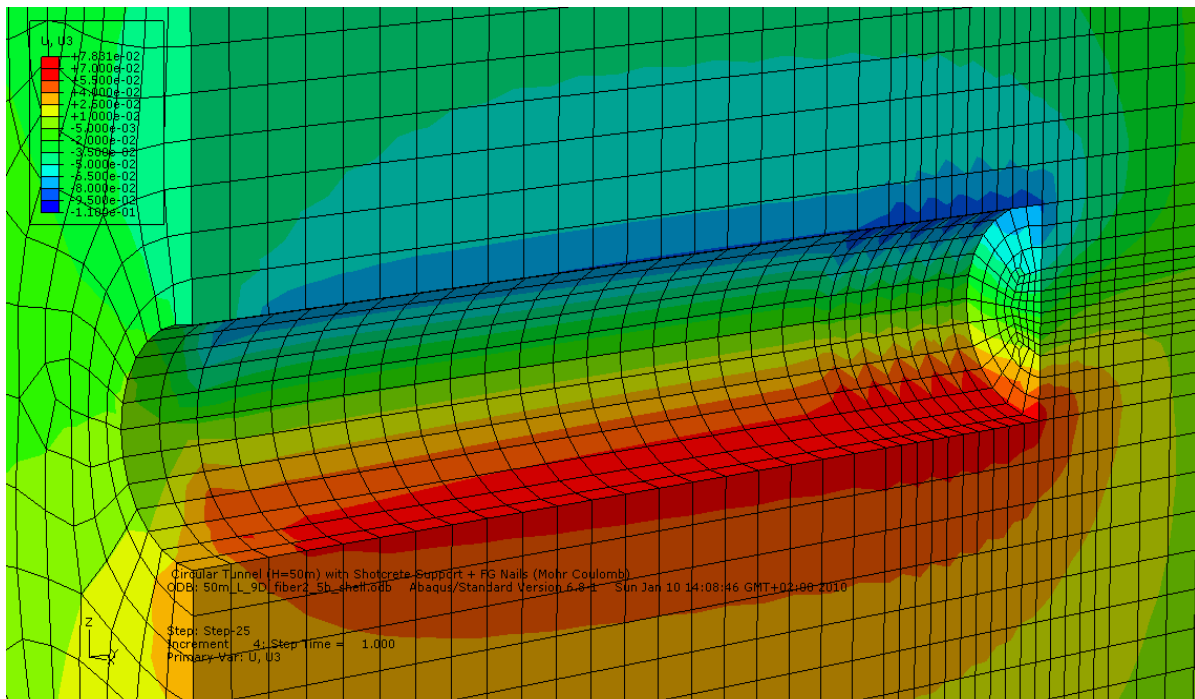
Ανυποστήρικτο μέτωπο – κατακόρυφες μετακινήσεις

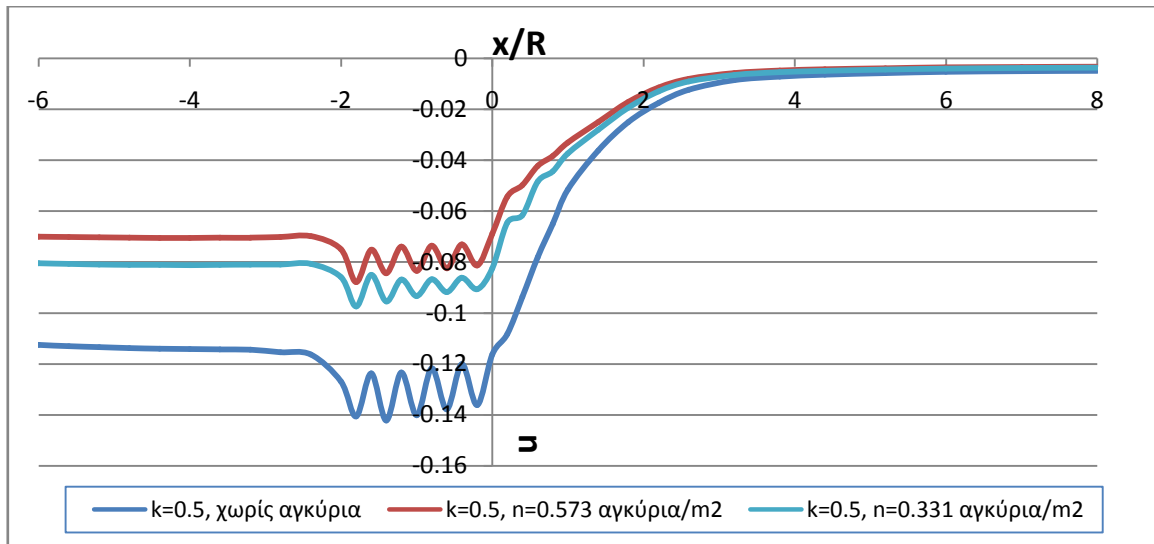


Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) – κατακόρυφες μετακινήσεις



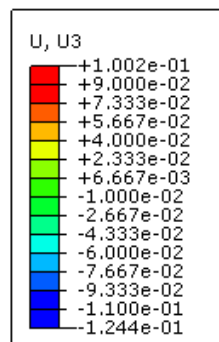
Διάταξη 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) – κατακόρυφες μετακινήσεις



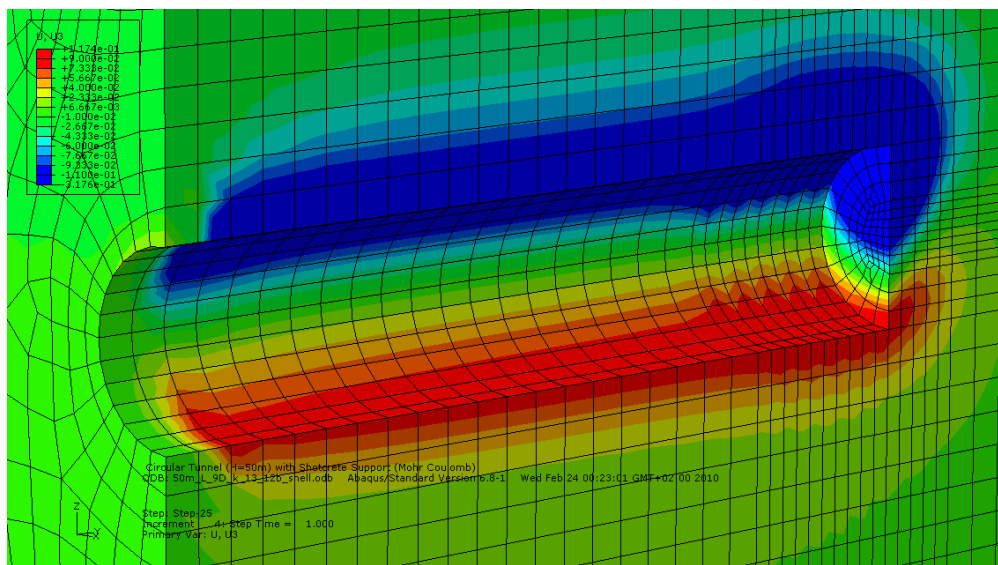


Σχήμα 6.30: Γραφική απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων συναρτήσει της πυκνότητας των αγκυριών

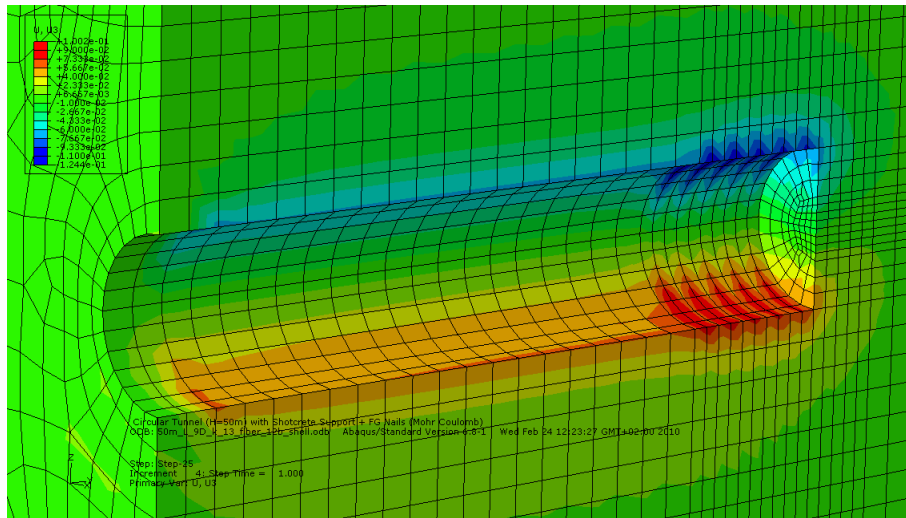
$\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa, $k=1.3$



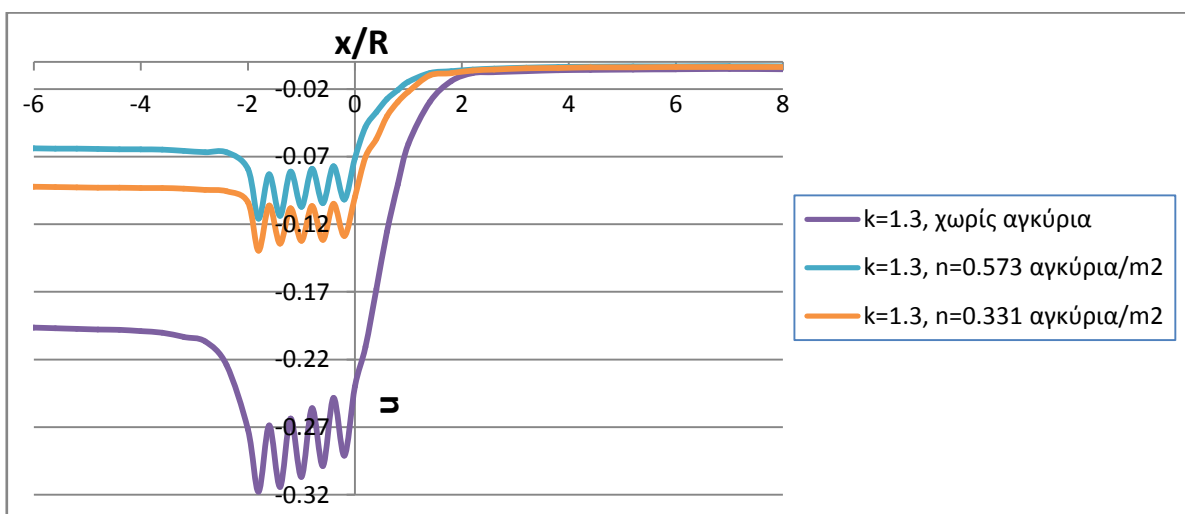
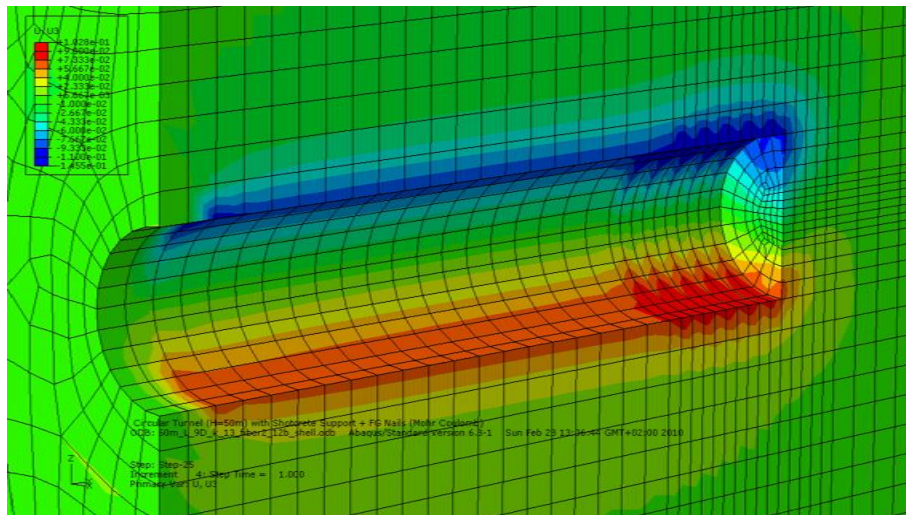
Ανυποστήρικτο μέτωπο – κατακόρυφες μετακινήσεις



Διάταξη 1 ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2) – κατακόρυφες μετακινήσεις



Διάταξη 2 ($n=0.331$ αγκύρια/ m^2) – κατακόρυφες μετακινήσεις



Σχήμα 6.31: Γραφική απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων και αντίστοιχη σύγκριση διαγραμμάτων συγκλίσεων συναρτήσει της πυκνότητας των αγκυριών

Με βάση τα δύο παραπάνω διαγράμματα συναρτήσει της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο ελέγχεται η επιρροή της στην μείωση των συγκλίσεων στο μέτωπο. Σε όλες τις αναλύσεις προκύπτει ότι η πιο πυκνή διάταξη προσφέρει μεγαλύτερη μείωση συγκλίσεων στο μέτωπο σε σχέση με την πιο αραιή.

Στο **Σχήμα 6.30** παρουσιάζεται η μείωση των συγκλίσεων οροφής με την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου για εδαφικό σχηματισμό με $\varphi=20^\circ$, $c=35$ kPa και συντελεστή οριζοντίων τάσεων $K_0=0.5$. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (**Πίνακας 6.8**) προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η **ελάχιστη μείωση της σύγκλισης** οροφής στο μέτωπο, της τάξης του 30%, κατά την εφαρμογή της αραιής διάταξης 2 ($n=0.331$ αγκύρια/m²). Με την εφαρμογή της πυκνότερης διάταξης αγκυρίων 1 ($n=0.331$ αγκύρια/m²), η μείωση αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη και πλησιάζει το 40%.

Στο **Σχήμα 6.31** παρουσιάζεται η μείωση των συγκλίσεων οροφής με την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου για εδαφικό σχηματισμό με $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa και συντελεστή οριζοντίων τάσεων $K_0=1.3$. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (**Πίνακας 6.8**) προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η **μέγιστη μείωση της σύγκλισης** οροφής στο μέτωπο, της τάξης του 70%, κατά την εφαρμογή της πυκνής διάταξης 1 ($n=0.573$ αγκύρια/m²). Με την εφαρμογή της πιο αραιής διάταξης αγκυρίων 1 ($n=0.331$ αγκύρια/m²), η μείωση αυτή είναι σημαντικά μικρότερη και φτάνει το 58%, η οποία βέβαια είναι επίσης μεγάλη.

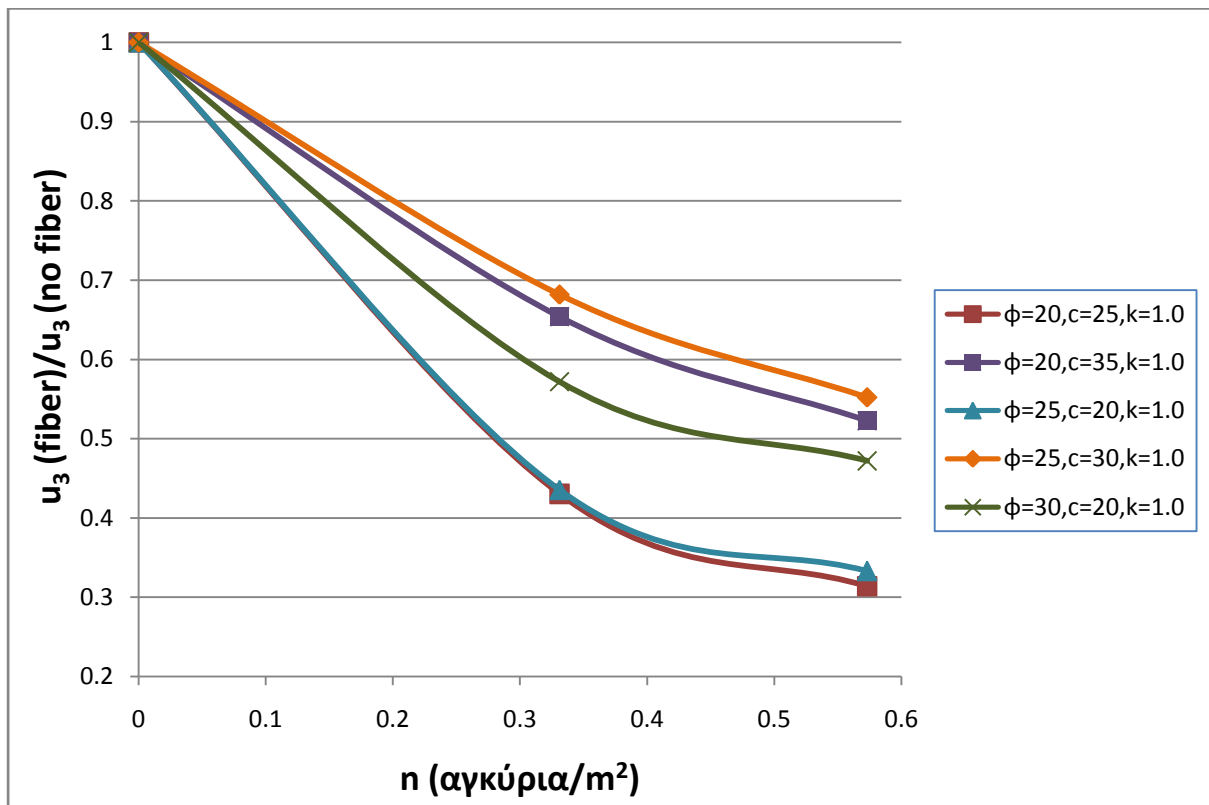
Στη συνέχεια επιχειρείται να ελεγχθεί η συμβολή της πυκνότητας n των αγκυρίων μετώπου στην εξέλιξη των συγκλίσεων. Ως κρίσιμο μέγεθος για την μελέτη της εξέλιξης των συγκλίσεων θεωρείται ο λόγος της σύγκλισης οροφής Σε υποστηριγμένο μέτωπο προς την αντίστοιχη σε ανυποστήρικτο μέτωπο $\left(\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}\right)$. Ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και αναφέρονται στην επίδραση της πυκνότητας των αγκυρίων στην μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων για τις γεωτεχνικές παραμέτρους που προσομοιώθηκαν με συντελεστή $K_0=0,5$ και $K_0=1.0$. (**Σχήμα 6.32**).

Από τη μελέτη και των διαγραμμάτων παρατηρούνται τα εξής:

- Παρουσιάζεται μια σταθερή σχέση – καμπύλη μείωσης του λόγου των συγκλίσεων (αυξημένη συμβολή αγκυρίων) λόγω της αύξησης της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο για οποιαδήποτε τιμή του συντελεστή K_0 .
- Η κλίση της καμπύλης αυτής γίνεται πιο απότομη με τη μείωση της γωνίας τριβής φ και της συνοχής c .
- Για κοινές γεωτεχνικές παραμέτρους (c, φ) οι αναλύσεις για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0=1.0$ δίνουν μεγαλύτερη μείωση της σύγκλισης στο μέτωπο. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.33**, για $\varphi=20^\circ$ και $c=25$ kPa, όταν

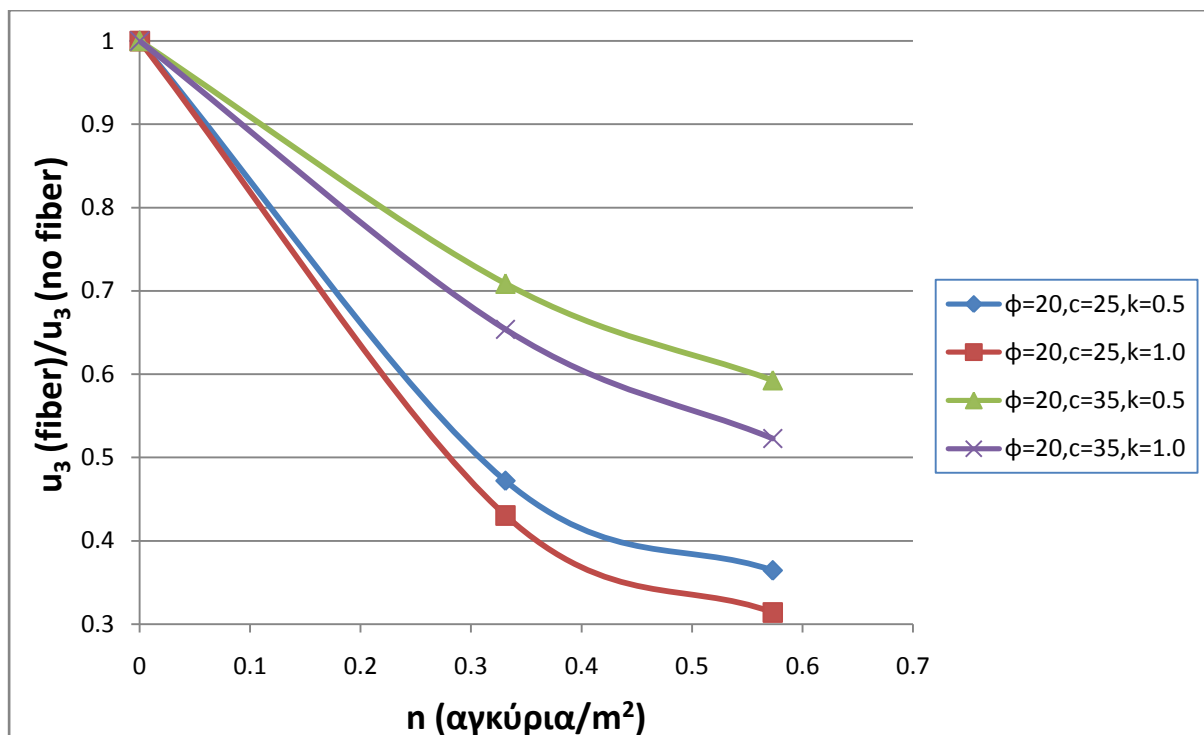
εφαρμόζουμε την πυκνότερη διάταξη 1 αγκυρίων ($n=0.573$ αγκύρια/ m^2), με $K_0=0.5$ ο λόγος των συγκλίσεων ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$) λαμβάνει τιμή 0.37 ενώ με $K_0=1.0$ λαμβάνει τιμή 0.31.

- Η αύξηση της συνοχής c για σταθερή γωνία τριβής ϕ , για μεταβολή της πυκνότητας των αγκυρίων από 0,331 σε 0,573 αγκύρια/ m^2 (οι δύο τιμές που προσομοιώθηκαν) προκαλεί πιο απότομη μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων.



Σχήμα 6.32: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων για τις γεωτεχνικές παραμέτρους που προσομοιώθηκαν με συντελεστή $K_0=1.0$

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται και το **Σχήμα 6.33**, όπου μελετάται η συμβολή του συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 στην επίδραση των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων, μέσω των αποτελεσμάτων για ορισμένες γεωτεχνικές παραμέτρους εδάφους.

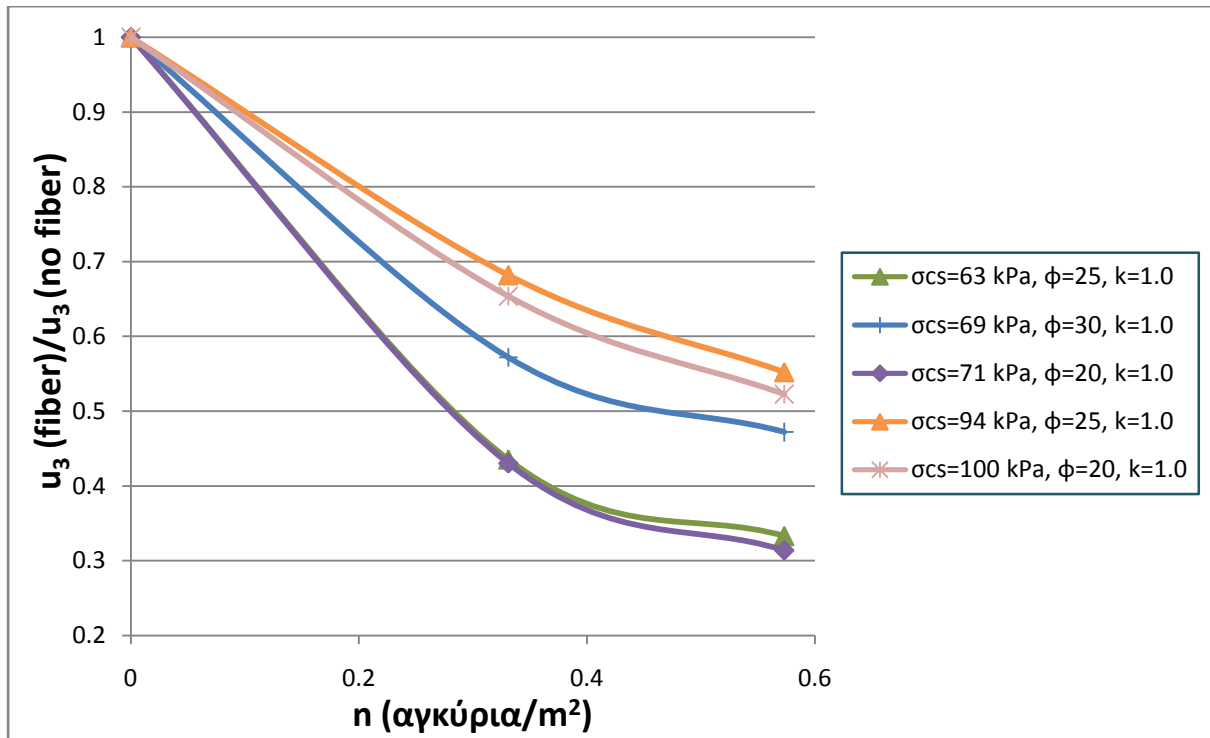


Σχήμα 6.33: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων για ορισμένες γεωτεχνικές παραμέτρους σε συνάρτηση με τον συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 .

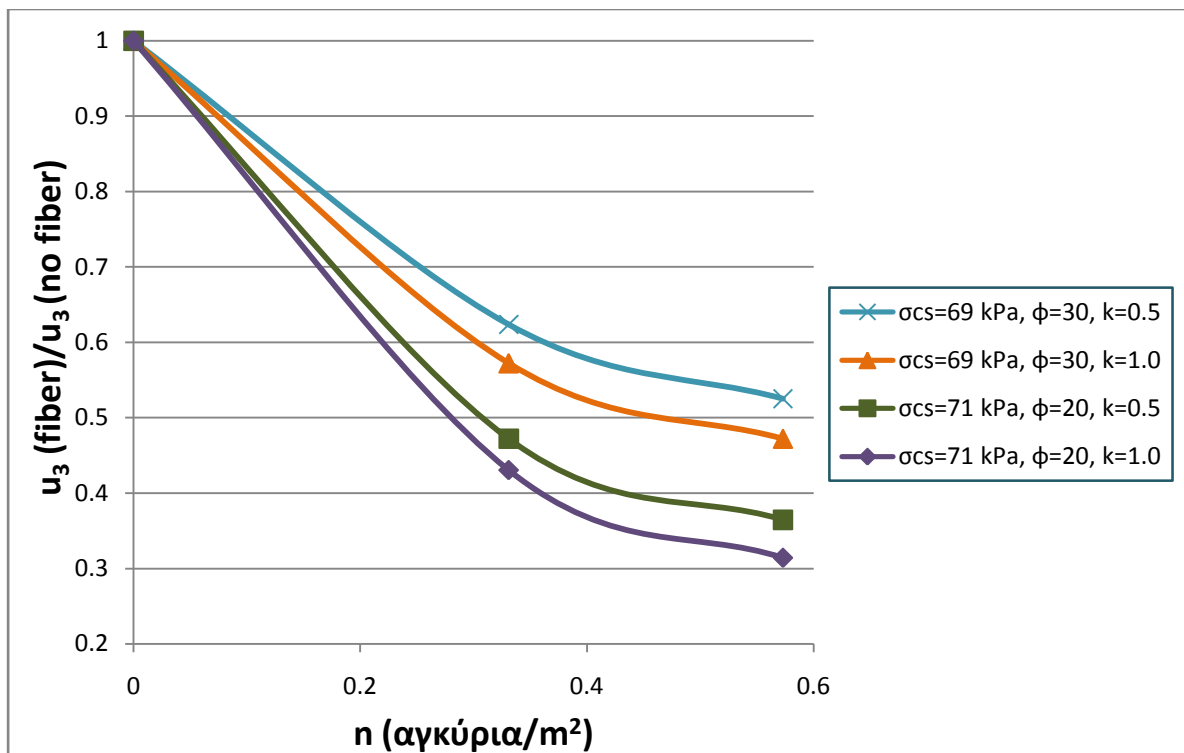
Επίσης κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος της επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων ανάλογα με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{cs} των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Δίνεται λοιπόν στο **Σχήμα 6.34** το διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων με κριτήριο την αντοχή σ_{cs} του εδάφους, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτής της εργασίας. Στο **Σχήμα 6.35** μελετάται η επιρροή και του συντελεστή K_0 , συγκρίνοντας περιπτώσεις με παρόμοια αντοχή σ_{cs} .

Από τη μελέτη του **Σχήματος 6.35** παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της σύγκλισης στο μέτωπο.

Από τη μελέτη του **Σχήματος 6.34** όμως παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σχέση αναλογίας της αντοχής σ_{cs} του εδάφους με την μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων. Πιο αναλυτικά, η αύξηση της αντοχής σ_{cs} του εδάφους δεν προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση του λόγου των συγκλίσεων $\left(\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}\right)$. Πιο συγκεκριμένα, από το **Σχήμα 6.35** παρατηρείται ότι για παρόμοιες τιμές της αντοχής σ_{cs} , η αύξηση της γωνίας τριβής ϕ προκαλεί αύξηση του λόγου των συγκλίσεων $\left(\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}\right)$ και συνεπώς μείωση της συμβολής των αγκυρίων στον περιορισμό των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο.



Σχήμα 6.34: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων σε συνάρτηση με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{cs} για $K_0=1.0$.



Σχήμα 6.35: Διάγραμμα επίδρασης της πυκνότητας των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων σε συνάρτηση με τον συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 , για εδάφη με παρόμοια αντοχή σ_{cs} .

6.5.4.10. Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας επιχειρήθηκε να γίνει έλεγχος αν ταυτόχρονη με τις άλλες γεωτεχνικές παραμέτρους μεταβολή και της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους E θα επηρεάσει σημαντικά τις συγκλίσεις και τις εξωθήσεις στο μέτωπο της σήραγγας

Αποφασίστηκε ο έλεγχος αυτός να γίνει σε ένα μόνο μοντέλο εδαφικού υλικού. Ως το μοντέλο προσομοίωσης των αναλύσεων αυτών επιλέχθηκε εδαφικό υλικό με $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa, $k=0.5$ και μέτρο ελαστικότητας $E=183$ MPa.

Δημιουργήθηκαν δύο νέα μοντέλα προσομοίωσης αυξάνοντας και μειώνοντας μόνο το μέτρο ελαστικότητας κατά 50%. ($E_{plus}=274$ MPa και $E_{minus}=91$ MPa) και πραγματοποιώντας για κάθε E τρεις αναλύσεις, μία με ανυποστήρικτο μέτωπο, και από μία με κάθε διάταξη αγκυρίων.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών μελετήθηκαν οι συγκλίσεις στο μέτωπο και οι εξωθήσεις στο μέτωπο και ο λόγος τους σε μέτωπο με ενίσχυση και ανυποστήρικτο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μεταβολή του λόγου αυτού. Προέκυψαν οι τιμές των ακόλουθων Πινάκων 6.10 και 6.11.

Πίνακας 6.10: Μεταβολή λόγου συγκλίσεων στο μέτωπο συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας E του εδάφους.

Case	$u(\text{fiber})/u(\text{no fiber})$	Ποσοστό	Μεταβολή
$E=183, n=0.573$	0.363417792	-	-
$E=183, n=0.331$	0.472390896	-	-
$E=91, n=0.573$	0.33645792	92.58%	-7.42%
$E=91, n=0.331$	0.444472243	94.09%	-5.91%
$E=274, n=0.573$	0.385126179	105.97%	5.97%
$E=274, n=0.331$	0.490867759	103.91%	3.91%

Πίνακας 6.11: Μεταβολή λόγου κανονικοποιημένου εμβαδού εξωθήσεων συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας E του εδάφους.

Case	A_f	A_f (fiber)/ A_f (no fiber)	Ποσοστό	Μεταβολή
E=183 MPa	7.704768149	-	-	-
E=183 MPa, n=0.573	2.748789333	0.356764705	-	-
E=183 MPa, n=0.331	3.65307779	0.474132085	-	-
E=91 MPa	7.651616769	-	-	-
E=91 MPa, n=0.573	2.237708161	0.292449064	81.97%	-18.03%
E=91 MPa, n=0.331	3.14491028	0.411012519	86.69%	-13.31%
E=274 MPa	7.745962475	-	-	-
E=274 MPa, n=0.573	3.10360849	0.400674351	112.31%	12.31%
E=274 MPa, n=0.331	3.990337746	0.515150668	108.65%	8.65%

Παρατηρήθηκε ότι τα ποσοστά των μεταβολών είναι πολύ μικρά σε σχέση με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E του εδάφους κατά 50%. Γι αυτό το λόγο θεωρούμε ότι οποιαδήποτε μεταβολή του E δεν επηρεάζει τα αποτελέσματά μας.

6.5.4.11. Επίδραση του μέτρου ακαμψίας των αγκυριών του μέτωπου

Στη συνέχεια αποφασίστηκε να γίνει έλεγχος αν ταυτόχρονη με τις άλλες γεωτεχνικές παραμέτρους μεταβολή και της τιμής του μέτρου ακαμψίας των αγκυριών E_{fiber} θα επηρεάσει σημαντικά τις συγκλίσεις και τις εξωθήσεις στο μέτωπο της σήραγγας

Αποφασίστηκε ο έλεγχος αυτός να γίνει σε ένα μόνο μοντέλο εδαφικού υλικού. Ως το μοντέλο προσομοίωσης των αναλύσεων αυτών επιλέχθηκε εδαφικό υλικό με $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa, $k=0.5$ και $k=1.0$, και $E_{fiber}=20$ GPa.

Δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο προσομοίωσης πενταπλασιάζοντας μόνο το E_{fiber} ($E_{fiber}=100$ GPa) και πραγματοποιώντας τρεις αναλύσεις, μία με ανυποστήρικτο μέτωπο, και από μία με κάθε διάταξη αγκυριών.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών μελετήθηκαν οι συγκλίσεις στο μέτωπο και ο λόγος τους σε μέτωπο με ενίσχυση και ανυποστήρικτο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μεταβολή του λόγου αυτού. Προέκυψαν οι τιμές του ακόλουθου Πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12: Μεταβολή λόγου συγκλίσεων στο μέτωπο συναρτήσει του μέτρου ακαμψίας E_{fiber} των αγκυρίων.

Case	k=0.5		
	u(fiber)/u(no fiber)	Ποσοστό	Μεταβολή
$E_{\text{fiber}}=20\text{GPa}$, $n=0.573$	0.363417792		
$E_{\text{fiber}}=20\text{GPa}$, $n=0.331$	0.472390896		
$E_{\text{fiber}}=100\text{GPa}$, $n=0.573$	0.319744435	87.98%	-12.02%
$E_{\text{fiber}}=100\text{GPa}$, $n=0.331$	0.411262108	87.06%	-12.94%

Case	k=1.0		
	u(fiber)/u(no fiber)	Ποσοστό	Μεταβολή
$E_{\text{fiber}}=20\text{GPa}$, $n=0.573$	0.333195593		
$E_{\text{fiber}}=20\text{GPa}$, $n=0.331$	0.435642959		
$E_{\text{fiber}}=100\text{GPa}$, $n=0.573$	0.289892069	87.00%	-13.00%
$E_{\text{fiber}}=100\text{GPa}$, $n=0.331$	4.01E-01	92.03%	-7.97%

Παρατηρήθηκε ότι τα ποσοστά των μεταβολών είναι πολύ μικρά σε σχέση με την αύξηση του E_{fiber} . Γι αυτό το λόγο θεωρούμε ότι οποιαδήποτε μεταβολή του E_{fiber} δεν επηρεάζει τα αποτελέσματά μας.

6.6. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ - ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΪΛΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΟΡΟΦΗΣ

Σύμφωνα με την παραπάνω παραμετρική ανάλυση οι παράμετροι της συμβολής των αγκυρίων του μετώπου στην εξέλιξη των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο εκκαμψής είναι οι εξής:

- Συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0
- Πυκνότητα n των αγκυρίων στο μέτωπο
- Συντελεστής ευστάθειας μετώπου F_{FS}

Τελικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι να προταθεί ένας νέος συντελεστής που θα προσεγγίζει όσο γίνεται ακριβέστερα τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Ο συντελεστής αυτός θα είναι γινόμενο των παραπάνω παραμέτρων, υφομένων σε αντίστοιχους εκθέτες, άρα θα έχει την εξής μορφή:

$$F_{FS}^{\alpha} \cdot K_0^{\beta} \cdot n^{\gamma}$$

Οι εκθέτες των παραμέτρων K_0 και n θα είναι αρνητικοί διότι, όπως αποδείξαμε και παραπάνω αύξηση των τιμών αυτών επιφέρει μείωση του κρίσιμου λόγου των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$), ενώ ο εκθέτης του συντελεστή F_{FS} θα είναι θετικός διότι αύξηση του συντελεστή προκαλεί και ταυτόχρονη αύξηση του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$. Συνεπώς ισχύει :

$$\alpha > 0, \beta, \gamma < 0$$

Τελικά, μετά από δοκιμές και παλινδρόμηση, προέκυψαν οι εξής τιμές των εκθετών, με κριτήριο την μέγιστη δυνατή γραμμική συσχέτιση (μέγιστη τιμή R^2):

$$\alpha = 1.5, \beta = -0.3 \text{ και } \gamma = -0.9$$

Επομένως, ο νέος συντελεστής επιρροής των αγκυρίων (nail influence) που επιλέγεται συμβολίζεται ως F_{NI} και δίνεται από τον τύπο:

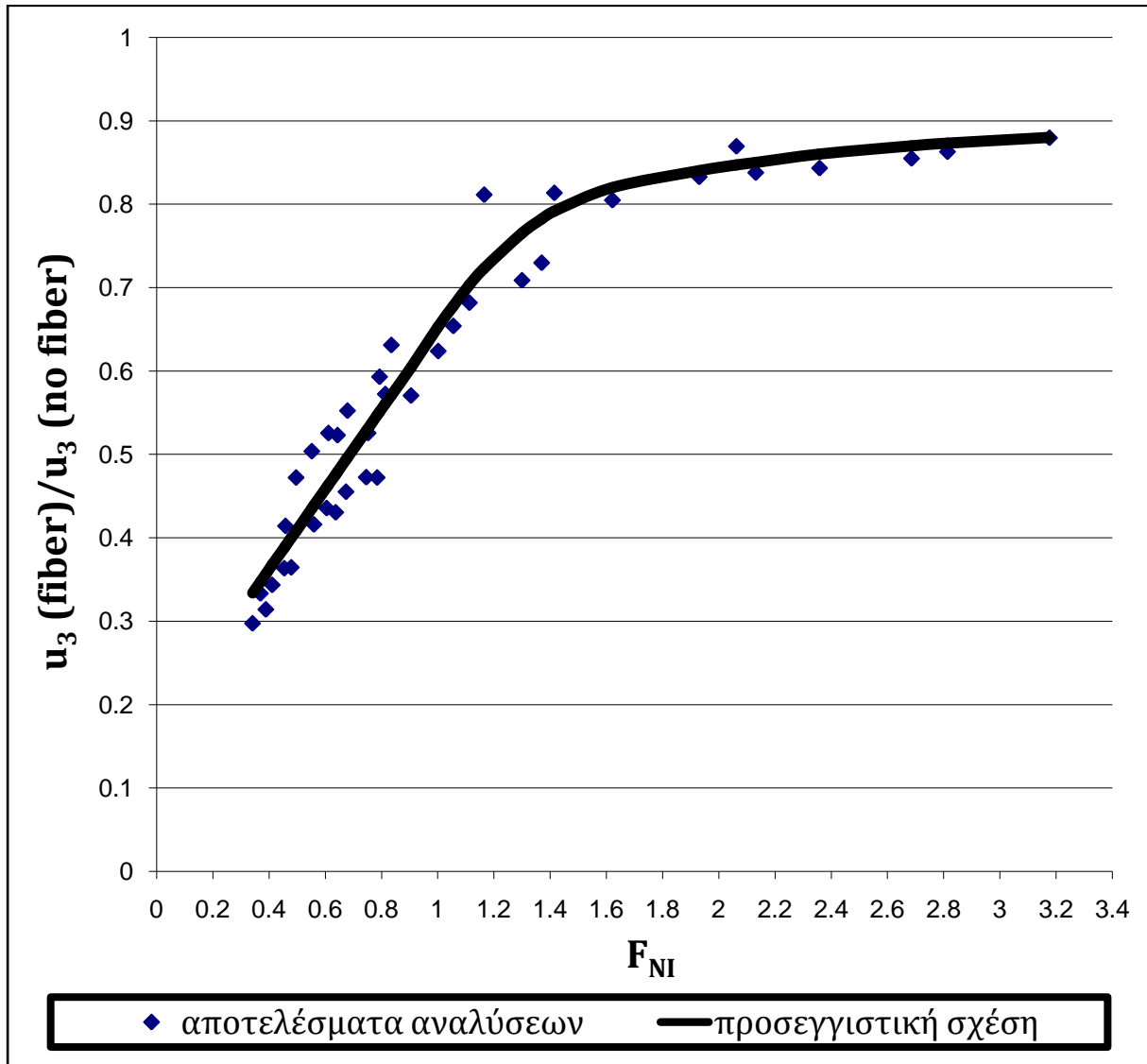
$$F_{NI} = \frac{F_{FS}^{1.5}}{K_0^{0.3} \cdot n^{0.9}}$$

Οι τιμές του συντελεστή F_{NI} και οι αντίστοιχες τιμές του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$ δίνονται στον Πίνακα 6.13 και η συσχέτισή τους στο Σχήμα 6.36, όπου παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή F_{NI} στην επιρροή των αγκυρίων στην ευστάθεια του μετώπου μέσω του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$.

Πίνακας 6.13: Τιμές του συντελεστή F_{NI} και οι αντίστοιχες τιμές του λόγου $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$

FFS	k	n (αγκύρια/m2)	F_{NI}	$u_3(\text{fiber})/u_3(\text{no fiber})$
0.381462319	0.5	0.573	0.478792464	0.364420938
0.381462319	0.5	0.331	0.784587296	0.472070793
0.381462319	1.0	0.573	0.388900327	0.314072993
0.381462319	1.0	0.331	0.637282912	0.430454123
0.534047247	0.5	0.573	0.793120837	0.592931386
0.534047247	0.5	0.331	1.299670692	0.708714117
0.534047247	1.0	0.573	0.644214301	0.522877746
0.534047247	1.0	0.331	1.055660634	0.653920484
0.368655342	0.5	0.573	0.454883974	0.363417792
0.368655342	0.5	0.331	0.745408948	0.472390896
0.368655342	0.7	0.573	0.411208635	0.343542773
0.368655342	0.7	0.331	0.673839074	0.45511105
0.368655342	1	0.573	0.369480598	0.333195593
0.368655342	1	0.331	0.605460204	0.435642959
0.368655342	1.3	0.573	0.341514094	0.297241123
0.368655342	1.3	0.331	0.559632074	0.416114641
0.552983013	0.5	0.573	0.835675221	0.631043942
0.552983013	0.5	0.331	1.369403679	0.729639403
0.552983013	1.0	0.573	0.678779201	0.552272663
0.552983013	1.0	0.331	1.11230142	0.681873291
0.448865732	0.5	0.573	0.611145355	0.525321444
0.448865732	0.5	0.331	1.001471236	0.623712053
0.448865732	0.7	0.573	0.552466698	0.503606621
0.448865732	0.7	0.331	0.905315737	0.570645867
0.448865732	1	0.573	0.496404279	0.472085552
0.448865732	1	0.331	0.813447412	0.572107556
0.448865732	1.3	0.573	0.458830744	0.414043943
0.448865732	1.3	0.331	0.751876439	0.525512769
1.009947896	0.5	0.573	2.062615572	0.869491039
1.104261269	0.5	0.573	2.358183514	0.843096474
0.860122113	0.5	0.573	1.621100757	0.80469156
1.204170958	0.5	0.573	2.685357196	0.854892434
1.242293928	0.5	0.573	2.813885247	0.862768649
0.690163293	0.5	0.573	1.165192351	0.811183785
0.96622861	0.5	0.573	1.930143854	0.832861409
1.032146536	0.5	0.573	2.130992286	0.837771354
1.346597195	0.5	0.573	3.175604415	0.879332992
0.78551503	0.5	0.573	1.414821295	0.813373056

Η καλύτερη δυνατή προσέγγιση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων ορίζεται η καμπύλη που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.36** και προέκυψε μέσω δοκιμών με κριτήριο τη μέγιστη δυνατή γραμμική συσχέτιση (μέγιστη τιμή του συντελεστή R^2).



Σχήμα 6.36: Επίδραση του συντελεστή F_{NI} στην επιρροή των αγκυρίων στην ευστάθεια του μετώπου μέσω του λόγου $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$

Για την καμπύλη αυτή προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Έχει παραβολική μορφή για να προσεγγίζει τον μειωμένο ρυθμό αύξησης του λόγου των συγκλίσεων $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$ με την αύξηση του συντελεστή F_{NI} . Ο μειωμένος ρυθμός αύξησης οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνει ο συντελεστής F_{NI} αναφερόμαστε σε καλύτερες γεωτεχνικές παραμέτρους όπου

τα αγκύρια συμβάλλουν στην ευστάθεια του μετώπου συνεχώς σε μικρότερο βαθμό.

- Για τιμές του συντελεστή F_{NI} **μέχρι και 1,2** η καμπύλη έχει μεγάλη κλίση (απότομη μείωση της συμβολής των αγκυρίων), είναι σχεδόν γραμμική και μπορεί να προσεγγιστεί από μια γραμμική εξίσωση:

$$\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)} = 0.48 \cdot F_{NI} + 0.17$$

Στο εύρος αυτό των τιμών του συντελεστή, παρατηρείται η μεγαλύτερη συμβολή των αγκυρίων στην ευστάθεια του μετώπου (ποσοστό μείωσης της σύγκλισης στο μέτωπο της τάξης του 30 – 70%)

- Για τιμές του συντελεστή F_{NI} **μεγαλύτερες του 1 - 1.2**, παρατηρείται μικρή μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο (της τάξης του 10 - 30%) λόγω επιρροής των αγκυρίων
- Παρατηρείται μέγιστη συνεισφορά των αγκυρίων ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}=0.3$) για $F_{NI}=0.3$. Θεωρούμε ότι το ποσοστό αυτό μείωσης είναι πολύ σημαντικό για εδάφη χαμηλών αντοχών. Θεωρούμε λοιπόν αυτήν ως ελάχιστη τιμή του συντελεστή F_{NI} .
- Οι αναλύσεις έχουν πραγματοποιηθεί για τιμές μέχρι $F_{NI}=3.2$, για την οποία τιμή παρατηρείται η ελάχιστη συνεισφορά των αγκυρίων ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}=0.88$). Θεωρήθηκε ότι για μεγαλύτερες τιμές του νέου συντελεστή η συνεισφορά των αγκυρίων είναι ασήμαντη (**μέχρι 10% μείωση** της σύγκλισης οροφής στο μέτωπο) και συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να πραγματοποιηθούν αναλύσεις για $F_{NI} > 3.2$.

6.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΑ ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

6.7.1. Εισαγωγή παραμέτρων και αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας επιχειρήθηκε να γίνει έλεγχος αν η εφαρμογή αγκυρίων μετώπου συμβάλλει και στην μεταβολή των συγκλίσεων στα πλευρικά τοιχώματα στη θέση του μετώπου, και να μελετηθεί η επίδραση αυτή των αγκυρίων.

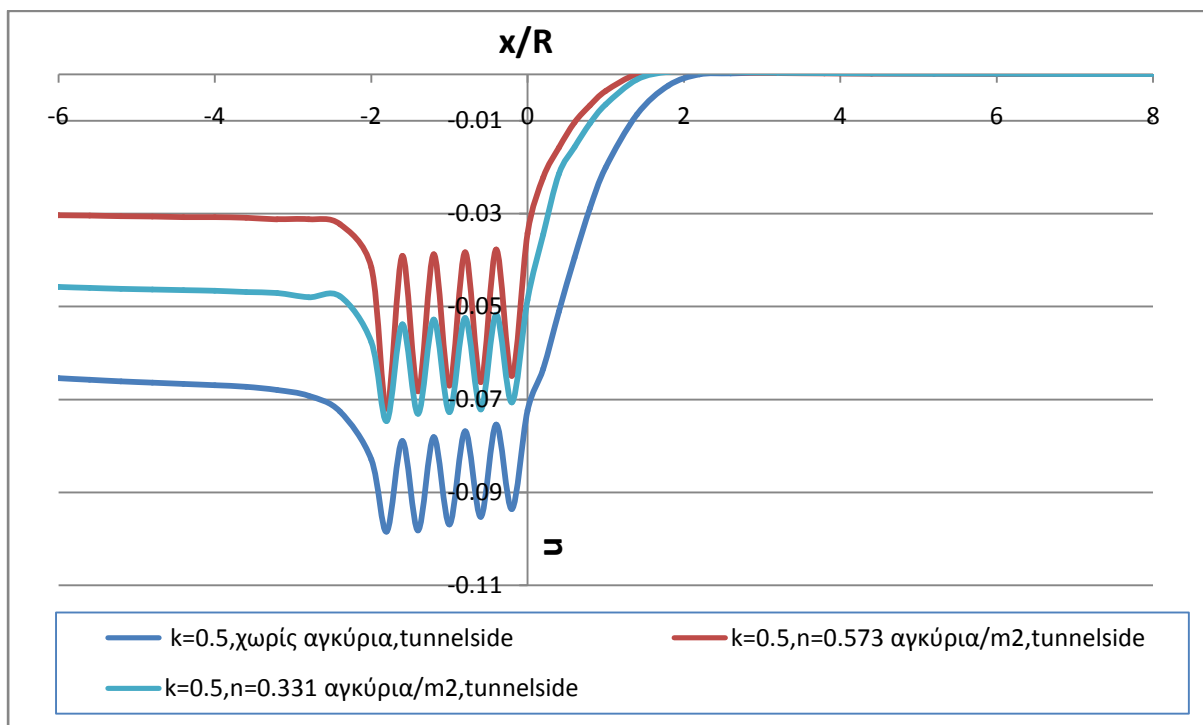
Ως μέγεθος σύγκρισης επιλέχθηκε η οριζόντια σύγκλιση στη θέση του μετώπου στον οριζόντιο άξονα της σήραγγας.

Αποφασίστηκε ο έλεγχος αυτός να γίνει σε ένα μόνο μοντέλο εδαφικού υλικού. Ως το μοντέλο προσομοίωσης των αναλύσεων αυτών επιλέχθηκε εδαφικό υλικό με $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa και μέτρο ελαστικότητας $E=183$ MPa. Αποφασίστηκε να γίνει έλεγχος της επιρροής αυτής για δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 0.5 και 1.0. Για την επίδραση της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο προσομοιώθηκαν τρεις περιπτώσεις, μία για ανυποστήρικτο μέτωπο και δύο τιμές της πυκνότητας n , πυκνότερη Διάταξη 1 με $n=0.573$ αγκύρια/ m^2 και πιο αραιή Διάταξη 2 με $n=0.331$ αγκύρια/ m^2

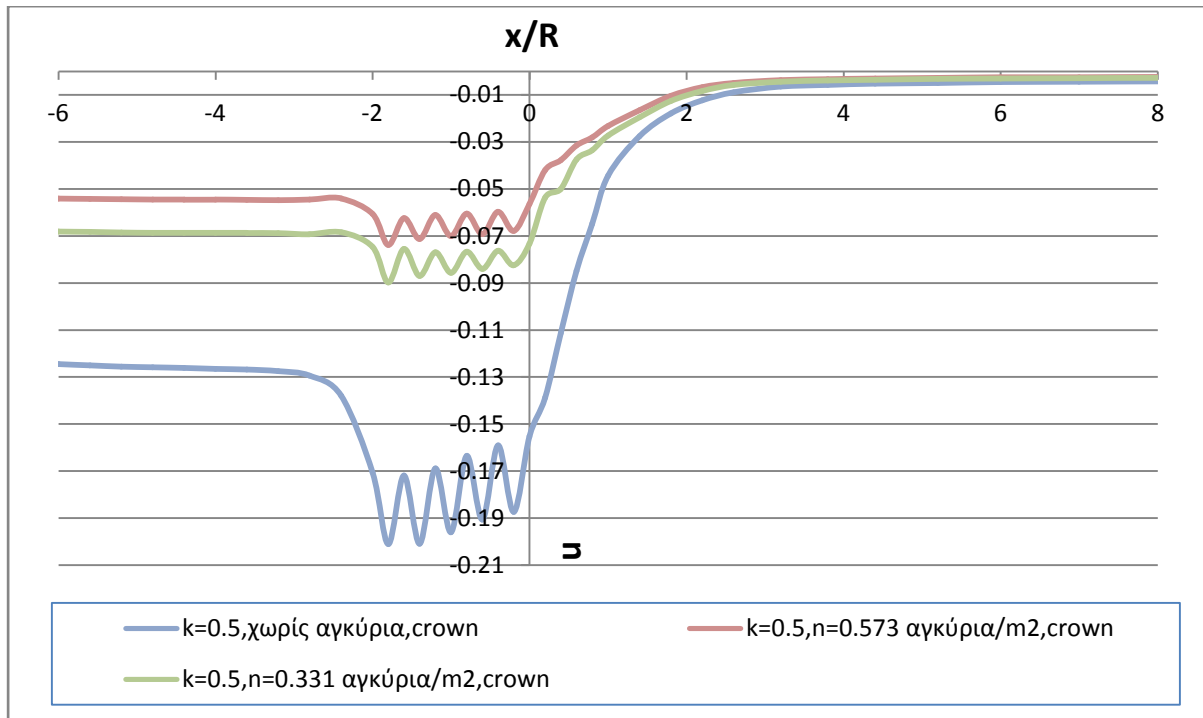
Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών μελετήθηκαν οι συγκλίσεις στα πλευρικά τοιχώματα στη θέση του μετώπου και υπολογίστηκε ο λόγος της οριζόντιας σύγκλισης τοιχώματος με ενίσχυση μετώπου με αγκύρια προς την αντίστοιχη με ανυποστήρικτο μέτωπο. Τα μεγέθη αυτά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα για τη σύγκλιση οροφής.

Στη συνέχεια δίνονται τα **Σχήματα 6.37** και **6.38** όπου παρουσιάζονται οι συγκλίσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο και 2 διατάξεις αγκυρίων όσον αφορά την σύγκλιση οροφής και τοιχώματος αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα και η σύγκρισή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.14.



Σχήμα 6.37: Διάγραμμα σύγκρισης σύγκλισης τοιχώματος για ανυποστήρικτο μέτωπο και δύο διατάξεις αγκυρίων για έδαφος με $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa, και $K_0=0.5$.



Σχήμα 6.38: Διάγραμμα σύγκρισης σύγκλισης οροφής για ανυποστήρικτο μέτωπο και δύο διατάξεις αγκυρίων για έδαφος με $\phi=25^{\circ}$, $c=20$ kPa, και $K_0=0.5$.

Από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων προκύπτει ότι η σύγκλιση τοιχώματος σε κάθε θέση είναι μικρότερη από την σύγκλιση οροφής στην ίδια θέση. Επίσης παρατηρείται ότι η προσύγκλιση του τοιχώματος μπροστά από το μέτωπο αναπτύσσεται πολύ πιο κοντά στο μέτωπο, σε απόσταση περίπου ίση με D , ενώ η σύγκλιση οροφής ξεκινά να αναπτύσσεται σε απόσταση περίπου ίση με $4D$ μπροστά από το μέτωπο. Παράλληλα, πρέπει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή αγκυρίων στο μέτωπο συμβάλλει πολύ λιγότερο στην μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος σε σχέση με την αντίστοιχη της σύγκλισης οροφής.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα σύγκλισης τοιχώματος στο μέτωπο και λόγου συγκλίσεων στο μέτωπο και σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα μεγέθη της σύγκλισης οροφής.

ϕ	c (kPa)	k	Διάταξη (n)	$u_{si}(\text{fiber})/u_{si}(\text{no fiber})$	$u_{cr}(\text{fiber})/u_{cr}(\text{no fiber})$	Ποσοστό $\Delta(u_{si})/\Delta(u_{cr})$
20	25	0.5	0.573	0.473098	0.363417792	1.30180097
20	25	0.5	0.331	0.670533	0.472390896	1.41944456
20	25	1.0	0.573	0.553579	0.333195593	1.66142449
20	25	1.0	0.331	7.18E-01	4.36E-01	1.64722238

Από τη μελέτη του παραπάνω Πίνακα παρατηρείται ότι ο λόγος των συγκλίσεων τοιχώματος είναι για κάθε περίπτωση μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των συγκλίσεων οροφής στη θέση του μετώπου. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση των

αγκυρίων είναι μικρότερη για τη σύγκλιση τοιχωμάτων. Επίσης πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι η σχέση αυτών των λόγων δεν είναι αναλογική, καθώς δεν είναι σταθερός ο λόγος των τιμών αυτών [$\Delta(u_{si})/\Delta(u_{cr})$].

Για το λόγο αυτόν δεν κατέστη δυνατή η δημιουργία μιας προσεγγιστικής σχέσης για την επίδραση των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων τοιχωμάτων ανάλογης αυτής του λόγου των συγκλίσεων οροφής (Σχήμα 6.31).

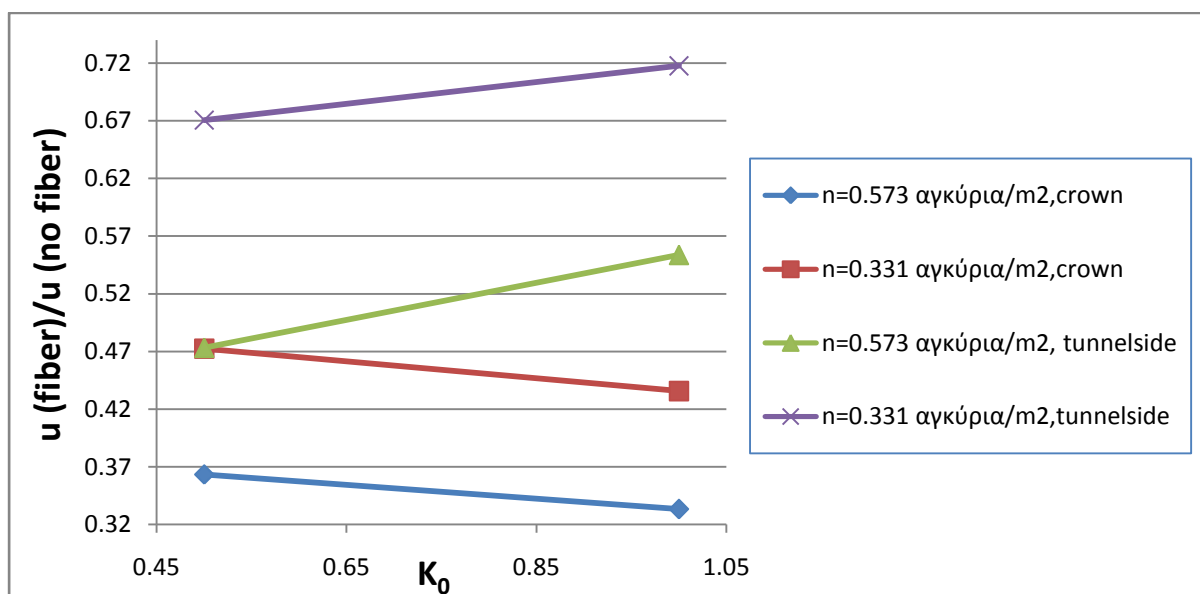
6.7.2. Επιρροή κάθε παραμέτρου ξεχωριστά

Στην εργασία αυτή, για να ελέγξουμε την επίδραση των αγκυρίων, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε ένα μόνο εδαφικό υλικό. Άρα σε αυτό το υποκεφάλαιο θα ελέγξουμε την επιρροή στα αποτελέσματα των λόγων σύγκλισης τοιχωμάτων των εξής παραμέτρων:

- Συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0
- Πυκνότητα αγκυρίων στο μέτωπο n

Επιρροή συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει το **Σχήμα 6.39**, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων στις παρειές και στην οροφή, συναρτήσει του K_0 .

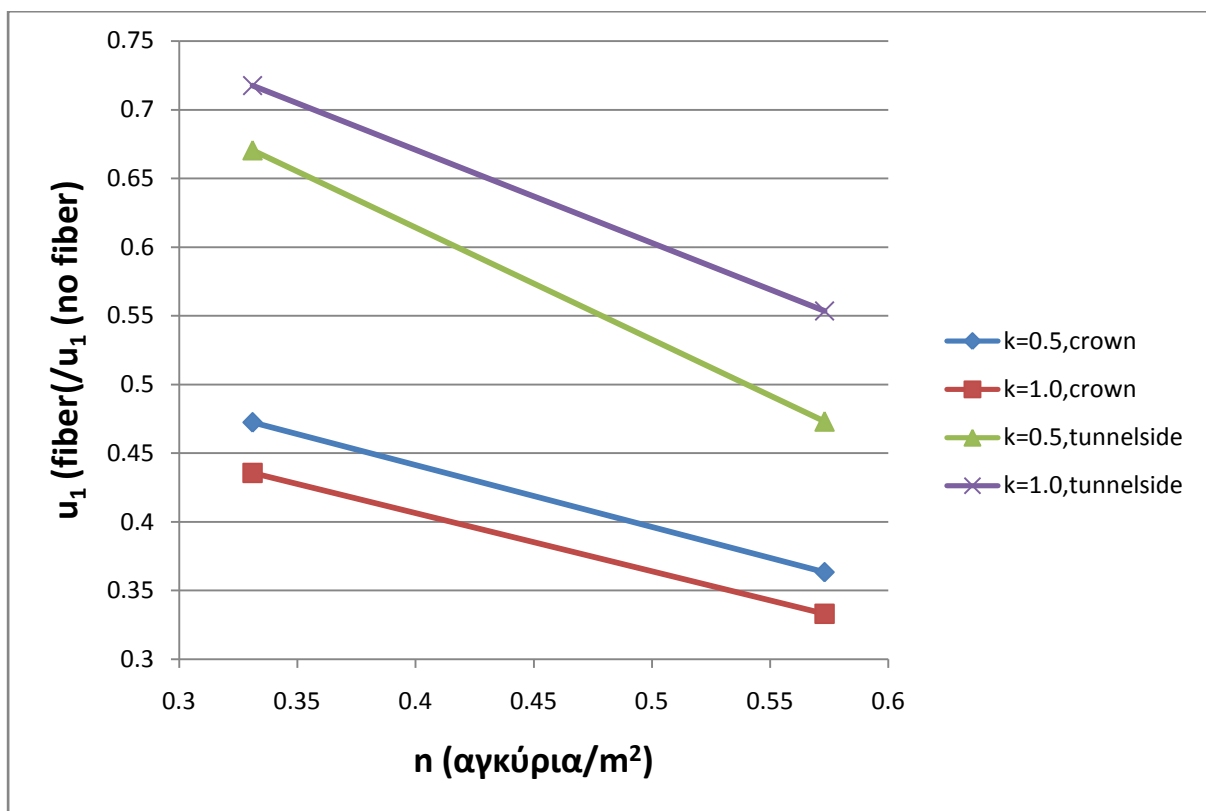


Σχήμα 6.39: Διάγραμμα μεταβολής του λόγου των συγκλίσεων στις παρειές και στην οροφή, συναρτήσει του K_0 , για τις δύο διατάξεις αγκυρίων

Παρατηρείται ότι η πυκνότερη διάταξη αγκυρίων δίνει μικρότερες τιμές των λόγων συγκλίσεων τόσο στην οροφή όσο και στις παρειές. Όμως είναι εμφανής και μια μεγάλη διαφορά. Ο λόγος των συγκλίσεων στις παρειές (υποστηριγμένο μέτωπο/ανυποστηρίκτο μέτωπο) αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή K_0 , ενώ αντίστοιχα ο λόγος των συγκλίσεων οροφής μειώνεται.

Επιρροή πυκνότητας αγκυρίων στο μέτωπο (n)

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει το **Σχήμα 6.40**, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων στις παρειές και στην οροφή, συναρτήσει της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο.



Σχήμα 6.40: Διάγραμμα μεταβολής του λόγου των συγκλίσεων στις παρειές και στην οροφή, συναρτήσει της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο, για τις δύο τιμές του συντελεστή K_0 .

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του λόγου των συγκλίσεων στις παρειές είναι πιο απότομη σε σχέση με αυτή των συγκλίσεων οροφής, λόγω αύξησης της πυκνότητας των αγκυρίων.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 6 παρατηρούνται τα εξής:

- Η τριδιάστατη ανάλυση παρέχει μεγάλες δυνατότητες υπολογισμού μετατοπίσεων σε οποιοδήποτε σημείο, τόσο κοντά όσο και μακριά από τα τοιχώματα της εκσκαφής και το μέτωπο
- Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού είναι η ευστάθεια του μετώπου. Για την επίτευξη αυτού απαιτείται η χρήση διάφορων μεθόδων ενίσχυσης και αντιστήριξης του μετώπου και του πυρήνα προώθησης.

Για τις αναλύσεις σε ανυποστήρικτη σήραγγα:

- Παρατηρούνται πολύ μικρές τιμές συγκλίσεων τόσο στο μέτωπο όσο και στη θέση πλήρους αποτόνωσης των τάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι προσομοιώθηκαν εδάφη με καλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν δυνατότητα αυτοϋποστήριξης.
- Στο μέτωπο έχει συμβεί πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης. Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο για συντελεστή $K_0=0.5$ (24-46%) σε σχέση με $K_0=1.0$ (10-25%)
- Με την εφαρμογή των αγκυρίων, οι συγκλίσεις στο μέτωπο τείνουν να μειωθούν σε μικρό βαθμό (10 – 30%), ανάλογα πάντα και με την πυκνότητα των αγκυρίων
- Από τη σύγκριση της τριδιάστατης αριθμητικής μεθόδου με διδιάστατες αριθμητικές μεθόδους και αναλυτικές λύσεις, οι διδιάστατες και οι αναλυτικές μέθοδοι δίνουν πολύ μικρότερες συγκλίσεις. Άρα οι διδιάστατες και οι αναλυτικές λύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένα πρώτο εργαλείο υπολογισμού των συγκλίσεων.
- Η μείωση της εξώθησης του μετώπου λόγω της επίδρασης των αγκυρίων είναι πολύ μικρή, της τάξης του 20-30%. Η μεταβολή του συντελεστή K_0 επιφέρει μεταβολή μόνο των απόλυτων τιμών των εξωθήσεων και όχι στο ποσοστό μείωσης τους λόγω εφαρμογής αγκυρίων (μεταβολή 1-5%)

Για τις αναλύσεις σε υποστηριγμένη σήραγγα:

- Στο μέτωπο έχει υλοποιηθεί ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης.
- Παρατηρείται μείωση των συγκλίσεων οροφής του μετώπου κατά 30-70% εξωθήσεων και του κανονικοποιημένου εμβαδού τους σε ποσοστό 30 – 67%, ανάλογα με το εδαφικό υλικό και την πυκνότητα των αγκυρίων στο μέτωπο

- Για δεδομένη τιμή της γωνίας τριβής φ , η επιρροή της μεταβολής της συνοχής ποικίλλει. Για μικρές τιμές της γωνίας φ ($20^\circ - 30^\circ$) η επιρροή της μεταβολής της συνοχής είναι μεγάλη, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας φ ($30^\circ - 40^\circ$) η επιρροή είναι αμελητέα, επειδή για καλύτερες γεωτεχνικές παραμέτρους η συμβολή των αγκυρίων στην ευστάθεια είναι μικρή. Αντίστοιχη συμπεριφορά ισχύει και για την εξώθηση του μετώπου
- Η αύξηση της γωνίας τριβής φ προκαλεί μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο. Για μικρές τιμές της γωνίας φ ($20^\circ - 30^\circ$) η επιρροή της μεταβολής της φ είναι μεγάλη, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας φ ($30^\circ - 40^\circ$) η επιρροή είναι αμελητέα, επειδή για καλύτερες γεωτεχνικές παραμέτρους παρατηρούνται μικρές συγκλίσεις και δεν αναμένεται μεταβολή τους λόγω συμβολής των αγκυρίων. Αντίστοιχη συμπεριφορά ισχύει και για την εξώθηση του μετώπου.
- Για δεδομένο εδαφικό υλικό, με μεταβολή μόνο του K_0 , προκύπτει σημαντική μεταβολή στις συγκλίσεις οροφής μόνο για $K_0 > 1.0$. Η μεταβολή αυτή είναι σημαντικότερη για την πιο αραιή διάταξη 2 και λαμβάνεται υπόψιν στον σχεδιασμό.
- Από την σύγκριση των αναλύσεων για ανυποστήρικτη σήραγγα και σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη προκύπτει ότι για τη δεύτερη παρατηρούνται μεγαλύτερη μείωση των συγκλίσεων και των εξωθήσεων στο μέτωπο λόγω τοποθέτησης αγκυρίων fiberglass. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την υποστηριγμένη σήραγγα προσομοιωθήκαν χαμηλότερες γεωτεχνικές παράμετροι του εδάφους (c, φ). Σε αυτά τα εδάφη αναπτύσσονται μεγαλύτερες συγκλίσεις στο μέτωπο και στην πλήρη αποτόνωση, και τα αγκύρια μετώπου μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση τους.
- Δεν παρατηρείται σταθερή μείωση της συμβολής των αγκυρίων με την αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{cs}
- Σημαντικότερος ο ρόλος της γωνίας τριβής φ στην επίδραση των αγκυρίων μετώπου στη μείωση των συγκλίσεων οροφής. Για σταθερή περίπου τιμή της σ_{cs} , παρατηρείται μικρότερη συμβολή των αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό με μεγαλύτερη γωνία τριβής φ .
- Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει εξάρτηση της επιρροής των αγκυρίων μετώπου στη μείωση των συγκλίσεων από τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου F_{FS} . Όσο αυξάνεται ο συντελεστής, αυξάνεται και ο λόγος συγκλίσεων $\frac{u_3(\text{fiber})}{u_3(\text{no fiber})}$ με μειούμενο ρυθμό.
- Προτάθηκε νέος συντελεστής που προσομοιώνει τη επίδραση των αγκυρίων μετώπου στην εξέλιξη των συγκλίσεων:

$$F_{NI} = \frac{F_{FS}^{1.5}}{K_0^{0.3} \cdot n^{0.9}}$$

- Προτάθηκε καμπύλη που προσεγγίζει στο μέγιστο βαθμό την επίδραση του συντελεστή F_{Ni} στο λόγο $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$
- Παρατηρείται μέγιστη συνεισφορά των αγκυρίων ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}=0.3$) για $F_{Ni}=0.3$.
- Παρατηρείται ελάχιστη συνεισφορά των αγκυρίων ($\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}=0.88$) για $F_{Ni}=3.2$.
- Για τιμές του συντελεστή F_{Ni} **μέχρι και 1,2** παρατηρείται μεγάλη μεταβολή του λόγου $\frac{u_3(fiber)}{u_3(no fiber)}$, σχεδόν γραμμική. Στο εύρος αυτό των τιμών του συντελεστή, παρατηρείται η μεγαλύτερη συμβολή των αγκυρίων στην μείωση των συγκλίσεων (ποσοστό 30 – 70%).
- Για τιμές του συντελεστή F_{Ni} **μεγαλύτερες του 1 - 1.2**, παρατηρείται μικρή μείωση των συγκλίσεων οροφής στο μέτωπο (της τάξης του 10 - 30%) λόγω επιρροής των αγκυρίων
- Η επιρροή της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους και του μέτρου ακαμψίας των αγκυρίων προκύπτει αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψιν
- Δεν κατέστη δυνατή η εφαρμογή της προσεγγιστικής καμπύλης για την επίδραση των αγκυρίων στην εξέλιξη των συγκλίσεων τοιχωμάτων.
- Ο λόγος των συγκλίσεων στις παρειές αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή K_0 , ενώ αντίστοιχα ο λόγος των συγκλίσεων οροφής μειώνεται.

Θεωρείται σκόπιμη η παράθεση ορισμένων προτάσεων σχετικά με την διενέργεια περαιτέρω έρευνας και παραμετρικών αναλύσεων βάσει των συμπερασμάτων που προέκυψαν σε αυτή την εργασία. Για περαιτέρω ανάλυση σημαντικές θα ήταν οι προτάσεις:

- Η διενέργεια παραμετρικής ανάλυσης για το βάθος υπερκειμένων H . Στον νέο συντελεστή που προτάθηκε, συμπεριλαμβάνεται ως παράμετρος αλλά στις δικές μας αναλύσεις θεωρήθηκε σταθερό $H=50m$. Να γίνει έλεγχος αν η καμπύλη που προτάθηκε ισχύσει και για άλλες τιμές του H
- Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν ένα εύρος τιμών των παραμέτρων (c, ϕ) , του συντελεστή K_0 και της πυκνότητας των αγκυρίων στο μέτωπο. Να γίνει έλεγχος αν η προσεγγιστική καμπύλη που προτάθηκε ισχύει και για μεγαλύτερο εύρος τιμών των παραμέτρων αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anagnostou G., Kovári K., 1994, *“The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels”*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.9, 165-174.
2. Anagnostou G., Kovári K., 1996, *“Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields”*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.11, 165-173.
3. Hoek Evert, 1999, *“Support for Very Weak Rock Associated with Faults and Shear Zones”*, International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia.
4. Hoek Evert and Marinos Paul, 2000, *“Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses”*, Tunnels and Tunnelling International.
5. Kamata Hirohisa and Mashimo Hideto, 2003, *“Centrifuge Model Test of Tunnel Face Reinforcement by Bolting”*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.18, 205-212.
6. Καββαδάς Μ., 2006-2007, *“Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων”*, Σειρά μεταπτυχιακών διαλέξεων στο ΕΜΠ.
7. Kavvadas M. and Proutzopoulos G., 2009, *“3D Analyses of Tunnel Face Reinforcement using Fibreglass Nails”*, EURO:TUN 2009, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Ruhr University Bochum, Aedificatio Publishers, 1-4
8. Kavvadas M., Proutzopoulos G. and Tzivakos K., 2009, *“Prediction of Face Stability in Unsupported Tunnels using 3D Finite Element Analyses”*, EURO:TUN 2009, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Ruhr University Bochum, Aedificatio Publishers, 1-4
9. Κουρεντζής Βασίλειος, 2008, *“Διερεύνηση της Επίδρασης Αγκυρίων Fiberglass στην Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων”*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
10. Λαζαρίδη Ελένη, 2005, *“Μέθοδοι Ενίσχυσης Μετώπου Διάνοιξης Σηράγγων”*, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
11. Lunardi Pietro, 2000, *“The Design and Construction of Tunnels using the Approach based on the Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils”*, T & T International, ADECO – RS Approach.
12. Μαρίνος Π, 2008, *“Σχεδιασμός υπογείων έργων”*, Σημειώσεις μεταπτυχιακού προγράμματος, ΕΜΠ.

13. Ng C.W.W., Lee G.T.K., 2002, "A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces", *Computers and Geotechnics*, Vol.29, 673-697.
14. Παπαδόπουλος Β., 2004, "Στοιχεία Μαθήματος «Βραχομηχανική – Σήραγγες»", ΕΜΠ.
15. Παπαδόπουλος Β., 2008, "Σχεδιασμός υπογείων έργων", Σημειώσεις μεταπτυχιακού προγράμματος, ΕΜΠ.
16. Peila D., 1994, "A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.12, 145-168.
17. Shin Jong-Ho, Choi Yong-Ki, Kwon Oh-Yeob, Lee Sang-Duk, 2007, "Model Testing for Pipe-Reinforced Tunnel Heading in a Granular Soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*.
18. Yoo Chungsik, 2001, "Finite- Element Analysis of Tunnel Face Reinforced by Longitudinal Pipes", *Computers and Geotechnics*, Vol.29, 73-94.
19. Yoo Chungsik, Shin Hyun-Kang, 2003, "Deformation Behaviour of Tunnel Face Reinforced with Longitudinal Pipes- Laboratory and Numerical Investigation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.18, 303-319.

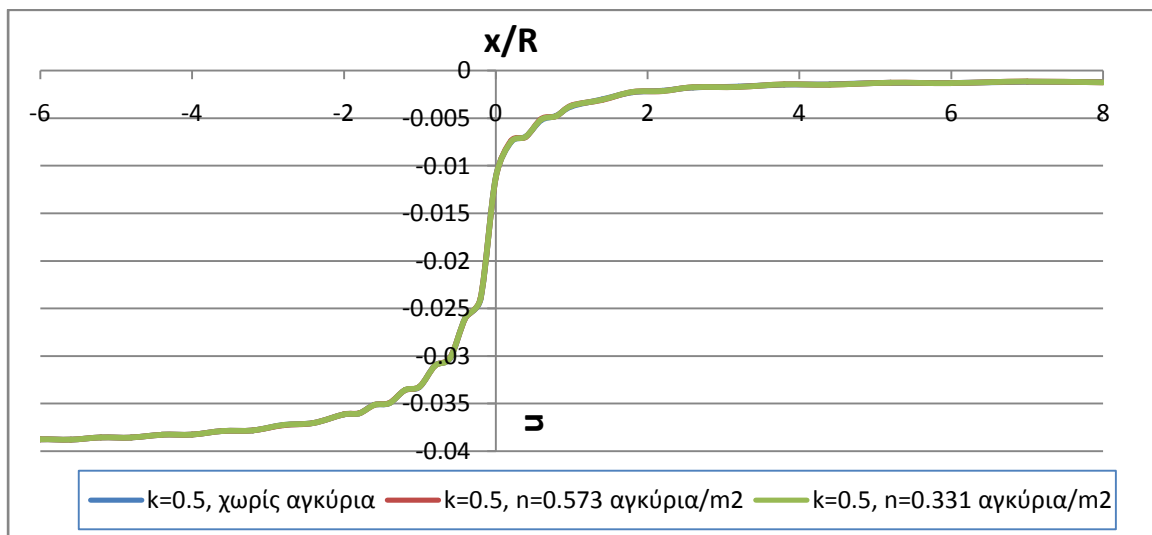
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αναλύσεις σε ανυποστήρικτη σήραγγα

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

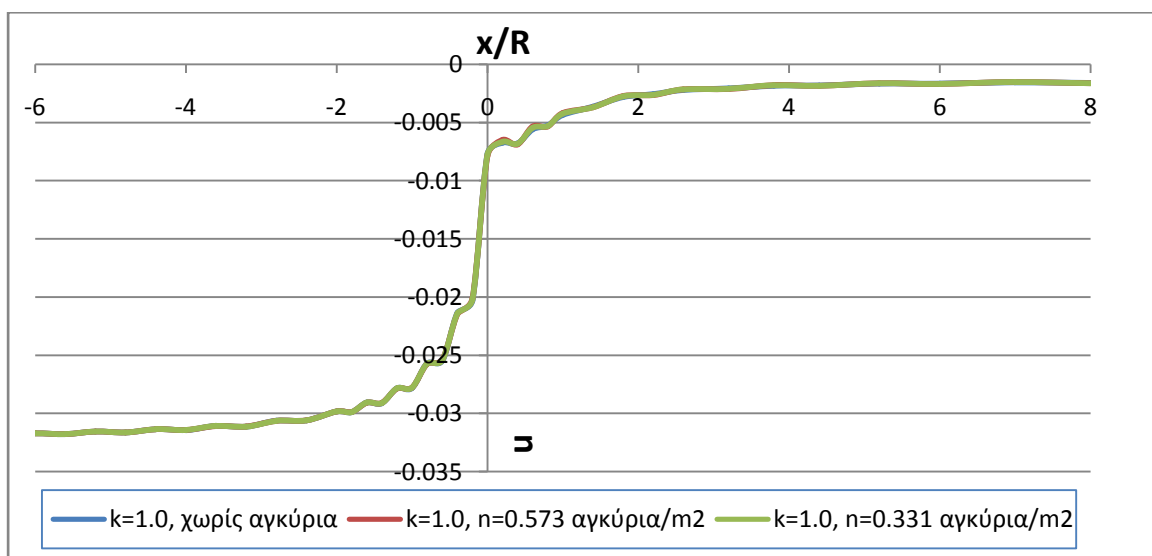
Συγκλίσεις

Ελαστικές αναλύσεις

➤ $k=0.5$

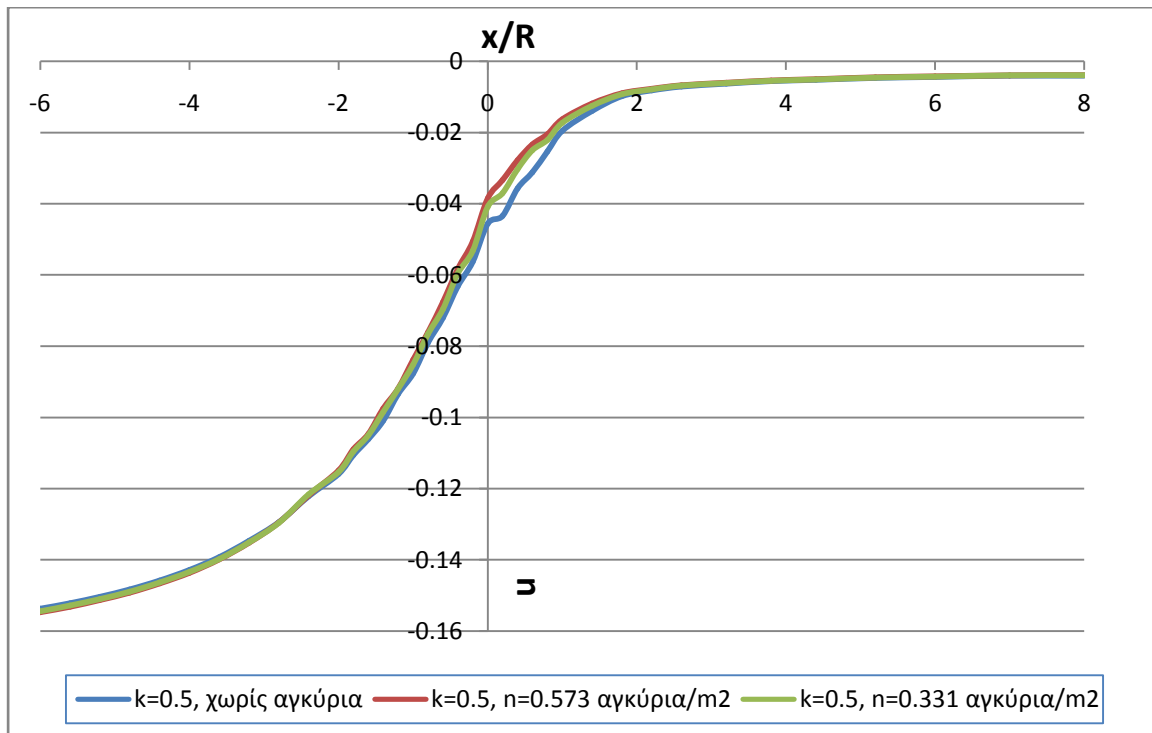


➤ $k=1.0$

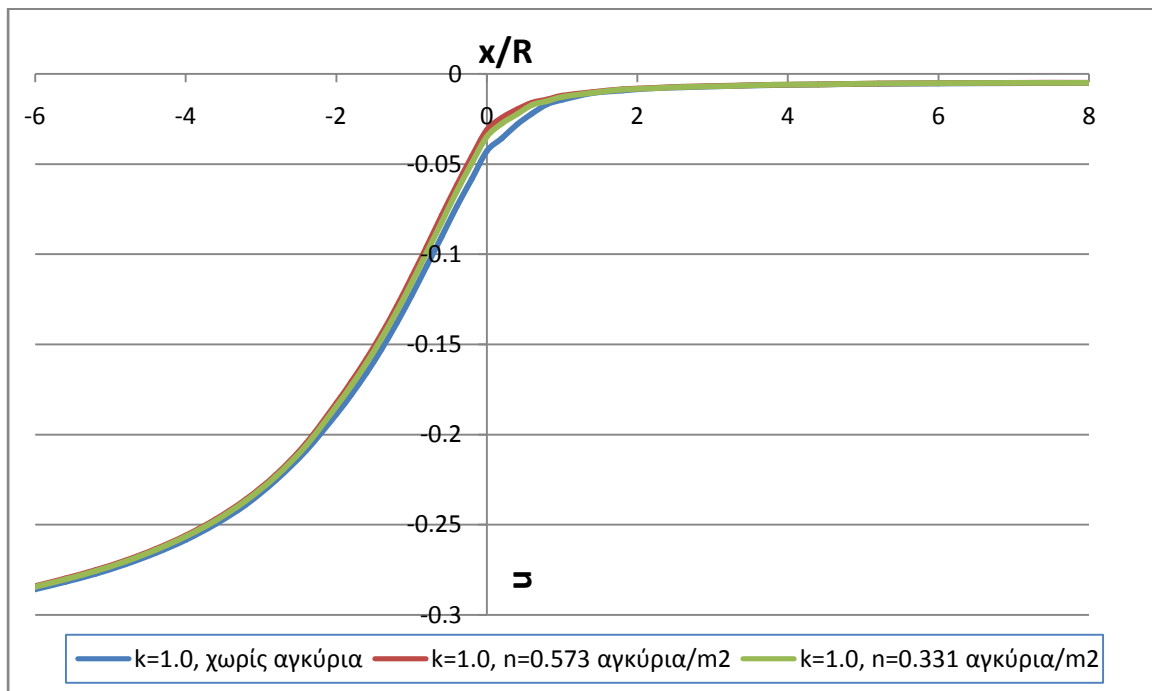


$\phi=30^\circ, c=50\text{kPa}$

➤ $k=0.5$

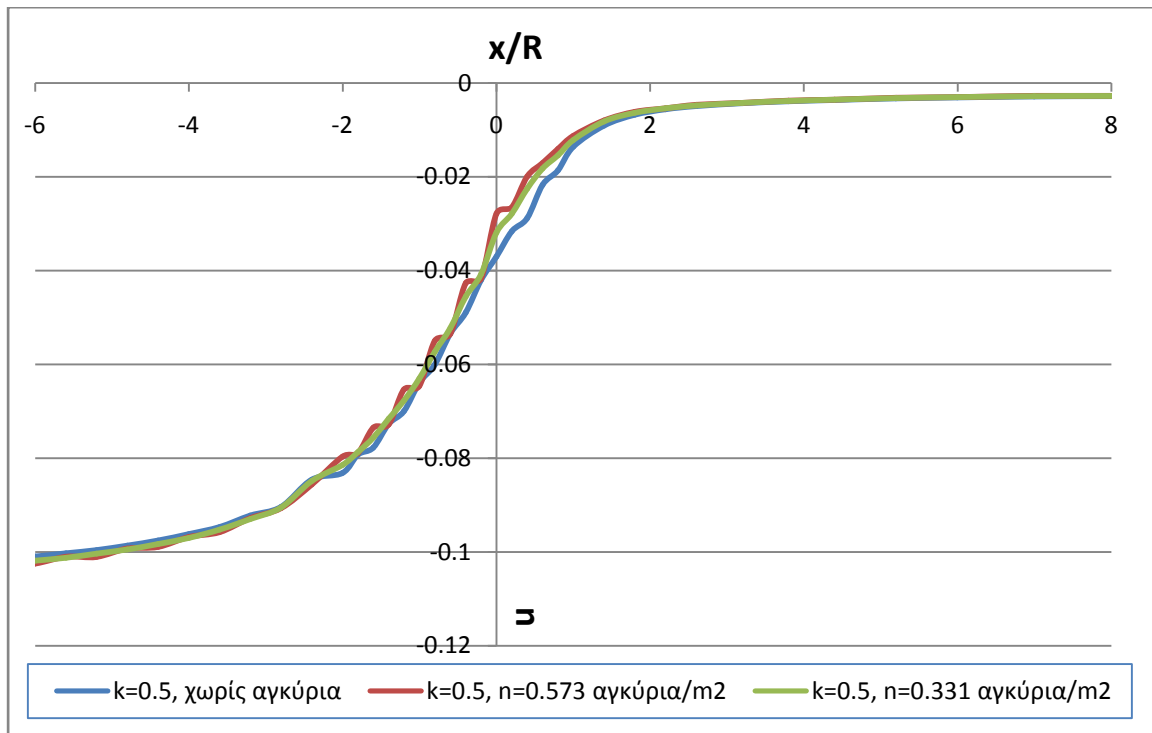


➤ $k=1.0$

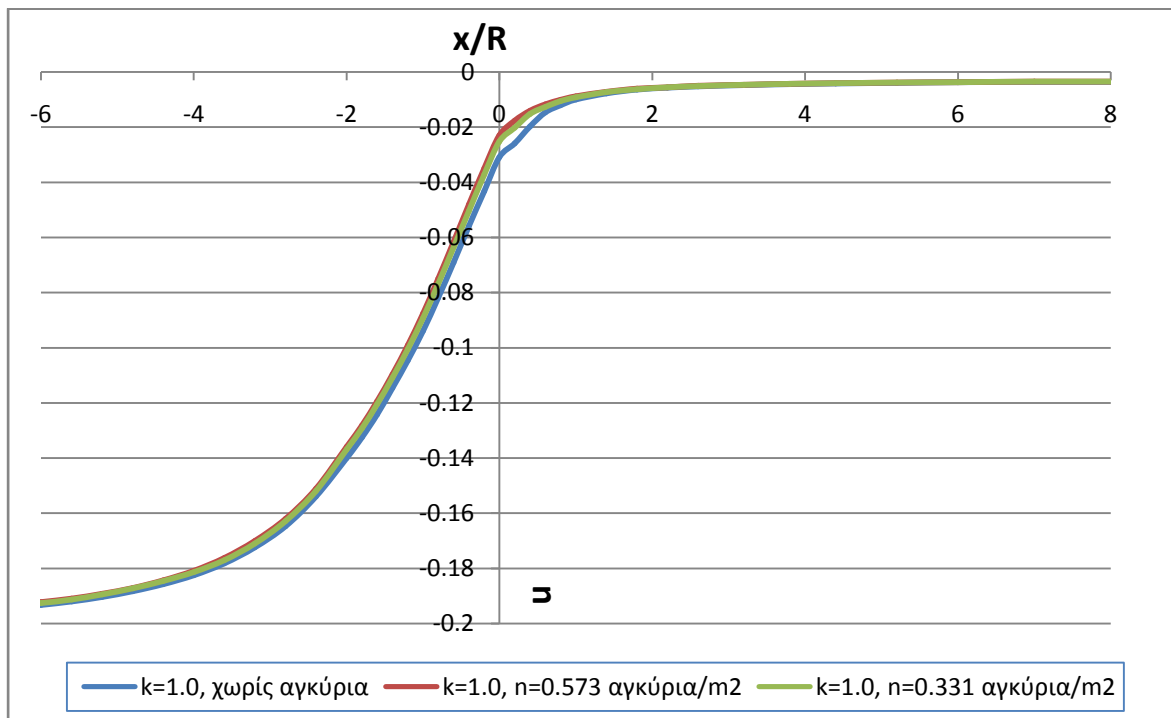


$\phi=35^\circ, c=40\text{kPa}$

➤ $k=0.5$

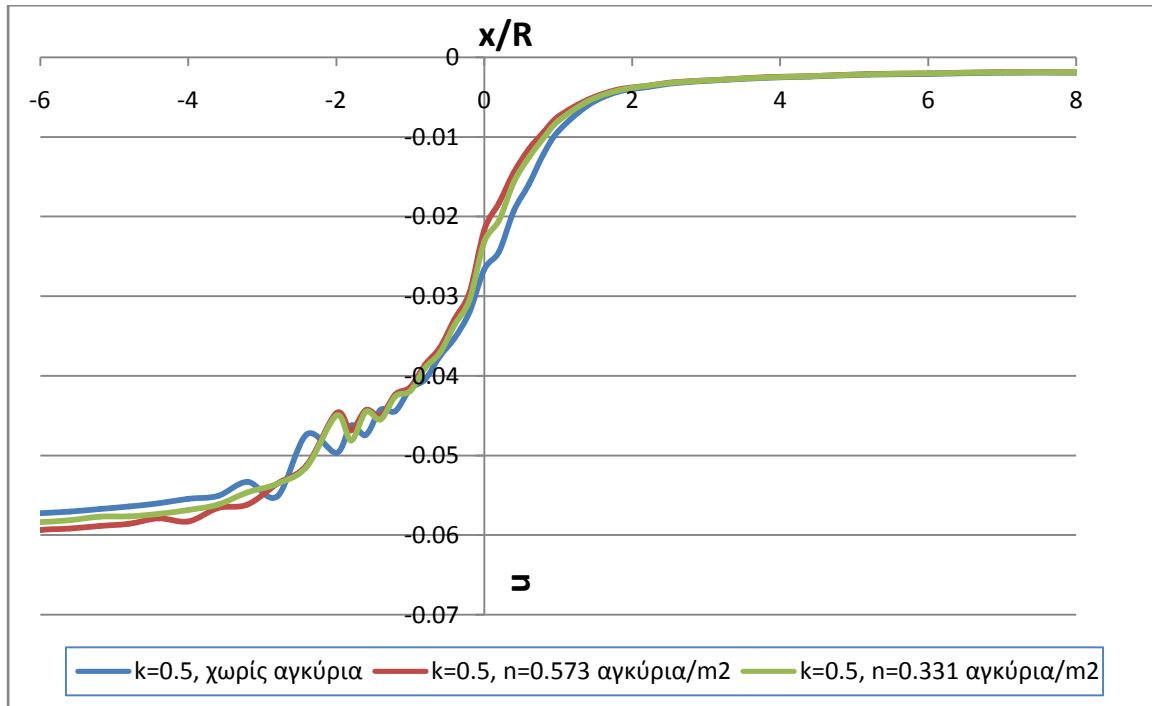


➤ $k=1.0$

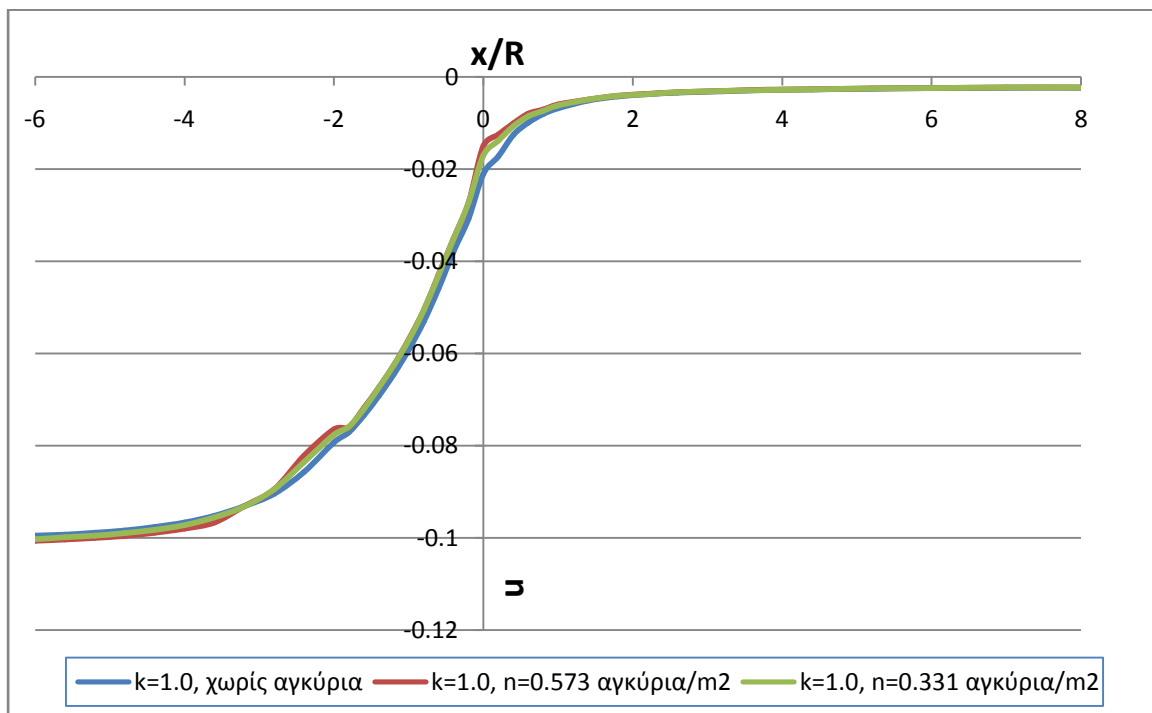


$\phi=40^\circ$, $c=35\text{kPa}$

➤ $k=0.5$



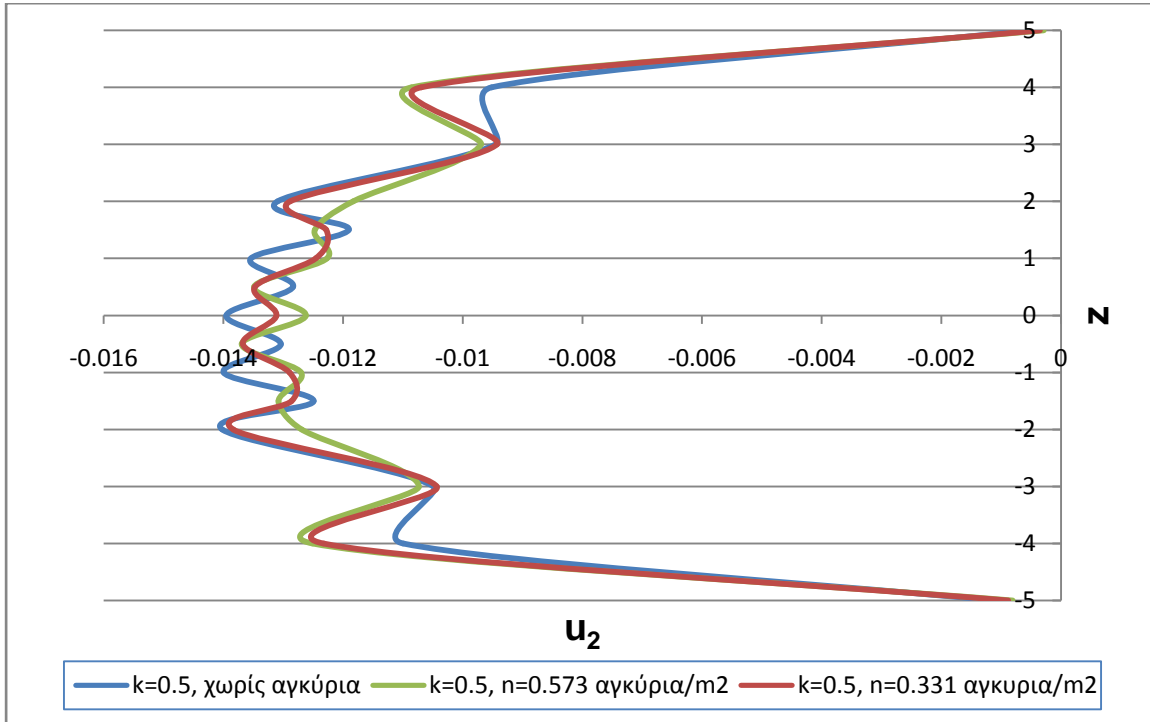
➤ $k=1.0$



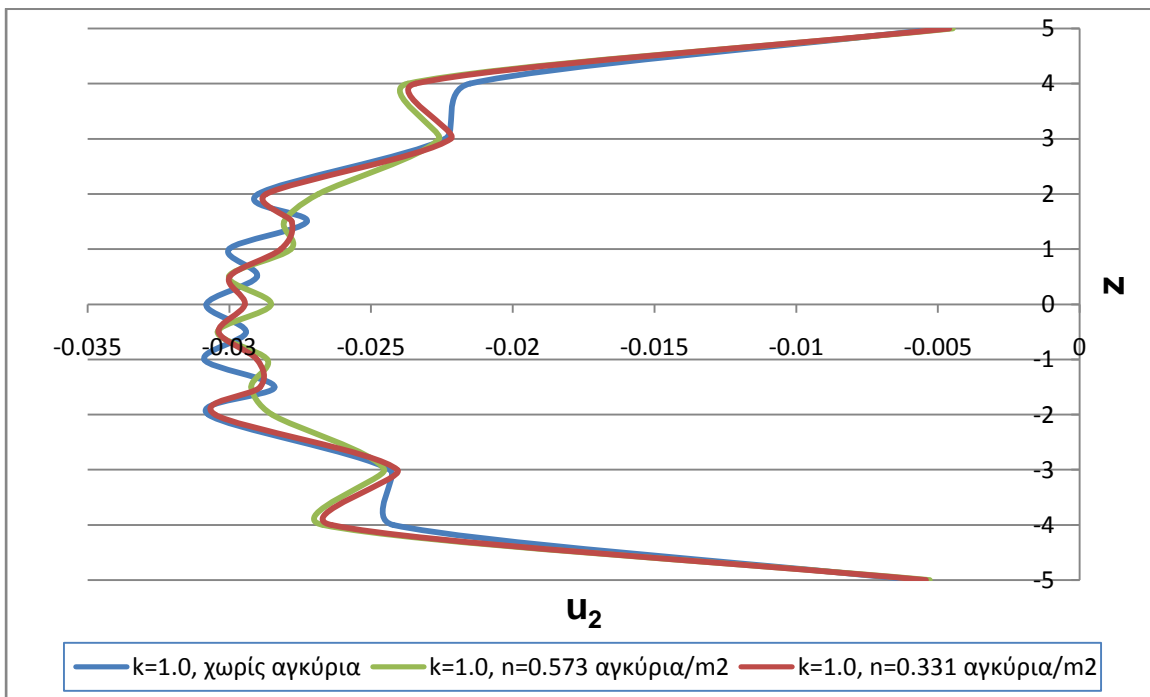
Εξωθήσεις

Ελαστικές αναλύσεις

➤ $k=0.5$

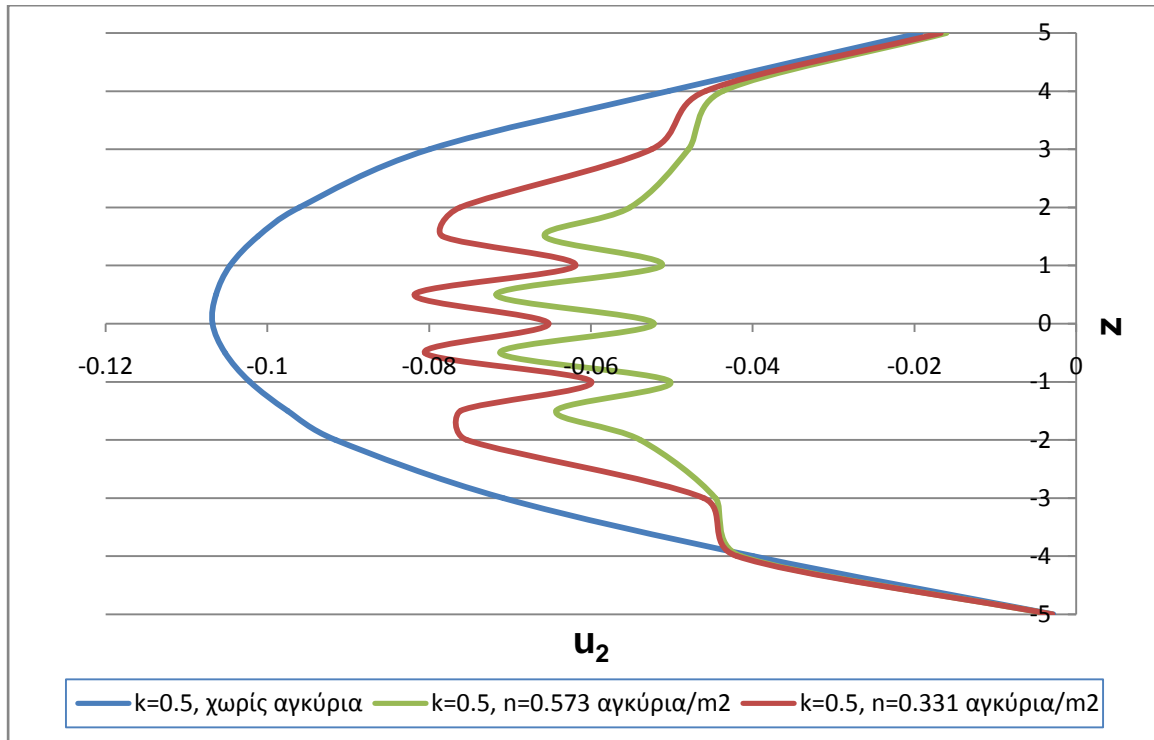


➤ $k=1.0$

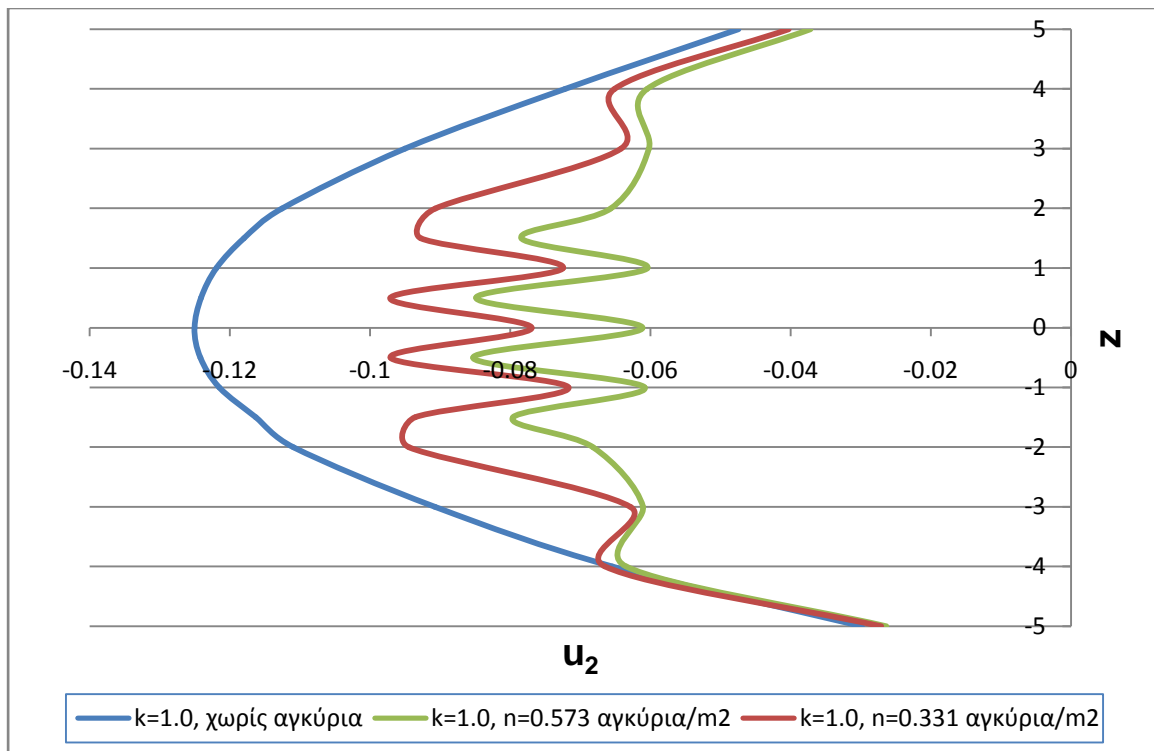


$\varphi=30^\circ, c=50\text{kPa}$

➤ $k=0.5$

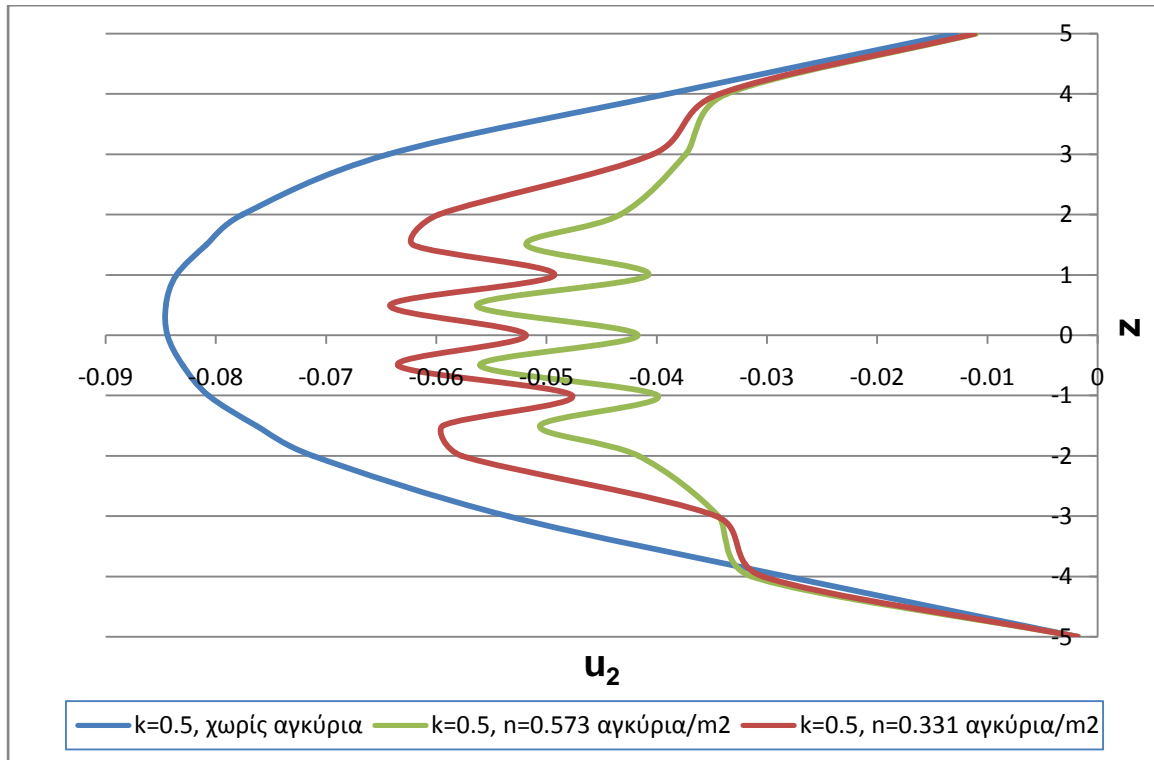


➤ $k=1.0$

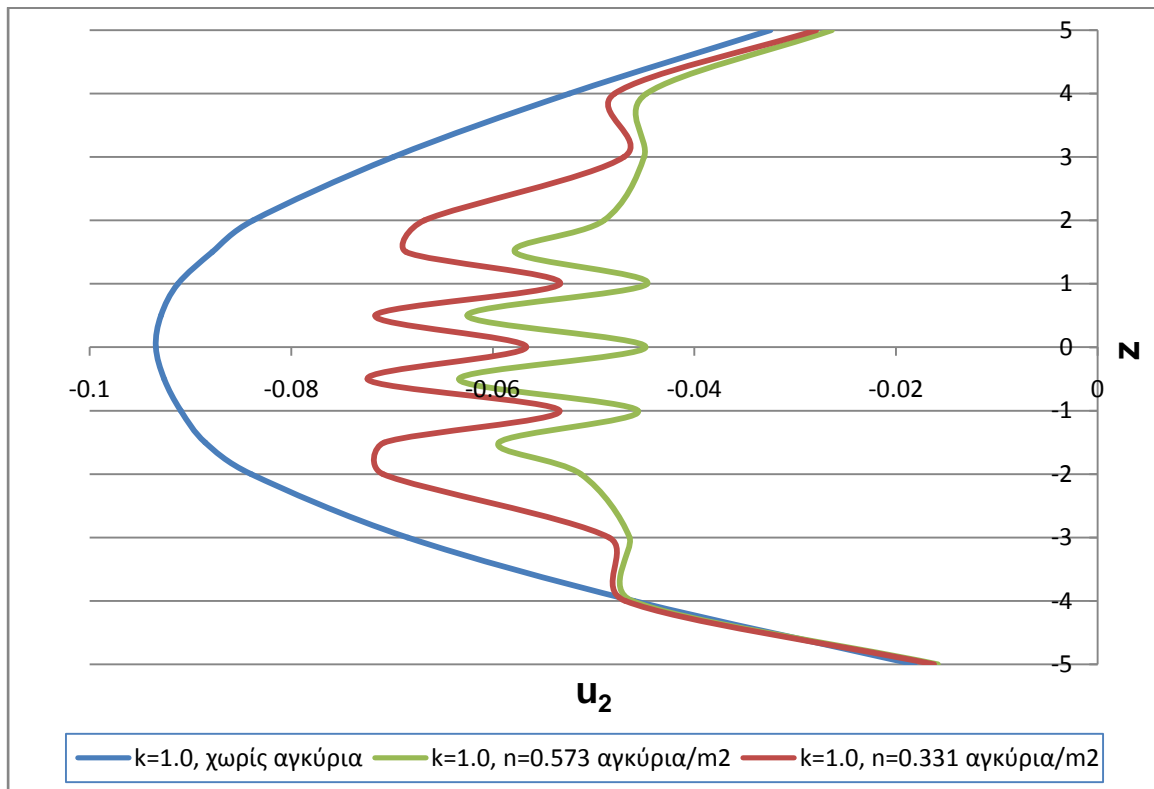


$\phi=35^\circ, c=40\text{kPa}$

➤ $k=0.5$

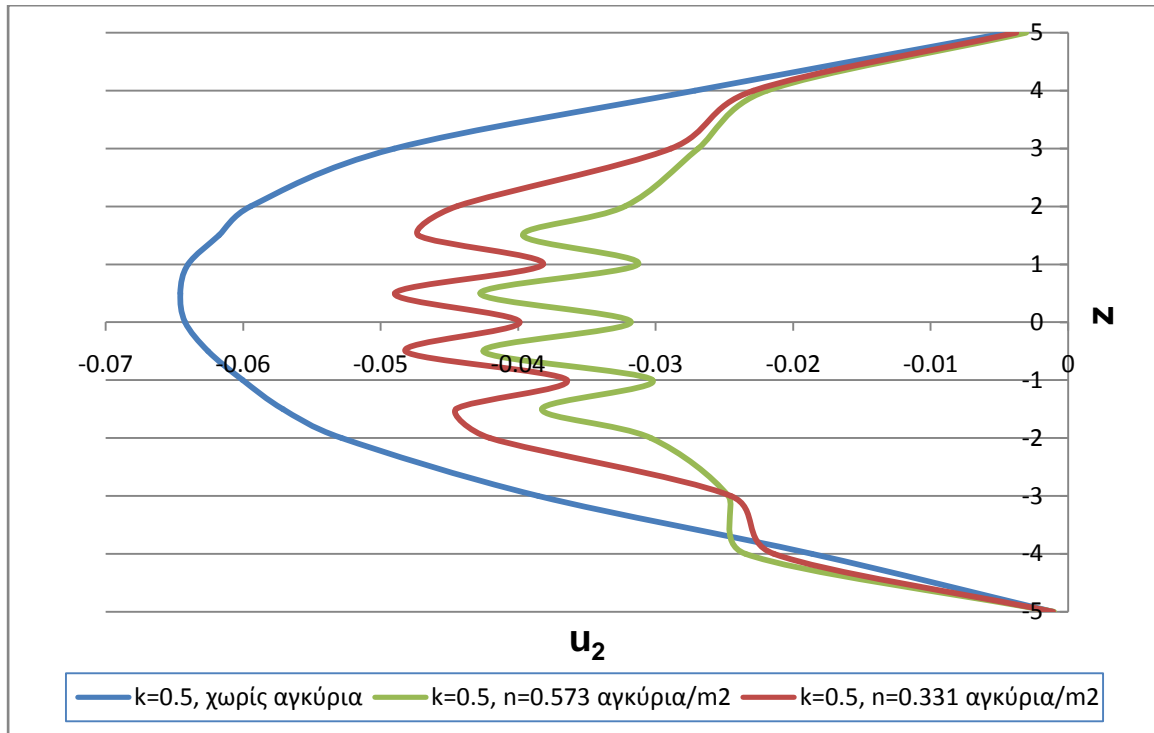


➤ $k=1.0$

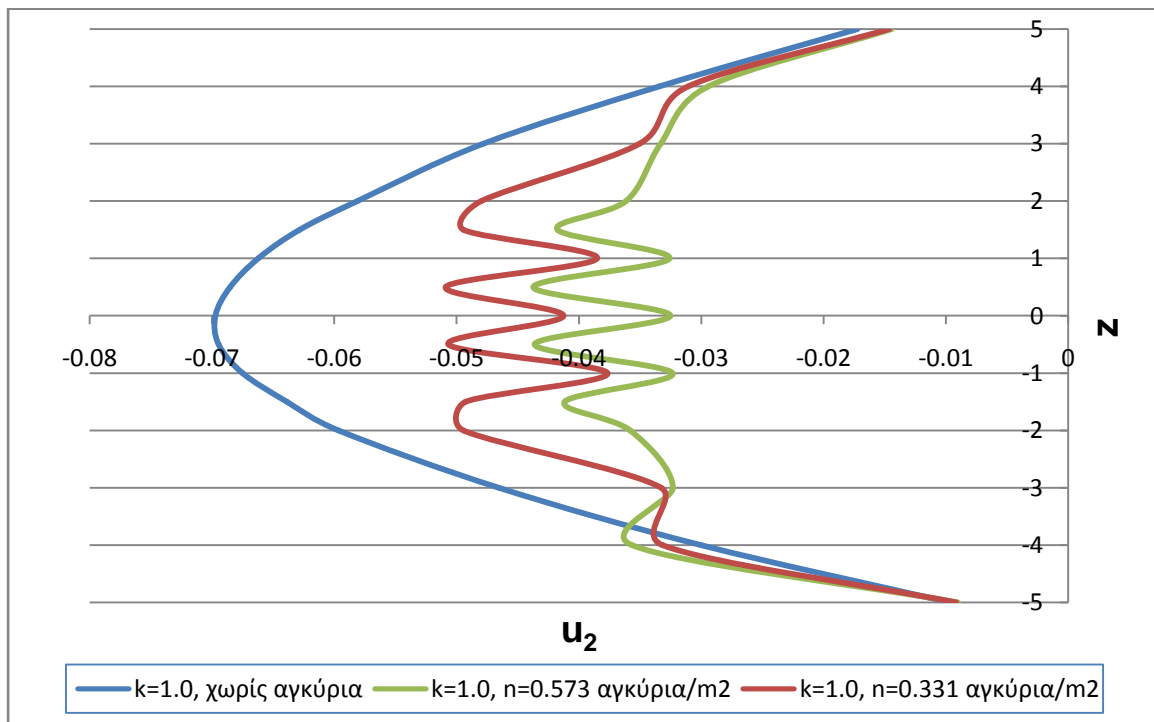


$\varphi=40^\circ, c=35\text{kPa}$

➤ $k=0.5$



➤ $k=1.0$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Αναλύσεις σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πίνακας 6.7: Οι 62 αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη

a/a	Case	ϕ (°)	c (kPa)	ψ (°)	E (MPa)	k	n (αγκύρια/m ²)
1	3b	20	25	3	148	0.5	-
2	3b	20	25	3	148	0.5	0.573
3	3b	20	25	3	148	0.5	0.331
4	3b	20	25	3	148	1.0	-
5	3b	20	25	3	148	1.0	0.573
6	3b	20	25	3	148	1.0	0.331
7	5b	20	35	3	154	0.5	-
8	5b	20	35	3	154	0.5	0.573
9	5b	20	35	3	154	0.5	0.331
10	5b	20	35	3	154	1.0	-
11	5b	20	35	3	154	1.0	0.573
12	5b	20	35	3	154	1.0	0.331
13	12b	25	20	4	183	0.5	-
14	12b	25	20	4	183	0.5	0.573
15	12b	25	20	4	183	0.5	0.331
16	12b	25	20	4	183	0.7	-
17	12b	25	20	4	183	0.7	0.573
18	12b	25	20	4	183	0.7	0.331
19	12b	25	20	4	183	1.0	-
20	12b	25	20	4	183	1.0	0.573
21	12b	25	20	4	183	1.0	0.331
22	12b	25	20	4	183	1.3	-
23	12b	25	20	4	183	1.3	0.573
24	12b	25	20	4	183	1.3	0.331
25	14b	25	30	4	188	0.5	-
26	14b	25	30	4	188	0.5	0.573
27	14b	25	30	4	188	0.5	0.331
28	14b	25	30	4	188	1.0	-

a/a	Case	ϕ (°)	c (kPa)	ψ (°)	E (MPa)	k	n (αγκύρια/m ²)
29	14b	25	30	4	188	1.0	0.573
30	14b	25	30	4	188	1.0	0.331
31	22b	30	20	5	220	0.5	-
32	22b	30	20	5	220	0.5	0.573
33	22b	30	20	5	220	0.5	0.331
34	22b	30	20	5	220	0.7	-
35	22b	30	20	5	220	0.7	0.573
36	22b	30	20	5	220	0.7	0.331
37	22b	30	20	5	220	1.0	-
38	22b	30	20	5	220	1.0	0.573
39	22b	30	20	5	220	1.0	0.331
40	22b	30	20	5	220	1.3	-
41	22b	30	20	5	220	1.3	0.573
42	22b	30	20	5	220	1.3	0.331
43	25b	30	35	5	228	0.5	-
44	25b	30	35	5	228	0.5	0.573
45	27b	30	45	5	233	0.5	-
46	27b	30	45	5	233	0.5	0.573
47	30b	30	60	5	241	0.5	-
48	30b	30	60	5	241	0.5	0.573
49	33b	35	25	6	261	0.5	-
50	33b	35	25	6	261	0.5	0.573
51	35b	35	35	6	266	0.5	-
52	35b	35	35	6	266	0.5	0.573
53	36b	35	40	6	269	0.5	-
54	36b	35	40	6	269	0.5	0.573
55	37b	35	45	6	271	0.5	-
56	37b	35	45	6	271	0.5	0.573
57	44b	40	25	7	299	0.5	-
58	44b	40	25	7	299	0.5	0.573
59	45b	40	30	7	301	0.5	-
60	45b	40	30	7	301	0.5	0.573
61	46b	40	35	7	303	0.5	-
62	46b	40	35	7	303	0.5	0.573

ΠΙΝΑΚΑΣ ΛΟΓΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ

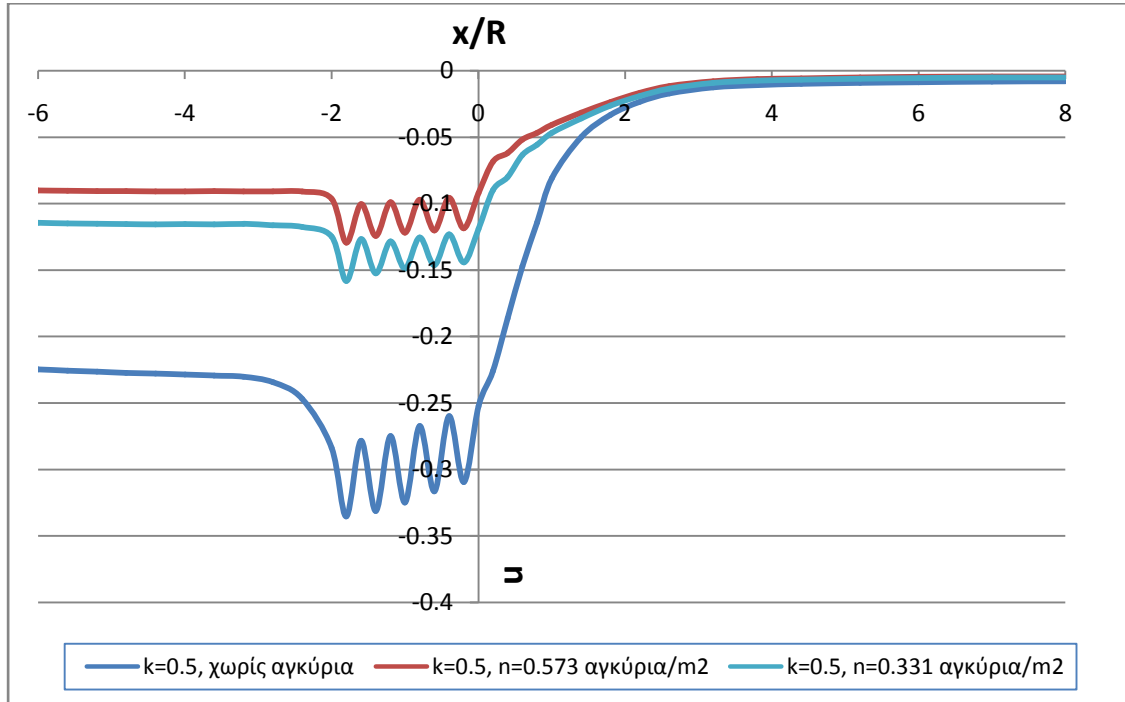
Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα λόγων συγκλίσεων οροφής για σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη της διανοιγμένης κοιλότητας πίσω από το μέτωπο

a/a	ϕ (°)	c (kPa)	k	n	u3(fiber)/u3(no fiber)	σ_{cs}	F_{FS}
2	20	25	0.5	0.573	36.44%	71.40740034	0.381462
3	20	25	0.5	0.331	47.21%	71.40740034	0.381462
5	20	25	1.0	0.573	31.41%	71.40740034	0.381462
6	20	25	1.0	0.331	43.05%	71.40740034	0.381462
8	20	35	0.5	0.573	59.29%	99.97036047	0.534047
9	20	35	0.5	0.331	70.87%	99.97036047	0.534047
11	20	35	1.0	0.573	52.29%	99.97036047	0.534047
12	20	35	1.0	0.331	65.39%	99.97036047	0.534047
14	25	20	0.5	0.573	36.34%	62.78742308	0.368655
15	25	20	0.5	0.331	47.24%	62.78742308	0.368655
17	25	20	0.7	0.573	34.35%	62.78742308	0.368655
18	25	20	0.7	0.331	45.51%	62.78742308	0.368655
20	25	20	1.0	0.573	33.32%	62.78742308	0.368655
21	25	20	1.0	0.331	43.56%	62.78742308	0.368655
23	25	20	1.3	0.573	29.72%	62.78742308	0.368655
24	25	20	1.3	0.331	41.61%	62.78742308	0.368655
26	25	30	0.5	0.573	63.10%	94.18113463	0.552983
27	25	30	0.5	0.331	72.96%	94.18113463	0.552983
29	25	30	1.0	0.573	55.23%	94.18113463	0.552983
30	25	30	1.0	0.331	68.19%	94.18113463	0.552983
32	30	20	0.5	0.573	52.53%	69.2820323	0.448866
33	30	20	0.5	0.331	62.37%	69.2820323	0.448866
35	30	20	0.7	0.573	50.36%	69.2820323	0.448866
36	30	20	0.7	0.331	57.06%	69.2820323	0.448866
38	30	20	1.0	0.573	47.21%	69.2820323	0.448866
39	30	20	1.0	0.331	57.21%	69.2820323	0.448866
41	30	20	1.3	0.573	41.40%	69.2820323	0.448866
42	30	20	1.3	0.331	52.55%	69.2820323	0.448866
44	30	35	0.5	0.573	81.34%	121.2435565	0.785515
46	30	45	0.5	0.573	86.95%	155.8845727	1.009948
48	30	60	0.5	0.573	87.93%	207.8460969	1.346597
50	35	25	0.5	0.573	81.12%	96.04910635	0.690163
52	35	35	0.5	0.573	83.29%	134.4687489	0.966229
54	35	40	0.5	0.573	84.31%	153.6785702	1.104261
56	35	45	0.5	0.573	86.28%	172.8883914	1.242294
58	40	25	0.5	0.573	80.47%	107.225346	0.860122
60	40	30	0.5	0.573	83.78%	128.6704152	1.032147
62	40	35	0.5	0.573	85.49%	150.1154844	1.204171

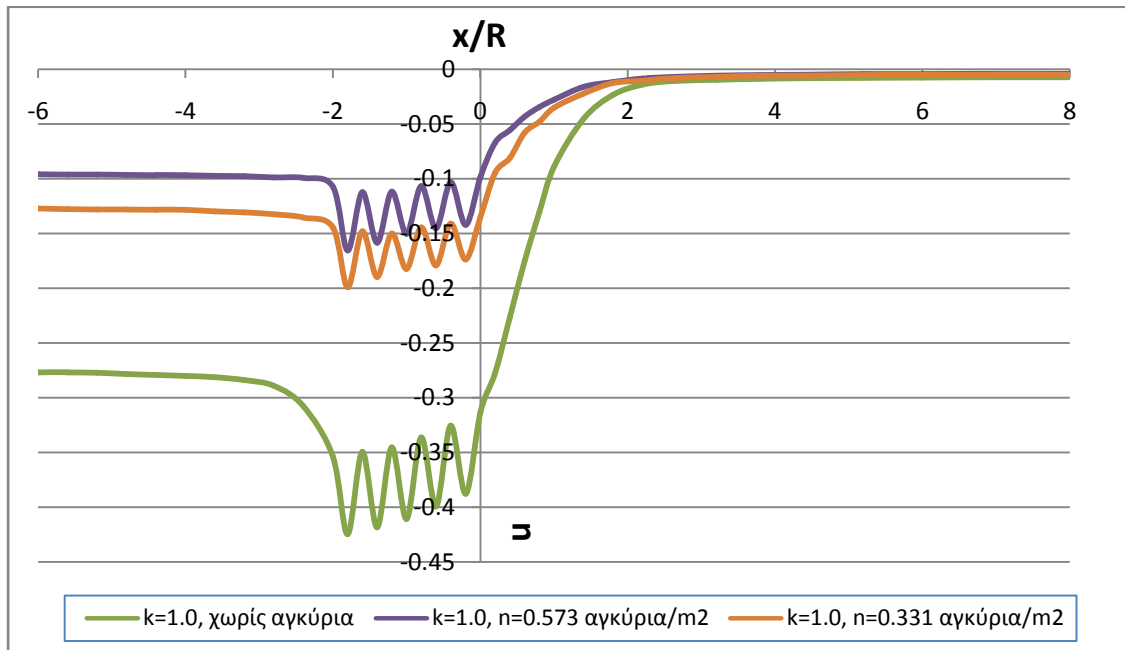
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

$\phi=20^\circ$, $c=25$ kPa

➤ $k=0.5$

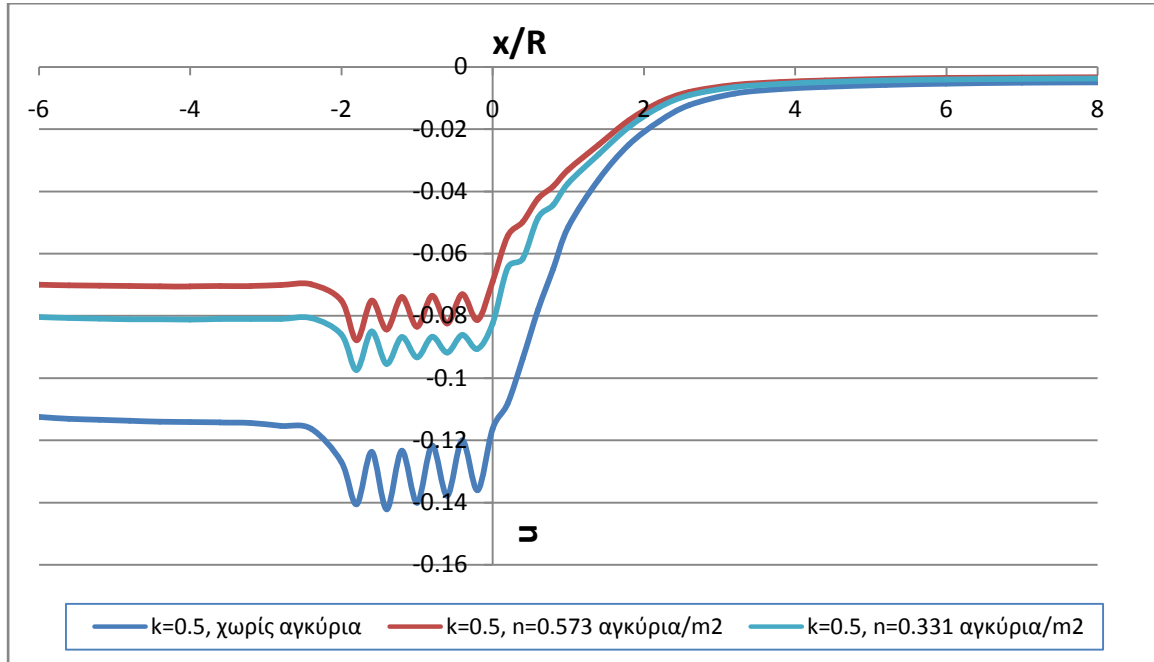


➤ $k=1.0$

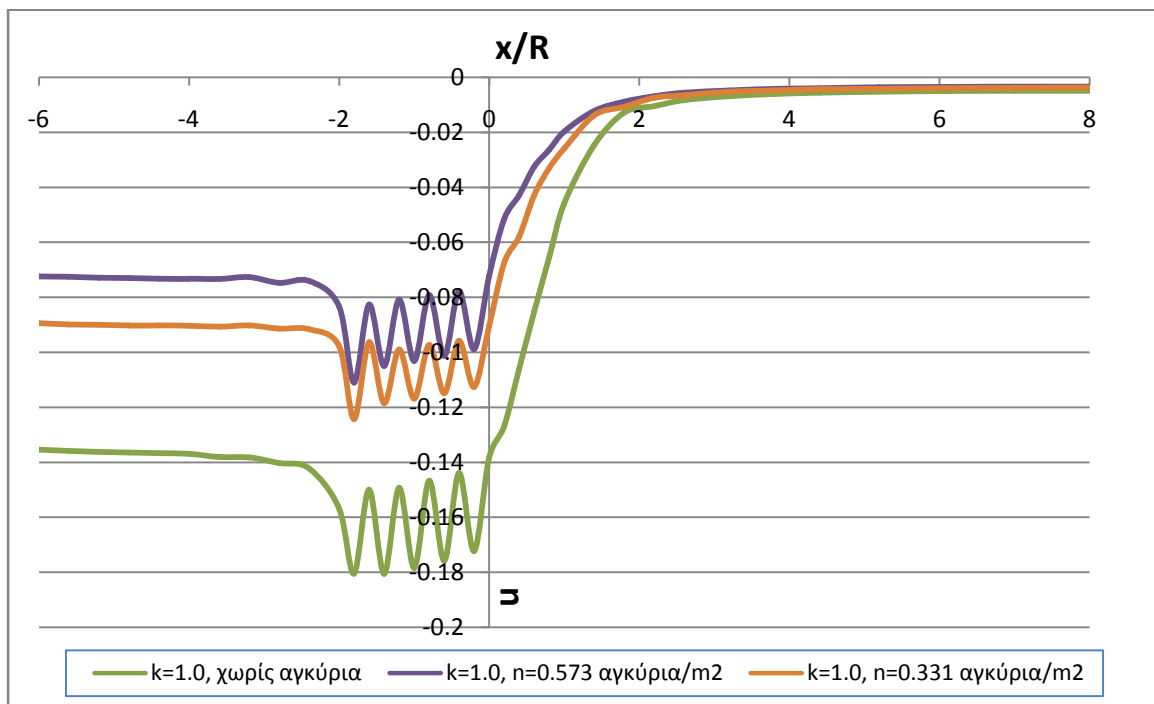


$\varphi=20^{\circ}$, $c=35$ kPa

➤ $k=0.5$

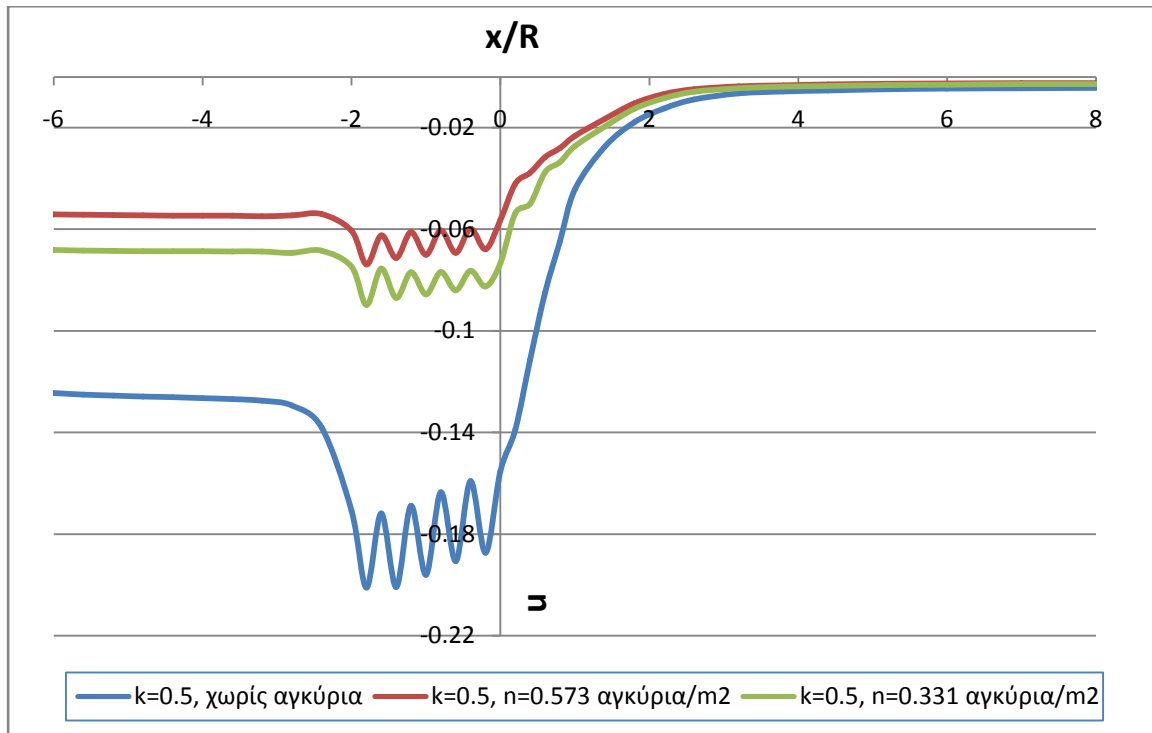


➤ $k=1.0$

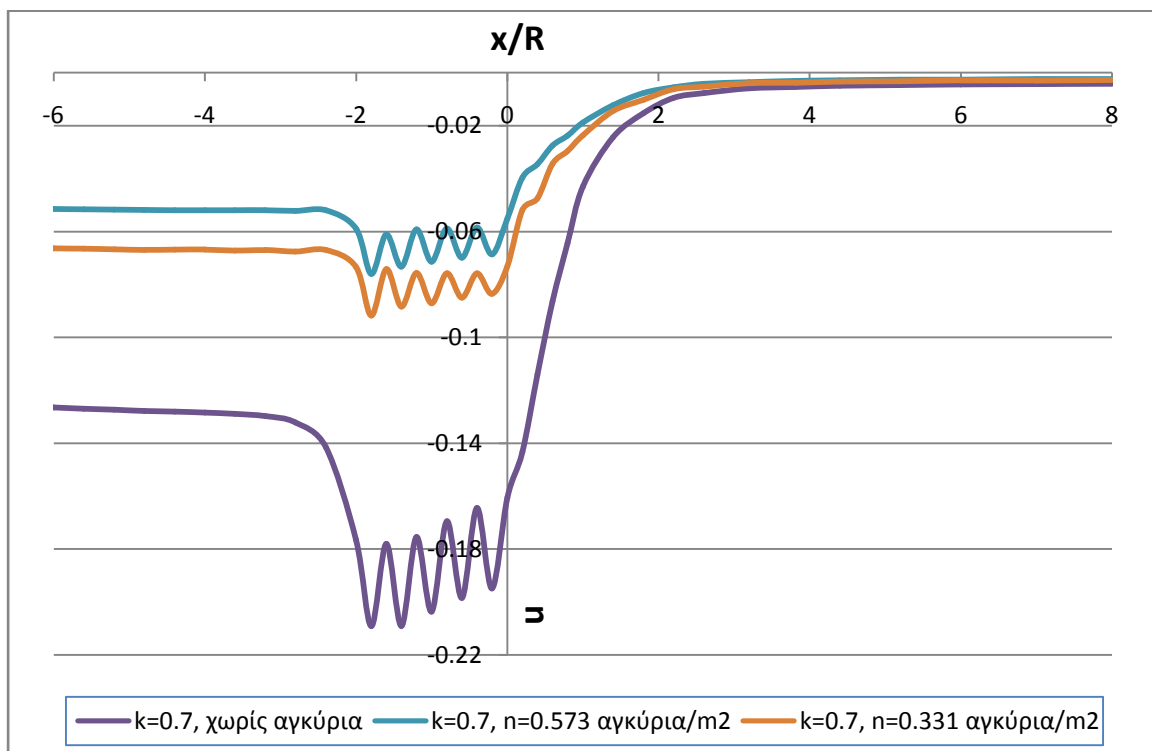


$\phi=25^\circ$, $c=20$ kPa

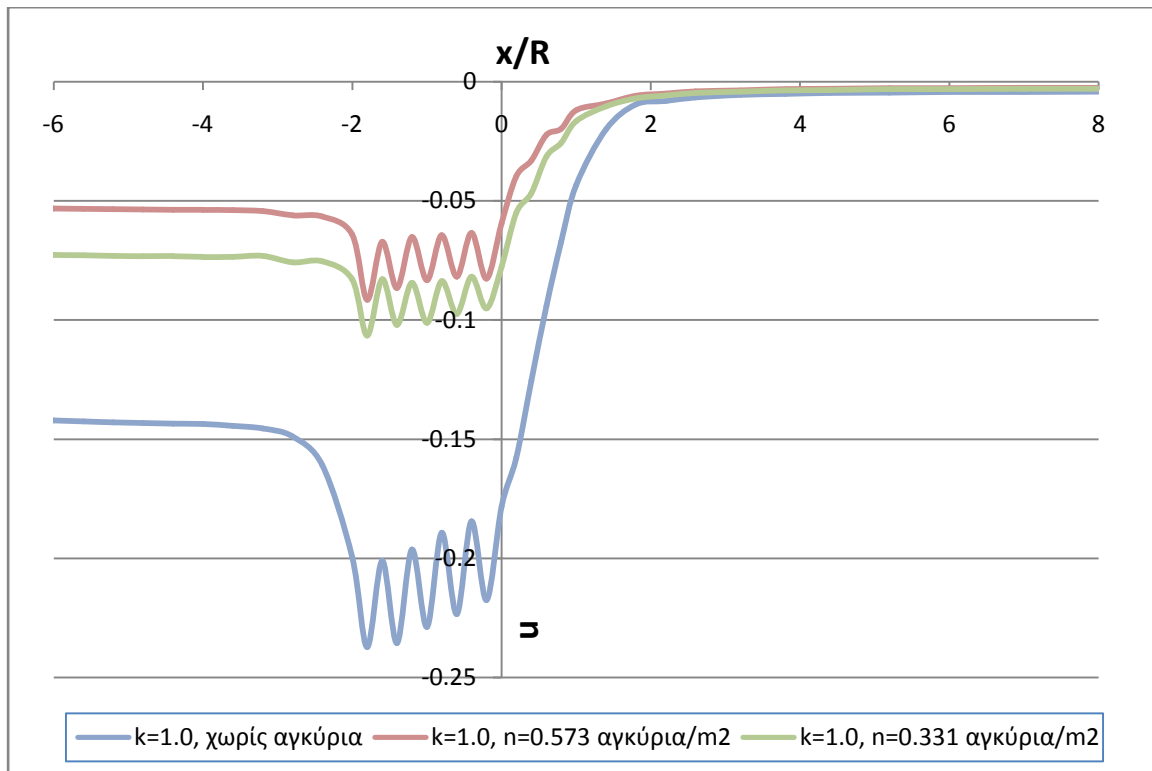
➤ $k=0.5$



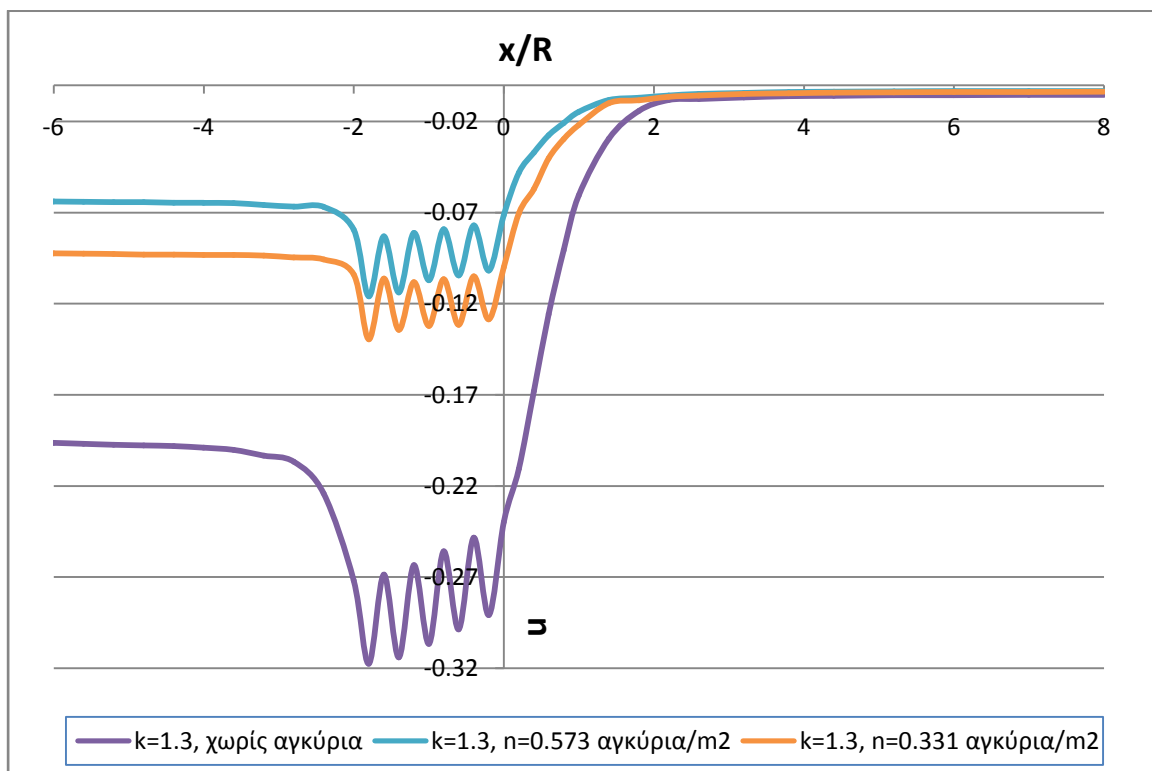
➤ $k=0.7$



➤ $k=1.0$

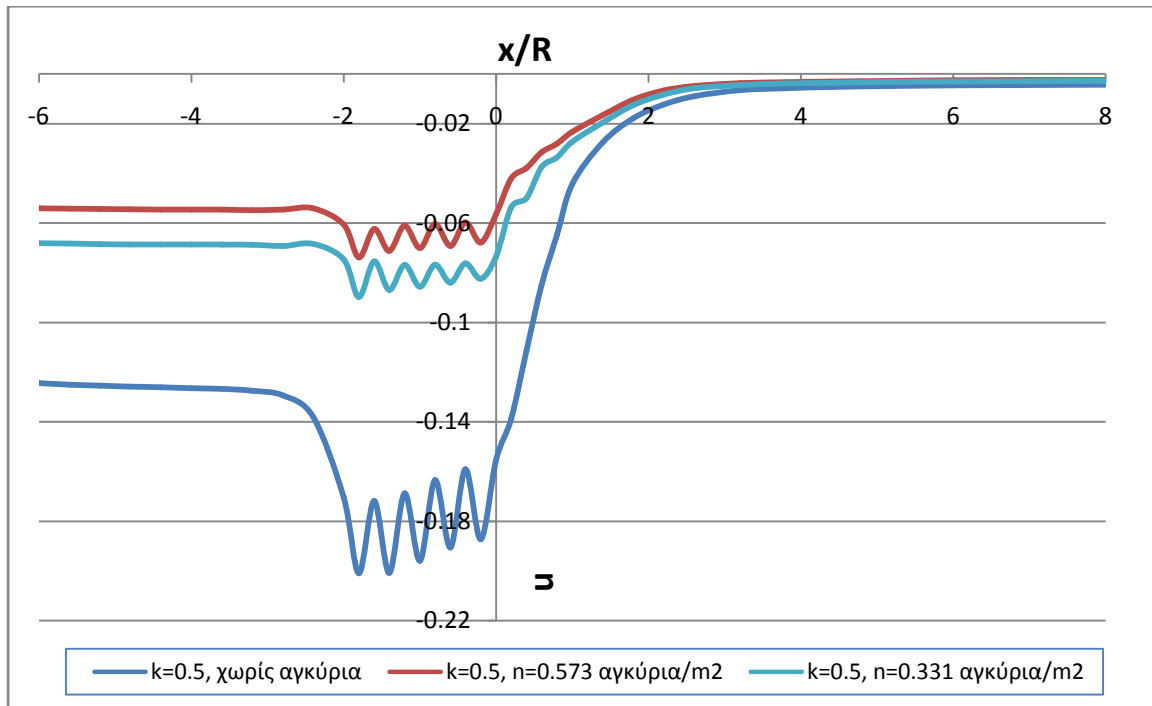


➤ $k=1.3$

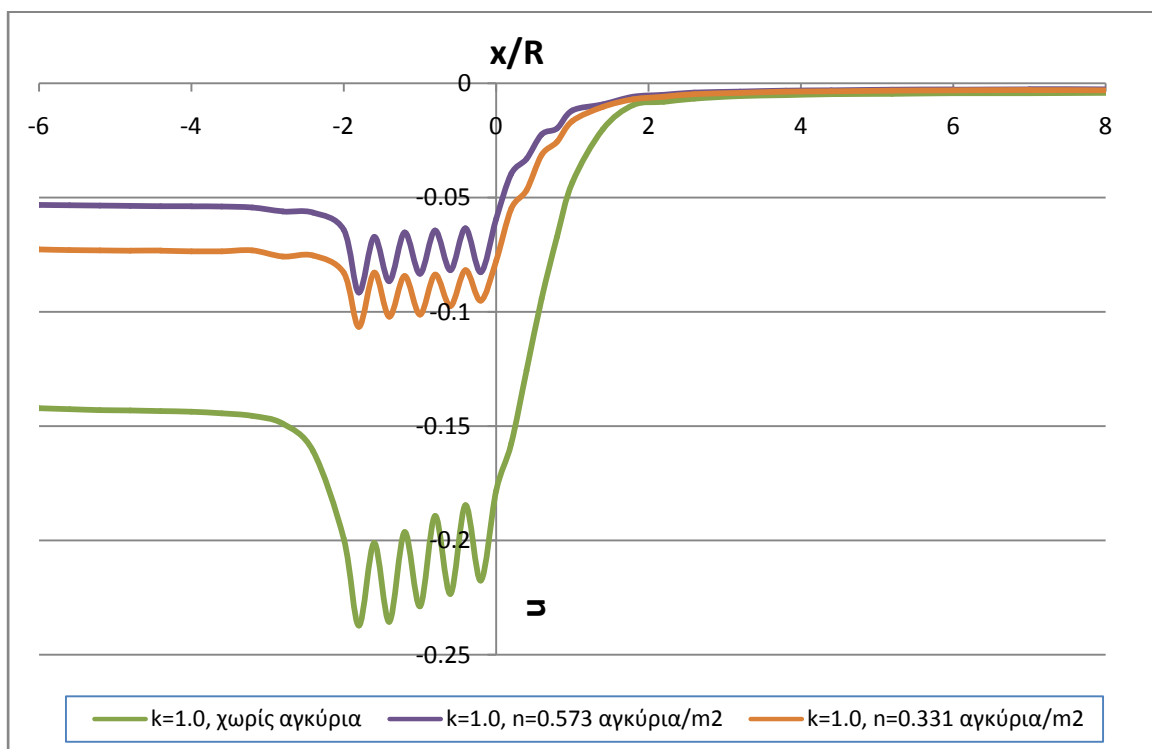


$\phi=25^\circ$, $c=30$ kPa

➤ $k=0.5$

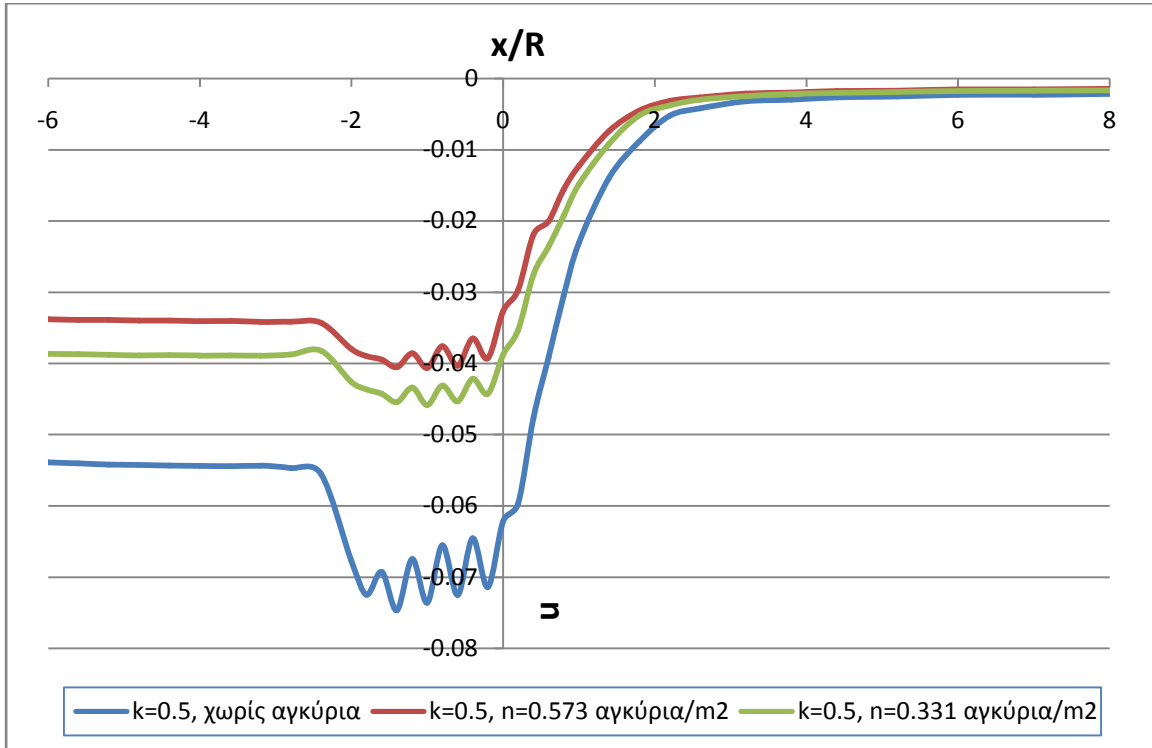


➤ $k=1.0$

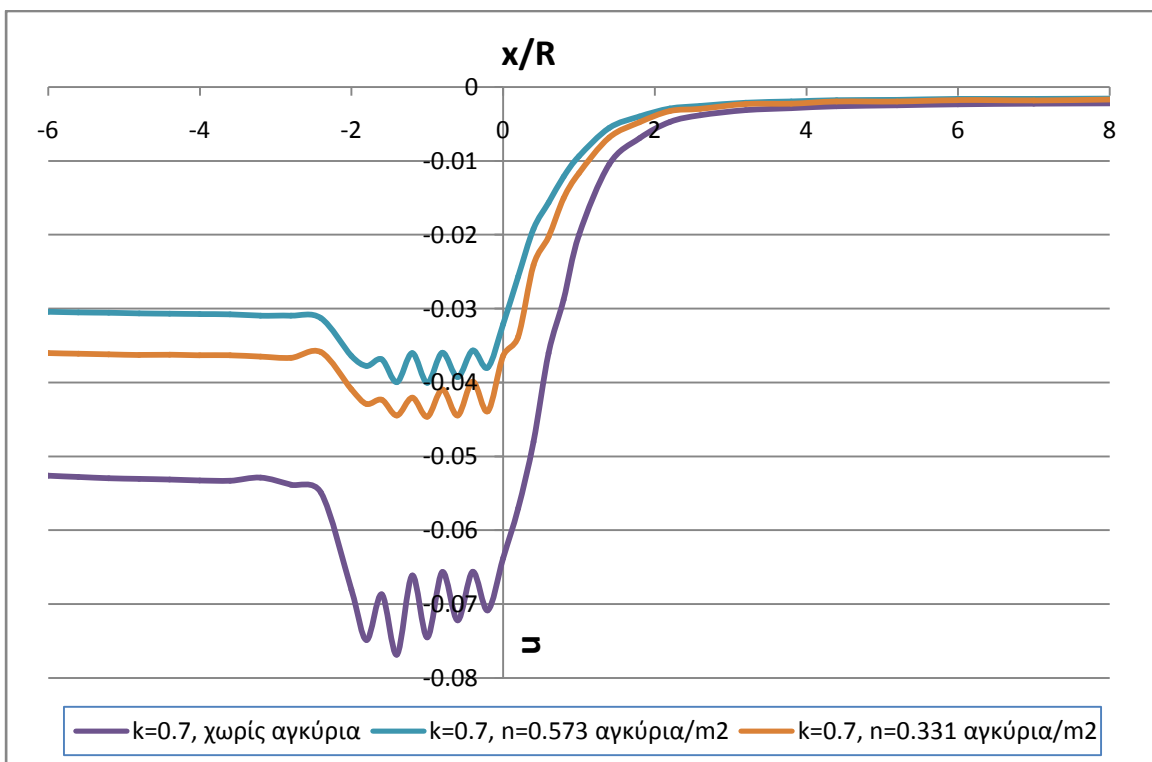


$\varphi=30^\circ, c=20 \text{ kPa}$

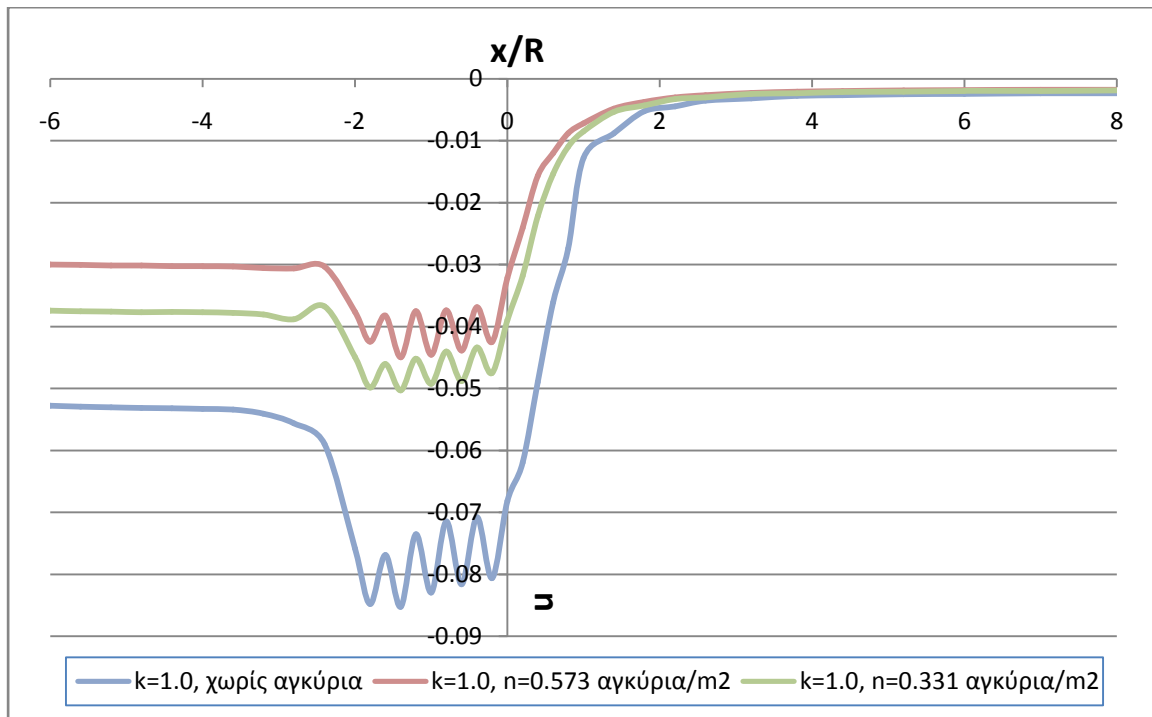
➤ $k=0.5$



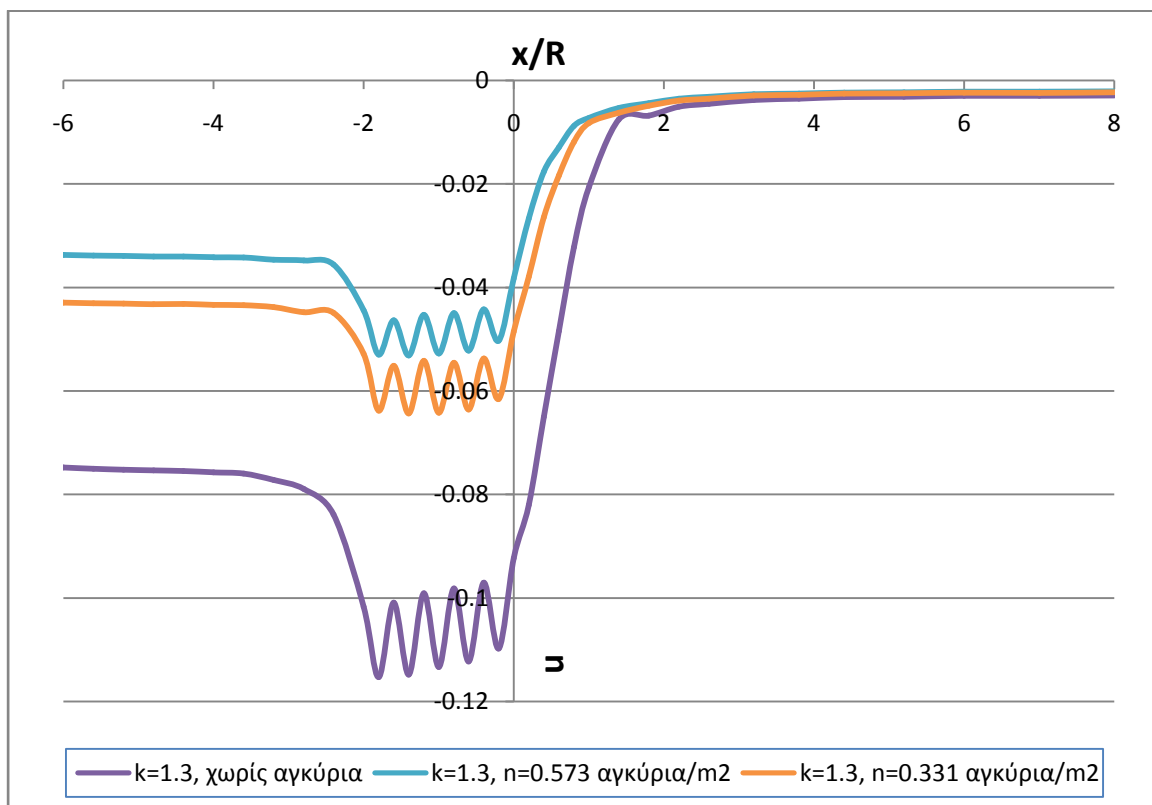
➤ $k=0.7$



➤ $k=1.0$

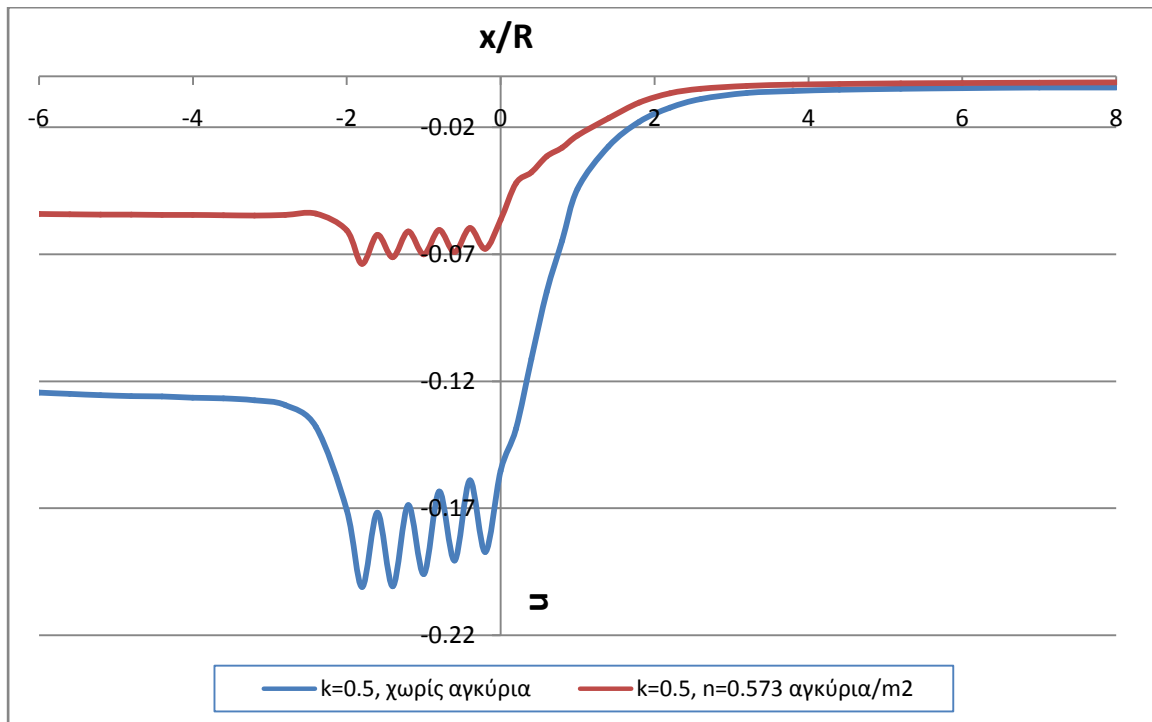


➤ $k=1.3$



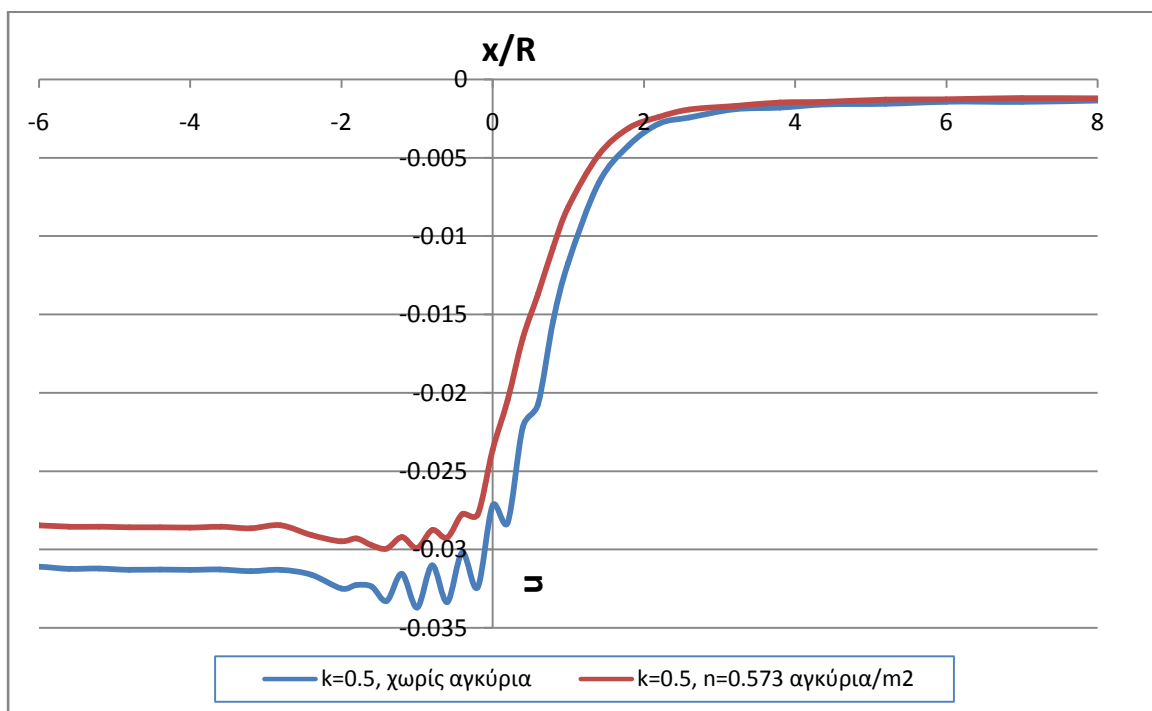
$\phi=30^\circ, c=35 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



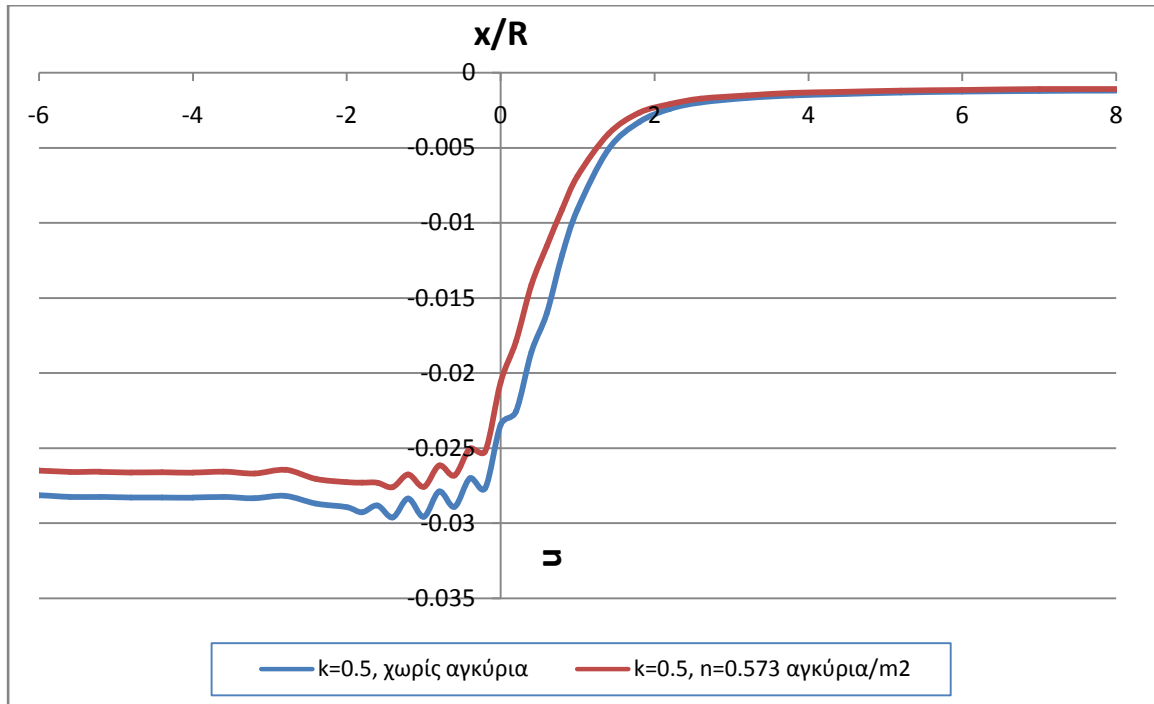
$\phi=30^\circ, c=45 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



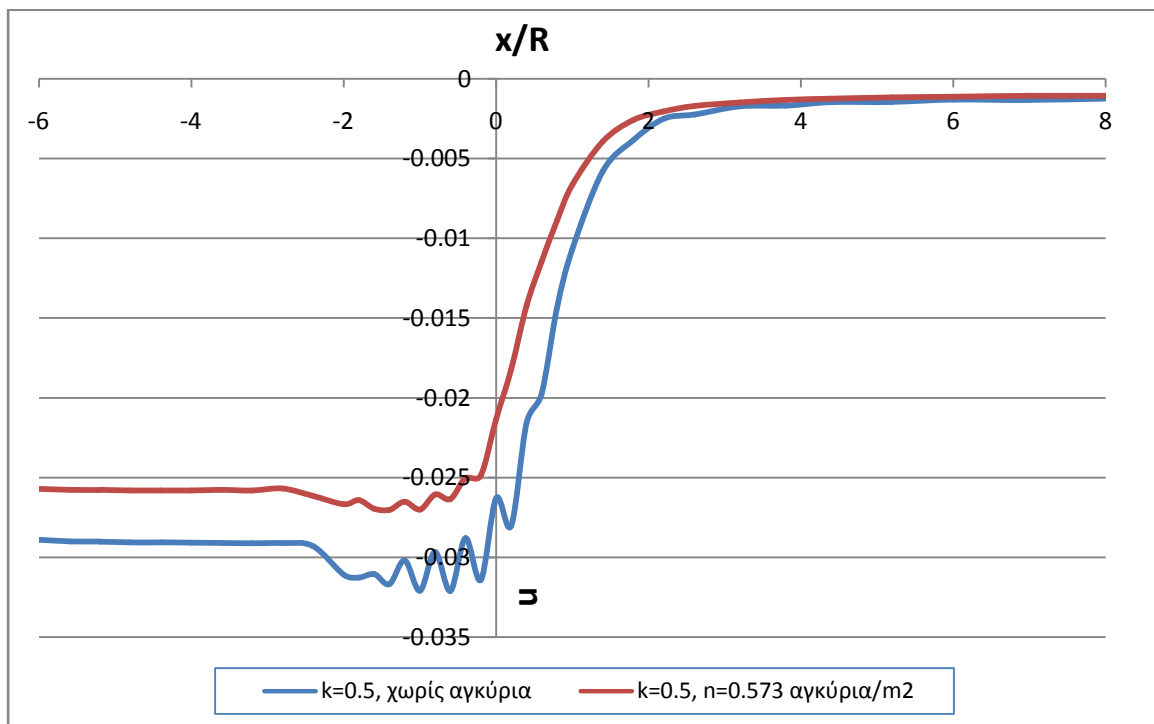
$\phi=30^\circ$, $c=60$ kPa

➤ $k=0.5$



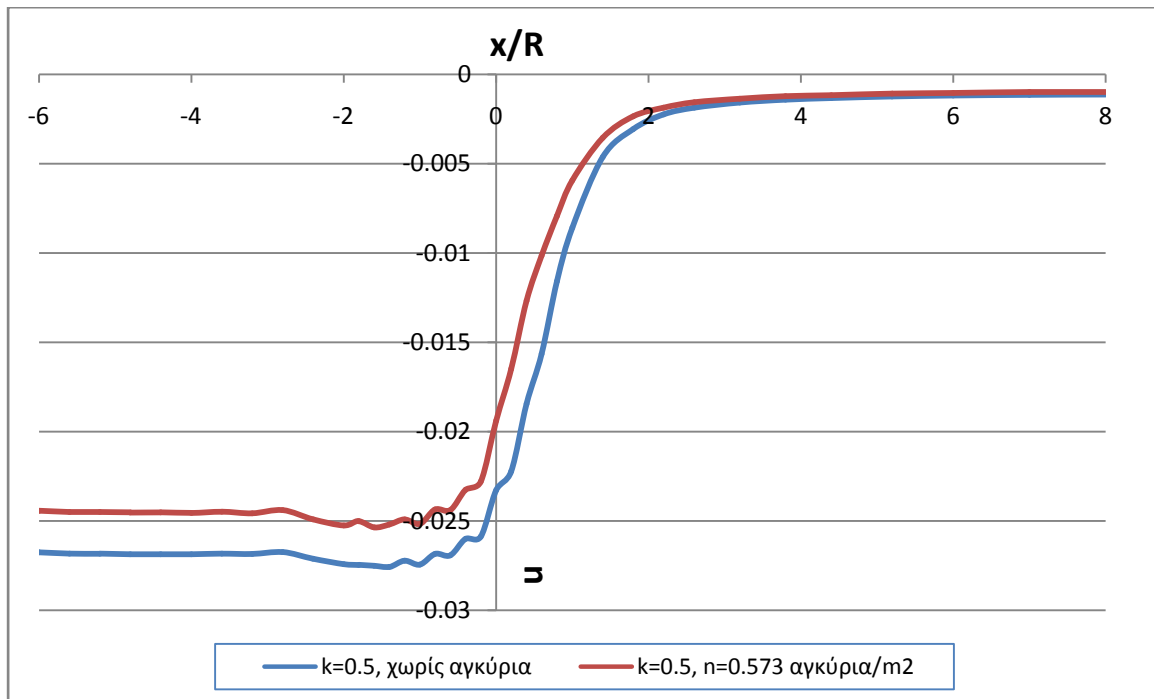
$\phi=35^\circ$, $c=25$ kPa

➤ $k=0.5$



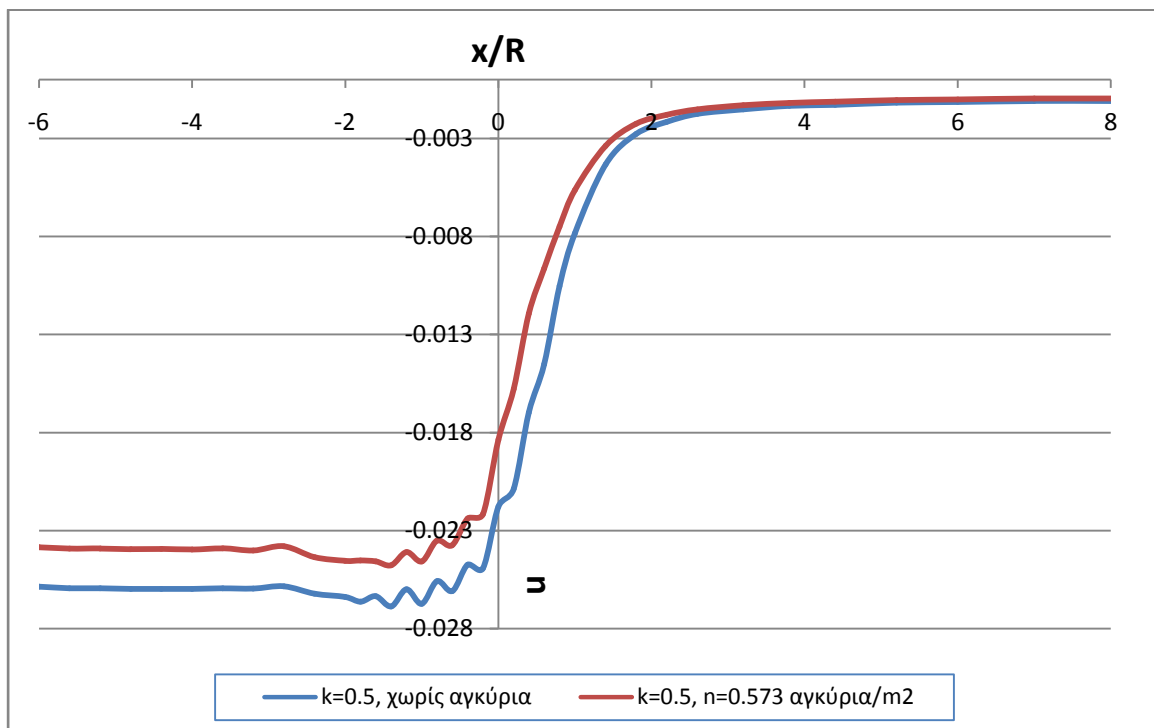
$\varphi=35^\circ$, $c=35$ kPa

➤ $k=0.5$



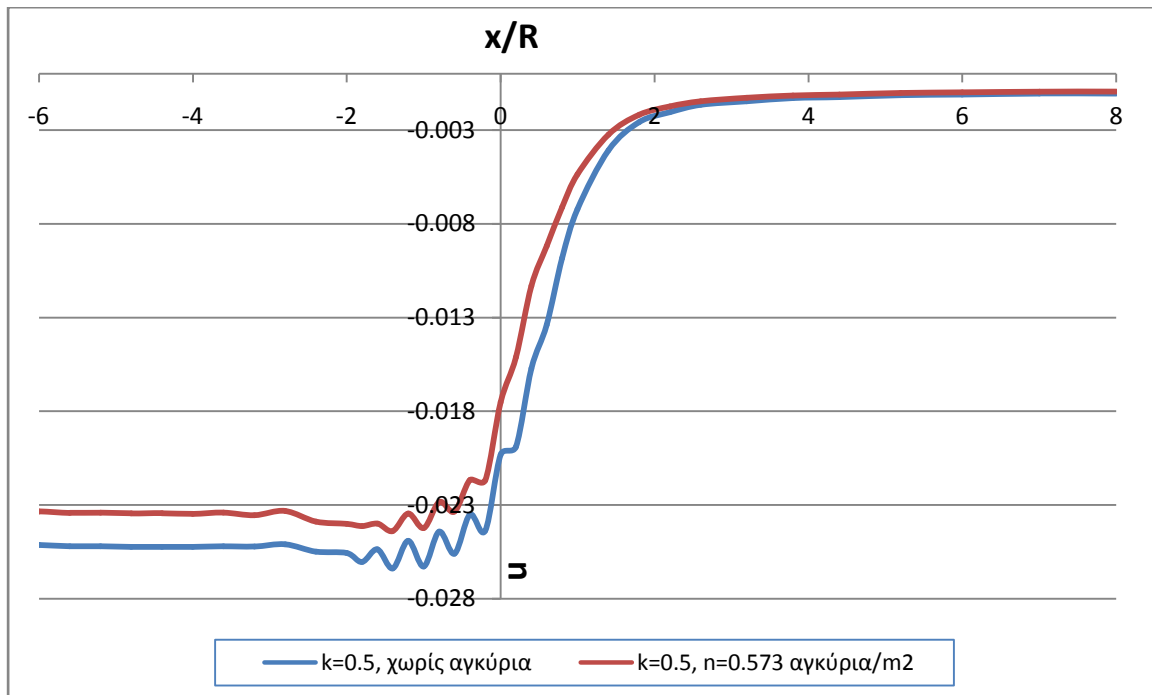
$\varphi=35^\circ$, $c=40$ kPa

➤ $k=0.5$



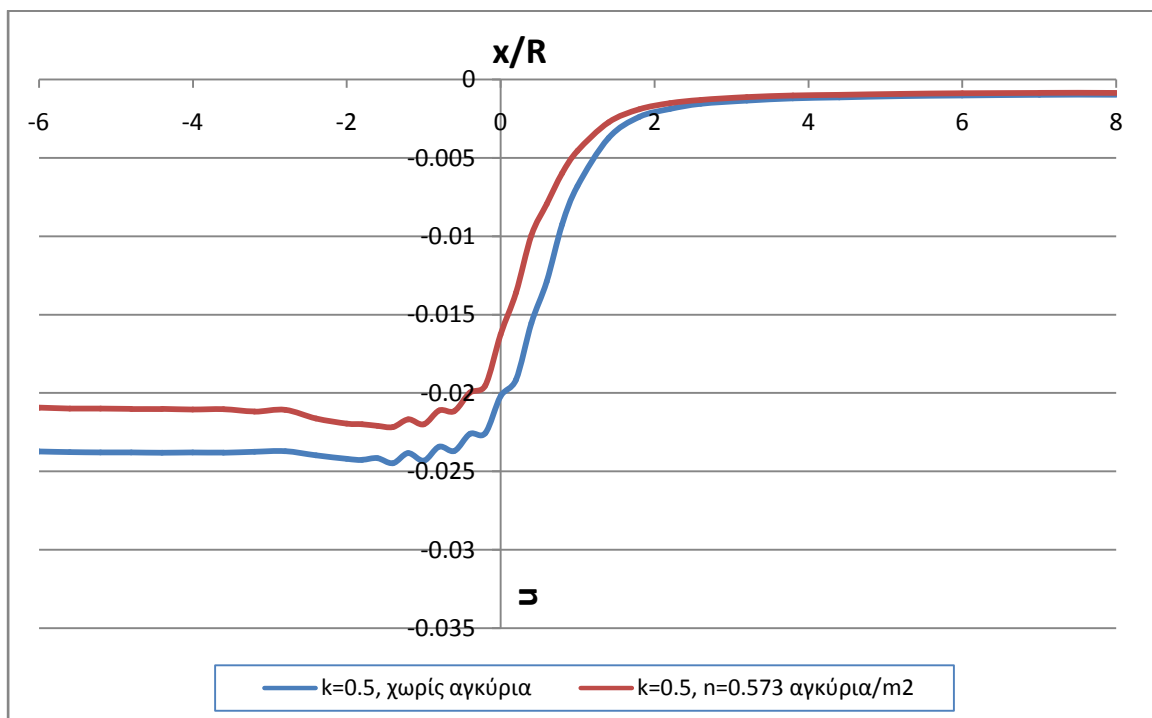
$\phi=35^\circ$, $c=45$ kPa

➤ $k=0.5$



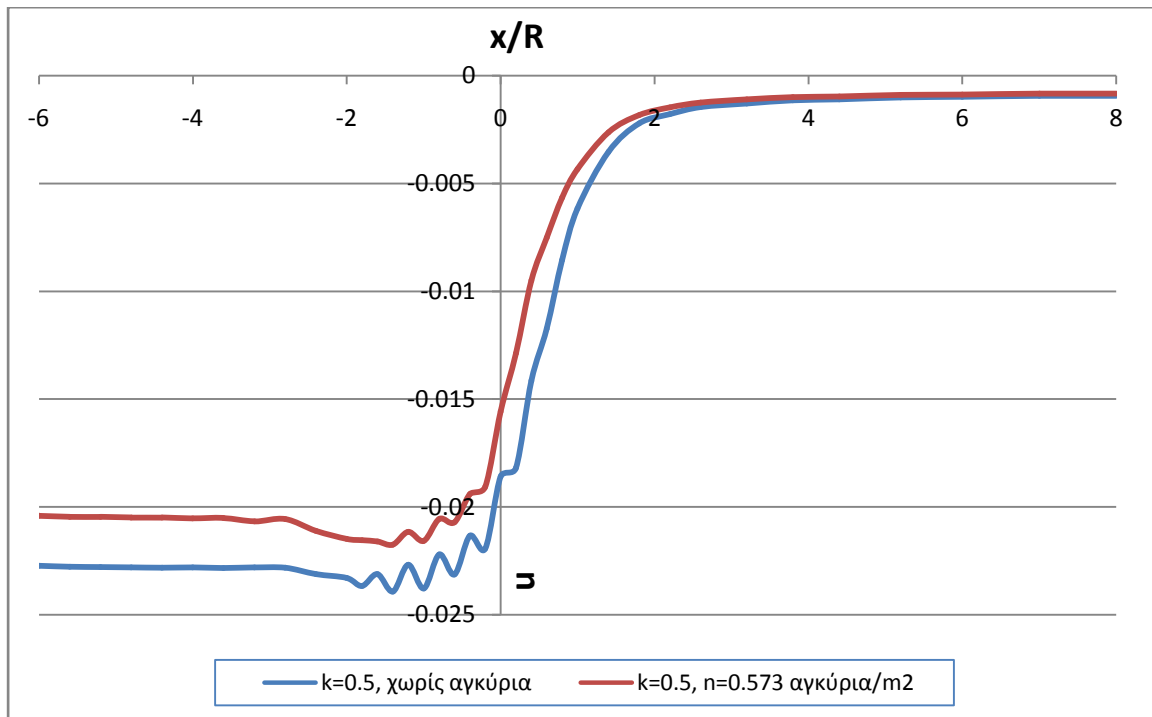
$\phi=40^\circ$, $c=25$ kPa

➤ $k=0.5$



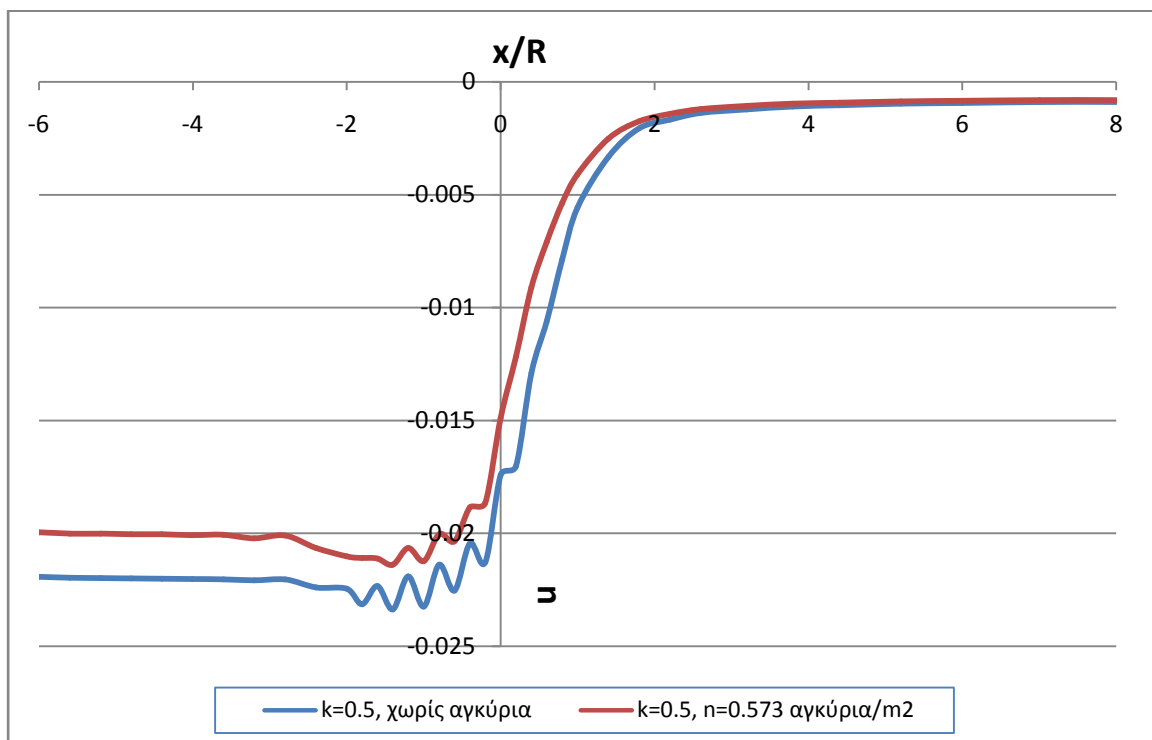
$\varphi=40^\circ$, $c=30$ kPa

➤ $k=0.5$



$\varphi=40^\circ$, $c=35$ kPa

➤ $k=0.5$



Εξωθήσεις

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΞΩΘΗΣΕΩΝ

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα εξωθήσεων για αναλύσεις με σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη

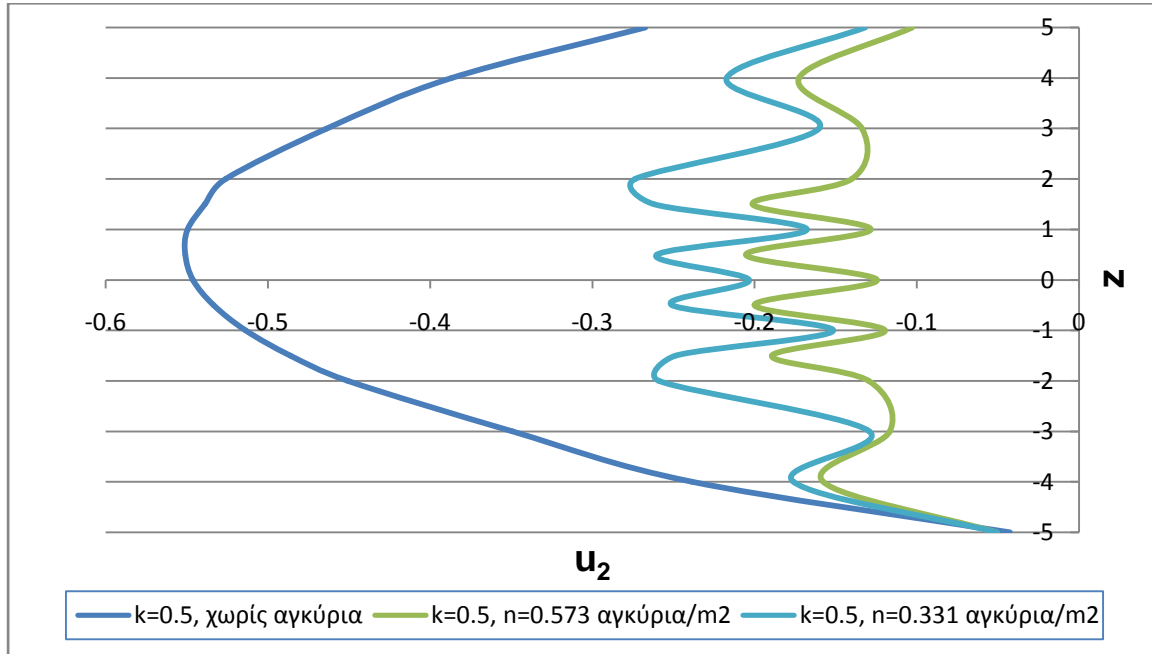
a/a	ϕ (°)	c (kPa)	k	n	A_f (fiber)/ A_f (no fiber)	A_f	σ_{cs}/γ^*H
1	20	25	0.5	-	-	10.04394	0.068007
2	20	25	0.5	0.573	0.344804385	3.463196	0.068007
3	20	25	0.5	0.331	0.464899956	4.669429	0.068007
4	20	25	1.0	-	-	10.1265	0.068007
5	20	25	1.0	0.573	0.329502444	3.336708	0.068007
6	20	25	1.0	0.331	0.447817761	4.534828	0.068007
7	20	35	0.5	-	-	6.107822	0.09521
8	20	35	0.5	0.573	0.463063362	2.828309	0.09521
9	20	35	0.5	0.331	0.594418909	3.630605	0.09521
10	20	35	1.0	-	-	6.195425	0.09521
11	20	35	1.0	0.573	0.451808956	2.799148	0.09521
12	20	35	1.0	0.331	0.583610616	3.615716	0.09521
13	25	20	0.5	-	-	7.704768	0.059798
14	25	20	0.5	0.573	0.356764705	2.748789	0.059798
15	25	20	0.5	0.331	0.474132085	3.653078	0.059798
16	25	20	0.7	-	-	7.381934	0.059798
17	25	20	0.7	0.573	0.356808448	2.633936	0.059798
18	25	20	0.7	0.331	0.473492337	3.495289	0.059798
19	25	20	1.0	-	-	7.287457	0.059798
20	25	20	1.0	0.573	0.34942102	2.546391	0.059798
21	25	20	1.0	0.331	0.461616495	3.36401	0.059798
22	25	20	1.3	-	-	9.166151	0.059798
23	25	20	1.3	0.573	0.326787929	2.995388	0.059798
24	25	20	1.3	0.331	0.443216537	4.06259	0.059798
25	25	30	0.5	-	-	4.673183	0.089696
26	25	30	0.5	0.573	0.491780729	2.298181	0.089696
27	25	30	0.5	0.331	0.619535178	2.895201	0.089696
28	25	30	1.0	-	-	4.463379	0.089696
29	25	30	1.0	0.573	0.485952308	2.168989	0.089696
30	25	30	1.0	0.331	0.613106251	2.736526	0.089696
31	30	20	0.5	-	-	4.643682	0.065983
32	30	20	0.5	0.573	0.443106342	2.057645	0.065983
33	30	20	0.5	0.331	0.565376179	2.625427	0.065983
34	30	20	0.7	-	-	4.383464	0.065983
35	30	20	0.7	0.573	0.444857169	1.950016	0.065983
36	30	20	0.7	0.331	0.568453358	2.491795	0.065983

a/a	ϕ (°)	c (kPa)	k	n	A_f (fiber)/ A_f (no fiber)	A_f	σ_{cs}/γ^*H
37	30	20	1.0	-	-	4.241216	0.065983
38	30	20	1.0	0.573	0.438444468	1.859538	0.065983
39	30	20	1.0	0.331	0.558149799	2.367234	0.065983
40	30	20	1.3	-	-	5.32685	0.065983
41	30	20	1.3	0.573	0.407668739	2.17159	0.065983
42	30	20	1.3	0.331	0.526867493	2.806544	0.065983
43	30	35	0.5	-	-	2.862159	0.11547
44	30	35	0.5	0.573	0.592411071	1.695575	0.11547
45	30	45	0.5	-	-	2.381551	0.148461
46	30	45	0.5	0.573	0.649395025	1.546568	0.148461
47	30	60	0.5	-	-	1.917824	0.197949
48	30	60	0.5	0.573	0.715368753	1.371951	0.197949
49	35	25	0.5	-	-	2.694935	0.091475
50	35	25	0.5	0.573	0.575835557	1.551839	0.091475
51	35	35	0.5	-	-	2.210178	0.128065
52	35	35	0.5	0.573	0.638843503	1.411958	0.128065
53	35	40	0.5	-	-	2.043007	0.146361
54	35	40	0.5	0.573	0.661682098	1.351821	0.146361
55	35	45	0.5	-	-	1.896151	0.164656
56	35	45	0.5	0.573	0.685729234	1.300246	0.164656
57	40	25	0.5	-	-	2.148114	0.102119
58	40	25	0.5	0.573	0.601129498	1.291295	0.102119
59	40	30	0.5	-	-	1.943792	0.122543
60	40	30	0.5	0.573	0.633654292	1.231692	0.122543
61	40	35	0.5	-	-	1.800206	0.142967
62	40	35	0.5	0.573	0.6551429	1.179392	0.142967

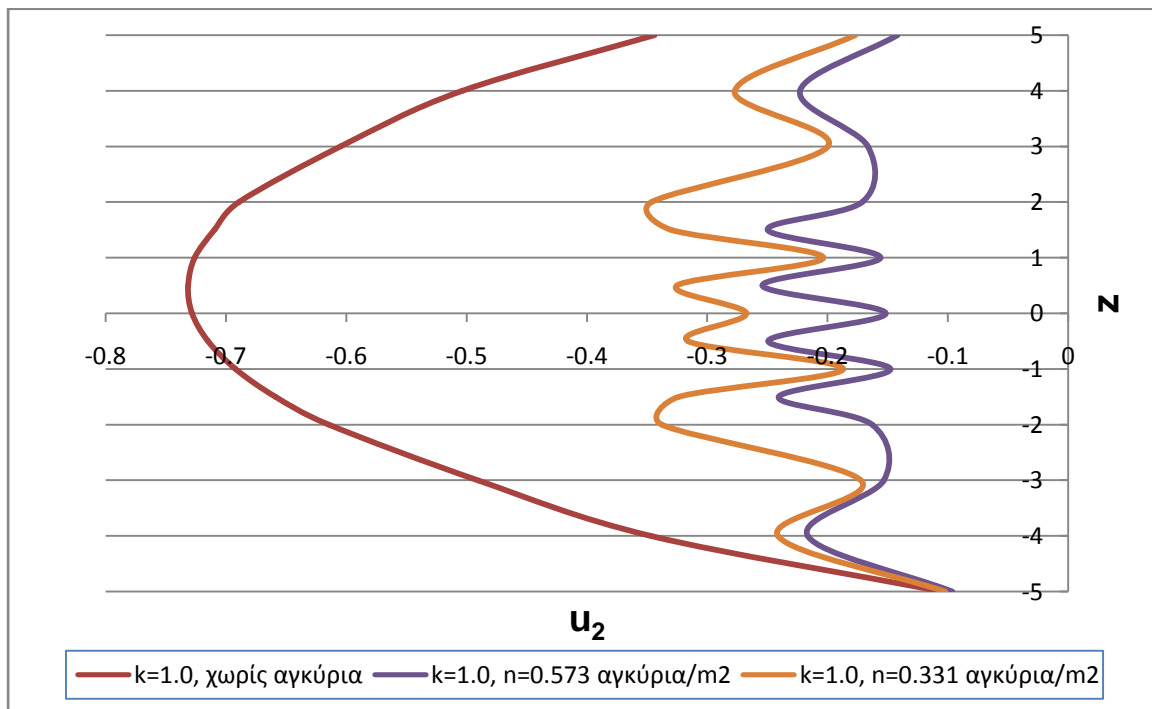
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

$\varphi=20^\circ$, $c=25$ kPa

➤ $k=0.5$

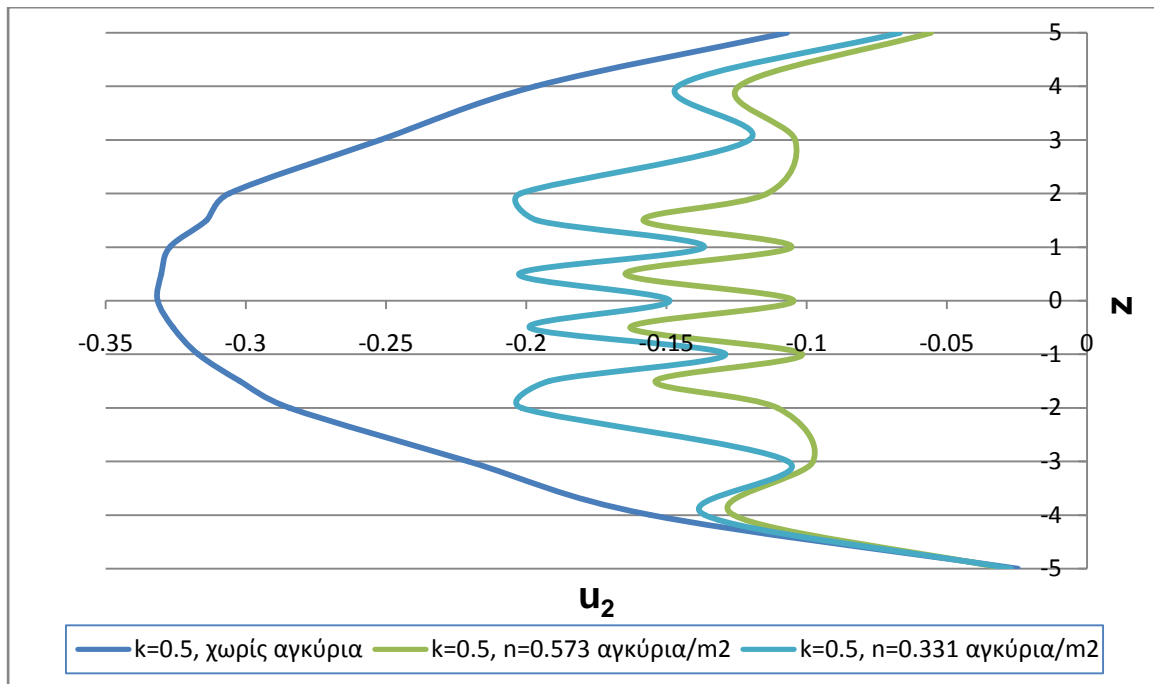


➤ $k=1.0$

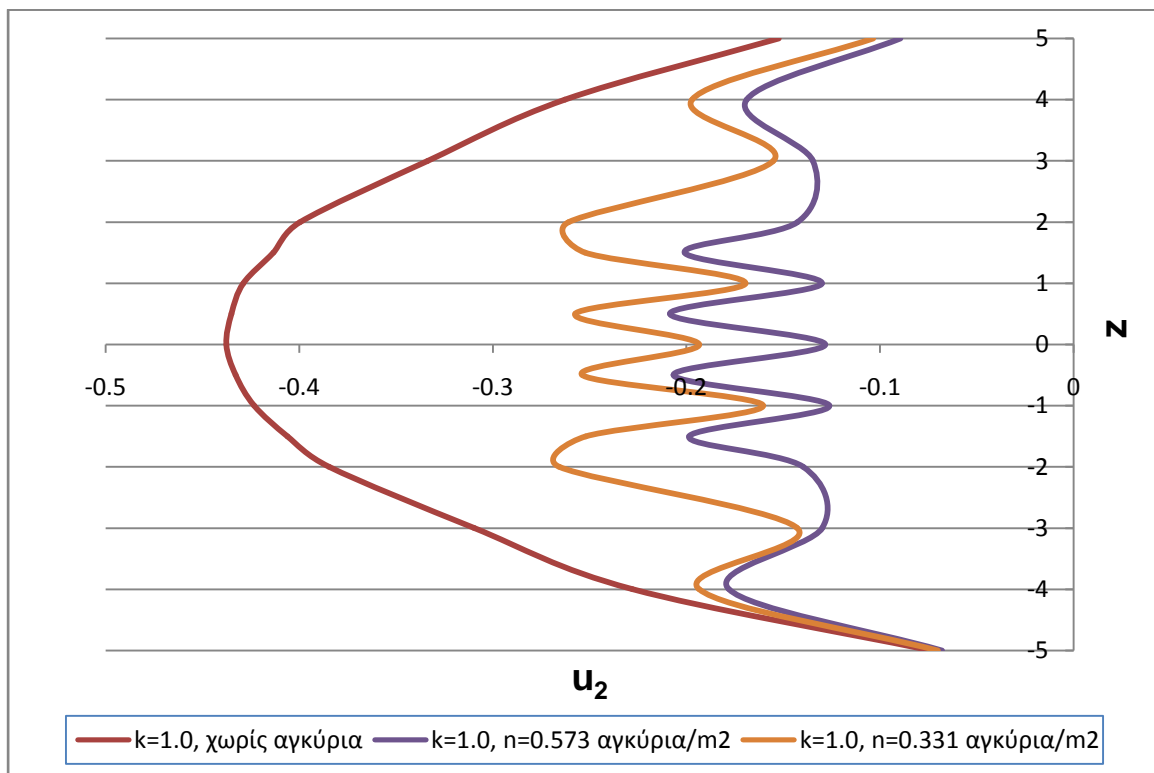


$\phi=20^\circ, c=35 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$

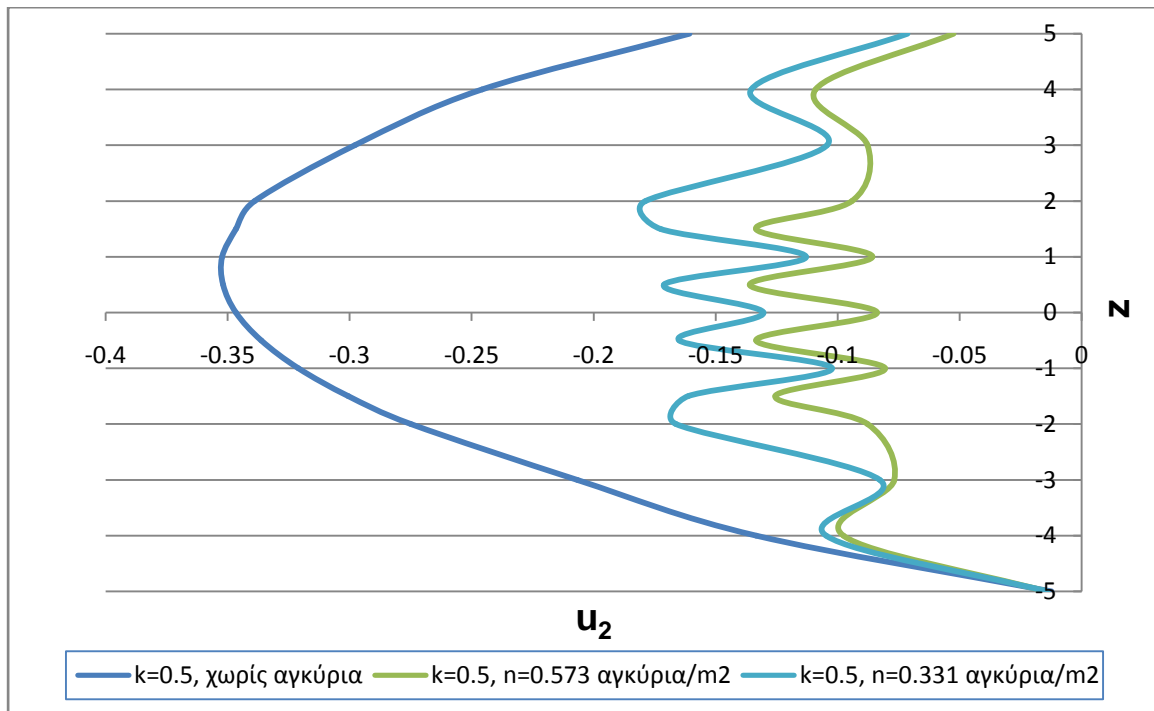


➤ $k=1.0$

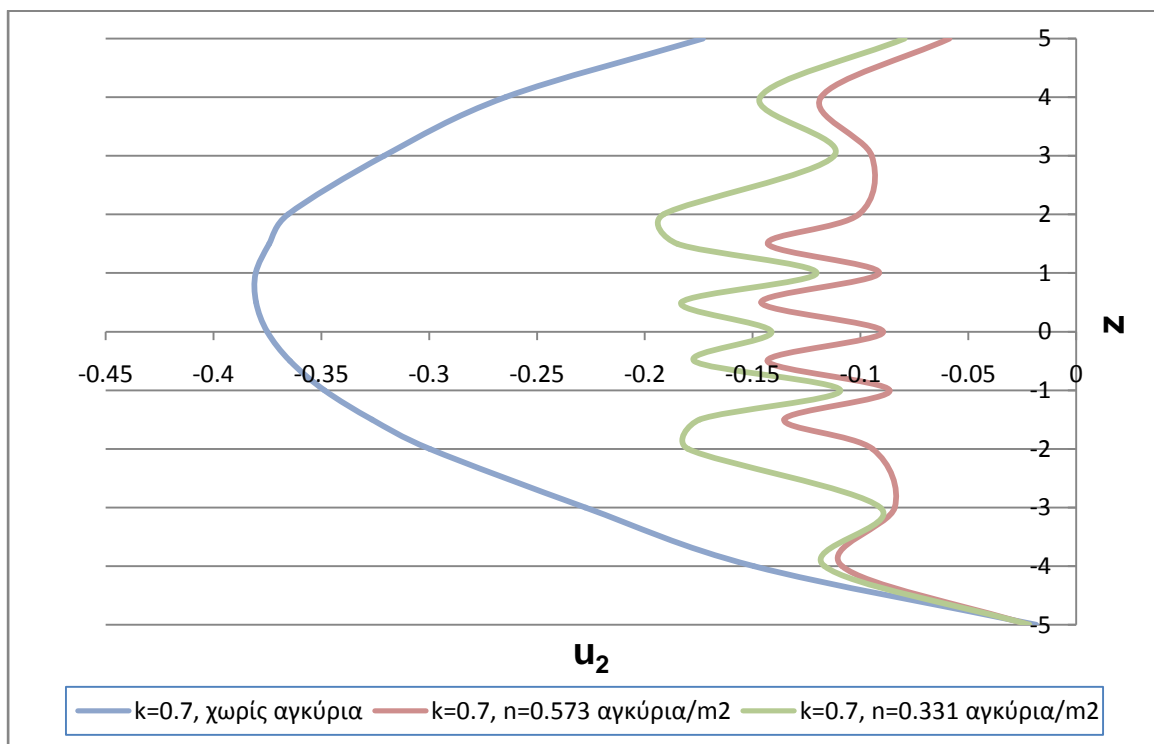


$\phi=25^\circ, c=20 \text{ kPa}$

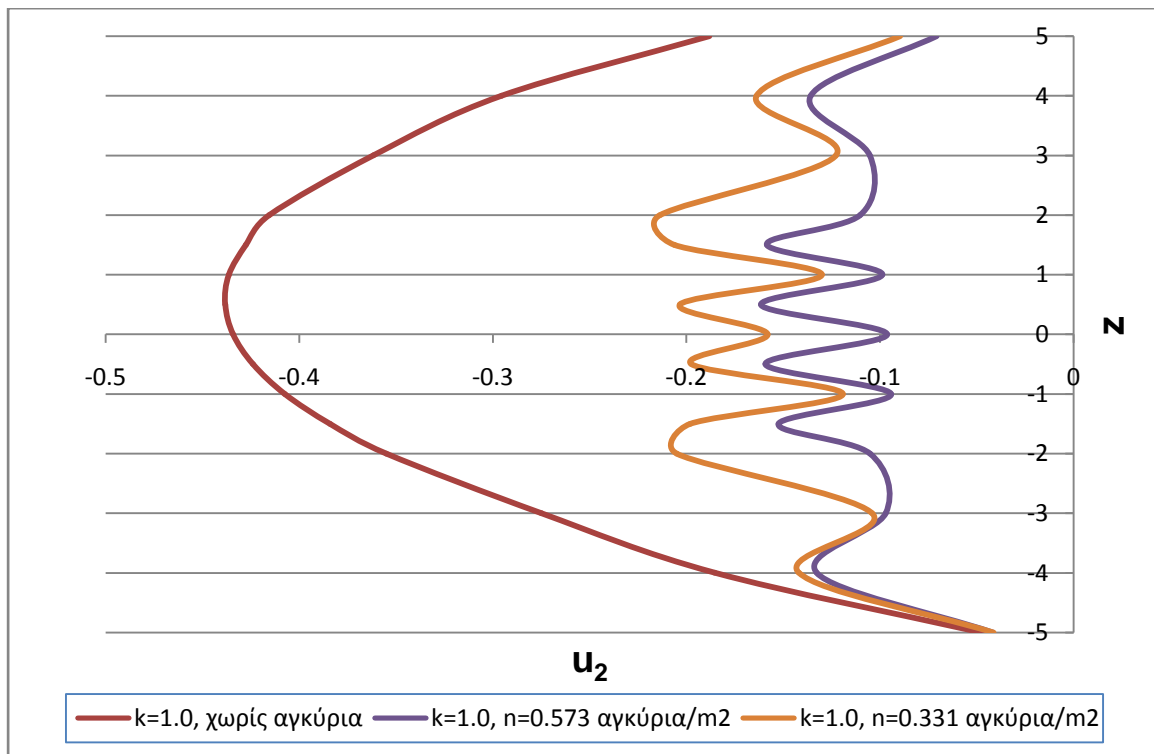
➤ $k=0.5$



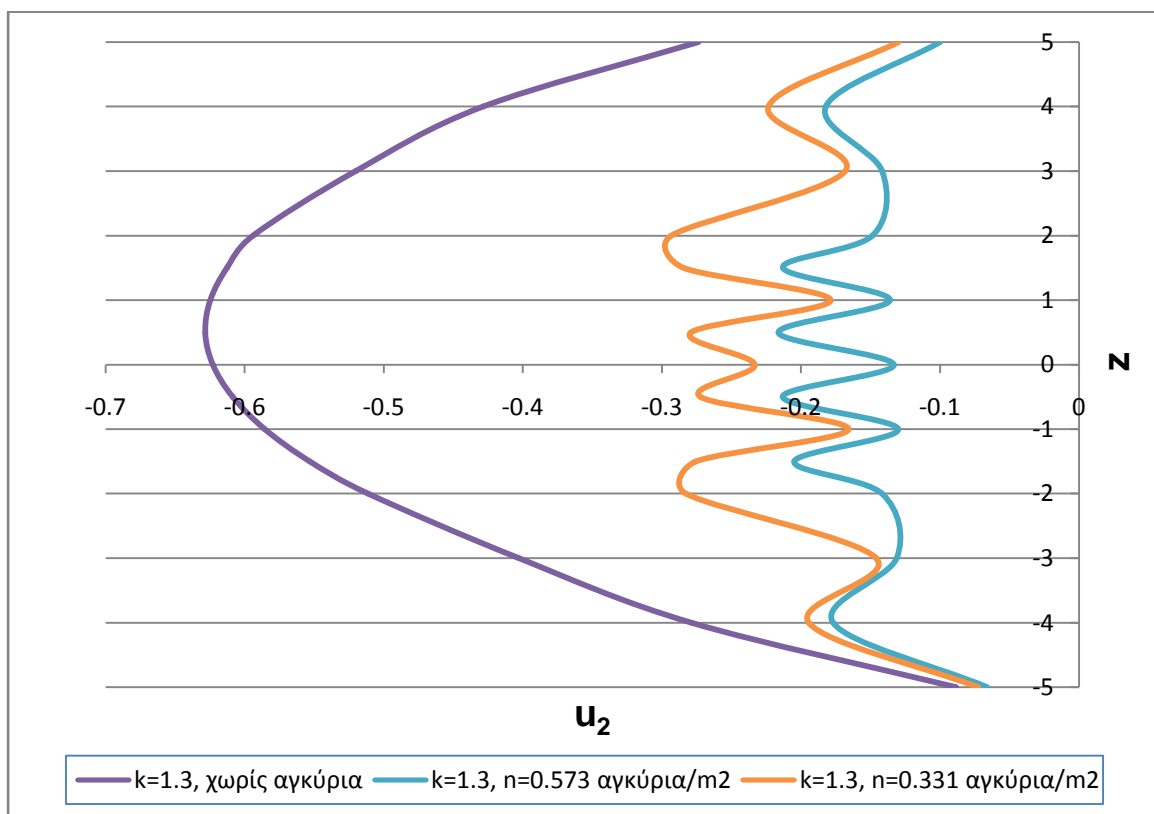
➤ $k=0.7$



➤ $k=1.0$

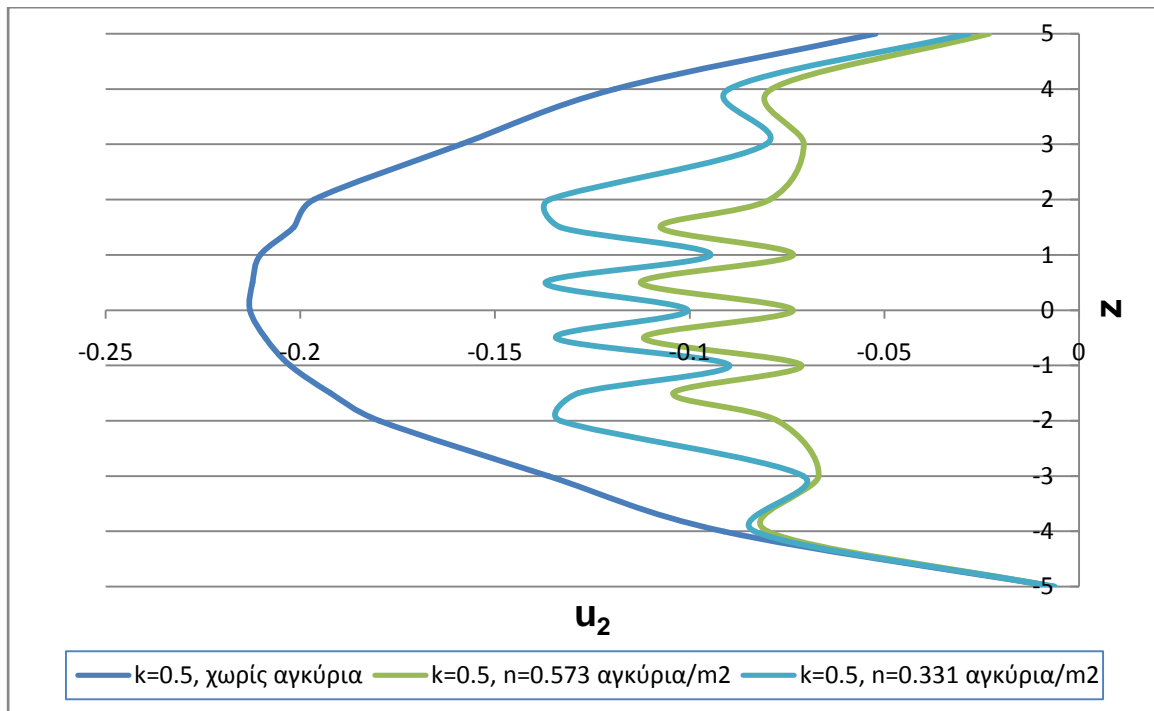


➤ $k=1.3$

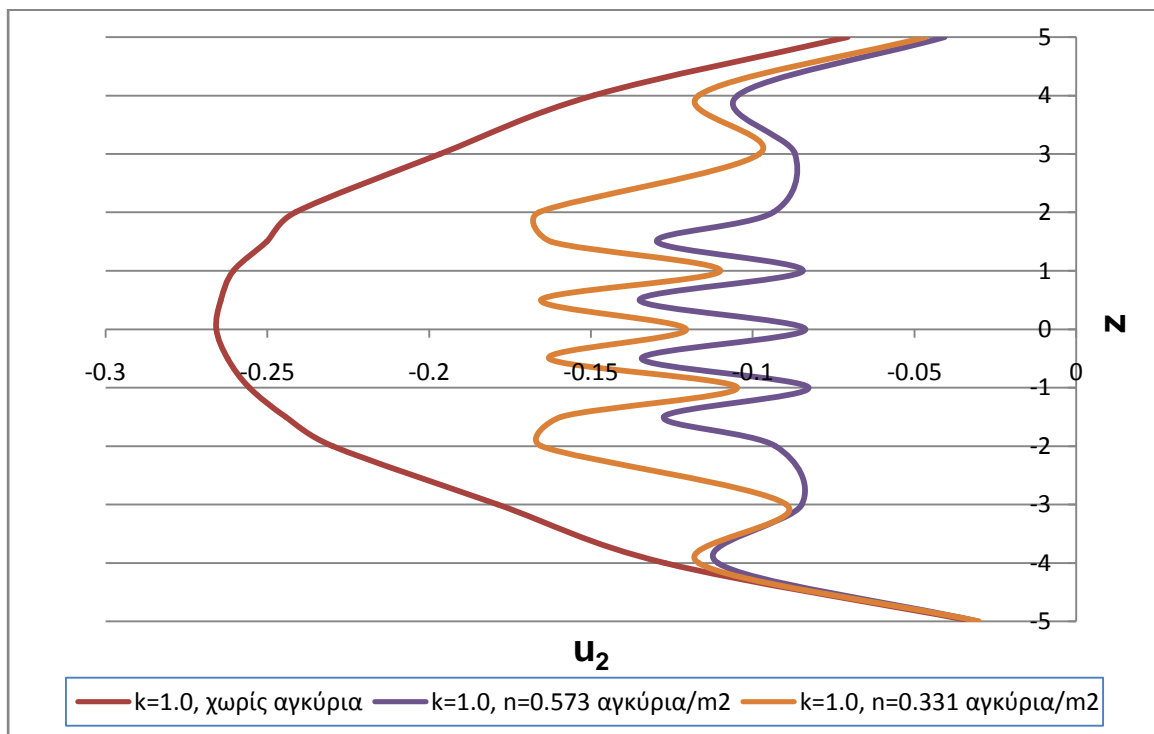


$\phi=25^\circ$, $c=30$ kPa

➤ $k=0.5$

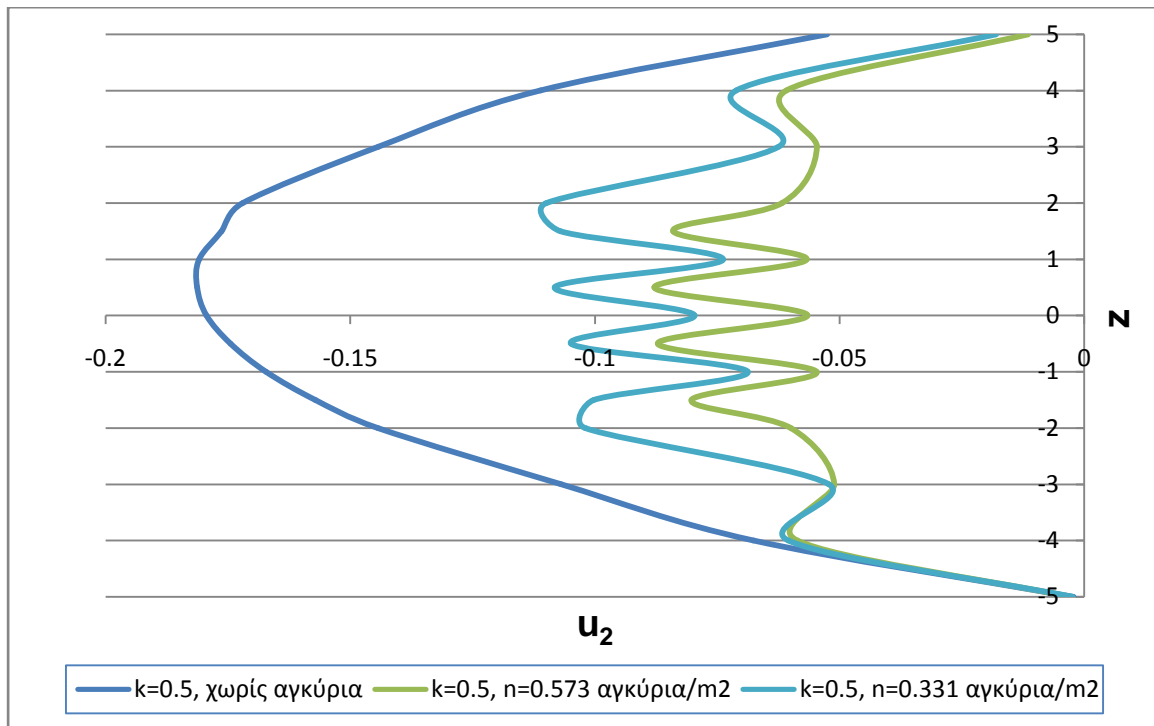


➤ $k=1.0$

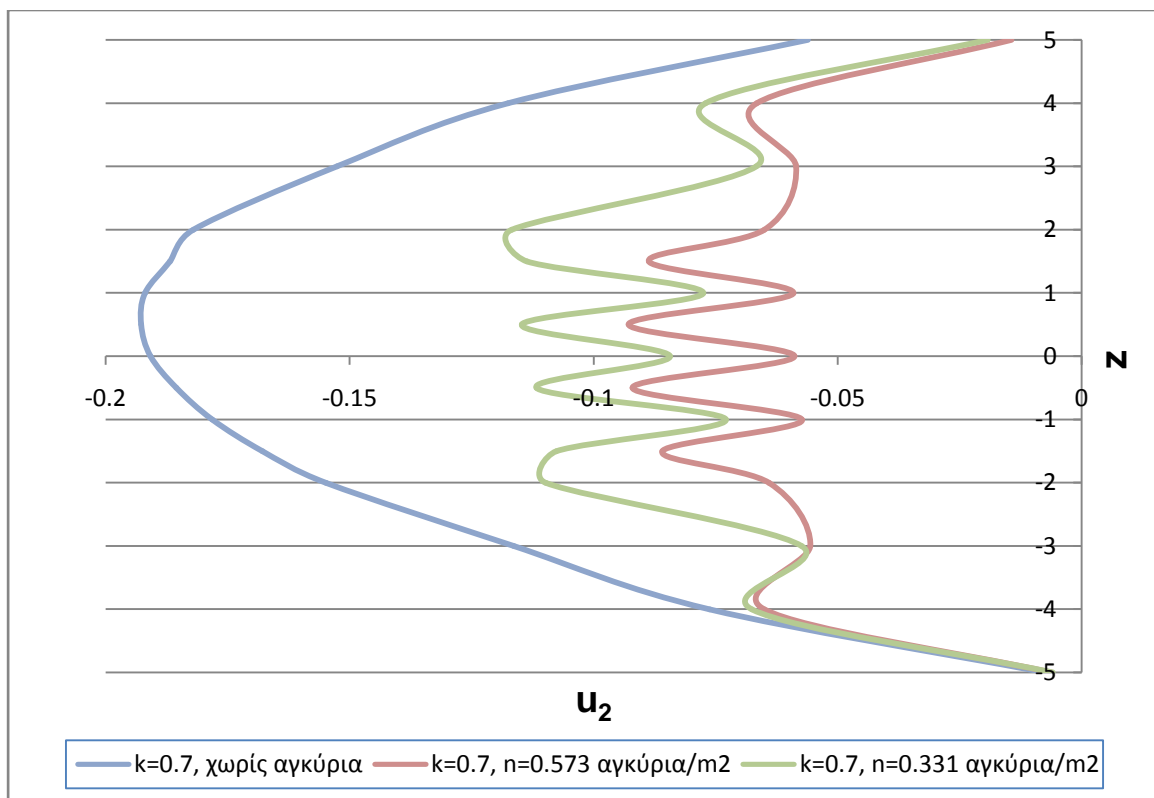


$\phi=30^\circ, c=20 \text{ kPa}$

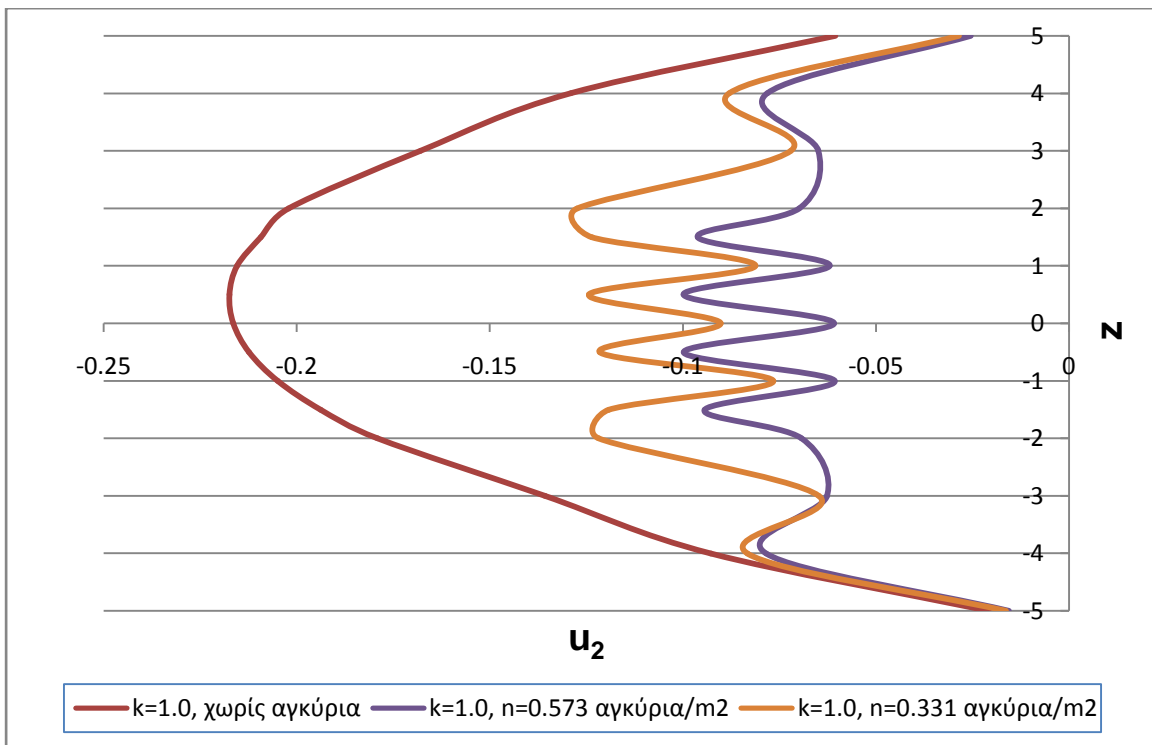
➤ $k=0.5$



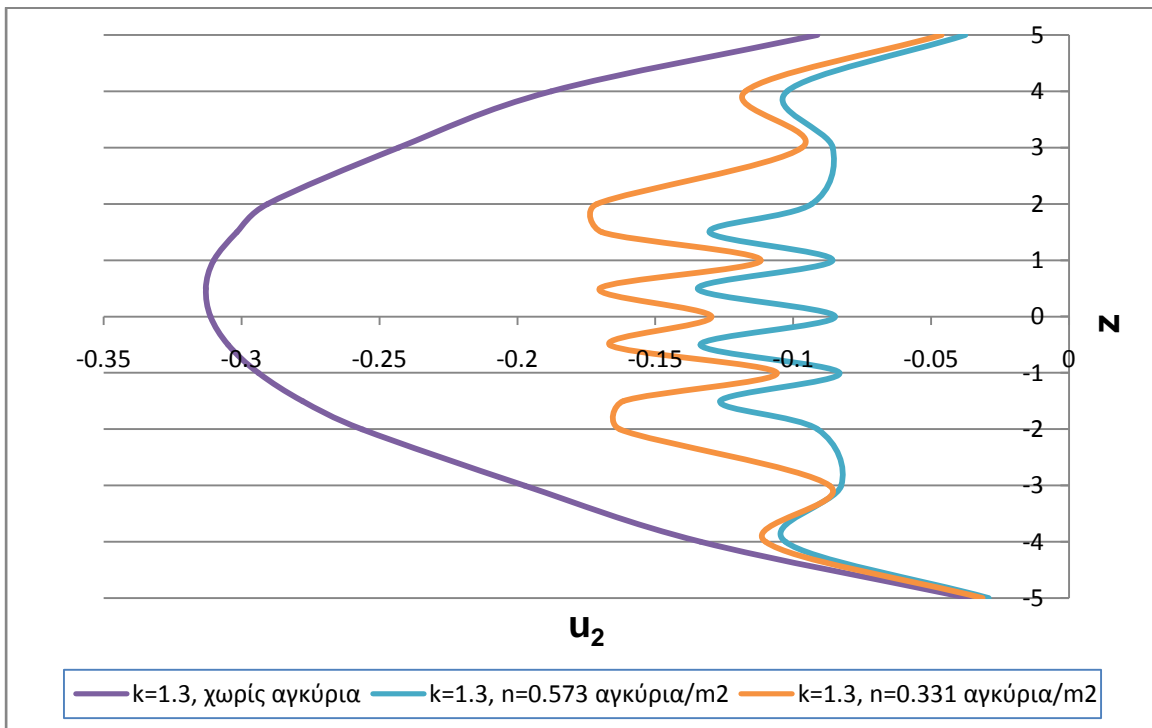
➤ $k=0.7$



➤ $k=1.0$

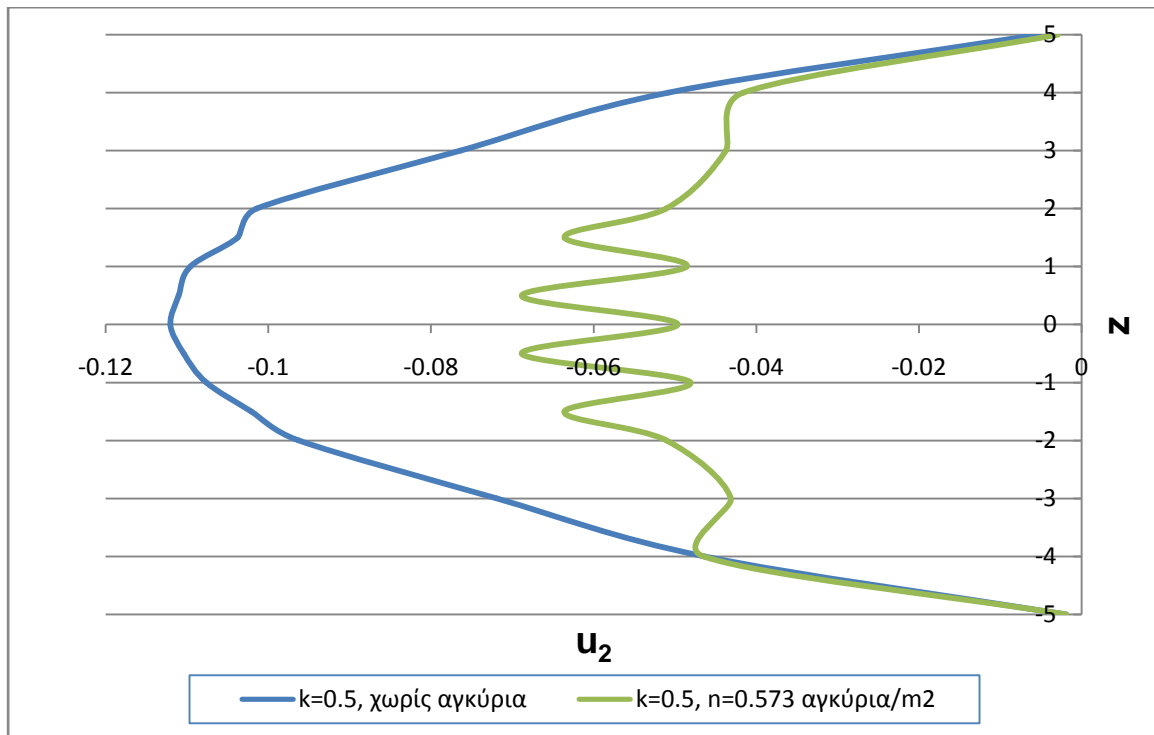


➤ $k=1.3$



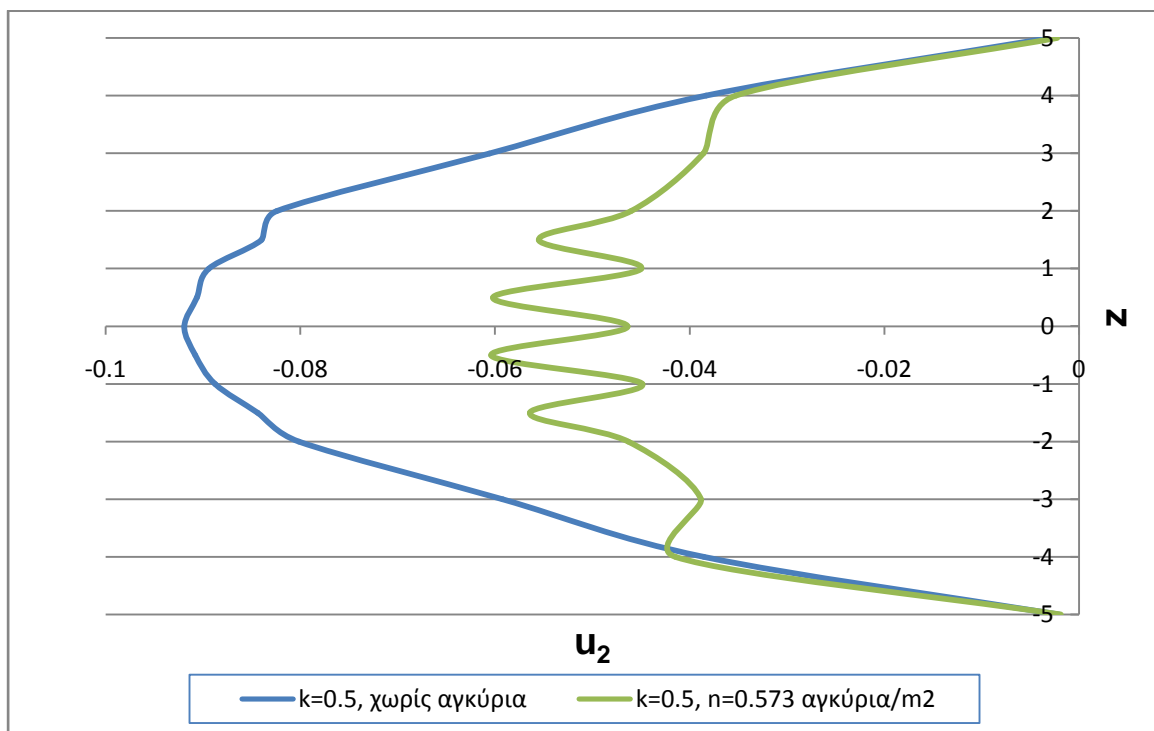
$\varphi=30^\circ$, $c=35$ kPa

➤ $k=0.5$



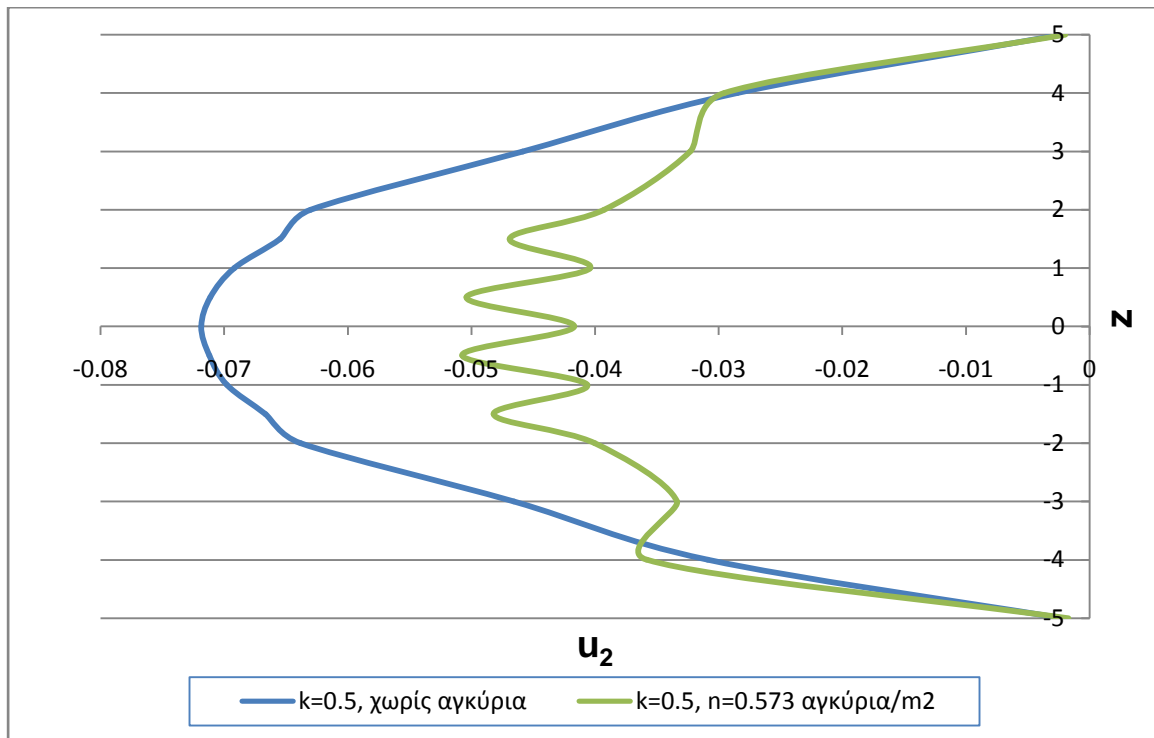
$\varphi=30^\circ$, $c=45$ kPa

➤ $k=0.5$



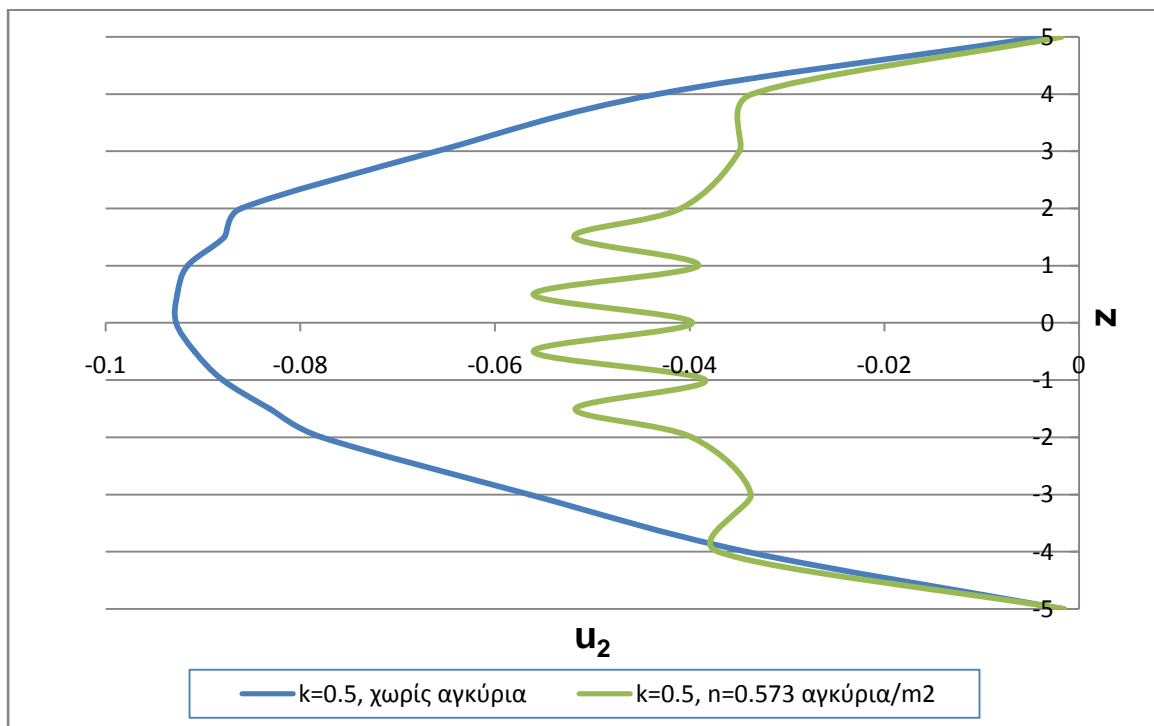
$\phi=30^\circ, c=60 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



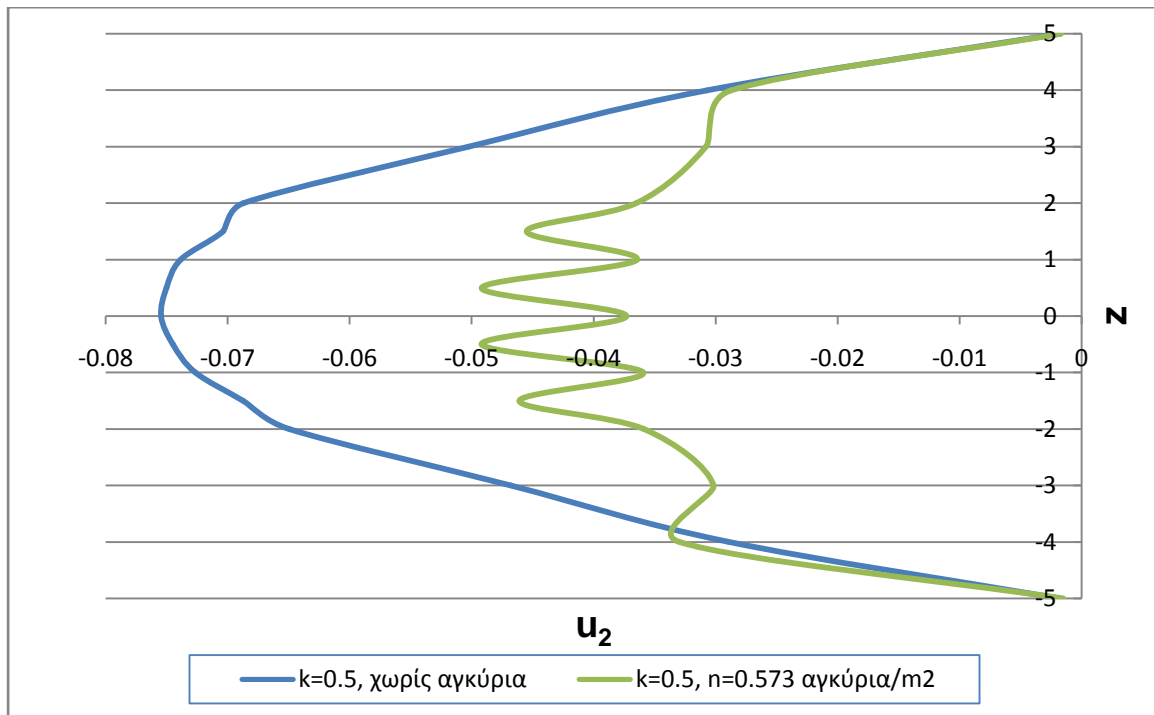
$\phi=35^\circ, c=25 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



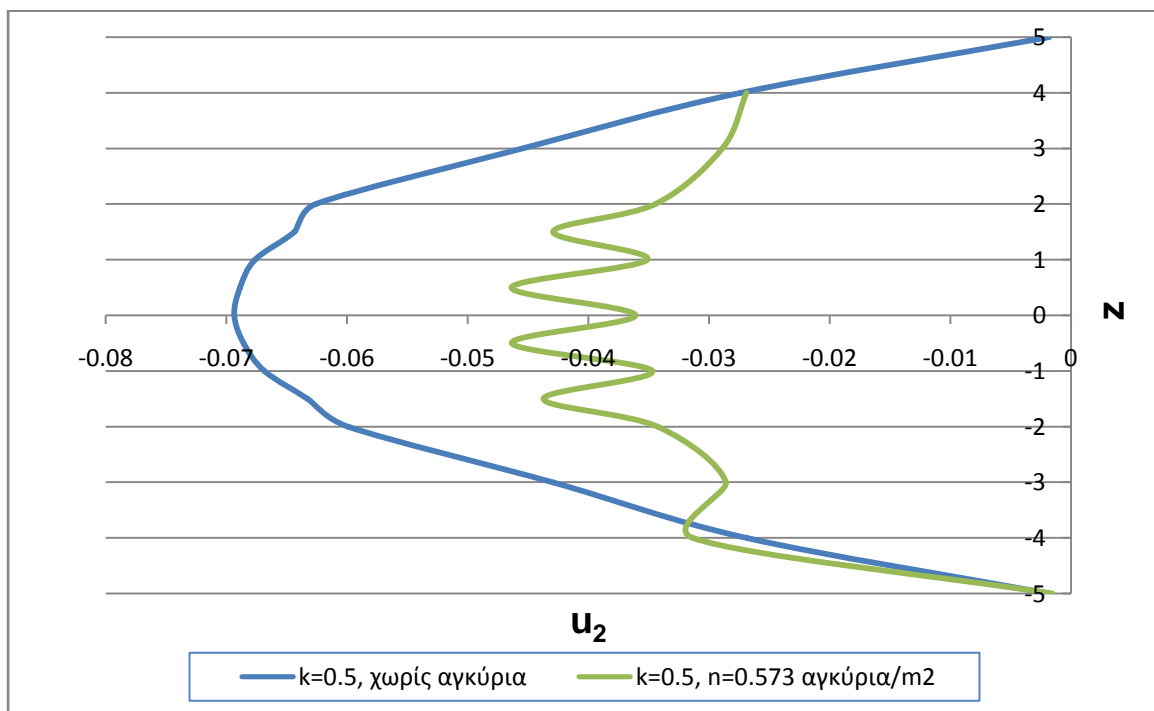
$\varphi=35^\circ, c=35 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



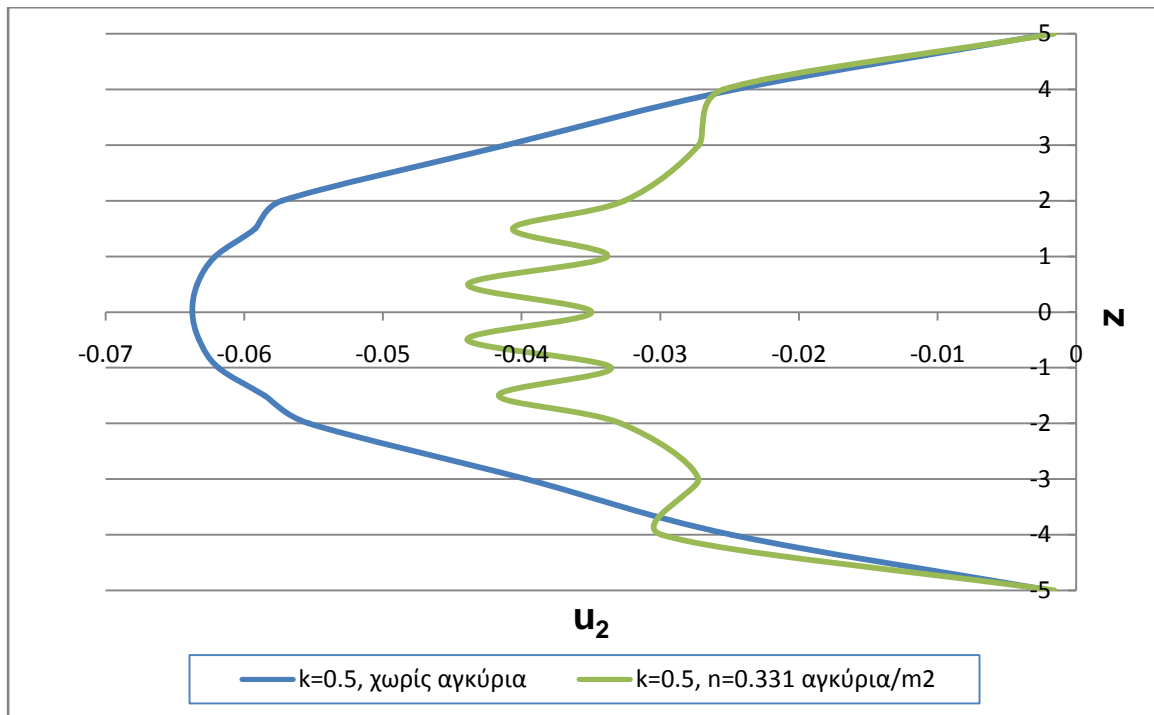
$\varphi=35^\circ, c=40 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



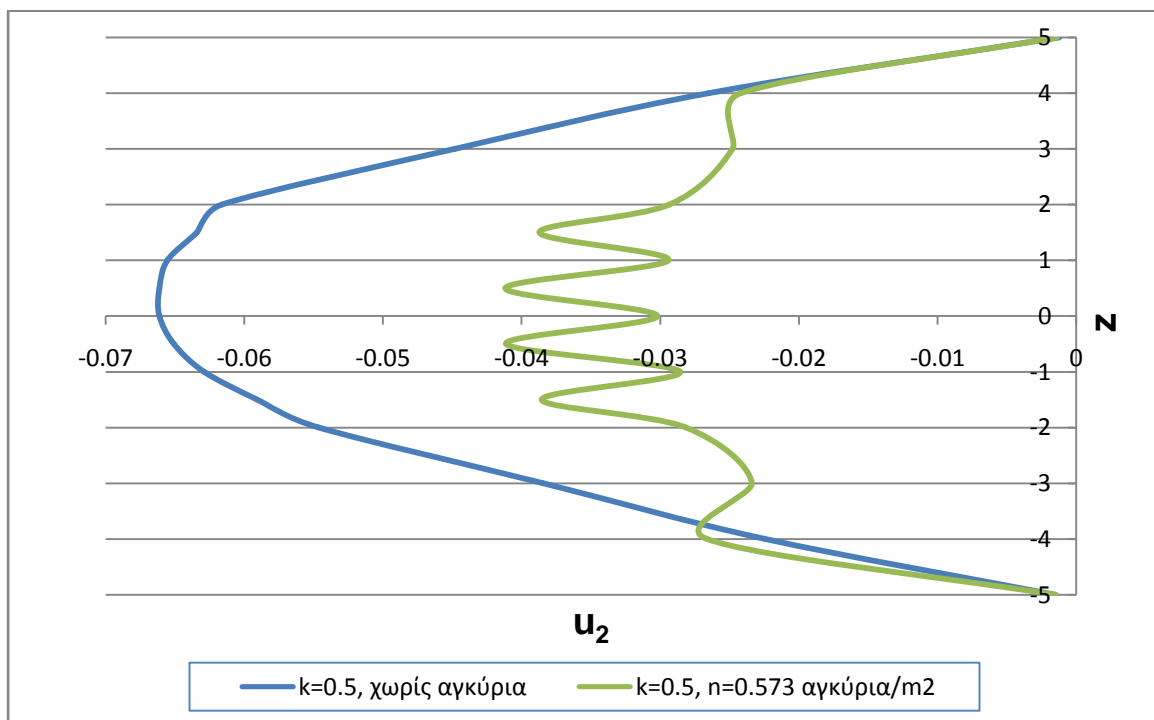
$\varphi=35^\circ, c=45 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



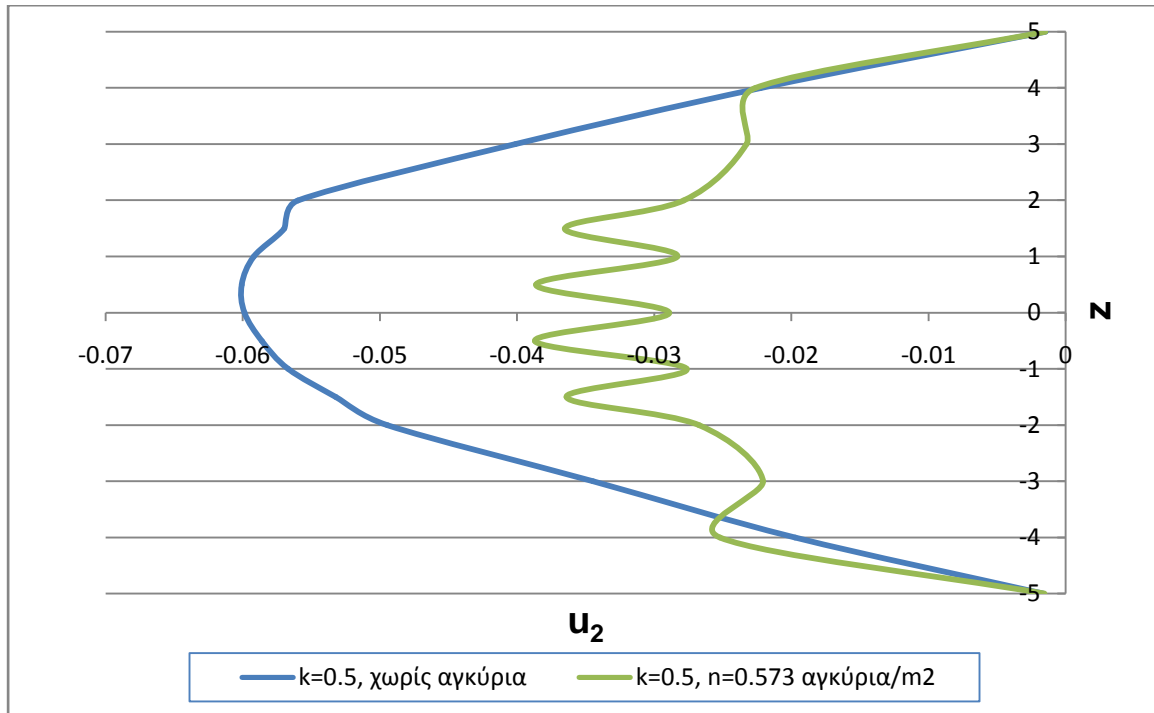
$\varphi=40^\circ, c=25 \text{ kPa}$

➤ $k=0.5$



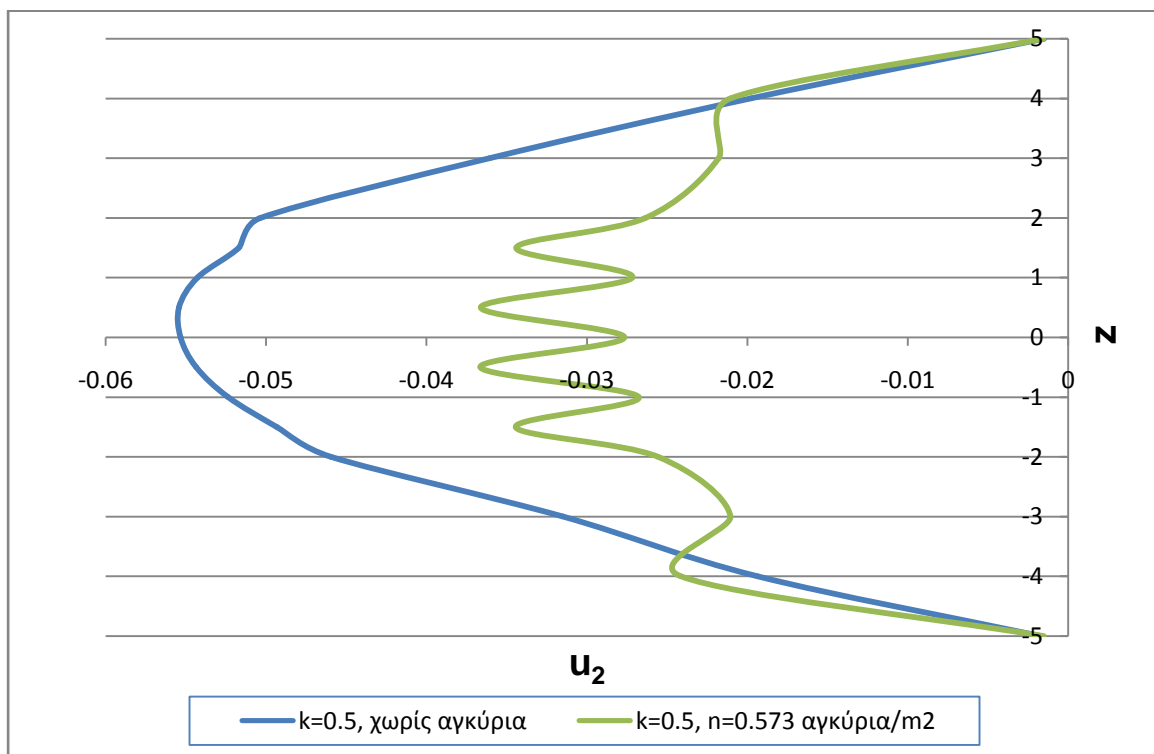
$\varphi=40^\circ$, $c=30$ kPa

➤ $k=0.5$



$\varphi=40^\circ$, $c=35$ kPa

➤ $k=0.5$



Διαγράμματα επίδρασης αντοχής σ_{cs} και συντελεστή F_{FS}

