



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

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ  
ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

**ΧΟΡΤΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ  
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ  
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2013**

## Ευχαριστίες

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Για τη συνεισφορά τους στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας ευχαριστώ ιδιαίτερα:

- ✓ τον κ. Μ. Καββαδά, Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Η εποπτεία του και η καθοδήγησή του αποτέλεσαν σημαντική συνεισφορά στην ολοκλήρωσή της.
- ✓ τον κ. Π. Φορτσάκη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό του ΕΜΠ, MSc, για την καθοριστική και ανεκτίμητη συνεισφορά του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Η αμέριστη συμπαράστασή του, η συγκροτημένη καθοδήγησή του και η μεταδοτικότητά του αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες που κατέστησαν τη συνεργασία μας υποδειγματική. Για τον απεριόριστο χρόνο που μου παρείχε και τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα κατά την συνεργασία μας και για τη συγγραφή επιστημονικού άρθρου θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου.
- ✓ τον κ. Γ. Προυντζόπουλο, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό του ΕΜΠ, MSc, για την συνεισφορά του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας
- ✓ τον κ. Κ. Τζιβάκο, Πολιτικό Μηχανικό, MSc, Υπ. Δρ. του ΕΜΠ, για την συνεισφορά του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας
- ✓ τον κ. Α. Καλό, Πολιτικό Μηχανικό, MSc, Υπ. Δρ. του ΕΜΠ, για την συνεισφορά του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας

Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2. Μηχανική των Σηράγγων</b>	<b>3</b>
2.1. Φορτία στην Άμεση Υποστήριξη της Σήραγγας	3
2.1.1. Εμπειρικές Μέθοδοι	3
2.1.2. Αναλυτικές Μέθοδοι Φορτίζοντος Στερεού	3
2.1.2.1. Μέθοδος Νεκρού Φορτίου και Πλαστικής Ζώνης	4
2.1.3. Αναλυτικές Μέθοδοι Αλληλεπίδρασης Γεωυλικού - Υποστήριξης	5
2.1.3.1. Μέθοδος Σύγκλισης - Αποτόνωσης	9
2.1.4. Αριθμητικές Μέθοδοι	19
2.1.5. Προσομοίωση Διαμήκου Κατανομής Συγκλίσεων	28
2.1.5.1. Μέθοδος Panet (Panet 1995)	28
2.1.5.2. Μέθοδος Chern (Chern et al. 1998)	29
2.1.5.3. Μέθοδος Vlachopoulos and Diederichs (Vlachopoulos and Diederichs 2009)	31
2.2. Μέτωπο Εκσκαφής	32
2.2.1. Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής	32
2.2.2. Αριθμητικές Μέθοδοι Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής	38
2.2.3. Αναλυτικές Μέθοδοι Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής	41
2.2.4. Μέθοδοι Ενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής	45
2.2.4.1. Μέθοδοι Ενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής	45
2.2.4.2. Μέθοδοι Βελτίωσης του Μετώπου Εκσκαφής	46
2.2.4.3. Μέθοδοι Προστασίας του Μετώπου Εκσκαφής	47
2.2.4.4. Μέθοδοι Αποστράγγισης του Μετώπου Εκσκαφής	49
2.2.4.5. Μέθοδοι Υποστήριξης του Μετώπου Εκσκαφής	50
2.3. Επίδραση της Πίεσης Υποστήριξης στο Μέτωπο Εκσκαφής στο Φορτίο της Άμεσης Υποστήριξης	56
<b>3. Αριθμητικές Αναλύσεις</b>	<b>58</b>
3.1. Προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων	58
3.1.1. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS	58
3.1.2. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus	59
3.2. Σχεδιασμός Προσομοιωμάτων	59
3.2.1. Γεωμετρία Προσομοιωμάτων	60
3.2.2. Διαμόρφωση & Διακριτοποίηση Καννάβων Προσομοιωμάτων	62
3.3. Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων	65
3.4. Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων	69
3.4.1. Γεωμετρικές & Κατασκευαστικές Παράμετροι Σήραγγας	69
3.4.2. Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωυλικού	69

3.4.3.	Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης -----	71
3.4.4.	Παράμετροι Αγκυρίων Fiberglass -----	71
3.4.5.	Προσδιορισμός Βασικών Συμβόλων Παραμετρικών Αναλύσεων -----	74
3.5.	Έλεγχος Αξιοπιστίας Προσομοιωμάτων -----	76
<b>4.</b>	<b>Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων -----</b>	<b>79</b>
4.1.	Φορτίο στην Άμεση Υποστήριξη της Σήραγγας -----	79
4.1.1.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m -----	79
4.1.2.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m -----	97
4.1.3.	Επίδραση του Ύψους Υπερκείμενων -----	113
4.1.4.	Επίδραση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας -----	114
4.2.	Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας -----	116
4.2.1.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m -----	116
4.2.2.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m -----	129
4.3.	Μετακινήσεις στη Στέψη και τον Πυθμένα της Σήραγγας -----	142
4.3.1.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m -----	142
4.3.2.	Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m -----	150
4.4.	Αγκύρια Fiberglass στο Μέτωπο Εκσκαφής -----	158
<b>5.</b>	<b>Συμπεράσματα &amp; Προτάσεις -----</b>	<b>171</b>
5.1.	Συμπεράσματα -----	171
5.2.	Προτάσεις -----	176

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης και καμπύλη νεκρού φορτίου πλαστικής ζώνης (Φορτσάκης 2012)	4
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των αρχών και των παραδοχών της μεθόδου σύγκλισης - αποτόνωσης (Φορτσάκης 2012)	10
Σχήμα 2.3: Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικών αριθμητικών αναλύσεων (Graziani et al. 2005)	19
Σχήμα 2.4: Ανηγμένο αξονικό φορτίο της άμεσης υποστήριξης στη θέση ισορροπίας με το γεωυλικό ( $\phi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού, $c$ : η συνοχή του γεωυλικού, $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $v$ : ο ρυθμός προχώρησης της διάνοιξης, $K$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και $q$ το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Graziani et al. 2005)	20
Σχήμα 2.5: Κανονικοποιημένο διάγραμμα για τον υπολογισμό του ανηγμένου αξονικού φορτίου της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM. ( $\phi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού, $\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του γεωυλικού, $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού και $p$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Ramoni et al. 2011)	21
Σχήμα 2.6: Κανονικοποιημένο διάγραμμα για τον υπολογισμό του ανηγμένου αξονικού φορτίου της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM. ( $\phi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού, $\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του γεωυλικού, $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού και $p$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Ramoni et al. 2011)	22
Σχήμα 2.7: Φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της αντοχής του γεωυλικού ( $p_\infty$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης, $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)	23
Σχήμα 2.8: (a) Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικών αναλύσεων (b) Εύρος πλαστικής ζώνης $r$ (c) Μετακινήσεις $u$ (d) Φορτίο της άμεσης υποστήριξης $p$ κατά μήκος του άξονα $y$ της σήραγγας ( $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)	24
Σχήμα 2.9: (a) (b) Κανονικοποιημένο φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της κανονικοποιημένης αντοχής του γεωυλικού ( $p_\infty$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης, $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)	25
Σχήμα 2.10: Κανονικοποιημένο φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της κανονικοποιημένης αντοχής του γεωυλικού ( $p_\infty$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης, $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb, $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης, $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής και $p_F$ : η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)	25
Σχήμα 2.11: Κατανομή του λόγου της μέσης πίεσης προς τη μέση γεωστατική τάση ( $p_m/p_{o,m}$ ) ως προς το συντελεστή εκτίμησης των φορτίων TLF (Φορτσάκης 2012)	27
Σχήμα 2.12: Προτεινόμενη εξίσωση και καμπύλες για την εκτίμηση του μέσου φορτίου της άμεσης υποστήριξης ως προς το συντελεστή TLF (Φορτσάκης 2012)	27
Σχήμα 2.13: Μέτωπο Εκσκαφής, Πυρήνας Προώθησης, Σύγκλιση, Έκθλιψη (Lunardi 2000)	32
Σχήμα 2.14: Έκθλιψη, Σύγκλιση, Προσύγκλιση (Lunardi 2000)	33
Σχήμα 2.15: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια (Lunardi 2000)	33
Σχήμα 2.16: Μηχανισμός δημιουργίας της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής (Cantieni 2011)	34
Σχήμα 2.17: Κύκλοι του Mohr που απεικονίζουν τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του γεωυλικού στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας λόγω της διάνοιξης για ασθενές και ισχυρό γεωυλικό που αντιστοιχούν σε ασταθές και ευσταθές μέτωπο εκσκαφής (Προυντζόπουλος 2012)	35
Σχήμα 2.18: Μέτωπο Εκσκαφής, Πυρήνας Προώθησης (Lunardi 2000)	35

Σχήμα 2.19: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια Μετώπου Εκσκαφής (Lunardi 2000)	36
Σχήμα 2.20: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια Μετώπου Εκσκαφής (Lunardi 2000)	37
Σχήμα 2.21: Μέση κανονικοποιημένη έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ (Προυντζόπουλος 2012)	40
Σχήμα 2.22: Μηχανισμός αστοχίας θεωρίας του σιλό (Horn 1961) (Προυντζόπουλος 2012)	41
Σχήμα 2.23: Γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού αστοχίας (Προυντζόπουλος 2012)	42
Σχήμα 2.24: Δρώσες δυνάμεις στη σφήνα ολίσθησης του μηχανισμού αστοχίας (Προυντζόπουλος 2012)	42
Σχήμα 2.25: Επίδραση των οριζόντιων αγκυριών μετώπου στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καββαδάς 2012)	45
Σχήμα 2.26: Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Hoek 2004)	47
Σχήμα 2.27: Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καββαδάς 2012)	48
Σχήμα 2.28: Επίδραση των δοκών προπορείας στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καββαδάς 2012)	48
Σχήμα 2.29: Earth Pressure Balance Machine (Herrenknecht)	51
Σχήμα 2.30: Earth Pressure Balance Machine (Herrenknecht)	51
Σχήμα 2.31: Λειτουργίες του Earth Pressure Balance Machine (Marinos 2009)	53
Σχήμα 2.32: Mix Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)	54
Σχήμα 2.33: Mix Shield Tunnel Boring Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)	54
Σχήμα 2.34: Περιοχές εφαρμογής Earth Pressure Balance Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Marinos 2009)	54
Σχήμα 2.35: Περιοχές εφαρμογής Earth Pressure Balance Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)	55
Σχήμα 2.36: Προσομοίωμα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (Kasper and Meschke 2006)	56
Σχήμα 2.37: (a) Καθιζήσεις στην επιφάνεια κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (b) Μέγιστες τιμές των καθιζήσεων στην επιφάνεια συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής $p_s$ (Kasper and Meschke 2006)	56
Σχήμα 2.38: (a) Φορτίο $p$ στην άμεση υποστήριξη (b) Αξονική δύναμη $N_q$ στην άμεση υποστήριξη (c) Ροπή κάμψης $M_q$ στην άμεση υποστήριξη (d) Ανύψωση $u_v$ στη στέψη της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής $p_s$ (Kasper and Meschke 2006)	57
Σχήμα 3.1: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	60
Σχήμα 3.2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	61
Σχήμα 3.3: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	61
Σχήμα 3.4: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	62
Σχήμα 3.5: Προσομοίωμα για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	63
Σχήμα 3.6: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8R) της εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	63
Σχήμα 3.7: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R5) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	64
Σχήμα 3.8: Προσομοίωμα για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	64
Σχήμα 3.9: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8R) της εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	65
Σχήμα 3.10: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R5) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	65
Σχήμα 3.11: Ολομέτωπη κατανομημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m (Τα βέλη απεικονίζουν την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας)	67
Σχήμα 3.12: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (πεπερασμένα στοιχεία δοκού T3D2) των αγκυριών fiberglass που εφαρμόζονται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	67

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Σύνοψη αναλυτικών μεθόδων αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης (Φορτσάκης 2012) ----- 8

Πίνακας 3.1 Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων -----73

Πίνακας 4.1 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m -----89

Πίνακας 4.2 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$ , για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ----- 103

Πίνακας 4.3 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψη υπερκείμενων  $H=2D=20$  m και  $H=5D=50$  m----- 113

Πίνακας 5.1 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m -----173

Πίνακας 5.2 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m -----173

Πίνακας 5.3 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψη υπερκείμενων  $H=2D=20$  m και  $H=5D=50$  m----- 173

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας -----46

Εικόνα 2.2 Αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας -----46

Εικόνα 2.3 Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Anagnostou et al. 1997) -----48

Εικόνα 3.1 Κατανομή της κατακόρυφης και των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m -----76

Εικόνα 3.2 Κατανομή της ολικής μετακίνησης του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m -----77

Εικόνα 3.3 Κατανομή της κατακόρυφης και των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m -----78

Εικόνα 3.4 Κατανομή της ολικής μετακίνησης του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m -----78

Εικόνα 4.1 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ ) -----96

Εικόνα 4.2 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ ) -----96

Εικόνα 4.3 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ ) -----111

Εικόνα 4.4 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ ) -----112

Εικόνα 4.5 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ ) -----124

Εικόνα 4.6 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ ) -----125

Εικόνα 4.7 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ ) -----126

Εικόνα 4.8 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ ) -----127

Εικόνα 4.9 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ ) -----128

Εικόνα 4.10 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ ) -----128

Εικόνα 4.11 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ ) -----137

Εικόνα 4.12 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ ) -----138

Εικόνα 4.13 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ ) -----139

Εικόνα 4.14 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ ) -----140

Εικόνα 4.15 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $r_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ ) -----141





Εικόνα 4.34 Ολικές, οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_F=1.25$ ) 170

## Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 2.1: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης $\sigma_\theta$ και της ακτινικής τάσης $\sigma_r$ για ελαστική απόκριση του γεωυλικού	13
Γράφημα 2.2: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης $\sigma_\theta$ και της ακτινικής τάσης $\sigma_r$ για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	17
Γράφημα 2.3: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης $\sigma_\theta$ και της ακτινικής τάσης $\sigma_r$ για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού ως προς το συντελεστή αποτόνωσης $\lambda$	17
Γράφημα 2.4: Καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	18
Γράφημα 2.5: Καμπύλη μεταβολής του εύρους της πλαστικής ζώνης για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	18
Γράφημα 2.6: Κατανομή του συντελεστή αποτόνωσης $\lambda$ κατά μήκος του άξονα της σήραγγας $x$ για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	29
Γράφημα 2.7: Κατανομή της ελαστικής μετακίνησης $u_{R,el}$ και της πλαστικής μετακίνησης $u_{R,pl}$ στην περίμετρο της εκσκαφής κατά μήκος του άξονα της σήραγγας $x$ για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	30
Γράφημα 2.8: Κατανομή του εύρους της πλαστικής ζώνης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας $x$ για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού	30
Γράφημα 4.1: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	79
Γράφημα 4.2: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	80
Γράφημα 4.3: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	81
Γράφημα 4.4: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	81
Γράφημα 4.5: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	82
Γράφημα 4.6: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας $\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.00$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	83
Γράφημα 4.7: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας $\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	84
Γράφημα 4.8: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας $\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	84
Γράφημα 4.9: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	85
Γράφημα 4.10: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	85
Γράφημα 4.11: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	86
Γράφημα 4.12: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	86
Γράφημα 4.13: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	87
Γράφημα 4.14: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	87



Γράφημα 4.37: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ )	107
Γράφημα 4.38: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ )	107
Γράφημα 4.39: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ )	108
Γράφημα 4.40: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ )	108
Γράφημα 4.41: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ )	109
Γράφημα 4.42: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ )	109
Γράφημα 4.43: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ )	110
Γράφημα 4.44: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ )	110
Γράφημα 4.45: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $\rho_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m για μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας $E$	114
Γράφημα 4.46: Κατανομή του λόγου $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m για μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας $E$	115
Γράφημα 4.47: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_{h,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	116
Γράφημα 4.48: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_{h,diameter}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	117
Γράφημα 4.49: Κατανομή του λόγου $U_{h,s}/U_{h,us}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	118
Γράφημα 4.50: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	119
Γράφημα 4.51: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,diameter}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	119
Γράφημα 4.52: Κατανομή του λόγου $\Omega_{f,s}/\Omega_{f,us}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m	120
Γράφημα 4.53: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_h$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ , $\Lambda_F=1.17$ )	121
Γράφημα 4.54: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_f$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ , $\Lambda_F=1.17$ )	122
Γράφημα 4.55: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_h$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=40$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ , $\Lambda_F=1.88$ )	122
Γράφημα 4.56: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_f$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=40$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ , $\Lambda_F=1.88$ )	123
Γράφημα 4.57: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_{h,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	129
Γράφημα 4.58: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_{h,diameter}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	130
Γράφημα 4.59: Κατανομή του λόγου $U_{h,s}/U_{h,us}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m	131

Γράφημα 4.60: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m-----	132
Γράφημα 4.61: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,diameter}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m-----	132
Γράφημα 4.62: Κατανομή του λόγου $\Omega_{f,s}/\Omega_{f,us}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής $\Lambda_F$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m -----	133
Γράφημα 4.63: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_h$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ ) -----	134
Γράφημα 4.64: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_f$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ ) -----	135
Γράφημα 4.65: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_h$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ ) -----	135
Γράφημα 4.66: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_f$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ ) -----	136
Γράφημα 4.67: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ , $\Lambda_F=1.17$ ) -----	142
Γράφημα 4.68: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ , $\Lambda_F=1.17$ ) -----	143
Γράφημα 4.69: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=40$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ , $\Lambda_F=1.88$ ) -----	143
Γράφημα 4.70: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=40$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=280$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ , $\Lambda_F=1.88$ ) -----	144
Γράφημα 4.71: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ ) -----	150
Γράφημα 4.72: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=25$ kPa, $\phi=25^\circ$ , $E=82$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ , $\Lambda_F=1.21$ ) -----	151
Γράφημα 4.73: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ ) -----	151
Γράφημα 4.74: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας $U_v$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=2D=20$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ , $E=95$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ , $\Lambda_F=1.16$ ) -----	152
Γράφημα 4.75: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ ) -----	159
Γράφημα 4.76: Κατανομή του λόγου $p_{s,m}/p_{us,m}$ συναρτήσει του λόγου $S/R$ κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ ) -----	159
Γράφημα 4.77: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου $p_m/\sigma_{o,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ ) --	160
Γράφημα 4.78: Κατανομή του λόγου $p_{s,m}/p_{us,m}$ συναρτήσει της γωνίας $\Theta$ στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ ) -----	160
Γράφημα 4.79: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $U_h$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ )-----	161
Γράφημα 4.80: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_f$ συναρτήσει του λόγου $z/R$ για ύψος υπερκείμενων $H=5D=50$ m ( $c=20$ kPa, $\phi=35^\circ$ , $E=320$ MPa, $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ , $\Lambda_F=1.25$ ) -----	161

Γράφημα 4.81: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )-----162

Γράφημα 4.82: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )-----162

Γράφημα 4.83: Συσχέτιση της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ ) -----163

Γράφημα 4.84: Συσχέτιση της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )-----163

## Περίληψη

Τα μέτρα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής χρησιμοποιούνται στη διάνοιξη σηράγγων σε ασθενή γεωυλικά, ώστε να βελτιώσουν τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, να περιορίσουν την αποτόνωση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως να μειώσουν τις καθιζήσεις στην επιφάνεια στην περίπτωση αβαθών σηράγγων και την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων στην περίπτωση δίδυμων σηράγγων. Στη μηχανική όρυξη σηράγγων με τη χρήση Earth Pressure Balance Machine (EPB) ή Slurry Shield Tunnel Boring Machine (TBM), τα προαναφερθέντα επιτυγχάνονται με την πίεση υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής. Στη συμβατική όρυξη σηράγγων, η παραμορφωσιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής βελτιώνεται με την χρήση αγκυρίων μετώπου fiberglass (υαλονημάτων) ή/και ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας. Τα αγκύρια μετώπου επιδρούν στον πυρήνα προώθησης ως πίεση υποστήριξης: είναι επομένως αποτελεσματικά όταν το πρόβλημα είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, ενώ η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας είναι κατά βάση μέτρο προστασίας για το ανυποστήρικτο τμήμα της εκσκαφής. Τα μέτρα υποστήριξης μειώνουν την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής, την προσύγκλιση και την αποτόνωση του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης πριν την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και επομένως προκαλούν αύξηση στα φορτία της άμεσης υποστήριξης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικές εμπειρικές, αναλυτικές ή αριθμητικές μέθοδοι για την εκτίμηση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη ή την τελική επένδυση. Ωστόσο, όλες οι μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των μέτρων υποστήριξης του μετώπου στα φορτία της άμεσης υποστήριξης. Επομένως, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με στόχο την περιγραφή του μηχανισμού του συγκεκριμένου φαινομένου και της ποσοτικοποίησης της αύξησης στα φορτία της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει των γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για το εύρος των περιπτώσεων που εξετάστηκαν έδειξαν ότι τα φορτία μπορεί να αυξηθούν έως και 80 % για  $H = 2D = 20$  m και έως 40 % για  $H = 5D = 50$  m. Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η γωνία τριβής του γεωυλικού, η οποία στην περίπτωση του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής επηρεάζει σημαντικά τη διατμητική αντοχή που αναπτύσσεται στις δυνητικές επιφάνειες αστοχίας. Αντίθετα, το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού δεν επηρεάζει σημαντικά την αύξηση του φορτίου γιατί κατά βάση καθορίζει το «δυναμικό φορτίο», αλλά δεν επηρεάζει την αποτόνωση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Ο ρόλος του ύψους υπερκείμενων είναι ενσωματωμένος στους κανονικοποιημένους παράγοντες  $p/\sigma_{o,m}$  και  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία γιατί οι τιμές του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζουν μικρές διαφορές για το ίδιο εύρος γεωτεχνικών συνθηκών. Η συνοχή του γεωυλικού μπορεί να διαφοροποιεί το λόγο  $p_{s,m}/p_{us,m}$  σε μεγάλο εύρος γεωτεχνικών συνθηκών, αλλά αν απομονωθεί το εύρος κοντά στην περιοχή της αστάθειας τότε ο ρόλος της συνοχής του γεωυλικού περιορίζεται. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, προτείνεται ένα αντιπροσωπευτικό εύρος του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  για κάθε συνδυασμό των σημαντικών παραμέτρων: γωνία τριβής και



κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής  $p_{fs}/\sigma_{ho}$ . Οι περιπτώσεις γεωτεχνικών συνθηκών για τις οποίες δεν θα χρησιμοποιούνταν μέτρα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής δεν έχουν συνυπολογιστεί.

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία είναι:  $p_{fs}$ : ολομέτωπη κατανομημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας,  $p_s$  &  $p_{us}$ : τελικό φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για υποστηριγμένο και ανυποστηρίκτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (ο δείκτης  $m$  προσδιορίζει το μέσο όρο στη διατομή της εκσκαφής της σήραγγας),  $\sigma_{ho}$  &  $\sigma_{o,m}$ : οριζόντια και μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας,  $\sigma_c$ : αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη.

**Πίνακας: Προτεινόμενα εύρη τιμών για την αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας ( $p_{s,m}/p_{us,m}$ ) λόγω της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας**

	H=2D=20 m				H=5D=50 m		
	$\phi=20^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.00-1.10	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.10-1.20	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.40$	1.25-1.35	1.35-1.45	1.45-1.60	1.55-1.70			
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.50$	1.30-1.40	1.45-1.55	1.55-1.70	1.60-1.80			

## Abstract

Face treatment measures are often used in tunnelling through weak formations in order to improve the face stability conditions, limit stress release (deconfinement) in front of the tunnel and thus reduce surface settlements in case of shallow tunnels and the interaction between the two branches in case of twin tunnels. In mechanized tunnelling using Earth Pressure Balance Machine (EPB) or Slurry Shield Tunnel Boring Machine (TBM), this is achieved by the pressure exerted on the excavation face. In conventional tunnelling, the behaviour of the tunnel face is often improved by fibreglass nails or/and forepole umbrella. Face nailing acts on the advance core as a retaining pressure; it is therefore very efficient when face stability is the problem and forepole umbrella is mainly a protective measure for the unsupported span of the tunnel. Face treatment measures decrease face extrusion, pre - convergence and deconfinement before the installation of the temporary support, and thus result in an increase of the loads on the support shell. Different methods can be found in the literature for estimating the loads on the temporary support or final lining based on empirical, analytical and numerical methods. Yet, all these approaches do not take into account the effect of face treatment on the loading of the support shell. Therefore, in the frame of this thesis, a set of 3D numerical analyses has been carried out aiming to describe the mechanism of this phenomenon and quantify the increase of the tunnel loads as a function of the geometrical and geotechnical parameters.

The numerical analyses results showed that, for the examined range of cases, the tunnel loads can be increased up to 80 % for  $H = 2D = 20$  m and up to 40 % for  $H = 5D = 50$  m. The most significant parameters are the face pressure and the geomaterial friction angle, which in the case of the supported tunnel face affects significantly the shear stress that is developed on the potential failure surfaces. On the contrary, geomaterial deformation modulus does not affect significantly the load increase since it mainly controls the “load potential” and not the deconfinement in front of the excavation face. The role of the overburden height is incorporated in the normalized factors  $p/\sigma_{o,m}$  and  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  that are used in the thesis since the values of the ratio  $p_{s,m}/p_{us,m}$  are very close for the same range of geotechnical conditions. The geomaterial cohesion may differentiate the ratio  $p_{s,m}/p_{us,m}$  in a large range of geotechnical conditions, but if the range close to instability is isolated then its role is reduced. Taking into account the aforementioned, a representative range for the  $p_{s,m}/p_{us,m}$  ratio is proposed for every combination of the significant parameters: friction angle and normalized face pressure  $p_{fs}/\sigma_{ho}$ . The cases of favourable geotechnical conditions where face treatment would not be used have not been co - evaluated.

The symbols that are used in the thesis are  $p_{fs}$ : tunnel face support pressure,  $p_s$  &  $p_{us}$ : final tunnel load for supported & unsupported tunnel face (the subscript m indicates the average around the section),  $\sigma_{ho}$  &  $\sigma_{o,m}$ : horizontal & mean geostatic stress before the excavation at the level of the tunnel center,  $\sigma_c$ : geomaterial uniaxial compressive strength.

**Table: Proposed ranges of values for the tunnel load increase on the temporary support ( $p_{s,m}/p_{us,m}$ ) due to tunnel face support**

Normalized Face Pressure	H=2D=20 m				H=5D=50 m		
	$\phi=20^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.00-1.10	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.10-1.20	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.40$	1.25-1.35	1.35-1.45	1.45-1.60	1.55-1.70			
$p_{fs}/\sigma_{ho}=0.50$	1.30-1.40	1.45-1.55	1.55-1.70	1.60-1.80			

## 1. Εισαγωγή

Η διάνοιξη σήραγγας προκαλεί μεταβολές στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικό στη διατομή της εκσκαφής και στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, λόγω της διαδικασίας της διάνοιξης συντελείται ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή που έχει εκσκαφθεί και υποστηριχθεί πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και στην περιοχή μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Η συνέπεια της συγκεκριμένης μεταβολής στο εντατικό πεδίο είναι η ανάπτυξη μετακινήσεων και στις δύο προαναφερθείσες περιοχές. Βασικό στοιχείο διερεύνησης στη διάνοιξη σηράγγων είναι η εκτίμηση, ο υπολογισμός και ο προσδιορισμός των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Ωστόσο, οι μέθοδοι εκτίμησης, υπολογισμού και προσδιορισμού των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των μέτρων υποστήριξης/αντιστήριξης του μετώπου εκσκαφής. Επομένως, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με στόχο την περιγραφή του μηχανισμού του συγκεκριμένου φαινομένου και της ποσοτικοποίησης της αύξησης στα φορτία της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει των γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων.

Τα μέτρα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής χρησιμοποιούνται στη διάνοιξη σηράγγων σε ασθενή γεωυλικά, ώστε να βελτιώσουν τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, να περιορίσουν την αποτόνωση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως να μειώσουν τις καθιζήσεις στην επιφάνεια στην περίπτωση αβαθών σηράγγων, να περιορίσουν το εύρος της πλαστικής ζώνης που αναπτύσσεται και επομένως να μειώσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων στην περίπτωση δίδυμων σηράγγων και να μειώσουν τη διεκτροπική τάση παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη χρονικά εξαρτημένης συμπεριφοράς (τον ερπυσμό) του γεωυλικού. Στη μηχανική όρυξη σηράγγων με τη χρήση Earth Pressure Balance Machine (EPB) ή Slurry Shield Tunnel Boring Machine (TBM), τα προαναφερθέντα επιτυγχάνονται με την πίεση υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής. Στη συμβατική όρυξη σηράγγων, η παραμορφωσιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής βελτιώνεται με την χρήση αγκυρίων μετώπου fiberglass (υαλονημάτων) ή/και ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας. Τα αγκύρια μετώπου επιδρούν στον πυρήνα προώθησης ως παθητική πίεση υποστήριξης: είναι επομένως αποτελεσματικά όταν το πρόβλημα είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, ενώ η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας είναι κατά βάση μέτρο προστασίας για το ανυποστήρικτο τμήμα της εκσκαφής: επιδρά μειώνοντας την κατακόρυφη τάση που πρόκειται να παραλάβει ο πυρήνας προώθησης. Τα μέτρα υποστήριξης μειώνουν την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής, την προσύγκλιση και την αποτόνωση του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης πριν την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και επομένως προκαλούν αύξηση στα φορτία της άμεσης υποστήριξης.

Για τη διερεύνηση της διαφοροποίησης των φορτίων της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας εξαιτίας της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Οι τριδιάστατες αριθμητικές

αναλύσεις προτιμήθηκαν γιατί προσομοιώνουν με επάρκεια τις συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης που επικρατούν κοντά στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και την προοδευτική μετάβαση στις συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης που επικρατούν μακριά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, προσομοιώνουν ικανοποιητικά την αποτόνωση, την παραμορφωσιακή απόκριση και την ανακατανομή τάσεων του γεωυλικού που πραγματοποιούνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και την αλληλεπίδραση των συγκεκριμένων φαινομένων. Επιπρόσθετα, συνεκτιμούν και ενσωματώνουν την επίδραση της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής (έκθλιψη) και του πυρήνα προώθησης (προσυγκλίσεις) της σήραγγας που καθορίζει τις συγκλίσεις (ακτινικές μετακινήσεις) και τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο πρόβλημα που διερευνήθηκε η εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων θεωρήθηκε επιβεβλημένη, ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Τα μέτρα υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας που διερευνήθηκαν είναι:

- ✓ η εφαρμογή ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής (μηχανική όρυξη σηράγγων με EPB)
- ✓ η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής (συμβατική όρυξη σηράγγων)

## 2. Μηχανική των Σηράγγων

Η διάνοιξη σήραγγας προκαλεί μεταβολές στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικό στη διατομή της εκσκαφής και στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, λόγω της διάνοιξης σήραγγας συντελείται ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή που έχει εκσκαφθεί και υποστηριχθεί πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και στην περιοχή μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Η συνέπεια της συγκεκριμένης μεταβολής στο εντατικό πεδίο είναι η ανάπτυξη μετακινήσεων και στις δύο προαναφερθείσες περιοχές. Βασικό στοιχείο διερεύνησης στη διάνοιξη σηράγγων είναι η εκτίμηση, ο υπολογισμός, ο προσδιορισμός των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας.

### 2.1. Φορτία στην Άμεση Υποστήριξη της Σήραγγας

Οι μέθοδοι υπολογισμού των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας διακρίνονται σε εμπειρικές μεθόδους, αναλυτικές μεθόδους φορτίζοντος στερεού, αναλυτικές μεθόδους αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης και αριθμητικές μεθόδους.

#### 2.1.1. Εμπειρικές Μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας εφαρμόζονται για διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδεις σχηματισμούς και βασίζονται στην ποιοτική περιγραφή, τη βαθμονόμηση και το χαρακτηρισμό του βραχώδους σχηματισμού. Οι συσχετίσεις που προτείνονται έχουν προκύψει από επί τόπου παρατηρήσεις και επί τόπου μετρήσεις τάσεων και παρέχουν ικανοποιητικές προσεγγίσεις υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται σε γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που συγκλίνουν με τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμησή τους. Με βάση τους Einstein et al. (1979) οι εμπειρικές μέθοδοι διακρίνονται σε ποιοτικές (Terzaghi 1946) και ποσοτικές (Deere et al. 1969 and 1970, Barton et al. 1974, Wickham et al. 1974, Unal 1983) με κριτήριο διαχωρισμού με τον τρόπο αξιολόγησης των χαρακτηριστικών του σχηματισμού.

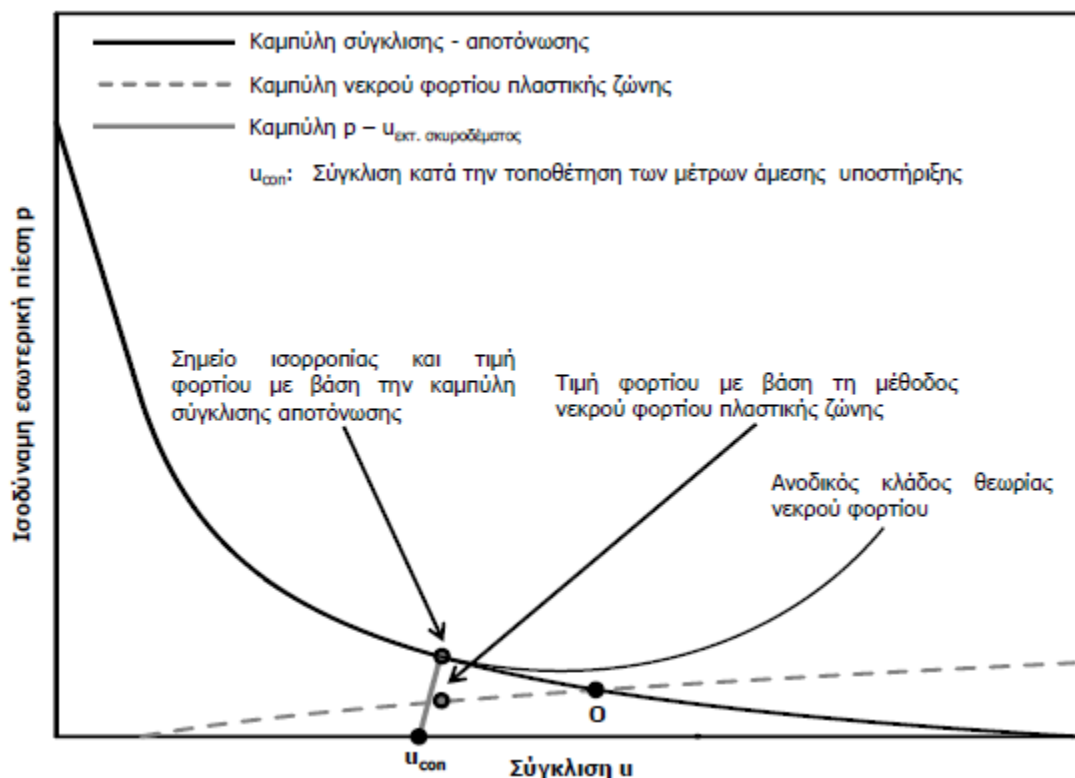
#### 2.1.2. Αναλυτικές Μέθοδοι Φορτίζοντος Στερεού

Οι αναλυτικές μέθοδοι φορτίζοντος στερεού αποτελούν πιο μηχανιστική προσέγγιση του υπολογισμού των φορτίων στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας και βασίζονται στις εξισώσεις ισορροπίας ενός στερεού σώματος γεωυλικού, πάνω από τη διατομή της εκσκαφής της σήραγγας. Οι βασικοί παράγοντες των συγκεκριμένων μεθόδων είναι η επίδραση του ύψους των υπερκειμένων και η γεωμετρία του φορτίζοντος στερεού. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (i) στις μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη το ύψος υπερκείμενων (Bierbaumer 1913, Maillart 1923, Eszto 1939, Terzaghi 1943, Balla 1963) στις οποίες τα φορτία προκύπτουν ως συνάρτηση του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου και (ii) στις μεθόδους που δεν λαμβάνουν υπόψη το ύψος υπερκείμενων (Engesser 1882, Forchheimer 1882, Kommerel 1912,

Protodyakonov 1948, Szechy 1963, 1966 and 1970) στις οποίες η φόρτιση θεωρείται ανεξάρτητη του ύψους υπερκειμένων και τα φορτία προκύπτουν από το ανηγμένο βάρος υπερκειμένου στερεού γεωυλικού, γενικά παραβολικού σχήματος. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι που εντάσσονται στη δεύτερη κατηγορία εφαρμόζονται σε κοκκώδη, μη συνεκτικά γεωυλικά στα οποία ενεργοποιείται η τριβή στις επιφάνειες ολίσθησης από την παραμορφωσιακή απόκριση που προκαλείται λόγω της διάνοιξης.

### 2.1.2.1. Μέθοδος Νεκρού Φορτίου και Πλαστικής Ζώνης

Οι Φορτσάκης et al. (2006) και οι Φορτσάκης και Καββαδάς (2010) παρουσίασαν τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στις σήραγγες της Εγνατίας Οδού στην οποία υιοθετήθηκε η μέθοδος του νεκρού φορτίου της πλαστικής ζώνης. Με βάση τη συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται ότι το φορτίο που πρόκειται να παραλάβει η άμεση υποστήριξη είναι το ανηγμένο βάρος του γεωυλικού εντός της πλαστικής ζώνης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία συνιστά υβριδική μέθοδο «φορτίζοντας στερεού» και «αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης» γιατί προσπαθεί να προσεγγίσει ορθολογικά τη μάζα του γεωυλικού που φορτίζει τη σήραγγα, για την οποία όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι υιοθετούν αυθαίρετες μηχανιστικές παραδοχές ως προς το σχήμα και το εύρος.



Σχήμα 2.1: Καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης και καμπύλη νεκρού φορτίου πλαστικής ζώνης (Φορτσάκης 2012)

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης ελαστικού - απολύτως πλαστικού γεωυλικού και η αντίστοιχη καμπύλη μεταβολής του φορτίου της μεθόδου του νεκρού φορτίου. Με βάση τη θεωρία των καμπυλών σύγκλισης - αποτόνωσης η αύξηση των ακτινικών μετατοπίσεων, οδηγεί σε αύξηση της αποτόνωσης και του εύρους της πλαστικής ζώνης, αλλά σε

μείωση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη. Επομένως, όπως είναι εμφανές και από το Σχήμα 2.1, η λογική της συγκεκριμένης προσέγγισης αντιτίθεται σε βασικές αρχές της μηχανικής των σηράγγων, γιατί μείωση της αποτόνωσης (μείωση βήματος εκσκαφής, τοποθέτηση μέτρων προ - υποστήριξης) οδηγεί σε μείωση του εύρους της πλαστικής ζώνης, άρα και σε μείωση των φορτίων στην άμεση υποστήριξη.

Η φιλοσοφία της μεθόδου μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική, μόνο στην περίπτωση δημιουργίας ενός ανοδικού κλάδου στην καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης για πολύ μεγάλες μετακινήσεις, ο οποίος οφείλεται στην εκτεταμένη χαλάρωση και αποδιοργάνωση του γεωυλικού. Ο κλάδος αυτός με βάση τις καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης δεν μπορεί να προσεγγιστεί ποσοτικά ούτε για γεωυλικά που παρουσιάζουν χαλάρωση ή ψαθυρή συμπεριφορά μετά την αστοχία. Με βάση τους Kovari (2000), Kolymbas (2008) και Fairhurst and Carranza - Torres (2002) ο συγκεκριμένος κλάδος, αν παρουσιαστεί, δεν μπορεί να εξηγηθεί και να εκφραστεί μέσω των καμπυλών σύγκλισης - αποτόνωσης.

### 2.1.3. Αναλυτικές Μέθοδοι Αλληλεπίδρασης Γεωυλικού - Υποστήριξης

Με τις αναλυτικές μεθόδους αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης προσδιορίζεται με την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας του γεωυλικού κατά την προχώρηση της διάνοιξης της σήραγγας, το φορτίο που παραλαμβάνει η διατομή της υποστήριξης. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη το γεωστατικό εντατικό πεδίο, τη γεωμετρία του προβλήματος και την ανακατανομή των τάσεων που προκαλείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας και οδηγούν στην εξαγωγή αναλυτικών εξισώσεων κλειστής μορφής για τις προκαλούμενες μετακινήσεις και τα επιβαλλόμενα φορτία στη διατομή της υποστήριξης.

Ωστόσο, για την επίλυση του προβλήματος, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία υιοθετούν απλοποιητικές παραδοχές, για τις εξής παραμέτρους:

- ✓ γεωμετρία διατομής σήραγγας (κυκλική, ορθογωνική, πεταλοειδής)
- ✓ βάθος διάνοιξης σήραγγας (ύψος υπερκείμενων), το οποίο συνδέεται με τη δυνατότητα ανάπτυξης της τοξωτής λειτουργίας του γεωυλικού
- ✓ επίλυση με θεώρηση διδιάστατης ή τριδιάστατης γεωμετρίας (στην περίπτωση τριδιάστατων επιλύσεων, η εξαγωγή των αναλυτικών εξισώσεων γίνεται σε περιοχή κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής)
- ✓ συντελεστής οριζοντίων τάσεων
- ✓ ελαστική ή ελαστοπλαστική θεώρηση του γεωυλικού
- ✓ κριτήριο αστοχίας του γεωυλικού σε περίπτωση θεώρησης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς (π.χ. Mohr - Coulomb, Hoek - Brown)



- ✓ συμπεριφορά του γεωυλικού μετά την αστοχία (π.χ. ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό, χαλάρωση μετά την αστοχία)
- ✓ χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά του γεωυλικού (ερπυσμός του γεωυλικού)
- ✓ συνεκτίμηση συνθηκών υπογείων υδάτων και υπόγειας ροής λόγω της διάνοιξης
- ✓ χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (ερπυσμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος)

Στη βιβλιογραφία προτείνεται μεγάλος αριθμός αναλυτικών μεθόδων αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σημαντικό βαθμό πολυπλοκότητας ως προς τις παραδοχές τους και τη διαδικασία επίλυσής τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύνοψη των αναλυτικών μεθόδων αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης στον Πίνακα 2.1 όπως παρουσιάστηκε στη διδακτορική διατριβή του Φορτσάκη (2012).

Δημοσίευση	Γεωμετρία διατομής	Συντελεστής οριζοντίων τάσεων	Πλαστικότητα	Παρατηρήσεις
Lame (1852)	Κυκλική	$K=1$	E	-
Kirsch (1898)	Κυκλική	$K \neq 1$	E	-
Fenner (1938) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P	-
Kastner (1949) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K \neq 1$	M-C / E-P	-
Labasse (1949) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K \neq 1$	M-C / E-P	Μηδενική συνοχή. Αξιολογεί μέσω ογκομετρική παραμόρφωση στην πλαστική ζώνη.
Morrison & Coates (1955) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-B-P	-
Hobbs (1966) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	Μη-γραμμικό / E-B-P	Διαφορετικά E, ν στην πλαστική ζώνη.
Bray (1967) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P	Όλσηση σε λογαριθμικές σπείρες στην πλαστική ζώνη.
Diest (1967) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-SS	Μηδενική παραμένουσα αντοχή
Salencon (1969) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	Tresca & M-C / E-P	Ρυθμός μεταβολής πλαστικού όγκου ανεξάρτητος από την παραμόρφωση.
Daemen & Fairhurst (1971) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	E-SS	Μεταβολή πλαστικού όγκου σταθερή ή μεταβαλλόμενη ανάλογα με την ακτινική παραμόρφωση. Δεν παρουσιάζονται σχέσεις κλειστής μορφής.
Lombardi (1970) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-B-P	Εκτιμάται η μέση ογκομετρική παραμόρφωση στην πλαστική ζώνη. Στην πλαστική ζώνη διαφορετικές τιμές E, ν.
Hedron & Aiyer (1971) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P & E-B-P & E-SS	Σταθερή γωνία τριβής και συνοχή μεταβλητή συνοχή. Συζευγμένος νόμος ροής στην πλαστική ζώνη. Σε ορισμένες αναλύσεις διαφορετικές τιμές E, ν στην πλαστική ζώνη.
Ladayni (1974) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	Fairhurst (1964) / E-B-P	Μη-γραμμικό κριτήριο αστοχίας για άρηκτο και ρωγματομένο βράχο σε βραχυχρόνια και μακροχρόνια φόρτιση. Συζευγμένος νόμος ροής που εφαρμόζεται σε μικρό εύρος περί την αστοχία.
Egger (1974) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-SS	Μηδενική παραμένουσα συνοχή. Μέγιστη και ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση γραμμικά συσχετισμένες με την παράμετρο φ.
Muir Wood (1975)	Κυκλική	$K \neq 1$	E	Αναφορά και στο ρόλο των υπογείων υδάτων.
Panet (1976) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-SS	Μηδενική παραμένουσα συνοχή. Μέγιστη και ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση γραμμικά συσχετισμένες με την παράμετρο φ. Επιτρέπει την προσομοίωση της επίδρασης του μετώπου διάνοιξης.
Korbin (1976) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-SS	Μη-γραμμική σχέση χαλάρωση - παραμόρφωσης. Υιοθετεί την παραδοχή των Hedron & Aiyer (1971) για το συζευγμένο νόμο ροής.
Atkinson & Potts (1977)	Κυκλική	$K \neq 1$	M-C	Επίλυση για ρηχές σήραγγες με θεωρία αξονοσυμμετρικής κατάστασης κοντά στη διατομή και επίπεδης παραμόρφωσης πέραν της απόστασης επιρροής.
Kennedy & Lindberg (1977) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P	Ο νόμος ροής εφαρμόζεται σε ολόκληρη την πλαστική ζώνη. Παρουσιάζεται μία εναλλακτική λύση ασυμπίεστης ροής.
Florence & Schwer (1978) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P	Συζευγμένος νόμος ροής σε όλη την πλαστική ζώνη. Επιτρέπει την επίδραση αξονικής τάσης, η οποία οδηγεί έως και σε τρεις διαφορετικές πλαστικές ζώνες εξαρτώμενες από τις τιμές των ν και φ και τα σχετικά μεγέθη των εραπτομενικών, ακτινικών και αξονικών τάσεων.
Nguyen Minh & Berest (1979) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-SS	Σταθερή γωνία τριβής στη μέγιστη και παραμένουσα αντοχή. Η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση συσχετίζονται γραμμικά. Επιτρέπει την επίδραση αξονικής τάσης, η οποία οδηγεί σε δύο διαφορετικές πλαστικές ζώνες εξαρτώμενες τα σχετικά μεγέθη των εραπτομενικών, ακτινικών και αξονικών τάσεων.
Schwartz & Einstein (1979)	Κυκλική	$K \neq 1$	E	-
Schwartz & Einstein (1980) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P	Μηδενική ογκομετρική παραμόρφωση στην πλαστική ζώνη. Επιτρέπει την προσομοίωση της επίδρασης του μετώπου διάνοιξης.
Hoek & Brown (1980a) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	Εμπειρικά μη-γραμμικά κριτήρια / E-B-P	Συζευγμένος νόμος ροής που εφαρμόζεται σε μικρό εύρος περί την αστοχία. Δίνονται βήματα για πλήρη επίλυση της αλληλεπίδρασης εδάφους - υποστήριξης.
Kaiser (1980) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-B-P	Η μείωση σφαιρότητας και αντοχής εξαρτώνται από το ρυθμό μεταβολής. Η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση συσχετίζονται γραμμικά.
Brown et al. (1983) <sup>1</sup>	Κυκλική	$K=1$	Εμπειρικά μη-γραμμικά κριτήρια / E-B-P & E-SS	Επίλυση κλειστής μορφής για απλά προσομοιώματα γεωλυκού. Σταδιακή αριθμητική επίλυση για περίπλοκα προσομοιώματα γεωλυκού.
Fritz (1984)	Κυκλική	$K=1$	M-C / E-P & E-SS	Θεώρηση ελαστο-βισκοπλαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωλυκού.
Muhlhaus (1985)	Κυκλική			Επίλυση με βάση το θεώρημα κατώτατου ορίου για διατομή σήραγγας υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και για διατομής σήραγγας πλησίον του μετώπου εκκακής με την επίδραση της τρίτης διάστασης.
Detournay & Fairhurst (1987)	Κυκλική	$K \neq 1$	M-C / E-P	-
Cristescu et al. (1987)	Κυκλική	$K=1$	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωλυκού.

Δημοσίευση	Γεωμετρία διατομής	Συντελεστής οριζοντίων τάσεων	Πλαστικότητα	Παρατηρήσεις
Cristescu (1988)	Κυκλική	K=1	E-P	Θεώρηση βισκοπλαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό.
Sulem et al. (1987a, b)	Κυκλική	K=1	M-C / E-P	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό.
Cristescu & Duda (1989)	Κυκλική	K=1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό. Στην επίλυση περιλαμβάνεται και ζώνη κερματισμένου βραχώδους υλικού, το οποίο τοποθετείται μεταξύ περιβάλλοντος γεωυλικού και υποστήριξης με σκοπό τη μείωση της επιβαλλόμενης πίεσης στην υποστήριξη.
Goodman (1989)	Κυκλική	K≠1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό.
Pan & Dong (1991a)	Κυκλική	K=1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό.
Pan & Dong (1991b)	Κυκλική	K=1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό.
Duncan Fama (1993)	Κυκλική	K=1	M-C / E-P	-
Panet (1995)	Κυκλική	K=1	M-C / E-P & E-SS & E-B-P	-
Carranza-Torres & Fairhurst (1999)	Κυκλική	K=1	H-B / E-P	-
Carranza-Torres & Fairhurst (2000)	Κυκλική	K=1 K≠1	H-B / E-P	-
Carranza-Torres (2002)	Κυκλική	K=1	M-C / E-P	-
Exadaktylos & Stavropoulou (2002)	Πεταλοειδής Ημικυκλική	K≠1	E	-
Oreste (2003)	Κυκλική	-	-	Δίνεται έκφραση στην προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια κ.τ.λ.).
Alonso et al. (2003)	Κυκλική	K=1	M-C & H-B & Tresca / E-SS	-
Sharan (2003)	Κυκλική	K=1	H-B / E-B-P	Δεν χρησιμοποιεί ως εκθέτη την παράμετρο $\alpha$ (Hoek et al., 2002) αλλά τη συγκεκριμένη τιμή $\alpha=0.5$ .
Carranza-Torres (2004)	Κυκλική	K=1	H-B / E-SS	Χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έκφραση του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown.
Sharan (2005)	Κυκλική	K=1	H-B / E-B-P	Δεν χρησιμοποιεί ως εκθέτη την παράμετρο $\alpha$ (Hoek et al., 2002) αλλά τη συγκεκριμένη τιμή $\alpha=0.5$ .
Park & Kim (2006)	Κυκλική	K=1	H-B & M-C / E-B-P	-
Kim & Eisenstein (2006)	Κυκλική	K=1	E	Τρόπος ονομασία μεθόδου Einstein & Schwartz (1979).
Αγγελοπούλου et al. (2006)	Πεταλοειδής	K≠1	E	-
Li & Wang (2008)	Κυκλική	K≠1	E	Λαμβάνεται υπόψη η σχετική δυσκαμψία της υποστήριξης.
Park et al. (2008)	Κυκλική	K=1	H-B & M-C / E-SS	-
Bobet (2009)	Κυκλική	K≠1	E	Θεώρηση κυλινδρικής ανισοτροπίας στην περιοχή γύρω από τη διατομή εκσκαφής.
Fahimifar et al. (2010)	Κυκλική	K=1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό με βάση το προσομοίωμα Burgers.
Nomikos et al. (2011)	Κυκλική	K=1	E	Θεώρηση βισκοελαστικής συμπεριφοράς για το περιβάλλον γεωυλικό με βάση το προσομοίωμα Burgers.

<sup>1</sup>Στοιχεία από Brown et al. (1983)

M-C: Mohr-Coulomb, E: Ελαστική συμπεριφορά, E-P: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά, E-B-P: Ελαστική - Ψαθυρή - Πλαστική συμπεριφορά, E-SS: Ελαστική - Πλαστική συμπεριφορά με χαλάρωση μετά την αστοχία

Πίνακας 2.1 Σύνοψη αναλυτικών μεθόδων αλληλεπίδρασης γεωυλικού - υποστήριξης (Φορτσάκης 2012)

### 2.1.3.1. Μέθοδος Σύγκλισης - Αποτόνωσης

Η μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης (convergence - confinement method CCM) αποτελεί την πιο αποδεκτή και λογική προσέγγιση του προβλήματος της διάνοιξης σηράγγων με βάση τους Fairhurst and Carranza - Torres (2002). Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρουσιάζονται οι αρχές και οι παραδοχές της μεθόδου, οι αναλυτικές εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται η κατανομή των τάσεων και των μετακινήσεων στη διατομή της εκσκαφής και η καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης του γεωυλικού.

#### ❖ Αρχές & Παραδοχές

Οι αρχές και οι παραδοχές της μεθόδου είναι οι εξής:

- ✓ σήραγγα κυκλικής διατομής με ακτίνα R
- ✓ συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης κατά τον άξονα της σήραγγας (άξονας x)
- ✓ ισότροπο γεωστατικό εντατικό πεδίο ( $K_0=1$ )
- ✓ ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό Mohr - Coulomb (M - C / E - P) με διαστολική συμπεριφορά μετά την αστοχία
- ✓ ομοιόμορφη υποστήριξη της διατομής της εκσκαφής

Λόγω των συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης και του ισότροπου γεωστατικού εντατικού πεδίου το αξονοσυμμετρικό πρόβλημα ως προς τον άξονα της σήραγγας εκφυλίζεται σε μονοδιάστατο πρόβλημα ως προς την απόσταση από το κέντρο της διατομής της σήραγγας (r) και επομένως η επίλυση του προβλήματος καθίσταται εφικτή με αναλυτικές εξισώσεις.

Το γεωυλικό ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot N_\varphi + \sigma_{cm}$$

2.1

όπου:

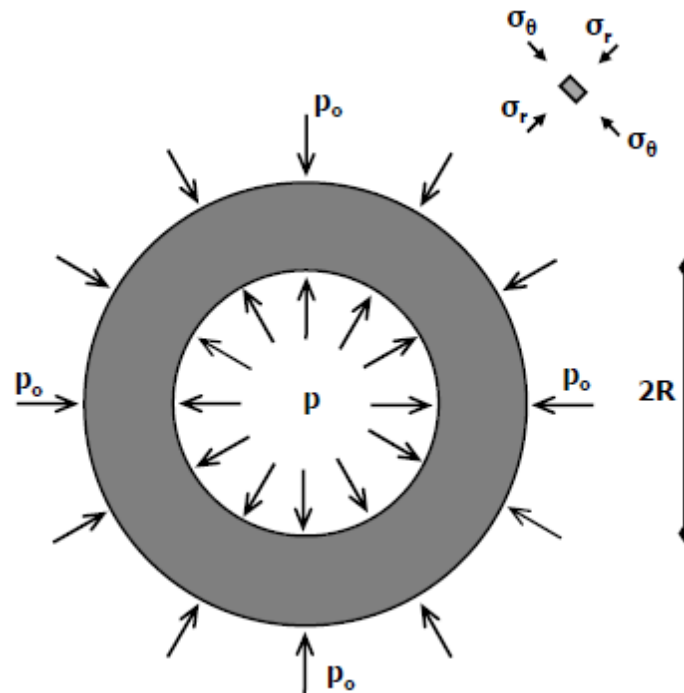
$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \geq 1$$

$$\sigma_{cm} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\varphi}$$

c: συνοχή γεωυλικού

φ: γωνία εσωτερικής τριβής γεωυλικού

Η γραφική απεικόνιση των αρχών και των παραδοχών για το ισότροπο γεωστατικό εντατικό πεδίο και τη γεωμετρία του προβλήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2 και στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των αρχών και των παραδοχών της μεθόδου σύγκλισης - αποτόνωσης (Φορτσάκης 2012)

### ❖ Βασικά Μεγέθη

Τα βασικά μεγέθη της μεθόδου είναι τα εξής:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_{vol}}{\varepsilon_{shear}} = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_\theta}{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta} \geq 0 \quad 2.2$$

$$K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta} = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_\theta} = \frac{\varepsilon_{shear} + \varepsilon_{vol}}{\varepsilon_{shear} - \varepsilon_{vol}} \geq 1 \quad 2.3$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad 2.4$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad 2.5$$

$$N_s = \frac{2 \cdot p_o}{\sigma_{cm}} \quad , \text{ συντελεστής υπερφόρτισης} \quad 2.6$$

$$\lambda = 1 - \frac{p}{p_o} \quad , \text{ συντελεστής αποτόνωσης} \quad 2.7$$

$$\lambda_{cr} = 1 - \frac{2}{1 + N_\varphi} \cdot \frac{N_s - 1}{N_s} \quad , \text{ κρίσιμος συντελεστής αποτόνωσης} \quad 2.8$$

$$\frac{p_{cr}}{p_o} = 1 - \lambda_{cr} \quad 2.9$$

$$K_o = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad 2.10$$

όπου:

$\varphi$ : γωνία εσωτερικής τριβής γεωυλικού

$\delta$ : γωνία διαστολικότητας γεωυλικού

$\varepsilon_{vol}$ : ογκομετρική παραμόρφωση

$\varepsilon_{shear}$ : διατμητική παραμόρφωση

$u$ : ακτινική μετακίνηση

$r$ : απόσταση από το κέντρο της διατομής της εκσκαφής

$p_o$ : γεωστατική τάση στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας

$p$ : εσωτερική πίεση υποστήριξης

$E$ : μέτρο παραμορφωσιμότητας γεωυλικού

$\nu$ : λόγος του Poisson γεωυλικού

Η προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας γίνεται ως εξής: η αρχική τιμή της εσωτερικής πίεσης είναι γεωστατική ( $p = p_o$ ), η ενδιάμεση τιμή της εσωτερικής πίεσης μειώνεται ( $0 < p < p_o$ ) και η τελική τιμή της εσωτερικής πίεσης γίνεται μηδενική ( $p = 0$ ). Στην αρχική κατάσταση η τιμή του συντελεστή αποτόνωσης είναι  $\lambda = 1$  και στην τελική κατάσταση είναι  $\lambda = 0$ . Επομένως, η μείωση της τιμής της εσωτερικής πίεσης από  $p = p_o$  σε  $p = 0$ , αντικατοπτρίζει την αύξηση της τιμής του συντελεστή αποτόνωσης από  $\lambda = 0$  σε  $\lambda = 1$ .

### ❖ Εξισώσεις Ισορροπίας

Η εξίσωση ισορροπίας του προβλήματος για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \Rightarrow \frac{d\dot{\sigma}_r}{dr} + \frac{\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_\theta}{r} = 0 \quad 2.11$$

όπου:

$\sigma_r$ : αξονική τάση

$\sigma_\theta$ : εφαπτομενική τάση

$\dot{\sigma}_r = \sigma_r - p_o$

$$\dot{\sigma}_\theta = \sigma_\theta - p_o$$

### ❖ Ελαστική Απόκριση του Γεωυλικού

Το γεωυλικό παρουσιάζει ελαστική απόκριση αν ικανοποιείται, είτε η συνθήκη (I), είτε η συνθήκη (II) και ειδικότερα δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη.

$$\text{συνθήκη (I): } N_s \leq 1 \ \& \ \lambda_{cr} \geq 1$$

$$\text{συνθήκη (II): } N_s > 1 \ \& \ \lambda_{cr} < 1 \ \& \ \lambda < \lambda_{cr}$$

### ❖ Συνοριακές Συνθήκες

$$r = \infty \Rightarrow u = 0 \quad 2.12$$

$$r = R \Rightarrow \sigma_r = p \quad 2.13$$

### ❖ Τάσεις

Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση είναι:

$$\sigma_r = p_o \cdot \left[ 1 - \lambda \cdot \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right], r \geq R \quad 2.14$$

$$\sigma_\theta = p_o \cdot \left[ 1 + \lambda \cdot \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right], r \geq R \quad 2.15$$

Στην περίμετρο της εκσκαφής ( $r = R$ ) είναι:

$$\sigma_r = p_o \cdot (1 - \lambda) \Leftrightarrow \sigma_r = p \quad 2.16$$

$$\sigma_\theta = p_o \cdot (1 + \lambda) \Leftrightarrow 2 \cdot p_o - p \quad 2.17$$

### ❖ Μετακινήσεις

Η ακτινική μετακίνηση είναι:

$$\frac{u_r}{R} = \lambda \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{R}{r} \quad 2.18$$

$$\frac{u_{r\infty}}{R} = \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{R}{r} \quad 2.19$$

$$\frac{u_r}{u_{r\infty}} = \lambda \quad 2.20$$

Στην περίμετρο της εκσκαφής ( $r = R$ ) είναι:

$$\frac{u_R}{R} = \lambda \cdot \frac{p_0}{2 \cdot G} \quad 2.21$$

$$\frac{u_{R\infty}}{R} = \frac{p_0}{2 \cdot G} \quad 2.22$$

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \lambda \quad 2.23$$

όπου:

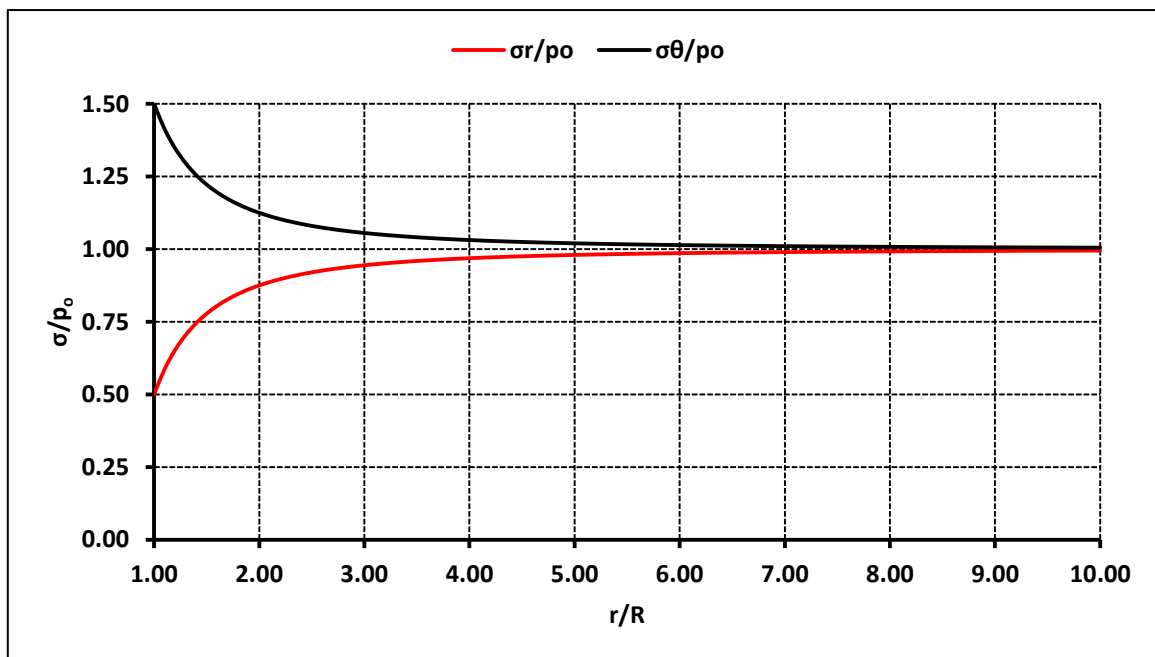
$G$ : μέτρο διάτμησης γεωυλικού

$u_r$ : ακτινική μετακίνηση

$u_R$ : ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής

$u_{r\infty}$ : τελική ακτινική μετακίνηση για πλήρη αποτόνωση ( $\lambda = 1$ )

$u_{R\infty}$ : τελική ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής για πλήρη αποτόνωση ( $\lambda = 1$ )



Γράφημα 2.1: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης  $\sigma_\theta$  και της ακτινικής τάσης  $\sigma_r$  για ελαστική απόκριση του γεωυλικού



❖ **Ελαστική - Απολύτως Πλαστική Απόκριση του Γεωυλικού**

Το γεωυλικό παρουσιάζει ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση αν ικανοποιείται η συνθήκη (III) και ειδικότερα αναπτύσσεται πλαστική ζώνη.

συνθήκη (III):  $N_s > 1$  &  $\lambda_{cr} < 1$  &  $\lambda > \lambda_{cr}$

❖ **Συνοριακές Συνθήκες**

$$r = \infty \Rightarrow u = 0 \quad 2.24$$

$$r = R \Rightarrow \sigma_r = p \quad 2.25$$

$$r = r_p \Rightarrow \sigma_{r,el} = \sigma_{r,pl} \quad 2.26$$

$$r = r_p \Rightarrow u_{r,el} = u_{r,pl} \quad 2.27$$

όπου:

$r_p$ : ακτίνα πλαστικής ζώνης

$\sigma_{r,el}$ : ακτινική τάση στην ελαστική ζώνη

$\sigma_{r,pl}$ : ακτινική τάση στην πλαστική ζώνη

$u_{r,el}$ : ακτινική μετακίνηση στην ελαστική ζώνη

$u_{r,pl}$ : ακτινική μετακίνηση στην πλαστική ζώνη

❖ **Τάσεις**

Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση στην πλαστική ζώνη είναι:

$$\sigma_r = p_o \cdot \left\{ \left[ (1 - \lambda) + \frac{2}{(N_\phi - 1) \cdot N_s} \right] \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^{N_\phi - 1} - \frac{2}{(N_\phi - 1) \cdot N_s} \right\}, R \leq r \leq r_p \quad 2.28$$

$$\sigma_\theta = N_\phi \cdot \sigma_r + \frac{2 \cdot p_o}{N_s}, R \leq r \leq r_p \quad 2.29$$

Η ακτινική και η εφαπτομενική τάση στην ελαστική ζώνη είναι:

$$\sigma_r = p_o \cdot \left\{ \left[ (1 - \lambda) + \frac{2}{(N_\phi - 1) \cdot N_s} \right] \cdot \left( \frac{r_p}{R} \right)^{N_\phi - 1} - \frac{2}{(N_\phi - 1) \cdot N_s} \right\}, r > r_p \quad 2.30$$

$$\sigma_\theta = N_\phi \cdot \sigma_r + \frac{2 \cdot p_o}{N_s}, r > r_p \quad 2.31$$

Στην περίμετρο της εκσκαφής ( $r = R$ ) είναι:

$$\sigma_r = p_o \cdot \left[ (1 - \lambda) + \frac{2}{(N_\varphi - 1) \cdot N_s} - \frac{2}{(N_\varphi - 1) \cdot N_s} \right] \quad 2.32$$

$$\sigma_\theta = N_\varphi \cdot \sigma_r + \frac{2 \cdot p_o}{N_s} \quad 2.33$$

### ❖ Μετακινήσεις

Η ακτινική μετακίνηση στην πλαστική ζώνη είναι:

$$\frac{u_r}{R} = \frac{u_p}{R} \cdot \left( \frac{r_p}{r} \right)^K, R \leq r \leq r_p \quad 2.34$$

$$\frac{u_p}{R} = \frac{r_p}{R} \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{(N_\varphi + 1) \cdot N_s} \quad 2.35$$

$$\frac{r_p}{R} = \left[ \frac{2}{N_\varphi + 1} \cdot \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}}{(1 - \lambda) \cdot N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.36$$

$$\frac{u_{r\infty}}{R} = \frac{u_{p\infty}}{R} \cdot \left( \frac{r_{p\infty}}{r} \right)^K, R \leq r \leq r_p \quad 2.37$$

$$\frac{u_{p\infty}}{R} = \frac{r_{p\infty}}{R} \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{(N_\varphi + 1) \cdot N_s} \quad 2.38$$

$$\frac{r_{p\infty}}{R} = \left[ \frac{2}{N_\varphi + 1} \cdot \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}}{\frac{2}{N_\varphi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} = \left[ \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{N_\varphi + 1} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.39$$

Στην περίμετρο της εκσκαφής ( $r = R$ ) είναι:

$$\frac{u_R}{R} = \frac{u_p}{R} \cdot \left( \frac{r_p}{R} \right)^K \quad 2.40$$

$$\frac{u_p}{R} = \frac{r_p}{R} \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{(N_\varphi + 1) \cdot N_s} \quad 2.41$$

$$\frac{r_p}{R} = \left[ \frac{2}{N_\varphi + 1} \cdot \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}}{(1 - \lambda) \cdot N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.42$$

$$\frac{u_{R\infty}}{R} = \frac{u_{p\infty}}{R} \cdot \left( \frac{r_{p\infty}}{R} \right)^K \quad 2.43$$

$$\frac{u_{p\infty}}{R} = \frac{r_{p\infty}}{R} \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{(N_\varphi + 1) \cdot N_s} \quad 2.44$$

$$\frac{r_{p\infty}}{R} = \left[ \frac{2}{N_\varphi + 1} \cdot \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}}{\frac{2}{N_\varphi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} = \left[ \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{N_\varphi + 1} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.45$$

$$\frac{r_p}{R} = \left[ \frac{2}{N_\varphi + 1} \cdot \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}}{(1 - \lambda) \cdot N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1}} \right]^{\frac{1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.46$$

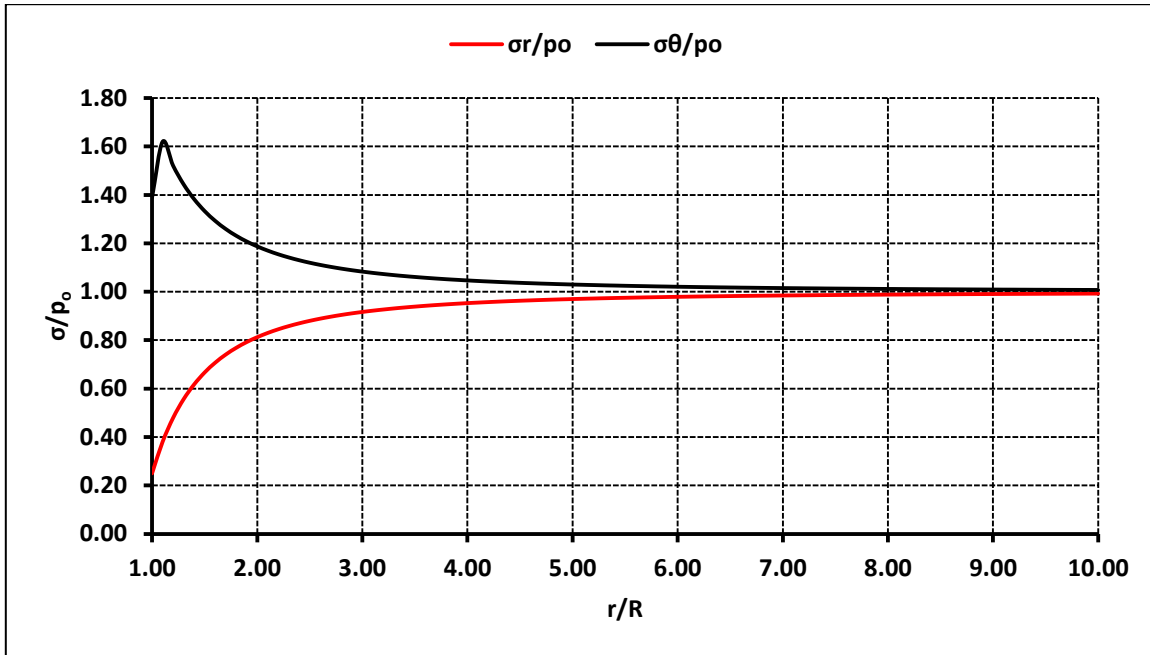
$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ \frac{2}{(N_\varphi - 1) \cdot \left[ (1 - \lambda) \cdot N_s + \frac{2}{N_\varphi - 1} \right]} \right\}^{\frac{K+1}{N_\varphi - 1}} \quad 2.47$$

όπου:

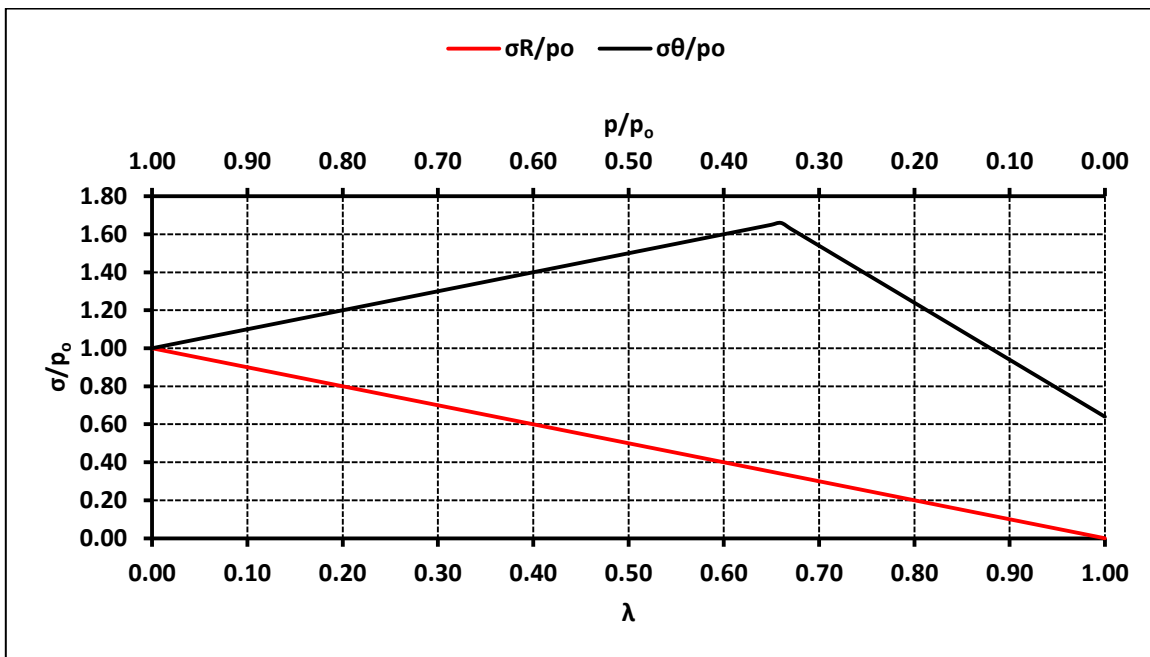
$u_p$ : ακτινική μετακίνηση στο όριο του εύρους της πλαστικής ζώνης

Η ακτινική μετακίνηση στην ελαστική ζώνη είναι:

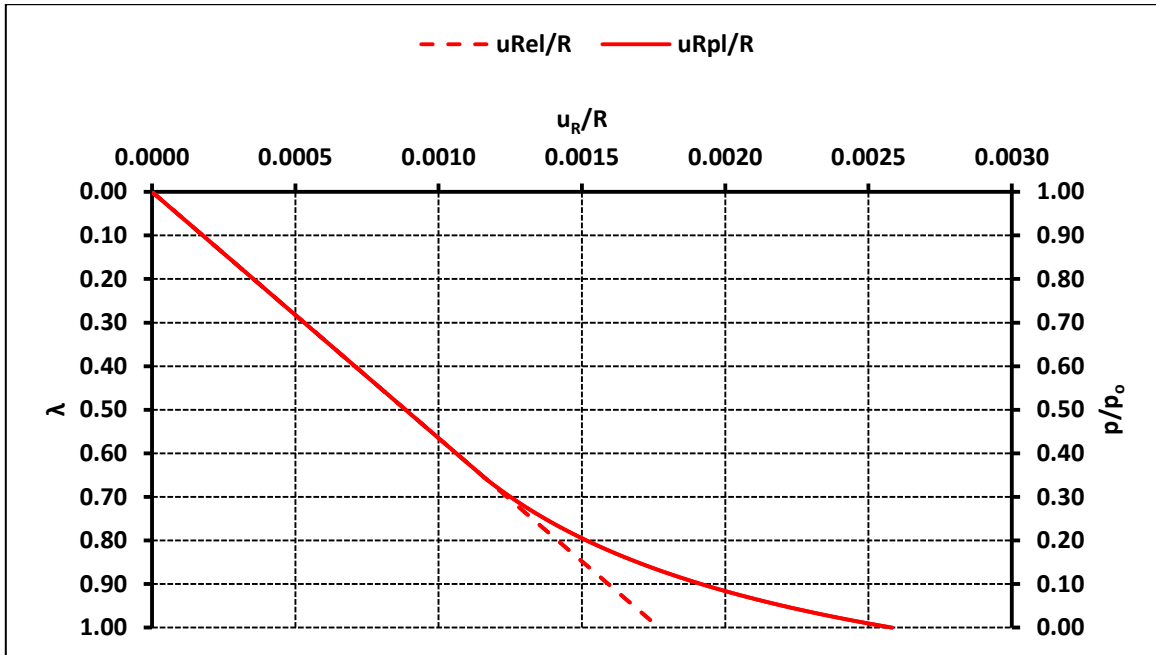
$$u = \frac{r_p^2}{r} \cdot \frac{p_o}{2 \cdot G} \cdot \frac{N_\varphi - 1}{N_\varphi + 1} \cdot \left[ 1 + \frac{2}{(N_\varphi - 1) \cdot N_s} \right], r > r_p \quad 2.48$$



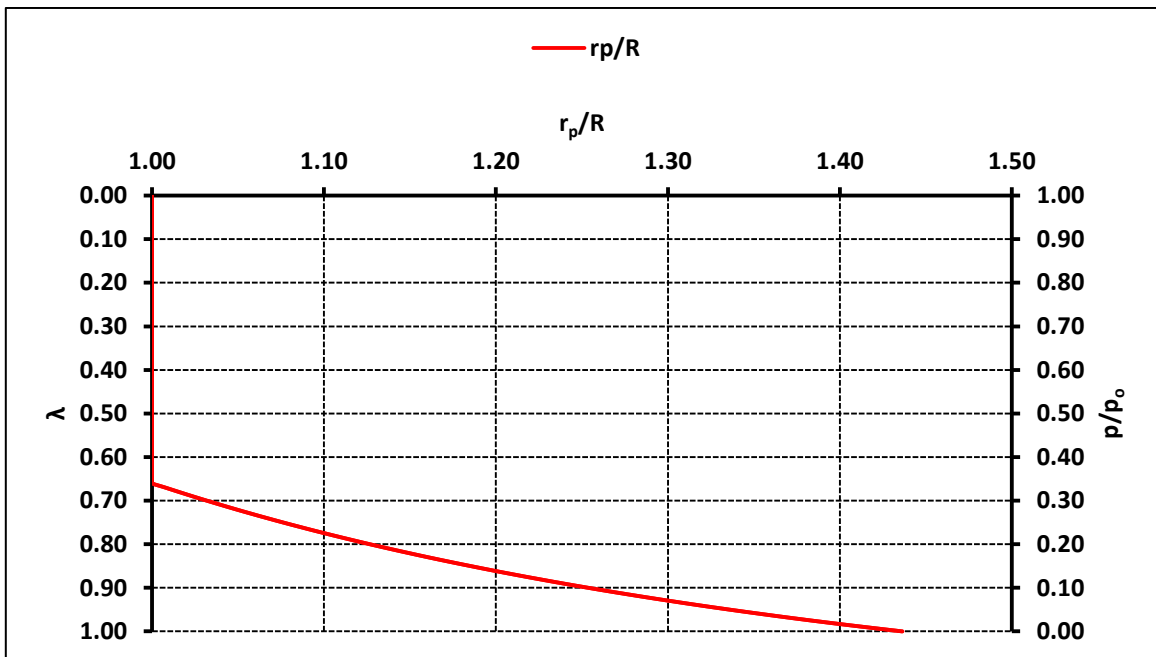
Γράφημα 2.2: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης  $\sigma_\theta$  και της ακτινικής τάσης  $\sigma_r$  για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού



Γράφημα 2.3: Κατανομή της εφαπτομενική τάσης  $\sigma_\theta$  και της ακτινικής τάσης  $\sigma_r$  για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού ως προς το συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda$



Γράφημα 2.4: Καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού

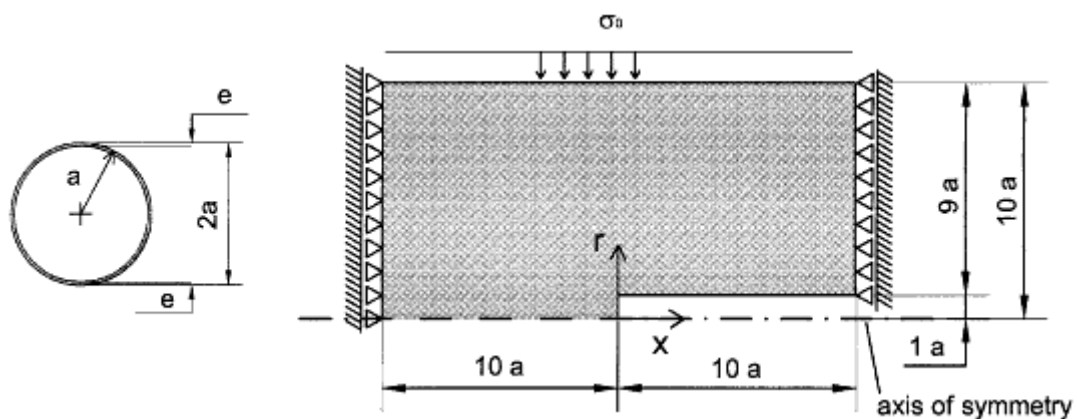


Γράφημα 2.5: Καμπύλη μεταβολής του εύρους της πλαστικής ζώνης για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού

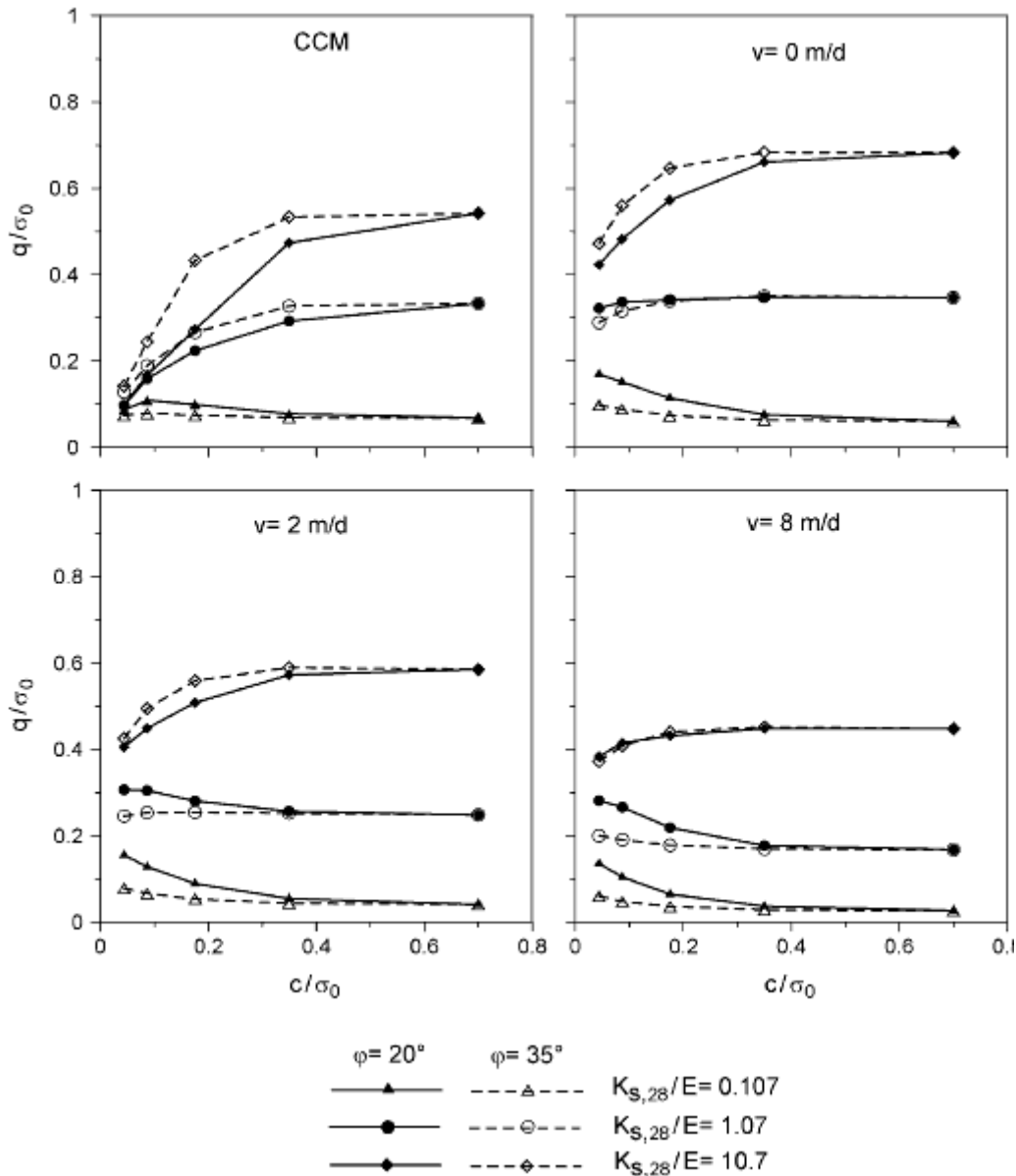
### 2.1.4. Αριθμητικές Μέθοδοι

Οι αριθμητικές αναλύσεις παρουσιάζουν το προτέρημα ότι καθιστούν εφικτή την επαρκή και κατά το δυνατό ακριβή προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας και της φόρτισης της άμεσης υποστήριξης, χωρίς να υπόκεινται σε περιορισμούς ως προς τη γεωμετρία, το εντατικό πεδίο και τις ιδιότητες των γεωυλικών. Οι προσεγγίσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση των φορτίων της άμεσης υποστήριξης μέσω αριθμητικών μεθόδων σχετίζονται, είτε με συγκεκριμένες μελέτες, είτε προκύπτουν από μικρό εύρος γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων και επομένως δεν χαρακτηρίζονται από γενικότητα. Επιπρόσθετα, ως επί το πλείστο υιοθετούνται αξονοσυμμετρικά προσομοιώματα, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ρεαλιστικά μόνο για την περίπτωση κυκλικών σηράγγων με μεγάλο ύψος υπερκείμενων και υδροστατικό εντατικό πεδίο. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται κάποιες από τις μεθοδολογίες που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

Οι Graziani et al. (2005) με την εκτέλεση αξονοσυμμετρικών αναλύσεων προτείνουν τιμές για το ανηγμένο αξονικό φορτίο της άμεσης υποστήριξης, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή των ιδιοτήτων του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης, αναφέρουν ότι η σχετική δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και του περιβάλλοντος γεωυλικού είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση, ενώ η αντοχή του γεωυλικού επηρεάζει περισσότερο την ανάπτυξη των προσυγκλίσεων λόγω της επιβολής της φόρτισης και τις συγκλίσεις μετά την κατασκευή της άμεσης υποστήριξης.



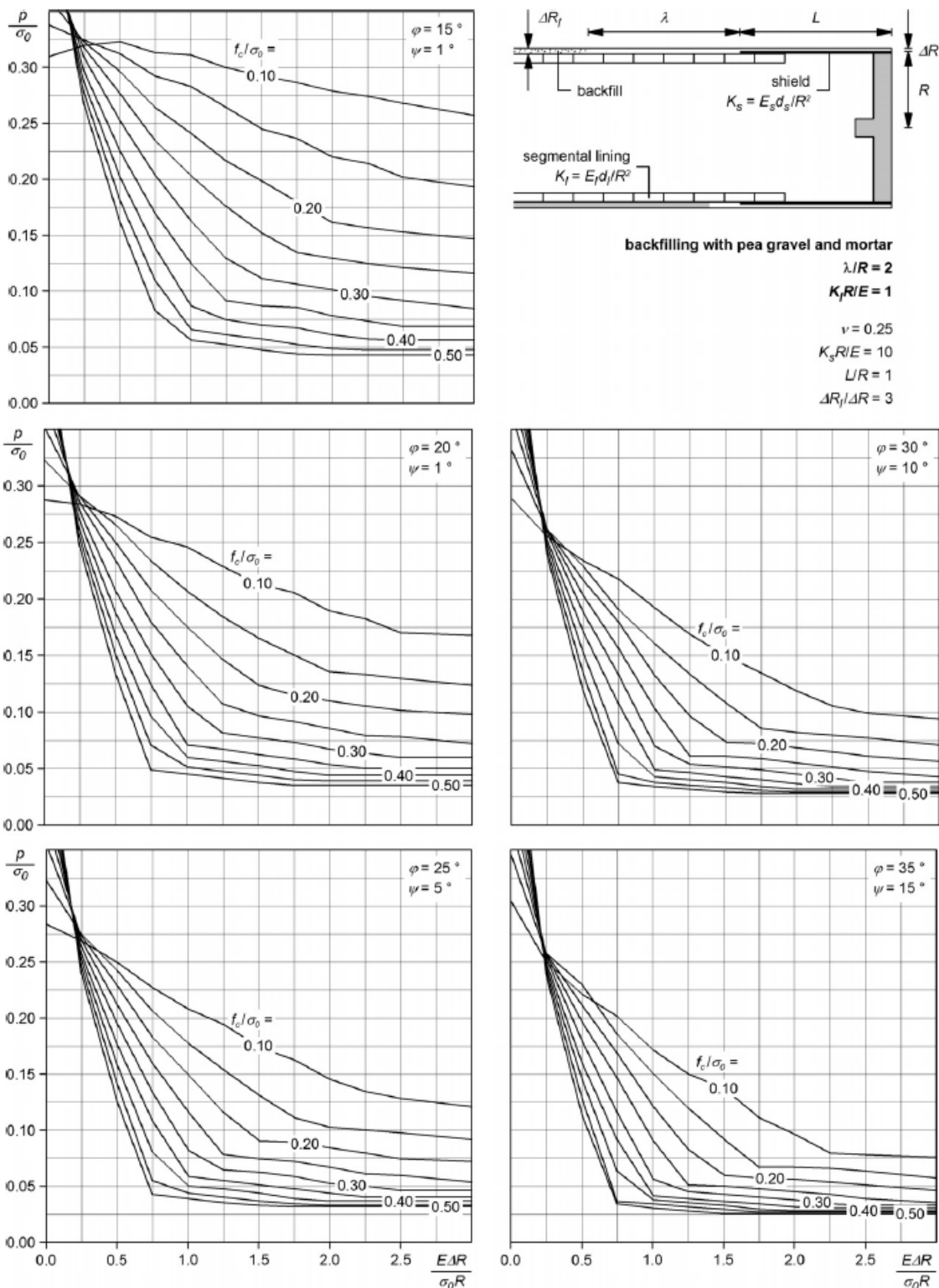
Σχήμα 2.3: Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικών αριθμητικών αναλύσεων (Graziani et al. 2005)



Σχήμα 2.4: Ανηγμένο αξονικό φορτίο της άμεσης υποστήριξης στη θέση ισορροπίας με το γεωυλικό ( $\varphi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού,  $c$ : η συνοχή του γεωυλικού,  $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $v$ : ο ρυθμός προχώρησης της διάνοιξης,  $K$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και  $q$  το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Graziani et al. 2005)

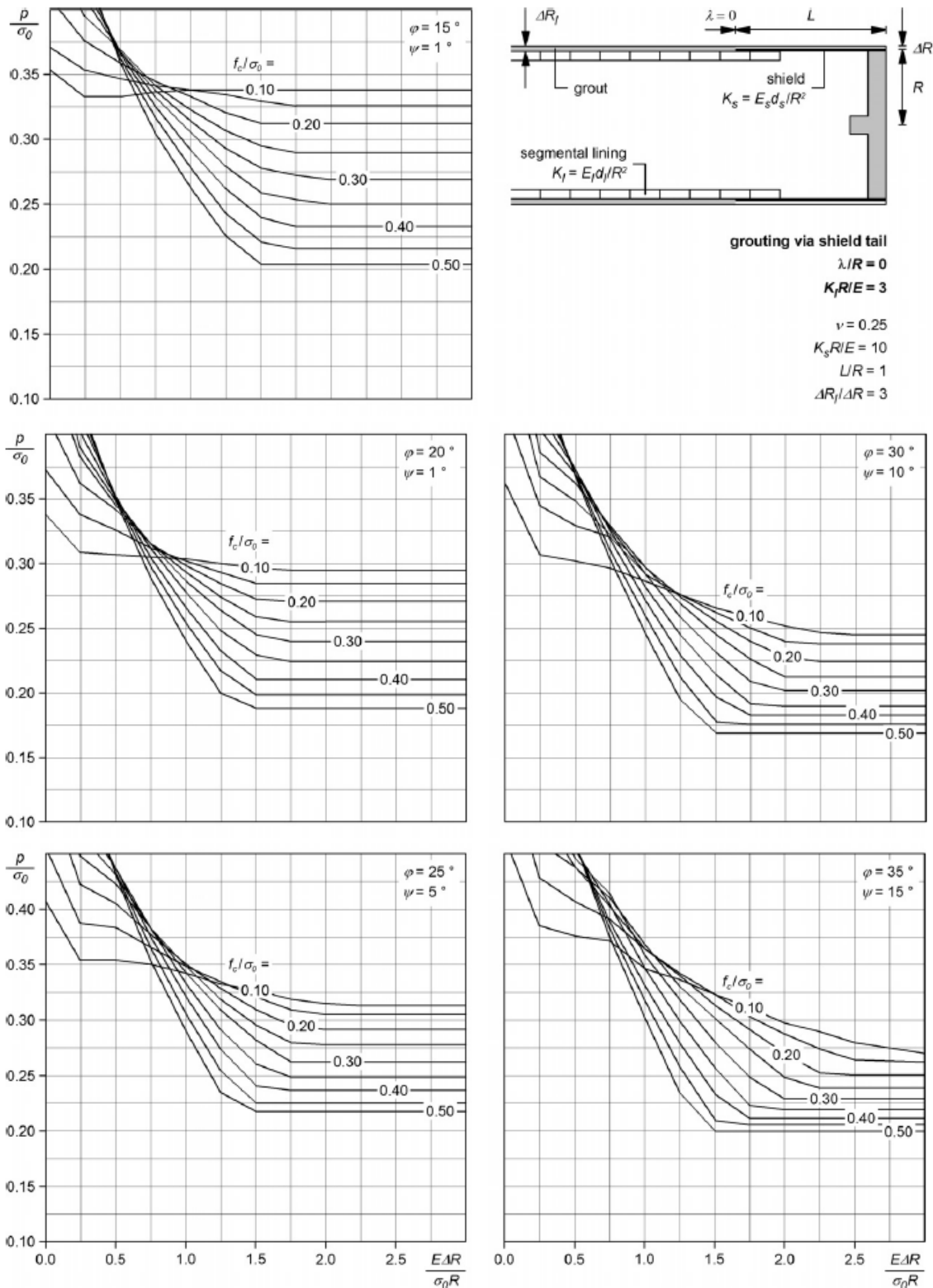
Οι Ramoni et al. (2011) με την εκτέλεση αξονοσυμμετρικών αριθμητικών αναλύσεων μελέτησαν το φορτίο της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, πρότειναν κανονικοποιημένα διαγράμματα, στα οποία ενσωματώθηκε μεγάλο πλήθος των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη διάνοιξη σηράγγων με μηχανική όρυξη και τα οποία παρουσιάζονται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.5 και στο Σχήμα 2.6. Από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που παρουσιάζονται προκύπτει ότι στην περιοχή στην οποία οι γεωτεχνικές συνθήκες είναι δυσμενείς, η βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού (η αύξηση του λόγου  $f_c/\sigma_0$ ) οδηγεί σε αύξηση του φορτίου που επιβάλλεται στην άμεση υποστήριξη. Επιπρόσθετα, ανάλογη αύξηση του φορτίου που επιβάλλεται στην άμεση υποστήριξη προκύπτει για αύξηση της δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης και μείωση της απόστασης τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο συνιστά παράδοξο στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και επιβεβαιώνεται στις εργασίες των Cantieni and Anagnostou (2009) και Cantieni and Anagnostou (2011).



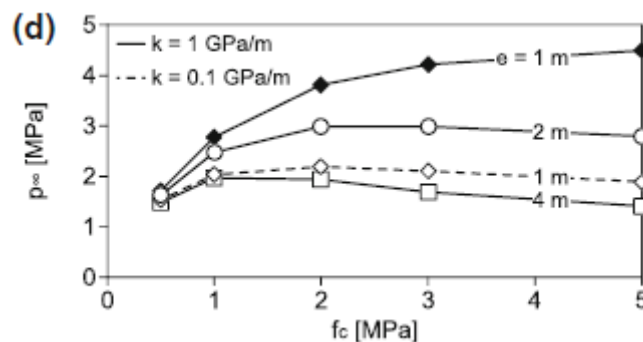
Σχήμα 2.5: Κανονικοποιημένο διάγραμμα για τον υπολογισμό του ανηγμένου αξονικού φορτίου της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM. ( $\phi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού,  $\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του γεωυλικού,  $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού και  $\rho$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Ramoni et al. 2011)





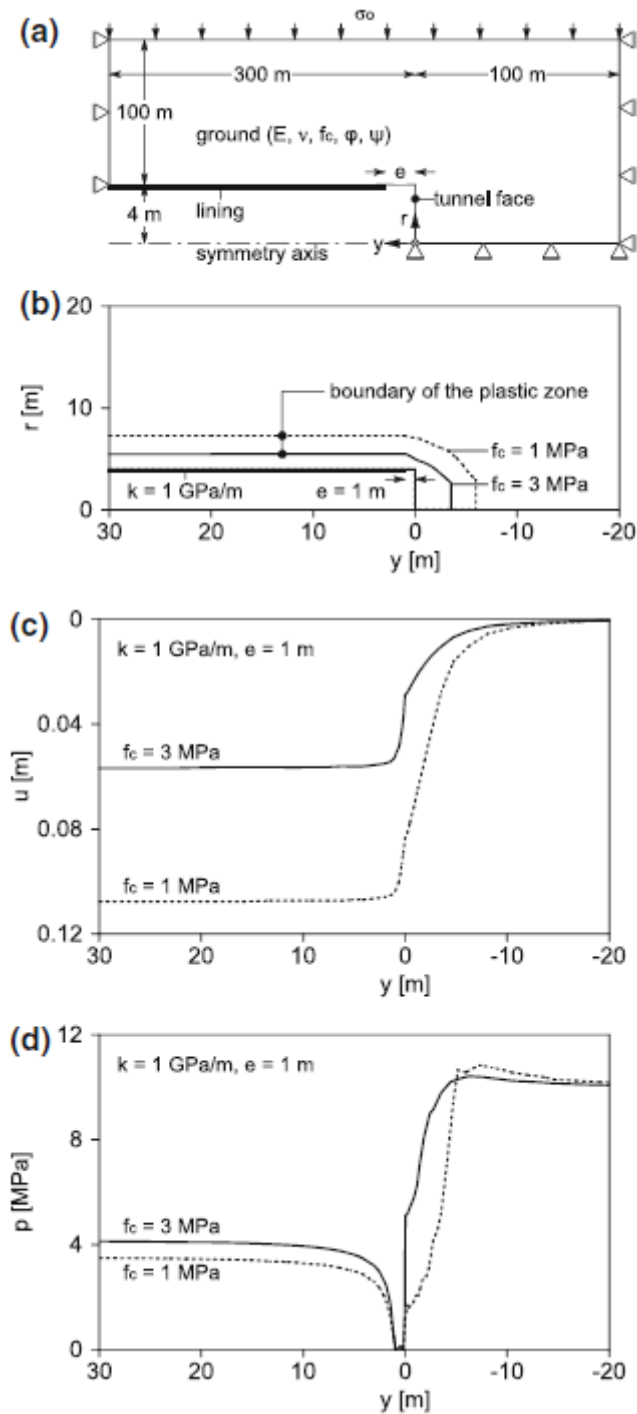
Σχήμα 2.6: Κανονικοποιημένο διάγραμμα για τον υπολογισμό του ανηγμένου αξονικού φορτίου της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοξη σηράγγων με TBM. ( $\varphi$ : η γωνία τριβής του γεωυλικού,  $\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του γεωυλικού,  $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού και  $\rho$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης) (Ramoni et al. 2011)

Οι Cantieni and Anagnostou (2010) σε αριθμητικές αναλύσεις που εκτέλεσαν, επεσήμαναν την προαναφερθείσα παράδοση συμπεριφορά και κατέληξαν ότι οφείλεται στις εξής παραδοχές που υιοθετούνται στην πλειοψηφία των αριθμητικών αναλύσεων: (i) η μη προσομοίωση της χρονικά εξαρτημένης (ερπυστικής) συμπεριφοράς του γεωυλικού, (ii) η προσομοίωση της ακαριαίας ενεργοποίησης της πλήρους δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης στις αριθμητικές αναλύσεις, η οποία στο πεδίο δεν επιτυγχάνεται άμεσα λόγω των κατασκευαστικών διαδικασιών. Οι δύο προαναφερθείσες παραδοχές τονίστηκαν ως οι βασικότεροι παράγοντες που προκαλούν και τροφοδοτούν την παράδοση συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση ή στον περιορισμό της παράδοξης συμπεριφοράς διαδραματίζει η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής. Τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7 και απεικονίζεται η επιρροή της δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης και της απόστασης τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στις αριθμητικές αναλύσεις οι δακτύλιοι της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκαν μη συνδεδεμένοι μεταξύ τους κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας και επομένως δεν συνεκτιμήθηκε η διαμήκης δυσκαμψία του κελύφους της άμεσης υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα.

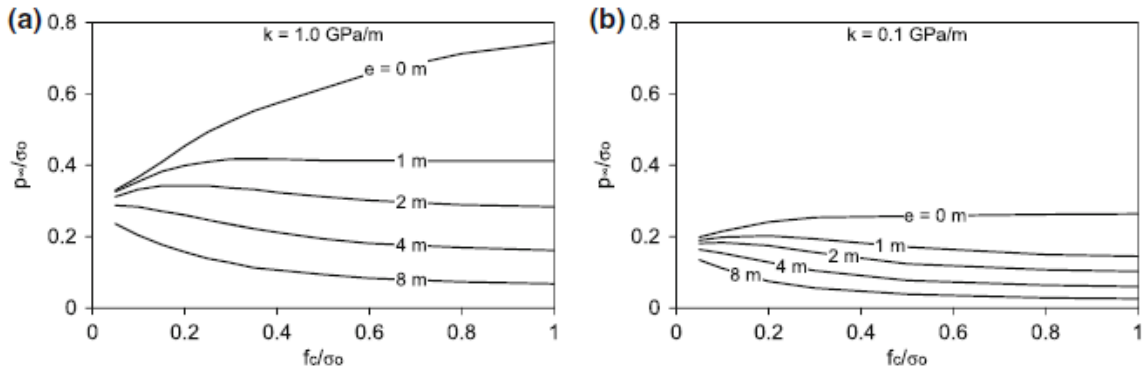


Σχήμα 2.7: Φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της αντοχής του γεωυλικού ( $p_{\infty}$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης,  $f_c$ : η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και  $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η προαναφερθείσα παράδοση συμπεριφορά για αξονοσυμμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη συμπεριφορά παρατηρείται για το φορτίο της άμεσης υποστήριξης στην περιοχή πίσω από το μέτωπο εκσκαφής και στον πυρήνα προώθησης μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής (το γεωυλικό υψηλότερης αντοχής παρουσιάζει μεγαλύτερο φορτίο που επιβάλλεται στην άμεση υποστήριξη σε σχέση με το γεωυλικό χαμηλότερης αντοχής). Ωστόσο, η συγκεκριμένη συμπεριφορά εξαλείφεται πλήρως ως προς τις μετακινήσεις και το εύρος της πλαστικής ζώνης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Η επιρροή της δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης και της απόστασης τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9.

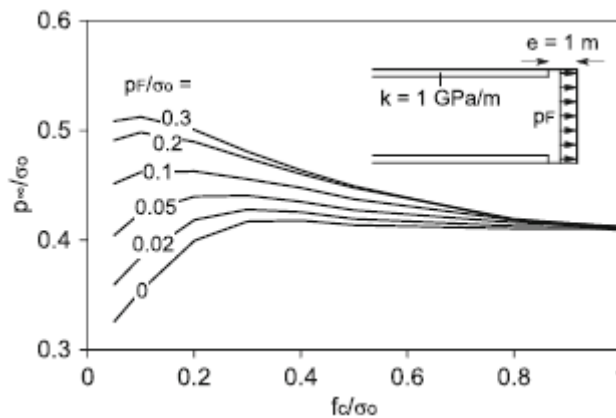


Σχήμα 2.8: (α) Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικών αναλύσεων (β) Εύρος πλαστικής ζώνης  $r$  (γ) Μετακινήσεις  $u$  (δ) Φορτίο της άμεσης υποστήριξης  $p$  κατά μήκος του άξονα  $y$  της σήραγγας ( $f_c$ : η αντοχή του γεωλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και  $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)



Σχήμα 2.9: (α) (β) Κανονικοποιημένο φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της κανονικοποιημένης αντοχής του γεωλικού ( $p_{\infty}$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης,  $f_c$ : η αντοχή του γεωλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης και  $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)

Οι Cantieni and Anagnostou (2010) επεσήμαναν ότι η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζει έως εξαλείφει την παράδοση συμπεριφορά. Η συγκεκριμένη επισήμανση επιβεβαιώθηκε από αξονοσυμμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποίησαν και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Κανονικοποιημένο φορτίο της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της κανονικοποιημένης αντοχής του γεωλικού ( $p_{\infty}$ : το φορτίο της άμεσης υποστήριξης,  $f_c$ : η αντοχή του γεωλικού σε ανεμπόδιση θλίψη κατά Mohr - Coulomb,  $\sigma_0$ : η αρχική γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας,  $k$ : η δυσκαμψία της άμεσης υποστήριξης,  $e$ : η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής και  $p_F$ : η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής) (Cantieni and Anagnostou 2010)

Στη διδακτορική διατριβή του Φορτσάκη (2012) παρουσιάστηκε ο συντελεστής εκτίμησης των φορτίων της άμεσης υποστήριξης TLF (Tunnel Load Factor). Για την εξαγωγή του συντελεστή TLF εκτελέστηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για υποστηριγμένη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κυκλική σήραγγα, για διαφορετικά ύψη υπερκείμενων ( $2 \leq H/D \leq 20$ ), για ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown.

Η έκφραση του TLF είναι η εξής:

$$TLF = \left( \frac{\sigma_c}{p_o} \right)^{0.30} \cdot \left( \frac{E \cdot D}{E_{sh} \cdot d_{sh}} \right)$$

όπου:

$\sigma_c$ : η αντοχή του περιβάλλοντος γεωυλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb.  $\sigma_c = 2c \cdot \tan(45^\circ + \varphi/2)$ . Για βραχώδες γεωυλικό χρησιμοποιούνται οι ισοδύναμες παράμετροι της βραχώμαζας.

$p_o$ : κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας.  $p_o = \gamma \cdot H$

$E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του περιβάλλοντος γεωυλικού. Για βραχώδες γεωυλικό χρησιμοποιείται το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας.

$D$ : η διάμετρος της διατομής εκσκαφής. Για μη κυκλικής διατομή χρησιμοποιείται η ισοδύναμη διάμετρος, δηλαδή η διάμετρος ενός κύκλου με εμβαδόν ίσο με το εμβαδόν της διατομής εκσκαφής.

$E_{sh}$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε περίπτωση τοποθέτησης μεταλλικών πλαισίων χρησιμοποιούνται οι ισοδύναμες παράμετροι της σύμμικτης διατομής.

$d_{sh}$ : το πάχος του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε περίπτωση τοποθέτησης μεταλλικών πλαισίων χρησιμοποιούνται οι ισοδύναμες παράμετροι της σύμμικτης διατομής.

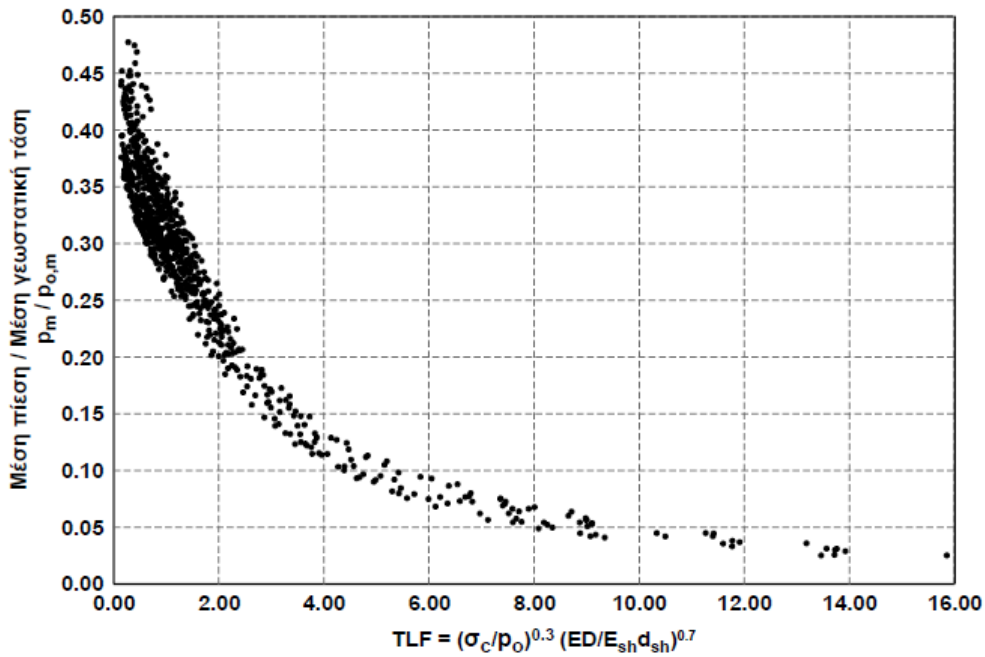
Στη συνέχεια μέσω μη - γραμμικής παλινδρόμησης προτάθηκε συσχέτιση μεταξύ του μέσου ανηγμένου φορτίου  $p_m/p_{o,m}$  και του συντελεστή TLF.

Η προτεινόμενη σχέση είναι η εξής:

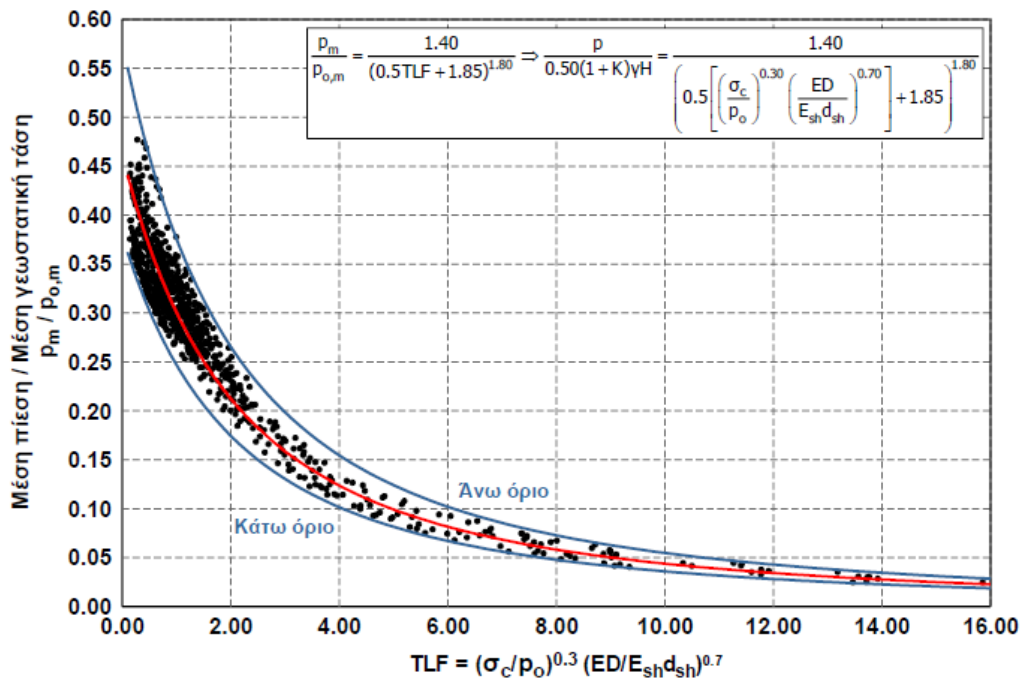
$$\frac{p_m}{p_{o,m}} = \frac{1.40}{(0.50 \cdot TLF + 1.85)^{1.80}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{p_m}{0.5 \cdot (1 + K)\gamma \cdot H} = \frac{1.40}{\left( 0.50 \cdot \left( \frac{\sigma_c}{p_o} \right)^{0.30} \cdot \left( \frac{E \cdot D}{E_{sh} \cdot d_{sh}} \right) + 1.85 \right)^{1.80}}$$

Η γραφική απεικόνιση της συσχέτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.11: Κατανομή του λόγου της μέσης πίεσης προς τη μέση γεωστατική τάση ( $p_m/p_{o,m}$ ) ως προς το συντελεστή εκτίμησης των φορτίων TLF (Φορτσάκης 2012)



Σχήμα 2.12: Προτεινόμενη εξίσωση και καμπύλες για την εκτίμηση του μέσου φορτίου της άμεσης υποστήριξης ως προς το συντελεστή TLF (Φορτσάκης 2012)

### 2.1.5. Προσομοίωση Διαμήκουσ Κατανομής Συγκλίσεων

Η διάνοιξη σήραγγας προκαλεί μεταβολές στο εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο του περιβάλλοντος γεωυλικό στη διατομή της εκσκαφής και στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, λόγω της διάνοιξης σήραγγας συντελείται ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή που έχει εκσκαφθεί και υποστηριχθεί πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και στην περιοχή μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Οι μετακινήσεις που εκδηλώνονται στον πυρήνα προώθησης (προσυγκλίσεις) μειώνουν την αποτόνωση που συντελείται και επομένως μειώνουν τα φορτία της άμεσης υποστήριξης. Για την εκτίμηση, τον προσδιορισμό, τον υπολογισμό των προσυγκλίσεων υπάρχουν μεθοδολογίες κάποιες από τις οποίες παρουσιάζονται ενδεικτικά στο συγκεκριμένο εδάφιο.

#### 2.1.5.1. Μέθοδος Panet (Panet 1995)

##### ❖ Ελαστική - Απόκριση του Γεωυλικού

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - \frac{3}{4} \cdot \left[ \frac{1}{1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{x}{R} \right)} \right]^2 \right\} \quad 2.49$$

##### ❖ Ελαστική - Απολύτως Πλαστική Απόκριση του Γεωυλικού

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left\{ 1 - \frac{3}{4} \cdot \left[ \frac{1}{1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{x}{R} \right) \cdot \xi} \right]^2 \right\} \quad 2.50$$

$$\frac{1}{\xi} = \frac{u_{R\infty}}{u_{R\infty,el}} = \frac{1}{N_s} \cdot \left[ \frac{(N_\varphi - 1) \cdot N_s + 2}{N_\varphi + 1} \right]^{\frac{N_\varphi + K}{N_\varphi - 1}} \quad 2.51$$

όπου:

$u_R$ : ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής

$u_{R\infty}$ : τελική ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής για πλήρη αποτόνωση ( $\lambda = 1$ )

$x$ : απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής

$R$ : ακτίνα σε περίπτωση κυκλικής διατομής ή ισοδύναμη ακτίνα σε περίπτωση μη κυκλικής διατομής

$u_{R\infty,el}$ : τελική ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής για πλήρη αποτόνωση στην περίπτωση που το γεωυλικό παρουσιάζει ελαστική απόκριση (δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη)

2.1.5.2. Μέθοδος Chern (Chern et al. 1998)

$$\frac{u_R}{u_{R\infty}} = \left(1 + e^{0,91 \cdot \frac{x}{R}}\right)^{-1,7} \Rightarrow \frac{x}{R} = 1,1 \cdot \ln \left[ \left(\frac{u_R}{u_{R\infty}}\right)^{-0,588} - 1 \right] \quad 2.52$$

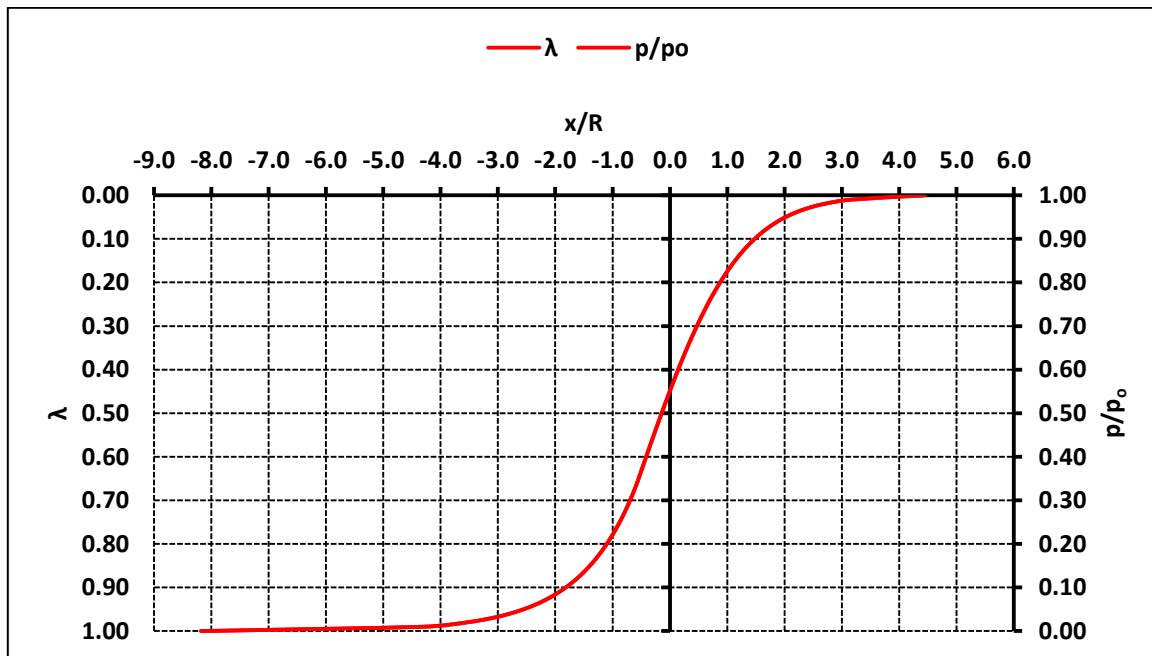
όπου:

$u_R$ : ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής

$u_{R\infty}$ : τελική ακτινική μετακίνηση στην περίμετρο της εκσκαφής για πλήρη αποτόνωση ( $\lambda = 1$ )

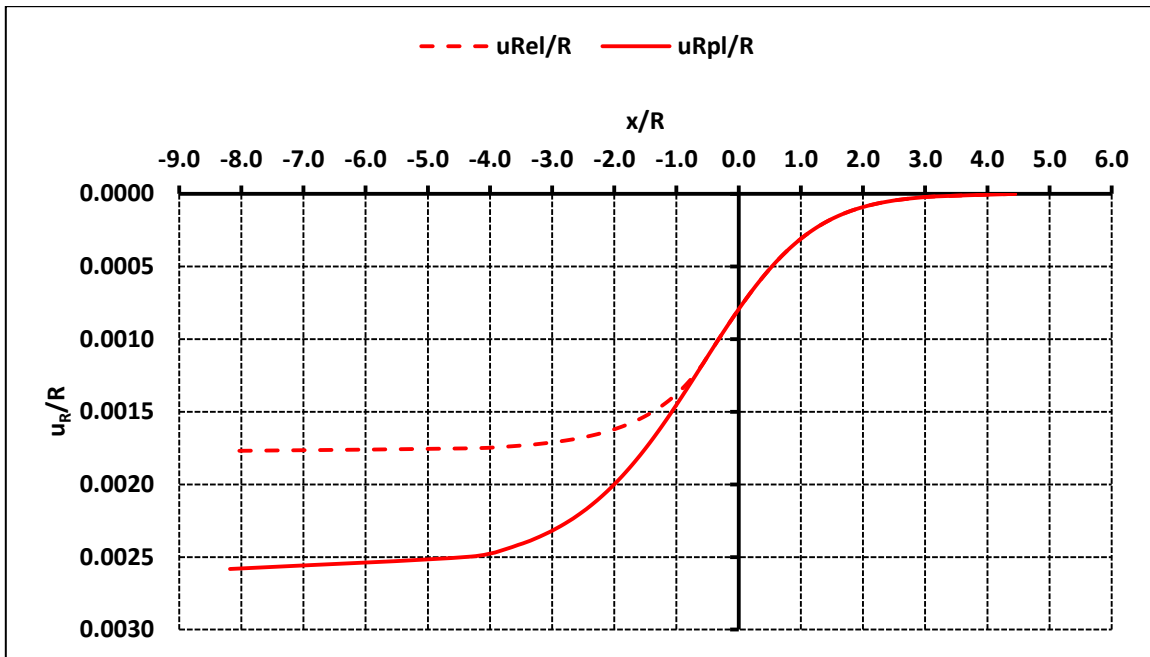
$x$ : απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής

$R$ : ακτίνα σε περίπτωση κυκλικής διατομής ή ισοδύναμη ακτίνα σε περίπτωση μη κυκλικής διατομής

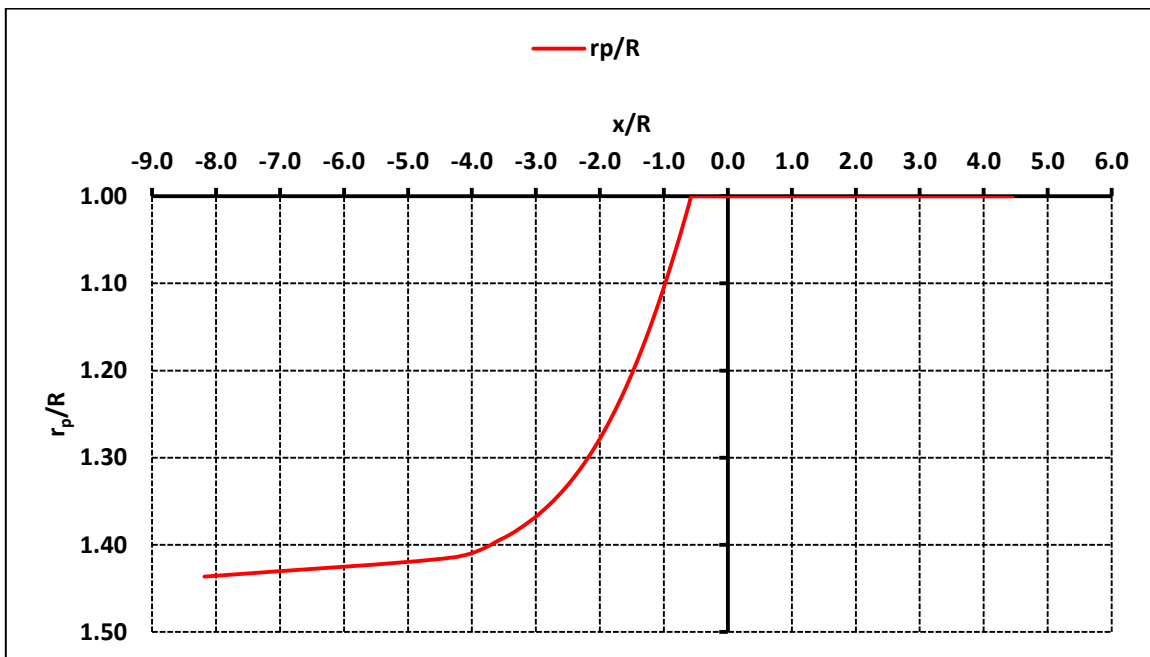


Γράφημα 2.6: Κατανομή του συντελεστή αποτόνωσης λ κατά μήκος του άξονα της σήραγγας x για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού





Γράφημα 2.7: Κατανομή της ελαστικής μετακίνησης  $u_{R,el}$  και της πλαστικής μετακίνησης  $u_{R,pl}$  στην περίμετρο της εκσκαφής κατά μήκος του άξονα της σήραγγας  $x$  για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού



Γράφημα 2.8: Κατανομή του εύρους της πλαστικής ζώνης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας  $x$  για ελαστική - απολύτως πλαστική απόκριση του γεωυλικού

**2.1.5.3. Μέθοδος Vlachopoulos and Diederichs (Vlachopoulos and Diederichs 2009)**

$$u^*(X) = u/u_{\max} = u_o^* \cdot e^{X^*}, \text{ για το διανοιχθέν τμήμα} \quad 2.53$$

$$u^*(X) = u/u_{\max} = 1 - (1 - u_o^*)u_o^* \cdot e^{-3X^*/2R^*}, \text{ για το μη διανοιχθέν τμήμα} \quad 2.54$$

$$u_o^* = u_o/u_{\max} = \frac{1}{3} \cdot e^{-0.15R} \quad 2.55$$

$$X^* = \frac{X}{R_T} \quad 2.56$$

$$R^* = \frac{R_P}{R_T} \quad 2.57$$

όπου:

$u$ : ακτινική σύγκλιση στην περιφέρεια της εκσκαφής

$u_{\max}$ : τελική ακτινική σύγκλιση στην περιφέρεια της εκσκαφής, όταν έχει ολοκληρωθεί η αποτόνωση και το μέτωπο έχει απομακρυνθεί επαρκώς

$u_o$ : ακτινική σύγκλιση στην περιφέρεια της εκσκαφής στη διατομή του μετώπου ( $X = 0$ )

$X$ : απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής

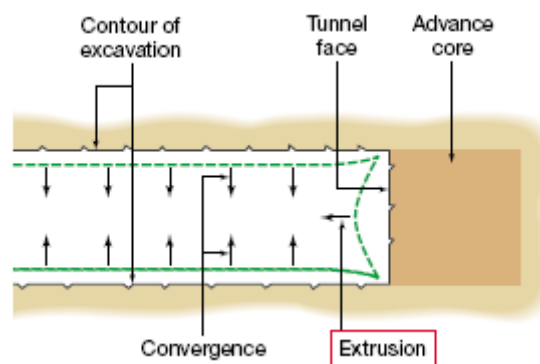
$R_T$ : ακτίνα σε περίπτωση κυκλικής διατομής ή ισοδύναμη ακτίνα σε περίπτωση μη κυκλικής διατομής

$R_P$ : ακτίνα πλαστικής ζώνης κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης

## 2.2. Μέτωπο Εκσκαφής

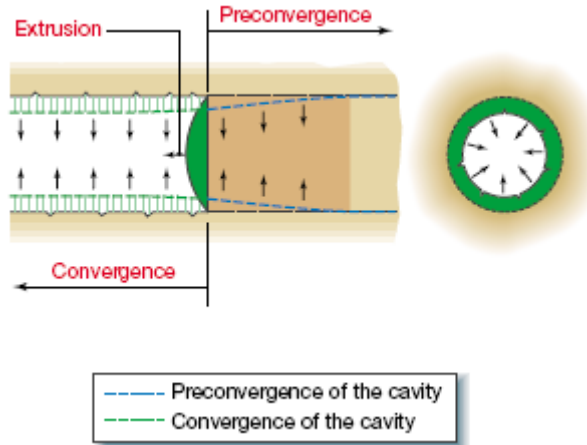
### 2.2.1. Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής

Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας αποτελεί σημαντικό παράγοντα που πρέπει να διερευνάται και να επιτυγχάνεται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, ώστε να αποτρέπεται η αστάθεια που προκαλεί αστοχία. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας οδήγησε στον καθορισμό νέων όρων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13 και χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική διερεύνηση και εκτενή μελέτη της συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής (Lunardi 2000).



Σχήμα 2.13: Μέτωπο Εκσκαφής, Πυρήνας Προώθησης, Σύγκλιση, Έκθλιψη (Lunardi 2000)

- ✓ **Ο πυρήνας προώθησης (advance core):** ο όγκος του γεωυλικού που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και έχει κυλινδρικό σχήμα. Το ύψος και η διάμετρος του κυλίνδρου πρακτικά ταυτίζεται με τη διάμετρο της σήραγγας.
- ✓ **Η έκθλιψη (extrusion):** η πρωτογενής συνιστώσα της παραμορφωσιακής απόκρισης του γεωυλικού που προκύπτει ως «αντίδραση» στη «δράση» της εκσκαφής και αναπτύσσεται αρκετά μέσα στον πυρήνα προώθησης. Εξαρτάται από τις ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας του πυρήνα προώθησης και το αρχικό πεδίο τάσεων στο οποίο υποβάλλεται. Εκδηλώνεται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής, στη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας και η γεωμετρία της είναι λιγότερο ή περισσότερο αξονοσυμμετρική ή επηρεάζεται από τη βαρύτητα.
- ✓ **Η προσύγκλιση (preconvergence):** το θεωρητικό προφίλ της σήραγγας μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Εξαρτάται, αυστηρά από τη σχέση ανάμεσα στις ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας του πυρήνα προώθησης και το αρχικό πεδίο τάσεων.
- ✓ **Η σύγκλιση (convergence):** το πραγματικό προφίλ της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Έχει υποστεί μείωση σε σχέση με το θεωρητικό προφίλ της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, λόγω παραμορφωσιακής απόκρισης.



Σχήμα 2.14: Έκθλιψη, Σύγκλιση, Προσύγκλιση (Lunardi 2000)

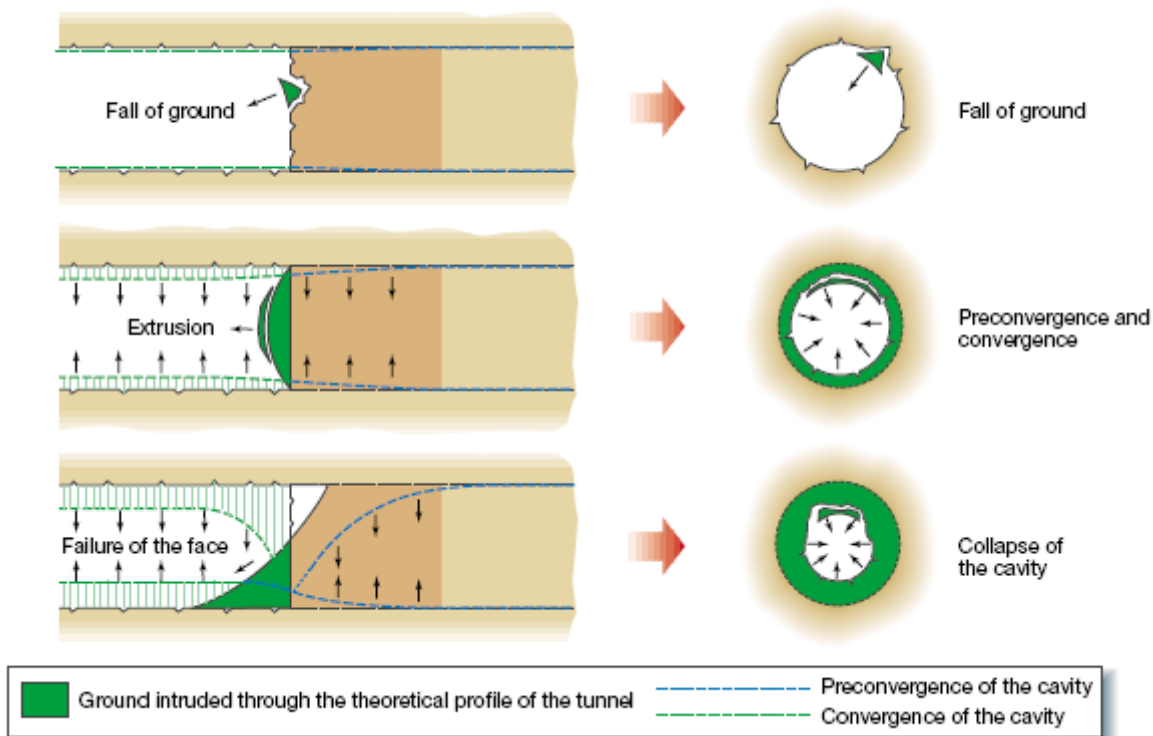
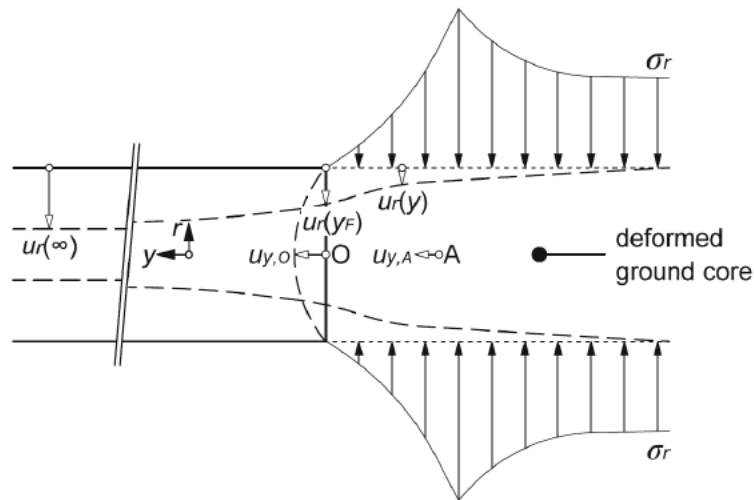


Fig. 5

Σχήμα 2.15: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια (Lunardi 2000)

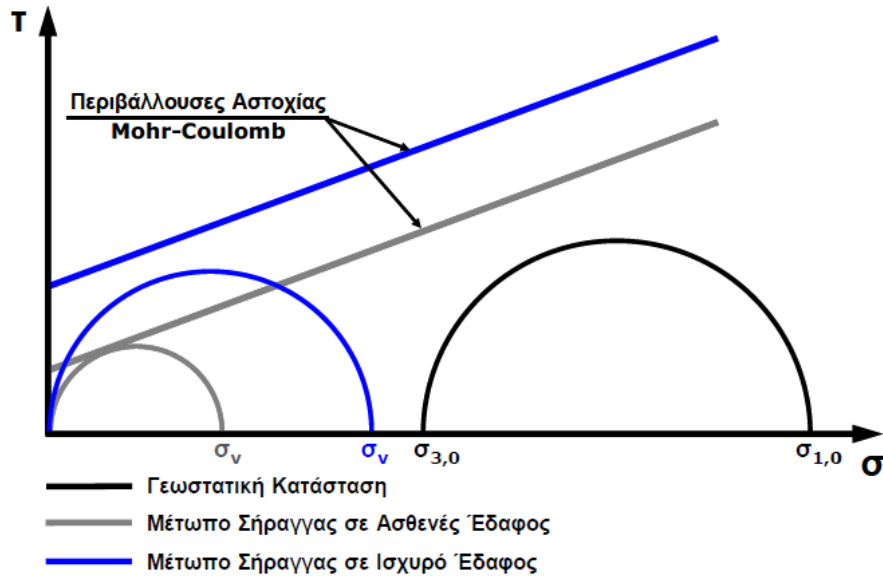
Κατά την διάνοιξη της σήραγγας και την προχώρηση της εκσκαφής ο πυρήνας προώθησης υπόκειται σε εντατικές και παραμορφωσιακές μεταβολές. Συγκεκριμένα, το εντατικό πεδίο, λόγω της αποτόνωσης και της ανακατανομής των τάσεων που συντελείται, μεταβάλλεται ως εξής: το αρχικό (γεωστατικό) εντατικό πεδίο που επικρατεί στον πυρήνα προώθησης όταν το μέτωπο εκσκαφής είναι σε μεγάλη απόσταση, υπόκειται σε μεταβολή λόγω της προοδευτικής μείωσης της πλευρικής τάσης  $\sigma_h$  (κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας), όσο το μέτωπο εκσκαφής προσεγγίζει τον πυρήνα προώθησης. Η μείωση της πλευρικής τάσης  $\sigma_h$  εξελίσσεται έως το μηδενισμό της. Η βαθμιαία μείωση της πλευρικής τάσης  $\sigma_h$  περιορίζει την ακτινική αντίσταση του πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και προκαλεί την παραμόρφωση του πυρήνα προώθησης λόγω της επίδρασης κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$ , ακτινικά (ακτινική μετατόπιση:

προσύγκλιση) και προς το εσωτερικό της εκσκαφής (έκθλιψη). Ο μηχανισμός που προκαλεί την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16.



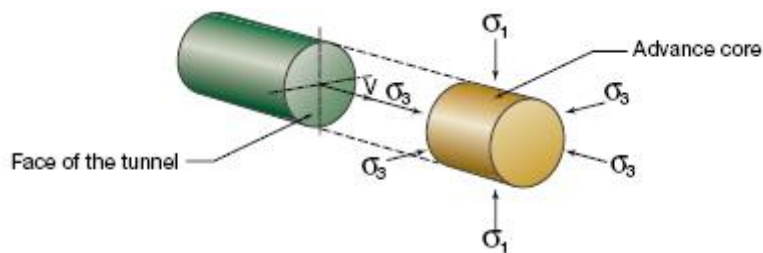
Σχήμα 2.16: Μηχανισμός δημιουργίας της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής (Cantieni 2011)

Η κατακόρυφη τάση  $\sigma_v$  στον πυρήνα προώθησης, μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, απομειώνεται σε σχέση με την αρχική (γεωστατική) κατακόρυφη τάση  $\sigma_{v0}$ . Το εύρος της μείωσης της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$  είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο ασθενέστερο είναι το γεωυλικό, λόγω της μεγαλύτερης αποτόνωσης που συντελείται. Συγκεκριμένα, σε ασθενές γεωυλικό, η διάνοιξη της σήραγγας προκαλεί μεταβολή του εντατικού πεδίου: το εντατικό πεδίο που δημιουργείται υπερβαίνει την αντοχή του γεωυλικού. Κατά συνέπεια, το μέτωπο εκσκαφής αστοχεί και η ανακατανομή των τάσεων γίνεται πιο μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής, σε περιοχές στις οποίες οι τριαξονικές συνθήκες φόρτισης που επικρατούν, συμβάλλουν στην ενίσχυση της αντοχής του γεωυλικού. Επομένως, δημιουργείται μία περιοχή μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής στην οποία το γεωυλικό υπόκειται σε χαμηλό εντατικό πεδίο, αποτελεί ουσιαστικά νεκρό φορτίο και καταρρέει. Ωστόσο, σε πιο ισχυρό γεωυλικό, το εντατικό πεδίο μπροστά και πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής δεν υπερβαίνει την αντοχή του γεωυλικού. Επομένως, το μέτωπο εκσκαφής είναι σε κατάσταση ευστάθειας και η κατακόρυφη τάση  $\sigma_v$  μειώνεται σε μικρότερο βαθμό σε σύγκριση με το ασθενές γεωυλικό γιατί η αποτόνωση που συντελείται είναι μικρότερη. Η συγκεκριμένη θεώρηση παρουσιάστηκε στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17, στο οποίο παρουσιάζονται οι κύκλοι του Mohr για τη μεταβολή του εντατικού του εντατικού πεδίου του γεωυλικού στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας λόγω της διάνοιξης της σήραγγας για ασθενές και ισχυρό γεωυλικό που αντιστοιχούν σε ασταθές και ευσταθές μέτωπο εκσκαφής.



Σχήμα 2.17: Κύκλοι του Mohr που απεικονίζουν τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του γεωυλικού στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας λόγω της διάνοιξης για ασθενές και ισχυρό γεωυλικό που αντιστοιχούν σε ασταθές και ευσταθές μέτωπο εκσκαφής (Προυντζόπουλος 2012)

Τα αποτελέσματα έρευνας για τον πυρήνα προώθησης αποδεικνύουν ότι αποτελεί εργαλείο σταθεροποίησης σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο επίπεδο για τη σήραγγα (Lunardi 2000). Ειδικότερα, η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του πυρήνα προώθησης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο γιατί προκύπτει εξάρτηση με την παραμορφωσιακή απόκριση της σήραγγας. Έτσι, προκύπτουν τρεις κατηγορίες στη συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχούν στις τρεις θεμελιώδεις εντατικές καταστάσεις του μετώπου εκσκαφής (ευστάθεια, βραχυπρόθεσμη ευστάθεια, αστάθεια/αστοχία) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.19 και στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.18: Μέτωπο Εκσκαφής, Πυρήνας Προώθησης (Lunardi 2000)

- ✓ στην πρώτη κατηγορία (κατηγορία Α) το πεδίο των τάσεων στο μέτωπο της εκσκαφής και στην περίμετρο της εκσκαφής δεν είναι επαρκές, ώστε να γίνει υπέρβαση της αντοχής του γεωυλικού. Όσο περισσότερο η διατομή της εκσκαφής προσεγγίζει το θεωρητικό προφίλ, τόσο πιο κοντά στα τοιχώματα της εκσκαφής θα δημιουργηθεί το «φαινόμενο θόλου». Το μέτωπο εκσκαφής είναι γενικά ευσταθές.

- ✓ στην δεύτερη κατηγορία (κατηγορία B) το πεδίο των τάσεων στο μέτωπο της εκσκαφής και στην περίμετρο της εκσκαφής είναι επαρκές, ώστε να γίνει υπέρβαση της αντοχής του γεωλικού στην ελαστική περιοχή. Το «φαινόμενο θόλου» δεν δημιουργείται κοντά στην περίμετρο της εκσκαφής, αλλά σε απόσταση που εξαρτάται από το εύρος της ζώνης του γεωλικού που υπόκειται σε πλαστικοποίηση. Το μέτωπο εκσκαφής είναι ευσταθές σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο. Κατά συνέπεια, χρειάζονται υποστηρικτικά μέτρα σταθεροποίησης και επίτευξης ισορροπίας ανάμεσα στο μέτωπο εκσκαφής και την εκσκαφή, ώστε να περιοριστούν οι παραμορφώσεις σε αποδεκτό εύρος τιμών.
  
- ✓ στην τρίτη κατηγορία (κατηγορία C) το πεδίο των τάσεων στο μέτωπο της εκσκαφής και στην περίμετρο της εκσκαφής είναι σημαντικά μεγαλύτερο από την αντοχή του γεωλικού. Το «φαινόμενο θόλου» δεν δημιουργείται ούτε στο μέτωπο εκσκαφής, ούτε στην περίμετρο της εκσκαφής γιατί το γεωλικό δεν έχει επαρκή παραμένουσα αντοχή. Το μέτωπο εκσκαφής είναι ασταθές. Οι παραμορφώσεις είναι μη αποδεκτές γιατί αναπτύσσονται στη ζώνη αστοχίας προκαλώντας σοβαρές καταστάσεις αστάθειας όπως αστοχία του μετώπου εκσκαφής και κατάρρευση της εκσκαφής. Ενέργειες βελτίωσης πρέπει να πραγματοποιηθούν μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, στον πυρήνα προώθησης, ώστε να δημιουργηθεί τεχνητά το «φαινόμενο θόλου».

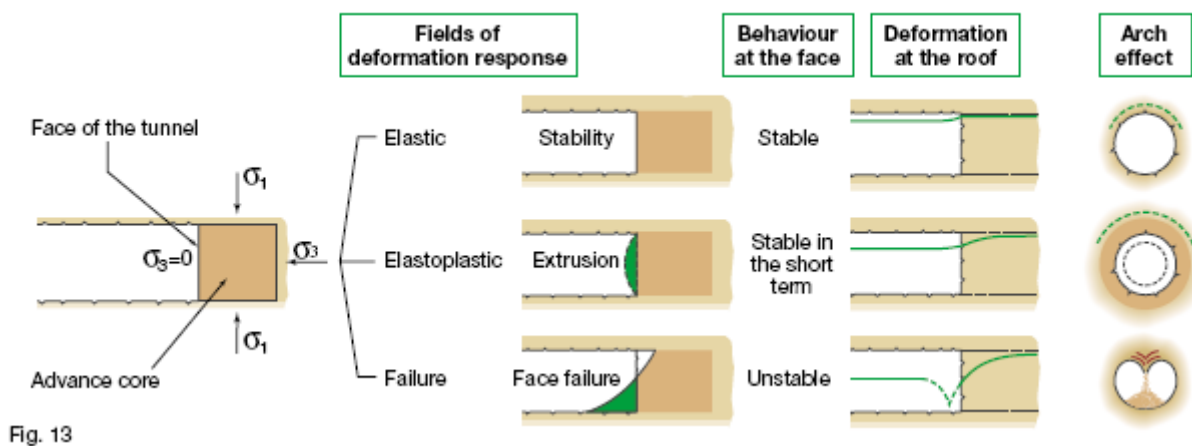


Fig. 13

Σχήμα 2.19: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια Μετώπου Εκσκαφής (Lunardi 2000)

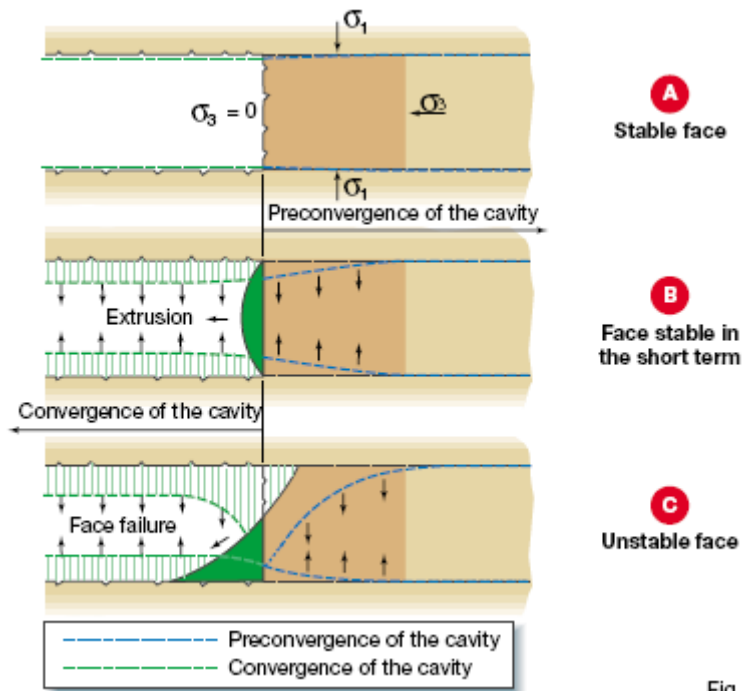


Fig. 14

Σχήμα 2.20: Ευστάθεια, Προσωρινή Ευστάθεια, Αστάθεια Μετώπου Εκσκαφής (Lunardi 2000)



### 2.2.2. Αριθμητικές Μέθοδοι Ευστάθειας Μετώπου Εσκαφής

Στη βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικός αριθμός προτεινόμενων μεθοδολογιών που προσδιορίζουν, μέσω της παραμορφωσιακής απόκρισης του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής, την ευστάθεια του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής (Vermeer et al. 2002, Kasper and Meschke 2004, Babendererde et al. 2005, Σπυρόπουλος 2007, Mollon et al. 2009, Kim and Tono 2009, Chen et al. 2011).

Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που προτάθηκε στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012) γιατί η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου διερευνήθηκε η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας, χωρίς την εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, αντιστήριξης, ενίσχυσης ή προστασίας του μετώπου εκσκαφής, με την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής. Ως έκθλιψη νοείται η οριζόντια μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής, λόγω της μείωσης της οριζόντιας αρχικής (γεωστατικής) τάσης  $\sigma_{ho}$ , εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας. Η έκθλιψη αναπτύσσεται σε μία θέση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, σε απόσταση ίση με την απόσταση επιρροής της εκσκαφής, αυξάνεται με την εξέλιξη της διάνοιξης της σήραγγας και μεγιστοποιείται όταν το μέτωπο εκσκαφής βρεθεί στην συγκεκριμένη προαναφερθείσα θέση. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για αβαθείς σήραγγες, ώστε εκτός από την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής να διερευνηθεί και η επίδραση της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής στην ανάπτυξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια.

Για την προαναφερθείσα διερεύνηση εκτελέστηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για υποστηριγμένη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κυκλική σήραγγα, για διαφορετικά ύψη υπερκείμενων ( $1 \leq H/D \leq 5$ ), για ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb.

Η έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής υπολογίστηκε με τρεις τρόπους:

1. ως η οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,center}$ )
2. ως η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,diameter}$ )

Συγκεκριμένα, για τους διαδοχικούς κόμβους από τους οποίους αποτελείται η κατακόρυφη διάμετρος του μετώπου εκσκαφής υπολογίστηκε το εμβαδό που προκύπτει από το τραπέζιο που δημιουργούν οι οριζόντιες μετακινήσεις των διαδοχικών κόμβων και η κατακόρυφη απόσταση των διαδοχικών κόμβων. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα των εμβαδών ( $E_{extrusion}$ ) το οποίο διαιρέθηκε με τη διάμετρο ( $D$ ) του μετώπου εκσκαφής και προσδιορίστηκε η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση.

$$U_{h,diameter} = \frac{E_{extrusion}}{D}$$

3. ως η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,area}$ )

Συγκεκριμένα, για τα στοιχεία εδάφους από τα οποία αποτελείται το μέτωπο εκσκαφής υπολογίστηκε η μέση οριζόντια μετακίνηση, το εμβαδό και ο όγκος που προκύπτει ως ο πολλαπλασιασμός της μέσης οριζόντιας μετακίνησης και του εμβαδού. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα των όγκων ( $V_{extrusion}$ ) το οποίο διαιρέθηκε με το εμβαδό ( $E$ ) του μετώπου εκσκαφής και προσδιορίστηκε η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση.

$$U_{h,area} = \frac{V_{extrusion}}{E}$$

Η έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής εκφράστηκε σε κανονικοποιημένη μορφή με την παράμετρο:

$$\Omega_f = (U_h \cdot E)/(D \cdot p_o)$$

όπου:

$E$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού

$D$ : η διάμετρος της σήραγγας

$p_o = (1 + K_o) \cdot \gamma \cdot H/2$ : η μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων διαμορφώθηκε και προτάθηκε ένας συντελεστής ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής:

$$\Lambda_F = (5.25 \cdot c \cdot N_\varphi^a) / (\gamma \cdot H^{1-b} \cdot D^b)$$

όπου:

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

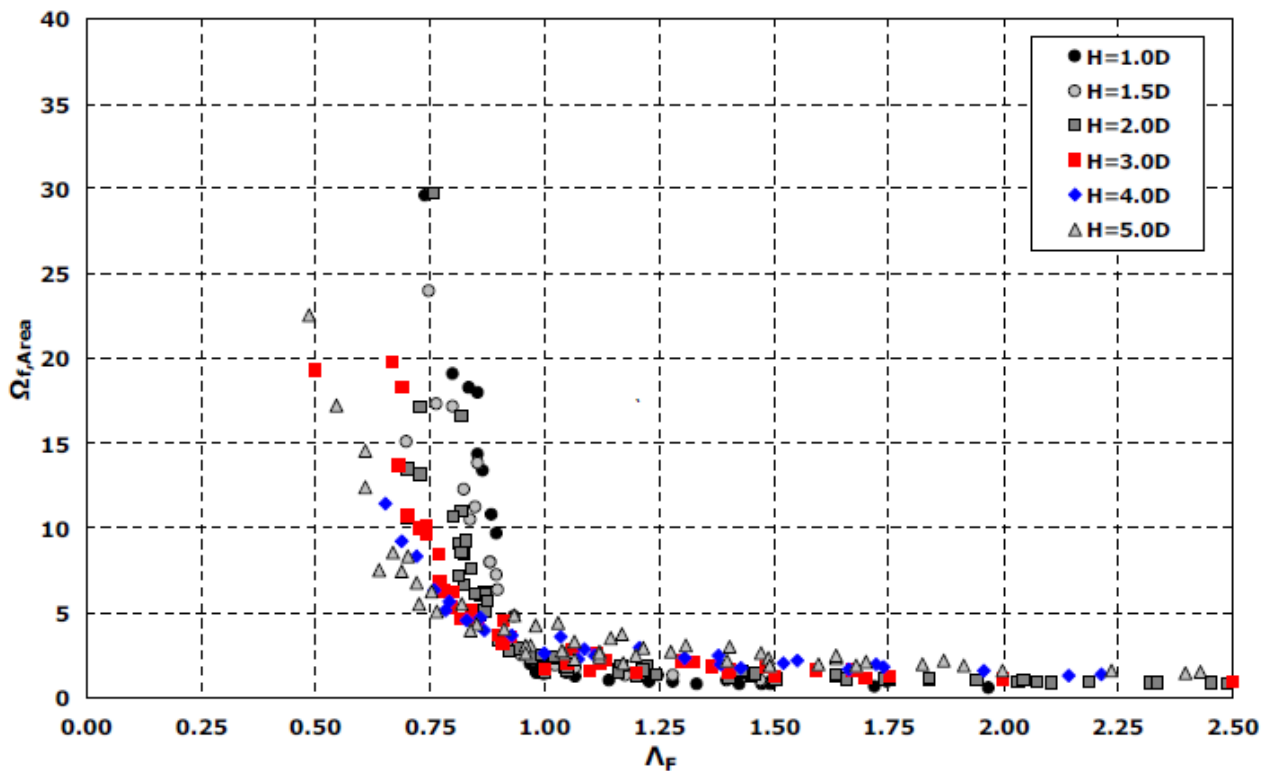
$$a = 0.16 \cdot \frac{H}{D} + 0.59$$

$$b = \left( \frac{H}{D} \right)^{-0.37}$$

Το όριο που διακρίνει το μέτωπο εκσκαφής ευσταθές και ασταθές αντίστοιχα είναι η τιμή του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F = 1$ . Συγκεκριμένα, για  $\Lambda_F > 1$  οι τιμές της κανονικοποιημένης έκθλιψης  $\Omega_f$  που προκύπτουν αντιστοιχούν σε ευσταθές μέτωπο εκσκαφής, ενώ για  $\Lambda_F < 1$  οι τιμές της κανονικοποιημένης έκθλιψης  $\Omega_f$  που προκύπτουν αντιστοιχούν σε

ασταθές μέτωπο εκσκαφής. Ο συντελεστής ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και η προταθείσα μεθοδολογία συσχέτισης με την κανονικοποιημένη έκθλιψη συνίσταται να εφαρμόζεται για σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H \leq 5D$ .

Τα αποτελέσματα της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21: Μέση κανονικοποιημένη έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  (Προυντζόπουλος 2012)

Επιπρόσθετα, στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012) προτάθηκε η συσχέτιση της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  με τον συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Συγκεκριμένα, η συσχέτιση που προέκυψε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων είναι η εξής:

$$\Omega_{f,area} = \frac{40D}{H \cdot (\Lambda_F + B)^c} + 0.6 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0.4}$$

όπου:

$$B = 0.23 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0.425}$$

$$C = \frac{16D}{H}$$

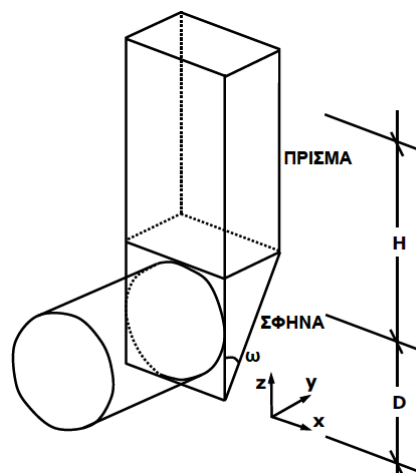
Στη βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικός αριθμός προτεινόμενων μεθοδολογιών που προσδιορίζουν, μέσω της παραμορφωσιακής απόκρισης του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής, την ευστάθεια του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής.

Συγκεκριμένα, η επίδραση της ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια fiberglass διερευνήθηκε και παρουσιάστηκε από τους Peila (1994), Yoo and Shin (2000), Ng and Lee (2002), Yoo (2002), Kamata and Mashimo (2003) και Dias (2011).

Επιπρόσθετα, η επίδραση της προστασίας του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας διερευνήθηκε και παρουσιάστηκε από τους Volkmann et al. (2006), Volkmann and Schubert (2007) και Προυντζόπουλος (2012).

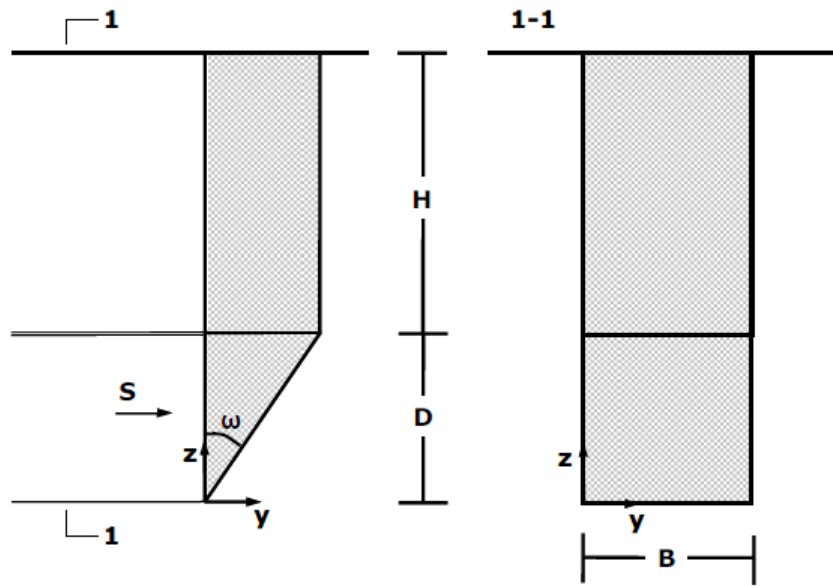
### 2.2.3. Αναλυτικές Μέθοδοι Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής

Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρουσιάζεται η αναλυτική μεθοδολογία των Kovari and Anagnostou (1994 and 1996) που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και τον προσδιορισμό της πίεσης υποστήριξης που πρέπει να εφαρμοστεί στο μέτωπο εκσκαφής, ώστε να διαμορφωθεί ο απαιτούμενος ή ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στη θεωρία του σιλό (Horn 1961). Με βάση τη μεθοδολογία, ο μηχανισμός αστοχίας αποτελείται από μία σφήνα και ένα πρίσμα. Ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων ευστάθειας προς τις δυνάμεις ολίσθησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης της σφήνας.

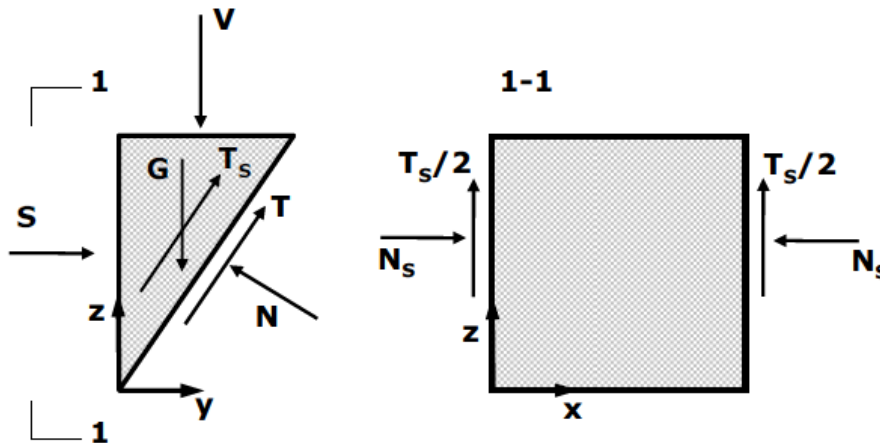


Σχήμα 2.22: Μηχανισμός αστοχίας θεωρίας του σιλό (Horn 1961) (Προυντζόπουλος 2012)

Ο μηχανισμός αστοχίας συγκροτείται από το πρίσμα και τη σφήνα που παρουσιάζονται από το Σχήμα 2.22. Το πρίσμα και η σφήνα ελέγχουν την ισορροπία και επομένως την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής.



Σχήμα 2.23: Γεωμετρικές παράμετροι του μηχανισμού αστοχίας (Προυντζόπουλος 2012)



Σχήμα 2.24: Δρώσες δυνάμεις στη σφήνα ολίσθησης του μηχανισμού αστοχίας (Προυντζόπουλος 2012)

Οι βασικές εξισώσεις της μεθοδολογίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η εξίσωση ισορροπίας στη διεύθυνση της ολίσθησης είναι η εξής:

$$(V + G) \cdot \cos \omega = T + T_s + S \cdot \sin \omega \tag{2.58}$$

Η εξίσωση ισορροπίας στη διεύθυνση της ορθής δύναμης N είναι η εξής:

$$N = S \cdot \cos \omega + (V + G) \cdot \sin \omega \tag{2.59}$$

Η διατμητική δύναμη T ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb.

$$T = N \cdot \tan \varphi + c \cdot B \cdot \frac{D}{\cos \omega} \tag{2.60}$$

Η πίεση υποστήριξης  $S$  που πρέπει να εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής, ώστε να επιτυγχάνεται η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής προκύπτει από την εξίσωση:

$$S = \frac{V + G}{\tan(\omega + \varphi)} - \frac{T_s + c \cdot B \cdot \frac{D}{\cos \omega}}{\cos \omega \cdot (\tan \omega + \tan \varphi)} \quad 2.61$$

Το βάρος  $G$  της σφήνας προκύπτει από την εξίσωση:

$$G = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot D^2 \cdot \tan \omega \quad 2.62$$

Η ορθή δύναμη  $V$  της σφήνας υπολογίζεται με την εφαρμογή της θεωρίας του σιλό στο πρίσμα και προκύπτει από την εξίσωση:

$$V = F \cdot \sigma_v \quad 2.63$$

όπου:

$F$ : η επιφάνεια της βάσης του πρίσματος

$\sigma_v$ : η πίεση του σιλό στο επίπεδο της στέψης της σήραγγας

Τα συγκεκριμένα μεγέθη προκύπτουν από τις εξισώσεις:

$$F = B \cdot D \cdot \tan \omega \quad 2.64$$

$$\sigma_v = \frac{R \cdot \gamma - c}{\lambda \cdot \tan \varphi} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H}{R}} \right) \quad 2.65$$

όπου:

$H$ : το ύψος υπερκείμενων

$\lambda = 0.8 - 1$ : συντελεστής πλευρικών τάσεων

$R$ : συντελεστής

$$R = \frac{F}{U} \quad 2.66$$

όπου:

$U$ : η περίμετρος της οριζόντιας τομής του πρίσματος

$$U = 2 \cdot (B + D \cdot \tan \omega) \quad 2.67$$

Η δύναμη  $T_s$  προκύπτει από την εξίσωση:

$$T_s = D^2 \cdot \tan \omega \cdot \left( c + \lambda_k \cdot \tan \varphi \cdot \frac{2 \cdot \sigma_v + D \cdot \gamma}{3} \right) \quad 2.68$$

όπου:

$\lambda_k = 0.4 - 0.5$ : συντελεστής πλευρικών τάσεων εντός της σφήνας

Ο συντελεστής ασφαλείας, για ανυποστήρικτο μέτωπο εσκαφής, ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων ευστάθειας προς τις δυνάμεις ολίσθησης κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης (που έχει την κρίσιμη κλίση  $\omega$ ) της σφήνας και προκύπτει από τη σχέση:

$$FS = \frac{T + T_s}{(V + G) \cdot \cos \omega} \quad 2.69$$

Ο συντελεστής ασφαλείας, για υποστηριγμένο μέτωπο εσκαφής, ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων ευστάθειας προς τις δυνάμεις ολίσθησης κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης (που έχει την κρίσιμη κλίση  $\omega$ ) της σφήνας και προκύπτει από τη σχέση:

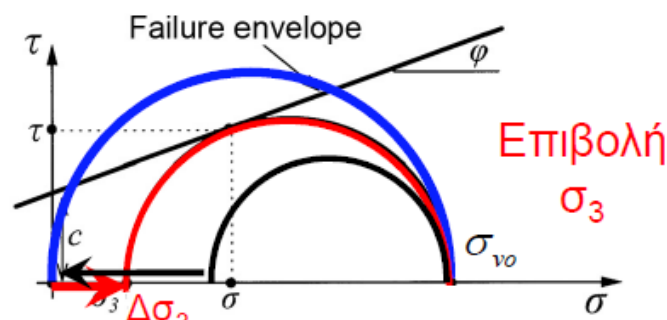
$$FS = \frac{T + T_s + S \cdot \sin \omega}{(V + G) \cdot \cos \omega} \quad 2.70$$

### 2.2.4. Μέθοδοι Ενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής

Η ενίσχυση της ευστάθειας και η βελτίωση της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας είναι βασικός στόχος, ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια και να αποτρέπεται η αστοχία του μετώπου εκσκαφής και να περιορίζονται οι καθιζήσεις στην επιφάνεια. Προκειμένου, να επιτευχθούν τα προαναφερθέντα πρέπει να περιοριστεί το εύρος της πλαστικής ζώνης, να μειωθούν οι ακτινικές μετακινήσεις (προσσυγκλίσεις) στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, να επιτευχθεί η ανάπτυξη της τοξωτής λειτουργίας του γεωυλικού («φαινόμενο θόλου») και να μεταβληθεί ο μηχανισμός ανακατανομής των τάσεων, ώστε να περιοριστεί η περιοχή στην οποία συντελείται υπέρβαση της αντοχής του γεωυλικού. Οι μέθοδοι ενίσχυσης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής διακρίνονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες.

#### 2.2.4.1. Μέθοδοι Ενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής

Οι μέθοδοι ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής στοχεύουν στην ενίσχυση της αντοχής του γεωυλικού. Συγκεκριμένα, περιορίζουν τη μείωση της πλευρικής τάσης  $\sigma_h$  ή περιορίζουν την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$  κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας στο μέτωπο εκσκαφής. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα οριζόντια αγκύρια μετώπου που διακρίνονται σε μεταλλικά αγκύρια ή αγκύρια fiberglass (υαλονήματα), τα οποία επιβάλλουν οριζόντια τάση  $\sigma_h$  στο μέτωπο εκσκαφής και μεταβάλλουν το εντατικό πεδίο στον πυρήνα προώθησης, περιορίζοντας την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής, τις προσσυγκλίσεις στον πυρήνα προώθησης και τις καθιζήσεις στην επιφάνεια. Τα οριζόντια αγκύρια μετώπου καθιστούν την εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης τριαξονική και επομένως ενισχύουν την αντοχή του γεωυλικού. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα κατακόρυφα αγκύρια, τα οποία αποτρέπουν την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$  μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και πάνω από τον πυρήνα προώθησης και περιορίζουν την ανάπτυξη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Επιπρόσθετα, τα κατακόρυφα αγκύρια παρεμποδίζουν την οριζόντια μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής λόγω δράσης βλήτρου και επομένως προκαλούν την ανάπτυξη παθητικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Η επίδραση των οριζόντιων αγκυρίων μετώπου στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.25 με την απεικόνιση των κύκλων του Mohr.



Σχήμα 2.25: Επίδραση των οριζόντιων αγκυρίων μετώπου στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καβαβάδας 2012)





Εικόνα 2.1 Αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας



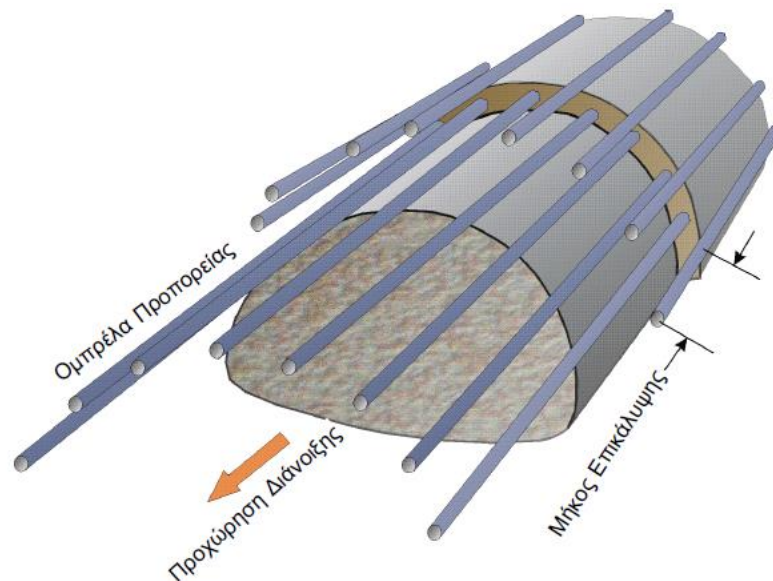
Εικόνα 2.2 Αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

#### 2.2.4.2. Μέθοδοι Βελτίωσης του Μετώπου Εκσκαφής

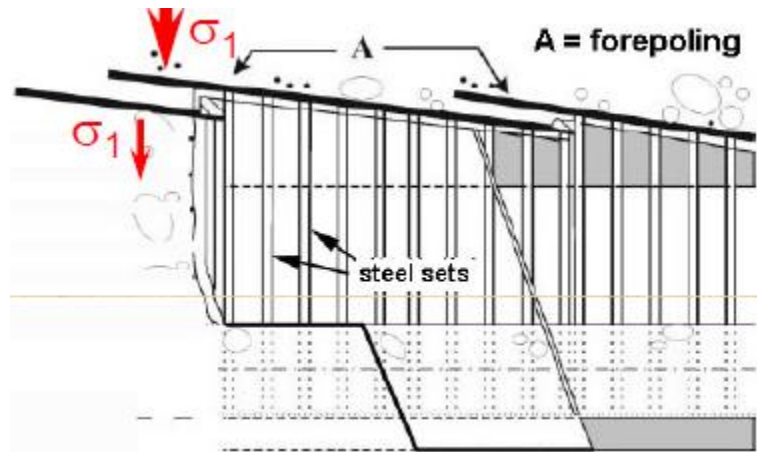
Οι μέθοδοι βελτίωσης του μετώπου εκσκαφής στοχεύουν στην βελτίωση της αντοχής του γεωυλικού. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσονται η ενεμάτωση με χαμηλή και υψηλή πίεση (grouting, jet grouting) και η ψύξη του γεωυλικού (ground freezing). Η ενεμάτωση (grouting) συνίσταται στην εισπίεση ενέματος (grout) στο γεωυλικό που προκαλεί την πλήρωση των κενών και τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του γεωυλικού. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται η δημιουργία πιο ισχυρού γεωυλικού και αποτρέπεται σε αβαθείς σήραγγες η αστοχία τύπου καμινάδας και μειώνεται η ανάπτυξη καθιζήσεων στην επιφάνεια. Η ψύξη του γεωυλικού εφαρμόζεται σε κορεσμένα γεωυλικά χαμηλής συνεκτικότητας και συνίσταται στην αύξηση της δυσκαμψίας του γεωυλικού και την μετατροπή του σε στεγανό γεωυλικό. Οι προαναφερθείσες μέθοδοι παρουσιάζουν υψηλό οικονομικό κόστος και επομένως προτιμώνται και εφαρμόζονται αν δεν ενδείκνυται η εφαρμογή άλλης μεθόδου.

### 2.2.4.3. Μέθοδοι Προστασίας του Μετώπου Εκσκαφής

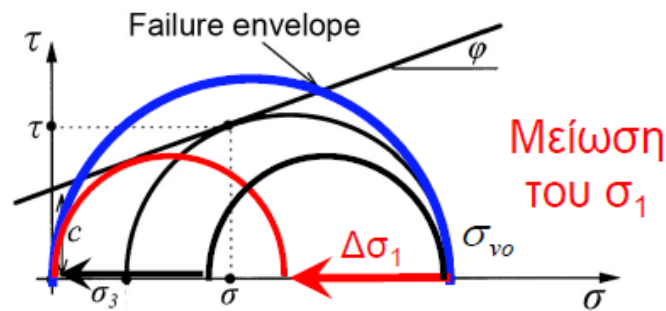
Οι μέθοδοι προστασίας του μετώπου εκσκαφής στοχεύουν στην μεταβολή του μηχανισμού της ανακατανομής των τάσεων που συντελείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα, προκαλούν τη μείωση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$  και συμβάλλουν στην ανάπτυξη της τοξωτής λειτουργίας του γεωυλικού, ενώ ταυτόχρονα μειώνουν την ανάπτυξη καθιζήσεων στην επιφάνεια. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσονται η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας (forepole umbrella), η ομπρέλα οριζόντιων μικροπασσάλων (microtunnelling crown arch) και η κατακόρυφη ενεμάτωση και δημιουργία στηλών (jet grouting columns arch). Η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας συνίσταται στην τοποθέτηση των δοκών στη στέψη της εκσκαφής υπό ανοδική κλίση κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας και τη δημιουργία θόλου μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και τον πυρήνα προώθησης. Η ομπρέλα δοκών προπορείας μετατοπίζει την ανακατανομή των τάσεων στις περιοχές που οι συνθήκες φόρτισης είναι τριαξονικές και επομένως η ένταση που δημιουργείται παραλαμβάνεται επαρκώς από το γεωυλικό, ενώ το εύρος της πλαστικής ζώνης περιορίζεται. Επιπρόσθετα, η καθοριστική συμβολή της ομπρέλας δοκών προπορείας συνίσταται στη μείωση των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Η επίδραση της ομπρέλας δοκών προπορείας στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.28 με την απεικόνιση των κύκλων του Mohr.



Σχήμα 2.26: Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Hoek 2004)



Σχήμα 2.27: Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καββαδάς 2012)



Σχήμα 2.28: Επίδραση των δοκών προπορείας στην εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Καββαδάς 2012)



Εικόνα 2.3 Ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Anagnostou et al. 1997)

#### 2.2.4.4. Μέθοδοι Αποστράγγισης του Μετώπου Εκσκαφής

Οι μέθοδοι αποστράγγισης του μετώπου εκσκαφής στοχεύουν στην αποτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων που προκαλούν τη δημιουργία συνθηκών υδατικής ροής στο μέτωπο εκσκαφής όταν η υδραυλική κλίση είναι δυσμενής. Οι μέθοδοι αποστράγγισης (dewatering) του μετώπου εκσκαφής συνίστανται στην διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

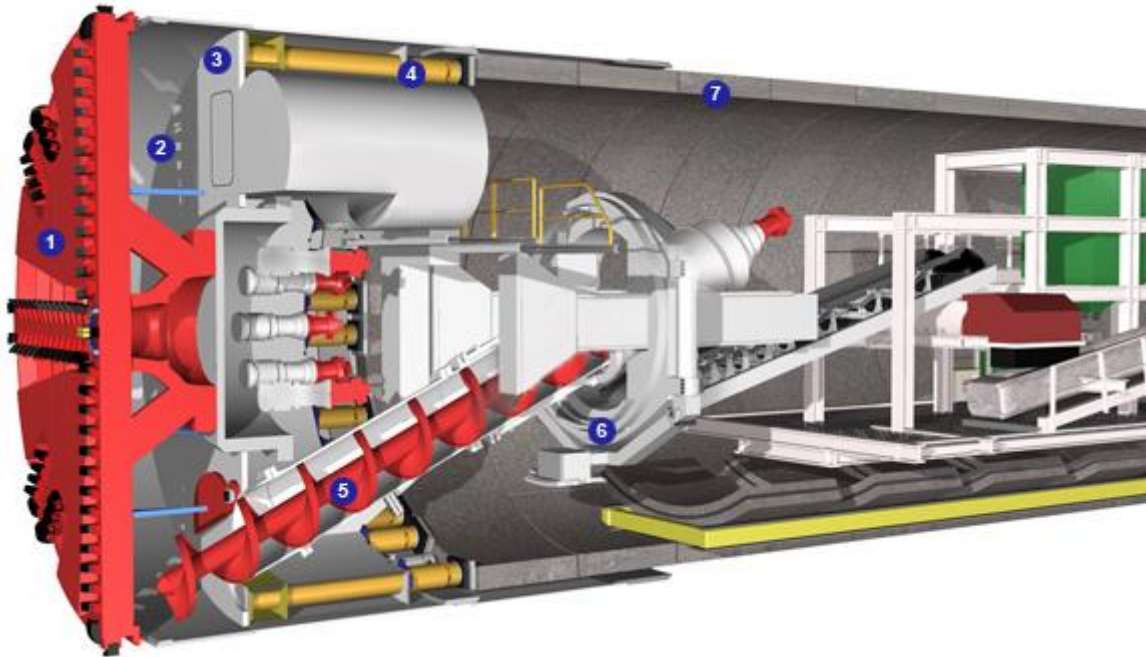
Οι προαναφερθείσες μέθοδοι ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας (ενίσχυση, βελτίωση, προστασία, αποστράγγιση) χρησιμοποιούνται κατά τη συμβατική όρυξη σηράγγων (NATM).

#### 2.2.4.5. Μέθοδοι Υποστήριξης του Μετώπου Εκσκαφής

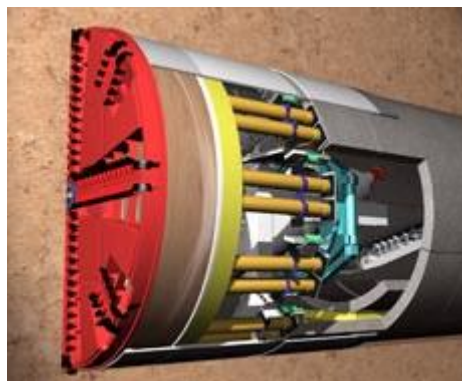
Οι μέθοδοι υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής συνοψίζονται στην εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας με σκοπό την αντιστήριξή του και είναι εφικτή κατά τη μηχανική όρυξη σηράγγων: στην ολομέτωπη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήματα κλειστού τύπου εξισορρόπησης πίεσης με ασπίδα (Earth Pressure Balance Machine) ή μηχανήματα κλειστού τύπου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield Tunnel Boring Machine).

Το μηχανήματα κλειστού τύπου εξισορρόπησης πίεσης με ασπίδα (Earth Pressure Balance Machine) και τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.29 και στο Σχήμα 2.30. Η διάνοιξη σήραγγας με EPB γίνεται με ολομέτωπη προσβολή του μετώπου εκσκαφής. Συγκεκριμένα, η κεφαλή κοπής (cutter wheel - 1) του μηχανήματος περιστρέφεται και ωθείται προς τα εμπρός από τη δύναμη ώθησης (thrust force), η οποία παράγεται από υδραυλικά έμβολα του μηχανήματος (thrust cylinders - 4) τα οποία εδράζονται στα προκατασκευασμένα τεμάχια από σπλισμένο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης (lining segments - 7) που έχουν τοποθετηθεί τελευταία. Η ασπίδα (shield) του μηχανήματος αποτελείται από χαλύβδινο κύλινδρο ο οποίος προστατεύει το μηχανολογικό εξοπλισμό και παρεμποδίζει την παραμορφωσιακή απόκριση του γεωυλικού και επομένως την αποτόνωση του γεωυλικού. Το γεωυλικό κατά την προχώρηση της εκσκαφής εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων της κεφαλής κοπής (cutter wheel - 1) του μηχανήματος στο θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος. Το εκσκαφθέν γεωυλικό απομακρύνεται από το θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος μέσω ενός συστήματος μεταφοράς που αποτελείται από τον ατέρμονα κοχλία (auger conveyor - 5) του μηχανήματος και μεταφορικές ταινίες. Το στοιχείο που αποτελεί την ειδοποιό διαφορά στην διάνοιξη σήραγγας με EPB σε σχέση με τη διάνοιξη σήραγγας με τα υπόλοιπα μηχανήματα κλειστού τύπου με ασπίδα συνίσταται στην ολομέτωπη υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Η πίεση στο μέτωπο εκσκαφής επιβάλλεται με τον έλεγχο του ποσοστού πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος. Το εκσκαφθέν γεωυλικό που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος αποτελεί το σταθεροποιητικό μέσο για το μέτωπο εκσκαφής. Ο ρυθμός περιστροφής του ατέρμονος κοχλία (auger conveyor - 5) του μηχανήματος καθορίζει την ποσότητα του εκσκαφθέντος γεωυλικού στο θαλάμο εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος και επομένως προσδιορίζει και το μέγεθος της εφαρμοζόμενης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Ο θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος είναι υπό πίεση και απομονώνεται από το υπόλοιπο μηχανήματα στο οποίο επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση μέσω του διαφράγματος (pressure bulkhead - 3) του μηχανήματος. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν το εκσκαφθέν γεωυλικό που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber - 2) του μηχανήματος δεν μπορεί να συμπιεστεί περισσότερο από την πίεση του γεωυλικού και την πίεση του νερού μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτρέπεται η αστάθεια και η αστοχία του μετώπου εκσκαφής και περιορίζεται η ανάπτυξη καθιζήσεων στην επιφάνεια. Κατά τη διάνοιξη σήραγγας με EPB η κεφαλή κοπής (cutter wheel - 1) του μηχανήματος και η ασπίδα (shield) του μηχανήματος έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από την διάμετρο της τελικής επένδυσης (lining) και επομένως δημιουργείται κενό στην τελική επένδυση (lining) και το γεωυλικό. Το κενό μπορεί να

περιοριστεί λόγω της παραμορφωσιακής απόκρισης του γεωυλικού, των ακτινικών μετακινήσεων (συγκλίσεων) του γεωυλικού. Η συγκεκριμένη απόκριση του γεωυλικού παρεμποδίζεται, είτε μέσω της εισπίεσης ενέματος από προϋπάρχουσες οπές στα προκατασκευασμένα τεμάχια από σπλισμένο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης (lining segments - 7), είτε μέσω της εκτίναξης ενέματος από σωληνώσεις που βρίσκονται στο πίσω μέρος της ασπίδας (shield) του μηχανήματος και επομένως περιορίζεται η ανάπτυξη καθιζήσεων στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.29: Earth Pressure Balance Machine (Herrenknecht)



Σχήμα 2.30: Earth Pressure Balance Machine (Herrenknecht)

Το μηχάνημα κλειστού τύπου εξισορρόπησης πίεσης με ασπίδα (Earth Pressure Balance Machine) ενδείκνυται να χρησιμοποιείται στη μηχανική όρυξη σηράγγων για μαλακά και συνεκτικά γεωυλικά με υψηλή πλαστικότητα, ώστε το εκσκαφθέν γεωυλικό να επιτυγχάνεται ομαλή εισροή μέσω των ανοιγμάτων της κεφαλής κοπής του μηχανήματος στο θάλαμο εκσκαφής του μηχανήματος και απόλυτη πλήρωση του θαλάμου εκσκαφής του μηχανήματος και επομένως διασφαλίζεται η απομόνωση του υπό πίεση τμήματος του μηχανήματος από το τμήμα στο οποίο επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο, το εύρος εφαρμογής του μηχανήματος επεκτάθηκε και

συγκεκριμένα το μηχάνημα δύναται να χρησιμοποιείται και για στιφρά συνεκτικά γεωυλικά και για μη συνεκτικά γεωυλικά.

Οι καταστάσεις λειτουργίας του μηχανήματος διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες που εξαρτώνται και καθορίζονται από το γεωυλικό και τις επικρατούσες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, οι καταστάσεις λειτουργίας του μηχανήματος είναι οι εξής:

✓ **ανοιχτή λειτουργία (open mode)**

Η συγκεκριμένη λειτουργία εφαρμόζεται σε γεωυλικά με υψηλή αντοχή και χαμηλή διαπερατότητα και για μέτωπο εκσκαφής που θεωρείται ευσταθές και επομένως δεν χρειάζεται η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης. Η πίεση υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Το εκσκαφθέν γεωυλικό προκαλεί τη μερική πλήρωση του θαλάμου εκσκαφής και συγκεκριμένα το εύρος της πλήρωσης είναι τέτοιο, ώστε να επιτυγχάνεται η επαρκής τροφοδοσία του ατέρμονος κοχλίου και η συνεχής απομάκρυνση του εκσκαφθέντος γεωυλικού.

✓ **ημι - ανοιχτή λειτουργία με πεπιεσμένο αέρα (semi - open mode)**

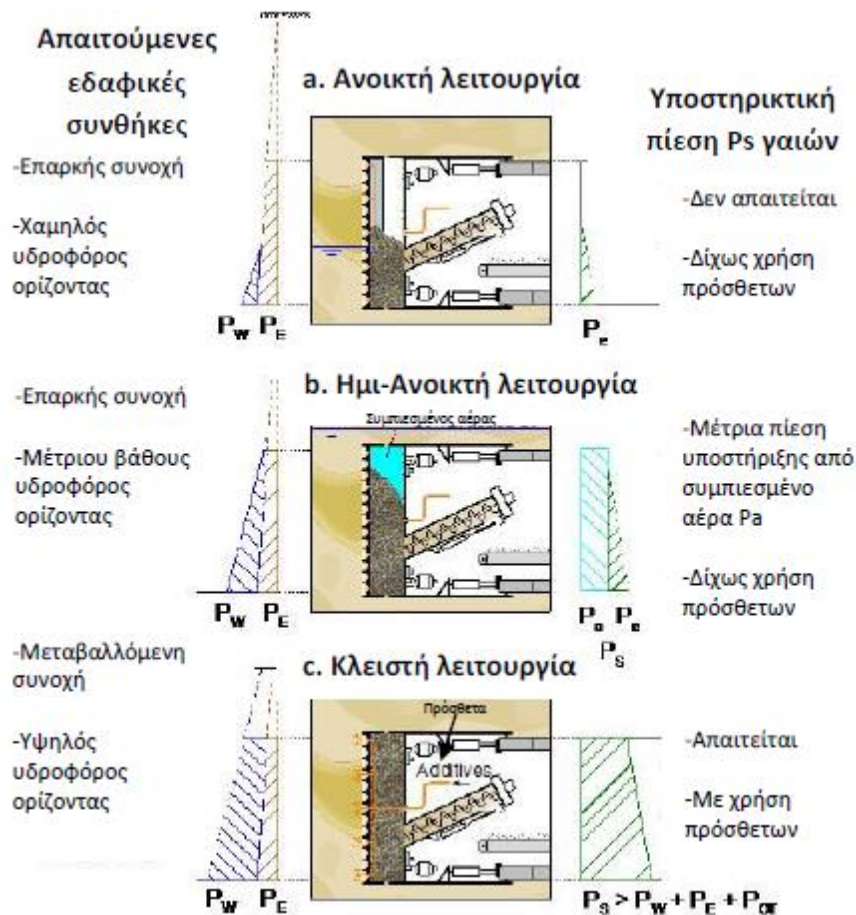
Η συγκεκριμένη λειτουργία εφαρμόζεται σε μη συνεκτικά γεωυλικά με μεγάλο εύρος διαβάθμισης κόκκων και σε συνεκτικά γεωυλικά με παρεμβολές μη συνεκτικών γεωυλικών με υπόγειο νερό και για μέτωπο εκσκαφής που θεωρείται ότι η ευστάθεια/αστάθεια του εξαρτάται και καθορίζεται από τη συρτική δύναμη (seepage force) που δημιουργείται από την υδραυλική κλίση και την υδατική ροή η οποία προκαλεί αύξηση στην πίεση του νερού των πόρων και μείωση στην ενεργό τάση οδηγώντας σε ενδεχόμενη ρευστοποίηση του γεωυλικού. Προκειμένου, να επιτευχθεί η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, η πίεση του νερού των πόρων ελέγχεται με πεπιεσμένο αέρα και η ενεργός τάση εξισορροπείται από το εκσκαφθέν γεωυλικό. Το κατώτερο τμήμα του θαλάμου εκσκαφής πληρώνεται με το εκσκαφθέν γεωυλικό και το ανώτερο με πεπιεσμένο αέρα. Επομένως, ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται υπό πίεση, το μέτωπο εκσκαφής σταθεροποιείται και διασφαλίζεται η επαρκής τροφοδοσία του ατέρμονος κοχλίου και η συνεχής απομάκρυνση του εκσκαφθέντος γεωυλικού.

✓ **κλειστή λειτουργία (closed mode)**

Η συγκεκριμένη λειτουργία εφαρμόζεται σε γεωυλικά με χαμηλή αντοχή και υψηλή διαπερατότητα και για μέτωπο εκσκαφής που θεωρείται ασταθές και επομένως χρειάζεται η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης. Προκειμένου, να επιτευχθεί η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, η πίεση του νερού των πόρων και η ενεργός τάση εξισορροπείται από το εκσκαφθέν γεωυλικό. Ο θάλαμος εκσκαφής πληρώνεται με το εκσκαφθέν γεωυλικό. Επομένως, ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται υπό πίεση, το μέτωπο εκσκαφής σταθεροποιείται και διασφαλίζεται η επαρκής τροφοδοσία του ατέρμονος κοχλίου και η συνεχής απομάκρυνση του εκσκαφθέντος γεωυλικού. Σε

ενδεχόμενο απώλειας πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής, η απώλεια εξισορροπείται με την ενεργοποίηση παροχής μπεντονίτη στο θάλαμο εκσκαφής.

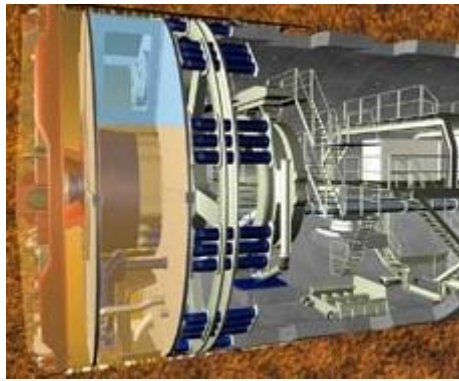
Το εύρος της μέγιστης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που μπορεί να εφαρμοστεί από το EPB είναι 3 – 4 bar (300 – 400 kPa). Οι προαναφερθείσες καταστάσεις λειτουργίας του μηχανήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.31.



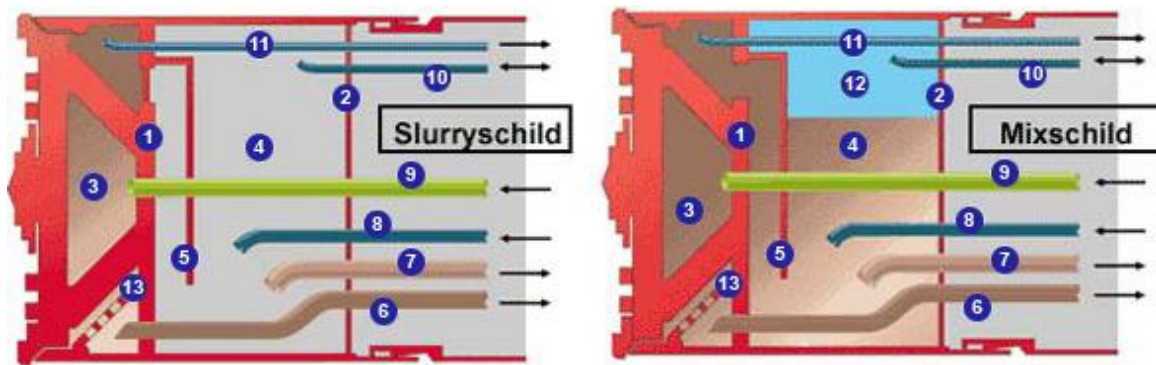
Σχήμα 2.31: Λειτουργίες του Earth Pressure Balance Machine (Marinos 2009)

Τα μηχανήματα κλειστού τύπου με ασπίδα εκτός από το μηχάνημα κλειστού τύπου εξισορρόπησης πίεσης με ασπίδα (Earth Pressure Balance Machine) είναι κατά τα εξής: το μηχάνημα κλειστού τύπου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield Tunnel Boring Machine) και το μηχάνημα κλειστού τύπου μικτού μετώπου με ασπίδα (Mix Shield Tunnel Boring Machine). Η διαφορά των δύο συγκεκριμένων μηχανημάτων συνοψίζεται στη χρήση πολφού μπεντονίτη για την επιβολή υποστηρικτικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία καθίσταται πιο αποτελεσματική η διασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και ο περιορισμός των καθιζήσεων στην επιφάνεια σε μεικτές, ετερογενείς γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες και σε μη συνεκτικά γεωυλικά. Η διαφορά του Slurry Shield Tunnel Boring Machine και του Mix Shield Tunnel Boring Machine εντοπίζεται στον αριθμό των θαλάμων μπεντονίτη. Το Slurry Shield Tunnel Boring Machine λειτουργεί με σύστημα μονού θαλάμου μπεντονίτη, ενώ το Mix Shield Tunnel Boring Machine με σύστημα διπλού θαλάμου μπεντονίτη. Το Mix Shield Tunnel Boring Machine παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.32.

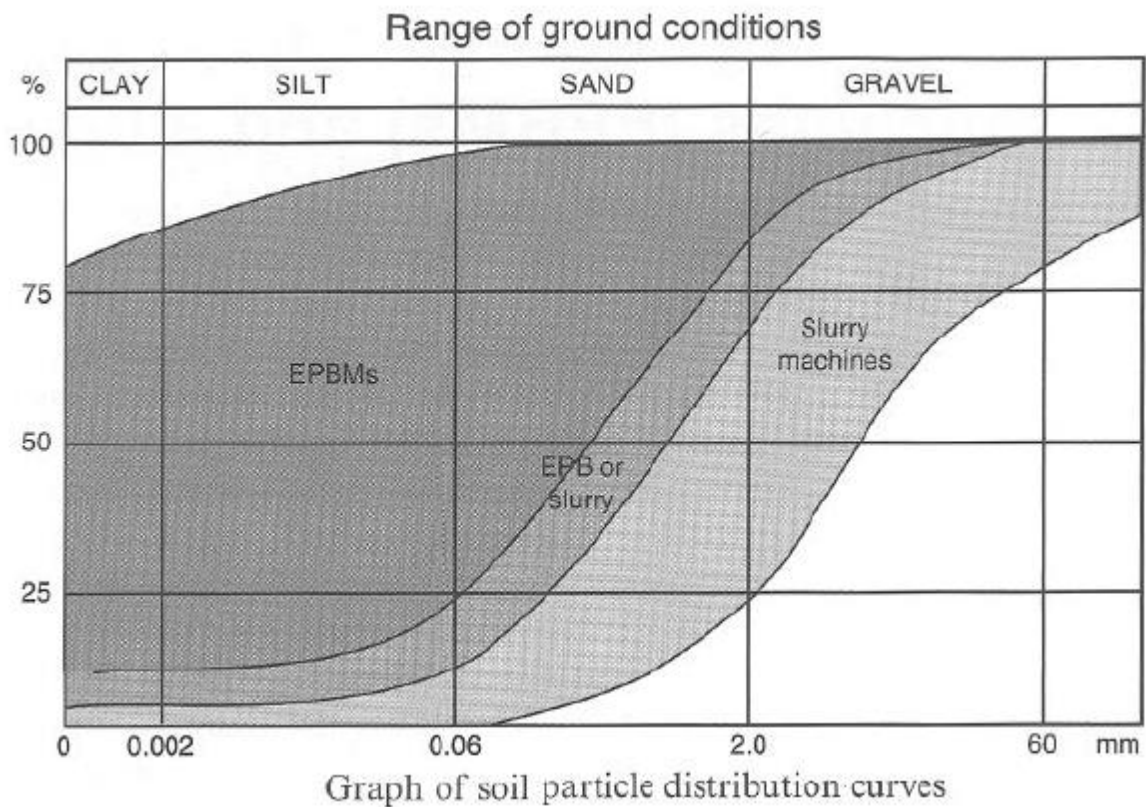




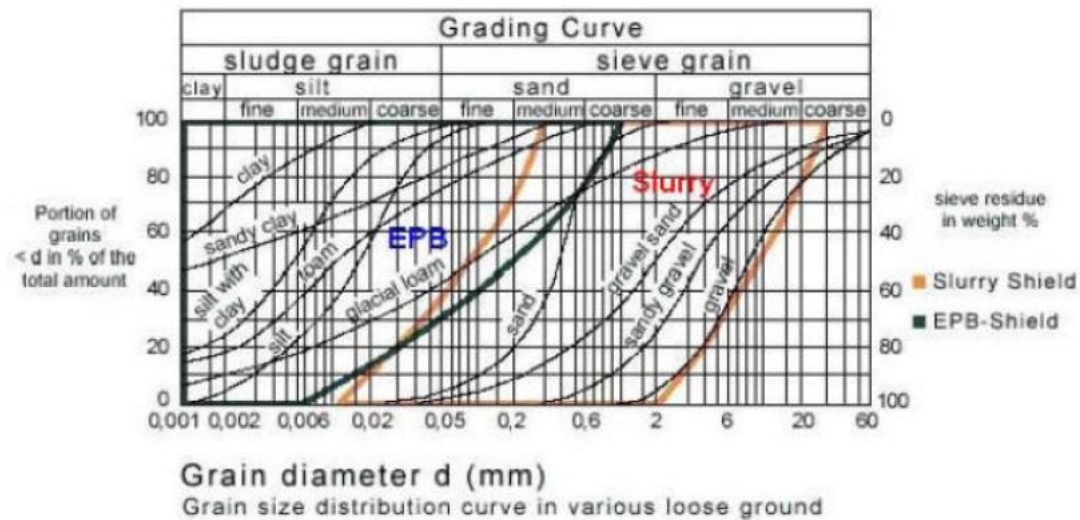
Σχήμα 2.32: Mix Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)



Σχήμα 2.33: Mix Shield Tunnel Boring Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)



Σχήμα 2.34: Περιοχές εφαρμογής Earth Pressure Balance Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Marinos 2009)



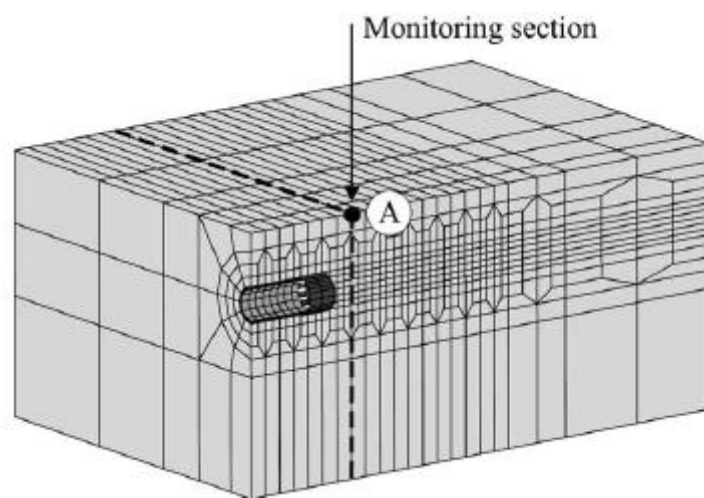
Σχήμα 2.35: Περιοχές εφαρμογής Earth Pressure Balance Machine & Slurry Shield Tunnel Boring Machine (Herrenknecht)

Οι περιοχές εφαρμογής του Earth Pressure Balance Machine & του Slurry Shield Tunnel Boring Machine με κριτήριο τον τύπο του γεωλυτικού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.34 και στο Σχήμα 2.35.

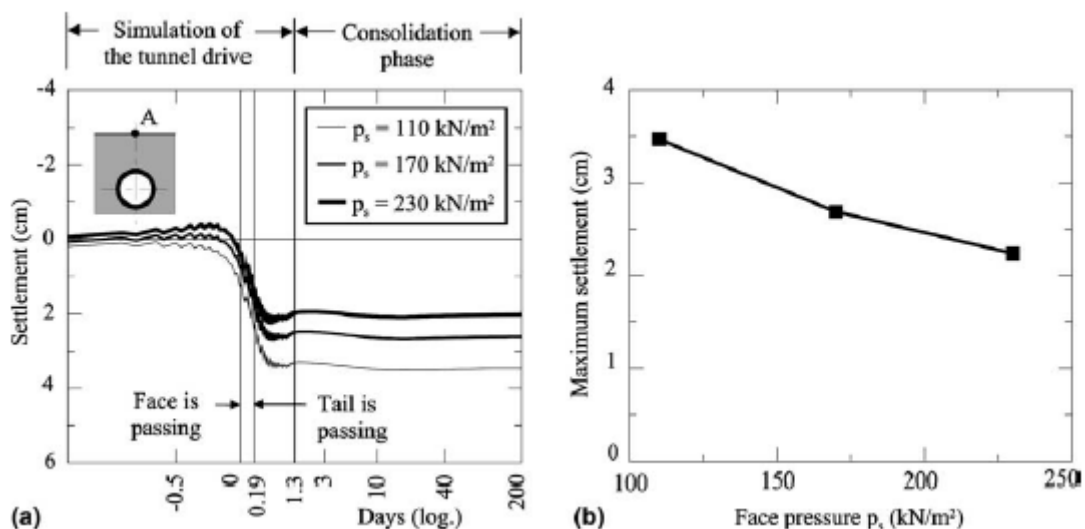
Οι μέθοδοι ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής που εφαρμόζονται στη μηχανική και τη συμβατική όρυξη σηράγγων παρουσιάζουν διαφορές ως προς την επίδραση τους στο μέτωπο εκσκαφής και στον πυρήνα προώθησης. Συγκεκριμένα, η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας είναι μέθοδος προστασίας του ανυποστήρικτου τμήματος της εκσκαφής και δεν διασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής γιατί δεν επηρεάζει την πρωτογενή αιτία της αστάθειας του μετώπου εκσκαφής που είναι η προοδευτική μείωση της πλευρικής τάσης  $\sigma_h$  κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας (Harazaki et al. 1998, Shin et al. 2008, Volkmann and Schubert 2007, Προυντζόπουλος 2012). Ωστόσο, τα μεταλλικά αγκύρια ή αγκύρια fiberglass (υαλονήματα) προκαλούν μηχανισμό ανακατανομής τάσεων και παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής και τον πυρήνα προώθησης ανάλογο με το μηχανισμό μεταβολής του εντατικού και παραμορφωσιακού πεδίου που προκαλεί η ολομέτωπη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Η ισοδυναμία μεταξύ της ολομέτωπης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και της επίδρασης των αγκυρίων μετώπου έχει αποδειχτεί και προσδιοριστεί στη βιβλιογραφία από τις εργασίες των Peila (1994), Kavvadas and Prountzopoulos (2009), Dias (2011) and Προυντζόπουλος (2012).

### 2.3. Επίδραση της Πίεσης Υποστήριξης στο Μέτωπο Εκσκαφής στο Φορτίο της Άμεσης Υποστήριξης

Οι Kasper and Meschke (2006) με την εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων διερεύνησαν την επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη σήραγγας με μηχανική όρυξη στο φορτίο της άμεσης υποστήριξης. Το προσομοίωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.36. Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Cam - Clay, για αβαθείς σήραγγες ( $H/D = 1.5$ ) και για τρεις τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που επιβάλλεται από Slurry Shield TBM.

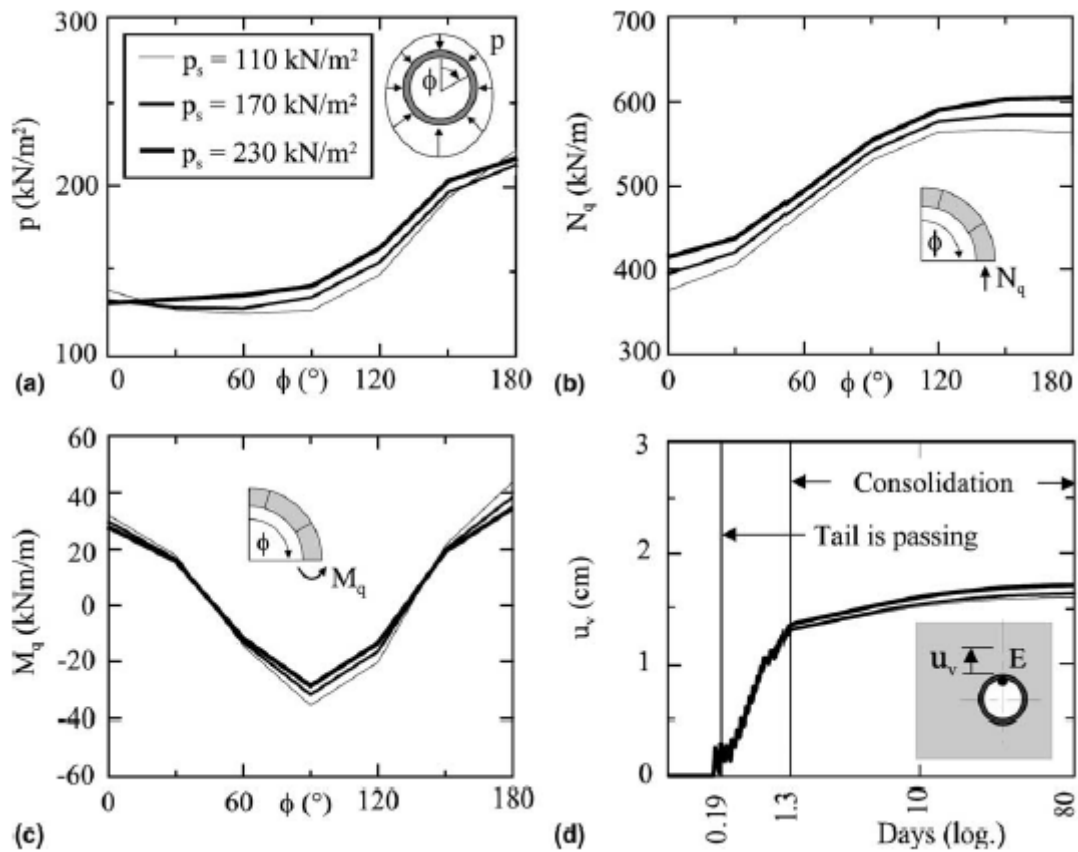


Σχήμα 2.36: Προσομοίωμα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (Kasper and Meschke 2006)



Σχήμα 2.37: (α) Καθιζήσεις στην επιφάνεια κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (β) Μέγιστες τιμές των καθιζήσεων στην επιφάνεια συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_s$  (Kasper and Meschke 2006)

Στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προς τις καθιζήσεις στην επιφάνεια. Η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις καθιζήσεις πίσω από το μέτωπο εκσκαφής που έχει ολοκληρωθεί η εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του γεωυλικού και μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής.



Σχήμα 2.38: (α) Φορτίο  $p$  στην άμεση υποστήριξη (β) Αξονική δύναμη  $N_q$  στην άμεση υποστήριξη (γ) Ροπή κάμψης  $M_q$  στην άμεση υποστήριξη (δ) Ανύψωση  $u_v$  στη στέψη της άμεσης υποστήριξης συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_s$  (Kasper and Meschke 2006)

Στο Σχήμα 2.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προς το φορτίο, την αξονική δύναμη, τη ροπή κάμψης στην άμεση υποστήριξη και την ανύψωση στη στέψη της άμεσης υποστήριξης. Η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί αύξηση στο φορτίο και την ανηγμένη δύναμη στη διατομή της άμεσης υποστήριξης. Η συγκεκριμένη μεταβολή οφείλεται στον περιορισμό της αποτόνωσης που συντελείται στον πυρήνα προώθησης και οδηγεί σε μείωση των μετακινήσεων μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως σε αύξηση του φορτίου. Ωστόσο, ως προς τη ροπή κάμψης και την ανύψωση στη στέψη η επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην άμεση υποστήριξη δεν είναι σημαντική: οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται είναι περιορισμένες.

### 3. Αριθμητικές Αναλύσεις

Για τη διερεύνηση της διαφοροποίησης των φορτίων της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας εξαιτίας της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις προτιμήθηκαν γιατί προσομοιώνουν με επάρκεια τις συνθήκες τριαξονικής εντατικής κατάστασης που επικρατούν κοντά στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και την προοδευτική μετάβαση στις συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης που επικρατούν μακριά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, προσομοιώνουν με επάρκεια την αποτόνωση, την παραμορφωσιακή απόκριση και την ανακατανομή τάσεων του γεωυλικού που πραγματοποιούνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και την αλληλεπίδραση των συγκεκριμένων φαινομένων. Επιπρόσθετα, συνεκτιμούν και ενσωματώνουν την επίδραση της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής (έκθλιψη) και του πυρήνα προώθησης (προσυγκλίσεις) της σήραγγας που καθορίζει τις συγκλίσεις (ακτινικές μετακινήσεις) και τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο πρόβλημα που διερευνήθηκε η εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων θεωρήθηκε επιβεβλημένη, ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Τα μέτρα υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας που διερευνήθηκαν είναι:

- ✓ η εφαρμογή ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής (μηχανική όρυξη σηράγγων με EPB)
- ✓ η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής (συμβατική όρυξη σηράγγων)

#### 3.1. Προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη διερεύνηση της διαφοροποίησης των φορτίων της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας εξαιτίας της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS v13 και Abaqus v6.10, ώστε να επιτευχθεί αξιόπιστη προσομοίωση και λεπτομερής μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος.

##### 3.1.1. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS

Με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS πραγματοποιήθηκε στο στάδιο του προ - σχεδιασμού (preprocessing) ο σχεδιασμός της γεωμετρίας και του καννάβου των προσομοιωμάτων και η διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων σε πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις.

### 3.1.2. Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus

Με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus εκτελέστηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Για την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία: δημιουργήθηκε το αρχείο δεδομένων (input file) το οποίο συγκροτήθηκε με συγκεκριμένη μεθοδολογία, με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Στο αρχείο δεδομένων (input file) πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των κόμβων (nodes), των πεπερασμένων στοιχείων εδάφους, κελύφους και αγκυρίων (solid elements, shell elements, truss elements), των ιδιοτήτων των γεωυλικών και των άλλων υλικών (material properties), του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου (initial conditions), των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions) και των στοιχείων για τον προσδιορισμό των ζητούμενων (output) και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα ζητούμενα (output) είναι τα εξής: οι μετακινήσεις των κόμβων (U), οι τάσεις (S), οι παραμορφώσεις (E), οι πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG), και οι πιέσεις (τα φορτία) (CPRESS) των πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν σε διαδοχικά στατικά βήματα (steps) τα οποία αντιπροσωπεύουν μία αυτοτελή περίοδο συγκεκριμένης απόκρισης.

### 3.2. Σχεδιασμός Προσομοιωμάτων

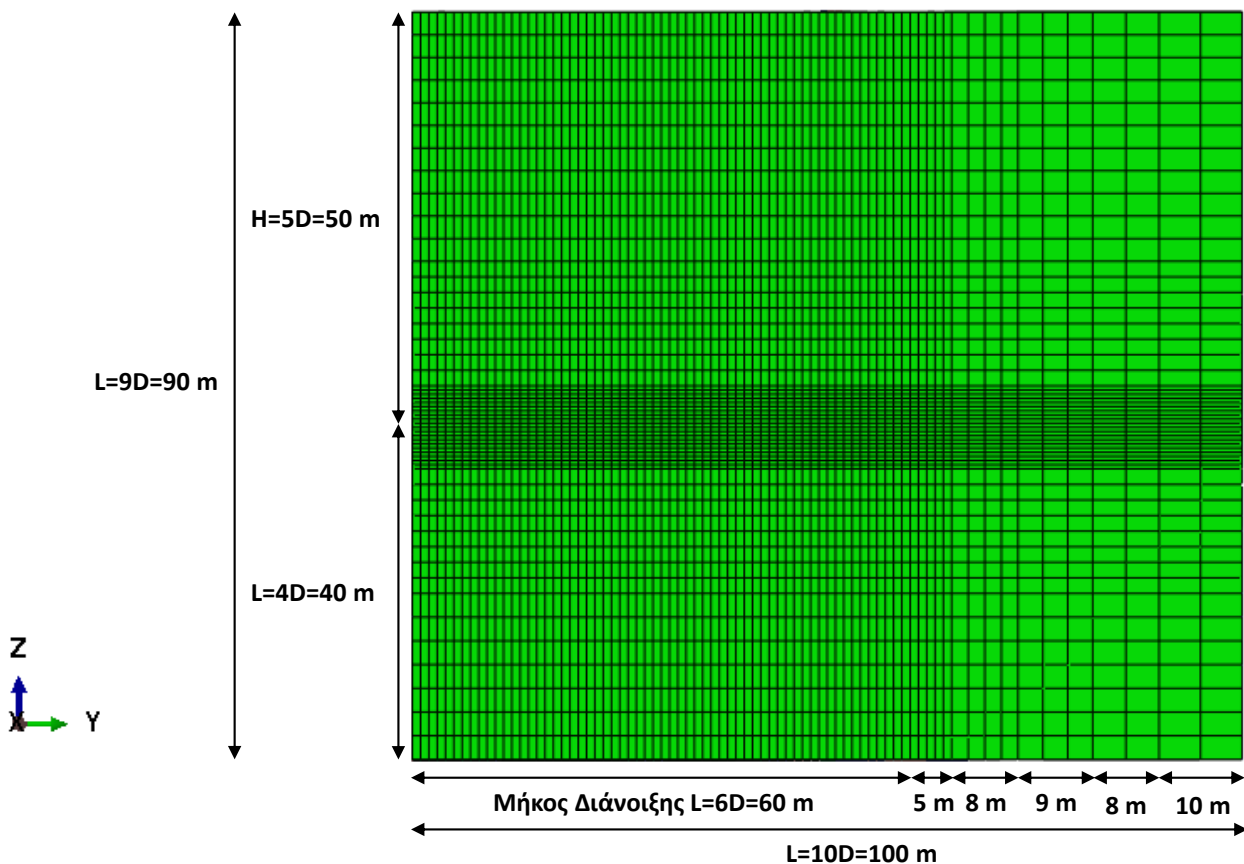
Για τη διερεύνηση του προβλήματος σχεδιάστηκαν δύο προσομοιώματα για κυκλική σήραγγα με διάμετρο  $D = 10$  m, για δύο ύψη υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m και  $H = 5D = 50$  m. Το προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m σχεδιάστηκε ολόκληρο, ενώ το προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m σχεδιάστηκε κατά το ήμισυ, λόγω των συνθηκών συμμετρίας που επικρατούν. Συγκεκριμένα, ως επίπεδο συμμετρίας θεωρήθηκε το κατακόρυφο επίπεδο YZ που διέρχεται από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, από τον άξονα Υ. Με τη συγκεκριμένη θεώρηση επιτυγχάνεται η μείωση του υπολογιστικού φόρτου για την ολοκλήρωση των αριθμητικών αναλύσεων. Ανεξάρτητα, από τη θεώρηση συμμετρίας, τα εύρη και οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων καθορίστηκαν με συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα σε επαρκή βαθμό τα εξής κριτήρια: η αξιοπιστία και η ορθότητα των αποτελεσμάτων και ο περιορισμός (η ελαχιστοποίηση) του υπολογιστικού φόρτου για την ολοκλήρωση των αριθμητικών αναλύσεων. Επομένως, με γνώμονα η εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου να μην κλονίζει την επιστημονική αρτιότητα των αποτελεσμάτων, τα εύρη και οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων προσδιορίστηκαν με εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων με κριτήριο ελέγχου και αξιολόγησης την κατανομή των τάσεων. Επιπρόσθετα, τα προσομοιώματα σχεδιάστηκαν με τα εξής κριτήρια: (i) το εύρος από τον άξονα της σήραγγας έως τα όρια του προσομοιώματος πρέπει να είναι επαρκές, ώστε τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να μην επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες, (ii) το μήκος της σήραγγας κατά μήκος του άξονα της σήραγγας πρέπει να είναι επαρκές, ώστε η περιοχή στην οποία εξάγονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να μην επηρεάζεται από τα όρια, (iii) η κατανομή των τάσεων μετά την πραγματοποίηση της διάνοιξης της σήραγγας πρέπει να είναι ομοιόμορφη ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η οποία εξαρτάται από την απόσταση του άξονα της σήραγγας από

το κατώτερο όριο, (iv) η απόσταση του άξονα της σήραγγας από τα πλευρικά όρια πρέπει να είναι επαρκής, ώστε η κατανομή των τάσεων στα πλευρικά όρια να είναι ομοιόμορφη.

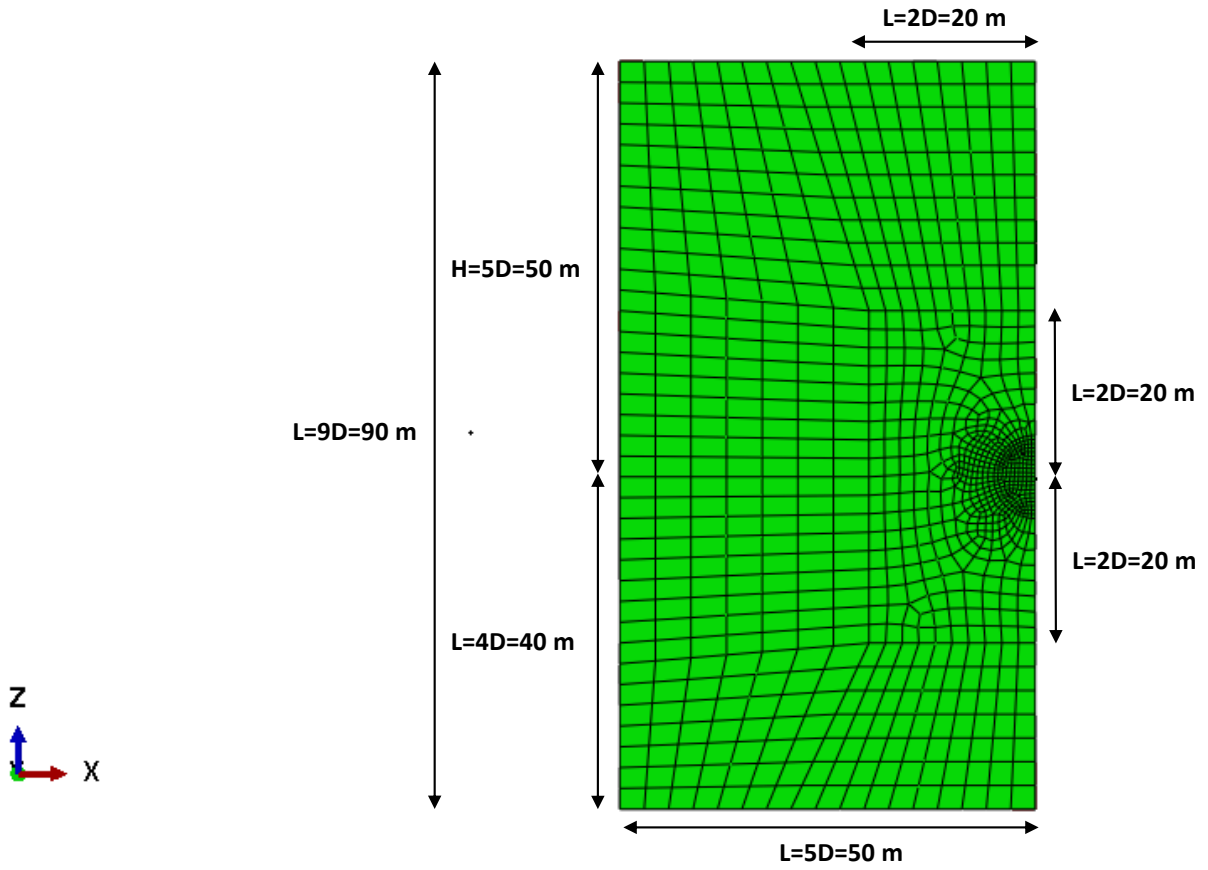
### 3.2.1. Γεωμετρία Προσομοιωμάτων

Το προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 (διαμήκης όψη) και στο Σχήμα 3.2 (εγκάρσια όψη). Η απόσταση του ανώτερου ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Z, είναι  $L = 5D = 50$  m. Η απόσταση του κατώτερου ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Z, είναι  $L = 4D = 40$  m. Η απόσταση του πλευρικού ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα X, είναι  $L = 5D = 50$  m. Η απόσταση κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Y, είναι  $L = 10D = 100$  m.

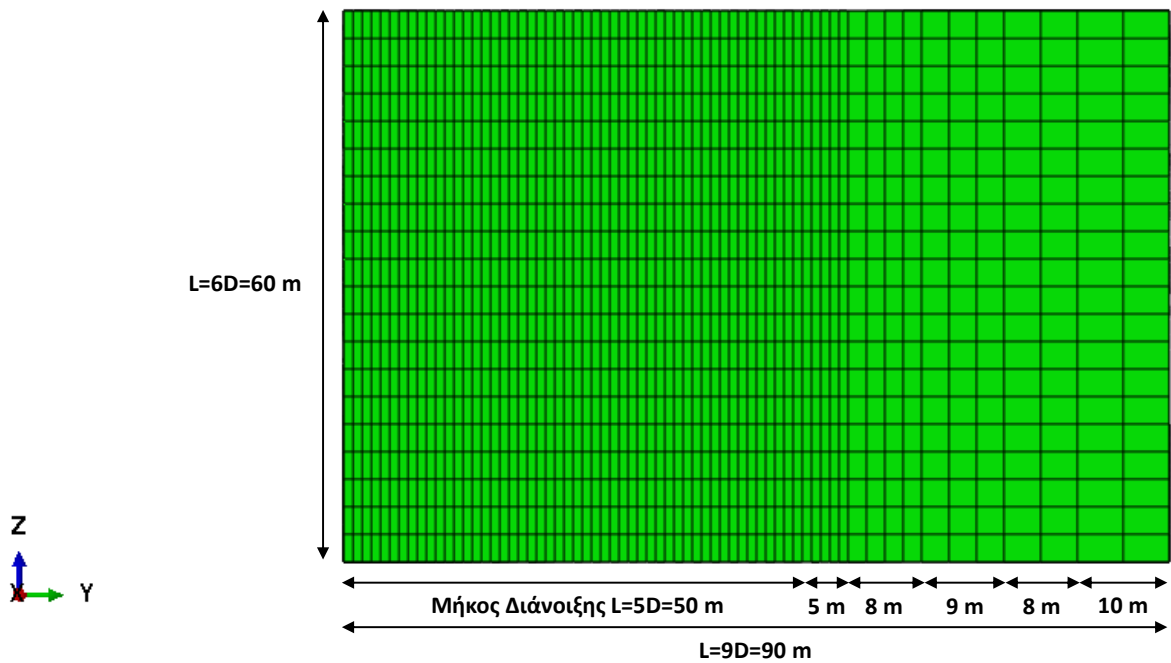
Το προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 (διαμήκης όψη) και στο Σχήμα 3.4 (εγκάρσια όψη). Η απόσταση του ανώτερου ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Z, είναι  $L = 2D = 20$  m. Η απόσταση του κατώτερου ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Z, είναι  $L = 4D = 40$  m. Η απόσταση του πλευρικού ορίου του προσομοιώματος από το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα X, είναι  $L = 5D = 50$  m. Η απόσταση κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα Y, είναι  $L = 9D = 90$  m.



Σχήμα 3.1: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

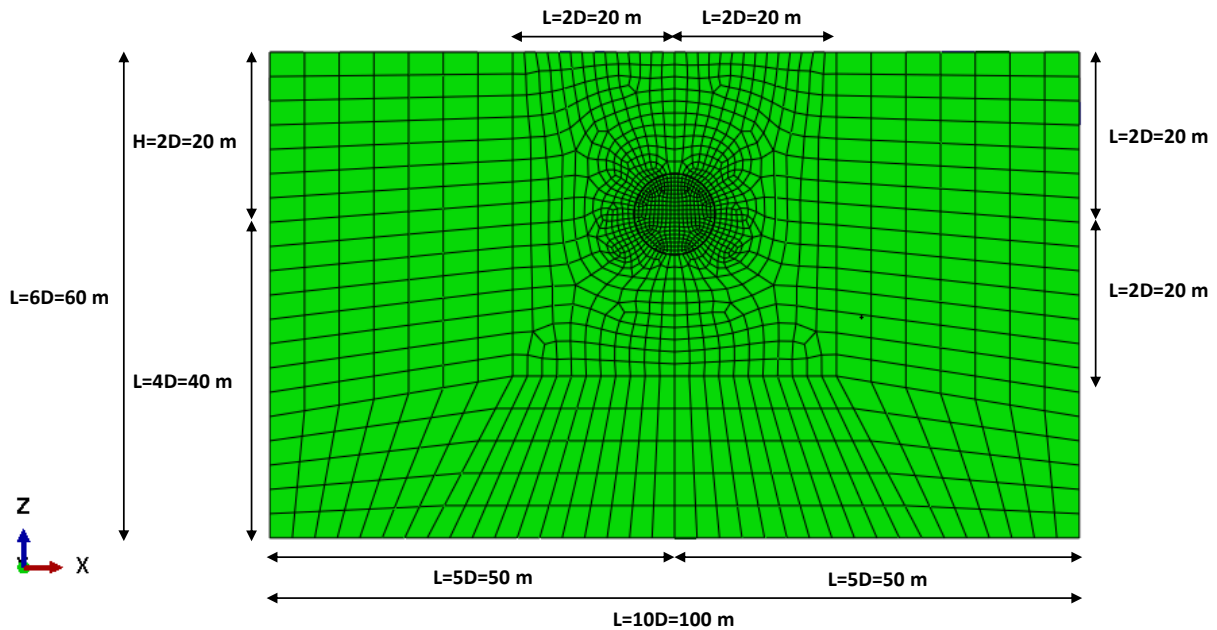


Σχήμα 3.2: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50\text{ m}$



Σχήμα 3.3: Διαμήκης όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20\text{ m}$





Σχήμα 3.4: Εγκάρσια όψη του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

### 3.2.2. Διαμόρφωση & Διακριτοποίηση Καννάβων Προσομοιωμάτων

Οι κάνναβοι των προσομοιωμάτων διαμορφώθηκαν με οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (C3D8R) για την προσομοίωση του γεωυλικού και με τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (S4R5) για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης και με πεπερασμένα στοιχεία δοκού (T3D2) για την προσομοίωση των αγκυρίων fiberglass του μετώπου εκσκαφής. Οι συνοριακές συνθήκες των προσομοιωμάτων που πρέπει να ικανοποιούνται είναι οι εξής: (i) η παρεμπόδιση (δέσμευση) των οριζόντιων μετακινήσεων στα πλευρικά όρια των προσομοιωμάτων με την εφαρμογή κυλίσεων, (ii) η παρεμπόδιση (δέσμευση) των οριζόντιων και των κατακόρυφων μετακινήσεων στο κατώτερο όριο των προσομοιωμάτων με την εφαρμογή αρθρώσεων, (iii) η ελεύθερη απόκριση του ανώτερου ορίου ως προς τις μετακινήσεις (ελεύθερο πεδίο). Οι κάνναβοι των προσομοιωμάτων διαμορφώθηκαν με κριτήριο την ενίσχυση της πυκνότητας στις περιοχές εξαγωγής των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πύκνωση των καννάβων στις περιοχές που παρουσιάζεται ελαστοπλαστική απόκριση του γεωυλικού, ανακατανομές τάσεων, μετακινήσεις και πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ στις περιοχές που παρουσιάζεται ελαστική απόκριση πραγματοποιήθηκε αραιώση των καννάβων, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος για την ολοκλήρωση των αριθμητικών αναλύσεων.

Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος (το μήκος των πεπερασμένων στοιχείων) με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα  $Y$ , είναι η εξής:

$$Y = 0 \text{ m} - 60 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ m}$$

$$Y = 60 \text{ m} - 65 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ m}$$

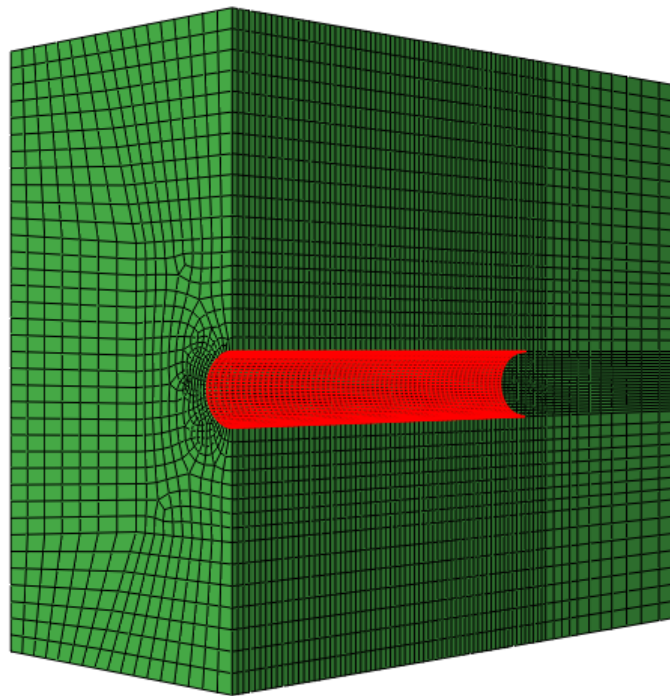
$$Y = 65 \text{ m} - 73 \text{ m} \rightarrow 2 \text{ m}$$

$$Y = 73 \text{ m} - 82 \text{ m} \rightarrow 3 \text{ m}$$

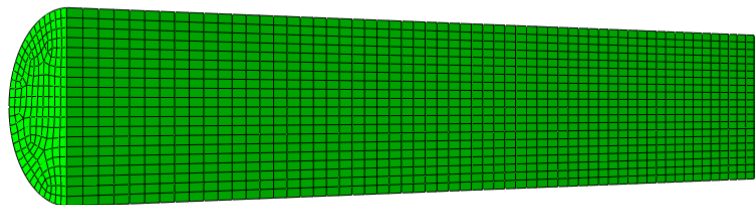
$$Y = 82 \text{ m} - 90 \text{ m} \rightarrow 4 \text{ m}$$

$$Y = 90 \text{ m} - 100 \text{ m} \rightarrow 5 \text{ m}$$

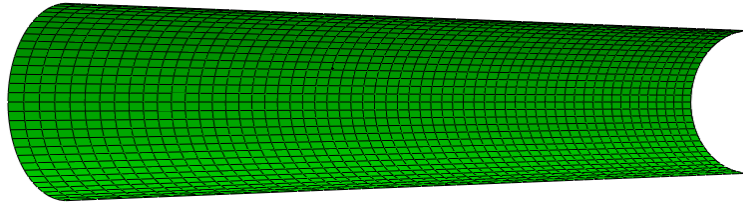
Επιπρόσθετα, σε ορθογωνική περιοχή, με μήκος  $L = 2D = 20 \text{ m}$ , περιμετρικά της σήραγγας πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου, ώστε να επιτευχθεί η αύξηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις περιοχές εξαγωγής αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και επομένως η αύξηση της ορθότητας και της αξιοπιστίας των. Το προσομοίωμα αποτελείται από 77385 κόμβους (nodes), 71668 πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) και 1920 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements).



Σχήμα 3.5: Προσομοίωμα για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$



Σχήμα 3.6: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8R) της εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$

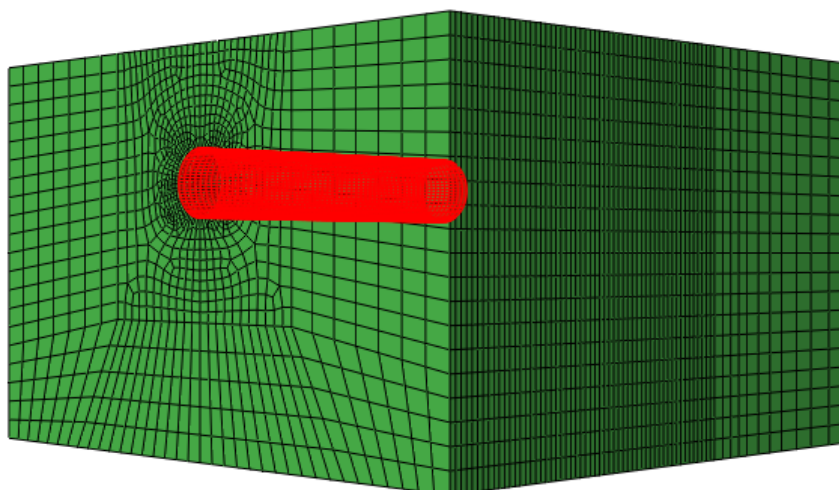


Σχήμα 3.7: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R5) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

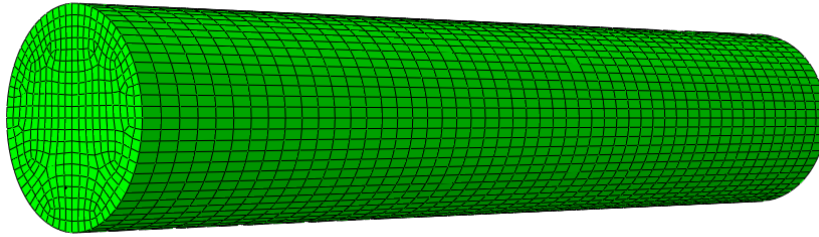
Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος (το μήκος των πεπερασμένων στοιχείων) με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας, κατά τον άξονα  $Y$ , είναι η εξής:

- $Y = 0 \text{ m} - 50 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ m}$
- $Y = 50 \text{ m} - 55 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ m}$
- $Y = 55 \text{ m} - 63 \text{ m} \rightarrow 2 \text{ m}$
- $Y = 63 \text{ m} - 72 \text{ m} \rightarrow 3 \text{ m}$
- $Y = 72 \text{ m} - 80 \text{ m} \rightarrow 4 \text{ m}$
- $Y = 80 \text{ m} - 90 \text{ m} \rightarrow 5 \text{ m}$

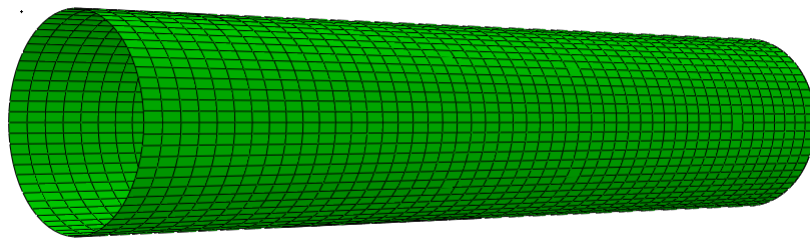
Επιπρόσθετα, σε ορθογωνική περιοχή, με μήκος  $L = 2D = 20$  m, περιμετρικά της σήραγγας πραγματοποιήθηκε πύκνωση του καννάβου, ώστε να επιτευχθεί η αύξηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις περιοχές εξαγωγής αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και επομένως η αύξηση της ορθότητας και της αξιοπιστίας των. Το προσομοίωμα αποτελείται από 120428 κόμβους (nodes), 110616 πεπερασμένα στοιχεία εδάφους (solid elements) και 3840 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements).



Σχήμα 3.8: Προσομοίωμα για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Σχήμα 3.9: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (οκτακομβικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία εδάφους C3D8R) της εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Σχήμα 3.10: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R5) της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

### 3.3. Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων

Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν με ολομέτωπη διάνοιξη σε ομογενές, ισότροπο, ελαστικό - απολύτως πλαστικό γεωυλικό. Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε με βήμα 1 m.

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, προκειμένου να εξεταστεί η συσχέτιση της ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής (μηχανική όρυξη σηράγγων με EPB), με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής (συμβατική όρυξη σηράγγων) εκτελέστηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής.

Η μηχανική όρυξη σηράγγων με EPB που συνεπάγεται εφαρμογή ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζεται σε αβαθείς σήραγγες  $H \leq 2D = 20$  m. Ο συγκεκριμένος περιορισμός οφείλεται στο ότι το εύρος της μέγιστης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που μπορεί να εφαρμοστεί από το EPB είναι 3 – 4 bar (300 – 400 kPa). Τα μέτρα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής που χρησιμοποιούνται σε σήραγγες με ύψη υπερκείμενων  $H > 2D = 20$  m είναι αγκύρια ή/και δοκοί προπορείας. Επομένως, η ολομέτωπη κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m θεωρήθηκε ότι προσομοιώνει την πίεση υποστήριξης που προκαλείται στο μέτωπο εκσκαφής από τα αγκύρια fiberglass. Ωστόσο, για να επαληθευθεί αν η επίδραση των αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής είναι ίδια ή ανάλογη με την αντίστοιχη που προκαλεί η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης, εκτελέστηκαν οι

προαναφερθείσες τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής.

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε σε 60 στατικά βήματα με διεύθυνση από  $Y = 0$  m έως  $Y = 60$  m. Συγκεκριμένα:

✓ **βήμα 1<sup>ο</sup>**

Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου.

Στις τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προστίθεται ένα επιπρόσθετο βήμα στο οποίο ενεργοποίηση των αγκυρίων μετά τον υπολογισμό του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου. Η απευθείας ενεργοποίηση των αγκυρίων γίνεται για να προσομοιωθεί το μήκος παράθεσης των αγκυρίων που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της διάνοιξης.

✓ **βήμα 2<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή του πρώτου και δεύτερου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του πρώτου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

Εφαρμογή ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, για να προσομοιωθεί η ολομέτρωτη διάνοιξη με εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (μηχανική όρυξη σήραγγας με EPB).

Στις τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής στο συγκεκριμένο βήμα γίνεται αφαίρεση του πρώτου και δεύτερου μέτρου των αγκυρίων.

✓ **βήμα 3<sup>ο</sup> - βήμα 60<sup>ο</sup>**

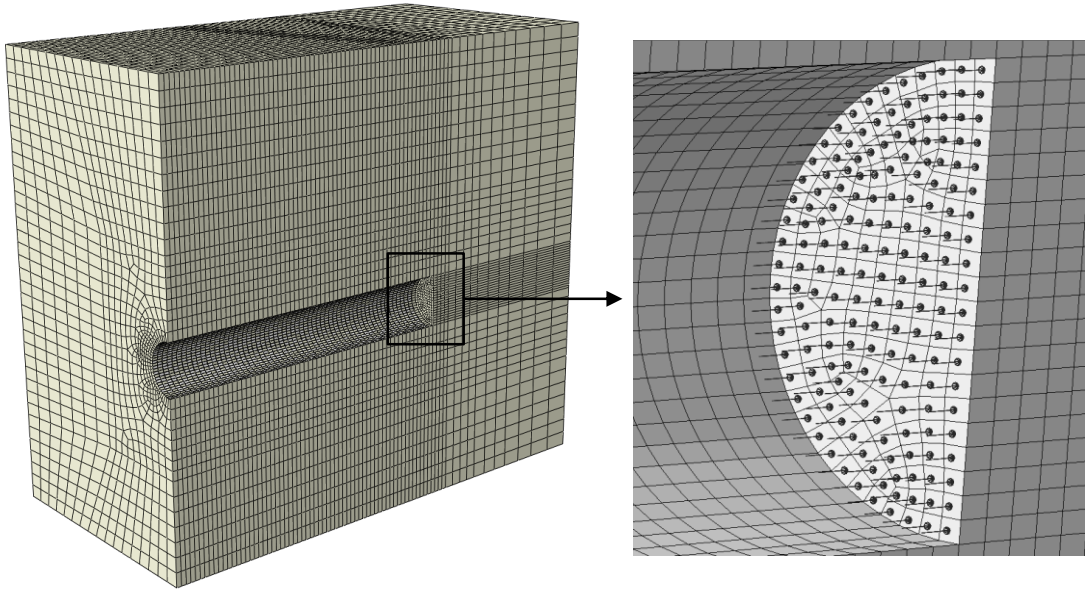
Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

Εφαρμογή ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, για να προσομοιωθεί η ολομέτρωτη διάνοιξη με εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (μηχανική όρυξη σήραγγας με EPB).

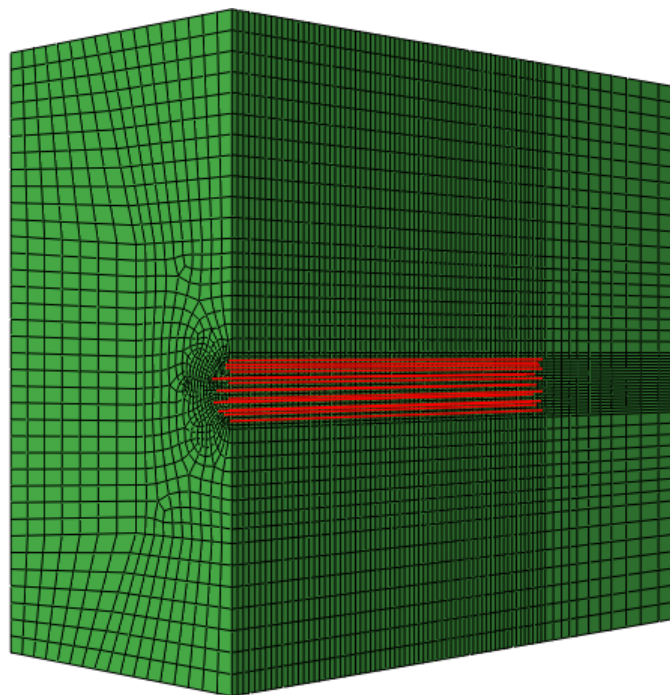
Στις τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής στο συγκεκριμένο βήμα γίνεται αφαίρεση του επόμενου μέτρου των αγκυρίων.

Το συνολικό μήκος των αγκυρίων είναι 65 m. Επομένως, στο τελευταίο βήμα το μήκος των αγκυρίων στον πυρήνα προώθησης είναι  $5$  m  $>$   $4$  m που θεωρείται επαρκές μήκος παράθεσης

(Προυντζόπουλος, 2012). Συγκεκριμένα, τα αγκύρια με μήκος 12 m, τοποθετούνται ανά 8 m: το μήκος παράθεσης είναι 4 m.



Σχήμα 3.11: Ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m (Τα βέλη απεικονίζουν την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας)



Σχήμα 3.12: Προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (πεπερασμένα στοιχεία δοκού T3D2) των αγκυρίων fiberglass που εφαρμόζονται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε σε 60 στατικά βήματα με διεύθυνση από  $Y = 0$  m έως  $Y = 50$  m. Συγκεκριμένα:

✓ **βήμα 1<sup>ο</sup>**

Υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου.

✓ **βήμα 2<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή του πρώτου και δεύτερου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του πρώτου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

Εφαρμογή ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, για να προσομοιωθεί η ολομέτρωτη διάνοιξη με εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (μηχανική όρυξη σήραγγας με EPB).

✓ **βήμα 3<sup>ο</sup> - βήμα 50<sup>ο</sup>**

Εκσκαφή του επόμενου μέτρου της σήραγγας, τοποθέτηση και ενεργοποίηση του προηγούμενου μέτρου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης.

Εφαρμογή ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, για να προσομοιωθεί η ολομέτρωτη διάνοιξη με εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (μηχανική όρυξη σήραγγας με EPB).

### 3.4. Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων

#### 3.4.1. Γεωμετρικές & Κατασκευαστικές Παράμετροι Σήραγγας

- ✓ Διάμετρος Σήραγγας (**D**)

Διερευνήθηκε μία τιμή της διαμέτρου: **D = 10 m**.

- ✓ Ύψος Υπερκείμενων (**H**)

Το ύψος υπερκείμενων είναι η απόσταση του διαμήκη άξονα της σήραγγας από το ελεύθερο πεδίο του γεωυλικού. Διερευνήθηκαν δύο τιμές του ύψους υπερκείμενων: **H = 2D = 20 m** (αβαθής σήραγγα) και **H = 5D = 50 m** (όριο διάκρισης αβαθούς και βαθιάς σήραγγας).

#### 3.4.2. Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωυλικού

Το γεωυλικό θεωρήθηκε ομογενές, ισότροπο, ελαστικό απολύτως - πλαστικό που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb. Η αντοχή του γεωυλικού σε ανεμπόδιση θλίψη με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb είναι:

$$\sigma_c = 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\varphi}$$

όπου:

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

- ✓ Ειδικό Βάρος (**γ**)

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20 \text{ m}$  το ειδικό βάρος του γεωυλικού θεωρήθηκε  $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ . Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50 \text{ m}$  το ειδικό βάρος του γεωυλικού θεωρήθηκε  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ .

- ✓ Παράμετροι Διατμητικής Αντοχής: Γωνία Τριβής (**φ**), Συνοχή (**c**)

Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του γεωυλικού είναι η γωνία τριβής  $\varphi$  και η συνοχή  $c$ .

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20 \text{ m}$ , διερευνήθηκαν τέσσερις τιμές της γωνίας τριβής:  $\varphi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ .

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50 \text{ m}$ , διερευνήθηκαν τρεις τιμές της γωνίας τριβής:  $\varphi = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ .



✓ Γωνία Διαστολικότητας ( $\delta$ )

Η γωνία διαστολικότητας του γεωυλικού θεωρήθηκε  $\delta = \varphi/6$ .

✓ Μέτρο Παραμορφώσιμότητας ( $E$ )

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του γεωυλικού θεωρήθηκε  $E = 500 \cdot S_u$ , όπου  $S_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του γεωυλικού.

$$S_u = \frac{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

όπου:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma_3 \cdot N_\varphi + 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\varphi} - \sigma_1}{1 + A \cdot (N_\varphi - 1)}$$

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

$\sigma_1$ : κατακόρυφη γεωστατική τάση σε στοιχείο του γεωυλικού στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

$\sigma_3$ : οριζόντια γεωστατική τάση σε στοιχείο του γεωυλικού στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

$\Delta\sigma_1$ : επιπρόσθετη κατακόρυφη τάση για να πραγματοποιηθεί αστοχία σε στοιχείο του γεωυλικού στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας για αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης

A: συντελεστής του τύπου του Skempton για αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης

Η τιμή του συντελεστή A του τύπου του Skempton θεωρήθηκε 1/3.

✓ Λόγος Poisson ( $\nu$ )

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

✓ Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων ( $K_0$ )

Ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων του γεωυλικού είναι ο λόγος των οριζόντιων τάσεων προς τις κατακόρυφες τάσεις και καθορίζει το γεωστατικό εντατικό πεδίο και επηρεάζει τις διεκτροπικές τάσεις. Διερευνήθηκε μία τιμή του συντελεστή οριζόντιων τάσεων:  $K_0 = 0.5$ .

Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν με σταθερές τις τιμές της γωνίας τριβής  $\varphi$  και του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  και μεταβλητή την τιμή της συνοχής  $c$  για τις δύο τιμές του ύψους υπερκείμενων  $H$ .

### 3.4.3. Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης

- ✓ Πάχος ( $d_{sh}$ )

Το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης θεωρήθηκε  $d_{sh} = 0.2 \text{ m}$ .

- ✓ Ειδικό Βάρος ( $\gamma_{sh}$ )

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

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

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

- ✓ Λόγος Poisson ( $\nu_{sh}$ )

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

### 3.4.4. Παράμετροι Αγκυρίων Fiberglass

- ✓ Πλήθος ( $n_{nails}$ )

Το πλήθος των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $n_{nails} = 16$ .

- ✓ Διάμετρος ( $d_{nails}$ )

Η διάμετρος των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $d_{nails} = 0.02 \text{ m}$ .

- ✓ Διατομή ( $A_{nails}$ )

Η διατομή των αγκυρίων fiberglass προέκυψε  $A_{nails} = \pi \cdot d_{nails}^2 / 4 = 0.000314 \text{ m}^2$ .

- ✓ Ειδικό Βάρος ( $\gamma_{nails}$ )

Το ειδικό βάρος των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $\gamma_{nails} = 18 \text{ kN/m}^3$ .

- ✓ Μέτρο Παραμορφώσιμότητας ( $E_{nails}$ )

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $E_{nails} = 80 \text{ MPa}$ .

✓ **Λόγος Poisson ( $\nu_{nails}$ )**

Ο λόγος του Poisson των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $\nu_{nails} = 0.2$ .

✓ **Τάση Διαρροής ( $\tau_{ult,nails}$ )**

Η τάση διαρροής των αγκυρίων fiberglass θεωρήθηκε  $\tau_{ult,nails} = 960000 \text{ kPa}$ .

✓ **Φέρουσα Ικανότητα ( $T_{ult,nails}$ )**

Η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων fiberglass προέκυψε  $T_{ult,nails} = A_{nails} \cdot \tau_{ult,nails} = 300 \text{ kN}$ .

✓ **Πυκνότητα ( $\rho_{nails}$ )**

Η πυκνότητα του καννάβου των αγκυρίων fiberglass προέκυψε  $\rho_{nails} = 0.40 \text{ αγκύρια/m}^2$ .

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

Πίνακας 3.1 Παράμετροι Αριθμητικών Αναλύσεων

	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές	Μονάδες
Γεωμετρικές Κατασκευαστικές Παράμετροι Σήραγγας	Διάμετρος Σήραγγας	D	10	m
	Ύψος Υπερκεείμενων	H	20, 50	m
Γεωτεχνικές Παράμετροι Γεωυλικού	Ειδικό Βάρος	$\gamma$	21, 25	kN/m <sup>3</sup>
	Συνοχή	c	18 - 240	kPa
	Γωνία Τριβής	$\phi$	20, 25, 30, 35	( <sup>ο</sup> )
	Γωνία Διαστολικότητας	$\psi$	$\phi/6$	( <sup>ο</sup> )
	Μέτρο	E	69 - 320	MPa
	Παραμορφωσιμότητας	$\nu$	0.3	-
	Λόγος του Poisson	$\nu$	0.3	-
Παράμετροι Άμεσης Υποστήριξης	Συντελεστής Οριζόντιων Τάσεων	$K_o$	0.5	-
	Πάχος	$d_{sh}$	0.2	m
	Ειδικό Βάρος	$\gamma_{sh}$	25	kN/m <sup>3</sup>
	Μέτρο	$E_{sh}$	20	GPa
Κανονικοποιημένη Πίεση Υποστήριξης Μετώπου Εκσκαφής	Παραμορφωσιμότητας	$\nu_{sh}$	0.2	-
	Λόγος του Poisson	$\rho_{fs}/\sigma_{ho}$	0.10	-
			0.20	-
			0.40	-
			0.50	-
			0.10	-
H=2D=20 m		0.20	-	
H=5D=50 m		0.20	-	

### 3.4.5. Προσδιορισμός Βασικών Συμβόλων Παραμετρικών Αναλύσεων

Τα βασικά σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις είναι τα εξής:

$p_{fs}$ : ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

$p_{us}$ : τελικό φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (ο δείκτης  $m$  προσδιορίζει το μέσο όρο στη διατομή της εκσκαφής της σήραγγας)

$p_s$ : τελικό φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (ο δείκτης  $m$  προσδιορίζει το μέσο όρο στη διατομή της εκσκαφής της σήραγγας)

$\sigma_{vo} = \gamma \cdot H$ : κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

$\sigma_{ho} = K_o \cdot \gamma \cdot H$ : οριζόντια γεωστατική τάση στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

$\sigma_{o,m} = (1 + K_o) \cdot \gamma \cdot H/2$ : μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο του διαμήκη άξονα της σήραγγας

$S$ : η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

$U_h$ : έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής: οριζόντια μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής, λόγω της αποτόνωσης των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων που προκαλείται από τη διάνοιξη της σήραγγας (Προυντζόπουλος 2012)

$\Omega_f = (U_h \cdot E)/(D \cdot \sigma_{o,m})$ : κανονικοποιημένη έκθλιψη (Προυντζόπουλος 2012)

Η έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής υπολογίστηκε με τρεις τρόπους:

1. ως η οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,center}$ )
2. ως η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,diameter}$ )

Συγκεκριμένα, για τους διαδοχικούς κόμβους από τους οποίους αποτελείται η κατακόρυφη διάμετρος του μετώπου εκσκαφής υπολογίστηκε το εμβαδό που προκύπτει από το τραπέζιο που δημιουργούν οι οριζόντιες μετακινήσεις των διαδοχικών κόμβων και η κατακόρυφη απόσταση των διαδοχικών κόμβων. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα των εμβαδών ( $E_{extrusion}$ ) το οποίο διαιρέθηκε με τη διάμετρο ( $D$ ) του μετώπου εκσκαφής και προσδιορίστηκε η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση.

$$U_{h,diameter} = \frac{E_{extrusion}}{D}$$

3. ως η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής ( $U_{h,area}$ )

Συγκεκριμένα, για τα στοιχεία εδάφους από τα οποία αποτελείται το μέτωπο εκσκαφής υπολογίστηκε η μέση οριζόντια μετακίνηση, το εμβαδό και ο όγκος που προκύπτει ως ο πολλαπλασιασμός της μέσης οριζόντιας μετακίνησης και του εμβαδού. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα των όγκων ( $V_{extrusion}$ ) το οποίο διαιρέθηκε με το εμβαδό ( $E$ ) του μετώπου εκσκαφής και προσδιορίστηκε η μέση κανονικοποιημένη οριζόντια μετακίνηση.

$$U_{h,area} = \frac{V_{extrusion}}{E}$$

Οι τρεις μορφές της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής υπολογίστηκαν όπως παρουσιάστηκαν και προτάθηκαν στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012).

$\Lambda_F = (5.25 \cdot c \cdot N_\varphi^a) / (\gamma \cdot H^{1-b} \cdot D^b)$ : συντελεστής ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής (Προυντζόπουλος 2012)

όπου:

$$a = 0.16 \cdot \frac{H}{D} + 0.59$$

$$b = \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.37}$$

Ο συντελεστής ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  υπολογίστηκε όπως προτάθηκε στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012).

Το όριο που διακρίνει το μέτωπο εκσκαφής ευσταθές και ασταθές αντίστοιχα είναι η τιμή του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F = 1$ . Συγκεκριμένα, για  $\Lambda_F > 1$  οι τιμές της κανονικοποιημένης έκθλιψης  $\Omega_f$  που προκύπτουν αντιστοιχούν σε ευσταθές μέτωπο εκσκαφής, ενώ για  $\Lambda_F < 1$  οι τιμές της κανονικοποιημένης έκθλιψης  $\Omega_f$  που προκύπτουν αντιστοιχούν σε ασταθές μέτωπο εκσκαφής. Η προαναφερθείσα μεθοδολογία προτάθηκε στη διδακτορική διατριβή του Προυντζόπουλου (2012) για σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H \leq 5D$ .

### 3.5. Έλεγχος Αξιοπιστίας Προσομοιωμάτων

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε στο 1<sup>ο</sup> βήμα (υπολογισμός του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου) των αριθμητικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα ελέγχθηκε η ορθότητα της κατανομής της κατακόρυφης και των γεωστατικών τάσεων και της κατανομής της ολικής μετακίνησης. Ειδικότερα,  $S11 = S_{xx}$  και  $S22 = S_{yy}$  είναι οι οριζόντιες γεωστατικές τάσεις,  $S33 = S_{zz}$  είναι η κατακόρυφη γεωστατική τάση και  $U$  είναι η ολική μετακίνηση.

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m το εύρος των τιμών των γεωστατικών τάσεων με βάση την αναλυτική μεθοδολογία είναι:

$$\sigma_{vo} = 0 \text{ kPa}$$

κατακόρυφη γεωστατική τάση στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος

$$\sigma_{vo} = \gamma \cdot (5D + 4D) = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot (50 \text{ m} + 40 \text{ m}) = 2250 \text{ kPa}$$

κατακόρυφη γεωστατική τάση στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος

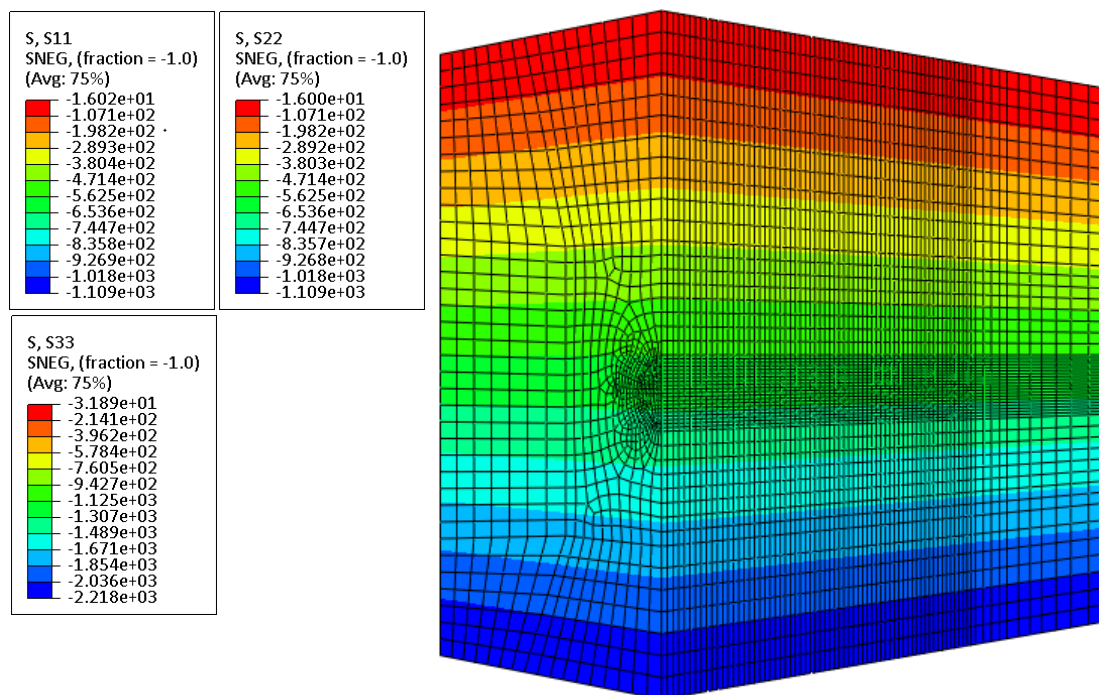
$$\sigma_{ho} = 0 \text{ kPa}$$

οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος

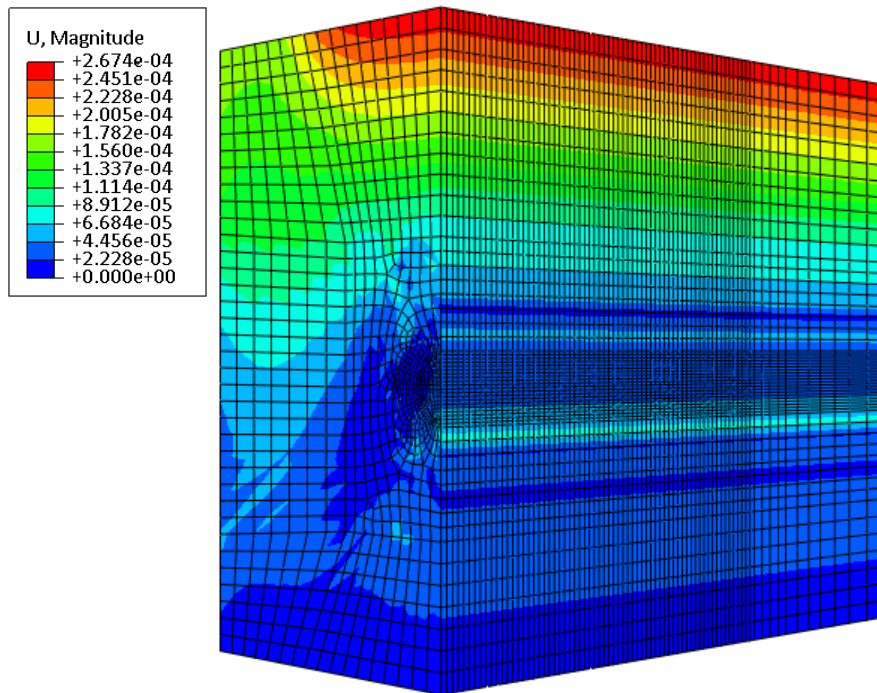
$$\sigma_{ho} = K_o \cdot \gamma \cdot (5D + 4D) = 0.5 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot (50 \text{ m} + 40 \text{ m}) = 1125 \text{ kPa}$$

οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος

Το εύρος των τιμών των γεωστατικών τάσεων που προκύπτουν από το προσομοίωμα θεωρήθηκαν αποδεκτές.



Εικόνα 3.1 Κατανομή της κατακόρυφης και των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



Εικόνα 3.2 Κατανομή της ολικής μετακίνησης του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Στο προσομοίωμα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m το εύρος των τιμών των γεωστατικών τάσεων με βάση την αναλυτική μεθοδολογία είναι:

$$\sigma_{vo} = 0 \text{ kPa}$$

κατακόρυφη γεωστατική τάση στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος

$$\sigma_{vo} = \gamma \cdot (2D + 4D) = 21 \text{ kN/m}^3 \cdot (20 \text{ m} + 40 \text{ m}) = 1260 \text{ kPa}$$

κατακόρυφη γεωστατική τάση στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος

$$\sigma_{ho} = 0 \text{ kPa}$$

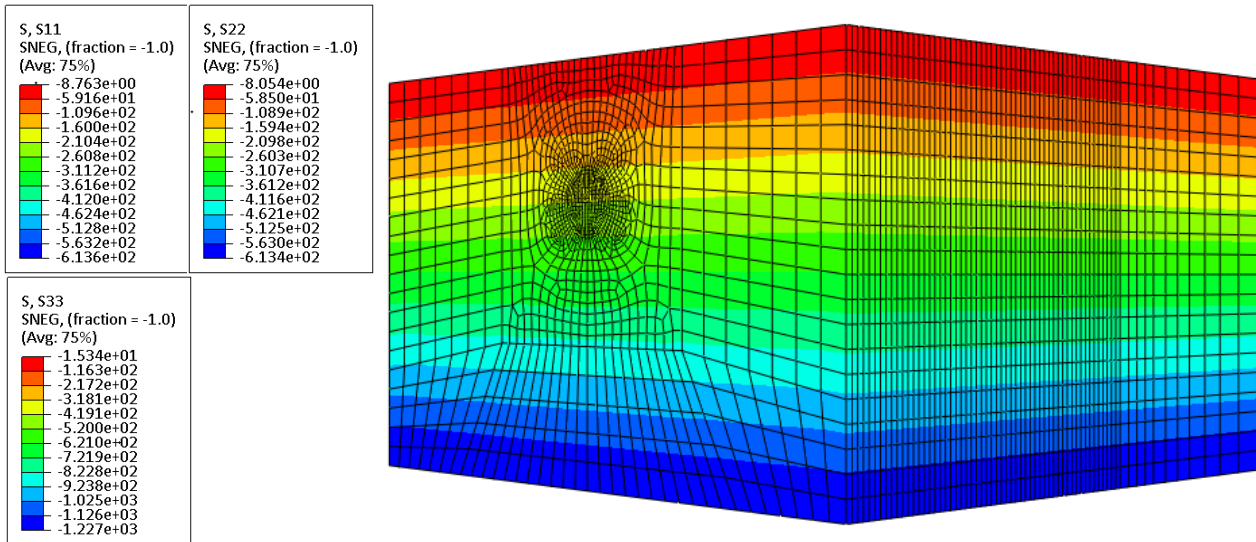
οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στο ανώτερο όριο του προσομοιώματος

$$\sigma_{ho} = K_o \cdot \gamma \cdot (2D + 4D) = 0.5 \cdot 21 \text{ kN/m}^3 \cdot (20 \text{ m} + 40 \text{ m}) = 630 \text{ kPa}$$

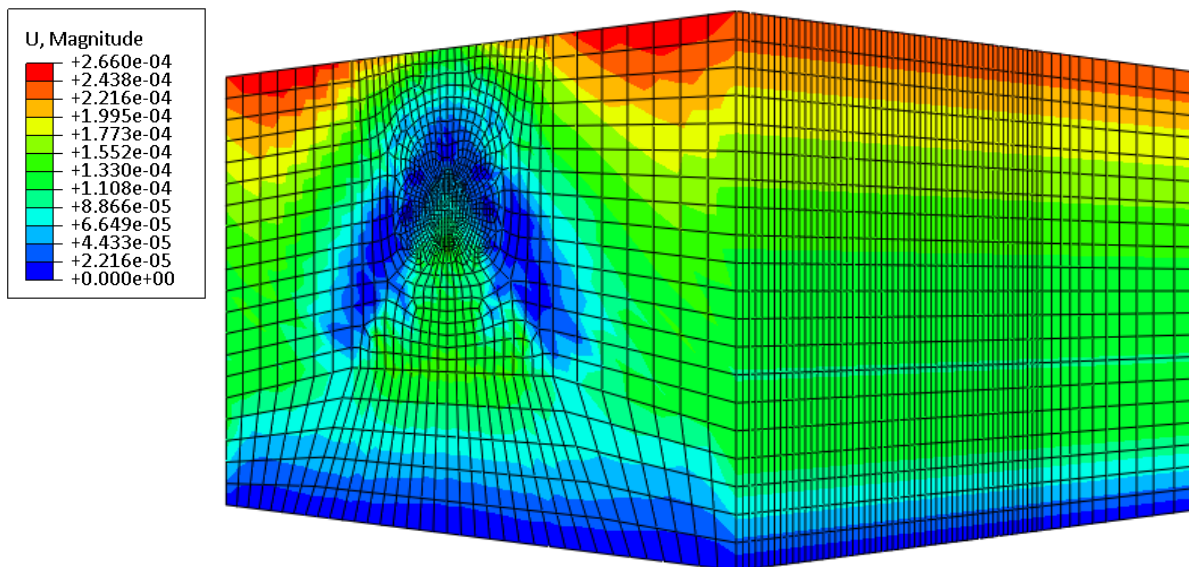
οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στο κατώτερο όριο του προσομοιώματος

Το εύρος των τιμών των γεωστατικών τάσεων που προκύπτουν από το προσομοίωμα θεωρήθηκαν αποδεκτές.





Εικόνα 3.3 Κατανομή της κατακόρυφης και των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Εικόνα 3.4 Κατανομή της ολικής μετακίνησης του προσομοιώματος για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

Η ολική μετακίνηση στο αρχικό (γεωστατικό) εντατικό πεδίο είναι μηδενική. Το εύρος των τιμών της ολικής μετακίνησης που προκύπτουν από τα προσομοιώματα θεωρήθηκαν αποδεκτές.

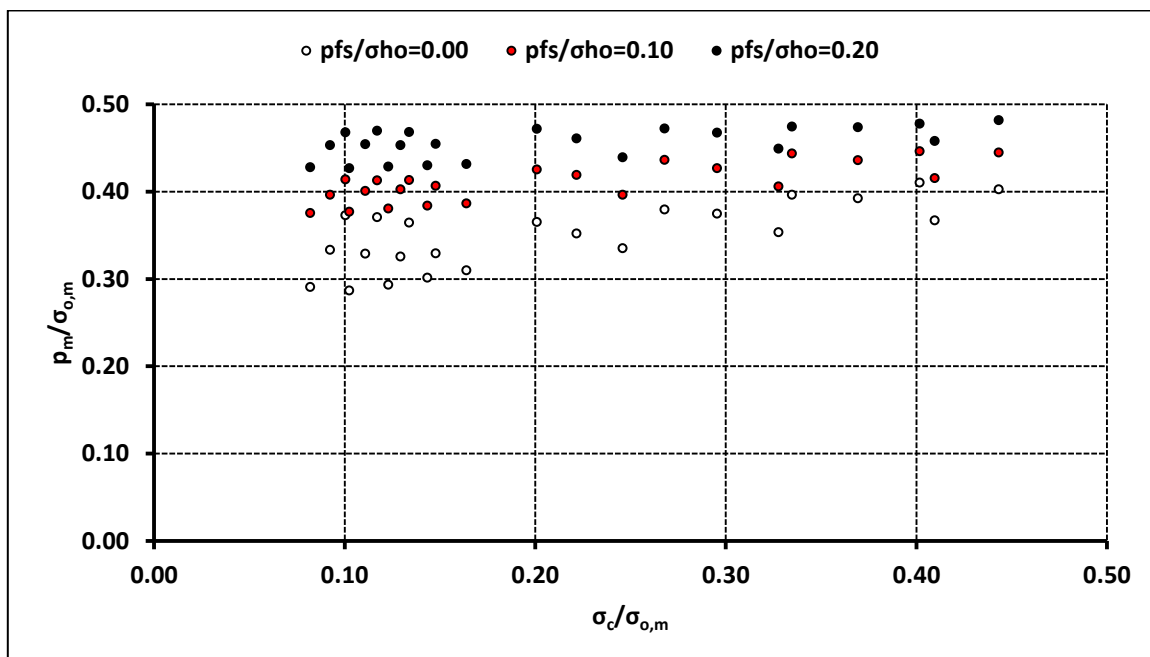
## 4. Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

### 4.1. Φορτίο στην Άμεση Υποστήριξη της Σήραγγας

#### 4.1.1. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m

Τα αποτελέσματα του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.1 και στο Γράφημα 4.2. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.1.

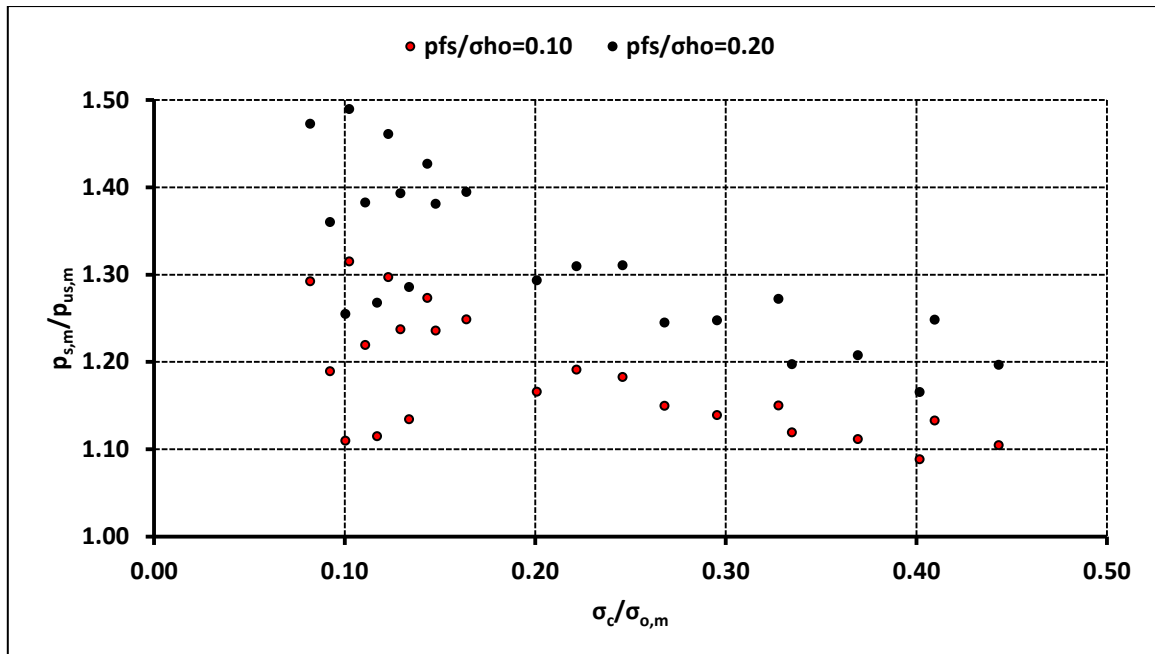
Ως τυπική διατομή της σήραγγας θεωρείται η διατομή στην οποία η εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση (αποτόνωση και σύγκλιση) του γεωυλικού έχει ολοκληρωθεί (σταθεροποιηθεί) και η διατομή είναι σε κατάσταση ισορροπίας. Ως κριτήριο για τον προσδιορισμό της τυπικής διατομής της σήραγγας θεωρείται η μεταβολή του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας σε ποσοστό 0.5 % (σταθεροποίηση) για διαδοχικές διατομές της σήραγγας.



Γράφημα 4.1: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.2. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου του μέσου φορτίου στην άμεση υποστήριξη

της σήραγγας του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής προς το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

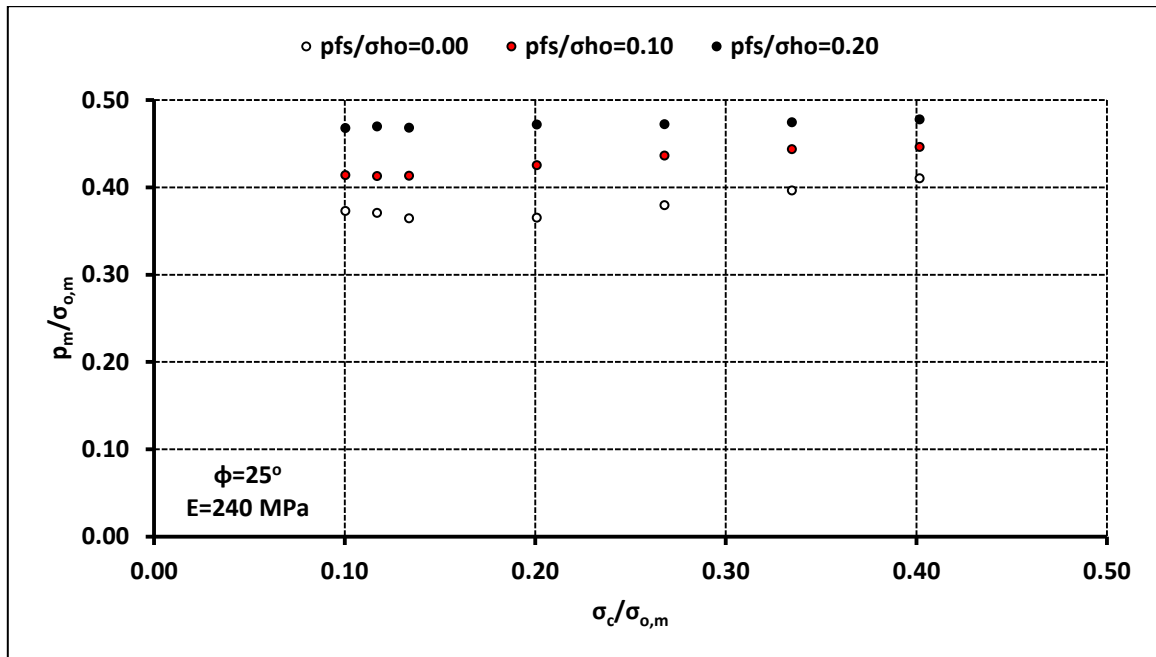


Γράφημα 4.2: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

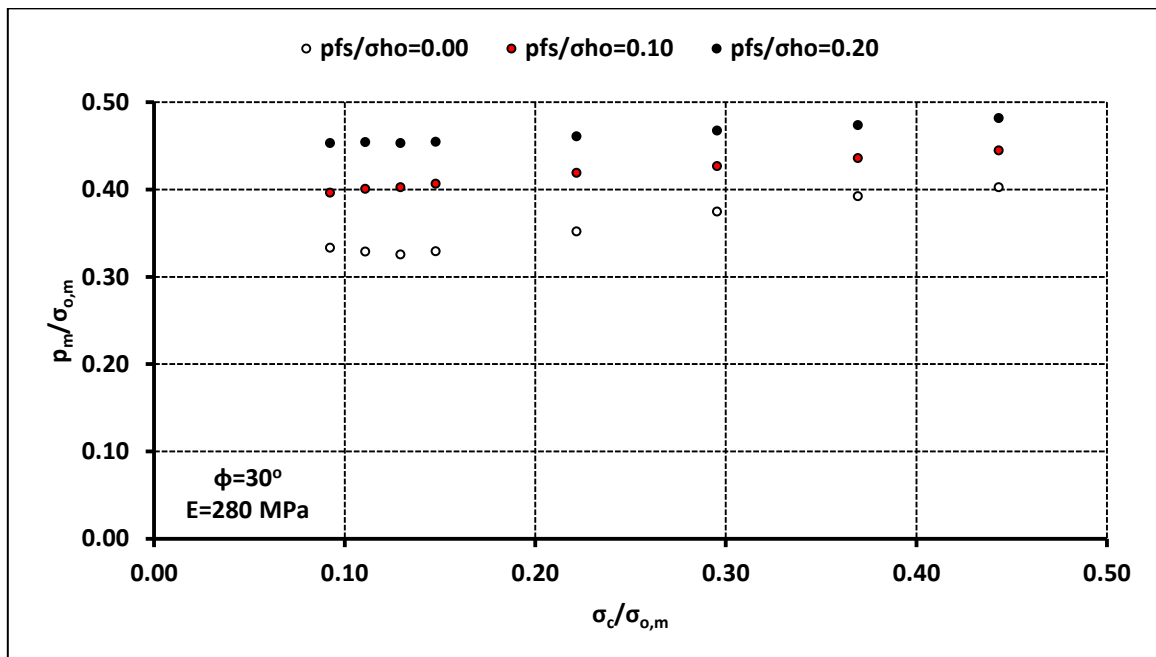
Από το Γράφημα 4.1 και το Γράφημα 4.2 προκύπτει ότι η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και συγκεκριμένα η εφαρμογή ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη εξαρτάται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

Η αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη προκαλείται από την επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης. Ειδικότερα, η εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης μειώνει την έκθλιψη και την αποτόνωση στο μέτωπο εκσκαφής, μειώνει την προσύγκλιση και την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως οδηγεί στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

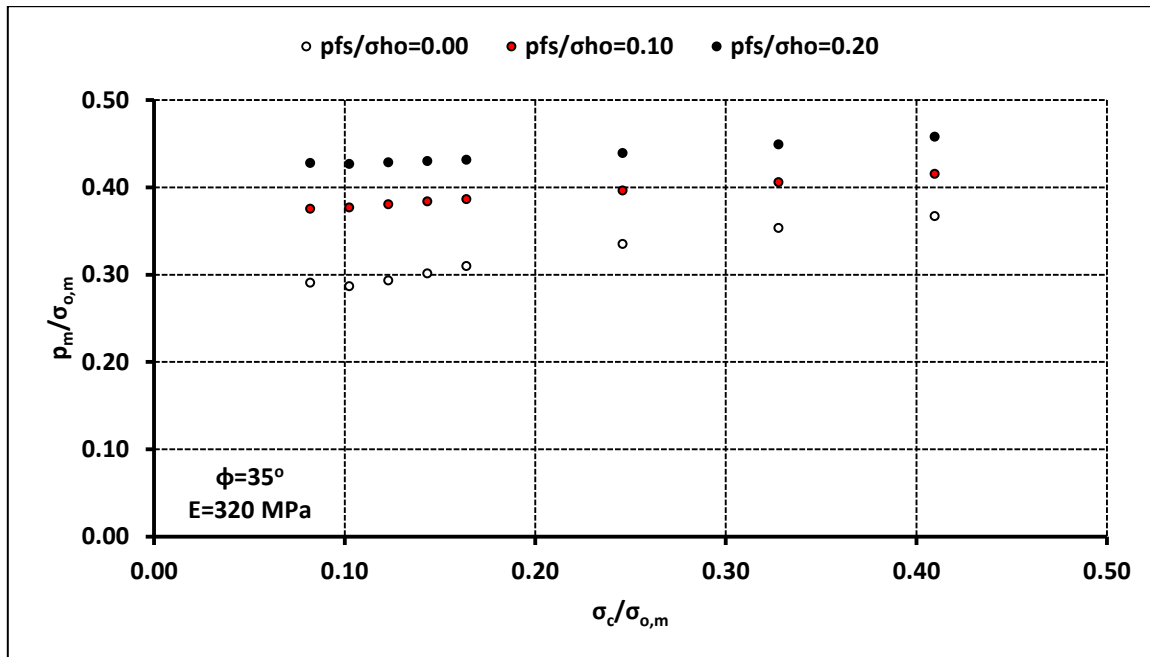
Η κατανομή των αποτελεσμάτων δεν παρουσιάζει διακριτές περιοχές και επομένως δεν μπορεί να επιτευχθεί κατηγοριοποίηση του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  και του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Για να διερευνηθεί το φαινόμενο επαρκέστερα τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζονται για μεμονωμένη σταθερή γωνία τριβής  $\varphi$ , σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  και μεταβλητή συνοχή  $c$  στο Γράφημα 4.3, στο Γράφημα 4.4 και στο Γράφημα 4.5.



Γράφημα 4.3: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



Γράφημα 4.4: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



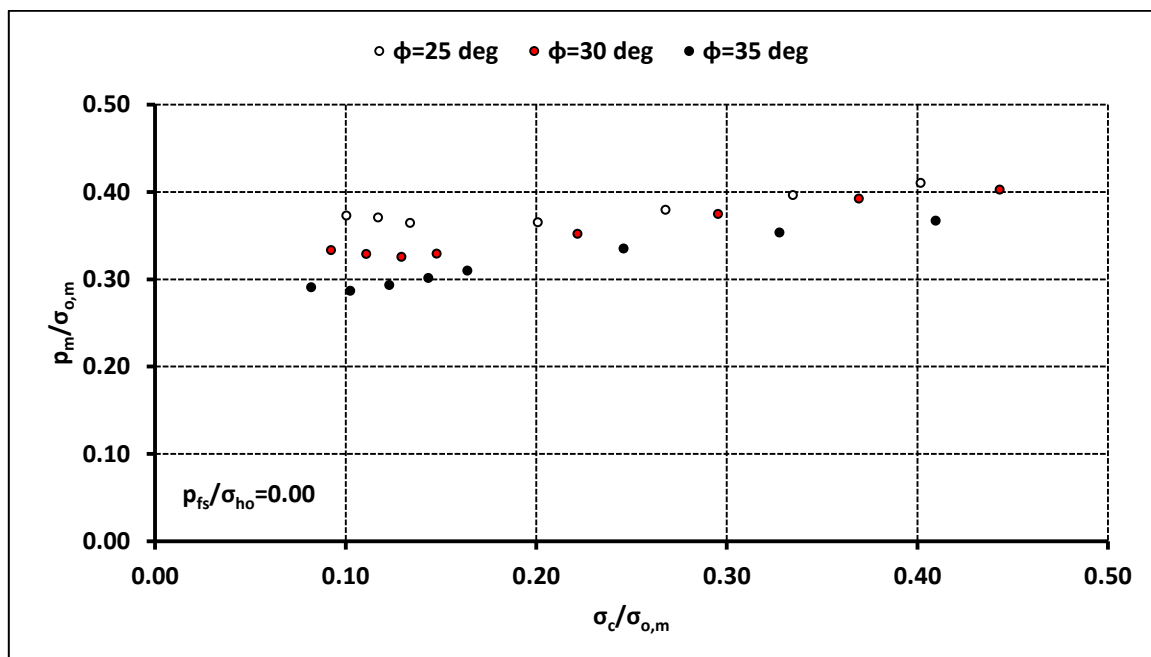
Γράφημα 4.5: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  που διερευνήθηκε. Για το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής το μέσο φορτίο παρουσιάζει για τις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  καθοδική κατανομή και για τις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  ανοδική κατανομή. Συγκεκριμένα, οι περιοχές του καθοδικού και του ανοδικού κλάδου διακρίνονται από το τοπικό ελάχιστο που για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  είναι διαφορετικό. Ειδικότερα, προκύπτει ότι για μεγαλύτερη γωνία τριβής  $\phi$  το τοπικό ελάχιστο μετατοπίζεται προς τα αριστερά (παρουσιάζεται για χαμηλότερη τιμή του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ ). Για το υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής η μορφή της κατανομής του μέσου φορτίου δεν παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο, αλλά μονοδιάστατη κατανομή. Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  (η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών) προκαλεί αύξηση του φορτίου. Ο ανοδικός κλάδος του φορτίου που παρουσιάζεται στο ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής και η κατανομή του φορτίου που παρουσιάζεται στο υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής συνιστούν και αποτελούν παράδοξη απόκριση του γεωυλικού στη διάνοιξη της σήραγγας. Ειδικότερα, η παράδοξη απόκριση του γεωυλικού εντοπίζεται στο ότι για σταθερή γωνία τριβής  $\phi$  και για σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  η αύξηση της συνοχής  $c$  προκαλεί αύξηση του φορτίου. Οι Cantieni and Anagnostou (2010) σε αριθμητικές αναλύσεις που εκτέλεσαν, επεσήμαναν την συγκεκριμένη παράδοξη συμπεριφορά και κατέληξαν ότι οφείλεται στις εξής παραδοχές που υιοθετούνται στην πλειοψηφία των αριθμητικών αναλύσεων: (i) η μη προσομοίωση της χρονικά εξαρτημένης (ερπυστικής) συμπεριφοράς του γεωυλικού, (ii) η προσομοίωση της ακαριαίας ενεργοποίησης της πλήρους δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης στις αριθμητικές αναλύσεις, η οποία στο πεδίο δεν επιτυγχάνεται άμεσα λόγω των κατασκευαστικών διαδικασιών. Οι δύο προαναφερθείσες παραδοχές τονίστηκαν ως οι βασικότεροι παράγοντες που προκαλούν και τροφοδοτούν την παράδοξη συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση ή στον περιορισμό της παράδοξης συμπεριφοράς διαδραματίζει η απόσταση τοποθέτησης της άμεσης

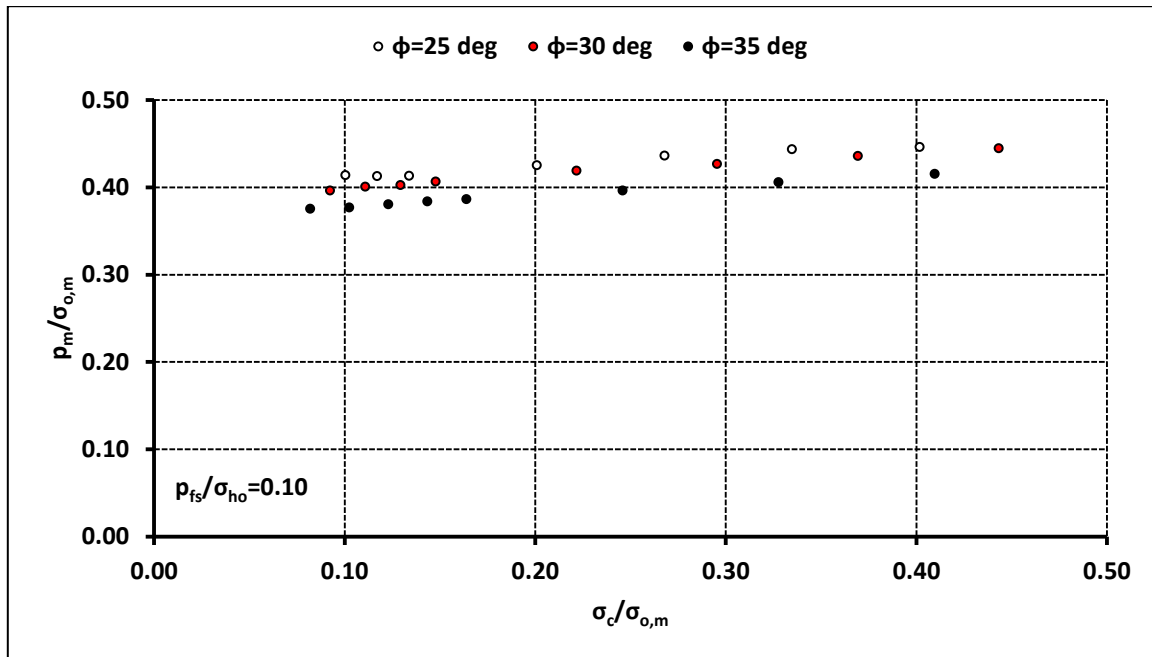
υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής. Οι Cantieni and Anagnostou (2010) επεσήμαναν ότι η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζει έως εξαλείφει την παράδοξη συμπεριφορά. Η συγκεκριμένη επισήμανση επιβεβαιώθηκε από αξονοσυμμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήσαν και ειδικότερα ανέδειξαν ότι η αύξηση της πίεσης υποστήριξης περιορίζει την κλίση του ανοδικού κλάδου. Οι Graziani et al (2005) σε αριθμητικές αναλύσεις που εκτέλεσαν, παρατήρησαν την προαναφερθείσα παράδοξη συμπεριφορά.

Ο καθοδικός κλάδος του φορτίου που παρουσιάζεται στο ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής σχετίζεται με τις συνθήκες οριακής ευστάθειας/αστάθειας του μετώπου εκσκαφής. Η αστοχία του μετώπου εκσκαφής στις αριθμητικές αναλύσεις συνίσταται στην εκδήλωση υπερβολικής αύξησης στην έκθλιψη (οριζόντια μετακίνηση) του μετώπου εκσκαφής. Το φορτίο που προκύπτει από αριθμητικές αναλύσεις στις οποίες εκδηλώνεται μεγάλη έκθλιψη (οριζόντια μετακίνηση) του μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχεί συνθήκες οριακής ευστάθειας/αστάθειας, δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική και απολύτως αξιόπιστη γιατί: το φορτίο που προκύπτει εξάγεται ως αποτέλεσμα του ιδεατού (πλασματικού) εντατικού πεδίου και της ιδεατής (πλασματικής) πλαστικής ζώνης που δημιουργείται από την αλληλουχία των διαδοχικών αστοχιών του μετώπου εκσκαφής που πραγματοποιούνται σε κάθε στατικό βήμα των αριθμητικών αναλύσεων.

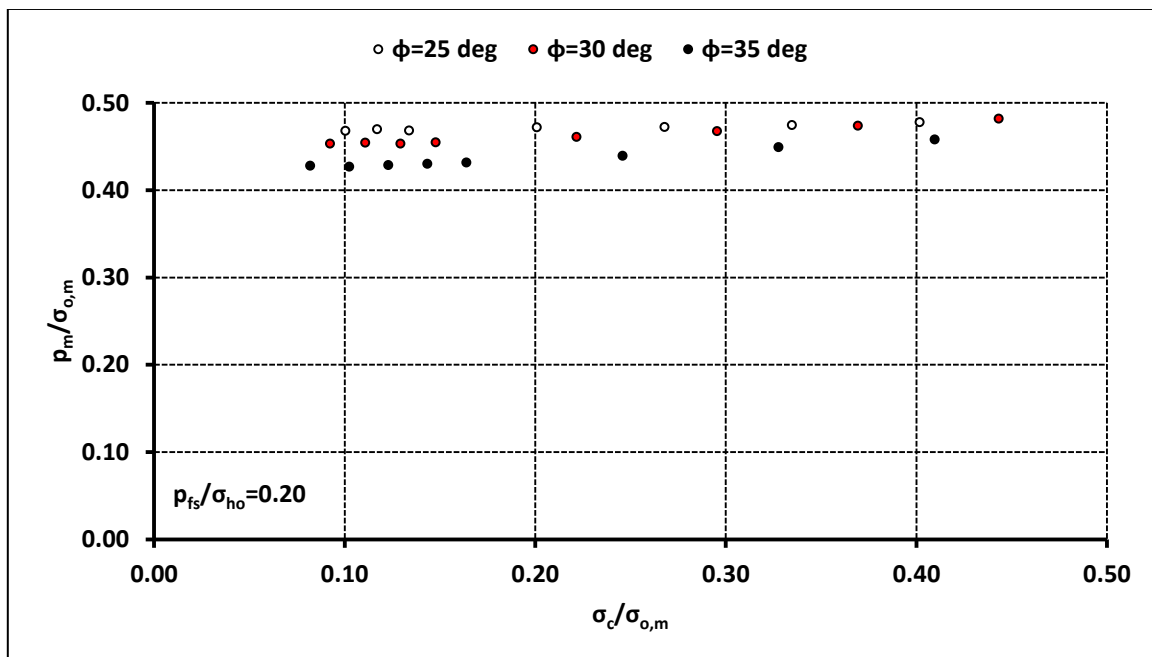
Για να διερευνηθεί περισσότερο η προαναφερθείσα παράδοξη συμπεριφορά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ , για μεταβολή της γωνίας τριβής  $\phi$ , για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) στο Γράφημα 4.6, στο Γράφημα 4.7 και στο Γράφημα 4.8.



Γράφημα 4.6: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}=0.00$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



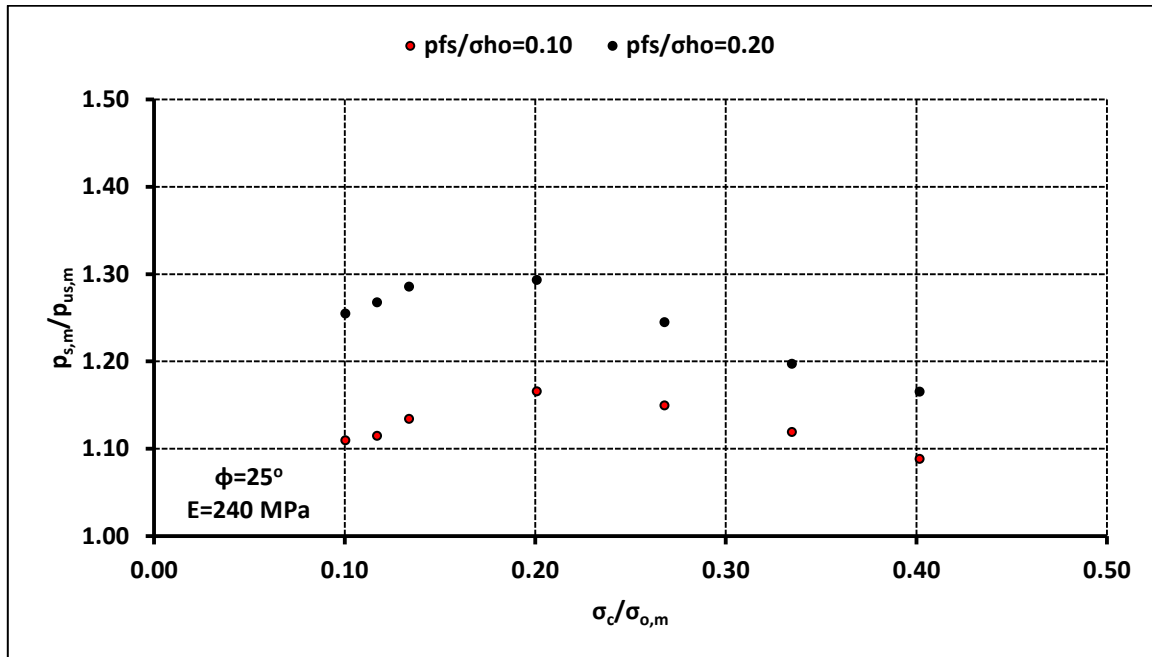
Γράφημα 4.7: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



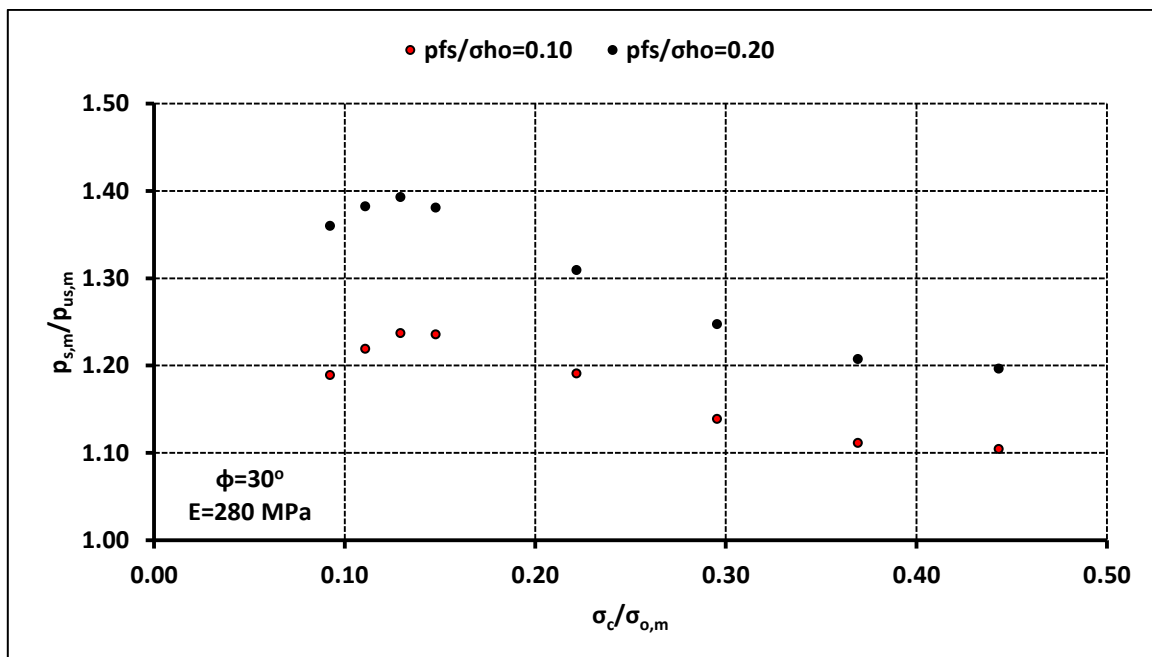
Γράφημα 4.8: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για κανονικοποιημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι, είτε για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ), είτε για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ), η αύξηση της γωνίας τριβής  $\phi$  συνεπάγεται μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Το εύρος της μείωσης εξαρτάται από το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  και την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Επομένως, καταδεικνύεται ότι η γωνία τριβής  $\phi$  δεν αποτελεί παράγοντα διαμόρφωσης της παράδοξης συμπεριφοράς.

Για να διερευνηθεί η επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και να επιτευχθεί η αποδέσμευση από την επιρροή της προαναφερθείσας παράδοξης συμπεριφοράς του γεωλικού τα αποτελέσματα της κατανομής του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  και του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  παρουσιάζονται για μεμονωμένη σταθερή γωνία τριβής  $\phi$ , σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  και μεταβλητή συνοχή  $c$  στο Γράφημα 4.9, στο Γράφημα 4.10, στο Γράφημα 4.11, στο Γράφημα 4.12, στο Γράφημα 4.13 και στο Γράφημα 4.14.

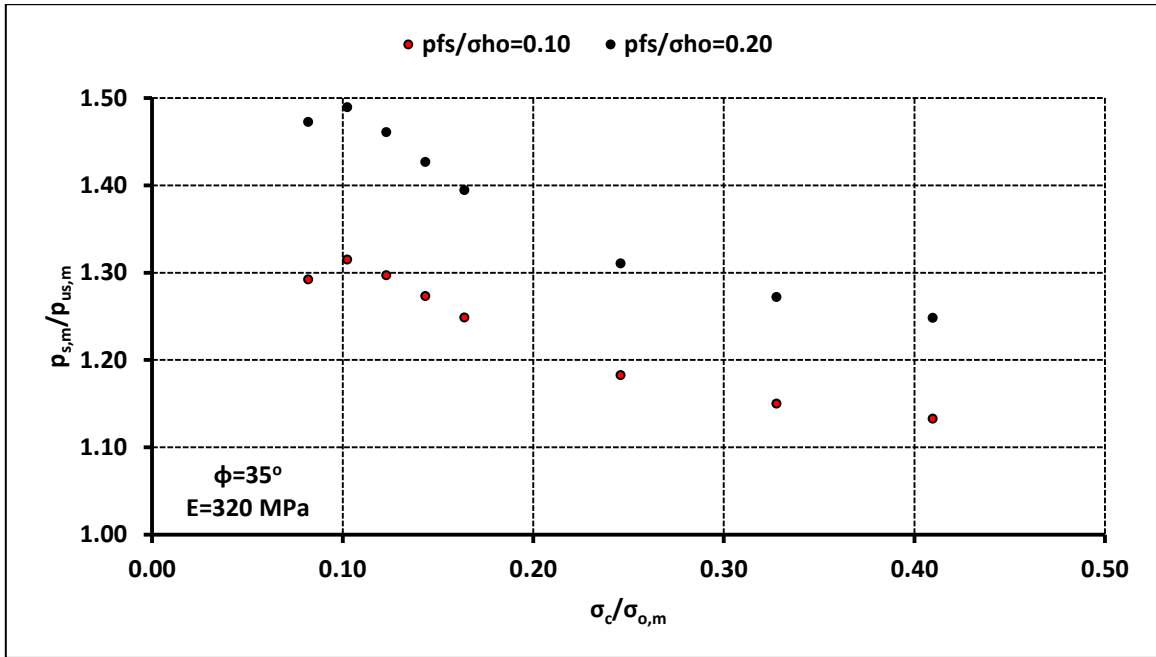


Γράφημα 4.9: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$

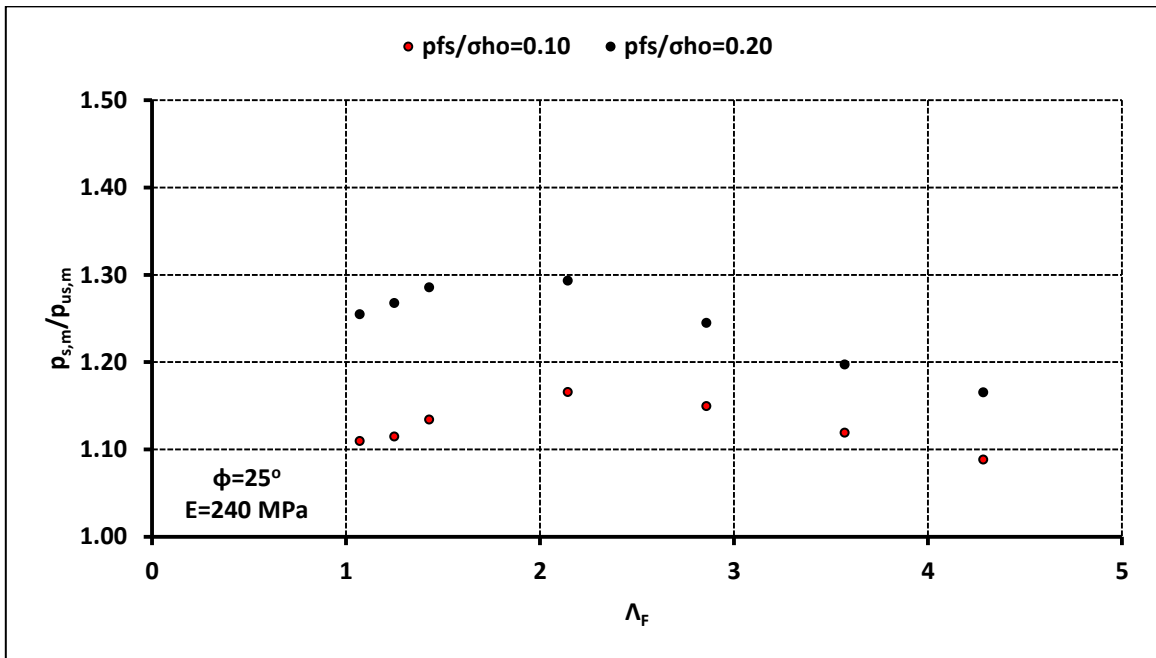


Γράφημα 4.10: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$

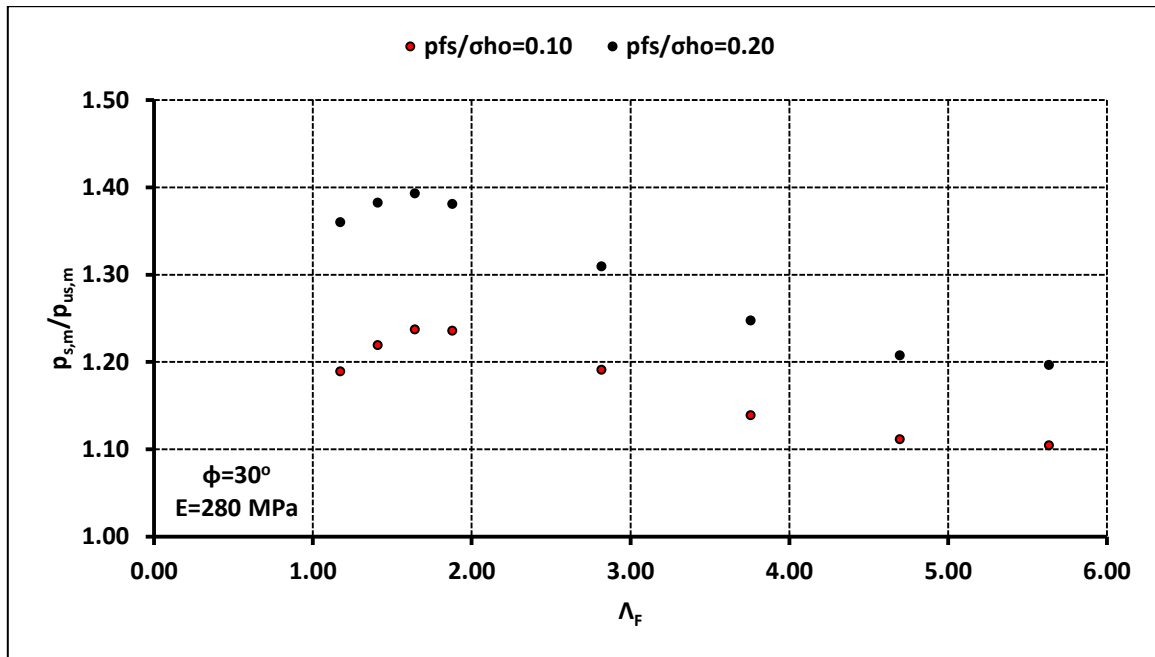




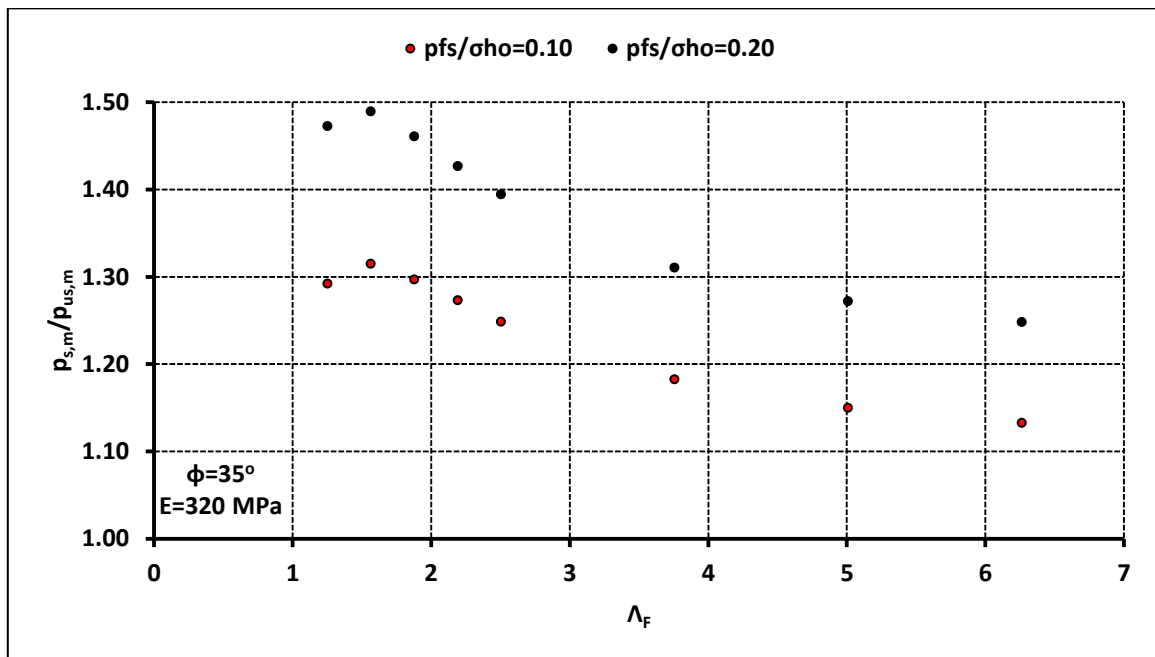
Γράφημα 4.11: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$



Γράφημα 4.12: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$



Γράφημα 4.13: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



Γράφημα 4.14: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Τα μέτωπα εκσκαφής στα οποία διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης αντιστοιχούν σε  $\Lambda_F > 1$  και συγκεκριμένα σε  $1 < \Lambda_F < 7$ . Οι συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  αντιστοιχούν σε οριακά ευσταθή, ευσταθή και πλήρως ευσταθή μέτωπα εκσκαφής.

Τα αποτελέσματα του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  που διερευνήθηκε. Συγκεκριμένα, ο λόγος  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζει για τις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{0,m}$  ανοδική κατανομή και για τις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{0,m}$

καθοδική κατανομή. Συγκεκριμένα, οι περιοχές του καθοδικού και του ανοδικού κλάδου διακρίνονται από το τοπικό μέγιστο που για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$  είναι διαφορετικό. Ειδικότερα, προκύπτει ότι για μεγαλύτερη γωνία τριβής  $\varphi$  το τοπικό μέγιστο μετατοπίζεται προς τα αριστερά (παρουσιάζεται για χαμηλότερη τιμή του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ ). Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες οριακής ευστάθειας ή ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής ( $\Lambda_F < 1.5 - 2$ ) που συνεπάγεται: μεγάλη έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση ευρείας ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη εκτενούς πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μεγάλων προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Ο περιορισμός των συγκεκριμένων αποκρίσεων του γεωυλικού είναι καθοριστικός στην διαμόρφωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη και λόγω του μεγάλου περιθωρίου μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι σημαντικό. Η συγκεκριμένη επίδραση της πίεσης υποστήριξης επιβεβαιώνεται από την εμφάνιση του τοπικού μεγίστου σε χαμηλές τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μικρότερο στις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες πλήρους ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής ( $\Lambda_F \geq 1.5 - 2$ ) που συνεπάγεται: μικρή έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση περιορισμένης ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη περιορισμένης πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μικρών προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Επομένως, το περιθώριο μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων είναι μικρότερο, η επίδραση της πίεσης υποστήριξης είναι μικρότερη και το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι περιορισμένο.

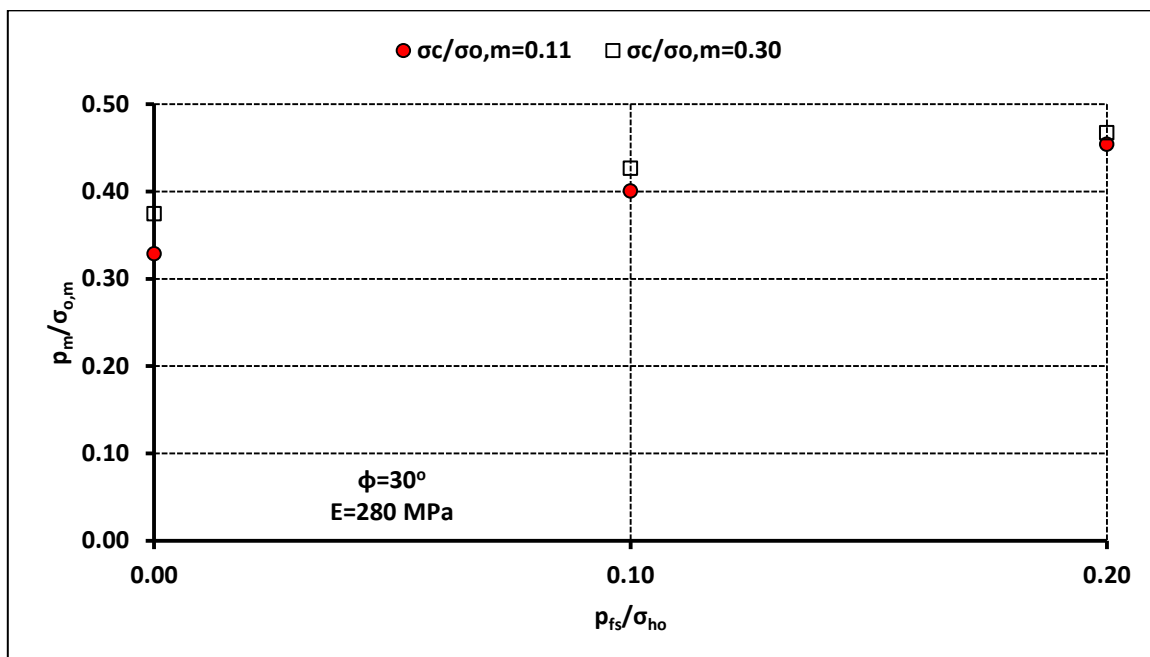
Οι παράγοντες που παρουσιάζουν καθοριστική επίδραση στο εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η γωνία τριβής  $\varphi$ . Ειδικότερα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Επιπρόσθετα, αν και η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, είτε για ανυποστήρικτο, είτε για υποστηριγμένο μέτωπο, η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται, για την ίδια πίεση υποστήριξης, αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, για το ίδιο εύρος του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Συγκεκριμένα, για  $\varphi = 25^\circ$  η αύξηση είναι έως και 30 %, για  $\varphi = 30^\circ$  η αύξηση είναι έως και 40 % και για  $\varphi = 35^\circ$  η αύξηση είναι έως και 50 %. Η επίδραση της γωνίας τριβής  $\varphi$  είναι σημαντική γιατί επηρεάζει την δυναμική επιφάνεια αστοχίας στο μέτωπο εκσκαφής ενισχύοντας την διατμητική αντοχή του γεωυλικού.

Τα προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_{fs}/\sigma_{ho}$ , για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, όπως προκύπτουν από το Γράφημα 4.9, το Γράφημα 4.10 και το Γράφημα 4.11 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στα προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  δεν συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα για τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες ευστάθειας ως προς το μέτωπο εκσκαφής.

Πίνακας 4.1 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

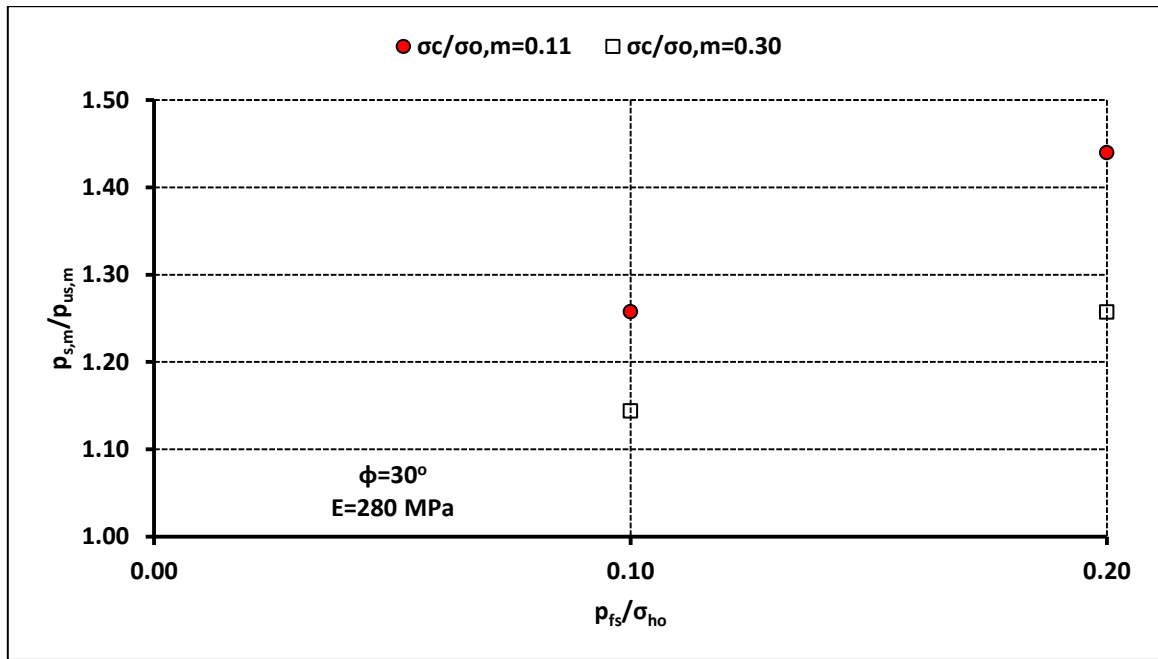
H=5D=50 m	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50

Η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  και του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi = 30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.15 και στο Γράφημα 4.16.



Γράφημα 4.15: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το εύρος της αύξησης καθορίζεται και εξαρτάται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και από το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  και μικρότερο στις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ .



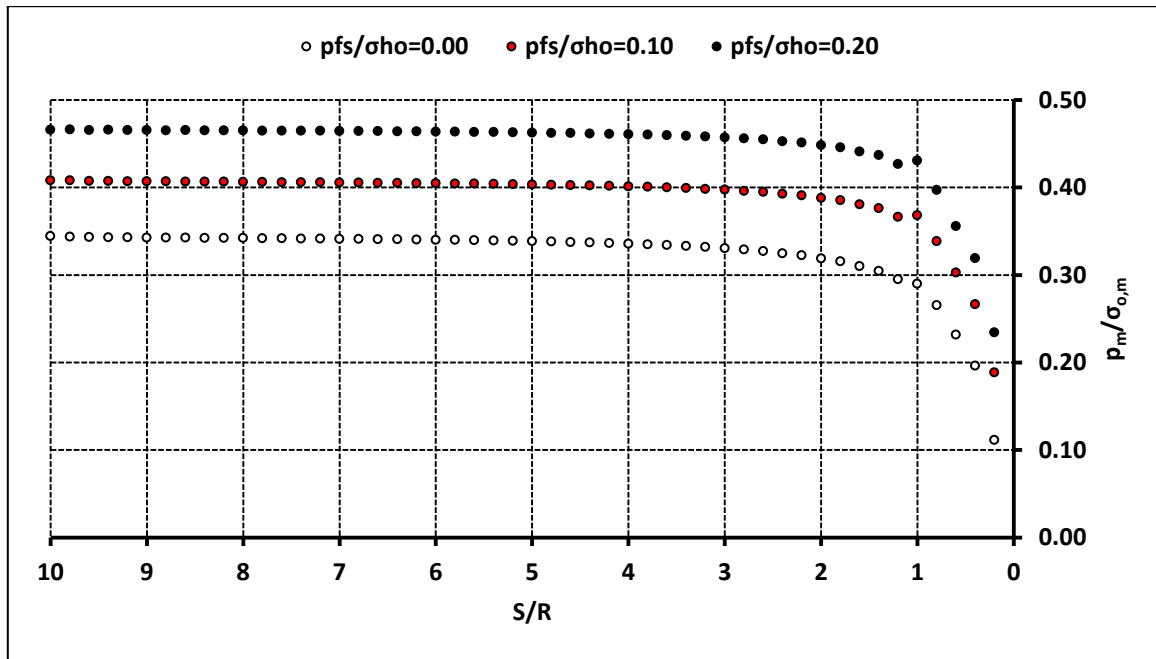
Γράφημα 4.16: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$  για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_o,m$

Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται τα εξής:

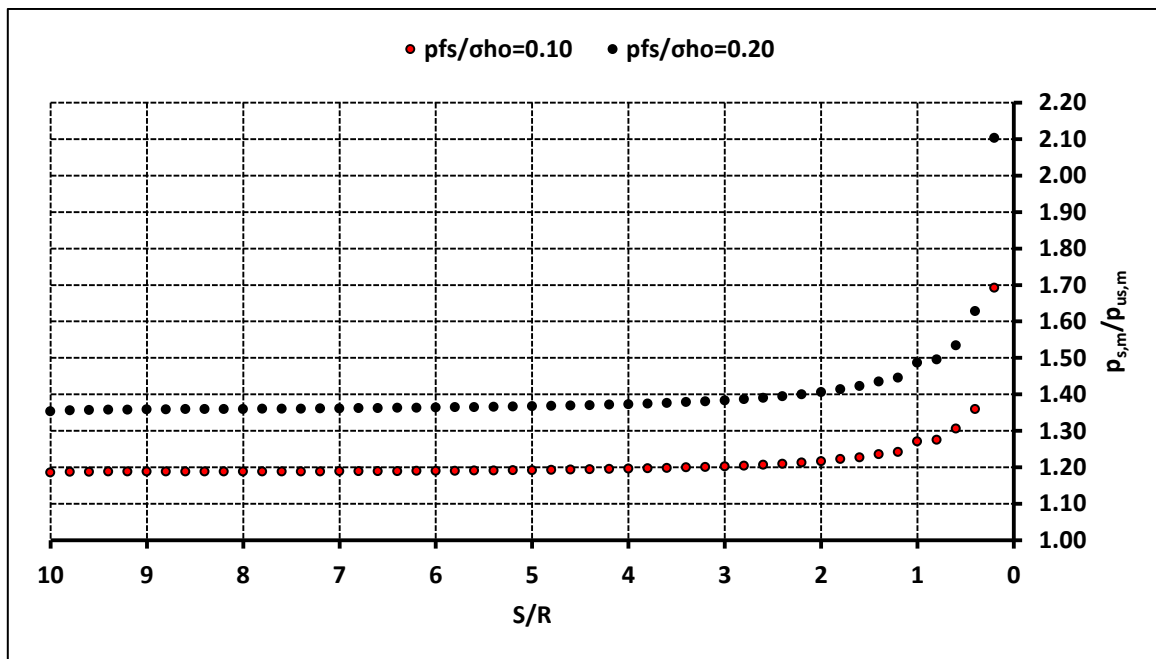
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.17 και στο Γράφημα 4.21
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.18 και στο Γράφημα 4.22
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.19 και στο Γράφημα 4.23
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.20 και στο Γράφημα 4.24

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτουν τα εξής:

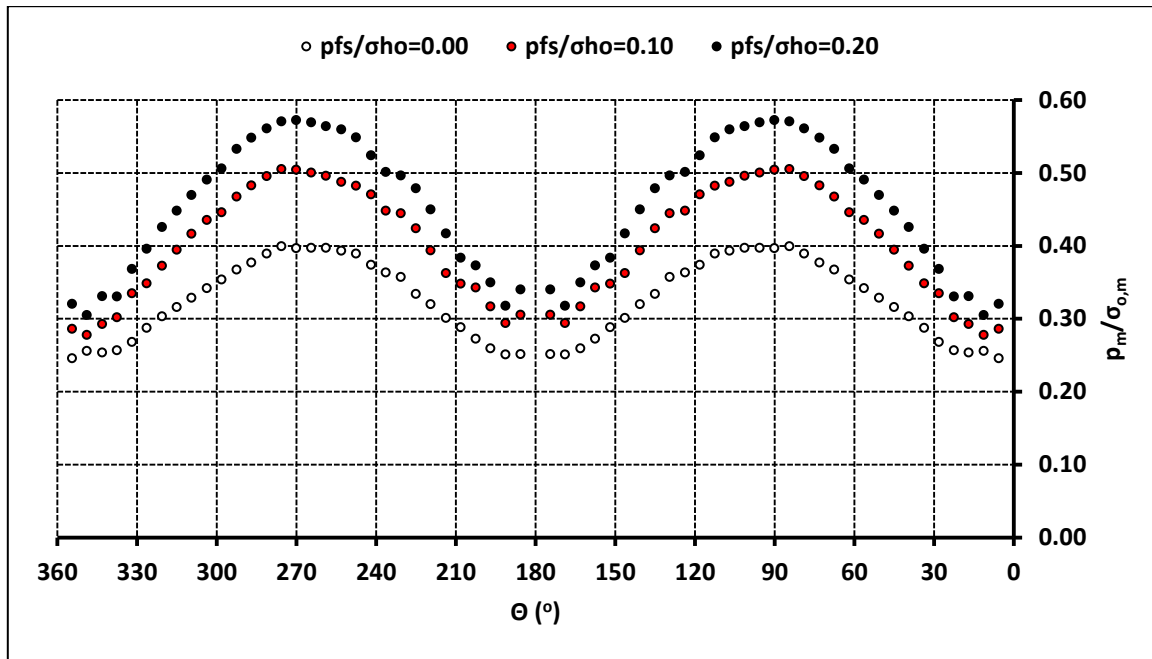
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη: (i) συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας (Γράφημα 4.17 και Γράφημα 4.21), (ii) συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας (Γράφημα 4.19 και Γράφημα 4.23)
- ✓ η σταθεροποίηση της μεταβολής (η σύγκλιση) του φορτίου στην άμεση υποστήριξη εντοπίζεται για  $S/R \geq 4$  (Γράφημα 4.17 και Γράφημα 4.21), είτε για ανυποστήρικτο, είτε για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την απόσταση σύγκλισης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.
- ✓ για  $S/R \geq 4$  (περιοχή στην οποία έχει ολοκληρωθεί η εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του γεωυλικού στη διάνοιξη και έχει επιτευχθεί σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη) το εύρος της αύξησης είναι σταθερό, ενώ για  $S/R \leq 4$  (περιοχή στην οποία δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη) το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη παρουσιάζει αυξανόμενη τάση προς το μέτωπο εκσκαφής. Ειδικότερα, όσο προσεγγίζεται το μέτωπο εκσκαφής παρουσιάζεται το μέγιστο εύρος της αύξησης και επομένως εξάγεται ότι η επίδραση της πίεσης υποστήριξης μεγιστοποιείται στο μέτωπο εκσκαφής (Γράφημα 4.18 και στο Γράφημα 4.22).
- ✓ το φορτίο στην άμεση υποστήριξη παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της στις παρειές της σήραγγας ( $\theta = 90^\circ$  &  $\theta = 270^\circ$ ) και την ελάχιστη τιμή της στη στέψη και στον πυθμένα της σήραγγας ( $\theta = 0^\circ$  &  $\theta = 180^\circ$ ) (Γράφημα 4.19 και Γράφημα 4.23). Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση είναι ορθή και προκύπτει λόγω της θεώρησης συντελεστή οριζόντιων τάσεων  $K_o = 0.5$ .



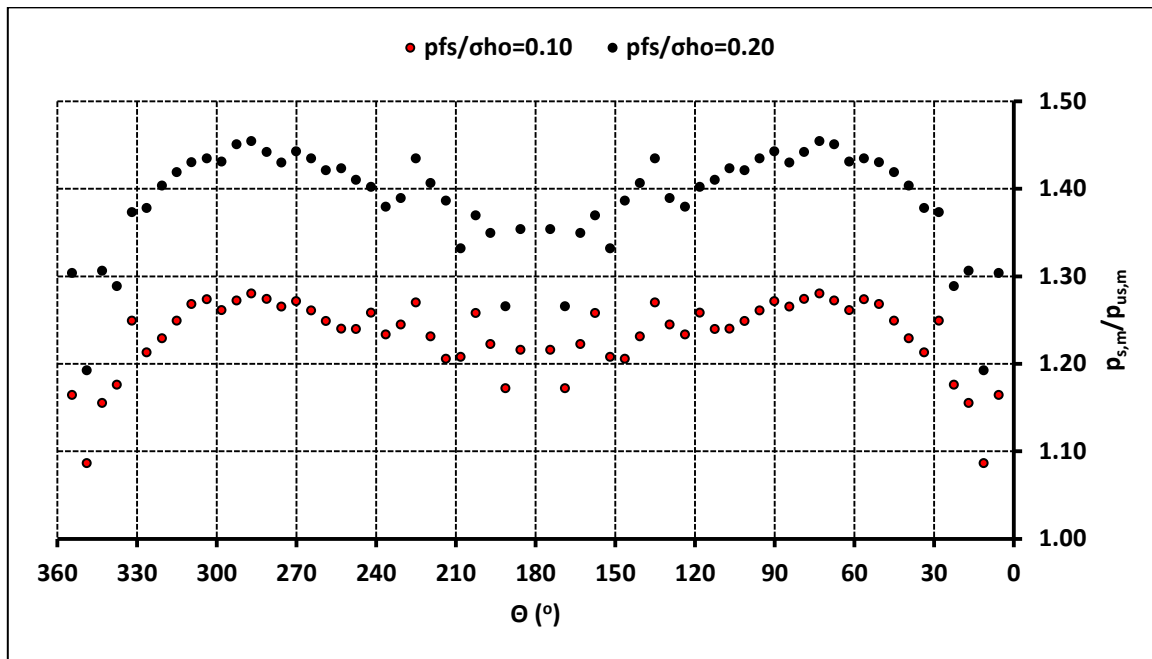
Γράφημα 4.17: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )



Γράφημα 4.18: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )

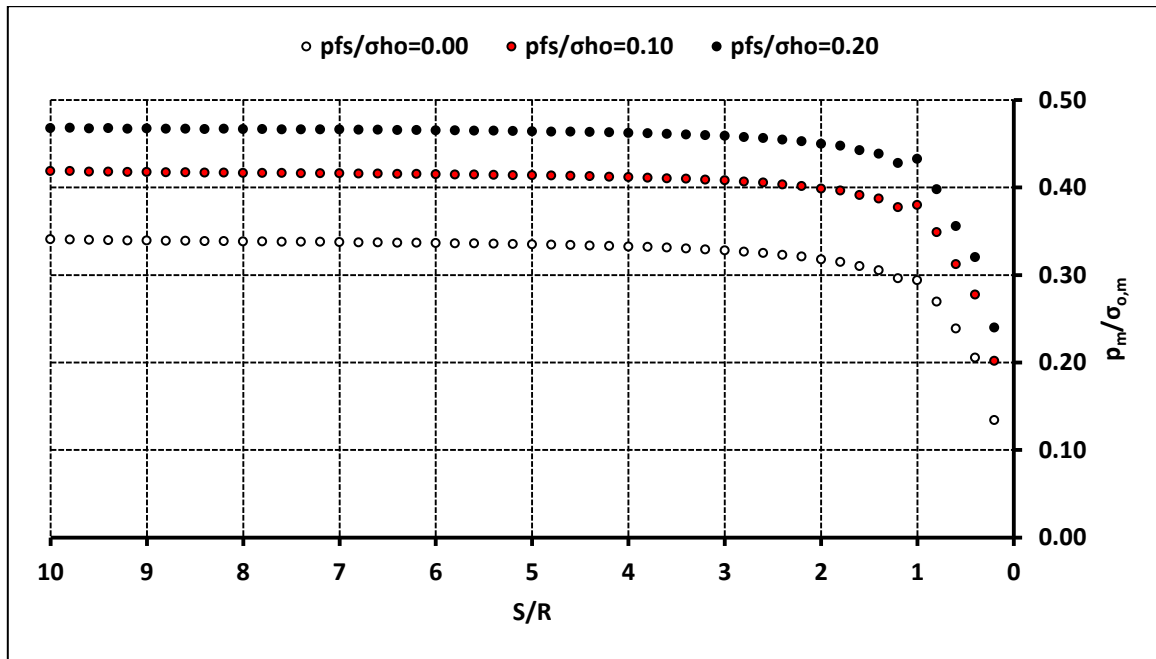


Γράφημα 4.19: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )

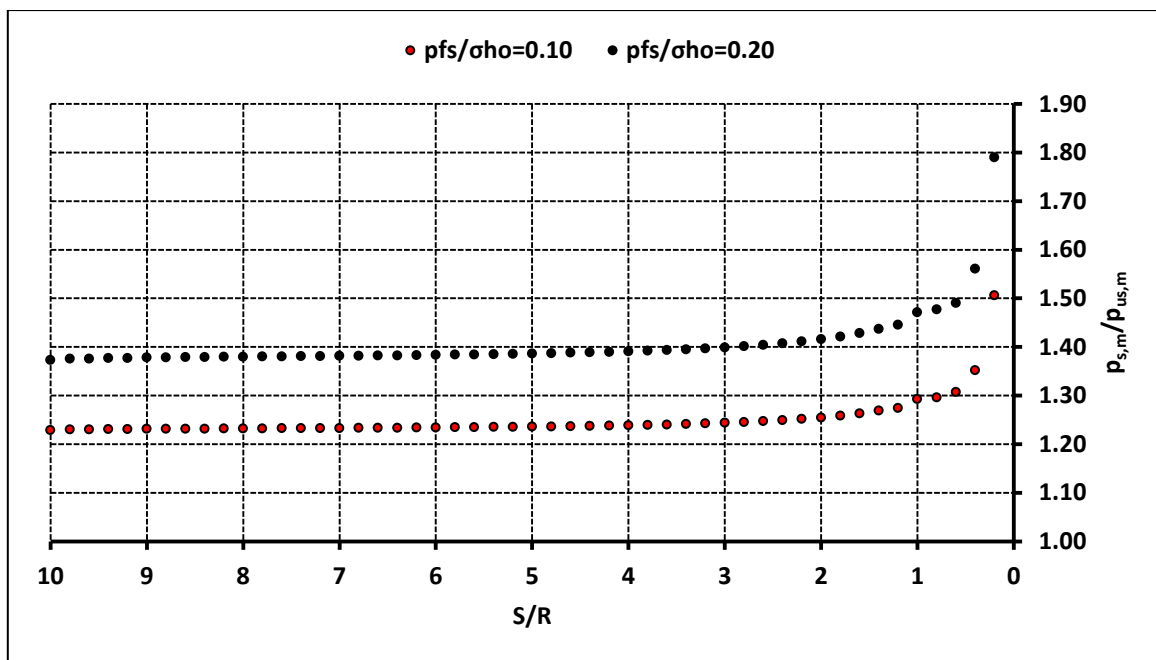


Γράφημα 4.20: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )

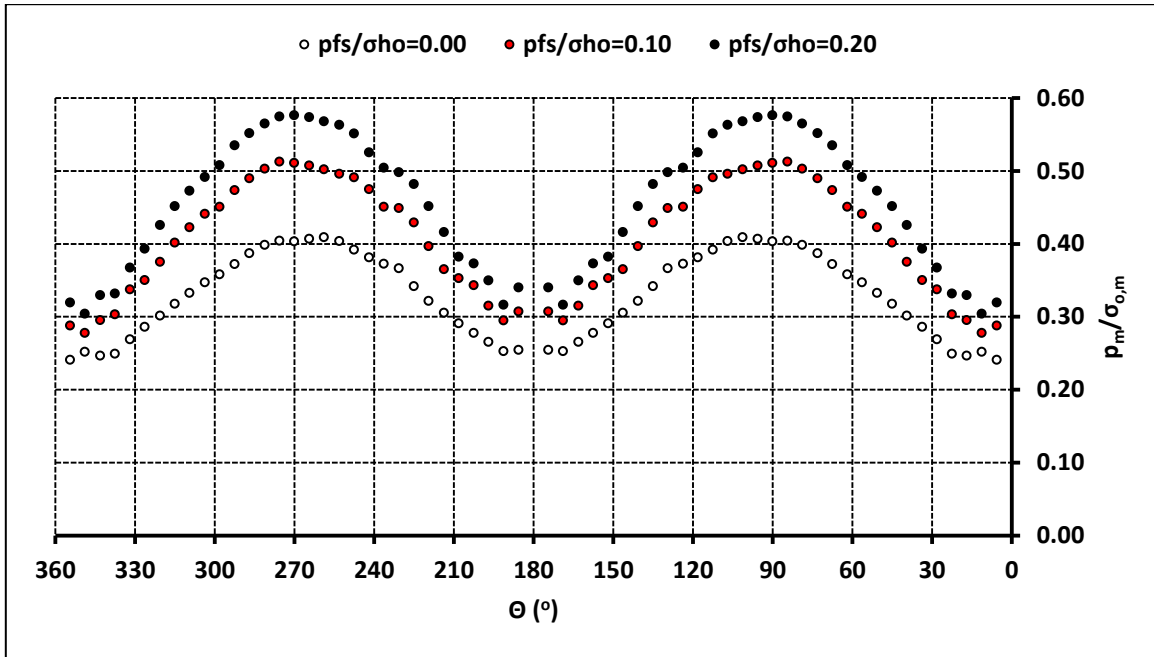




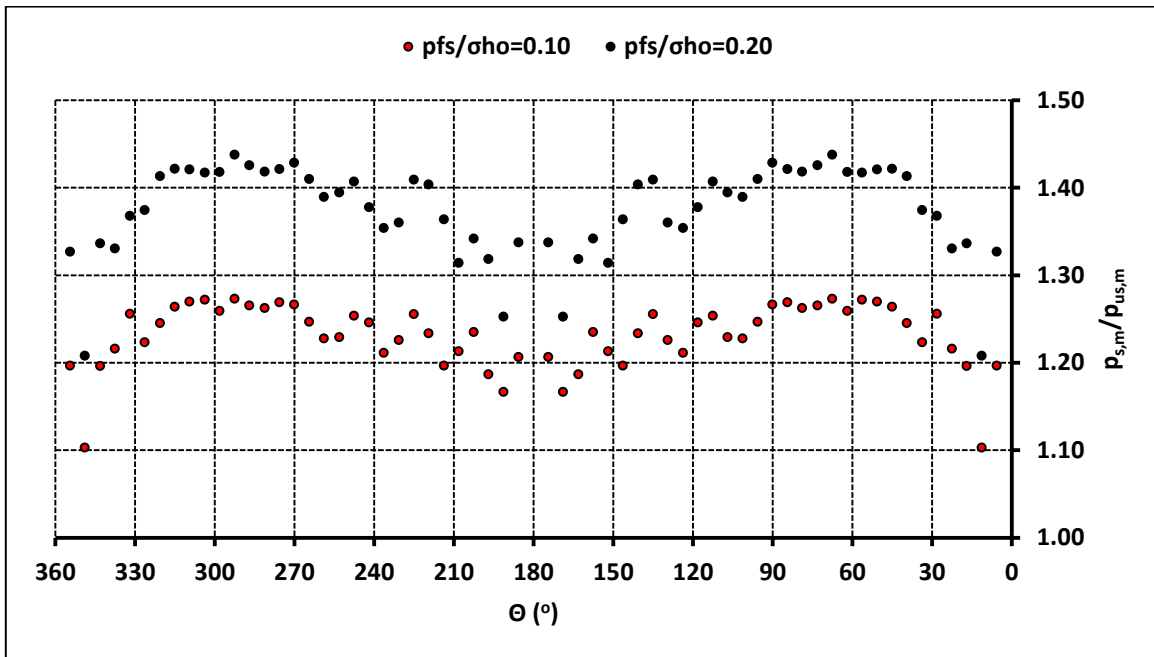
Γράφημα 4.21: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



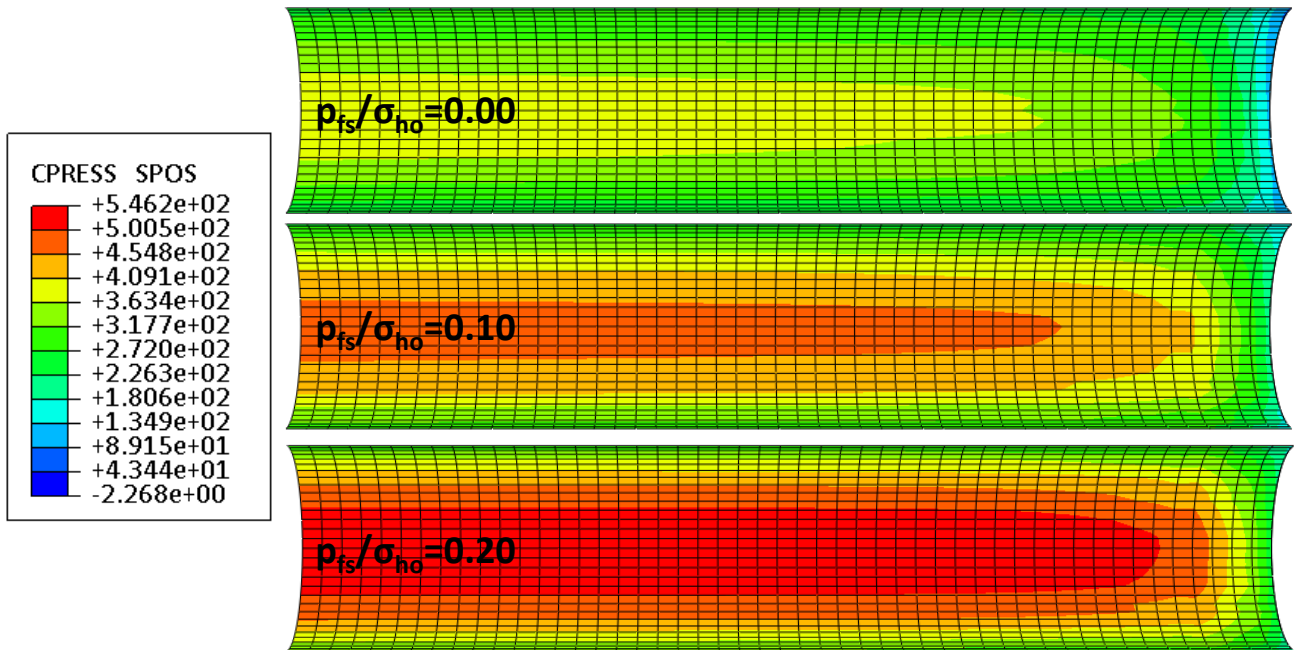
Γράφημα 4.22: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



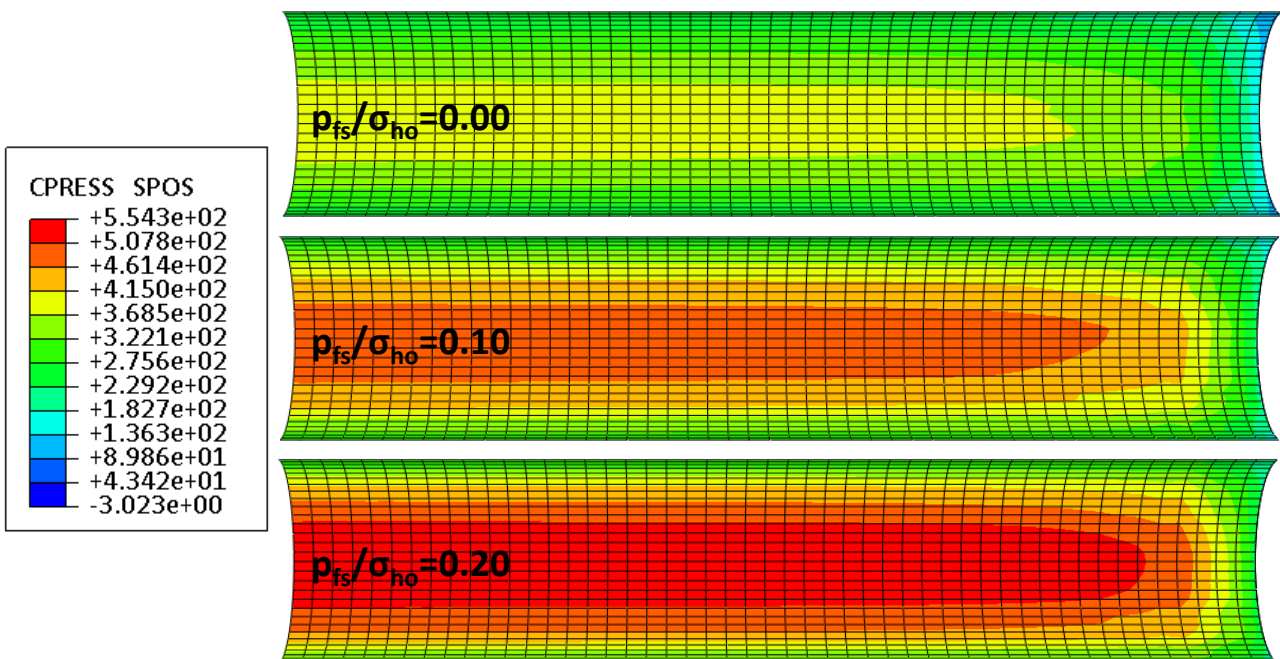
Γράφημα 4.23: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



Γράφημα 4.24: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



Εικόνα 4.1 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )



Εικόνα 4.2 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ )

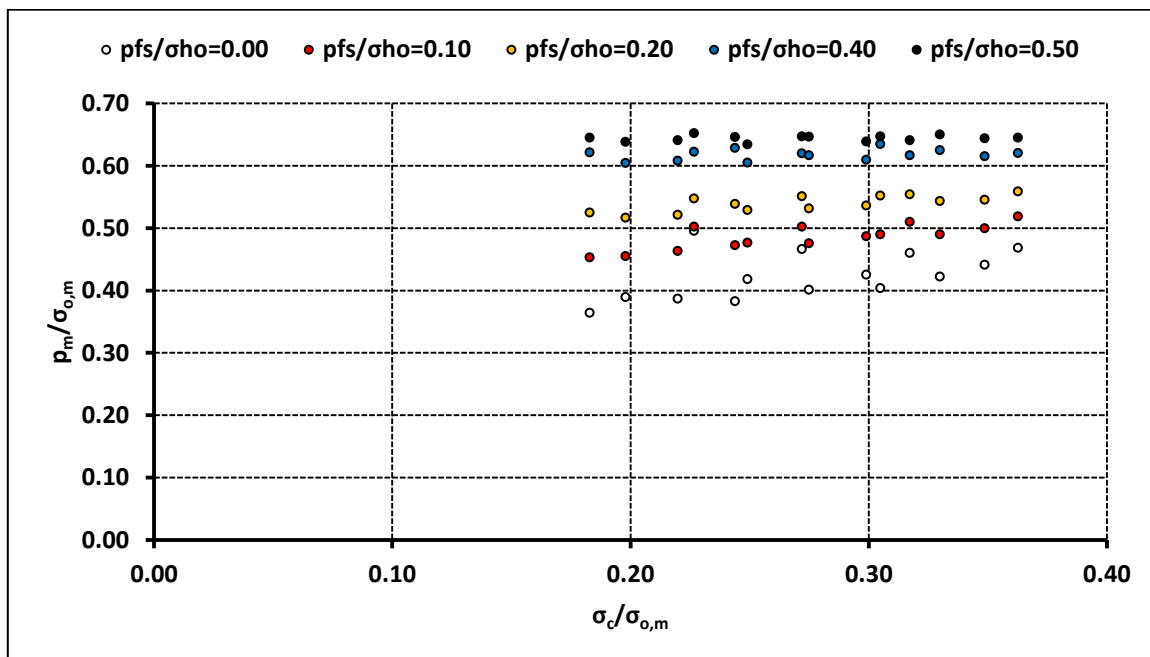
Το φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1 και στην Εικόνα 4.2.

#### 4.1.2. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m

Τα αποτελέσματα του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m είναι ανάλογα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη σήραγγα με ύψος  $H = 5D = 50$  m.

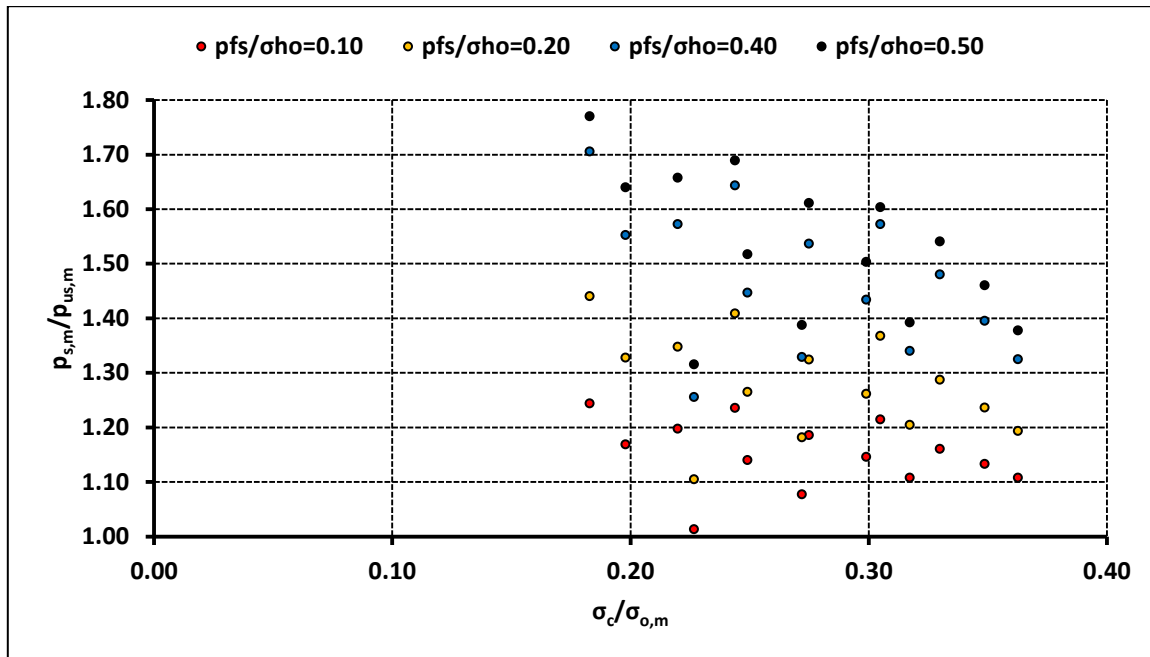
Τα αποτελέσματα του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.25 και στο Γράφημα 4.26. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.25.

Ως τυπική διατομή της σήραγγας θεωρείται η διατομή στην οποία η εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση (αποτόνωση και σύγκλιση) του γεωυλικού έχει ολοκληρωθεί (σταθεροποιηθεί) και η διατομή είναι σε κατάσταση ισορροπίας. Ως κριτήριο για τον προσδιορισμό της τυπικής διατομής της σήραγγας θεωρείται η μεταβολή του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας σε ποσοστό 0.5 % (σταθεροποίηση) για διαδοχικές διατομές της σήραγγας.



Γράφημα 4.25: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.26. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου του μέσου φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής προς το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

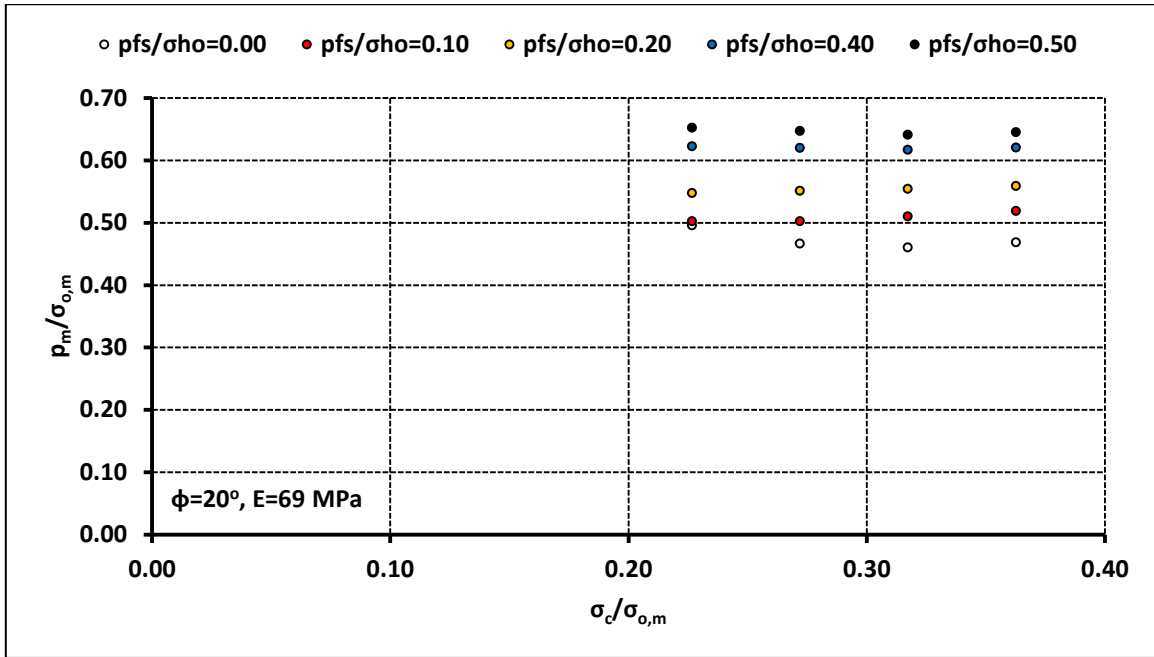


Γράφημα 4.26: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

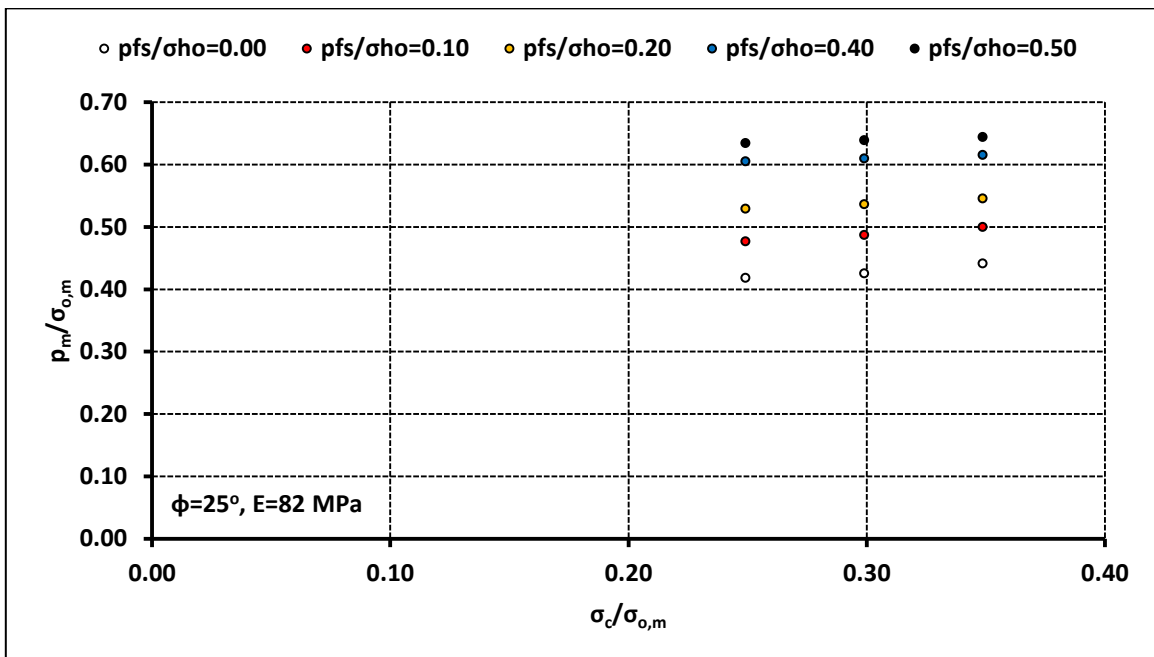
Από το Γράφημα 4.25 και το Γράφημα 4.26 προκύπτει ότι η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και συγκεκριμένα η εφαρμογή ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη εξαρτάται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

Η αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη προκαλείται από την επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης. Ειδικότερα, η εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης μειώνει την έκθλιψη και την αποτόνωση στο μέτωπο εκσκαφής, μειώνει την προσύγκλιση και την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως οδηγεί στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

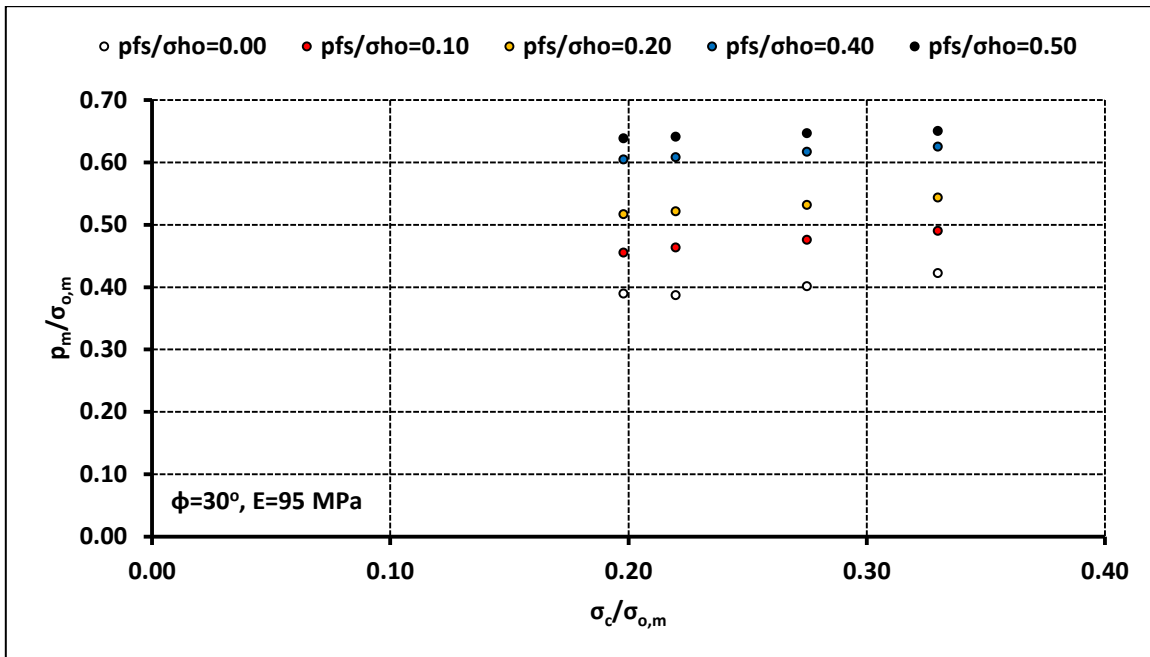
Η κατανομή των αποτελεσμάτων δεν παρουσιάζει διακριτές περιοχές και επομένως δεν μπορεί να επιτευχθεί κατηγοριοποίηση του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  και του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Για να διερευνηθεί το φαινόμενο επαρκέστερα τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζονται για μεμονωμένη σταθερή γωνία τριβής  $\varphi$ , σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  και μεταβλητή συνοχή  $c$  στο Γράφημα 4.27, στο Γράφημα 4.28, στο Γράφημα 4.29 και στο Γράφημα 4.30.



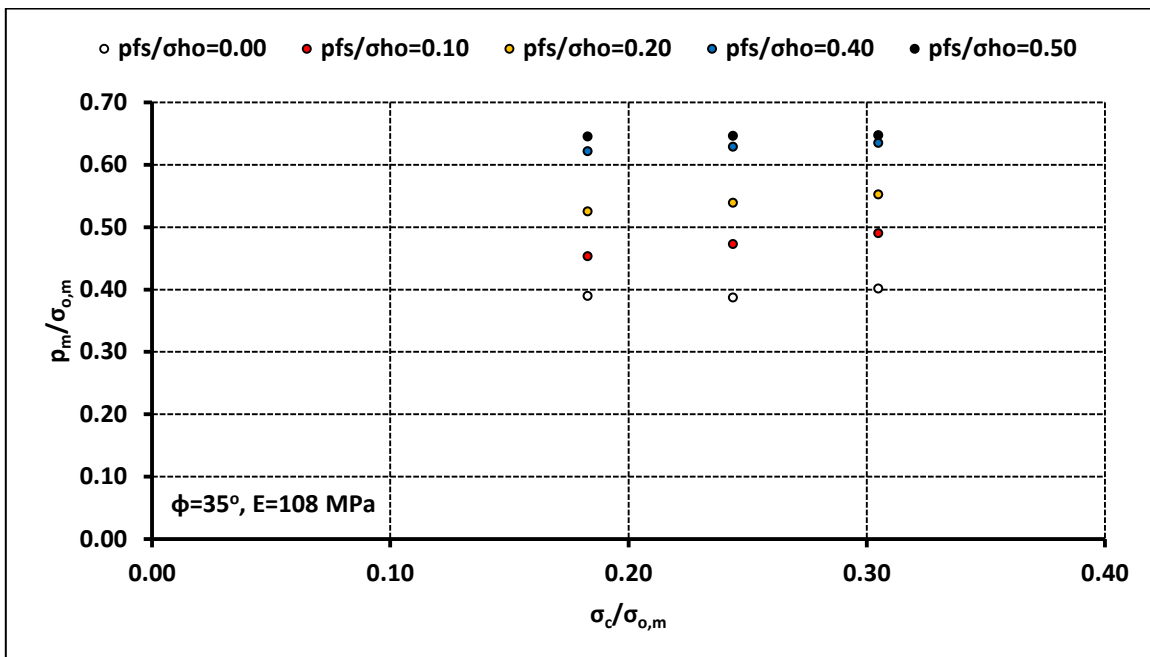
Γράφημα 4.27: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=20^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Γράφημα 4.28: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

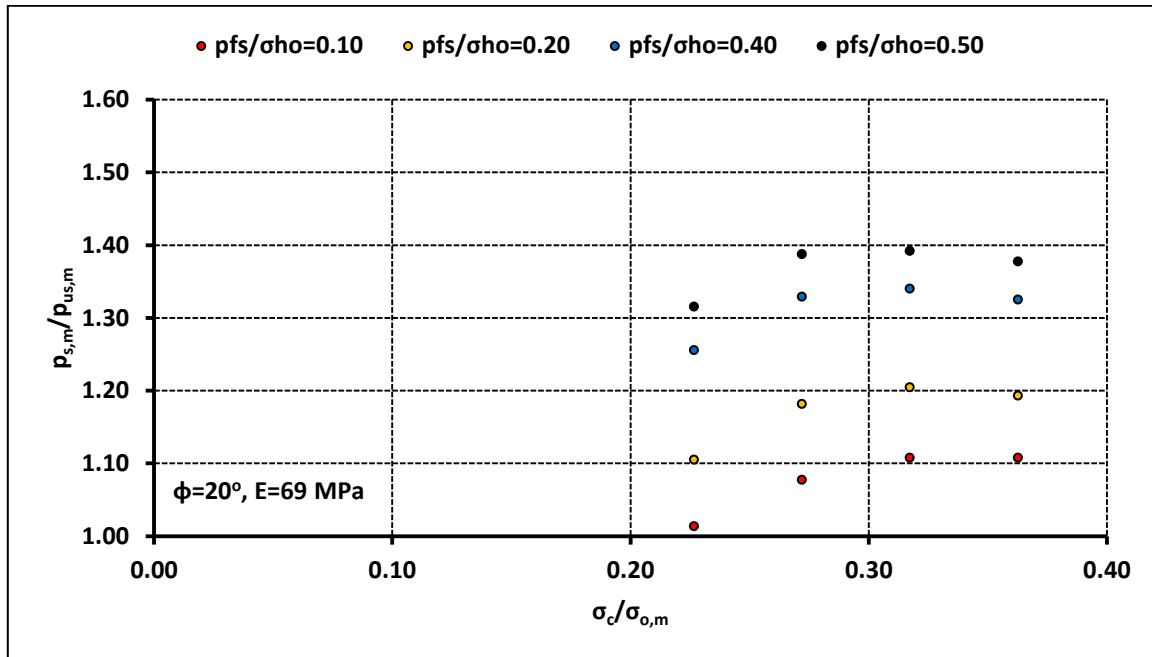


Γράφημα 4.29: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20 \text{ m}$

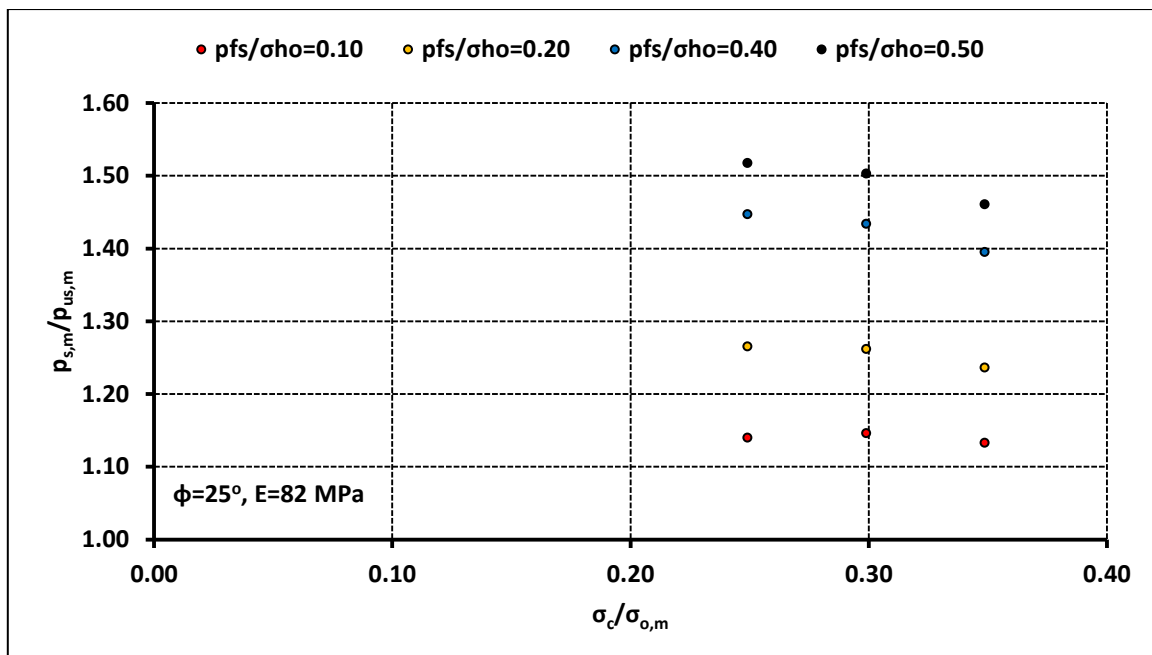


Γράφημα 4.30: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20 \text{ m}$

Για να διερευνηθεί η επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και να επιτευχθεί η αποδέσμευση από την επιρροή της προαναφερθείσας παράδοξης συμπεριφοράς του γεωυλικού τα αποτελέσματα της κατανομής του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζονται για μεμονωμένη σταθερή γωνία τριβής  $\phi$ , σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  και μεταβλητή συνοχή  $c$  στο Γράφημα 4.31, στο Γράφημα 4.32, στο Γράφημα 4.33 και στο Γράφημα 4.34.

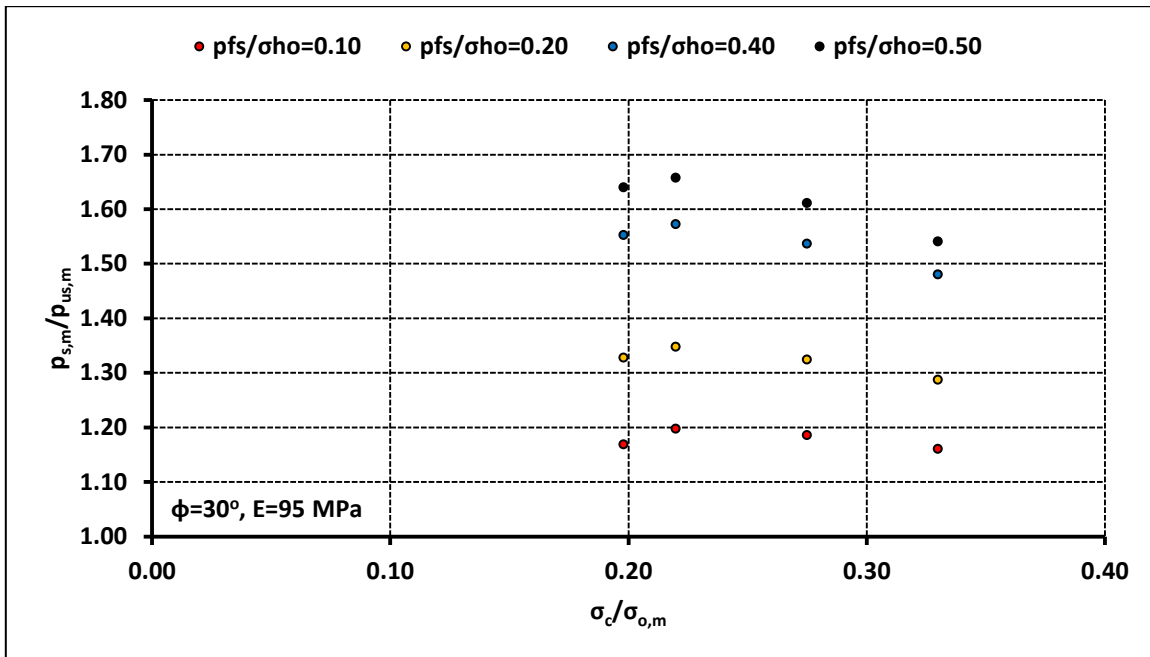


Γράφημα 4.31: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=20^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

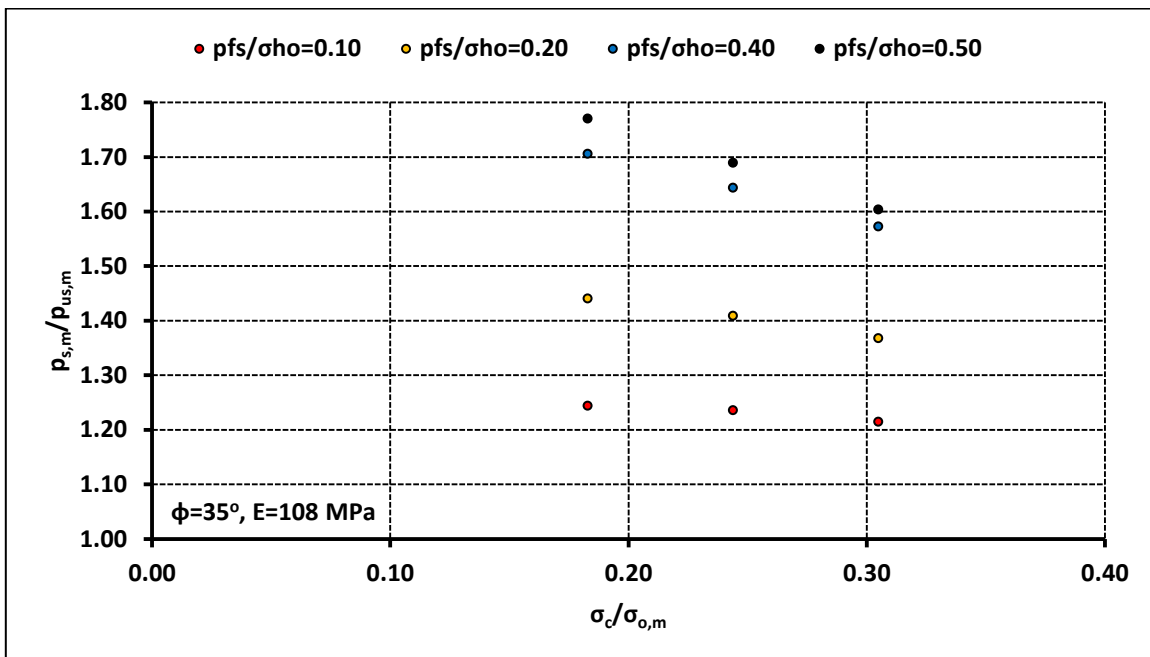


Γράφημα 4.32: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m





Γράφημα 4.33: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20 \text{ m}$



Γράφημα 4.34: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20 \text{ m}$

Τα μέτωπα εκσκαφής στα οποία διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης αντιστοιχούν σε  $\Lambda_F > 1$  και συγκεκριμένα σε  $1 < \Lambda_F < 2$ . Οι συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  αντιστοιχούν σε οριακά ευσταθή και ευσταθή μέτωπα εκσκαφής.

Τα αποτελέσματα του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  που διερευνήθηκε. Συγκεκριμένα, ο λόγος  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  παρουσιάζει για τις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  ανοδική κατανομή και για τις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  καθοδική κατανομή. Συγκεκριμένα, οι περιοχές του καθοδικού και του ανοδικού κλάδου

διακρίνονται από το τοπικό μέγιστο που για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$  είναι διαφορετικό. Ειδικότερα, προκύπτει ότι για μεγαλύτερη γωνία τριβής  $\varphi$  το τοπικό μέγιστο μετατοπίζεται προς τα αριστερά (παρουσιάζεται για χαμηλότερη τιμή του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ ). Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες οριακής ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής που συνεπάγεται: μεγάλη έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση ευρείας ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη εκτενούς πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μεγάλων προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Ο περιορισμός των συγκεκριμένων αποκρίσεων του γεωυλικού είναι καθοριστικός στην διαμόρφωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη και λόγω του μεγάλου περιθωρίου μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι σημαντικό. Η συγκεκριμένη επίδραση της πίεσης υποστήριξης επιβεβαιώνεται από την εμφάνιση του τοπικού μεγίστου σε χαμηλές τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μικρότερο στις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής που συνεπάγεται: μικρή έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση περιορισμένης ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη περιορισμένης πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μικρών προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Επομένως, το περιθώριο μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων είναι μικρότερο, η επίδραση της πίεσης υποστήριξης είναι μικρότερη και το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι περιορισμένο.

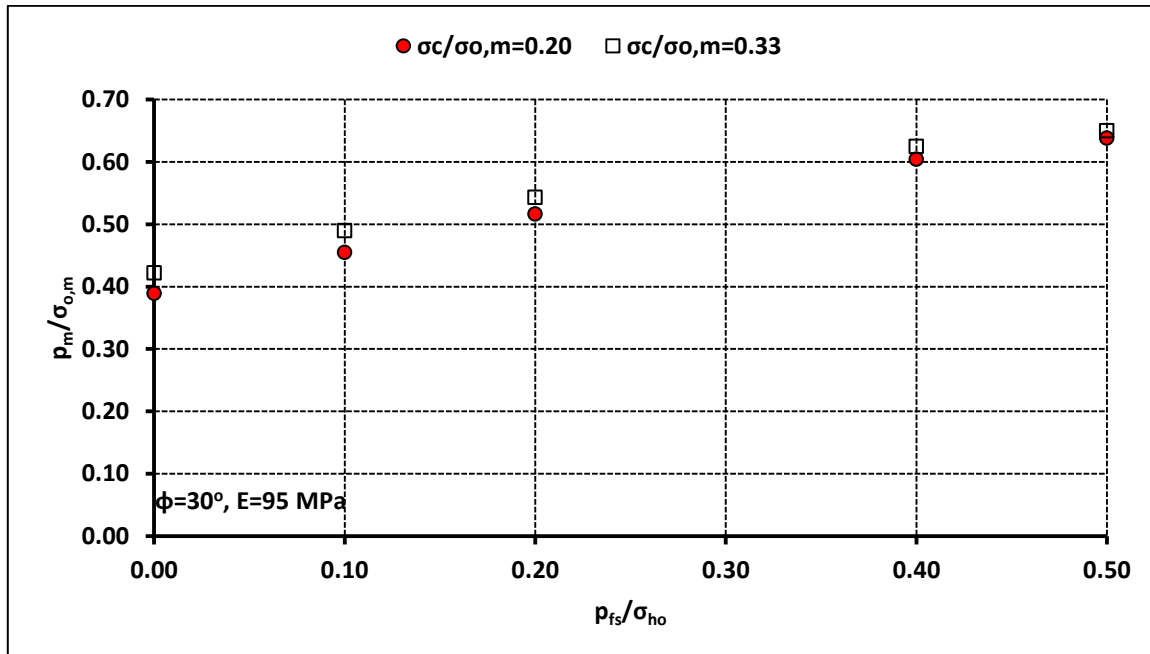
Οι παράγοντες που παρουσιάζουν καθοριστική επίδραση στο εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η γωνία τριβής  $\varphi$ . Ειδικότερα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Επιπρόσθετα, αν και η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, είτε για ανυποστήρικτο, είτε για υποστηριγμένο μέτωπο, η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται, για την ίδια πίεση υποστήριξης, αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, για το ίδιο εύρος του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Συγκεκριμένα, για  $\varphi = 20^\circ$  η αύξηση είναι έως και 40 %, για  $\varphi = 25^\circ$  η αύξηση είναι έως και 55 %, για  $\varphi = 30^\circ$  η αύξηση είναι έως και 70 % και για  $\varphi = 35^\circ$  η αύξηση είναι έως και 80 %. Η επίδραση της γωνίας τριβής  $\varphi$  είναι σημαντική γιατί επηρεάζει την δυνητική επιφάνεια αστοχίας στο μέτωπο εκσκαφής ενισχύοντας την διατμητική αντοχή του γεωυλικού.

Τα προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, όπως προκύπτουν από το Γράφημα 4.31, το Γράφημα 4.32, το Γράφημα 4.33 και το Γράφημα 4.34 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2 Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$ , για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m**

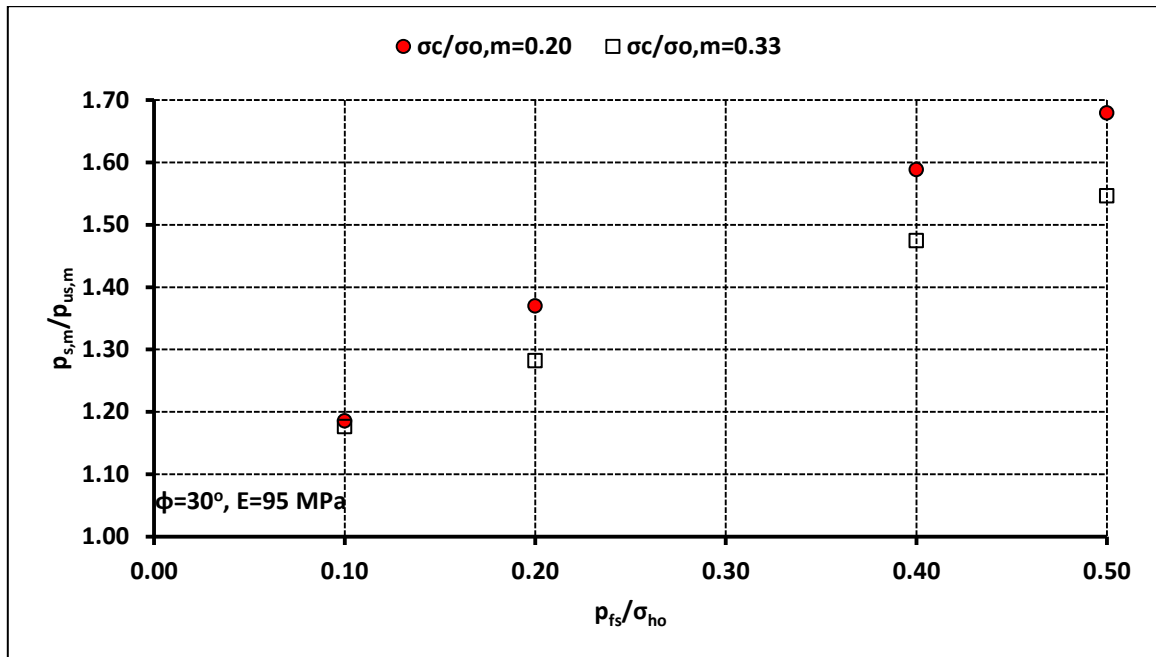
H=2D=20 m	$\varphi=20^\circ$	$\varphi=25^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=35^\circ$
	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.00-1.10	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.10-1.20	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.40$	1.25-1.35	1.35-1.45	1.45-1.60	1.55-1.70
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.50$	1.30-1.40	1.45-1.55	1.55-1.70	1.60-1.80

Η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  και του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\varphi = 30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.35 και στο Γράφημα 4.36.



Γράφημα 4.35: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\varphi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το εύρος της αύξησης καθορίζεται και εξαρτάται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και από το λόγο των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  και μικρότερο στις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ .



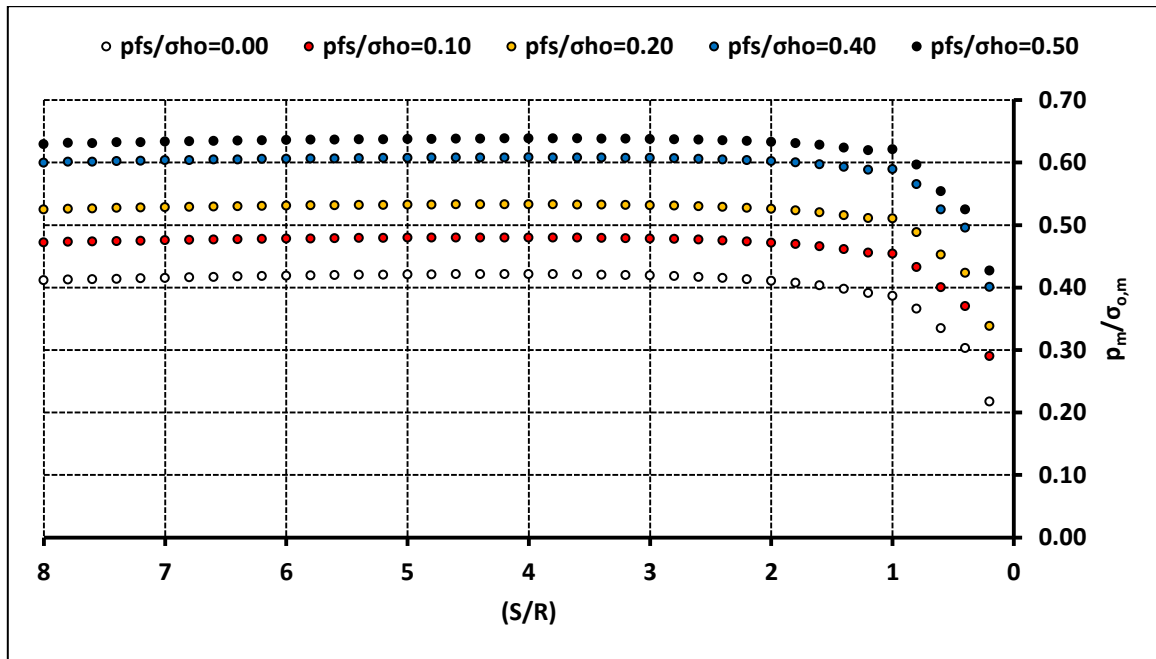
Γράφημα 4.36: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m για διαφορετικές τιμές του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$

Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ) παρουσιάζονται τα εξής:

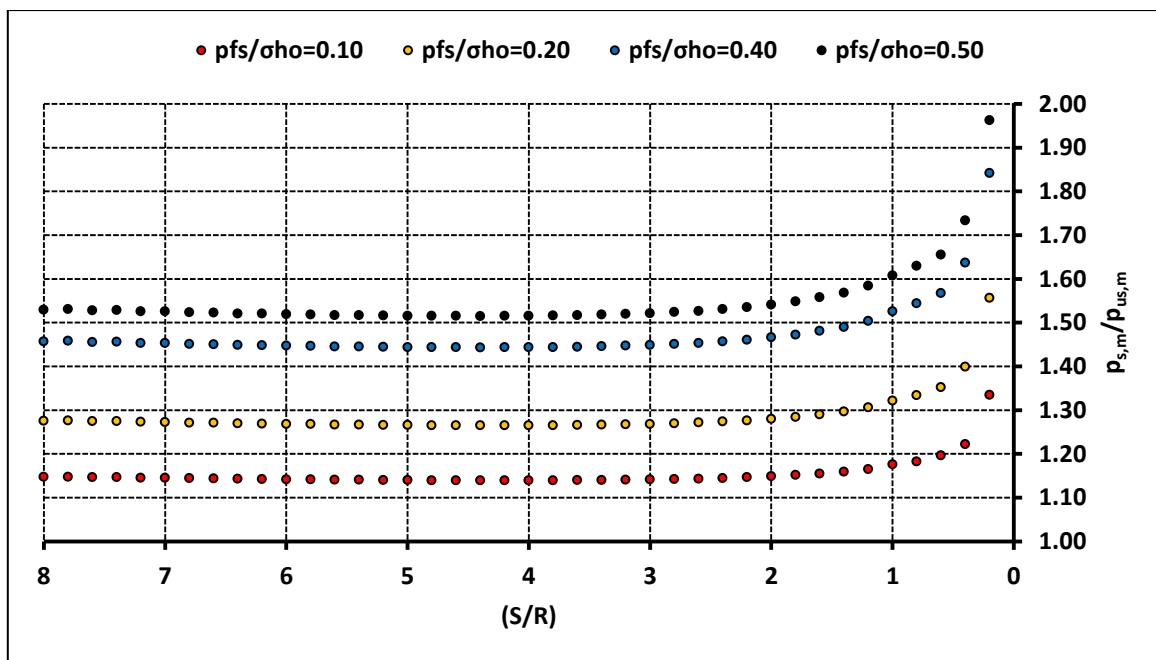
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.37 και στο Γράφημα 4.41
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.38 και στο Γράφημα 4.42
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.39 και στο Γράφημα 4.43
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.40 και στο Γράφημα 4.44

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτουν τα εξής:

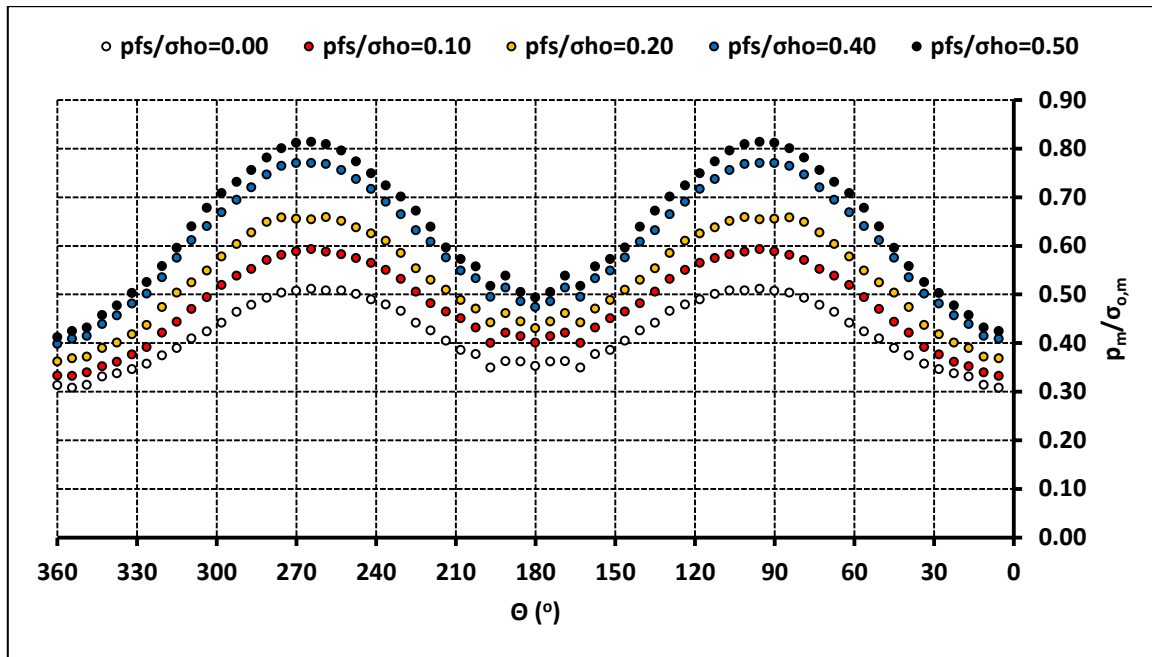
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη: (i) συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας (Γράφημα 4.37 και Γράφημα 4.41), (ii) συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας (Γράφημα 4.39 και Γράφημα 4.43)
- ✓ η σταθεροποίηση της μεταβολής (η σύγκλιση) του φορτίου στην άμεση υποστήριξη εντοπίζεται για  $S/R \geq 3$  (Γράφημα 4.37 και Γράφημα 4.41), είτε για ανυποστήρικτο, είτε για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την απόσταση σύγκλισης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.
- ✓ για  $S/R \geq 3$  (περιοχή στην οποία έχει ολοκληρωθεί η εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του γεωυλικού στη διάνοιξη και έχει επιτευχθεί σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη) το εύρος της αύξησης είναι σταθερό, ενώ για  $S/R \leq 3$  (περιοχή στην οποία δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη) το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη παρουσιάζει αυξανόμενη τάση προς το μέτωπο εκσκαφής. Ειδικότερα, όσο προσεγγίζεται το μέτωπο εκσκαφής παρουσιάζεται το μέγιστο εύρος της αύξησης και επομένως εξάγεται ότι η επίδραση της πίεσης υποστήριξης μεγιστοποιείται στο μέτωπο εκσκαφής (Γράφημα 4.38 και στο Γράφημα 4.42).
- ✓ το φορτίο στην άμεση υποστήριξη παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της στις παρειές της σήραγγας ( $\theta = 90^\circ$  &  $\theta = 270^\circ$ ) και την ελάχιστη τιμή της στη στέψη και στον πυθμένα της σήραγγας ( $\theta = 0^\circ$  &  $\theta = 180^\circ$ ) (Γράφημα 4.39 και Γράφημα 4.43). Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση είναι ορθή και προκύπτει λόγω της θεώρησης συντελεστή οριζόντιων τάσεων  $K_o = 0.5$ .



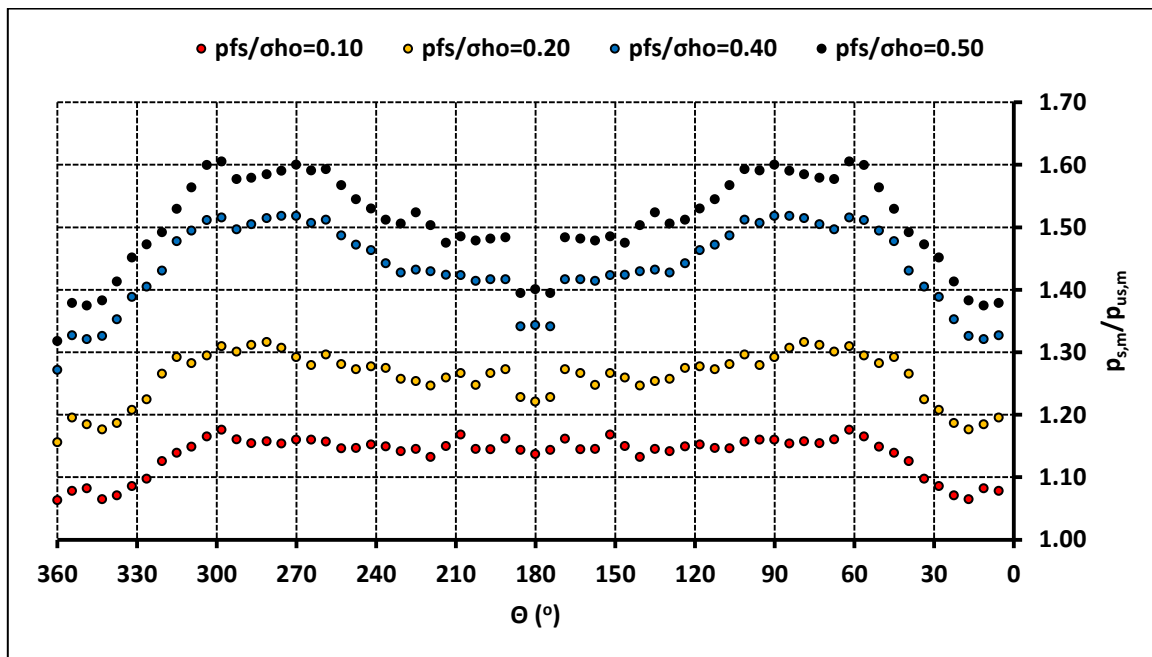
Γράφημα 4.37: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



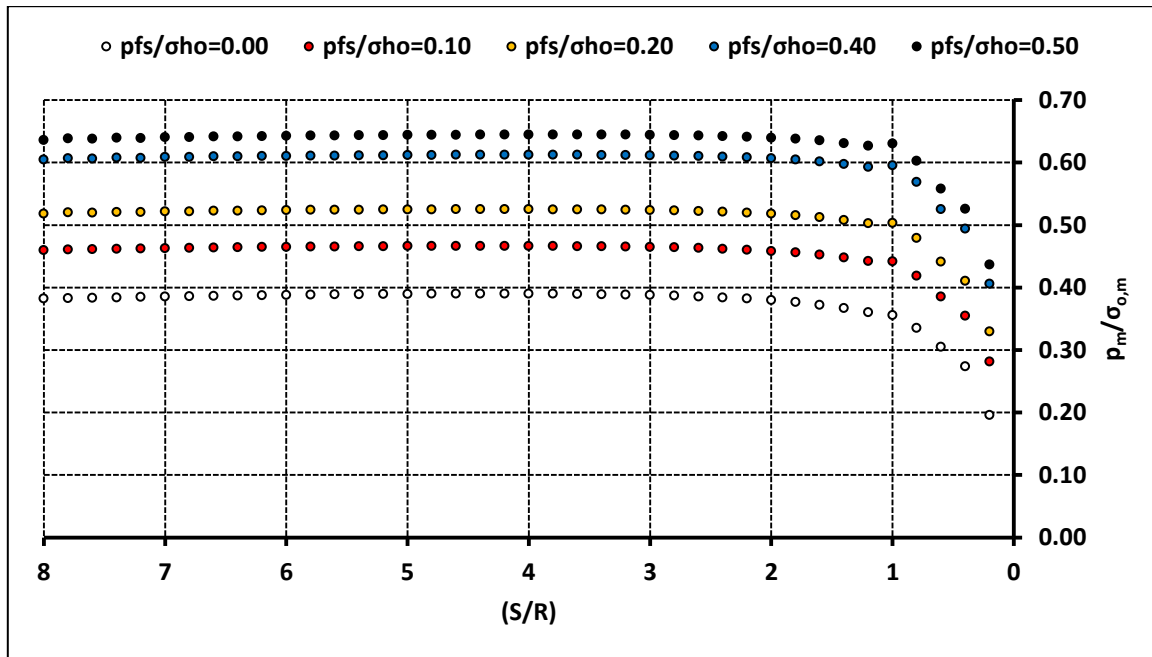
Γράφημα 4.38: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου S/R κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



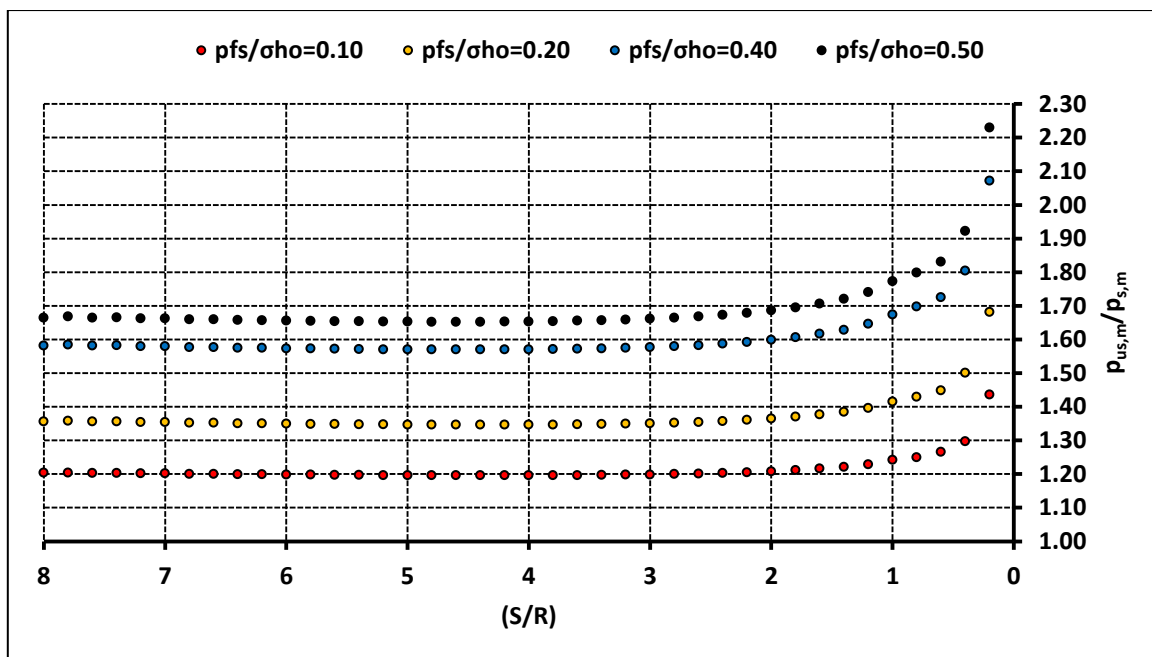
Γράφημα 4.39: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



Γράφημα 4.40: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )

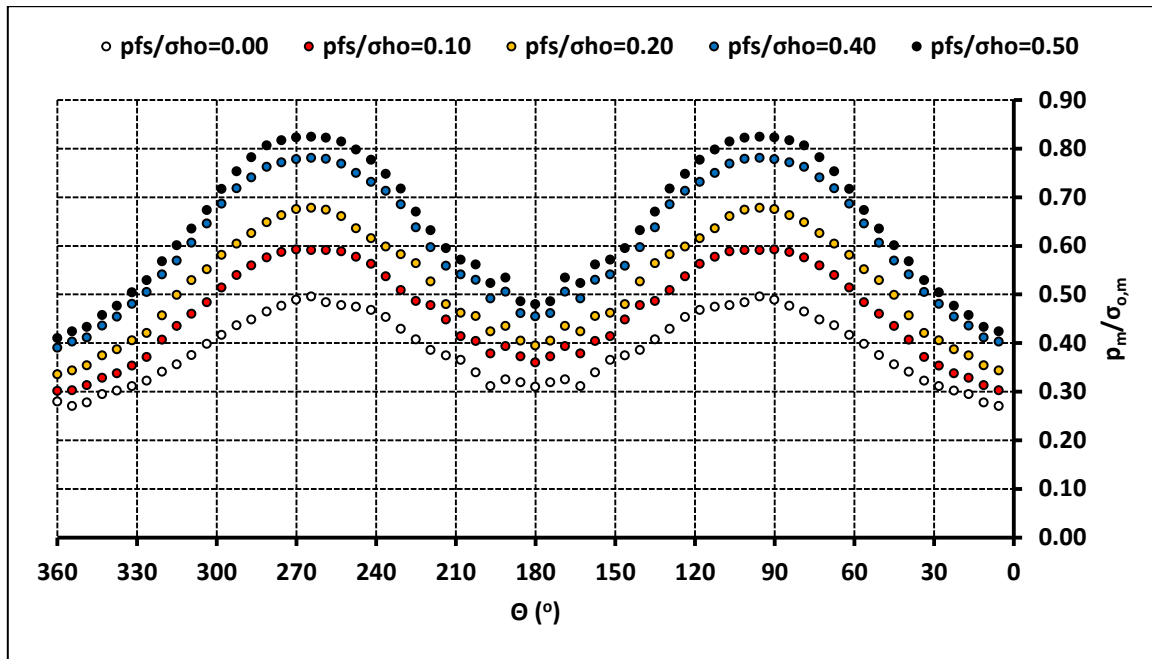


Γράφημα 4.41: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

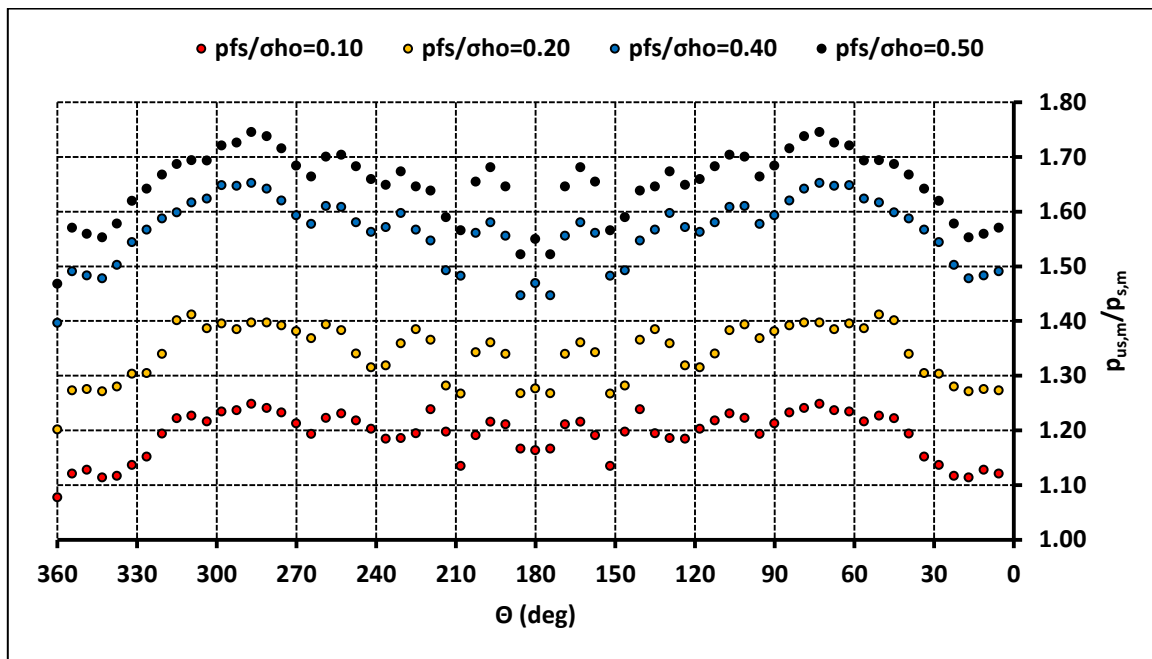


Γράφημα 4.42: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

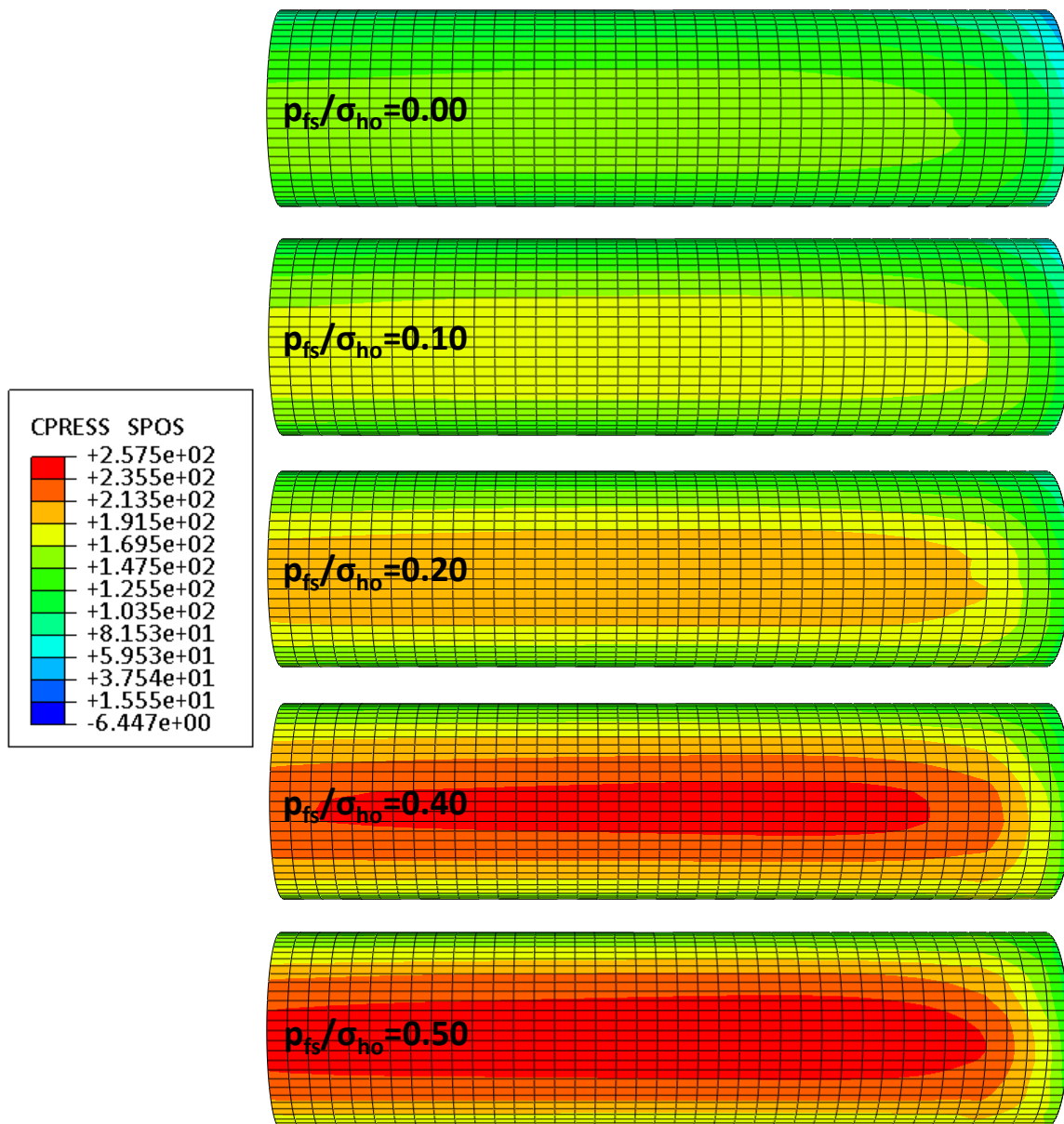




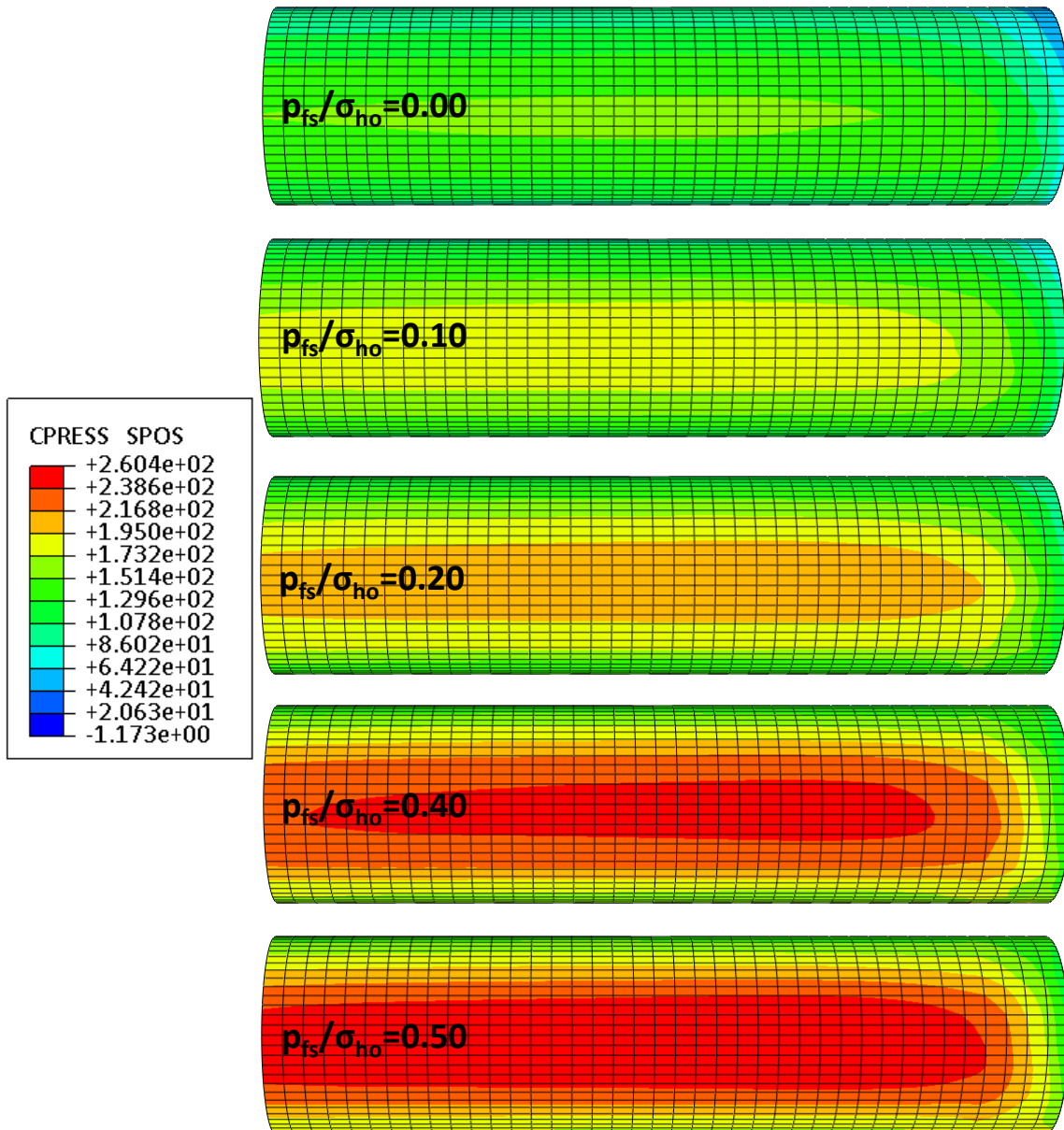
Γράφημα 4.43: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )



Γράφημα 4.44: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )



Εικόνα 4.3 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



Εικόνα 4.4 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Το φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 20$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3 και στην Εικόνα 4.4.

### 4.1.3. Επίδραση του Ύψους Υπερκείμενων

Για να εξεταστεί η επίδραση του ύψους υπερκείμενων στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας εξαιτίας της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής απομονώθηκαν από τα γεωυλικά που διερευνήθηκαν οι κοινές γωνίες τριβής  $\varphi$  ( $\varphi = 25^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 35^\circ$ ) και οι κοινές κανονικοποιημένες πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) για ύψη υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m και  $H = 5D = 50$  m και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.3** Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$  για ύψη υπερκείμενων  $H=2D=20$  m και  $H=5D=50$  m

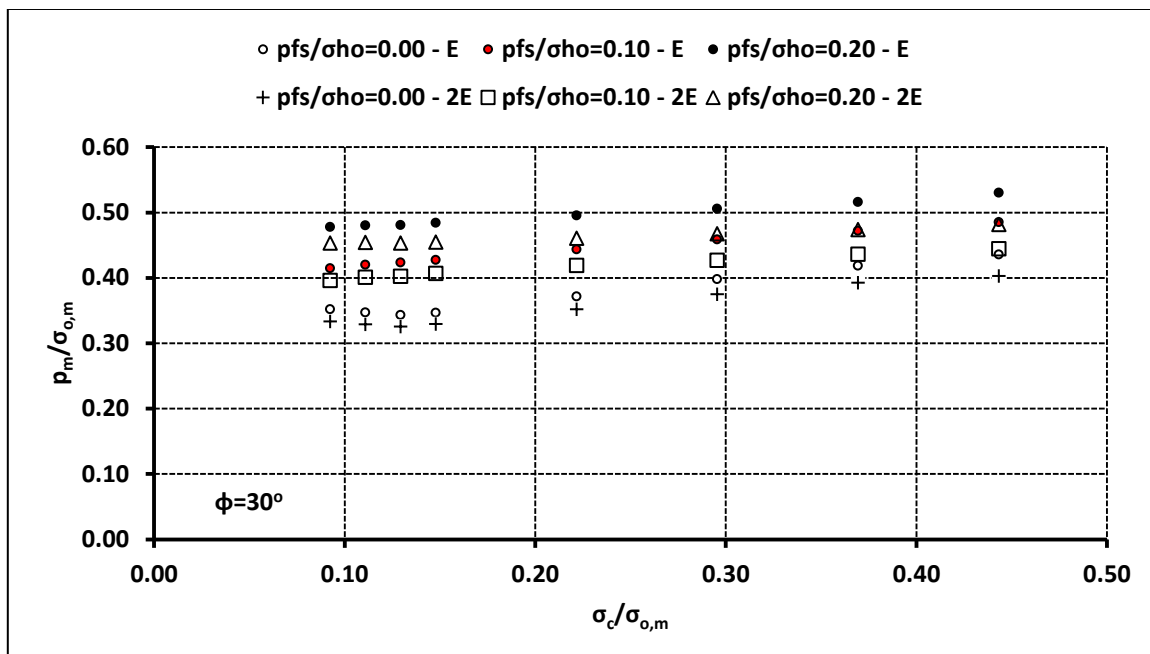
		$\varphi=25^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=35^\circ$
$p_{fs}/\sigma_{ho}$	H	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$	$p_{s,m}/p_{us,m}$
0.10	2D=20 m	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25
	5D=50 m	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
0.20	2D=20 m	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45
	5D=50 m	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 εξάγεται ότι το ύψος υπερκείμενων δεν αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει καθοριστικά το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Ωστόσο, τα προτεινόμενα εύρη του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  δεν ταυτίζονται απόλυτα, αλλά παρουσιάζονται αποκλίσεις που εντοπίζονται για αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  και για το ανώτερο όριο του προτεινόμενου εύρους του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$ . Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι: (i) για γωνίες τριβής  $\varphi = 25^\circ$  και  $\varphi = 30^\circ$  τα κατώτερα όρια του προτεινόμενου εύρους του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  ταυτίζονται, ενώ τα ανώτερα όρια παρουσιάζουν απόκλιση έως 5 %, (ii) για γωνία τριβής  $\varphi = 35^\circ$  τα κατώτερα όρια του προτεινόμενου εύρους του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζουν απόκλιση έως 5 %, ενώ τα ανώτερα όρια παρουσιάζουν απόκλιση έως 10 %.

#### 4.1.4. Επίδραση του Μέτρου Παραμορφωσιμότητας

Για να εξεταστεί η επίδραση του μέτρου παραμορφωσιμότητας στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας εξαιτίας της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστηρίκτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) διερευνήθηκε για γωνία τριβής  $\varphi = 30^\circ$  η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  κατά 50 %.

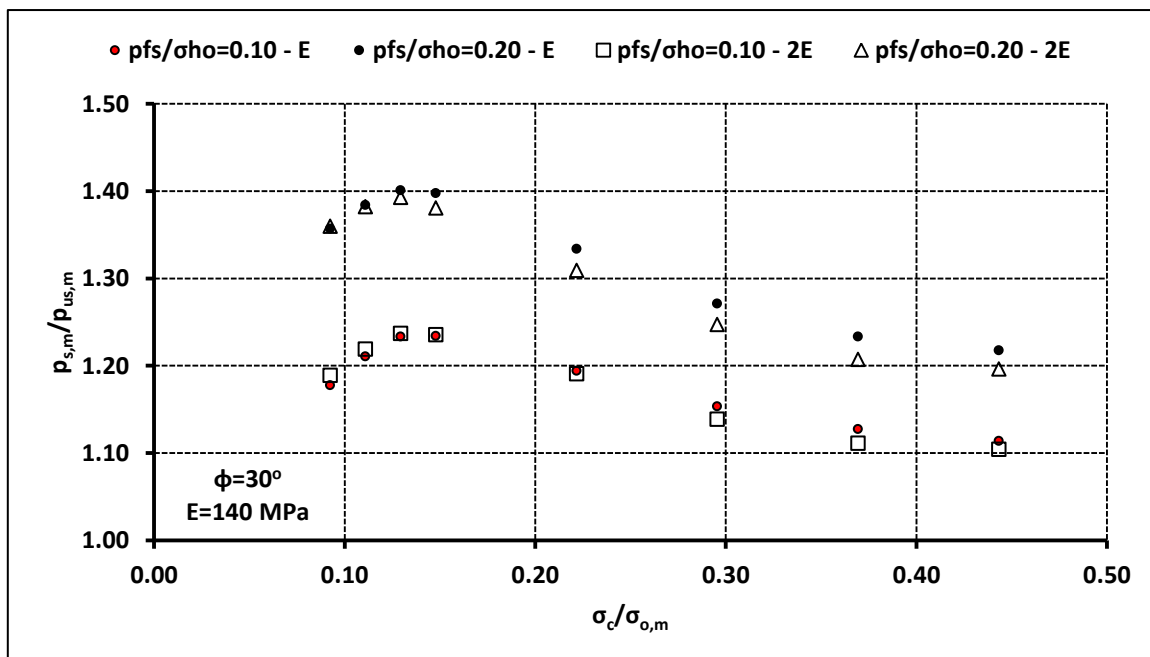
Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.45 και η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.46.



Γράφημα 4.45: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m για μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$

Από το Γράφημα 4.45 προκύπτει ότι η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  κατά 50 % προκαλεί μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Η συγκεκριμένη απόκριση προκύπτει λόγω της βελτίωσης της μηχανικής απόκρισης του γεωυλικού που προκαλεί η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$ . Ειδικότερα, περιορίζεται το εύρος της πλαστικής ζώνης και της ανακατανομής των τάσεων του γεωυλικού λόγω της διάνοιξης της σήραγγας. Επομένως, το φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας παρουσιάζει μείωση.

Από το Γράφημα 4.46 προκύπτει ότι η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  κατά 50 % προκαλεί περιορισμένες διακυμάνσεις στις τιμές του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  καταδεικνύοντας ότι το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει το φορτίο στην άμεση υποστήριξη εξαιτίας της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  επηρεάζει και καθορίζει την τελική δυνητική μετακίνηση του γεωυλικού η οποία παρεμποδίζεται λόγω της άμεσης υποστήριξης και επομένως προκαλεί την ανάπτυξη του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  επηρεάζει τη δυσκαμψία του περιβάλλοντος γεωυλικού και της άμεσης υποστήριξης κατά την αλληλεπίδραση τους έως την σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη και την επίτευξη ισορροπίας, αλλά δεν επηρεάζει σημαντικά την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης που ελέγχεται και καθορίζεται από τις παραμέτρους αντοχής του γεωυλικού και αποτελεί το βασικό παράγοντα διαμόρφωσης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  δεν επηρεάζει σημαντικά το φορτίο στην άμεση υποστήριξη για δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες γιατί το εύρος της πλαστικής ζώνης και η πλαστική απόκριση του γεωυλικού είναι οι παράγοντες από τους οποίους καθορίζεται το φορτίο. Ωστόσο, για ευμενείς γεωτεχνικές συνθήκες η μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  ενδέχεται να προκαλεί σημαντική μεταβολή στο φορτίο της άμεσης υποστήριξης (Φορτσάκης 2012).



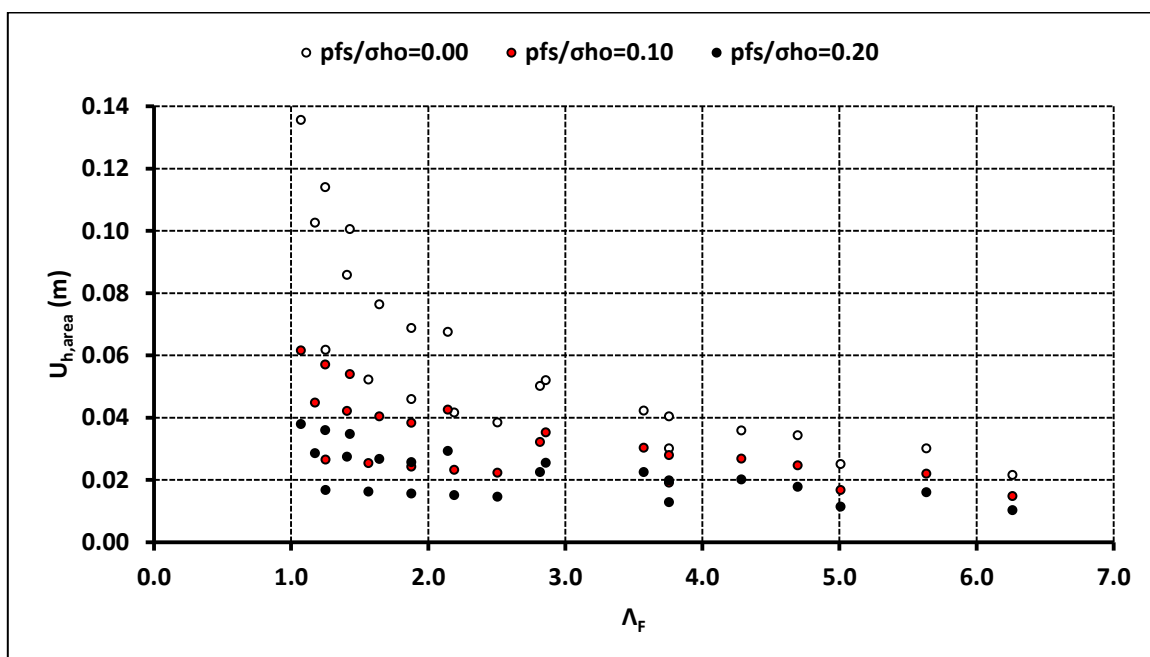
Γράφημα 4.46: Κατανομή του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου των γεωτεχνικών συνθηκών  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για γωνία τριβής  $\phi=30^\circ$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$  για μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$

## 4.2. Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας

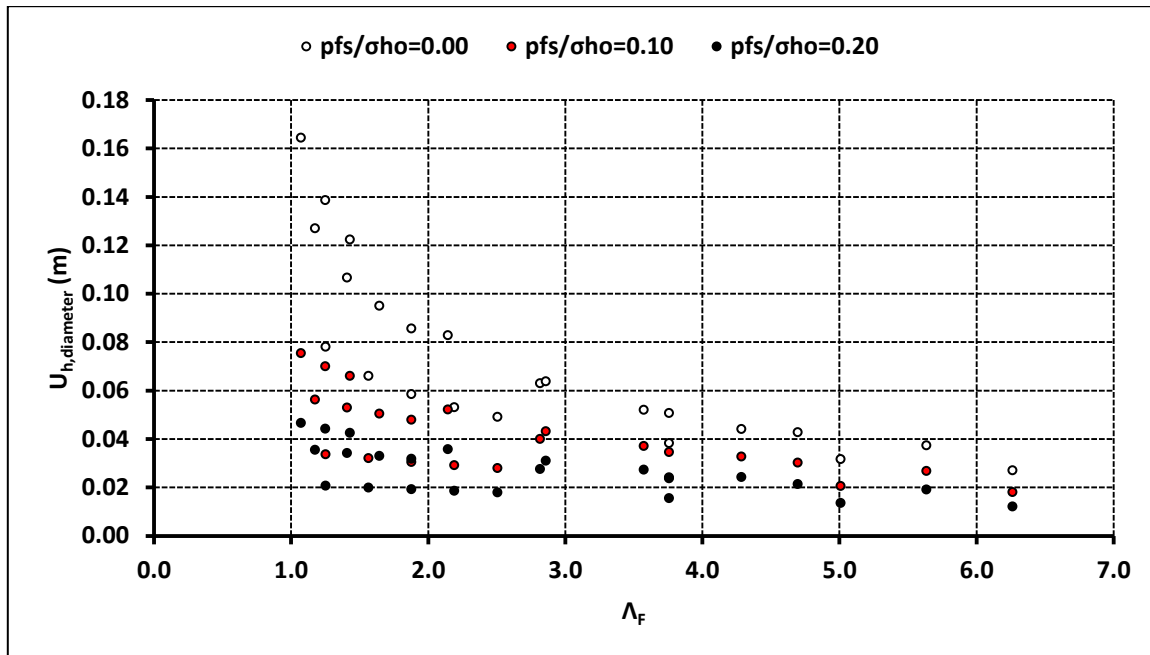
### 4.2.1. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m

Τα αποτελέσματα της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.47 και στο Γράφημα 4.48. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,diameter}$  στο Γράφημα 4.47 και η κατανομή της μέσης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,area}$  στο Γράφημα 4.48 συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ .

Τα μέτωπα εκσκαφής στα οποία διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης αντιστοιχούν σε  $\Lambda_F > 1$  και συγκεκριμένα σε  $1 < \Lambda_F < 7$ . Οι συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  αντιστοιχούν σε οριακά ευσταθή μέτωπα εκσκαφής, στα οποία εφαρμόζονται μέτρα ενίσχυσης/σταθεροποίησης, ώστε να επιτευχθεί και να διασφαλιστεί η ευστάθεια, σε ευσταθή και σε πλήρως ευσταθή μέτωπα εκσκαφής, στα οποία δεν εφαρμόζονται αντίστοιχα μέτρα. Ειδικότερα, για το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στα μέτωπα εκσκαφής που διερευνήθηκαν, με βάση την αναλυτική μεθοδολογία (Anagnostou and Kovari, 1994 & 1996) υπολογίστηκαν στο εξής εύρος  $FS = 1.1 - 3.9$  και προέκυψαν οριακά ή πολύ μεγαλύτεροι της κρίσιμης τιμής του συντελεστή ασφαλείας  $FS_{cr} = 1$ . Το συγκεκριμένο εύρος προτιμήθηκε ώστε να καταστεί εφικτή η εκτενέστερη διερεύνηση της μεταβολής της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής λόγω της πίεσης υποστήριξης.



Γράφημα 4.47: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

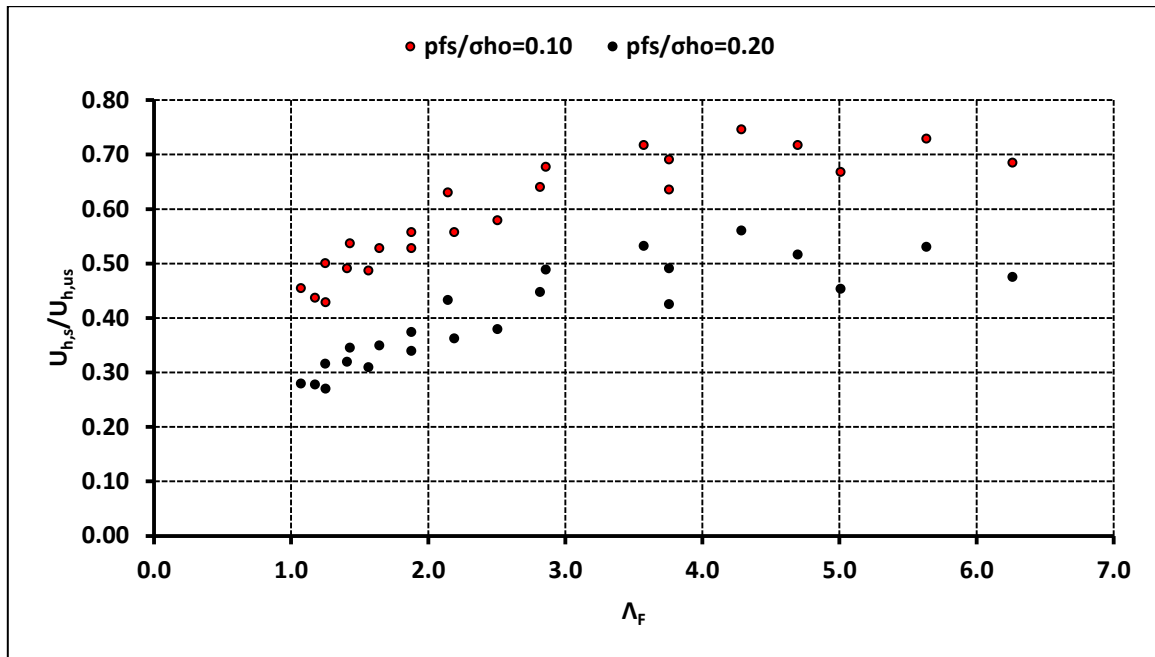


Γράφημα 4.48: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,diameter}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50 \text{ m}$

Από το Γράφημα 4.47 και το Γράφημα 4.48 προκύπτει ότι η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζει την έκθλιψη. Ο βαθμός περιορισμού της έκθλιψης είναι μεγαλύτερος στα οριακά ευσταθή και ευσταθή μέτωπα εκσκαφής. Η συγκεκριμένη απόκριση είναι αναμενόμενη γιατί στο εύρος του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $1 < \Lambda_F < 2$  η έκθλιψη που αντιστοιχεί σε ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) παρουσιάζει ανοδικό κλάδο και ειδικότερα εμφανίζει αύξηση που καταδεικνύει ότι το μέτωπο εκσκαφής είναι σε κατάσταση οριακής ευστάθειας ή ευστάθειας. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο εύρος τα μέτωπα εκσκαφής δεν θεωρούνται ασταθή ή πλήρως ασταθή, αλλά ενδείκνυται η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, ώστε να περιοριστεί η ανάπτυξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια και να αποτραπεί ενδεχόμενη αστοχία για μέτωπα εκσκαφής που είναι στο όριο ευστάθειας/αστάθειας ( $\Lambda_F = 1$ ). Ο βαθμός περιορισμού της έκθλιψης είναι μικρότερος στα πλήρως ευσταθή μέτωπα εκσκαφής ( $\Lambda_F > 2$ ). Η μείωση της έκθλιψης εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης υποστήριξης (η συσχέτιση είναι ανάλογη).

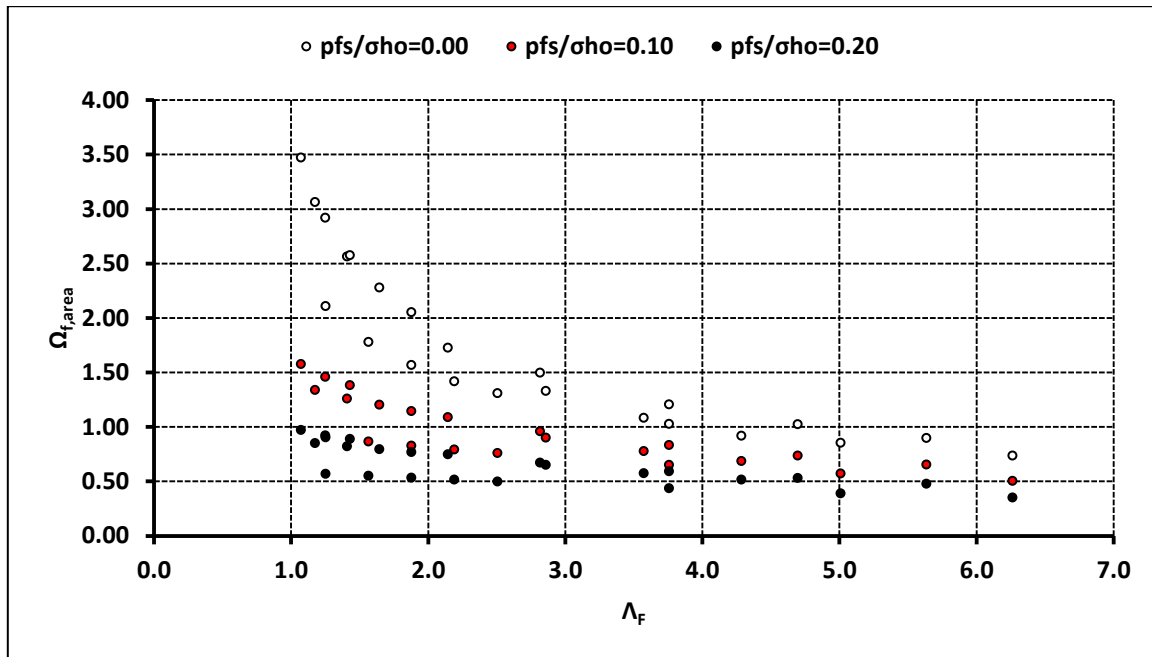
Η σταθεροποιητική επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής επιβεβαιώνεται και από την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στα υποστηριγμένα μέτωπα εκσκαφής ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ). Συγκεκριμένα, οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στα υποστηριγμένα μέτωπα εκσκαφής που διερευνήθηκαν, με βάση την αναλυτική μεθοδολογία υπολογίστηκαν στο εξής εύρος  $FS = 1.6 - 4.9$ . Ωστόσο, η μεγαλύτερη επιρροή στα οριακά ευσταθή μέτωπα απεικονίζεται και στο Γράφημα 4.49 στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $U_{h,s}/U_{h,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου της έκθλιψης του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής προς το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Ειδικότερα, για  $1 < \Lambda_F < 2$  η έκθλιψη μειώνεται από 30 % έως 70 %, ενώ για  $\Lambda_F > 2$  η έκθλιψη μειώνεται από 25 % έως 45 %.



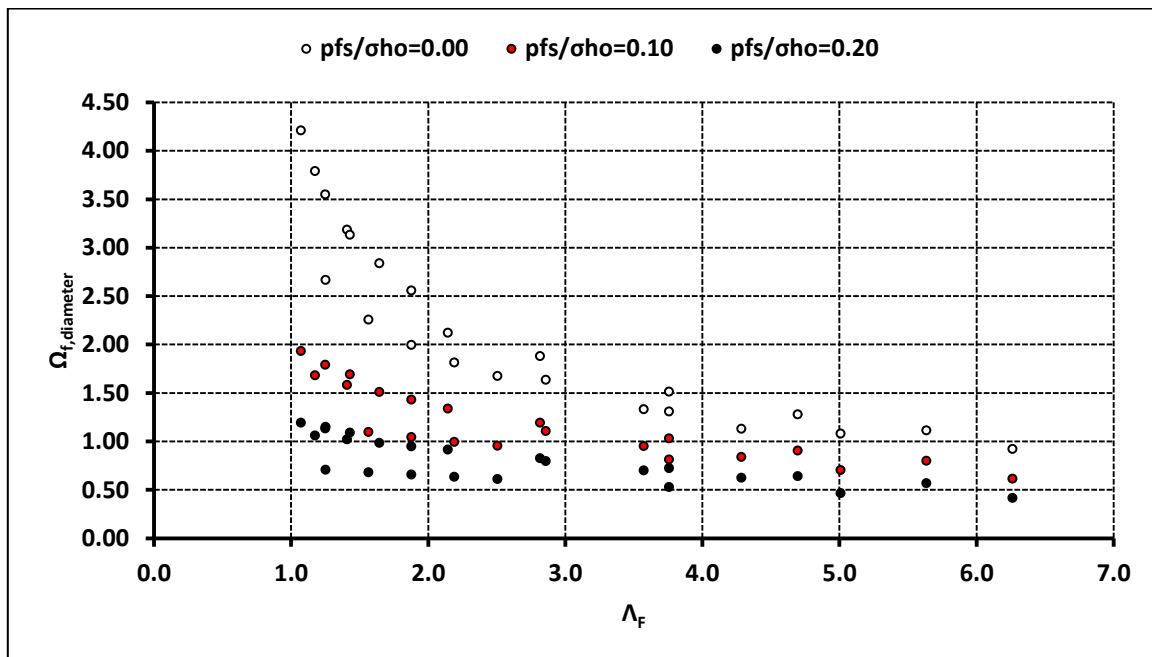


Γράφημα 4.49: Κατανομή του λόγου  $U_{h,s}/U_{h,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Τα αποτελέσματα της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.50 και στο Γράφημα 4.51. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,diameter}$  στο Γράφημα 4.50 και η κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  στο Γράφημα 4.51 συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την αντίστοιχη των αποτελεσμάτων της έκθλιψης  $U_h$ .

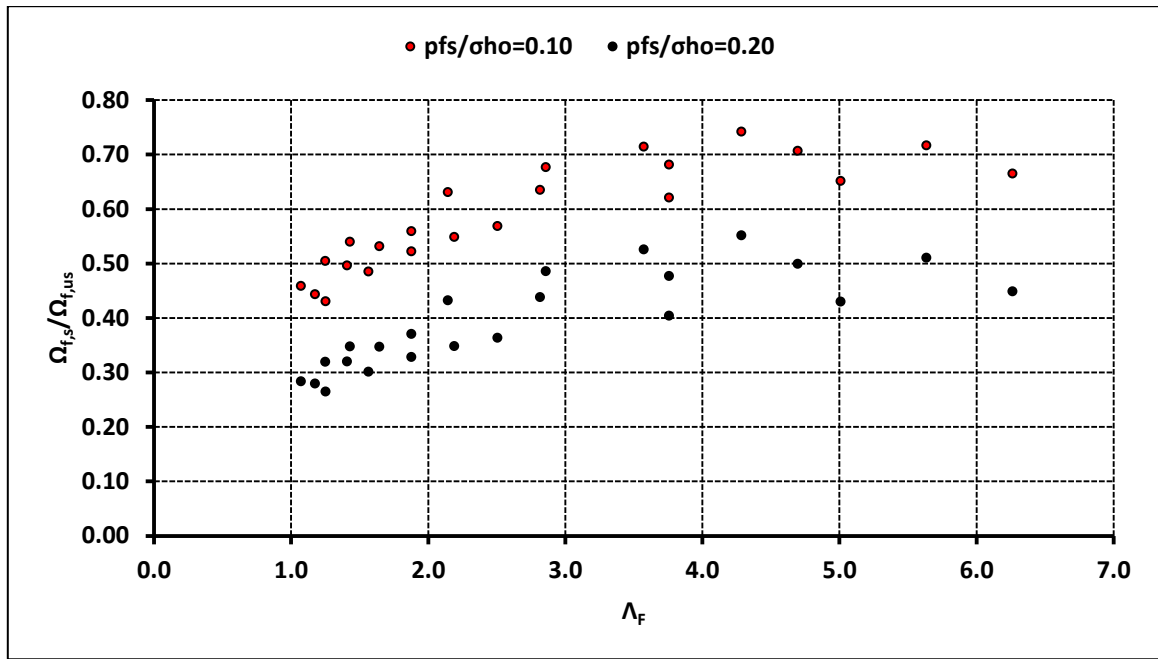


Γράφημα 4.50: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m



Γράφημα 4.51: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,diameter}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Στο Γράφημα 4.52 στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $\Omega_{f,S}/\Omega_{f,US}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την αντίστοιχη των αποτελεσμάτων του λόγου  $U_{h,S}/U_{h,US}$ .



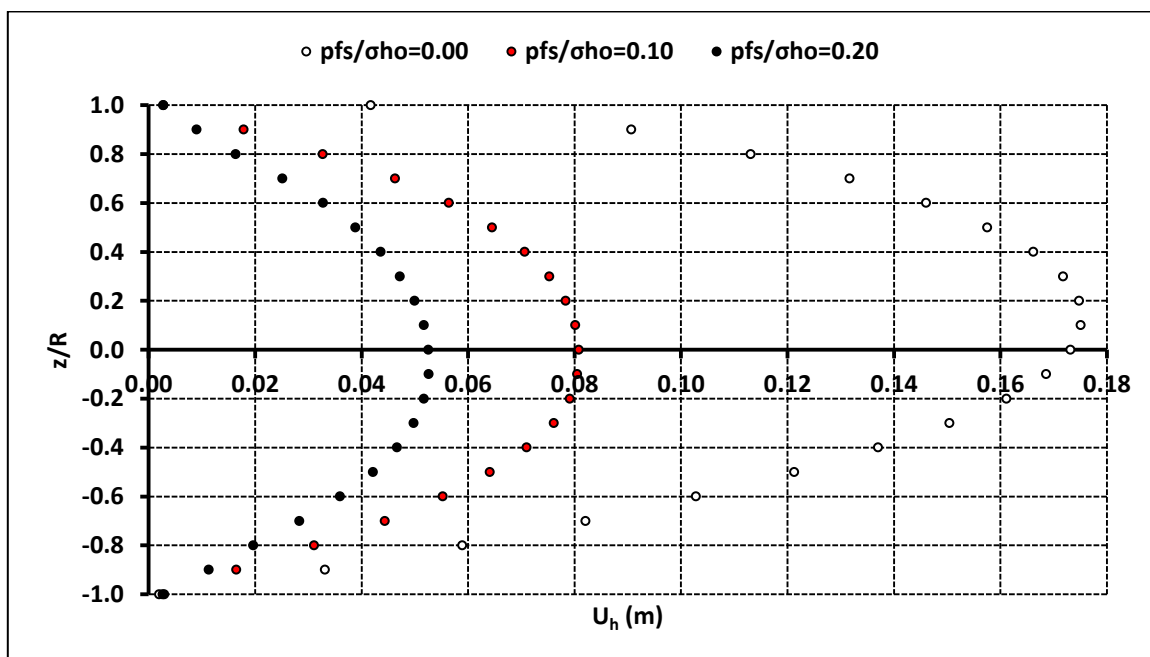
Γράφημα 4.52: Κατανομή του λόγου  $\Omega_{f,s}/\Omega_{f,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10, p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται τα εξής:

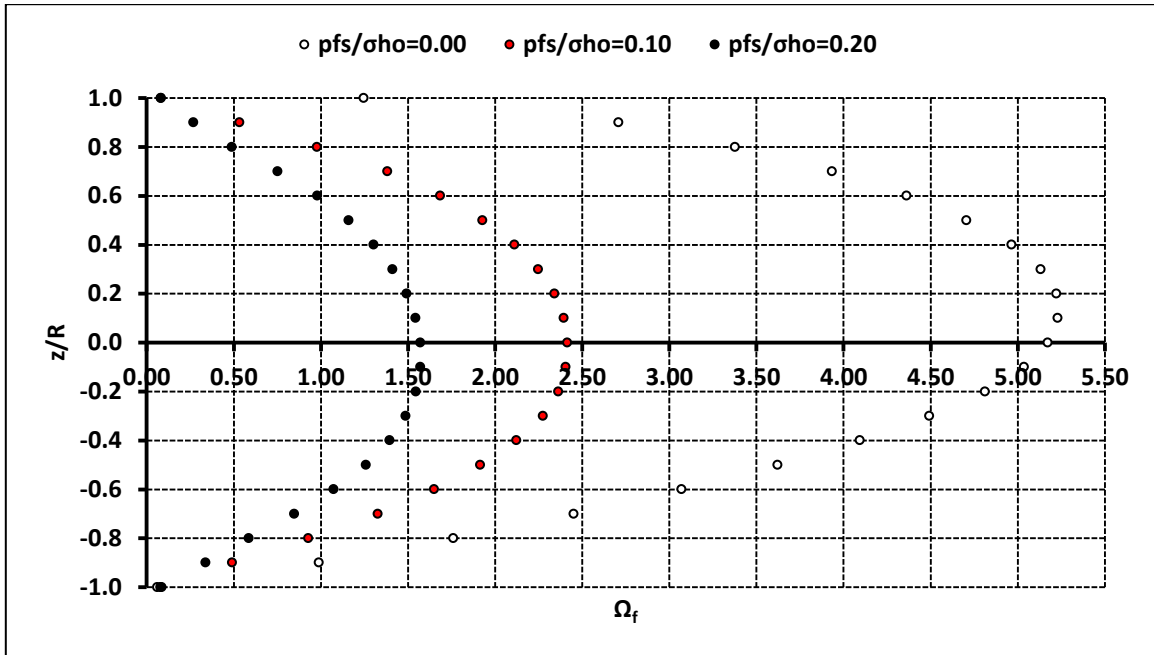
- ✓ η κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.53 και στο Γράφημα 4.55
- ✓ η κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.54 και στο Γράφημα 4.56

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτει το εξής:

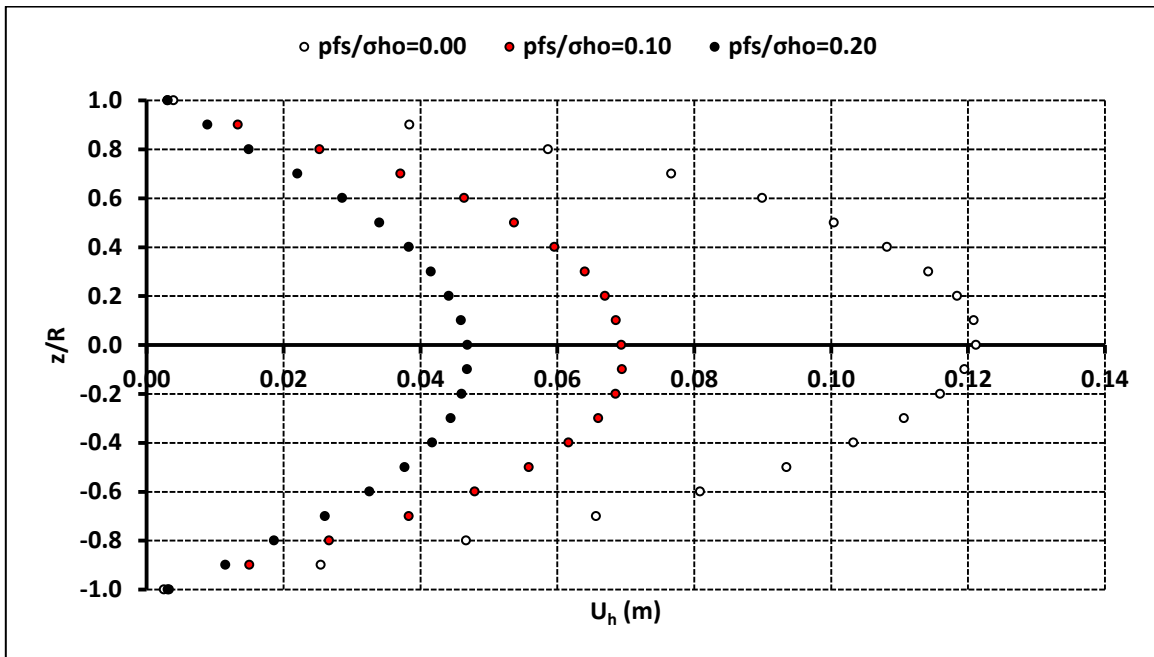
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  και στην κανονικοποιημένη έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$



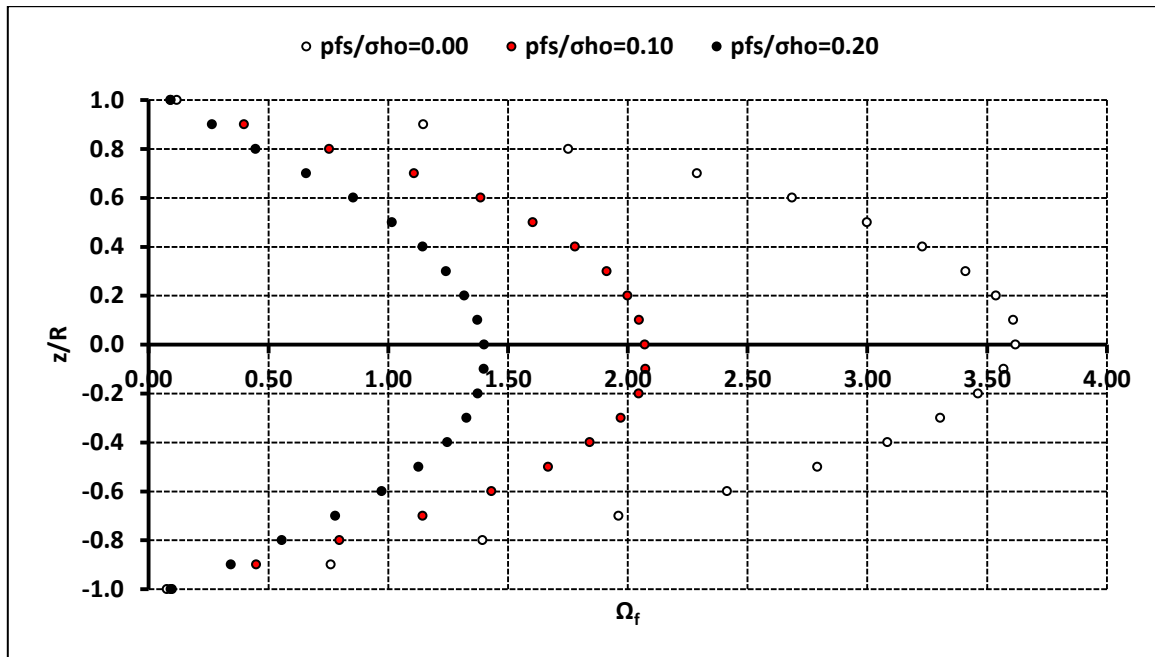
Γράφημα 4.53: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )



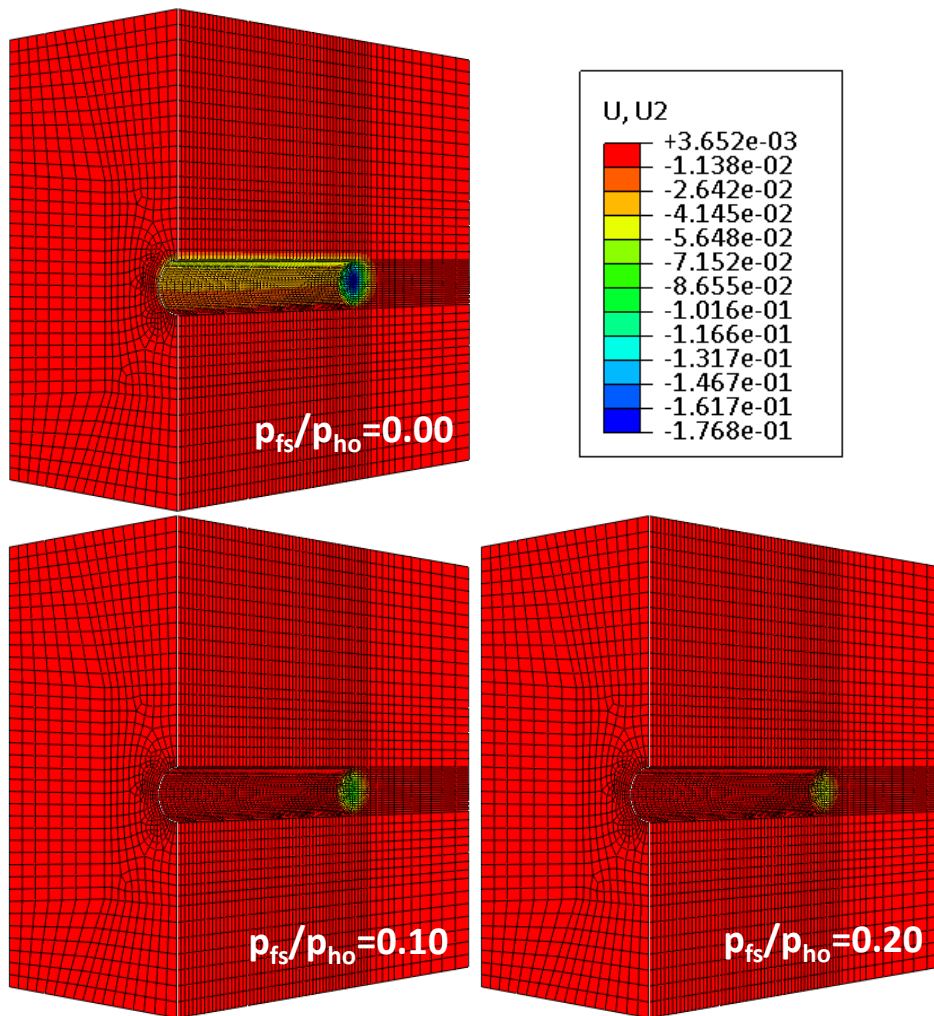
Γράφημα 4.54: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )



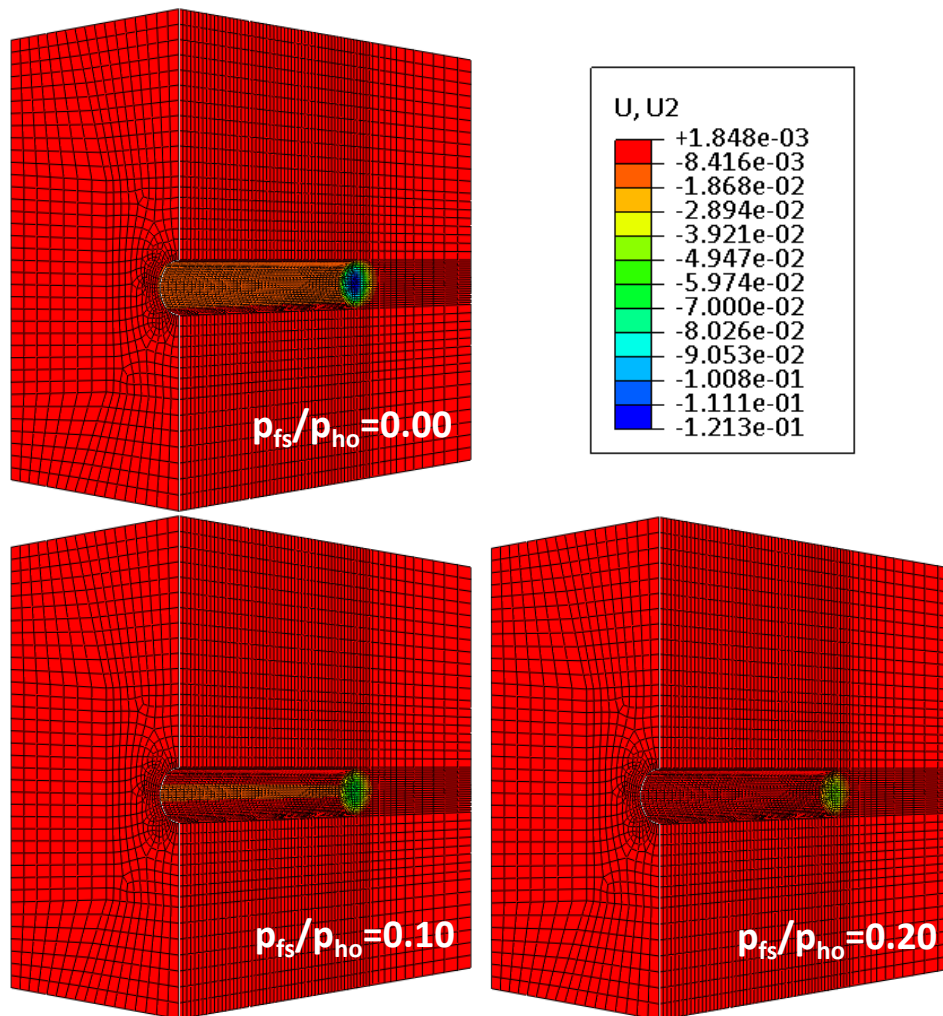
Γράφημα 4.55: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



Γράφημα 4.56: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )



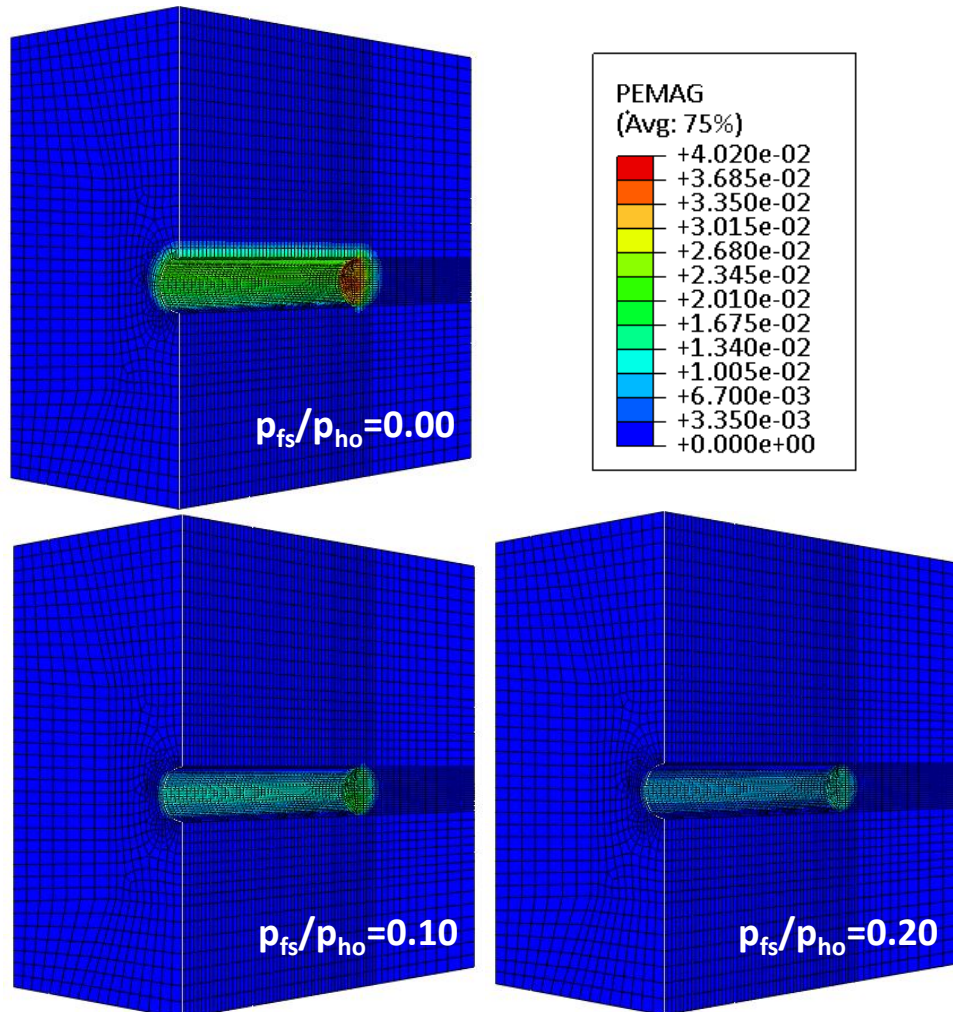
Εικόνα 4.5 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )



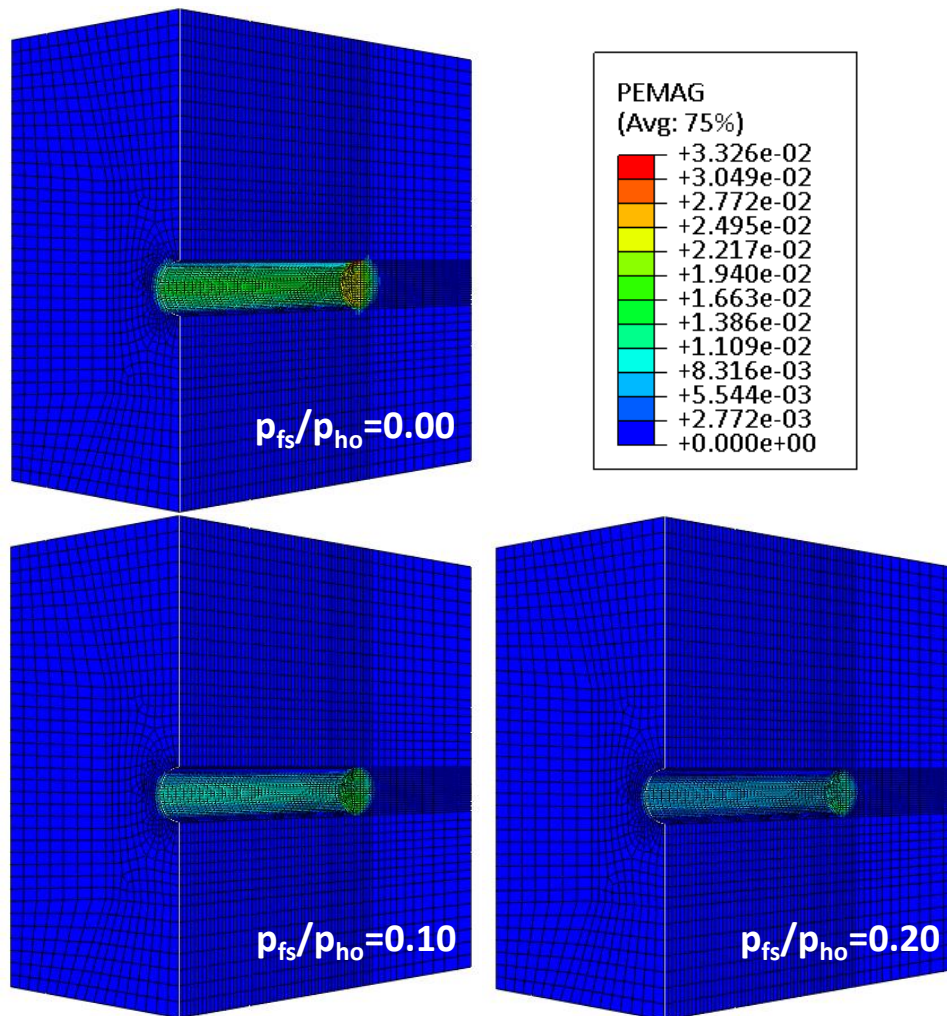
Εικόνα 4.6 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5 και στην Εικόνα 4.6. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις.



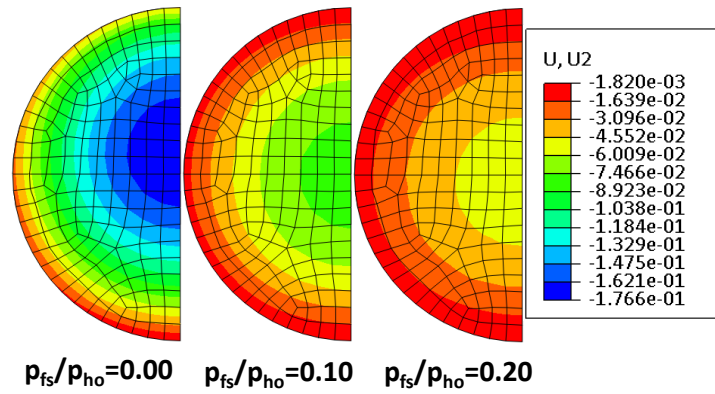


Εικόνα 4.7 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )

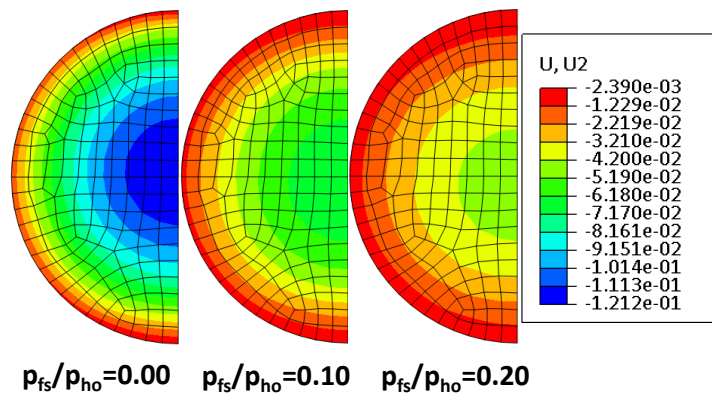


Εικόνα 4.8 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_T=1.88$ )

Οι πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7 και στην Εικόνα 4.8. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 4.9 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )



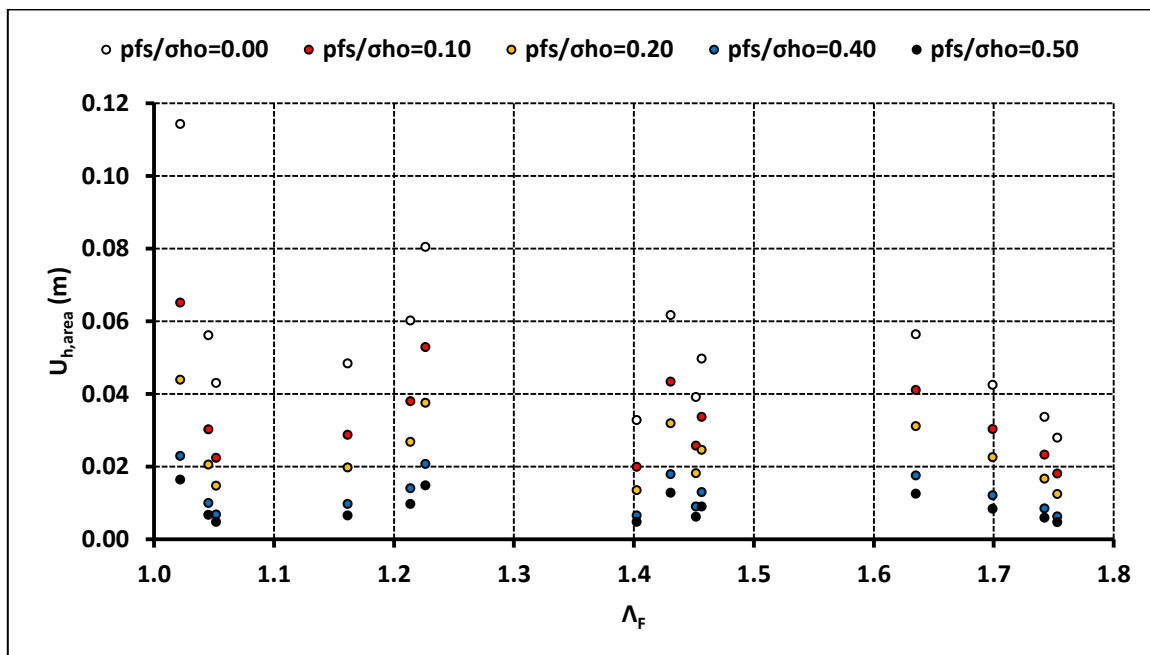
Εικόνα 4.10 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9 και στην Εικόνα 4.10. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής.

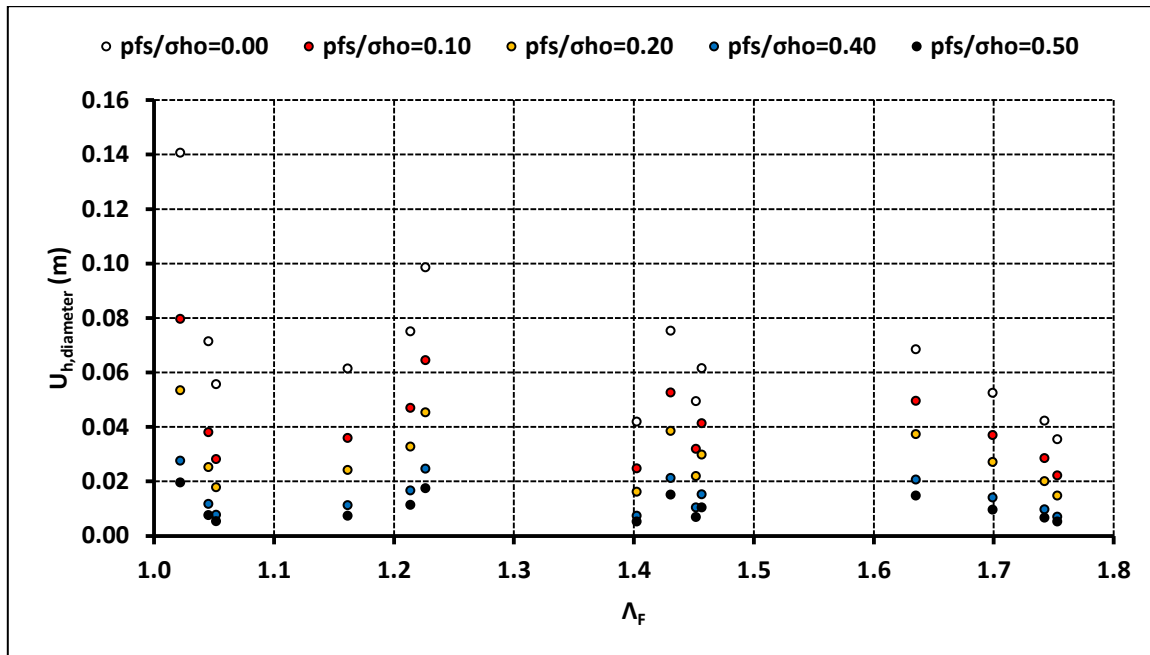
#### 4.2.2. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m

Τα αποτελέσματα της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.57 και στο Γράφημα 4.58. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,diameter}$  στο Γράφημα 4.57 και η κατανομή της μέσης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,area}$  στο Γράφημα 4.58 συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ .

Τα μέτωπα εκσκαφής στα οποία διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης αντιστοιχούν σε  $\Lambda_F > 1$  και συγκεκριμένα σε  $1 < \Lambda_F < 2$ . Οι συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  αντιστοιχούν σε οριακά ευσταθή μέτωπα εκσκαφής, στα οποία εφαρμόζονται μέτρα ενίσχυσης/σταθεροποίησης, ώστε να επιτευχθεί και να διασφαλιστεί η ευστάθεια και σε ευσταθή μέτωπα, στα οποία δεν εφαρμόζονται αντίστοιχα μέτρα. Ειδικότερα, για το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στα μέτωπα εκσκαφής που διερευνήθηκαν, με βάση την αναλυτική μεθοδολογία (Anagnostou and Kovari, 1994 & 1996) υπολογίστηκαν στο εξής εύρος  $FS = 0.9 - 1.5$  και προέκυψαν οριακά μικρότεροι ή οριακά έως λίγο μεγαλύτεροι της κρίσιμης τιμής του συντελεστή ασφαλείας  $FS_{cr} = 1$ . Το συγκεκριμένο εύρος προτιμήθηκε ώστε να καταστεί εφικτή η στοχευμένη διερεύνηση της μεταβολής της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής λόγω της πίεσης υποστήριξης για μέτωπα εκσκαφής που χρειάζονται μέτρα ενίσχυσης/σταθεροποίησης.



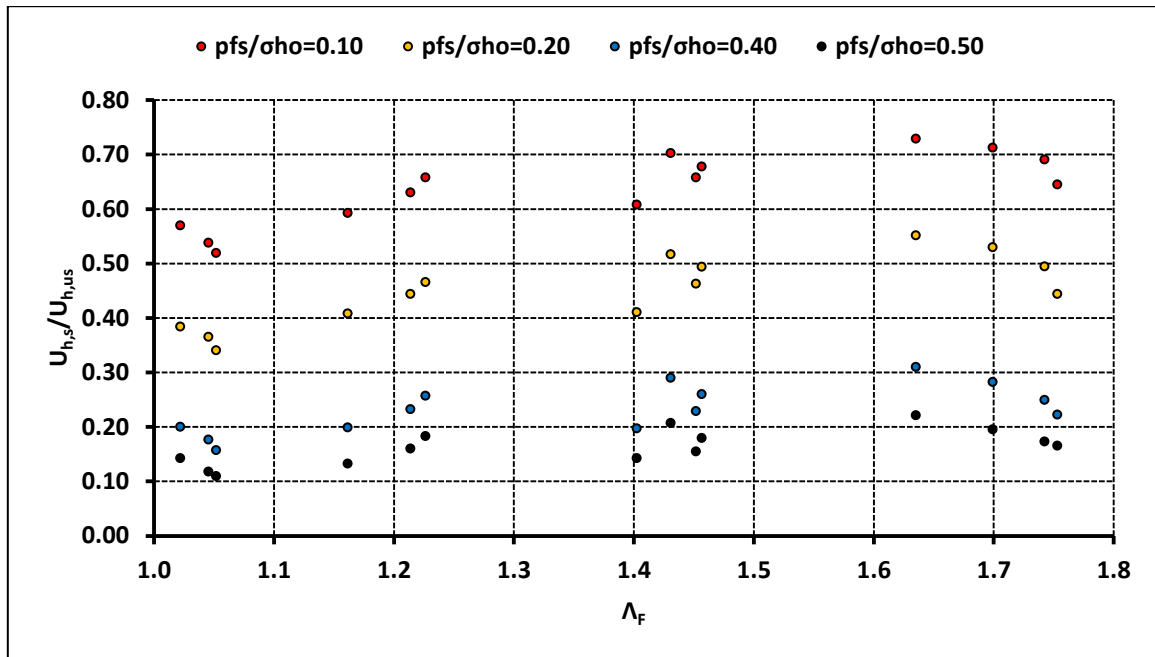
Γράφημα 4.57: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Γράφημα 4.58: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_{h,diameter}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20 \text{ m}$

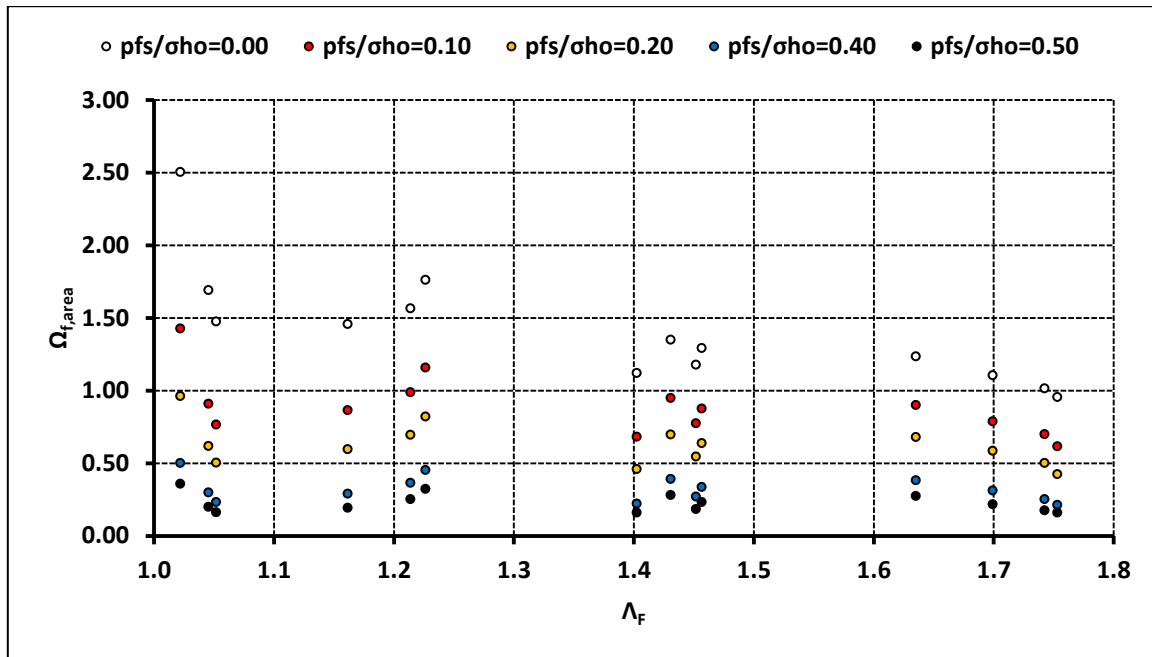
Από το Γράφημα 4.57 και στο Γράφημα 4.58 προκύπτει ότι η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζει την έκθλιψη. Ο βαθμός περιορισμού της έκθλιψης είναι μεγάλος. Η συγκεκριμένη απόκριση είναι αναμενόμενη γιατί στο εύρος του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $1 < \Lambda_F < 2$  τα μέτωπα εκσκαφής είναι οριακά ευσταθή και ευσταθή. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο εύρος τα μέτωπα εκσκαφής δεν θεωρούνται ασταθή ή πλήρως ασταθή, αλλά ενδείκνυται η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, ώστε να περιοριστεί η ανάπτυξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια και να αποτραπεί ενδεχόμενη αστοχία για μέτωπα εκσκαφής που είναι στο όριο ευστάθειας/αστάθειας ( $\Lambda_F = 1$ ). Η μείωση της έκθλιψης εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης υποστήριξης (η συσχέτιση είναι ανάλογη).

Η μείωση της έκθλιψης εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης υποστήριξης (η συσχέτιση είναι ανάλογη). Η σταθεροποιητική επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής επιβεβαιώνεται και από την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στα υποστηριγμένα μέτωπα εκσκαφής ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ). Συγκεκριμένα, οι συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στα υποστηριγμένα μέτωπα εκσκαφής που διερευνήθηκαν, με βάση την αναλυτική μεθοδολογία υπολογίστηκαν στο εξής εύρος  $FS = 1.1 - 2.5$ . Ωστόσο, η μεγαλύτερη επιρροή στα οριακά ευσταθή μέτωπα απεικονίζεται και στο Γράφημα 4.59 στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $U_{h,s}/U_{h,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου της έκθλιψης του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής προς το ανυποστηρίκτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Ειδικότερα, η έκθλιψη μειώνεται από 30 % έως 90 %.

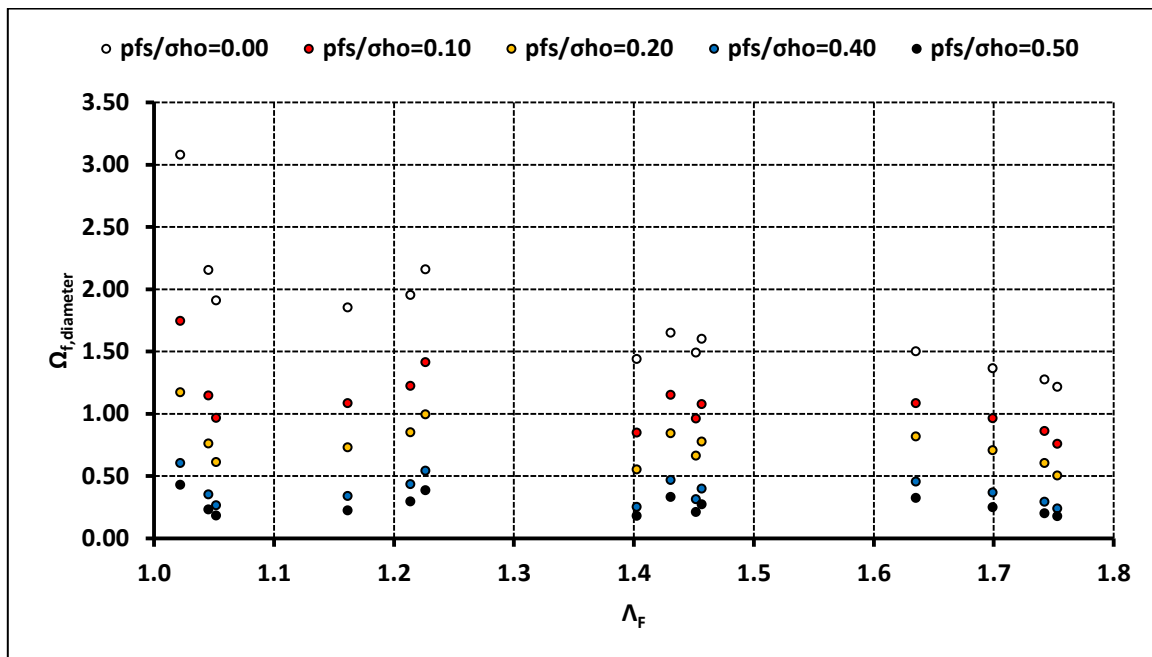


Γράφημα 4.59: Κατανομή του λόγου  $U_{h,s}/U_{h,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

Τα αποτελέσματα της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ) παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.60 και στο Γράφημα 4.61. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά την κατακόρυφη διάμετρο του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,diameter}$  στο Γράφημα 4.60 και η κατανομή της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης κανονικοποιημένης κατά το εμβαδό του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  στο Γράφημα 4.61 συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την αντίστοιχη των αποτελεσμάτων της έκθλιψης  $U_h$ .

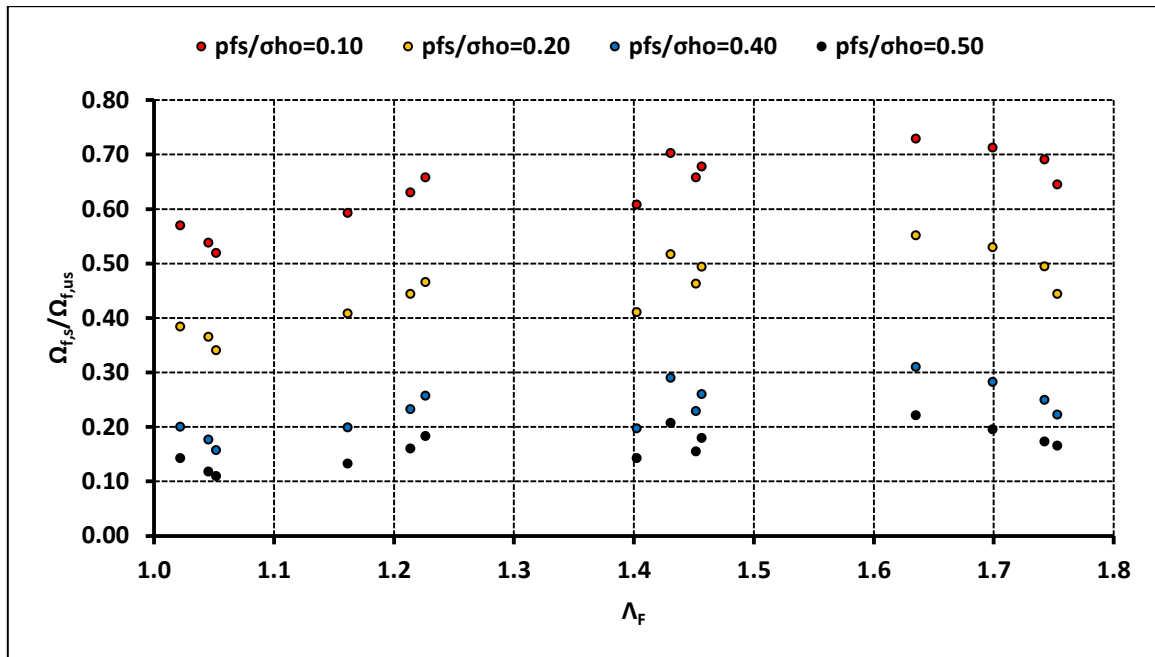


Γράφημα 4.60: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,area}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m



Γράφημα 4.61: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_{f,diameter}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

Στο Γράφημα 4.62 στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου  $\Omega_{f,s}/\Omega_{f,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την αντίστοιχη των αποτελεσμάτων του λόγου  $U_{h,s}/U_{h,us}$ .



Γράφημα 4.62: Κατανομή του λόγου  $\Omega_{f,s}/\Omega_{f,us}$  συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

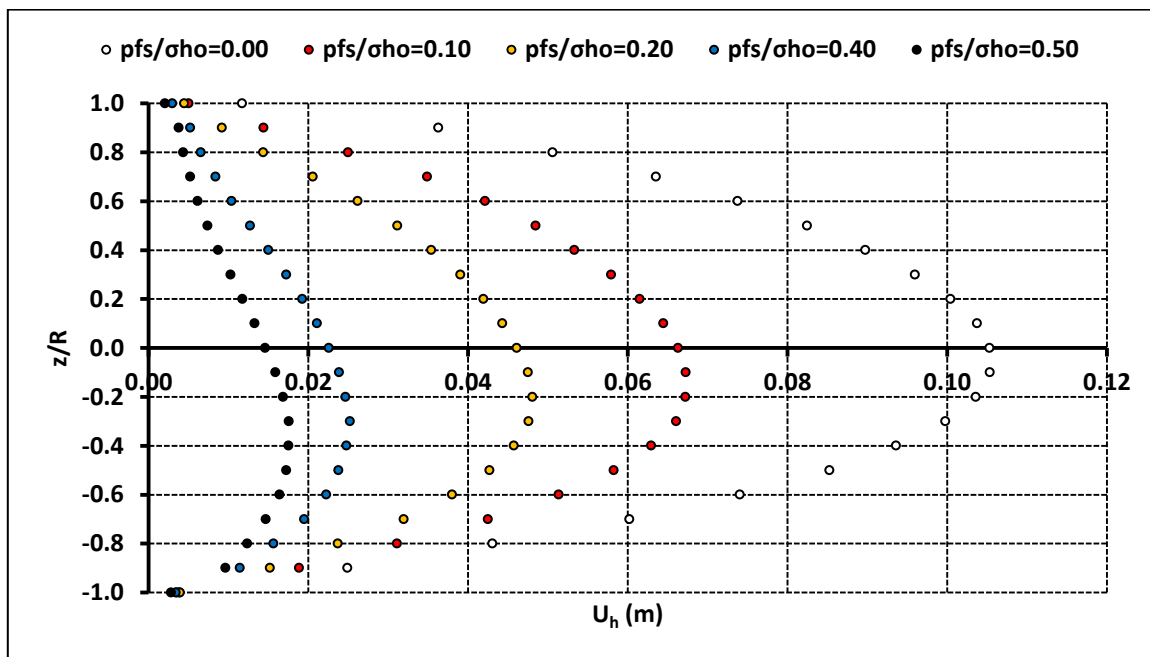


Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ) παρουσιάζονται τα εξής:

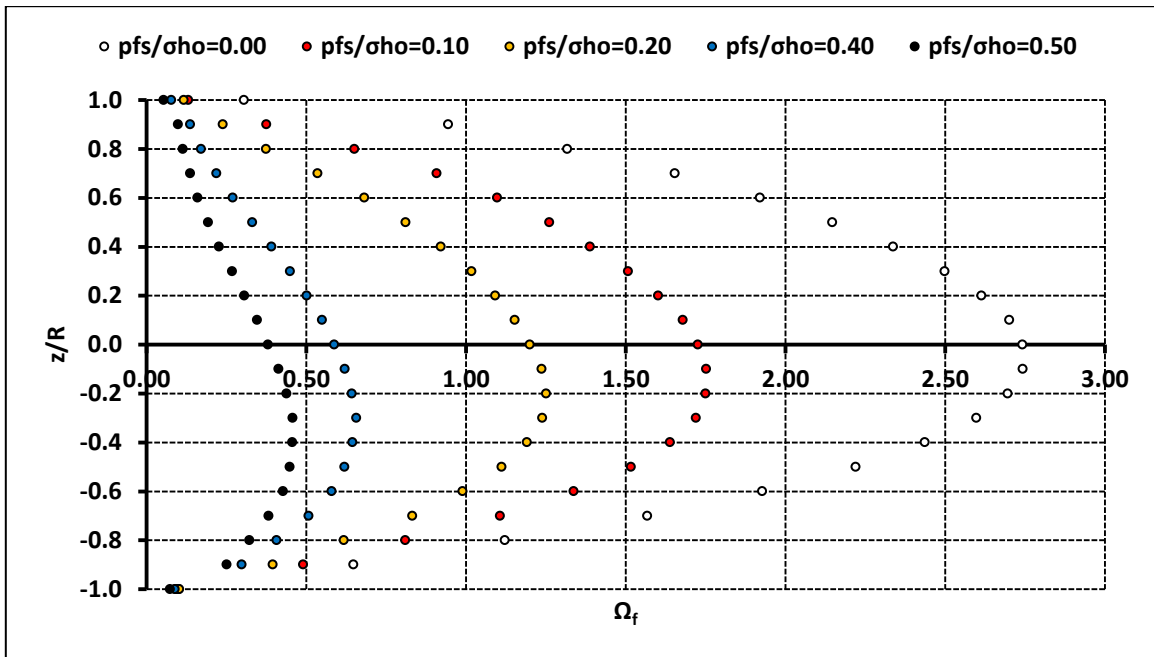
- ✓ η κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.63 και στο Γράφημα 4.65
- ✓ η κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.64 και στο Γράφημα 4.66

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτει το εξής:

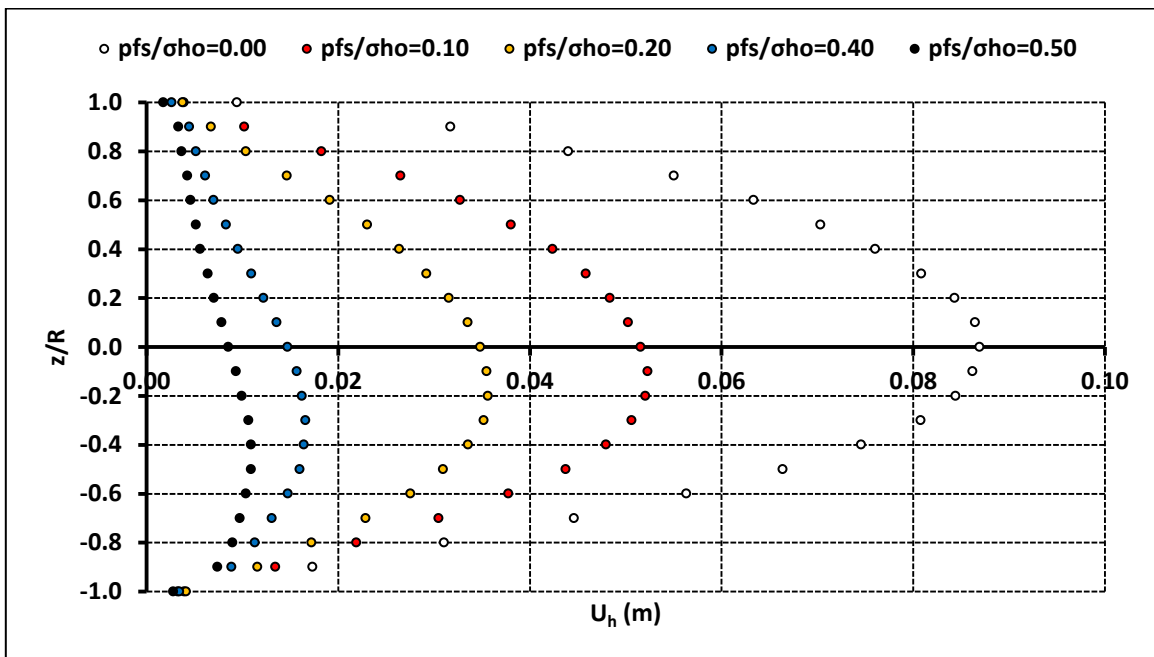
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  και στην κανονικοποιημένη έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$



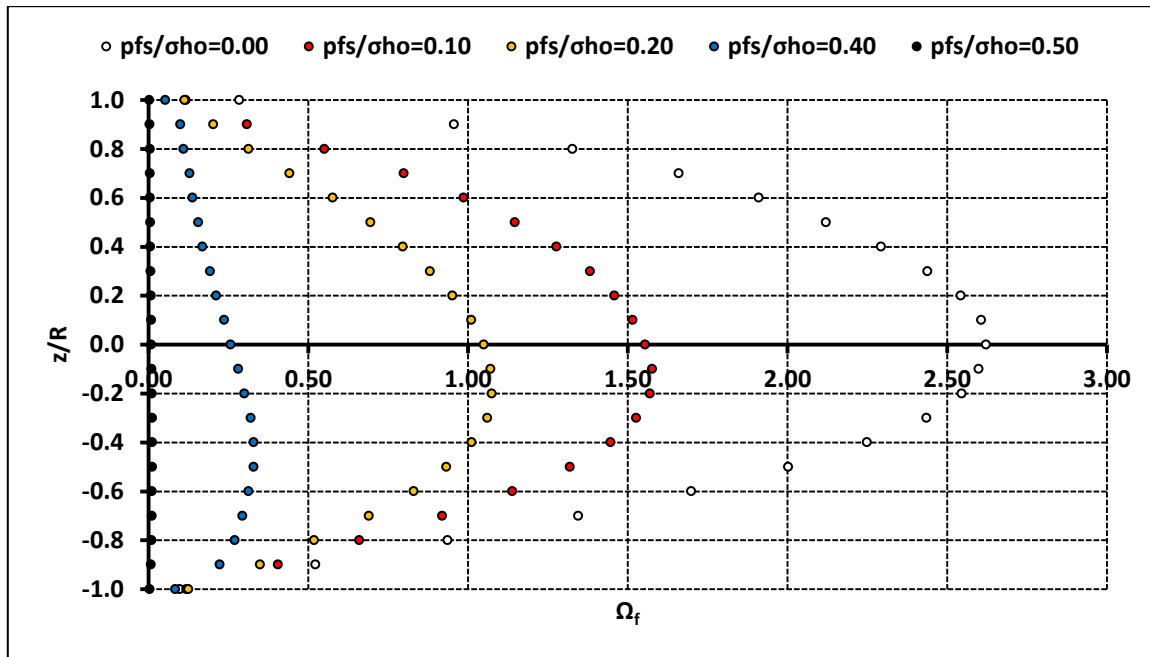
Γράφημα 4.63: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



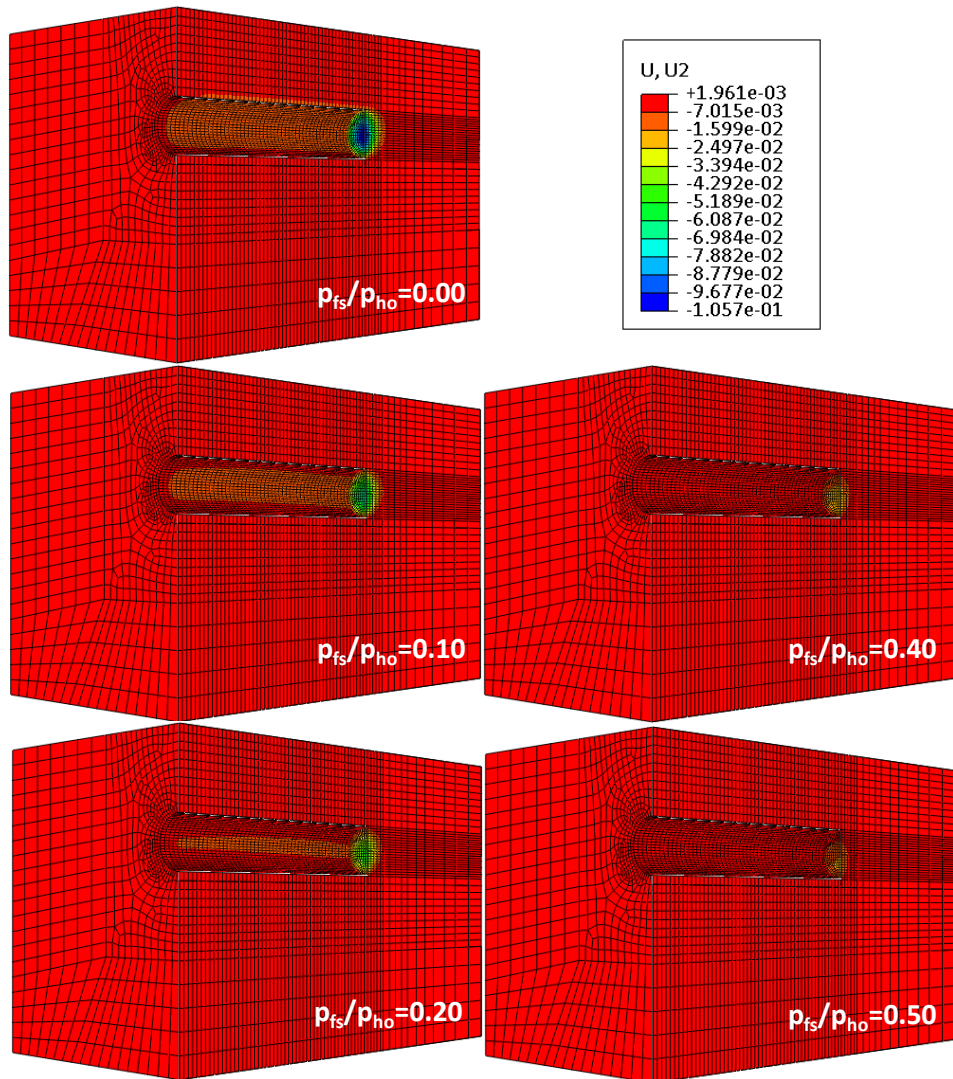
Γράφημα 4.64: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



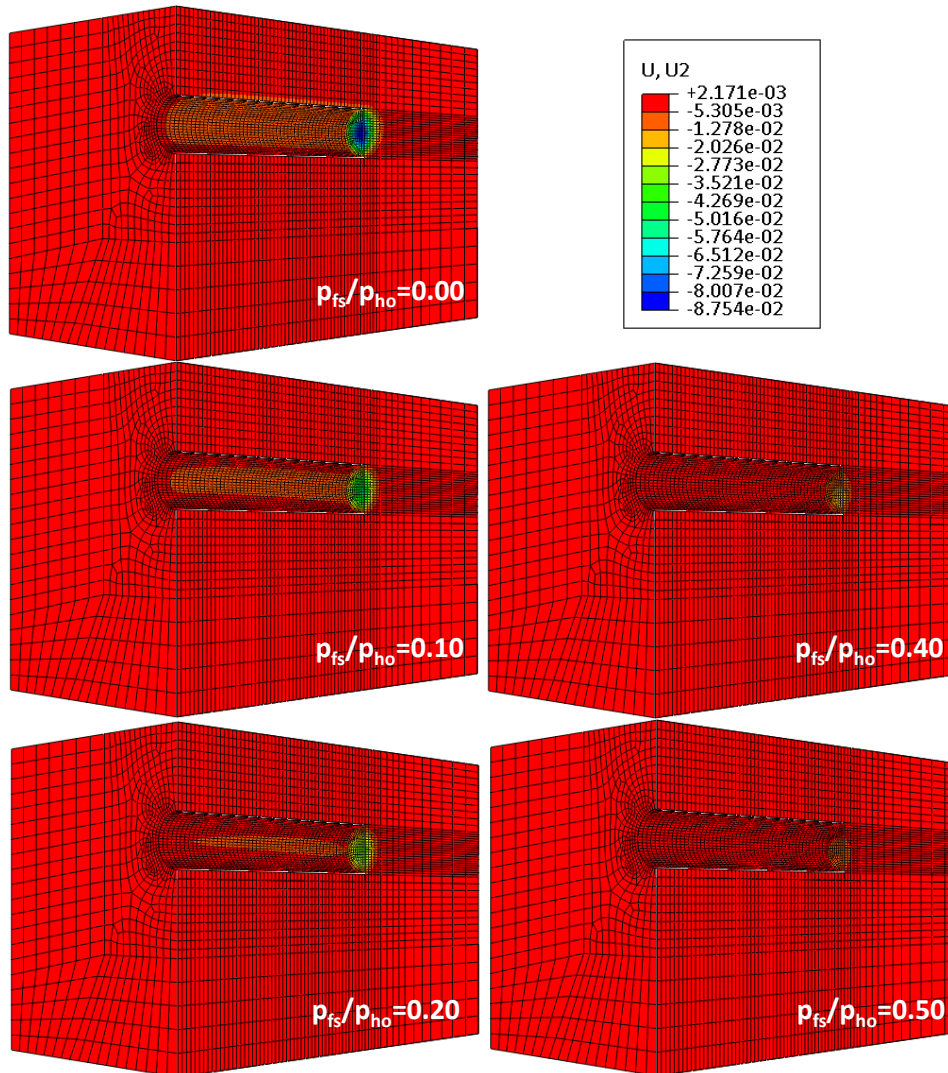
Γράφημα 4.65: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )



Γράφημα 4.66: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

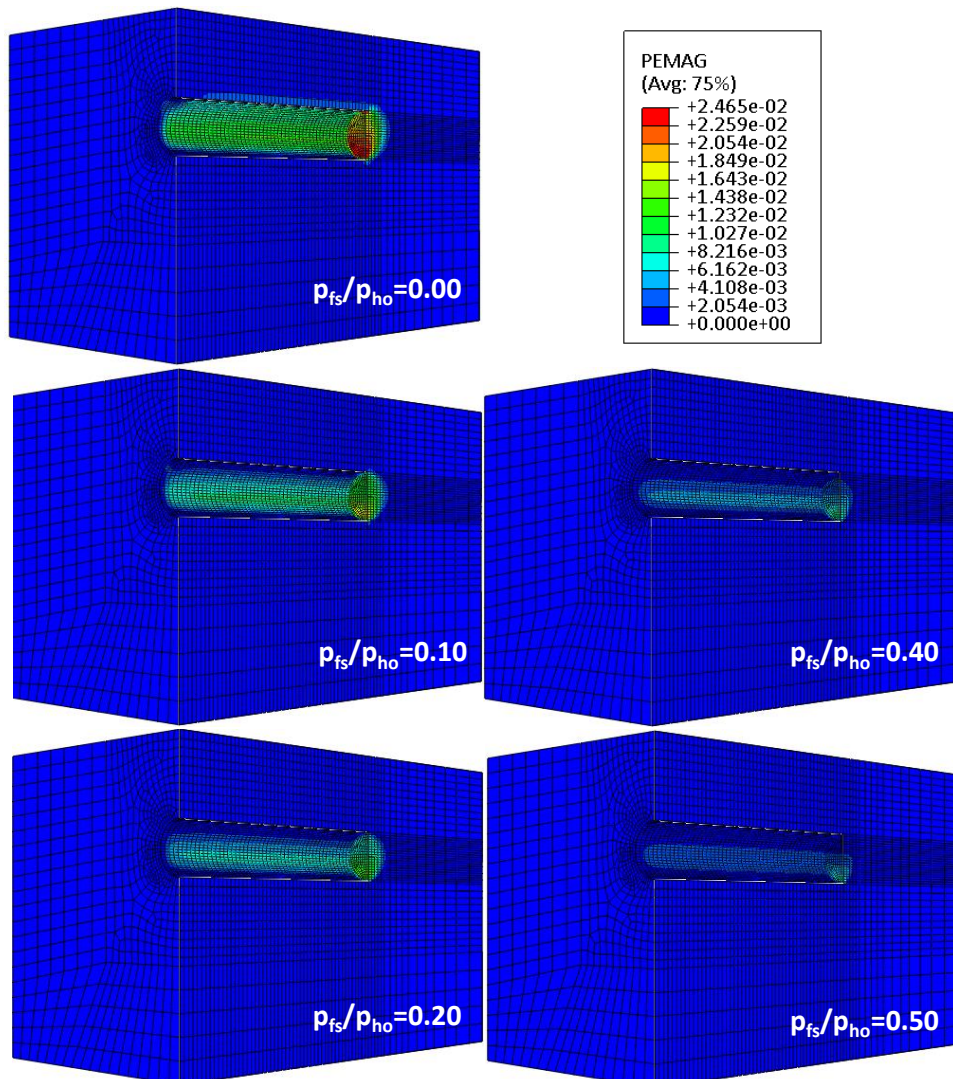


Εικόνα 4.11 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_f=1.21$ )

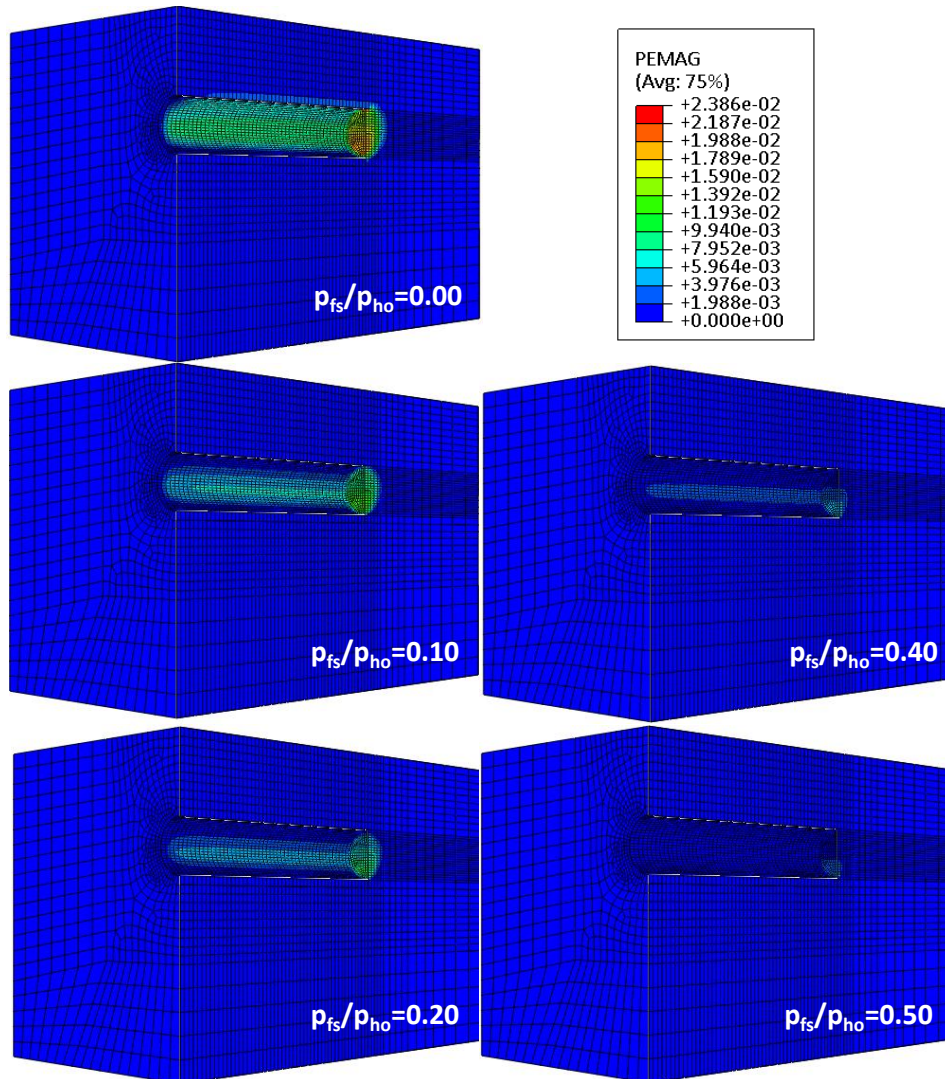


Εικόνα 4.12 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_f=1.16$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11 και στην Εικόνα 4.12. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις.

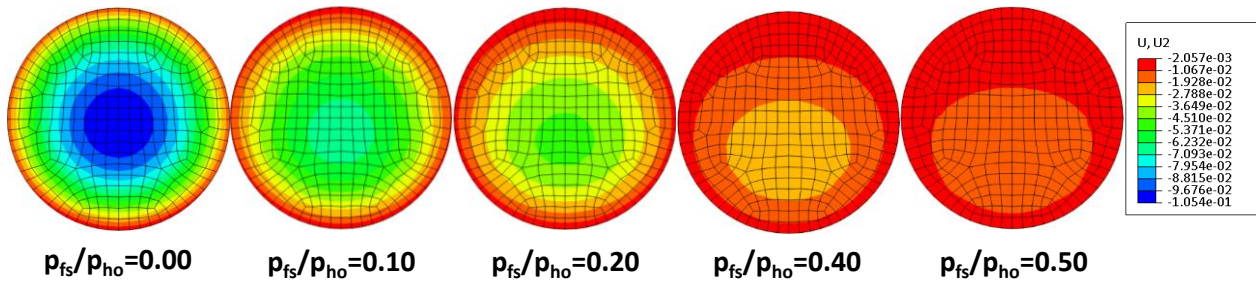


Εικόνα 4.13 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )

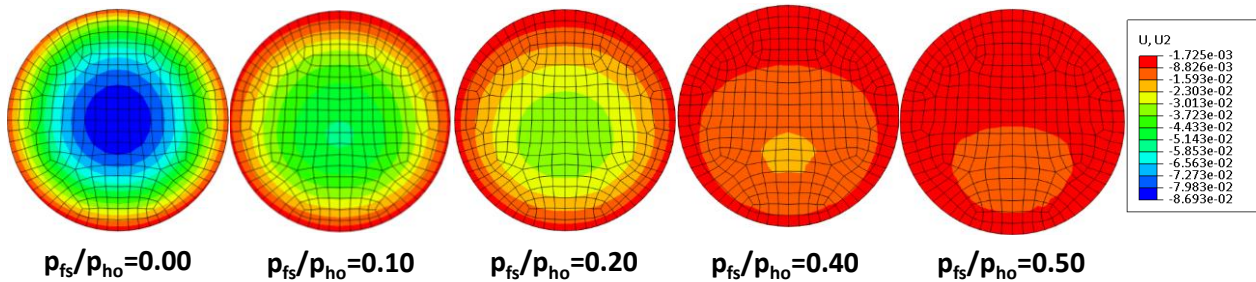


Εικόνα 4.14 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Οι πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13 και στην Εικόνα 4.14. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 4.15 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



Εικόνα 4.16 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.15 και στην Εικόνα 4.16. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής.



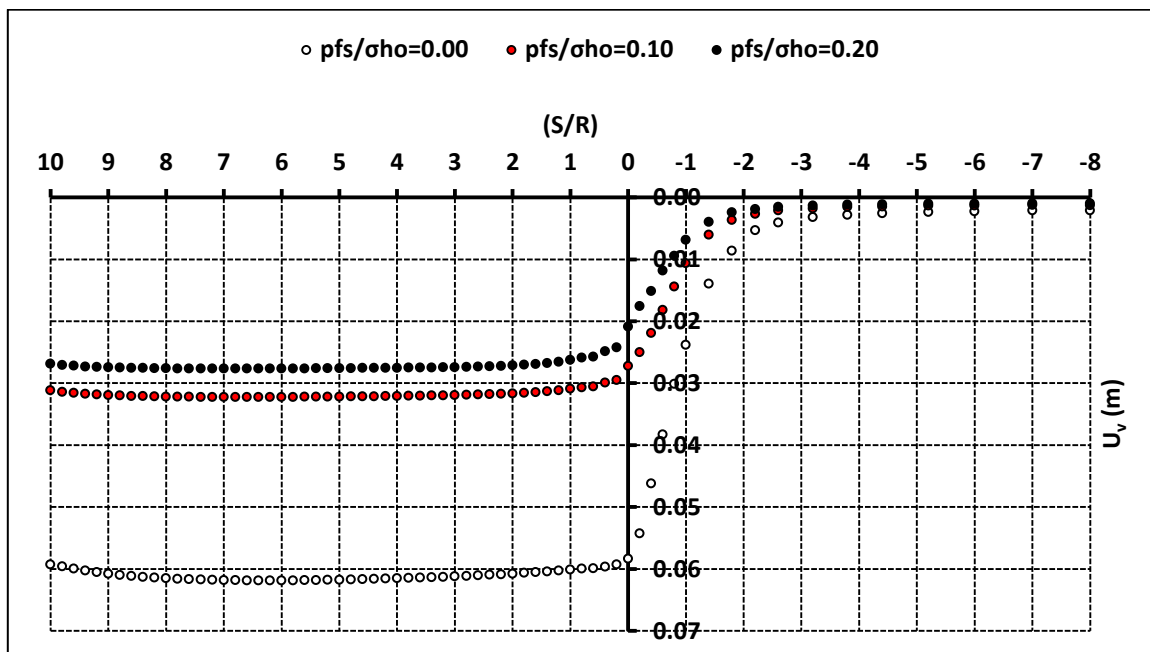
### 4.3. Μετακινήσεις στη Στέψη και τον Πυθμένα της Σήραγγας

#### 4.3.1. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=5D=50$ m

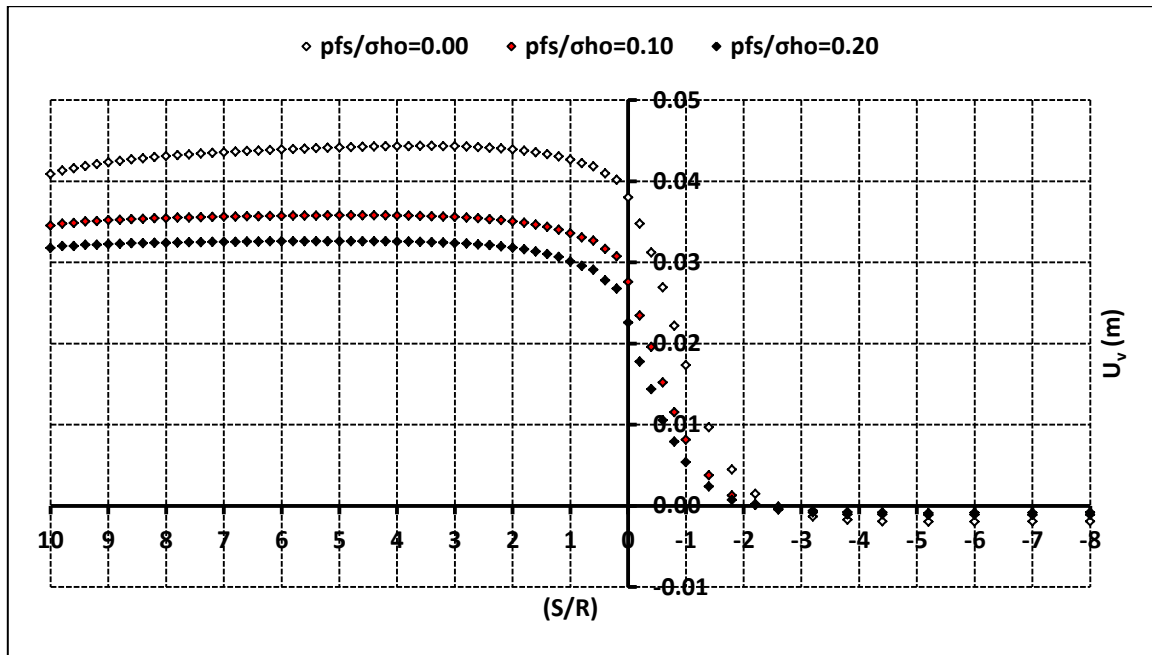
Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10, p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) παρουσιάζονται τα εξής: η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.67 και στο Γράφημα 4.69 και η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.68 και στο Γράφημα 4.70.

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτουν τα εξής:

- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη και στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

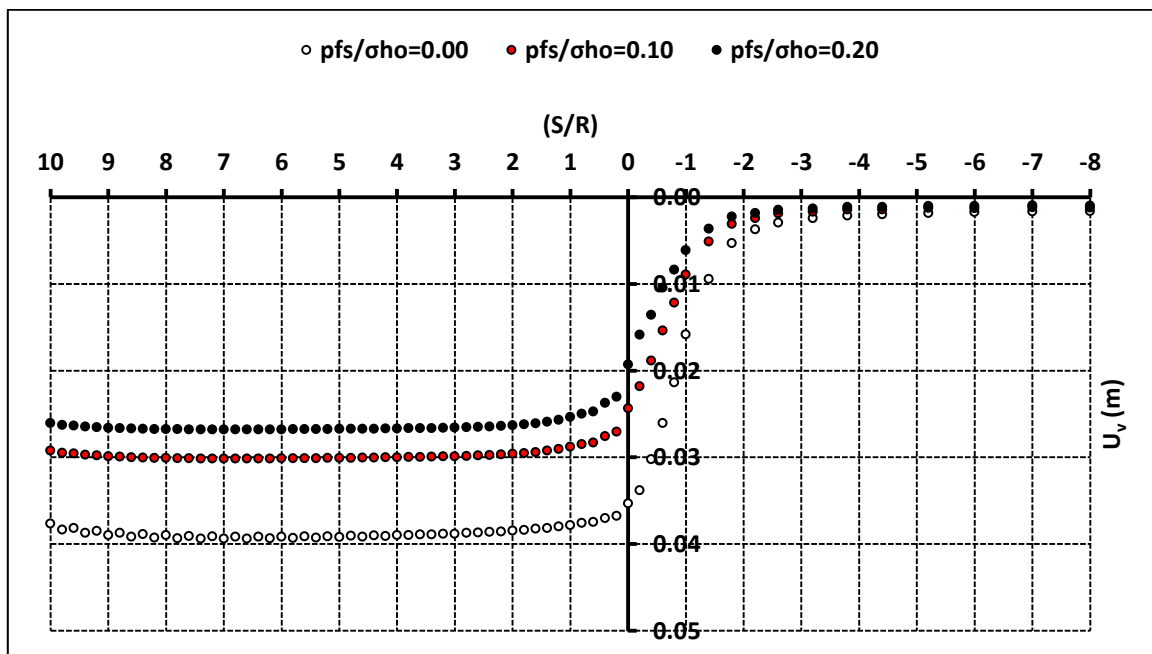


Γράφημα 4.67: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )

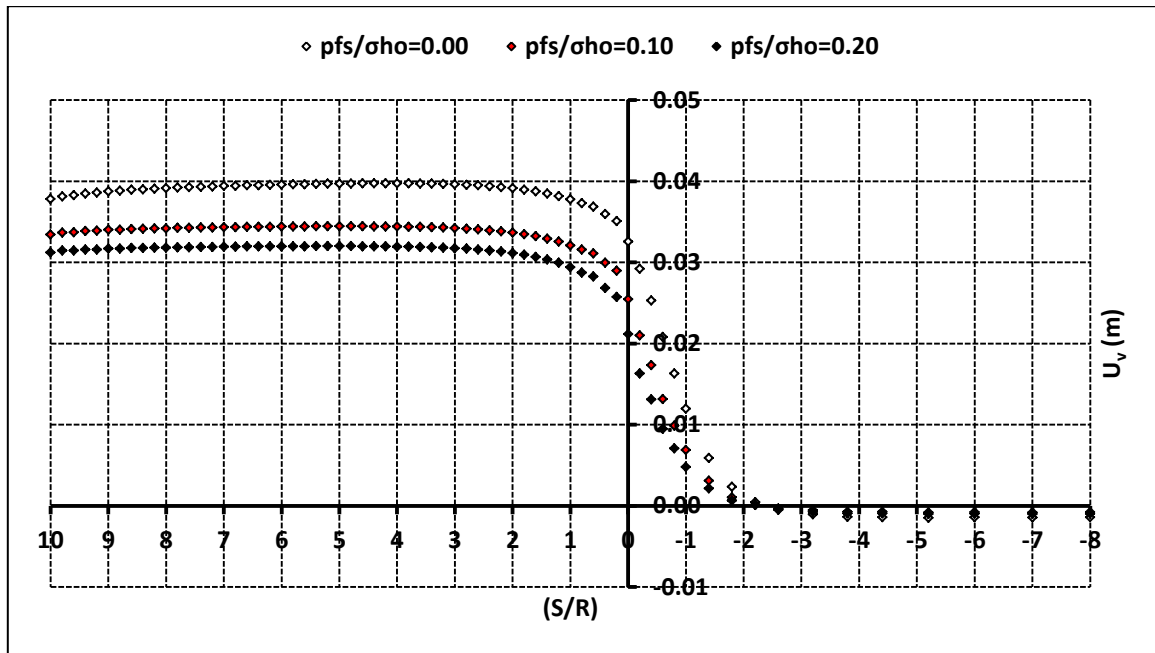


Γράφημα 4.68: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )

Ειδικότερα, προκύπτει ότι η εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης μειώνει την έκθλιψη και την αποτόνωση στο μέτωπο εκσκαφής, μειώνει την προσύγκλιση και την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως οδηγεί στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

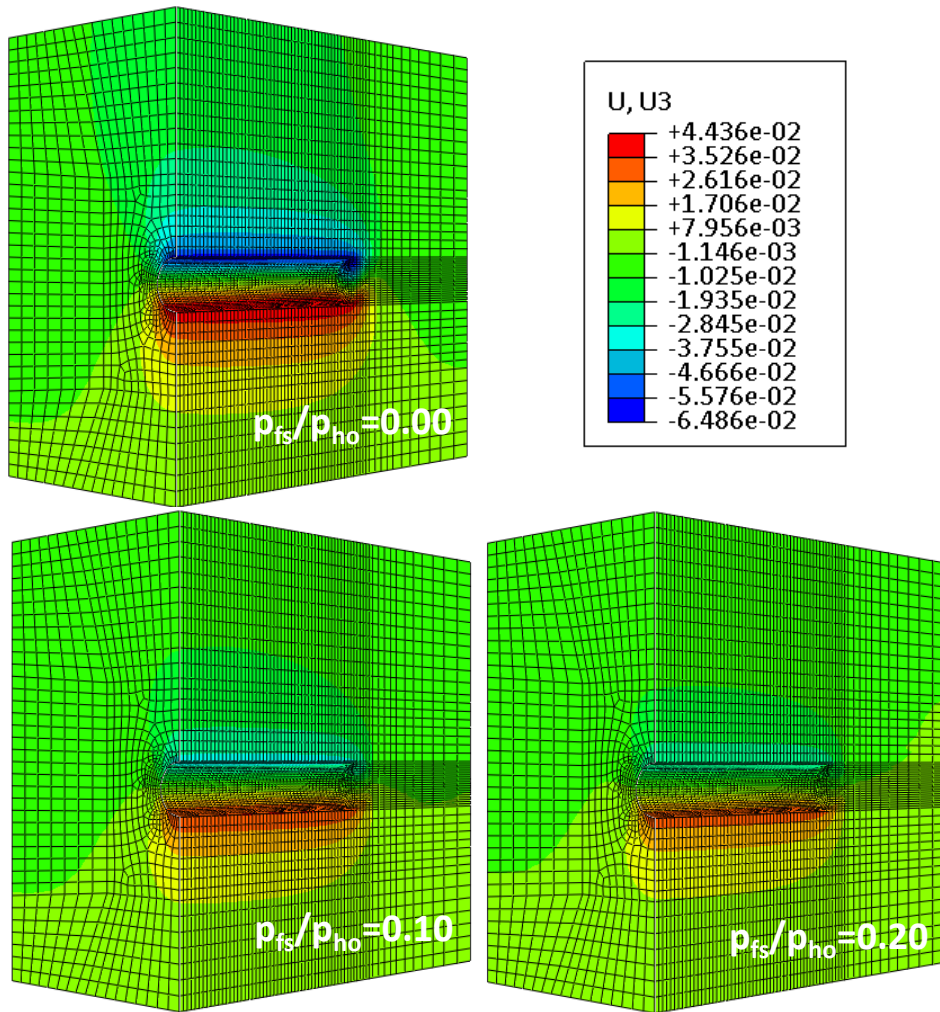


Γράφημα 4.69: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ )

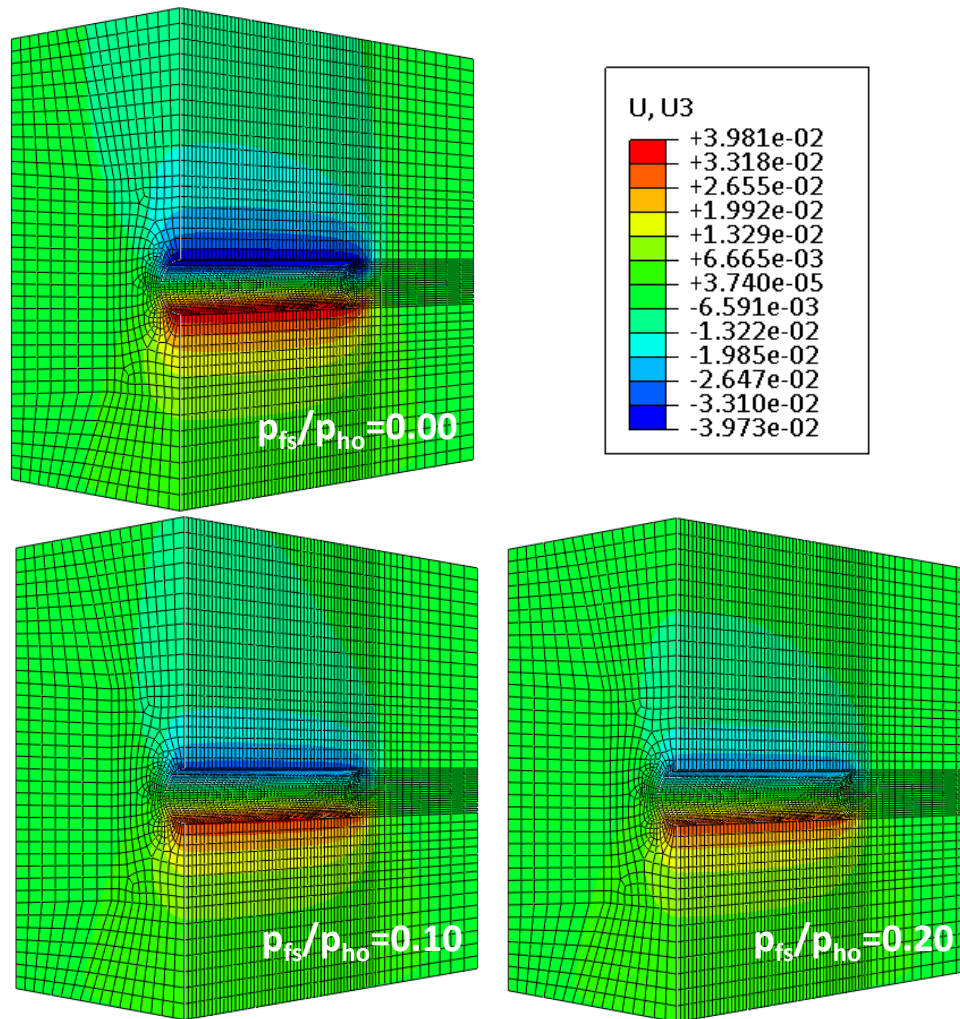


Γράφημα 4.70: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )

Από τα αποτελέσματα καταδεικνύεται ότι το εύρος της μείωσης της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας επηρεάζεται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, αλλά με μειούμενο βαθμό. Ειδικότερα, το εύρος της μείωσης της κατακόρυφης μετακίνησης παρουσιάζει μειούμενο ρυθμό σε σχέση με την αύξηση της πίεσης υποστήριξης. Η σημαντική μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης εντοπίζεται σε σχέση με το ανυποστηρίκτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για την πρώτη περίπτωση του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι αν και οι επόμενες περιπτώσεις του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές και στη μέγιστη τιμή της πίεσης υποστήριξης δεν παρουσιάζουν ανάλογο εύρος μειώσεων, το εύρος της μείωσης που προκαλούν ενδεχομένως να θεωρείται κρίσιμο για τον περιορισμό των καθιζήσεων στην επιφάνεια.

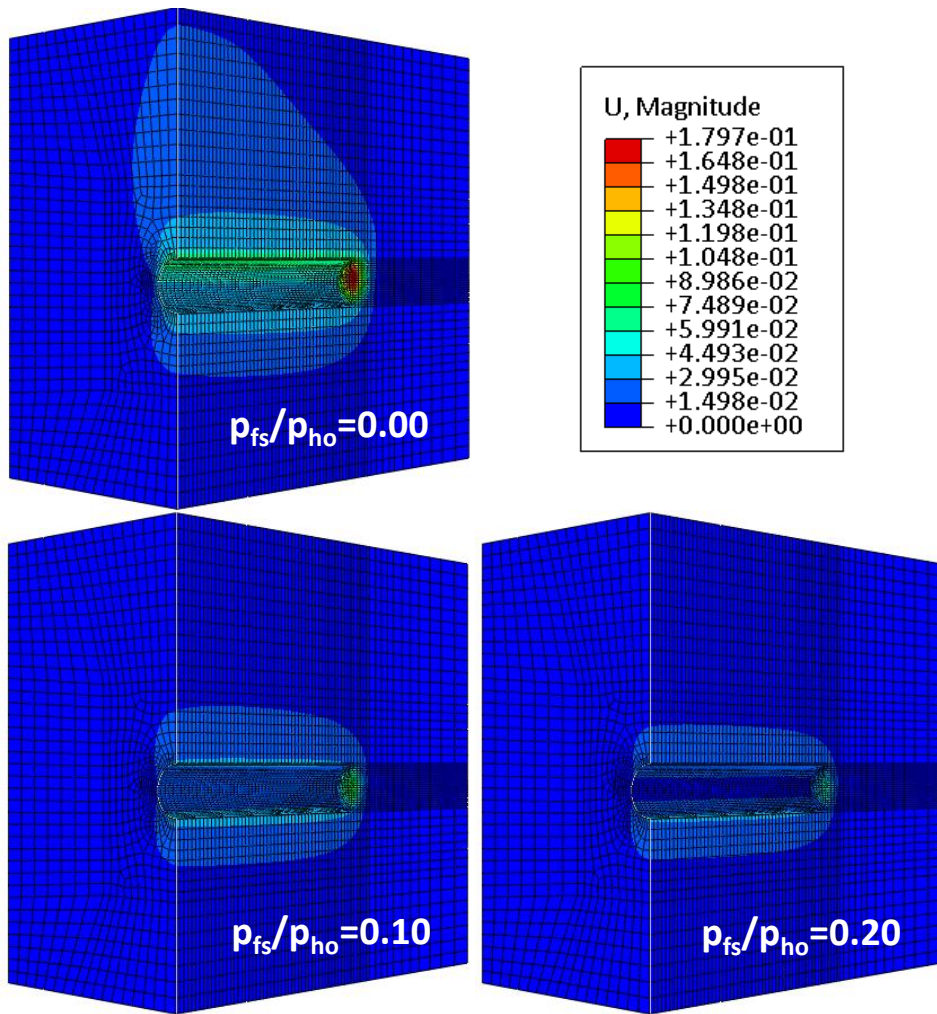


Εικόνα 4.17 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $\rho_{fs}/\rho_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_f=1.17$ )

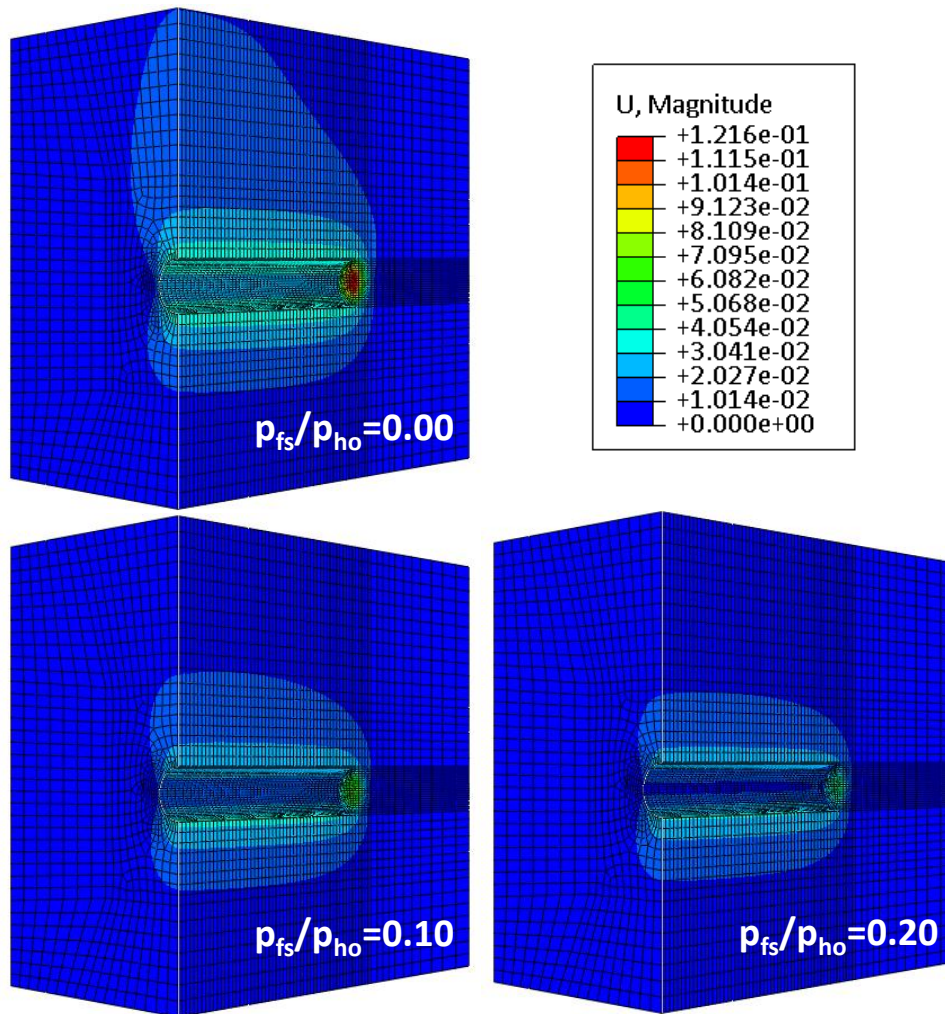


Εικόνα 4.18 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17 και στην Εικόνα 4.18. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη και στον πυθμένα όπου εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις.

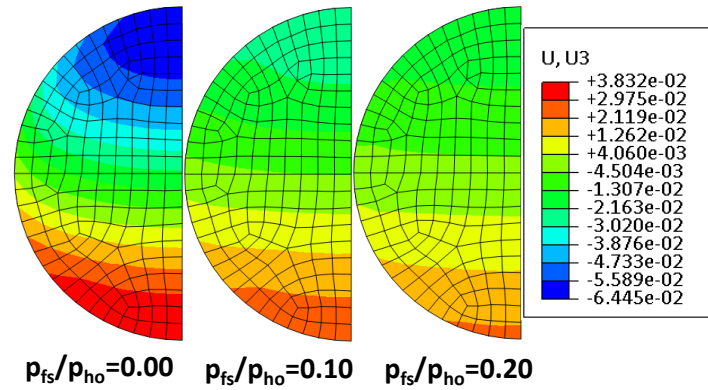


Εικόνα 4.19 Ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )

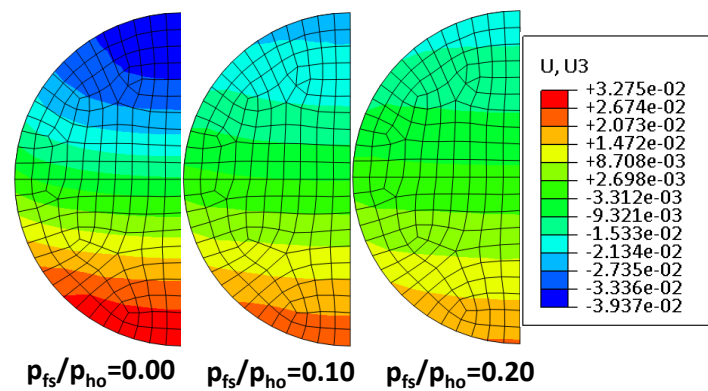


Εικόνα 4.20 Ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_f=1.88$ )

Οι ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.19 και στην Εικόνα 4.20. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις ολικές μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες ολικές μετακινήσεις.



Εικόνα 4.21 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.09$ ,  $\Lambda_F=1.17$ )



Εικόνα 4.22 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=40$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=280$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.11$ ,  $\Lambda_F=1.88$ )

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.23 και στην Εικόνα 4.24. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής.

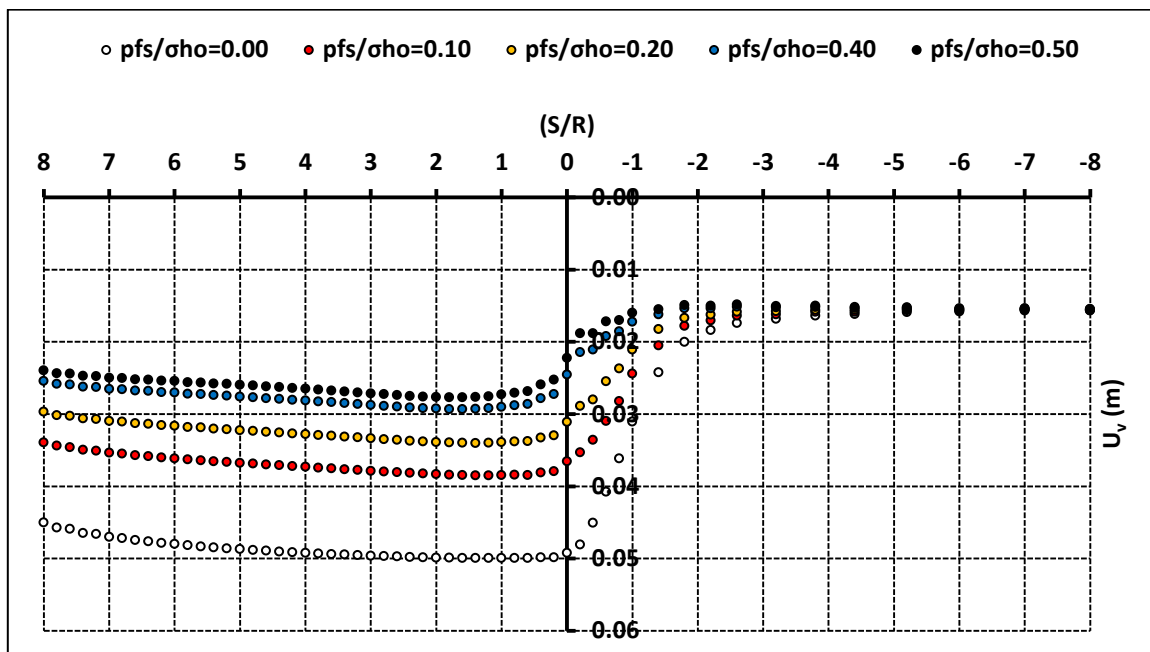


### 4.3.2. Σήραγγα με Ύψος Υπερκείμενων $H=2D=20$ m

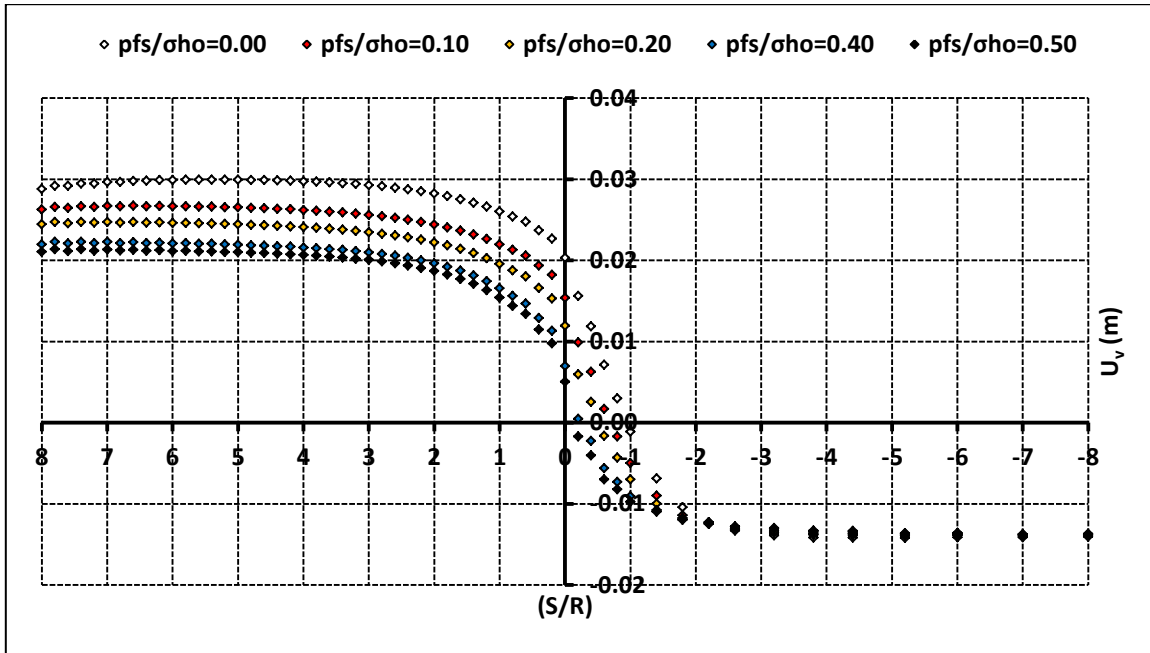
Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.40$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.50$ ) παρουσιάζονται τα εξής: η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.71 και στο Γράφημα 4.73 και η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.72 και στο Γράφημα 4.74

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για δύο γεωυλικά που διερευνήθηκαν και προκύπτουν τα εξής:

- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη και στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας
- ✓ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

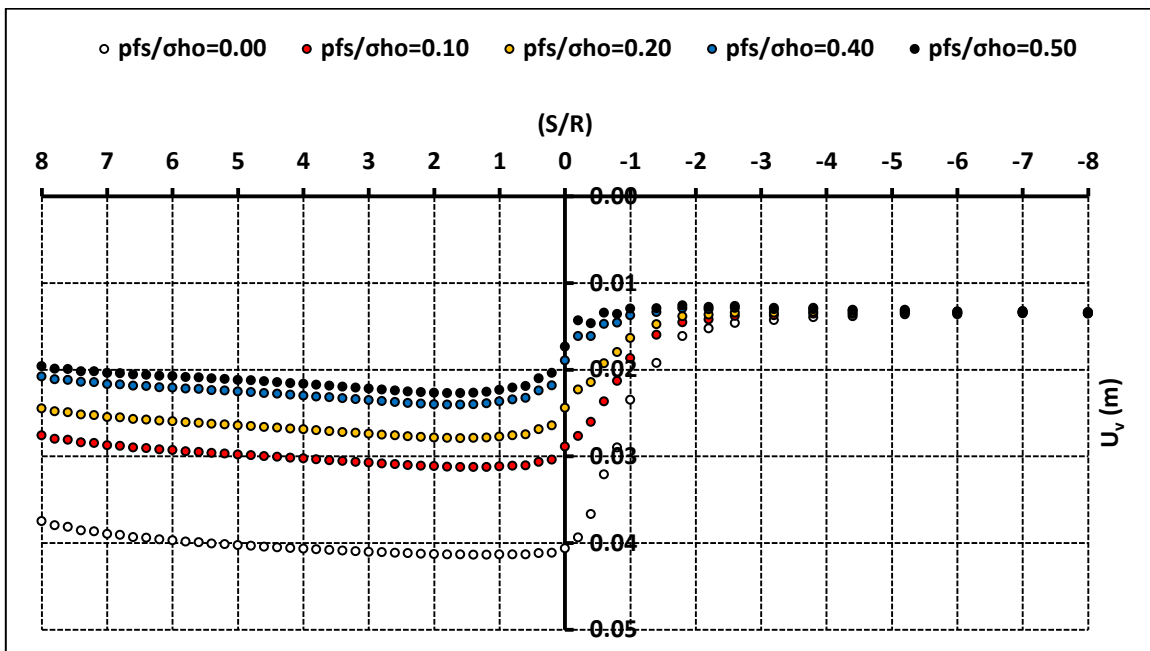


Γράφημα 4.71: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_f=1.21$ )

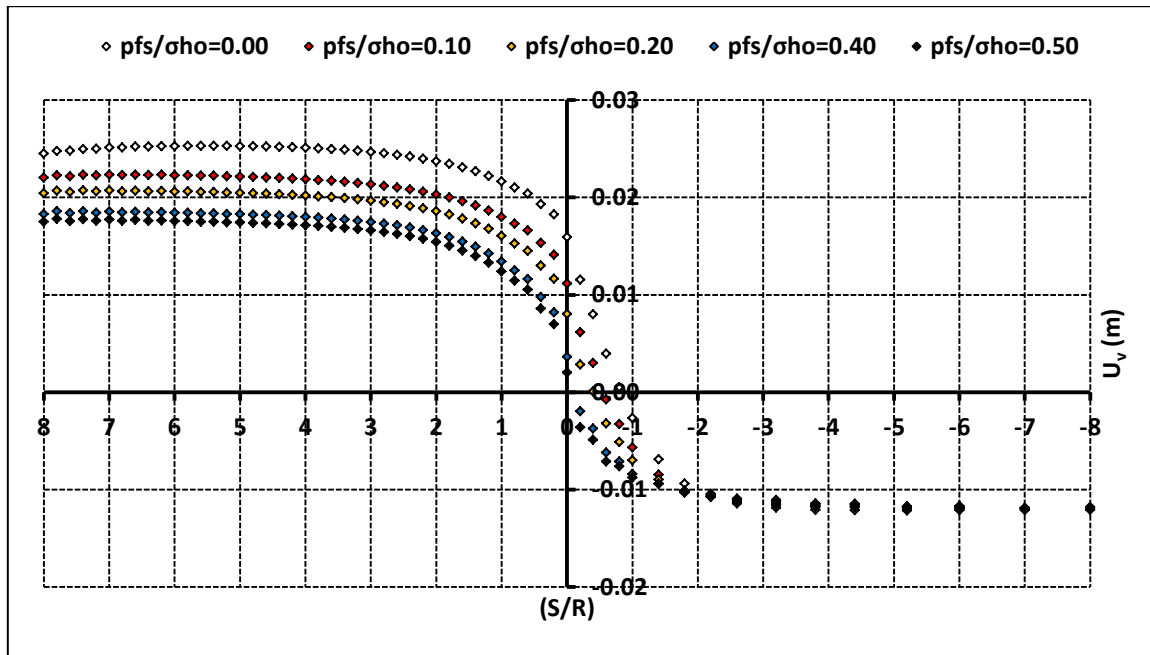


Γράφημα 4.72: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_f=1.21$ )

Ειδικότερα, προκύπτει ότι η εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης μειώνει την έκθλιψη και την αποτόνωση στο μέτωπο εκσκαφής, μειώνει την προσύγκλιση και την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως οδηγεί στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.

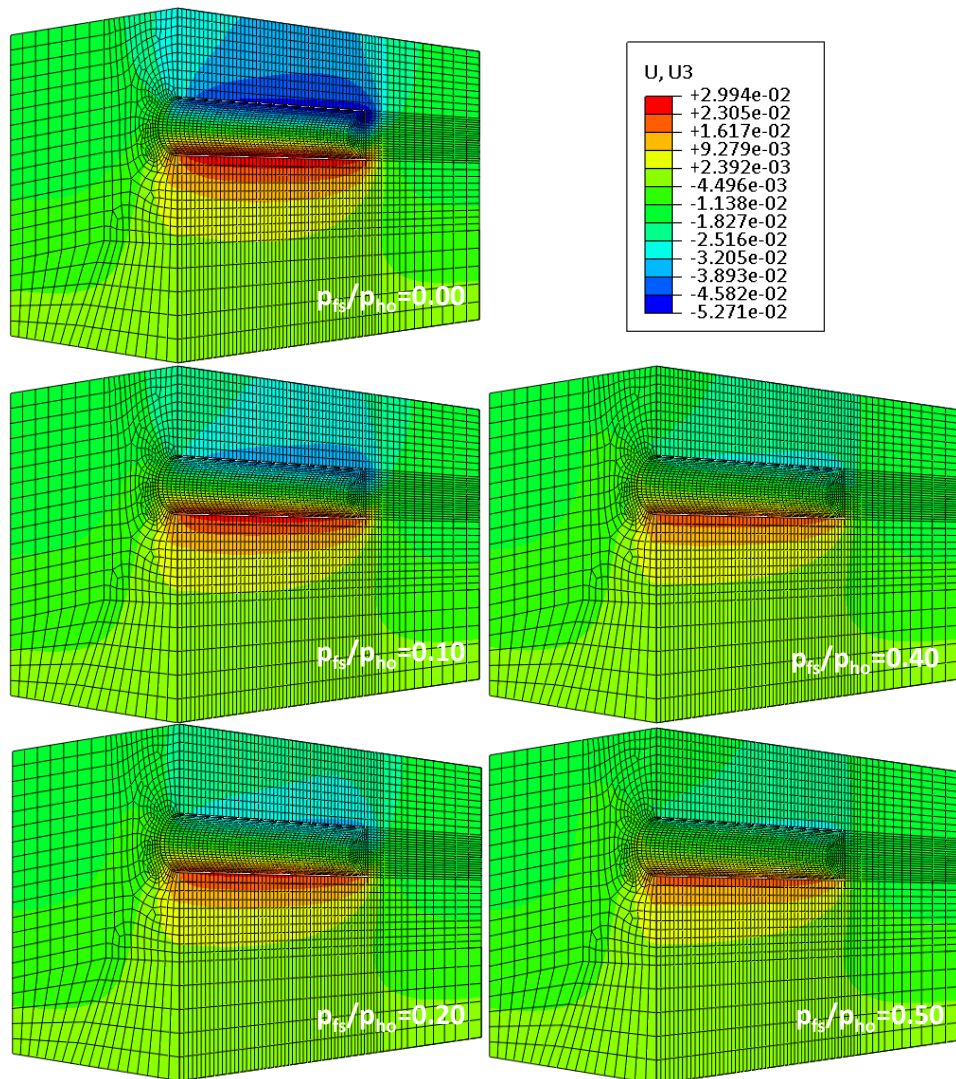


Γράφημα 4.73: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_f=1.16$ )

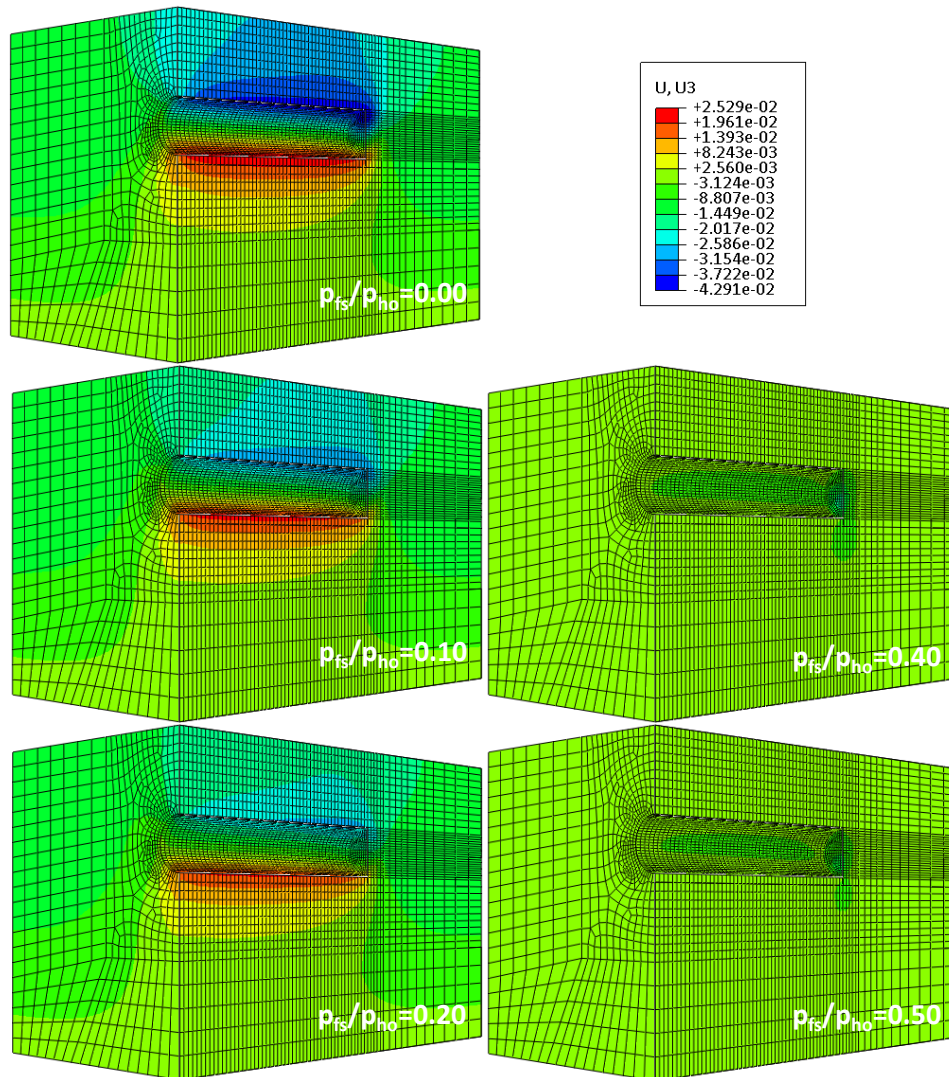


Γράφημα 4.74: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_f=1.16$ )

Από τα αποτελέσματα καταδεικνύεται ότι το εύρος της μείωσης της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας επηρεάζεται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, αλλά με μειούμενο βαθμό. Ειδικότερα, το εύρος της μείωσης της κατακόρυφης μετακίνησης παρουσιάζει μειούμενο ρυθμό σε σχέση με την αύξηση της πίεσης υποστήριξης. Η σημαντική μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης εντοπίζεται σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για την πρώτη περίπτωση του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και για τις δύο επόμενες περιπτώσεις. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι αν και οι επόμενες περιπτώσεις του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές και στη μέγιστη τιμή της πίεσης υποστήριξης δεν παρουσιάζουν ανάλογο εύρος μειώσεων, το εύρος της μείωσης που προκαλούν ενδεχομένως να θεωρείται κρίσιμο για τον περιορισμό των καθιζήσεων στην επιφάνεια.

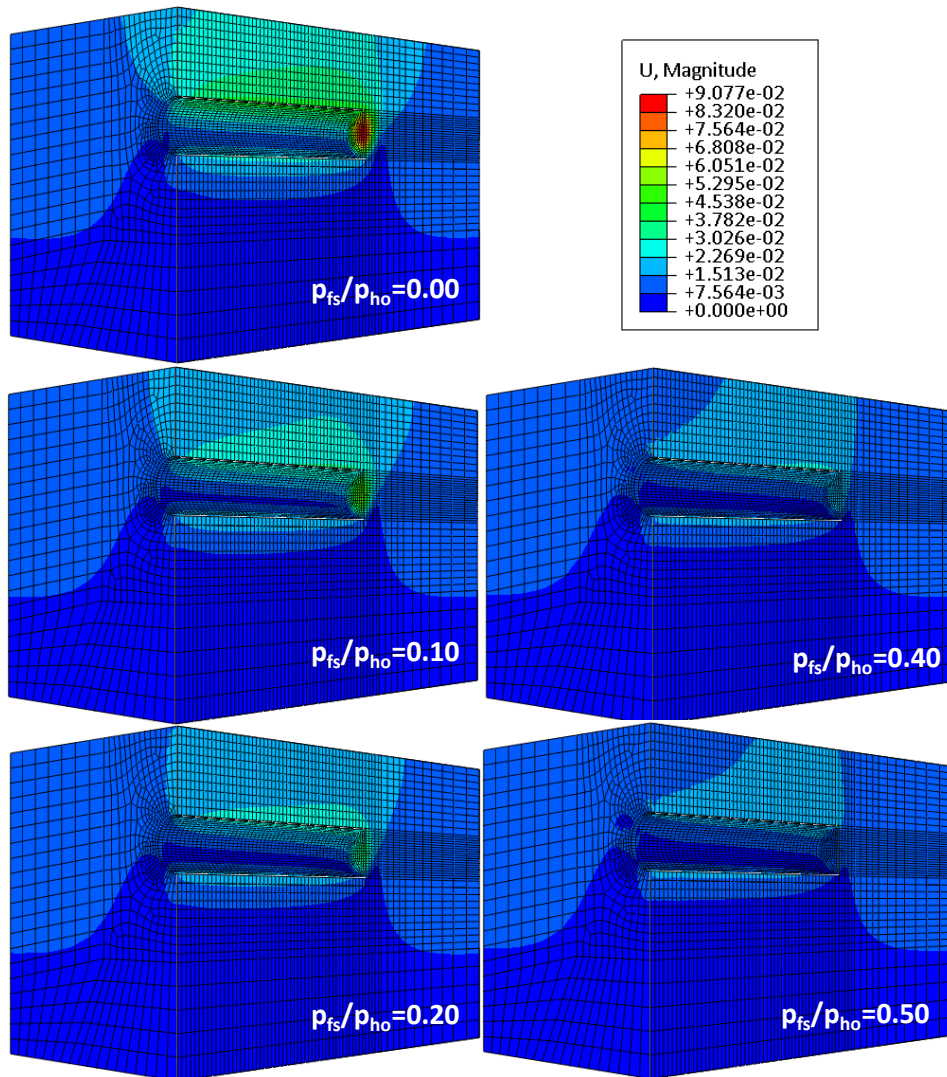


Εικόνα 4.23 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )

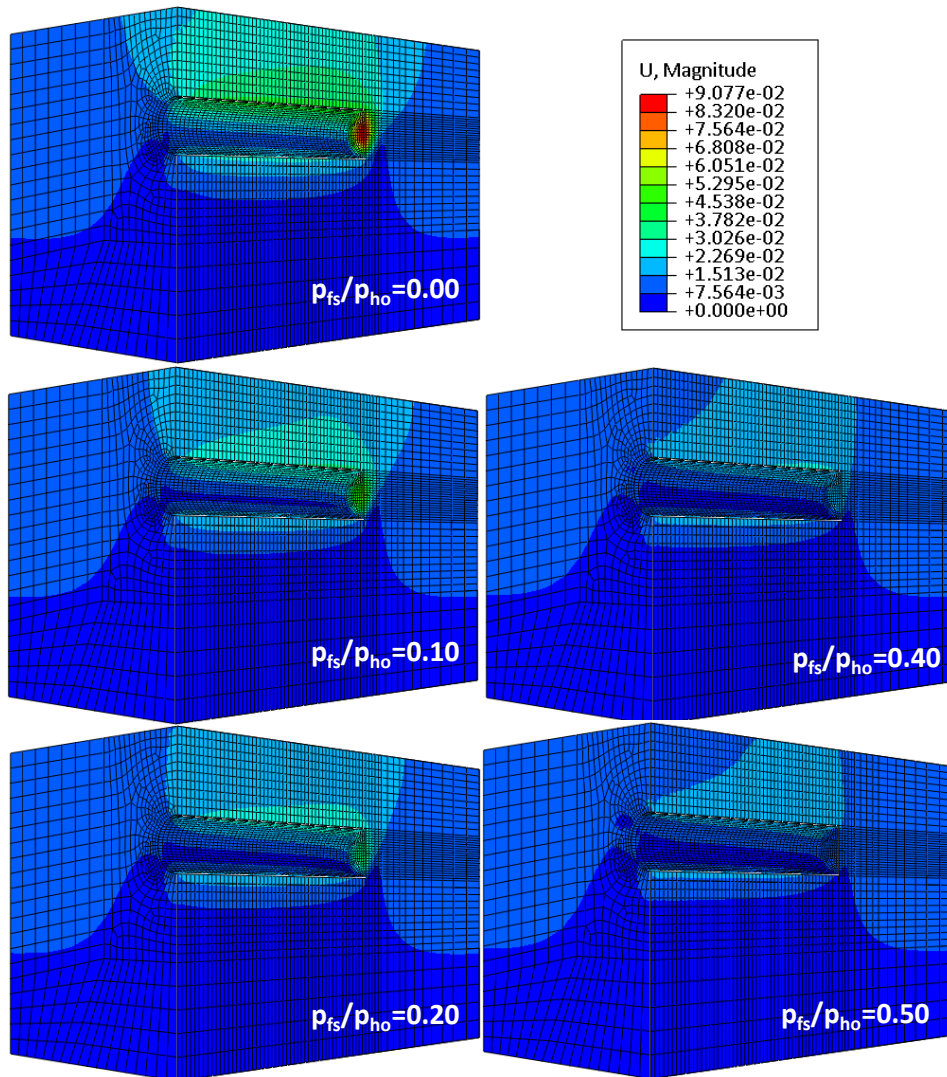


Εικόνα 4.24 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.23 και στην Εικόνα 4.24. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη και στον πυθμένα όπου εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις.

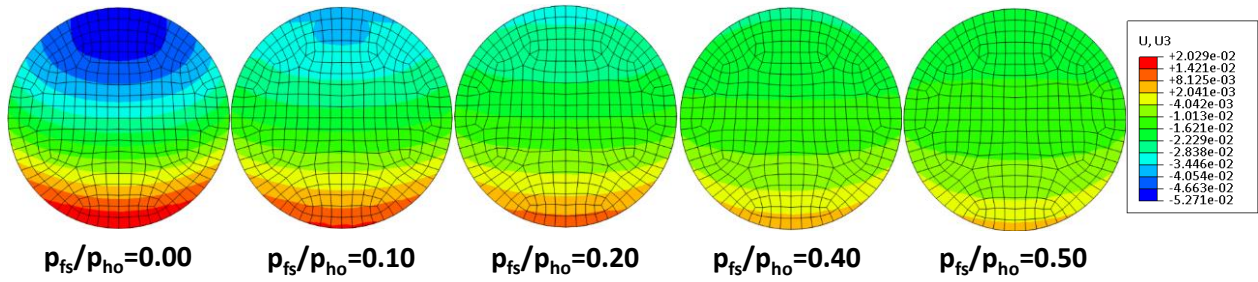


Εικόνα 4.25 Ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )

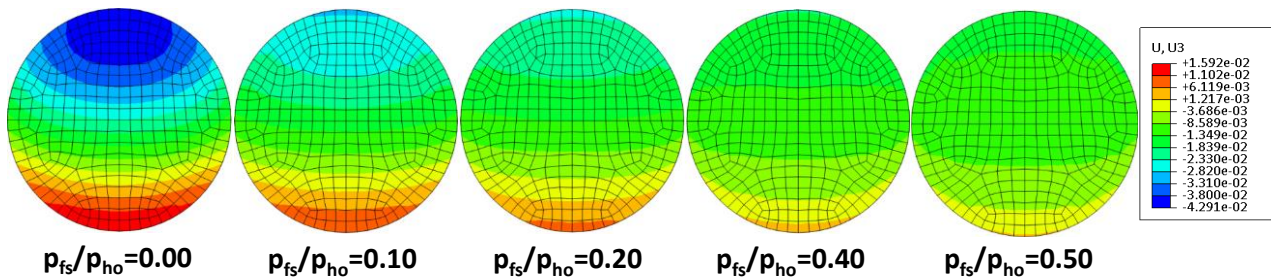


Εικόνα 4.26 Ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Οι ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.25 και στην Εικόνα 4.26. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις ολικές μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες ολικές μετακινήσεις.



Εικόνα 4.27 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=25$  kPa,  $\phi=25^\circ$ ,  $E=82$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.25$ ,  $\Lambda_F=1.21$ )



Εικόνα 4.28 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=30^\circ$ ,  $E=95$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.22$ ,  $\Lambda_F=1.16$ )

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.27 και στην Εικόνα 4.28. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής.



#### 4.4. Αγκύρια Fiberglass στο Μέτωπο Εκσκαφής

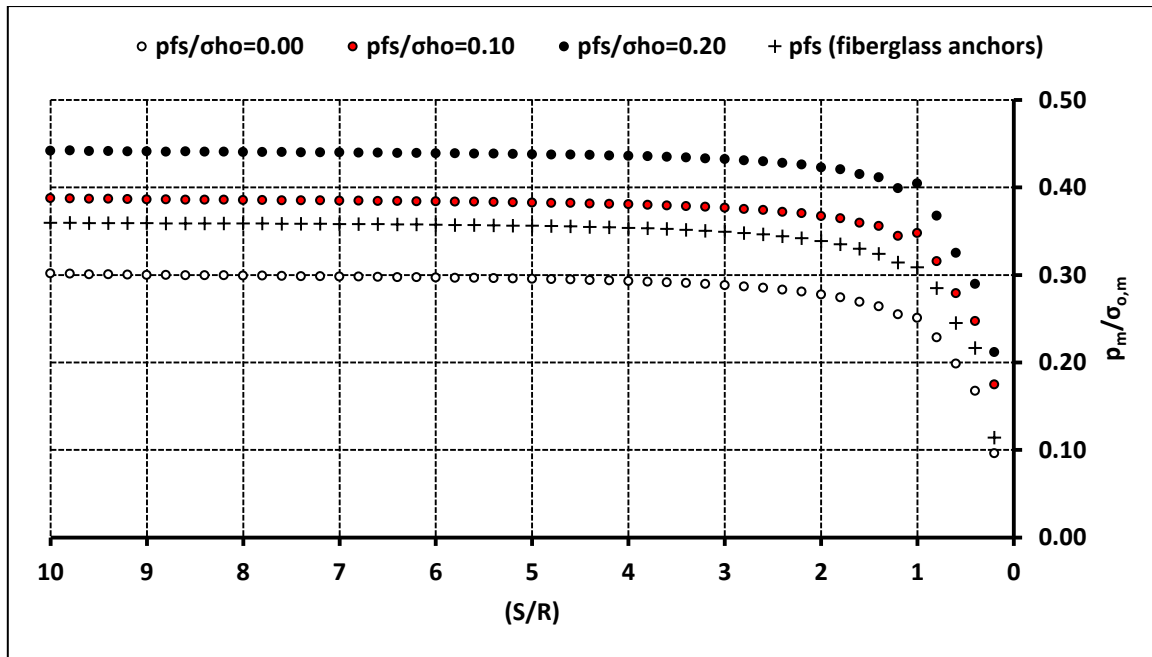
Για να εξεταστεί η συσχέτιση της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής (μηχανική όρυξη σήραγγων με EPB), με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής (συμβατική όρυξη σήραγγων) εκτελέστηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με αγκύρια fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m. Τα αγκύρια fiberglass είναι παθητικά αγκύρια. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν παθητική λειτουργία, γιατί προκειμένου να ενεργοποιηθούν, ώστε να προκαλέσουν ένταση στο μέτωπο εκσκαφής και στον πυρήνα προώθησης περιορίζοντας τις μετακινήσεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, προϋπόθεση είναι η ανάπτυξη μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής και στον πυρήνα προώθησης. Ο μηχανισμός ανακατανομής των τάσεων που αναπτύσσεται λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο που αναπτύσσεται λόγω της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.

Για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.00$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.10$ ,  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.20$ ) και για υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας με αγκύρια fiberglass παρουσιάζονται τα εξής:

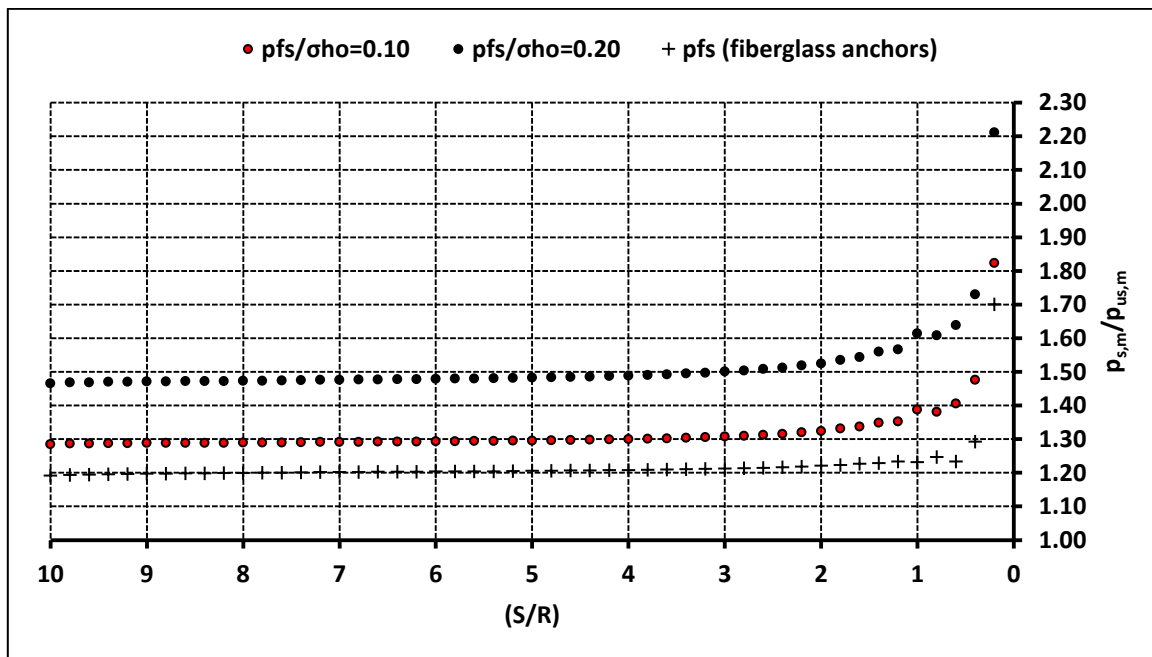
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.75
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.76
- ✓ η κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.77
- ✓ η κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας στο Γράφημα 4.78
- ✓ η κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.79
- ✓ η κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  στο Γράφημα 4.80
- ✓ η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.81
- ✓ η κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας στο Γράφημα 4.82

Οι προαναφερθείσες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά και αντιπροσωπευτικά για ένα γεωυλικό που διερευνήθηκε και προκύπτει ότι η εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της έκθλιψης και της αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής, μείωση της

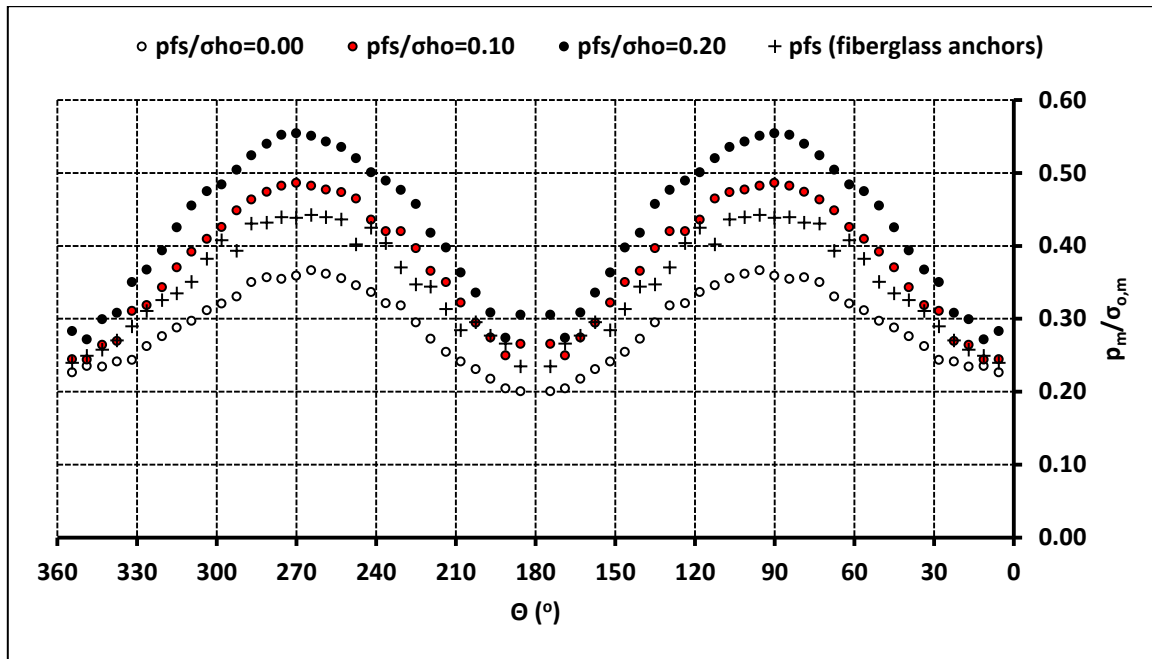
προσύγκλισης και της αποτόνωσης στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.



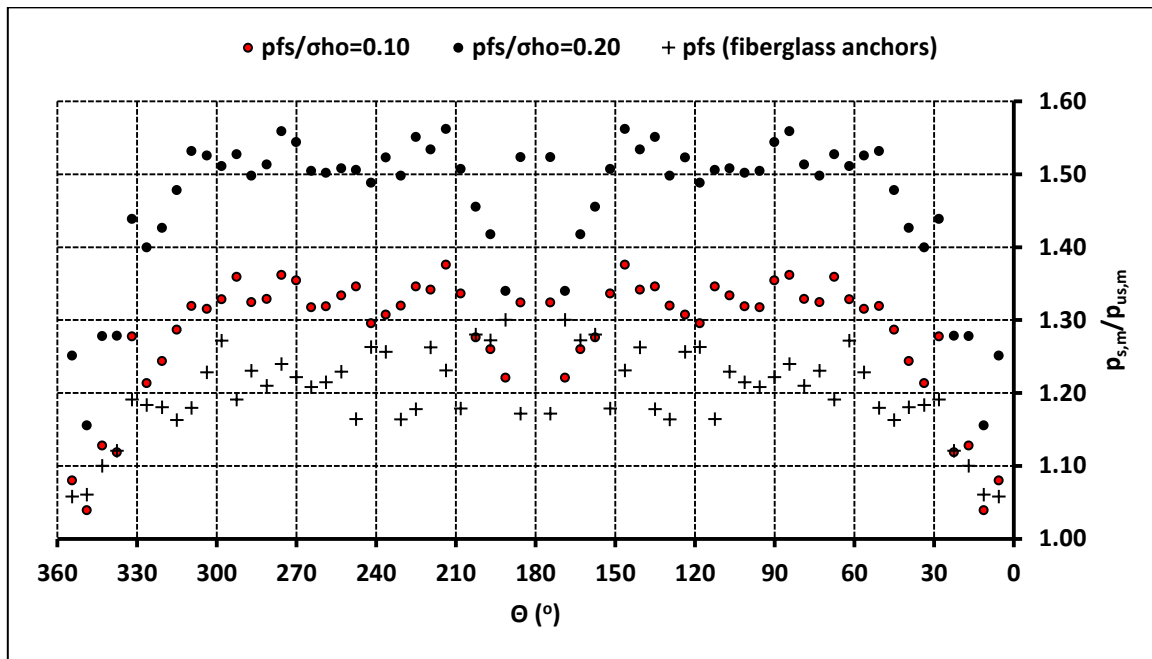
Γράφημα 4.75: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )



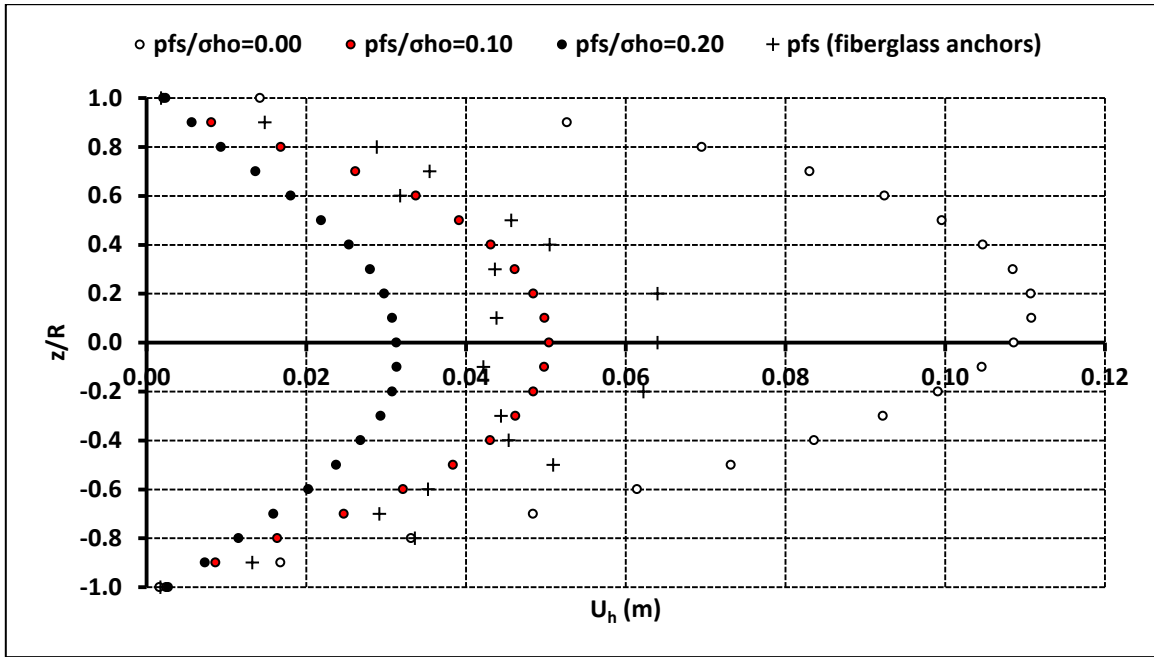
Γράφημα 4.76: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )



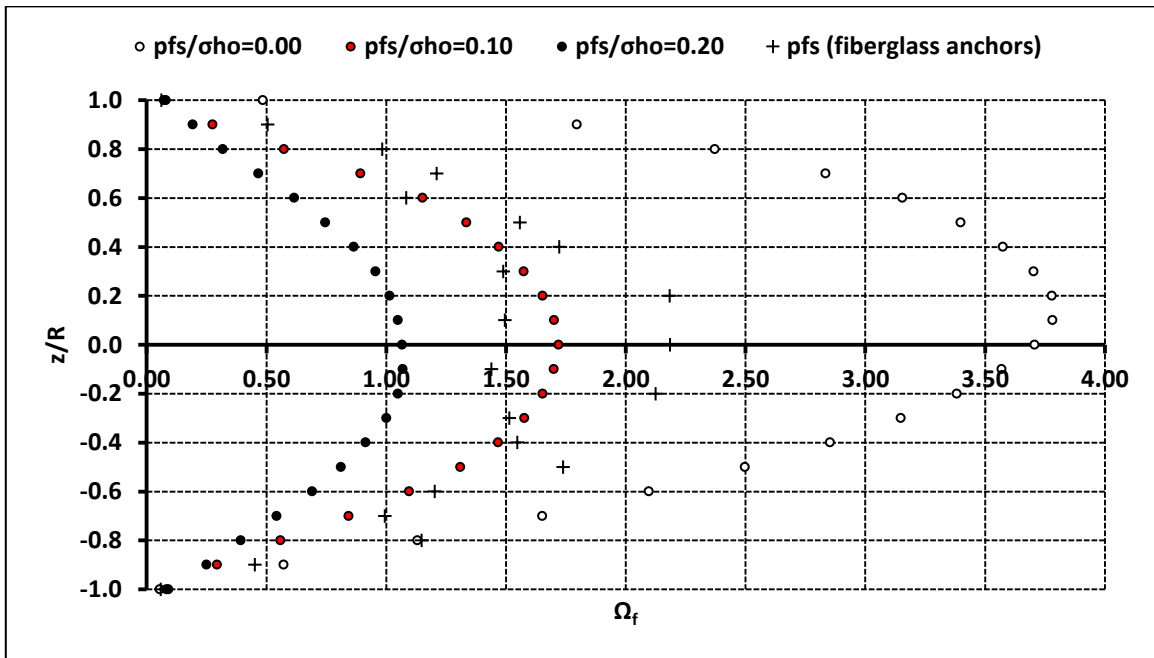
Γράφημα 4.77: Κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{0,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.08$ ,  $\Lambda_F=1.25$ )



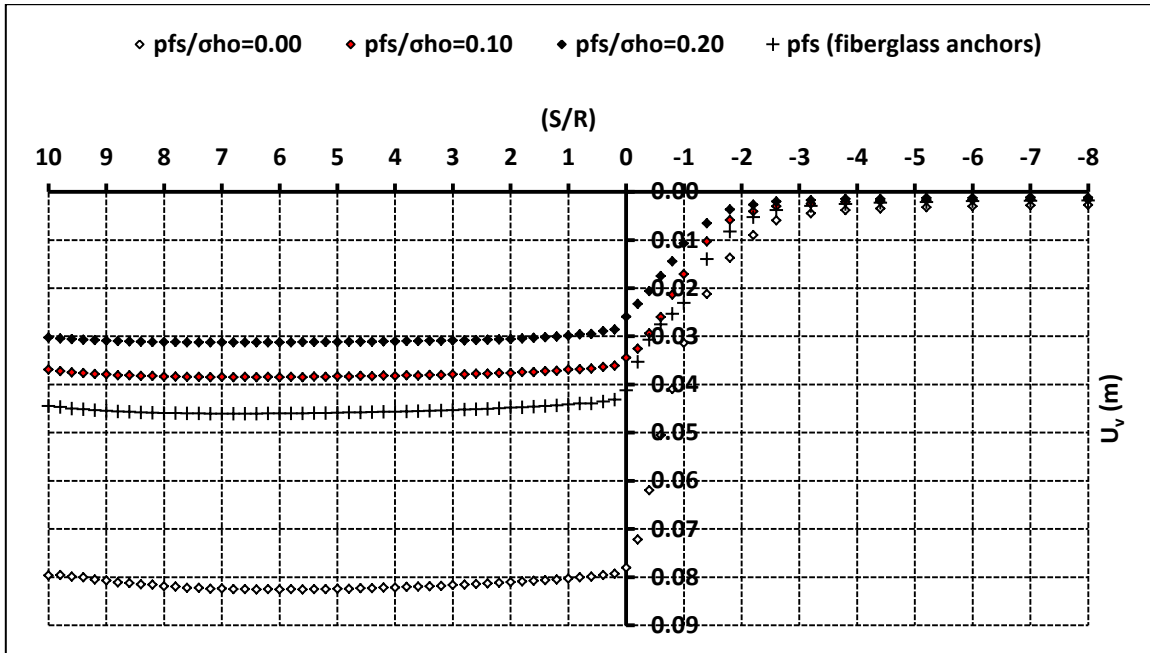
Γράφημα 4.78: Κατανομή του λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{0,m}=0.08$ ,  $\Lambda_F=1.25$ )



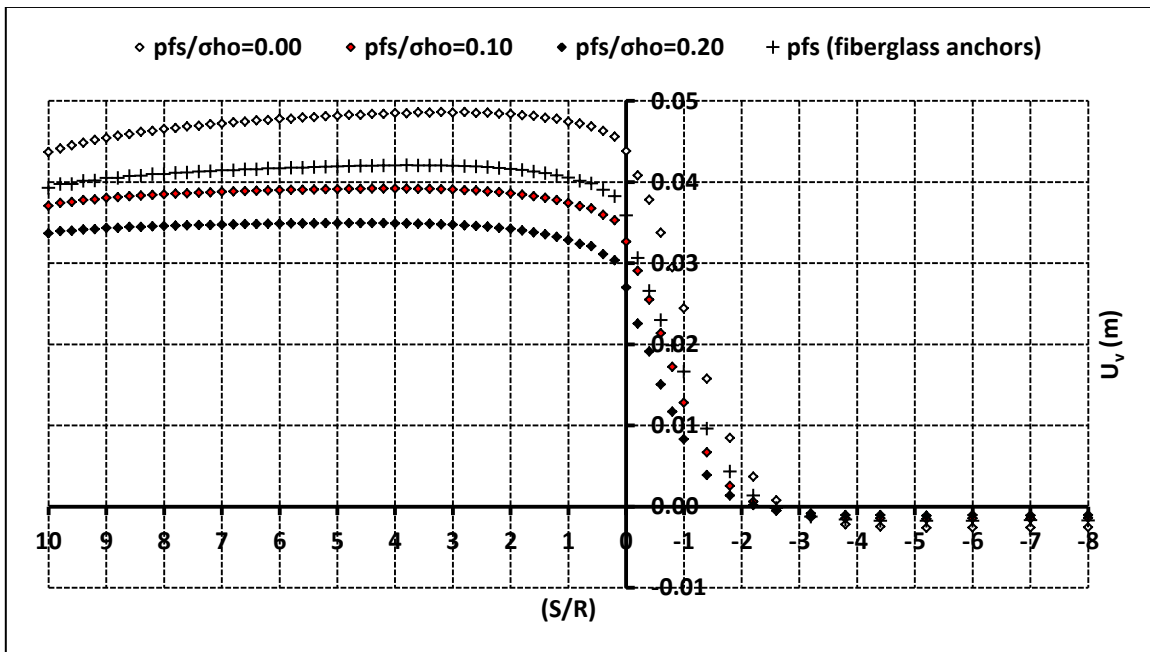
Γράφημα 4.79: Κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )



Γράφημα 4.80: Κατανομή της κανονικοποιημένης έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_f$  συναρτήσει του λόγου  $z/R$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

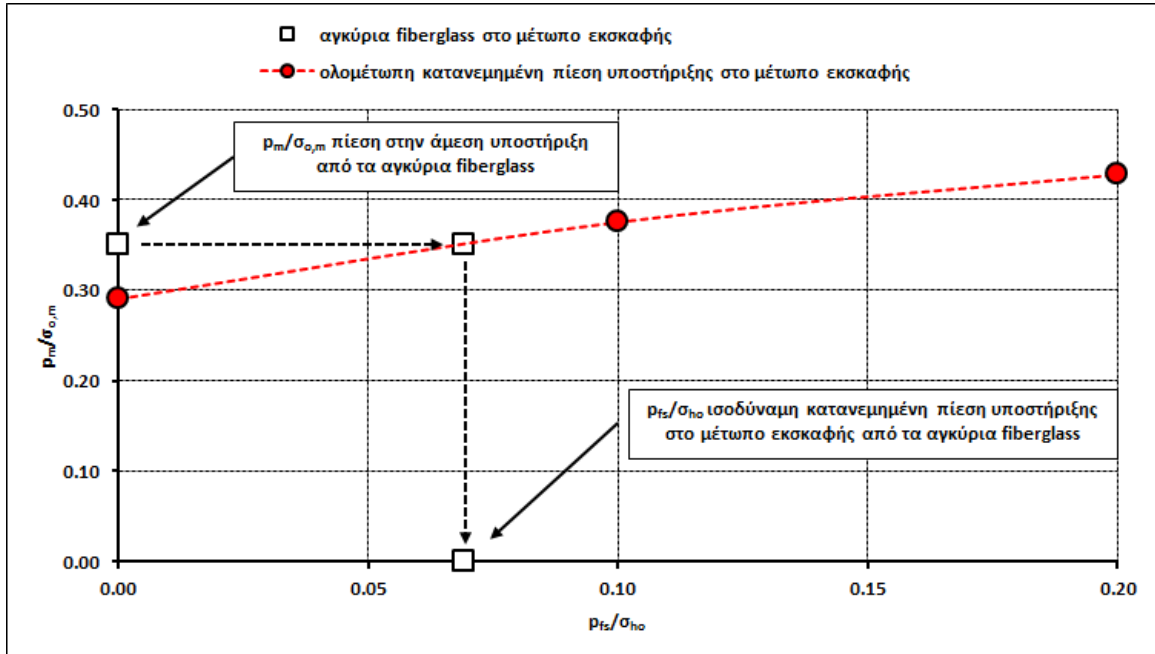


Γράφημα 4.81: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

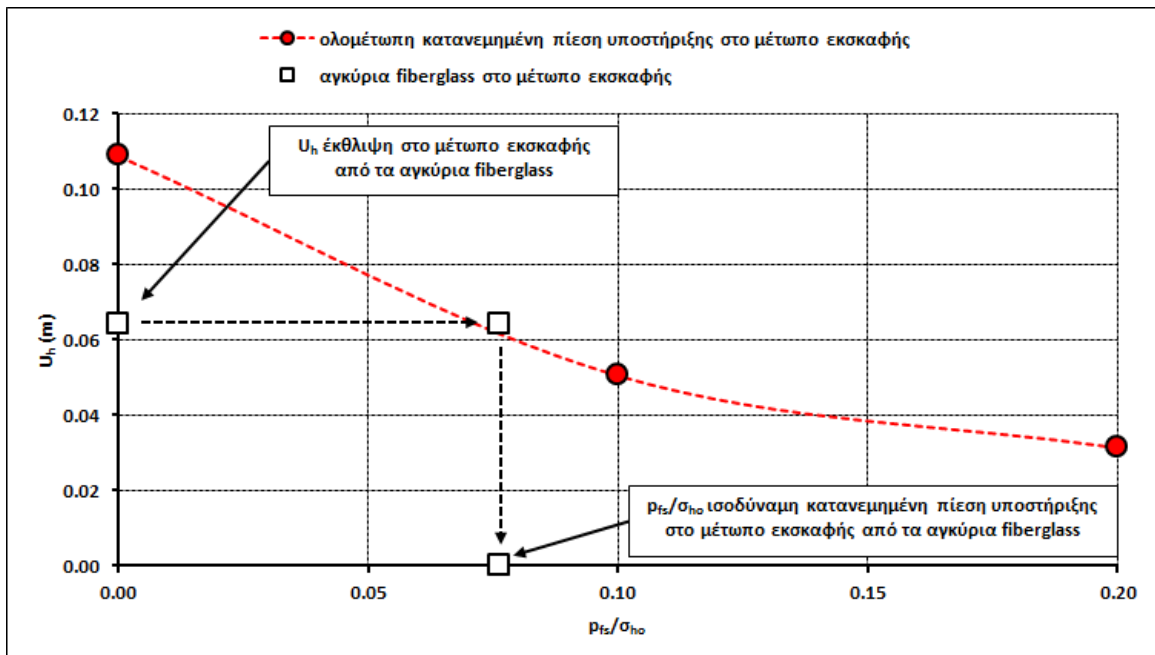


Γράφημα 4.82: Κατανομή της κατακόρυφης μετακίνησης στον πυθμένα της σήραγγας  $U_v$  συναρτήσει του λόγου  $S/R$  κατά μήκος του διαμήκη άξονα της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Στο Γράφημα 4.83 και στο Γράφημα 4.84 παρουσιάζεται η συσχέτιση της ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m.

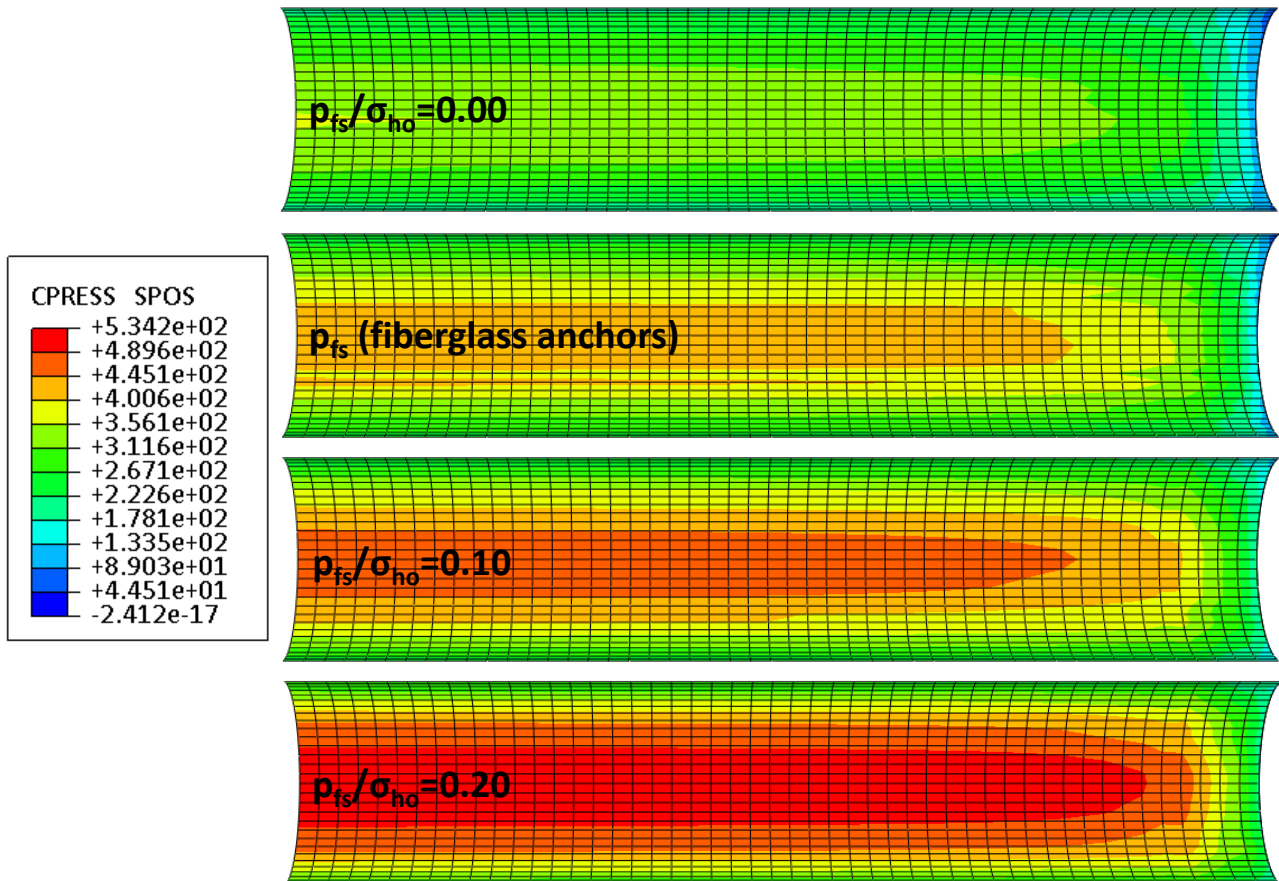


Γράφημα 4.83: Συσχέτιση της ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής κατανομή του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $\rho_m/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_F=1.25$ )



Γράφημα 4.84: Συσχέτιση της ολομέτρωτης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής κατανομή της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_F=1.25$ )

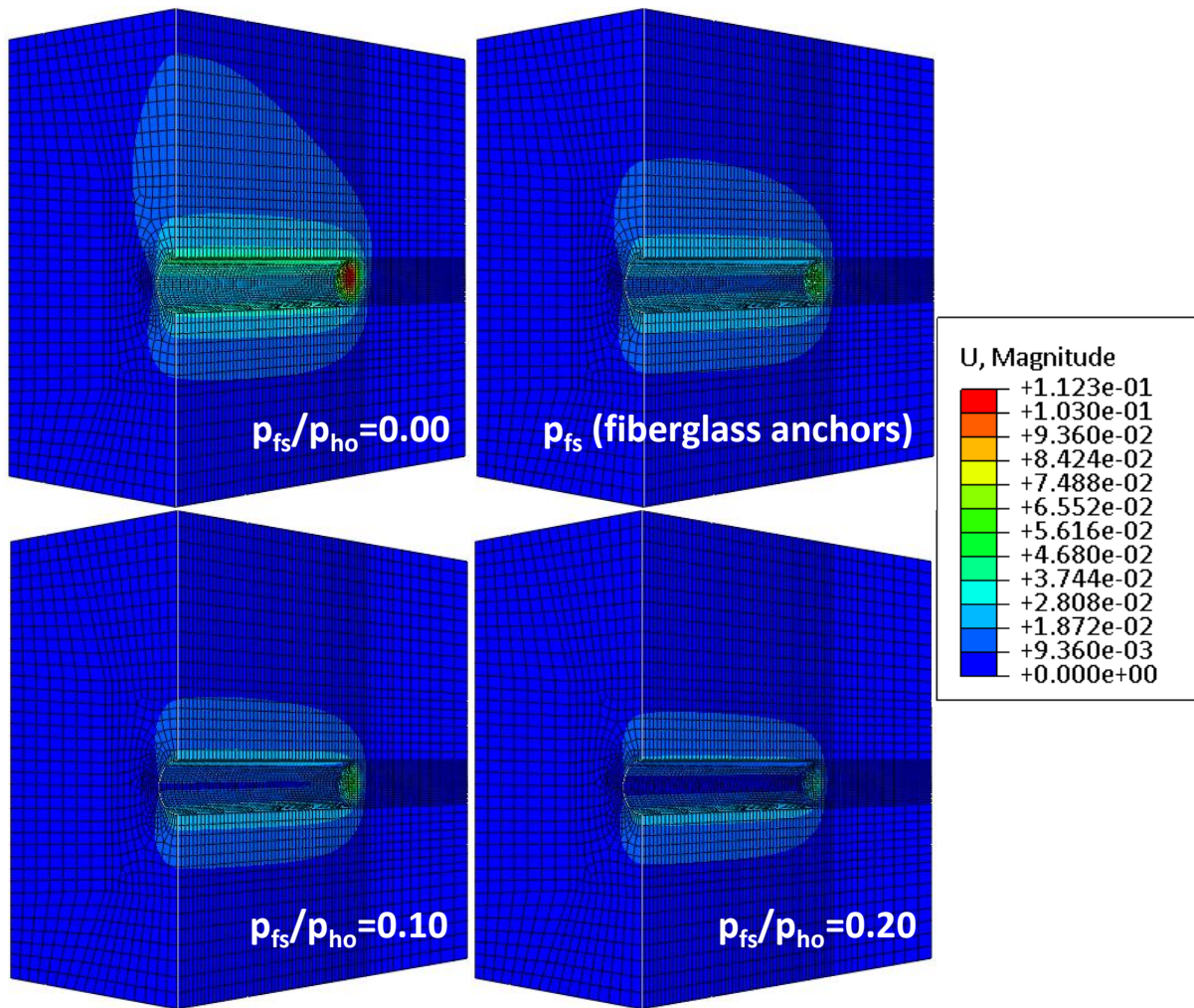
Από το Γράφημα 4.83 και το Γράφημα 4.84 γίνεται ο προσδιορισμός της ισοδύναμης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που προκύπτει από τα αγκύρια. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα κανονικοποιημένης μέσης πίεσης  $p_m/\sigma_{o,m}$  στην τυπική διατομή της σήραγγας και της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής  $U_h$  ως προς τον προσδιορισμό της ισοδύναμης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής συγκλίνουν. Συγκεκριμένα, η κανονικοποιημένη ισοδύναμη πίεση υποστήριξης που προκύπτει από τα αγκύρια είναι  $p_{fs}/\sigma_{ho} = 0.07$  και επομένως η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης είναι  $p_{fs} = 44$  kPa. Ωστόσο, η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης που αντιστοιχεί στην μέγιστη εφελκυστική τάση των αγκυρίων είναι  $p_{fs} = \tau_{ult} = 122$  kPa, ενώ η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης που αντιστοιχεί στο λόγο της συνολικής μέγιστης αξονικής εφελκυστικής δύναμης των αγκυρίων προς τη διατομή του μετώπου εκσκαφής είναι  $p_{fs} = T_{ult}/A = 31$  kPa. Επομένως, η ισοδύναμη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που προκύπτει από τα αγκύρια δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί από απλοποιημένες αναλυτικές μεθόδους, αλλά προτείνεται ο υπολογισμός να προκύπτει από την εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι τα αγκύρια λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, για την ίδια ισοδύναμη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης, γιατί γενικά ο κάρναβος των αγκυρίων είναι πιο πυκνός στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής (περιοχή στην οποία η έκθλιψη είναι μεγάλη), ενώ μέρος της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης επιβάλλεται στην περίμετρο του μετώπου εκσκαφής (περιοχή στην οποία η έκθλιψη είναι μικρή) και επομένως δεν είναι κρίσιμη ως προς την σταθεροποίηση και τον περιορισμό της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης.



Εικόνα 4.29 Φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

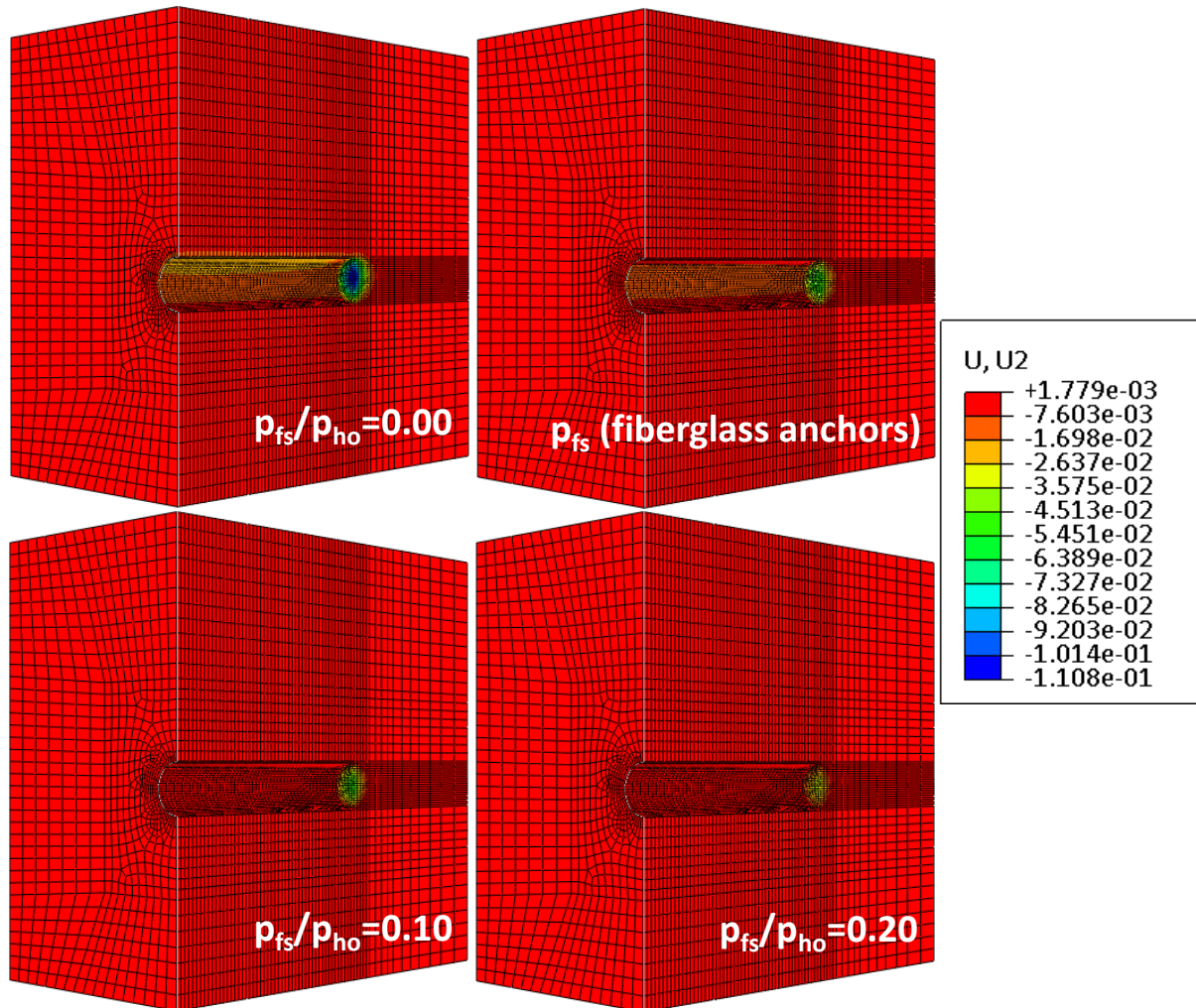
Το φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.29. Η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας.





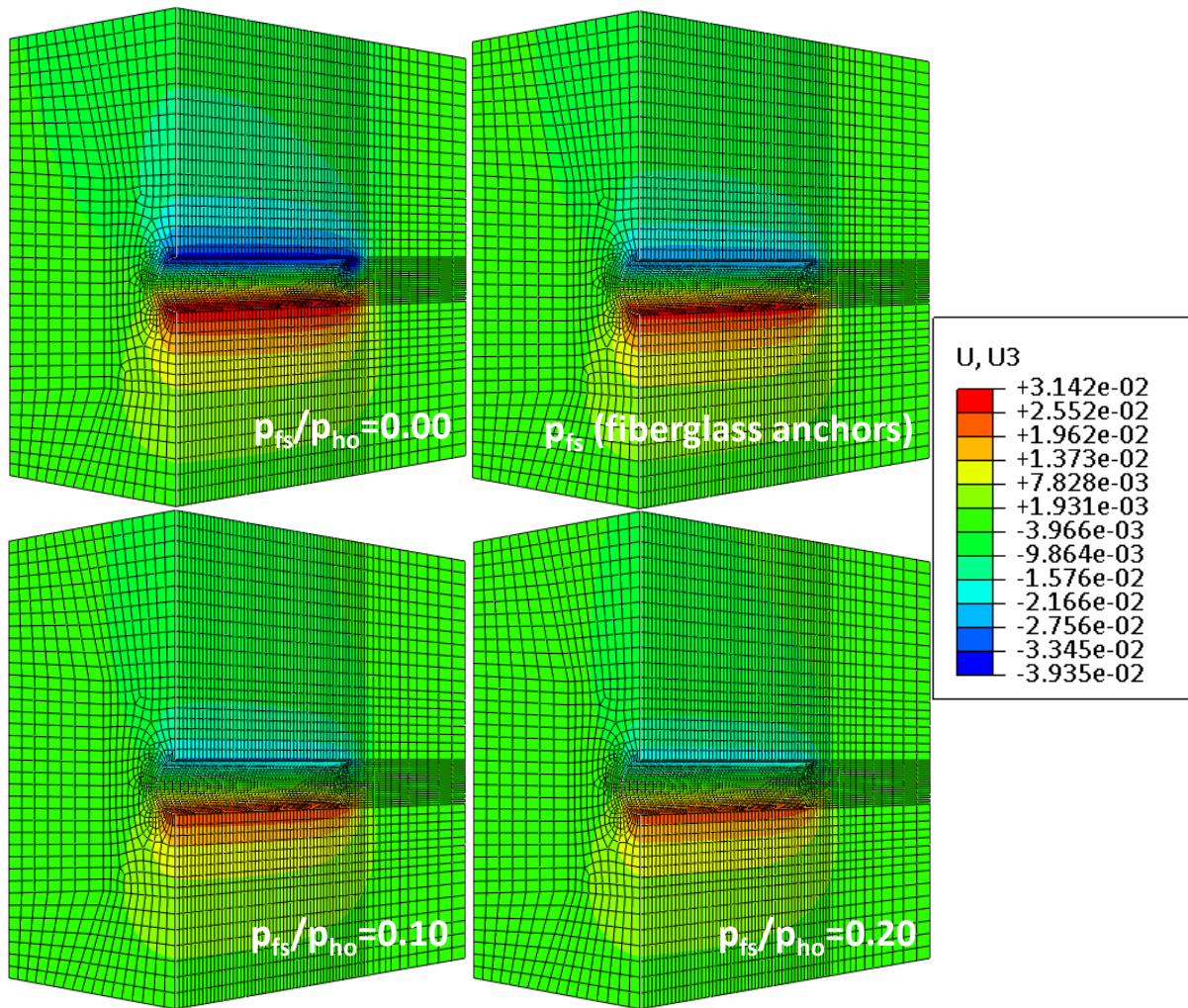
Εικόνα 4.30 Ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Οι ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.30. Η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν μείωση στις ολικές μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες ολικές μετακινήσεις.



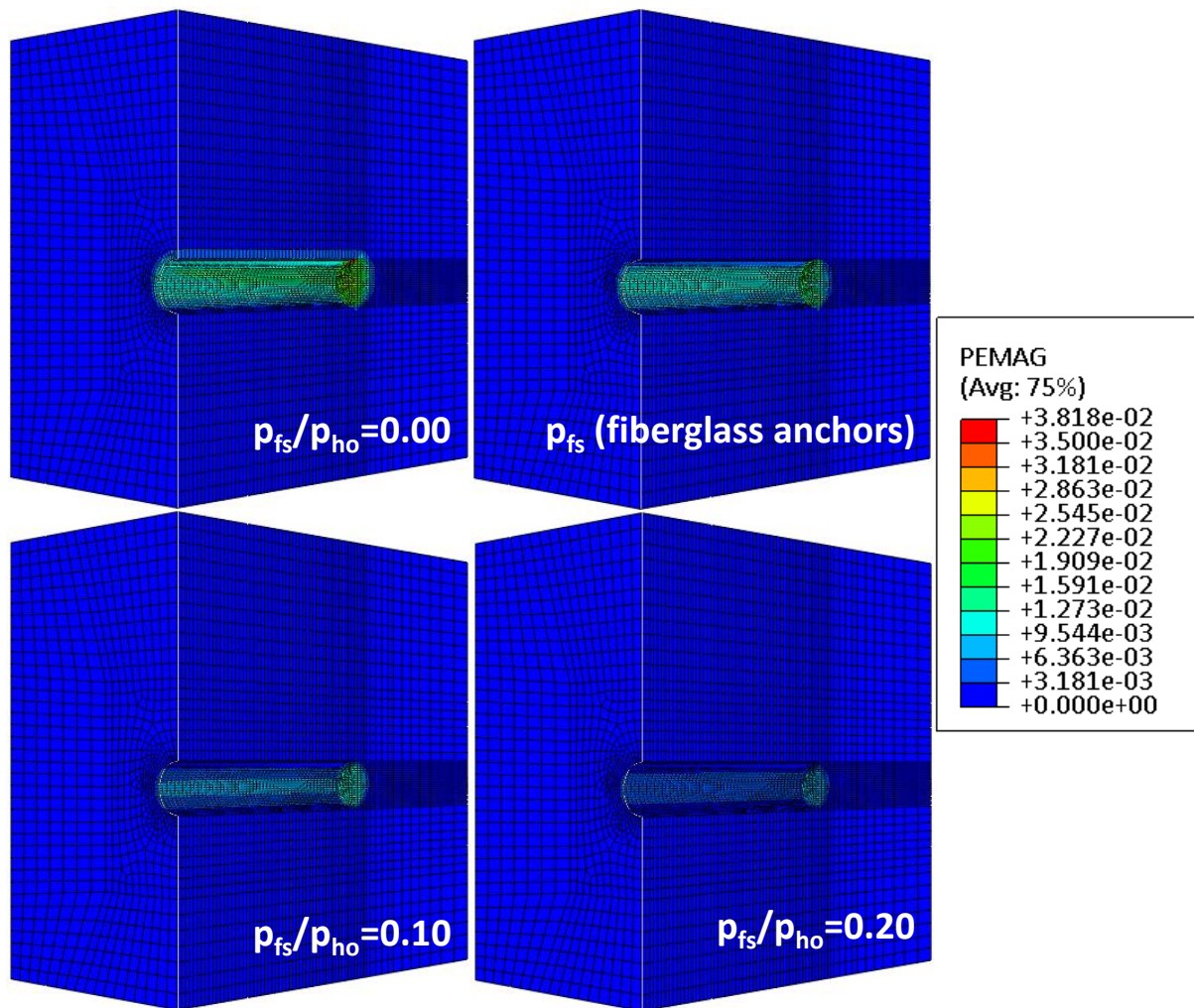
Εικόνα 4.31 Οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.31. Η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις.



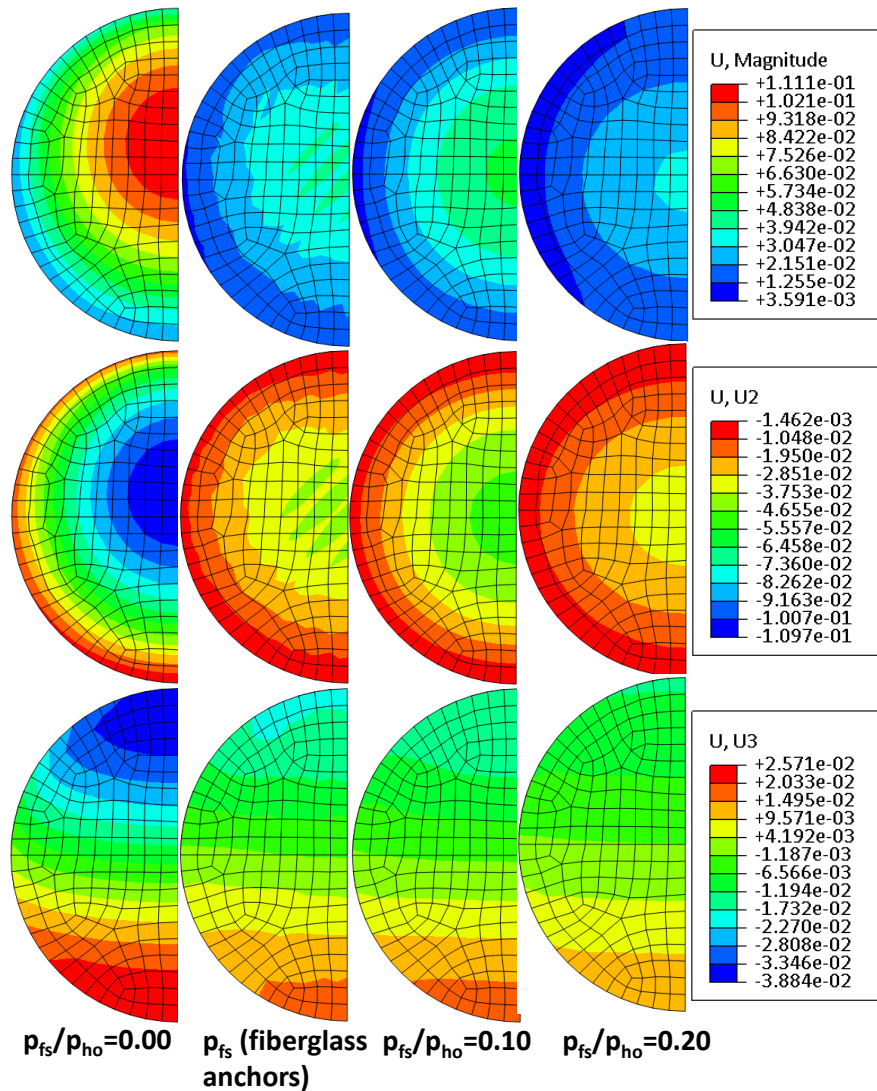
Εικόνα 4.32 Κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.32. Η ολομέτωπη κατανομημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη και στον πυθμένα όπου εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις.



Εικόνα 4.33 Πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Οι πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.33. Η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν μείωση στις πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής στο οποίο εμφανίζονται οι μέγιστες πλαστικές παραμορφώσεις.



**Εικόνα 4.34** Ολικές, οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m ( $c=20$  kPa,  $\phi=35^\circ$ ,  $E=320$  MPa,  $\sigma_c/\sigma_{o,m}=0.08$ ,  $\Lambda_f=1.25$ )

Οι οριζόντιες μετακινήσεις, οι κατακόρυφες μετακινήσεις και οι ολικές μετακινήσεις για μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας  $p_{fs}/\sigma_{ho}$  και για εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.34. Η ολομέτωπη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλούν μείωση στα προαναφερθέντα μεγέθη στο μέτωπο εκσκαφής.

## 5. Συμπεράσματα & Προτάσεις

### 5.1. Συμπεράσματα

- ✓ Η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας και συγκεκριμένα η εφαρμογή ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας.
- ✓ Η αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη προκαλείται από την επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην εντατική και παραμορφωσιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης. Ειδικότερα, η εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης μειώνει την έκθλιψη και την αποτόνωση στο μέτωπο εκσκαφής, μειώνει την προσύγκλιση και την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως οδηγεί στην αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.
- ✓ Τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου φορτίου  $p_m/\sigma_{o,m}$  παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$  που διερευνήθηκε. Για το ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής το μέσο φορτίο παρουσιάζει για τις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  καθοδική κατανομή και για τις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  ανοδική κατανομή. Για το υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής η μορφή της κατανομής του μέσου φορτίου είναι μονοδιάστατη. Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  (η βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών) προκαλεί αύξηση του φορτίου. Ο ανοδικός κλάδος του φορτίου που παρουσιάζεται στο ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής και η κατανομή του φορτίου που παρουσιάζεται στο υποστηριγμένο μέτωπο εκσκαφής συνιστούν και αποτελούν παράδοση απόκριση του γεωυλικού στη διάνοιξη της σήραγγας. Ειδικότερα, η παράδοση απόκριση του γεωυλικού εντοπίζεται στο ότι για σταθερή γωνία τριβής  $\varphi$  και για σταθερό μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  η αύξηση της συνοχής  $c$  προκαλεί αύξηση του φορτίου.

Οι Cantieni and Anagnostou (2010) σε αριθμητικές αναλύσεις που εκτέλεσαν, επεσήμαναν την συγκεκριμένη παράδοση συμπεριφορά και κατέληξαν ότι οφείλεται στις εξής παραδοχές που υιοθετούνται στην πλειοψηφία των αριθμητικών αναλύσεων: (i) η μη προσομοίωση της χρονικά εξαρτημένης (ερπυστικής) συμπεριφοράς του γεωυλικού, (ii) η προσομοίωση της ακαριαίας ενεργοποίησης της πλήρους δυσκαμψίας της άμεσης υποστήριξης στις αριθμητικές αναλύσεις, η οποία στο πεδίο δεν επιτυγχάνεται άμεσα λόγω των κατασκευαστικών διαδικασιών.

- ✓ Τα αποτελέσματα λόγου  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή για κάθε γωνία τριβής  $\varphi$  που διερευνήθηκε. Συγκεκριμένα, ο λόγος  $p_{s,m}/p_{us,m}$  παρουσιάζει για τις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  ανοδική κατανομή και για τις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  καθοδική κατανομή. Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες οριακής ευστάθειας ή ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής που συνεπάγεται: μεγάλη έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση ευρείας ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη εκτενούς πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μεγάλων προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Ο περιορισμός των συγκεκριμένων αποκρίσεων του γεωυλικού είναι καθοριστικός στην διαμόρφωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη και λόγω του μεγάλου περιθωρίου μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι σημαντικό. Το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι μικρότερο στις υψηλότερες τιμές του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$  που αντιστοιχούν σε συνθήκες πλήρους ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής που συνεπάγεται: μικρή έκθλιψη στο μέτωπο εκσκαφής, πρόκληση περιορισμένης ανακατανομής των τάσεων, ανάπτυξη περιορισμένης πλαστικής ζώνης και εκδήλωση μικρών προσυγκλίσεων στον πυρήνα προώθησης. Επομένως, το περιθώριο μείωσης και «άμβλυνσης» των συγκεκριμένων φαινομένων είναι μικρότερο, η επίδραση της πίεσης υποστήριξης είναι μικρότερη και το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι περιορισμένο.
- ✓ Οι παράγοντες που παρουσιάζουν καθοριστική επίδραση στο εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη είναι η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και η γωνία τριβής  $\varphi$ . Ειδικότερα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης προκαλεί αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Επιπρόσθετα, αν και η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, είτε για ανυποστήρικτο, είτε για υποστηριγμένο μέτωπο, η αύξηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  συνεπάγεται, για την ίδια πίεση υποστήριξης, αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη, για το ίδιο εύρος του λόγου  $\sigma_c/\sigma_{o,m}$ . Η επίδραση της γωνίας τριβής  $\varphi$  είναι σημαντική γιατί επηρεάζει την δυναμική επιφάνεια αστοχίας στο μέτωπο εκσκαφής ενισχύοντας την διατμητική αντοχή του γεωυλικού.

- ✓ Τα προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$ , για κάθε γωνία τριβής  $\phi$ , για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m και για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 και στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.1** Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=5D=50$  m

H=5D=50 m	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50

**Πίνακας 5.2** Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψος υπερκείμενων  $H=2D=20$  m

H=2D=20 m	$\phi=20^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.10$	1.00-1.10	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.20$	1.10-1.20	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.40$	1.25-1.35	1.35-1.45	1.45-1.60	1.55-1.70
$\rho_{fs}/\sigma_{ho}=0.50$	1.30-1.40	1.45-1.55	1.55-1.70	1.60-1.80

- ✓ Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3 εξάγεται ότι το ύψος υπερκείμενων δεν αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει καθοριστικά το εύρος της αύξησης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη. Ωστόσο, τα προτεινόμενα εύρη του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  δεν ταυτίζονται απόλυτα, αλλά παρουσιάζονται αποκλίσεις που εντοπίζονται για αύξηση της γωνίας τριβής  $\phi$  και για το ανώτερο όριο του προτεινόμενου εύρους του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$ .

**Πίνακας 5.3** Προτεινόμενα εύρη τιμών του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  συναρτήσει της κανονικοποιημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής  $\rho_{fs}/\sigma_{ho}$  για κάθε γωνία τριβής  $\phi$  για ύψη υπερκείμενων  $H=2D=20$  m και  $H=5D=50$  m

$\rho_{fs}/\sigma_{ho}$	H	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
		$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$	$\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$
0.10	2D=20 m	1.10-1.15	1.10-1.20	1.20-1.25
	5D=50 m	1.10-1.20	1.10-1.25	1.15-1.35
0.20	2D=20 m	1.20-1.30	1.25-1.35	1.35-1.45
	5D=50 m	1.20-1.30	1.25-1.40	1.30-1.50



- ✓ Η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  κατά 50 % προκαλεί μείωση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας. Η συγκεκριμένη απόκριση προκύπτει λόγω της βελτίωσης της μηχανικής απόκρισης του γεωυλικού που προκαλεί η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$ . Ειδικότερα, περιορίζεται το εύρος της πλαστικής ζώνης και της ανακατανομής των τάσεων του γεωυλικού λόγω της διάνοιας της σήραγγας. Επομένως, το φορτίο στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας παρουσιάζει μείωση.
- ✓ Ωστόσο, προκύπτει ότι η μεταβολή (αύξηση) του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  κατά 50 % προκαλεί περιορισμένες διακυμάνσεις στις τιμές του λόγου  $\rho_{s,m}/\rho_{us,m}$  καταδεικνύοντας ότι το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει το φορτίο στην άμεση υποστήριξη εξαιτίας της εφαρμογής πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E$  επηρεάζει τη δυσκαμψία του περιβάλλοντος γεωυλικού και της άμεσης υποστήριξης κατά την αλληλεπίδραση τους έως την σύγκλιση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη και την επίτευξη ισορροπίας, αλλά δεν επηρεάζει την αποτόνωση στον πυρήνα προώθησης που ελέγχεται και καθορίζεται από τις παραμέτρους αντοχής του γεωυλικού και αποτελεί το βασικό παράγοντα διαμόρφωσης του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.
- ✓ Η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής περιορίζει την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής και προκαλεί αύξηση στους συντελεστές ασφαλείας που αντιστοιχούν στα μέτωπα εκσκαφής που διερευνήθηκαν, με βάση την αναλυτική μεθοδολογία (Anagnostou and Kovari, 1994 & 1996).
- ✓ Ο βαθμός περιορισμού της έκθλιψης είναι μεγαλύτερος στα οριακά ευσταθή μέτωπα εκσκαφής. Ειδικότερα, για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 5D = 50$  m, για το εύρος του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής  $1 < \Lambda_F < 2$  που αντιστοιχεί σε οριακά ευσταθή και ευσταθή μέτωπα εκσκαφής, η έκθλιψη μειώνεται από 30 % έως 70 %, ενώ για τη σήραγγα με ύψος υπερκείμενων  $H = 2D = 20$  m, η έκθλιψη μειώνεται από 30 % έως 90 %. Το διαφορετικό εύρος της μείωσης της έκθλιψης οφείλεται στο διαφορετικό εύρος της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που διερευνήθηκε για κάθε ύψος υπερκείμενων. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο εύρος τα μέτωπα εκσκαφής δεν θεωρούνται ασταθή ή πλήρως ασταθή, αλλά ενδείκνυται η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, ώστε να περιοριστεί η ανάπτυξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια και να αποτραπεί ενδεχόμενη αστοχία για μέτωπα εκσκαφής που είναι στο όριο ευστάθειας/αστάθειας ( $\Lambda_F = 1$ ). Ο βαθμός περιορισμού της έκθλιψης είναι μικρότερος στα πλήρως ευσταθή μέτωπα εκσκαφής ( $\Lambda_F > 2$ ). Η μείωση της έκθλιψης εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης υποστήριξης (η συσχέτιση είναι ανάλογη).

- ✓ Η εφαρμογή αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής προκαλεί μείωση της έκθλιψης και της αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής, μείωση της προσύγκλισης και της αποτόνωσης στον πυρήνα προώθησης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και επομένως αύξηση του φορτίου στην άμεση υποστήριξη.
- ✓ Ο μηχανισμός ανακατανομής των τάσεων που αναπτύσσεται λόγω της εφαρμογής αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο που αναπτύσσεται λόγω της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ Η ισοδύναμη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής που προκύπτει από τα αγκύρια δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί από απλοποιημένες αναλυτικές μεθόδους, αλλά προτείνεται ο υπολογισμός να προκύπτει από την εκτέλεση τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι τα αγκύρια λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, για την ίδια ισοδύναμη κατανεμημένη πίεση υποστήριξης, γιατί γενικά ο κάρναβος των αγκυρίων είναι πιο πυκνός στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής (περιοχή στην οποία η έκθλιψη είναι μεγάλη), ενώ μέρος της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης επιβάλλεται στην περίμετρο του μετώπου εκσκαφής (περιοχή στην οποία η έκθλιψη είναι μικρή) και επομένως δεν είναι κρίσιμη ως προς την σταθεροποίηση και τον περιορισμό της παραμορφωσιακής απόκρισης του μετώπου εκσκαφής και του πυρήνα προώθησης.

## 5.2. Προτάσεις

Από την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας προκύπτουν θέματα προς εκτενέστερη μελέτη και διεξοδικότερη διερεύνηση ως προς την επίδραση των μέτρων υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής στα φορτία της άμεσης υποστήριξης. Ειδικότερα, προτείνεται να μελετηθεί η διερεύνηση της επίδρασης των μέτρων υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής στα φορτία της άμεσης υποστήριξης για τις εξής περιπτώσεις:

- ✓ για μέτρα υποστήριξης και προστασίας του μετώπου εκσκαφής (κοινή εφαρμογή αγκυρίων μεταλλικών ή fiberglass και ομπρέλας μεταλλικών δοκών προπορείας στο μέτωπο εκσκαφής), ώστε: (i) να προσδιοριστεί η συσχέτιση της ολομέτωπης κατανεμημένης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής με την ισοδύναμη πίεση που αναπτύσσεται στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της εφαρμογής αγκυρίων και της ομπρέλας μεταλλικών δοκών προπορείας, (ii) να διερευνηθεί η επίδραση της ομπρέλας μεταλλικών δοκών προπορείας και συγκεκριμένα να ελεγχθεί αν κρίσιμος παράγοντας (παράγοντας με μεγαλύτερο βαθμό επιρροής) είναι τα αγκύρια ή η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας λόγω του διαφορετικού μηχανισμού μεταβολής του εντατικού και παραμορφωσιακού πεδίου των προαναφερθέντων μέτρων
- ✓ για διάνοιξη δίδυμων σηράγγων, ώστε να διερευνηθεί η ενδεχόμενη αλληλεπίδραση των δύο σηράγγων

**Βιβλιογραφία**

ABAQUS 6.10 Documentation. 2010. SIMULIA, United States of America.

Anagnostou, G., Kovári, K. 1994. The face stability of slurry-shield-driven tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9, 165-174.

Anagnostou, G., Kovári, K. 1996. Face stability conditions with Earth-Pressure-Balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11, 165-174.

Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P. and Cardoso, A.S. 2005. EPB-TBM face support control in the Metro do Porto project, Portugal. Proceedings, Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC), Seattle, Online geoengineering library.

Balla, A. 1963. Rock pressure determined from shearing resistance. Proceedings of the International Conference in Soil Mechanics.

Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 4, 189-239.

Bierbaumer, A. 1913. Die dimensionierung des Tunnelmauerwerks. Leipzig und Berlin: Engelmann.

Bowles, J.E. 1997. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, McGraw Hill.

Cantieni, L., Anagnostou, G. 2010. On a paradox of elasto-plastic tunnel analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 129-147.

Chen, R.P., Tang, L.J., Ling, D.S. and Chen, Y.M. 2011. Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 38(2), 187-195.

Chern, J.C., Shiao, F.Y., Yu, C.W. 1998. An empirical safety criterion for tunnel construction. Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 222-227.

Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E. and Schmidt, B. 1969. Design of Tunnel Liners and Support Systems. Report for U.S. Department of Transportation. OHSGT, Contract 3-0151, NTIS, Springfield, Va., No. PB 183 799.

Deere, D.U., Peck, R.B., Parker, H.W., Monsees, J.E. and Schmidt, B. 1970. Design of Tunnel Support Systems. *Highway Res. Rec.* 339, 26-33.

- Dias, D. 2011. Convergence-confinement approach for designing tunnel face reinforcement by horizontal bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 4, 517–523.
- Einstein, H.H., Schwartz, C.W. 1979. Simplified analysis for tunnel supports. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105 (4), 499-518.
- Einstein, H.H., Steiner, W.S. and Baecher, G.B. 1979. Assessment of empirical design methods for tunnels in rock. *Proceedings of RETC*, 1, 683-706.
- Engesser, F. 1882. Ueber den Erddruck gegen inhere Stutzwaende. *Deutsche Bauzeitung*, 36.
- Eszto, P. 1939. Mechanical elements of rock movements, *Banyaszati es Kohaszati Lapok*, 24.
- Fairhurst, C. and Carranza-Torres, C. 2002. Closing the Circle. Some comments on design procedures for tunnel supports in rock. *Proceedings of the 50th Annual Geotechnical Conference (Fabuz, J.F. & Benler, J.G.)*. Minnesota, February, 21-84.
- Forchheimer, P. 1882. Ueber sanddruck und bewegungerscheinungen im inneren trockenen sandes. *O.I.A.V.*
- Graziani, A., Boldini, D., Ribacchi, R. 2005. Practical estimate of deformations and stress relief factors for deep tunnels supported by shotcrete. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38, 5, 345-372.
- Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T., Hakoishi, Y. 1998. Field observation of large tunnel supported by umbrella method: Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan. *Tunnels and Metropolises: Proceedings of the World Tunnel Congress, Sao Paulo, Brazil, 25-30 April*, Negro Jr and Ferreira (eds), 1009-1014, Rotterdam: Balkema.
- Horn, M. 1961. Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflaechen von Tunneln. *Landeskonferenz der ungarischen Tiefbauindustrie (German translation by STUVA, Düsseldorf)*.
- Kamata, H. and Mashimo, H. 2003. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 205-212.
- Kasper, T. and Meschke, G. 2004. A 3D finite simulation model for TBM tunneling in soft ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 1441–1460.
- Kasper, T., Meschke, G. 2006. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 2, 160-171.

Kavvadas, M., Proutzopoulos, G. 2009. 3D Analyses of tunnel face reinforcement using fibreglass nails. Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Ruhr University Bochum, 9-11 September, Meschke, Beer, Eberhardsteiner, Hartmann and Thewes (eds), 2, 825-832, Aedificatio Publishers.

Kim, S.H. and Tono, F., 2009. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane - Drained case. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(5), 526-542.

Kommerell, O. 1912. Grundlagen für die statische Berechnung von Tunnelmauerwerk. Berlin.

Lunardi, P. 2000. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rock and soils. Tunnels and Tunnelling International, Special Supplement, May 2000.

Maillart, R. 1923. Ueber Gebirgsdruck. Schweiz. Bauzeitung, 81, 14.

Mollon, G., Dias, D. and Soubra, A.H. 2010. Face Stability Analysis of Circular Tunnels Driven by a Pressurized Shield". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(1), 215-229.

Ng, C.W.W. and Lee, G.T.K. 2002. A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces. Computers and Geotechnics, 29, 673-697.

Peila, D. 1994. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of tunnel face. Geotechnical and Geological Engineering, 12, 145-168.

Peila, D., 1994. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of tunnel face. Geotechnical and Geological Engineering, 12, 145-168.

Ramoni, M., Lavdas, N., Anagnostou, G. 2011. Squeezing loading of segmental linings and the effect of backfilling. Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 692-717.

Shin, J.H., Choi, Y.K., Kwon, O.Y. and Lee, S.D., 2008. Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil. Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 241-250.

Szechy, C. 1966. Approximate determination of rock pressure in the basis of a statical analogy. Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics. Lisbon.

Szechy, C. 1970. Approximate determination of rock pressure in the basis of a statical analogy. Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics. Belgrade.

Szechy, K. 1963. Angenaeherte bestimmung des gebirgsdruckes auf grund einer statischen analogie. Proceedings of the international Conference in Soil Mechanics. Budapest.

Terzaghi, K. Rock defects and loads on tunnel supports. 1946. Rock tunnelling with steel supports (Proctor, R.V. & White, T.L. (eds)), 17-99, Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Company.

Unal, E. 1983. Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs. PhD Thesis. The Pennsylvania State University.

Vermeer, P.A., Ruse, N. and Marcher, T. 2002. Tunnel Heading Stability in Drained Ground. *Felsbau*, 20(6), 8-18.

Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. 2009. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, 2, 131-146.

Volkman, G.M. and Schubert, W. 2007. Geotechnical Model for Pipe Roof Supports in Tunneling. Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunneling Congress, Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, Prague, Czech Republic, 5-10 May 2007, Bartac, Hrdina, Romancov and Zlamal (eds), Taylor & Francis Group, 1, 755-760.

Volkman, G.M. and Schubert, W., 2007. Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling. Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunneling Congress, Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises, Prague, Czech Republic, Bartac, Hrdina, Romancov and Zlamal (eds), 1, 755-760, Taylor & Francis Group.

Volkman, G.M., Button, E.A. and Schubert, W. 2006. A Contribution to the Design of Tunnels Supported by a Pipe Roof. Proceedings of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, June 17-21, Golden, CO.

Wickham, G.E., Tiedmann, H.R. and Skinner, E.H. 1974. Ground support prediction model-RSR concept. Proceedings of the North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference. San Francisco, California, 1, 691-708.

Yoo, C. 2002. Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes. *Computers and Geotechnics*, 29, 73-94.

Yoo, C. and Shin, H.K. 2000. Behaviour of tunnel face pre-reinforced with subhorizontal pipes. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Tokyo, Kusakabe, Fujita and Miyazaki (eds), Balkema, Rotterdam, 463-468.

Προυντζόπουλος, Γ. 2011. Ενίσχυση και προστασία μετώπου σηράγγων - βελτιστοποίηση μέσω τριδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Το Δελτίο των Σηράγγων. Δεκέμβριος 2011. Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων, 11-16.

Προυντζόπουλος, Γ. 2012. Διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής αβαθών σηράγγων. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

Σπυρόπουλος, Ι. 2007. Διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων μεγάλου βάθους. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

Φορτσάκης, Π. 2012. Διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος εδάφους/βράχου και της τελικής επένδυσης σηράγγων. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

Φορτσάκης, Π.Ι. και Καββαδάς, Μ.Ι. 2010. Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης φορτίων της τελικής επένδυσης μέσω αριθμητικών αναλύσεων και στοιχείων από την Εγνατία Οδό. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, 2, 571-578. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Φορτσάκης, Π.Ι., Μαγκανάς, Κ.Α., και Καββαδάς, Μ.Ι. 2006. Μεθοδολογίες και φορτίσεις σχεδιασμού της τελικής επένδυσης σηράγγων. Παρουσίαση στοιχείων από σήραγγες της Εγνατίας Οδού. 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος. Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 25-27 Οκτωβρίου, Δ, 117-128. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.



Παράρτημα

L (m)	D (m)	K <sub>o</sub>	γ (kN/m <sup>3</sup> )	H (m)	σ <sub>o,m</sub> (kPa)	E (kPa)	ν	c (kPa)	φ (deg)	ψ (deg)	N <sub>φ</sub>	σ <sub>c</sub> (kPa)	σ <sub>c</sub> /σ <sub>o,m</sub>	Λ <sub>F</sub>	ρ <sub>fs</sub> /σ <sub>ho</sub>	ρ <sub>m</sub> /σ <sub>o,m</sub>	U <sub>h,area</sub> (m)	U <sub>h,diameter</sub> (m)	U <sub>h,center</sub> (m)
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	25	20	3	2.0	71	0.23	1.02	0	0.50	0.114	0.141	0.190
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	25	20	3	2.0	71	0.23	1.02	0.1	0.50	0.065	0.080	0.111
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	25	20	3	2.0	71	0.23	1.02	0.2	0.55	0.044	0.053	0.075
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	25	20	3	2.0	71	0.23	1.02	0.4	0.62	0.023	0.027	0.038
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	25	20	3	2.0	71	0.23	1.02	0.5	0.65	0.016	0.019	0.027
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	30	20	3	2.0	86	0.27	1.23	0	0.47	0.080	0.099	0.136
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	30	20	3	2.0	86	0.27	1.23	0.1	0.50	0.053	0.064	0.090
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	30	20	3	2.0	86	0.27	1.23	0.2	0.55	0.037	0.045	0.063
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	30	20	3	2.0	86	0.27	1.23	0.4	0.62	0.021	0.025	0.034
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	30	20	3	2.0	86	0.27	1.23	0.5	0.65	0.015	0.017	0.023
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	35	20	3	2.0	100	0.32	1.43	0	0.46	0.062	0.075	0.105
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	35	20	3	2.0	100	0.32	1.43	0.1	0.51	0.043	0.053	0.073
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	35	20	3	2.0	100	0.32	1.43	0.2	0.55	0.032	0.038	0.053
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	35	20	3	2.0	100	0.32	1.43	0.4	0.62	0.018	0.021	0.029
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	35	20	3	2.0	100	0.32	1.43	0.5	0.64	0.013	0.015	0.020
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	40	20	3	2.0	114	0.36	1.64	0	0.47	0.056	0.068	0.095
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	40	20	3	2.0	114	0.36	1.64	0.1	0.52	0.041	0.049	0.069
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	40	20	3	2.0	114	0.36	1.64	0.2	0.56	0.031	0.037	0.051
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	40	20	3	2.0	114	0.36	1.64	0.4	0.62	0.017	0.021	0.028
50	10	0.5	21	20	315	69000	0.3	40	20	3	2.0	114	0.36	1.64	0.5	0.64	0.012	0.015	0.019
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	25	25	4	2.5	78	0.25	1.21	0	0.42	0.060	0.075	0.105
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	25	25	4	2.5	78	0.25	1.21	0.1	0.48	0.038	0.047	0.066
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	25	25	4	2.5	78	0.25	1.21	0.2	0.53	0.027	0.033	0.046
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	25	25	4	2.5	78	0.25	1.21	0.4	0.60	0.014	0.017	0.023
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	25	25	4	2.5	78	0.25	1.21	0.5	0.63	0.010	0.011	0.015
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.30	1.46	0	0.43	0.050	0.061	0.086
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.30	1.46	0.1	0.49	0.034	0.041	0.058
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.30	1.46	0.2	0.54	0.024	0.030	0.042
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.30	1.46	0.4	0.61	0.013	0.015	0.020
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.30	1.46	0.5	0.64	0.009	0.010	0.013
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.35	1.70	0	0.44	0.042	0.052	0.074
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.35	1.70	0.1	0.50	0.030	0.037	0.052
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.35	1.70	0.2	0.55	0.022	0.027	0.038
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.35	1.70	0.4	0.62	0.012	0.014	0.018
50	10	0.5	21	20	315	82000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.35	1.70	0.5	0.64	0.008	0.010	0.011
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	18	30	5	3.0	62	0.20	1.05	0	0.39	0.056	0.071	0.100
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	18	30	5	3.0	62	0.20	1.05	0.1	0.45	0.030	0.038	0.054
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	18	30	5	3.0	62	0.20	1.05	0.2	0.52	0.020	0.025	0.036
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	18	30	5	3.0	62	0.20	1.05	0.4	0.60	0.010	0.012	0.015
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	18	30	5	3.0	62	0.20	1.05	0.5	0.64	0.007	0.008	0.009
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	20	30	5	3.0	69	0.22	1.16	0	0.39	0.048	0.061	0.087
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	20	30	5	3.0	69	0.22	1.16	0.1	0.46	0.029	0.036	0.052
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	20	30	5	3.0	69	0.22	1.16	0.2	0.52	0.020	0.024	0.035
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	20	30	5	3.0	69	0.22	1.16	0.4	0.61	0.010	0.011	0.015
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	20	30	5	3.0	69	0.22	1.16	0.5	0.64	0.006	0.007	0.009
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.27	1.45	0	0.40	0.039	0.049	0.071
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.27	1.45	0.1	0.48	0.026	0.032	0.046

50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.27	1.45	0.2	0.53	0.018	0.022	0.031
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.27	1.45	0.4	0.62	0.009	0.010	0.013
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.27	1.45	0.5	0.65	0.006	0.007	0.008
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.33	1.74	0	0.42	0.034	0.042	0.060
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.33	1.74	0.1	0.49	0.023	0.028	0.041
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.33	1.74	0.2	0.54	0.017	0.020	0.028
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.33	1.74	0.4	0.62	0.008	0.010	0.012
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.33	1.74	0.5	0.65	0.006	0.007	0.007
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.66	3.48	0	0.52	0.020	0.023	0.032
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.66	3.48	0.1	0.57	0.015	0.017	0.022
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.66	3.48	0.2	0.61	0.011	0.013	0.015
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.66	3.48	0.4	0.66	0.007	0.008	0.009
50	10	0.5	21	20	315	95000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.66	3.48	0.5	0.66	0.005	0.006	0.007
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	15	35	6	3.7	58	0.18	1.05	0	0.36	0.043	0.056	0.079
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	15	35	6	3.7	58	0.18	1.05	0.1	0.45	0.022	0.028	0.041
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	15	35	6	3.7	58	0.18	1.05	0.2	0.52	0.015	0.018	0.026
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	15	35	6	3.7	58	0.18	1.05	0.4	0.62	0.007	0.008	0.009
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	15	35	6	3.7	58	0.18	1.05	0.5	0.64	0.005	0.005	0.006
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.24	1.40	0	0.38	0.033	0.042	0.061
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.24	1.40	0.1	0.47	0.020	0.025	0.036
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.24	1.40	0.2	0.54	0.013	0.016	0.023
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.24	1.40	0.4	0.63	0.006	0.007	0.008
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.24	1.40	0.5	0.65	0.005	0.005	0.006
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.30	1.75	0	0.40	0.028	0.035	0.052
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.30	1.75	0.1	0.49	0.018	0.022	0.032
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.30	1.75	0.2	0.55	0.012	0.015	0.020
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.30	1.75	0.4	0.63	0.006	0.007	0.008
50	10	0.5	21	20	315	108000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.30	1.75	0.5	0.65	0.005	0.005	0.006
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.10	1.07	0	0.37	0.136	0.164	0.220
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.10	1.07	0.1	0.41	0.062	0.075	0.106
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	30	25	4	2.5	94	0.10	1.07	0.2	0.47	0.038	0.047	0.067
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.12	1.25	0	0.37	0.114	0.139	0.188
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.12	1.25	0.1	0.41	0.057	0.070	0.099
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	35	25	4	2.5	110	0.12	1.25	0.2	0.47	0.036	0.044	0.064
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	40	25	4	2.5	126	0.13	1.43	0	0.36	0.101	0.122	0.168
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	40	25	4	2.5	126	0.13	1.43	0.1	0.41	0.054	0.066	0.094
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	40	25	4	2.5	126	0.13	1.43	0.2	0.47	0.035	0.043	0.061
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	60	25	4	2.5	188	0.20	2.14	0	0.36	0.067	0.083	0.116
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	60	25	4	2.5	188	0.20	2.14	0.1	0.43	0.042	0.052	0.075
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	60	25	4	2.5	188	0.20	2.14	0.2	0.47	0.029	0.036	0.052
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	80	25	4	2.5	251	0.27	2.86	0	0.38	0.052	0.064	0.091
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	80	25	4	2.5	251	0.27	2.86	0.1	0.44	0.035	0.043	0.062
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	80	25	4	2.5	251	0.27	2.86	0.2	0.47	0.025	0.031	0.045
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	100	25	4	2.5	314	0.33	3.57	0	0.40	0.042	0.052	0.074
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	100	25	4	2.5	314	0.33	3.57	0.1	0.44	0.030	0.037	0.053
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	100	25	4	2.5	314	0.33	3.57	0.2	0.47	0.022	0.027	0.039
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	120	25	4	2.5	377	0.40	4.29	0	0.41	0.036	0.044	0.063
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	120	25	4	2.5	377	0.40	4.29	0.1	0.45	0.027	0.033	0.047
60	10	0.5	25	50	937.5	240000	0.3	120	25	4	2.5	377	0.40	4.29	0.2	0.48	0.020	0.024	0.034
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0	0.33	0.103	0.127	0.173
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0.1	0.40	0.045	0.056	0.081
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0.2	0.45	0.028	0.035	0.053
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0	0.33	0.086	0.107	0.149
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0.1	0.40	0.042	0.053	0.076

60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0.2	0.45	0.027	0.034	0.051
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0	0.33	0.076	0.095	0.133
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0.1	0.40	0.040	0.050	0.073
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0.2	0.45	0.027	0.033	0.049
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0	0.33	0.069	0.086	0.121
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0.1	0.41	0.038	0.048	0.069
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0.2	0.45	0.026	0.032	0.047
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0	0.35	0.050	0.063	0.090
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0.1	0.42	0.032	0.040	0.059
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0.2	0.46	0.022	0.028	0.040
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0	0.37	0.040	0.051	0.073
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0.1	0.43	0.028	0.034	0.051
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0.2	0.47	0.020	0.024	0.035
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0	0.39	0.034	0.043	0.062
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0.1	0.44	0.025	0.030	0.044
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0.2	0.47	0.018	0.021	0.030
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0	0.40	0.030	0.037	0.054
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0.1	0.44	0.022	0.027	0.038
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0.2	0.48	0.016	0.019	0.026
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	200	30	5	3.0	693	0.74	9.39	0	0.45	0.020	0.024	0.032
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	200	30	5	3.0	693	0.74	9.39	0.1	0.49	0.015	0.018	0.023
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	200	30	5	3.0	693	0.74	9.39	0.2	0.52	0.011	0.013	0.016
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	280	30	5	3.0	970	1.03	13.15	0	0.50	0.015	0.017	0.021
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	280	30	5	3.0	970	1.03	13.15	0.1	0.53	0.012	0.014	0.016
60	10	0.5	25	50	937.5	280000	0.3	280	30	5	3.0	970	1.03	13.15	0.2	0.54	0.010	0.011	0.013
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.08	1.25	0	0.29	0.062	0.078	0.109
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.08	1.25	0.1	0.38	0.026	0.034	0.050
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	20	35	6	3.7	77	0.08	1.25	0.2	0.43	0.017	0.021	0.031
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.10	1.57	0	0.29	0.052	0.066	0.093
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.10	1.57	0.1	0.38	0.025	0.032	0.048
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	25	35	6	3.7	96	0.10	1.57	0.2	0.43	0.016	0.020	0.030
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	30	35	6	3.7	115	0.12	1.88	0	0.29	0.046	0.058	0.083
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	30	35	6	3.7	115	0.12	1.88	0.1	0.38	0.024	0.030	0.046
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	30	35	6	3.7	115	0.12	1.88	0.2	0.43	0.016	0.019	0.029
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	35	35	6	3.7	134	0.14	2.19	0	0.30	0.042	0.053	0.077
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	35	35	6	3.7	134	0.14	2.19	0.1	0.38	0.023	0.029	0.044
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	35	35	6	3.7	134	0.14	2.19	0.2	0.43	0.015	0.018	0.028
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	40	35	6	3.7	154	0.16	2.51	0	0.31	0.038	0.049	0.071
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	40	35	6	3.7	154	0.16	2.51	0.1	0.39	0.022	0.028	0.042
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	40	35	6	3.7	154	0.16	2.51	0.2	0.43	0.015	0.018	0.027
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	60	35	6	3.7	231	0.25	3.76	0	0.34	0.030	0.038	0.057
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	60	35	6	3.7	231	0.25	3.76	0.1	0.40	0.019	0.024	0.036
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	60	35	6	3.7	231	0.25	3.76	0.2	0.44	0.013	0.015	0.023
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	80	35	6	3.7	307	0.33	5.01	0	0.35	0.025	0.032	0.047
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	80	35	6	3.7	307	0.33	5.01	0.1	0.41	0.017	0.021	0.031
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	80	35	6	3.7	307	0.33	5.01	0.2	0.45	0.011	0.014	0.019
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	100	35	6	3.7	384	0.41	6.26	0	0.37	0.022	0.027	0.040
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	100	35	6	3.7	384	0.41	6.26	0.1	0.42	0.015	0.018	0.026
60	10	0.5	25	50	937.5	320000	0.3	100	35	6	3.7	384	0.41	6.26	0.2	0.46	0.010	0.012	0.016
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0	0.35	0.163	0.201	0.275
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0	0.35	0.136	0.169	0.236
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0	0.34	0.121	0.151	0.212
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0	0.35	0.109	0.136	0.192
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0	0.37	0.080	0.100	0.143

Παράρτημα

60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0	0.40	0.064	0.081	0.117
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0	0.42	0.055	0.068	0.099
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0	0.44	0.048	0.060	0.087
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0.1	0.41	0.071	0.089	0.128
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0.1	0.42	0.067	0.084	0.121
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0.1	0.42	0.064	0.080	0.116
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0.1	0.43	0.061	0.076	0.110
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0.1	0.44	0.051	0.064	0.093
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0.1	0.46	0.045	0.055	0.081
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0.1	0.47	0.040	0.048	0.070
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0.1	0.48	0.035	0.043	0.061
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	25	30	5	3.0	87	0.09	1.17	0.2	0.48	0.045	0.056	0.083
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	30	30	5	3.0	104	0.11	1.41	0.2	0.48	0.044	0.054	0.080
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	35	30	5	3.0	121	0.13	1.64	0.2	0.48	0.042	0.052	0.077
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	40	30	5	3.0	139	0.15	1.88	0.2	0.48	0.041	0.051	0.074
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	60	30	5	3.0	208	0.22	2.82	0.2	0.49	0.036	0.044	0.064
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	80	30	5	3.0	277	0.30	3.76	0.2	0.51	0.032	0.039	0.055
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	100	30	5	3.0	346	0.37	4.70	0.2	0.52	0.029	0.034	0.048
60	10	0.5	25	50	937.5	150000	0.3	120	30	5	3.0	416	0.44	5.64	0.2	0.53	0.026	0.031	0.042
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	125	25	5	2.5	392	0.04		0	0.33	0.51	0.60	0.80
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	125	25	5	2.5	392	0.04		0.05	0.36	0.20	0.25	0.34
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	125	25	5	2.5	392	0.04		0.3	0.54	0.04	0.05	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	250	25	5	2.5	785	0.08		0	0.32	0.29	0.36	0.48
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	250	25	5	2.5	785	0.08		0.05	0.37	0.16	0.19	0.26
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	250	25	5	2.5	785	0.08		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	500	25	5	2.5	1570	0.16		0	0.34	0.17	0.20	0.28
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	500	25	5	2.5	1570	0.16		0.05	0.39	0.11	0.13	0.18
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	500	25	5	2.5	1570	0.16		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	750	25	5	2.5	2355	0.24		0	0.37	0.12	0.14	0.19
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	750	25	5	2.5	2355	0.24		0.05	0.42	0.09	0.11	0.14
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	750	25	5	2.5	2355	0.24		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1000	25	5	2.5	3139	0.31		0	0.40	0.09	0.11	0.15
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1000	25	5	2.5	3139	0.31		0.05	0.44	0.08	0.09	0.11
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1000	25	5	2.5	3139	0.31		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1250	25	5	2.5	3924	0.39		0	0.42	0.08	0.09	0.12
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1250	25	5	2.5	3924	0.39		0.05	0.45	0.07	0.08	0.09
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1250	25	5	2.5	3924	0.39		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1500	25	5	2.5	4709	0.47		0	0.43	0.07	0.08	0.10
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1500	25	5	2.5	4709	0.47		0.05	0.46	0.06	0.07	0.08
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1500	25	5	2.5	4709	0.47		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1750	25	5	2.5	5494	0.55		0	0.45	0.07	0.07	0.08
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1750	25	5	2.5	5494	0.55		0.05	0.48	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	1750	25	5	2.5	5494	0.55		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2000	25	5	2.5	6279	0.63		0	0.47	0.06	0.07	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2000	25	5	2.5	6279	0.63		0.05	0.51	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2000	25	5	2.5	6279	0.63		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2250	25	5	2.5	7064	0.71		0	0.50	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2250	25	5	2.5	7064	0.71		0.05	0.52	0.05	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2250	25	5	2.5	7064	0.71		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2500	25	5	2.5	7848	0.78		0	0.52	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2500	25	5	2.5	7848	0.78		0.05	0.54	0.05	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2500	25	5	2.5	7848	0.78		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2750	25	5	2.5	8633	0.86		0	0.53	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2750	25	5	2.5	8633	0.86		0.05	0.54	0.05	0.06	0.07

**Παράρτημα**

60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	2750	25	5	2.5	8633	0.86		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	3000	25	5	2.5	9418	0.94		0	0.54	0.06	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	3000	25	5	2.5	9418	0.94		0.05	0.54	0.05	0.06	0.07
60	10	1	20	500	10000	1000000	0.3	3000	25	5	2.5	9418	0.94		0.3	0.54	0.04	0.04	0.05

