



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής

National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Geotechnical Division



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ
ΛΟΓΩ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

Κοντονίκας Φώτης

Επιβλέπων: Μιχαήλ Καθβαδάς, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μιχαήλ Καββαδά, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στους υποψήφιους διδάκτορες Λίτσα Δημήτρη και Χόρτη Φίλιππο, για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Χάρη στα κατάλληλα σχόλια και τις εμπειριστατωμένες παρατηρήσεις τους η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα για την υπομονή και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των εδαφικών μετακινήσεων που συντελούνται στο μέτωπο της σήραγγας λόγω μηχανοποιημένης εκσκαφής σε αβαθείς σήραγγες αστικού περιβάλλοντος. Η διερεύνηση των μετακινήσεων επικεντρώθηκε κυρίως στις πρόδρομες ακτινικές συγκλίσεις και στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής. Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων η εξαγωγή νομογραφημάτων που θα προβλέπουν την εξώθηση και την ακτινική σύγκλιση του μετώπου για οποιαδήποτε γεωμετρία σήραγγας, εδαφικού προφίλ αλλά και πίεση υποστήριξης.

Αρχικά στο 1^ο και 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στη λειτουργία των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και ζύγιση του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται. Άμεσο ζητούμενο το οποίο και περιγράφεται στο 2^ο Κεφάλαιο αναλυτικότερα είναι η σύνδεση του εκσκαπόμενου εδαφικού υλικού με την ποσοστιαία μεταβολή του εμβαδού του μετώπου και κατ' επέκταση με τον προσδιορισμό της υπερεκσκαφής που συντελείται στο μέτωπο. Βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι, βασιζόμενοι στη διδακτορική έρευνα του Δρ. Γ. Προυντζόπουλου η οποία εισήγαγε το συντελεστή ευστάθειας Λ_{f0} για ανυποστήρικτο μέτωπο, η εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων που θα συνδέουν τη γεωμετρία της εκσκαφής, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού αλλά και την πίεση του μετώπου, με την εξώθηση και την ακτινική σύγκλιση του μετώπου εκσκαφής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 288 παραμετρικές αναλύσεις σε ξηρές συνθήκες με διαφορετικά βάθη υπερκείμενων, διαφορετικές διαμέτρους και πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Ο νέος προτεινόμενος συντελεστής Λ_f που προκύπτει, έχει την ικανότητα να προβλέπει τις εδαφικές μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής για οποιοδήποτε σενάριο εκσκαφής, ενώ για ανυποστήρικτα μέτωπα καταλήγει στην αρχική συσχέτιση του Λ_{f0} .

Παράλληλα, με την πραγματοποίηση των παραπάνω αναλύσεων σε ξηρές συνθήκες, έγιναν επιπλέον κάποιες αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη του νερού, με απώτερο στόχο τη διερεύνηση της επιρροής του νερού τόσο στις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής, όσο και στις ακτινικές συγκλίσεις που συντελούνται γύρω από τη σήραγγα. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν ότι η ύπαρξη του νερού επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του εδάφους γύρω από τη σήραγγα, όπως επίσης και ο συντελεστής εδαφικής υδατοπερατότητας. Στο τελευταίο κεφάλαιο συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, όπως επίσης και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κατάλογος Περιεχομένων

1	Διάνοιξη σηράγγων με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)	1
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Μηχανήματα Εξισσορόπησης της Εδαφικής Πίεσης – EPBM (Earth Pressure Balance Machines)	1
1.2.1	Γενικά Στοιχεία και βασική λειτουργία των μηχανημάτων EPB	1
1.2.2	Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος EPB	5
1.3	Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα (Slurry Shield Machines)	15
1.3.1	Γενικά στοιχεία και βασική λειτουργία των μηχανημάτων Slurry	16
1.3.2	Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος Slurry	18
2	Μεθοδολογία εκτίμησης της υπερεκσκαφής αξιοποιώντας τις μετρήσεις του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού	23
2.1	Εισαγωγή-Σκοπός μέτρησης εδαφικού υλικού	23
2.2	Μέθοδοι μέτρησης απώλειας του εδαφικού όγκου	23
2.2.1	Έλεγχος του εδαφικού όγκου σε μηχανήματα Slurry	25
2.3	Προτεινόμενη μεθοδολογία προσέγγισης της υπερεκσκαφής με μέτρηση του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού	26
2.4	Αξιολόγηση της σημασίας της χρήσης των μηχανικών ζωνών με βάση πραγματικά περιστατικά	28
3	Δημιουργία τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων	35
3.1	Εισαγωγή.....	35
3.2	Περιγραφή αριθμητικών αναλύσεων	35
3.3	Περιγραφή του γεωμετρικού καθορισμού των μοντέλων των αριθμητικών προσομοιωμάτων	36
3.4	Περιγραφή της διαδικασίας διακριτοποίησης των καταστατικών προσομοιωμάτων	39
3.5	Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας.....	40

4	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων.....	41
4.1	Εισαγωγή.....	41
4.2	Επιρροή του βάθους υπερκείμενων στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου και των ακτινικών συγκλίσεων.....	46
4.3	Επιρροή της εφαρμοζόμενης πίεσης υποστήριξης στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου, των ακτινικών συγκλίσεων καθώς και στον λόγο της αναμενόμενης υπερεκσκαφής.....	52
4.4	Επιρροή του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_0 στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου και των ακτινικών συγκλίσεων	60
4.5	Διεύρυνση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου λ_f	62
5	Συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν υδρομηχανικά φαινόμενα (Coupled Analyses).....	67
5.1	Εισαγωγή.....	67
5.2	Παρουσίαση εδαφικών προσομοιωμάτων	70
5.3	Αποτελέσματα συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων	75
6	Συμπεράσματα.....	81
	Βιβλιογραφία	81

Κατάλογος Γραφημάτων:

- Γράφημα 4-1: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/p_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=0, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 47
- Γράφημα 4-2: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/p_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=50kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 48
- Γράφημα 4-3: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/p_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=100kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 50
- Γράφημα 4-5: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/p_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=200kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 51
- Γράφημα 4-6: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$ 53
- Γράφημα 4-7: Απεικόνιση του λόγου της αναμενόμενης υπερεκσκαφής $(OER)_{calculated}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$ 54
- Γράφημα 4-8: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$ 55
- Γράφημα 4-9: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 56
- Γράφημα 4-10: Απεικόνιση του λόγου της αναμενόμενης υπερεκσκαφής $(OER)_{calculated}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 56
- Γράφημα 4-11: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$ 57
- Γράφημα 4-12: Απεικόνιση δύο μηκοτομικών προφίλ εξωθήσεων σε υλικό με εδαφική συνοχή $c=10kPa$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4kPa$ για λόγο βάθους

υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$, διάμετρο $D=6m$ για $Ko=0.50$ (πάνω) και $Ko=1.50$ (κάτω) για όλες τις πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν..... 58

Γράφημα 4-13: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για τους δύο εξεταζόμενους λόγους οριζόντιων ωθήσεων Ko για τιμές της πίεσης υποστήριξης $FP=0$ (πάνω αριστερά) $FP=50kPa$ (πάνω δεξιά) $FP=100kPa$ (κάτω αριστερά) και $FP=200kPa$ (κάτω δεξιά)... 60

Γράφημα 4-14: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για τους δύο εξεταζόμενους λόγους οριζόντιων ωθήσεων Ko για τιμές της πίεσης υποστήριξης $FP=0$ (πάνω αριστερά) $FP=50kPa$ (πάνω δεξιά) $FP=100kPa$ (κάτω αριστερά) και $FP=200kPa$ (κάτω δεξιά)... 61

Γράφημα 4-15: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου (πάνω) καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης (κάτω) συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για το σύνολο των αναλύσεων για όλες τις πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν..... 62

Γράφημα 4-16: Αδιαστατοποιημένη μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων Ko 63

Γράφημα 4-17: Αδιαστατοποιημένη ακτινική σύγκλιση Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων Ko 64

Γράφημα 4-18: Απεικόνιση του αναμενόμενου λόγου υπερεκσκαφής $OER_{calculated}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων Ko 64

Γράφημα 5-1: Απεικόνιση της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $U_{2,area}$ και της μέσης ακτινικής σύγκλισης $U_{radial,average}$ συναρτήσει της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη σ_{cs} για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ίση με $0kPa$ για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $Ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$, $Ks_2=5 \cdot 10^{-8}m/s$, ενώ με πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για 'ξηρές' συνθήκες..... 76

Γράφημα 5-2: Απεικόνιση της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $U_{2,area}$ και της μέσης ακτινικής σύγκλισης $U_{radial,average}$ συναρτήσει της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη σ_{cs} για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ίση με $50kPa$ για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $Ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$, $Ks_2=5 \cdot 10^{-8}m/s$, ενώ με πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για 'ξηρές' συνθήκες..... 77

Γράφημα 5-3: Απεικόνιση των αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ και των αδιαστατοποιημένων ακτινικών συγκλίσεων συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $Ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$, $Ks_2=5 \cdot 10^{-8}m/s$, ενώ με

πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για 'ξηρές' συνθήκες.	79
---	----

Κατάλογος Εικόνων:

Εικόνα 1-1: Εύρος εφαρμογής του EPB-TBM (πηγή: Wittke, W., 2007) [18].....	2
Εικόνα 1-2: Αρχή λειτουργίας της ασπίδας εξισσορόπησης ενός μηχανήματος EPB-TBM (πηγή: Wittke, W., 2007) [18].....	3
Εικόνα 1-3: Σχηματική απεικόνιση της κοπτικής κεφαλής ενός EPB-TBM (Πηγή: LOVAT Inc.)	3
Εικόνα 1-4: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος EPB (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15].....	4
Εικόνα 1-5: Σχηματική απεικόνιση της τελικής επένδυσης σε EPB-TBM (πηγή Greenwood, 2003)	5
Εικόνα 1-6: Αριστερά, κοπτική κεφαλή ανοικτού τύπου που χρησιμοποιήθηκε στο μετρό του Νέου Δελχί στην Ινδία, Δεξιά, κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του Μετρό της Αθήνας στο Ελληνικό (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε)	6
Εικόνα 1-7: 1)Πάνω αριστερά: Κοπτικός δίσκος που χρησιμοποιήθηκε στην κεφαλή του EPB στο μετρό της Θεσσαλονίκης 2)Πάνω δεξιά: Κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ίδια κεφαλή 3)Κάτω: Η διαμόρφωση του μετώπου εκσκαφής κατά τη διάρκεια της κοπής με τα εργαλεία (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε)	7
Εικόνα 1-8: Απεικόνιση ατέρμονα κοχλία με κεντρικό άξονα περιστροφής (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	9
Εικόνα 1-9: Κυλινδρικά έμβολα ώθησης ευθυγραμμισμένα με τα στοιχεία της τελικής επένδυσης (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	10
Εικόνα 1-10: Βασικές διαστάσεις και στοιχεία ενός προκατασκευασμένου δακτύλιου από σκυρόδεμα, με εμφανή τα σημεία σύνδεσης των στοιχείων στον ίδιο το δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτύλιους. (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	11
Εικόνα 1-11: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15].....	12
Εικόνα 1-12: Ο μηχανισμός των γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός μηχανήματος EPB (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε).....	12
Εικόνα 1-13: Απεικόνιση των δύο διαφορετικών κενών που δημιουργούνται κατά την προώθηση του μηχανήματος (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15].....	13

Εικόνα 1-14: Χαρακτηριστική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση σωληνώσεων εγκατεστημένων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	14
Εικόνα 1-15: Εύρος εφαρμογής μηχανήματος με ασπίδα πολφού (πηγή: Wittke, W., 2007) [18].....	16
Εικόνα 1-16: Αρχή λειτουργίας μηχανήματος με ασπίδα πολφού (πηγή: Wittke, W., 2007) [18].....	17
Εικόνα 1-17: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα-Slurry Machine (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	18
Εικόνα 1-18: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Mixshield που χρησιμοποιήθηκε στο Μετρό του Λονδίνου (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	19
Εικόνα 1-19: Απεικόνιση της εδαφικής πίεσης που ασκείται καθώς και τα στοιχεία του θαλάμου εκσκαφής (πηγή: Guglielmetti V. “Mechanized tunneling in urban environment, control of ground response and face stability, when excavating with an EPB machine”) [4]	20
Εικόνα 1-20: Το σύστημα σωληνώσεων αναρρόφησης του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη και το σύστημα τροφοδοσίας του αιωρήματος του μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος Slurry (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	21
Εικόνα 1-21: Σύστημα διαχωρισμού εδαφικού υλικού από το μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick TBSS-450 (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	22
Εικόνα 2-1: Μοναδιαίος μετρητής βάρους και μηχανικός ιμάντας μέτρησης εδαφικού όγκου όπως είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό ενός μηχανήματος TBM (πηγή: TBM Conveyor belt scales, the university link project experience, Indra Banerjee CH2M HILL, Inc. Richard McLane Traylor Bros., Inc. Ed Shorey CH2M HILL, Inc., Paul Gasson CH2M HILL, Inc.).....	24
Εικόνα 2-2: Μετρητής scanner για τον προσδιορισμό του εδαφικού όγκου – Courtesy of SICK AG (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	24
Εικόνα 2-3: Μετρητής πυκνότητας – Courtesy of Ronan Engineering Company (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	25
Εικόνα 2-4: Σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής της διαμέτρου του μετώπου εκσκαφής (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]	26
Εικόνα 2-5: Αποτελέσματα μετρήσεων εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού σε συγκεκριμένες Χ.Θ και στις δύο σήραγγες του Beacon Hill Project. Σε κύκλο φαίνονται οι μετρήσεις που υποδεικνύουν την παρουσία υπερεκσκαφών (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11].....	28

Εικόνα 2-6: Απεικόνιση των 9 κύριων ζωνών στις οποίες φαίνονται πόσο παραπάνω από τις φυσιολογικές τιμές εδαφικού όγκου προέκυψαν ανα βήμα εκσκαφής. (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11].....29

Εικόνα 2-7: Απεικόνιση της σύγκρισης του θεωρητικώς αναμενόμενου και του πραγματικού εδαφικού όγκου: 1) στα δαχτυλίδια τελικής επένδυσης 1020 – 1024 με την πίεσεις εξισορρόπησης στο μέτωπο να είναι λιγότερες από το 80% περίπου της συνολικής περιβάλλουσας πίεσης (φορτία εδάφους και υδροστατικές πιέσεις) με αποτέλεσμα την παρουσία μεγάλων υπερεκσκαφών και 2) στα δαχτυλίδια 1024 – 1031 στα οποία οι πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες περιβάλλουσες με τους θεωρητικούς και τους αναμενόμενους όγκους πρακτικά να ταυτίζονται. (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11].....30

Εικόνα 2-8: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο τμήμα από το Σταθμό Μετρό της Αργυρούπολης μέχρι το Φρέαρ Υμηττού. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων) [17].....32

Εικόνα 2-9: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο τμήμα από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το Φρέαρ Λέοντος. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων) [17]33

Εικόνα 2-10: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο μεσοδιάστημα του τμήματος από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το Φρέαρ Λέοντος. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων) [17].....34

Εικόνα 3-1: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου $D=6m$ για λόγους υπερκειμένων $H/D=1.5$ (πάνω) 2.5 (στη μέση) και 4.0 (κάτω) αντίστοιχα.37

Εικόνα 3-2: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου $D=10m$ για λόγους υπερκειμένων $H/D=1.5$ (πάνω) 2.5 (στη μέση) και 4.0 (κάτω) αντίστοιχα.38

Εικόνα 3-4: Απεικόνιση της διαδικασίας διακριτοποίησης όπως περιγράφηκε παραπάνω, όπου φαίνεται η περιοχή της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς και οι βοηθητικές ζώνες διακριτοποίησης. Το αριθμητικό προσομοίωμα που απεικονίζεται έχει διάμετρο $D=10m$ και $H/D=1,5$39

Εικόνα 4-1: Υπολογισμός της μέσης έκθλιψης $U_{2,area}$ στο σύνολο της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής.....42

Εικόνα 4-2: Μέση αδιαστατοποιημένη οριζόντια μετατόπιση στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ ως συνάρτηση του συντελεστή ευστάθειας Λ_{F0} για διαφορετικά βάθη υπερκειμένων (Προυντζόπουλος 2012).....44

Εικόνα 4-3: Απεικόνιση των μετακινήσεων στη διεύθυνση του άξονα γ-γ (αριστερά) καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής (δεξιά) σε σήραγγα διαμέτρου $D=6m$ με λόγο υπερκειμένων προς τη διάμετρο σήραγγας $H/D=2,5$ και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο $FP=0kPa$45

Εικόνα 4-4: : Απεικόνιση των μετακινήσεων στη διεύθυνση του άξονα γ-γ (αριστερά) καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής (δεξιά) σε σήραγγα διαμέτρου $D=6m$ με λόγο υπερκειμένων προς τη διάμετρο σήραγγας $H/D=4,0$ και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο $FP=100kPa$45

Εικόνα 4-5: Κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής για λόγο βάθους υπερκειμένων προς διάμετρο $H/D=4,0$, διάμετρο $D=6m$ και μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο σε υλικό με εδαφική συνοχή $c=10kPa$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4kPa$59

Εικόνα 5-1: Απεικόνιση της κατανομής των πιέσεων πόρων για εδαφικά προσομοιώματα με συνοχή $c=10kPa$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$ (πάνω) και $ks_2=5 \cdot 10^{-8}m/s$ (κάτω).70

Εικόνα 5-2: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο βάθους υπερκειμένων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για τιμές της εδαφικής συνοχής $c=10kPa$ (πάνω αριστερά), $c=30kPa$ (πάνω δεξιά), $c=60kPa$ (κάτω), μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και για τιμή εδαφικής υδατοπερατότητας ίση με $ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$71

Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο βάθους υπερκειμένων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για τιμές της εδαφικής συνοχής $c=10kPa$ (πάνω αριστερά), $c=30kPa$ (πάνω δεξιά), $c=60kPa$ (κάτω), μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και για τιμή εδαφικής υδατοπερατότητας ίση με $ks_1=5 \cdot 10^{-8}m/s$72

Εικόνα 5-4: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο βάθους υπερκειμένων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=35^\circ$, εδαφική συνοχή $c=60kPa$ για τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο $Face Pressure=0$ (αριστερά) και $Face Pressure=50kPa$ (δεξιά) για $ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$73

Εικόνα 5-5: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο βάθους υπερκειμένων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=35^\circ$, εδαφική συνοχή $c=60kPa$ για τιμές της πίεσης

υποστήριξης στο μέτωπο Face Pressure=0 (αριστερά) και Face Pressure=50kPa (δεξιά) για $ks_1=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$	73
--	----

Κατάλογος Πινάκων:

Πίνακας 2-1: Όρια και συνθήκες επιφυλακής - Επέκταση προς Ελληνικό	31
Πίνακας 2-2: Όρια και συνθήκες συναγερμού – Επέκταση προς Ελληνικό.....	31
Πίνακας 2-3: Βασικές Παράμετροι Λειτουργίας της μηχανής EPB – Επέκταση προς Ελληνικό.....	32
Πίνακας 3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι μεταβαλλόμενες τιμές του εκάστοτε παραμετρικού μεγέθους.....	36
Πίνακας 4-1: Παράμετροι αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους	41
Πίνακας 4-2:Τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{cs} που εμφανίζονται στα διαγράμματα $\Omega f_{area}-\sigma_{cs}$ και $\Omega_R -\sigma_{cs}$ και αντιστοίχιση τους με τις εξεταζόμενες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής.....	51
Πίνακας 5-1: Παράμετροι των συζευγμένων αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους	69
Πίνακας 5-2:Τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{cs} που εμφανίζονται στα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ και αντιστοίχιση τους με τις εξεταζόμενες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής.....	77

1 Διάνοιξη σηράγγων με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

1.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή υπογείων έργων στις αστικές περιοχές έχει γίνει αναγκαία τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού στις περιοχές αυτές, η οποία με τη σειρά της έχει υποβαθμίσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αστικού περιβάλλοντος. Έγινε σύντομα αντιληπτό λοιπόν ότι η μεταφορά μεγάλων συγκοινωνιακών υποδομών (όπως οδικοί ή σιδηροδρομικοί άξονες) κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, θα μπορούσε αφενός μεν να ανακουφίσει κάπως το υπέργειο κοινωνικό περιβάλλον, αφετέρου να του προσφέρει την ευκαιρία για περαιτέρω ανάπτυξη. Για την ικανοποίηση αυτών των αναγκών αναπτύχθηκε ο κλάδος της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων μέσω ειδικών μηχανημάτων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει καταφέρει να μειώσει σημαντικά την ενόχληση και τις φθορές στο υπάρχον δομικό περιβάλλον και παράλληλα μέσω της συνεχής εξέλιξης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με ασπίδα (shielded machines), είναι πλέον δυνατή η κατασκευή σηράγγων σε μικρά βάθη, σε εδάφη με υψηλή παραμορφωσιμότητα και μικρή αντοχή, ακόμα και σε βάθη κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής ελέγχεται η ευστάθεια του μετώπου, ενώ η παρουσία περιμετρικής ασπίδας εξασφαλίζει τον έλεγχο των συγκλίσεων των τοιχωμάτων μέχρι την κατασκευή της τελικής επένδυσης. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα σε υπόγειες κατασκευές είναι:

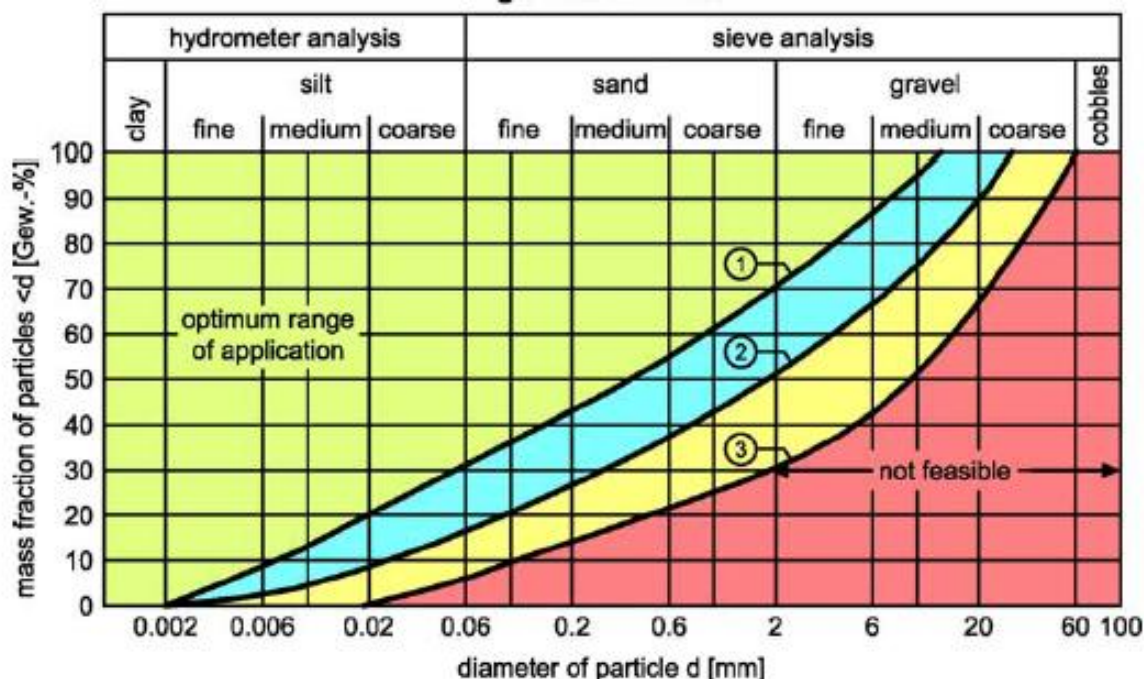
- Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης - EPBM (Earth Pressure Balance Machines)
- Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα – Slurry Shield Machines

1.2 Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης – EPBM (Earth Pressure Balance Machines)

1.2.1 Γενικά Στοιχεία και βασική λειτουργία των μηχανημάτων EPB

Τα Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης (EPBM) αποτελούν ιδανική λύση όταν η διάνοιξη σηράγγων γίνεται σε λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, αργιλώδη και ιλυώδη εδάφη (δηλαδή σε εδάφη με χαμηλή υδατοπερατότητα), ενώ η τυπική διάμετρος εκσκαφής του μηχανήματος κυμαίνεται από 2μέτρα έως 14μέτρα και περισσότερο. Τα μηχανήματα EPB χρησιμοποιούνται συχνότερα σε περιπτώσεις κατά τις οποίες τμήματα σηράγγων διανοίγονται τόσο σε έδαφος όσο και σε βράχο, καθώς και σε περιπτώσεις όπου οι σχηματισμοί αποτελούνται από διαφορετικές και συχνά μεταβαλλόμενες συνθήκες

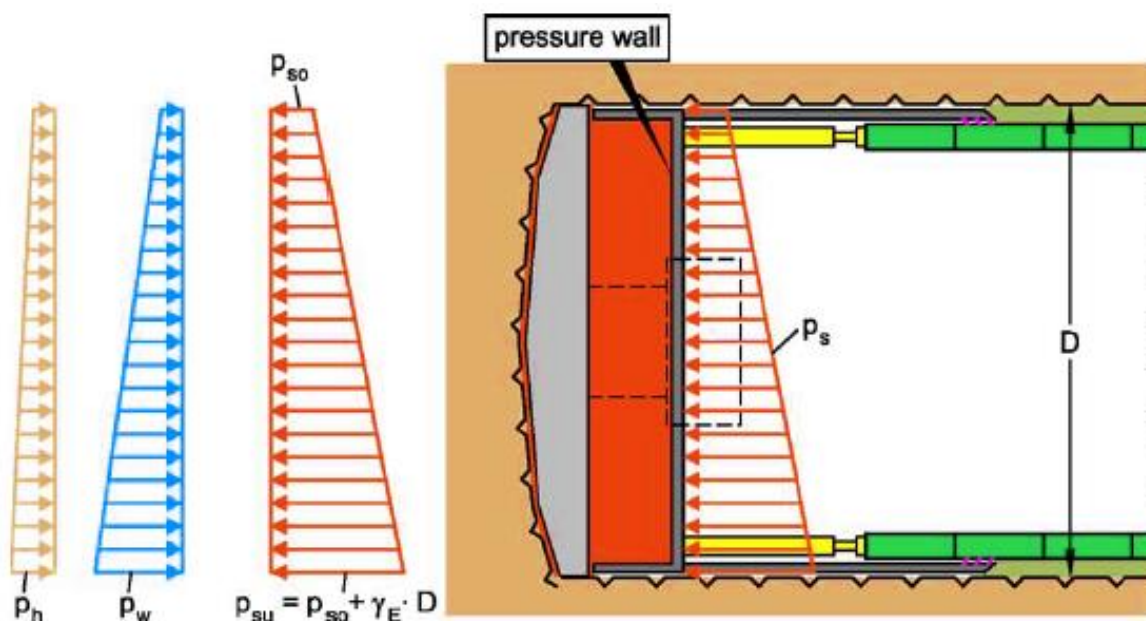
εδάφους «συνθήκες μικτού μετώπου», ή σε περιπτώσεις έντονα αποσαθρωμένου βράχου. Το κλασικό εύρος εφαρμογής τους μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη ρυθμιστικών παραγόντων σε συνεκτικά ως λιγότερο συνεκτικά, κοκκώδη εδάφη, και σε εδάφη που παρουσιάζουν μεικτή γεωλογία, όπως σε μαλακά πετρώματα και βράχο. Στην Εικόνα 1-1 απεικονίζονται τα όρια εφαρμογής του EPB-TBM με κοκκομετρικές καμπύλες. Τα αργιλώδη-ιλυώδη και ιλυώδη-αμμώδη εδάφη είναι κατάλληλα για χρήση. Παρατηρείται ότι αριστερά από την καμπύλη (1) για μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων (30%), με υψηλή συνοχή και χαμηλή διαπερατότητα, δεν υπάρχει περιορισμός για την εφαρμογή του μηχανήματος, όσον αφορά στην κατανομή των εδαφικών κόκκων. Μεταξύ των καμπυλών (1) και (2) παρουσιάζεται αύξηση της διαπερατότητας και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού. Για τη μείωση της διαπερατότητας χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά πρόσθετα, εφόσον η πίεση των υπογείων υδάτων είναι σχετικά χαμηλή. Στην περιοχή μεταξύ των καμπυλών (2) και (3) η λειτουργία των μηχανημάτων τύπου EPB απαιτεί την πρόσθετη έγχυση ρυθμιστικών παραγόντων (πολφός υψηλής πυκνότητας, αφρός με πολυμερή). Τέλος, η χρήση μηχανήματος EPB δεξιά της καμπύλης (3) δεν είναι εφικτή. Γενικά, οι καλύτερες εδαφικές συνθήκες συναντώνται όταν το υπό εκσκαφή έδαφος παρουσιάζει καλή πλαστική παραμορφωσιμότητα, πολφώδη έως αραιή σύσταση, μικρή γωνία εσωτερικής τριβής και χαμηλή διαπερατότητα.



Εικόνα 1-1: Εύρος εφαρμογής του EPB-TBM (πηγή: Wittke, W., 2007) [18]

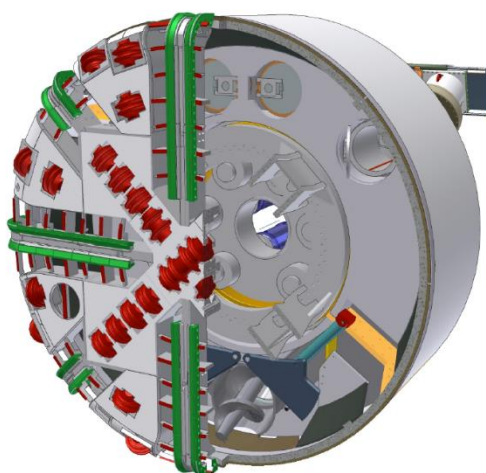
Η βασική αρχή λειτουργίας των μηχανημάτων αυτών είναι η δυνατότητα που έχουν να αξιοποιούν το υλικό που απομακρύνεται κατά τη διάνοιξη και να το χρησιμοποιούν ως μέσο άσκησης πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής για τον περιορισμό των παραμορφώσεων του. Συγκεκριμένα, μέρος του υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής και μέσω του ίδιου βάρους του ασκεί πίεση στην επιφάνεια του μετώπου. Εξαιτίας της δυνατότητας

αυτής στην ίδια κατηγορία με τα μηχανήματα Slurry αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή κατά τη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Στην Εικόνα 1-2 απεικονίζεται η παραπάνω βασική αρχή λειτουργίας των μηχανημάτων εξισσορόπησης της εδαφικής πίεσης.



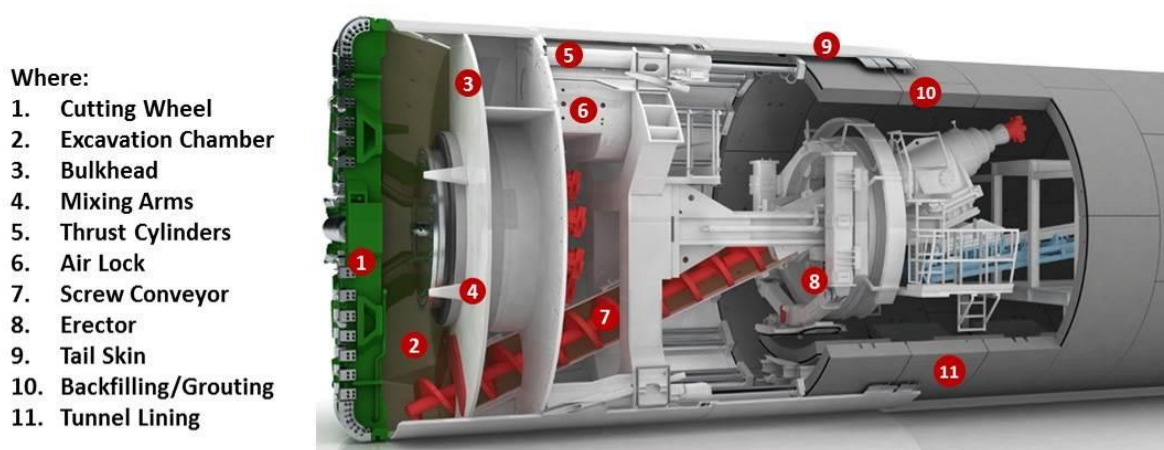
Εικόνα 1-2: Αρχή λειτουργίας της ασπίδας εξισσορόπησης ενός μηχανήματος EPB-TBM (πηγή: Wittke, W., 2007) [18]

Η εκσκαφή με μηχανήμα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης γίνεται από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή εφοδιασμένη με κοπτικούς δίσκους ή κοπίδια ή ένα συνδυασμό και των δύο, το πλήθος και η διάταξη των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα του πετρώματος.



Εικόνα 1-3: Σχηματική απεικόνιση της κοπτικής κεφαλής ενός EPB-TBM (Πηγή: LOVAT Inc.)

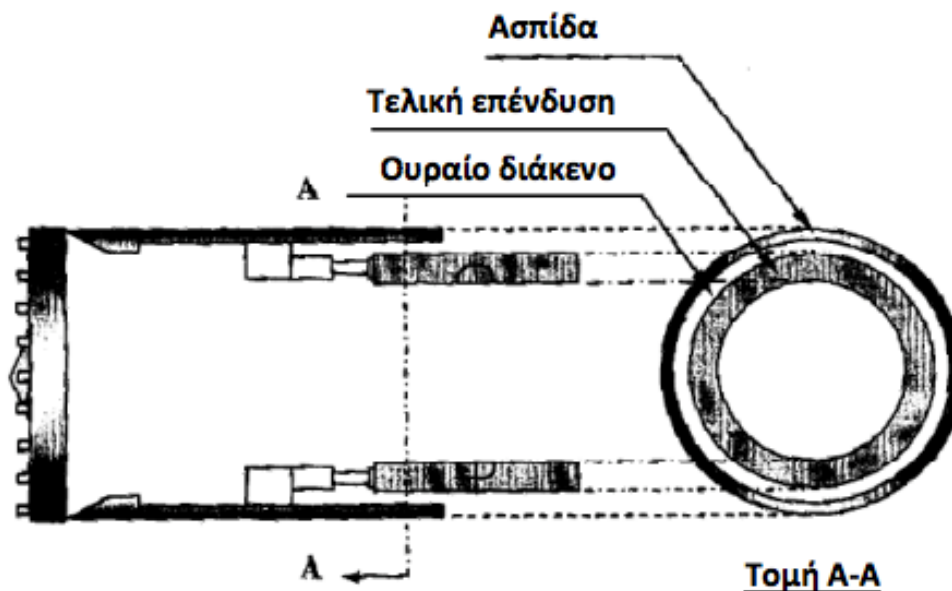
Η κοπτική κεφαλή είναι σχεδιασμένη σύμφωνα με τα φορτία εδάφους, νερού, κυκλοφορίας και εργασίας, καθώς και τις αναμενόμενες υψηλές συνθήκες φθοράς για τις δύο κατευθύνσεις περιστροφής. Περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύνολο αποξεστών (κοπτικά ελάσματα) και χείλη κάδων. Για την περίπτωση βραχιδών σχηματισμών χρησιμοποιούνται κοπτικοί δίσκοι, ενώ για αμμώδη και συνεκτικά εδάφη χρησιμοποιούνται σιαγώνες σύνθλιψης και εκχωμάτωσης αντίστοιχα. Όλα τα κοπτικά τοποθετούνται από πίσω και είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να έχουν αντίσταση στη φθορά. Η κοπτική κεφαλή, η οποία έρχεται ολοκληρωτικά σε επαφή με το μέτωπο και όχι σημειακά προκαλεί την εκσκαφή και τη χαλάρωση του εδάφους (1). Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ο θάλαμος εκσκαφής (2), ο οποίος διαχωρίζεται με το διάφραγμα πίεσης (3) από το υπόλοιπο εσωτερικό του μηχανήματος. Αναλυτικότερα, το χαλαρωμένο εδαφικό υλικό ρέει μέσω των ανοιγμάτων που υπάρχουν στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή και καταλήγει στο θάλαμο εκσκαφής. Σε αυτό το σημείο σταματάει η ανεξέλεγκτη διείσδυση του εδάφους από το μέτωπο της εκσκαφής στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής με τη δύναμη που ασκούν υδραυλικοί κύλινδροι (5).



Εικόνα 1-4: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος EPB (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

Η ισορροπία θα επέλθει όταν το εδαφικό υλικό στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω. Η πίεση που ασκείται από το εδαφικό υλικό μετράται από κατάλληλα κελιά, τοποθετημένα μπροστά από το διάφραγμα πίεσης. Στη συνέχεια ακολουθεί η μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού από το θάλαμο εκσκαφής μέσω του ατέρμονα κοχλία (screw conveyor) (7), προς την ουρά του μηχανήματος όπου πραγματοποιείται η ζύγιση, πράγμα που θα περιγραφεί εκτενέστερα σε επόμενο Κεφάλαιο. Η ποσότητα του υλικού που μεταφέρεται ελέγχεται μέσω της ταχύτητας περιστροφής και της διατομής του άνω ανοίγματος του ατέρμονα κοχλία. Μία βασική διαδικασία κατά τη διάρκεια της εκσκαφής με TBM είναι η ενίσχυση του τοιχώματος της σήραγγας με τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων από σκυρόδεμα (11). Τα στοιχεία αυτά ενώνονται και διαμορφώνουν δακτυλίους, δημιουργώντας ένα αλληλένδετο σύστημα που εξασφαλίζει ένα αξιόπιστο και ασφαλές κέλυφος από σκυρόδεμα για τη σήραγγα. Ταυτόχρονα με την εκσκαφή, η ασπίδα απομακρύνεται από τον τελευταίο δακτύλιο που έχει ανεγερθεί

μέσω του συστήματος ανύψωσης. Δεδομένου ότι η διάμετρος της ασπίδας είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της τελικής επένδυσης, η δημιουργία ενός διάκενου μεταξύ της τελικής επένδυσης και του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού είναι αναπόφευκτη.



Εικόνα 1-5: Σχηματική απεικόνιση της τελικής επένδυσης σε EPB-TBM (πηγή Greenwood, 2003)

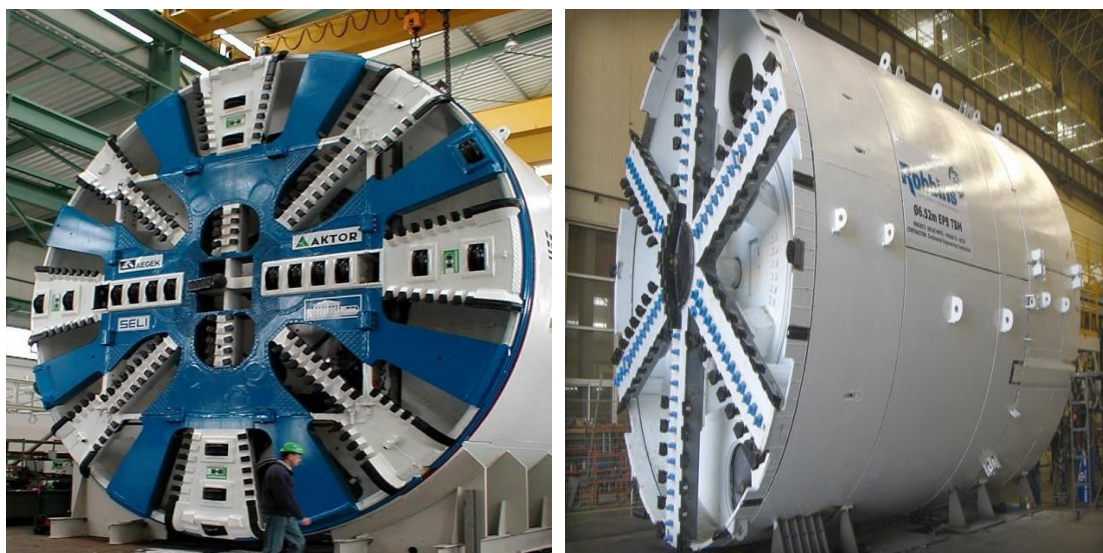
Το δακτυλιοειδές κενό μεταξύ του εξωραχίου του δακτυλίου επένδυσης και του προφίλ εκσκαφής πληρώνεται με διαμήκεις ενεματώσεις με κατάλληλη πίεση, χρησιμοποιούμενου όγκου ενέματος που είναι τουλάχιστον ίσος προς το θεωρητικό όγκο του δακτυλιοειδούς κενού. Οι εγχυτήρες είναι ενσωματωμένοι στην επιφάνεια της ουράς της ασπίδας, η οποία προστατεύεται στο εσωτερικό της από τον κίνδυνο εισροής ενέματος μέσω συστήματος στεγανοποίησης που αποτελείται από σειρές συρμάτινων βουρτσών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα μηχανήματα τύπου EPB, οι δυνάμεις ώθησης που απαιτούνται πρέπει να έχουν τέτοια τιμή έτσι ώστε να μπορεί να ξεπεραστεί η πίεση εκσκαφής, η υποστήριξη του μετώπου και η τριβή της ασπίδας. Επιπλέον οι ροπές που αναπτύσσονται στο μηχανήμα είναι υψηλές καθώς η περιστροφή της κοπτικής κεφαλής γίνεται με το θάλαμο εκσκαφής γεμάτο με υλικό.

1.2.2 Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος EPB

1.2.2.1 Κοπτική Κεφαλή (Cutting Wheel)

Η χαλάρωση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού από το μέτωπο εκσκαφής πραγματοποιείται κατά την επαφή του με την κοπτική κεφαλή και με τη ταυτόχρονη περιστροφική κίνηση της και στη συνέχεια εναποτίθεται το γεωυλικό στο θάλαμο εκσκαφής μέσω κάποιων κενών που υπάρχουν στην επιφάνεια της. Τα ανοίγματα στην κοπτική κεφαλή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ώστε αφενός μεν να επιτρέπουν την είσοδο του γεωυλικού στο θάλαμο εκσκαφής χωρίς

παρεμποδίσεις, αφετέρου το μέγεθος τους πρέπει να είναι τέτοιο που θα εξασφαλίζει ότι δεν θα είναι δυνατή η διέλευση μεγάλων κομματιών τα οποία δεν μπορούν να μεταφερθούν από τον ατέρμονα κοχλία. Ως γενικότερος κανόνας έχει υιοθετηθεί τα κενά να καταλαμβάνουν ένα ποσοστό της τάξης του 20-35%. Υπάρχουν δύο τύποι χρησιμοποιούμενων ασπίδων σε ένα μηχάνημα EPB, ανάλογα με το ποσοστό ανοιγμάτων που έχουν, ο ανοιχτός και ο κλειστός τύπος. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η κοπτική κεφαλή ανοικτού τύπου είναι ο μειωμένος κίνδυνος παγίδευσης σε σχέση με του κλειστού τύπου, ενώ η πίεση του μετώπου είναι πιο ομοιόμορφη και η ροή στον ατέρμονα κοχλία ομαλότερη. Σημαντικό μειονέκτημα βέβαια αποτελεί η αύξηση του ρίσκου λειτουργίας λόγω έλλειψης μηχανικής υποστήριξης όταν ο θάλαμος εκσκαφής λειτουργεί υπό ατμοσφαιρική πίεση, με συνέπεια η κοπτική κεφαλή να είναι λιγότερο ευσταθής και άκαμπτη με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο επιφανειακών μετακινήσεων όταν το ύψος των υπερκειμένων είναι μικρό. Αντίθετα, στον κλειστό τύπο η πίεση που ασκείται στο μέτωπο είναι λιγότερο ομοιόμορφη και επιπλέον ο συγκεκριμένος τύπος είναι επιρρεπής σε μπλοκαρίσματα του εδαφικού υλικού στα ανοίγματα του. Για αυτό και ο συγκεκριμένος τύπος επιλέγεται σε εδάφη όπου το μέτωπο εμφανίζει αστάθεια και υπάρχει κίνδυνος ανεξέλεγκτης ροής του χαλαρωμένου γεωυλικού προς το θάλαμο εκσκαφής. Ωστόσο τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση αφρού ή άλλων πρόσθετων. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του κλειστού τύπου είναι ότι παρέχει την απαραίτητη μηχανική υποστήριξη στο μέτωπο εκσκαφής και απαγορεύει την χαλάρωση μεγάλων τεμαχών από την υπόλοιπη εδαφική μάζα. Αυτό τον καθιστά τη συνηθέστερη και πιο αξιόπιστη επιλογή των κατασκευαστών.



Εικόνα 1-6: Αριστερά, κοπτική κεφαλή ανοικτού τύπου που χρησιμοποιήθηκε στο μετρό του Νέου Δελχί στην Ινδία, Δεξιά, κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του Μετρό της Αθήνας στο Ελληνικό (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε)

1.2.2.2 Κοπτικοί Δίσκοι (Cutting tools)

Η χαλάρωση και εκσκαφή του γεωυλικού στο μέτωπο κατά την επαφή με την κοπτική κεφαλή, γίνεται πρακτικά μέσω διαφορετικών τύπων κοπτικών εργαλείων, τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με τον τύπο του εδαφικού σχηματισμού που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη. Συγκεκριμένα, ο κύριος διαχωρισμός γίνεται για εδαφικούς σχηματισμούς όπου χρησιμοποιούνται **drag picks** και κοπτικοί δίσκοι για μαλακούς ή σκληρούς βραχώδεις σχηματισμούς. Στην πράξη, λόγω της ετερογένειας που εντοπίζεται συχνά στα εδάφη όπου διανοίγονται σήραγγες, συνήθως τα μηχανήματα αυτά διαθέτουν και τους δύο τύπους κοπτικών εργαλείων.



Εικόνα 1-7: 1) Πάνω αριστερά: Κοπτικός δίσκος που χρησιμοποιήθηκε στην κεφαλή του EPB στο μετρό της Θεσσαλονίκης 2) Πάνω δεξιά: Κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ίδια κεφαλή 3) Κάτω: Η διαμόρφωση του μετώπου εκσκαφής κατά τη διάρκεια της κοπής με τα εργαλεία (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε)

1.2.2.3 Θάλαμος Εκσκαφής (Excavation Chamber)

Αποτελεί το τμήμα του μηχανήματος που βρίσκεται στο ενδιάμεσο της κοπτικής κεφαλής και του διαφράγματος πίεσης και στο οποίο το εκσκαπτόμενο υλικό δρα ως πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας. Ο σχεδιασμός του θαλάμου καθορίζεται από τη θέση του ατέρμονα κοχλία, τον τύπο της κοπτικής κεφαλής, ενώ ο ίδιος ο θάλαμος παράλληλα πρέπει να εξασφαλίζει και να επιτρέπει

τη συνεχόμενη ροή του γεωυλικού. Το μήκος του θαλάμου εκσκαφής καθορίζει το χρονικό διάστημα που το υλικό παραμένει στο εσωτερικό του. Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής, το υλικό που εκσκάπτεται πρέπει να είναι ομογενές και να υπάρχει σωστή αναλογία χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού για να διατηρείται η πλαστικότητα του. Το υλικό που βρίσκεται στον κάδο αναμιγνύεται με νερό, αφρό, μπετονίτη σε τέτοια αναλογία έτσι ώστε το τελικό προϊόν να έχει την ίδια συνεκτικότητα με το περιβάλλον εδαφικό υλικό. Επιπρόσθετα οφέλη του βελτιωμένου εδάφους είναι η μείωση της διαπερατότητας καθώς σπάνε οι δεσμοί του υλικού και προκαλείται αποκόλληση, με αποτέλεσμα την διευκόλυνση κατά την εξόρυξη. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η περίπτωση απόφραξης του θαλάμου εκσκαφής. Ο κίνδυνος αυτός αυξάνεται, όταν ο θάλαμος εκσκαφής περιστρέφεται μαζί με την κοπτική κεφαλή (drum type), δεδομένου ότι η ανάμιξη και τροποποίηση μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του υλικού. Ο κίνδυνος περιορίζεται με επιπρόσθετες διατάξεις, τοποθέτηση ροτόρων στο πίσω μέρος της κεφαλής ή στατήρων και αναδευτήρων στο διάφραγμα πίεσης μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της ανάμιξης. Ακόμα, όταν η διάμετρος της ασπίδας είναι μεγάλη αυξάνεται ο κίνδυνος να κολλήσει το υλικό στο κέντρο του θαλάμου εκσκαφής καθώς εκεί η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται.

1.2.2.4 Ατέρμονας Κοχλίας (Screw Conveyor)

Στα μηχανήματα EPB, ο ατέρμονας κοχλίας είναι το πιο δημοφιλές μέσο για τη μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού από το θάλαμο εκσκαφής. Η χρήση του ατέρμονα κοχλία εξυπηρετεί:

- Τη μεταφορά του γεωυλικού από το θάλαμο εκσκαφής στο εξωτερικό της σήραγγας μέσω ατμοσφαιρικής πίεσης
- Την εφαρμογή πίεσης έναντι υπόγειων υδάτων σε έντονα διαπερατά εδάφη
- Τον έλεγχο της πίεσης υποστήριξης διαμέσου της ελεγχόμενης αφαίρεσης του εδαφικού υλικού.

Η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός προώθησης του μηχανήματος αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες για την άσκηση πίεσης του μετώπου από το υλικό εντός του θαλάμου εκσκαφής. Οι χειριστές των μηχανημάτων EPB έχουν τη δυνατότητα ελέγχου αυτών των παραμέτρων μόνο με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία. Ένα πρόβλημα που δημιουργείται κατά τη λειτουργία του ατέρμονα κοχλία είναι ότι κατά την είσοδο του γεωυλικού από τις πύλες, προκαλείται απότομη πτώση στη λειτουργία του ατέρμονα κοχλία επομένως και στην πίεση του μετώπου. Αυτή η αδυναμία του συστήματος επιλύεται με την εγκατάσταση ακροφυσίων στο μπροστινό μέρος του κοχλία, που εκτοξεύουν πρόσμικτα και βελτιώνουν την ποιότητα του εδάφους. Το σύστημα λειτουργίας του κοχλία μπορεί να είναι είτε κεντρικό είτε περιφερειακό.

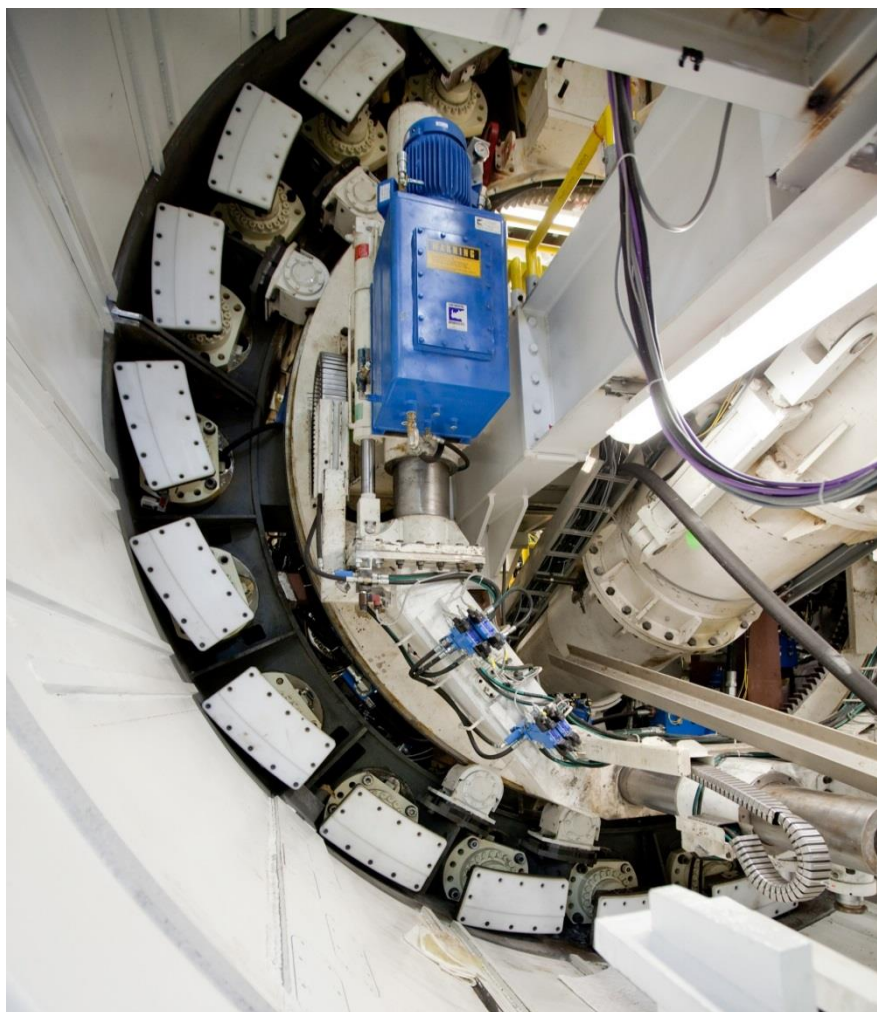


Εικόνα 1-8: Απεικόνιση ατέρμονα κοχλία με κεντρικό άξονα περιστροφής (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

1.2.2.5 Κυλινδρικά έμβολα ώθησης (Thrust cylinders)

Τα Κυλινδρικά έμβολα ώθησης είναι αυτά που κρατούν σταθερό στη θέση του το μηχάνημα κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ενώ την ίδια στιγμή μέσω αυτών πραγματοποιείται η ώθηση του μηχανήματος στη φορά της διάνοιξης με σταθερό ρυθμό. Συγκεκριμένα, τα υδραυλικά έμβολα ασκούν πίεση στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης, σπρώχνοντας το μηχάνημα προς τα μπροστά. Για τον υπολογισμό της δύναμης ώθησης, η οποία αποτελεί σημαντικό βήμα έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις και διαγράμματα. Γενικά, η δύναμη ώθησης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και το μηχάνημα εκσκαφής και παράλληλα να διατηρεί κατάλληλη επαφή με το μέτωπο, έτσι ώστε να μεταφέρεται η απαραίτητη πίεση υποστήριξης. Η επιλογή του συστήματος κυλίνδρων για κάθε μηχάνημα EPB είναι μοναδική και εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- Τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής
- Την κατάλληλη πίεση στο μέτωπο
- Το συνολικό βάρος του μηχανήματος (ασπίδα και ουρά)
- Η απαιτούμενη δύναμη εκσκαφής προκειμένου τα κοπτικά εργαλεία της κεφαλής να είναι αποτελεσματικά.



Εικόνα 1-9: Κυλινδρικά έμβολα ώθησης ευθυγραμμισμένα με τα στοιχεία της τελικής επένδυσης (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

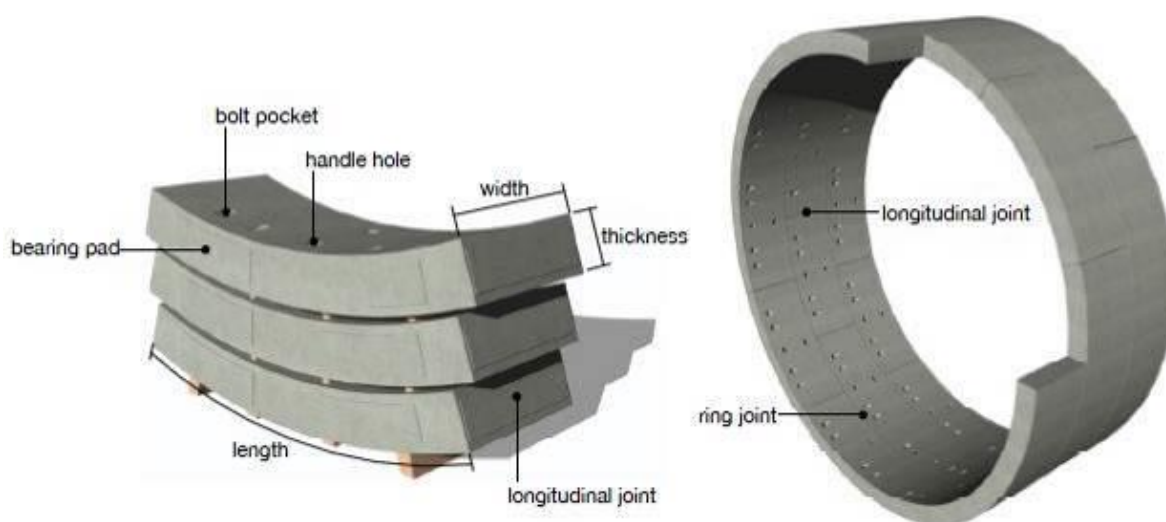
1.2.2.6 Τελική Επένδυση (Segmental Lining)

Η τελική επένδυση της σήραγγας πρέπει να εγγυάται την ασφάλεια, ανθεκτικότητα καθώς επίσης και τη λειτουργικότητα της ίδιας της σήραγγας για το χρόνο ζωής του έργου. Είναι σχεδιασμένη να αναλαμβάνει φορτία όπως οι πιέσεις που αναπτύσσονται από το περιβάλλον γεωυλικό και τα υπόγεια ύδατα, τα στατικά φορτία, διάφορες τυχηματικές δράσεις καθώς επίσης σεισμικά και θερμοκρασιακά φορτία. Κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη, η διάνοιξη πραγματοποιείται σε πλήρη κυκλική διατομή, για αυτό και η τελική επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία τα οποία εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη μόρφωση ενός κυκλικού δακτυλίου. Η επιλογή και εγκατάσταση προκατασκευασμένων στοιχείων στην επένδυση παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλή κατασκευαστική ποιότητα, δίνοντας παράλληλα και τη δυνατότητα βιομηχανικού ελέγχου
- Με την τοποθέτηση τους έχουν ήδη αναπτύξει τη φέρουσα ικανότητα τους

- Τυχόν διαρροές στα σημεία σύνδεσης μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν άμεσα

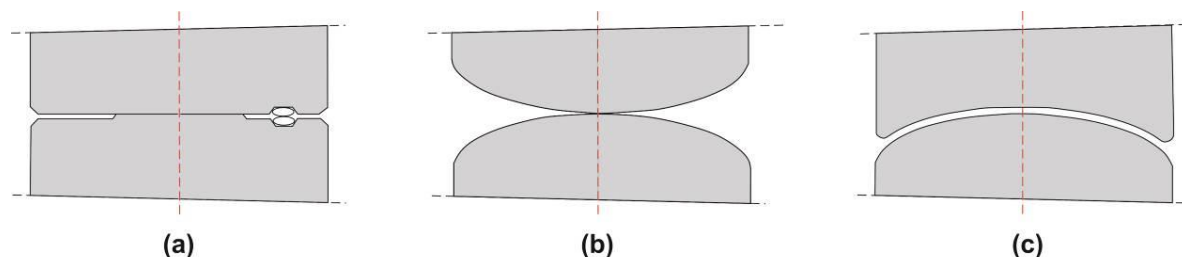
Το ελάχιστο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων προκειμένου να είναι σε θέση να παραλάβουν την δύναμη των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του μηχανήματος κυμαίνεται μεταξύ των 20-50cm. Για μεγάλες διατομές απαιτούνται απαιτούνται στοιχεία πάχους 60cm. Αυξημένες τιμές στο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων έχουν ως αποτέλεσμα την ταχύτερη τοποθέτηση και τη μείωση των σημείων σύνδεσης των στοιχείων. Επιπρόσθετα, μειώνεται η πιθανότητα απόκλισης σε καμπύλη διαδρομή, με αύξηση παράλληλα της κίνησης των εμβόλων. Ως εκ τούτου αυξάνεται η ταχύτητα διάνοιξης σιηράγγων. Ωστόσο, η αύξηση του πάχους των στοιχείων της επένδυσης μπορεί να προκαλέσει συγκέντρωση δευτερευόντων φορτίσεων στα σημεία σύνδεσης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κινδύνου εκτόνωσης και θραύσης. Η κατασκευή της τελικής επένδυσης μπορεί να ολοκληρωθεί με one layer (single-pass) ή δύο και περισσότερα. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, είτε με μονό κέλυφος είτε με σύνθετη διατομή πρέπει να διασφαλίζεται η ασφάλεια και λειτουργικότητα της κατασκευής. Στην πράξη η επιλογή ανάμεσα σε μονό ή διπλό κέλυφος επένδυσης καθορίζεται από τα οικονομικά στοιχεία. Επιπλέον στην περίπτωση της διπλής επένδυσης η κατανομή των φορτίων της εσωτερικής και εξωτερικής επένδυσης παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας στον υπολογισμό.



Εικόνα 1-10: Βασικές διαστάσεις και στοιχεία ενός προκατασκευασμένου δακτύλιου από σκυρόδεμα, με εμφανή τα σημεία σύνδεσης των στοιχείων στον ίδιο το δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτύλιους. (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

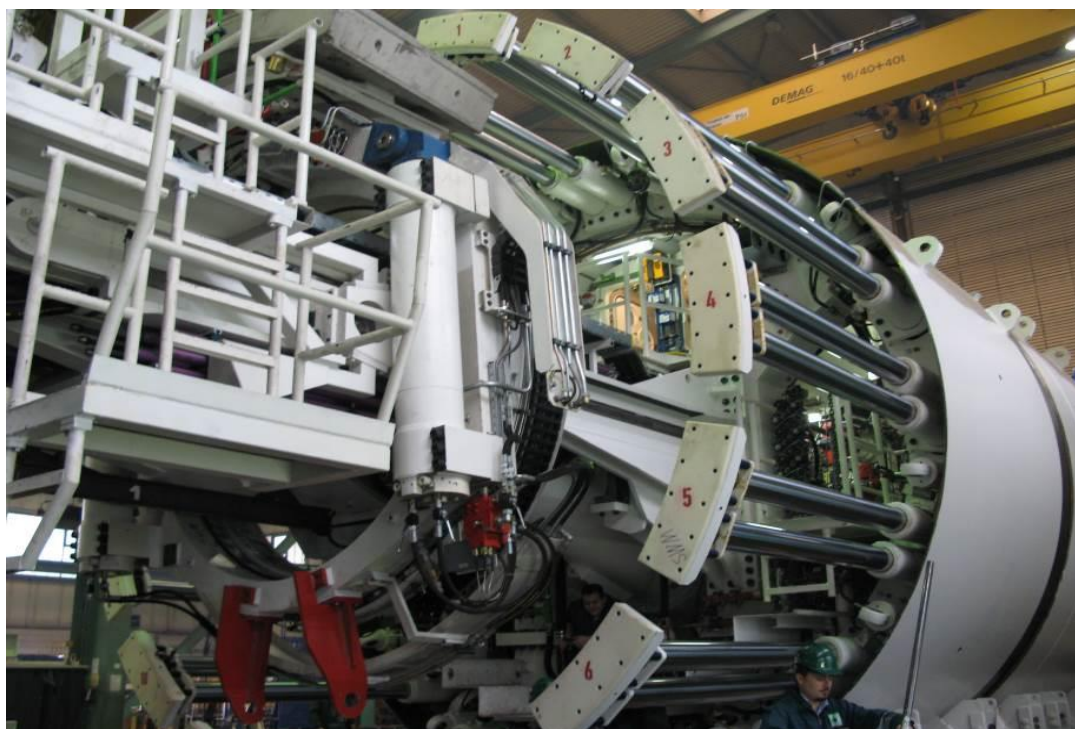
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων παρουσιάζει και ο αριθμός των σημείων ένωσης τους. Τα σημεία σύνδεσης εντοπίζονται κάθετα στα στοιχεία και κατά μήκος της σιηράγγας. Υπάρχουν δύο τύποι σημείων σύνδεσης των στοιχείων της επένδυσης. Πρόκειται για τα επίπεδα σημεία σύνδεσης plane joint (flat contact surface) και τα κυρτά σημεία (convex joint). Η

βασική διαφοροποίηση τους έγκειται στην ικανότητα τους να μεταφέρουν καμπτικές ροπές από στοιχείο σε στοιχείο.



Εικόνα 1-11: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

Η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης πραγματοποιείται με τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό, γνωστό ως γάντζο (erector). Ο μηχανισμός των γάντζων μπορεί να βρίσκεται είτε προστατευμένος στο εσωτερικό της ουράς του μηχανήματος, είτε πίσω από την ασπίδα σε άμεση επαφή με τη βραχώμαζα.

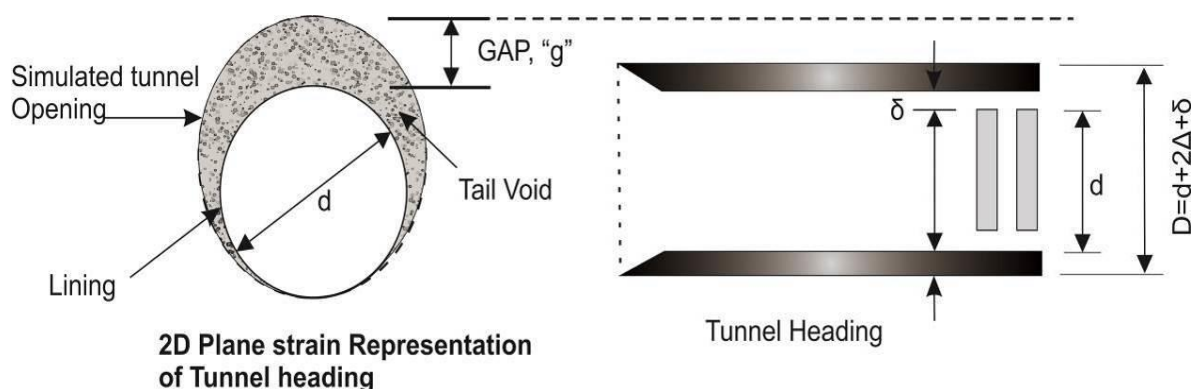


Εικόνα 1-12: Ο μηχανισμός των γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός μηχανήματος EPB (φωτογραφία από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε)

1.2.2.7 Ουραίο κενό του μηχανήματος και οι διαδικασίες πλήρωσης του με ένεμα (Shield tail sealing and grouting works)

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων αναπόφευκτα δημιουργεί κάποια κενά μεταξύ του περιβάλλοντος γεωυλικού και της μόνιμης επένδυσης. Συγκεκριμένα οι δύο τύποι κενών που δημιουργούνται είναι:

- Το κενό που σχηματίζεται ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον γεωυλικό, ως αποτέλεσμα του κωνικού σχήματος της ασπίδας, το οποίο έχει ως σκοπό την αποφυγή ανάπτυξης τριβής της ασπίδας με το εδαφικό υλικό, γεγονός που θα μπορούσε να μπλοκάρει το μηχάνημα.
- Το κενό μεταξύ της τελικής επένδυσης και του περιβάλλοντος γεωυλικού, το οποίο είναι αποτέλεσμα του πάχους της ασπίδας και του αναμενόμενα αποδεκτού κενού που σχηματίζεται κατά την εκσκαφή.



Εικόνα 1-13: Απεικόνιση των δύο διαφορετικών κενών που δημιουργούνται κατά την προώθηση του μηχανήματος (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

Ο ορισμός για το μέγεθος της παραμέτρου “G” που δημιουργείται, δόθηκε από το Lee et al. ως:

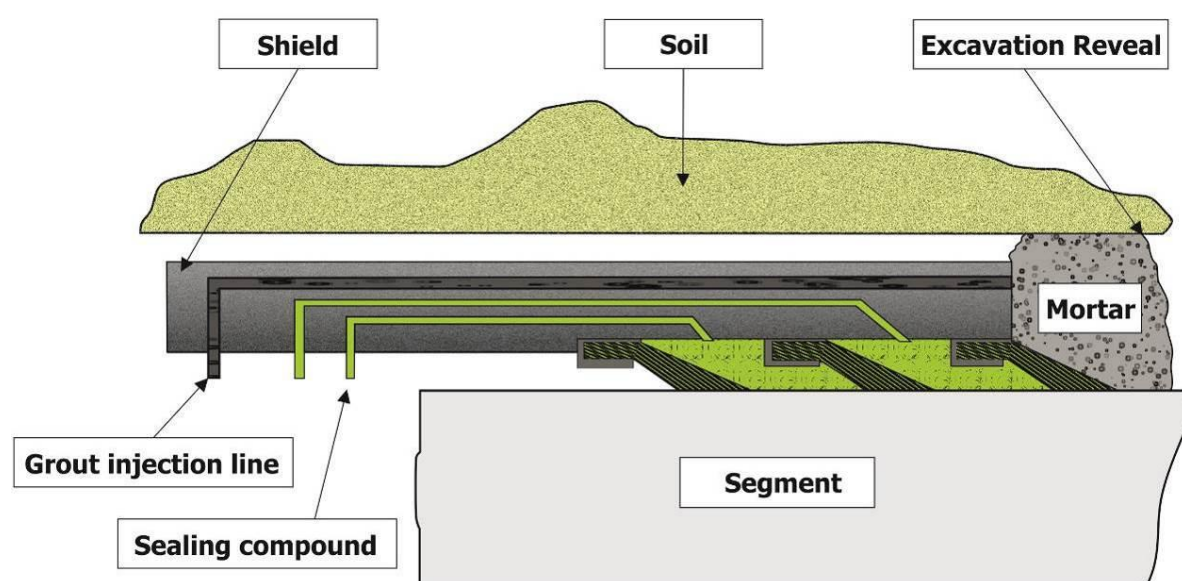
$$G = G_p + U_{3D} \cdot w \quad (1)$$

Όπου:

- G_p , είναι το κενό που δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς της εξωτερικής διαμέτρου του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με την εξωτερική διάμετρο της τελικής επένδυσης. Οι τυπικές τιμές που χρησιμοποιούνται σήμερα κυμαίνονται μεταξύ 115-140mm (με ελάχιστη 85mm και μέγιστη 185mm) εξαρτώμενη από τη διάμετρο της ασπίδας.
- U_{3D} , είναι η τρισδιάστατη παραμόρφωση στο μέτωπο
- W , ένας ορισμένος συντελεστής

1.2.2.8 Διαδικασία Ενεμάτωσης (Shield tail sealing)

Η διαδικασία ενεμάτωσης ή αλλιώς διαδικασία έγχυσης μπετονίτη εκτελείται είτε μέσω έγχυσης του ενέματος σε ανοίγματα που υπάρχουν ανάμεσα στους δακτυλιούς της επένδυσης, είτε μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων εγκατεστημένο στην ουρά του μηχανήματος. Η τελευταία πρακτική είναι και η δημοφιλέστερη σε μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης. Το πλεονέκτημα της είναι η δυνατότητα για ομοιόμορφη κατανομή του ενέματος, μέσω πολλαπλών σημείων έγχυσης του. Επιπλέον, για να εξασφαλιστεί το πλήρες γέμισμα του κενού σε κάθε δακτυλίδι τελικής επένδυσης, η εισπίεση του ενέματος πρέπει να πραγματοποιείται συνεχώς με την προώθηση του μηχανήματος, ελέγχοντας διαρκώς τον όγκο του ενέματος που εισπίζεται, καθώς επίσης και την απαιτούμενη ισχύ εισπίεσης.



Εικόνα 1-14: Χαρακτηριστική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση σωληνώσεων εγκατεστημένων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

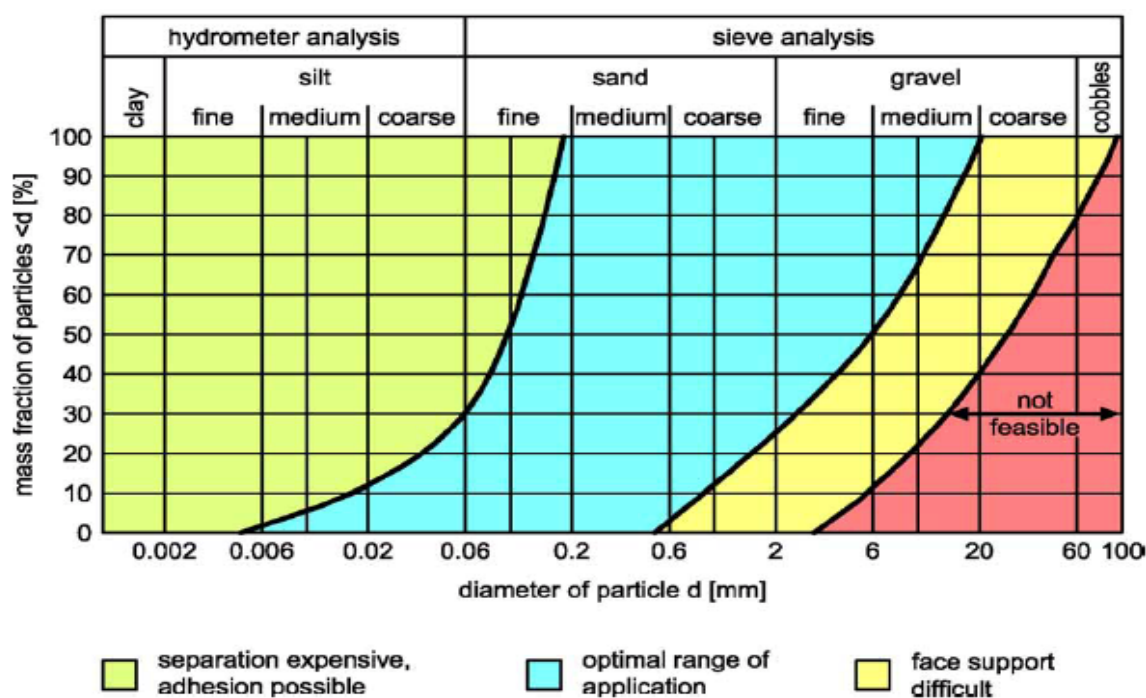
Η διαδικασία ενεμάτωσης αποτελεί μια σημαντική ενέργεια κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων, καθώς η αδυναμία επαρκούς πλήρωσης του ουραίου κενού με ένεμα αποτελεί την κυριότερη αιτία πρόκλησης εδαφικών και επιφανειακών μετακινήσεων στο πίσω μέρος του μηχανήματος. Επιπρόσθετα οφέλη της εκτέλεσης ενεμάτωσης είναι:

- Η στρώση του ενέματος μεταφέρει τις πιέσεις από το περιβάλλον γεωυλικό στην τελική επένδυση πιο ομοιόμορφα. Ως εκ τούτου και οι εσωτερικές δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα.
- Διατηρεί το φυσικό καθεστώς των τάσεων στην εδαφική μάζα και δρα κατά των εδαφικών παραμορφώσεων.
- Απομονώνει την τελική επένδυση από μια άμεση επαφή με τις περιβάλλουσες και πολλές φορές δυσμενείς εδαφικές συνθήκες.
- Βελτιώνει τη στεγανοποίηση σε περίπτωση επένδυσης μονού κελύφους.

Διακρίνονται η αρχική διαδικασία ενεμάτωσης και η δευτερεύουσα διαδικασία, η οποία εκτελείται με σκοπό την πλήρωση κενών που υπάρχουν μετά την πρώτη εκτέλεση ενεμάτωσης και η επιλογή της καθορίζεται με βάση την εμπειρία και τον όγκο της αρχικής διαδικασίας ενεμάτωσης. Αναφορικά με τις ιδιότητες του ενέματος, πρέπει να είναι κατάλληλες προκειμένου, αρχικά να εξασφαλίζεται η ροή στο κενό και να σκληραίνει μετά από κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα (συνήθως μετά από 4-5h), έτσι ώστε να συμπεριφερθεί ως σκληρυμένο σκυρόδεμα με κάποια ακαμψία. Στην τελική φάση το ένεμα πρέπει να διαθέτει καλή ροή, εργασιμότητα μέχρι τη σκλήρυνση, δυνατότητα έγχυσης και ταχύτατη σκλήρυνση όταν ολοκληρωθεί η έγχυση στο κενό.

1.3 Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα (Slurry Shield Machines)

Τα μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα (Slurry Machines) και τα μηχανήματα Εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB Machines) αποτελούν τις πιο δημοφιλείς λύσεις στη μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, καθώς με την πίεση που ασκούν στο μέτωπο εκσκαφής αποτρέπουν οποιαδήποτε απώλεια όγκου και απελευθέρωση των τάσεων από το περιβάλλον έδαφος. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο ότι τα μηχανήματα Slurry με την εισπίεση μπετονίτη στο εσωτερικό τους, είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε μεγαλύτερο εύρος εδαφικών συνθηκών, σε αντίθεση με τα EPB μηχανήματα τα οποία παρουσιάζουν καλύτερη λειτουργία σε συνεκτικά αργιλικά εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα. Σύμφωνα με τον Krause (1987), η εφαρμογή της ασπίδας πολφού, ανάλογα με τον τύπο εδάφους, μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα εύρος κατανομών μεγέθους κόκκου συμπεριλαμβανομένων κυρίως άμμου και καλά διαβαθμισμένων χαλικιών. Η ποσότητα μεσαίου μεγέθους έως χονδρόκοκκης λάσπης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 30%. Στην περίπτωση εδαφών με υψηλότερης συνεκτικότητας κλάσματα υπάρχει ο κίνδυνος της πρόσφυσης στην κοπτική κεφαλή ή στο θάλαμο εκσκαφής. Επιπλέον, τα συνεκτικά εδάφη προκαλούν αυξημένη δυσκολία κατά το διαχωρισμό του μίγματος μπετονίτη – εδάφους, καθώς οι μικρού μεγέθους κόκκοι τους ενώνονται με το μπετονίτη.



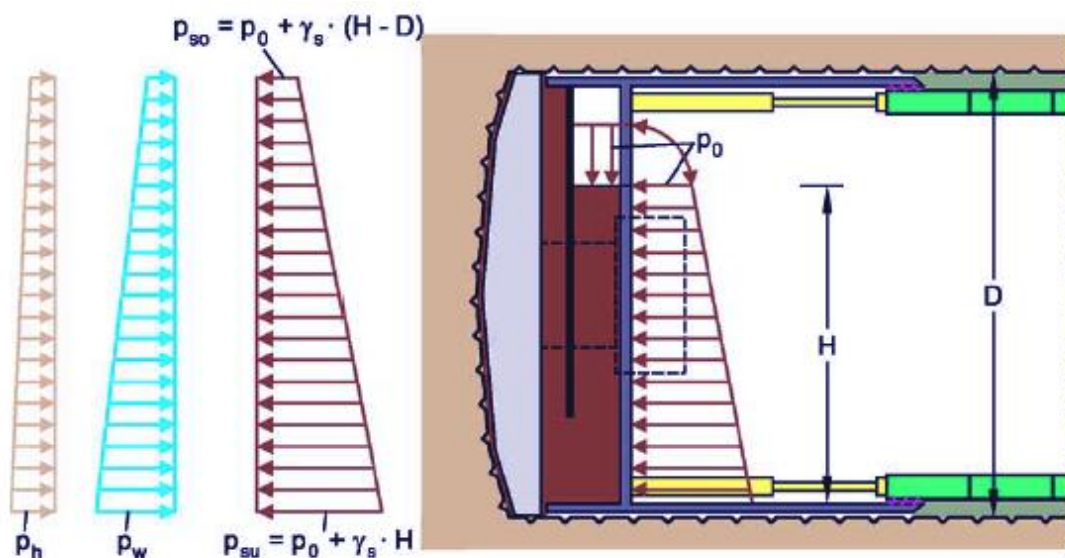
Εικόνα 1-15: Εύρος εφαρμογής μηχανήματος με ασπίδα πολφού (πηγή: Wittke, W., 2007) [18]

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1-12 οι ιδανικοί εδαφικοί τύποι για τη χρήση μηχανήματος με ασπίδα πολφού είναι τα αδρόκοκκα μαλακά, αμώδη και λεπτόκοκκα εδάφη. Η χρήση του μηχανήματος σε αργιλώδη εδάφη ενέχει τον κίνδυνο εμπλοκής των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής, του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Στην περίπτωση χαλαρών, μη συνεκτικών εδαφών (κυρίως χαλικιών) απαιτείται στήριξη του μετώπου με τη χρήση μπεντονιτικού αιωρήματος, ιδιαίτερα αν ο εδαφικός σχηματισμός παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα και η στάθμη των υπογείων υδάτων είναι υψηλή. Επιπλέον, οι ρεολογικές ιδιότητες του πολφού και η κατανομή μεγέθους των εδαφικών κόκκων ενδέχεται να καθιστούν ανεπαρκή τη σταθεροποιητική επίδραση του πολφού. Συνεπώς, η εκσκαφή σε χονδρόκοκκα και κακώς διαβαθμισμένα εδάφη είναι ιδιαίτερα δυσμενής, γιατί η δομή τους δεν αντιστέκεται στη διείδυση του πολφού (Anagnostou, G., Rizos, D., 2009).

1.3.1 Γενικά στοιχεία και βασική λειτουργία των μηχανημάτων Slurry

Η βασική λειτουργία και ιδιαιτερότητα των μηχανημάτων Slurry είναι η δυνατότητα ανάπτυξης του αιωρήματος με το εδαφικό υλικό που εκσκάπτεται, σχηματίζοντας μια ιδανική τέλεια πάστα η οποία χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του μετώπου. Συγκεκριμένα στα Slurry μηχανήματα, ο πεπιεσμένος μπετονίτης ασκεί μια πίεση σταθεροποίησης στο μέτωπο μέσω του ίδιου βάρους του και της πίεσης εισπίεσης. Στην υποκατηγορία των μηχανημάτων hydroshields ο μπετονίτης ασκείται μέσω πεπιεσμένου αέρα. Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μηχάνημα Slurry καθώς και τα κυριότερα στάδια λειτουργίας του παρουσιάζονται και περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους. Για την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο διαθέτουν ένα κλειστό κάδο ανάμειξης του αιωρήματος με το χαλαρωμένο έδαφος που προκύπτει κατά την απομάκρυνση του εδαφικού υλικού από την κίνηση της

κοπτικής κεφαλής. Στην Εικόνα 1-13 που ακολουθεί φαίνονται με αρίθμηση τα αντιπροσωπευτικά μέρη ενός μηχανήματος Slurry. Στον αριθμό (1) αντιστοιχεί η κοπτική κεφαλή, η οποία έρχεται σε επαφή με το εδαφικό υλικό στο μέτωπο και συντελεί στην χαλάρωση του και απομάκρυνση του από αυτό. Ο χώρος πίσω από την κοπτική κεφαλή όπου γίνεται η ανάμειξη του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη, γνωστός και ως κάδος ανάμειξης (excavation chamber), διαχωρίζεται από το διάφραγμα πίεσης (3) υπό ατμοσφαιρική πίεση. Ο εφοδιασμός του μπετονιτικού αιωρήματος στο θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται από τις σωληνώσεις τροφοδοσίας (4) μέσω πίεσης αέρα. Κατά την εκσκαφή, η πίεση υποστήριξης p_s πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την οριζόντια πίεση της βραχομάζας p_h και με πιθανή υδροστατική πίεση p_w (Εικόνα 1-13). Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η μη ελεγχόμενη εκσκαφή και η διείσδυση του εδαφικού υλικού στο θάλαμο εκσκαφής.

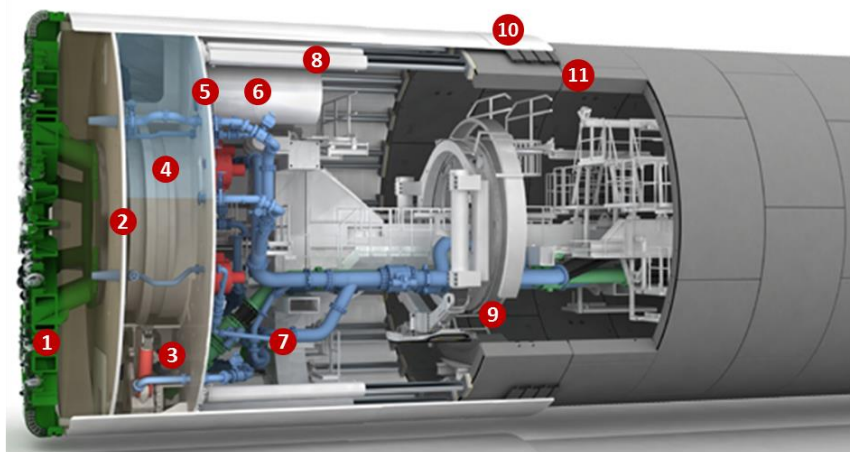


Εικόνα 1-16: Αρχή λειτουργίας μηχανήματος με ασπίδα πολφού (πηγή: Wittke, W., 2007) [18]

Στη συνέχεια το χαλαρωμένο υλικό που έχει απομακρυνθεί από το μέτωπο αναμιγνύεται με το αιώρημα μπετονίτη και αντλείται προς απομάκρυνση σε μια κυκλική διαδικασία διαχωρισμού στο εξωτερικό της σήραγγας. Με σκοπό να αποτραπεί οποιαδήποτε διακοπή της κυκλικής διαδικασίας και για να εξασφαλίζεται συνεχής ροή στο εξωτερικό, τοποθετείται στο μπροστινό τμήμα των σωληνώσεων ένα σύστημα που φιλτράρει το υλικό και αποτρέπει οποιαδήποτε εισροή στο σωλήνα αναρρόφησης (4). Τέλος, με τον αριθμό (7) φαίνονται τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα τα οποία τοποθετούνται με γάντζους (8) και μορφώνουν τον τελικό δακτύλιο της επένδυσης.

Where:

1. Cutting Wheel
2. Submerged-Wall
3. Jaw crusher
4. Air cushion
5. Bulkhead
6. Air Lock
7. Slurry Circuit
8. Thrust Cylinders
9. Erector
10. Tailskin
11. Backfilling/Grouting



Εικόνα 1-17: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα-Slurry Machine (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

Η χρήση του αιωρήματος μπετονίτη καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ο μπετονιτικός πολτός παρουσιάζει παραπλήσιες ιδιότητες διατμητικής αντοχής, ιξώδους και πυκνότητας με τις αντίστοιχες του εδάφους. Σημαντικό γεγονός αποτελεί και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του με καθαρισμό και επαναφορά των ιδιοτήτων του, διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται με αραίωση του μπετονίτη που επανασυλλέγεται και την προσθήκη σε αυτόν κατάλληλων καταλυτών και προσμίκτων. Το βασικό ορυκτό του μπετονιτικού αιωρήματος είναι μοντμοριλλονίτης με προσμίξεις μικρών ποσοτήτων άλλων μετάλλων όπως ο χαλαζίας, άστριος, μαρμαρυγίας, ασβεστιτης, κλπ. Η εμφάνιση του μπετονίτη γίνεται υπό μορφή νατρίου ή ασβεστίου όπου στην εκάστοτε περίπτωση εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά. Στην περίπτωση του νατρίου, έχει πολύ υψηλότερη ικανότητα διόγκωσης όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, σε αντίθεση με την περίπτωση του ασβεστίου, που μπορεί βέβαια να γίνει κάποια χημική επεξεργασία έτσι ώστε να προκύψει κάποιο προϊόν νατρίου. Τέλος, το αιώρημα μπετονίτη δημιουργεί μια μεμβράνη (mud cake) με σκοπό να διασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου για αυτό και πρέπει να έχει χαμηλή διαπερατότητα. Σημαντικός είναι και ο έλεγχος απώλειας νερού, ποσότητα που πρέπει να αποκαθίσταται με πρόσθετα ή με νέο μίγμα, διότι με την απομάκρυνση νερού το μίγμα γίνεται παχύρευστο και αδιαπέρατο.

1.3.2 Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος Slurry

1.3.2.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting wheel)

Το σχήμα της κοπτικής κεφαλής στα μηχανήματα Slurry είναι επίπεδο και κλειστό έτσι ώστε να παρέχει μηχανική υποστήριξη κατά τη διάρκεια σταματημάτων σε συνδυασμό με την υποστηρικτική πίεση που ασκεί το αιώρημα μπετονίτη. Η προσέγγιση της κεφαλής επιτυγχάνεται μέσω κάποιων παραθύρων τα οποία είναι κλειστά κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Επιπλέον η κοπτική κεφαλή είναι επαρκώς εξοπλισμένη με κοπτικά εργαλεία προκειμένου να επιτυγχάνεται η χαλάρωση και αφαίρεση του εδαφικού υλικού από το μέτωπο και τα οποία διατάσσονται σε κυκλική διάταξη προκειμένου να εξασφαλίζεται η εκσκαφή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

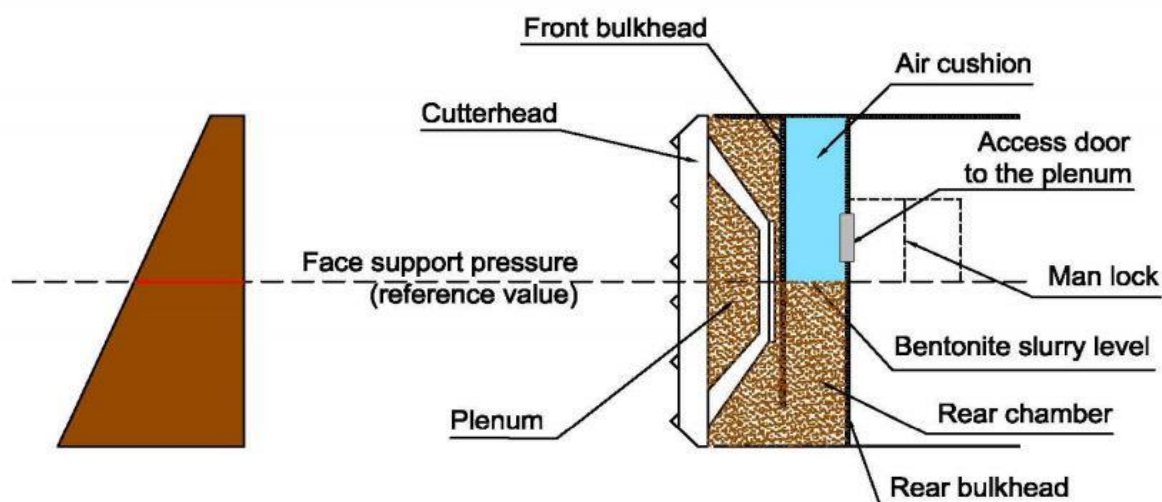
Ανάλογα με την απαιτούμενη ροπή της κοπτικής ασπίδας, αυτή μπορεί να κινηθεί κατά ένα κεντρικό άξονα περιμετρικά ή σε τέταρτα. Αναφορικά με το ποσοστό των ανοιγμάτων επί της κεφαλής, αυτή η παράμετρος συνδέεται άμεσα με την άσκηση της εδαφικής πίεσης και για τα μηχανήματα Slurry κυμαίνεται μεταξύ 25-35%.



Εικόνα 1-18: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Mixshield που χρησιμοποιήθηκε στο Μετρό του Λονδίνου (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

1.3.2.2 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation Chamber)

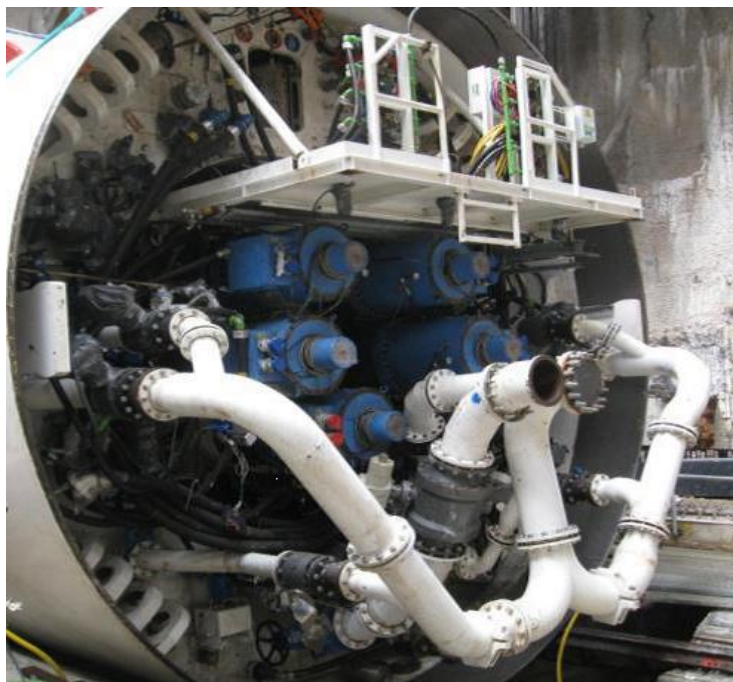
Η πίεση στο μέτωπο από το αιώρημα μπετονίτη προσφέρεται στο θάλαμο εκσκαφής. Ο θάλαμος εκσκαφής είναι το τμήμα του μηχανήματος που διαχωρίζει την κοπτική κεφαλή με το υπόλοιπο λειτουργικό σύστημα του μηχανήματος. Η κυκλική διαδικασία ροής και απορροής του μπετονίτικου πολτού είναι η μέθοδος για να ελέγχεται η πίεση στο θάλαμο επομένως και ο έλεγχος της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο. Η βασική αρχή της υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας είναι η ίδια σε όλες τις μηχανές αυτού του είδους. Παρόλα αυτά στην κατηγορία των **hydroshield** μηχανημάτων, η διάταξη είναι πολύπλοκότερη καθώς ο θάλαμος εκσκαφής διαιρείται σε δύο μέρη με την παρεμβολή ενός τοίχου σχηματίζοντας έτσι δύο υποθάλαμους. Ο μπροστινός είναι πλήρως γεμάτος με μπετονιτικό πολτό, σε αντίθεση με το δεύτερο ο οποίος γεμίζει κατά ένα ποσοστό. Το αιώρημα του μπετονίτη εφαρμόζεται μέσω σωληνώσεων με την πίεση αέρα, με αποτέλεσμα ο έλεγχος της πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής να μην είναι άμεσος αλλά να πραγματοποιείται από ένα αυτόματο σύστημα ρύθμισης.



Εικόνα 1-19: Απεικόνιση της εδαφικής πίεσης που ασκείται καθώς και τα στοιχεία του θαλάμου εκσκαφής (πηγή: Guglielmetti V. “Mechanized tunneling in urban environment, control of ground response and face stability, when excavating with an EPB machine”) [4]

1.3.2.3 Υδραυλικό σύστημα μεταφοράς (Pumping System)

Η απομάκρυνση και μεταφορά του εδαφικού πολτού πραγματοποιείται από ένα σύστημα σωληνώσεων, η διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός των οποίων πρέπει να αποτρέπει οποιαδήποτε φραγή στη διατομή. Οι σωληνώσεις αναρρόφησης απομακρύνουν το μπετονιτικό πολτό στο θάλαμο διαχωρισμού και στη συνέχεια ο καθαρός πλέον μπετονίτης επιστρέφει μέσω της κυκλικής διαδικασίας με τις σωληνώσεις τροφοδοσίας στο θάλαμο εκσκαφής. Λόγω του συστήματος άντλησης, το οποίο καλείται και κλειστό κύκλωμα υδραυλικού πολτού, οι μηχανές μπορούν να ανταπεξέλθουν ακόμα και σε υψηλές πιέσεις νερού άνω και των 15bar. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για την εξασφάλιση της συνεχούς και χωρίς διακοπή λειτουργίας του συστήματος, ενώ η διάμετρος των σωληνώσεων πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να εξασφαλίζει τη ροή των υλικών με κατάλληλη ταχύτητα.



Εικόνα 1-20: Το σύστημα σωληνώσεων αναρρόφησης του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη και το σύστημα τροφοδοσίας του αιωρήματος του μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος Slurry (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

1.3.2.4 Διαδικασία Διαχωρισμού (Separation plant)

Το υδραυλικό σύστημα μεταφοράς σε ένα μηχανήμα Slurry απαιτεί πάντα την παρουσία εξοπλισμού για το διαχωρισμό του υλικού που έχει απομακρυνθεί και αναμιχθεί με μπετονίτη στο τέλος των σωληνώσεων. Η διαδικασία αυτή δεν αποτελεί ένα ανεξάρτητο τμήμα του μηχανήματος, αλλά απαιτείται ένας αριθμός διαφορετικών μηχανών διαχωρισμού που θα εξασφαλίσουν έναν ικανοποιητικό και επαρκή διαχωρισμό, οι οποίες συνθέτουν ουσιαστικά το λεγόμενο «σχέδιο διαχωρισμού». Το «σχέδιο διαχωρισμού» σχεδιάζεται σύμφωνα με τις πληροφορίες που συλλέγονται για τις περιβάλλουσες εδαφικές συνθήκες και ο εξοπλισμός που επιστρατεύεται απαιτείται να αξιολογείται ως προς το μέγεθος των στερεών που αναμένεται να συναντηθούν. Οι μεταφερόμενες ποσότητες στη διαδικασία διαχωρισμού ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος του εκάστοτε Slurry μηχανήματος, με συχνό εύρος μεταξύ 50m³/h για μικρές σήραγγες σε καλά διαβαθμισμένα κοκκώδη εδάφη και 2800m³/h για μηχανήματα πολύ μεγάλων διαμέτρων. Στην πραγματικότητα, διαπιστώνονται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες διαχωρισμού, η καθίζηση και η διείσδυση, οι οποίες εξαρτώνται από τα συστατικά που θα διαχωριστούν. Επομένως, για το σχέδιο διαχωρισμού απαιτούνται διαφορετικά στάδια επεξεργασίας, ώστε σε κάθε στάδια αφαιρούνται διαφορετικά συστατικά του πολτού. Ο αριθμός των σταδίων επεξεργασίας εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες του εδάφους, της περιοχής εργασίας και από τη μελέτη του έργου. Οι δύο μορφολογίες διαχωρισμού, η καθίζηση και η διείσδυση αναπτύσσονται παρακάτω:

- Ως καθίζηση χαρακτηρίζεται η καθίζηση του υλικού που μεταφέρεται. Οι δύο απαραίτητες παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία της καθίζησης είναι αρχικά το όριο ροής και το ιξώδες του μέσου μεταφοράς, όπου συνήθως λαμβάνεται ίσο με του νερού ή με του μπετονιτικού υγρού και από την άλλη το μέγεθος και η πυκνότητα των κόκκων του εδάφους. Επομένως μεταβάλλοντας αυτές τις δύο παραμέτρους επηρεάζεται η ροή.
- Αναφορικά με τη διείσδυση χρησιμοποιούνται φίλτρα διαφορετικών ανοιγμάτων για να κοσκινίζουν το υλικό καθώς το μέγεθος των κόκκων και το σχήμα τους ποικίλλει από έδαφος σε έδαφος.



Εικόνα 1-21: Σύστημα διαχωρισμού εδαφικού υλικού από το μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick TBSS-450 (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

2 Μεθοδολογία εκτίμησης της υπερεκσκαφής αξιοποιώντας τις μετρήσεις του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού

2.1 Εισαγωγή-Σκοπός μέτρησης εδαφικού υλικού

Η εισαγωγή των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής ήδη από το 1970, βελτίωσε κατά πολύ την ικανότητα να κατασκευάζονται όλο και μεγαλύτερες σήραγγες, ακόμα και σε πολύ δυσμενείς εδαφικές συνθήκες καθώς και σε όλο και περισσότερο αυξανόμενα βάθη. Τα Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης (EPBM) και τα μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα (Slurry Machines) έχουν γενικώς επιτύχει σημαντική μείωση των εδαφικών απωλειών γύρω από την ασπίδα, με την απόκλιση από τον θεωρητικώς εκσκαπτόμενο εδαφικό όγκο να αγγίζει το 0,5%. Παρόλα αυτά, η χρήση αυτών των καινοτόμων μηχανημάτων δεν έχει εξαλείψει πλήρως τις εδαφικές απώλειες που συντελούνται στο μέτωπο της εκσκαφής. Η μείωση ή ο μηδενισμός των μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής αποτελεί μια πρόκληση. Η υπερεκσκαφή που συντελείται στο μέτωπο μπορεί να συνδεθεί με τις καθιζήσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια. Ένας από τους τρόπους πρόβλεψης της υπερεκσκαφής θα μπορούσε να είναι μέσω του υπολογισμού του βάρους του υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο. Οι κατηγορίες μηχανημάτων που αναφέρονται παραπάνω διαθέτουν εξελιγμένο εξοπλισμό με τον οποίο μπορούν να ζυγίζουν τις ποσότητες εδαφικού υλικού που απομακρύνονται από το μέτωπο εκσκαφής. Στην προσπάθεια εκτίμησης της υπερεκσκαφής που συντελείται κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας, στόχος ήταν να αναπτυχθεί με «έξυπνη» μέθοδος η οποία και έχει προταθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος NETTUN από την ερευνητική ομάδα του Μ.Καββαδά, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών. Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση του υλικού που εκσκάπτεται και στη σύγκρισή του με το θεωρητικώς εκσκαπτόμενο όγκο συνυπολογίζοντας και άλλες παραμέτρους όπως το ρυθμό προώθησης του μηχανήματος, το ρυθμό περιστροφής του ατέρμονα κοχλία κλπ.

2.2 Μέθοδοι μέτρησης απώλειας του εδαφικού όγκου

Ο όγκος του εδαφικού υλικού που χαλαρώνει και απομακρύνεται από το μέτωπο πρέπει διαρκώς να μετράται και να ελέγχεται καθώς προωθείται το μηχάνημα. Ένας συμβατικός τρόπος υπολογισμού του εδαφικού όγκου είναι η χρησιμοποίηση της σχέσης μεταξύ των αμαξιδίων μεταφοράς του υλικού με την απόσταση από την εκσκαφή. Ωστόσο προκειμένου να βελτιωθεί σημαντικά η ακρίβεια των μετρήσεων, έχουν αναπτυχθεί καινούργιες τεχνικές, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικότερα παρακάτω. Με τη χρήση μεταφορικών ταινιών, οι οποίες εγκαθίστανται στον ιμάντα μεταφοράς του μηχανήματος, μετράται το βάρος του υλικού που μεταφέρεται. Αναλυτικότερα το σύστημα περιλαμβάνει μια πλατφόρμα με κελιά τα οποία μετράνε φορτίο και εν συνεχεία το βάρος του υλικού που «ταξιδεύει» πάνω στον ιμάντα μεταφοράς. Για μεγαλύτερη ακρίβεια τοποθετούνται 2 ζυγαριές, οπότε το τελικό βάρος υπολογίζεται σαν μέσος όρος των ενδείξεων των 2 ζυγαριών. Ανάλογα με τον κατασκευαστή τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής έχουν ποσοστό ακρίβειας που φτάνει το $\pm 0,5\%$ καθώς και δυνατότητα επαναβαθμονόμησης όπου απαιτείται. Ο βαρέως τύπου τροχός, η υψηλή ανάλυση μέτρησης και οι διαφορετικές

διαθέσιμες διεπιφάνειες καθώς και η δυνατότητα στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων αποτελούν κάποια από τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής



Εικόνα 2-1: Μοναδιαίος μετρητής βάρους και μηχανικός ιμάντας μέτρησης εδαφικού όγκου όπως είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό ενός μηχανήματος TBM (πηγή: TBM Conveyor belt scales, the university link project experience, Indra Banerjee CH2M HILL, Inc. Richard McLane Traylor Bros., Inc. Ed Shorey CH2M HILL, Inc., Paul Gasson CH2M HILL, Inc.)

- 1) Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του όγκου του εκσκαπτόμενου υλικού είναι μέσω της χρήσης της τεχνολογίας των Laser Scanner. Στο σύστημα αυτό, το σήμα διαδίδεται με παλμούς και ουσιαστικά σκανάρει μια δισδιάστατη εικόνα του υλικού που μεταφέρεται στον μεταφορικό ιμάντα. Η βασική λειτουργία του είναι η μέτρηση του χρόνου επιστροφής των παλμών, ενώ κάθε παλμός που εκπέμπεται από το laser scanner αντανακλάται στην επιφάνεια του μεταφερόμενου υλικού και επιστρέφει στο μηχάνημα. Με τη δημιουργία πολλών τέτοιων παλμών δημιουργείται ένα προσομοίωμα του αντικειμένου (contour) και στη συνέχεια υπολογίζεται ο όγκος του.



Εικόνα 2-2: Μετρητής scanner για τον προσδιορισμό του εδαφικού όγκου – Courtesy of SICK AG (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

- 2) Τέλος, αξίζει να αναφερθεί και η ύπαρξη μετρητών, οι οποίοι με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας μπορούν και μετρούν την πυκνότητα του υλικού που εκσκάπτεται (Nuclear Density Meters) και τοποθετούνται πάνω στον ιμάντα μεταφοράς. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής, είναι ότι η μέτρηση δεν επηρεάζεται από την αλλαγή του ταινιοδρόμου ούτε από τις διαφοροποιήσεις της πυκνότητας που μπορεί να παρουσιάζει το υλικό. Στη συγκεκριμένη τεχνική, εξαιρετικά μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας μεταδίδεται στο υλικό που μεταφέρεται στον ιμάντα. Οπότε, ο ανιχνευτής ενέργειας που είναι τοποθετημένος επί του ιμάντα λαμβάνει αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος ακτινοβολίας με αυτό του βάρους του υλικού. Συνδυάζοντας τη μέτρηση της πυκνότητας από τις αντίστοιχες ενδείξεις, καθώς και την ταχύτητα του ιμάντα υπολογίζεται στη συνέχεια ο ρυθμός ροής του εκσκαπτόμενου υλικού.



Εικόνα 2-3: Μετρητής πυκνότητας – Courtesy of Ronan Engineering Company (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

2.2.1 Έλεγχος του εδαφικού όγκου σε μηχανήματα Slurry

Το βάρος του υλικού που φορτώνεται και απομακρύνεται στο εξωτερικό της σήραγγας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μετράται είτε άμεσα με μετρητές ζωνών είτε έμμεσα μέσω της χρήσης μετρητών που «σκανάρουν» το βάρος του υλικού. Στα μηχανήματα Slurry υπάρχει υδραυλικό σύστημα σωληνώσεων που απομακρύνει τον μπετονιτικό εδαφικό πολτό. Σε αυτή την περίπτωση ο υπολογισμός της ταχύτητας και της πυκνότητας του υλικού που μεταφέρεται μετράται με μαγνητικούς μετρητές και η πυκνότητα με ραδιομετρικούς μετρητές. Ο πραγματικός αριθμός που αντιστοιχεί στο βάρος του υλικού που έχει απομακρυνθεί από το μέτωπο είναι η διαφορά που υπολογίζεται μεταξύ του βάρους του υλικού που μετράται στο σωλήνα αναρρόφησης και στο σωλήνα τροφοδοσίας.

Η διαδικασία ελέγχου του βάρους του υλικού που απομακρύνεται από το μέτωπο παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Μετρώντας το βάρος του εδαφικού υλικού δεν προκύπτει καμία πληροφορία για το ποσοστό πλήρωσης του θαλάμου εκκαφής.
- Παρατηρείται ανακρίβεια και απόκλιση μεταξύ των τιμών που μετρώνται σε κάθε μέθοδο.

- Ο συντελεστής διόγκωσης του υλικού και το αποτέλεσμα του δεν είναι ούτε γνωστό, ούτε σταθερό για να χρησιμοποιηθεί στη μέτρηση.
- Υπάρχουν δυσκολίες υπολογισμού του βάρους ή του όγκου του εδαφικού υλικού, όταν οι εντολές για τους διάφορους ρυθμιστικούς παράγοντες δίνονται ταυτόχρονα.

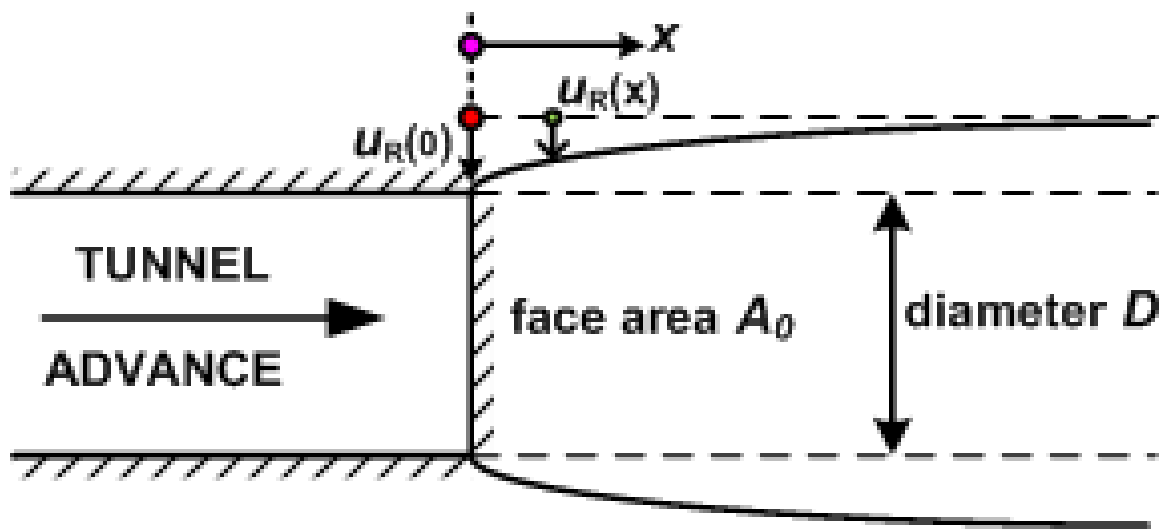
2.3 Προτεινόμενη μεθοδολογία προσέγγισης της υπερεκσκαφής με μέτρηση του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού

Στη μηχανοποιημένη διάνοιξη σιράγγων, η μάζα του εκσκαπτόμενου υλικού ζυγίζεται στο μεταφορικό ιμάντα σε μια προσπάθεια προσέγγισης της υπερεκσκαφής που συντελείται έτσι ώστε να ελεγχθεί η ευστάθεια του μετώπου μέσω των μεταβολών που προκύπτουν από τα ζυγίσματα. Η μέθοδος που προτείνεται περιγράφεται συνοπτικότερα παρακάτω. Ορίζεται αρχικά η εδαφική μάζα (ΔM_m) που εκσκάπτεται για ένα μικρό μήκος εκσκαφής (ΔL) και υπολογίζεται στη συνέχεια ο θεωρητικός εδαφικός όγκος που αντιστοιχεί στην κυλινδρική αυτή διατομή (ΔM_o) = $A_o (\Delta L) \rho$ όπου:

A_o είναι το εμβαδό διατομής κυκλικής σήραγγας με $A_o = \pi R^2$, R είναι η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής και ρ είναι η πυκνότητα της βραχώμαζας. Ορίζουμε το μέγεθος της υπερεκσκαφής (αυτό που μετράμε) ως:

$$OER_m = \frac{\Delta M_m}{\Delta M_o}$$

Το OER_m είναι πάντα μεγαλύτερο από την μονάδα γιατί η εκσκαπτόμενη μάζα ΔM_m είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητικώς αναμενόμενη. Η προσύγκλιση στο μέτωπο εκσκαφής στην ουσία αυξάνει τον πραγματικό εκσκαπτόμενο όγκο (ΔM_c) σε σχέση με τον θεωρητικό (ΔM_o). Τα παραπάνω φαίνονται αναλυτικότερα στην εικόνα 2-1 που ακολουθεί:



Εικόνα 2-4: Σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής της διαμέτρου του μετώπου εκσκαφής (πηγή: SOA of Mechanized Shield Tunneling) [15]

Η υπολογιζόμενη εδαφική μάζα (ΔM_c) ισούται με το άθροισμα της θεωρητικά αναμενόμενης στην κυλινδρική διατομή (ΔM_o) συν τη μάζα του εδαφικού υλικού λόγω σύγκλισης του μετώπου της σήραγγας (ΔM_a). Επιπλέον αν $U_{R(x)}$ η ακτινική σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο τότε:

$$\Delta M_c = \Delta M_o + \Delta M_a = A_o (\Delta L) \rho + (\Delta A) (\Delta L) \rho = [A_o + (\Delta A)] (\Delta L) \rho = \pi [R + u_R(0)]^2 (\Delta L) \rho$$

όπου:

$U_{R(0)}$ = η ακτινική παραμόρφωση του μετώπου της σήραγγας, η οποία προκύπτει από αναλύσεις, R = η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής. Εάν το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές, ο λόγος της αναμενόμενης υπερεκσκαφής πρέπει να είναι ίσος με το λόγο που μετράται $OER_{(calculated)} = OER_{(measured)}$, δεδομένου ότι η σύγκλιση του τοιχώματος $U_{R(0)}$ έχει υπολογιστεί σωστά. Εάν παρόλα αυτά το μέτωπο υπάρχει αστάθεια στο μέτωπο, τότε το μετρούμενο πηλίκο είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο $OER_{(measured)} > OER_{(calculated)}$ καθώς στο πρώτο συνυπολογίζεται και το επιπλέον εδαφικό υλικό που πέφτει από το μέτωπο. Έτσι υπολογίζεται ο λόγος ευστάθειας του μετώπου, που είναι ουσιαστικά ο λόγος της αναμενόμενης και της μετρούμενης υπερεκσκαφής:

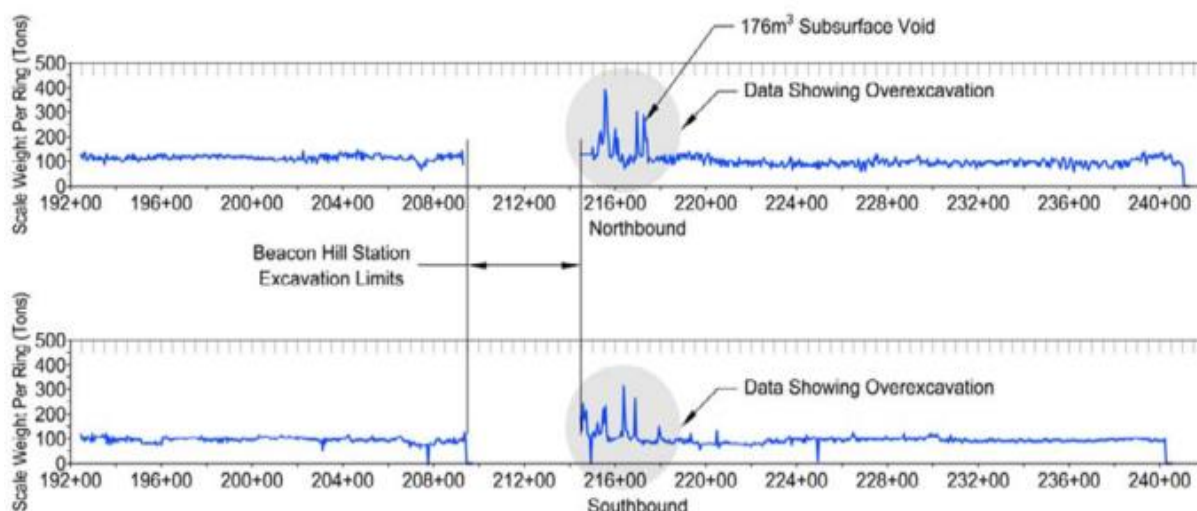
$$FIR = \frac{OER_m}{OER_c} = \frac{[\Delta M_m / \Delta L]}{\pi [R + u_R(0)]^2 \rho}$$

Όπου: ΔM_m = ο ζυγισμένος εδαφικός όγκος για ένα μικρό μήκος εκσκαφής ΔL , R = η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής, ρ = η πυκνότητα της βραχώμαζας και $U_{R(0)}$ = η ακτινική σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Για $FIR=1$ το μέτωπο είναι ευσταθές, ενώ σε περιπτώσεις με τιμές μεγαλύτερες της μονάδας αυξάνονται οι υπερεκσκαφές και η αστάθεια του μετώπου είναι πιθανή. Ο λόγος ευσταθειας του μετώπου (FIR) εξαρτάται από παράγοντες όπως η εκσκαπτόμενη μάζα του εδαφικού υλικού, από τη γεωμετρία της σήραγγας, την πυκνότητα του εδάφους καθώς και την ακτινική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας στο μέτωπο η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από:

- Το λόγο (p/p_h) της μέσης πίεσης (p) που ασκείται από το TBM προς την οριζόντια ολική γεωστατική τάση.
- Την ακτίνα της σήραγγας (R) και το εκάστοτε βάθος υπερκειμένων ($overbunden=d$)
- Τις ιδιότητες του εδάφους (Μέτρο ελαστικότητας E , την αντοχή της βραχώμαζας σε θλίψη σ_{cm} και της γωνίας διαστολικότητας
- Το κενό μεταξύ της κοπτικής κεφαλής και της ασπίδας S_1 , καθώς επίσης και από το χώρο μεταξύ της ασπίδας και του δακτυλίου της τελικής επένδυσης S_2 .

2.4 Αξιολόγηση της σημασίας της χρήσης των μηχανικών ζωνών με βάση πραγματικά περιστατικά

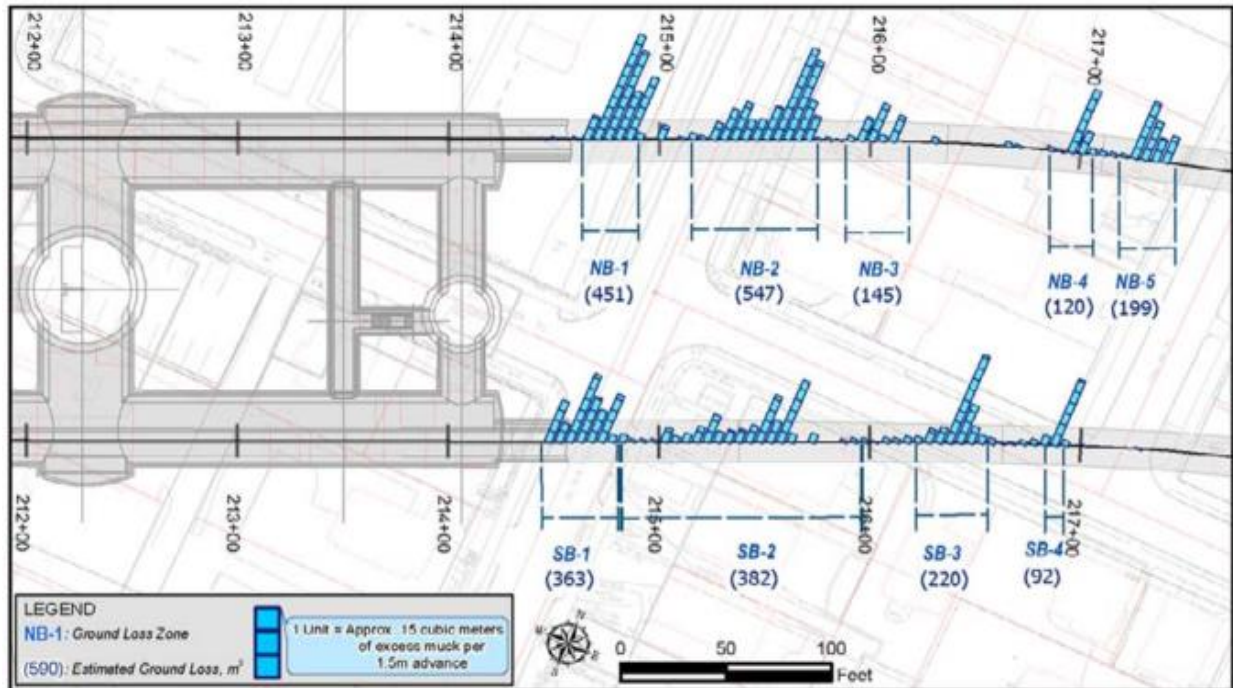
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στη μηχανοποιημένη όρυξη σιηράγγων η μάζα του εκσκαπτόμενου υλικού ζυγίζεται σε μια προσπάθεια εντοπισμού των υπερεκσκαφών και της πιθανής αστάθειας του μετώπου λόγω αλλαγών που συντελούνται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Όλες οι διαφορετικές παράμετροι ενός τέτοιου έργου πρέπει να συνυπολογίζονται για την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, καθώς η μηχανοποιημένη διάνοιξη σιηράγγων αποτελείται από πολλαπλές παραμέτρους, που η καθεμία ξεχωριστά δεν μπορεί από μόνη της να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μια απότομη αλλαγή στο βάρος του εκσκαπτόμενου υλικού μπορεί να μεταφραστεί σαν υπερεκσκαφή, αλλά μπορεί απλά να είναι μια αύξηση στο ρυθμό προώθησης του μηχανήματος ή αλλαγή στην ταχύτητα του ατέρμονα κοχλία, οπότε για αυτό και εκσκάπτεται περισσότερο υλικό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα κακής χρήσης των δεδομένων από τα ζυγίσματα αποτελεί το Beacon Hill Project[]. Σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του έργου, το οποίο περιλάμβανε την κατασκευή διδύμων σιηράγγων συνολικού μήλους 1,3km οι ζυγαριές έδειξαν μεγάλες διακυμάνσεις εως και τριπλασιασμό της μάζας που εκσκάπτηκε σε σχέση με τις φυσιολογικές τιμές και στις 2 σήραγγες, όπως φαίνεται και στο μέσο της Εικόνας 2 – 5 .



Εικόνα 2-5: Αποτελέσματα μετρήσεων εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού σε συγκεκριμένες Χ.Θ και στις δύο σήραγγες του Beacon Hill Project. Σε κύκλο φαίνονται οι μετρήσεις που υποδεικνύουν την παρουσία υπερεκσκαφών (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11]

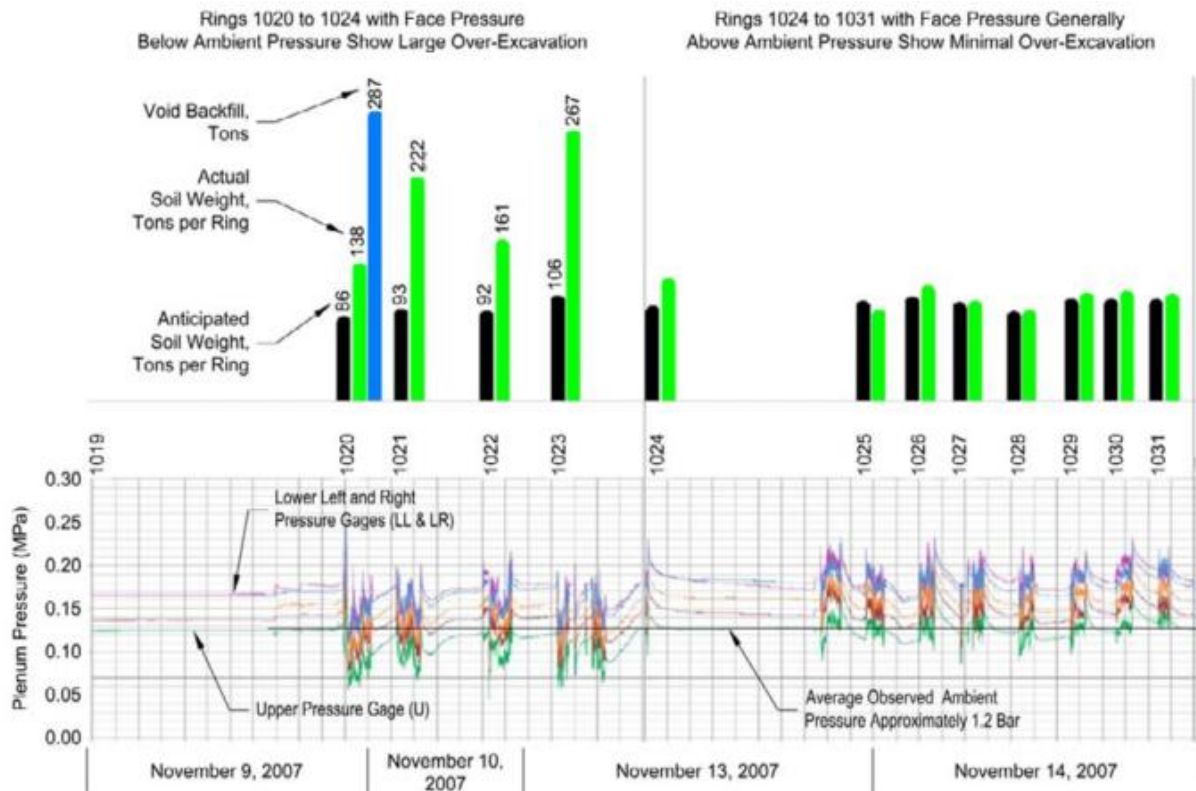
Η επικρατέστερη εξήγηση που δώθηκε ήταν ότι οι ζυγαριές ήταν λανθασμένες λόγω επανεκκίνησης της διαδικασίας εκσκαφής. Επαναβαθμονομήσεις, επισκευές και μεταγενέστερη αντικατάσταση τους δεν είχε αντίκτυπο στα αρχικά δεδομένα. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω και μετά την επανεκκίνηση της διαδικασίας εκσκαφής 90m ανατολικά του σταθμού στο Beacon Hill δημιουργήθηκε μια τεράστια τρύπα βάθους 7m και διαμέτρου 7,6m πάνω από τις σήραγγες οι οποίες ήταν σε βάθος 35m. Σε μια προσπάθεια εξακρίβωσης των αιτίων δημιουργίας της τρύπας, χρησιμοποιώντας και τις παραμέτρους λειτουργίας του EPB με το οποίο έγινε η εκσκαφή, γρήγορα διαπιστώθηκε

μία ζώνη 8m με όγκους εκσκαπτόμενου υλικού κοντά στα 200m³ ή 400 τόνους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα . Περαιτέρω αξιολόγηση των δεδομένων από τα ζυγίσματα έδειξε 9 πιθανές ζώνες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν υπερεκσκαφές με συνολικό εκσκαπτόμενο όγκο και στις 2 σήραγγες 2520m³ ή 4893 τόνους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Απεικόνιση των 9 κύριων ζωνών στις οποίες φαίνονται πόσο παραπάνω από τις φυσιολογικές τιμές εδαφικού όγκου προέκυψαν ανα βήμα εκσκαφής. (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11]

Επιπλέον, ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας που συντέλεσε στην εμφάνιση υπερεκσκαφών στο ίδιο έργο ήταν και η λειτουργία του μηχανήματος σε ορισμένες περιπτώσεις με πίεση υποστήριξης στο μέτωπο αρκετά χαμηλότερη από αυτή που είχε προκαθοριστεί για την εξισσορόπηση τόσο των φορτίων του εδάφους όσο και των αντίστοιχων υδροστατικών πιέσεων. Συγκεκριμένα, ως minimum πίεση στο μέτωπο είχε οριστεί η τιμή των 0,34MPa, ενώ σε κάποια φάση του έργου το μηχάνημα λειτουργούσε με πίεση υποστήριξης λιγότερη και από 0,12MPa. Στην ίδια φάση του έργου, στο τέλος κάθε εκσκαπτικού βήματος οι μετρούμενες εδαφικές πιέσεις στο θάλαμο εκσκαφής ανέβαιναν και συχνά διπλασιαζόντουσαν κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης της υποστήριξης, δείχνοντας έτσι ότι οι εξωτερικές συνολικές πιέσεις ξεπερνούσαν την πεκάστοτε πίεση στο θάλαμο εκσκαφής. Πιεζόμετρα που εγκαταστάθηκαν ανατολικά του σταθμού μέτρησαν υδροστατικές πιέσεις 0,12MPa πάνω από τη στέψη της σήραγγας, ενώ η αντίστοιχη πίεση στο θάλαμο εκσκαφής όπως μετρήθηκε για την τοποθέτηση των πρώτων 16 δαχτυλιδιών υποστήριξης ανατολικά του σταθμού ήταν λιγότερη από 0,06MPa που αντιστοιχεί στο 50% της υδροστατικής πίεσης μόνο. Στην Εικόνα φαίνεται ότι οι εδαφικές απώλειες αυξάνονται σημαντικά όταν οι πιέσεις εξισσορόπησης στο μέτωπο είναι λιγότερες από το 80% περίπου της εξωτερικής συνολικής πίεσης (φορτία εδάφους και υδροστατικές πιέσεις).



Εικόνα 2-7: Απεικόνιση της σύγκρισης του θεωρητικώς αναμενόμενου και του πραγματικού εδαφικού όγκου: 1) στα δαχτυλίδια τελικής επένδυσης 1020 – 1024 με την πίεσεις εξισσορόπησης στο μέτωπο να είναι λιγότερες από το 80% περίπου της συνολικής περιβάλλουσας πίεσης (φορτία εδάφους και υδροστατικές πιέσεις) με αποτέλεσμα την παρουσία μεγάλων υπερεκσκαφών και 2) στα δαχτυλίδια 1024 – 1031 στα οποία οι πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες περιβάλλουσες με τους θεωρητικούς και τους αναμενόμενους όγκους πρακτικά να ταυτίζονται. (πηγή: 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling) [11]

Συμπερασματικά, οι καλά εγκατεστημένες και διατηρημένες μηχανικές ζώνες είναι πιθανό να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από $\pm 5\%$, ενώ μπορεί να φτάσουν και ακρίβεια $\pm 2\%$ όταν γίνεται συσχέτιση των δεδομένων από τα ζυγίσματα για μερικά δαχτυλίδια υποστήριξης αντί για ένα. Επιπλέον, στοιχεία όπως το ειδικό βάρος του εδάφους που εκσκάπτεται, οι ποσότητες των πρόσθετων που χρησιμοποιούνται για τη χαλάρωση του εκσκαπτόμενου υλικού καθώς και αλλαγές στη γεωλογία πρέπει να γίνονται γνωστές για την καλύτερη εξήγηση των δεδομένων που θα προκύψουν. Επιπρόσθετα, η λειτουργία του μηχανήματος με πίεση υποστήριξης αυτή του περιβάλλοντος εδάφους και των υδροστατικών πιέσεων ή και μεγαλύτερη εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων και παράλληλα μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης υπερεκσκαφών.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται παραδείγματα των χαρακτηριστικότερων υπερεκκαφών που συντελέστηκαν στην επέκταση του Μετρό της Αθήνας προς το Ελληνικό, υπερεκκαφές οι οποίες συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με τις καθιζήσεις που συντελέστηκαν επίσης στα συγκεκριμένα τμήματα. Οι περιοχές που θα εξεταστούν είναι 3 και συγκεκριμένα:

- Από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το σταθμό μετρό της Αργυρούπολης, που αντιστοιχούν σε χιλιομετρικές θέσεις της κεφαλής του μηχανήματος κοπής Χ.Θ: 13960-13800 και αντίστοιχα σε προκατασκευασμένα δαχτυλίδια τελικής επένδυσης με αριθμούς: 938-1033 και συνολικό μήκος του τμήματος ίσο με 608m.
- Από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το Φρέαρ Λέοντος που αντιστοιχούν σε χιλιομετρικές θέσεις κοπής της κεφαλής του μηχανήματος Χ.Θ: 13340-13160 και αντίστοιχα σε προκατασκευασμένα δαχτυλίδια τελικής επένδυσης με αριθμούς: 1340-1448 και συνολικό μήκος του τμήματος ίσο με 586m.
- Στο μεσοδιάστημα Φρέαρ Υμηττού-Φρέαρ Λέοντος όπου οι Χ.Θ της κεφαλής του μηχανήματος κοπής ήταν Χ.Θ: 13175-12950 και αντίστοιχα σε προκατασκευασμένα δαχτυλίδια τελικής επένδυσης με αριθμούς: 1450-1601.

Οι τιμές των ορίων επιφυλακής και συναγερμού που προδιαγράφονται στη μελέτη εφαρμογής του έργου καθώς και οι παράμετροι λειτουργίας του μηχανήματος EPB, που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση προς Ελληνικό φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες 2-1, 2-2 και 2-3.

Πίνακας 2-1: Όρια και συνθήκες επιφυλακής - Επέκταση προς Ελληνικό

	Ευαίσθητο Κτήριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτήρια, οδοί ή πεζοδρόμια,
Συνολική Καθίζηση	15 mm	20 mm
Γωνιακή Παραμόρφωση	1/1200	1/800
Ρυθμός αλλαγής Συνολικής Καθίζησης	2,0 mm/day	3,0 mm/day
Αλλαγή Ανοιγμάτων Ρωγμών	0,5 mm/day	0,5 mm/day
Οριζόντια Παραμόρφωση	0,05%	0,10%

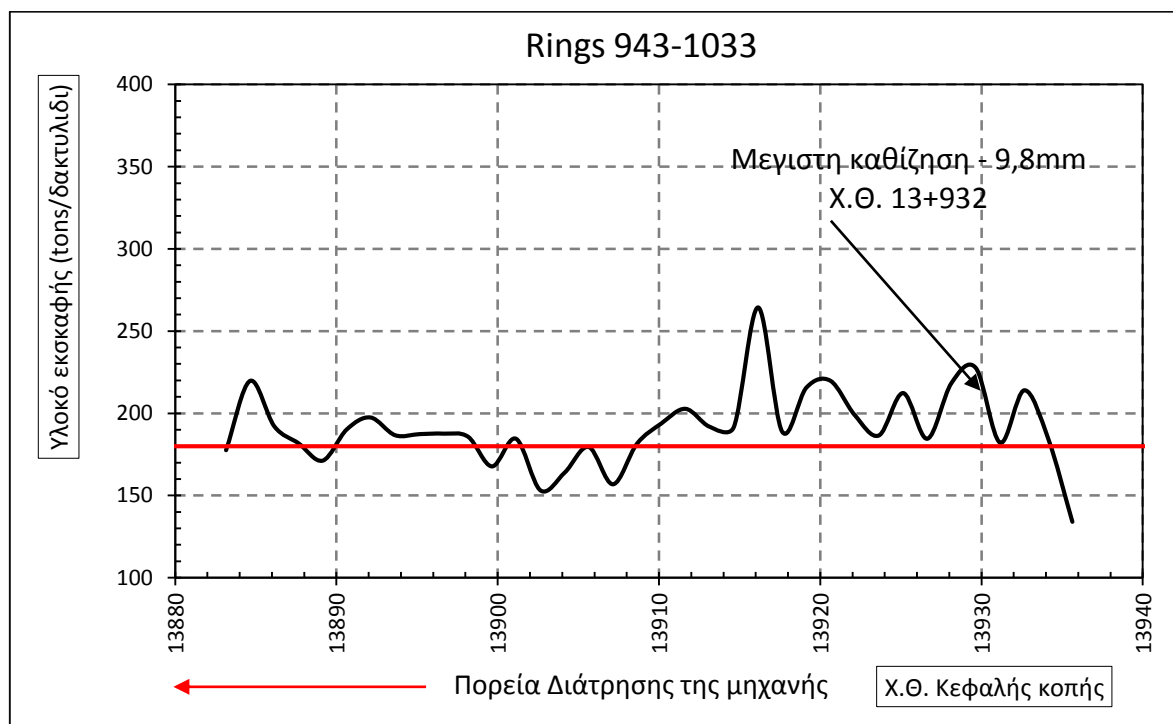
Πίνακας 2-2: Όρια και συνθήκες συναγερμού – Επέκταση προς Ελληνικό

	Ευαίσθητο Κτήριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτήρια, οδοί ή πεζοδρόμια,
Συνολική Καθίζηση	20 mm	30 mm
Γωνιακή Παραμόρφωση	1/800	1/600
Ρυθμός μεταβολής Συνολικής Καθίζησης	3,0 mm/ημέρα	4,0 mm/ ημέρα
Αλλαγή Ανοιγμάτων Ρωγμών	1.0 mm/ ημέρα	1.0 mm/ ημέρα
Οριζόντια Παραμόρφωση	0,10%	0,20%

Πίνακας 2-3: Βασικές Παράμετροι Λειτουργίας της μηχανής EPB – Επέκταση προς Ελληνικό

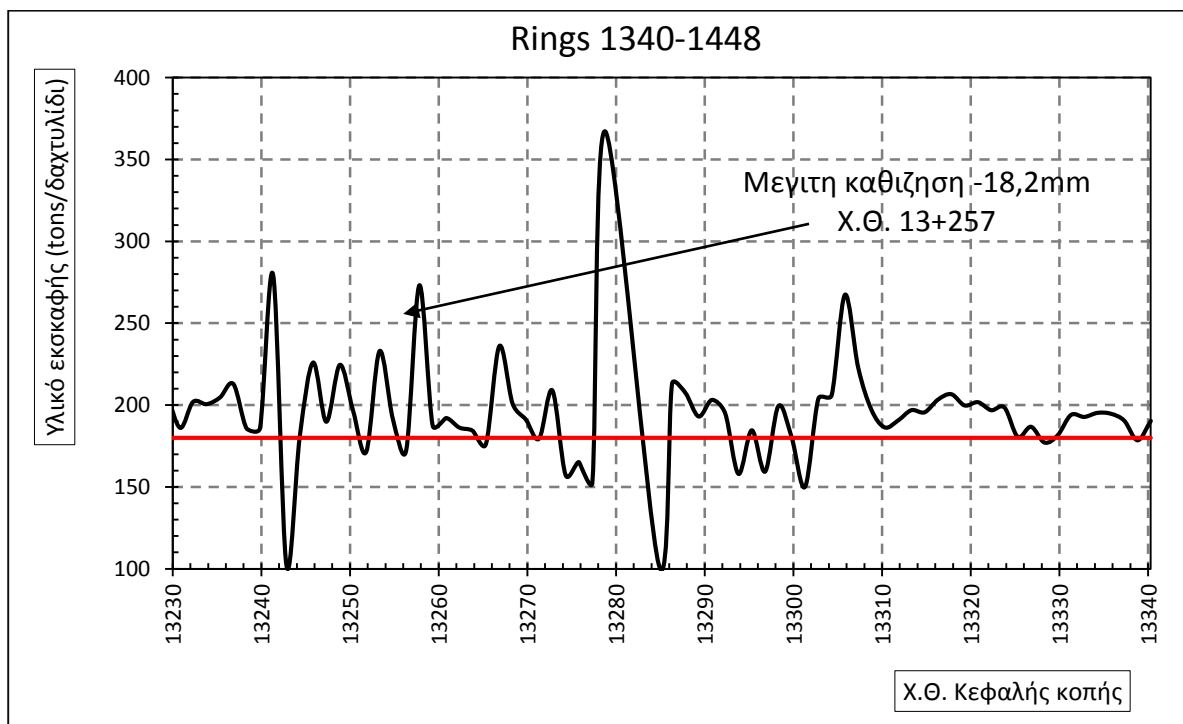
Εδαφική Πίεση Μετώπου [bar]	Δύναμη Ώθησης [kN]	Ροπή Στρέψης [MNm]	Ρυθμός Διείσδυσης [mm/min]	Εκσκαφθείσα Μάζα [t/advance]	Πρωτογενής Ενεμάτωση [lt/advance]
0.6	12500	5.0	40	180	4575

Η μέγιστη καθίζηση που σημειώθηκε στην 1^η περιοχή από αυτές που αναφέρονται παραπάνω (Χ.Θ: 13960-13800) σημειώθηκε στη Χ.Θ. 13+932 και ήταν -9.8mm. Η καθίζηση ξεκίνησε στις 7 Νοεμβρίου 2007 όταν η κεφαλή της μηχανής TBM είχε περάσει κατά 13m από το σχετικό χωροσταθμικό σημείο και σταθεροποιήθηκε στις 19 Νοεμβρίου 2007 σε απόσταση 120 μέτρων. Ωστόσο, κατά τα πρώτα 40 μέτρα διάνοιξης από το σταθμό «ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ» στην Χ.Θ. 13+949 παρατηρήθηκε ότι η πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής που ασκούσε η μηχανή EPB ήταν χαμηλή 0.4 bar αντί 1.2 bar, τιμή που απαιτούνταν σύμφωνα με τη μελέτη. Εκτιμάται πως η χαμηλή πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, επέτρεψε τη χαλάρωση του εδάφους εμπρός και πάνω από την κεφαλή κοπής με αποτέλεσμα τις μετέπειτα καθιζήσεις. Οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής στο υπόλοιπο τμήμα διάνοιξης της σήραγγας που σημειώθηκε η καθίζηση κυμαίνονταν ως εξής: πίεση υποστήριξης μετώπου 1.2 bar, δύναμη ώθησης 13,635kN, μάζα των υλικών εκσκαφής ανα βήμα προώθησης 180t και ενεμάτωσης 4528lt. Στην Εικόνα 2-8 απεικονίζεται η αποκομιδή του εκσκαπτόμενου υλικού συναρτήσει της Χ.Θ. Κεφαλής κοπής, ενώ με κόκκινο βελάκι σημειώνεται η πορεία διάτρησης της μηχανής.



Εικόνα 2-8: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο τμήμα από το Σταθμό Μετρό της Αργυρούπολης μέχρι το Φρέαρ Υμηττού. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σιραγγών) [17]

Η μέγιστη καθίζηση που σημειώθηκε στην 2^η περιοχή από αυτές που αναφέρονται παραπάνω (Χ.Θ: 13340-13160) σημειώθηκε στη Χ.Θ 13+257, ήταν -18.2mm και ξεκίνησε στις 24 Ιανουαρίου 2008 όταν η κεφαλή της μηχανής EPB είχε περάσει κατά 23m από το σχετικό χωροσταθμικό σημείο και σταθεροποιήθηκε στις 25 Ιανουαρίου 2008, σε απόσταση 92μέτρων. Στην Χ.Θ. 13+257, οι τιμές πίεσης υποστήριξης εδάφους, ώθησης και ροπής στρέψης κυμαίνονταν σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές-στόχους, ενώ οι τιμές διείσδυσης, ενεμάτωσης και προιόντων εκσκαφή ήταν χαμηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές-στόχους. Οι καθιζήσεις στην Χ.Θ. 13+257, λόγω διάνοιξης της σήραγγας, φαίνεται ότι οφείλονται στη λειτουργία της μηχανής EPB. Εκτιμάται ότι οι υψηλές τιμές ροπής, στρέψης και πίεσης μετώπο, επέτρεψαν τη χαλάρωση του εδάφους μπροστά από τη κεφαλή κοπής με αποτέλεσμα τις μετέπειτα καθιζήσεις. Στην Εικόνα 2-9 απεικονίζεται η αποκομιδή του εκσκαπτόμενου υλικού συναρτήσει της Χ.Θ. Κεφαλής κοπής. Αξίζει να αναφερθεί εδώ πως στο προκατασκευασμένο δακτύλιο τελικής επένδυσης με αριθμό 1381 και Χ.Θ. της Κεφαλής κοπής 13278 είχαμε τοπικά μια μεγάλη υπερεκσκαφή, η οποία έφτανε τα 366m³, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από την αναμενόμενη εκσκαφθείσα μάζα ανα βήμα προώθησης που ήταν 180τόνοι, η οποία ωστόσο επειδή ενεματώθηκε άμεσα με μια μεγάλη ποσότητα ενέματος ίση με 9000lt, οπότε και δεν αντιληφθήκαμε τοπικά καμία καθίζηση.

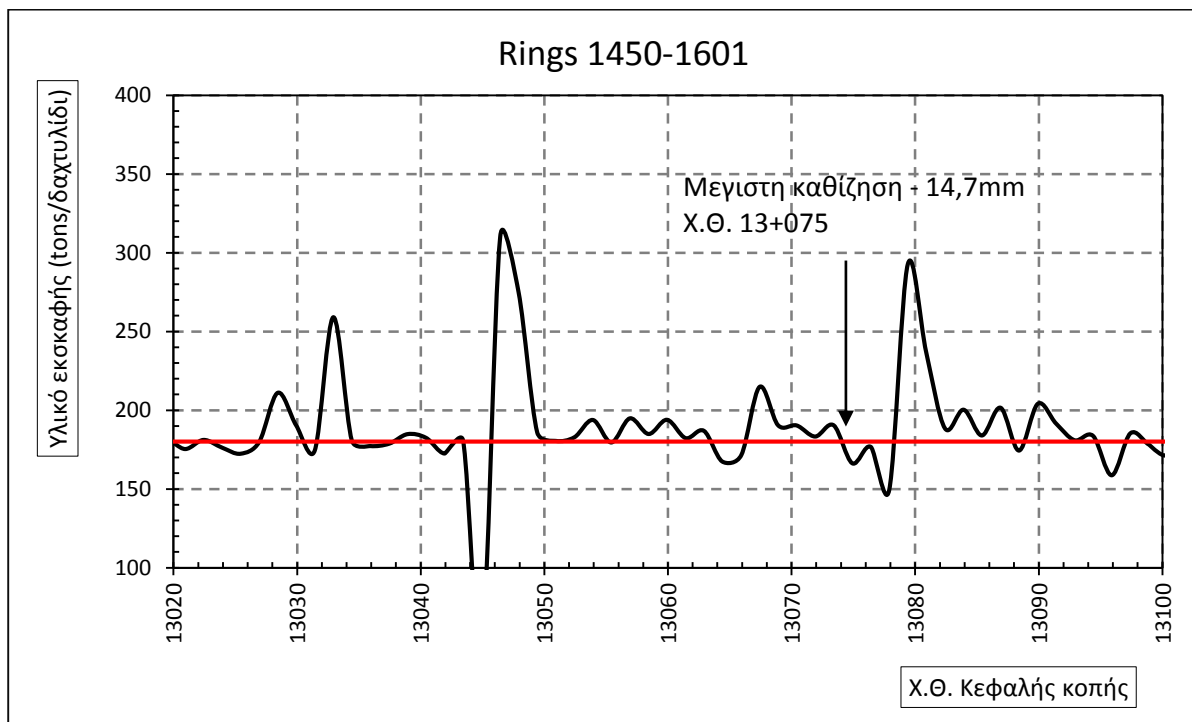


Εικόνα 2-9: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο τμήμα από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το Φρέαρ Λέοντος. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων) [17]

Η πρώτη και σημαντικότερη καθίζηση που σημειώθηκε στην 3^η περιοχή από αυτές που αναφέρονται παραπάνω (Χ.Θ: 13175-12950), σημειώθηκε στη Χ.Θ. 13+075, ήταν -14.7mm ξεκίνησε στις 12 Ιανουαρίου 2008 όταν η κεφαλή της μηχανής είχε περάσει κατά 27m από το αντίστοιχο χωροσταθμικό σημείο και σταθεροποιήθηκε στις 7 Μαρτίου 2008 σε απόσταση 257m. Κατά την διάνοιξη της σήραγγας σημειώθηκαν καθιζήσεις που οφείλονται στη λειτουργία της μηχανής. Αναλυτικότερα:

- Απεργία στις 13/02/2008 (έναρξη μετακινήσεων) και απώλεια της εδαφικής πίεσης υποστήριξης του μετώπου εκκαφής της σήραγγας στην Χ.Θ. 13+047 και κατά την διάρκεια ακινητοποίησης της μηχανής.
- Κατά τη συντήρηση της κοπτικής κεφαλής στην Χ.Θ 13+041, στις 14/02/2008, σημειώθηκε η μέγιστη καθίζηση -12.3mm λόγω απώλειας εδαφικής πίεσης στο μέτωπο της σήραγγας για τουλάχιστον μία βάρδια (δηλαδή επί 8-ώρου). Κατά τις εργασίες συντήρησης της κοπτικής κεφαλής, δεν εφαρμόστηκε η προβλεπόμενη από την μελέτη υποστήριξης του μετώπου από την μηχανή EPB.

Στην Εικόνα 2-10 που ακολουθεί απεικονίζεται η αποκομιδή του εκσκαπτόμενου υλικού συναρτήσει της Χ.Θ. Κεφαλής κοπής, ενώ παράλληλα τονίζεται και η θέση της μέγιστης καθίζησης, η οποία σημειώθηκε Χ.Θ. 13+075 και ήταν -14.7mm.



Εικόνα 2-10: Παρουσίαση του συλλεγόμενου εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού συναρτήσει της Χ.Θ της Κεφαλής κοπής στο μεσοδιάστημα του τμήματος από το Φρέαρ Υμηττού μέχρι το Φρέαρ Λέοντος. (πηγή: Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφιανός, Διδακτορική διατριβή: Επτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων) [17]

3 Δημιουργία τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η δημιουργία τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων σε πρώτο στάδιο και μετέπειτα η εξαγωγή αποτελεσμάτων για συγκεκριμένα μεγέθη όπως, η ακτινική σύγκλιση και εξώθηση του μετώπου κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε προκαθορισμένα βάθη καθώς επίσης και η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών με τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου. Με αυτόν τον σκοπό πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο πολλών παραμετρικών αναλύσεων (288 για την ακρίβεια), αξιοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα **Abaqus** και δημιουργώντας έτσι τρισδιάστατα μοντέλα διαφοτετικής γεωμετρίας. Κύριο ζητούμενο των συγκεκριμένων αναλύσεων είναι να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής των γεωτεχνικών παραμέτρων καθώς και της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής στα μεγέθη της ακτινικής σύγκλισης και της εξώθησης του μετώπου.

3.2 Περιγραφή αριθμητικών αναλύσεων

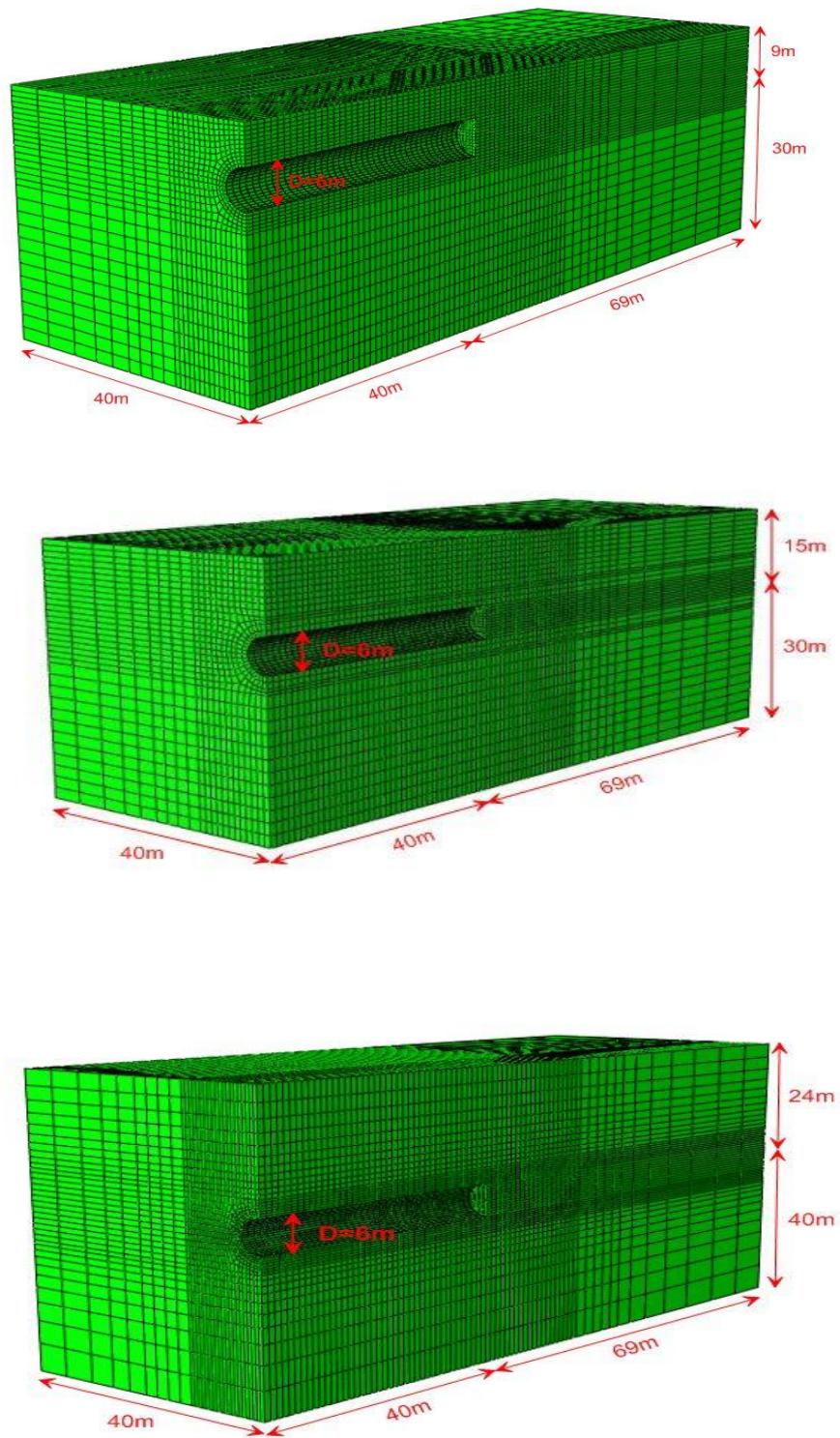
Από τις 288 αναλύσεις συνολικά που πραγματοποιήθηκαν, οι μισές έγιναν για συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων $K_0=0.5$ ενώ αντίστοιχα οι άλλες μισές για $K_0=1.5$. Επιπλέον για κάθε ομάδα αναλύσεων του ίδιου K_0 δημιουργήθηκαν δύο βασικές ομάδες διαφορετικών προσομοιωμάτων με κριτήριο διαχωρισμού τη διάμετρο της σήραγγας. Η πρώτη ομάδα όπου η διάμετρος της σήραγγας ήταν $D=6\text{m}$ και η δεύτερη ομάδα προσομοιωμάτων με διάμετρο σήραγγας $D=10\text{m}$. Στη συνέχεια στην κάθε ομάδα διαμέτρου ορίστηκαν τρεις διαφορετικοί λόγοι ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας (H/D) με τις αναλογίες αυτές να είναι κοινές για τις δύο διαμέτρους σήραγγας και συγκεκριμένα με τιμές $H/D=1.5$, $H/D=2.5$ και $H/D=4.0$. Επιπλέον σε κάθε ανάλυση υπεισέρχονται οι γνωστές μας γεωτεχνικές παράμετροι συνοχή (c) και γωνία τριβής (ϕ), καθώς επίσης και η πίεση που ασκείται στο μέτωπο από το μηχάνημα. Για το έδαφος θεωρήθηκε ελαστική-απολύτως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb. Το έδαφος προσομοιώθηκε με εξαπλευρικά οκτακομβικά στοιχεία C3D8, ενώ τα στοιχεία της επένδυσης αντίστοιχα με γραμμικώς ελαστικά στοιχεία S4 κελύφους. Τέλος, η γωνία διαστολικότητας θεωρήθηκε ως συνάρτηση της γωνίας τριβής και συγκεκριμένα σαν ένα κλάσμα της από τη σχέση $\delta=\phi/6$, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας ακολουθώντας διάφορες σχέσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία το υπολογίσαμε σύμφωνα με τη σχέση $500 \cdot s_u$ (Bowles 1997), όπου s_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι πρωτεύοντες παράμετροι των αναλύσεων που έγιναν.

Πίνακας 3-1: Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι μεταβαλλόμενες τιμές του εκάστοτε παραμετρικού μεγέθους

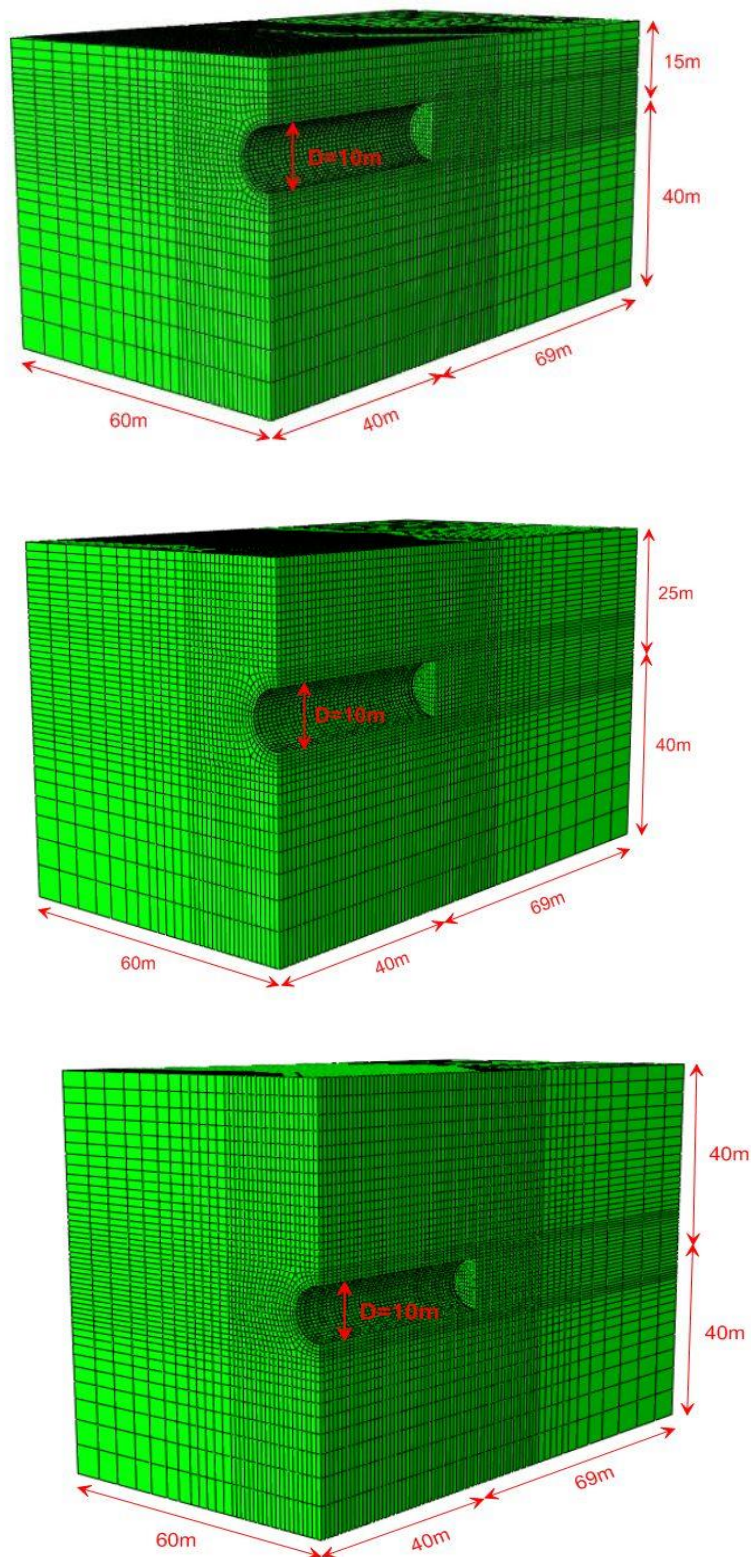
Κύριες παράμετροι αναλύσεων	Έυρος τιμών
Διάμετρος σήραγγας: D (m)	6,10
Λόγος υπερκείμενων προς διάμετρο H/D	1.5 , 2.5 , 4.0
Ειδικό βάρος: γ (kN/m ³)	20
Συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων: K_0	0.5 , 1.5
Συνοχή: c (kPa)	10, 30, 60
Γωνία τριβής: ϕ (°)	25, 35
Γωνία διαστολικότητας: δ (°)	4.2 , 5.8
Πίεση υποστήριξης μετώπου: FP (kPa)	0, 50,100, 200

3.3 Περιγραφή του γεωμετρικού καθορισμού των μοντέλων των αριθμητικών προσομοιωμάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δημιουργία τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του προγράμματος Abaqus. Επισημαίνεται ότι κατά το σχεδιασμό στο Abaqus σχεδιάζεται το μισό αριθμητικό προσομοίωμα λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία που παρουσιάζεται ως προς το κατακόρυφο επίπεδο (z-z) το οποίο είναι κάθετο στο διαμήκη άξονα της σήραγγας. Αναφορικά με τις διαστάσεις των αριθμητικών προσομοιωμάτων ως προς τα πλευρικά όρια, η απόσταση του κέντρου της σήραγγας από το κάτω όριο του προσομοιώματος διατηρήθηκε σταθερή στα 40m τόσο για τα προσομοιώματα με διάμετρο σήραγγας D=6m όσο και για τα αντίστοιχα με διάμετρο D=10m. Στον άξονα x-x, το πλευρικό όριο σχεδιάστηκε σε απόσταση 40m για την ομάδα αριθμητικών προσομοιωμάτων όπου η διάμετρος της σήραγγας είναι D=6m, ενώ για την ομάδα προσομοιωμάτων με διάμετρο D=10m σε απόσταση 60m. Στον άξονα y-y, που ταυτίζεται πρακτικά με το διαμήκη άξονα της σήραγγας, η διάσταση κατά τη διεύθυνση εκσκαφής είναι κοινή για όλα τα προσομοιώματα ανεξαρτήτως διαμέτρου και ίση με 109m από το σημείο έναρξης εκσκαφής της σήραγγας μέχρι το τέλος του προσομοιώματος. Από τα 109m που αναφέρθηκαν τα πρώτα 40m είναι το μήκος διάνοιξης της σήραγγας. Στις Εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται έξι διαφορετικά προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν στα οποία εμφανίζονται χαρακτηριστικές διαστάσεις όπως οι αποστάσεις από τα πλευρικά όρια, το ύψος των υπερκειμένων, η διάμετρος της κάθε σήραγγας καθώς και το συνολικό μήκος διάνοιξης της.



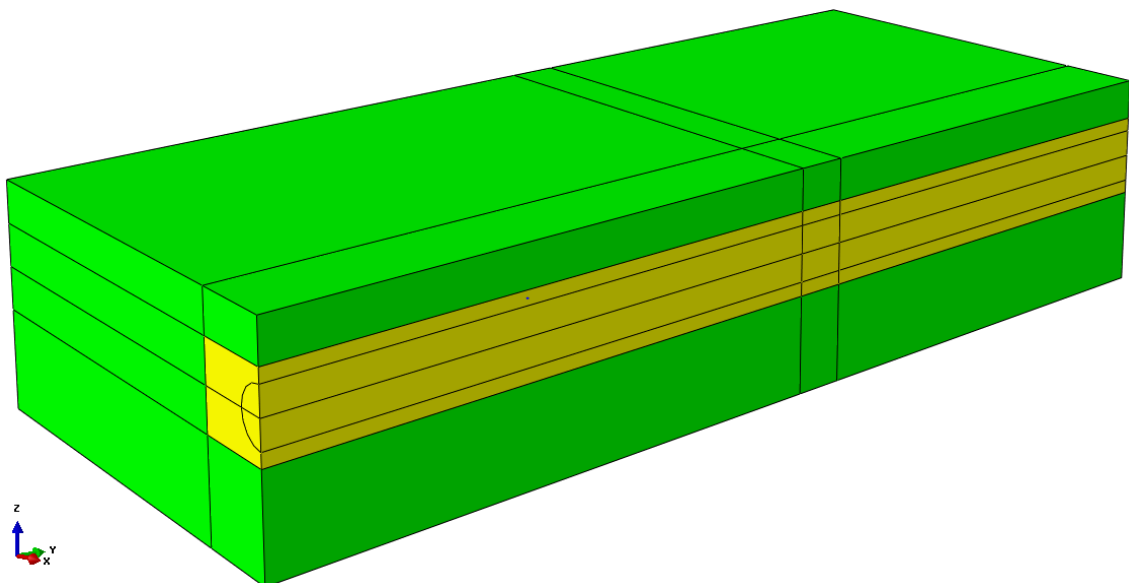
Εικόνα 3-1: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου $D=6m$ για λόγους υπερκειμένων $H/D=1.5$ (πάνω) 2.5 (στη μέση) και 4.0 (κάτω) αντίστοιχα.



Εικόνα 3-2: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου $D=10m$ για λόγους υπερκευμένων $H/D=1.5$ (πάνω) 2.5 (στη μέση) και 4.0 (κάτω) αντίστοιχα.

3.4 Περιγραφή της διαδικασίας διακριτοποίησης των καταστατικών προσομοιωμάτων

Αφού έχει καθοριστεί η γεωμετρία του προσομοιώματος, ακολουθεί η διαδικασία διακριτοποίησης του, η οποία είναι σημαντική για την πραγματοποίηση των αναλύσεων στη συνέχεια. Η προσομοίωση των στοιχείων του εδαφικού όγκου γίνεται με τη χρήση οκτακομβικών εξαπλευρικών στοιχείων, ενώ για την προσομοίωση των στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά στοιχεία κελύφους. Μετά από συστηματική έρευνα πάνω στις μεθόδους διακριτοποίησης, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Από τις δυνατότητες επιλογής μεθόδου διακριτοποίησης που παρέχει το πρόγραμμα, επιλέχθηκε η εντολή **structural** για το σύνολο του μοντέλου εκτός από την περιοχή της σήραγγας όπου επιλέχθηκε η εντολή **sweep**.



Εικόνα 3-3: Απεικόνιση της διαδικασίας διακριτοποίησης όπως περιγράφηκε παραπάνω, όπου φαίνεται η περιοχή της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς και οι βοηθητικές ζώνες διακριτοποίησης. Το αριθμητικό προσομοίωμα που απεικονίζεται έχει διάμετρο $D=10\text{m}$ και $H/D=1,5$

Στη συνέχεια κύριο ζητούμενο είναι οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε ζώνη διακριτοποίησης. Για λόγους οικονομίας υπολογιστικού κόστους στην πραγματοποίηση των αναλύσεων, τα πεπερασμένα στοιχεία δεν μπορούν να σχεδιαστούν υπερβολικά μικρά, ενώ έμφαση ως προς τη διακριτοποίηση τους δίνεται κυρίως στο ημικύκλιο της σήραγγας όπου και μας ενδιαφέρει περισσότερο γιατί εκεί θα πάρουμε τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν στη συνέχεια. Αντίθετα όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας (στη έννοια του άξονα $x-x$) περνάμε από μια πυκνή μορφή διακριτοποίησης σε μια αραιή. Τα στοιχεία της διακριτοποίησης έχουν διαφορετική πυκνότητα κατά τη διεύθυνση $y-y$ και κατά τη διεύθυνση $x-x$. Η διαδικασία διακριτοποίησης ξεκινάει αρχικά από την περιοχή της σήραγγας επιλέγοντας αρχικά τις δύο γραμμές του ημικυκλίου. Σε αυτά τα τμήματα η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε ήταν σύμφωνα με την επιλογή **by number** με τοποθέτηση συγκεκριμένου αριθμού στοιχείων σε κάθε γραμμή. Για παράδειγμα, στο προσομοίωμα της παραπάνω εικόνας χρησιμοποιήθηκαν 12 στοιχεία σε κάθε γραμμή του ημικυκλίου. Ακολουθεί η επιλογή των τριών γραμμών στην περιοχή του ημικυκλίου που είναι κάθετες στον άξονα της σήραγγας,

με τη διακριτοποίηση τους να γίνεται με την επιλογή **by size**, όπου ουσιαστικά ορίζεται το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Στο προσομοίωμα της εικόνας 3-3 χρησιμοποιήθηκαν σε εκείνες τις περιοχές στοιχεία με πάχος 0,8m. Έχοντας πλέον διακριτοποιήσει την περιοχή της σήραγγας, η οποία και μας ενδιαφέρει για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, προχωράμε στη διακριτοποίηση του υπόλοιπου μοντέλου πηγαίνοντας ουσιαστικά σε μια πιο αραιή δομή πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με την περιοχή της σήραγγας. Επίσης, η αραιώση αυτή αφορά και το διαμήκη άξονα της σήραγγας, στο κομμάτι μετά τα 40m που έχουμε ορίσει σαν σταθερό μήκος εκσκαφής σε όλα τα προσομοιώματα. Κάθε μετάβαση από μια πυκνή σε μια αραιή δομή διακριτοποίησης επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής **bias**.

3.5 Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας

Αφού τελειώσει η διακριτοποίηση όλου του μοντέλου, ορίζονται από το χρήστη κάποιες χαρακτηριστικές ομάδες κόμβων και πεπερασμένων στοιχείων, όπως οι κόμβοι όλων των στοιχείων, τα στοιχεία του εδαφικού όγκου, τα στοιχεία της επένδυσης της σήραγγας, που με τη σειρά τους δομούν το αρχείο εισαγωγής δεδομένων ή αλλιώς Input File το οποίο είναι ένα αρχείο txt. Στο Input file επιπλέον γίνεται και ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών του αριθμητικού προσομοιώματος. Η επιφάνεια του εδάφους θεωρήθηκε ελεύθερη σε μετακινήσεις και παραμορφώσεις οπότε δεν δεσμεύτηκε με κάποιον τρόπο. Στο κάτω όριο τοποθετούνται αρθρώσεις και στις 3 διευθύνσεις προκειμένου να δεσμεύσω όλες τις μετακινήσεις, στο δεξί και αριστερό όριο δεσμεύτηκε η μετακίνηση κατά τον άξονα x-x, ενώ στην πρόσοψη και κατά την εκσκαφή της σήραγγας δεσμεύονται οι μετακινήσεις κατά τον άξονα y-y. Η διαδικασία της διάνοιξης της σήραγγας ορίστηκε με εντολή στο input file σε βήματα. Ορίστηκε ότι η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιείται κατά τη διεύθυνση y-y σε μήκος 40m εκσκάπτοντας φέτες πάχους 1m η καθεμία με ταυτόχρονη τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης με ίδιο πάχος. Παράλληλα σε κάθε βήμα με κατάλληλες εντολές γίνεται καθορισμός των αποτελεσμάτων που ζητάμε από το πρόγραμμα. Χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία ορίζουμε στο Input file να μας βγάλει σαν αποτελέσματα μετά το πέρας των αναλύσεων είναι οι μετακινήσεις των κόμβων των στοιχείων, τάσεις και παραμορφώσεις στα στοιχεία, αξονικές δυνάμεις και ροπές στα στοιχεία της επένδυσης, πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο της εκσκαφής.

4 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

4.1 Εισαγωγή

Για να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας της διάνοιξης, των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους καθώς και η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, στα μεγέθη της ακτινικής σύγκλισης της σήραγγας καθώς και στην εξώθηση του μετώπου της πραγματοποιήθηκαν αρχικά συνολικά 288 αναλύσεις όπου αγνοήθηκε η ύπαρξη του νερού και τα φαινόμενα στερεοποίησης (ξηρές συνθήκες). Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1:

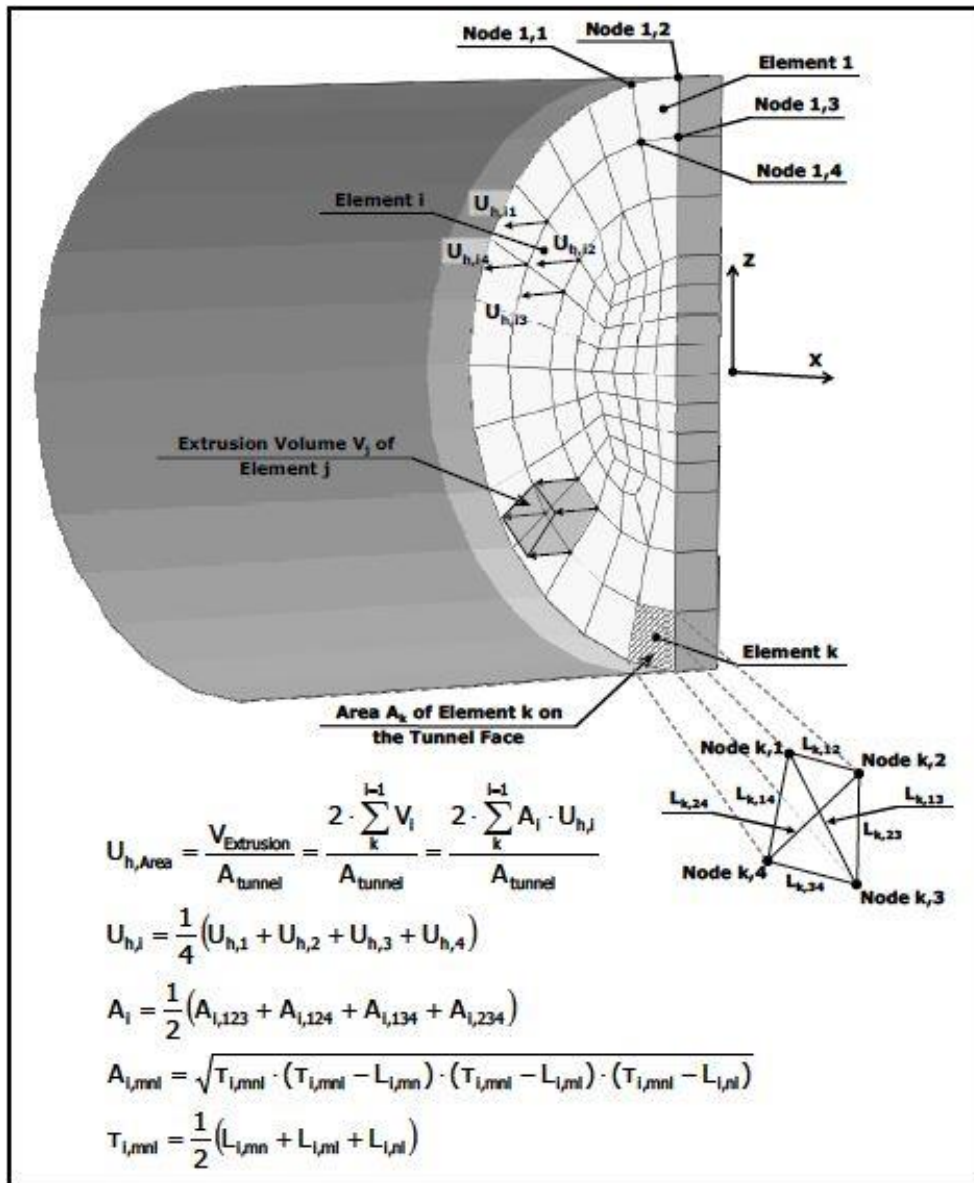
Πίνακας 4-1: Παράμετροι αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους

Παράμετροι αναλύσεων	Έυρος τιμών
Διάμετρος σήραγγας: D (m)	6,10
Βάθος υπερκείμενων/Διάμετρος σήραγγας: (H/D)	1.5, 2.5, 4.0
Ειδικό βάρος: γ (kN/m ³)	20
Συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων: K_o	0.5 , 1.5
Συνοχή: c (kPa)	10, 30, 60
Γωνία τριβής: ϕ (°)	25, 35
Γωνία διαστολικότητας: δ (°)	4.2 , 5.8
Πίεση υποστήριξης μετώπου: FP (kPa)	0,50,100, 200

Σημειώνεται πως αντίθετα με τη συνήθη πρακτική επιβολής ενός ποσοστού της οριζόντιας γεωστατικής τάσης ως πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, θεωρήσαμε σταθερές τιμές αυτές που παραθέτονται στον Πίνακα 4-1. Επιπλέον οι συνδυασμοί στις τιμές της γωνίας τριβής (ϕ) και της εδαφικής συνοχής (c) έχουν ως στόχο να καλύψουν μια ευρεία γκάμα γεωτεχνικών συνθηκών, από χαλαρά εδάφη έως πολύ μαλακούς βράχους, ενώ και οι διάμετροι που επιλέχθηκαν αποτελούν συνήθεις γεωμετρίες σηράγγων σε αστικά περιβάλλοντα. Επιδιώκεται πρωταρχικά ο προσδιορισμός της επιρροής της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής καθώς και του βάθους υπερκείμενων στα μεγέθη της μέσης ακτινικής σύγκλισης, $U_{radial,average}$ καθώς και στην μετακίνηση του μετώπου (μετακινήσεις κατά τον άξονα $y-y$) στην τελευταία φέτα εκσκαφής. Ειδικότερα, για τις μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής τα κύρια εξαγόμενα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι:

- $U_{2,max}$: Είναι η οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής. Αποτελεί την απλούστερη έκφραση της έκθλιψης και λαμβάνεται ως η οριζόντια μετακίνηση του κόμβου που βρίσκεται στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής. Αποτελεί το απλούστερο παραμορφωσιακό μέγεθος του μετώπου που μπορεί να εξαχθεί, είτε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, είτε από μετρήσεις κατά την εκσκαφή με χρήση του μηχανοσκόπου.
- $U_{2,area}$: Ορίζεται ως η μέση οριζόντια μετακίνηση σε όλη τη διατομή του μετώπου της σήραγγας. Προκύπτει υπολογίζοντας το συνολικό όγκο της έκθλιψης $V_{extrusion}$ και διαιρώντας με το εμβαδό της επιφάνειας του μετώπου. Ο όγκος της έκθλιψης

υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους όγκων V_i για κάθε στοιχείο του μετώπου. Κάθε επιμέρους όγκος V_i υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια του στοιχείου A_i με το μέσο όρο $U_{h,i}$ των οριζόντιων μετακινήσεων στους 4 κόμβους του στοιχείου επί του μετώπου. Η επιφάνεια A_i του στοιχείου υπολογίζεται ως το ημιάθροισμα των εμβαδών των 4 τριγώνων που ορίζονται από τους 4 κόμβους του στοιχείου. Για κάθε επιμέρους τρίγωνο, ο υπολογισμός του εμβαδού γίνεται χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των κόμβων του (για να υπολογιστεί το μήκος των πλευρών του) και εφαρμόζοντας στη συνέχεια τον τύπο του Ήρωνα. Παρακάτω δίνεται μια εικόνα του πως ορίζεται το μέτωπο εκσκαφής καθώς και μια συνοπτική διαδικασία υπολογισμού της $U_{2,area}$.



Εικόνα 4-1: Υπολογισμός της μέσης έκθλιψης $U_{2,area}$ στο σύνολο της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής.

Σε δεύτερη φάση και με αφορμή τη διδακτορική του κ. Προυντζόπουλου (2012) στην οποία δημιουργήθηκε ένας συντελεστής που είχε σκοπό να προβλέψει καλύτερα την παραμορφωσιμότητα και την ευστάθεια του μετώπου. Αρχικό ζητούμενο ήταν να δείξουμε τη μεταβολή συναρτήσει αυτού του συντελεστή στα μεγέθη της μέσης ακτινικής σύγκλισης, στη μετακίνηση της ευρύτερης περιοχής του μετώπου καθώς και στον αναμενόμενο λόγο υπερεκσκαφής (OER)_{calculated} που περιγράφηκε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2 για τις διάφορες τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο που διαχειριστήκαμε. Σημειώνεται πως τα μεγέθη των ακτινικών συγκλίσεων και των μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής κανονικοποιήθηκαν με βάση τη διάμετρο, το μέτρο Ελαστικότητας και τη μέση γεωστατική πίεση, όπως φαίνεται και στις εξισώσεις 4.1 και 4.2.

$$\Omega_{F,MC} = \frac{U_h E}{D p_{0,m}} \quad \text{Εξίσωση 4.1}$$

$$\Omega_{R,MC} = \frac{U_R E}{D p_{0,m}} \quad \text{Εξίσωση 4.2}$$

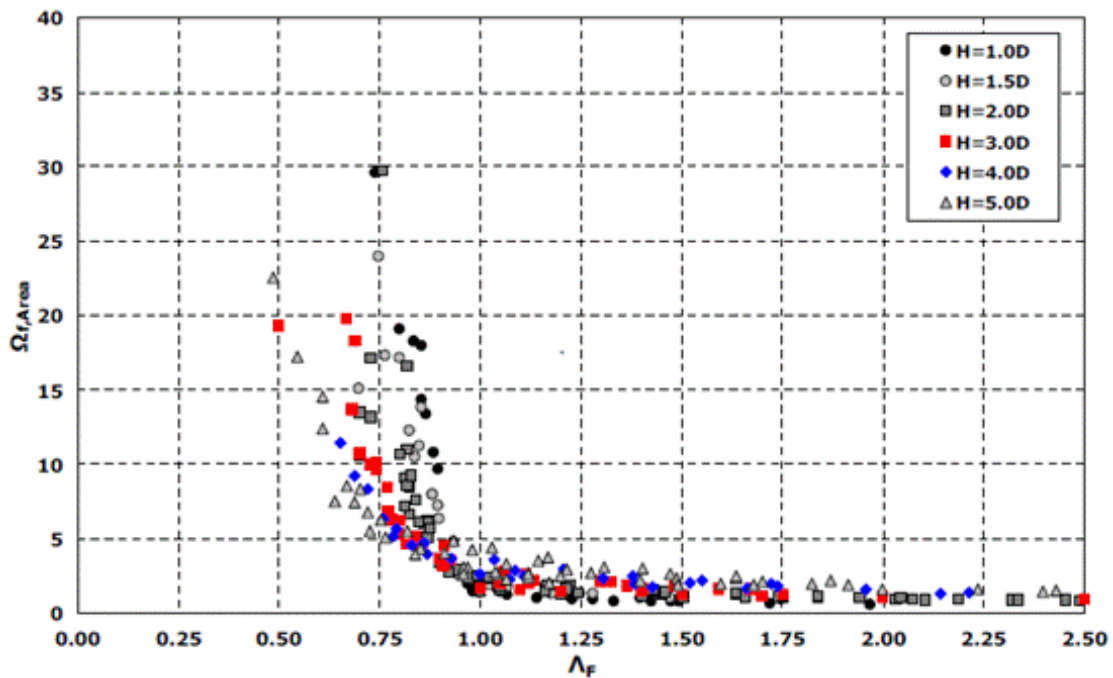
Ο δείκτης Λ_{F0} είναι ουσιαστικά μια σχέση στην οποία συνδέεται η γεωμετρία της εκσκαφής με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού. Στον αριθμητή πολλαπλασιάζεται η τιμή της συνοχής σε (kPa) του γεωυλικού με τον αριθμό 5,25 καθώς και με το συντελεστή N_ϕ , όπου $N_\phi = \tan(45 + \phi/2)^2$. Στον παρονομαστή χρησιμοποιούνται τα μεγέθη για την περιγραφή της γεωμετρίας της διάνοιξης, όπου το ειδικό βάρος σε (kN/m³) πολλαπλασιάζεται με το ύψος υπερκείμενων H (m) και με τη διάμετρο D (m). Ωστόσο ο συντελεστής Λ_{F0} προτάθηκε για ανυποστήριχτη σήραγγα, οπότε απώτερος σκοπός ουσιαστικά των προαναφερθέντων 288 αναλύσεων είναι να διευρυνθεί ο παραπάνω συντελεστής, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψιν του με κάποιον τρόπο την επίδραση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Σημειώνεται επίσης ότι ο παραπάνω συντελεστής Λ_{F0} χρησιμοποιείται για αβαθείς σήραγγες όπου το βάθος υπερκείμενων δεν ξεπερνάει το $H=4 \cdot D$, όπου D η διάμετρος της εκσκαφής. Για μεγαλύτερα βάθη, από $H/D > 5$ και πάνω, η σήραγγα είναι σαφώς βαθιά οπότε δεν συνίσταται η εφαρμογή του προτεινόμενου συντελεστή Λ_{F0} . Η καθοριστική τιμή που αποφασίζει αν το μέτωπο της σήραγγας είναι ευσταθές ή ασταθές ανεξαρτήτως του βάθους H της σήραγγας και του τύπου του εδάφους (χαμηλή ή υψηλή γωνία τριβής) είναι για $\Lambda_{F0}=1$.

$$\Lambda_{F0} = \frac{5.25 c N_\phi^a}{\gamma H^{1-b} D^b} \quad \text{Εξίσωση 4.3}$$

$$a = 0.16 \frac{H}{D} + 0.59 \quad \text{Εξίσωση 4.4}$$

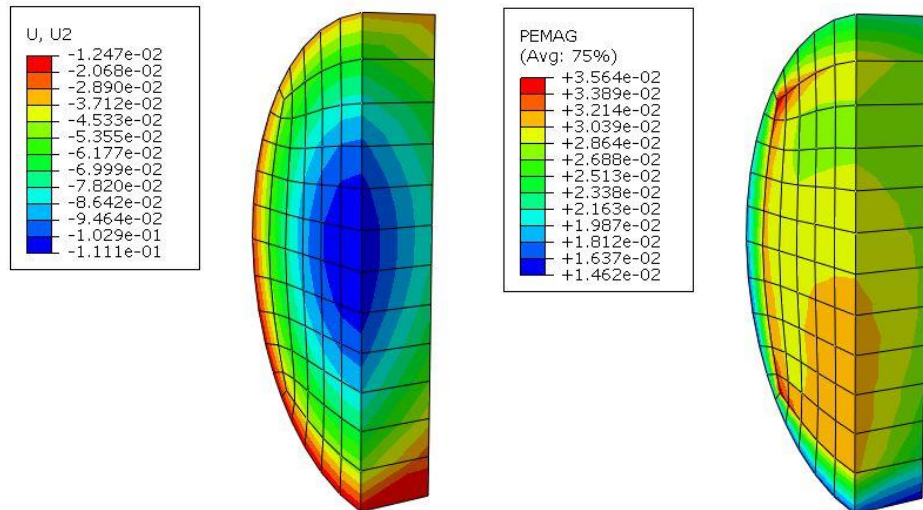
$$b = \left(\frac{H}{D} \right)^{-0.37} \quad \text{Εξίσωση 4.5}$$

Επιπλέον, ο παραπάνω συντελεστής Λ_{F0} σχετίζεται με την παράμετρο Ω_f , όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4-2, η οποία είναι ουσιαστικά μια αδιαστατοποιημένη απεικόνιση της οριζόντιας μετακίνησης U_h στο μέτωπο εκσκαφής και υπολογίζεται από την σχέση 4.1 που παρουσιάστηκε παραπάνω.

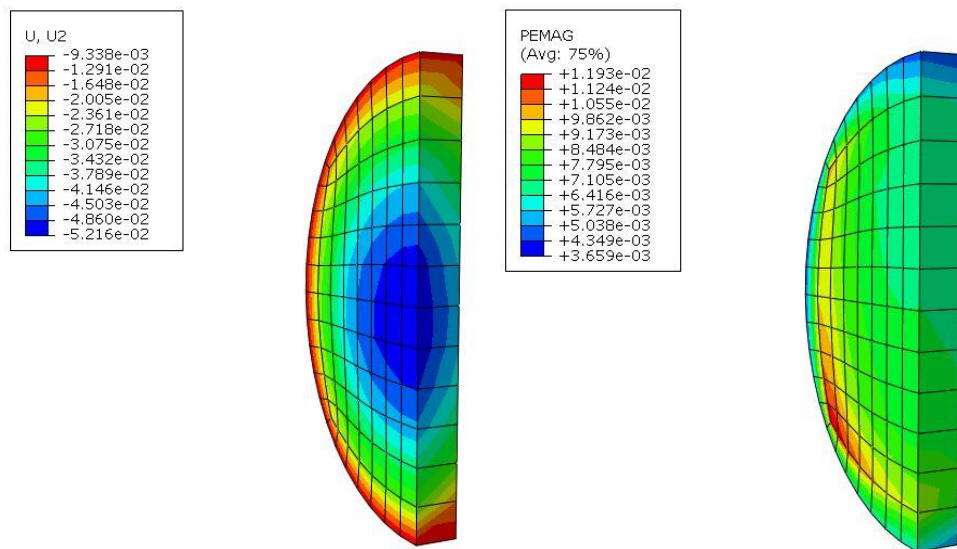


Εικόνα 4-2: Μέση αδιαστατοποιημένη οριζόντια μετατόπιση στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ ως συνάρτηση του συντελεστή ευστάθειας Λ_{F0} για διαφορετικά βάθη υπερκειμένων (Προυντζόπουλος 2012).

Μετά από την ολοκλήρωση των αναλύσεων, περαιτέρω επεξεργασία γίνεται σε κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία excel με αποτέλεσμα την εξαγωγή των μεγεθών που αναφέρονται πιο πάνω, ενώ παράλληλα κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το Abaqus από το τελευταίο βήμα της εκσκαφής αφαιρούνται οι μετακινήσεις που συντελέστηκαν κατά το γεωστατικό βήμα. Παρακάτω παραθέτονται αναγνωριστικά η 41^η φέτα εκσκαφής για δύο αναλύσεις, η πρώτη για διάμετρο $D=6m$, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_0=0.50$ και μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο, ενώ η δεύτερη για διάμετρο $D=10m$, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_0=0.50$ και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο ίση με $100kPa$ με αντίστοιχα ύψη υπερκειμένων προς διάμετρο H/D 2.5 και 4.0 αντίστοιχα. Σε κάθε εικόνα απεικονίζονται οι μετακινήσεις κατά την εξώθηση του μετώπου καθώς και οι πλαστικές παραμορφώσεις που συντελούνται στο μέτωπο της σήραγγας. Βλέπουμε πως και στα δύο εδαφικά προσομοιώματα οι μέγιστες μετακινήσεις εμφανίζονται στο κέντρο της σήραγγας με τιμές $1.1cm$ και $5.2cm$ αντίστοιχα ενώ μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις συναντώνται στο προσομοίωμα εκείνο με μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και μάλιστα σε μια περιοχή κοντά στη βάση της σήραγγας μέχρι και το κέντρο αυτής. Αντίθετα στο δεύτερο εδαφικό προσομοίωμα βλέπουμε πως με την υφιστάμενη πίεση υποστήριξης, οι πλαστικές παραμορφώσεις στη σήραγγα περιορίζονται σημαντικά, τόσο σαν τιμές όσο και ως ποσοστό που καταλαμβάνουν επί της διατομής της σήραγγας.



Εικόνα 4-3: Απεικόνιση των μετακινήσεων στη διεύθυνση του άξονα γ-γ (αριστερά) καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής (δεξιά) σε σήραγγα διαμέτρου $D=6\text{m}$ με λόγο υπερκειμένων προς τη διάμετρο σήραγγας $H/D=2,5$ και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο $FP=0\text{kPa}$.



Εικόνα 4-4: : Απεικόνιση των μετακινήσεων στη διεύθυνση του άξονα γ-γ (αριστερά) καθώς και των πλαστικών παραμορφώσεων στο μέτωπο εκσκαφής (δεξιά) σε σήραγγα διαμέτρου $D=6\text{m}$ με λόγο υπερκειμένων προς τη διάμετρο σήραγγας $H/D=4,0$ και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο $FP=100\text{kPa}$.

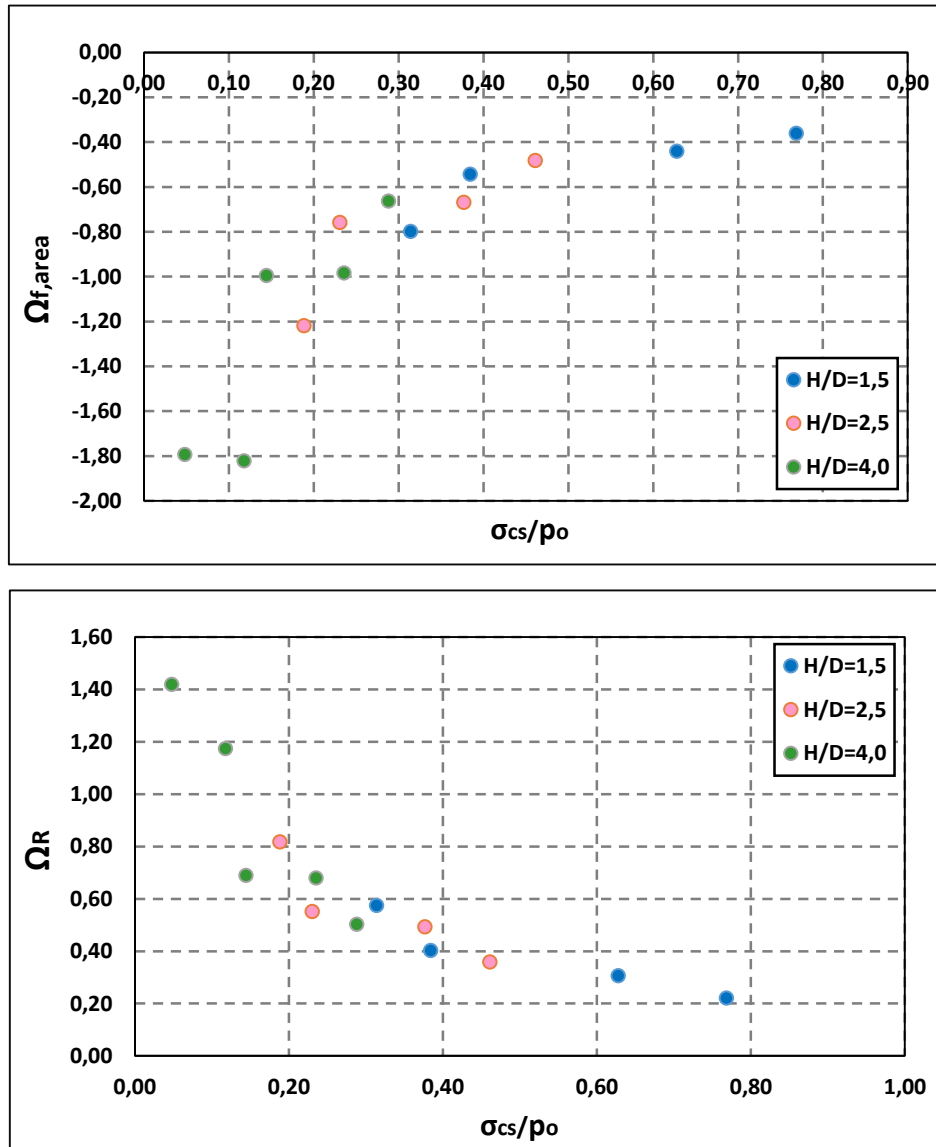
Στις επόμενες σελίδες ακολουθεί ξεχωριστή διάκριση της επιρροής της πίεσης υποστήριξης (για σταθερό λόγο υπερκειμένων/διάμετρο H/D) καθώς και του λόγου υπερκειμένων/διάμετρο H/D (για σταθερή πίεση υποστήριξης στο μέτωπο) στα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4.2 Επιρροή του βάθους υπερκείμενων στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου και των ακτινικών συγκλίσεων

Κατ' αρχάς γίνεται διαχωρισμός των διαφορετικών αναλύσεων με βάση τις παραμέτρους που παρατέθηκαν στον Πίνακα 4-1. Τέτοιες παράμετροι είναι η διάμετρος της σήραγγας, ο λόγος του ύψους υπερκείμενων προς τη διάμετρο H/D , ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων K_o και η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής (Face Pressure). Η βασική κατηγοριοποίηση έγινε πρώτα με βάση το συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων και σε δεύτερη φάση με τη διάμετρο της σήραγγας και το H/D , όπου ουσιαστικά κρατώντας κάθε φορά σταθερή την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο για σταθερές τιμές 0, 50, 100, 200kPa αντίστοιχα πλοταρίστηκαν τα διαγράμματα $\Omega_{f,area} - \sigma_{cs}/p_o$, $\Omega_R - \sigma_{cs}/p_o$ για όλους τους εξεταζόμενους λόγους H/D . Επειδή παρατηρείται μια σχετική ομοιότητα ως προς την εξέταση της επιρροής του ύψους υπερκείμενων για τις 2 διαμέτρους και για τους 2 λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_o , για λόγους οικονομίας χώρου παρακάτω επεξηγείται η επιρροή του λόγου H/D στα προαναφερθέντα μεγέθη για σήραγγες με διάμετρο $D=10m$ και λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$. Για την καλύτερη κατανόηση και εποπτεία παραθέτονται επίσης τα διαγράμματα $\Omega_{f,area} - \sigma_{cs}/p_o$, $\Omega_R - \sigma_{cs}/p_o$, συναρτήσει όλων των πιέσεων υποστήριξης που εξετάστηκαν.

Αρχικά για **1)Face Pressure=0**: Σαν γενικό σχόλιο παρατηρούμε κατ' αρχάς πως τόσο για τα μεγέθος της κανονικοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$, όσο και για αυτό της μέσης ακτινικής σύγκλισης Ω_R , αύξηση στην τιμή του λόγου H/D συντελεί στην αύξηση και των 2 παραπάνω μεγεθών. Βλέπουμε επίσης πως και στα δύο διαγράμματα υπάρχει μια περιοχή για υψηλές τιμές του λόγου $\sigma_{cs}/p_o > 0.40$, στην οποία τα αποτελέσματα εμφανίζουν μια σχεδόν οριζόντια διασπορά με περίπου σταθερή ή ελαφρώς αυξανόμενη τιμή και των δύο κανονικοποιημένων μεγεθών $\Omega_{f,area}$ και Ω_R καθώς η αντοχή του εδάφους μειώνεται. Η οριζόντια αυτή διασπορά είναι πιο σαφής για μικρές τιμές του λόγου $H/D=1.5$ και 2.5, για αβαθείς σήραγγες δηλαδή. Στις βαθύτερες σήραγγες παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες τιμές στα παραπάνω μεγέθη σε σχέση με τις αβαθείς κυρίως λόγω των υψηλότερων τάσεων που επικρατούν. Ακόμη, η κλίση της καμπύλης των αποτελεσμάτων και για τα δύο μεγέθη μεταβάλλεται για διαφορετικούς λόγους H/D και συγκεκριμένα αυξάνεται με την αύξηση του λόγου H/D . Γενικότερα, παρατηρούμε πως για όλους τους εξεταζόμενους λόγους περισσότερο επηρεάζονται τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ με την αύξηση της εδαφικής συνοχής, παρά τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=35^\circ$. Χαρακτηριστικά, για λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=1.5$ παρατηρούνται μεγαλύτερες μειώσεις στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ με την αύξηση της εδαφικής συνοχής. Αναλυτικότερα, τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και εδαφική συνοχή $c=30kPa$ και $60kPa$ στο διάγραμμα 4-1 της επόμενης σελίδας αντιστοιχούν στα σημεία με σ_{cs}/p_o 0.31 και 0.63 αντίστοιχα, όπου για αύξηση της εδαφικής συνοχής σε 30kPa επέρχεται μια μείωση της $\Omega_{f,area}$ περίπου 0.357, η οποία αντιστοιχεί σε πραγματική μεταβολή της μετακίνησης του μετώπου περίπου 1.50cm. Από την άλλη μεριά τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ και εδαφική συνοχή $c=30kPa$ και $60kPa$ αντιστοιχούν στα σημεία με σ_{cs}/p_o 0.38 και 0.77 αντίστοιχα, στα οποία για τη συγκεκριμένη αύξηση της εδαφικής συνοχής επέρχεται μια μείωση της $\Omega_{f,area}$ περίπου 0.182 που αντιστοιχεί σε πραγματική μεταβολή της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής περίπου 0.75cm, η μισή περίπου σε σχέση με αυτήν για τα εδάφη με $\phi=25^\circ$. Αντίστοιχα και για τους μεγαλύτερους λόγους $H/D=2.5$ και 4.0 τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ επηρεάζονται περισσότερο. Βλέπουμε επίσης πως η αύξηση της

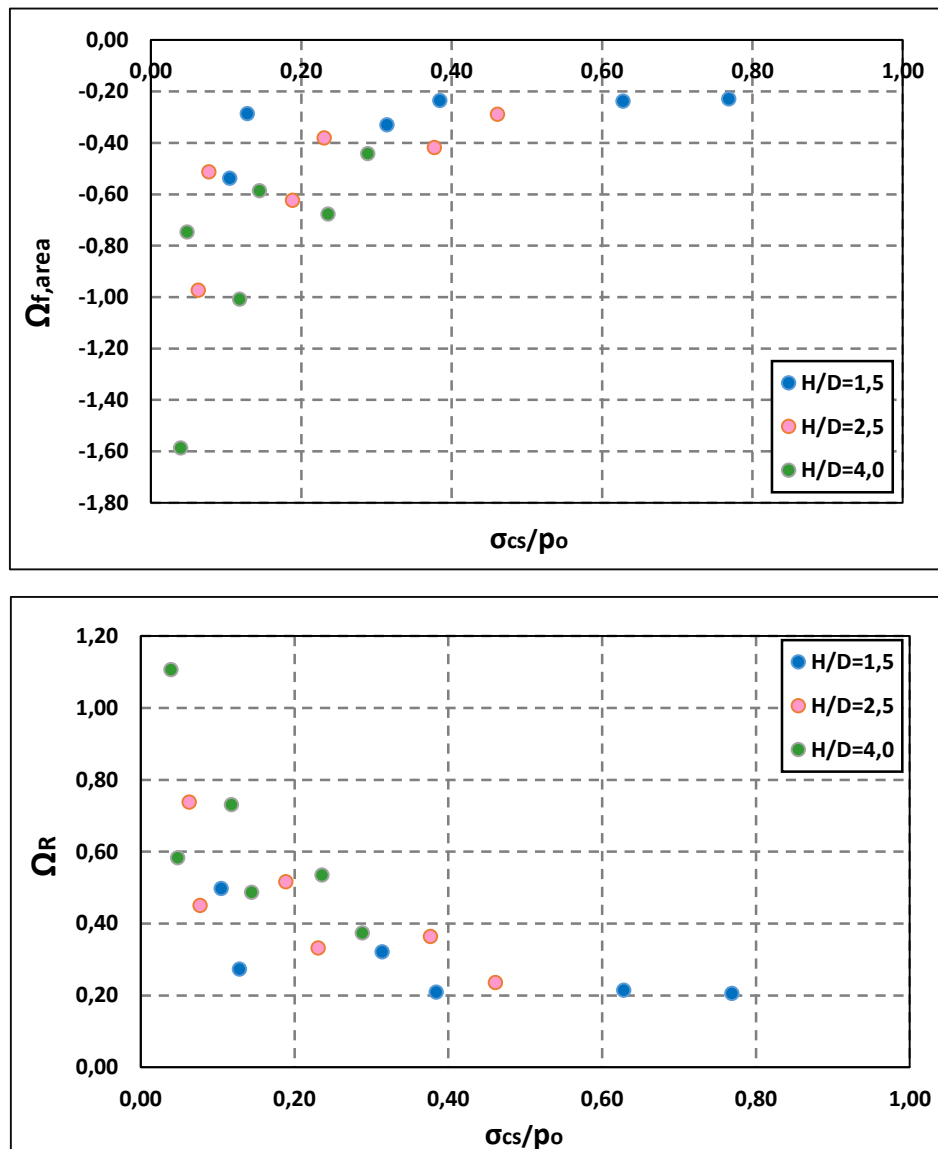
γωνίας τριβής (για σταθερή εδαφική συνοχή) δείχνει να γίνεται σημαντικότερη όσο αυξάνει το βάθος επαληθεύοντας ουσιαστικά τη συσχέτιση του κ. Προυντζόπουλου μεταξύ της γωνίας τριβής και του βάθους υπερκείμενων στην έκφραση του συντελεστή Λ_{fo} . Τέλος σημειώνεται πως για τη συγκεκριμένη πίεση υποστήριξης οι αναλύσεις που περιείχαν τα εδαφικά προσομοιώματα με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και 35° με εδαφική συνοχή $c=10\text{kPa}$ για λόγους $H/D=1.5$ και 2.5 , καθώς και το αντίστοιχο με $\phi=25^\circ$ και $c=10\text{kPa}$ για λόγο $H/D=4.0$ δεν πραγματοποιήθηκαν.



Γράφημα 4-1: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/ρ_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=0, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10\text{m}$.

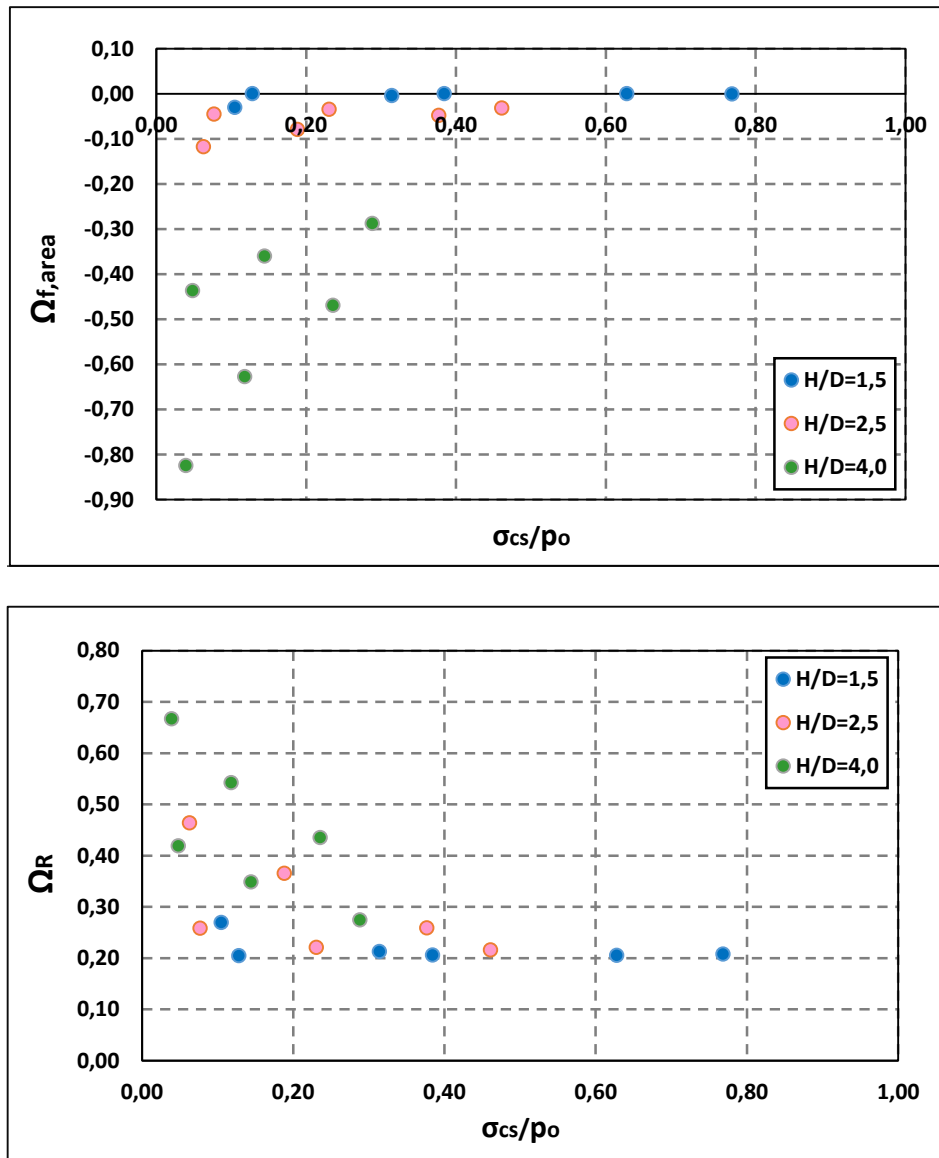
2) Face Pressure=50kPa: Πηγαίνοντας σε μεγαλύτερη τιμή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο βλέπουμε πάλι πως και στα δύο διαγράμματα για $\sigma_{cs}/\rho_o > 0.40$ εμφανίζουν μια οριζόντια διασπορά με σταθερή περίπου την κανονικοποιημένη ακτινική σύγκλιση Ω_R , ενώ η κανονικοποιημένη μετακίνηση του μετώπου $\Omega_{f,area}$ εμφανίζει μικρές αυξήσεις με την αύξηση της εδαφικής αντοχής. Πάλι, η οριζόντια αυτή διασπορά είναι εμφανή για αβαθείς

σήραγγες και συγκεκριμένα για λόγους $H/D=1.5$ και 2.5 . Για $\sigma_{cs}/p_o < 0.40$ μείωση του βάθους υπερκείμενων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση στις τιμές και των δύο παραπάνω μεγεθών ενώ και εδώ βλέπουμε πως η αύξηση της γωνίας τριβής είναι καθοριστική όσο πηγαίνουμε σε μεγαλύτερα υπερκείμενα. Τέλος, για $H/D=2.5$ και 4.0 η αύξηση της εδαφικής συνοχής φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$, παρά εκείνα με $\phi=35^\circ$. Συγκεκριμένα, για λόγο $H/D=2.5$ τα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και αντίστοιχες τιμές εδαφικής συνοχής $c=10\text{kPa}$, 30kPa και 60kPa αντιστοιχούν στα σημεία του παρακάτω διαγράμματος 4-2 με σ_{cs}/p_o 0.06, 0.19 και 0.38 αντίστοιχα, ενώ από την άλλη μεριά τα εδάφη με $\phi=35^\circ$ στα σημεία 0.08, 0.23 και 0.46 αντίστοιχα. Είναι φανερό πως μεγαλύτερες μειώσεις με την αύξηση της εδαφικής συνοχής συμβαίνουν στην πρώτη κατηγορία εδαφών, ενώ οι μειώσεις γίνονται εντονότερες μόλις πάμε σε λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$.



Γράφημα 4-2: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσεως του λόγου σ_{cs}/p_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=50kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10\text{m}$.

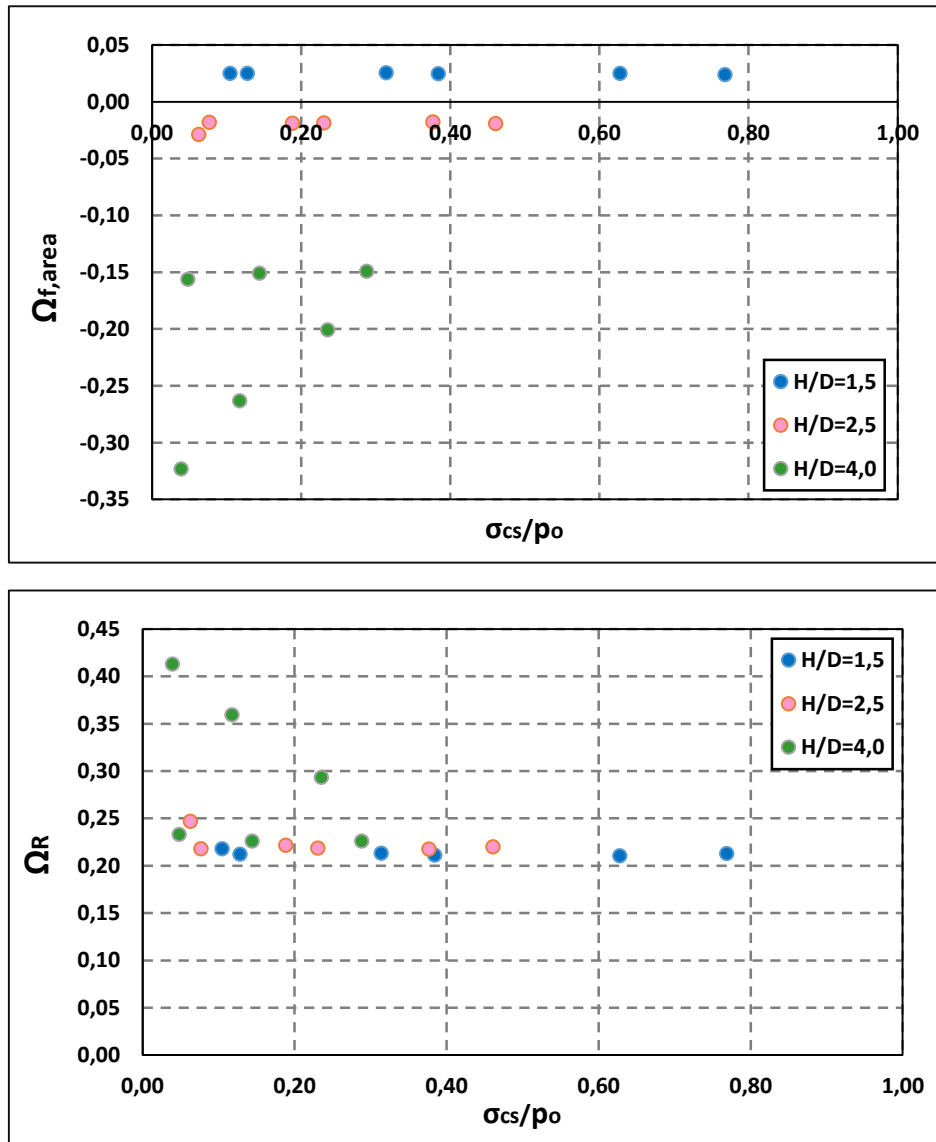
3)Face Pressure=100kPa: Αναφορικά με την κανονικοποιημένη σύγκλιση Ω_R βλέπουμε πως για $\sigma_{cs}/p_o > 0.40$ τα αποτελέσματα εμφανίζουν μια οριζόντια διασπορά η οποία αφορά κυρίως αβαθείς σήραγγες, δηλαδή για λόγους $H/D=1.5$ και 2.5 . Ακόμη σαν γενικό σχόλιο, παρατηρούμε πως ο ρυθμός μείωσης των ακτινικών συγκλίσεων που συντελείται με την αύξηση του λόγου H/D είναι πιο έντονος στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$, ενώ και για τους δύο τύπους (ως προς τη γωνία τριβής) εδαφών ο ρυθμός αυτός μειώνεται όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου σ_{cs}/p_o . Για την κανονικοποιημένη μετακίνηση στην περιοχή του μετώπου $\Omega_{f,area}$ βλέπουμε αρχικά πως για λόγους υπερκείμενων $H/D=1.5$ και 2.5 οι τιμές είναι πολύ κοντά στο 0, ενώ για $H/D=4.0$ συνεχίζουμε να έχουμε αρνητικές μετακινήσεις, καθώς η υφιστάμενη πίεση υποστήριξης $FP=100\text{kPa}$ δεν μπορεί να υπερνικήσει την οριζόντια γεωστατική τάση που εδώ είναι $p_{ho}=400\text{kPa}$. Ακόμη, όσο προχωράμε σε μεγαλύτερα υπερκείμενα η τιμή της $\Omega_{f,area}$ αυξάνεται, ενώ για την υφιστάμενη πίεση υποστήριξης η γωνία τριβής δείχνει να είναι καθοριστική για τα αποτελέσματα της $\Omega_{f,area}$ μόνο για $H/D=4.0$ και πολύ λιγότερο για $H/D=2.5$. Στο παρακάτω διάγραμμα 4-3 απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ακτινική σύγκλιση και μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/p_o πίεση υποστήριξης $FP=100\text{kPa}$ για όλους τους εξεταζόμενους λόγους H/D .



Γράφημα 4-3: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/ρ_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=100kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$.

4) Face Pressure=200kPa: Παρατηρώντας το διάγραμμα 4-4 της επόμενης σελίδας και ξεκινώντας με τα αποτελέσματα της κανονικοποιημένης σύγκλισης, βλέπουμε πως στο σύνολό τους παρουσιάζουν μια οριζόντια διασπορά με τιμές λίγο πιο πάνω από το 0.2, με τη μετάβαση από λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=1.5$ σε 2.5 να μην έχει ουσιαστική επιρροή στην εξέλιξη των συγκλίσεων για όλες τις τιμές της εδαφικής αντοχής. Δεν συμβαίνει το ίδιο για τα προσομοιώματα που αντιστοιχούν σε λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$ με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$, τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία με σ_{cs}/ρ_o 0.04, 0.12 και 0.24. Για την κανονικοποιημένη μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ η εικόνα είναι παρόμοια με αυτήν για Face Pressure=100kPa με τη διαφορά ότι για $H/D=1.5$ οι μετακινήσεις είναι θετικές, οπότε και τα αντίστοιχα μέτωπα εισπιέζονται καθώς η υφιστάμενη πίεση υποστήριξης μπορεί και υπερνικάει την οριζόντια γεωστατική που για $H/D=1.5$ είναι $p_{ho}=150kPa$. Ακόμη, η επιρροή της συνοχής και της

γωνίας τριβής στις αβαθείς σήραγγες (για λόγους $H/D=1.5$ και 2.5) πρακτικά εξαλείφεται καθώς τα δεδομένα για αυτούς τους λόγους H/D δεν εμφανίζουν κάποια διακύμανση.



Γράφημα 4-4: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του λόγου σ_{cs}/ρ_o για πίεση υποστήριξης Face Pressure=200kPa, λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$.

Πίνακας 4-2: Τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{cs} που εμφανίζονται στα διαγράμματα $\Omega_{f,area}-\sigma_{cs}$ και $\Omega_R-\sigma_{cs}$ και αντιστοίχισή τους με τις εξεταζόμενες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής.

Συνοχή c (kPa)	Γωνία Τριβής ϕ (°)	σ_{cs} (kPa)
10	25	31.4
10	35	38.4
30	25	94.2
30	35	115.3
60	25	188.4
60	35	230.5

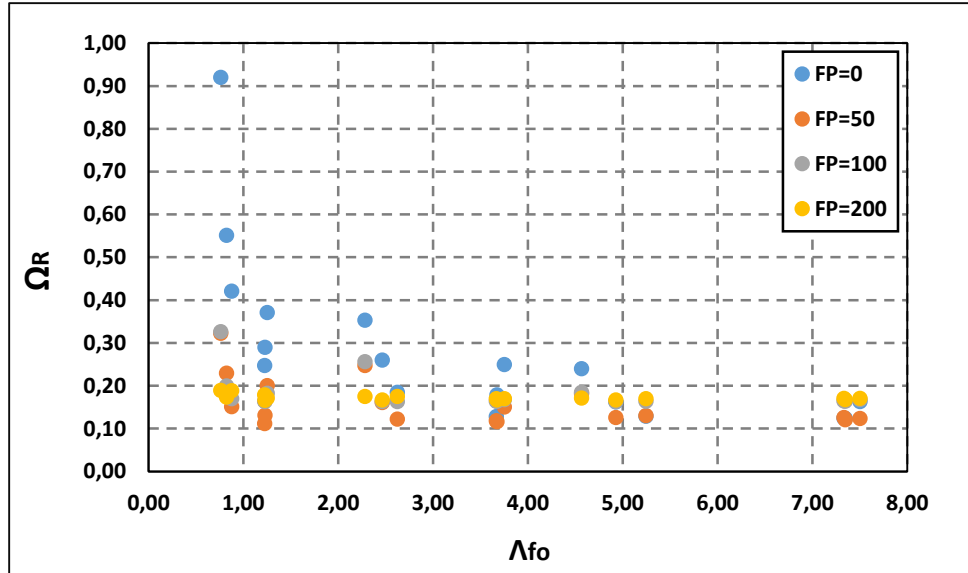
Τέλος, η επιρροή της γωνίας τριβής και της εδαφικής συνοχής είναι σημαντική μόνο για λόγο $H/D=4.0$ και ιδιαίτερα η επιρροή της συνοχής είναι εντονότερη στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$, τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία με σ_{cs}/p_o 0.04, 0.12 και 0.24 στο διάγραμμα $\Omega_{f,area}-\sigma_{cs}/p_o$ εκεί όπου η αύξηση της συνοχής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής. Αντίθετα, στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία με σ_{cs}/p_o 0.05, 0.14 και 0.29 η αύξηση της συνοχής δεν έχει ουσιαστικό αποτέλεσμα με τις τιμές της $\Omega_{f,area}$ να παραμένουν σταθερές κοντά στο 0.15. Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως για την καλύτερη παρακολούθηση και εποπτεία των παραπάνω διαγραμμάτων $\Omega_{f,area}-\sigma_{cs}$ και $\Omega_R-\sigma_{cs}$ γίνεται παράθεση του παραπάνω πίνακα 4-2 ο οποίος αντιστοιχεί στις τιμές των σ_{cs} τα αντίστοιχα ζεύγη c , ϕ της εκάστοτε ανάλυσης.

4.3 Επιρροή της εφαρμοζόμενης πίεσης υποστήριξης στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου, των ακτινικών συγκλίσεων καθώς και στον λόγο της αναμενόμενης υπερεκσκαφής.

Για να εξαχθεί η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για τα μεγέθη της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R , της αντίστοιχης αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ καθώς και για τον λόγο της αναμενόμενης υπερεκσκαφής που συντελείται μπροστά από το μέτωπο $(OER)_{calculated}$ έγιναν συσχετίσεις των παραπάνω μεγεθών με τον συντελεστή ευστάθειας του μετώπου Λ_{fo} , για τις οποίες ομαδοποιήθηκαν ουσιαστικά τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων, ανεξαρτήτως του λόγου βάθους υπερεκτεταμένων H/D , της γωνίας τριβής ϕ και της συνοχής c , μεγέθη τα οποία εμπεριέχονται στο συντελεστή Λ_{fo} . Η ομαδοποίηση αυτή έγινε αρχικά για κάθε διάμετρο και λόγο οριζόντιων ωθήσεων K_o ξεχωριστά, ενώ τα τελικά διαγράμματα συναρτήσεως του Λ_{fo} και για τα τρία προαναφερθέντα μεγέθη που αφορούν το σύνολο των αναλύσεων παραθέτονται στο τέλος του κεφαλαίου 4.

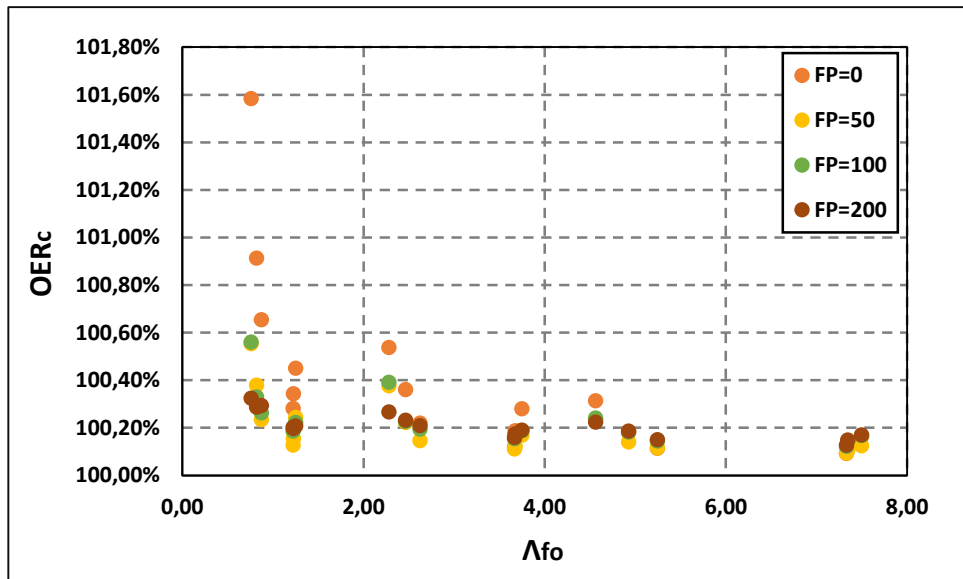
Αρχικά για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$, εξετάζοντας σε πρώτη φάση το μέγεθος της κανονικοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R παρατηρούμε αρχικά πως για ανυποστήριχτο μέτωπο ($Face\ Pressure=0$) τα αποτελέσματα των ακτινικών συγκλίσεων ακολουθούν μια φθίνουσα πορεία καθώς πηγαίνουμε σε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} άρα και σε πιο ευσταθή μέτωπα, ενώ για $\Lambda_{fo}>3$ δηλαδή για πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες η διασπορά που εμφανίζουν είναι σχετικά μικρή και κυμαίνεται από τιμές 0.25 μέχρι 0.12 περίπου. Επιπλέον οι περισσότερες τιμές σε εκείνη την περιοχή φαίνονται να συγκλίνουν με τις αντίστοιχες για πιέσεις υποστήριξης 50, 100 και 200kPa. Σημαντικό είναι και το γεγονός πως η μετάβαση από το ανυποστήριχτο μέτωπο σε υψηλότερες τιμές της πίεσης υποστήριξης έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις στην κανονικοποιημένη ακτινική σύγκλιση Ω_R κυρίως σε ασταθή μέτωπα, για συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{fo}<1$ ενώ και για τιμές του Λ_{fo} από 1.22-1.25 υπάρχουν μειώσεις οι οποίες ωστόσο είναι μικρότερες. Βλέπουμε επίσης πως για πιέσεις υποστήριξης 50, 100 και 200kPa οι κανονικοποιημένες ακτινικές συγκλίσεις παρουσιάζουν μια σχεδόν οριζόντια διασπορά με τα αποτελέσματα για τις συγκεκριμένες πιέσεις υποστήριξης να μην μεταβάλλονται ουσιαστικά καθώς προχωράμε σε όλο και καλύτερες γεωτεχνικές

συνθήκες, οπότε και η αύξηση της Face Pressure δείχνει να μην επηρεάζει ουσιαστικά τη μεταβολή των Ω_R για τιμές του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου μεγαλύτερες του 3. Για την καλύτερη εποπτεία των παραπάνω γίνεται παράθεση του διαγράμματος 4-5 στην επόμενη σελίδα, στο οποίο απεικονίζεται η αδιαστατοποιημένη ακτινική σύγκλιση Ω_R για τις διάφορες τιμές της πίεσης υποστήριξης που εξετάστηκαν στην επόμενη σελίδα.



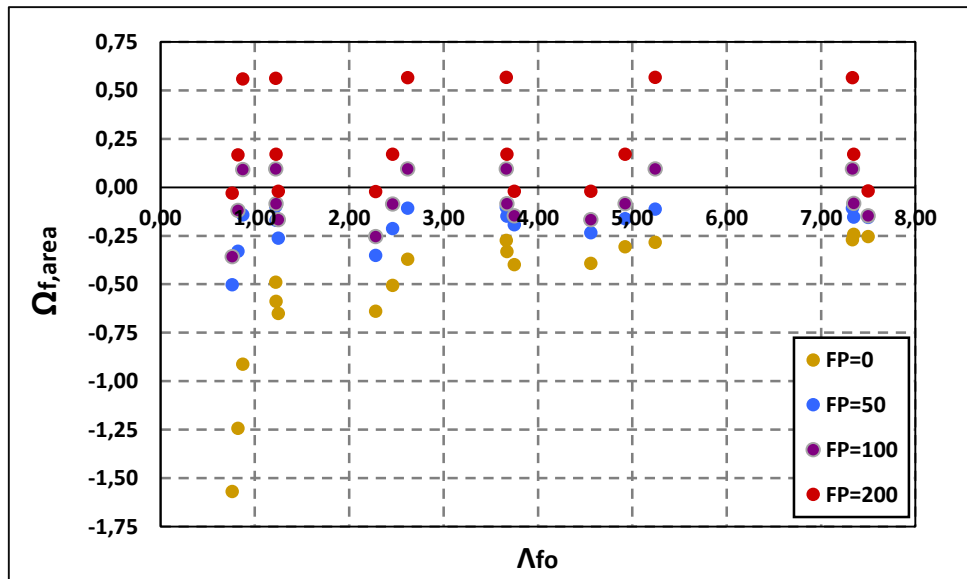
Γράφημα 4-5: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$.

Ανάλογη εικόνα με παραπάνω παρουσιάζει και το μέγεθος του λόγου της αναμενόμενης υπερεκσκαφής $(OER)_{calculated}$ όπου στο ανυποστήριχτο μέτωπο ο λόγος της υπολογιζόμενης εδαφικής μάζας λόγω των προσυγκλίσεων που συντελούνται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής προς τη θεωρητική εκσκαπτόμενη, ακολουθεί μια φθίνουσα κατανομή όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ευστάθειας άρα και πιο ευσταθή μέτωπα, ενώ για $\Lambda_{fo} > 3$ δηλαδή για πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες η παραπάνω διαφορά δεν ξεπερνάει το 0.3%. Και εδώ η αύξηση στην τιμή της πίεσης υποστήριξης οδηγεί σε μειώσεις στις τιμές του $(OER)_{calculated}$ κυρίως στα ασταθή μέτωπα για $\Lambda_{fo} < 1$ δηλαδή και λιγότερο για τιμές του Λ_{fo} λίγο πιο πάνω από τη μονάδα (1.22-1.25), ενώ και για πιέσεις υποστήριξης 50, 100 και 200kPa τα αποτελέσματα σε πλήρη αντιστοιχία με πριν ακολουθούν οριζόντιες διασπορές με πολύ μικρές μεταβολές του $(OER)_{calculated}$. Στο παρακάτω διάγραμμα 4-6 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή $(OER)_{calculated}$ για όλο το εύρος τιμών του συντελεστή Λ_{fo} που εξετάστηκαν, καθώς και για όλες τις τιμές πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.



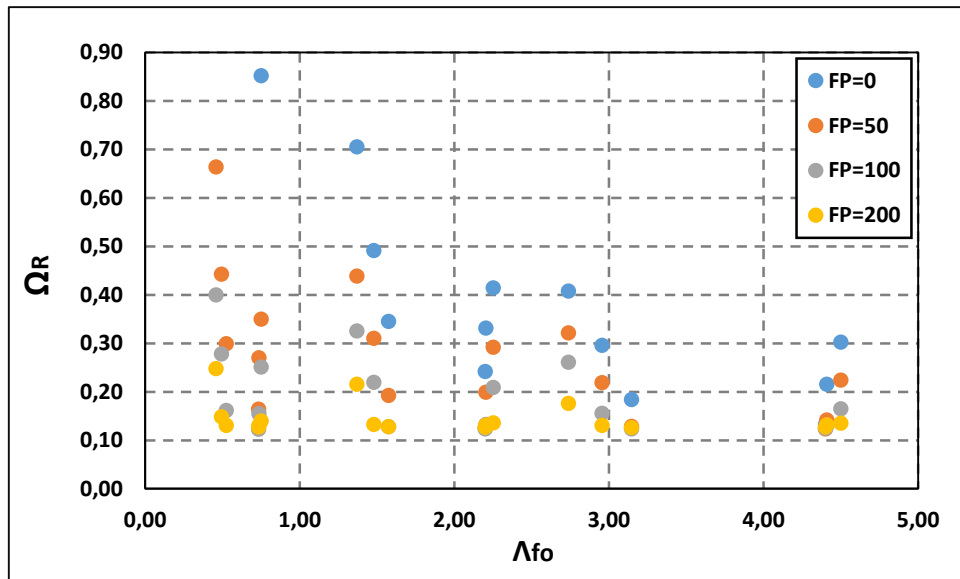
Γράφημα 4-6: Απεικόνιση του λόγου της αναμενόμενης υπερεκσκαφής ($OER_{calculated}$) συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $Ko=0.50$ και διάμετρο $D=6m$.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$, βλέπουμε πως για όλες τις τιμές του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} , αύξηση της πίεσης υποστήριξης συντελεί στη μείωση των μετακινήσεων του μετώπου με τις μειώσεις αυτές να είναι πιο έντονες σε ασταθή μέτωπα (για τιμές του συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{fo} < 1$) και κυρίως κατά τη μετάβαση από το ανυποστήριχτο μέτωπο σε μεγαλύτερες τιμές της πίεσης υποστήριξης. Παρατηρείται επιπλέον ότι υπάρχουν περιοχές στο διάγραμμα $\Omega_{f,area} - \Lambda_{fo}$ για τις οποίες οι διαφορές των αποτελεσμάτων μεταξύ των πιέσεων 50 και 100kPa είναι πολύ μικρές, ενώ για Face Pressure=200kPa υπάρχει ένα εύρος θετικών μετακινήσεων που αντιστοιχεί σε λόγο βάθους υπερκείμενων $H/D=1.5$ (αβαθείς σήραγγες) όπου η μετάβαση από Face Pressure=100kPa σε 200kPa αυξάνει σημαντικά τις εισπίψεις στα μέτωπα αυτά. Σημειώνεται τέλος πως στο διάγραμμα $\Omega_{f,area} - \Lambda_{fo}$ υπάρχουν και θετικές τιμές της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου που δηλώνουν ουσιαστικά εισπίεση του μετώπου και αντιστοιχούν σε λόγους βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=1.5$ και 2.5 καθώς για υφιστάμενη πίεση υποστήριξης ίση με 200kPa και οι δύο οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, $p_{ho}=90kPa$ για $H/D=1.5$ και $p_{ho}=150kPa$ για $H/D=2.5$ είναι μικρότερες από αυτήν. Στο διάγραμμα 4-7 της επόμενης σελίδας απεικονίζεται η αδιαστατοποιημένη μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής (θετική ή αρνητική) συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για όλες τις τιμές της πίεσης υποστήριξης που εξετάστηκαν.

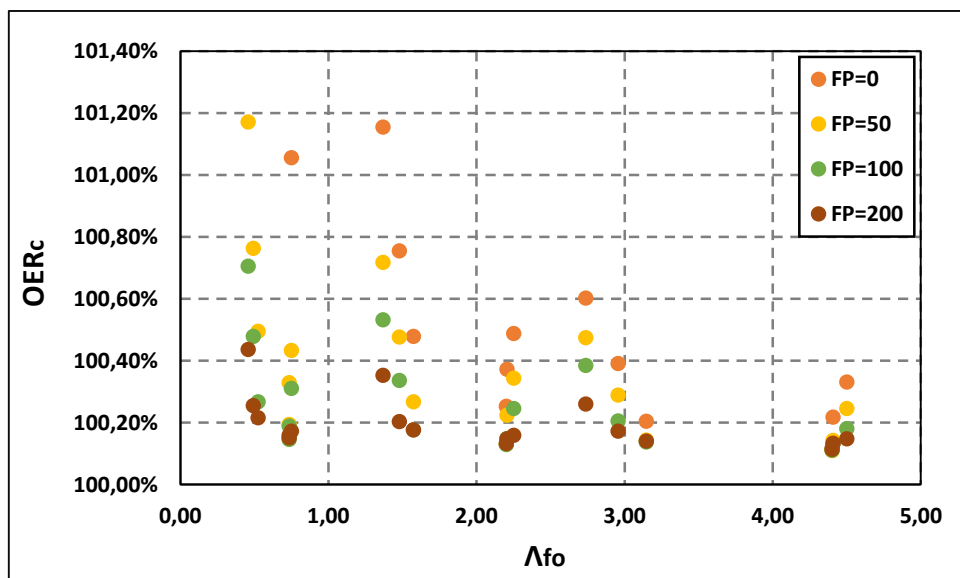


Γράφημα 4-7: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=6m$.

Για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0,50$ και διάμετρο $D=10m$ τώρα και σε αντίθεση με τη διάμετρο $D=6m$ στα αποτελέσματα της κανονικοποιημένης ακτινικής σύγκλισης, η επιρροή της πίεσης υποστήριξης είναι ορατή για όλο το εύρος τιμών του Λ_{fo} με αύξηση της Face Pressure να οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των Ω_R και άρα των ακτινικών συγκλίσεων. Για $\Lambda_{fo}>3$ όμως, δηλαδή για πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες οι μειώσεις στις τιμές των Ω_R αυξανόμενης της πίεσης υποστήριξης είναι σαφώς αρκετά μικρότερες. Παράλληλα για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο ίση με 50 και 100kPa τα αποτελέσματα εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση σε σχέση με πριν, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για Face Pressure=200kPa όπου η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι και πάλι σχεδόν οριζόντια χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές. Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και το διάγραμμα $(OER)_{calculated} - \Lambda_{fo}$ όπου και εδώ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης τείνει να μειώσει τις ακτινικές συγκλίσεις για όλα τα μέτωπα που εξετάστηκαν είτε ασταθή είτε ευσταθή και άρα την μετρούμενη εδαφική μάζα που πρόκειται να εκσκαφτεί, με τις μειώσεις αυτές να είναι πιο αισθητές για τιμές του συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{fo}<1$, για ασταθή μέτωπα δηλαδή καθώς και για ευσταθή μέτωπα με το συντελεστή ευστάθειας σε ένα εύρος τιμών από 1.37-1.57. Ακόμη, σε αντίθεση με το αντίστοιχο διάγραμμα για $K_o=0,50$ και $D=6m$ για πιέσεις υποστήριξης 50 και 100kPa τα δεδομένα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση, δεν συμβαίνει το ίδιο όμως και για Face Pressure=200kPa για την οποία οι τιμές του λόγου $(OER)_{calculated}$ δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές για όλες τις τιμές του Λ_{fo} . Στα παρακάτω διαγράμματα 4-8 και 4-9 που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη ακτινική σύγκλιση συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} καθώς ο λόγος της αναμενόμενης υπερεκσκαφής $(OER)_{calculated}$ συναρτήσει του ίδιου συντελεστή για όλες τις τιμές της πίεσης υποστήριξης που εξετάστηκαν.

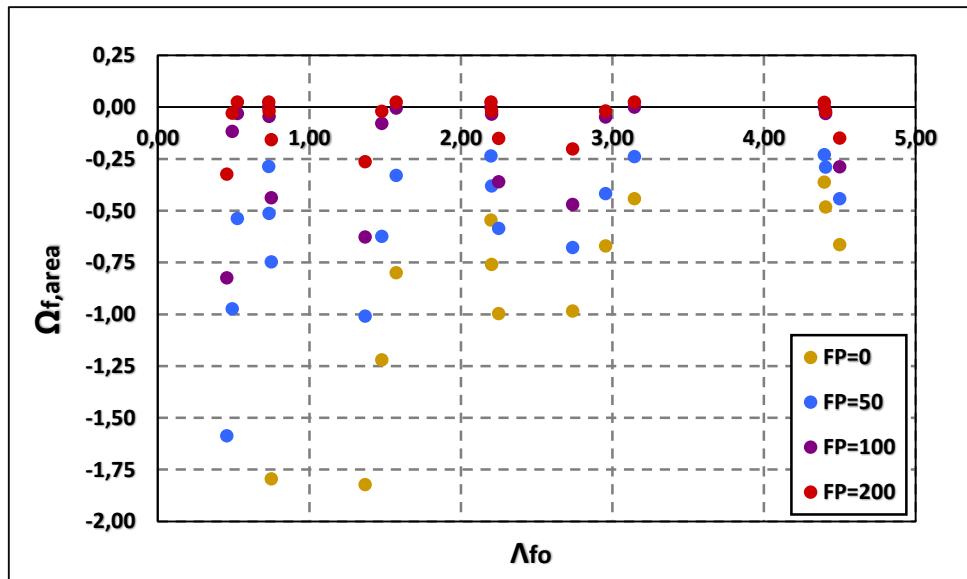


Γράφημα 4-8: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $Ko=0.50$ και διάμετρο $D=10m$.



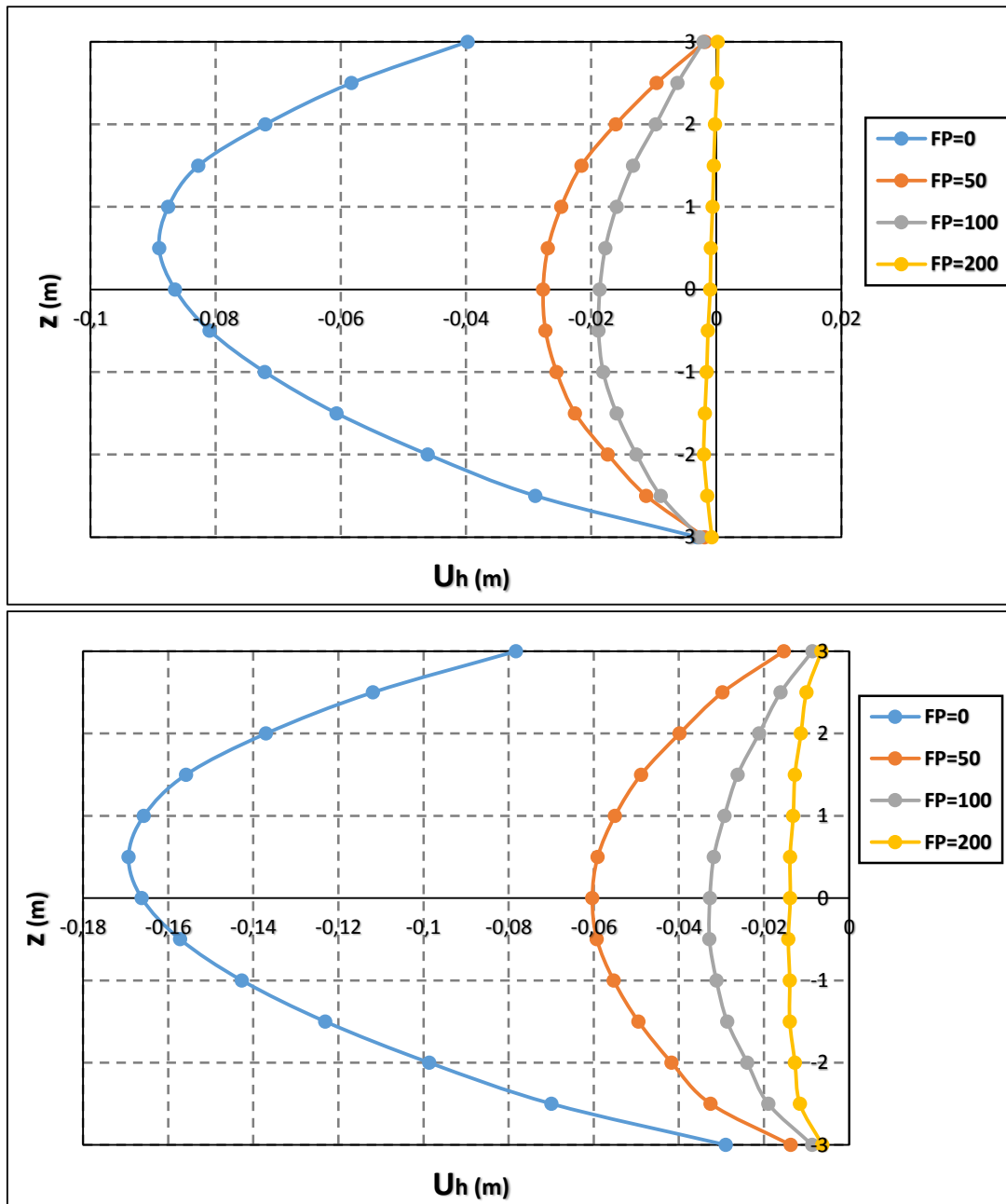
Γράφημα 4-9: Απεικόνιση του λόγου της αναμενόμενης υπερεκσκαφής ($OER_{calculated}$) συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $Ko=0.50$ και διάμετρο $D=10m$.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4-10 της επόμενης σελίδας για το μέγεθος της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$, αύξηση της Face Pressure δείχνει να οδηγεί σε μεγαλύτερες μειώσεις στις τιμές των μετακινήσεων του μετώπου για όλες τις τιμές του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα για $Ko=0.50$ και $D=6m$, ενώ δεν παρατηρούνται σημαντικές θετικές μετακινήσεις.



Γράφημα 4-10: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$ και διάμετρο $D=10m$.

Πηγαίνοντας σε μεγαλύτερο λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_o=1.50$ παρατηρούμε πως η μορφή των διαγραμμάτων $\Omega_{f,area} - \Lambda_{fo}$, $\Omega_R - \Lambda_{fo}$ καθώς και $OER_c - \Lambda_{fo}$ είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα διαγράμματα για $K_o=0.50$ και για τις 2 διαμέτρους με ορατή διαφορά στα εύρη των τιμών των τριών παραπάνω μεγεθών, τα οποία αυξάνονται κάτι που είναι απολύτως λογικό καθώς λόγω μεγαλύτερου εντατικού πεδίου, τόσο η οριζόντια p_{ho} όσο και η μέση γεωστατική τάση $p_{o,m}$ αυξάνονται σε σχέση με τις αντίστοιχες για $K_o=0.50$, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τιμές τόσο στις ακτινικές συγκλίσεις όσο και στις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής. Ακόμη, για να υπάρχει μια εικόνα της ποσοτικοποίησης των μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής, στην επόμενη σελίδα και συγκεκριμένα στο διάγραμμα 4-11 παρουσιάζονται δύο μηκοτομικά προφίλ των μετακινήσεων που συνέβησαν σε αριθμητικά μοντέλα με εδαφική συνοχή $c=10kPa$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4kPa$, για διάμετρο $D=6m$ και λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$. Η σύγκριση γίνεται και για τους δύο λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_o που εξετάστηκαν. Για $K_o=0.50$, παρατηρούμε πως στο ανυποστήρικτο μέτωπο η μέγιστη τιμή της εδαφικής εξώθησης εμφανίζεται $0.5m$ πάνω από το κέντρο της σήραγγας με τιμή περίπου στα $9cm$ και όλα αυτά όταν η οριζόντια γεωστατική τάση είναι ίση με $p_{ho}=240kPa$. Για $K_o=1.50$, όπου ουσιαστικά το οριζόντιο γεωστατικό πεδίο τριπλασιάζεται με την οριζόντια γεωστατική τάση να είναι ίση με $p_{ho}=720kPa$, οπότε και λόγω μεγαλύτερης αποτόνωσης, η μέγιστη τιμή εδαφικής μετακίνησης περίπου διπλασιάζεται με τιμή κοντά στα $17cm$. Επιπλέον και για τα τους δύο λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_o που εξετάστηκαν παρατηρούμε πως η στέψη της σήραγγας δείχνει να επηρεάζεται περισσότερο σε σχέση με τη βάση, αναφερόμενοι πάντα στο ανυποστήρικτο μέτωπο. Ενδεικτικά, για $K_o=0.50$ η οριζόντια μετακίνηση στη στέψη για Face Pressure=0 είναι περίπου $3.9cm$, ενώ στη βάση είναι πρακτικά μηδενική. Για $K_o=1.50$ η οριζόντια εξώθηση στην στέψη διπλασιάζεται σε σχέση με πριν, ενώ η μετακίνηση στη βάση αγγίζει τα $3cm$ περίπου.

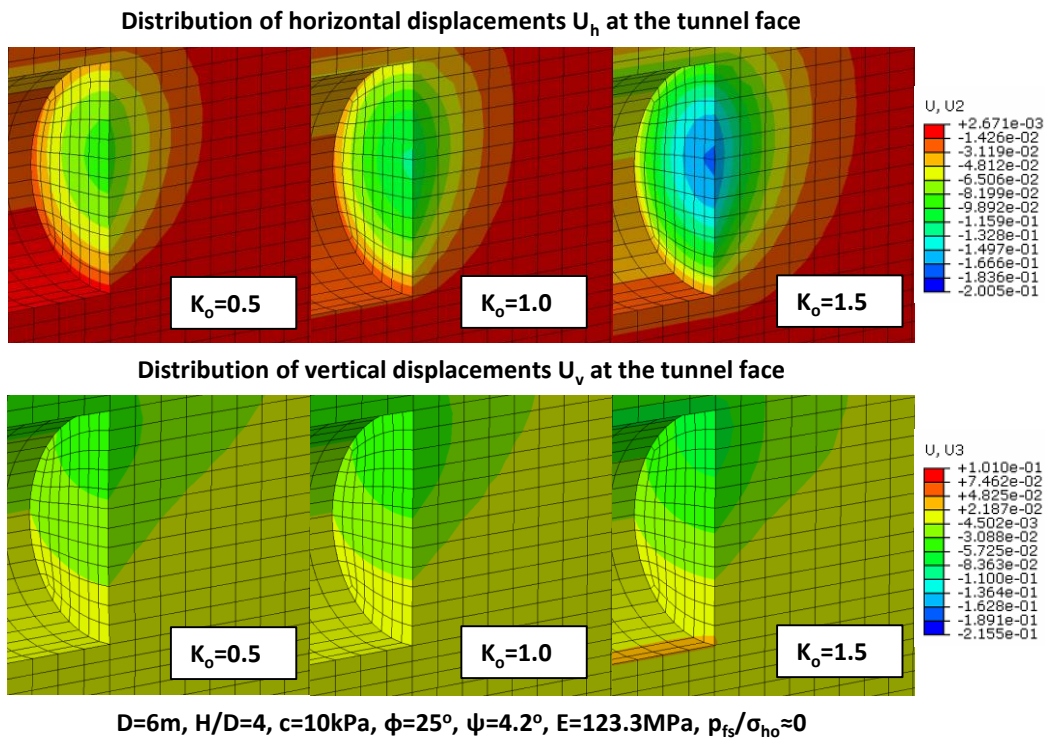


Γράφημα 4-11: Απεικόνιση δύο μηκοτομικών προφίλ εξωθήσεων σε υλικό με εδαφική συνοχή $c=10\text{kPa}$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4\text{kPa}$ για λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$, διάμετρο $D=6\text{m}$ για $K_o=0.50$ (πάνω) και $K_o=1.50$ (κάτω) για όλες τις πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν.

Πηγαίνοντας τώρα σε μεγαλύτερες τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο, παρατηρούμε πως η μείωση της Face Pressure είναι περισσότερο καθοριστική για τη μείωση των εδαφικών εξωθήσεων για $K_o=1.50$, παρά για $K_o=0.50$, ενώ βλέπουμε επί πρόσθετα πως για τιμές της πίεσης υποστήριξης 50, 100 και 200kPa αντίστοιχα οι μετακινήσεις στη βάση και στη στέψη της σήραγγας συγκλίνουν μεταξύ τους και για τα 2 K_o που εξετάστηκαν. Παράλληλα όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες πιέσεις τα προφίλ των εδαφικών εξωθήσεων γίνονται πιο συμμετρικά σε σχέση με τα αντίστοιχα στο ανυποστήριχτο μέτωπο, με τις μέγιστες μετακινήσεις να εμφανίζονται πλέον στο κέντρο της σήραγγας. Τέλος για πίεση υποστήριξης ίση με 200kPa και για $K_o=0.50$ αρχικά όπου η

οριζόντια γεωστατική τάση είναι ίση με $p_{ho}=240\text{kPa}$ οι εδαφικές μετακινήσεις καθ' ύψος της σήραγγας στο σύνολο τους προσεγγίζουν το μηδέν, ενώ και για $K_o=1.50$, για τριπλασιασμό δηλαδή της οριζόντιας γεωστατικής τάσης, η μέγιστη μετακίνηση που εντοπίζεται στον άξονα της σήραγγας και περιορίζεται στα 1.4cm περίπου.

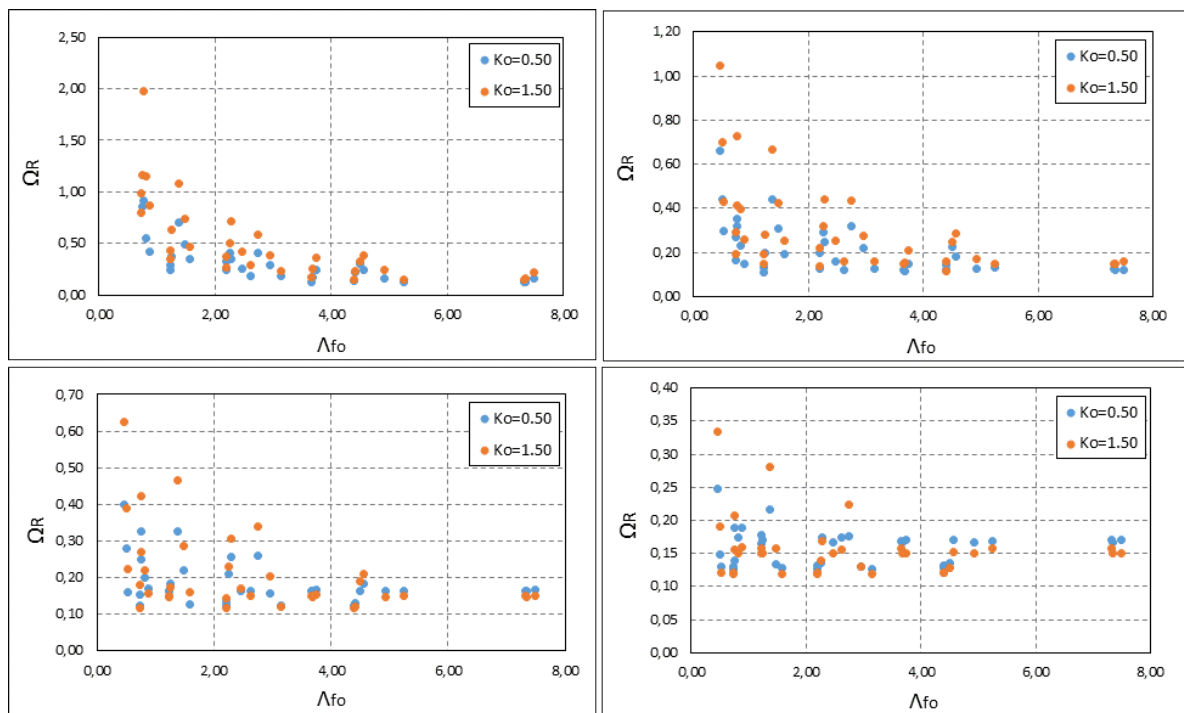
Οι οριζόντιες καθώς και οι κατακόρυφες μετακινήσεις που συνέβησαν στο μέτωπο εκσκαφής σε αριθμητικά μοντέλα με εδαφική συνοχή $c=10\text{kPa}$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4\text{kPa}$, για διάμετρο $D=6\text{m}$ και λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$ για λόγους οριζόντιων ωθήσεων $K_o=0.50$, 1.0 και 1.50 αντίστοιχα, έτσι όπως εξήχθησαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα Abaqus φαίνονται στην εικόνα 4.5. Αναφορικά με τις κατακόρυφες μετακινήσεις τα προφίλ μετακινήσεων και για τους τρεις λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_o παρουσιάζουν παρόμοια μορφή με τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις να κυμαίνονται μεταξύ 3.1cm-8.3cm. Αντίθετα για τις οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου, αύξηση του συντελεστή K_o και άρα αύξηση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης στην εξεταζόμενη διεύθυνση ισοδυναμεί με αύξηση των τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων, οι οποίες στο συγκεκριμένο προσομοίωμα για $K_o=1.50$ συσσωρεύονται στο κέντρο της σήραγγας με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν περίπου τα 20cm, ενώ σε αντίθεση με τα προσομοιώματα για $K_o=0.50$ και 1.0 σημαντικές μετακινήσεις έχουμε σε ολη την επιφάνεια του μετώπου.



Εικόνα 4-5: Κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής για λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=4.0$, διάμετρο $D=6\text{m}$ και μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο σε υλικό με εδαφική συνοχή $c=10\text{kPa}$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και $\sigma_{cs}=31.4\text{kPa}$.

4.4 Επιρροή του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_o στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των μετακινήσεων του μετώπου και των ακτινικών συγκλίσεων

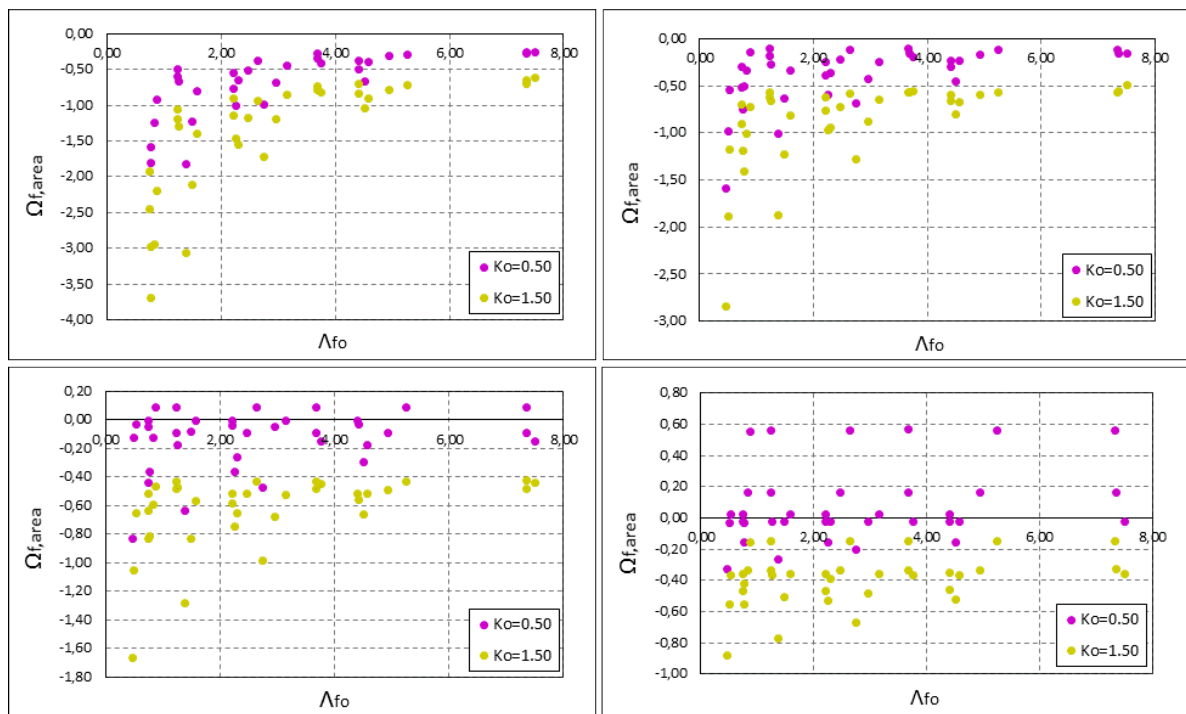
Για να εξαχθεί η επιρροή του λόγου των οριζόντιων ωθήσεων K_o στα μεγέθη της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R καθώς και στην αδιαστατοποιημένη μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ έγιναν συσχετίσεις των παραπάνω μεγεθών με τον συντελεστή ευστάθειας του μετώπου Λ_{fo} και για τις δύο εξεταζόμενες τιμές του K_o . Ομαδοποιήθηκαν ουσιαστικά τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων για κάθε πίεση υποστήριξης στο μέτωπο ξεχωριστά, ανεξαρτήτως του λόγου βάθους υπερκειμένων H/D , της διαμέτρου, της γωνίας τριβής ϕ και της συνοχής c , μεγέθη τα οποία εμπεριέχονται στο συντελεστή Λ_{fo} . Εν συνεχεία και για κάθε πίεση υποστήριξης από αυτές που εξετάστηκαν πλοταρίστηκαν τα διαγράμματα $\Omega_{f,area} - \Lambda_{fo}$ και $\Omega_R - \Lambda_{fo}$ τα οποία παραθέτονται συγκεντρωτικά παρακάτω.



Γράφημα 4-12: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης ακτινικής σύγκλισης Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για τους δύο εξεταζόμενους λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_o για τιμές της πίεσης υποστήριξης $FP=0$ (πάνω αριστερά) $FP=50\text{kPa}$ (πάνω δεξιά) $FP=100\text{kPa}$ (κάτω αριστερά) και $FP=200\text{kPa}$ (κάτω δεξιά).

Παρατηρώντας τα τέσσερα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ουσιαστικά πως η επιρροή του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_o έχει βαρύτητα για συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} και συγκεκριμένα οι σημαντικότερες αυξήσεις στις τιμές των αδιαστατοποιημένων ακτινικών συγκλίσεων με την αύξηση του K_o λαμβάνουν χώρα κυρίως σε ασταθή μέτωπα, για τιμές δηλαδή του συντελεστή ευστάθειας μικρότερες της μονάδας, με τις αυξήσεις αυτές να μειώνονται όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες τιμές. Όλα αυτά για $\Lambda_{fo} \leq 3$ καθώς από εκεί και πέρα έχοντας ουσιαστικά πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες η αύξηση του K_o δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο στη μεταβολή των ακτινικών συγκλίσεων για όλες τις τιμές της πίεσης υποστήριξης. Σε ότι αφορά τις μετακινήσεις του

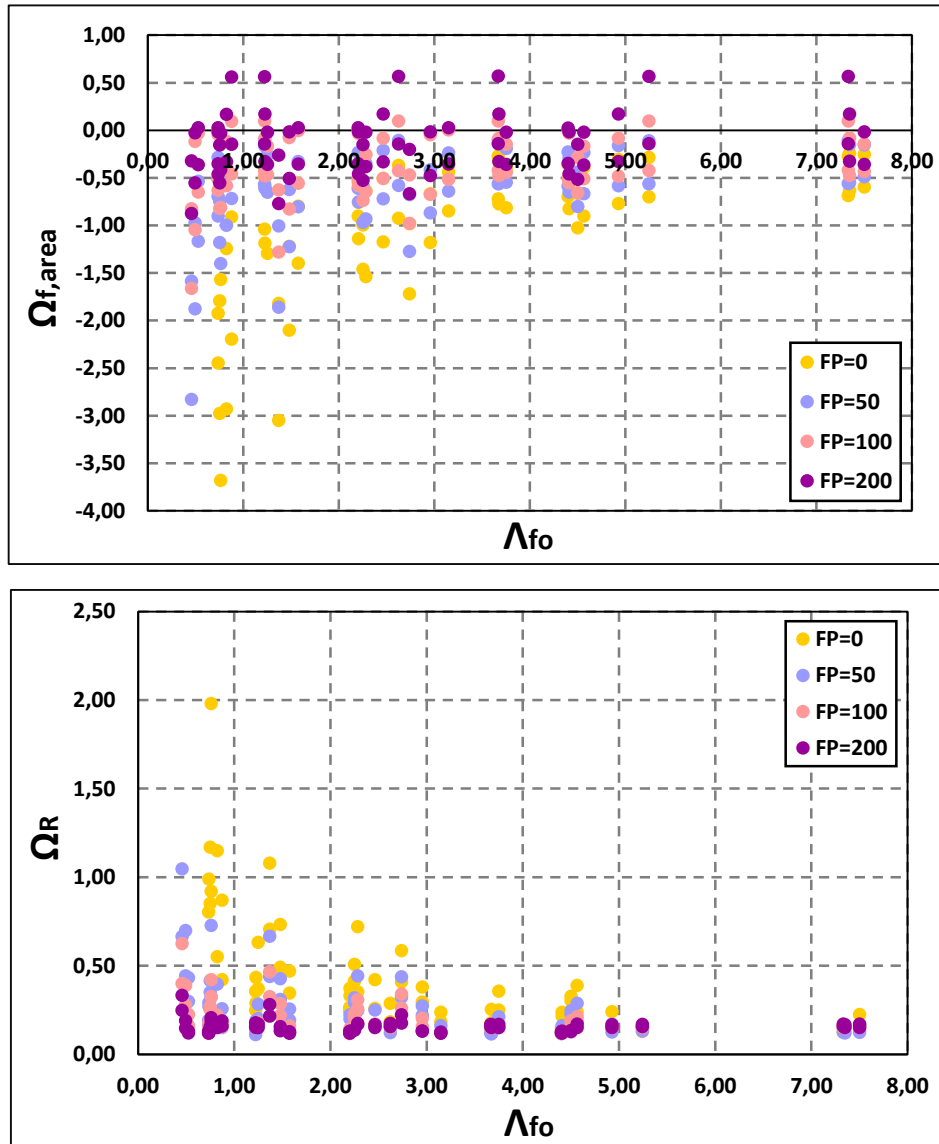
μετώπου εκσκαφής παρατηρείται πως ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες τιμές της πίεσης υποστήριξης και συγκεκριμένα για Face Pressure=100 και 200kPa η αύξηση του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων αυξάνει σημαντικά τις εδαφικές μετακινήσεις για όλο το εύρος τιμών του Λ_{fo} . Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα σταθερό εύρος πιέσεων μετώπου, λόγω του γεγονότος ότι στη μηχανοποιημένη εκσκαφή σιράγγων οι πιέσεις μετώπου κυμαίνονται από 1-2bars (100-200 kPa). Συνεπώς δεν ακολουθήθηκε η συνήθης πρακτική επιβολής ενός ποσοστού της οριζόντιας γεωστατικής πίεσης όπου για κάθε αλλαγή ύψους υπερκείμενων και (α =σταθ) θα άλλαζε το φορτίο επιβολής ($FP=\alpha \cdot \sigma_{ho}=\alpha \cdot (\gamma \cdot H \cdot Ko)$). Σε τέτοια περίπτωση οι μετακινήσεις που θα περιμέναμε θα ήταν σαφώς μικρότερες, ενώ τώρα έχοντας επιλέξει σταθερές τιμές της Face Pressure βλέπουμε πως με την αύξηση του Ko αυξάνονται σημαντικά οι εξωθήσεις του μετώπου εκσκαφής.



Γράφημα 4-13: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για τους δύο εξεταζόμενους λόγους οριζόντιων ωθήσεων Ko για τιμές της πίεσης υποστήριξης $FP=0$ (πάνω αριστερά) $FP=50$ kPa (πάνω δεξιά) $FP=100$ kPa (κάτω αριστερά) και $FP=200$ kPa (κάτω δεξιά).

4.5 Διεύρυνση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_f

Αφού παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια οι επιρροές του λόγου βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο H/D , της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο καθώς και του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_o στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη των ακτινικών συγκλίσεων και των μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής, βασικό ζητούμενο είναι η διεύρυνση του συντελεστή ευστάθειας του μετώπου με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να συμπεριλάβει και την ασκούμενη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο. Παρουσιάζονται αρχικά τα διαγράμματα $\Omega_{f,area} - \Lambda_{fo}$ και $\Omega_R - \Lambda_{fo}$ έτσι όπως προέκυψαν για το σύνολο των αναλύσεων για όλες τις τιμές πίεσης υποστήριξης που εξετάστηκαν.



Γράφημα 4-14: Απεικόνιση της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου (πάνω) καθώς και της αντίστοιχης ακτινικής σύγκλισης (κάτω) συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_{fo} για το σύνολο των αναλύσεων για όλες τις πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν.

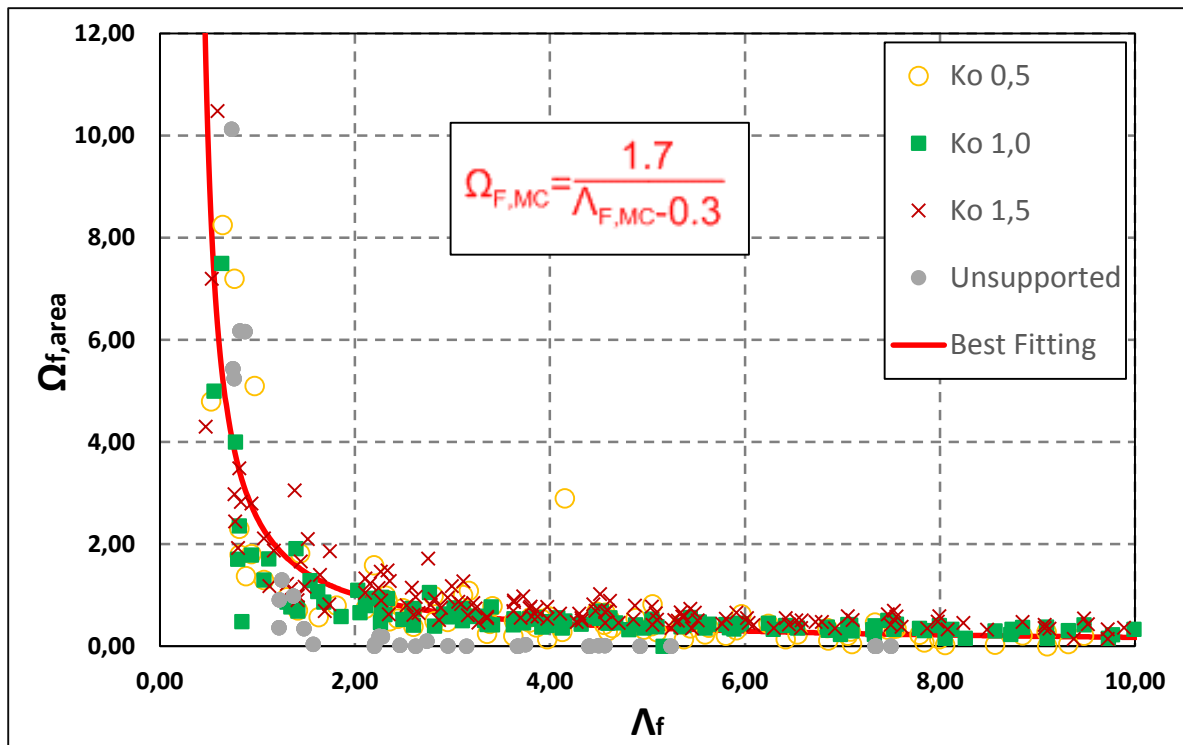
Ο νέος συντελεστής ευστάθειας του μετώπου Λ_f που περιέχει μια τροποποίηση από την αρχική του έκφραση Λ_{f0} όπως εκείνη παρουσιάστηκε στη διδακτορική έρευνα του κ. Προυντζόπουλου (2012) παρουσιάζεται στην εξίσωση 4.7 που ακολουθεί.

$$\Lambda_{F,MC} = \frac{5.25cN_{\varphi}^a}{\gamma H^{1-b} D^b} + 8 \frac{H}{D} \left(\frac{P_{fp}}{p_{h0}} \right)^{(1+0.1H/D)} \quad \text{or} \quad \Lambda_{F0} + 8 \frac{H}{D} \left(\frac{P_{fp}}{p_{h0}} \right)^{(1+0.1H/D)} \quad \text{Εξίσωση 4.6}$$

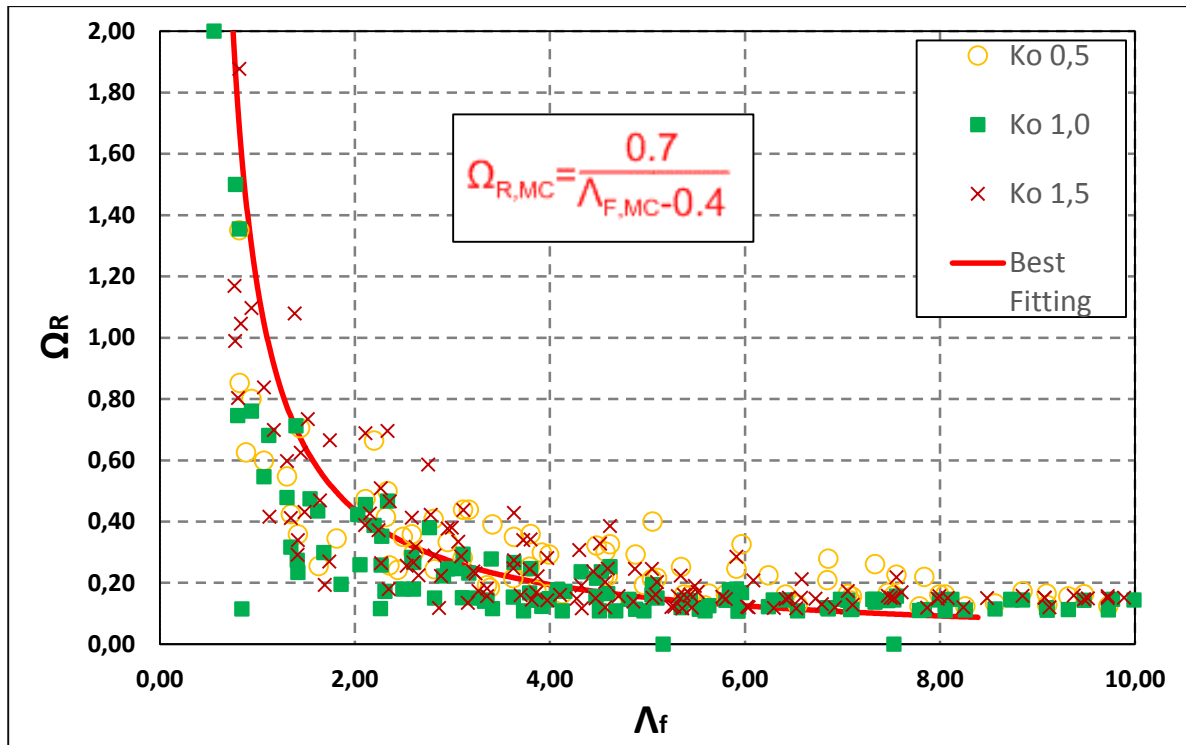
Όπου:

- p_{fp} : Η ασκούμενη πίεση υποστήριξης στο κέντρο της σήραγγας
- p_{h0} : Η αρχική οριζόντια γεωστατική τάση στον άξονα της σήραγγας

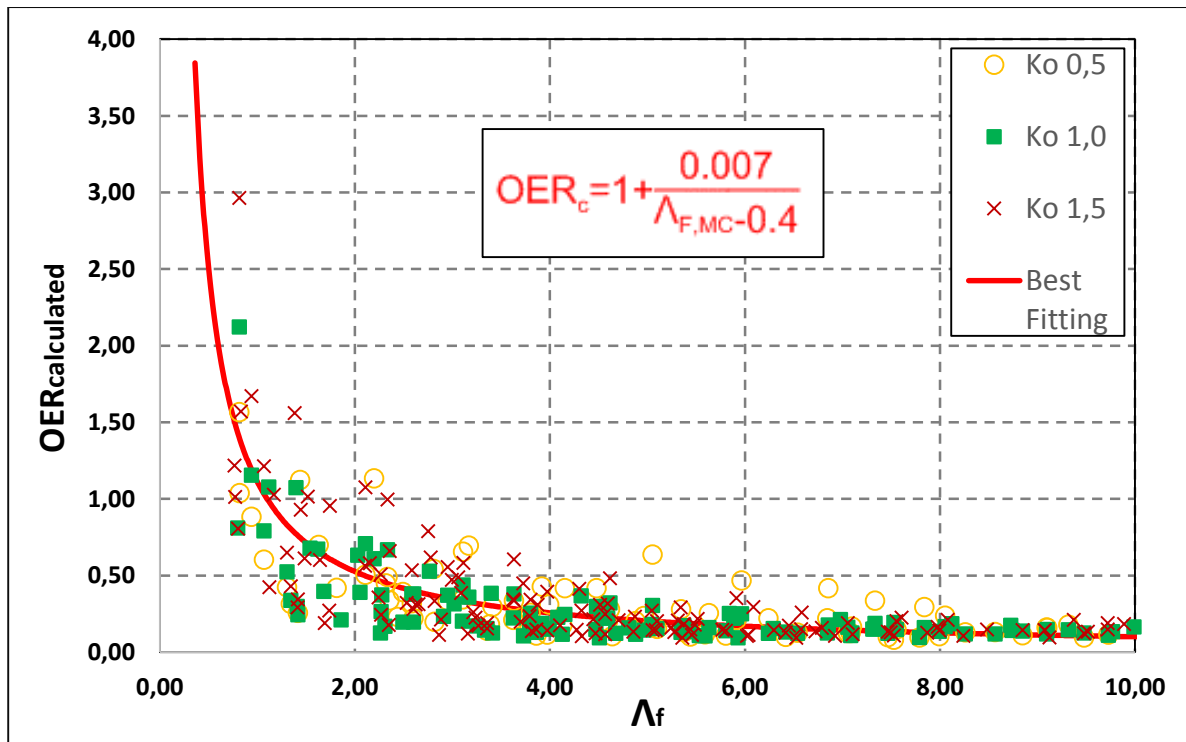
Είναι προφανές από την εξίσωση 4.7 έτσι όπως περιγράφηκε παραπάνω πως για μηδενική πίεση υποστήριξης, η οποία ισοδυναμεί με ανυποστήρικτο μέτωπο πως η έκφραση του συντελεστή ευστάθειας εξισώνεται με το δείκτη Λ_{f0} . Η καθοριστική τιμή που αποφασίζει αν το μέτωπο της σήραγγας είναι ευσταθές ή ασταθές ανεξαρτήτως του βάθους H της σήραγγας και του τύπου του εδάφους (χαμηλή ή υψηλή γωνία τριβής) είναι και εδώ η $\Lambda_F=1$. Με τη νέα αυτή έκφραση του συντελεστή ευστάθειας και εξετάζοντας το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων βλέπουμε πως μόνο για ανυποστήρικτο μέτωπο έχουμε τιμές του $\Lambda_F < 1$, ενώ σε μεγάλες τιμές της πίεσης υποστήριξης οι εξωθήσεις μειώνονται σημαντικά και για τους δύο λόγους οριζόντιων ωθήσεων K_0 . Ακολουθούν τα διαγράμματα $\Omega_{f,area} - \Lambda_f$ καθώς και $\Omega_R - \Lambda_f$ ενώ παράλληλα δείχνεται με κόκκινο χρώμα η προτεινόμενη συσχέτιση που ακολουθήθηκε.



Γράφημα 4-15: Αδιαστατοποιημένη μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_0 .



Γράφημα 4-16: Αδιαστατοποιημένη ακτινική σύγκλιση Ω_R συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_o .



Γράφημα 4-17: Απεικόνιση του αναμενόμενου λόγου υπερεκκαφής $OER_{calculated}$ συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιων ωθήσεων K_o .

Σημειώνεται πως στα παραπάνω διαγράμματα εμφανίζονται και τιμές των μεγεθών με τα οποία ασχοληθήκαμε, που αντιστοιχούν σε λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_0=1.0$, οι οποίες προέρχονται από παλαιότερη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της συναδέλφου Κοτσαμίδα Σπυριδούλας (Μάρτιος 2014). Παρατηρούμε ότι η αδιαστατοποιημένη σχέση του Λ_f 'πλοτάρει' τα σημεία των αποτελεσμάτων των ζητούμενων μεγεθών ($\Omega_{f,area}$ και Ω_R) μία νοητή γραμμή (κόκκινη). Συνεπώς μπορούμε να ισχυριστούμε πως με τη βοήθεια αυτών των νομογραφημάτων ένας μελετητής γνωρίζοντας τα γεωμετρικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά μιας σήραγγας διάνοιξης θα μπορεί να επιλέξει την πίεση του μετώπου αυτή η οποία θα πληροί τις προδιαγραφές του έργου τόσο για τις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής όσο και για τις συγκλίσεις.

5 Συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν υδρομηχανικά φαινόμενα (Coupled Analyses)

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι συσχετίσεις της αδιαστατοποιημένης μετακίνησης του μετώπου $\Omega_{F,MC}$, της αδιαστατοποιημένης σύγκλισης $\Omega_{R,MC}$, καθώς και του αναμενόμενου λόγου υπερεκσκαφής $OER_{C,MC}$ συναρτήσει των γεωτεχνικών παραμέτρων, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σήραγγας και της υφιστάμενης κάθε φορά πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Οι παραπάνω συσχετίσεις αναφέρονται συγκεκριμένα σε ξηρές συνθήκες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση του νερού, κάτι το οποίο δεν αποτελεί μια ρεαλιστική προσέγγιση για κατασκευή σήραγγων σε αστικά περιβάλλοντα, καθώς σε ελάχιστες μόνο εξαιρέσεις ο άξονας της σήραγγας περνάει εξ' ολοκλήρου πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Οι μετακινήσεις του εδάφους (ακτινικές συγκλίσεις, μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής) παρουσιάζουν τελείως διαφορετική απόκριση σε σύγκριση με τις ξηρές συνθήκες καθώς λόγω ύπαρξης διάφορων υδρομηχανικών φαινομένων η συνολική παραμόρφωση του εδάφους επηρεάζεται. Επιπλέον, σε συζευγμένες αναλύσεις η εδαφική υδατοπερατότητα και ο ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα παραγόμενα αποτελέσματα μιας και ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων είναι καθοριστικός για τον χαρακτηρισμό των εδαφικών συνθηκών ως στραγγισμένες ή αστράγγιστες αντίστοιχα. Για εδάφη με μεγάλες τιμές της εδαφικής υδροπερατότητας και συμπίεστότητας (sands, gravels) η εκτόνωση της πίεσης των πόρων πραγματοποιείται γρηγορότερα σε σχέση με εδάφη με χαμηλότερες τιμές υδροπερατότητας όπως είναι οι άργιλοι και οι ιλυώδεις άμμοι, όπου για ταχείες φορτίσεις η εκτόνωση των πιέσεων των πόρων πραγματοποιείται πολύ πιο αργά. Οι συγκεκριμένου τύπου αναλύσεις επίσης είναι αρκετά χρονοβόρες καθώς η επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος πραγματοποιούνται ταυτόχρονα.

Οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι είναι και εδώ οι ίδιες σχέση με τις ξηρές αναλύσεις έτσι όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι στις συζευγμένες αναλύσεις υπεισέρχονται ακόμα τρεις παράγοντες σε σχέση με πριν. Αυτοί είναι: α) ο δείκτης κενών e (Void Ratio) για τον οποίο λήφθηκε η τιμή 0.70, β) ο δείκτης κορεσμού S_r (%) όπου για κορεσμένες συνθήκες η τιμή του S_r είναι 100% και γ) η ξηρή πυκνότητα του εδάφους που λαμβάνεται ίση με $\rho_{\text{ξηρό}}=1.588 \text{ Mgr/m}^3$ ενώ αντίστοιχα η κορεσμένη είναι $\rho_{\text{sat}}=2 \text{ Mgr/m}^3$. Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες των προσομοιωμάτων για συζευγμένες αναλύσεις, αυτές είναι ουσιαστικά οι ίδιες με αυτές των αντίστοιχων μοντέλων για ξηρές συνθήκες (βλέπε 3.5: Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας), με μόνη διαφορά εδώ ότι στους κόμβους της επιφάνειας των συγκεκριμένων μοντέλων οι πιέσεις των πόρων θέτονται εξ' αρχής μηδενικές και ακολουθούν μια τριγωνική κατανομή με την αύξηση του βάθους και υπολογίζονται από τη σχέση: $\text{Pore Pressure}=\gamma_w \cdot H$, όπου γ_w το ειδικό βάρος του νερού των πόρων και H το ύψος υπερκείμενων μετρημένο από την επιφάνεια.

Η πίεση του μετώπου προσομοιώθηκε με ένα κατανεμημένο φορτίο στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής, όπως ακριβώς έγινε και στις ξηρές συνθήκες προκειμένου να μπορεί να υπάρξει συσχέτιση μεταξύ των δύο ομάδων αναλύσεων. Στις ξηρές συνθήκες όπου οι ολικές τάσεις ισούνται με τις ενεργές η ολική πίεση του μετώπου είναι ταυτόχρονα και ενεργή. Στις συζευγμένες αναλύσεις ωστόσο, υπάρχει και ενεργή αλλά και πίεση πόρων στο μέτωπο εκσκαφής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται να υποστηριχθεί το μέτωπο με ένα κατανεμημένο φορτίο (ολικών τάσεων), δίχως κάποια συνοριακή συνθήκη πιέσεων πόρων στο μέτωπο, αφήνοντας ουσιαστικά ελεύθερη τη ροή του νερού από το μέτωπο.

Για τις συγκεκριμένες συζευγμένες αναλύσεις που πρόκειται να αναφερθούν στη συνέχεια παρ' όλα αυτά η πίεση που επιβλήθηκε στο μέτωπο εκσκαφής είναι ορθογωνική, προκειμένου να μπορέσουμε να τις συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα προσομοιώματα για ξηρές συνθήκες τα οποία έχουν εξ'αρχής ορθογωνική κατανομή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Αξίζει να αναφερθεί εδώ πως δεν επιβλήθηκαν στο μέτωπο εκσκαφής συνοριακές συνθήκες αναφορικά με τις υφιστάμενες πιέσεις των πόρων (Pore Boundaries), όπου δηλαδή ουσιαστικά αφήνουμε το νερό των πόρων να στραγγίξει. Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι (συνοχή, γωνία τριβής και λόγος του Poisson) παραμένουν ίδιες σε σχέση με τις ξηρές συνθήκες, ενώ το μέτρο Ελαστικότητας και σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται από τη σχέση: $E=500 \cdot s_u$ (Bowles 1997) όπου s_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους υπολογίζεται από τις εξισώσεις 5.1, 5.2 που ακολουθούν συνδυάζοντας το κριτήριο Mohr-Coulomb με την παράμετρο του Skempton, η οποία υπεισέρχεται στον όρο $\Delta\sigma_1$, στην πρόσθετη κατακόρυφη τάση που απαιτείται έτσι ώστε να αστοχήσει ένα εδαφικό στοιχείο υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η παράμετρος του Skempton στην περίπτωση μας τίθεται ίση με 1/3. Ο υπολογισμός της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους και της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma_1$ φαίνεται αναλυτικότερα στις εξισώσεις 5.1 και 5.2.

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma'_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} - \sigma'_1}{\frac{1}{3}(N_\phi - 1) + 1} \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

$$c_u = \frac{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση 5.1, για τον προσδιορισμό της επιπρόσθετης κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma_1$ που απαιτείται για την αστοχία ενός εδαφικού στοιχείου υπό αστράγγιστες συνθήκες, υπεισέρχονται οι ποσότητες σ'_1 και σ'_3 , οι κατακόρυφες και οριζόντιες ενεργές τάσεις αντίστοιχα, που στην περίπτωση των συζευγμένων αναλύσεων δεν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες ολικές τάσεις. Ως εκ τούτου, επειδή είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες ολικές τάσεις, αναμένεται να υπάρξει μεταβολή στο μέτρο Ελαστικότητας. Στο παρόν Κεφάλαιο, στόχος είναι η μελέτη και πραγματοποίηση συγκεκριμένων συζευγμένων αναλύσεων με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για δύο τιμές εδαφικής υδατοπερατότητας, με τιμές $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ και $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ αντίστοιχα. Αναφορικά με την πρώτη τιμή της ks , έγινε προσπάθεια να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις με $ks_1=5 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$, χωρίς αποτέλεσμα καθώς ο αλγόριθμος των πεπερασμένων στοιχείων δεν συνέκλινε. Οι εδαφικές μετακινήσεις λόγω ροής δημιουργούσαν εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες οδήγησαν στη μη

πραγματοποίηση αυτών των αναλύσεων. Οι συγκεκριμένες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με ασκούμενη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο 0 και 50kPa, για λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=2.5$ και διάμετρο $D=10m$, ενώ οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι (συνοχή, γωνία τριβής, λόγος Poisson) παραμένουν ίδιες σε σχέση με τις αντίστοιχες αναλύσεις για ξηρές συνθήκες.

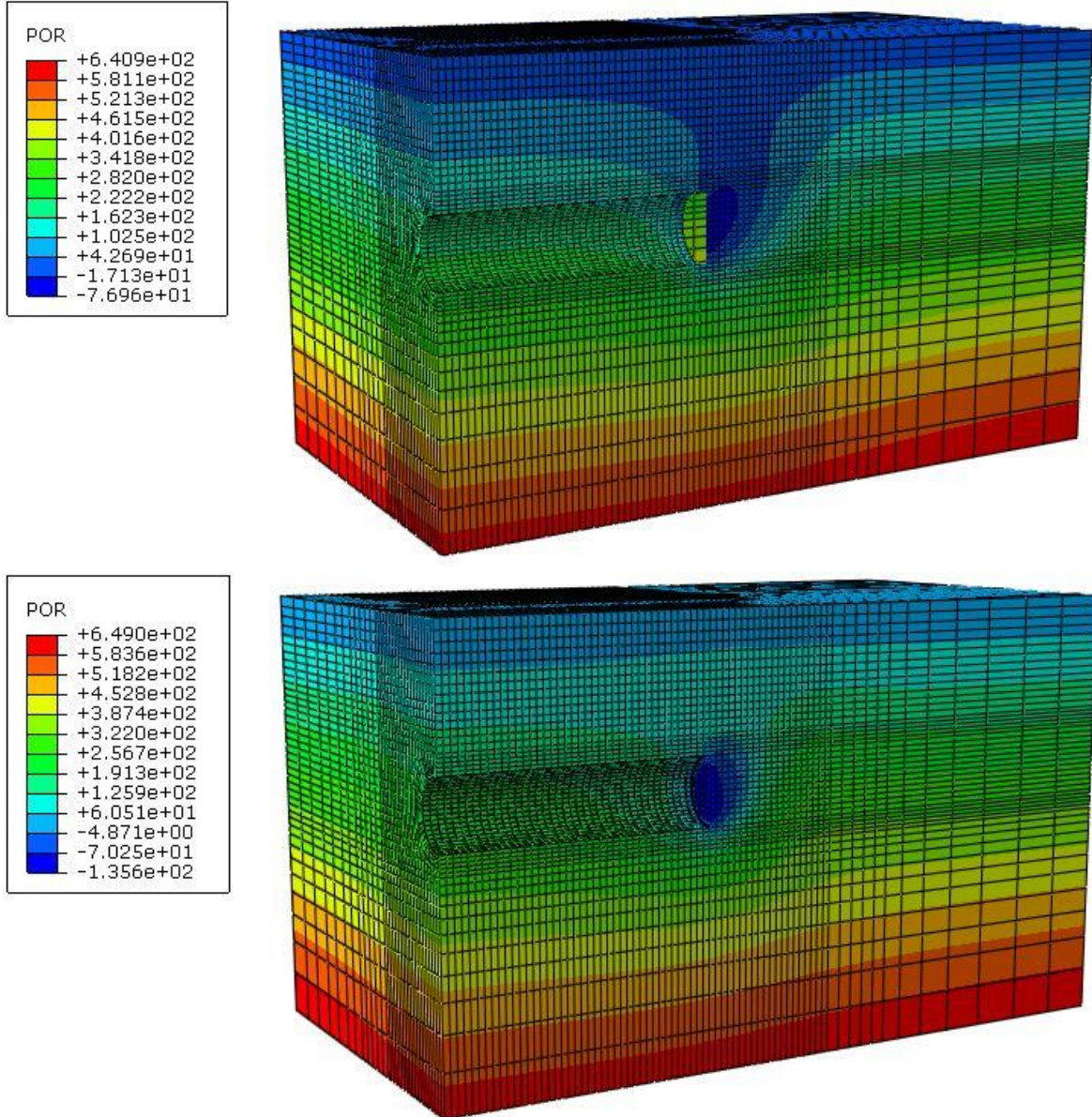
Πίνακας 5-1: Παράμετροι των συζευγμένων αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους

Παράμετροι αναλύσεων	Έυρος τιμών
Διάμετρος σήραγγας: D (m)	10
Βάθος υπερκείμενων/Διάμετρος σήραγγας: (H/D)	2.5
Ειδικό κορεσμένο βάρος: γ_{sat} (kN/m ³)	20
Συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων: K_0	0.5
Συνοχή: c (kPa)	10, 30, 60
Γωνία τριβής: ϕ (ο)	25, 35
Γωνία διαστολικότητας: δ (ο)	4.2 , 5.8
Πίεση υποστήριξης μετώπου: FP (kPa)	0,50
Δείκτης Κενών (Void Ratio)	0.70
Βαθμός Κορεσμού (Sr)	100%
Ξηρή πυκνότητα του εδάφους: $\rho_{ξηρό}$ (Mg/m ³)	1.588
Εδαφική υδατοπερατότητα (m/s)	$5 \cdot 10^{-7}$, $5 \cdot 10^{-8}$

Στον παραπάνω Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των παραπάνω αναλύσεων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 24 αναλύσεις, 12 με $ks_1=5 \cdot 10^{-7}m/s$ και 12 με $ks_2=5 \cdot 10^{-8} m/s$, όπου για κάθε δωδεκάδα αναλύσεων οι μισές εκτελέστηκαν με πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ίση με 0kPa (ανυποστήρικτο μέτωπο) και οι άλλες μισές με 50kPa. Στόχος της σύγκρισης αυτής είναι να εξεταστεί η επιρροή της ύπαρξης νερού στα παραμορφωσιακά μεγέθη $\Omega_{F,MC}$, $\Omega_{R,MC}$ και OER_c τα οποία θα συσχετιστούν με το συντελεστή ευστάθειας Λ_f (που λαμβάνει την επιρροή της πίεσης υποστήριξης). Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως οι συντελεστές Λ_{f0} και Λ_f χρησιμοποιούνται μόνο για ξηρές συνθήκες, απλά θέλοντας να ξεχωρίσουμε ξεχωριστά το φαινόμενο των συζευγμένων αναλύσεων και να τις συσχετίσουμε με κάποιο τρόπο με τις αντίστοιχες ξηρές επιλέξαμε τους συντελεστές Λ_{f0} και Λ_f χωρίς αυτό βέβαια να είναι απαραίτητα σωστό. Πρόταση για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι να γίνει ξεχωριστή παραμετρική διερεύνηση και για αυτού του τύπου αναλύσεις, όπως έγινε για τις αναλύσεις σε ξηρές συνθήκες έτσι όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

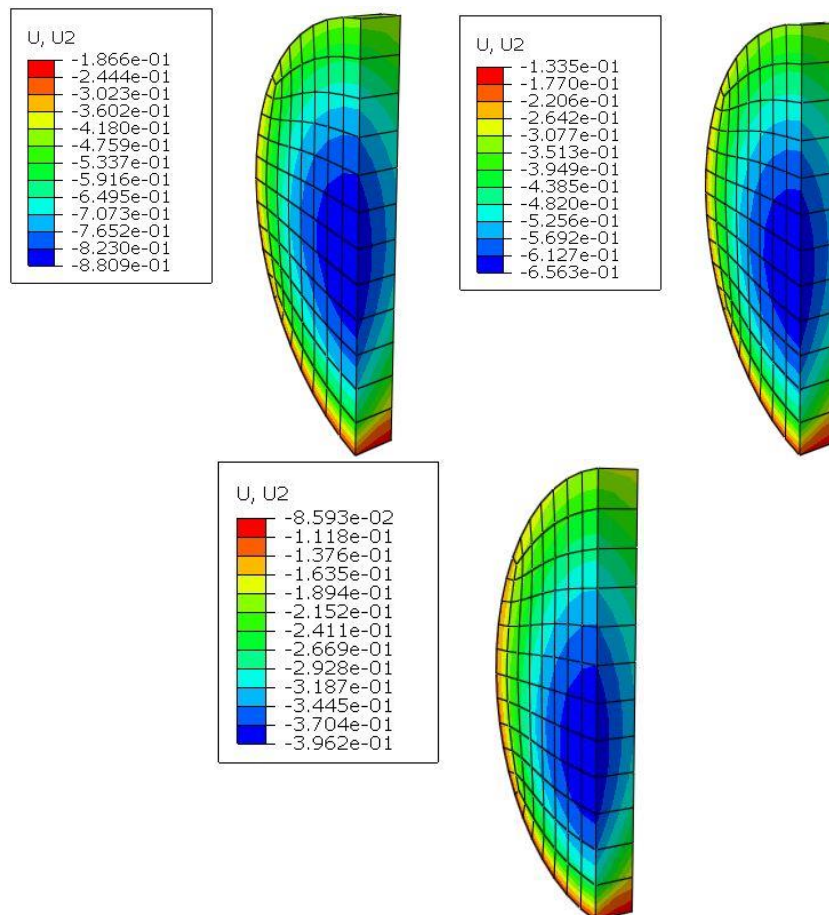
5.2 Παρουσίαση εδαφικών προσομοιωμάτων

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο γίνεται παράθεση εδαφικών προσομοιωμάτων καθώς και αποκομμένων εδαφικών προφίλ κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής, με ίδια βασικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά για τις δύο διαφορετικές τιμές εδαφικής υδατοπερατότητας που αναφέρθηκαν, προκειμένου να υπάρξει μια καλύτερη εποπτεία τόσο των πιέσεων των πόρων, όσο και των μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής. Αρχικά στην εικόνα 5-2 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά για δύο κάνναβους πεπερασμένων στοιχείων, ο πρώτος για $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ και ο δεύτερος αντίστοιχα για $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$, οι κατανομές των πιέσεων πόρων.

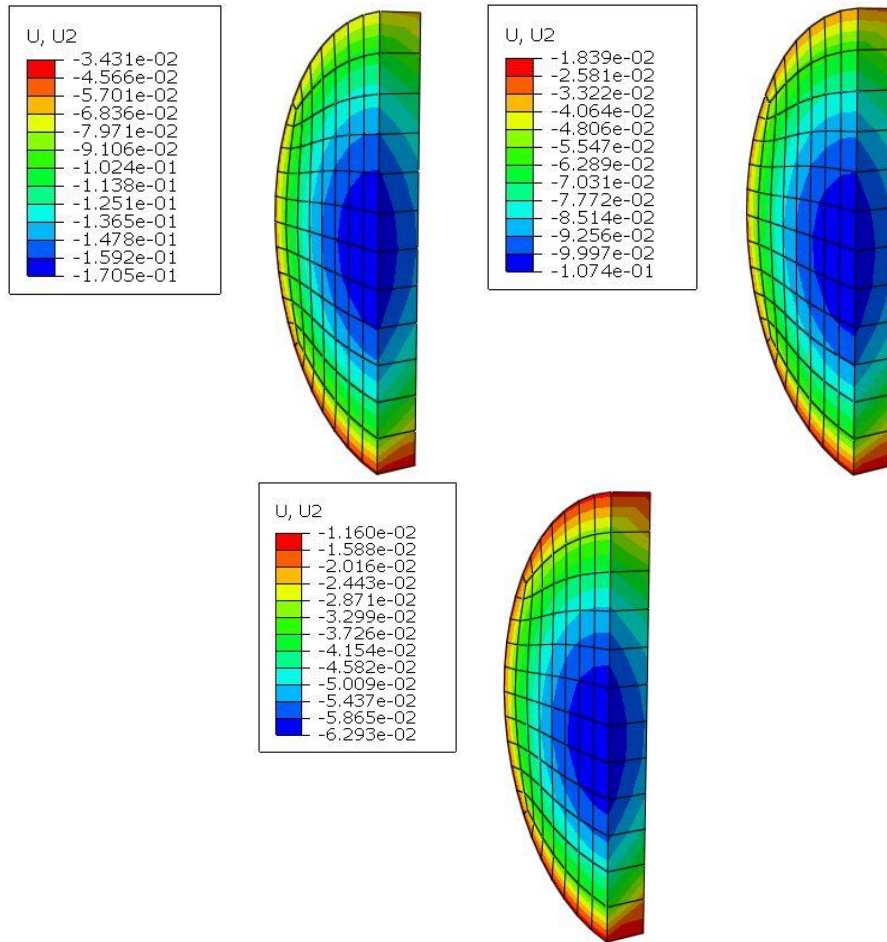


Εικόνα 5-1: Απεικόνιση της κατανομής των πιέσεων πόρων για εδαφικά προσομοιώματα με συνοχή $c=10 \text{kPa}$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ (πάνω) και $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ (κάτω).

Έυλογα, η αστράγγιστη συμπεριφορά του εδάφους ενισχύεται με τη μείωση της εδαφικής υδατοπερατότητας. Είναι χαρακτηριστικό πως στον πιο διαπερατό σχηματισμό (Εικόνα 5-2 πάνω) φαίνεται χαρακτηριστικά η υδατική ροή προς το μέτωπο (στράγγιση), δημιουργώντας δυνάμεις διήθησης (seepage forces) και συνεπώς παραμορφώσεις. Από την άλλη μεριά στον αδιαπέρατο σχηματισμό η υδατική ροή περιορίζεται κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Είναι χαρακτηριστικό ότι και στους δύο σχηματισμούς αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων στο μέτωπο λόγω του φαινομένου της μύζησης (suction), ωστόσο στο σχηματισμό με $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ το φαινόμενο ανάπτυξης υποπίεσεων είναι πιο έντονο (-135kPa). Βλέπουμε επίσης στο συγκεκριμένο μοντέλο πως σε όλη την περιοχή του μετώπου εκσκαφής, οι πιέσεις που αναπτύσσονται έχουν αρνητικό πρόσημο. Όπως θα δούμε και παρακάτω η ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων σε αδιαπέρατους σχηματισμούς, έχει σημαντικές συνέπειες στις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής, καθώς φαίνεται να ενεργεί ευεργετικά για τις όποιες εξωθήσεις τείνουν να αναπτυχθούν στο μέτωπο εκσκαφής. Στις Εικόνες 5-3, 5-4 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές εξώθησης έτσι όπως λήφθηκαν από το τελευταίο βήμα εκσκαφής σε εδαφικά υλικά με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και για τις δύο τιμές εδαφικής υδατοπερατότητας που εξετάστηκαν.

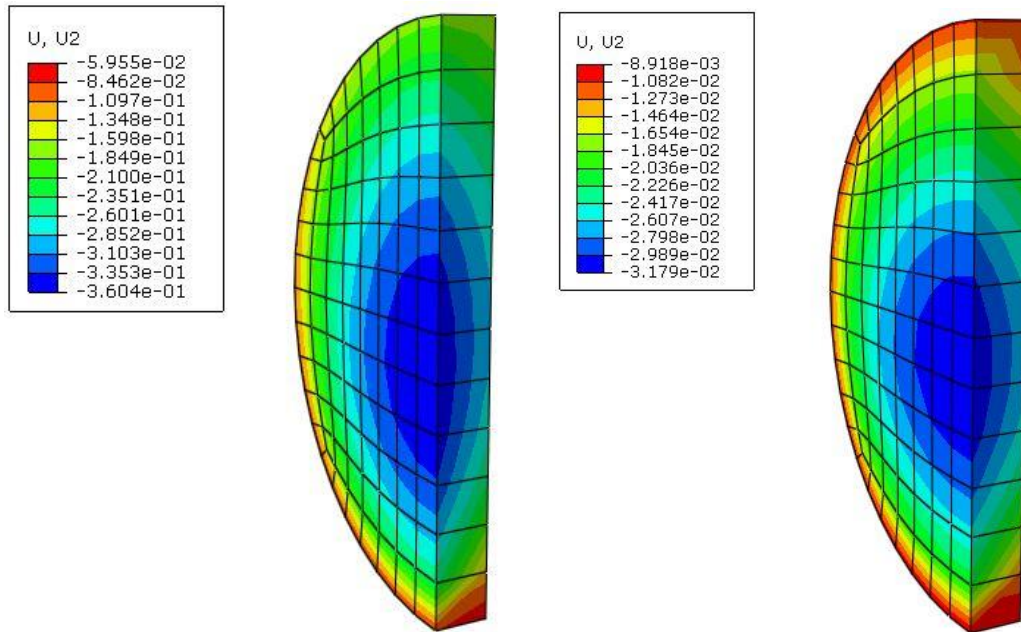


Εικόνα 5-2: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10\text{m}$ με λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για τιμές της εδαφικής συνοχής $c=10\text{kPa}$ (πάνω αριστερά), $c=30\text{kPa}$ (πάνω δεξιά), $c=60\text{kPa}$ (κάτω), μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και για τιμή εδαφικής υδατοπερατότητας ίση με $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$.

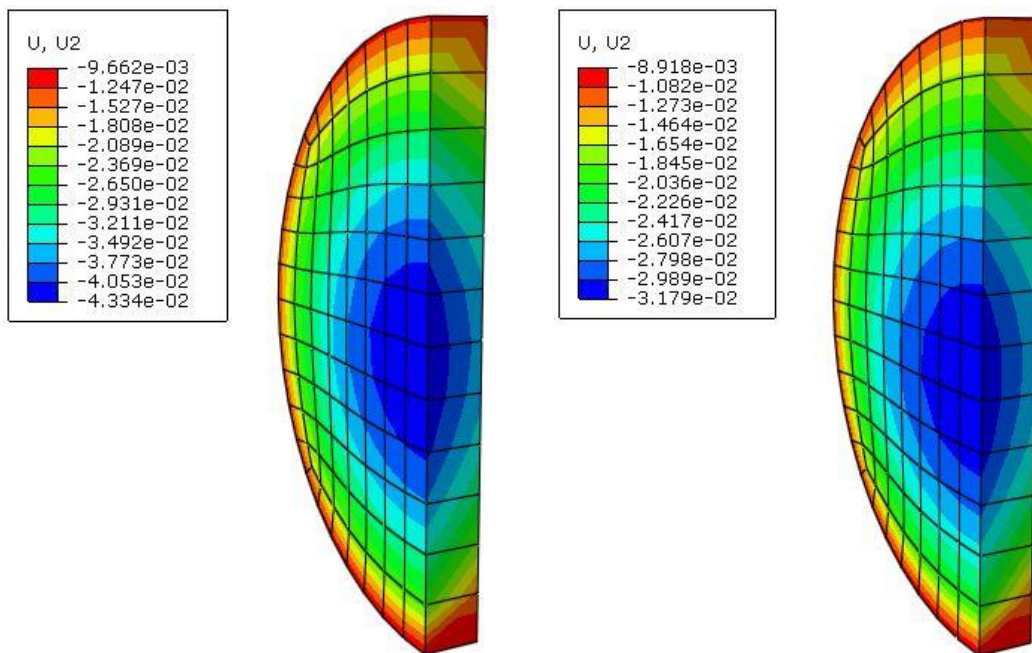


Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10\text{m}$ με λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ για τιμές της εδαφικής συνοχής $c=10\text{kPa}$ (πάνω αριστερά), $c=30\text{kPa}$ (πάνω δεξιά), $c=60\text{kPa}$ (κάτω), μηδενική πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και για τιμή εδαφικής υδατοπερατότητας ίση με $ks_1=5 \cdot 10^{-8}\text{m/s}$.

Παρατηρείται πως στα αριθμητικά προσομοιώματα με $ks_1=5 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$ η αύξηση της εδαφικής συνοχής με σταθερή τη γωνία τριβής ϕ παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των εδαφικών μετακινήσεων, καθώς όσο αυξάνεται η συνοχή οι τιμές των εδαφικών εξωθήσεων ολοένα και μειώνονται. Συγκεκριμένα για $c=10\text{kPa}$ μέγιστη τιμή είναι 0.88m , ενώ για μεγαλύτερες τιμές της εδαφικής συνοχής, για $c=30$ και 60kPa η μέγιστη τιμή μετακίνησης στο μέτωπο είναι 0.65m και 0.40m περίπου. Αντίθετα, για τον πιο αδιαπέρατο σχηματισμό, για $ks_2=5 \cdot 10^{-8}\text{m/s}$ η αύξηση της συνοχής επηρεάζει την εξώθηση του μετώπου αλλά σε μικρότερο βαθμό από πριν ($ks_1=5 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$), καθώς η ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων συγκρατεί σε μεγαλύτερο βαθμό το μέγεθος της εδαφικής εξώθησης. Σημαντικό ζητούμενο επίσης για το σύνολο των συζευγμένων αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι και η επιρροή της κάθε πίεσης υποστήριξης στις παραμορφώσεις του μετώπου εκσκαφής και για τις δύο τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας που εξετάστηκαν. Στις παρακάτω εικόνες 5-5, 5-6 παρουσιάζονται για $ks_1=5 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$ και $ks_2=5 \cdot 10^{-8}\text{m/s}$ αντίστοιχα οι μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής για κάθε πίεση υποστήριξης ξεχωριστά από αυτές που εξετάστηκαν σε εδάφη με γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ και εδαφική συνοχή $c=60\text{kPa}$.



Εικόνα 5-4: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10\text{m}$ με λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=35^\circ$, εδαφική συνοχή $c=60\text{kPa}$ για τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο $\text{Face Pressure}=0$ (αριστερά) και $\text{Face Pressure}=50\text{kPa}$ (δεξιά) για $ks_1=5 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$.



Εικόνα 5-5: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στα αριθμητικά προσομοιώματα σήραγγας διαμέτρου $D=10\text{m}$ με λόγο βάθους υπερκείμενων προς διάμετρο $H/D=2.5$, γωνία τριβής $\phi=35^\circ$, εδαφική συνοχή $c=60\text{kPa}$ για τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο $\text{Face Pressure}=0$ (αριστερά) και $\text{Face Pressure}=50\text{kPa}$ (δεξιά) για $ks_1=5 \cdot 10^{-8}\text{m/s}$.

Γίνεται αντιληπτό πως από τις παραπάνω εικόνες, πως για εδαφική υδατοπερατότητα $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$, η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στις παραμορφώσεις του μετώπου εκσκαφής εντονότερη από ότι για $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$. Συγκεκριμένα παρατηρείται πως στα αριθμητικά προσομοιώματα με $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ η αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής φαίνεται να μειώνει έως και μια τάξη μεγέθους τις μέγιστες εδαφικές εξωθήσεις που εμφανίζονται στο μέτωπο εκσκαφής. Χαρακτηριστικά, για πίεση υποστήριξης ίση με 0kPa η μέγιστη τιμή εξώθησης του μετώπου είναι περίπου 0.36m, όταν για αυξημένη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο 50kPa η αντίστοιχη τιμή είναι 0.03m περίπου. Αντίθετα στα αριθμητικά προσομοιώματα με $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ η μεταβολή της πίεσης υποστήριξης δεν έχει ουσιώδες αποτέλεσμα στην εξέλιξη των παραμορφώσεων του μετώπου, καθώς για πίεση υποστήριξης ίση με 0kPa η μέγιστη τιμή εξώθησης του μετώπου είναι περίπου 0.04m, και η αντίστοιχη τιμή για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο 50kPa είναι 0.03m περίπου. Είναι χαρακτηριστικό λοιπόν ότι σε πιο αδιαπέρατους σχηματισμούς, η ανάπτυξη υδατικών υποπιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής λειτουργεί ευεργετικά μειώνοντας την εξώθηση του μετώπου και σύμφωνα με τις αναλύσεις που έχουν παρατεθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία φαίνεται να είναι κρίσιμότερος μηχανισμός ευστάθειας σε σύγκριση με την πίεση του μετώπου. Αξίζει όμως να υπογραμμιστεί ότι στις αναλύσεις έχει γίνει μια απλοποιητική παραδοχή για τη συνοριακή συνθήκη των πιέσεων πόρων στο μέτωπο, όπου υπάρχει η θεώρηση της πλήρους στράγγισης του μετώπου εκσκαφής.

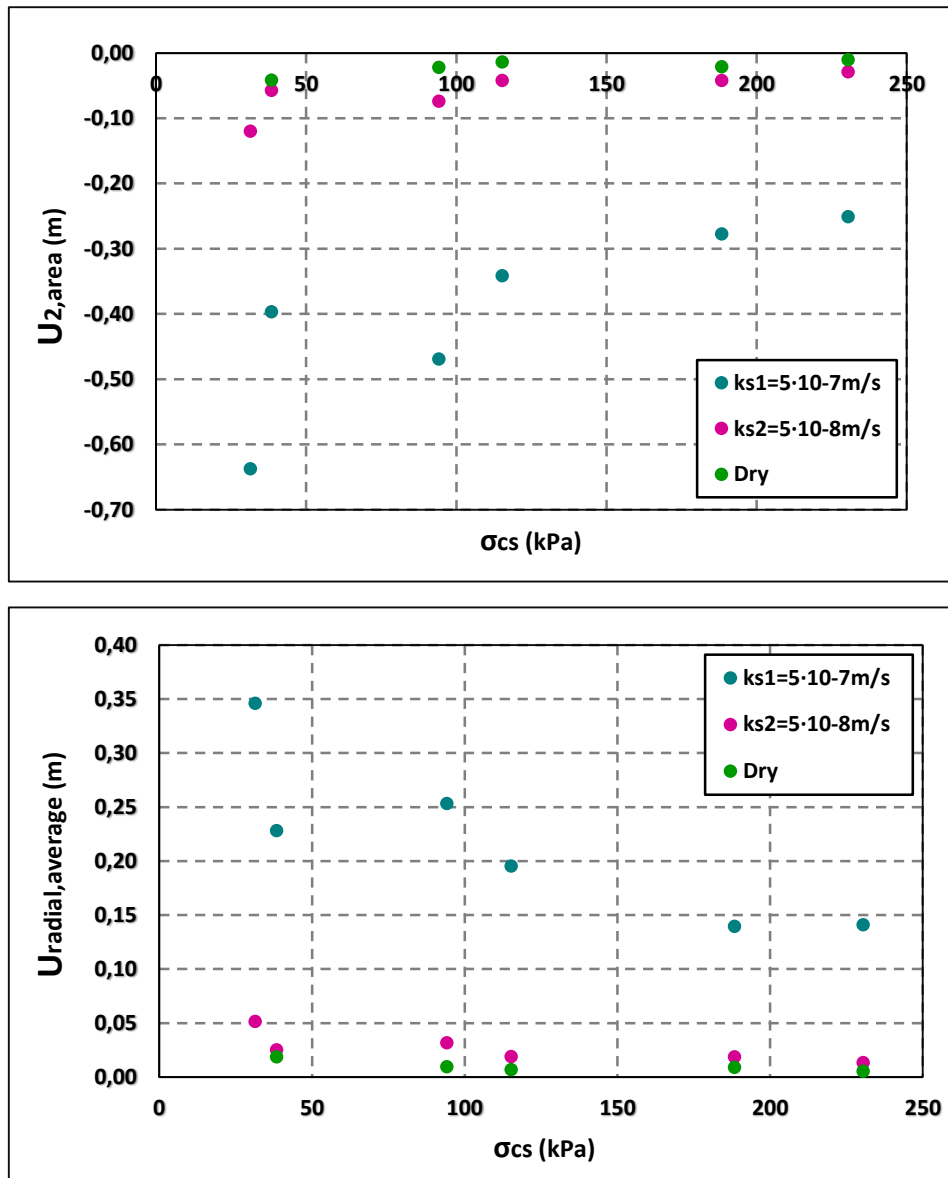
5.3 Αποτελέσματα συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων

Μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων που αναφέρθηκαν στην Εισαγωγή, επόμενο ζητούμενο είναι η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής καθώς και τις ακτινικές συγκλίσεις που συντελούνται γύρω από τη σήραγγα. Σε πρώτη φάση για κάθε πίεση υποστήριξης από αυτές που εξετάστηκαν, αρχικά για πίεση υποστήριξης ίση με 0kPa (πρακτικά για ανυποστήριχτο μέτωπο) και στη συνέχεια για 50kPa πλοταρίστηκαν τα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ για να αναδειχτεί για κάθε πίεση υποστήριξης ξεχωριστά η επιρροή της ύπαρξης νερού (θεωρώντας δύο διαφορετικές υδατοπερατότητες) στα μεγέθη της μέσης ακτινικής σύγκλισης $U_{radial,av}$ και της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $U_{2,area}$. Εν συνεχεία τα δεδομένα των αποτελεσμάτων για τα προαναφερθέντα μεγέθη κανονικοποιούνται όπως τα αντίστοιχα για τις ξηρές συνθήκες που περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, κάνοντας χρήση των αδιαστατοποιημένων συντελεστών $\Omega_{F,MC}$ $\Omega_{R,MC}$. Η διαφορά για τις συγκεκριμένες αναλύσεις είναι ότι στα παραπάνω αδιαστατοποιημένα μεγέθη ως μέση γεωστατική πίεση στον παρονομαστή τίθεται η ενεργός, ενώ όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, τα αντίστοιχα μέτρα Ελαστικότητας μεταβάλλονται καθώς μεταβάλλεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, η οποία υπολογίζεται πλέον συναρτήσει των ενεργών τάσεων και όχι των ολικών, που ισούσαν ουσιαστικά με τις ενεργές τάσεις λόγω απουσίας νερού στις ξηρές συνθήκες. Στις εξισώσεις 5.3, 5.4 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι νέες εκφράσεις των $\Omega_{F,MC}$ και $\Omega_{R,MC}$ οι οποίες αναφέρονται σε συζευγμένες (Coupled) αναλύσεις.

$$\Omega_{F,CPLD,MC} = \frac{U_h E}{D p'_{0,m}} \quad \text{Εξίσωση 5.3}$$

$$\Omega_{R,CPLD,MC} = \frac{U_R E}{D p'_{0,m}} (\times 10^3) \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

Αρχικά λοιπόν, για κάθε εξεταζόμενη πίεση υποστήριξης ξεχωριστά παρουσιάζονται τα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ όπου σ_{cs} η μονοαξονική αντοχή των εξεταζόμενων εδαφών σε θλίψη, η οποία είναι συνάρτηση των δύο βασικότερων γεωτεχνικών παραμέτρων, της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ και δίνεται από τη σχέση: $\sigma_{cs}=2 \cdot c \cdot \sqrt{N\phi}$, όπου $N\phi=\tan(45+\phi/2)^2$. Σημειώνεται πως με πράσινο χρώμα είναι τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για ξηρές (Dry) συνθήκες.

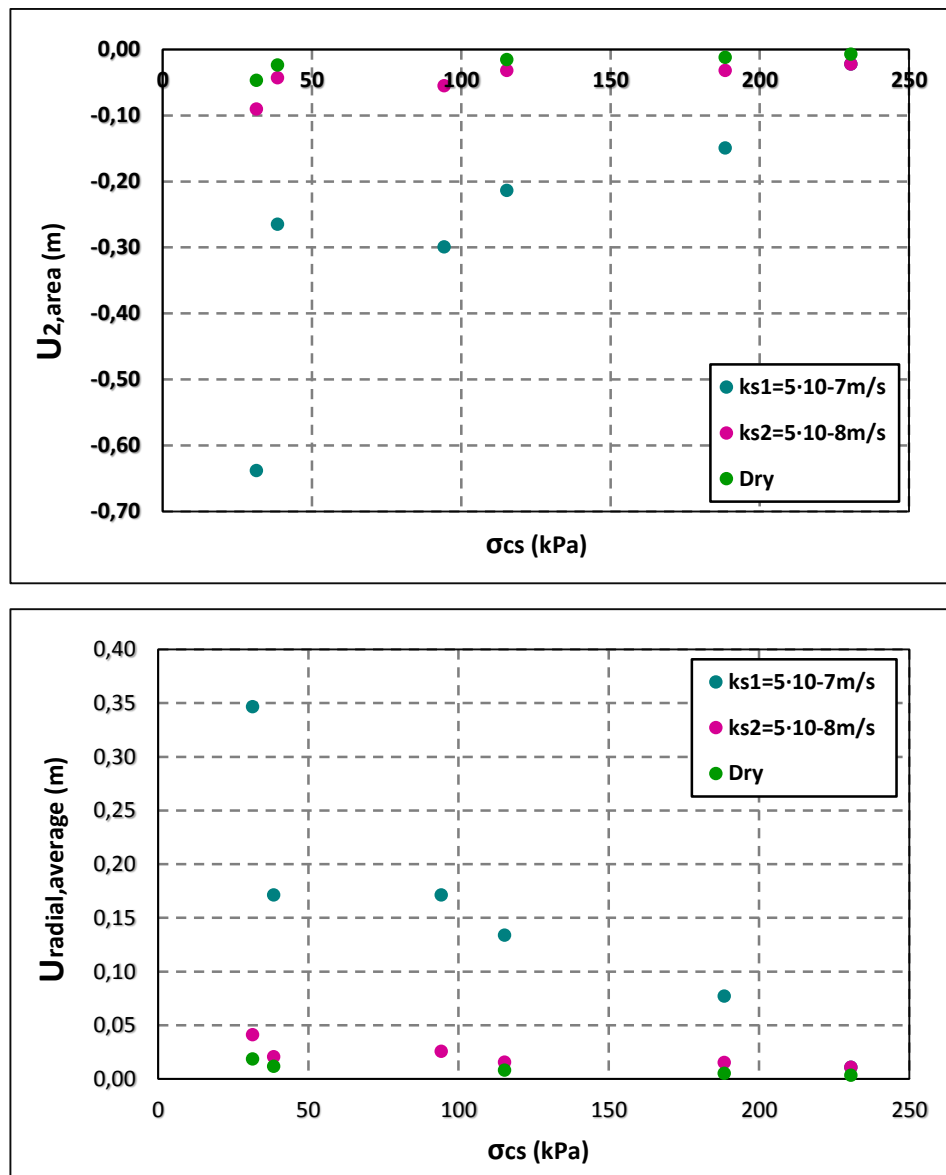


Γράφημα 5-1: Απεικόνιση της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $U_{2,area}$ και της μέσης ακτινικής σύγκλισης $U_{radial,average}$ συναρτήσει της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη σ_{cs} για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ίση με 0kPa για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, ενώ με πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για ‘ξηρές’ συνθήκες.

Βλέποντας τα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ για πίεση υποστήριξης 0kPa φαίνεται επιπλέον πως σε πολύ στιφρά εδάφη (για εδαφική συνοχή $c=60 \text{ kPa}$) οι τιμές των μετακινήσεων του μετώπου όπως και των ακτινικών συγκλίσεων και για τις δύο γωνίες τριβής για εδαφική περατότητα $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους, όπως επίσης για $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ και για τις ξηρές συνθήκες για εδαφική συνοχή $c=60 \text{ kPa}$ και για τις δύο γωνίες τριβής οι τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών πρακτικά ταυτίζονται μεταξύ τους, με τις μετακινήσεις για $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ να είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως για την καλύτερη παρακολούθηση και εποπτεία των διαγραμμάτων $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ γίνεται παράθεση του παρακάτω πίνακα 5-2 ο οποίος αντιστοιχεί στις τιμές των σ_{cs} τα αντίστοιχα ζεύγη c , ϕ της εκάστοτε ανάλυσης.

Πίνακας 5-2: Τιμές της μονοαξονικής αντοχής σ_{cs} που εμφανίζονται στα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ και αντιστοίχιση τους με τις εξεταζόμενες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής.

Συνοχή c (kPa)	Γωνία Τριβής ϕ (°)	σ_{cs} (kPa)
10	25	31.4
10	35	38.4
30	25	94.2
30	35	115.3
60	25	188.4
60	35	230.5

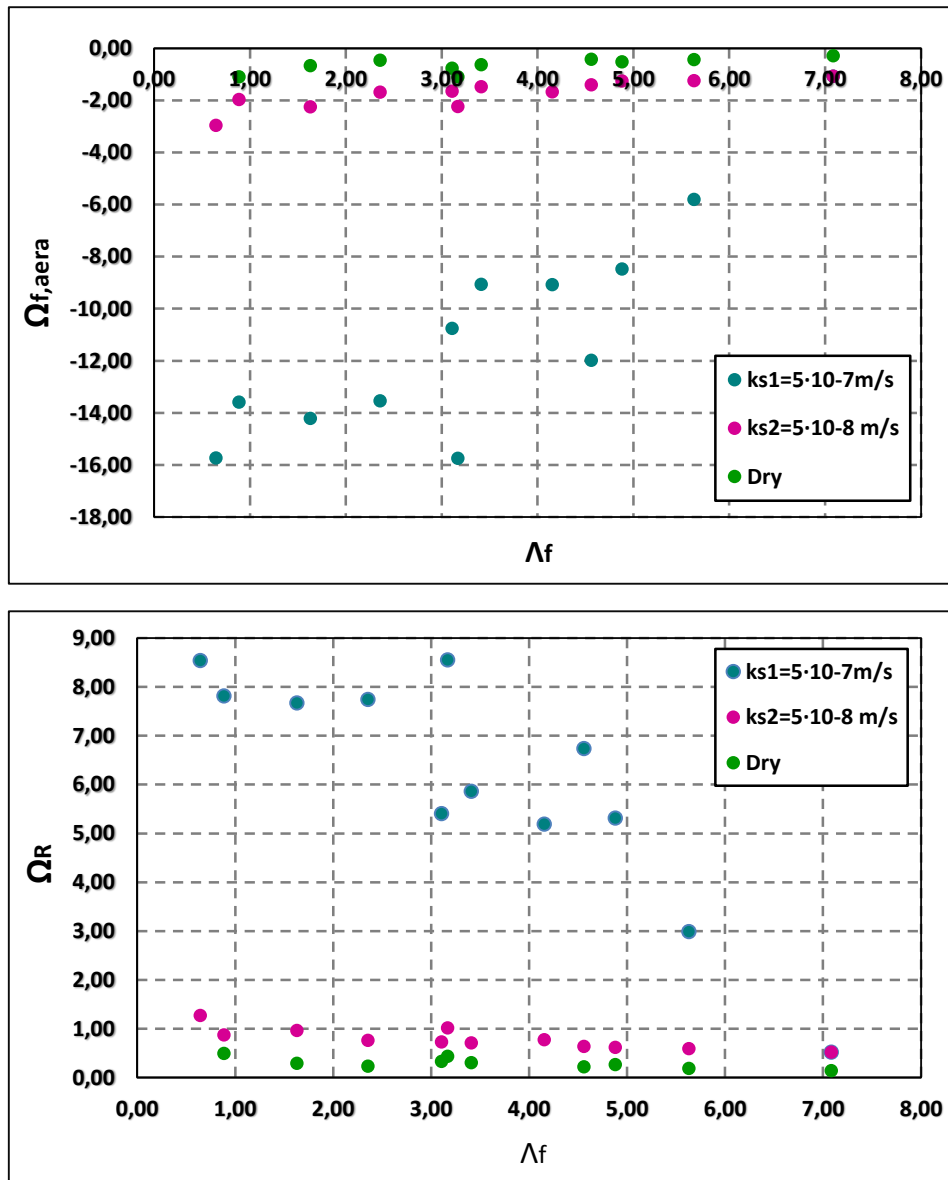


Γράφημα 5-2: Απεικόνιση της μετακίνησης του μετώπου εκσκαφής $U_{2,area}$ και της μέσης ακτινικής σύγκλισης $U_{radial,average}$ συναρτήσει της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη σ_{cs} για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ίση με 50kPa για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $ks1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$, $ks2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$, ενώ με πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για 'ξηρές' συνθήκες.

Για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο ίση με 50kPa τώρα παρατηρείται και εδώ πως για εδαφική περατότητα $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ η απομείωση των εδαφικών μετακινήσεων είναι εντονότερη στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$, ενώ σε αντίθεση με τα διαγράμματα $U_{2,area}-\sigma_{cs}$ και $U_{radial,av}-\sigma_{cs}$ για πίεση υποστήριξης στο μέτωπο 0kPa, εδώ παρατηρείται πως στα εδάφη με μεγάλη εδαφική συνοχή ($c=60\text{kPa}$), η αύξηση της γωνίας τριβής παίζει σημαντικό ρόλο μειώνοντας σημαντικά τις μετακινήσεις. Μάλιστα η μείωση αυτή των εδαφικών μετακινήσεων είναι τέτοια για $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$, που για γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ τόσο οι μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής όσο και οι ακτινικές συγκλίσεις ταυτίζονται για όλα τα εύρη των εξεταζόμενων αναλύσεων.

Από την παρουσίαση των παραγόμενων αποτελεσμάτων και για τις δύο πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν παρατηρούμε πως και για τις δύο πιέσεις υποστήριξης, όσο προχωράμε σε ευνοικότερες γεωτεχνικές συνθήκες τόσο η μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής όσο και η μέση ακτινική σύγκλιση γύρω από τη σήραγγα μειώνονται. Παρατηρούμε επίσης πως και στις δύο πιέσεις υποστήριξης μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής όπως και συγκλίσεις συμβαίνουν για $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$, ενώ οι τιμές των παραπάνω μεγεθών για εδαφική υδατοπερατότητα $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ καθώς και των ξηρών αναλύσεων είναι σημαντικά μικρότερες και δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη διασπορά. Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψιν και τα δεδομένα του Πίνακα 5-2, αξίζει να αναφερθεί πως και για τις δύο πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν, το φαινόμενο της απομείωσης των μετακινήσεων του μετώπου και των ακτινικών συγκλίσεων είναι εντονότερο στα εδάφη με γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ απ' ό,τι στα εδάφη με $\phi=35^\circ$. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί επιπλέον πως όσο αυξάνεται η τιμή της εδαφικής υδατοπερατότητας οι παραγόμενες μετακινήσεις αυξάνονται και για τις δύο πιέσεις υποστήριξης που εξετάστηκαν. Για αυτό το λόγο ουσιαστικά, οι αναλύσεις των εδαφικών προσομοιωμάτων με $ks=5 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$ δεν πραγματοποιήθηκαν, λόγω εκτεταμένων παραμορφώσεων. Επίσης, το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των ξηρών αναλύσεων με τα αντίστοιχα για ks_2 είναι τυχηματικό, καθώς όσο πιο αδιαπέρατο είναι ένα υλικό τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της μύζησης (suction), όπου ουσιαστικά οι αναπτυσσόμενες αρνητικές πιέσεις πόρων (υποπίεσεις) που αναπτύσσονται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, επενεργούν ευεργετικά για την εξέλιξη των παραμορφωσιακών μεγεθών του μετώπου εμποδίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις εδαφικές εξωθήσεις που τείνουν να αναπτυχθούν. Αφού παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για κάθε πίεση ξεχωριστά, στη συνέχεια εκμεταλλευόμενοι τον συντελεστή Λ_f , ο οποίος λαμβάνει την επιρροή της πίεσης υποστήριξης παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι αναλύσεις στα διαγράμματα $\Omega_{F,MC}-\sigma_{cs}$ και $\Omega_{R,MC}-\sigma_{cs}$. Υπενθυμίζεται πως ο συντελεστής ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής Λ_f που περιέχει την επιρροή της πίεσης υποστήριξης έτσι όπως παρουσιάστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο είναι:

$$\Lambda_{F,MC} = \frac{5.25cN_\phi^a}{\gamma H^{1-b} D^b} + 8 \frac{H}{D} \left(\frac{P_{fp}}{p_{h0}} \right)^{(1+0.1H/D)} \quad \text{or} \quad \Lambda_{F0} + 8 \frac{H}{D} \left(\frac{P_{fp}}{p_{h0}} \right)^{(1+0.1H/D)} \quad \text{Εξίσωση 5.5}$$



Γράφημα 5-3: Απεικόνιση των αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής $\Omega_{f,area}$ και των αδιαστατοποιημένων ακτινικών συγκλίσεων συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας Λ_f για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, ενώ με πράσινο χρώμα έχουμε τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αριθμητικών προσομοιωμάτων για 'ξηρές' συνθήκες.

Από τα αποτελέσματα μέσω της συσχέτισης με το συντελεστή ευστάθειας Λ_f φαίνεται πως μεγαλύτερες εδαφικές μετακινήσεις συντελούνται για $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, ενώ για τη μικρότερη τιμή της εδαφικής περατότητας, για $ks_2=5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ δηλαδή φαίνεται πως οι μετακινήσεις του μετώπου καθώς και οι ακτινικές συγκλίσεις είναι οριακά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για ξηρές συνθήκες. Σημαντικό είναι και το γεγονός όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 5 πως ο συντελεστής ευστάθειας Λ_f δεν αναφέρεται σε συζευγμένες αναλύσεις (Coupled Analyses), απλά είναι ένας τρόπος προκειμένου να συγκρίνουμε τις αναλύσεις με τιμές εδαφικών υδατοπερατοτήτων $ks_1=5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ και

$k_{s2}=5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ μεταξύ τους, καθώς και με τα αντίστοιχα προσομοιώματα που αναφέρονται σε ξηρές συνθήκες. Αυτό φαίνεται και από την κανονικοποίηση των συζευγμένων αναλύσεων έτσι όπως παρουσιάζονται στο Γράφημα 5-3, όπου στην ουσία δεν κανονικοποιούνται.

6 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των μεγεθών της ακτινικής σύγκλισης στην περιφέρεια του μετώπου, καθώς και της εξώθησης του μετώπου, με απώτερο στόχο τη σύνδεση του εδαφικού υλικού που ζυγίζεται στο πίσω μέρος του μηχανήματος με την ποσοστιαία μεταβολή του εμβαδού του μετώπου και άρα με τον προσδιορισμό της υπερεκσκαφής που συντελείται στο μέτωπο. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν αρχικά 288 παραμετρικές αναλύσεις σε ξηρές συνθήκες και τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτές διατυπώνονται παρακάτω:

- ✓ Είναι εύλογο ότι ανεξαρτήτως της πίεσης του μετώπου, οι εδαφικές μετακινήσεις (είτε προσυγκλίσεις, είτε εξωθήσεις μετώπου) μειώνονται όσο καλυτερεύουν οι εδαφικές ιδιότητες (αντοχή και παραμορφωσιμότητα).
- ✓ Η αύξηση των υπερκείμενων γαιών, θεωρώντας σταθères τιμές πιέσεων μετώπου, οδηγούσε στην αύξηση των προσυγκλίσεων και των εξωθήσεων μετώπου. Είναι εύλογο ότι όσο αυξάνεται το οριζόντιο γεωστατικό φορτίο ενώ η πίεση παραμένει σταθερή, αφού δεν είναι συζευγμένη με το εκάστοτε οριζόντιο γεωστατικό φορτίο, η αποτόνωση του μετώπου είναι πιο έντονη.
- ✓ Σε περιορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκε το φαινόμενο της εισπίεσης του μετώπου, δηλαδή της μετακίνησης του μετώπου προς την κατεύθυνση της εκσκαφής. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα των ξηρών αναλύσεων, εισπίεσεις μετώπων παρατηρούνται για συγκεκριμένες αναλύσεις με λόγο οριζόντιων ωθήσεων $K_0=0.50$ και διάμετρο $D=6m$ για πιέσεις υποστήριξης 100 και 200kPa.
- ✓ Η ασκούμενη πίεση του μετώπου παίζει κυρίαρχο ρόλο στις εδαφικές μετακινήσεις ανεξαρτήτως γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων. Ωστόσο, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το $\Omega_{F,MC}$ (το οποίο αφορά στην εξώθηση του μετώπου) φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητο στην μεταβολή της πίεσης του μετώπου σε σχέση με το $\Omega_{R,MC}$ και το $OER_{C,MC}$, αφού δεν έχουν τον ίδιο ακριβώς μηχανισμό απόκρισης.
- ✓ Ένα από τα σημαντικότερα εξαγόμενα από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι η παραγωγή του αδιάστατου συντελεστή $\Lambda_{F,MC}$ που αποτελεί τη βελτίωση του συντελεστή Λ_{f0} που προτάθηκε από τον Δρ. Γ. Προυντζόπουλο κατά τη διδακτορική του διατριβή (Διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής αβαθών σηράγγων, Προυντζόπουλος 2012).

$$\Lambda_{F,MC} = \frac{5.25cN_{\varphi}^a}{\gamma H^{1-b} D^b} + 8 \frac{H}{D} \left(\frac{P_{fp}}{p_{h0}} \right)^{(1+0.1H/D)}$$

Συγκεκριμένα, ο αδιάστατος δείκτης L_f λαμβάνοντας υπόψιν:

- i. τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας (ύψος υπερκειμένων και διάμετρο σήραγγας)
- ii. τις εδαφικές παραμέτρους (συνοχή, γωνία τριβής και μέτρο ελαστικότητας εδάφους)
- iii. την πίεση μέτωπου εκσκαφής

μπορεί να προβλέψει την εξώθηση και την προσύγκλιση του μετώπου εκσκαφής.

Λόγω του γεγονότος ότι τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν ξηρές συνθήκες (αγνοώντας δηλαδή την επιρροή του νερού), έγιναν επιλεκτικά κάποιες επιπλέον αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν την ύπαρξη νερού. Σκοπός αυτών των αναλύσεων ήταν η διερεύνηση της επιρροής της ύπαρξης νερού τόσο στις μετακινήσεις του μετώπου εκσκαφής όσο και στις ακτινικές συγκλίσεις που συντελούνται γύρω από τη σήραγγα. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτήν την ομάδα αναλύσεων διατυπώνονται παρακάτω:

- ✓ Ένα γενικότερο συμπέρασμα που ισχύει και στις ξηρές αλλά και στις αναλύσεις με νερό είναι ότι όσο προχωράμε σε ευνοικότερες γεωτεχνικές συνθήκες οι τιμές των αντίστοιχων μετακινησιακών μεγεθών μειώνονται.
- ✓ Η εδαφική υδατοπερατότητα k_s φαίνεται να παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη μετακινησιακή συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής. Είναι γεγονός ότι με τη μείωση της οδηγούμαστε σε πιο αστράγγιστη συμπεριφορά του εδάφους, όπου αυξάνοντας το φαινόμενο της μύζησης (suction) έχουμε ως αποτέλεσμα τη μείωση των εδαφικών μετακινήσεων. Από την άλλη μεριά η αύξηση του k_s (δηλαδή πιο περατοί σχηματισμοί) οδηγεί σε αύξηση των μετακινήσεων, αφού εντείνεται η υδατική ροή προς το μέτωπο.
- ✓ Από τις τελικές συσχετίσεις των αδιαστατοποιημένων ακτινικών συγκλίσεων καθώς και των αντίστοιχων μετακινήσεων του μετώπου εκσκαφής με το συντελεστή ευστάθειας L_f που λαμβάνει υπόψιν την επιρροή της πίεσης υποστήριξης, προκύπτει πως οι συζευγμένες αναλύσεις δεν κανονικοποιούνται.

Πρόταση για μελλοντική έρευνα

Είναι γεγονός ότι η ύπαρξη του νερού επηρεάζει σημαντικά την μετακινησιακή απόκριση του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας σε σύγκριση με τη θεώρηση ξηρών συνθηκών. Συνεπώς ως πρόταση για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης του μετώπου εκσκαφής λαμβάνοντας υπόψιν υδρομηχανικά φαινόμενα. Είναι αναγκαίο βέβαια, όπως προκύπτει και από τα ανωτέρω, ότι η παραμετρική διερεύνηση πέρα από τη γεωμετρία και τα εδαφικά προφίλ θα πρέπει να στοχεύει και σε διάφορες τιμές της εδαφικής υδατοπερατότητας, η οποία έδειξε ότι παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Abaqus Simulia 6.11 Manual Documentation
- [2] TBM Conveyor Belt Scales: The University Link Project Experience.
- [3] EFNARC, (2001) Red Line belt conveyors.
- [4] Guglielmetti V., Grasso P., Gaj F., Giacomini G., (2003), "Mechanized tunneling in urban environment, control of ground response and face stability, when excavating with an EPB machine".
- [5] EFNARC, (2005), "Specification and guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunneling (TBM) in soft and hard Rock".
- [6] Herrenknecht Company, (without date), "Technical documents".
- [7] Herrenknecht M., Ing. Bappler, "The latest technology in mechanized tunneling, the design of the world's largest EPB and Slurry shield TBMs".
- [8] ITA WG Mechanized Tunneling, "Recommendations and guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)".
- [9] Maidl B., M. Herrenknecht, L. Anheuser, (1995), "Mechanized Shield Tunneling", Ernst & Sohn.
- [10] Maidl B, Herrenknecht M, Anheuser L (2012): "Mechanized Shield Tunnelling", Ernst&Sohn.
- [11] Robert Robinson, Richard Sage, Rob Clark, Edward Cording, Peter Raleigh, Clement Wiggins 2012 Raleigh Conveyor Belt Weigh Measurements, and Related Ground Losses in EPB Tunneling.
- [12] 2013 HE belt-conveyor Operation Instruction.
- [13] Slinchenko, D., (2009). "Control of Ground Settlement in EPB Tunneling", Proceedings of the ITA-IATES World Tunnel Congress 2009, Budapest.
- [14] Slinchenko, D., (2009). "Soft Ground TBM Technology: EPB Machines: Special Solutions and Case Histories", ITA Training Course.
- [15] Kavvadas Michael, Prountzopoulos George, Fortsakis Petros, Tzivakos Kwnstantinos, Litsas Dimitris, Chortis Philippos, Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling.
- [16] Προυντζόπουλος Γ.(2012) Επιβλέπων Καθηγητής:Μ.Καββαδάς. Διδακτορική διατριβή: Διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής αβαθών σηράγγων, Ε.Μ.Π
- [17] Στυλιανός Π. Κουκουτάς (2015) Επιβλέπων Καθηγητής:Α.Ι. Σοφινός, Διδακτορική διατριβή: Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων.
- [18] Wittke, W., Druffel, R., Gattermann, J., (2007). Stability Analysis and Design for Mechanized Tunnelling, Geotechnical Engineering in Research and Practice, WBI-PRINT 6, Aachen.
- [19] Κοτσαμίδα Σπυριδούλα (2014) Επιβλέπων Καθηγητής:Μιχαήλ Καββαδάς, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Διερεύνηση εδαφικών μετακινήσεων μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής

