

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## «ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΤΒΜ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ»

ΠΟΝΤΙΚΑ ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μ. Καββαδάς, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Ευχαριστίες

### Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία αυτή ολοκληρώνει επίσημα τον κύκλο των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Ως εκ τούτου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του τομέα της Γεωτεχνικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών για τη γενική βοήθεια τους κατά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές και ειδικότερα τον υπεύθυνο της διπλωματικής Αν. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών κ. Μ.Καββαδά που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντας μου τη παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Δημήτρη Λίτσα για την αμέριστη συμπαράσταση του και την καθοριστική συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν υποδειγματική και η μεταδοτικότητα του αποτέλεσε αρωγό για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Τον ευχαριστώ πολύ για την διάθεση του να μοιραστεί μαζί μου τις γνώσεις και το χρόνο του και την ανεκτίμητη συνεισφορά του. Ευχαριστώ επίσης την ερευνητική ομάδα του κ.Καββαδά για τις πολύτιμες συμβουλές της και κυρίως τον υποψήφιο διδάκτορα Φίλιππο Χόρτη για την καθοδήγηση του σε θέματα προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για τη συνεχή υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια, καθώς επίσης και τους φίλους μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου με το ενδιαφέρον και τη διάθεση τους.

Πόντικα Εμμανουέλα Πολιτικός Μηχανικός, Δ.Π.Θ. Αθήνα, Μάρτιος 2016

### Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται το ζήτημα της διερεύνησης επιφανειακών καθιζήσεων λόγω εκσκαφής αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, διανοιγμένων με μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB). Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επιρροή μηχανικών χαρακτηριστικών του EPB στα αποτελέσματα των αναλύσεων για δύο (2) διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα, σε οκτώ (8) εδαφικούς τύπους υπό την θεώρηση ότι η σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Αρχικά, πραγματοποιείται η περιγραφή των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο. Έπειτα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί στο πέρασμα των χρόνων και αναλύουν όλους εκείνους τους μηχανισμούς, οι οποίοι κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης μίας σήραγγας δημιουργούν απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss ή volume loss) και συνεπώς σχετίζονται άμεσα με την εμφάνιση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Σήμερα, οι πιο συνήθεις μέθοδοι βασίζονται σε ημι-εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Έτσι, γίνεται μια αναφορά σε μελέτες που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου γίνεται περιγραφή αυτών των μεθόδων από διάφορους ερευνητές. Διαπιστώνεται ότι οι εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι δίνουν μια καλή εκτίμηση του μεγέθους και της κατανομής των καθιζήσεων; εφαρμόζονται όμως υπό προϋποθέσεις, σε αντίθεση με τις αριθμητικές μεθόδους, και κυρίως με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM), που δίνουν τη δυνατότητα της αλληλεπίδρασης των διάφορων συνιστωσών ενός προβλήματος σε μια ανάλυση.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της γεωμετρικής μόρφωσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προαναφερθείσα διερεύνηση, η οποία συντελέστηκε μέσω εβδομήντα έξι (76) τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων «Abaqus v6.13». Η μηχανοποιημένη όρυξη με ΕΡΒ προσομοιώθηκε λαμβάνοντας υπόψιν παραμέτρους όπως τα κενά μεταξύ ασπίδας και εδάφους/προκατασκευασμένου στοιχείου, το βάρος του μηχανήματος, τη γεωμετρία της ασπίδας, το θάλαμο εκσκαφής, την ενεμάτωση, την πίεση στο μέτωπο κλπ. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο (2) λόγους υπερκειμένων προς τη διάμετρο της διατομής (H/D). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν σε κάθε ομάδα αναλύσεων είναι τα γεωτεχνικά στοιχεία του εδάφους (c, φ, Ε, δ) με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb. Ενδεικτικά επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν δύο (2) ομάδες αναλύσεων για δύο εδαφικά προφίλ, για ένα εδαφικό υλικό με ασθενή γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και για ένα υλικό σε καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες. Οι παράμετροι των οποίων η επιρροή διερευνήθηκε ήταν:

-η εφαρμοσμένη πίεση ενέματος - Grout Pressure

-το κενό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος (overcut/tail shield Gap) – Gap

-η εφαρμοσμένη πίεση στο μέτωπο - Face Pressure

Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα των ενδεικτικών αναλύσεων και διερευνάται πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα των εδαφικών μετακινήσεων (εγκάρσια και διαμήκη προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων, πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από τη σήραγγα) από το εύρος του διαμορφωμένου κενού, από την τιμή της πίεσης του ενέματος καθώς και από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο. Επιπλέον, για την πίεση στο μέτωπο παρουσιάζεται και το προφίλ έκθλιψης του μετώπου. Στο τέλος κάθε ενότητας διερεύνησης μίας εκ των τριών παραμέτρων γίνεται σύγκριση κάποιων χαρακτηριστικών αποτελεσμάτων (μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (U<sub>s,max</sub>), λόγος μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους (U<sub>s,max</sub>) προς μέγιστης καθίζησης στη στέψη (U<sub>crown</sub>), ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου (V<sub>L</sub>), σημείο καμπής(i)) των αναλύσεων για τις διάφορες ομάδες γεωτεχνικών χαρακτηριστικών. Αποδείχτηκε ότι με μικρή μεταβολή στις τιμές των δύο πρώτων εξεταζόμενων παραμέτρων (Grout Pressure, Gap) επηρεάζεται σημαντικά το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων, ενώ η επίδραση των διερευνηθέντων τιμών της πίεσης του μετώπου είναι αμελητέα.

### Abstract

This thesis investigates the induced soil movements due to shield tunnelling excavation assuming that the tunnel lies above the ground water table. More specifically, the study examines the influence of various shield tunnelling components on the ground subsidence via 3D parametric analyses. To do so, two (2) different numerical models are developed in this thesis modelling in detail the whole shield tunnelling procedure.

In the first chapters, a thorough literature review is taken place about a) the Tunnel Boring Machines and b) the main proposed empirical, analytical and numerical methods for the tunnel-induced settlement prediction.

Afterwards, the development of the proposed numerical model is described thoroughly showing some of the numerical techniques that were adopted to simulate this complex procedure. It should be noted that the proposed model takes into account all the TBM components (shield, cutterhead, submerged-wall etc.) and the whole construction sequence (face pressure, grouting, TBM advance, lining erection etc.). Two different models are developed in this thesis to carry out the parametric analyses assuming a very shallow (H/D=2 and D=6m) and a deeper (H/D=3 and D=6m) one tunnel. Based on these models a large set of seventy-six (76) numerical 3D analyses are carried out using the Finite Element code "Abaqus v6.11". The Mohr-Coulomb failure criterion is used to model the soil behavior. The parametric analyses investigate the influence of the following parameters:

- -Grout Pressure
- -Steering gap
- -Face Pressure

It is evident that the first two investigated parameters (grout pressure and steering gap) show to have pronounced influence on the soil displacements, since a small change of their magnitudes strongly affects the soil movement around the tunnel boundary. On the contrary, the investigated tunnel face pressures shows to have negligible effect on the ground subsidence.

# Πίνακας περιεχομένων

1 Μηχαν	ήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής-Tunnel
Boring Mach	nines (EPBs)1
1.1 Eu	σαγωγή1
12 M	ηνανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης (EDBM-Earth Pressure Balance
Machine)	
1 2 1	Αργές λειτομονίας FPBs 1
122	Συνιστώντα μέρη του μηχανήματος
1.2.2	1 Κοπτική κεφαλή (Cutting Wheel)
1.2.2	.2 Κοπτικά εργαλεία (Cutting tools)
1.2.2	.3 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)6
1.2.2	4.4 Ατέρμονας κοχλίας (Screw conveyor)
1.2.2	
1.2.3	Τελική επένδυση (Segmental lining)10
1.2.4	Ουραίο κενό του μηχανήματος και διαδικασίες πλήρωσης του με ένεμα (Shield
tail sea	ling and grouting works)13
1.2.5	Πρόσμικτα16
1.2.6	Έλεγχος πίεσης του μετώπου (Control of face pressure)17
1.3 M	ηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα-Slurry Shield Machine
1.3.1	Αρχές Λειτουργίας Slurry Machine19
1.3.2	Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος ασπίδας Slurry21
1.3.2	.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting wheel)21
1.3.2	2 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)
1.3.2	3 Υδραυλικό Σύστημα Μεταφοράς (Hydraulic Transport)23
1.3.2	.4 Σχέδιο Διαχωρισμού (Separation Plant)24
2 Εκτίμηο	ση εδαφικών μετακινήσεων λόγω διανοίξεως αβαθών σηράγγων27
2.1 Eu	σαγωγή27
2.2 E&	αφικές μετακινήσεις και μηχανισμοί απώλειας εδάφους
2.2.1	Εδαφικές μετακινήσεις κάθετα προς τον άξονα της σήραγγας
2.2.2	Εδαφικές μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας
2.2.3	Μετα-κατσκευαστικές εδαφικές μετακινήσεις
2.2.4	Απώλεια εδαφικού όγκου και σχετική απώλεια εδαφικού όγκου
2.3 M	έθοδοι εκτίμησης εδαφικών μετακινήσεων
2.3.1	Αναλυτικές μέθοδοι
2.3.2	Εμπειρικές μέθοδοι34
2.3.3	Αριθμητικές μέθοδοι37
2.3.3	.1 Αριθμητικό μοντέλο Pr. Meschke et al38
2.3.3	.2 Αριθμητικό μοντέλο Lambrughi et al. (2012)43

3 π	Αριθ οσοοιο	οιθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων ι ιοίωση του TBM	με πλήρη 45
	3.1	Εισαγωγή	45
	3.2	Προσομοίωση περιβάλλοντος εδάφους	45
	3.3	Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων των αριθμητικώ	ών προσομοιωμάτων48
	3.4	Δημιουργία γεωμετρίας μηχανήματος ολομέτωπης κοπής	49
	3.5	Ορισμός διεπιφάνειας εδάφους-ασπίδας μηγανήματος	
	3.6	Ποοσομοίωση ενέματος (Grouting)	53
	3.6.	5.1 Λιακοιτοποιήση ενέματος	
	3.6.2	5.2 Υλικό ενέματος (Grout Material)	
	3.6.3	6.3 Πίεση ενέματος (Grout Pressure)	55
	3.7	Προσομοίωση πίεσης μετώπου εκσκαφής (Face Pressure)	
	3.7.2	7.1 Η παράμετρος "Α"	57
	3.7.2	7.2 Πυκνότητα εδαφικού πολτού (γ <sub>muck</sub> )	
	3.8	Μόρφωση στοιχείων τελικής επένδυσης (Final Lining)	58
	3.9	Στάδια ανάλυσης	59
4	Απο	ιοτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	63
	4.1	Εισαγωγή	63
	4.2	Εδαφικός τύπος – Καταστατικός Νόμος	63
	4.3	Παράμετροι ανάλυσης	63
	4.4	Επιρροή των παραμέτρων του μηχανήματος	
	4.4.2	4.1 Επιρροή πίεσης ενέματος (Grout Pressure effect)	67
	4.	4.4.1.1 Εδαφικό προφίλ b (σ <sub>cs</sub> = 42.8 Kpa)	68
	4.	4.4.1.2 Εδαφικό προφίλ g (σ <sub>cs</sub> = 172.3 Kpa)	74
	4.	4.4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις δι	άφορες ομάδες
	γε	γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (codes a-g)	79
	4.	4.4.1.4 Συμπεράσματα	
	4.4.2	4.2 Επιρροή διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος κ	αι εκσκαφής (Gap
	effe	fect) 84	
	4.	4.4.2.1 Εδαφικό προφίλ b (σ <sub>cs</sub> = 42.8 Kpa)	
	4.	4.4.2.2 Εδαφικό προφίλ g (σ <sub>cs</sub> = 172.3 Kpa)	
	4.	4.4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις δι	άφορες ομάδες
	γ٤	γεωτεχνικων χαρακτηριστικών (codes a-g)	
	4.	4.4.2.4 Συμπερασματα	
	4.4.;	+.5 Επιρροή πιεσής μετώπου (Face Pressure effect)	
	4. 1	4.4.5.1 Ευαψικυ πρυψιλ $U(0_{CS} = 42.8 \text{ Kpd})$	
	4. ve	τ.τ.σ.2 20γκριση αποτελεσματών των αναλυσεών για τις στ	αφορες ομασες 100
	r c		

	4.4.3.3	Συμπεράσματα12	11
5	Συμπεράσμ	ιατα1:	13

# Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Ρυθμιστές και δυνατότητες ρύθμισης του εδάφους για διερεύνηση του πεδίου
εφαρμογής μηχανήματος (Maidl 1994)2
Εικόνα 1.2: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος ΕΡΒ [2]3
Εικόνα 1.3: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο
μηχάνημα για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στο New Delhi, δεξιά
απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του
υπόγειου σιδηρόδρομου στην Αθήνα [2]4
Εικόνα 1.4: (a) Κοπτικά συρόμενου τύπου σε κοπτική κεφαλή ΕΡΒ (Μετρό Θεσσαλονίκης);
(b) Κοπτικά τύπου δίσκου σε κοπτική κεφαλή ΕΡΒ (Μετρό Θεσσαλονίκης); (c) Μέτωπο
σήραγγας με ραβδώσεις (1) που προκλήθηκαν από κοπτικό τύπου δίσκου και επιφάνεια (2)
από κοπτικό συρόμενου τύπου [2]6
Εικόνα 1.5: Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής [2]
Εικόνα 1.6: Υδραυλικά έμβολα τοποθετημένα στην ουρά της ασπίδας για σωστή
ευθυγράμμιση με τα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης [2]
Εικόνα 1.7: Σημείο του εξοπλισμού όπου είναι τοποθετημένα τα υδραυλικά έμβολα
ώθησης [2]10
Εικόνα 1.8: Τελική επένδυση στο Μετρό της Αθήνας (φωτογραφίες από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤRO).11
Εικόνα 1.9: Διαστάσεις δακτυλίου τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης
μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο
διαδοχικούς δακτυλίους [2]11
Εικόνα 1.10: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων
στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) plane joint (b) και (c) convex joints [2]12
Εικόνα 1.11: Μηχανισμός γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός ΕΡΒ
μηχανήματος (φωτογραφίες από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤRO)12
Εικόνα 1.12: Απεικόνιση ουραίου κενού όπως δημιουργείται κατά την προώθηση του μηχανήματος [2]13
Εικόνα 1.13: Ενδεικτική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση συστήματος
σωληνώσεων εγκατεστημένων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος. [2]
Εικόνα 1.14: Εισπίεση ενέματος μέσω ανοιγμάτων στην τελική επένδυση [2]
Εικόνα 1.15: Διαδικασία ελέγχου εισπίεσης αφρού στην κοπτική κεφαλή ενός μηχανήματος
EPB [2]17
Εικόνα 1.16: Κατανομή της εδαφικής πίεσης που ασκεί στο μέτωπο κατά τη λειτουργία του
ένα μηχάνημα ΕΡΒ [2]18
Εικόνα 1.17: Πεδίο εφαρμογής μηχανήματος πολφού (Attiko Metro)
Εικόνα 1.18: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα-Slurry
Machine20
Εικόνα 1.19: Αρχές λειτουργίας Slurry TBM (Fujita, 1989 Mair & Taylor)
Εικόνα 1.20: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Slurry/Mixshield
Εικόνα 1.21: Σχηματική απεικόνιση εδαφικής πίεσης στο μέτωπο και θαλάμου εκσκαφής
ενός Slurry-Mixshield23

Εικόνα 1.22: Τυπική διάταξη υδραυλικού συστήματος μεταφοράς μπετονιτικού πολφού και
αιωρήματος μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος Slurry
Εικόνα 1.23: Σύστημα Διαχωρισμού γεωυλικού από μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick
TBSS-450 [2]
Εικόνα 1.24: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών σταδίων επεξεργασίας σ' ένα σχέδιο
διαχωρισμού υλικών κατά Herrenknecht [2]26
Εικόνα 2.1: Ιδεατή καμπύλη επιφανειακών κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων
(καθιζήσεων) υπό συνθήκες <<ελεύθερου πεδίου>>
Εικόνα 2.2: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω
υπόγειων εκσκαφών (Franzius, 2003)
Εικόνα 2.3: Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων ως καμπύλη συνάρτησης σφάλαματος
(O'Reilly and New, 1988)
Εικόνα 2.4: Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας30
Εικόνα 2.5: Μακροχόνια παρατήρηση καθιζήσεων πάνω από σήραγγα σε μαλακές
αργίλους: i) χρονοϊστορία εξέλιξης επιφανειακών καθιζήσεων ii) ενκάρσιο προφίλ
επιφανειακών καθιζήσεων (O'Reilly et al., 1991)
Εικόνα 2.6: Ορισμός παραμέτρων απώλειας εδαφικού όγκου (volume loss) και σχετικής
απώλειας εδαφικού όγκου (ground loss)
Εικόνα 2.7: Σύγκοιση καμπυλών επιφαγειακών καθιζήσεων για σήραννα ακτίνας 5m και
ύψος υπερκειμένων 20m από τον άξονα της σήραννας υπολονισμένες με διάφορες
ποστεινόμενες αναλυτικές μεθόδους (i) για κενό ίσο με 5cm που σύμφωνα με τους (Lee et
al 1992)αντιστοιχεί σε σχετικής απώλεια εδαφικού όγκου 2%, και με τιμή παράγοντα δ
όπως εισήχθη από τους (Verruiit and Booker, 1996) ίση με 0. (ii) για κενό ίσο με 7cm που
$\alpha$ γτιστοιχεί σε 2.8% (Lee et al. 1992) ενώ ο παράγοντας δ λαμβάνει τιμό 0.5% 34
Εικόνα 2 8: (i) Επιφανειακές καθιζήσεις απεικονιζόμενες από καμπύλη σφάλματος (Peck
1969: Schmidt 1969) (ii) Sugyétign μεταξύ σημείου καμπός και βάθους σύραννας (Peck
1969) 35
Εικόνα 2.9: Εκτίμηση του ί συναοτήσει του βάθους διάνοιξης της σήραννας σε (i) αργιλικά
$rar$ (ii) as rorr( $\delta h$ solution $rar$ ) (Mair and Taylor 1997)
$F_{\mu}$ (ii) Metaβολά παραμέτρου i καμπυλών καθιζάσεων σε διαφορετικά βάθη ζ. για
$z^{2}$
σηραγγες σε αργικούς (π) μεταροκη παραμετρού κ ως προς το βασος για προφικ
καθιζήσεων καιώ από την επιφανεία του εσαφούς, πανώ από σηραγγες σε αργιλούς (R J
Walf et al., 1993)
Εικονά 2.11: (Ι) Αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιηθηκε για τη οιαοικασία προωθησης
εκσκαφης και μηχανηματος (kasper and Mescnke, 2004)
Εικονα 2.12: (II) Συστατικά μερη και βημα-βημα διαδικασια προσομοιωσης (a) Γελος
προηγουμένου βηματός εκσκαφής (b) Προωθήση TBM (c) Εκσκαφή εδαφικού υλικού και
εισαγωγη στοιχειων που προσομοιώνουν το ένεμα στο κενό και την επένδυση (Kasper and
Meschke, 2004)
Εικονα 2.13: (Ι) Ιεστ προομοιωσης σήραγγας με καμπύλη διαδρομή προώθησης ακτίνας
200m (II) Υποθετικό σύστημα φόρτωσης για το back up trailer (Kasper and Meschke, 2006)

Εικόνα 2.14: Υπολογιζόμενες επιφανειακές καθιζήσεις στο σημείο Α του τμήματος ελέγχου για (i) πιέσεις στο μέτωπο  (ii) πιέσεις ενέματος (iii) φορτία trailer (Kasper and Meschke,
2006)
Εικόνα 2.15: Τρι-φασικό μοντέλο μερικώς κορεσμένου εδαφικού υλικού και
αλληλεπιδράσεις των στοιχείων του εδάφους κόκκοι του εδάφους, νερό των πόρων και
αέρας (i) Ανεξάρτητη κίνηση των στοιχείων του εδάφους (ii) καταστατικό προσομοίωμα
Cam–Clay (Nagel et al., 2012)41
Εικόνα 2.16: Σύγκριση των τελικών τιμών επιφανειακών καθιζήσεων για δύο διαφορετικά
σετ εδαφικών χαρακτηριστικών (η πιο λεπτή γραμμή αναφέρεται σε στιφρές αργίλους) και
τρεις υποθέσεις για συνθήκες ροής: (i) για ένα σημέιο μέτρησης πάνω στον άξονα της
σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από το μέτωπο (ii) για μία εγκάρσια τομή στο τέλος της
προώθησης της σήραγγας (Nagel et al., 2012)42
Εικόνα 2.17: Προσομοίωση πεπιεσμένου αέρα' ανάπτυξη μερικώς κορεσμένης εδαφικής
ζώνης μπροστά από το μέτωπο για τις εξής περιπτώσει: (i) επέκταση ζώνης για κορεσμό
εδάφους μικρότερο από 95% (ii) επέκταση ζώνη για κορεσμό εδάφους μικρότερο από 50%
(Nagel et al., 2012)43
Εικόνα 2.18: Υπολογισμένες και πραγματικές μετρήσεις εδαφικών μετακινήσεων: (i) Προφίλ
επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (Τομή 5-PK-3+721) (ii)
Εγκάρσια προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων (Τομή 9-2+260) (iii) Οριζόντιες μετατοπίσεις
ως προς το βάθος (σε απόσταση από τον άξονα της σήραγγας 6m) (Τομή 4.2-2+810)
(Lambrughi et al., 2012)44
Εικόνα 3.1: Βασικά γεωμετικά χαρακτηριστικά αριθμητικού μοντέλου με υπερκείμενα
H=12m46
Εικόνα 3.2: Βασικά γεωμετικά χαρακτηριστικά αριθμητικού μοντέλου με υπερκείμενα
H=18m46
Εικόνα 3.3: Άποψη του καννάβου των μοντέλων στο επίπεδο x-z
Εικόνα 3.4: Οκτακομβικά στοιχεία προσομοίωσης εδαφικού υλικού
Εικόνα 3.5: Κάνναβος στοιχείων όπως σχεδιάστηκε49
Εικόνα 3.6: Το μηχάνημα κοπής που προσομοιώθηκε για τη διάνοιξη της σήραγγας50
Εικόνα 3.7: Ενδεικτικό σκίτσο ορισμού υπερεκσκαφής(overcut) και ουραίου κενού(tail
shield Gap)51
Εικόνα 3.8: Ενδεικτική εικόνα διακριτοποίησης ενέματος53
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος Εικόνα 3.10: Κατανομή πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής ενός EPB στο Botlek Rail Tunnel για διάφορα χρονικά βήματα, ενδεικτικά φαίνονται ο μέγιστος και ελάχιστος βαθμός πίεσης
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος
Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος

Εικόνα 4.1: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις (contours), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σcs=42.8 Kpa)......70 Εικόνα 4.2: Σύγκριση πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (33m, 36m και 33m από το μέτωπο για GP<sub>factor</sub>=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa Εικόνα 4.3: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις (contours), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP factor=1), 90 Kpa (GP factor=0.5) και 270 Kpa (GP factor=1.5) -Εικόνα 4.4: Σύγκριση πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 42m και 37.5m από το μέτωπο για GP factor=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa).....73 Εικόνα 4.5: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις, με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 σ<sub>cs</sub>=173.2 Кра)......75 Εικόνα 4.6: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στη χαρακτηριστική τομή (31.5m από το μέτωπο), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)......76 Εικόνα 4.7: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις, με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=3 σ<sub>cs</sub>=173.2 Кра)......78 Εικόνα 4.8: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (36m, 39m και 30m από το μέτωπο για GP<sub>factor</sub>=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa).....78 Εικόνα 4.9: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa) .86 Εικόνα 4.10: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 34.5m και 33m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa).....87 Εικόνα 4.11: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa) .89 Εικόνα 4.12: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (40.5m, 39m και 39m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa).....89 Εικόνα 4.13: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)92 Εικόνα 4.14: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (34.5m, 31.5m και 34.5m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa).....92

Εικόνα 4.15: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ
εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=3 - σ <sub>cs</sub> =172.3 Kpa)94
Εικόνα 4.16: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις
χαρακτηριστικές τομές (39m, 36m και 36m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm
αντίστοιχα), - (H/D=3 - σ <sub>cs</sub> =172.3 Kpa)95
Εικόνα 4.17: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις πιέσεις μετώπου ίση με 129
Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=2 - σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa)102
Εικόνα 4.18: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις
χαρακτηριστικές τομές (33m από το μέτωπο για Α=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση
μετώπου ίση με 129 Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=2 - σ <sub>cs</sub> =42.8
Kpa)103
Εικόνα 4.19: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου για τρεις τιμές πίεσης μετώπου
(A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa)104
Εικόνα 4.20: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις πιέσεις μετώπου ίση με 129
Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=3 - σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa)106
Εικόνα 4.21: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις
χαρακτηριστικές τομές (39m, 39m, 37.5m από το μέτωπο για Α=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα),
με πίεση μετώπου ίση με 129 Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=3 -
σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa)107
Εικόνα 4.22: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου για τρεις τιμές πίεσης μετώπου
(A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa)108

# Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: (i) "Hard" contact συμπεριφορά; (ii) "Softened" exponential pressure-
overclosure relationship (Abaqus 2011)52
Διάγραμμα 3.2: Χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά μέτρου ελαστικότητας (Ε) σύμφωνα με
(Kasper & Meschke 2004), (Comodromos et al. 2014) και (Lambrughi et al. 2012)54
Διάγραμμα 4.1: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U₃) αδιαστατοποιημένων
ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U <sub>smax, overall</sub> =20mm) για τρεις
διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GPfactor=0.5, 1, 1.5) για Η/D=2 και σ <sub>cs</sub> =42.8 Кра;
(αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ69
Διάγραμμα 4.2: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U₃) αδιαστατοποιημένων
ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U <sub>smax, overall</sub> =20mm) για τρεις
διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1, 1.5) για Η/D=3 και σ <sub>cs</sub> =42.8 Κpa; (αριστερά)
Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ72
Διάγραμμα 4.3: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U₃) αδιαστατοποιημένων
ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U <sub>smax, overall</sub> =13mm) για τρεις
διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1, 1.5) για H/D=2 και σ <sub>cs</sub> =172.3 Kpa; (αριστερά)
Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ74
Διάγραμμα 4.4: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U $_3$ ) αδιαστατοποιημένων
ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U <sub>smax, overall</sub> =13mm) για τρεις
διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1, 1.5) για H/D=3 και σ <sub>cs</sub> =172.3 Kpa; (αριστερά)
Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ77
Διάγραμμα 4.5: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη
θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g)
ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ $_{ m c}$ /Po, για τρεις
διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5 <i>,</i> 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά
H/D=3)79
Διάγραμμα 4.6: Λόγος μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους (U <sub>s,max</sub> ) προς
μέγιστης καθίζησης στη στέψη (U <sub>crown</sub> ) συναρτήσει του σ <sub>c</sub> /Ρο, για τρεις διαφορετικές
πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)80
Διάγραμμα 4.7:Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση
διάνοιξης της σήραγγας για την περίπτωση GP <sub>factor</sub> = 1.5 στη στέψη της σήραγγας, στη βάση
της και στην επιφάνεια80
Διάγραμμα 4.8: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της
σήραγγας συναρτήσει του σ <sub>c</sub> /Ρο, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1,
1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)81
Διάγραμμα 4.9: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969;
O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)82
Διάγραμμα 4.10: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U $_3$ ) αδιαστατοποιημένων
ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U <sub>smax, overall</sub> =29mm) για τρεις
περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=2 και σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa;
(αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ85

Διάγραμμα 4.11: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=21mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (GAP 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Διάγραμμα 4.12: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax. overall</sub>=13mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Διάγραμμα 4.13: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax. overall</sub>=12mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Διάγραμμα 4.14: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)......96 Διάγραμμα 4.15: Λόγος μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους (U<sub>s.max</sub>) προς μέγιστης καθίζησης στη στέψη (Ucrown) συναρτήσει του σc/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)......96 Διάγραμμα 4.16: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)......97 Διάγραμμα 4.17: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)......98 Διάγραμμα 4.18: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=19mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ .....101 Διάγραμμα 4.19: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ως προς την ακτίνα της σήραγγας D=6m για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa).....104 Διάγραμμα 4.20: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=15mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) για H/D=3 και  $\sigma_{cs}$ =42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ ......105 Διάγραμμα 4.21: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ως προς την ακτίνα της σήραγγας D=6m για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)......108 Διάγραμμα 4.22: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις

περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3) 109
Διάγραμμα 4.23: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας συναρτήσει του σ <sub>c</sub> /Po για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c), για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)
Διάγραμμα 4.24: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)110 Διάγραμμα 5.1: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ <sub>c</sub> /Po, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP <sub>factor</sub> =0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)
Διάγραμμα 5.2: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σc/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)
Διάγραμμα 5.3: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ <sub>c</sub> /Po, για τρεις περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)
Διάγραμμα 5.4: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997), συμπεριλαμβανομένων των τιμών σημείων καμπής και για τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους (Grout Pressure, Gap, Face Pressure)
Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας αριθμητικών αναλύσεων και για τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους (V <sub>L</sub> <sub>FEM</sub> )συναρτήσει της απώλειας εδαφικού όγκου από σχέση Peck, 1969 (V <sub>L Calculated</sub> )118

# Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 3.1: Βασικές γεωμετρικές παράμετροι μοντέλων4	7
Πίνακας 3.2: Ιδιότητες συστατικών μερών TBM49	9
Πίνακας 3.3: Overcut και Tail shield Gap (Gaps) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά	
προσομοιώματα	1
Πίνακας 3.4: Πίεση ενέματος (GP) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα5	6
Πίνακας 3.5: Πίεση μετώπου (P <sub>APPLIED</sub> ) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα5	7
Πίνακας 3.6: Ιδιότητες τελικής επένδυσης (Tunnel lining)5	9
Πίνακας 4.1: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ για Η/D=264	4
Πίνακας 4.2: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ για Η/D=364	4
Πίνακας 4.3: Ιδιότητες και παράμετροι αναλύσεων60	6
Πίνακας 4.4: Ομάδες παραμέτρων εδάφους για βάθη σήραγγας H=2D και H=3D6	7
Πίνακας 4.5: Τιμές πίεσης ενέματος6	7
Πίνακας 4.6: Overcut και Tail shield Gap (Gaps) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά	
προσομοιώματα	4
Πίνακας 4.7: Ομάδες παραμέτρων εδάφους για βάθη σήραγγας H=2D και H=3D84	4
Πίνακας 4.8: Πίεση μετώπου (P <sub>APPLIED</sub> ) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα 100	C
Πίνακας 4.9: Παράμετροι εδάφους εδαφικών προσομοιωμάτων (H=2D και H=3D)100	C

# 1 Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής-Tunnel Boring Machines (EPBs)

### 1.1 Εισαγωγή

Η διάνοιξη σηράγγων με τη χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine) πραγματοποιείται σε περιπτώσεις που ενδιαφέρει η ευστάθεια του θόλου, η ευστάθεια του μετώπου και ο περιορισμός-έλεγχος των καθιζήσεων (σε αστικές σήραγγες). Η μέθοδος μηχανικής όρυξης εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες και την παρουσία ή μη υπόγειου νερού, σύμφωνα με τις οποίες γίνεται η οριστικοποίηση επιλογής και ενδεχομένως προσαρμογή των στοιχείων λειτουργίας του TBM.

Σήμερα, στις αστικές περιοχές επικρατούν τα TBM κλειστού μετώπου έναντι άλλων μεθόδων ή μηχανημάτων, αφού επιτυγχάνουν πολύ καλύτερο έλεγχο του εδάφους και συνεπώς των καθιζήσεων. Στην κατηγορία αυτή μηχανημάτων ανήκουν τα μηχανήματα εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης-EPB TBMs (Earth Pressure Balance) και τα μηχανήματα μπετονιτικού πολφού-Slurry TBMs, τα οποία και αναλύονται παρακάτω.

### 1.2 Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης (EPBM-Earth Pressure Balance Machine)

### 1.2.1 Αρχές λειτουργίας EPBs

Τα EPBs παρουσιάζουν καλή λειτουργία σε αργιλοϊλυώδη εδάφη με ποσοστό παρουσίας λεπτόκοκκου υλικού (<60μm) μεγαλύτερο από 20%, διότι σφραγίζουν τον ατέρμονα κοχλία και ελέγχουν την εισροή του υπόγειου νερού. Το εύρος εφαρμογής μεγαλώνει με χρήση κατάλληλων ρυθμιστών, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 1.1, όπου διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιοχές εφαρμογής.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους, που τα καθιστά και ως ιδανικά μηχανήματα διάνοιξης σε αστικά περιβάλλοντα, αφορά την άσκηση πίεσης στο μέτωπο από τις τάσεις που μεταφέρονται από το εκσκαφθέν υλικό, που γεμίζει υπό πίεση πλήρως το θάλαμο εργασίας, για το περιορισμό παραμορφώσεων του περιβάλλοντος εδάφους. Το κύριο χαρακτηριστικό τους αφορά στη χρήση του υλικού που απομακρύνεται κατά τη διάνοιξη (ως έχειν ή μετά από ανάμιξη με ειδικά πρόσμικτα) απευθείας ως μέσο άσκησης πίεσης. Συγκεκριμένα, μέρος του εκσκαφθέντος υλικού παραμένει στο θάλαμο εκσκαφής και εφαρμόζει σταθεροποιητική πίεση στο μέτωπο μέσω του ιδίου βάρους του.

Ένα ΕΡΒ αποτελείται από πολλά διαφορετικά μέρη, καθένα από τα οποία διαθέτει ξεχωριστό ρόλο στο χειρισμό του μηχανήματος. Ο χειρισμός αφορά μία περίπλοκη διαδικασία της οποίας η επιτυχής πρόοδος εξαρτάται από τη σωστή λειτουργία κάθε επιμέρους τμήματος καθώς και την ομαλή αλληλεπίδραση μεταξύ τους.



Εικόνα 1.1: Ρυθμιστές και δυνατότητες ρύθμισης του εδάφους για διερεύνηση του πεδίου εφαρμογής μηχανήματος (Maidl 1994)

Τα κύρια μέρη που αποτελούν ένα EPB, όπως αριθμώνται και στην Εικόνα 1.2, καθώς και κάποια βασικά βήματα περιγράφονται εν συντομία ακριβώς παρακάτω, ενώ στη συνέχεια γίνεται αναλυτικότερη αναφορά.

Η εκσκαφή πραγματοποιείται με την περιστροφή και ώθηση του μπροστινού τμήματος του EPB, την κοπτική κεφαλή, η οποία είναι εξοπλισμένη με κατάλληλα κοπτικά εργαλεία, ενώ διαθέτει και ανοίγματα μέσω των οποίων διέρχεται το χαλαρωμένο υλικό στο θάλαμο εκσκαφής. Ο θάλαμος μπορεί να είναι μερικώς ή πλήρως γεμάτος με το υλικό, ανάλογα με τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις. Παρόλα αυτά σε αστικά περιβάλλοντα έχει επικρατήσει να γεμίζεται πλήρως ο θάλαμος με το υλικό, ενώ η ανεξέλεγκτη διείσδυση εδάφους από το μέτωπο εκσκαφής στο εσωτερικό αυτού του θαλάμου αποτρέπεται από τη δύναμη που ασκούν οι υδραυλικοί κύλινδροι. Ακολουθεί η μεταφορά του υλικού από τη βάση του θαλάμου μέσω του ατέρμονα κοχλία και η εναπόθεση του σε μεταφορικές ταινίες.

Η τελική επένδυση των σηράγγων ολοκληρώνεται με τη τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων, τα οποία τοποθετούνται υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης με τη βοήθεια γάντζων που βρίσκονται πίσω από το διάφραγμα πίεσης. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται συνεχόμενη πλήρωση με την εφαρμογή ενέματος, του κενού που δημιουργείται ανάμεσα στην εξωτερική πλευρά των προκατασκευασμένων στοιχείων και του περιβάλλοντος εδάφους, στο πίσω μέρος του μηχανήματος.

Η τεράστια εμπειρία που αποκτήθηκε, στο πέρασμα των χρόνων, στη μηχανοποιημένη όρυξη, με χρήση μηχανημάτων EPBs σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε τους κατασκευαστές EPBs σε περισσότερο βελτιωμένα και

αποτελεσματικά μηχανήματα. Οι επόμενες υποενότητες εξετάζουν διεξοδικά αυτή τη τεχνολογική πρόοδο με περιγραφή των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν ένα EPB μηχάνημα καθώς και των διάφορων ενδιάμεσων διεργασιών.

#### Where:

- 1. Cutting Wheel
- 2. Excavation Chamber
- 3. Bulkhead
- 4. Mixing Arms
- 5. Thrust Cylinders
- 6. Air Lock
- 7. Screw Conveyor
- 8. Erector
- 9. Tail Skin
- 10. Backfilling/Grouting
- 11. Tunnel Lining

Εικόνα 1.2: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος ΕΡΒ [3]

#### 1.2.2 Συνιστώντα μέρη του μηχανήματος

#### 1.2.2.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting Wheel)

Η κοπτική κεφαλή διαθέτει σημαντικό ρόλο κατά τη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων με EPB, καθώς χρησιμοποιείται για τη χαλάρωση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού από την αρχική του θέση του μετώπου. Συγκεκριμένα, κατά την επαφή του μετώπου με την κοπτική κεφαλή και με ταυτόχρονη περιστροφή της, χαλαρώνεται το εδαφικό υλικό και εναποτίθεται στο θάλαμο εκσκαφής. Η κοπτική κεφαλή ενός μηχανήματος EPB, μπορεί να χαρακτηριστεί, ανάλογα με το ποσοστό των ανοιγμάτων που έχει, σε ανοιχτού ή κλειστού τύπου, όπως δείχνει και η Εικόνα 1.3. Κάθε μέθοδος κατασκευής έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.





Εικόνα 1.3: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο μηχάνημα για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στο New Delhi, δεξιά απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στην Αθήνα [3]

Η κοπτική κεφαλή ανοιχτού τύπου παρουσιάζει ευδιάκριτα μειωμένο κίνδυνο παγίδευσης και περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης στο μέτωπο. Παρόλα αυτά, όταν ο θάλαμος εκσκαφής λειτουργεί υπό ατμοσφαιρική πίεση, λόγω έλλειψης μηχανικής υποστήριξης, στις "ευαίσθητες" αστικές περιοχές παρουσιάζεται αυξημένος ο κίνδυνος επιφανειακών μετακινήσεων.

Από την άλλη, η κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου είναι περισσότερο ευπαθής στην έμφραξη της εδαφικής πάστας στα ανοίγματα και η πίεση του μετώπου είναι λιγότερο ομοιόμορφη, μειονεκτήματα που μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση αφρού και εδαφικών πρόσμικτων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτού του τύπου η κεφαλή αφορά στην παροχή κατάλληλης μηχανικής υποστήριξης στο μέτωπο, αποτρέποντας την ανεξέλεγκτη ροή χαλαρωμένου υλικού προς το θάλαμο εκσκαφής, θέτοντας αυτό τον τύπο ως τη συνηθέστερη επιλογή των κατασκευαστών στη διάνοιξη σε αστικά περιβάλλοντα.

Το μέγεθος των ανοιγμάτων στην κοπτική κεφαλή καταλαμβάνουν ένα ποσοστό επί αυτής, το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις εδαφικές συνθήκες κάθε υπόγειου έργου. Ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε από τη μία να επιτρέπει την είσοδο του γεωυλικού στο θάλαμο εκσκαφής χωρίς να εγκλωβίζεται και ταυτόχρονα να αποτρέπει να εισχωρήσουν μεγάλα τεμάχια που δεν θα μπορούν να μεταφερθούν από τον ατέρμονα κοχλία, αυξάνοντας τον κίνδυνο παύσης λειτουργίας του ή ακόμα και καταστροφής του. Γενικά, η εμπειρία έχει δείξει ότι ο κατάλληλος βαθμός ανοιγμάτων κυμαίνεται στο 0.2 με 0.35.

#### 1.2.2.2 Κοπτικά εργαλεία (Cutting tools)

Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με διάφορα κοπτικά εργαλεία για την χαλάρωση και εκσκαφή του γεωυλικού στο μέτωπο, τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με το τύπο του εδαφικού σχηματισμού όπου θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη. Στη μηχανοποιημένη όρυξη υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατηγορίες κοπτικών εργαλείων, με κυριότερες τα κοπτικά τύπου δίσκου (disk cutters) για μαλακούς ή σκληρούς βραχώδεις σχηματισμούς και κοπτικά συρόμενου τύπου (drag picks) για εδαφικούς σχηματισμούς. Τα EPBs συχνά διέρχονται μέσα από σχηματισμούς που παρουσιάζουν ετερογένεια, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι κοπτικών εργαλείων στην κεφαλή.

Στα κοπτικά συρόμενου τύπου η θραύση γίνεται μέσω της δύναμης κοπής, η οποία ασκείται παράλληλα στην επιφάνεια κοπής. Τοποθετούνται στα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής υπό κάποια κλίση, καθώς η εμπειρία σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές έχουν δείξει ότι έτσι αυξάνεται η απόδοση της κοπτικής κεφαλής και η αντοχή της στη φθορά.

Τα κοπτικά τύπου δίσκου περιστρέφονται με την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διεισδύουν στο πέτρωμα του μετώπου μέσω κάθετης δύναμης. Σε αντίθεση με τα κοπτικά συρόμενου τύπου, τα κοπτικά τύπου δίσκου αντικαθίστανται όταν χάσουν την αντοχή τους εξαιτίας της φθοράς.





(c)

Εικόνα 1.4: (a) Κοπτικά συρόμενου τύπου σε κοπτική κεφαλή ΕΡΒ (Μετρό Θεσσαλονίκης); (b) Κοπτικά τύπου δίσκου σε κοπτική κεφαλή ΕΡΒ (Μετρό Θεσσαλονίκης); (c) Μέτωπο σήραγγας με ραβδώσεις (1) που προκλήθηκαν από κοπτικό τύπου δίσκου και επιφάνεια (2) από κοπτικό συρόμενου τύπου [3]

#### 1.2.2.3 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)

Με τον όρο θάλαμος εκσκαφής περιγράφεται το τμήμα του μηχανήματος που βρίσκεται ενδιάμεσα στην κοπτική κεφαλή και στο διάφραγμα πίεσης. Η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής από το EPB στηρίζεται κατά βάση στη λειτουργία του θαλάμου εκσκαφής. Το χαλαρωμένο γεωυλικό, όπως έχει ήδη αναφερθεί (1.2.1), εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής στο θάλαμο και παραμένει εκεί λειτουργώντας ως μέσο υποστήριξης.

Ο σχεδιασμός του θαλάμου καθορίζεται από τη θέση του ατέρμονα κοχλία και τον τύπο της κοπτικής κεφαλής. Επίσης, ακολουθεί κάποιες αρχές ώστε το εκσκαφθέν υλικό να ρέει ομαλά στο θάλαμο, αποτρέποντας φαινόμενα έμφραξης. Ο κίνδυνος αυτός αυξάνεται όταν ο θάλαμος περιστρέφεται μαζί με την κοπτική κεφαλή, δεδομένου ότι η ανάμειξη και τροποποίηση μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του υλικού. Ακόμα όταν η διάμετρος της ασπίδας είναι μεγάλη αυξάνεται ο κίνδυνος να κολλήσει το υλικό στο κέντρο του θαλάμου, αφού η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται σε αυτό το μέρος.

Το μήκος του θαλάμου και η ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα κοχλία καθορίζουν το χρονικό διάστημα που το υλικό παραμένει στο εσωτερικό του θαλάμου. Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής, το υλικό πρέπει να είναι ομοιογενές

και να υπάρχει σωστή αναλογία χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού για να διατηρείται η πλαστικότητα του. Γ' αυτό το λόγο το υλικό στον κάδο αναμιγνύεται με νερό, αφρό, μπετονίτη σε τέτοια αναλογία ώστε το τελικό προϊόν να έχει την ίδια συνεκτικότητα με το περιβάλλον εδαφικό υλικό, ενώ επιπρόσθετο όφελος του βελτιωμένου εδάφους αποτελεί η μείωση της διαπερατότητας του, καθώς σπάνε οι δεσμοί του υλικού και προκαλείται αποκόλληση, με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση κατά την εξόρυξη.

Ο θάλαμος μπορεί να επιδιορθωθεί είτε στην ασπίδα είτε στην κοπτική κεφαλή' όμως στη δεύτερη περίπτωση αυξάνεται ο κίνδυνος έμφραξης.

#### 1.2.2.4 Ατέρμονας κοχλίας (Screw conveyor)

Οι ατέρμονες κοχλίες χρησιμοποιούνται στα EPBs για την ελεγχόμενη μεταφορά του εκσκαφθέντος υλικού. Χρησιμοποιείται για:

- Τη μεταφορά του γεωυλικού από το θάλαμο εκσκαφής στο εξωτερικό της σήραγγας μέσω μεταφορικών ταινιών
- Την εφαρμογή πίεσης έναντι υπόγειων υδάτων σε έντονα διαπερατά εδάφη
- Τον έλεγχο της πίεσης υποστήριξης στο θάλαμο εκσκαφής με κατάλληλη προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής.



Εικόνα 1.5: Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής [3]

Στην Εικόνα 1.5 απεικονίζεται ένας ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής. Παρατηρείται ότι το άνοιγμα καλύπτει μόνο το 50% της συνολική διαμέτρου του κοχλία. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη μεταφορά μεγάλων τεμαχίων μέσω του κοχλία. Για το θρυμματισμό τέτοιων τεμαχίων, κοπτικά τύπου δίσκου συνήθως εγκαθίστανται στην κεφαλή.

Η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός προώθησης του μηχανήματος αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες ελέγχου της πίεσης υποστήριξης του μετώπου στο θάλαμο

εκσκαφής. Οι χειριστές των EPBs έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της άσκησης πίεσης στο θάλαμο, μέσω του ελέγχου αυτών των δύο παραγόντων και ιδιαίτερα με προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής. Επιπλέον, κάτι που πρέπει να ελέγχεται είναι η πίεση στον ατέρμονα κοχλία, καθώς μία απομάκρυνση ανεξέλεγκτης ποσότητας υλικού μπορεί να προκαλέσει απότομη πτώση στη λειτουργία του, να επηρεάσει δηλαδή σημαντικά την πίεση στο μέτωπο και κατ' επέκταση την ευστάθεια του μετώπου και τις επιφανειακές καθιζήσεις. Η αδυναμία αυτή του συστήματος επιλύεται με την εγκατάσταση ακροφυσίων, στο μπροστινό μέρος του κοχλία, που εκτοξεύουν πρόσμικτα και βελτιώνουν την ποιότητα του εδάφους.

#### 1.2.2.5 Κυλινδρικά έμβολα ώθησης (Thrust cylinders)

Τα έμβολα ώθησης λειτουργούν με υδραυλικό λάδι πίεσης και είναι υπεύθυνα για τη διατήρηση του EPB σε σταθερή θέση κατά την εκσκαφή και ταυτόχρονα για την ώθηση του μηχανήματος με συγκεκριμένο ρυθμό προχώρησης. Ουσιαστικά, τα έμβολα ασκούν πολύ μεγάλη πίεση στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης και ωθούν το μηχάνημα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι δυνάμεις ώθησης που ασκούνται από τα έμβολα μπορούν να μεταφερθούν και να διανεμηθούν ως πίεση αντισταθμίζοντας την πίεση από το έδαφος και το νερό πίσω από το μέτωπο, μέσω του βελτιωμένου γεωυλικού στο θάλαμο εκσκαφής.



Εικόνα 1.6: Υδραυλικά έμβολα τοποθετημένα στην ουρά της ασπίδας για σωστή ευθυγράμμιση με τα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης [3]

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού της δύναμης ώθησης. Γενικά, διατυπώνεται ότι αυτή η δύναμη καλείται να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος και ταυτόχρονα να διατηρεί την κατάλληλη επαφή με το μέτωπο προκειμένου να μεταφέρεται η απαραίτητη πίεση υποστήριξης. Η επιλογή αυτού του συστήματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

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



Εικόνα 1.7: Σημείο του εξοπλισμού όπου είναι τοποθετημένα τα υδραυλικά έμβολα ώθησης [3]

#### 1.2.3 Τελική επένδυση (Segmental lining)

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας εξυπηρετεί και εξασφαλίζει την κατασκευαστική αρτιότητα, την ανθεκτικότητα και λειτουργικότητα στο εσωτερικό της σήραγγας. Σχεδιάζεται έτσι ώστε να λαμβάνει φορτία που αναπτύσσονται από το περιβάλλον έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, τις τυχηματικές δράσεις (π.χ. εκρήξεις, φωτιά) και σεισμικά φορτία.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι από σκυρόδεμα, εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη δημιουργία ενός κυκλικού δακτυλίου. Βασικό χαρακτηριστικό της τελικής επένδυσης αποτελεί ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων μεταξύ των στοιχείων (ring joints). Τα σημεία σύνδεσης είναι κάθετα στα στοιχεία και κατά μήκος της σήραγγας ανάμεσα στα στοιχεία. Υπάρχουν πολλών ειδών σχήματα προκατασκευασμένων στοιχείων, παρόλα αυτά τα ορθογωνικά στοιχεία είναι τα συνήθη χρησιμοποιούμενα, με κάθε δακτύλιο υποστήριξης συνήθως να φτιάχνεται με πέντε έως οκτώ στοιχεία. Η επιλογή εγκατάστασης προκατασκευασμένων στοιχείων στην επένδυση παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Εξασφαλίζουν υψηλή κατασκευαστική ποιότητα, καθώς υπάρχει η δυνατότητα βιομηχανικού ελέγχου
- Με την τοποθέτηση τους έχουν ήδη αναπτύξει την τελική φέρουσα ικανότητά τους
- Τυχόν διαρροές στα σημεία σύνδεσης μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν άμεσα

Ο υπολογισμός των φορτίων που δρουν στους δακτυλίους περιλαμβάνει λιγότερο βαθμό αβεβαιότητας



Εικόνα 1.8: Τελική επένδυση στο Μετρό της Αθήνας (φωτογραφίες από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤRO)

Γενικά, η φιλοσοφία στο σχεδιασμό των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης δεν διαφέρει σημαντικά από το σχεδιασμό τελικής επένδυσης συμβατικής σήραγγας. Εξ'αιτίας της μηχανοποιημένης όρυξης, η τελική επένδυση πρέπει να είναι σε θέση να παραλάβει και το θλιπτικό φορτίο των υδραυλικών εμβόλων. Το ελάχιστο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων προκειμένου να παραλάβουν τη δύναμη των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του ΕΡΒ κυμαίνεται μεταξύ των 20-50cm.



Εικόνα 1.9: Διαστάσεις δακτυλίου τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτυλίους [3]

Όπως, προαναφέρθηκε παραπάνω, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων αποτελούν τα σημεία σύνδεσης τους. Στην πράξη έχουν

διαπιστωθεί δύο τύποι σημείων σύνδεσης των στοιχείων της επένδυσης, τα επίπεδα σημεία σύνδεσης plane joint (flat contact surface) και τα κυρτά σημεία (convex joint). Η βασική τους διαφοροποίηση έγκειται στην ικανότητά τους να μεταφέρουν καμπτικές ροπές από στοιχείο σε στοιχείο. Στην περίπτωση των plane joints, όταν συμβεί μία στροφή, το κενό μεταξύ των στοιχείων τείνει να κλείσει και καμπτικές ροπές μεταφέρονται μεταξύ των στοιχείων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι ότι σε μεγάλες στροφές αναπτύσσονται υψηλές ροπές κάμψης και οι εξωτερικές παρειές των στοιχείων έρχονται σε επαφή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ζημιά στην κατασκευή. Όταν αναμένονται μεγάλες στροφές πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό ο δεύτερος τύπος συνδέσμων. Εξαιτίας της γεωμετρίας τους οι σύνδεσμοι αυτοί λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις.



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) plane joint (b) και (c) convex joints [3]

Η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης πραγματοποιείται με τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό, τους λεγόμενους γάντζους (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 βραχόμαζα.



Εικόνα 1.11: Μηχανισμός γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός ΕΡΒ μηχανήματος (φωτογραφίες από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤRO)

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

Η διαδικασία προώθησης του μηχανήματος αναπόφευκτα δημιουργεί στο πίσω μέρος του (ουρά) ένα κενό μεταξύ της μόνιμης επένδυσης και του περιβάλλοντος εδάφους. Το κωνικό σχήμα της ασπίδας και η ταυτόχρονη εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης στο εσωτερικό τμήμα της ασπίδας του μηχανήματος είναι οι δύο κύριοι λόγοι δημιουργίας του κενού. Κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη δημιουργούνται οι εξής δύο τύποι κενών:

- Το κενό ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος εξαιτίας του κωνικού σχήματος της, που σκοπό έχει την αποφυγή δημιουργίας δυνάμεων τριβής ανάμεσα σ'αυτήν και το γεωυλικό (tail shield Gap).
- Το κενό μεταξύ της τελικής επένδυσης και του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού. Το συνολικό κενό που δημιουργείται είναι αποτέλεσμα του πάχους της ασπίδας αλλά και του αναμενόμενου αποδεκτού κενού που σχηματίζεται ανάμεσα στην ασπίδα και την τελική επένδυση (annular Gap).



Εικόνα 1.12: Απεικόνιση ουραίου κενού όπως δημιουργείται κατά την προώθηση του μηχανήματος [3]

Ένας ορισμός για το μέγεθος του κενού "G" δίνεται από το Lee et al:

$$G = G_P + U_{3D} + w$$
 Σχέση 1.1

,όπου G<sub>P</sub> είναι το φυσικό κενό που δημιουργείται από τη διαφορά της εξωτερικής διαμέτρου του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με την εξωτερική διάμετρο της τελικής επένδυσης και συνήθως λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 115-140mm (με ελάχιστη 85mm και μέγιστη 185mm) ανάλογα από τη διάμετρο της ασπίδας, U<sub>3D</sub> είναι η τρισδιάστατη ελαστο-πλαστική παραμόρφωση στο μέτωπο και w ένας ορισμένος συντελεστής.

#### <u>Εξοπλισμός πλήρωσης ουραίου κενού</u>

Διάφορα είδη εξοπλισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενεματώσουν το κενό με πιο συνήθους χρήση, στη μηχανοποιημένη όρυξη, σωληνώσεις που καταλήγουν στην ουρά του μηχανήματος. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διαδικασίας ενεμάτωσης με σωληνώσεις είναι ότι αποτρέπεται η διείσδυση υπόγειου νερού και γεωυλικού στο κενό τη στιγμή που το ένεμα το γεμίζει υπό πίεση.



Εικόνα 1.13: Ενδεικτική απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση συστήματος σωληνώσεων εγκατεστημένων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος. [3]

#### Διαδικασία ενεμάτωσης

Η διαδικασία ενεμάτωσης (έγχυση μπετονίτη) εκτελείται είτε με έγχυση μέσω προκαθορισμένων ανοιγμάτων που υπάρχουν ανάμεσα στους δακτυλίους της επένδυσης, είτε με σύστημα σωληνώσεων που εγκαθίσταται στην ουρά του μηχανήματος. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως στη μηχανοποιημένη όρυξη, όταν απαιτείται υποστήριξη του μετώπου. Το πλεονέκτημά της αφορά στη δυνατότητα ομοιόμορφης κατανομής λόγω της ύπαρξης πολλαπλών σημείων έγχυσης ενέματος. Επιπλέον, για τη σωστή πλήρωση των κενών, η ενεμάτωση πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς διακοπή, κατά τη προχώρηση του ΕΡΒ, με ταυτόχρονο έλεγχο του όγκου του ενέματος και της ισχύος εισπίεσης.



Εικόνα 1.14: Εισπίεση ενέματος μέσω ανοιγμάτων στην τελική επένδυση [3]

Η εισπίεση ενέματος αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία στη μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων, καθώς η αδυναμία επαρκούς πλήρωσης του ουραίου κενού με ένεμα αποτελεί συχνή αιτία πρόκλησης εδαφικών και επιφανειακών μετακινήσεων στο πίσω μέρος του EPB. Η στρώση που δημιουργείται επιφέρει τα εξής οφέλη:

- Επιτρέπει την ομοιόμορφη μεταφορά της εδαφικής πίεσης στα στοιχεία της επένδυσης, με αποτέλεσμα να κατανέμονται ομοιόμορφα και οι εσωτερικές δυνάμεις.
- Διατηρεί το αρχικό εντατικό πεδίο και δεν επιτρέπει εδαφικές παραμορφώσεις.
- Προστατεύει τα στοιχεία της επένδυσης καθώς αποτρέπει την άμεση επαφή τους με τις περιβάλλουσες, πιθανότατα δυσμενείς εδαφικές συνθήκες.
- Βελτιώνει τη στεγανοποίηση σε περίπτωση επένδυσης μονού κελύφους.

Η παραπάνω διαδικασία χαρακτηρίζεται ως αρχική διαδικασία ενεμάτωσης. Δευτερεύουσα διαδικασία ενεμάτωσης μπορεί ωστόσο να πραγματοποιηθεί για την πλήρωση κενών που ίσως υφίστανται και μετά την πρώτη εκτέλεση ενεμάτωσης' απόφαση που λαμβάνεται με βάση την εμπειρία και τον έλεγχο του όγκου του αρχικού ενέματος.

Το ένεμα είναι απαραίτητο να πληροί κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές προκειμένου να είναι κατάλληλο για χρήση. Πρέπει να μπορεί να ρέει μέσα στο κενό και να παρουσιάζει καλή εργασιμότητα και σε δεύτερη φάση (συνήθως μετά από ένα διάστημα 4 με 5 ωρών) να συμπεριφέρεται ως σκληρυμένο σκυρόδεμα με κάποια ακαμψία.

### 1.2.5 Πρόσμικτα

Κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη με ΕΡΒ, το εκσκαφθέν γεωυλικό πρέπει να έχει κάποιες ιδιότητες μέσα σε συγκεκριμένα όρια έτσι ώστε η προώθηση του μηχανήματος να γίνεται χωρίς προβλήματα. Ελάχιστα εδαφικά υλικά διαθέτουν στη φυσική τους κατάσταση αυτές τις ιδιότητες με αποτέλεσμα να αναμιγνείονται με διάφορα πρόσμικτα προϊόντα στις περισσότερες περιπτώσεις. Έτσι, η ανάμιξη του εδαφικού υλικού με πρόσμικτα πίσω από το μέτωπο ή στο θάλαμο εκσκαφής έγινε μια απαραίτητη πρακτική. Οι παράμετροι που χρήζουν βελτίωση αφορούν το εύρος εφαρμογής του ΕΡΒ στους εδαφικούς σχηματισμούς, την περιεκτικότητα του γεωυλικού σε νερό (w), το δείκτη πλαστικότητας (I<sub>p</sub>),το δείκτη υδαρότητας (w<sub>L</sub>) και μπορούν να ελεγχθούν με προσθήκη νερού, μπετονίτη, αργίλου και αφρού. Στην όρυξη με ΕΡΒ χρησιμοποιείται κυρίως ο αφρός για τη βελτίωση του εδαφικού υλικού.

#### <u>Χρήση αφρού (Foam conditioning)</u>

Ο αφρός είναι ουσιαστικά αέρας, ο οποίος αναμειγνύεται με πρόσμικτα προϊόντα στο πίσω τμήμα του EPB και εκτοξεύεται μέσω ακροφυσίων στο μπροστινό μέρος της κοπτικής κεφαλής. Το σύστημα διανομής πρέπει να βρίσκεται το πλησιέστερο δυνατό στο σημείο όπου θα πραγματοποιηθεί η εκτόξευση του αφρού, σε αντίθετη περίπτωση η διαδικασία εκτόξευσης πραγματοποιείται μέσω σωληνώσεων. Σε κατάσταση πολλαπλής έγχυσης, κάθε θύρα εκτόξευσης έχει το δικό της σύστημα διανομής, στο οποίο απαιτείται να εξασφαλίζεται πίεση 16bar.

Οι υπάρχουσες φυσαλίδες στο στερεό σκελετό του εδάφους μειώνουν την πυκνότητα του πολτοποιημένου υλικού και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρότερη τριβή μεταξύ των κόκκων. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης αφρού είναι η παθητική ώθηση που τείνει να αποσταθεροποιεί την πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής. Στην περίπτωση πτώσης της πίεσης στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής, οι φυσαλίδες ελέγχουν την ευστάθεια του μετώπου από πτώση. Επιπλέον, βοηθούν στη μείωση του βαθμού δυσκαμψίας του γεωυλικού προσδίδοντας του καλύτερες ελαστοπλαστικές ιδιότητες.



Εικόνα 1.15: Διαδικασία ελέγχου εισπίεσης αφρού στην κοπτική κεφαλή ενός μηχανήματος ΕΡΒ [3]

#### 1.2.6 Έλεγχος πίεσης του μετώπου (Control of face pressure)

Η ευστάθεια του μετώπου και ο έλεγχος των παραμορφώσεων του αποτελούν κύριους παράγοντες επιλογής μεθόδου εκσκαφής και κατασκευής σε περιοχές με αστικές δραστηριότητες. Ιδιαίτερα στη μηχανοποιημένη όρυξη, ο υπολογισμός και εφαρμογή της απαιτούμενης πίεσης στο μέτωπο είναι βασικό στάδιο στο σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου. Επιπλέον, η διατήρηση της απαιτούμενης πίεσης στο μέτωπο είνα ασφαλή λειτουργία του μηχανήματος.

Το ΕΡΒ παρέχει συνεχή υποστήριξη του μετώπου μέσω της εφαρμογής φρέσκουεκσκαπτόμενου υγρού υλικού, το οποίο υπό πίεση πληρώνει το θάλαμο εκσκαφής. Το εκσκαπτόμενο γεωυλικό αποτελεί το μέσο μεταφοράς των δυνάμεων ώθησης στο μέτωπο, με πίεση κατάλληλη να αντισταθμίζει τις αποσταθεροποιητικές δυνάμεις (γεωστατικές και νερού πόρων). Στην Εικόνα 1.16 απεικονίζεται η κατανομή της γεωστατικής πίεσης και της πίεσης που ασκείται από το μηχάνημα προς εξισορρόπηση.

Η απαραίτητη τιμή πίεσης στο μέτωπο πρέπει να βασίζεται σε υπολογισμούς βασισμένους σε αναλυτικές και/ή αριθμητικές μεθόδους. Κατά τη προώθηση του μηχανήματος, ο χειριστής του μηχανήματος και ο μηχανικός πρέπει να εξασφαλίζουν τη πίεση στο θάλαμο εκσκαφής στα επιτρεπτά όρια. Αυτό επιτυγχάνεται προσαρμόζοντας το ρυθμό προώθησης του μηχανήματος και το ρυθμό εναποθέτησης του υλικού στον ατέρμονα κοχλία, με βάση τα διαθέσιμα συστήματα ελέγχου (κυψέλες πίεσης μέσα στο θάλαμο) και σαφώς την αντίστοιχη επαγγελματική εμπειρία.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι η εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο, στη μηχανοποιημένη όρυξη έχει και άνω όριο καθώς αστάθεια του μετώπου μπορεί να προκληθεί και από απαράδεκτα υψηλές πιέσεις (πιθανότητα ανύψωσης της επιφάνειας) σε πολύ ρηχές σήραγγες.





# 1.3 Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα-Slurry Shield Machine

Τα μηχανήματα πολφού-Slurries, μαζί με τα EPBs, αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα μηχανήματα μηχανοποιημένης όρυξης σε αστικές περιοχές, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται και τον περιορισμό των τάσεων στο περιβάλλον έδαφος. Η βασικότερη διαφορά που εντοπίζεται στην επιλογή ενός μηχανημάτος Slurry και ενός EPB, είναι η αποτελεσματικότητα των Slurries με την εφαρμογή μπετονιτικού πολφού σε μεγαλύτερο εύρος εδαφικών σχηματισμών και σε περιπτώσεις ύπαρξης υψηλού υδραυλικού φορτίου και υψηλής περατότητας (ο μπετονιτικός πολφός βοηθάει στο "σφράγισμα" του μετώπου κατά τις επισκευές του θαλάμου σε περιβάλλον πεπιεσμένου αέρα), σε αντίθεση με τα EPBs που παρουσιάζουν καλύτερη λειτουργία σε συνεκτικά αργιλικά εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα.

Η μηχανοποιημένη όρυξη με Slurry ενδείκνυται σε χαλαρά κοκκώδη εδάφη για ένα εύρος υδραυλικής διαπερατότητας μεταξύ 10<sup>-8</sup>m/s – 10<sup>-2</sup> m/s, που εύκολα διαχωρίζονται στην εγκατάσταση διαχωρισμού (δυσκολίες διαχωρισμού μπετονίτη-εδάφους όταν οι κόκκοι μικρότεροι των 60μm > 20%). Σε πολύ διαπερατά εδάφη, με διαπερατότητα μεγαλύτερη από 10<sup>-3</sup>m/s, παρεμποδίζεται ο σχηματισμός μεμβράνης και η μεταφορά πίεσης στο μέτωπο, καθώς υπάρχει κίνδυνος ροής μπετονίτη στο έδαφος.



Στην Εικόνα 1.17 παρουσιάζεται το κριτήριο επιλογής μεταξύ ενός Slurry με ένα ΕΡΒ σύμφωνα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες προκειμένου να επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός προχώρησης κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας.

#### 1.3.1 Αρχές Λειτουργίας Slurry Machine

Τα μηχανήματα Slurries αποτελούν την καταλληλότερη λύση για επιτυχημένη διάνοιξη σε χαλαρά εδάφη, όπου η χρήση των EPBs δεν είναι δυνατή. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός Slurry είναι η δυνατότητα ανάμειξης του αιωρήματος με το εδαφικό υλικό που εκσκάπτεται, σχηματίζοντας μια τέλεια πλαστική πάστα υλικού για τη συγκράτηση του μετώπου. Συγκεκριμένα, σ' αυτού του τύπου τα μηχανήματα, ο μπετονίτης εφαρμόζεται στο μέτωπο προσφέροντας μια σταθεροποιητική πίεση, διαμέσου του ιδίου βάρους του.

Η επιτυχής λειτουργία του Slurry εξαρτάται άμεσα από τη σωστή λειτουργία κάθε επι μέρους τμήματος που το απαρτίζει και από την ομαλή αλληλεπίδραση μεταξύ τους, όπως και σε οποιαδήποτε μηχανοποιημένη διαδικασία εκσκαφής.


Notes: (1) Cutterhead; (2) excavation chamber; (3) bulkhead; (4) slurry feed line; (5) air cushion; (6) wall; (7) Segmental Lining; and (8) segment erector

#### Εικόνα 1.18: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα-Slurry Machine [3]

Οι αριθμοί στην Εικόνα 1.18 αντιστοιχούν στα μέρη που απαρτίζουν ένα Slurry. Η κοπτική κεφαλή, εξοπλισμένη με κατάλληλα κοπτικά εργαλεία, συντελεί στη χαλάρωση και απομάκρυνση του γεωυλικού από το μέτωπο. Ποσότητες εκσκαφθέντος υλικού εισέρχονται στο θάλαμο, γνωστό και ως κάδο ανάμειξης (chamber excavation), όπου γίνεται η ανάμειξη του με μπετονίτη. Με την εφαρμογή του μπετονιτικού πολφού ως μέσο πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής, ισοσταθμίζεται η εδαφική πίεση και η πίεση του νερού των πόρων και ελέγχεται η σταθερότητα του μετώπου, αποτρέποντας την τάση διείσδυσης προς την ασπίδα του μηχανήματος.

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής διαχωρίζεται από την υπόλοιπη σήραγγα μέσω ενός αεροσταγούς διαφράγματος. Ο σχεδιασμός μέγιστης λειτουργίας της πίεσης στα τοιχώματα του διαφράγματος της κεφαλής κοπής είναι 7 bars.

Ο εφοδιασμός του μπετονιτικού αιωρήματος στο θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται από σωληνώσεις τροφοδοσίας . Η απαιτούμενη για τη στήριξη του μετώπου πίεση, ρυθμίζεται μέσω του ελέγχου της ταχύτητας παροχής του μπετονίτη των αντλιών τροφοδοσίας και άντλησης των υλικών εκσκαφής. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με υδραυλικές αντλίες μέσω των σωλήνων του εναιωρήματος προς τη μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται σε εργοτάξιο εκτός της σήραγγας, όπου διαχωρίζεται το υλικό εκσκαφής από το μπετονίτη.

Στην οικογένεια των Slurries ανήκουν και τα μηχανήματα ασπίδας μικτού τύπουυδροασπίδας (Hydroshields), των οποίων το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού που τα διαφοροποιεί από τα Slurries είναι η πίεση του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο εκσκαφής της κεφαλής κοπής που ελέγχεται και υποστηρίζεται μέσω ενός συστήματος πεπιεσμένου αέρα, πιέζοντας ανάλογα το αιώρημα υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.



Εικόνα 1.19: Αρχές λειτουργίας Slurry TBM (Fujita, 1989 Mair & Taylor)

### 1.3.2 Συνιστώντα μέρη ενός μηχανήματος ασπίδας Slurry

#### 1.3.2.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting wheel)

Στις μηχανές ολομέτωπης κοπής ως εργαλείο χαλάρωσης του εδαφικού υλικού στο μέτωπο χρησιμοποιείται η κοπτική κεφαλή, εξοπλισμένη με κοπτικά εργαλεία. Η κοπτική κεφαλή στα Slurries είναι επίπεδη και σχετικά κλειστή, με μοναδική δυνατότητα πρόσβασης κάποια ανοίγματα, τα οποία είναι κλειστά κατά τη διαδικασία προχώρησης. Τα κοπτικά εργαλεία είναι γενικά scrapers ή flat chisels, και έχουν κυκλική διάταξη ώστε να εξασφαλίζεται η εκσκαφή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Ανάλογα με τη διάταξη των κοπτικών εργαλείων της κεφαλής, αυτή μπορεί να κινηθεί κατά ένα κεντρικό άξονα, περιμετρικά και κατά το ένα τέταρτο.



Εικόνα 1.20: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Slurry/Mixshield [3]

Ο βαθμός ανοιγμάτων ορίζεται ως ποσοστό επί ολόκληρης της κοπτικής κεφαλής. Αυτή η παράμετρος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης και για τα Slurries και κυμαίνεται μεταξύ 25-35%.

#### 1.3.2.2 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)

Ένα Slurry παρέχει υποστήριξη στο εκσκαπτόμενο μέτωπο, μέσω μίγματος μπετονιτικού πολφού που υπό πίεση βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, ο θάλαμος εκσκαφής αποτελεί το τμήμα του μηχανήματος που διαχωρίζει τη κοπτική κεφαλή με το υπόλοιπο λειτουργικό σύστημα του μηχανήματος. Η κυκλική διαδικασία ροής και απορροής μπετονιτικού πολφού αποτελεί τη μέθοδο ελέγχου της πίεσης στο θάλαμο, κατ'επέκταση και της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο.

Στην υποκατηγορία, της οικογένειας των Hydroshield μηχανημάτων, υπάρχει η ιδιαιτερότητα ύπαρξης μιας επιπλέον κοπτικής κεφαλής (bulkhead) εγκατεστημένη αρκετά πίσω από την κυρίως κοπτική κεφαλή. Εδώ, ο θάλαμος διαιρείται σε δύο μέρη με την ύπαρξη ενός τοίχου. Το μπροστινό τμήμα πληρώνεται με μίγμα μπετονιτικού πολφού, ενώ το υπόλοιπο πληρώνεται μερικώς. Ο εφοδιασμός του μπετονιτικού αιωρήματος στο θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται από σωληνώσεις τροφοδοσίας μέσω πίεσης αέρα. Σ'αυτή την περίπτωση η πίεση υποστήριξης στο θάλαμο δεν ελέγχεται απευθείας μέσω της πίεσης του αιωρήματος, αλλά έμμεσα από ένα αυτόματο σύστημα ρύθμισης.



Εικόνα 1.21: Σχηματική απεικόνιση εδαφικής πίεσης στο μέτωπο και θαλάμου εκσκαφής ενός Slurry-Mixshield [2]

#### 1.3.2.3 Υδραυλικό Σύστημα Μεταφοράς (Hydraulic Transport)

Η απομάκρυνση και μεταφορά του μπετονιτικού πολφού υδραυλικά διαμέσου σωληνώσεων αποτελεί την πιο βέλτιστη λύση και πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε ν' αποτρέπεται η οποιαδήποτε φραγή στη διατομή. Οι σωληνώσεις αναρρόφησης απομακρύνουν το αιώρημα μπετονίτη στο θάλαμο διαχωρισμού και έπειτα ο καθαρός πλέον μπετονίτης επιστρέφει μέσω της κυκλικής διαδικασίας με τις σωληνώσεις τροφοδοσίας στο θάλαμο εκσκαφής.

Εξαιτίας του υδραυλικού συστήματος, το οποίο επίσης καλείται κλειστό υδραυλικό σύστημα κυκλοφορίας πολτού, τα Slurries μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια ακόμα και με πίεση νερού μεγαλύτερη από 15bar.

Εφόσον η μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού γίνεται μέσω σωληνώσεων, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται διάμετρος σωλήνων τέτοια ώστε να επιτρέπει τη ροή των υλικών με κατάλληλη ταχύτητα.



Εικόνα 1.22: Τυπική διάταξη υδραυλικού συστήματος μεταφοράς μπετονιτικού πολφού και αιωρήματος μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος Slurry [3]

#### 1.3.2.4 Σχέδιο Διαχωρισμού (Separation Plant)

Η υδραυλική μεταφορά του γεωυλικού σ' ένα Slurry πάντοτε απαιτεί διαχωρισμό του υλικού που αναμίχθηκε με μπετονίτη στο τέλος των σωληνώσεων. Στη μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων, ένας αριθμός διαφορετικών μηχανών απαιτείται για τον επαρκή και αποτελεσματικό διαχωρισμό των υλικών, ο οποίος είναι γνωστός και ως Σχέδιο Διαχωρισμού (Separation Plant).

Τα Σχέδια Διαχωρισμού σχεδιάζονται βάσει των προβλεπόμενων γεωτεχνικών πληροφοριών που είναι διαθέσιμες για το έργο και πρέπει να συνεκτιμούνται για την επιλογή του εξοπλισμού κατάλληλου για το μέγεθος των υλικών που αναμένεται να συναντηθούν.

Οι μεταφερόμενες ποσότητες στο Slurry προκειμένου ν' ακολουθήσουν τη διαδικασία διαχωρισμού ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος του μηχανήματος, με σύνηθες εύρος να κυμαίνεται για πολύ μικρές σήραγγες στα 50 m<sup>3</sup>/h, σε καλά διαβαθμισμένα κοκκώδη εδάφη και 2800 m<sup>3</sup>/h για μηχανήματα μεγαλύτερης διαμέτρου.

Ουσιαστικά υπάρχουν δυο διαφορετικές τεχνικές διαδικασιών διαχωρισμού των υλικών που εξαρτώνται από τα συστατικά που επρόκειτο να διαχωριστούν, η καθίζηση και η διείσδυση.

Στην διαδικασία της καθίζησης ορίζεται με αυτό τον όρο η καθίζηση του μεταφερόμενου υλικού. Οι δυο βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία είναι το από τη μία όριο ροής και το ιξώδες του μέσου μεταφοράς (συνήθως νερό ή

μπετονιτικό αιώρημα) και από την άλλη το μέγεθος και η πυκνότητα των κόκκων του εδάφους. Μεταβολές σε αυτές τις παραμέτρους προκαλούν μεταβολή στη ροή

Φίλτρα με προκαθορισμένο μέγεθος διερχόμενου υλικού χρησιμοποιούνται στην τεχνική της διείσδυσης. Το μέγεθος των κόκκων και το σχήμα, που μπορεί ν' αλλάζουν πολύ από υλικό σε υλικό, ορίζουν την απόδοση του διαχωρισμού



Εικόνα 1.23: Σύστημα Διαχωρισμού γεωυλικού από μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick TBSS-450 [3]

Βάσει όσων προαναφέρθηκαν παραπάνω, το Σχέδιο Διαχωρισμού χρησιμοποιεί διάφορα στάδια επεξεργασίας, ούτως ώστε σε κάθε στάδιο να αφαιρούνται διαφορετικά συστατικά του πολτού. Ο αριθμός αυτών των σταδίων εξαρτάται από τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του έργου.



Εικόνα 1.24: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών σταδίων επεξεργασίας σ' ένα σχέδιο διαχωρισμού υλικών κατά Herrenknecht [3]

# 2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την κατασκευή των σηράγγων κυρίως σε αστικό περιβάλλον, είναι η εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων και της πιθανής επίδρασης τους στη θεμελίωση των υπερκείμενων κατασκευών.

Είναι δεδομένο ότι ενώ η εκδήλωση επιφανειακών εδαφικών καθιζήσεων εξαιτίας της διάνοιξης μιας σήραγγας είναι αναπόφευκτη, ο περιορισμός του μεγέθους των εντός καθορισμένων ανεκτών ορίων, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων διάνοιξης και υποστήριξης υπόγειων εκσκαφών. Τονίζεται ότι η επιλογή και ο επαρκής σχεδιασμός αυτών των μεθόδων πρέπει να βασίζεται αφενός στην αξιολόγηση των επιτόπου εδαφικών συνθηκών, κι αφετέρου στην όσο το δυνατόν ορθότερη και αρχική εκτίμηση του μεγέθους και της κατανομής των καθιζήσεων της επιφανείας.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί στο πέρασμα των χρόνων και αναλύουν όλους εκείνους τους μηχανισμούς, οι οποίοι κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης μίας σήραγγας δημιουργούν απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss ή volume loss) και συνεπώς σχετίζονται άμεσα με την εμφάνιση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Σήμερα, οι πιο συνήθεις μέθοδοι βασίζονται σε ημιεμπειρικές, αναλυτικές και μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων.

## 2.2 Εδαφικές μετακινήσεις και μηχανισμοί απώλειας εδάφους

## 2.2.1 Εδαφικές μετακινήσεις κάθετα προς τον άξονα της σήραγγας

Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες, έχουν μέχρι σήμερα επικεντρωθεί στην πρόβλεψη της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων (ground surface settlement trough), η οποία είναι δυνατόν να προσομοιωθεί, με ικανοποιητική ακρίβεια, από μία καμπύλη σφάλματος (Εικόνα 2.1) της οποίας η μαθηματική έκφραση δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Peck and Schmidt, 1969):

$$S_{v(x)} = S_{v,max} e^{(\frac{-x^2}{2i_x^2})}$$
 Σχέση 2.1

Όπου:

 $S_{v(x)}$ : η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους και σε σημείο το οποίο απέχει εγκάρσια απόσταση x από τον άξονα της σήραγγας

 $S_{v,max}$ : η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτει για τη θέση x=0

i<sub>x</sub> : η τυπική απόκλιση της καμπύλης των καθιζήσεων. Η τιμή της παραμέτρου i καθορίζει στην ουσία το εύρος της καμπύλης των καθιζήσεων και αντιστοιχεί στη θέση του σημείου καμπής (σημείο με τη μέγιστη κλίση). Στις πρακτικές εφαρμογές το εύρος της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων λαμβάνεται ίσο με 3i (inflection point)

Η μαθηματική Σχέση 2.1 έχει προκύψει μετά από στατιστική επεξεργασία και αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού επιτόπου μετρήσεων υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, οι οποίες προέρχονται από περιπτώσεις διανοίξεων υπόγειων ανοιγμάτων σε μεγάλη ποικιλία γεωτεχνικών συνθηκών.



Εικόνα 2.1: Ιδεατή καμπύλη επιφανειακών κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (καθιζήσεων) υπό συνθήκες <<ελεύθερου πεδίου>> [8]

Το σημείο καμπής i<sub>x</sub> (inflection point) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός υπόγειου έργου σε μικρό βάθος, όσον αφορά τις μετακινήσεις, στροφές και παραμορφώσεις που μπορεί να προκληθούν σε γειτονικά κτίρια και κατασκευές (Addenbrooke et al., 1997, Franzius, 2003, Losacco et al., 2014). Ως σημείο μέγιστης κλίσης, διαχωρίζει τη ζώνη συνθηκών κάμψης (sagging) από τη ζώνη συνθηκών κύρτωσης (hogging). Οι (Kimura and Mair, 1981) έδειξαν ότι η τιμή του σημείου καμπής i<sub>x</sub> είναι ανεξάρτητη της μεθόδου διάνοιξης (συμβατικής ή μηχανοποιημένης).

Ο όγκος ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων ορίζει την απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss) ανά μονάδα μήκους σήραγγας V<sub>s</sub> στην επιφάνεια του εδάφους, και υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της Σχέση 2.2.

$$V_{s} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v,max} e^{(\frac{-x^{2}}{2i_{x}^{2}})} dx = \sqrt{2\pi} i_{x} S_{v,max} \qquad \qquad \textbf{Sxéon 2.2}$$

Το μέγεθος «σχετική απώλεια εδαφικού όγκου» V<sub>L</sub> (volume loss) εκφράζει την προαναφερθείσα απώλεια εδαφικού όγκου, V<sub>s</sub>, ως ποσοστό του ιδεατού εμβαδού της εκσκαφθείσας διατομής της σήραγγας, V, σύμφωνα με τη Σχέση 2.3.

$$V_{\rm L} = rac{V_{\rm s}}{V} = rac{\sqrt{2\pi} i_{\rm x} S_{\rm v,max}}{\pi rac{D^2}{4}}$$
 Σχέση 2.3

Έχει παρατηρηθεί ότι σε μία ευρύτερη περιοχή αστικού περιβάλλοντος, όπου διανοίγεται μία σήραγγα, και κατά τη διαδικασία κατασκευής της δημιουργούνται στα υπερκείμενα

κτίρια ζημιές όχι μόνο λόγω των καθιζήσεων αλλά και εξαιτίας της δημιουργίας οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Έτσι καθίσταται απαραίτητη η εκτίμηση και των οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, που σχετίζονται με την κατασκευή ενός υπόγειου ανοίγματος. Οι (Mair et al, 1996) προτείνουν την παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$S_h = \frac{x}{z_0} S_v$$
 Σχέση 2.4

$$ε_h = \frac{S_v}{z_0} (\frac{x^2}{i_x^2} - 1)$$
 Σχέση 2.5

η οποία συνδέει την καθίζηση  $S_v$  με την οριζόντια απόσταση  $S_h$  στην επιφάνεια του εδάφους, σε μία εγκάρσια απόσταση x από τον άξονα της σήραγγας, με την προϋπόθεση ότι η συνισταμένη των διανυσμάτων των εδαφικών μετακινήσεων κατευθύνεται προς τον άξονα της σήραγγας. Διαφορίζοντας τη Σχέση 2.4 ως προς x προκύπτουν οι οριζόντιες εδαφικές παραμορφώσεις  $ε_h$ .

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται η κατά πλάτος κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων  $S_h$ , των οριζόντιων παραμορφώσεων  $\varepsilon_h$  καθώς και οι αντίστοιχες καθιζήσεις  $S_v$  στην επιφάνεια του εδάφους λόγω διανοίξεως της σήραγγας (Mair et al, 1996).



# Εικόνα 2.2: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω υπόγειων εκσκαφών (Franzius, 2003)

Τονίζεται ότι οι οριζόντιες εδαφικές παραμορφώσεις στην επιφάνεια είναι εφελκυστικές  $(\varepsilon_h < 0)$  για i < x < -i και θλιπτικές για i > x > -i. Οι (O'Reilly and New, 1988) παρουσίασαν κάποια βασικά μεγέθη της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων μέσα από μαθηματική προοπτική, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων ως καμπύλη συνάρτησης σφάλαματος (O'Reilly and New, 1988)

#### 2.2.2 Εδαφικές μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας

Οι καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα διάνοιξης μίας σήραγγας, από παρατηρήσεις των (Attewell and Woodman, 1982) σε κατασκευές σηράγγων σε αργιλικά εδάφη, διαπιστώθηκε ότι ακολουθούν με ικανοποιητική ακρίβεια τη μορφή μίας συνάρτησης πιθανότητας (cumulative probability curve). Η μορφή αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4. Οι ανωτέρω ερευνητές παρατήρησαν ακόμη ότι η άμεση καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους αμέσως πάνω από το μέτωπο της σήραγγας λαμβάνεις 0.3-0.5 *S*<sub>ν</sub> (max), παρόλαυτά αυτό είνα άμεσα συνδεδεμένο με την τεχνική διάνοιξης. Σε περιπτώσεις όπου λαμβάνονται επιπλέον μέτρα υποστήριξης του μετώπου (όπως στη μηχανοποιημένη όρυξη), η ανωτέρω καθίζηση είναι σημαντικά μικρότερη.



Εικόνα 2.4: Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας [8]

$$S_v (y)_{x=0} = S_{v,max} \Phi(\frac{y}{i})$$
 Σχέση 2.6

$$Φ(y) = \frac{1}{i_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y} e^{-\frac{y^2}{2i_y^2}}$$
 Σχέση 2.7

Το προφίλ των κατά μήκος επιφανειακών καθιζήσεων περιγράφεται από την εξίσωση της Σχέση 2.6, όπου Φ(y) είναι η συνάρτηση πιθανότητας (Σχέση 2.7). Το σημείο καμπής  $i_y$ (inflection point) του προφίλ των κατά μήκος του άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων χρήζει μικρότερης σημασίας από το  $i_x$  του εγκάρσιου στον άξονα της σήραγγας προφίλ και παρακάτω με το συμβολισμό i θα χαρακτηρίζεται το σημείο καμπής αντί των  $i_x$  και  $i_y$ .

Η εκδήλωση των ανωτέρω καθιζήσεων, κατά τη διάρκεια κατασκευής των σηράγγων είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές σε υπερκείμενες κατασκευές, ανάλογες με εκείνες οι οποίες προέρχονται από τις αντίστοιχες κατά πλάτος καθιζήσεις μετά και την ολοκλήρωση των εργασιών διανοίξεως (Mair et al, 1998).

#### 2.2.3 Μετα-κατσκευαστικές εδαφικές μετακινήσεις

Σε αργιλικές εδαφικές συνθήκες είναι δυνατό να αναπτυχθούν σημαντικές κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις ακόμα και μετά το πέρας της κατασκευής της σήραγγας (postconstruction settlements). Αυτό αποδίδεται κυρίως στη μεταβολή του καθεστώτος των πιέσεων του νερού των πόρων, με συνέπεια την αύξηση των ενεργών τάσεων (Mair and Taylor, 1997). Ορισμένοι ερευνητές τις αναφέρουν ως καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης. Οι μακροχρόνιες αυτές μετακινήσεις εκδηλώνονται κυρίως ως κατακόρυφες, στην περίπτωση των μαλακών αργίλων, και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να λαμβάνουν τιμές της τάξης του 30-90% της εκδηλωθείσης ολικής καθίζησης (Mair, 1998, Burland, 2001), προκαλώντας επιπλέον διεύρυνση της μορφής της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων, πέραν της αύξησης του μεγέθους των τιμών των τελικών καθιζήσεων. Τονίζεται ότι η οριζόντια συνιστώσα αυτών των μετακινήσεων θεωρείται πρακτικώς αμελητέα.

Κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη, εξαιτίας της υψηλής πίεσης μετώπου και εισπίεσης ενέματος το φαινόμενο ενισχύεται με αποτέλεσμα την πρόκληση υψηλών πιέσεων πόρων στο περιβάλλον έδαφος. Οι (O'Reilly et al., 1991) παρατηρώντας τις καθιζήσεις σε περίοδο 11 χρόνων για μία 3m διαμέτρου σήραγγα, που κατασκευάστηκε με πεπιεσμένο αέρα σε κανονικά στερεοποιημένη ιλυώδη άργιλο στο Grimsby, ανέφεραν ότι περαιτέρω καθιζήσεις παρατηρήθηκαν για κάποιο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της κατασκευής με την τελική ισορροπία να επιτυγχάνεται μόνο μετά από περίπου 10 χρόνια.



Εικόνα 2.5: Μακροχρόνια παρατήρηση καθιζήσεων πάνω από σήραγγα σε μαλακές αργίλους: i) χρονοϊστορία εξέλιξης επιφανειακών καθιζήσεων ii) εγκάρσιο προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων (O'Reilly et al., 1991)

Οι κυριότεροι παράγοντες οι οποίοι διέπουν το φαινόμενο της εκδήλωσης των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης μίας σήραγγας είναι οι ακόλουθοι, όπως κατηγοριοποιήθηκαν από τους (Mair and Taylor, 1997):

- Η αρχική κατανομή των πιέσεων πόρων στο έδαφος, πριν την κατασκευή της σήραγγας.
- Το μέγεθος και η κατανομή των πιέσεων πόρων οι οποίες δημιουργούνται κατά την εκσκαφή της σήραγγας.
- Η συμπιεστότητα και διαπερατότητα της εδαφικής μάζας που περιβάλλει τη σήραγγα.
- Η διαπερατότητα της επένδυσης (lining) της σήραγγας σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους.

#### 2.2.4 Απώλεια εδαφικού όγκου και σχετική απώλεια εδαφικού όγκου

Με τον όρο σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (volume loss), εκφράζεται το ποσοστό επί του ονομαστικού (πλασματικού) όγκου εκσκαφής της σήραγγας (Σχέση 2.8). Γενικά ως απώλεια όγκου ορίζεται ως ένα ποσοστό του λόγου του όγκου της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων προς το πλασματικό όγκο εκσκαφής ανά μονάδα μήκους (R. J Mair et al., 1993).

Στις αναλυτικές και εμπειρικές μεθόδους αναφέρεται συχνά ο όρος απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss). Κατά τον Sagaseta, η εδαφική απώλεια ποσοτικοποιεί το ποσοστό υπερεκσκαφής και ορίζεται ως ο λόγος του πραγματικού εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού προς το θεωρητικό όγκο εκσκαφής της σήραγγας (Σχέση 2.9).

$$V_{\rm L}(\%) = \frac{A_{surface \, settlements}}{A_{tunnel}}$$
 (Volume Loss) Σχέση 2.8

$$G_L(\%) = \frac{A_{tunnel \ convergence}}{A_{tunnel}}$$
 (Ground Loss) Σχέση 2.9





Σε αστράγγιστες συνθήκες, οι όροι εδαφικής απώλειας και σχετικής εδαφικής απώλειας ταυτίζονται, αφού το έδαφος είναι ασυμπίεστο και παραμορφώνει χωρίς μεταβολή του όγκου του, ενώ όταν εμφανίζονται φαινόμενα εξαρτώμενα από το χρόνο (στερεοποίηση, ερπυσμός) οι δύο παράμετροι αποκλίνουν.

## 2.3 Μέθοδοι εκτίμησης εδαφικών μετακινήσεων

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν διάφορες τεχνικές για πρόβλεψη των εδαφικών μετακινήσεων εξαιτίας της διάνοιξης σηράγγων, από αναλυτικές και εμπειρικές μεθόδους σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Κάθε μία μέθοδος χρησιμοποιεί τις δικές τις υποθέσεις.

## 2.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Στις μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε <u>κλειστές αναλυτικές λύσεις</u>, με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, κάθε ερευνητής προτείνει μία αναλυτική ελαστική λύση για τον υπολογισμό των κατακόρυφων και οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων, λόγω διάνοιξης σήραγγας. Τέτοιες μέθοδοι έχουν παρουσιαστεί από τους (Sagaseta, 1987), (Verruijt and Booker, 1996), (Loganathan and Poulos, 1998) και (Osman et al., 2006). Μία σύγκριση των διαφόρων αναλυτικών μεθόδων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7(i), για σήραγγα ακτίνας 5m με ύψος υπερκειμένων 20m από τον άξονα της σήραγγας. Προκειμένου να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις μεθόδους, θεωρήθηκε μία σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss) ίση με 2%, που αντιστοιχεί σε ένα κενό (Gap) της τάξης των 5cm σύμφωνα με τους (Lee et al., 1992), και ένας συντελεστής δ (ovalization factor) ίσος με 0 (Verruijt and Booker, 1996), ενώ στην Εικόνα 2.7(ii) η τιμή της σχετικής εδαφικής απώλειας ισούται με 2.8% και του κενού 7cm, ενώ ο συντελεστής δ λαμβάνεται ίσος με 0.5%. Διαπιστώνεται ότι ο (Osman et al., 2006) προβλέπει μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις κοντά στην άξονα της σήραγγας και καμπύλες με μικρότερες τιμές συγκριτικά με τις υπόλοιπες καμπύλες. Επιπλέον,

αγνοώντας το παράγοντα δ (Εικόνα 2.7(i)) οι (Sagaseta, 1987) και (Verruijt and Booker, 1996) εκτιμούν την ίδια καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων, ενώ όταν αυξάνει η τιμή του δ οι (Verruijt and Booker, 1996) καταλήγουν σε καμπύλες με μεγαλύτερες καθιζήσεις γύρω από τον άξονα της σήραγγας. Τέλος, οι , (Sagaseta, 1987) και (Loganathan and Poulos, 1998) προβλέπουν ίδιες τιμές όσον αφορά τις καθιζήσεις κοντά στον άξονα, ενώ οι δεύτεροι καταλήγουν σε πιο στενή καμπύλη που έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές σημείων καμπής.



Εικόνα 2.7: Σύγκριση καμπυλών επιφανειακών καθιζήσεων για σήραγγα ακτίνας 5m και ύψος υπερκειμένων 20m από τον άξονα της σήραγγας υπολογισμένες με διάφορες προτεινόμενες αναλυτικές μεθόδους (i) για κενό ίσο με 5cm που σύμφωνα με τους (Lee et al., 1992)αντιστοιχεί σε σχετικής απώλεια εδαφικού όγκου 2%, και με τιμή παράγοντα δ όπως εισήχθη από τους (Verruijt and Booker, 1996) ίση με 0. (ii) για κενό ίσο με 7cm που αντιστοιχεί σε 2.8% (Lee et al., 1992), ενώ ο παράγοντας δ λαμβάνει τιμή 0.5%.

#### 2.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκτίμηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων και ειδικότερα των επιφανειακών καθιζήσεων κάθετα στον άξονα της σήραγγας. Από τις εμπερικές μεθόδους βάση για την ανάπτυξη των υπόλοιπων αποτέλεσε η μέθοδος των Peck (1969) και Schmidt (1974), στην οποία η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων προσεγγίζεται από μία καμπύλη σφάλματος (Σχέση 2.1) όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.2.1. Αυτοί έδειξαν ότι η προσέγγιση αυτή προσομοιάζει ικανοποιητικά τη μορφή της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων σε μαλακές αργίλους, με βάση στατιστική επεξεργασία επιτόπου μετρήσεων. Στην Εικόνα 2.8(i) δίνονται κάποια βασικά μεγέθη στην καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων.

2° Κεφάλαιο: Εκτίμηση εδαφικών μετακινήσεων λόγω διανοίξεως αβαθών σηράγγων



Εικόνα 2.8: (i) Επιφανειακές καθιζήσεις απεικονιζόμενες από καμπύλη σφάλματος (Peck, 1969; Schmidt, 1969) (ii) Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής και βάθους σήραγγας (Peck, 1969)

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος γίνεται η υπόθεση μία μέγιστης καθίζησης (S<sub>max</sub>) και του σημείου καμπής i. Η διαδικασία που ακολουθείται για χρήση της μεθόδου αφορά αρχικά την εκτίμηση της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου (volume loss) με βάση την υπάρχουσα εμπειρία και εμπειρικές σχέσεις και έπειτα την υπόθεση ενός σημείου καμπής από το διάγραμμα του Peck (Εικόνα 2.8 (ii)), ώστε έχοντας ορίσει αυτά τα μεγέθη να υπολογιστεί από την Σχέση 2.3 η μέγιστη καθίζηση και από τη Σχέση 2.1 η καθίζηση στην επιφάνεια σε κάθε θέση x από τον άξονα της σήραγγας.

Οι <u>O'Reilly and New (1982)</u>, παρουσίασαν πιο γενικευμένες εμπειρικές σχέσεις για την εύρεση του σημείου καμπής i βασισμένοι στον Peck (1969). Αξιολογώντας επιτόπου μετρήσεις και σχετίζοντας το σημείο καμπής i με το βάθος της σήραγγας z<sub>0</sub> ανακάλυψαν μία γραμμική σχέση (Σχέση 2.10). Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για τις αργίλους η πιο κατάλληλη τιμή K, παραμέτρου που εκφράζει το πλάτος της καμπύλης καθιζήσεων, είναι ίση με 0.5 και μπορεί να ποικίλλει από 0.4 έως 0.7. Οι Kimura and Mair (1981) κατέληξαν σε παρόμοιο συμπέρασμα. Επιπλέον, τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η τιμή του K είναι ανεξάρτητη της μεθόδου διάνοιξης.

$$i = 0.43z_0 + 1.1$$
 για συνεκτικά εδάφη Σχέση 2.11

i = 
$$0.43z_0 - 0.12$$
 για μη συνεκτικά εδάφη Σχέση 2.12

Όπου, i και z<sub>0</sub> σε μέτρα

Προκειμένου να δώσουν πιο ακριβείς προβλέψεις για το σημείο καμπής i, οι O'Reilly and New, 1982, αξιολογώντας δεδομένα παρατηρήσεων στο πεδίο για 21 συνεκτικά και 16 μη συνεκτικά εδάφη όρισαν δύο διαφορετικές σχέσεις που το συνδέουν γραμμικά με το βάθος

διάνοιξης της σήραγγας ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και ανεξάρτητα από τον τρόπο κατασκευής και τη διάμετρο της D (Σχέση 2.11 και Σχέση 2.12).

Οι <u>Mair and Taylor (1997)</u>, στηριζόμενοι στην υπόθεση των O'Reilly and New (1982) ότι η τιμή της παραμέτρου i είναι, κατά προσέγγιση, γραμμική συνάρτηση του βάθους της σήραγγας συνιστούν για πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού τιμές της παραμέτρου Κ: α) K=0.5 για την περίπτωση αργιλικών εδαφών (Εικόνα 2.9(i)) και β) K=0.35 για την περίπτωση κοκκωδών εδαφών (Εικόνα 2.9(ii)). Τα δεδομένα στην Εικόνα 2.9 αφορούν διάφορες μεθόδους κατασκευής σηράγγων, παρόλα αυτά παρουσιάζονται ομαδοποιημένα καθώς η παράμετρος i είναι ανεξάρτητη αυτών (O'Reilly and New, 1982).



Εικόνα 2.9: Εκτίμηση του i συναρτήσει του βάθους διάνοιξης της σήραγγας σε (i) αργιλικά και (ii) σε κοκκώδη εδάφη (άμμοι, χάλικες) (Mair and Taylor, 1997)

Στην (Εικόνα 2.9(i)) επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα των (O'Reilly and New, 1982) ότι για την πλειονότητα των περιπτώσεων η σχέση i=0.50z<sub>0</sub> διατηρείται σταθερή μέσα σ' ένα πλαίσιο απόκλισης i=0.40-0.60z<sub>0</sub>. Όσον αφορά τα δεδομένα για σήραγγες σε κοκκώδη εδάφη παρότι παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση, παρόλα αυτά η πλειονότητα των περιπτώσεων βρίσκεται εντός των ορίων i=0.25z<sub>0</sub> και i=0.45z<sub>0</sub>. Επιπλέον, για αυτό τον τύπο εδάφους η τιμή K=0,35 ισχύει ανεξάρτητα από την τυχόν ύπαρξη στάθμης υπόγειων υδάτων επάνω από τη σήραγγα.

Οι Mair and Taylor (1997) ύστερα από αξιολόγηση σημαντικού αριθμού επιτόπου μετρήσεων των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσσεων σε διαφορετικές στάθμες z υπερκείμενες των σηράγγων, κυρίως σε άργιλο, κατέληξαν ότι ακολουθούν με ικανοποιητική ακρίβεια την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως περιγράφεται από τη Σχέση 2.1. Στηριζόμενοι στην υπόθεση των Ο'Reilly and New (1982), έδειξαν ότι η παράμετρος K αυξάνει με το βάθος, δίνοντας αναλογικά ευρύτερες καμπύλες κοντά στην σήραγγα. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10(i), όπου οι τιμές της παραμέτρου i που λήφθηκαν από μετρήσεις καμπυλών καθιζήσεων σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια

διάνοιξης της σήραγγας z<sub>0.</sub> Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε K=0.5 και όπως φαίνεται έχει απόκλιση από τις μετρήσεις στο πεδίο, ενώ η έντονη μαύρη γραμμή περιγράφει καλύτερα την συμπεριφορά που ακολουθούν τα εύρη i των καμπυλών καθιζήσεων σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια ( Σχέση 2.13).

$$i/z_0 = 0.175 + 0.325(1 - z/z_0)$$
 Σχέση 2.13  
 $i = K(z_0 - z)$  Σχέση 2.14

K = 
$$\frac{0.175 + 0.325(1 - Z/z_0)}{1 - Z/z_0}$$
 Σχέση 2.15



Εικόνα 2.10: (i) Μεταβολή παραμέτρου i καμπυλών καθιζήσεων σε διαφορετικά βάθη z για σήραγγες σε αργίλους (ii) μεταβολή παραμέτρου K ως προς το βάθος για προφίλ καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, πάνω από σήραγγες σε αργίλους (R J Mair et al., 1993)

Στην Εικόνα 2.10(ii) απεικονίζονται οι τιμές της παραμέτρου Κ που λαμβάνονται από τη Σχέση 2.14 χρησιμοποιώντας εύρη i από πραγματικές μετρήσεις. Φαίνεται πως η Σχέση 2.15 κάνει καλή πρόβλεψη της μεταβολής του Κ σε σχέση με το βάθος, ενώ η υπόθεση σταθερού K=0.5 ειδικά για μεγαλύτερα βάθη υποτιμά το εύρος των καμπυλών (μικρότερο i).

#### 2.3.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Οι προαναφερθείσες σχέσεις αφορούν καθιζήσεις που πραγματοποιούνται σε βραχυχρόνιες συνθήκες (σε μαλακές και συμπιεστές αργίλους είναι πιθανή η εμφάνιση μετακατασκευαστικών μετακινήσεων). Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων περιορίζεται επίσης, σε περιπτώσεις που δεν έχουμε συνθήκες greenfield (οι προ υπάρχουσες κατασκευές επηρεάζουν τις προβλεπόμενες μετακινήσεις εξαιτίας της διάνοιξης σηράγγων), καθώς και όταν η απόσταση μεταξύ των σηράγγων δεν είναι αρκετή ώστε κάθε σήραγγα να εξετασθεί ως μονή. Αναμφίβολα, οι σχέσεις αυτές έχουν περιορισμένη χρήση με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις και εάν μια από αυτές δεν πληρείται τότε οι προβλέψεις μπορεί να αποκλίνουν πολύ σε σχέση με την πραγματικότητα.

Αντίθετα, οι αριθμητικές μέθοδοι -που παρατίθενται στο υποκεφάλαιο αυτό δίνουν τη δυνατότητα της αλληλεπίδρασης των διάφορων συνιστωσών ενός προβλήματος σε μια ανάλυση.

Η πλειονότητα των χαρακτηριστικών της διαδικασίας μηχανοποιημένης εκσκαφής (εξώθηση μετώπου, ανάπτυξη καθιζήσεων κτλπ) είναι τρισδιάστατα προβλήματα. Μέχρι σήμερα που η τεχνολογία δεν ευνοούσε την ανάπτυξη τέτοιου είδους προσομοιωμάτων, πραγματοποιούνταν κυρίως δισδιάστατες αναλύσεις, καθώς το υπολογιστικό κόστος ήταν μικρότερο. Παρακάτω, παρουσιάζεται μια οπτική του πως οι αριθμητικές μέθοδοι, και κυρίως με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM), εφαρμόζονται για πρόβλεψη μετακινήσεων που προκαλούνται λόγω της εκσκαφής.

#### 2.3.3.1 Αριθμητικό μοντέλο Pr. Meschke et al

Ο Pr. Meschke και η ομάδα του συγκαταλέγονται ανάμεσα στους πρώτους που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη τρισδιάστατων πεπερασμένων προσομοιωμάτων σχετικά με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Πάνω από μία δεκαετία δουλεύουν σε προσομοιώσεις του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM με χρήση του λογισμικού TSIM3D και έχουν μελετήσει διάφορες παραμέτρους, που επηρεάζουν, άλλες λιγότερο άλλες περισσότερο, τις εδαφικές μετακινήσεις εξαιτίας της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων.

To 2004, οι Kasper και Meschke παρουσίασαν ένα λεπτομερές μοντέλο που λάμβανε υπόψιν του όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη λειτουργία του ΕΡΒ μηχανήματος, π.χ. την τριβή του μηχανήματος με το περιβάλλον εδαφικό σχηματισμό, τη διαδικασία ενεμάτωσης του ουραίου κενού, την κίνηση των υδραυλικών εμβόλων, καθώς και την προοδευτική διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας και προώθησης του μηχανήματος. Το αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: (i) Αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία προώθησης εκσκαφής και μηχανήματος (Kasper and Meschke, 2004)

Το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM προσομοιώνεται ως ένα άκαμπτο σώμα, που επιτρέπει τη παραμόρφωση και συνδέεται με το περιβάλλον έδαφος μέσω στοιχείων που

έχουν ιδιότητες τριβής. Αυτό το μοντέλο έλαβε υπόψη του γραμμική προσέγγιση άσκησης πίεσης υποστήριξης ως προς το ύψος και μάλιστα με τραπεζοειδή κατανομή. Η διαδικασία προώθησης του μηχανήματος πραγματοποιείται με την ώθηση που προσφέρουν τα υδραυλικά έμβολα πάνω στα δακτυλίδια της υποστήριξης που έχουν ήδη τοποθετηθεί, νικώντας με αυτό τον τρόπο την αντίσταση που παρουσιάζει το περιβάλλον γεωυλικό Εικόνα 2.11.

Για να επιτευχθεί η κατά το δυνατότερο ακριβέστερη προσέγγιση της προχώρησης του ΤΒΜ και της αλληλεπίδρασης αυτού με το περιβάλλον έδαφος χρησιμοποιούνται ειδικοί αλγόριθμοι που καθορίζουν την ακριβή πορεία του μηχανήματος όπως αυτή έχει σχεδιαστεί. Ακολουθείται μία μέθοδος ανάλυσης βήμα προς βήμα που σε καθένα από αυτά ενεργοποιούνται τα στοιχεία του μηχανήματος και αφαιρούνται τα στοιχεία του εδάφους μπροστά από τη κοπτική κεφαλή. Σε κάθε βήμα λοιπόν έχουμε την εκσκαφή μπροστά από τη κεφαλή, τη πλήρωση του ουραίου κενού και τη τοποθέτηση του νέου δακτυλίου της επένδυσης. Στη συνέχεια διαμορφώνεται μια νέα κατάσταση και μεταφέρονται στο επόμενο βήμα οι συνοριακές συνθήκες και τα πεπερασμένα στοιχεία του νέου βήματος διαμορφώνονται. Σημαντικό βήμα στο αριθμητικό προσομοίωμα προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος αποτελεί η συνεχής προσαρμογή της διακριτοποίησης στη περιοχή του μετώπου της σήραγγας (re-meshing). Ακόμη το κενό μεταξύ της επένδυσης και των στοιχείων του εδάφους καθώς επίσης και η ενεμάτωση αυτού, γίνεται σε δύο φάσεις με στοιχεία που προσομοιώνουν το ένεμα και εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης. Το ένεμα στο κενό προσομοιώνεται ως ένα ελαστικό υλικό, με χρονικά εξαρτώμενη απόκτηση της ακαμψίας του.



Pressure bulkhead Shield skin (with frictional contact to the soil) Tail void grout Hydraulic jacks of the machine

Εικόνα 2.12: (ii) Συστατικά μέρη και βήμα-βήμα διαδικασία προσομοίωσης (a) Τέλος προηγούμενου βήματος εκσκαφής (b) Προώθηση TBM (c) Εκσκαφή εδαφικού υλικού και εισαγωγή στοιχείων που προσομοιώνουν το ένεμα στο κενό και την επένδυση (Kasper and Meschke, 2004)

Μία εξέλιξη στην προσομοίωση του TBM από τους Kasper και Meschke, 2006 αποτέλεσε η πραγματοποίηση ενός τεστ προσομοίωσης σήραγγας με καμπύλη διαδρομή προώθησης Εικόνα 2.13(i). Όμως, έδειξαν ότι ο εφαρμοζόμενος αυτόματος μηχανισμός προώθησης των

μεμονωμένων εμβόλων ώθησης οδηγεί σε απόκλιση από τη προδιαγεγραμμένη πορεία με αποτέλεσμα να απαιτείται περαιτέρω εξέλιξη όσον αφορά τον αλγόριθμο αυτόματου συστήματος διεύθυνσης. Παρόλαυτα οι Kasper και Meschke, 2006 βασιζόμενοι στην προηγούμενη δουλειά τους, μοντελοποίησης του TBM (Kasper και Meschke, 2004) και κάνοντας την παραδοχή ευθείας πορείας, διεξήγαγαν αριθμητικές αναλύσεις ευαισθησίας, προκειμένου να διερευνήσουν την επιρροή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο, της πίεσης του ενέματος και του σχεδιασμού του TBM στις εδαφικές μετακινήσεις και στα φορτία της επένδυσης.



100		100 270	)	270 280	)	280 230	230	230	(kN)
↓		$\downarrow\downarrow\downarrow$		$\downarrow\downarrow\downarrow$		$\downarrow \downarrow$	¥	↓	
$\downarrow$	15	3	15	3	15	3 7.	5 7.	5 3	_(m)

Εικόνα 2.13: (i) Τεστ πρσομοίωσης σήραγγας με καμπύλη διαδρομή προώθησης ακτίνας 200m (ii) Υποθετικό σύστημα φόρτωσης για το back up trailer (Kasper and Meschke, 2006)

Οι παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για σήραγγα διαμέτρου 6.3m, ένα ύψος υπερκειμένων 1.5D και για ισότροπο, υπερστερεοποιημένο, μαλακό, συνεκτικό εδαφικό υλικό του οποίου η συμπεριφορά επιλέχθηκε να ακολουθεί ένα ελαστοπλαστικό Cam-Clay καταστατικό προσομοίωμα. Οι βασικές παράμετροι για τις αναλύσεις με το Cam-Clay κριτήριο ήταν λ=-0.05 (βαθμός συμπίεσης) κ=-0.01 (βαθμός διόγκωσης), ν=0.35 και M=1.0 (κλίση της γραμμής Κρίσιμης κατάστασης). Η περατότητα του εδάφους επιλέχθηκε να είναι ίση με 1x10<sup>-7</sup> m/s και η πυκνότητα του κορεσμένου εδαφικού πολφού ίση με 18kN/m<sup>3</sup>.

Οι Kasper και Meschke, 2006 αφού έκαναν παραμετρική διερεύνηση αυτού του μοντέλου, του οποίου κάποιες από τις υπολογιζόμενες επιφανειακές καθιζήσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.14 συμπέραναν ότι η πίεση στο μέτωπο, η πίεση του ενέματος, το μήκος και η κωνικότητα του μηχανήματος έχουν σημαντική επιρροή στις εδαφικές μετακινήσεις, ενώ το βάρος του μηχανήματος TBM δεν επηρεάζει ιδιαίτερα. Επιπλέον, από τις διερευνηθείσες παραμέτρους, η πίεση του ενέματος και το μήκος της ασπίδας φαίνεται να αποτέλεσαν τους σημαντικότερους παράγοντες όσον αφορά τις ακτινικές τάσεις, τα αξονικά φορτία και τις καμπτικές ροπές στην εγκάρσια τομή της επένδυσης της σήραγγας.



Εικόνα 2.14: Υπολογιζόμενες επιφανειακές καθιζήσεις στο σημείο Α του τμήματος ελέγχου για (i) πιέσεις στο μέτωπο (ii) πιέσεις ενέματος (iii) φορτία trailer (Kasper and Meschke, 2006)

Παρότι, η χρήση ενός δι-φασικού μοντέλου του εδαφικού υλικού φαίνεται να είναι ικανοποιητική, οι Nagel και Meschke, 2010 ισχυρίστηκαν ότι η προσομοίωση πεπιεσμένου αέρα εντός του σχηματισμού απαιτεί τη χρήση τρι-φασικού μοντέλου με την παραδοχή του αέρα ως ξεχωριστή φάση. Έτσι, παρουσίασαν ένα πολυφασικό προσομοίωμα για μαλακά εδάφη, στο οποίο θεωρούνται μεμονωμένα τα στοιχεία του εδάφους – ο εδαφικός σκελετός, η ρευστή και η αέρια φάση – καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους. Το τρι-φασικό μοντέλο σχεδιάστηκε με βάση τη θεωρία του πορώδους μέσου TPM (Theory of Porous Media) και το καταστατικό μοντέλο Cam–Clay χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη συμπεριφορά του υλικού του κορεσμένου εδάφους συμπεριλαμβάνοντας τριχοειδή φαινόμενα.



Εικόνα 2.15: Τρι-φασικό μοντέλο μερικώς κορεσμένου εδαφικού υλικού και αλληλεπιδράσεις των στοιχείων του εδάφους κόκκοι του εδάφους, νερό των πόρων και αέρας (i) Ανεξάρτητη κίνηση των στοιχείων του εδάφους (ii) καταστατικό προσομοίωμα Cam–Clay (Nagel et al., 2012)

Με βάση το παραπάνω καταστατικό μοντέλο οι Nagel and Meschke, 2011 πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις προκειμένου να διερευνήσουν την επιρροή πιθανών πεπιεσμένων ρευστών στο κενό που δημιουργείται ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος εξαιτίας του κωνικού σχήματος της πρώτης και της υπερεκσκαφής. Μία τέτοια μεμβράνη πεπιεσμένων ρευστών ανάμεσα στο TBM και το έδαφος μπορεί να προέχεται από την απευθείας εισπίεση μπετονίτη μέσω ακροφυσίων στην ασπίδα ή από

την εισροή ρευστού υλικού κατόπιν διεργασίας (ένεμα και μίγμα μπετονίτη/εδαφικός πολφός), από το δακτυλιώδες διάκενο και το θάλαμο εκσκαφής.

Συγκεκριμένα, εξέτασαν παραμετρικά τρία διαφορετικά σενάρια(Εικόνα 2.16):

-Με θεώρηση τέτοιου ρευστού φιλμ

-Με θεώρηση ενός πεπιεσμένου ρευστού φιλμ που περιγράφεται από συνοριακές συνθήκες πίεσης που αυξάνεται γραμμικά λόγω του διαφορετικού ύψους κενού στο μπροστινό και πίσω μέρος του μηχανήματος.

-Με θεώρηση ρευστού φιλμ υπό πίεση που περιγράφεται από συνοριακές συνθήκες πίεσης που παραμένει σταθερό με την αύξηση του ύψους κενού.

Οι Nagel και Meschke, 2011, Nagel et al., 2012 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ροή ρευστών στο κενό που δημιουργείται ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος εξαιτίας του κωνικού σχήματος της πρώτης και της υπερεκσκαφής έχει επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις, τη μορφή της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων και στο μέγεθος των δυνάμεων ώθησης από τα έμβολα (Εικόνα 2.16) και επισήμαναν ότι αγνοώντας την επιρροή αυτής της παραμέτρου είναι δυνατό να οδηγηθούν σε υπερεκτίμηση των προκληθέντων καθιζήσεων εξαιτίας της διάνοιξης.



Εικόνα 2.16: Σύγκριση των τελικών τιμών επιφανειακών καθιζήσεων για δύο διαφορετικά σετ εδαφικών χαρακτηριστικών (η πιο λεπτή γραμμή αναφέρεται σε στιφρές αργίλους) και τρεις υποθέσεις για συνθήκες ροής: (i) για ένα σημείο μέτρησης πάνω στον άξονα της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από το μέτωπο (ii) για μία εγκάρσια τομή στο τέλος της προώθησης της σήραγγας (Nagel et al., 2012)

Οι Nagel et al., 2012 διερευνώντας την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και την πίεση του ενέματος, εφαρμόζοντας το τρι-φασικό καταστατικό μοντέλο (CAS) συμπέραναν ότι η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο παρουσιάζει τεράστια επιρορή στις αρχικές καθιζήσεις μπροστά από το μέτωπο, ενώ η πίεση του ενέματος, κυρίως επηρεάζει την τελική καθίζηση.

Επιπλέον, τα αποτέλεσματά τους έδειξαν ότι η εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα δημιουργεί μία μερικώς κορεσμένη ζώνη μπροστά από το μέτωπο (Εικόνα 2.17).



Εικόνα 2.17: Προσομοίωση πεπιεσμένου αέρα' ανάπτυξη μερικώς κορεσμένης εδαφικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο για τις εξής περιπτώσεις: (i) επέκταση ζώνης για κορεσμό εδάφους μικρότερο από 95% (ii) επέκταση ζώνη για κορεσμό εδάφους μικρότερο από 50% (Nagel et al., 2012)

#### 2.3.3.2 Αριθμητικό μοντέλο Lambrughi et al. (2012)

Οι Lambrughi et al., 2012 εισήγαγαν ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο για τη μηχανοποιημένη διάνοιξη, το οποίο μπορούσε να προσομοιώνει ολόκληρη τη διαδικασία εκσκαφής με EPB μηχάνημα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο software FLAC<sup>3D</sup>, το οποίο είναι βασισμένο πάνω στην Generalised Finite Difference, και προκειμένου να εξετασθεί η ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων του, μία σειρά αριθμητικών αναλύσεων διεξήχθησαν των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πραγματικές μετρήσεις από το έργο της επέκτασης του Μετρό Μαδρίτης. Η ασπίδα του TBM προσομοιώθηκε από συνεχή στοιχεία (elements) και αντί του κωνικού σχήματος έγινε η απλοποιημένη υπόθεση ενός κυλίνδρου, ενώ όσον αφορά την πίεση στο μέτωπο έγινε η παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής της αντί γραμμικής. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος προσομοιώθηκε έμμεσα ορίζοντας μία λεπτή στρώση συνεχούς Γραμμικών Ελαστικών στοιχείων (Linear Elastic elements) με πολύ χαμηλή δυσκαμψία. Τέλος, το ένεμα στο ουραίο κενό (tail Gap grouting) μοντελοποιήθηκε με εισαγωγή συνεχών στοιχείων ανάμεσα στο όριο της επένδυσης και του περιβάλλοντος εδάφους.

Προκειμένου να προσομοιωθεί η πίεση ενέματος, τα εισαχθέντα στοιχεία (grout elements) έχουν μία αρχική ισοτροπική θλιπτική πίεση, και μόλις ελευθερώνονται στο κενό, θέλουν να διογκωθούν με αποτέλεσμα να εφαρμόζουν μία ομοιόμορφη ισότροπη πίεση γύρω από τη σήραγγα. Τα στοιχεία ενέματος (grout elements) δίπλα από την ασπίδα εισήχθησαν με πολύ μικρή δυσκαμψία, ώστε να γίνεται προσομοίωση του φρέσκου ενέματος, καθώς μία αυξανόμενη τιμή δυσκαμψίας εφαρμοζόταν αρκετά μακριά από την ασπίδα προκειμένου να προσομοιωθεί η χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά σκλήρυνσης.

Οι τυπικοί εδαφικοί σχηματισμοί στη Μαδρίτη έχουν ένα εύρος, από αργιλώδεις άμμους μέχρι στιφρές αργίλους και γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά καταστατικά μοντέλα για την προσομοίωση: Γραμμικό-ελαστικό, Mohr-Coulomb και τροποποιημένο Cam-Clay. Χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς μια τυπική τομή της επέκτασης του Μετρό της Μαδρίτης, ένας σημαντικός αριθμός παραμετρικών αναλύσεων διεξήχθη ώστε να γίνει εκτίμηση της ευαισθησίας του μοντέλου στη μεταβολή των δεδομένων εισαγωγής. Οι παραμετρικές αναλύσεις ερεύνησαν την επιρροή των προκληθέντων εδαφικών μετακινήσεων εξαιτίας διάφορων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα παράμετροι των καταστατικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, η πίεση στο μέτωπο υποστήριξης και η πίεση του ενέματος.



Εικόνα 2.18: Υπολογισμένες και πραγματικές μετρήσεις εδαφικών μετακινήσεων: (i) Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (Τομή 5-PK-3+721) (ii) Εγκάρσια προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων (Τομή 9-2+260) (iii) Οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς το βάθος (σε απόσταση από τον άξονα της σήραγγας 6m) (Τομή 4.2-2+810) (Lambrughi et al., 2012)

Οι Lambrughi et al., 2012, συμπέραναν ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το τροποποιημένο Cam-Clay είχαν καλύτερη σύγκλιση με τις μετρήσεις ,στο πεδίο, των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων από ότι το Γραμμικό-ελαστικό ή το Mohr-Coulomb μοντέλο (Εικόνα 2.18).

# 3 Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του TBM

## 3.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων και του λογισμικού με το οποίο πραγματοποιούνται αναλύσεις, οδήγησε στην ενσωμάτωση πολύπλοκων αριθμητικών αναλύσεων στο σχεδιασμό των σηράγγων. Ένας από τους κύριους στόχους του σχεδιαστή αποτελεί ο καθορισμός της βέλτιστης σχέσης μεταξύ της ακρίβειας μίας ανάλυσης και του υπολογιστικού κόστους. Γι' αυτό το λόγο σε πολλά προβλήματα, ειδικά στη φάση του σχεδιασμού, γίνονται κάποιες απλοποιητικές προσεγγίσεις οι οποίες δεν αλλοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

Οι κύριοι παράγοντες που δημιουργούν την πολυπλοκότητα της προσομοίωσης της διαδικασίας διάνοιξης με μηχανοποιημένες μεθόδους αφορούν την τρισδιάστατη γεωμετρία του μοντέλου, τα κενά (Gaps) ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος, την πίεση στο μέτωπο, την χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά σκλήρυνσης του ενέματος (grout).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης όλων των ανωτέρω στοιχείων που οδηγούν σε μία ρεαλιστική προσομοίωση της διαδικασίας διάνοιξης με μηχανοποιημένες μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα προσομοιώνονται τα εδαφικά στοιχεία και η βήμα προς βήμα εκσκαφή της σήραγγας, καθώς και το μηχάνημα εκσκαφής με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.13.

## 3.2 Προσομοίωση περιβάλλοντος εδάφους

Οι αριθμητικές αναλύσεις στη συγκεκριμένη διπλωματική διεξάγονται με τη χρήση του σχεδιαστικού και υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.13.

Σχεδιάστηκαν δύο αριθμητικά προσομοιώματα στο γραφικό περιβάλλον του Abaqus, όπως φαίνεται και στις Εικόνα 3.1 και Εικόνα 3.2, και περιλαμβάνουν σήραγγα διαμέτρου D=6m και μήκους διάνοιξης L<sub>exc</sub>=84m. Όσον αφορά τις διαστάσεις των μοντέλων, ορίστηκαν για τις αναλύσεις δύο λόγοι ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας (H/D) με αναλογίες H/D = 2 (Εικόνα 3.1) και H/D = 3, (Εικόνα Εικόνα 3.2) δηλαδή ύψη υπερκειμένων στα 12 και 18m, ενώ η απόσταση του κάτω ορίου του κάθε προσομοιώματος από τον άξονα της σήραγγας ελήφθη σταθερή και ίση με 20m. Όψεις των δύο μοντέλων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3. Το πλευρικό όριο κατά τον άξονα x-x σχεδιάστηκε σε απόσταση ίση με 134m. Λόγω συμμετρίας του τριδιαστάτου σχήματος, σχεδιάστηκε το μισό αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιώντας ως επίπεδο συμμετρίας το κατακόρυφο επίπεδο (z-z) που είναι κάθετο στο διαμήκη άξονα της σήραγγας (y-y).



Εικόνα 3.1: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αριθμητικού μοντέλου με υπερκείμενα H=12m



Εικόνα 3.2: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αριθμητικού μοντέλου με υπερκείμενα H=18m

Ο σχεδιασμός των παραπάνω προσομοιωμάτων στηρίχθηκε σε προηγούμενες αναλύσεις ευαισθησίας και βάσει κάποιων παραδοχών και περιορισμών. Συγκεκριμένα, ο περιορισμός των διαστάσεων της σήραγγας και η προσομοίωση της μισής διατομής λόγω συμμετρίας οδήγησε στην εξοικονόμηση χρόνου της ανάλυσης μειώνοντας τις χρονικές απαιτήσεις του προγράμματος. Ακόμα, επιλέχθηκε απόσταση των ορίων του προσομοιώματος από τη σήραγγα τέτοια ώστε να μην υπάρχει επίδραση των συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Επίσης το μήκος της σήραγγας κατά τη φορά διάνοιξης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην επηρεάζεται η περιοχή στην οποία λαμβάνονται τα αποτελέσματα από τα πλευρικά όρια. Η απόσταση του άξονα από το κάτω όριο παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανομή των ολικών τάσεων μετά την εκσκαφή οι οποίες πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες, παρεμποδίστηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις στα πλευρικά όρια και οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις στο κάτω όριο του μοντέλου. Το άνω όριο αυτού θεωρήθηκε ελεύθερο. Συγκεκριμένα, στο αριστερό και δεξί όριο τοποθετήθηκαν κυλίσεις με σκοπό να επιτρέπεται κατακόρυφη μετακίνηση χωρίς ανάπτυξη διατμητικών τάσεων και στο κάτω όριο τοποθετήθηκαν αρθρώσεις απαγορεύοντας όλες τις μετακινήσεις. Για να αποφευχθεί πάλι η επιρροή των συνοριακών

συνθηκών (boundary effects) στις αναλύσεις, στο κάτω μέρος του προσομοιώματος θεωρήθηκε ένα εδαφικό στρώμα με μεγάλη δυσκαμψία (stiff layer), παραδοχή η οποία έγινε ώστε να εξαχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.3: Άποψη του καννάβου των μοντέλων στο επίπεδο x-z

Συγκεντρωτικά παρουσιάζεται παρακάτω, ένας πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων (Πίνακας 3.1):

Γεωμετρία Μοντέλων					
Μήκος εκσκαφής	84m(=14D)	84m(=14D)			
Βήμα εκσκαφής	1.5m	1.5m			
Βάθος σήραγγας(Η)	12m	18m			
Διάμετρος σήραγγας(D)	6m	6m			
Ύψος υπερκειμένων από τον άξονα της σήραγγας(Η1)	9m	15m			
Συνολικό μήκος	134m	134m			
Συνολικό πλάτος	80m	80m			
Πάχος δύσκαμπτης στρώσης(Stiff layer)	20m	20m			

Πίνακας 3.1: Βασικές γεωμετρικές παράμετροι μοντέλων

## 3.3 Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων των αριθμητικών προσομοιωμάτων

Η προσομοίωση του εδαφικού όγκου έγινε με οκτακομβικά εξαπλευρικά στοιχεία (C2D8).



Εικόνα 3.4: Οκτακομβικά στοιχεία προσομοίωσης εδαφικού υλικού

Η διακριτοποίηση των στοιχείων ακολούθησε μία συγκεκριμένη λογική. Τοποθετήθηκε πυκνός κάνναβος στις περιοχές που απαιτούνταν πιο ακριβή αποτελέσματα, δηλαδή στη σήραγγα και γύρω από αυτή και όσο απομακρυνόμασταν από αυτή έγινε μια σταδιακή αραίωση του καννάβου. Γενικά προσπαθήσαμε να κρατήσουμε ένα ορθοκανονικό σύστημα διακριτοποίησης. Στη βασική γεωμετρία περιλαμβάνονται 7 βοηθητικές γραμμές, 3 οριζόντιες και 4 κατακόρυφες όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα πεπερασμένα στοιχεία της σήραγγας ήταν γύρω από αυτή ανά 1m και η περίμετρος χωρισμένη σε 16 κομμάτια. Όσο απομακρυνόμασταν από αυτή τα στοιχεία ήταν με αραιότερη διακριτοποίηση, με σταδιακή αύξηση και τα στοιχεία εκτός της αναμενόμενης διαμορφούμενης πλαστικής περιοχής και κοντά στα πλευρικά όρια σχεδιάστηκαν ανά 10m καθώς δεν επηρεάζουν τις αναλύσεις και περισσότερα στοιχεία θα αύξαναν το χρόνο ολοκλήρωσής τους. Γύρω από τη σήραγγα διαμορφώθηκαν δύο κυκλικές ομόκεντρες επιφάνειες με απόσταση 1m μεταξύ τους έτσι ώστε η αραίωση των στοιχείων να γίνει όσο το δυνατό πιο ομαλά και να μην δημιουργηθούν προβληματικά πεπερασμένα στοιχεία.

Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η αύξηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις περιοχές εξαγωγής των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και κατ' επέκταση η αύξηση της ορθότητας και της αξιοπιστίας αυτών.



Εικόνα 3.5: Κάνναβος στοιχείων όπως σχεδιάστηκε

## 3.4 Δημιουργία γεωμετρίας μηχανήματος ολομέτωπης κοπής

Το μηχάνημα σχεδιάστηκε και διακριτοποιήθηκε στο περιβάλλον του Ansys και στη συνέχεια ενσωματώθηκε στη γεωμετρία του προσομοιώματος που δημιουργήθηκε στο Abaqus. Το μηχάνημα σχεδιάστηκε κατά το ήμισυ αξιοποιώντας τη συμμετρία κατά των άξονα z-z, με δέσμευση των κόμβων στο επίπεδο συμμετρίας.

Στις αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώνονται όλα τα συστατικά μέρη του ΕΡΒ και συγκεκριμένα η ασπίδα, η κοπτική κεφαλή και ο διαφραγματικός τοίχος με στοιχεία κελύφους τύπου S4 ενώ ο θάλαμος εκσκαφής και το υπόλοιπο τμήμα του μηχανήματος με οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία solid C2D8. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε ρεαλιστική προσομοίωση του βάρους και της δυσκαμψίας του ΕΡΒ. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες αυτών των μερών που συνιστούν ένα TBM.

Συστατικά μέρη ΤΒΜ	Πάχος (cm)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson (-)	Ειδικό βάρος (kN/m³)	
Κοπτική κεφαλή Διαφραγματικός τοίχος Πίσω τμήμα μηχανήματος Ασπίδα ΤΒΜ	10 10 - 10	210 210 0.06 210	0.2 0.2 0.3 0.2	78.5 78.5 16.0 78.5	

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες συστατικών μερών ΤΒΜ

Όσον αφορά τη γεωμετρία του μηχανήματος (Εικόνα 3.6), έχει μήκος ίσο με 10.5m από τα οποία τα 3 πρώτα προσομοιώνουν το θάλαμο εκσκαφής. Για τον υπολογισμό του βάρους του μηχανήματος, προσομοιώνεται και το πίσω μέρος του, backup system. Το πίσω μέρος του θαλάμου εκσκαφής πληροίται με πεπερασμένα στοιχεία έτσι ώστε να προσομοιωθεί το πρόσθετο βάρος λόγω του μηχανολογικού εξοπλισμού που υπάρχει εκεί μέσα. Το μήκος

του είναι ίσο με 6m και στο πίσω μέρος βρίσκεται το προκατασκευασμένο στοιχείο που θα τοποθετηθεί (για τις αναλύσεις μας, το βάρος του μηχανήματος για διάμετρο ίση με 6m λήφθηκε ίσο με 350tons). Στο τελευταίο 1.5m θεωρείται ότι κάτω από την ασπίδα βρίσκεται η πρώτη σειρά προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης πλάτους 1.5m, όσο και το βήμα εκσκαφής και προχώρησης του μηχανήματος.



Εικόνα 3.6: Το μηχάνημα κοπής που προσομοιώθηκε για τη διάνοιξη της σήραγγας

Η ασπίδα του μηχανήματος πάντοτε κατασκευάζεται με διαφορετική διάμετρο μεταξύ στο μπροστινό και πίσω τμήμα του μηχανήματος προκειμένου α) να αποτρέψει όσο είναι δυνατόν τη δημιουργία υψηλών τιμών διατμητικών τάσεων ανάμεσα στην ασπίδα και στο περιβάλλον έδαφος, ώστε να απαιτούνται και μικρότερες δυνάμεις ώθησης (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012) και β) να υποβοηθά το μηχανισμό οδήγησης σε περιπτώσεις καμπύλων διαδρομών. Το σχήμα της ασπίδας είναι κωνικό με κλίση 1-2%, ποσοστό λογικό για περιπτώσεις μαλακών εδαφών. Για παράδειγμα, ποσοστό 1% για μια τυπική ασπίδα μήκους 10m αντιστοιχεί σε 1cm διαφορά ανάμεσα στη διάμετρο στο μπροστινό τμήμα και στο πίσω μέρος του μηχανήματος. Η κωνικότητα του μηχανήματος έχει και μία αρνητική επίδραση στις επιφανειακές καθιζήσεις (Kasper & Meschke, 2006; Litsas, Rachmani, Fortsakis, & Kavvadas, 2014).



Εικόνα 3.7: Ενδεικτικό σκίτσο ορισμού υπερεκσκαφής(overcut) και ουραίου κενού(tail shield Gap)

Το μηχάνημα είναι γεωμετρικά μικρότερο από την εκσκαφή και με αυτό τον τρόπο δημιουργείται εντέχνως υπερεκσκαφή (overcut). Στη προκείμενη εργασία δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα. Το πρώτο και δεύτερο μοντέλο είχαν υπερεκσκαφή 1cm και ουραίο κενό 2cm και 4cm, αντίστοιχα και ένα τρίτο με υπερεκσκαφή 2cm και ουραίο κενό 6cm (Πίνακας 3.3). Αυτές οι αναλύσεις έγιναν με σκοπό να δούμε πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα το διαφορετικό ουραίο κενό που προκύπτει (tail shield Gap).

Πίνακας 3.3: Overcut και Tail shield Gap (Gaps) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα

Overcut	Tail shield Gap		
1 cm	4 cm		
1 cm	2 cm		
2 cm	6 cm		

## 3.5 Ορισμός διεπιφάνειας εδάφους-ασπίδας μηχανήματος

Η ρεαλιστική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ασπίδας μηχανήματος-εδάφους αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στη προσομοίωση της μηχανοποιημένης όρυξης, καθώς η υπερεκσκαφή (overcut) και η κωνικότητα (conicity) του μηχανήματος επιδρούν σημαντικά στις εδαφικές μετακινήσεις.

Η χρήση διεπιφανειών είναι μια από τις κυριότερες μεθόδους προσομοίωσης αλληλεπίδρασης δύο επιφανειών. Αυτή η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε και από τους Nagel, Stascheit, & Meschke, 2011 υιοθετείται και στις αναλύσεις μας. Η υπερεκσαφή και η κωνικότητα της ασπίδας συμπεριλαμβάνονται στην μοντελοποίηση γεωμετρικά, με ορισμό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος μικρότερης διαμέτρου από το όριο της εκσκαφής.

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις επιφάνειες ορίζεται από δύο συνιστώσες μία ορθή και μία εφαπτομενική στις επιφάνειες που αλληλοεπιδρούν.

Η απόσταση ανάμεσα στις δύο επιφάνειες ορίζεται ως clearance. Ο περιορισμός επαφής εφαρμόζεται στο Abaqus όταν το μέγεθος clearance ανάμεσα στις δύο επιφάνειες γίνεται μηδέν. Δεν υπάρχει όριο στο μέγεθος της ασκούμενης πίεσης επαφής που μπορεί να

μεταδοθεί μεταξύ των επιφανειών. Οι επιφάνειες απομακρύνονται όταν η αναπτυσσόμενη πίεση μεταξύ τους γίνεται μηδέν ή αρνητική και ο περιορισμός εξαλείφεται. Αυτή η συμπεριφορά, αναφερόμενη και ως "hard" contact, είναι προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα ως νόμος αλληλεπίδρασης επιφανειών και συνοψίζεται στην Διάγραμμα 3.1(i).

Η παραπάνω συμπεριφορά θα μπορούσε να περιγράφει ιδανικά την αλληλεπίδραση ασπίδας μηχανήματος - εδάφους, παρόλαυτα εξαιτίας της "ακρίβειας" των περιορισμών αυτής της σχέσης (μηδενική διείσδυση) μπορεί να συμβούν πολλές αριθμητικές αστάθειες. Γι' αυτό το λόγο, μια "softened" εκθετική συμπεριφορά για τη σχέση pressure-overclosure επιλέχθηκε (Διάγραμμα 3.1(ii)), όπου οι επιφάνειες ξεκινούν να μεταφέρουν πίεση επαφής μεταξύ τους όταν η απόσταση clearance ανάμεσα τους, μετρημένη στη διεύθυνση της επαφής (ορθών συνιστωσών), μειώνεται σε c<sub>0.</sub> Έπειτα, η μεταφερόμενη πίεση επαφής αυξάνεται εκθετικά ενώ η απόσταση clearance συνεχίζει να μειώνεται, μέχρις ώτου για μηδενική clearance η αναπτυσσόμενη πίεση αντιστοιχεί σε τιμή p<sub>o</sub>. Να σημειωθεί ότι για πολύ μικρές τιμές c<sub>o</sub> και p<sub>o</sub>, η εκθετική σχέση pressure-overclosure δεν διαφέρει καθόλου από τη "hard" contact συμπεριφορά.



Διάγραμμα 3.1: (i) "Hard" contact συμπεριφορά; (ii) "Softened" exponential pressure-overclosure relationship (Abaqus 2011)

Για τις αναλύσεις μας, με στόχο τη προσομοίωση του κενού μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και του εδάφους ορίζονται 2 επιφάνειες. Η πρώτη επιφάνεια αφορά την εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας του μηχανήματος και η δεύτερη την εξωτερική του εδαφικού όγκου στην περιοχή της διάνοιξης. Ειδικότερα η επιφάνεια της ασπίδας ορίζεται ως master interface, ενώ του εδαφικού όγκου ορίζεται ως slave interface, πρακτικά αυτό σημαίνει ότι επιτρέπεται ελάχιστη διείσδυση της slave interface προς τη master.

Στο μοντέλο για να οριστούν οι επιφάνειες εντοπίστηκαν οι εξωτερικές επιφάνειες των στοιχείων και διπλοορίστηκαν οι αντίστοιχοι κόμβοι. Έτσι ορίζεται η συνθήκη όπου θα διαπιστώνεται αν έρχονται σε επαφή οι 2 επιφάνειες. Οι τιμές c<sub>o</sub> και p<sub>o</sub>, με βάση αναλύσεις ευαισθησίας επιλέχθηκαν ίσες με  $10^{-6}$ m και 1KPa, αντίστοιχα. Όταν η κίνηση της slave interface προς τη master φτάσει τη τιμή  $10^{-6}$ m δίνεται η εντολή να ασκηθεί πίεση.

# 3.6 Προσομοίωση ενέματος (Grouting)

Η προσομοίωση του ενέματος στο ουραίο κενό (tail void grouting) στη μηχανοποιημένη όρυξη είναι μία περίπλοκη διαδικασία με πολλές παραμέτρους σχετικά με την πίεση ενέματος (grouting pressure) και το υλικό του ενέματος (grout material). Η πίεση ενέματος (grouting pressure) ασκείται κατά την εισαγωγή ενέματος είτε μέσω ανοιγμάτων που υπάρχουν ανάμεσα στους δακτυλίους της επένδυσης, είτε με σύστημα σωληνώσεων που εγκαθίσταται στην ουρά του μηχανήματος. Όσον αφορά το υλικό ενέματος (grout material), πρόκειται για υλικό με χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά σκλήρυνσης, όπου θεωρείται ότι βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση ακριβώς μετά την έγχυση και άμεσα στερεοποιείται λόγω των επιταχυντών τσιμέντου που μειώνουν το χρόνο σκλήρυνσης του (Διάγραμμα 3.2).

## 3.6.1 Διακριτοποιήση ενέματος

Η προσομοίωση του ενέματος ακολουθεί αυτή του εδαφικού προσομοιώματος; το ένεμα θεωρείται συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας (άξονας z-z που διέρχεται από το κέντρο της). Επομένως, προσομοιώθηκε η μισή γεωμετρία του με δέσμευση των κόμβων στο επίπεδο συμμετρίας.

Η διακριτοποίηση του ενέματος επιτεύχθηκε με οκτακομβικά-εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία, solid elements τύπου C2D8, τα οποία κατά τον άξονα y-y σχεδιάστηκαν με μήκος όσο το βήμα εκσκαφής (1.5m). Το ένεμα στην τελική του μορφή έχει μεταβλητό πάχος καθ' ύψος της ενεμάτωσης ανά βήμα εκσκαφής και αυτό διότι κατά την προσομοίωση, όπως και στη γεωμετρία του μηχανήματος, λήφθηκε υπόψη η κωνικότητα του EPB. Επομένως η διαφορά πάχους στο κατώτερο σημείο της εκσκαφής έναντι του πάχους της στέψης σχεδιάστηκε να είναι 4cm όσα δηλαδή το συνολικό ουραίο κενό της ασπίδας με δεδομένο πως λόγω βαρύτητας το μηχάνημα πατάει στους κόμβους του invert της περιβάλλουσας βραχόμαζας.



Εικόνα 3.8: Ενδεικτική εικόνα διακριτοποίησης ενέματος

## 3.6.2 Υλικό ενέματος (Grout Material)

Η χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά του υλικού του ενέματος παίζει σημαντικό ρόλο στις εδαφικές μετακινήσεις στη μηχανοποιημένη όρυξη. Στο Διάγραμμα 3.2 απεικονίζονται τρεις καμπύλες που προτείνονται στη βιβλιογραφία (Comodromos et al., 2014; Kasper & Meschke, 2004; Lambrughi et al., 2012) σχετικά με την σκλήρυνση του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος με το χρόνο. Οι Kasper & Meschke 2004 και Comodromos et al. 2014 έκαναν παρόμοια υπόθεση για τη συμπεριφορά του υλικού με μόνη διαφορά στις τελικές μέγιστες τιμές του σκληρυμένου ενέματος, 1 και 2.5GPa αντίστοιχα, ενώ οι Lambrughi et al. 2012 πρότειναν μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά κάνοντας την υπόθεση ότι το ένεμα φτάνει στη μέγιστη τιμή αντοχής των 2.6GPa μέσα στις πρώτες 12 ώρες μετά την έκχυση ενέματος. Στις αναλύσεις μας εισάγαμε τη προτεινόμενη από τους (Kasper & Meschke, 2004) σχέση.



Διάγραμμα 3.2: Χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά μέτρου ελαστικότητας (Ε) σύμφωνα με (Kasper & Meschke 2004), (Comodromos et al. 2014) και (Lambrughi et al. 2012)

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την προσομοίωση της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς του ενέματος. Η πλειονότητα των δημοσιεύσεων (Chortis, Tzivakos, & Kavvadas, 2014; Comodromos et al., 2014; N. A. Do et al., 2013; N.-A. Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2013; Kasper & Meschke, 2004; Lambrughi et al., 2012; Litsas et al., 2014; Zhao, Janutolo, & Barla, 2012b) χρησιμοποιούν μια απλοποιημένη λύση διαχωρισμού σε δύο η τρία στάδια της φάσης σκλήρυνσης του υλικού: την υδαρή κατάσταση μέσω της εισαγωγής μιας πολύ χαμηλής τιμής μέτρου ελαστικότητας και μία ή δύο (2) διαφορετικές φάσεις του ενέματος σε στερεή κατάσταση. Παρόλα αυτά, η παραπάνω προσέγγιση δεν προσομοιώνει με ακρίβεια το φυσικό φαινόμενο, καθώς όχι μόνο δεν λαμβάνει υπόψιν την βαθμιαία σκλήρυνση του ενέματος, αλλά αγνοεί και το πεδίο των τάσεων του ενέματος, λόγω της ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των στοιχείων του ενέματος.

Προκειμένου να γίνει ρεαλιστική προσομοίωση της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς του ενέματος, δημιουργήθηκε μία υπορουτίνα στο UMAT (Abaqus, 2011), στην οποία κάθε στοιχείο ενέματος αποκτά χρονικά εξαρτώμενα μία τιμή μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με την προτεινόμενη καμπύλη από τους Kasper and Meschke 2004 (Διάγραμμα 3.2). Έτσι, η ρεαλιστική συμπεριφορά σκλήρυσης του υλικού λαμβάνεται υπόψη χωρίς απλοποιήσεις και το πεδίο των τάσεων των στοιχείων ενέματος διατηρείται σταθερό, εφόσον πλέον εισάγονται σε κώδικα και δεν υφίστανται ενεργοποιήσεις ή αφαιρέσεις αυτών.

## 3.6.3 Πίεση ενέματος (Grout Pressure)

Η πίεση έκχυσης ενέματος αποτελεί υψίστης σημασίας στη μηχανοποιημένη όρυξη, καθώς περαιτέρω εδαφική μετακίνηση και επιφανειακές καθιζήσεις μπορούν να αποφευχθούν μέσω κατάλληλης πίεσης ενέματος. Η πλειονότητα των ερευνητών προσομοιώνουν την πίεση αυτή ως ένα διανεμημένο φορτίο ή μέσω συνοριακών συνθηκών (Comodromos et al., 2014; N. A. Do et al., 2013; N.-A. Do et al., 2013; Kasper & Meschke, 2004; Litsas et al., 2014; Zhao et al., 2012b). Πιο συγκεκριμένα, με την υπόθεση ότι το ένεμα είναι σε ρευστή κατάσταση ακριβώς μετά την έγχυση, εφαρμόζουν μία πίεση ίση με την πίεση του ενέματος στο περιβάλλον έδαφος, κάνοντας όμως κάποιες αναπόφευκτες απλοποιήσεις σχετικά με το μήκος επιρροής, την κατανομή της πίεσης στη διαμήκη διεύθυνση (ομοιόμορφη, τραπεζοειδής, τριγωνική).

Προκειμένου να γίνει προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της πίεσης του ενέματος, εισάγονται τα elements του grout με ένα αρχικό εντατικό πεδίο ίσο με την πίεση του ενέματος(Lambrughi et al., 2012). Γι' αυτό, το υλικό του ενέματος, έχοντας πολύ χαμηλή δυσκαμψία ακριβώς μετά την έγχυση, και με ένα αρχικό εντατικό πεδίο λόγω της πίεσης του ενέματος, τείνει να διογκωθεί και να πιέσει το περιβάλλον έδαφος μέχρι αυτό να φτάσει σε ισορροπία. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η πίεση εφαρμόζεται μέσω του πεδίου των τάσεων των στοιχείων του ενέματος, χωρίς εφαρμογή κατανεμημένων φορτίων ή εισαγωγή περαιτέρω απλοποιήσεων.

Στις αναλύσεις μας, θεωρήθηκαν για τα δύο διαφορετικά μοντέλα που δημιουργήσαμε οι τιμές πίεσης όπως φαίνονται στον πίνακα 3.2. Προκειμένου να έχουμε κοινό σημείο αναφοράς, η πίεση του ενέματος (Grout Pressure) συσχετίστηκε με την επί τόπου τάση στη στέψη της σήραγγας (Σχέση 3.1). Με σκοπό να εξετασθεί η επιρροή της παραμέτρου GP στα αποτελέσματα, εισήχθη ο παράγοντας Grout Pressure factor (GP<sub>factor</sub>), που σύμφωνα με τις τιμές που λαμβάνεις (GP<sub>factor</sub>=1, GP<sub>factor</sub> =0.5 και GP<sub>factor</sub> =1.5) μεταβάλλει την τιμή της πίεσης GP (Σχέση 3.2), όπως παρουσιάζεται στον Πίνακας 3.4.

$$P_{crown} = \gamma \cdot H_{crown}$$
 Σχέση 3.1

$$GP = GP_{factor} \cdot P_{crown}$$
 Σχέση 3.2
3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του ΤΒΜ

H/D	γ	H <sub>crown</sub>	P <sub>crown</sub>	GP (GP <sub>factor</sub> =1)	GP (GP <sub>factor</sub> =0.5)	GP (GP <sub>factor</sub> =1.5)
2	20 (kN/m <sup>3</sup> )	9 (m)	180 Kpa	180 (Kpa)	90 (Kpa)	270 (Kpa)
3	20 (kN/m³)	15 (m)	300 Kpa	300 (Kpa)	150 (Kpa)	450 (Kpa)

# 3.7 Προσομοίωση πίεσης μετώπου εκσκαφής (Face Pressure)

Στη μηχανοποιημένη όρυξη σε αστικές περιοχές τα πιο συνήθη χρησιμοποιούμενα μηχανήματα είναι τα ΕΡΒ, καθώς έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής υψηλής πίεσης στο μέτωπο χρησιμοποιώντας το υπάρχον εκσκαπτόμενο υλικό, το οποίο υπό πίεση γεμίζει το θάλαμο εκσκαφής και επιπλέον αποτρέπουν να υποστεί παραμορφώσεις το περιβάλλον έδαφος. Ειδικότερα, το γεωυλικό στο θάλαμο εκσκαφής, το οποίο είναι βελτιωμένο με νερό, αφρό και άλλα πρόσμικτα, ασκεί μια σταθεροποιητική πίεση μέσω του ιδίου βάρους του και ομοιόμορφα κατανέμει τις δυνάμεις ώθησης του μηχανήματος (P<sub>0</sub>) στο μέτωπο της σήραγγας.



Εικόνα 3.9: Ενδεικτικό σκίτσο εφαρμογής των σταθεροποιητικών και αποσταθεροποιητικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής κατά την προώθηση του μηχανήματος

3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του TBM

Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σκίτσο των πιέσεων που ασκούνται στο μέτωπο από και προς το μέτωπο εκσκαφής όταν το μηχάνημα προωθείται. Έχοντας μία σταθερή πίεση P<sub>0</sub> στην στέψη εξαιτίας της πίεσης ώθησης, γίνεται η υπόθεση ότι η ασκούμενη πίεση μετώπου λαμβάνει τραπεζοειδή κατανομή με κλίση ίση και σταθερή με την πυκνότητα του υλικού εκσκσαφής (γ<sub>muck</sub>), η οποία θεωρήθηκε 13kN/m<sup>3</sup>.

$$P_o = A\gamma_w (H - D/2) \rightarrow P_o = AP_{w,crown}$$
 Σχέση 3.3

$$P_{oSOL} = \gamma_w H + \gamma_{eff} K_o H$$
 Σχέση 3.4

$$P_{APPLIED} = P_o + \gamma_{MUCK} D/2$$
 Σχέση 3.5

## 3.7.1 Η παράμετρος "Α"

Η πίεση P<sub>0</sub> ρυθμίζεται από το χειριστή του EPB προσαρμόζοντας τις δυνάμεις ώθησης. Προκειμένου στις αναλύσεις μας να έχουμε κοινό σημείο αναφοράς, η τιμή P<sub>0</sub> σχετίζεται με την υδροστατική πίεση στην στέψη της σήραγγας (Σχέση 3.3) με εισαγωγή του αδιάστατου παράγοντα Α. Έτσι, η εφαρμοζόμενη πίεση P<sub>0</sub> του μηχανήματος για τιμή της παραμέτρου A=1, ισούται με P<sub>w,crown</sub>=γ<sub>w</sub>(H-D/2), ενώ για A=0,5 γίνεται P<sub>w,crown</sub>/2=0.5γ<sub>w</sub>(H-D/2).

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο εδαφικά προσομοιώματα(H/D=2, H/D=3), αναλύσεις για τιμές της παραμέτρου Face Pressure (FP) A=1, A=0,5 και A=1,5.

H/D	Υw	P <sub>w,crown</sub>	γ <sub>мυск</sub> D/2	P <sub>APPLIED</sub> (A=1)	P <sub>APPLIED</sub> (A=0.5)	P <sub>APPLIED</sub> (A=1.5)
2	10 (kN/m³)	90 Kpa	39 (Kpa)	129 (Kpa)	64.5 (Kpa)	193.5 (Kpa)
3	10 (kN/m³)	150 Kpa	39 (Kpa)	189 (Kpa)	94.5 (Kpa)	283.5 (Kpa)

Πίνακας 3.5: Πίεση μετώπου (PAPPLIED) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα

3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του TBM

## 3.7.2 Πυκνότητα εδαφικού πολτού (γ<sub>muck</sub>)

Εικόνα 3.10 απεικονίζει πραγματικές Н μετρήσεις της κατανομής της πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής ενός ΕΡΒ μηχανήματος κατά την προώθηση του στο Botlek Rail Tunnel (Bezuijen, Joustra, Talmon, & Grote, 2005). Οι μετρήσεις αναφέρονται σε διάφορα χρονικά βήματα και ενδεικτικά παρουσιάζονται ο μέγιστος και ελάχιστος βαθμός πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής και η αντίστοιχη πυκνότητα του εδαφικού πολτού για κάθε βαθμό(10-16.5kN/m<sup>3</sup>). Έτσι, η τιμή της πυκνότητας ίση με 13kN/m<sup>3</sup> θεωρήθηκε μία λογική προσέγγιση. Οι αντίστοιχες τιμές λαμβάνονται στον αναφοράς άξονα της σήραγγας(Εικόνα 3.10) και σχετίζονται με την

ολική οριζόντια γεωστατική τάση στο πεδίο. P<sub>APPLIED</sub>/P<sub>SOIL</sub> (Σχέση 3.3, Σχέση 3.4 & Σχέση 3.5). Στο Simulia ABAQUS αυτή η τραπεζοειδής πίεση στο μέτωπο εκσκαφής επιτυγχάνεται με εφαρμογή κατανεμημένου φορτίου.



Εικόνα 3.10: Κατανομή πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής ενός EPB στο Botlek Rail Tunnel για διάφορα χρονικά βήματα, ενδεικτικά φαίνονται ο μέγιστος και ελάχιστος βαθμός πίεσης στο μέτωπο και η αντίστοιχες πυκνότητες εδαφικού πολτού (Bezuijen et al. 2005)

# 3.8 Μόρφωση στοιχείων τελικής επένδυσης (Final Lining)

Οι τυπικές σήραγγες που διανοίγονται με μηχανοποιημένη μέθοδο εκσκαφής, υποστηρίζονται μέσω προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος (precast concrete segmental linings) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικές βίδες και ξυλόπροκες. Ένα σύνηθες segmental lining ring αποτελείται από πέντε με επτά segments και ένα μικρότερο key-element, που τοποθετείται τελευταίο προκειμένου να ολοκληρώσει και σταθεροποιήσει το δακτύλιο(ring). Το κύριο χαρακτηριστικό ενός segmental lining ring είναι ο μεγάλος βαθμός συνδέσμων (jointing).

Οι σύνδεσμοι (joints) χωρίζονται σε (i) ring joints μεταξύ των δακτυλίων και ii) longitudinal joints μεταξύ των segments ενός δακτυλίου (Εικόνα 3.11, i).

3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του ΤΒΜ



Εικόνα 3.11: Ενδεικτική απεικόνιση (i) segmental lining simulation και (ii) continuous shell lining (Kavvadas M. et al,2015)

Όπως στις περισσότερες προσομοιώσεις μηχανοποιημένης όρυξης, η τελική επένδυση (final lining) μοντελοποιείται ως ένας ελαστικός, συνεχές κύλινδρος με επιφανειακά στοιχεία shell elements τύπου (S4) και γ' αυτό για λόγους απλοποίησης, λαμβάνεται υπόψιν καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των segments ή των δακτυλίων (rings) (Εικόνα 3.11, ii). Η συγκεκριμένη θεώρηση, ελάχιστα αποκλίνει από την πραγματικότητα, όπως στην περίπτωση κατανεμημένων φορτίων στην κατά μήκος διεύθυνση, επί της επένδυσης, κλιμακωτή σύνδεση των συνδέσμων ενεργοποιεί μηχανισμό αλληλεπίδρασης δυνάμεων μεταξύ διπλανών δακτυλίων (rings), δημιουργώντας τα λεγόμενα coupling effects (Arnau O., Molins C., 2012). Τέλος, η τελική επένδυση αντιπροσωπεύει ένα αδιαπέρατο όριο στους τοίχους της σήραγγας, ώστε το νερό να ρέει μόνο προς το μέτωπο. Οι ιδιότητες της τελικής επένδυσης πένδυσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Τελική επένδυση (Tunnel lining)					
Εξωτερική διάμετρος	5m				
Πάχος	0.35m				
Μήκος δακτυλίου	1.5m				
Μέτρο ελαστικότητας	20GPa				
Ειδικό βάρος σκυροδέματος	25kN/m <sup>3</sup>				
Λόγος Poisson	0.2				

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες τελικής επένδυσης (Tunnel lining)

# 3.9 Στάδια ανάλυσης

Εφόσον έχουν παρουσιαστεί τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, είναι απαραίτητο να περιγραφούν τα βήματα προσομοίωσης της διαδικασίας εκσκαφής. Η εκσκαφή προσομοιώνεται με διαδοχική απενεργοποίηση συγκεκριμένων, πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις διεξάγονται μέσω μιας βήμα-βήμα διαδικασίας τα κυριότερα βήματα της οποίας περιγράφονται στην Εικόνα 3.12.

## ο Γεωστατικό βήμα (Geostatic step)

3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του ΤΒΜ

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι το Γεωστατικό, όπου το έδαφος βρίσκεται κάτω από ένα αρχικό γεωστατικό πεδίο τάσεων.

## Εγκατάσταση TBM (TBM installation)

Το βήμα αυτό ακολουθεί το γεωστατικό και είναι απαραίτητο για την ενεργοποίηση του μηχανήματος και την αλληλεπίδραση επιφανειών.

- Το έδαφος στα όρια της εκσκαφής (επτά φέτες εκσκαφής) αφαιρείται για ένα μήκος ίσο με το μήκος της ασπίδας (10.5m).
- Το TBM με όλα τα μέρη που το απαρτίζουν (ασπίδα, κοπτική κεφαλή, διαφραγματικός τοίχος κτλπ.) εισάγεται και η διεπιφάνεια ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και την ασπίδα του μηχανήματος ενεργοποιείται. Το ουραίο κενό εξαιτίας της κωνικότητας του μηχανήματος και του overcut δημιουργείται γεωμετρικά λόγω της μικρότερης διαμέτρου του μηχανήματος ως προς το όριο εκσκαφής(1.1.3.)
- Εφαρμόζεται η πίεση στο μέτωπο(face pressure) (1.1.5)
- Ο δακτύλιος επένδυσης (segmental ring) μήκους 1.5m εγκαθίσταται μέσα στο πίσω τμήμα της ασπίδας χωρίς να αλληλοεπιδρά με το έδαφος (1.1.4)

## Βήμα "n"

Μετά την εγκατάσταση του EPB, τα βήματα της ανάλυσης ακολουθούν ένα επαναληπτικό pattern υποσταδίων τα οποία περιγράφονται αμέσως παρακάτω, μέχρι την ολοκλήρωση της ανάλυσης. Έτσι, υποθέτοντας ότι η ανάλυση είναι στο βήμα "n", τα κύρια υποστάδια (ενεργοποίηση στοιχείων και αφαίρεση, προώθηση του μηχανήματος κλπ.) περιγράφονται για την ανάλυση καθώς γίνεται προώθηση από το βήμα "n" στο βήμα "n+1".

- Αφαιρείται η 1.5m μήκους φέτα εκσκαφή (excavation slice).
- Το μηχάνημα προωθείται για ένα μήκος δακτυλίου 1.5m χρησιμοποιώντας καθορισμένες μετακινήσεις. Καθώς οι κόμβοι του μηχανήματος είναι διαφορετικοί από τους κόμβους του εδάφους, η μετακίνηση του μηχανήματος για έναν δακτύλιο ενεργοποιεί μία σχέση επαφής με τους κόμβους του εδάφους που βρίσκονται έναν δακτύλιο μπροστά (για παράδειγμα, η ασπίδα συνέχεια έρχεται σε επαφή με τους κόμβους του εδάφους που βρίσκονται στη νέα θέση που θα βρεθεί το μηχάνημα). Το ουραίο κενό εξαιτίας της κωνικότητας του μηχανήματος και του overcut επιτυγχάνεται γεωμετρικά μέσω μικρότερης διαμέτρου ασπίδας από την διάμετρο της σήραγγας(3.5).
- Η πίεση του μετώπου (face pressure) μεταφέρεται από την προηγούμενη θέση (μέτωπο φέτας εκσκαφής "n+1") στη νέα θέση (μέτωπο φέτας εκσκαφής "n+2") (3.7).
- Καθώς το μηχάνημα προωθείται, ο δακτύλιος τμηματικής επένδυσης (segmental ring) "n-7" που βρισκόταν μέσα στο μηχάνημα, "αφήνεται" πίσω και αλληλεπιδρά με το έδαφος και ένας άλλος δακτύλιος "n-6" εγκαθίσταται μέσα στο μηχάνημα (Εικόνα 3.12,iii) χωρίς να αλληλεπιδρά καθόλου με το περιβάλλον γεωυλικό(3.8.).

3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του TBM

Το κενό ανάμεσα στο δακτύλιο "n-7" και το περιβάλλον έδαφος πληρώνεται με στοιχεία ενέματος (grout elements), όπου η φέτα με το ένεμα "n-7" απεικονίζεται με το πράσινο (Εικόνα 3.12,iv). Η πίεση του ενέματος (grout pressure) προσομοιώνεται τροποποιώντας τεχνητά το πεδίο των τάσεων των στοιχείων του ενέματος που μόλις εγκαταστάθηκαν, μέσω αύξησης της τιμής της ισότροπης πίεσης που ισούται με την πίεση του ενέματος και έτσι ανατίθεται στο υλικό του ενέματος μία χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά σκλήρυνσης(3.6).

Όλα τα βήματα της ανάλυσης αποτελούν μια επαναληπτική διαδικασία του προαναφερθέντος βήματος "n". Η ανάλυση ολοκληρώνεται επιτυχώς όταν το μηχάνημα έχει "εκσκάψει" το απαιτούμενο μήκος εκσκαφής.



Εικόνα 3.12: Ενδεικτική παρουσίαση των βημάτων ανάλυσης i) βήμα ανάλυσης "n", ii) βήμα ανάλυσης "n+1", iii) βήμα ανάλυσης "n+1" με έμφαση στην ενεργοποίηση της φέτας επένδυσης (segment slice) "n-6" iv) βήμα ανάλυσης "n+1" με έμφαση στην ενεργοποίηση της φέτας ενέματος (grout slice) "n-7" (Litsas et al, 2015) 3° Κεφάλαιο: Αριθμητική προσομοίωση μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με πλήρη προσομοίωση του TBM

# 4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

# 4.1 Εισαγωγή

Η βασική δομή των παραμετρικών αναλύσεων εκτείνεται σε τρία (3) πεδία διερεύνησης για καθένα από τα δύο (2) μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τους δύο (2) διαφορετικούς λόγους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας (H/D=2 και H/D=3). Σε κάθε set αναλύσεων, κάθε μοντέλου, διερευνάται για οκτώ (8) περιπτώσεις διαφορετικών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, η επίδραση στα αποτελέσματα μίας βασικής παραμέτρου. Με δεδομένο ότι σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να μελετήσει και εκτιμήσει το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη διαδικασία προώθησης ενός μηχανήματος EPB σε σήραγγες σε αστικό περιβάλλον, επιλέχθηκαν τρεις παράμετροι επιρροής στο μέγεθος των καθιζήσεων, σχετικές με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του EPB. Οι παράμετροι που μεταβάλλουμε είναι οι εξής και οι τιμές τους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακας 4.3:

- Εφαρμοσμένη πίεση ενέματος Grout Pressure, GP (3.6.3)
- Κενό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος (overcut/tail shield Gap) <u>Gap</u> (3.4)
- Εφαρμοσμένη πίεση στο μέτωπο Face Pressure, P<sub>applied</sub> (3.7)

# 4.2 Εδαφικός τύπος - Καταστατικός Νόμος

Δεδομένου ότι τα ΕΡΒ μηχανήματα χρησιμοποιούνται σε αργιλοϊλυώδη εδαφικά υλικά, που συναντώνται συνήθως σε αστικά περιβάλλοντα, στην προσομοίωση γίνεται η υπόθεση ότι ο τύπος του εδάφους που εκσκάπτεται είναι ένα συνεκτικό υλικό, ομογενές και ισότροπο.

Για το έδαφος θεωρήθηκε ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb. Αναμφισβήτητα το κριτήριο Mohr-Coulomb αποτελεί τον πιο πρακτικό καταστατικό νόμο που χρησιμοποιείται στο τομέα των επιστημών, με περιορισμούς στα όρια εφαρμογής του. Στη σηραγγοποιία, όπου η κατάσταση αστοχίας οφείλεται στη σταδιακή αποτόνωση του υλικού (αποφόρτιση), ίσως ένα κριτήριο αστοχίας που να περιλαμβάνει ένα μέτρο ελαστικότητας στη φόρτιση και ένα άλλο στην αποφόρτιση να είναι πιο ακριβές (Τροποποιημένο κριτήριο Cam-Clay).

# 4.3 Παράμετροι ανάλυσης

Στην παρούσα διπλωματική, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση που αντιστοιχεί σε ένα σημαντικό εύρος εδαφών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί, ο οποίος συνοψίζει το εύρος των γεωμετρικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα, στα set αναλύσεων, για κάθε μοντέλο (H/D=2 και H/D=3) πραγματοποιήθηκαν οκτώ (8) αναλύσεις, στις οποίες τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους μεταβάλλονται, σύμφωνα με έναν κωδικό(ah), από τις χειρότερες στις καλύτερες εδαφικές συνθήκες. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους Πίνακας 4.1 καιΠίνακας 4.2.

Εδαφικά προφίλ (Η/D=2)								
Code	γ (kN/m³)	ф (deg)	c (Kpa)	E <sub>soil</sub> (Mpa)	ψ (deg)	v	σ <sub>cs</sub> (MPa)	σ <sub>c</sub> /P₀
а	20	20	10	21.7	3.3	0.3	28.6	0.12
b	20	20	15	23.3	3.3	0.3	42.8	0.18
С	20	20	20	24.9	3.3	0.3	57.1	0.24
d	20	25	20	29.9	4.2	0.3	62.8	0.26
е	20	25	30	33.1	4.2	0.3	94.2	0.39
f	20	30	30	38.2	5	0.3	103.9	0.43
g	20	30	50	44.4	5	0.3	173.2	0.72
h	20	35	70	55.3	5.8	0.3	268.9	1.12

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ για H/D=2

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ για Η/D=3

Εδαφικά προφίλ (Η/D=3)								
Code	γ (kN/m³)	ф (deg)	c (Kpa)	E <sub>soil</sub> (Mpa)	ψ (deg)	v	σ <sub>cs</sub> (MPa)	σ <sub>c</sub> /P₀
а	20	20	10	31	3.3	0.3	28.6	0.08
b	20	20	15	32.6	3.3	0.3	42.8	0.12
с	20	20	20	34.2	3.3	0.3	57.1	0.16
d	20	25	20	41.7	4.2	0.3	62.8	0.17
е	20	25	30	44.9	4.2	0.3	94.2	0.26
f	20	30	30	52.6	5	0.3	103.9	0.29
g	20	30	50	58.8	5	0.3	173.2	0.48
h	20	35	70	72.3	5.8	0.3	268.9	0.75

Για κάθε set αναλύσεων, τροποποιείται η τιμή μιας παραμέτρου, ενώ διατηρούνται σταθερά κάποια βασικά μεγέθη όπως το ειδικό βάρος γ του γεωυλικού το οποίο ελήφθη ίσο με 20kN/m<sup>3</sup>, ο λόγος Poisson v=0.3 και ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K<sub>0</sub>, η διερεύνηση του οποίου δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής και έλαβε την τιμή K<sub>0</sub>=0.5.

Αμέσως παρακάτω περιγράφονται όλες οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις τρισδιάστατες αναλύσεις.

Μέτρο ελαστικότητας εδαφικού υλικού για κάθε ζεύγος παραμέτρων διατμητικής αντοχής, E<sub>soil</sub>

Με δεδομένες τις αρχικές γεωστατικές κύριες τάσεις  $σ_1$  και  $σ_3$  ενός εδαφικού στοιχείου στο βάθος του κέντρου της σήραγγας και τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους c και φ, προσδιορίστηκε αρχικά η πρόσθετη τάση  $Δσ_1$  που απαιτείται για να αστοχήσει το στοιχείο αυτό υπό αστράγγιστες συνθήκες. Για το υπολογισμό αυτόν υποτέθηκε ότι η τιμή του συντελεστή Α του τύπου του Skempton ισούται με 1/3. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$\Delta \sigma_1 = \frac{\sigma_3 \cdot N_{\varphi} + 2c \cdot \sqrt{N_{\varphi}} - \sigma_1}{1 + A(N_{\varphi} - 1)}$$
   
 Science 4.1

$$N_{\varphi} = tan^{2}(45 + \frac{\varphi}{2})$$
 Σχέση 4.2

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους Su, ενώ το μέτρο παραμορφωσιμότητας εκτιμήθηκε ίσο με 300·Su, ακολουθώντας προτάσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία (Bowles, 1997).

$$E_{soil} = 300S_u$$
 Σχέση 4.3

$$S_u = \frac{\sigma_1 + \Delta \sigma_1 - \sigma_3}{2}$$
 Σχέση 4.4

Κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, P<sub>o</sub>

$$P_o = \gamma \cdot H$$
 Σχέση 4.5

Οριζόντια γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, Pho

$$P_{ho} = K_0 \cdot \gamma \cdot H$$
 Σχέση 4.6

Μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, P<sub>o,m</sub>

$$P_{o,m} = (\frac{1 + K_0}{2}) \cdot \gamma \cdot H$$
 Σχέση 4.7

, όπου Κ<sub>0</sub> ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων

#### Γωνία διαστολικότητας ψ

Η διαστολικότητα του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού ελήφθη ίση με φ/6, άρα

$$\psi = 3.3 \div 5.8 \,(\text{deg})$$

#### Μονοαξονική θλιπτική αντοχή του εδάφους, σ<sub>cs</sub>

Η αντοχή σ<sub>cs</sub> υπολογίστηκε από τις παραμέτρους αντοχής c και φ, μέσω του κριτηρίου Mohr-Coulomb, ως:

$$\sigma_{cs} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_{\varphi}}$$
 Σχέση 4.8

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται συναρτήσει της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του εδάφους, σ<sub>cs</sub>.

Δείκτης αντοχής, σ<sub>cs</sub>/ P<sub>o</sub>

Εκφράζει την αντοχή του εδάφους (υπολογισμένη από τις παραμέτρους αντοχής c και φ, μέσω του κριτηρίου Mohr-Coulomb) αδιαστατοποιημένη ως προς την κατακόρυφη γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας

Εδαφικές παρά	άμετροι	Παράμετροι ΤΒΜ		
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(deg)	20 - 30	Πίεση μετώπου, FP (Kpa)	129, 189	
Γωνία διαστολικότητας, ψ(deg)	3.3 - 5	Overcut / Tail shield Gap(cm)	1/4	
Συνοχή, c(Kpa)	10 – 50	Πίεση ενέματος, GP (Kpa)	180, 300	
Μέτρο ελαστικότητας, E <sub>soil</sub> (MPa)	21.7 – 58.8	γ <sub>muck</sub> (kN/m³)	13	
Αντοχή σε θλίψη, σ <sub>cs</sub> (MPa)	28.6 – 268.9	Μήκος δακτυλίου(m)	1.5	
		Πλάτος δακτυλίου(m)	0.35	
		Βάρος TBM(tons)	1000	
Εδαφικές ιδιά	<b>ότητε</b> ς			
Λόγος Poisson, v	0.3			
Ειδικό βάρος, γ (kN/m³)	20			
Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων, Κ₀	0.5			

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες κα	ι παράμετροι αναλύσεων
---------------------------	------------------------

# 4.4 Επιρροή των παραμέτρων του μηχανήματος

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Abaqus Simulia. Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν εβδομήντα έξι (76) αναλύσεις, για οκτώ (8) διαφορετικά υλικά, σύμφωνα με τους κωδικούς που περιγράφονται παραπάνω (a-h).

Για μείωση του υπολογιστικού κόστους, στα τρία (3) πακέτα αναλύσεων, δεν εξετάζονται οι κωδικοί f και h καθώς η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων (Gaps, Grout Pressure, Face Pressure) στα αποτελέσματα μπορεί να εκτιμηθεί και δίχως των πραγματοποίηση αναλύσεων γ' αυτούς τους κωδικούς.

Από το πλήθος των αναλύσεων που διεξήχθησαν, επιλέχθηκαν δύο (2) αντιπροσωπευτικές αναλύσεις (κωδικοί b και g) προκειμένου να παρουσιαστούν οι τιμές των μεγεθών που αναπτύχθηκαν. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν προέρχονται από ενδεικτικές αναλύσεις με τρόπο ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ τους.

Για την εκτέλεση των αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία: δημιουργήθηκε το αρχείο δεδομένων (input file) το οποίο συγκροτήθηκε με συγκεκριμένη μεθοδολογία, με χρήση του προγράμματος Microsoft Excel, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Στο αρχείο δεδομένων (input file) πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των κόμβων (nodes), των πεπερασμένων στοιχείων εδάφους, κελύφους (solid elements, shell elements αντίστοιχα), των ιδιοτήτων των γεωυλικών και των άλλων υλικών (material properties), του αρχικού (γεωστατικού) εντατικού πεδίου (initial conditions), των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions) και των στοιχείων για τον προσδιορισμό των ζητουμένων (output) και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα εξαχθέντα μεγέθη (output) είναι τα εξής: οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις (U<sub>3</sub>) και οι πλαστικές παραμορφώσεις (PEMAG).

Σημειώνεται ότι όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για σήραγγα που εκσκάπτεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (dry conditions).

# 4.4.1 Επιρροή πίεσης ενέματος (Grout Pressure effect)

Η πίεση ενέματος προσομοιώθηκε, όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.6.3, με εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία, solid elements τύπου C3D8, στα οποία δίνεται ένα αρχικό εντατικό πεδίο ίσο με την πίεση που θα ασκηθεί από το ένεμα. Έχοντας μια χαμηλή τιμή δυσκαμψίας λίγο μετά την έγχυση, λόγω του αρχικού εντατικού πεδίου, τα στοιχεία (ένεμα) τείνουν να διογκωθούν και να πιέσουν το περιβάλλον έδαφος μέχρι αυτό να έρθει σε κατάσταση ισορροπίας.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που θα παρουσιασθούν έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Έδαφος	σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa (code b)	σ <sub>cs</sub> =172.3 Кра (code g)
Γωνία τριβής, φ(deg)	20	30
Συνοχή, c (Kpa)	15	50

Πίνακας 4.4: Ομάδες παραμέτρων εδάφους για βάθη σήραγγας H=2D και H=3D

H/D	GP (GP <sub>factor</sub> =1)	GP (GP <sub>factor</sub> =0.5)	GP (GP <sub>factor</sub> =1.5)
2	180(Kpa)	90(Кра)	270(Kpa)
3	300(Кра)	150(Kpa)	450(Kpa)

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται, για τις δύο (2) περιπτώσεις βάθους σήραγγας (H/D=2 και H/D=3) και για τις δύο (2) ομάδες παραμέτρων εδάφους; για ένα σχετικά ασθενές εδαφικό υλικό – πρόβλημα μεγάλων παραμορφώσεων ( $\sigma_{cs}$ =42.8 Kpa – code b) και για ένα πιο ισχυρό έδαφος – πρόβλημα σχετικά μικρών παραμορφώσεων ( $\sigma_{cs}$ =172.3 Kpa – code g), που εξετάσθηκαν για δημιουργούμενο overcut/tail shield Gap 1/4cm, για ασκούμενη πίεση στο μέτωπο P<sub>applied</sub>=129 Kpa για H/D=2 και P<sub>applied</sub>=189 Kpa για H/D=3 και για τρεις περιπτώσεις πίεσης ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, GP<sub>factor</sub>=1 και GP<sub>factor</sub>=1.5):

• Η σύγκριση των εγκάρσιων προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) της σήραγγας στις χαρακτηριστικές θέσεις .

• Η σύγκριση των διαμήκων προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) της σήραγγας

Η σύγκριση, με τη μορφή ισοπαραμετρικών καμπυλών (contours), των κατακόρυφων μετακινήσεων σε όλο το εύρος των μοντέλων, για εποπτική και μόνο σύγκριση ανάμεσα στις 3 ομάδες μοντέλων.

Η σύγκριση των κατανομών των πλαστικών παραμορφώσεων.

# 4.4.1.1 Εδαφικό προφίλ b (σ<sub>cs</sub> = 42.8 Kpa)

Στο Διάγραμμα 4.1, παρουσιάζονται για τις τρεις (3) αναλύσεις (GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1, 1.5) τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε απόσταση 33m, 36m και 33m από το μέτωπο για GP<sub>factor</sub>=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα). Και στα δύο (2) διαγράμματα, ο μηχανισμός των εδαφικών μετακινήσεων ακολουθεί ίδια συμπεριφορά ανεξαρτήτως τιμής GP<sub>factor</sub> (ίδια μορφή). Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει για GP<sub>factor</sub> = 0.5 και είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 20mm. Επίσης, παρατηρείται ότι υπάρχει επιρροή του GP<sub>factor</sub> στο μέγεθος των καθιζήσεων. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση του GP<sub>factor</sub> από 0.5 σε 1 παρατηρείται μείωση στο μέγεθος των καθιζήσεων της τάξης του 20%, ενώ από 1 σε 1.5 το ποσοστό μείωσης κυμαίνεται στο 10%.

Στο αριστερά διάγραμμα, και για τις τρεις (3) περιπτώσεις πίεσης ενέματος, οι καθιζήσεις φαίνεται ότι λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους σε απόσταση περίπου ίση με 1.5D πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, όπου και σταθεροποιούνται. Κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, όπου υπάρχει η ασπίδα του μηχανήματος το έδαφος περιορίζεται και δεν αφήνεται να μετακινηθεί με αποτέλεσμα οι προκύπτουσες καθιζήσεις να είναι πολύ μικρότερες.

Στο δεξιά διάγραμμα, παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0).



Διάγραμμα 4.1: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=20mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GPfactor=0.5, 1, 1.5) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.1 γίνεται η σύγκριση του μεγέθους των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά μήκος της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5, για ένα ασθενές έδαφος. Προκύπτει ένα αναμενόμενο προφίλ καθιζήσεων με τις καθιζήσεις να μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας. Το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται να επηρεάζεται άμεσα από την τιμή πίεσης ενέματος που λαμβάνουμε υπόψιν, ενώ η έκταση της κατανομής τους γύρω από τη σήραγγα έχει την ίδια μορφή, δηλαδή φαίνεται να συμπίπτουν τ' αποτελέσματα με αυτά του διαγράμματος 4.1.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 20mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 30mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 20mm (ανοιχτό μπλε) όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.1. Με την αύξηση της πίεσης (GP<sub>factor</sub> = 1, 1.5) παρατηρείται σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.



GP factor = 1

Εικόνα 4.1: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις (contours), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σcs=42.8 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 2D (Εικόνα 4.6) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές της πίεσης του ενέματος. Επιπλέον, οι μέγιστες τιμές πλαστικής τάσης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας, με μία μικρή αύξηση να παρατηρείται καθώς αυξάνεται η τιμή της πίεσης του ενέματος. Γενικότερα, το κυριότερο που παρατηρείται είναι η ελαστική απόκριση που φαίνεται ότι παρουσιάζει το υλικό και η μικρή έκταση πλαστικής ζώνης.



GP factor = 1

Εικόνα 4.2: Σύγκριση πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (33m, 36m και 33m από το μέτωπο για GP<sub>factor</sub>=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Όσον αφορά την περίπτωση βάθους σήραγγας ίση με 3D, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτή των 2D.

Και στα δύο (2) διαγράμματα (Διάγραμμα 4.2), παρατηρείται κ εδώ ο ίδιος μηχανισμός εδαφικών μετακινήσεων (ίδια συμπεριφορά ανεξαρτήτως τιμής  $GP_{factor}$ ). Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει για  $GP_{factor} = 0.5$  είναι ίση με  $U_{smax,overall} = 18$ mm και εμφανίζεται όπως και στην περίπτωση υπερκειμένων 2D σε απόσταση πίσω από το μέτωπο περίπου ίση με 1.5D. Επιπλέον, παρατηρείται έντονα η επιρροή του  $GP_{factor}$  στο μέγεθος των καθιζήσεων. Έτσι, με αύξηση του  $GP_{factor}$  από 0.5 σε 1.5 παρατηρείται μείωση στο μέγεθος των καθιζήσεων της τάξης του 25%, ενώ από 1 σε 1.5 το ποσοστό μείωσης κυμαίνεται στο 5%.



Διάγραμμα 4.2: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=20mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.1, για το μοντέλο όπου H/D=3, η μορφή της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου για H/D=2, με τις μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις να εμφανίζονται επίσης στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub> = 0.5. Και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 18mm (ανοιχτό μπλε) όπως δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.1.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 23mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 32mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5. Με την αύξηση της πίεσης (GP<sub>factor</sub> = 1, 1.5) παρατηρείται, όπως στην περίπτωση βάθους 2D, σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.





Εικόνα 4.3: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις (contours), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP factor=1), 90 Kpa (GP factor=0.5) και 270 Kpa (GP factor=1.5) - (H/D=3 -  $\sigma_{cs}$ =42.8 Kpa)

Σχετικά με τα contours που αφορούν τις πλαστικές παραμορφώσεις, διαπιστώνεται και για το βάθος των 3D η ελαστική απόκριση του υλικού (πολύ μικρό εύρος πλαστικής ζώνης).





Εικόνα 4.4: Σύγκριση πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 42m και 37.5m από το μέτωπο για GP factor=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=3 -  $\sigma_{cs}$ =42.8 Kpa)

#### 4.4.1.2 Εδαφικό προφίλ g (σ<sub>cs</sub> = 172.3 Kpa)

Αντίστοιχα με το εδαφικό προφίλ b – ασθενές εδαφικό υλικό, διεξήχθησαν αποτελέσματα και για το εδαφικό προφίλ g – πιο ισχυρό εδαφικό υλικό με την ίδια λογική αλληλουχία. Στο Διάγραμμα 4.1, παρουσιάζονται για τις τρεις (3) αναλύσεις (GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1, 1.5) τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε αποστάσεις 33m, 36m και 33m από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, για GP factor=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα) Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται με αυτά του εδαφικού προφίλ b, δηλαδή οι καθιζήσεις και για τις τρεις (3) αναλύσεις διαφορετικού GP<sub>factor</sub> στο μέγεθος των καθιζήσεων. Πιο συγκεκριμένα, με αυξηση του GP<sub>factor</sub> στο μέγεθος των καθιζήσεων. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση του 20%, και αντίστοιχα ποσοστό μείωσης περίπου 25% όταν μεταβάλλεται από 1 σε 1.5. Εξαιτίας της καλύτερης ποιότητας υλικού παρατηρείται μικρότερη τιμή μέγιστης καθίζησης συγκριτικά με αυτή που προέκυψε για τον κωδικό b, η οποία λαμβάνει την τιμή U<sub>smax,overall</sub> = 13mm και αντιστοιχεί σε GP<sub>factor</sub> = 0.5.

Στο αριστερά διάγραμμα, οι καθιζήσεις φαίνεται ότι λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους σε απόσταση περίπου 1.5D πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, όπου και σταθεροποιούνται. Κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, όπου υπάρχει η ασπίδα του μηχανήματος το έδαφος περιορίζεται και δεν αφήνεται να μετακινηθεί με αποτέλεσμα οι προκύπτουσες καθιζήσεις να είναι πολύ μικρότερες.

Στο δεξιά διάγραμμα, παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0). Όπως και στο διαμήκες προφίλ, παρουσιάζεται αντίστοιχη μείωση στο μέγεθος των καθιζήσεων με αύξηση του GP<sub>factor.</sub>



Διάγραμμα 4.3: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=13mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.1 γίνεται η σύγκριση του μεγέθους των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά μήκος της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5, για ένα ισχυρό έδαφος. Διαπιστώνεται αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή του διαγράμματος 4.3. Οι καθιζήσεις μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας, ενώ επιπλέον το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται ότι επηρεάζεται άμεσα από την τιμή πίεσης ενέματος που λαμβάνουμε υπόψιν και η έκταση της κατανομής τους γύρω από τη σήραγγα έχει την ίδια μορφή.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα παρουσιάζονται, όπως και στο εδαφικό προφίλ b, οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 15mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 21mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5. Επιπλέον, η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 13mm (ανοιχτό μπλε) όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.1. Διαπιστώνεται ότι προκύπτουν μικρότερες τιμές μέγιστων κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το προφίλ b, λόγω της βελτίωσης της ποιότητας του γεωυλικού. Επιπλέον, με την αύξηση της πίεσης (GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1, 1.5) παρατηρείται σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.



η κατακόριμαων μετακινήσεων για τορις αναλύσρις

Εικόνα 4.5: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις, με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=173.2 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 2D (Εικόνα 4.6) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές της πίεσης του ενέματος. Επιπλέον, οι μέγιστες τιμές πλαστικής τάσης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας.





Εικόνα 4.6: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στη χαρακτηριστική τομή (31.5m από το μέτωπο), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και με αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D (Διάγραμμα 4.2).

Και στα δύο (2) διαγράμματα (Διάγραμμα 4.2), παρατηρείται κ εδώ ο ίδιος μηχανισμός εδαφικών μετακινήσεων (ίδια συμπεριφορά ανεξαρτήτως τιμής GP<sub>factor</sub>). Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει για GP<sub>factor</sub> = 0.5 είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 11mm και εμφανίζεται όπως και στην περίπτωση υπερκειμένων 2D σε απόσταση πίσω από το μέτωπο περίπου ίση με 1.5D. Επιπλέον, παρατηρείται έντονα η επιρροή του GP<sub>factor</sub> στο μέγεθος των καθιζήσεων. Έτσι, με αύξηση του GP<sub>factor</sub> από 0.5 σε 1.5 παρατηρείται μείωση στο μέγεθος των καθιζήσεων της τάξης του 20%, αντίστοιχα ποσοστό μείωσης περίπου 25% από 1 σε 1.5.



Διάγραμμα 4.4: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=13mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.1, για το μοντέλο όπου H/D=3, η μορφή της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου για H/D=2, με τις μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις να εμφανίζονται επίσης στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub> = 0.5. Και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 11mm (ανοιχτό μπλε) όπως δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.1.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 18mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 24mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για GP<sub>factor</sub>=0.5. Με την αύξηση της πίεσης (GP<sub>factor</sub> = 1, 1.5) παρατηρείται, όπως στην περίπτωση βάθους 2D, σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.

Ακόμα παρατηρούμε, όπως και στο έδαφος με σ<sub>cs</sub>=42.8 Κρα πως οι μετακινήσεις μειώνονται κοντά στο μέτωπο καθώς εκεί τοποθετείται στην ανάλυση η ασπίδα του μηχανήματος που εμποδίζει το έδαφος να μετακινηθεί. Τέλος, βλέπουμε και από εδώ ότι οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν για το ασθενές έδαφος (σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)



GP factor = 1

Εικόνα 4.7: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις αναλύσεις, με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=173.2 Kpa)

Όσον αφορά στα σχήματα (Εικόνα 4.8) που απεικονίζουν τις πλαστικές παραμορφώσεις για βάθος H=3D, φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση βάθους ότι το εύρος της πλαστικής ζώνης είναι πάρα πολύ μικρό



Εικόνα 4.8: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (36m, 39m και 30m από το μέτωπο για GP<sub>factor</sub>=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση ενέματος ίση με 180 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1), 90 Kpa (GP<sub>factor</sub>=0.5) και 270 Kpa (GP<sub>factor</sub>=1.5) -(H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

#### 4.4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις διάφορες ομάδες γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (codes a-g)

Στο Διάγραμμα 4.5 παρατηρείται και στις δύο (2) περιπτώσεις υπερκειμένων μείωση της τιμής της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης όσο βελτιώνονται οι ιδιότητες του εδάφους και αυξάνεται η αντοχή του και για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετικό GP<sub>factor</sub>. Επιπλέον, φαίνεται ότι υπάρχει επιρροή του GP<sub>factor</sub> στο μέγεθος των μέγιστων καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του GP<sub>factor</sub> από 0.5 σε 1 υφίστανται μια μείωση οι τιμές των μέγιστων καθιζήσεων Μικρότερη μείωση υφίστανται οι τιμές όταν ο GP<sub>factor</sub> αυξάνει από 1 σε 1.5. Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 10%.



Διάγραμμα 4.5: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.6, φαίνεται τί ποσοστό των καθιζήσεων στη στέψη μεταφράζεται σε καθιζήσεις στην επιφάνεια. Παρατηρούμε ότι η επιρροή του GP<sub>factor</sub> δεν είναι τόσο έντονη στην επιφάνεια όσο στη στέψη (εντοπίζονται μικρότερες οι μετακινήσεις στην επιφάνεια απ' αυτές της στέψης). Για GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1 η απόκριση του υλικού για U<sub>s,max</sub> και U<sub>crown</sub> είναι ίδια και αλλάζει όταν GP<sub>factor</sub> = 1.5.

Το μέγεθος των μετακινήσεων που εμφανίζονται στην επιφάνεια εξαρτάται και από το ύψος των υπερκειμένων. Όσο πιο ρηχή είναι η σήραγγα (H/D=2σε σχέση με H/D=3) τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση των μετακινήσεων της στέψης στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.6: Λόγος μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους (U<sub>s,max</sub>) προς μέγιστης καθίζησης στη στέψη (U<sub>crown</sub>) συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στην περίπτωση που το βάθος σήραγγας είναι ίσο με 3D παρατηρούμε ότι υπάρχει μία τιμή του λόγου  $U_{s,max}/U_{crown}$  για  $GP_{factor} = 1.5$  πάνω από τη μονάδα, που φαίνεται σαν να αντιτίθεται σε όσα προαναφέρθηκαν για μικρότερη επιρροή του GP στην επιφάνεια απ' ότι στη στέψη. Για το λόγο αυτό παρατίθενται τα longitudinal προφίλ για  $GP_{factor} = 1.5$  για την τιμή  $U_{s,max}/U_{crown}$  που βγάζει πάνω απ' τη μονάδα (σ<sub>cs</sub> = 28.6 Kpa) και διαπιστώνεται ότι οι καθιζήσεις στην επιφάνεια δεν επηρεάζονται όντως από το GP, σε αντίθεση με τις καθιζήσεις στην στέψη.



Διάγραμμα 4.7:Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας για την περίπτωση GP<sub>factor</sub> = 1.5 στη στέψη της σήραγγας, στη βάση της και στην επιφάνεια.

Στο Διάγραμμα 4.8 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του όγκου του εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας, συναρτήσει της ποιότητας του γεωυλικού. Διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου μειώνεται, γεγονός που ταυτίζεται απόλυτα με όσα προαναφέραμε, καθώς το μέγεθος αυτό συνδέεται με τις καθιζήσεις που συντελούνται (Σχέση 2.8). Βλέπουμε ακόμα πως λόγω της αύξησης της τιμής του GP<sub>factor</sub> προκύπτουν μικρότερες ποσοστιαίες μεταβολές του εδαφικού όγκου ως αποτέλεσμα των μικρότερων τιμών των εδαφικών μετακινήσεων.



Διάγραμμα 4.8: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.9, παρουσιάζεται η μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων ως προς το βάθος της σήραγγας. Παρατηρείται μία (γραμμική) αύξηση του σημείου καμπής με αύξηση του βάθους της σήραγγας (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997), γεγονός που διαπιστώνεται και από τις αναλύσεις ευαισθησίας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης ενέματος (GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1, 1.5). Επιπλέον, και από τις FEM (Finite Element Method) αναλύσεις φαίνεται ότι το σημείο καμπής για το ίδιο βάθος εκσκαφής ακολουθεί μια σταθερή τιμή; μικρή μείωση παρατηρείται όταν ο GP<sub>factor</sub> αυξάνεται από την τιμή 0.5 σε 1, ενώ όταν αυξάνεται από 1 σε 1.5 δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στην τιμή του.



Διάγραμμα 4.9: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)

#### 4.4.1.4 Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που αφορούν τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο (2) εδαφικά προσομοιώματα με διαφορετικό βάθος σήραγγας (H/D=2, H/D=3), για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης ενέματος (GP<sub>factor</sub> = 0.5, 1, 1.5).

- Παρατηρείται μία επιρροή της πίεσης του μετώπου (GP) στις επιφανειακές καθιζήσεις. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο παράγοντας GP<sub>factor</sub> τόσο μικρότερη καθίζηση επί της εδαφικής επιφάνειας προκύπτει. Με αύξηση του GP<sub>factor</sub> από 0.5 σε 1.5 για το ασθενές εδαφικό υλικό (σ<sub>cs</sub>=42.8 KPa) το μέγεθος των καθιζήσεων μειώνεται σε ποσοστό περίπου 25%, ενώ για την σκληρή άργιλο (σ<sub>cs</sub>=172.3 KPa) οι καθιζήσεις μειώνονται περίπου κατά 40%. Τα προφίλ των καθιζήσεων ακολουθούν την ίδια κατανομή ανεξαρτήτως τιμής GP<sub>factor</sub>.
- Το μέγεθος των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε διαφορετικά βάθη φαίνεται να επηρεάζεται από την τιμή του GP<sub>factor</sub> που λαμβάνουμε υπόψιν. Με αύξηση του GP<sub>factor</sub> προκύπτει μικρότερη τιμή μετακίνησης.
- Οι καθιζήσεις σταθεροποιούνται σε απόσταση περίπου 1.5D (9m) από το μέτωπο.
- Παρατηρείται περιορισμένη έκταση πλαστικής ζώνης; το υλικό φαίνεται ν' αποκρίνεται ελαστικά.
- Οι μέγιστες κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας και για τις τρεις τιμές του GP<sub>factor</sub>. Από τις τρεις (3) αναλύσεις οι μέγιστες μετακινήσεις προέκυψαν για τη μικρότερη τιμή GP<sub>factor</sub>.
- Με βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους προκύπτει μείωση στο μέγεθος των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων για οποιαδήποτε τιμή πίεσης ενέματος.
- Η επίδραση του GP<sub>factor</sub> δεν είναι τόσο έντονη στην επιφάνεια όσο στη στέψη (εντοπίζονται μικρότερες οι μετακινήσεις στην επιφάνεια απ' αυτές της στέψης).

Ακόμα, διαπιστώνουμε ότι για  $GP_{factor} = 0.5$ , 1 η απόκριση του υλικού για  $U_{s,max}$  και  $U_{crown}$  είναι ίδια και αλλάζει όταν  $GP_{factor} = 1.5$ , κάτι που οφείλεται στο ότι ασκείται μεγαλύτερη τάση γι' αυτή την περίπτωση από την επιτόπου τάση; Ασκείται μεγαλύτερη πίεση στη στέψη και μεταφέρεται στην επιφάνεια.

- Το μέγεθος της μεταβολής του όγκου του εδαφικού υλικού που καθιζάνει στην επιφάνεια ως προς τον όγκο του εκσκαπτόμενου υλικού (V<sub>L</sub>%) επηρεάζεται από τις προκύπτουσες καθιζήσεις, με συνέπεια να είναι μεγαλύτερο για προκύπτουσες καθιζήσεις μεγαλύτερες. Συνεπώς λόγω αύξησης της τιμής του GP<sub>factor</sub> προκύπτουν μικρότερες ποσοστιαίες μεταβολές του εδαφικού όγκου ως αποτέλεσμα των μικρότερων τιμών των εδαφικών μετακινήσεων.
- Επιπλέον, διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου (V<sub>L</sub>%) μειώνεται.
- Το σημείο καμπής (i) για το ίδιο βάθος εκσκαφής δεν μεταβάλλεται.

Για αύξηση του βάθους από 2D σε 3D συνοψίζονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 10%.
- Παρατηρείται αύξηση του σημείου καμπής (i) με αύξηση του βάθους της σήραγγας.

# 4.4.2 Επιρροή διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής (Gap effect)

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3.4, το μηχάνημα είναι γεωμετρικά μικρότερο από την υπό εκσκαφή σήραγγα (D=6m) δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο υπερεκσκαφή. Συγκεκριμένα είναι κωνικού σχήματος με την ασπίδα να έχει διάμετρο 5.99m στην περιοχή της κοπτικής κεφαλής (overcut) και 5.96m στο ουραίο τμήμα της (tail shield Gap). Στη προκείμενη εργασία δημιουργήθηκαν ακόμα δύο (2) διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο είχε υπερεκσκαφή (overcut) 1cm και ουραίο κενό (tail shield Gap) 2cm και το δεύτερο υπερεκσκαφή (overcut) 2cm και ουραίο κενό (tail shield Gap) 6cm (Πίνακας 3.3). Παρακάτω για συντομία θα αναφέρονται ως Gap 1/2cm, Gap 1/4cm και Gap.

Αυτές οι αναλύσεις έγιναν με σκοπό να δούμε πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα το διαφορετικό διάκενο που προκύπτει στο μπροστινό και πίσω τμήμα του μηχανήματος (overcut/tail shield Gap).

Overcut	Tail shield Gap	Κωδική ονομασία
1 cm	4 cm	Gap 1/4 cm
1 cm	2 cm	Gap 1/2 cm
2 cm	6 cm	Gap 2/6 cm

Πίνακας 4.6: Overcut και Tail shield Gap (Gaps) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που θα παρουσιασθούν έχουν ασκούμενη πίεση στο μέτωπο P<sub>applied</sub>=129 Kpa και πίεση ενέματος GP=180 Kpa για H/D=2 και P<sub>applied</sub>=189 Kpa και GP=300 Kpa για H/D=3, καθώς και τα ίδια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά με αυτά των αναλύσεων της επιρροής της πίεσης του ενέματος (4.4.1):

Πίνακας 4.7: Ομάδες παραμέτρων εδάφους για βάθη σήραγγας H=2D και H=3D

Έδαφος	σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa (code b)	σ <sub>cs</sub> =172.3 Kpa (code g)
Γωνία τριβής, φ(deg)	20	30
Συνοχή, c (Kpa)	15	50

## 4.4.2.1 Εδαφικό προφίλ b (σ<sub>cs</sub> = 42.8 Kpa)

Στο Διάγραμμα 4.10, παρουσιάζονται, για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετικό εύρος προσομοιωμένου κενού μεταξύ ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm), τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε απόσταση 39m, 34.5m και 33m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα.

Στο δεξιά διάγραμμα (εγκάρσιο προφίλ), παρατηρείται και για τις τρεις (3) αναλύσεις μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0). Επίσης, παρατηρείται ότι υπάρχει έντονη επιρροή του Gap στο μέγεθος των καθιζήσεων. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος του κενού τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθίζηση που προκύπτει. Σχετικά με τα αποτελέσματα, όταν το κενό διαμορφώνεται στα 1cm overcut και 2cm tail shield Gap (Gap 1/2cm) η καθίζηση προκύπτει της τάξης των 10mm (0.35\* U<sub>smax,overall</sub>) και όταν διπλασιάζεται (περίπου 80% αύξηση) και ξεπερνά τα 18mm. Όταν το κενό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος αυξάνεται και γίνεται Gap 2/6cm τότε λαμβάνεται και η μέγιστη τιμή της καθίζησης η οποία είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 29mm (περίπου 60% αύξηση από τις προκύπτουσες τιμές για Gap 1/4cm). Τα προφίλ των καθιζήσεων ακολουθούν την ίδια κατανομή ανεξαρτήτως τιμής Gap.

Στο αριστερά διάγραμμα (διαμήκες προφίλ), βλέπουμε ότι προκύπτει και από αυτό πως όσο μεγαλύτερο είναι το διαμορφωμένο κενό τόσο μεγαλύτερη καθίζηση επί της εδαφικής επιφάνειας προκύπτει. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έχουν μία σταθερή τιμή για το μεγαλύτερο μήκος της εκσκαφής με εξαίρεση περίπου 1.5D απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής όπου τα μεγέθη των καθιζήσεων προκύπτουν μικρότερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκεί είναι τοποθετημένη η ασπίδα του μηχανήματος κατά την ανάλυση με συνέπεια να παρεμποδίζεται η μετακίνηση του εδαφικού υλικού και να προκύπτει αυτή η απόκλιση στα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 4.10: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=29mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.9, παρουσιάζεται η σύγκριση των εδαφικών καθιζήσεων κατά μήκος της σήραγγας για τις τρεις (3) παραπάνω αναλύσεις (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm). Παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που παρουσιάζει το Διάγραμμα 4.10 προκύπτουν. Προκύπτει ένα αναμενόμενο προφίλ καθιζήσεων με τις καθιζήσεις να μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας. Το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται να επηρεάζεται από την τιμή του διαμορφωμένου κενού στο μπροστινό και πίσω τμήμα του μηχανήματος που λαμβάνουμε υπόψιν.

Οι μέγιστες εδαφικές καθιζήσεις προκύπτουν στο μοντέλο με το προσομοιωμένο κενό Gap 2/6cm και στο υπόμνημα απεικονίζονται με ανοιχτό μπλε χρώμα το οποίο αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 29mm, όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.10. Οι μέγιστες μετακινήσεις προκύπτουν στη στέψη της σήραγγας (σκούρο μπλε και τάξης μεγέθους 39mm) και στο δάπεδο προκύπτουν ανιζήσεις (με σκούρο κόκκινο οι μέγιστες και αντιστοιχούν σε τάξη μεγέθους 22mm). Με τη μείωση του overcut/tail shield Gap παρατηρείται σημαντική μείωση του μεγέθους των κατακόρυφων μετακινήσεων.



Εικόνα 4.9: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 2D (Εικόνα 4.6) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές overcut/tail shield Gap. Επιπλέον, οι μέγιστες τιμές πλαστικής τάσης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας για την περίπτωση Gap 2/6cm, οι οποίες απεικονίζονται στο υπόμνημα με κόκκινο χρώμα. Γενικότερα, το κυριότερο που παρατηρείται είναι η ελαστική απόκριση που φαίνεται ότι παρουσιάζει το υλικό και η σχεδόν μηδενική έκταση πλαστικής ζώνης.



Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.10: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 34.5m και 33m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Όσον αφορά την περίπτωση βάθους σήραγγας ίση με 3D, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτή των 2D. Και στα δύο (2) διαγράμματα (Διάγραμμα 4.2), παρατηρείται κ εδώ ο ίδιος μηχανισμός εδαφικών μετακινήσεων (ίδια μορφή σχήματος καμπάνας). Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει για Gap 2/6cm και είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 21mm και εμφανίζεται όπως και στην περίπτωση υπερκειμένων 2D σε απόσταση πίσω από το μέτωπο περίπου ίση με 3D. Επιπλέον, παρατηρείται έντονα η επιρροή του Gap στο μέγεθος των καθιζήσεων. Έτσι, με αύξηση του Gap από 1/2cm σε 1/4cm παρατηρείται αύξηση στο μέγεθος των καθιζήσεων της τάξης του 75%, ενώ από 1/4cm σε 2/6cm το ποσοστό αύξησης κυμαίνεται στο 40%.



Διάγραμμα 4.11: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=21mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (GAP 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.11, για το μοντέλο όπου H/D=3, η μορφή της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου για H/D=2, με τις μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις να εμφανίζονται επίσης στη στέψη της σήραγγας για Gap 2/6cm. Και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 20mm (ανοιχτό μπλε) όπως δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.11.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 22mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 38mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για Gap 2/6cm. Με τη μείωση του overcut/tail shield Gap παρατηρείται, όπως στην περίπτωση βάθους 2D, σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.



Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.11: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Σχετικά με τα contours που αφορούν τις πλαστικές παραμορφώσεις, διαπιστώνεται και για το βάθος των 3D η ελαστική απόκριση του υλικού (πολύ μικρό εύρος πλαστικής ζώνης με μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στις παρειές για το μοντέλο Gap 2/6cm).



Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.12: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (40.5m, 39m και 39m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

## 4.4.2.2 Εδαφικό προφίλ g (σ<sub>cs</sub> = 172.3 Kpa)

Αντίστοιχα με το εδαφικό προφίλ b – ασθενές εδαφικό υλικό, διεξήχθησαν και εδώ αποτελέσματα και για το εδαφικό προφίλ g – πιο ισχυρό εδαφικό υλικό με την ίδια λογική αλληλουχία.

Στο Διάγραμμα 4.12, παρουσιάζονται, για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετικό εύρος προσομοιωμένου κενού μεταξύ ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm), τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε απόσταση 34.5m, 31.5m και 34.5m από το μέτωπο για GAP 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα).

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται με αυτά του εδαφικού προφίλ b, δηλαδή οι καθιζήσεις και για τις τρεις (3) αναλύσεις διαφορετικού Gap ακολουθούν παρόμοια κατανομή, ενώ και πάλι παρατηρείται η έντονη επιρροή αυτού του παράγοντα στο μέγεθος των καθιζήσεων. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος του κενού τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθίζηση που προκύπτει. Σχετικά με τα αποτελέσματα, όταν το κενό διαμορφώνεται στα 1cm overcut και 2cm tail shield Gap (GAP 1/2cm) η καθίζηση προκύπτει της τάξης των 6mm (0.45\*U<sub>smax,overall</sub>) και όταν διπλασιάζεται το tail shield Gap (Gap 1/4cm) η τιμή της καθίζησης αυξάνεται και πίσω τμήμα του μηχανήματος αυξάνεται και γίνεται Gap 2/6cm τότε λαμβάνεται και η μέγιστη τιμή της καθίζησης η οποία είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 13mm (περίπου 25% αύξηση από τις προκύπτουσες τιμές για GAP 1/4cm).Παρατηρούμε ακόμα πως εξαιτίας της καλύτερης πουπροέκυψε για τον κωδικό b.

Στο αριστερά διάγραμμα (διαμήκες), τα αποτελέσματα των αναλύσεων έχουν μία σταθερή τιμή για το μεγαλύτερο μήκος της εκσκαφής με εξαίρεση περίπου 1.5D απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (10.5m για την ακρίβεια όσο και το μήκος της ασπίδας) όπου τα μεγέθη των καθιζήσεων προκύπτουν μικρότερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκεί είναι τοποθετημένη η ασπίδα του μηχανήματος κατά την ανάλυση με συνέπεια να παρεμποδίζεται η μετακίνηση του εδαφικού υλικού και να προκύπτει αυτή η απόκλιση στα αποτελέσματα.

Στο δεξιά διάγραμμα (εγκάρσιο), παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0).



Διάγραμμα 4.12: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=13mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.13, παρουσιάζεται η σύγκριση των εδαφικών καθιζήσεων κατά μήκος της σήραγγας για τις τρεις (3) παραπάνω αναλύσεις (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm). Παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που παρουσιάζει το Διάγραμμα 4.12 προκύπτουν. Προκύπτει ένα αναμενόμενο προφίλ καθιζήσεων με τις καθιζήσεις να μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας. Το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται να επηρεάζεται απόλυτα από την τιμή του διαμορφωμένου κενού στο μπροστινό και πίσω τμήμα του μηχανήματος που λαμβάνουμε υπόψιν.

Οι μέγιστες εδαφικές καθιζήσεις προκύπτουν στο μοντέλο με το προσομοιωμένο κενό Gap 2/6cm και στο υπόμνημα απεικονίζονται με ανοιχτό μπλε χρώμα το οποίο αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 10-15mm, όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.10. Οι μέγιστες μετακινήσεις προκύπτουν στη στέψη της σήραγγας (σκούρο μπλε και τάξης μεγέθους 24mm) και στο δάπεδο προκύπτουν ανιζήσεις (με σκούρο κόκκινο οι μέγιστες και αντιστοιχούν σε τάξη μεγέθους 15mm). Με τη μείωση του overcut/tail shield Gap παρατηρείται σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.

Διαπιστώνεται ότι προκύπτουν μικρότερες τιμές μέγιστων κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το προφίλ b, λόγω της βελτίωσης της ποιότητας του γεωυλικού.


Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.13: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 2D (Εικόνα 4.14) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές overcut/tail shield Gap. Οι πλαστικές τάσεις είναι μηδενικές για Gap 1/2cm και Gap 1/4cm ενώ μικρές τιμές πλαστικής τάσης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας για Gap 2/6cm.



Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.14: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (34.5m, 31.5m και 34.5m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

Όσον αφορά την περίπτωση βάθους σήραγγας ίση με 3D, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτή των 2D.

Στο Διάγραμμα 4.13, παρουσιάζονται, για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετικό εύρος προσομοιωμένου κενού μεταξύ ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm), τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε απόσταση 39m, 36m και 36m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα).

Και στα δύο (2) διαγράμματα (Διάγραμμα 4.13), παρατηρείται κ εδώ ο ίδιος μηχανισμός εδαφικών μετακινήσεων (ίδια μορφή σχήματος καμπάνας). Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει για Gap 2/6cm και είναι ίση με U<sub>smax,overall</sub> = 12mm και εμφανίζεται όπως και στην περίπτωση υπερκειμένων 2D σε απόσταση πίσω από το μέτωπο περίπου ίση με 1.5D. Επιπλέον, παρατηρείται έντονα η επιρροή του Gap στο μέγεθος των καθιζήσεων. Έτσι, με αύξηση του Gap από 1/2cm σε 1/4cm παρατηρείται αύξηση στο μέγεθος των καθιζήσεων της τάξης του 90%, ενώ από 1/4cm σε 2/6cm το ποσοστό αύξησης κυμαίνεται στο 30%.



Διάγραμμα 4.13: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=12mm) για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.15, για το μοντέλο όπου H/D=3, η μορφή της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου για H/D=2, με τις μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις να εμφανίζονται επίσης στη στέψη της σήραγγας για Gap 2/6cm. Και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 9-13mm (ανοιχτό μπλε προς πράσινο) όπως δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.13.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 17mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 29mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για Gap 2/6cm. Με τη μείωση του overcut/tail shield

Gap παρατηρείται, όπως στην περίπτωση βάθους 2D, σημαντική μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.



Εικόνα 4.15: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις περιπτώσεις κενών μεταξύ εκσκαφής - ασπίδας μηχανήματος (Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 3D (Εικόνα 4.16) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές overcut/tail shield Gap. Οι πλαστικές τάσεις είναι μηδενικές για Gap 1/2cm και Gap 1/4cm ενώ μικρές τιμές πλαστικής τάσης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας για Gap 2/6cm.



Gap 1/4 cm

Εικόνα 4.16: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 36m και 36m από το μέτωπο για Gap 1/2 cm, 1/4 cm, 2/6 cm αντίστοιχα), - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=172.3 Kpa)

#### 4.4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις διάφορες ομάδες γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (codes a-g)

Στο Διάγραμμα 4.14 παρατηρείται και στις δύο (2) περιπτώσεις υπερκειμένων μείωση της τιμής της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης όσο βελτιώνονται οι ιδιότητες του εδάφους και αυξάνεται η αντοχή του και για τις τρεις αναλύσεις με διαφορετικό Gap. Επιπλέον, φαίνεται ότι είναι έντονη η επιροοή του Gap στο μέγεθος των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, με την μείωση του Gap υφίστανται μια μείωση οι τιμές των μέγιστων καθιζήσεων. Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 20%.



Διάγραμμα 4.14: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.15, φαίνεται τί ποσοστό των καθιζήσεων στη στέψη μεταφράζεται σε καθίζησεις στην επιφάνεια. Παρατηρούμε ότι η επιρροή του Gap δεν είναι τόσο έντονη στην επιφάνεια όσο στη στέψη (εντοπίζονται μικρότερες οι μετακινήσεις στην επιφάνεια απ' αυτές της στέψης). Ακόμα, διαπιστώνουμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap η απόκριση του υλικού για U<sub>s,max</sub> και U<sub>crown</sub> είναι ίδια.

Το μέγεθος των μετακινήσεων που εμφανίζονται στην επιφάνεια εξαρτάται και από το ύψος των υπερκειμένων. Όσο πιο ρηχή είναι η σήραγγα (H/D=2 σε σχέση με H/D=3) τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση των μετακινήσεων της στέψης στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.15: Λόγος μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους (U<sub>s,max</sub>) προς μέγιστης καθίζησης στη στέψη (U<sub>crown</sub>) συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.16 προκύπτει η σύγκριση για το μέγεθος της μεταβολής του όγκου του εδαφικού υλικού που καθιζάνει στην επιφάνεια ως προς τον όγκο του εκσκαπτόμενου υλικού, συναρτήσει της ποιότητας του γεωυλικού. Το μέγεθος αυτό επηρεάζεται από τις

προκύπτουσες καθιζήσεις με συνέπεια να είναι μεγαλύτερο για αναλύσεις με προκύπτουσες μεγαλύτερες καθιζήσεις. Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το διαμορφώμενο κενό (overcut/tail shield Gap), τόσο μεγαλύτερη είναι η κατακόρυφη εδαφική μετακίνηση και τόσο μεγαλύτερη και η τιμή του μεγέθους.

Επιπλέον, διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου μειώνεται, γεγονός που ταυτίζεται απόλυτα με όσα προαναφέραμε, καθώς το μέγεθος αυτό συνδέεται με τις καθιζήσεις που συντελούνται (Σχέση 2.8).



Διάγραμμα 4.16: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.17, παρουσιάζεται η μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων ως προς το βάθος της σήραγγας. Παρατηρείται μία (γραμμική) αύξηση του σημείου καμπής με αύξηση του βάθους της σήραγγας (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997), γεγονός που διαπιστώνεται και από τις αναλύσεις ευαισθησίας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method), για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm). Επιπλέον, και από τις FEM (Finite Element Method) αναλύσεις φαίνεται ότι το σημείο καμπής για το ίδιο βάθος εκσκαφής ακολουθεί μια σταθερή τιμή; μικρή αύξηση παρατηρείται όταν το Gap παίρνει τιμή 2/6cm.



Διάγραμμα 4.17: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)

#### 4.4.2.4 Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που αφορούν τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο (2) εδαφικά προσομοιώματα με διαφορετικό βάθος σήραγγας (H/D=2, H/D=3), για τις τρεις περιπτώσεις διαμορφωμένου κενού στο μπρος και πίσω τμήμα του μηχανήματος, overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm).

- Αυξημένη παρουσιάζεται η επιρροή του Gap στις επιφανειακές καθιζήσεις. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το διαμορφωμένο κενό Gap τόσο μεγαλύτερη καθίζηση επί της εδαφικής επιφάνειας προκύπτει. Με αύξηση του διαμορφωμένου κενού από 1/2cm στα 2/6cm για το ασθενές εδαφικό υλικό (σ<sub>cs</sub>=42.8 KPa) το μέγεθος των καθιζήσεων σχεδόν τριπλασιάζεται, ενώ για την σκληρή άργιλο (σ<sub>cs</sub>=172.3 KPa) οι καθιζήσεις αυξάνονται σε ποστοστό 120%.
- Τα προφίλ των καθιζήσεων ακολουθούν την ίδια κατανομή ανεξαρτήτως τιμής Gap.
- Το μέγεθος των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε διαφορετικά βάθη φαίνεται να επηρεάζεται απόλυτα από την τιμή του διαμορφωμένου κενού στο μπροστινό και πίσω τμήμα του μηχανήματος που λαμβάνουμε υπόψιν. Με αύξηση του εύρους του κενού προκύπτει μεγαλύτερη τιμή μετακίνησης.
- Παρατηρείται περιορισμένη έκταση πλαστικής ζώνης; το υλικό φαίνεται ν' αποκρίνεται ελαστικά.
- Οι μέγιστες κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας και για τις τρεις τιμές της παραμέτρου Gap. Από τις τρεις (3) αναλύσεις οι μέγιστες μετακινήσεις προέκυψαν για τη μεγαλύτερη τιμή κενού (Gap 2/6cm).
- Με βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους προκύπτει μείωση στο μέγεθος των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου Gap.

- Η επίδραση του Gap δεν είναι τόσο έντονη στην επιφάνεια όσο στη στέψη (εντοπίζονται μικρότερες οι μετακινήσεις στην επιφάνεια απ' αυτές της στέψης). Ακόμα, διαπιστώνουμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap η απόκριση του υλικού για U<sub>s,max</sub> και U<sub>crown</sub> είναι ίδια.
- Το μέγεθος της μεταβολής του όγκου του εδαφικού υλικού που καθιζάνει στην επιφάνεια ως προς τον όγκο του εκσκαπτόμενου υλικού (V<sub>L</sub> %) επηρεάζεται από τις προκύπτουσες καθιζήσεις, με συνέπεια να είναι μεγαλύτερο για προκύπτουσες καθιζήσεις μεγαλύτερες. Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το διαμορφώμενο κενό (overcut/tail shield Gap), τόσο μεγαλύτερη είναι η κατακόρυφη εδαφική μετακίνηση και τόσο μεγαλύτερη και η τιμή του μεγέθους. Επιπλέον, διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου (V<sub>L</sub> %) μειώνεται.
- Το σημείο καμπής (i) για το ίδιο βάθος εκσκαφής δεν μεταβάλλεται.

Για αύξηση του βάθους από 2D σε 3D συνοψίζονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 20%.
- Παρατηρείται αύξηση του σημείου καμπής (i) με αύξηση του βάθους της σήραγγας.

### 4.4.3 Επιρροή πίεσης μετώπου (Face Pressure effect)

Η εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο (P<sub>APPLIED</sub>) προσομοιώνεται όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.7 ως άθροισμα δύο όρων, μίας σταθερής πίεσης (P<sub>0</sub>) στη στέψη της σήραγγας λόγω των εμβόλων, οποία λαμβάνεται για τις αναλύσεις μας ίση με την υδροστατική πίεση στη στέψη (P<sub>w,crown</sub>) και μιας πρόσθετης πίεσης στο μέτωπο λόγω του ιδίου βάρους του ενέματος για την οποία γίνεται η υπόθεση ότι λαμβάνει τραπεζοειδή κατανομή με κλίση ίση και σταθερή με την πυκνότητα του υλικού εκσκσαφής (γ<sub>muck</sub>), η οποία θεωρήθηκε 13kN/m<sup>3</sup>.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο (2) εδαφικά προσομοιώματα(H/D=2, H/D=3), αναλύσεις για τρεις πιέσεις στο μέτωπο (face pressure) για τιμές της παραμέτρου A=0.5, A=1 και A=1.5 (Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.8: Πίεση μετώπου (P<sub>APPLIED</sub>) για τα δυο διαφορετικά εδαφικά προσομοιώματα

H/D	γw	P <sub>w,crown</sub>	<b>ү</b> миск <b>D/2</b>	P <sub>APPLIED</sub> (A=1)	P <sub>APPLIED</sub> (A=0.5)	P <sub>APPLIED</sub> (A=1.5)
2	10 (kN/m³)	90 Kpa	39 (Kpa)	129 (Kpa)	64.5 (Kpa)	193.5 (Kpa)
3	10 (kN/m <sup>3</sup> )	150 Kpa	39 (Kpa)	189 (Kpa)	94.5 (Kpa)	283.5 (Kpa)

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που θα παρουσιασθούν έχουν τιμή διαμορφωμένου διάκενου στο μπρος και πίσω τμήμα του μηχανήματος (overcut/tail shield Gap) 1/4cm και πίεση ενέματος GP=180 Kpa για H/D=2 και GP=300 Kpa για H/D=3.

Σε αντίθεση με τις άλλες παραμετρικές αναλύσεις (grout pressure, Gap effect) δεν πραγματοποιήθηκαν πολλές αναλύσεις σε μεγάλο εύρος εξαιτίας της μη επιρροής της παραμέτρου και για τις τρεις (3) πιέσεις μετώπου. Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα για το εδαφικό προφίλ b (σcs=42.8 Kpa).

Πίνακας 4.9: Παράμετροι εδάφους εδαφικών προσομοιωμάτων (H=2D και H=3D)

Έδαφος	σ <sub>cs</sub> =42.8 Kpa (code b)
Γωνία τριβής, φ(deg)	20
Συνοχή, c (Kpa)	15
Μέτρο ελαστικότητας, Esoil, H/D=2 (MPa)	23.3
Μέτρο ελαστικότητας, Esoil, H/D=3 (MPa)	32.6

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται για τις δύο περιπτώσεις βάθους σήραγγας (H/D=2 και H/D=3), για τις παραπάνω παραμέτρους και τις τρεις (3) πιέσεις μετώπου:

• Η σύγκριση των εγκάρσιων προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων  $(U_3)$  της σήραγγας στις χαρακτηριστικές θέσεις.

Η σύγκριση των διαμήκων προφίλ επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) της σήραγγας.

Η σύγκριση, με τη μορφή ισοπαραμετρικών καμπυλών (contours), των κατακόρυφων μετακινήσεων σε όλο το εύρος των μοντέλων, για εποπτική και μόνο σύγκριση ανάμεσα στις 3 ομάδες μοντέλων.

- Η σύγκριση των κατανομών των πλαστικών παραμορφώσεων.
- Η σύγκριση των προφίλ έκθλιψης του μετώπου.

### 4.4.3.1 Εδαφικό προφίλ b (σ<sub>cs</sub> = 42.8 Kpa)

Στο Διάγραμμα 4.18 παρουσιάζονται, για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετική πίεση μετώπου (A=0.5, 1, 1.5), τα προφίλ των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά το διαμήκες (αριστερά διάγραμμα) και εγκάρσιο (δεξιά διάγραμμα) επίπεδο της σήραγγας, για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=2. Η εγκάρσια τομή έχει ληφθεί στις χαρακτηριστικές θέσεις (σε απόσταση 33m από το μέτωπο για A=0.5, 1, 1.5).

Στο δεξιά διάγραμμα (εγκάρσιο προφίλ), παρατηρείται και για τις τρεις (3) αναλύσεις ένα αναμενόμενο προφίλ (τα προφίλ ακολουθούν την ίδια κατανομή), όπως προέκυψε και για τις προηγούμενες αναλύσεις με μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας και τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0). Στο αριστερά διάγραμμα (διαμήκες προφίλ), βλέπουμε ότι προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα με αυτά των προηγούμενων αναλύσεων όσον αφορά τη μορφή της καμπύλης και τη συμπεριφορά των τιμών των καθιζήσεων (σταθερή τιμή καθίζησης για το μεγαλύτερο μήκος της εκσκαφής με εξαίρεση περίπου 3D απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής όπου τα μεγέθη των καθιζήσεων προκύπτουν μικρότερα, λόγω της τοποθέτησης της ασπίδας).

Επίσης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει επιρροή της πίεσης του μετώπου στο μέγεθος των καθιζήσεων καθώς οι καμπύλες ταυτίζονται και για τις τρεις πιέσεις, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να είναι ίση με 19mm. Κάποιες πρόδρομες καθιζήσεις με την αύξηση της πίεσης διακρίνεται στο διαμήκες προφίλ ότι ίσως μπορούν ν' αποφευχθούν.



Διάγραμμα 4.18: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=19mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) για H/D=2 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.17 γίνεται η σύγκριση του μεγέθους των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά μήκος της σήραγγας για A=0.5, 1, 1.5, για το εδαφικό προφίλ b (σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa). Διαπιστώνεται ένα αναμενόμενο προφίλ καθιζήσεων με τις καθιζήσεις να μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας. Η έκταση της κατανομής τους γύρω από τη σήραγγα έχει την ίδια μορφή, ενώ το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται να μην επηρεάζεται από την τιμή πίεσης μετώπου, δηλαδή φαίνεται να συμπίπτουν τ' αποτελέσματα με αυτά στο Διάγραμμα 4.18.

Με κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα, παρουσιάζονται οι ανιζήσεις τάξης μεγέθους περίπου 18mm και με σκούρο μπλε οι μέγιστες καθιζήσεις τάξης μεγέθους 25mm, οι οποίες εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου Α. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η τιμή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 19mm (ανοιχτό μπλε) όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το Διάγραμμα 4.18. Με την αύξηση της πίεσης δεν παρατηρείται μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.





Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 2D (Εικόνα 4.18) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Α. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το υλικό έχει ελαστική απόκριση (σχεδόν μηδενική έκταση πλαστικής ζώνης). Κάποιας μικρής τάξης μεγέθους πλαστικές τάσεις εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας.



Εικόνα 4.18: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (33m από το μέτωπο για A=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση μετώπου ίση με 129 Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Επιπλέον, εξετάζονται για τις τρεις (3) πιέσεις στο μέτωπο το μέγεθος των οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>2</sub>) καθ'ύψος της διαμέτρου της σήραγγας και η κατανομή τους (contours).

Διαπιστώνουμε από το Διάγραμμα 4.19 ότι η μέγιστη τιμή οριζόντιας μετακίνησης εντοπίζεται στο κέντρο της σήραγγας και στο ψηλότερο τμήμα του μετώπου και όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο της σήραγγας με τη μεγαλύτερη τιμή της εξώθησης του μετώπου προς την περιφέρεια της σήραγγας τόσο μειώνεται η τιμή της μετακίνησης; η εξώθηση οφείλεται στη σταδιακή μείωση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης κατά την προώθηση του μηχανήματος και της χαμηλής επιρροής των συνοριακών συνθηκών στα σημεία αυτά (περιορισμός κίνησης στις παρειές). Έτσι, για χαμηλή εφαρμοζόμενη πίεση (A=0.5) παρουσιάζεται εξώθηση του μετώπου μετώπου (μετακίνηση του γεωυλικού εντός της εκσκαφής) που υπολογίζεται σε 7mm περίπου. Για μεγάλη τιμή πίεσης (A=1.5) παρατηρείται μία μετακίνηση του μετώπου προς το εξωτερικό της διανοιχθείσας σήραγγας (12mm); Σχεδόν μηδενική εξώθηση (τιμή μετακίνησης (A=1), γεγονός που οφείλεται στο ότι ασκείται μεγαλύτερη πίεση ποο σημεία την οριζόντια γεωστατική ση.

Η κατεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας προσημαίνεται θετικά ενώ αρνητικές τιμές αξονικής μετακίνησης (U<sub>2</sub>) υποδηλώνουν κίνηση κόμβων προς το εσωτερικό της σήραγγας.



Διάγραμμα 4.19: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ως προς την ακτίνα της σήραγγας D=6m για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ<sub>G</sub>=42.8 Kpa)

Στην Εικόνα 4.19 παρουσιάζεται η 57<sup>η</sup> φέτα στο μέτωπο εκσκαφής (μέτωπο στα 84m). Στην ανάλυση για χαμηλή πίεση υποστήριξης (A=0.5) η μέγιστη τιμή εξώθησης εμφανίζεται στο κέντρο (με τιμή της τάξης των 7-8mm) και στο ψηλότερο τμήμα της διατομής (σκούρο μπλε του υπομνήματος) και οι τιμές μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε προς τις παρειές. Στις αναλύσεις για τιμή πίεσης μετώπου ελάχιστα μεγαλύτερη από την οριζόντια γεωστατική παρατηρείται μία μικρή μετακίνηση του μετώπου εκτός της εκσκαφής της τάξη των 2-3mm (σχεδόν μηδενική εξώθηση), ενώ για υψηλή τιμή πίεσης υποστήριξης διαπιστώνεται μετακίνηση εκτός της εκσκαφής της τάξης των 11-12mm.



Εικόνα 4.19: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Όσον αφορά την περίπτωση βάθους σήραγγας ίση με 3D, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτή των 2D.

Και στα δύο διαγράμματα (Διάγραμμα 4.20), παρατηρείται κ εδώ ο ίδιος μηχανισμός εδαφικών μετακινήσεων (ίδια συμπεριφορά ανεξαρτήτως τιμής Α). Στο δεξιά διάγραμμα (εγκάρσιο προφίλ), παρατηρείται και για τις τρεις (3) αναλύσεις μείωση των καθιζήσεων όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να παρουσιάζεται ακριβώς στον άξονα της σήραγγας (x=0). Στο αριστερά διάγραμμα (διαμήκες προφίλ), βλέπουμε ότι προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα με αυτά των προηγούμενων αναλύσεων και του εδαφικού προσομοιώματος H/D=2 όσον αφορά τη μορφή της καμπύλης και τη συμπεριφορά των τιμών των καθιζήσεων (σταθερή τιμή καθίζησης για το μεγαλύτερο μήκος της εκσκαφής με εξαίρεση περίπου 3D απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής όπου τα μεγέθη των καθιζήσεων προκύπτουν μικρότερα, λόγω της τοποθέτησης της ασπίδας).

Επίσης, παρατηρείται και για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=3 ότι δεν υπάρχει επιρροή της πίεσης του μετώπου στο μέγεθος των καθιζήσεων καθώς οι καμπύλες ταυτίζονται και για τις τρεις (3) πιέσεις, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να είναι ίση με 15mm.



Διάγραμμα 4.20: Προφίλ κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>3</sub>) αδιαστατοποιημένων ως προς την μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης (U<sub>smax, overall</sub>=15mm) για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) για H/D=3 και σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa; (αριστερά) Διαμήκες προφίλ (δεξιά) Εγκάρσιο προφίλ

Στην Εικόνα 4.20, παρουσιάζεται η σύγκριση των εδαφικών καθιζήσεων κατά μήκος της σήραγγας για τις τρεις (3) παραπάνω αναλύσεις (A=0.5, 1, 1.5) για το εδαφικό προσομοίωμα H/D=3. Παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που παρουσιάζει το Διάγραμμα 4.20 προκύπτουν. Προκύπτει ένα αναμενόμενο προφίλ καθιζήσεων με τις καθιζήσεις να μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της σήραγγας. Το μέγεθος των εδαφικών μετακινήσεων φαίνεται να μην επηρεάζεται από την αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο.

Οι μέγιστες εδαφικές καθιζήσεις απεικονίζονται στο υπόμνημα με ανοιχτό μπλε χρώμα το οποίο αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 15mm, όπως ακριβώς δηλαδή δείχνει και το

Διάγραμμα 4.20. Οι μέγιστες μετακινήσεις προκύπτουν στη στέψη της σήραγγας (σκούρο μπλε και τάξης μεγέθους 26mm) και στο δάπεδο προκύπτουν ανιζήσεις (με σκούρο κόκκινο οι μέγιστες και αντιστοιχούν σε τάξη μεγέθους 18mm) για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου Α.



Εικόνα 4.20: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων για τρεις πιέσεις μετώπου ίση με 129 Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Από τα σχήματα που αφορούν στο βάθος των 3D (Εικόνα 4.21) προκύπτει ότι τόσο το σχήμα όσο και η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα δεν παρουσιάζουν διαφορές για τις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Α. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το υλικό έχει ελαστική απόκριση (σχεδόν μηδενική έκταση πλαστικής ζώνης). Κάποιας μικρής τάξης μεγέθους πλαστικές τάσεις εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας (κόκκινο χρώμα στο υπόμνημα).



A=1

Εικόνα 4.21: Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για τρεις αναλύσεις στις χαρακτηριστικές τομές (39m, 39m, 37.5m από το μέτωπο για A=1, 0.5 και 1.5 αντίστοιχα), με πίεση μετώπου ίση με 129 Kpa (A=1), 64.5 Kpa (A=0.5) και 193.5 Kpa (A=1.5) - (H/D=3 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

Στο Διάγραμμα 4.21 παρουσιάζεται για τις τρεις (3) πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο (A=0.5, 1, 1.5) η κατανομή και το μέγεθος των οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων (U<sub>2</sub>) καθ'ύψος της διαμέτρου της σήραγγας. Φαίνεται να προκύπτουν ποιοτικά παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που εξήχθησαν με το αντίστοιχο διάγραμμα του εδαφικού προσομοιώματος για H/D=2.

Διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη τιμή οριζόντιας μετακίνησης εντοπίζεται στο κέντρο της σήραγγας και στο ψηλότερο τμήμα του μετώπου και όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο της σήραγγας με τη μεγαλύτερη τιμή της εξώθησης του μετώπου προς την περιφέρεια της σήραγγας τόσο μειώνεται η τιμή της μετακίνησης; η εξώθηση οφείλεται στη σταδιακή μείωση της οριζόντιας γεωστατικής τάσης κατά την προώθηση του μηχανήματος και της χαμήλης επιρροής των συνοριακών συνθηκών στα σημεία αυτά (περιορισμός κίνησης στις παρειές). Έτσι, για χαμηλή εφαρμοζόμενη πίεση (A=0.5) παρουσιάζεται εξώθηση του μετώπου μετώπου (μετακίνηση του γεωυλικού εντός της εκσκαφής) που υπολογίζεται σε 15mm περίπου. Για μεγάλη τιμή πίεσης (A=1.5) παρατηρείται μία μετακίνηση του μετώπου προς το εξωτερικό της διανοιχθείσας σήραγγας (12mm); Σχεδόν μηδενική εξώθηση (τιμή μετακίνησης εκτός εκσκαφής περί τα 2-3mm) παρατηρείται μεγάλυτερη πίεση από την οριζόντια γεωστατική (σ<sub>h,o</sub>=180 Kpa).

Η κατεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας προσημαίνεται θετικά ενώ αρνητικές τιμές αξονικής μετακίνησης(U<sub>2</sub>) υποδηλώνουν κίνηση κόμβων προς το εσωτερικό της σήραγγας.



Διάγραμμα 4.21: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ως προς την ακτίνα της σήραγγας D=6m για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=3 - σ<sub>G</sub>=42.8 Kpa)

Στην Εικόνα 4.22 παρουσιάζεται, αντίστοιχα και με το εδαφικό προσομοίωμα για H/D=2, η 57<sup>η</sup> φέτα στο μέτωπο εκσκαφής (μέτωπο στα 84m) του εδαφικού προσομοιώματος για βάθος 3D. Στην ανάλυση για χαμηλή πίεση υποστήριξης (A=0.5) η μέγιστη τιμή εξώθησης εμφανίζεται στο κέντρο (με τιμή της τάξης των 7-8mm) και στο ψηλότερο τμήμα της διατομής (σκούρο μπλε του υπομνήματος) και οι τιμές μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε προς τις παρειές. Στις αναλύσεις για τιμή πίεσης μετώπου ελάχιστα μεγαλύτερη από την οριζόντια γεωστατική παρατηρείται μία μικρή μετακίνηση του μετώπου εκτός της εκσκαφής της τάξη των 2-3mm (σχεδόν μηδενική εξώθηση), ενώ για υψηλή τιμή πίεσης υποστήριξης διαπιστώνεται μετακίνηση εκτός της εκσκαφής της τάξης των 11-12mm.



Εικόνα 4.22: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου για τρεις τιμές πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (H/D=2 - σ<sub>cs</sub>=42.8 Kpa)

#### 4.4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων για τις διάφορες ομάδες γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (codes a-c

Στο Διάγραμμα 4.22 παρατηρείται και στις δύο (2) περιπτώσεις υπερκειμένων μείωση της τιμής της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης όσο βελτιώνονται οι ιδιότητες του εδάφους και για τις τρεις (3) αναλύσεις με διαφορετικό Α. Επιπλέον, φαίνεται και εδώ ότι δεν υπάρχει καμία επιροοή της παραμέτρου Α στο μέγεθος των μέγιστων καθιζήσεων, καθόσον οι μέγιστες καθιζήσεις, για κάθε γεωτεχνική ομάδα (a-c), ταυτίζονται για A=0.5, 1, 1.5. Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 20%.



Διάγραμμα 4.22: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.23 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του όγκου του εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας, συναρτήσει της ποιότητας του γεωυλικού. Διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου μειώνεται, γεγονός που ταυτίζεται απόλυτα με όσα προαναφέραμε, καθώς το μέγεθος αυτό συνδέεται με τις καθιζήσεις που συντελούνται (Σχέση 2.8). Βλέπουμε ακόμα πως λόγω της αύξησης της τιμής του Α δεν επηρεάζεται καθόλου το μέγεθος αυτό της μεταβολή του εδαφικού όγκου.



Διάγραμμα 4.23: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c), για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Στο Διάγραμμα 4.24 παρουσιάζεται η μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των εδαφικών καθιζήσεων ως προς το βάθος της σήραγγας. Παρατηρείται μία αύξηση του σημείου καμπής με αύξηση του βάθους της σήραγγας (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997), γεγονός που διαπιστώνεται και από τις αναλύσεις ευαισθησίας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A= 0.5, 1, 1.5). Επιπλέον, και από τις FEM (Finite Element Method) αναλύσεις φαίνεται ότι το σημείο καμπής για το ίδιο βάθος εκσκαφής ακολουθεί μια σταθερή τιμή χωρίς να επηρεάζεται από τη μεταβολή κάποιας παραμέτρου.



Διάγραμμα 4.24: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997)

### 4.4.3.3 Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που αφορούν τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο (2) εδαφικά προσομοιώματα με διαφορετικό βάθος σήραγγας (H/D=2, H/D=3), για τις τρεις περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A= 0.5, 1, 1.5).

- Η πίεση του μετώπου (Face Pressure) δεν επηρεάζει καθόλου τις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς οι καμπύλες ταυτίζονται και για τις τρεις πιέσεις, με τη μέγιστη τιμή καθίζησης να είναι ίση με 19mm. Μόνο κάποιες πρόδρομες καθιζήσεις διακρίνεται να μπορούν ν' αποφευχθούν με την αύξηση της πίεσης.
- Τα προφίλ των καθιζήσεων ακολουθούν την ίδια κατανομή ανεξαρτήτως τιμής Α.
- Το μέγεθος των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε διαφορετικά βάθη δεν επηρεάζεται από την τιμή της παραμέτρου Α που λαμβάνουμε υπόψιν. Με την αύξηση της πίεσης δεν παρατηρείται μείωση του μεγέθους των μετακινήσεων.
- Οι καθιζήσεις σταθεροποιούνται σε απόσταση περίπου 1.5D (9m) από το μέτωπο.
- Παρατηρείται περιορισμένη έκταση πλαστικής ζώνης; το υλικό φαίνεται ν' αποκρίνεται ελαστικά.
- Οι μέγιστες κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας και για τις τρεις τιμές του Α.
- Με βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους προκύπτει μείωση στο μέγεθος των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων για οποιαδήποτε τιμή πίεσης μετώπου.
- Δεν υπάρχει καμία επιρροή της παραμέτρου Α στο μέγεθος των μέγιστων καθιζήσεων, καθόσον οι μέγιστες καθιζήσεις, για κάθε γεωτεχνική ομάδα (a-c), ταυτίζονται για A=0.5, 1, 1.5.
- Το μέγεθος της μεταβολής του όγκου του εδαφικού υλικού που καθιζάνει στην επιφάνεια ως προς τον όγκο του εκσκαπτόμενου υλικού (V<sub>L</sub>%) επηρεάζεται από τις προκύπτουσες καθιζήσεις. Λόγω της μεταβολής της τιμής του Α δεν επηρεάζεται καθόλου το μέγεθος αυτό της μεταβολής του εδαφικού όγκου.
- Επιπλέον, διαπιστώνουμε πως όσο βελτιώνονται οι εδαφικές ιδιότητες το ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου (V<sub>L</sub>%) μειώνεται.
- Για χαμηλή εφαρμοζόμενη πίεση (A=0.5) παρουσιάζεται εξώθηση του μετώπου (μετακίνηση του γεωυλικού εντός της εκσκαφής) που υπολογίζεται σε 7mm περίπου. Για μεγάλη τιμή πίεσης (A=1.5) παρατηρείται μία μετακίνηση του μετώπου προς το εξωτερικό της διανοιχθείσας σήραγγας (12mm). Σχεδόν μηδενική εξώθηση (τιμή μετακίνησης εκτός εκσκαφής περί τα 2-3mm) παρατηρείται για συνήθη τιμή πίεσης υποστήριξης (A=1), γεγονός που οφείλεται στο ότι ασκείται μεγάλυτερη πίεση από την οριζόντια γεωστατική (σ<sub>h,o</sub>=120 Kpa).
- Η μέγιστη τιμή εξώθησης του μετώπου εντοπίζεται στον κεντρικό άξονα της εκσκαφής και στο ψηλότερο τμήμα του μετώπου και όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο της σήραγγας με τη μεγαλύτερη τιμή της εξώθησης του μετώπου προς την περιφέρεια της σήραγγας τόσο μειώνεται η τιμή της.
- Το σημείο καμπής (i) για το ίδιο βάθος εκσκαφής δεν μεταβάλλεται.

Για αύξηση του βάθους από 2D σε 3D συνοψίζονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων κατά ένα ποσοστό περίπου στο 20%.
- Με την αύξηση των υπερκειμένων παρουσιάζει αύξηση η τιμή του μεγέθους της εξώθησης του μετώπου (από 7mm αυξάνεται στα 15mm), ενώ το μέγεθος των μετακινήσεων προς το εξωτερικό της εκσκαφής σχεδόν δεν μεταβάλλεται.
- Παρατηρείται αύξηση του σημείου καμπής (i) με αύξηση του βάθους της σήραγγας.

## 5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, εξήχθησαν αποτελέσματα από ένα σημαντικό αριθμό τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) για μηχανοποιημένη διάνοιξη αβαθών σηράγγων, με σκοπό να πραγματοποιηθεί διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις εδαφικές μετακινήσεις, για δύο (2) εδαφικά προσομοιώματα με διαφορετικό βάθος σήραγγας (H/D=2, H/D=3), για οκτώ (8) εδαφικά προφίλ υπό την θεώρηση ότι η σήραγγα εκσκάπτεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση στις εδαφικές μετακινήσεις τριών (3) κύριων παραμέτρων που αφορούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΕΡΒ και είναι οι εξής:

- Εφαρμοσμένη πίεση ενέματος Grout Pressure, GP
- Κενό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος (overcut/tail shield Gap) Gap
- Εφαρμοσμένη πίεση στο μέτωπο Face Pressure, Papplied

Παρουσιάστηκαν ενδεικτικές αναλύσεις για ένα εδαφικό υλικό με ασθενή γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (code b) και για ένα υλικό σε καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες (code g). Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτή την εργασία συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία για κάθε παράμετρο:

Τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της πίεσης ενέματος (Grout Pressure) συνοψίζονται ως εξής:

- Από το κανονικοποιημένο διάγραμμα σ<sub>c</sub>/p<sub>0</sub> U<sub>s,max</sub>/D (Διάγραμμα 5.1) παρατηρείται μία επιρροή του Grout Pressure στις τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων; με αύξηση της τιμής του Grout Pressure προκύπτει μικρότερη καθίζηση επί της εδαφικής επιφάνειας. Επιπλέον, υφίστανται μείωση οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων με βελτίωση της ποιότητας του γεωυλικού. Με διακεκομμένες καμπύλες σημειώνεται η τάση των σημείων για κάθε τιμή του Grout Pressure και διαπιστώνεται μία παρόμοια συμπεριφορά για τις τρεις τιμές Grout Pressure με μία απόκλιση μεταξύ τους.
- Ο μηχανισμός των επιφανειακών καθιζήσεων ακολουθεί ίδια συμπεριφορά κατά τον εγκάρσιο και διαμήκη άξονα ανεξαρτήτως μεταβολής της τιμής του Grout Pressure.
- Διαπιστώθηκε μία επιρροή του Grout Pressure στις τιμές του Volume Loss, V<sub>L</sub>(%), αφού η αύξηση του Grout Pressure οδηγεί σε σημαντική μείωση των τιμών του V<sub>L</sub>(%), ταυτόχρονα και μείωση από την επιρροή της ποιότητας του εδάφους.
- Σχετικά με το σημείο καμπής, προέκυψε μικρή η επιρροή του Grout Pressure στον καθορισμό της τιμής του; φαίνεται ν΄ακολουθεί σταθερή κατανομή για το ίδιο βάθος εκσκαφής.



Διάγραμμα 5.1: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις διαφορετικές πιέσεις ενέματος (GP<sub>factor</sub>=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή του κενού στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος (Gap) συνοψίζονται ως εξής:

- Από το κανονικοποιημένο διάγραμμα σ<sub>c</sub>/p<sub>0</sub> U<sub>s,max</sub>/D προέκυψε η αυξημένη επιρροή του Gap στις επιφανειακές καθιζήσεις, αφού η αύξηση του Gap οδηγεί σε αισθητή αύξηση των τιμών των επιφανειακών καθιζήσεων; αντίθετα προκύπτει μείωση των τιμών από την επιρροή των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Με διακεκομμένες καμπύλες σημειώνεται η τάση των σημείων για κάθε τιμή του Grout Pressure και διαπιστώνεται μία παρόμοια συμπεριφορά για τις τρεις τιμές Grout Pressure με σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. (Διάγραμμα 5.2).
- Η μορφή της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τον εγκάρσιο και τον διαμήκη άξονα παραμένει σταθερή με την αύξηση του Gap.
- Διαπιστώθηκε η αυξημένη επιρροή του Grout Pressure στις τιμές του Volume Loss, V<sub>L</sub>(%), αφού η αύξηση του Grout Pressure οδηγεί σε σημαντική μείωση των τιμών του V<sub>L</sub>(%), ταυτόχρονα και μείωση από την επιρροή της ποιότητας του εδάφους.
- Σχετικά με το σημείο καμπής, προέκυψε μικρή η επιρροή του Gap στον καθορισμό της τιμής του; φαίνεται ν΄ακολουθεί σταθερή κατανομή για το ίδιο βάθος εκσκαφής.



Διάγραμμα 5.2: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-g) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σc/Po, για τρεις περιπτώσεις overcut/tail shield Gap (Gap 1/2cm, 1/4cm, 2/6cm) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της πίεσης μετώπου (Face Pressure) συνοψίζονται ως εξής:

- Από το κανονικοποιημένο διάγραμμα σ<sub>c</sub>/p<sub>0</sub> U<sub>s,max</sub>/D προέκυψε ότι δεν υπάρχει επιρροή του Face Pressure στις επιφανειακές καθιζήσεις, αφού η αύξηση του Face Pressure δίνει ίδιες τιμές επιφανειακών καθιζήσεων; όμως προκύπτει μείωση των τιμών από την επιρροή των εδαφικών ιδιοτήτων. Ουσιαστικά αρκεί ν' ασκηθεί στο μέτωπο μια μικρή πίεση ώστε να κρατηθεί σταθερό χωρίς να χρειάζεται ν' ασκήσουμε την πλήρη γεωστατική πίεση. (Διάγραμμα 5.2).
- Η μορφή της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τον εγκάρσιο και τον διαμήκη άξονα παραμένει σταθερή με την αύξηση του Face Pressure.
- Διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει επιρροή του Face Pressure στις τιμές του Volume Loss, V<sub>L</sub>(%), αφού η αύξηση του Face Pressure δεν προκαλεί μεταβολή των τιμών του V<sub>L</sub>(%), υπάρχει όμως μείωση από την επιρροή των εδαφικών ιδιοτήτων.
- Για χαμηλή τιμή εφαρμοζόμενης πίεσης (A=0.5) παρουσιάζεται εξώθηση του μετώπου (μετακίνηση του γεωυλικού εντός της εκσκαφής).
- Σχετικά με το σημείο καμπής, προέκυψε μικρή η επιρροή του Face Pressure στον καθορισμό της τιμής του; φαίνεται ν΄ακολουθεί σταθερή κατανομή για το ίδιο βάθος εκσκαφής.



Διάγραμμα 5.3: Μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν για τη θέση x=0 (στον άξονα της σήραγγας) για κάθε ομάδα παραμέτρων εδάφους (codes a-c) ανηγμένες ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (D), συναρτήσει του σ<sub>c</sub>/Po, για τρεις περιπτώσεις πίεσης μετώπου (A=0.5, 1, 1.5) - (αριστερά διάγραμμα H/D=2 – δεξιά H/D=3)

Για αύξηση του βάθους από 2D σε 3D συνοψίζονται και για τις τρεις παραμέτρους επιρροής τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την αύξηση των υπερκειμένων από 2D σε 3D παρατηρούνται μειωμένες τιμές μέγιστων καθιζήσεων, οι μετακινήσεις της στέψης μεταφέρονται λιγότερο έντονα στην επιφάνεια. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση του βάθους αυξάνει και η δυνατότητα ανακατανομής πάνω από τη σήραγγα των τάσεων λόγω της διάνοιξης. Έτσι, καθώς το βάθος της σήραγγας αυξάνει, αυξάνει και το ποσοστό της απελευθερούμενης τάσης στην περιοχή του μετώπου που παραλαμβάνεται από εδαφικά στοιχεία πάνω από το μέτωπο της σήραγγας (πληρέστερη ανάπτυξη τοξωτής λειτουργίας εδάφους/φαινόμενο του θόλου)
- Το σημείο καμπής (i) επηρεάζεται από την αύξηση του βάθους της σήραγγας, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 5.4. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι εμπειρικές προτάσεις μέσω εμπειρικών σχέσεων που έχουν προταθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές στη διεθνή βιβλιογραφία συμβαδίζουν με τα δικά μας αποτελέσματα.



Διάγραμμα 5.4: Συσχέτιση μεταξύ σημείου καμπής (i) και βάθους σήραγγας (z) (Peck, 1969; O'Reilly and New, 1982; Mair and Taylor, 1997), συμπεριλαμβανομένων των τιμών σημείων καμπής και για τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους (Grout Pressure, Gap, Face Pressure)

Τέλος, γίνεται ένας συσχετισμός ανάμεσα στα ποσοστά μεταβολής εδαφικού όγκου (V<sub>L</sub>) όπως υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση του Peck, 1969 (Σχέση 2.3) και των υπολογιζόμενων τιμών όπως προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις (FEM) για όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Διαπιστώνεται ότι υπάρχει καλή συσχέτιση καθώς τ' αποτελέσματα βρίσκονται κοντά στη διαγώνιο, πάνω στην οποία οι τιμές θεωρείται ότι έχουν ακριβή αντιστοίχιση.



Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή όγκου εδαφικού υλικού σε σχέση με το εκσκαπτόμενο υλικό της σήραγγας αριθμητικών αναλύσεων και για τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους (V<sub>L</sub> <sub>FEM</sub>)συναρτήσει της απώλειας εδαφικού όγκου από σχέση Peck, 1969 (V<sub>L Calculated</sub>)

# Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια κάποιας μελλοντικής έρευνας προτείνεται αρχικά η μελέτη αριθμητικών προσομοιωμάτων διαφορετικής γεωμετρία, δηλαδή διαφορετικής διαμέτρου σήραγγας (D) και διαφορετικής αναλογίας υπερκειμένων/διαμέτρου (H/D) σήραγγας. Επίσης, θα ήταν δόκιμο να ερευνηθούν αριθμητικά μοντέλα η ανάλυση των οποίων θα έκανε χρήση διαφορετικού καταστατικού νόμου εκτός του Mohr Coulomb, όπως είναι το Cam-Clay ή το Modified Cam-Clay καθώς και προσομοιώματα που λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμικότητα στην ελαστική περιοχή.

120

5° Κεφάλαιο: Συμπεράσματα

•

## Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- [1] Abaqus Simulia 6.13 Manual Documentation
- [2] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control. Taylor & Francis.
- [3] Kavvadas Michael, Prountzopoulos George, Fortsakis Petros, Tzivakos Kwnstantinos, Litsas Dimitris, Chortis Philippos, (2013) Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling, NETTUN Research Program
- Kasper, T., Meschke, G., 2006. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 21, 160–171. doi:10.1016/j.tust.2005.06.006
- [5] Kasper, T., Meschke, G., 2004. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 28, 1441–1460.
- [6] Lambrughi, A., Medina Rodríguez, L., Castellanza, R., 2012. Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations. Comput. Geotech. 40, 97–113. doi:10.1016/j.compgeo.2011.10.004
- [7] Litsas, D., Rachmani, A., Fortsakis, P., Kavvadas, M., 2014. 3D Numerical simulation of shield tunnelling with emphasis on the influence of the tail gap, in: Tunnelling in a Challenging Environement: Proceedings of the 2nd Eastern European Tunnelling Conference. Athens, Greece, pp. 1–9.
- [8] Litsas, D. , 2016. Doctoral Thesis: Investigation of surface subsidence due to mechanized excavation of tunnels based on 3D numerical analyses using finite element code Abaqus (in progress)
- [9] Loganathan, N., Poulos, H., 1998. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 124, 846–856. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846)
- [10] Loganathan, N., Poulos, H.G., Bustos-Ramirez, 2000. Estimation of ground loss during tunnel excavation, in: GeoEng2000. Melbourne, AUstralia.
- [11] Mair, R.J., Taylor, R.N., 1997. Bored tunnelling in the urban environment (State-ofthe-art report and theme lecture), in: The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. pp. 2353–2385.
- [12] Mair, R.J., Taylor, R.N., 1993. Prediction of clay behaviour around tunnels using plasticity solutions. Predict. soil Mech. Proc. Wroth Meml. Symp. Oxford, 1992 449– 463.
- [13] Mair, R.J., Taylor, R.N., Bracegirdle, A., 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. Technical note: mair, R J; Taylor, R N; Bracegirdle, A GeotechniqueV43, N2, June 1993, P315–320. Geotechnique 43, 315–320. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(93)91702-K

Βιβλιογραφία

- [14] Mair, R.J., Taylor, R.N., Bracegirdle, A., 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. Geotechnique 43, 315–320.
- [15] Nagel, F., Meschke, G., 2011. Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 26, 445–452. doi:10.1016/j.tust.2010.12.001
- [16] Nagel, F., Meschke, G., 2010. An elasto-plastic three phase model for partially saturated soil for the finite element simulation of compressed air support in tunnelling. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 34, 605–625. doi:10.1002/nag.828
- [17] Nagel, F., Stascheit, J., Meschke, G., 2012. Numerical Simulation of Interactions between the Shield-Supported Tunnel Construction Process and the Response of Soft Water-Saturated Soils. Int. J. Geomech. 12, 689–696. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000174
- [18] O'Reilly, M.P., Mair, R.J., Alderman, G.H., 1991. Long-term settlements over tunnels: An eleven-year study at Grimsby. Proc. Conf. Tunn. 55–64.
- [19] O'Reilly, M.P., New, B.M., 1988. Evaluating and predicting ground settlements caused by tunnelling in London Clay. Proc. Tunn. Symp. 231–241.
- [20] O'Reilly, M.P., New, B.M., 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction. Tunn. '82. Pap. Present. 3rd Int. Symp. 173–181.
- [21] Prountzopoulos, G. (2012). Investigation of the excavation face stability in shallow tunnels. Athens, (in Greek): Doctoral Thesis, National Technical University of Athens.
- [22] Sagaseta, C., 1987. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. Geotechnique 37, 301–320.
- [23] Sitarenios, P., Litsas, D., Papadakos, A., Kavvadas, M., 2015. Effect of Hydraulic Conditions in controlling the Face in EPB Excavated Tunnels, in: SEE Tunnel:Promoting Tunneling in SEE Region. Proceedings of the 41st World Tunnel Congress. Dubrovnik, Croatia.
- [24] Stallebrass, S.E., Grant, R.J., Taylor, R.N., 1996. A finite element study of ground movements measured in centrifuge model tests of tunnels, in: Proc., Int. Symp. on Geotech. Aspects of Underground Constr. in Soft Ground. The Netherlands, pp. 595– 600.
- [25] Verruijt, A., Booker, J.R., 1996. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. Geotechnique 46, 753–756.

Ελληνική βιβλιογραφία

- **[26]** Αναγνωστόπουλος, Α, Μιχάλης, Η, 2004. Σημειώσεις Αντιστηρίξεων και καθιζήσεων λόγω εκσκαφών, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [27] Μαρίνος, Π. (1998). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.