



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ
ΠΙΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΕ
ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΟΥΤΣΑΣ Ν. ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, Π. Κ.

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

αφιερώνεται
στην οικογένειά μου

Γ.Β.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της επιρροής της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής και της ανάπτυξης ενεργών τάσεων στον πολφό, στην ανάπτυξη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας, με τη χρήση μηχανήματος EPB, σε πλήρως κορεσμένο αργιλικό έδαφος. Συγκεκριμένα, εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις, στόχος των οποίων είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει η πίεση υποστήριξης καθώς και η αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό, σε συνδυασμό με την εδαφική αντοχή στην εξέλιξη και τις τελικές τιμές των καθιζήσεων. Η προαναφερθείσα διερεύνηση συντελέστηκε μέσω 10 (δέκα) τριδιάστατων συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Για την προσομοίωση των εδαφικών προφίλ, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Επίσης, στο προσομοίωμα περιλαμβάνονται σημαντικές λεπτομέρειες που επηρεάζουν τη διάνοιξη, όπως η κωνικότητα της ασπίδας, η υπερεκσκαφή που εκτελεί το EPB και η πίεση ενεμάτωσης. Για τη σωστή προσομοίωση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας απαιτείται ο ανεξάρτητος έλεγχος, της ολικής τάσης και των υδραυλικών συνοριακών συνθηκών που ασκούνται στο μέτωπο εκσκαφής. Τόσο η ολική τάση στο μέτωπο της εκσκαφής, όσο και η πίεση των πόρων ελέγχονται και επιβάλλονται ξεχωριστά. Η ασκούμενη πίεση μετώπου λαμβάνει τραπεζοειδή κατανομή για πυκνότητα του υλικού εκσκαφής, η οποία θεωρήθηκε 13 kN/m^3 . Η τιμή αναφοράς στη στέψη της σήραγγας εκφράστηκε ως συνάρτηση της υδροστατικής πίεσης μέσω μιας αδιάστατης παραμέτρου A . Βασική παραδοχή των αναλύσεων είναι πως το υλικό εκσκαφής συμπεριφέρεται ως ιξώδες ρευστό λόγω της χρήσης ρυθμιστικών προσθέτων το οποίο από γεωτεχνικής απόψεως σημαίνει ότι δεν αναπτύσσονται ενεργές τάσεις στο θάλαμο και άρα η ασκούμενη πίεση (ολική) «μεταφράζεται» ως συνοριακή πίεση πόρων στο μέτωπο εκσκαφής. Επειδή η προαναφερθείσα θεώρηση παραπέμπει σε ιδανικές συνθήκες βελτίωσης του εκσκαπόμενου υλικού διενεργήθηκε μια ομάδα αναλύσεων όπου εξετάστηκε η επιρροή της ανάπτυξης ενεργών τάσεων στο υλικό.

Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα στα οποία αξίζει να αναφερθούμε επιγραμματικά αφορούν στην εξώθηση του μετώπου, στις καθιζήσεις και τις πιέσεις πόρων. Αρχικά, η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής είναι καθοριστικός παράγοντας για την

εξώθηση του μετώπου και για την ανάπτυξη των καθιζήσεων, καθώς όσο μειώνεται η τιμή της πίεσης υποστήριξης, τόσο αυξάνεται η εξώθηση του μετώπου και η ανάπτυξη καθιζήσεων. Οι πιέσεις των πόρων δείχνουν να επηρεάζονται από την πίεση υποστήριξης, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Συγκεκριμένα, σε εδάφη χαμηλής αντοχής η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στην πίεση των πόρων είναι σημαντική, καθώς όσο αυξάνεται η πίεση υποστήριξης μειώνεται σημαντικά το χρονικό διάστημα επιρροής της πίεσης των πόρων πριν και μετά την εκσκαφή. Αντίθετα, η αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό στο μέτωπο της εκσκαφής, παρόλο που δείχνει να είναι εξαιρετικά ευεργετική στην εξώθηση του μετώπου, δείχνει να μη βελτιώνει καθόλου τις καθιζήσεις και τις πιέσεις των πόρων. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση των ενεργών τάσεων επηρεάζει την πίεση των πόρων μόνο στα πρώτα μέτρα του πυρήνα προώθησης της σήραγγας, διότι λόγω της μικρής περατότητας του σχηματισμού δεν επιτρέπεται ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μεταβολές πίσω από το μέτωπο εκσκαφής να εξελίσσονται πολύ αργά, σε σχέση με το ρυθμό προχώρησης της σήραγγας.

Abstract

The present diploma thesis deals with the issue of the influence of support face pressure technology and effective stress acting on the excavated muck, in the development of the surface settlements during the construction of a tunnel by an EPB machine in a saturated clay. To be more specific, a set of parametrical analyses were carried out in order to investigate the effect of the face pressure as well as the increase of effective stress in muck, combined with the undrained shear strength parameter in the progress of the surface settlements. The aforementioned investigation was conducted through numerical 3D-coupled analyses in the Finite Element code Abaqus.

The constitutive law adopted for the soil behavior was the elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb yield criterion. Furthermore, the model includes important details that affect the tunnel's excavation, such as the shield's conicity, the cutterhead's overcut and the grout injection's pressure. In order to achieve the exact simulation of face pressure the independent determination of the total stress and the hydraulic boundary conditions that applied to the tunnel face is required. The total stress and the pore pressure are controlled and applied separately. The applied face pressure is formulated via trapezoidal distribution for density of the excavated material, which was assumed to be 13 kN/m^3 . The applied face pressure was correlated with the hydrostatic pressure at the crown of the shield. One of the basic modelling assumptions that had to be made in order to define the hydraulic boundary conditions of the problem, concerns the muck's condition. The muck was assumed to act as a viscous fluid due to effective soil conditioning. The latter means, in terms of modelling, that the applied face pressure (total pressure values) coincides with pore pressure values at each node of the face. However, because such approach referred to the perfect conditions of excavation material, a group of analysis is conducted, where the influence of development of effective stresses in the muck is taken into account and examined.

The most important conclusions that are extracted by the present thesis are presented in terms of face extrusion, settlements and pore pressures. Firstly, the face pressure has a crucial impact on the progress of the face extrusion and the surface settlements. Particularly, the decrease of the face pressure value, leads to the increase of face extrusion

and development of larger settlements. The pore pressure is less affected by the face pressure. Specifically, in soils with a low strength, the influence of the face pressure is important to the pore pressure; as the supporting pressure is increased, the time of influence of the pore pressure after and before the tunnel's excavation is reduced significantly. Conversely, the increase of effective stress in the muck in front of excavation's face, although it seems to be extremely beneficial in the face extrusion, it doesn't improve the settlements and pore pressures. In more details, the increase of effective stress affects the pore pressure, only in the start of tunnel face core because due to the low permeability of the soil profile, the water flow wasn't permitted. As the result, the changes behind the tunnel face are evolved very slowly, compared with the tunnel's rate of advance.

Πρόλογος

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, που έγινε στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, είναι η διερεύνηση της επιρροής της πίεσης υποστήριξης του μετώπου, κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Βασίζεται σε αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων *Simulia Abaqus FEA v.6.13*. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις, για τη μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, της πίεσης υποστήριξης, καθώς και για τη θεώρηση ανάπτυξης ενεργών τάσεων στον πολφό και εκτιμήθηκε η επιρροή τους σε κρίσιμα μεγέθη, όπως οι καθιζήσεις, η εξώθηση του μετώπου, οι πιέσεις των πόρων, κ.α..

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους με βοήθησαν και συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και πρώτα από όλους στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καββαδά για την επιλογή του θέματος και για την ευχάριστη συνεργασία που είχαμε. Επιπλέον, ευχαριστίες οφείλω στα μέλη του τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής και κυρίως στον υποψήφιο Δρ. Δ. Λίτσα, στον Δρ. Π. Σιταρένιο, και στον υποψήφιο Δρ. Φ. Χόρτη, για την υπέροχη συνεργασία, τις ώρες που αφιέρωσαν και τα πολύτιμα πράγματα που μου έδειξαν.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο, για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε στο διάστημα των προπτυχιακών σπουδών μου. Επιπλέον, οφείλω μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και την κοπέλα μου Κυριακή, για την πολύτιμη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια συμβάλλοντας καθοριστικά στην εξέλιξη μου. Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους μου Αλέξανδρο, Βασίλη, Εβίνα, Θανάση, Μανώλη, Μελίνα, Νίκο, Στέλιο, Τίφανη και Χρόνη για την υπομονή και τη στήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συμφοιτητές και φίλους, Κυριακόπουλο Θ. και Δούλκα Γ., για την πολύτιμη βοήθειά τους και την πολύ καλή συνεργασία.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Βουτσάς Ν. Γιώργος

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Πρόλογος	ix
Περιεχόμενα	xi
Κατάλογος Διαγραμμάτων	xv
Κατάλογος Εικόνων	xxi
Κατάλογος Πινάκων	xxvii
Σύμβολα/Συντομογραφίες	xxix
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.....	1
1.2 Μελέτη διάνοιξης σηράγγων με EPBM.....	1
Κεφάλαιο 2 Μηχανή Ολομέτωπης Κοπής με Εξισορρόπηση πιέσεων	3
2.1 Γενικά στοιχεία	3
2.2 Κατηγορίες μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων	3
2.3 Κριτήρια επιλογής του μηχανήματος.....	4
2.4 Μηχάνημα εξισοροπητικής της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance Machines).....	6
2.5 Μηχάνημα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield).....	8
2.6 Επιμέρους τμήματα μηχανημάτων.....	11
2.6.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting Wheel).....	11
2.6.2 Κοπτικά εργαλεία (Cutting tools).....	12
2.6.3 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)	14

2.6.3.1	Θάλαμος εκσκαφής μηχανημάτων EPB	14
2.6.3.2	Θάλαμος εκσκαφής μηχανημάτων Slurry.....	14
2.6.4	Σύστημα μεταφοράς εκσκαπτόμενου υλικού.....	15
2.6.4.1	Ατέρμονας κοιλίας (Screw conveyor).....	15
2.6.4.2	Υδραυλικό Σύστημα Μεταφοράς (Hydraulic Transport).....	17
2.6.5	Κυλινδρικά έμβολα ώθησης (Thrust cylinders).....	18
2.6.6	Τελική επένδυση (Segmental lining)	19
2.6.7	Πλήρωση του ουραίου κενού και διαδικασίες ενεμάτωσης.....	22
2.6.8	Πρόσμικτα.....	24
2.6.9	Έλεγχος πίεσης του μετώπου (Control of face pressure).....	26
2.6.9.1	Έλεγχος πίεσης του μετώπου σε μηχανήματα EPB.....	26
2.6.9.2	Έλεγχος πίεσης του μετώπου σε μηχανήματα Slurry	27
2.6.10	Σχέδιο Διαχωρισμού (Separation Plant).....	27
2.6.11	Σύστημα Μέτρησης Μάζας και Όγκου των Εκσκαφών (Weighting and volume measuring of the excavated products).....	28
Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων		31
3.1	Εισαγωγή	31
3.2	Ορισμός απώλειας εδάφους και απώλειας όγκου.....	31
3.3	Αναλυτικές μέθοδοι.....	32
3.3.1	Sagaseta (1987)	32
3.3.2	Verruijt A. & Booker J. R. (1996).....	34
3.3.3	Loganathan N. & Poulos H. G. (1998).....	36
3.4	Εμπειρικές μέθοδοι.....	38
3.4.1	Peck & Schmidt (1969).....	38
3.4.2	Cording & Hansmire (1972–75)	40
3.4.3	Atkinson et al. (1977).....	41
3.4.4	O'Reilly & New (1982).....	43
3.4.5	Mair et al. (1997).....	44
3.5	Αριθμητικά μοντέλα.....	47
3.5.1	G. Meschke, T. Kasper & F. Nagel (2004–12)	47

3.5.2	A. Lambrughì et al. (2012)	52
3.5.3	A. Bezuijen (2007).....	55
3.5.4	Do et al. (2013)	57
3.5.5	E. Comodromos et al. (2014).....	59
3.5.6	D. Litsas et al. (2015).....	61
Κεφάλαιο 4 Στοιχεία Αριθμητικού Μοντέλου		65
4.1	Εισαγωγή.....	65
4.2	Χαρακτηριστικά και παράμετροι του μοντέλου	66
4.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.....	66
4.2.2	Διακριτοποίηση του μοντέλου και συνοριακές συνθήκες.....	67
4.2.3	Εδαφικός τύπος – Καταστατικός νόμος	68
4.2.4	Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση του εδάφους	69
4.2.5	Γεωμετρία και προσομοίωση του μηχανήματος.....	71
4.2.5.1	Προσομοίωση μηχανήματος.....	71
4.2.5.2	Προσομοίωση διεπιφάνειας μηχανήματος-περιβάλλοντος εδάφους	73
4.2.5.3	Πίεση υποστήριξης μετώπου (Face Pressure).....	74
4.2.5.4	Θεώρηση ενεργών τάσεων (Effective Stresses).....	78
4.2.5.5	Προσομοίωση της τελικής επένδυσης.....	79
4.2.5.6	Προσομοίωση της διαδικασίας ενεμάτωσης.....	81
4.2.5.7	Τεχνική προσαρμοσμένης διακριτοποίησης (Adaptive Mesh)	82
4.3	Στάδια ανάλυσης.....	83
4.3.1	Γεωστατικό βήμα.....	83
4.3.2	Βήμα εισαγωγής του TBM	84
4.3.3	Τυπικό βήμα « n ».....	84
4.3.4	Τελικό στάδιο (βήμα Steady state)	86
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων		87
5.1	Εισαγωγή.....	87
5.2	Υπολογισμός μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στην ερμηνεία των αναλύσεων	88
5.2.1	Σημείο καμπής (i)	88

5.2.2	Απώλεια όγκου (V _L).....	89
5.3	Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων.....	89
5.3.1	Εξώθηση μετώπου.....	90
5.3.2	Κατακόρυφες μετατοπίσεις.....	91
5.3.3	Πιέσεις πόρων	94
5.4	Επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην ευστάθεια του μετώπου.....	96
5.4.1	Εξώθηση μετώπου.....	97
5.4.2	Κατακόρυφες μετατοπίσεις.....	98
5.4.3	Πιέσεις πόρων	101
5.5	Επίδραση των ενεργών τάσεων στην ευστάθεια του μετώπου	105
5.5.1	Εξώθηση μετώπου.....	106
5.5.2	Κατακόρυφες μετατοπίσεις.....	107
5.5.3	Πιέσεις πόρων	109
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα και προτάσεις	115
6.1	Συμπεράσματα.....	115
6.1.1	Πλαστικές παραμορφώσεις.....	116
6.1.2	Εξώθηση μετώπου.....	116
6.1.3	Καθιζήσεις.....	117
6.1.4	Πιέσεις πόρων	118
6.2	Προτάσεις.....	119
Βιβλιογραφία		121

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Ποσοστό απόδοσης μηχανήματος TBM συγκριτικά με το RMR της βραχώμαζας.....	5
Διάγραμμα 2.2: Εύρος εφαρμογής μηχανημάτων EPB ή Πολφού, σε σχέση με την κοκκομετρία του εδαφικού σχηματισμού εκσκαφής.....	5
Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης με την καθίζηση της στέψης για τρία διαφορετικά εδάφη (Atkinson et al. 1977).	42
Διάγραμμα 3.2: Διαφοροποίηση για το σημείο καμπής i συναρτήσεις του βάθους της σήραγγας (i) για αργίλους, (ii) για άμμους και χαλίκι (Mair & Taylor 1997).....	45
Διάγραμμα 3.3: (i) Μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των υπόγειων καθιζήσεων με το βάθος, (ii) Μεταβολή της παραμέτρου K σε αργίλους (Mair & Taylor 1997).	46
Διάγραμμα 3.4: Υπόγειες καθιζήσεις πάνω από τον άξονα σήραγγας σε London Clay (Mair et al. 1993).	46
Διάγραμμα 3.5: (a) Υπολογισμένες κατακόρυφες μετακινήσεις στον σταθμό καταγραφής, όπου ο χρόνος μηδέν θεωρείται η στιγμή όπου το μηχάνημα περνάει κάτω από τον σταθμό, (b) προβλεπόμενες καθιζήσεις για διαφορετικό μήκος προχώρησης του μηχανήματος (Kasper & Meschke 2004).	49
Διάγραμμα 3.6: Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (a) της πίεσης μετώπου, (b) της πίεσης του ενέματος και (c) της κωνικότητας της ασπίδας (Kasper & Meschke 2006).....	49
Διάγραμμα 3.7: Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο στιφρά (λεπτές γραμμές) εδάφη και για λιγότερο (παχιές γραμμές), (a) για ένα σημείο πάνω από τον άξονα της σήραγγας και (b) για μία διατομή στο τέλος την προχώρησης του TBM (Nagel & Meschke 2011).	51
Διάγραμμα 3.8: Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της πίεσης του ενέματος με χρήση κριτηρίου Mohr-Coulomb στις (a) κατακόρυφες μετακινήσεις (εγκάρσια στον άξονα	

τομή), (b) οριζόντιες μετακινήσεις και (c) κατακόρυφες μετακινήσεις (κατά μήκος στον άξονα τομή) (Lambrughi et al. 2012).....	53
Διάγραμμα 3.9: Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογίστηκαν από τα αριθμητικά μοντέλα (Lambrughi et al. 2012).	54
Διάγραμμα 3.10: Επίδραση της συμμετρίας της ασπίδας ως προς τον άξονα της σήραγγας στις πιέσεις του ενέματος και στο πάχος του κενού (αριστερά συμμετρική ασπίδα, δεξιά ασύμμετρη ασπίδα) (Bezuijen 2007).	56
Διάγραμμα 3.11: Επίδραση της αλλαγής της πίεσης του ενέματος στο μήκος διεύδυσης και πάχος του κενού (Bezuijen 2007).	57
Διάγραμμα 3.12: Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις επιφανειακές καθιζήσεις (α) διαμήκης τομή και (b) εγκάρσια τομή (Do et al. 2013).	58
Διάγραμμα 3.13: Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις (Comodromos et al. 2014).	61
Διάγραμμα 3.14: (i) ‘Hard’ contact και εκθετική σχέση πίεσης αλληλεπίδρασης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού και (ii) χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας του ενέματος (Litsas et al. 2015).	62
Διάγραμμα 3.15: (i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας (Litsas et al. 2015).	62
Διάγραμμα 3.16: (i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων (Litsas et al. 2015).	63
Διάγραμμα 4.1: Σχέσεις αλληλεπίδρασης: (i) Hard contact συμπεριφορά και (ii) Soft contact συμπεριφορά (Dassault Systems 2010).	74
Διάγραμμα 4.2: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου υποστήριξης μετώπου A, των ενεργών τάσεων, των υδροστατικών πιέσεων και ολικών οριζόντιων γεωστατικών πιέσεων σε σχέση με την κατακόρυφη απόσταση από τον οριζόντιο άξονα της σήραγγας.	77
Διάγραμμα 4.3: Μετρήσεις ολικών τάσεων από το όργανο μέτρησης R3, μπροστά και πίσω από την κοπτική κεφαλή του EPB (Bezuijen & Talmon 2014).	78

Διάγραμμα 4.4: Χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με Kasper & Meschke (2004), Lambreght et al. (2012) και Comodromos et al. (2014).....	82
Διάγραμμα 5.1: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ.....	90
Διάγραμμα 5.2: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για τα δύο εδαφικά προφίλ.	92
Διάγραμμα 5.3: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης $z=7.5$ m από τον άξονα της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ.....	93
Διάγραμμα 5.4: Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τα δύο εδαφικά προφίλ.....	95
Διάγραμμα 5.5: (i) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.....	97
Διάγραμμα 5.6: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (iii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου και (iv) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή, για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.	99
Διάγραμμα 5.7: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.	100

- Διάγραμμα 5.8: (i) Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για το εδαφικά προφίλ a σε διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$), (ii) Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για το εδαφικά προφίλ b σε διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$)..... 103
- Διάγραμμα 5.9: (i) Μέση εξώθηση μετώπου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (ii) μέγιστη καθίζηση συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (iii) Ελάχιστη πίεση πόρων συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους και (iv) ποσοστό απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους..... 105
- Διάγραμμα 5.10: (i) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων, (ii) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων..... 107
- Διάγραμμα 5.11: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, σε εδαφικό προφίλ a, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια, σε εγκάρσια τομή, σε εδαφικό προφίλ a, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (iii) Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, σε εδαφικό προφίλ a, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου και (iv) Κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας σε εγκάρσια τομή, σε εδαφικό προφίλ a, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου..... 108
- Διάγραμμα 5.12: (i) Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής σήραγγας σε εδαφικό προφίλ τύπου a, για πίεση υποστήριξης $A=0.5$ και διαφορετικές υποθέσεις ενεργών τάσεων ($Ef.S.=0\%$, $Ef.S.=25\%$ και $Ef.S.=50\%$), (ii) Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής σήραγγας σε εδαφικό προφίλ τύπου a, για πίεση υποστήριξης $A=1$ και διαφορετικές υποθέσεις ενεργών τάσεων ($Ef.S.=0\%$, $Ef.S.=25\%$ και $Ef.S.=50\%$)..... 110
- Διάγραμμα 5.13: (i) Μέση εξώθηση μετώπου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (ii) μέγιστη καθίζηση συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (iii) Ελάχιστη πίεση πόρων

συναρτήσεως της ποιότητας του εδάφους και (iv) ποσοστό απώλειας όγκου συναρτήσεως της ποιότητας του εδάφους.	112
Διάγραμμα 5.14: Πιέσεις πόρων στον πυρήνα προώθησης, πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής.	113

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Τυπικό μοντέλο μηχανήματος εξισορροπητικής της εδαφικής πίεσης (Herrenknecht n.d.).....	8
Εικόνα 2.2: Τυπικό μοντέλο μηχανήματος με αιώρημα – πολφού (Herrenknecht n.d.).	10
Εικόνα 2.3: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο μηχανήμα για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στο Νέο Δελχί (Robbins n.d.), δεξιά απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στην Αθήνα (Attiko Metro n.d.).....	12
Εικόνα 2.4: (a) Κοπτικά συρόμενου τύπου και φωτογραφία από κοπτική κεφαλή EPB (Seli n.d.; Roxborough 1973), (b) Κοπτικά τύπου δίσκου και φωτογραφία από κοπτική κεφαλή EPB(Roxborough & Phillips 1975; Seli n.d.).....	13
Εικόνα 2.5: Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής (Μετρό Θεσσαλονίκης).	16
Εικόνα 2.6: Εγκάρσια και διαμήκης τομή του ατέρμονα κοχλία.	17
Εικόνα 2.7: Τυπικό σύστημα αγωγών μεταφοράς πολφού σε μηχανήμα Slurry.....	17
Εικόνα 2.8: Αριστερά απεικονίζεται σύστημα υδραυλικών εμβόλων τοποθετημένων στην ουρά της ασπίδας (MOST Construction Company 2012). Δεξιά απεικονίζονται υδραυλικά έμβολα ώθησης σε μηχανήμα EPB διαμέτρου 8.9m της εταιρίας Robbins (Robbins n.d.).	18
Εικόνα 2.9: Τελική επένδυση σε σήραγγα που κατασκευάστηκε από TBM (Prague Metro 2013).	20
Εικόνα 2.10: Διαστάσεις δακτυλίου τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτυλίους (Choi & Yoo 2015).	20
Εικόνα 2.11: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) επίπεδος σύνδεσμος (plane joint), (b) και (c) σύνδεσμοι με καμπύλη επιφάνεια (convex joints)(Luttikholt 2007).	21

Εικόνα 2.12: Μηχανισμός γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός EPB μηχανήματος (Attiko Metro n.d.).....	21
Εικόνα 2.13: Ορισμός του κενού που δημιουργείται κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας (Lee et al. 1992).....	22
Εικόνα 2.14: Σχηματική απεικόνιση της σφράγισης της ουράς της ασπίδας με χαλύβδινες βούρτσες και της εισπίεσης ενέματος και υλικού σφράγισης μέσω συστήματος σωλήνων εγκατεστημένων στην ουρά της ασπίδας (Kanvadas et al. 2013).....	23
Εικόνα 2.15: Εισπίεση ενέματος μέσα από έτοιμα ανοίγματα που υπάρχουν στα προκατασκευασμένα στοιχεία (Robbins n.d.).....	24
Εικόνα 2.16: Διαδικασία ελέγχου εισπίεσης αφρού στην κοπτική κεφαλή ενός μηχανήματος EPB (Tunnelseis n.d.).....	25
Εικόνα 2.17: Πίεση υποστήριξης μετώπου από μηχάνημα EPB (Herrenknecht n.d.)....	26
Εικόνα 2.18: Κατανομή της πίεσης με χρήση πολφού για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (The Masterbuilder 2014).....	27
Εικόνα 2.19: Αριστερά εγκαταστάσεις διαχωρισμού του πολφού από το μεταφερόμενο εδαφικό υλικό (Derrick Corporation n.d.), Δεξιά πλάνο διαχωρισμού (Herrenknecht n.d.).....	28
Εικόνα 2.20: (a),(b) Σαρωτές όγκου με λέιζερ (Kanvadas et al. 2013).....	29
Εικόνα 2.21: (a) Κύλινδροι στις μεταφορικές ταινίες που ζυγίζουν το διερχόμενο υλικό, (b) Οθόνες όπου γίνεται η απεικόνιση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τους κυλίνδρους (Kanvadas et al. 2013).....	30
Εικόνα 3.1: Ορισμός των μεγεθών απώλεια όγκου V_L και απώλεια εδάφους G_L	32
Εικόνα 3.2: Απώλεια όγκου λόγω διάνοιξης σήραγγας με χρήση TBM.....	32
Εικόνα 3.3: Βήματα της ανάλυσης (Sagaseta 1987).....	33
Εικόνα 3.4: (i) Ορισμός του προβλήματος και (ii) Άπειρο μέσο (Sagaseta 1987).....	34
Εικόνα 3.5: Απώλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση σε διάνοιξη σήραγγας (Verruijt & Booker 1996).....	35
Εικόνα 3.6: Κυκλικό και οβάλ σχήμα εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από την διατομή της σήραγγας. (Loganathan & Poulos 1998).....	36

Εικόνα 3.7: Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan & Poulos 1998).	37
Εικόνα 3.8: (a) Χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα (Peck 1969; Schmidt 1969) και (b) η σχέση μεταξύ i/R και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2R$ για διάφορα εδάφη (Peck 1969).	39
Εικόνα 3.9: Σχέση της γωνίας β με την απόσταση i του σημείου καμπής του προφίλ των καθιζήσεων από το σημείο μέγιστης καθίζησης (Hansmire & Cording 1972; Cording & Hansmire 1975).....	40
Εικόνα 3.10: Γεωμετρία της σήραγγας και επιφανειακές καθιζήσεις για κυκλική σήραγγα (Atkinson et al. 1977).	42
Εικόνα 3.11: Κατανομή των κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων και των οριζοντίων παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Franzius 2003).	44
Εικόνα 3.12: Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D (Kasper & Meschke 2004).	48
Εικόνα 3.13: Μοντελοποίηση του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους, ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος (Kasper & Meschke 2004).	48
Εικόνα 3.14: Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό (Nagel & Meschke 2011).	50
Εικόνα 3.15: Μοντέλο τριών φάσεων για μερικώς κορεσμένα εδάφη χρησιμοποιώντας την θεωρία του πορώδους μέσου για την περιγραφή των αρχικώς μικροσκοπικών καταστάσεων και αλληλεπιδράσεων των φάσεων του εδάφους (κόκκοι, νερό και αέρα) (Nagel et al. 2012).	51
Εικόνα 3.16: Προσομοίωση της χρήσης πεπιεσμένου αέρα ως μέσο υποστήριξης και διερεύνηση της δημιουργίας μερικώς κορεσμένων ζωνών μπροστά από το μέτωπο για κορεσμό λιγότερο από 95% (αριστερά) και λιγότερο από 50% (δεξιά) (Nagel et al. 2012).	52
Εικόνα 3.17: Τριδιάστατος κánaβος του προβλήματος (Lambrughì et al. 2012).	53

Εικόνα 3.18: Ιδεατό σκαρίφημα ενός TBM, της υποστήριξης και του ενέματος (Bezuijen 2007).....	55
Εικόνα 3.19: Μοντέλο του TBM (Do et al. 2013).	58
Εικόνα 3.20: Πλαστικές ζώνες γύρω από τη σήραγγα (a) μοντέλο CY_{soil} και (b) μοντέλο MC (Do et al. 2013).	59
Εικόνα 3.21: Προσομοίωση της προοδευτικής προχώρησης του TBM και των διαφορετικών ζωνών ενέματος με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (Comodromos et al. 2014).....	60
Εικόνα 3.22: Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Litsas et al. 2015).....	62
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση και διαστασιολόγηση του υπό μελέτη μοντέλου.	67
Εικόνα 4.2: Μοντέλο του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής i) ολόκληρο, ii) τα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν την ασπίδα, την κοπτική κεφαλή και το τοίχο πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής.	71
Εικόνα 4.3: Διαφοροποίηση της υπερεκσκαφής από το μέτωπο στο πίσω μέρος του μηχανήματος, στο TBM του υπό μελέτη μοντέλου.	72
Εικόνα 4.4: Απεικόνιση των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής.	76
Εικόνα 4.5: Καμπτικές ροπές σε στοιχεία υποστήριξης που προσομοιώνονται με (i) συνεχή κύλινδρο, (ii) διαμήκεις αρμούς που συμπίπτουν σε διαδοχικούς δακτυλίους και (iii) διαμήκεις αρμούς που δεν συμπίπτουν (Litsas et al. 2015).	80
Εικόνα 4.6: Τοποθέτηση τελικής επένδυσης στο υπό μελέτη μοντέλο.	80
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση της τοποθέτησης και σκλήρυνσης του ενέματος στο μοντέλο.	81
Εικόνα 4.8: Κόμβοι στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνική του Adaptive Mesh στο μοντέλο.....	83
Εικόνα 4.9: Ενδεικτική απεικόνιση των υπό-βημάτων σε ένα τυπικό βήμα ανάλυσης «n». (i) αφαίρεση της «n» ομάδας στοιχείων προς εκσκαφή, (ii) άσκηση πίεσης μετώπου στην « n+1 » ομάδα στοιχείων, (iii) ενεργοποίηση του δακτυλίου υποστήριξης « n-6 » μέσα στην ασπίδα, (iv) ενεργοποίηση της ομάδας στοιχείων ενέματος « n-7 ».	85
Εικόνα 5.1: Σημεία παρατήρησης (Πίνακας 5.1) πάνω στο μοντέλο.	88

Εικόνα 5.2: Υπολογισμός της απώλειας όγκου με τη μέθοδο των ορθογωνίων γνωρίζοντας τις καθιζήσεις στα σημεία των κόμβων του μοντέλου.	89
Εικόνα 5.3: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).	90
Εικόνα 5.4: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).	91
Εικόνα 5.5: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).	94
Εικόνα 5.6: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).	95
Εικόνα 5.7: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).	96
Εικόνα 5.8: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).	98
Εικόνα 5.9: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).	101
Εικόνα 5.10: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).	104
Εικόνα 5.11: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$) και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).	106
Εικόνα 5.12: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$). και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).	107

Εικόνα 5.13: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$). και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).109

Εικόνα 5.14: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$). και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%)......111

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Διαφορετικά σενάρια της παραμετρικής διερεύνησης (Comodromos et al. 2014).	60
Πίνακας 4.1: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ	70
Πίνακας 4.2: Στοιχεία δυσκαμψίας για τα κομμάτια που απαρτίζουν το μηχάνημα.....	73
Πίνακας 4.3: Τιμές της συνολικής οριζόντιας πίεσης ($P_{t, h}$), της εφαρμοζόμενης πίεσης ($P_{applied}$) στη στέψη του μετώπου εκσκαφής και ο λόγος εξισορρόπησης, συγκριτικά με τις τιμές της παραμέτρου A	78
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά προκατασκευασμένων στοιχείων υποστήριξης της σήραγγας.....	81
Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες σημείων παρατήρησης.....	87

Σύμβολα/Συντομογραφίες

- A: Παράμετρος πίεσης μετώπου / Συντελεστής κατά Skempton / Επιφάνεια
- c: Συνοχή εδάφους
- C: Απόσταση από την επιφάνεια μέχρι τη στέψη της σήραγγας
- C_u: Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
- D: Διάμετρος σήραγγας
- E: Μέτρο ελαστικότητας
- e: Δείκτης κενών
- EPB: Earth Pressure Balance
- F_C: Δύναμη κοπής
- F_N: Ορθή δύναμη
- F_R: Δύναμη κύλισης
- FEM: Finite Element Method
- g: Κατασκευαστικό κενό / Σταθερά βαρύτητας
- G: Μέτρο διάτμησης
- G_L: Απώλεια εδάφους
- G_p: Φυσικό κενό
- h: Ύψος
- H: Βάθος σήραγγας (επιφάνεια-άξονας σήραγγας)
- i: Σημείο καμψής
- k_s: Διαπερατότητα
- K: Δυσκαμψία / Συντελεστής υπολογισμού σημείου καμψής (εμπειρικός)
- K₀: Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων

L:	Μήκος
M-C:	Mohr Coulomb
P:	Πίεση
R, r:	Ακτίνα σήραγγας
$S_{v, \max}$:	Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση
T:	Ωθηση
TBM:	Tunnel Boring Machine
U_3 :	Κατακόρυφη μετακίνηση
U_w :	Υδροστατική πίεση
U_{3D}^* :	Τριδιάστατες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο
V:	Όγκος
V_L :	Απώλεια εδάφους
γ :	Ειδικό βάρος
γ' :	Υπό άνωση ειδικό βάρος
δ :	Μακροχρόνια εδαφική παραμόρφωση λόγω σχήματος
ϵ :	Ομοιόμορφη ακτινική απώλεια εδάφους
ϵ_0 :	Ισοδύναμη απώλεια εδάφους
ν :	Λόγος Poisson
σ_1 :	Κατακόρυφη κύρια τάση
σ_3 :	Οριζόντια κύρια τάση
σ' :	Ενεργές τάσεις
ϕ :	Γωνία εσωτερικής τριβής
ψ :	Γωνία διασταλτικότητας
ω :	Συντελεστής εργασιμότητας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον

Η διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον αποτελεί ένα από τα πλέον απαιτητικά γεωτεχνικά έργα που έχει να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός. Πρόκειται για σχετικά ρηχές σήραγγες, όπως η δημιουργία δικτύου μετρό, που εκτείνονται σε μεγάλο μέρος των πόλεων. Στόχος κατά τη δημιουργία των συγκεκριμένων έργων, είναι η διαταραχή που θα προκαλέσει η εκσκαφή της σήραγγας στον περιβάλλοντα χώρο να περιοριστεί στο ελάχιστο, ώστε οι υφιστάμενες κατασκευές να μην αντιμετωπίσουν ουσιαστικά προβλήματα κατά τη διάνοιξη και το πέρας κατασκευής του έργου. Για τον λόγο αυτόν κρίνεται απαραίτητος ο περιορισμός κατά το δυνατόν των επιφανειακών καθιζήσεων, οι οποίες είναι ο καθοριστικός παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει τα κτίρια σε βλάβες, ακόμα και αστοχία. Έτσι, η βέλτιστη λύση, που συχνά αποτελεί και μονόδρομο, είναι η χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Συνήθως, το αστικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς ή κυρίως εδαφικές στρώσεις μέσα στις οποίες επιτελείται η διάνοιξη της σήραγγας. Έτσι, τα μηχανήματα που επιχειρούν αυτά τα έργα είναι EPBM (Earth Pressure Balance Machines) στα αργιλικά κορεσμένα εδάφη ή Slurry Machines για τα πιο κοκκώδη εδάφη, ενώ ενίοτε χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός και των δύο. Παρόλα αυτά, η σημερινή τεχνολογία κυρίως με την εξέλιξη των πρόσθετων που μπορεί να εισάγει το EPB στο περιβάλλον έδαφος και κυρίως στο μέτωπο, έχουν μειώσει σημαντικά τη χρήση των Slurry μηχανημάτων καθιστώντας τα EPBM την πλέον αξιόπιστη λύση για διάνοιξη σήραγγας σε εδαφικούς σχηματισμούς.

1.2 Μελέτη διάνοιξης σηράγγων με EPBM

Το EPBM έχει το χαρακτηριστικό ότι ασκεί πίεση στο μέτωπο τόσο κατά την προχώρηση, όσο και σε στασιμότητα, εμποδίζοντας έτσι την εξώθηση του εδάφους στο μέτωπο. Αυτή η λειτουργία του είναι πολύ σημαντική και αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών,

καθώς η ανεξέλεγκτη εξώθηση του μετώπου οδηγεί σε εκτεταμένες επιφανειακές καθιζήσεις. Μια επίσης πολύ σημαντική λειτουργία του EPB είναι η εισαγωγή ενέματος στο κενό που δημιουργείται μεταξύ εδάφους και ασπίδας. Συγκεκριμένα, η κεφαλή κοπής εκτελεί μια υπερεκσκαφή της τάξης του ενός εκατοστού ενώ η ασπίδα έχει μια κωνική μορφή καθώς η διάμετρος της είναι μερικά εκατοστά μικρότερη στην ουρά της έναντι της κεφαλής κοπής. Δημιουργείται έτσι ένα κενό, ο βασικός σκοπός του οποίου είναι να μην αναπτύσσονται σημαντικές τριβές μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους, οι οποίες θα απαιτούσαν πολύ μεγάλες δυνάμεις για την προχώρηση του EPB, καθώς επίσης και για να μπορεί το EPB να στρίβει με ορισμένη βέβαια καμπυλότητα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Επομένως αυτό το κενό είναι πρακτικά απαραίτητο για τη λειτουργία του EPB, όμως παράλληλα λειτουργεί ευνοϊκά για την ανάπτυξη παραμορφώσεων και εκδήλωση καθιζήσεων. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου γίνεται με την εισαγωγή ενέματος σε αυτό το κενό στο πίσω μέρος της ασπίδας όπου πλέον έχει τοποθετηθεί η επένδυση των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί παραμετρικά το πόσο επηρεάζουν τα αποτελέσματα από τη διάνοιξη σηράγγων, οι γεωτεχνικές συνθήκες, η πίεση μετώπου, καθώς και η ανάπτυξη ενεργών τάσεων στον πολφό, μπροστά από την κοπτική κεφαλή. Αρχικά, θα μελετηθούν εκτενώς δύο περιπτώσεις εδαφών με καλά, αλλά και όχι τόσο καλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ώστε να διευκρινιστούν οι περιπτώσεις που αναμένονται τα περισσότερα προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Στη συνέχεια, θα διερευνηθεί η επιρροή της πίεσης υποστήριξης μετώπου στις συγκεκριμένες συνθήκες και θα εκτιμηθεί το κατά πόσο λειτουργεί ευεργετικά ή όχι στα εξεταζόμενα μεγέθη. Τέλος, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα από την υπόθεση εμφάνισης ενεργών τάσεων στο πολφό ανάμεσα στην κοπτική κεφαλή και το μέτωπο εκσκαφής και θα σχολιαστεί το ποσοστό βελτίωσης της διαταραχής που προκαλεί η διάνοιξη μιας σήραγγας με χρήση μηχανήματος EPB στο αστικό περιβάλλον. Οι αναλύσεις γίνονται με πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Abaqus, για να εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων αλλά και για να ερμηνευτούν σωστά ορισμένες συμπεριφορές, γίνεται αρχικά μια εκτενής περιγραφή των χαρακτηριστικών του EPBM, και παρουσιάζονται βασικές έννοιες για τις καθιζήσεις καθώς και αποτελέσματα προηγούμενων δημοσιεύσεων πάνω σε αυτές.

Κεφάλαιο 2

Μηχανή Ολομέτωπης Κοπής με Εξισορρόπηση πιέσεων

2.1 Γενικά στοιχεία

Τα μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων χρησιμοποιούνται για την ολομέτωπη εκσκαφή σηράγγων με συνήθως κυκλική διατομή. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι TBM και η επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου εξαρτάται κάθε φορά κατά κύριο λόγο από τις συνθήκες του υπεδάφους όπου θα διανοιχθεί η σήραγγα (σκληροί βράχοι, ασθενείς βραχώμαζες, λεπτόκοκκα ή αδρόκοκκα εδαφικά υλικά, εναλλαγές υλικών, παρουσία νερού, πάχος υπερκειμένου εδάφους κ.τ.λ.).

Στα πλεονεκτήματα των TBM συγκαταλέγονται η ταχύτητα της διάνοιξης των σηράγγων, η άμεση τοποθέτηση μόνιμης υποστήριξης – επένδυσης των σηράγγων και δυνατότητες που παρέχουν για την ελαχιστοποίηση της διαταραχής του περιβάλλοντος υπεδάφους (μικρή απώλεια όγκου στην επιφάνεια και καθιζήσεων), γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε αστικές περιοχές. Μειονεκτήματα των TBM είναι το αρχικό κόστος κατασκευής τους, οι εκτεταμένες και πολύπλοκες εργοταξιακές εγκαταστάσεις υποστήριξης που απαιτούν και η δυσκολία στην μεταφορά τους προς το έργο και στην συναρμολόγησή τους στο εργοτάξιο.

2.2 Κατηγορίες μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων

Κατά τα τελευταία έτη, το εύρος εφαρμογής της μηχανικής διάνοιξης σηράγγων έχει μεγαλώσει σημαντικά. Έτσι, τα κριτήρια που καθορίζουν την κατηγορία του μηχανήματος είναι κυρίως τα χαρακτηριστικά του εδάφους (αντοχή, κοκκομετρία, περατότητα, προέλευση), η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα καθώς και το μέγεθος των αποδεκτών καθιζήσεων στην επιφάνεια. Συχνότερα, χρησιμοποιούνται τα μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης με ασπίδα ή χωρίς, όπως και εκείνα που εφαρμόζουν πίεση ευστάθειας

στο μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα, οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής είναι οι εξής (Xiroudakis 2015):

- Μηχανήματα εφαρμογής με ασπίδα (μονή ή διπλή) σε ασθενή ή κατακερματισμένα πετρώματα – εδάφη (Single – Double shield TBM).
- Μηχανήματα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (Earth Pressure Balance shield).
- Μηχανήματα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield).
- Μηχανήματα για μεγάλες μεταβολές της ποιότητας του γεωυλικού (Μεικτές καταστάσεις – Mix shield).

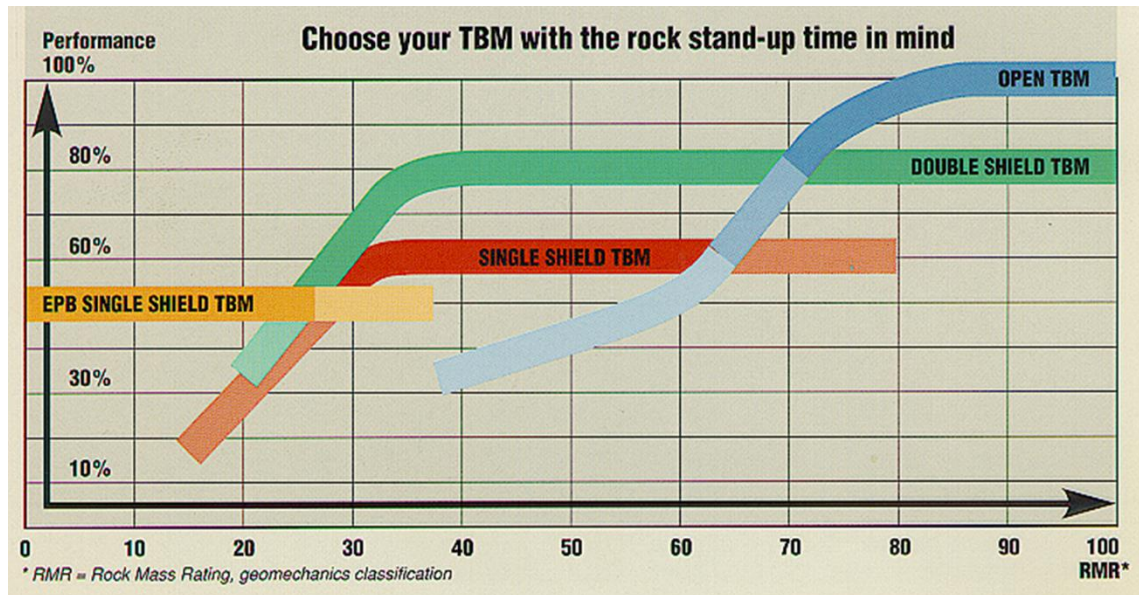
Ωστόσο, εκτός από τα παραπάνω συνήθη μηχανήματα υπάρχουν κι άλλες κατηγορίες διαφορετικών μηχανημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται πιο σπάνια.

Βεβαίως, ξεχωριστή περίπτωση αποτελούν τα μηχανήματα διάνοιξης με ασπίδα σημειακής εκσκαφής με μερική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής, ενώ για έργα όπου υπάρχουν ιδιαίτερες συνθήκες τροποποιούνται παλαιά μηχανήματα ή κατασκευάζονται νέα που πληρούν τις προδιαγραφές που απαιτούνται και διαφέρουν σημαντικά από τα συνηθισμένα μηχανήματα διάνοιξης.

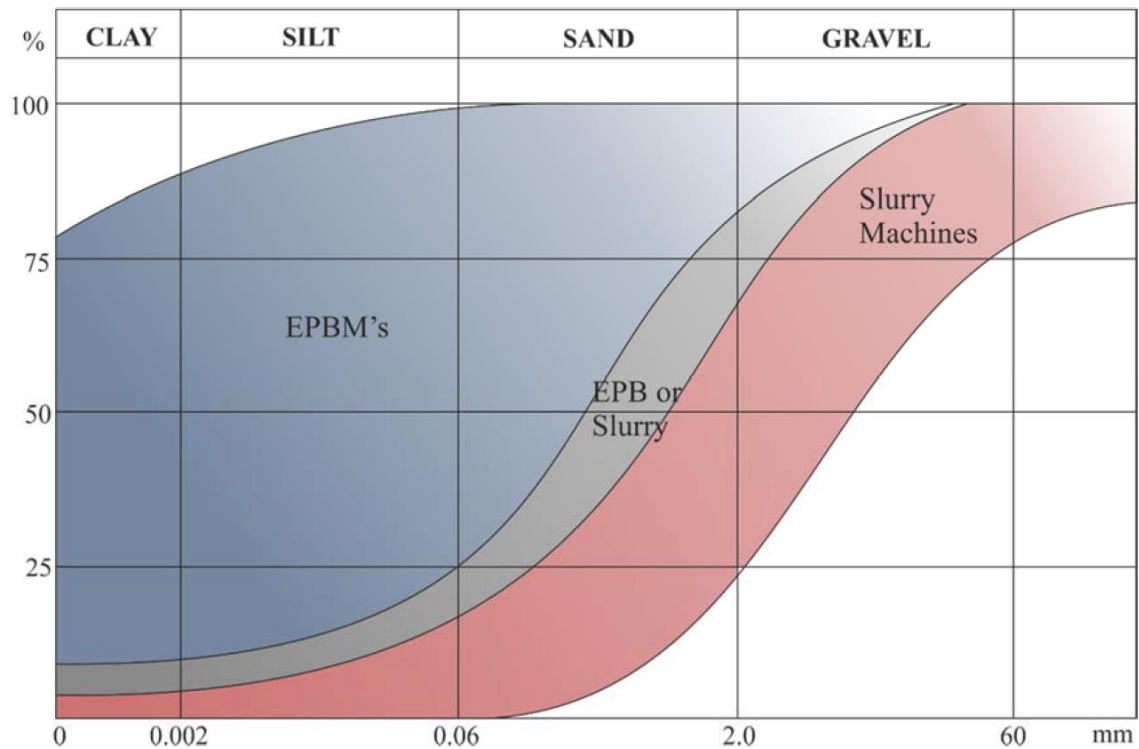
2.3 Κριτήρια επιλογής του μηχανήματος

Σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή πραγματοποιείται σε βραχώμαζα καλών χαρακτηριστικών (υψηλό RMR και GSI), γίνεται χρήση μηχανημάτων ανοιχτού τύπου. Στις αστικές περιοχές, όπου συνήθως οι σχηματισμοί δεν αποτελούνται από βράχους υψηλών αντοχών και τα όρια επιφανειακών καθιζήσεων είναι πολύ πιο αυστηρά, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε με ασπίδα, είτε ακόμη συχνότερα, μηχανήματα που εφαρμόζουν πίεση στο μέτωπο (Earth Pressure Balance, Slurry, Mix shield). Τα μηχανήματα Earth Pressure Balance έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τη διάνοιξη σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, αφού οι επιφανειακές καθιζήσεις, με τους κατάλληλους χειρισμούς του μηχανήματος, είναι εφικτό να είναι σχεδόν μηδενικές.

Επιπλέον, με την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εξασφαλίζεται η ευστάθειά του, όπως και της οροφής. Κατά συνέπεια, αποκλείονται οι καθυστερήσεις είτε λόγω αστοχιών, είτε για βελτιώσεις των σχηματισμών που βρίσκονται στην οροφή της σήραγγας, ή στη στάθμη του μετώπου. Έτσι, είναι εφικτό να επιτευχθεί ένας σταθερός και αρκετά υψηλός ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής.



Διάγραμμα 2.1: Ποσοστό απόδοσης μηχανήματος TBM συγκριτικά με το RMR της βραχώμαζας.



Διάγραμμα 2.2: Εύρος εφαρμογής μηχανημάτων EPB ή Πολφού, σε σχέση με την κοκκομετρία του εδαφικού σχηματισμού εκσκαφής.

Πιο συγκεκριμένα, για τα μηχανήματα πολφού υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί παράγοντες που κρίνουν σε μεγάλο βαθμό την καταλληλότητά τους. Πρώτος παράγοντας, αποτελεί η περατότητα του υλικού εκσκαφής. Για παράδειγμα, διαπερατότητα της τάξεως των 10^{-5} m/s, είναι ένα εμπειρικό όριο λειτουργίας του Earth Pressure Balance και μπορεί να ελεγχθεί με έκχυση μπετονίτη ή άλλων πρόσθετων παραγόντων. Εάν το έδαφος έχει υψηλή διαπερατότητα, το υπόγειο νερό θα καταφέρει να διαπεράσει το υλικό,

στο θάλαμο εκσκαφής και στον ατέρμονα κοχλία και να μην είναι εφικτή η «δημιουργία» της απαιτούμενης πίεσης εξισορρόπησης. Δεύτερο βασικό κριτήριο που χρειάζεται να εξετάζεται κατά την επιλογή μηχανήματος πολφού, είναι η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού. (βλ. Διάγραμμα 2.2)

2.4 Μηχάνημα εξισορροπητικής της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance Machines)

Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος, σε αποσπασμένο βράχο και χαλαρά εδάφη στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων μέσω του ελέγχου της γεωστατικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του περιβάλλοντος εδάφους, για να αντιστέκεται στις μετακινήσεις και στη δυναμική εισροή νερού. Η γεωστατική πίεση του εδάφους ποικίλει από 1 έως 4 bar και εξαρτάται από το ύψος των υπερκειμένων και την πίεση του ύδατος των πόρων.

Η εξισορρόπηση του μετώπου καθώς το EPB προωθείται, επιτυγχάνεται κρατώντας τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμονα κοχλία μεταφοράς των προϊόντων εκσκαφής, γεμάτο με το υλικό εκσκαφής. Αναλυτικότερα, για να διατηρηθεί ο έλεγχος των προϊόντων εκσκαφής με το EPB, η εκσκαφή ξεκινά περιστρέφοντας την κοπτική κεφαλή και ρυθμίζοντας στον ατέρμονα κοχλία το άνοιγμα της θύρας αποκομιδής του υλικού. Καθώς τα έμβολα προώθησης του μηχανήματος εκτείνονται, τα προϊόντα εκσκαφής γεμίζουν το θάλαμο της κεφαλής κοπής με αποτέλεσμα το έδαφος μπροστά από το EPB και μέσα στην κοπτική κεφαλή να είναι υπό πίεση. Οι κυψέλες μέτρησης της πίεσης του εδάφους, που βρίσκονται μέσα στον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μετρούν την πίεση του εδάφους. Εάν η πίεση υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, οι υδραυλικά ελεγχόμενες θύρες εκτόνωσης της πίεσης, που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο ατέρμονα κοχλία, αναγκάζονται να ανοίξουν και επιτρέπουν στο υλικό εκσκαφής να περάσει από τις θύρες αυτές στην πρώτη μεταφορική ταινία.

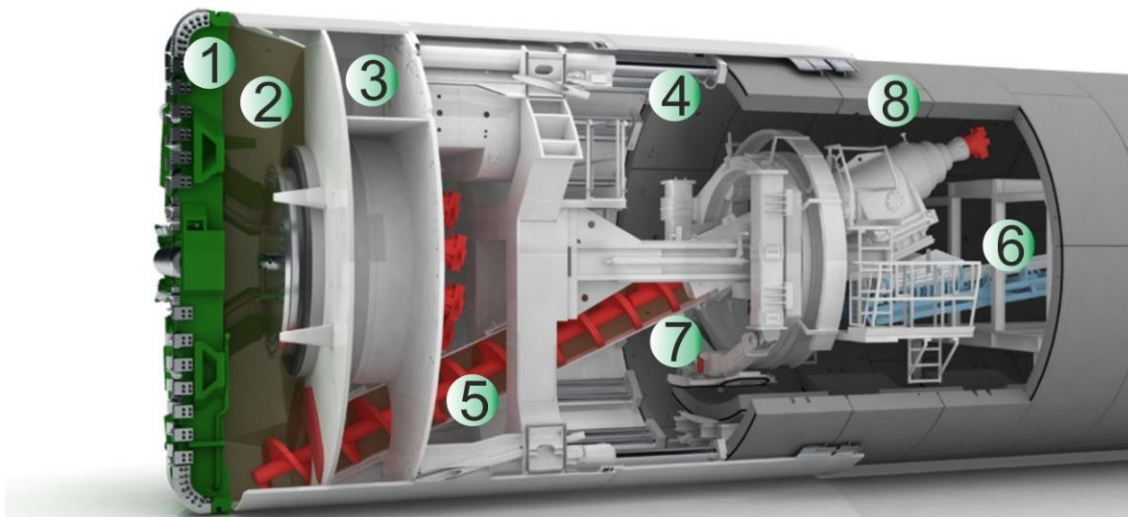
Με αυτόν τον τρόπο, το έδαφος εκσκάπτεται με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων, τα οποία βρίσκονται επί της κοπτικής κεφαλής και εν συνεχεία πιέζεται προς τον θάλαμο εκσκαφής μέσω ανοιγμάτων, τα οποία βρίσκονται και αυτά επί της κοπτικής κεφαλής. Κατά συνέπεια, υφίσταται ανάμειξη το εκσκαφθέν υλικό με το ήδη υπάρχον στο

θάλαμο εκσκαφής. Η πίεση των υδραυλικών κυλίνδρων μεταφέρεται μέσω του τοιχώματος διαχωρισμού στον εδαφικό πολφό, ώστε να αποφευχθεί μια ατυχής είσοδος εδαφικού υλικού από το μέτωπο της σήραγγας μέσα στον θάλαμο. Όταν ο εδαφικός πολφός μέσα στο θάλαμο εκσκαφής δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω, τότε επέρχεται η ισορροπία. Η τρέχουσα πίεση στο μέτωπο της σήραγγας αντιστοιχεί στην ώθηση ηρεμίας. Μια αύξηση της πίεσης του εδαφικού πολφού οδηγεί σε ανύψωση εδάφους μπροστά από την ασπίδα. Αντιστοίχως η μείωση της πίεσης οδηγεί σε ανάπτυξη καθιζήσεων. Με τη βοήθεια του κοχλία μεταφοράς, το υλικό εκσκαφής μεταφέρεται από τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής στην ταινία μεταφοράς σε ατμοσφαιρική πίεση. Για να υφίσταται μια τέτοιου είδους μεταφορά χωρίς την χρήση θυρίδας, η περατότητα του νερού στον εδαφικό πολφό πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί ροή μέσα στο κοχλία μεταφοράς.

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής με δεδομένη ταχύτητα, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται αλλάζοντας τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοχλία μεταφοράς. Όταν το υλικό εκσκαφής εκφορτώνεται με υψηλότερο ρυθμό τότε η πίεση πέφτει. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν ο ρυθμός εκφόρτωσης μειώνεται. Με τη βοήθεια αισθητήρων πίεσης εγκατεστημένων σε διάφορα επίπεδα στο τοίχωμα διαχωρισμού, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται συνεχώς από το κέντρο ελέγχου. Σκοπός είναι να διατηρείται η πίεση του εδαφικού πολφού σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια εκσκαφής. Η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής πρέπει να αντισταθμίζει την εδαφική πίεση ώστε να μην αναπτύσσονται καθιζήσεις και ανεξέλεγκτη ροή υλικού.

Με βάση την Εικόνα 2.1 δίνεται η δυνατότητα να παρουσιαστούν τα κύρια μέρη του μηχανήματος EPB και παράλληλα να περιγραφεί η λειτουργία του. Το έδαφος εκσκάπτεται με την κοπτική κεφαλή (cutter head) (1), πάνω στη οποία υπάρχουν τα κοπτικά εργαλεία και οι απαραίτητες οπές ώστε να έχει τη δυνατότητα να εκκενώνεται το μέτωπο από το υλικό της εκσκαφής. Η περιοχή της ασπίδας πίσω από την κοπτική κεφαλή είναι γνωστή ως θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber) (2) και χωρίζεται με ένα διάφραγμα πίεσης από την περιοχή της ασπίδας με ατμοσφαιρική πίεση (pressure bulkhead) (3). Το εκσκαπτόμενο υλικό, πέφτει από τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής, στο θάλαμο εκσκαφής. Η διείδυση του εδάφους, από το μέτωπο της σήραγγας στον θάλαμο εκσκαφής, ελέγχεται από τη δύναμη που ασκούν τα κυλινδρικά έμβολα ώθησης (thrust cylinders) (4) στο έδαφος μέσω του διαφράγματος πίεσης. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν το εδαφικό υλικό, στο θάλαμο εκσκαφής, δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω από την πίεση των υπερκειμένων και την υδροστατική πίεση. Το υλικό της εκσκαφής απομακρύνεται από τον θάλαμο εκσκαφής μέσω ενός ατέρμονα κοχλία (screw conveyor) (5).

Το ποσό των υλικών που απομακρύνεται ελέγχεται από την ταχύτητα του κοχλίου και από το άνοιγμα στην πάνω μεριά του οδηγού, εντός του οποίου βρίσκεται ο ατέρμονας κοχλίας. Η πίεση στον θάλαμο εκσκαφής ελέγχεται από την εξισορρόπηση του ρυθμού προχώρησης της μηχανής και του ρυθμού απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία. Ο ατέρμονας κοχλίας μεταφέρει το υλικό της εκσκαφής σε μία μεταφορική ταινία (conveyor belt) (6), η οποία το μεταφέρει εκτός της σήραγγας.



Εικόνα 2.1: Τυπικό μοντέλο μηχανήματος εξισορροπητικής της εδαφικής πίεσης (Herrenknecht n.d.).

Για την επένδυση των σηράγγων συνήθως χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος (lining segments) (8), τα οποία τοποθετούνται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης από τον μηχανισμό τοποθέτησης (erectors) (7), στην περιοχή της ασπίδας, πίσω από το διάφραγμα πίεσης. Στη συνέχεια, γίνεται ενεμάτωση των κενών ανάμεσα στην εξωτερική πλευρά των προκατασκευασμένων στοιχείων και στο περιβάλλον γεωυλικό, από ανοίγματα που υπάρχουν στο πίσω μέρος του μηχανήματος ή πάνω στα προκατασκευασμένα στοιχεία. Τέλος, να σημειωθεί πως οι δυνάμεις ώθησης πρέπει να υπερνικούν την αντίδραση από την εκσκαφή, την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και την τριβή που ασκείται στην ασπίδα του μηχανήματος. Η δύναμη περιστροφής είναι σχετικά μεγάλη (συγκριτικά με τα Slurry TBM), διότι η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται εντός του θαλάμου, ο οποίος είναι γεμάτος με τα υλικά της εκσκαφής.

2.5 Μηχάνημα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield)

Τα μηχανήματα πολφού αποτελούν κατηγορία των μηχανημάτων με ασπίδα, ειδικά σχεδιασμένα για διάνοιξη σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς και για θεωρητικά ιδανικότερη διαχείριση των εδαφικών συνθηκών, συγκριτικά με τα μηχανήματα EPB, καθώς

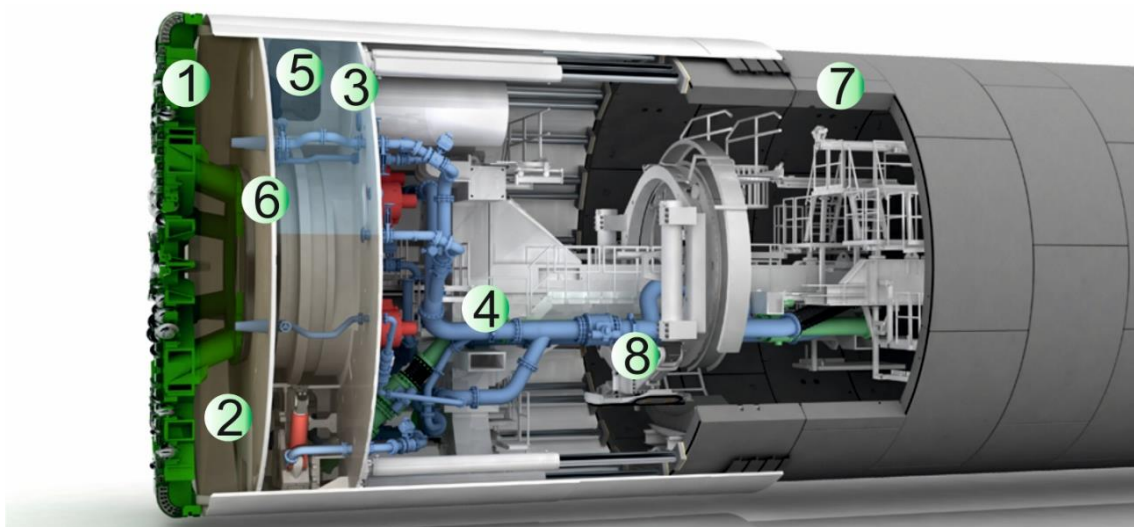
έχουν τη δυνατότητα βελτίωσης της εδαφικής μάζας στο μέτωπο της εκσκαφής. Τα πλέον πρόσφορα εδάφη για την χρήση μηχανήματος πολφού είναι τα αδρόκοκκα μαλακά, τα αμμώδη και τα λεπτόκοκκα εδάφη, κυρίως κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και με διάμετρο εκσκαφής από 2 ως 14 και πλέον μέτρα.

Στα μηχανήματα πολφού, η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απευθείας μέσω της άντλησης του αιωρήματος των υλικών εκσκαφής, από τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής διαχωρίζεται από την υπόλοιπη σήραγγα μέσω ενός αεροστεγούς διαφράγματος. Ο σχεδιασμός μέγιστης πίεσης στα τοιχώματα του διαφράγματος της κεφαλής κοπής είναι ≈ 7 bars. Η απαιτούμενη πίεση για τη στήριξη του μετώπου, ρυθμίζεται με τον έλεγχο της ταχύτητας παροχής του μπετονίτη μέσω των αντλιών τροφοδοσίας και με τον έλεγχο της ταχύτητας άντλησης των υλικών εκσκαφής. Η άντληση του αιωρήματος για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής καθώς και η παρουσία των υπογείων υδάτων και του μπετονίτη δημιουργούν μία κρούστα σφράγισης του εδάφους εκσκαφής. Η κρούστα αυτή, σφραγίζει το μέτωπο της εκσκαφής σχηματίζοντας μία μεμβράνη, μέσω της οποίας μεταφέρεται στο μέτωπο της σήραγγας η πίεση του μηχανήματος πολφού.

Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με υδραυλικές αντλίες μέσω των σωλήνων του εναιωρήματος, και οδηγούνται στη μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται σε εργοτάξιο εκτός της σήραγγας, όπου και διαχωρίζεται το γεωυλικό από τον μπετονίτη.

Το μέγεθος των ογκόλιθων ή των βράχων που μπορεί να μεταφερθεί μέσα από τις σωληνώσεις του συστήματος απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής, χωρίς να αποφράσσεται, είναι περίπου το 1/3 της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης (το μέγεθος κυμαίνεται από $\approx 7,5$ έως 15 cm). Η μείωση του μεγέθους των ογκόλιθων επιτυγχάνεται μέσω των δίσκων κοπής και των θραυστήρων (κυλινδρικού τύπου, κωνικού τύπου ή τύπου σιαγώνας) που βρίσκονται στον θάλαμο της κεφαλής κοπής. Συχνότερα εφαρμόζεται ο θραυστήρας τύπου σιαγώνας, διότι έχει μεγάλα ανοίγματα και έχει τη δυνατότητα να δέχεται μεγάλα σε διαστάσεις τεμάχια ογκόλιθων.

Η χρήση μηχανημάτων πολφού σε αργιλώδη εδάφη ενέχει τον κίνδυνο εμπλοκής των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής, του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των υλικών εκσκαφής. Στις περιπτώσεις χαλαρών, μη συνεκτικών εδαφών, όπως για παράδειγμα χαλίκια, άμμος και εξαιρετικά ρηγματωμένος βράχος, σε συνδυασμό με μεγάλη διαπερατότητα και υψηλή στάθμη υπογείων υδάτων, είναι πιθανόν να απαιτείται στήριξη του μετώπου με τη χρήση μπετονιτικού εναιωρήματος.



Εικόνα 2.2: Τυπικό μοντέλο μηχανήματος με αιώρημα – πολφού (Herrenknecht n.d.).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2, κατά τη διάνοιξη σήραγγας με μηχανήμα πολφού, στο μέτωπο της εκσκαφής το έδαφος εκσκάπτεται με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής (cutter head) (1) μέσα στο αιώρημα μπετονίτη και στη συνέχεια το έδαφος αναμειγνύεται με το αιώρημα του μπετονίτη. Η περιοχή της ασπίδας εντός της οποίας η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται είναι γνωστή ως θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber) (2) και είναι διαχωρισμένη με ένα διάφραγμα πίεσης (pressure bulkhead) (3) από την περιοχή της ασπίδας, που είναι υπό ατμοσφαιρική πίεση. Το αιώρημα μπετονίτη διοχετεύεται με μία γραμμή τροφοδοσίας (feed line) (4) στον θάλαμο εκσκαφής, μέσω πίεσης αέρα (air cushion) (5) εξισορροπώντας τις εδαφικές και υδροστατικές πιέσεις. Έτσι αποτρέπεται η μη ελεγχόμενη διείδυση του εδάφους ή ο κίνδυνος αστάθειας του μετώπου της σήραγγας. Για αυτόν τον λόγο ο θάλαμος εκσκαφής, πίσω από την κοπτική κεφαλή, χωρίζεται από το διάφραγμα πίεσης με έναν «τοίχο» (submerged wall) (6). Η περιοχή από τον «τοίχο» αυτό, ως το διάφραγμα πίεσης είναι γνωστή ως θάλαμος πίεσης. Το μίγμα του εκσκαπόμενου υλικού και του αιωρήματος του μπετονίτη μεταφέρεται εκτός της σήραγγας, στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού. Προκειμένου να εμποδίζεται τυχών εμπλοκή στο κύκλωμα τροφοδοσίας και να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των αντλιών μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού, τοποθετείται ένα κόσκινο μπροστά από τον σωλήνα αναρρόφησης για να εμποδίσει την πρόσβαση μεγάλων τεμαχίων.

2.6 Επιμέρους τμήματα μηχανημάτων

2.6.1 Κοπτική κεφαλή (Cutting Wheel)

Ο ρόλος της κοπτικής κεφαλής, κατά τη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων με EPB, είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς χρησιμοποιείται για τη χαλάρωση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού από την αρχική του θέση, στο μέτωπο. Συγκεκριμένα, κατά την επαφή του μετώπου με την κοπτική κεφαλή και με ταυτόχρονη περιστροφή της, χαλαρώνεται το εδαφικό υλικό και εναποτίθεται στο θάλαμο εκσκαφής.

Στην περίπτωση των μηχανημάτων EPB, η κοπτική κεφαλή μπορεί να χαρακτηριστεί σε ανοιχτού ή κλειστού τύπου, ανάλογα με το ποσοστό των ανοιγμάτων που έχει, όπως δείχνει και η Εικόνα 2.3. Κάθε μέθοδος κατασκευής έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

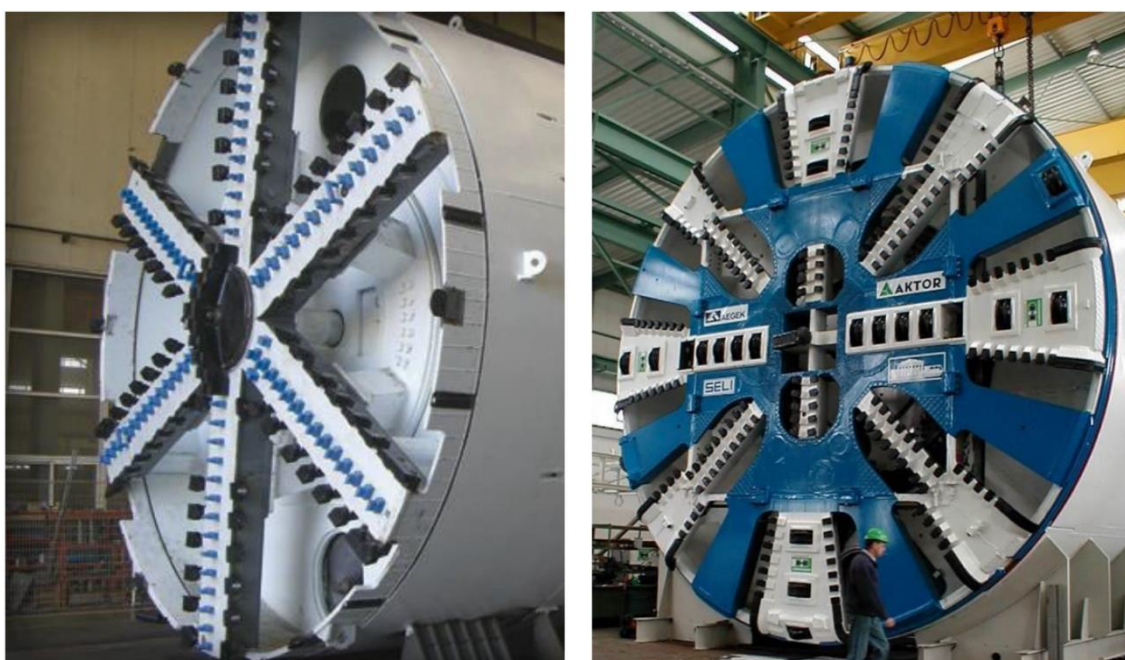
Η κοπτική κεφαλή ανοιχτού τύπου παρουσιάζει ευδιάκριτα μειωμένο κίνδυνο παγίδευσης και περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης στο μέτωπο. Παρόλα αυτά, όταν ο θάλαμος εκσκαφής λειτουργεί υπό ατμοσφαιρική πίεση, λόγω έλλειψης μηχανικής υποστήριξης, στις «ευαίσθητες» αστικές περιοχές παρουσιάζεται αυξημένος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

Από την άλλη, η κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου παρουσιάζει μικρότερη ομοιομορφία στην πίεση που ασκεί στο μέτωπο και είναι περισσότερο ευπαθής στην έμφραξη των ανοιγμάτων της από την εδαφική πάστα, 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 τον 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 δε θα μπορούν να μεταφερθούν από τον ατέρμονα κοχλία, αυξάνοντας τον κίνδυνο παύσης λειτουργίας του ή ακόμα και καταστροφής του. Ο βαθμός ανοιγμάτων ορίζεται ως ποσοστό επί ολόκληρης της κοπτικής κεφαλής. Αυτή η παράμετρος είναι

άμεσα συνδεδεμένη με την εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης. Γενικά, η εμπειρία έχει δείξει ότι ο κατάλληλος βαθμός ανοιγμάτων κυμαίνεται από 0.2 ως 0.35 και μεταφράζεται σαν 20 – 35% της επιφάνειας της κεφαλής.

Στην περίπτωση των Slurries machines, η κοπτική κεφαλή είναι επίπεδη και σχε- τικά 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 οποια- δήποτε κατεύθυνση. Ανάλογα με τη διάταξη των κοπτικών εργαλείων της κεφαλής, αυτή μπορεί να κινηθεί κατά έναν κεντρικό άξονα, περιμετρικά και κατά το ένα τέταρτο.



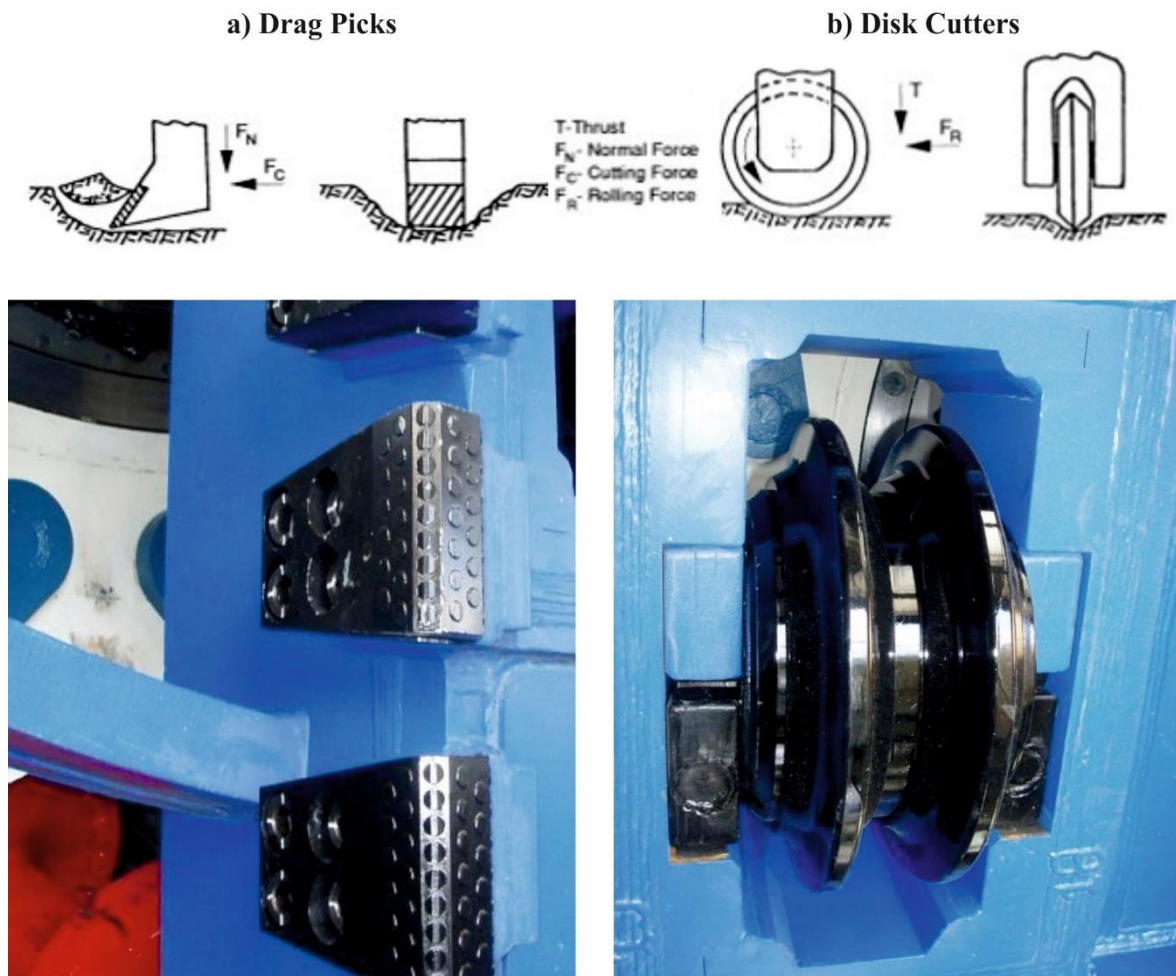
Εικόνα 2.3: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο μηχάνημα για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στο Νέο Δελχί (Robbins n.d.), δεξιά απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του υπόγειου σιδηρόδρομου στην Αθήνα (Attiko Metro n.d.).

2.6.2 Κοπτικά εργαλεία (Cutting tools)

Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με διάφορα κοπτικά εργαλεία για την εκσκαφή του γεωυλικού στο μέτωπο. Στη μηχανοποιημένη όρυξη χρησιμοποιούνται αρκετές διαφορε- τικές κατηγορίες κοπτικών εργαλείων, ανάλογα με τον τύπο του εδαφικού σχηματισμού όπου θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη. Σε μηχανήματα EPB συνήθως συναντάμε κοπτικά τύπου δίσκου (disk cutters) για μαλακούς ή σκληρούς βραχώδεις σχηματισμούς και κο- πτικά συρόμενου τύπου (drag picks) για εδαφικούς σχηματισμούς. Τα EPBs συχνά διέρ- χονται μέσα από σχηματισμούς που παρουσιάζουν ετερογένεια, με αποτέλεσμα να χρη- σιμοποιούνται και οι δύο τύποι κοπτικών εργαλείων στην κεφαλή.

Τα κοπτικά συρόμενου τύπου εγκαθίστανται στα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής, αλλά και στο κέντρο της. Τοποθετούνται κυρίως περιμετρικά των ανοιγμάτων 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. Στα κοπτικά συρόμενου τύπου η θραύση γίνεται μέσω της δύναμης κοπής, η οποία ασκείται παράλληλα στην επιφάνεια κοπής (βλ. Εικόνα 2.1, Εικόνα 2.4.a). Η συγκεκριμένη κατηγορία κοπτικών καταστρέφει τη συμπαγή δομή του εδάφους και βοηθούν τη δημιουργία του εδαφικού πολφού (με τα απαραίτητα πρόσθετα).

Τα κοπτικά τύπου δίσκου περιστρέφονται με την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διεισδύουν στο πέτρωμα του μετώπου μέσω κάθετης δύναμης (βλ. Εικόνα 2.4.b). Σε αντίθεση με τα κοπτικά συρόμενου τύπου, τα κοπτικά τύπου δίσκου αντικαθίστανται όταν χάσουν την αντοχή τους εξαιτίας της φθοράς. Η συγκεκριμένη κατηγορία κοπτικών χρησιμοποιείται για την κοπή μαλακών ή σκληρών πετρωμάτων.



Εικόνα 2.4: (a) Κοπτικά συρόμενου τύπου και φωτογραφία από κοπτική κεφαλή EPB (Seli n.d.; Roxborough 1973), (b) Κοπτικά τύπου δίσκου και φωτογραφία από κοπτική κεφαλή EPB (Roxborough & Phillips 1975; Seli n.d.).

2.6.3 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)

Ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή και είναι ο χώρος στον οποίο εισέρχεται το εκσκαπτόμενο υλικό, το οποίο βρίσκεται υπό πίεση μέσα στον θάλαμο και αποτελεί το μέσο αντιστήριξης του μετώπου.

2.6.3.1 Θάλαμος εκσκαφής μηχανημάτων EPB

Με τον όρο θάλαμος εκσκαφής περιγράφεται το τμήμα του μηχανήματος το οποίο βρίσκεται ενδιάμεσα στην κοπτική κεφαλή και στο διάφραγμα πίεσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1. Η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής από το EPB στηρίζεται κατά βάση στη λειτουργία του θαλάμου εκσκαφής. Το υλικό της εκσκαφής, εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής στον 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 υλικό της εκσκαφής 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 στον θάλαμο εκσκαφής, το υλικό πρέπει να είναι ομοιογενές και να υπάρχει σωστή αναλογία χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού για να διατηρείται η πλαστικότητα του. Γι' αυτόν τον λόγο το υλικό στον θάλαμο 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.

2.6.3.2 Θάλαμος εκσκαφής μηχανημάτων Slurry

Ένα Slurry παρέχει υποστήριξη στο εκσκαπτόμενο μέτωπο, μέσω μίγματος μπετονιτικού πολφού που βρίσκεται υπό πίεση στο θάλαμο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, ο θάλαμος εκσκαφής αποτελεί το τμήμα του μηχανήματος που διαχωρίζει την 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 και κατ' επέκταση της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο.

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

2.6.4 Σύστημα μεταφοράς εκσκαπτόμενου υλικού

Για την ελεγχόμενη μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού ή πολφού, από τον θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber) στην επιφάνεια γίνεται χρήση των παρακάτω συστημάτων ή συνδυασμού αυτών, ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος.

2.6.4.1 Ατέρμονας κοχλίας (Screw conveyor)

Οι ατέρμονες κοχλίες χρησιμοποιούνται στα EPBs για την ελεγχόμενη μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού. Ο ατέρμονας κοχλίας είναι ένας συνεχόμενος μεταφορέας, ο οποίος αποτελείται από έναν κοχλία – με μορφή σπирάλ – που περιστρέφεται μέσα σε ένα σταθερό περίβλημα (βλ. Εικόνα 2.5).

Στα EPBs οι ατέρμονες κοχλίες είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την απομάκρυνση του υλικού της εκσκαφής από τον θάλαμο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για:

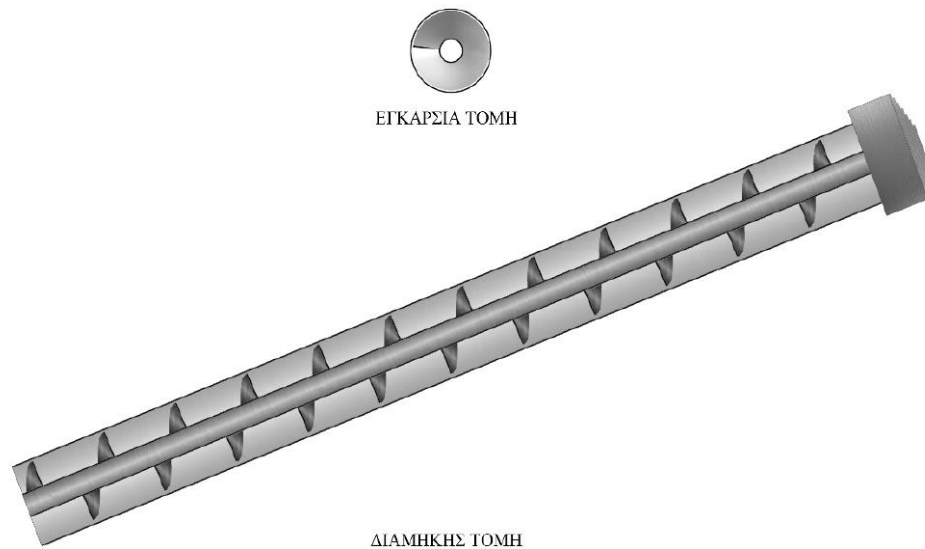
- Τη μεταφορά του γεωυλικού από τον θάλαμο εκσκαφής σε σύστημα μεταφορικών ταινιών, μέσω του οποίου οδηγείται στο εξωτερικό της σήραγγας
- Την εφαρμογή πίεσης έναντι υπόγειων υδάτων σε έντονα διαπερατά εδάφη
- Τον έλεγχο της πίεσης υποστήριξης στο θάλαμο εκσκαφής με κατάλληλη προσαρμογή της ταχύτητας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



Εικόνα 2.5: Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής (Μετρό Θεσσαλονίκης).

Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται ένας ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό άξονα περιστροφής. Παρατηρείται ότι το άνοιγμα καλύπτει μόνο το 50% της συνολικής διαμέτρου του κοχλίας. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη μεταφορά μεγάλων τεμαχίων μέσω του κοχλίας. Για τον θρυμματισμό τέτοιων τεμαχίων, κοπτικά τύπου δίσκου συνήθως εγκαθίστανται στην κεφαλή.

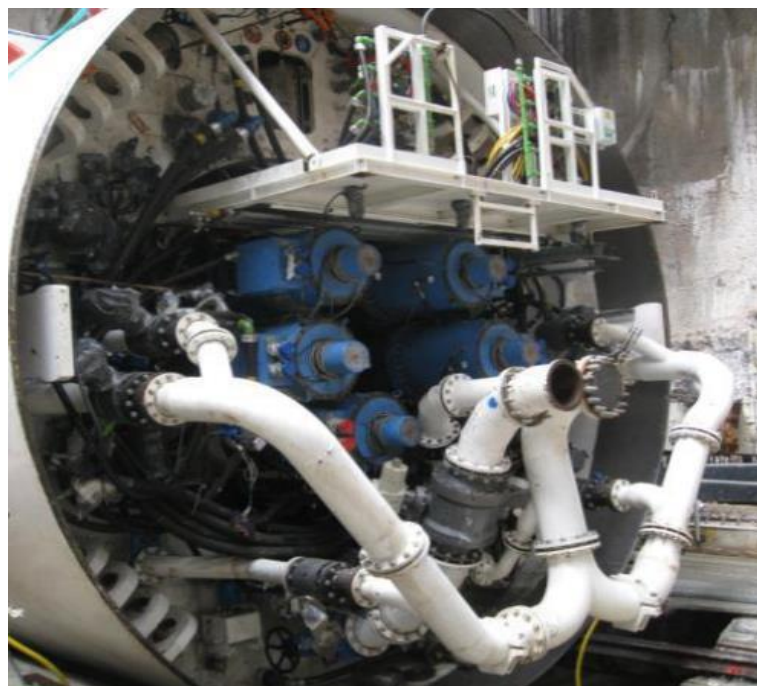
Η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός προώθησης του μηχανήματος αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες ελέγχου της πίεσης υποστήριξης του μετώπου στον θάλαμο εκσκαφής. Οι χειριστές των EPBs έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της άσκησης πίεσης στον θάλαμο, μέσω του ελέγχου αυτών των δύο παραγόντων και ιδιαίτερα με προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής. Επιπλέον, κάτι που πρέπει να ελέγχεται είναι η πίεση στον ατέρμονα κοχλίας, 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 ακροφύσιων, στο μπροστινό μέρος του κοχλίας, που εκτοξεύουν πρόσμικτα και βελτιώνουν την ποιότητα του εδάφους.



Εικόνα 2.6: Εγκάρσια και διαμήκης τομή του ατέρμονα κοχλία.

2.6.4.2 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 στον θάλαμο εκσκαφής.

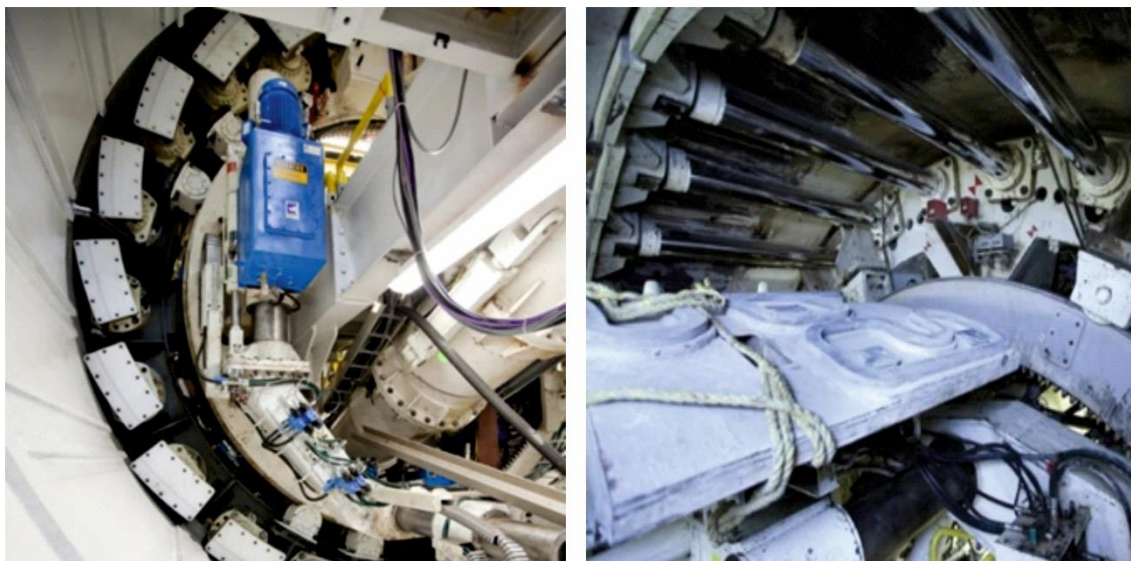


Εικόνα 2.7: Τυπικό σύστημα αγωγών μεταφοράς πολφού σε μηχανήμα Slurry.

Εξαιτίας του υδραυλικού συστήματος, το οποίο επίσης καλείται κλειστό υδραυλικό σύστημα κυκλοφορίας πολφού, τα Slurries μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια ακόμα και με πίεση νερού μεγαλύτερη από 15bar. Εφόσον η μεταφορά του εκσκαπόμενου υλικού γίνεται μέσω σωληνώσεων, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται διάμετρος σωλήνων τέτοια ώστε να επιτρέπει τη ροή των υλικών με κατάλληλη ταχύτητα.

2.6.5 Κυλινδρικά έμβολα ώθησης (Thrust cylinders)

Τα υδραυλικά έμβολα ώθησης είναι υπεύθυνα για να κρατάνε το μηχάνημα σταθερό κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και ταυτόχρονα να ρυθμίζουν τον ρυθμό προχώρησης. Για να ασκήσουν τη δύναμη ώσης που απαιτείται, εφαρμόζουν και ασκούν πολύ υψηλές τάσεις στα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης. Οι δυνάμεις που ασκούν τα έμβολα μετατρέπονται σε ώθηση αντιστήριξης στο μέτωπο μέσω της υπό πίεσης πάστας εδαφικού υλικού στον θάλαμο εκσκαφής.



Εικόνα 2.8: Αριστερά απεικονίζεται σύστημα υδραυλικών εμβόλων τοποθετημένων στην ουρά της ασπίδας (MOST Construction Company 2012). Δεξιά απεικονίζονται υδραυλικά έμβολα ώθησης σε μηχάνημα EPB διαμέτρου 8.9m της εταιρίας Robbins (Robbins n.d.).

Η επιλογή του συστήματος υδραυλικών εμβόλων γίνεται με κριτήρια όπως:

- Τις εδαφικές συνθήκες. Για παράδειγμα, κακές εδαφικές συνθήκες με προβλεπόμενες υψηλές τιμές συγκλίσεων έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων τριβών στη διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας.
- Την ανάπτυξη της απαραίτητης ώθησης αντιστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας.
- Το βάρος του TBM.

- Την απαραίτητη δύναμη εκσκαφής που αποτελείται από το άθροισμα της ορθής δύναμης που απαιτεί το κάθε κοπτικό εργαλείο για να λειτουργεί αποδοτικά.

2.6.6 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.

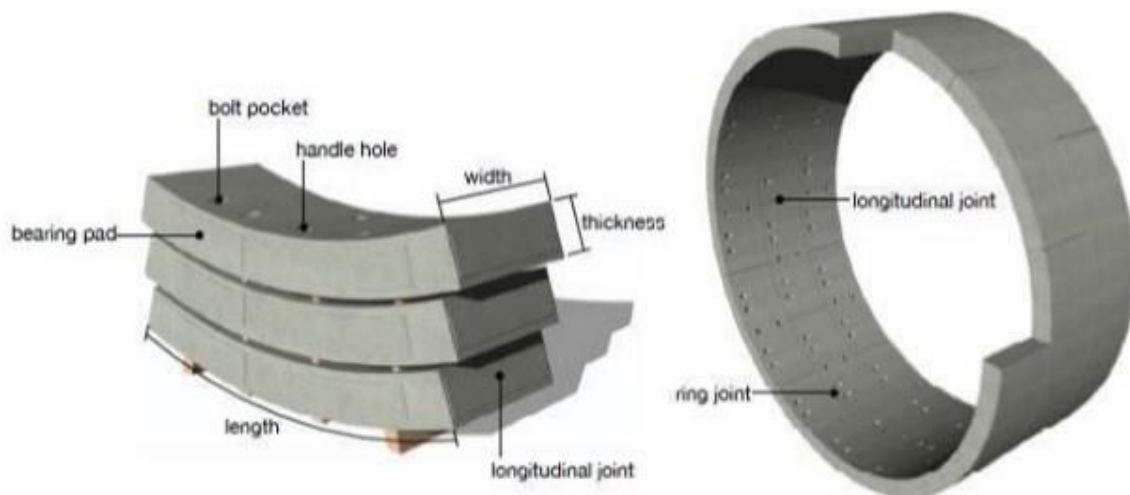
Τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι από σκυρόδεμα, εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη δημιουργία ενός κυκλικού δακτυλίου. Βασικό χαρακτηριστικό της τελικής επένδυσης αποτελεί ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων μεταξύ των στοιχείων (ring joints). Τα σημεία σύνδεσης είναι κάθετα στα στοιχεία 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.

Γενικά, η φιλοσοφία στο σχεδιασμό των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης δε διαφέρει σημαντικά από τον σχεδιασμό τελικής επένδυσης συμβατικής σήραγγας. Εξαιτίας 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 EPB κυμαίνεται μεταξύ των 20-50 cm.



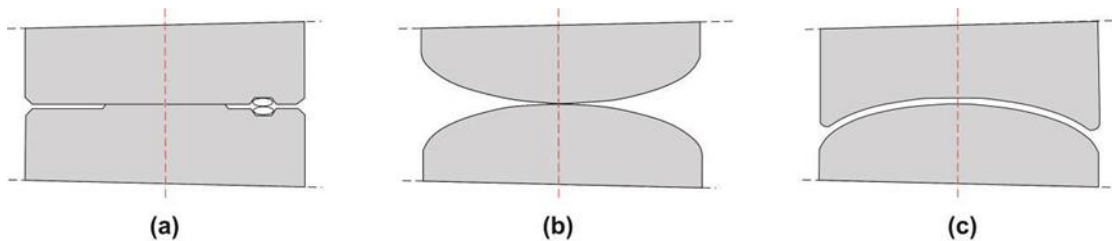
Εικόνα 2.9: Τελική επένδυση σε σήραγγα που κατασκευάστηκε από TBM (Prague Metro 2013).



Εικόνα 2.10: Διαστάσεις δακτύλιου τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτυλίους (Choi & Yoo 2015).

Όπως προαναφέρθηκε, 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 στον σχεδιασμό ο δεύτερος τύπος συνδέσμων. Εξαιτίας της γεωμετρίας τους οι σύνδεσμοι αυτοί λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις.



Εικόνα 2.11: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) επίπεδος σύνδεσμος (plane joint), (b) και (c) σύνδεσμοι με καμπύλη επιφάνεια (convex joints)(Luttikholt 2007).

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.



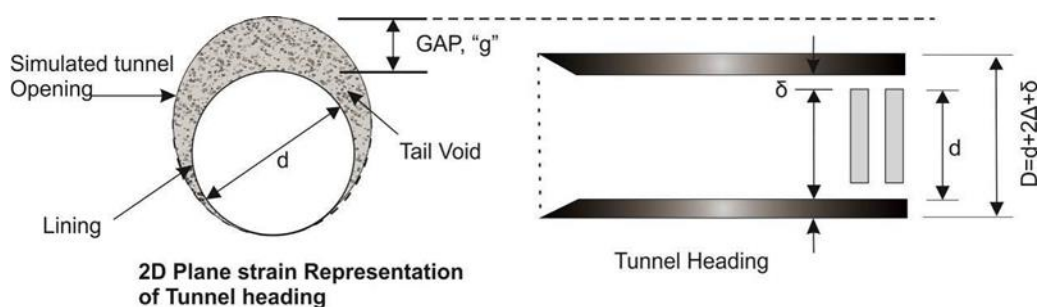
Εικόνα 2.12: Μηχανισμός γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης ενός EPB μηχανήματος (Attiko Metro n.d.).

2.6.7 Πλήρωση του ουραίου κενού και διαδικασίες ενεμάτωσης

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων αναπόφευκτα δημιουργεί κάποια κενά μεταξύ του περιβάλλοντος γεωυλικού και των στοιχείων του μηχανήματος και της υποστήριξης. Η κωνικότητα της ασπίδας και η τοποθέτηση των στοιχείων της υποστήριξης στο εσωτερικό τμήμα της ασπίδας είναι οι δύο βασικότερες αιτίες για αυτά τα κενά. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο βασικοί τύποι κενών αναλύονται παρακάτω:

- Το κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους δημιουργείται λόγω της κωνικότητας της ασπίδας. Το κωνικό σχήμα όπως έχει προαναφερθεί έχει ως στόχο να μειωθούν οι τριβές στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας που μπορεί να προκαλέσουν μπλοκάρισμα του μηχανήματος.
- Το κενό μεταξύ του περιβάλλοντος γεωυλικού στην περιοχή της ουράς της ασπίδας και της εξωτερικής επιφάνειας της υποστήριξης. Αποτελείται από το άθροισμα του πάχους της ασπίδας και του κενού μεταξύ της ασπίδας και του δαχτυλιδιού της υποστήριξης.

Στο αστικό περιβάλλον που ο έλεγχος των εδαφικών μετακινήσεων είναι μείζονος σημασίας, τα κενά που δημιουργούνται από τη διαδικασία της εκσκαφής πρέπει να αντιμετωπίζονται κατάλληλα. Συνεπώς, το παρέμβυσμα στην ουρά της ασπίδας και ο εξοπλισμός ενεμάτωσης αποτελούν σημαντικά στοιχεία όλων των μηχανημάτων με ασπίδα. Το παρέμβυσμα σφραγίζει την ουρά της ασπίδας εμποδίζοντας την είσοδο υπόγειου νερού και εδάφους, αλλά μπλοκάρει και την εισροή ενέματος και ρευστού υποστήριξης. Ο εξοπλισμός ενεμάτωσης είναι υπεύθυνος για την πλήρωση του κενού στην ουρά της ασπίδας μεταξύ του περιβάλλοντος γεωυλικού και της υποστήριξης.

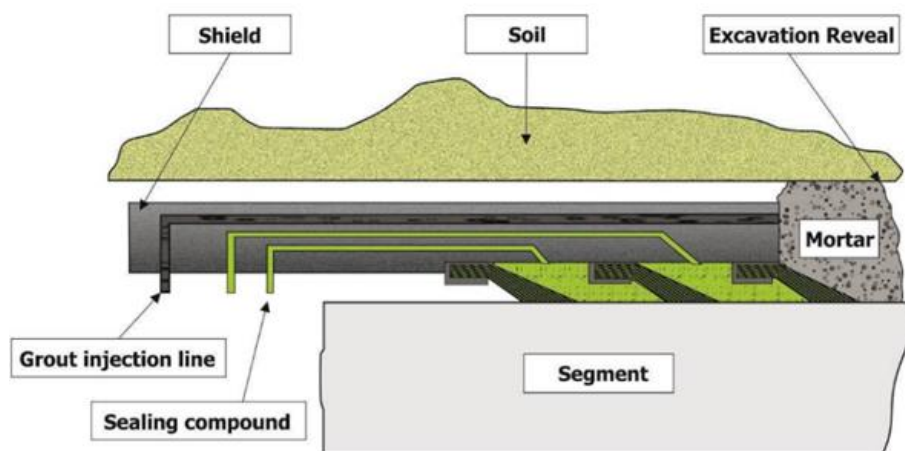


Εικόνα 2.13: Ορισμός του κενού που δημιουργείται κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας (Lee et al. 1992).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να σφραγίσεις την ουρά της ασπίδας. Ωστόσο, οι χαλύβδινες βούρτσες, οι οποίες αρχικά αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία, είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες. Οι χαλύβδινες βούρτσες είναι πακτωμένες στην ουρά της ασπίδας,

όπου έως και τέσσερις διαδοχικές βούρτσες δομούν ανεξάρτητους θαλάμους σφράγισης μαζί με την ασπίδα και την υποστήριξη. Σε κάθε θάλαμο, ένα υλικό σφράγισης εισάγεται ως λίπανση και διατηρείται υπό μία συγκεκριμένη πίεση. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σφράγισης είναι ότι ακόμα και όταν πέφτει η πίεση του ενέματος, εμποδίζεται η διείσδυση νερού και εδάφους καθώς το υλικό σφράγισης ρέει από τους θαλάμους προς το κενό. Συνεπώς, το ένεμα και το υλικό σφράγισης είναι πάντοτε σε επαφή και αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ελέγχεται ώστε να είναι φιλικό προς το περιβάλλον.

Η διαδικασία ενεμάτωσης πραγματοποιείται είτε με εισπίεση σε έτοιμα ανοίγματα στα προκατασκευασμένα στοιχεία όπως φαίνεται σε επόμενη εικόνα, είτε μέσω του συστήματος σωλήνων στην ουρά της ασπίδας όπως προαναφέρθηκε και είναι αυτό που συμβαίνει συνήθως σε μηχανήματα που ασκούν πίεση στο μέτωπο. Αυτός ο τρόπος έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει μία πιο ομοιόμορφη κατανομή ενέματος στην περίμετρο της εκσκαφής. Επίσης, για να πληρωθεί όλο το κενό γύρω από κάθε δαχτυλίδι, η εισπίεση ενέματος πρέπει να είναι συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια της προχώρησης και να ελέγχεται συνεχώς ο όγκος του ενέματος και η πίεση του.



Εικόνα 2.14: Σχηματική απεικόνιση της σφράγισης της ουράς της ασπίδας με χαλύβδινες βούρτσες και της εισπίεσης ενέματος και υλικού σφράγισης μέσω συστήματος σωλήνων εγκατεστημένων στην ουρά της ασπίδας (Kanvadas et al. 2013).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της διαδικασίας ενεμάτωσης είναι τα ακόλουθα:

- Η πίεση από το περιβάλλον γεωυλικό μεταφέρεται στην υποστήριξη πιο ομοιόμορφα,
- Συμβάλλει στη διατήρηση της αρχικής εντατικής κατάστασης του εδάφους και δρα ενάντια στις παραμορφώσεις,
- Απομονώνει την υποστήριξη από την άμεση επαφή με πιθανώς επιθετικό (για κατασκευές σκυροδέματος) περιβάλλον γεωυλικό,

- Βελτιώνει την υδραυλική μόνωση της σήραγγας.

Επίσης, το ένεμα πρέπει να είναι ικανό να ρέει μέσα στο κενό και να σκληραίνει μετά από σύντομη περίοδο. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει είναι:

- Πολύ καλές ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται με την ροή,
- Καλή εργασιμότητα μέχρι την τοποθέτηση,
- Καλές ιδιότητες που αφορούν στην άντληση,
- Ταχεία πήξη αφού πληρώσει το κενό.

Πιο συγκεκριμένα, όταν το ένεμα εισπίζεται μέσα στο κενό, συμπεριφέρεται ως ρευστό, χωρίς δυσκαμψία, αλλά η πρακτικώς μηδενική συμπιεστότητα του και η πίεση που αναπτύσσεται με την εισπίεση προλαμβάνει τη σύγκλιση του περιβάλλοντος εδάφους. Μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα μέσα στο κενό, συνήθως 4 με 5 ώρες, το ένεμα σκληραίνει και συμπεριφέρεται ως μια στρώση σκυροδέματος με σημαντική δυσκαμψία. Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί η προσομοίωση των χρονικά εξαρτώμενων ιδιοτήτων του ενέματος σε αριθμητικές αναλύσεις.



Εικόνα 2.15: Εισπίεση ενέματος μέσα από έτοιμα ανοίγματα που υπάρχουν στα προκατασκευασμένα στοιχεία (Robbins n.d.).

2.6.8 Πρόσμικτα

Κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη με EPB, 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 αναμιγνύονται 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 EPB στους εδαφικούς σχηματισμούς, την περιεκτικότητα του γεωυλικού σε νερό (w), τον δείκτη πλαστικότητας (I_p), τον δείκτη υδαρότητας (w_L) και μπορούν να ελεγχθούν με προσθήκη νερού, μπετονίτη, αργίλου και αφρού. Στην όρυξη με EPB χρησιμοποιείται κυρίως ο αφρός (Foam conditioning) για τη βελτίωση του εδαφικού υλικού.



Εικόνα 2.16: Διαδικασία ελέγχου εισπίεσης αφρού στην κοπτική κεφαλή ενός μηχανήματος EPB (Tunnelseis n.d.).

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 κοντά στο σημείο, που 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 16 bar.

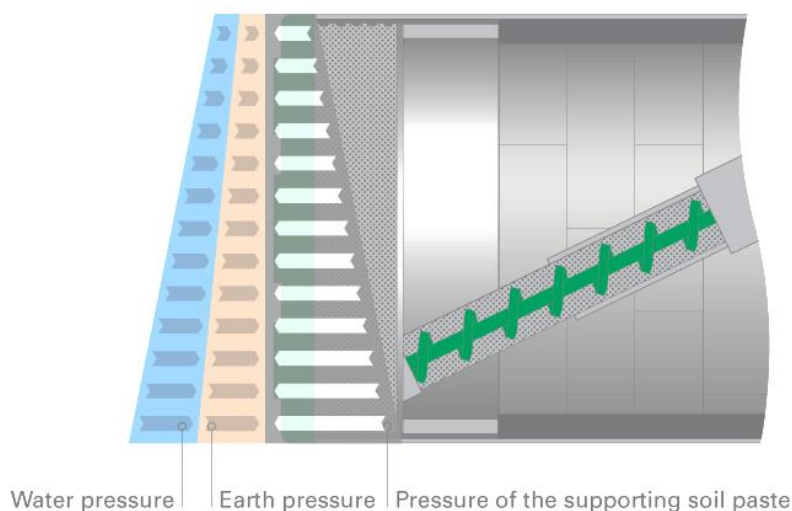
Οι υπάρχουσες φυσαλίδες στο στερεό σκελετό του εδάφους μειώνουν την πυκνότητα του πολτοποιημένου υλικού και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρότερη τριβή μεταξύ των κόκκων. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης αφρού είναι η παθητική ώθηση η οποία τείνει να αποσταθεροποιεί την πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου 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.

2.6.9 Έλεγχος πίεσης του μετώπου (Control of face pressure)

Η πρόβλεψη, εφαρμογή και διατήρηση της απαραίτητης πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο είναι μείζονος σημασία για τον περιορισμό των καθιζήσεων που ενδέχεται να ζημιώσουν την στατική ακεραιότητα των κτιρίων πλησίον της εκσκαφής, αλλά και τη λειτουργικότητα τους.

2.6.9.1 Έλεγχος πίεσης του μετώπου σε μηχανήματα EPB

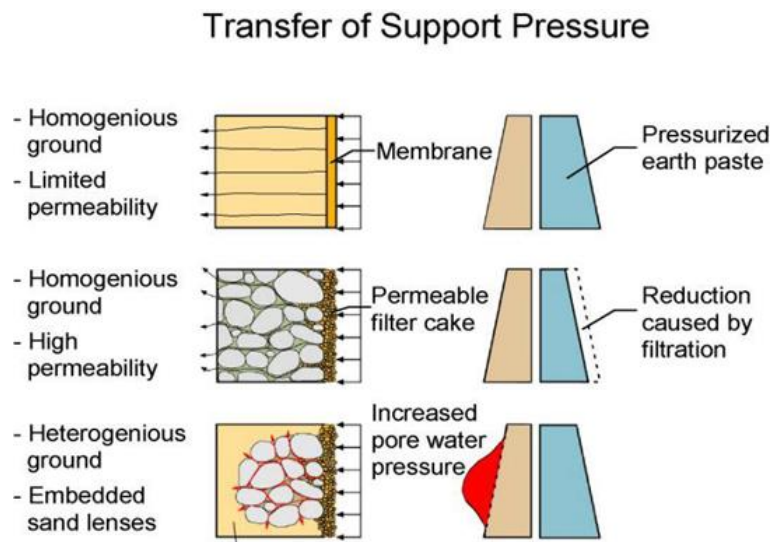
Στα μηχανήματα EPB, η εδαφική πάστα μέσα στον θάλαμο, που μεταφέρει στο μέτωπο την δύναμη ώθησης του μηχανήματος, πρέπει να αντισταθμίσει τις ωθήσεις αποσταθεροποίησης του εδάφους και του νερού των πόρων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από ελάχιστη πίεση μετώπου υπάρχει και μέγιστη ανεκτή, όπου υπέρβαση της θα προκαλούσε ανύψωση της επιφάνειας σε πολύ επιφανειακές σήραγγες.



Εικόνα 2.17: Πίεση υποστήριξης μετώπου από μηχανήματα EPB (Herrenknecht n.d.).

2.6.9.2 Έλεγχος πίεσης του μετώπου σε μηχανήματα Slurry

Ο έλεγχος της πίεσης υποστήριξης στα μηχανήματα Slurry γίνεται μέσω του πολφού. Η πίεση του πολφού έχει ως συνέπεια την διείσδυση του μέσα στους πόρους του εδάφους. Τα μήκος διείσδυσης του πολφού εξαρτάται από την ασκούμενη πίεση, το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, τις υδραυλικές ιδιότητες του πολφού και τις υδρογεωλογικές συνθήκες, κατά κύριο λόγο το μέγεθος της συγκέντρωσης αλάτων στο υπόγειο νερό. Το μήκος διείσδυσης είναι μία υπερβολικά σημαντική παράμετρος. Ειδικότερα, ένα πολύ μεγάλο μήκος διείσδυσης δεν είναι ευεργετικό στην σταθερότητα, ενώ, από την άλλη, ένα πολύ μικρό μήκος διείσδυσης θα έκανε την υποστήριξη του μετώπου λιγότερο αποδοτική. Επιπροσθέτως, υψηλές ποσότητες νερού που διεισδύουν στο έδαφος πρέπει να αποφεύγεται, λόγω του γεγονότος ότι θα μπορούσε να προκαλέσει διόγκωση κάποιων αργιλικών γεωυλικών και να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας και αύξηση της διάμεσης πίεσης. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η μεταφορά της πίεσης ανάλογα με τις διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες.



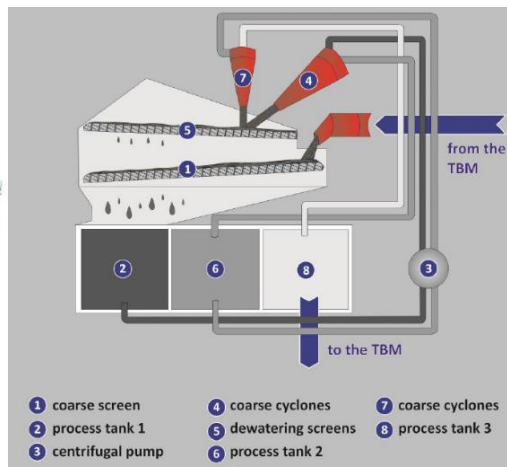
Εικόνα 2.18: Κατανομή της πίεσης με χρήση πολφού για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (The Masterbuilder 2014).

2.6.10 Σχέδιο Διαχωρισμού (Separation Plant)

Ο πολφός μπεντονίτη πάντα πρέπει να διαχωρίζεται από το εκσκαπτόμενο υλικό στο τέλος των σωληνώσεων, ώστε να μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά στο σύστημα. Για τον σκοπό αυτόν χρειάζεται ένας αριθμός διαφορετικών μηχανημάτων που συγκροτούν τις εγκαταστάσεις διαχωρισμού. Οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα όσον αφορά τις αναμενόμενες διαστάσεις κόκκων

στερεών. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές διαχωρισμού που εφαρμόζονται στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού, η ιζηματογένεση και το φιλτράρισμα:

- Η ιζηματογένεση αναφέρεται στην καθίζηση του στερεού μεταφερόμενου υλικού μέσα στο ρευστό μεταφοράς. Οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία, είναι το όριο ροής και το ιξώδες του μέσου μεταφοράς από τη μία μεριά και το μέγεθος και η πυκνότητα των εδαφικών κόκκων από την άλλη. Μεταβολές σε αυτούς τους παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα καθίζησης.
- Φίλτρα, με καθορισμένο μέγεθος κόκκων που επιτρέπεται να τα διαπεράσουν, χρησιμοποιούνται για την τεχνική του φιλτραρίσματος. Το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων καθορίζουν τον διαχωρισμό.



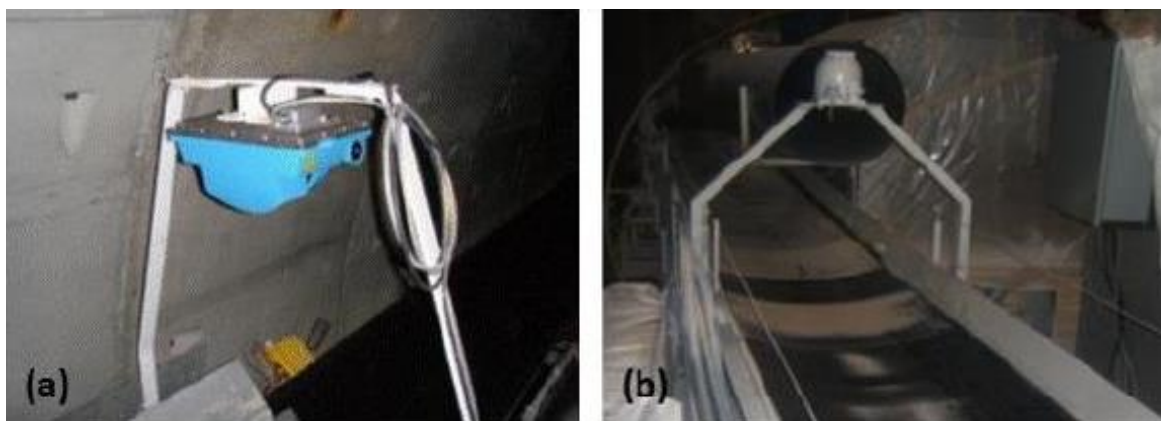
Εικόνα 2.19: Αριστερά εγκαταστάσεις διαχωρισμού του πολφού από το μεταφερόμενο εδαφικό υλικό (Derrick Corporation n.d.), Δεξιά πλάνο διαχωρισμού (Herrenknecht n.d.).

2.6.11 Σύστημα Μέτρησης Μάζας και Όγκου των Εκσκαφών (Weighting and volume measuring of the excavated products)

Οι υπερεκσκαφές κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη σωστή λειτουργία του EPB και κατ' επέκταση την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου. Συγκεκριμένα, οι υπερεκσκαφές επηρεάζουν σημαντικά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και επομένως είναι σημαντικό να μετριοούνται κατά τη διάρκεια προχώρησης του EPB, ώστε σε περίπτωση σημαντικών αποκλίσεων να λαμβάνεται ειδική μέριμνα. Ουσιαστικά μετρείται η μάζα και ο όγκος του υλικού που εκσκάπτεται και συγκρίνεται με τα θεωρητικά αντίστοιχα μεγέθη που έχουν προκύψει από τη μελέτη. Εφόσον οι αποκλίσεις είναι μικρές και υπάρχει πρακτικά συμφωνία με τη μελέτη,

η διάνοιξη γίνεται με επιτυχή τρόπο. Οι μετρήσεις στο σώμα του EPB γίνονται κυρίως μέσω δυο συστημάτων, με Laser Volume Scanner και Mechanical Belt Scales.

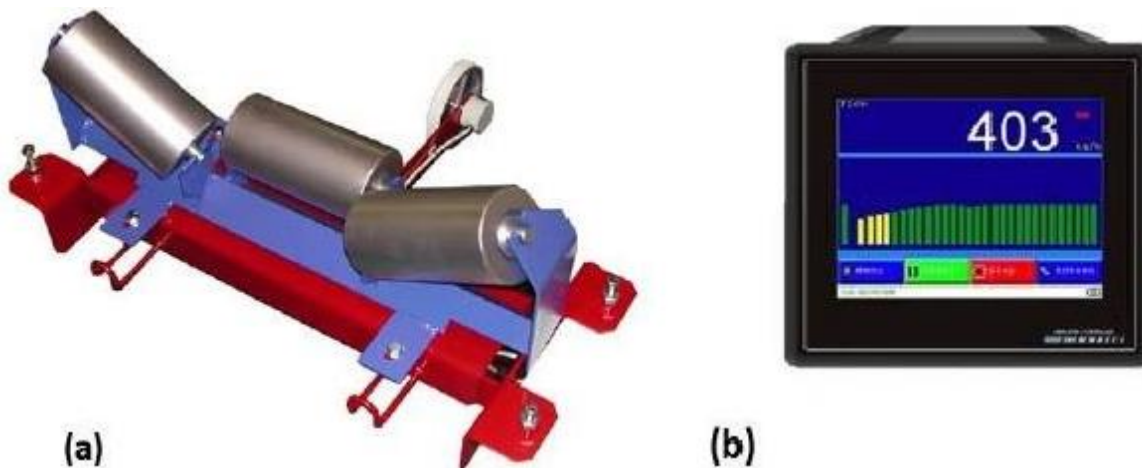
Ο σαρωτής όγκου με λέιζερ σκανάρει το υλικό που διέρχεται από τον ιμάντα μεταφοράς και εκτιμά με πολύ καλή ακρίβεια τον όγκο του υλικού. Έχει το πλεονέκτημα ότι δεν έρχεται ουσιαστικά το σύστημα σε επαφή με το υλικό, επομένως αφενός δεν επηρεάζει τη σύσταση του και αφετέρου δεν υπάρχει φθορά του σαρωτή και κατ' επέκταση ανάγκη για αντικατάσταση τμημάτων του. Παράλληλα, είναι εύκολη η τοποθέτηση του σε ήδη κατασκευασμένα EPB. Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η μέτρηση της μάζας, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που υπάρχει σχετικά με την πυκνότητα του υλικού που μεταφέρει ο ιμάντας. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα είναι πολύ πιθανό να μεταβάλλεται κατά μήκος του ιμάντα, ενώ ο υπολογισμός της με ακρίβεια μετά την εκσκαφή του υλικού και την ανάμιξη του με τα διάφορα χημικά πρόσθετα είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία.



Εικόνα 2.20: (a),(b) Σαρωτές όγκου με λέιζερ (Kavvadas et al. 2013).

Οι μεταφορικές ταινίες έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα EPB. Σε κάποιο σημείο έχουν ορισμένους κυλίνδρους, οι οποίοι ζυγίζουν το υλικό που διέρχεται πάνω από αυτούς. Ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται μπορούν να τοποθετηθούν κύλινδροι σε περισσότερα από ένα σημεία της μεταφορικής ταινίας. Με βάση τις μετρήσεις που γίνονται καταρτίζονται γραφήματα που δείχνουν ανά πάσα στιγμή τη μάζα του υλικού που μεταφέρεται, δίνοντας πλήρη εικόνα για την κατάσταση που επικρατεί στο θέμα των υπερεκσκαφών. Το σύστημα αυτό έχει πολύ καλή ακρίβεια, της τάξης του 0.5% μέγιστη απόκλιση, ενώ παράλληλα προσφέρει πολλές πληροφορίες όπως η διακύμανση της ποσότητας του υλικού που μεταφέρεται κάθε στιγμή, τα όρια που επιτρέπεται να κυμανθεί αυτή η διακύμανση, ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας, γεγονός που δίνει μια γενικότερη εποπτεία της διαδικασίας διάνοιξης της σήραγγας. Η σημασία μέτρησης

των υπερεκσκαφών με ικανοποιητική ακρίβεια παραμένει μεγάλη, επομένως είναι αντικείμενο συστηματικής έρευνας, ώστε να βελτιωθούν τα υπάρχοντα συστήματα ή να προκύψουν νέα, πιο αποτελεσματικά.



Εικόνα 2.21: (α) Κύλινδροι στις μεταφορικές ταινίες που ζυγίζουν το διερχόμενο υλικό, (β) Οθόνες όπου γίνεται η απεικόνιση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τους κυλίνδρους (Κανναδάς et al. 2013).

Κεφάλαιο 3

Εκτίμηση εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγων

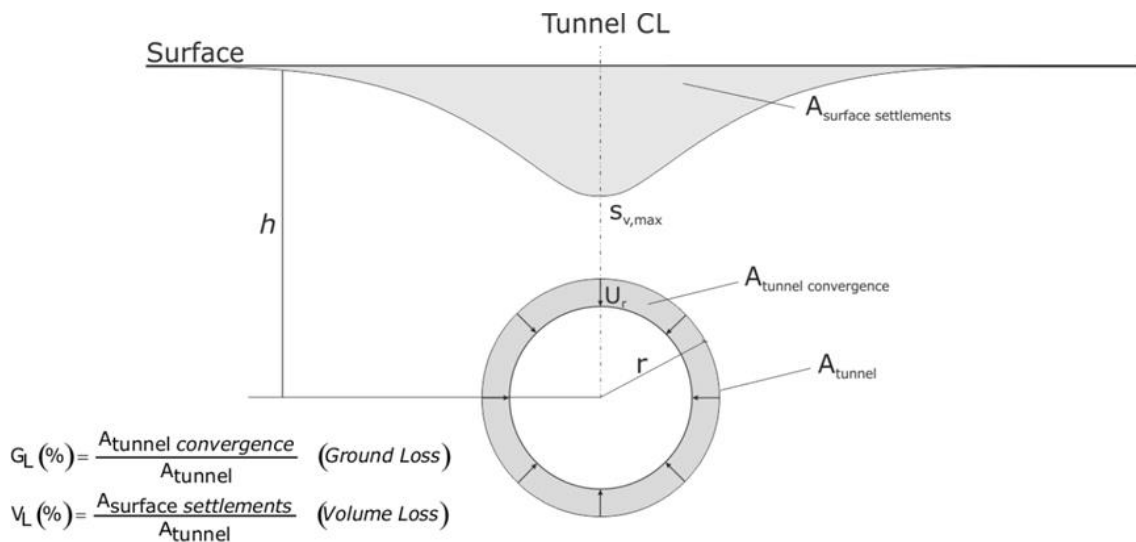
3.1 Εισαγωγή

Η διάνοιξη σήραγγων σε μαλακά εδάφη οδηγεί αναπόφευκτα σε εδαφικές μετακινήσεις που μπορεί να επηρεάσουν υφιστάμενες επιφανειακές ή υπόγειες κατασκευές σε ένα αστικό περιβάλλον. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι για την πρόβλεψη εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας βασίζονται σε αναλυτικές, ημιεμπειρικές και αριθμητικές μεθόδους. Οι πρώτες δύο βασίζονται σε διάφορες υποθέσεις και περιορισμούς που αφορούν στην μέθοδο διάνοιξης, βάθος διάνοιξης, διάμετρο σήραγγας κ.τ.λ., που πρέπει να παίρνονται υπ' όψη όταν εφαρμόζονται. Από την άλλη, η τελευταία εξαρτάται σημαντικά από τις παραδοχές που γίνονται κατά την προσομοίωση όπως το καταστατικό μοντέλο του εδάφους, η γεωμετρία, οι λεπτομέρειες που αφορούν το μηχάνημα κ.τ.λ..

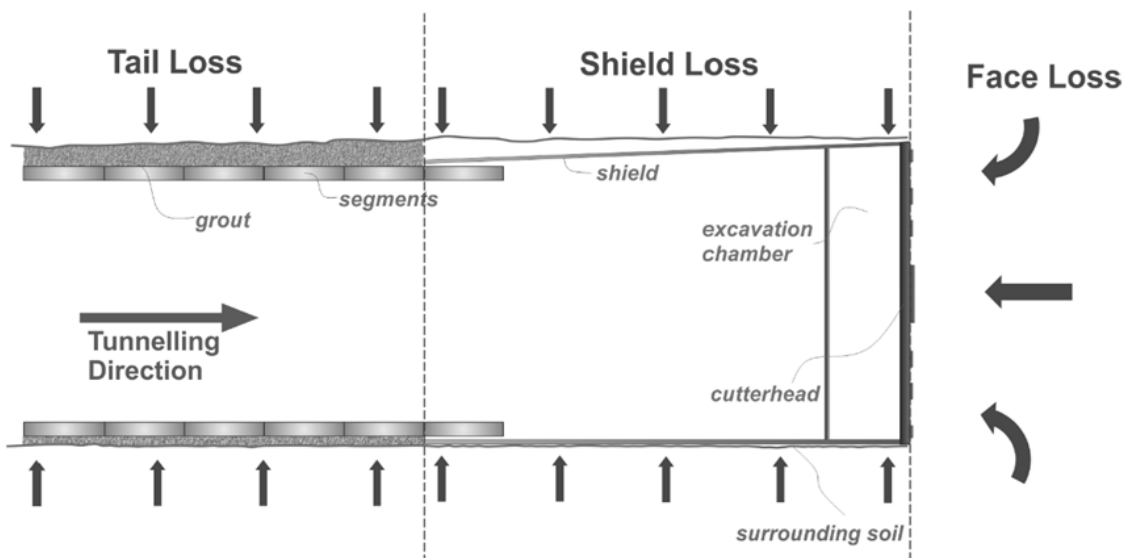
3.2 Ορισμός απώλειας εδάφους και απώλειας όγκου

Οι αναλυτικές και οι εμπειρικές μέθοδοι συχνά αναφέρονται στους όρους απώλεια εδάφους G_L (ground loss) και απώλεια όγκου V_L (volume loss) (βλ. Εικόνα 3.1). Ο Sagaseta (1987) όρισε την απώλεια εδάφους G_L ως ένα μέγεθος που ποσοτικοποιεί το μέγεθος της υπερεκσκαφής. Μια συνήθης πρακτική στην διεθνή βιβλιογραφία είναι η ταύτιση αυτών των δύο παραμέτρων (Sagaseta 1987; Loganathan & Poulos 1998).

Η ταύτιση αυτή συνοδεύει συνήθως συγκεκριμένες παραδοχές όπως θεώρηση αστράγγιστων συνθηκών ώστε να ισχύουν συνθήκες ισόογκης παραμόρφωσης. Η διαστολικότητα ενός εδάφους καθώς και χρονικά εξαρτώμενα φαινόμενα όπως ο ερπυσμός απομακρύνουν την συμπεριφορά από μία τέτοια παραδοχή.



Εικόνα 3.1: Ορισμός των μεγεθών απώλεια όγκου V_L και απώλεια εδάφους G_L .



Εικόνα 3.2: Απώλεια όγκου λόγω διάνοιξης σήραγγας με χρήση TBM.

3.3 Αναλυτικές μέθοδοι

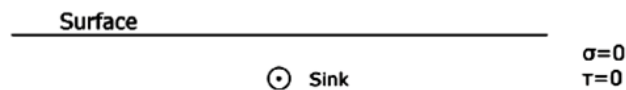
3.3.1 Sagaseta (1987)

Ο Sagaseta (1987) ανέλυσε το πεδίο των μετατοπίσεων που προκαλούνται από την διάνοιξη κυκλικής σήραγγας εντός ισότροπου και ομοιογενούς μέσου με θεώρηση ισοόγκης παραμόρφωσης και ελαστικής συμπεριφοράς. Βασική παραδοχή είναι ότι η διάνοιξη πραγματοποιείται σε μικρό βάθος και το περιβάλλον γεωολικό πληρώνει πλήρως το κενό

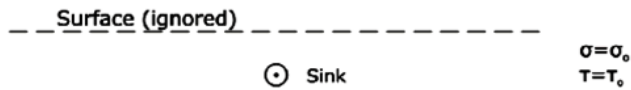
που δημιουργεί η εκσκαφή. Το συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζει ομοιότητες με αντίστοιχο υδραυλικό πρόβλημα. Ειδικότερα, η μέθοδος που χρησιμοποιεί προσπαθεί να προβλέψει τις εδαφικές μετακινήσεις συνδυάζοντας την υδραυλική προσέγγιση με ελαστικές επιλύσεις. Η επίλυση ακολουθεί τα παρακάτω διαδοχικά βήματα (βλ. Εικόνα 3.3):

- Η επίδραση της επιφάνειας αμελείται και το πρόβλημα επιλύεται σε ελαστικό ημίχωρο.
- Οι τάσεις στην επιφάνεια που προκύπτουν από αυτές τις παραμορφώσεις, παραβιάζουν την συνθήκη μηδενικών τάσεων. Αυτές οι τάσεις μπορούν να ακυρωθούν μερικώς με την θεώρηση αφαίρεσης υλικού από κατοπτρική θέση ως προς την επιφάνεια, είτε αρνητική που δημιουργεί αντίθετες ορθές και ίσες διατμητικές τάσεις, είτε θετική που δημιουργεί ίσες ορθές και αντίθετες διατμητικές.
- Οι απομένουσες διατμητικές ή ορθές τάσεις στην επιφάνεια έπειτα υπολογίζονται και αφαιρούνται.

Actual problem



Step 1- infinite medium

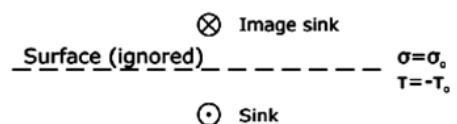


Step 2- image sink/source

(a) Negative image

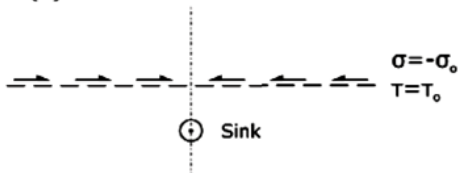


(b) Positive image

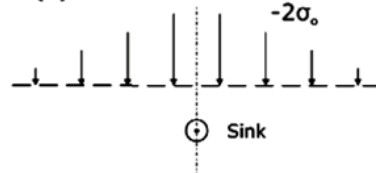


Step 3- Surface stresses

(a)



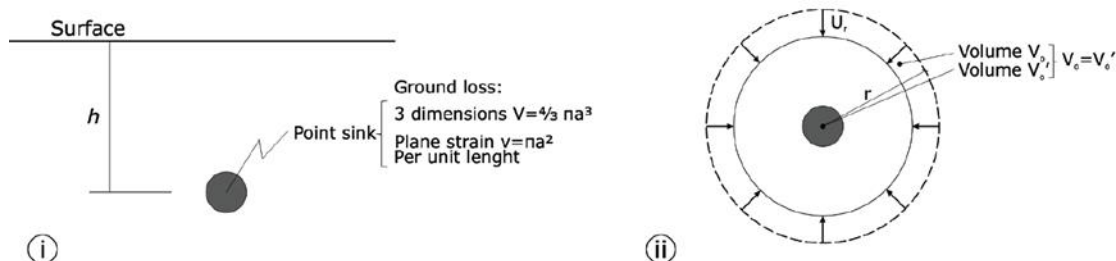
(b)



Εικόνα 3.3: Βήματα της ανάλυσης (Sagaseta 1987).

Αγνοώντας την επιφάνεια, το πρόβλημα γίνεται συμμετρικό και οι μετακινήσεις είναι μόνο ακτινικές. Σύμφωνα με την συνθήκη της μηδενικής μεταβολής όγκου στις αστράγγιστες συνθήκες, το μέγεθος της απώλειας εδάφους μπορεί να προσομοιαστεί από την

ακτίνα μιας ισοδύναμης σφαίρας ή την ακτίνα ενός κυλίνδρου. Η χρήση της μεθόδου αυτής εμπεριέχει τον προσδιορισμό της τιμής της απώλειας εδάφους. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται είτε με επί τόπου μετρήσεις στο πεδίο και εμπειρικές συσχετίσεις είτε με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3.4: (i) Ορισμός του προβλήματος και (ii) Άπειρο μέσο (Sagaseta 1987).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γενικές σχέσεις για τις μετακινήσεις στην επιφάνεια.

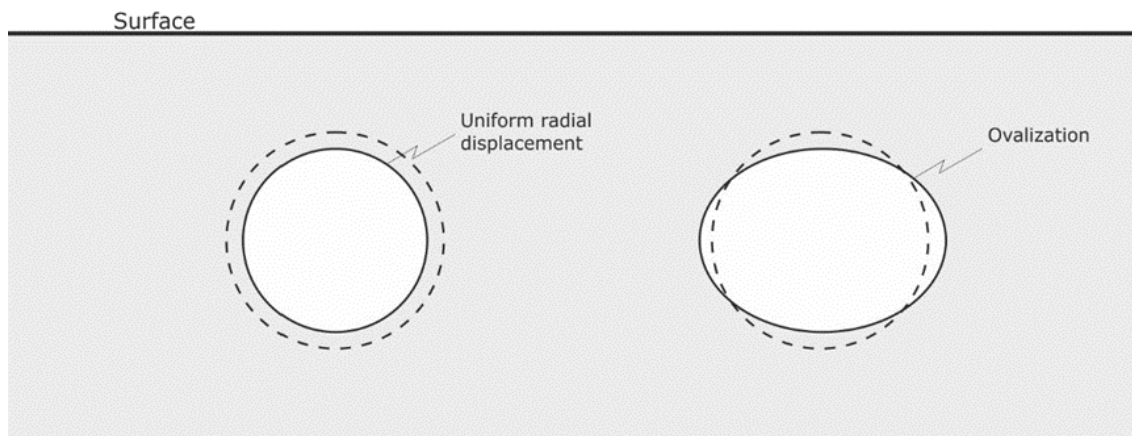
$$S_{x0} = -\frac{v}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{x}{x^2 + h^2} \cdot \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}\right) \quad (3.1)$$

$$S_{y0} = \frac{v}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}} \quad (3.2)$$

$$S_{x0} = \frac{v}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{h}{x^2 + h^2} \cdot \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}\right) \quad (3.3)$$

3.3.2 Verruijt A. & Booker J. R. (1996)

Οι Verruijt & Booker (1996) παρουσίασαν μία γενίκευση της μεθοδολογίας του Sagaseta (1987) εισάγοντας δύο βασικές διαφοροποιήσεις: την δυνατότητα επίλυσης και για μη ισόγκες συνθήκες παραμόρφωσης με του λόγου Poisson ν και την επιρροή από τυχόν μη ομοιόμορφη κυκλική παραμόρφωση της σήραγγας (π.χ. ovalization) (βλ. Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Απώλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση σε διάνοιξη σήραγγας (Verruijt & Booker 1996).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις των μετακινήσεων.

$$S_x = -\varepsilon \cdot R^2 \left[\frac{x}{r_1^2} + \frac{x}{r_2^2} \right] + \delta \cdot R^2 \left[\frac{z_1 \cdot (x^2 - k \cdot z_1^2)}{r_1^4} + \frac{x \cdot (x^2 - k z_2^2)}{r_2^4} \right] -$$

$$- \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot R^2 \cdot x}{m} \left[\frac{1}{r_2^2} + \frac{2 \cdot m \cdot z \cdot z_2}{r_2^4} \right] - \frac{4 \cdot \delta \cdot R^2 \cdot x \cdot h}{m + 1} \left[\frac{z_2}{r_2^4} + \frac{m \cdot z (x^2 - 3 \cdot z_2^2)}{r_2^6} \right] \quad (3.4)$$

$$S_z = -\varepsilon \cdot R^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \delta \cdot R^2 \left[\frac{z_1 \cdot (k \cdot x^2 - z_2^2)}{r_1^4} + \frac{z_2 \cdot (k \cdot x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right] +$$

$$+ \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot R^2}{m} \left[\frac{(m + 1) \cdot z_2}{r_2^2} + \frac{m \cdot z \cdot (x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right] -$$

$$- 2 \cdot \delta \cdot R^2 \cdot h \left[\frac{x^2 - z_2^2}{r_2^4} + \frac{m}{m + 1} \frac{2 \cdot z \cdot z_2 (3x^2 - z_2^2)}{r_2^6} \right] \quad (3.5)$$

όπου,

ε : η ομοιόμορφη ακτινική απώλεια εδάφους

δ : η μακροχρόνια εδαφική παραμόρφωση λόγω του σχήματος που παίρνει η υποστήριξη

R : η ακτίνα της σήραγγας

h : το βάθος της σήραγγας

z_1 : το βάθος, $z-H$

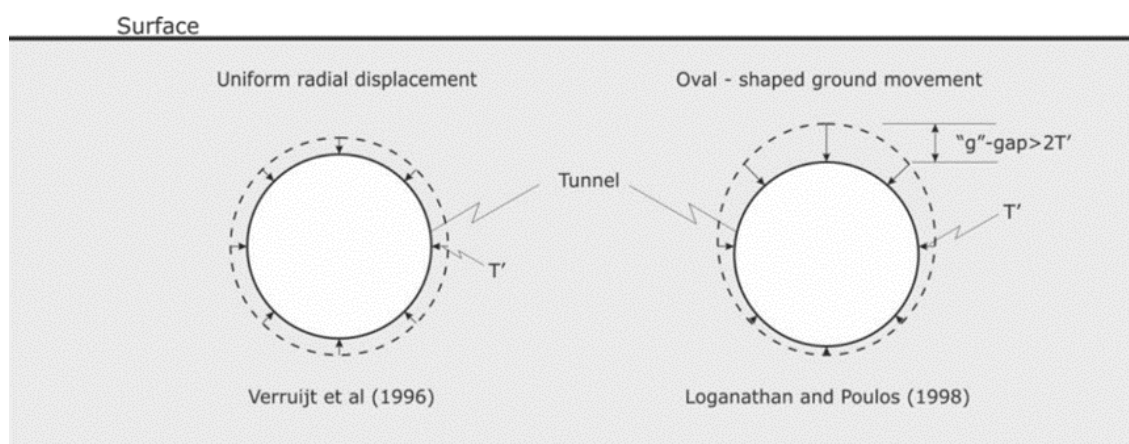
z_2 : το βάθος, $z+H$

m : ο λόγος, $1/(1-2\nu)$

k: ο λόγος, $\nu/(1-\nu)$

3.3.3 Loganathan N. & Poulos H. G. (1998)

Οι Loganathan & Poulos (1998) παρήγαγαν μια αναλυτική πρόβλεψη για τις εδαφικές μετακινήσεις λόγω διάνοιξης σήραγγας επαναπροσδιορίζοντας τον κλασικό ορισμό της απώλειας εδάφους με μία «ισοδύναμη παράμετρο απώλειας εδάφους ϵ_0 » σε σχέση με το κενό «g». Αυτή η παράμετρος που πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Lee et al. (1992) χρησιμοποιήθηκε, καθώς η απώλεια εδάφους αποκτιόταν από εμπειρικές παρατηρήσεις και μεθόδους που δεν έπαιρναν υπ' όψη τους πάντα την μέθοδο διάνοιξης. Η βασική διαφορά με τους Verruijt & Booker (1996) φαίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Κυκλικό και οβάλ σχήμα εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από την διατομή της σήραγγας. (Loganathan & Poulos 1998)

Σύμφωνα με τους Loganathan & Poulos (1998) η απώλεια εδάφους πραγματοποιείται σε δύο στάδια: (α) την απώλεια εδαφικού υλικού καθώς περνάει το TBM και (β) τη χρονικά εξαρτώμενη απώλεια εδαφικού υλικού λόγω στερεοποίησης ή ερπυσμού του εδάφους. Η εκτίμηση της παραμέτρου g δεν παίρνει υπ' όψη της τα χρονικά εξαρτώμενα φαινόμενα. Συνεπώς, η ισοδύναμη παράμετρος απώλειας εδάφους ϵ_0 , εφαρμόζεται μόνο σε αστράγγιστες συνθήκες.

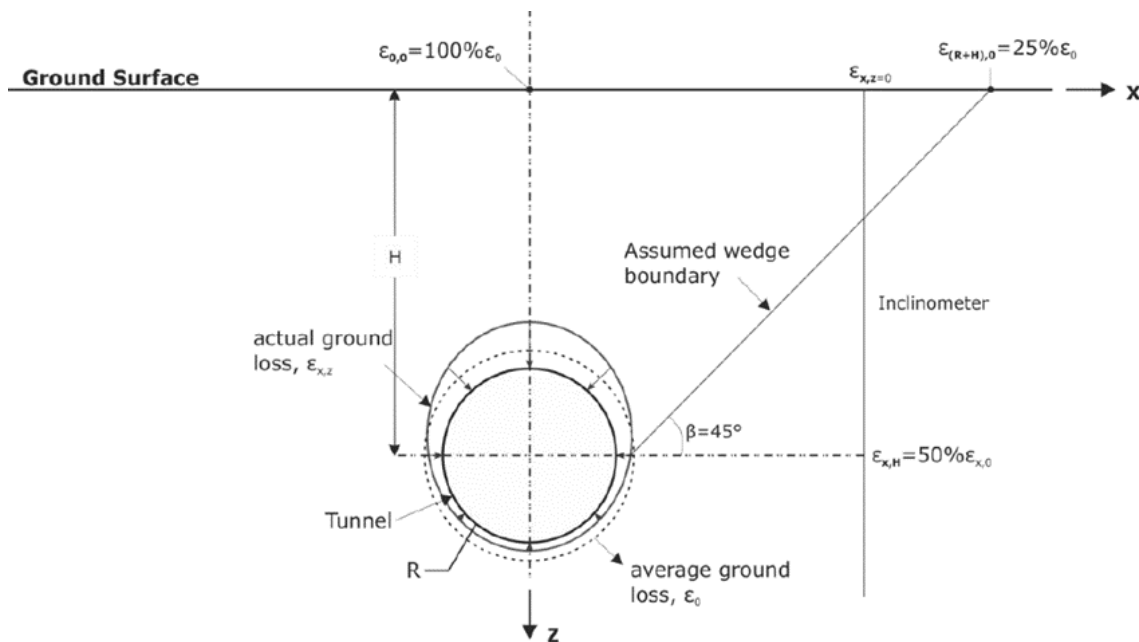
$$g = G_p + U_{3D}^* + \omega \quad (3.6)$$

$$\epsilon_0 = \frac{4 \cdot g \cdot R + g^2}{4 \cdot R} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

όπου,

G_p : το φυσικό κενό (συνήθως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης εξωτερικής διαμέτρου του μηχανήματος και της εξωτερικής διαμέτρου της υποστήριξης)

Εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 3.7 οι Loganathan & Poulos (1998) δημιούργησαν την συνιστώσα της ισοδύναμης απώλειας εδάφους για μη-ομοιόμορφη κατακόρυφη μετακίνηση.



Εικόνα 3.7: Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan & Poulos 1998).

$$\varepsilon_{x,z} = \varepsilon_0 \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{1.38 \cdot x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69 \cdot z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (3.8)$$

$$S_x = -R^2 \cdot x \left\{ \frac{1}{x^2 + (H-z)^2} + \frac{3-4 \cdot \nu}{x^2 + (z+H)^2} - \frac{4 \cdot z \cdot (z+H)}{[x^2 + (z+H)^2]^2} \right\} \cdot \frac{4 \cdot g \cdot R + g^2}{4 \cdot R^2} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{1.38 \cdot x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69 \cdot z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (3.9)$$

$$S_z = -R^2 \cdot \left\{ \frac{z-H}{x^2 + (z-H)^2} + \frac{(3-4 \cdot \nu) \cdot (z+H)}{x^2 + (z+H)^2} - \frac{2 \cdot z \cdot [x^2 - (z+H)^2]}{[x^2 + (z+H)^2]^2} \right\} \cdot \frac{4 \cdot g \cdot R + g^2}{4 \cdot R^2} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{1.38 \cdot x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69 \cdot z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (3.10)$$

Οι Loganathan & Poulos (1998) ισχυρίζονται ότι η μέθοδος των Verruijt & Booker (1996) εκτιμάει σε μικρότερο βαθμό τις μέγιστες καθιζήσεις και δίνει πολύ πιο ευρύ προφίλ καθιζήσεων όταν συγκρίνεται με εμπειρικές μεθόδους και δεδομένα πεδίου. Λόγω του ότι το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον καθορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων με εμπειρικές μεθόδους, η επόμενη σχέση υπολογίζει την κανονικοποιημένη i/R σε σχέση με την ανηγμένη παράμετρο H/D για την συγκεκριμένη αναλυτική λύση.

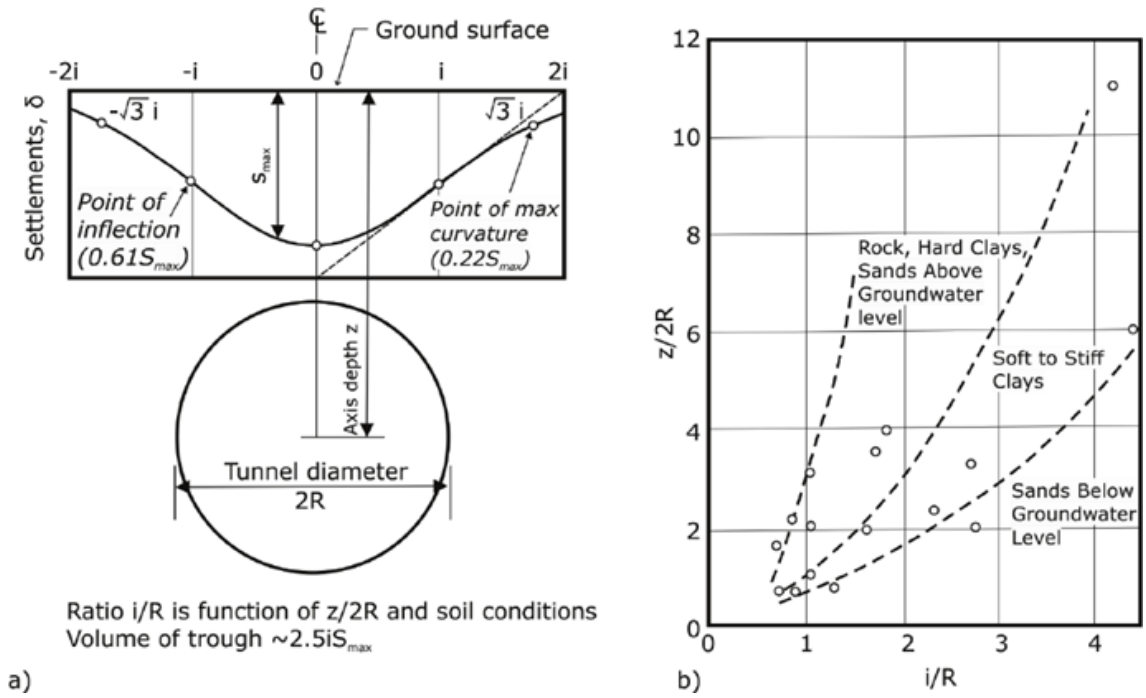
$$\frac{i}{R} = 1.15 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0.9} \quad (3.11)$$

3.4 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι σκοπό έχουν να προβλέπουν και να δίνουν τιμές στα μεγέθη όχι μόνο των επιφανειακών μετακινήσεων, αλλά και των κάτω από την επιφάνεια καθιζήσεων. Ειδικότερα, ανταποκρίνονται κυρίως στις μετακινήσεις κάθετα στον άξονα της σήραγγας. Πρωτοπόροι στο πεδίο των εμπειρικών καθιζήσεων ήταν οι Peck και Schmidt (1969). Οι περισσότερες εμπειρικές μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα που πλησιάζουν την πραγματικότητα σε ικανοποιητικό βαθμό, κάτω όμως από συγκεκριμένες καταστάσεις και όταν πληρούνται οι απαραίτητες ακόλουθες προϋποθέσεις: Οι εμπειρικές μέθοδοι πλέον χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια πρώτη χονδροειδή εικόνα του προβλήματος, το οποίο αντιμετωπίζεται πλέον με αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια.

3.4.1 Peck & Schmidt (1969)

Οι Peck & Schmidt (1969), βασισμένοι σε παρατηρήσεις πεδίου υπέθεσαν ότι το τελικό προφίλ καθιζήσεων, που προκαλείται από την διάνοιξη σήραγγας σε μαλακό έδαφος, μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μία εξίσωση κανονικής κατανομής (καμπύλη Gauss). Αν και η παραπάνω προσέγγιση δεν έχει καμία θεωρητική αιτιολόγηση, ισχυρίζονται ότι μπορεί να παρέχει τουλάχιστον μια χονδροειδή εκτίμηση του αναμενόμενου προφίλ καθιζήσεων πάνω από μονή σήραγγα. Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φαίνονται στην Εικόνα 3.8, όπου R η ακτίνα, S_{\max} η μέγιστη καθίζηση και i το σημείο καμπής της καμπύλης.



Εικόνα 3.8: (α) Χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα (Peck 1969; Schmidt 1969) και (β) η σχέση μεταξύ i/R και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2R$ για διάφορα εδάφη (Peck 1969).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές σχέσεις για τον υπολογισμό των καθιζήσεων και της απώλειας όγκου.

$$S_z = S_{v,max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) \quad (3.12)$$

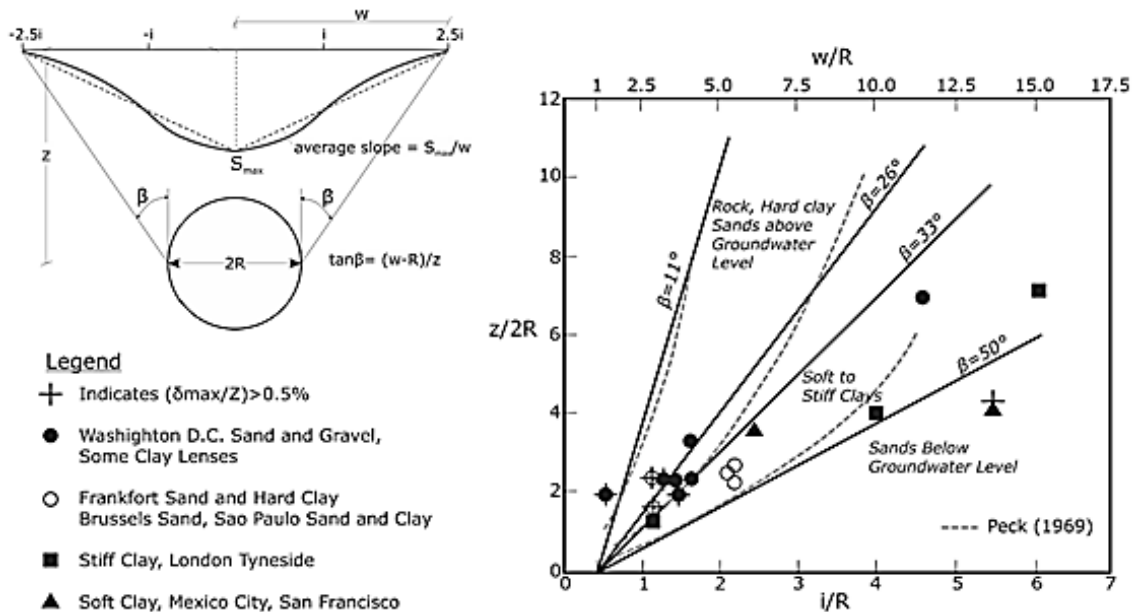
$$V_L(\%) = \frac{S_{v,max} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot i}}{\pi \cdot R^2} \quad (3.13)$$

$$\frac{2 \cdot i}{D} = \left(\frac{Z}{D}\right)^{0.8-1.0} \quad (3.14)$$

Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος πρέπει να γίνει υπόθεση της μέγιστης καθίζησης και της απόστασης του σημείου καμπής της καμπύλης i . Μια συνηθισμένη πρακτική είναι να εκτιμάται πρώτα η απώλεια όγκου βασισμένη στην εμπειρία και σε εμπειρικές συσχετίσεις και έπειτα να γίνεται εκτίμηση του i σύμφωνα με την Εικόνα 3.8. Έχοντας αυτά, γίνεται υπολογισμός του S_{max} και των καθιζήσεων για οποιαδήποτε απόσταση στην επιφάνεια.

3.4.2 Cording & Hansmire (1972–75)

Οι Hansmire & Cording (1972) και Cording & Hansmire (1975) επικεντρώθηκαν στην εκτίμηση της απώλειας εδάφους που προκαλείται από την διάνοιξη σήραγγας και βασισμένοι σε παρατηρήσεις πεδίου και πειράματα διατύπωσαν ότι η βασική διαφοροποίηση μεταξύ της απώλειας εδάφους στην περιφέρεια της σήραγγας και της απώλειας όγκου από τις επιφανειακές καθιζήσεις, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην θλίψη που υφίσταται το έδαφος στην αριστερή και δεξιά παρειά της σήραγγας. Βασισμένοι στην υπόθεση του Peck (1969) για προφίλ καθιζήσεων με μορφή καμπύλης Gauss, τροποποίησαν την σχέση για το σημείο καμπής, εισάγοντας την γωνία β όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Στην εικόνα αυτή γίνεται συσχέτιση της γωνίας β με το τύπο του εδάφους.



Εικόνα 3.9: Σχέση της γωνίας β με την απόσταση i του σημείου καμπής του προφίλ των καθιζήσεων από το σημείο μέγιστης καθιζήσης (Hansmire & Cording 1972; Cording & Hansmire 1975).

Οι Cording & Hansmire, για απλοποίηση, θεώρησαν ότι η απώλεια όγκου μπορεί να υπολογιστεί από ένα ισοδύναμο τρίγωνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9, με βάση τη παρακάτω σχέση.

$$V_L = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot w \cdot S_{max} = w \cdot S_{max} \quad (3.15)$$

Οι Hansmire & Cording (1972) και Cording & Hansmire (1975) υποστήριξαν ότι είναι πιθανό πραγματικές μετρήσεις καθιζήσεων να μην μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά από μία καμπύλη Gauss, κυρίως λόγω του ότι οι μετρούμενες καθιζήσεις μακριά

από τον άξονα εμφανίζονται αναλογικά μικρότερες από αυτές που προβλέπει η καμπύλη με βάση την τιμή της καθίζησης στο κέντρο. Το απέδωσαν στην τοπική δημιουργία ζωνών αυξημένης διατμητικής παραμόρφωσης πάνω από την στέψη, που έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της καθίζησης στην περιοχή περί τον άξονα συμμετρίας του προβλήματος.

3.4.3 Atkinson et al. (1977)

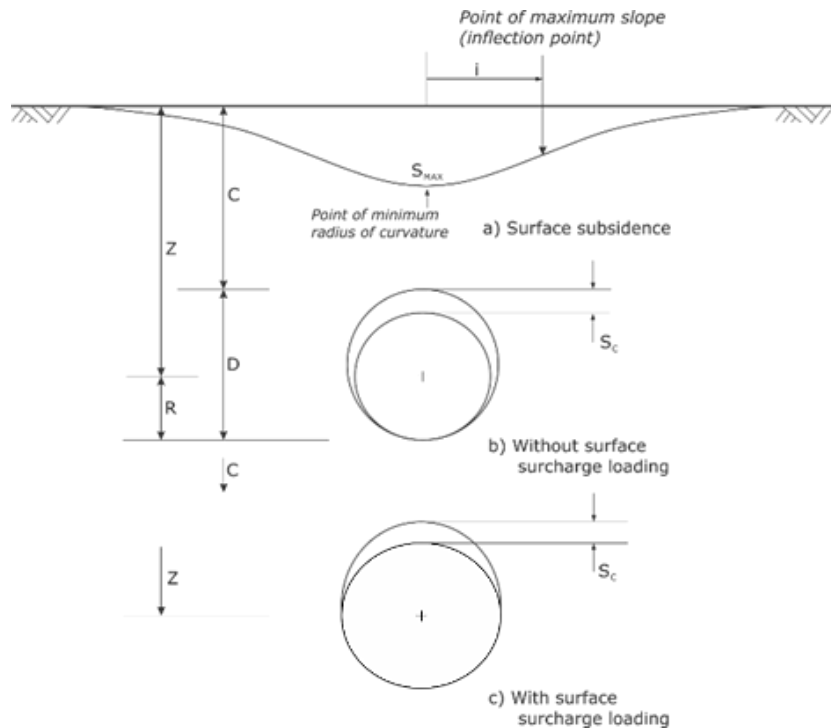
Οι Atkinson et al. (1977) έδειξαν πως η κατανομή των καθιζήσεων εξαρτάται από την φύση του εδάφους και το βάθος της σήραγγας. Υποστήριξαν ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις μπορούν να συσχετιστούν εμπειρικά με την καθίζηση στη στέψη της σήραγγας, παίρνοντας υπ' όψη το βάθος της σήραγγας και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Μελέτησαν την σχέση ανάμεσα στο σημείο καμπής i και στο βάθος της σήραγγας, διεξάγοντας ελέγχους σε μοντέλα με και χωρίς επιφανειακό φορτίο. Ως αποτέλεσμα προέκυψε, ότι για μία μέση άμμο χωρίς επιφανειακό φορτίο, το σημείο καμπής μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 3.16, ενώ για μια πυκνή άμμο και υπερστεροποιημένο καολινίτη με επιφανειακό φορτίο, το σημείο καμπής προκύπτει από την σχέση 3.17.

$$i = 0.25 \cdot (C + D) \quad (3.16)$$

για αμμώδη εδάφη χωρίς επιφανειακό φορτίο.

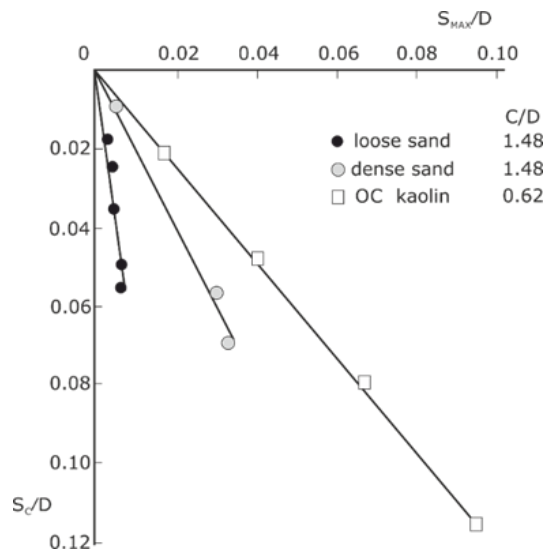
$$i = 0.25 \cdot (1.5 \cdot C + D) \quad (3.17)$$

για πυκνές άμμους και υπερστεροποιημένες αργίλους με επιφανειακό φορτίο



Εικόνα 3.10: Γεωμετρία της σήραγγας και επιφανειακές καθιζήσεις για κυκλική σήραγγα (Atkinson et al. 1977).

Με σκοπό να ερμηνεύσουν τον μηχανισμό για την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων, οι Atkinson et al. (1977) συσχέτισαν την μετακίνηση στην στέψη με την καθίζηση στην επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα ισχυρίστηκαν ότι το μέγεθος του λόγου S_{max}/S_c εξαρτάται από την παρουσία επιφανειακού φορτίου και το ποσό συστολής ή διαστολής που υφίσταται το έδαφος γύρω από την σήραγγα.



Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθιζήσης με την καθίζηση της στέψης για τρία διαφορετικά εδάφη (Atkinson et al. 1977).

Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνεται η σχέση της μέγιστης καθίζησης με την μετακίνηση στη στέψη της σήραγγας, για τρεις διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς.

Τελικώς, καταλήξαν να περιγράψουν την μέγιστη καθίζηση συναρτήσει των μετακινήσεων στη στέψη, παίρνοντας υπ' όψη και το είδος του εδάφους, χρησιμοποιώντας μία παράμετρο a (βλ. σχέση 3.18), η οποία παίρνει τιμή 0.57 (πυκνή άμμο σε μικρές τάσεις), 0.40 (χαλαρή και πυκνή άμμο σε υψηλές τάσεις) και 0.13 (υπερστερεοποιημένο καολινίτη).

$$\frac{S_{\max}}{S_c} = 1.0 - a \cdot \left(\frac{C}{D}\right) \quad (3.18)$$

3.4.4 O'Reilly & New (1982)

Οι O'Reilly & New (1982), βασισμένοι στον Peck (1969), παρουσίασαν σχέσεις για το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων, βασισμένες σε πραγματικές μετρήσεις. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων από το πεδίο και ελέγχοντας το σημείο καμπής i σε σχέση με το βάθος της σήραγγας z_0 παρατήρησαν μια γραμμική συσχέτιση.

$$i = K \cdot z_0 \quad (3.19)$$

Τονίζουν ότι η τιμή του K μπορεί να κυμαίνεται από 0.40 έως 0.70, ενώ συγκεκριμένα, για τις αργίλους το K είναι γύρω στο 0.5. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, μετά από γραμμική παρεμβολή σε δεδομένα από 21 συνεκτικά και 16 μη-συνεκτικά εδάφη κατέληξαν στις σχέσεις 3.20 και 3.21.

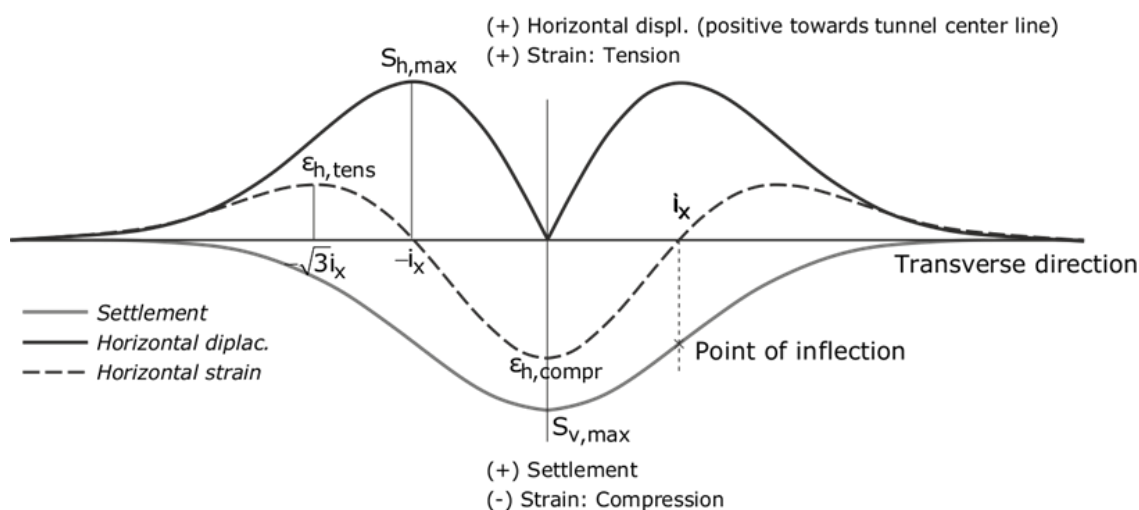
$$i = 0.43 \cdot K + 1.1 \quad (\text{συνεκτικά εδάφη}) \quad (3.20)$$

$$i = 0.43 \cdot K - 0.12 \quad (\text{μη-συνεκτικά εδάφη}) \quad (3.21)$$

Ακόμα πρότειναν μία σχέση για τις οριζόντιες μετακινήσεις. Η σχέση προκύπτει από την σχέση του Peck (1969) και την θεώρηση ότι η συνισταμένη της μετακίνησης περνάει από το κέντρο της σήραγγας. Για x οριζόντιο άξονα και z κατακόρυφο άξονα προκύπτει η σχέση 3.22, για τις οριζόντιες μετακινήσεις.

$$S_h = \frac{x}{z_0} \cdot S_v = \frac{x}{z_0} \cdot S_{v,max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right) \quad (3.22)$$

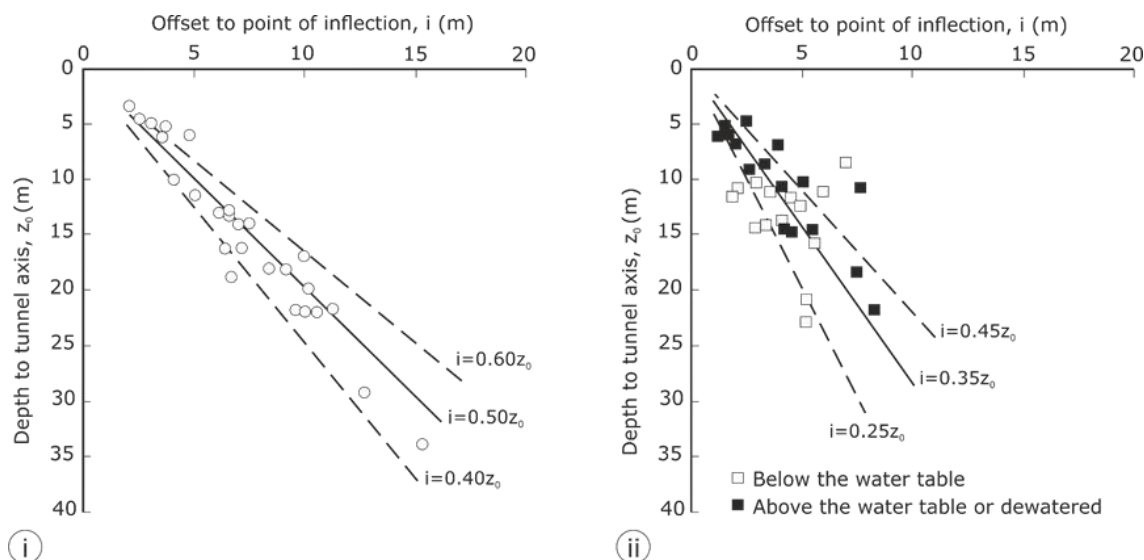
Στην Εικόνα 3.11 φαίνεται η κατανομή των οριζοντίων μετακινήσεων σε σχέση με τις κατακόρυφες, αλλά και οι οριζόντιες παραμορφώσεις που προκύπτουν με παραγωγή ως προς x του S_h . Από τις παραμορφώσεις φαίνεται καθαρά ότι μεταξύ των δύο σημείων καμψής αναπτύσσεται θλιπτική ζώνη και εκτός των σημείων καμψής εφελκυστική ζώνη.



Εικόνα 3.11: Κατανομή των κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων και των οριζοντίων παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Franzius 2003).

3.4.5 Mair et al. (1997)

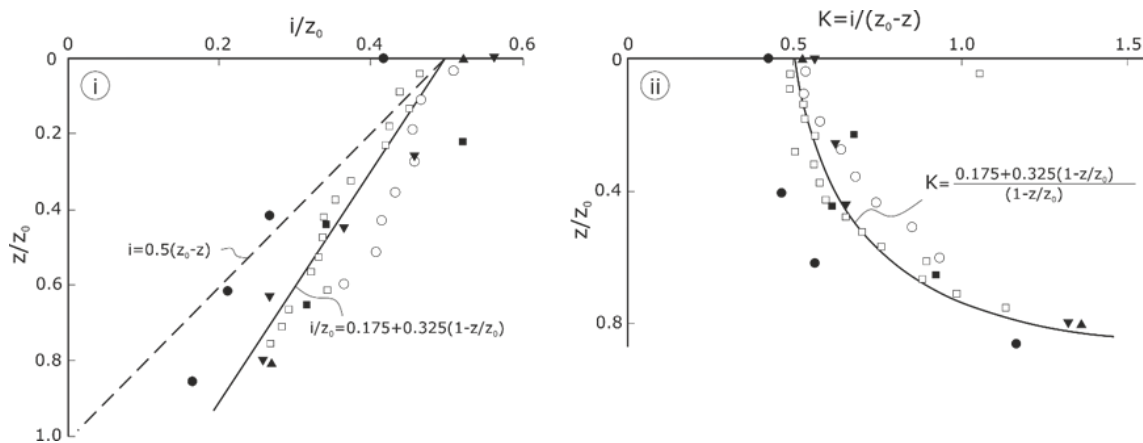
Οι O'Reilly & New (1982) υποστήριξαν ότι το σημείο καμψής i , του προφίλ των επιφανειακών καθιζήσεων μπορεί να περιγραφεί από μία γραμμική σχέση με το βάθος της σήραγγας z_0 , ανεξαρτήτως από την μέθοδο κατασκευής της σήραγγας και την διάμετρο της. Οι Mair & Taylor (1997) βασισμένοι σε αυτήν την υπόθεση, τοποθέτησαν σε διάγραμμα το σημείο καμψής i , σε σχέση με το βάθος της σήραγγας z_0 για αργίλους, για άμμους και για χαλίκια (βλ. Διάγραμμα 3.2). Η πλειοψηφία των δεδομένων που έχει παρουσιαστεί στο παρελθόν (Rankin 1988), εμπλουτίστηκε αργότερα από τους Mair & Taylor (1997).



Διάγραμμα 3.2: Διαφοροποίηση για το σημείο καμπής i συναρτήσεις του βάθους της σήραγγας (i) για αργίλους, (ii) για άμμους και χαλίκι (Mair & Taylor 1997).

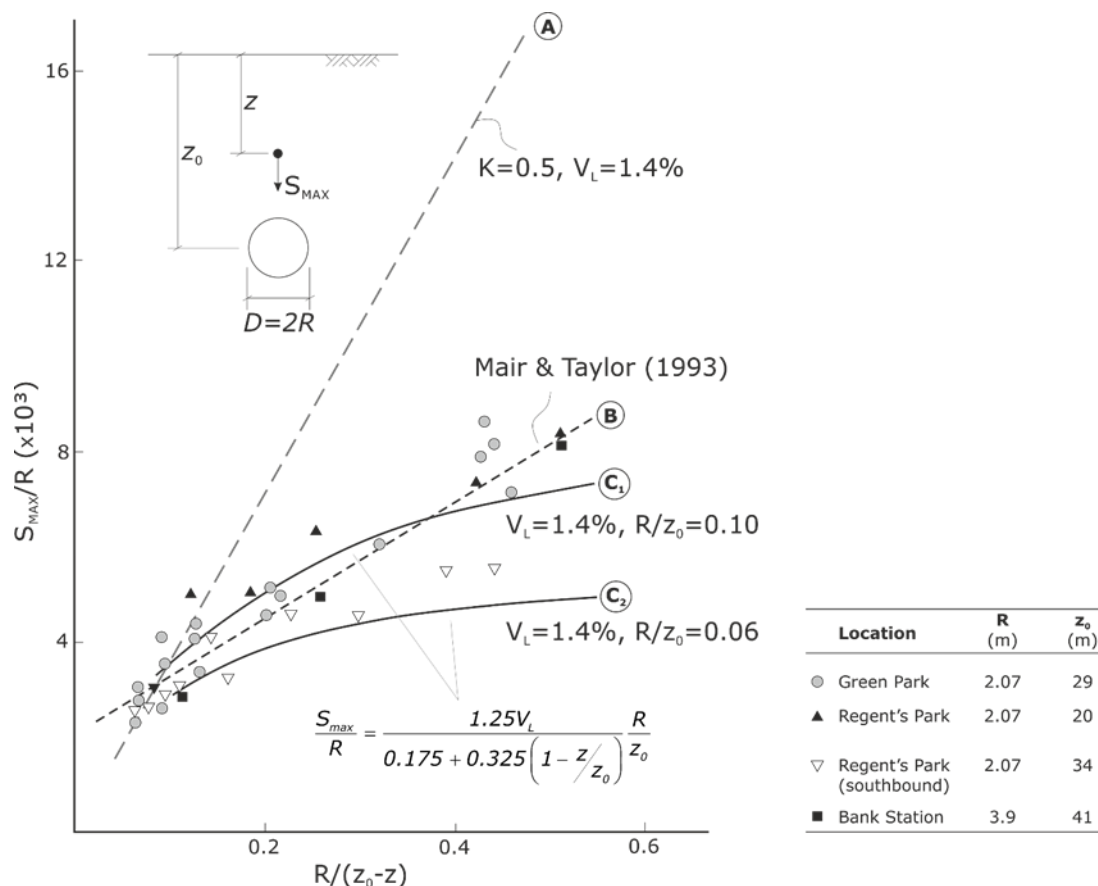
Τα δεδομένα που παρουσιάζονται παραπάνω αφορούν σε διαφορετικές τεχνικές διάνοιξης, ωστόσο παρουσιάζονται μαζί καθώς το σημείο καμπής δεν επηρεάζεται από την τεχνική διάνοιξης (O'Reilly & New 1982). Το διάγραμμα για τις αργίλους επιβεβαιώνει το συμπέρασμα των O'Reilly & New (1982) ότι για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, μια τιμή $K=0.50$ είναι μια ικανοποιητική παραδοχή, από τη στιγμή που βρίσκεται εντός του αποδεκτού εύρους τιμών $K \approx 0.40-0.60$. Για τις άμμους και το χαλίκι, παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων, αλλά η πλειοψηφία βρίσκεται μέσα στα όρια $K=0.25-0.45$ με μια μέση τιμή $K \approx 0.35$. Επιπροσθέτως, σήραγγες πάνω και κάτω από τον υπόγειο υδάτινο ορίζοντα δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά στο σημείο καμπής, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με την πρόταση του Peck (1969).

Το σχήμα του προφίλ των καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια, θεωρείται συχνά ότι μπορεί να περιγράφεται και αυτό με μία καμπύλη τύπου Gauss, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφονται και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια. Οι Mair et al. (1993) βασισμένοι σε μετρήσεις καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια, τονίζουν ότι η παράμετρος K των O'Reilly & New (1982) αυξάνει με το βάθος, δίνοντας αυξανόμενο εύρος στο προφίλ των καθιζήσεων πιο κοντά στην σήραγγα. Στο Διάγραμμα 3.3 φαίνεται πως μια σταθερή τιμή του $K=0.50$ (διακεκομμένη γραμμή), αποκλίνει σημαντικά από τις μετρήσεις, ενώ η συμπαγής γραμμή περιγράφει πολύ καλύτερα την συμπεριφορά των καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια. Η σχέση για το K που προκύπτει από το πρώτο Διάγραμμα 3.3 (i), φαίνεται στο Διάγραμμα 3.3 (ii).



Διάγραμμα 3.3: (i) Μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των υπόγειων καθιζήσεων με το βάθος, (ii) Μεταβολή της παραμέτρου K σε αργίλους (Mair & Taylor 1997).

Οι Mair et al. (1993) τοποθέτησαν σε διάγραμμα, τις καθιζήσεις ανηγμένες ως προς την ακτίνα, ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας, για διάφορες σήραγγες, το βάθος και η ακτίνα των οποίων φαίνεται στο υπόμνημα, στο Διάγραμμα 3.4. Η απώλεια όγκου θεωρήθηκε ίση με $V_L=1,3\sim 1.4\%$ κατά O'Reilly & New (1982).



Διάγραμμα 3.4: Υπόγειες καθιζήσεις πάνω από τον άξονα σήραγγας σε London Clay (Mair et al. 1993).

Από το Διάγραμμα 3.4 φαίνεται ότι με τη χρήση του $K=0.50$ σαν σταθερή τιμή (γραμμή Α), υπερεκτιμώνται πολύ οι υπόγειες καθιζήσεις. Στο Διάγραμμα 3.4 φαίνονται επίσης

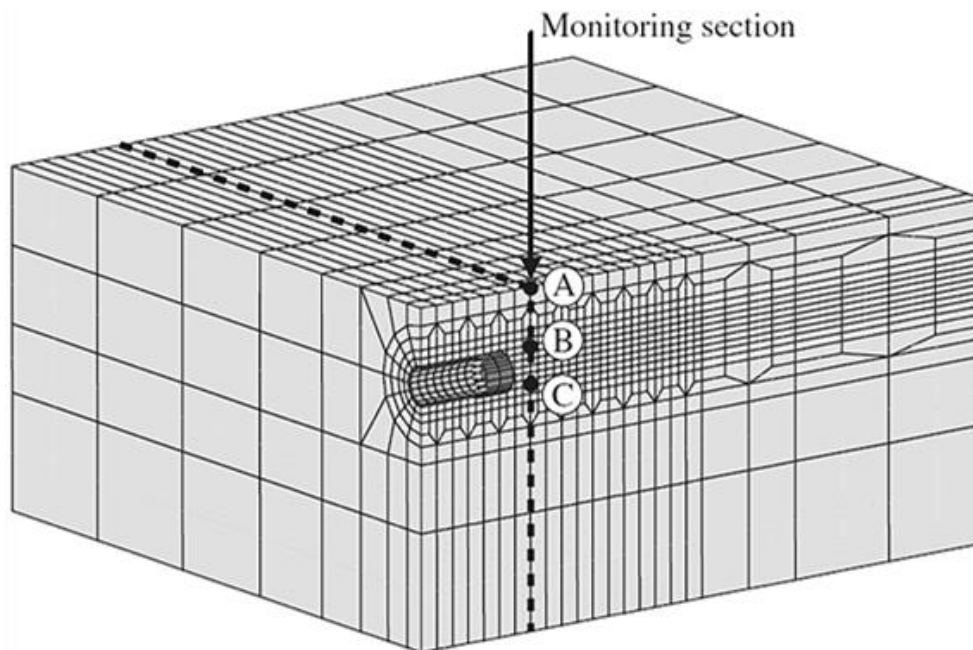
μια γραμμική συσχέτιση που προτάθηκε από του Mair & Taylor (1993) (γραμμή Β). Κά-
νοντας χρήση της σχέσης που προκύπτει από την συσχέτιση με το Διάγραμμα 3.3, για το
i ως συνάρτηση του βάθους z, προκύπτει η σχέση 3.23 που περιγράφει τις καμπύλες C₁
και C₂. Επειδή τα δεδομένα αφορούν σε διάφορα R και z₀, δίνονται οι δυο αυτές καμπύ-
λες που περιγράφουν ένα εύρος στο οποίο αναμένονται να βρίσκονται οι μετρήσεις.

$$\frac{S_{\max}}{R} = \frac{1.25 \cdot V_L}{0.175 + 0.325 \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)} \cdot \frac{R}{z_0} \quad (3.23)$$

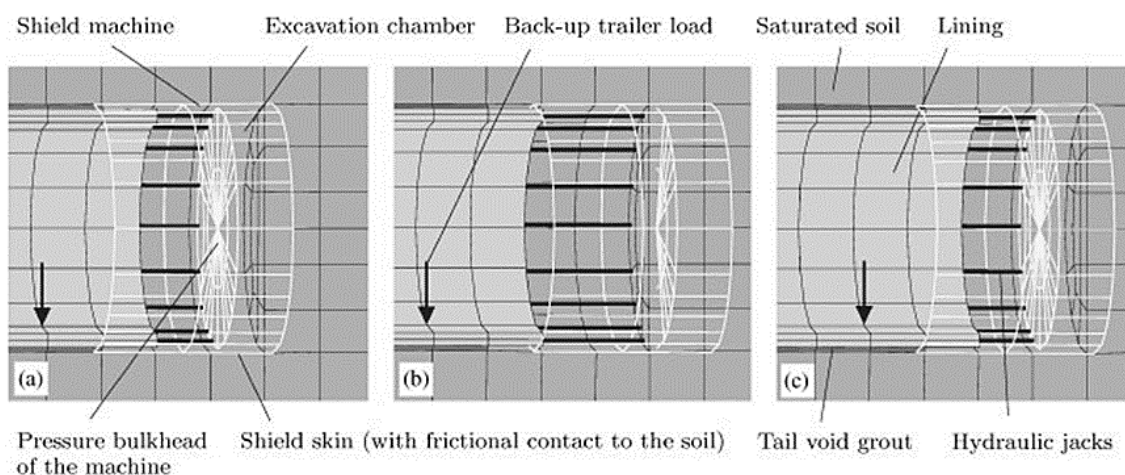
3.5 Αριθμητικά μοντέλα

3.5.1 G. Meschke, T. Kasper & F. Nagel (2004–12)

Οι Kasper & Meschke (2004) ανέπτυξαν ένα τριδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης μηχανο-
ποιημένης όρυξης, όπου το έδαφος, το υπόγειο νερό, η ασπίδα του TBM, τα υδραυλικά
έμβολα, η τσιμεντένεση του ουραίου κενού και τα στοιχεία της υποστήριξης προσομοιώ-
νονται ως ξεχωριστά στοιχεία. Το TBM προσομοιώνεται ως απαραμόρφωτο μετακινού-
μενο σώμα με δύο κόμβους που αντιπροσωπεύουν τους μεταφορικούς και περιστροφι-
κούς βαθμούς ελευθερίας. Η κωνικότητα της ασπίδας και η τριβή μεταξύ του εδάφους
και της ασπίδας λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο. Τα έμβολα προσομοιώνονται από
γραμμικά στοιχεία που ενώνονται στα στοιχεία της υποστήριξης. Η προσομοίωση γίνεται
σε βήματα. Αρχικά εκτείνονται τα γραμμικά στοιχεία που προσομοιώνουν τα έμβολα και
αφήνεται κενό μεταξύ του εδάφους και της υποστήριξης. Έπειτα, τροποποιείται ο κানা-
βος μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής έτσι ώστε να αποκτήσει ακριβώς την διάμετρο
εκσκαφής. Ενεργοποιούνται τα νέα στοιχεία που προσομοιώνουν την τσιμεντένεση στην
ουρά της ασπίδας και ανανεώνονται οι οριακές συνθήκες για τις πιέσεις των πόρων. Η
πίεση υποστήριξης στο μέτωπο προσομοιώνεται ως κατανεμημένο φορτίο με γραμμική
αύξηση με την αύξηση του βάθους. Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με οριακές
συνθήκες στους κόμβους των στοιχείων του ενέματος στην ουρά, με διαφοροποίηση καθ'
ύψος κατά 10kN/m². Το έδαφος προσομοιώνεται σύμφωνα με το καταστατικό μοντέλο
Cam-Clay. Το βάρος του εξοπλισμού του TBM που ακολουθεί την ασπίδα προσομοιώ-
νεται με σημειακά φορτία. Οι αναλύσεις γίνονται με χρήση το κώδικα TSIM^{3D} και είναι
συζευγμένες (ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος).

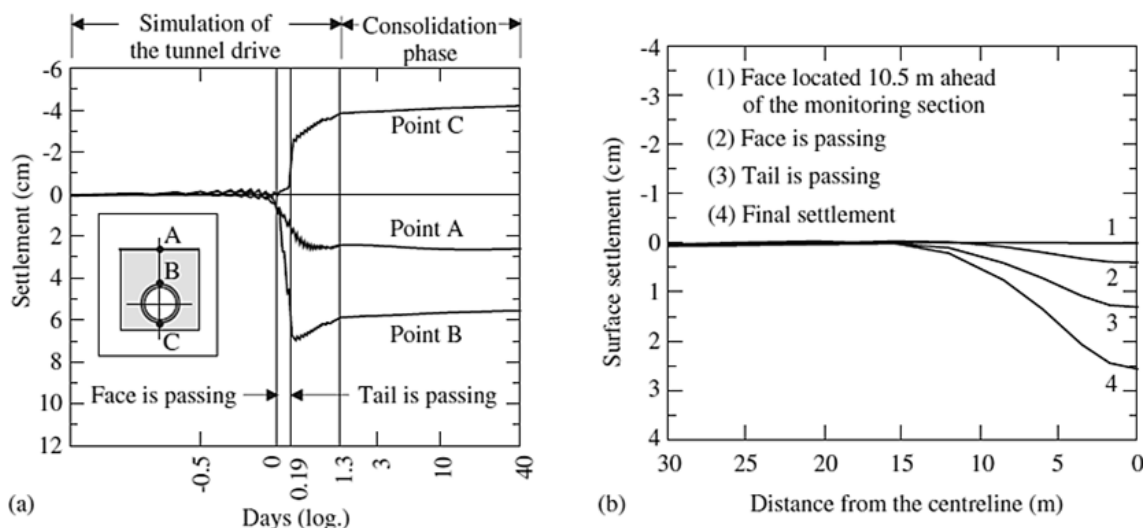


Εικόνα 3.12: Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D (Kasper & Meschke 2004).



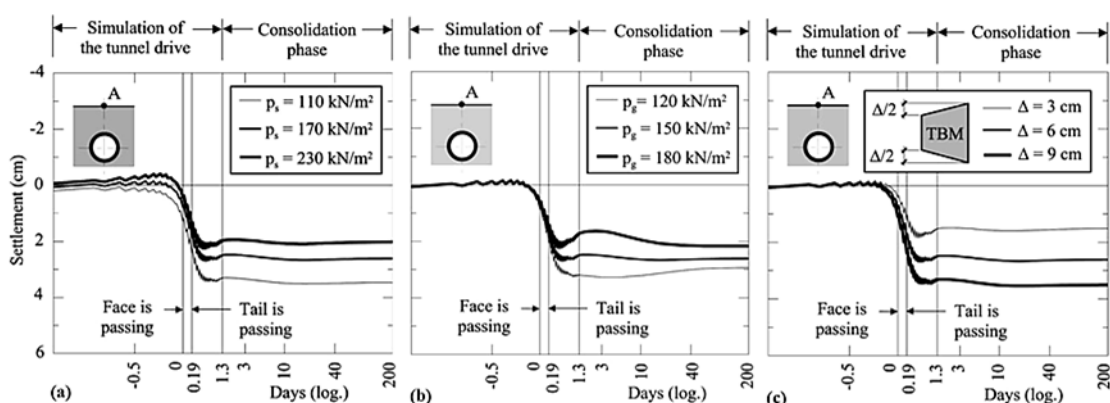
Εικόνα 3.13: Μοντελοποίηση του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους, ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος (Kasper & Meschke 2004).

Οι αναλύσεις δεν αναφέρονταν σε συγκεκριμένο έργο. Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ ότι επιλέχθηκε διάμετρος $D=6.3$ m και βάθος ίσο με $1.5D=9.45$ m. Ο υδροφόρος βρίσκεται στην επιφάνεια. Η κωνικότητα της ασπίδας επιλέχθηκε ως 6 cm διαφορά στην διάμετρο στο μέτωπο με την διάμετρο στην ουρά. Μετά από προχώρηση 48 m, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της στερεοποίησης στις καθιζήσεις σε βάθος χρόνου, χωρίς περαιτέρω προχώρηση του TBM. Σε επόμενη εικόνα φαίνονται οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν.



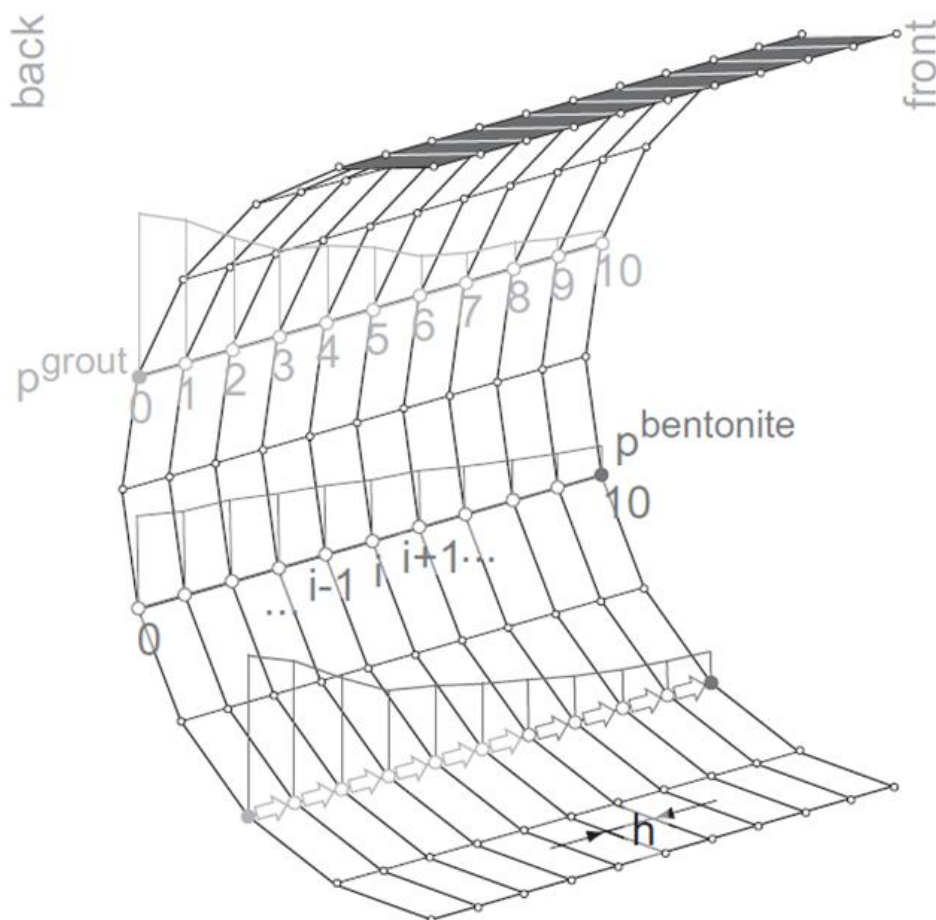
Διάγραμμα 3.5: (α) Υπολογισμένες κατακόρυφες μετακινήσεις στον σταθμό καταγραφής, όπου ο χρόνος μηδέν θεωρείται η στιγμή όπου το μηχανήμα περνάει κάτω από τον σταθμό, (β) προβλεπόμενες καθιζήσεις για διαφορετικό μήκος προχώρησης του μηχανήματος (Kasper & Meschke 2004).

Οι Kasper & Meschke (2006) χρησιμοποίησαν το παραπάνω μοντέλο για να διερευνήσουν παραμετρικά την επιρροή της πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο, της πίεσης του ενέματος, του βάρους του μηχανήματος, του μήκους της ασπίδας και της κωνικότητας της ασπίδας στις καθιζήσεις. Στις αναλύσεις έγινε θεώρηση ομοιογενούς, υπερστερεοποιημένου, μαλακού συνεκτικού εδαφικού υλικού, κάτω από την επιφάνεια το υπόγειο ορίζοντα. Ως συμπεράσματα προέκυψαν ότι η πίεση μετώπου, η πίεση ενέματος, το μήκος και η κωνικότητα της ασπίδας έχουν σημαντική επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις. Το βάρος του TBM έχει μικρή επίδραση, ενώ το βάρος του εξοπλισμού που ακολουθεί προκαλεί μόνο προσωρινές (ελαστικές) παραμορφώσεις.



Διάγραμμα 3.6: Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (α) της πίεσης μετώπου, (β) της πίεσης του ενέματος και (c) της κωνικότητας της ασπίδας (Kasper & Meschke 2006).

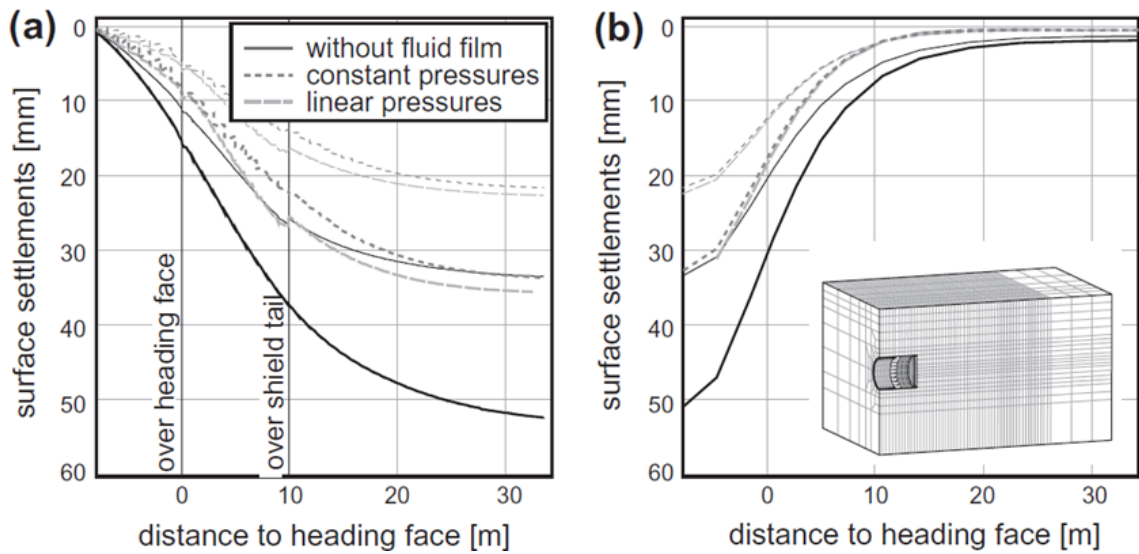
Οι Nagel & Meschke (2011) επιχείρησαν να προσομοιώσουν την ροή του ενέματος και του πολφού μεντονίτη γύρω από την ασπίδα και την μελέτη της επιρροής στις επιφανειακές καθιζήσεις.



Εικόνα 3.14: Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό (Nagel & Meschke 2011).

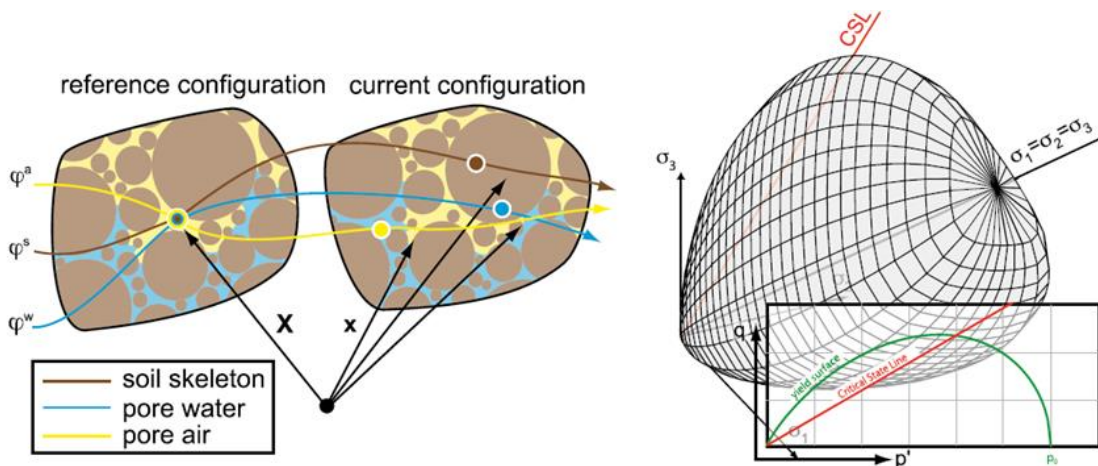
Έτσι το μοντέλο επεκτάθηκε με την εισαγωγή αλγορίθμου που υπολογίζει την ροή των ρευστών υπό πίεση γύρω από την ασπίδα για το μήκος, στο οποίο υπάρχει κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Θεωρείται ιξώδης συμπεριφορά των ρευστών και γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για χωρική διακριτοποίηση των εξισώσεων που διέπουν την διαμήκη ροή των ρευστών και γίνεται σύζευξή τους με αλγόριθμο επαφής για την διεπιφάνεια ασπίδας εδάφους, που παίρνει υπ' όψη και την διάτμηση κατά την επαφή. Με χρήση αυτού του μοντέλου γίνεται η παραμετρική διερεύνηση που κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την κατάσταση στην διεπιφάνεια ασπίδας εδάφους είναι το βάρος και το φορτίο του TBM και η κατανομή του, η κωνικότητα της ασπίδας, η υπερεκσκαφή στο μέτωπο, οι πιέσεις των ρευστών και η κατανομή τους στο μέτωπο και την ουρά της ασπίδας, καθώς και οι παραμορφώσεις στο περιβάλλον γεωυλικό. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η ροή των ρευστών στο κενό επηρεάζουν τις επιφανειακές καθιζήσεις, το σχήμα του προφίλ των καθιζήσεων και το μέγεθος των δυνάμεων που καλούνται να ασκήσουν τα υδραυλικά έμβολα. Αγνοώντας

την ροή των ρευστών στο κενό, οδηγούμαστε σε υπερεκτίμηση των καθιζήσεων που προκαλούνται από την διάνοιξη της σήραγγας.

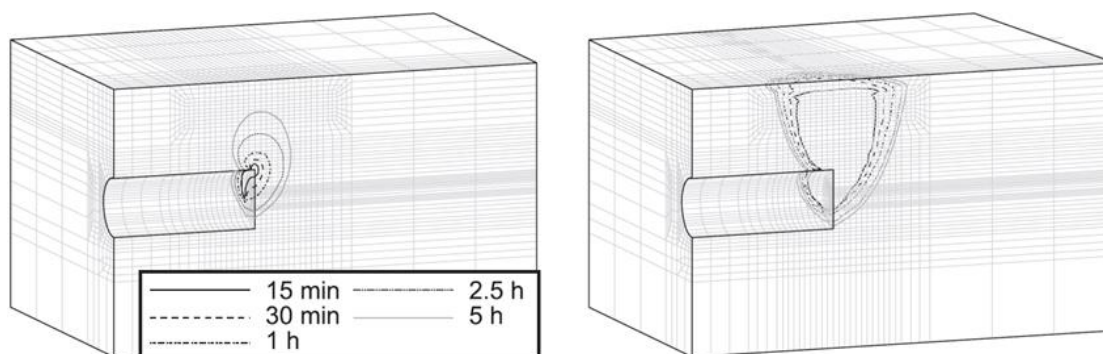


Διάγραμμα 3.7: Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο στιφρά (λεπτές γραμμές) εδάφη και για λιγότερο (παχιές γραμμές), (a) για ένα σημείο πάνω από τον άξονα της σήραγγας και (b) για μία διατομή στο τέλος την προχώρησης του TBM (Nagel & Meschke 2011).

Οι Nagel et al. (2012) εισήγαγαν ένα καταστατικό μοντέλο για το έδαφος τριών φάσεων (κόκκοι εδάφους, νερό πόρων, αέρας πόρων). Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την θεώρηση ροής και του νερού και του αέρα διαμέσου μερικώς κορεσμένων ζωνών στο περιβάλλον γεωυλικό. Έτσι γίνεται διερεύνηση της έκτασης της μερικώς κορεσμένης ζώνης μπροστά από το μέτωπο, για την περίπτωση στάσης και αντικατάστασης του μέσου υποστήριξης του μετώπου από πολφό σε πεπιεσμένο αέρα για διάφορα χρονικά διαστήματα.



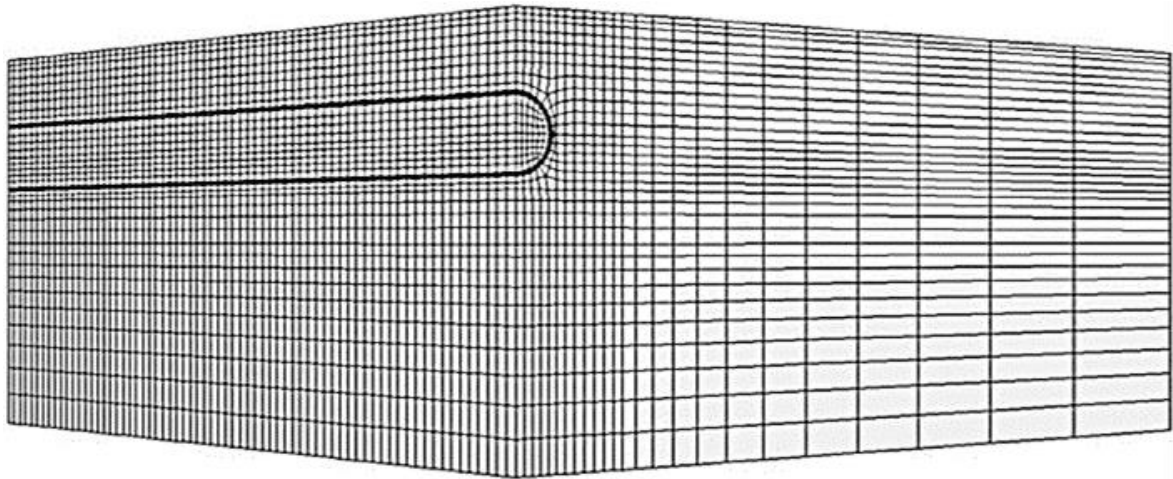
Εικόνα 3.15: Μοντέλο τριών φάσεων για μερικώς κορεσμένα εδάφη χρησιμοποιώντας την θεωρία του πορώδους μέσου για την περιγραφή των αρχικών μικροσκοπικών καταστάσεων και αλληλεπιδράσεων των φάσεων του εδάφους (κόκκοι, νερό και αέρας) (Nagel et al. 2012).



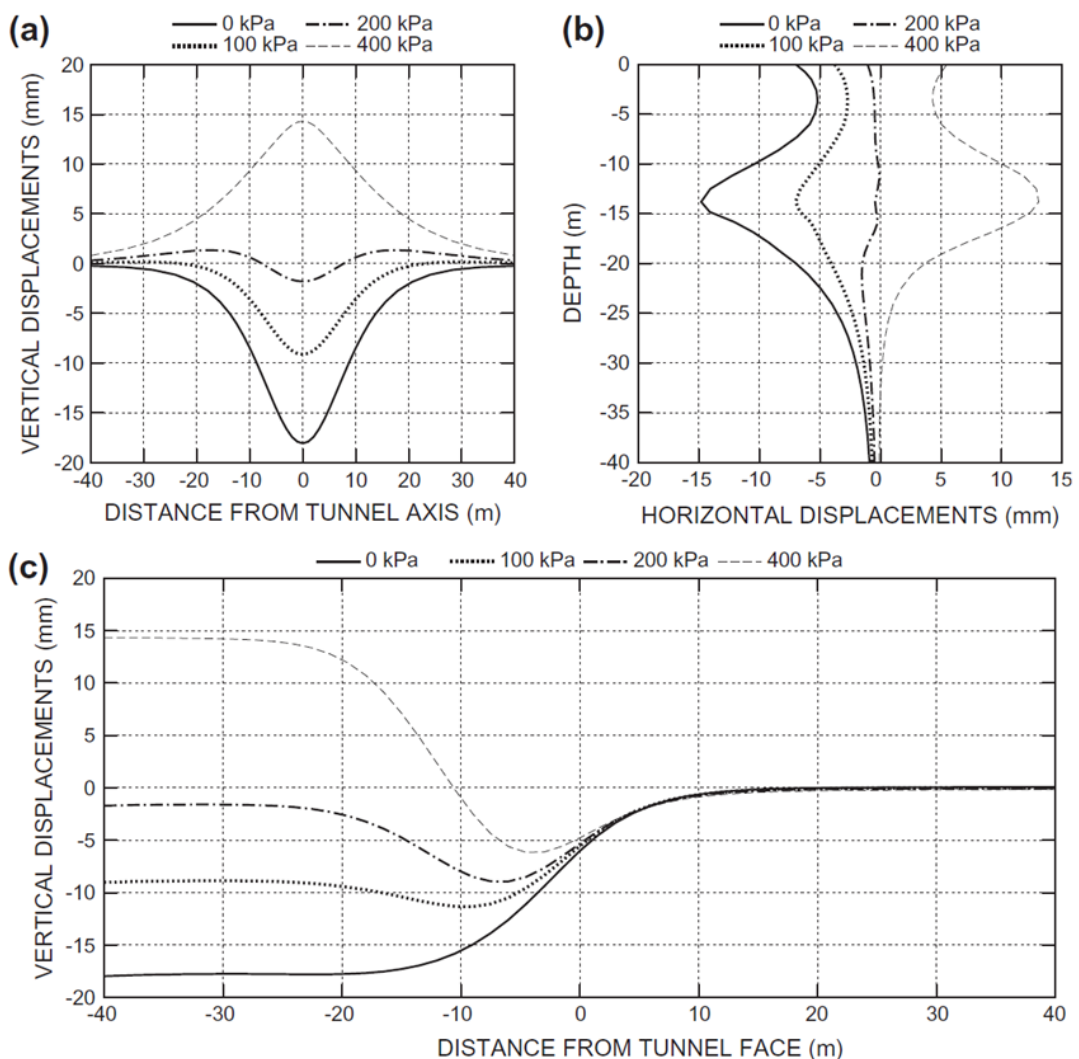
Εικόνα 3.16: Προσομοίωση της χρήσης πεπιεσμένου αέρα ως μέσο υποστήριξης και διερεύνηση της δημιουργίας μερικώς κορεσμένων ζωνών μπροστά από το μέτωπο για κορεσμό λιγότερο από 95% (αριστερά) και λιγότερο από 50% (δεξιά) (Nagel et al. 2012).

3.5.2 A. Lambrugh et al. (2012)

Οι Lambrugh et al. (2012) υλοποίησαν ένα τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για την μελέτη της εκσκαφής σήραγγας με χρήση μηχανήματος τύπου EPB. Το αριθμητικό προσομοίωμα υλοποιήθηκε στον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}. Το προσομοίωμα θεωρεί ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης του μετώπου, ενώ η ασπίδα προσομοιώνεται ως κυλινδρική με ελαστική συμπεριφορά. Η κωνικότητα της ασπίδας καθώς και η υπερεκσκαφή προσομοιώνονται εμμέσως με την θεώρηση μιας στρώσης ελαστικού υλικού στο εξωτερικό μέρος της ασπίδας με κατάλληλες ιδιότητες που εξασφαλίζουν ότι η σύγκλιση στο πίσω μέρος της ασπίδας δεν υπερβαίνει το πραγματικό κατασκευαστικό κενό λόγω κωνικότητας και υπερεκσκαφής. Τα στοιχεία της υποστήριξης θεωρούνται γραμμικά ελαστικά και ενώνονται μονολιθικά, ενώ το ειδικό τους βάρος μεταβάλλεται κατάλληλα ώστε να προσομοιωθεί το βάρος του εξοπλισμού που ακολουθεί το TBM. Τα στοιχεία του ενέματος προσομοιώνονται ως ελαστικά και ενώνονται μονολιθικά με τα υπόλοιπα στοιχεία. Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με αύξηση τις ισοτροπικής πίεσης στα στοιχεία στο επίπεδο της επιθυμητής πίεσης εισπίεσης του ενέματος και θεωρείται ομοιόμορφη καθ ύψος. Η δυσκαμψία των στοιχείων θεωρείται συνάρτηση του χρόνου καθώς σε κάθε βήμα λαμβάνει μία νέα τιμή για να προσομοιωθεί η διαδικασία της σκλήρυνσης.



Εικόνα 3.17: Τριδιάστατος κάναβος του προβλήματος (Lambrughì et al. 2012).

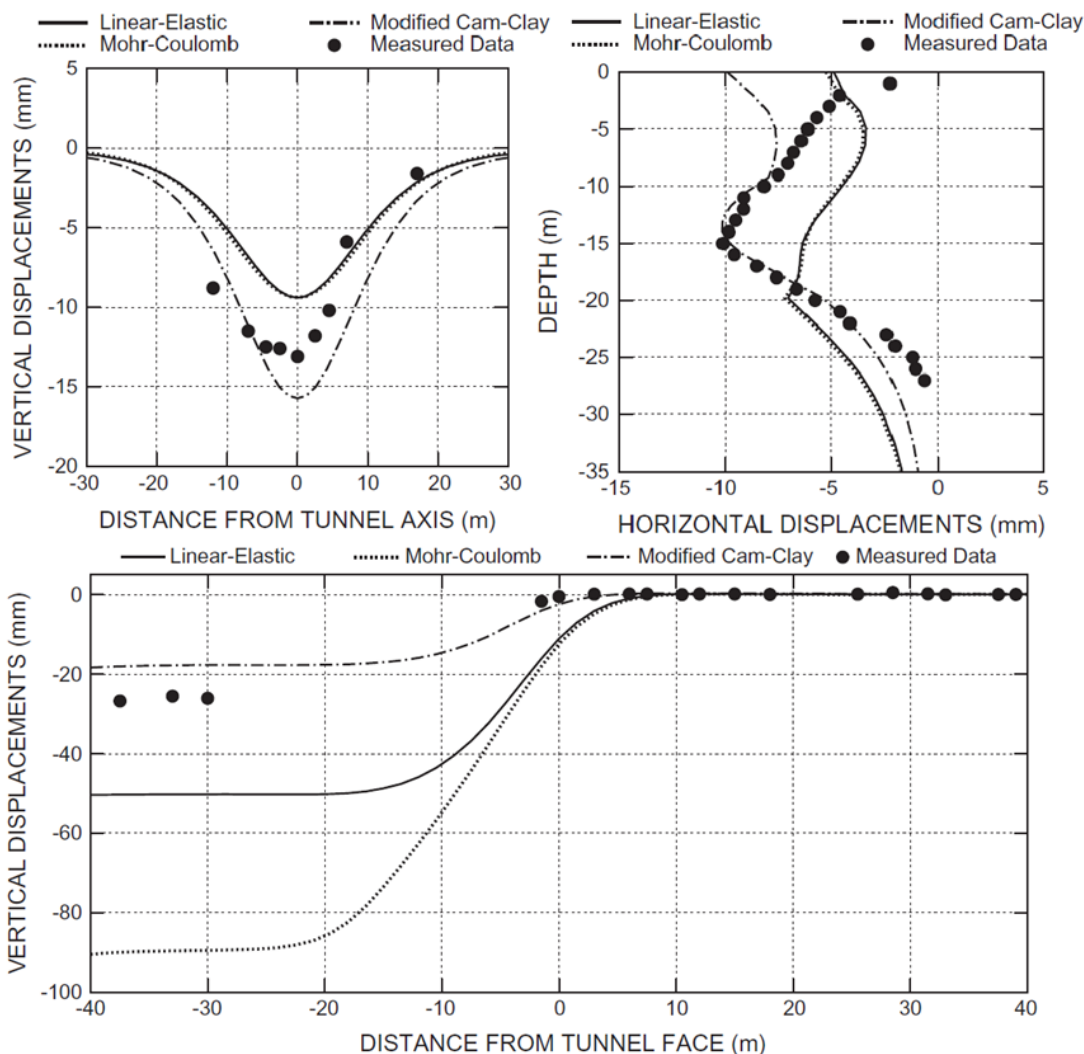


Διάγραμμα 3.8: Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της πίεσης του ενέματος με χρήση κριτηρίου Mohr-Coulomb στις (a) κατακόρυφες μετακινήσεις (εγκάρσια στον άξονα τομής), (b) οριζόντιες μετακινήσεις και (c) κατακόρυφες μετακινήσεις (κατά μήκος στον άξονα τομής) (Lambrughì et al. 2012).

Αρχικά, έγινε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της πίεσης του ενέματος στις κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για μεγάλες

πίσεις ενέματος παρατηρούνται ακόμα και ανυψώσεις. Οι αναλύσεις έγιναν με θεώρηση κριτηρίου Mohr-Coulomb.

Έπειτα έγιναν αναλύσεις που αναφέρονταν στα έργα της επέκτασης του METRO της Μαδρίτης, που έγιναν σε δύο στάδια μεταξύ του 1995 και του 2003. Στις αναλύσεις για το έδαφος χρησιμοποιήθηκαν κριτήριο Mohr-Coulomb, τροποποιημένο κριτήριο Cam-Clay, αλλά και ένα γραμμικά ελαστικό μοντέλο και έγιναν συγκρίσεις με τις πραγματικές μετρήσεις. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, δείχνουν μεγαλύτερη συμφωνία με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που θεώρησαν τροποποιημένο Cam-Clay μοντέλο για το έδαφος. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις στα άλλα δυο μοντέλα παρατηρούνται μερικές αρκετά μεγάλες διαφορές, ενώ το μοντέλο Cam-Clay παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς εμφανίζει μέγιστες καθιζήσεις ανηγμένες ως προς τις μετρημένες τιμές από 0.5 έως 2.0.



Διάγραμμα 3.9: Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογίστηκαν από τα αριθμητικά μοντέλα (Lambrugh et al. 2012).

3.5.3 A. Bezuijen (2007)

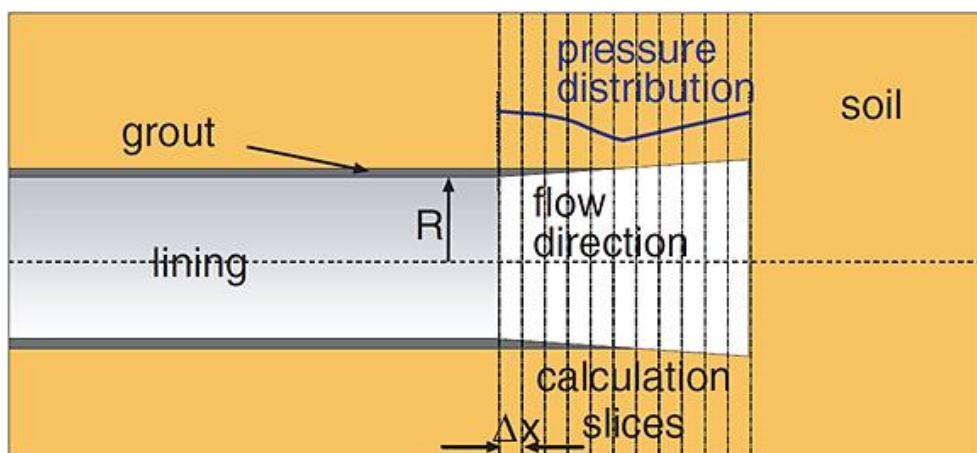
Ο Bezuijen (2007) μελέτησε την ροή του ενέματος και του πολφού στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Η διαδικασία υπολογισμού για τις πιέσεις φαίνεται στην Εικόνα 3.18. Το έδαφος θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως ξεχωριστή φέτα πάχους Δx . Γνωρίζοντας την γεωμετρία της σήραγγας, την πίεση του ενέματος και τις ελαστικές ιδιότητες του εδάφους, το πάχος του κενού μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 3.24.

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \frac{\Delta r}{r} \cdot G \quad (3.24)$$

Από αυτό το πάχος κενού μπορεί να υπολογιστεί η πτώση της πίεσης λόγω της ροής, για απόσταση Δx από την σχέση 3.25.

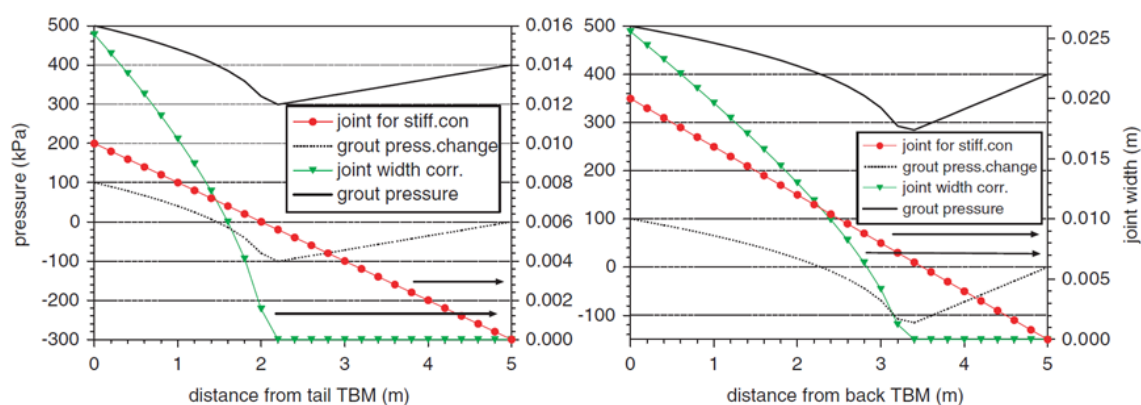
$$\Delta P = \frac{\Delta x}{s} \cdot \tau_{\gamma} \quad (3.25)$$

Η υπολογιζόμενη πίεση χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της παραμόρφωσης και του πάχους του κενού της επόμενης φέτας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά σε όλες τις φέτες. Για όλες τις φέτες ελέγχεται ότι το κενό είναι θετικό. Σε κάθε άλλη περίπτωση σημαίνει ότι το έδαφος είναι σε επαφή με την ασπίδα και η πίεση υπολογίζεται από την σχέση 3.24, θεωρώντας ως διάμετρο την διάμετρο της ασπίδας που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη φέτα.



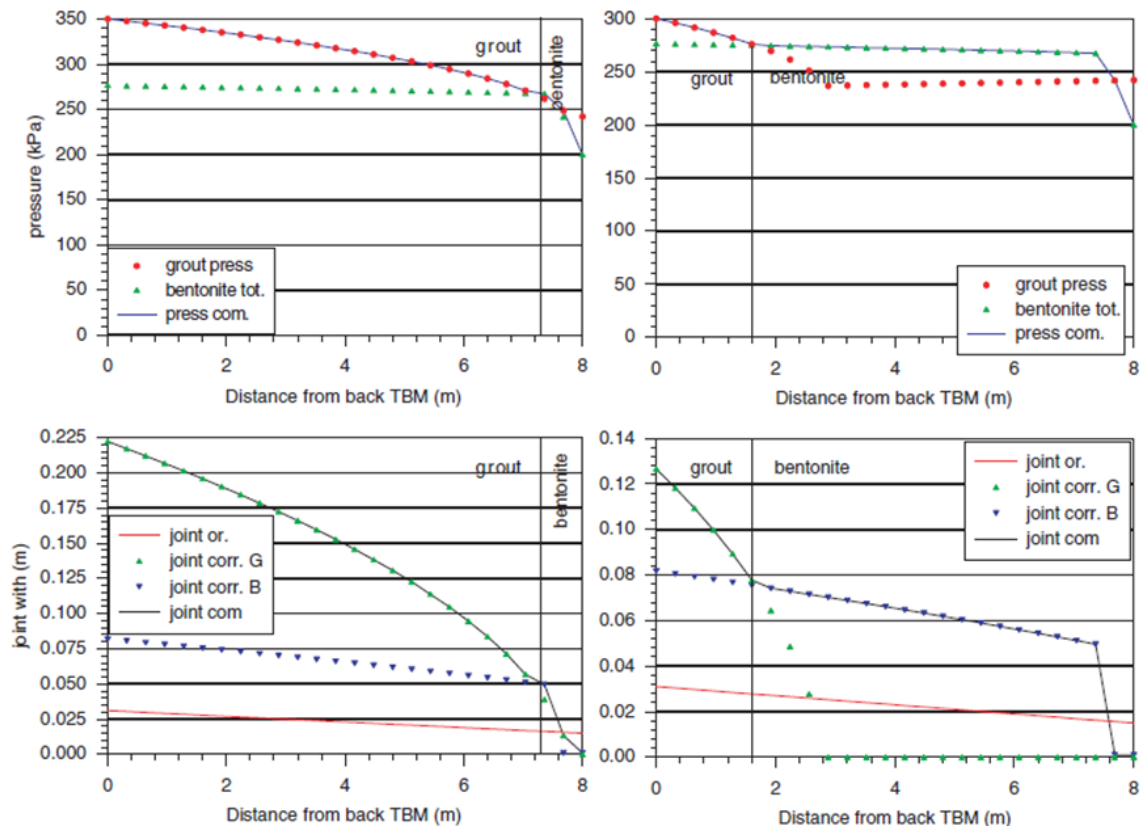
Εικόνα 3.18: Ιδεατό σκαρίφημα ενός TBM, της υποστήριξης και του ενέματος (Bezuijen 2007).

Αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος της επιρροής της συμμετρίας της ασπίδας όσον αφορά τον άξονα της σήραγγας. Έγιναν υπολογισμοί για συμμετρική και για ασύμμετρη (το TBM βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος στην βάση καθ' όλο το μήκος του) ασπίδα. Τα αποτελέσματα φαίνονται σε αντίστοιχα διαγράμματα στη συνέχεια. Με κύκλους συμβολίζεται το κενό για πρακτικά απαραμόρφωτο έδαφος (εξαρτάται μόνο από την κωνικότητα της ασπίδας) και με τρίγωνα είναι για ελαστικό έδαφος. Επίσης παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που μελετά το μήκος διείσδυσης και το ουραίο κενό για μία μεταβολή της πίεσης ενέματος από 350 kPa σε 300 kPa. Ο παράγοντας που επηρεάζει τον όγκο του ενέματος που θα χρησιμοποιηθεί κατά την διάνοιξη, είναι το πάχος του κενού. Παρατηρείται ότι με μικρή μεταβολή στην πίεση ενέματος μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μεταβολή στο πάχος κενού και συνεπώς στον όγκο του ενέματος.



Διάγραμμα 3.10: Επίδραση της συμμετρίας της ασπίδας ως προς τον άξονα της σήραγγας στις πιέσεις του ενέματος και στο πάχος του κενού (αριστερά συμμετρική ασπίδα, δεξιά ασύμμετρη ασπίδα) (Bezuijen 2007).

Σημειώνεται εδώ ότι το ένεμα και ο πολφός συχνά περιγράφονται ως ρευστά Bingham. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται μια συγκεκριμένη υδραυλική τάση για να ξεκινήσει η ροή. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξουν τρεις περιπτώσεις ροής. Ροή ενέματος προς το μέτωπο, ροή πολφού προς την ουρά και ροή ενέματος και πολφού προς ένα σημείο μεταξύ ουράς και μετώπου. Η τρίτη θεώρηση έχει αξία μόνο αν υπάρχει απώλεια όγκου ρευστού δια μέσω του εδάφους. Στους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η πρώτη θεώρηση, καθώς είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση.

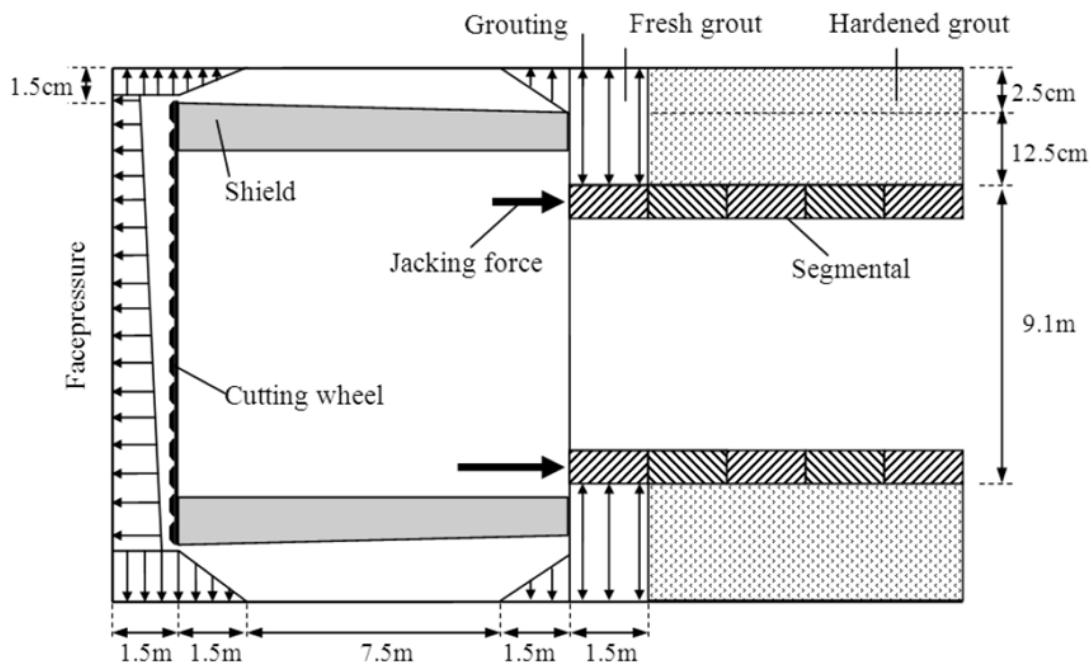


Διάγραμμα 3.11: Επίδραση της αλλαγής της πίεσης του ενέματος στο μήκος διείδυσης και πάχος του κενού (Bezuijen 2007).

3.5.4 Do et al. (2013)

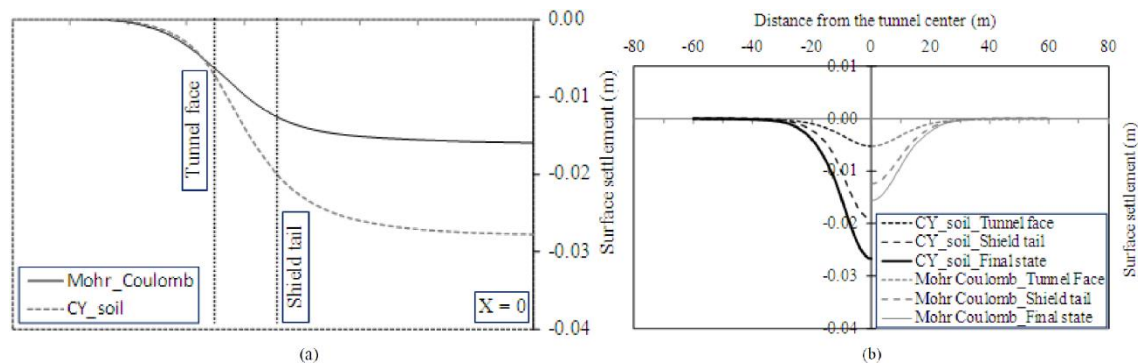
Οι Do et al. (2013) κατασκεύασαν ένα μοντέλο διάνοιξης σήραγγας με TBM για να μελετήσουν την επιρροή του καταστατικού μοντέλου του εδάφους. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Mohr-Coulomb (M-C) και το Cap-Yield (CY_{soil}). Στο CY_{soil} μοντέλο η σφιγρότητα του εδάφους έχει μεγαλύτερη τιμή για καταστάσεις αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Το μοντέλο κατασκευάστηκε στο λογισμικό FLAC^{3D}. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με φορτίο τραπεζοειδούς κατανομής. Λόγο υπερεκσκαφής, θεωρείται ότι πολφός περνάει στο κενό και ασκεί πίεση στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο για 1.5 m και τριγωνικό για άλλο 1.5 m. Η ασπίδα δεν υπάρχει στο μοντέλο, ενώ ο περιορισμός των παραμορφώσεων λόγω της ασπίδας προσομοιώνεται με συνθήκη που απαγορεύει παραμόρφωση, τέτοια που οι κόμβοι του εδάφους να βρεθούν μέσα από την φανταστική ασπίδα. Τα υδραυλικά έμβολα προσομοιώνονται με συγκεντρωμένα φορτία που ασκούνται κατατεθείαν στους κόμβους των στοιχείων υποστήριξης. Θεωρείται γραμμική αύξηση των δυνάμεων με το ύψος. Το ένεμα προσομοιώνεται σε δύο φάσεις, την ρευστή και την στερεή. Στην ρευστή προσομοιώνεται με κατανεμημένο φορτίο στο κενό, ενώ στην στερεή

θεωρείται ελαστική συμπεριφορά με σταθερό μέτρο ελαστικότητας. Η υποστήριξη προσομοιώνεται με γραμμικά ελαστικά επιφανειακά στοιχεία. Οι ενώσεις των στοιχείων του ίδιου δαχτυλιδιού γίνεται με συνδέσμους που έχουν δυσκαμψία στρωφική (K_θ), αξονική (K_A) και ακτινική (K_R). Ομοίως και για τους συνδέσμους μεταξύ διαδοχικών δαχτυλιδιών.

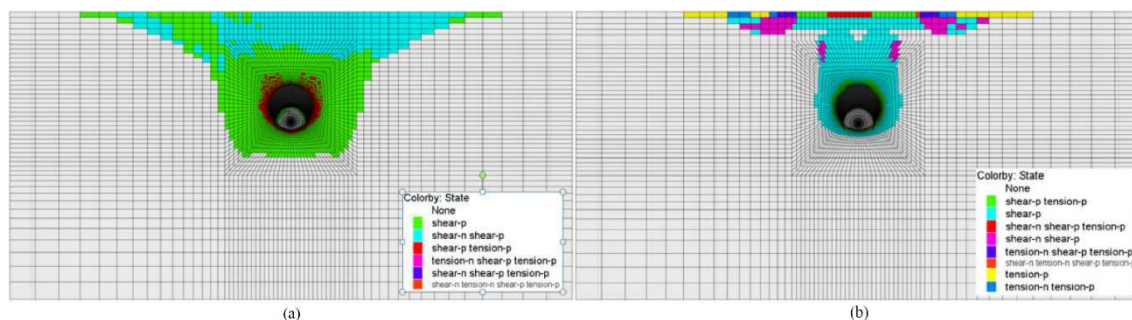


Εικόνα 3.19: Μοντέλο του TBM (Do et al. 2013).

Παρατηρείται μεγάλη επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις καθιζήσεις. Για να τονιστεί η επιρροή του καταστατικού μοντέλου παρουσιάζονται και οι πλαστικές ζώνες. Στην περίπτωση του μοντέλου CY_{soil} η ζώνη είναι περίπου διπλάσια από αυτή του μοντέλου M-C. Η σταθερή δυσκαμψία του μοντέλου M-C και τα χαρακτηριστική διαρροής για μικρές παραμορφώσεις του CY_{soil} μοντέλου είναι οι βασικοί λόγοι για την διαφορά στις επιφανειακές καθιζήσεις.



Διάγραμμα 3.12: Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις επιφανειακές καθιζήσεις (α) διαμήκης τομή και (β) εγκάρσια τομή (Do et al. 2013).

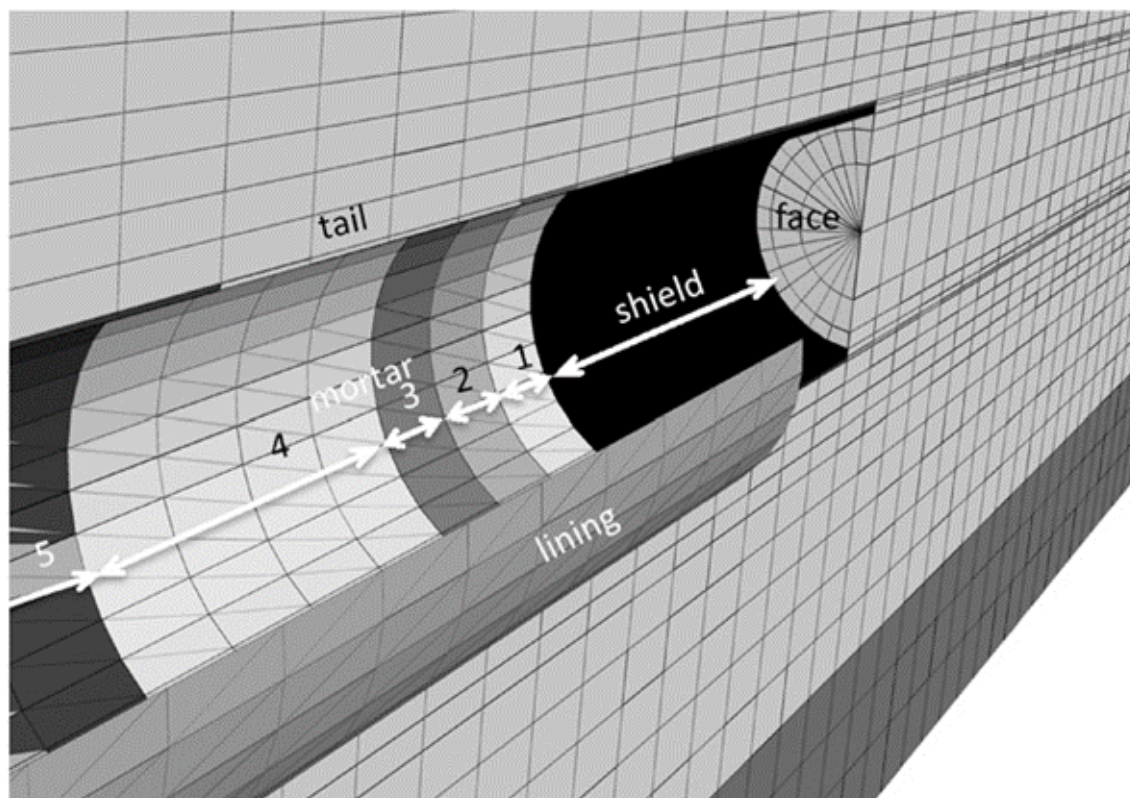


Εικόνα 3.20: Πλαστικές ζώνες γύρω από τη σήραγγα (a) μοντέλο CY_{soil} και (b) μοντέλο MC (Do et al. 2013).

3.5.5 E. Comodromos et al. (2014)

Οι Comodromos et al. (2014) δημιούργησαν ένα μοντέλο για την μελέτη των καθιζήσεων κατά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας πλησίον πολυώροφου κτιρίου. Το μοντέλο αναφέρεται σε έργα για την κατασκευή του METPO Θεσσαλονίκης. Το μοντέλο κατασκευάστηκε με χρήση του λογισμικού FLAC^{3D}. Τα πιεζόμετρα κοντά στις σήραγγες δεν κατέγραψαν υπερπίεση των πόρων που αποδόθηκε στην υψηλή περατότητα του γεωυλικού. Έτσι δεν έγινε σύζευξη του υδραυλικού και του μηχανικού προβλήματος. Για το έδαφος χρησιμοποιήθηκε μοντέλο CY_{soil} . Η πίεση στο μέτωπο θεωρήθηκε σταθερή καθ' ύψος για πρακτικούς λόγους. Τα στοιχεία της υποστήριξης στο έργο είναι κοχλιωμένα οπότε στο μοντέλο, ο δεσμός τους θεωρείται άκαμπτος. Το ένεμα έχει χρονικά εξαρτώμενα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι η μεγαλύτερη επιρροή συμβαίνει από την σκλήρυνση του ενέματος στα πρώτα τέσσερα δαχτυλίδια.

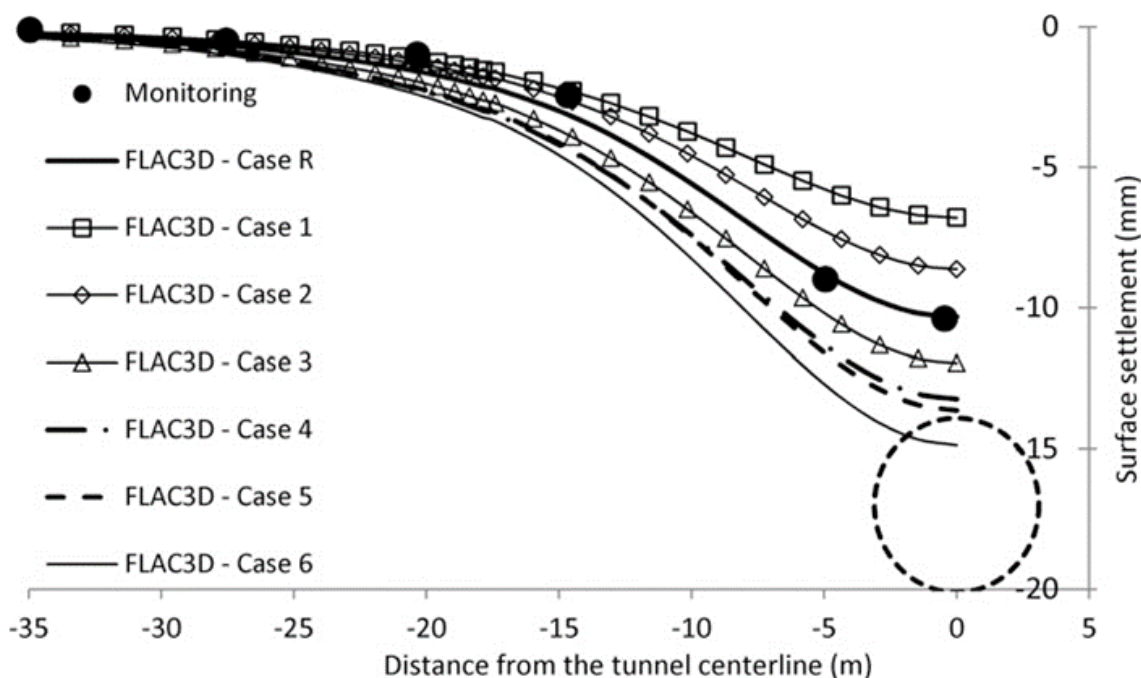
Η ασπίδα προσομοιώνεται από στοιχεία κελύφους, γραμμικά ελαστικά με πολύ ψηλό μέτρο ελαστικότητας. Το σχήμα της ασπίδας είναι κυλινδρικό και αγνοείται η κωτικότητα. Κανονικά, σύμφωνα με τις οδηγίες στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους ο πολφός έπρεπε να εισπνέζεται με 50 kPa παραπάνω από την πίεση που έχει στο μέτωπο. Το σύστημα όμως δεν ενεργοποιήθηκε στη περίπτωση που μελετάται και απλώς αναπτύχθηκε μία πίεση που κυμαινόταν από 20 έως 50 kPa λόγω της επικοινωνίας του κενού με τον θάλαμο εκσκαφής, στο μέτωπο, μέσω του κενού της υπερεκσκαφής. Σημειώνεται ότι η πίεση στο μέτωπο είναι της τάξης των 180 kPa. Έγινε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της πίεσης του πολφού στο κενό, της επιρροής της πίεσης στο μέτωπο και της πίεσης ενέματος.



Εικόνα 3.21: Προσομοίωση της προοδευτικής προχώρησης του TBM και των διαφορετικών ζωνών ενέματος με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (Comodromos et al. 2014).

Πίνακας 3.1: Διαφορετικά σενάρια της παραμετρικής διερεύνησης (Comodromos et al. 2014).

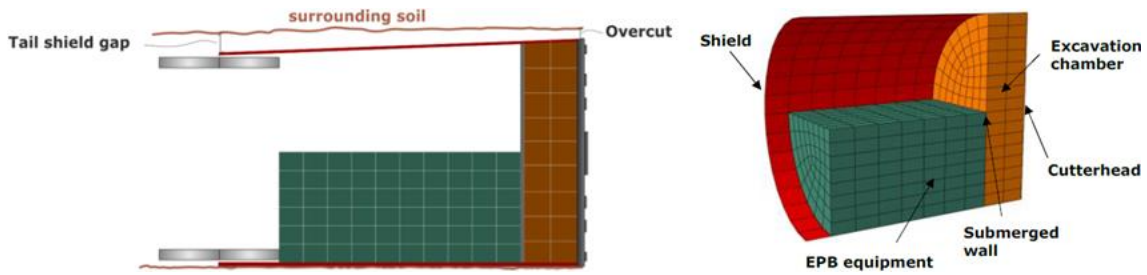
Case	Applied pressure (kPa)		
	Face	Steering gap	Tail gap
R	180	40	180
1	180	180	180
2	180	50	180
3	180	30	180
4	180	0	180
5	150	0	180
6	180	0	0



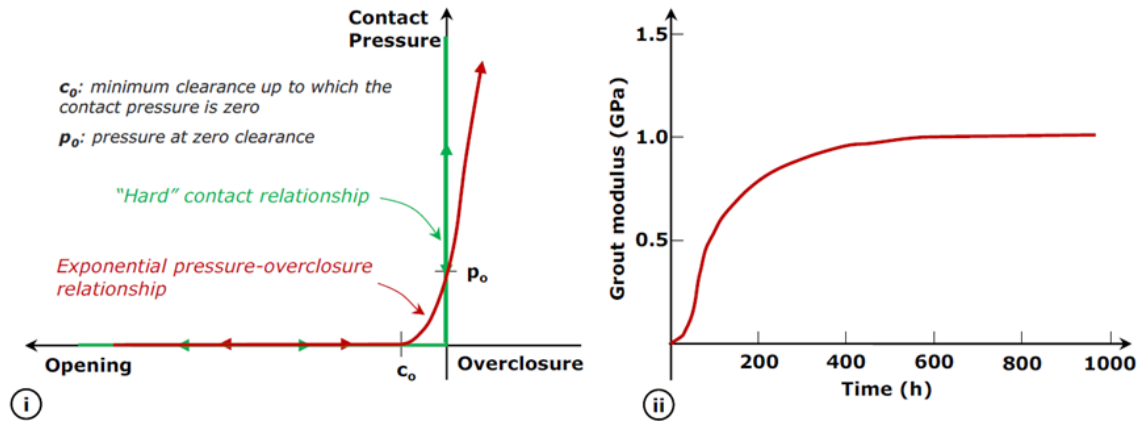
Διάγραμμα 3.13: Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις (Comodromos et al. 2014).

3.5.6 D. Litsas et al. (2015)

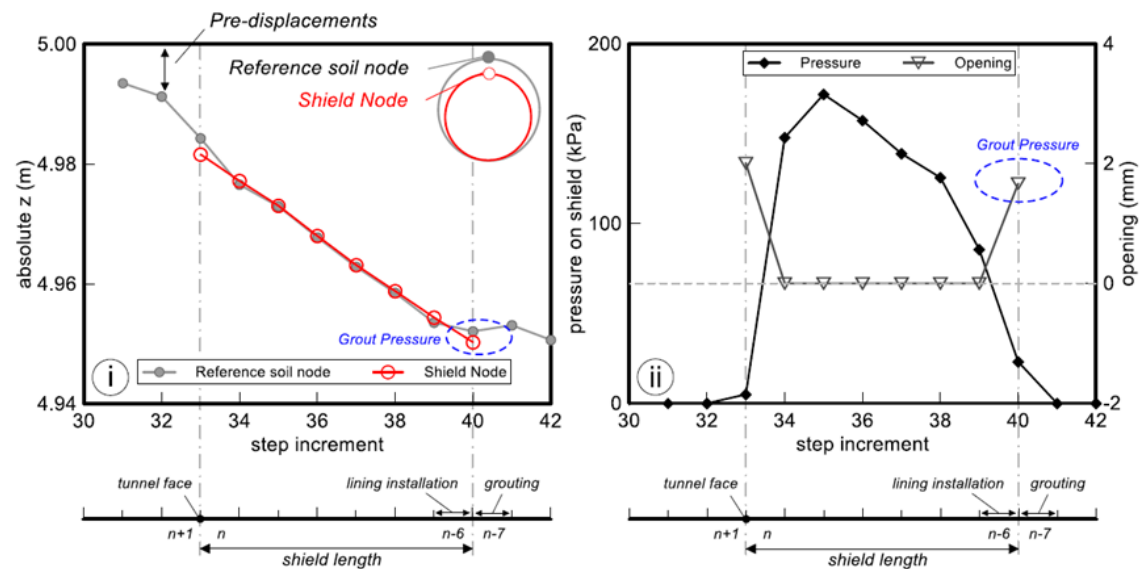
Οι Litsas et al. (2015) κατασκεύασαν ένα μοντέλο για την προσομοίωση της διάνοιξης σήραγγας με χρήση TBM χρησιμοποιώντας το κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με κατανομημένο φορτίο που αυξάνει γραμμικά με το βάθος. Το καταστατικό μοντέλο του εδάφους θεωρείται το Mohr-Coulomb. Η υποστήριξη προσομοιώνεται ως ενιαίο κυλινδρικό κέλυφος, αγνοώντας τους αρμούς. Η κωνικότητα της ασπίδας και η υπερεκσκαφή προσομοιώνεται με 3 cm κενό στο μέτωπο και μειώνεται βαθμιαία άλλα 3 cm μέχρι την ουρά της ασπίδας. Το βάρος του πολφού στον θάλαμο εκσκαφής και το βάρος του εξοπλισμού μέσα στην ασπίδα προσομοιώνεται με χωρικά στοιχεία που έχουν το κατάλληλο ειδικό βάρος. Αυτά τα στοιχεία δεν αλληλοεπιδρούν με τα εδαφικά στοιχεία στο μέτωπο, αλλά εισάγονται μόνο για να προσομοιώσουν το βάρος του μηχανήματος, που επηρεάζει τις μετακινήσεις στον ανάστροφο θόλο της σήραγγας. Η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος γεωυλικού με την ασπίδα γίνεται μέσω ενός νόμου διεπιφάνειας. Η ιδεατή περίπτωση της σχέσης «hard contact» της πίεσης επαφής, με το πάχος κενού μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού, δημιουργεί αστάθεια στην αριθμητική επίλυση. Έτσι, χρησιμοποιείται μία εκθετική σχέση. Το ένεμα έχει χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με την σχέση που προτείνουν οι Kasper & Meschke (2004). Η πίεση του προσομοιώνεται με μία αρχική ιστροπική τάση, ίση με την τάση εισπίεσης του στο ουραίο κενό.



Εικόνα 3.22: Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Litsas et al. 2015).



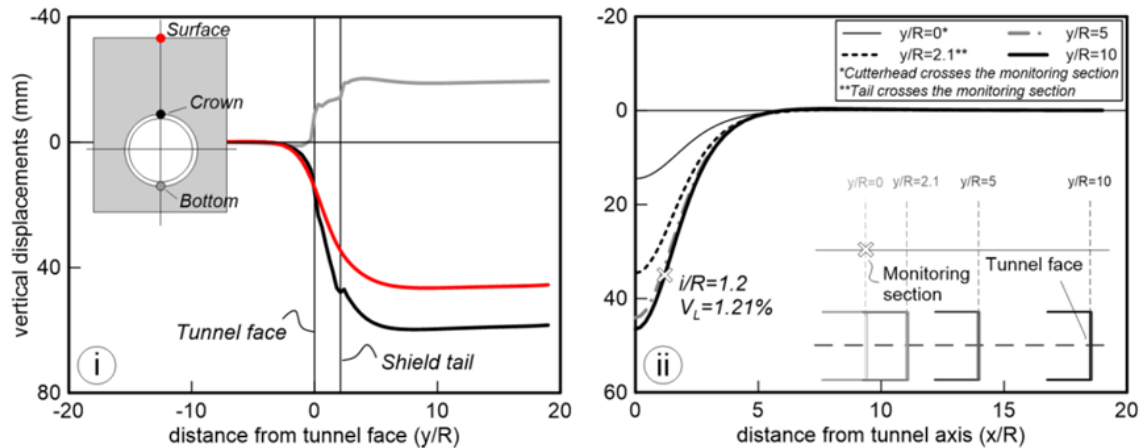
Διάγραμμα 3.14: (i) 'Hard' contact και εκθετική σχέση πίεσης αλληλεπίδρασης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωλικού και (ii) χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας του ενέματος (Litsas et al. 2015).



Διάγραμμα 3.15: (i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας (Litsas et al. 2015).

Κοιτώντας ένα κόμβο εδάφους στην στέψη της σήραγγας παρατηρούνται συγκλίσεις μπροστά από το μέτωπο, καθώς και ότι αμέσως μετά την εκσκαφή μιας φέτας εδάφους το έδαφος έρχεται σε επαφή με την ασπίδα και αρχίζει να αναπτύσσεται πίεση στην διεπιφάνεια. Η σταδιακή μείωση αυτής της πίεσης οφείλεται στην κωνικότητα. Στην ουρά λόγω της εισπίεσης του ενέματος ανοίγει πάλι το κενό και η πίεση διεπιφάνειας

πέφτει. Οι καθιζήσεις στην στέψη και στην διεπιφάνεια φαίνεται ότι σταθεροποιούνται σε απόσταση $10R$ από το μέτωπο (R : η ακτίνα της σήραγγας). Παράλληλα, παρατηρούνται μικρές διαφορές στο προφίλ των καθιζήσεων πέρα από απόσταση $5R$. Το σημείο καμπής του προφίλ υπολογίζεται σε απόσταση $1.2R$ από τον άξονα ενώ η απώλεια όγκου υπολογίζεται σε 1.21% .



Διάγραμμα 3.16: (i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων (Litsas et al. 2015).

Κεφάλαιο 4

Στοιχεία Αριθμητικού Μοντέλου

4.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση της μηχανικής όρυξης αβαθών σηράγγων με χρήση αριθμητικών μοντέλων, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία στην οποία υπεισέρχεται μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου, είναι η παρουσίαση του αριθμητικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Επιπλέον, γίνεται η περιγραφή ορισμένων παραμέτρων, των οποίων η επιρροή – στις κατακόρυφες μετακινήσεις και στις πιέσεις των πόρων πάνω από τη στέψη της σήραγγας, καθώς και στις μετατοπίσεις στο μέτωπο της σήραγγας – εξετάζεται στο Κεφάλαιο 5. Θα παρατηρηθεί με άλλα λόγια, η ευαισθησία των προηγούμενων μεγεθών στην μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, καθώς και των τιμών των εξεταζόμενων παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- Η πίεση στο μέτωπο (Face Pressure, FP),
- Η παρουσία ενεργών τάσεων στον πολφό μέσα στο μέτωπο (Effective Stresses, ES).

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων *Simulia Abaqus FEA v.6.13¹*, και είναι συζευγμένες, δηλαδή γίνεται ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος. Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω, αλλά επιγραμματικά αναφέρεται ότι λήφθηκαν υπόψη λεπτομέρειες που δεν υπήρχαν σε άλλες αναλύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να έχουμε ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικότητας. Έτσι, στον κώδικα προσομοιώνεται η κωνικότητα της ασπίδας, η τραπεζοειδής πίεση που ασκείται στο μέτωπο από την ασπίδα του EPB και η σκλήρυνση του ενέματος συναρτήσει του χρόνου, προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στα τελικά αποτελέσματα.

¹ (Dassault Systems 2010)

4.2 Χαρακτηριστικά και παράμετροι του μοντέλου

Η διάνοιξη σήραγγων με μηχανήμα EPB είναι μία ιδιαιτέρως πολύπλοκη διαδικασία. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο που θα δημιουργηθεί έχει ως στόχο να προσομοιώσει όσο καλύτερα γίνεται κάθε ένα από τα βήματα της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, οι διαδικασίες που σχεδιάστηκαν ανά βήμα εκσκαφής είναι οι εξής:

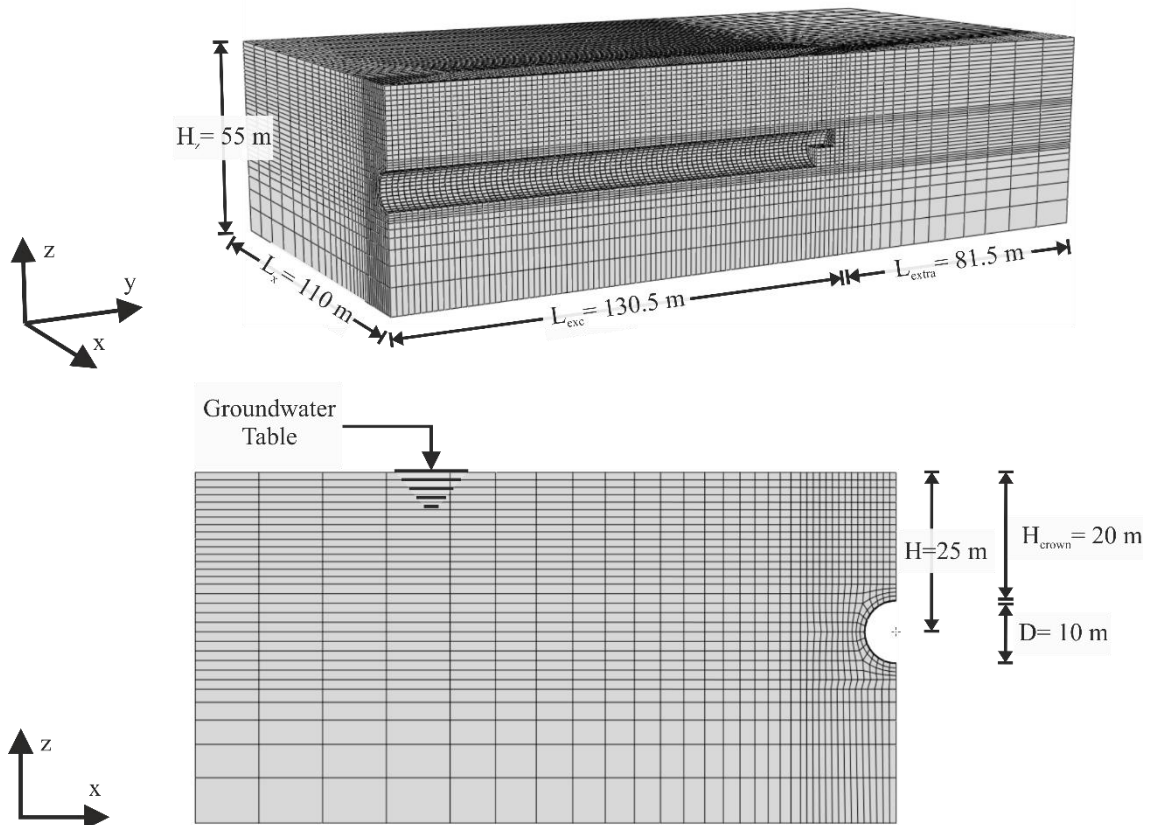
- Το μηχανήμα ασκεί μια πίεση στο μέτωπο μέσω του πολφού, η οποία αυξάνεται γραμμικά με το βάθος, λόγω του ίδιου βάρους του πολφού.
- Το ένεμα εισπνέζεται στο ουραίο κενό με μία συγκεκριμένη πίεση, ενώ το μέτρο ελαστικότητας του, από μηδενική τιμή στην ρευστή κατάσταση αυξάνεται με τον χρόνο καθώς λαμβάνει χώρα η αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- Οι δακτύλιοι κατασκευάζονται μέσα στην ασπίδα και καθώς προωθείται το μηχανήμα εξέρχονται αυτής και έρχονται σε επαφή με το ένεμα που εισπνέζεται στο κενό.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος προσομοίωσης του κάθε στοιχείου του αριθμητικού μοντέλου ξεχωριστά.

4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου

Το πρόβλημα της μελέτης των παραμέτρων που επηρεάζονται από τη διάνοιξη ευθείας σήραγγας σε ιδανικές συνθήκες, μπορεί να θεωρηθεί συμμετρικό, γεγονός που εξοικονομεί υπολογιστική ισχύ κατά την επίλυση και κατά συνέπεια χρόνο. Μορφώθηκε, λοιπόν, ένα τριδιάστατο μοντέλο, συμμετρικό ως προς το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της σήραγγας (επίπεδο $y-z$), με κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από τις συνθήκες των ορίων (boundary conditions).

Το υπό μελέτη μοντέλο, αφορά εκσκαφή σήραγγας μήκους (L) 130.5 m, διαμέτρου (D) 10 m και βάθους (H) 25 m (δηλ. λόγο βάθους προς διάμετρο $H/D=2.5$), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διεύθυνση $x-x'$ το πλευρικό όριο του μοντέλου από τον άξονα της σήραγγας είναι στα 110 m (11D), το ύψος του μοντέλου είναι 55 m και το μήκος του μοντέλου είναι 212 m ($\approx 20D$). Τα επιπλέον 81,5 m ($\approx 8D$) του μοντέλου, μετά το τέλος της διάνοιξης, θεωρούνται απαραίτητα για την παρατήρηση τυχόν φαινομένων πρόδρομων συγκλίσεων και επιφανειακών καθιζήσεων μπροστά από το μέτωπο.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση και διαστασιολόγηση του υπό μελέτη μοντέλου.

Η διάνοιξη πραγματοποιείται ευθύγραμμα με σταθερό ρυθμό εκσκαφής. Ο ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος θεωρείται 18 m/d ή μία τοποθέτηση δακτυλίου υποστήριξης (δηλ. πλάτος 1.5 m) ανά 2 h . Το μήκος του μηχανήματος είναι 10.5 m , δηλαδή αντιστοιχεί σε μήκος επτά δακτυλίων υποστήριξης. Για τη προσομοίωση της υπερεκσκαφής, η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας του μηχανήματος, εισηχθη μικρότερη από τη διάμετρο εκσκαφής. Επιπλέον, το σχήμα της ασπίδας είναι κωνικό, δηλαδή η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας μειώνεται γραμμικά προς μια μικρότερη τιμή στην ουρά της ασπίδας. Η κάτω πλευρά του μηχανήματος θεωρείται ότι είναι σε επαφή με το περιβάλλον έδαφος.

4.2.2 Διακριτοποίηση του μοντέλου και συνοριακές συνθήκες

Για την μόρφωση του προσομοιώματος χρησιμοποιούνται τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων και όσο μικρότερο το μέγεθος τους, τόσο πιο ακριβή είναι συνήθως τα αποτελέσματα. Από την άλλη βέβαια η αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων, οδηγεί και σε αναπό-

φευκτη αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Γι' αυτό έγινε προσπάθεια, η διακριτοποίηση του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί να έχει τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων, που θα εξασφαλίζουν την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Αναλυτικότερα, η διακριτοποίηση των στοιχείων του μοντέλου είναι πυκνή στον χώρο της σήραγγας και περιμετρικά αυτής, δηλαδή στις περιοχές που αναμένουμε σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1, η διακριτοποίηση προοδευτικά αραιώνει καθώς απομακρυνόμαστε από την εκσκαφή, εκτός από την περιοχή που βρίσκεται πάνω από τη σήραγγα στην οποία παραμένει πυκνή (ακριβέστερη παρατήρηση καθιζήσεων). Κατά τη διεύθυνση y και μέχρι τα 130.5 m (μήκος εκσκαφής) τα στοιχεία έχουν πλευρά 1.5 m (πλάτος προκατασκευασμένων στοιχείων/βήμα εκσκαφής). Ύστερα βαθμιαία αυξάνουν το μήκος της πλευράς τους. Κατά τη διεύθυνση του άξονα $x-x'$ και για 15 m από τον άξονα της σήραγγας, τα στοιχεία διακριτοποιούνται με πλάτος 1 m. Έπειτα, αυξάνουν το μήκος τους βαθμιαία μέχρι το τέλος του μοντέλου. Καθ' ύψος, τα στοιχεία από την επιφάνεια $Z=25$ m και μέχρι τη στάθμη $Z=7.5$ m λαμβάνουν ύψος 1.17 m. Στην περιοχή της σήραγγας τα στοιχεία πυκνώνουν αρκετά κατόπιν κατάλληλης εντολής στο πρόγραμμα και από τη στάθμη $Z=-9$ m έως τη βάση $Z=-30$ m αυξάνουν βαθμιαία από 1.8 m σε ύψος 8 m περίπου.

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), όπως αναφέρθηκε και στο § 4.2.1, λόγω συμμετρίας του προβλήματος, το μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι το μισό. Για τον λόγο αυτό, ήταν απαραίτητη η εφαρμογή κάποιων περιορισμών των βαθμών ελευθερίας των κόμβων των συνοριακών επιφανειών του μοντέλου. Έτσι, αρχικά δεσμεύτηκαν οι κατά $x-x'$ μετακινήσεις και στροφές των κόμβων στο επίπεδο που διχοτομεί την εκσκαφή ($X=0$ m). Οι κόμβοι στην επιφάνεια ($Z=25$ m) είναι ελεύθεροι ενώ οι κόμβοι στον κάτω μέρος του μοντέλου ($Z=-30$ m) δεσμεύτηκαν πλήρως. Τέλος, στους κόμβους στις εκατέρωθεν επιφάνειες του μοντέλου ($Y=0$ m, $Y=212$ m και $X=110$ m) παρεμποδίζονται οι μετακινήσεις εκτός επιπέδου και κατά την διεύθυνση $z-z'$.

4.2.3 Εδαφικός τύπος – Καταστατικός νόμος

Δεδομένου ότι τα EPB και Slurry μηχανήματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε αστικά περιβάλλοντα και πιο συγκεκριμένα σε αργιλοϊλυώδη εδαφικά υλικά, στην προσομοίωση γίνεται η υπόθεση ότι ο τύπος του εδάφους που εκσκάπτεται είναι ένα συνεκτικό, ομοιογενές και ισότροπο υλικό.

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, αλλά ειδικές περιπτώσεις καθιστούν προτιμότερη τη χρήση πιο εξειδικευμένων, στο ελάχιστο πρόβλημα, μοντέλων. Στη διάνοιξη σηράγγων, όπου η κατάσταση αστοχίας οφείλεται στη σταδιακή αποτόνωση του υλικού (αποφόρτιση), ίσως ένα κριτήριο αστοχίας που να περιλαμβάνει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας στη φόρτιση και διαφορετικό στην αποφόρτιση να προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια (βλ. τροποποιημένο κριτήριο Cam-Clay).

Παρόλα αυτά, ανεξάρτητα με τα μειονεκτήματά του, το κριτήριο M-C θεωρείται ιδανικό για τη συγκεκριμένη εργασία, από τη στιγμή που στόχος δεν είναι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά η σύγκρισή τους για διάφορους τύπους γεωτεχνικών συνθηκών. Επιπλέον, το M-C δίνει τη δυνατότητα διαχωρισμού των γεωτεχνικών συνθηκών, βάση δύο πολύ διαδεδομένων παραμέτρων, της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ .

4.2.4 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση του εδάφους

Το έδαφος προσομοιώνεται στο μοντέλο με χωρικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8P. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από οκτώ κόμβους στις γωνίες τους. Οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε κόμβου είναι τέσσερις. Πιο συγκεκριμένα, είναι τρεις βαθμοί ελευθερίας για τις μετακινήσεις κατά τους τρεις άξονες αντίστοιχα και ένας ακόμα βαθμός ελευθερίας για την πίεση των πόρων.

Στη συνέχεια, ορίστηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, δηλαδή οι παράμετροι του κριτηρίου που επιλέχθηκε για την επίλυση του προβλήματος (M-C). Οι παράμετροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε δύο τύπους εδαφικών προφίλ, με ευνοϊκές και μη ευνοϊκές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν αναλύσεις για δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ με ονομασίες a και b , των οποίων οι γεωτεχνικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Όπως είναι εμφανές και στον Πίνακα 4.1, ουσιαστικά, ο συντελεστής ωθήσεων K_0 , το ειδικό βάρος γ , ο λόγος poisson ν και η διαπερατότητα του εδάφους K_s έχουν σταθερή τιμή για όλες τις αναλύσεις. Κατά συνέπεια, η διαφορά των αναλύσεων έγκειται στις παραμέτρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb, συνοχή c και γωνία τριβής ϕ .

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες εδαφικών προφίλ

Soil Profiles											
Code	K_0	γ (kN/m ³)	ϕ (deg)	c (kPa)	E (MPa)	E_{stiff} (MPa)	ψ (deg)	e	ν	c_u (kPa)	k_s (m/h)
a	0.5	20	20	15	24.07	240.74	3	0.7	0.3	80.25	10 ⁻⁸
b	0.5	20	30	50	45.59	455.88	5	0.7	0.3	151.96	10 ⁻⁸

Η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους προκύπτει μέσω των παραμέτρων Mohr-Coulomb και των αρχικών γεωστατικών τάσεων. Συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένο τις αρχικές γεωστατικές κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 ενός εδαφικού στοιχείου στο κέντρο της σήραγγας και τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής c και ϕ , υπολογίζεται αρχικά η πρόσθετη τάση $\Delta\sigma_1$ που απαιτείται για να αστοχήσει σε αστράγγιστες συνθήκες το συγκεκριμένο στοιχείο. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό που περιγράφεται στην εξίσωση 4.1 έγινε η υπόθεση ότι η τιμή του συντελεστή A του τύπου του Skempton ισούται με $1/3$.

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma'_3 \cdot N_\phi + 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\phi} - \sigma'_1}{1 + A \cdot (N_\phi - 1)} \quad (4.1)$$

$$N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.2)$$

Έπειτα, υπολογίζεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους c_u (εξίσωση 4.3), ενώ το μέτρο παραμορφωσιμότητας εκτιμήθηκε ίσο με $300 \cdot c_u$ (εξίσωση 4.4), ακολουθώντας προτάσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία (Bowles 1997; Prountzopoulos 2012).

$$c_u = \frac{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4.3)$$

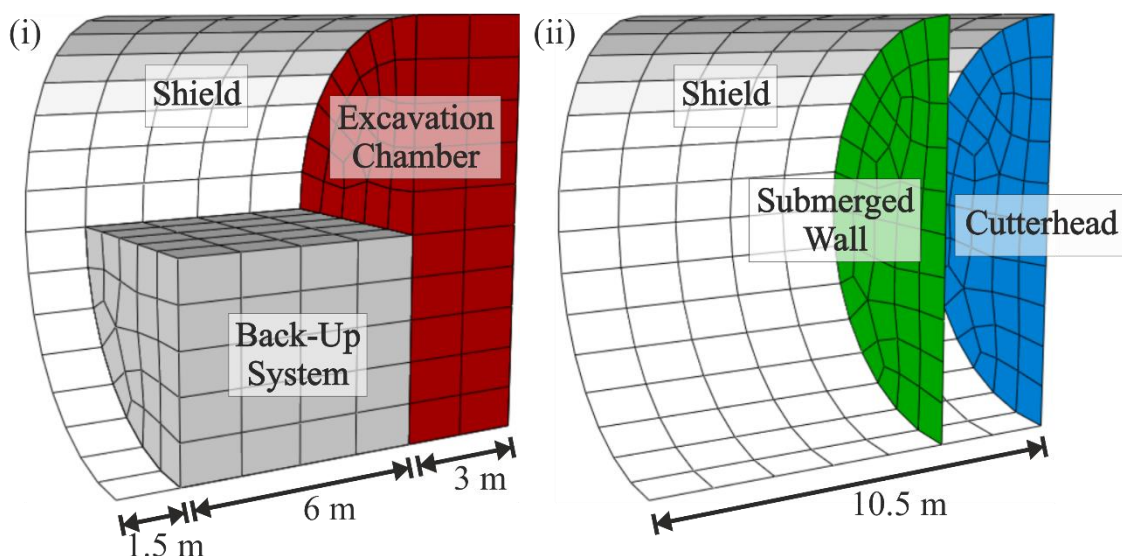
$$E = 300 \cdot c_u \quad (4.4)$$

Η διαστολικότητα του εδάφους θεωρήθηκε ίση με το $1/6$ της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους.

$$\psi = \frac{1}{6} \cdot \phi \quad (4.5)$$

4.2.5 Γεωμετρία και προσομοίωση του μηχανήματος

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο § 2.4, το EPB αποτελείται από την κοπτική κεφαλή (cutterhead), τον θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber), τον διαφραγματικό τοίχο (submerged wall), την ασπίδα (shield) και τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη, όπως ο ατέρμων κοχλίας (screw conveyor), το δωμάτιο χειρισμού (control room) κ.α., τα οποία προσομοιάζονται ως ένα «βάρος» πίσω από το μηχάνημα και αναφέρονται ως σύστημα back up (βλ. Εικόνα 4.2). Το προσομοίωμα του μηχανήματος μορφώθηκε στο Abaqus/CAE και παρουσιάζεται αναλυτικά στα παρακάτω υποκεφάλαια.

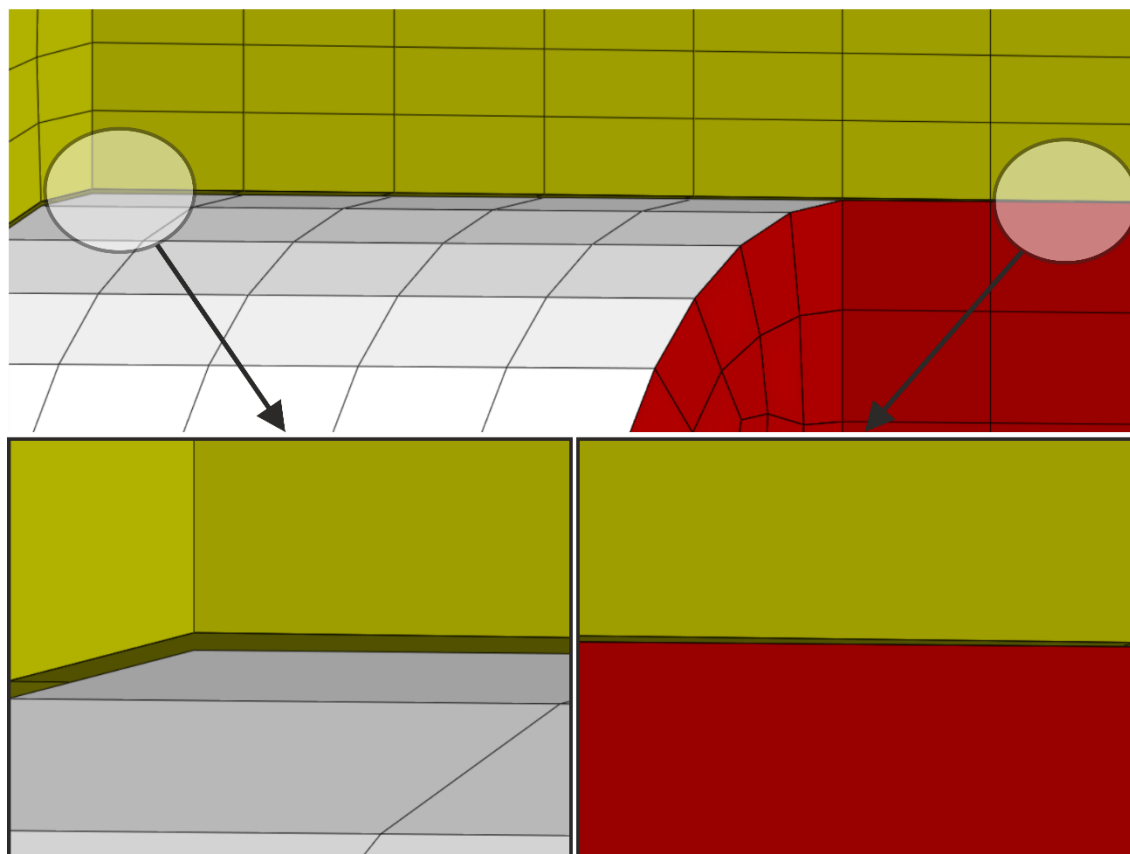


Εικόνα 4.2: Μοντέλο του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής i) ολόκληρο, ii) τα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν την ασπίδα, την κοπτική κεφαλή και το τοίχο πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής.

4.2.5.1 Προσομοίωση μηχανήματος

Το μηχάνημα διακριτοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε οι ακμές και οι κόμβοι των εξωτερικών του στοιχείων, να συμπίπτουν γεωμετρικά με αυτά του ορίου εκσκαφής, του περιβάλλοντος εδάφους. Η ασπίδα, η κοπτική κεφαλή και ο τοίχος πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής προσομοιώνονται με στοιχεία κελύφους τύπου S4, ενώ ο πολφός μέσα στο θάλαμο εκσκαφής και ο μηχανολογικός εξοπλισμός του TBM προσομοιώνονται με χωρικά εξαπλευρικά στοιχεία C3D8 (βλ. Εικόνα 4.2). Τα στοιχεία S4 είναι τετρακομβικά στοιχεία κελύφους με έξι βαθμούς ελευθερίας στον κάθε κόμβο, τρεις που αφορούν στη μετακίνηση και τρεις περιστροφικούς. Τα στοιχεία C3D8 είναι οκτακομβικά όπως τα C3D8P, με μόνη διαφορά ότι ο κάθε κόμβος έχει μόνο τρεις βαθμούς ελευθερίας όσον αφορά στις μετακινήσεις ως προς τους τρεις άξονες.

Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το μηχάνημα έχει μήκος 10.5 m, ενώ η διάμετρος του είναι μικρότερη από τη διάμετρο της σήραγγας (λόγω υπερεκσκαφής) και μεταβαλλόμενη κατά το μήκος σχηματίζοντας ένα κόλουρο κώνο, με διάμετρο 9.99 m στο μέτωπο και 9.96 m στο πίσω μέρος (βλ. Εικόνα 4.3). Το μήκος του θαλάμου εκσκαφής είναι 3 m και το μήκος του συστήματος back up είναι 6 m. Το πάχος της ασπίδας είναι 10 cm. Τέλος, το μηχάνημα τοποθετείται έκκεντρα στην εκσκαφή, έτσι ώστε στη βάση του να είναι σε επαφή με την παρειά της εκσκαφής.



Εικόνα 4.3: Διαφοροποίηση της υπερεκσκαφής από το μέτωπο στο πίσω μέρος του μηχανήματος, στο TBM του υπό μελέτη μοντέλου.

Όλα τα στοιχεία του TBM θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά. Στα στοιχεία της ασπίδας χρησιμοποιήθηκαν οι ελαστικές ιδιότητες του χάλυβα, δηλαδή μέτρο ελαστικότητας (E) 210 GPa και λόγος Poisson (ν) 0.2. Η πυκνότητα (ρ) του υλικού ορίστηκε 40.4 kg/m^3 . Η μεγάλη αυτή τιμή επιλέχτηκε έτσι ώστε εκτός από την προσομοίωση του ίδιου βάρους του υλικού της ασπίδας, να εξισορροπείται και περίπου το 80% του βάρους του εκσκαπόμενου υλικού. Αυτό συμβαίνει διότι, το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται λαμβάνει το ίδιο μέτρο ελαστικότητας σε φόρτιση και αποφόρτιση. Έτσι η αφαίρεση του εδαφικού υλικού θα είχε ως συνέπεια την διόγκωση του περιβάλλοντος

εδάφους και την ανάπτυξη μη ρεαλιστικών ανυψώσεων κατά την επίλυση του προβλήματος. Τα στοιχεία που προσομοιώνουν τον πολφό και τον μηχανολογικό εξοπλισμό έχουν τοποθετηθεί με μοναδικό σκοπό να προσομοιώσουν ρεαλιστικά το βάρος του μηχανήματος. Να σημειωθεί εδώ, ότι η μόνη αλληλεπίδραση που έχει το μηχάνημα με το περιβάλλον έδαφος, είναι μέσω του νόμου διεπιφάνειας, ο οποίος συνδέει την ασπίδα με τους εσωτερικούς κόμβους του εδάφους στην περίμετρο της εκσκαφής.

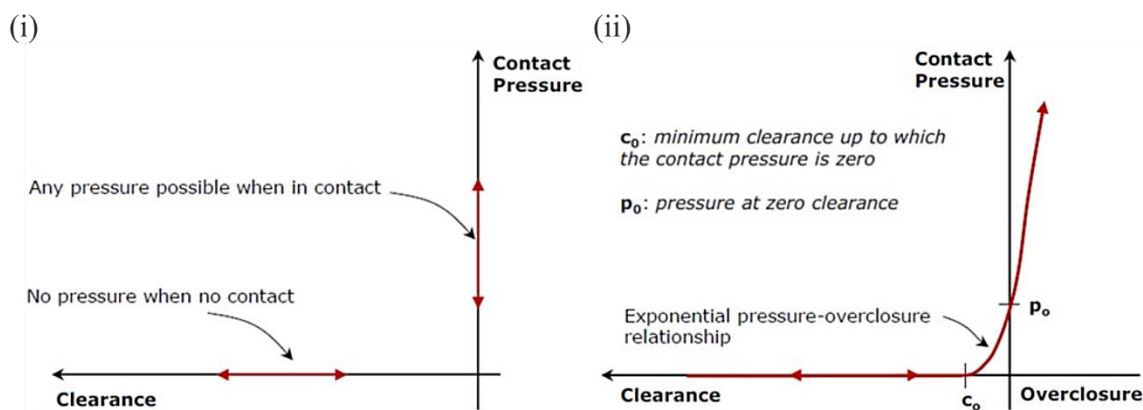
Πίνακας 4.2: Στοιχεία δυσκαμψίας για τα κομμάτια που απαρτίζουν το μηχάνημα.

	Muck	Back-Up System	Submerged Wall	Cutterhead	Shield
γ (kN/m ³)	13	16	78.5	78.5	78.5
E (GPa)	-	0.06	210	210	210
v	-	0.3	0.2	0.2	0.2

4.2.5.2 Προσομοίωση διεπιφάνειας μηχανήματος-περιβάλλοντος εδάφους

Η ρεαλιστική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ασπίδα του μηχανήματος και του εδάφους αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στη προσομοίωση της μηχανοποιημένης όρυξης, καθώς τόσο η υπερεκσκαφή (overcut) όσο και η κωνικότητα (conicity) του μηχανήματος επιδρούν σημαντικά στις εδαφικές μετακινήσεις. Στο μοντέλο δεν υπάρχουν κοινοί κόμβοι μεταξύ των στοιχείων του μηχανήματος και των στοιχείων του εδάφους. Η αλληλεπίδραση της ασπίδας του μηχανήματος με το περιβάλλον έδαφος προσομοιώνεται με τον ορισμό μιας διεπιφάνειας, μιας δηλαδή συνθήκης που αφορά στις ιδιότητες επαφής των δύο πλευρών.

Για την αλληλεπίδραση της ασπίδας με το περιβάλλον έδαφος ορίζονται δύο επιφάνειες. Η μία επιφάνεια είναι η εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας και η άλλη είναι εσωτερική επιφάνεια των στοιχείων, στην περίμετρο της εκσκαφής. Ανάμεσα σ' αυτές τις επιφάνειες, η αλληλεπίδραση ορίζεται από δύο συνιστώσες, μία ορθή και μία εφαπτομενική. Στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν η εφαπτομενική τάση αμελείται. Όσον αφορά την ορθή δεν υπάρχει όριο στην τάση που μπορεί να μεταδοθεί από τη μια επιφάνεια στην άλλη. Όταν το μέγεθος της απόστασης ανάμεσα στις δύο επιφάνειες γίνεται μηδέν, οι επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή και η πίεση μεταφέρεται πλήρως από τη μία στην άλλη. Η συνθήκη αυτή, αναφέρεται ως «hard contact» και είναι προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα Abaqus ως νόμος αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε επιφάνειες που εφάπτονται. Ο νόμος «hard contact» συνοψίζεται στο Διάγραμμα 4.1 (i).



Διάγραμμα 4.1: Σχέσεις αλληλεπίδρασης: (i) Hard contact συμπεριφορά και (ii) Soft contact συμπεριφορά (Dassault Systems 2010).

Ο παραπάνω νόμος θα μπορούσε να περιγράψει ιδανικά την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην ασπίδα του μηχανήματος και του εδάφους. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της ακρίβειας που απαιτείται στους περιορισμούς αυτής της σχέσης (π.χ. μηδενική διεύθυνση) μπορεί να συμβούν πολλές αριθμητικές αστάθειες. Για τον λόγο αυτό, γίνεται χρήση μιας «softened contact», εκθετικής συμπεριφοράς (βλ. Διάγραμμα 4.1 (ii)). Σ' αυτή τη συνθήκη ορίζονται τα μεγέθη c_0 και p_0 . Ως c_0 ορίζεται το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών για το οποίο μηδενίζεται η πίεση, ενώ ως p_0 ορίζεται η μεταφερόμενη πίεση όταν μηδενίζεται το κενό. Αναλυτικότερα, οι επιφάνειες ξεκινούν να μεταφέρουν πίεση επαφής μεταξύ τους όταν η απόσταση ανάμεσα τους, γίνεται σε c_0 . Έπειτα, η μεταφερόμενη πίεση επαφής αυξάνεται εκθετικά, ενώ η απόσταση συνεχίζει να μειώνεται, μέχρι να μηδενιστεί η απόσταση και να αναπτυχθεί πίεση με τιμή p_0 . Να σημειωθεί εδώ ότι όσο πιο μικρές τιμές των c_0 και p_0 , τόσο προσεγγίζεται η σχέση «hard contact». Στις αναλύσεις των υπό μελέτη μοντέλων, οι τιμές για τα μεγέθη c_0 και p_0 ορίστηκαν σε 10^{-5} m και 1 kPa αντίστοιχα.

4.2.5.3 Πίεση υποστήριξης μετώπου (Face Pressure)

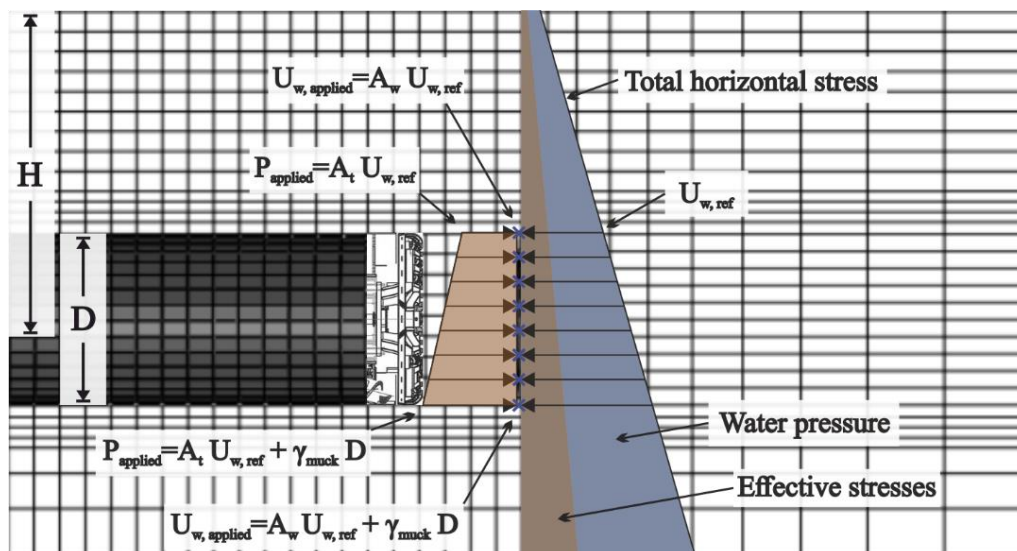
Στο αριθμητικό μοντέλο, η πίεση υποστήριξης του μετώπου προσομοιώνεται μέσω κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, στην επιφάνεια του μετώπου. Για την παρούσα εργασία εκτελούνται συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος. Σε συζευγμένες αναλύσεις, η ορθή προσομοίωση της πίεσης υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας επιβάλει τον ανεξάρτητο έλεγχο, τόσο της ολικής τάσης που ασκείται στο μέτωπο, όσο και των υδραυλικών συνοριακών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής.

Πρακτικά, η πίεση υποστήριξης του μετώπου στα μηχανήματα EPB ασκείται από τα ίδια τα προϊόντα της εκσκαφής, με τα οποία παραμένει πληρωμένος ο θάλαμος εκσκαφής. Ο ρυθμός απομάκρυνσής τους και κατά συνέπεια η αύξηση και η μείωση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας, ρυθμίζεται μέσω του ατέρμονα κοχλία (βλ. § 2.6.9). Στην πραγματικότητα, το υλικό πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής αποτελεί το προϊόν ανάμειξης του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού με το νερό και διάφορα άλλα πρόσμικτα που εισπνέζονται στον θάλαμο και την κοπτική κεφαλή (πχ. αφρός). Τα πρόσμικτα αυτά προστίθενται, τόσο για λόγους λίπανσης και ψύξης των κοπτικών, όσο και για λόγους αύξησης της εργασιμότητας του σχηματιζόμενου εδαφικού πολφού εντός του θαλάμου εκσκαφής.

Όπως αναφέρεται από διάφορους ερευνητές (Bezuijzen et al. 2005; Sitarenios et al. 2015), ο εδαφικός πολφός, εντός του θαλάμου εκσκαφής συμπεριφέρεται κατά περισσότερο ως ένα βαρύ, με αυξημένο ιξώδες υγρό, παρά ως ένα έδαφος. Αυτό οφείλεται στο ότι συνήθως λόγω της προσθήκης νερού και αφρού, το υλικό εντός του θαλάμου ξεπερνάει το μέγιστο πορώδες του (ελάχιστη πυκνότητα) και οι εδαφικοί κόκκοι ή συσσωματώματα αρχίζουν να αιωρούνται εντός του πολφού (μηδενισμός ενεργών τάσεων – ρευστοποίηση). Είναι γνωστό πως ένα υγρό ασκεί στα σύνορά του με ένα πορώδες υλικό, ισόποση ολική τάση και πίεση πόρων.

Στο προσομοίωμα της παρούσας εργασίας, τόσο η ολική τάση στο μέτωπο της εκσκαφής, όσο και η πίεση των πόρων ελέγχονται και επιβάλλονται ξεχωριστά. Η ολική τάση ορίζεται ως κατανεμημένη πίεση επί της επιφάνειας του μετώπου και η πίεση των πόρων ορίζεται ως επικόμβια συνοριακή συνθήκη. Και οι δύο ακολουθούν μία τραπεζοειδή κατανομή, με χαρακτηριστικά που περιγράφονται παρακάτω με την βοήθεια της Εικόνας 4.4.

Στην κορυφή του μετώπου της εκσκαφής θεωρείται ως χαρακτηριστική τιμή η πίεση P_0 . Επί της ουσίας, η τιμή P_0 είναι η αντίστοιχη υδροστατική πίεση (U_w) στην κορυφή του μετώπου και στην υπό διερεύνηση περίπτωση είναι ίση με 200 kPa, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 4.6. Η αύξηση της πίεσης του μετώπου γίνεται γραμμικά με το βάθος συναρτήσει του γ_{muck} , που αντιστοιχεί στο ειδικό βάρος του υλικού που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής. Για το υπό μελέτη μοντέλο η τιμή του γ_{muck} είναι 13 kN/m³.



Εικόνα 4.4: Απεικόνιση των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής.

Η εφαρμοζόμενη από το EPB πίεση στο μέτωπο δίνεται από την εξίσωση 4.7.

$$P_0 = \gamma_w \cdot \left(H - \frac{D}{2} \right) = U_w \quad (4.6)$$

$$P_{\text{applied}} = P_0 + \gamma_{\text{muck}} \cdot h_f \quad (4.7)$$

όπου,

P_0 : πίεση στην κορυφή του μετώπου εκσκαφής

U_w : υδροστατική πίεση

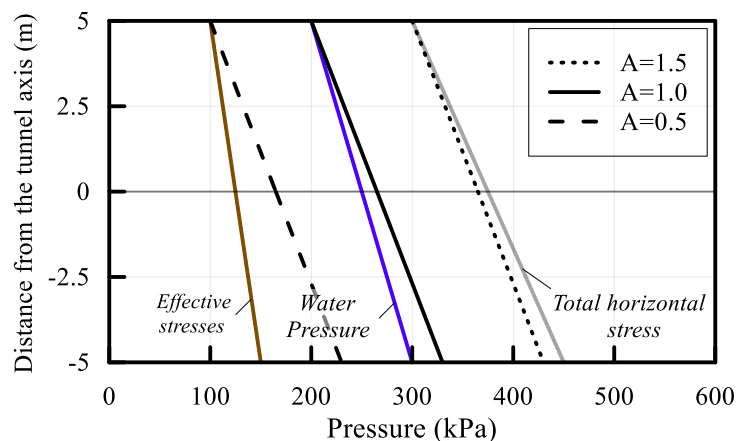
P_{applied} : εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής

h_f : ύψος στον κατακόρυφο άξονα του μετώπου

Στη συνέχεια, ορίζεται η παράμετρος A , η οποία λαμβάνεται ως ο λόγος της πίεσης P_0 προς την υδροστατική πίεση στο αντίστοιχο σημείο (βλ. εξίσωση 4.8). Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στην Εικόνα 4.4, η εφαρμοζόμενη πίεση υποστήριξης απαρτίζεται από δύο παραμέτρους ($A=A_t=A_w$), την A_t και την A_w . Η πρώτη παράμετρος (A_t) ελέγχει τη μηχανική πίεση (ολικές πιέσεις), ενώ η δεύτερη (A_w) ελέγχει την πίεση των πόρων στο μέτωπο της σήραγγας.

$$A = \frac{P_0}{\gamma_w \cdot \left(H - \frac{D}{2} \right)} \quad (4.8)$$

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη μελέτη, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της πίεσης υποστήριξης, δηλαδή $A=A_t=A_w$ ίσο με 0.5, 1 και 1.5. Στο Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζεται η κατανομή και το μέγεθος της εφαρμοζόμενης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και συγκρίνεται με την επί τόπου οριζόντια γεωστατική πίεση (P_h), την υδροστατική πίεση (U_w) και τη συνολική οριζόντια πίεση ($P_{t,h}$).



Διάγραμμα 4.2: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου υποστήριξης μετώπου A , των ενεργών τάσεων, των υδροστατικών πιέσεων και ολικών οριζόντιων γεωστατικών πιέσεων σε σχέση με την κατακόρυφη απόσταση από τον οριζόντιο άξονα της σήραγγας.

Συγκεκριμένα στο βάθος που βρίσκεται ο άξονας της σήραγγας, παρατηρείται ότι:

- για $A=A_t=A_w=0.5$, η εφαρμοζόμενη πίεση είναι περίπου το 70% της επί τόπου υδροστατικής πίεσης, και το 50% της συνολικής οριζόντιας γεωστατικής πίεσης,
- για $A=A_t=A_w=1$, οι τιμές της εφαρμοζόμενης πίεσης είναι κοντά σ' αυτές της επί τόπου υδροστατικής πίεσης και είναι περίπου το 70% της οριζόντιας γεωστατικής πίεσης,
- για $A=A_t=A_w=1.5$, η πίεση υποστήριξης είναι περίπου 50% μεγαλύτερη από την επί τόπου υδροστατική και είναι κοντά στην τιμή της οριζόντιας γεωστατικής πίεσης.

Η εξισορρόπηση του μετώπου περιγράφεται από τον λόγο $P_{\text{applied}}/P_{t,h}$. Σημαντικό είναι να σημειωθεί, πως ο σκοπός της υποστήριξης δεν είναι η πλήρης εξισορρόπηση των οριζόντιων τάσεων, αλλά απλά η συγκράτηση του μετώπου σε επιτρεπτά όρια, ώστε να αποφευχθεί η πλαστική αστοχία μεγάλου εύρους που θα είχε ως αποτέλεσμα καθιζήσεις πέρα από το επιτρεπτά όρια. Ο συγκεκριμένος λόγος, σ' αυτές τις αναλύσεις είναι περίπου 0.70, που είναι μια τιμή που θεωρείται ικανοποιητική για την υποστήριξη του μετώπου. Σε περιπτώσεις που ο λόγος της εξισορρόπησης του μετώπου είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 1, παρατηρούνται αρκετά προβλήματα στη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας, όπως η φθορά των κοπτικών, η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

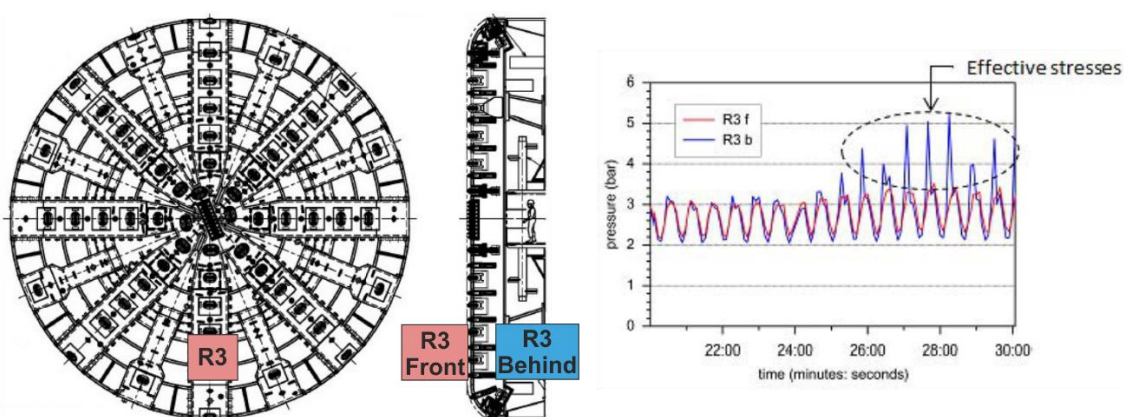
Πίνακας 4.3: Τιμές της συνολικής οριζόντιας πίεσης ($P_{t,h}$), της εφαρμοζόμενης πίεσης ($P_{applied}$) στη στέψη του μετώπου εκσκαφής και ο λόγος εξισορρόπησης, συγκριτικά με τις τιμές της παραμέτρου A .

		A=0.5	A=1.0	A=1.5
$P_{t,h}$	(kPa)	375	375	375
$P_{applied}$	(kPa)	165	265	365
$P_{applied}/P_{t,h}$		0.44	0.71	0.97

4.2.5.4 Θεώρηση ενεργών τάσεων (Effective Stresses)

Η θεώρηση που έγινε στη συγκεκριμένη εργασία δεν περιέχει ανάπτυξη ενεργών τάσεων. Παρόλα αυτά για να εξετασθεί το ενδεχόμενο ανάπτυξης ενεργών τάσεων, έγινε η υπόθεση ότι οι ενεργές τάσεις αναπτύσσονται στον πολφό που υπάρχει στον θάλαμο εκσκαφής. Με άλλα λόγια δηλαδή, εάν η εισερχόμενη ποσότητα (υλικό εκσκαφής) είναι μεγαλύτερη από την απερχόμενη ποσότητα (υλικό που απομακρύνεται), τότε το μέσο πορώδες του πολφού μειώνεται, προκαλώντας αύξηση των ενεργών τάσεων. Επιπλέον, η ανάπτυξη ενεργών τάσεων μπορεί να ελεγχθεί μέσω της αλλαγής των χαρακτηριστικών των πρόσμικτων προϊόντων που προστίθενται στο μέτωπο κατά την εκσκαφή.

Οι Bezuijen & Talmon (2014) πραγματοποίησαν μετρήσεις κατά τη διάνοιξη σήραγγας με EPBM σε κορεσμένη άμμο. Πιο συγκεκριμένα παρουσίασαν αποτελέσματα από μετρήσεις ολικών πιέσεων και πιέσεων πόρων, μπροστά και πίσω από την κοπτική κεφαλή και στη συνέχεια τις σύγκριναν με εκείνες που έλαβαν στο σημείο του διαφραγματικού τοίχου.



Διάγραμμα 4.3: Μετρήσεις ολικών τάσεων από το όργανο μέτρησης R3, μπροστά και πίσω από την κοπτική κεφαλή του EPB (Bezuijen & Talmon 2014).

Μέσα από αυτή τη διερεύνηση, παρατήρησαν ότι οι ενεργές τάσεις αναπτύσσονται στο κάτω μέρος της διατομής, πίσω από την κοπτική κεφαλή (δηλ. στον πολφό) (βλ. Διάγραμμα 4.3), και οδηγούν σε απότομη αύξηση των συνολικών τάσεων. Αυτό πρακτικά

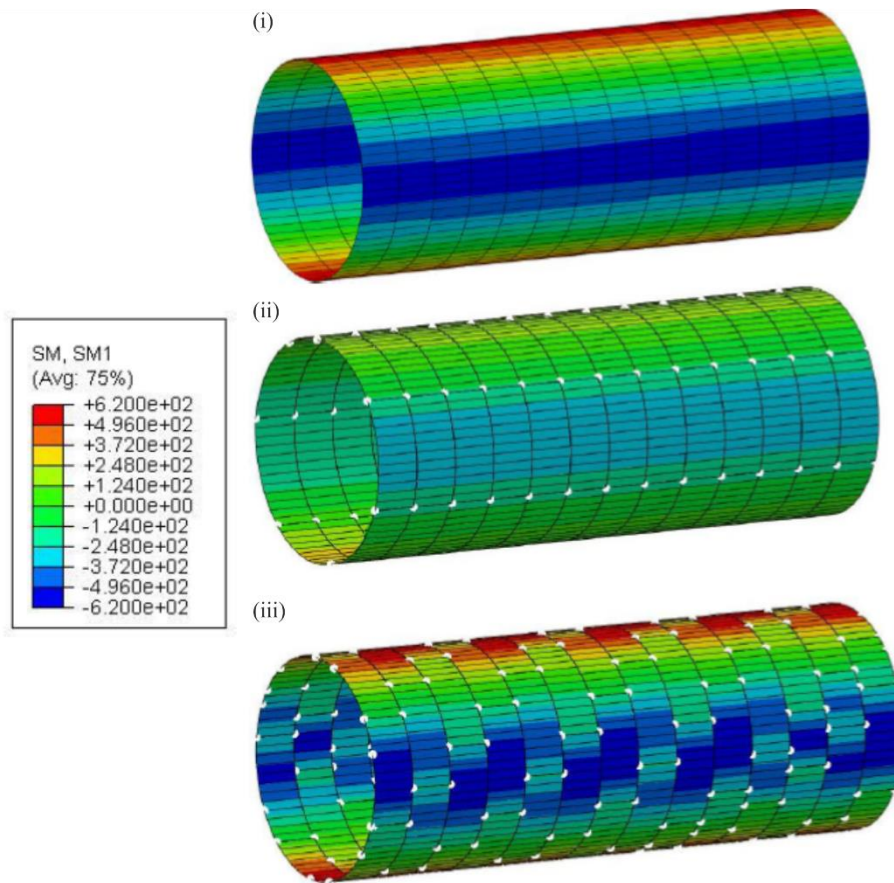
σημαίνει ότι ο πολφός συμπιέζεται, αυξάνει την πυκνότητά του και δε συμπεριφέρεται ως υγρό (ολικές πιέσεις \neq πιέσεις πόρων), επειδή αναπτύσσονται δυνάμεις μεταξύ των κόκκων.

Στη παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τιμές της παραμέτρου της πίεσης υποστήριξης $A=0.5$ και $A=1.0$ χωρίς αύξηση των ενεργών τάσεων, αλλά και με αύξησή τους κατά 25% και 50%. Πιο συγκεκριμένα, για να διαφοροποιηθεί το μέγεθος των ενεργών πιέσεων έγινε αλλαγή στη θεώρηση των πιέσεων των πόρων, ως εξής:

- $A_w=A_t$ (περίπτωση Effective Stresses 0%),
- $A_w=0.75 A_t \Leftrightarrow A_e=0.25 A_t$ (περίπτωση Effective Stresses 25%), δηλαδή με θεώρηση ανάπτυξης ενεργών τάσεων ίσων με το 25% της ολικής τάσης,
- $A_w=0.50 A_t \Leftrightarrow A_e=0.50 A_t$ (περίπτωση Effective Stresses 50%), δηλαδή με θεώρηση ανάπτυξης ενεργών τάσεων ίσων με το 50% της ολικής τάσης.

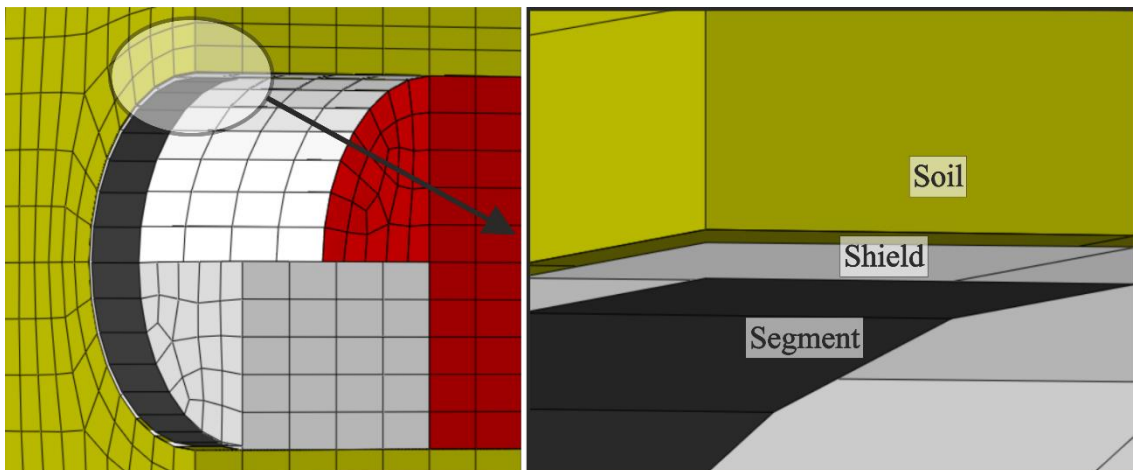
4.2.5.5 Προσομοίωση της τελικής επένδυσης

Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε για τη συγκεκριμένη εργασία, για την προσομοίωση της τελικής επένδυσης της σήραγγας (final lining) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους τύπου S4, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μονολιθικά. Δηλαδή, στο μοντέλο δεν προσομοιώνονται οι αρμοί σύνδεσης μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων, αλλά εισάγεται η υποστήριξη ως ένας ενιαίος κύλινδρος. Η συγκεκριμένη θεώρηση, δε διαφέρει πολύ από την πραγματικότητα. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 η συμπεριφορά του συστήματος με διαμήκεις αρμούς που δε συμπίπτουν (iii), είναι όμοια με τη συμπεριφορά του συνεχούς κυλίνδρου (i). Έτσι για λόγους απλοποίησης του μοντέλου, όπως υιοθετείται και από άλλους ερευνητές (Kasper & Meschke 2004; Kasper & Meschke 2006; Nagel & Meschke 2011; Nagel et al. 2012; Lambrughi et al. 2012), λαμβάνεται μονολιθική σύνδεση των στοιχείων της υποστήριξης.



Εικόνα 4.5: Καμπτικές ροπές σε στοιχεία υποστήριξης που προσομοιώνονται με (i) συνεχή κύλινδρο, (ii) διαμήκεις αρμούς που συμπίπτουν σε διαδοχικούς δακτύλιους και (iii) διαμήκεις αρμούς που δεν συμπίπτουν (Litsas et al. 2015).

Στο μοντέλο, σε κάθε βήμα εκσκαφής ενεργοποιείται και ένας δακτύλιος υποστήριξης, στο εσωτερικό τμήμα της ασπίδας (βλ. Εικόνα 4.6). Το πάχος της επένδυσης λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 0.35 m, το οποίο είναι μία μέση τιμή για συνήθεις πρακτικές εφαρμογές σε έργα ΜΕΤΡΟ. Το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού του δακτυλίου λαμβάνεται ίσο με 20 GPa και ο λόγος Poisson ν ίσος με 0.2.



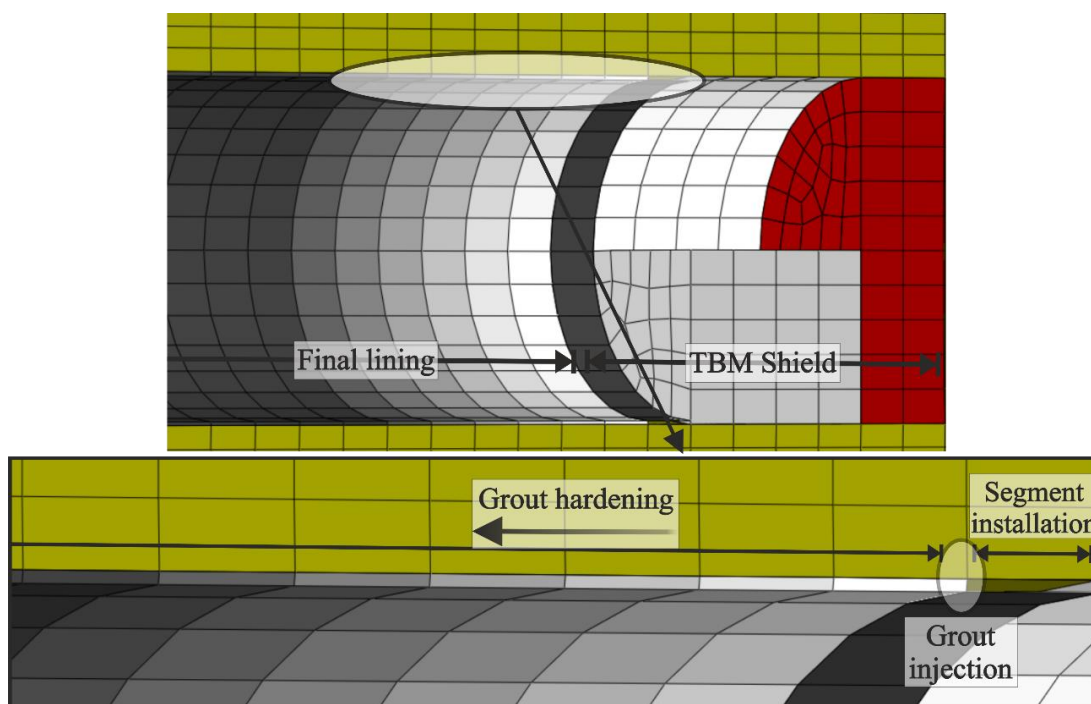
Εικόνα 4.6: Τοποθέτηση τελικής επένδυσης στο υπό μελέτη μοντέλο.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά προκατασκευασμένων στοιχείων υποστήριξης της σήραγγας.

Τελική υποστήριξη σήραγγας		
Εξωτερική διάμετρος	(m)	9.74
Πάχος δακτυλίων	(m)	0.35
Μήκος δακτυλίων	(m)	1.50
E	(GPa)	20
ν		0,2

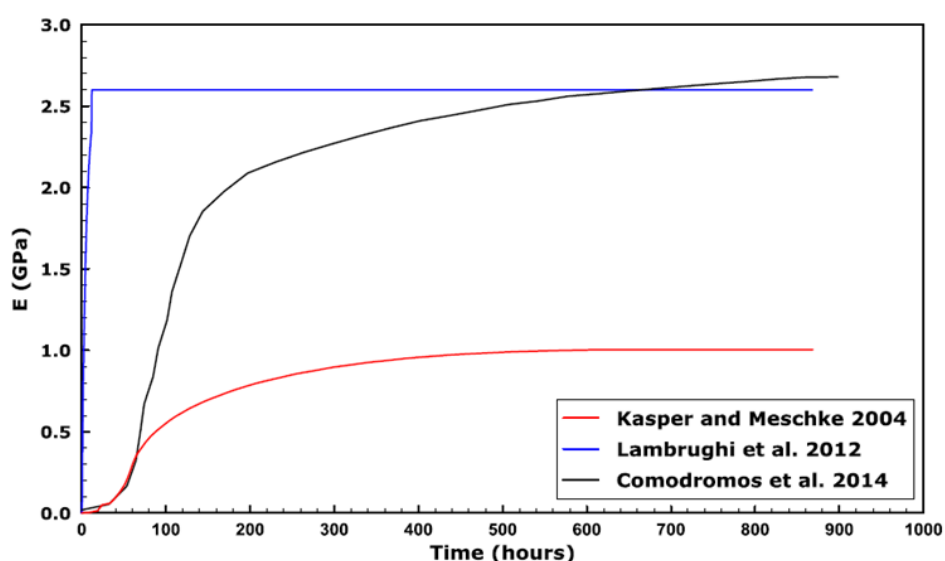
4.2.5.6 Προσομοίωση της διαδικασίας ενεμάτωσης

Στο μοντέλο που εξετάζεται στη συγκεκριμένη εργασία, το ένεμα προσομοιώνεται με εξαπλευρικά οκτακομβικά στοιχεία C3D8. Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται μεταξύ των στοιχείων του κελύφους της υποστήριξης και του περιβάλλοντος εδάφους, δηλαδή έχουν τέσσερις κοινούς κόμβους με το έδαφος και τέσσερις κοινούς κόμβους με την επένδυση. Κατά τη διαδικασία της εκσκαφής η ενεμάτωση λαμβάνει χώρα μόλις τα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης βρεθούν εκτός της ασπίδας (βλ. Εικόνα 4.7). Κατά αντίστοιχο τρόπο, στη μοντελοποίηση τα συγκεκριμένα στοιχεία ενεργοποιούνται περιμετρικά της τελικής επένδυσης, μόλις το μηχάνημα περάσει στο επόμενο βήμα εκσκαφής και ο δακτύλιος αυτός βρεθεί εκτός της ασπίδας του μηχανήματος.



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση της τοποθέτησης και σκλήρυνσης του ενέματος στο μοντέλο.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της διαδικασίας της ενεμάτωσης, είναι πως το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου (βλ. Εικόνα 4.7). Για την προσομοίωση της διαδικασίας σκλήρυνσης του ενέματος έγινε χρήση μιας υπορουτίνας², η οποία τρέχει μαζί με το κυρίως πρόγραμμα και υπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας των στοιχείων του ενέματος, συγκριτικά με το χρονικό διάστημα που είναι ενεργοποιημένο (τη στιγμή που εισπιάστηκε). Η σχέση του μέτρου ελαστικότητας με τον χρόνο έχει περιγραφεί από διάφορους ερευνητές, με διαφορετικές καμπύλες (βλ. Διάγραμμα 4.4). Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε χρήση του νόμου σκλήρυνσης που προτείνουν οι Kasper & Meschke (2004).



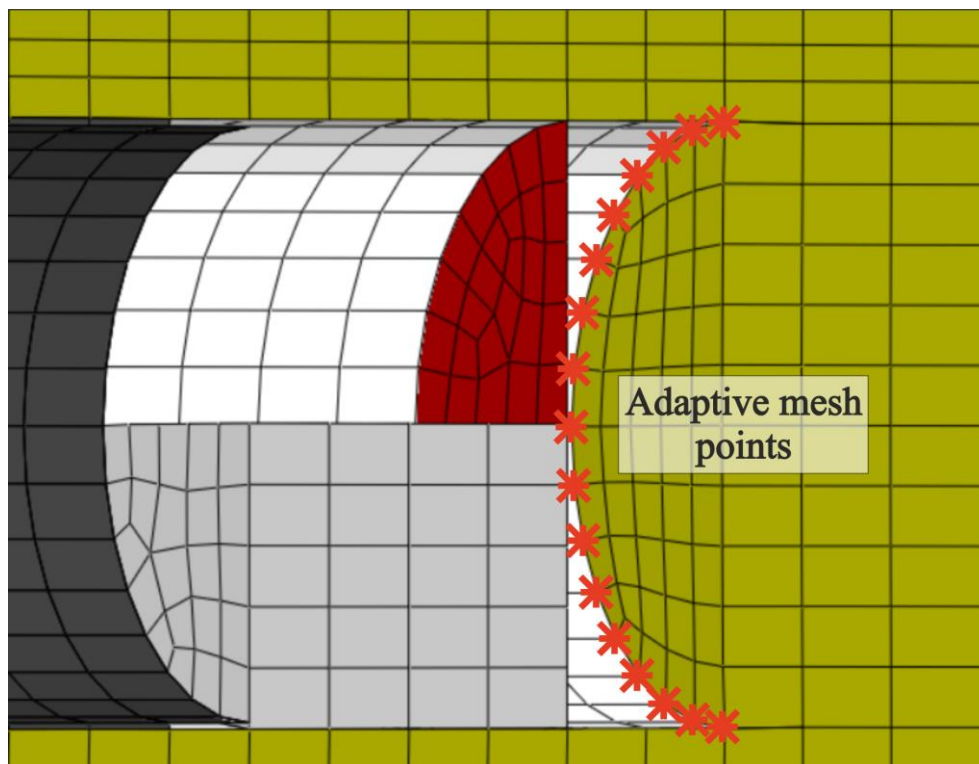
Διάγραμμα 4.4: Χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με Kasper & Meschke (2004), Lambrugh et al. (2012) και Comodromos et al. (2014).

4.2.5.7 Τεχνική προσαρμοσμένης διακριτοποίησης (Adaptive Mesh)

Σε πολλές περιπτώσεις, κατά την επίλυση αντίστοιχων προβλημάτων προσομοίωσης, παρουσιάζονται πολύ μεγάλες μετακινήσεις στην περιοχή μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Αυτό το φαινόμενο συχνά έχει ως αποτέλεσμα οι εσωτερικοί κόμβοι των περιμετρικών στοιχείων της εκσκαφής – μπροστά ακριβώς από το μέτωπο – να έχουν μετακινηθεί σε τέτοιο βαθμό (λόγω προσυγκλίσεων), που στο επόμενο βήμα – κατά την προχώρηση του TBM – να βρίσκονται εντός της περιφέρειας της ασπίδας του μηχανήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όταν προχωρήσει η εκσκαφή, οι κόμβοι αυτοί θα σπρωχτούν από την ασπίδα προς την αρχική τους θέση (βλ. Εικόνα 4.8). Έτσι θα υπάρξει μία μη ρεαλιστική αποφόρτιση του εδάφους στο μέτωπο.

² (Hibbitte 2005)

Υιοθετώντας την τεχνική Adaptive Mesh παρέχεται η δυνατότητα μηδενισμού των μετακινήσεων σε κατάλληλους κόμβους, χωρίς να επηρεάζεται το μέχρι τότε αναπτυχθέν εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο.



Εικόνα 4.8: Κόμβοι στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνική του Adaptive Mesh στο μοντέλο.

4.3 Στάδια ανάλυσης

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων, στην πλειοψηφία των τριδιάστατων αναλύσεων προσομοιώνεται ως διαδοχική αφαίρεση πεπερασμένων στοιχείων από το μέτωπο της εκσκαφής. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε και στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας και είναι γνωστή ως «βήμα-προς-βήμα» ανάλυση. Κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αποτελείται από 83 βήματα. Τα χαρακτηριστικά βήματα των αναλύσεων περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.1 Γεωστατικό βήμα

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι το γεωστατικό βήμα. Σ' αυτό το βήμα εισάγονται στο μοντέλο οι αρχικές γεωστατικές τάσεις και τα χαρακτηριστικά του γεωυλικού (φυσικά και μηχανικά). Εφαρμόζεται το βαρυτικό πεδίο κατανεμημένο στον όγκο του εδάφους (επιτάχυνση της βαρύτητας $g=10 \text{ m/s}^2$) και επέρχεται ισορροπία των αρχικών τάσεων με τις βαρυτικές δυνάμεις. Το βήμα αυτό λειτουργεί ως αφητηρία για τις αναλύσεις.

4.3.2 Βήμα εισαγωγής του TBM

Το TBM εισάγεται στο μοντέλο και ενεργοποιείται μετά την ολοκλήρωση του γεωστατικού βήματος. Στο βήμα αυτό ενεργοποιείται και η συνθήκη διεπιφάνειας ανάμεσα στην ασπίδα του μηχανήματος και την εσωτερική πλευρά της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, τα υπό-βήματα αυτού του βήματος έχουν ως εξής:

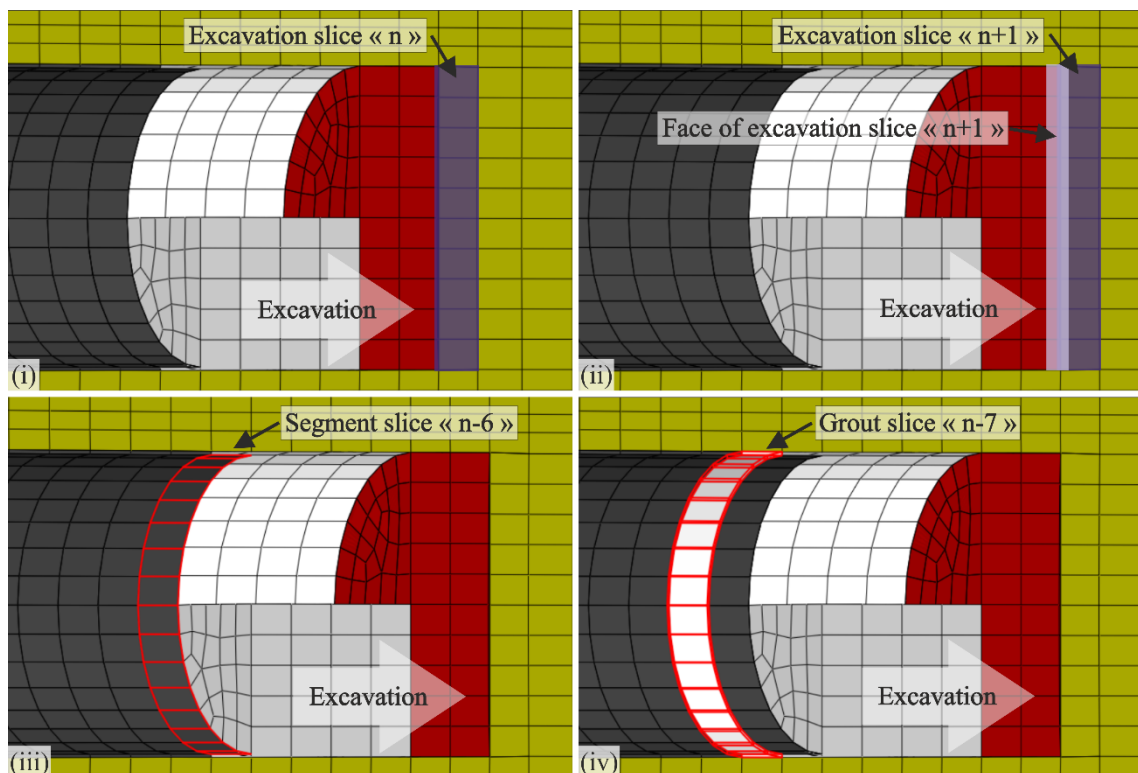
- Αφαίρεση των στοιχείων του εδάφους στο σύνορο του μοντέλου για διαστάσεις ίσες με αυτές του TBM. Συγκεκριμένα αφαιρούνται 7 «φέτες» εκσκαφής ($L_{TBM}=10.5\text{ m}$, $R=5\text{m}$).
- Εισαγωγή του TBM και ενεργοποίηση της συνθήκης διεπιφάνειας μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους. Να σημειωθεί ότι η διάμετρος του μηχανήματος είναι μικρότερη από τα στοιχεία που αφαιρέθηκαν, λόγω της υπερεκσκαφής και της κωνικότητας της ασπίδας του μηχανήματος (βλ. § 4.2.5.1).
- Εφαρμογή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας, μέσω κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Γίνεται τροποποίηση των συνοριακών συνθηκών προσθέτοντας τις τιμές για την πίεση των πόρων στο μέτωπο της σήραγγας.
- Εγκατάσταση του πρώτου προκατασκευασμένου δακτυλίου υποστήριξης, στο εσωτερικό της ασπίδας του TBM. Σ' αυτό το βήμα δεν αλληλοεπιδρά με το εδάφους.

4.3.3 Τυπικό βήμα « n »

Αφού τοποθετηθεί και ενεργοποιηθεί το TBM, τα βήματα της ανάλυσης ακολουθούν μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι το τέλος της εκσκαφής, στο βήμα 82. Παρακάτω περιγράφονται τα υπό-βήματα που μεσολαβούν από το βήμα « n », μέχρι το βήμα « n+1 ». Τα βήματα αυτά ουσιαστικά προσομοιώνουν τη διαδικασία διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας.

- Αφαίρεση της εδαφικής «φέτας» εκσκαφής « n+1 ». Η διάσταση κάθε φέτας στην διαμήκη διεύθυνση είναι ίση με το πάχος του προκατασκευασμένου στοιχείου υποστήριξης που θα τοποθετηθεί, δηλαδή 1.5 m.
- Προχώρηση του μηχανήματος κατά 1.5 m.
- Μεταφορά της πίεσης υποστήριξης στο νέο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή στην εδαφική φέτα « n+2 ». Ταυτόχρονα μεταφέρονται οι τιμές της πίεσης πόρων στους κόμβους του μετώπου « n+2 ».

- Λόγω της προχώρησης του μηχανήματος, ο δακτύλιος « n-7 », που στο προηγούμενο βήμα βρισκόταν μέσα στην ασπίδα, εξέρχεται απ' αυτή. Ένας νέος δακτύλιος « n-6 » τοποθετείται μέσα στην ασπίδα. Στο δακτύλιο « n-6 » ασκείται μόνο το βαρυντικό φορτίο και δεν έχει καμία αλληλεπίδραση με τα στοιχεία της ασπίδας που τον περιβάλλουν.
- Ενεργοποίηση των στοιχείων του ενέματος, που βρίσκονται στο κενό μεταξύ του δακτυλίου « n-7 » και του περιβάλλοντος εδάφους. Η πίεση εισαγωγής του ενέματος προσομοιώνεται με την επιβολή αρχικής ισοτροπικής τάσης, ίσης με την πίεση της ενεμάτωσης. Τα στοιχεία του ενέματος ακολουθούν τη συμπεριφορά που καθορίζει ο νόμος σκλήρυνσης που έχει οριστεί κατά τη δημιουργία του μοντέλου (βλ. § 4.2.5.6).
- Πραγματοποίηση αριθμητικών υπολογισμών (νέο πεδίο τάσεων, μετακινήσεις, πιέσεις πόρων, κ.τ.λ.).
- Εφαρμογή της τεχνικής «Adaptive Mesh» στους κόμβους περιμετρικά της « n+2 » φέτας εκσκαφής.



Εικόνα 4.9: Ενδεικτική απεικόνιση των υπό-βημάτων σε ένα τυπικό βήμα ανάλυσης «n». (i) αφαίρεση της «n» ομάδας στοιχείων προς εκσκαφή, (ii) άσκηση πίεσης μετώπου στην « n+1 » ομάδα στοιχείων, (iii) ενεργοποίηση του δακτυλίου υποστήριξης « n-6 » μέσα στην ασπίδα, (iv) ενεργοποίηση της ομάδας στοιχείων ενέματος « n-7 ».

4.3.4 Τελικό στάδιο (βήμα **Steady state**)

Όταν το μηχάνημα ολοκληρώσει την εκσκαφή (μέτωπο στο $Y=130.5$ m) και πριν ολοκληρωθεί η ανάλυση, γίνεται ένα τελευταίο υπολογιστικό βήμα, στο οποίο μεταβάλλεται μόνο ο χρόνος. Ο στόχος αυτού του βήματος είναι να φτάσει το μοντέλο σε ισορροπία στις πιέσεις των πόρων και να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση. Αυτό το βήμα κρίνεται απαραίτητο, από τη στιγμή που οι συνθήκες εκσκαφής είναι αστράγγιστες. Έτσι για να εκτονωθούν οι υποπιέσεις πόρων και να υπολογιστούν οι τελικές μετακινήσεις, χρειάζεται να περάσει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Στις συγκεκριμένες αναλύσεις το βήμα αυτό ολοκληρώνεται μετά από 10,000 hrs.

Κεφάλαιο 5

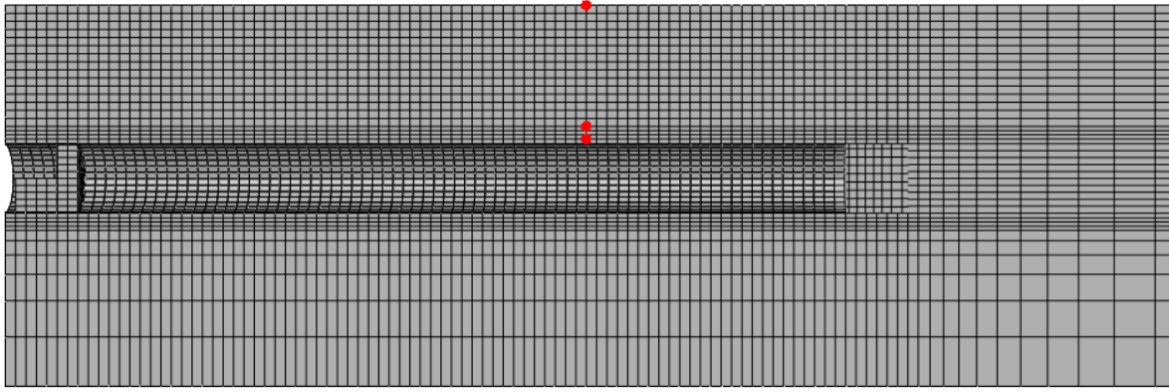
Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες εξετάστηκαν η επιρροή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο και της πίεσης των πόρων του εδαφικού υλικού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν κυρίως διαγράμματα εξέλιξης των κατακόρυφων μετατοπίσεων, της πίεσης πόρων, και της εξώθησης του μετώπου της σήραγγας με την πρόοδο της εκσκαφής. Τα διαγράμματα ιστορίας των κατακόρυφων μετακινήσεων και των πιέσεων των πόρων παρουσιάζονται για κοινά σημεία παρατήρησης σε όλες τις αναλύσεις. Τα σημεία παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατά βάση στην επιφάνεια του εδάφους ($z = 25$ m), στη στέψη της σήραγγας ($z \approx 5.5$ m), αλλά και κοντά σ' αυτή ($z = 7.5$ m) και απεικονίζονται στην Εικόνα 5.1, ενώ οι συντεταγμένες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες σημείων παρατήρησης.

Survey Points			
Point	x	y	z
	(m)	(m)	(m)
Surface	0	84	25.00
Near the crown	0	84	7.50
Crown	0	84	5.69



Εικόνα 5.1: Σημεία παρατήρησης (Πίνακας 5.1) πάνω στο μοντέλο.

5.2 Υπολογισμός μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στην ερμηνεία των αναλύσεων

5.2.1 Σημείο καμπής (i)

Ο υπολογισμός της απόστασης του σημείου καμπής i στην επιφάνεια, για το εγκάρσιο στον άξονα προφίλ καθιζήσεων, γίνεται με τον έλεγχο της αλλαγής στο πρόσημο της δεύτερης παραγώγου, της καμπύλης περιγραφής του προφίλ των εγκάρσιων κατακόρυφων μετακινήσεων. Επειδή οι καθιζήσεις δεν περιγράφονται από κάποια καμπύλη, αλλά επί της ουσίας τα δεδομένα που εξάγονται αφορούν τις μετακινήσεις στους κόμβους, ο έλεγχος για την αλλαγή προσήμου γίνεται υπολογίζοντας τους παρακάτω λόγους:

$$\frac{\partial U_3}{\partial x} = \frac{U_{3,i} - U_{3,j}}{x_i - x_j} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^2 U_3}{\partial x^2} = \frac{\left(\frac{\partial U_3}{\partial x}\right)_i - \left(\frac{\partial U_3}{\partial x}\right)_j}{x_i - x_j} \quad (4.2)$$

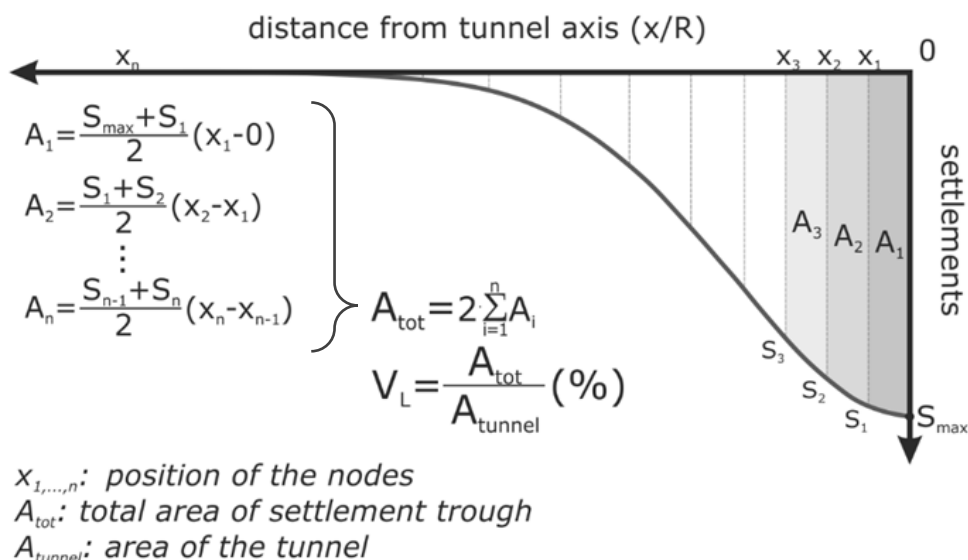
όπου

i, j : διαδοχικοί κόμβοι στην επιφάνεια

Μια παρατήρηση που πρέπει να γίνει εδώ είναι ότι υπάρχουν πεπερασμένοι αριθμοί διαφορετικών τιμών του i που μπορούν να προκύψουν με αυτή την μέθοδο, που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες των κόμβων στην επιφάνεια του μοντέλου.

5.2.2 Απόλεια όγκου (V_L)

Ο υπολογισμός της απώλειας όγκου γίνεται με άθροισμα ορθογωνίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2 και προκύπτει από τη σχέση 4.3.



Εικόνα 5.2: Υπολογισμός της απώλειας όγκου με τη μέθοδο των ορθογωνίων γνωρίζοντας τις καθιζήσεις στα σημεία των κόμβων του μοντέλου.

$$V_L = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i + S_{i-1}}{2} \cdot (x_i - x_{i-1})}{\pi \cdot R^2} \quad (4.3)$$

όπου

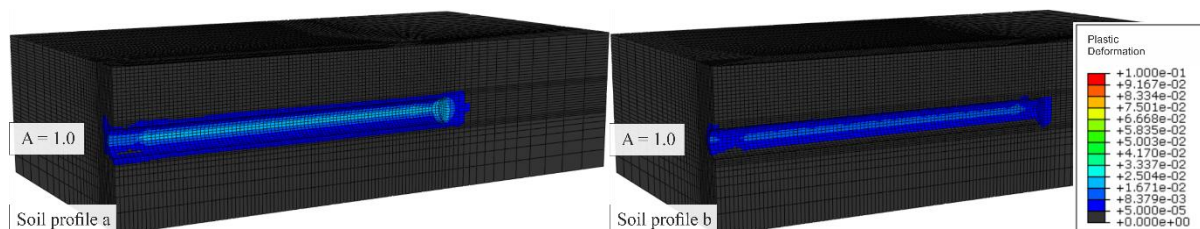
S_i: η καθίζηση του εκάστοτε κόμβου

5.3 Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων

Αρχικά, έγιναν δύο αναλύσεις, για τα εδαφικά προφίλ a και b (Πίνακας 4.1), κρατώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, στις αναλύσεις αυτές ο δείκτης που αφορά στην πίεση υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας είναι A=1, η υπερεκσκαφή και το ουραίο κενό είναι 1 cm και 4 cm αντίστοιχα, ενώ δε γίνεται θεώρηση κάποιας πίεσης στο κενό λόγω διεύθυνσης των υπό πίεση ρευστών.

Σαν πρώτη εκτίμηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.3 οι πλαστικές παραμορφώσεις, που δημιουργούνται από την εκσκαφή της σήραγγας στα δύο εδαφικά προφίλ. Είναι σαφές ότι στο εδαφικό προφίλ, μικρής αντοχής (a), έχουμε πολύ πιο εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις από ότι στο προφίλ υψηλής αντοχής (b). Και

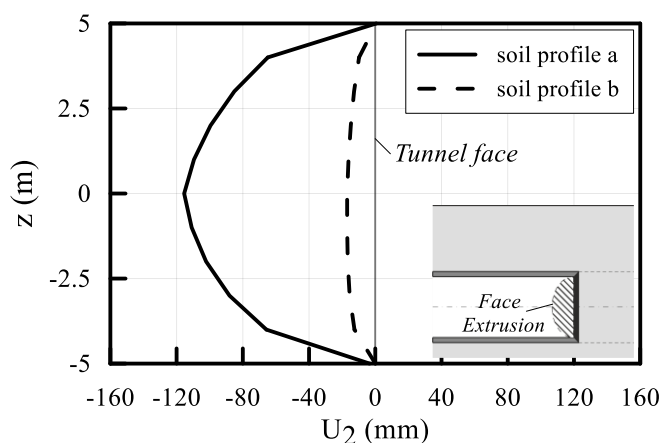
στα δύο εδαφικά προφίλ παρατηρούμε ότι το μέτωπο βρίσκεται σε καθεστώς μικρής πλαστικοποίησης, ιδίως στο προφίλ (b), επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η πίεση στο μέτωπο είναι επαρκής.



Εικόνα 5.3: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).

5.3.1 Εξώθηση μετώπου

Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται η εξώθηση (οριζόντια μετακίνηση) του μετώπου της σήραγγας. Στις δύο αναλύσεις του διαγράμματος, η πίεση υποστήριξης είναι $A=1$. Η μέγιστη τιμή εξώθησης και για τα δύο εδαφικά προφίλ εμφανίζεται στο κέντρο ($z=0$ m), με τιμή της τάξης των 115 mm για το έδαφος a και τιμή της τάξης των 17 mm για το έδαφος a. Όσο απομακρυνόμαστε προς τις παρειές της σήραγγας οι τιμές της εξώθησης μειώνονται. Σημαντικό είναι να σημειωθεί, ότι στις συγκεκριμένες αναλύσεις παρατηρείται περίπου 85% μεγαλύτερη μέση εξώθηση του μετώπου της σήραγγας για το εδαφικό προφίλ a, συγκριτικά με το προφίλ b.

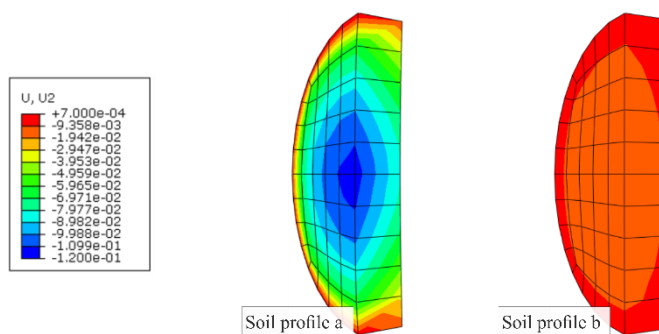


Διάγραμμα 5.1: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας του μετώπου εκσκαφής. Στην ανάλυση για χαμηλής αντοχής εδαφικό προφίλ (a) η μέγιστη τιμή εξώθησης εμφανίζεται στο κέντρο (με τιμή της τάξης των 110-120 mm) και οι τιμές μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε προς τις παρειές. Στις αναλύσεις για υψηλής αντοχής εδαφικό προφίλ

(b) παρατηρείται μία μικρή μετακίνηση του μετώπου εκτός της εκσκαφής, της τάξης των 15-20 mm (πολύ μικρή εξώθηση).

Από την παράλληλη παρατήρηση της Εικόνα 5.3 και του Διάγραμμα 5.1, φαίνεται πως με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, υπάρχει αύξηση και στην εξώθηση του μετώπου. Πιο συγκεκριμένα, από τη σύγκριση των εδαφικών υλικών (a) και (b), το εδαφικό προφίλ (a) είναι χαμηλότερης ποιότητας υλικό σε όρους αντοχής (c, φ) και σε όρους παραμορφωσιμότητας (E), προκαλώντας μεγαλύτερη και εντονότερη ζώνη πλαστικοποίησης.



Εικόνα 5.4: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).

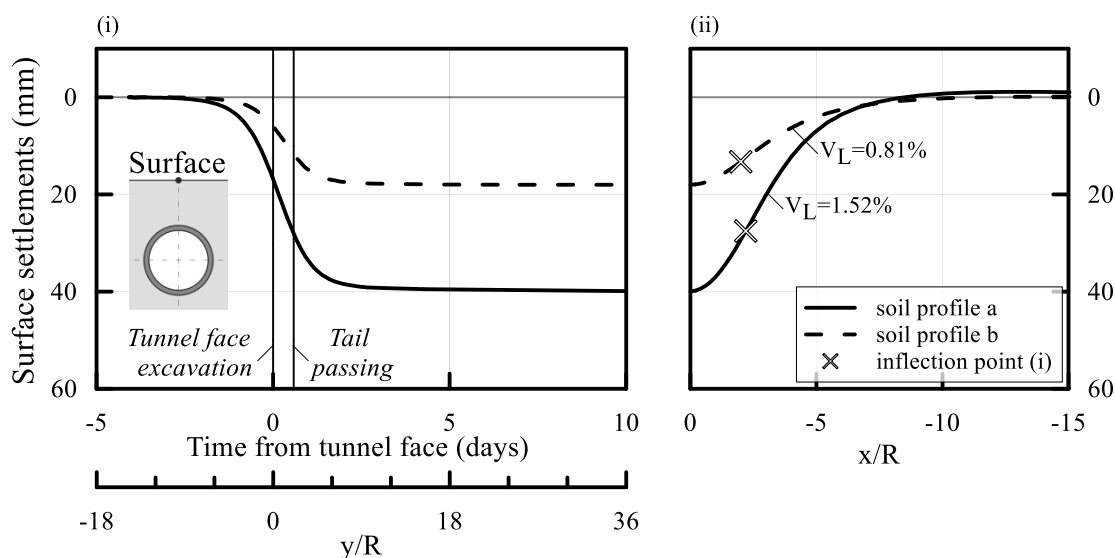
5.3.2 Κατακόρυφες μετατοπίσεις

Στο Διάγραμμα 5.2 φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις στο σημείο παρατήρησης στην επιφάνεια, συναρτήσει του χρόνου και της απόστασης y/R . Ο άξονας του χρόνου έχει τιμή μηδέν τη χρονική στιγμή που το μέτωπο βρίσκεται ακριβώς κάτω από το σημείο παρατήρησης. Παράλληλα, απεικονίζεται το εγκάρσιο προφίλ καθιζήσεων, που αποτελεί στιγμιότυπο για χρονική στιγμή κοντά στις 10 μέρες (τέλος διαγράμματος της ιστορίας), και η τομή στην οποία απεικονίζεται το σημείο παρατήρησης.

Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 5.2-ι παρατηρούμε τον τρόπο που εξελίσσονται οι καθιζήσεις ενός επιφανειακού σημείου με το πέρασ του χρόνου για δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ, καθώς και την τομή των τελικών εγκάρσιων καθιζήσεων. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή μειώνονται σημαντικά οι καθιζήσεις που αναπτύσσονται σε όλη τη διάρκεια της εκσκαφής. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι ο μεγάλος όγκος των καθιζήσεων εκδηλώνεται στο διάστημα μεταξύ της εκσκαφής του μετώπου από την κεφαλή κοπής και του χρονικού σημείου που περνάει το τέλος της ασπίδας του μηχανήματος από το σημείο παρατήρησης. Συγκεκριμένα, το 30 – 35 % της

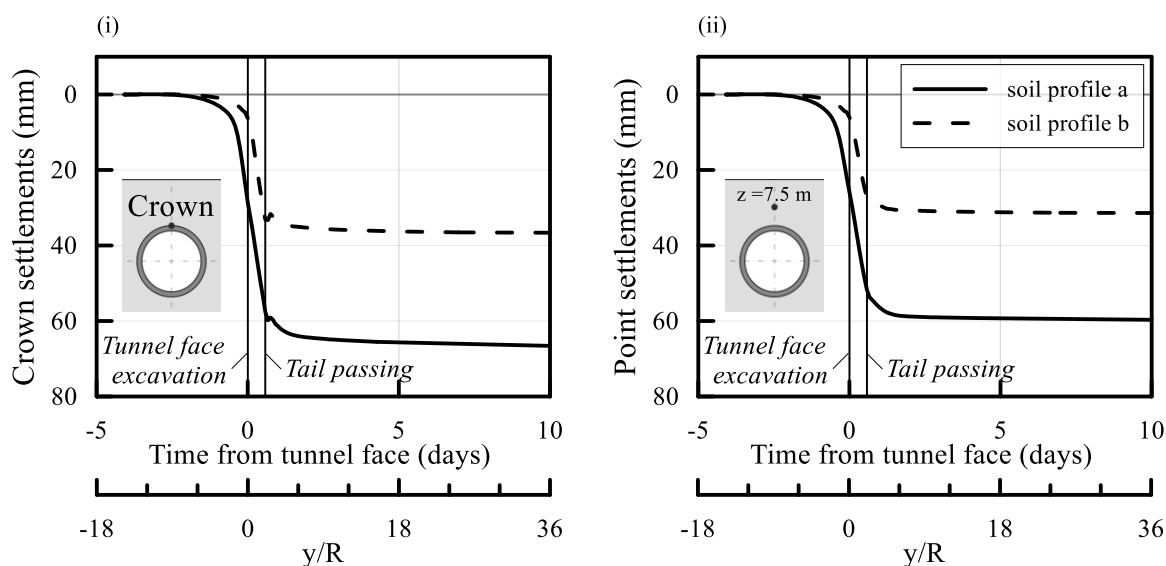
συνολικής καθίζησης πραγματοποιείται πάνω από την ασπίδα του μηχανήματος, ανεξαρτήτως εδαφικού προφίλ. Αυτό οφείλεται στην κωνικότητα της ασπίδας που ευνοεί την ανάπτυξη καθιζήσεων μέχρι ενός ορίου και στην απουσία του ενέματος σε αυτό το διάστημα, που θα μείωνε την έκταση των καθιζήσεων. Πίσω από την ασπίδα του EPB, όπου γίνεται και η ενεμάτωση, οι καθιζήσεις έχουν μια μικρή αύξηση έως $t \approx 2.5$ days, όπου πλέον σχεδόν σταθεροποιούνται. Αυτές οι καθιζήσεις μετά το πέρας της ασπίδας αναπτύσσονται κυρίως λόγω της στερεοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους αλλά και της σκλήρυνσης του ενέματος. Σε ότι αφορά το ένεμα, όταν εισάγεται στο κενό μεταξύ εδάφους και επένδυσης συμπεριφέρεται ως ρευστό υπό πίεση, όσο όμως σκληραίνει και αποκτά μια πιο στερεά μορφή έχει τη τάση να παραμορφωθεί, επιτρέποντας έτσι την εκδήλωση καθιζήσεων, οι οποίες όμως είναι γενικά περιορισμένες και εντός ανεκτών ορίων.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 5.2-ii, ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι το εδαφικό προφίλ (a), το οποίο έχει περίπου διπλάσια καθίζηση από το εδαφικό προφίλ (b), καταλήγει να έχει περίπου διπλάσια απώλεια εδάφους (V_L). Έτσι φαίνεται πως τα δύο αυτά μεγέθη ($S_{v,max}$ και V_L) παρουσιάζουν μια ανάλογη συμπεριφορά απόκρισης, σε αντίθεση με το σημείο καμπής, όπου και στις δύο περιπτώσεις είναι σταθερό. Είναι γνωστό άλλωστε ότι το σημείο καμπής επηρεάζεται αρκετά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και λιγότερο από τις επί τόπου γεωτεχνικές συνθήκες.



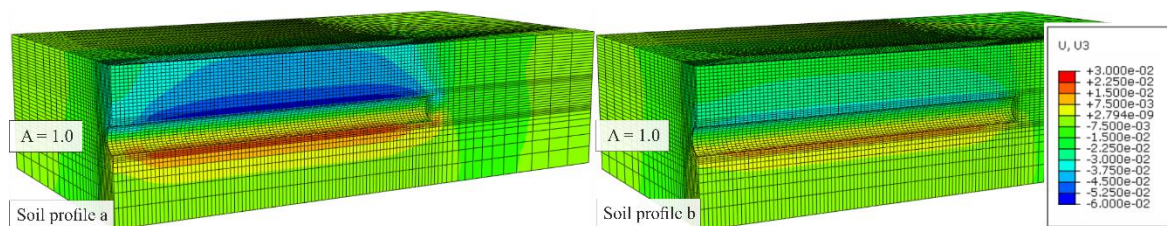
Διάγραμμα 5.2: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για τα δύο εδαφικά προφίλ.

Με βάση το Διάγραμμα 5.3, παρατηρείται σημαντική επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στη σύγκλιση της στέψης της σήραγγας, όπως και σε ένα σημείο περίπου 2 m πάνω από αυτή. Αξιοσημείωτο είναι πως 2 m πάνω από τη στέψη της σήραγγας σημειώνονται μετατοπίσεις μικρότερες κατά περίπου 8 mm, σε σχέση με την στέψη. Ακόμα, πάνω από τη στέψη της σήραγγας παρατηρείται μία ελαφριά ανύψωση μετά το πέρασμα της ασπίδας του μηχανήματος, η οποία πιθανότατα οφείλεται στην εισπίεση του ενέματος.



Διάγραμμα 5.3: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης $z=7.5$ m από τον άξονα της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τα δύο εδαφικά προφίλ.

Τέλος, στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται για τα δύο επιλεγμένα εδαφικά προφίλ οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις. Είναι εμφανές ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις μειώνονται δραστικά όσο αυξάνεται η ποιότητα του εδάφους. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται στις μετακινήσεις της στέψης και του πυθμένα της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η ανύψωση του πυθμένα και η υποχώρηση της στέψης της σήραγγας είναι μεγαλύτερες στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a) σε σύγκριση με το εδαφικό προφίλ υψηλότερης αντοχής (b).



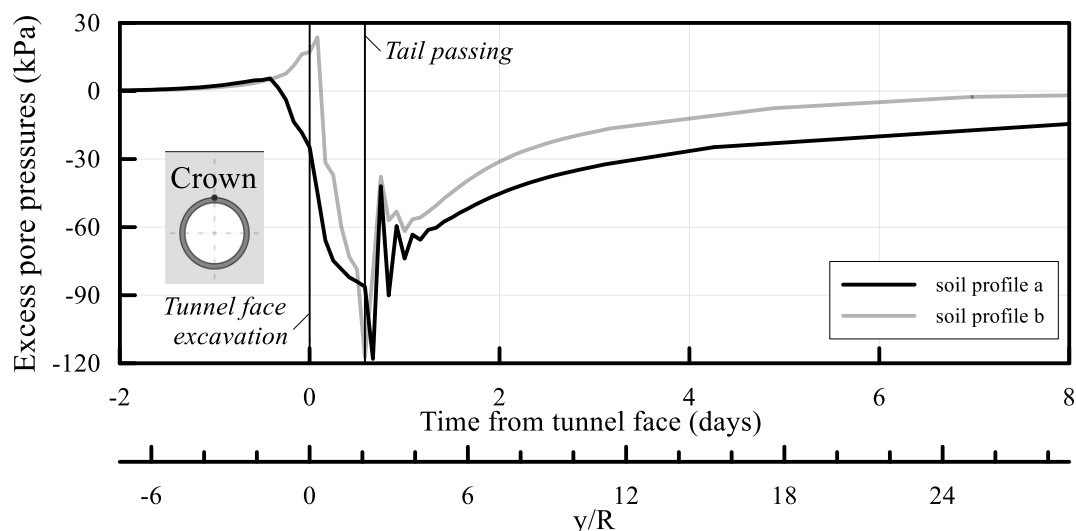
Εικόνα 5.5: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).

5.3.3 Πιέσεις πόρων

Στο Διάγραμμα 5.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων στη στέψη της σήραγγας για τα δύο εδαφικά προφίλ. Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές, ανεξαρτήτως των εδαφικών συνθηκών εμφανίζεται ανάπτυξη υποπιέσεων από τη στιγμή που η κεφαλή κοπής φτάσει κάτω από το σημείο παρατήρησης, ενώ αμέσως μετά το πέρας της ασπίδας παρουσιάζεται απότομη αύξηση των πιέσεων, η οποία πιθανόν οφείλεται στην εισαγωγή του ενέματος. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο εδαφικών προφίλ.

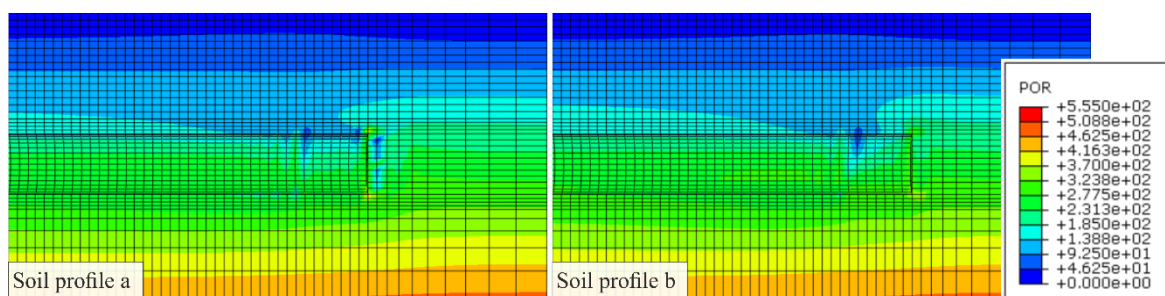
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι περίπου 12 ώρες πριν την εκσκαφή έως και την εκσκαφή κάτω από το σημείο παρατήρησης ($t=0$ days), στο εδαφικό προφίλ με τη χαμηλότερη αντοχή (a) αναπτύσσεται μια υποπίεση της τάξης των 25 kPa, τη στιγμή που το εδαφικό προφίλ με την υψηλότερη αντοχή (b), έχει αναπτύξει υπερπίεση της τάξης των 17 kPa. Παρόλα αυτά, μετά το πέρας της ασπίδας του μηχανήματος παρατηρείται η μέγιστη υποπίεση και για τα δύο προφίλ, της τάξης των 120 kPa. Αξιοσημείωτο είναι πως αμέσως μετά την εκσκαφή του μετώπου, στο προφίλ b παρατηρείται η μέγιστη τιμή των υπερπιέσεων των πόρων, στα 23 kPa, τη στιγμή που στο προφίλ (a) καταγράφονται τιμές της τάξεως των -45 kPa.

Τα φαινόμενα αυτά, που αναπτύσσονται κοντά στη σήραγγα είναι σύνθετα και κατά συνέπεια μπορεί να υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις υπερπιέσεις ή υποπιέσεις πόρων. Βέβαια είναι ξεκάθαρο ότι το εδαφικό υλικό (a), το οποίο εμφανίζει σημαντικές αποτονώσεις στο μέτωπο εκσκαφής, είναι λογικό να δημιουργεί υποπιέσεις πόρων κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της παραμόρφωσης και των αστράγγιστων υδραυλικών συνθηκών εμφανίζονται έντονα φαινόμενα μύζησης.



Διάγραμμα 5.4: Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τα δύο εδαφικά προφίλ.

Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στο μοντέλο. Οι ουσιαστικές μεταβολές εμφανίζονται και στα δύο εδαφικά προφίλ στον χώρο κοντά στο μέτωπο. Χαρακτηριστικά παρατηρείται, η εξέλιξη της πίεσης των πόρων πάνω από την στέψη της σήραγγας. Όπως προαναφέρθηκε, είναι εμφανές ότι στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a) εντοπίζεται πτώση της πίεσης των πόρων πάνω από το μέτωπο της εκσκαφής, σε αντίθεση με το προφίλ υψηλότερης αντοχής (b), όπου εμφανίζεται ίδιας τάξης πτώση της πίεσης των πόρων λίγο πριν το τέλος της ασπίδας του EPB. Επίσης είναι ευδιάκριτο πως η σταδιακή επιστροφή της πίεσης πόρων στις υδροστατικές συνθήκες αρχίζει πολύ πιο σύντομα για το προφίλ (b), συγκριτικά με το προφίλ (a). Η πίεση πόρων στο προφίλ (b) χρειάζεται περίπου τον μισό χρόνο, σε σχέση με το (a), για να επανέλθει στις φυσιολογικές της τιμές. Τέλος, στο εδαφικό προφίλ (a), μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής παρατηρείται υποπίεση των πόρων, η οποία δεν εμφανίζεται στο εδαφικό προφίλ (b).

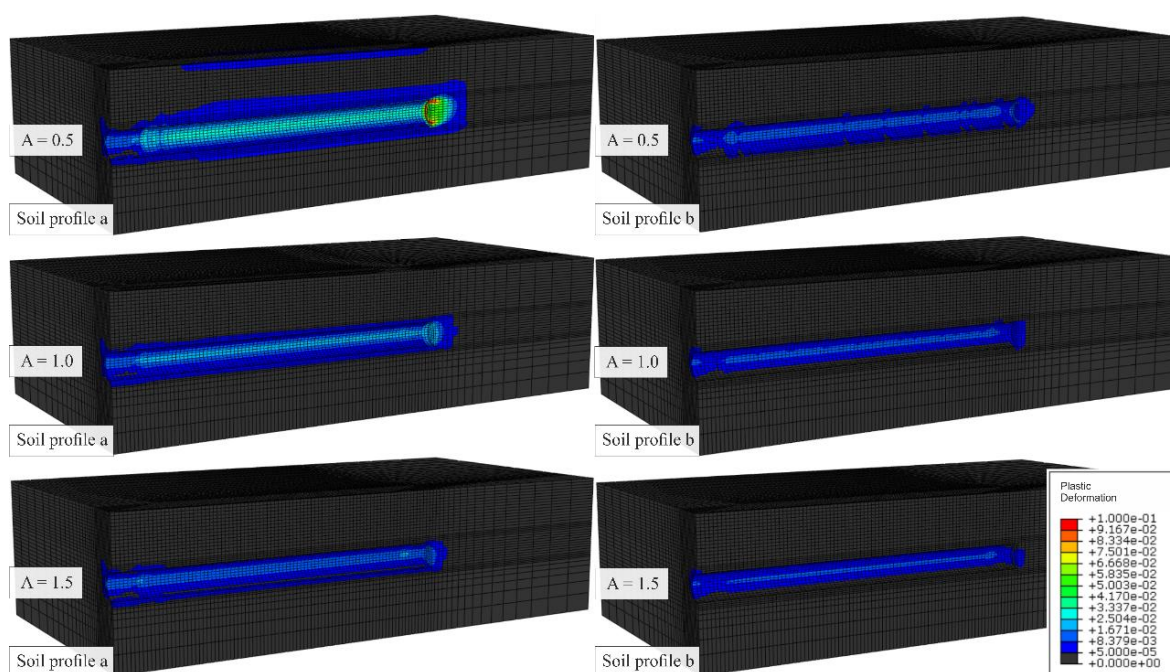


Εικόνα 5.6: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για δύο αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b).

5.4 Επίδραση της πίεσης υποστήριξης στην ευστάθεια του μετώπου

Σε αυτό το σημείο της ανάλυσης εξετάζουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της πίεσης υποστήριξης του μετώπου στις καθιζήσεις, στις πιέσεις των πόρων, καθώς και στην ευστάθεια του μετώπου. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στο § 4.2.5.3 εφαρμόζουμε τρεις περιπτώσεις για την παράμετρο A ($A=0.5, 1$ & 1.5) στα δύο εδαφικά προφίλ, που εξετάστηκαν στην § 5.3.

Αρχικά, με βάση την Εικόνα 5.7, που απεικονίζει χρωματικά τις πλαστικές παραμορφώσεις που δημιουργούνται από την εκσκαφή, μπορεί να γίνει μία πρώτη εκτίμηση σχετικά με την επίδραση της πίεσης υποστήριξης, στη διάνοιξη σηράγγων με TBM.



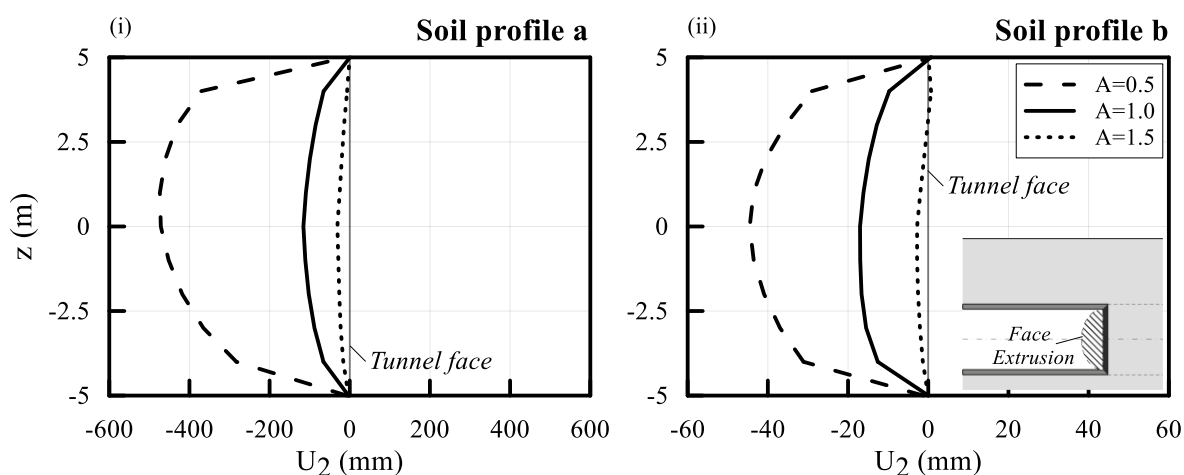
Εικόνα 5.7: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (α και β) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).

Όπως αναφέρθηκε και στο § 5.3, το εδαφικό προφίλ μικρής αντοχής (α) εμφανίζει μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις από το εδαφικό προφίλ υψηλής αντοχής (β), σε όλες τις πιέσεις μετώπου. Στο έδαφος με καλές μηχανικές ιδιότητες (β), φαίνεται χαρακτηριστικά πως σε όλες τις περιπτώσεις πίεσης υποστήριξης που εξετάστηκαν, οι τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων δεν μεταβάλλονται πολύ. Αντίθετα, στο έδαφος με τις χειρότερες μηχανικές ιδιότητες παρατηρείται, για αύξηση της πίεσης μετώπου, αισθητή μείωση των πλαστικών παραμορφώσεων και για μείωση της πίεσης μετώπου έντονη αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα για τιμή της παραμέτρου A ίση με 0.5, εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις στην επιφάνεια (δεν εμφανίζονται σε καμία

άλλη περίπτωση), σε μεγάλο εύρος περιμετρικά της σήραγγας, καθώς και στο μέτωπο της εκσκαφής, όπου σημειώνονται οι μεγαλύτερες τιμές πλαστικών παραμορφώσεων.

5.4.1 Εξώθηση μετώπου

Η εξώθηση του μετώπου της σήραγγας είναι ένα μέγεθος με έντονη ευαισθησία στις αλλαγές των παραμέτρων διάνοιξης της σήραγγας και συγκεκριμένα στις αλλαγές της πίεσης υποστήριξης. Στο Διάγραμμα 5.5 παρουσιάζεται η εξώθηση του μετώπου για τρεις τιμές πίεσης υποστήριξης, στα δύο εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ.

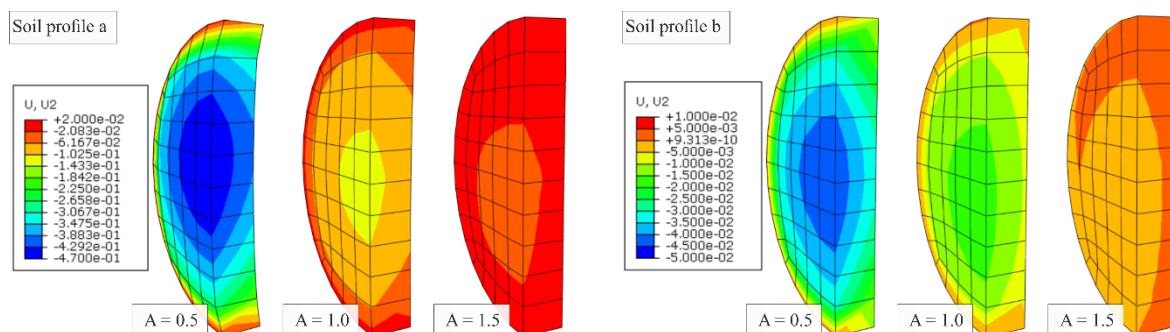


Διάγραμμα 5.5: (i) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.

Εκ' πρώτης όψεως, παρατηρείται αύξηση της εξώθησης του μετώπου για μείωση της παραμέτρου A , και κατά συνέπεια της πίεσης υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, σχεδόν καθόλου εξώθηση παρατηρείται για υψηλή πίεση υποστήριξης ($A=1.5$), ενδιάμεση εξώθηση για μέση τιμή πίεσης υποστήριξης ($A=1$) και τέλος μεγάλες τιμές εξώθησης για χαμηλή πίεση υποστήριξης ($A=0.5$). Αναλυτικότερα, στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a), για μικρές τιμές πίεσης υποστήριξης ($A=0.5$) καταγράφεται εξώθηση του μετώπου έως και 50 cm, ενώ για ενδιάμεσες και υψηλές τιμές της αντίστοιχης παραμέτρου ($A=1.0$ και $A=1.5$) καταγράφονται τιμές εξώθησης έως 11 cm και 2 cm, αντίστοιχα. Αντίθετα, στο εδαφικό προφίλ (b), για τις ίδιες τιμές της παραμέτρου A , οι τιμές της εξώθησης είναι αρκετά μικρότερες. Για $A=0.5$, 1.0 και 1.5 καταγράφεται εξώθηση έως 4.5 cm, 1.8 cm και 0.3 cm, αντίστοιχα.

Παρατηρώντας στην Εικόνα 5.8 με τα χρωματικά μοντέλα του μετώπου της σήραγγας, είναι χαρακτηριστικό ότι για χαμηλές τιμές της εφαρμοσμένης πίεσης υποστήρι-

ξης στο μέτωπο, έχουμε τις μεγαλύτερες τιμές εξώθησης μετώπου και στους δύο εδαφικούς τύπους. Συγκεκριμένα, οι υψηλότερες τιμές εξώθησης παρουσιάζονται στο κέντρο του μετώπου της σήραγγας και οι χαμηλότερες στην περιφέρεια της διατομής. Εξάιρεση μπορούμε να πούμε ότι αποτελούν οι περιπτώσεις υψηλής πίεσης υποστήριξης και κυρίως για το προφίλ με καλά εδαφικά χαρακτηριστικά (b), όπου οι μεγαλύτερες τιμές εξώθησης παρατηρούνται από τον άξονα της σήραγγας και προς τα κάτω, ενώ στο πάνω μέρος της διατομής εμφανίζεται μικρή μετακίνηση του μετώπου εκτός της εκσκαφής.

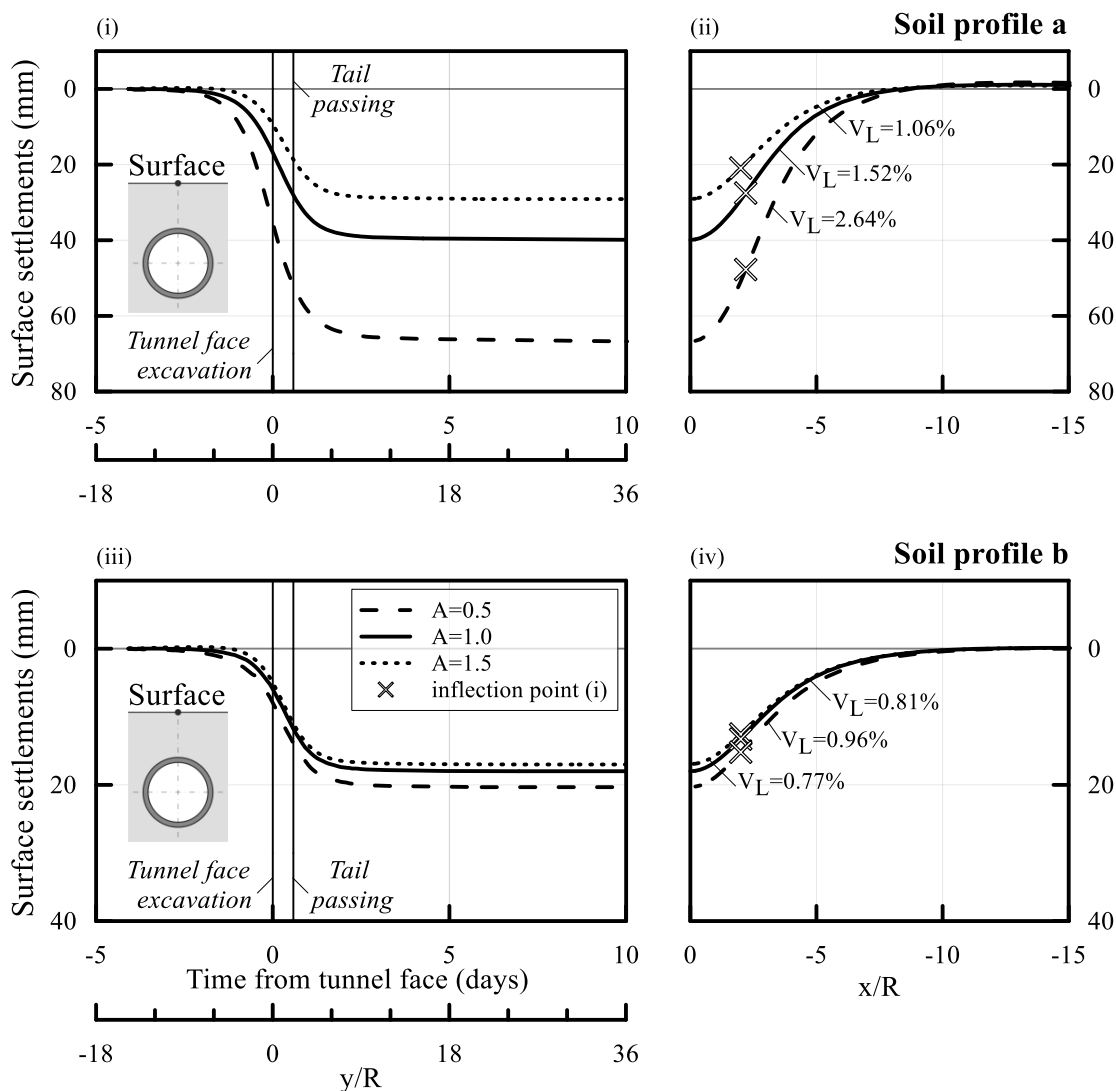


Εικόνα 5.8: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).

Κλείνοντας, στα αποτελέσματα των αναλύσεων, οι τιμές εξώθησης μετώπου διαμορφώνονται με αντίστοιχο τρόπο, με τις τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων. Επικεντρώνοντας στο μέτωπο της σήραγγας, είναι ξεκάθαρο ότι στα σημεία που εντοπίζονται οι μεγαλύτερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης, εμφανίζονται και οι υψηλότερες τιμές εξώθησης. Συνεπώς, η αστοχία του μετώπου εξαρτάται άμεσα από την πλαστικοποίηση του εδάφους στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής και μπροστά από αυτό.

5.4.2 Κατακόρυφες μετατοπίσεις

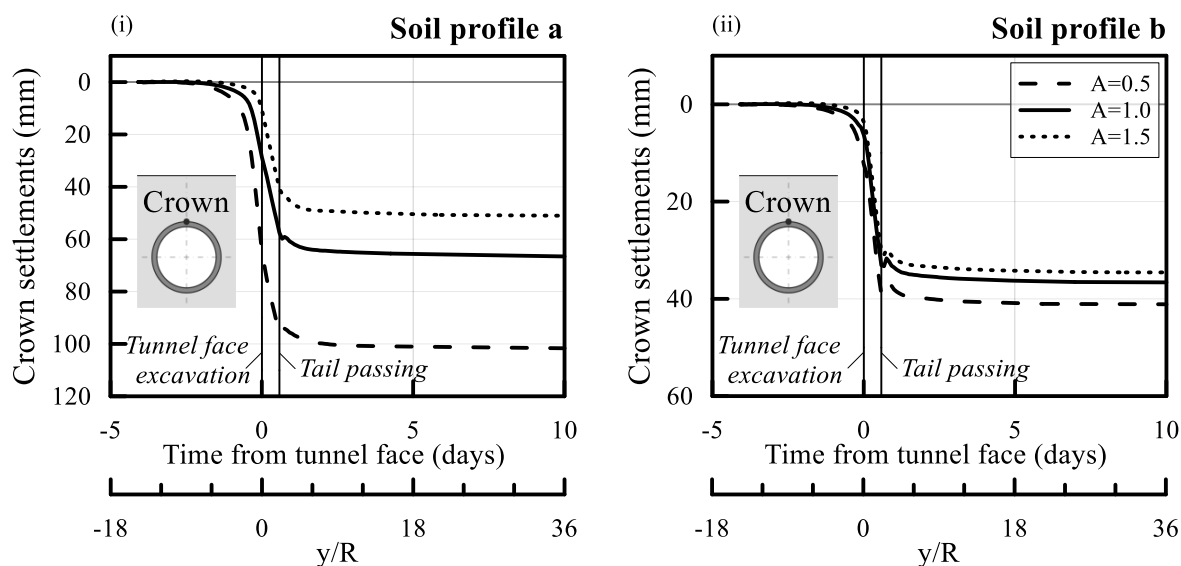
Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Διάγραμμα 5.6, η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στις κατακόρυφες μετατοπίσεις – στο σημείο παρατήρησης που βρίσκεται στην επιφάνεια – είναι πολύ μικρότερη στο εδαφικό προφίλ (b), συγκριτικά με το εδαφικό προφίλ (a). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στο έδαφος με υψηλή αντοχή (b), οι τελικές καθιζήσεις για μεταβολή της παραμέτρου A από 0.5 σε 1.5, μειώνονται περίπου 5 mm. Αντίθετα, στο έδαφος με χαμηλή αντοχή (a) παρατηρείται ότι για μεταβολή της παραμέτρου A από 0.5 σε 1, οι τελικές καθιζήσεις μειώνονται περίπου 25 mm και για μεταβολή της A από 1 σε 1.5 οι τελικές καθιζήσεις μειώνονται κατά περίπου 10 mm.



Διάγραμμα 5.6: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή, για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (iii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου και (iv) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή, για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 5.6-ii και Διάγραμμα 5.6-iv, ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι στο εδαφικό προφίλ (a), στο οποίο δείχνει να έχει μεγάλη επιρροή η αλλαγή της πίεσης υποστήριξης, εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις στην απώλεια εδάφους (V_L). Συγκεκριμένα για χαμηλή πίεση υποστήριξης η απώλεια όγκου αυξάνεται ως και 70%, ενώ για υψηλές τιμές της πίεσης υποστήριξης η απώλεια όγκου μειώνεται κατά περίπου 30%. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά των αντίστοιχων μεταβολών της πίεσης υποστήριξης, για εκσκαφή στο εδαφικό προφίλ υψηλής αντοχής (b), παρατηρούμε ότι οι μεταβολές της απώλειας όγκου είναι πολύ μικρότερες.

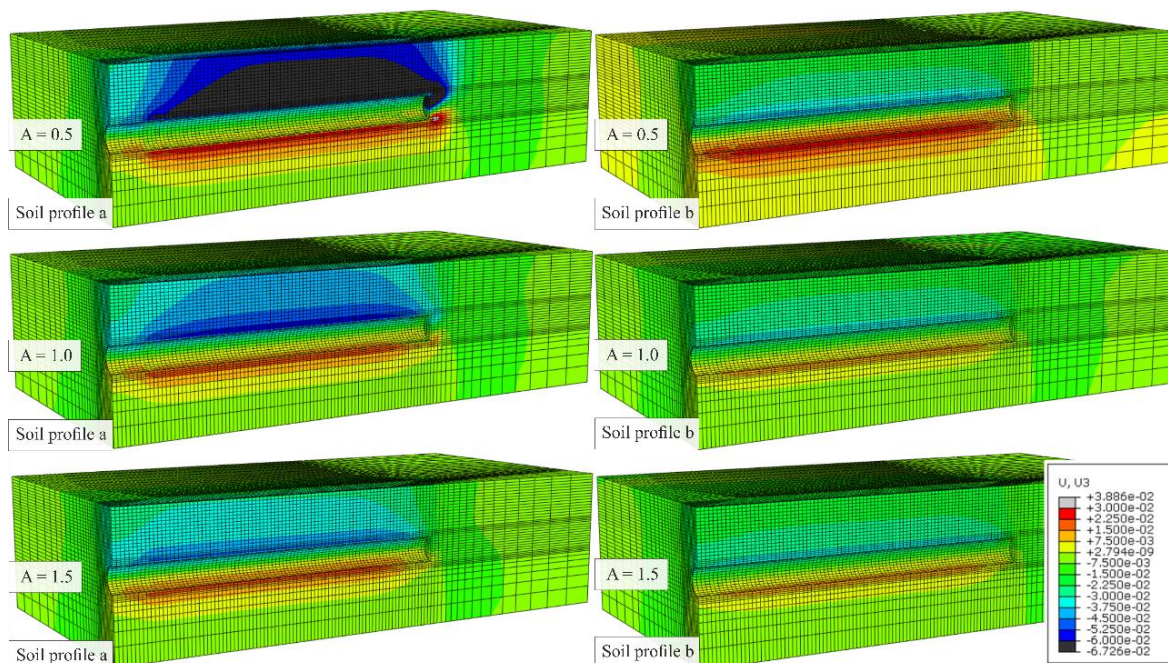
Όσο αναφορά τις παρατηρήσεις που έγιναν στη στέψη της σήραγγας, σε γενικές γραμμές είναι παρόμοιες με εκείνες του σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια του εδάφους. Αξιοσημείωτο είναι πως κυρίως στο έδαφος υψηλής αντοχής (b), πάνω από τη στέψη της σήραγγας παρατηρείται μία ανύψωση μετά το πέρασμα της ασπίδας του μηχανήματος, η οποία πιθανόν οφείλεται στην εισπίεση του ενέματος. Ειδικότερα όσο μικραίνει η πίεση υποστήριξης, τόσο πιο έντονη είναι αυτή η εδαφική ανύψωση. Αντίθετα, στο προφίλ με τα χειρότερα εδαφικά χαρακτηριστικά, υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή ενώ για $A=1$ εμφανίζεται εδαφική ανύψωση, για $A=0.5$ δεν εμφανίζεται καθόλου. Αυτό πιθανόν συμβαίνει διότι, στο εδαφικό προφίλ (a), σε χαμηλή πίεση μετώπου παρατηρήθηκε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε μεγάλο εύρος περιμετρικά της σήραγγας και συνεπώς από τη στιγμή που το έδαφος έχει πλαστικοποιηθεί δεν επηρεάζεται από την πίεση του ενεμάτωσης.



Διάγραμμα 5.7: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ a και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για το εδαφικό προφίλ b και για τρεις διαφορετικές πιέσεις μετώπου.

Επιπλέον, είναι άξιο παρατήρησης ότι στο χαμηλής αντοχής εδαφικό προφίλ (a) και για μικρή πίεση υποστήριξης ($A=0.5$), περίπου το 60% των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων πραγματοποιείται πριν φτάσει η κοπτική κεφαλή κάτω από το σημείο παρατήρησης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις πίεσης υποστήριξης για το συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ και μέχρι το αντίστοιχο χρονικό σημείο, έχει σημειωθεί περίπου το 20% των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων. Παρόλα αυτά η αρχή της εκδήλωσης των μετατοπίσεων, υπολογίζεται περίπου στο ίδιο χρονικό σημείο. Τέλος, στο εδαφικό προφίλ υψη-

λής αντοχής (b) παρατηρούμε ότι περίπου το 50% των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων πραγματοποιείται από τη χρονική στιγμή της εκσκαφής του μετώπου έως και το τέλος της ασπίδας.



Εικόνα 5.9: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).

Συνοψίζοντας, με βάση την Εικόνα 5.9, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για καλές εδαφικές συνθήκες (b) δεν επηρεάζονται αισθητά οι καθιζήσεις, από την πίεση υποστήριξης που ασκείται στο μέτωπο της σήραγγας. Αντίθετα, στο προφίλ χαμηλότερης αντοχής (a), είναι σαφές ότι με αύξηση της πίεσης υποστήριξης μειώνονται έως και 50% οι κατακόρυφες μετατοπίσεις. Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα των εξωθήσεων του μετώπου, είναι σαφές πως η εξώθηση του μετώπου της σήραγγας, οι κατακόρυφες μετακινήσεις, καθώς και η απώλεια όγκου, είναι άμεσα συνδεδεμένα μεγέθη. Συγκεκριμένα για αύξηση των τιμών της εξώθησης παρατηρήθηκε αύξηση της απώλειας όγκου και αντίστροφα.

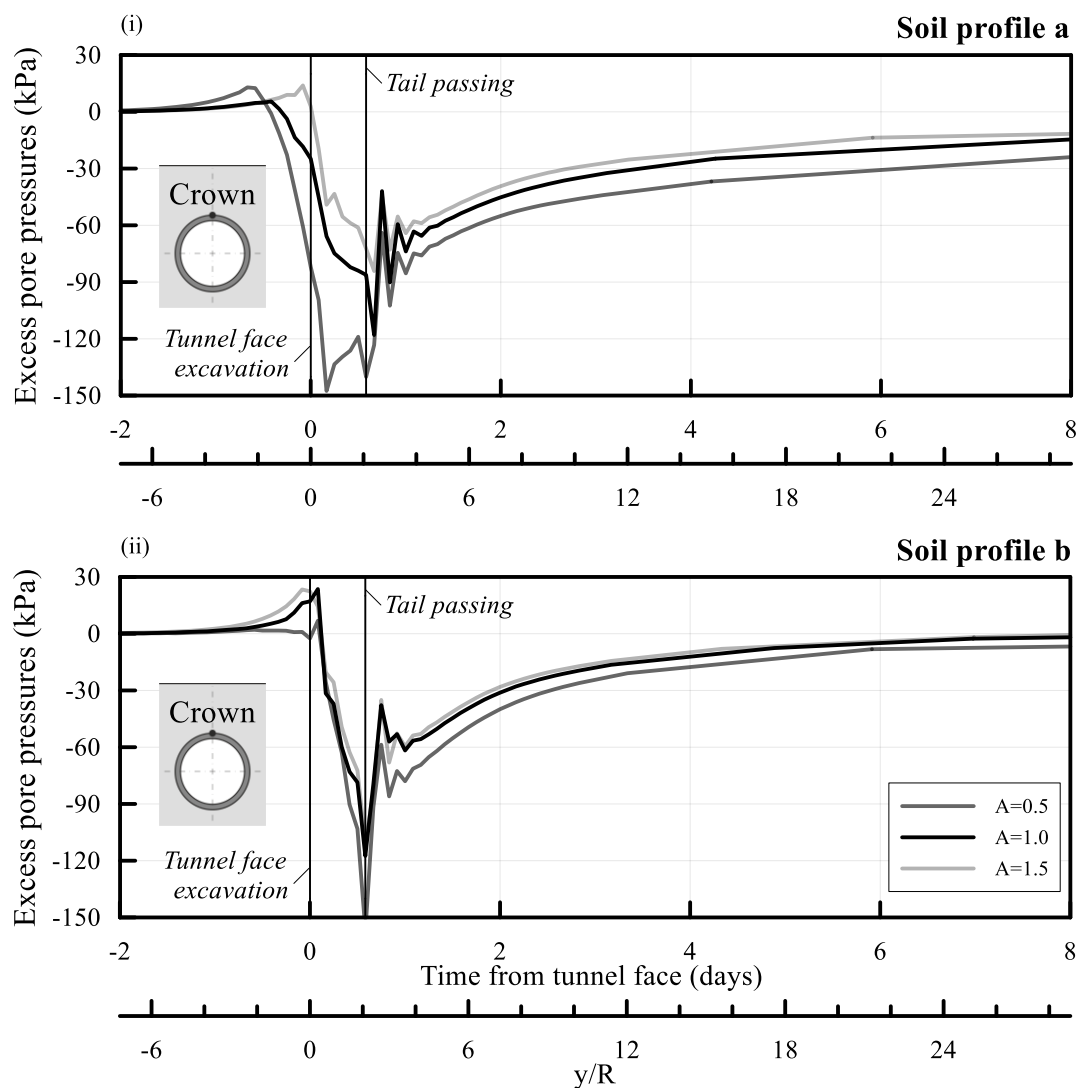
5.4.3 Πιέσεις πόρων

Στο Διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων στη στέψη της σήραγγας στα δύο εδαφικά προφίλ και για τις τρεις διαφορετικές υποθέσεις πίεσης υποστήριξης. Παρατηρούμε ότι σε ένα γενικότερο πλαίσιο, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της πίεσης των πόρων που καταγράφηκαν είναι πολύ κοντινές και στους δύο εδαφικούς τύπους και στις τρεις ξεχωριστές τιμές πίεσης υποστήριξης. Αυτό που διαφοροποιείται

μεταξύ των αναλύσεων είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να επανέλθει το σύστημα σε ισορροπία, η απόσταση από το μέτωπο που εμφανίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές πίεσης πόρων, καθώς και η ομαλότητα με την οποία αυξομειώνονται.

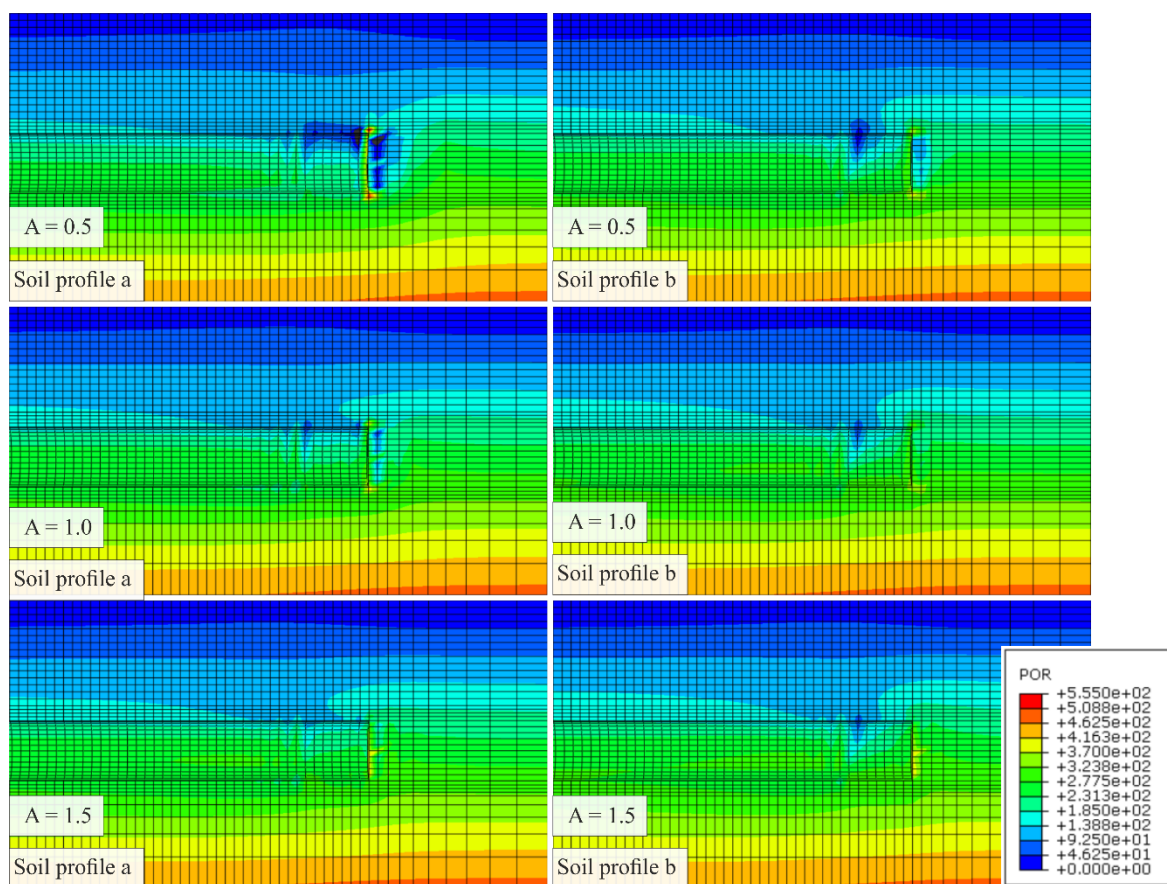
Πιο συγκεκριμένα, για καλές γεωτεχνικές συνθήκες η συμπεριφορά της πίεσης των πόρων είναι πανομοιότυπη, για διάφορες πιέσεις μετώπου και κυρίως $A \geq 1$. Όπως το μόνο αξιοσημείωτο στην περίπτωση του εδαφικού προφίλ (b), είναι πως για $A=0.5$ δεν παρατηρείται καμία διαταραχή στην πίεση των πόρων μέχρι το μηχάνημα να φτάσει κάτω από το σημείο παρατήρησης, ενώ παράλληλα σημειώνεται μείωση της ελάχιστης τιμής της πίεσης πόρων κατά 50% στο τέλος της ασπίδας. Δηλαδή, παρουσιάζεται μηδενική επιρροή της πίεσης των πόρων από την εκσκαφή μέχρι και λίγα μέτρα μπροστά από το μέτωπο, αλλά και απότομη ανάπτυξη υποπιέσεων μετά την εκσκαφή του μετώπου.

Όσον αφορά το έδαφος (a), δηλαδή αυτό με τις χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες, η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στην πίεση των πόρων δείχνει να είναι αρκετά μεγάλη. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά, για υψηλή πίεση μετώπου ($A=1.5$), οι πιέσεις πόρων επηρεάζονται έως και 20 m ($y/R=2$) μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, εμφανίζοντας μια μικρή ανάπτυξη υπερπιέσεων. Στη συνέχεια, κατά την εκσκαφή του μετώπου εμφανίζεται απότομη ανάπτυξη υποπιέσεων, οι οποίες συνεχίζουν να αυξάνονται με μικρότερο ρυθμό μέχρι το τέλος της ασπίδας, όπου και αρχίζει η σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων μέχρι την επαναφορά τους σε συνθήκες ισορροπίας μετά από περίπου 20 μέρες. Στην περίπτωση χαμηλής πίεσης μετώπου ($A=0.5$), οι πιέσεις πόρων αρχίζουν να επηρεάζονται περίπου 40 m ($y/R=4$) μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής εμφανίζοντας μια μικρή ανάπτυξη υπερπιέσεων για περίπου 10 m, όπου και αρχίζει η απότομη ανάπτυξη υποπιέσεων. Μέχρι την εκσκαφή του μετώπου από το μηχάνημα, η πίεση των πόρων έχει μειωθεί κατά 50-60%, ενώ και μετά την εκσκαφή του μετώπου η πίεση των πόρων συνεχίζει να μειώνεται μέχρι περίπου το μέσο της ασπίδας του μηχανήματος. Πιθανότατα αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη μεγάλη ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας (βλ. Εικόνα 5.7). Μετά το πέρας του μηχανήματος οι πιέσεις των πόρων σταδιακά αυξάνονται μέχρι το σύστημα να επανέλθει σε ισορροπία.



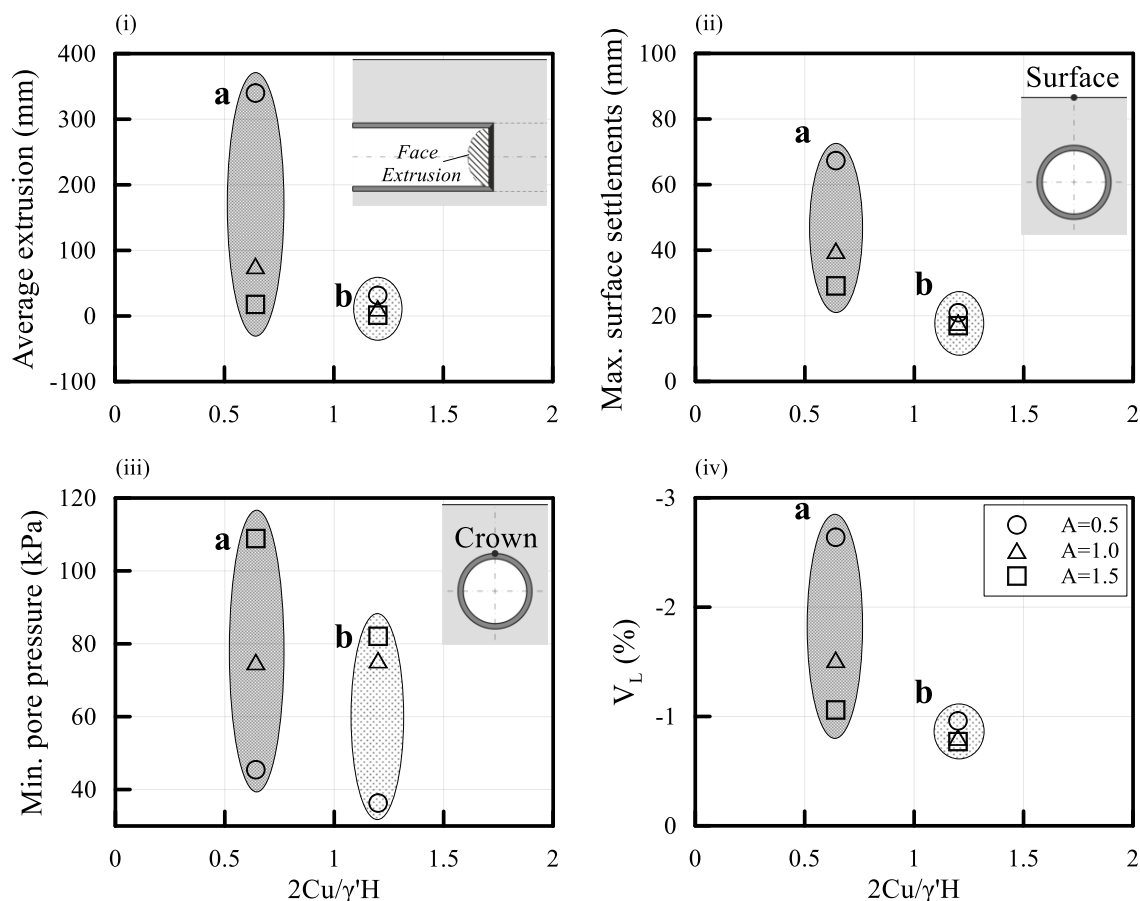
Διάγραμμα 5.8: (i) Εξέλιξη υπερπίεσεων πόρων στη στέγη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για το εδαφικά προφίλ a σε διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$), (ii) Εξέλιξη υπερπίεσεων πόρων στη στέγη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για το εδαφικά προφίλ b σε διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).

Επιπλέον, παρατηρείται πως η αυξομείωση των υπερπίεσεων και των υποπίεσεων σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται άμεσα από τον ρυθμό ανάπτυξης των κατακόρυφων μετακινήσεων. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι κατακόρυφες μετακινήσεις αυξάνουν με μικρό ρυθμό εμφανίζεται αύξηση της πίεσης των πόρων, όταν οι κατακόρυφες μετακινήσεις αυξάνουν με μεγάλο ρυθμό εμφανίζεται απότομη μείωση των πιέσεων των πόρων και όταν οι κατακόρυφες μετακινήσεις σταθεροποιούνται παρατηρείται σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων μέχρι την επαναφορά τους σε συνθήκες ισορροπίας. Όπως και στα προηγούμενα μεγέθη, η πίεση υποστήριξης έχει έντονη επιρροή στην πίεση των πόρων κυρίως σε άσχημες γεωτεχνικές συνθήκες.



Εικόνα 5.10: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικά εδαφικά προφίλ (a και b) και διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$, $A=1.0$ και $A=1.5$).

Συνοψίζοντας, στο Διάγραμμα 5.9 παρουσιάζεται η γενικότερη επιρροή της αυξομείωσης της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής, σε διάφορα εξεταζόμενα μεγέθη. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά, η πίεση υποστήριξης προκαλεί έντονες αλλαγές σε όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη του διαγράμματος, σε εδαφικούς σχηματισμούς χαμηλής αντοχής (π.χ. a εδαφικό προφίλ). Αντιθέτως, φαίνεται να μην έχει την ίδια επιρροή σε εδαφικούς σχηματισμούς υψηλής αντοχής (π.χ. b εδαφικό προφίλ). Το μόνο μέγεθος το οποίο φαίνεται να επηρεάζει έντονα σε καλούς εδαφικούς σχηματισμούς είναι η ελάχιστη τιμή της πίεσης των πόρων (βλ. Διάγραμμα 5.9-iii). Όσον αφορά το εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (b), είναι εμφανές ότι η παράμετρος της πίεσης υποστήριξης είναι κομβικής σημασίας. Με μείωση της πίεσης υποστήριξης φαίνεται να γίνονται ιδιαίτερος δυσμενείς οι συνθήκες εκσκαφής και η αστοχία είναι πολύ πιθανή. Αντίθετα, με αύξηση της πίεσης υποστήριξης είναι πολύ έντονη η βελτίωση όλων των παραμέτρων που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.9.

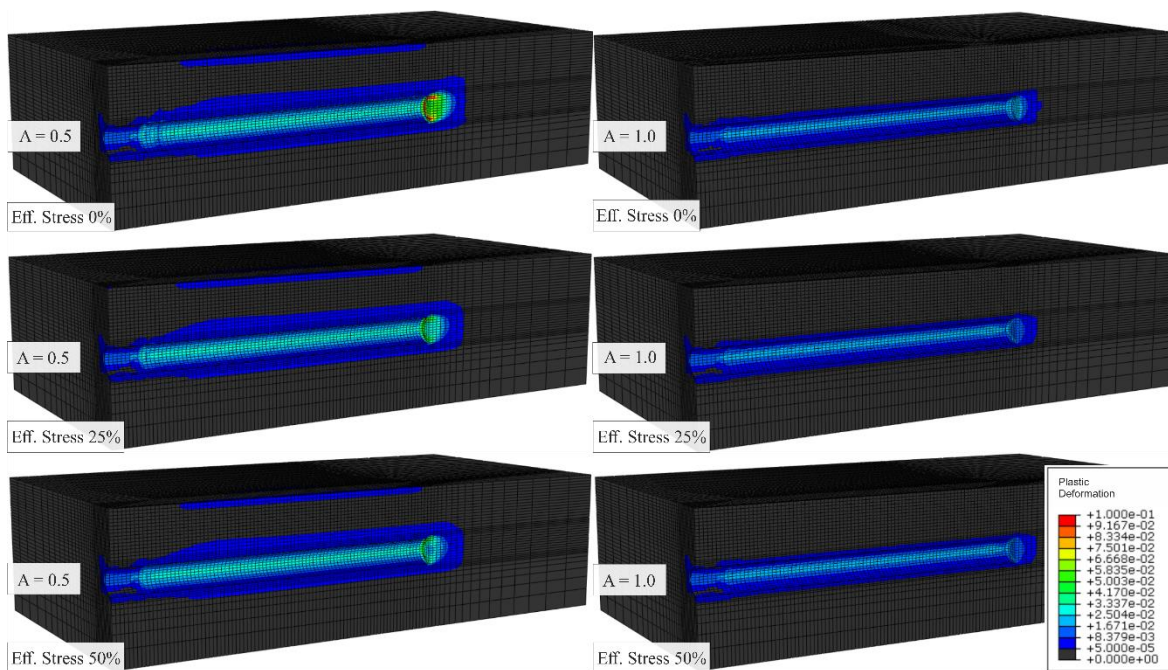


Διάγραμμα 5.9: (i) Μέση εξώθηση μετώπου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (ii) μέγιστη καθίζηση συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (iii) Ελάχιστη πίεση πόρων συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους και (iv) ποσοστό απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

5.5 Επίδραση των ενεργών τάσεων στην ευστάθεια του μετώπου

Στο τελευταίο μέρος της ανάλυσης μας εξετάζουμε την επίδραση που έχει η εναλλαγή των ενεργών τάσεων στις καθιζήσεις, στις πιέσεις των πόρων, καθώς και στην ευστάθεια του μετώπου. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στην § 4.2.5.4, δοκιμάστηκαν στο εδαφικό προφίλ (a), τρεις περιπτώσεις για το ποσοστό ανάπτυξης ενεργών τάσεων (Eff. Stress=0%, 25% & 50%), για δύο τιμές της παραμέτρου A ($A=0.5$ & 1.0).

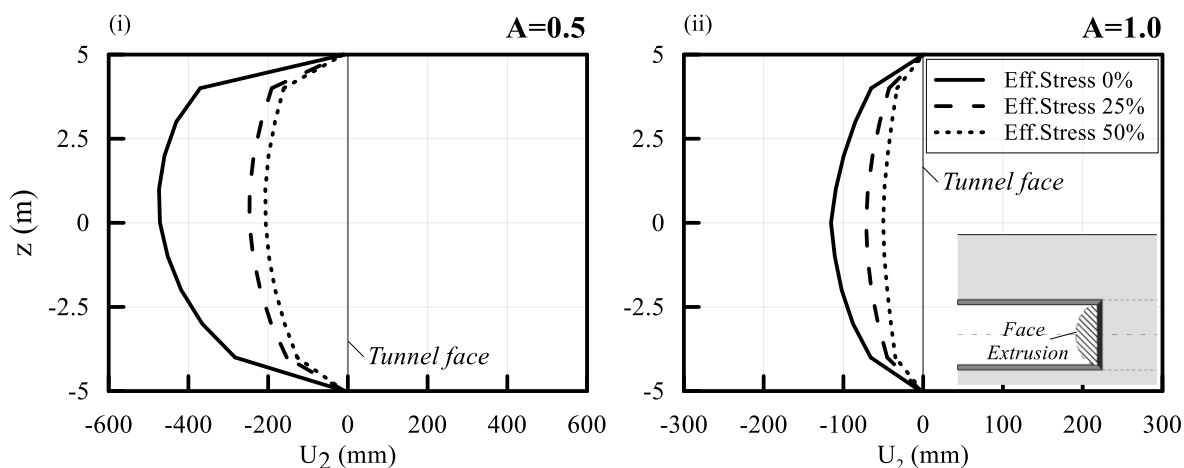
Εξετάζοντας τις χρωματικές απεικονίσεις για τις πλαστικές παραμορφώσεις, φάνηκε πως δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική αλλαγή κατά την αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό. Μόνο στην περίπτωση χαμηλής πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο, δείχνει να βελτιώνεται η κατάσταση, με αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό κατά 25%. Παρόλα αυτά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση για επιπλέον αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό.



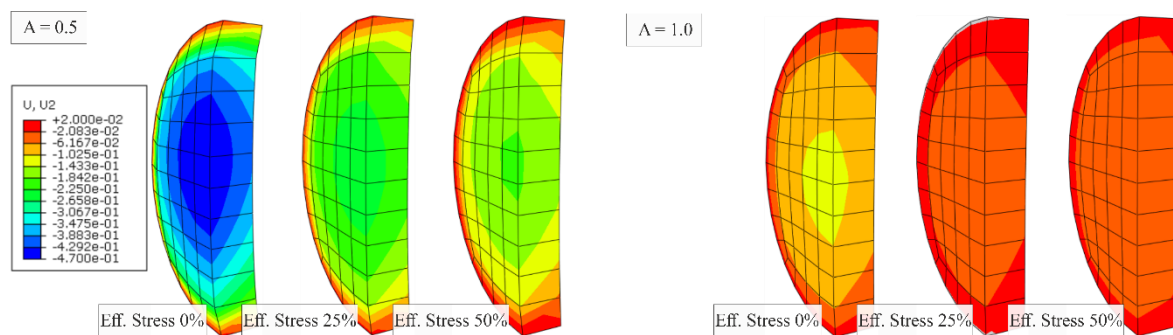
Εικόνα 5.11: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$) και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).

5.5.1 Εξώθηση μετώπου

Στο Διάγραμμα 5.10 παρουσιάζεται η εξώθηση του μετώπου της σήραγγας, για αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό και για πιέσεις υποστήριξης, $A=0.5$ και $A=1$. Οι τιμές εξώθησης και στις δύο περιπτώσεις πίεσης υποστήριξης δείχνουν να επηρεάζονται από την αλλαγή των ενεργών τάσεων στον πολφό. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση πίεσης υποστήριξης $A=1$, η εξώθηση μετώπου μειώνεται κατά περίπου 35% για 25% αύξηση των ενεργών τάσεων, ενώ για 50% αύξηση των ενεργών τάσεων μειώνεται περίπου 55%. Στην περίπτωση πίεσης υποστήριξης $A=0.5$, παρουσιάζεται μείωση της εξώθησης μετώπου κατά περίπου 50% για 25% αύξηση των ενεργών τάσεων, ενώ για 50% αύξηση των ενεργών τάσεων η κατάσταση αλλάζει ελάχιστα. Παρόλα αυτά για χαμηλή πίεση υποστήριξης δείχνει να λειτουργεί ιδιαίτερος ευνοϊκά η αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό καθώς μειώνει την μέση εξώθηση ως και 17 cm. Γενικότερα, η μεταβολή της εξώθησης μετώπου δείχνει να ταυτίζεται με τη μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων.



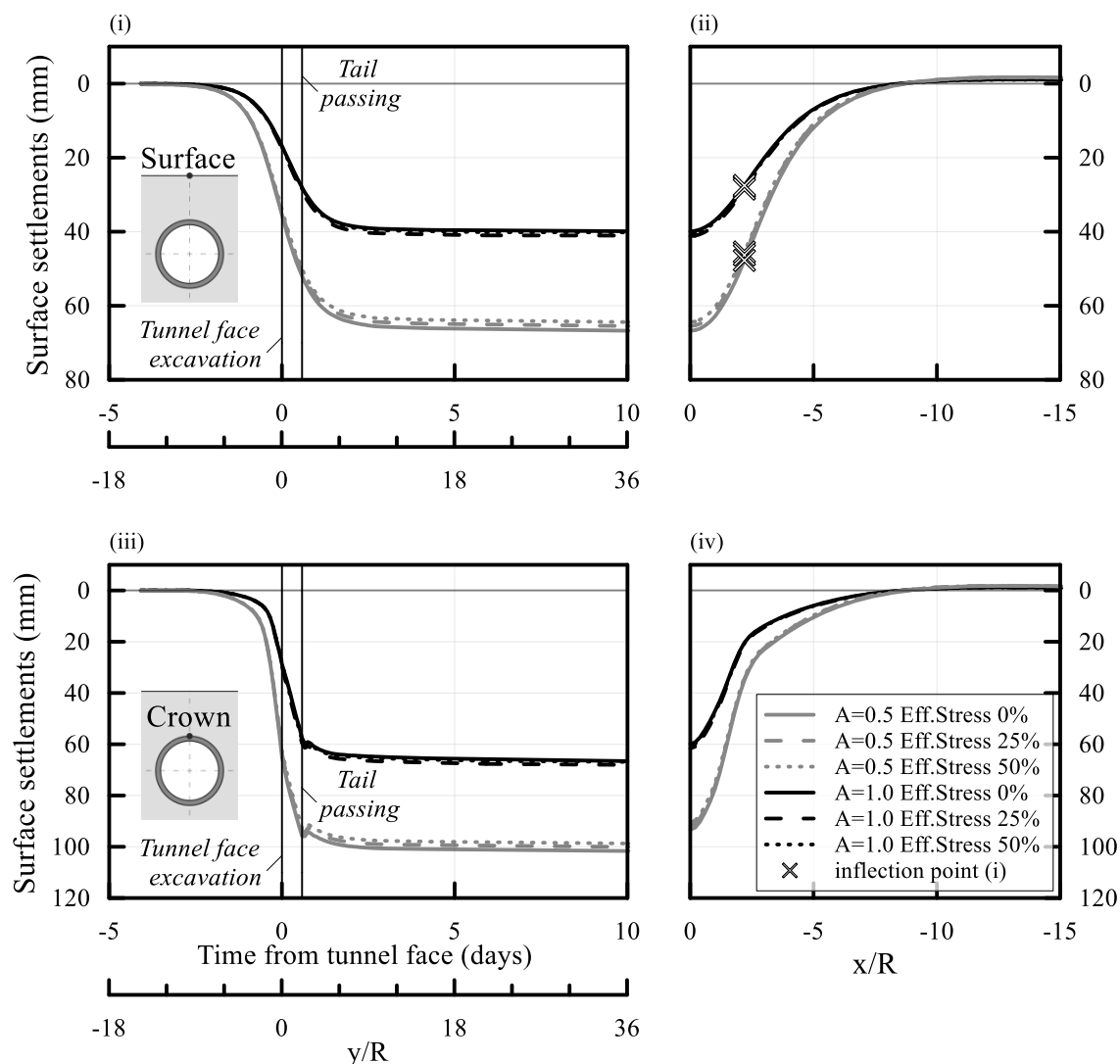
Διάγραμμα 5.10: (i) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ α και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων, (ii) Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας, για το εδαφικό προφίλ α και για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων.



Εικόνα 5.12: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση της εξώθησης μετώπου, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$), και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).

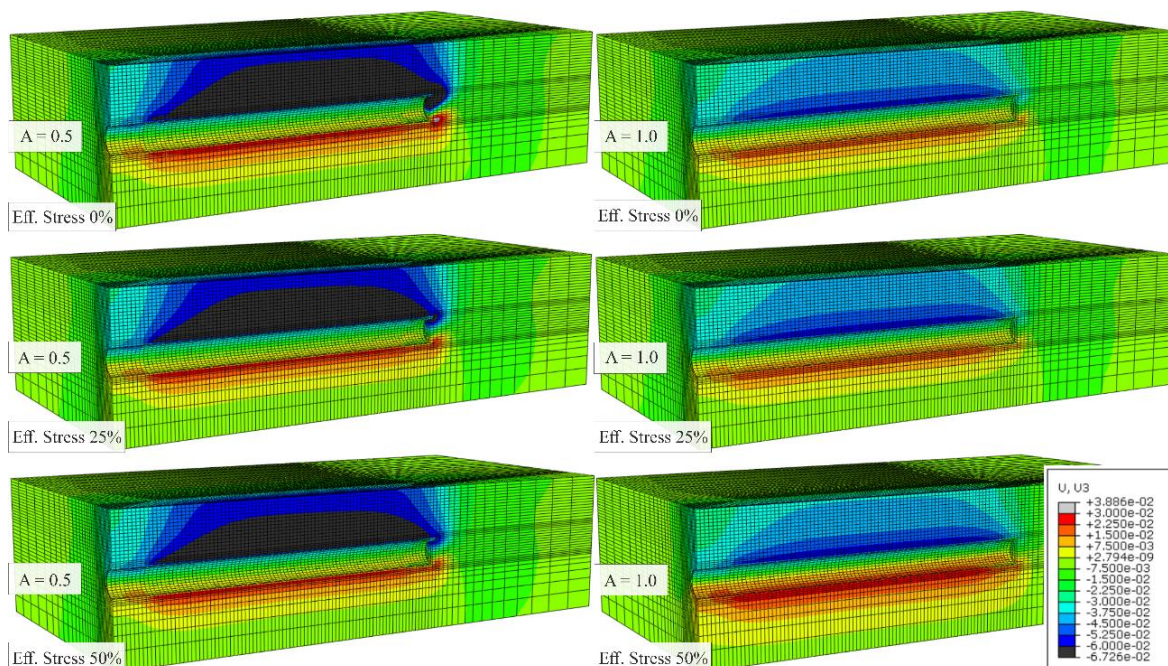
5.5.2 Κατακόρυφες μετατοπίσεις

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Διάγραμμα 5.11, η επιρροή της αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό στις κατακόρυφες μετακινήσεις, είναι πολύ μικρή. Σε αντίθεση με τις εξωθήσεις του μετώπου, είναι εμφανές ότι στις κατακόρυφες μετακινήσεις οι αυξομειώσεις που δημιουργούνται με την αλλαγή των ενεργών τάσεων είναι ελάχιστες. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για πίεση υποστήριξης $A=1$ και αύξηση των ενεργών τάσεων κατά 50%, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας αυξάνονται περίπου 2%, τη στιγμή που οι καθιζήσεις αυξάνονται 4%. Στην περίπτωση πίεσεως υποστήριξης $A=0.5$ και αύξησης των ενεργών τάσεων κατά 50%, οι κατακόρυφες μετακινήσεις μειώνονται κατά 3% στη στέψη της σήραγγας, καθώς και στην επιφάνεια του εδάφους.



Διάγραμμα 5.11: (i) Εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου παρατήρησης στην επιφάνεια, σε εδαφικό προφίλ a , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (ii) Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια, σε εγκάρσια τομή, σε εδαφικό προφίλ a , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου, (iii) Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων ενός σημείου παρατήρησης στη στέψη της σήραγγας, σε εδαφικό προφίλ a , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου και (iv) Κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας σε εγκάρσια τομή, σε εδαφικό προφίλ a , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ενεργών τάσεων και δύο διαφορετικές πιέσεις μετώπου.

Στη συνέχεια παρατηρώντας τη χρωματική απεικόνιση των μετακινήσεων στην Εικόνα 5.13, είναι ξεκάθαρο πως δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες μεταβολές καθώς αυξάνονται οι ενεργές τάσεις στον πολφό. Η μόνη περίπτωση που είναι άξια παρατήρησης, είναι για χαμηλή πίεση υποστήριξης σε εδαφικό σχηματισμό χαμηλής αντοχής, που εμφανίζεται αύξηση των μετακινήσεων μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις στην εξώθηση του μετώπου.

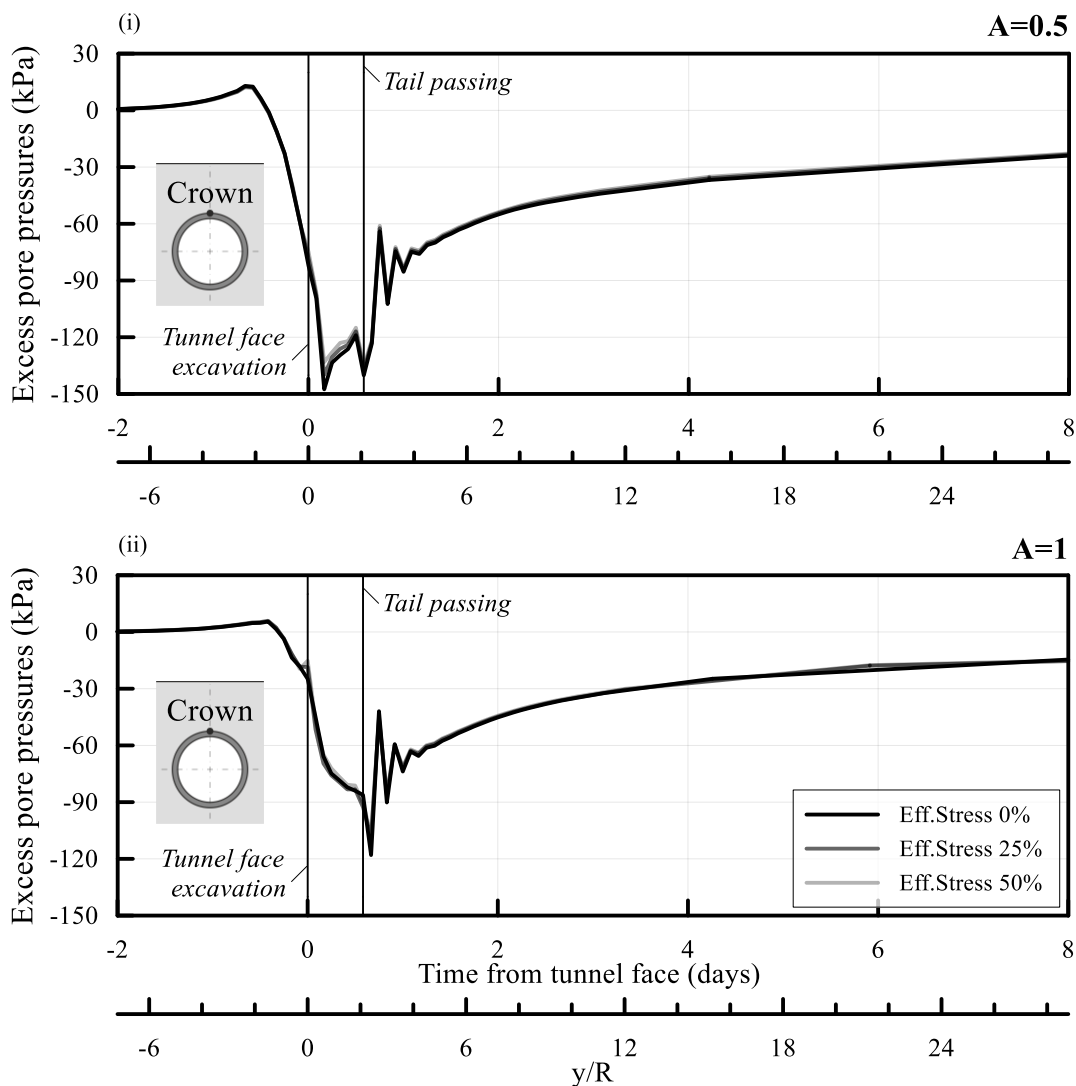


Εικόνα 5.13: Τριδιάστατη χρωματική απεικόνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$), και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).

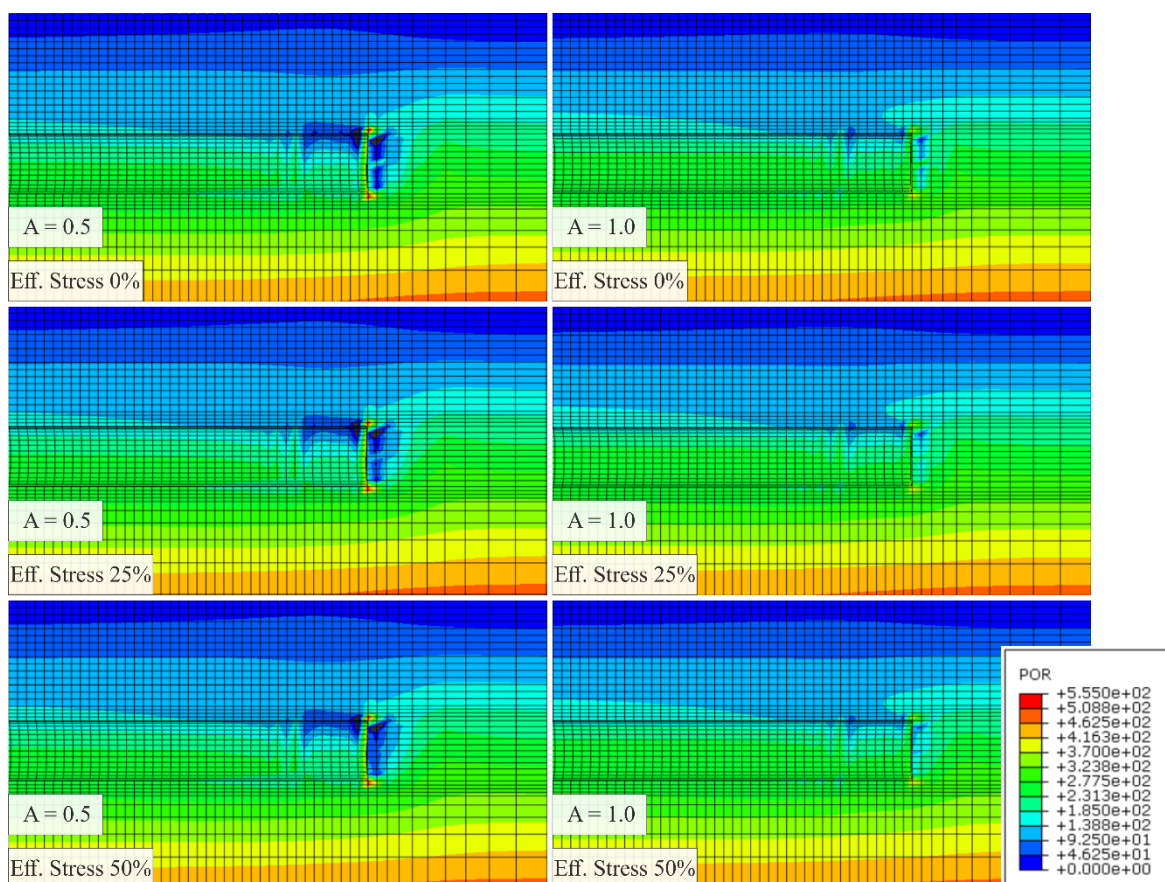
5.5.3 Πιέσεις πόρων

Στο Διάγραμμα 5.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων στη στέψη της σήραγγας στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a), για αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό, για πιέσεις υποστήριξης, $A=0.5$ και $A=1$. Παρατηρούμε ότι όπως στην περίπτωση των καθιζήσεων (βλ. § 5.5.2), έτσι και στην περίπτωση των πιέσεων των πόρων, η επιρροή της αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό είναι πολύ μικρή.

Αντίστοιχα συμπεράσματα παρατηρούνται και στις χρωματικές απεικονίσεις της Εικόνα 5.13, που αναφέρονται στις πιέσεις των πόρων, έτσι όπως διαμορφώνονται τη στιγμή αμέσως μετά την εκσκαφή του μετώπου. Και εδώ φαίνεται χαρακτηριστικά πως η επιρροή της αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό είναι ελάχιστη.

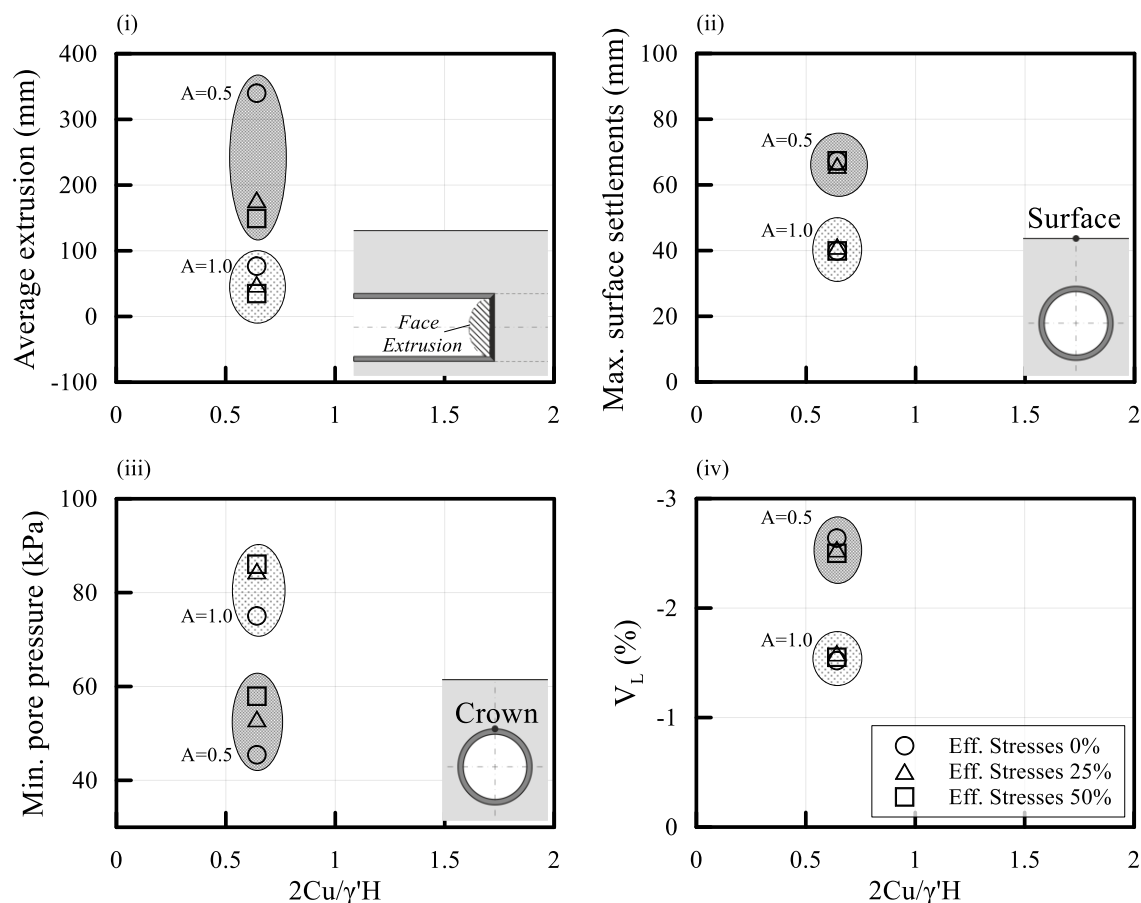


Διάγραμμα 5.12: (i) Εξέλιξη υπερπίεσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής σήραγγας σε εδαφικό προφίλ τύπου a , για πίεση υποστήριξης $A=0.5$ και διαφορετικές υποθέσεις ενεργών τάσεων ($Ef.S.=0\%$, $Ef.S.=25\%$ και $Ef.S.=50\%$), (ii) Εξέλιξη υπερπίεσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής σήραγγας σε εδαφικό προφίλ τύπου a , για πίεση υποστήριξης $A=1$ και διαφορετικές υποθέσεις ενεργών τάσεων ($Ef.S.=0\%$, $Ef.S.=25\%$ και $Ef.S.=50\%$).



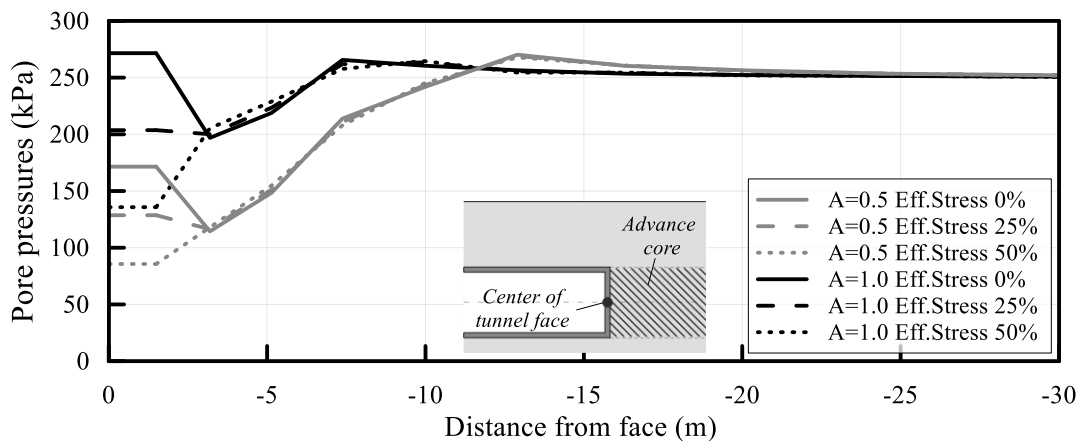
Εικόνα 5.14: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης των πόρων, για έξι αναλύσεις με διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης ($A=0.5$ και $A=1.0$), και διαφορετικές περιπτώσεις αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από την κοπτική κεφαλή (Eff. Stresses=0%, Eff. Stresses=25% και Eff. Stresses=50%).

Συνεχίζοντας, στο Διάγραμμα 5.13 παρουσιάζεται η γενικότερη επιρροή της αύξησης των ενεργών τάσεων στον πολφό, σε διάφορα εξεταζόμενα μεγέθη. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά, η εμφάνιση των ενεργών τάσεων στον πολφό λειτουργεί άκρως ευεργετικά στην μείωση της εξώθησης του μετώπου της σήραγγας, για περιπτώσεις χαμηλής πίεσης υποστήριξης σε εδαφικούς σχηματισμούς χαμηλής αντοχής (π.χ. α εδαφικό προφίλ). Παράλληλα, κατά την αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό εμφανίζεται αύξηση της ελάχιστης τιμής που λαμβάνουν οι πιέσεις πόρων κατά τη διαδικασία της εκσκαφής, χωρίς όμως να βελτιώνεται ο χρόνος επαναφοράς του συστήματος στην αρχική του κατάσταση (βλ. Διάγραμμα 5.12). Παρόλα αυτά φαίνεται να μην υπάρχει καμία βελτίωση τόσο στις καθιζήσεις, όσο και στο ποσοστό απώλειας όγκου.



Διάγραμμα 5.13: (i) Μέση εξώθηση μετώπου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (ii) μέγιστη καθίζηση συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους, (iii) Ελάχιστη πίεση πόρων συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους και (iv) ποσοστό απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

Η πιθανότερη εξήγηση των όσων παρατηρήθηκαν με βάση το Διάγραμμα 5.13, είναι ότι λόγω της μικρής διαπερατότητας του εδαφικού σχηματισμού, η επιρροή από την αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό περιορίζεται στο μέτωπο της εκσκαφής, στο οποίο καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και σε μια τοπική ζώνη μικρού εύρους μπροστά από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.14 η αύξηση των ενεργών τάσεων επηρεάζει την πίεση των πόρων μόνο στα πρώτα 3-4 m του πυρήνα προώθησης της σήραγγας, διότι λόγω της μικρής περατότητας του σχηματισμού δεν επιτρέπεται ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να εμφανιστούν αλλαγές στην πίεση των πόρων μετά από αυτά τα πρώτα μέτρα του πυρήνα προώθησης. Ωστόσο, ο ρυθμός προχώρησης δεν παρέχει το απαιτούμενο χρονικό περιθώριο για την επίτευξη μεταβολών σε μεγαλύτερο εύρος. Για τον λόγο αυτό παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές σε μεγέθη που επικεντρώνονται στο μέτωπο της εκσκαφής (π.χ. εξώθηση μετώπου), οι οποίες δεν αναπτύσσονται σε αντίστοιχα μεγέθη πάνω από τη στέψη της σήραγγας.



Διάγραμμα 5.14: Πιέσεις πόρων στον πυρήνα προώθησης, πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, εξήχθησαν αποτελέσματα από ένα σημαντικό αριθμό τριδιάστατων αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων, με σκοπό να πραγματοποιηθεί διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις εδαφικές μετακινήσεις. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για δύο (2) εδαφικά προφίλ, για τρεις (3) πιέσεις υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής και για δύο (2) περιπτώσεις ανάπτυξης ενεργών τάσεων στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ευαισθησία διαφόρων μεγεθών που διερευνήθηκαν (επιφανειακές καθιζήσεις, εδαφικές μετακινήσεις, πιέσεις πόρων, πλαστικές παραμορφώσεις κ.λ.π.), εξαιτίας της μεταβολής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, και των εξής παραμέτρων:

- Η πίεση στο μέτωπο εκσκαφής (Face Pressure, FP),
- Η ανάπτυξη ενεργών τάσεων στον πολφό στο μέτωπο εκσκαφής (Effective Stresses, ES).

Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ένα εδαφικό υλικό με ασθενή γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (a) και για ένα υλικό με συγκριτικά βελτιωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (b). Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτή την εργασία συνοψίζονται στη συνέχεια, ξεχωριστά για κάθε παράμετρο που σχετίζεται με την μηχανική απόκριση του εδαφικού υλικού. Οι παράμετροι συντάχτηκαν με την αντίστοιχη σειρά που περιγράφονται στην αναλυτική επεξήγηση των αναλύσεων στο Κεφάλαιο 5.

6.1.1 Πλαστικές παραμορφώσεις

Σε ότι αφορά την πλαστικοποίηση του εδάφους κατά μήκος της σήραγγας, προκύπτει ότι επηρεάζεται και καθορίζεται από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής, περισσότερο σε ασθενείς γεωτεχνικές συνθήκες και κατά κύριο λόγο η επίδραση επικεντρώνεται στη μείωσή της. Γενικότερα για διαφορετικές πιέσεις υποστήριξης, αλλά ίδια αστράγγιστη διατμητική αντοχή, οι πλαστικές παραμορφώσεις παρουσίαζαν την ίδια εικόνα. Αντίθετα, για μεταβολή της διατμητικής αντοχής, παρατηρήθηκαν έντονες αλλαγές στις πλαστικές παραμορφώσεις συμπεραίνοντας ότι αφενός ο κρίσιμος παράγοντας για το συγκεκριμένο μέγεθος είναι η εδαφική αντοχή και όχι η πίεση υποστήριξης. Άξια παρατήρησης είναι η περίπτωση ασθενών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών (α εδαφικό προφίλ) και χαμηλής πίεσης υποστήριξης ($A=0.5$), όπου υπήρχε αυξημένη εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια (δεν εμφανίζονται σε καμία άλλη περίπτωση), σε μεγάλο εύρος περιμετρικά της σήραγγας και του μετώπου της εκσκαφής. Συνοπτικά, οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους αυξάνονται σημαντικά όσο μειώνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

6.1.2 Εξώθηση μετώπου

Η εξώθηση του μετώπου της εκσκαφής είναι ένα μέγεθος πολύ σημαντικό για τη μελέτη της διάνοιξης σηράγγων, καθώς συνδέεται άμεσα με κρίσιμα μεγέθη, όπως η απώλεια όγκου και οι καθιζήσεις. Επιπλέον έχει άμεση συσχέτιση, με τα μεγέθη που μελετήθηκαν παραμετρικά και συγκεκριμένα την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής και την ανάπτυξη ενεργών τάσεων στον πολφό στο μέτωπο. Αναλυτικά:

- Η αντοχή του εδαφικού προφίλ φαίνεται να είναι καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος της εξώθησης του μετώπου της εκσκαφής. Χαρακτηριστικά η διαφοροποίηση της μέσης εξώθησης μετώπου μεταξύ των δύο εδαφικών προφίλ που μελετήθηκαν είναι της τάξης του 85%. Δηλαδή το εδαφικό προφίλ χαμηλότερης αντοχής εμφανίζει 85% μεγαλύτερη εξώθηση σε σχέση με το προφίλ υψηλότερης αντοχής.
- Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής δείχνει να επηρεάζει σημαντικά την εξώθηση του μετώπου σε περιπτώσεις ασθενών γεωτεχνικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα στο εδαφικό προφίλ υψηλής αντοχής (b) η μεταβολή της πίεσης υποστήριξης δεν προκαλεί αξιοσημείωτες μεταβολές στην μέση εξώθηση του μετώπου. Στην περίπτωση του εδαφικού προφίλ χαμηλής αντοχής η αύξηση της πίεσης υποστήριξης επίσης δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές της εξώθησης. Αντίθετα, η μείωση της

πίεσης υποστήριξης οδηγεί σε αύξηση της μέσης εξώθησης περισσότερο από 300%, γεγονός που μπορεί να συνδεθεί με την έντονη αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων που παρατηρήθηκε στην ίδια ανάλυση.

- Η αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό μπροστά από το μέτωπο δεν εμφανίζει επιρροή στην εξώθηση του μετώπου για την περίπτωση που η παράμετρος της πίεσης υποστήριξης A ισούται με 1.0. Στην περίπτωση μείωσης της πίεσης υποστήριξης, η αύξηση των ενεργών τάσεων φαίνεται να λειτουργεί ιδιαίτερος ευεργετικά στην εξώθηση του μετώπου, μειώνοντας τη μέση εξώθηση ως και 50%.

6.1.3 Καθιζήσεις

Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας έχει άμεση συσχέτιση, με τα μεγέθη που μελετήθηκαν παραμετρικά, δηλαδή την αντοχή του εδαφικού προφίλ, την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής καθώς και την ανάπτυξη ενεργών τάσεων στον πολφό στο μέτωπο. Συγκεκριμένα:

- Η αύξηση της εδαφικής αντοχής συνεπάγεται μειωμένες καθιζήσεις από την αρχή της διάνοιξης της σήραγγας, τόσο στις προσυγκλίσεις του εδάφους, όσο και στις μετακινήσεις μετά τη διάνοιξη της διατομής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ανεξαρτήτως της εδαφικής αντοχής, το ποσοστό των καθιζήσεων επί της τελικής τιμής είναι σταθερό για όλες τις τιμές σε ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία. Συγκεκριμένα, μέχρι να φτάσει το EPB στο σημείο αναφοράς, αναπτύσσεται περίπου το 40% των τελικών καθιζήσεων. Στη συνέχεια, στο χρονικό διάστημα από την εκσκαφή του μετώπου κάτω από το σημείο αναφοράς μέχρι τη διέλευση του ουριαίου τμήματος της ασπίδας από το σημείο αναφοράς, αναπτύσσεται περίπου το 35% της τελικής καθιζήσης. Ενώ μετά την εισαγωγή του ενέματος στο τέλος της ασπίδας του EPBM, εξελίσσεται το υπόλοιπο 25% των τελικών καθιζήσεων που κατά κύριο λόγο οφείλεται στη στερεοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους.
- Η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής φαίνεται να αυξάνεται όσο χειροτερεύουν οι γεωτεχνικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για το εδαφικό προφίλ υψηλής αντοχής (b), με αύξηση ή μείωση της πίεσης υποστήριξης, παρατηρήθηκε βελτίωση ή αντίστοιχα επιδείνωση των καθιζήσεων της τάξης του 5-15%. Αντίθετα, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για το εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a), για αύξηση της πίεσης υποστήριξης

μειώθηκαν οι καθιζήσεις έως 30% και για μείωση, της πίεσης υποστήριξης παρουσιάστηκε 70% αύξηση των καθιζήσεων. Έτσι γίνεται ξεκάθαρο, πως η ευαισθησία των καθιζήσεων στην μεταβολή της πίεσης υποστήριξης εξαρτάται άμεσα από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

- Η αύξηση των ενεργών τάσεων φαίνεται να μην επηρεάζει, τόσο τις καθιζήσεις όσο και γενικότερα τις μετακινήσεις πάνω από τη στέψη της σήραγγας. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως αναλύθηκε και στην § 5.5.3, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έχει θεωρηθεί ότι ο εδαφικός σχηματισμός έχει μικρή υδατοπερατότητα, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές πραγματοποιούνται από την αύξηση των ενεργών τάσεων στον πολφό, να περιορίζονται στα πρώτα μέτρα του πυρήνα προώθησης της σήραγγας.

6.1.4 Πιέσεις πόρων

Η εξέλιξη της πίεσης των πόρων έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί σε τρία χρονικά σημεία, ανάλογα με τα στάδια της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά της πίεσης των πόρων μπορεί να διαχωριστεί σε: συμπεριφορά πριν την εκσκαφή του μετώπου από το EPB, συμπεριφορά κατά τη διάρκεια προχώρησης του EPB και συμπεριφορά αφού γίνει εισαγωγή του ενέματος. Έτσι, τα συμπεράσματα για κάθε μια κατάσταση είναι:

- Για τη συμπεριφορά της πίεσης των πόρων δείχνει να είναι κομβικής σημασίας ο τύπος του εδαφικού υλικού καθώς και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του.
- Στο εδαφικό προφίλ υψηλής αντοχής (b), η μεταβολή της πίεσης των πόρων καταδεικνύεται να είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής. Αναλυτικότερα, τη στιγμή που το EPBM φτάνει στο μέτωπο δημιουργούνται υπερπιέσεις πόρων στη θέση της στέψης της σήραγγας. Αυτές οφείλονται στην πίεση που ασκεί το EPB καθώς και στη γενικότερη διαταραχή που προκαλεί στο χώρο γύρω από τη σήραγγα η εκσκαφή του μετώπου. Στη συνέχεια, μετά την εκσκαφή του μετώπου και μέχρι την εισαγωγή του ενέματος, δηλαδή το χρονικό διάστημα που η ασπίδα διέρχεται από το σημείο αναφοράς, παρατηρείται έντονη πτώση της πίεσης των πόρων, αναπτύσσοντας σημαντικές υποπιέσεις. Αυτές οφείλονται στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, που έχει δημιουργηθεί από τις υπερεκσκαφές της κεφαλής κοπής και την κωνικότητα της ασπίδας. Έτσι, η τάση του εδάφους να παραμορφωθεί μέσω αυτού του κενού οδηγεί σε φαινόμενα

αναρρόφησης (suction) που συνεπάγονται σημαντικές υποπίεσεις. Τέλος, μετά το πέρας του μηχανήματος και την εισαγωγή του ενέματος οι πιέσεις των πόρων σταδιακά αυξάνονται για περίπου 8-12 μέρες, οπότε το σύστημα επανέρχεται σε ισορροπία.

- Στο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής (a), η μεταβολή της πίεσης των πόρων διαφοροποιείται αρκετά με την αυξομείωση της πίεσης υποστήριξης κυρίως μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Αναλυτικότερα, τη στιγμή που το EPBM φτάνει στο μέτωπο, για υψηλές τιμές της πίεσης υποστήριξης, δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων στη θέση της στέψης της σήραγγας. Αντίθετα, στις περιπτώσεις $A=1.0$ και $A=0.5$ εμφανίζεται ανάπτυξη υποπίεσεων μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Στα υπόλοιπα στάδια της εκσκαφής η πίεση των πόρων ακολουθεί περίπου την ίδια διακύμανση με την περίπτωση του εδαφικού προφίλ (b). Τέλος, μετά το πέρας του μηχανήματος και την εισαγωγή του ενέματος οι πιέσεις των πόρων σταδιακά αυξάνονται για περίπου 40-60 μέρες, οπότε το σύστημα επανέρχεται σε ισορροπία.
- Έντονη προκύπτει ότι είναι η επιρροή της πίεσης υποστήριξης στην ελάχιστη τιμή που φτάνουν οι πιέσεις των πόρων κατά τη φάση της εκσκαφής και κατά συνέπεια στον χρόνο που απαιτείται για την επαναφορά του συστήματος σε ισορροπία. Χαρακτηριστικά, ανεξαρτήτως του εδαφικού σχηματισμού, για μείωση της πίεσης υποστήριξης, μειώνεται κατά 50% η ελάχιστη πίεση των πόρων και αυξάνεται κατά 30-40% ο χρόνος που απαιτείται για την επαναφορά του συστήματος σε ισορροπία. Αντιθέτως, για αύξηση της πίεσης υποστήριξης, η επιρροή μεταβάλλεται ανάλογα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού και συγκεκριμένα αυξάνεται όσο μειώνεται η αντοχή του εδαφικού σχηματισμού.
- Η ανάπτυξη ενεργών τάσεων δεν επηρεάζει σημαντικά την μεταβολή της πίεσης των πόρων.

6.2 Προτάσεις

Στα πλαίσια κάποιας μελλοντικής έρευνας προτείνεται:

- Η διερεύνηση του προβλήματος μέσω αριθμητικών αναλύσεων με μεγαλύτερο εύρος στις τιμές της διαπερατότητας των εδαφικών σχηματισμών και συνεκτίμηση της επιρροής της ανάπτυξης ενεργών τάσεων στον πολφό.
- Η διερεύνηση με χρήση ενός διαφορετικού καταστατικού προσομοιώματος για αργίλους, όπως το Cam Clay ή το modified Cam Clay, ώστε να γίνει πιο ακριβής προσέγγιση των καθιζήσεων.

- Η διεξαγωγή αριθμητικών αναλύσεων για διαφορετική γεωμετρία, δηλαδή διαφορετικής διαμέτρου σήραγγας (D) και διαφορετικής αναλογίας υπερκειμένων/διαμέτρου (H/D) σήραγγας.
- Η διερεύνηση των αντίστοιχων παραμέτρων και η επιρροή που μπορεί να έχουν στην εκσκαφή δίδυμων σηράγγων.

Βιβλιογραφία

- Atkinson, J.H., Brown, E.T. & Potts, D.M., 1977. Ground movements near shallow model tunnels in sand. In *Large Ground Movements and Structures: Proc. of the Conference Held at the University of Wales Institute of Science and Technology*. Cardiff, Wales, pp. 372–386.
- Attiko Metro, Earth Pressure Balance, Tunnel Boring Machine (EPB). Available at: http://www.ametro.gr/?page_id=4360&lang=en.
- Bezuijen, A., 2007. Bentonite and grout flow around a TBM. *Tunnels and Tunnelling International*, (JUNE), pp.39–42.
- Bezuijen, A. et al., 2005. Pressure gradients at the tunnel face of an Earth Pressure Balance shield. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, pp.809–814.
- Bezuijen, A. & Talmon, A.M., 2014. Soil pressures at the cutting wheel and the pressure bulkhead of an EPB-shield. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. CRC Press, pp. 523–529.
- Bowles, J.E., 1997. *Foundation Analysis and Design Fifth Edition*,
- Choi, J. & Yoo, C., 2015. TBM segment lining section design of hypothetical subsea tunnels. *Korean Tunneling Underground Space Association*, 17(1), pp.49–63.
- Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C. & Konstantinidis, G.K., 2014. Numerical Assessment of Subsidence and Adjacent Building Movements Induced by TBM-EPB Tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), p.4014061.
- Cording, E.J. & Hansmire, W.H., 1975. Displacements around soft ground tunnels. In *General Report: Session IV, Tunnels in soil: "Proc., 5th Panamerican Congr. on Soil Mech. and Found Engrg."* pp. 571–633.
- Dassault Systems, 2010. *Abaqus/CAE User Manual*,
- Derrick Corporation, Derrick Corporation. Available at: <http://derrick.com/>.

- Do, N.A. et al., 2013. 3D modelling for mechanized tunnelling in soft ground-influence of the constitutive model. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), pp.863–875.
- Franzius, J.N., 2003. *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence*. Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Hansmire, W.H. & Cording, E.J., 1972. Performance of a Soft Ground Tunnel on the Washington Metro. In *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Chicago, Illinois, pp. 271–289.
- Herrenknecht, EPB Shield. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>.
- Herrenknecht, Mixshield. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/mixshield.html>.
- Herrenknecht, Separation plants. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/additional-equipment/tunnelling-logistics/separation-plants.html>.
- Hibbitte, K., 2005. *ABAQUS user subroutines reference manual*, Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ABAQUS+User+Subroutines+Reference+Manual#3>.
- Kasper, T. & Meschke, G., 2004. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(14), pp.1441–1460.
- Kasper, T. & Meschke, G., 2006. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), pp.160–171.
- Kavvadas, M. et al., 2013. Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling. *European Research Program NeTTUN*.
- Lambrughi, A., Medina Rodríguez, L. & Castellanza, R., 2012. Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations. *Computers and Geotechnics*, 40, pp.97–113.
- Lee, K.M., Rowe, R.K. & Lo, K.Y., 1992. Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), pp.929–940.
- Litsas, D., Fortsakis, P. & Kavvadas, M., 2015. 3D simulation of mechanized tunnel

- excavation. In *3rd Arabian Tunnelling Conference & Exhibition*. Dubai, UAE.
- Loganathan, N. & Poulos, H.G., 1998. Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9), pp.846–856.
- Luttikholt, A., 2007. *Ultimate limit state analysis of a segmented tunnel lining: Results of full-scale tests compared to finite element analysis*. Delft University of Technology.
- Mair, R.J. & Taylor, R.N., 1997. Bored tunnelling in the urban environment (State-of-the-art report and theme lecture). *The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.2353–2385.
- Mair, R.J., Taylor, R.N. & Bracegirdle, A., 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Géotechnique*, 43(2), pp.315–320.
- MOST Construction Company, 2012. Robbins Company Plant, Manufactured a Tunneling System for Moscow Subway Construction. Available at: <http://en.skmost.ru/press/photo/2012/08/29/robbins-moscow-metro.html>.
- Nagel, F. & Meschke, G., 2011. Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(3), pp.445–452. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.12.001>.
- 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. *International Journal of Geomechanics*, (December), pp.689–696.
- O'Reilly, M.P. & New, B.M., 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. In *Tunnelling 82. Papers presented at the third International Symposium, organized by the Institution of Mining and Metallurgy*. Institution of Mining & Metallurgy, pp. 173–181.
- Peck, R.G., 1969. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 7(3), pp.225–290.
- Prague Metro, 2013. TBM tunnel of the metro station Petřiny in Prague. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Petřiny_tunel_TBM_2013-01-19.jpg.

- Proutzopoulos, G., 2012. *Investigation of the Excavation Face Stability in Shallow Tunnels*. National Technical University of Athens.
- Rankin, W.J., 1988. Ground movements resulting from urban tunnelling: Predictions and effects. *Geological Society London Engineering Geology Special Publications*, 5(1), pp.79–92.
- Robbins, New Delhi Metro Extension Project. Available at: <http://www.therobbinscompany.com/en/case-study/new-delhi-metro/>.
- Robbins, Robbins TBM. Available at: <http://www.therobbinscompany.com/>.
- Roxborough, F., 1973. Cutting rock with picks. *Trans. Inst. Min. Eng.*, 132, pp.445–454.
- Roxborough, F. & Phillips, H., 1975. Rock excavation by disc cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 12(12), pp.361–366.
- Sagaseta, C., 1987. Analysis of Undrained Soil Deformation Due To Ground Loss. *Geotechnique*, 37(3), pp.301–320.
- Schmidt, B., 1969. *Settlements and Ground Movements Associated with Tunneling in Soil*, University of Illinois. Available at: https://books.google.gr/books?id=8M8_nQEACAAJ.
- Seli, Greece - Thessaloniki Metro. Available at: http://db.selitunnel.com/4daction/seli_news?id=338&page=newsPhotoGallery&lingua=ing.
- Sitarenios, P. et al., 2015. Effect of Hydraulic Conditions in controlling the Face in EPB Excavated Tunnels. *SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Region. Proceedings of the 41st World Tunnel Congress*.
- The Masterbuilder, 2014. State of the Art TBM Full Face Driving. Available at: <https://www.masterbuilder.co.in/state-of-the-art-tbm-full-face-driving/>.
- Tunnelseis, Tunnelling. Available at: <http://www.tunnelseis.de/tunnelling.html>.
- Verruijt, A. & Booker, J.R., 1996. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Géotechnique*, 46(4), pp.753–756. Available at: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geot.1996.46.4.753>.
- Xiroudakis, G., 2015. *Μοντέλα Όρυξης Υπογείων Έργων με Μηχανήματα Ολομετώπου και Σημειακής Κοπής*. Technical University of Crete.