



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ»

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ
ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ
ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΔΟΥΛΚΑΣ Χ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ., Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την διπλωματική εργασία, εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνει επίσημα τον κύκλο μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου με τίτλο «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων». Στόχος της είναι η αριθμητική διερεύνηση κυρίως της επιρροής της διαπερατότητας του εδάφους στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων, κατά την μηχανοποιημένη όρυξη σήραγγας σε μικρό σχετικά βάθος από την επιφάνεια.

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μ. Καββαδά, που μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της εργασίας αυτής και την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ υπό την εποπτεία του. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Δ. Λίτσα, ο οποίος με συμβούλευσε και με βοήθησε στην επιλογή του θέματος της έρευνας. Η αμέριστη συμπαράσταση του ήταν καθοριστική στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν άψογη και η υποδειγματική μεταδοτικότητα του αποτέλεσε αρωγό για την ολοκλήρωση αυτής. Επιπρόσθετα, οφείλω ένα ειλικρινές ευχαριστώ στον Δρ. Π. Σιταρένιο και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Φ. Χόρτη, για την υπέροχη συνεργασία, τις ώρες που αφιέρωσαν, τις πολύτιμες και υψηλού επιπέδου γνώσεις τους τόσο πάνω σε θεωρητικά όσο και τεχνικά θέματα της αριθμητικής προσομοίωσης, και την βοήθειά τους στην ερμηνεία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Συνεχίζοντας, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου Μαρία και Χρήστο, και τα αδέρφια μου Χάρη και Ξένια, που ανιδιοτελώς και συνεχώς με στηρίζουν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους θείους μου Νίκη και Απόστολο. Επίσης, ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξη τους φίλους μου Πάνο, Μίλτο, Εβίτα και Γιάννη. Τελευταία αλλά εξίσου αληθινά, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου Γιώργο και Θεοδωρή.

Δούλκας Χ. Γεώργιος

Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επιρροή της διαπερατότητας του εδάφους, σε συνδυασμό με την εφαρμοζόμενη στο μέτωπο εκσκαφής πίεση υποστήριξης, στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας με την μέθοδο της μηχανοποιημένης εκσκαφής σε μικρό σχετικά βάθος. Η διερεύνηση συντελείται σε αριθμητικό προσομοίωμα, με χρήση του κώδικα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων *Simulia Abaqus v.6.13*.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πραγματικό πρόβλημα, ο σκοπός της εργασίας και επιγραμματικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBMs) και παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι μηχανήματος, καθώς και οι διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες όπου βρίσκει χρήση ο κάθε τύπος. Εκτενέστερα περιγράφονται οι τύποι μηχανήματος εξισσορόπησης πίεσης γαιών (EPBM) – που προσομοιώθηκε στην παρούσα εργασία - και πολφού μπεντονίτη (Slurry TBM). Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην βασική αρχή λειτουργίας αυτών των τύπων και στις ιδιαίτερες μηχανολογικές τους διατάξεις.

Ο μηχανισμός ανάπτυξης εδαφικών μετακινήσεων καθώς και οι βασικοί ορισμοί και παράμετροι που συσχετίζονται με το φαινόμενο περιγράφονται στο τρίτο κεφάλαιο. Έπειτα, λαμβάνει χώρα μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναλυτικών και εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού των εδαφικών μετακινήσεων, που χρησιμοποιούνται έως σήμερα. Τέλος, παραθέτονται ορισμένες διδιάστατες (2D) και τριδιάστατες (3D) αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, αποτελούν ορόσημα στην προσομοίωση διάνοιξης σηράγγων με αριθμητικά μέσα και χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγοί στην παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται διεξοδικά το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε. Γίνεται μια εκτενής αναφορά στις τεχνικές προσομοίωσης που υιοθετήθηκαν, ώστε να εκφραστούν με ακρίβεια όλες οι πτυχές της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων, όπως η αλληλεπίδραση της ασπίδας του μηχανήματος με το έδαφος και η πίεση υποστήριξης του μετώπου, και περιγράφονται τα διαδοχικά βήματα της ανάλυσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί το κύριο μέρος της εργασίας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δεκατριών (13) αριθμητικών αναλύσεων, δέκα (10) εκ των οποίων συζευγμένες. Οι παράμετροι για τις οποίες εξετάζεται η επιρροή τους είναι (i) ο συντελεστής περατότητας K_s , (ii) η πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής εκφραζόμενη μέσω μιας παραμέτρου A και (iii) ο ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος εκσκαφής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους, προφίλ κατανομής επιφανειακών καθιζήσεων και απεικονίσεων των δημιουργούμενων πλαστικών παραμορφώσεων στο μέτωπο και στην περιφέρεια της διατομής. Επιπρόσθετα, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των συζευγμένων αναλύσεων με αυτά των τριών (3) αναλύσεων που δεν λαμβάνουν υπόψιν το υδραυλικό πρόβλημα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφονται τα εξαγόμενα από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το κύριο συμπέρασμα είναι πως η διαπερατότητα του εδάφους έχει σημαντική επιρροή στις εδαφικές μετακινήσεις στην επιφάνεια, ιδιαίτερα σε συνθήκες μη επαρκούς υποστήριξης του μετώπου, ενώ σε υψηλές τιμές της πίεσης υποστήριξης οι συνθήκες περατότητας δείχνουν να μην είναι καθοριστικές στην εξέλιξη του φαινομένου. Επιπλέον, ο μη υπολογισμός του υδραυλικού μέρους παράγει αποτελέσματα, τα οποία αποκλίνουν αισθητά από αυτά των συζευγμένων αναλύσεων.

ABSTRACT

This postgraduate thesis deals with the influence of the permeability of the soil, combined with different values of the applied face pressure, on the development of surface settlements during the construction of a relatively shallow tunnel by an EPB machine in cohesive soils. The investigation is conducted on a numerical model, using the *Simulia Abaqus v.6.13* finite element analysis code.

The actual problem is briefly described in the very first pages along with the scope of this thesis and the methodology that was followed.

In the second chapter, an extensive review of the tunnel boring machine technology takes place, where different types of TBMs and the geological conditions for which each type is more suitable are described. Furthermore, the chapter focuses on the Earth Pressure Balance Machines (EPBMs) and Slurry TBMs, their basic principle of operation and special mechanical equipment and utilities.

The mechanics behind the development of soil deformations and the basic terms and parameters that relate with this phenomenon are given in the third chapter. Moreover, a literature review of the most commonly used analytical and empirical methods is presented, followed by some 2D and 3D numerical analysis methods, that serve as guidelines in the present research.

The 3D numerical model that is being used in this thesis is thoroughly described in the fourth chapter. The several modelling techniques, that have been adapted to accurately simulate all the aspects of the mechanized shield tunneling, such as the interaction between the TBM shield and the surrounding soil and the applied face pressure, are given in detail. The steps of the numerical analysis are explained here as well.

The main body of the investigation takes place in the fifth chapter, where the results of the thirteen (13) parametric analyses, of which ten (10) are coupled, are presented through diagrams and contoured depictions. The parameters, the influence of which is examined, are (i) the coefficient of permeability K_s , (ii) the applied face support, expressed through the parameter A , and (iii) the rate of advance of the machine.

Additionally, a comparison between the results of the coupled analyses and the results of the ones that do not take the hydraulic problem into consideration is executed.

The outcomes of the aforementioned investigation are highlighted in the sixth and last chapter of this thesis. It is noted that, the permeability state of the soil has a great influence on the development of surface settlements, especially in low face pressure scenarios, where the undrained state seems to be more favourable and the drained state is deemed as the most unfavourable. In high face pressure scenarios, where the full horizontal geostatic stresses are being counterbalanced, the effect of the permeability of the soil is minimized. Moreover, different rates of advance do not seem to affect the settlements at the surface, when the excavation takes place in impermeable soils. However, significant differences regarding the excess pore pressures around the tunnel can be observed. In addition to the above, proof is given that the results of the coupled analyses are more accurate, as far as the effect of the permeability is considered.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IV
ABSTRACT.....	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	IX
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	21
2. ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ – ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ (TBMS)	25
2.1 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	27
2.1.1 TBM Ανοιχτού Τύπου (Non-shielded Open Face Machines / Gripper TBMs) ...	27
2.1.2 TBM Ανοιχτού Τύπου με Ασπίδα (Shielded Open Face Machines).....	28
2.1.3 TBM Μονής Ασπίδας (Single Shield TBMs)	29
2.1.4 TBM Διπλής Ασπίδας (Double Shielded TBMs).....	29
2.1.5 TBM Εξισορρόπησης Πίεσης Γαιών (Earth Pressure Balance Machines / EPBMs).....	30
2.1.6 TBM Εξισορρόπησης Πίεσης Πολφού (Slurry Machines / Hydroshield / STBMs)	31
2.1.7 Mixed Mode/ Convertible TBMs.....	32
2.2 ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ (EPB – SLURRY TBMS).....	36
2.2.1 Προετοιμασία – Συγκέντρωση Δεδομένων και Αρχικός Σχεδιασμός.....	37
2.2.2 Σχετικά με το Μηχάνημα Εξισορρόπησης Πίεσης Γαιών (EPBTBM)	40
2.2.3 Σχετικά με το Μηχάνημα Πολφού (Slurry TBM).....	42
2.3 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ EPBM ΚΑΙ SLURRY TBM – Δομή και Ιδιαιτερες Διατάξεις	43
2.3.1 Κοπτική Κεφαλή (Cutter Head / Cutting Wheel)	43
2.3.2 Θάλαμος Εκσκαφής (Excavation Chamber)	47
2.3.3 Ατέρμων Κοχλίας (Screw Conveyor).....	48
2.3.4 Υδραυλικά έμβολα ώθησης.....	50
2.3.5 Ανυψωτής στοιχείων τελικής επένδυσης (Erector)	51

2.3.6 Τρόλεϊ μεταφοράς στοιχείων τελικής επένδυσης (<i>Segment Feed Trolley</i>)	52
2.3.7 Σύστημα Μεταφοράς Εξορυγμένου Υλικού Σύστημα Μέτρησης Μάζας και Όγκου των Εκσκαφών	53
2.3.8 Υδραυλικό Σύστημα Μεταφοράς (<i>Slurry TBM</i>)	55
2.3.9 Εγκαταστάσεις Διαχωρισμού Πολφού Μπεντονίτη (<i>Slurry Separation Plant</i>)	57
2.3.10 Λοιπά στοιχεία της Μηχανοποιημένης Όρυξης με EPB / <i>Slurry TBMs</i>	58
3. ΕΛΑΦΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΒΑΘΟΣ - ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ	67
3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ – ΑΙΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ, ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (<i>ground loss</i>) ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΓΚΟΥ (<i>volume loss</i>)	68
3.1.1 Μηχανισμοί Αστοχίας – Αίτια Μετακινήσεων	68
3.1.2 Ορισμοί Απώλειας Εδάφους (<i>Ground Loss</i>) και Απώλειας Όγκου (<i>Volume Loss</i>)	69
3.1.3 Εγκάρσια Συμπεριφορά των Επιφανειακών Μετακινήσεων	72
3.1.4 Διαμήκης Συμπεριφορά των Επιφανειακών Μετακινήσεων	74
3.1.5 Εκδήλωση Μετακινήσεων μετά το Πέρασ της Κατασκευής	75
3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	77
3.2.1 <i>Sagaseta (1987)</i>	77
3.2.2 <i>Verruijt A. & Booker J. R. (1996)</i>	79
3.2.3 <i>Loganathan N. & Poulos H. G. (1998)</i>	80
3.3 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	83
3.3.1 <i>Peck & Schmidt (1969, 1974)</i>	83
3.3.2 <i>Cording & Hansmire (1972, 1975)</i>	84
3.3.3 <i>O'Reilly και New (1982)</i>	85
3.3.4 <i>Mair et al. (1993, 1997)</i>	86
3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	88
3.4.1 2D Αναλύσεις – Μέθοδοι και Τεχνικές Προσομοίωσης	89
3.4.2 <i>G. Meschke et al., G. Meschke και T. Kasper (2004, 2006)[1][9]</i>	90
3.4.3 <i>F. Nagel και G. Meschke (2010, 2011, 2012)[10][11]</i>	94
3.4.4 <i>A. Lambrughli et al. (2012)[12]</i>	96
3.4.5 <i>Do et al. (2013)[13]</i>	99
3.4.6 <i>E. Comodromos et al. (2014)[7]</i>	102

3.4.7 D. Litsas et al. (2015)[14]	103
4. ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	107
4.1 Κατασκευή και Μόρφωση του Μοντέλου.....	107
4.1.1 Γεωμετρία του Μοντέλου και Διακριτοποίηση του Εδάφους	107
4.1.2 Καταστατικό μοντέλο.....	110
4.1.3 Εδαφικό προφίλ μελέτης.....	111
4.1.4 Κατασκευή, Προσομοίωση και Γεωμετρία του Μηχανήματος.....	113
4.1.5 Κατασκευή και Προσομοίωση Ενέματος	120
4.1.6 Κατασκευή και Προσομοίωση Τελικής Επένδυσης.....	123
4.2 Σταδια αναλυσης	124
4.2.1 Γεωστατικό Βήμα	124
4.2.2 Βήμα Εισαγωγής του TBM.....	125
4.2.3 “n” Βήμα.....	125
4.2.4 Τελικό στάδιο – Εξισορρόπηση πιέσεων.....	126
4.2.5 Adaptive Meshing.....	127
5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	129
5.1 α’ ΟΜΑΔΑ αποτελεσμάτων – επιρροή της περατοτητας	133
5.1.1 Επίδραση της Περατότητας στην Πίεση του Νερού των Πόρων	133
5.1.2 Εξωθήσεις Μετώπου	142
5.1.3 Καθιζήσεις στη Επιφάνεια – Προφίλ Καθιζήσεων.....	147
5.1.4 Εδαφικές Απώλειες – Καθιζήσεις στο Όριο Εκσκαφής (στέψη)	157
5.1.5 Επιρροή του Ρυθμού Προχώρησης στις Μη-Στραγγιζόμενες Συνθήκες.....	159
5.2 Β’ ΟΜΑΔΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - Γενική Επιρροή της Υπαρξης Νερού στη Διάνοιξη Σηράγγων με TBM.....	163
5.2.1 Εξωθήσεις Μετώπου	163
5.2.2 Καθιζήσεις στη Επιφάνεια – Προφίλ Καθιζήσεων.....	168
5.2.3 Εδαφικές Απώλειες – Καθιζήσεις στο Όριο Εκσκαφής (στέψη)	176
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	179
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (BIBLIOGRAPHY).....	183

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2-1: TBMανοιχτού τύπου (www.fhwa.dot.gov).....	28
Εικόνα 2-2: Τυπική τομή TBM Μονής Ασπίδας	29
Εικόνα 2-3: Τυπική τομή TBM Διπλής Ασπίδας και λεπτομέρειες αρμού μεταξύ ασπίδας και επένδυσης (a) και (b)[3].....	30
Εικόνα 2-4: Βασική αρχή λειτουργίας μηχανήματος EPB και σκαρίφημα. (facesupport.org)	31
Εικόνα 2-5: Τυπική τομή και χαρακτηριστικά ενός TBM Πολφού. (facesupport.org)	32
Εικόνα 2-6: Δυνατοί συνδυασμοί μετατρεπόμενων μηχανημάτων TBM (www.herrenknecht.com).....	33
Εικόνα 2-7: Δυνατές μετατροπές ανάλογα με την θέση του μηχανήματος, σε φρέαρ ή όχι (www.herrenknecht.com).....	34
Εικόνα 2-8: Σχηματικό τυπικής διάταξης TBM Variable Density Type[4].....	34
Εικόνα 2-9: Ενδεικτικά τέσσερις λειτουργίες ενός VDSTBM. [4]	35
Εικόνα 2-10: Τυπική τομή ενός DSUTBMμε διατάξεις επεξεργασίας εδάφους προ του μετώπου.[5].....	36
Εικόνα 2-11: Τυπικές διατάξεις ενός EPBTBM. [6]	41
Εικόνα 2-12: Τυπικές διατάξεις ενός EPBTBM. [6]	42
Εικόνα 2-13: Κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου (αριστερά, Herrenknecht) και ανοιχτού τύπου (δεξιά, Robbins) [2].....	45
Εικόνα 2-14: Σκίτσο κοπτικής κεφαλής κλειστού τύπου με πιθανές θέσεις και τύπους κοπτικών.....	45
Εικόνα 2-16: 3Dαπεικόνιση εσωτερικού του θαλάμου εκσκαφής. Διακρίνονται ο θραυστήρας (κάτω) και οι θύρες εισόδου (air-locks)	48
Εικόνα 2-16: Σχηματική απεικόνιση ενός διπλού θαλάμου εκσκαφής. Διακρίνονται ο ενδιάμεσος τοίχος (submerged wall) και η φουσαλίδα αέρα (aircushion).(www.facesupport.org).....	48
Εικόνα 2-17: Διαφορετικές διατάξεις ατέρμονα κοχλία, αναλόγως του τύπου της κοπτικής κεφαλής. (www.p3planningengineer.com).....	49
Εικόνα 2-18: Ατέρμων κοχλίας EPTBTBM (www.ltd.com)	50
Εικόνα 2-19: Υδραυλικά έμβολα ώσης (www.robbsins.com)	51
Εικόνα 2-20: Ανυψωτής στοιχείων τελικής επένδυσης (www.robbsins.com)	52
Εικόνα 2-21: Τρόλεϊ μεταφοράς στοιχείων τελικής επένδυσης.....	53
Εικόνα 2-22: Ταινιόδρομος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού (πάνω) και διατάξεις σαρωτών λέιζερ (κάτω).....	55

<i>Εικόνα 2-24: Διάταξη σωλήνων αναρρόφησης και τροφοδοσίας πολφού από και προς τον θάλαμο εκσκαφής[2]</i>	56
<i>Εικόνα 2-24: Σχηματικό διάγραμμα Υδραυλικού Συστήματός Μεταφοράς Πολφού.....</i>	56
<i>Εικόνα 2-25: Σχηματικό διάγραμμα τυπικού δικτύου εγκαταστάσεων διαχωρισμού πολφού μπεντονίτη (www.p3planningengineer.com).....</i>	57
<i>Εικόνα 2-26: Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς πίεσης μέσω της «μεμβράνης πολφού» στο μέτωπο σε τρία πιθανά γεωλογικά σενάρια. (www.facepressure.org)</i>	59
<i>Εικόνα 2-27: Σχηματική απεικόνιση ορισμών ουριαίου κενού και κενού υπερεκσκαφής...62</i>	62
<i>Εικόνα 2-28: Λεπτομέρεια τυπικής διάταξης ενεμάτωσης στην ουρά της ασπίδας. [2]</i>	63
<i>Εικόνα 2-29: Απεικόνιση στοιχείων τελικής επένδυσης.[2]</i>	64
<i>Εικόνα 2-30: Τύποι σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του δακτυλίου τελικής επένδυσης[2].</i>	65
<i>Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση ορισμών απώλειας όγκου και εδάφους κατά Segaseta70</i>	70
<i>Εικόνα 3-2: Αίτια εδαφικών απωλειών. [2]</i>	71
<i>Εικόνα 3-3: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης κυκλικής σήραγγας (Mair et al. 1996, Franzius 2003)</i>	74
<i>Εικόνα 3-4: Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων ως καμπύλη συνάρτηση σφάλματος (Attewell and Woodman 1982, O'Reilly and New, 1988).....</i>	75
<i>Εικόνα 3-5: (i) Ορισμός του προβλήματος και (ii) άπειρο μέσο (Sagaseta, 1987.....</i>	78
<i>Εικόνα 3-6: Βήματα της ανάλυσης Sagaseta (Sagaseta, 1987).....</i>	78
<i>Εικόνα 3-7: Απώλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση ανοίγματος σήραγγας (Verruijt&Booker, 1996).....</i>	80
<i>Εικόνα 3-8: Κυκλικό και οβάλ σχήμα εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από την διατομή της σήραγγας.....</i>	81
<i>Εικόνα 3-9: Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan&Poulos, 1998)...82</i>	82
<i>Εικόνα 3-11: Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D[9]</i>	93
<i>Εικόνα 3-11: Μοντέλο του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους και ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος. [1]</i>	93
<i>Εικόνα 3-13 (αριστερά): Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό [11]</i>	95
<i>Εικόνα 3-13 (δεξιά): Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων του μηχανήματος και ασκούμενα φορτία από τον θάλαμο εκσκαφής και τον μηχανολογικό εξοπλισμό του μηχανήματος (ερέκτορας κλπ) [10][11]</i>	95
<i>Εικόνα 3-15: Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο στιφρά (λεπτές γραμμές) εδάφη και για λιγότερο (παχιές γραμμές), (a) για ένα σημείο πάνω από</i>	

τον άξονα της σήραγγας και (b) για μία διατομή στο τέλος την προχώρησης του TBM.[10]	96
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 αέρας)[11]	96
Εικόνα 3-16: Τριδιάστατος κάναβος του προβλήματος [12]	97
Εικόνα 3-17: Πλαστικές ζώνες για το μοντέλο Mohr-Coulomb (αριστερά) και CYsoil (δεξιά)	101
Εικόνα 3-18: Σχηματική επεξήγηση του μοντέλου του TBM και των ασκούμενων φορτίων πίεσης[13]	102
Εικόνα 3-19: Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων [14]	105
Εικόνα 4-1: Απεικόνιση του προσομοιώματος στο περιβάλλον του Abaqus/CAE	108
Εικόνα 4-2: Σκαρίφημα διαστάσεων μοντέλου	108
Εικόνα 4-3: Διακριτοποίηση των στοιχείων του μοντέλου	109
Εικόνα 4-5: Απεικόνιση του μηχανήματος (EPB TBM) στο περιβάλλον του Abaqus/CAE	114
Εικόνα 4-5: Διαστάσεις του μηχανήματος του μοντέλου. Διακρίνονται (i) ο θάλαμος εκσκαφής (ii) το back-υψύστημα (iii) η ασπίδα και (iv) ο διαφραγματικός τοίχος (πεσσοειδή στοιχεία)	114
Εικόνα 4-6: Απεικόνιση των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής	119
Εικόνα 4-8: Απεικόνιση των στοιχείων του ενέματος στο περιβάλλον του Abaqus/CAE	121
Εικόνα 4-8: Απεικόνιση της προσομοίωσης της πορείας σκλήρυνσης του ενέματος στο μοντέλο	121
Εικόνα 4-9: Απεικόνιση των στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας σε πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. (Kanvadas et al. 2005)	123
Εικόνα 4-10: Σχηματική απεικόνιση των τριών μεθόδων αναδιακριτοποίησης	127
Εικόνα 5-1: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για σχεδόν περατές (semi-drained - αριστερά) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$	145
Εικόνα 5-2: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained- αριστερά), σχεδόν περατές (semi-drained - μέση) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$	145
Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained - αριστερά) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$	146

<i>Εικόνα 5-4: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$.....</i>	<i>150</i>
<i>Εικόνα 5-5: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$</i>	<i>150</i>
<i>Εικόνα 5-6: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained–αριστερά), σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – μέση) και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$.....</i>	<i>152</i>
<i>Εικόνα 5-7: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – πάνω αριστερά), σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – πάνω δεξιά) και μη περατές συνθήκες (undrained–κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$</i>	<i>153</i>
<i>Εικόνα 5-8: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained–αριστερά, και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$.....</i>	<i>155</i>
<i>Εικόνα 5-9: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$.....</i>	<i>156</i>
<i>Εικόνα 5-10: Απεικόνιση των μεταβολών της πίεσης του νερού των πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με ισομεγέθεις περιοχές (contours) σε μη περατές συνθήκες. Επάνω, η διάνοιξη προσομοιώνεται με ρυθμό 1hr/ring, στη μέση με ρυθμό 2hrs/ring, κάτω με ρυθμό 4hrs/ring.....</i>	<i>161</i>
<i>Εικόνα 5-11: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για μη περατές (undrained - αριστερά) και ξηρές (dry - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$.....</i>	<i>166</i>
<i>Εικόνα 5-12: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained - αριστερά), μη περατές (undrained - μέση) και ξηρές (dry – δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$</i>	<i>167</i>
<i>Εικόνα 5-13: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained - αριστερά), μη περατές (undrained - μέση) και ξηρές (dry – δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$</i>	<i>167</i>
<i>Εικόνα 5-14: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για μη περατές συνθήκες (drained – αριστερά) και ξηρές συνθήκες (dry – δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$.....</i>	<i>170</i>

- Εικόνα 5-15: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για μη περατές συνθήκες (undrained – αριστερά) και ξηρές συνθήκες (dry–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$ 170*
- Εικόνα 5-16: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – πάνω αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained – πάνω δεξιά) και ξηρές συνθήκες (dry–κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$ 172*
- Εικόνα 5-17: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained–αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained – μέση) και ξηρές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$ 172*
- Εικόνα 5-18: Απεικόνιση των δημιουργούμενων πλαστικών ζωνών στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained–μέση) και ξηρές συνθήκες (dry – δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$ 174*
- Εικόνα 5-19: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – πάνω αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained–πάνω δεξιά) και για ξηρές συνθήκες (dry – κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$ 175*

Πίνακας 2-1: Ορισμός διαφορετικών τύπων αφρού EPBM αναλόγως των εδαφικών τύπων	61
Πίνακας 3-1: Διαφορετικά σενάρια της παραμετρικής διερεύνησης. [7]	104
Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών στοιχείων προσομοιώματος	110
Πίνακας 4-2: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμηχανικών χαρακτηριστικών προσομοιώματος	112
Πίνακας 4-3: Στοιχεία δυσκαμψίας των μερών που απαρτίζουν το μηχάνημα.....	115
Πίνακας 4-4: Τιμές γεωστατικών μεγεθών μοντέλου.....	120
Πίνακας 4-5: Τιμές εφαρμοζόμενης πίεσης στο μέτωπο ανά τιμές παραμέτρου A.....	120
Πίνακας 4-6: Στοιχεία τελικής επένδυσης του προσομοιώματος.....	123
Πίνακας 5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών αναλύσεων και μεταβαλλόμενων τιμών παραμέτρων.....	130
Πίνακας 5-2: Κόμβοι που μελετήθηκαν στην θέση Y=84 (διατομή μελέτης – monitoring section).....	132
Πίνακας 5-3: Κόμβοι του μετώπου από τους οποίους ελήφθησαν δεδομένα υπολογισμού για τις εξωθήσεις του μετώπου και τις απώλειες όγκου.....	132

Διάγραμμα 2-1: Σχέση προκαταρκτικής μελέτης και σχεδιασμού έναντι απρόβλεπτων κινδύνων.....	37
Διάγραμμα 2-2: Όρια EPBTVM και περιοχές βελτίωσης του εδάφους [19].....	59
Διάγραμμα 3-1: (a) Χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα (Peck, 1969; Schmidt, 1969) και (b) σχέση μεταξύ i/R και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2R$ για διάφορα εδάφη (Peck, 1969)	84
Διάγραμμα 3-2: Εκτίμηση του ισυναρτήσεως του βάθους διάνοιξης της σήραγγας σε (i) αργιλικά και (ii) σε κοκκώδη εδάφη (Mair et al., 1993).....	87
Διάγραμμα 3-3: (i) Μεταβολή παραμέτρου i καμπυλών καθιζήσεων σε διαφορετικά βάθη z για σήραγγες σε αργίλους (ii) μεταβολή παραμέτρου K ως προς το βάθος για προφίλ καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, πάνω από σήραγγες σε αργίλους (Mair and Taylor., 1997).....	87
Διάγραμμα 3-4: 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 το μηχανήματος. [1] ..	93
Διάγραμμα 3-5: Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (a) της πίεσης μετώπου, (b) της πίεσης του ενέματος και (c) της κωνικότητας της ασπίδας. [9]	94
Διάγραμμα 3-6: 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). [12].....	98
Διάγραμμα 3-7: Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογιστήκαν από τα αριθμητικά μοντέλα. [12]	99
Διάγραμμα 3-8: Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων [13].....	101
Διάγραμμα 3-9: Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις [7]	103
Διάγραμμα 3-10: (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. [14]	105
Διάγραμμα 3-12: (i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας. [14].....	106
Διάγραμμα 3-12: (i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων. [14]	106
Διάγραμμα 4-1: Σχέσεις διεπαφής. (i) Hard contact συμπεριφορά και (ii) Soft Contact συμπεριφορά.....	117

Διάγραμμα 4-2: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου υποστήριξης μετώπου A , των ολικών οριζόντιων γεωστατικών και των υδροστατικών πιέσεων σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα της σήραγγας [16]	118
Διάγραμμα 5-1: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-8m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$	135
Διάγραμμα 5-2: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-8m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$	136
Διάγραμμα 5-3: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-8m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$	136
Διάγραμμα 5-4: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-4m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$	138
Διάγραμμα 5-5: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-4m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$	138
Διάγραμμα 5-6: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-6m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$	141
Διάγραμμα 5-7: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10-6m/s$, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($Y=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$	141
Διάγραμμα 5-8: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$	144
Διάγραμμα 5-9: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$	144
Διάγραμμα 5-10: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$	144
Διάγραμμα 5-11: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$	149
Διάγραμμα 5-12: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$	152
Διάγραμμα 5-13: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$	155

<i>Διάγραμμα 5-14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εδαφικών απωλειών (αριστερά) και καθιζήσεων στο όριο εκσκαφής (δεξιά) για το σύνολο των συζευγμένων αναλύσεων</i>	<i>158</i>
<i>Διάγραμμα 5-15: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων επιφανειακών καθιζήσεων (αριστερά), κανονικοποιημένο συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων επιφανειακών καθιζήσεων (κάτω) ως προς την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής και εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας για μη-περατές συνθήκες, παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$ και διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης.....</i>	<i>160</i>
<i>.Διάγραμμα 5-16: Κανονικοποιημένο συγκριτικό διάγραμμα ως προς την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής των αναπτυσσόμενων πιέσεων του νερού των πόρων (στη στέψη) για μη-περατές συνθήκες, παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$ και διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης</i>	<i>161</i>
<i>Διάγραμμα 5-17: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$.....</i>	<i>165</i>
<i>Διάγραμμα 5-18: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$.....</i>	<i>165</i>
<i>Διάγραμμα 5-19: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$.....</i>	<i>166</i>
<i>Διάγραμμα 5-20: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$.....</i>	<i>169</i>
<i>Διάγραμμα 5-21: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$</i>	<i>171</i>
<i>Διάγραμμα 5-22: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$</i>	<i>174</i>

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Από τις αρχές του 20ου αιώνα και έπειτα παρατηρείται έντονα και παγκοσμίως το φαινόμενο της αστυφιλίας, της συσπείρωσης δηλαδή του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα. Επιπλέον, η συνεχής επέκταση και πυκνωση της δομικής δραστηριότητας οδήγησε όχι μόνον στην μεγάλη αύξηση της αξίας της γης στον αστικό ιστό αλλά και στην υποβάθμιση της ποιότητας του αστικού περιβάλλοντος. Περαιτέρω μεταβολές στις ανάγκες της σύγχρονης αστικής κοινωνίας τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως στη μεταφορά καθώς και στην διακριτοποίηση των περιοχών κατοικίας και εργασίας, υπαγόρευαν λύσεις, οι οποίες θα ήταν εξαιρετικά κοστοβόρες αν πραγματοποιούνταν επιφανειακά. Η ανάγκη λοιπόν εύρεσης οικονομικών λύσεων που θα ελαχιστοποιούσαν την όχληση των περιοχών υλοποίησης κατά τη διάρκεια της κατασκευής και δεν θα είχαν σημαντικό αντίκτυπο στον ήδη υπάρχοντα αστικό ιστό οδήγησε στην μεταφορά των πρόσθετων έργων και εγκαταστάσεων υπογείως. Η μεταφορά αυτή πλέον εφαρμόζεται σε οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, μονάδες παραγωγής ενέργειας, αποθήκευσης πόρων και λοιπών άλλων δικτύων και χώρων κοινής ωφέλειας.

Το παραπάνω εγχείρημα παρότι αναγκαίο κρίνεται και εξαιρετικά απαιτητικό, δεδομένης της ευαισθησίας και σημασίας των υφιστάμενων κατασκευών του πυκνού αστικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τα κατά κανόνα ασθενή και διαταραγμένα εδάφη επί των οποίων βρίσκονται τα αστικά κέντρα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εμφάνιση μιας νέας βιομηχανίας αλλά και κλάδο επιστημονικού ενδιαφέροντος.

Η ανάπτυξη της Μηχανοποιημένης (ή Μηχανικής) Όρυξης Σηράγγων τις τελευταίες δεκαετίες έχει προσφέρει όχι μόνο τεχνολογία και τεχνογνωσία, αλλά και νέες μεθόδους μελέτης και σχεδιασμού των σηράγγων. Με την επιλογή κατάλληλου τύπου Μηχανής Ολομέτωπης Κοπής (TBM) κατόπιν σωστού σχεδιασμού πλέον, επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα η κατασκευή σηράγγων σε πολύ μικρά βάθη ακόμη και σε εδάφη πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών με ελάχιστες επιπτώσεις στις δομές που εδράζονται στην επιφάνεια. Εκτεταμένα δίκτυα σηράγγων αλλά και μεμονωμένες σήραγγες διανοίγονται παγκοσμίως με ασφάλεια και επιτυχία πλέον σε περιπτώσεις έντονων μεταβολών της

γεωλογίας του υπεδάφους και σε περιπτώσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αρκετά υψηλότερα της στέψης της διατομής.

Πρέπει να αναφερθεί, επίσης, πως στην αντιμετώπιση του προβλήματος της διάνοιξης σήραγγων σε αστικό περιβάλλον συνέβαλλε σημαντικά η ανάπτυξη τόσο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών όσο και φιλικών στον χρήστη πλην όμως αποδοτικών κωδίκων προγραμματισμού. Οι περιορισμοί και η δυσχρησία των αναλυτικών μεθόδων βοήθησαν στην διάδοση και υιοθέτηση των αριθμητικών μεθόδων σχεδιασμού ήδη από το 1980 όπου έκαναν εμφάνιση τα πρώτα διδιάστατα μοντέλα (2D). Η διαδικασία της εκσκαφής προσομοιώνεται εδώ ως ποσοτική μεταβολή των εδαφικών πιέσεων στα όρια της σήραγγας. Τα αποτελέσματα εισάγονται ως δυνάμεις σχεδιασμού στα στοιχεία της διατομής του τούνελ. Τα πρώτα περίπλοκα τρισδιάστατα (3D) μοντέλα κάνουν την εμφάνισή τους στα μέσα της δεκαετίας του 1990, όπου πλέον TBM, επένδυση και υπέδαφος προσομοιώνονται με λεπτομέρεια. Μετά το 2000 αναπτύσσονται λογισμικά όπου πλέον είναι δυνατή και η πλήρης οπτική απεικόνιση του μοντέλου.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM), με την πρώτη να αποτελεί τον κανόνα. Συνηθέστερα τα εδάφη προσομοιώνονται ως ελαστικά – τέλεια πλαστικά υλικά (μοντέλο Mohr – Coulomb) χάριν απλότητας και συντομίας υπολογισμών, αν και υπάρχουν δημοσιευμένες μελέτες όπου γίνεται χρήση και άλλων, πιο αντιπροσωπευτικών μοντέλων όπως το μοντέλο Modified Cam-Clay.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πρωτίστως να μελετήσει την επιρροή της περατότητας των λεπτόκοκκων αργιλικών εδαφών στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη ρηχής σήραγγας με την μέθοδο της Μηχανοποιημένης Όρυξης. Αυτό θα επιτευχτεί με την χρήση των προαναφερθέντων μεθόδων και τεχνικών, δηλαδή την μοντελοποίηση σε H/Y και Ανάλυση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Στόχος της μελέτης των αναλύσεων είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων που συνδέουν το μέγεθος της εκδήλωσης του φαινομένου των καθιζήσεων στην επιφάνεια με τις αναπτυσσόμενες πιέσεις στο νερό των πόρων του εδάφους στο περιβάλλον της διάνοιξης, της πλαστικές παραμορφώσεις του γεωυλικού και τις οριζόντιες μετατοπίσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Επιπρόσθετα μελετάται η επιρροή του ρυθμού εκσκαφής σε κορεσμένα, μη περατά εδάφη και η γενικότερη επιρροή της ύπαρξης νερού, συγκριτικά σε περατές και μη περατές συνθήκες. Το τελευταίο έχει σκοπό να καταδείξει το κατά

πόσο είναι δόκιμο να μην λαμβάνεται υπόψιν το υδραυλικό πρόβλημα χάριν εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων και χρόνου.

2. ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ – ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ (TBMS)

Η χρήση των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής συναντάται πλέον σε έργα ευρείας κλίμακας, λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρουν έναντι της συμβατικής εκσκαφής σηράγγων κυρίως στον έλεγχο και περιορισμό των εδαφικών παραμορφώσεων, αλλά και του ρυθμού προχώρησης. Η μέθοδος της μηχανοποιημένης όρυξης σήμερα κυριαρχεί σε περιπτώσεις αστικών τούνελ, κυρίως διότι ελαχιστοποιεί τις όποιες επιφανειακές επιπτώσεις. Συγκεκριμένα, τα TBMs χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να υποστηρίζουν το μέτωπο και τα τοιχώματα, μέχρι τη στιγμή της τοποθέτησης της επένδυσης, βρίσκοντας έτσι εφαρμογή σε ασθενείς, αμμώδεις ακόμη και ρέοντες εδαφικούς σχηματισμούς, μειώνοντας σημαντικά την ανάπτυξη παραμορφώσεων και μετακινήσεων. Επιπλέον, η λειτουργία τους είναι ομαλή και πρακτικά συνεχής, ελαχιστοποιώντας το εύρος της διαταραχής των σχηματισμών που περιβάλλουν τη σήραγγα και την τυχόν επίδραση της σε κατασκευές στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ παράλληλα οι υπερεκσκαφές είναι σημαντικά λιγότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών μεθόδων. Σε ότι αφορά την υποστήριξη της σήραγγας η ομοιομορφία της εκσκαφής επιτρέπει την τυποποίηση της και την αυτοματοποίηση της τοποθέτησης, παράγοντας που συντελεί όχι μόνο στην ταχύτητα κατασκευής μιας σήραγγας, αλλά και στην ποιότητα κατασκευής^[1].

Πρέπει να αναφερθεί πως η επιτυχής επιλογή του τύπου του μηχανήματος εκσκαφής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τεχνική και οικονομική επιτυχία του εκάστοτε έργου. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται ενδελεχής μελέτη και σχεδιασμός όχι μόνο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του αλλά και της λειτουργίας του εν γένει. Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικοί τύποι των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, με κέντρο ενδιαφέροντος τις μηχανές κλειστού τύπου, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τα πεδία εφαρμογής τους. Τέλος γίνεται ανάλυση του μηχανήματος, γεωμετρικά και λειτουργικά, που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης TBM, έναντι της συμβατικής μεθόδου (λ.χ. NATM)^[2]:

Πλεονεκτήματα:

- Τυποποίηση και αυτοματοποίηση των διαδικασιών εκσκαφής και επένδυσης με αποτέλεσμα υψηλούς ρυθμούς προώθησης, μείωση του σχετικού κόστους και ευκολία διαχείρισης του έργου
- Ελάχιστη επιρροή του βάθους στο κόστος κατασκευής
- Υψηλή ακρίβεια στο προφίλ εκσκαφής
- Ελαχιστοποίηση των επιφανειακών παραμορφώσεων/μειωμένη επίδραση στις κοντά-στην-επιφάνεια κατασκευές (π.χ. δίκτυα ύδρευσης, υπόγειοι χώροι κλπ.)
- Βελτιωμένες συνθήκες εργασίας για τους εργαζόμενους.
- Ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις/αμελητέα διαταραχή του υδροφόρου ορίζοντα
- Ελάχιστη διατάραξη του αστικού περιβάλλοντος από ηχορύπανση δονήσεις ή/και αέριους ρύπους
- Διασφάλιση ποιότητας λόγω τυποποιημένης – προκατασκευασμένης επένδυσης

Μειονεκτήματα:

- Μη ευέλικτη, τουλάχιστον οριζοντιογραφικά μέθοδος
- Μεγάλο αρχικό κόστος αγοράς μηχανημάτων
- Υψηλή απαίτηση σε επιφανειακό χώρο στην είσοδο και έξοδο
- Περίπλοκες μηχανολογικές εγκαταστάσεις (εγκαταστάσεις διαχωρισμού μπεντονίτη, μηχανοστάσια ταινιόδρομων κλπ.)
- Μεγάλος χρόνος αρχικού σχεδιασμού έργου
- Μεγάλος χρόνος εξοικείωσης εργατών με το μηχάνημα/εργοτάξιο
- Χρήση μιας μοναδικής διατομής
- Συνήθως υψηλό κόστος τελική επένδυση, λόγω χρήσης σκυροδέματος υψηλής αντοχής που ανθίσταται επαρκώς στις δυνάμεις ώθησης των πέδινων του TBM
- Κίνδυνος έμφραξης

Από τα προηγούμενα γίνεται αντιληπτό πως η χρήση αυτών των μηχανημάτων γίνεται από ένα ελάχιστο μήκος διάνοιξης και έπειτα, όπου πλέον είναι ασύμφορη οικονομικά η συμβατική διάνοιξη, καθώς και για περιπτώσεις που θέλουμε να περιορίσουμε κατά το ελάχιστο την επίδραση στο περιβάλλον έδαφος και κατασκευές.

1

2.1 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ

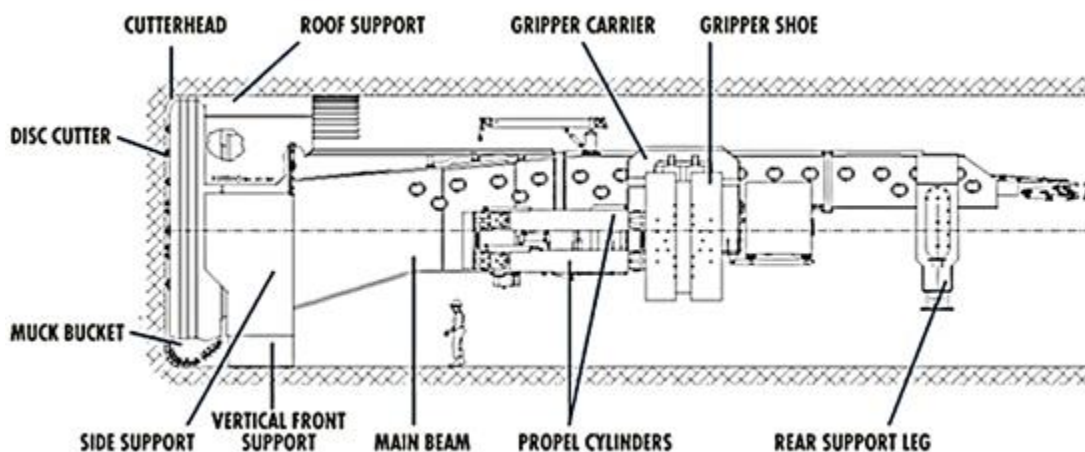
Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα γίνει αναφορά στους διαθέσιμους τύπους μηχανών TBM, και θα δοθεί έμφαση στους τύπους EPB TBM και Slurry Pressure TBM, οι οποίοι είναι οι συνηθέστεροι σε έργα ρηχών σήραγγων σε αστικό περιβάλλον και προσομοιώνονται στο μοντέλο της παρούσης εργασίας. Θα αναφερθούν επίσης και σχετικά πρόσφατοι τύποι μηχανών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλουν βασικές αρχές λειτουργίας εύκολα και γρήγορα, ώστε να αντιμετωπίζουν αλλαγές και δυσμενείς περιπτώσεις στο υπέδαφος, με το μικρότερο δυνατό κόστος.

2.1.1 TBM Ανοιχτού Τύπου

(Non-shielded Open Face Machines / Gripper TBMs)

Πρόκειται για τα μηχανήματα TBM ελεύθερης κεφαλής, χωρίς ασπίδα, τα οποία έχουν εφαρμογή σε καλής ποιότητας σχετικά αρωγμάτωτους σχηματισμούς, μέσης έως υψηλής αντοχής, με μικρά εύρη ασθενών τμημάτων. Τυχόν υδατικές εισροές που οφείλονται στον υδροφόρο ορίζοντα είναι περιορισμένες και ελεγχόμενες. Ουσιαστικά, τόσο το μέτωπο, όσο και τα τοιχώματα της σήραγγας δεν απαιτούν κάποια υποστήριξη, και συνήθως δεν τοποθετείται κάποια επένδυση στη διατομή που εκσκάπτεται, αν και τα εν λόγω μηχανήματα συχνά φέρουν διατάξεις διατήρησης και έμπηξης αγκυρίων. Αυτός ο τύπος μηχανήματος χρησιμοποιείται για την εκσκαφή σε σκληρούς, σχετικά αρωγμάτωτους σχηματισμούς πετρωμάτων υψηλής αντοχής, με ελεγχόμενες εισροές υπογείων υδάτων όπου πρακτικά δεν απαιτείται υποστήριξη στα τοιχώματα και το μέτωπο της σήραγγας. Η ώθηση του μηχανήματος στο μέτωπο της εκσκαφής ασκείται μέσω υδραυλικών πέδων που εφαρμόζουν στα τοιχώματα της σήραγγας. Η εκσκαφή πραγματοποιείται από μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή με προσαρμοσμένους κοπτικούς δίσκους ως το εργαλείο κοπής, οι οποίοι ωθούνται στο πέτρωμα καθώς η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται. Η ασκούμενη πίεση από τις ακμές των δίσκων στο πέτρωμα δημιουργεί ρωγματώσεις που προκαλούν την δημιουργία θραυσμάτων που αποκολλώνται από το μέτωπο (spalling). Αντί ασπίδας, τα TBM αυτού του τύπου φέρουν μια κουρτίνα από πτυσσόμενες λάμες μετάλλου (fingers), ώστε να προστατεύονται οι

εργάτες από αποκολλώμενα τεμάχια. Το συγκεκριμένο μηχάνημα χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα προχώρησης του, που οφείλεται κυρίως στην έλλειψη φάσης τοποθέτησης επένδυσης, γεγονός που το επιτρέπει η ευστάθεια των καλής ποιότητας σχηματισμών.



Εικόνα 2-1: TBM ανοιχτού τύπου (www.fhwa.dot.gov)

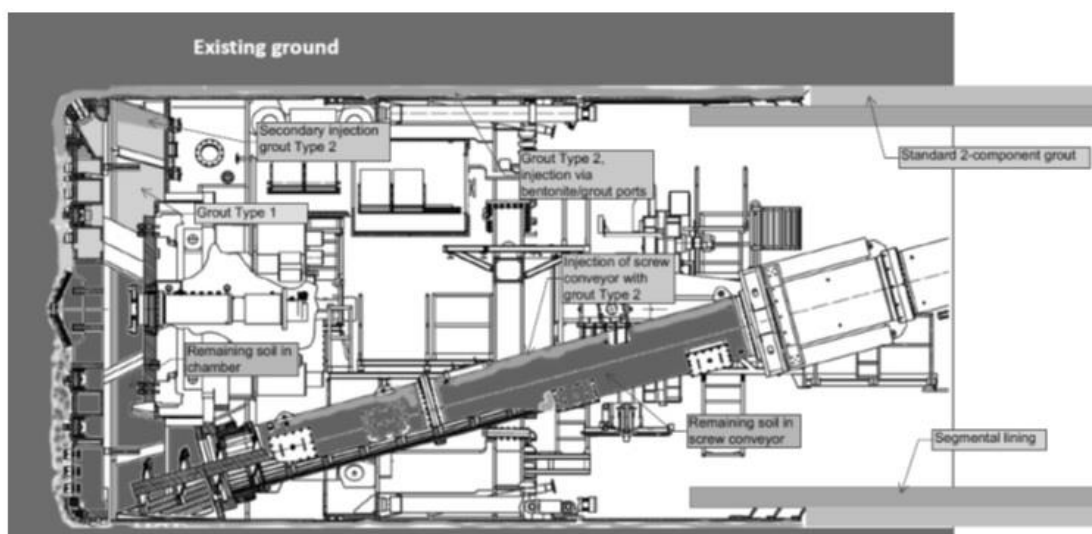
2.1.2 TBM Ανοιχτού Τύπου με Ασπίδα (Shielded Open Face Machines)

Τα TBM αυτού του τύπου κατασκευάζονται ώστε να πραγματοποιήσουν εκσκαφές σε πτωχές έως μέτριες συνθήκες βραχώμαζας, για έντονα ρωγματομένους ή διαταραγμένους σχηματισμούς (για τιμές του RQD μικρότερες του 50%) ή μαλακές βραχώμαζες, με τοπικά ασταθή μέτωπα εκσκαφής. Ωστόσο, τα τεμάχια του βράχου πρέπει να έχουν αντοχή και να μην είναι διαλυτά, έτσι ώστε η βραχώμαζα να έχει μια δομή, τα τεμάχια βράχου να είναι αλληλοκλειδωμένα και μεγέθους τέτοιου που να δύναται να κοπούν και να μη διαβρώνονται από το νερό. Η ασπίδα υποστηρίζει τα εκτεθειμένα τοιχώματα της σήραγγας ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή, ενώ η κοπτική κεφαλή δύναται να χρησιμοποιηθεί με την κατάλληλη ώση ως μέσο υποστήριξης του μετώπου όπου η βραχώμαζα είναι χαλαρή. Η εγκατάσταση της υποστήριξης (προσωρινής ή μόνιμης) λαμβάνει χώρα κάτω από την προστασία της ασπίδας στο πίσω μέρος του μηχανήματος, όπου υπάρχει ο απαραίτητος χώρος για τον αναγκαίο εξοπλισμό. Δύο τύποι ασπίδας είναι οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι, μονής και διπλής (τηλεσκοπικής) ασπίδας, οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Αναφορικά με την τοποθέτηση της τμηματικής επένδυσης (segmental lining), στα μηχανήματα με ασπίδα, αναπτύσσονται και τάσεις τριβής στην διεπιφάνεια ασπίδας-περιβάλλουσας βραχομάζας, κατά την προώθηση του TBM. Απαιτείται λοιπόν η χρήση επένδυσης από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ώστε να αντέχει στις υψηλές ορθές δυνάμεις που επιβάλλουν τα έμβολα προώθησης πάνω στα τμήματα της επένδυσης.

2.1.3 TBM Μονής Ασπίδας (Single Shield TBMs)

Καθώς δηλώνει η ονομασία, ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος διαθέτει ένα μόνο τμήμα ασπίδας, η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρό μήκος. Το κατασκευαστικό αυτό γεγονός μειώνει την πιθανότητα παγίδευσης λόγω των τάσεων σύνθλιψης που αναπτύσσονται κατά την εκσκαφή σε βραχώδεις σχηματισμούς. Από την άλλη μεριά, το μηχάνημα αυτό λειτουργεί σε δύο διακριτές φάσεις εκσκαφής – τοποθέτησης ασπίδας, που λόγω του μικρού μήκους της ασπίδας επαναλαμβάνονται συχνά. Συνεπώς, ακόμη ένα χαρακτηριστικό αυτού του τύπου είναι οι χαμηλοί ρυθμοί προχώρησης.

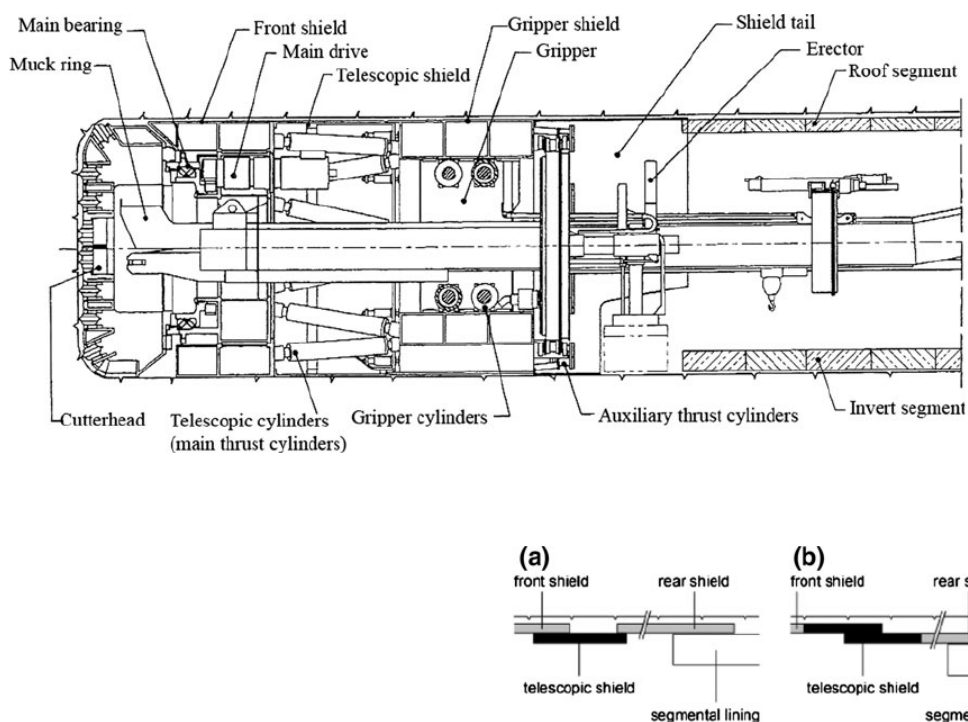


Εικόνα 2-2: Τυπική τομή TBM Μονής Ασπίδας

2.1.4 TBM Διπλής Ασπίδας (Double Shielded TBMs)

Τα μηχανήματα TBM διπλής ασπίδας έχουν ως ουσιαστική διαφορά με τα προηγούμενα το μήκος της ασπίδας, επομένως και τον ρυθμό διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η ασπίδα διακρίνεται σε δύο τμήματα. Το εμπρόσθιο τμήμα που

περιλαμβάνει την κεφαλή κοπής που διανοίγει τη σήραγγα, ενώ το δεύτερο τμήμα που περιλαμβάνει την ουρά της ασπίδας είναι σταθεροποιημένο και τοποθετεί τα στοιχεία της επένδυσης στα τοιχώματα της σήραγγας. Ως αποτέλεσμα, ο συγκεκριμένος τύπος TBM είναι ταχύτερος στη διάνοιξη μιας σήραγγας, αλλά ταυτόχρονα λόγω του μεγαλύτερου μήκους της ασπίδας και του αρμού μεταξύ των δύο μερών κινδυνεύει περισσότερο να παγιδευτεί από τυχούσες συνθλύβουσες τάσεις. Η επένδυση επιπρόσθετα καλείται να αναλάβει μεγαλύτερα ορθά φορτία από τα έμβολα κατά την προώθηση του μηχανήματος.



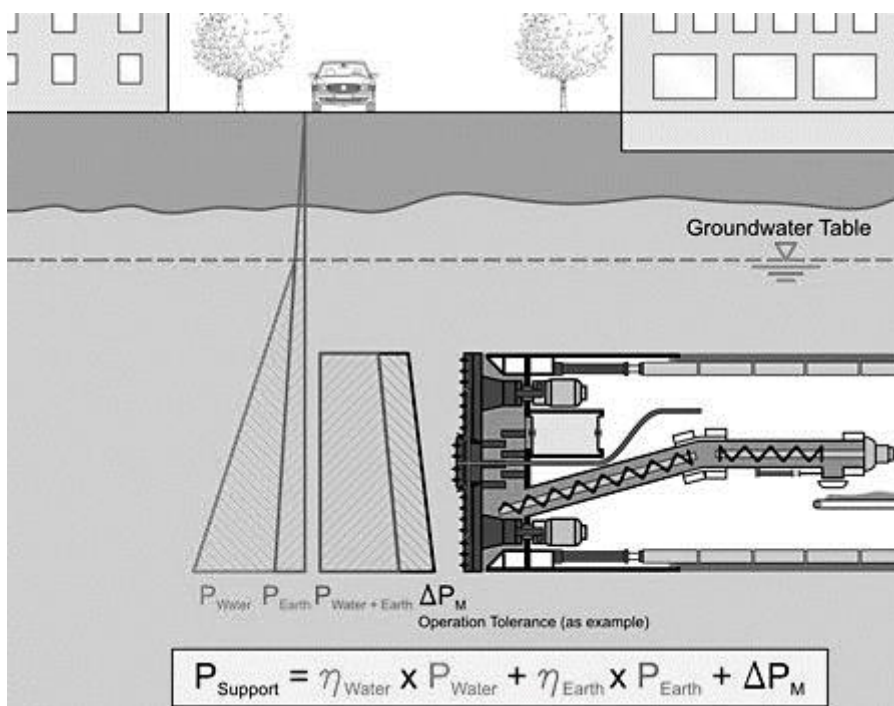
Εικόνα 2-3: Τυπική τομή TBM Διπλής Ασπίδας και λεπτομέρειες αρμού μεταξύ ασπίδας και επένδυσης (a) και (b)[3].

2.1.5 TBM Εξισορρόπησης Πίεσης Γαιών (Earth Pressure Balance Machines / EPBMs)

Το EPBTBM είναι τύπος μηχανήματος που ασκεί πίεση στο μέτωπο μέσω του ίδιου του εκσκαπόμενου υλικού, ώστε να το σταθεροποιεί. Επιχειρεί κατά κανόνα σε αργιλικά εδάφη, σχετικά αδιαπέρατα, τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές αντοχές με αποτέλεσμα η υποστήριξη τοιχωμάτων και μετώπου να καθίσταται απαραίτητη. Το μέτωπο υποστηρίζεται μέσω μιας πάστας γεωυλικού εκσκαφής, νερού και πρόσμικτων (muck) υπό πίεση, η οποία βρίσκεται στον ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο

πίσω από την κοπτική κεφαλή, η οποία σε αντίθεση με τους προηγούμενους τύπους, επιτρέπει την επαφή πάστας – μετώπου. Τα τοιχώματα υποστηρίζονται άμεσα κατά την εκσκαφή από την ασπίδα καθώς και με βοήθεια εισπνεζόμενου ενέματος μπεντονίτη. Το EPB TBM χρησιμοποιείται επιτυχώς σε αστικές περιοχές (χαρακτηριστικό παράδειγμα οι σήραγγες μετρό), όπου ο περιορισμός των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους είναι ο βασικός στόχος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας.

Λόγω του αντικειμένου της παρούσης εργασίας, εκτεταμένη αναφορά στην λειτουργία αλλά και τις διατάξεις που αποτελούν ένα EPBTBM.

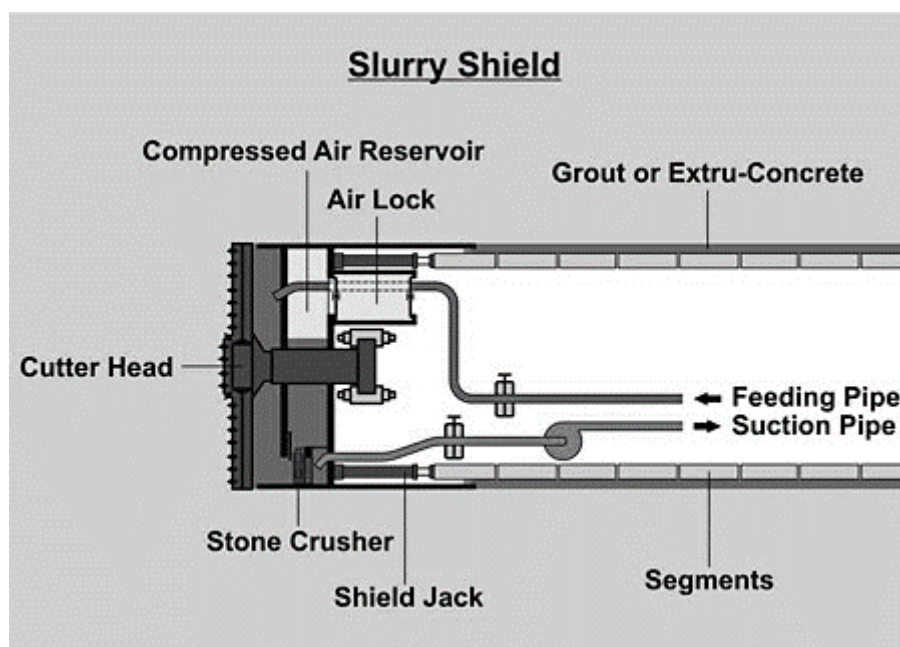


Εικόνα 2-4: Βασική αρχή λειτουργίας μηχανήματος EPB και σκαρίφημα. (facesupport.org)

2.1.6 TBM Εξισορρόπησης Πίεσης Πολφού (Slurry Machines / Hydroshield / STBMs)

Στα TBM πολφού μπεντονίτη (bentonite slurry) η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με τα EPB, εν προκειμένω όμως, η αντιστήριξη του μετώπου γίνεται από πολφό μπεντονίτη αναμειγμένο με αέρα και νερό υπό πίεση. Το εκσκαπτόμενο υλικό αφαιρείται μαζί με τον μπεντονίτη και διαχωρίζεται σε ειδικές εγκαταστάσεις ώστε ο καθαρός πολφός να επιστραφεί για να χρησιμοποιηθεί ξανά. Τα παραπάνω είναι και οι δύο κύριες διαφορές με τα EPB. Επιπλέον μια ακόμη κατασκευαστική διαφορά είναι η

έλλειψη ατέρμονου κοχλία (screw conveyor) αφού εδώ το υλικό απομακρύνεται και ο πολφός τροφοδοτείται στον θάλαμο εκσκαφής μέσω σωληνώσεων. Τα Slurry TBM βρίσκουν χρήση σε εδαφικούς σχηματισμούς σχετικά υψηλότερης περατότητας, με κυρίαρχο το ποσοστό των αδρομερών. Σε περίπτωση ετερογενών σχηματισμών όπου το μηχάνημα δύναται να συναντήσει μεγάλους βραχώδεις όγκους, προκειμένου να τους διαχειριστεί προσαρμόζονται στην κοπτική κεφαλή εκτός από κοπτικά τύπου σφήνας και κοπτικά τύπου δίσκου. Τυχόν μεγάλα τεμάχια βράχου που δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσω των σωλήνων του πολφού, θρυμματίζονται από μια ειδική διάταξη μέσα στο θάλαμο εκσκαφής. Η ρύθμιση της πίεσης αντιστήριξης του μετώπου γίνεται μέσω εισαγωγής αέρα υπό πίεση μέσα στον θάλαμο εκσκαφής. Αναλυτικότερα, τα μέρη του μηχανήματος θα περιγραφούν σε επόμενο υποκεφάλαιο.



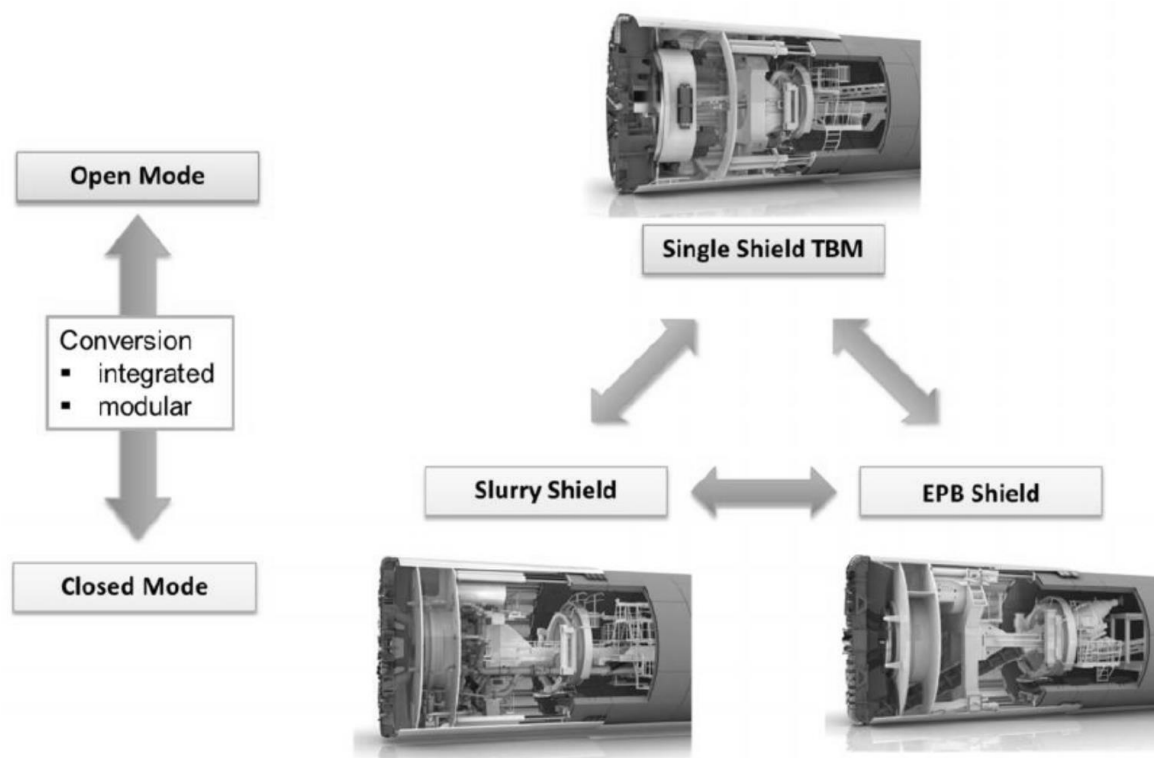
Εικόνα 2-5: Τυπική τομή και χαρακτηριστικά ενός TBM Πολφού. (facesupport.org)

2.1.7 Mixed Mode/ Convertible TBMs

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, ο τύπος μηχανήματος που θα επιλεγεί στο έργο εξαρτάται από τις κυρίαρχουσες γεωλογικές συνθήκες και εδαφικούς τύπους. Για παράδειγμα, αν το 90% του υπεδάφους προς εκσκαφή είναι ένας υδατοπερατός σχηματισμός με υψηλό ποσοστό χαλαρών αδρανών, τότε ξεκάθαρα επιλέγεται ένα Slurry TBM. Όλο και περισσότερα έργα όμως λαμβάνουν χώρα σε εδάφη όπου δεν υπάρχει ξεκάθαρη κάποια κυρίαρχη φάση, τα εδάφη είναι φτωχών μηχανικών αντοχών και

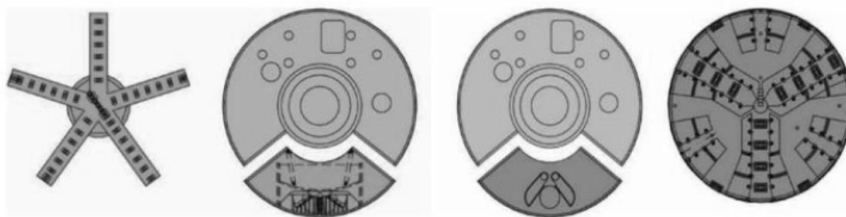
υπάρχει η απαίτηση του περιορισμού των καθιζήσεων στην επιφάνεια. Επίσης, οι αλλαγές στον τύπο του εδάφους μπορεί να συμβαίνουν δραστικά και ανά συχνά τακτά διαστήματα. Για να εξαλειφθούν περιπτώσεις όπου το TBM προχωρά με μη οικονομικά αποδεκτούς, αργούς ρυθμούς αλλά και οι χρονοβόρες μεν απαιτούμενες δε παύσεις για μετατροπές και αλλαγές στον εξοπλισμό της σήραγγας, ώστε να ξεπεραστούν οι «μη συμβατοί» εδαφικοί σχηματισμοί, η βιομηχανία σήραγγοποιίας πλέον έχει να δώσει νέους πιο ευέλικτους τύπους μηχανημάτων.

Τα TBM Μικτής Ασπίδας / Μεταβλητά (Mixed Mode/ Convertible) είναι μηχανήματα τα οποία συνδυάζουν τουλάχιστον δύο συστήματα, μπορούν σχετικά εύκολα να μεταπηδήσουν από τον έναν τρόπο λειτουργίας στον άλλο, και χαρακτηρίζονται από ευελιξία και ταχύτητα προχώρησης συνολικά. Για τον λόγο αυτό συχνά προτιμώνται από οικονομικής σκοπιάς. Συνήθως, τα TBM μικτού τύπου καλύπτουν λειτουργίες και μορφώνονται σε δύο εκ των TBM Πολφού (Slurry), TBMEξισορρόπησης Πίεσης Γαιών (EPB) και TBMAσπίδας Ανοιχτού Τύπου (Open Shield), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η μετατροπή γίνεται συνήθως εύκολα εντός του τούνελ, είτε προσθέτοντας ή/και αφαιρώντας κατάλληλες διατάξεις από το μηχάνημα (modular conversion), είτε ενεργοποιώντας μια δεύτερη ήδη εγκατεστημένη διάταξη μέσα στο μηχάνημα.

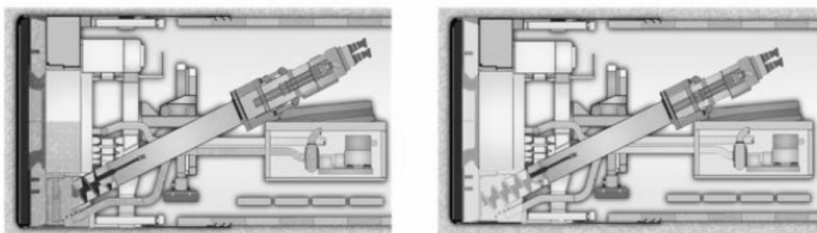


Εικόνα 2-6: Δυνατοί συνδυασμοί μετατρέπομενων μηχανημάτων TBM (www.herrenknecht.com)

Modular system:
Exchange of subassemblies
or specific modules
→ conversion in shaft



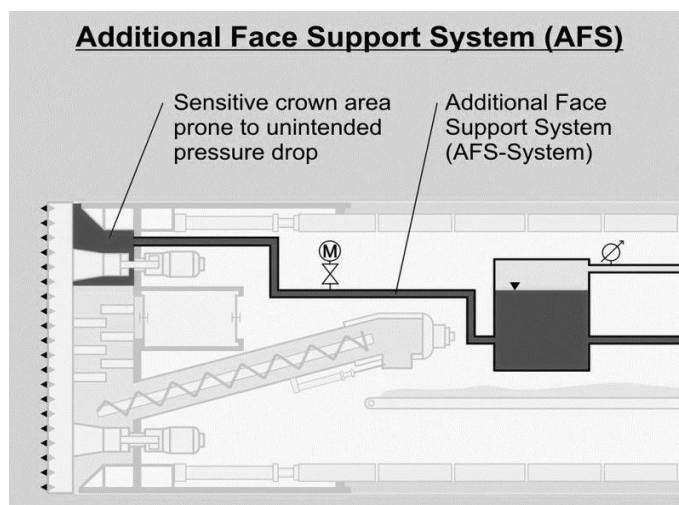
Integrated system:
Dual systems „on Board“
→ conversion in tunnel



Εικόνα 2-7: Δυνατές μετατροπές ανάλογα με την θέση του μηχανήματος, σε φρέαρ ή όχι (www.herrenknecht.com)

2.1.7.1 Variable Density TBM's ® (Herrenknecht)^[4]

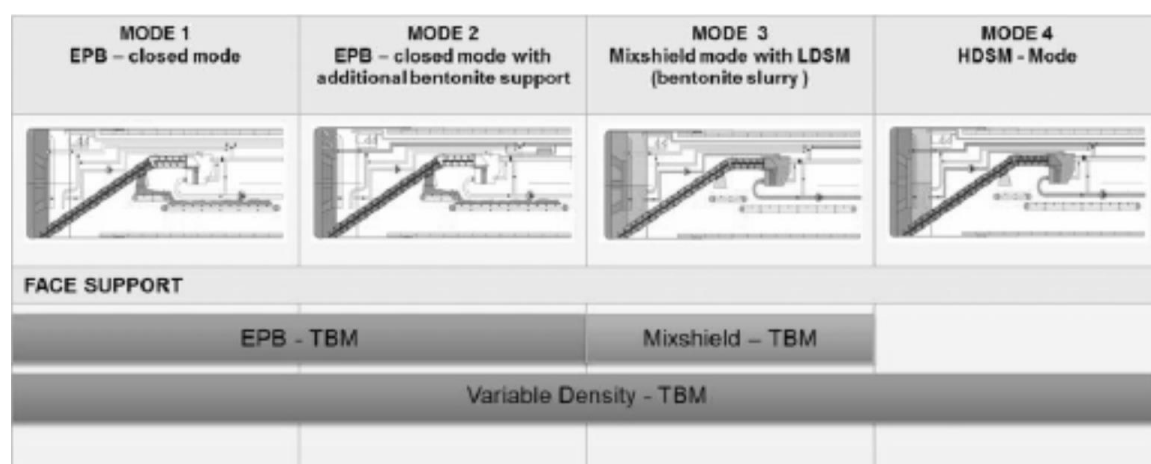
Τα μηχανήματα τύπου Variable Density TBM έχουν αναπτυχθεί από την γερμανική εταιρία Herrenknecht. Πρόκειται για TBM τα οποία έχουν εγκατεστημένα στο σώμα τους δύο συστήματα, ένα EPB και ένα Slurry mode καθώς και τα απαραίτητα για την μεταφορά των εκσκαφθέντων. Τα Variable Density TBM's επιτρέπουν την ομαλή και σχετικά άμεση μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο, αυτοματοποιημένα, κατόπιν εντολής του χειριστή. Το χαρακτηριστικό τους που τα ξεχωρίζει, όμως, είναι η



Εικόνα 2-8: Σχηματικό τυπικής διάταξης TBM Variable Density Type[4]

δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας των συστημάτων Slurry και EPB.

Αντίθετα με τα περισσότερα Convertible TBMs, το εν λόγω μηχάνημα μπορεί να λειτουργεί υβριδικά χρησιμοποιώντας ως μέσο υποστήριξης – πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής από χαμηλής πυκνότητας πολφό, έως υψηλής πυκνότητας πολφό ή και καθαρά μόνο προϊόντα εκσκαφής.

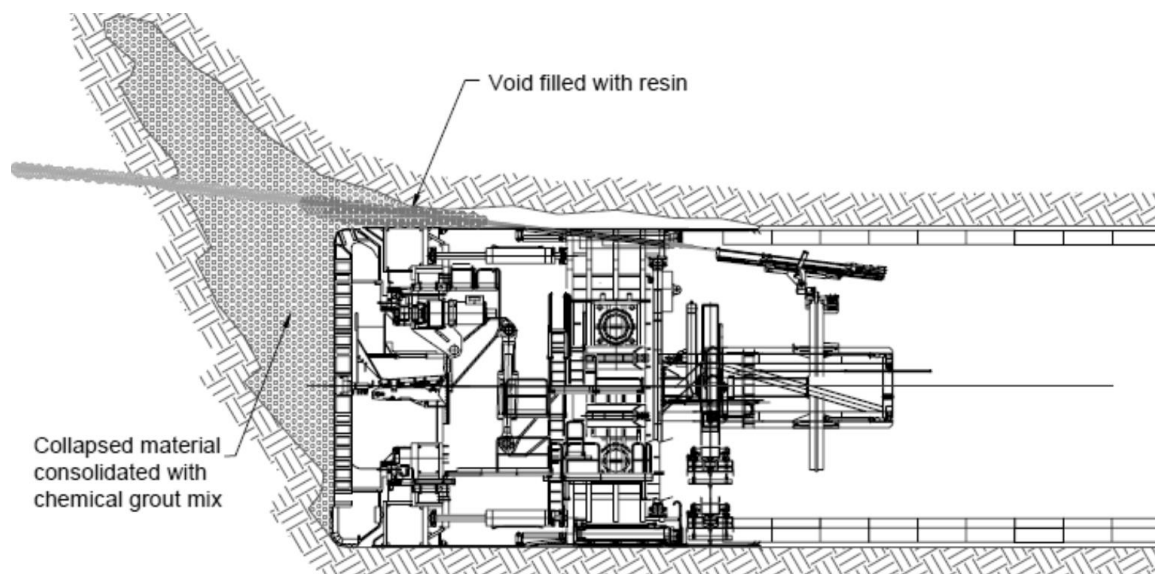


Εικόνα 2-9: Ενδεικτικά τέσσερις λειτουργίες ενός VDSTBM. [4]

2.1.7.2 Double Shielded Universal DSU TBM® (SELI)^[5]

Πρόκειται για ένα μηχάνημα διπλής ασπίδας, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ως ανοιχτής εκσκαφής ή κλειστής EPB. Τα DSUTBMs έχουν αναπτυχθεί από την ιταλική SELI. Συχνά χαρακτηριστικά αυτών των μηχανημάτων είναι η αρκετά φαρδύτερη μπροστινή ασπίδα, η υψηλή κωνικότητα και το σχετικά μεγάλο μέγεθος υπερεκσκαφής, τα οποία βοηθούν στην αποφυγή της παγίδευσης του TBM σε γρήγορα συγκλίνοντα εδάφη. Κύριο χαρακτηριστικό τους, όμως, είναι οι διατάξεις εξυγίανσης του εδάφους εμπροσθεν του μετώπου που φέρουν. Στα DSU και κάτω από την μπροστινή ασπίδα, βρίσκονται συνήθως διατηρητικά για ενεμάτωση της οροφής, διατάξεις για ενεμάτωση τυχόν κενών ακόμη και διατάξεις για τοποθέτηση αγκυρίων fiberglass πίσω από την κεφαλή.

Τα DSUTBMs μπορούν να λειτουργήσουν ως ανοιχτής ασπίδας ή EPB. Ενδείκνυνται για όρυξη σε σχηματισμούς όπου η εξυγίανση του υπεδάφους προ του μετώπου είναι αναγκαία. Παρακάτω δίνεται μια τυπική τομή.



Εικόνα 2-10: Τυπική τομή ενός DSUTBM με διατάξεις επεξεργασίας εδάφους προ του μετώπου.[5]

2.2 ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ (EPB – SLURRY TBMS)

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αύξηση στη ζήτηση μηχανών διάνοιξης σηράγγων, οι οποίες προσφέρουν στήριξη μετώπου με κατάλληλη επεξεργασία του εξορυγμένου εδάφους (Soil Conditioning). Αυτό εξηγείται εύκολα αν λάβει κανείς υπόψιν το γεγονός ότι τα περισσότερα υπόγεια έργα πραγματοποιούνται σε γοργά αναπτυσσόμενες μητροπόλεις, συνήθως σε μαλακό και υγρό έδαφος, όπου ως γνωστόν ο κίνδυνος ζημιών υψηλού κόστους λόγω καθιζήσεων είναι μεγάλος. Το αποτέλεσμα είναι η έντονη επιστημονική και βιομηχανική έρευνα, καθώς και τεχνολογική ανάπτυξη των μηχανών τύπου Slurry (STBM) και EPB, με στόχο την βελτιστοποίηση του τρόπου και των μέσων που διαθέτουν οι εν λόγω μηχανές να διαχειρίζονται και να βελτιστοποιούν το εξορυγμένο έδαφος και τις μηχανικές του ιδιότητες, ώστε να το χρησιμοποιούν ύστερα ως εργαλείο υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας.

Επιπλέον των παραπάνω, για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου απαιτείται διεξοδική γεωτεχνική έρευνα του υπεδάφους, εντοπισμός των κινδύνων και ορθός σχεδιασμός. Συνοπτικά, παρακάτω αναφέρονται κάποια στοιχεία καλής πρακτικής, κατά τις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές^[6].

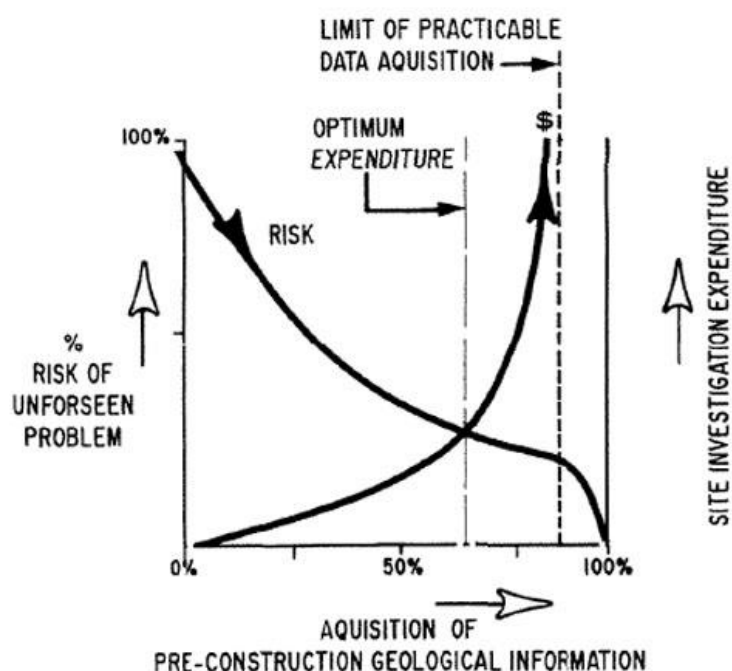
Έπειτα, θα αναλυθούν τα μηχανήματα τύπου EPBM και STBM ως προς την κατασκευή και την λειτουργία των επιμέρους στοιχείων τους.

2.2.1 Προετοιμασία – Συγκέντρωση Δεδομένων και Αρχικός Σχεδιασμός

2.2.1.1 Γεωτεχνική Έρευνα

Η εκσκαφή ενός τούνελ κατά κανόνα επιφέρει μεταβολές στην κατάσταση του εδάφους, αλλάζοντας το αρχικό πεδίο τάσεων και την δομή του σκελετού των κόκκων, προκαλώντας έτσι παραμορφώσεις. Η αντίδραση ενός εδάφους στην εκσκαφή εξαρτάται αφενός από τα γεωμηχανικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του, και αφετέρου από τον τρόπο εκσκαφής και τα κατά περίπτωση εφαρμοζόμενα μέσα ενίσχυσης-υποστήριξης. Ως εκ τούτου, μια λεπτομερής εικόνα αυτών των χαρακτηριστικών μέσω γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών προκαταρκτικών ερευνών είναι πλέον απαραίτητη ώστε να είναι δυνατό να επιλεγθεί η σωστή μέθοδος εκσκαφής, ο σωστός τύπος μηχανήματος κ.ο.κ. Επιπρόσθετα, θα βοηθήσει στην λήψη αποφάσεων σχετικά με την γεωμετρία της σήραγγας, την χάραξη και θα ελαχιστοποιήσει τις ανάγκες για μεταβολές του περιβάλλοντος εδάφους.

Ο αριθμός και οι ποιότητα των προκαταρκτικών αυτών μελετών συνδέονται κυρίως με το μέγεθος, τη σημαντικότητα και τον σκοπό του έργου, καθώς και με την τοπική γεωλογία και την ήδη υπάρχουσα γνώση. Γενικά, ισχύει η σχέση μεταξύ των αναμενόμενων κινδύνων, του κόστους και του όγκου δεδομένων όπως απεικονίζεται στο



παρακάτω διάγραμμα.

Κατά κανόνα, πρέπει να διατηρείται ένα ελάχιστο επίπεδο απαιτούμενων δεδομένων ερευνών, ώστε να αποτραπεί το ενδεχόμενο τα κόστη «απρόβλεπτων κινδύνων» να είναι μεγαλύτερα των πραγματοποιηθέντων ερευνών. Άλλωστε, το κόστος γεωτεχνικών ερευνών συνήθως κυμαίνεται στο 2,5% του συνολικού κόστους του έργου.

2.2.1.2 Εξακρίβωση Χαρακτηριστικών (Μαλακών) Εδαφών

Το μέγεθος των φαινομένων παραμόρφωσης κατά και μετά την εκσκαφή είναι άμεσα συνδεδεμένο με το αρχικό γεωστατικό πεδίο και την διατάραξη αυτού. Είναι σημαντικό να είναι γνωστά η ιστορία του σχηματισμού, η εξέλιξη του ο βαθμός στερεοποίησης κλπ. Ύστερα, η στατική επάρκεια της σήραγγας εξαρτάται τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος υπεδάφους. Σε βάθος χρόνου, η εξέλιξη των καθιζήσεων και η αλληλεπίδραση εδάφους σήραγγας εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση αλλά και την ευρύτερη γεωυδρολογία. Συνεπώς, στην ιδιαίτερη περίπτωση διάνοιξης σήραγγας σε μαλακούς, ασθενείς εδαφικούς σχηματισμούς, πρέπει να γίνουν τουλάχιστον οι παρακάτω έρευνες^[6]:

- Χαρακτηρισμός και ταξινόμηση εδάφους
- Εξακρίβωση ή κατά το δυνατόν ορθότερη εκτίμηση του αρχικού εντατικού πεδίου
- Μελέτη μηχανικών χαρακτηριστικών
- Μελέτη υδραυλικών χαρακτηριστικών

Οι κύριες παράμετροι που θα πρέπει να εκτιμηθούν είναι:

- Πυκνότητα, επί τόπου και ξηρού δήγματος
- Ποσοστό υγρασίας
- Κοκκομετρία
- Πορώδες
- Τραχύτητα (abrasiveness)
- Όρια Atterberg
- Ορυκτολογική Ανάλυση

- Μέτρο Ελαστικότητας και λόγος Poisson
- Συνοχή, γωνία τριβής
- Διαπερατότητα
- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή

2.2.1.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Λόγω μεγέθους τα έργα υποδομής και μάλιστα τα υπόγεια μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις εγγύτερες κατασκευές αλλά και στο ισοζύγιο του τοπικού συστήματος. Πρέπει, επομένως, να λαμβάνονται υπόψιν:

- Μεταβολές στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα
- Επιπτώσεις κραδασμών, δονήσεων, οχλήσεων από μηχανήματα και εκρήξεις στην ευρύτερη οικιστική περιοχή, στην πανίδα κ.ο.κ.
- Επιπτώσεις αποστραγγίσεων, και της στάθμης του εδάφους.
- Πιθανότητα μόλυνσης υπεδάφους ή/και υδροφόρου ορίζοντα

2.2.1.4 Φάση Σχεδιασμού – Ορθός Σχεδιασμός

Απαραίτητο για τον ορθό σχεδιασμό ενός υπογείου έργου (τούνελ) είναι η συγκέντρωση των περισσότερων δυνατών και παρεχόμενων πληροφοριών σχετικά με τη γεωλογία και την υδρογεωλογία του υπεδάφους της περιοχής του έργου, της ιστορίας της περιοχής (σεισμοί κλπ.). Πέραν από τα δεδομένα που θα αποκτηθούν από τις έρευνες που προβλέπονται για το εκάστοτε έργο, πρέπει να ληφθούν υπόψη δεδομένα και έγγραφα προγενέστερων μελετών, καταγεγραμμένα γεωλογικά δεδομένα και γεωλογικοί χάρτες κ.α. Τέλος, δεδομένα από παρόμοια έργα σε παρόμοια περιβάλλοντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα.

Για την βελτιστοποίηση όχι μόνο της διατομής αλλά και της χάραξης της σήραγγας, κατά τη φάση σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι εξής παράμετροι:

- Η σχετική θέση, βάθος και διεύθυνση των εδαφικών στρώσεων
- Η έκταση, το πλήθος και η διεύθυνση των ασυνεχειών
- Η ύπαρξη νερού και οι ιδιότητες ροής

- Η φύση των υπερκειμένων
- Το μέγεθος του επιθυμητού/επιτρεπτού αντίκτυπου στο περιβάλλον της περιοχής
- Μέγεθος και απόσταση υπερκείμενων κατασκευών

Κατά τη φάση σχεδιασμού πρέπει να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με:

- Τα «κρίσιμα» σημεία της χάραξης (περιοχές υψηλών γεωτεχνικών απαιτήσεων)
- Τον τρόπο εκσκαφής
- Τις συνθήκες σταθερότητας – στατικής επάρκειας
- Τον τύπο και τη διαστασιολόγηση των μέσων υποστήριξης
- Τις μηχανικές αντοχές της διατομής του έργου, το σχήμα και την ποιότητα των υλικών
 - Το μέγεθος και τη διάταξη του εργοταξίου, τις θέσεις των φρεατίων, των εγκαταστάσεων επεξεργασίας μπεντονίτη κ.α.

2.2.2 Σχετικά με το Μηχάνημα Εξισορρόπησης Πίεσης Γαιών (EPBTBM)

Το κύριο και μείζον μέλημα στην μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων με μηχανήματα κλειστού τύπου εξισορρόπησης πίεσης γαιών (EPB TBM) είναι όχι μόνο η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο, αλλά και η ομαλή διατήρηση και ο συνεχής έλεγχός της. Η σύγχρονη πρακτική υπαγορεύει να λαμβάνονται υπόψιν τρία κύρια θέματα κατά την λειτουργία ενός EPBM, η μηχανική του εδάφους, η δεδομένη τεχνολογία της μηχανής και οι ιδιότητες των πρόσθετων προς χρήση. Η πλήρης κατανόηση των παραπάνω και η αλληλεξάρτησή τους θα οδηγήσουν σε μια τεχνικά και οικονομικά επιτυχημένη εκσκαφή.

Κατά την εκσκαφή με EPB, λοιπόν, πρέπει να παρέχεται στο μέτωπο συγκεκριμένη και συνεχής πίεση αντιστήριξης, μέσω του ίδιου του εκσκαφθέντος εδάφους, το οποίο πρέπει να γεμίζει πλήρως ή μερικώς, αναλόγως των συνθηκών, τον θάλαμο εκσκαφής. Το μέγεθος της πίεσης επιτυγχάνεται από τα παρακάτω δύο:

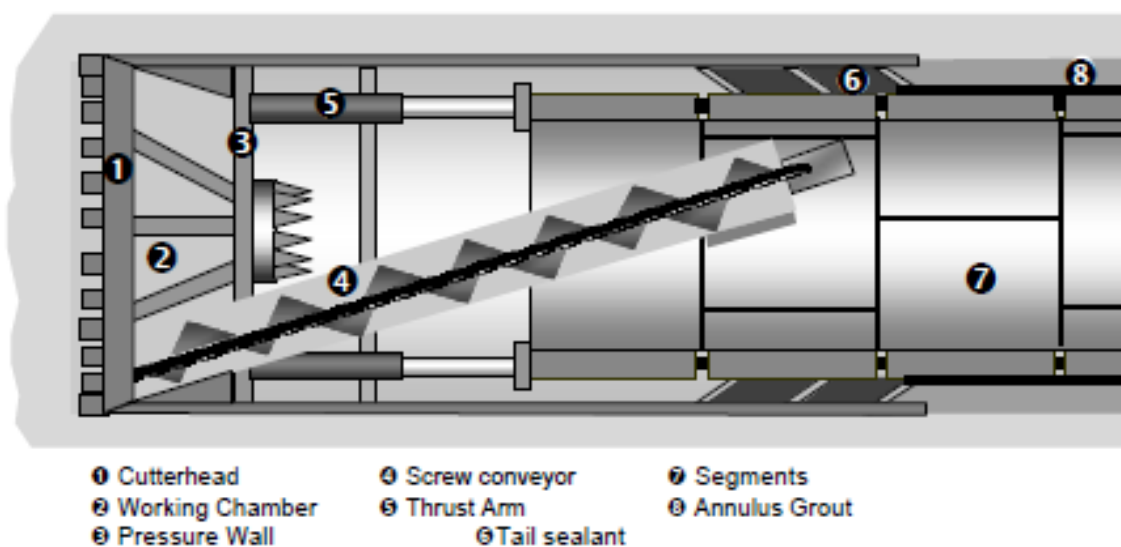
- i. Ωθηση προς τα εμπρός του μηχανήματος μέσω των υδραυλικών εμβόλων στο πίσω μέρος της ασπίδας

- ii. Ρύθμιση της αναρρόφησης υλικού από τον θάλαμο εκσκαφής μέσω του ατέρμονου κοχλία (screw conveyor)

Πρέπει να αναφερθεί πως ο σωστός συνδυασμός των προαναφερθέντων δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα στον έλεγχο της εφαρμοζόμενης πίεσης. Η πίεση υποστήριξης πρέπει να δύναται να αντισταθμίζει ακριβώς τις γεωστατικές πιέσεις αλλά και τις πιέσεις του νερού των πόρων. Συνήθως, εξαρτάται κατά κόρον από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, την διαπερατότητα και τον λόγο υπερκείμενων διαμέτρου.

Τα EPB TMBs όμως, αν και τα πιο δημοφιλή μηχανήματα προς χρήση σε μαλακά αργιλώδη και ιλυώδη εδάφη με υψηλό ποσοστό λεπτομερών, αρχίζουν και παρουσιάζουν δυσκολίες όταν αυξάνεται η διάμετρος κόκκου. Αυτό αντιμετωπίζεται πλέον επιτυχώς μέσω κατάλληλης επεξεργασίας τους εδάφους με τη βοήθεια χημικών προσθέτων στη μάζα του υλικού στον θάλαμο εκσκαφής (muck). Ενδεικτικά, παρατίθεται το παρακάτω νομογράφημα, όπου τύπος εδάφους, μέγεθος κόκκου και χρήση μηχανήματος συσχετίζονται. Αναφέρεται πως πλέον, κυρίως βάσει της ολοένα και αυξανόμενης πρακτικής εμπειρίας, τα EPBMs χρησιμοποιούνται και σε εδάφη όπου ο μέσος κόκκος εδάφους ξεπερνά τα 0,4 mm.

EPB Tunnel Boring Machine

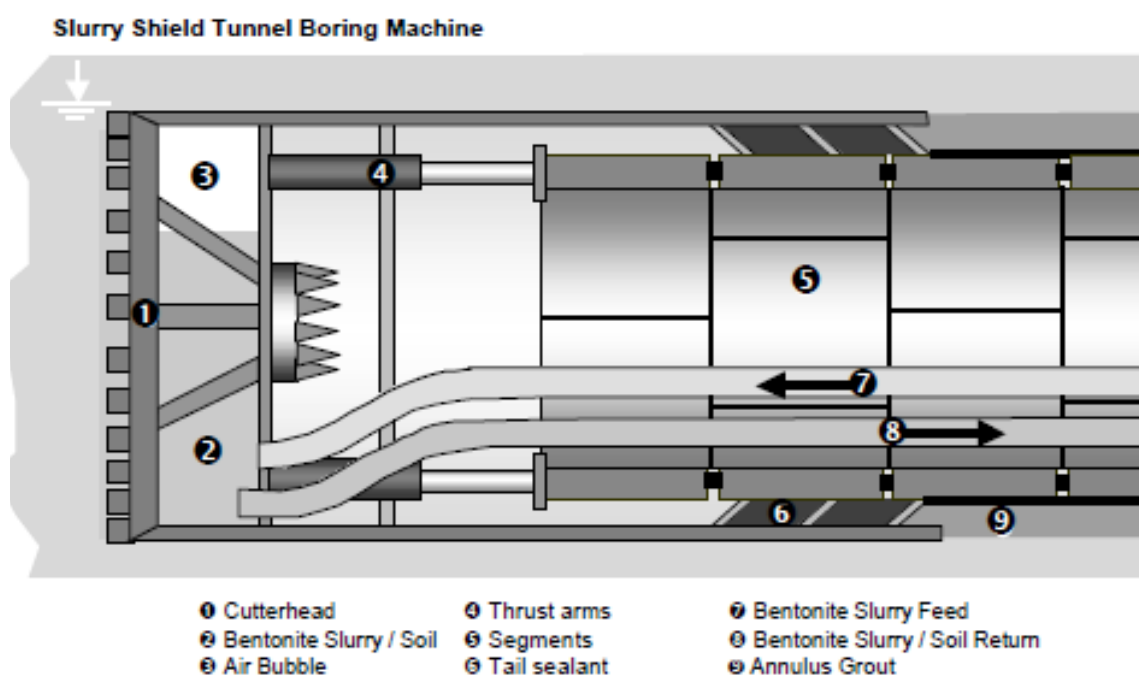


Εικόνα 2-11: Τυπικές διατάξεις ενός EPBTBM. [6]

2.2.3 Σχετικά με το Μηχάνημα Πολφού (Slurry TBM)

Η μέθοδος όρυξης με σταθεροποίηση μετώπου με χρήση πολφού μπεντονίτη (slurry) εφαρμόζεται πλέον σε ένα ευρύ σύνολο εδαφικών τύπων και σχηματισμών, με διαπερατότητα (K_s) από 10^{-8} m/s έως 10^{-2} m/s. Τα όρια της περιοχής χρήσης της μεθόδου συνδέονται με τις συνθήκες σχηματισμού «πάστας» (mudcake) στο μέτωπο και την κοκκομετρία του εκσκαπτόμενου εδάφους. Η πάστα πολφού έχει ως πρώτο σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή και εφαρμογή της πίεσης στηρίζεως στο μέτωπο, και την σταθεροποίηση της πρώτης λεπτής στρώσης των κόκκων και των αδρανών του εδάφους, ειδικά σε περίπτωση πολύ χαμηλής συνοχής. Ο καλός σχηματισμός της εξαρτάται από τις ιδιότητες του πολφού και το πορώδες του υλικού του μετώπου.

Ο πολφός βοηθά στην ομαλή απομάκρυνση των θραυσμάτων ενώ διατηρεί την πίεση στήριξης σταθερή, εμποδίζοντας έτσι τις μετακινήσεις. Επιπρόσθετα, λιπαίνει και ψύχει τα κοπτικά, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομικότητα του έργου. Παρασκευάζεται στο εργοτάξιο στην επιφάνεια, σε ειδικές εγκαταστάσεις, και τροφοδοτείται στον θάλαμο εκσκαφής μέσω ενός κλειστού συστήματος σωληνώσεων. Αντίστοιχα απομακρύνεται μαζί με τα προϊόντα εκσκαφής που φέρει ως αιωρήματα, και διαχωρίζεται από αυτά σε εγκαταστάσεις διαχωρισμού επίσης στην επιφάνεια. Εκεί επιπλέον περνάει μέσα από μια επανεπεξεργασία ώστε να ανακτήσει τις επιθυμητές του ιδιότητες. Κατόπιν ανατροφοδοτείται στο μέτωπο.



Εικόνα 2-12: Τυπικές διατάξεις ενός EPBTBM. [6]

Ο μπεντονίτης παράγεται από της επεξεργασία ουσιαστικά φυσικού πηλού. Το κύριο ορυκτό του είναι ο μοντμοριλλονίτης και περιέχει επίσης ασβεστίτη, χαλαζία μαρμαρυγία κλπ. Η ποιότητα του πολφού μπεντονίτη μπορεί να επηρεαστεί χημικά από στοιχεία που υπάρχουν στο έδαφος, από το σχήμα, το μέγεθος και την ποσότητα των θραυσμάτων στον θάλαμο και από το νερό. Για παράδειγμα, χημική αλλοίωση μπορεί να προέλθει από διαλυμένα θειούχα στο έδαφος, άλατα του ασβεστίου κ.α. Τέτοιου είδους αλλοιώσεις μπορεί να δημιουργήσουν σβόλους στον σώμα του πολφού, επιφέροντας προβλήματα στην άντλησή του. Καθίσταται λοιπόν σημαντική η συνεχής παρακολούθηση της σύστασης και των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του πολφού, τόσο στο μέτωπο όσο και στις εγκαταστάσεις παρασκευής. Πρότυπες δοκιμές και διαδικασίες περιγράφονται στο ευρωπαϊκό πρότυπο ENISO 13500.

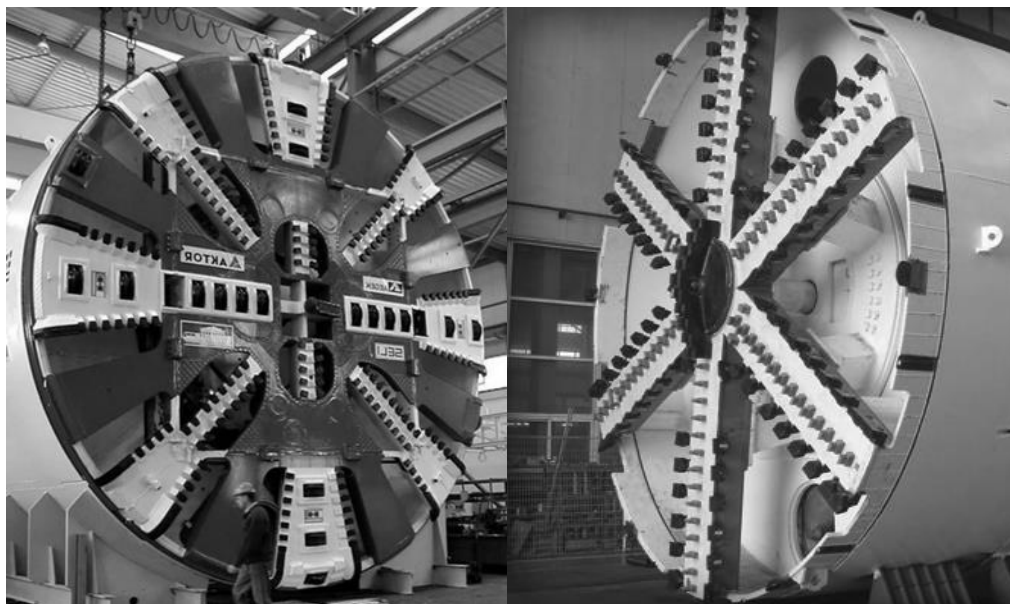
2.3 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ EPBM ΚΑΙ SLURRY TBM – ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΑΙΤΕΡΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι Μηχανές Αυτοματοποιημένης Όρυξης (TBM) είναι μηχανές των οποίων το μήκος κυμαίνεται από σε τάξη μέγεθος στα 100 μέτρα, μαζί με της διατάξεις μεταφοράς των στοιχείων επένδυσης και των προϊόντων εκσκαφής. Παρακάτω περιγράφονται έλα τα στοιχεία που συναντώνται στο παραπάνω μήκος και απαρτίζουν μια πλήρη εγκατάσταση. Αυτό κρίνεται σκόπιμο, καθώς όλα όσα θα αναφερθούν συμβάλλουν στην διάνοιξη μιας σήραγγας, στη συμπεριφορά του μετώπου και των τοιχωμάτων, και πρακτικά καθορίζουν την έκβαση του έργου.

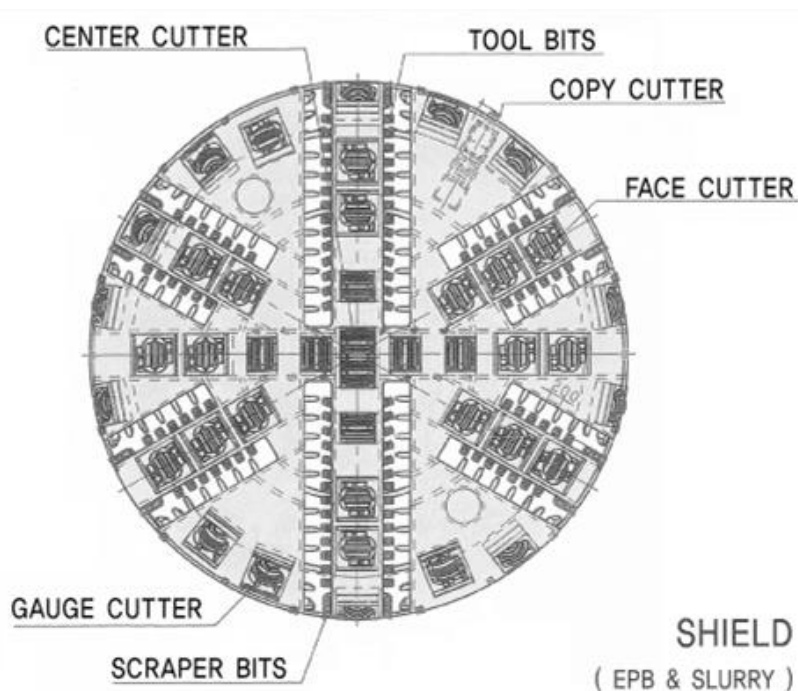
2.3.1 Κοπτική Κεφαλή (Cutter Head / Cutting Wheel)

Επί της κοπτικής κεφαλής εδράζονται τα κοπτικά εργαλεία, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η εκσκαφή του μετώπου, κατά την ώση του μηχανήματος και περιστροφή της κεφαλής. Το είδος των κοπτικών εξαρτάται από το έδαφος που πρέπει να εκσκαφτεί στο μέτωπο. Συχνά συναντώνται κατά την εκσκαφή ετερογενείς σχηματισμοί αποτελούμενοι από εδαφικά υλικά με όγκους μαλακού ή σκληρού βράχου. Για να διαχειριστεί το μηχάνημα ένα τέτοιο γεωυλικό έχει προσαρμοσμένα στην κοπτική κεφαλή διαφορετικού τύπου κοπτικά εργαλεία, δίσκου και σφήνας. Τα κοπτικά τύπου

σφήνας προορίζονται για σαθρούς εδαφικούς σχηματισμούς, ενώ τα κοπτικά τύπου δίσκου για τεμάχη βράχου.



Εικόνα 2-14: Κοπτική κεφαλή κλειστού τύπου (αριστερά, Herrenknecht) και ανοιχτού τύπου (δεξιά, Robbins) [2]



Εικόνα 2-14: Σκίτσο κοπτικής κεφαλής κλειστού τύπου με πιθανές θέσεις και τύπους κοπτικών

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει για τα κενά που έχει διακρίνονται στην πρόσοψη της κεφαλής. Μέσω αυτών διέρχεται το υλικό που εκσκάπτεται από το μέτωπο. Συγκεκριμένα, μεγάλα κενά προσφέρουν ομοιομορφία στην πίεση υποστήριξης του μετώπου και μειώνουν τον κίνδυνο φραγμού των κενών, όμως σε αστικές περιοχές

υπάρχει κίνδυνος για σημαντικές παραμορφώσεις λόγω μη αποτελεσματικής συγκράτησης του συνόλου του μετώπου. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται κλειστή κεφαλή κοπής, με χαμηλότερο ποσοστό κενών επί της συνολικής επιφάνειας αυξάνεται ο κίνδυνος φραγμού των μικρών κενών, αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή ειδικών χημικών προσθετικών, που αυξάνουν την εργασιμότητα του εδαφικού υλικού. Σε αστικές περιοχές, όπου πρακτικά οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους καθορίζουν εν πολλοίς τη μελέτη, τον σχεδιασμό και την επιλογή μηχανήματος, μια σχετικά κλειστή κοπτική κεφαλή είναι η συνηθέστερη λύση. Συνηθέστερα, η επιφάνεια των κενών σε ένα EPB ή Slurry TBM κυμαίνεται στο διάστημα 20% - 35%.

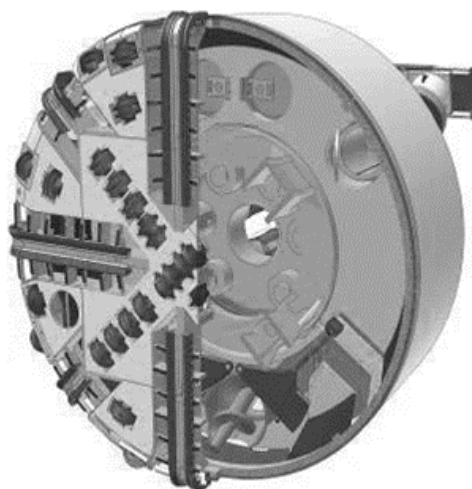
Στα άκρα του δίσκου της κεφαλής κοπής υπάρχουν επιπλέον κοπτικά εργαλεία, συνήθως τύπου δίσκου, τα οποία ουσιαστικά εκσκάπτουν μεγαλύτερη διάμετρο από αυτή της ασπίδας που ακολουθεί, με τη διαφορά αυτή να είναι συνήθως λίγα εκατοστά. Δημιουργείται έτσι επιπρόσθετος χώρος, αναφερόμενος και ως «υπερεκσκαφή», η οποία γίνεται με σκοπό την καλύτερη και οικονομικότερη λειτουργία του EPB, αφού ελαχιστοποιούνται οι τριβές μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Επίσης, η υπερεκσκαφή καθώς επιβάλλεται ώστε να μπορεί να στρίβει το EPB με προκαθορισμένη καμπυλότητα.

Σε ότι αφορά τα εργαλεία κοπής που τοποθετούνται είτε μπροστά στην κεφαλή κοπής, είτε στα άκρα της, είναι πολύ σημαντική η αντικατάστασή τους όταν αυτή απαιτείται, κατόπιν της φθοράς που υφίστανται κατά την εκσκαφή. Η αντικατάσταση των κοπτήρων είναι ιδιαίτερα σχολαστική και δαπανηρή διαδικασία όταν λαμβάνει χώρα στο μέτωπο εκσκαφής, καθώς σε τέτοιες καταστάσεις είναι ιδιαίτερα δυσμενής η υποστήριξη του μετώπου ενώ το μηχάνημα ακινητοποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να προσφέρει έργο. Συνεπώς, η αλλαγή των κοπτήρων και τυχόν συντήρηση του μηχανήματος γίνεται στους σταθμούς, οι οποίοι κατά το σχεδιασμό έχουν εκσκαφτεί πριν τρυπήσει το μέτωπο το EPB. Παράλληλα, για να εμποδιστεί η ταχεία φθορά των κοπτήρων, λαμβάνονται μέτρα, όπως η ελαχιστοποίηση τριβών μεταξύ κεφαλής – εδάφους, συνηθέστερα εφαρμόζοντας υποστήριξη του μετώπου με μικρότερες τάσεις από τις αντίστοιχες γεωστατικές στο συγκεκριμένο βάθος επιτρέποντας ενδεχομένως κάποιες μικρές ελεγχόμενες μετακινήσεις.

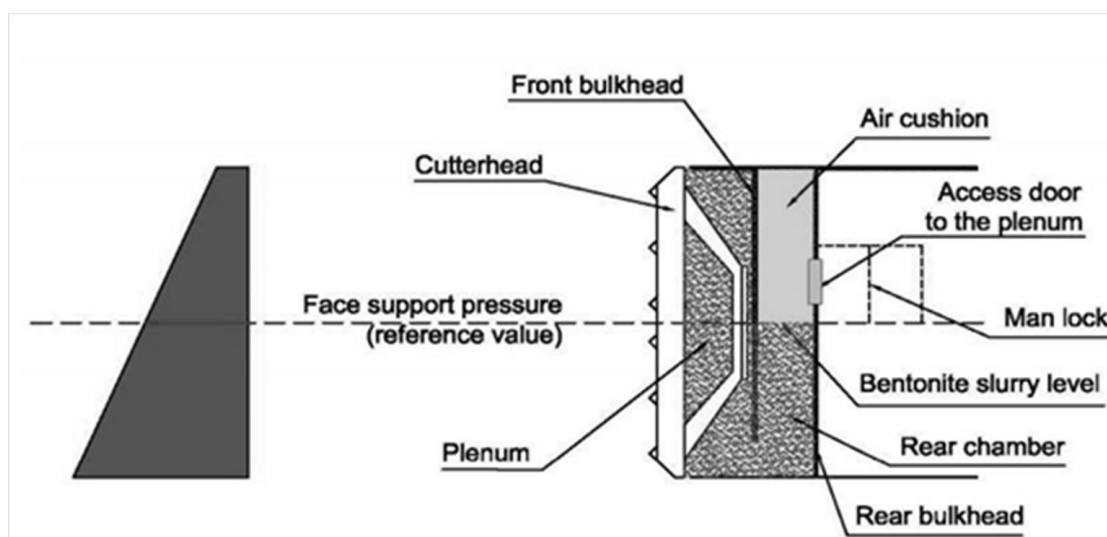
2.3.2 Θάλαμος Εκσκαφής (Excavation Chamber)

Ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται κατασκευαστικά αμέσως μετά την κεφαλή κοπή και μπορεί να είναι μονός ή διπλός. Σε αυτόν το χώρο εισέρχεται το υλικό που εκσκάπτεται, το οποίο συχνά είναι αναμεμιγμένο με χημικά πρόσθετα, που αυξάνουν την εργασιμότητα του υλικού στην περίπτωση του EPB TBM, ή βρίσκεται αιρούμενο στον πολφό – περίπτωση Slurry TBM. Ο θάλαμος εκσκαφής είναι γεμάτος με υλικό εδαφικής βάσης, το οποίο λειτουργεί ως το μέσω υποστήριξης του μετώπου, σε συνδυασμό με την πρόσοψη της κεφαλής. Η πίεση που απαιτείται για την εξισορρόπηση του μετώπου προκύπτει από τα έμβολα ώθησης αφενός, και από το ρυθμό αναρρόφησης υλικού από τον θάλαμο αφετέρου.

Μια υποκατηγορία των μηχανημάτων, έχει ένα δεύτερο τοίχο πίσω από το βασικό, που χωρίζει το θάλαμο σε δύο διακριτούς αλλά επικοινωνούντες χώρους, τον θάλαμο εκσκαφής και τον θάλαμο εργασιών. Η καλή πρακτική και η εμπειρία πλέον υποδεικνύουν την μερική πλήρωση του θαλάμου εργασιών και εισαγωγή αέρα υπό πίεση στο κενό που δημιουργείται (air-bubble technique). Λόγω του ότι η πίεση στα αέρια μεταβάλλεται ευκολότερα και ταχύτερα απ' ό,τι στα ρευστά/ημίρρευστα, διατηρώντας ένα ποσοστό του θαλάμου πληρωμένο με αέρα υπερπυκνωμένο, βοηθά στην διατήρηση ενιαίας πίεσης στο μέτωπο, ακόμη και αν συναντηθούν κενά στον προ του μετώπου σχηματισμό, ή αλλάξει ο ρυθμός προχώρησης Κ.Ο.^{[21][7]}



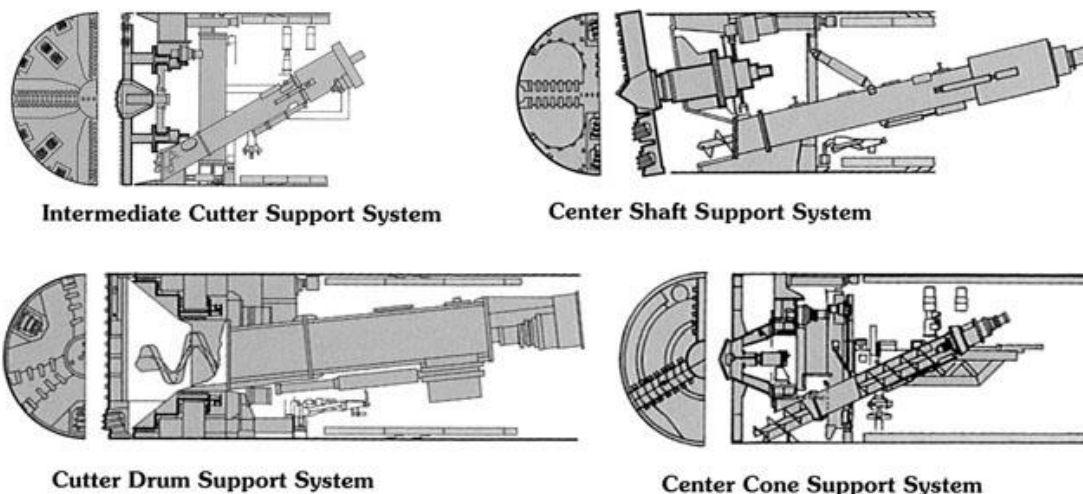
Εικόνα 2-16: 3D απεικόνιση εσωτερικού του θαλάμου εκσκαφής. Διακρίνονται ο θραυστήρας (κάτω) και οι θύρες εισόδου (air-locks)



Εικόνα 2-16: Σχηματική απεικόνιση ενός διπλού θαλάμου εκσκαφής. Διακρίνονται ο ενδιάμεσος τοίχος (submerged wall) και η φουσαλίδα αέρα (aircushion). (www.facesupport.org)

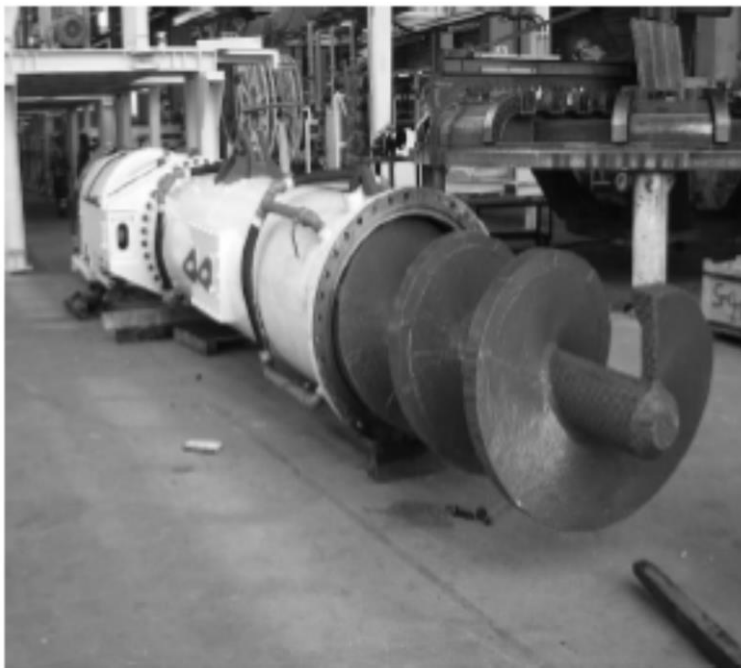
2.3.3 Ατέρμων Κοιλίας (Screw Conveyor)

Από τα πλέον σημαντικά τμήματα του EPB, αφού η λειτουργία του καθορίζει την επίτευξη της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης του μετώπου. Ο σκοπός του είναι να μεταφέρει το υλικό εκσκαφής από το θάλαμο εκσκαφής στο πίσω μέρος του EPB, ώστε να απομακρυνθεί με ασφάλεια, συνήθως με κάποιο ταινιόδρομο. Ο ρυθμός περιστροφής του κοιλία καθορίζεται αναλόγως του ρυθμού διάνοιξης της σήραγγας, ώστε ο θάλαμος εκσκαφής να είναι πάντα γεμάτος για την πλήρη υποστήριξη του μετώπου.



Εικόνα 2-17: Διαφορετικές διατάξεις ατέρμονα κοχλία, αναλόγως του τύπου της κοπτικής κεφαλής.
(www.p3planningengineer.com)

Ιδιαίτερη σημασία για τη σωστή λειτουργία του ατέρμονος κοχλία, ώστε να υποστηρίζεται το μέτωπο όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι η πίεση που αναπτύσσεται κατά μήκος του. Συγκεκριμένα, η μείωση της πίεσης στον ατέρμων κοχλία πρέπει να γίνεται σταδιακά, αφού απότομες μεταβολές θα επηρεάσουν την πίεση στο μέτωπο και κατά συνέπεια την ευστάθεια του. Τέτοιες απότομες πτώσεις της πίεσης μπορούν να συμβούν σε υλικά με μεγάλη διαπερατότητα, τα οποία μπορούν να σχηματίσουν διαρροές νερού και κατ' επέκταση απότομη πτώση της υδροστατικής πίεσης καθώς και σε υλικά με μεγάλης διαμέτρου κόκκους. Έτσι, είναι σύνηθες ανάλογα με την ποιότητα του υλικού που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής, να υπάρχουν ακροφύσια στην αρχή του ατέρμονος κοχλία, τα οποία αναμιγνύουν το υλικό εκσκαφής με μπεντονίτη, προσδίδοντάς του έτσι μικρή διαπερατότητα και πλαστικότητα. Δημιουργείται έτσι υδατοστεγής φραγμός στη βάση του θαλάμου εκσκαφής. Υπάρχουν επιπρόσθετα προδιαγραφές για τη μέγιστη διάμετρο των κόκκων που επιτρέπεται να εισέλθει στον ατέρμων κοχλία χωρίς να δημιουργεί κίνδυνο απότομης πτώσης της πίεσης.



Εικόνα 2-18: Ατέρμων κοχλίας EPTBTBM (www.ltd.com)

2.3.4 Υδραυλικά έμβολα ώθησης

Όλα τα TBM, με εξαίρεση τα Gripper (ανοιχτού τύπου), προωθούνται με την βοήθεια ενός συστήματος υδραυλικών εμβόλων ώθησης. Τα έμβολα εδράζονται πάνω στους μόλις τοποθετημένους δακτυλίους της τελικής επένδυσης και ωθούν το μηχάνημα προς τα εμπρός. Πέρα από την προχώρηση του μηχανήματος, τα έμβολα ώθησης έχουν ως στόχους τη σταθεροποίηση του EPBM αλλά και τον έλεγχο των αλλαγών κατεύθυνσης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, και παράλληλα να παρέχουν την κατάλληλη δύναμη στήριξης στο μέτωπο. Γενικά οι δυνάμεις που ασκούν τα έμβολα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να υπερκαλύψουν τις τριβές μεταξύ ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Όμως, πολύ μεγάλες δυνάμεις από τα έμβολα ώθησης δεν είναι επιθυμητές, αφού θα αυξήσουν τις τριβές μεταξύ της κεφαλής κοπής και του μετώπου δυσχεραίνοντας την περιστροφή της κεφαλής, με άμεση συνέπεια την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και τη φθορά των κοπτικών και την ενδεχόμενη αλλαγή τους εν μέσω της διάνοιξης, κατάσταση η οποία πρέπει να αποφεύγεται.

Ο καθορισμός των δυνάμεων των εμβόλων εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων και αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Γενικά, η λειτουργία των εμβόλων βελτιστοποιείται όταν τα κοπτικά έχουν την επιθυμητή αποδοτικότητα και όταν η φθορά των κοπτικών της κεφαλής κοπής γίνεται με τέτοιο ρυθμό που επιτρέπει να γίνει η αντικατάστασή τους

στους σταθμούς και όχι κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το μήκος και το βάρος ολόκληρου του EPB, καθώς και οι περιβάλλουσες εδαφικές συνθήκες, αφού καθορίζουν την τριβή που θα αναπτυχθεί επιφανειακά με το EPB, την οποία πρέπει να υπερνικήσουν τα έμβολα κατά την προώθηση του μηχανήματος.

Η βασική πορεία υπολογισμού της απαραίτητη δύναμης ώσης των εμβόλων δίνεται από την παρακάτω μεθοδολογία:

$$T = \gamma_f * \Sigma W \text{ η απαραίτητη δύναμη ώσης } T$$

$$\mu \Sigma W = W_{sk} + W_{supp} + W_{exc} + W_{sh} \text{ όπου}$$

$W_{sk} = \mu[2\pi * R * L * (\sigma_m) + F_w]$ η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται επί της ασπίδας

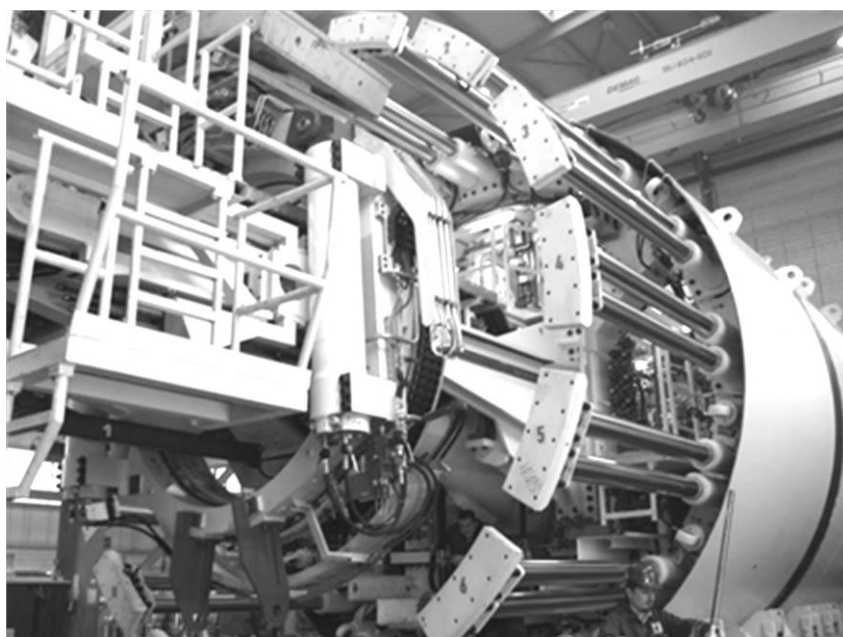
$W_{supp} = A_{exc} * P_f$ η απαραίτητη δύναμη για την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης

$W_{exc} = N_{cutter} + P_{cutter}$ η απαραίτητη δύναμη για την ορθή λειτουργία των κοπτικών

$W_{sh} = 2\pi R * (p_{sh} + p_b)$ η αναπτυσσόμενη οπισθέλκουσα στην ουρά του μηχανήματος (drag force of the tail skin)

2.3.5 Ανυψωτής στοιχείων τελικής επένδυσης (Erector)

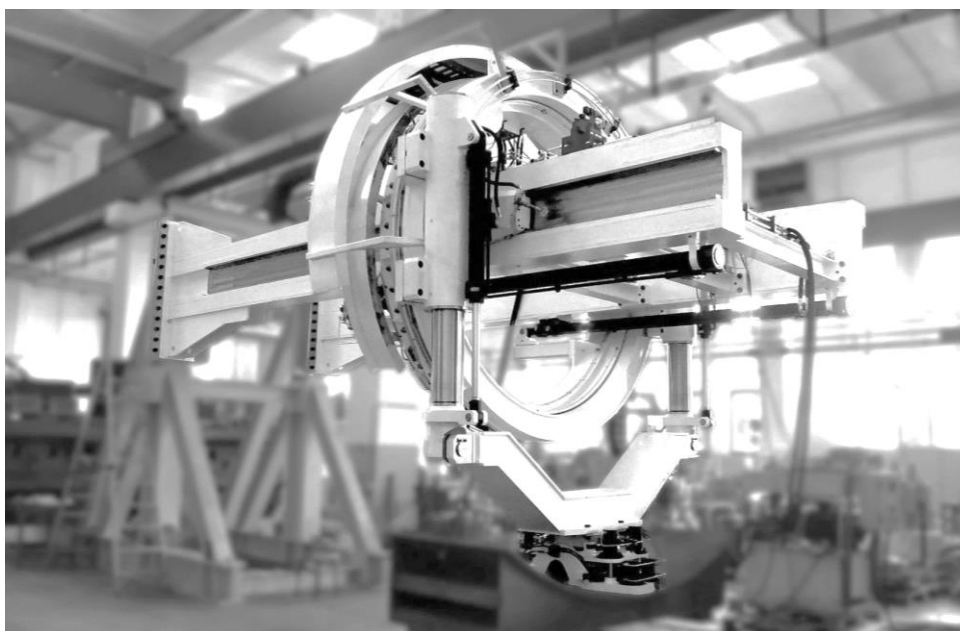
Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανέγερσης και τοποθέτησης των στοιχείων



Εικόνα 2-19: Υδραυλικά έμβολα ώσης (www.robins.com)

τελικής επένδυσης μέσω εξειδικευμένου μηχανολογικού εξοπλισμού μειώνει σημαντικά το χρόνο εγκατάστασης της υποστήριξης και συνεπώς όλης της διαδικασίας διάνοιξης μιας σήραγγας. Ο μηχανολογικός αυτός εξοπλισμός αποτελεί τον Ανυψωτή (erector).

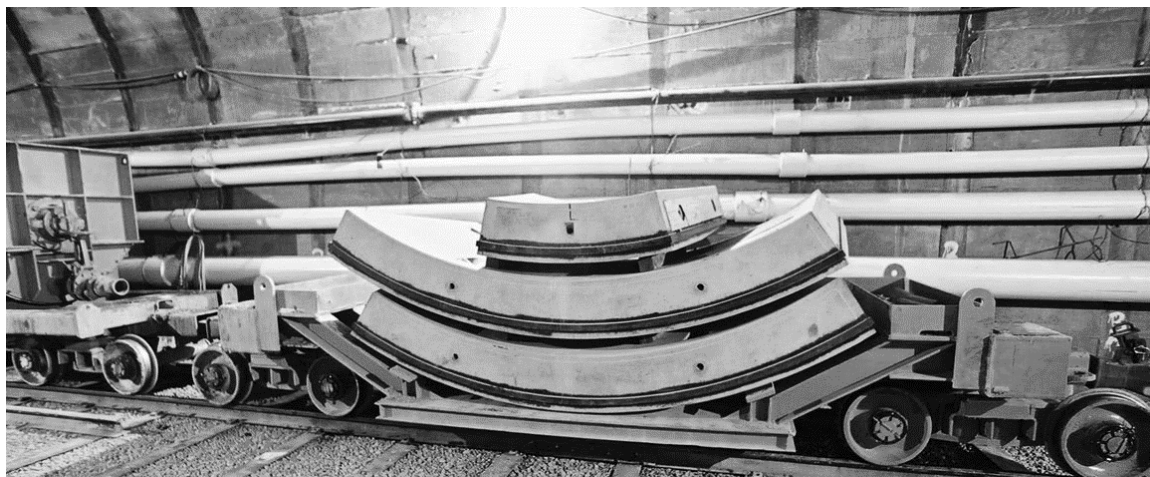
Ένας τυπικός ανυψωτής σε ένα TBM αποτελείται από έναν βραχίονα προσαρτημένο σε ένα μεταλλικό δακτύλιο με δυνατότητα περιστροφής του δακτυλίου 360° κάθετα στη φορά του μηχανήματος. Στο άλλο άκρο ο βραχίονας φέρει μια αρπάγη, με την οποία ο χειριστής λαμβάνει, κατευθύνει και τοποθετεί το στέλεχος του έκαστος δακτυλίου επένδυσης. Ο δακτύλιος με τον προσαρτημένο βραχίονα δύνανται να κινηθούν και κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, πάνω σε μεταλλικούς κυλίνδρους. Σημειωτέο είναι, πως τα τελευταία χρόνια η χαλύβδινη αρπάγη έχει αντικατασταθεί με ειδική διάταξη κενού αέρος (βεντούζα / vacuum erectors) ώστε να μη δημιουργούνται φθορές στα τεμάχια της τελικής επένδυσης κατά την τοποθέτησή τους. Ο χειρισμός ενός ερέκτορα είναι μια δύσκολη εργασία, και οι κορυφαίες στον χώρο εταιρίες εκπαιδεύουν τους χειριστές τους σε προσομοιωτές, προτού τους ανατεθούν καθήκοντα σε έργο.



Εικόνα 2-20: Ανυψωτής στοιχείων τελικής επένδυσης (www.robins.com)

2.3.6 Τρόλεϊ μεταφοράς στοιχείων τελικής επένδυσης (Segment Feed Trolley)

Τα στοιχεία τελικής επένδυσης τροφοδοτούνται από το εργοτάξιο στο TBM μέσω ενός συρμού βαγονέτων. Στο σημείο όπου ο συρμός φτάνει στον ανυψωτή, υπάρχουν κατάλληλες μηχανολογικές διατάξεις οι οποίες τροφοδοτούν τα στοιχεία στην αρπάγη του ανυψωτή, και διασφαλίζουν τη σωστή απόσπασή τους από τα βαγονέτα, την ευθυγράμμισή τους κλπ.



Εικόνα 2-21: Τρόλεϊ μεταφοράς στοιχείων τελικής επένδυσης

2.3.7 Σύστημα Μεταφοράς Εξορυγμένου Υλικού

Σύστημα Μέτρησης Μάζας και Όγκου των Εκσκαφών

Κατά γενική πρακτική, το εξορυγμένο υλικό μεταφέρεται από τον θάλαμο εκσκαφής στο πίσω μέρος του μηχανήματος μέσω του ατέρμονου κοχλία (screw conveyor) και ύστερα μέσω κατάλληλου ταινιόδρομου. Ο ταινιόδρομος μπορεί να συνεχίζει μέχρι την επιφάνεια, ή να εκφορτώνει σε συρμό βαγονέτων.

Εξάιρεση αποτελούν τα TBM τύπου Slurry (TBM πολφού). Το σύστημα μεταφοράς σε αυτή την περίπτωση θα περιγραφεί παρακάτω.

Οι χαμηλές τιμές υπερεκσκαφές κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας είναι ενδείξεις της σωστής λειτουργίας των EPBM ή Slurry TBMs και κατ' επέκταση της επιτυχής ολοκλήρωσης του έργου. Οι υπερεκσκαφές επηρεάζουν σημαντικά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και είναι σημαντικό να μετριοούνται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια κατά τη διάρκεια προχώρησης του μηχανήματος όρυξης, ώστε σε περίπτωση σημαντικών αποκλίσεων να λαμβάνεται ειδική μέριμνα. Ουσιαστικά μετριέται η μάζα και ο όγκος του υλικού που εκσκάπτεται και εξέρχεται του θαλάμου

εκσκαφής και συγκρίνεται με τα θεωρητικά αντίστοιχα μεγέθη που έχουν προκύψει από τη μελέτη. Οι μετρήσεις στο σώμα ενός TBM γίνονται κυρίως μέσω δυο συστημάτων, με Σαρωτές Όγκου Λείζερ (Laser Volume Scanner) και με ηλεκτρονικές ζυγαριές στον ταινιόδρομο μεταφοράς (Mechanical Belt Scales). Στην περίπτωση του Slurry TBM υπολογίζεται η εξορυγμένη ποσότητα μέσω διακυμάνσεων στην παροχή στερεών στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού.

Ο σαρωτής όγκου με λέιζερ σκανάρει το υλικό που διέρχεται από τον ιμάντα μεταφοράς και δίνει εκτιμήσεις με ικανοποιητική ακρίβεια. 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 TBM. 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.

Οι μεταφορικές ταινίες με ράουλα έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα EPB. Σε συγκεκριμένο σημείο έχουν ορισμένους κυλίνδρους (ράουλα), 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. Το σύστημα αυτό έχει πολύ καλή ακρίβεια ($\pm 0,5\%$), και 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 και λοιπά δεδομένα που δίνουν μια γενικότερη εποπτεία της διαδικασίας διάνοιξης της σήραγγας.



Εικόνα 2-22: Ταινιόδρομος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού (πάνω) και διατάξεις σαρωτών λέιζερ (κάτω)

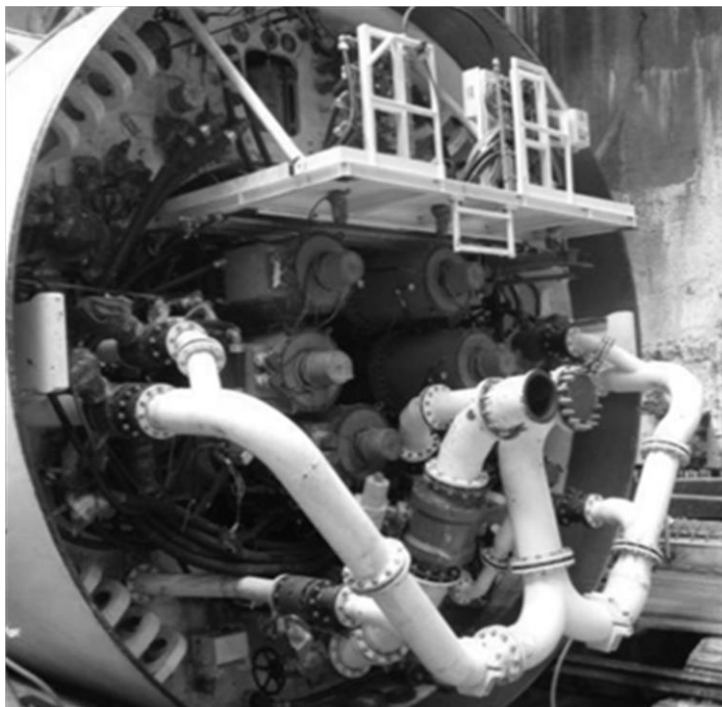
2.3.8 Υδραυλικό Σύστημα Μεταφοράς (Slurry TBM)

Η απομάκρυνση και μεταφορά του μεντονιτικού πολφού από και προς τον θάλαμο εκσκαφής των STBM γίνεται υδραυλικά μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων και αποτελεί την πιο βέλτιστη λύση. Το δίκτυο αυτό πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε ν' αποτρέπεται η οποιαδήποτε φραγή στη διατομή, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται διάμετρος σωλήνων τέτοια ώστε να επιτρέπει τη ροή των υλικών με κατάλληλη ταχύτητα.

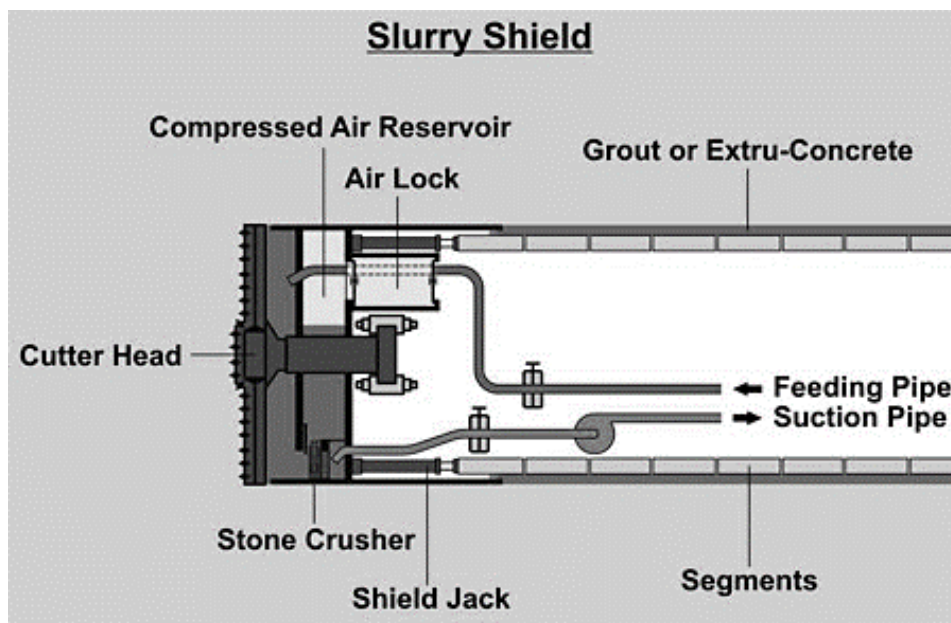
Το υδραυλικό κύκλωμα του πολφού (εισροές και εκροές πολφού) μπορεί να καθορίζει την πίεση του πολφού μέσα στο θάλαμο και συνεπώς της πίεση στήριξης μετώπου. Επίσης, το υδραυλικό σύστημα κυκλοφορίας πολτού είναι κλειστό και υπό

υψηλή πίεση, για τον λόγο αυτό τα Slurries μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια ακόμα και σε περιβάλλοντα εκσκαφής με πίεση νερού μεγαλύτερη από 15bar.

Η ανάγκη χρήσης αντλιών, αντλιοστασίων και εγκαταστάσεων διαχωρισμού του



Εικόνα 2-24: Διάταξη σωλήνων αναρρόφησης και τροφοδοσίας πολφού από και προς τον θάλαμο εκσκαφής[2]

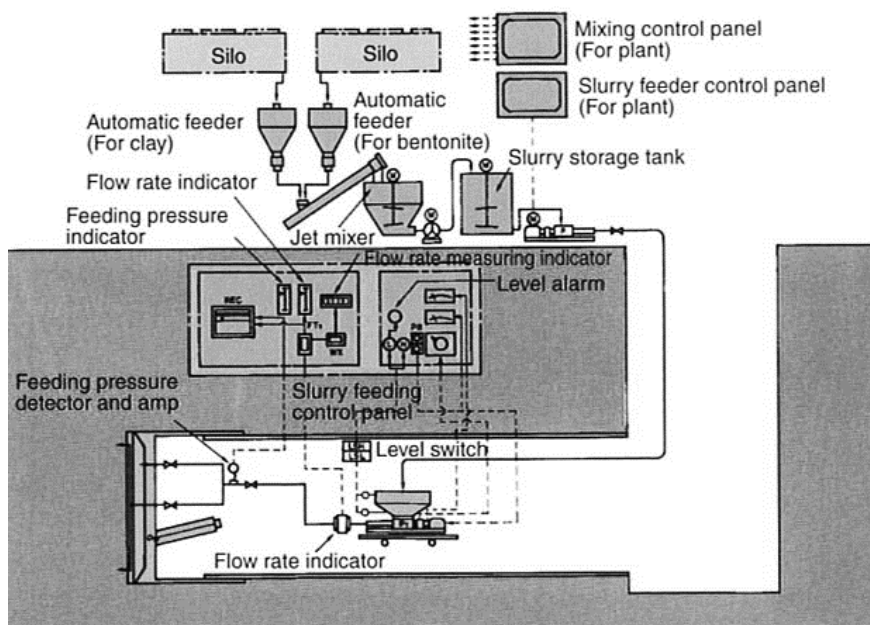


Εικόνα 2-24: Σχηματικό διάγραμμα Υδραυλικού Συστήματος Μεταφοράς Πολφού

πολφού απαιτούν υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με μία μέθοδο ξηρής μεταφοράς (π.χ. ταινιόδρομος), και καθιστά την μεταφορά με υδραυλικό σύστημα ως μα από τις ακριβότερες μεθόδους αφαίρεσης του εκσκαπτόμενου υλικού.

2.3.9 Εγκαταστάσεις Διαχωρισμού Πολφού Μπεντονίτη (Slurry Separation Plant)

Το υδραυλικό σύστημα μεταφοράς πολφού αρχίζει και τελειώνει το κύκλωμά του σε ειδικές εγκαταστάσεις διαχωρισμού στην επιφάνεια. Ο πολφός μπεντονίτη διαχωρίζεται από το εξορυγμένο υλικό, ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται στο σύστημα. Οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά (αναμενόμενες διαστάσεις κόκκων) αλλά και χωρικά δεδομένα (διαθέσιμη επιφάνεια εργοταξίου). Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές διαχωρισμού που εφαρμόζονται στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού και αναλόγως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, η ιζηματογένεση και το φιλτράρισμα. Στην πρώτη περίπτωση, δύο κύριοι παράγοντες επηρεάζουν την διαδικασία, το όριο ροής και το ιξώδες του μέσου μεταφοράς, και το μέγεθος και η πυκνότητα των εδαφικών κόκκων. Μεταβολές σε αυτούς τους παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα καθίζησης. Πέραν των φίλτρων και των δεξαμενών καθίζησης,



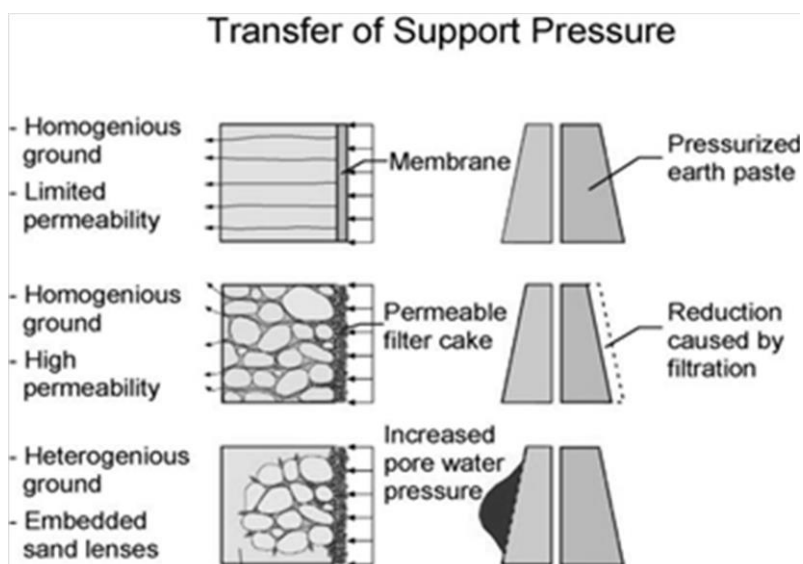
Εικόνα 2-25: Σχηματικό διάγραμμα τυπικού δικτύου εγκαταστάσεων διαχωρισμού πολφού μπεντονίτη (www.p3planningengineer.com) χρησιμοποιούνται και φυγοκεντρωτές.

2.3.10 Λοιπά στοιχεία της Μηχανοποιημένης Όρυξης με EPB / Slurry TBMs

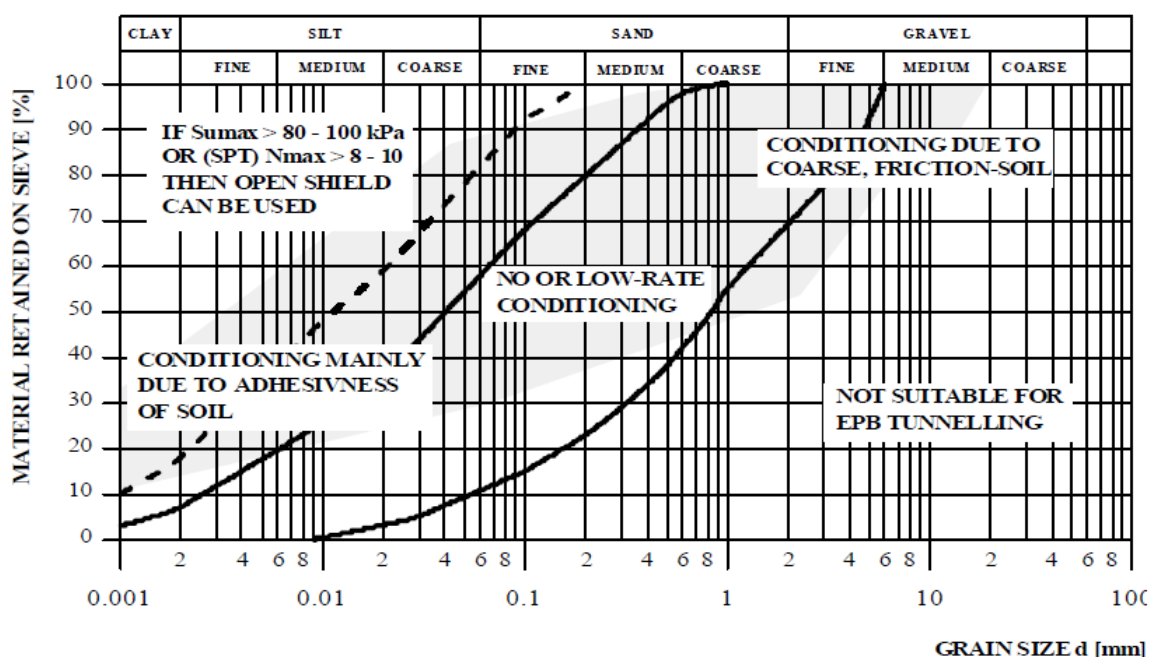
2.3.10.1 Πρόσθετα

Κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχανήματα EPB και Slurry οι ιδιότητες του εδάφους πρέπει να βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα όρια ώστε η εκσκαφή να μην παρουσιάζει προβλήματα, όπως αστάθειες στο μέτωπο και επιπλοκές στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Στο φυσικό περιβάλλον, όμως, τα εδάφη συναντώνται πολύ σπάνια με τις επιθυμητές ιδιότητες και ομοιογένεια. Από οικονομικής σκοπιάς, είναι συνεπώς προτιμότερη εισαγωγή ρυθμιστικών πρόσθετων ουσιών στο έδαφος που εκσκάπτεται, ώστε να επιτευχθεί η διάνοιξη παρά να γίνουν αλλαγές στο μηχάνημα. Οι πρόσθετες ουσίες μπορεί να είναι νερό, διάλυμα μπεντονίτη, αργίλου ή πολυμερών και αφρός. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις επιθυμητές ιδιότητες είναι η κοκκομετρία, η περιεκτικότητα σε νερό, το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλαστικότητας και υδαρότητας.

Σε εφαρμογές STBM εισάγεται συνήθως νερό και διάλυμα μπεντονίτη μπροστά από την κοπτική κεφαλή, μεταβάλλοντας έτσι την πυκνότητα και την πίεση του πολφού και επιτυγχάνοντας την ομαλή κατανομή της υπερπίεσης στο μέτωπο. 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 πολύ σημαντική παράμετρος. Ειδικότερα, ένα πολύ μεγάλο μήκος διείσδυσης επιδρά δυσμενώς στην σταθερότητα, ενώ, ένα πολύ μικρό μήκος διείσδυσης θα έκανε την υποστήριξη του μετώπου λιγότερο αποδοτική. Επιπροσθέτως, υψηλές ποσότητες νερού που διεισδύει στο έδαφος πρέπει να αποφεύγεται, λόγω του γεγονότος ότι θα μπορούσε να προκαλέσει διόγκωση αργιλικών γεωυλικών που πιθανά να υπάρχουν πίσω από το μέτωπο.



Εικόνα 2-26: Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς πίεσης μέσω της «μεμβράνης πολφού» στο μέτωπο σε τρία πιθανά γεωλογικά σενάρια. (www.facepressure.org)



Διάγραμμα 2-2: Όρια EPB/TBM και περιοχές βελτίωσης του εδάφους[19]

Σε εφαρμογές EPBM χρησιμοποιείται περισσότερο ο αφρός ο οποίος εισπνέζεται μέσα στην εδαφική πάστα από ακροφύσια έμπροσθεν της κοπτικής κεφαλής, αλλά και μέσα στον θάλαμο εκσκαφής και τον ατέρμων κοχλία.

Με τη σωστή εισαγωγή και μίξη των πρόσθετων στην εδαφική πάστα επιτυγχάνονται γενικά τα παρακάτω^[6]:

- Μείωση της κολλώδους συμπεριφοράς των αργιλικών και μείωση του κινδύνου έμφραξης του ατέρμονα κοχλία και των κενών της κεφαλής
- Μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής σε κοκκώδη εδάφη, γεγονός που βοηθά στην εκσκαφή με Slurry μηχανήματα
- Μείωση της υδατοπερατότητας
- Λίπανση και ψύξη κοπτικών. Μείωση απαιτούμενης ροπής περιστροφής και μείωση φθορών με αποτέλεσμα την οικονομία στο έργο.
- Επίτευξη επιθυμητών ιδιοτήτων πλαστιμότητας και πλαστικών παραμορφώσεων που οδηγούν σε καλύτερες συνθήκες κοπής και μεταφοράς.

Επίσης, ο αφρός μειώνει το ειδικό βάρος της εδαφικής πάστας και μειώνει την σφιγρότητα της προσδίδοντας ιδανικές πλαστικές ιδιότητες. Μια καίρια λειτουργία του αφρού είναι η παθητική του ενεργοποίηση κατά τις μεταβολές πίεσης μέσα στον θάλαμο εκσκαφής. Κατά την πτώση της πίεσης αυτός διαστέλλεται ενώ κατά την αύξηση της συστέλλεται, ελέγχοντας έτσι τις απότομες μεταβολές στην πίεση του θαλάμου εκσκαφής.

Οι βασικές παράμετροι του αφρού είναι:

- $C_F = 100 * m_{surfactant} / m_{foamsolution}$
όπου C_F η συγκέντρωση στο αφροποιητή σε υδατικό διάλυμα
- $FER = \frac{V_{compressedair}}{V_{foamsolution}}$
όπου FER ο λόγος διόγκωσης του αφρού
- $FIR = 100 * \frac{V_{foam}}{V_{soil}}$
όπου FIR ο λόγος εισαγωγής αφρού

Πίνακας 2-1: Ορισμός διαφορετικών τύπων αφρού EPBM αναλόγως των εδαφικών τύπων

Soil	EFNARC Foam types			Foam Injection		Other tunnel additives		
	A	B	C	c _f	FIR	dispersing agents	foam stabilisers	soil stabilisers
Clay				+	+	++	-	-
Sandy clay – silt				+	+	+	-	-
Sand – clayey silt				+	++	o	+	-
Sand				++	+++	-	++	++
Clayey gravels				++	++	-	+++	+
Sandy gravels				+++	+++	-	+++	+++

- generally not necessary

o not generally necessary, but sometimes useful

+ useful in low quantities

++ useful in increased quantities

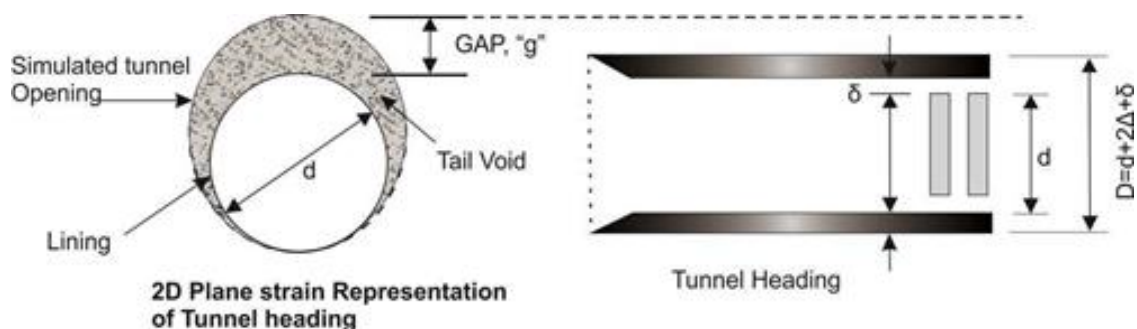
+++ strongly recommended in increased quantities

NB other soil conditions may exist which affect the suitability of different foam types.

2.3.10.2 Διαδικασίες ενεμάτωσης και πληρώσεως κενών.

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων αναπόφευκτα δημιουργεί κενά μεταξύ του περιβάλλοντος γεωλογικού και των στοιχείων του μηχανήματος (ασπίδα) και της τελικής επένδυσης. Η υπερεκσκαφή από την κοπτική κεφαλή, η κωνικότητα της ασπίδας και η τοποθέτηση των στοιχείων της υποστήριξης στο εσωτερικό τμήμα της ασπίδας είναι οι κύριες αιτίες για αυτά τα κενά. Κατά τον ορισμό του κενού που δημιουργείται μεταξύ εδάφους και επένδυσης που δόθηκε από τους Lee et al. (1992)^[8]:

$$G = G_p + U_{3D} + w$$



Εικόνα 2-27: Σχηματική απεικόνιση ορισμών ουριαίου κενού και κενού υπερεκκαφής

όπου το μέγεθος G_p εκφράζει το φυσικό κενό, συνήθως τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας με τη μέγιστη εξωτερική διάμετρο της επένδυσης, το μέγεθος U_{3D} την ελαστοπλαστική παραμόρφωση στο μέτωπο της σήραγγας ενώ το μέγεθος w λαμβάνει υπόψη τον ανθρώπινο παράγοντα (χειριστής ερέκτορα, φθορές στοιχείων επένδυσης).

Πιο συγκεκριμένα, οι δύο βασικοί τύποι κενών είναι το κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους δημιουργείται λόγω της κωνικότητας της ασπίδας και 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.

Η εισπίεση του ενέματος μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, είτε μέσω προκαθορισμένων κενών στα προκατασκευασμένα στοιχεία, διά μέσου των οποίων διέρχονται σωληνώσεις που εισπιάζουν το ένεμα, είτε με ένα σύστημα σωληνώσεων, το οποίο καταλήγει στην ουρά της ασπίδας, όπου και γίνεται η εισπίεση. Ο δεύτερος τρόπος έχει το πλεονέκτημα της ομοιόμορφης κατανομής του ενέματος μέσω πολλών σημείων εισπίεσης στην περιφέρεια της ουράς της ασπίδας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η στεγάνωση της ασπίδας στην ουρά, ώστε να μην εισχωρήσει το ένεμα πάνω στην ασπίδα. Για να επιτευχθεί η στεγάνωση τοποθετούνται σειρές από ειδικές βούρτσες μεταξύ του εξωτερικού τμήματος του TBM και του προκατασκευασμένου στοιχείου (ουρά), στις οποίες εισπιάζεται στεγανωτικός παράγοντας -λάδι- υπό ορισμένη πίεση τουλάχιστον ίση με αυτή της πίεσης του ενέματος.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της διαδικασίας ενεμάτωσης είναι τα ακόλουθα:

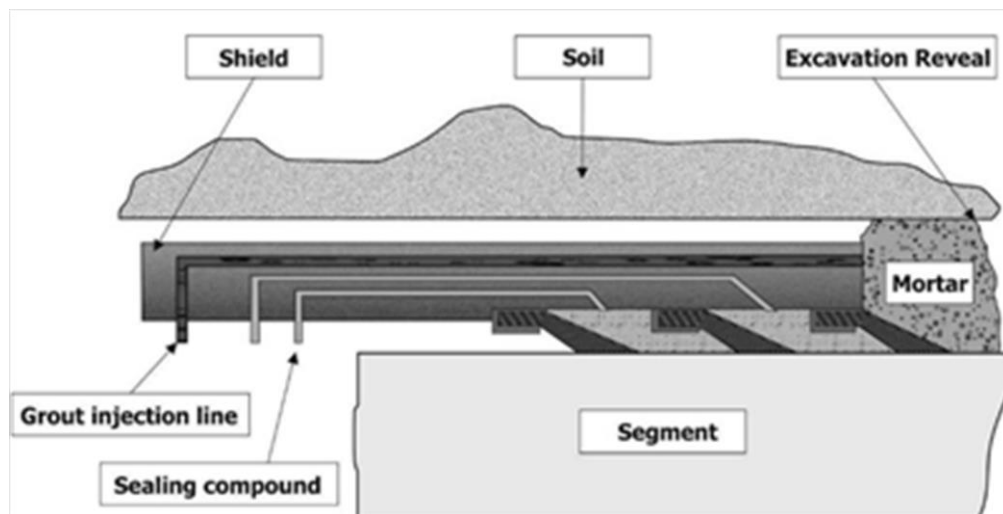
- Η πίεση από το περιβάλλον γεωυλικό μεταφέρεται στην υποστήριξη πιο ομοιόμορφα

- Συμβάλλει στην 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 γεωολικό
- Βελτιώνει την υδραυλική μόνωση της σήραγγας

Το ένεμα πρέπει να είναι ικανό να ρέει μέσα στο κενό και να σκληραίνει μετά από σύντομη περίοδο, συνήθως 4 με 5 ώρες. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει είναι:

- Πολύ καλές ιδιότητες που σχετίζονται με την ροή
- Καλή εργασιμότητα μέχρι την τοποθέτηση
- Καλές ιδιότητες που αφορούν στην άντληση
- Ταχεία πήξη

Η ενεμάτωση είναι διαδικασία υψηλής σημασίας και για το λόγο αυτό τα συστατικά του ενέματος προδιαγράφονται στα ευρωπαϊκά στάνταρ EN 197 (τσιμέντο), EN 1008 (νερό), EN 934 (πρόσθετα) και EN 413 (ροή και εργασιμότητα).



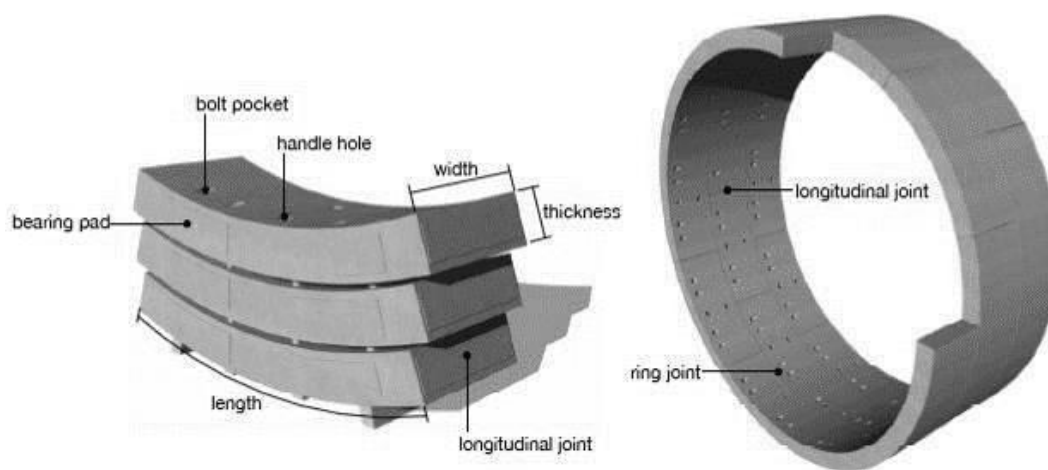
Εικόνα 2-28: Λεπτομέρεια τυπικής διάταξης ενεμάτωσης στην ουρά της ασπίδας. [2]

2.3.10.3 Προκατασκευασμένα στοιχεία τελικής επένδυσης

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν την τελική επένδυση της σήραγγας, η οποία είναι σχεδιασμένη να αναλαμβάνει με ασφάλεια τις στατικές φορτίσεις από το περιβάλλον έδαφος και υδροφόρο ορίζοντα καθώς και τις

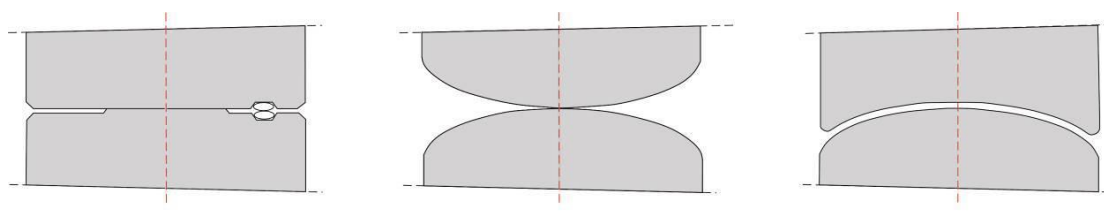
δυναμικές φορτίσεις, όπως είναι η κίνηση ενός συρμού εντός της σήραγγας, οι σεισμικές δράσεις, μια έκρηξη και πιο σημαντικά τις ορθές πιέσεις από τα έμβολα ώθησης του TBM.

Έξι (6) έως οκτώ (8) ίσων διαστάσεων συνήθως προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μαζί με ένα μικρότερο, την κλείδα, δημιουργούν ένα δακτύλιο, ο οποίος ενώνεται με τους αντίστοιχους γειτονικούς. Η σύνδεση των στοιχείων του δακτυλίου, αλλά και των δακτυλίων μεταξύ τους, γίνεται με αρμούς σύνδεσης η θέση των οποίων επιδιώκεται να είναι διαφορετική σε κάθε διαδοχικό δακτύλιο, ώστε συνολικά η επένδυση να παρουσιάζει συμπεριφορά μονολιθικής κατασκευής χωρίς πρακτικά αδύναμα σημεία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αρμών, και επιλέγονται οι κατάλληλοι για την εκάστοτε περίπτωση μηχανήματος, χάραξης ή/και έργου.



Εικόνα 2-29: Απεικόνιση στοιχείων τελικής επένδυσης.[2]

Στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο τύποι συνδέσμων. Οι επίπεδοι και αυτοί με καμπύλη επιφάνεια όπως φαίνεται σε επόμενο σχήμα. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι ο δεύτερος λόγω της γεωμετρίας του δεν δύναται να μεταφέρει ροπές από στοιχείο σε στοιχείο.^[2]



Εικόνα 2-30: Τύποι σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του δακτυλίου τελικής επένδυσης[2].

Οι υπολογισμοί για τον σχεδιασμό των στοιχείων προκατασκευασμένου σκυροδέματος δεν διαφέρουν σημαντικά από τους υπολογισμούς για την υποστήριξη μιας σήραγγας που διανοίγεται με την συμβατική μέθοδο. Φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι τα φορτία της περιβάλλουσας βραχώμαζας και οι υδραυλικές πιέσεις του νερού των πόρων, κινητά φορτία, τυχηματικά φορτία, φορτία θερμοκρασιακών μεταβολών και σεισμικά φορτία. Η κλείδα, το στοιχείο το οποίο τοποθετείται τελευταίο στην κορυφή κάθε δακτυλίου και έχει μικρότερο μέγεθος από τα άλλα, ουσιαστικά μεταφέρει τα φορτία που δέχεται η σήραγγα από τα υπερκείμενα στην υπόλοιπη επένδυση και εν τέλει στο περιβάλλον έδαφος. Ωστόσο, πέραν αυτών, στη περίπτωση της μηχανοποιημένης όρυξης με TBM, πρέπει να ελεγχθεί και η επάρκεια των στοιχείων στην φόρτιση από τα υδραυλικά έμβολα που προωθούν μπροστά το μηχάνημα.

Γενικά, η εφαρμογή της προκατασκευασμένης επένδυσης όπως περιγράφεται παραπάνω προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα^{[2][11]}:

- Εξασφάλιση υψηλής ποιότητας μέσω τυποποιημένης διαδικασίας παραγωγής
- Εφόσον είναι προκατασκευασμένη, η τελική επένδυση έχει ήδη την μέγιστη αντοχή της
- Ευκολότερος εντοπισμός βλαβών, αντικατάσταση και επισκευή
- Ευκολότερος υπολογισμός εσωτερικών φορτίων λόγω κυκλικής διατομής
- Χαμηλότερο κόστος λόγω βιομηχανοποιημένης παραγωγής

3. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΒΑΘΟΣ - ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

Η διάνοιξη σηράγγων, και μάλιστα ρηχών, σε μαλακά εδάφη οδηγεί αναπόφευκτα σε εδαφικές μετακινήσεις που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις σε υφιστάμενες επιφανειακές ή υπόγειες κατασκευές σε υψηλότερη στάθμη σε ένα πυκνό αστικό περιβάλλον. Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μελέτη και πρόγνωση της εξέλιξης των μετακινήσεων αυτών αποτελεί αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος και καθορίζει κατά πολύ μέσα σε άλλα και την οικονομική απόδοση του όλου έργου. Οι πιο συνηθισμένες πρακτικές για την πρόβλεψη του μεγέθους και της εξέλιξης των εδαφικών μετακινήσεων λόγω κατασκευής σηράγγων βασίζονται σε αναλυτικές, ημιεμπειρικές και αριθμητικές μεθόδους. Οι πρώτες δύο βασίζονται σε διάφορες υποθέσεις και περιορισμούς που αφορούν στην μέθοδο διάνοιξης, βάθος και γεωμετρία σήραγγας κλπ. Η τελευταία κατηγορία βασίζεται στην μοντελοποίηση της σήραγγας και του μέσου, εξαρτάται σημαντικά από τις παραδοχές που γίνονται κατά την προσομοίωση σε διάφορα στοιχεία της κατασκευής και του εξοπλισμού και της μεθόδου εξόρυξης, καθώς και το καταστατικό μοντέλο του εδάφους, τη γεωμετρία κ.α.

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται σε βασικές έννοιες σχετικά με τις καθιζήσεις που σχετίζονται με τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων και ορισμένες από της πιο αξιοσημείωτες και θεμελιώδεις μελέτες πάνω στο αντικείμενο αυτό. Επίσης θα γίνει αναφορά σε διάφορες μεθόδους και μοντέλα υπολογισμού των καθιζήσεων. Έμφαση δίνεται στη συμπεριφορά και την εξέλιξη των φαινομένου, στον μηχανισμό που το προκαλεί και τον ρόλο του υπόγειου νερού, την ανάπτυξη υπερπιέσεων σε μη διαπερατά εδάφη κλπ.

3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ – ΑΙΤΙΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (GROUND LOSS) ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΓΚΟΥ (VOLUME LOSS)

3.1.1 Μηχανισμοί Αστοχίας – Αίτια Μετακινήσεων

Η διάνοιξη χώρου, οποιασδήποτε γεωμετρίας και μεγέθους, μέσα στην εδαφική μάζα προκαλεί παραμορφώσεις στο περιβάλλον υλικό και μετακινήσεις, οι οποίες συνδέονται με απώλειες εδαφικού όγκου. Η κινητοποίηση της εδαφικής μάζας κατά τη διαδικασία της εκσκαφής είναι εύλογα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, αφού προκαλεί επιφανειακές μετακινήσεις. Το φαινόμενο μάλιστα είναι εντονότερο, όσο η εκσκαφή λαμβάνει χώρα πιο κοντά στην επιφάνεια. Καθώς ο έλεγχος και η πρόβλεψη των επιφανειακών μετακινήσεων είναι καθοριστικός για την ασφάλεια των κατασκευών στο χώρο επιρροής μιας σήραγγας, μια σειρά ερευνητών όπως οι Litsas et al. 2014; Gatti & Cassani 2007; ΙΤΑ/AITES 2007; Loganathan et al. 2000; Sagaseta 1987 όρισαν τρεις ανεξάρτητες περιοχές εμφάνισης του φαινομένου, για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας στη μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων. Κάθε μια περιοχή μελετάται ξεχωριστά ως προς τη συμπεριφορά και τον ρόλο της στις απώλειες εδαφικού όγκου. Συγκεκριμένα, οι περιοχές αυτές δημιουργούνται γύρω από συγκεκριμένα τμήματα ενός τυπικού μηχανήματος διάνοιξης σηράγγων (TBM) κλειστού τύπου, όπως φαίνεται σε παρακάτω εικόνα. Οι περιοχές αυτές είναι το μέτωπο (έμπροσθεν της κοπτικής κεφαλής), η περιοχή γύρω από την ασπίδα και τέλος η περιοχή της ουράς.

Η απώλεια εδαφικού υλικού στο μέτωπο συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο «Face Loss». Σχετίζεται με την εξώθηση του μετώπου καθώς και τις μετακινήσεις της εδαφικής μάζας που λαμβάνουν χώρα μπροστά από το μέτωπο, ακόμη και κατά τη υποστήριξή του με ανάλογη πίεση που ασκεί το μηχάνημα (EPB – Slurry). Οι Sitarenios et al. (2015) υπέδειξε τη σημασία της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο, καθώς οι παραμορφώσεις μπροστά από το μέτωπο εξαρτώνται κυρίως από αυτή την παράμετρο. Συγκεκριμένα, αν το έδαφος στο μέτωπο παραμείνει στον ελαστικό κλάδο, τότε αναμένονται σχετικά μικρές μετακινήσεις σε μορφή εξώθησης ή/και προσύγκλισης. Αντίθετα, αν η αντοχή του εδάφους ξεπεραστεί και αυτό πλαστικοποιηθεί, θα ακολουθήσουν σημαντικές παραμορφώσεις καθώς και χαλάρωση του εδάφους στο μέτωπο και μπροστά από αυτό, οδηγώντας σε σημαντικές συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας και συνεπώς σε υψηλές τιμές απώλειας όγκου.

Για την περιοχή γύρω από την ασπίδα του TBM, οι εδαφικές μετακινήσεις που συντελούνται σε αυτό το τμήμα αναφέρονται με τον όρο «Shield Loss» και σχετίζονται με τη σύγκλιση της διατομής εξαιτίας της υπερεκσκαφής που εκτελεί η κεφαλή κοπής και της κωνικότητας της ασπίδας. Οι Kasper & Meschke (2006) και Litsas et al. (2014) μελέτησαν την επιρροή του κενού που υπάρχει μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους (όριο εκσκαφής) στις εδαφικές μετακινήσεις και κατέληξαν ότι μεγαλύτερα κενά συνεπάγονται μεγαλύτερες μετακινήσεις και επιφανειακές καθιζήσεις.

Με τον όρο «Tail Loss» γίνεται αναφορά στις παραμορφώσεις που συντελούνται στον ουρά του TBM, όπου έχει τοποθετηθεί η τελική επένδυση. Το φαινόμενο εδώ, σχετίζεται με πολλούς παράγοντες όπως είναι η παραμόρφωση των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και του ενέματος, καθώς και τα φαινόμενα στερεοποίησης και ερπυσμού. Η παραμόρφωση της επένδυσης και του ενέματος λογίζονται ως βραχυχρόνιες συνθήκες, ενώ η στερεοποίηση και ο ερπυσμός ως μακροχρόνιες. Γενικότερα, όμως, όλες αυτές οι δράσεις εισάγονται στην ίδια κατηγορία καθώς δεν υπάρχει σαφής χρονικός διαχωρισμός μεταξύ των δύο καταστάσεων, ενώ παράλληλα συσχετίζονται σε σημαντικό βαθμό μεταξύ τους. Χαρακτηριστικά, οι Bernat et al. 1999; Kasper & Meschke 2004; Mair & Taylor 1997; Yi et al. 1993 έδειξαν ότι η εσωτερική πίεση του ενέματος όταν εισπίεζεται περιμετρικά της επένδυσης (βραχυχρόνιο), προκαλεί υπερπίεσεις πόρων επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του εδάφους (μακροχρόνιο).

Οι αναλυτικές και οι εμπειρικές μέθοδοι συχνά αναφέρονται στους όρους απώλεια εδάφους G_L (ground loss) και απώλεια όγκου V_L (volume loss). 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 (Loganathan & Poulos, 1998; Sagaseta, 1987).

3.1.2 Ορισμοί Απώλειας Εδάφους (Ground Loss) και Απώλειας Όγκου (Volume Loss)

Για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου των επιφανειακών μετακινήσεων, αλλά και τη σύνδεση του μεγέθους με τη γεωμετρία της σήραγγας, έχουν εισαχθεί διάφοροι όροι κατά τη διεθνή έρευνα. Οι δύο ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι είναι οι όροι «Απώλεια

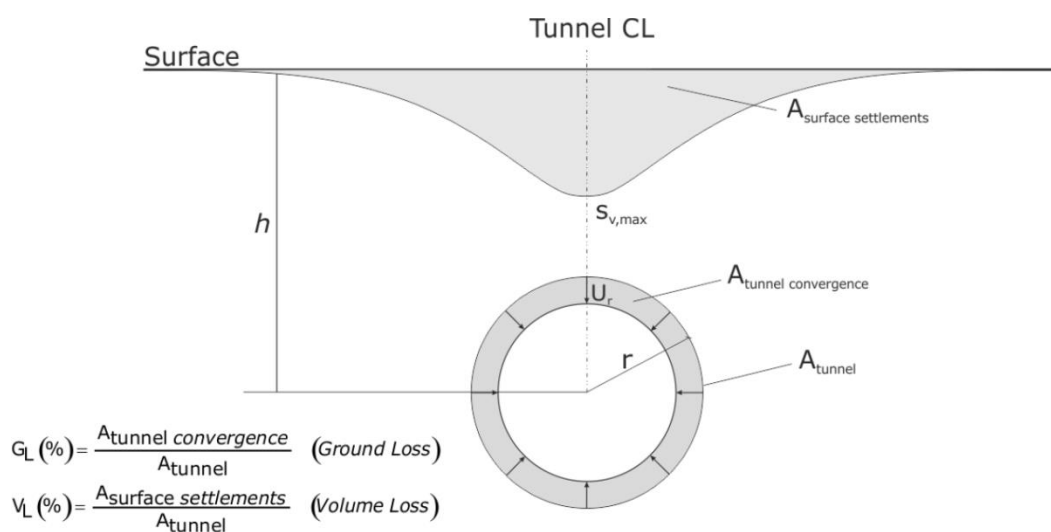
Όγκου» (Volume Loss - V_L) και «Απώλεια Εδάφους / Εδαφικού Όγκου» (Ground Loss - G_L).

Με τον όρο «Απώλεια Όγκου» εκφράζεται το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας της καμπύλης καθιζήσεων (settlement trough) επί της διατομής της σήραγγας (Mair et al. 1993). Με τον όρο «Απώλεια Εδάφους» ή «Απώλεια Εδαφικού Όγκου» ποσοτικοποιείται το ποσοστό υπερεκσκαφής ως ο λόγος του πραγματικού εκσκαπόμενου εδαφικού υλικού προς το θεωρητικά αναμενόμενο όγκο εκσκαφής. Ο παραπάνω όρος απαντάται συχνά στις αναλυτικές και ημιεμπειρικές μεθόδους. Εισήχθη δε από τον Segaseta (1987).

$$V_L = \frac{A_{trough\ surface}}{A_{tunnel}} [\%]$$

$$G_L = \frac{V_{excavated}}{V_{calculated}} [\%]$$

Αξίζει να αναφερθεί πως σε αστράγγιστες συνθήκες οι δύο πάνω όροι ταυτίζονται, αφού το έδαφος είναι ασυμπίεστο και παραμορφώνει χωρίς μεταβολή του όγκου του. Οι λόγοι V_L και G_L όμως αποκλίνουν όταν εμφανίζονται φαινόμενα εξαρτώμενα από τον χρόνο, όπως ο ερπυσμός.



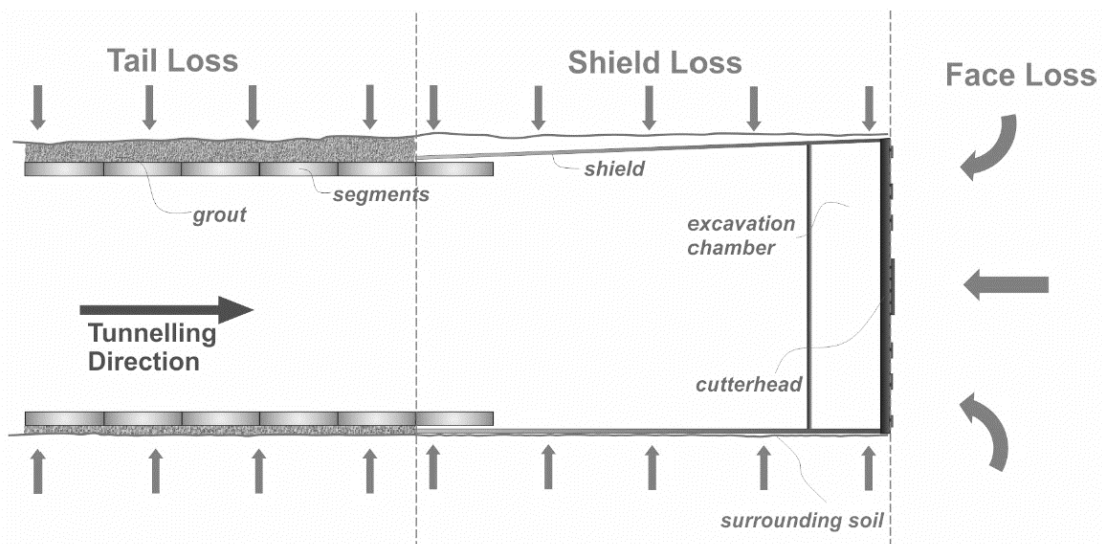
Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση ορισμών απώλειας όγκου και εδάφους κατά Segaseta

3.1.2.1 Πρακτική μέτρησης υπερεκσκαφών και εδαφικών απωλειών στο έργο (on-site)

Στο σημείο αυτό κρίνεται άξια αναφοράς, χάριν πληρότητας, η αναφορά στην μέθοδο μέτρησης των υπερεκσκαφών κατά την πορεία του έργου.

Στις σήραγγες όπου η εκσκαφή γίνεται με TBM, η μάζα του εξορυγμένου υλικού ζυγίζεται άμεσα σε διατάξεις επί του ταινιόδρομου μεταφοράς, ώστε να ανιχνεύεται το ενδεχόμενο υπερεκσκαφής και μετωπικών εξωθήσεων το κατά δυνατότερο άμεσα. Βάσει των μετρήσεων υπολογίζεται η υπερεκσκαφή. Η διαδικασία ακολουθεί ως εξής:

- i. Ζύγιση του εξορυγμένου υλικού. Κατόπιν αναλύσεως των δεδομένων, ορίζεται ένα «φυσιολογικό» εύρος διακύμανσης των τιμών, το οποίο εμπεριέχει διακυμάνσεις και σφάλματα ενδείξεων λόγω δονήσεων των



Εικόνα 3-2: Αίτια εδαφικών απωλειών. [2]

ζυγών, φυσικές μεταβολές στην πυκνότητα του υλικού και την παροχή από τον ατέρμονα κοχλία κα. Μεταβολές πέραν τη φυσιολογικής διακύμανσης ερευνώνται περαιτέρω.

- ii. Ορίζεται η «μέση εξορυγμένη μάζα» ΔM_m ως η μέση ζυγισμένη μάζα εξορυγμένου υλικού για ένα μικρό μήκος προχώρησης ΔL .
- iii. Ορίζεται ως $\Delta M_o = A_o * \Delta L * \rho_h$ αντιστοιχιζόμενη στην εκσκαφή μάζα, όπου A_o είναι το εμβαδό της κοπτικής κεφαλής του TBM, και ρ_h πυκνότητα του εδάφους στην περιοχή εκσκαφής.
- iv. Ορίζεται ως «Λόγος Υπερεκσκαφής» ο λόγος:

$$OER_m = \frac{\Delta M_m}{\Delta M_o} > 1$$

Επιπρόσθετα, ορίζεται ο Λόγος Αστάθειας Μετώπου (Face Instability Ratio) ως:

$$FIR = \frac{OER_m}{OER_c}$$

Όπου $OER_c = \left[1 + \frac{u_{R(0)}}{R}\right]^2$ ο υπολογισμένος λόγος υπερεκσκαφής, R η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής και $u_{R(0)}$ η ακτινική σύγκλιση των τοιχωμάτων στο μέτωπο.

Για $FIR > 1$ θεωρείται κατάσταση έντονων υπερεκσκαφών και πιθανότητα αστάθειας μετώπου.

3.1.3 Εγκάρσια Συμπεριφορά των Επιφανειακών Μετακινήσεων

Το μέγεθος και η κατανομή των μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους εγκάρσια του άξονα της σήραγγας απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Στο μέσον της σήραγγας, επί του άξονά της δηλαδή, εμφανίζεται η μέγιστη τιμή καθίζησης. Το μέγεθος των καθιζήσεων φθίνει προς τα άκρα. Την τάση αυτή των καθιζήσεων μπορούμε να την περιγράψουμε κατά τον (Peck 1969) με την κανονική κατανομή του Gauss.

Από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους για τη μελέτη των καθιζήσεων και την εκτίμηση των επιπτώσεών τους στις υφιστάμενες επιφανειακές κατασκευές είναι το σημείο καμπής i_x (inflection point). Ως σημείο μέγιστης κλίσης, διαχωρίζει τη ζώνη συνθηκών κάμψης (sagging) από τη ζώνη συνθηκών κύρτωσης (hogging). Η θέση μιας κατασκευής σε σχέση με το σημείο καμπής μπορεί να καθορίσει το πόσο επικίνδυνη ή όχι είναι η καθίζηση για την ασφάλεια της. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική κλίση που έχουν οι δυο περιοχές εκατέρωθεν του σημείου. Ακόμη δυσμενέστερη είναι η περίπτωση συνηθισμένων μονολιθικών κατασκευών από σκυρόδεμα, καθώς οι ανοχές τους είναι πολύ μικρές σε διαφορετικές καθιζήσεις της θεμελίωσής τους, λόγω διαφορετικών τιμών καμπυλότητας και κλίσης περί του σημείου καμπής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο καμπής είναι ανεξάρτητο του τρόπου διάνοιξης της σήραγγας, καθώς οι κατανομές από ήδη κατασκευασμένες σήραγγες πρακτικώς ταυτίζονται τόσο για συμβατικά μέσα διάνοιξης, όσο και για μηχανοποιημένη όρυξη, σύμφωνα με μελέτες των (Kimura & Mair 1981; Mair et al. 1993; O'Reilly & New 1983).

Ο όγκος ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων ορίζει την απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss) ανά μονάδα μήκους σήραγγας V_s στην επιφάνεια του εδάφους, και υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$V_s = \int S_v dx = \int S_{v,max} e^{\left(\frac{-x^2}{2i_x^2}\right)} dx = \sqrt{2\pi i_x} * S_{v,max}$$

Το μέγεθος «σχετική απώλεια εδαφικού όγκου» V_L (volume loss) εκφράζει την προαναφερθείσα απώλεια εδαφικού όγκου V_s ως ποσοστό του όγκου της εκσκαφθείσας διατομής της σήραγγας V σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_L = \frac{V_s}{V} = \frac{\sqrt{2\pi i_x} * S_{v,max}}{\pi * \frac{D^2}{4}}$$

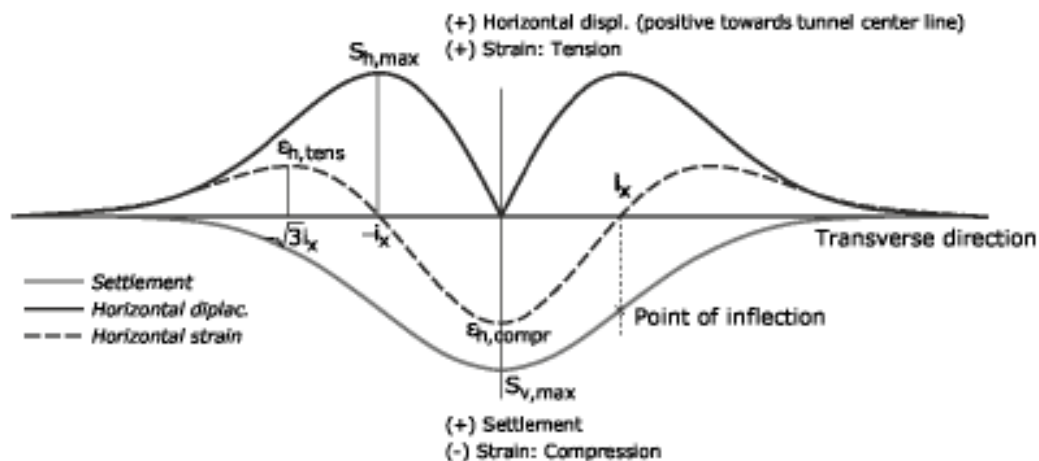
Σε ότι αφορά την οριζόντια συμπεριφορά των επιφανειακών μετακινήσεων οι (Mair & Taylor 1997) αναφέρουν ότι σημαντικές ζημιές μπορούν να προκύψουν στις κατασκευές λόγω οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Οι οριζόντιες μετακινήσεις επιβάλλονται στις κατασκευές λόγω της διαφορικής καθίζησης της θεμελίωσής τους. Από το διάγραμμα του (Franzius 2003) παρατηρούμε ότι η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζεται στα σημεία καμπής, καταδεικνύοντας τη σημασία του σημείου καμπής και της θέσης του, για την επίδραση του στις επιφανειακές κατασκευές. Οι (Mair et al. 1996) προτείνουν την παρακάτω προσεγγιστική σχέση, η οποία συνδέει την καθίζηση – κάθετη μετακίνηση με τη οριζόντια, εισάγοντας την οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας x , και το βάθος της σήραγγας z_0 .

$$S_h = \frac{x}{z_0} * S_v$$

Διαφορίζοντας την παραπάνω, προκύπτει η οριζόντια εδαφική παραμόρφωση ε_h :

$$\varepsilon_h = \frac{S_v}{z_0} \left(\frac{x^2}{i_x^2} - 1 \right)$$

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι εγκάρσιες κατανομές των οριζόντιων μετακινήσεων S_h και των οριζόντιων εδαφικών παραμορφώσεων ϵ_h σχετικά με την κατανομή των καθιζήσεων.



Εικόνα 3-3: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης κυκλικής σήραγγας (Mair et al. 1996, Franzius 2003)

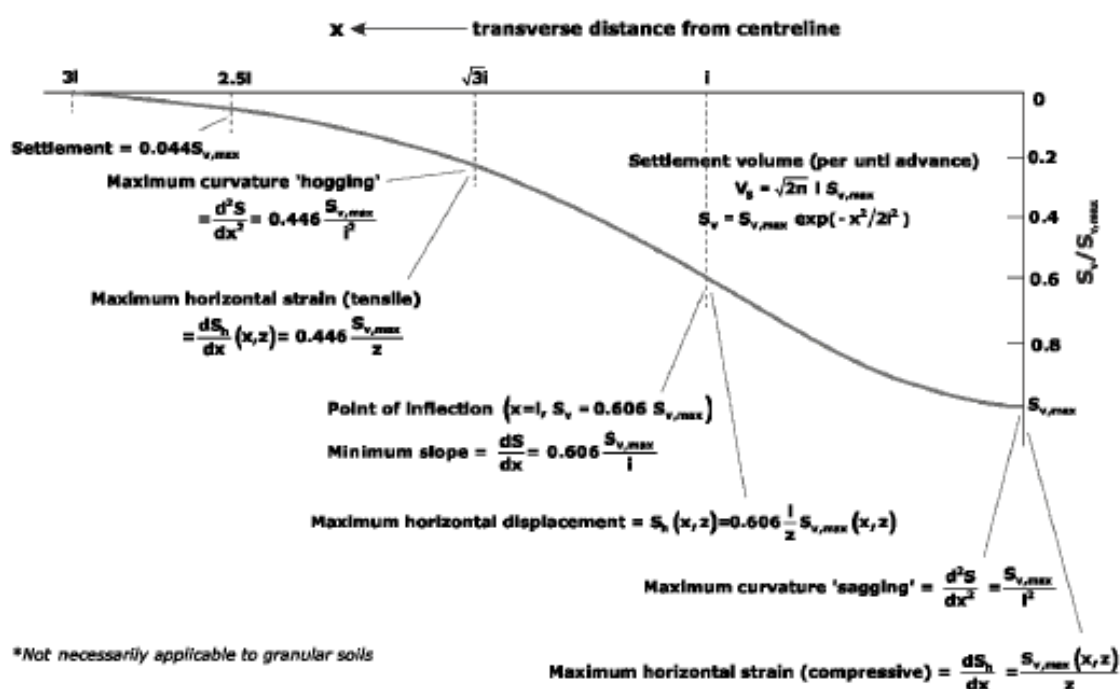
3.1.4 Διαμήκης Συμπεριφορά των Επιφανειακών Μετακινήσεων

Οι επιφανειακές καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα διάνοιξης μιας σήραγγας, από παρατηρήσεις των Attewell and Woodman (1982) σε κατασκευές σε αργιλικά μη διαπερατά εδάφη, διαπιστώθηκε πως ακολουθούν τη μορφή μιας αντεστραμμένης συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (reverse cumulative probability curve). Επιπρόσθετα, οι ανωτέρω ερευνητές εξήγαγαν το συμπέρασμα πως η άμεση καθίζηση πάνω από το μέτωπο λαμβάνει την τιμή $0.3 \sim 0.5 S_{v,max}$. Το τελευταίο όμως είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα μέτρα και την ποιότητα υποστήριξης του μετώπου. Συνήθως, με την εφαρμογή σύγχρονων TBM και μέσων παρακολούθησης, επιτυγχάνονται στη θέση του μετώπου τιμές καθιζήσεων σημαντικά μικρότερες.

Το προφίλ των κατά μήκος επιφανειακών μετακινήσεων μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας συνάρτησης πιθανότητας $\Phi(y)$, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση. Όπου i_y το σημείο καμπής.

$$S_v(y)_{x=0} = S_{v,max} * \Phi\left(\frac{y}{i}\right)$$

$$\Phi(y) = \frac{1}{i_y \sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^y \frac{y^2}{e^{2i_y^2}} dy$$



Εικόνα 3-4: Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων ως καμπύλη συνάρτηση σφάλματος (Attewell and Woodman 1982, O'Reilly and New, 1988)

3.1.5 Εκδήλωση μετακινήσεων μετά το πέρας της κατασκευής

Σε μη υδατοπερατές εδαφικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα τα αργιλικά εδάφη, είναι δυνατό να αναπτυχθούν σημαντικές κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις ακόμα και μετά το πέρας της κατασκευής της σήραγγας (post-construction settlements). Αυτό αποδίδεται κυρίως στη μεταβολή του καθεστώτος των πιέσεων του νερού των πόρων, με συνέπεια την αύξηση των ενεργών τάσεων (Mair and Taylor, 1997). Ορισμένοι ερευνητές τις αναφέρουν ως καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης. Οι μετακινήσεις αυτές εκδηλώνονται μακρόχρονα και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να λαμβάνουν τιμές έως και 90% της εκδηλωθείσας ολικής καθιζήσης σε μαλακές αργίλους (Mair, 1998, Burland, 2001), προκαλώντας επίσης επιπλέον διεύρυνση της καμπύλης των εγκάρσιων και

διαμήκων επιφανειακών καθιζήσεων. Σημειώνεται ότι η οριζόντια συνιστώσα αυτών των μετακινήσεων θεωρείται πρακτικώς αμελητέα.

Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στο φαινόμενο της εκδήλωσης των μετακατασκευαστικών καθιζήσεων είναι οι ακόλουθοι, όπως κατηγοριοποιήθηκαν από τους Mair and Taylor(1997):

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

Σημειώνεται πως κατά τη μηχανοποιημένη όρυξη με EPBMs και Slurry TBMs, εξαιτίας της υψηλής πίεσης μετώπου και εισπίεσης ενέματος το φαινόμενο ενισχύεται με αποτέλεσμα την πρόκληση υψηλών πιέσεων πόρων στο περιβάλλον έδαφος. Οι Trolley et al. (1991) παρατηρώντας τις καθιζήσεις σε περίοδο 11 χρόνων για μία τριών (3) μέτρων διαμέτρου σήραγγα, που κατασκευάστηκε με πεπιεσμένο αέρα σε κανονικά στερεοποιημένη ιλυώδη άργιλο στο Grimsby του Ηνωμένου Βασιλείου, ανέφεραν ότι περαιτέρω καθιζήσεις εκδηλώθηκαν μετά το πέρας της κατασκευής με την τελική ισορροπία να επέρχεται μετά από περίπου 10 χρόνια.

Οι (Yi et al. 1993) μελετώντας τις πιέσεις πόρων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάνοιξη σήραγγας διαμέτρου 4.2m με EPB σε μαλακή άργιλο στη Σαγκάη, κατέληξαν ότι η θέση της ασπίδας προκαλούσε αυξομειώσεις στις υδατικές πιέσεις. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονταν υπερπίεσεις λόγω της πίεσης στο μέτωπο και της εισπίεσης ενέματος στο κενό μεταξύ επένδυσης και περιβάλλοντος εδάφους στην ουρά της ασπίδας, ενώ η κωνικότητα της ασπίδας επέτρεπε μεγαλύτερες καθιζήσεις από αυτές που απαιτούνταν για την εκτόνωση των υπερπιέσεων δημιουργώντας την ανάγκη για την απορρόφηση νερού (suction effect), προκαλώντας υποπίεσεις. Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνουν δύο ακόμα δημοσιεύσεις των (Bernat et al. 1999; Kasper&Meschke 2004). Συγκεκριμένα, οι (Bernat et al. 1999) παρουσίασαν στοιχεία από επί τόπου

μετρήσεις των υπερπιέσεων πόρων κατά την κατασκευή δύο σηράγγων στη Lyon με τη χρήση μηχανημάτων Slurry, ενώ οι (Kasper & Meschke 2004) διεξήγαγαν τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Και οι δύο δημοσιεύσεις καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα.

Η δημοσίευση των (Finn & Clough 1985), οι οποίοι διεξήγαγαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία μελετώντας αποκλειστικά τις εδαφικές μετακινήσεις λόγω των υπερπιέσεων πόρων και την εξέλιξη τους στο χρόνο, δίνει αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων όπου φαίνεται πως η ανύψωση του εδάφους μέσω της πίεσης του ενέματος μειώνει τις καθιζήσεις στο κενό που δημιουργείται μεταξύ του εδάφους και της ουράς της ασπίδας, αυξάνοντας όμως τις επιφανειακές καθιζήσεις που οφείλονταν σε φαινόμενα στερεοποίησης.

3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

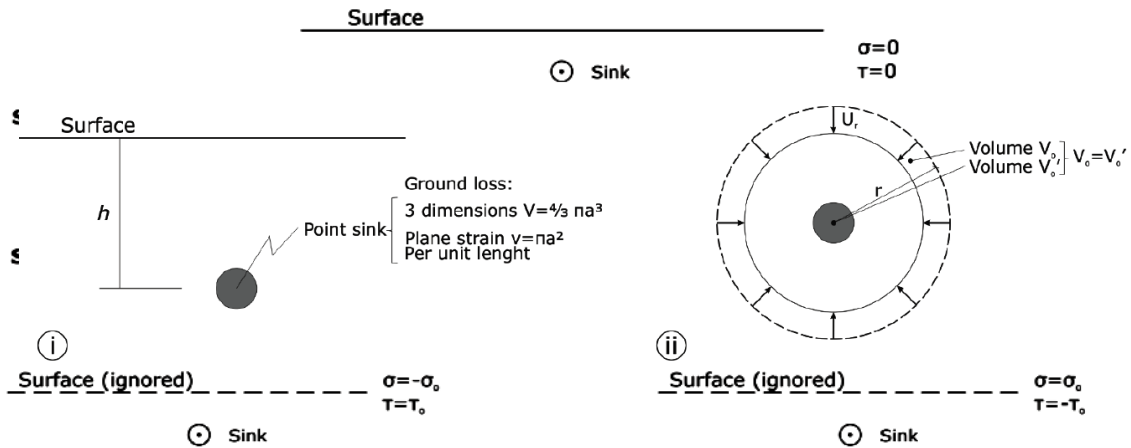
3.2.1 Sagaseta (1987)

Ο Sagaseta ανέλυσε το πεδίο των μετατοπίσεων σε ένα ισότροπο και ομοιογενές ασυμπίεστο έδαφος όταν μέρος του υλικού αφαιρείται από αυτό σε μικρό βάθος και το περιβάλλον έδαφος γεμίζει πλήρως το κενό που δημιουργεί η εκσκαφή. Το πρόβλημα ομοιάζει με το αντίστοιχο υδραυλικό. Ειδικότερα, η μέθοδος προσπαθεί να προβλέψει τις εδαφικές μετακινήσεις με ελαστικές επιλύσεις. Η επίλυση ακολουθεί τα εξής διαδοχικά βήματα:

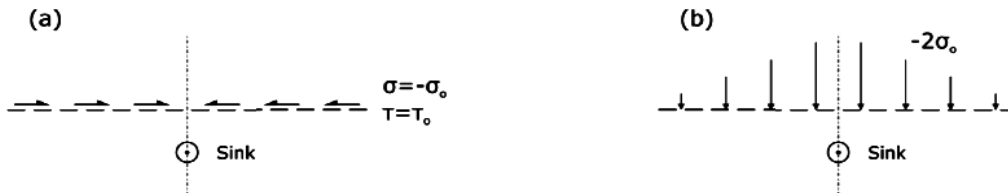
- i. Η επίδραση της επιφάνειας αμελείται και οι παραμορφώσεις υπολογίζονται σαν το μέσο να ήταν άπειρων διαστάσεων.
- ii. Οι τάσεις στην επιφάνεια που προκύπτουν από αυτές τις παραμορφώσεις, παραβιάζουν την συνθήκη μηδενικών τάσεων. Αυτές οι τάσεις μπορούν να ακυρωθούν μερικώς με την θεώρηση αφαίρεσης 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.
- iii. Οι απομένουσες διατμητικές ή ορθές τάσεις στην επιφάνεια έπειτα υπολογίζονται και αφαιρούνται

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 προσδιοριστεί από την ακτίνα μίας ισοδύναμης σφαίρας ή κυλίνδρου αντίστοιχα. 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.

Actual problem



Εικόνα 3-5: (i) Ορισμός του προβλήματος και (ii) άπειρο μέσο (Sagaseta, 1987)



Εικόνα 3-6: Βήματα της ανάλυσης Sagaseta (Sagaseta, 1987)

$$S_{x_0} = -\frac{v}{2\pi} \frac{x}{x^2 + h^2} \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}} \right)$$

$$S_{y_0} = \frac{v}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}$$

$$S_{x_0} = \frac{v}{2\pi} \frac{h}{x^2 + h^2} \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}} \right)$$

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

Οι Verruijt & Booker παρουσίασαν μία γενίκευση της προσέγγισης του Sagaseta (1987), δίνοντας λύση στην περίπτωση απώλειας εδάφους με χρήση της τιμής του λόγου Poisson ν . Η λύση των Verruijt & Booker περιλαμβάνει την επίδραση παραμόρφωσης του ανοίγματος (οβάλ σχήμα).

$$S_x = -\varepsilon R^2 \left(\frac{x}{r_1^2} + \frac{x}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left[\frac{z_1(x^2 - kz_1^2)}{r_1^4} + \frac{x(x^2 - kz_2^2)}{r_2^4} \right] - \frac{2\varepsilon R^2 x}{m} \left[\frac{1}{r_2^2} + \frac{2mzz_2}{r_2^4} \right]$$

$$- - \frac{4\delta R^2 xh}{m+1} \left[\frac{z_2}{r_2^4} + \frac{mz(x^2 - 3z_2^2)}{r_2^6} \right]$$

$$S_z = -\varepsilon R^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left[\frac{z_1(kx^2 - z_2^2)}{r_1^4} + \frac{z_2(kx^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right] + \frac{2\varepsilon R^2}{m} \left[\frac{(m+1)z_2}{r_2^2} + \frac{mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right]$$

$$- 2\delta R^2 h \left[\frac{x^2 - z_2^2}{r_2^4} + \frac{m}{m+1} \frac{2zz_2(3x^2 - z_2^2)}{r_2^6} \right]$$

Όπου ε η ομοιόμορφη ακτινική απώλεια εδάφους

δη μακροχρόνια εδαφική παραμόρφωση λόγω του οβάλ σχήματος που παίρνει η υποστήριξη

$$z_1 = z - H$$

$$z_2 = z + H$$

$$r_1^2 = x^2 + z_1^2$$

$$r_2^2 = x^2 + z_2^2$$

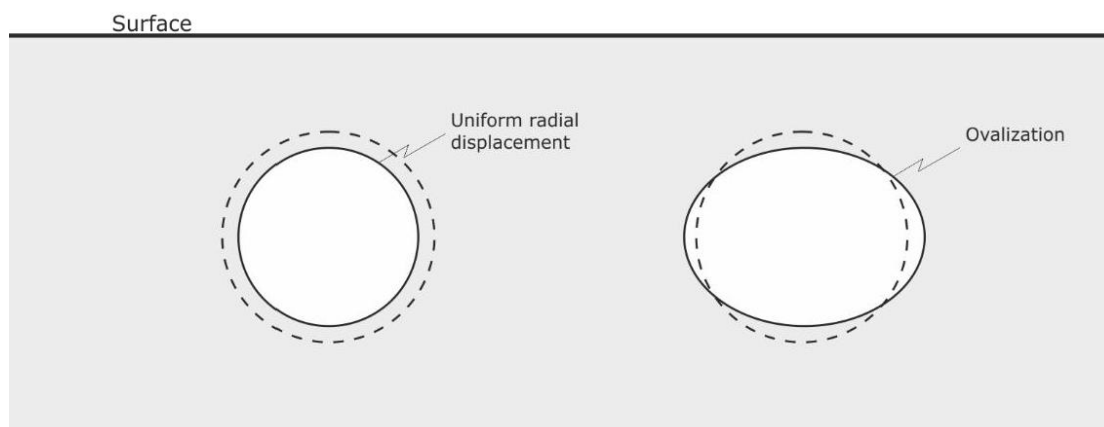
Ρ και h: η ακτίνα και το βάθος της σήραγγας

$$m = 1/(1-2\nu)$$

$$k = \nu/(1-\nu)$$

ν : λόγος Poisson του εδάφους

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



Εικόνα 3-7: Απώλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση ανοίγματος σήραγγας (Verruijt&Booker, 1996)

Οι Loganathan&Poulos, επαναπροσδιορίζοντας τον κλασικό ορισμό της απώλειας εδάφους με μία «ισοδύναμη παράμετρο απώλειας εδάφους ε » σε σχέση με το κενό « g », παρήγαγαν μια αναλυτική σχέση για την πρόβλεψη των εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας. Η παράμετρος ε , που πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Lee et al. (1992), χρησιμοποιήθηκε καθώς η απώλεια εδάφους λαμβάνονταν από εμπειρικές παρατηρήσεις και μεθόδους που δεν έπαιρναν υπόψιν τους πάντα την μέθοδο διάνοιξης.

Σύμφωνα με τους Loganathan&Poulos (1998) η απώλεια εδάφους συμβαίνει σε δύο στάδια: (α) απώλεια καθώς περνάει το TBM και (β) χρονικά εξαρτώμενη απώλεια λόγω στερεοποίησης ή ερπυσμού του εδάφους. Η εκτίμηση της παραμέτρου g δεν παίρνει υπόψιν της τα χρονικά εξαρτώμενα φαινόμενα, συνεπώς η ισοδύναμη παράμετρος απώλειας εδάφους είναι εφαρμόσιμη μόνο για αστράγγιστες συνθήκες.

$$g = G_p + U_{3D}^* + \omega$$

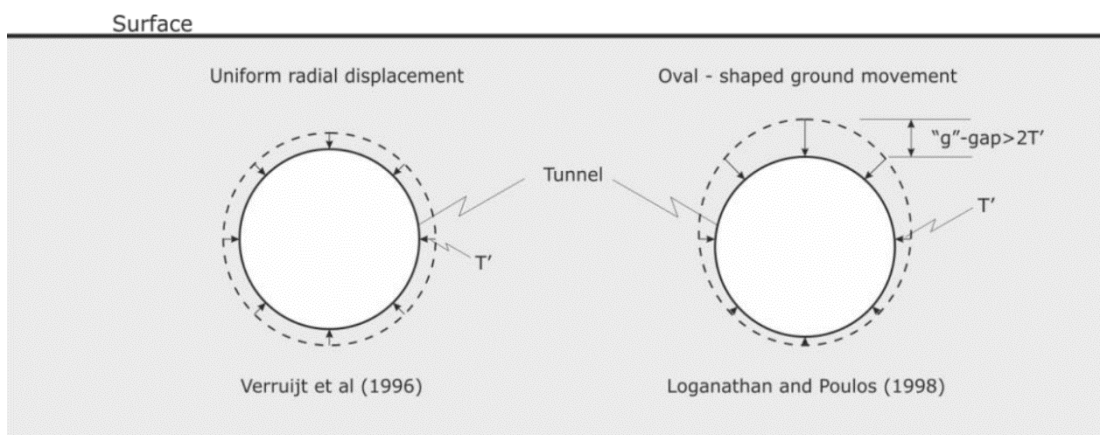
$$\varepsilon_0 = \frac{4gR + g^2}{4R} 100\%$$

Όπου G_p το φυσικό κενό μεταξύ μηχανήματος και τοιχώματος

U_{3D}^* τριδιάστατες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο

ω συντελεστής εργασιμότητας

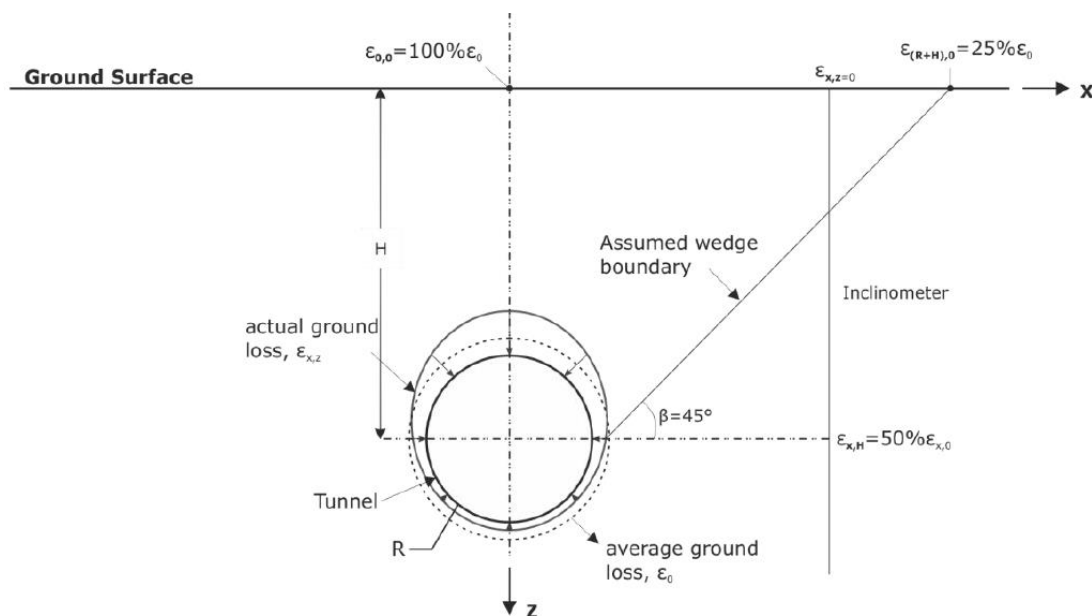
ε_0 ισοδύναμη απώλεια εδάφους



Εικόνα 3-8: Κυκλικό και οβάλ σχήμα εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από την διατομή της σήραγγας.

Εφαρμόζοντας της οριακές συνθήκες που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα οι Loganathan&Poulos(1998) δίνουν την συνιστώσα της ισοδύναμης απώλειας εδάφους για μη-ομοιόμορφη κατακόρυφη μετακίνηση.

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



Εικόνα 3-9: Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan&Poulos, 1998)

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

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

Λόγω του ότι το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων i αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον καθορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων με εμπειρικές μεθόδους, η επόμενη σχέση υπολογίζει την κανονικοποιημένο i/R σε σχέση με την ανηγμένη παράμετρο H/D για την συγκεκριμένη αναλυτική λύση.

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

Σημειώνεται πως οι Loganathan & Poulos (1998) ισχυρίζονται ότι η μέθοδος των Verrijt & Booker (1996) υποεκτιμάει τις μέγιστες καθιζήσεις και δίνει πολύ πιο ευρύ προφίλ καθιζήσεων όταν συγκρίνεται με εμπειρικές μεθόδους και δεδομένα πεδίου.

3.3 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

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:

- Συνθήκες Greenfield. Προϋπάρχουσες κατασκευές στο πεδίο επιρροής δύνανται να επηρεάσουν την αναμενόμενη μετατόπιση.
- Βραχεία χρονική περίοδος. Οι εμπειρικές μέθοδοι αφορούν σε μετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα. Καθιζήσεις όμως συνεχίζουν και εκδηλώνονται και μετά το πέρας της κατασκευής, ειδικά σε μαλακά και παραμορφώσιμα αργιλικά εδάφη
- Μονές σήραγγες. Οι εμπειρικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για μονές σήραγγες, κυρίως. Οι πραγματικές μετακινήσεις δύνανται να αποκλίνουν στην περίπτωση κοντινής υπόγειας κατασκευής.

Λόγω των παραπάνω, οι εμπειρικές μέθοδοι πλέον χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια πρώτη χονδροειδή εικόνα του προβλήματος, το οποίο αντιμετωπίζεται πλέον με αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες αναφέρονται σε παρακάτω υποκεφάλαιο.

3.3.1 Peck & Schmidt (1969, 1974)

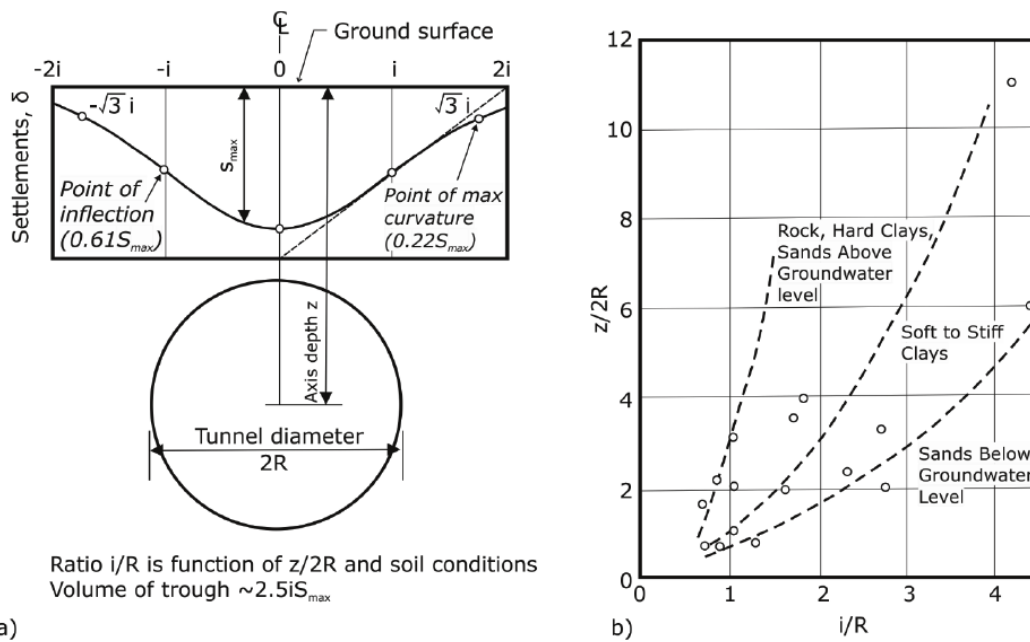
Οι Peck και Schmidt, βασιζόμενοι σε στατιστική επεξεργασία πλήθους in-situ παρατηρήσεων, υπέθεσαν ότι το μόνιμο προφίλ καθιζήσεων, που προκαλείται από την διάνοιξη σήραγγας σε σχετικά μαλακό έδαφος, περιγράφεται επαρκώς από μία εξίσωση κανονικής κατανομής (καμπύλη Gauss). Αυτή η παραπάνω προσέγγιση δεν έχει καμία θεωρητική αιτιολόγηση, μπορεί όμως να παρέχει τουλάχιστον μια χονδροειδή άποψη του αναμενόμενου προφίλ καθιζήσεων πάνω από μονή σήραγγα. Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φαίνονται στο επόμενο σχήμα, όπου η ακτίνα συμβολίζεται με R , η μέγιστη καθίζηση S_{max} και το σημείο καμπής της καμπύλης με i . Οι βασικές σχέσεις γράφονται ως

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

$$V_L(\%) = \frac{\sqrt{2\pi}iS_{v,max}}{\pi R^2}$$

$$\frac{2i}{D} = \left(\frac{z}{D}\right)^{0.8-1.0}$$

Αρχικά γίνεται λήψη από άλλη πηγή ή υπόθεση της μέγιστης καθίζησης S_{max} και του σημείου καμπής i . Η διαδικασία που ακολουθείται για χρήση της μεθόδου αφορά αρχικά την εκτίμηση της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου (volume loss) με βάση την υπάρχουσα εμπειρία και εμπειρικές σχέσεις και έπειτα την εύρεση του σημείου καμπής από το διάγραμμα του Peck (Εικόνα 2.8 (ii)), ώστε έχοντας ορίσει αυτά τα μεγέθη να υπολογιστεί η μέγιστη καθίζηση και η καθίζηση στην επιφάνεια σε κάθε θέση x από τον άξονα της σήραγγας



Διάγραμμα 3-1: (α) Χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα (Peck, 1969; Schmidt, 1969) και (β) σχέση μεταξύ i/R και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2R$ για διάφορα εδάφη (Peck, 1969)

3.3.2 Cording & Hansmire (1972, 1975)

Οι Hansmire & Cording επικεντρώθηκαν στην εκτίμηση της απώλειας εδάφους που προκαλείται από την διάνοιξη σήραγγας βασισμένοι δεδομένα από ήδη

κατασκευασμένες σήραγγες. Διατύπωσαν ότι οι εδαφικές απώλειες σε οποιαδήποτε δεδομένη διατομή κατά την κατασκευή της σήραγγας επιμερίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: απώλειες λόγω εξώθησης μετώπου $V_{L,face}$, απώλειες λόγω απώλειας ευθυγράμμισης της ασπίδας $V_{L,shield}$, απώλειες που συμβαίνουν κατά την τοποθέτηση της επένδυσης $V_{L,lining}$ και απώλειες λόγω ουριαίου κενού $V_{L,tail}$. Τονίζουν ως βασική απώλεια εδάφους αυτή στην περιφέρεια της σήραγγας που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην θλίψη που υφίσταται το έδαφος στην αριστερή και δεξιά παρειά της σήραγγας. Το σύνολο της απώλειας όγκου λοιπόν δίνεται ως:

$$V_L = V_{L,face} + V_{L,shield} + V_{L,tail} + V_{L,lining}$$

3.3.3 O'Reilly και New (1982)

Οι O'Reilly and New, παρήγαγαν πιο γενικευμένες εμπειρικές σχέσεις για την εύρεση του σημείου καμψής i , βασισμένοι στον Peck (1969). Βάσει στατιστικής επεξεργασίας επιτόπου μετρήσεων, συσχετίζοντας το σημείο καμψής i με το βάθος της σήραγγας z_0 κατέληξαν σε μία γραμμική σχέση. Ύστερα, συγκρίνοντας την τελευταία σχέση με τις διάφορες περιπτώσεις που μελέτησαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για τις αργίλους η πιο κατάλληλη τιμή K (παράμετρος που εκφράζει το πλάτος της καμπύλης καθιζήσεων) είναι ίση με 0.5 και μπορεί να ποικίλλει από 0.4 έως 0.7. Οι εργασίες των Kimura and Mair (1981) επαλήθευσαν αυτό το συμπέρασμα. Επιπλέον, απέδειξαν βάσει αποτελεσμάτων πως η τιμή του K είναι ανεξάρτητη της μεθόδου διάνοιξης. Για να δώσουν πιο ακριβείς προβλέψεις για το σημείο καμψής i , οι O'Reilly and New αξιολογώντας δεδομένα παρατηρήσεων στο πεδίο για 21 συνεκτικά και 16 μη συνεκτικά εδάφη όρισαν δύο διαφορετικές σχέσεις που το συνδέουν γραμμικά με το βάθος της σήραγγας, ανεξαρτήτως του τρόπου κατασκευής και της διαμέτρου.

$$i = K * z_0$$

$$i = 0.43z_0 + 1.1$$

$$i = 0.43z_0 - 0.12$$

Οι O'Reilly και New πρότειναν, επιπρόσθετα, σχέσεις συσχέτισης της οριζόντιας με την κατακόρυφη επιφανειακή μετακίνηση, αναλόγως του βάθους της σήραγγας, καθώς και μια σχέση κατανομής της οριζόντιας επιφανειακής μετατόπισης.

$$S_h = \frac{x}{z} S_v = \frac{x}{z} S_{v,max} e^{\frac{x^2}{2i^2}}$$

$$\frac{S_h}{S_{h,max}} = 1.65 \left(\frac{x}{z}\right) e^{\frac{x^2}{2i^2}}$$

Σημειώνεται πως η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση $S_{h,max}$ λαμβάνει χώρα στο σημείο καμπής ($x=i$) και μάλιστα ισούται με $0.61KS_{v,max}$, τιμή που ταυτίζεται με τα όσα συμπεράναν προγενέστερα από παρατηρήσεις πεδίου ου Cordingκαι Hansmire (1975).

Τέλος, γενικεύοντας οι O'Reillyκαι Newπαραθέτουν τις εξής σχέσεις για την κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση:

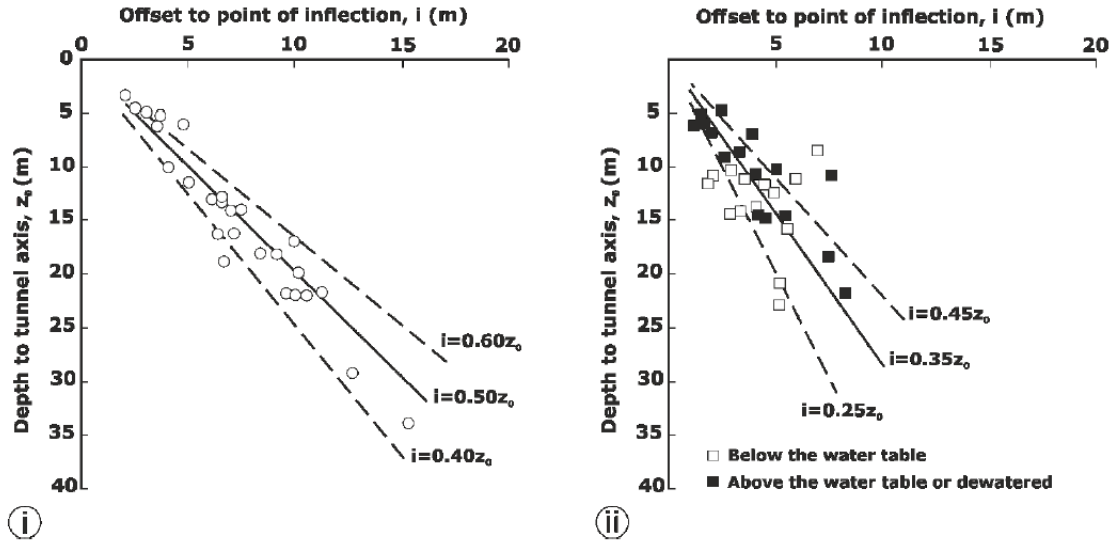
$$S_v = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi K z_0}} e^{\left[\frac{x^2}{2(Kz_0)^2}\right]}$$

$$S_h = \frac{V_s * z}{\sqrt{2\pi K z_0^2}} e^{\left[\frac{x^2}{2(Kz_0)^2}\right]}$$

3.3.4 Mair et al. (1993,1997)

Στηριζόμενοι στα συμπεράσματα των O'Reilly and New (1982), ότι η τιμή της παραμέτρου i είναι κατά προσέγγιση γραμμικά συναρτώμενη του βάθους της σήραγγας, και λαμβάνοντας την πλειονότητα των δεδομένων από τον Rankine (1988) συνιστούν για πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού προκαθορισμένες τιμές της παραμέτρου K : α) $K=0.5$ για την περίπτωση αργιλικών εδαφών και β) $K=0.35$ για την περίπτωση κοκκωδών εδαφών. Τα δεδομένα στα διαγράμματα αφορούν διάφορες μεθόδους κατασκευής σηράγγων και βάθη, παρόλα αυτά παρουσιάζονται ομαδοποιημένα καθώς η παράμετρος i είναι ανεξάρτητη αυτών.

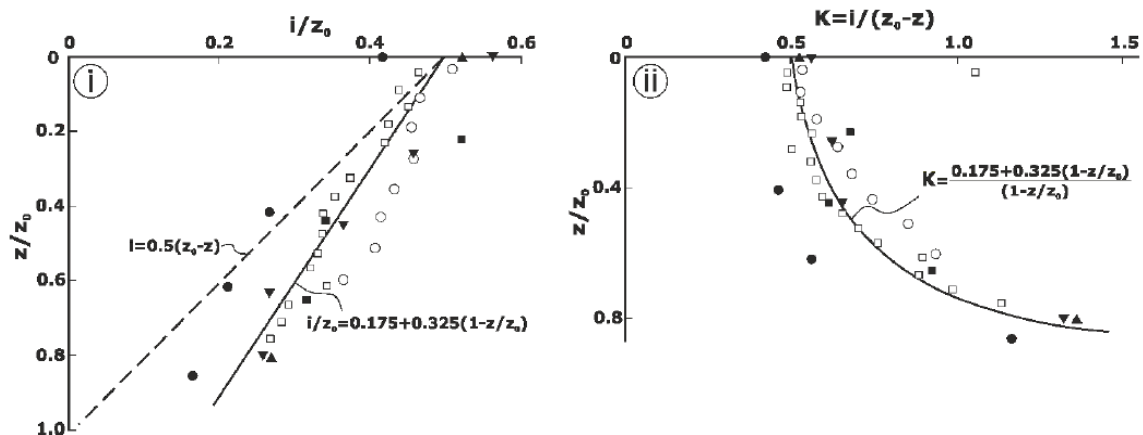
Κατά τους Mair et al. (1993), επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα των O'Reilly and New (1982), ότι για την πλειονότητα των περιπτώσεων διάνοιξης σε αργιλικά, η σχέση $i=0.50z_0$ διατηρείται σταθερή μέσα σε ένα πλαίσιο απόκλισης $i=0.40-0.60z_0$. Στα



Διάγραμμα 3-2: Εκτίμηση του ισυναρτήσεως του βάθους διάνοιξης της σήραγγας σε (i) αργιλικά και (ii) σε κοκκώδη εδάφη (Mair et al., 1993)

κοκκώδη εδάφη, παρότι παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση βάσει δεδομένων από κατασκευή ριγών σήραγγων, η πλειονότητα των περιπτώσεων βρίσκεται εντός των ορίων $i=0.25z_0$ και $i=0.45z_0$. Επιπλέον, για αυτόν τον τύπο εδάφους –αμμοχάλικα- η τιμή $K=0,35$ ισχύει ανεξάρτητα από την τυχόν ύπαρξη στάθμης υπόγειων υδάτων επάνω από τη σήραγγα.

Εν συνεχεία, οι Mair και Taylor (1997) κατέληξαν, ότι η παράμετρος K αυξάνει με το βάθος, δίνοντας αναλογικά ευρύτερες καμπύλες κοντά στην σήραγγα. Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου οι τιμές της παραμέτρου i που λήφθηκαν από μετρήσεις καμπυλών καθιζήσεων σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια σχετίζονται με



Διάγραμμα 3-3: (i) Μεταβολή παραμέτρου i καμπυλών καθιζήσεων σε διαφορετικά βάθη z για σήραγγες σε αργίλους (ii) μεταβολή παραμέτρου K ως προς το βάθος για προφίλ καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, πάνω από σήραγγες σε αργίλους (Mair and Taylor., 1997)

τα διάφορα βάθη z , κανονικοποιημένα και τα δύο μεγέθη ως προς το βάθος διάνοιξης της σήραγγας z_0 . Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε $K=0.5$ και όπως φαίνεται έχει απόκλιση από τις μετρήσεις στο πεδίο, ενώ η έντονη μαύρη γραμμή περιγράφει καλύτερα την συμπεριφορά που ακολουθούν τα εύρη i των καμπυλών καθιζήσεων σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια.

3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών της σημερινής εποχής, οι σχεδιαστές μηχανικοί αλλά και οι ερευνητές καταφεύγουν ολοένα και περισσότερο σε αριθμητικές μεθόδους και μοντέλα, για την επίλυση του προβλήματος. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρατίθενται μέθοδοι και μοντέλα, των οποίων το πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα προσομοίωσης και εποπτείας της αλληλεπίδρασης των συνιστωσών ενός προβλήματος σε μια ή περισσότερες αναλύσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται κυρίως FEM (Finite Element Method – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων) αναλύσεις, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί και επαληθευθεί, και σκοπό έχουν την πρόβλεψη των καθιζήσεων εξαιτίας της διάνοιξης ενός υπόγειου χώρου (κυλινδρικής σήραγγας επί το πλείστο).

Η διάνοιξη των σηράγγων στην πλειονότητα των τριδιάστατων (3D) προσομοιώσεων εκτελείται από διαδοχική αφαίρεση στοιχείων του μετώπου της σήραγγας, που ονομάζεται και «βήμα προς βήμα διαδικασία». Επιπρόσθετα, ποικίλες τεχνικές έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την προσομοίωση όλων των σχετικών επιμέρους στοιχείων της μηχανοποιημένης όρυξης, τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά την κατασκευή της σήραγγας και έχουν καθοριστικό ρόλο στις εδαφικές μετακινήσεις στο μέσο. Ανάμεσα στο κρισιμότερα είναι τα:

- Πίεση στο μέτωπο
- Αλληλεπίδραση εδάφους – ασπίδας
- Ενεμάτωση – σκλήρυνση ενέματος
- Νερό των πόρων

Από τα ποιο σημαντικά κατά την προσομοίωση είναι το καταστατικό μοντέλο που θα επιλεγεί. Διάφορα μοντέλα υπάρχουν διαθέσιμα και η επιλογή βασίζεται στο σκοπό της προσομοίωσης, τα διαθέσιμα γεωμηχανικά δεδομένα και την αξιοπιστία αυτών, την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και τον χρόνο ανάλυσης κλπ.

Παρακάτω, αρχικά θα αναφερθούν κάποιες από της ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους για διδιάστατες (2D) αναλύσεις, καθώς αποτέλεσαν τη βάση για της πιο περίπλοκες τρισδιάστατες αναλύσεις αλλά και επειδή ακόμη και σήμερα χρησιμοποιούνται προς εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικής ισχύος. Κατόπιν, θα γίνει αναφορά σε προηγμένες αριθμητικά τρισδιάστατες προσομοιώσεις και ενδιαφέρουσες δημοσιεύσεις σχετικά με το πρόβλημα της μοντελοποίησης του μέσου, του μηχανήματος και της διαδικασίας διάνοιξης.

3.4.1 2D Αναλύσεις – Μέθοδοι και Τεχνικές Προσομοίωσης

Αν και η πλειοψηφία των ιδιοτήτων της διαδικασίας κατασκευής μιας σήραγγας καθώς και των πιθανών προβλημάτων που συναντώνται, όπως η εξώθηση του μετώπου, οι επιφανειακές καθιζήσεις κ.α., είναι τριδιάστατα προβλήματα, οι διδιάστατες αναλύσεις είναι αναμφίβολα γρηγορότερες και οικονομικότερες, λαμβάνοντας υπόψιν την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Τα αποτελέσματα που παράγουν βάσει συγκεκριμένων υποθέσεων κρίνονται αρκούτως ικανοποιητικά. Ακολουθούν οι μέθοδοι και τεχνικές δισδιάστατης προσομοίωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις σύγχρονες μελέτες ή/και έρευνα.

3.4.1.1 Προοδευτική Μέθοδος Χαλάρωσης – Swoboda (1979)

Η χαλάρωση του εντατικού πεδίου γίνεται μέσω μείωσης της δυσκαμψίας του εντός της σήραγγας εδάφους, επιτρέποντας έτσι τα όρια της εκσκαφής να κινηθούν προς το εσωτερικό της σήραγγας.

3.4.1.2 Μέθοδος Συγκλίσεων / Αποτονώσεων – Panet και Guenot (1982)

Η μέθοδος περιγράφει το ποσοστό των υπάρχουσών ακτινικών τάσεων, οι οποίες αποτονώνονται πλήρως ή μερικώς, πριν την εφαρμογή της υποστήριξης. Θεωρείται μια παράμετρος $\lambda \in [0, 1]$, η οποία ονομάζεται συντελεστής αποτόνωσης και εκφράζει το μέγεθος της αποτόνωσης των αρχικών τάσεων. Για να αναπαραχθεί στο μοντέλο πλασματικά η αποτόνωση, εισάγεται στο όριο της εκσκαφής μια εσωτερική πίεση $p_i = (1 - \lambda)\sigma_o$, όπου σ_o η αρχική εντατική κατάσταση.

3.4.1.3 Μέθοδος Κενού (*Gap Method*) – Rowe και Kick (1983)

Βάσει της θεώρησης ότι η τελική διαμόρφωση των ορίων της σήραγγας είναι, ως προς το εμβαδό που αυτά περικλείουν, μικρότερη της αρχικής εκσκαφής, η μέθοδος αυτή περιγράφει τις μετακινήσεις βάσει της διαφοράς του αρχικού και τελικού εμβαδού. Συνεπώς, το μέγεθος των μετακινήσεων έχει ως άνω όριο το «κενό» μεταξύ της τελικής διαμόρφωσης της σήραγγας και της αρχικής εκσκαφής.

3.4.1.4 Μέθοδος Ελέγχου των Εδαφικών Απωλειών (*Ground Loss Control*) - *Addenbrooke et al. (1997)*

Πρώτο βήμα αυτής της μεθόδου είναι ο ορισμός μιας σταθερής προσδοκώμενης τιμής G_L (ground loss) από την αρχή της ανάλυσης. Η εκσκαφή της σήραγγας προσομοιώνεται σε ένα σύνολο βημάτων i , το καθένα από τα οποία δίνει ένα $G_{L,i}$. Μόλις το άθροισμα αυτών των επιμέρους απωλειών δώσει το προκαθορισμένο G_L , θεωρείται πως έχει τοποθετηθεί η υποστήριξη του ανοίγματος.

3.4.2 G. Meschke et al., G. Meschke και T. Kasper (2004, 2006)^{[1][9]}

Οι Meschke et al., Kasper και Meschke, από τους πρωτοπόρους στην 3D ανάλυση της μηχανοποιημένης όρυξης με πεπερασμένα στοιχεία, παρήγαγαν ένα τριδιάστατο λεπτομερές αριθμητικό προσομοίωμα, το οποίο εμπεριέχει μοντελοποιημένα όλα τα συνιστούντα μέρη της διαδικασίας της μηχανοποιημένης όρυξης, όπως το έδαφος και το υπόγειο νερό, η ασπίδα του TBM, τα υδραυλικά έμβολα, η τσιμεντένεση του ουριαίου κενού και τα στοιχεία της υποστήριξης. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα TSIM3D. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι συζευγμένες, συνδυάζουν δηλαδή το υδραυλικό και το μηχανικό πρόβλημα. Οι αναλύσεις δεν αναφέρονταν σε συγκεκριμένο έργο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι επιλέχθηκε διάμετρος $D=6.3\text{m}$ και βάθος ίσο με $1.5D = 9.45\text{m}$. Ο υδροφόρος βρίσκεται στην επιφάνεια. Η κωνικότητα της ασπίδας επιλέχθηκε ως 6cm διαφορά στην διάμετρο στο μέτωπο με την διάμετρο στην ουρά. Το έδαφος προσομοιώθηκε ως συνεκτικό και επιλέχθηκε να περιγραφεί μέσω ενός πλαστικού καταστατικού μοντέλου Cam-Clay.

Το TBM προσομοιώνεται σε ένα άκαμπτο απαραμείωτο μετακινούμενο σώμα κινητής επαφής, τα στοιχεία δηλαδή του μηχανήματος που έρχονται σε επαφή με το

περιβάλλον μέσο έχουν ιδιότητες τριβής. Η αλληλεπίδραση αυτή επιτεύχθηκε με την εισαγωγή κατάλληλων συνθηκών διεπιφάνειας. Η κωνικότητα της ασπίδας λαμβάνεται επίσης υπόψιν στο μοντέλο. Το βάρος του εξοπλισμού του TBM που ακολουθεί την ασπίδα προσομοιώνεται με σημειακά φορτία.

Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο προσομοιώνεται ως κατανεμημένο φορτίο με γραμμική αύξηση με το βάθος (τραπεζοειδής κατανομή), λαμβάνοντας έτσι την γραμμική μεταβολή των γεωστατικών πιέσεων στο σώμα της εδαφικής πάστας σε σχέση με το ύψος.

Η μοντελοποίηση της διαδικασίας ενέματος σε αυτό το προσομοίωμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με οριακές συνθήκες στους κόμβους των στοιχείων ενέματος στην ουρά, με διαφοροποίηση καθ' ύψος κατά 10kN/m^2 . Η σκλήρυνση του ενέματος στο κενό, εκφράζεται μέσω ενός ελαστικού στοιχείου σε σχήμα δακτυλίου, με χρονικά εξαρτώμενες παραμέτρους δυσκαμψίας και περατότητας.

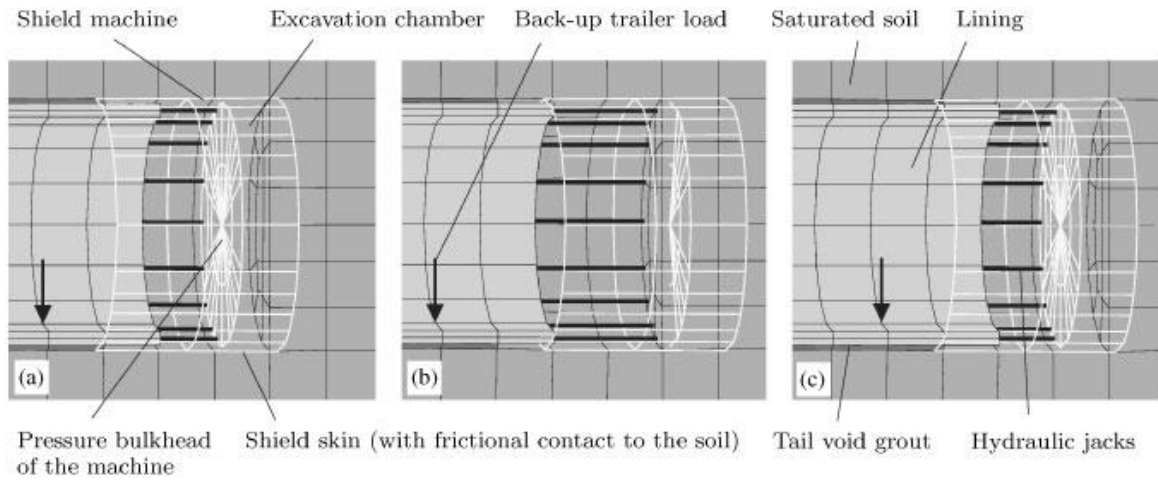
Η εκσκαφή προσομοιώθηκε με αφαίρεση των στοιχείων «κατά φέτες» (slicing) μπροστά από την κοπτική κεφαλή, ακολουθώντας τη μέθοδο προσομοίωσης «βήμα προς βήμα». Για να επιτύχουν την κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση της προχώρησης του TBM, οι Kasper και Meschke ανέπτυξαν ειδικούς αλγόριθμους που καθορίζουν την ακρινή πορεία του μηχανήματος. Ορόσημο αποτελεί η τεχνική αναπροσαρμογής της διακριτοποίησης του κανάβου των στοιχείων μπροστά από το μέτωπο σε κάθε βήμα (re-meshing technique), ώστε να μην υπάρχουν διαφορές στην διάμετρο της εκσκαφής λόγω μεταφοράς των κόμβων.

Τα έμβολα προσομοιώνονται από γραμμικά στοιχεία που ενώνονται στα στοιχεία της υποστήριξης. Αρχικά αυτά εκτείνονται και αφήνεται κενό μεταξύ του εδάφους και της υποστήριξης. Έπειτα, τροποποιείται ο κανάβος μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, ενεργοποιούνται τα νέα στοιχεία που προσομοιώνουν την τσιμεντένεση στην ουρά της ασπίδας και ανανεώνονται οι οριακές συνθήκες για τις πιέσεις των πόρων.

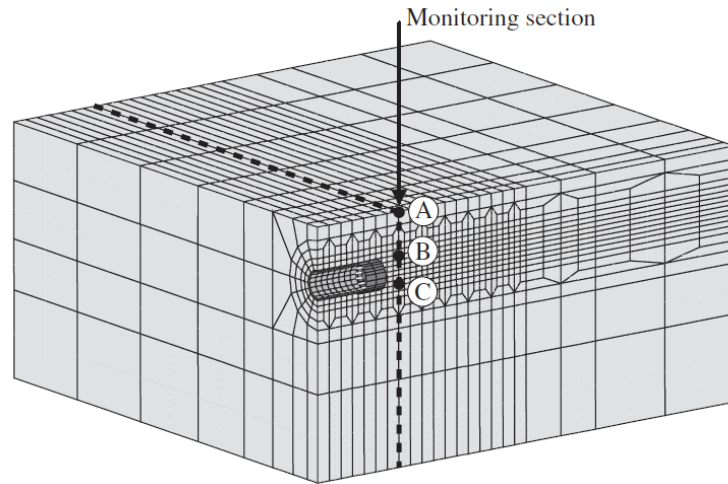
Σημαντικό είναι πως το συγκεκριμένο μοντέλο παρήγαγε αποτελέσματα για εδαφικές παραμορφώσεις, λόγω υπερπιέσεων του νερού των πόρων οι οποίες αναπτύχθηκαν κατά την εισπίεση του ενέματος. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι η πίεση μετώπου, η πίεση ενέματος, το μήκος και η κωνικότητα της ασπίδας έχουν σημαντική επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις. Το βάρος του TBM επίσης έχει

μικρή επίδραση, ενώ το βάρος του εξοπλισμού που ακολουθεί προκαλεί μόνο προσωρινές ελαστικές παραμορφώσεις.

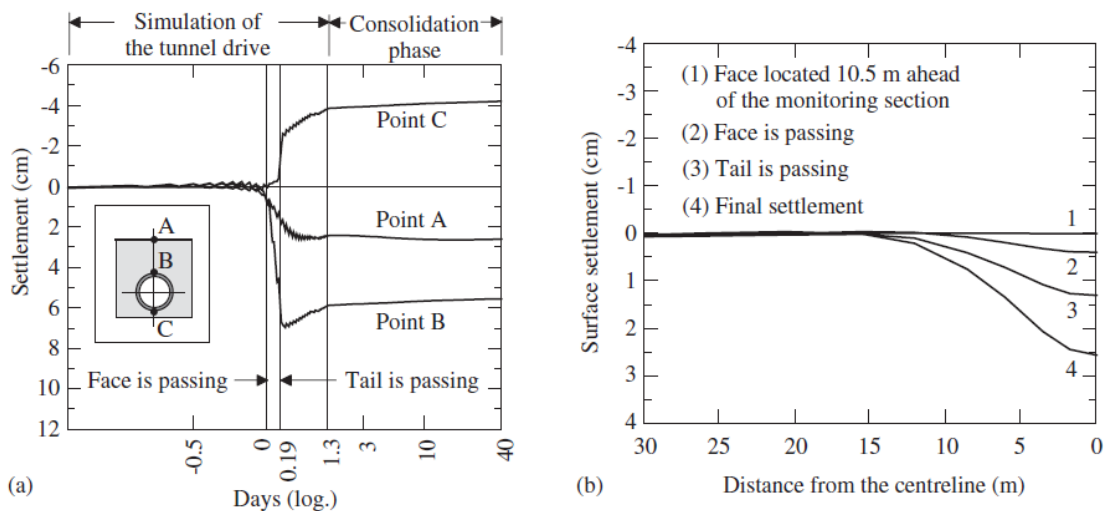
Μετά από προχώρηση 48m, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της στερεοποίησης στις καθιζήσεις σε βάθος χρόνου, χωρίς περεταίρω προχώρηση του TBM. Σε επόμενη εικόνα φαίνονται οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν.



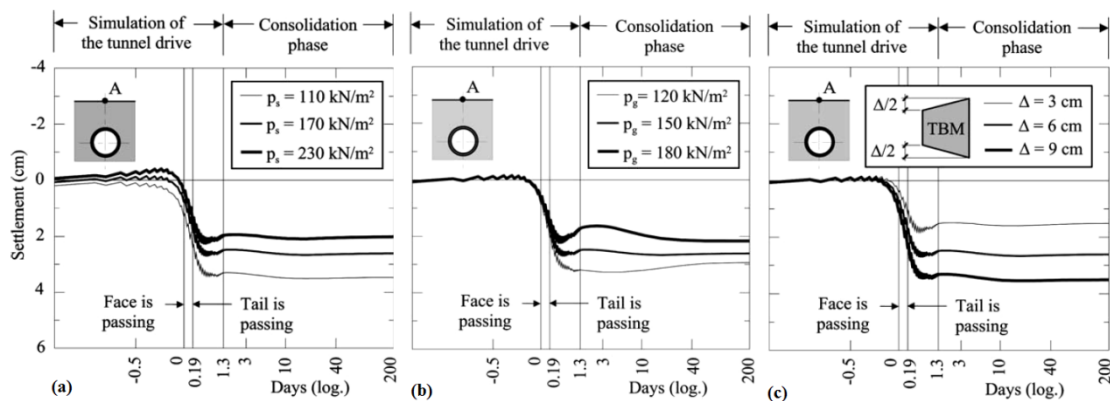
Εικόνα 3-11: Μοντέλο του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους και ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος. [1]



Εικόνα 3-11: Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D[9]



Διάγραμμα 3-4: α) 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 το μηχανήματος. [1]



Διάγραμμα 3-5: Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (α) της πίεσης μετώπου, (β) της πίεσης του ενέματος και (γ) της κωνικότητας της ασπίδας. [9]

3.4.3 F. Nagel και G. Meschke (2010, 2011, 2012)^{[10][11]}

Οι Nagel και Meschke κατά δημοσίευσή τους (2010), ισχυρίστηκαν πως η προσομοίωση υποστήριξης μετώπου μέσω πεπιεσμένου αέρα κατά την περίπτωση εκκένωσης του θαλάμου εκσκαφής ενός EPB / Slurry TBM σε μια ενδεχόμενη ανάγκη αντικατάστασης κοπτικών, και αλλαγής του μέσου υποστήριξης του μετώπου από πολφού σε πεπιεσμένο αέρα, απαιτεί την χρήση ενός μοντέλου τριών φάσεων (εδαφικοί κόκκοι, νερό πόρων, αέρας), ακόμη και αν τα εδαφικά προσομοιώματα δύο φάσεων θεωρούνται σχετικά επαρκή (εδαφικοί κόκκοι, νερό πόρων). Κατά συνέπεια, παρουσίασαν ένα τριφασικό εδαφικό προσομοίωμα για μαλακά εδάφη, στο οποίο διακρίτοποιούνται οι τρεις επιμέρους φάσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους λαμβάνονται υπόψιν. Το μοντέλο αυτό διαμορφώθηκε βασιζόμενο στην θεωρία του πορώδους μέσου και ένα ελαστοπλαστικό Cam-Clay καταστατικό χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς των πόρων και του εδαφικού σκελετού, με την ενσωμάτωση τριχοειδούς πίεσης.

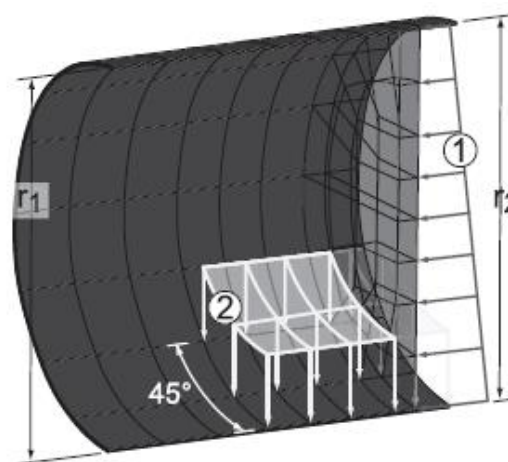
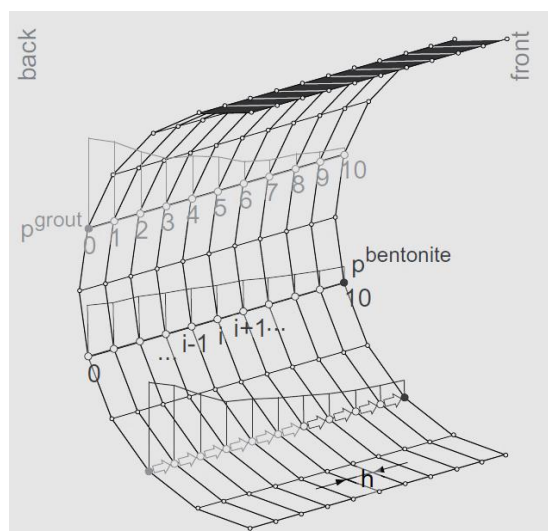
Σε επόμενη δημοσίευσή τους^[10], οι Nagel και Meschke επιχείρησαν να προσομοιώσουν την ροή του ενέματος υπό πίεση και του πολφού μπεντονίτη γύρω από την ασπίδα, καθώς και την μελέτη της επιρροής αυτών στις επιφανειακές καθιζήσεις. Το παραπάνω συμβαίνει κυρίως λόγω της υπερεκσκαφής στην κεφαλή και κωνικότητας της ασπίδας. Έτσι, το μοντέλο επεκτάθηκε με την εισαγωγή αλγορίθμου που υπολογίζει την ροή των ρευστών υπό πίεση, κατά την έννοια μιας μεμβράνης ρευστού που διεισδύει στους πόρους του περιβάλλοντος εδάφους. Θεωρείται ιξώδη συμπεριφορά των ρευστών

και γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method - FDM) για χωρική διακριτοποίηση των εξισώσεων που διέπουν την διαμήκη ροή των ρευστών. Επιπλέον, γίνεται σύζευξη τους με αλγόριθμο επαφής για την διεπιφάνεια ασπίδας εδάφους, που παίρνει υπόψιν και την διάτμηση κατά την επαφή.

Με χρήση αυτού του μοντέλου, διερευνήθηκαν μέσω παραμετρικών αναλύσεων τρία σενάρια:

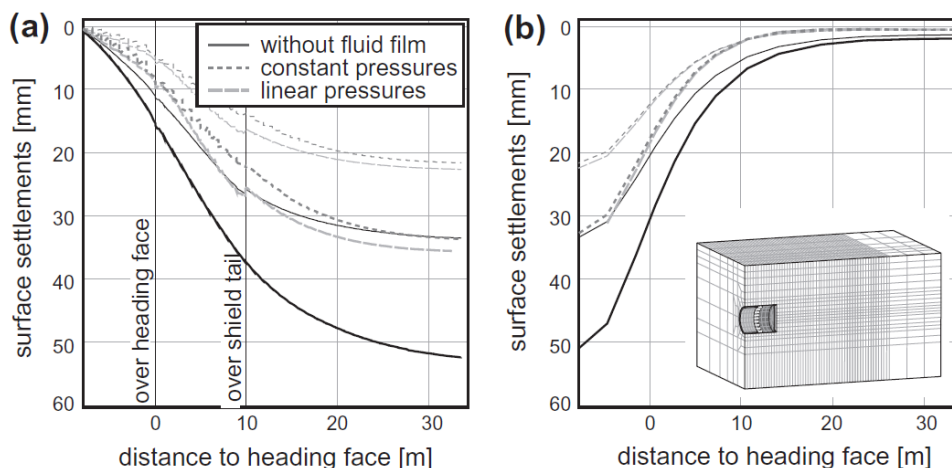
- Διάνοιξη χωρίς διαρροή ρευστού (χωρίς μεμβράνη περί της ασπίδας)
- Διάνοιξη με ύπαρξη μεμβράνης, της οποίας οι συνοριακές συνθήκες αυξάνονται γραμμικά από το μπροστά προς το πίσω μέρος της ασπίδας
- Διάνοιξη με ύπαρξη μεμβράνης, με συνοριακές συνθήκες που διατηρούνται σταθερές και προδιαγεγραμμένες κατά το μήκος της ασπίδας

Κατά τους Nagel και Meschke^[11], τα βασικά αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων είναι πως η ύπαρξη ή μη μιας μεμβράνης ρευστού στο διάκενο μεταξύ της ασπίδας και του ορίου εκσκαφής έχει σημαντικές επιπτώσεις στην εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων, στο προφίλ της καμπύλης τους αλλά πιο σημαντικά στις απαιτούμενες δυνάμεις ώθησης του TBM. Επίσης έδειξαν πως η πίεση υποστήριξης έχει επιρροή κυρίως στις καθιζήσεις μπροστά από το μέτωπο, ενώ η πίεση ενεμάτωσης ουριαίου κενού επηρεάζει κυρίως τις τελικές καθιζήσεις.

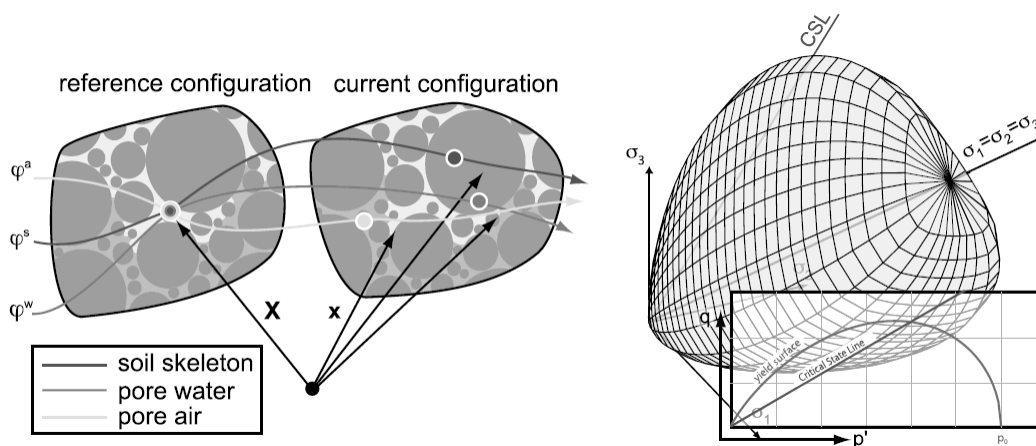


Εικόνα 3-13 (δεξιά): Διακριτοποίηση στοιχείων του μηχανήματος και ασκούμενα φορτία από τον θάλαμο εκσκαφής και τον μηχανολογικό εξοπλισμό του μηχανήματος (ερέκτορας κλπ) [10][11]

Εικόνα 3-13 (αριστερά): Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό [11]



Εικόνα 3-15: Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο σιφρά (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.[10]



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 αέρας)[11]

3.4.4 A. Lambrugh et al. (2012)^[12]

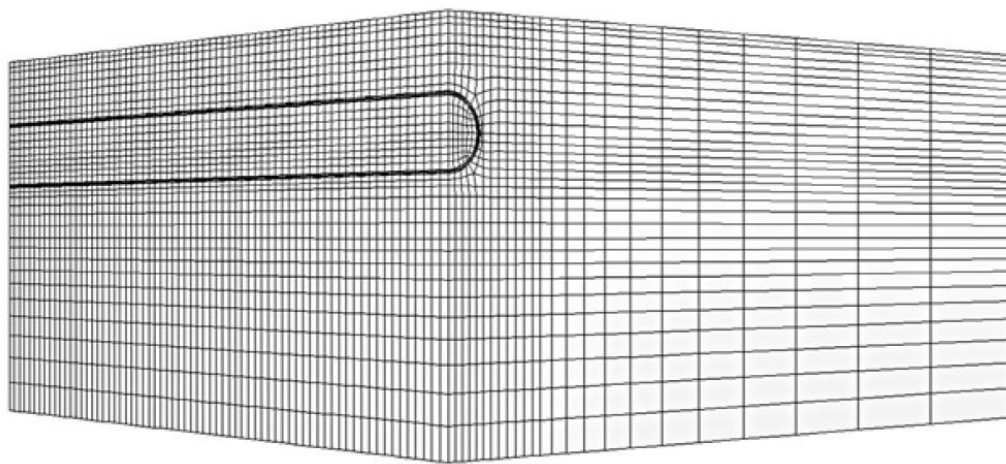
Οι Lambrugh et al. κατασκεύασαν ένα τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο για την πλήρη προσομοίωση της διαδικασίας εκσκαφής σήραγγας με χρήση EPB μηχανήματος. Το μοντέλο κατασκευάστηκε με την χρήση του λογισμικού FLAC^{3D} ακολουθώντας τη Γενικευμένη Μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών (Generalised Finite Difference Method - GFDM). Για να εξακριβωθεί η εγκυρότητα του προσομοιώματος, παρήγαγαν μια εκτενή σειρά από ανάστροφες αναλύσεις (back-analyses), των οποίων τα εξαγόμενα

συγκρίθηκαν με πραγματικές μετρήσεις από έργα της επέκτασης του Μετρό της Μαδρίτης.

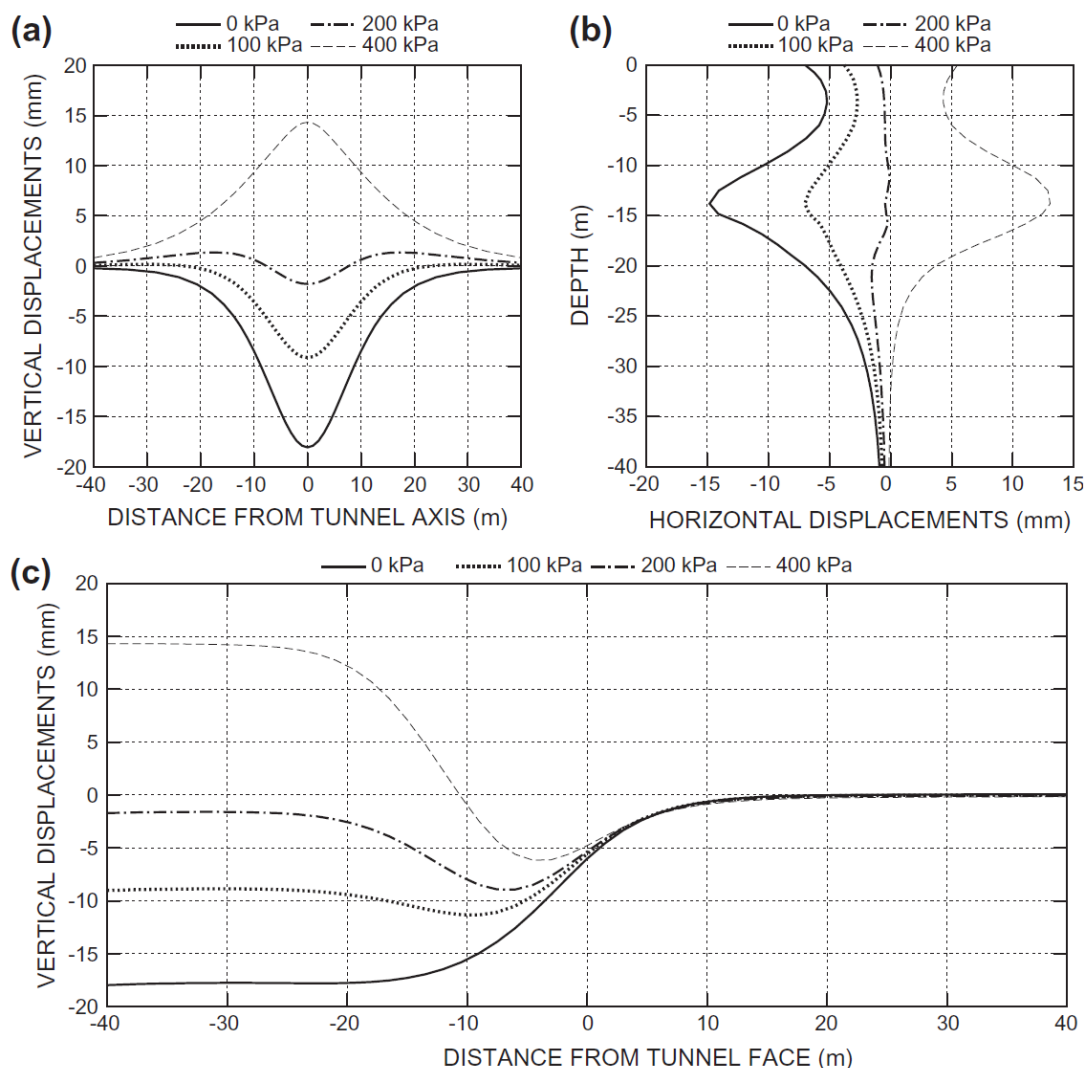
Το TBM στο μοντέλο αυτό προσομοιώνεται με χρήση συνεχών στοιχείων. Η ασπίδα προσομοιώνεται ως κυλινδρική -αγνοείται η κωνικότητα χάριν απλότητας - με ελαστική συμπεριφορά. Μια μέση πυκνότητα της ασπίδας επιλέγεται διαιρώντας το συνολικό βάρος της ασπίδας με τον φαινόμενο όγκο της ασπίδας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους, προσδιορίστηκε έμμεσα με την εισαγωγή ενός στρώματος συνεχών γραμμικών ελαστικών στοιχείων με πολύ χαμηλή δυσκαμψία.

Η ενεμάτωση μοντελοποιήθηκε με την εισαγωγή συνεχών ελαστικών στοιχείων ανάμεσα στο κενό της τελικής επένδυσης και του ορίου εκσκαφής. Τα στοιχεία του ενέματος ενώνονται μονολιθικά με τα υπόλοιπα στοιχεία. Η δυσκαμψία των στοιχείων θεωρείται συνάρτηση του χρόνου καθώς σε κάθε βήμα λαμβάνει μία νέα τιμή για να προσομοιωθεί η διαδικασία της σκλήρυνσης. Η κωνικότητα και η υπερεκσκαφή προσομοιώνονται με χρήση μιας στρώσης ελαστικού υλικού στο εξωτερικό μέρος της ασπίδας ρυθμίζοντας τις ελαστικές ιδιότητες του έτσι ώστε στην ουρά της ασπίδας η σύγκλιση να προσεγγίζει το κενό λόγω κωνικότητας συν την υπερεκσκαφή.

Η υποστήριξη στο μέτωπο εισήχθη ως ένα ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο. Τα στοιχεία της υποστήριξης θεωρούνται γραμμικά ελαστικά και ενώνονται μονολιθικά. Η πυκνότητα τους αυξάνεται έτσι ώστε λαμβάνεται υπόψιν το βάρος του εξοπλισμού που ακολουθεί το TBM.. Η πίεση προσομοιώνεται με αύξηση τις ισοτροπικής πίεσης στα στοιχεία.



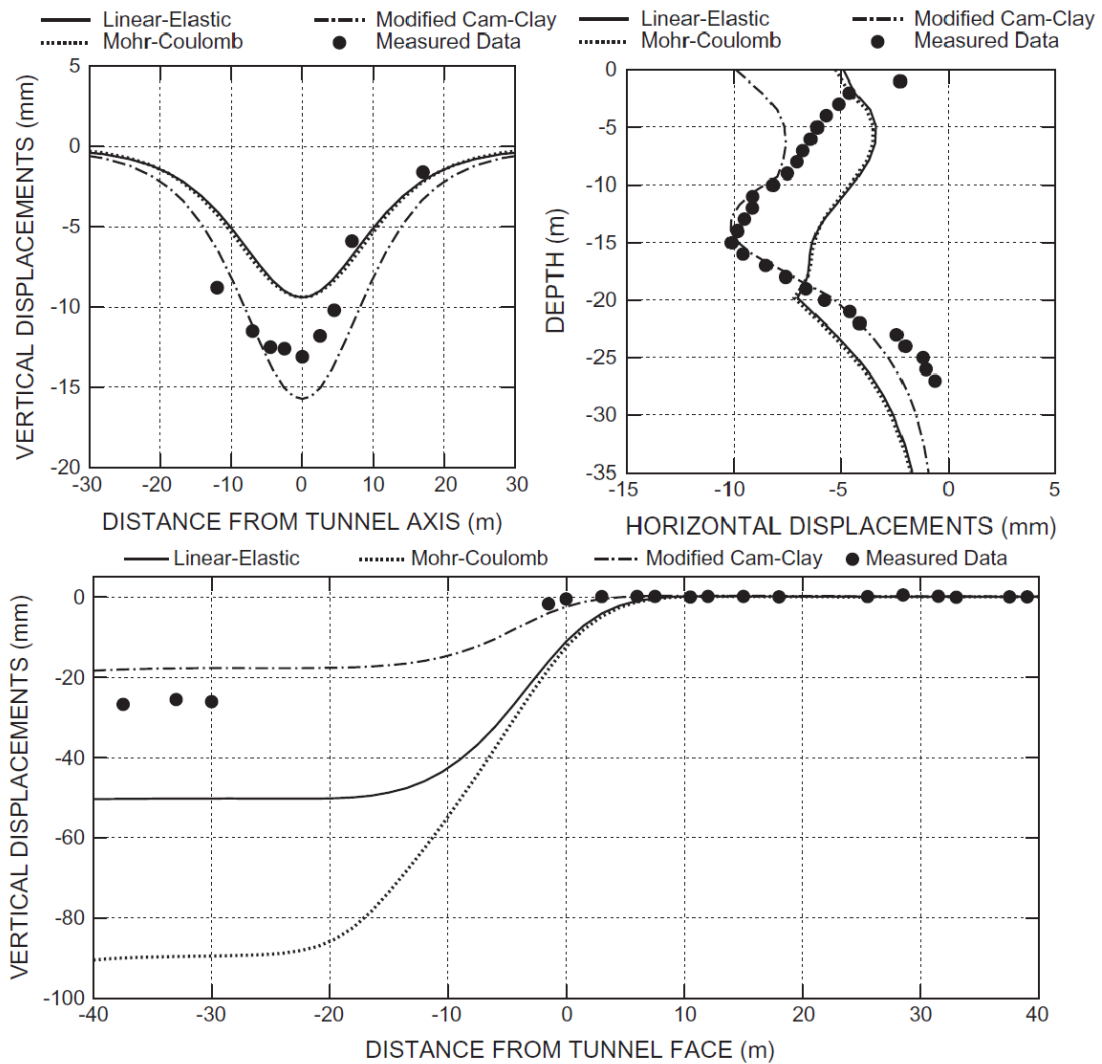
Εικόνα 3-16: Τριδιάστατος κάναβος του προβλήματος [12]



Διάγραμμα 3-6: Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της πίεσης του ενέματος με χρήση κριτηρίου Mohr-Coulomb στις (α) κατακόρυφες μετακινήσεις (εγκάρσια στον άξονα τομή), (β) οριζόντιες μετακινήσεις και (γ) κατακόρυφες μετακινήσεις (κατά μήκος στον άξονα τομή). [12]

Οι αναλύσεις που έγιναν αναφέρονταν στα έργα της επέκτασης του Μετρό της Μαδρίτης, τα οποία έγιναν σε δύο στάδια μεταξύ του 1995 και του 2003, και είχαν σκοπό να εξετάσουν την ευαισθησία του μοντέλου στα δεδομένα εισόδου. Οι τυπικοί σχηματισμοί του υπεδάφους της Μαδρίτης κυμαίνονται από αργιλώδη άμμο (Arenademiga) έως στιφρή άργιλο (Peñuela). Για τον λόγο αυτό, 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 τη μεγαλύτερη συμφωνία να υπάρχει με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που θεώρησαν τροποποιημένο Cam-Clay

μοντέλο για το έδαφος. Άξιο αναφοράς είναι, πως σε αρκετές περιπτώσεις στα άλλα δυο μοντέλα παρατηρούνται μερικές αρκετά μεγάλες διαφορές.



Διάγραμμα 3-7: Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογιστήκαν από τα αριθμητικά μοντέλα. [12]

3.4.5 Do et al. (2013)^[13]

Οι Do et al. κατασκεύασαν ένα προσομοίωμα διάνοιξης σήραγγας με TBM κλειστού τύπου, με σκοπό να μελετήσουν την επιρροή του καταστατικού μοντέλου του εδάφους στη συμπεριφορά του εδάφους περί της σήραγγας και την ανταπόκριση της υποστήριξης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Mohr-Coulomb (MC) και το Cap-Yield (Cystic). Στο CYsoil μοντέλο η σφιγρότητα του εδάφους έχει μεγαλύτερη τιμή

για καταστάσεις αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Το μοντέλο κατασκευάστηκε στο λογισμικό FLAC^{3D} (εσωτερική γλώσσα FISH) και λειτουργεί με την «βήμα προς βήμα» διαδικασία.

Τα περισσότερα συνιστούντα στοιχεία προσομοιώθηκαν σε αυτό το μοντέλο., όπως για παράδειγμα η ασπίδα και η κωνικότητά της, η πίεση μέτωπου, οι χρονικά εξαρτώμενες μηχανικές ιδιότητες του ενέματος, οι αρθρώσεις μεταξύ των τμημάτων της επένδυσης κλπ. Εκτός αυτών, λήφθηκε υπόψιν μια εξωτερική περιμετρική πίεση επί του θαλάμου εργασίας πίσω από το μέτωπο και στην ουρά της ασπίδας, η οποία εισάγει στο προσομοίωμα την υπερπίεση κατά την έγχυση ενέματος. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με φορτίο τραπεζοειδούς κατανομής θεωρώντας σταθερό ειδικό βάρος πάστας εδάφους 11kN/m^3 . Λόγω υπερεκσκαφής, θεωρείται ότι πολφός περνάει στο κενό και ασκεί πίεση στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Θεωρείται ακτινική φόρτιση από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο για 1.5m και τριγωνικό για άλλο 1.5m.

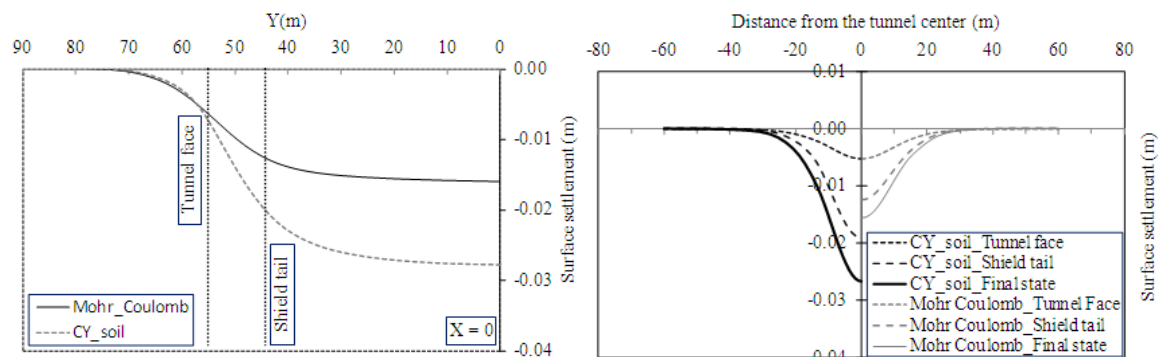
Η ασπίδα δεν προσομοιώθηκε από πεπερασμένα στοιχεία, αλλά αντικαταστάθηκε από προκαθορισμένες συνθήκες αναφερόμενες στις εδαφικές παραμορφώσεις, οι οποίες δεσμεύουν πως το έδαφος δεν δύνανται να διεισδύσει στην υποθετική ασπίδα (ο περιορισμός των παραμορφώσεων λόγω της ασπίδας προσομοιώνεται με συνθήκη που απαγορεύει παραμόρφωση τέτοια που οι κόμβοι του εδάφους να βρεθούν μέσα από την ασπίδα).

Το ένεμα προσομοιώνεται σε δύο φάσεις, την ρευστή και την στερεή. Στην ρευστή προσομοιώνεται με κατανεμημένο ακτινικό φορτίο στο κενό. Για 1.5m αυτό είναι τριγωνικό και για ακόμη 1.5m αυτό είναι ομοιόμορφο. Με τον τρόπο αυτό εισάγονται οι διαφορετικές πιέσεις από το φρέσκο και το υπό σκλήρυνση ένεμα αντίστοιχα. Στην στερεή φάση θεωρείται ελαστική συμπεριφορά με σταθερό μέτρο ελαστικότητας και το ένεμα προσομοιώθηκε με συνεχή ελαστικά στοιχεία.

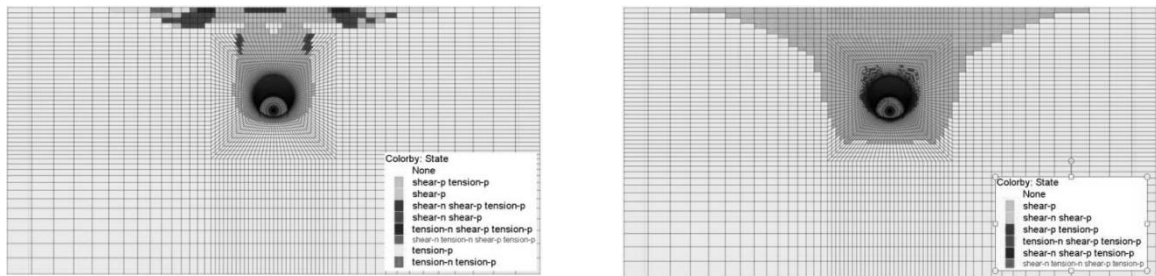
Η υποστήριξη προσομοιώνεται με γραμμικά ελαστικά επιφανειακά στοιχεία. Οι ενώσεις των στοιχείων του ίδιου δαχτυλιδιού γίνεται με συνδέσμους που έχουν δυσκαμψία στροφική (K_θ), αξονική (K_A) και ακτινική (K_R). Ομοίως και για τους συνδέσμους μεταξύ διαδοχικών δαχτυλιδιών, εισάγοντας έτσι τις όποιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων ίδιων ή διαδοχικών δακτυλίων.

Τα υδραυλικά έμβολα προσομοιώνονται με συγκεντρωμένα φορτία που ασκούνται κατευθείαν στους κόμβους των στοιχείων υποστήριξης. Θεωρείται γραμμική αύξηση των δυνάμεων με το ύψος.

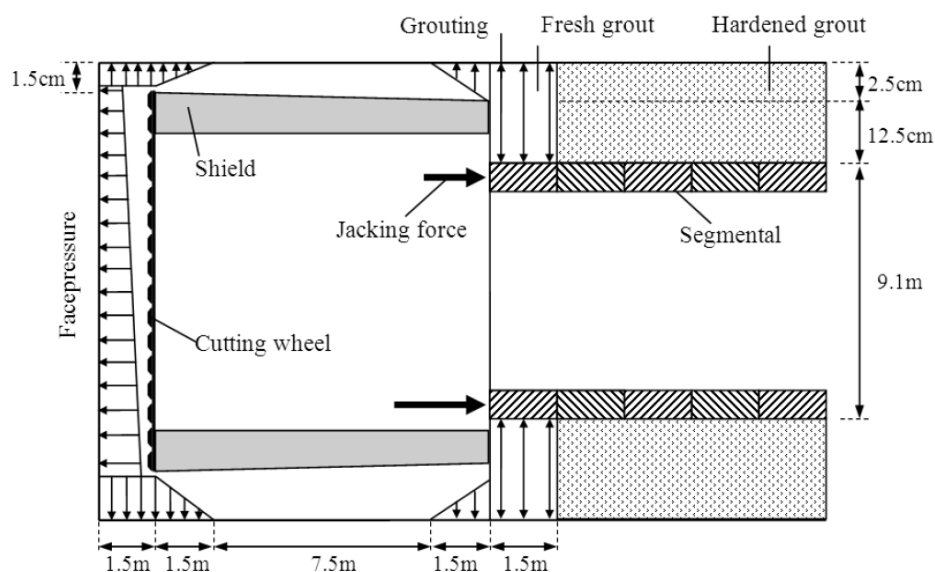
Παρατηρείται μεγάλη επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις καθιζήσεις. Για να τονιστεί η επιρροή του καταστατικού μοντέλου παρουσιάζονται και οι πλαστικές ζώνες. Στην περίπτωση του μοντέλου CYsoil η ζώνη επιρροής είναι περίπου διπλάσια από αυτή του μοντέλου M-C. Η σταθερή δυσκαμψία του μοντέλου M-C και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



Διάγραμμα 3-8: Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων [13]



Εικόνα 3-17: Πλαστικές ζώνες για το μοντέλο Mohr-Coulomb (αριστερά) και CYsoil (δεξιά)



Εικόνα 3-18: Σχηματική επεξήγηση του μοντέλου του TBM και των ασκούμενων φορτίων πίεσης[13]

3.4.6 E. Comodromos et al. (2014)^[7]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο των Comodromos et al. (2014) για την μελέτη των καθιζήσεων κατά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας πλησίον πολυώροφου κτιρίου (non-greenfield). Το μοντέλο αναφέρεται σε έργα για την κατασκευή του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης, όπου οι σήραγγες διανοίχθηκαν με μηχανήμα

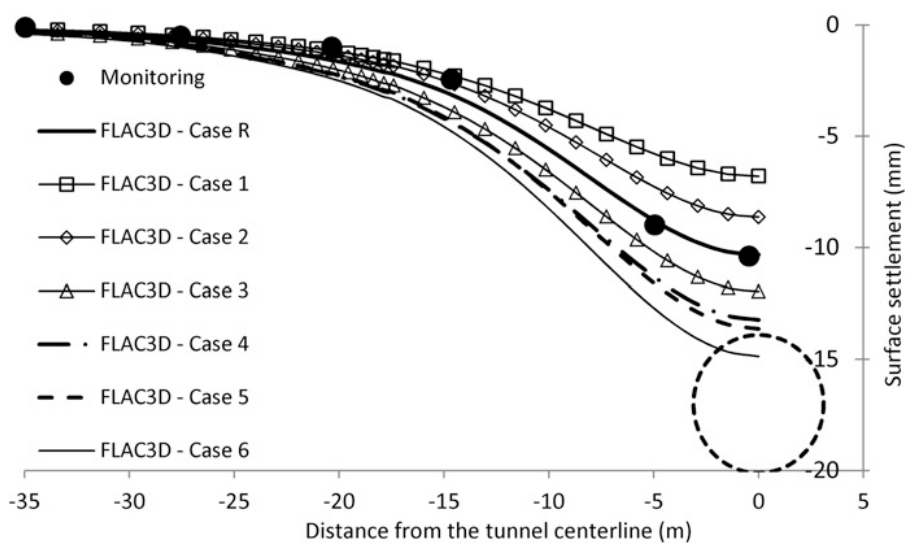
τα τύπου EPB, και αναπτύχθηκε ώστε να καταδείξει την αλληλεπίδραση της διαδικασίας διάνοιξης με τα υφιστάμενα παρακείμενα κτίρια. Το μοντέλο κατασκευάστηκε με χρήση του λογισμικού FLAC^{3D} (εσωτερική γλώσσα FISH).

Τα πιεζόμετρα κοντά στις σήραγγες στις περιοχές αναφοράς δεν κατέγραψαν υπερπίεση των πόρων, γεγονός το οποίο αποδόθηκε στην υψηλή περατότητα του γεωυλικού. Έτσι δεν έγινε σύζευξη του υδραυλικού και του μηχανικού προβλήματος στο μοντέλο, μια ενεργός τάση ασκήθηκε αμελώντας τη στερεοποίηση. Για το έδαφος χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο Cystic. Η πίεση στο μέτωπο θεωρήθηκε σταθερή καθ' ύψος για πρακτικούς λόγους, ενώ υπό πίεση στοιχεία προσομοίωσαν την πίεση του ενέματος. Από προκαταρκτικές παραμετρικές διερευνήσεις, προέκυψε ότι η μεγαλύτερη επιρροή από την σκλήρυνση του ενέματος συμβαίνει στα πρώτα τέσσερα δακτυλίδια. Επομένως, η σκλήρυνση του ενέματος προσομοιώθηκε μόνο στους τέσσερεις πρώτους δακτυλίους της επένδυσης, με προοδευτική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Το τελευταίο έγινε υπό τον ισχυρισμό πως όταν το ένεμα παρουσιάσει μεγαλύτερη

αντοχή και δυσκαμψία από το περιβάλλον έδαφος, η επιρροή της σκλήρυνσής του είναι αμελητέα. Τα στοιχεία της υποστήριξης στο έργο είναι κοχλιωμένα και στο μοντέλο θεωρείται ο δεσμός τους άκαμπτος.

Η ασπίδα προσομοιώνεται από στοιχεία κελύφους, γραμμικά ελαστικά με πολύ ψηλό μέτρο ελαστικότητας ενώ αγνοείται η κωνικότητα και το σχήμα της ασπίδας είναι αμιγώς κυλινδρικό.

Κανονικά σύμφωνα με τις οδηγίες στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους ο πολφός έπρεπε να εισπιέζεται με 50kPa 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 50kPa 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 180kPa. Έγινε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της πίεση πολφού στο κενό, αλλά και την επιρροή της πίεσης στο μέτωπο και της πίεσης ενέματος



Διάγραμμα 3-9: Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις [7]

3.4.7 D. Litsas et al. (2015)^[14]

Οι Litsas et al. (2015) κατασκεύασαν ένα μοντέλο για την προσομοίωση της διάνοιξης σήραγγας με χρήση EPB-TBM χρησιμοποιώντας το κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το καταστατικό μοντέλο του εδάφους θεωρείται το Mohr-Coulomb.

Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με κατανεμημένο φορτίο που αυξάνει γραμμικά με το βάθος. Το βάρος του πολφού στον θάλαμο εκσκαφής και το βάρος του εξοπλισμού μέσα στην ασπίδα προσομοιώνεται με χωρικά στοιχεία που έχουν κατάλληλο ειδικό βάρος. Τα στοιχεία της εδαφικής πάστας δεν αλληλεπιδρούν 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.

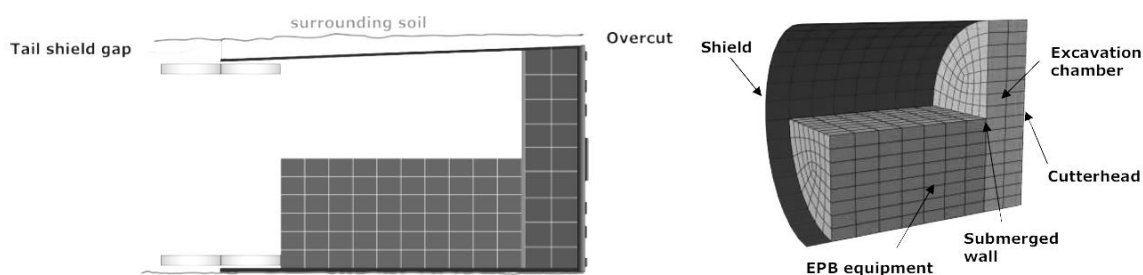
Πίνακας 3-1: Διαφορετικά σενάρια της παραμετρικής διερεύνησης. [7]

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

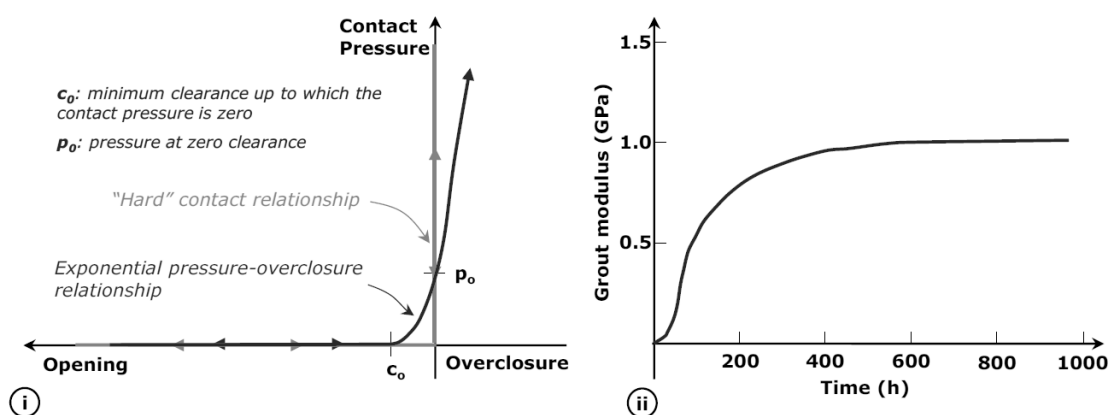
Η κωνικότητα της ασπίδας και η υπερεκσκαφή προσομοιώνεται με 3cmκενό στο μέτωπο που μειώνεται βαθμιαία άλλα 3cmμέχρι την ουρά της ασπίδας. Η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος γεωυλικού με την ασπίδα γίνεται μέσω ενός νόμου διεπιφάνειας. Επειδή η ιδεατή περίπτωση της σχέσης ‘hard’ contactτης πίεσης επαφής με το πάχος κενού μεταξύ ασπίδας και περιβάλλον γεωυλικού, δημιουργεί αστάθεια στην αριθμητική επίλυση, χρησιμοποιείται μία εκθετική σχέση.

Η υποστήριξη προσομοιώνεται ως ενιαίο κυλινδρικό κέλυφος, αγνοώντας τους αρμούς.

Το ένεμα έχει χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με την σχέση που προτείνουν οι Kasper&Meschke (2004)^[1]. Η πίεση του προσομοιώνεται με μία αρχική ιστροπική τάση ίση με την τάση εισπίεσης του στο ουραίο κενό.

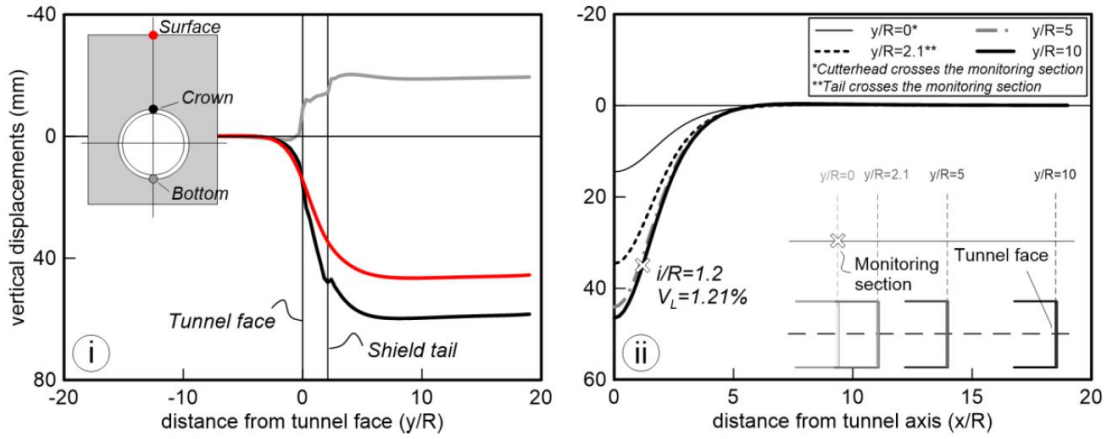


Εικόνα 3-19: Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων [14]

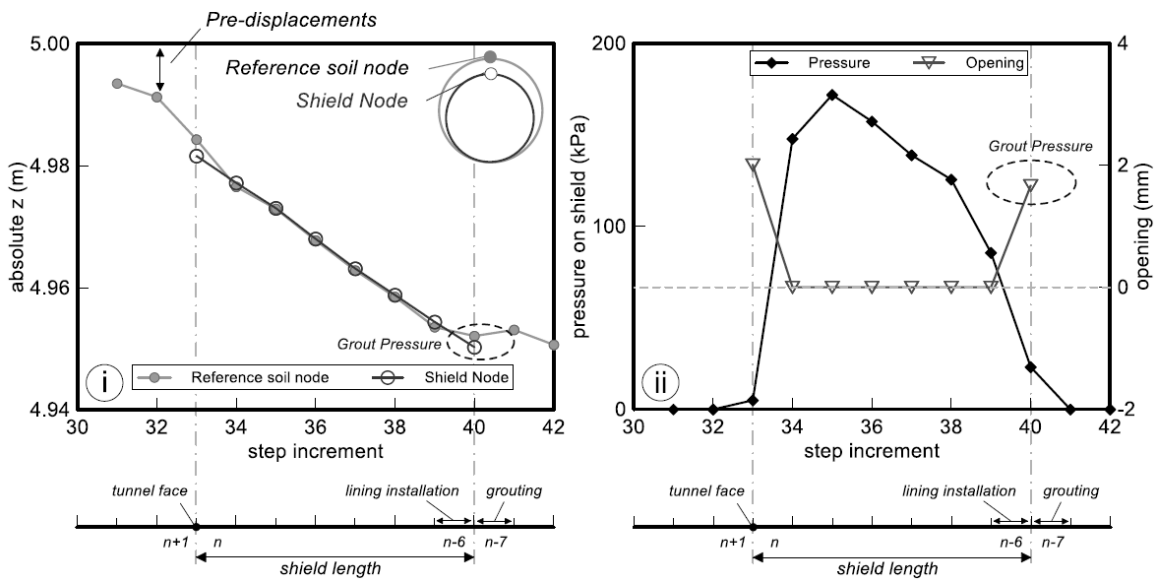


Διάγραμμα 3-10: (i) 'Hard' contact και εκθετική σχέση πίεσης αλληλεπίδρασης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωλικού και (ii) χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας του ενέματος. [14]

Κοιτώντας ένα κόμβο εδάφους στην στέψη της σήραγγας παρατηρούνται συγκλίσεις μπροστά από το μέτωπο 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 $10R$, όπου R ακτίνα της σήραγγας, από το μέτωπο, αλλά 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 3-12: (i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων. [14]



Διάγραμμα 3-12: (i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας. [14]

4. ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κύριο εργαλείο για την διερεύνηση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ένα τριδιάστατο προσομοίωμα, σε περιβάλλον λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Το προσομοίωμα συμπεριλαμβάνει το μέσο όπου γίνεται η διάνοιξη της σήραγγας, το μηχάνημα, την τελική επένδυση καθώς και λοιπά άλλα στοιχεία της μηχανοποιημένης όρυξης, τα οποία έχουν ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης ρηχής σήραγγας, και επηρεάζουν την τιμή τους. Διέπεται από νόμους και σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών ομάδων στοιχείων του, με σκοπό την ακριβέστερη δυνατή προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου και τον υπολογισμό των αναλύσεων είναι το *Abaqus FEA* v.6.13, ανεπτυγμένο από την εταιρία *Dassault Systèmes Simulia Corp.* Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας *Abaqus/Standard*, ένας γενικός κώδικας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με ευρεία εφαρμογή σε στατικά και δυναμικά προβλήματα, βελτιστοποιημένος για επίλυση θεμάτων επαφής και μη-ελαστικών υλικών. Η μόρφωση και διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε μέσω του *Abaqus/CAE*. Η εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων, των νόμων και των συνθηκών μεταξύ ορισμένων ομάδων των στοιχείων του μοντέλου έγινε μέσω αρχείων εισαγωγής (*.inp* - input files).

4

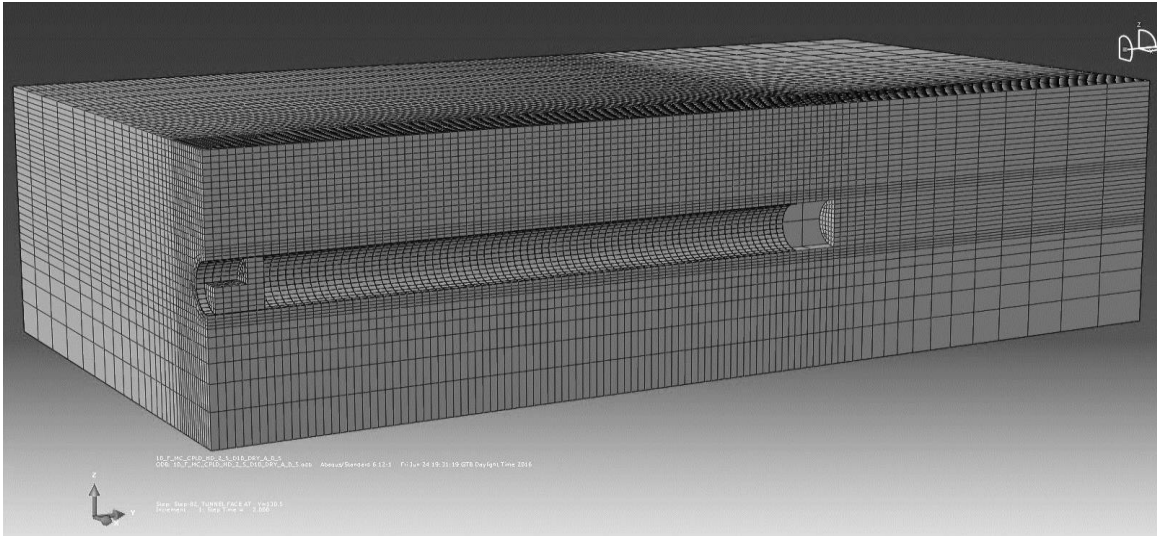
4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1.1 Γεωμετρία του Μοντέλου και Διακριτοποίηση του Εδάφους

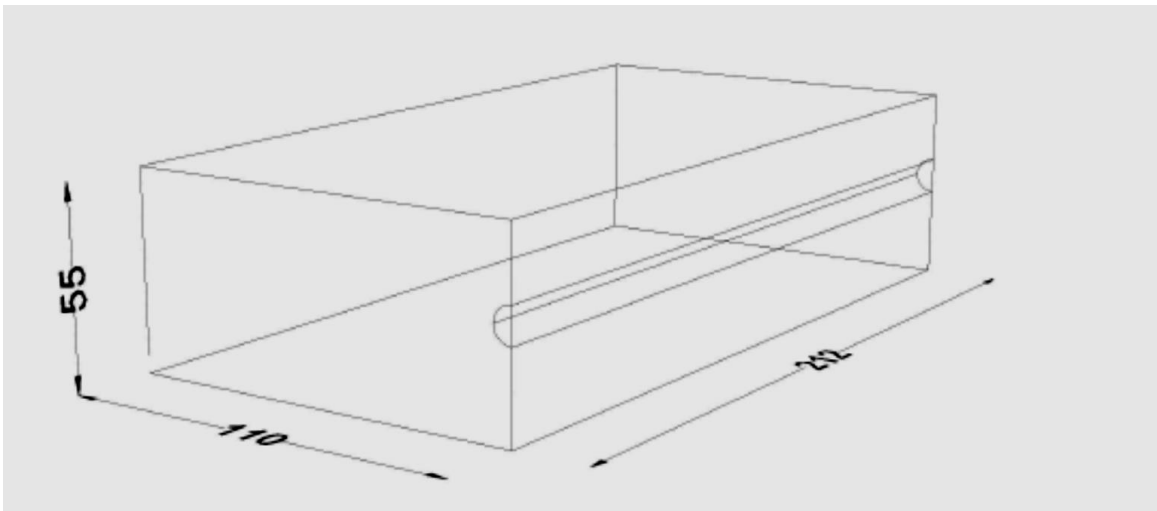
Το πρόβλημα των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης ευθείας σήραγγας σε ιδανικές συνθήκες *greenfield* μπορεί να θεωρηθεί συμμετρικό, γεγονός που εξοικονομεί υπολογιστική ισχύ και κατά συνέπεια χρόνο. Σχεδιάστηκε, λοιπόν, ένα προσομοίωμα

συμμετρικό ως προς το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της σήραγγας (επίπεδο yz), και με διαστάσεις τέτοιες ώστε να θεωρούνται επαρκείς και τα αποτελέσματα να μην επηρεάζονται από τις συνθήκες των ορίων (boundary effects).

Συγκεκριμένα, κατά τη διεύθυνση $x-x$ το πλευρικό όριο του μοντέλου από τον άξονα της σήραγγας τοποθετήθηκε στα 110m (11D, όπου Dη διάμετρος της σήραγγας), το ύψος του μοντέλου είναι 55m και το μήκος του μοντέλου είναι 212m (περίπου 20D). Η εκλογή των παραπάνω διαστάσεων στηρίχθηκε σε αναλύσεις ευαισθησίας και κατόπιν μελέτης της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικής με το θέμα.



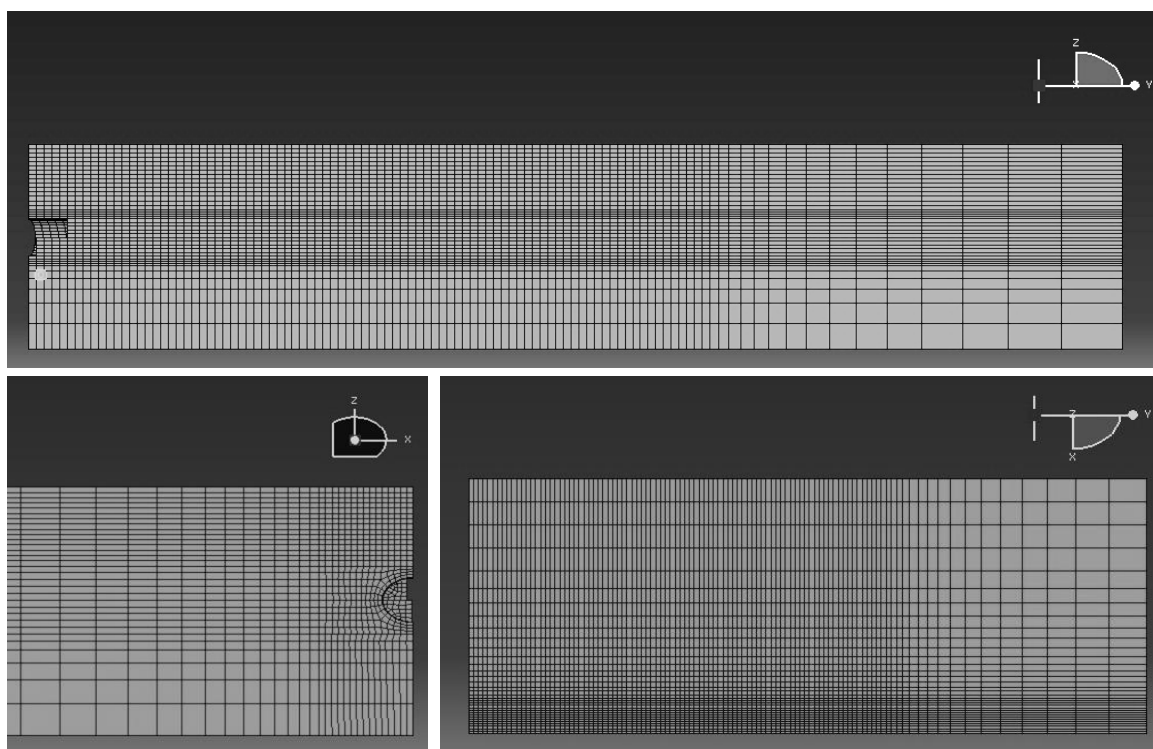
Εικόνα 4-1: Απεικόνιση του προσομοιώματος στο περιβάλλον του Abaqus/CAE



Εικόνα 4-2: Σκαρίφημα διαστάσεων μοντέλου

Καθώς έγινε εκμετάλλευση των συμμετρικών ιδιοτήτων του προβλήματος, ήταν απαραίτητη η εφαρμογή κάποιων περιορισμών των βαθμών ελευθερίας των κόμβων των συνοριακών επιφανειών του μοντέλου. Έτσι, αρχικά δεσμεύτηκαν οι κατά x - $χ$ μετακινήσεις και στροφές των κόμβων στο επίπεδο που διχοτομεί την εκσκαφή ($X=0$). Οι κόμβοι στην επιφάνεια ($Z=25$) αφέθηκαν παντελώς ελεύθεροι ενώ οι κόμβοι στον πάτο του προσομοιώματος ($Z=-30$) δεσμεύτηκαν πλήρως. Τέλος, στους κόμβους στις εκατέρωθεν επιφάνειες του μοντέλου ($Y=0$, $Y=212$ και $X=110$) παρεμποδίζονται οι μετακινήσεις εκτός επιπέδου και κατά την διεύθυνση z - z .

Η διακριτοποίηση των στοιχείων του μοντέλου είναι πυκνή στη σήραγγα και πέριξ αυτής και προοδευτικά αραιώνει στα άκρα του προσομοιώματος. Η φιλοσοφία αυτή ακολουθείται ώστε να επιτευχθεί από τη μία ακρίβεια αποτελεσμάτων στις περιοχές ενδιαφέροντος και από την άλλη εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Κατά την διεύθυνση y και μέχρι την επιφάνεια $Y=130,5$ τα στοιχεία έχουν πλευρά $1,5m$ (βήμα εκσκαφής). Ύστερα βαθμιαία αυξάνουν μέχρι το μήκος κατά y $11,85m$. Κατά την διεύθυνση του άξονα x - x' , τα στοιχεία διακριτοποιούνται με πλάτος $1m$ έως και την επιφάνεια $X=15$. Έπειτα, αυξάνουν το μήκος τους βαθμιαία μέχρι $10m$ έως την επιφάνεια $X=70$. Ακολουθούν τέσσερις σειρές στοιχείων πλάτους $10m$ μέχρι το όριο. Καθ' ύψος, τα στοιχεία από την επιφάνεια $Z=25$ και μέχρι την στάθμη $Z=7,5$ λαμβάνουν ύψος $1,17m$. Στην περιοχή της σήραγγας τα στοιχεία πυκνώνουν αρκετά κατόπιν κατάλληλης εντολής στο πρόγραμμα και από την στάθμη $Z=-9$ έως την βάση $Z=-30$ αυξάνουν



Εικόνα 4-3: Διακριτοποίηση των στοιχείων του μοντέλου.

προοδευτικά από 1,8mσε ύψος 8mπερίπου.

Όσον αφορά στη σήραγγα, πρόκειται για μία σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$ και εμβαδό διατομής 78,54m, με τον άξονά της, ο οποίος διέρχεται από το κέντρο της διατομής, να βρίσκεται 25m ($H/D=2,5$, όπου H το ύψος των υπερκειμένων από τον άξονα της σήραγγας) κάτω από την επιφάνεια και να είναι παράλληλος στον άξονα $y-y$. Το μήκος της εκσκαφής είναι 130,5m. Τα υπόλοιπα 81,5m (περίπου $8D$) κατά μήκος του προσομοιώματος θεωρείται πως επαρκούν ώστε να εκδηλωθούν τυχόν φαινόμενα πρόδρομων συγκλίσεων και επιφανειακών καθιζήσεων μπροστά από το μέτωπο.

Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών στοιχείων προσομοιώματος

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

L_y	212	[m]
L_x	110	[m]
L_z	55	[m]
L_{TUNNEL}	130.5	[m]
D	10	[m]
$A_{,face}$	78.54	[m ²]
H	25	[m]
H/D	2.5	-

4.1.2 Καταστατικό μοντέλο

Στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας το έδαφος θεωρήθηκε ως συνεκτικό, ομογενές και χρησιμοποιήθηκε ως καταστατικός νόμος το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (MC). Κύριο χαρακτηριστικό του κριτηρίου αυτού ως ελαστικού – τέλεια πλαστικού νόμου, είναι η θεώρηση πως το σημείο διαρροής και το σημείο αστοχίας ταυτίζονται. Η κατάσταση λοιπόν αστοχίας/διαρροής είναι δεδομένη, προσδιορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους του μοντέλου και δεν επηρεάζεται από πλαστικές

παραμορφώσεις. Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων καθορίζεται από τον νόμο του Hooke.

Το καταστατικό μοντέλο MC, διέπεται από την γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης τ και της ορθής τάσης σ , που αναπτύσσονται κατά την θραύση πάνω στην επιφάνεια αστοχίας:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

όπου φ η γωνία εσωτερικής τριβής και c η συνοχή

Σημειώνεται πως η παραπάνω σχέση αντιπροσωπεύει την περιβάλλουσα αστοχίας στο διδιάστατο επίπεδο. Στον τριδιάστατο χώρο η σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{cases} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right] \sin \varphi + c * \cos \varphi \\ \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right] \sin \varphi + c * \cos \varphi \\ \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} = \left[\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \right] \sin \varphi + c * \cos \varphi \end{cases}$$

Το βασικότερο μειονέκτημα του κριτηρίου MC αναφορικά με την μοντελοποίησή του, είναι η ύπαρξη «γωνιών» στην πορεία φόρτισης και στην επιφάνεια διαρροής, γεγονός που οδηγεί σε αδυναμία μονοσήμαντου προσδιορισμού της παραγώγου και παράληψη της κύριας τάσης σ_2 (θεωρείται συχνά ίση με την σ_3). Από την άλλη, το κυρίαρχο πλεονέκτημά του μοντέλου MC είναι η ταχύτητα των υπολογισμών που προσφέρει, η απλότητα στην κατανόηση και την χρήση καθώς και το μικρό πλήθος μεταβλητών παραμέτρων.

Η ανάλυση με το μοντέλο αυτό απαιτεί την εισαγωγή τιμών πέντε (5) εδαφικών γεωμηχανικών παραμέτρων: το μέτρο ελαστικότητας E , ο λόγος του Poisson ν , η γωνία διαστολικότητας ψ και οι παράμετροι αντοχής c και φ , η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα.

4.1.3 Εδαφικό προφίλ μελέτης

Στο προσομοίωμα, η διάνοιξη της σήραγγας έλαβε χώρα μόνο μέσα ένα εδαφικό σχηματισμό και μελετήθηκε για ένα μόνο εδαφικό προφίλ, κοντά στα χαρακτηριστικά της τυπικής αργίλου, σε κορεσμένη και ξηρή κατάσταση. Στο μοντέλο, το έδαφος

κατασκευάστηκε από οκτακομβικά εξαεδρικά ελαστικά στοιχεία. Τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4-2: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμηχανικών χαρακτηριστικών προσομοιώματος

ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛ

K_o	0.5	-
γ_{sat}	20	[kN/m ³]
Φ (φ)	20	[deg]
c	15	[kPa]
E	24.1	[MPa]
ν	0.3	-
ψ	3.3	[deg]
C_u	80.2	[kPa]
N_φ	2	-

Η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους c_u 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 παρακάτω εξίσωση έγινε η υπόθεση ότι η τιμή του συντελεστή A του τύπου του Skempton ισούται με 1/3.

$$N_\varphi = (\tan(45 + \varphi/2))^2$$

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

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους εκτιμήθηκε μέσω της εξίσωσης:

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

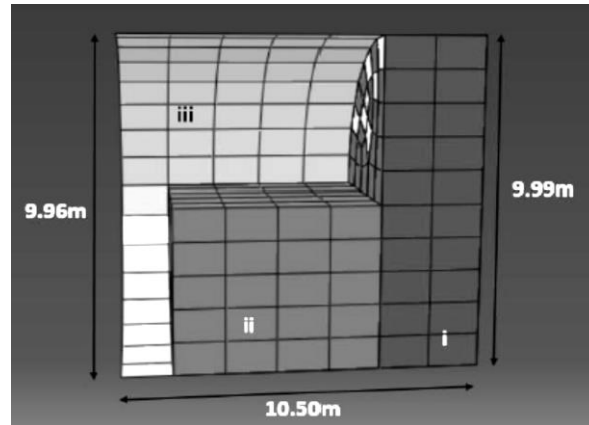
4.1.4 Κατασκευή, Προσομοίωση και Γεωμετρία του Μηχανήματος

Το προσομοίωμα του EPB TBM κατασκευάστηκε στο Abaqus/CAE (υποπεριβάλλον *Sketch*). Συνίσταται από την κοπτική κεφαλή, τον θάλαμο εκσκαφής, τον διαφραγματικό τοίχο (submerged wall), την ασπίδα και ένα μέρος όπου θεωρείται πως περιέχονται τα υπόλοιπα μηχανολογικά συστήματα και εξοπλισμός όπως ο ατέρμων κοχλίας, το control room, ο ερέκτορας κ.α. Το τελευταίο θα αναφέρεται σε αυτή την ενότητα ως back-upσύστημα.

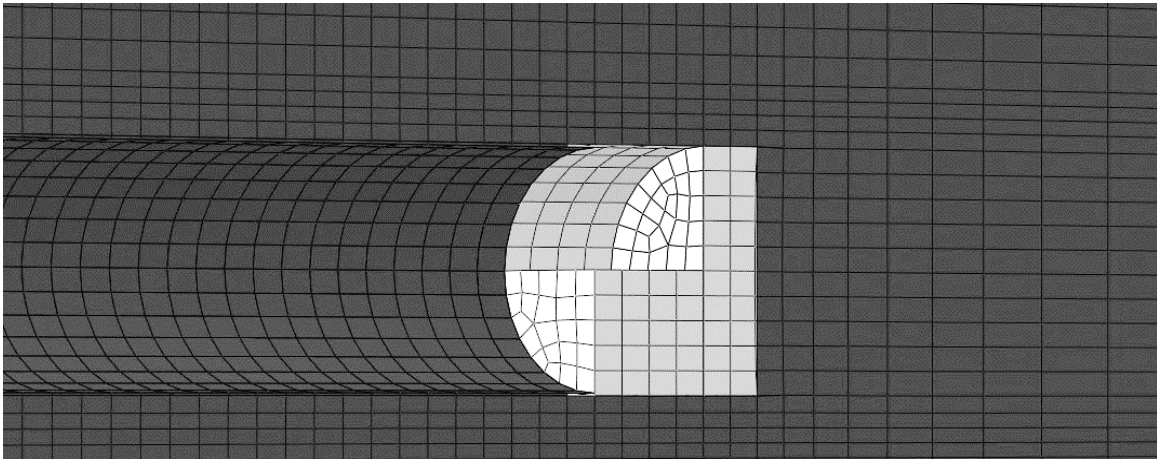
Το μηχάνημα διακριτοποιήθηκε με τρόπο τέτοιο, ώστε οι ακμές και οι κόμβοι των εξωτερικών στοιχείων του να συμπίπτουν γεωμετρικά με αυτά του ορίου εκσκαφής του περιβάλλοντος εδάφους. Επιπρόσθετα, κατά y-y' ακολουθείται διαστασιολόγηση όμοια με τα στοιχεία του μοντέλου, δηλαδή στοιχεία διάστασης $y=1,5\text{m}$. Η ασπίδα, η κοπτική κεφαλή και ο διαφραγματικός τοίχος κατασκευάστηκαν από τετρακομβικά shell elements S4, ενώ το υλικό του θαλάμου εκσκαφής και το back-up σύστημα με οκτακομβικά εξαεδρικά solid elements C3D8. Επιπλέον, το back-up σύστημα μοντελοποιήθηκε γεωμετρικά ως ένας ημικύλινδρος. Το TBM λόγω συμμετρίας εισήχθη στο μοντέλο κατά το ήμισυ του, λόγω της συμμετρικής προσέγγισης του προβλήματος.

Το TBM αρχικά μορφώνεται ως ορθός κύλινδρος. Η προσομοίωση της κωνικότητας της ασπίδας ακολούθησε δική της διαδικασία, όπως περιγράφεται παρακάτω:

- Οι κόμβοι όλων των στοιχείων του μηχανήματος με τις συντεταγμένες τους αφού ληφθούν από το CAE σε μορφή αρχείου εισαγωγής (.inp), εισάγονται σε κατάλληλα μορφωμένο λογιστικό φύλλο (.xls).
- Στο λογιστικό φύλλο, εισάγονται οι κατάλληλες τριγωνομετρικές φόρμουλες και δημιουργούνται οι νέες συντεταγμένες του κωνικού πλέον TBM. Το κενό υπερεκσκαφής στην κεφαλή είναι 1cm και στην ουρά λόγω κωνικότητας είναι 4cm.
- Οι κόμβοι πλέον με νέες συντεταγμένες επανεισάγονται με αντικατάσταση στο input file του CAE όπου μορφώθηκε το μηχάνημα



Εικόνα 4-5: Διαστάσεις του μηχανήματος του μοντέλου. Διακρίνονται (i) ο θάλαμος εκσκαφής (ii) το back-υρσυστήμα (iii) η ασπίδα και (iv) ο διαφραγματικός τοίχος (πεσσοειδή στοιχεία)



Εικόνα 4-5: Απεικόνιση του μηχανήματος (EPB TBM) στο περιβάλλον του Abaqus/CAE

Οι διαστάσεις του μηχανήματος είναι 10,5m μήκος, 9,99m διάμετρος στην κεφαλή και 9,96m στην ουρά. Το πάχος του θαλάμου εκσκαφής είναι 3m και το μήκος του back-υρσυστήματος είναι 6m.

Η εισαγωγή του μηχανήματος στο μοντέλο, γίνεται μέσω εισαγωγής των στοιχείων του αρχείου εισαγωγής του μοντέλου του μηχανήματος στο αντίστοιχο του γενικού μοντέλου. Το ειδικό βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson των στοιχείων που απαρτίζουν το μηχάνημα δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Στο Παράρτημα παρατίθενται ενδεικτικά ένα αρχείο εισαγωγής .inp του μηχανήματος και ένα λογιστικό φύλλο για την κατασκευή της κωνικότητας.

Πίνακας 4-3: Στοιχεία δυσκαμψίας των μερών που απαρτίζουν το μηχάνημα

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ		
Y_{SHIELD}	78,5	[kN/m ³]
$Y_{CUTTERHEAD}$	78,5	[kN/m ³]
Y_{WALL}	78,5	[kN/m ³]
Y_{BACKUP}	16	[kN/m ³]
Y_{muck}	13	[kN/m ³]
E_{SHIELD}, ν_{SHIELD}	210 [GPa],	0,2
$E_{CUTTERHEAD}, \nu_{CUTTERHEAD}$	210 [GPa],	0,2
E_{WALL}, ν_{WALL}	210 [GPa],	0,2
E_{BACKUP}, ν_{BACKUP}	0,06	0,3

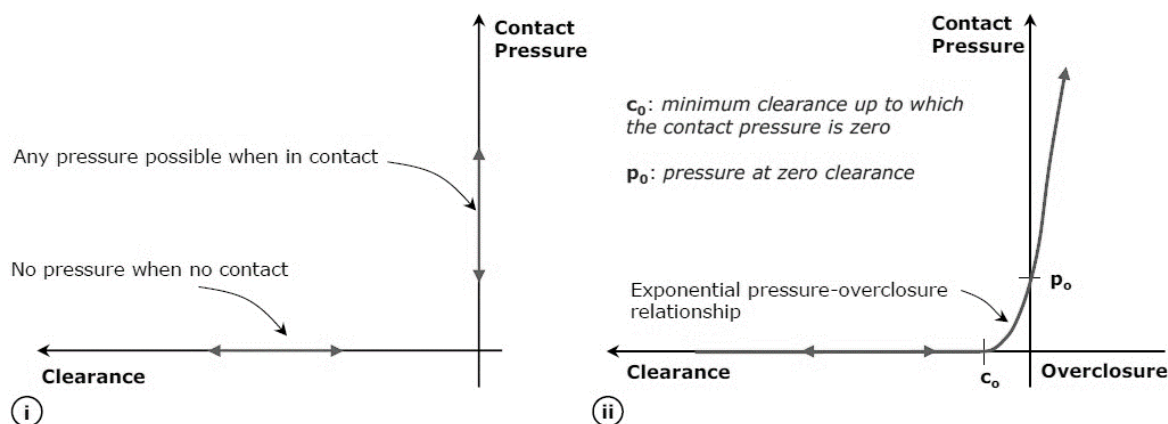
4.1.4.1 Ορισμός διεπιφάνειας μηχανήματος-περιβάλλοντος εδάφους

Η κατά το δυνατό ρεαλιστικότερη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και του εδάφους αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στη προσομοίωση της μηχανοποιημένης όρυξης. Η αλληλεπίδραση ασπίδας – περιβάλλοντος γεωυλικού γίνεται με τον ορισμό μιας διεπιφάνειας, μιας δηλαδή συνθήκης που αφορά στις ιδιότητες επαφής των δύο μερών.. Η χρήση διεπιφανειών είναι μια από τις κυριότερες μεθόδους προσομοίωσης αλληλεπίδρασης δύο επιφανειών πλέον στις FEA και FDM μελέτες. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται ανάλογη τεχνική με αυτή που χρησιμοποιήθηκε και από τους Nagel, Stascheit, & Meschke (2011)^{[11][14]}. Η υπερεκσκαφή (overcut) και η κωνικότητα (conicity) της ασπίδας συμπεριλαμβάνονται στην μοντελοποίηση γεωμετρικά, με ορισμό στο μπροστά και πίσω τμήμα του μηχανήματος μικρότερης διαμέτρου από το όριο της εκσκαφής.

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις επιφάνειες ορίζεται από δύο συνιστώσες, μία ορθή και μία εφαπτομενική. Ιδανικά, επαφή αναπτύσσεται όταν το μέγεθος της απόστασης ανάμεσα στις δύο επιφάνειες (clearance) γίνεται μηδέν και τότε η πίεση μεταφέρεται πλήρως από τη μία επιφάνεια στην άλλη.. Αυτή η συνθήκη, η οποία αναφέρεται ως «“hard” contact», είναι προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα *Abaqus* ως

νόμος αλληλεπίδρασης δύο επιφανειών που εφάπτονται και συνοψίζεται σε παρακάτω διάγραμμα. Κατά την hard contact συνθήκη, δύο επιφάνειες κινούνται ανεξάρτητα όταν δεν ακουμπούν μεταξύ τους, ενώ μετατοπίζονται ενιαία όταν βρίσκονται σε επαφή. Δεν υπάρχει όριο στο μέγεθος της ασκούμενης πίεσης επαφής που μπορεί να μεταδοθεί μεταξύ των επιφανειών και οι επιφάνειες θεωρείται πως απομακρύνονται όταν η αναπτυσσόμενη πίεση μεταξύ τους γίνεται μηδέν ή αρνητική. Η παραπάνω συμπεριφορά, όμως, αφενός δεν μπορεί να περιγράψει τις παραμορφώσεις και τις διεισδύσεις κατά την αλληλεπίδραση ασπίδας - εδάφους, και σε συνδυασμό με την τεχνική remeshing (επανατοποθέτηση κόμβων και αναμόρφωση των στοιχείων προ της κοπτικής κεφαλής) τείνουν να συμβούν πολλές αριθμητικές αστάθειες και να εξαχθούν εσφαλμένα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, μια «softened» contact με εκθετική συμπεριφορά για τη σχέση pressure-overclosure υιοθετήθηκε, όπου οι επιφάνειες ξεκινούν να μεταφέρουν πίεση επαφής μεταξύ τους όταν το μέγεθος της απόστασης (clearance) ανάμεσα τους, μετρημένο στην ορθή διεύθυνση της επαφής, μειώνεται σε μια προκαθορισμένη τιμή c_0 (clearance threshold). Κατόπιν του σημείου αυτού, η μεταφερόμενη πίεση επαφής αυξάνεται εκθετικά ενώ η απόσταση συνεχίζει να μειώνεται, μέχρις ότου για μηδενική απόσταση η αναπτυσσόμενη πίεση αντιστοιχεί σε τιμή p_0 . Να σημειωθεί πως όσο το μέγεθος c_0 τείνει στο 0, τόσο η pressure-overclosure συμπεριφορά προσομοιάζει την hard contact.^[14]

Οι τιμές των παραμέτρων c_0 και p_0 έχουν ληφθεί από υπολογισμούς που έχουν γίνει σε παραμετρικές αναλύσεις απλοποιημένων μοντέλων όμοιας γεωμετρίας και σε όμοιες εντατικές καταστάσεις, ενισχύοντας έτσι ταυτόχρονα την αριθμητική σταθερότητα του μοντέλου και την αξιοπιστία της προσομοίωσης της μεταφοράς πίεσης από την διεπιφάνεια.



(i) Διάγραμμα 4-1: Σχέσεις διεπαφής. (i) Hard contact συμπεριφορά και (ii) Soft Contact συμπεριφορά

Τέλος, αν και στο Abaqus υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης διατμητικής συμπεριφοράς μεταξύ των επιφανειών, εισάγοντας έναν συντελεστή τριβής μ , η τριβή μεταξύ της ασπίδας και του ορίου εκσκαφής αγνοείται ($\mu=0$). Το παραπάνω βασίζεται στην εργασία των Maidl et al. (2012), όπου αποδεικνύεται πως η διαδικασίες λίπανσης γύρω από την ασπίδα και ενεμάτωσης πρακτικά μηδενίζουν την τριβή.

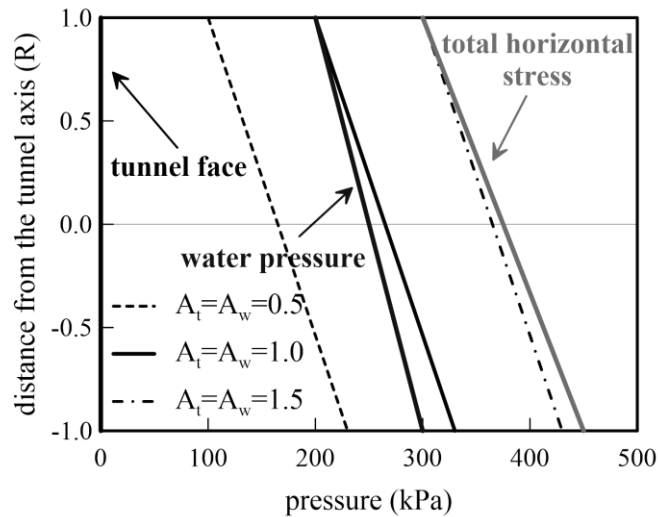
4.1.4.2 Πίεση μετώπου – Η παράμετρος A

Στο προσομοίωμα η υποστήριξη του μετώπου μέσω του EPB επιτυγχάνεται με την εισαγωγή πίεσης στην αντίστοιχη επιφάνεια του μετώπου που εκσκάπτεται σε κάθε βήμα. Η προσομοίωση της υποστήριξης δεν γίνεται με την επαφή της ασπίδας του EPB στο μέτωπο, αλλά με υπολογισμό των τάσεων υποστήριξης και εισαγωγή αυτών στο μοντέλο, ως φορτία στους κόμβους, σε κάθε βήμα προχώρησης.

Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο θεωρείται πως έχει τραπεζοειδή κατανομή, λόγω γεωστατικών και υδροστατικών τάσεων, έχοντας ως χαρακτηριστική τιμή την πίεση P_0 στην κορυφή του θαλάμου εκσκαφής, η οποία καθορίζεται από την δύναμη ώσης των εμβόλων ωθήσεως, τον ρυθμό μεταφοράς του υλικού εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία και την πίεση του αέρα που εισάγεται στον θάλαμο. Η τιμή P_0 συσχετίζεται με την αντίστοιχη υδροστατική πίεση στην κορυφή της διατομής που εκσκάπτεται, ώστε να μπορεί να συγκριθεί και να ρυθμιστεί η υποστήριξη του μετώπου σε διαφορετικές στάθμες, όπως το βάθος διάνοιξης της σήραγγας. Ορίζεται έτσι η παράμετρος A, η οποία λαμβάνεται ως ο λόγος της πίεσης P_0 προς την υδροστατική πίεση στο αντίστοιχο σημείο^[15].

$$A = \frac{P_0}{\gamma_w(H - D/2)}$$

Στην πράξη, η εφαρμοζόμενη πίεση μετώπου μπορεί να θεωρηθεί πως έχει δύο σκέλη ($A=A_t=A_w$), την εξισορρόπηση της πίεσης του νερού των πόρων (A_t) και των ενεργών τάσεων (A_w). Το παρακάτω διάγραμμα^[16] συσχετίζει την παράμετρο της πίεσης μετώπου A με τις γεωστατικές ενεργές τάσεις και τις υδροστατικές σε σήραγγα $H/D=2.5$.



Διάγραμμα 4-2: Απεικόνιση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου υποστήριξης μετώπου A , των ολικών οριζόντιων γεωστατικών και των υδροστατικών πιέσεων σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα της σήραγγας [16]

Όπως απεικονίζεται, για $A=0.5$ η εφαρμοζόμενη πίεση αντιστοιχεί στο 70% περίπου των υδροστατικών και 50% των συνολικών γεωστατικών πιέσεων. Η τιμή $A=1$ υπερκαλύπτει τις τιμές των υδροστατικών πιέσεων αλλά αντιστοιχεί μόνο στο 70% των συνολικών γεωστατικών. Όπως όμως θα αναφερθεί παρακάτω σε αυτή την ενότητα, αυτή είναι μια επιθυμητή τιμή, κυρίως για λειτουργικούς λόγους. Τέλος, για $A=1.5$, η εφαρμοζόμενη υποστήριξη μετώπου εξισορροπεί σχεδόν ολοκληρωτικά τις οριζόντιες γεωστατικές πιέσεις.^[16]

Η αύξηση της πίεσης του μετώπου γίνεται γραμμικά με το βάθος συναρτήσεως του γ_{muck} που αντιστοιχεί στο ειδικό βάρος του υλικού που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής. Κατόπιν βιβλιογραφικής αναζήτησης, βρέθηκε πως οι τιμές του ειδικού βάρους της πάστας (muck) στον θάλαμο εκσκαφής κυμαίνονται στο εύρος $10 - 16.5 \text{ kN/m}^3$ και επιλέχθηκε για το εν λόγω μοντέλο η τιμή 13 kN/m^3 . Η εφαρμοζόμενη από το EPB πίεση

στο μέτωπο της εκσκαφής στη στάθμη του άξονα της σήραγγας (κέντρο διατομής) δίνεται από την παρακάτω σχέση.

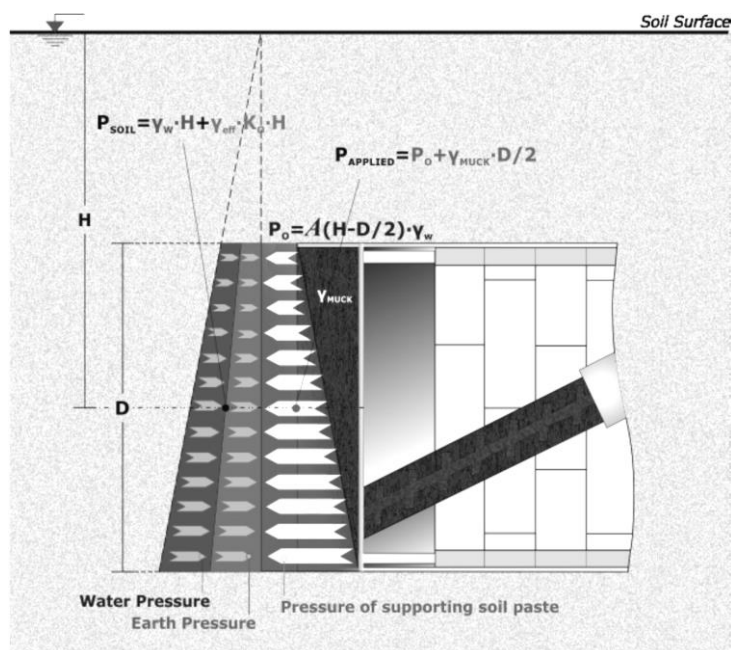
$$P_{applied} = P_0 + \gamma_{muck} * \frac{D}{2}$$

$$\frac{P_{applied}}{P_{ho}} = \frac{A * \gamma_w \left(H - \frac{D}{2} \right) + \gamma_{muck} * \frac{D}{2}}{\gamma_{eff} * H * K_0 + \gamma_w * H}$$

Όπου: γ_{eff} : το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους (kN/m^3)

P_{ho} : η οριζόντια πίεση των γαιών του μετώπου (kPa)

Η εξισορρόπηση του μετώπου περιγράφεται από την εξίσωση []. Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός της υποστήριξης δεν είναι η πλήρης εξισορρόπηση των αποσταθεροποιητικών οριζόντιων τάσεων, αλλά η συγκράτηση του μετώπου σε ανεκτά όρια, ώστε να αποφευχθεί η ολική πλαστική αστοχία του που θα οδηγούσε σε εκτεταμένες παραμορφώσεις και μετακινήσεις. Ο λόγος $P_{applied}/P_{ho}$ στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής είναι 0.71. Γενικά μια τιμή του λόγου περί το 0.70 είναι ικανοποιητική για την υποστήριξη του μετώπου. Αντίθετα, μια τιμή που τείνει στο 1.0 αρχικά μοιάζει να εξισορροπεί πλήρως το μέτωπο, αλλά εν τέλει προκαλεί αρκετά προβλήματα στη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας, όπως η φθορά των κοπτικών, η δυσανάλογη κατανάλωση ενέργειας κ.α.^[17]



Εικόνα 4-6: Απεικόνιση των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής

Στις αναλύσεις αυτής της διπλωματικής η παράμετρος A θα λαμβάνει τις τιμές 0.5, 1.0, 1.5. Παρακάτω δίνεται συνοπτικός πίνακας όλων των τιμών των γεωστατικών μεγεθών της προσομοίωσης.

Πίνακας 4-4: Τιμές γεωστατικών μεγεθών μοντέλου

ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ					
P_0	500	[kPa]	K_0	0.5	
P_{v0}	500	[kPa]	γ_{sat}	20	[kN/m ³]
P_{h0}	375	[kPa]	γ_{eff}	10	[kN/m ³]
P_w	250	[kPa]	γ_{muck}	13	[kN/m ³]

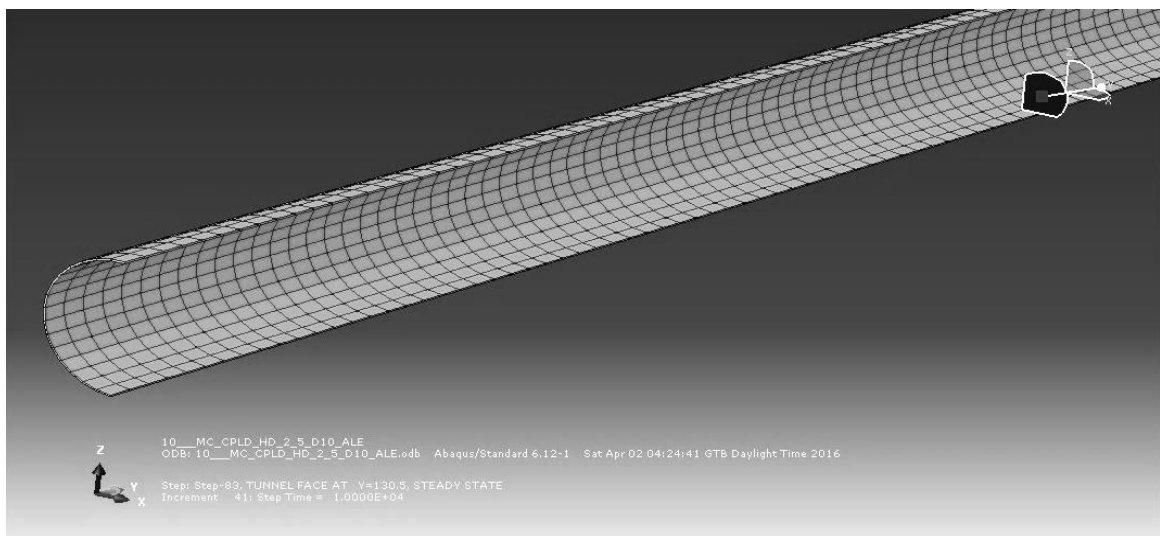
Πίνακας 4-5: Τιμές εφαρμοζόμενης πίεσης στο μέτωπο ανά τιμές παραμέτρου A

ΠΙΕΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ			
	$A = 0.5$	$A = 1.0$	$A = 1.5$
$P_{applied}$ [kPa]	165	265	365
$P_{applied}/P_{h0}$	0.44	0.71	0.97

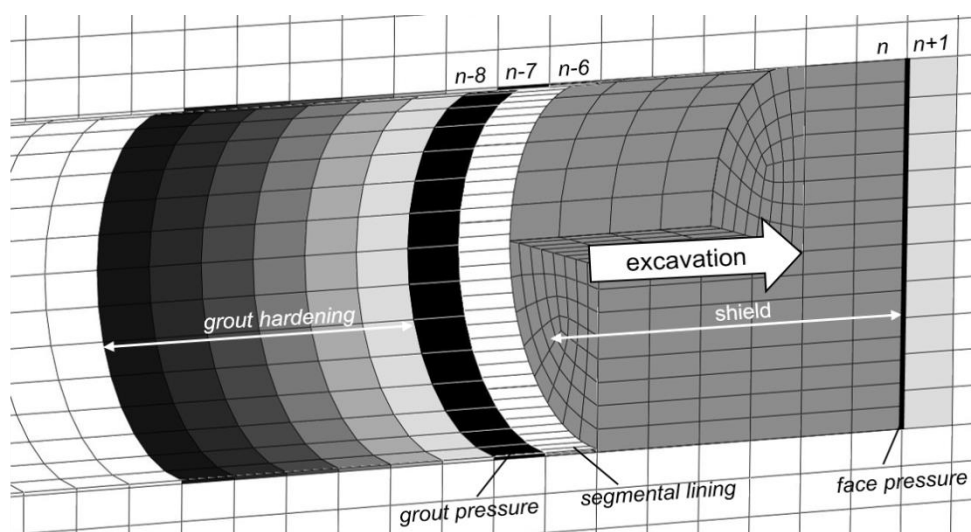
4.1.5 Κατασκευή και Προσομοίωση Ενέματος

Το ένεμα προσομοιώνεται ως οκτακομβικά εξαεδρικά στοιχεία. Αυτά δημιουργήθηκαν όχι αυτόματα από κάποιο εργαλείο του προγράμματος, αλλά μέσα στο αρχείο εισόδου της ανάλυσης. Έτσι, τα στοιχεία του ενέματος έχουν ως εξωτερικούς τέσσερεις κόμβους τους ίδιους με αυτούς του αντίστοιχου εδαφικού στοιχείου, και ως εσωτερικούς τους τέσσερεις του στοιχείου της επένδυσης. Τα εν λόγω στοιχεία, ενεργοποιούνται πάνω από τον δακτύλιο της τελικής επένδυσης, μόλις το μηχάνημα περάσει στο επόμενο βήμα και ο δακτύλιος αυτός βρεθεί εκτός της ασπίδας του μηχανήματος. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της ομάδας στοιχείων είναι πως κατά την πορεία της ανάλυσης, μεταβάλλεται η δυσκαμψία τους συναρτήσει μιας

καθορισμένης και χρονικά εξαρτώμενης σχέσης, προσομοιώνοντας έτσι την σκλήρυνση του ενέματος^[1]. Προκειμένου να γίνει προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της πίεσης του ενέματος, τα στοιχεία του εισάγονται με ένα αρχικό εγγενές ιστροπικό εντατικό πεδίο 400kPa-την πίεση στην στέψη της σήραγγας δηλαδή- και μηδενική δυσκαμψία ώστε να προσομοιωθεί κατάσταση υγρού υπό πίεση^[12]. Μετά την έγχυση, τα στοιχεία λόγω πολύ χαμηλής δυσκαμψίας τείνουν να διογκωθούν και να πιάσουν το περιβάλλον έδαφος έως μια κατάσταση ισορροπίας, ή έως ότου αναπτύξουν με την πάροδο του χρόνου την προκαθορισμένη δυσκαμψία, που στην παρούσα περίπτωση είναι 1GPa. Η δυσκαμψία αναπτύσσεται με τον χρόνο, κατά τον νόμο σκλήρυνσης που



Εικόνα 4-8: Απεικόνιση των στοιχείων του ενέματος στο περιβάλλον του Abaqus/CAE



Εικόνα 4-8: Απεικόνιση της προσομοίωσης της πορείας σκλήρυνσης του ενέματος στο μοντέλο προτείνουν οι Kasper and Meschke (2004).

4.1.6 Κατασκευή και Προσομοίωση Τελικής Επένδυσης

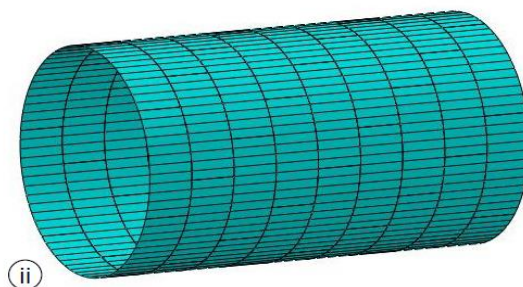
Όπως στις περισσότερες προσομοιώσεις μηχανοποιημένης όρυξης, η τελική επένδυση (final lining) στην εργασία αυτή μοντελοποιείται ως ένας ελαστικός, συνεχές κύλινδρος από επιφανειακά στοιχεία (shell elements) και για λόγους απλοποίησης, δεν λαμβάνεται υπόψιν καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων ή των δακτυλίων, παρά την ύπαρξη των εγκάρσιων και παράλληλων συνδέσμων και αρμών ανάμεσά τους στην πραγματικότητα. Η συγκεκριμένη θεώρηση, ελάχιστα αποκλίνει από την πραγματικότητα, αφού κλιμακωτή σύνδεση των συνδέσμων ενεργοποιεί μηχανισμό αλληλεπίδρασης δυνάμεων μεταξύ διπλανών δακτυλίων, δημιουργώντας τα λεγόμενα coupling effects (Arнау O., Molins C., 2012) κατά τα οποία η τελική επένδυση στο σύνολό της παρουσιάζει συμπεριφορά μονολιθικής κατασκευής. Τέλος, η τελική επένδυση προσομοιώνεται αδιαπέρατη, και όπως και στην πραγματικότητα, αντιπροσωπεύει ένα αδιαπέρατο όριο στους τοίχους της σήραγγας, ώστε το νερό να ρέει μόνο προς το μέτωπο. Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της επένδυσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-6: Στοιχεία τελικής επένδυσης του προσομοιώματος

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Lining width	0.5 [m]	γ_{concrete}	25 [kN/m ³]
Ring width	1.5 [m]	E, ν	30 [GPa], 0.2

Στο μοντέλο της παρούσας εργασίας, για την κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά εξαεδρικά στοιχεία (S4 shell elements), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μονολιθικά. Σε κάθε βήμα αρχικά απλά δημιουργείται ένας μόνο δακτύλιος επένδυσης, μέσα στην ασπίδα του μηχανήματος. Σε επόμενο στάδιο



Εικόνα 4-9: Απεικόνιση των στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας σε πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. (Kavvadas et al. 2005)

ενώνεται με την ήδη τοποθετημένη επένδυση και αλληλεπιδρά με το έδαφος (ενεργοποίηση).

4.2 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων, δηλαδή η εκσκαφή, η προχώρηση του TBM με παράλληλη υποστήριξη μετώπου, η τοποθέτηση της επένδυσης και η ενεμάτωση προσομοιώνεται στην πλειονότητα των τριδιάστατων (3D) αναλύσεων ως διαδοχική απενεργοποίηση και αφαίρεση «φετών» πεπερασμένων στοιχείων από το μέτωπο της εκσκαφής και ταυτόχρονη μεταφορά φορτίων, στοιχείων και συνθηκών. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως «βήμα-προς-βήμα» ανάλυση και υιοθετήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

Κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας αποτελείται από 83 βήματα. Εξαιρούνται οι αναλύσεις σε ξηρές συνθήκες, από τις οποίες απουσιάζει το τελευταίο και ολοκληρώνονται σε 82 βήματα. Οι αναλύσεις θεωρείται ότι εκτελέστηκαν επιτυχώς, όταν ολοκληρωθεί εκσκαφή μήκους ίσου με 130.5m (13D) στα προκαθορισμένα βήματα. Τα χαρακτηριστικά βήματα των αναλύσεων περιγράφονται παρακάτω.

4.2.1 Γεωστατικό Βήμα

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι το γεωστατικό βήμα. Όπως τα περισσότερα λογισμικά ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη γεωτεχνική μηχανική, έτσι και το *Abaqus FEA v.6.13*, αναλύει σε ένα πρώτο γεωστατικό βήμα και εισάγει στο μοντέλο τις αρχικές γεωστατικές τάσεις, κατά τα δεδομένα που έχει δώσει ο χρήστης. Το έδαφος σε αυτό το στάδιο αναλαμβάνει το αρχικό εντατικό πεδίο (στην εν λόγω περίπτωση βαρυντικό) και το πρόγραμμα υπολογίζει τις εντάσεις μέσα στην εδαφική μάζα σε συνθήκες ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες στα όρια (boundary conditions). Το βήμα αυτό λειτουργεί ως αφετηρία για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και είναι απαραίτητο για τη σύγκλιση των αναλύσεων.[]

4.2.2 Βήμα Εισαγωγής του TBM

Το EPB TBM εισάγεται στο μοντέλο και ενεργοποιείται έπειτα της ολοκλήρωσης του γεωστατικού βήματος (step 0). Στο βήμα αυτό ενεργοποιείται και η συνθήκη διεπιφάνειας μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και της νεωτερικής παρειάς της εκσκαφής. Τα στάδια του βήματος περιγράφονται παρακάτω.

- Αφαιρούνται στοιχεία εδάφους στο σύνορο του μοντέλου για μήκος και διάμετρο ίσα με αυτά που αντιστοιχούν στο TBM. Συγκεκριμένα αφαιρούνται 7 «φέτες» εκσκαφής (7 x 1.5m, R=5m).
- Εισάγεται το TBM με όλα τα συνιστούμενα μέρη του, τα οποία είναι η κοπτική κεφαλή, ο θάλαμος εκσκαφής, ο διαφραγματικός τοίχος, η ασπίδα, το back-υψύστημα και ενεργοποιείται η συνθήκη διεπιφάνειας ασπίδας-περιβάλλοντος εδάφους. Λόγω κωνικότητας και για να προσομοιωθούν οι υπερεκσκαφές, όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. υποενότητα 3.1.4) η διάμετρος του μηχανήματος είναι μικρότερη από τα στοιχεία που αφαιρέθηκαν.
- Εφαρμόζεται και ενεργοποιείται η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο, ως συνθήκη νέας επιφάνειας. Επίσης, εισάγονται οι κατάλληλες τιμές πιέσεων των πόρων στις αντίστοιχες ομάδες κόμβων του μετώπου.
- Τοποθετείται ο πρώτος δακτύλιος των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, ο οποίος όμως βρίσκεται εσωτερικά της ουράς του EPB, και δεν αλληλεπιδρά ακόμα με το εδάφος. Θα ενεργοποιηθεί και θα χρησιμοποιηθεί ως υποστήριξη στην επόμενη προχώρηση του EPB.

4.2.3 “n” Βήμα

Μετά την τοποθέτηση και ενεργοποίηση του μηχανήματος εκσκαφής (step 1), τα βήματα της ανάλυσης ακολουθούν ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο μέχρι το πέρας της εκσκαφής (step 82). Υποθέτοντας πως η ανάλυση είναι στο βήμα “n”, παρακάτω περιγράφονται τα υποβήματα καθώς η ανάλυση προχωρά από το βήμα “n” στο βήμα “n+1”. Τα βήματα αυτά ουσιαστικά προσομοιώνουν την διαδικασία διάνοιξης και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης.

- Αφαιρείται η εδαφική φέτα εκσκαφής που αντιστοιχεί στο βήμα «n+1» μήκους 1.5m
- Γίνεται προχώρηση του EPB κατά 1.5m, ίση απόσταση δηλαδή με το πλάτος των προκατασκευασμένων στοιχείων. Η μετακίνηση του EPB

γίνεται με την τοποθέτησή του σε συγκεκριμένους κόμβους, οι οποίοι συσχετίζονται με τους αντίστοιχους εδαφικούς κόμβους που περιβάλλουν το EPB.

- Η πίεση μετώπου μεταφέρεται στην επόμενη εδαφική φέτα εκσκαφής. Έτσι, αφού έχει αφαιρεθεί η «n+1», το νέο μέτωπο είναι η φέτα «n+2» όπου και ασκείται η πίεση. Οι τιμές των πιέσεων πόρων στους κόμβους του μετώπου μεταφέρονται αντίστοιχα στο νέο μέτωπο που αντιστοιχεί στη φέτα «n+2».
- Λόγω της προχώρησης του EPB ο δακτύλιος «n-7» των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ελευθερώνεται από το EPB και λειτουργεί ως υποστήριξη για τη διατομή που έχει εκσκαφτεί. Παράλληλα, τοποθετείται ο δακτύλιος «n-6» εσωτερικά της ουράς του EPB, χωρίς να επιδρά ακόμα με το εδάφος, αφού θα χρησιμοποιηθεί ως υποστήριξη μετά την επόμενη προχώρηση του EPB.
- Μεταξύ του δακτυλίου «n-7» των προκατασκευασμένων στοιχείων και του εδάφους εισάγονται τα στοιχεία του ενέματος στη φέτα «n-7». Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με εισαγωγή ίσης εσωτερικής πίεσης στα στοιχεία του ενέματος η οποία είναι ιστροπική όπως σε ένα ρευστό. Τα στοιχεία του ενέματος ακολουθούν τη συμπεριφορά που καθορίζει ο νόμος σκλήρυνσης που εισάγεται στο πρόγραμμα από τον χρήστη.
- Γίνεται επανατοποθέτηση των κόμβων μόνο των στοιχείων του ορίου εκσκαφής στο νέο μέτωπο στις κατάλληλες συντεταγμένες που συνάδουν με αυτές των στοιχείων της κοπτικής κεφαλής (adaptive meshing, βλ. ενότητα 3.2.5).
- Εξάγονται τιμές αποτελεσμάτων των παραμέτρων που έχει ζητήσει ο χρήστης για τους κόμβους, τα στοιχεία και τις επιφάνειες επαφής του μοντέλου.

4.2.4 Τελικό στάδιο – Εξισορρόπηση πιέσεων

Στις αναλύσεις όπου το έδαφος προσομοιώθηκε ως κορεσμένο, υπάρχει ένα ακόμη τελευταίο βήμα (step 83). Το βήμα αυτό ολοκληρώνεται μετά από αρκετό χρόνο, συγκεκριμένα 10000hrs για τα μη περατά και 24hrs για τα περατά εδάφη, και σκοπός του είναι η εποπτεία της πορείας του φαινομένου της εξισορρόπησης του νερού των πόρων και η επιρροή του στην εξέλιξη των μακρόχρονων επιφανειακών καθιζήσεων.

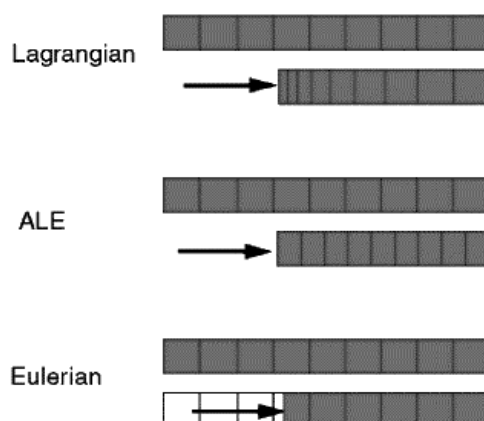
Η ανάλυση ολοκληρώνεται με το πέρας του τελευταίου βήματος.

4.2.5 Adaptive Meshing

Είναι συχνό σε μη-γραμμικά προβλήματα προσομοίωσης και ανάλυσης το υλικό να υπόκειται σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να παραμορφώσουν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων σε τέτοιο βαθμό, που πλέον η ανάλυση δίνει μη ακριβή στοιχεία ή τερματίζει πρόωρα λόγω αριθμητικών ασυμφωνιών. Για αυτές τις περιπτώσεις, ο κώδικας του Abaqus παρέχει κατάλληλα εργαλεία με τη δυνατότητα εφαρμογής δυναμικά προσαρμοζόμενης διακριτοποίησης (adaptive meshing), ώστε να εξομαλύνονται οι παραμορφώσεις του πλέγματος αλλά όχι του υλικού.

Κατά τη λειτουργία του adaptive meshing, αφενός οι παραμορφώσεις του πλέγματος εξομαλύνονται με προκαθορισμένο από τον χρήστη βαθμό σε τακτά διαστήματα, ώστε να υπάρχει μια αποδεκτή αναλογία στις παραμορφώσεις των στοιχείων, και αφετέρου διατηρεί την ίδια τοπολογία του πλέγματος, δηλαδή ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων καθώς και οι συνδέσεις μεταξύ τους δεν αλλάζουν. Στο Abaqus υπάρχουν οι εξής τρεις μορφές adaptive meshing:

- *Pure Lagrangian Method.* Οι κόμβοι του πλέγματος μετακινούνται ακριβώς με τις μετακινήσεις του υλικού. Αποδίδει καλώς στις ελεύθερες επιφάνειες, αλλά παρατηρούνται υψηλές διαφορές στις παραμορφώσεις γειτονικών στοιχείων.
- *Pure Eulerian Method.* Οι κόμβοι του πλέγματος δεν μετακινούνται κατά κόρον, παρά μόνο το υλικό. Η τοπολογία του πλέγματος διατηρείται και το πλέγμα παραμορφώνεται ελάχιστα έως καθόλου, αποδίδοντας έτσι ακριβέστερα αποτελέσματα.
- *Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) Method.* Το πλέγμα αναμορφώνεται μόνο όταν κριθεί βάσει οριακών τιμών απαραίτητο και μόνο κοντά στις ελεύθερες επιφάνειες με ελεγχόμενη προοδευτική αναλογία. Η παραμόρφωση του πλέγματος είναι ανεξάρτητη από αυτή του υλικού. Η



μέθοδος αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των παραπάνω δύο, καθώς αποτελεί συνδυασμό αυτών, αποδίδει αποτελέσματα ακριβείας και εξοικονομεί υπολογιστικό χρόνο.

Στο μοντέλο επιλέγηκε προς χρήση η Μέθοδος ALE, ώστε να επιτυγχάνεται αναπροσαρμογή του πλέγματος μόνον στα όρια της εκσκαφής και μπροστά από το μέτωπο. Με τον τρόπο αυτό, επίσης, διασφαλίζεται εκσκαφή ακριβώς της προκαθορισμένης θεωρητικής διαμέτρου. Το αποτέλεσμα είναι να μην μεταφέρονται παράλογες μετακινήσεις στα σημεία της επιφάνειας και ο αποκλεισμός συσσωρευμένου σφάλματος στις τιμές των μετακινήσεων των επιφανειακών κόμβων.

5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής της περατότητας στο φαινόμενο των επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω αριθμητικού προσομοιώματος σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Με χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διεξήχθησαν 15 παραμετρικές αναλύσεις, με σκοπό:

- την μελέτη της απόκρισης συνεκτικών εδαφών διαφορετικής περατότητας κατά τη διάνοιξη ρηχής σήραγγας με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής. Ο ρυθμός προχώρησης παραμένει σταθερός.
- την επίδραση της μεταβολής της πίεσης υποστήριξης μετώπου σε διαφορετικές συνθήκες περατότητας. Ο ρυθμός προχώρησης παραμένει σταθερός.
- την επιρροή του ρυθμού προχώρησης σε εδαφικό υλικό πολύ χαμηλής περατότητας (πρακτικά μηδενικής περατότητας). Με την επιλογή πολύ χαμηλής περατότητας η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Οι αναλύσεις καθώς και οι παράμετροι που μεταβάλλονται σε κάθε μια συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών αναλύσεων και μεταβαλλόμενων τιμών παραμέτρων

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αριθμός Ανάλυσης ζ	Χαρακτηρισμός ζ	Τιμή συντ. Περατότητα $\zeta K_s[m/s]$	Τιμή Παραμέτρο μA	Ρυθμός προχώρησης $\zeta [hrs/ring]$	Κατάσταση η
1	UNDRAINED	10^{-8}	0.5	2	<i>converged</i>
2		10^{-8}	1	2	<i>converged</i>
3		10^{-8}	1.5	2	<i>converged</i>
4		10^{-8}	1	1	<i>converged</i>
5		10^{-8}	1	4	<i>converged</i>
6	SEMI-DRAINED	10^{-6}	0.5	2	<i>converged</i>
7		10^{-6}	1	2	<i>converged</i>
8		10^{-6}	1.5	2	<i>failed</i>
9		10^{-4}	0.5	2	<i>failed</i>
11	DRAINED	10^{-4}	1	2	<i>converged</i>
12		10^{-4}	1.5	2	<i>converged</i>
13	DRY	-	0.5	2	<i>converged</i>
14		-	1	2	<i>converged</i>
15		-	1.5	2	<i>converged</i>

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα έχει να κάνει αμιγώς με τις συζευγμένες αναλύσεις, όπου λαμβάνεται υπόψιν το υδραυλικό πρόβλημα. Η δεύτερη ομάδα θα παρουσιάσει τα αποτελέσματα των αναλύσεων όπου το έδαφος προσομοιώθηκε και σε ξηρή κατάσταση (dry) και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων για μη-περατές και περατές συνθήκες σε κορεσμένα και σε ξηρά εδάφη. Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως

δύο εκ των δεκαπέντε αναλύσεων δεν συνέκλιναν αριθμητικά και συνεπώς δεν ολοκληρώθηκαν, καθώς εμφανίστηκαν μεγάλες τιμές πλαστικών παραμορφώσεων και οριζόντιων μετακινήσεων στο μέτωπο εκσκαφής και στον πηρύνα προώθησης προκαλώντας αστοχία της εδαφικής μάζας.

Τα αποτελέσματα εξήχθησαν από μια συγκεκριμένη για όλες τις αναλύσεις διατομή αναφοράς (monitoring section) ώστε να είναι δόκιμη η σύγκριση μεταξύ τους. Η διατομή αυτή βρίσκεται στην θέση $Y=84$ ή αλλιώς στο βήμα 51 των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που αφορούν στην πίεση του νερού των πόρων και την χρονική εξέλιξη των διαμήκων καθιζήσεων (longitudinal settlements) ελήφθησαν για τέσσερις συγκεκριμένους κόμβους του μοντέλου, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος και παρουσιάζονται σε ακόλουθο πίνακα. Η λήψη δε των δεδομένων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν σε εγκάρσιες στον άξονα καθιζήσεις (transversal settlements) έγινε στους κόμβους με συντεταγμένες $Y=84$ και $Z=25$. Οι οριζόντιες μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής (εξωθήσεις) ελήφθησαν στο τελευταίο βήμα των αναλύσεων από του κόμβους του μετώπου, όπως παρουσιάζονται σε ακόλουθο πίνακα. Σημειώνεται πως οι εξωθήσεις κατά την προσομοίωση της εκσκαφής δε παρουσίασαν διαφορές στην τιμή, στα βήματα της προσομοίωσης όπου πλέον το μηχανήμα είχε απομακρυνθεί από τα όρια του μοντέλου.

Πίνακας 5-2: Κόμβοι που μελετήθηκαν στην θέση Υ=84 (διατομή μελέτης – monitoring section)

ΚΟΜΒΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ (Υ=84)

Όνομα Κόμβου	Θέση
7863084	Επιφάνεια
63083	Στέψη (Crown)
63079	Spring Line
63078	Invert

Πίνακας 5-3: Κόμβοι του μετώπου από τους οποίους ελήφθησαν δεδομένα υπολογισμού για τις εξωθήσεις του μετώπου και τις απώλειες όγκου

ΚΟΜΒΟΙ ΜΕΤΩΠΟΥ

Κόμβος	X	Y	Z
98048	0	130.5	-5
98372	0	130.5	-4
98373	0	130.5	-3
98374	0	130.5	-2
98375	0	130.5	-1
98049	0	130.5	0
98376	0	130.5	1
98377	0	130.5	2
98378	0	130.5	3
98379	0	130.5	4
98034	0	130.5	5

5.1 Α΄ ΟΜΑΔΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Στην ενότητα αυτή, στόχος είναι να καταδειχθεί η σημασία της περατότητας του εδάφους στον μηχανισμό δημιουργίας επιφανειακών μετακινήσεων και παραμορφώσεων κατά την διάνοιξη ρηχής σήραγγας με TBM. Για τον σκοπό αυτό, έγιναν τρία (3) σετ αναλύσεων, όπου ο συντελεστής περατότητας K_s έλαβε τις τιμές 10^{-8} m/s, 10^{-6} m/s και 10^{-4} m/s και για τις οποίες θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν τις μη-περατές (undrained), σχεδόν περατές (semi-drained) και περατές (drained) καταστάσεις^{[18][17]} αντίστοιχα, κατά τους Anagnostou (1993,1995), Anagnostou and Kovari (1994,1996) και Sitarenios et al. (2015,2016). Σημειώνεται πως ο όρος “semi-drained”, αν και δεν τεκμηριώνεται επαρκώς επιστημονικά, αντιπροσωπεύει μια ενδιάμεση κατάσταση και θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία καθαρά για λόγους ευκολίας αναφοράς και σύγκρισης. Για κάθε μια κατάσταση μελετάται επίσης και η μεταβολή της πίεσης υποστήριξης μετώπου (παράμετρος A).

Χάριν πληρότητας της εργασίας, σε πρώτο στάδιο παραθέτονται παρακάτω διαγράμματα μεταβολής πιέσεων του νερού των πόρων για τις προαναφερθείσες συνθήκες περατότητας, ώστε να εξακριβωθούν οι χαρακτηρισμοί κατ’ αντιστοιχία στο προσομοίωμα. Έπειτα, ακολουθεί το κυρίως τμήμα της μελέτης αναφερόμενο στις επιφανειακές καθιζήσεις και στις μετακινήσεις στην εδαφική μάζα.

5.1.1 Επίδραση της Περαιτότητας στην Πίεση του Νερού των Πόρων

Για την μελέτη της μεταβολής της τιμής της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους επιλέγησαν συγκεκριμένοι ίδιοι κόμβοι του μοντέλου για όλες τις περιπτώσεις, που αντιστοιχούν στην διατομή μελέτης (Y=84) όπως έχει ήδη εξηγηθεί. Οι κόμβοι αυτοί δίνονται κατά ονομασία και θέση στον Πίνακα 5-2, και δεδομένα ελήφθησαν για αυτούς σε κάθε βήμα της διάνοιξης της σήραγγας και της διέλευσης του μηχανήματος. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων τέτοιων, ώστε να γίνονται εύκολα κατανοητές οι μεταβολές της πίεσης συναρτήσει του χρόνου.

5.1.1.1 Συνθήκες Μη-περατού Εδάφους (Undrained, $K_s = 10^{-8}$ m/s)

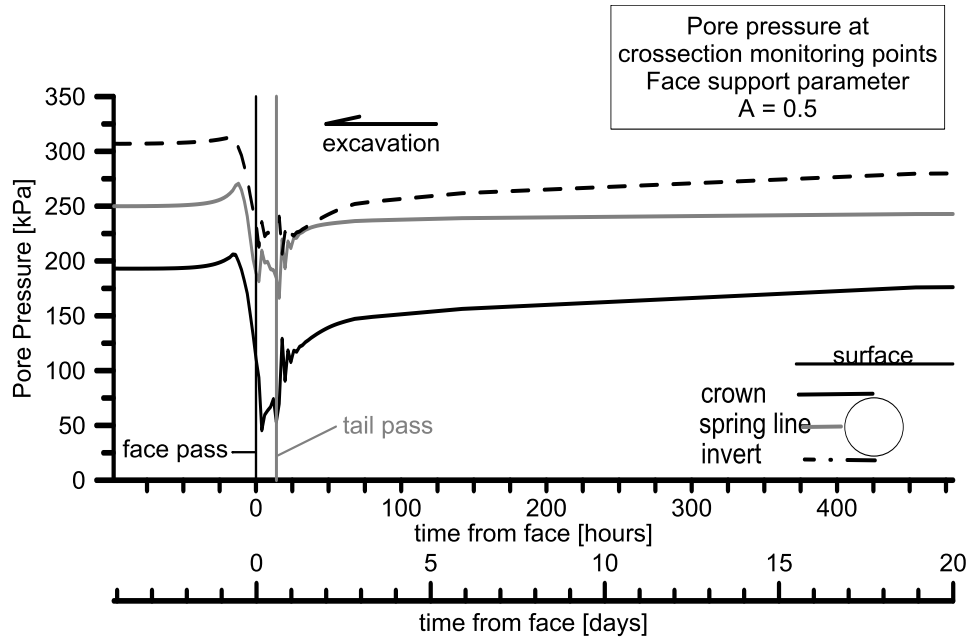
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα μεταβολής πίεσεως του νερού των πόρων κατά την διέλευση του TBM από την διατομή μελέτης σε έδαφος με συντελεστή

περατότητας $K_s = 10^{-8} \text{ m/s}$. Κάθε ένα από τα διαγράμματα αντιστοιχεί σε μία εκ των τριών τιμών της παραμέτρου πίεσης μετώπου A.

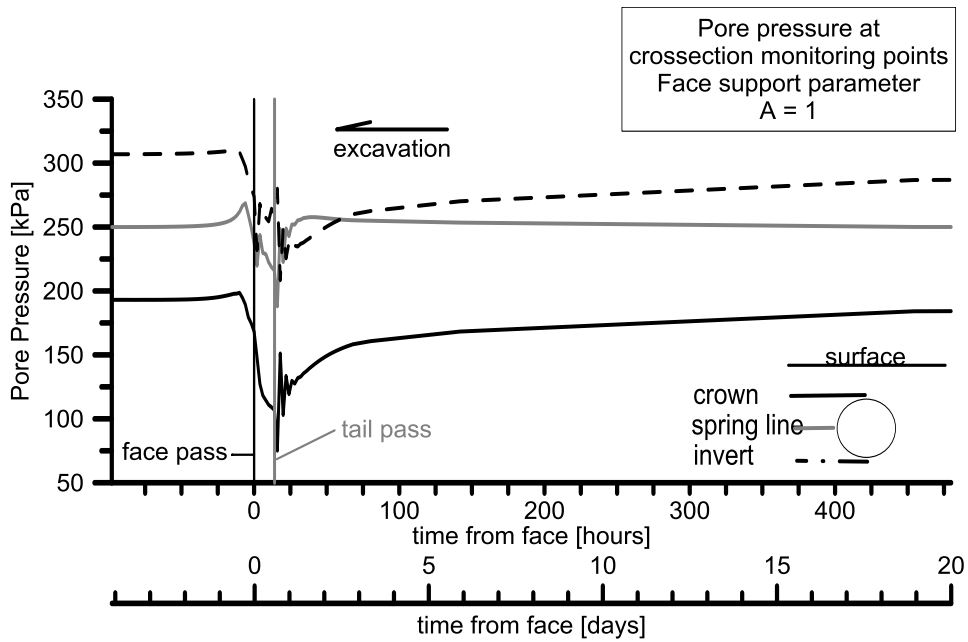
Παρατηρώντας τα τρία *Διάγραμμα 5-1*, *Διάγραμμα 5-2* και *Διάγραμμα 5-3*, γίνεται αμέσως αντιληπτή μια κοινή συμπεριφορά. Ανεξαρτήτως του καθεστώτος πίεσης υποστήριξης, ή αλλιώς της τιμής της παραμέτρου A, εμφανίζεται πάντοτε μπροστά από την εκσκαφή μια ανάπτυξη υπερπίεσεων στο νερό των πόρων και μάλιστα σε συγκεκριμένο χρόνο ή μήκος, 14 hrs ή 10m που αντιστοιχεί σε μία διάμετρο. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε κάθε σημείο της διατομής και μάλιστα για κάθε A, γεγονός που υποδεικνύει τυπική συμπεριφορά μη περατού εδάφους. Επιπρόσθετα, είναι εμφανής και μια μεγάλη πτώση της πίεσης του νερού των πόρων στην εγγύτερη περιοχή έμπροσθεν του μετώπου. Αυτό αποτελεί ακόμη ένα στοιχείο μη περατής συμπεριφοράς και εξηγείται ως ακολούθως. Κατά την αφαίρεση γεωυλικού κατά τη διαδικασία της μηχανικής όρυξης, το εναπομένον έδαφος τείνει να αυξήσει τον όγκο του καθώς το μέτωπο και οι παρειές εξωθούνται προς τον κενό χώρο. Η αύξηση του όγκου αυτή συνεπάγεται αύξηση των κενών των πόρων και την ανάγκη προσρόφησης νερού (μυζητικά φαινόμενα). Η ιδιότητα της μη περατότητας (αστράγγιστες συνθήκες) όμως δεν επιτρέπει την ταχεία σχετικά ροή νερού με αποτέλεσμα το νερό των πόρων να τείνει να διογκωθεί και αυτό και να μειώνει την πίεσή του (ανάπτυξη υποπίεσεων στο νερό των πόρων).

Αποκατάσταση των αρχικών τιμών πίεσης παρατηρείται αρκετές μέρες (εβδομάδες) μετά την κατασκευή με την εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Κατά τη διάρκεια της διέλευσης του TBM, το νερό των πόρων του εδάφους στην παρειά της εκσκαφής βρίσκεται σε καθεστώς υποπίεσης και η πίεση αρχίζει και αυξάνει με την έναρξη της διαδικασίας ενεμάτωσης, και παράλληλα με την σκλήρυνση του ενέματος. Η αποκατάσταση των αρχικών τιμών πίεσης γίνεται ταχύτερα στο μέσο της διατομής (spring line) και με βραδύτερο ρυθμό στον πάτο (invert). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως ο κόμβος στην στέψη (crown) επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις διακυμάνσεις στην πίεση σε σχέση με τον κόμβο στον πυθμένα (invert) αμέσως μετά το πέρασμα της ουράς του TBM. Το παραπάνω είναι αποτέλεσμα του συνυπολογισμού του βάρους του μηχανήματος και είναι ένδειξη που επιβεβαιώνει την ορθότητα της αριθμητικής προσομοίωσης, αφού όπως και στην πραγματικότητα, στον πυθμένα η ενεμάτωση – και συνεπώς οι έντονες διακυμάνσεις πίεσης- είναι μικρότερου μεγέθους.

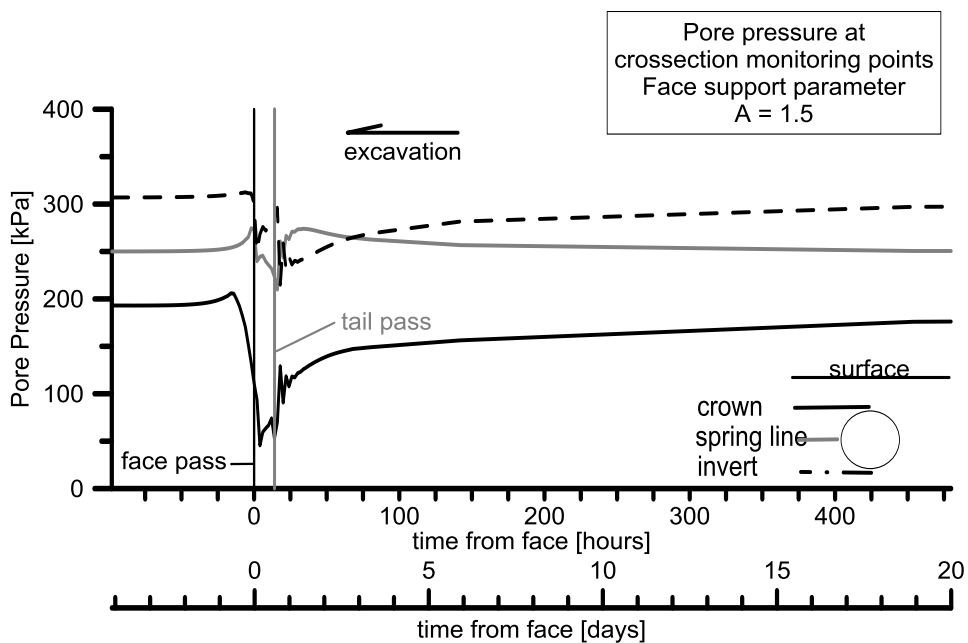
Σημειώνεται, τέλος, πως η τιμή της παραμέτρου A δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά ούτε τον ρυθμό, ούτε το μέγεθος των μεταβολών της πίεσης του νερού των πόρων σε μη περατές συνθήκες.



Διάγραμμα 5-1: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^{-8}$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$



Διάγραμμα 5-2: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^8$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$

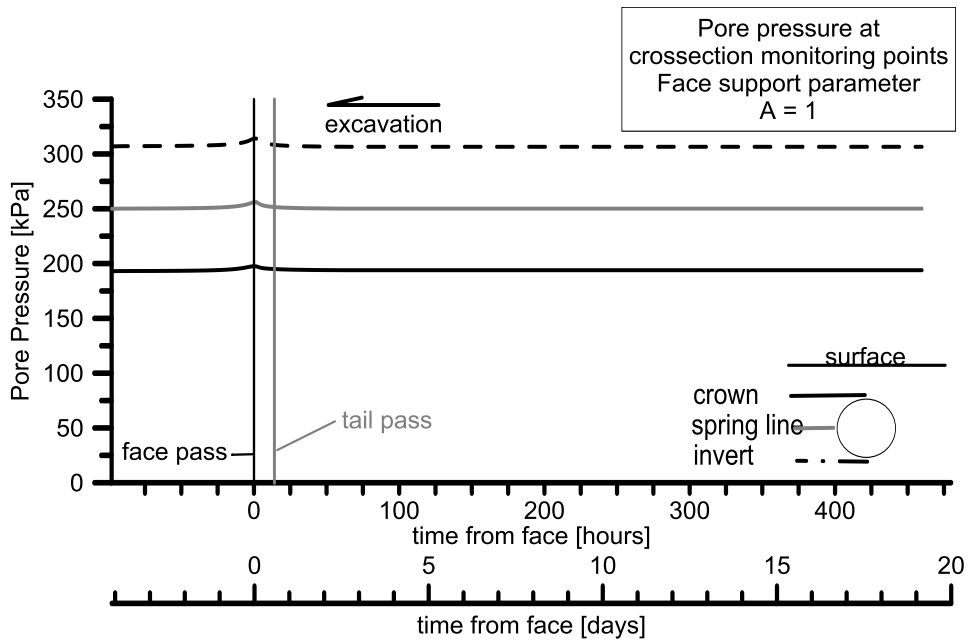


Διάγραμμα 5-3: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^8$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$

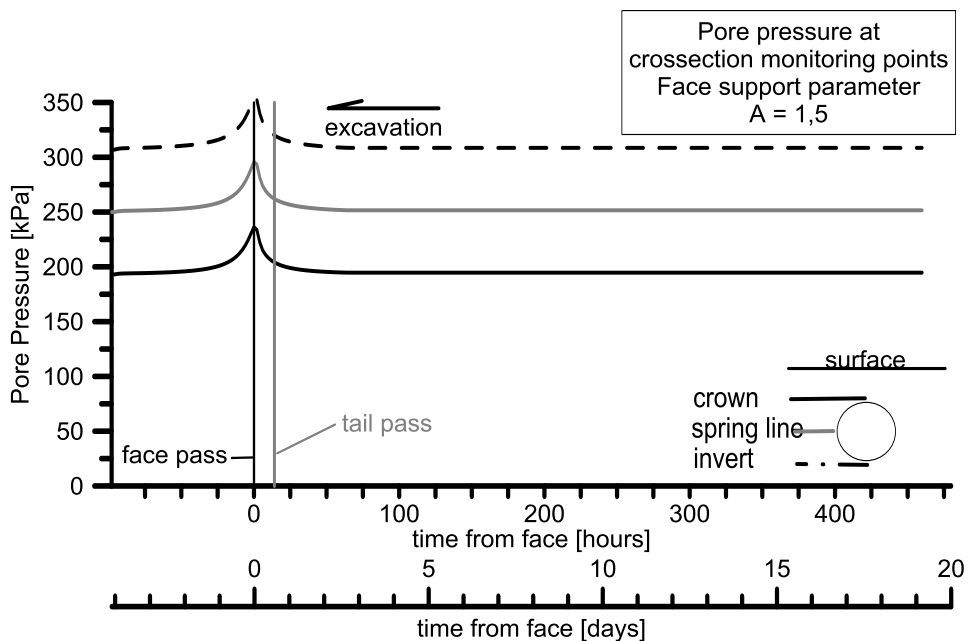
5.1.1.2 Συνθήκες Περατού Εδάφους (*Drained, $K_s = 10^{-4} m/s$*)

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται διαγράμματα μεταβολής πίεσεως του νερού των πόρων κατά την διέλευση του TBM από την διατομή μελέτης σε έδαφος με συντελεστή περατότητας $K_s = 10^{-4} m/s$. Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε δύο τιμές της παραμέτρου πίεσης μετώπου, για $A = 1$ και $A = 1.5$ αντίστοιχα. Η ανάλυση για περατές συνθήκες με $A = 0.5$ δεν ολοκληρώθηκε καθώς εμφανίστηκαν μη αποδεκτές πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο εκσκαφής.

Στο *Διάγραμμα 5-4* και το *Διάγραμμα 5-5*, στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους στην παρεία της εκσκαφής στη διατομή μελέτης κατά την διέλευση του TBM, δεν παρατηρείται πουθενά πτώση της πίεσης. Αντιθέτως, κατά το πέρασμα και μόνον της κοπτικής κεφαλής από τα παρακολουθούμενα σημεία εντοπίζεται μια μικρή σχετικά αύξηση της πίεσης, η οποία αποκαθίσταται σύντομα. Η υπερπίεση αυτή οφείλεται κυρίως στην ώθηση της κοπτικής κεφαλής επί του μετώπου εκσκαφής, αλλά και στο καθεστώς σχετικά υψηλότερων υδροστατικών πιέσεων που επικρατεί στην εδαφική πάστα στον θάλαμο εκσκαφής, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση $A = 1.5$ (*Διάγραμμα 5-5*) όπου φαίνεται ξεκάθαρα πλέον μια αύξηση της πίεσης κατά την άφιξη της κοπτικής κεφαλής και στα τρία σημεία παρακολούθησης. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως των 95~100 kPa. Μπορεί εδώ να υποθεθεί πως λόγω της περατότητας, η υψηλή πίεση της εδαφικής πάστας μεταφέρεται δια της επαφής στο νερό των πόρων του γεωυλικού του μετώπου, και μάλιστα σε μήκος έμπροσθεν του μετώπου ανάλογο της πίεσης υποστήριξης. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την γρήγορη αποκατάσταση της πίεσης στις φυσικές τιμές μετά το πέρασμα της κεφαλής υποδηλώνουν μια αναμφίβολα υδατοπερατή συμπεριφορά. Δόκιμο είναι λοιπόν, οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας όπου το έδαφος έλαβε συντελεστή $K_s = 10^{-4} m/s$ να χρησιμοποιηθούν ώστε να καταδείξουν την διάνοιξη ρηχής σήραγγας σε περατές καταστάσεις.



Διάγραμμα 5-4: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^4$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$



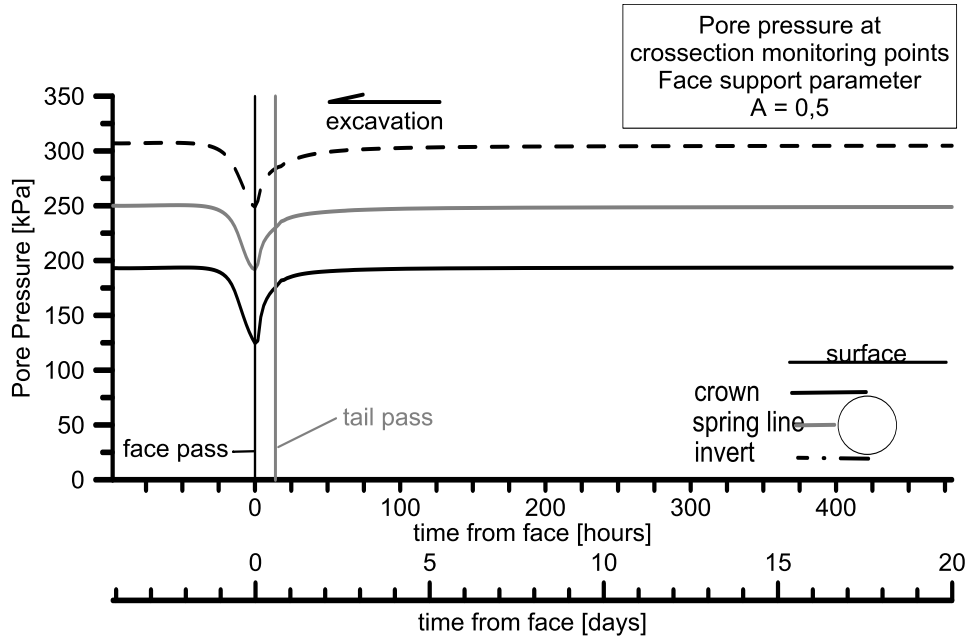
Διάγραμμα 5-5: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^4$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$

5.1.1.3 Συνθήκες Εδάφους Μέσης Περρατότητας (*Semi-drained*, $K_s = 10^{-6} m/s$)

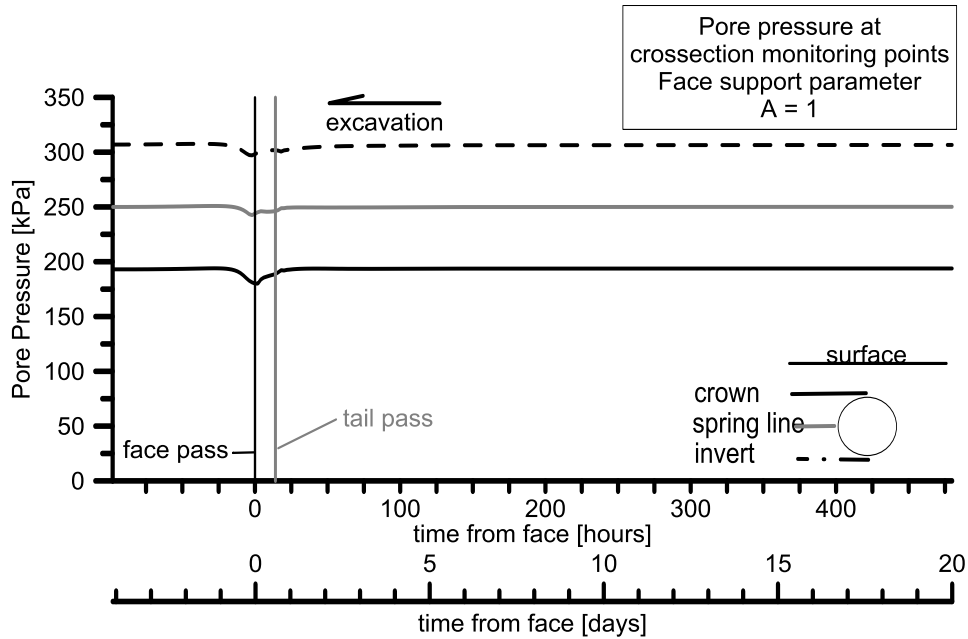
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται διαγράμματα μεταβολής πίεσεως του νερού των πόρων κατά την διέλευση του TBM από την διατομή μελέτης σε έδαφος με συντελεστή περατότητας $K_s = 10^{-6} m/s$. Οι αναλύσεις αυτές αποτελούν το τελευταίο σετ των συζευγμένων αναλύσεων σε πλήρως κορεσμένο έδαφος. Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε δύο τιμές της παραμέτρου πίεσης μετώπου, για $A = 0.5$ και $A = 1$ αντίστοιχα.

Παρατηρώντας τις καμπύλες πιέσεων των πόρων στα *Διάγραμμα 5-6* και *Διάγραμμα 5-7* διακρίνονται περιοχές μπροστά από την εκσκαφή, όπου παρατηρείται πτώση της πίεσης, με τρόπο όμοιο με αυτόν στις μη περατές συνθήκες που παρουσιάζονται στην προηγούμενη ενότητα. Παρά αυτού όμως, δεν εμφανίζονται υπερπίεσεις και η εν λόγω πτώση πίεσης αποκαθίσταται σχετικά νωρίς, σχεδόν αμέσως μετά την διέλευση του TBM. Επιπρόσθετα, η αλλαγή της τιμής της εφαρμοζόμενης πίεσης στο μέτωπο δείχνει να έχει δραστικότερο ρόλο στην εκδήλωση των προαναφερθέντων μεταβολών.

Συμπερασματικά λοιπόν, στις αναλύσεις όπου το έδαφος λαμβάνει συντελεστή περατότητας $K_s = 10^{-6} m/s$ εμφανίζονται μυζητικά φαινόμενα ανάλογα των μη περατών συνθηκών, αλλά πολύ μικρότερης έκτασης. Επιπρόσθετα, η πίεση των πόρων αποκαθίσταται σχετικά γρήγορα και μάλιστα τόσο γρήγορα όσο υψηλότερη είναι η πίεση στον θάλαμο εκσκαφής. Η περίπτωση αυτή συνεπώς συνδυάζει συμπεριφορές περατών και μη περατών καταστάσεων και δικαίως το σετ των αναλύσεων με $K_s = 10^{-6} m/s$ λαμβάνει τον χαρακτηρισμό «Σχεδόν Περατό / Έδαφος Μέσης Περρατότητας / *Semi – Drained*» και μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω στην εργασία ως συγκριτικό μέτρο μιας ενδιάμεσης κατάστασης.



Διάγραμμα 5-6: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^{-6}$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$



Διάγραμμα 5-7: Μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων για έδαφος με συντελεστή $K_s=10^{-6}$ m/s, μετρούμενες στην διατομή μελέτης ($\gamma=84$) και για παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$

5.1.2 Εξωθήσεις Μετώπου

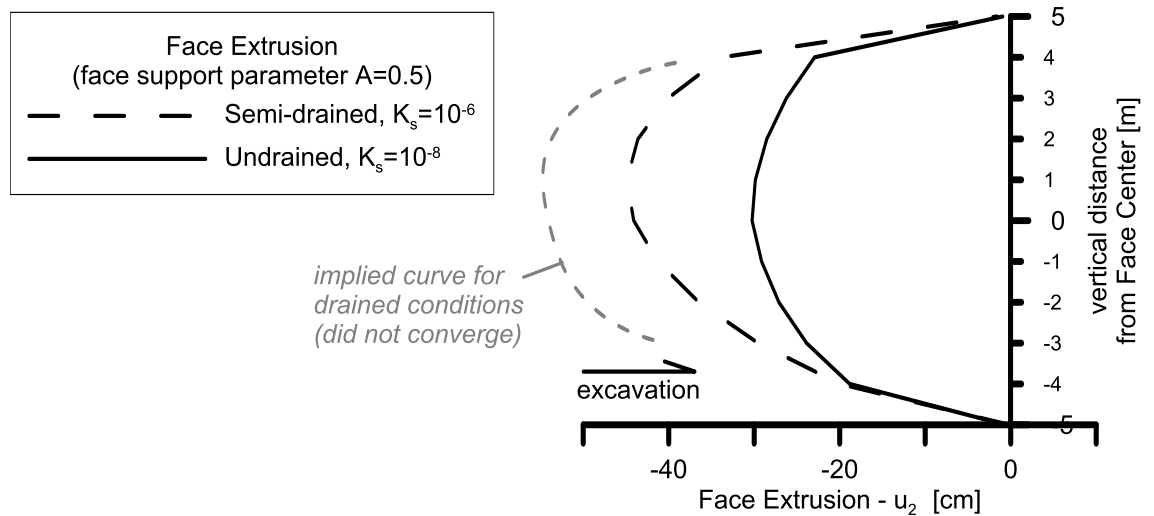
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι οριζόντιες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στο μέτωπο της εκσκαφής κατά την προσομοίωση διάνοιξης της σήραγγας σε κάθε μία από της πραγματοποιηθείσες αναλύσεις. Ακριβέστερα, δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων του μετώπου που βρίσκονται στην τομή των επιπέδων $X = 0$ και $Y = 130.5$ (βλ. Πίνακας 5-3: Κόμβοι του μετώπου από τους οποίους ελήφθησαν δεδομένα υπολογισμού για τις εξωθήσεις του μετώπου και τις απώλειες όγκου). Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν την συμπεριφορά των τριών διαφορετικών καταστάσεων περατότητας για κάθε μία εκ των τριών τιμών της παραμέτρου πίεσης υποστήριξης A . Επιπλέον, για να έχει ο αναγνώστης μια ακόμη πιο σαφή εικόνα, δίνονται απεικονίσεις ισομεγεθών γραμμών (contours) των στοιχείων του μετώπου στην εν λόγω θέση, όπου αναπαρίστανται οι οριζόντιες παραμορφώσεις. Σημειώνεται πως για τις δύο αναλύσεις που δεν συνέκλιναν (αναλύσεις 8 & 9, βλ. Πίνακας 5-1), εισάγονται για λόγους εποπτικών και συγκριτικών κυρίως υποτιθέμενες καμπύλες.

Ξεκινώντας από το Διάγραμμα 5-8 εύκολα συμπεραίνει κανείς πως μια πίεση υποστήριξης που αντιστοιχεί στην τιμή $A = 0.5$ κρίνεται ανεπαρκής. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην εξισορρόπηση του 50% των συνολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και 70% των υδροστατικών πιέσεων (βλ. 4.1.4.2.). Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούνται για μη περατές συνθήκες πολύ υψηλές οριζόντιες μετακινήσεις, περίπου 30cm, οι οποίες σχεδόν διπλασιάζονται για αύξηση του συντελεστή υδατοπερατότητας K_s κατά δύο τάξεις μεγέθους. Ανάλογα, αναμένεται περαιτέρω αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων στον πυρήνα εκσκαφής για ακόμη μεγαλύτερες τιμές του K_s , για παράδειγμα $K_s = 10^{-4} m/s$. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί βάσει των ασταθειών που προκαλούνται στην επιφάνεια του μετώπου λόγω της ροής του νερού από το περιβάλλον έδαφος προς το εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής. Η ροή αυτή δικαιολογείται από την διαφορά δυναμικού υδροστατικής πίεσης και υποβοηθάται με την αύξηση της περατότητας του μέσου όπου λαμβάνει χώρα η εκσκαφή.

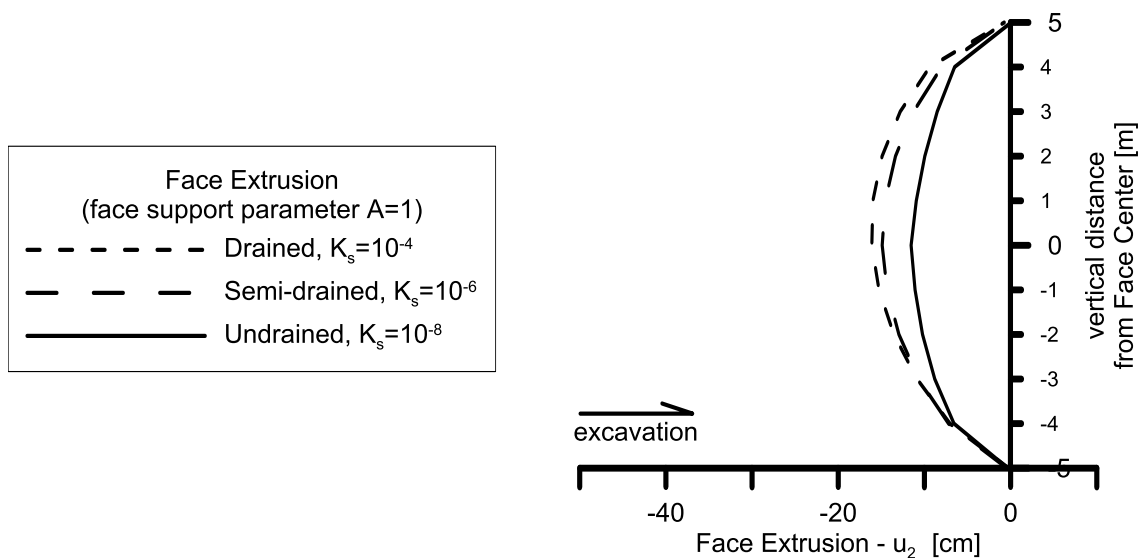
Για πλήρη εξισορρόπηση των υδροστατικών πιέσεων και εξισορρόπηση των πλήρων οριζόντιων γεωστατικών τάσεων κατά 70%, περίπτωση που εκφράζεται για τιμή $A = 1$, η εικόνα δείχνει να αλλάζει. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5-9, οι οριζόντιες μετακινήσεις πλέον μειώνονται κατά $\approx 60\%$ σε κάθε κατάσταση περατότητας, για

παράδειγμα οι εξωθήσεις που αναπτύσσονται στις μη περατές συνθήκες είναι 11cm, ενώ η αύξηση του συντελεστή K_s δεν επηρεάζει δραματικά τις παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, αύξηση τεσσάρων τάξεων μεγέθους στον K_s επιφέρει αύξηση των εξωθήσεων μόνο κατά 35% περίπου, ενώ η μεταβολή της τιμής της περατότητας από $10^{-6}m/s$ σε $10^{-4}m/s$ δεν αυξάνει σημαντικά τις παραμορφώσεις. Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως στην σιραγγοποιία, έχουν αναφερθεί τέτοιες περιπτώσεις όπου οι μετωπιαίες εξωθήσεις πρακτικά μένουν ανεπηρέαστες κατά τη μετάβαση του EPB από μη περατό σε περατό μέσο, ενόσω υπήρχε πλήρης εξισορρόπηση των υδροστατικών πιέσεων. Μια εκ των πιο γνωστών τέτοιων περιπτώσεων είναι αυτή του Botlek Rail Tunnel (NL) την οποία ανέλυσαν οι Bezuijzen & Talmon (2014).

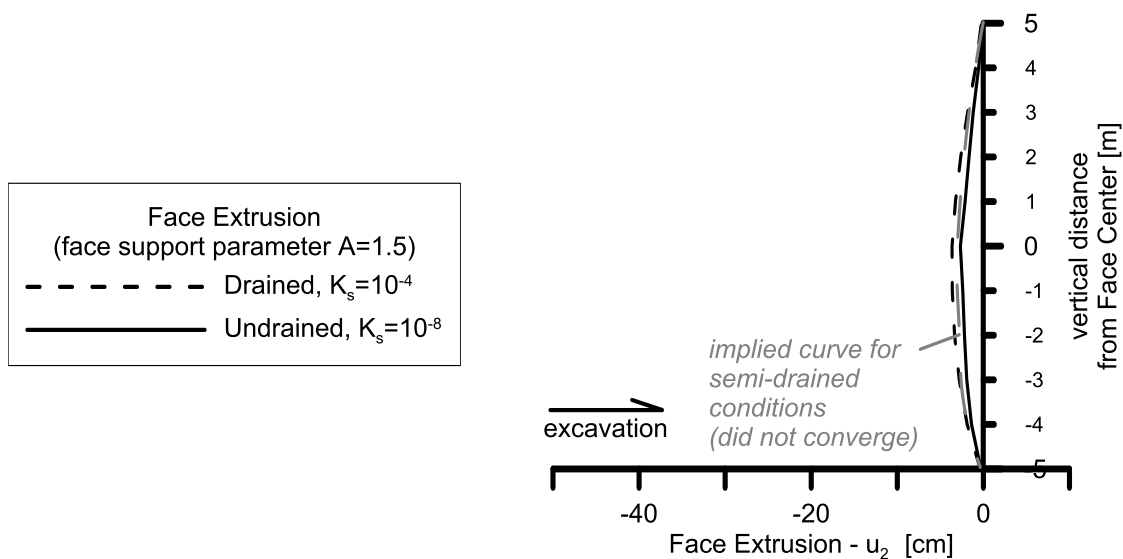
Τελικά, το Διάγραμμα 5-10 δείχνει πλέον ξεκάθαρα την ελάχιστη επίδραση της περατότητας όταν πια υπάρχει υψηλή πίεση υποστήριξης. Στο διάγραμμα αυτό, απεικονίζονται οι εξωθήσεις μετώπου εδαφών διαφορετικής περατότητας, όπου η εκσκαφή έγινε λαμβάνοντας $A = 1.5$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε πλήρη εξισορρόπηση των ολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων (βλ. Πίνακας 4-5: Τιμές εφαρμοζόμενης πίεσης στο μέτωπο ανά τιμές παραμέτρου A , $P_{applied}/P_{h0} = 0.97$). Ελάχιστη διακύμανση παρουσιάζεται -περίπου 1cm- για αύξηση του συντελεστή περατότητας ακόμη και για τέσσερις τάξεις μεγέθους, ενώ οι εξωθήσεις αγγίζουν ένα μέγιστο 5cm.



Διάγραμμα 5-8: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$

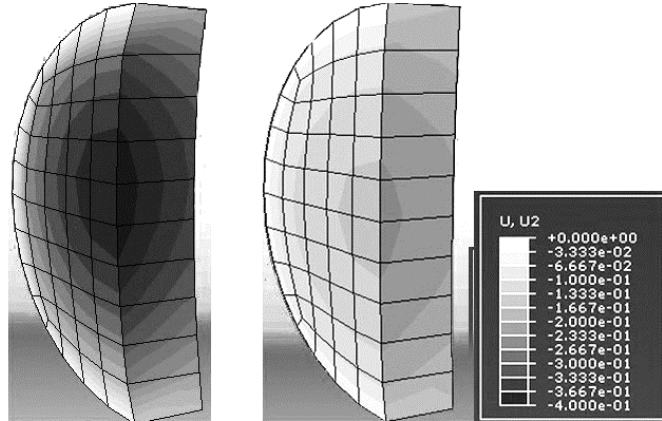


Διάγραμμα 5-9: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$

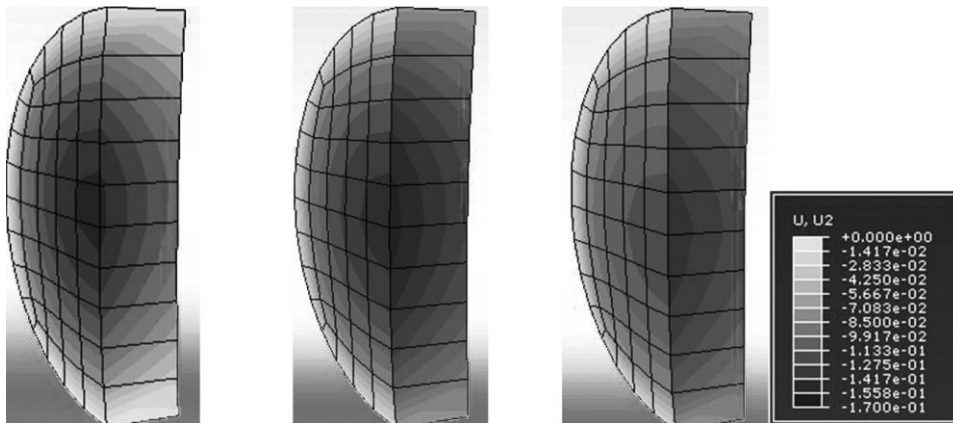


Διάγραμμα 5-10: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$

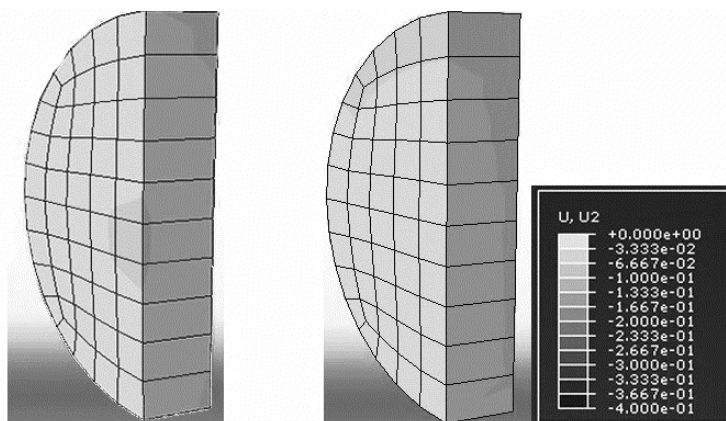
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ



Εικόνα 5-1: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για σχεδόν περατές (semi-drained - αριστερά) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$



Εικόνα 5-2: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained- αριστερά), σχεδόν περατές (semi-drained - μέση) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$



Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατές (drained - αριστερά) και μη περατές (undrained - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

5.1.3 Καθιζήσεις στη Επιφάνεια – Προφίλ Καθιζήσεων

Η ενότητα αυτή έχει να κάνει με τα αποτελέσματα των συζευγμένων αναλύσεων που αφορούν στις καθιζήσεις κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας και αποτελεί το κύριο εξαγόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σκοπός είναι να διαπιστωθούν σχέσεις επιρροής και αλληλεπίδρασης μεταξύ των συνθηκών περατότητας και της εφαρμοζόμενης πίεσης μετώπου στην εξέλιξη των κάθετων παραμορφώσεων στην επιφάνεια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε τρεις υποενότητες που αντιστοιχούν στις τρεις τιμές της παραμέτρου A. Σε κάθε υποενότητα δίνονται:

- συγκριτικά διαγράμματα των προφίλ των καθιζήσεων κατά μήκος της σήραγγας για όλες τις συνθήκες περατότητας. Απεικονίζεται η εξέλιξη του φαινομένου.
- συγκριτικά διαγράμματα κατανομής των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για όλες τις συνθήκες περατότητας. Απεικονίζεται η έκταση του φαινομένου.
- τομές του προσομοιώματος όπου διακρίνονται το σχήμα και η έκταση των πλαστικών ζωνών στην εδαφική μάζα.
- τομές του προσομοιώματος όπου διακρίνονται η κατανομή και η έκταση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην εδαφική μάζα.

Σημειώνεται πως για τις δύο αναλύσεις που δεν συνέκλιναν (αναλύσεις 8 & 9, βλ. Πίνακας 5-1), εισάγονται για λόγους εποπτικών και συγκριτικών κυρίως υποτιθέμενες καμπύλες.

Η απόσταση του σημείου καμπής i (inflection point) των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθούς σήραγγας αποτελεί σημαντική παράμετρο στην πρόβλεψη πιθανών ζημιών σε επιφανειακές κατασκευές, καθώς αποτελεί το σημείο εναλλαγής από θλιπτικές σε εφελκυστικές οριζόντιες επιφανειακές παραμορφώσεις του εδάφους. Στις παρακάτω ενότητες θα σημειωθούν οι ανηγμένες αποστάσεις των σημείων αυτών επί των διαγραμμάτων για κάθε περίπτωση. Ο υπολογισμός της απόστασης του σημείου καμπής από την κατακόρυφο που διέρχεται από το κέντρο της σήραγγας, για το εγκάρσιο στον άξονα της σήραγγας προφίλ καθιζήσεων, γίνεται υπολογίζοντας τους παρακάτω λόγους, εν είδει ελέγχου της αλλαγής στο πρόσημο της δεύτερης παραγώγου μιας καμπύλης περιγραφής του προφίλ των εγκάρσιων κατακόρυφων μετακινήσεων.

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

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

όπου

i, j : διαδοχικοί κόμβοι στην επιφάνεια

U_3 : η κατακόρυφη μετακίνηση

5.1.3.1 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=0,5$

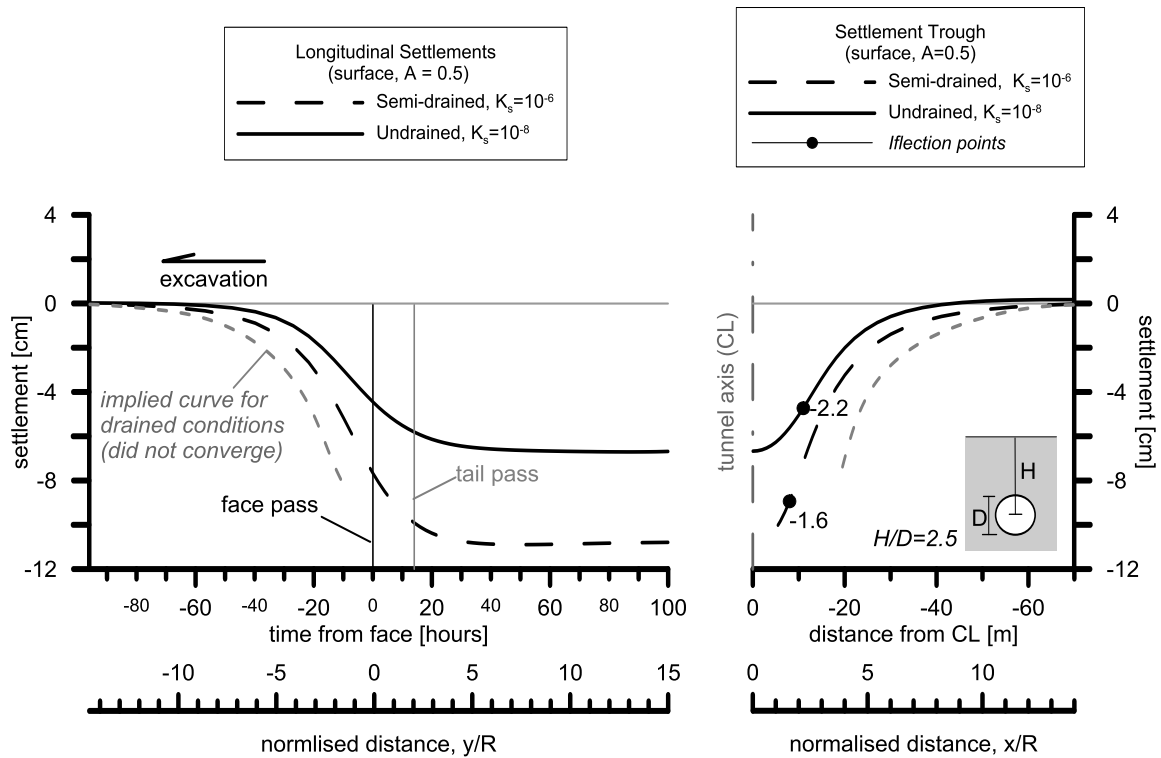
Για την χαμηλότερη τιμή πίεσης υποστήριξης μετώπου, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα με αρκετά μεγάλο εύρος τιμών επιφανειακών καθιζήσεων, οι οποίες δείχνουν να εξαρτώνται ισχυρά από τις συνθήκες περατότητας. Έχει ήδη αναφερθεί πως η τιμή $A = 0.5$ αντιστοιχεί στο μόλις 30% των υδροστατικών και 50% των ολικών γεωστατικών τάσεων και πως η αδυναμία ανάληψης τάσεων αυτή δημιουργεί σοβαρές παραμορφώσεις στο μέτωπο (βλ. 5.1.2), οι οποίες αντανακλώνται κατ' αντιστοιχία στην επιφάνεια.

Πράγματι, στο *Διάγραμμα 5-11*: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$ η αύξηση του συντελεστή K_s κατά δύο τάξεις μεγέθους φαίνεται πως αυξάνει το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων σχεδόν κατά δύο φορές, συμπεριφορά που συμφωνεί απόλυτα με τα όσα έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση για μη περατές συνθήκες εκδηλώνεται μέγιστη καθίζηση 6,7cm, ενώ στην ενδιάμεση κατάσταση οι καθιζήσεις στην επιφάνεια αυξάνονται σε 11,4cm. Ουσιαστική σταθεροποίηση επέρχεται και στις δύο περιπτώσεις μετά από χρονικό διάστημα 50 περίπου ωρών ή μετά από απόσταση $y/R = 7$. Επιπλέον, στο διάγραμμα των διαμήκων καθιζήσεων (*Διάγραμμα 5-11*: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες

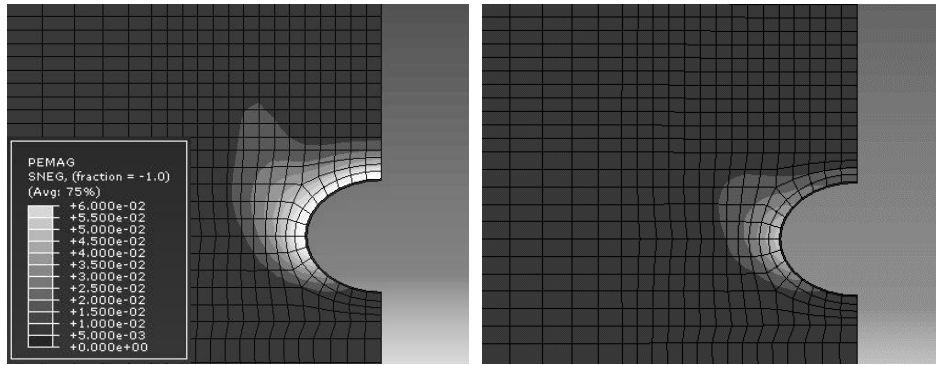
καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$ αριστερά) διακρίνει κανείς εύκολα πως στην περίπτωση χαμηλών πιέσεων υποστήριξης, η περατότητα του εδάφους επηρεάζει έντονα και τον ρυθμό ανάπτυξης επιφανειακών παραμορφώσεων μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής λόγω προσυγκλίσεων. Η απόσταση εμπροσθεν της εκσκαφής που παρατηρούνται προσυγκλίσεις είναι της τάξης του $y/R = 12$.

Αναφορικά με το Διάγραμμα 5-11 δεξιά, όπου απεικονίζεται το εγκάρσιο προφίλ των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων, παρατηρείται πως η καμπύλη των καθιζήσεων διευρύνεται με την αύξηση της περατότητας, και το σημείο καμπής μετακινείται αντίστοιχα προς τη σήραγγα. Ακριβέστερα, για μη περατές καταστάσεις υπολογίστηκε η απόσταση του i $x/R = 2.2$ ενώ για την ενδιάμεση σχεδόν περατή περίπτωση η απόσταση μειώθηκε σε $x/R = 1.6$.

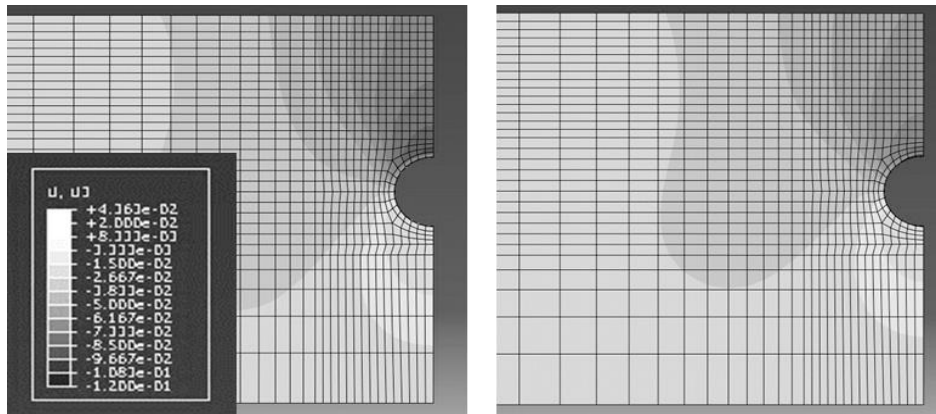
Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα πως τα φαινόμενα μύζησης (suction effects) που αναπτύσσονται στο υπέδαφος κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αστράγγιστες συνθήκες λειτουργούν ευνοϊκά, αφού κατά μία έννοια συγκρατούν το έδαφος στην περιοχή της εκσκαφής από το να παραμορφωθεί ελεύθερα.



Διάγραμμα 5-11: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$



Εικόνα 5-4: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (undrained– δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$

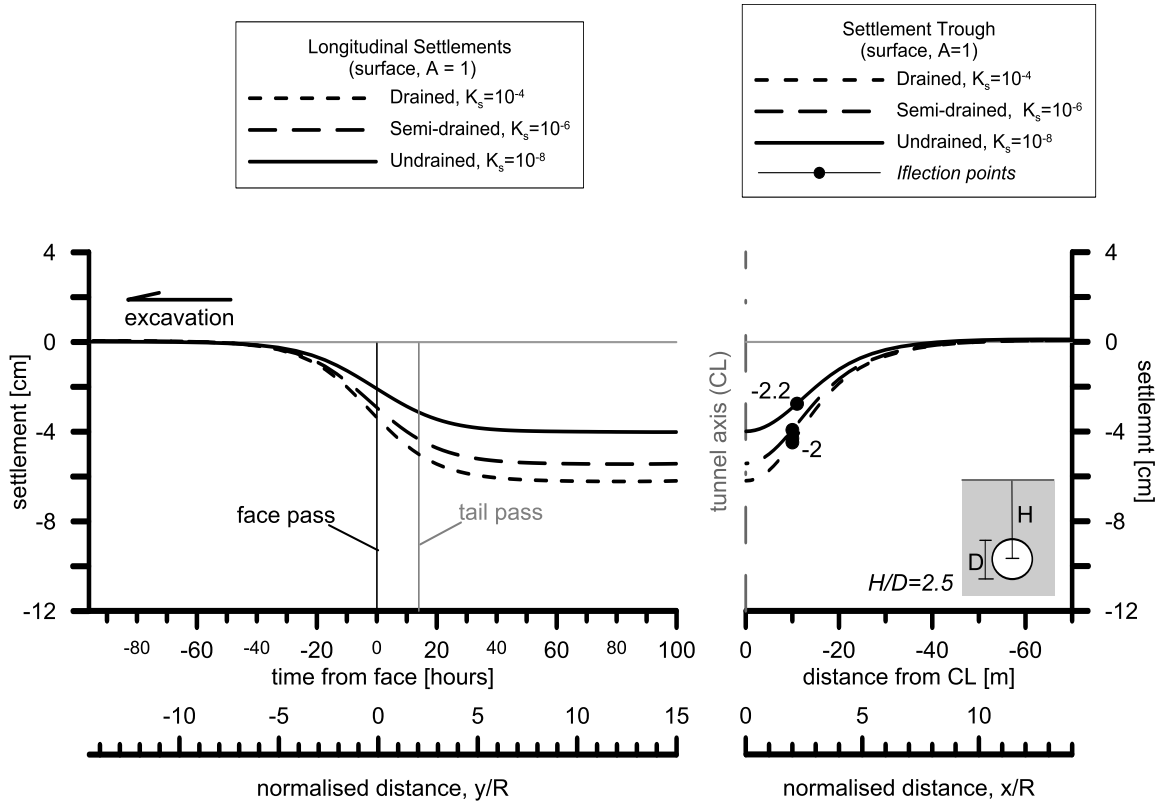


Εικόνα 5-5: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$

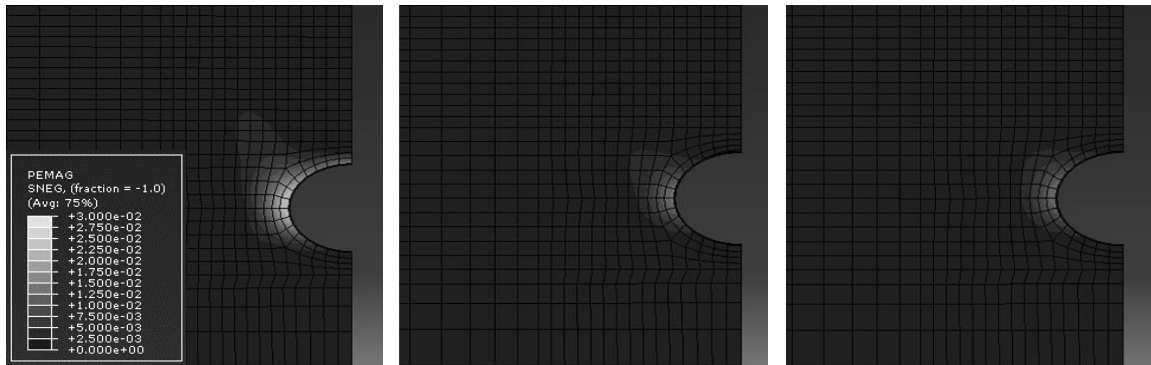
5.1.3.2 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=1$

Για την τιμή $A = 1$, με την οποία θεωρείται πως έχουμε πλήρη εξισορρόπηση των υδροστατικών πιέσεων και του μεγαλύτερου μέρους των ολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, η εικόνα των καθιζήσεων είναι αυτή που περιγράφεται στο *Διάγραμμα 5-12*. Συγκριτικά με την περίπτωση της υποενότητας 5.1.3.1 (*Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=0.5$*), οι μετατοπίσεις είναι αρκετά μικρότερου μεγέθους και μάλιστα το εύρος των μεγίστων μικραίνει κατά πολύ. Οι αστράγγιστες συνθήκες δείχνουν να είναι σαφώς οι ευνοϊκότερες, με μέγιστη αναπτυσσόμενη καθίζηση τα 4cm, ενώ οι περατές είναι οι πιο δυσμενείς και εμφανίζουν μέγιστη καθίζηση 6,2cm. Για τον ενδιάμεσο συντελεστή περατότητας παρατηρείται μια τιμή της τάξης των 5,6cm και η συμπεριφορά του σχεδόν περατού (semi-drained) εδάφους προσομοιάζει στην στραγγιζόμενη κατάσταση. Κάτι ακόμη που διακρίνεται στο διάγραμμα των διαμήκων καθιζήσεων (βλ. *Διάγραμμα 5-12 αριστερά*) είναι πως η έκταση ανάπτυξης προσυγκλίσεων έχει μειωθεί χαρακτηριστικά στην τιμή $y/R = 7$.

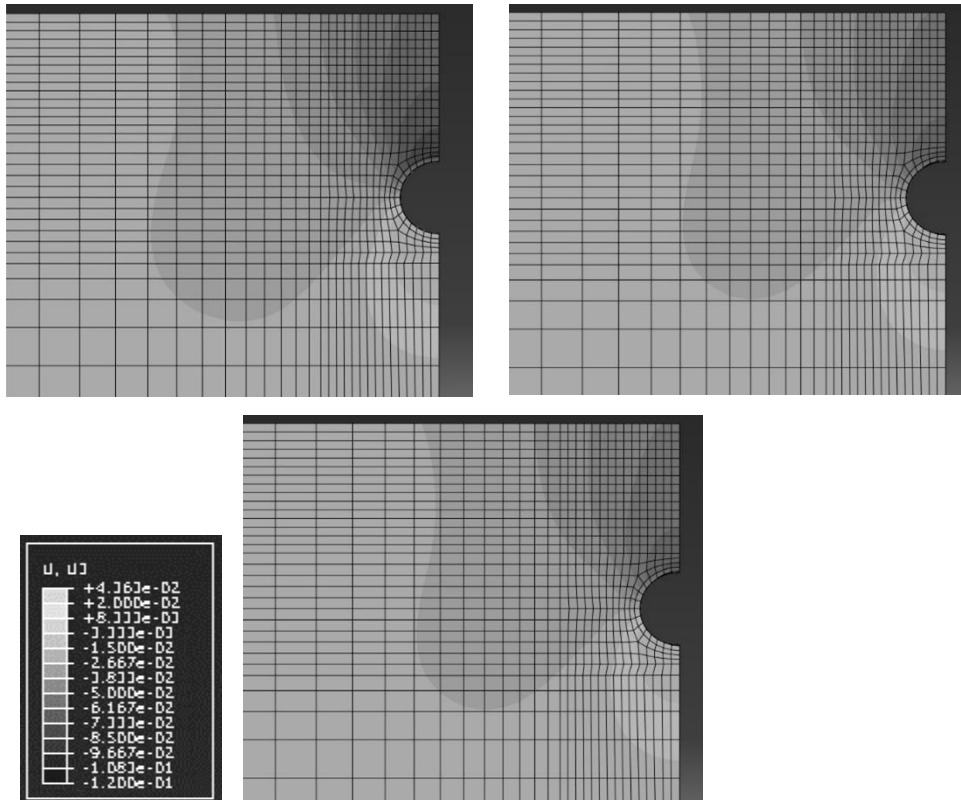
Όσον αφορά το εγκάρσιο προφίλ των καθιζήσεων (βλ. *Διάγραμμα 5-12 δεξιά*), φαίνεται πως η κατάσταση έχει εξομαλυνθεί αρκετά, και αυτό λόγω κυρίως της πλήρους ανάληψης των υδροστατικών πιέσεων. Η καμπύλη των καθιζήσεων δεν αλλάζει αξιοσημείωτα για τις τρεις καταστάσεις, γεγονός που φαίνεται από τις θέσεις των σημείων καμπής για τις διαφορετικές καταστάσεις. Ειδικότερα, για τις μη περατές συνθήκες λαμβάνουμε θέση σημείου καμπής $x/R = 2.2$, ενώ για τις σχεδόν περατές και τις περατές λαμβάνουμε $x/R = 2$. Η σύμπτωση των δύο τελευταίων, ενισχύει το συμπέρασμα πως στην εν λόγω περίπτωση ($A=1$), τα εδάφη με $K_s = 10^{-4}$ και 10^{-6} m/s παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.



Διάγραμμα 5-12: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$



Εικόνα 5-6: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained-αριστερά), σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – μέση) και μη περατές συνθήκες (undrained-δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$



Εικόνα 5-7: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – πάνω αριστερά), σχεδόν περατές συνθήκες (semi-drained – πάνω δεξιά) και μη περατές συνθήκες (undrained – κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$

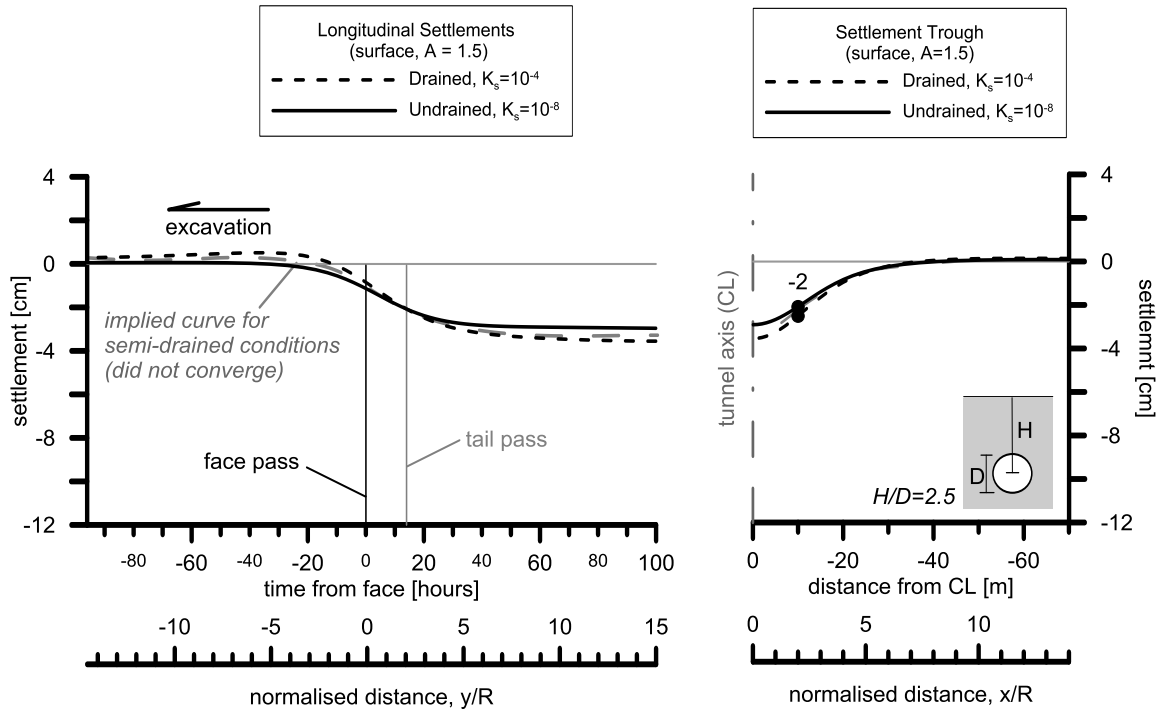
5.1.3.3 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=1,5$

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο (βλ. 5.1.2 *Εξωθήσεις Μετώπου*), για εφαρμοζόμενη πίεση τέτοια, που να αντισταθμίζει πλήρως τις ολικές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, η επιρροή της περατότητας είναι ελάχιστη στις δημιουργούμενες κατά την εκσκαφή καθιζήσεις. Η θεώρηση αυτή υποστηρίζεται και από το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων (βλ. *Διάγραμμα 5-13*).

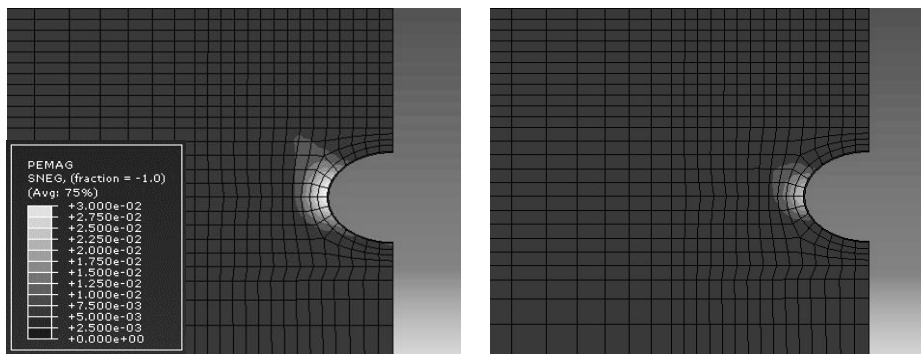
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τιμή της παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$ δείχνουν πως λίγη επίδραση έχει η περατότητα στο πρόβλημα των καθιζήσεων. Ακριβέστερα, το εύρος των μέγιστων επιφανειακών παραμορφώσεων για τους διαφορετικούς συντελεστές περατότητας μειώνεται δραματικά, με τη μέγιστη καθίζηση για τις αστράγγιστες συνθήκες να είναι 3,1cm και για τις στραγγιζόμενες 3,6cm αντίστοιχα. Ενδιαφέρον όμως εδώ παρουσιάζεται κατά την παρατήρηση του διαμήκους προφίλ των καθιζήσεων (*Διάγραμμα 5-13 αριστερά*). Σε αστράγγιστες συνθήκες, οι καθιζήσεις φαίνεται να σταθεροποιούνται νωρίτερα σε χρόνο 40hrs και σε απόσταση $x/R = 6$, ενώ στις στραγγιζόμενες το φαινόμενο σταματά μετά από 75hrs και σε απόσταση $x/R = 11$ περίπου. Επιπρόσθετα, ενώ για τις αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζεται μια μικρή περιοχή προσυγκλίσεων που εκτίνεται εμπροσθεν του μετώπου σε μήκος $x/R = 3$, κατά την εκσκαφή σε στραγγιζόμενες συνθήκες εμφανίζονται ανυψώσεις στην επιφάνεια που φτάνουν σε μήκος έως και $x/R = 12$ εμπροσθεν του μετώπου. Οι ανιζήσεις αυτές παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή 0,7cm περίπου. Η τιμή αυτή δεν θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική σε γενικές γραμμές, αλλά πρέπει να λάβει κανείς υπόψιν και το γεγονός πως η εν λόγω ανάλυση γίνεται για σήραγγες με λόγο υπερκειμένων $H/D = 2.5$. Είναι αναμενόμενο σε ρηχότερες σήραγγες, με λόγο υπερκειμένων για παράδειγμα $H/D = 1.5$, η τιμή της μέγιστης ανιζήσης να αυξάνεται σημαντικά για υψηλές τιμές πίεσης εξισορρόπησης μετώπου.

Η εικόνα του εγκάρσιου προφίλ των επιφανειακών μετακινήσεων (βλ. *Διάγραμμα 5-13 δεξιά*) συμφωνεί με τα όσα έχουν γραφτεί παραπάνω. Η κατανομή όπως και το μέγεθος των καθιζήσεων στην επιφάνεια δεν διαφέρει σημαντικά για τις τρεις τιμές του συντελεστή περατότητας. Επίσης, τα σημεία καμπής βρίσκονται όλα σε απόσταση $x/R = 2$ από τον άξονα συμμετρίας της σήραγγας. Σε αντίθεση, τέλος, με την διαμήκη

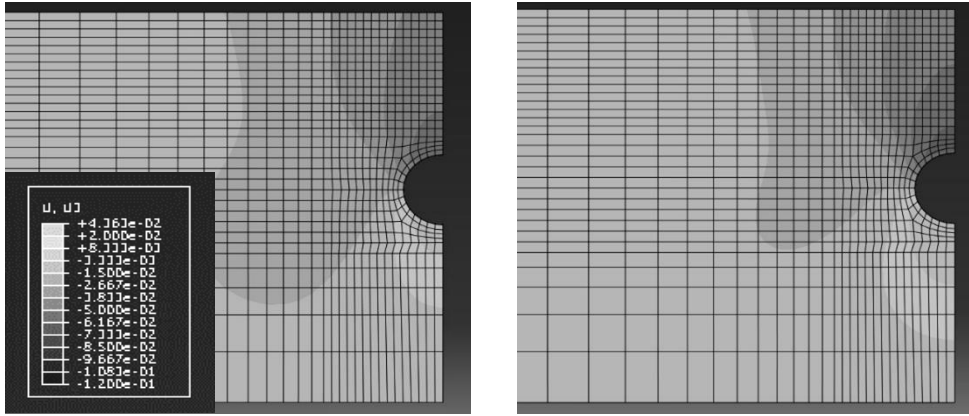
κατανομή, στο εγκάρσιο προφίλ δεν παρατηρούνται ανυψώσεις της επιφάνειας στις στραγγιζόμενες συνθήκες.



Διάγραμμα 5-13: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για κορεσμένες καταστάσεις και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$



Εικόνα 5-8: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drowned-αριστερά, και μη περατές συνθήκες (undrained-δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

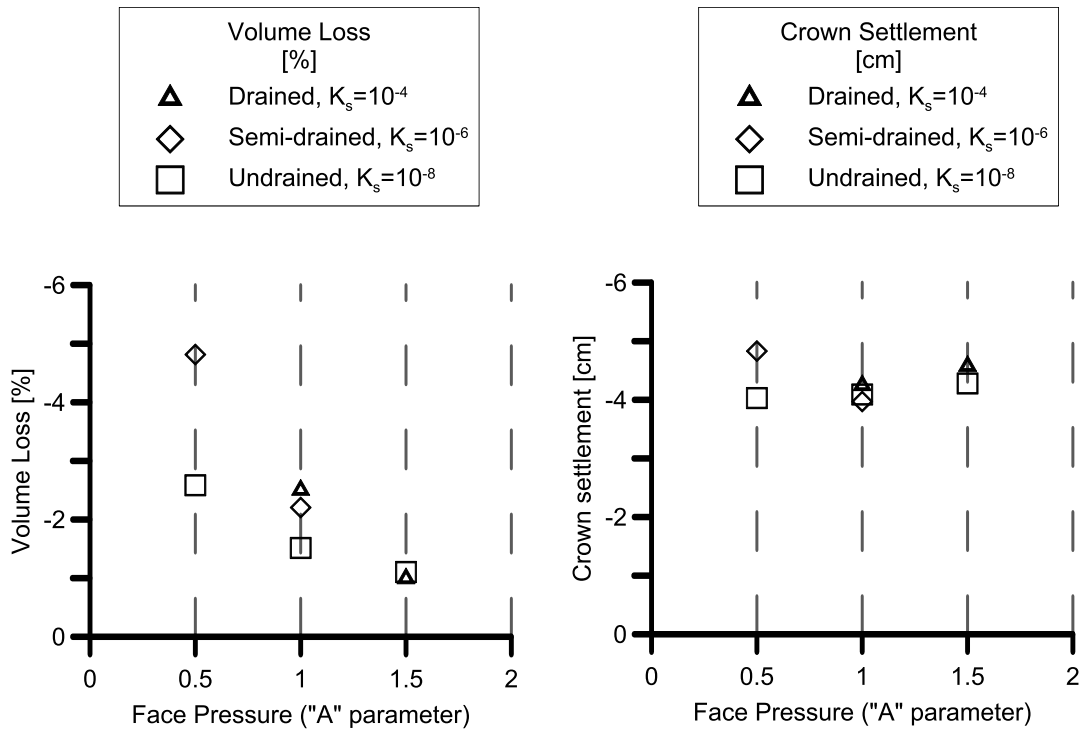


Εικόνα 5-9: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (*drained* – αριστερά) και μη περατές συνθήκες (*undrained*–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

5.1.4 Εδαφικές Απώλειες – Καθιζήσεις στο Όριο Εκσκαφής (στέψη)

Παρακάτω δίνονται, συμπληρωματικά, δύο διαγράμματα όπου συγκεντρώνονται με τη μορφή σημείων οι εδαφικές απώλειες και οι καθιζήσεις στην στέψη που συμβαίνουν κατά την όρυξη, για όλες τις αναλύσεις όπου το έδαφος προσομοιώθηκε ως κορεσμένο.

Παρατηρείται έντονη αύξηση των απωλειών όγκου με την αύξηση της περατότητας σε χαμηλές πιέσεις υποστήριξης, ενώ για τιμή $A = 1.5$ οι απώλειες παίρνουν την ελάχιστη τιμή και η περατότητα πρακτικά σταματά να έχει την όποια επίδραση. Συγκεκριμένα, για $A = 0.5$ σε μη περατές συνθήκες υπολογίστηκε μέγιστη απώλεια όγκου περίπου 2.7% και για τις ενδιάμεσες, σχεδόν περατές (semi-drained) συνθήκες περαιτέρω αύξηση που φτάνει το 4.8%. Από την άλλη, οι ακτινικές παραμορφώσεις, που εκφράζονται εδώ ως κάθετες μετατοπίσεις στην στέψη της σήραγγας (crown settlements) δεν δείχνουν να μεταβάλλονται αισθητά, με μεταβολή της τάξης του 1cm να συμβαίνει για διαφορά του συντελεστή περατότητας κατά δύο τάξεις μεγέθους στην περίπτωση χαμηλής πίεσης υποστήριξης. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση παρατηρήθηκε για $K_s = 10^{-6} m/s$ και $A = 0.5$ και είναι περίπου 5cm. Η ελάχιστη για $K_s = 10^{-6} m/s$ και $A = 0.5$ και είναι περίπου 4cm.



Διάγραμμα 5-14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εδαφικών απωλειών (αριστερά) και καθιζήσεων στο όριο εκσκαφής (δεξιά) για το σύνολο των συζητημένων αναλύσεων

5.1.5 Επιρροή του Ρυθμού Προχώρησης στις Μη-Στραγγιζόμενες Συνθήκες

Τελευταία διερεύνηση στην Α' ενότητα αποτελεσμάτων, γίνεται για την επιρροή του ρυθμού προχώρησης σε μη-στραγγιζόμενες συνθήκες στην εξέλιξη των επιφανειακών κάθετων μετακινήσεων.

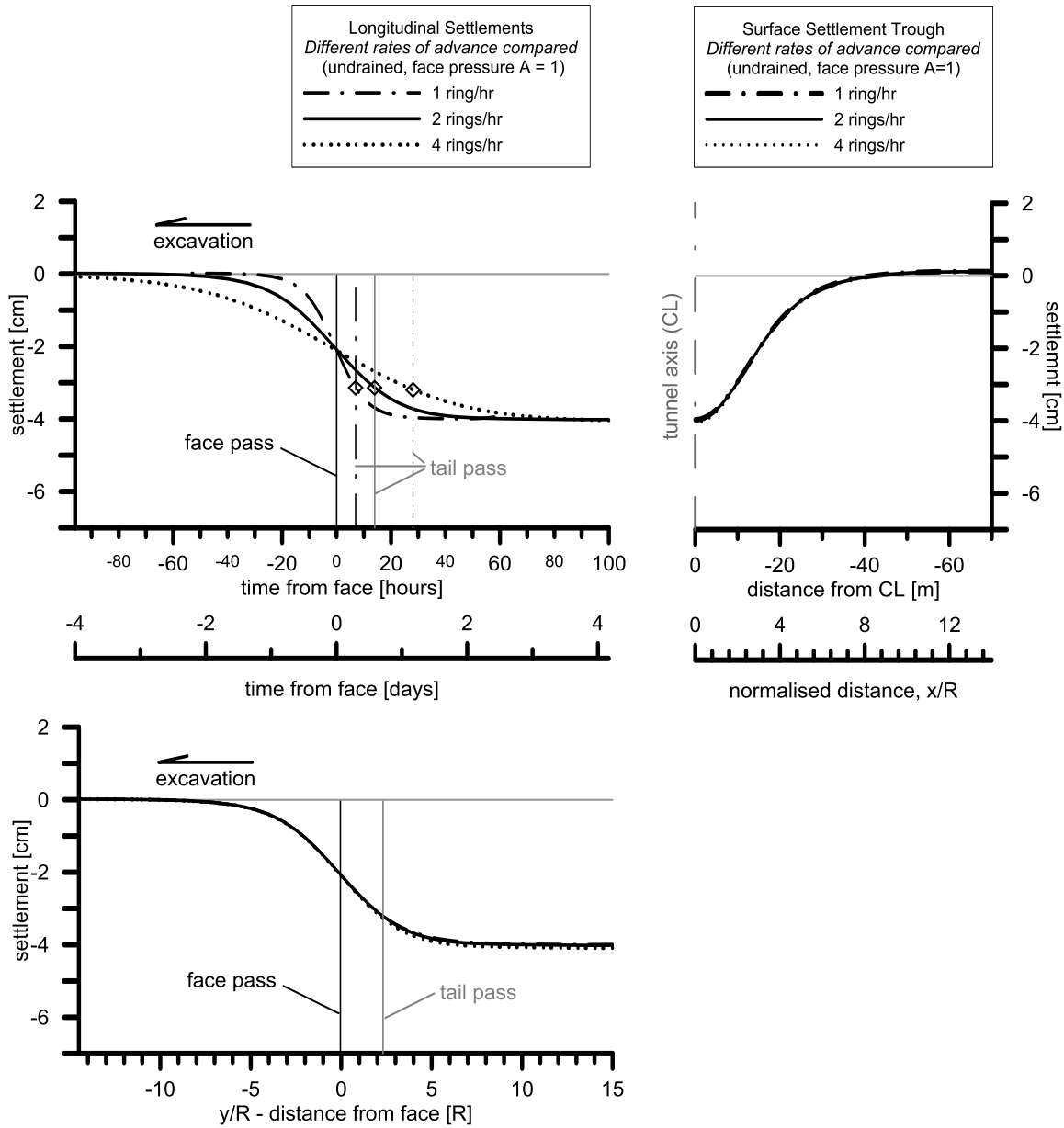
Παρακάτω παραθέτονται συγκριτικά διαγράμματα για τρεις διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης, αναφερόμενα στις κατά μήκος και εγκάρσιες στον άξονα της σήραγγας καθιζήσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκρινόμενα ως προς την κανονικοποιημένη ως προς την ακτίνα απόσταση y/R και x/R , και τον χρόνο. Πέραν όμως των μετακινήσεων στην επιφάνεια, σκόπιμο κρίθηκε να παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα που αφορούν στην πίεση του νερού των πόρων και τις μεταβολές αυτής κατά την διάνοιξη με διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης. Τα τελευταία παρουσιάζονται επίσης σε αντίστοιχα διαγράμματα, τα οποία θα αναλυθούν στις επόμενες σελίδες.

Όπως απεικονίζεται στα κανονικοποιημένα διαγράμματα (βλ. *Διάγραμμα 5-15 δεξιά και κάτω*), μεταβολές στον ρυθμό προχώρησης του μηχανήματος τις ίδιας τάξης μεγέθους δεν επιδρούν ουσιαστικά στην εξέλιξη των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, η διαφορά στις τιμές των μέγιστων αναπτυσσόμενων μετακινήσεων για ταχύτητες 1 hr/ring και 4 hr/ring είναι μόλις 0,2cm και οι μετρημένες κατά το πέρασμα της ουράς μετακινήσεις διαφέρουν μόλις 0,1cm. Η κατανομή των καθιζήσεων στην επιφάνεια πάνω από τον χώρο διέλευσης της σήραγγας είναι επίσης πανομοιότυπη και για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης.

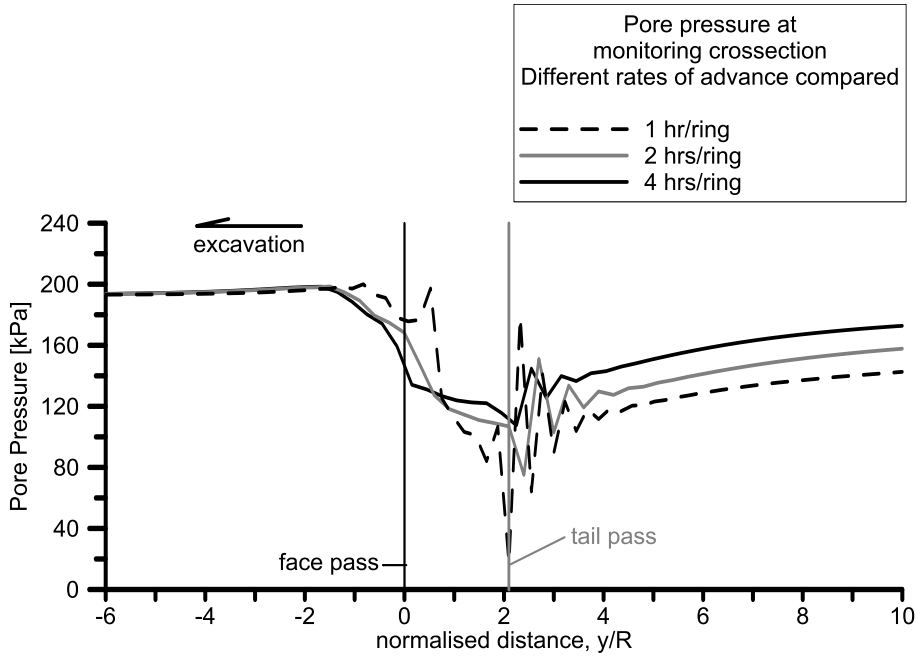
Περαιτέρω διερεύνηση όμως στις αναπτυσσόμενες πιέσεις του νερού των πόρων επιδεικνύει διαφορές που συσχετίζονται με τον διαφορετικό ρυθμό προώθησης του μηχανήματος. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο *Διάγραμμα 5-16*, για γρήγορη προχώρηση το μηχανήματος με ρυθμό 1hr/ring έχουμε μια μέγιστη πτώση της πίεσης κατά 160 kPa. Για αργή προχώρηση του μηχανήματος με ρυθμό 4hrs/ring η πτώση της πίεσης κατά το πέρασμα του μηχανήματος δεν ξεπερνά τα 80 kPa, ενώ για τον ενδιάμεσο ρυθμό 2 hrs/ring η πίεση πέφτει περίπου 100 kPa. Επιπλέον, οι τελικές πιέσεις των πόρων δείχνουν να αποκαθίστανται γρηγορότερα σε μία αργή εκσκαφή.

Βάσει των παραπάνω, μπορεί να ειπωθεί πως παρόλο που σε αστραγγιστες συνθήκες η ταχύτητα διάνοιξης της σήραγγας δεν επηρεάζει τις καθιζήσεις στην επιφάνεια, είναι πολύ πιθανό αυτό να μην ισχύει για αρκετά υψηλότερες τιμές

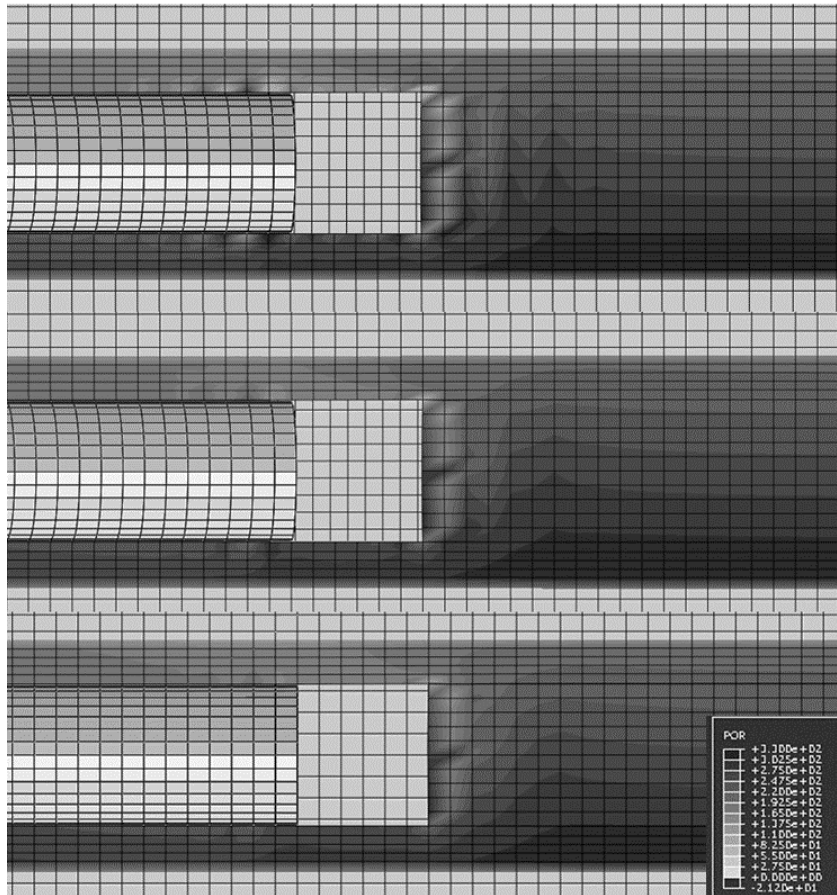
περατότητας, όπου δεν υφίσταται η ευεργετική επίδραση των μυζητικών φαινομένων λόγω υποπιέσεων στο νερό των πόρων.



Διάγραμμα 5-15: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων επιφανειακών καθιζήσεων (αριστερά), κανονικοποιημένο συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων επιφανειακών καθιζήσεων (κάτω) ως προς την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής και εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας για μη-περατές συνθήκες, παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$ και διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης.



.Διάγραμμα 5-16: Κανονικοποιημένο συγκριτικό διάγραμμα ως προς την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής των αναπτυσσόμενων πιέσεων του νερού των πόρων (στη στέψη) για μη-περατές συνθήκες, παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$ και διαφορετικούς ρυθμούς προχώρησης



Εικόνα 5-10: Απεικόνιση των μεταβολών της πίεσης του νερού των πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με ισομεγέθεις περιοχές (contours) σε μη περατές συνθήκες. Επάνω, η διάνοιξη προσομοιώνεται με ρυθμό 1hr/ring, στη μέση με ρυθμό 2hrs/ring, κάτω με ρυθμό 4hrs/ring

5.2 Β' ΟΜΑΔΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΒΜ

Στις περισσότερες αριθμητικές αναλύσεις, συνήθως η ύπαρξη του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα είτε αγνοείται, προσομοιώνοντας το έδαφος σε ξηρές συνθήκες, είτε συμπεριλαμβάνεται έμμεσα μόνο, θεωρώντας πλήρως στραγγιζόμενες ή παντελώς μη-περατές συνθήκες^[15]. Η προαναφερθείσα θεώρηση χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου, ευκολίας συγκρίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων διαφόρων αναλύσεων και χάριν απλότητας της διαδικασίας προσομοίωσης. Σκόπιμο κρίθηκε, λοιπόν, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, να αφιερωθεί το υποκεφάλαιο αυτό στη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών αναλύσεων όμοιων μοντέλων σε ξηρές και κορεσμένες, περατές και μη περατές συνθήκες.

5.2.1 Εξωθήσεις Μετώπου

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, κύριο γενεσιουργό αίτιο των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη ρηχής σήραγγας με EPB TBM είναι οι πλαστικές παραμορφώσεις και οι αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής. Κατά κανόνα, αυτές εκφράζονται με τη μορφή οριζόντιων μετατοπίσεων. Στην ενότητα αυτή δίνονται τρία (3) διαγράμματα όπου παρουσιάζονται οι μετακινήσεις των κόμβων του μετώπου, όπως μετρήθηκαν στις αναλύσεις για ξηρές (dry) και κορεσμένες συνθήκες, οι τελευταίες για μη περατές (undrained) και περατές συνθήκες (drained). Η σύγκριση γίνεται βάσει όμοιας τιμής πίεσης υποστήριξης μετώπου.

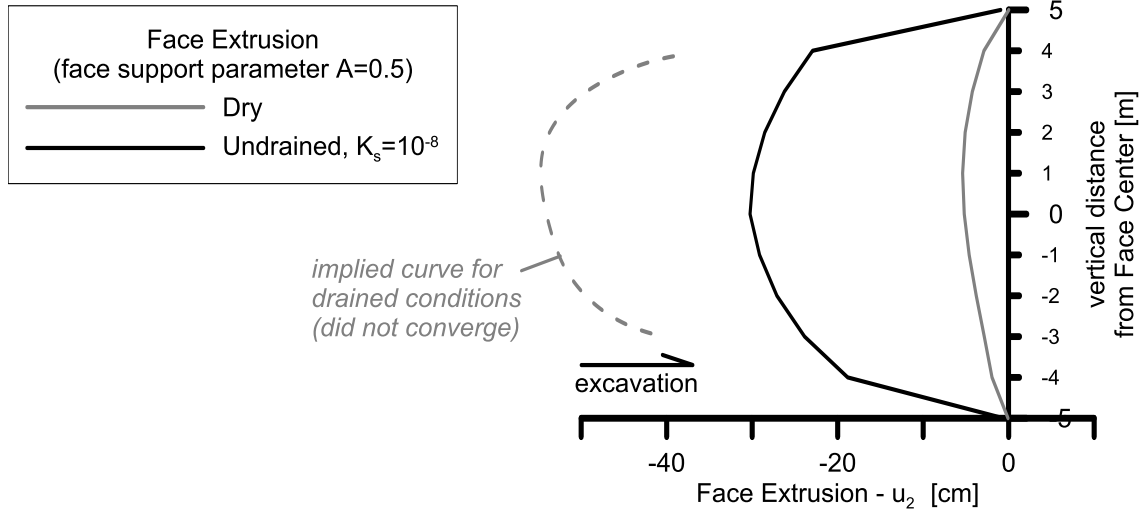
Στο

Διάγραμμα 5-17 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τιμή της παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$, φαίνεται καθαρά πως ο συνυπολογισμός του υδραυλικού προβλήματος δίνει κατά πολύ δυσμενέστερα αποτελέσματα. Ενώ για ξηρές συνθήκες η μέγιστη εξώθηση δεν ξεπερνά τα 8cm, στις μη περατές συνθήκες η εξώθηση του μετώπου φτάνει τα 30cm. Σε περατές συνθήκες η εξώθηση αυτή αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη. Σημειώνεται πως τελευταία αυτή ανάλυση για $K_s = 10^{-4}$ m/s και $A = 0.5$ δεν ολοκληρώθηκε λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων.

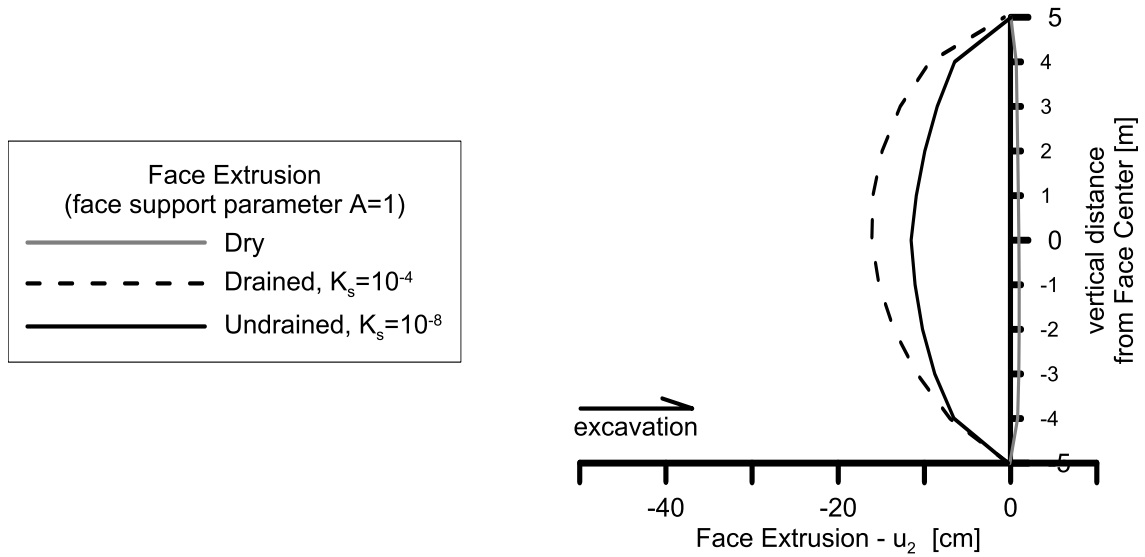
Στο *Διάγραμμα 5-18* το μέτωπο φαίνεται να ισορροπεί σε ξηρές συνθήκες. Οι αναλύσεις εδώ έτρεξαν με τιμή $A = 1$ που αντιστοιχεί στην ανάληψη του 70% των ολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων και του 100% των υδροστατικών. Για μη

ύπαρξη νερού, δεν παρατηρούνται εξωθήσεις, αλλά μικρές ωθήσεις του μετώπου ομόρροπες της εκσκαφής. Οι παραμορφώσεις αυτές (face push-outs) λαμβάνουν τιμές της τάξης των λίγων εκατοστών $\sim 2\text{cm}$. Ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο, αυξάνει αυτές τις ωθήσεις. Ακριβέστερα, για $A = 1.5$, λαμβάνουμε ωθήσεις μετώπου σε ξηρές συνθήκες περίπου 4cm .

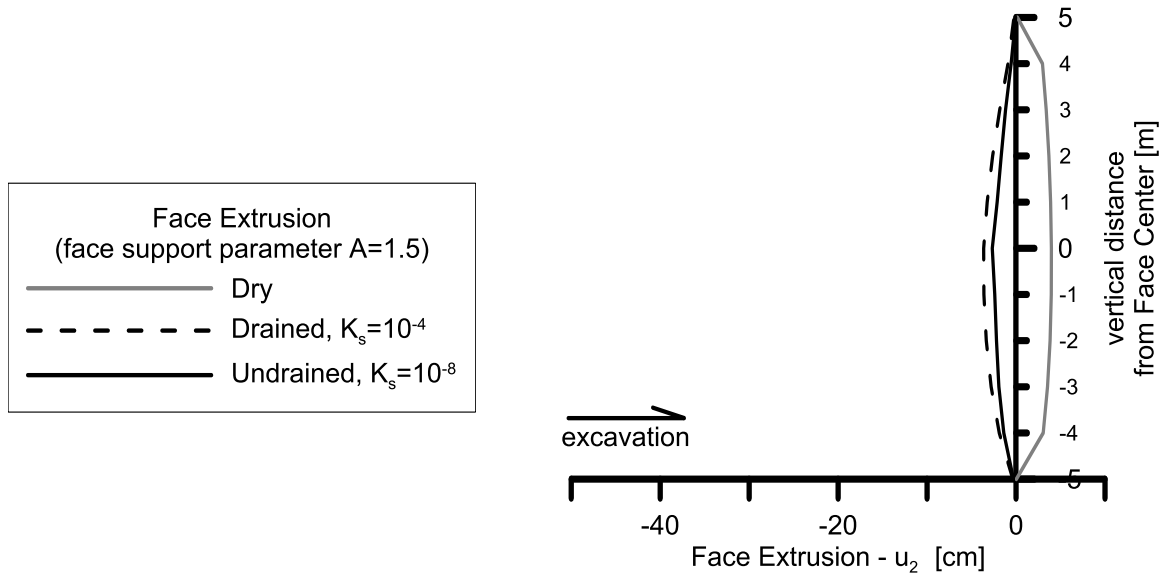
Στις προαναφερθείσες περιπτώσεις, οι εξωθήσεις του μετώπου για περατές και μη περατές συνθήκες ακολουθούν συμπεριφορά που περιγράφηκε στην ενότητα 5.1.2.



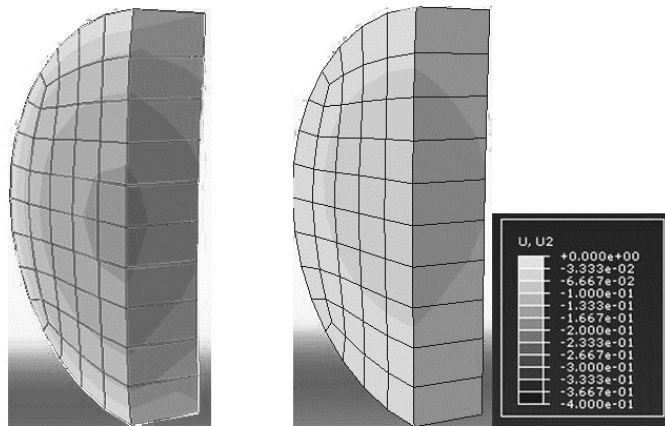
Διάγραμμα 5-17: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$



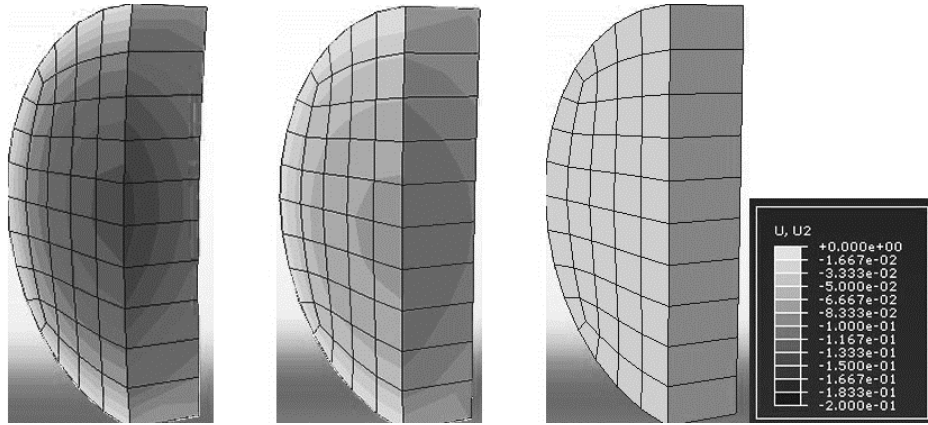
Διάγραμμα 5-18: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$



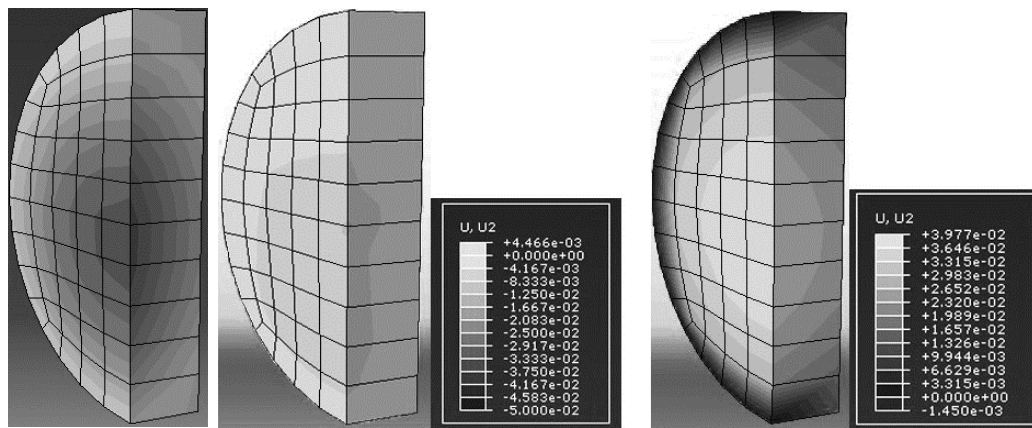
Διάγραμμα 5-19: Συγκριτικό διάγραμμα εξωθήσεων μετώπου (οριζόντιων μετατοπίσεων) για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες και παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου A=1.5



Εικόνα 5-11: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για μη περατές (undrained - αριστερά) και ξηρές (dry - δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου A = 0.5



Εικόνα 5-12: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατάς (drained - αριστερά), μη περατάς (undrained - μέση) και ξηρές (dry – δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$



Εικόνα 5-13: Απεικόνιση των μετωπιαίων εξωθήσεων με ισομεγέθεις περιοχές (contours) στα πεπερασμένα στοιχεία του μετώπου για περατάς (drained - αριστερά), μη περατάς (undrained - μέση) και ξηρές (dry – δεξιά) συνθήκες, και τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

5.2.2 Καθιζήσεις στη Επιφάνεια – Προφίλ Καθιζήσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εδαφικών μετακινήσεων σε κοινά διαγράμματα για τις τρεις συνθήκες, μια ξηρή (dry) και δύο κορεσμένες εκ των οποίων η μια περατή (drained) και η άλλη μη-περατή (undrained). Παρατίθενται επίσης απεικονίσεις των δημιουργούμενων πλαστικών ζωνών καθώς και των κατανομών των μετακινήσεων μέσα την εδαφική μάζα. Η σύγκριση γίνεται βάσει όμοιας τιμής πίεσης υποστήριξης μετώπου.

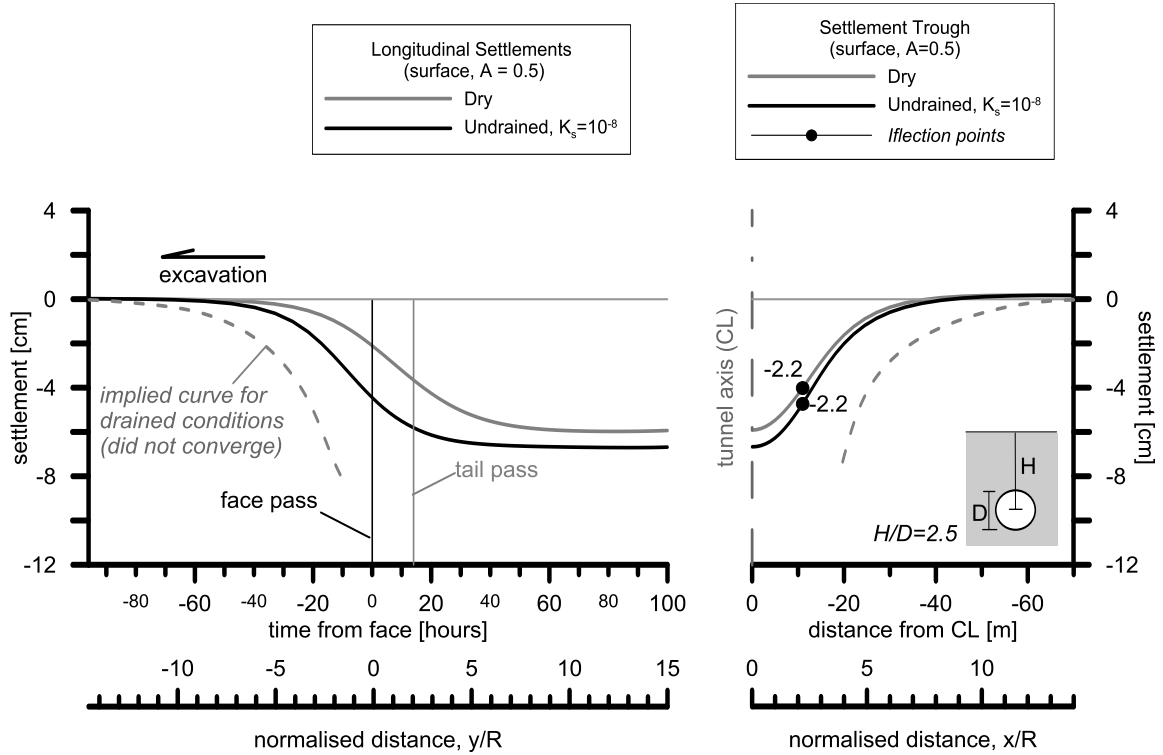
5.2.2.1 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=0,5$

Για την χαμηλότερη τιμή πίεσης υποστήριξης μετώπου που εκφράζεται μέσω της παραμέτρου $A = 0.5$, έχει ήδη αναφερθεί πως αντιστοιχεί στο μόλις 30% των υδροστατικών και 50% των ολικών γεωστατικών τάσεων και πως η αδυναμία ανάληψης τάσεων αυτή δημιουργεί σοβαρές παραμορφώσεις στο μέτωπο, οι οποίες αντανακλώνται κατ' αντιστοιχία στην επιφάνεια.

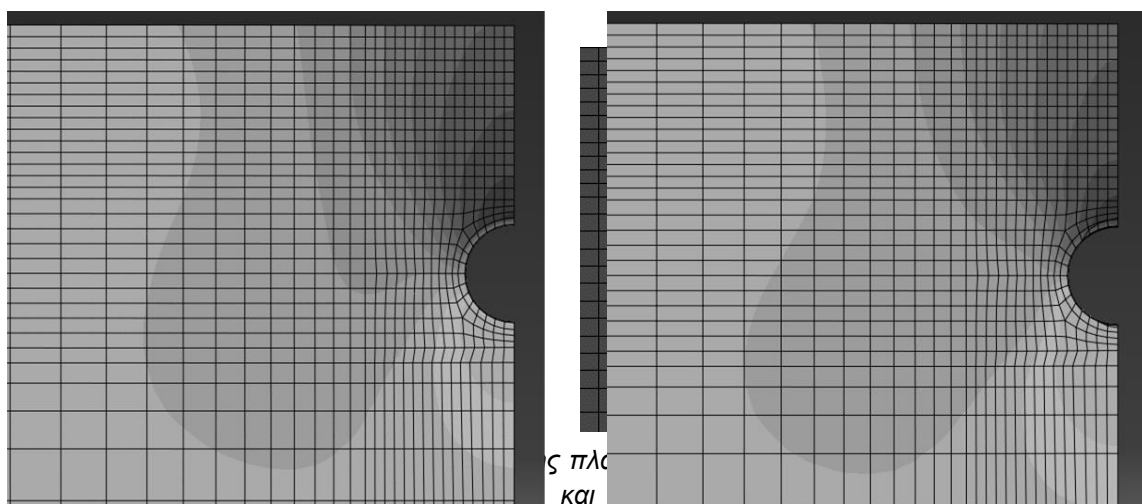
Στο *Διάγραμμα 5-20* η ύπαρξη του νερού στο μοντέλο αυξάνει το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων αρκετά. Επιπρόσθετα, στις κορεσμένες συνθήκες αναπτύσσονται παραμορφώσεις λόγω προσυγκλίσεων σε μεγαλύτερη απόσταση από το μέτωπο απ' ότι στις ξηρές, και μάλιστα τόσο εντονότερα όσα αυξάνει η περατότητα. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση για μη περατές συνθήκες εκδηλώνεται μέγιστη καθίζηση 6,7cm, ενώ στην ξηρή κατάσταση οι καθιζήσεις στην επιφάνεια μειώνονται σε 5,9cm. Ουσιαστική σταθεροποίηση επέρχεται πιο νωρίς κορεσμένες μη περατές περιπτώσεις μετά από χρονικό διάστημα 50 περίπου ωρών και στις ξηρές μετά από 70 ώρες. Αυτά αντιστοιχούν σε κανονικοποιημένες αποστάσεις $y/R = 7.5$ και $y/R = 10.5$. Η απόσταση έμπροσθεν της εκσκαφής που παρατηρούνται προσυγκλίσεις είναι της τάξης του $y/R = 8$ τις μη περατές και $y/R = 6$ για τις ξηρές συνθήκες αντίστοιχα.

Αναφορικά με το *Διάγραμμα 5-20* *Διάγραμμα 5-11 δεξιά*, όπου απεικονίζεται το εγκάρσιο προφίλ των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων, παρατηρείται πως το εύρος της καμπύλης των καθιζήσεων εγκάρσια στη σήραγγα δεν μεταβάλλεται αισθητά από την εισαγωγή ή όχι του υδραυλικού προβλήματος στο μοντέλο και το σημείο καμπής βρίσκεται στην ίδια απόσταση $x/R = 2.2$ διευρύνεται με την αύξηση της περατότητας, και το σημείο καμπής i μετακινείται αντίστοιχα προς τη σήραγγα.

Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα πως ο μη συνυπολογισμός του νερού στην αριθμητική ανάλυση, όταν εφαρμόζονται χαμηλές τιμές πίεσης μετώπου οδηγεί σε μια μικρή υποεκτίμηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 5-20: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=0.5$



παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$

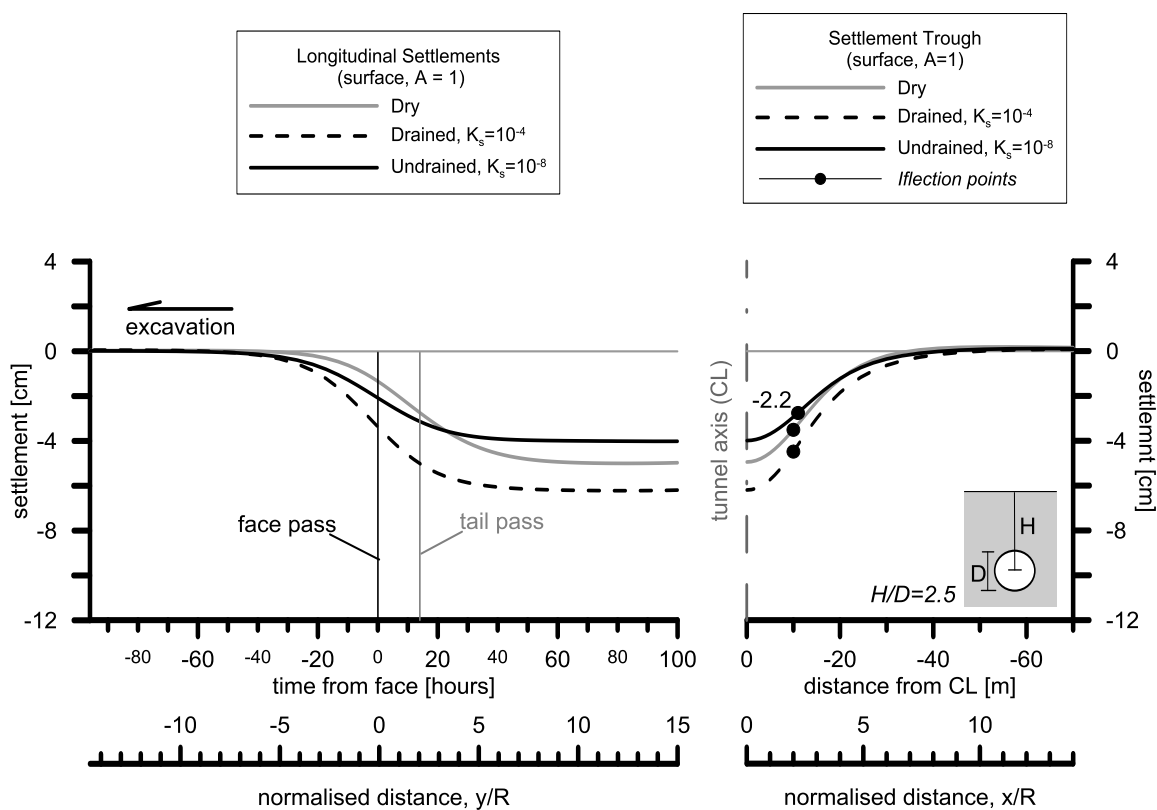
Εικόνα 5-15: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για μη περατές συνθήκες (undrained – αριστερά) και ξηρές συνθήκες (dry–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 0.5$

5.2.2.2 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=1$

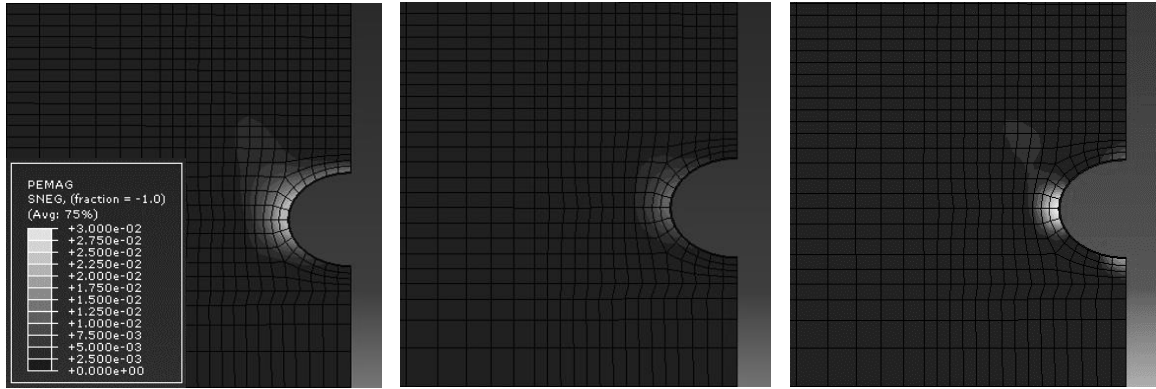
Για την τιμή $A = 1$, με την οποία θεωρείται πως έχουμε πλήρη εξισορρόπηση των υδροστατικών πιέσεων και του 70% περίπου των ολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων, η εικόνα των καθιζήσεων για ξηρές και κορεσμένες καταστάσεις περιγράφεται στο

Διάγραμμα 5-21. Οι μετατοπίσεις στην επιφάνεια είναι μικρότερου μεγέθους με τις αστράγγιστες συνθήκες δείχνουν να είναι σαφώς οι ευνοϊκότερες, με μέγιστη αναπτυσσόμενη καθίζηση τα 4cm, ενώ οι περατές είναι οι πιο δυσμενείς και εμφανίζουν μέγιστη καθίζηση 6,2cm. Οι ξηρές συνθήκες εκδηλώνουν μέγιστη καθίζηση με μια τιμή της τάξης των 5,2cm. Μάλιστα, η έκφραση του φαινομένου όταν δεν υπολογίζεται το υδραυλικό μέρος είναι εκτός των άλλων και εντονότερη, αφού η κλίση της καμπύλης του προφίλ των καθιζήσεων είναι πιο απότομη. Κάτι ακόμη που διακρίνεται στο διάγραμμα των διαμήκων καθιζήσεων (βλ. Διάγραμμα 5-12 αριστερά) είναι πως η έκταση ανάπτυξης προσυγκλίσεων έχει μειωθεί χαρακτηριστικά στην τιμή $y/R = 7$ και είναι κοινή και για τις τρεις περιπτώσεις. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, και εδώ το φαινόμενο των καθιζήσεων σε ξηρές συνθήκες σταθεροποιείται αργότερα σε σχέση με τις κορεσμένες.

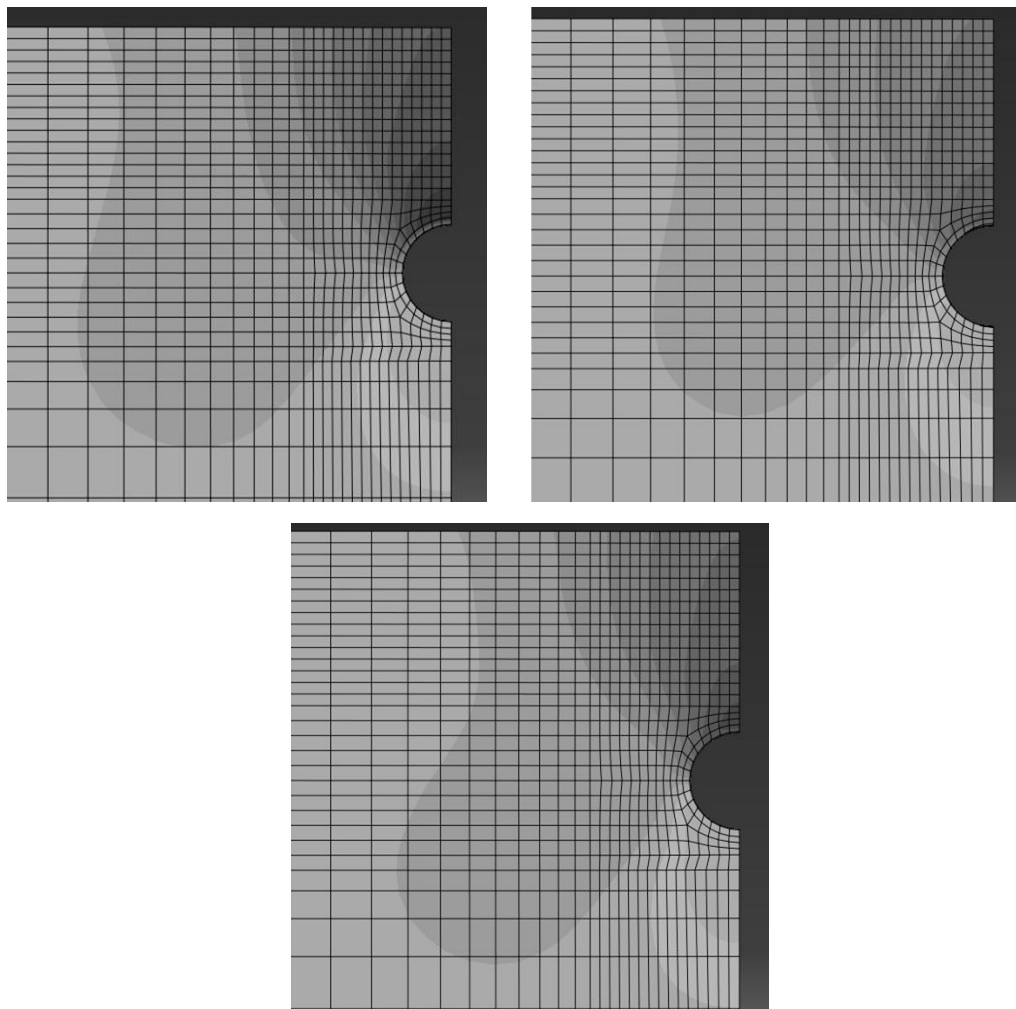
Όσον αφορά το εγκάρσιο προφίλ των καθιζήσεων (βλ. Διάγραμμα 5-12 δεξιά), αξίζει να σημειωθεί πως παρατηρείται αναλόγως της κατάστασης και αλλαγή στην κλίση της καμπύλης. Η πιο απότομη κλίση παρουσιάζεται για τις ξηρές συνθήκες ενώ η ομαλότερη για τις κορεσμένες περατές. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εξαγόμενο, αφού η γωνία της κλίσης αυτής βοηθά στην πρόγνωση των διατμητικών φορτίσεων που θα κληθούν να αναλάβουν τυχόν κατασκευές στην επιφάνεια, λόγω διαφορετικής καθίζησης της θεμελίωσής τους. Τέλος, για τις κορεσμένες μη περατές συνθήκες λαμβάνουμε θέση σημείου καμπής $x/R = 2.2$, ενώ για τις ξηρές και τις κορεσμένες περατές λαμβάνουμε $x/R = 2$.



Διάγραμμα 5-21: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1$



Εικόνα 5-17: Απεικόνιση της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained–αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained – μέση) και ξηρές συνθήκες (undrained–δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$



Εικόνα 5-16: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – πάνω αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained – πάνω δεξιά) και ξηρές συνθήκες (dry–κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1$

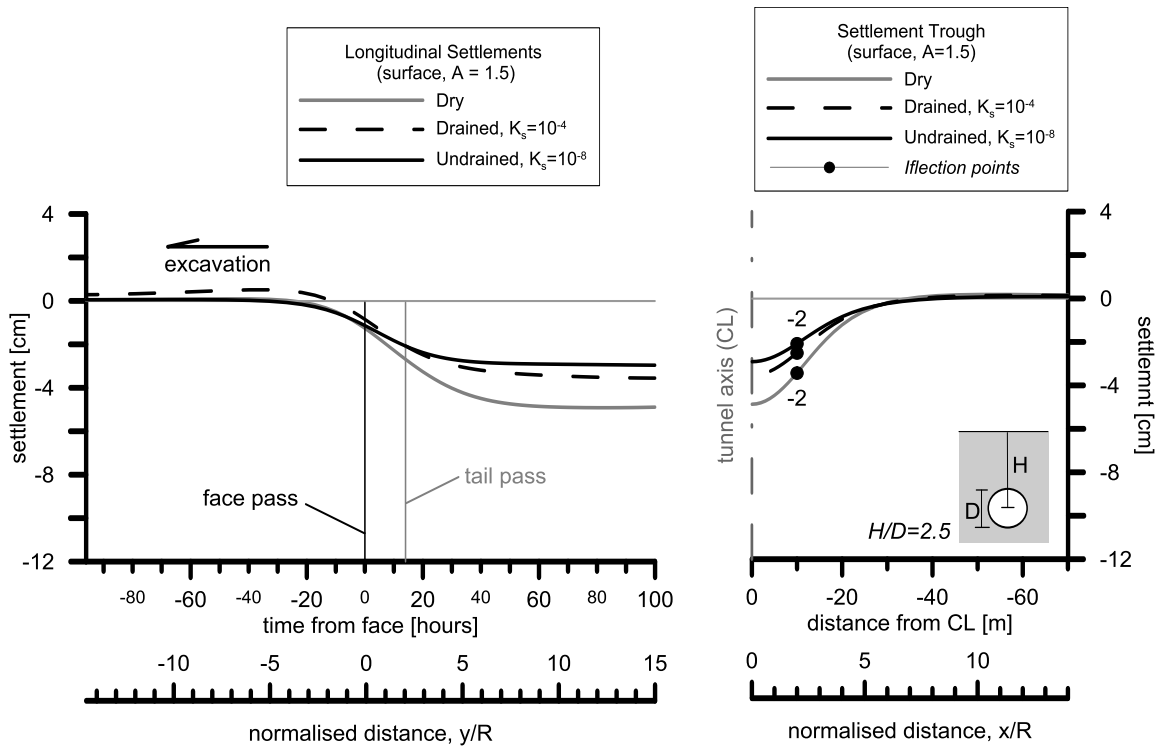
5.2.2.3 Παράμετρος Πίεσης Υποστήριξης Μετώπου $A=1,5$

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί, για εφαρμοζόμενη πίεση τέτοια, που να αντισταθμίζει πλήρως τις ολικές οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, η επιρροή της περατότητας είναι ελάχιστη στις δημιουργούμενες κατά την εκσκαφή καθιζήσεις στις κορεσμένες συνθήκες (βλ. *Παράγραφο 5.1.3.3*). Η εικόνα όμως αλλάζει σημαντικά αν γίνει σύγκριση με την ξηρή κατάσταση, όπως φαίνεται στο *Διάγραμμα 5-22*.

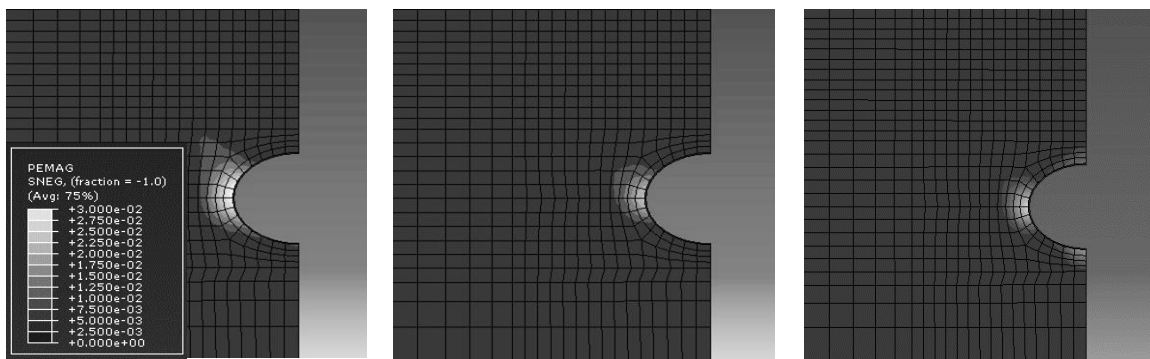
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τιμή της παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$ δείχνουν πως λίγη επίδραση έχει η περατότητα στο πρόβλημα των καθιζήσεων αναφορικά με τις ξηρές αναλύσεις. Ακριβέστερα, ενώ οι μέγιστες καθιζήσεις για τις αστράγγιστες συνθήκες να είναι 3,1cm και για τις στραγγιζόμενες 3,6cm, δηλαδή λαμβάνουν μια μείωση της τάξης του 1cm και 2,6cm αντίστοιχα, στην ξηρή ανάλυση παρατηρείται μείωση μόνο 0,3cm αφού η μέγιστη καθίζηση είναι 4,9cm. Το παραπάνω υποδεικνύει την μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της πίεσης μετώπου για τις μη συζευγμένες αναλύσεις.

Αναφορικά με την σταθεροποίηση του φαινομένου, σε αστράγγιστες κορεσμένες συνθήκες οι καθιζήσεις φαίνεται να σταθεροποιούνται νωρίτερα σε χρόνο 40hrs και σε απόσταση $x/R = 6$, και στις ξηρές σταματούν μετά από 60hrs και σε απόσταση $x/R = 9$ περίπου.

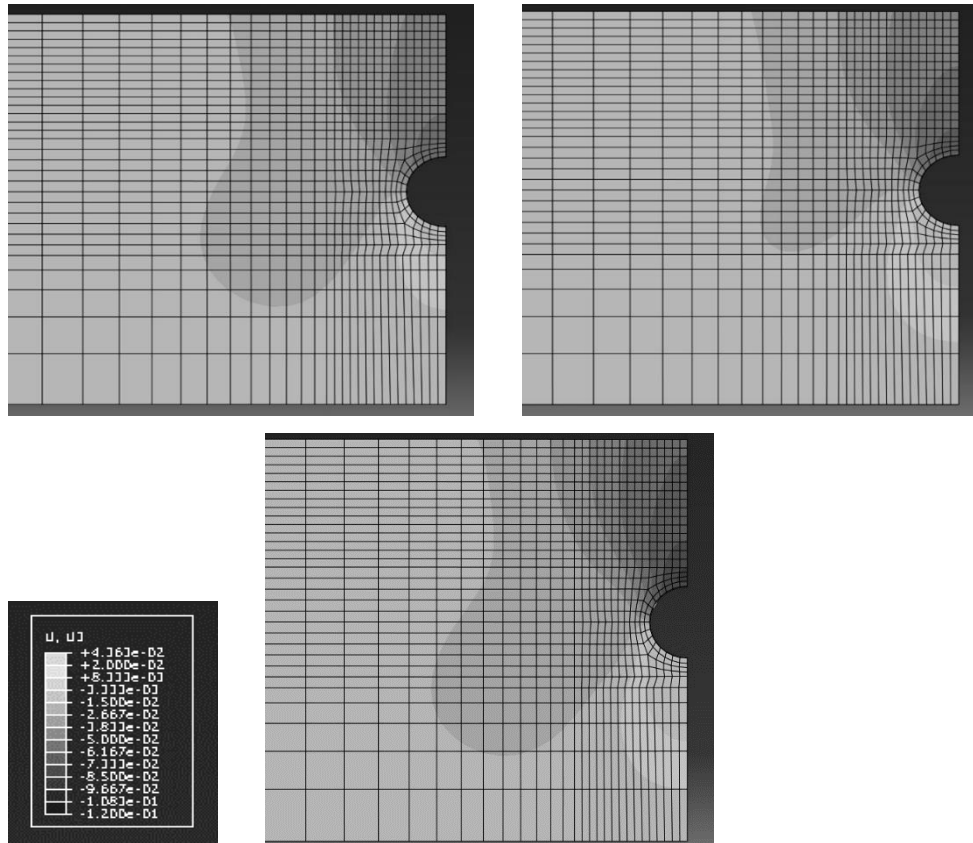
Η εικόνα του εγκάρσιου προφίλ των επιφανειακών μετακινήσεων (βλ. *Διάγραμμα 5-22 δεξιά*) δεν παρουσιάζει κάτι άξιο αναφοράς, πέραν του ότι και οι τρεις καμπύλες αλλάζουν κυρτότητα στην ίδια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας $x/R = 2$.



Διάγραμμα 5-22: Συγκριτικό διάγραμμα διαμήκων (αριστερά) και εγκάρσιων (δεξιά) στον άξονα της σήραγγας επιφανειακών καθιζήσεων για ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες με παράμετρο πίεσης υποστήριξης μετώπου $A=1.5$



Εικόνα 5-18: Απεικόνιση των δημιουργούμενων πλαστικών ζωνών στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες (drained – αριστερά), μη περατές συνθήκες (undrained–μέση) και ξηρές συνθήκες (dry – δεξιά) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

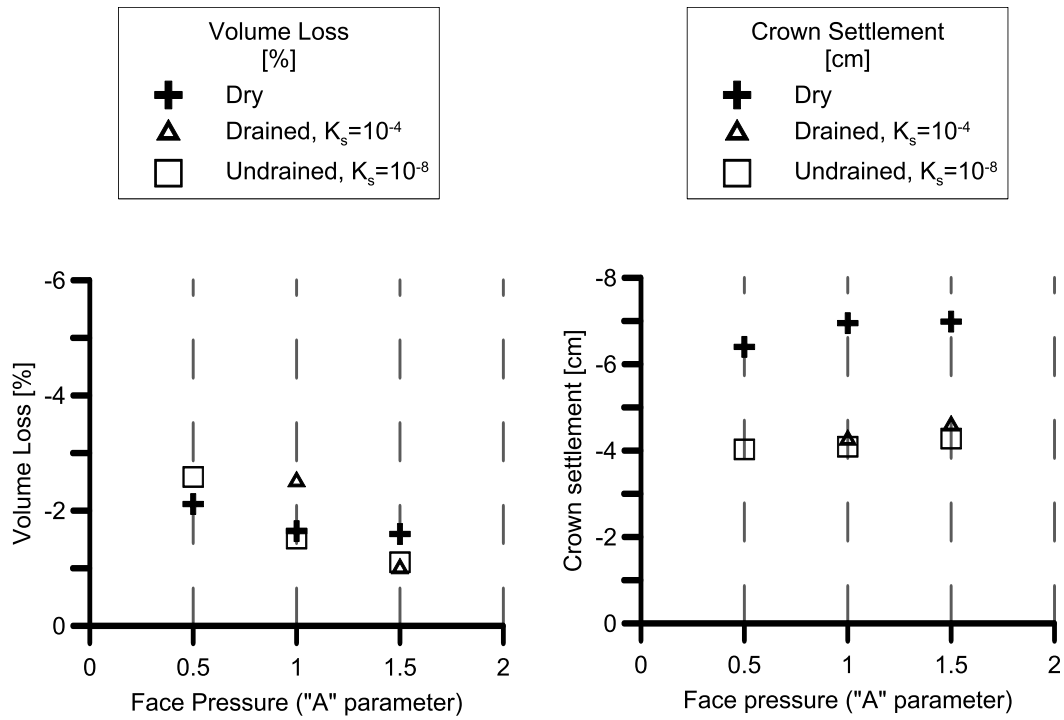


Εικόνα 5-19: Απεικόνιση της κατανομής των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων στην διατομή ελέγχου, για περατές συνθήκες ($drained$ – πάνω αριστερά), μη περατές συνθήκες ($undrained$ – πάνω δεξιά) και για ξηρές συνθήκες (dry – κάτω) για τιμή παραμέτρου πίεσης μετώπου $A = 1.5$

5.2.3 Εδαφικές Απώλειες – Καθιζήσεις στο Όριο Εκσκαφής (στέψη)

Παρακάτω δίνονται, συμπληρωματικά, δύο διαγράμματα όπου συγκεντρώνονται με τη μορφή σημείων οι εδαφικές απώλειες και οι καθιζήσεις στην στέψη που συμβαίνουν κατά την όρυξη, για τις αναλύσεις όπου το έδαφος προσομοιώθηκε ως κορεσμένο περατό, κορεσμένο μη περατό και ξηρό.

Παρατηρείται έντονη αύξηση των απωλειών όγκου με την αύξηση της περατότητας στις συζευγμένες αναλύσεις σε χαμηλές πιέσεις υποστήριξης, ενώ για τιμή $A = 1.5$ οι απώλειες παίρνουν τις ελάχιστες τιμές ($\leq 2\%$) και χωρίς έντονη διασπορά. Από την άλλη, οι κάθετες μετατοπίσεις στην στέψη της σήραγγας (crown settlements) δεν δείχνουν να μεταβάλλονται αισθητά, με την αλλαγή της τιμής της παραμέτρου A . Αξιοσημείωτο είναι όμως πως στο διάγραμμα αυτό (βλ. *Διάγραμμα 5-23 δεξιά*) σχηματίζονται δυο διακριτές μεταξύ τους περιοχές. Η μία συγκεντρώνει τις τιμές των ξηρών αναλύσεων και η άλλη των συζευγμένων. Ουσιαστικές μεταβολές στις τιμές των δεδομένων των περιοχών αυτών δεν υπάρχουν. Οι ξηρές συνθήκες παρουσίασαν μια κατακόρυφη μετακίνηση της στέψης της τάξης των 7cm και οι κορεσμένες αναλύσεις μια κατακόρυφη μετακίνηση της τάξης των 5cm.



Διάγραμμα 5-23: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εδαφικών απωλειών (αριστερά) και καθιζήσεων στο όριο εκσκαφής (δεξιά) για τις αναλύσεις σε ξηρές (dry), περατές (drained) και μη-περατές (undrained) συνθήκες.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής της υδατοπερατότητας σε συνεκτικά εδάφη στην ανάπτυξη επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα ολομέτωπης κοπής (EPBM), διαμέτρου 10m και με λόγο υπερκειμένων $H/D = 2.5$. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκαν 15 παραμετρικές αναλύσεις (βλ. Πίνακας 5-1) και οι παράμετροι, για τις οποίες εξετάστηκε η επιρροή τους, είναι:

- Ο συντελεστής υδατοπερατότητας K_s
- Η πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής
- Η ύπαρξη ή όχι υδροφόρου ορίζοντα (συνυπολογισμός κι επίλυση του υδραυλικού προβλήματος)

Αναφορικά με την μέθοδο προσομοίωσης της περατότητας του εδάφους, αποδεικνύεται πως η μέθοδος που ακολουθήθηκε, η αλλαγή δηλαδή του συντελεστή υδατοπερατότητας κατα δύο τάξεις μεγέθους, αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα και μάλιστα για μεταβολή του συντελεστή από τιμές της τάξης του 10^{-8} m/s σε τιμές της τάξης του 10^{-4} m/s οι συνθήκες μεταβάλλονται από αστράγγιστες σε στραγγισμένες. Αυτό αποδεικνύεται από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 5.1.1., τα οποία απεικονίζουν την μεταβολή των πιέσεων του νερού των πόρων στο μέτωπο της εκσκαφής. Για μικρές τιμές του συντελεστή περατότητας δημιουργούνται υπερπίεσεις πριν και υποπίεσεις μετά το πέρασμα της κοπτικής κεφαλής, οι οποίες αποκαθίστανται μετά από σημαντικό χρονικό διάστημα, ενώ για μεγάλες σχετικά τιμές του συντελεστή περατότητας δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή.

Στο μέτωπο της εκσκαφής, όσο αυξάνεται η πίεση υποστήριξης περιορίζεται η οριζόντια παραμόρφωση, αποτέλεσμα λογικό και αναμενόμενο αφού επηρεάζονται άμεσα οι συνοριακές συνθήκες, και η κατάταξη ως προς την επίδραση της διάνοιξης στην προκαλούμενη διαταραχή του εδαφικού υλικού, από ευμενέστερη σε δυσμενέστερη είναι η εξής: ξηρές, αστράγγιστες και στραγγισμένες συνθήκες αντίστοιχα. Η αποτόνωση που

συντελείται στο μέτωπο εκσκαφής και τον πυρήνα προώθησης συνεπάγεται μια μείωση των ενεργών τάσεων και της διατμητικής αντοχής, η οποία μεγιστοποιείται στις στραγγισμένες συνθήκες. Συνεπώς, με την αύξηση του συντελεστή K_s λαμβάνονται εξωθήσεις μεγαλύτερου μεγέθους και αναμένονται εντονότερες καθιζήσεις στην επιφάνεια. Επιπρόσθετα, για υψηλές εφαρμοζόμενες πιέσεις στον θάλαμο εκσκαφής εμφανίζονται οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια του μετώπου, ομόρροπες στην φορά εκσκαφής που ενδέχεται σε στραγγιζόμενες συνθήκες να οδηγήσουν σε ανυψώσεις της επιφάνειας του εδάφους, οι οποίες αναμένεται να αυξάνουν σε μέγεθος, όσο μειώνεται ο λόγος H/D . Όσον αφορά στις παρατηρούμενες στην επιφάνεια καθιζήσεις, αυτές δείχνουν να αυξάνονται με την μείωση της παραμέτρου A . Αντίθετα, για υψηλές τιμές της πίεσης υποστήριξης η επιρροή της περατότητας δείχνει να περιορίζεται.

Ο ρυθμός προχώρησης του TBM, η επιρροή του οποίου μελετήθηκε μόνο σε πρακτικά μη περατές συνθήκες στην παρούσα εργασία, δεν επηρεάζει της επιφανειακές καθιζήσεις. Παρόλα αυτά παρατηρείται μεταβολή στις αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις του νερού των πόρων, με τις υψηλότερες να παρατηρούνται για την ταχύτερη διάνοιξη της σήραγγας. Συμπερασματικά, αναμένεται μεταβολή της εντατικής απόκρισης του εδάφους υψηλότερης περατότητας, για μεταβολές στην ταχύτητα της διάνοιξης της σήραγγας.

Τέλος, από την μελέτη των αναλύσεων με και χωρίς τον συνυπολογισμό του υδραυλικού μέρους του προβλήματος, καταδεικνύονται σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα, για διαφορετικές τιμές της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Όταν εφαρμόζεται χαμηλή πίεση, παρατηρούνται ελάχιστα μικρότερες τελικές τιμές επιφανειακών καθιζήσεων για τις ξηρές συνθήκες. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου όμως διαφέρει αρκετά, με τις περισσότερες προσυγκλίσεις να εμφανίζονται στις αστράγγιστες συνθήκες. Για τις μεγαλύτερες τιμές εφαρμοζόμενης πίεσης μετώπου, οι μη συζευγμένες αναλύσεις υπερεκτιμούν τις παραμορφώσεις γενικά, αν η σήραγγα πρόκειται να διανοιχθεί σε κορεσμένα μη περατά εδάφη, ενώ αντίθετα να υποεκτιμούν τις επιφανειακές παραμορφώσεις αν η διάνοιξη λαμβάνει χώρα σε κορεσμένα περατά εδάφη. Επίσης, για υψηλότερες τιμές της πίεσης υποστήριξης, οι μη συζευγμένες αναλύσεις υποεκτιμούν τις παραμορφώσεις στην επιφάνεια. Αξίζει να αναφερθεί πως οι απώλειες όγκου για τις συζευγμένες και μη αναλύσεις δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, συγκεντρώθηκαν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα γύρω από φαινόμενα που επηρεάζουν τις πιέσεις του νερού των πόρων των κορεσμένων εδαφικών σχηματισμών, και κατ' επέκταση τις επιφανειακές καθιζήσεις, ώστε να επιτευχτεί μια καλύτερη κατανόηση των διαφόρων μηχανισμών που συντελούνται κατά τη διάνοιξη σήραγγων. Οι προτάσεις αυτές παραθέτονται παρακάτω:

- Αναφορικά με το μοντέλο, προτείνεται η χρήση ενός πιο κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος για αργίλους, όπως το Cam Clay ή το modified Cam Clay, ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα που προκύπτει στον υπολογισμό των καθιζήσεων από το κοινό μέτρο φόρτισης και αποφόρτισης.
- Διερεύνηση της τυχόν επιρροής του συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων K_0 στις μεταβολές των πιέσεων των πόρων, κατά τη διάνοιξη.
- Μελέτη αναλύσεων με διαφορετικές διαμέτρους σήραγγας D και διαφορετικούς λόγους βάθους υπερκειμένων προς προς διάμετρο H/D . Ενδεικτικά, προτείνεται $H/D=1.5$.
- Μελέτη της επιρροής του ρυθμού προχώρησης του TBM σε περατά και μέσης περατότητας εδάφη.
- Εις βάθος διερεύνηση των φαινομένων μύζησης σε μη περατούς σχηματισμούς.
- Συνεκτίμηση της επιρροής της ανάπτυξης ενεργών τάσεων στον πολφό.
- Μόρφωση κατάλληλου μοντέλου και μελέτη της επιρροής της διαπερατότητας σε συνδυασμό με τις λοιπές παραμέτρους στο πρόβλημα των καθιζήσεων σε περίπτωση εκσκαφής δίδυμης σήραγγας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (BIBLIOGRAPHY)

- [1] T. Kasper and G. Meschke, "A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 28, no. 14, pp. 1441–1460, 2004.
- [2] M. Kavvadas, D. Litsas, P. Fortsakis, G. Prountzopoulos, K. Tzivakos, and F. Chortis, "Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling," *Eur. Res. Progr. NeTTUN*, 2013.
- [3] M. Beade, "Settlement induced by tunneling in cohesive-frictional soils," 1997.
- [4] W. Schaub, "Multi-Mode and Variable Density TBMs Latest Trends in Developments," 2014.
- [5] R. Grandori, "1. Tbm Design Development," *Geology*.
- [6] EFNARC, "Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock," vol. 44, no. April, pp. 1–45, 2005.
- [7] E. M. Comodromos, M. C. Papadopoulou, and G. K. Konstantinidis, "Numerical Assessment of Subsidence and Adjacent Building Movements Induced by TBM-EPB Tunneling," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 140, no. 11, p. 4014061, 2014.
- [8] K. M. Lee, R. K. Rowe, and K. Y. Lo, "Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter," *Can. Geotech. J.*, vol. 29, no. 6, pp. 929–940, 1992.
- [9] T. Kasper and G. Meschke, "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 160–171, 2006.
- [10] F. Nagel and G. Meschke, "Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 26, no. 3, pp. 445–452, 2011.
- [11] F. Nagel, "Numerical simulation of interactions between the shield supported tunnel construction process and the response of soft , water saturated soils," no. December, pp. 689–696, 2012.
- [12] A. Lambrughi, L. Medina Rodríguez, and R. Castellanza, "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations," *Comput. Geotech.*, vol. 40, pp. 97–113, 2012.
- [13] N. A. Do, D. Dias, P. Oreste, and I. Djeran-Maigre, "3D modelling for mechanized tunnelling in soft ground-influence of the constitutive model," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, pp. 863–875, 2013.

- [14] D. Litsas, P. Fortsakis, and M. Kavvadas, "3D simulation of mechanized tunnel excavation," *3rd Arab. Tunn. Conf. Exhib.*, 2015.
- [15] P. Sitarenios, D. Litsas, and M. Kavvadas, "The interplay of face support pressure and soil permeability on face stability in EPB tunnelling," *Proc. 42nd World Tunn. Congr.*, pp. 1–10, 2016.
- [16] D. Litsas, "Effect of the face support pressure on tunnelling-induced ground movement," 2017.
- [17] G. Anagnostou and K. Kovari, "Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 165–173, 1996.
- [18] P. Sitarenios, D. Litsas, A. Papadakos, and M. Kavvadas, "Effect of Hydraulic Conditions in controlling the Face in EPB Excavated Tunnels," *SEE TunnelPromoting Tunneling SEE Reg. Proc. 41st World Tunn. Congr.*, 2015.
- [19] S. Jancsecz, R. Krause, and L. Langmaack, "Advantages of Soil Conditioning in Shield Tunnelling. Experiences of LRTS Izmir," *Proc. WTC*, 1999.