

**Διερεύνηση εδαφικών μετακινήσεων μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής  
σε μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**  
**ΚΟΤΣΑΜΙΔΗ ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Μ.ΚΑΒΒΑΔΑΣ**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

### Ευχαριστίες

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

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Λίσα Δημήτρη, για την αμέριστη υποστήριξη, χωρίς το ενδιαφέρον του οποίου με' τα κατάλληλα σχόλια και παρατηρήσεις του δεν θα υπήρχε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την υπομονή και το πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στη μητέρα μου για την ψυχολογική βοήθεια που έδειξαν τον τελευταίο χρόνο των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική εργασία στη Κοτσαμίδα Ευτυχία-Στεφανία και στη Καραϊσκού Μαρία για τη πίστη και υποστήριξη που έδειξαν σε αυτή τη προσπάθεια.

Κοτσαμίδα Σπυριδούλα

Αθήνα, Μάρτιος 2014

### Περίληψη

Το σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του μεγέθους της ακτινικής σύγκλισης στην περιφέρεια του μετώπου και η εξώθηση του μετώπου σε αβαθείς σήραγγες αστικού περιβάλλοντος. Στόχος της διπλωματική εργασίας είναι η εξαγωγή κάποιων σχέσεων μέσω των οποίων πραγματοποιείται η συσχέτιση των παραμέτρων ποιότητας του εδάφους με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από τα αριθμητικά προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν.

Αρχικά πραγματοποιείται η περιγραφή των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με εφαρμοζόμενη πίεση στο μέτωπο. Συγκεκριμένη αναφορά γίνεται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του εδαφικού υλικού που αφαιρείται από το μέτωπο, μέτρηση που συντελείται στο πίσω μέρος του μηχανήματος αξιοποιώντας τον εξοπλισμό που διαθέτει.

Ακολουθεί η αναφορά σε μελέτες που έχουν προταθεί στο παρελθόν από άλλους ερευνητές, περιγράφοντας διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τα μεγέθη που αναφέρθηκαν εξήχθησαν από παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για 6 αριθμητικά προσομοιώματα. Κατέπекταση συντελείται η περιγραφή της γεωμετρικής μόρφωσης των προσομοιωμάτων που δημιουργήθηκαν με σκοπό να διεξαχθούν συνολικά 72 αναλύσεις.

Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων επιλέχθηκαν 4 ενδεικτικές αναλύσεις με στόχο τη ποιοτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν για την εξώθηση του μετώπου και τη συνολική μετακίνηση ( $u_{\text{magnitude}}$ ).

Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται η περιγραφή μιας νέας μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης. Στο αριθμητικό προσομοίωμα που δημιουργείται περιλαμβάνεται η προσομοίωση του μηχανήματος, του κενού μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και τη εκσκαφής και το υλικό πλήρωσης του. Για το συγκεκριμένο αριθμητικό προσομοίωμα εκτελέστηκαν 24 αναλύσεις οι οποίες διαχωρίζονταν στις 12 πρώτες για κενό ασπίδας μηχανήματος – περιβάλλοντος γεωυλικού ίσο με 0cm και στις επόμενες 12 για κενό ασπίδας μηχανήματος – περιβάλλοντος γεωυλικού ίσο με 2cm. Από αυτές τις αναλύσεις παρουσιάζονται τα ποιοτικά αποτελέσματα της συνολικής μετακίνησης και της εξώθησης μετώπου για 4 αναλύσεις. Τα αποτελέσματα των 12 αναλύσεων συγκρίνονται σε διαγράμματα με αυτά που προέκυψαν από τις αρχικές 72 αναλύσεις.

Στο τελευταίο κεφάλαιο συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Στο ίδιο κεφάλαιο διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.





## Abstract

---

### **Summary**

The purpose of this thesis is to investigate the magnitude of the radial convergence at the periphery and the front's extrusion in shallow tunnels of urban environments. The aim of this thesis is to extract some relations through which the association between soil quality parameters and the analysis results obtained from the numerical simulations generated, is achieved.

Initially, the description of the tunnel boring machine cutters with applied to the front pressure will be presented. Specific reference is made to the techniques used to measure soil material removed from the front, measurement which occurs at the rear of the machine utilizing the equipment available.

Later on, the reference in studies previously proposed by other investigators follows, describing different numerical simulations which were developed.

In this thesis the results regarding the already mentioned sizes were extracted from parametric analyzes which were performed for 6 numerical simulations. Therefore, the description of simulations' geometric modeling created in order to carry out a total of 72 analyzes occurs.

From the total of numerical analyzes, four pilot analyzes were selected aiming at the qualitative presentation of the results obtained for the front's extrusion sizes and the overall's movement (U magnitude).

Moving forward, the description of a new numerical simulation method takes place. The numerical model generated includes the simulation of the machine, the gap between the shield and the excavating machine and the filler. For this numerical model 24 analyzes were performed which were divided, the first 12 for shield machine's vacuum - geomaterial environment equal to 0cm and the next 12 for shield machine's vacuum - geomaterial environment equal to 2cm. From these analyzes the qualitative results of the overall movement and front's extrusion for 4 analyzes, are presented. The results of 12 tests are compared to graphs obtained from the initial 72 analyzes.

In the last chapter the obtained conclusions are collected and presented. In the same chapter some recommendations for future research are expressed as well.



**Πίνακας περιεχομένων**

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	i
Πίνακας περιεχομένων .....	i
Περιεχόμενα εικόνων .....	v
Περιεχόμενα διαγραμμάτων .....	ix
Περιεχόμενα Πινάκων .....	xi
1 Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής- Tunnel Boring Machines (TBM) 1	
1.1 Μηχανήματα Εξισορρόπησης της Εδαφικής Πίεσης- EPBM (Earth Pressure Balance Machine).....	1
1.1.1 Περιοχή επιλογής χρήσης μηχανήματος EPB .....	1
1.1.2 Καταστάσεις Λειτουργίας (Operations Mode) .....	4
1.1.2.2 Ανοιχτή κατάσταση λειτουργίας Open mode (screw conveyor – conveyor belt).....	5
1.1.3 Συνιστώμενα μέρη του μηχανήματος .....	9
1.1.4 Χρήση αφρού (foam conditioning).....	16
1.1.5 Έλεγχος πίεσης του μετώπου (Control of face pressure).....	17
1.1.6 Τελική Επένδυση (Segmental lining) .....	18
1.2 Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα - Slurry Shield Machine .....	23
1.2.1 Βασική Λειτουργία των μηχανημάτων Slurry .....	25
1.2.2 Συνιστώμενα μέρη ενός μηχανήματος ασπίδας Slurry .....	28
2 Μεθοδολογία προσέγγισης υπερεκσκαφής με τη μέτρηση βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού ....	33
2.1 Σκοπός μέτρησης εδαφικού υλικού .....	33
2.2 Τεχνικές υπολογισμού απώλειας εδαφικού όγκου .....	33
2.3 Μεθοδολογία εκτίμησης της υπερεκσκαφής με μέτρηση του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού .....	37
3 Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων .....	41
3.1 Εισαγωγή .....	41
3.2 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke 41	
3.2.1 Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης .....	41
3.2.2 Κινηματικός αλγόριθμος του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής .....	41
3.2.3 Αλγόριθμος διόρθωσης (steering correction algorithm).....	42
3.2.4 Μοντέλο υπολογισμού της διαδικασίας διάνοιξης.....	45
3.2.5 Διακριτοποίηση στη περιοχή του μετώπου .....	46
3.2.6 Hybrid mesh .....	47
3.2.7 Μοντέλο εκσκαφής.....	47
3.2.8 Παραδείγματα εφαρμογής του προτεινόμενου αριθμητικού προσομοιώματος.....	48

## Πίνακας Περιεχομένων

3.3	Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Rafik Demagh, Fabrice Emeriault και Farid Hammoud	.50
3.3.1	Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος μελέτης	50
3.3.2	Αριθμητική Προσομοίωση	51
3.4	Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Kai Zhao, Michele Janutolo, Giovanni Barla	54
3.4.1	Μοντέλο αλληλεπίδρασης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με τη περιβάλλουσα βραχόμαζα	54
3.4.2	Προσομοίωση της βραχόμαζας	55
3.4.3	Προσομοίωση των στοιχείων που συνθέτουν το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής	56
3.4.4	Προσομοίωση της διαδικασίας προώθησης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής	57
3.4.5	Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της ασπίδας με τη βραχόμαζα	59
3.4.6	Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της κοπτικής κεφαλής με τη βραχόμαζα	60
3.4.7	Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της επένδυσης της σήραγγας με τη βραχόμαζα	61
4	Δημιουργία αριθμητικών προσομοιωμάτων με "συμβατική μέθοδο" εκσκαφής	63
4.1	Εισαγωγή	63
4.2	Αριθμητικές Αναλύσεις	63
4.3	Γεωμετρική μόρφωση και σχηματισμός καννάβου των αριθμητικών προσομοιωμάτων	64
4.3.1	Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων των αριθμητικών προσομοιωμάτων	67
4.3.2	Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας	68
5	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	69
5.1	Εισαγωγή	69
5.2	Ποιοτική Ανάλυση Αποτελεσμάτων	69
5.2.1	Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=6m$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=30KPa$ , γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ και ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs}=200KPa$	70
5.2.2	Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=10m$ με λόγο $H/D=2.5$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=10KPa$ , γωνία τριβής $\varphi=35^\circ$	73
5.3	Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το δείκτη ευστάθειας $\Lambda_f$	75
5.4	Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το μέτρο ελαστικότητας $E$	77
6	Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)	83
6.1	Εισαγωγή	83
6.2	Δημιουργία γεωμετρίας αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=8m$ και αναλογία ύψους υπερκειμένων με τη διάμετρο της σήραγγας $H/D=3.5$	83
6.3	Δημιουργία γεωμετρίας μηχανήματος ολομέτωπης κοπής	84
6.4	Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων του αριθμητικού προσομοιώματος	85
6.5	Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας διαμέτρου $D=8m$ , $H/D=3.5$	86
6.5.1	Ορισμός διεπιφάνειας εδάφους-ασπίδας μηχανήματος	87

## Πίνακας περιεχομένων

---

7	Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος	91
7.1	Εισαγωγή .....	91
7.2	Ποιοτική Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	91
7.2.1	Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=8m$ , $H/D=3.5$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=30KPa$ , γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ και ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs}=200KPa$ , για κενό ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και την ασπίδα του μηχανήματος $Gap=0cm$ και $Gap=2cm$	91
7.2.2	Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=8m$ , $H/D=3.5$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=10KPa$ , γωνία τριβής $\varphi=35^\circ$ και ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs}=100,200KPa$ , για κενό ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και την ασπίδα του μηχανήματος $Gap=2cm$ .....	94
7.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων από το αριθμητικό μοντέλο με τη προσομοίωση του μηχανήματος για τις διαφορετικές τιμές του διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής .....	96
7.4	Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το μέτρο ελαστικότητας $E$ .....	100
8	Συμπεράσματα .....	103
8.1	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	107
	Βιβλιογραφία .....	108



**Περιεχόμενα εικόνων**

Εικόνα 1-1: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος EPB όπου οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν τα επιμέρους αποτελούμενα μέρη (πηγή: Kanvadas Michael, Prountzopoulos George, Fortsakis Petros, Tzivakos Kwnstantinos, Litsas Dimitris, Chortis Philippos, (2013): Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling).....3

Εικόνα 1-2: Κελί μέτρησης της εδαφικής πίεσης (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling).....3

Εικόνα 1-3: Ροή του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο από το θάλαμο εκσκαφής στον ατέρμονα κοχλία (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling).....4

Εικόνα 1-4: Μηχάνημα ασπίδας EPB S-165 ( Herrenknecht) με ανοιχτή λειτουργία, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη διάνομιξη της σήραγγας στο μετρό της Μαδρίτης το 1997 με διάμετρο  $D=9,33m$  (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling).....6

Εικόνα 1-5: Απεικόνιση των διαφορετικών τύπων λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB με ταυτόχρονη απομάκρυνση του εκσκαπόμενου υλικού (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling) .....8

Εικόνα 1-6: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο μηχανήμα για την επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου στο New Delhi, δεξιά απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου στην Αθήνα ..... 10

Εικόνα 1-7: Επιλογή μηχανήματος EPB διαμέτρου  $D = 15.2 m$  για τη διάνομιξη σήραγγας στο υπόγειο σιδηρόδρομο της Μαδρίτης , δύο κοπτικές κεφαλές με αντίθετη κατεύθυνση εκσκαφής (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling)..... 10

Εικόνα 1-8: Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής Ιαπωνικού τύπου (σχεδιαστής (Mitsubishi) ,με ανοιχτού τύπου κοπτική κεφαλή (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling)..... 11

Εικόνα 1-9: Αριστερά: το πρώτο από τα δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής που χρησιμοποιήθηκαν στη διάνομιξη της σήραγγας Koralm με τα κοπτικά εργαλεία που είναι εξοπλισμένη η κοπτική κεφαλή, δεξιά..... 12

Εικόνα 1-10: Ο μηχανικός εξοπλισμός του θαλάμου εκσκαφής του μηχανήματος EPB που χρησιμοποιήθηκε στη διάνομιξη της σήραγγας Toshiori-Tsumori υπό αστράγγιστες συνθήκες, Osaka (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling) ..... 13

Εικόνα 1-11: Απεικόνιση ατέρμονα κοχλία με κεντρικό άξονα περιστροφής ..... 14

Εικόνα 1-12: Διαφορετικές διατάξεις περιστροφής και λειτουργίας του ατέρμονα κοχλία (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling) ..... 14

Εικόνα 1-13: Απεικόνιση της κίνησης των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του μηχανήματος ..... 15

Εικόνα 1-14: Σημείο του εξοπλισμού όπου είναι τοποθετημένα τα υδραυλικά έμβολα ώθησης ..... 16

Εικόνα 1-15: Διαδικασία ελέγχου της εισπίεση αφρού στο τμήμα της κοπτικής κεφαλής ενός μηχανήματος EPB..... 17

Εικόνα 1-16: Άσκηση και κατανομή της εδαφικής πίεσης που ασκεί στο μέτωπο κατά τη λειτουργία του ένα μηχανήμα EPB. Απεικονίζεται η κατανομή της γεωστατικής πίεσης και της πίεσης που ασκείται από το μηχανήμα προς εξισορρόπηση..... 18

Εικόνα 1-17: Δακτύλιος τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτυλίους ..... 19

Εικόνα 1-18: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σιδηροδρόμων... 20

Εικόνα 1-19: Ο μηχανισμός των γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης του μηχανήματος EPB, που χρησιμοποιήθηκε στη διάνομιξη του υπόγειου σιδηροδρόμου στην Αθήνα ..... 20

Εικόνα 1-20: Απεικόνιση των δύο διαφορετικών κενών που δημιουργούνται κατά τη πρόωση του μηχανήματος διάνομιξης... 21

Εικόνα 1-21: Απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση σωληνώσεων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος..... 22

## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1-22: Εύρος αποτελεσματικής εφαρμογής κατά την επιλογή ενός μηχανήματος Slurry.....	24
Εικόνα 1-23: Κριτήριο επιλογής ανάμεσα σε ένα μηχάνημα Slurry και ένα μηχάνημα EPB σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους.....	24
Εικόνα 1-24: Το πρώτο μηχάνημα πολφού μπετονίτη Ιαπωνικού τύπου (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling).....	25
Εικόνα 1-25: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα- Slurry Machine .....	26
Εικόνα 1-26: Σχηματική απεικόνιση τη κυκλικής διαδικασίας τροφοδοσίας του μπετονιτικού αιωρήματος (πηγή: B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer, Mechanised Shield Tunnelling).....	27
Εικόνα 1-27: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Hydroshield που χρησιμοποιήθηκε στην εκσκαφή της γραμμής του υπόγειου σιδηροδρόμου στη Σιγκαπούρη .....	28
Εικόνα 1-28: Παρουσίαση της εδαφικής πίεσης που ασκείται και τα στοιχεία του θαλάμου εκσκαφής.....	29
Εικόνα 1-29: Το σύστημα σωληνώσεων αναρρόφησης του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη και τροφοδοσίας του αιωρήματος μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος slurry.....	30
Εικόνα 1-30: Σύστημα Διαχωρισμού εδαφικού υλικού από το μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick TBSS-450 (πηγή: Kanvadas Michael, Prountzopoulos George, Fortsakis Petros, Tzivakos Kwnstantinos, Litsas Dimitris, Chortis Philippos, (2013): Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling).....	31
Εικόνα 2-1: Μοναδιαίος μετρητής βάρους Siemens Miltronics και μηχανικός μάντας μέτρησης εδαφικού όγκου όπως είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος TBM .....	34
Εικόνα 2-2: Μετρητής skaner για τον προσδιορισμό του εδαφικού όγκου - Courtesy of SICK AG.....	35
Εικόνα 2-3: Μετρητής πυκνότητας - Courtesy of Ronan Engineering Company.....	36
Εικόνα 2-4: Απεικόνιση μαγνητικών και ραδιομετρικών μετρητών για τον υπολογισμό του βάρους του υλικού που εκσκάπτεται .37	
Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής της διαμέτρου του μετώπου.....	38
Εικόνα 3-1: Γεωμετρικό μοντέλο της ασπίδας όπου παρουσιάζονται η θέση των υδραυλικών εμβόλων και οι διαστάσεις της.....	42
Εικόνα 3-2: Προσδιορισμός του αλγορίθμου όπου βασίζεται η διόρθωση για τη προ΄θηση του μηχανήματος , με α) σχέση για ένα στοιχείο $J_i$ , β) μέτρηση για τον αλγόριθμο διόρθωσης γ) προσδιορισμός του συντελεστή $ros$ .....	45
Εικόνα 3-3: Παρουσίαση της γεωμετρίας της εκσκαφής σύμφωνα με το σύστημα PLS .....	46
Εικόνα 3-4: Παρουσίαση της γεωμετρίας της εκσκαφής σύμφωνα με Hydrd mesh(πηγή: three dimensional re-meshing for real tim modeling of advancing process in mechanized tunneling- Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke).....	47
Εικόνα 3-5: Παρουσίαση της εξέλιξης της διαδικασίας εκσκαφής σε διατομή κατά το επίπεδο x-z , για το α) 4 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, β) 10 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, γ) 16 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα.....	49
Εικόνα 3-6: Παρουσίαση της εξέλιξης της διαδικασίας εκσκαφής σε διατομή κατά το επίπεδο x-z , για το α) 4 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, β) 10 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, γ) 16 <sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα(πηγή: three dimensional re-meshing for real tim modeling of advancing process in mechanized tunneling- Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke).....	50
Εικόνα 3-7: Γεωμετρία της εκσκαφής, της ασπίδας και της επένδυσης της σήραγγας .....	51
Εικόνα 3-8: Σταδιακή προσομοίωση της εκσκαφής με συμμετοχή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής.....	52
Εικόνα 3-9: Σταδιακή προσομοίωση της εκσκαφής με συμμετοχή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής.....	53
Εικόνα 3-10: Μοντέλο διακριτοποίησης, με εμφανή το προσδιορισμό της διεύθυνσης των αξόνων (πηγή: A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation - Kai Zhao • Michele Janutolo • Giovanni Barla).....	56
Εικόνα 3-11: Διαδικασία προσομοίωσης σε βραχομαζες καλής ποιότητας (πηγή: A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation - Kai Zhao • Michele Janutolo • Giovanni Barla).....	58



## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 3-12: Διαδικασία προσομοίωσης σε βραχώμαξες μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών (πηγή: <i>A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation - Kai Zhao • Michele Janutolo • Giovanni Barla</i> ) .....	59
Εικόνα 3-13: Αλληλεπίδραση της ασπίδας με τη περιβάλλουσα βραχώμαξα (πηγή: <i>A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation - Kai Zhao • Michele Janutolo • Giovanni Barla</i> ) .....	60
Εικόνα 3-14: Πλήρωση του ουραίου κενού, α) περίπτωση πλήρωσης με γαρμπίλι, β) περίπτωση πλήρωσης με ένεμα (πηγή: <i>A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation - Kai Zhao • Michele Janutolo • Giovanni Barla</i> ) .....	61
Εικόνα 4-1: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου σήραγγας $D=6m$ με πρώτο το προσομοίωμα με λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=1.5$ , δεύτερο το προσομοίωμα με $H/D=1.5$ , τρίτο το προσομοίωμα με $H/D=4.0$ .....	65
Εικόνα 4-2: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου σήραγγας $D=10m$ με πρώτο το προσομοίωμα με λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=1.5$ , δεύτερο το προσομοίωμα με $H/D=1.5$ , τρίτο το προσομοίωμα με $H/D=4.0$ .....	66
Εικόνα 4-3: Επιλογή της διαδικασίας διακριτοποίησης, όπου φαίνεται η περιοχή της διάνοιξης, ο βοηθητικός ομόκεντρος κύκλος και οι βοηθητικές ζώνες διακριτοποίησης. Το αριθμητικό προσομοίωμα που απεικονίζεται είναι για διάμετρο σήραγγας $D=6m$ και $H/D=2.5$ .....	67
Εικόνα 5-1: Απεικόνιση των μετακινήσεων κατά την εξώθηση του μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας $D=6m$ , πάνω αριστερά $H/D=1.5$ , πάνω δεξιά $H/D=2.5$ κάτω $H/D=4.0$ .....	71
Εικόνα 5-2: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου $D=6m$ , για ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs}=200KPa$ με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=1.5$ πάνω, $H/D=2.5$ ενδιάμεση και $H/D=4.0$ κάτω .....	72
Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=2.5$ για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με $P_{fs}=100KPa$ αριστερά και για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με $P_{fs}=200KPa$ δεξιά .....	73
Εικόνα 5-4: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου $D=10m$ με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=2.5$ για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με $P_{fs}=100KPa$ πάνω και για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με $P_{fs}=200KPa$ κάτω .....	74
Εικόνα 6-1: Αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας $D=8m$ με αναλογία ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με $H/D=3.5$ .....	84
Εικόνα 6-2: Το μηχάνημα κοπής που προσομοιώθηκε για τη διάνοιξη της σήραγγας .....	85
Εικόνα 6-3: Αριστερά προσομοίωση της ασπίδας του μηχανήματος, του διαφραγματικού τοίχου και της κοπτικής κεφαλής, δεξιά τα 4-κομβικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση .....	85
Εικόνα 6-4: Αριστερά προσομοίωση του θαλάμου εκσκαφής και του backup system, δεξιά τα στοιχεία εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση .....	86
Εικόνα 6-5: Αριστερά απεικονίζεται το δεύτερο βήμα της ανάλυσης, όπου αφαιρούνται τα πρώτα 10m και εισάγεται το μηχάνημα, δεξιά φαίνεται το πρώτο προκατασκευασμένο στοιχείο μαζί με το μηχάνημα .....	87
Εικόνα 6-6: Νόμος ορισμού διεπιφάνειας (πηγή: <i>Abaqus Simulia 6.10 Documentation</i> ) .....	87
Εικόνα 6-7: Απεικόνιση του 3 <sup>ου</sup> βήματος όπου φαίνεται το σκληρυμένο ένεμα και τα πρώτα 3 προκατασκευασμένα στοιχεία .....	88
Εικόνα 6-8: Απεικόνιση προώθησης του μηχανήματος .....	89
Εικόνα 7-1: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας $D=8m$ , $H/D=3.5$ αριστερά για $Gar=0cm$ δεξιά $Gar=2cm$ για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με $P_{fs}=200KPa$ .....	92

## Περιεχόμενα εικόνων

---

<i>Εικόνα 7-2: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου <math>D=8m</math> με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρου σήραγγας ίσο με <math>H/D=3.5</math> για ασκούμενη πίεση μετώπου <math>P_{fs}=200KPa</math>, πάνω για <math>Gar=0cm</math> κάτω για <math>Gar=2cm</math> .....</i>	<i>93</i>
<i>Εικόνα 7-3: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την εξώθησης μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας <math>D=8m</math>, αριστερά για ασκούμενη πίεση μετώπου <math>P_{fs}=100KPa</math>, δεξιά για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με <math>P_{fs}=200KPa</math>.....</i>	<i>94</i>
<i>Εικόνα 7-4: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας <math>D=8m</math>, πάνω για ασκούμενη πίεση μετώπου <math>P_{fs}=100KPa</math>, κάτω για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με <math>P_{fs}=200KPa</math> για <math>Gar=2cm</math> .....</i>	<i>95</i>
<i>Εικόνα 8-1: Διαγράμματα μεταβολής σε σχέση με το δείκτη <math>CF_{MT}</math> για τα μεγέθη της ποσοστιαίας μεταβολής επιφάνειας μετώπου (πάνω αριστερά), μέση ακτινική σλυγκλιση (πάνω δεξιά) , μέγιστη εξώθηση μετώπου (κάτω) .....</i>	<i>104</i>
<i>Εικόνα 8-2: Διαγράμματα συσχέτισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων της συμβατικής μεθόδου με τη νέα μέθοδο προσομοίωσης σε σχέση με το δείκτη <math>CF_{MT}</math> .....</i>	<i>105</i>

**Περιεχόμενα διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 5-1: Μεταβολή της μέσης ακτινική σύγκλιση  $U_{radial,aver}$  για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη  $A_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100KPa$  και  $P_{fs} = 200KPa$ .....76

Διάγραμμα 5-2: Μεταβολή της μέγιστης εξώθησης μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη  $A_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100KPa$  και  $P_{fs} = 200KPa$ ..... 76

Διάγραμμα 5-3: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου σε σχέση με το δείκτη  $A_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100KPa$  και  $P_{fs} = 200KPa$  ..... 77

Διάγραμμα 5-4: Μεταβολή μέσης ακτινικής σύγκλιση  $U_{radial,average}$  για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη,  $CF_{MT}$ ..... 79

Διάγραμμα 5-5: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη,  $CF_{MT}$ ..... 80

Διάγραμμα 5-6: Μεταβολή της μέγιστης τιμής εξώθησης μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με την εξίσωση του μέτρου ελαστικότητας που προτάθηκε ..... 80

Διάγραμμα 7-1: Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $Gap=2cm$  ..... 97

Διάγραμμα 7-2: Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $Gap=2cm$  στη στέψη της σήραγγας, στη βάση της, στην επιφάνεια και κατά το διαμήκη άξονα..... 98

Διάγραμμα 7-3: Ποσοστιαία μεταβολή του εδαφικού όγκου σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $Gap=2cm$ ..... 99

Διάγραμμα 7-4: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $Gap=2cm$ ..... 99

Διάγραμμα 7-5: Μεταβολή της μέγιστης εξώθησης του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$ ..... 100

Διάγραμμα 7-6: Μεταβολή της μέσης ακτινικής σύγκλισης του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$ ..... 101

Διάγραμμα 7-7: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$ ..... 102



### **Περιεχόμενα Πινάκων**

<i>Πίνακας 3-1: Μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών υλικών που ορίστηκαν στο προσομοίωμα .....</i>	<i>49</i>
<i>Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι μεταβαλλόμενες τιμές του εκάστοτε παραμετρικού μεγέθους.....</i>	<i>63</i>
<i>Πίνακας 5-1: Παράμετροι αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους.....</i>	<i>69</i>
<i>Πίνακας 5-2: Εξαγόμενα μεγέθη από το σύνολο των αναλύσεων.....</i>	<i>70</i>
<i>Πίνακας 7-1: Παράμετροι αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους.....</i>	<i>91</i>



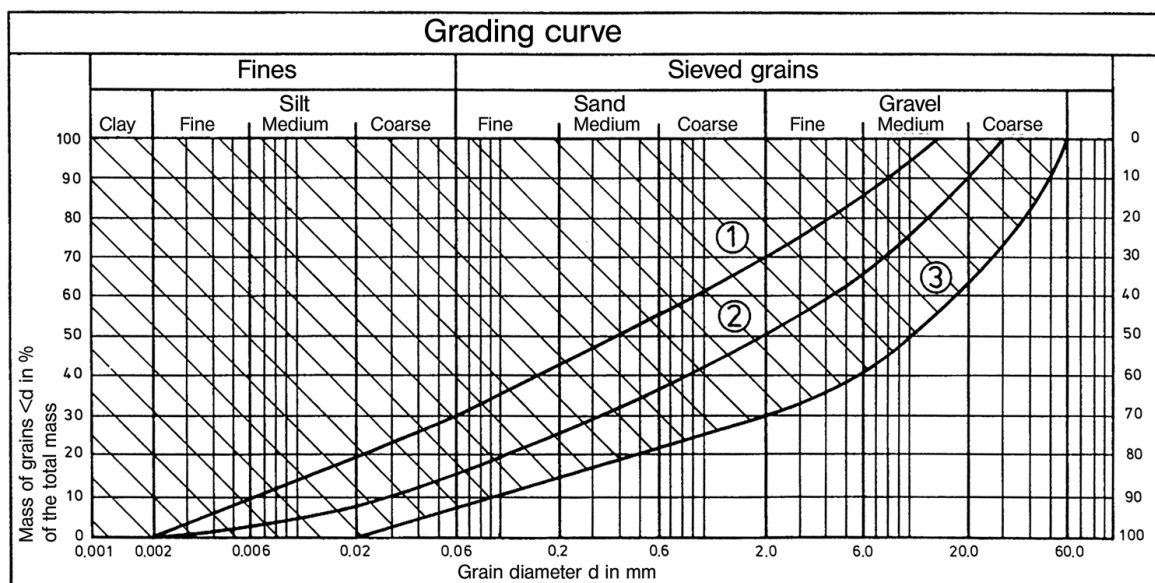
## 1 Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής- Tunnel Boring Machines (TBM)

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

#### 1.1.1 Περιοχή επιλογής χρήσης μηχανήματος EPB

Η διάνοιξη σήραγγας με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής EPB παρουσιάζει καλή λειτουργία σε εδαφικούς σχηματισμούς με ποσοστό παρουσίας λεπτόκοκκου υλικού (<math><6\text{mm}</math>) μικρότερο από 30%. Για διάνοιξη σήραγγας σε αργιλικά εδάφη με υψηλό ποσοστό ιλύος και χαμηλή διαπερατότητα, η πρώτη επιλογή είναι ένα μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης, EPB. Στην περίπτωση χονδρόκοκκων και βραχωδών σχηματισμών η δύναμη επαφής και η ροπή της κοπτικής κεφαλής αυξάνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της δύναμης που απαιτείται για την υποστήριξη του μετώπου.

Το εύρος του φάσματος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB απεικονίζεται στην Εικόνα 1-1 όπου διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιοχές εφαρμογής:



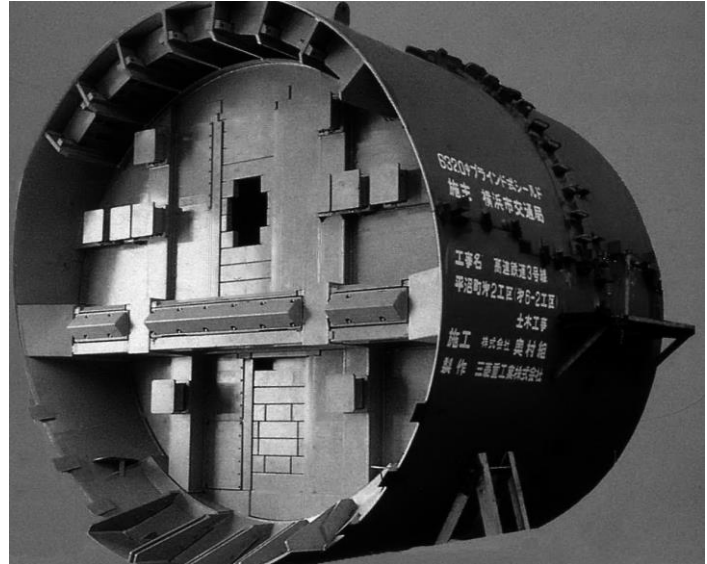
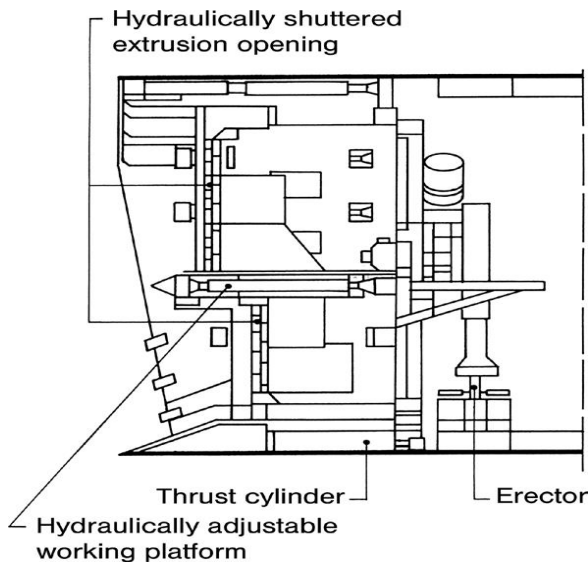
Εικόνα 1-1: Εύρος καλύτερης λειτουργίας ενός μηχανήματος ολομέτωπης κοπής

Η διάδοσης χρήσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής ξεκίνησε τη δεκαετία του 70 στην Ιαπωνία με πρώτη εφαρμογή το 1974 σε διάνοιξη σήραγγας στο Tokyo.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που εμφανίζουν είναι η ικανότητα τους να εκμεταλλεύονται το υλικό που απομακρύνεται κατά τη διάνοιξη και να το χρησιμοποιούν ως μέσο άσκησης πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής για το περιορισμό των παραμορφώσεων του. Αναλυτικότερα, μέρος του υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο εισέρχεται παραμένοντας στο θάλαμο εκσκαφής και μέσω του ίδιου βάρους

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

του ασκεί πίεση στην επιφάνεια του μετώπου. Εξαιτίας αυτής της δυνατότητας στην ίδια κατηγορία με τα μηχανήματα Slurry αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή κατά τη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.



**Εικόνα 1-2: Απεικόνιση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής που σχεδιάστηκε από τον Mitsubishi [12]**

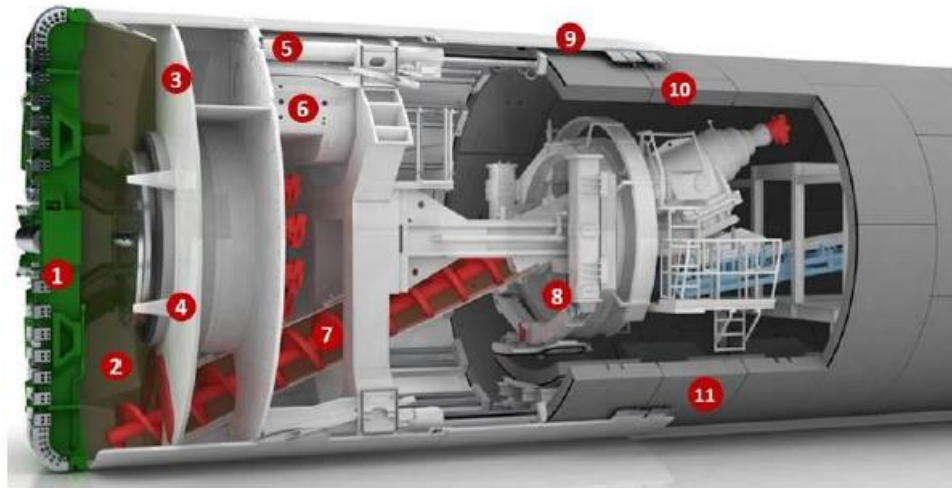
Η κοπτική κεφαλή, η οποία έρχεται ολοκληρωτικά σε επαφή με το μέτωπο και όχι σημειακά, προκαλεί την εκσκαφή και την χαλάρωση του εδάφους, αριθμός 1. Πίσω από την κοπτική κεφαλή βρίσκεται ο θάλαμος εκσκαφής (2), ο οποίος διαχωρίζεται με το διάφραγμα πίεσης (3) από το υπόλοιπο εσωτερικό του μηχανήματος. Πιο συγκεκριμένα, το χαλαρωμένο εδαφικό υλικό ρέει μέσω των ανοιγμάτων που υπάρχουν στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή και αποτίθεται στο θάλαμο εκσκαφής. Σε αυτό το σημείο αποτρέπεται η ανεξέλεγκτη διείσδυση του εδάφους από το μέτωπο εκσκαφής στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής με τη δύναμη που ασκούν υδραυλικοί κύλινδροι (5).



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

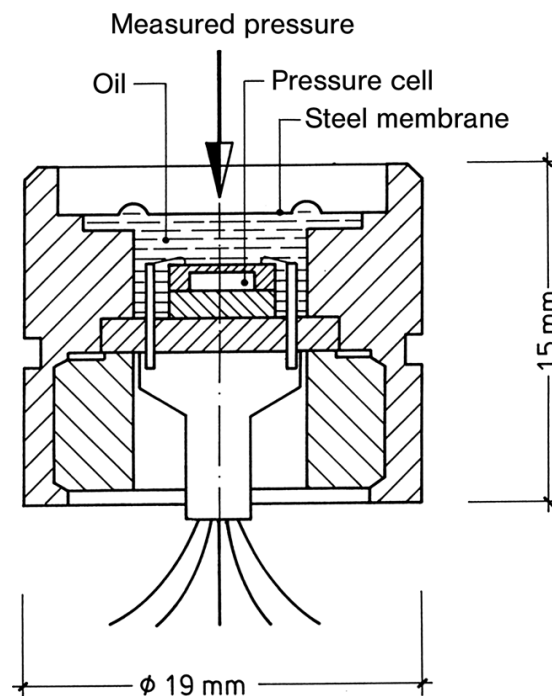
Where:

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



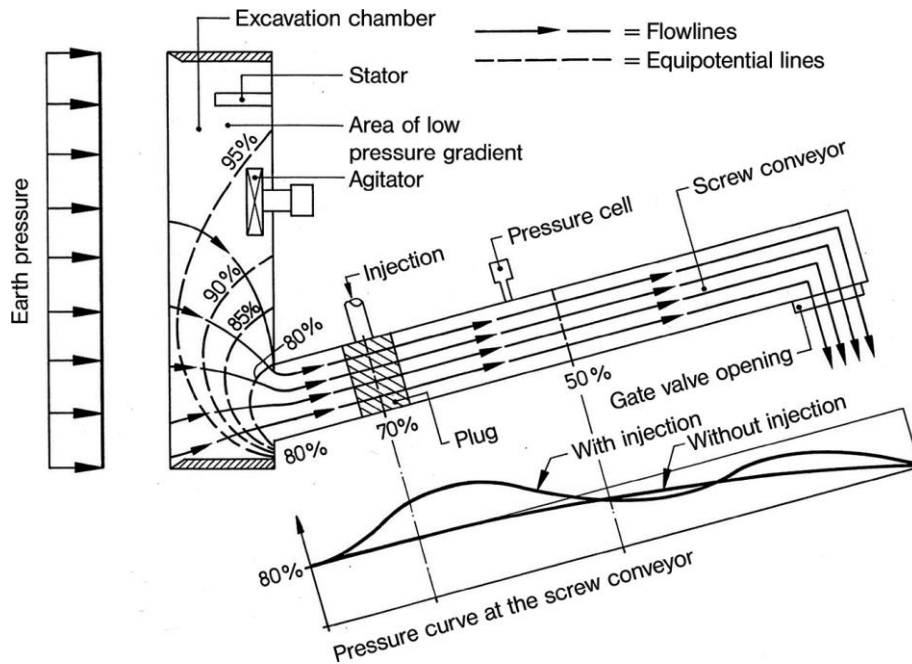
Εικόνα 1-1: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος EPB όπου οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν τα επιμέρους αποτελούμενα μέρη [9]

Η ισορροπία επέρχεται όταν το εδαφικό υλικό στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω. Η πίεση που ασκείται από το εδαφικό υλικό μετράται από κατάλληλα κελιά τοποθετημένα μπροστά από το διάφραγμα πίεσης.



Εικόνα 1-2: Κελί μέτρησης της εδαφικής πίεσης [12]

Ακολουθεί η μεταφορά του εκσκαπτόμενου υλικού από το θάλαμο εκσκαφής μέσω του ατέρμονα κοχλία (7) ,Εικόνα 1-3, προς την ουρά του μηχανήματος όπου πραγματοποιείται η ζύγιση, που θα περιγραφεί μετέπειτα. Η ποσότητα του υλικού που μεταφέρεται ελέγχεται μέσω της ταχύτητας περιστροφής και της διατομής του άνω ανοίγματος του ατέρμονα κοχλία.



Εικόνα 1-3: Ροή του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο από το θάλαμο εκσκαφής στον ατέρμονα κοχλία [12]

Σημειώνεται ότι η πίεση που μετράται στο διάφραγμα έχει απόκλιση από τη πίεση που ασκείται στο μέτωπο και η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που επικρατεί στο θάλαμο εκσκαφής. Σημαντικές παράμετροι του υλικού που μεταφέρεται είναι η διαπερατότητα του, ο δείκτης ρευστοποίησης και ο δείκτης πλαστιμότητας. Οι τιμές αυτών των δεικτών μπορούν να επηρεαστούν μέσω της προσθήκης νερού, της προσθήκης αιωρήματος μπεντονίτη ή αργίλου ή άλλου πολυμερούς και της προσθήκης αφρού.

Τέλος, η τελική επένδυση των σηράγγων ολοκληρώνεται με τη τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων (11), τα οποία τοποθετούνται υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης με τη βοήθεια γάντζων (8) που βρίσκονται πίσω από το διάφραγμα πίεσης. Παράλληλα, πραγματοποιείται συνεχόμενη πλήρωση με την εφαρμογή ενέματος (10), πληρώνοντας το κενό που προκύπτει μεταξύ της εξωτερικής πλευράς των προκατασκευασμένων στοιχείων και του περιβάλλοντος εδάφους, στο πίσω μέρος του μηχανήματος (9).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα μηχανήματα τύπου EPB, οι δυνάμεις ώθησης που απαιτούνται πρέπει να έχουν τέτοιο μέγεθος τιμής ώστε να μπορεί να ξεπεραστεί η πίεση εκσκαφής, η υποστήριξη του μετώπου και η τριβή της ασπίδας. Η δε ροπές που αναπτύσσονται είναι υψηλές καθώς η περιστροφή της κοπτικής κεφαλής γίνεται με το θάλαμο εκσκαφής γεμάτο υλικό.

## 1.1.2 Καταστάσεις Λειτουργίας (Operations Mode)

Ένα από τα πλεονεκτήματα που εντοπίζεται στη χρήση μηχανημάτων EPB ανάλογα με τις γεωλογικές ιδιαιτερότητες που εντοπίζονται στη περιοχή του έργου, είναι η δυνατότητα προσαρμογής σε

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)**

---

ότι αφορά την πίεση για την ευστάθεια του μετώπου και τη μεταφορά του εδαφικού υλικού έξω από τη σήραγγα. Επομένως μπορούν να εφαρμοστούν 4 καταστάσεις λειτουργίας:

1. Υπό πίεση κατάσταση λειτουργίας με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα Semi open mode (screw conveyor – conveyor belt)
2. Ανοιχτή κατάσταση λειτουργίας Open mode (screw conveyor – conveyor belt)
3. Κλειστή κατάσταση λειτουργίας Closed mode (hydraulic mucking circuit)
4. EPB mode (screw conveyor – conveyor belt or screw conveyor – piston pump)

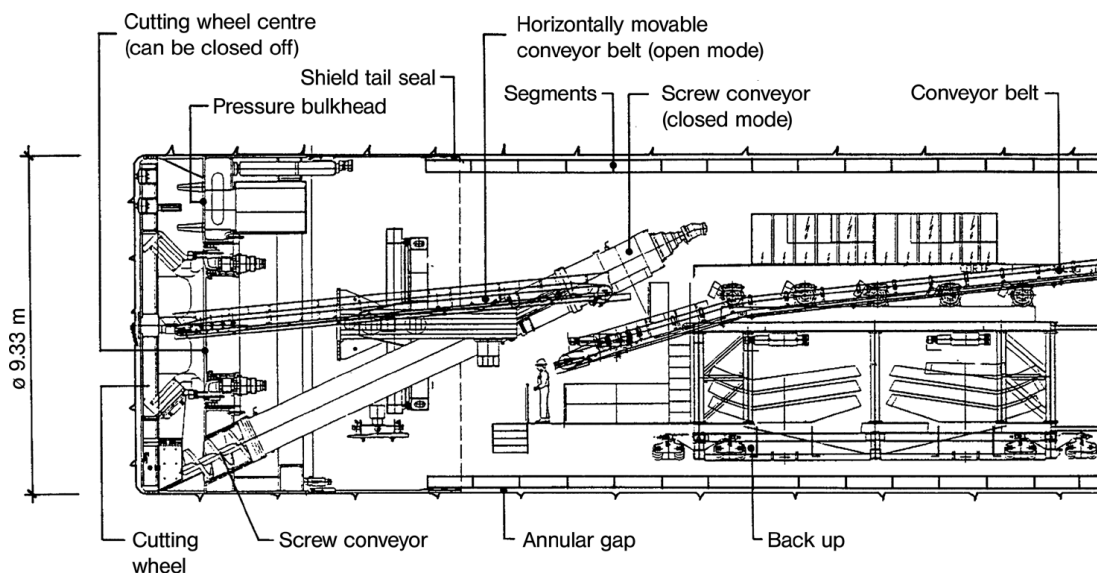
### **1.1.2.1 Υπό πίεση κατάσταση λειτουργίας με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα-Semi open mode (screw conveyor – conveyor belt)**

Στην περίπτωση εδαφικών υλικών με χαμηλό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού ή για συνεκτικά εδάφη με φακούς άμμου, η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής καθορίζεται από υδραυλικές συνθήκες. Κατάρρευση της δομής με καταστροφικές συνέπειες στη διάνοιξη της σήραγγας , προκαλείται εξαιτίας δυνάμεων από τη ροή υπόγειων ροών κατά τη διάνοιξη, αποτέλεσμα της οποίας είναι χαλάρωση των δεσμών μεταξύ των κόκκων , δηλαδή εμφάνιση φαινομένων ρευστοποίησης. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί η ευστάθεια του μετώπου, η πίεση του νερού των πόρων αντισταθμίζεται με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα. Σε αυτή τη κατάσταση λειτουργίας το άδειο άνω τμήμα του θαλάμου εκσκαφής πληρώνεται με πεπιεσμένο αέρα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια βέλτιστη ροή του υλικού προς και μέσω του ατέρμονα κοχλία, όπου ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε μία επαρκώς χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους για να αποφευχθεί μια ανεξέλεγκτη απώλεια πίεσης στην έξοδο του κοχλία. Σε αυτή τη κατάσταση οποιαδήποτε προσπάθεια για συντήρηση απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την ανοιχτή κατάσταση λειτουργίας.

### **1.1.2.2 Ανοιχτή κατάσταση λειτουργίας Open mode (screw conveyor – conveyor belt)**

Σε βραχώδεις σχηματισμούς, ακόμη και ασταθείς σχηματισμούς μπορεί να μην κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή πίεσης επί του μετώπου. Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα με αποτέλεσμα τον εντοπισμό διακυμάνσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου του εδαφικού υλικού στο θάλαμο, με δεδομένη ωστόσο την ύπαρξη αρκετής ποσότητας όγκου ώστε να τροφοδοτεί ο ατέρμονας κοχλίας τη συνεχή μεταφορά του υλικού. Άμεσο επακόλουθο είναι η μείωση κατά 20-50% της απαιτούμενης ροπής της κοπτικής κεφαλής καθώς και μείωση της φθοράς των κοπτικών κεφαλών, διότι η κοπτική επαφή δεν βρίσκεται σε πλήρη επαφή με το μέτωπο.

Σε περιπτώσεις συντήρησης που απαιτείται η είσοδος προσωπικού στο θάλαμο εκσκαφής, αυτό πρέπει να γίνεται με ταχείς ρυθμούς καθώς το άνω τμήμα βρίσκεται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης.



Εικόνα 1-4: Μηχάνημα ασπίδας EPB S-165 ( Herrenknecht) με ανοιχτή λειτουργία, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας στο μετρό της Μαδρίτης το 1997 με διάμετρο  $D=9,33\text{m}$  [12]

### 1.1.2.3 Κλειστή κατάσταση λειτουργίας Closed mode (Hydraulic mucking circuit)

Η αποφυγή εκρήξεων κατά την έξοδο του υλικού στον ατέρμονα κοχλία μπορεί να πραγματοποιηθεί στην κλειστή κατάσταση λειτουργίας των μηχανημάτων. Πιο συγκεκριμένα επιτυγχάνεται, μέσω και ενός κλειστού συστήματος μεταφοράς του υλικού, όπου περιστροφικοί τροφοδότες, κιβώτια μεταφοράς ακόμα και διπλοί κοχλίες έχουν αποδειχθεί στη πράξη μη κατάλληλα μέτρα για την σφράγιση του υλικού. Αντιθέτως η χρήση υδραυλικών συστημάτων είναι αρκετά αποτελεσματική. Η μεταφορά του υγρού μπορεί να γίνει είτε στο θάλαμο εκσκαφής είτε σε ένα κιβώτιο τοποθετημένο αμέσως μετά τον ατέρμονα κοχλία.

Το υγρό μέσο που χρησιμοποιείται στην υδραυλική μεταφορά διοχετεύεται είτε άμεσα στο θάλαμο εκσκαφής είτε σε ένα κιβώτιο που είναι τοποθετημένο αμέσως πριν τον ατέρμονα κοχλία. Ο σχεδιασμός κοπτικής κεφαλής και κοχλία πρέπει να είναι κατάλληλος και επιπλέον να τοποθετηθούν και κυλινδρικοί θραυστήρες που θα ευνοούν την άντληση του υλικού .

### 1.1.2.4 EPB mode (screw conveyor – conveyor belt or screw conveyor – piston pump)

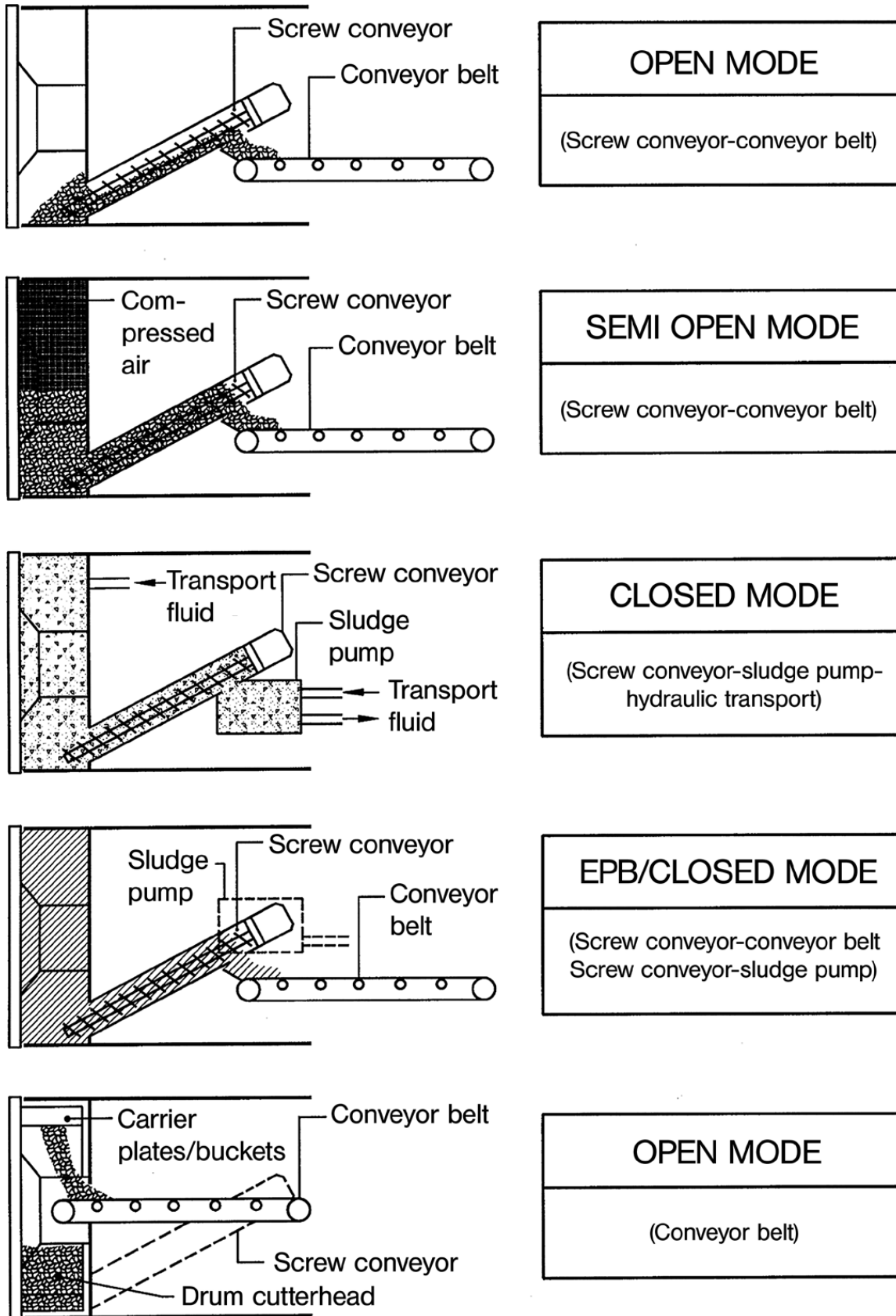
Η κατάσταση λειτουργίας EPB mode (screw conveyor – conveyor belt or screw conveyor –piston pump) έχει το ίδιο εύρος εφαρμογής με τη υπό πίεση κατάσταση λειτουργίας με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη ότι είναι η μόνη επιλογή σε ασταθές μαλακό έδαφος σε συνδυασμό με υψηλές πιέσεις νερού, υψηλή διαπερατότητα και υψηλή διείσδυση νερού.

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)**

---

Κατά τη κλειστή λειτουργία, ο θάλαμος εκσκαφής είναι πλήρως γεμάτος με υλικό που εκσκάπτεται και χρησιμοποιείται για την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου υλικού που έχει μετακινηθεί, απαιτείται υψηλή ροπή με αποτέλεσμα την αύξηση της φθοράς των κοπτικών.

Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)



Εικόνα 1-5: Απεικόνιση των διαφορετικών τύπων λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB με ταυτόχρονη απομάκρυνση του εκσκαπτόμενου υλικού [13]

### 1.1.3 Συνιστώντα μέρη του μηχανήματος

#### 1.1.3.1 Κοπτική κεφαλή (cutting wheels)

Η χαλάρωση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού από την αρχική του θέση του μετώπου γίνεται κατά την επαφή με τη κοπτική κεφαλή και με τη ταυτόχρονη περιστροφική κίνηση της, εναποτίθεται το γεωυλικό στον θάλαμο εκσκαφής. Ο τύπος χρησιμοποιούμενης ασπίδας σε ένα μηχάνημα EPB μπορεί να διαχωριστεί σε ανοιχτού και σε κλειστού τύπου, ανάλογα με το ποσοστό των ανοιγμάτων που έχουν. Και στις δύο περιπτώσεις η επιλογή του αντίστοιχου τύπου χαρακτηρίζεται από ορισμένα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα.

Στη περίπτωση του ανοιχτού τύπου κοπτικής κεφαλής, το μέγεθος των ανοιγμάτων στην κοπτική κεφαλή καταλαμβάνουν ένα ποσοστό επί αυτής, το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται κατά βούληση, εξαρτώμενη από την φέρουσα ικανότητα του μετώπου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά το κατασκευή της κοπτικής κεφαλής είναι ο σχεδιασμός του μεγέθους των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής πρέπει να περιορίζονται σύμφωνα με το μέγεθος των τεμαχίων της βραχόμαζας που μπορεί να περάσει από το θάλαμο εκσκαφής και στη συνέχεια να μεταφερθεί από τον ατέρμονα κοχλία. Μεγάλου όγκου τεμάχια βραχόμαζας θραύονται στο κάτω μέρος μπροστά από τη κοπτική κεφαλή μειώνοντας το κίνδυνο παύσης λειτουργίας ή καταστροφής του ατέρμονα κοχλία. Το πρόβλημα όμως που να συναντάται και συχνά στη πράξη, είναι η διακοπή της λειτουργίας της κοπτικής κεφαλής εξαιτίας του μικρού μεγέθους των ανοιγμάτων.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η κοπτική κεφαλή ανοιχτού τύπου είναι ο μειωμένος κίνδυνος παγίδευσης σε σχέση με του κλειστού τύπου, η πίεση του μετώπου είναι ομοιόμορφη και η ροή στον ατέρμονα κοχλία είναι ομαλότερη. Εντούτοις, παρουσιάζει και μειονεκτήματα όπως η αύξηση του ρίσκου λειτουργίας λόγω έλλειψης μηχανικής υποστήριξης όταν ο θάλαμος εκσκαφής λειτουργεί υπό ατμοσφαιρική πίεση, η κοπτική κεφαλή είναι λιγότερη ευσταθής και άκαμπτη με αποτέλεσμα αυξημένος κίνδυνος επιφανειακών μετακινήσεων όταν το ύψος των υπερκειμένων είναι μικρό.



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)



Εικόνα 1-6: Αριστερά απεικονίζεται η ανοιχτού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε στο μηχάνημα για την επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου στο New Delhi, δεξιά απεικονίζεται η κλειστού τύπου ασπίδα που χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου στην Αθήνα [9]

Η ροπή που αναπτύσσεται στην κοπτική κεφαλή παρουσιάζει μια εκθετική αύξηση καθώς αυξάνεται η διάμετρος της κεφαλής. Μείωση της ροπής μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση δύο κοπτικών κεφαλών που θα λειτουργούν σε αντίθετη κατεύθυνση, Εικόνα 1-7.



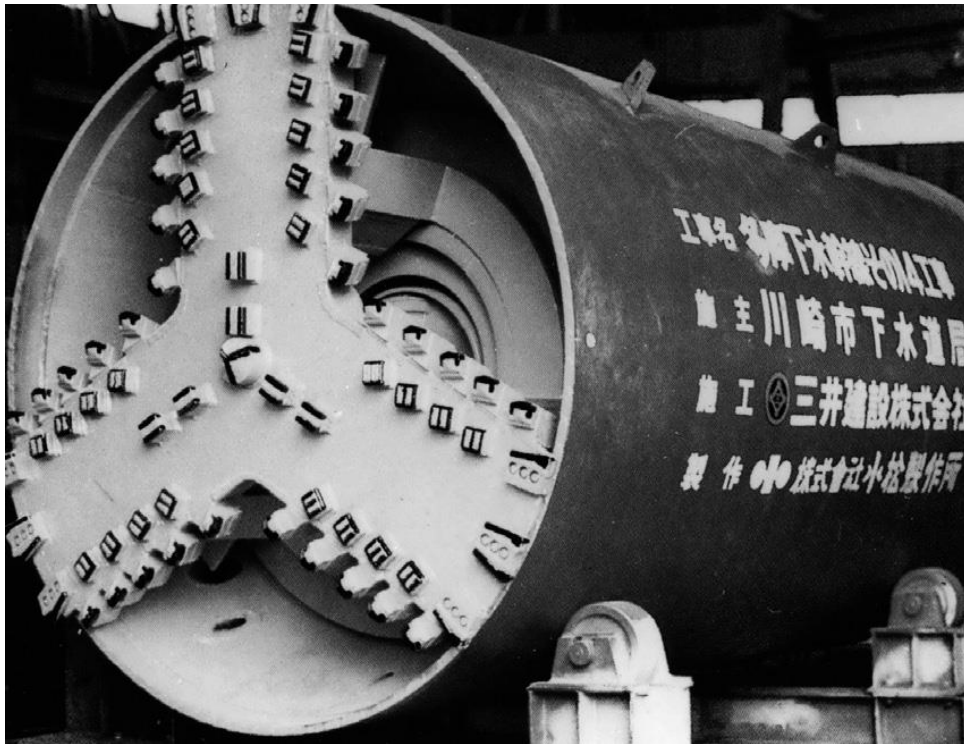
Εικόνα 1-7: Επιλογή μηχανήματος EPB διαμέτρου  $D = 15.2$  m για τη διάνοιξη σήραγγας στο υπόγειο σιδηρόδρομο της Μαδρίτης, δύο κοπτικές κεφαλές με αντίθετη κατεύθυνση εκσκαφής [12]



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

Ο κλειστός τύπος ασπίδας, αποτελεί και την συνηθέστερη επιλογή των κατασκευαστών. Επιλέγεται σε εδάφη που όπου το μέτωπο εμφανίζει αυξημένη αστάθεια και υπάρχει κίνδυνος ανεξέλεγκτης ροής του χαλαρωμένου γεωυλικού προς το θάλαμο εκσκαφή. Ωστόσο, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί και στον ανοιχτό τύπο ασπίδας με την χρήση αφρού.

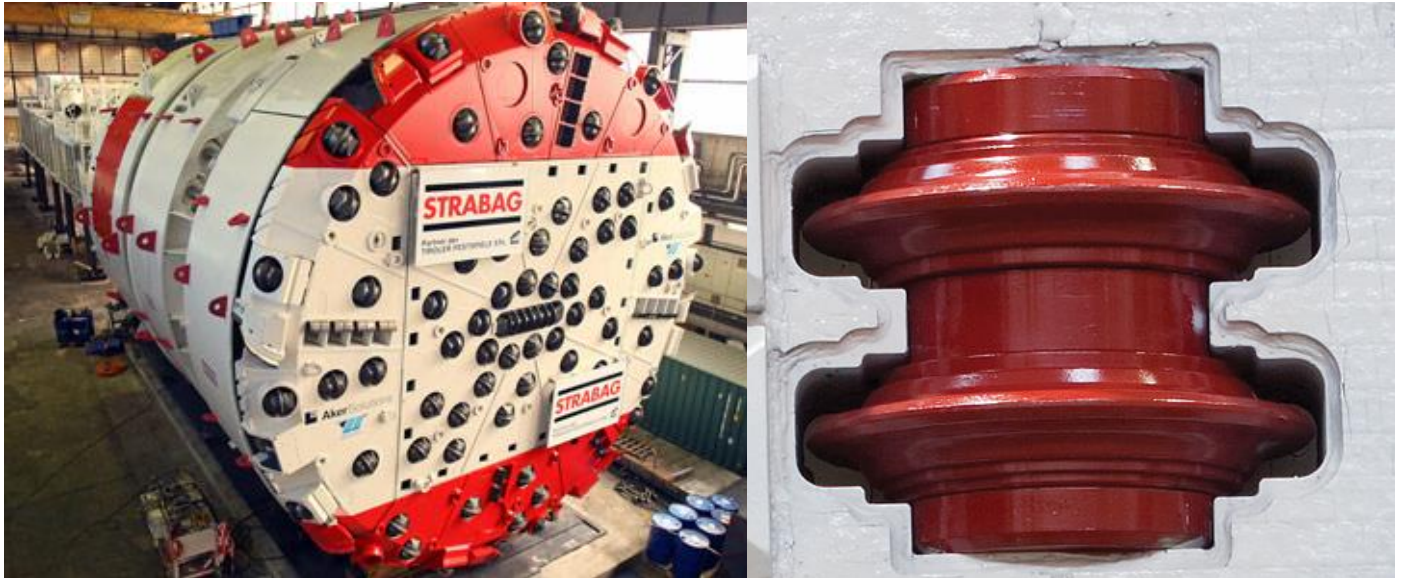
Επί της κοπτικής κεφαλής υπάρχει η δυνατότητα εφοδιασμού με επιπρόσθετες διατάξεις ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν , όπως είναι drag picks, scrapers , round--shafted chisels or disc cutters.



Εικόνα 1-8: Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής Ιαπωνικού τύπου (σχεδιαστής (Mitsubishi) ), με ανοιχτού τύπου κοπτική κεφαλή [13]

### 1.1.3.2 Κοπτικοί δίσκοι (Cutting tools)

Για την χαλάρωση και εκσκαφή του γεωυλικού στο μέτωπο κατά την επαφή με την κοπτική ασπίδα, αυτή είναι εξοπλισμένη με διαφορετικούς τύπους κοπτικών εργαλείων, τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με το τύπο του εδαφικού σχηματισμού που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη. Συγκεκριμένα, ο κύριος διαχωρισμός γίνεται για εδαφικούς σχηματισμούς όπου χρησιμοποιούνται drag picks για εδαφικούς σχηματισμούς και κοπτικοί δίσκοι για μαλακούς ή σκληρούς βαχώδεις σχηματισμούς . Στην πράξη, εξαιτίας της ετερογένειας που εντοπίζεται σε σήραγγες που διανοίγονται με EPB συνήθως τα μηχανήματα αυτά διαθέτουν και τους δύο τύπους κοπτικών εργαλείων.



Εικόνα 1-9: Αριστερά: το πρώτο από τα δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής που χρησιμοποιήθηκαν στη διάνοιξη της σήραγγας Koralm (δεξιά) με τα κοπτικά εργαλεία που είναι εξοπλισμένη η κοπτική κεφαλή [9]

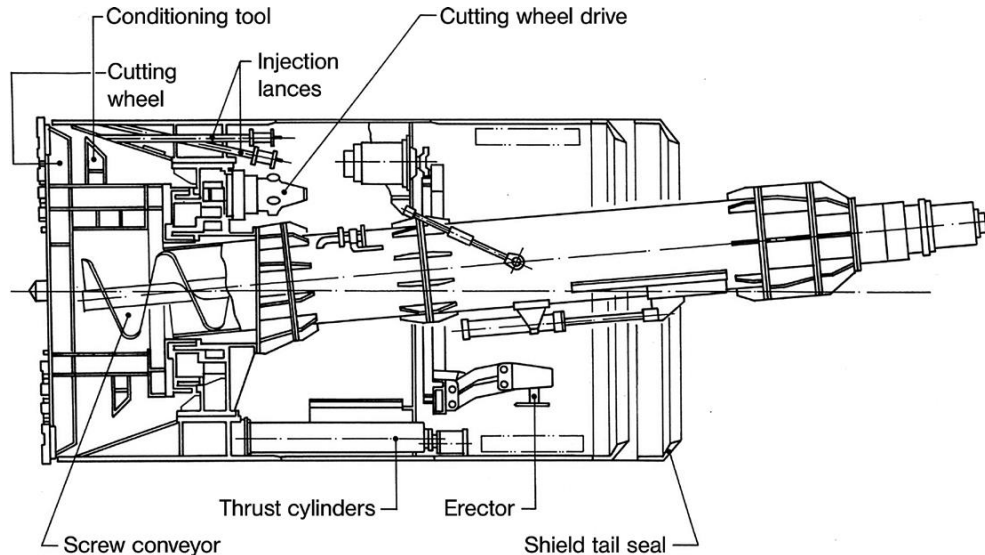
### 1.1.3.3 Θάλαμος εκσκαφής (Excavation chamber)

Διαφορετική ονομασία που χρησιμοποιείται για να περιγραφθεί ο θάλαμος εκσκαφής είναι plenum chamber, και αποτελεί το τμήμα του μηχανήματος που βρίσκεται ενδιάμεσα της κοπτικής κεφαλής και του διαφράγματος πίεσης. Ο σχεδιασμός του θαλάμου καθορίζεται από τη θέση του ατέρμονα κοχλία, το τύπο της κοπτικής κεφαλής και να επιτρέπει την συνεχόμενη ροή του γεωυλικού. Το μήκος του θαλάμου εκσκαφής καθορίζει το χρονικό διάστημα που το υλικό παραμένει στο εσωτερικό του. Όπως έχει αναφερθεί το χαλαρωμένο υλικό απομακρύνεται από το μέτωπο, εισέρχεται και παραμένει στο θάλαμο εκσκαφής.

Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής, το υλικό που εκσκάπτεται πρέπει να είναι ομογενές και να υπάρχει σωστή αναλογία χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού για να διατηρείται η πλαστικότητα του. Το υλικό που βρίσκεται στο κάδο αναμιγνύεται με νερό, αφρό, μπετονίτη σε τέτοια αναλογία ώστε το τελικό προϊόν να έχει την ίδια συνεκτικότητα με το περιβάλλον εδαφικό υλικό. Επιπρόσθετα οφέλη του βελτιωμένου εδάφους είναι η μείωση της διαπερατότητας καθώς σπάνε οι δεσμοί του υλικού και προκαλείται αποκόλληση, με αποτέλεσμα την διευκόλυνση κατά την εξόρυξη.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη περίπτωση απόφραξης του θαλάμου εκσκαφής. Ο κίνδυνος αυτός αυξάνεται, όταν ο θάλαμος εκσκαφής περιστρέφεται μαζί με τη κοπτική κεφαλή (drum type), δεδομένου ότι η ανάμιξη και τροποποίηση μειώνεται με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του υλικού. Ο κίνδυνος περιορίζεται με επιπρόσθετες διατάξεις, τοποθέτηση ροτόρων στο πίσω μέρος της κεφαλής ή στατήρων και αναδευτήρων στο διάφραγμα πίεσης μπορούν να βελτιωθούν τα αποτελέσματα της ανάμιξης. Ακόμη όταν η διάμετρος της ασπίδας είναι μεγάλη αυξάνεται ο κίνδυνος να κολλήσει το υλικό στο κέντρο του θαλάμου εκσκαφής καθώς η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται σε αυτό το μέρος.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)



Εικόνα 1-10: Ο μηχανικός εξοπλισμός του θαλάμου εκσκαφής του μηχανήματος EPB που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας Toshiori-Tsumori υπό ασφράγγιστες συνθήκες, Osaka [12]

### 1.1.3.4 Ατέρμονας κοχλίας (Screw conveyor)

Η χρήση του ατέρμονα κοχλίας εξυπηρετεί:

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

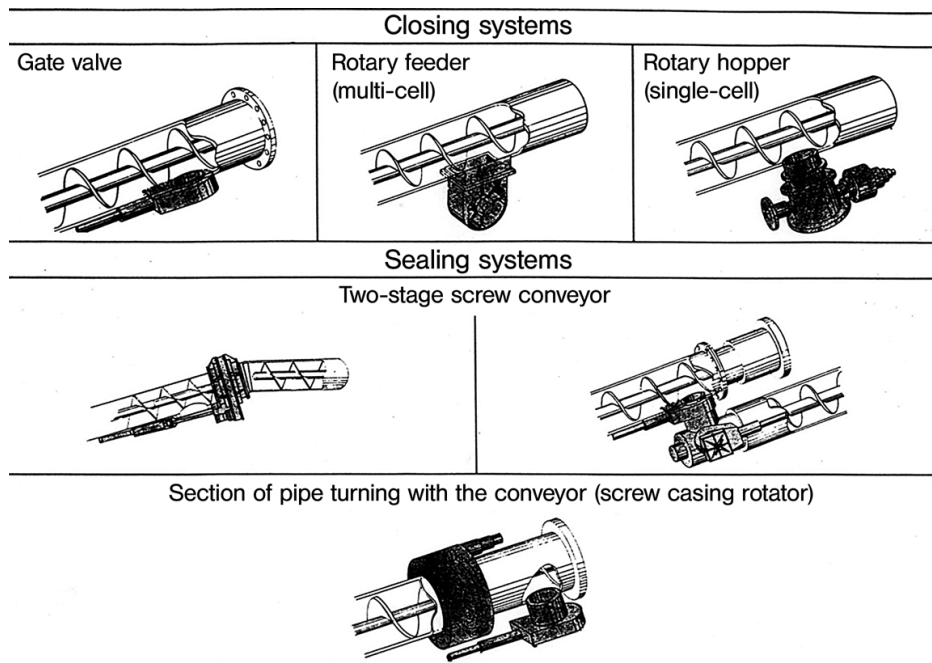
Η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός προώθησης του μηχανήματος αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες ελέγχους για την άσκηση πίεσης του μετώπου από το υλικό εντός του θαλάμου εκσκαφής. Οι χειριστές των μηχανημάτων EPB έχουν την δυνατότητα ελέγχου αυτών των παραμέτρων μόνο με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής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





**Εικόνα 1-11: Απεικόνιση ατέρμονα κοχλία με κεντρικό άξονα περιστροφής [9]**

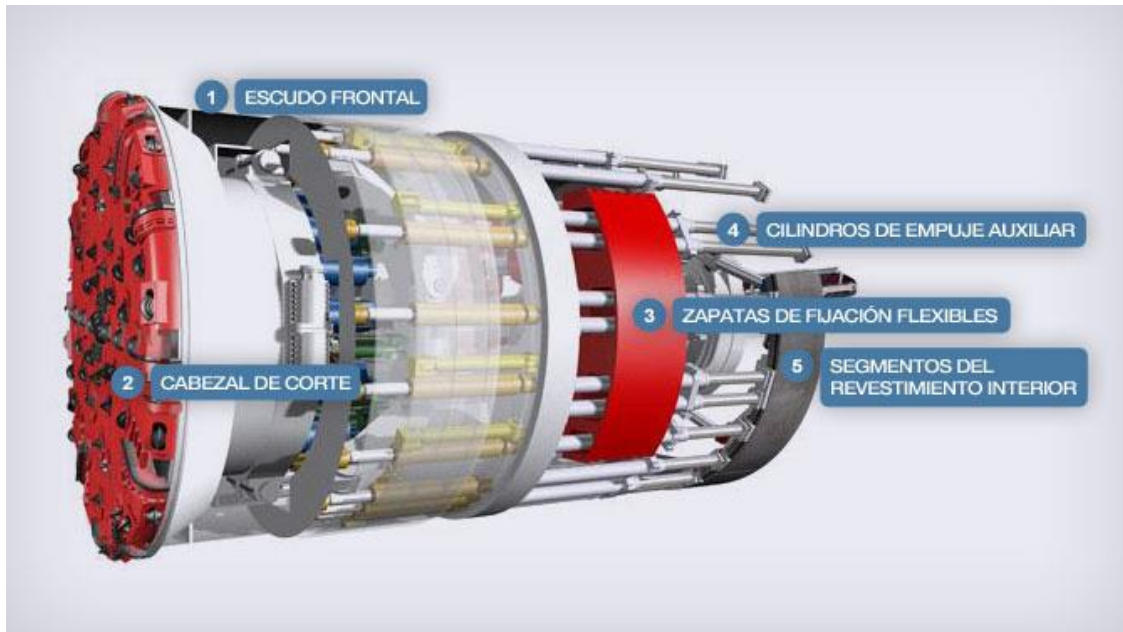
Το σύστημα λειτουργίας του κοχλία μπορεί να είναι κεντρικό ή περιφερειακό. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι με το κεντρικό σύστημα το γεωλικό μεταφέρεται μέσω a lower gate shutter, ενώ στο περιφερειακό το γεωλικό μεταφέρεται απευθείας από το τέλος του. Στη συνέχεια, παρατίθεται διάφορες διατάξεις για κεντρική και περιφερειακή λειτουργία του ατέρμονα κοχλία, Εικόνα 1-12.



**Εικόνα 1-12: Διαφορετικές διατάξεις περιστροφής και λειτουργίας του ατέρμονα κοχλία [12]**

### 1.1.3.5 Κυλινδρικά έμβολα ώθησης (Thrust cylinders)

Ο ρόλος των υδραυλικών εμβόλων ώθησης είναι διπτός καθώς μέσω αυτών πραγματοποιείται η ώθηση του μηχανήματος και ταυτόχρονα διατηρούν σταθερό στη θέση του το μηχάνημα κατά την εκσκαφή. Ουσιαστικά, τα υδραυλικά έμβολα ασκούν πίεση στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης και ωθούν το μηχάνημα προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 1-13: Απεικόνιση της κίνησης των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του μηχανήματος [9]

Δεδομένου ότι αποτελεί σημαντικό βήμα ο υπολογισμός της δύναμης ώθησης έχουν διατυπωθεί ποικίλες θεωρίες. Γενικά διατυπώνεται ότι η δύναμη ώθησης καλείται να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και το μηχάνημα εκσκαφής και ταυτόχρονα να διατηρεί την κατάλληλη επαφή με το μέτωπο προκειμένου να μεταφέρεται η απαραίτητη πίεση υποστήριξης. Η επιλογή του συστήματος των κυλίνδρων για κάθε μηχάνημα EPB είναι μοναδικό και εξαρτάται από παράγοντες όπως:

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



Εικόνα 1-14: Σημείο του εξοπλισμού όπου είναι τοποθετημένα τα υδραυλικά έμβολα ώθησης [9]

### 1.1.4 Χρήση αφρού (foam conditioning)

Για πρώτη φορά η εκτόξευση αφρού εφαρμόστηκε το 1974 στην Ιαπωνία. Ο αφρός είναι ουσιαστικά αέρας, ο οποίος αναμειγνύεται με πρόσμικτα προϊόντα στο πίσω μέρος του μηχανήματος, και στη συνέχεια εκτοξεύεται από ακροφύσια στο μπροστινό μέρος της κοπτικής κεφαλής. Το σύστημα διανομής πρέπει να βρίσκεται το πλησιέστερο δυνατό στο σημείο όπου θα πραγματοποιηθεί η εκτόξευση του αφρού, σε αντίθετη περίπτωση η διαδικασία εκτόξευσης πραγματοποιείται μέσω σωληνώσεων. Σε κατάσταση πολλαπλής έγχυσης, κάθε θύρα εκτόξευσης έχει δικό της σύστημα διανομής στο οποίο απαιτείται να εξασφαλίζεται πίεση 16bar.

Η ύπαρξη των φυσαλίδων στο στερεό σκελετό του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του πολτοποιημένου υλικού, επομένως, επιτυγχάνεται μικρότερη τριβή μεταξύ των κόκκων. Το πλεονέκτημα χρήσης αφρού είναι η παθητική ώθηση που τείνει να αποσταθεροποιεί τη πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής. Στη περίπτωση πτώσης της πίεσης στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής, οι φυσαλίδες αέρα ελέγχουν την ευστάθεια του μετώπου από πτώση. Επιπρόσθετα, οι φυσαλίδες αέρα που εγκαθίσταται στο έδαφος μειώνουν το βαθμό δυσκαμψίας του εδάφους και το καθιστούν υλικό που παρουσιάζει καλύτερες ελαστοπλαστικές ιδιότητες.



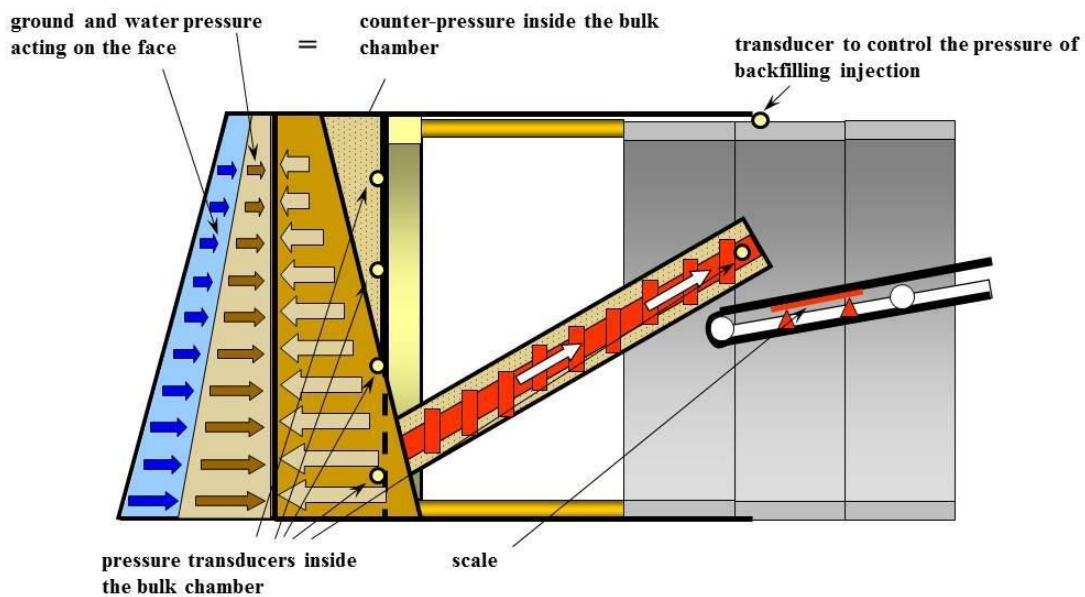


Εικόνα 1-15: Διαδικασία ελέγχου της εισπίεση αφρού στο τμήμα της κοπτικής κεφαλής ενός μηχανήματος EPB [9]

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

Σε περιοχές με αστικές δραστηριότητες, ο έλεγχος της ευστάθειας και της μη παραμόρφωσης του μετώπου, προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις στην επιφάνεια είναι από τις κύριες απαιτήσεις ενός μηχανήματος EPB. Γι'αυτό το λόγο η εφαρμογή της απαιτούμενης πίεσης στο μέτωπο είναι βασικό στάδιο στο σχεδιασμό και στην κατασκευή του έργου. Ωστόσο, ακόμα πιο σημαντικό είναι η διατήρηση της απαιτούμενης πίεσης μετώπου για την επιτυχημένη και ασφαλή λειτουργία του μηχανήματος.

Η εδαφική πίεση που ασκείται στο μέτωπο μέσω της εφαρμογής ανανεωμένου υγρού εκσκαπτόμενου υλικού, το οποίο υπό πίεση πληρώνει τον θάλαμο εκσκαφής. Ειδικότερα, η πίεση για την ευστάθεια του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω της πίεσης που ασκείται από το υλικό που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής. Το γεωυλικό που εκσκάπτεται εμπλουτίζεται όπου είναι απαραίτητο με πρόσμικτα (μπετονίτη,αφρό, νερό) , και αποτελεί το μέσο μεταφοράς της πίεσης στο μέτωπο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πολτοποιημένο υλικό πρέπει να εφαρμόζεται στο μέτωπο με κατάλληλη πίεση για να αντισταθμίσει την αντίστοιχη γεωστατική εδαφική πίεση.



Εικόνα 1-16: Άσκηση και κατανομή της εδαφικής πίεσης που ασκεί στο μέτωπο κατά τη λειτουργία του ένα μηχάνημα EPB. Απεικονίζεται η κατανομή της γεωστατικής πίεσης και της πίεσης που ασκείται από το μηχάνημα προς εξισορρόπηση [9]

Κατά τη προώθηση του μηχανήματος, ο χειριστής του μηχανήματος και ο μηχανικός πρέπει να εξασφαλίζουν τη πίεση στο θάλαμο εκσκαφής στα επιτρεπτά όρια. Αυτό επιτυγχάνεται αξιολογώντας το ρυθμό προώθησης του μηχανήματος και το ρυθμό εναποθέτησης του υλικού στον ατέρμονα κοχλία, γεγονός όμως που απαιτεί και την αντίστοιχη επαγγελματική εμπειρία.

- Για την εξασφάλιση της ισορροπίας του μετώπου προτείνεται ακόμη, εφαρμογή πίεσης με νερό. Η αδυναμία συνδυασμού σωστής πίεσης νερού με εδαφική πίεση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια μετώπου όταν η πίεση μέσα στο θάλαμο είναι σε χαμηλότερο επίπεδο από την εδαφική πίεση. Ωστόσο, για περιπτώσεις όπου τα υπερκείμενα βρίσκονται σε βάθος μικρότερο από το διπλάσιο της διαμέτρου του μηχανήματος, με την εφαρμογή- απόδοσης μεγαλύτερης πίεσης από το μηχάνημα υπάρχει κίνδυνος ανύψωσης της επιφάνειας.

## 1.1.6 Τελική Επένδυση (Segmental lining)

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας εξυπηρετεί και εξασφαλίζει την κατασκευαστική αρτιότητα, την ανθεκτικότητα και την λειτουργικότητα στο εσωτερικό της σήραγγας. Προστατεύει το εσωτερικό της σήραγγας καθώς είναι σχεδιασμένη να λαμβάνει τις πιέσεις που αναπτύσσονται από το περιβάλλον έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, τις τυχρηματικές δράσεις και τα στατικά φορτία.

Κατά την μηχανοποιημένη όρυξη, η διάνοιξη πραγματοποιείται σε πλήρη κυκλική διατομή, επομένως, η τελική επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία τα οποία εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη δημιουργία ενός κυκλικού δακτυλίου. Η επιλογή εγκατάσταση προκατασκευασμένων στοιχείων στην επένδυση παρουσιάζει πλεονεκτήματα:

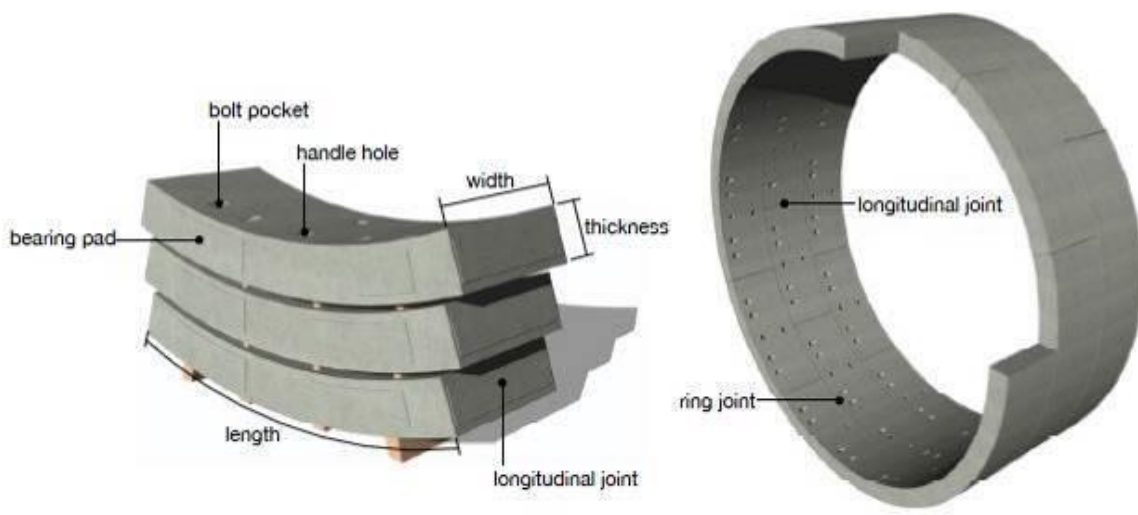


## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

- Δίνουν την δυνατότητα βιομηχανικού ελέγχου, καθώς προσφέρουν υψηλή κατασκευαστική ποιότητα
- Με την τοποθέτηση τους έχουν ήδη ανάπτυξη την τελική φέρουσα ικανότητα τους
- Τυχόν διαρροές στα σημεία σύνδεσης μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν άμεσα.

Το ελάχιστο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων προκειμένου να είναι σε θέση να παραλάβουν την δύναμη των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του μηχανήματος κυμαίνεται μεταξύ των 20-50cm. Για μεγάλες διατομές απαιτούνται στοιχεία πάχους 60cm. Το πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων κυμαίνεται από 1,0m έως 2,0m, μια αυξανόμενη τάση αυτών των τιμών. Αυξημένες τιμές στο πάχος των προκατασκευασμένων τμημάτων έχουν ως αποτέλεσμα την ταχύτερη τοποθέτηση και τη μείωση των σημείων σύνδεσης των στοιχείων. Επιπρόσθετα, μειώνεται η πιθανότητα απόκλισης σε καμπύλη διαδρομή και αύξηση της κίνησης των εμβόλων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αυξημένη ταχύτητα διάνοιξης σηράγγων. Ωστόσο η αύξηση του πάχους των στοιχείων της επένδυσης μπορεί να προκαλέσει συγκέντρωση δευτερευόντων φορτίσεων στα σημεία σύνδεσης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κινδύνου εκτόνωσης και θραύσης.

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης μπορεί να ολοκληρωθεί με one layer (single -pass) ή δύο και περισσότερα. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις μονό κέλυφος ή σύνθετη διατομή πρέπει να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα της κατασκευής. Στη πράξη η επιλογή ανάμεσα σε μονό ή διπλό κέλυφος επένδυσης καθορίζεται από τα οικονομικά στοιχεία. Επιπλέον στην περίπτωση της διπλής επένδυσης η κατανομή των φορτίων της εσωτερικής και εξωτερικής επένδυσης παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας στον υπολογισμό.

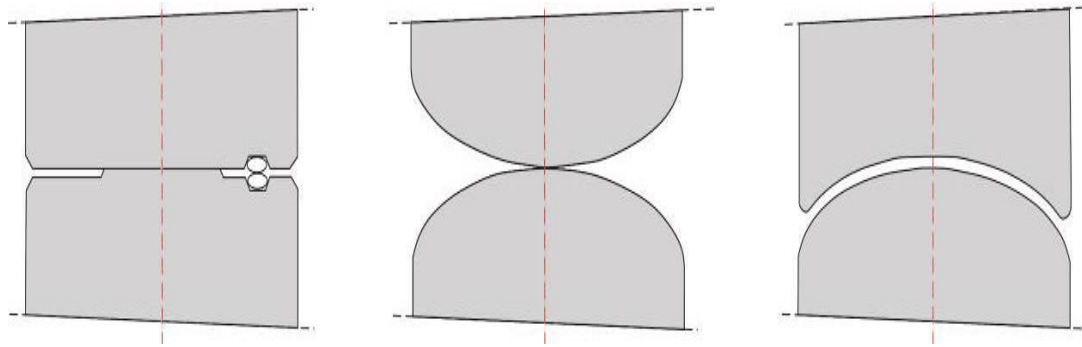


**Εικόνα 1-17: Δακτύλιος τελικής επένδυσης με εμφανή τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων στον ίδιο δακτύλιο και τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δακτυλίους [9]**

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικών της τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων είναι ο αριθμός των σημείων ένωσης τους. Τα σημεία σύνδεσης είναι κάθετα στα στοιχεία και κατά μήκος της σήραγγας. Στην πράξη έχουν διαπιστωθεί δύο τύποι σημείων σύνδεσης των στοιχείων της επένδυσης. Πρόκειται

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

για τα επίπεδα σημεία σύνδεσης plane joint (flat contact surface) και τα κυρτά σημεία- (convex joint). Η βασική διαφοροποίηση τους έγκειται στην ικανότητα τους να παραλαμβάνουν καμπτικές ροπές. Καθώς το κενό μεταξύ των συνδεόμενων στοιχείων κλείνει προκαλούνται καμπτικές ροπές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι σε μεγάλες στροφές αναπτύσσονται υψηλές ροπές κάμψης.



Εικόνα 1-18: Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων [9]

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



Εικόνα 1-19: Ο μηχανισμός των γάντζων τοποθέτησης των στοιχείων της επένδυσης του μηχανήματος EPB, που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοξη του υπόγειου σιδηροδρόμου στην Αθήνα [9]

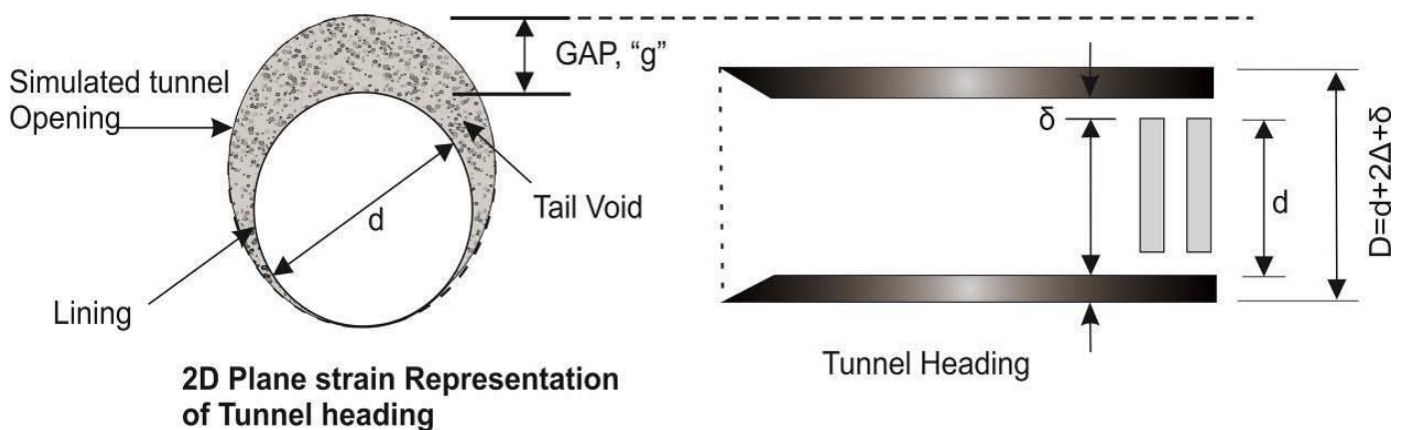
# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

## 1.1.6.1 Ουραίο κενό του μηχανήματος και οι διαδικασίες πλήρωσης του ουραίου κενού με ένεμα (Shield tail sealing and grouting works)

Κατά τη προώθηση του μηχανήματος, στο πίσω μέρος του, στην ουρά του μηχανήματος δημιουργείται ένα κενό μεταξύ της μόνιμης επένδυσης και του περιβάλλοντος εδάφους.

Διακρίνονται δύο τύποι κενών που δημιουργούνται κατά την μηχανοποιημένη όρυξη:

- Το κενό που σχηματίζεται ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος, ως αποτέλεσμα του κωνικού σχήματος της πρώτης. Κωνικότητα  $\eta$  Ωστόσο, ο λόγος της τελικής κωνικότητας της ασπίδας έχει ως σκοπό την αποφυγή ανάπτυξης τριβής με το εδαφικό υλικό.
- Το κενό μεταξύ της τελικής επένδυσης και του περιβάλλοντος γεωυλικού. Το οποίο είναι αποτέλεσμα, του πάχους της ασπίδας και του αναμενόμενα αποδεκτού κενού του σχηματίζεται κατά την εκσκαφή.



Εικόνα 1-20: Απεικόνιση των δύο διαφορετικών κενών που δημιουργούνται κατά τη προώθηση του μηχανήματος διάνοιξης [9]

Ο ορισμός για το μέγεθος του κενού “G” που δημιουργείται δόθηκε από το Lee et al ως :

$$G = G_p + U_{3D} + W \quad \text{Σχέση 1-1}$$

Όπου,

$G_p$  είναι το κενό που δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς της εξωτερικής διαμέτρου του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με την εξωτερική διάμετρο της τελικής επένδυσης. Οι τυπικές τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται μεταξύ 115-140mm (με ελάχιστη 85mm και μέγιστη 185mm) εξαρτώμενη από τη διάμετρο της ασπίδας.

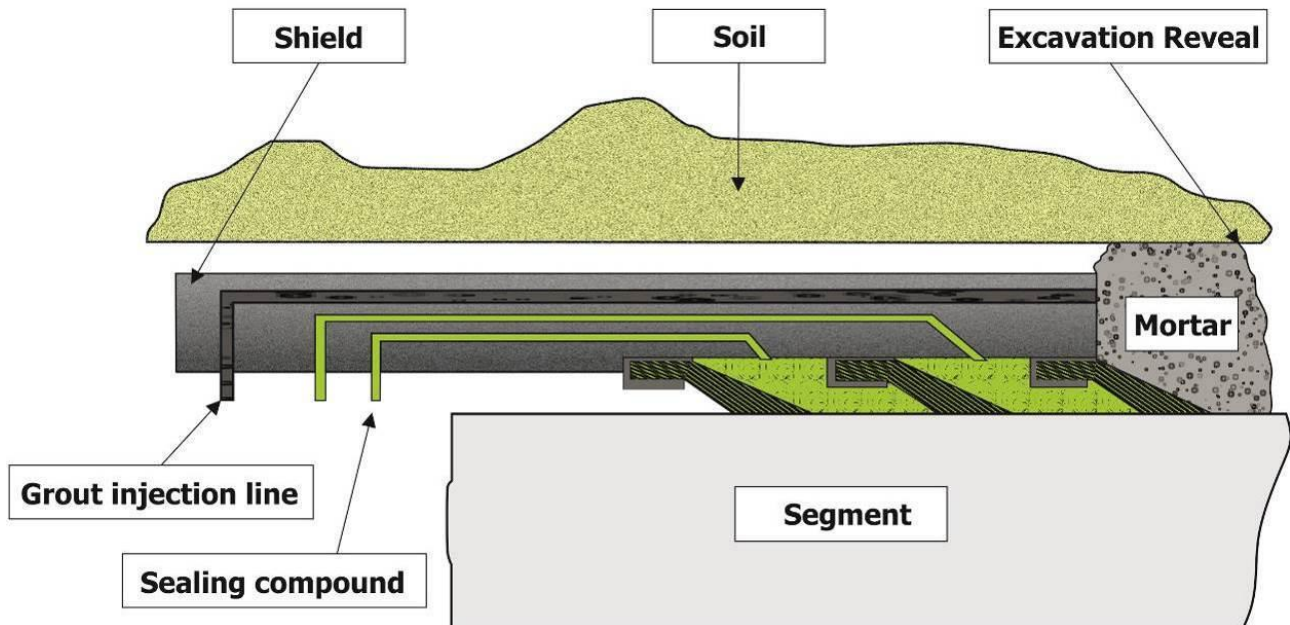
$U_{3D}$ , είναι η τριδιάστατη παραμόρφωση στο μέτωπο  
 $w$ , ένας ορισμένος συντελεστής

## 1.1.6.2 Διαδικασία ενεμάτωσης

Η διαδικασία ενεμάτωσης, δηλαδή η διαδικασία έγχυσης μπετονίτη όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-21 που ακολουθεί, εκτελείται είτε με έγχυση μέσω ανοιγμάτων που υπάρχουν ανάμεσα στους

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

δακτυλίου της επένδυσης, είτε με σωληνώσεις που καταλήγουν στην ουρά του μηχανήματος. Το πλεονέκτημα της δεύτερης μεθόδου είναι η δυνατότητα για ομοιόμορφη κατανομή εξαιτίας της ύπαρξης πολλαπλών σημείων έγχυσης ενέματος. Σημαντικός είναι ο έλεγχος του όγκου του ενέματος και της ισχύς εισπίεση, που πρέπει να συντελούνται καθόλα τη διάρκεια ώθησης του μηχανήματος.



Εικόνα 1-21: Απεικόνιση της διαδικασίας ενεμάτωσης με χρήση σωληνώσεων στο πίσω τμήμα του μηχανήματος [9]

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

- Επιτρέπεται η ομοιόμορφη μεταφορά της εδαφικής πίεσης στα στοιχεία της επένδυσης, επομένως οι εσωτερικές δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα.
- Δυνατότητα διατήρησης των εδαφικών τάσεων που δρουν αντίθετα στην εδαφική παραμόρφωση.
- Προστατεύει τα στοιχεία της επένδυσης καθώς αποτρέπει την άμεση επαφή της με τις περιβάλλουσες, ίσως, δυσμενείς εδαφικές συνθήκες.
- Και τέλος, βελτιώνει τη στεγανοποίηση σε περίπτωση επένδυσης μονού κελύφους.

Διακρίνονται η αρχική διαδικασία ενεμάτωσης και η δευτερεύουσα διαδικασία, η οποία θεωρείται και περισσότερο επαρκή. Η αιτία εκτέλεσης της είναι η πλήρωση κενών που ίσως υφίστανται και μετά από τη πρώτη εκτέλεση ενεμάτωσης, και η επιλογή της πραγματοποιείται με βάση την εμπειρία και τον όγκο της αρχικής διαδικασίας ενεμάτωσης.

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)**

---

Σχετικά με τις ιδιότητες του ενέματος, είναι κατάλληλες προκειμένου, αρχικά να εξασφαλίζεται η ροή στο κενό καθώς δεν παρουσιάζει καμία δυσκαμψία και σε δεύτερη φάση ( συνήθως μετά από 4-5h) να συμπεριφέρεται ως σκληρυμένο σκυρόδεμα με κάποια ακαμψία. Στη τελική φάση το ένεμα πρέπει να διαθέτει καλή ροή, εργασιμότητα μέχρι τη σκλήρυνση, δυνατότητα έγχυσης και ταχύτατη σκλήρυνση όταν ολοκληρωθεί η έγχυση στο κενό.

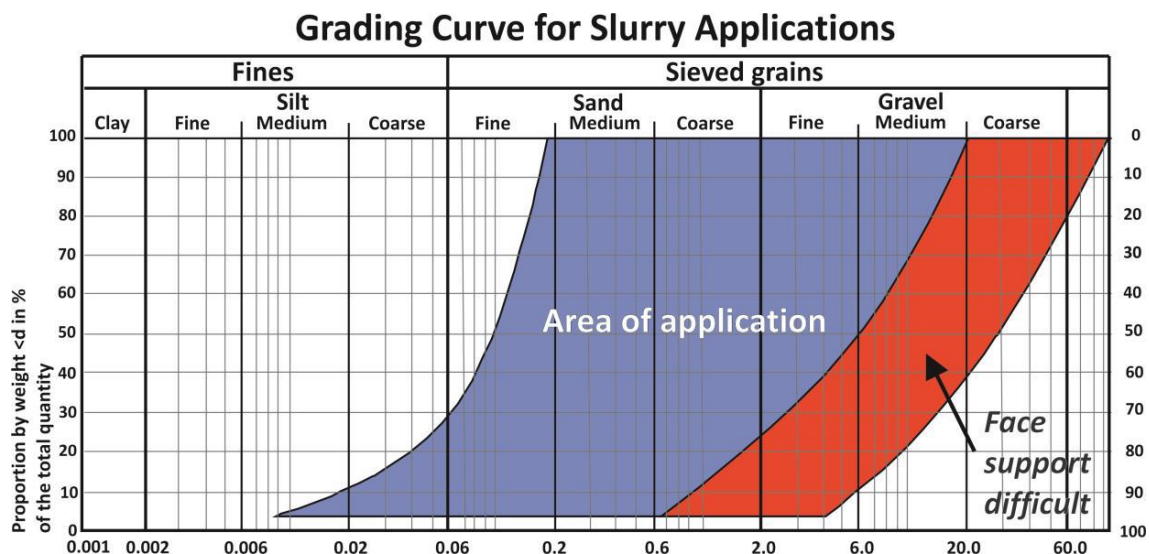
### **1.2 Μηχανήματα Πολφού Μπετονίτη με Ασπίδα - Slurry Shield Machine**

Τα μηχανήματα πολφού αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα μηχανήματα μηχανοποιημένης όρυξης σε αστικές περιοχές καθώς παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου του εδαφικού όγκου που εκσκάπτεται και τον περιορισμό των τάσεων στο περιβάλλον έδαφος. Η βασικότερη διαφορά που εντοπίζεται στην επιλογή ενός μηχανήματος Slurry και ενός EPB είναι η αποτελεσματικότητα των μηχανημάτων Slurry με την εφαρμογή του μπετονιτικού πολτού σε διαφορετικών χαρακτηριστικών εδαφικών σχηματισμών σε αντίθεση με τα μηχανήματα EPB που παρουσιάζουν καλύτερη λειτουργία σε συνεκτικά αργιλικά εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα.

Τα Slurry μηχανήματα ανήκουν στη κατηγορία των μηχανημάτων με ασπίδα που προσφέρουν υποστήριξη στο μέτωπο. Τα μηχανήματα αυτού του τύπου όπως και τα μηχανήματα τύπου EPB σχεδιάστηκαν για τη διάνοιξη σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς που χαρακτηρίζονται από ετερογένεια .

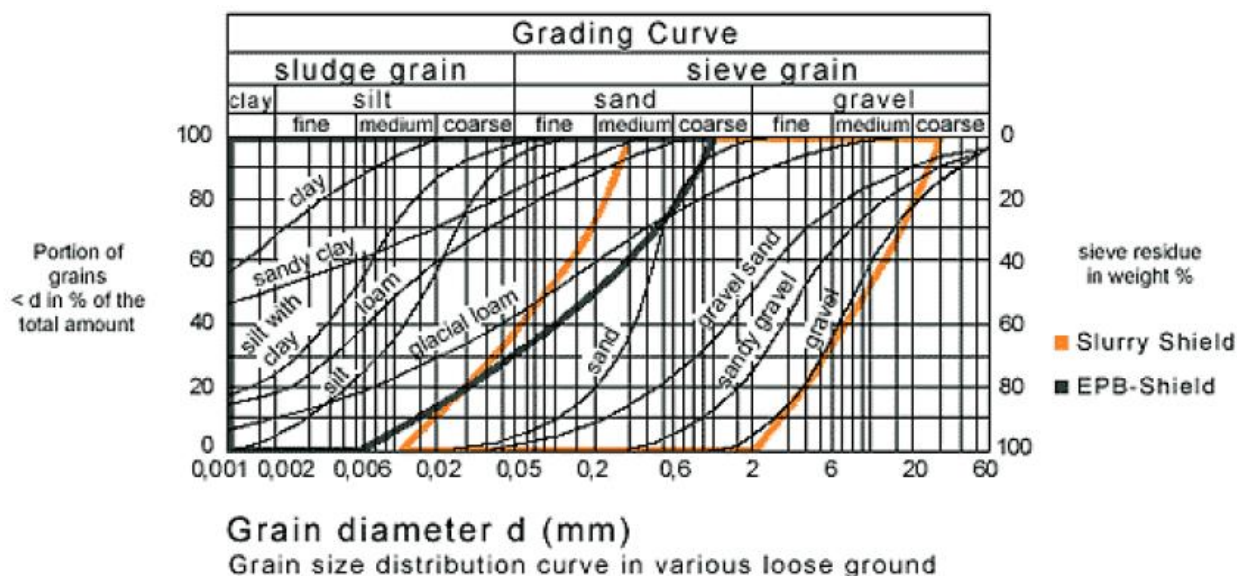
Η μηχανοποιημένη όρυξη με slurry μηχανήματα ενδείκνυται σε χονδρόκοκκους σχηματισμούς για ένα εύρος υδραυλικής διαπερατότητας μεταξύ  $10^{-8}$ m/s- $10^{-2}$ m/s. Σε πολύ διαπερατά εδάφη, με διαπερατότητα μεγαλύτερη από  $5 \cdot 10^{-3}$ m/s , παρεμποδίζεται ο σχηματισμός μεμβράνης και τη μεταφορά πίεσης στο μέτωπο, καθώς υπάρχει κίνδυνος ροής του μπετονίτη στο έδαφος. Επιπλέον πλεονεκτήματα της επιλογής μηχανοποιημένης όρυξης με μηχανήματα Slurry είναι η βελτιωμένη ικανότητα εκσκαφής χωρίς το κλείσιμο των κενών στην ασπίδα, μείωση των τριβών στο μηχανολογικό εξοπλισμό και τέλος, ο καλύτερος διαχωρισμός της ιλύος.





Εικόνα 1-22: Εύρος αποτελεσματικής εφαρμογής κατά την επιλογή ενός μηχανήματος Slurry

Στην Εικόνα 1-23 παρουσιάζεται το κριτήριο επιλογής μεταξύ ενός μηχανήματος Slurry με ένα μηχάνημα EPB σύμφωνα με της γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες προκειμένου να επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός λειτουργίας κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας.



Εικόνα 1-23: Κριτήριο επιλογής ανάμεσα σε ένα μηχάνημα Slurry και ένα μηχάνημα EPB σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους

Για την ιστορική αναδρομή, η πρώτη εφαρμογή ενός μηχανήματος Slurry πραγματοποιήθηκε το 1959/60 στις Ηνωμένες Πολιτείες για τη διάνοιξη και κατασκευή μιας αποστραγγιστικής σήραγγας. Στο συγκεκριμένο μηχάνημα, η απομάκρυνση του εδαφικού πολτού πραγματοποιούνταν με τη λειτουργία ενός υδραυλικού συστήματος και η ώθηση του μηχανήματος γινόταν με την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού ως μέσο μεταφοράς.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

Τα μηχανήματα πολφού έκαναν την εμφάνιση τους το 1912, με κατασκευαστή τον Grauel. Με εξέλιξη το 1960 οπότε και ο Schneidereit εισάγει το αιώρημα μπετονίτη για την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο. Εφαρμογή slurry μηχανήματος έγινε το 1973 από τους Ιάπωνες στη διάνοιξη σήραγγας στη περιοχή Mitsubishi. Το μηχάνημα αυτό αποτελεί ουσιαστικά και τον πρόγονο των slurry μηχανημάτων. Μηχανήματα με την ίδια λειτουργία τα οποία όμως απερρίφθησαν προτάθηκαν από τους Άγγλους , ενώ η πρόταση των Γερμανών οδήγησε στην εξέλιξη των Hydrosields-Mixshields.



Εικόνα 1-24: Το πρώτο μηχάνημα πολφού μπετονίτη Ιαπωνικού τύπου [12]

### 1.2.1 Βασική Λειτουργία των μηχανημάτων Slurry

Η βασική λειτουργία και ιδιαιτερότητα των μηχανημάτων Slurry που τα διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα μηχανήματα ασπίδας είναι η δυνατότητα ανάμειξη του αιωρήματος με το εδαφικό υλικό που εκσκάπεται, σχηματίζοντας μια τέλεια πλαστική πάστα υλικού που χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του μετώπου. Ειδικότερα στα slurry μηχανήματα, ο μπετονίτης εφαρμόζεται στο μέτωπο με πίεση δια μέσου του ιδιού βάρους του. Στην υποκατηγορία των μηχανημάτων hydrosields ο μπετονίτης ασκείται μέσω πεπιεσμένου αέρα.

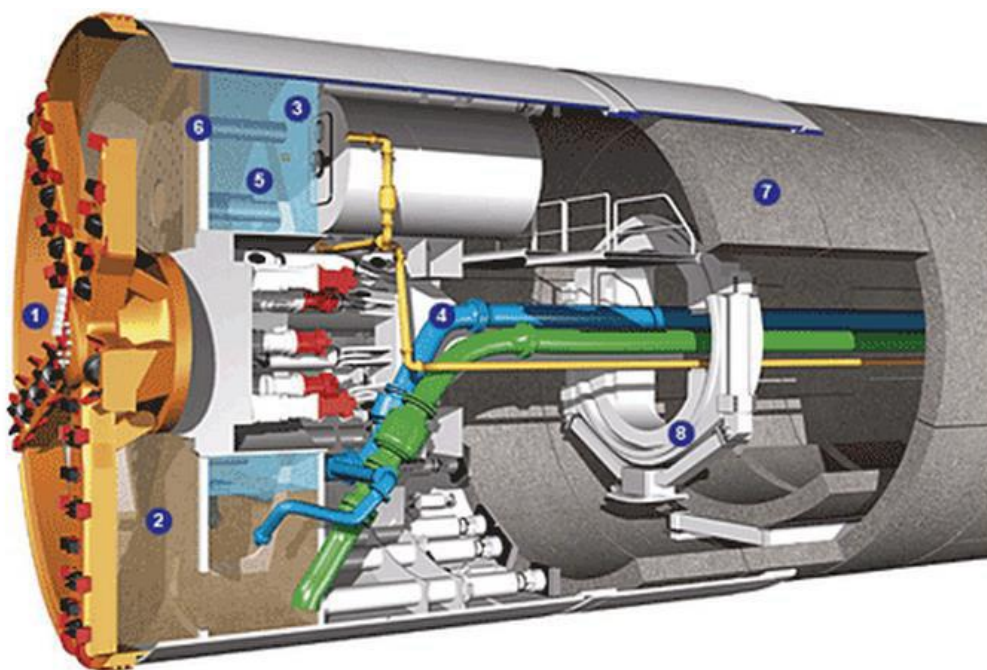
Τα κυριότερα μέρη από τα οποία συνθέτεται ένα μηχάνημα slurry καθώς και τα κυριότερα στάδια λειτουργίας του παρουσιάζονται και περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους:

Για την εξασφάλιση πίεσης στο μέτωπο τα μηχανήματα αυτά διαθέτουν ένα κλειστό κάδο ανάμειξης του αιωρήματος με το χαλαρωμένο έδαφος που προκύπτει κατά την κοπή του εδάφους από τη κίνηση της κοπτικής κεφαλής.

Στην Εικόνα 1-25 που ακολουθεί οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν τα μέρη ενός τυπικού μηχανήματος Slurry. Ο αριθμός (1) απεικονίζει το μέρος της κοπτικής κεφαλής- cutter head , το οποίο έρχεται σε επαφή με το εδαφικό υλικό στο μέτωπο και συντελεί στην χαλάρωση και απομακρυνσή του από αυτό. Η περιοχή πίσω από την κοπτικής κεφαλής όπου γίνεται η ανάμειξη του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη,

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

γνωστή ως κάδος ανάμειξης ( chamber excavation(2) ), διαχωρίζεται από το διάφραγμα πίεσης (3) από το τμήμα της ασπίδας υπό ατμοσφαιρική πίεση. Ο εφοδιασμός του μπετονιτικού αιωρήματος στο θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται από τις σωληνώσεις τροφοδοσίας (4) μέσω πίεσης αέρα. Η πίεση που ασκείται είναι ισοδύναμη με αυτή του στον εδαφικό σχηματισμό και ίση με την πίεση των πόρων προκειμένου να αποτρέπεται η ανεξέλεκτη διείδυση στο έδαφος ή η απώλεια ευστάθειας στη περιοχή του μετώπου. Αυτός είναι ο κύριος λόγος διαχωρισμού του θαλάμου εκσκαφής με το διάφραγμα πίεσης. Στη συνέχεια, το χαλαρωμένο υλικό που έχει απομακρυνθεί από το μέτωπο αναμιγνύεται με το αιώρημα μπετονίτη και αντλείται προς απομάκρυνση σε μια κυκλική διαδικασία διαχωρισμού στο εξωτερικό της σήραγγας. Με σκοπό να αποτραπεί οποιαδήποτε διακοπή της κυκλικής διαδικασίας και για να εξασφαλίζεται η συνεχή ροή στο εξωτερικό, τοποθετείται στο μπροστινό τμήμα των σωληνώσεων ένα τεράστιο σύστημα που φιλτράρει το υλικό και αποτρέπει οποιαδήποτε εισροή στο σωλήνα αναρρόφησης. Οι σωλήνες αναρρόφησης και τροφοδοσίας ξεχωρίζουν με το πράσινο και μπλε χρώμα. Στην Εικόνα 1-25, φαίνονται με το τα προκατασκευασμένα στοιχεία (7) τα οποία τοποθετούνται με γάντζους (8) και σχηματίζουν το κλειστό δακτύλιο της επένδυσης.



Εικόνα 1-25: Τυπική διάταξη ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα- Slurry Machine [9]

Τα Slurry μηχανήματα έχουν τη δυνατότητα παροχής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής μέσω της εφαρμογής μπετονιτικού πολτού. Εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο να ισοσταθμίζεται η εδαφική πίεση και η πίεση του νερού των πορών, ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται η σταθερότητα του μετώπου αποτρέποντας τη τάση διείδυσης προς την ασπίδα του μηχανήματος.

Η χρήση του αιωρήματος μπετονίτη καθίσταται ιδιαίτερα αποτελεσματική. Ο μπετονιτικός πολτός παρουσιάζει παραπλήσιες ιδιότητες διατμητικής αντοχής, ιξώδους, πυκνότητας με αυτές του εδάφους.



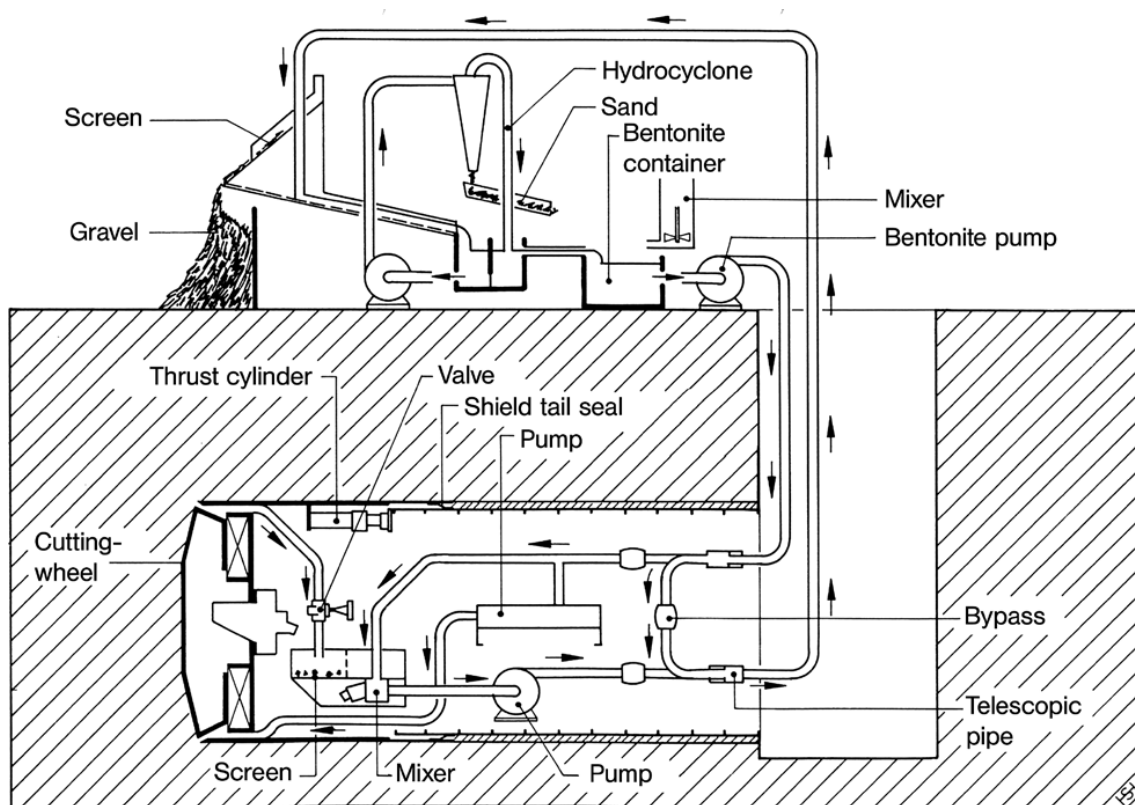
## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του αιωρήματος μπετονίτη, με καθαρισμό και επαναφορά των ιδιοτήτων του. Διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται με αραίωση του μπετονίτη που επανασυλλέγεται και την προσθήκη σε αυτόν κατάλληλων προσμίκτων και καταλυτών.

Το βασικό ορυκτό του μπετονιτικού αιωρήματος είναι μοντμοριλλονίτη με προσμίξεις μικρών ποσοτήτων άλλων μετάλλων όπως ο χαλαζίας, μαρμαρυγίας, άστριος, ασβεσίτη, κλπ. Η εμφάνιση του μπετονίτη γίνεται υπό μορφή νατρίου ή ασβεστίου όπου στην εκάστοτε περίπτωση εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά. Στη περίπτωση του νατρίου έχει πολύ υψηλότερη ικανότητα διογκώσης όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, σε αντίθεση με τη περίπτωση του ασβεστίου, που μπορεί, ωστόσο, να υποστεί κάποια χημική επεξεργασία για να προκύψει κάποιο προϊόν νατρίου.

Το αιώρημα μπετονίτη δημιουργεί μια μεμβράνη (mud cake) με σκοπό να διασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου γι' αυτό και πρέπει να έχει χαμηλή διαπερατότητα. Σημαντικός είναι ο έλεγχος απώλειας νερού, ποσότητα που πρέπει να αποκαθίσταται με πρόσθετα ή με νέο μίγμα, διότι με την απομάκρυνση νερού το μίγμα γίνεται παχύρευστο και αδιαπέρατο.

Στη Εικόνα 1-26 φαίνεται η κυκλική πορεία επαναχρησιμοποίησης του αιωρήματος του μπετονίτη.



Εικόνα 1-26: Σχηματική απεικόνιση τη κυκλικής διαδικασίας τροφοδοσίας του μπετονιτικού αιωρήματος [12]

### 1.2.2 Συνιστώσα μέρη ενός μηχανήματος ασπίδας Slurry

#### 1.2.2.1 Κοπτική ασπίδα

Η κοπτική κεφαλή είναι επαρκώς εξοπλισμένη με κοπτικά εργαλεία προκειμένου να επιτυγχάνεται χαλάρωση του εδαφικού υλικού στο μέτωπο. Τα κοπτικά εργαλεία τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα επί της κοπτικής κεφαλής πρέπει να ανταποκρίνονται στις επικρατούσες εδαφικές συνθήκες. Το σχήμα της κοπτικής κεφαλής στα μηχανήματα slurry είναι επίπεδη και κλειστή με μοναδική δυνατότητα προσέγγισης της κεφαλής μέσω κάποιων παραθύρων τα οποία είναι κλειστά κατά τη διαδικασία εκσκαφής. Τα κοπτικά εργαλεία, είναι κυρίως scrapers or flat chisels, και έχουν κυκλική διάταξη τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η εκσκαφή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τη διάταξη των κοπτικών εργαλείων επί της κεφαλής, η τελευταία μπορεί να κινηθεί κατά ένα κεντρικό άξονα, περιμετρικά και κατά το ένα τέταρτο.

Χαρακτηριστικό μέγεθος, είναι το ποσοστό ανοιγμάτων επί της κεφαλής. Αυτή η παράμετρος είναι άμεσα συνιφασμένη με την άσκηση της εδαφικής πίεσης και για τα μηχανήματα slurry κυμαίνεται μεταξύ 25-35%.



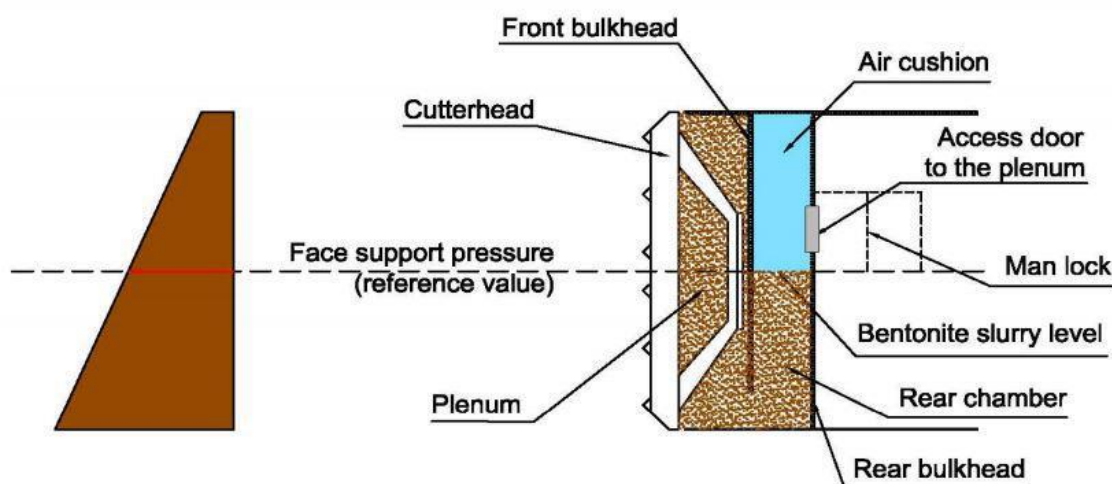
Εικόνα 1-27: Κοπτική κεφαλή του μηχανήματος Hydroshield που χρησιμοποιήθηκε στην εκσκαφή της γραμμής του υπόγειου σιδηροδρόμου στη Σιγκαπούρη [9]

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μηχανήματα ολομέωπης κοπής με άσκηση πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής – Tunnel Boring Machines (TBM)

### 1.2.2.2 Θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber)

Η πίεση στο μέτωπο από το μπετονιτικό πολτό προσφέρεται μέσο του θαλάμου εκσκαφής. Ο θάλαμος εκσκαφής ή και plenum αποτελεί το τμήμα του μηχανήματος που διαχωρίζει τη κοπτική κεφαλή με το υπόλοιπο λειτουργικό σύστημα του μηχανήματος. Η κυκλική διαδικασία ροής και απορροής μπετονιτικού πολτού είναι η μέθοδος για να ελέγχεται η πίεση στο θάλαμο επομένως και ο έλεγχος της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο.

Στην υποκατηγορία, της οικογένεια των Hydroschild μηχανημάτων, διακρίνεται η ιδιαιτερότητα ύπαρξης μιας επιπλέον κοπτικής κεφαλής η οποία τοποθετείται σε αρκετή απόσταση πίσω από την κυρίως κοπτική κεφαλή. Σε αυτή τη περίπτωση, ο θάλαμος εκσκαφής διαιρείται σε δυο μέρη με την ύπαρξη ενός τοίχου. Οι υποθάλαμοι που σχηματίζονται, ο μπροστινός είναι πλήρως γεμάτος με πολτό σε αντίθεση με τον δεύτερος, ο οποίος γεμίζει κατά ένα ποσοστό. Το αιώρημα του μπετονίτη εφαρμόζεται διαμέσο σωληνώσεων με την πίεση αέρα, με αποτέλεσμα ο έλεγχος της πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής να μην είναι άμεσος αλλά να πραγματοποιείται έμμεσα από ένα αυτόματο σύστημα ρύθμισης.



Εικόνα 1-28: Παρουσίαση της εδαφικής πίεσης που ασκείται και τα στοιχεία του θαλάμου εκσκαφής [17]

### 1.2.2.3 Υδραυλικό σύστημα μεταφοράς

Η απομάκρυνση και μεταφορά του εδαφικού πολτού πραγματοποιείται από ένα σύστημα σωληνώσεων, η διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός των οποίων πρέπει να αποτρέπει την οποιαδήποτε φραγή στη διατομή. Οι σωληνώσεις αναρρόφησης απομακρύνουν το αιώρημα μπετονίτη στο θάλαμο διαχωρισμού και στη συνέχεια το καθαρός πλέον μπετονίτης μέσω της κυκλικής διαδικασίας επιστρέφει με τις σωληνώσεις τροφοδοσίας στο θάλαμο εκσκαφής.

Λόγω του συστήματος άντλησης, η οποία καλείται επίσης κλειστό κύκλωμα υδραυλικού πολτού, οι μηχανές ασπίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια ακόμη και με υψηλές πιέσεις νερού άνω των 15 bar. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για την εξασφάλιση της συνεχής και χωρίς διακοπές λειτουργίας του

συστήματος, η διάμετρος των σωληνώσεων να είναι σε τέτοιο μέγεθος ώστε να επιτρέπει τη ροή των υλικών με κατάλληλη ταχύτητα.



Εικόνα 1-29: Το σύστημα σωληνώσεων αναρρόφησης του εδαφικού υλικού με το μπετονίτη και τροφοδοσίας του αιωρήματος μπετονίτη στο εσωτερικό ενός μηχανήματος slurry [9]

### 1.2.2.4 Separation plant

Ακόμη, μια ιδιαιτερότητα που εντοπίζεται κατά τη διάνοιξη σήραγγας με μηχανήματα slurry είναι η απαίτηση εξοπλισμού για το διαχωρισμό του υλικού που έχει απομακρυνθεί και αναμιχθεί με το μπετονίτη στο τέλος των σωληνώσεων. Η διαδικασία αυτή δεν αποτελεί ένα ανεξάρτητο μεμονωμένο τμήμα του μηχανήματος, αλλά απαιτείται ένας ικανός αριθμός μηχανών διαχωρισμού για τον αποτελεσματικό και επαρκή διαχωρισμό. Ο σύνθεση αυτής της διαδικασίας σχηματίζει το «σχέδιο διαχωρισμού».

Το «σχέδιο διαχωρισμού» σχεδιάζεται σύμφωνα με τις πληροφορίες που συλλέγονται για τις περιβάλλουσες εδαφικές συνθήκες και ο εξοπλισμός απαιτείται να αξιολογείται ως προς το μέγεθος πρώτου να ξεκινήσει το έργο.





**Εικόνα 1-30: Σύστημα Διαχωρισμού εδαφικού υλικού από το μπετονιτικό αιώρημα κατά Derrick TBSS-450 [9]**

Οι ποσότητες που μεταφέρονται προκειμένου να ακολουθήσει η διαδικασία διαχωρισμού ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος του εκάστοτε slurry μηχανήματος, με συχνά συναντώμενες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 50m<sup>3</sup>/h για μικρά μηχανήματα σε καλά διαβαθμισμένα κοκκώδη εδάφη και 2800m<sup>3</sup>/h για μηχανήματα μεγαλύτερης διαμέτρου.

Στη πραγματικότητα, διαπιστώνονται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες διαχωρισμού, η καθίζηση και η διείσδυση, οι οποίες εξαρτώνται από τα συστατικά που θα διαχωριστούν. Επομένως, για το σχέδιο διαχωρισμού απαιτούνται διαφορετικά στάδια επεξεργασίας, ώστε σε κάθε στάδιο να αφαιρούνται διαφορετικά συστατικά του πολτού. Ο αριθμός των σταδίων επεξεργασίας εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες του εδάφους της περιοχής εργασίας και από τη μελέτη του έργου.

- Ως καθίζηση χαρακτηρίζεται η καθίζηση του υλικού που μεταφέρεται. Ορίζονται δύο βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη καθίζηση, με αρχικό το όριο ροής και το ιζώδες του μέσου μεταφοράς, όπου συνήθως λαμβάνεται ίσο με του νερού ή με του μπετονιτικού υγρού και δεύτερο το μέγεθος και τη πυκνότητα των κόκκων του εδάφους. Επομένως, μεταβάλλοντας αυτές τις δύο παραμέτρους επηρεάζεται η ροή.
- Σχετικά με τη διείσδυση χρησιμοποιούνται φίλτρα διαφορετικών ανοιγμάτων για να κοσκινίζουν το υλικό καθώς το μέγεθος των κόκκων και το σχήμα ποικίλει από έδαφος σε έδαφος.



## **2 Μεθοδολογία προσέγγισης υπερεκσκαφής με τη μέτρηση βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού**

### **2.1 Σκοπός μέτρησης εδαφικού υλικού**

Όπως έχει αναφερθεί και στα παραπάνω κεφάλαια, κατά τη διάνοιξη σήραγγων σε αστικό περιβάλλον, η μείωση ή ο μηδενισμός των μετακινήσεων του μέτωπου εκσκαφής αποτελεί μία πρόκληση. Η υπερεκσκαφή που συντελείται στο μέτωπο δύναται να συνδεθεί με τις καθιζήσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια. Ένας από τους τρόπους πρόβλεψης της υπερεκσκαφής θα μπορούσε να είναι μέσω του υπολογισμού του βάρους του υλικού που εκσκάπτεται από το μέτωπο. Τα μηχανήματα ασπίδας έχουν τη δυνατότητα να διαθέτουν εξελιγμένο εξοπλισμό προκειμένου να ζυγίζουν την ποσότητα εδάφους που απομακρύνεται από το μέτωπο της σήραγγας.

Στην προσπάθεια προσέγγισης της υπερεκσκαφής που συντελείται κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας, έχει προταθεί μια καινοτόμα πρόταση στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος NETTUN από την ερευνητική ομάδα του Μ.Καββαδά, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών. Η πρόταση βασίζεται στην αξιολόγηση του βάρους του υλικού που εκσκάπτεται, συνυπολογίζοντας το ρυθμό προώθησης του μηχανήματος και το ρυθμό περιστροφής του ατέρμονα κοχλία.

### **2.2 Τεχνικές υπολογισμού απώλειας εδαφικού όγκου**

Ο όγκος του εδαφικού υλικού που χαλαρώνει και απομακρύνεται από το μέτωπο απαιτεί διαρκή έλεγχο καθώς το μηχάνημα προωθείται. Ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού του εδαφικού όγκου είναι η χρησιμοποίηση της σχέσης μεταξύ των αμαξιδίων μεταφοράς του υλικού με την απόσταση από την εκσκαφή. Ωστόσο, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές καθώς και η εφαρμογή της τεχνολογίας συμβάλλει στην μέτρηση του εδαφικού υλικού. Ορισμένες από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζονται παρακάτω :

- Με τη χρήση μηχανικής ζώνης, που τοποθετείται στον ιμάντα μεταφοράς του υλικού, μετράται το βάρος του υλικού που μεταφέρεται. Για μεγαλύτερη ακρίβεια τοποθετούνται 2 ζυγαριές μέσω των οποίων προκύπτει ένα μέσο βάρος του υλικού που μεταφέρεται. Ανάλογα με το κατασκευαστή τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής έχουν ποσοστό ακρίβειας  $\pm 0.5\%$  καθώς και δυνατότητα επαναβαθμονόμησης όπου απαιτείται. Ο βαρέως τύπου τροχός, η υψηλή ανάλυση μέτρησης και οι διαφορετικές διαθέσιμες διεπιφάνειες καθώς και η δυνατότητα στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων αποτελούν κάποια από τα πλεονεκτήματα της ανωτέρω τεχνικής.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Μεθοδολογία προσέγγισης της υπερεκσκαφής με τη μέτρηση του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού



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

• Ένας δεύτερος τρόπος υπολογισμού του όγκου του εκσκαπτόμενου υλικού είναι η χρήση της τεχνολογίας των Laser Scanner. Με το σύστημα Laser Scanner, το σήμα διαδίδεται με παλμούς και σαρώνει σε 2 διαστάσεις το υλικό που βρίσκεται στο μεταφορικό ιμάντα. Η βασική λειτουργία του είναι η μέτρηση του χρόνου επιστροφής των παλμών. Κάθε παλμός που εκπέμπεται από το laser scanner αντανακλάται από την επιφάνεια του μεταφερόμενου υλικού. Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η τεχνική του Laser Scanner είναι τα κάτωθι:

- Δεν απαιτείται επαφή με το μεταφερόμενο υλικό, επιτρέποντας έτσι την ελεύθερη λειτουργία του μηχανισμού και αποτρέποντας την φθορά του
- Επιτρέπει την προσαρμογή του σε ήδη υπάρχοντα συστήματα και προσφέρει υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία στη τιμή του όγκου που μετράται





Εικόνα 2-2: Μετρητής skaner για τον προσδιορισμό του εδαφικού όγκου - Courtesy of SICK AG [9]

- Για την αύξηση της ακρίβειας της μέτρησης του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού με τη τεχνολογία Laser skanner πραγματοποιείται η μέτρηση της πυκνότητας του με πυρηνική ενέργεια (Nuclear Density Meter) μέσω ενός μετρητή, ο οποίος τοποθετείται πάνω στον ιμάντα μεταφοράς. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής, είναι ότι η μέτρηση δεν επηρεάζεται από την αλλαγή του ταινιοδρόμου ούτε από τις διαφοροποιήσεις της πυκνότητας που μπορεί να παρουσιάζει το υλικό. Στη συγκεκριμένη τεχνική, εξαιρετικά μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας διαπερνά το υλικό που μεταφέρεται στον ιμάντα. Επομένως, ο ανιχνευτής ενέργειας που είναι τοποθετημένος επί του ιμάντα λαμβάνει αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος ακτινοβολίας με αυτό του βάρους του υλικού. Με αυτό τον τρόπο συνδιάζεται η μέτρηση της πυκνότητας και της ταχύτητας του ιμάντα και προσδιορίζεται συνεχόμενα ο ρυθμός ροής του εκσκαπτόμενου υλικού.



**Εικόνα 2-3: Μετρητής πυκνότητας - Courtesy of Ronan Engineering Company [9]**

### **2.2.1.1 Έλεγχος του εδαφικού όγκου σε μηχανήματα Slurry**

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



**Εικόνα 2-4: Απεικόνιση μαγνητικών και ραδιομετρικών μετρητών για τον υπολογισμό του βάρους του υλικού που εκσκάπτεται [9]**

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

- Μετρώντας το βάρος του εδαφικού υλικού δεν παρέχεται καμία πληροφορία για το βαθμό πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής
- Παρατηρείται ανακρίβεια και απόκλιση μεταξύ των τιμών που μετρώνται με κάθε μέθοδο
- Ο συντελεστής διόγκωσης του υλικού και το αποτέλεσμα του δεν είναι ούτε γνωστό, ούτε σταθερό για να χρησιμοποιηθεί στη μέτρηση και
- Υπάρχουν δυσκολίες υπολογισμού του βάρους ή του όγκου του εδαφικού υλικού, όταν η εντολή για τους διάφορους ρυθμιστικούς παράγοντες δίνονται ταυτόχρονα.

### **2.3 Μεθοδολογία εκτίμησης της υπερεκσκαφής με μέτρηση του εκσκαπτόμενου εδαφικού υλικού**

Με τη ποσότητα της εδαφικής μάζας που ζυγίζεται κατά τη προώθηση ενός μηχανήματος TBM κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, μπορεί να γίνει προσπάθεια προσέγγισης της υπερεκσκαφής που συντελείται και να ελεγχθεί η ευστάθεια του μετώπου μέσω των μεταβολών που προκύπτουν από τα ζυγίσματα. Αυτή η εμπειρική μέθοδος περιγράφεται παρακάτω:

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Μεθοδολογία προσέγγισης της υπερεκσκαφής με τη μέτρηση του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού

Αρχικά ορίζεται η εδαφική μάζα ( $\Delta M_m$ ) για ένα μικρό μήκος εκσκαφής ( $\Delta L$ ) και υπολογίζεται ο αναμενόμενος εδαφικός όγκος για κυκλική διατομή ( $\Delta M_o = A_o (\Delta L) \rho$ ), όπου

$\rho$  = πυκνότητα της βραχώμαζας και

$A_o$  = εμβαδό διατομής σήραγγας με  $A_o = \pi R^2$ , όπου  $R$ = η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής.

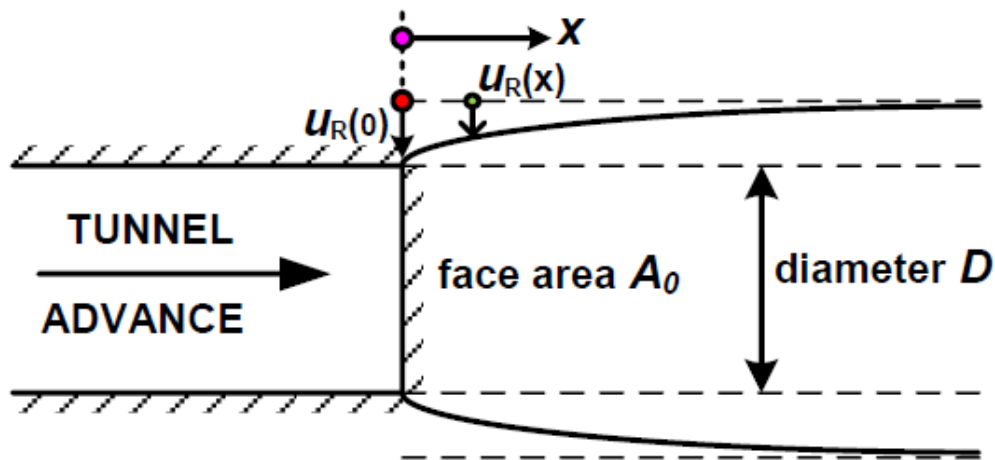
Επομένως ορίζεται το μέγεθος της υπερεκσκαφής ως:

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

Σχέση 2-1

Σημειώνεται ότι, το μέγεθος υπερεκσκαφής "υποθετικά" θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από τη μονάδα διότι η εδαφική μάζα που ζυγίζεται είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητικά αναμενόμενη. Η προσύγκλιση στο μέτωπο εκσκαφής (Εικόνα 2-5) αυξάνει τον πραγματικό όγκο-βάρους του εκσκαφθέν υλικού ( $\Delta M_c$ ) συγκρινόμενο με το θεωρητικό όγκο-βάρους ( $\Delta M_o$ ).

Ο λόγος υπερεκσκαφής, στη διαδικασία διάνοιξης κατά την οποία το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό, μπορεί να υπολογιστεί, σύμφωνα με την Εικόνα 2-5:



Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής της διαμέτρου του μετώπου [9]

Η μετρούμενη εδαφική μάζα ( $\Delta M_c$ ) ισούται με το άθροισμα της θεωρητικά αναμενόμενης ποσότητας συν τη μάζα του εδαφικού υλικού λόγω της σύγκλισης του μετώπου της σήραγγας ( $\Delta M_a$ ). Επομένως η μετρούμενη εδαφική μάζα, όταν συντελείται η ακτινική σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο, έχει τον κατωτέρω τύπο:

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

$$OER_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta M_o} = \left[ 1 + \frac{u_R(0)}{R} \right]^2 \geq 1$$

Σχέση 2-2

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Μεθοδολογία προσέγγισης της υπερεκσκαφής με τη μέτρηση του βάρους του εκσκαπτόμενου υλικού

όπου,  $u_{R_0}$  = η ακτινική παραμόρφωση του μετώπου της σήραγγας, η οποία προκύπτει από αναλύσεις

$R$  = η ακτίνα της ασπίδας του μηχανήματος

Προκύπτει ότι για τη διάνοιξη όπου το μέτωπο της σήραγγας είναι ευσταθές ο λόγος της αναμενόμενης υπερεκσκαφής πρέπει να είναι ίσος με το λόγο που μετράται,  $(OER)_{calculated} = (OER)_{measured}$

Στη περίπτωση που παρουσιάζεται αστάθεια του μετώπου της σήραγγας, τότε το μετρούμενο πηλίκο είναι μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο.  $(OER)_m > (OER)_c$  καθώς στο πρώτο συνυπολογίζεται το επιπλέον εδαφικό υλικό που πέφτει από το μέτωπο.

Έτσι υπολογίζεται ο λόγος ευστάθειας του μετώπου, που είναι το πηλίκο της αναμενόμενης και της μετρούμενης υπερεκσκαφής :

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

Σχέση 2-3

όπου,  $\Delta M_m$  = ο μετρούμενος εδαφικός όγκος για ένα μικρό μήκος εκσκαφής

$R$  = η ακτίνα της κοπτικής κεφαλής

$\rho$  = η πυκνότητα της βραχώμαζας

$u_{R_0}$  = η ακτινική σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής

Ο συντελεστής ευστάθειας μετώπου εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στη σήραγγα. Για τιμές  $FIR=1$  το μέτωπο είναι ευσταθές, για περιπτώσεις με τιμές πολύ μεγαλύτερες από τη μονάδα αυξάνεται η υπερεκσκαφή και η αστάθεια του μετώπου.





### **3 Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η δημιουργία προσομοιωμάτων σε δύο διαστάσεις για την ανάλυση σηράγγων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων είναι ευρύτατα διαδεδομένη καθώς προσφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον προσδιορισμό μεγεθών όπως είναι η ακτινική σύγκλιση μια σήραγγας, οι επιφανειακές μετατοπίσεις. Ένα από τα πλεονεκτήματα των προσομοιωμάτων σε δύο διαστάσεις είναι ότι δεν απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, ωστόσο υστερούν στην ακρίβεια που αποδίδουν ανάλογα με τα μεγέθη που εξάγονται. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης μεταξύ της περιβάλλουσας βραχώμαζας και του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine-TBM). Εντούτοις, σε αστικές περιοχές όπου οι επιφανειακές κατασκευές παρουσιάζουν μεγάλη αναγκαιότητα για λεπτομερή ανάλυση κατά το σχεδιασμό, υπήρξε η ανάγκη για ανάπτυξη αριθμητικών προσομοιωμάτων που θα προσομοιώνουν ακριβέστερα και ρεαλιστικότερα την πραγματικότητα. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία προσομοιωμάτων σε τρεις διαστάσεις.

#### **3.2 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke**

##### **3.2.1 Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης**

Σκοπός της μελέτης κατά Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke αποτελεί η αριθμητική προσομοίωση ενός μοντέλου που θα συνδέει τη προοδευτική διαδικασία εκσκαφής μια σήραγγας και τη προώθηση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine-TBM). Η επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιείται με την κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην κοπτική κεφαλή του μηχανήματος και του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού, γεγονός όμως που δεν δύναται να πραγματοποιηθεί με τα υπάρχοντα υπολογιστικά διδιάστατα προσομοιώματα.

Στη συγκεκριμένη έρευνα, ένας κύριος αλγόριθμος και η τεχνική της ενδιάμεσης διακριτοποίησης (re-meshing) παρουσιάζονται στο τριών διαστάσεων μοντέλο για την επίτευξη της εξέλιξης της εκσκαφής.

##### **3.2.2 Κινηματικός αλγόριθμος του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής**

Σημαντικό βήμα διάρθρωσης του αριθμητικού μοντέλου είναι η επιλογή του κινηματικού αλγορίθμου κίνησης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Για το σκοπό αυτό, διαμορφώνεται μια μη γραμμική κινηματική ανάλυση, η οποία βασίζεται στις παραμέτρους των αξονικών δυνάμεων που δρουν επί της κοπτικής κεφαλής και των δυνάμεων αδράνειας αυτής.

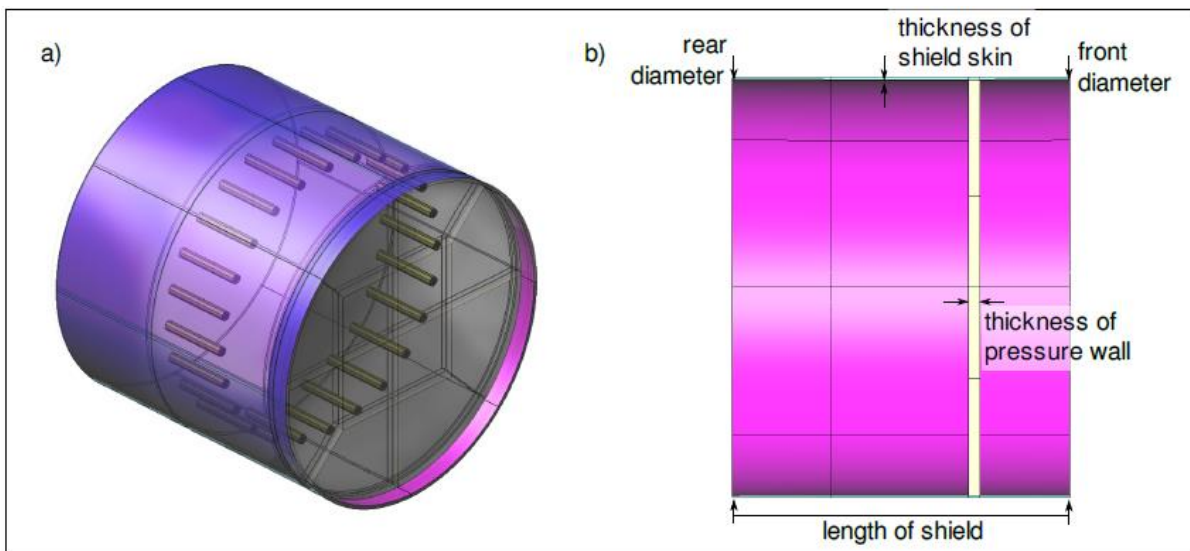
## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

Οι αξονικές δυνάμεις λήφθηκαν ως αποτέλεσμα :

- Της κίνηση υδραυλικών εμβόλων, τα οποία ωθούν σε αντίθετη κατεύθυνση από τη φορά κίνησης του μηχανήματος
- Της ύπαρξη των γεωστατικών τάσεων στην κοπτική κεφαλή
- Τη γωνία τριβής του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού
- Και, διαδικασία ροής του ενέματος

Ενώ οι αδρανειακές δυνάμεις οφείλονταν στο ίδιο βάρος του μηχανήματος και της ασπίδας. Η μοντελοποίηση της ασπίδας επιτεύχθηκε με τη χρήση Total Lagrangian Finite Element formulation.

Στην Εικόνα 3-1 που ακολουθεί απεικονίζεται η γεωμετρία του μηχανήματος, όπου το πάχος της ασπίδας και το κωνικό της σχήμα επιτρέπει την ρεαλιστική κατανομή των δυνάμεων αντίδρασης του περιβάλλοντος σχηματισμού κατά τη περιμετρική και αξονική διεύθυνση.



Εικόνα 3-1: Γεωμετρικό μοντέλο της ασπίδας όπου παρουσιάζονται η θέση των υδραυλικών εμβόλων και οι διαστάσεις της [2]

### 3.2.3 Αλγόριθμος διόρθωσης (steering correction algorithm)

Η προώθηση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM πραγματοποιείται με την ώθηση που προσφέρουν τα υδραυλικά έμβολα πάνω στα δακτυλίδια της υποστήριξης που έχουν ήδη τοποθετηθεί, νικώντας με αυτό τον τρόπο την αντίσταση που παρουσιάζει το περιβάλλον γωυλικό. Μέσω του αλγορίθμου επιτρέπεται η διόρθωση διεύθυνσης, καθώς σε κάθε υδραυλικό έμβολο αναπτύσσονται ροπές σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Στο υπολογιστικό μοντέλο η προσομοίωση των υδραυλικών εμβόλων πραγματοποιείται με Crisfield truss elements, τα οποία συνδέονται με την ασπίδα και τα στοιχεία της επένδυσης. Ο αλγόριθμος ωστόσο δεν παρέχει τη δυνατότητα ομοιόμορφης ώθησης των υδραυλικών εμβόλων γι' αυτό δημιουργείται ένα σημείο αναφοράς το οποίο είναι συνδεδεμένο με τη

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

πορεία της ασπίδας. Η περιγραφή της μεθόδου του μηχανισμού προώθησης του μηχανήματος παρατίθεται στα ακόλουθα βήματα ως:

Προσδιορισμός των βημάτων διάνοιξης της σήραγγας ορειοθετείται με συντεταγμένες τριών διαστάσεων στο χώρο.

- Η ύπαρξη ενός σημείου αναφοράς  $c_{ref}$  μέσω του οποίου πραγματοποιείται η απόκλιση του μηχανήματος από την προηγούμενη θέση. Το σημείο αυτό αποτελεί το κέντρο της κυκλικής ασπίδας και προσδιορίζεται :

$$c_{ref} = \frac{1}{n_j} * \sum_i^{n_j} p_s^i$$

Σχέση 3-1

- Δεδομένου ότι το ορισμένο σημείο αναφοράς διαφέρει από το κέντρο των κοπτικών κεφαλών ορίζεται το διανυσματικό μέγεθος  $r_{os}$ , προκειμένου να πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της νέας θέσης αυτών, η οποία και συμβολίζεται ως  $p_{target}$ . Ο προσδιορισμός αυτής της θέσης απαιτείται για τον καθορισμό της διεύθυνσης της προώθησης της ασπίδας, η οποία συμβολίζεται ως  $d$ . Ο προσδιορισμός αυτών των παραμέτρων πραγματοποιείται κατά το χιλιομετρικό ανάπτυγμα της σήραγγας.

$$p_{target} = \alpha^{k+1}$$
$$d = \frac{\alpha^{k+2} - \alpha^{k-1}}{\|\alpha^{k+2} - \alpha^{k-1}\|}$$

Σχέση 3-2

Σε συνδιασμό με τα παραπάνω η καινούργια θέση του σημείου αναφοράς προσδιορίζεται ως :

$$c_{new} = r_{target} - r_{os}$$

Σχέση 3-3

Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται και ένας δείκτης μεταφοράς από την αρχική στη νέα θέση του σημείου αναφοράς, με συμβολισμό  $t$ .

$$t = c_{new} - c_{ref}$$

.....

Σχέση 3-4

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

Ενώ για το τελικό προσδιορισμό της περιμετρικής θέσης της κεφαλής ορίζονται οι ακτινικοί δείκτες  $r_1$  και  $r_2$ .

$$n = \frac{r_1 * r_2}{\|r_1 * r_2\|}$$

Σχέση 3-5

- Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται στο χώρο η τελική θέση των στοιχείων ,  $p_{s,new}^i$ .

$$P_{s,new}^i = c_{new} + A_{rot} * (P_s - c_{ref})$$

Σχέση 3-6

$A_{rot}$  : standard cartesian rotation matrix και προσδιορίζεται

$$A_{rot} = \begin{vmatrix} C + u_1^2 * (1 - C) & u_1 * u_2 * (1 - C) - u_3 * S & u_1 * u_3 * (1 - C) - u_2 * S \\ u_2 * u_1 * (1 - C) - u_3 * S & C + u_2^2 * (1 - C) & u_2 * u_3 * (1 - C) - u_1 * S \\ u_3 * u_1 * (1 - C) - u_2 * S & u_3 * u_2 * (1 - C) - u_1 * S & C + u_3^2 * (1 - C) \end{vmatrix}$$

Σχέση 3-7

και  $C = \cos \alpha$  ,  $S = \sin \alpha$  , όπου  $\alpha = \arccos(n * d)$

- Το μήκος που έχει επαναπροσδιοριστεί και οι μετακινήσεις υπολογίζονται με τον ακόλουθο τύπο και αποδίδονται ως internal Green Lagrange strain για κάθε Crisfield truss element:

$$L_{new}^i = \|p_{s,new} - p_L\|$$

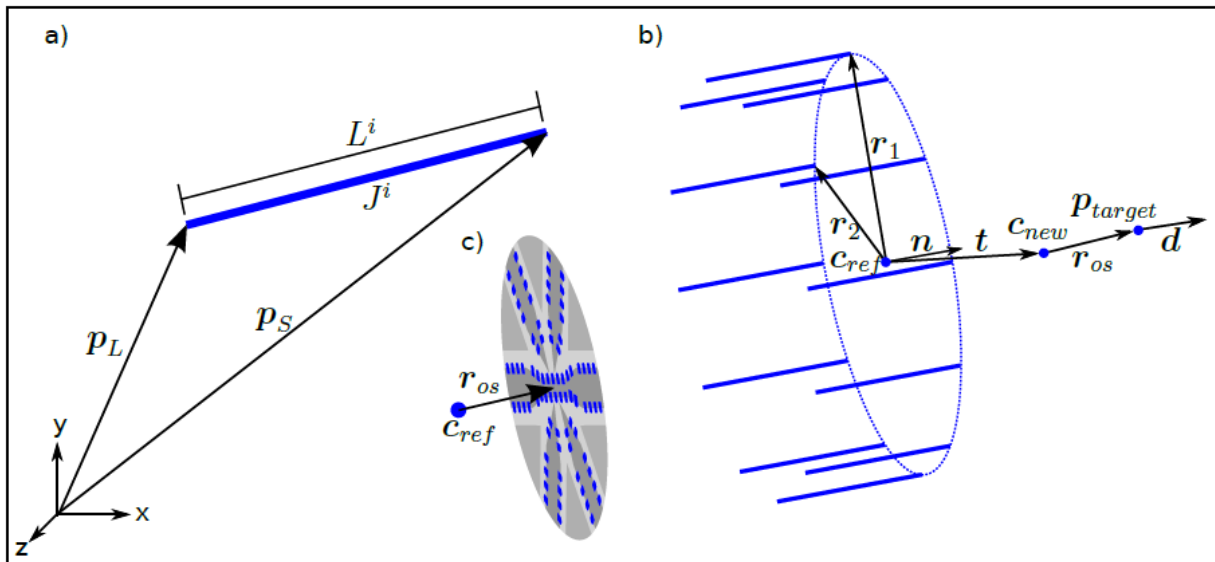
Σχέση 3-8

$$E_{11} = \frac{L_{new}^2 - l_{ref}^2}{2 * l_{ref}^2}$$

Σχέση

3-9

Οι δείκτες που αναπτύχθηκαν στον παραπάνω κείμενο παρουσιάζονται στη Εικόνα 3-2, όπου το πρώτο σχήμα αφορά την μεμονωμένη μετατόπιση ενός υδραυλικού εμβόλου (jack element), ακολουθεί το δεύτερο σχήμα για την ολοκληρωμένη μετατόπιση της κεφαλής και τέλος παρουσιάζεται η συσχέτιση του σημείου αναφοράς με το βέλος  $r_{os}$ .



Εικόνα 3-2: Προσδιορισμός του αλγορίθμου όπου βασίζεται η διόρθωση για τη προθήση του μηχανήματος, με α) σχέση για ένα στοιχείο  $J^i$ , β) μέτρηση για τον αλγόριθμο διόρθωσης γ) προσδιορισμός του συντελεστή  $r_{os}$  [2]

### 3.2.4 Μοντέλο υπολογισμού της διαδικασία διάνοιξης

Σημαντικό βήμα στο αριθμητικό προσομοίωμα προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος αποτελεί η συνεχής προσαρμογή της διακριτοποίησης στη περιοχή του μετώπου της σήραγγας (re-meshing). Για το λόγο αυτό δημιουργείται ένας ενδιάμεσος αλγόριθμος διακριτοποίησης που λαμβάνει χώρα κατά την εκτέλεση της γενικής διακριτοποίησης προκειμένου να συνδεθεί η περιοχή του μετώπου με το υπόλοιπο μοντέλο.

#### 3.2.4.1 Γεωμετρία τη σήραγγας

Ο καθορισμός του γεωμετρικού συστήματος ακολουθεί δύο διακριτές περιπτώσεις: Constructive Solid Geometry (CSG) schemes and Boundary Representations (B-Rep) schemes. Στη περίπτωση μιας υπόγειας εκσκαφής το σύστημα B-Rep επιτρέπει μια ικανοποιητική προσομοίωση των πολυεδρικών επιφανειών των στοιχείων της εκσκαφής. Στο τριδιάστατο μοντέλο που δημιουργείται, η διαδρομή της σήραγγας και η διατομή της αποτυπώνονται με τμηματικά ευθύγραμμα στοιχεία που βελτιώνονται για να ταιριάζουν στη κυκλική διατομή της σήραγγας. Η επιφάνεια του μετώπου της σήραγγας δημιουργείται με την επιλογή sweep κατά μήκος της διαδρομής διάνοιξης της σήραγγας.

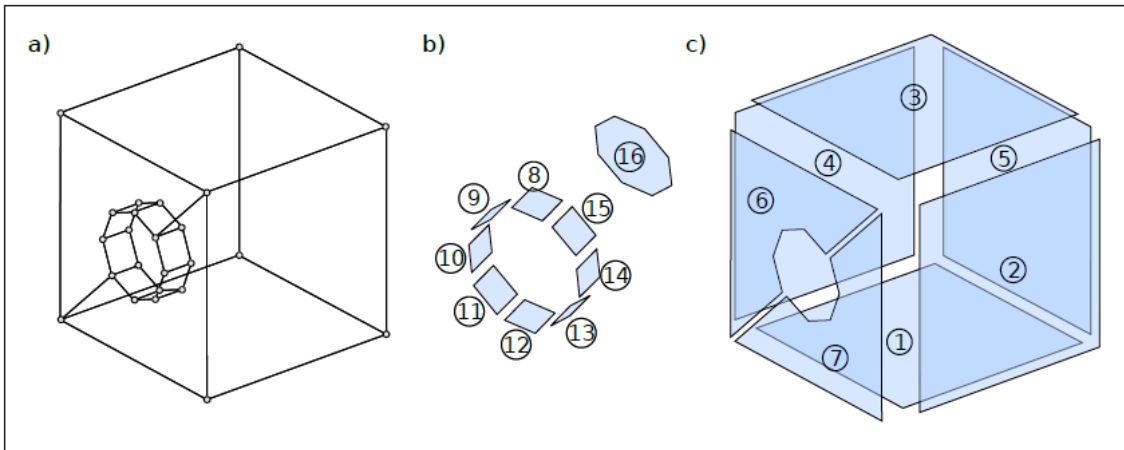
#### 3.2.4.2 Αλγόριθμος διακριτοποίησης

Η χρήση του αλγορίθμου διακριτοποίησης έχει ως στόχο τον αυτόματο διαχωρισμό – διακριτοποίηση του μοντέλου. Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται η επιλογή piecewise linear system (PLS), προκειμένου να γίνει προσομοίωση στη περιοχή των εξωτερικών ορίων του μοντέλου και στη περιοχή του ορίου εφαρμογής του ενδιάμεσου αλγορίθμου διακριτοποίησης. Στην Εικόνα 3-3, παρουσιάζονται οι δύο

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

διαφορετικές περιοχές εφαρμογής της εντολής, όπου ουσιαστικά πρόκειται για μια πιθανή εκπροσώπηση του μοντέλου ύστερα από την εκτέλεση ενός υπολογιστικού βήματος. Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται αυτόματα η δημιουργία ενός εσωτερικού ορίου καθώς το εσωτερικό όριο αναπροσαρμόζεται.

Το σχήμα (b) απεικονίζει το εσωτερικό όριο, πρόκειται δηλαδή για το μέτωπο της διάνοιξης όπου εφαρμόζεται ο ενδιάμεσος αλγόριθμος και το σχημα (c) το εξωτερικό όριο του μοντέλου, με την εφαρμογή της γενικής διακριτοποίησης.



Εικόνα 3-3: Παρουσίαση της γεωμετρίας της εκσκαφής σύμφωνα με το σύστημα PLS [2]

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή η εκτέλεση της εντολής so-called piecewise linear system (PLS) πραγματοποιείται στο εκάστοτε ανασκαμμένο τμήμα σύμφωνα με το βήμα πρόωσης. Ωστόσο, η διακριτοποίηση του γενικού μοντέλου σε τετραεδρικά στοιχεία εκτελείται με την εφαρμογή του αλγορίθμου TetGen και για το καθορισμό του αλγορίθμου απαιτείται ο προσδιορισμός των στοιχείων:

- Ο καθορισμός μιας πολυεδρικής περιοχής που οριοθετεί το μοντέλο
- Η θέση της κοπτικής κεφαλής ύστερα από κάθε βήμα ανάλυσης

#### 3.2.5 Διακριτοποίηση στη περιοχή του μετώπου

Στη ιδιαίτερη περιοχή του μετώπου, όπου εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία διακριτοποίησης (re-meshing), ένας τομέας  $\Omega$ , υποδιερίζεται σε 2 επιπλέον τομείς  $\Omega_1$  και  $\Omega_2$ , τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$  και  $\Omega_1 \cap \Omega_2 = 0$ . Κάθε υποπεριοχή που ορίζεται μπορεί να αποτελεί είτε διαφορετική περιοχή εκσκαφής είτε περιοχή με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφοροποιείται στο πρόγραμμα με τη χρήση των layers. Τα όρια τους καθορίζονται είτε με διεπιφάνειες επαφής μεταξύ τους είτε με ένα εσωτερικό συνοριακό όριο με την περιοχή του υπόλοιπου μοντέλου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο δημιουργείται μία περιοχή  $\Omega_1$ , που περιλαμβάνει τη περιοχή διάνοιξης και

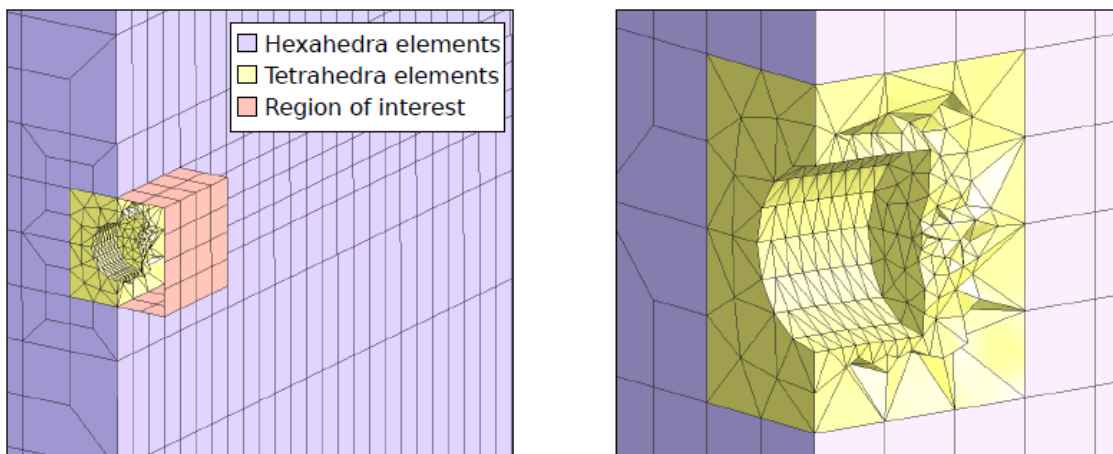


## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

παρουσιάζεται με ένα κλειστό πολύεδρο. Η περιοχή διάνοιξης δύναται να επιλεγεί με υποκειμενικά κριτήρια είτε ως η γενική περιοχή προσομοίωσης είτε μόνο ως περιοχή της μετώπου.

### 3.2.6 Hybrid mesh

Κατά τη διακριτοποίηση χρησιμοποιούνται εξαεδρικά στοιχεία σε περιοχές όπου η γεωμετρία του μοντέλου δεν παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες και δεν απαιτείται επαναδιακριτοποίηση (re-meshing), ενώ στοιχεία τεσσάρων εδρών δημιουργούνται αυτόματα σε περιοχές με περίπλοκες γεωμετρίες, όπως στα όρια του μοντέλου και στη περιοχή του μετώπου εκσκαφής. Στο σημείο που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι στη διεπιφάνεια των τετραεδρικών στοιχείων εντός της εσωτερικής περιοχής με τα εξαεδρικά στοιχεία εκτός αυτής. Η επίλυση αυτού του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη σύνδεση με ένα τριγωνικό πλέγμα που ένωνε τα τετραεδρικά και εξαεδρικά στοιχεία. Στην Εικόνα 3-4 παρουσιάζεται η αυτόματη σύνδεση του εσωτερικού με το εξωτερικό όριο.



Εικόνα 3-4: Παρουσίαση της γεωμετρίας της εκσκαφής σύμφωνα με Hybrid mesh [2]

### 3.2.7 Μοντέλο εκσκαφής

Ο μηχανισμός της ενδιάμεσης διακριτοποίησης πραγματοποιείται σε συνδιασμό με το steering correction algorithm. Ο steering correction algorithm είναι αυτός που προσομοιώνει τη διαδικασία εκσκαφής σε κάθε βήμα ανάλυσης, όπου μετά από κάθε βήμα εισάγεται ο (re-meshing) ενδιάμεσος αλγόριθμος και δημιουργεί τη νέα διακριτοποίηση στη νέα διατομή. Ο ενδιάμεσος αλγόριθμος (re-meshing) στηρίζεται στα δεδομένα εισαγωγής της αρχικής διακριτοποίησης. Η νέα θέση του μηχανήματος και η γεωμετρία του μετά από κάθε στάδιο ανάλυσης χρησιμοποιεί για τη δημιουργία του νέου πλέγματος την προηγούμενη παραμορφωμένη γεωμετρία. Τέλος, ύστερα από κάθε καινούργια διακριτοποίηση απαιτείται επιπλέον διαδικασία διακριτοποίησης, όπως:

- Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης προκειμένου να εξασφαλίζεται η κυκλική διατομή της ασπίδας και η ακριβής καμπύλη διάνοιξης

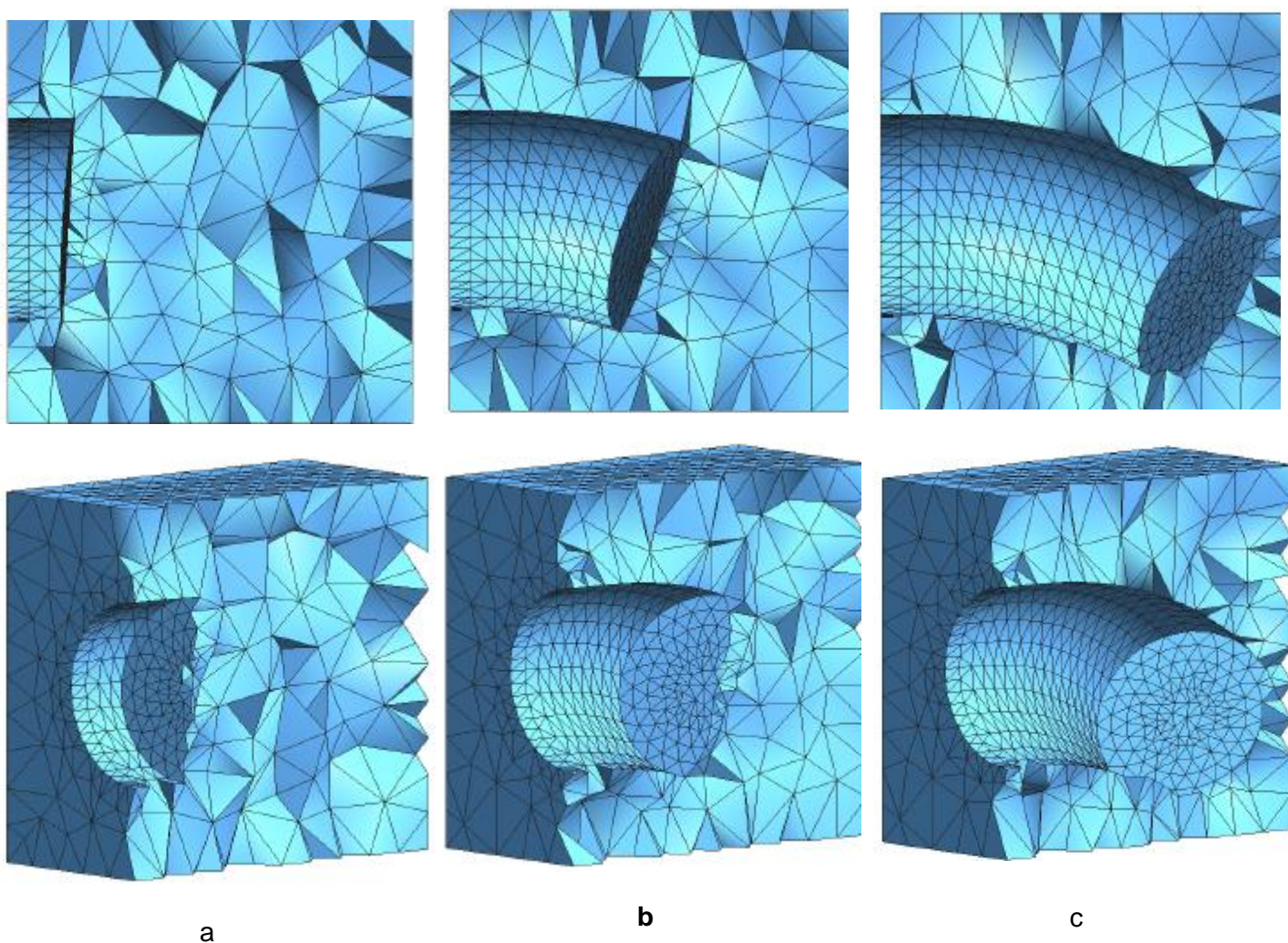
- Παραγωγή μιας καινούργια διακριτοποίησης που θα προσομοιώνουν τα όρια εκσκαφής, το μέτωπο εκσκαφής και τις επιφάνειες επαφής.
- Διαφορετικός αλγόριθμος προώθησης. Σύμφωνα με την επαναδιακριτοποίηση που συντελείται, οι τιμές των τάσεων και η τιμές για τη νέα διακριτοποίηση χρησιμοποιούν ως αφετηρία της αρχικές τιμές που ορίστηκαν στην αρχική διακριτοποίηση. Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη να πραγματοποιηθεί πριν την εκτέλεση του επόμενου υπολογιστικού βήματος. Για την μεταφορά αυτών των εσωτερικών μεγεθών εφαρμόστηκε κατάλληλος αλγόριθμος, ο οποίος βασίστηκε στο σύστημα Superconvergent Patch Recovery (SPR)

### 3.2.8 Παραδείγματα εφαρμογής του προτεινόμενου αριθμητικού προσομοιώματος

Στη συγκεκριμένη έρευνα αναπτύσσονται δύο παραδείγματα μέσω των οποίων περιγράφεται η διαδικασία re-meshing και ο σχεδιασμός καμπύλης κίνησης του μηχανήματος. Για τη γεωμετρία του πρώτου συστήματος επιλέχθηκε :

- Η ακτίνα της σήραγγας ίση με την ακτίνα του μηχανήματος ίση μ 5,25m.
- Κάθε υπολογιστικό βήμα πραγματοποιείται για κάθε 0,5m.
- Η περιοχή της διάνοιξης προσεγγίζεται ως μια ορθωγωνική διαδρομή που περιγράφεται από την ακολουθία σημείων.

Μετά από την ολοκλήρωση ενός υπολογιστικού βήματος υλοποιείται καινούργια διακριτοποίηση που αντιπροσωπεύει το ολοκληρωμένο βήμα. Η πορεία εκσκαφής κατά τη διεύθυνση x απεικονίζεται στις τομές των επιπέδων x-y και y-z, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-5.



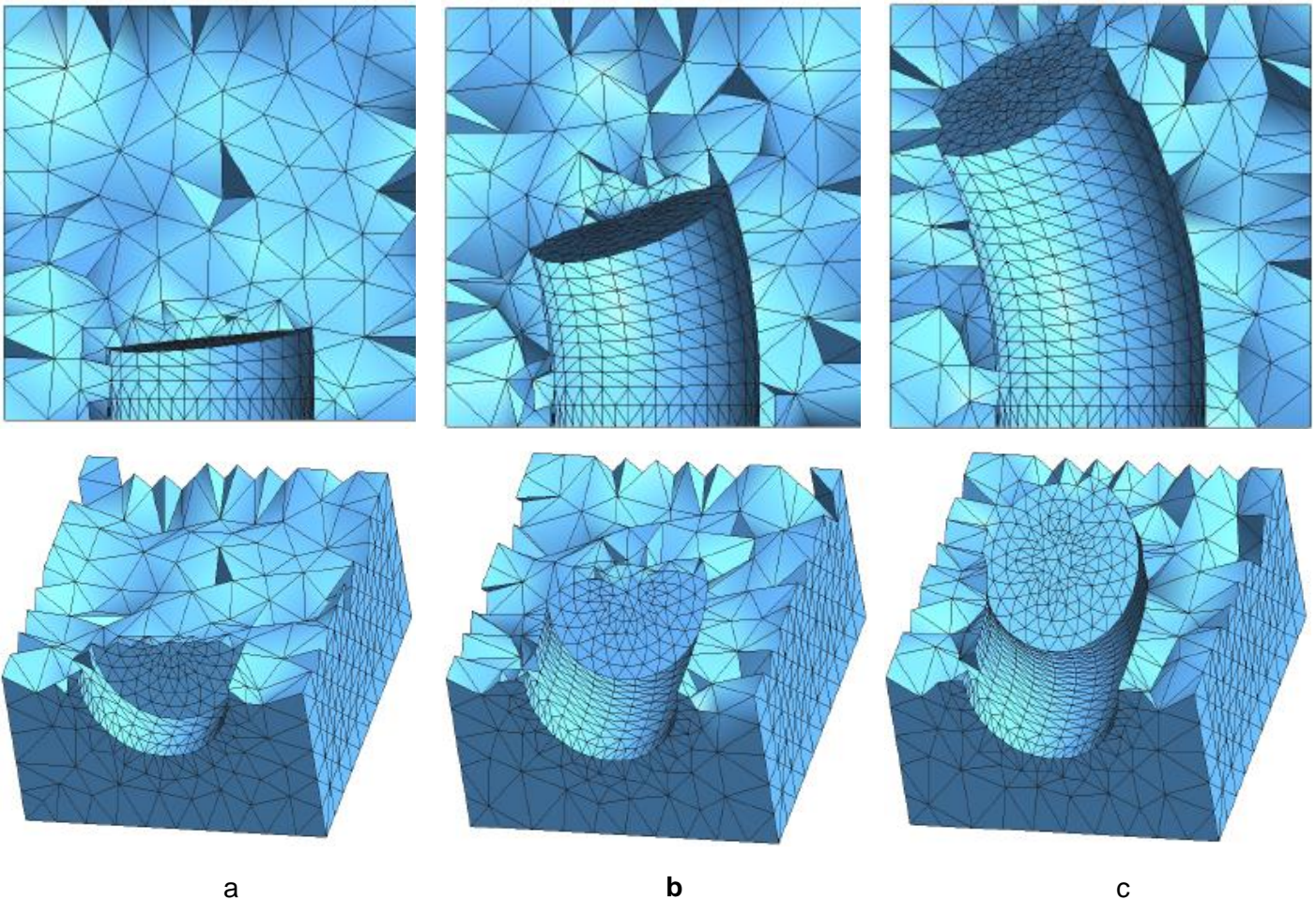
Εικόνα 3-5: Παρουσίαση της εξέλιξης της διαδικασίας εκσκαφής σε διατομή κατά το επίπεδο x-z , για το α) 4<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, β) 10<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, γ) 16<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα [2]

Για τη γεωμετρία του δεύτερου συστήματος, η διάμετρος της σήραγγας είναι 9,4m και το ύψος των υπερκειμένων 14m. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε μοντέλου εδάφους το Drucker-Prager, στο Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες τη επένδυσης, του μηχανήματος και του εδάφους και στην εικόνα Εικόνα 3-6 η διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας.

Πίνακας 3-1: Μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών υλικών που ορίστηκαν στο προσομοίωμα [2]

Περιγραφή αντικειμένου προσομοίωσης	$\gamma$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\varphi$ (°)	c (MPa)	E (MPa)	$\nu$
Επένδυση	25	-	-	30000	0,2
Ασπίδα μηχανήματος	76,2	-	-	210000	0,27
Έδαφικός σχηματισμός	28	29	0,11	2100	0,28





Εικόνα 3-6: Παρουσίαση της εξέλιξης της διαδικασίας εκσκαφής σε διατομή κατά το επίπεδο x-z , για το α) 4<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, β) 10<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα, γ)16<sup>ο</sup> υπολογιστικό βήμα [2]

### 3.3 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Rafik Demagh, Fabrice Emeriault και Farid Hammoud

Στη συγκεκριμένη έρευνα δημιουργείται ένα τριδιάστατο προσομοίωμα διάνοιξης σήραγγας με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής. Πρόκειται για ένα αριθμητικό προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την μελέτη διάνοιξης του υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου, της δεύτερης γραμμής στη περιοχή της Τουλούζ. Στη περιοχή εντοπίστηκαν υπερστεροποιημένοι εδαφικοί σχηματισμού με τιμή ουδέτερου συντελεστή ωθήσεων  $K_0 = 1,7$ . Η προσομοίωση συντελέστηκε με βάση των επιτόπου μετρήσεων στη περιοχή Castera, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Τα δεδομένα των μετρήσεων περιελάμβαναν τις επιφανειακές εδαφικές μετακινήσεις και τις μετακινήσεις στον όγκο της εδαφικής μάζας.

#### 3.3.1 Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος μελέτης

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής τύπου EPB. Η ασπίδα είχε διάμετρο  $D=7,7m$ , παρουσίαζε κωνικότητα ίση με 25mm και το μήκος του μηχανήματος ήταν  $L=8,4m$ .

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

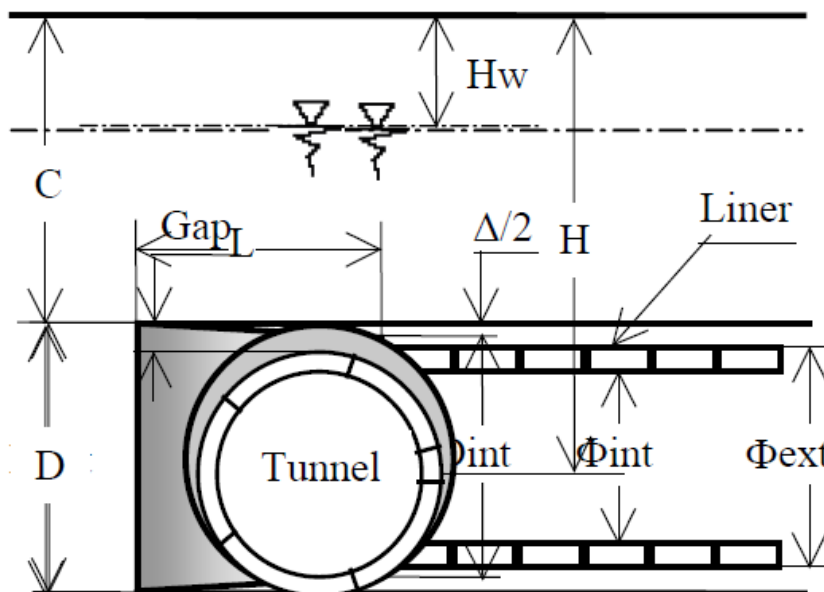
Από τα όργανα μέτρησης που είχαν τοποθετηθεί στη περιοχή, εντοπίστηκαν υπερστερεοποιημένοι αργιλοκοί σχηματισμοί μικρής διαπερατότητας, ίση με  $10^{-8} - 10^{-9}$  m/s και αστράγγιστης διαμηκτικής αντοχής ίση με  $c_u = 300$  kPa. Ο μολασσικός σχηματισμός, ιδιαίτερος στη περιοχή της Τουλούζ χαρακτηρίζεται για τα πρώτα 10m με Young μέτρο ίσο με 165MPa, το οποίο μειώνεται ακολουθώντας την γραμμική σχέση:

$$E(z) = E_0 + z * \Delta E \quad \text{όπου } E_0 = 66.1 \text{ MPa και } \Delta E = 9.9 \text{ MN/m}^2/\text{m}$$

Στο σημείο όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα η βάση της σήραγγας βρίσκεται σε βάθος 16,5m και η στέψη σε βάθος 12,7m.

Σχετικά με την επένδυση που κατασκευάστηκε, τα δακτυλία, αποτελούνταν από έξι στοιχεία (συμπεριλαμβανομένου και του στοιχείου κλειδί) με πάχος 35cm και πλάτος 1,40m. Σημειώνεται ότι το βήμα προχώρησης του μηχανήματος προσδιορίστηκε ίσο με 1,33m/h, χρονικό διάστημα που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός δακτυλίου επένδυσης.

Στη Εικόνα 3-7 παρατίθενται σχηματικά η γεωμετρία της θέσης της τομής και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τα στοιχεία γεωμετρίας του μηχανήματος.



Εικόνα 3-7: Γεωμετρία της εκσκαφής, της ασπίδας και της επένδυσης της σήραγγας [17]

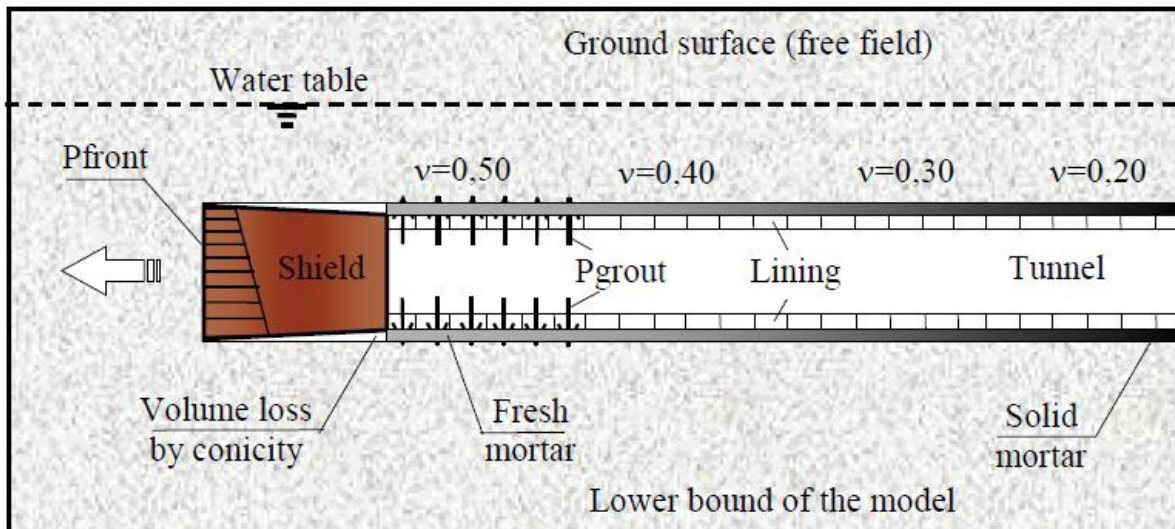
#### 3.3.2 Αριθμητική Προσομοίωση

Η προσομοίωση υλοποιείται σε χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FLAC3D. Η προσομοίωση πραγματοποιείται σε φάσεις με σκοπό να επιτευχθεί ακρίβεια στην περιγραφή των λειτουργιών του μηχανήματος. Συγκεκριμένα το πλέγμα μέσα στο οποίο σχεδιάστηκε το μοντέλο συνθέτεται από 75000 κόμβους, που σχημάτιζαν οκτακομβικά στοιχεία. Στα όρια του μοντέλου δεν ήταν

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων

επιτρεπτές μετακινήσεις κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση στη κίνηση του μηχανήματος. Ενώ στην διεύθυνση κατά τη φορά κίνησης του μηχανήματος το μήκος του πλέγματος είχε σχέση stationary section. Το προσομοίωμα παρέχει τη δυνατότητα λήψης των αποτελεσμάτων συμμετρικά κατά το ήμισυ με τον κατακόρυφο άξονα και η διαδικασία της ανάλυσης βασίστηκε στο προτεινόμενο ελαστοπλαστικό καταστατικό Mohr-Coulomb.

Η κωνική, απόλυτα άκαμτη ασπίδα του μηχανήματος προσομοιώθηκε με λεπτά ογκομετρικά στοιχεία που τοποθετήθηκαν στην εδαφική μάζα, όπου η αρχική εντατική κατάσταση των τάσεων αποδίδεται με έναν οριζόντιο συντελεστή ωθήσεων  $K_0$ , με χρήση της μεθόδου fixed center.

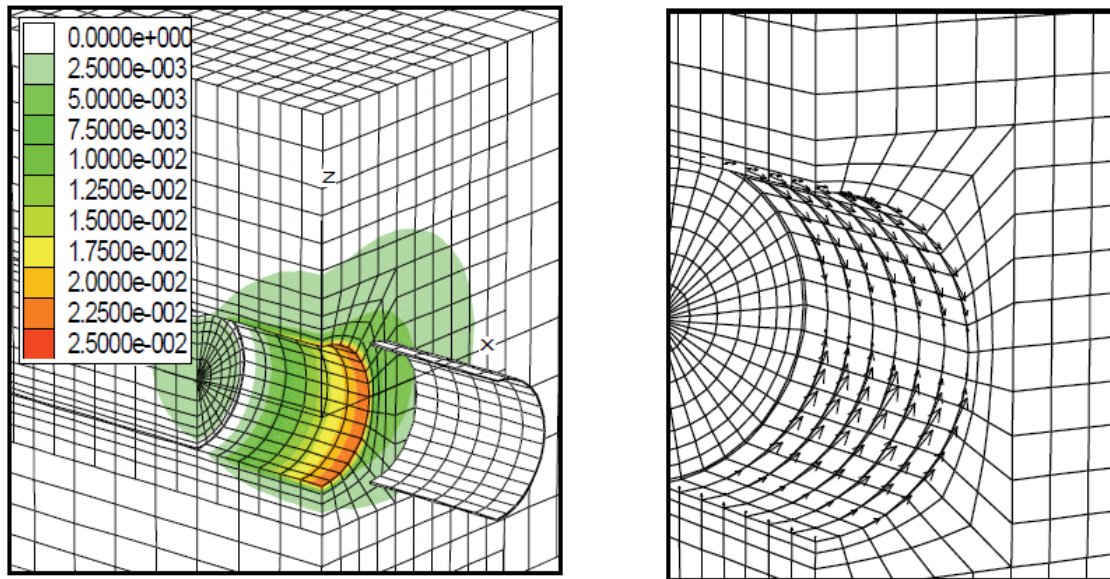


Εικόνα 3-8: Σταδιακή προσομοίωση της εκσκαφής με συμμετοχή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής [17]

Η προσομοίωση της εκσκαφής πραγματοποιείται με την απενεργοποίηση soil disk elements. Η σταθερότητα του μετώπου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πίεσης με κλίση  $22\text{KN/m}^2/\text{m}$  σε σχέση με το βάθος και είναι ίση με το ειδικό βάρος του εδαφικού σχηματισμού η οποία είναι ίση με  $P_{\text{front}} = 0.6 \sigma_{Vo}^{\text{crown}}$ .

Η εκσκαφή προσομοιώνεται με την αφαίρεση εφαπτομενικών τάσεων με αποτέλεσμα η απώλεια όγκου να προκαλεί μετακινήσεις μεγάλης τάσεως.





Εικόνα 3-9: Σταδιακή προσομοίωση της εκσκαφής με συμμετοχή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής [17]

Η διεπιφάνεια μεταξύ της ασπίδας και του μηχανήματος έχει ως σκοπό να περιορίσει τις ακτινικές παραμορφώσεις, επιτρέποντας παράλληλα την επαπτομενική παραμόρφωση, και ενεργοποιείται μόλις η ασπίδα έρθει σε επαφή με το περιβάλλον γεωυλικό. Η απώλεια του εδαφικού όγκου μερικώς ισοσταθμίζεται με την πλήρωση του ενέματος στο μπροστινό τμήμα της ασπίδας. Η προσομοίωση του ενέματος (grouts) επιτυγχάνεται με δύο διαφορετικές τεχνικές:

- Με εφαρμογή πίεσης σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο πίσω από την ασπίδα
- Με διόρθωση της κωνικότητας του μηχανήματος, με στόχο να αναπτύσσονται κατακόρυφες μετατοπίσεις, μέθοδος γνωστή με την επωνυμία back-analysis on surface and/or tunnel crown vertical displacement . Από τις δύο μεθόδους η δεύτερη είναι και αυτή που προσομοιώνει καλύτερα το μοντέλο.

Η προσομοίωση της επένδυσης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με στοιχεία κελύφους είτε με ογκομετρικά στοιχεία. Η υπερεκσκαφή είναι ίση με 20cm και πληρώνεται με ένεμα που ελέγχεται ως προς τον όγκο του και την παρεχόμενη πίεση. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι η πίεση που μεταφέρεται στο έδαφος είναι μικρότερη από τη μέση πίεση που μετράται στα σημεία εξόδου του ενέματος. Αυτή η διαφορά είναι αποτέλεσμα της τριβής καθώς το ένεμα ρέει και εισχωρεί στο περιβάλλον έδαφος. Με αυτό τον τρόπο εξετάζονται οι δύο διαφορετικές φάσεις του ενέματος (υγρή φάση και στερεή φάση), με τη παρεμβολή ενός μεταβατικού σταδίου:

- Όταν το ένεμα βρίσκεται σε ρευστή μορφή, είναι ασυμπίεστο και ο σκοπός χρήσης του είναι η πλήρωση των κενών του εδάφους και τη μεταφορά της πίεσης σε αυτό. Η διάρκεια αυτής της φάσης προσεγγίζεται σε τέσσερις ώρες και όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, καθώ η τοποθέτηση κάθε δακτυλίου απαιτεί 1,33h/m, σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιείται η τοποθέτηση 4

δακτυλιδίων της επένδυσης. Η υγρή μορφή του ενέματος προσομοιώνεται με την εφαρμογή της πίεσης και της απενεργοποίησης των ογκομετρικών στοιχείων. Στη φάση αυτή το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι υψηλό σε αντίθεση με το χαμηλό μέτρο διάτμησης, όπου η σχέση μεταξύ τους είναι  $10^2 \leq K/G \leq 10^3$ .

- Ακολουθεί η μεταβατική φάση της στερεοποίησης του ενέματος (drying grout), η διάρκεια της οποίας εξαρτάται αποκλειστικά από το χρησιμοποιούμενο τύπο του ενέματος. Αντίστοιχα η προσομοίωση της δεύτερης φάσης γίνεται με την απενεργοποίηση της εφαρμοζόμενης πίεσης και της ταυτόχρονης σταδιακής μείωσης του λόγου Poisson.
- Τέλος στη στερεή φάση το ένεμα είναι απόλυτα άκαμπτο και μεταφέρει την πίεση του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού στους δακτύλιους της μόνιμης επένδυσης. Σε αυτή τη φάση σε αντίθεση με την φάση όπου το ένεμα βρίσκεται σε υγρή μορφή ο λόγος του ελαστικού μέτρου προς το μέτρο διάτμησης λαμβάνεται περίπου ίσο με τη μονάδα  $K/G = 1$

### 3.4 Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατά Kai Zhao, Michele Janutolo, Giovanni Barla

#### 3.4.1 Μοντέλο αλληλεπίδρασης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με τη περιβάλλουσα βραχόμαζα

Στη έρευνα για την αλληλεπίδραση μεταξύ του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής και του εδάφους που το περιβάλλει έχουν προταθεί δυο μέθοδοι:

- Τα αξονοσυμμετρικά μοντέλα, με το ευρύτατα διαδεδομένο μοντέλο κατά Ramoni και Anagnostou(2006,2010,2011) για εδάφη που παρουσιάζουν έντονες συγκλίσεις
- Και τα τριδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης

Για την διάθρωση της συγκεκριμένης μελέτης θεωρήθηκε:

Για την επένδυση εσωτερική διάμετρος της σήραγγας ίση με 8,1m , λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη διατομή για σιδηροδρομικές σήραγγες, εξωτερική διάμετρος θεωρήθηκε ίση με 9,0m, πάχος στοιχείων επένδυσης 450mm και μέτρο Young 30-36 GPa. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τα στοιχεία της επένδυσης ήταν κατηγορίας C20 ( $f_{ck} = 20$  MPa) με C45 ( $f_{ck} = 45$  MPa) και το μέτρο ελαστικότητας (όπως ορίζεται στον Ευρωκώδικα 2) κυμαίνεται μεταξύ 30-36 GPa. Σημειώνεται, ότι υψηλότερες κατηγορίες σκυροδέματος επιλέγονται για εδάφη που παρουσιάζουν έντονες συγκλίσεις.

Σχετικά με τα στοιχεία που ορίστηκαν για τη κοπτική κεφαλή, θεωρήθηκε διάμετρος εκσκαφής 9,3m με υπερεκσκαφή 140mm, συνολική διάμετρος εκσκαφής 9,440m. Η ελάχιστη ώθηση της κοπτικής κεφαλής υπολογίζεται ίση με 17MN ώστε να εξασφαλίζεται η διεύθυνση στη βραχόμαζα. Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με 64 κοπτικούς δίσκους, διαμέτρου 17 ίντσες και δυνατότητα ατομικού φορτίου ίσο με 267KN. Πέντε επιπρόσθετοι κοπτικοί δίσκοι χρησιμοποιούνται για μέγιστη υπερδιάτρηση 70mm.

Η κύρια ώθηση του μηχανήματος για τη διείδυση στη βραχώμαζα παρέχεται μέσω των γάντζους-πέδιλα (grippers). Τα grippers έχουν διαστάσεις μήκους 1-2m και ύψος 6,6m. Σε γενικές γραμμές χρησιμοποιούνται 2 περιοχές, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαφή με το μέτωπο εκσκαφής και η διατήρηση πίεσης μεγέθους 4MPa.

Η ασπίδα που χρησιμοποιείται είναι τηλεσκοπικού τύπου με μπροστά ασπίδα διαμέτρου 9,230m, εξωτερική διάμετρος τηλεσκοπικής ασπίδας 9,230m και εσωτερική 9,170m. Η μπροστική ασπίδα έχει μήκος 5m και το μήκος της εσωτερικής τηλεσκοπικής ασπίδας+της ουράς της ασπίδας+τα πέδιλα είναι 6m.

### 3.4.2 Προσομοίωση της βραχώμαζας

Αξιοποιώντας τη συμμετρία της γεωμετρίας του μοντέλου στο κατακόρυφο άξονα, η ανάλυση πραγματοποιείται με τη μισή γεωμετρία του μοντέλου. Η χρήση ενός κυλινδρικού μοντέλου αποσκοπεί στη μείωση:

- Του συνολικού αριθμού των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν
- Στη διασφάλιση ότι η διακριτοποίηση συντελείται σε ένα μόνο βήμα
- Και τέλος στη βελτίωση της διακριτοποίησης του μοντέλου, ώστε οι εξωτερικές γωνίες των στοιχείων να προσεγγίζουν τις  $90^\circ$ . Για τη σωστότερη απόδοση της γεωμετρίας επιλέχθηκαν εξαεδρικά στοιχεία.

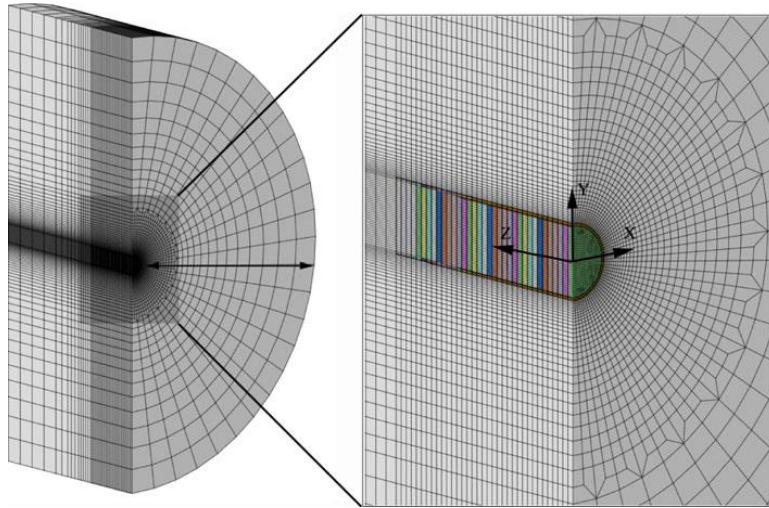
Με τη χρήση του κανόνα rule-of-thumb η διακριτοποίηση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ορίζεται με ένα δείκτη διαστολής ίσο με  $10 \cdot D$  της σήραγγας. (Eberhardt 2001; Graziani et al. 2007). Ο δείκτης, σε βραχώμαζες καλής ποιότητας μπορεί να μειωθεί, λαμβάνοντας ως μια ικανοποιητική τιμή τη  $6 \cdot D$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος της σήραγγας. Σε αντίθεση, με βραχώμαζες που παρουσιάζουν έντονες συγκλίσεις ο δείκτης αυτός αυξάνεται σε  $15 \cdot D$ .

Κατά την κατά μήκος διεύθυνση, σύμφωνα με τους Graziani et al. (2007), προτείνεται για μαλακούς βράχους η τοποθέτηση των ορίων σε απόσταση  $20 \cdot D$ , ενώ για σκληρούς βράχους, σύμφωνα με τον Eberhardt (2001), προτείνεται απόσταση ορίων μήκους  $10 \cdot D$ . Με την επιλογή των παραπάνω ορίων γίνεται προσπάθεια αποφυγής επίδρασης των συνοριακών συνθηκών στη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων.

Η διακριτοποίηση του πλέγματος επιλέγεται να είναι ίση με το βήμα εκσκαφής, δηλαδή ίση με 1m μέχρι τη τελική θέση του μετώπου της εκσκαφής και στη συνέχεια αυξάνεται περιοδικά. Στη συγκεκριμένη μελέτη, επιλέχθηκε μια πυκνή δομή πλέγματος στη περιοχή γύρω από τη σήραγγα, με στοιχεία μεγέθους  $30\text{cm} \cdot 30\text{cm}$ , η οποία αραιώνει με την απομάκρυνση από αυτήν. Οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν στον τριδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης:

- Στο εξωτερικό όριο της σήραγγας επιτρέπονται οι μετακινήσεις κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση

- Στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας που έχει οριστεί επιτρέπονται οι μετακινήσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση
- Στο μέτωπο και στο πίσω όριο επιτρέπονται οι μετακινήσεις κατά τον άξονα z.



Εικόνα 3-10: Μοντέλο διακριτοποίησης, με εμφανή το προσδιορισμό της διεύθυνσης των αξόνων [10]

### 3.4.3 Προσομοίωση των στοιχείων που συνθέτουν το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής

Η σύνθεση των στοιχείων του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής πραγματοποιείται σύμφωνα με γραμμικά ελαστικές ιδιότητες, όπου περιλαμβάνεται και το βάρος των στοιχείων.

Αρχικά, η ασπίδα του μηχανήματος, προσομοιώνεται με επίπεδα στοιχεία μέχρι το όριο εκσκαφής τα οποία χαρακτηρίζονται από την ακαμψία του χάλυβα. Ακολουθεί, η κοπτική κεφαλή, η οποία ομοίως προσομοιώνεται με επίπεδα στοιχεία με ιδιότητες του χάλυβα. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία της κοπτικής κεφαλής τοποθετούνται στο μέτωπο όπου εφαρμόζεται η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης. Η προσομοίωση της επιχωμάτωσης της εκσκαφής (back-filling) πραγματοποιείται με στοιχεία εδάφους, όπου το υλικό με το οποίο πληρώνεται το κενό μπορεί να έχει ιδιότητες χαλικιού ή σκυροδέματος. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της επένδυσης της σήραγγας γίνεται με επίπεδα στοιχεία που έχουν ιδιότητες σκυροδέματος, χωρίς ενδιάμεσους αρμούς. Ακολουθεί, η προσομοίωση των πεδίων του μηχανήματος με επίπεδα στοιχεία στα όρια της εκσκαφής, τα οποία έχουν τις ιδιότητες σκυροδέματος. Η τοποθέτηση τους πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής και εφαρμόζεται συγκεκριμένη πίεση για την προώθηση του μηχανήματος. Τέλος, προσομοιώνεται ο γρύλος πίεσης (jack pressure), ο οποίος ασκείται στον τελευταίο δακτύλιο της επένδυσης για βραχόμαζες καλής ποιότητας, σύμφωνα με Castellanza et al. 2008, ενώ σε βραχόμαζες με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά εφαρμόζεται στα πέδιλα του μηχανήματος.

### 3.4.4 Προσομοίωση της διαδικασίας προώθησης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής

Η διαδικασία προώθησης του μηχανήματος αποτυπώνεται βήμα-βήμα και χαρακτηρίζεται από το μήκος εκσκαφής και από τα υπολογιστικά βήματα που καθορίζονται. Με δεδομένο ότι το μήκος εκσκαφής λαμβάνεται ίσο με το βήμα προχώρησης, δηλαδή ίσο με 1m, προσομοιώνεται:

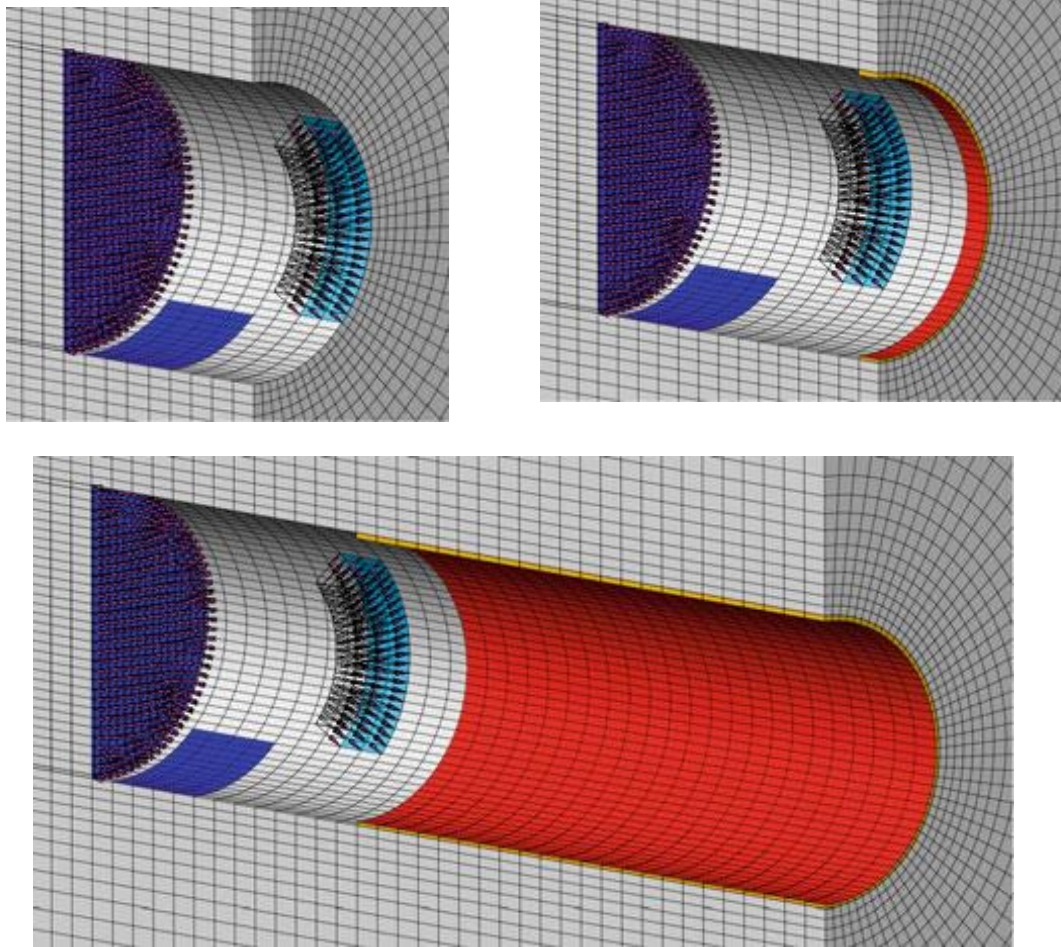
- Μια αντιπροσωπευτική αναπαραγωγή της συνεχόμενης προώθησης του μηχανήματος, σύμφωνα με (Vlachopoulos and Diederichs 2009)
- Η βελτίωση της σύγκλισης μεταξύ μιας πλαστικής και μιας ελαστικής ανάλυσης
- Η βελτίωση του απαιτούμενου χρόνου για την ολοκλήρωση της ανάλυσης ενός τριδιάστατου αριθμητικού μοντέλου.

Η κατασκευή και ο αριθμός των υπολογιστικών βημάτων εξαρτώνται από τη γεωμετρία που έχει η εκσκαφή, το τύπο του μηχανήματος που χρησιμοποιείται και τη ποιότητα της βραχόμαζας.

Σε βραχώδεις σχηματισμούς με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και μετρίως ποιότητας βραχόμαζες, η προώθηση του μηχανήματος γίνεται με τη χρήση των πεδίων του (grippers). Η διαδικασία προώθησης του μηχανήματος περιγράφεται από τα ακόλουθα υπολογιστικά βήματα:

Αρχικά, στο πρώτο υπολογιστικό βήμα προσδιορίζονται οι αρχικές τάσεις του εδάφους, στο δεύτερο εισάγεται το μηχανήμα TBM με την ενεργοποίηση των στοιχείων που έχουν οριστεί για την κοπτική κεφαλή και ταυτόχρονα πραγματοποιείται η εκσκαφή της πρώτης φέτας μήκους 1m. Στο τρίτο βήμα ενεργοποιείται η πρώτη φέτα της ασπίδας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το 10 βήμα όπου ενεργοποιούνται για πρώτη φορά τα στοιχεία που έχουν οριστεί για τα πέδιλα του μηχανήματος (grippers) και εφαρμόζεται η πίεση για την ώθηση. Η θέση των πεδίων αλλάζει για κάθε 2m με σκοπό να προσομοιώνεται ο επαναπροσδιορισμός της θέσης των πεδίων (re-gripping) με μία απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής ίση με 6-7m. Η διαδικασία επαναπροσδιορισμού των πεδίων δεν αποτελεί ξεχωριστό υπολογιστικό βήμα αλλά είναι μέρος της συνολικής εκσκαφής. Ακολουθεί το 15<sup>ο</sup> βήμα όπου ενεργοποιούνται τα στοιχεία της επένδυσης της σήραγγας καθώς και η επιχωμάτωση της εκσκαφής. Η παραπάνω διαδικασία έχει επαναληπτικό χαρακτήρα μέχρι να επιτευχθεί σταθερότητα στις εδαφικές συνθήκες.

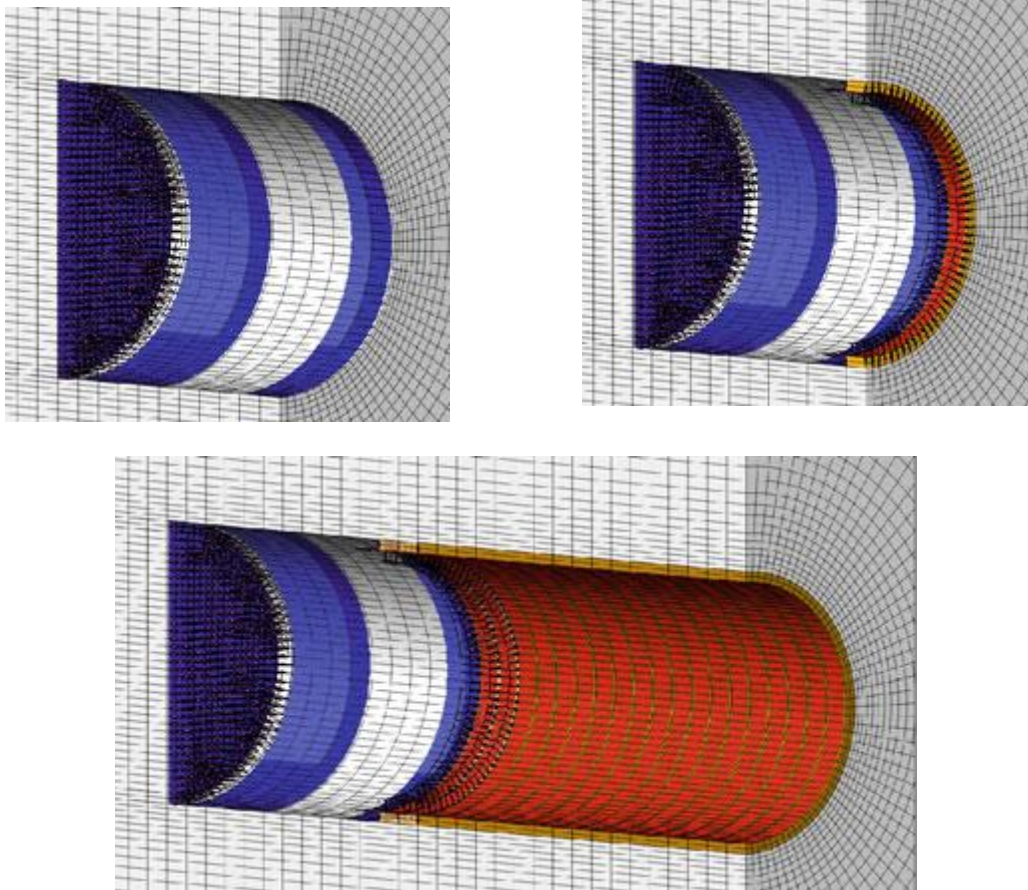




Εικόνα 3-11: Διαδικασία προσομοίωσης σε βραχώμαζες καλής ποιότητας [10]

Σε βραχώδεις σχηματισμούς με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά, η λειτουργία του μηχανήματος είναι η single shield mode. Όπου η δύναμη ώθησης ασκείται μέσω των υδραυλικών εμβόλων στα στοιχεία της επένδυσης, αυτό αποτελεί και σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με τη διάρθρωση του μοντέλου για ισχυρούς βραχώδεις σχηματισμούς. Η διαδικασία της ανάλυσης οργανώνεται όμοια με τη διαδικασία για της καλής ποιότητας βραχώμαζες για το πρώτο ως το τρίτο υπολογιστικό βήμα. Διαφορά υπάρχει στον ορισμό του 13<sup>ου</sup> βήματος όπου ενεργοποιούνται τα στοιχεία της επένδυσης, η υδραυλική πίεση που ασκείται καθώς και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (grouting). Σημειώνεται ότι η διαδικασία της εκσκαφής και η τοποθέτηση των δακτυλίων της επένδυσης πραγματοποιείται στο ίδιο βήμα. Στο 13<sup>ο</sup> βήμα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι σε νωπή μορφή μέχρι το 15<sup>ο</sup> βήμα όπου οι ιδιοτητές του αλλάζουν σε αυτές του σκληρυμένου σκυροδέματος. Και τέλος, η εκτέλεση των αναλύσεων συνεχίζουν μέχρι την επίτευξη σταθερών συνθηκών.





Εικόνα 3-12: Διαδικασία προσομοίωσης σε βραχώμαζες μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών [10]

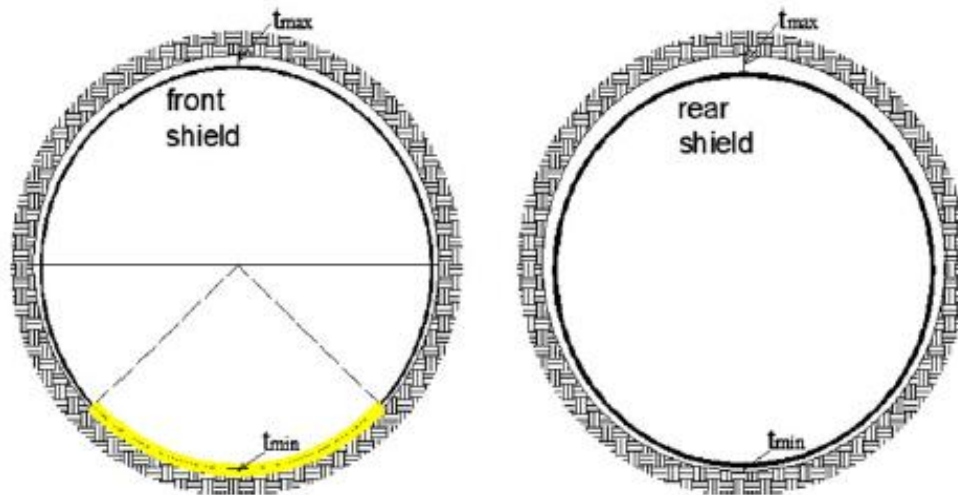
### 3.4.5 Προσομοίωση της αλληλεπίδραση της ασπίδας με τη βραχώμαζα

Προκειμένου να υλοποιηθεί η προσομοίωση των ασπίδα και περιβάλλουσα βραχώμαζα, απαιτείται να ληφθεί υπόψιν η γεωμετρία της εκσκαφής, ώστε να ελέγχονται οι παραμορφώσεις του μετώπου και το κενό λόγω υπερεκσκαφής. Σε μηχανήμα διπλής ασπίδας το κενό λόγω υπερεκσκαφής υπολογίζεται:

$$\Delta g = \begin{cases} \Delta D \text{ εμπρόςθια ασπίθα} \\ \Delta D + 2 * \Delta r \text{ οπίσθια ασπίδα} \end{cases}, \text{ όπου } \Delta D = \text{κενό υπερεκσκαφής}$$

Για τον υπολογισμό του κενού γίνεται ο διαχωρισμός για σκληρά και ασθενή πετρώματα:

- Για τα σκληρά πετρώματα, δεν υπάρχει η δυνατότητα πλήρους πλήρωσης του κενού. Σε αυτές τις κατηγορίες των πετρωμάτων οι συγκλίσεις είναι μικρές στις ελαστικές ζώνες και η αποτυχία οφείλεται σε θρυμματισμό. Πρακτικά γίνεται δεκτό ότι το κενό παραμένει ανοιχτό σε αυτές τις ζώνες διότι λόγω της επαναληπτικής μετακίνησης του μηχανήματος (re-gripping) το μπροστινό μέρος της ασπίδας σαρώνει το μέτωπο και μετατοπίζει το θραυσμένο υλικό προς τα πίσω, με αποτέλεσμα να μην παρέχεται μια επαρκή υποστήριξη στην περιοχή. Παρόλα αυτά, λαμβάνεται ότι το κενό είναι ελάχιστο έως μηδενικό στο κατώτερο τμήμα της περιφέρειας του μηχανήματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-13.



Εικόνα 3-13: Αλληλεπίδραση της ασπίδας με τη περιβάλλουσα βραχόμαζα [10]

- Στη περίπτωση των ασθενών πετρωμάτων συντελούνται μεγάλες συγκλίσεις. Σε αυτή τη περίπτωση η πλήρωση του κενού μπορεί να γίνει στο μπροστινό τμήμα της ασπίδας, στο οπίσθιο τμήμα αυτής, καθώς και σε όλο της το μήκος. Η παρακολούθηση των συγκλίσεων πραγματοποιείται τόσο στη στέψη της σήραγγας όσο και στο κατώτερο τμήμα αυτής. Με δεδομένη την κατάσταση των τάσεων και της μεγάλης σύγκλισης, εξετάζεται η πιθανότητα ανύψωσης του μηχανήματος, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ελεύθερης κενό στο στέμμα.

Για το μπροστινό τμήμα του μηχανήματος, το κενό κλείνει όταν το άθροισμα της σύγκλισης που εμφανίζεται στη στέψη ( $u_{crown}$ ) και της σύγκλισης που εμφανίζεται στο κατώτερο τμήμα ( $u_{invert}$ ) είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος του διάκενου ( $\Delta D$ ):

$$u_{crown} + u_{invert} \geq \Delta D$$

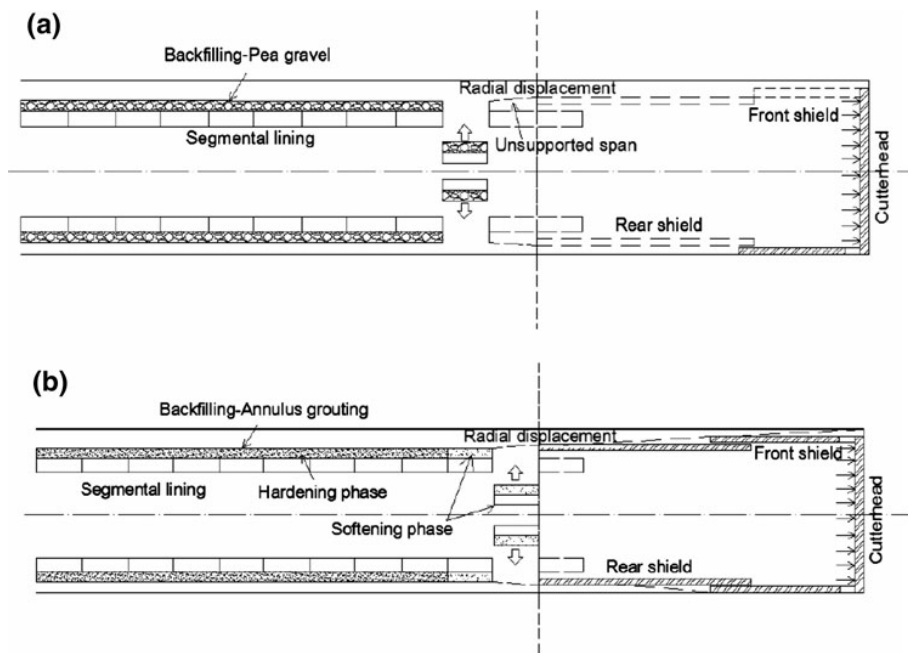
### 3.4.6 Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της κοπτικής κεφαλής με τη βραχόμαζα

Η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος προσομοιώνεται με επίπεδα στοιχεία που έχουν ιδιότητες μετάλλου και διαχωρίζεται από την υπόλοιπη ασπίδα με στόχο την δυνατότητα περιστροφής της. Η συμμετοχή της στην διαδικασία εκσκαφής δηλώνεται μέσω των κοπτικών εργαλείων, καθώς το υπόλοιπο τμήμα της δεν έρχεται σε επαφή με το μέτωπο. Στη διάρθρωση του μοντέλου τα στοιχεία προσομοίωσης της κοπτικής κεφαλής έχουν πάχος 3cm και για απλούστευση του μοντέλου γίνεται η παραδοχή ότι είναι σε επαφή με το μέτωπο. Η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο μέσω των κοπτικών εργαλείων παρουσιάζεται ως ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Στη διακριτοποίηση με τη δημιουργία ενός κενού πάχους 1m πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της κοπτικής κεφαλής από την ασπίδα.

### 3.4.7 Προσομοίωση της αλληλεπίδραση της επένδυσης της σήραγγας με τη βραχώμαζα

Στην περίπτωση βραχώμαζας με υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά το κενό που δημιουργείται μεταξύ της επένδυσης και του περιβάλλοντος εδάφους πληρώνεται με υγρό ένεμα, όπου αρχικά εγχύεται γαρμπίλι και στη συνέχεια σκυρόδεμα, και τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από την ασπίδα. Σε αυτή τη περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος προσεγγίζεται σε 1GPa.

Στην περίπτωση ωστόσο ασθενούς βραχώμαζας, το ένεμα εκγύεται με ταχύτατο ρυθμό στην ουρά του μηχανήματος καθώς προωθείται. Σε αυτή τη περίπτωση η προσομοίωση της ενεμάτωσης υλοποιείται σε δύο φάσεις. Στο πρώτο στάδιο, ακριβώς πίσω από την ασπίδα το ένεμα προσομοιώνεται με εδαφικά στοιχεία με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας 0,5GPa, και εφαρμόζεται μέσω πίεσης μεταξύ του ορίου εκσκαφής και της επένδυσης. Το δεύτερο στάδιο είναι η φάση σκλήρυνσης του σκυροδέματος, με μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 1GPa, σε απόσταση 2m από την ασπίδα και ταυτόχρονη απενεργοποίηση της πίεσης που ασκήθηκε στο πρώτο στάδιο.



Εικόνα 3-14: Πλήρωση του ουραίου κενού, α) περίπτωση πλήρωσης με γαρμπίλι, β) περίπτωση πλήρωσης με ένεμα [10]



## 4 Δημιουργία αριθμητικών προσομοιωμάτων με "συμβατική μέθοδο" εκσκαφής

### 4.1 Εισαγωγή

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συσχέτιση παραμέτρων, όπως η ακτινική σύγκλιση και η εξώθηση μετώπου κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αβαθείς σήραγγες που βρίσκονται σε αστικό περιβάλλον με τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή του έργου. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο παραμετρικών αναλύσεων, όπου με τη χρήση του σχεδιαστικού και υπολογιστικού προγράμματος Abaqus δημιουργήθηκαν τριδιάστατα μοντέλα, διαφορετικής γεωμετρίας. Κατά την παραμετρική ανάλυση για δύο διαφορετικής διαμέτρου σήραγγες, διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού και της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής στα μεγέθη της ακτινικής σύγκλισης και της εξώθησης μετώπου.

### 4.2 Αριθμητικές Αναλύσεις

Δημιουργήθηκαν δύο βασικές ομάδες διαφορετικών προσομοιωμάτων, με πρώτη ομάδα τα αριθμητικά προσομοιώματα, όπου η διάμετρος της σήραγγας είναι  $D=6m$  και η δεύτερη ομάδα προσομοιωμάτων με διάμετρο σήραγγας  $D=10m$ .

Στη συνέχεια σε κάθε ομάδα διάμετρος σήραγγας, ορίστηκαν τρεις διαφορετικοί λόγοι ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ( $H/D$ ). Οι αναλογίες ήταν κοινές για τις δύο διαμέτρους σήραγγας και θεωρήθηκαν  $H/D = 1.5$ ,  $H/D = 2.5$ ,  $H/D = 4.0$ .

Στο Πίνακα 4-1, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το παράμετροι της πρώτης σειράς αναλύσεων που πραγματοποιήθηκε, με δύο διαφορετικές διαμέτρου σήραγγες, 3 διαφορετικούς λόγους  $H/D$  για κάθε αριθμητικό προσομοίωμα διαφορετικής διαμέτρου, 3 διαφορετικές τιμές για την εκάστοτε μηχανική παράμετρο και τις 2 τιμές για την πίεση που ασκείται στο μέτωπο της σήραγγας.

Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι μεταβαλλόμενες τιμές του εκάστοτε παραμετρικού μεγέθους

Διάμετρος σήραγγας: D (m)	6.0	10.0		2
Αναλογία υπερκειμένων/δαμέτρου: H/D	1.5	2.5	4.0	3
Συνοχή: c (kPa)	10.0	30.0	60.0	3
Γωνία τριβής: phi (°)	25.0	35.0		2
Πίεση μετώπου: $P_{fs}$ (kPa)	100.0	200.0		2

### 4.3 Γεωμετρική μόρφωση και σχηματισμός καννάβου των αριθμητικών προσομοιωμάτων

Η δημιουργία των τριδιάστατων αριθμητικών προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του λογισμικού Abaqus.

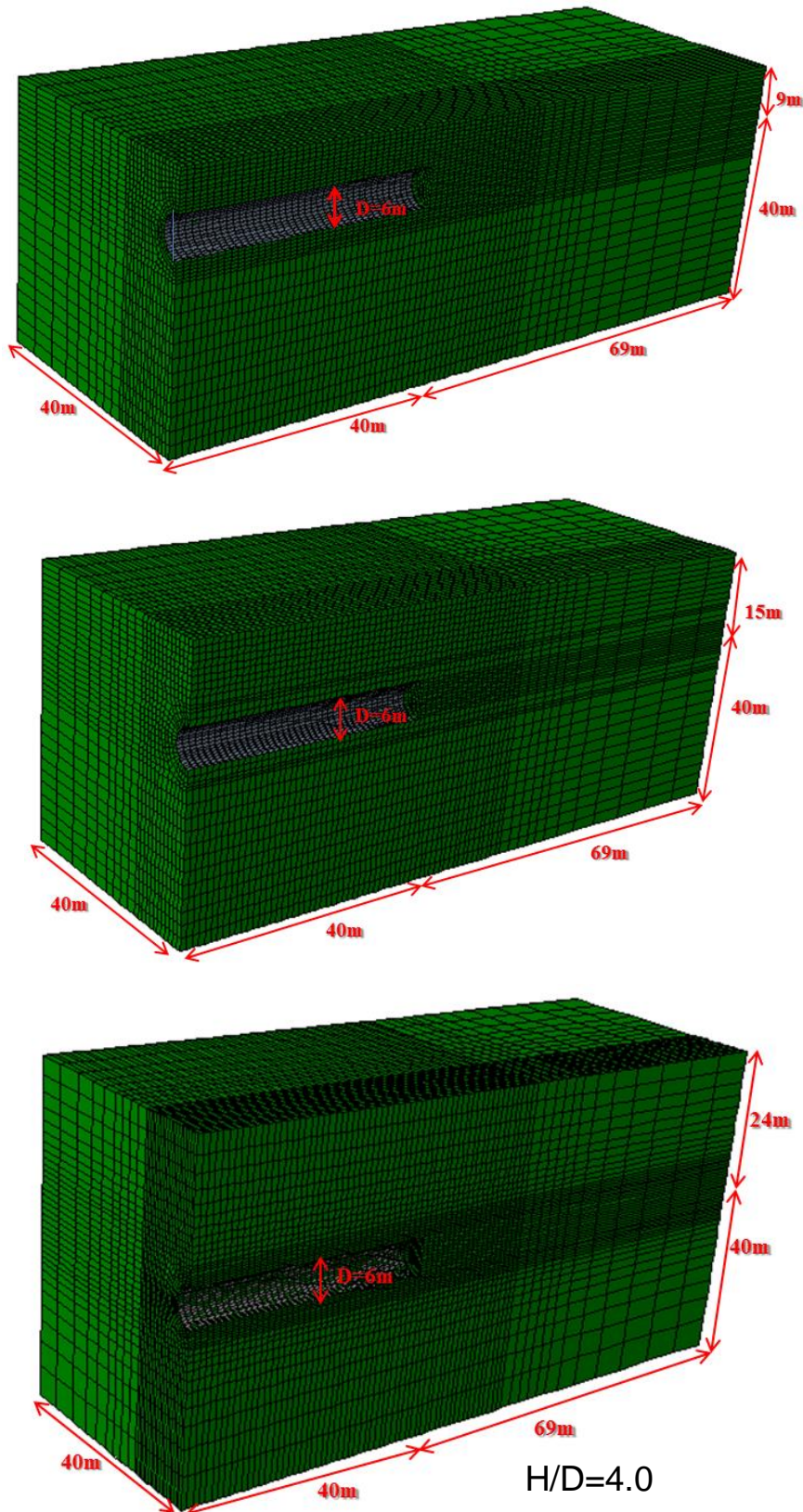
Κατά το σχεδιασμό στο Abaqus σχεδιάστηκε το μισό αριθμητικό προσομοίωμα λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία που παρουσιάζεται ως προς το κατακόρυφο επίπεδο (z-z) που είναι κάθετο στο διαμήκη άξονα της σήραγγας.

Σχετικά με τις διαστάσεις του αριθμητικού προσομοιώματος ως προς τα πλευρικά όρια, η απόσταση του κέντρου της σήραγγας από το κάτω όριο του προσομοιώματος διατηρήθηκε σταθερή στα 40m τόσο για τα προσομοιώματα με διάμετρο σήραγγας  $D=6m$  όσο και για αυτά με διάμετρο σήραγγας  $D=10m$ . Το πλευρικό όριο κατά τον άξονα x-x σχεδιάστηκε σε απόσταση 40m για την ομάδα αριθμητικών προσομοιωμάτων όπου η διάμετρος της σήραγγας είναι  $D=6m$  και για την ομάδα αριθμητικών προσομοιωμάτων με διάμετρο σήραγγας  $D=10m$  υπολογίστηκε σε  $6 \cdot D = 60m$ . Η διάσταση του προσομοιώματος κατά την διεύθυνση εκσκαφής (y-y) ήταν κοινή και για τις δύο διαμέτρους σήραγγες με απόσταση 109m από το σημείο έναρξης εκσκαφής της σήραγγας μέχρι το όριο του προσομοιώματος. Από αυτά τα 109m του αριθμητικού προσομοιώματος τα πρώτα 40m είναι το μήκος διάνοιξης της σήραγγας.

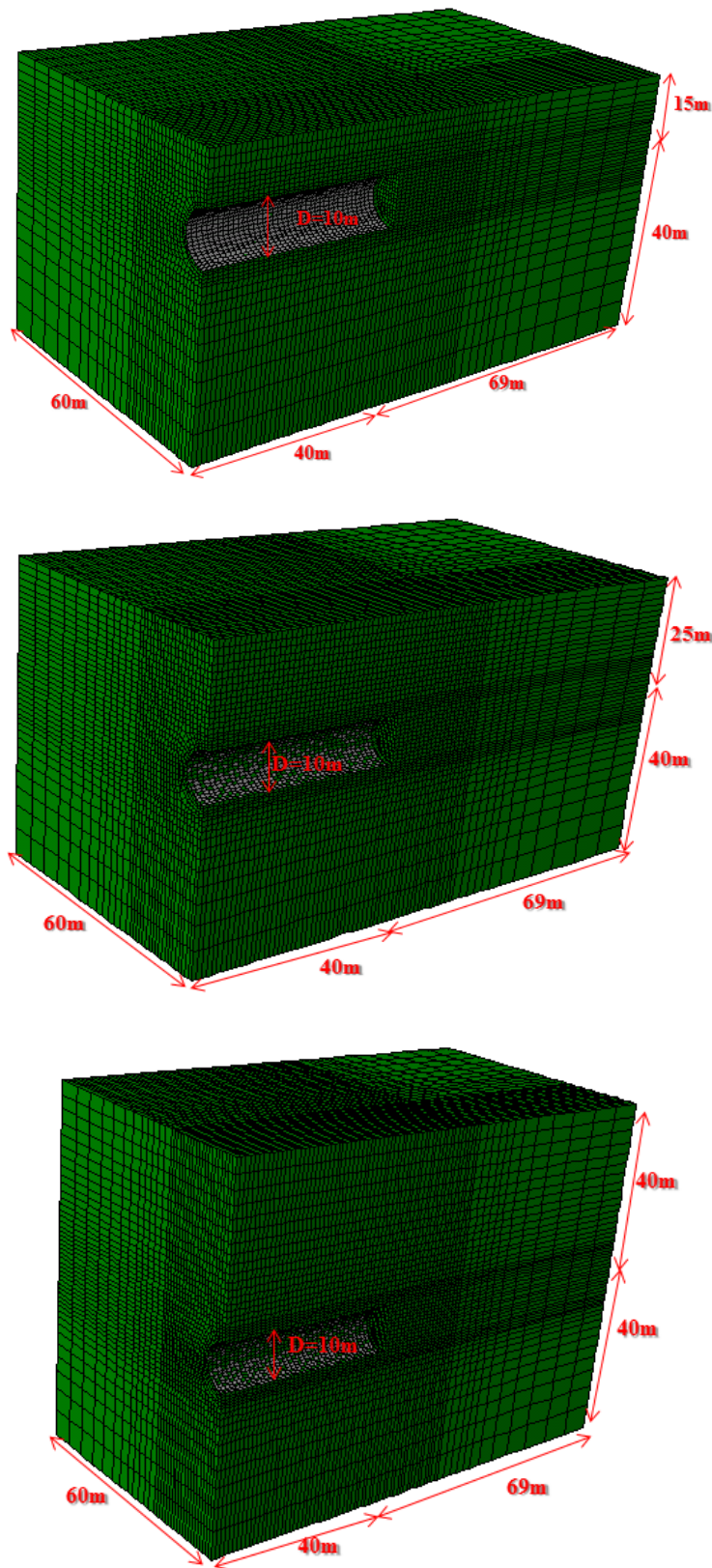
Στις Εικόνα 4-1 και Εικόνα 4-2 απεικονίζονται τα έξι διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν στα οποία εμφανίζονται οι αποστάσεις από τα πλευρικά όρια, το ύψος των υπερκειμένων, η διάσταση της διαμέτρου σήραγγας καθώς και το μήκος διάνοιξης της.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Δημιουργία αριθμητικών προσομοιωμάτων με συμβατική μέθοδο εκσκαφής



Εικόνα 4-1: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου σήραγγας  $D=6m$  με πρώτο το προσομοίωμα με λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D = 1.5$ , δεύτερο το προσομοίωμα με  $H/D = 1.5$ , τρίτο το προσομοίωμα με  $H/D = 4.0$

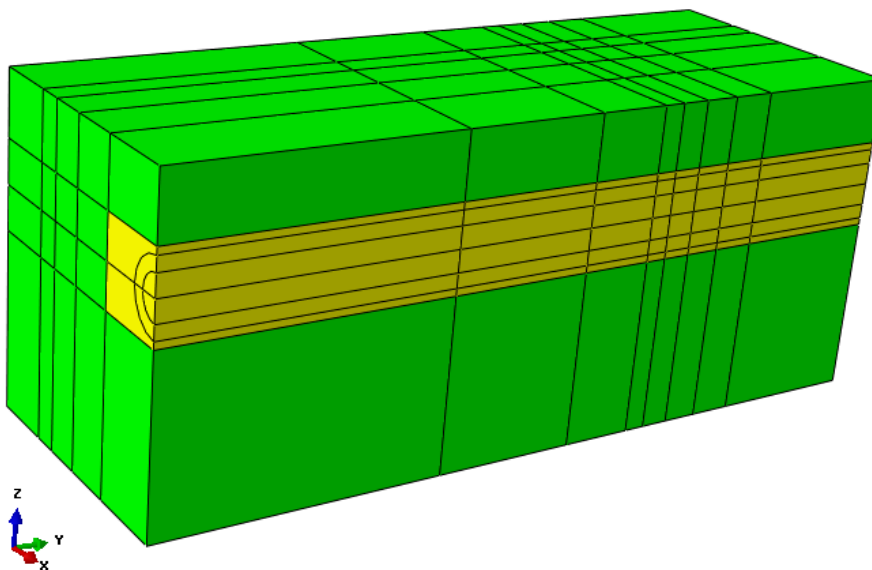


Εικόνα 4-2: Αριθμητικά προσομοιώματα διαμέτρου σήραγγας  $D=10\text{m}$  με πρώτο το προσομοίωμα με λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D = 1.5$ , δεύτερο το προσομοίωμα με  $H/D = 1.5$ , τρίτο το προσομοίωμα με  $H/D = 4.0$

### 4.3.1 Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων των αριθμητικών προσομοιωμάτων

Στη διαδικασία διακριτοποίησης, η προσομοίωση του εδαφικού όγκου έγινε με οκτακομβικά εξαπλευρικά στοιχεία, ενώ για την προσομοίωση των στοιχείων της τελικής επένδυσης της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά στοιχεία κελύφους.

Αρχικά από τις δυνατότητες επιλογής μεθόδου διακριτοποίησης που παρέχει το πρόγραμμα, επιλέχθηκε η εντολή structural για το σύνολο του μοντέλου εκτός από τη περιοχή της σήραγγας όπου επιλέχθηκε η εντολή sweep. Σημειώνεται ότι, στη περιοχή της περιφέρειας της σήραγγας δημιουργήθηκε ένας ομόκεντρος κύκλος προκειμένου να επιτευχθεί απόσταση 2m μεταξύ της περιφέρειας της σήραγγας και της περιφέρειας του ομόκεντρου κύκλου. Ο σκοπός ύπαρξης του ομόκεντρου κύκλου είναι η επίτευξη της καλύτερης διακριτοποίησης στη περιοχή της σήραγγας καθώς και η δυνατότητα ομαλής μετάβασης από μια πυκνή δομή διακριτοποίησης της σήραγγας σε μια πιο αραιή απομακρυνόμενη από αυτή. Στην Εικόνα 4-3 φαίνονται οι περιοχές που ορίστηκαν με τη διαφορετική εντολή διακριτοποίησης καθώς και οι ζώνες διακριτοποίησης.



Εικόνα 4-3: Επιλογή της διαδικασίας διακριτοποίησης, όπου φαίνεται η περιοχή της διάνοιξης, ο βοηθητικός ομόκεντρος κύκλος και οι βοηθητικές ζώνες διακριτοποίησης. Το αριθμητικό προσομοίωμα που απεικονίζεται είναι για διάμετρο σήραγγας  $D=6\text{m}$  και  $H/D=2.5$

Τα στοιχεία της διακριτοποίησης έχουν διαφορετική πυκνότητα κατά τη διεύθυνση y-y και κατά τη διεύθυνση x-x. Κατά τη διεύθυνση x-x τα μήκη των ζωνών μετρώντας την απόσταση από το κέντρο της σήραγγας είναι 12m. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στη ζώνη των 12 m ήταν πάχος 1m, στις ζώνες πάχους 8m και 6m το πάχος των στοιχείων ταυτίζεται με αυτό της ζώνης και τέλος η ζώνη πάχους 20m, διαιρείται σε δύο ίσα τμήματα.

Κατά μήκος της σήραγγας για απόσταση ίση με 40m δηλαδή ίση με την εκσκαφή της σήραγγας, τα στοιχεία του καννάβου κατά τη διακριτοποίηση έχουν πάχος 1m . Μετά τα 40 μέτρα εκσκαφής η

πύκνωση του καννάβου διατηρήθηκε σταθερή ίση με 1m για τα επόμενα 20m. Η διατήρηση της διακριτοποίησης των στοιχείων σε 1m συνεχίζεται διότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων μετρώνται στο μέτωπο της διάνοιξης και επιδιώκουμε με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης. Ακολούθησε η δημιουργία ζώνης 10m όπου ο το πάχος των στοιχείων ήταν 2m. Για τα υπόλοιπα μέτρα του προσομοιώματος μέχρι το όριο πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός σε διαδοχικές ζώνες πάχους 3m , 4m , 5m, 6m .Σε αυτά τα τμήματα η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε ήταν σύμφωνα με την επιλογή by size, ώστε το μήκος των στοιχείων που διακριτοποιούνται να ταυτίζεται με το μήκος της ζώνης. Στα τελευταία 21m η ζώνη με την ίδια επιλογή χωρίστηκε σε 3 τμήματα μήκους 7m το καθένα.

### 4.3.2 Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας

Από το σχεδιαστικό περιβάλλον του Abaqus εξάγεται το input file, δηλαδή ένα αρχείο txt το οποίο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που απεικονίζονται στο προσομοίωμα, δηλαδή κόμβοι όλων των στοιχείων, τα στοιχεία του εδαφικού όγκου, τα στοιχεία κελύφους και τα sets που ορίστηκαν.

Στο input file δίνεται η εντολή για τις συνοριακές συνθήκες του αριθμητικού προσομοιώματος. Η επιφάνεια του εδάφους θεωρήθηκε ελεύθερη σε μετακινήσεις και παραμορφώσεις. Στο κάτω όριο δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις κατά τον άξονα x-x και z-z, ενώ στο δεξί και αριστερό όριο δεν επιτρεπόταν η κίνηση κατά τον άξονα x-x. Οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν και στις πλευρές κατά την εκσκαφή της σήραγγας όπου δεσμεύονταν οι κινήσεις κατά τον άξονα y-y.

Η διαδικασία της διάνοιξης της σήραγγας ορίστηκε με εντολή στο input file. Ορίστηκε ότι η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιείται κατά τη διεύθυνση y-y σε μήκος 40m εκσκάπτοντας φέτες πάχους 1m και ταυτόχρονα τοποθετώντας τα στοιχεία της επένδυσης με ίσο πάχος. Σημειώνεται ότι, κατά τη διαδικασία εκσκαφής για το τελευταίο 1m τα τοιχώματα της σήραγγας παρέμειναν ανυποστήριχτα. Έτσι επιδιώκεται να προσομοιωθεί το κενό ανάμεσα στην ασπίδα του μηχανήματος και την εκσκαφή.

Τέλος, στο input file για κάθε αριθμητικό προσομοίωμα και για κάθε διαφορετικό λόγο H/D ορίστηκαν υλικά με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπου σε κάθε περίπτωση μεταβαλλόταν η τιμή της συνοχής, η τιμή της γωνίας τριβής και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας.



### 5 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

#### 5.1 Εισαγωγή

Με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας της διάνοιξης, των μηχανικών χαρακτηριστικών του γεωυλικού και η τιμή του μεγέθους της εφαρμοζόμενης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής, στο μέγεθος της ακτινικής σύγκλισης της σήραγγας καθώς και στην εξώθηση του μετώπου της πραγματοποιήθηκαν 72 αναλύσεις. Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένοι παράμετροι παρουσιάζονται στο Πίνακα 5-1.

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

Δεδομένοι Παράμετροι	Εύρος τιμών
Διάμετρος Σήραγγας (m)	6, 10
Ύψος υπερκειμένων/Διάμετρος σήραγγας (H/D)	1.5, 2.5, 4.0
Ειδικό βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
Συντελεστής οριζόντιων γαιών $K_o$	1
Συνοχή $c$ (KPa)	10,30,60
Γωνία τριβής $\phi$ (°)	25, 35
Γωνία διαστολικότητας $\delta$ (°)	4.2, 5.8
Πίεση μετώπου $P_{fs}$ (KPa)	100,200

#### 5.2 Ποιοτική Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Από το πλήθος των αναλύσεων που διεξήχθησαν επιλέχθησαν 4 αντιπροσωπευτικές αναλύσεις προκειμένου να παρουσιαστούν οι τιμές των εντατικών μεγεθών που αναπτύχθηκαν. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται είναι συνισταμένη των μετακινήσεων  $U_{magnitude} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$  και η εξώθηση του μετώπου (μετακινήσεις κατά των άξονα y-y) στη τελευταία φέτα της εκσκαφής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που επιλέχθησαν να παρουσιαστούν προέρχονται από ενδεικτικές αναλύσεις με τρόπο ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ τους.

Ύστερα από την λήψη των προσομοιωμάτων στο Abaqus εξαγεται ένα αρχείο rpt, το οποίο εισάγεται σε ένα κατάλληλα επεξεργασμένο αρχείο excel, με αποτέλεσμα την εξαγωγή των μεγεθών του Πίνακα 5-2.

Σημειώνεται ότι κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το abaqus, από το τελευταίο βήμα της εκσκαφής αφαιρούνται οι μετακινήσεις που συντελέστηκαν κατά το γεωστατικό βήμα.



Πίνακας 5-2: Εξαγόμενα μεγέθη από το σύνολο των αναλύσεων

Εξαχθεν από αρχείο excel	μέγεθος	Περιγραφή Αποτελέσματος	Σύμβολισμός
<b>Convergence Area</b>		Παραμόρφωση της περιοχής του μετώπου	$\frac{A_0 - A_1}{A_0} \%$
<b>Convergence Uradial</b>		Μέγιστη και μέση τιμή ακτινικής σύγκλισης	$U_{radial,average}$ , $U_{radial,max}$
<b>Face Extrusion</b>		Μέγιστη και μέση τιμή εξώθησης μετώπου	$U_{2,average}$ , $U_{2,max}$

όπου,  $A_0 =$  είναι η αρχικά μετρώμενη επιφάνεια του μετώπου, η οποία προσδιορίζεται από τη γεωμετρία της σήραγγας,  $A_0 = \pi * R^2$ .

$A_1 =$  είναι το εμβαδό την επιφάνειας του μετώπου όταν έχει προκληθεί η ακτινική σύγκλιση και προσδιορίζεται ω

$U_{radial,average}$  : είναι η μέση ακτινική σύγκλιση που λαμβάνεται στο μέτωπο και υπολογίζεται

$$U_{radial,average} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

$U_{radial,max}$  :είναι η μέγιστη τιμή των ακτινικών συγκλίσεων που έχουν μετρηθεί

$U_{2,average}$  : είναι η μέση τιμή της εξώθησης του μετώπου, δηλαδή της μετακίνησης κατά τον άξονα y-y

$U_{2,max}$ : είναι η μέγιστη τιμή των τιμών εξώθησης μετώπου που έχουν μετρηθεί

### 5.2.1 Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=6m$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=30KPa$ , γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs} =200KPa$

Παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για τα αριθμητικά μοντέλα με ίδιες μηχανικές ιδιότητες γεωυλικού, ίδια τιμή ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο αλλά διαφορετικό λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας.

Σημειώνεται ότι, κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων έχουν αφαιρεθεί τα πρώτα 5m της εκσκαφής δηλαδή οι 5 πρώτες φέτες από το σύνορο του προσομοιώματος με σκοπό την αποφυγή της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Τα χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων αναλύσεων είναι :

Συνοχή  $c= 30KPa$ , Γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$

Ασκούμενη πίεση στο μέτωπο:  $P_{fs} =200KPa$

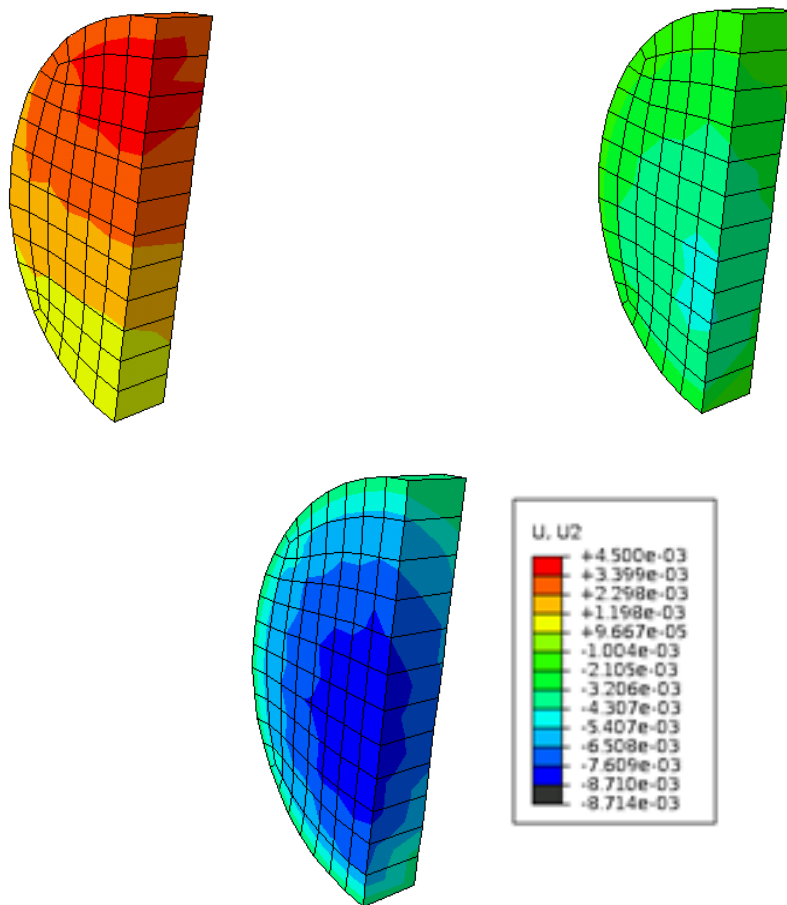
Λόγος υπερκειμένων/Διαμετρο σήραγγας:  $H/D=1.5, 2.5, 4.0$

Στην Εικόνα 5-1 παρουσιάζεται η 41<sup>η</sup> φέτα της διάνοιξης όπου υπολογίζεται το εύρος του μεγέθους της εξώθησης του μετώπου για 3 διαφορετικές αναλύσεις.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

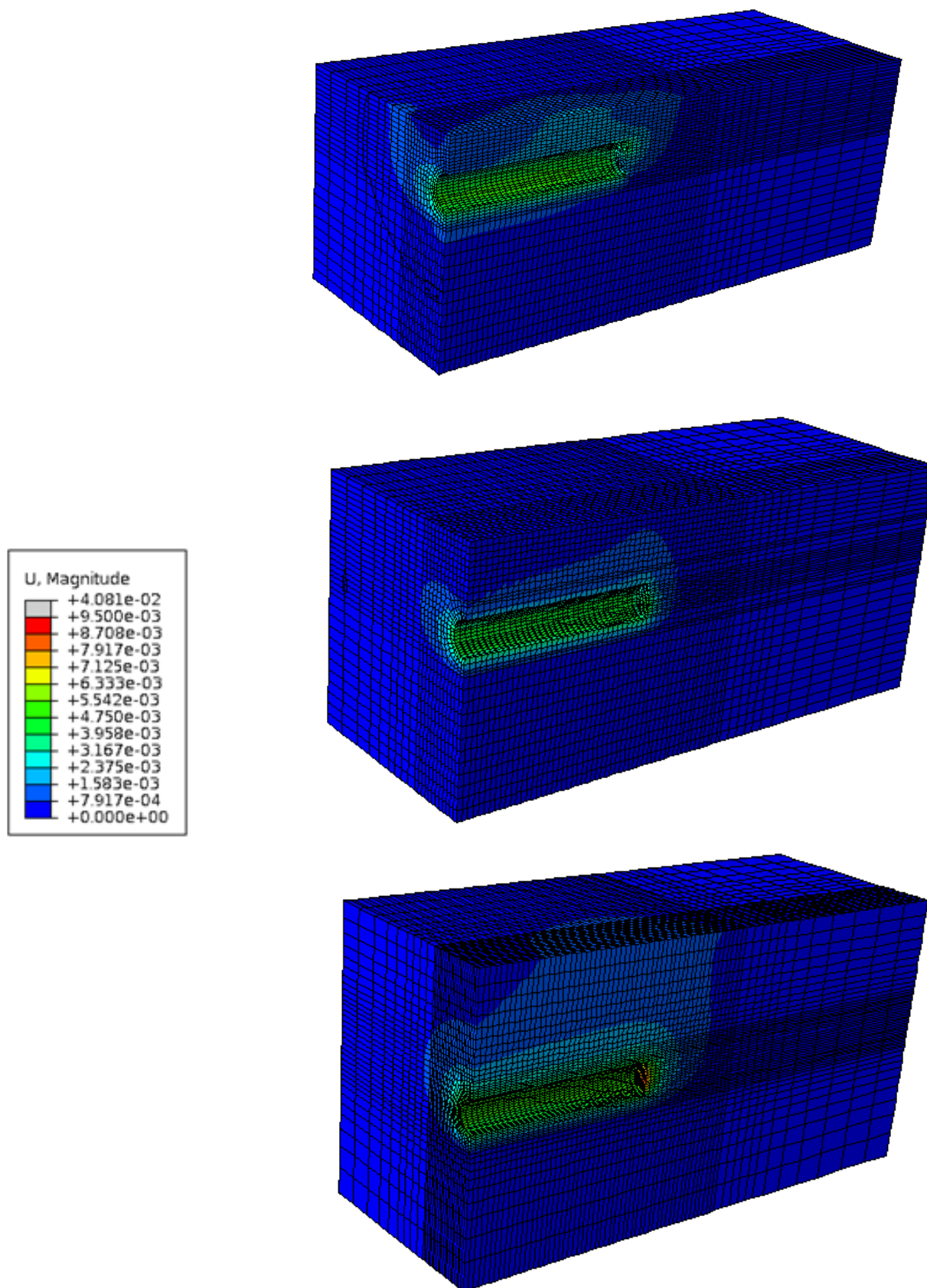
Παρατηρείται ότι για το αριθμητικό προσομοίωμα  $H/D=1.5$  οι τιμές της εξώθησης του μετώπου είναι θετικές καθώς η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο είναι μεγαλύτερη από τη αναπτυσσόμενη γεωστατική.

Ακόμη η μεγαλύτερη τιμή της εξώθησης μετώπου εντοπίζεται στο κέντρο της σήραγγας και στο κάτω μισό του άξονα συμμετρίας z-z. Η θέση μετατόπισης εμφάνισης της μέγιστης τιμής μετατοπίζεται προς τα κάτω και αυξάνεται με τη αύξηση των υπερκειμένων. Συγκεκριμένα από τις αναλύσεις που συγκρίθηκαν παραπάνω η μέγιστη τιμή εξώθησης μετώπου  $U_{2,max}$  παρατηρείται, στο αριθμητικό προσομοίωμα με λόγο  $H/D=4.0$  και τιμή μετώπου  $U_{2,max}= 8.71mm$ .



**Εικόνα 5-1:** Απεικόνιση των μετακινήσεων κατά την εξώθηση του μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας  $D=6m$ , πάνω αριστερά  $H/D=1.5$ , πάνω δεξιά  $H/D=2.5$  κάτω  $H/D=4.0$ .

Στην Εικόνα 5-2 πραγματοποιείται σύγκριση του εύρους του μεγέθους της συνολικής μετακίνησης. Από τη σύγκριση των παρακάτω αναλύσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι τιμές της συνολικής μετατόπισης κυμαίνεται μεταξύ του  $0,7917mm - 9,5mm$  και εμφανίζονται στη περιοχή του μετώπου. Επιπλέον παρατηρείται ότι με την αύξηση των υπερκειμένων η τιμή της συνολικής μετακίνησης αυξάνεται με ταυτόχρονη αύξηση της έκτασης στην οποία αναπτύσσεται.



Εικόνα 5-2: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου  $D=6\text{m}$ , για ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs} = 200\text{KPa}$  με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D=1.5$  πάνω,  $H/D=2.5$  ενδιάμεση και  $H/D=4.0$  κάτω

### 5.2.2 Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=10\text{m}$ με λόγο $H/D=2.5$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=10\text{KPa}$ , γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για τα αριθμητικά μοντέλα με ίδιες μηχανικές ιδιότητες γεωυλικών, ίδιο λόγο υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας αλλά διαφορετική ασκούμενη πίεση στο μέτωπο.

Τα χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων αναλύσεων είναι :

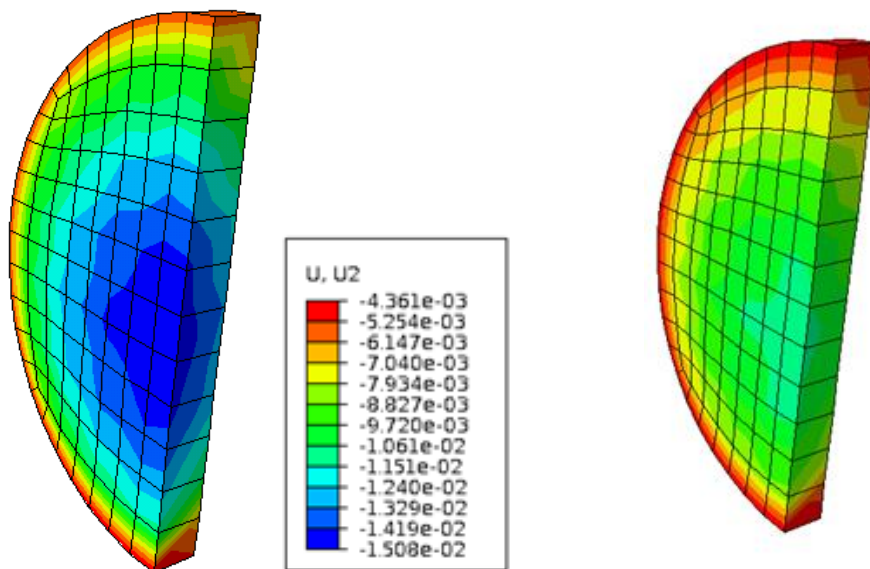
Συνοχή  $c= 10\text{KPa}$ , Γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$

Ασκούμενη πίεση στο μέτωπο:  $P_{fs}=100\text{KPa}$  και  $P_{fs}=200\text{KPa}$

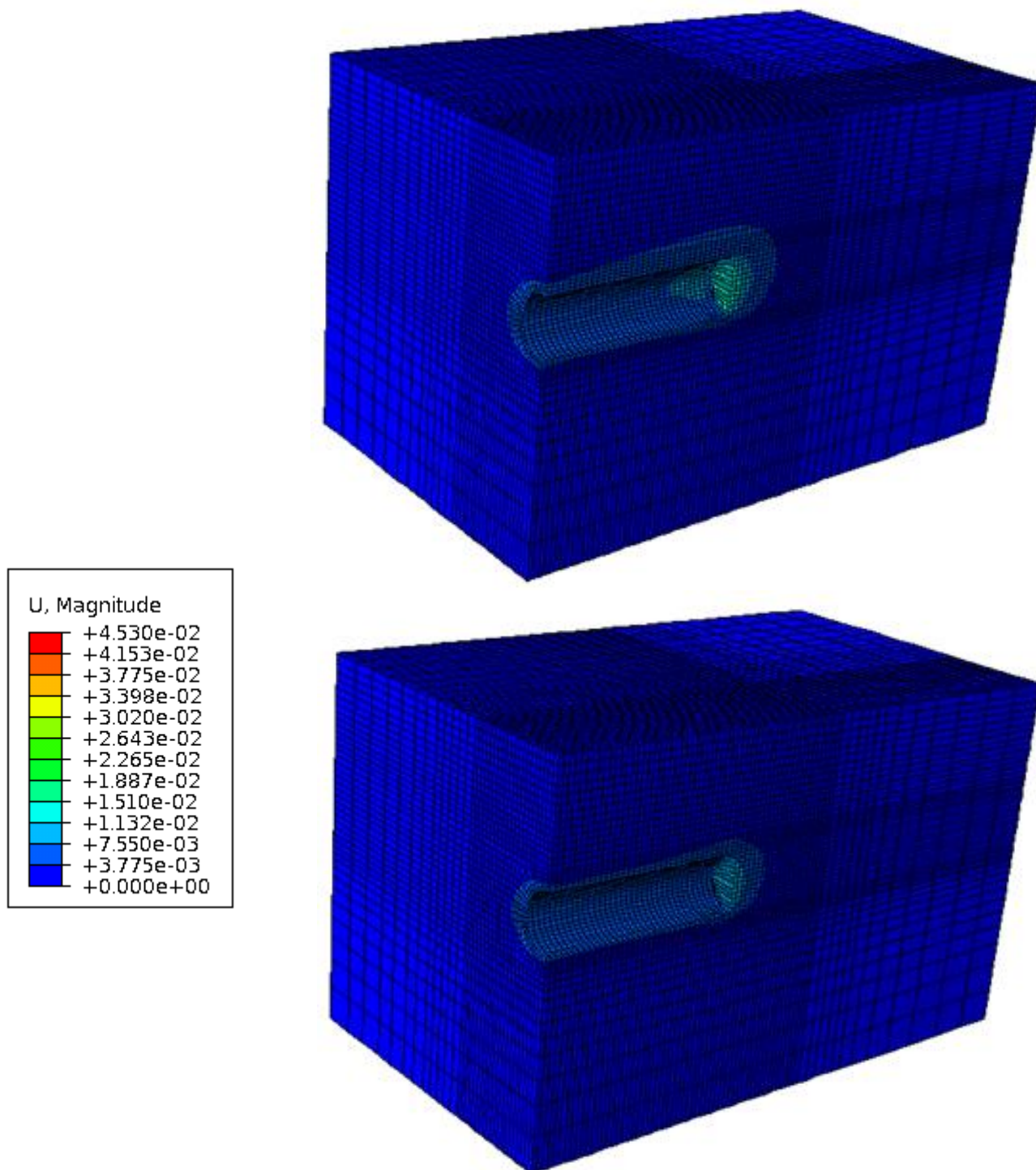
Λόγος υπερκειμένων/Διάμετρο σήραγγας:  $H/D=2.5$

Στην Εικόνα 5-3 παρουσιάζονται οι τιμές εξώθησης μετώπου για τις 2 διαφορετικές αναλύσεις. Αριστερά απεικονίζεται η 41<sup>η</sup> φέτα κατά τη διάνοιξη στην οποία ασκείται πίεση ίση με  $P_{fs}=100\text{KPa}$  ενώ αριστερά απεικονίζεται η διακύμανση των τιμών της εξώθησης του μετώπου για ασκούμενη πίεση  $P_{fs}=200\text{KPa}$ .

Παρατηρείται ότι για το αριθμητικό προσομοίωμα  $H/D=2.5$  με διάμετρο σήραγγας  $D=10\text{m}$  καθώς αυξάνεται η ασκούμενη πίεση στο μέτωπο οι τιμές της εξώθησης του μετώπου μειώνονται. Συγκεκριμένα για πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$  η μέγιστη τιμή είναι  $11,51\text{mm}$  σε αντίθεση με  $15,08\text{mm}$  που μετρήθηκε για πίεση  $P_{fs}=100\text{KPa}$ .



Εικόνα 5-3: Απεικόνιση των τιμών της εξώθησης του μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου  $D=10\text{m}$  με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D=2.5$  για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs}=100\text{KPa}$  αριστερά και για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs}=200\text{KPa}$  δεξιά



Εικόνα 5-4: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου  $D=10\text{m}$  με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D=2.5$  για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs}=100\text{KPa}$  πάνω και για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs}=200\text{KPa}$  κάτω

Από την Εικόνα 5-4 παρατηρούμε ότι το μέγεθος της συνολικής μετακίνησης παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με την πίεση που ασκείται στο μέτωπο της διάνοιξης. Η κατανομή και στα δύο μοντέλα είναι όμοια ωστόσο για τη περίπτωση με μικρότερη πίεση μετώπου οι τιμές της μετακίνησης είναι μεγαλύτερες. Για μικρότερη πίεση οι τιμές αυξάνονται με μεγαλύτερη έμφαση κοντά στη περιοχή



του μετώπου και παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος κατανομής γύρω από τη σήραγγα και προς την επιφάνεια.

### 5.3 Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το δείκτη ευστάθειας $\Lambda_f$

Για τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν έγινε συσχέτιση της μέγιστης ακτινικής σύγκλισης και της ποσοστιαίας μεταβολής της επιφάνειας της μετώπου με το δείκτη ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ , ο οποίος προτάθηκε στη διδακτορική διατριβή του κ<sup>ου</sup> Γεωργίου Προυντζόπουλου. Ο δείκτης  $\Lambda_f$  είναι μια σχέση στην οποία συνδέεται η γεωμετρία της εκσκαφής με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού. Στον αριθμητή πολλαπλασιάζεται η τιμή της συνοχής (KPa) του γεωυλικού με τον αριθμό 5.25 και με το συντελεστή  $N_\phi$ , όπου  $N_\phi = \tan(45 + \frac{\phi}{2})^2$ . Στο παρονομαστή χρησιμοποιούνται τα μεγέθη για τη περιγραφή της γεωμετρίας της διάνοιξης, όπου το ειδικό βάρος (KN/m<sup>2</sup>) πολλαπλασιάζεται με το ύψος υπερκειμένων H (m) και με τη διάμετρο της σήραγγας D(m).

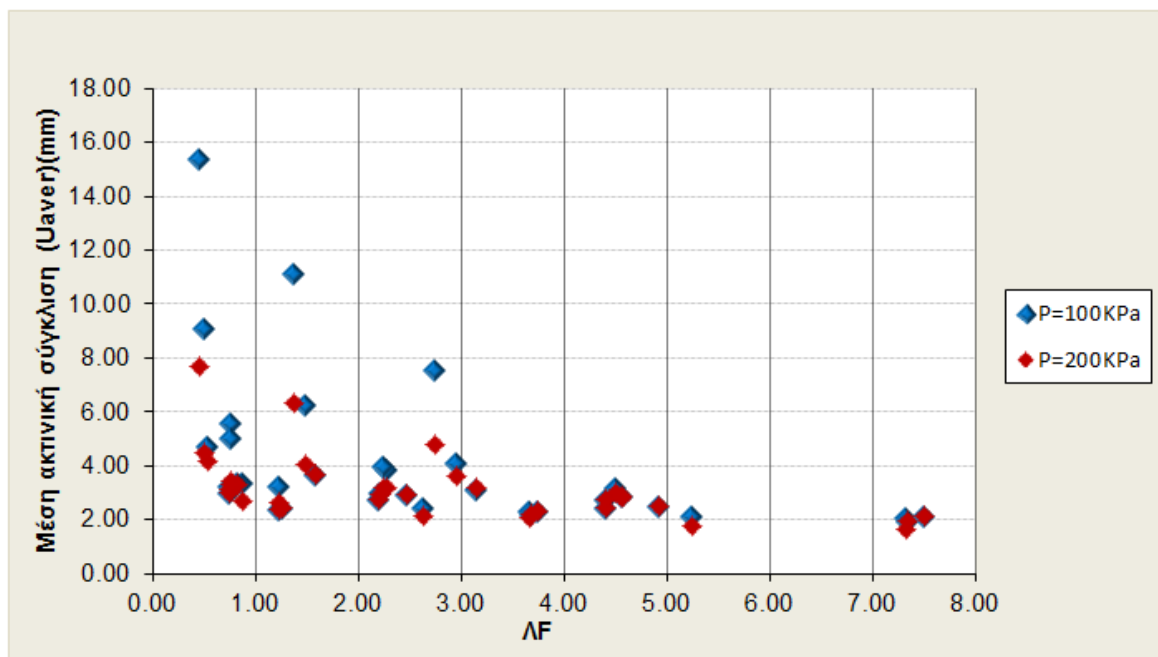
$$\Lambda_f = \frac{5.25 * c * N_\phi^a}{\gamma * H^{(1-\beta)} * D^\beta}$$

Σχέση 5-1

Ωστόσο ο συντελεστής  $\Lambda_f$  προτάθηκε για ανυποστήριχτη σήραγγας επομένως ο συντελεστής  $\Lambda_f$  αποτελεί μια εξίσωση σύνδεσης μεταβλητών στην οποία δεν περιλαμβάνεται το ποσοστό ασκούμενης πίεσης από το μηχάνημα στο μέτωπο.

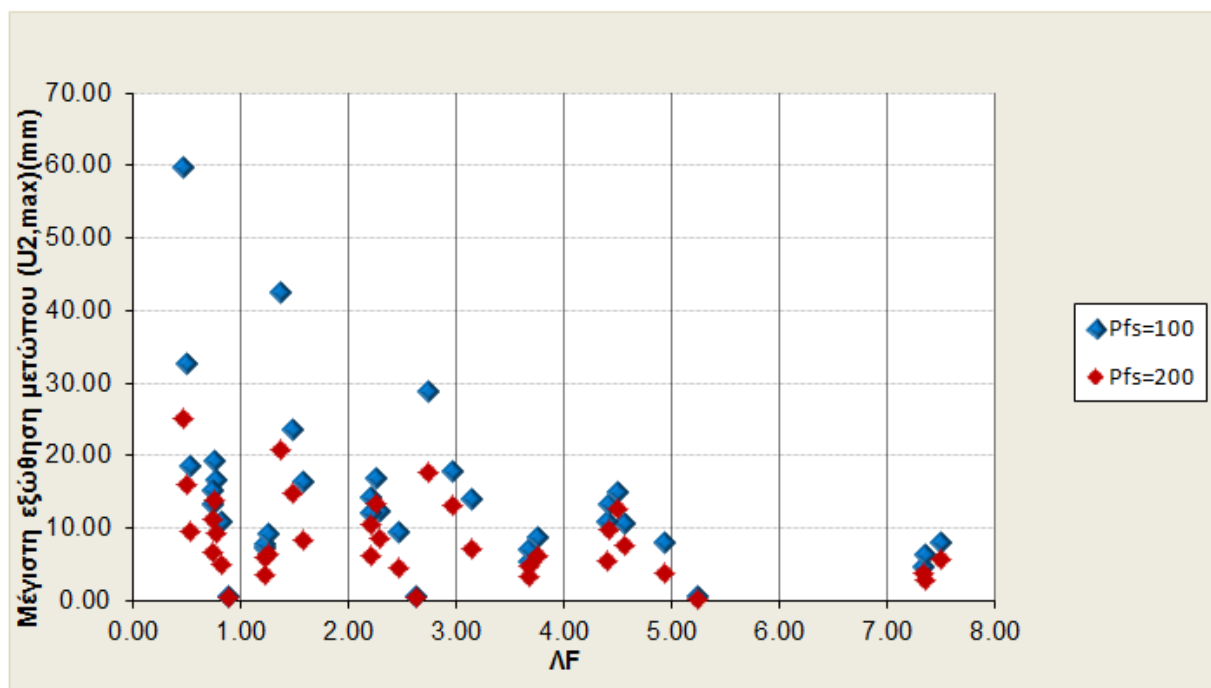
Γ'αυτό το σκοπό πραγματοποιείται η συσχέτιση του δείκτη ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$  με τη μέγιστη ακτινική σύγκλιση ( $U_{\text{radial,max}}$ ), με το ποσοστό μεταβολής του εμβαδού ( $\frac{A_0 - A_1}{A_0} \%$ ), και με τη τιμή της μέγιστης εξώθησης του μετώπου ( $U_{2,\text{max}}$ ) γίνεται για τις 2 διαφορετικές τιμές πίεσης που ασκήθηκαν,  $P_{fs} = 100\text{KPa}$  και  $P_{fs} = 200\text{KPa}$ .

Στο Διάγραμμα 5-1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η τάση μεταβολής του μεγέθους της μέγιστης ακτινικής σύγκλισης σε σχέση με το συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ , όπου παρατηρείται αρκετά καλή συσχέτιση και κατανομή των τιμών.

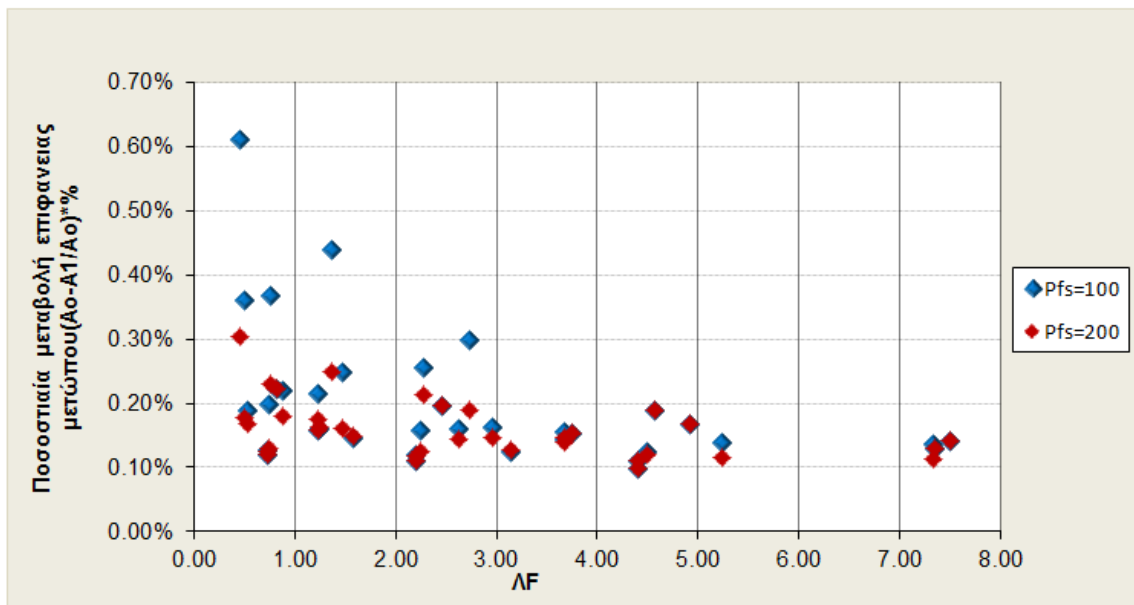


Διάγραμμα 5-1: Μεταβολή της μέση ακτινική σύγκλιση  $U_{\text{radial,aver}}$  για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη  $\Lambda_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100\text{KPa}$  και  $P_{fs} = 200\text{KPa}$

Στα επόμενα διαγράμματα συσχετίζονται τα μεγέθη της ποσοστιαίας μεταβολής τη επιφάνειας του μετώπου και της εξώθησης του μετώπου με το προτεινόμενο συντελεστή ευστάθειας.



Διάγραμμα 5-2: Μεταβολή της μέγιστης εξώθησης μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη  $\Lambda_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100\text{KPa}$  και  $P_{fs} = 200\text{KPa}$



Διάγραμμα 5-3: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου σε σχέση με το δείκτη  $\Lambda_f$  για τις δύο διαφορετικές τιμές πίεσης μετώπου  $P_{fs} = 100\text{KPa}$  και  $P_{fs} = 200\text{KPa}$

Σύμφωνα με τα Διάγραμμα 5-2, Διάγραμμα 5-3, Διάγραμμα 5-4 παρατηρείται παρόμοια τάση στη διασπορά των μετρήσεων.

Εν κατακλείδι από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν φαίνεται ο δείκτης ευστάθειας είναι ανεξάρτητος από τη μεταβολή της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο. Ακόμη παρατηρείται ότι για μεγαλύτερη πίεση μετώπου οι τιμές των μετρήσεων για την εξώθηση του μετώπου και τη μέση ακτινική σύγκλιση παρουσιάζονται μειωμένες με καλύτερη κατανομή σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν για μειωμένη πίεση υποστήριξης μετώπου.

### 5.4 Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το μέτρο ελαστικότητας E

Με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού φύλλου excel διαμορφώνονται ορισμένα διαγράμματα, στα οποία γίνεται προσπάθεια σύνδεσης των εξαγόμενων μεγεθών που αναφέρονται στο Πίνακας 5-2 με κατάλληλες εξισώσεις προκειμένου να διαπιστωθεί η τάση μεταβολής που εμφανίζουν σε σχέση με κάποιο μέγεθος που αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά ποιότητα του εδάφους.

Εξαιτίας των υψηλών πιέσεων μετώπου, που ασκούνται σε μηχανοποιημένη εκσκαφή σηράγγων, και κατ'επέκταση στις παραπάνω αριθμητικές αναλύσεις το υλικό έχει ελαστική ή σχεδόν ελαστική συμπεριφορά σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας διαδραματίζει πιο κρίσιμο ρόλο για την ενδοσιμότητα του υλικού σε σχέση με τις τιμές  $c, \phi$  που χρησιμοποιούνται για την οριακή κατάσταση αστοχίας, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Η εκτίμηση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας που εισήχθη ως δεδομένο στις αναλύσεις προέκυψε από την αριθμητική σχέση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής που περιείχε τις παραμέτρους της συνοχής και της γωνίας τριβής του γεωυλικού.

$$E(MPa) = \frac{500 * (\gamma * H - \gamma * H * K_o + (\gamma * H * K_o * N_\varphi + 2 * c * N_\varphi - \gamma * H) * 2}{1000 * (1 + \frac{1}{3} * (N_\varphi - 1))}$$

$$\text{όπου } N_\varphi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

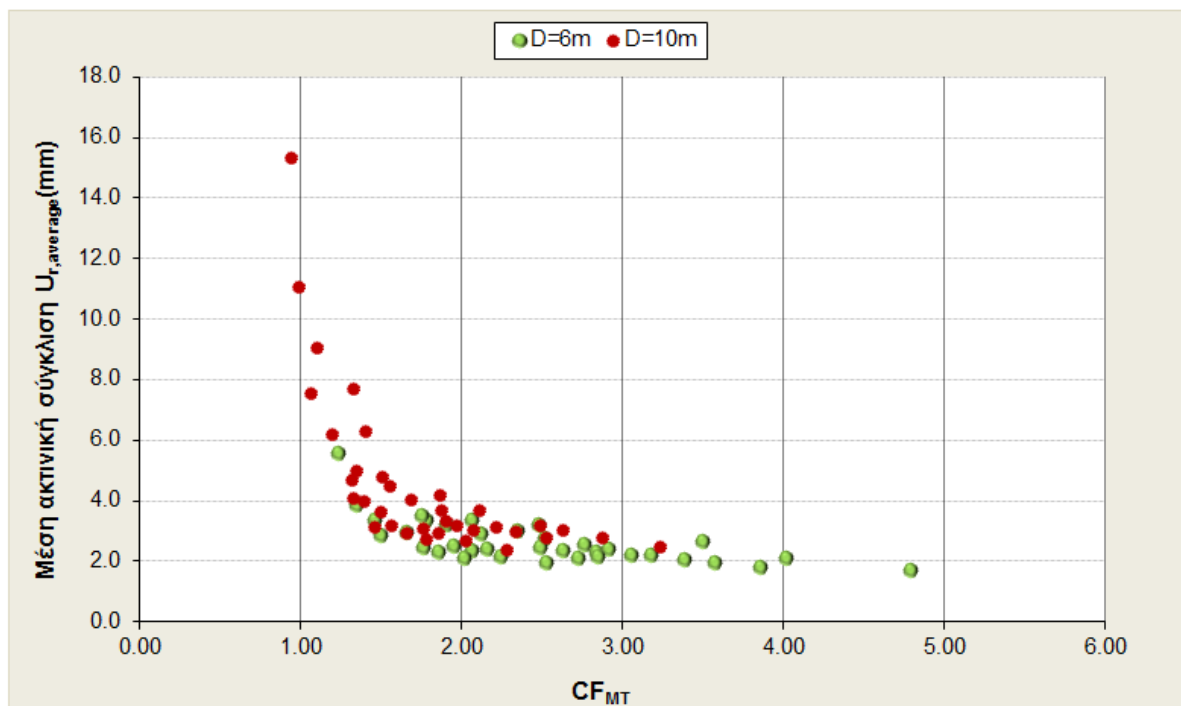
Για τις διαφορετικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα συσχέτισης των αποτελεσμάτων της μέσης ακτινικής σύγκλισης, της εξώθησης μετώπου και της ποσοστιαίας μεταβολής της επιφάνειας του μετώπου με το Μέτρο Ελαστικότητας. Είναι μια συνάρτηση που συμπεριλαμβάνει το λόγο του ποσοστού πίεσης που ασκείται στο μέτωπο και του μέτρου ελαστικότητας.

$$CF_{MT} = \frac{1}{1000} * \left[ \frac{4 * E}{\gamma * H^{0.8} * D^{0.2}} \right] * \left[ 2 * \sqrt{\frac{Face\ Pressure}{K_o * \gamma * H}} \right] \quad \text{Σχέση 5-2}$$

Στο πρώτο σκέλος της σχέσης στον αριθμητή υπάρχει η τιμή του μέτρου ελαστικότητας πολλαπλασιασμένη με τη τιμή 4. Στο παρανομαστή χρησιμοποιούνται τα μεγέθη για τη περιγραφή της γεωμετρίας της διάνοιξης, όπου H= το ύψος των υπερκειμένων για κάθε ανάλυση, D= η διάμετρος της σήραγγας για τις δύο κατηγορίες προσομοιωμάτων D=6m και D=10m και γ το ειδικό βάρος του γεωυλικού (γ=20KN/m<sup>2</sup>). Στο δεύτερο μέρος η ρίζα της ασκούμενης πίεσης προς τη γεωστατική τάση πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 2.

Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας το ύψος των υπερκειμένων παρατηρήθηκε ότι έχει μεγαλύτερη επιρροή από τη διάμετρο της σήραγγας. Συνεπώς έγινε μια προσπάθεια να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στο ύψος των υπερκειμένων σε σχέση με τη διάμετρο της σήραγγας γι'αυτό υψώθηκαν στις αντίστοιχες δυνάμεις, 0.8 και 0.2 .

Ο συντελεστής Convergence Factor Mechanized Tunneling (CF<sub>MT</sub>) είναι ένας δείκτης υπολογισμού της σύγκλισης της περιφέρειας της σήραγγας στη θέση του μετώπου. Με τον όρο Convergence του CF<sub>MT</sub> υποδηλώνεται ότι ο συντελεστής αναφέρεται σε σύγκλιση της περιφέρειας της σήραγγας, ενώ ο περιορισμός MT (Mechanized Tunneling) υποδηλώνει τις υψηλές εφαρμοζόμενες πιέσεις μετώπου που επικρατούν σε μια μηχανοποιημένη εκσκαφή σήραγγας.



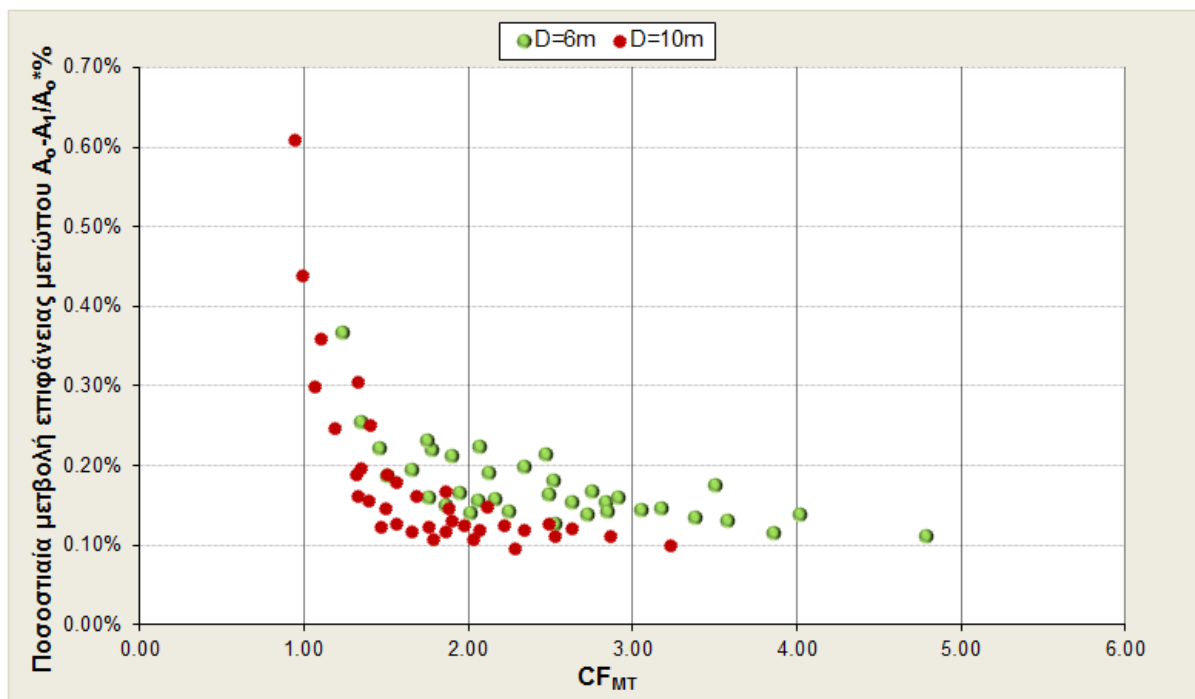
**Διάγραμμα 5-4: Μεταβολή μέσης ακτινικής σύγκλιση  $U_{radial,average}$  για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη,  $CF_{MT}$**

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5-4 όπου εμφανίζεται η συσχέτιση ανάμεσα στη μέση ακτινική σύγκλιση ( $U_{radial,max}$ ) που μετρήθηκε στο μέτωπο της εκσκαφής με το δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ), εξετάζοντας την επίδραση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας στην παραπάνω συσχέτιση, προκύπτει μια ομαλή φθίνουσα καμπύλη.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι για διάμετρο σήραγγας  $D=10m$  οι τιμές τη μέσης ακτινικής σύγκλισης παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τιμές από 2.5-6.0mm, σε αντίθεση με τη διάμετρο σήραγγας  $D=6m$  όπου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ του 2-16mm.

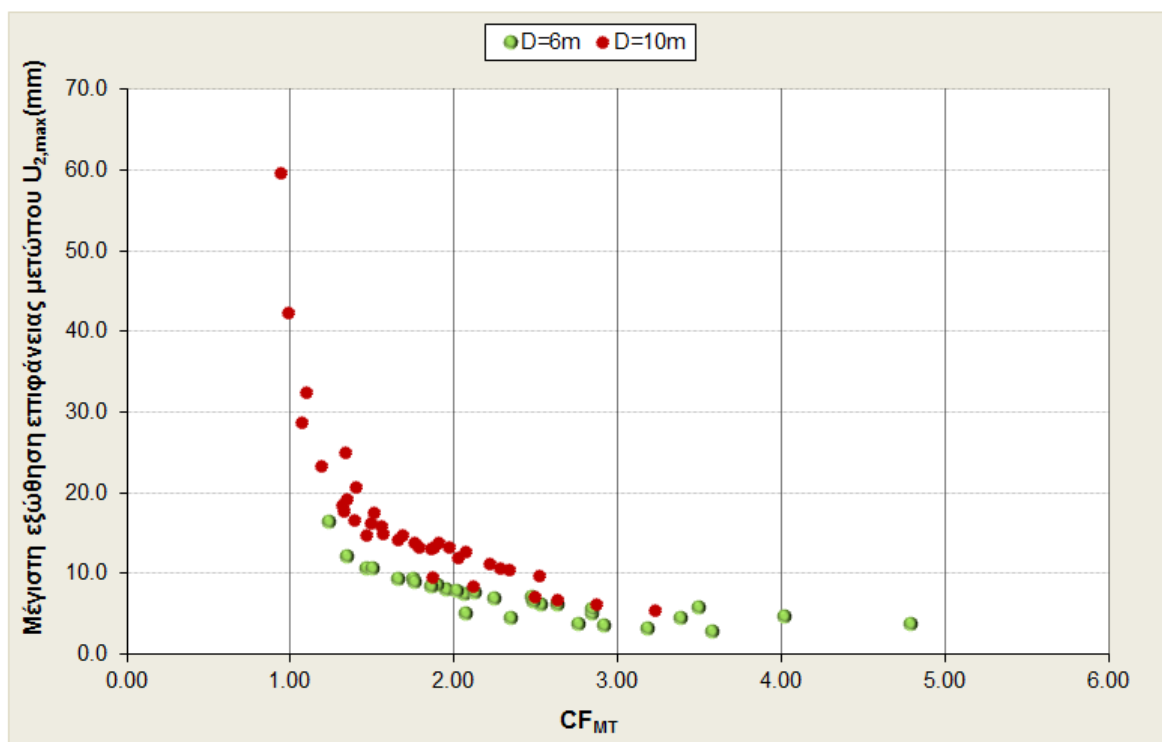
Το Διάγραμμα 5-5 παρουσιάζει τη τάση μεταβολής της ποσοστιαίας μεταβολής του εμβαδού συναρτήσει με τη σχέση που προτάθηκε. Σύμφωνα με την εικόνα του διαγράμματος οι τιμές των αναλύσεων εμφανίζουν ομαλή φθίνουσα τάση. Ακόμη παρατηρείται ότι οι τιμές για διάμετρο σήραγγας  $D=6m$  εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων για διάμετρο σήραγγας  $D=10m$ . Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ποσοστιαία μεταβολή της περιοχής του μετώπου συντελείται σε μικρότερης διατομής σήραγγας.





Διάγραμμα 5-5: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με το δείκτη,  $CF_{MT}$

Ακολουθεί το Διάγραμμα 5-6, όπου απεικονίζεται συσχέτιση των μετρήσεων της μέγιστης εξώθησης του μετώπου στον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με το δείκτη,  $CF_{MT}$  στον οριζόντιο άξονα.



Διάγραμμα 5-6: Μεταβολή της μέγιστης τιμής εξώθησης μετώπου για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με την εξίσωση του μέτρου ελαστικότητας που προτάθηκε

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων**

---

Σύμφωνα να το Διάγραμμα 5-6, παρατηρείται ότι σε αντίθεση με τα Διάγραμμα 5-4 και Διάγραμμα 5-5 υπάρχει αντιστροφή στη φθίνουσα τάση του διαγράμματος. Αναλυτικότερα παρατηρείται ότι η μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου είναι εντονότερη για σήραγγα διαμέτρου  $D=6m$  σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μετρήσεις για διάμετρο  $D=10m$ .



## **6 Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)**

### **6.1 Εισαγωγή**

Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος προσομοίωσης, κατά την οποία δημιουργείται ένα αριθμητικό προσομοίωμα στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η ενσωμάτωση των στοιχείων για τη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής, τη προσομοίωση του κενού που δημιουργείται μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και του γεωυλικού και της διαδικασίας ενεμάτωσης στο ουραίο τμήμα της ασπίδας. Για το συγκεκριμένο μοντέλο εκτελέστηκαν 24 παραμετρικές αναλύσεις τη χρήση του πρόγραμμα Abaqus.

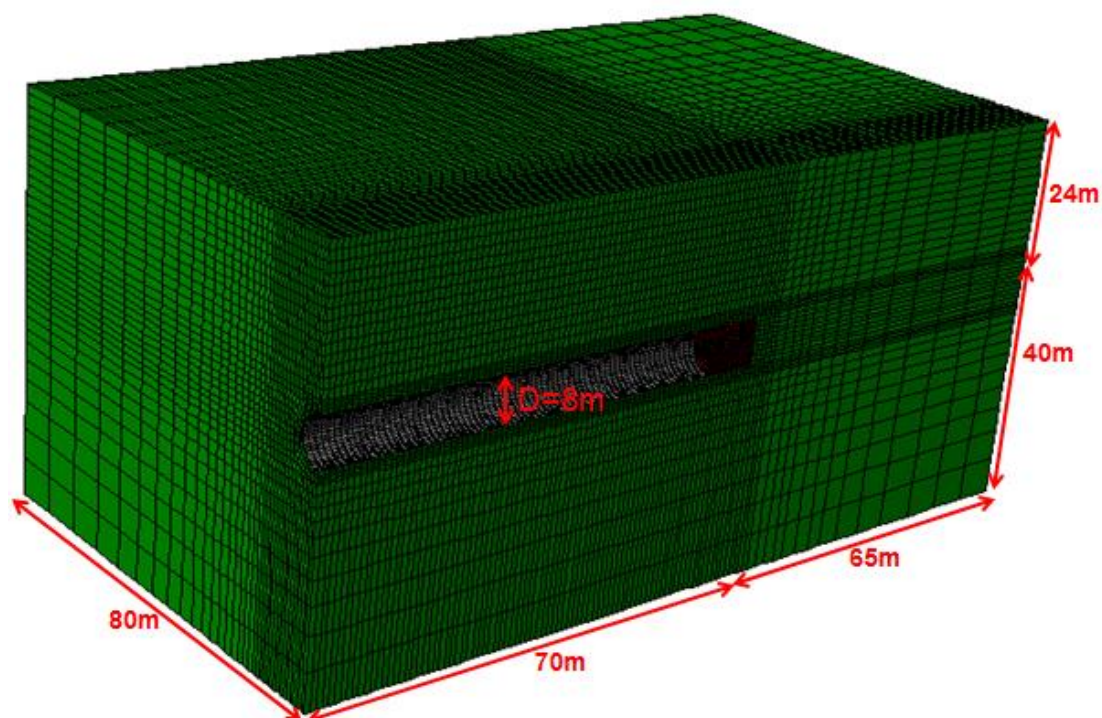
### **6.2 Δημιουργία γεωμετρίας αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=8m$ και αναλογία ύψους υπερκειμένων με τη διάμετρο της σήραγγας $H/D=3.5$**

Ομοίως με τα αριθμητικά προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5 κατά το σχεδιασμό στο Abaqus σχεδιάστηκε το μισό αριθμητικό προσομοίωμα αξιοποιώντας τη συμμετρία που παρουσιάζει ως προς το κατακόρυφο επίπεδο ( $z-z$ ) κάθετο στο διαμήκη άξονα της σήραγγας.

Για την εκτέλεση των 24 αναλύσεων κατασκευάστηκε ένα αριθμητικό προσομοίωμα με διάμετρο σήραγγας  $D=8m$  και μήκος διάνοιξης  $80m$ . Η απόσταση του κέντρου της σήραγγας από το κάτω όριο του προσομοιώματος διατηρήθηκε σταθερή στα  $40m$  όπως σχεδιάστηκε για τα προσομοιώματα με διάμετρο σήραγγας  $D=6m$  όσο και με διάμετρο  $D=10m$ . Το πλευρικό όριο κατά τον άξονα  $x-x$  σχεδιάστηκε σε απόσταση  $8*D=80m$  από το κέντρο της σήραγγας. Η διάσταση του προσομοιώματος κατά την διεύθυνση εκσκαφής είναι  $145m$  από το σημείο έναρξης εκσκαφής της σήραγγας μέχρι το όριο του προσομοιώματος κατά τον άξονα  $y-y$ . Το ύψος των υπερκειμένων μετρήθηκε από το κέντρο της σήραγγας κατά την αναλογία  $H/D=3.5$ , ίσο με  $3,5*D= 28m$ . Στόχος κατά την επιλογή διαστάσεων του προσομοιώματος είναι η αποφυγή της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν ώστε η επιφάνεια του εδάφους να θεωρηθεί ελεύθερη σε μετακινήσεις και παραμορφώσεις. Στο κάτω όριο δεσμεύτηκαν οι κόμβοι ώστε να απαγορεύονται οι μετακινήσεις κατά τον άξονα  $x-x$ ,  $z-z$ ,  $y-y$ . Ενώ, στο δεξί και αριστερό όριο δεν επιτρέπεται η κίνηση κατά τον άξονα  $x-x$ . Τέλος, συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν και στις πλευρές κατά την εκσκαφή της σήραγγας όπου δεσμεύονταν οι μετακινήσεις κατά τον άξονα  $y-y$ .

Στην Εικόνα 6-2 απεικονίζεται το μισό προσομοίωμα, όπου φαίνονται οι αποστάσεις από τα πλευρικά όρια, το ύψος των υπερκειμένων, η διάσταση της διαμέτρου σήραγγας και το μήκος διάνοιξης της και το μηχανήμα που ενσωματώθηκε στο μοντέλο.



**Εικόνα 6-1: Αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας  $D=8m$  με αναλογία ύψους υπερκειμένων/διάμετρο σήραγγας ίσο με  $H/D=3.5$**

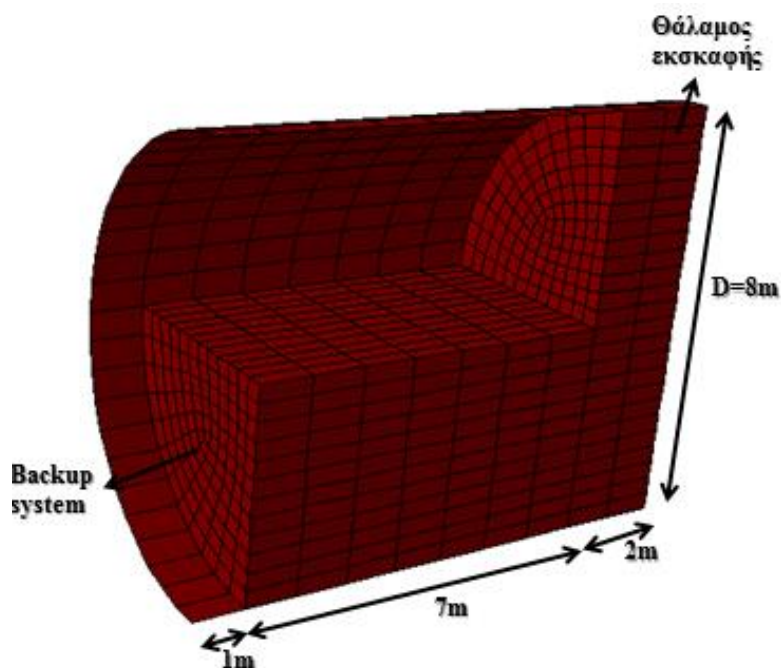
### **6.3 Δημιουργία γεωμετρίας μηχανήματος ολομέτωπης κοπής**

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

Το μηχάνημα έχει μήκος ίσο με 10m. Από τα οποία τα 2 πρώτα προσομοιώνουν το θάλαμο εκσκαφής. Συγκεκριμένα δημιουργούνται 2 κυκλικές διαμέτροι  $D=8m$ , όσο η διάμετρος της σήραγγας, και πάχους 1m έκαστη. Επιπλέον, για τη καλύτερη προσομοίωση του μηχανήματος, προσομοιώνονται η ασπίδα του μηχανήματος, η κοπτική κεφαλή και ο διαφραγματικός τοίχος όπισθεν του θαλάμου εκσκαφής.

Για τον υπολογισμό του βάρους του μηχανήματος, προσομοιώνεται και το πίσω μέρος του, backup system. Το μήκος του είναι ίσο με 7m και στο πίσω μέρος βρίσκεται το προκατασκευασμένο στοιχείο που θα τοποθετηθεί. Στο τελευταίο 1m θεωρείται ότι κάτω από την ασπίδα βρίσκεται η πρώτη σειρά προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης πλάτους 1m, όσο και το βήμα εκσκαφής και προχώρησης του μηχανήματος.

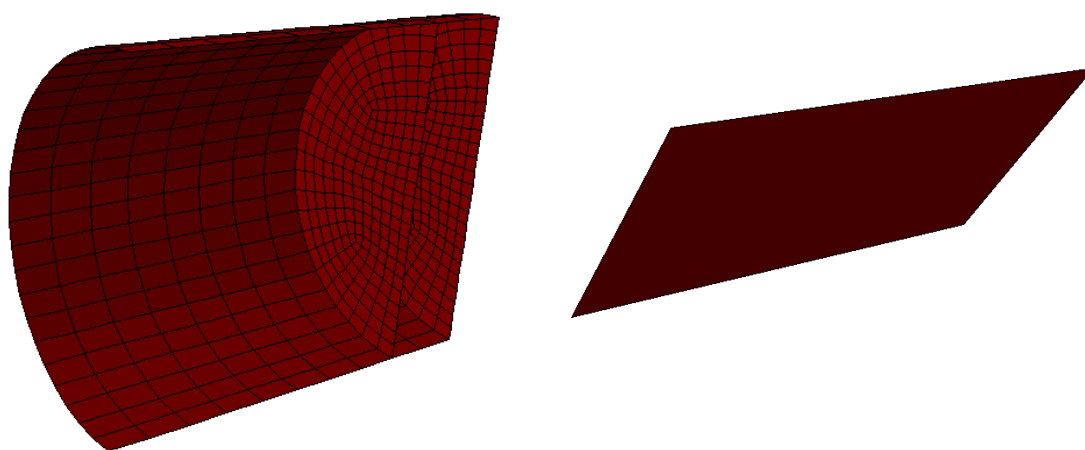




Εικόνα 6-2: Το μηχάνημα κοπής που προσομοιώθηκε για τη διάνοιξη της σήραγγας

#### 6.4 Διαδικασία διακριτοποίησης των στοιχείων του αριθμητικού προσομοιώματος

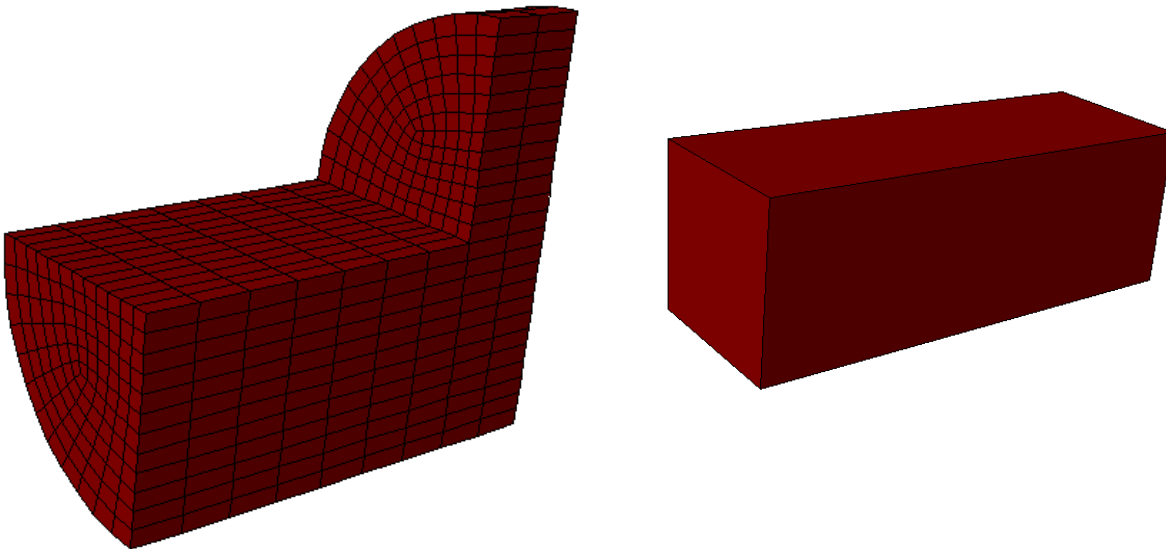
Η διακριτοποίηση του γεωυλικού και των προκατασκευασμένων στοιχείων στο αριθμητικό προσομοίωμα διατηρεί την ίδια προσέγγιση με τα προηγούμενα μοντέλα που παρουσιάστηκαν. Δηλαδή, χρησιμοποιούνται εδαφικά 8-κομβικά στοιχεία για τη προσομοίωση του γεωυλικού και 4-κομβικά στοιχεία για την προσομοίωση των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης.



Εικόνα 6-3: Αριστερά προσομοίωση της ασπίδας του μηχανήματος, του διαφραγματικού τοίχου και της κοπτικής κεφαλής, δεξιά τα 4-κομβικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση

## Κεφάλαιο 6° : Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)

Αναφορικά με τη διαδικασία διακριτοποίησης του μηχανήματος, τα στοιχεία της ασπίδας, ο διαφραγματικός τοίχος και η κοπτική κεφαλή προσομοιώνονται με 4-κομβικά στοιχεία, ενώ ο θάλαμος εκσκαφής και το backup system του μηχανήματος προσομοιώνονται με στοιχεία εδάφους.

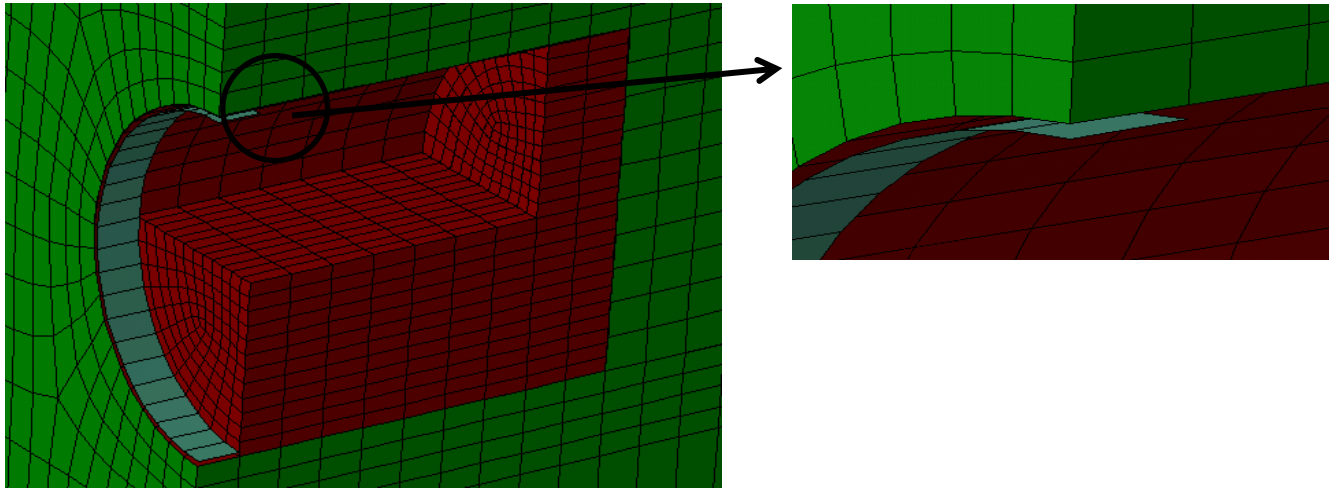


Εικόνα 6-4: Αριστερά προσομοίωση του θαλάμου εκσκαφής και του backup system, δεξιά τα στοιχεία εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση

### 6.5 Διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας διαμέτρου $D=8m$ , $H/D=3.5$

Η διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας στο συγκεκριμένο αριθμητικό προσομοίωμα διαφοροποιείται από τη διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα προσομοιώματα, ενότητα 5. Αρχικά πραγματοποιείται το γεωστατικό, πρώτο βήμα της ανάλυσης. Στη συνέχεια, στο δεύτερο βήμα, αφαιρούνται τα πρώτα 10m από τη διάνοιξη, δηλαδή οι 10 πρώτες φέτες, και εισάγεται το μηχάνημα.

## Κεφάλαιο 6° : Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)



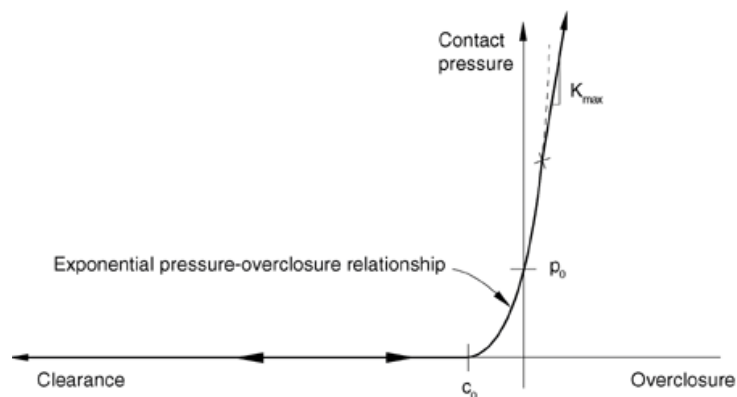
Εικόνα 6-5: Αριστερά απεικονίζεται το δεύτερο βήμα της ανάλυσης, όπου αφαιρούνται τα πρώτα 10m και εισάγεται το μηχάνημα, δεξιά φαίνεται το πρώτο προκατασκευασμένο στοιχείο μαζί με το μηχάνημα

### 6.5.1 Ορισμός διεπιφάνειας εδάφους-ασπίδας μηχανήματος

Με στόχο τη προσομοίωση του κενού μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και του εδάφους ορίζονται 2 διεπιφάνειες. Η πρώτη διεπιφάνεια αφορά την εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας του μηχανήματος και η δεύτερη την εξωτερική του εδαφικού όγκου στη περιχή της διάνοιξης. Ειδικότερα η διεπιφάνεια της ασπίδας ορίζεται ως master interface, ενώ του εδαφικού όγκου ορίζεται ως slave interface, πρακτικά αυτό σημαίνει ότι επιτρέπεται ελάχιστη διείσδυση της slave interface προς τη master.

Στο μοντέλο για να οριστούν οι διεπιφάνειες εντοπίστηκαν οι εξωτερικές επιφάνειες των στοιχείων και διπλοορίστηκαν οι αντίστοιχοι κόμβοι. Έτσι ορίζεται η συνθήκη όπου θα διαπιστώνεται αν έρχονται σε επαφή οι 2 διεπιφάνειες.

Ο νόμος που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 6-6, όπου για το συντελεστή  $c_0$  η τιμή λαμβάνεται  $10^{-6}$ , δηλαδή όταν η κίνηση της slave interface προς τη master φτάσει αυτή τη τιμή δίνεται η εντολή να ασκηθεί πίεση.



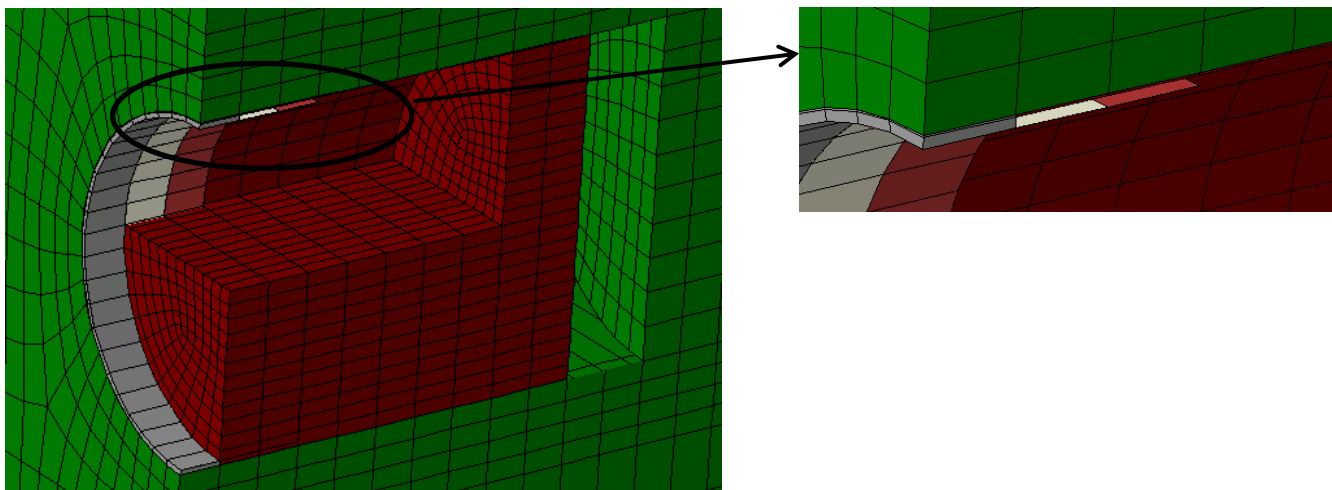
Εικόνα 6-6: Νόμος ορισμού διεπιφάνειας (πηγή: Abaqus Simulia 6.10 Documentation)

## Κεφάλαιο 6° : Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)

Έπειτα από την ενεργοποίηση της διεπιφάνειας, η εκσκαφή πραγματοποιείται η προώθηση του μηχανήματος κατά 1m, όσο το πάχος μιας φέτας εκσκαφής. Κατά την προώθηση του μηχανήματος για την εκσκαφή του επόμενου 1m, δίνεται η εντολή υποστήριξης του μέτωπου με την απαιτούμενη προσφερόμενη πίεση. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται η πλήρωση του κενού που έχει δημιουργηθεί ανάμεσα στην ασπίδα και το γεωυλικό με ένεμα (grout). Το υλικό της ενεμάτωσης μεταβαίνει από την υδαρή μορφή, κατά την διαδικασία την εισπίεση, στη φάση της σκλήρυνσης. Κατά τη πρώτη φάση του ενέματος (υδαρή μορφή) η εισαγωγή του αποδίδεται με την άσκηση πίεσης στην επιφάνεια του γεωυλικού, στην ασπίδα και στο ήδη τοποθετημένο προκατασκευασμένο στοιχείο της επένδυσης. Στη δεύτερη φάση το σκληρυμένο ένεμα εισάγεται ως στοιχεία εδάφους (solid elements). Η σκλήρυνση του ενέματος θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε διάστημα 2ωρών. Θεωρώντας ότι το μηχάνημα εκσκάπτει 1m σε περίπου 1ώρα άρα το μηχάνημα έχει προωθηθεί κατά 2m όταν ολοκληρώνεται η σκλήρυνση.

Κατά τη προώθηση του μηχανήματος κατά το τρίτο βήμα, με επαναληπτική διαδικασία ασκείται η πίεση στο μέτωπο, τοποθετείται το επόμενο προκατασκευασμένο στοιχείο και ασκείται η πίεση του ενέματος σε περιβάλλον γεωυλικό, ασπίδα και segment. Στο ίδιο βήμα προστίθεται το πλέον σκληρυμένο ένεμα, δηλαδή ένεμα με ιδιότητες σκυροδέματος, το οποίο στο προηγούμενο βήμα είχε αποδοθεί ως πίεση.

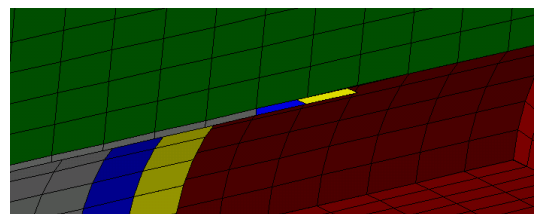
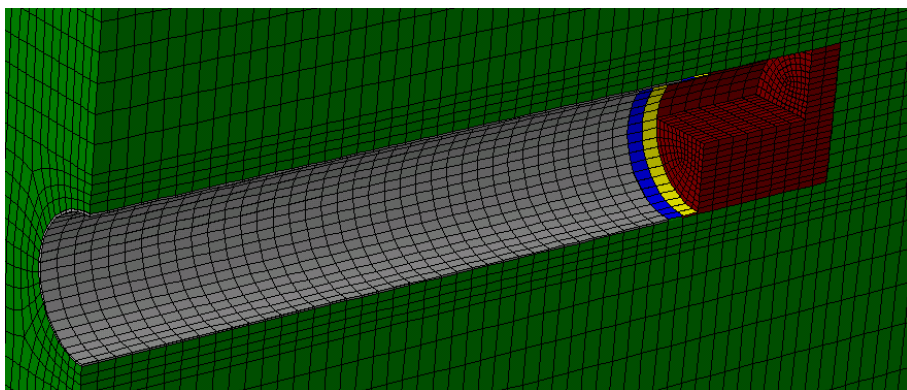
Στην Εικόνα 6-7 απεικονίζεται το 3<sup>ο</sup> βήμα όπου με μωβ χρώμα φαίνεται το σκληρυμένο ένεμα, το 2<sup>ο</sup> προκατασκευασμένο στοιχείο καθώς το μηχάνημα προωθείται κατά 1m.



Εικόνα 6-7: Απεικόνιση του 3<sup>ου</sup> βήματος όπου φαίνεται το σκληρυμένο ένεμα και τα πρώτα 3 προκατασκευασμένα στοιχεία

## Κεφάλαιο 6° : Δημιουργία αριθμητικού προσομιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)

Στην Εικόνα 6-8 που έπεται φαίνεται η προώθηση του μηχανήματος για τα πρώτα 40m, όπου διακρίνονται το τελευταίο προκατασκευασμένο στοιχείο (κίτρινο χρώμα), το προκατασκευασμένο στοιχείο στο οποίο ασκεί πίεση το υγρό ένεμα (μπλε χρώμα), τα προκατασκευασμένα στοιχεία και το σκληρυμένο ένεμα που έχουν τοποθετηθεί σε προηγούμενα βήματα.



Εικόνα 6-8: Απεικόνιση προώθησης του μηχανήματος





## **7 Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος**

### **7.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο επιλέγονται να παρουσιαστούν 4 από τις 24 αναλύσεις για το αριθμητικό προσομοίωμα με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος. Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα παρουσιάζονται στο Πίνακας 7-1.

**Πίνακας 7-1: Παράμετροι αναλύσεων και το εύρος των τιμών τους**

<b>Δεδομένοι Παράμετροι</b>	<b>Εύρος τιμών</b>
<b>Διάμετρος Σήραγγας (m)</b>	8
<b>Διάμετρος σήραγγας/Ύψος υπερκειμένων (H/D)</b>	3.5
<b>Ειδικό βάρος <math>\gamma</math>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	20
<b>Συντελεστής οριζόντιων γαιών <math>K_0</math></b>	1
<b>Συνοχή c (KPa)</b>	10,30,60
<b>Γωνία τριβής <math>\phi</math> (°)</b>	25, 35
<b>Γωνία διαστολικότητας <math>\delta</math> (°)</b>	4.2, 5.8
<b>Πίεση μετώπου <math>P_{fs}</math> (KPa)</b>	100,200

### **7.2 Ποιοτική Ανάλυση Αποτελεσμάτων**

Στο παρόν κεφάλαιο όμοιας με τα προηγούμενα μοντέλα επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν τα μεγέθη της συνολικής μετακίνησης  $U_{magnitude}$  και της εξώθησης του μετώπου (μετακινήσεις κατά των άξονα y-y).

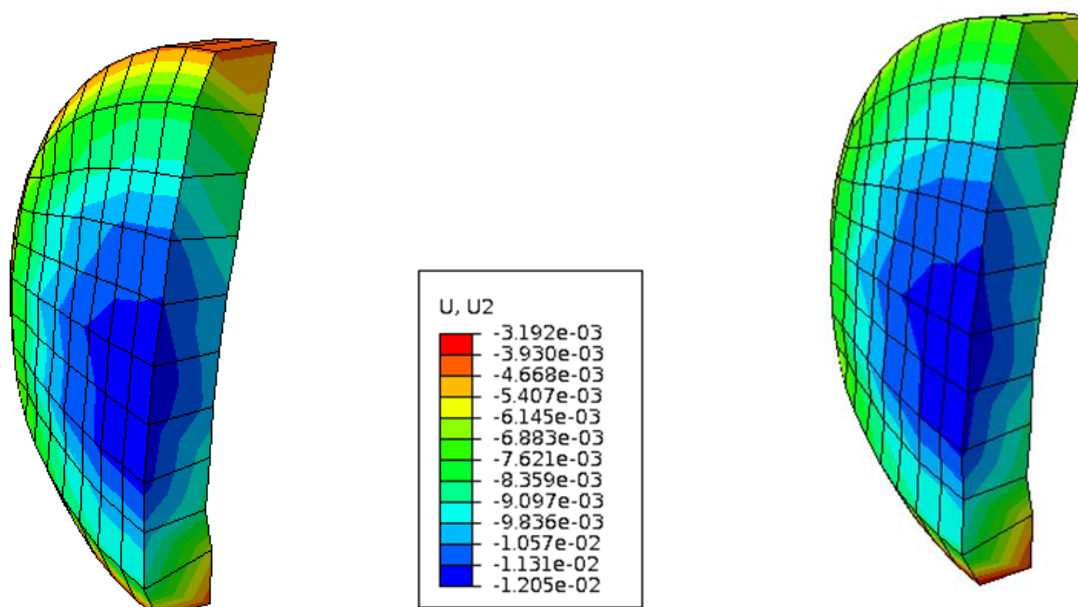
#### **7.2.1 Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου $D=8m$ , $H/D=3.5$ με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή $c=30KPa$ , γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ και ασκούμενη πίεση μετώπου $P_{fs} =200KPa$ , για κενό ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και την ασπίδα του μηχανήματος $G_{ap}=0cm$ και $G_{ap}=2cm$**

Οι δύο αναλύσεις που παρουσιάζονται διαφέρουν ως προς το κενό μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος- εκσκαφής. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, η ασκούμενη πίεση στο μέτωπο είναι κοινά αλλά το κενό της ασπίδας του μηχανήματος με το περιβάλλον γεωυλικό είναι στη πρώτη ανάλυση  $G_{ap}= 0cm$  ενώ στην δεύτερη είναι  $G_{ap}= 2cm$ .

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος

Σημειώνεται ότι όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, για να αποφύγουμε την επίδραση των συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα δεν λαμβάνονται υπόψη τα 5 πρώτα μέτρα της εκσκαφής της σήραγγας.

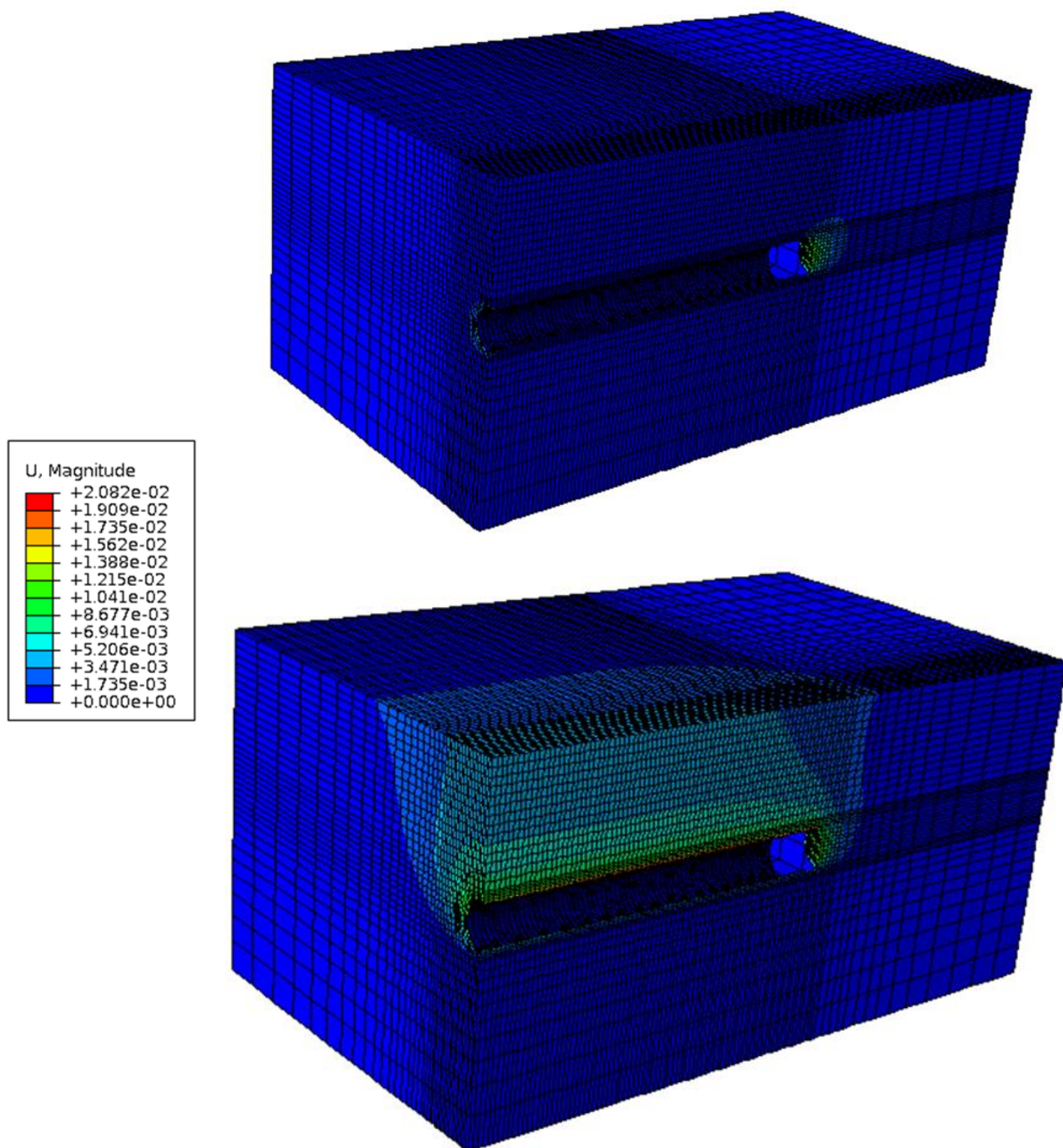
Στην Εικόνα 7-1 παρουσιάζεται η 81<sup>η</sup> φέτα στο μέτωπο της εκσκαφής. Η μέγιστη τιμή της εξώθησης εντοπίζεται στο κέντρο της σήραγγας, όμοια με τα προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος. Παρατηρείται η μείωση της εξώθησης του μετώπου καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο εξαιτίας του περιορισμού της κίνησης του από τις παρειές. Ωστόσο δεν παρατηρείται διακύμανση των τιμών της εξώθησης του μετώπου για τις δύο διαφορετικές τιμές κενού, λογικό συμπέρασμα καθώς η τιμή της εξώθησης δεν εξαρτάται από το δημιουργούμενο κενό ασπίδας-εκσκαφής.



Εικόνα 7-1: Απεικόνιση των τιμών εξώθησης μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας  $D=8m$ ,  $H/D=3.5$  αριστερά για  $Gap=0cm$  δεξιά  $Gap=2cm$  για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs} = 200KPa$

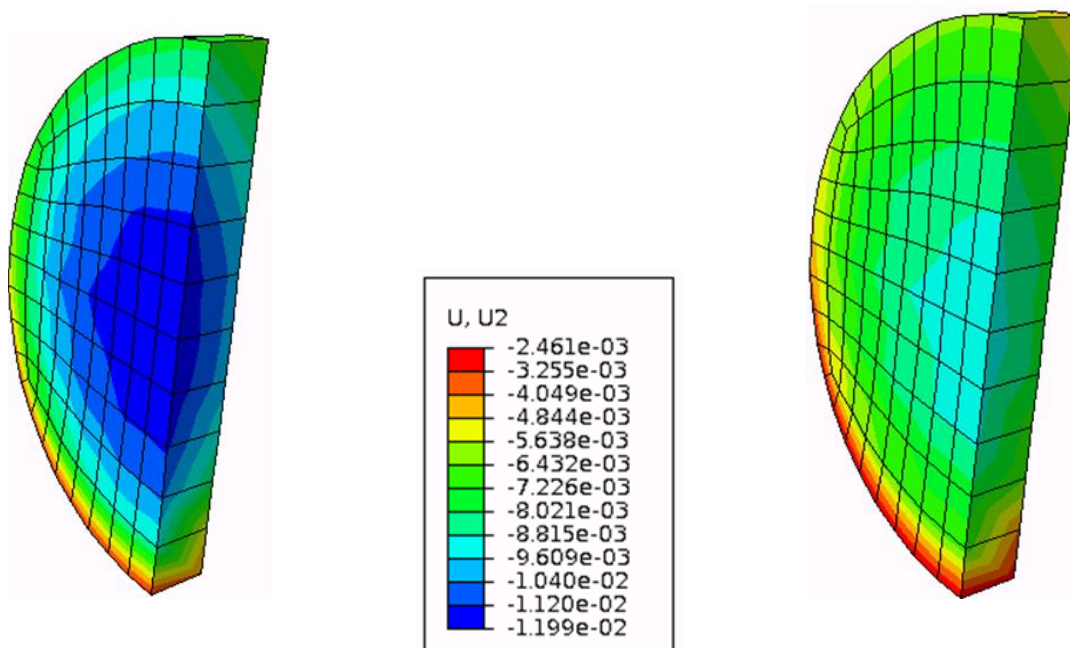
Στην Εικόνα 7-2 παρουσιάζεται η διάδοση των συνολικών μετακινήσεων για τη περίπτωση κενού μεταξύ της ασπίδας μηχανήματος και περιβάλλοντος εδάφους ίσο με  $Gap=0cm$  και  $Gap=2cm$ . Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας και στο μέτωπο αυτής. Φαίνεται ότι οι τιμές των συνολικών μετακινήσεων είναι μεγαλύτερες για κενό  $Gap=2cm$  με μέγιστη τιμή 20,82mm, σε αντίθεση με τη σχεδόν μηδενική τιμή για τη περίπτωση όπου το κενό μεταξύ της εκσκαφής - ασπίδας του μηχανήματος είναι μηδενικό.

## Κεφάλαιο 7° : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος



Εικόνα 7-2: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας διαμέτρου  $D=8\text{m}$  με λόγο ύψους υπερκειμένων/διάμετρου σήραγγας ίσο με  $H/D=3.5$  για ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$ , πάνω για  $G_{ar}=0\text{cm}$  κάτω για  $G_{ar}=2\text{cm}$

**7.2.2 Ενδεικτικές τιμές μεγεθών αριθμητικού προσομοιώματος διαμέτρου  $D=8m$ ,  $H/D=3.5$  με μηχανικά χαρακτηριστικά, συνοχή  $c=10KPa$ , γωνία τριβής  $\varphi=35^\circ$  και ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs}=100,200KPa$ , για κενό ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και την ασπίδα του μηχανήματος  $G_{ap}=2cm$**

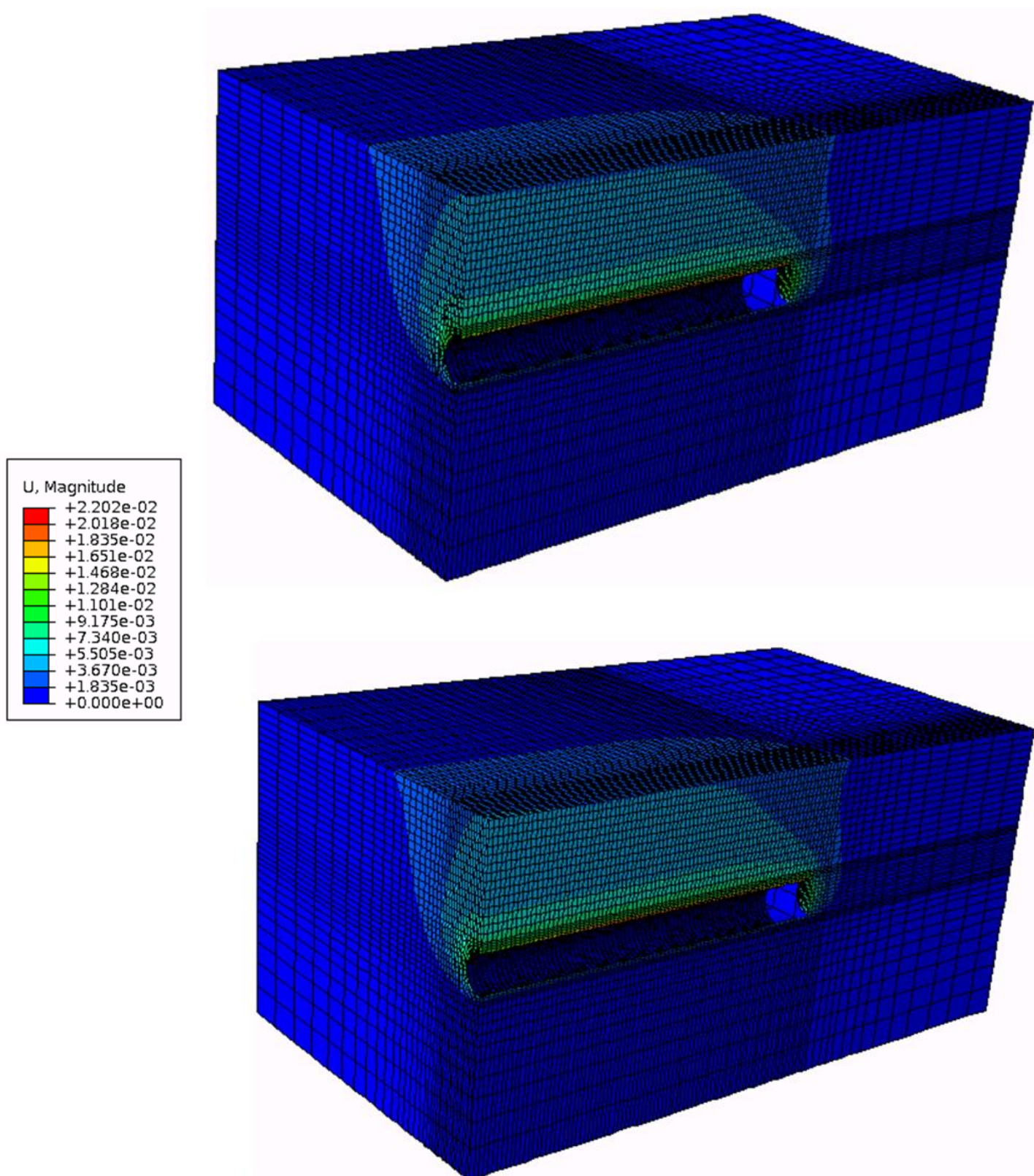


**Εικόνα 7-3: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την εξώθησης μετώπου στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας  $D=8m$ , αριστερά για ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs} =100KPa$ , δεξιά για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs} =200KPa$**

Από την Εικόνα 7-3 διαπιστώνεται ότι η μέγιστη τιμή της εξώθησης μετώπου αναπτύσσεται στο κέντρο της σήραγγας, κατά μήκος του άξονα  $y-y$ , καθώς εκεί εντοπίζεται το μέγιστο γεωστατικό φορτίο. Παρατηρείται ότι για το ίδιο κενό ασπίδας μηχανήματος-γεωυλικού, με την αύξηση της της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο η τιμή της εξώθησης μειώνεται. Για πίεση μετώπου  $P_{fs}=100KPa$  η μέγιστη τιμή εξώθησης είναι  $11,99mm$  σε αντίθεση με την μέγιστη τιμή  $8,815mm$  για  $P_{fs}=200KPa$ . Η μείωση αυτή αυξάνει προοδευτικά προς τις παρειές της σήραγγας, με την ελάχιστη τιμή να εντοπίζεται στη βάση της.



## Κεφάλαιο 7° : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος



Εικόνα 7-4: Απεικόνιση της συνολικής μετακίνησης στο αριθμητικό προσομοίωμα διαμέτρου σήραγγας  $D=8\text{m}$ , πάνω για ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs}=100\text{KPa}$ , κάτω για ασκούμενη πίεση μετώπου ίση με  $P_{fs}=200\text{KPa}$  για  $\text{Gap}=2\text{cm}$

## **Κεφάλαιο 7° : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος**

Η σύγκριση στην Εικόνα 7-4 αφορά τις αναπτυσσόμενες συνολικές μετακινήσεις. Στην ανάλυση για κενό  $G_{ap}=2\text{cm}$  οι μεγαλύτερες τιμές της συνολικής μετακίνησης εντοπίζονται στη στέψη της σήραγγας. Οι τιμές αυτές αναπτύσσονται κοντά στο μέτωπο διάνοιξης με βαθμιαία μείωση καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό. Επιπλέον οι τιμές της συνολικής μετακίνησης αυξάνονται με τη μείωση της ασκούμενης πίεσης και παρατηρείται ότι για ασκούμενη πίεση  $P_{fs}=100\text{KPa}$  οι τιμές κυμαίνονται από  $1,385\text{mm}-22,02\text{mm}$ , σε σχέση με τις τιμές για πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$  να λαμβάνουν μέγιστη και ελαχιστη τιμή  $1,776\text{mm}-21,31\text{mm}$  αντίστοιχα.

### **7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων από το αριθμητικό μοντέλο με τη προσομοίωση του μηχανήματος για τις διαφορετικές τιμές του διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής**

Με επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε υπολογιστικό φύλλο excel δημιουργούνται διαγράμματα που επιτρέπουν την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη διερεύνηση των επιδράσεων της διαφορετικού μεγέθους του διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος και εκσκαφής στην διάδοση των μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας, της ποσοστιαίας μεταβολής του εμβαδού και τη εξώθησης που παρουσιάζει το μέτωπο.

Τα χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων αναλύσεων είναι :

Συνοχή  $c=60\text{KPa}$ , Γωνία τριβής  $\varphi=25^\circ$

Ασκούμενη πίεση στο μέτωπο:  $P_{fs}=100, 200\text{KPa}$

Λόγος υπερκειμένων/Διαμετρο σήραγγας:  $H/D=3.5$

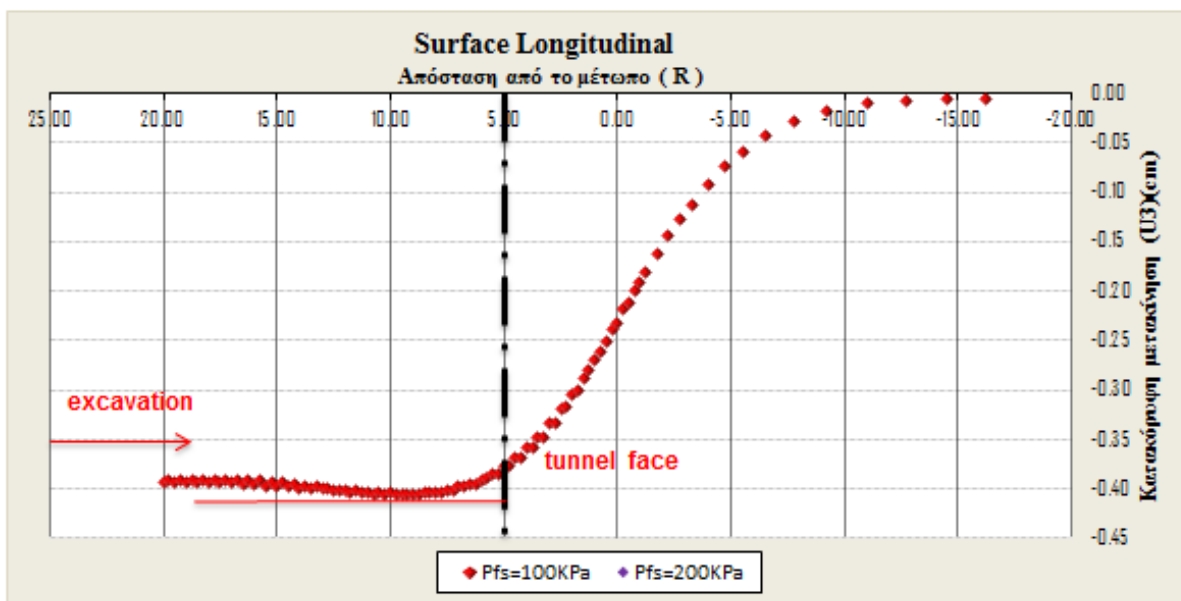
Δημιουργούμενο κενό γεωυλικού-ασπίδα μηχανήματος:  $2\text{cm}$

Στο Διάγραμμα 7-1 πραγματοποιείται η σύγκριση 2 αναλύσεων με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά γεωυλικού και κενό ασπίδας και εκσκαφής ίσο με  $G_{ap}=2\text{cm}$  για τις 2 διαφορετικές πιέσεις που ασκήθηκαν στο μέτωπο. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για πίεση μετώπου  $P_{fs}=100\text{KPa}$  και με μωβ χρώμα για ασκούμενη πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$ .

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις σταθεροποιούνται σε απόσταση  $4*R$  από το μέτωπο εκσκαφής. Επιπλέον παρατηρείται ότι για ασκούμενη πίεση  $P_{fs}=100\text{KPa}$  η μέση τιμή  $U_{3,average}=3,8\text{mm}$  είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$  όπου υπολογίζεται ίση με  $U_{3,average}=3,3\text{mm}$ . Εξάγεται το συμπέρασμα ότι μετά από κάποια τιμή της πίεσης η καθίζηση που συντελείται δεν εξαρτάται από αυτή.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος



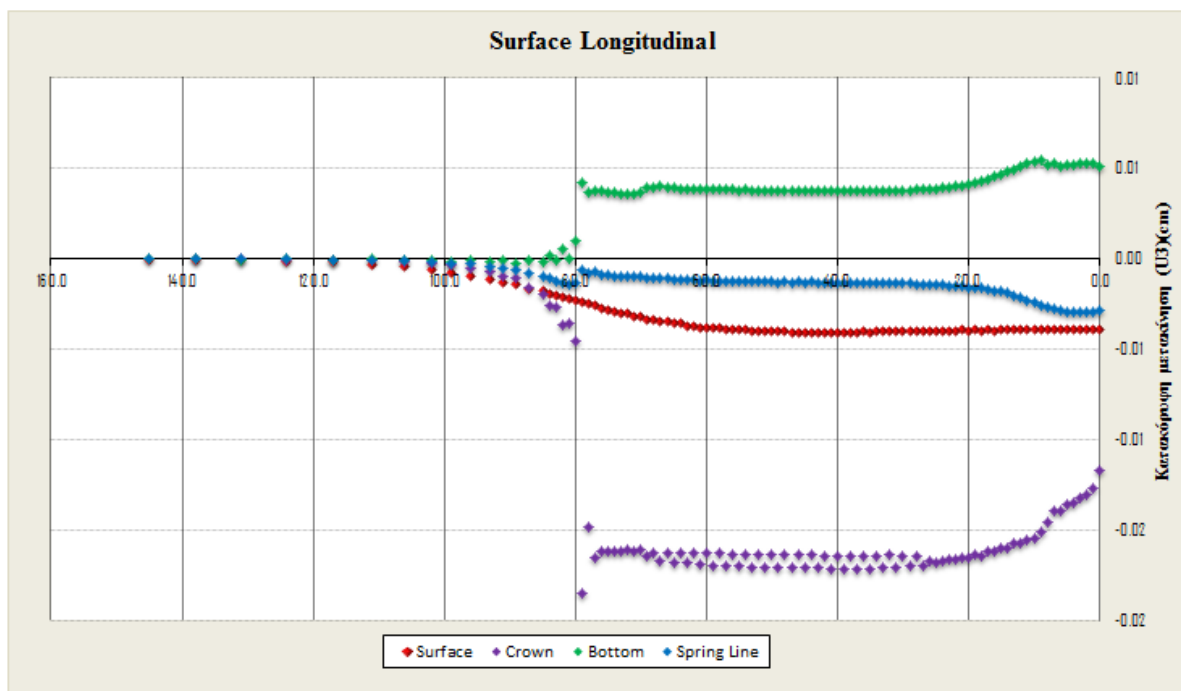
Διάγραμμα 7-1: Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $G_{ap}=2\text{cm}$

Σε αυτό το σημείο επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διαφοροποίηση της κατακόρυφης μετακίνησης σε 4 χαρακτηριστικές κομβοσειρές με στόχο να αποδοθεί η σημασία ύπαρξης του κενού μεταξύ της ασπίδας του μηχανήματος και του εδαφικού σχηματισμού. Συγκεκριμένα από την ανάλυση του αριθμητικού προσομοιώματος με χαρακτηριστικά εδάφους (συνοχή  $c=60\text{KPa}$  γωνία τριβής  $\phi=25^\circ$ ), κενό ασπίδας-εκσκαφής  $G_{ap}=2\text{cm}$  και πίεση μετώπου  $P_{fs}=200\text{KPa}$  συγκρίνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν στη στέψη της σήραγγας, στη βάση της, στην επιφάνεια και κατά το διαμήκη άξονα y-y (τον άξονα στο κέντρο της σήραγγας).

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 7-2, ότι η μεγαλύτερες τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων εντοπίζονται στην στέψη της σήραγγας σε αντίθεση με αυτές που προκύπτουν για τις μετακινήσεις στην επιφάνεια και στο διαμήκη άξονα. Επιπλέον η μετακινήσεις της επιφάνειας προκύπτουν μικρότερες από αυτές τις στέψης. Το μέγεθος των μετακινήσεων που εμφανίζονται στην επιφάνεια εξαρτάται από το ύψος των υπερκειμένων. Όσο πιο ρηχή είναι σήραγγα τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση των μετακινήσεων της στέψης στην επιφάνεια.

Σημειώνεται ότι οι θετικές τιμές που προκύπτουν στη βάση της σήραγγας είναι ανιζήσεις και αποτελούν αδυναμία του καταστατικού μοντέλου Mohr-Coulomb που χρησιμοποιεί το ίδιο μέτρο ελαστικότητας κατά τη φόρτιση και επαναφόρτιση.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος

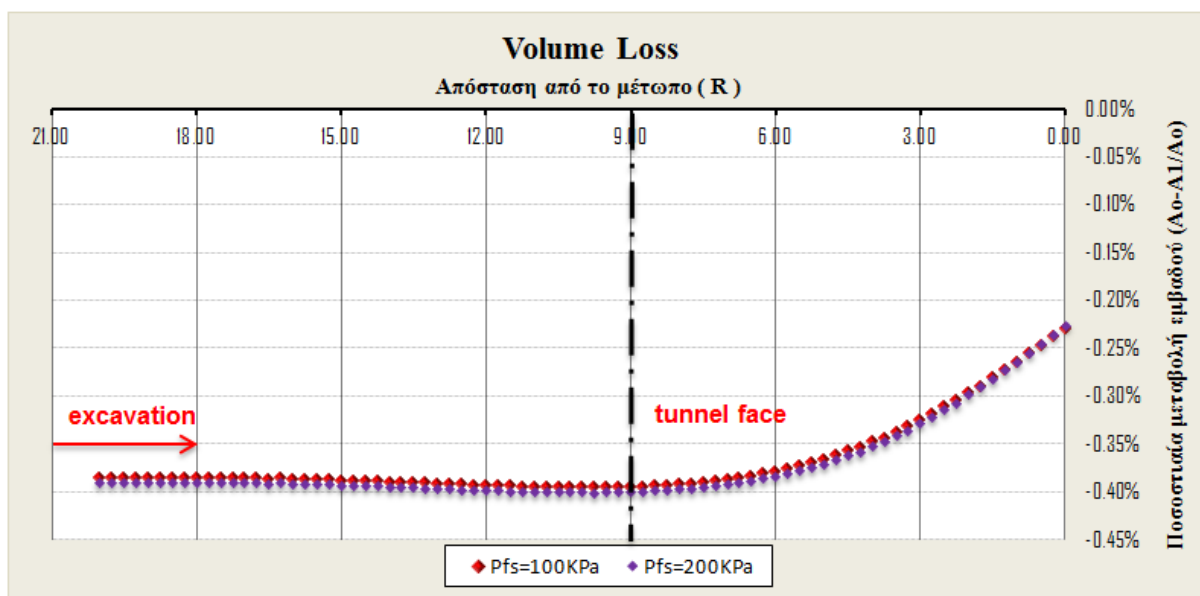


**Διάγραμμα 7-2:** Διάδοση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $Gar=2\text{cm}$  στη στέψη της σήραγγας, στη βάση της, στην επιφάνεια και κατά το διαμήκη άξονα

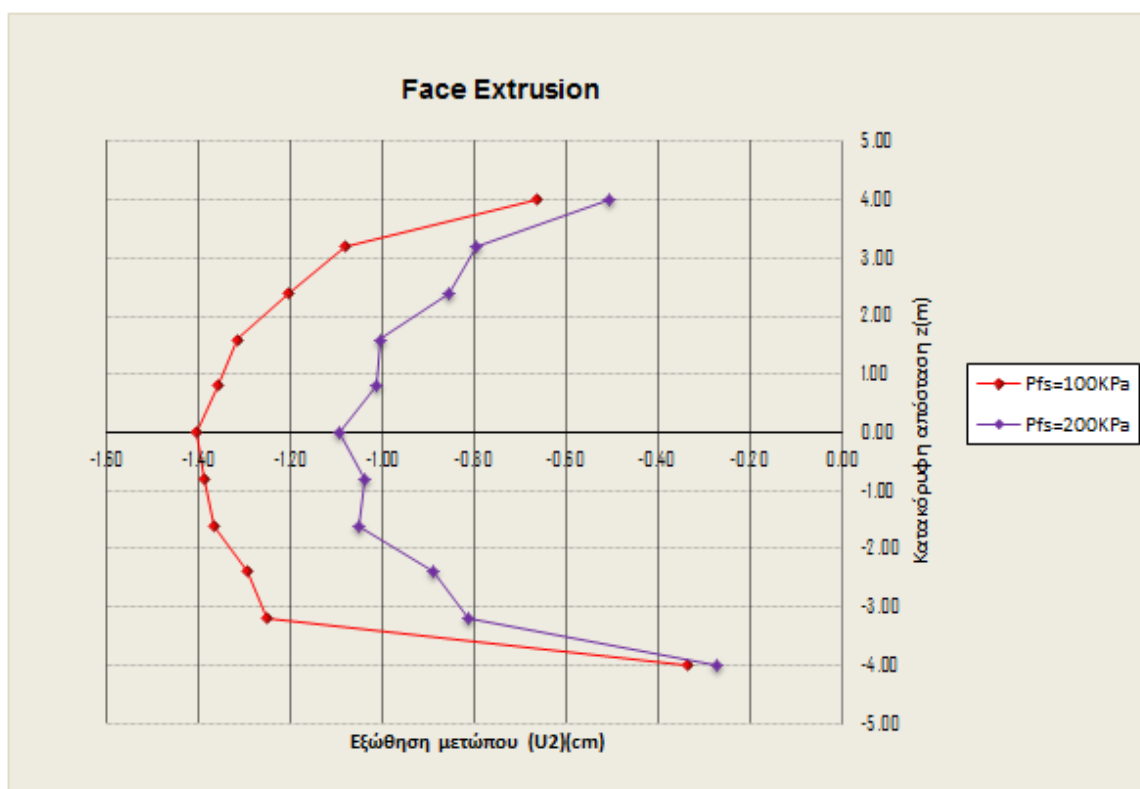
Στο παρακάτω Διάγραμμα 7-3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του εδαφικού όγκου του υλικού σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας. Αφορά ανάλυση για κενό εύρους 2cm και 2 διαφορετικές ασκούμενες πιέσεις  $P_{fs}=100\text{KPa}$  και  $P_{fs}=200\text{KPa}$ . Η μεταβολή του εδαφικού όγκου συνδέεται με τις καθιζήσεις που συντελούνται.

Στο Διάγραμμα 7-4 απεικονίζεται το μέγεθος της εξώθησης εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας. Η μέγιστη τιμή της εξώθησης εντοπίζεται στο κέντρο της σήραγγας και παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερη πίεση η τιμή αυτή μειώνεται. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της εξώθησης υπολογίζεται σε 14mm για πίεση μετώπου  $P_{fs}=100\text{KPa}$ , ενώ για  $P_{fs}=200\text{KPa}$  είναι ίση με 10mm.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος



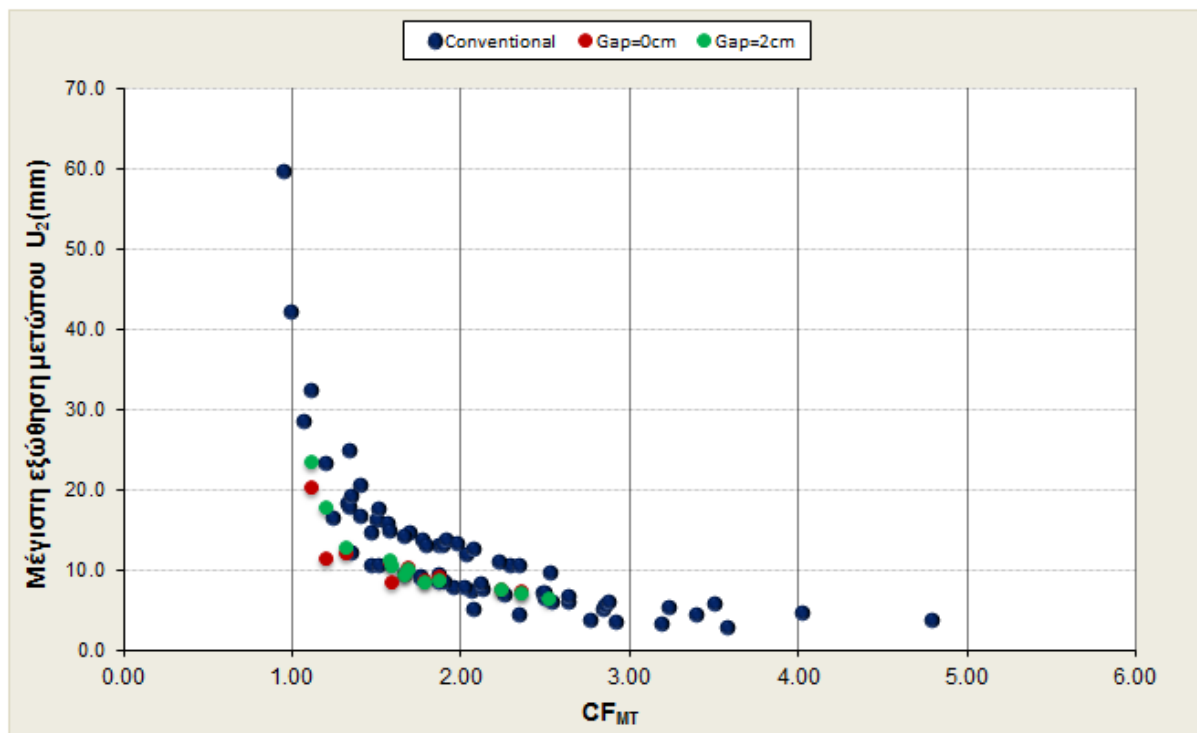
Διάγραμμα 7-3: Ποσοστιαία μεταβολή του εδαφικού όγκου σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $G_{ap}=2\text{cm}$



Διάγραμμα 7-4: Εξώθηση εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ανηγμένη ως προς την ακτίνα της σήραγγας για τη περίπτωση διαμορφωμένου κενού ασπίδας μηχανήματος εκσκαφής ίσο με  $G_{ap}=2\text{cm}$

### 7.4 Συσχέτιση αποτελεσμάτων αναλύσεων με το μέτρο ελαστικότητας E

Σύμφωνα με τη Σχέση 5-2, με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού φύλλου excel, κατασκευάστηκαν διαγράμματα για όλες τις αναλύσεις (72 αναλύσεις χωρίς την προσομοίωση του μηχανήματος και 12 αναλύσεις με τη προσομοίωση του μηχανήματος) με μια τελική συσχέτιση με το δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ).



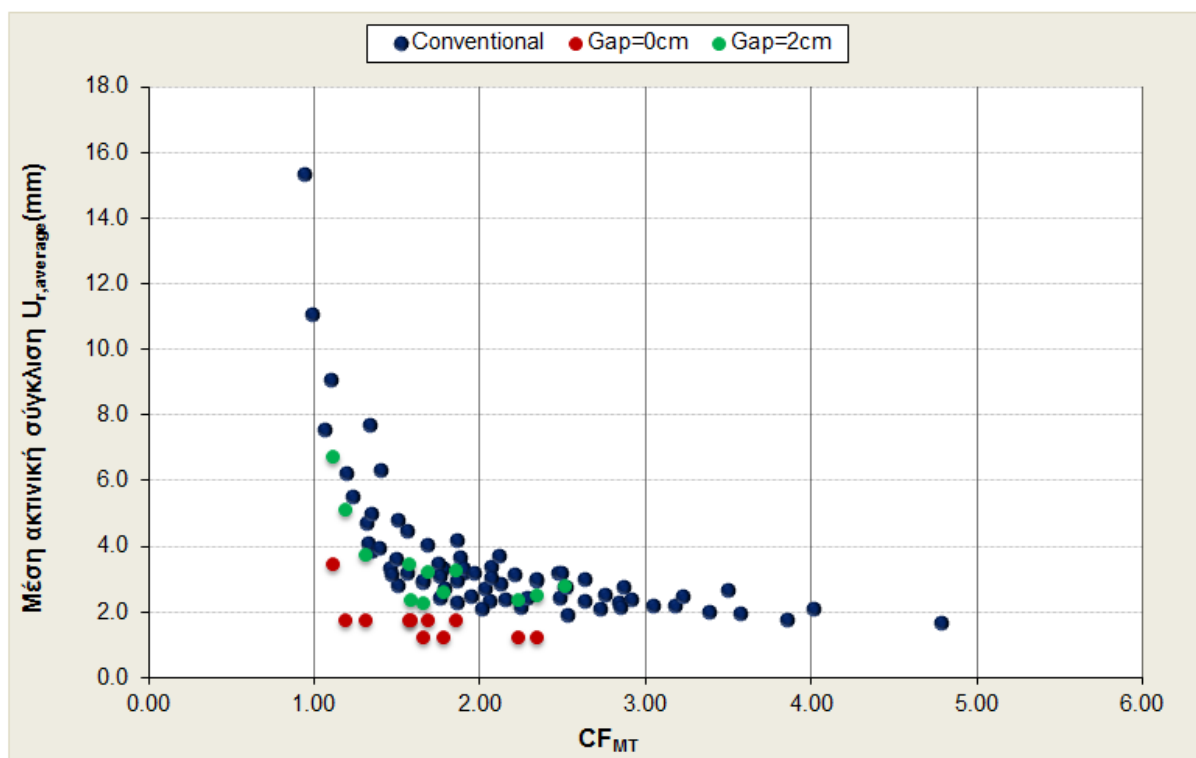
Διάγραμμα 7-5: Μεταβολή της μέγιστης εξώθησης του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$

Στο Διάγραμμα 7-5 που φαίνεται παραπάνω παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην εξώθηση του μετώπου και του δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ). Με το μπλέ χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις για τα αριθμητικά μοντέλα που δεν περιελάμβανε τη προσομοίωση του μηχανήματος, με πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου της μηχανοποιημένης εσκαφής όπου προσομοιώνεται το μηχάνημα εκσκαφής για διαμορφωμένο κενό ασπίδας μηχανήματος ίσο με 2cm και με κόκκινο χρώμα οι τιμές της εξώθησης μετώπου για κενό 0cm.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 7-5, οι τιμές της εξώθησης του μετώπου παρουσιάζουν ομαλή φθίνουσα τάση συναρτήσει της σχέσης που προτάθηκε. Οι μετρήσεις παρουσιάζουν κάποια συγκέντρωση για  $F=1.00-2.50$  και παρατηρείται ότι ο όρος που συμπεριελήφθει δεν επηρρέασε τη κατανομή τους των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των μεγεθών με τη συμβατική μέθοδο. Όπως έχει αναφερθεί αυτό συμβαίνει καθώς η εξώθηση του μετώπου δεν επηρεάζεται από το κενό ασπίδας-εσκαφής.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος

Ακολουθεί το Διάγραμμα 7-6 όπου στον κατακόρυφο άξονα λαμβάνονται οι τιμές για τη μέση ακτινική σύγκλιση που προέκυψαν για όλες τις αναλύσεις και στον οριζόντιο άξονα μετρώνται οι τιμές του δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ).

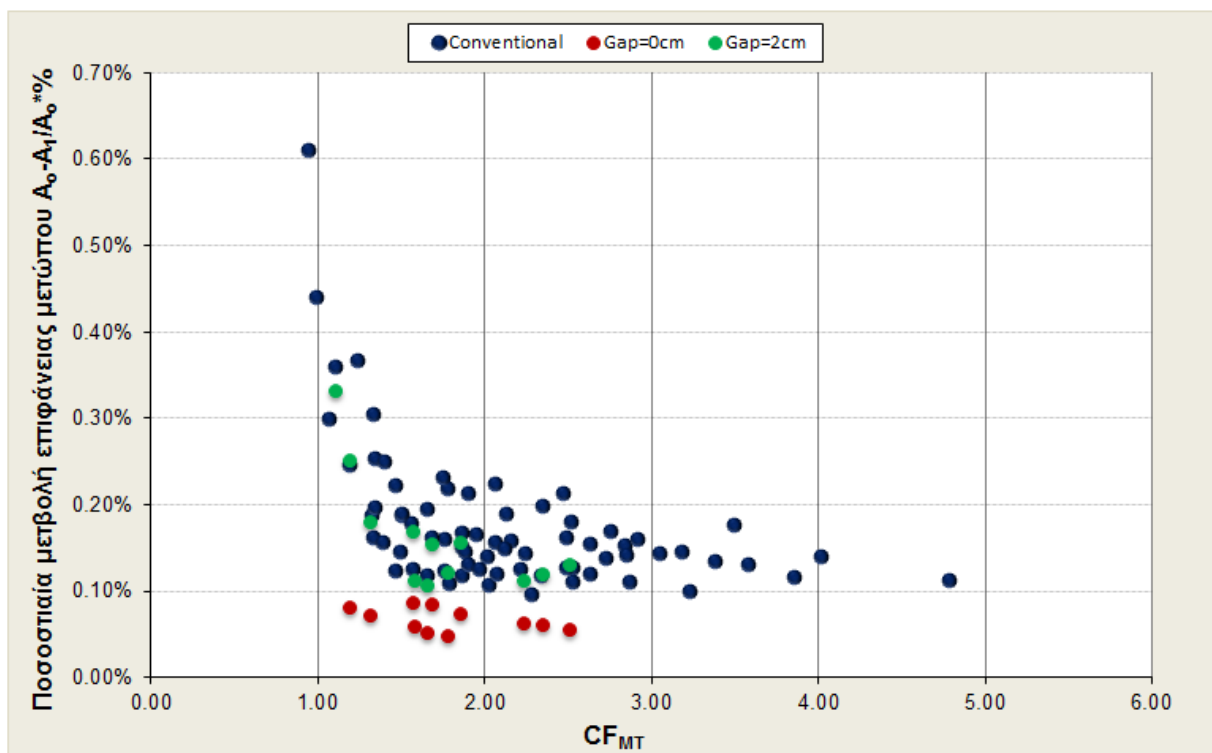


Διάγραμμα 7-6: Μεταβολή της μέσης ακτινικής σύγκλισης του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$

Σύμφωνα με την εικόνα του διαγράμματος, φαίνεται ότι οι τιμές της μέσης ακτινικής σύγκλισης με κενό ίσο με 2cm ακολουθούν αυτή τη φθίνουσα τάση των μετρήσεων που προέκυψαν από τις αναλύσεις χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι οι τιμές για μηδενικό διαμορφωμένο κενό ασπίδας μηχανήματος με την εκσκαφή ακολουθούν μια γραμμική κατανομή.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Αποτελέσματα αναλύσεων του αριθμητικού προσομοιώματος με πλήρη προσομοίωση του μηχανήματος



Διάγραμμα 7-7: Ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου για το σύνολο των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με ή χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι οι τιμές της εξώθησης μετώπου, της μέσης ακτινικής σύγκλισης και της ποσοστιαίας μεταβολής της επιφάνειας του μετώπου για κενό ασπίδας μηχανήματος- εκσκαφής ίσο με 2cm και οι αντίστοιχες τιμές χωρίς τη προσομοίωση του μηχανήματος συσχετίζονται καλύτερα και παρουσιάζουν την ίδια φθίνουσα τάση . Σε αντίθεση με τις μετρήσεις όπου το Gap=0cm όπου δείχνουν μια ανεξαρτητή και γραμμική τάση.

Οι μετρήσεις των αναλύσεων με κενό ίσο με 2cm και των αναλύσεων όπου είχε αφεθεί ένα μέτρο ανυποστήριχτο προσομοιώνουν με καλύτερο τρόπο τις πραγματικές συνθήκες διάνοιξης. Οι μετρήσεις αυτών των αναλύσεων προκαλούν μεγαλύτερες μεταβολές των μετρούμενων μεγεθών σε αντίθεση με την ιδεατή περίπτωση για μηδενικό κενό όπου τιμές που υπολογίζονται να είναι πολύ μικρότερες.

### 8 Συμπεράσματα

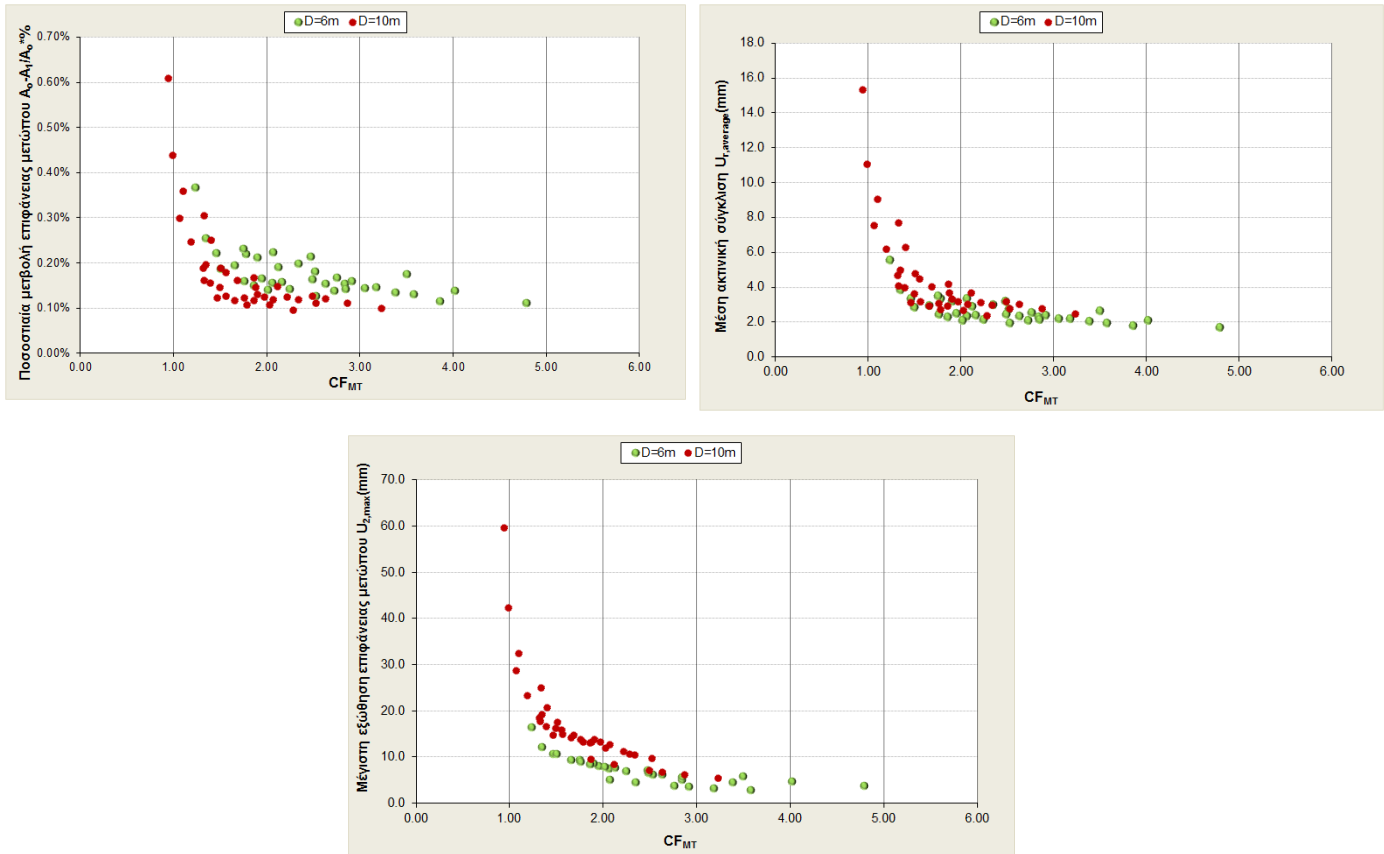
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των μεγεθών της ακτινικής σύγκλισης στη περιφέρεια του μετώπου και της εξώθησης του μετώπου. Και κατ'επέκταση ο προσδιορισμός της ποσοστιαίας μεταβολής της επιφάνειας του μετώπου της σήραγγας. Με απότερο στόχο τη σύνδεση του εδαφικού υλικού που ζυγίζεται στο πίσω μέρος του μηχανήματος με τη ποσοστιαία μεταβολή του εμβαδού και δηλαδή με το προσδιορισμό της υπερεκσκαφής στο μέτωπο. Σε αυτή τη προσπάθεια διερεύνησης μελετήθηκε η επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και της πίεσης που εφαρμόζεται στο μέτωπο.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται για της 72 αναλύσεις της συμβατικής προσομοίωσης των προσομοιωμάτων:

- Για αναλύσεις με ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους, ίδια ασκούμενη πίεση μετώπου για τους 3 διαφορετικούς λόγους ύψους υπερκειμένων/διαμέτρου σήραγγας (H/D) προκύπτει ότι με την αύξηση των υπερκειμένων η τιμή της συνολικής μετακίνησης αυξάνεται.
- Για την ίδια σύγκριση αναλύσεων, η τιμή του μεγέθους της εξώθησης του μετώπου όμοια παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση των υπερκειμένων. Γενικά η μέγιστη τιμή της εξώθησης μετώπου εντοπίζεται στον κεντρικό άξονα της εκσκαφής. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται σε αυτό το σημείο εξαιτίας της αύξησης του γεωστατικού φορτίου.
- Για αναλύσεις με ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά, ίδιο λόγο H/D αλλά με διαφορετικές ασκούμενες πιέσεις επί το μέτωπο προκύπτει μείωση των τιμών της συνολικής μετακίνησης με την αύξηση της ασκούμενης πίεσης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για τις τιμές της εξώθησης του μετώπου, όπου για το διπλασιασμό της πίεσης υπολογίζεται η τιμή της εξώθησης μετώπου μειώνεται αισθητά.
- Ακολούθησε η συσχέτιση των μεγεθών της μέσης ακτινικής σύγκλισης, της μέγιστης εξώθησης του μετώπου και της ποσοστιαίας μεταβολής της επιφάνειας του μετώπου με το δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ). Η εξίσωση περιελάμβανε τη τιμή του μέτρου ελαστικότητας και το ποσοστό της ασκούμενης πίεσης.

$$CF_{MT} = \frac{1}{1000} * \left[ \frac{4 * E}{\gamma * H^{0.8} * D^{0.2}} \right] * \left[ 2 * \sqrt{\frac{Face\ Pressure}{K_o * \gamma * H}} \right]$$

Από τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν η συσχέτιση των μετρήσεων με τη προτεινόμενη σχέση χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή, **Error! Reference source not found.**



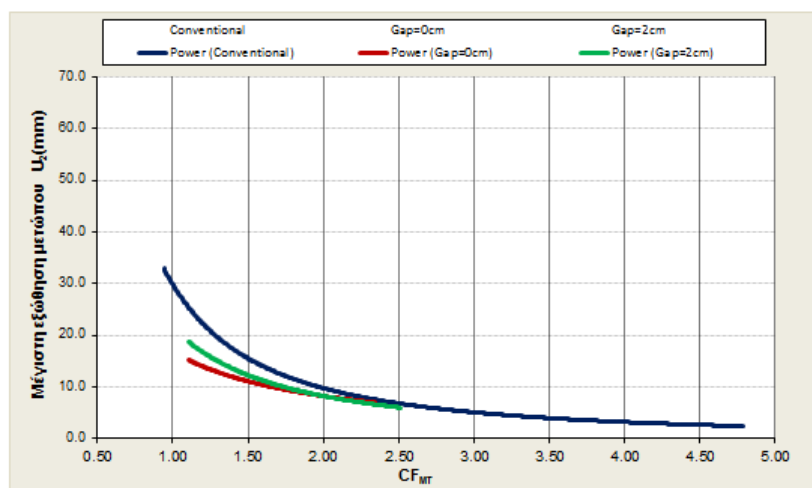
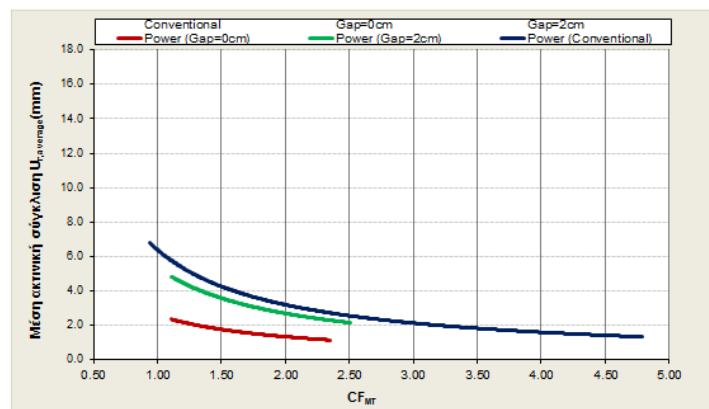
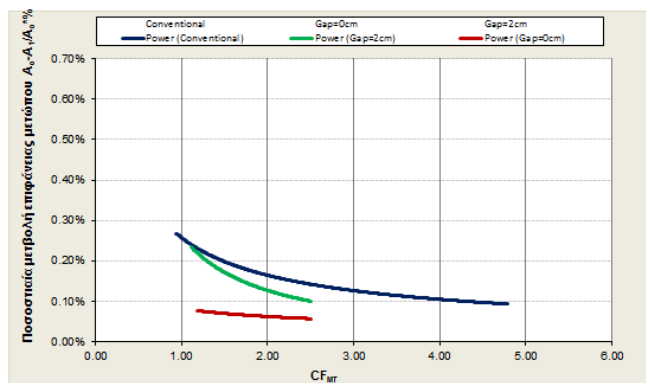
**Διάγραμμα 8-1: Διαγράμματα μεταβολής σε σχέση με το δείκτη CFMT για τα μεγέθη της ποσοστιαίας μεταβολής επιφάνειας μετώπου (πάνω αριστερά), μέση ακτινική συλγκλιση (πάνω δεξιά) , μέγιστη εξώθηση μετώπου (κάτω)**

Από το πλήθος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου, συνεπώς η μεταβολή του εδαφικού όγκου, συνδέεται άμεσα και προκύπτει από τις υπολογιζόμενες ακτινικές συγκλίσεις. Η μεταβολή αυτή υπολογίζεται κάτω από το 0.3%, ποσοστό πολύ μικρό και εντός των ορίων σφαλμάτων της ζυγαριάς.

- Από τις αναλύσεις με τη νέα μέθοδο προσομοίωσης με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους, ίδια πίεση μετώπου αλλά με κενό  $Gar=0cm$  και  $Gar=2cm$  προκύπτει ότι η ύπαρξη κενού η όχι δεν επηρεάζει τις τιμές του μεγέθους της εξώθησης του μετώπου. Ωστόσο παρατηρείται έντονη αύξηση στις τιμές της συνολικής μετακίνησης με την αύξηση του κενού.
- Για αποτελέσματα των αναλύσεων με το ίδιο μέγεθος  $Gar$ , αλλά διαφορετική ασκούμενη πίεση μετώπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συνολική καθίζηση δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Σε αντίθεση με τις τιμές για την εξώθηση του μετώπου όπου παρατηρείται ότι η μείωση των τιμών της με την αύξηση της πίεσης στο μέτωπο.
- Κατόπιν πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων όπου προσομοιώθηκε το μηχάνημα με τις αναλύσεις της συμβατικής μεθόδου. Η συσχέτιση αυτή συντελείται με το δείκτη Convergence Factor Mechanized Tunneling ( $CF_{MT}$ ). Από τα διαγράμματα που

## Συμπεράσματα

κατασκευάστηκαν η συσχέτιση των μετρήσεων με τη προτεινόμενη σχέση χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων για  $Gap=2cm$  ακολουθούν σε ικανοποιητικό βαθμό αυτή των αποτελεσμάτων με τη συμβατική μέθοδο.



**Διάγραμμα 8-2: Διαγράμματα συσχέτισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων της συμβατικής μεθόδου με τη νέα μέθοδο προσομοίωσης σε σχέση με το δείκτη  $CF_{MT}$**

Εν κατακλείδι, συγκεντρωτικό και σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ποσοστιαία μεταβολή της επιφάνειας του μετώπου (περίπου 0,5%) είναι μικρότερη από το 1%, αριθμός που προτείνεται και ως απόκλιση κατά τη ζύγιση του εδαφικού υλικού. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι μετρήσεις όπου προσομοιώθηκε το κενό ίσο με  $Gap=2cm$  ακολουθούν τη τάση των αποτελεσμάτων της συμβατικής μεθόδου.



### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Στα πλαίσια κάποιας μελλοντικής έρευνας και σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων προτείνεται η μελέτη αριθμητικών προσομοιωμάτων διαφορετικής γεωμετρίας, δηλαδή διαφορετικής διαμέτρου σήραγγας και διαφορετικής αναλογίας υπερκειμένων/διαμέτρου σήραγγας.
- Αναφορικά με τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση του χωρίς να εξαρτάται υπολογιστικά από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους (συνοχή, γωνία τριβής) αλλά να υπολογίζεται με διαφορετική αριθμητική σχέση.
- Επίσης, θα ήταν δόκιμο να ερευνηθούν αριθμητικά μοντέλα η ανάλυση των οποίων θα έκανε χρήση διαφορετικού καταστατικού νόμου εκτός του Mohr Coulomb, όπως είναι το Cam-Clay ή το soil hardening model
- Στα δεδομένα των αναλύσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο συντελεστής ουδέτερων εδαφικών μετακινήσεων υπολογίστηκε  $K_0=1$ . Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η χρήση η λήψη διαφορετικών τιμών για το συντελεστή ωθήσεων ( $K_0=0.5$ ,  $K_0=1.5$ ).
- Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η εκτέλεση αναλύσεων με διαφορετικές ασκούμενες πιέσεις.
- Για τη νέα μέθοδο προσομοίωσης με προσομοίωση του μηχανήματος προτείνεται η διερεύνηση επίδρασης διαφορετικού μεγέθους κενού ασπίδας μηχανήματος-εδάφους
- Ακόμη δύναται να ερευνηθεί η επίδραση του κενού σε σήραγγα διαφορετικής γεωμετρίας, δηλαδή σύγκριση αριθμητικών μοντέλων με διαφορετική διάμετρο σήραγγας και ύψος υπερκειμένων.



### Βιβλιογραφία

1. Abaqus Simulia 6.10 Manual Documentation
2. Abdullah Alsahly, Janosch Stascheit and Gunther Meschke (2013): Three dimensional re-meshing for real time modeling of advancing process in mechanized tunneling
3. Βαζαΐος Ιωάννης (2012). Επιβλ. Καθηγητής: Μ. Καββαδάς. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία: Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών- γεωτεχνικών συνθηκών και η εφαρμογή της στην εκτίμηση των επιφανειακών μετακινήσεων σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων εφαρμόζοντας αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης. Το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του μετρό Θεσσαλονίκης
4. Denys Slinchenko: Control of ground settlement in EPB tunneling, LOVAT Inc., 441 Carlingview Dr., Toronto, Ontario, Canada
5. Do, N. A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 3D Modelling for Mechanized Tunneling in Soft Ground-influence of the Constitutive Model. American Journal of Applied Sciences, 10(8), 863–875. doi:10.3844/ajassp.2013.863.875
6. Eric Leca (2006) : Settlements induced by tunneling in Soft Ground, ITA/AITES Report
7. Indra Banerjee, Richard McLane, Ed Shorey, Paul Gasson: TBM conveyor belt scales: The university link project experience
8. Καββαδάς Μ.(2005): Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα
9. Kavvadas Michael, Proutzopoulos George, Fortsakis Petros, Tzivakos Kwnstantinos, Litsas Dimitris, Chortis Philippos, (2013) Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunneling, NETTUN Research Program
10. Kai Zhao, Michele Janutolo, Giovanni Barla (9 March 2012) : A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation
11. Meschke G.[et al.](2008): Numerical Simulation of Mechanized Tunneling as Part of an Integrated Optimization Platform for Tunneling Design, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)
12. Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G.(2012) : Mechanised Shield Tunneling
13. Martin Herrenknecht/ Dr. Ulrich Rehm: Earth Pressure Balance Shield Technology
14. Nagel, F. and G. Meschke (2011): Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements. Tunneling and Underground Space Technology
15. Ngoc-Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste and Irini Djeran-Maigre, (2013), 3D Modelling for mechanized tunneling in soft ground-influence of the constitutive model
16. Προυντζόπουλος Γ.(2012). Επιβλ. Καθηγητής: Μ.Καββαδάς. Διδακτορική διατριβή: Διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής αβαθών σηράγγων, Ε.Μ.Π.

17. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control*. Taylor & Francis.
18. Rafik Demach, Fabrice Emeriault, Farid Hammoud (2013): *3D Modelling of tunnel excavation using pressurized tunnel boring machine in overconsolidated soils*
19. Ραχμάνη Ανθή (2013) . Επιβλέπων Καθηγητής: Μ. Καββαδάς. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασίας : Διερεύνηση των καθιζήσεων σε αβαθείς σήραγγες με συμβατική και μηχανοποιημένη μέθοδο εκσκαφής σε αστικό περιβάλλον