



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

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

## **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ ΤΟΥ ΤΒΜ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Σ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ**

ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, Π. Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017



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





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή Μιχαήλ Καββαδά, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου έδωσε την ευκαιρία για αυτή την ευχάριστη, ενδιαφέρουσα και πολύ εποικοδομητική συνεργασία.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, και κυρίως την ερευνητική ομάδα του κ. Καββαδά καθώς ήταν παρόντες να μου παρέχουν τη στήριξη και την γνώμη τους παρά τον μεγάλο φόρτο εργασίας τους. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Λίτσα και τον διδάκτορα Παναγιώτη Σιταρένιο για την καθοριστική συμβολή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, καθώς ήταν πάντα παρόντες να μοιραστούν μαζί μου τις υψηλού επιπέδου επιστημονικές γνώσεις τους, σε θεωρητικό και προγραμματιστικό επίπεδο, προσφέροντας μου πάντα λεπτομερή και κατανοητή επεξήγηση σε οποιαδήποτε απορία. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Φίλιππο Χόρτη για όλες τις εύστοχες παρατηρήσεις και προτάσεις του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, και συγκεκριμένα τον Γεώργιο Βουτσά και τον Γεώργιο Δούλκα για τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε μαζί κατά την εκπόνηση των διπλωματικών εργασιών μας.

Με την ολοκλήρωση αυτή των μεταπτυχιακών σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά του γονείς μου Σταύρο και Αιμιλία, την νονά μου Κυριακή για την ηθική και υλική στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης, θα ήθελα ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου επί πολλά χρόνια στην Πάτρα, Γεώργιο Μυλωνάκη, που αποτελεί τον λόγο που στράφηκε το ενδιαφέρον μου προς την γεωτεχνική μηχανική στα προπτυχιακά μου χρόνια.

Κυριακόπουλος Θεόδωρος  
Πολιτικός Μηχανικός, Π. Π.  
Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά της επιφανειακές και υπόγειες μετακινήσεις που προκαλούνται από την διάνοιξη σήραγγας με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής. Το πεδίο διερεύνησης εστιάζει σε επιφανειακές σήραγγες κάνοντας θεώρηση κορεσμένου εδαφικού υλικού. Συγκεκριμένα, διεξάγονται τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις κάνοντας χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, θεωρούνται κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για την περιγραφή της απόκρισης του γεωυλικού. Οι παράμετροι που διερευνώνται είναι (i) οι γεωτεχνικές συνθήκες, (ii) η πίεση ενέματος, (iii) το ουραίο κενό και (iv) η πίεση των ρευστών (πολφός και ένεμα) στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Οι αριθμητικές αναλύσεις συγκρίνονται με αναλυτικές και εμπειρικές λύσεις από την βιβλιογραφία.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μία αναφορά στην βιβλιογραφία και αναλύονται οι διαφορετικές κατηγορίες μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής που χρησιμοποιούνται στην μηχανοποιημένη όρυξη και οι γεωτεχνικές συνθήκες και οι τύποι των έργων όπου η κάθε κατηγορία μηχανήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ενώ μία πιο εκτενής περιγραφή των μηχανημάτων και των μερών που τα αποτελούν γίνεται συγκεκριμένα για τις κατηγορίες μηχανημάτων Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης και Πολφού Μπεντονίτη. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται αναλυτικές, εμπειρικές και αριθμητικές προτεινόμενες μέθοδοι και επιλύσεις από την διεθνή βιβλιογραφία για πρόβλεψη των επιφανειακών και υπόγειων μετακινήσεων προκαλούμενων από την διάνοιξη σηράγγων. Όσον αφορά τις αναλυτικές και τις εμπειρικές μεθόδους, αναφέρονται οι βασικές σχέσεις χωρίς να εστιάση στο μαθηματική υπόβαθρο, καθώς επίσης μερικές από τις προτεινόμενες σχέσεις συγκρίνονται με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια περιγράφεται διεξοδικά η μόρφωση του μοντέλου για την αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας μηχανοποιημένης όρυξης. Όλα τα στοιχεία του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής έχουν προσομοιωθεί με λεπτομέρεια, ενώ η αλληλεπίδραση της ασπίδας με το περιβάλλον γεωυλικό προσομοιώνεται με χρήση νόμου διεπιφάνειας.

Το κύριο μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παραμετρικής διερεύνησης. Παρουσιάζονται χρονοϊστορίες καθιζήσεων πάνω από τον άξονα της σήραγγας και προφίλ καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας, χρονοϊστορίες πιέσεων πόρων, πλαστικές παραμορφώσεις και συγκεντρωτικά διαγράμματα για τα μεγέθη που

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

διερευνώνται. Σημειώνεται ότι και οι γεωτεχνικές συνθήκες, το ουραίο κενό, η πίεση ενέματος και η πίεση των ρευστών στο κενό, επηρεάζουν σημαντικά τις καθιζήσεις, σε διαφορετικό, ωστόσο, βαθμό. Ακόμα στη σύγκριση με αναλυτικές και εμπειρικές λύσεις η σύγκλιση που παρατηρείται είναι ικανοποιητική, αν και πιο κοντά στην περιφέρεια της σήραγγας, τα προφίλ κατακόρυφων μετακινήσεων που προκύπτουν από τις αναλύσεις διαφέρουν από τις εμπειρικές καμπύλες.

## ABSTRACT

This thesis investigates the tunneling-induced surface and subsurface settlements in urban environment due to shield tunneling. The investigation field focuses on shallow tunnel depths and assuming saturated ground conditions. Specifically, 3D numerical coupled analyses are performed using the finite element software Abaqus, assuming Mohr-Coulomb failure criterion to describe the ground behavior response. The investigated parameters (i) the geotechnical conditions, (ii) the grout pressure, (iii) the tail/annular gap and (iv) the pressure of the fluids (grout and slurry) inside the void between the shield and the surrounding soil. The numerical results are also compared with analytical and empirical solutions from literature.

In the first part of the thesis, a literature review takes place analyzing the different types of tunnel boring machines used in mechanized tunneling, the geotechnical conditions and the types of tunneling projects that each type is applicable for, while a more thorough description of the machines and their components is done for EPB and the Slurry machines. Furthermore, analytical, empirical and numerical proposed methods and solutions are presented from the international literature for the surface and subsurface settlement prediction due to shield tunneling. Concerning the analytical and empirical methods, the basic assumptions and relationships are presented without focusing significantly in the mathematical background, while some of the proposed relationships are compared with the numerical analyses results of this thesis.

Afterwards the thesis thoroughly describes the numerical modelling techniques used to simulate the shield tunneling procedure. All the components of the EPB machine have been modelled in detail, while the shield-soil interaction have been done by interfaces.

The main part of the thesis is completed with the results of the parametric analyses, which are presented through diagrams of the examined magnitudes such as: settlements, soil movements, pore pressure and plastic deformation of the surrounding soil. Furthermore, additional results from the calculations of the maximum surface and crown vertical displacements, volume loss as a function of the soil undrained shear strength are provided. It should be highlighted that all the parameters investigated in this thesis (geotechnical conditions, grout pressure, tail gap, and gap fluid pressure) have significant effect on the settlements, but on a different level. In addition, a

## ABSTRACT

---

comparison with analytical and empirical solutions for the settlements is done leading to satisfying convergence between the results. However, though it is important to observe that as the comparison is made for settlements closer to the tunnel periphery, the numerical settlement profiles start to differentiate from the empirical Gaussian curves.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... i

ABSTRACT ..... iii

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ..... v

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... ix

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... xix

ΣΥΜΒΟΛΑ / ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ..... xxi

**1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 1**

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ..... 1

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ..... 1

1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... 2

**2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΒΜ ..... 5**

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 5

2.2 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ..... 5

2.2.1 Χωρίς ασπίδα ανοικτής λειτουργίας (Gripper TBM)..... 6

2.2.2	Ανοικτής λειτουργίας TBM με ασπίδα .....	6
2.2.3	TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB - Earth Pressure Balance).....	8
2.2.4	TBM πολφού μπεντονίτη .....	9
2.2.5	Υβριδικά TBM .....	10
2.3	ΧΡΗΣΗ TBM ΓΙΑ ΑΒΑΘΕΙΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΣΕ ΕΛΑΦΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....	11
2.3.1	Τα μέρη ενός μηχανήματος EPB.....	11
2.3.2	Τα μέρη ενός μηχανήματος τύπου πολφού μπεντονίτη (Slurry TBM).....	22
<b>3</b>	<b>ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΒΑΘΟΣ .....</b>	<b>27</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	27
3.2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΓΚΟΥ .....	27
3.3	ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	29
3.3.1	Sagaseta .....	29
3.3.2	Verruijt A. & Booker J. R. ....	31
3.3.3	Loganathan N. & Poulos H. G. ....	32
3.4	ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	34
3.4.1	Peck & Schmidt.....	34
3.4.2	Cording & Hansmire .....	35
3.4.3	Atkinson et al.....	37
3.4.4	O'Reilly & New .....	38
3.4.5	Mair et al. ....	39
3.5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	42
3.5.1	G. Meschke, T. Kasper και F. Nagel.....	42
3.5.2	A. Lambrughi et al.....	47
3.5.3	A. Bezuijen.....	50
3.5.4	Do et al. ....	52
3.5.5	E. Comodromos et al. ....	54
3.5.6	D. Litsas et al.....	55



<b>4</b>	<b>ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>59</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	59
4.2	ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	59
4.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΠΣ.....	60
4.3.1	Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία .....	60
4.3.2	Επιλογή ανεξαρτήτων μεταβλητών .....	61
4.3.3	Επιλογή συνάρτησης παρεμβολής.....	61
4.3.4	Υπολογισμός μητρώων στιφρότητας των στοιχείων.....	62
4.3.5	Κατάστροψη του συστήματος εξισώσεων .....	62
4.3.6	Επίλυση του συστήματος των εξισώσεων.....	62
4.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	62
4.5	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	63
4.5.1	Προσομοίωση του εδάφους.....	64
4.5.2	Προσομοίωση της δράσης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής.....	65
4.5.3	Προσομοίωση της τελικής επένδυσης.....	70
4.5.4	Προσομοίωση της διαδικασίας εισπίεσης ενέματος.....	71
4.5.5	Βήματα της ανάλυσης .....	73
<b>5</b>	<b>ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....</b>	<b>77</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	77
5.2	ΕΔΑΦΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ.....	77
5.3	ΔΙΕΡΕΥΝΗΘΗΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	78
5.3.1	Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων του εδάφους.....	80
5.3.2	Επίδραση της πίεση του ενέματος.....	88
5.3.3	Επίδραση του ουραίου κενού (Gap) και της υπερεκσκαφής.....	98
5.3.4	Επίδραση της πίεσης των ρευστών στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους.....	108
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ .....	113

5.4.1	Πρόβλεψη του σημείου καμπής $i$ για επιφανειακές καθιζήσεις.....	114
5.4.2	Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με σχέσεις κατά Mair et al. (1993).... .....	115
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>123</b>
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	123
6.1.1	Γεωτεχνικές συνθήκες.....	123
6.1.2	Πίεση ενέματος .....	124
6.1.3	Ουραίο κενό .....	125
6.1.4	Πίεση ρευστών στο κενό .....	126
6.1.5	Αναλυτικές και εμπειρικές προβλέψεις.....	127
6.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	127
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>129</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Τυπικό σχέδιο ενός ανοικτού τύπου TBM χωρίς ασπίδα (Robbins n.d.)..	6
Σχήμα 2.2	Τυπική τομή ενός ανοικτού τύπου TBM μονής ασπίδας (Herrenknecht n.d.) .....	7
Σχήμα 2.3	Τυπικό σχέδιο ενός ανοικτού τύπου TBM διπλής ασπίδας (Robbins n.d.)	8
Σχήμα 2.4	Τυπικό σχέδιο ενός EPB TBM (Http://www.tunnelseis.de n.d.).....	9
Σχήμα 2.5	Τυπικό σχέδιο ενός TBM πολφού μπεντονίτη (Http://konspekta.net/ n.d.)	9
Σχήμα 2.6	Μετατρεπόμενου τύπου TBM (Http://www.tbm.cat.com/ n.d.).....	10
Σχήμα 2.7	Μέρη που αποτελούν ένα μηχάνημα τύπου EPB (Herrenknecht n.d.) ....	11
Σχήμα 2.8	Αριστερά: Κλειστή κοπτική κεφαλή κατασκευασμένη από την Herrenknecht για την επέκταση του μετρό προς Ελληνικό(Attiko Metro n.d.). Δεξιά: Ανοιχτή κοπτική κεφαλή κατασκευασμένη από την Robbins για επέκταση του ΜΕΤΡΟ στο Νέο Δελχί. (Robbins n.d.).....	12
Σχήμα 2.9	Κοπτικά τύπου σφήνας και κοπτικά τύπου δίσκου(Seli n.d.).....	12
Σχήμα 2.10	Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό στέλεχος, ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης, ....	13
Σχήμα 2.11	Υδραυλικά έμβολα ώθησης σε μηχάνημα EPB διαμέτρου 8.9m της εταιρίας Robbins (Robbins n.d.).....	15
Σχήμα 2.12	Σύστημα υδραυλικών εμβόλων τοποθετημένων στην ουρά της ασπίδας (MOST Construction Company 2012).....	15
Σχήμα 2.13	Υποστήριξη σήραγγας από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.(Choi & Yoo 2015) .....	16
Σχήμα 2.14	Σύνδεσμοι μεταξύ στοιχείων της υποστήριξης (a) επίπεδος σύνδεσμος, (b) σύνδεσμος με καμπύλη επιφάνεια (Luttikholt 2007).....	16
Σχήμα 2.15	Μηχανολογικός εξοπλισμός ανέγερσης και τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων (Attiko Metro n.d.). .....	17

Σχήμα 2.16	Ορισμός του κενού που δημιουργείται κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας (Lee et al. 1992).....	18
Σχήμα 2.17	Σχηματική απεικόνιση της σφράγισης της ουράς της ασπίδας με χαλύβδινες βούρτσες και της εισπίεσης ενέματος και υλικού σφράγισης μέσω συστήματος σωλήνων εγκατεστημένων στην ουρά της ασπίδας (Kanvadas et al. 2013).....	19
Σχήμα 2.18	Εισπίεση ενέματος μέσω έτοιμων ανοιγμάτων στα προκατασκευασμένα στοιχεία (Robbins n.d. ....)	20
Σχήμα 2.19	Πίεση υποστήριξης μετώπου από μηχάνημα EPB (Herrenknecht n.d.)	21
Σχήμα 2.20	Μέρη που αποτελούν ένα μηχάνημα τύπου Slurry (Herrenknecht n.d.)	22
Σχήμα 2.21	Άσκηση πίεσης στο μέτωπο από μηχάνημα Slurry.(www.facesupport.org n.d.) .....	23
Σχήμα 2.22	Τυπικό σύστημα αγωγών μεταφορά πολφού σε μηχάνημα Slurry (Herrenknecht n.d.) .....	24
Σχήμα 2.23	Εγκαταστάσεις διαχωρισμού του πολφού από το μεταφερόμενο εδαφικό υλικό. (αριστερά: (Derrick n.d.); δεξιά: (Herrenknecht n.d.)) .....	25
Σχήμα 2.24	Κατανομή της πίεσης με χρήση πολφού για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (The Masterbuilder Bureau 2014).....	26
Σχήμα 3.1	Ορισμός των μεγεθών απώλεια όγκου $V_L$ και απώλεια εδάφους $G_L$ .....	28
Σχήμα 3.2	Πηγές απώλειας όγκου σε διάνοιξη σήραγγας με χρήση TBM.....	28
Σχήμα 3.3	Βήματα της ανάλυσης (Sagaseta 1987). .....	30
Σχήμα 3.4	(i) Ορισμός του προβλήματος, (ii) άπειρο μέσο και (iii) τριδιάστατο πρόβλημα (Sagaseta 1987 .....	30
Σχήμα 3.5	Απώλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση ανοίγματος σήραγγας (Verruijt & Booker 1996) .....	31
Σχήμα 3.6	Κυκλικό και οβάλ σχήμα εδαφικής παραμόρφωσης γύρω από την διατομή της σήραγγας. (Loganathan & Poulos 1998).....	33
Σχήμα 3.7	Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan & Poulos 1998)	34
Σχήμα 3.8	(a) Χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή των καθιζήσεων πάνω από σήραγγα (Peck 1969; Schmidt 1969) και (b) σχέση μεταξύ $i/R$ και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2R$ για διάφορα εδάφη (Peck 1969) .....	35

Σχήμα 3.9	Σχέση της γωνίας $\beta$ με την απόσταση $i$ του σημείου καμπής του προφίλ των καθιζήσεων από το σημείο μέγιστης καθίζησης (Cording & Hansmire 1975; Hansmire & Cording 1972) .....	36
Σχήμα 3.10	Γεωμετρία της σήραγγας και επιφανειακές καθιζήσεις για κυκλική σήραγγα (αριστερά) και μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης με την καθίζηση της στέψης για τρία διαφορετικά εδάφη (δεξιά) (Atkinson et al. 1977) .....	38
Σχήμα 3.11	Κατανομή των κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων και των οριζοντίων παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Franzius 2003) .....	39
Σχήμα 3.12	Διαφοροποίηση για το σημείο καμπής $i$ συναρτήσεις του βάθους της σήραγγας για (i) αργίλους και για (ii) άμμους. (Mair & Taylor 1997) .....	40
Σχήμα 3.13	(i) Μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των υπόγειων καθιζήσεων με το βάθος και (ii) Μεταβολή της παραμέτρου $K$ σε αργίλους. (Mair et al. 1993) ...	41
Σχήμα 3.14	Υπόγειες καθιζήσεις πάνω από τον άξονα σήραγγας σε London Clay (Mair et al. 1993) .....	41
Σχήμα 3.15	Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D (Kasper & Meschke 2004). .....	43
Σχήμα 3.16	Μοντέλο του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους και ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος (Kasper & Meschke 2004) .....	43
Σχήμα 3.17	a) Υπολογισμένες κατακόρυφες μετακινήσει στον σταθμό καταγραφής, όπου ο χρόνος μηδέν θεωρείται η στιγμή όπου το μηχάνημα περνάει κάτω από τον σταθμό, (b) προβλεπόμενες καθιζήσεις για διαφορετικό μήκος προχώρησης το μηχανήματος (Kasper & Meschke 2004) .....	44
Σχήμα 3.18	Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (a) της πίεσης μετώπου, (b) της πίεσης του ενέματος και (c) της κωνικότητας της ασπίδας (Kasper & Meschke 2006) .....	44
Σχήμα 3.19	Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό (Nagel & Meschke, 2011) .....	45
Σχήμα 3.20	Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο σιφρά (λεπτές γραμμές) εδάφη και για λιγότερο (παχιές γραμμές), (a) για ένα σημείο πάνω από τον άξονα της σήραγγας και (b) για μία διατομή στο τέλος την προχώρησης του TBM (Nagel & Meschke 2011) .....	45
Σχήμα 3.21	Μοντέλο τριών φάσεων για μερικώς κορεσμένα εδάφη χρησιμοποιώντας την θεωρία του πορώδους μέσου για την περιγραφή των αρχικώς μικροσκοπικών	

	καταστάσεων και αλληλεπιδράσεων των φάσεων του εδάφους (κόκκοι, νερό και αέρας) (Nagel et al. 2012).....	46
Σχήμα 3.22	Προσομοίωση της χρήσης πεπιεσμένου αέρα ως μέσο υποστήριξης και διερεύνηση της δημιουργίας μερικών κορεσμένων ζωνών μπροστά από το μέτωπο για κορεσμό λιγότερο από 95% (αριστερά) και λιγότερο από 50% (δεξιά) (Nagel et al. 2012) .....	47
Σχήμα 3.23	Τριδιάστατος κάρναβος του προβλήματος (Lamborghini et al. 2012).....	48
Σχήμα 3.24	Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της πίεσης του ενέματος με χρήση κριτηρίου Mohr-Coulomb στις (α) κατακόρυφες μετακινήσεις (εγκάρσια στον άξονα τομή), (b) οριζόντιες μετακινήσεις και (c) κατακόρυφες μετακινήσεις (κατά μήκος στον άξονα τομή) (Lamborghini et al. 2012) .....	48
Σχήμα 3.25	Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογιστήκαν από τα αριθμητικά μοντέλα (Lamborghini et al. 2012) .....	49
Σχήμα 3.26	Ιδεατό σκαρίφημα ενός TBM, της υποστήριξης και του ενέματος (Bezuijen 2007) .....	50
Σχήμα 3.27	Επίδραση της συμμετρίας της ασπίδας ως προς τον άξονα της σήραγγας στις πιέσεις του ενέματος και στο πάχος του κενού (αριστερά συμμετρική ασπίδα, δεξιά ασύμμετρη ασπίδα) (Bezuijen 2007) .....	51
Σχήμα 3.28	Επίδραση της αλλαγής της πίεσης του ενέματος στο μήκος διεύθυνσης και πάχος του κενού (Bezuijen 2007) .....	51
Σχήμα 3.29	Μοντέλο του TBM (Do et al. 2013) .....	53
Σχήμα 3.30	Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις επιφανειακές καθιζήσεις (Do et al. 2013) .....	53
Σχήμα 3.31	Πλαστικές ζώνες για το μοντέλο CYsoil (αριστερά) και MC (δεξιά) (Do et al. 2013) .....	53
Σχήμα 3.32	Προσομοίωση της προοδευτικής προχώρησης του TBM και των διαφορετικών ζωνών ενέματος με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (Comodromos et al. 2014) .....	54
Σχήμα 3.33	Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις (Comodromos et al. 2014) .....	55
Σχήμα 3.34	Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Litsas et al. 2015) .....	56

Σχήμα 3.35	(i) ‘Hard’ contact και εκθετική σχέση πίεσης αλληλεπίδρασης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού και (ii) χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας του ενέματος (Litsas et al. 2015) ..... 56
Σχήμα 3.36	(i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας (Litsas et al. 2015)..... 57
Σχήμα 3.37	(i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων (Litsas et al. 2015). 57
Σχήμα 4.1	Διαστάσεις εκσκαφής και γεωμετρία του προβλήματος..... 63
Σχήμα 4.2	Οκτακομβικό στοιχείο προσομοίωσης εδάφους. .... 64
Σχήμα 4.3	Διακριτοποίηση του εδάφους..... 65
Σχήμα 4.4	Μοντέλο του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (αριστερά ολόκληρο - δεξιά μόνο τα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν την ασπίδα, την κοπτική κεφαλή και το τοίχο πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής)..... 66
Σχήμα 4.5	Τετρακομβικό στοιχείο κελύφους προσομοίωσης της ασπίδας..... 66
Σχήμα 4.6	Υπερεκσκαφή και κωνικότητα της ασπίδας του TBM στο μοντέλο. .... 67
Σχήμα 4.7	(i) ‘Hard’ contact και (ii) εκθετική σχέση πίεσης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού ..... 68
Σχήμα 4.8	(i) Κόμβοι εφαρμογής οριακών συνθηκών πίεσης πόρων και (ii) επιφάνεια άσκησης του φορτίου στο μέτωπο ..... 69
Σχήμα 4.9	Διάγραμμα σύγκρισης ασκούμενης πίεσης μετώπου και οριακές συνθήκες πίεσης πόρων με ενεργές οριζόντιες τάσεις και πίεση πόρων στο έδαφος. .... 69
Σχήμα 4.10	Καμπτικές ροπές σε στοιχεία υποστήριξης που προσομοιώνονται με (i) συνεχή κύλινδρο (ii) διαμήκεις αρμούς που συμπίπτουν σε διαδοχικούς δακτυλίους και (iii) διαμήκεις αρμούς που δεν συμπίπτουν (Litsas et al. 2015) ..... 70
Σχήμα 4.11	Προσομοίωση της τελικής επένδυσης στο μοντέλο..... 71
Σχήμα 4.12	Χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με Kasper & Meschke (2004), Lamborghini et al. (2012) και Comodromos et al. (2014)..... 72
Σχήμα 4.13	Πλήρωση του κενού μεταξύ τελικής επένδυσης και περιβάλλοντος εδάφους με ένεμα στο μοντέλο..... 73
Σχήμα 4.14	Κόμβοι στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνική του Adaptive Mesh στο μοντέλο. .... 74
Σχήμα 4.15	Ενδεικτική απεικόνιση των υποβημάτων σε ένα τυπικό βήμα ανάλυσης “n” (i) αφαιρούνται η “n” ομάδα στοιχείων προς εκσκαφή (ii) ασκείται η πίεση μετώπου στην

	“n+1” ομάδα στοιχείων (iii) ενεργοποίηση του δακτυλίου υποστήριξης “n-6” μέσα στην ασπίδα (iv) ενεργοποίηση της ομάδας στοιχείων ενέματος “n-7” (Litsas et al. 2015).76	
Σχήμα 5.1	Τα δύο σημεία ελέγχου στην επιφάνεια και κοντά στην στέψη, στα οποία αναφέρονται οι χρονοϊστορίες. ....	79
Σχήμα 5.2	Υπολογισμός της απώλειας όγκου γνωρίζοντας τις καθιζήσεις στα σημεία των κόμβων του μοντέλου. ....	80
Σχήμα 5.3	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά εδαφικά χαρακτηριστικά, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας. ....	82
Σχήμα 5.4	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, για τα διαφορετικά εδαφικά χαρακτηριστικά. ....	83
Σχήμα 5.5	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. ....	85
Σχήμα 5.6	Πλαστικές ζώνες σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας, για τα εδάφη a, f και h αντίστοιχα (στο σχήμα φαίνονται οι τιμές του δείκτη $2C_u/\gamma'H$ ). ....	87
Σχήμα 5.7	Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.88	
Σχήμα 5.8	Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής i από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. ....	88
Σχήμα 5.9	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B για το έδαφος a, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	90
Σχήμα 5.10	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B, για το έδαφος a.91	
Σχήμα 5.11	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος a. ....	91
Σχήμα 5.12	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B για το έδαφος b, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	92
Σχήμα 5.13	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος b. ....	92
Σχήμα 5.14	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B, για το έδαφος b. ....	93



Σχήμα 5.15	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B για το έδαφος f, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	94
Σχήμα 5.16	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος f.....	94
Σχήμα 5.17	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B, για το έδαφος f.95	
Σχήμα 5.18	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.....	96
Σχήμα 5.19	Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.97	
Σχήμα 5.20	Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής i από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. ....	97
Σχήμα 5.21	Προσομοίωση της υπερεκσκαφής και του ουραίου κενού του μηχανήματος (Litsas et al., 2015).....	98
Σχήμα 5.22	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) για το έδαφος a, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	99
Σχήμα 5.23	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap), για το έδαφος a..	100
Σχήμα 5.24	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος a. ....	101
Σχήμα 5.25	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) για το έδαφος b, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	102
Σχήμα 5.26	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος b.....	102
Σχήμα 5.27	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap), για το έδαφος b. .	103
Σχήμα 5.28	Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) για το έδαφος f, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	104
Σχήμα 5.29	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος f.....	105

Σχήμα 5.30	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap), για το έδαφος f... 105
Σχήμα 5.31	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. .... 106
Σχήμα 5.32	Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. .... 107
Σχήμα 5.33	Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής $i$ από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. .... 107
Σχήμα 5.34	Διεΐσδυση των ρευστών υπό πίεση (πολφός και ένεμα) στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. .... 108
Σχήμα 5.35	Διαφορετικά σενάρια για την πίεση των ρευστών (πολφός και ένεμα) που διεισδύουν υπό πίεση στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους 109
Σχήμα 5.36	Επιφανειακές καθιζήσεις για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, για το έδαφος b, όπου με $\times$ συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας. .. 110
Σχήμα 5.37	Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, για το έδαφος b. .... 111
Σχήμα 5.38	Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, στο έδαφος b. .... 112
Σχήμα 5.39	Επίδραση της πίεσης κενού στο πάχος του κενού (χρωματική κλίμακα για διάφορες τιμές πάχους κενού) μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, όπου με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται και οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από το άνω όριο της κλίμακας (αριστερά είναι η ουρά και δεξιά το μέτωπο). .... 113
Σχήμα 5.40	Σύγκριση πρόβλεψης αναλυτικών και εμπειρικών λύσεων για το σημείο καμπής των επιφανειακών καθιζήσεων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. .... 114
Σχήμα 5.41	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειου προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος a. .... 116
Σχήμα 5.42	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειου προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος b. .... 116

Σχήμα 5.43	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος c. .....	117
Σχήμα 5.44	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος d. .....	117
Σχήμα 5.45	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος e. .....	117
Σχήμα 5.46	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος f. .....	118
Σχήμα 5.47	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος g. .....	118
Σχήμα 5.48	Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος h. .....	118
Σχήμα 5.49	Σύγκριση σημείων καμπής επιφανειακών και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα .....	119
Σχήμα 5.50	Σύγκριση πρότασης των Mair et al. (1993) για τις μέγιστες καθιζήσεις $S_{max}$ με τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα εδάφη a, b, c και d.....	120
Σχήμα 5.51	Σύγκριση πρότασης των Mair et al. (1993) για τις μέγιστες καθιζήσεις $S_{max}$ με τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα εδάφη e, f, g και h. ....	121



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1	Διαφορετικά σενάρια της παραμετρικής διερεύνησης (Comodromos et al. 2014)	55
Πίνακας 5.1	Συντεταγμένες σημείων που εξετάζονται στις χρονοϊστορίες.....	78
Πίνακας 5.2	Τιμές παραμέτρων για τα διαφορετικά εδαφικά προφίλ.....	80
Πίνακας 5.3	Περιπτώσεις που διερευνώνται όσον αφορά το μέγεθος του ουραίου κενού του μηχανήματος.....	98



## ΣΥΜΒΟΛΑ / ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- A: Συντελεστής κατά Skempton / Επιφάνεια
- B: Παράμετρος πίεσης ενέματος
- c: Συνοχή εδάφους
- C: Απόσταση από την επιφάνεια μέχρι τη στέψη της σήραγγας
- C<sub>u</sub>: Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
- D: Διάμετρος σήραγγας
- E: Μέτρο ελαστικότητας
- e: Δείκτης κενών
- EPB: Earth Pressure Balance
- FEM: Finite Element Method
- g: Κατασκευαστικό κενό / Σταθερά βαρύτητας
- G: Μέτρο διάτμησης
- G<sub>L</sub>: Απώλεια εδάφους
- G<sub>p</sub>: Φυσικό κενό
- H: Βάθος σήραγγας (επιφάνεια-άξονας σήραγγας)
- i: Σημείο καμψής
- k<sub>s</sub>: Διαπερατότητα
- K: Δυσκαμψία / Συντελεστής υπολογισμού σημείου καμψής (εμπειρικός)
- K<sub>0</sub>: Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων
- M-C: Mohr Coulomb
- R, r: Ακτίνα σήραγγας
- S<sub>v, max</sub>: Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση

TBM:	Tunnel Boring Machine
$U_3$ :	Κατακόρυφη μετακίνηση
$U_{3D}^*$ :	Τριδιάστατες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο
$V_L$ :	Απώλεια εδάφους
$\gamma$ :	Ειδικό βάρος
$\gamma'$ :	Υπό άνωση ειδικό βάρος
$\delta$ :	Μακροχρόνια εδαφική παραμόρφωση λόγω σχήματος
$\varepsilon$ :	Ομοιόμορφη ακτινική απώλεια εδάφους
$\varepsilon_0$ :	Ισοδύναμη απώλεια εδάφους
$\nu$ :	Λόγος Poisson
$\sigma'_v$ :	Κατακόρυφη ενεργός τάση
$\sigma'_h$ :	Οριζόντια ενεργός τάση
$\varphi$ :	Γωνία εσωτερικής τριβής
$\psi$ :	Γωνία διασταλτικότητας
$\omega$ :	Συντελεστής εργασιμότητας



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένα από τα πλέον απαιτητικά προβλήματα πολιτικού μηχανικού είναι η διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον. Οι σήραγγες αυτές είναι κατά κύριο λόγο ρηχές σήραγγες (π.χ. σήραγγες METRO) και το γεωυλικό συνήθως να είναι μαλακός βράχος ή αποθέσεις με σημαντικό λεπτόκοκκο κλάσμα συχνά κορεσμένες. Στόχος μιας μελέτης κατασκευής σήραγγας σε αστικό περιβάλλον είναι η ελαχιστοποίηση της διαταραχής του περιβάλλοντος γεωυλικού και κατ' επέκταση των επιφανειακών καθιζήσεων που αποτελούν σοβαρό λόγο για εμφάνιση βλαβών σε υφιστάμενες κατασκευές που πιθανώς να επιφέρουν και την αστοχία. Για την επίτευξη αυτού του στόχου συχνά χρησιμοποιούνται μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, η χρήση των οποίων συχνά αποτελεί μονόδρομο. Οι τύποι μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς σχηματισμούς είναι (i) τύπου εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) για εδάφη με υψηλό αργιλικό κλάσμα και (ii) τύπου πολφού μπεντονίτη για τα πιο αδρόκοκκα. Οι λειτουργία των μηχανημάτων αυτών συνοψίζεται σε αντιστήριξη του μετώπου μέσω άσκησης πίεσης, αντιστήριξη των παρειών της σήραγγας μέσω χαλύβδινης ασπίδας συνήθως σχήματος κόλουρου κώνου, κατασκευή της υποστήριξης από προκατασκευασμένα στοιχεία μέσα στην ασπίδα σε προστατευόμενο περιβάλλον και πλήρωση του κενού μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της υποστήριξης και της εσωτερικής επιφάνειας του γεωυλικού με εισπίεση ενέματος.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση παραμέτρων της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων σε επιφανειακές και υπόγειες καθιζήσεις, στις πιέσεις πόρων και τις πλαστικές παραμορφώσεις. Η εργασία επικεντρώνεται σε αβαθείς σήραγγες που διανοίγονται σε αστικό περιβάλλον, σε κορεσμένο αργιλικό εδαφικό υλικό, υπό αστράγγιστες συνθήκες (συνθήκες αμελητέας ογκομετρικής παραμόρφωσης), με χρήση μηχανήματος

ολομέτωπης κοπής τύπου εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) ή τύπου πολφού μπεντονίτη (Slurry TBM). Οι παράμετροι των οποίων διερευνάται η επίδραση είναι

- Η μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών
- Η πίεση του ενέματος πλήρωσης του ουραίου κενού
- Η κωνικότητα της ασπίδας
- Η πίεση των ρευστών (πολφός και ένεμα) που διεισδύουν στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού

Οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφών, παίζουν κύριο ρόλο στην ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων. Πτωχά εδαφικά χαρακτηριστικά έχουν ως αποτέλεσμα ανάπτυξη πλαστικών ζωνών σημαντικού εύρους που συνεπάγονται μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Στόχος της παραμετρικής διερεύνησης είναι η εξέταση της ευαισθησίας του εδαφικών καθιζήσεων στην μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

Η συμβολή της εισπίεσης του ενέματος πλήρωσης του ουραίου κενού εξαρτάται σημαντικά από τα χρονική εξάρτηση των μηχανικών του ιδιοτήτων αλλά και από την αρχική πίεση εισαγωγής σε σχέση με τις γεωστατικές συνθήκες. Η παραμετρική διερεύνηση έχει ως στόχο την εξέταση της ευαισθησίας των εδαφικών καθιζήσεων στην μεταβολή της αρχικής αυτής πίεσης ενέματος. Τα χρονικά χαρακτηριστικά σκλήρυνσης του ενέματος θεωρούνται ίδια.

Η κωνικότητα της ασπίδας έχει ως στόχο την διευκόλυνση της χάραξης καμπυλόγραμμης πορείας του μηχανήματος και το να μειωθούν οι τριβές στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας που μπορεί να προκαλέσουν μπλοκάρισμα του μηχανήματος. Το μέγεθος του ουραίου κενό λόγω κωνικότητας προκαλεί αύξηση των καθιζήσεων. Η παραμετρική διερεύνηση έχει ως στόχο την εξέταση της ευαισθησίας των εδαφικών καθιζήσεων στην μεταβολή του μεγέθους του ουραίου κενού.

Τέλος, ο πολφός μπεντονίτη και το ένεμα βρίσκονται υπό πίεση. Αυτό πιθανώς να έχει ως συνέπεια την διείσδυση των ρευστών στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Η πίεση που θα ασκούν σε μια τέτοια περίπτωση τα ρευστά στην παρειά της σήραγγας θα έχει επίπτωση στην ανάπτυξη των καθιζήσεων. Συνεπώς θα διερευνηθούν διαφορετικά σενάρια πίεσης των ρευστών στο κενό και θα εξεταστεί η επιρροή που έχουν στις καθιζήσεις του εδάφους.

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παραμετρική διερεύνηση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, αποτελείται από αριθμητικές αναλύσεις με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις αναλύσεις πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός αριθμητικού τριδιάστατου προσομοιώματος που αφορά στην μηχανοποιημένη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας σε εδαφικό υλικό. Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Στο μοντέλο αυτό, το έδαφος, το

ένεμα στο ουραίο κενό, τα στοιχεία της υποστήριξης και η ασπίδα του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) προσομοιώνονται με ξεχωριστά στοιχεία. Στο μοντέλο εισάγεται και η χρονική εξάρτηση για το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος. Ακόμα, η αλληλεπίδραση της ασπίδας του TBM με το περιβάλλον έδαφος γίνεται μέσω ενός νόμου διεπιφάνειας. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται ως ένα κατανεμημένο φορτίο, με γραμμική αύξηση καθ' ύψος. Τέλος, οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται είναι συζευγμένες, γίνεται δηλαδή ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος.

Μέσα από την διαδικασία της παραμετρικής διερεύνησης διαπιστώθηκε ότι και οι γεωτεχνικές συνθήκες και το ουραίο κενό και η πίεση ενέματος και η πίεση των ρευστών στο κενό, όλα επηρεάζουν σημαντικά τις καθιζήσεις, αν και το καθένα σε διαφορετικό βαθμό. Επίσης, συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα με τις αναλυτικές και τις εμπειρικές λύσεις παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση, αν η απόκλιση αυξάνει πιο κοντά στην περίμετρο της σήραγγας.



## 2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΟΡΥΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ TBM

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συχνότητα χρήσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBM – Tunnel Boring Machine) αυξάνεται συνεχώς με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στο τομέα της μηχανικής όρυξης σηράγγων. Αν και δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την συμβατική μέθοδο, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Παρουσιάζει αυξημένους ρυθμούς προχώρησης και λόγω της επαναλαμβανόμενης διαδικασίας οι περισσότερες εργασίες μπορούν να αυτοματοποιηθούν. Με την χρήση της ασπίδας και την άσκηση πίεσης στο μέτωπο ελαχιστοποιείται η διαταραχή του περιβάλλοντος γεωολογικού, καθώς και η εμφάνιση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να επηρεάσουν τις κατασκευές. Ακόμα, έχει μικρή επίδραση στον υπόγειο υδάτινο ορίζοντα, προσφέρει ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας και προκαλεί λιγότερο θόρυβο, δονήσεις, σκόνη και μόλυνση. Ωστόσο, μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η έλλειψη προσαρμοστικότητας σε μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες. Απαιτείται ευρύτερη περιοχή εργασιών για την εκκίνηση και την άφιξη του TBM. Επίσης η διατομή είναι κυκλική με μικρές δυνατότητες μεταβολής της εκσκαπτόμενης γεωμετρίας. Η εκλογή της μεθόδου γίνεται συνήθως με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Η χρήση TBM προϋποθέτει ότι το υψηλό κόστος αγοράς, μεταφοράς και συναρμολόγησης αντισταθμίζεται με τα οικονομικά οφέλη της γρήγορης προχώρησης και της τυποποίησης της διαδικασίας, για αυτό επιλέγεται σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας. Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις που η χρήση τους είναι επιτακτική, όπως σε έργα μητροπολιτικών σιδηροδρόμων, καθώς απαιτείται ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων μέσα στο αστικό περιβάλλον. Η περιγραφή των μηχανημάτων σε αυτό το κεφάλαιο βασίζεται στους (Kanvadas et al. 2013).

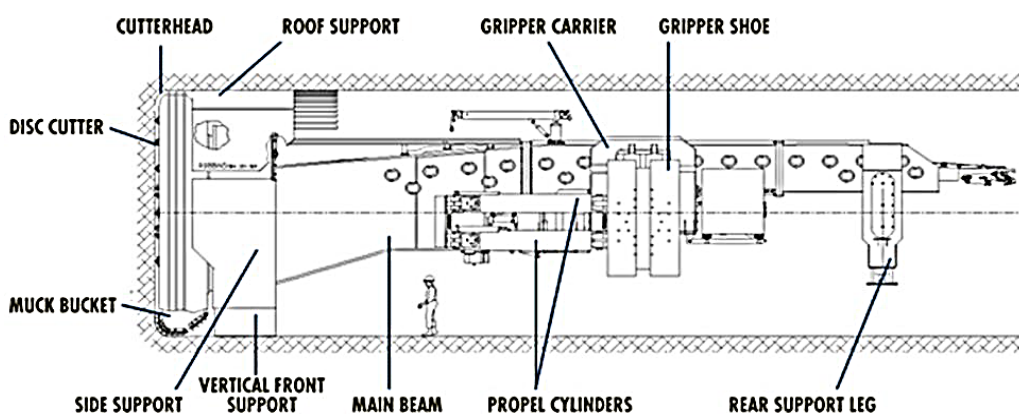
### 2.2 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής διακρίνονται σε διάφορους τύπους, διαφοροποιούμενοι κυρίως στη βάση των γεωλογικών – γεωτεχνικών συνθηκών εκσκαφής.

Συχνά, τα TMBs σχεδιάζονται ειδικά για τις απαιτήσεις του έργου για το οποίο προορίζονται με αποτέλεσμα η μελλοντική χρήση τους σε άλλα έργα να απαιτεί σοβαρές μετασκευές ή ακόμα και να μην είναι τεχνικά εφικτή. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται οι βασικές κατηγορίες TBM.

### 2.2.1 Χωρίς ασπίδα ανοικτής λειτουργίας (Gripper TBM)

Τα μηχανήματα τύπου Gripper TBM χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή σε σκληρούς, σχετικά αρωγάτωτους σχηματισμούς πετρωμάτων υψηλής αντοχής, με ελεγχόμενες εισροές υπογείων υδάτων όπου πρακτικά δεν απαιτείται υποστήριξη στα τοιχώματα και το μέτωπο της σήραγγας. Η προώθηση του μηχανήματος επιτυγχάνεται μέσω υδραυλικών πέλδων που εφαρμόζουν στα τοιχώματα της σήραγγας. Η εκσκαφή πραγματοποιείται από μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή με προσαρμοσμένους κοπτικούς δίσκους ως το κύριο εργαλείο κοπής. Οι κοπτικοί δίσκοι ωθούνται στο πέτρωμα καθώς η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται. Η ασκούμενη πίεση στο πέτρωμα δημιουργεί ρωγματώσεις που προκαλούν την δημιουργία θραυσμάτων που αποκολλώνται από το μέτωπο. Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος χαρακτηρίζεται από μεγάλη ταχύτητα προχώρησης.



Σχήμα 2.1 Τυπικό σχέδιο ενός ανοικτού τύπου TBM χωρίς ασπίδα (Robbins n.d.)

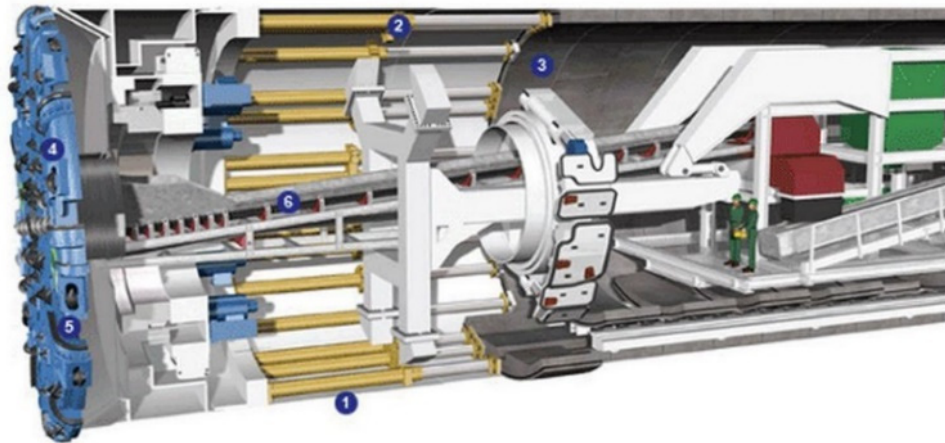
### 2.2.2 Ανοικτής λειτουργίας TBM με ασπίδα

Τα ανοικτής λειτουργίας TBM με ασπίδα χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σε πτωχές προς μέτριες ποιότητες βραχώμαζας, σε έντονα ρωγματωμένους ή διαταραγμένους σχηματισμούς (π.χ.  $RQD \leq 50\%$ ), με τοπικά ασταθή μέτωπα εκσκαφής. Η ασπίδα υποστηρίζει τα εκτεθειμένα τοιχώματα της σήραγγας ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή. Η εγκατάσταση της υποστήριξης γίνεται κάτω από την προστασία της ασπίδας στο πίσω μέρος του μηχανήματος. Η ασπίδα δύναται

να είναι ενιαία (μονής ασπίδας TBM) ή να διαιρείται σε δύο μέρη κατά το μήκος του μηχανήματος (διπλής ασπίδας).

### 2.2.2.1 Μονής ασπίδας TBM

Τα μονής ασπίδας TBM έχουν μια σχετικά μικρού μήκους ασπίδα και δεν είναι τόσο ευάλωτα σε συνθήκες συνθλιβουσας βραχώμαζας. Το TBM κατά την προχώρηση προωθείται μέσω υδραυλικών εμβόλων που εφαρμόζουν στα ήδη εγκατεστημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης. Λόγω της τριβής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια της ασπίδας και του περιβάλλοντος γεωολογικού, η ώθηση που απαιτείται σε ένα ανοικτού τύπου TBM με ασπίδα είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται σε ένα χωρίς ασπίδα. Κατά την τοποθέτηση των στοιχείων της υποστήριξης η προχώρηση διακόπτεται. Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται ο εξοπλισμός από τον οποίο αποτελείται το μηχάνημα.



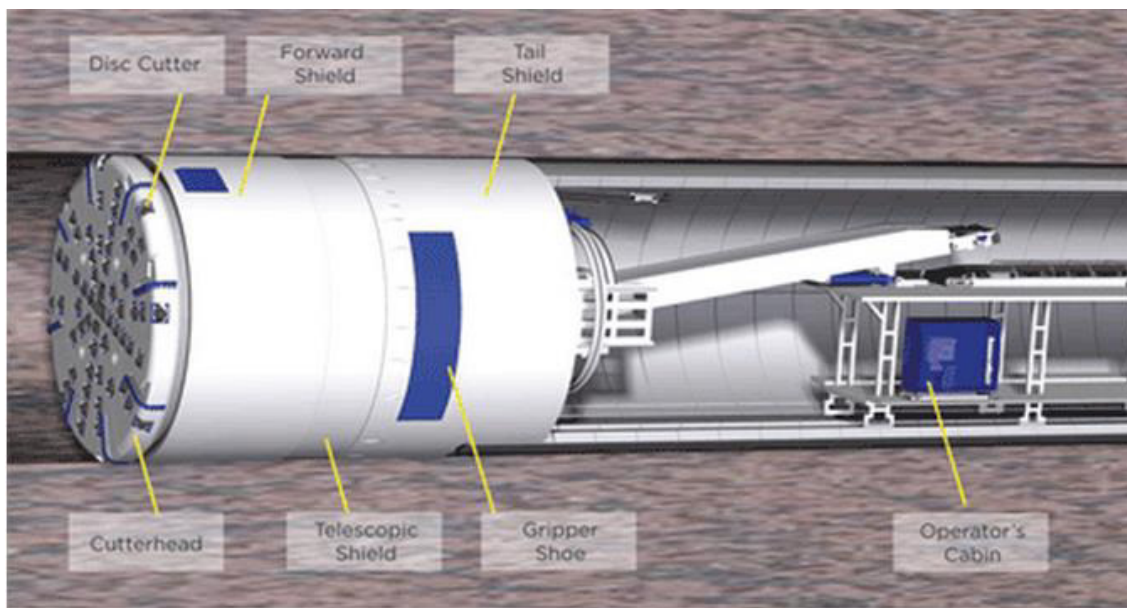
Notes: (1) Shield; (2) thrust cylinders; (3) segmental lining; (4) cutterhead; (5) muck bucket; and (6) conveyers

Σχήμα 2.2 Τυπική τομή ενός ανοικτού τύπου TBM μονής ασπίδας (Herrenknecht n.d.)

### 2.2.2.2 Διπλής ασπίδας TBM

Το χαρακτηριστικό των μηχανημάτων διπλής ασπίδας είναι ότι η ασπίδα είναι διαιρούμενη, χωρίζεται δηλαδή σε δύο επιμέρους μέρη. Το μπροστινό τμήμα το οποίο περιλαμβάνει την κοπτική κεφαλή και το οπίσθιο τμήμα στο οποίο γίνεται η εγκατάσταση της υποστήριξης. Συνδέονται μεταξύ τους μέσω τηλεσκοπικού αρμού. Η δύναμη για την προχώρηση επιτυγχάνεται από το σύστημα των πεδίων που συνεργάζεται με τον τηλεσκοπικό αρμό και δίνει την δυνατότητα ταυτόχρονης εκσκαφής και τοποθέτησης των στοιχείων της υποστήριξης, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται αυξημένοι ρυθμοί προχώρησης. Υδραυλικά έμβολα που εδράζονται πάνω στα στοιχεία της υποστήριξης όπως στην περίπτωση της μονής ασπίδας,

μπορούν να ασκήσουν την απαιτούμενη αυτή δύναμη σε περίπτωση που η περιβάλλουσα βραχώμαζα δεν έχει την απαιτούμενη αντοχή να φέρει τα φορτία των πεδίων της ασπίδας. Σε μία τέτοια περίπτωση, η ταυτόχρονη προχώρηση και τοποθέτηση της υποστήριξης είναι αδύνατη. Σε συνθήκες συνθλιβουσας βραχώμαζας τα TBM διπλής ασπίδας μπορούν να παγιδευτούν πιο εύκολα από αυτά με μονή ασπίδα. Βέβαια, δεδομένου ότι το φαινόμενο της σύνθλιψης είναι χρονικά εξαρτώμενο, οι αυξημένοι ρυθμοί προχώρησης ισορροπούν σε ένα βαθμό αυτό το αυξημένο ρίσκο. Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται τα μέρη του μηχανήματος.



Σχήμα 2.3 Τυπικό σχέδιο ενός ανοικτού τύπου TBM διπλής ασπίδας (Robbins n.d.)

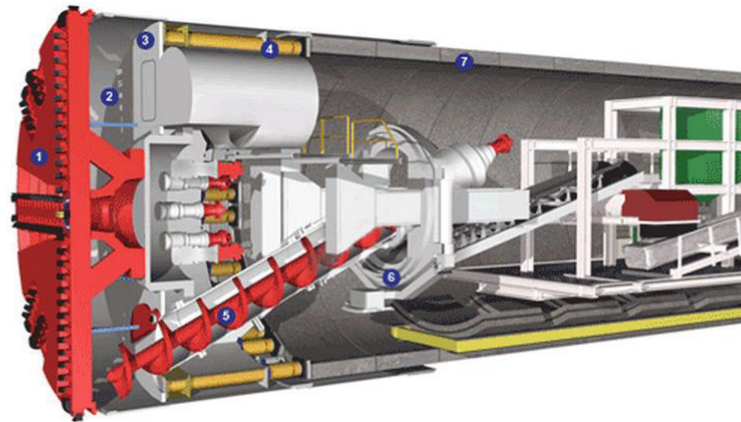
### 2.2.3 TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB - Earth Pressure Balance)

Τα EPB TBMs είναι μηχανήματα με ασπίδα που ασκούν πίεση στο μέτωπο και χρησιμοποιούνται συνήθως σε γεωλογικές συνθήκες που είτε αντιστοιχούν σε ένα ασταθές μέτωπο εκσκαφής είτε υπάρχει αυξημένη ανάγκη περιορισμού των καθιζήσεων όπως σε εκσκαφή σε μικρά βάθη υπερκειμένων σε αστικό περιβάλλον (π.χ. έργα METRO). Η απαιτούμενη ευστάθεια του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω ενός θαλάμου στο μπροστινό μέρος του μηχανήματος που περιέχει το ίδιο το εκσκαπτόμενο υλικό υπό πίεση. Μπροστά από τον θάλαμο, η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, η οποία έχει προσαρμοσμένα κοπτικά τύπου σφήνας, εκσκάπτει το γεωυλικό, το οποίο ταυτόχρονα συσσωρευόμενο στο θάλαμο εκσκαφής αντιστηρίζει το μέτωπο

Τα EPB μηχανήματα εφαρμόζονται συνήθως στην εκσκαφή εντός μαλακών εδαφικών σχηματισμών με σημαντικό αργιλικό ή ιλυώδες κλάσμα ώστε να δύναται να σχηματιστεί εντός του θαλάμου μία εδαφική πάστα αυξημένου ιξώδους. Τα μηχανικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά



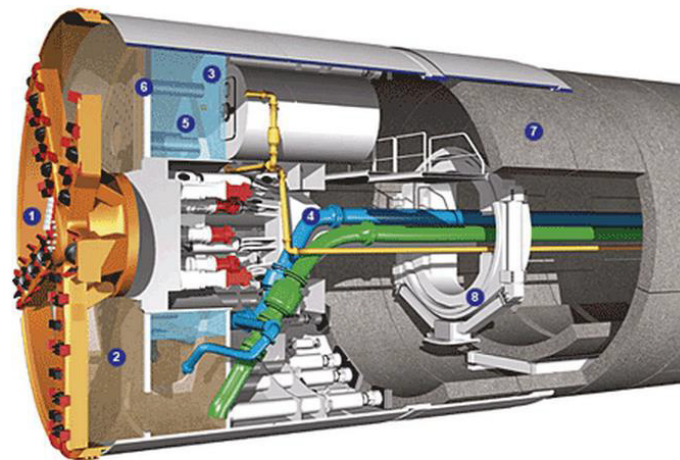
της δημιουργούμενης πάστας ρυθμίζονται επιπρόσθετα μέσω της προσθήκης κατάλληλων χημικών προσμίκτων. Τα μέρη του μηχανήματος φαίνονται στο Σχήμα 2.4.



Notes: (1) Cutterhead; (2) excavation chamber; (3) bulkhead; (4) thrust cylinders; (5) screw conveyor; (6) segment erector; and (7) Segmental Lining

Σχήμα 2.4 Τυπικό σχέδιο ενός EPB TBM (Tunnelseis n.d.)

#### 2.2.4 TBM πολφού μπεντονίτη



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

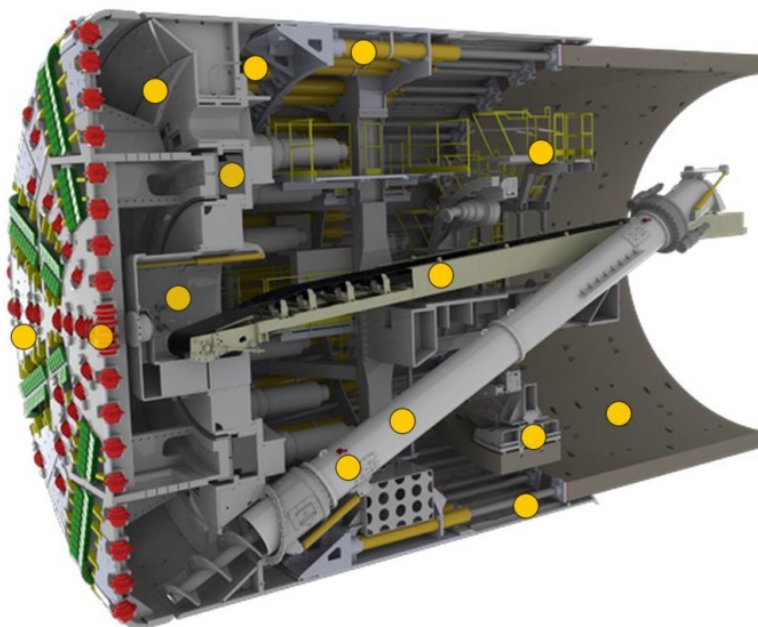
Σχήμα 2.5 Τυπικό σχέδιο ενός TBM πολφού μπεντονίτη (Konspekta n.d.)

Στα TBM πολφού μπεντονίτη η αντιστήριξη του μετώπου γίνεται από πολφό μπεντονίτη υπό πίεση. Το εκσκαπόμενο υλικό αφαιρείται μαζί με τον μπεντονίτη και διαχωρίζεται σε ειδικές εγκαταστάσεις ώστε ο καθαρός πολφός να επιστραφεί για να χρησιμοποιηθεί ξανά. Τα TBM πολφού χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς σχηματισμούς με μικρότερο συνήθως ποσοστό

λεπτομερούς υλικού από ότι τα EPB καθώς ο διαχωρισμός του από τον πολφό είναι μια ακριβή διαδικασία. Σε περίπτωση ετερογενών σχηματισμών όπου το μηχάνημα δύναται να συναντήσει μεγάλους βραχώδεις όγκους, προκειμένου να τους διαχειριστεί προσαρμόζονται στην κοπτική κεφαλή εκτός από κοπτικά τύπου σφήνας και κοπτικά τύπου δίσκου. Τυχόν μεγάλα τεμάχια βράχου που δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσω των σωλήνων του πολφού, θρυμματίζονται από μια ειδική διάταξη μέσα στο θάλαμο εκσκαφής. Η ρύθμιση της πίεσης αντιστήριξης του μετώπου γίνεται μέσω εισαγωγής αέρα υπό πίεση μέσα στον θάλαμο εκσκαφής. Τα μέρη του μηχανήματος φαίνονται στο Σχήμα 2.5.

### 2.2.5 Υβριδικά TBM

Στη βιομηχανία των TBM υπάρχουν μηχανήματα τα οποία μπορούν με κατάλληλες αλλαγές να μεταβάλλουν την λειτουργία τους μεταξύ δύο από τους παραπάνω τύπους μηχανημάτων. Αυτά επιλέγονται σε περιπτώσεις έργων στα οποία μεταβάλλεται η γεωλογία σε τέτοιο βαθμό κατά μήκος του έργου, που η χρήση τέτοιων μηχανημάτων δικαιολογείται από τεχνικοοικονομικά κριτήρια. Ένα τέτοιο μηχάνημα φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



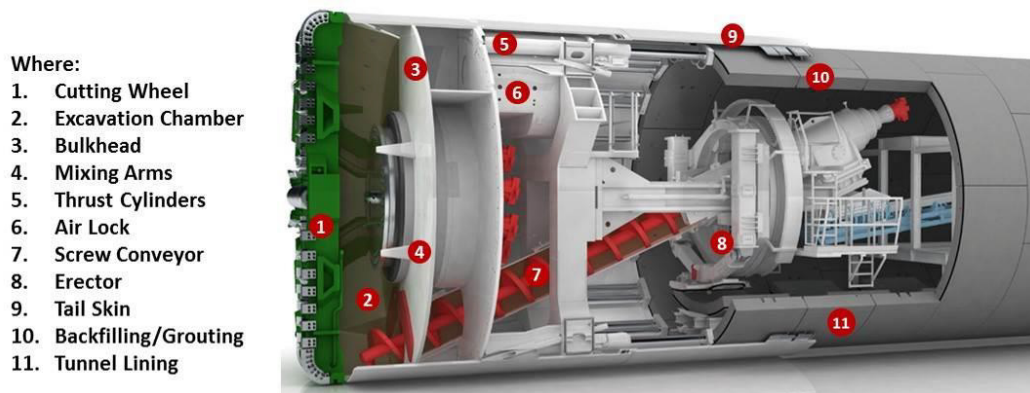
Σχήμα 2.6 Υβριδικού τύπου TBM (Cat n.d.)

## 2.3 ΧΡΗΣΗ TBM ΓΙΑ ΑΒΑΘΕΙΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΣΕ ΕΔΑΦΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι αναλύσεις που θα ακολουθήσουν σε επόμενο κεφάλαιο αφορούν σε μηχάνημα τύπου EPB ή πολφού μπεντονίτη (Slurry TBM). Σε αυτήν την ενότητα λοιπόν θα γίνει μια πιο διεξοδική ανάλυση των μερών που αποτελούν τους παραπάνω δύο τύπους μηχανημάτων.

### 2.3.1 Τα μέρη ενός μηχανήματος EPB

Ένα μηχάνημα EPB αποτελείται από πολλά διαφορετικά μέρη, όπου το καθένα έχει μια ξεχωριστή αρμοδιότητα. Η επιτυχής λειτουργία του μηχανήματος εξαρτάται από την αποτελεσματική λειτουργία του κάθε μέρους ξεχωριστά, αλλά και από την ομαλή συνεργασία όλων των μερών ταυτόχρονα. Τα μέρη του μηχανήματος φαίνονται στο Σχήμα 2.7.

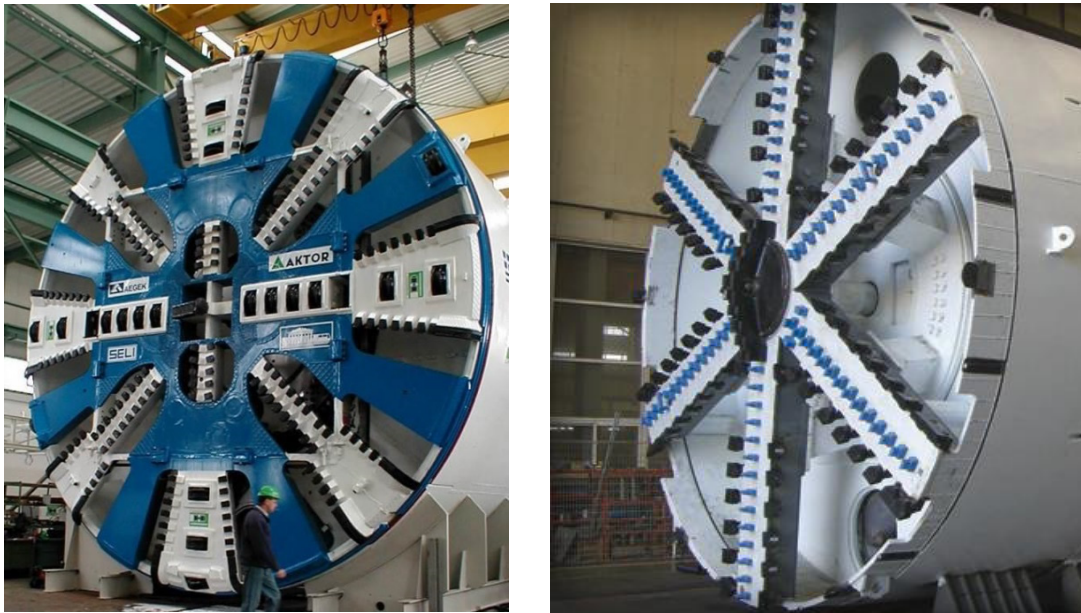


Σχήμα 2.7 Μέρη που αποτελούν ένα μηχάνημα τύπου EPB (Herrenknecht n.d.)

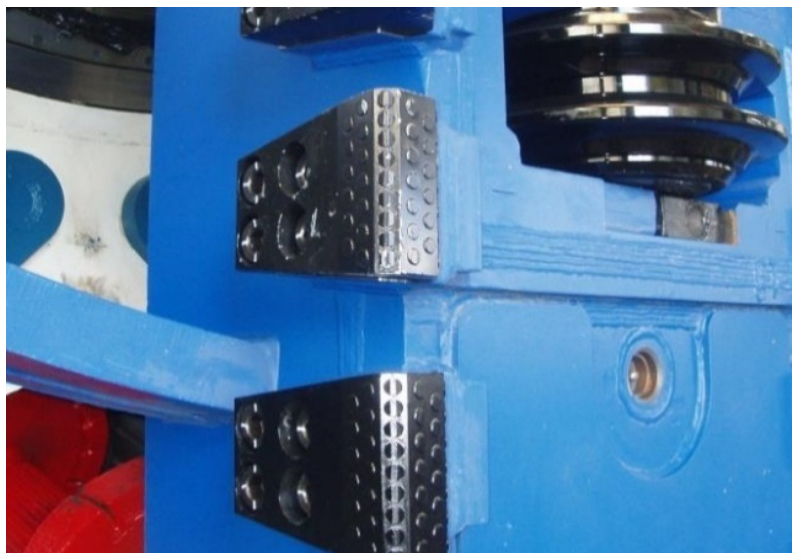
#### 2.3.1.1 Κοπτική κεφαλή και κοπτικά εργαλεία

Η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται και τα κοπτικά εργαλεία που είναι τοποθετημένα πάνω της αφαιρούν υλικό από το μέτωπο. Αυτό το υλικό αναδεύεται και αναμιγνύεται με καταλλήλους αφρούς και πρόσμικτα που εισάγονται από ειδικά ακροφύσια, ώστε να διαμορφωθεί μια πάστα υλικού υπό πίεση, που αποτελεί το μέσο αντιστήριξης του μετώπου. Το μέγεθος των ανοιγμάτων της κεφαλής επηρεάζει σημαντικά την πίεση αντιστήριξης. Τα μεγάλα ανοίγματα επιτρέπουν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης και έχουν μικρότερο ρίσκο έμφραξη από την εδαφική πάστα, όμως δεν προστατεύουν από τυχών αστάθειες μεγάλων όγκων που μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση των καθιζήσεων. Από την άλλη, κεφαλές με μικρά ανοίγματα έχουν μεγαλύτερο κίνδυνό έμφραξης και αρκετά πιο ανομοιόμορφη πίεση, αλλά αποτελούν μια πιο αξιόπιστη επιλογή όσον αφορά στις καθιζήσεις. Στο Σχήμα 2.8 φαίνονται κοπτικές κεφαλές διαφορετικών ανοιγμάτων.





Σχήμα 2.8 Αριστερά: Κλειστή κοπτική κεφαλή κατασκευασμένη από την Herrenknecht για την επέκταση του μετρό προς Ελληνικό(Attiko Metro n.d.). Δεξιά: Ανοιχτή κοπτική κεφαλή κατασκευασμένη από την Robbins για επέκταση του ΜΕΤΡΟ στο Νέο Δελχί. (Robbins n.d.)



Σχήμα 2.9 Κοπτικά τύπου σφήνας και κοπτικά τύπου δίσκου(Seli n.d.)

Συχνά συναντώνται κατά την εκσκαφή ετερογενείς σχηματισμοί αποτελούμενοι από εδαφικά υλικά με όγκους μαλακού ή σκληρού βράχου. Για να διαχειριστεί το μηχάνημα ένα τέτοιο γεωυλικό έχει προσαρμοσμένα στην κοπτική κεφαλή διαφορετικού τύπου κοπτικά εργαλεία. Τα

κοπτικά τύπου σφήνας προορίζονται για τον εδαφικό σχηματισμό ενώ τα κοπτικά τύπου δίσκου για τεμάχι βράχου. Στο Σχήμα 2.9 φαίνονται τα κοπτικά εργαλεία.

### 2.3.1.2 Θάλαμος εκσκαφής

Ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή (Σχήμα 1.7) και είναι ο χώρος όπου εισέρχεται το εκσκαπτόμενο υλικό, το οποίο βρίσκεται υπό πίεση μέσα στο θάλαμο και αποτελεί το μέσο αντιστήριξης του μετώπου. Η πίεση ρυθμίζεται μέσω του ρυθμού εισαγωγής νέου εκσκαπτόμενου υλικού στο θάλαμο και του ρυθμού αφαίρεσης υλικού μέσω του ατέρμονα κοχλίας.

### 2.3.1.3 Ατέρμονας κοχλίας



Σχήμα 2.10 Ατέρμονας κοχλίας με κεντρικό στέλεχος, ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης.

Για την ελεγχόμενη αφαίρεση εκσκαπτόμενου υλικού από τον θάλαμο εκσκαφής χρησιμοποιείται ένας ατέρμονας κοχλίας ή κοχλίας του Αρχιμήδη. Ο κοχλίας μπορεί να περιστρέφεται από ένα κεντρικό περιστρεφόμενο στέλεχος είτε να περιστρέφεται περιφερειακά.

Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται ένας κοχλίας με κεντρικό στέλεχος. Οι βασικές λειτουργίες του κοχλίας είναι

- Η ελεγχόμενη αφαίρεση της εδαφικής πάστας από τον θάλαμο εκσκαφής και η εναπόθεσή της στην μεταφορική ταινία
- Η δημιουργία φραγμού που εμποδίζει τις εισροές νερού σε υδατοπερατούς σχηματισμούς
- Ο έλεγχος της πίεσης αντιστήριξης του μετώπου μέσα στον θάλαμο, με κατάλληλη ρύθμιση του ρυθμού περιστροφής του

### 2.3.1.4 Υδραυλικά έμβολα ώθησης

Τα υδραυλικά έμβολα ώθησης είναι υπεύθυνα για να κρατάνε το μηχάνημα σταθερό κατά την διάρκεια της εκσκαφής και ταυτόχρονα να ρυθμίζουν τον ρυθμό προχώρησης. Για να ασκήσουν την δύναμη ώσης που απαιτείται, εφαρμόζουν και ασκούν πολύ υψηλές τάσεις στα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης. Οι δυνάμεις που ασκούν τα έμβολα μετατρέπονται σε ώθηση αντιστήριξης στο μέτωπο μέσω της υπό πίεσης πάστας εδαφικού υλικού στο θάλαμο εκσκαφής. Η διαστασιολόγηση του συστήματος υδραυλικών εμβόλων γίνεται με κριτήρια όπως:

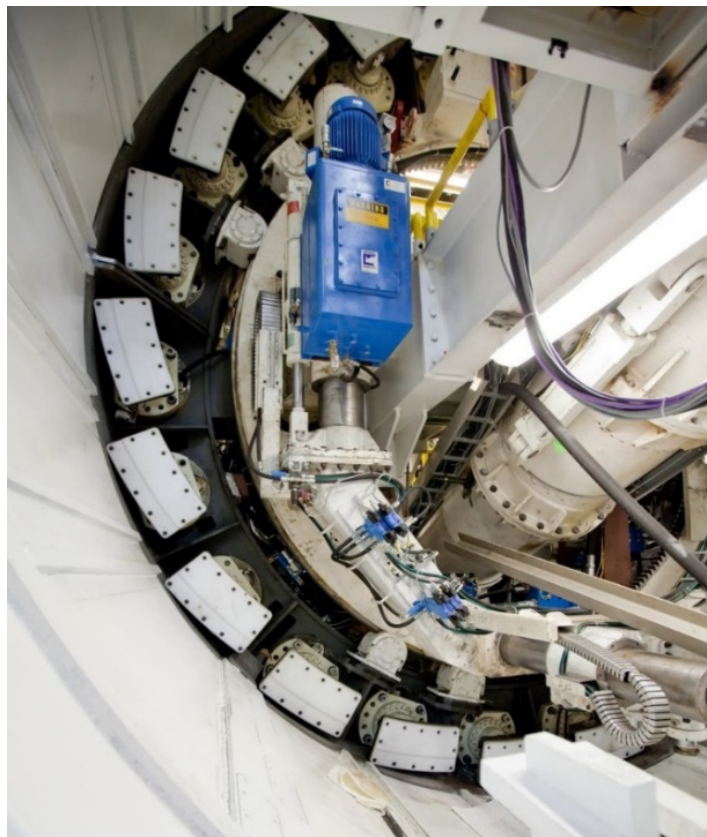
- Κακές εδαφικές συνθήκες με προβλεπόμενες υψηλές τιμές συγκλίσεων έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων τριβών στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας
- Την ανάπτυξη της απαραίτητης ώθησης αντιστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας
- Το βάρος του TBM
- Την απαραίτητη δύναμη εκσκαφής που αποτελείται από το άθροισμα της ορθής δύναμης που απαιτεί το κάθε κοπτικό εργαλείο για να λειτουργεί αποδοτικά

Στο Σχήμα 2.11 και στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά συστήματα υδραυλικών εμβόλων





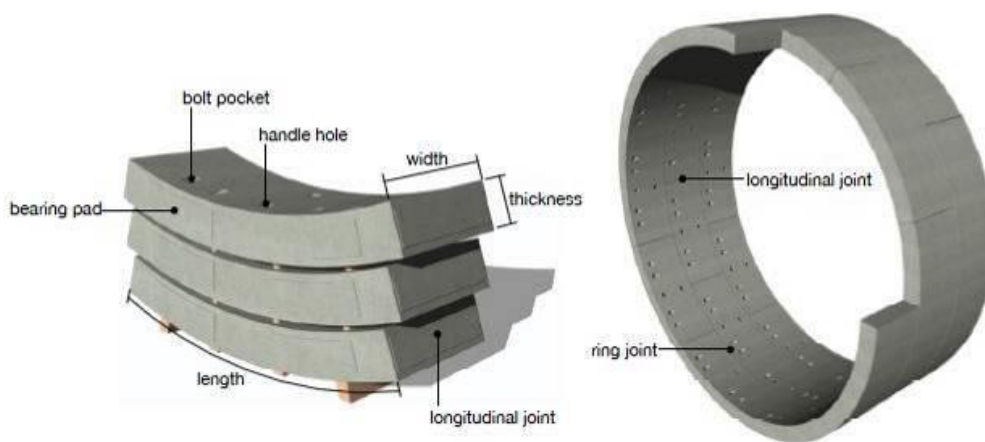
Σχήμα 2.11 Υδραυλικά έμβολα ώθησης σε μηχανήμα EPB διαμέτρου 8.9m της εταιρίας Robbins (Robbins n.d.)



Σχήμα 2.12 Σύστημα υδραυλικών εμβόλων τοποθετημένων στην ουρά της ασπίδας (MOST Construction Company 2012)

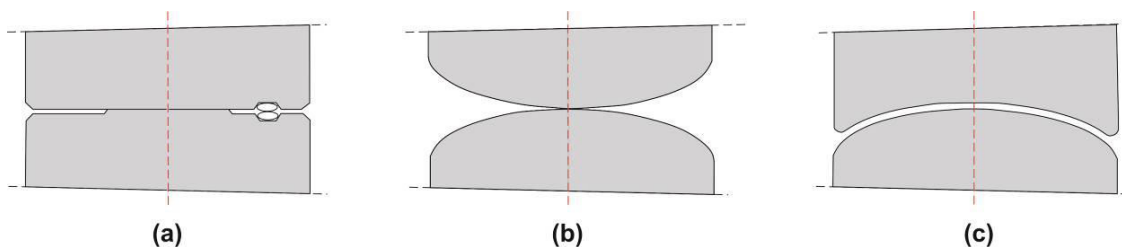
2.3.1.5 Προκατασκευασμένα στοιχεία τελικής επένδυσης

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα τοποθετούνται στο τέλος της ασπίδας διαμορφώνοντας ένα δαχτυλίδι που λειτουργεί ως κομμάτι της υποστήριξης. Ένα βασικό γνώρισμα της υποστήριξης από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος είναι ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων που διακρίνονται σε διαμήκεις συνδέσμους μεταξύ στοιχείων του ίδιου δαχτυλιδιού και σε εγκάρσιους συνδέσμους μεταξύ δύο διαδοχικών δαχτυλίων. Η τοποθέτηση διαδοχικών δαχτυλίων γίνεται με τρόπο που εξασφαλίζει ότι οι διαμήκεις σύνδεσμοι δεν θα συμπίπτουν, συνεπώς αν και το κάθε δαχτυλίδι από μόνο του είναι πιο εύκαμπτο από ένα μονολιθικό δαχτυλίδι (χωρίς συνδέσμους), η αλληλεπίδραση πολλών διαδοχικών δαχτυλιδιών οδηγεί σε μία συμπεριφορά που αντιστοιχεί σε μία πιο συμπαγή δομή.



Σχήμα 2.13 Υποστήριξη σήραγγας από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.(Choi & Yoo 2015)

Στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο τύποι συνδέσμων. Οι επίπεδοι και αυτοί με καμπύλη επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι ο δεύτερος λόγω της γεωμετρίας του δεν δύναται να μεταφέρει ροπές από στοιχείο σε στοιχείο και έτσι λειτουργεί ως άρθρωση.

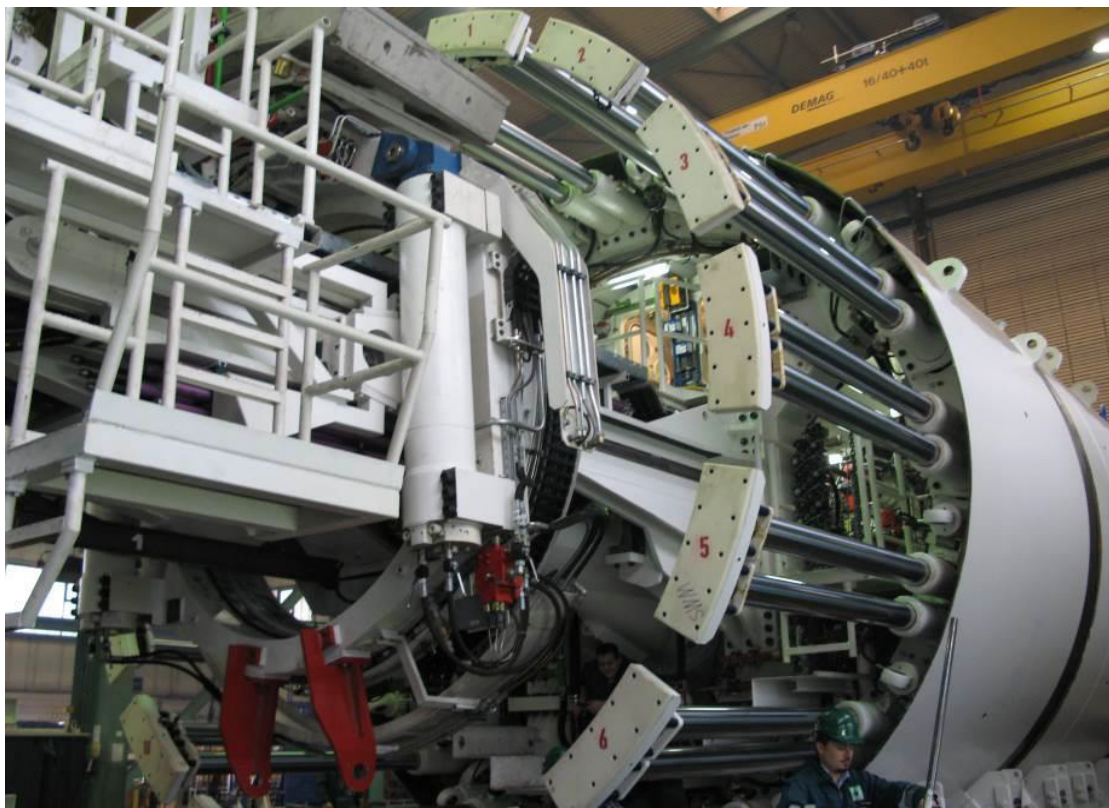


Σχήμα 2.14 Σύνδεσμοι μεταξύ στοιχείων της υποστήριξης (a) επίπεδος σύνδεσμος, (b) σύνδεσμος με καμπύλη επιφάνεια (Luttikholt 2007)



Η υπολογιστική διαδικασία επίλυσης που ακολουθείται κατά τον σχεδιασμό των στοιχείων προκατασκευασμένου σκυροδέματος δεν διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη μίας μονολιθικής τελικής επένδυσης σήραγγας. Λαμβάνονται υπόψιν φορτία από το περιβάλλον γεωυλικό, οι υδραυλικές πιέσεις του νερού των πόρων, κινητά φορτία, τυχηματικά φορτία, φορτία θερμοκρασιακών μεταβολών καθώς και σεισμικά φορτία. Μια ιδιαιτερότητα στη περίπτωση της μηχανοποιημένης όρυξης με TBM, είναι ότι πρέπει επιπρόσθετα να ελεγχθεί η επάρκεια των στοιχείων έναντι των δυνάμεων που ασκούνται από τα υδραυλικά έμβολα ώθησης.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανέγερσης και τοποθέτησης των στοιχείων μέσω εξειδικευμένου μηχανολογικού εξοπλισμού μειώνει σημαντικά το χρόνο εγκατάστασης της υποστήριξης και συνεπώς όλης της διαδικασίας εκσκαφής.



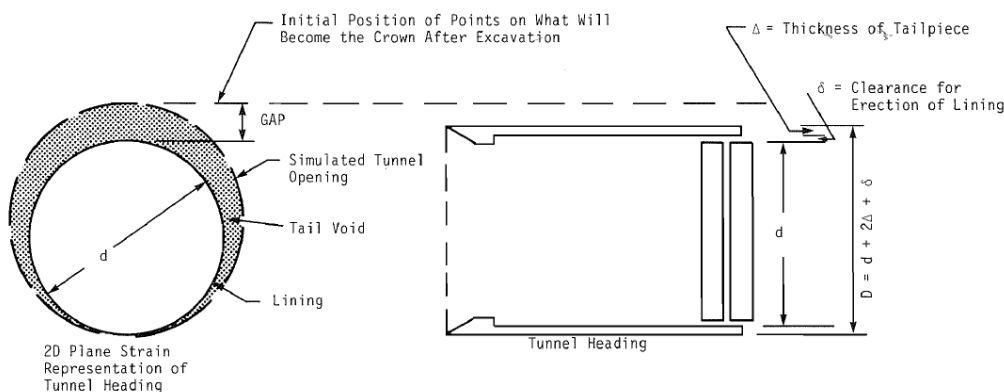
Σχήμα 2.15 Μηχανολογικός εξοπλισμός ανέγερσης και τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων (Attiko Metro n.d.).

### 2.3.1.6 Πλήρωση του ουραίου κενού και διαδικασίες ενεμάτωσης

Η διαδικασία της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων αναπόφευκτα δημιουργεί κάποια κενά μεταξύ του περιβάλλοντος γεωυλικού και των στοιχείων του μηχανήματος και της υποστήριξης. Η κωνικότητα της ασπίδας και η τοποθέτηση των στοιχείων της υποστήριξης στο

εσωτερικό τμήμα της ασπίδας είναι οι δύο βασικότερες αιτίες για αυτά τα κενά. Πιο συγκεκριμένα, τα δύο κατασκευαστικά κενά που δημιουργούνται είναι:

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



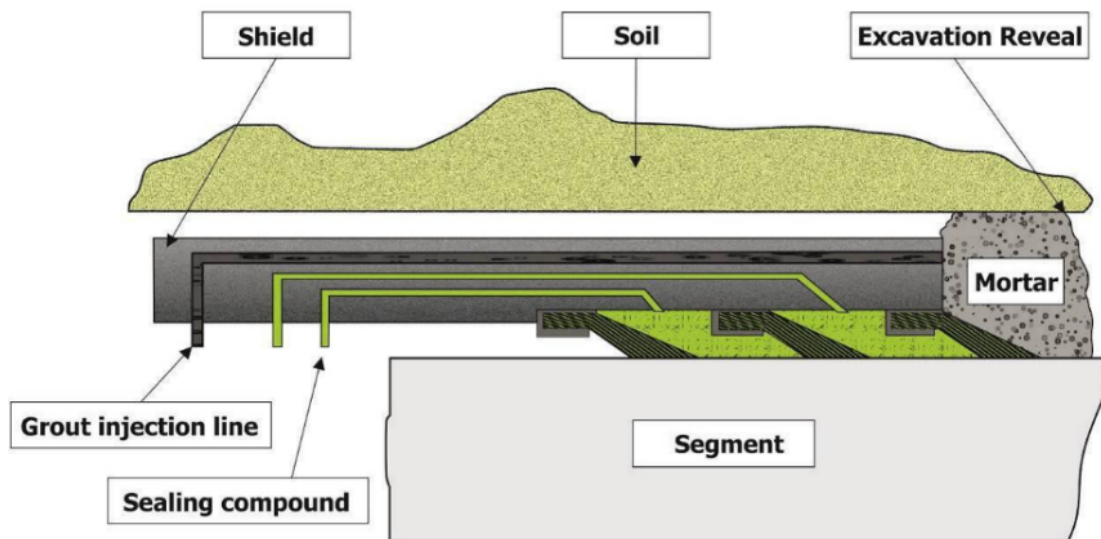
Σχήμα 2.16 Ορισμός του κενού που δημιουργείται κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγας (Lee et al. 1992)

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

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να σφραγιστεί η ουρά της ασπίδας. Ωστόσο, οι χαλύβδινες βούρτσες, που αρχικά αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία, είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες. Οι χαλύβδινες βούρτσες είναι πακτωμένες στην ουρά της ασπίδας, όπου έως και τέσσερις διαδοχικές βούρτσες δομούν ανεξάρτητους θαλάμους σφράγισης μαζί με την ασπίδα και την υποστήριξη. Σε κάθε θάλαμο, ένα υλικό σφράγισης εισάγεται ως λίπανση και διατηρείται υπό μία συγκεκριμένη πίεση. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σφράγισης είναι ότι ακόμα και όταν πέφτει η πίεση του ενέματος, εμποδίζεται η διείσδυση νερού και εδάφους καθώς το υλικό σφράγισης ρέει

από τους θαλάμους προς το κενό. Συνεπώς, το ένεμα και το υλικό σφράγισης είναι πάντοτε σε επαφή και αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ελέγχεται ώστε να είναι φιλικό προς το περιβάλλον.

Η διαδικασία ενεμάτωσης πραγματοποιείται είτε με εισπίεση ενέματος μέσω προυπάρχοντων ανοιγμάτων στα προκατασκευασμένα στοιχεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18, είτε μέσω του συστήματος σωλήνων στην ουρά της ασπίδας όπως προαναφέρθηκε και είναι αυτό που συμβαίνει συνήθως σε μηχανήματα που ασκούν πίεση στο μέτωπο. Αυτός ο τρόπος έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει μία πιο ομοιόμορφη κατανομή του ενέματος στην περίμετρο της εκσκαφής. Επίσης, για να πληρωθεί όλο το κενό γύρω από κάθε δαχτυλίδι, η εισπίεση ενέματος πρέπει να είναι συνεχής καθ' όλη την διάρκεια της προχώρησης και να ελέγχεται συνεχώς ο όγκος του ενέματος και η πίεση του.



Σχήμα 2.17 Σχηματική απεικόνιση της σφράγισης της ουράς της ασπίδας με χαλύβδινες βούρτσες και της εισπίεσης ενέματος και υλικού σφράγισης μέσω συστήματος σωλήνων εγκατεστημένων στην ουρά της ασπίδας (Kavvadas et al. 2013).

Με την ενεμάτωση επιτυγχάνεται:

- Η ομοιόμορφη μεταφορά της πίεσης από το περιβάλλον γεωυλικό στην υποστήριξη
- Στον περιορισμό της ανακατανομής των τάσεων και τον περιορισμό των παραμορφώσεων
- Προλαμβάνει την πιθανή έκθεση της υποστήριξης σε διαβρωτικό περιβάλλον
- Συμβάλει στην στεγάνωση τ της σήραγγας

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

- Πολύ καλές ιδιότητες που σχετίζονται με την ροή

- Καλή εργασιμότητα μέχρι την τοποθέτηση
- Καλές ιδιότητες που αφορούν στην άντληση
- Ταχεία πήξη αφού πληρώσει το κενό

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



Σχήμα 2.18 Εισπίεση ενέματος μέσω έτοιμων ανοιγμάτων στα προκατασκευασμένα στοιχεία (Robbins n.d.)

### 2.3.1.7 Πρόσθετα

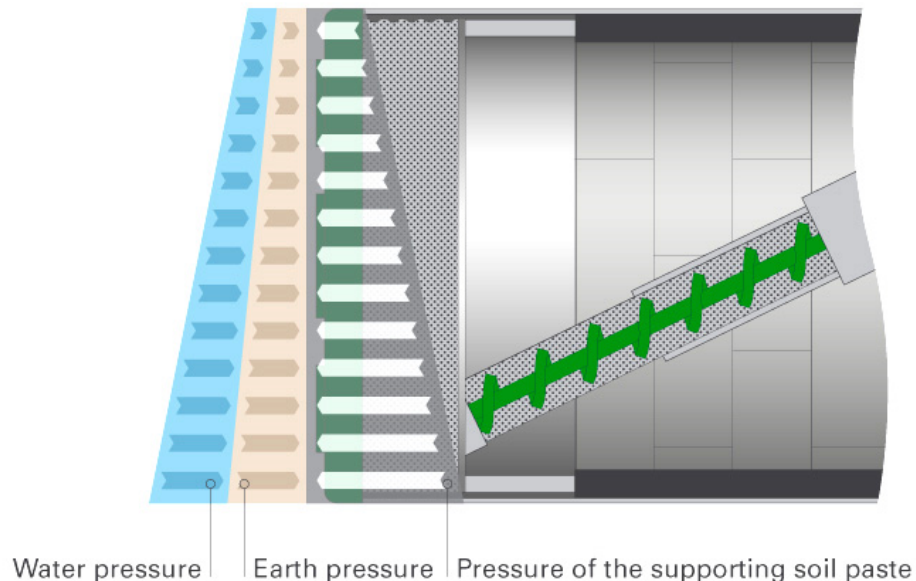
Κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχάνημα EPB οι ιδιότητες του εδάφους πρέπει να βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα όρια ώστε η εκσκαφή να μην παρουσιάζει προβλήματα. Τα φυσικά εδάφη έχουν πολύ σπάνια τις κατάλληλες ιδιότητες και συνεπώς καθίσταται απαραίτητη η εισαγωγή κατάλληλων πρόσθετων. Οι κύριες παράμετροι που σχετίζονται με τις ιδιότητες αυτές είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση, η περιεκτικότητα σε νερό, το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλαστικότητας και υδαρότητας. Οι πρόσθετες ουσίες μπορεί να είναι νερό, διάλυμα μπεντονίτη,

αργίλου ή πολυμερών και αφρός. Γενικά σε εφαρμογές EPB χρησιμοποιείται περισσότερο ο αφρός ο οποίος εισπνέζεται μέσα στην εδαφική πάστα από ακροφύσια στην κοπτική κεφαλή.

Ο αφρός μειώνει το ειδικό βάρος της εδαφικής πάστας και μειώνει την σφιγρότητα, προσδίδοντάς της αυξημένη πλαστιμότητα. Μια επιπρόσθετη βασική λειτουργία του αφρού είναι και η παθητική του ενεργοποίηση κατά τις μεταβολές πίεσης μέσα στον θάλαμο εκσκαφής λόγω της αυξημένης συμπιεστότητας που του προσδίδει ο περιεχόμενος αέρας. Κατά την πτώση της πίεσης αυτός διαστέλλεται ενώ κατά την αύξηση της συστέλλεται, ελέγχοντας έτσι τις απότομες μεταβολές στην πίεση του θαλάμου εκσκαφής.

### 2.3.1.8 Άσκηση της πίεσης μετώπου

Η πρόβλεψη, εφαρμογή και διατήρηση της απαραίτητης πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο είναι μείζονος σημασία για τον περιορισμό των καθιζήσεων που ενδέχεται να βλάψουν τόσο την στατική ακεραιότητα των κτιρίων πλησίον της εκσκαφής όσο και την λειτουργικότητά τους. Η εδαφική πάστα που πληρώνει τον θάλαμο εκσκαφής μεταφέρει στο μέτωπο την δύναμη ώθησης του μηχανήματος και αντισταθμίζει τόσο την ενεργό οριζόντιο τάση του εδάφους όσο και την υδροστατική πίεση του νερού των πόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19 Πίεση υποστήριξης μετώπου από μηχανήμα EPB (Herrenknecht n.d.)

Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από ελάχιστη πίεση μετώπου υπάρχει και μέγιστη ανεκτή, όπου υπέρβαση της θα προκαλούσε ανύψωση της επιφάνειας σε πολύ επιφανειακές σήραγγες.

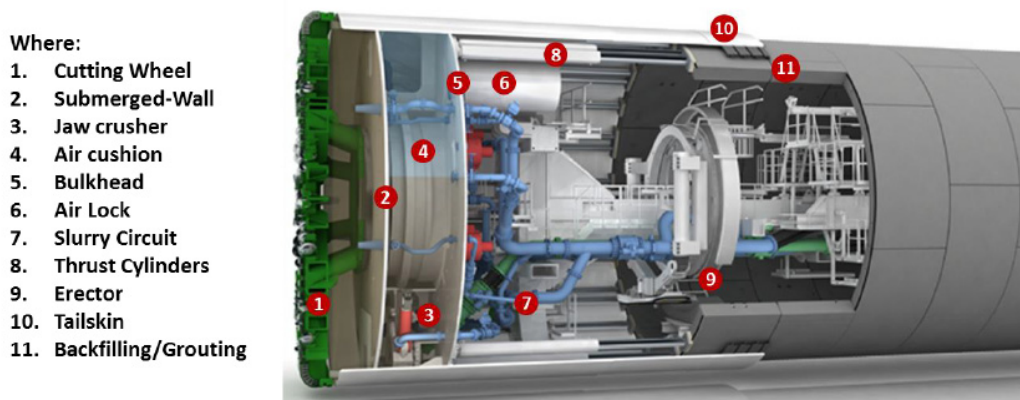


### 2.3.1.9 Μέτρηση βάρους και όγκου του εκσκαπτόμενου υλικού

Στην πράξη ο πραγματικός όγκος εδάφους που αφαιρείται μέσω του ατέρμονα κοχλία διαφέρει από τον θεωρητικό όγκο εκσκαπτόμενου εδάφους, που αντιστοιχεί στην διάμετρο της κοπτικής κεφαλής επί το μήκος προχώρησης. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η μέτρηση της ποσότητας του υλικού που αφαιρείται, έτσι ώστε να ελέγχεται και να αξιολογείται ο εκσκαπτόμενος όγκος για τυχόν υπερεκσκαφές. Οι πιο αποτελεσματικές και συνηθισμένες μέθοδοι μέτρησης όγκου και βάρους είναι οι συσκευές μέτρησης όγκου με χρήση λέιζερ και οι μηχανικές ζυγαριές της μεταφορικής ταινίας που αφαιρεί το υλικό.

### 2.3.2 Τα μέρη ενός μηχανήματος τύπου πολφού μπεντονίτη (Slurry TBM)

Η βασική διαφοροποίηση ενός μηχανήματος Slurry από ένα μηχάνημα EPB έγκειται στο ότι δύναται να διαχειρισθεί ένα ευρύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών με έμφαση σε πιο αδρόκοκκα υλικά όπως αμμόδεις σχηματισμοί. Σε αντίθεση με τα μηχανήματα EPB τα οποία χρησιμοποιούν το εκσκαπτόμενο εδαφικό υλικό για την υποστήριξη του μετώπου, τα μηχανήματα slurry χρησιμοποιούν ένα αιώρημα μπεντονίτη και μέσω αυτού επιτυγχάνουν τόσο την υποστήριξη του μετώπου όσο και την απαγωγή των προϊόντων της εκσκαφής. Τα βασικά μέρη ενός μηχανήματος Slurry φαίνονται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20 Μέρη που αποτελούν ένα μηχάνημα τύπου Slurry (Herrenknecht n.d.)

#### 2.3.2.1 Κοπτική κεφαλή

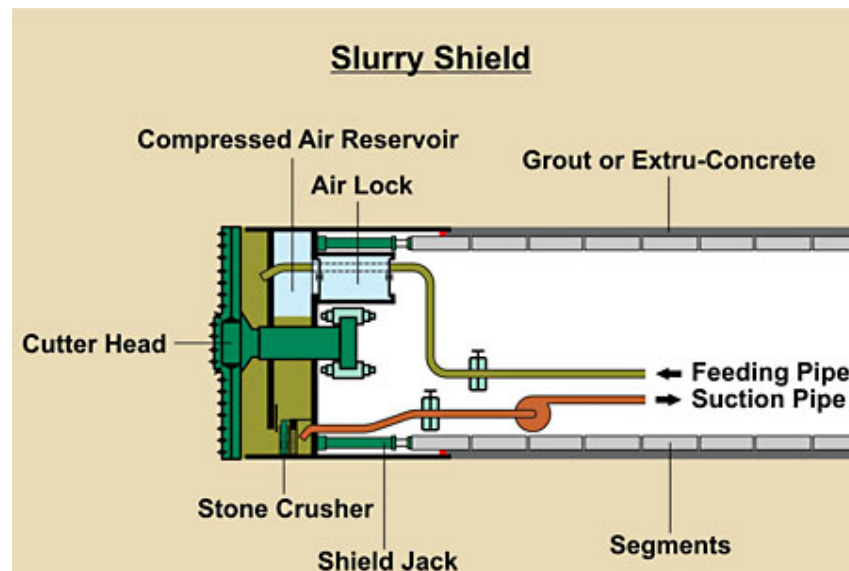
Η κοπτική κεφαλή των Slurry μηχανημάτων είναι επίπεδη και σχετικά κλειστή. Αυτό παρέχει επιπροσθέτως μηχανική υποστήριξη μαζί με την υποστήριξη από τον πολφό. Τα εργαλεία εκσκαφής, συνήθως κοπτικά τύπου σφήνας, έχουν διάταξη με δύο κοπτικά σε κάθε σειρά κοπής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κοπή και προς τις δύο φορές περιστροφής. Το έδαφος μπορεί να

περνάει από κενά παράλληλα στα κοπτικά, με εύρος που είναι προσαρμοσμένο στην αναμενόμενη μέγιστη διάσταση κόκκου του εκσκαπτόμενου υλικού.

### 2.3.2.2 Θάλαμος εκσκαφής

Τα Slurry μηχανήματα παρέχουν πίεση στο μέτωπο μέσω πολφού μπεντονίτη ο οποίος αντλείται υπό πίεση προς τον θάλαμο εκσκαφής. Ο πολφός αποτελείται από αιώρημα μπεντονίτη σε νερό, με την χρήση πρόσθετων όπου χρειάζεται. Ο θάλαμος εκσκαφής, είναι ο χώρος μεταξύ του μετώπου εκσκαφής και του διαφράγματος που χωρίζει τον θάλαμο από τα υπόλοιπα μέρη του μηχανήματος. Η πίεση του πολφού μέσα στο θάλαμο ελέγχεται μέσω των αντλιών του κυκλώματος κυκλοφορίας του πολφού.

Ορισμένα μηχανήματα Slurry, ενδέχεται να έχουν ένα επιπρόσθετο διάφραγμα εντός του θαλάμου που χωρίζει το θάλαμο εκσκαφής σε δύο διακριτούς χώρους, τον θάλαμο εκσκαφής και τον θάλαμο εργασιών. Στα μηχανήματα αυτά ο έλεγχος της πίεσης γίνεται μέσω θαλάμου αέρα (υπό πίεση) εντός του οπίσθιου θαλάμου (Σχήμα 2.21).

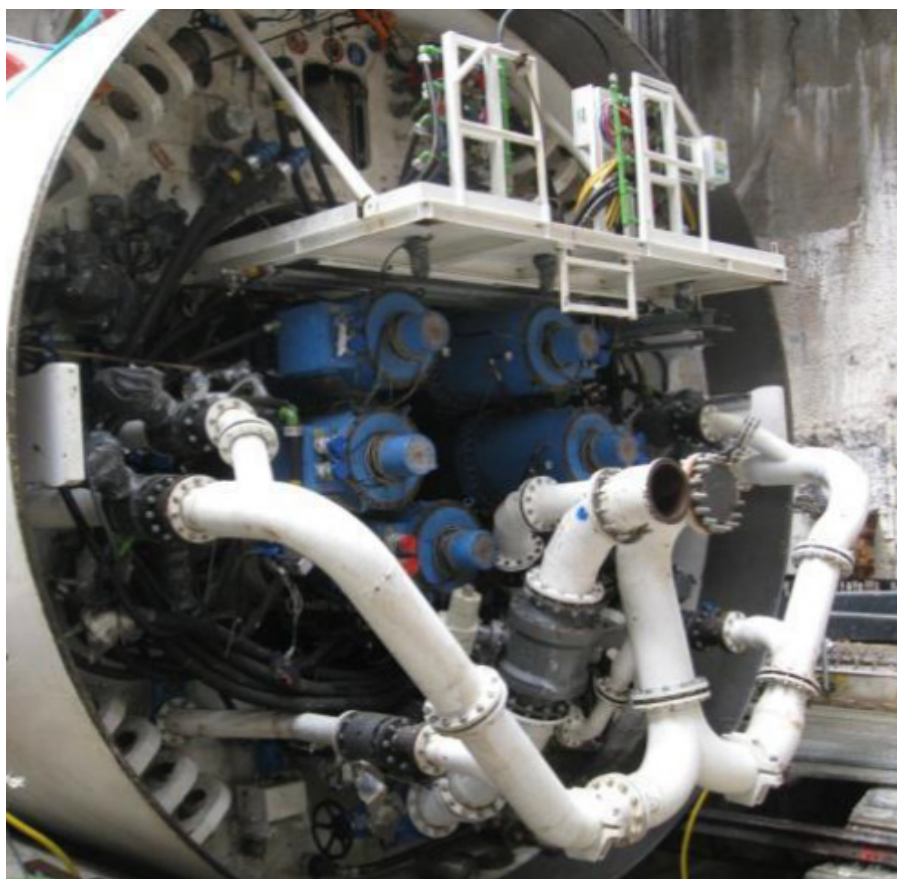


Σχήμα 2.21 Άσκηση πίεσης στο μέτωπο από μηχανήμα Slurry.(Facesupport n.d.)

### 2.3.2.3 Υδραυλική μεταφορά και συστήματα αγωγών (Guglielmetti et al., 2008)

Η αφαίρεση του εκσκαπτόμενου υλικού υδραυλικά ως ρευστό με χρήση αντλίας, είναι η βέλτιστη επιλογή που δεσμεύει τον λιγότερο χώρο. Ωστόσο, η ανάγκη χρήσης εγκαταστάσεων διαχωρισμού του πολφού και η υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, την καθιστά ως μια από τις ακριβότερες μεθόδους αφαίρεσης του εκσκαπτόμενου υλικού.

Στην διαστασιολόγηση των σωληνώσεων στην περίπτωση αφαίρεσης εδάφους με τάση να δημιουργεί συσσωματώματα ή πολφού με υψηλό ιξώδες, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η πιθανότητα έμφραξης τω αγωγών. Ακόμα, στην περίπτωση ύπαρξης τεμαχών βράχου, εγκαθίσταται θραυστήρας στην είσοδο προς το σύστημα των αγωγών. Χάρη στο σύστημα άντλησης, το μηχάνημα μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια ακόμα και για πιέσεις άνω των 15bar. Τέλος, η διάμετρος των αγωγών πρέπει να είναι συμβατή με την απαιτούμενη παροχή, ώστε να εγγυάται την απαραίτητη ταχύτητα ροής που δεν επιτρέπει την δημιουργία ιζημάτων εδαφικών κόκκων.



Σχήμα 2.22 Τυπικό σύστημα αγωγών μεταφορά πολφού σε μηχάνημα Slurry (Herrenknecht n.d.)

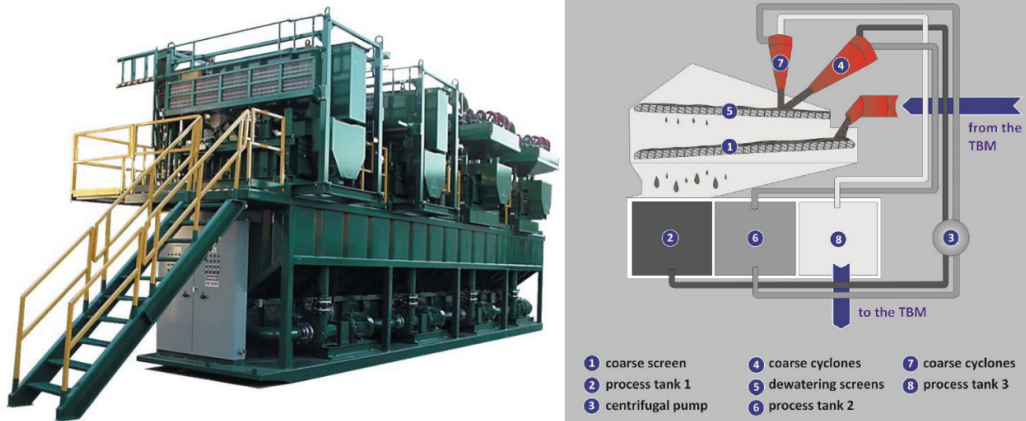
### 2.3.2.4 Εγκαταστάσεις διαχωρισμού

Η χρήση πολφού μπεντονίτη δημιουργεί την ανάγκη διαχωρισμού από το εκσκαπτόμενο υλικό, ώστε να μπορεί να ανακυκλώθει και να χρησιμοποιηθεί ξανά στο σύστημα. Για τον σκοπό αυτό χρειάζεται ένας αριθμός διαφορετικών μηχανημάτων που συγκροτούν τις εγκαταστάσεις διαχωρισμού. Οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα



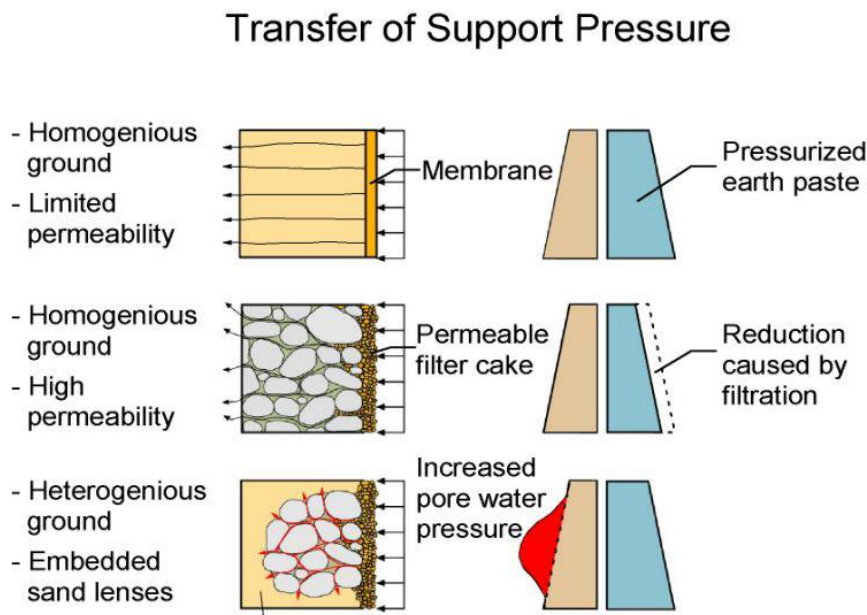
όσον αφορά τις αναμενόμενες διαστάσεις κόκκων στερεών. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές διαχωρισμού που εφαρμόζονται στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού, ο διαχωρισμός μέσω καθίζησης και το φιλτράρισμα:

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



Σχήμα 2.23 Εγκαταστάσεις διαχωρισμού του πολφού από το μεταφερόμενο εδαφικό υλικό. (αριστερά: (Derrick n.d.); δεξιά: (Herrenknecht n.d.))

2.3.2.5 Μεταφορά της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο



Σχήμα 2.24 Κατανομή της πίεσης με χρήση πολφού για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (The Masterbuilder Bureau 2014)

Η πίεση του πολφού έχει ως συνέπεια την διείσδυση του μέσα στους πόρους του εδάφους. Τα μήκος διείσδυσης του πολφού εξαρτάται από την ασκούμενη πίεση, το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, τις υδραυλικές ιδιότητες του πολφού και τις υδρογεωλογικές συνθήκες, κατά κύριο λόγο το μέγεθος της συγκέντρωσης αλάτων στο υπόγειο νερό. Το μήκος διείσδυσης είναι μία υπερβολικά σημαντική παράμετρος. Ειδικότερα, ένα πολύ μεγάλο μήκος διείσδυσης δεν είναι ευεργετικό στην σταθερότητα, ενώ, από την άλλη, ένα πολύ μικρό μήκος διείσδυσης θα έκανε την υποστήριξη του μετώπου λιγότερο αποδοτική. Επιπροσθέτως, υψηλές ποσότητες νερού που διεισδύει στο έδαφος πρέπει να αποφεύγεται, λόγω του γεγονότος ότι θα μπορούσε να προκαλέσει διόγκωση κάποιων αργιλικών γεωλικών και να έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αποδοτικότητας και αύξηση της διάμεσης πίεσης. Στο Σχήμα 2.24 φαίνεται η μεταφορά της πίεσης ανάλογα με τις διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες

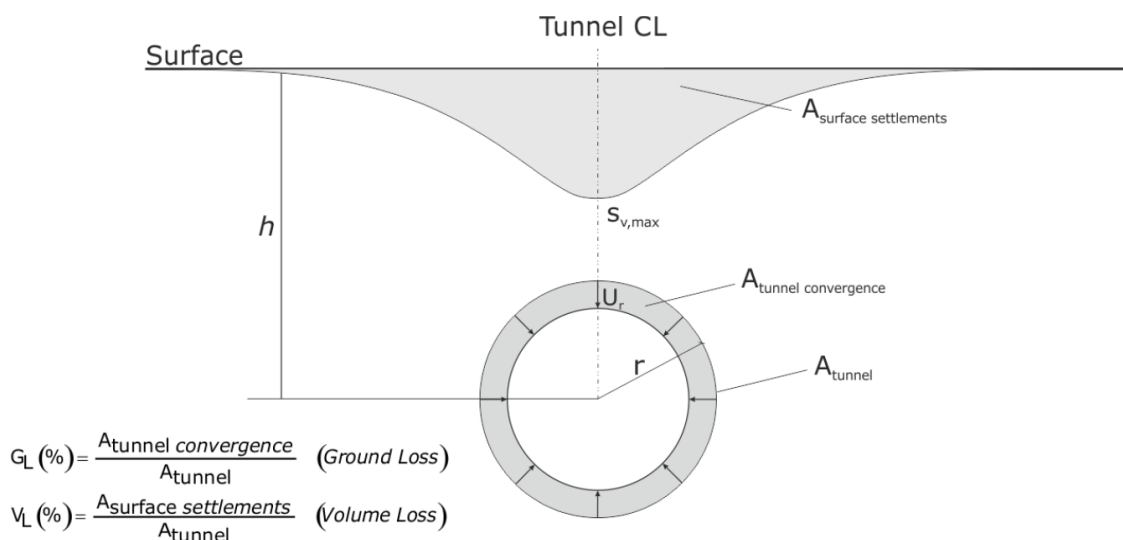
### **3 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΒΑΘΟΣ**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

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

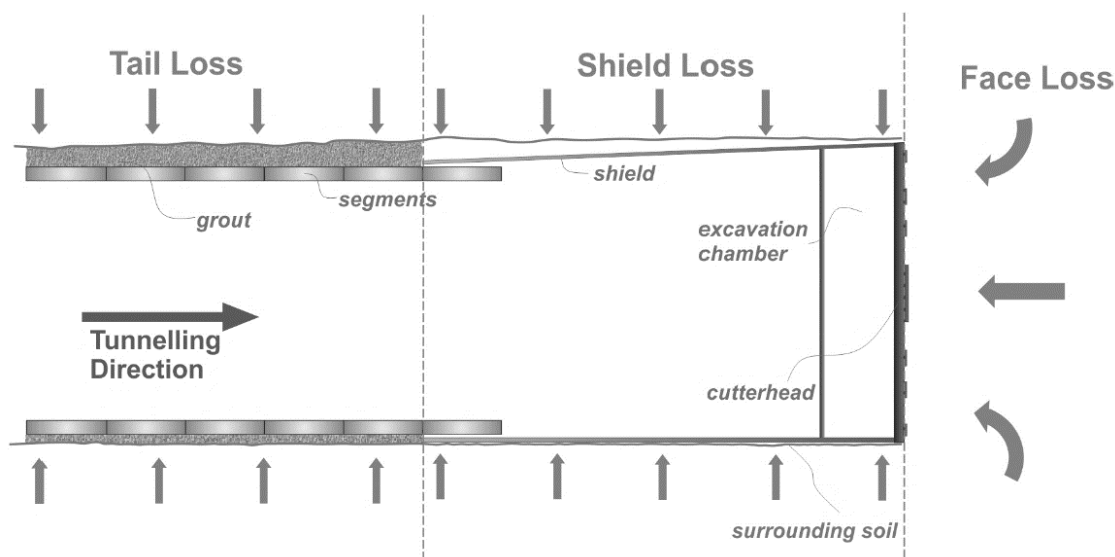
#### **3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΓΚΟΥ**

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



Σχήμα 3.1 Ορισμός των μεγεθών απώλεια όγκου  $V_L$  και απώλεια εδάφους  $G_L$

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



Σχήμα 3.2 Πηγές απώλειας όγκου σε διάνοιξη σήραγγας με χρήση TBM.

### 3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

#### 3.3.1 Sagaseta

Ο Sagaseta (1987) ανάλυσε το πεδίο των μετατοπίσεων που προκαλούνται από την διάνοιξη κυκλικής σήραγγας εντός ισότροπου και ομοιογενούς μέσου με θεώρηση ισόογκης παραμόρφωσης και ελαστικής συμπεριφοράς. Βασική παραδοχή είναι ότι η διάνοιξη πραγματοποιείται σε μικρό βάθος και το περιβάλλον γεωυλικό πληρώνει πλήρως το κενό που δημιουργεί η εκσκαφή. Η μέθοδος υπολογίζει τις μετατοπίσεις, οι τάσεις υπολογίζονται ύστερα από τις παραμορφώσεις μέσω του καταστατικού νόμου. Η επίλυση ακολουθεί διαδοχικά βήματα όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.3:

- i. Η επίδραση της επιφάνειας αμελείται και οι παραμορφώσεις υπολογίζονται σαν το μέσο να ήταν άπειρων διαστάσεων (Step 1).
- ii. Οι τάσεις στην επιφάνεια, παραβιάζουν την συνθήκη μηδενικών τάσεων. Για να ικανοποιείται η ισορροπία τάσεων στην επιφάνεια γίνεται θεώρηση αφαίρεσης υλικού από κατοπτρική θέση ως προς την επιφάνεια, είτε αρνητική που δημιουργεί αντίθετες ορθές και ίσες διατμητικές τάσεις, είτε θετική που δημιουργεί ίσες ορθές και αντίθετες διατμητικές (Step 2).
- iii. Οι απομένουσες διατμητικές ή ορθές τάσεις στην επιφάνεια έπειτα υπολογίζονται και αφαιρούνται (Step 3)

Αγνοώντας την επιφάνεια, το πρόβλημα γίνεται συμμετρικό και οι μετακινήσεις είναι μόνο ακτινικές. Σύμφωνα με την συνθήκη της μηδενικής μεταβολής όγκου, το μέγεθος της απώλειας εδάφους μπορεί να οριστεί από την ακτίνα μιας ισοδύναμης σφαίρας ή κυλίνδρου. Η χρήση της μεθόδου αυτής προϋποθέτει τον προσδιορισμό της τιμής της απώλειας εδάφους. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται είτε με επί τόπου μετρήσεις στο πεδίο και εμπειρικές συσχετίσεις είτε με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γενικές σχέσεις για τις επιφανειακές μετακινήσεις

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

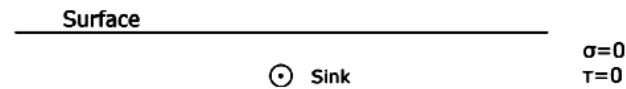
$$S_{yo} = \frac{v}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+h^2}} \quad \text{Εξ. 3.2}$$

$$S_{zo} = \frac{v}{2\pi} \frac{h}{x^2+h^2} \left( 1 + \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+h^2}} \right) \quad \text{Εξ. 3.3}$$

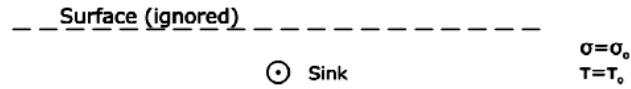
Η απόσταση του σημείου καμπής των επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων από τον άξονα της σήραγγας είναι

$$i = h/\sqrt{3} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

**Actual problem**

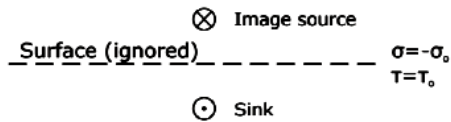


**Step 1- infinite medium**

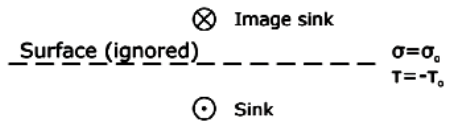


**Step 2- image sink/source**

(a) Negative image

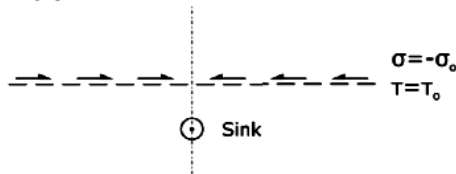


(b) Positive image

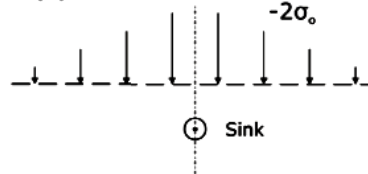


**Step 3- Surface stresses**

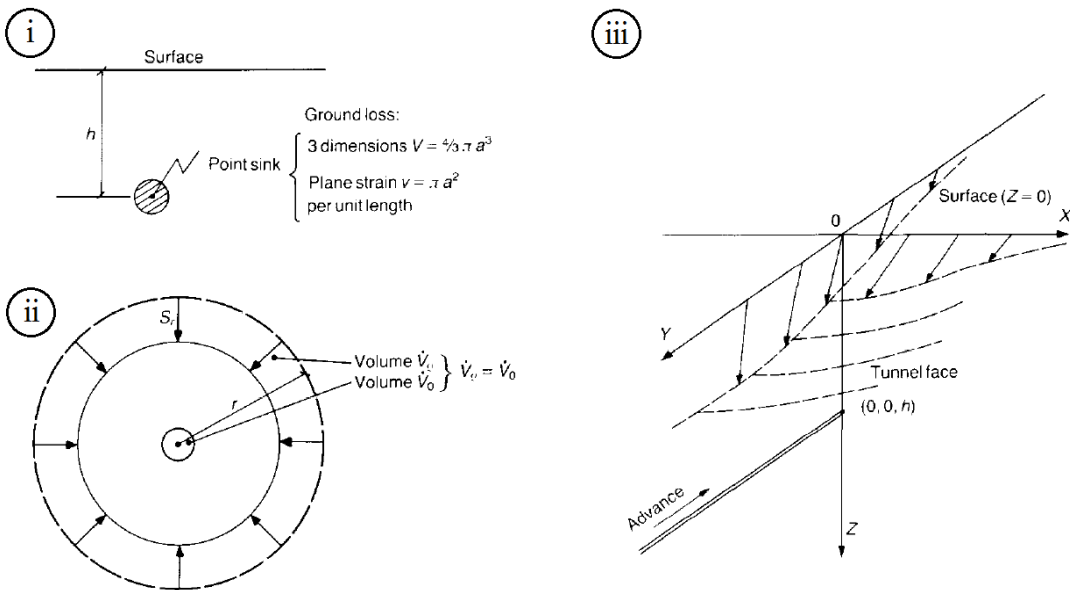
(a)



(b)



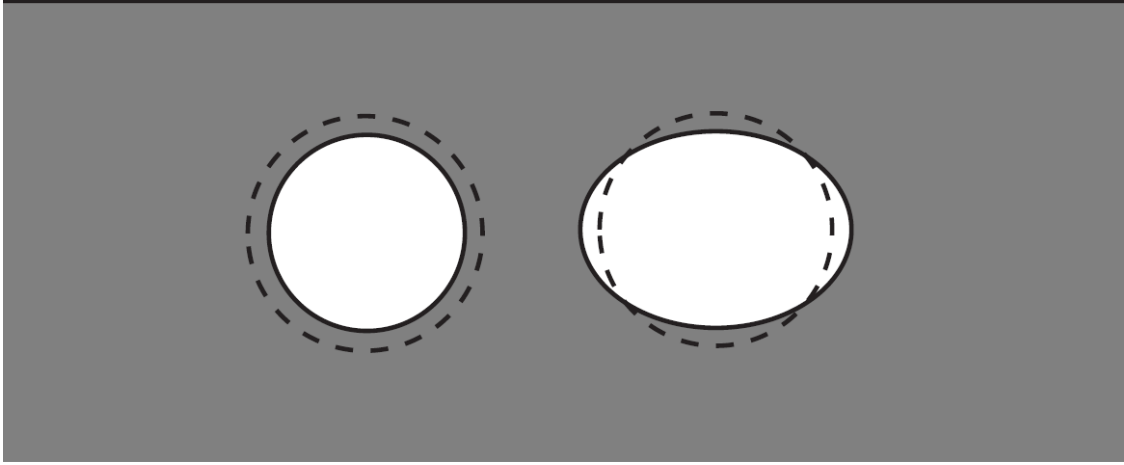
Σχήμα 3.3 Βήματα της ανάλυσης (Sagaseta 1987).



Σχήμα 3.4 (i) Ορισμός του προβλήματος, (ii) άπειρο μέσο και (iii) τριδιάστατο πρόβλημα (Sagaseta 1987)

### 3.3.2 Verruijt A. & Booker J. R.

Οι Verruijt & Booker (1996) παρουσίασαν μία γενίκευση της μεθοδολογίας του Sagaseta (1987) εισάγοντας δύο βασικές διαφοροποιήσεις. Την δυνατότητα επίλυσης και για μη ισόογκης συνθήκες παραμόρφωσης με χρήση του λόγου Poisson  $\nu$  καθώς και την επιρροή από τυχόν μη ομοιόμορφη κυκλική παραμόρφωση της σήραγγας (π.χ. ovalization). Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια



Σχήμα 3.5 Απόλεια εδάφους και μη-συμμετρική παραμόρφωση ανοίγματος σήραγγας (Verruijt & Booker 1996)

$$S_x = -\varepsilon R^2 \left( \frac{x}{r_1^2} + \frac{x}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left[ \frac{x(x^2 - kz_1^2)}{r_1^4} + \frac{x(x^2 - kz_2^2)}{r_2^4} \right] - \frac{2\varepsilon R^2 x}{m} \left[ \frac{1}{r_2^2} - \frac{2mzz_2}{r_2^4} \right] - \frac{4\delta R^2 xh}{m+1} \left[ \frac{z_2}{r_2^4} + \frac{mz(x^2 - 3z_2^2)}{r_2^6} \right] \quad \text{Εξ. 3.5}$$

$$S_z = -\varepsilon R^2 \left( \frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \delta R^2 \left[ \frac{z_1(kx^2 - z_1^2)}{r_1^4} + \frac{z_2(kx^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right] + \frac{2\varepsilon R^2}{m} \left[ \frac{(m+1)z_2}{r_2^2} - \frac{mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right] - 2\delta R^2 h \left[ \frac{x^2 - z_2^2}{r_2^4} + \frac{m}{m+1} \frac{2zz_2(3x^2 - z_2^2)}{r_2^6} \right] \quad \text{Εξ. 3.6}$$

όπου:

$\varepsilon$ : η ομοιόμορφη ακτινική απόλεια εδάφους

$\delta$ : η μακροχρόνια εδαφική παραμόρφωση λόγω του οβάλ σχήματος που παίρνει η υποστήριξη

$$z_1 = z - H$$

$$z_2 = z + H$$

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

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

R και h: η ακτίνα και το βάθος της σήραγγας

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

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

$\nu$ : λόγος Poisson του εδάφους

### 3.3.3 Loganathan N. & Poulos H. G.

Οι Loganathan & Poulos (1998) παρήγαγαν μια αναλυτική πρόβλεψη για τις εδαφικές μετακινήσεις λόγω διάνοιξης σήραγγας επαναπροσδιορίζοντας τον κλασικό ορισμό της απώλειας εδάφους με μία “ισοδύναμη παράμετρο απώλειας εδάφους  $\epsilon$ ” σε σχέση με το κενό “g”, που αντιστοιχεί στην σύγκλιση της στέψης της σήραγγας. Η παράμετρος “ $\epsilon$ ” εισήχθη αρχικά από τους Lee et al. (1992) και φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Η βασική διαφορά με τους Verruijt & Booker (1996) φαίνεται στο Σχήμα 3.6.

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

$$g = G_p + U_{3D}^* + \omega \quad \text{Εξ. 3.7}$$

$$\epsilon_0 = \frac{4gR + g^2}{4R} 100\% \quad \text{Εξ. 3.8}$$

όπου:

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

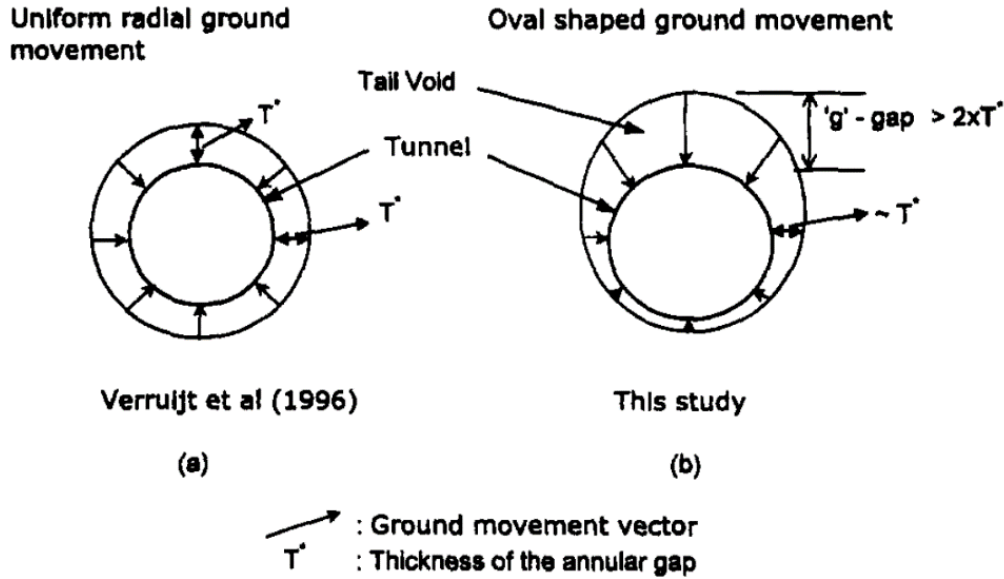
$U_{3D}^*$ : τριδιάστατες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο

$\omega$ : συντελεστής εργασιμότητας

$\epsilon_0$ : ισοδύναμη απώλεια εδάφους

Εφαρμόζοντας της οριακές συνθήκες που φαίνονται στο Σχήμα 3.7 οι Loganathan & Poulos (1998) παρήγαγαν την συνιστώσα της ισοδύναμης απώλειας εδάφους για μη-ομοιόμορφη κατακόρυφη μετακίνηση.





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

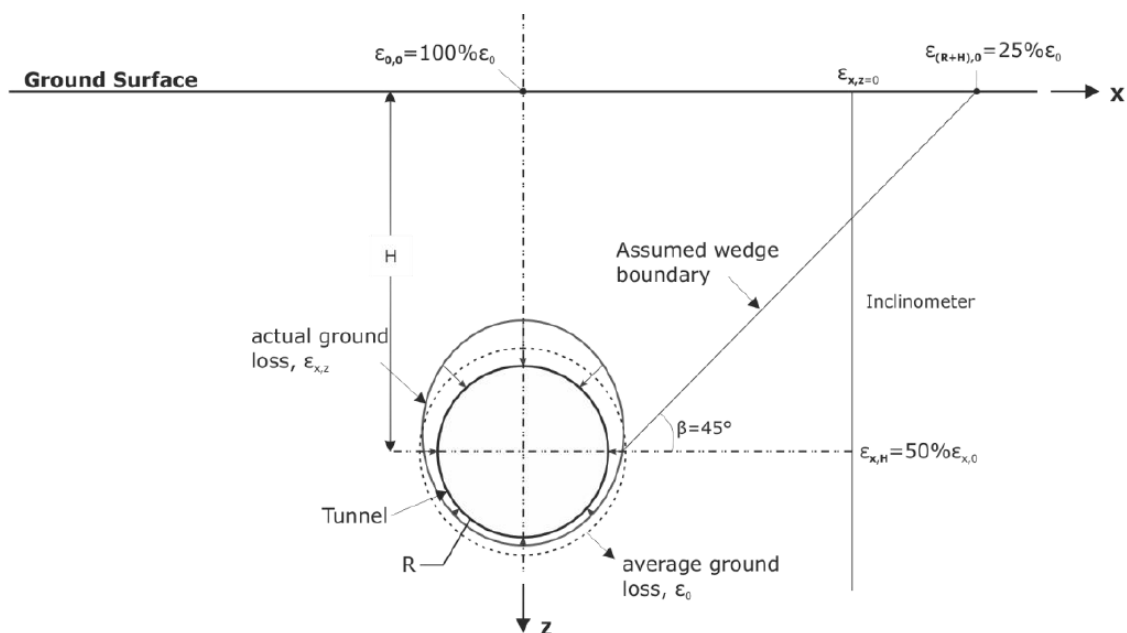
$$\varepsilon_{x,z} = \varepsilon_0 \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad \text{Εξ. 3.9}$$

$$S_x = -R^2 x \left\{ \frac{1}{x^2+(H-z)^2} + \frac{3-4\nu}{x^2+(z+H)^2} - \frac{4z(z+H)}{[x^2+(z+H)^2]^2} \right\} \frac{4gR+g^2}{4R^2} \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad \text{Εξ. 3.10}$$

$$S_z = -R^2 \left\{ \frac{z-H}{x^2+(z-H)^2} + \frac{(3-4\nu)(z+H)}{x^2+(z+H)^2} - \frac{2z[x^2-(z+H)^2]}{[x^2+(z+H)^2]^2} \right\} \frac{4gR+g^2}{4R^2} \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad \text{Εξ. 3.11}$$

Οι Loganathan & Poulos (1998) ισχυρίζονται ότι η μέθοδος των Verruijt & Booker (1996) υποεκτιμάει τις μέγιστες καθιζήσεις και δίνει πιο ευρύ προφίλ καθιζήσεων όταν συγκρίνεται με εμπειρικές μεθόδους και δεδομένα πεδίου. Λόγω του ότι το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον καθορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων με εμπειρικές μεθόδους, η Εξ.3.12 υπολογίζει την κανονικοποιημένο  $i/R$  σε σχέση με την ανηγμένη παράμετρο  $H/D$  για την συγκεκριμένη αναλυτική λύση.

$$\frac{i}{R} = 1.15 \left( \frac{H}{D} \right)^{0.9} \quad \text{Εξ. 3.12}$$



Σχήμα 3.7 Οριακές συνθήκες για την απώλεια εδάφους (Loganathan & Poulos 1998)

### 3.4 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

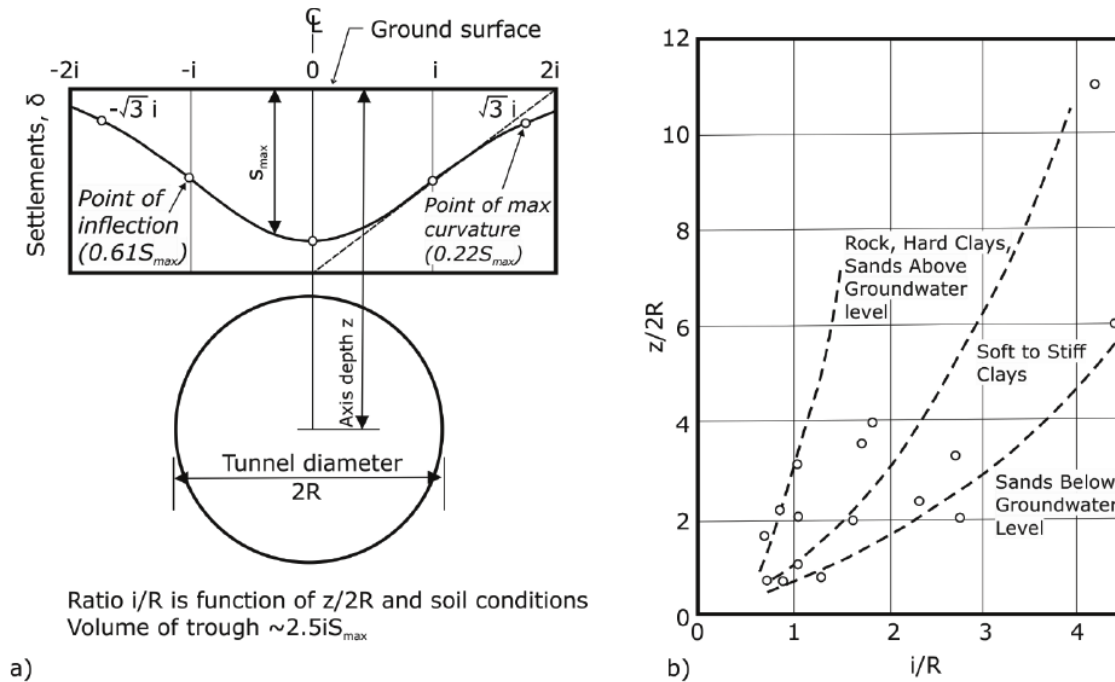
#### 3.4.1 Peck & Schmidt

Οι Peck (1969) και Schmidt (1969) βασιζόμενοι σε παρατηρήσεις πεδίου πρότειναν ότι το προφίλ των μονίμων καθιζήσεων, που προκαλούνται από την διάνοιξη κυκλικής σήραγγας σε μαλακό εδαφικό σχηματισμό, μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μία εξίσωση κανονικής κατανομής (καμπύλη Gauss). Αν και η παραπάνω προσέγγιση δεν έχει καμία θεωρητική αιτιολόγηση, ισχυρίζονται ότι μπορεί να παρέχει τουλάχιστον μια χονδροειδή εκτίμηση του αναμενόμενου προφίλ καθιζήσεων πάνω από μονή σήραγγα. Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φαίνονται στο Σχήμα 3.8, όπου R η ακτίνα της σήραγγας,  $S_{max}$  η μέγιστη καθίζηση στον άξονα της σήραγγας και i η απόσταση του σημείου καμπής της καμπύλης των καθιζήσεων στην επιφάνεια, από τον άξονα της σήραγγας (Σχήμα 3.8). Οι βασικές σχέσεις υπολογισμού των επιφανειακών καθιζήσεων, της απώλειας όγκου και του σημείου καμπής:

$$S_z = S_{v,max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad \text{Εξ. 3.13}$$

$$V_L(\%) = \frac{\sqrt{2\pi} i S_{v,max}}{\pi R^2} \quad \text{Εξ. 3.14}$$

$$\frac{2i}{D} = \left(\frac{Z}{D}\right)^{0.8-1.0} \quad \text{Εξ. 3.15}$$



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

Η μεθοδολογία αυτή προβλέπει την μορφή των προφίλ των καθιζήσεων και όχι το μέγεθος της καθίζησης. Τόσο η μέγιστη καθίζηση  $S_{max}$  όσο και η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  θεωρούνται γνωστά.. Μια συνηθισμένη πρακτική είναι να εκτιμάται πρώτα η απώλεια όγκου (πχ. μέσω εμπειρικών συσχετίσεων) και έπειτα να γίνεται εκτίμηση του  $i$  σύμφωνα με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος σύμφωνα με το γράφημα στο Σχήμα 3.8. Με γνωστά τα παραπάνω μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί το  $S_{max}$  και το εγκάρσιο προφίλ των καθιζήσεων για οποιαδήποτε απόσταση  $x$  από τον άξονα συμμετρίας.

### 3.4.2 Cording & Hansmire

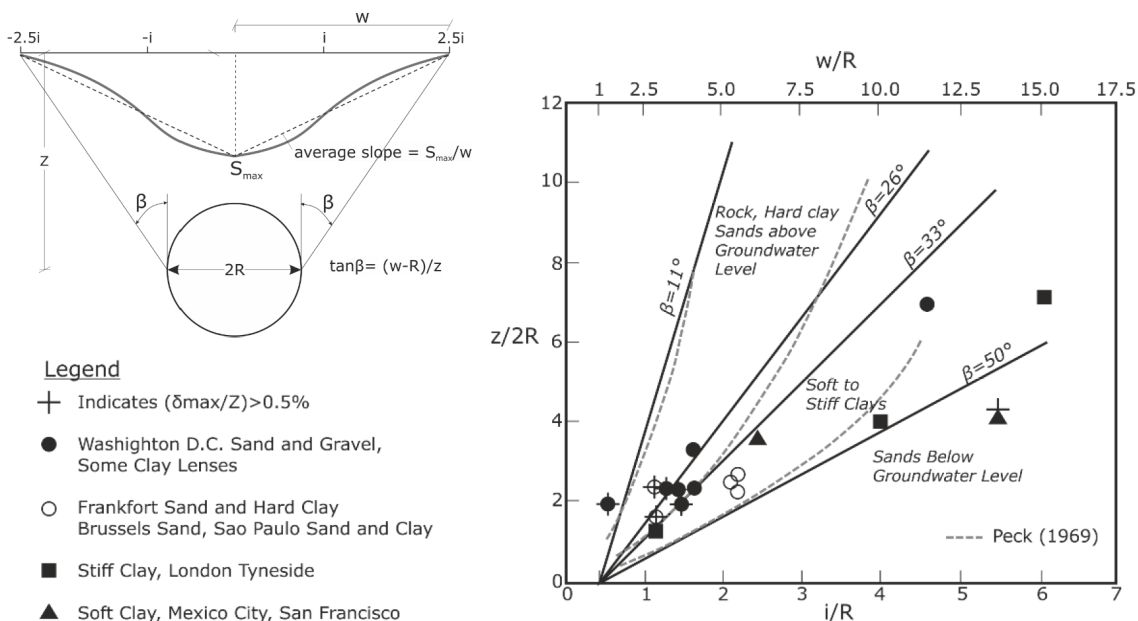
Οι Hansmire & Cording (1972) και Cording & Hansmire (1975) επικεντρώθηκαν στην εκτίμηση της απώλειας εδάφους που προκαλείται από την διάνοιξη σήραγγας και βασίζόμενοι σε παρατηρήσεις πεδίου και πειράματα διαπίστωσαν ότι η βασική διαφοροποίηση μεταξύ της απώλειας εδάφους στην περιφέρεια της σήραγγας και της απώλειας όγκου στην επιφάνεια οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στο θλιπτικό πεδίο των τάσεων που αναπτύσσεται στην αριστερή και δεξιά πλευρά της σήραγγας.

Υιοθέτησαν την βασική παραδοχή της μεθοδολογίας του Peck (1969) ότι το εγκάρσιο προφίλ των καθιζήσεων μπορεί να περιγραφεί μέσω μίας καμπύλης Gauss, τροποποιώντας την

σχέση υπολογισμού της απόστασης του σημείου καμπής. Εισήγαγαν στον υπολογισμό την γωνία  $\beta$  όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3.9, η τιμή της οποίας συσχετίζεται με τον τύπο του εδάφους μέσω του νομογραφήματος στο Σχήμα 3.9. Οι Cording & Hansmire, για λόγους απλοποίησης, θεωρούν ότι η απώλεια εδαφικού όγκου μπορεί να υπολογιστεί μέσω ενός ισοδύναμου τριγώνου (Σχήμα 3.9) με θεώρηση της ακόλουθης σχέσης

$$V_L = 2 \frac{1}{2} w S_{max} = w S_{max} \tag{Εξ. 3.16}$$

όπου  $2w$  το πλάτος ανάπτυξης των καθιζήσεων.



Σχήμα 3.9 Σχέση της γωνίας  $\beta$  με την απόσταση  $i$  του σημείου καμπής του προφίλ των καθιζήσεων από το σημείο μέγιστης καθίζησης (Cording & Hansmire 1975; Hansmire & Cording 1972)

Οι Hansmire & Cording (1972) και Cording & Hansmire (1975) υποστήριζαν ότι είναι πιθανό πραγματικές μετρήσεις καθιζήσεων να μην μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από μία καμπύλη Gauss, κυρίως λόγω του ότι οι μετρούμενες καθιζήσεις μακριά από τον άξονα εμφανίζονται αναλογικά μικρότερες από αυτές που προβλέπει η καμπύλη με βάση την τιμή της καθίζησης στο κέντρο. Αυτό το απέδωσαν στην τοπική δημιουργία ζωνών αυξημένης διατμητικής παραμόρφωσης πάνω από την στέψη, που έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της καθίζησης στην περιοχή περί τον άξονα συμμετρίας του προβλήματος.

### 3.4.3 Atkinson et al.

Οι Atkinson et al. (1977) έδειξαν πειραματικά πως η κατανομή των καθιζήσεων εξαρτάται από την φύση του εδάφους και το βάθος της σήραγγας. Υποστήριξαν ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις μπορούν να συσχετιστούν εμπειρικά με την καθίζηση στη στέψη της σήραγγας, παίρνοντας υπ' όψιν το βάθος της σήραγγας και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Μελέτησαν την σχέση μεταξύ του σημείου καμπής  $i$  και του βάθους της σήραγγας διεξάγοντας πειράματα σε μοντέλα με και χωρίς επιφανειακό φορτίο. Με βάση τις πειραματικές τους παρατηρήσεις πρότειναν ότι το σημείο καμπής μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$i = 0.25(C + D) \quad \text{Εξ. 3.17}$$

για αμμώδη εδάφη χωρίς επιφανειακό φορτίο, και ως:

$$i = 0.25(1.5C + D) \quad \text{Εξ. 3.18}$$

για πυκνές άμμους και υπερστερεοποιημένες αργίλους με επιφανειακό φορτίο, όπου:

$C$  το βάθος των υπερκειμένων και  $D$  η διάμετρος της σήραγγας

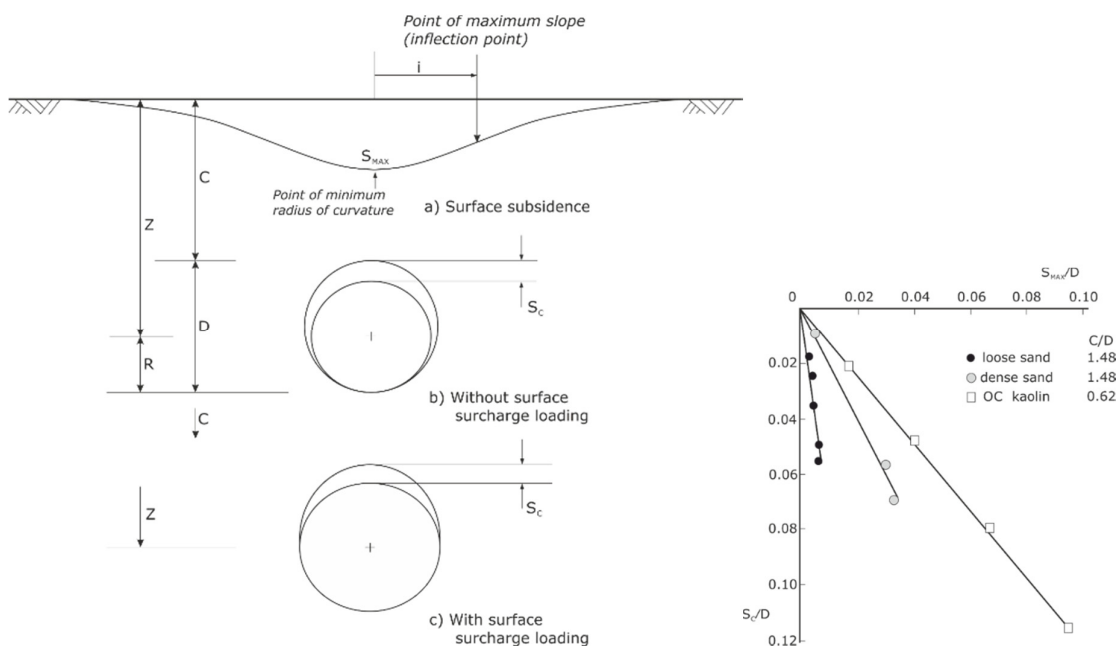
Με σκοπό να ερμηνεύσουν τον μηχανισμό για την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων οι Atkinson et al. (1977) συσχέτισαν την μετακίνηση την στέψη με την καθίζηση στην επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα ισχυρίστηκαν ότι το μέγεθος του λόγου  $S_{max}/S_c$  εξαρτάται από την παρουσία επιφανειακού φορτίου και του πόσο συστολικό ή διαστολικό είναι το έδαφος γύρω από την σήραγγα. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η μέγιστη καθίζηση πως σχετίζεται με την μετακίνηση στη στέψη για τρεις διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς.

Τελικώς, για να περιγράψουν την μέγιστη καθίζηση συναρτήσει των μετακινήσεων στη στέψη παίρνοντας υπ' όψιν και το είδος του εδάφους, πρότειναν την παρακάτω σχέση υπολογισμού

$$\frac{S_{max}}{S_c} = 1.0 - a \left( \frac{C}{D} \right) \quad \text{Εξ. 3.19}$$

όπου η παράμετρος  $a$  εισαγάγει την επιρροή του εδάφους και παίρνει τιμές:

- 0.57 για πυκνή άμμο σε χαμηλές τάσεις,
- 0.40 για χαλαρή και πυκνή άμμο σε υψηλές τάσεις, και
- 0.13 για υπερστερεοποιημένες αργίλους.



Σχήμα 3.10 Γεωμετρία της σήραγγας και επιφανειακές καθιζήσεις για κυκλική σήραγγα (αριστερά) και μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθιζήσης με την καθίζηση της στέψης για τρία διαφορετικά εδάφη (δεξιά) (Atkinson et al. 1977)

### 3.4.4 O'Reilly & New

Οι O'Reilly & New (1982), βασιζόμενοι στην μεθοδολογία του Peck (1969), πρότειναν σχέσεις για το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων στη βάση πραγματικών μετρήσεων. Επεξεργαζόμενοι διαθέσιμα δεδομένα από το πεδίο και συσχετίζοντας το σημείο καμπής  $i$  σε σχέση με το βάθος της σήραγγας  $z_0$  παρατήρησαν μια γραμμική συσχέτιση της μορφής

$$i = Kz_0 \tag{Εξ. 3.20}$$

όπου το  $K$  παράμετρος σχετιζόμενη με τον τύπο του εδάφους με τιμές που κυμαίνεται από 0.40 έως 0.70.

Για πιο ακριβή υπολογισμό του σημείου καμπής, μετά από γραμμική παρεμβολή σε δεδομένα από 21 συνεκτικά και 16 μη-συνεκτικά εδάφη πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις

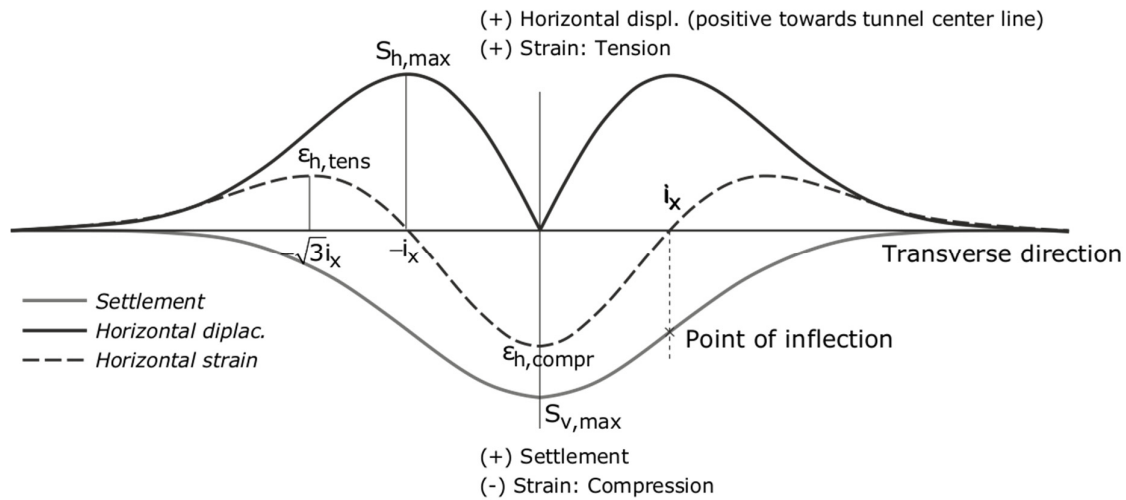
$$i = 0.43z_0 + 1.1 \text{ (συνεκτικά εδάφη)} \tag{Εξ. 3.21}$$

$$i = 0.43z_0 - 0.12 \text{ (μη - συνεκτικά εδάφη)} \tag{Εξ. 3.22}$$

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

$$S_h = \frac{x}{z_0} S_v = \frac{x}{z_0} S_{v,max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad \text{Εξ. 3.23}$$

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η κατανομή των οριζοντίων μετακινήσεων σε σχέση με τις κατακόρυφες, αλλά και η οριζόντιες παραμορφώσεις που προκύπτουν με παραγωγή ως προς  $x$  της σχέσης για το  $S_h$ . Από τις παραμορφώσεις φαίνεται καθαρά ότι μεταξύ των δύο σημείων καμπής αναπτύσσεται θλιπτική ζώνη και εκτός των σημείων καμπής εφελκιστική.



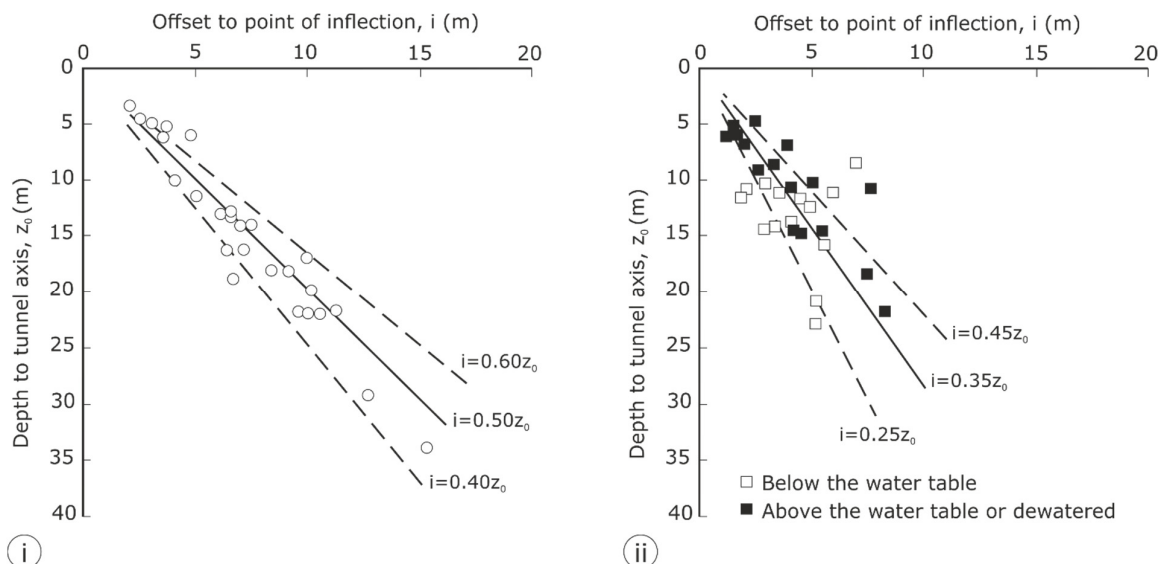
Σχήμα 3.11 Κατανομή των κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων και των οριζοντίων παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Franzius 2003)

### 3.4.5 Mair et al.

Οι O'Reilly & New (1982) υποστήριξαν ότι το σημείο καμπής  $i$  του προφίλ των επιφανειακών καθιζήσεων μπορεί να περιγραφεί από μία γραμμική σχέση με το βάθος της σήραγγας  $z_0$  ανεξαρτήτως από την μέθοδο κατασκευής της σήραγγας και την διάμετρο της. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12, οι Mair & Taylor (1997) βασιζόμενοι στην παραπάνω υπόθεση, συσχέτισαν σε διάγραμμα το σημείο καμπής  $i$  με το βάθος της σήραγγας  $z_0$ , τόσο για συνεκτικούς όσο και για μη-συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς. Η πλειοψηφία των δεδομένων έχουν παρουσιαστεί ξανά (Rankin 1988) και εμπλουτίστηκαν έπειτα από τους Mair & Taylor (1997).

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12 αφορούν σε διαφορετικές τεχνικές διάνοιξης, ωστόσο παρουσιάζονται μαζί καθώς το σημείο καμπής δεν επηρεάζεται από την τεχνική διάνοιξης (O'Reilly & New 1982). Το διάγραμμα για τις αργίλους επιβεβαιώνει το συμπέρασμα των O'Reilly & New (1982) ότι για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, ένα  $K=0.50$  είναι ικανοποιητική παραδοχή, με το εύρος διακύμανσης να είναι  $K=0.40\sim 0.60$ . Για αδρόκοκκα εδάφη ωστόσο, παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων, αλλά η πλειοψηφία βρίσκεται μέσα στο εύρος τιμών  $K=0.25\sim 0.45$  με μια μέση τιμή περί το  $K=0.35$ . Επιπρόσθετα

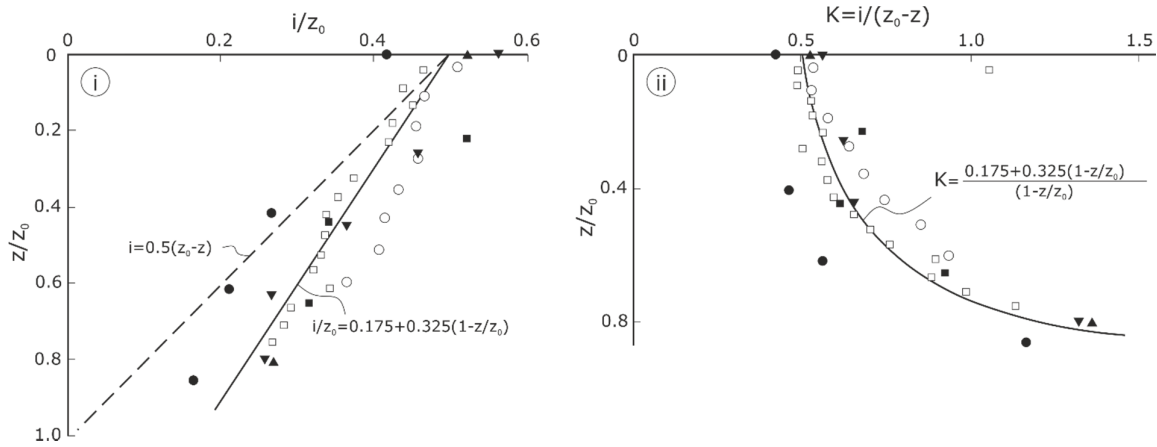
παρατήρησαν ότι σήραγγες πάνω και κάτω από τον υπόγειο υδάτινο ορίζοντα δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά στο σημείο καμπής.



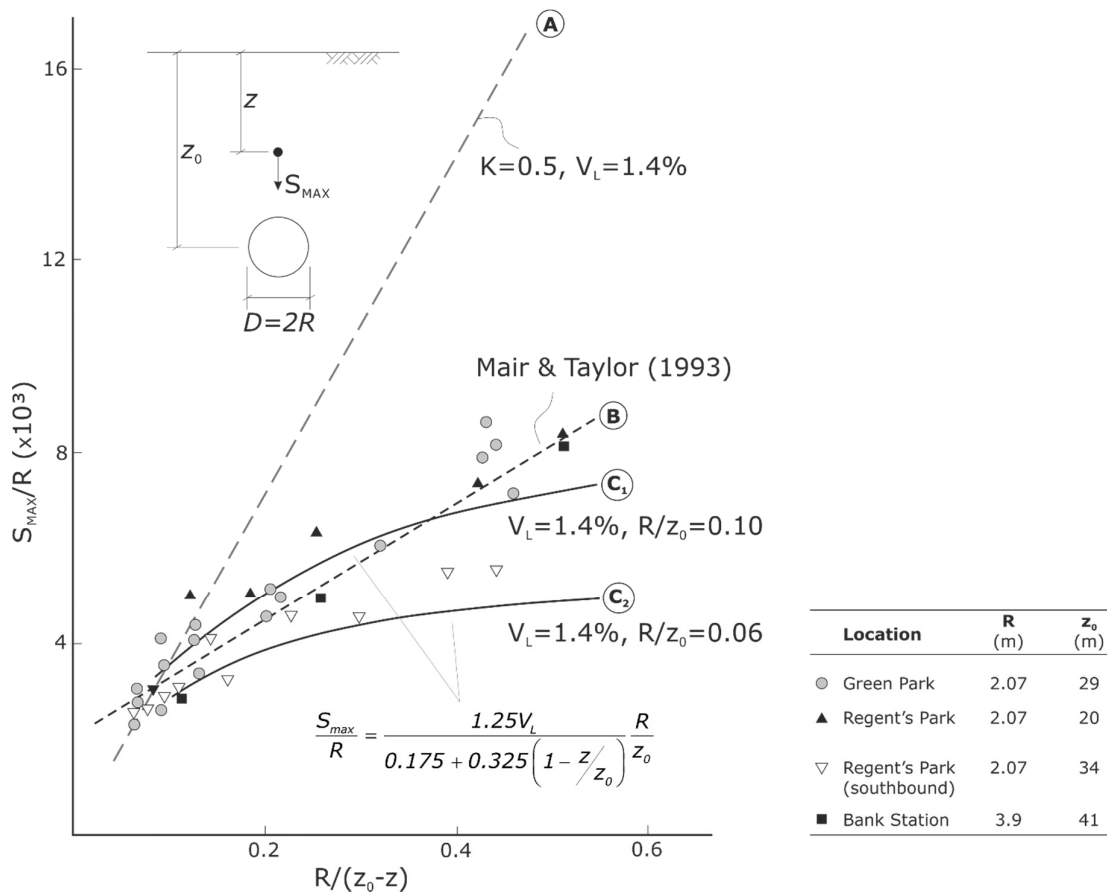
Σχήμα 3.12 Διαφοροποίηση για το σημείο καμπής  $i$  συναρτήσεις του βάθους της σήραγγας για (i) αργίλους και για (ii) άμμους. (Mair & Taylor 1997)

Το εγκάρσιο προφίλ των κατακόρυφων μετακινήσεων σε βάθος από την επιφάνεια, θεωρείται συχνά ότι μπορεί να περιγραφεί και αυτό με μία καμπύλη τύπου Gauss με τον ίδιο τρόπο που περιγράφονται και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια. Οι Mair et al. (1993) βασιζόμενοι σε μετρήσεις κατακόρυφων μετακινήσεων κάτω από την επιφάνεια, τονίζουν ότι η παράμετρος  $K$  των O'Reilly & New (1982) αυξάνει με το βάθος. Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται πως μια σταθερή τιμή του  $K=0.50$  (διακεκομμένη γραμμή), αποκλίνει σημαντικά από τις μετρήσεις, ενώ η συμπαγής γραμμή περιγράφει πολύ καλύτερα την συμπεριφορά των καθιζήσεων κάτω από την επιφάνεια. Η σχέση για το  $K$  που προκύπτει από το πρώτο διάγραμμα (i) στο Σχήμα 3.13, φαίνεται στο δεύτερο διάγραμμα (ii) του ίδιου σχήματος.





Σχήμα 3.13 (i) Μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των υπόγειων καθιζήσεων με το βάθος και (ii) Μεταβολή της παραμέτρου K σε αργίλους. (Mair et al. 1993)



Σχήμα 3.14 Υπόγειες καθιζήσεις πάνω από τον άξονα σήραγγας σε London Clay (Mair et al. 1993)

Οι Mair et al. (1993) τοποθέτησαν στο διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.14 τις υπόγειες καθιζήσεις  $S_{max}$  πάνω από τον άξονα της σήραγγας σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια  $z$ , για διάφορες σήραγγές το βάθος  $z_0$  και η ακτίνα  $R$  των οποίων φαίνεται στο

υπόμνημα. Η απώλεια όγκου θεωρήθηκε ίση με  $V_L=1.3\sim 1.4\%$  κατά O'Reilly & New (1982). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι με χρήση  $K=0.50$  σταθερή τιμή (γραμμή Α), υπερεκτιμώνται πολύ οι υπόγειες καθιζήσεις. Στο Σχήμα 3.14 φαίνονται επίσης μια γραμμική συσχέτιση (Mair & Taylor 1993) (γραμμή Β). Κάνοντας χρήση της σχέσης που προκύπτει από την συσχέτιση για το  $i$  (Σχήμα 3.13) ως συνάρτηση του βάθους  $z$  και της Εξ.3.14, προκύπτει η σχέση που φαίνεται στο Σχήμα 3.14 και περιγράφει τις καμπύλες C1 και C2. Επειδή τα δεδομένα αφορούν σε διάφορα  $R$  και  $z_0$ , δίνονται οι δυο αυτές καμπύλες που περιγράφουν ένα εύρος στο οποίο αναμένονται να βρίσκονται οι μετρήσεις.

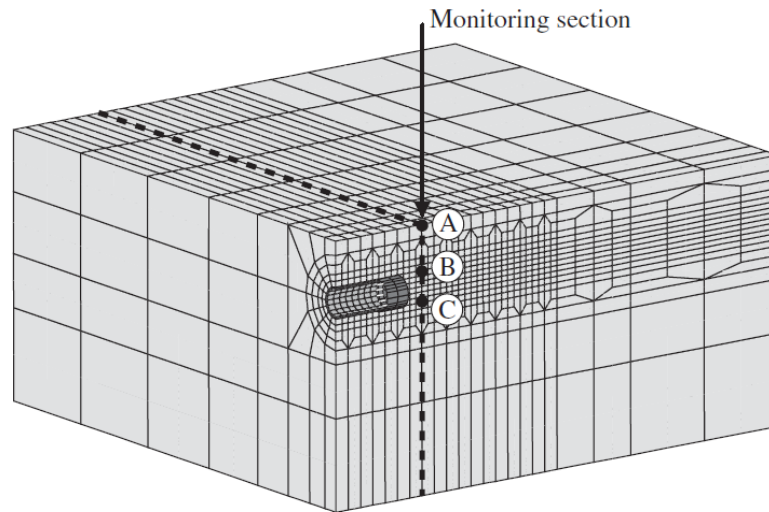
### 3.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

#### 3.5.1 G. Meschke, T. Kasper και F. Nagel.

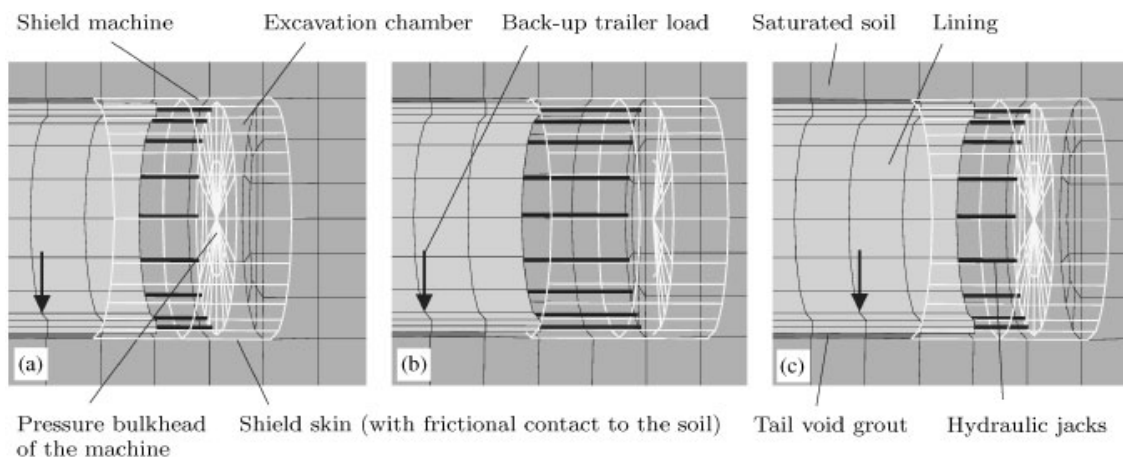
Οι Kasper & Meschke (2004) αναπτύξανε ένα τριδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης μηχανοποιημένης όρυξης, όπου το έδαφος και το υπόγειο νερό, η ασπίδα του TBM, τα υδραυλικά έμβολα, η τσιμεντένεση του ουραίου κενού και τα στοιχεία της υποστήριξης προσομοιώνονται ως ξεχωριστά στοιχεία. Το TBM προσομοιώνεται ως απαραμόρφωτο μετακινούμενο σώμα με δύο κόμβους που αντιπροσωπεύουν τους μεταφορικούς και περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Η κωνικότητα της ασπίδας και η τριβή μεταξύ του εδάφους και της ασπίδας λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο. Τα έμβολα προσομοιώνονται από γραμμικά στοιχεία που ενώνονται στα στοιχεία της υποστήριξης. Η προσομοίωση γίνεται σε βήματα. Αρχικά εκτείνονται τα γραμμικά στοιχεία που προσομοιώνουν τα έμβολα και αφήνεται κενό μεταξύ του εδάφους και της υποστήριξης. Έπειτα, τροποποιείται ο κánaβος μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής έτσι ώστε να αποκτήσει ακριβώς την διάμετρο εκσκαφής. Ενεργοποιούνται τα νέα στοιχεία που προσομοιώνουν την τσιμεντένεση στην ουρά της ασπίδας και ανανεώνονται οι οριακές συνθήκες για τις πιέσεις των πόρων. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο προσομοιώνεται ως κατανεμημένο φορτίο με γραμμική αύξηση με το βάθος. Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με οριακές συνθήκες στους κόμβους των στοιχείων ενέματος στην ουρά, με διαφοροποίηση καθ' ύψος κατά  $10\text{kN/m}^2$ . Το έδαφος προσομοιώνεται σύμφωνα με το καταστατικό μοντέλο Cam-Clay. Το βάρος του εξοπλισμού του TBM που ακολουθεί την ασπίδα προσομοιώνεται με σημειακά φορτία. Οι αναλύσεις γίνονται με χρήση το κώδικα TSIM3D και είναι συζευγμένες (ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος).

Οι αναλύσεις δεν αναφέρονταν σε συγκεκριμένο έργο. Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ ότι επιλέχθηκε διάμετρος  $D = 6.3\text{m}$  και βάθος ίσο με  $1.5 D = 9.45\text{m}$ . Ο υδροφόρος βρίσκεται στην επιφάνεια. Η κωνικότητα της ασπίδας επιλέχθηκε ως  $6\text{cm}$  διαφορά στην διάμετρο στο μέτωπο με την διάμετρο στην ουρά. Μετά από προχώρηση  $48\text{m}$ , γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της

στερεοποίησης στις καθιζήσεις σε βάθος χρόνου, χωρίς περεταίρω προχώρηση του TBM. Στο Σχήμα 3.17 φαίνονται οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν.



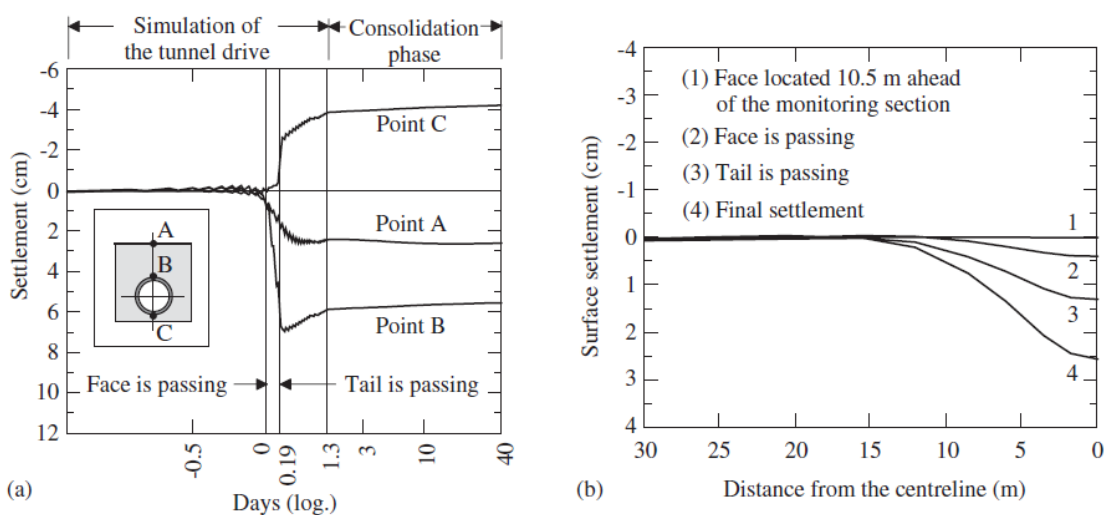
Σχήμα 3.15 Αριθμητικό μοντέλο με χρήση του κώδικα TSIM3D (Kasper & Meschke 2004).



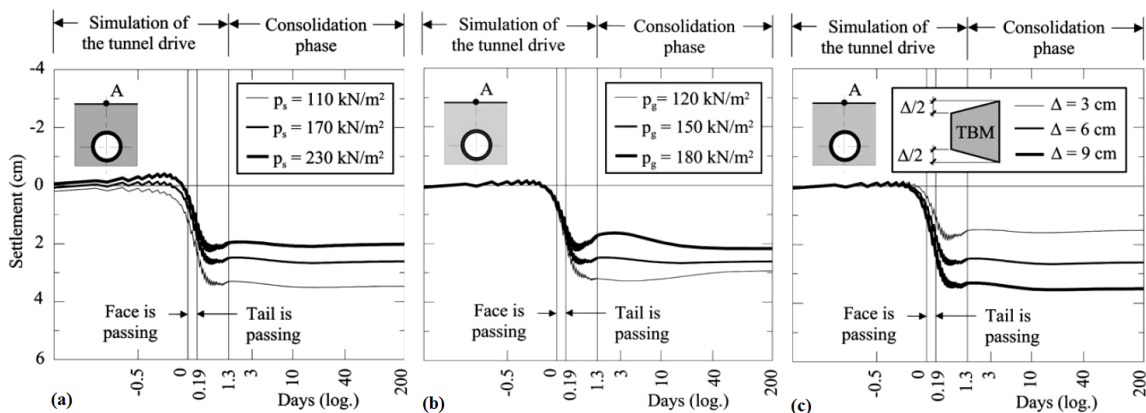
Σχήμα 3.16 Μοντέλο του TBM και βήματα της ανάλυσης. (a) Πέρασ του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, (b) προχώρηση του TBM, (c) εκσκαφή του εδάφους και ενεργοποίηση των στοιχείων της υποστήριξης και του ενέματος (Kasper & Meschke 2004)

Οι Kasper & Meschke (2006) χρησιμοποίησαν το μοντέλο για να διερευνήσουν παραμετρικά την επιρροή της πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο, της πίεση του ενέματος, του βάρους το μηχανήματος, του μήκους της ασπίδας και της κωνικότητας της ασπίδας στις καθιζήσεις. Στις αναλύσεις έγινε θεώρηση ομοιογενούς, υπερστερεοποιημένου, μαλακού συνεκτικού εδαφικού υλικού, κάτω από την επιφάνεια το υπόγειου ορίζοντα. Ως συμπεράσματα προέκυψαν ότι η πίεση μετώπου, η πίεση ενέματος, το μήκος και η κωνικότητα της ασπίδας έχουν σημαντική επιρροή

στις επιφανειακές καθιζήσεις. Το βάρος του TBM έχει μικρή επίδραση, ενώ το βάρος του εξοπλισμού που ακολουθεί προκαλεί μόνο προσωρινές (ελαστικές) παραμορφώσεις

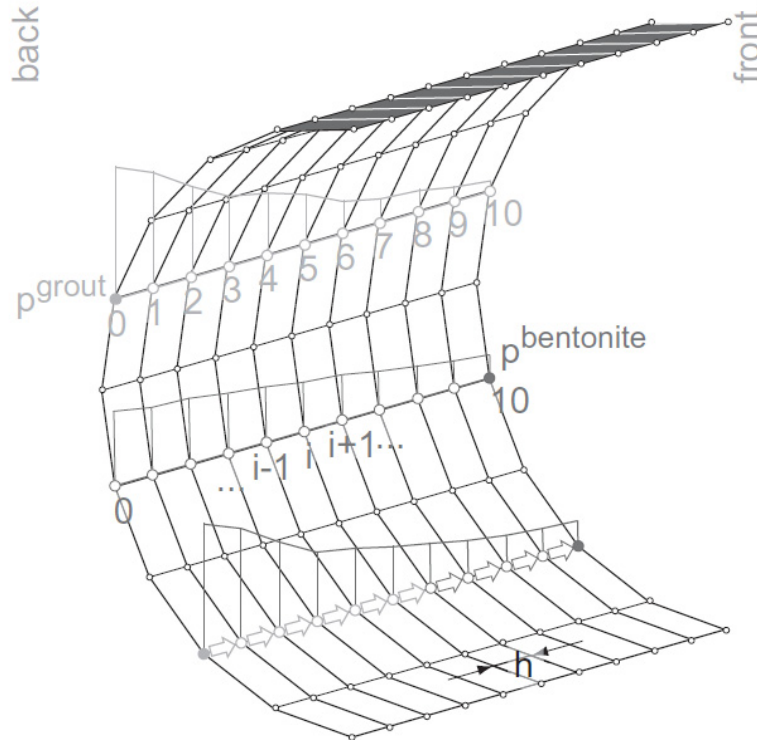


Σχήμα 3.17 α) Υπολογισμένες κατακόρυφες μετακινήσει στον σταθμό καταγραφής, όπου ο χρόνος μηδέν θεωρείται η στιγμή όπου το μηχάνημα περνάει κάτω από τον σταθμό, (b) προβλεπόμενες καθιζήσεις για διαφορετικό μήκος προχώρησης το μηχανήματος (Kasper & Meschke 2004)

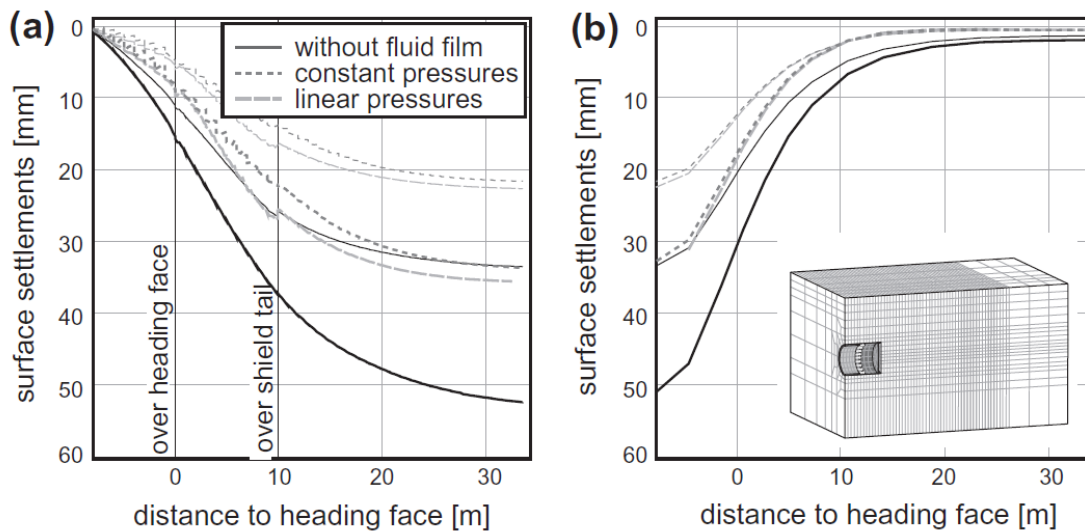


Σχήμα 3.18 Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης στις επιφανειακές καθιζήσεις (a) της πίεσης μετώπου, (b) της πίεσης του ενέματος και (c) της κωνικότητας της ασπίδας (Kasper & Meschke 2006)

Οι Nagel & Meschke (2011) επιχείρησαν να προσομοιώσουν την ροή του ενέματος και του πολφού μπεντονίτη γύρω από την ασπίδα και να μελετήσουν την επιρροή του στις επιφανειακές καθιζήσεις. Εισηγάγαν κατάλληλο αλγόριθμο προσομοίωσης της ροή ρευστών υπό πίεση βασιζόμενος στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του και την διάτμηση που αναπτύσσεται μεταξύ ασπίδας και ενέματος.



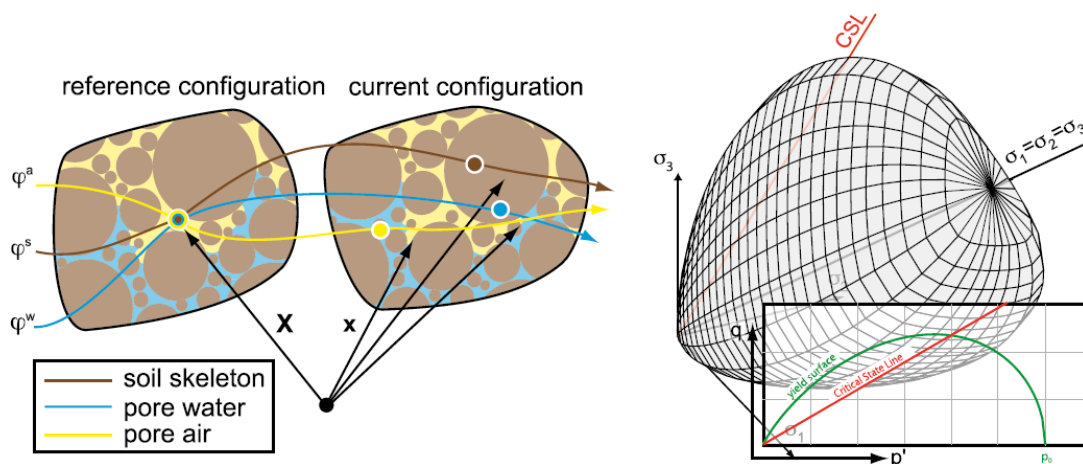
Σχήμα 3.19 Διακριτοποίηση κατά την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για τις πιέσεις των ρευστών μέσα στο κενό (Nagel & Meschke, 2011)



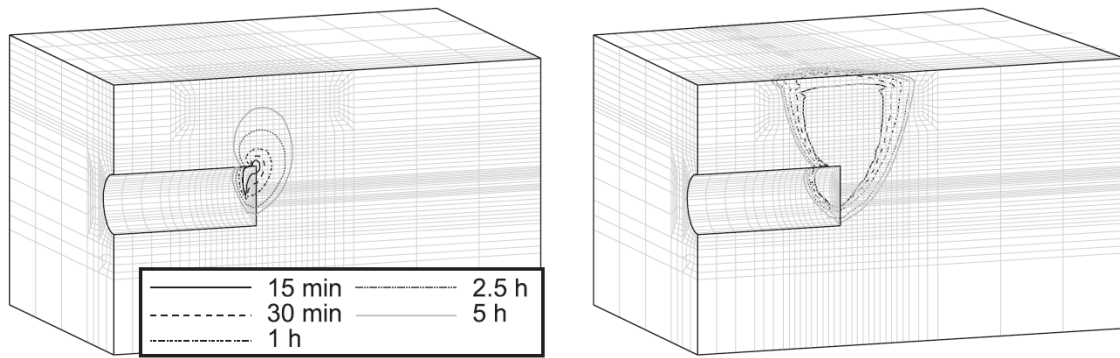
Σχήμα 3.20 Σύγκριση τριών υποθέσεων για τις καταστάσεις ροής για περισσότερο σιφρά (λεπτές γραμμές) εδάφη και για λιγότερο (παχιές γραμμές), (a) για ένα σημείο πάνω από τον άξονα της σήραγγας και (b) για μία διατομή στο τέλος την προχώρησης του TBM (Nagel & Meschke 2011)

Τα αποτελέσματα της διερεύνησής τους καταδεικνύουν ότι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της διεπιφάνειας ασπίδας εδάφους είναι το βάρος και το φορτίο του μηχανήματος, η κωνικότητα της ασπίδας, η υπερεκκαφή στο μέτωπο καθώς και η πίεση και κατανομή των διαφόρων ρευστών στο μέτωπο και την ουρά της ασπίδας. Σε ότι αφορά τις καθιζήσεις, διαπίστωσαν ότι η ροή ρευστού στο κενό επηρεάζει τόσο το μέγεθος όσο και το προφίλ των καθιζήσεων καθώς και την απαιτούμενη δύναμη προώθησης. Αγνόησή τους οδηγεί σε υπερεκτίμηση της αναμενόμενης καθιζήσης.

Οι Nagel et al. (2012) εισήγαγαν ένα καταστατικό μοντέλο για το έδαφος τριών φάσεων (κόκκοι εδάφους, νερό πόρων, αέρας πόρων), το οποίο προσομοιώνει τόσο την ροή της υγρής όσο και της αέριας φάσης του εδάφους. Μελέτησαν την επίπτωση της πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής με πεπιεσμένο αέρα (φάση συντήρησης EPB) και την έκταση και τα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης μη – κορεσμένης ζώνης μπροστά από το μέτωπο.



Σχήμα 3.21 Μοντέλο τριών φάσεων για μερικώς κορεσμένα εδάφη χρησιμοποιώντας την θεωρία του πορώδους μέσου για την περιγραφή των αρχικώς μικροσκοπικών καταστάσεων και αλληλεπιδράσεων των φάσεων του εδάφους (κόκκοι, νερό και αέρας) (Nagel et al. 2012)

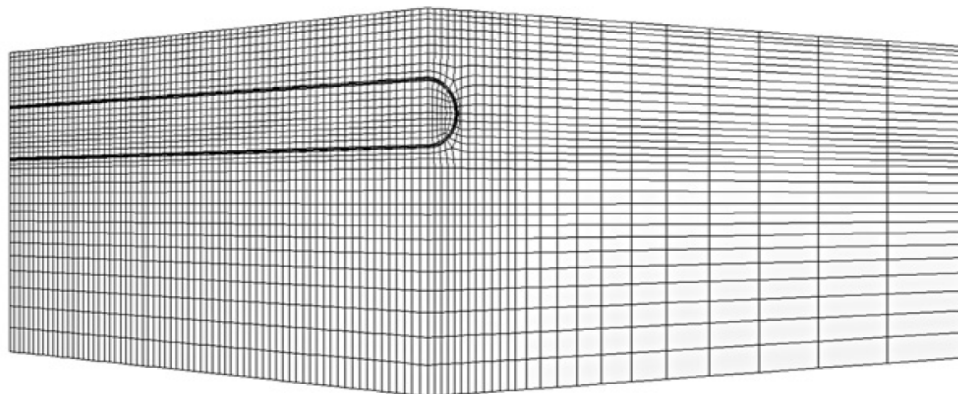


Σχήμα 3.22 Προσομοίωση της χρήσης πεπιεσμένου αέρα ως μέσο υποστήριξης και διερεύνηση της δημιουργίας μερικώς κορεσμένων ζωνών μπροστά από το μέτωπο για κορεσμό λιγότερο από 95% (αριστερά) και λιγότερο από 50% (δεξιά) (Nagel et al. 2012)

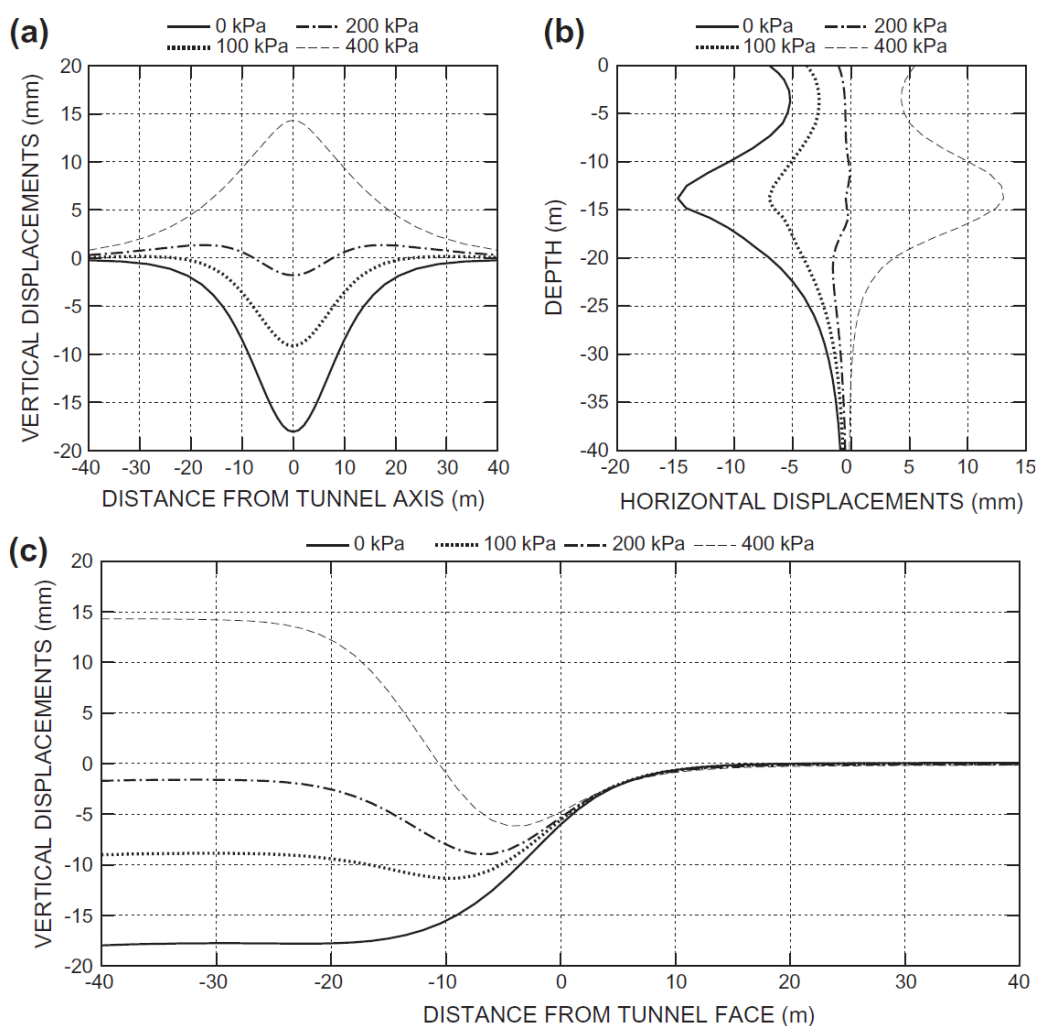
### 3.5.2 A. Lambrugh et al.

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



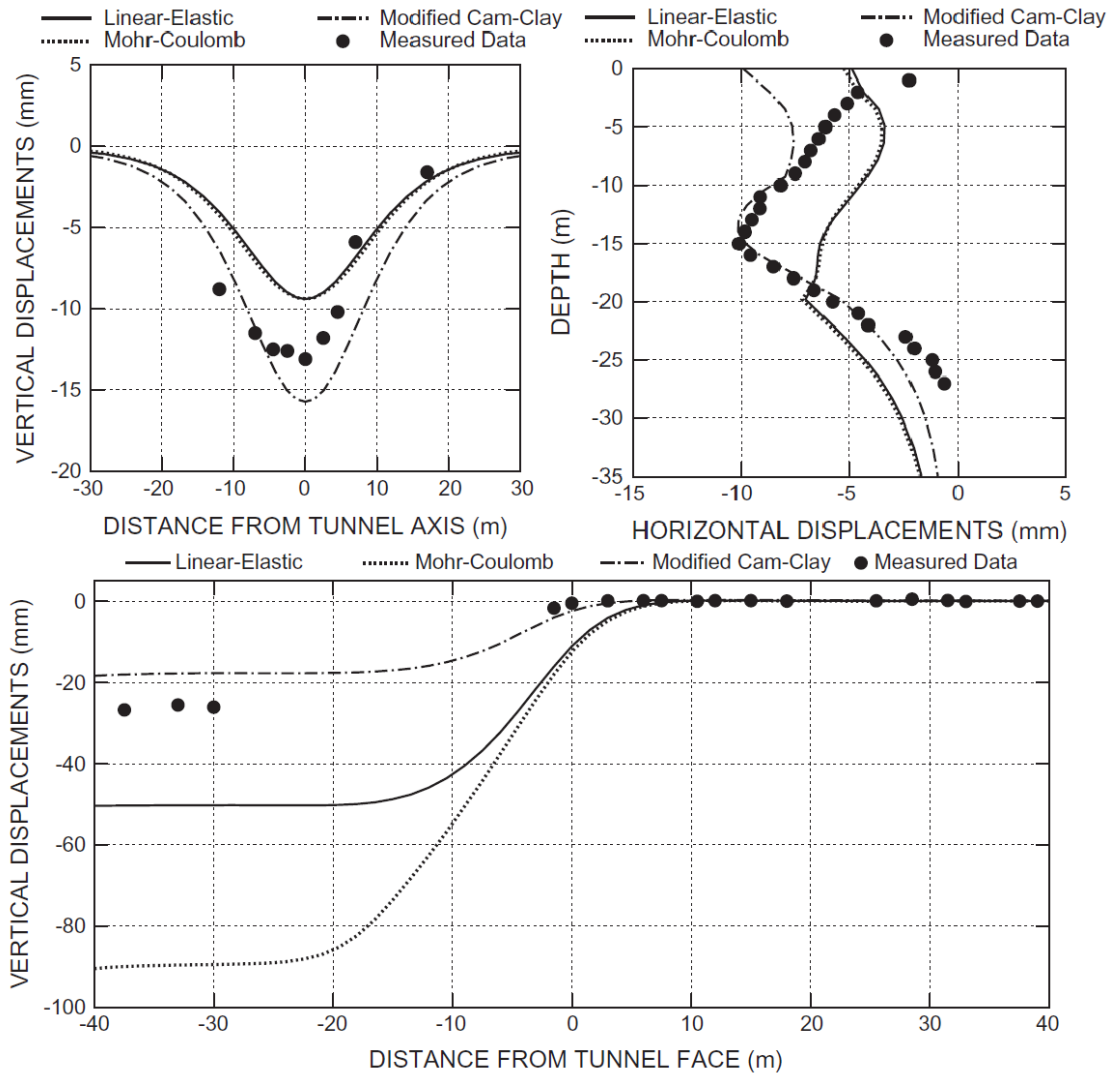


Σχήμα 3.23 Τριδιάστατος κάναβος του προβλήματος (Lambrughi et al. 2012)



Σχήμα 3.24 Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της πίεσης του ενέματος με χρήση κριτηρίου Mohr-Coulomb στις (a) κατακόρυφες μετακινήσεις (εγκάρσια στον άξονα τομή), (b) οριζόντιες μετακινήσεις και (c) κατακόρυφες μετακινήσεις (κατά μήκος στον άξονα τομή) (Lambrughi et al. 2012)





Σχήμα 3.25 Ενδεικτικές συσχετίσεις των μετακινήσεων που μετρήθηκαν και των μετακινήσεων που υπολογιστήκαν από τα αριθμητικά μοντέλα (Lambrughi et al. 2012)

Αρχικά, έγινε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της πίεσης του ενέματος στις κατακόρυφες και τις οριζόντιες μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για μεγάλες πιέσεις ενέματος παρατηρείται ακόμα και ανύψωση στην επιφάνεια του εδάφους. Οι αναλύσεις έγιναν με θεώρηση κριτηρίου Mohr-Coulomb.

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

μοντέλο Cam-Clay παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς εμφανίζει μέγιστες καθιζήσεις ανηγμένες ως προς τις μετρημένες τιμές από 0.5 έως 2.

### 3.5.3 A. Bezuijen

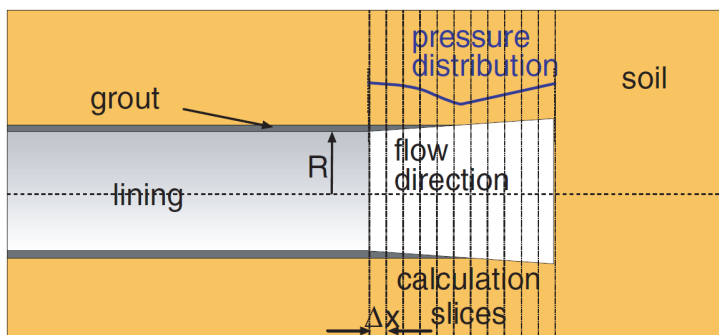
Ο Bezuijen (2007) μελέτησε την ροή του ενέματος και του πολφού στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Η διαδικασία υπολογισμού για τις πιέσεις φαίνεται στο Σχήμα 3.26. Το έδαφος θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως ξεχωριστή φέτα πάχους  $\Delta x$ . Γνωρίζοντας την γεωμετρία της σήραγγας, την πίεση του ενέματος, και τις ελαστικές ιδιότητες του εδάφους, του πάχους του κενού μπορεί να υπολογιστεί (Σχήμα 3.26) από την σχέση

$$\Delta\sigma = 2 \frac{\Delta r}{r} G \quad \text{Εξ. 3.24}$$

Από αυτό το πάχος κενού μπορεί να υπολογιστεί η πτώση της πίεσης λόγω ροής για απόσταση  $\Delta x$  από την σχέση

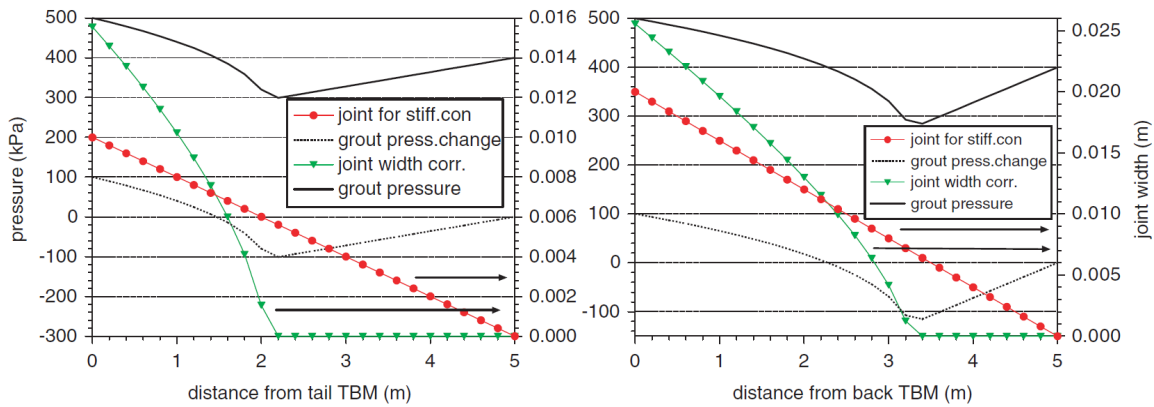
$$\Delta P = \frac{\Delta x}{s} \tau_\gamma \quad \text{Εξ. 3.25}$$

Η υπολογιζόμενη πίεση χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η παραμόρφωση και το πάχος κενού της επόμενης φέτας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά σε όλες τις φέτες. Για όλες τις φέτες ελέγχεται ότι το κενό είναι θετικό, σε άλλη περίπτωση σημαίνει ότι το έδαφος είναι σε επαφή με την ασπίδα και η πίεση υπολογίζεται από την Εξ.3.24 θεωρώντας ως διάμετρο την διάμετρο της ασπίδας που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη φέτα.

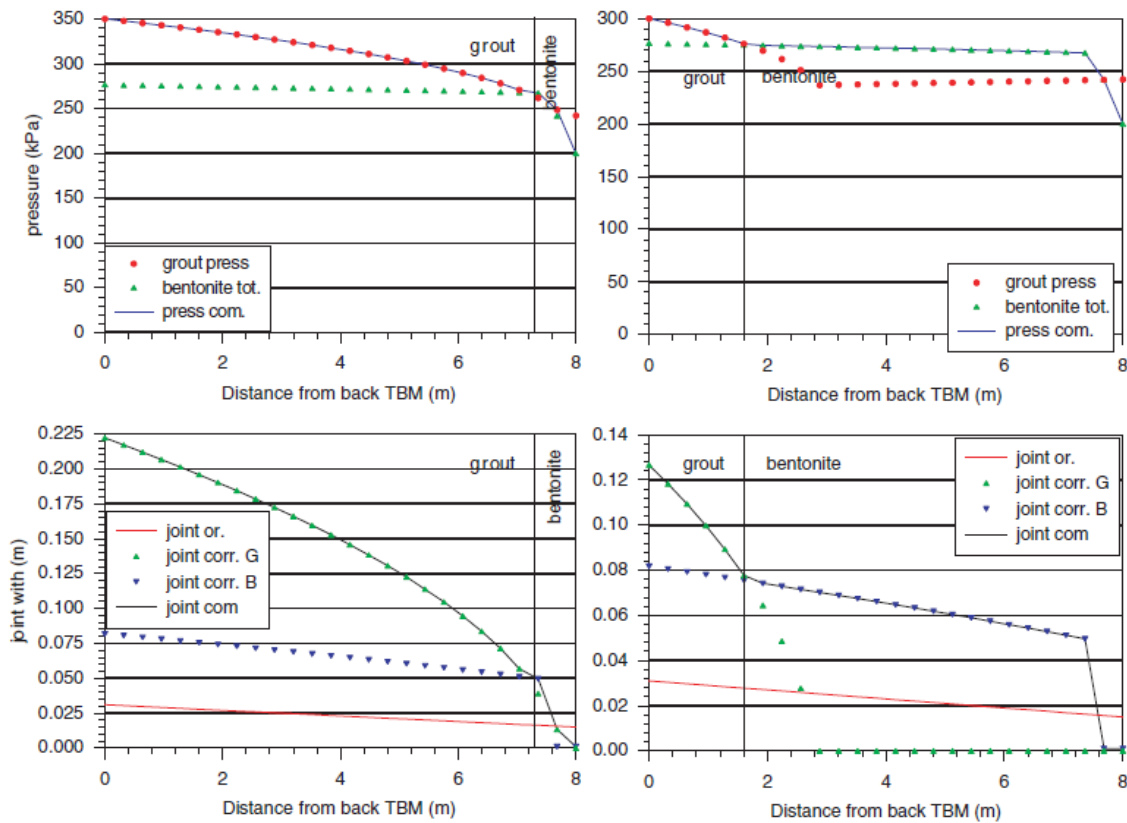


Σχήμα 3.26 Ιδεατό σκαρίφημα ενός TBM, της υποστήριξης και του ενέματος (Bezuijen 2007)

Αρχικά έγινε έλεγχος της επιρροής της συμμετρίας της ασπίδας όσον αφορά τον άξονα της σήραγγας. Έγιναν υπολογισμοί για συμμετρική και για ασύμμετρη (το TBM βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος στην βάση καθ' όλο το μήκος του) ασπίδα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.27. Με κύκλους συμβολίζεται το κενό για πρακτικά απαραμόρφωτο έδαφος



Σχήμα 3.27 Επίδραση της συμμετρίας της ασπίδας ως προς τον άξονα της σήραγγας στις πιέσεις του ενέματος και στο πάχος του κενού (αριστερά συμμετρική ασπίδα, δεξιά ασύμμετρη ασπίδα) (Bezuijen 2007)



Σχήμα 3.28 Επίδραση της αλλαγής της πίεσης του ενέματος στο μήκος διείσδυσης και πάχος του κενού (Bezuijen 2007)

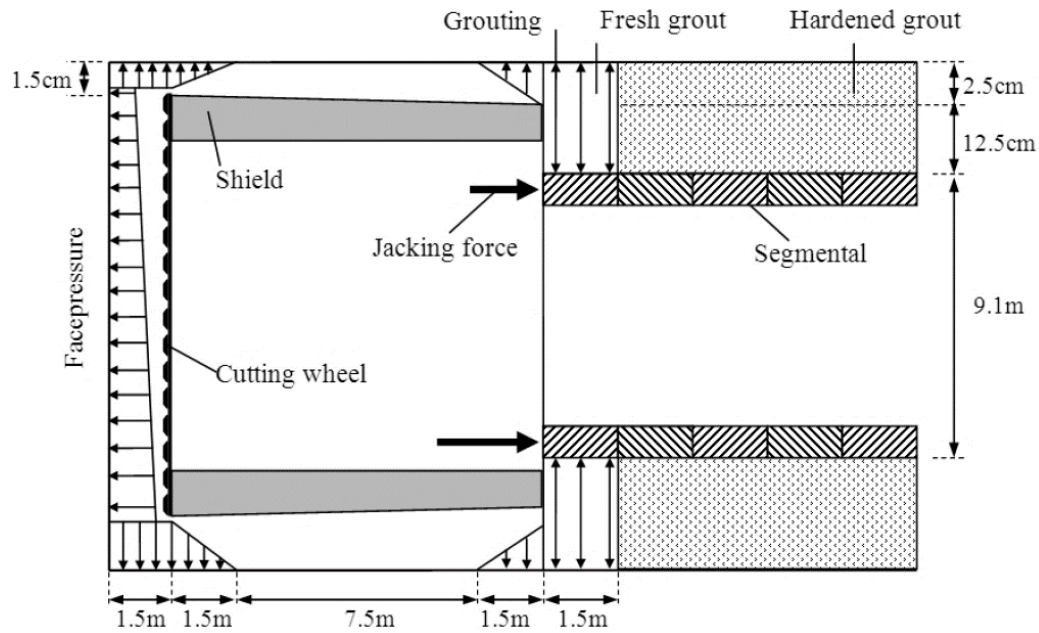
(εξαρτάται μόνο από την κωνικότητα της ασπίδας) και με τρίγωνα είναι για ελαστικό έδαφος. Επίσης παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που μελετά το μήκος διείσδυσης και το ουραίο κενό για μία μεταβολή της πίεσης ενέματος από 350kPa σε 300kPa. Ο παράγοντας που επηρεάζει τον όγκο του ενέματος που θα χρησιμοποιηθεί κατά την διάνοιξη είναι το πάχος του κενού. Παρατηρείται

ότι με μικρή μεταβολή στην πίεση ενέματος μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μεταβολή στο πάχος κενού και συνεπώς στον όγκο του ενέματος.

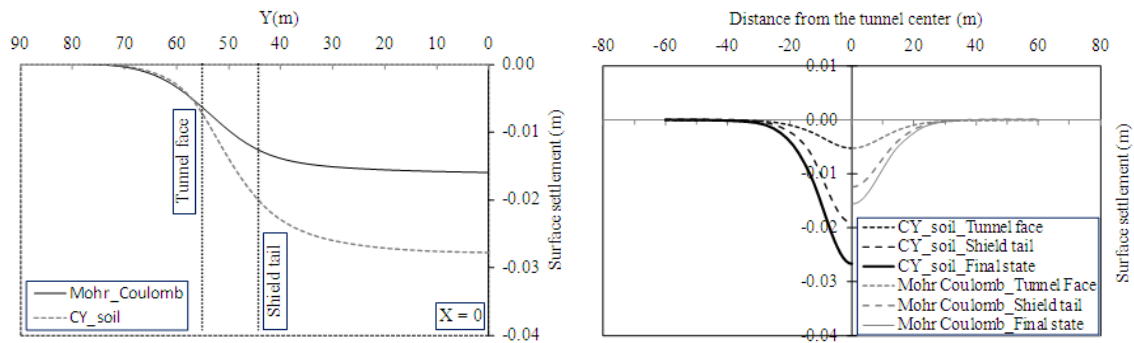
Σημειώνεται εδώ ότι το ένεμα και ο πολφός συχνά περιγράφονται ως ρευστά Bingham. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται μια συγκεκριμένη υδραυλική τάση για να ξεκινήσει η ροή. Συνεπώς, μπορεί να υπάρξουν τρεις περιπτώσεις ροής. Ροή ενέματος προς το μέτωπο, ροή πολφού προς την ουρά και ροή ενέματος και πολφού προς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

#### 3.5.4 Do et al.

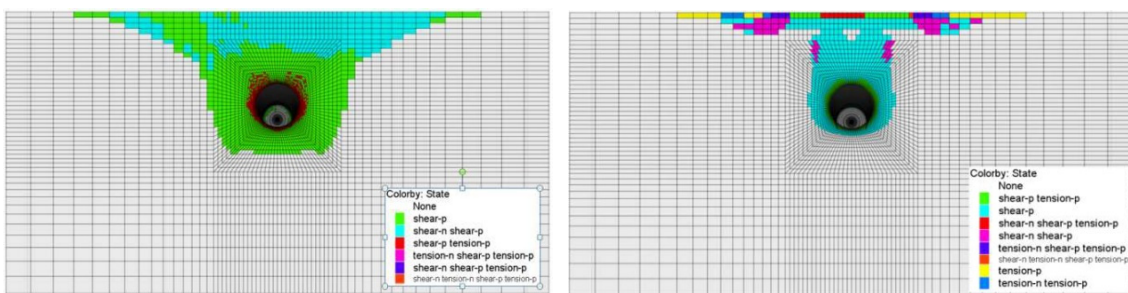
Οι Do et al. (2013) δημιούργησαν ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της διάνοιξης σήραγγας με TBM για να μελετήσουν την επιρροή του καταστατικού μοντέλου για το εδάφους. Τα καταστατικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Mohr-Coulomb (MC) και το Cap-Yield (CYsoil). Στο CYsoil προσομοίωμα η στιφρότητα του εδάφους έχει μεγαλύτερη τιμή για καταστάσεις αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Για τις αριθμητικές αναλύσεις έγινε χρήση του λογισμικού FLAC<sup>3D</sup>. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με φορτίο τραπεζοειδούς κατανομής. Λόγω υπερεκσκαφής, θεωρείται ότι πολφός περνάει στο κενό και ασκεί πίεση στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο για 1.5m και τριγωνικό για άλλο 1.5m. Η ασπίδα δεν υπάρχει στο μοντέλο, ενώ ο περιορισμός των παραμορφώσεων λόγω της ασπίδας προσομοιώνεται με συνθήκη που απαγορεύει παραμόρφωση τέτοια που οι κόμβοι του εδάφους να βρεθούν μέσα από την φανταστική ασπίδα. Τα υδραυλικά έμβολα προσομοιώνονται με συγκεντρωμένα φορτία που ασκούνται κατευθείαν στους κόμβους των στοιχείων υποστήριξης. Θεωρείται γραμμική αύξηση των δυνάμεων με το ύψος. Το ένεμα προσομοιώνεται σε δύο φάσεις, την ρευστή και την στερεή. Στην ρευστή προσομοιώνεται με κατανομημένο φορτίο στο κενό ενώ στην στερεή θεωρείται ελαστική συμπεριφορά με σταθερό μέτρο ελαστικότητας. Η υποστήριξη προσομοιώνεται με γραμμικά ελαστικά επιφανειακά στοιχεία. Οι ενώσεις των στοιχείων του ίδιου δαχτυλιδιού γίνεται με συνδέσμους που έχουν δυσκαμψία στρωφική ( $K_{\theta}$ ), αξονική ( $K_A$ ) και ακτινική ( $K_R$ ). Ομοίως και για τους συνδέσμους μεταξύ διαδοχικών δαχτυλιδιών.



Σχήμα 3.29 Μοντέλο του TBM (Do et al. 2013)



Σχήμα 3.30 Επιρροή του καταστατικού μοντέλου στις επιφανειακές καθιζήσεις (Do et al. 2013)



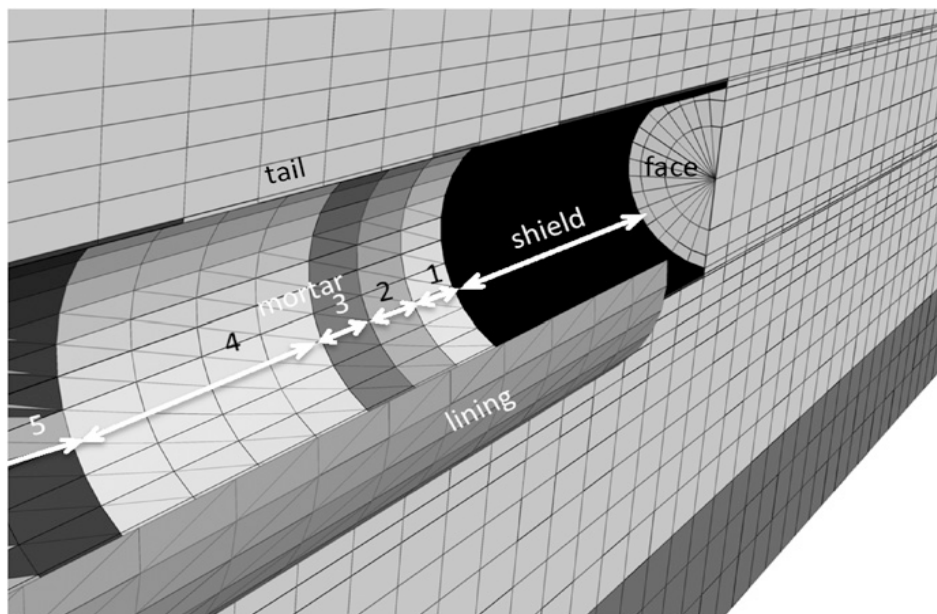
Σχήμα 3.31 Πλαστικές ζώνες για το μοντέλο CYsoil (αριστερά) και MC (δεξιά) (Do et al. 2013)

Παρατηρείται μεγάλη επιρροή του καταστατικού προσομοιώματος στις καθιζήσεις. Για να τονιστεί η επιρροή του καταστατικού μοντέλου παρουσιάζονται και οι πλαστικές ζώνες. Στην περίπτωση του προσομοιώματος CYsoil η ζώνη είναι περίπου διπλάσια από αυτή του

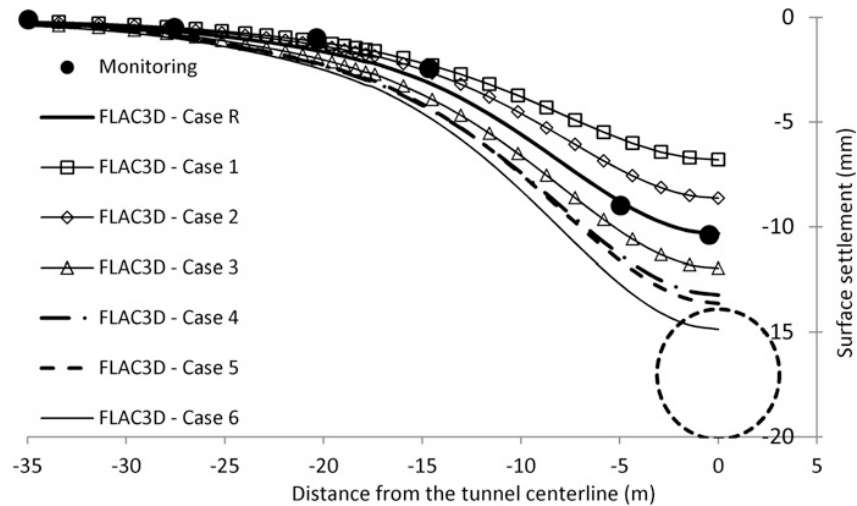
προσομοιώματος MC. Η σταθερή δυσκαμψία του προσομοιώματος MC και τα χαρακτηριστική διαρροής για μικρές παραμορφώσεις του CYsoil μοντέλου είναι οι βασικοί λόγοι για την διαφορά στις επιφανειακές καθιζήσεις.

### 3.5.5 E. Comodromos et al.

Οι Comodromos et al. (2014) δημιούργησαν ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την μελέτη των καθιζήσεων κατά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας πλησίον πολυώροφου κτιρίου. Το προσομοίωμα αναφέρεται σε έργα για την κατασκευή του METRO Θεσσαλονίκης. Για τις αριθμητικές αναλύσεις έγινε χρήση του λογισμικού FLAC<sup>3D</sup>. Τα πιεζόμετρα κοντά στις σήραγγες δεν κατέγραψαν υπερπίεση των πόρων που αποδόθηκε στην υψηλή περατότητα του γεωυλικού. Έτσι δεν έγινε σύζευξη του υδραυλικού και του μηχανικού προβλήματος. Για το έδαφος χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο CYsoil. Η πίεση στο μέτωπο θεωρήθηκε σταθερή καθ' ύψος για πρακτικούς λόγους. Τα στοιχεία της υποστήριξης στο έργο είναι κοχλιωμένα οπότε στο μοντέλο θεωρείται ο δεσμός τους άκαμπτος. Το ένεμα έχει χρονικά εξαρτώμενα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι η μεγαλύτερη επιρροή συμβαίνει από την σκλήρυνση του ενέματος στους πρώτους τέσσερεις δακτυλίους.



Σχήμα 3.32 Προσομοίωση της προοδευτικής προχώρησης του TBM και των διαφορετικών ζωνών ενέματος με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (Comodromos et al. 2014)



Σχήμα 3.33 Παραμετρική διερεύνηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια και σύγκριση με γεωδαιτικές μετρήσεις (Comodromos et al. 2014)

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

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

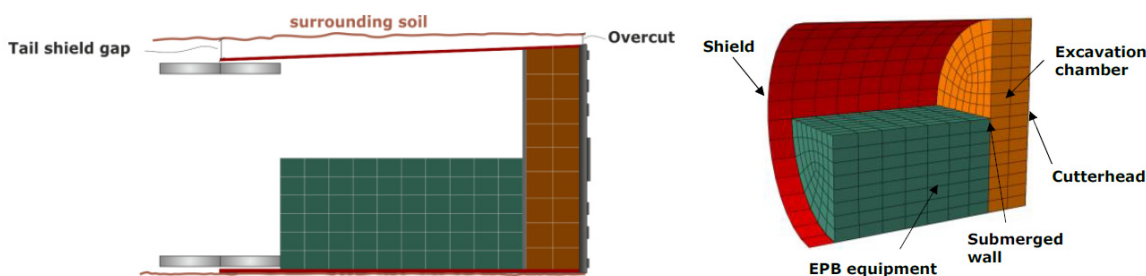
Η ασπίδα προσομοιώνεται από στοιχεία κελύφους, γραμμικά ελαστικά με πολύ ψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αγνοείται η κωνικότητα, το σχήμα της ασπίδας είναι κυλινδρικό. Κανονικά σύμφωνα με τις οδηγίες στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους ο πολφός έπρεπε να εισπιέζεται με 50kPa παραπάνω από την πίεση που έχει στο μέτωπο. Το σύστημα όμως δεν ενεργοποιήθηκε στη περίπτωση που μελετάται και απλώς αναπτύχθηκε μία πίεση που κυμαινόταν από 20 έως 50kPa λόγω της επικοινωνίας του κενού με τον θάλαμο εκσκαφής στο μέτωπο μέσω του κενού της υπερεκσκαφής.

### 3.5.6 D. Litsas et al.

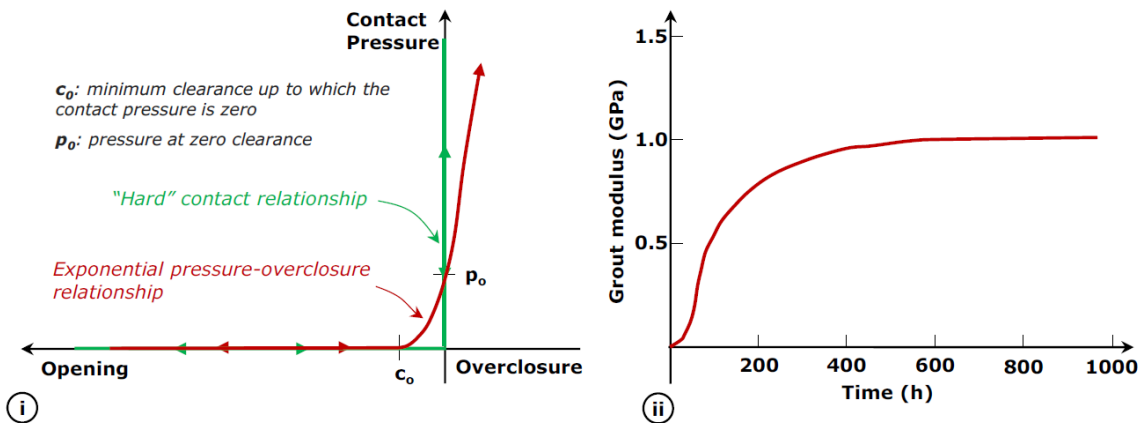
Οι Litsas et al. (2015) κατασκεύασαν ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για που αφορά στη διάνοιξη σήραγγας με χρήση TBM χρησιμοποιώντας το κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται με κατανομημένο φορτίο που αυξάνει



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

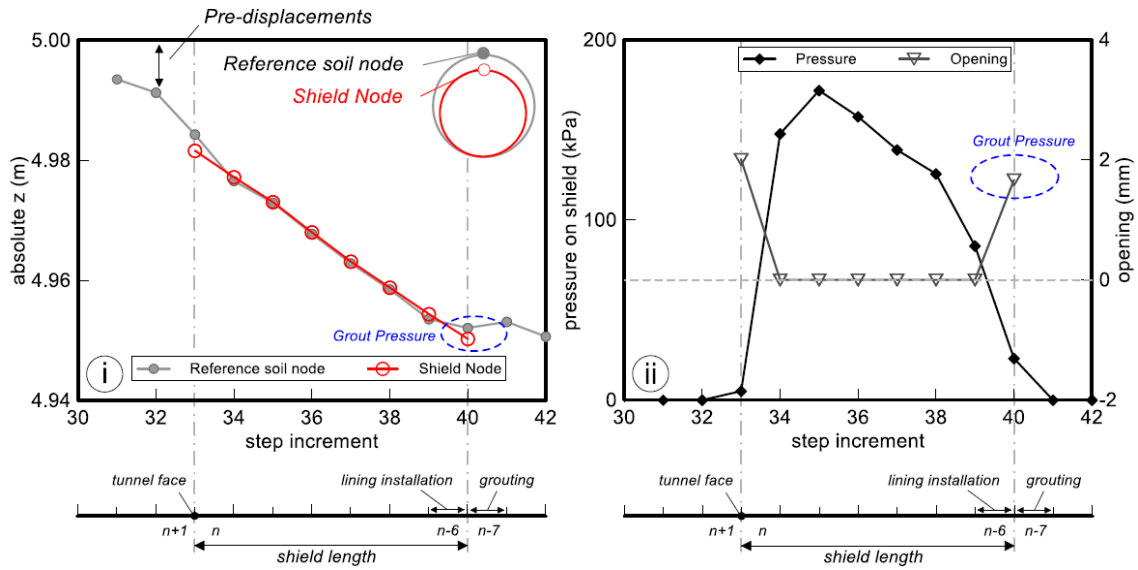


Σχήμα 3.34 Προσομοίωση του TBM με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Litsas et al. 2015)

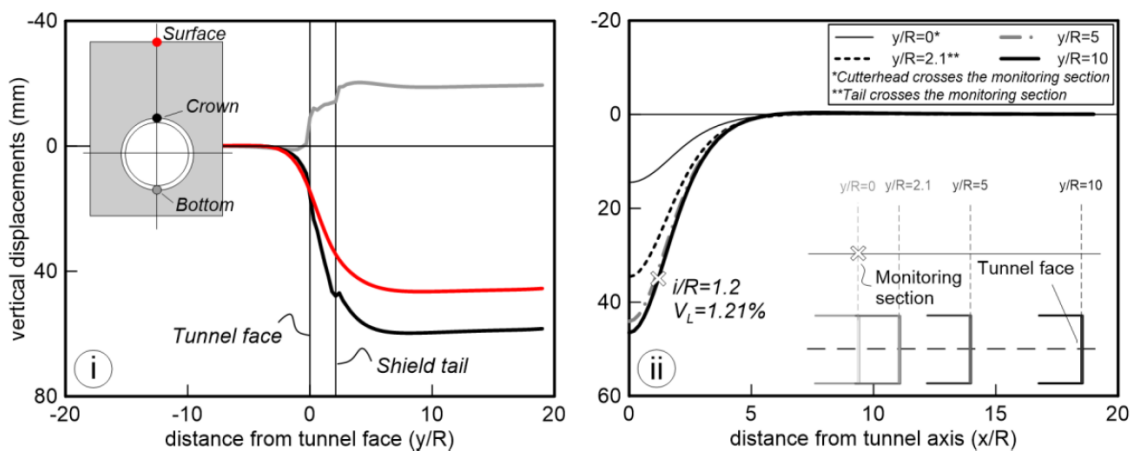


Σχήμα 3.35 (i) ‘Hard’ contact και εκθετική σχέση πίεσης αλληλεπίδρασης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού και (ii) χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας του ενέματος (Litsas et al. 2015)





Σχήμα 3.36 (i) Θέση εδαφικού κόμβου στην στέψη της σήραγγας και κόμβου πάνω στην ασπίδα σε διαφορετικά βήματα εκσκαφής και (ii) πίεση στην διεπιφάνεια εδάφους ασπίδας (Litsas et al. 2015)



Σχήμα 3.37 (i) Διαμήκη και (ii) εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων (Litsas et al. 2015)

Κοιτώντας ένα κόμβο εδάφους στην στέψη της σήραγγας παρατηρούνται συγκλίσεις μπροστά από το μέτωπο και ότι αμέσως μετά την εκσκαφή μιας φέτας εδάφους το έδαφος έρχεται σε επαφή με την ασπίδα και αρχίζει να αναπτύσσεται πίεση στην διεπιφάνεια. Η σταδιακή μείωση αυτής της πίεσης οφείλεται στην κωνικότητα. Στην ουρά λόγω της εισπίεσης του ενέματος ανοίγει πάλι το κενό και η πίεση διεπιφάνειας πέφτει. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη και στην διεπιφάνεια φαίνεται ότι σταθεροποιούνται σε απόσταση  $10R$ , όπου  $R$  ακτίνα της σήραγγας, από το μέτωπο, αλλά παρατηρούνται μικρές διαφορές στο προφίλ των κατακόρυφων μετακινήσεων πέρα από απόσταση  $5R$ . Το σημείο καμπής του προφίλ υπολογίζεται σε απόσταση  $1.2R$  από τον άξονα ενώ η απώλεια όγκου υπολογίζεται σε 1.21%.



## 4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή ενός αριθμητικού τριδιάστατου προσομοιώματος που αφορά στην μηχανοποιημένη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας σε εδαφικό υλικό. Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus<sup>1</sup>. Στο μοντέλο αυτό, το έδαφος, το ένεμα στο ουραίο κενό, τα στοιχεία της υποστήριξης και η ασπίδα του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) προσομοιώνονται με ξεχωριστά στοιχεία. Στο μοντέλο εισάγεται και η χρονική εξάρτηση για το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος. Ακόμα, η αλληλεπίδραση της ασπίδας του TBM με το περιβάλλον έδαφος γίνεται μέσω ενός νόμου διεπιφάνειας. Η πίεση στο μέτωπο προσομοιώνεται ως ένα κατανεμημένο φορτίο, με γραμμική αύξηση καθ' ύψος. Τέλος, οι αναλύσεις που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο είναι συζευγμένες, γίνεται δηλαδή ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος.

### 4.2 ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το ιστορικό είναι αναφορά από (Γκότσης 2007). Είναι δυνατόν να δούμε την ΜΠΣ από δύο οπτικές γωνίες. Από τη μία είναι αυτή του μαθηματικού για τον οποίο συνοπτικά αποτελεί μια μέθοδο επίλυσης συστημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν τη συμπεριφορά κάποιου φυσικού συστήματος. Η μέθοδος βασίζεται στην αριθμητική ελαχιστοποίηση κάποιας ολοκληρωματικής συνάρτησης (π.χ. δυναμικής ενέργειας) ή κάποιου σφάλματος (σταθμισμένα υπόλοιπα) που απορρέουν από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις. Από την πλευρά του μηχανικού μπορεί να θεωρηθεί σαν μια γενική μέθοδος ανάλυσης υλικών συστημάτων που αποτελούνται από διακριτά μέλη, είτε αυτά καθορίζονται από την φύση τους όπως τα δομικά στοιχεία (δοκοί, πλάκες, υποστυλώματα) είτε τεχνητά από τον μηχανικό

---

<sup>1</sup>(Dassault Systems 2010)

(πεπερασμένα στοιχεία). Από αυτή την άποψη η μέθοδος αποτελεί γενίκευση της ανάλυσης γραμμικών φορέων με μητρώα.

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρι την ανακάλυψη του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές. Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο. Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα 'Ενεργειακά Γενικά περί των Πεπερασμένων Στοιχείων 21 θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων' και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων. Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία. Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες.

#### 4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΠΣ

##### 4.3.1 Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία

Ο χώρος που καταλαμβάνει το υλικό σύστημα χωρίζεται σε υποχώρους (στοιχεία). Τα στοιχεία μπορεί να είναι μονοδιάστατα, διδιάστατα ή τριδιάστατα ανάλογα με την εξιδανίκευση

του προβλήματος που επιλέγεται. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των στοιχείων και όσο μικρότερο το μέγεθος τους, τόσο καλύτερη ακρίβεια θα έχουν τα αποτελέσματα. Με τον αριθμό των στοιχείων αυξάνεται όμως και το υπολογιστικό κόστος. Γι' αυτό με την εμπειρία του ο μηχανικός πρέπει να επιλέγει την διακριτοποίηση που θα εφαρμόσει ώστε να έχει τον ελάχιστο αριθμό στοιχείων που θα του εξασφαλίσουν την επιθυμητή ακρίβεια. Αυτό δεν είναι πάντα εύκολο και εξαρτάται από τον τύπο των στοιχείων που θα επιλεγθούν, γι' αυτό ίσως χρειάζονται στην αρχή κάποιες δοκιμαστικές διακριτοποιήσεις, από αραιότερο σε πυκνότερο σύστημα μέχρις ότου βγει ένα συμπέρασμα. Το κάθε στοιχείο που επιλέγεται χαρακτηρίζεται και από ένα αριθμό κόμβων που επιλέγονται σε σημεία πάνω στο στοιχείο. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός κόμβων τόσο μεγαλύτερου βαθμού συνάρτηση παρεμβολής μπορεί να επιλεγθεί και συνεπώς τόσο καλύτερη προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί.

#### 4.3.2 Επιλογή ανεξαρτήτων μεταβλητών

Όταν σε ένα υλικό σύστημα ασκείται μια δράση αυτή ακολουθείται από μια αντίδραση. Για παράδειγμα η επιβολή δύναμης ή υδραυλικού φορτίου δημιουργεί μια μετατόπιση ή μια ροή (παροχή) και αντίστροφα. Έτσι οι μεταβλητές που μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα σύστημα εμφανίζονται σε αλληλένδετα ζεύγη. Για την επίλυση του προβλήματος πρέπει να επιλεγεί μια από τις δύο κατηγορίες μεταβλητών. Αυτές ονομάζονται κύριες ή πρωτεύουσες μεταβλητές. Οι άλλες ονομάζονται δευτερεύουσες ή εξαρτημένες. Στα προβλήματα που εξετάζουμε οι κύριες μεταβλητές μπορεί να είναι οι μετατοπίσεις ή οι τάσεις στους κόμβους για τα προβλήματα που αφορούν παραμορφώσιμα σώματα, οι πιέσεις νερού των πόρων ή τα υδραυλικά ύψη για προβλήματα ροής και τέλος οι πιέσεις και οι μετατοπίσεις ταυτόχρονα για προβλήματα στερεοποίησης.

#### 4.3.3 Επιλογή συνάρτησης παρεμβολής

Η συνάρτηση παρεμβολής είναι μία συνάρτηση με την οποία υπολογίζονται οι τιμές των κυρίων μεταβλητών στο εσωτερικό του στοιχείου όταν είναι γνωστές οι τιμές στους κόμβους. Συνήθως επιλέγονται πολυωνυμικές συναρτήσεις, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια δέσμευση. Στις πολυωνυμικές ο βαθμός τους και ο αριθμός των κόμβων στους οποίους πρέπει να γνωρίζονται τα άγνωστα μεγέθη είναι αλληλεξαρτώμενα. Για παράδειγμα σε διδιάστατο τριγωνικό στοιχείο τριών κόμβων επιλέγεται γραμμική συνάρτηση, ενώ για στοιχείο τριγωνικό στοιχείο 6 κόμβων, δευτέρου βαθμού κλπ.

##### 4.3.4 Υπολογισμός μητρώων στιφρότητας των στοιχείων

Για κάθε στοιχείο βρίσκονται οι σχέσεις που συνδέουν τις κύριες με τις δευτερεύουσες μεταβλητές στους κόμβους του στοιχείου. Οι σχέσεις αυτές είναι της μορφής  $\{F\}=[K]\{\delta\}$  όπου  $K$  το μητρώο δυσκαμψία και  $F$  και  $\delta$  τα μητρώα στήλης των κομβικών δυνάμεων και κομβικών μετατοπίσεων αντίστοιχα. Οι διαστάσεις των μητρώων αυτών  $n$  είναι ίση με τον αριθμό  $n$  των κόμβων επί τον αριθμό των αγνώστων ανά κόμβο.

##### 4.3.5 Κατάστρωση του συστήματος εξισώσεων

Με βάση τις προηγούμενες σχέσεις δημιουργείται το γενικό μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος των στοιχείων. Ο αριθμός  $N$  των συνολικών εξισώσεων ισούται με τον συνολικό αριθμό κόμβων στο σύστημα επί τον αριθμό των αγνώστων ή αλλιώς τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο. Κάθε εξίσωση του συστήματος των εξισώσεων εκφράζει και μία σχέση ισορροπίας δυνάμεων στον αντίστοιχο κόμβο ως προς έναν από τους βαθμούς ελευθερίας του κόμβου.

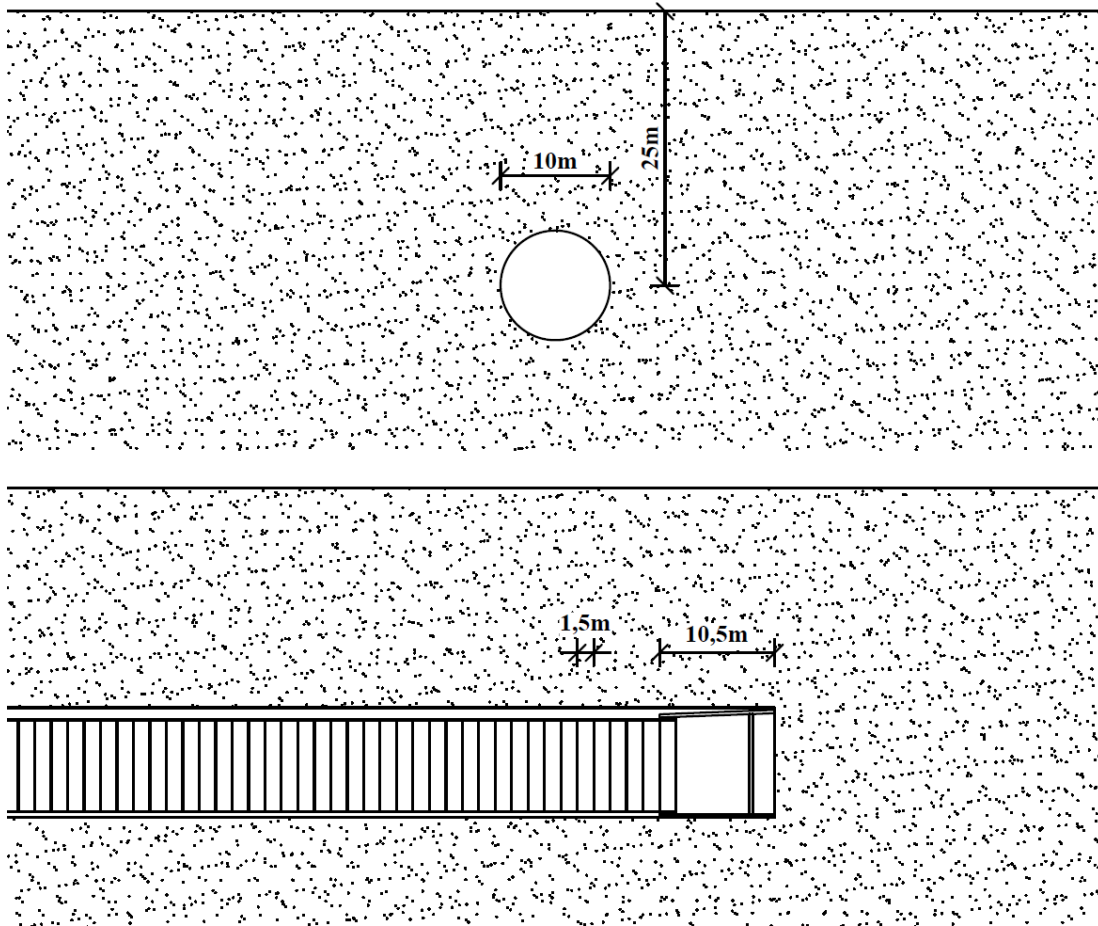
##### 4.3.6 Επίλυση του συστήματος των εξισώσεων

Η επίλυση γίνεται είτε με μία από τις γνωστές επαναληπτικές μεθόδους (Gauss–Seidel, μέθοδος συζυγών κλίσεων κ.α.) είτε με μεθόδους απ' ευθείας επίλυσης (απαλοιφή Gauss).

#### 4.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι διαστάσεις του μοντέλου που επιλέχθηκαν αφορούν σε μια εκσκαφή διαμέτρου  $D=10\text{m}$  και λόγο βάρους προς διάμετρο  $H/D=2.5$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η εκσκαφή είναι ευθύγραμμη. Ο ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος είναι  $18\text{m/d}$  ή αλλιώς  $1.5\text{m}$  ανά  $2\text{h}$ , όπου  $1.5\text{m}$  είναι το πλάτος του κάθε δακτυλίου υποστήριξης. Το μήκος του μηχανήματος είναι  $10.5\text{m}$  που αντιστοιχεί σε μήκος επτά δακτυλίων υποστήριξης. Η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας του μηχανήματος στο μέτωπο είναι μικρότερη από την διάμετρο της εκσκαφής (υπερεκσκαφή). Ακόμα, το σχήμα της ασπίδας είναι κωνικό. Αυτό σημαίνει ότι η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας μειώνεται γραμμικά προς μια μικρότερη τιμή στην ουρά της ασπίδας. Εδώ θεωρείται ότι η κάτω πλευρά είναι σε επαφή με το περιβάλλον έδαφος. Το μηχάνημα ασκεί μια πίεση στο μέτωπο μέσω του πολφού που αυξάνει γραμμικά με το βάθος λόγω του ιδίου βάρους του πολφού. Το ένεμα εισπνέζεται στο ουραίο κενό με μία συγκεκριμένη πίεση, ενώ το μέτρο ελαστικότητας του από μηδενική τιμή στην ρευστή κατάσταση αυξάνει με τον χρόνο καθώς λαμβάνει χώρα η αντίδραση στην ενυδάτωση. Οι δακτύλιοι κατασκευάζονται μέσα στην ασπίδα και καθώς προχωράει το μηχάνημα εξέρχονται αυτής και έρχονται σε επαφή με το ένεμα που εισπνέζεται στο κενό. Το

έδαφος είναι κορεσμένο μέχρι την επιφάνεια. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι σημαντική. Το μοντέλο που θα κατασκευαστεί έχει ως στόχο να προσομοιώσει όσο καλύτερα γίνεται κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία του προβλήματος. Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος προσομοίωσης του κάθε στοιχείου του αριθμητικού μοντέλου ξεχωριστά.



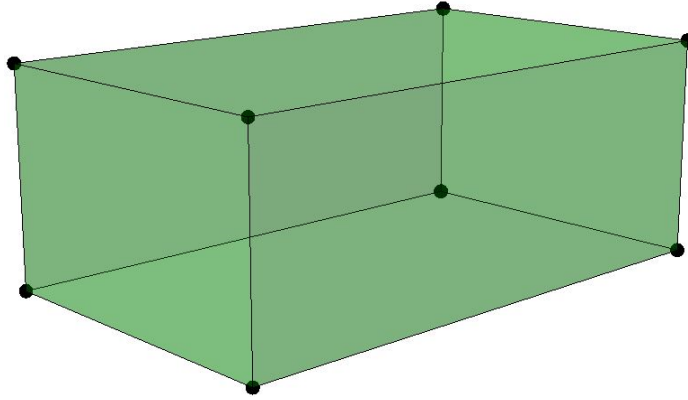
Σχήμα 4.1 Διαστάσεις εκσκαφής και γεωμετρία του προβλήματος.

#### 4.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Λόγω συμμετρίας του προβλήματος ως προς το κατακόρυφο επίπεδο που περνάει από τον άξονα της σήραγγας, το μοντέλο που θα κατασκευαστεί θα είναι το μισό. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την δραματική εξοικονόμηση χρόνου, πράγμα πολύ επιθυμητό, καθώς τριδιάστατες συζευγμένες αναλύσεις αυτού του τύπου έχουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Έτσι οι συνοριακές συνθήκες που επιλέγονται για τους κόμβους που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας περιορίζουν τις μετακινήσεις ως προς τον οριζόντιο άξονα X κάθετο στον άξονα της σήραγγας Y

( $u_x=0$ ), αλλά και τις στροφές ως προς τον άξονα της σήραγγας  $Y$  και τον κατακόρυφο άξονα  $Z$  ( $\theta_y=\theta_z=0$ ).

#### 4.5.1 Προσομοίωση του εδάφους



Σχήμα 4.2 Οκτακομβικό στοιχείο προσομοίωσης εδάφους.

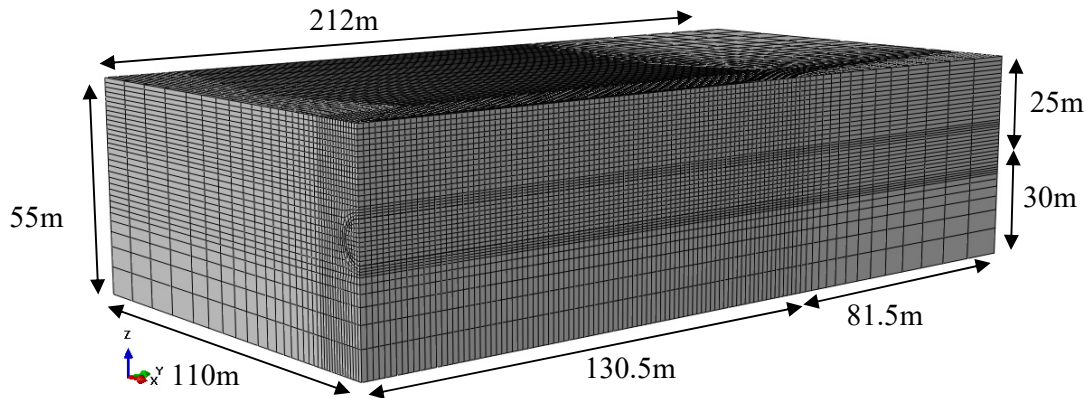
Το έδαφος προσομοιώνεται με χωρικά εξαπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8P. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από οκτώ κόμβους στις γωνίες τους. Οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε κόμβου είναι τέσσερις. Πιο συγκεκριμένα είναι τρεις βαθμοί ελευθερίας για τις μετακινήσεις κατά τους τρεις άξονες αντίστοιχα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

Το μοντέλο που κατασκευάστηκε έχει όριο στον άξονα  $X$  που απέχει από τον άξονα της σήραγγας 110m. Ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται σε βάθος 25m από την επιφάνεια και το κάτω όριο του μοντέλου βρίσκεται 30m κάτω από τον άξονα της σήραγγας. Η διάσταση του μοντέλου στον άξονα  $Y$  είναι 212m, ενώ το μηχάνημα αρχίζει την εκσκαφή από το  $Y=0$  και προχωράει μέχρι το  $Y=130.5$ , δηλαδή κάνει 87 βήματα του 1.5m. Μετά ακολουθεί διαδικασία στερεοποίησης χωρίς να γίνεται προχώρηση του μηχανήματος, θεωρώντας μόνο μεταβολή του χρόνου. Η πύκνωση του κανάβου του μοντέλου έγινε κοντά στην σήραγγα εκεί που αναμένονται οι μεγαλύτερες μεταβολές στα μεγέθη και χρειάζεται αυξημένη ακρίβεια. Όσο απομακρυνόμαστε από την σήραγγα η διακριτοποίηση γίνεται πιο αραιή. Γενικά, είναι σημαντικό ο λόγος των πλευρών των στοιχείων να μην αποκλίνει πέραν της τιμής 1 προς 4. Αυτό μπορεί να μην τηρείται για όλα τα στοιχεία του μοντέλου, αλλά τηρείται στις περιοχές που αναμένονται μεταβολές στις τάσεις, οπότε τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται. Ακόμα, η απόσταση των ορίων από την σήραγγα θεωρείται ότι είναι αρκετή ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα κοντά στην σήραγγα. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα όρια είναι:

- Για την επιφάνεια ( $Z=25m$ ) ο βαθμός ελευθερίας που αφορά στις πιέσεις πόρων είναι δεσμευμένος.



- Για το κάτω επίπεδο ( $Z=-30\text{m}$ ) οι τρεις βαθμοί ελευθερίας για τις μετακινήσεις είναι δεσμευμένοι
- Για τα κατακόρυφα επίπεδα με  $Y=0\text{m}$  και  $Y=212\text{m}$  δεσμεύεται ο βαθμός ελευθερίας που αφορά στην μετακίνηση κατά  $Y$
- Για τα κατακόρυφα επίπεδα με  $X=-110\text{m}$  και  $X=0\text{m}$  δεσμεύεται ο βαθμός ελευθερίας που αφορά στην μετακίνηση κατά  $X$



Σχήμα 4.3 Διακριτοποίηση του εδάφους.

Να σημειωθεί εδώ ότι η αρχή των αξόνων βρίσκεται στον άξονα της σήραγγας εκεί από όπου ξεκινάει το TBM και με το άξονα  $Z$  να έχει φορά προς τα πάνω και τον  $Y$  την κατεύθυνση της εκσκαφής. Το ολοκληρωμένο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

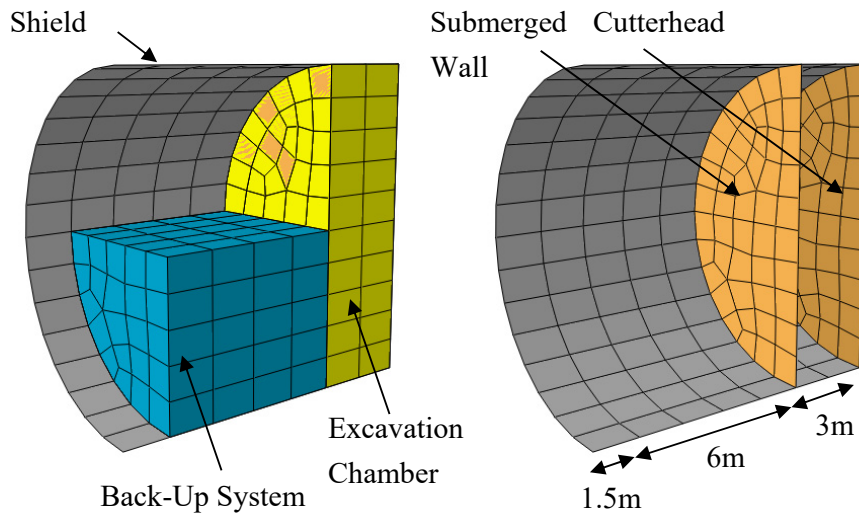
## 4.5.2 Προσομοίωση της δράσης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής

### 4.5.2.1 Προσομοίωση μηχανήματος

Η ασπίδα, η κοπτική κεφαλή και ο τοίχος πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής προσομοιώνονται με στοιχεία κελύφους τύπου S4, ενώ ο πολφός μέσα στο θάλαμο εκσκαφής και μηχανολογικός εξοπλισμός του TBM προσομοιώνονται με χωρικά εξαπλευρικά στοιχεία C3D8. Το προσομοίωμα του TBM φαίνεται στο Σχήμα 4.4 με επεξήγηση των μερών που το αποτελούν.

Τα στοιχεία S4 είναι τετρακομβικά στοιχεία κελύφους με έξι βαθμούς ελευθερίας στον κάθε κόμβο, τρεις που αφορούν στην μετακίνηση και τρεις περιστροφικούς. Τα στοιχεία C3D8 είναι οκτακομβικά όπως τα C3D8P με μόνη διαφορά ότι ο κάθε κόμβος έχει μόνο τρεις βαθμούς ελευθερίας όσον αφορά στις μετακινήσεις ως προς τους τρεις άξονες. Όλα τα στοιχεία του TBM είναι γραμμικά ελαστικά. Τα στοιχεία κελύφους έχουν ελαστικές ιδιότητες του χάλυβα,  $E=210\text{GPa}$  και  $\nu=0.2$ . Το πάχος της ασπίδας θεωρείται  $10\text{cm}$ . Η πυκνότητα του υλικού ορίζεται ως  $\rho=40.4\text{kg/m}^3$ . Η μεγάλη αυτή τιμή επιλέγεται έτσι ώστε εκτός από την προσομοίωση του ίδιου βάρους του υλικού της ασπίδας, να εξισορροπείται και το 80% του βάρους του εκσκαπόμενου

υλικού. Ο λόγος που επιθυμείτε κάτι τέτοιο είναι γιατί στις αναλύσεις γίνεται χρήση του κριτηρίου M-C. Αυτό έχει ως συνέπεια την χρήση ίδιου μέτρου ελαστικότητας στην φόρτιση και στην αποφόρτιση. Έτσι η αφαίρεση του εδαφικού υλικού θα είχε ως συνέπεια την διόγκωση του περιβάλλοντος εδάφους και την ανάπτυξη μη ρεαλιστικών ανυψώσεων κατά την επίλυση. Τα στοιχεία που προσομοιώνουν τον πολφό και τον μηχανολογικό εξοπλισμό έχουν τοποθετηθεί με μοναδικό σκοπό να προσομοιάσουν ρεαλιστικά το βάρος του TBM. Να σημειωθεί εδώ ότι η μόνη αλληλεπίδραση που έχει το μηχάνημα με το περιβάλλον έδαφος είναι μέσω της ασπίδας και ενός νόμου διεπιφάνειας που την συνδέει με τους εσωτερικούς κόμβους του εδάφους στην περίμετρο της εκσκαφής.



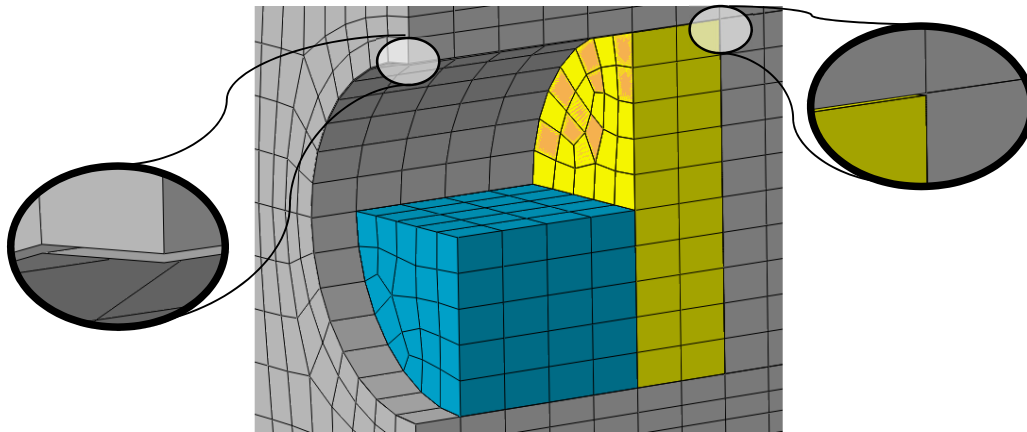
Σχήμα 4.4 Μοντέλο του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (αριστερά ολόκληρο - δεξιά μόνο τα στοιχεία κελύφους που προσομοιώνουν την ασπίδα, την κοπτική κεφαλή και το τείχος πίσω από τον θάλαμο εκσκαφής)



Σχήμα 4.5 Τετρακομβικό στοιχείο κελύφους προσομοίωσης της ασπίδας.

Οι διαστάσεις του μηχανήματος είναι 10.5m μήκος και η διάμετρος του είναι μεταβαλλόμενη κατά μήκος σχηματίζοντας ένα κόλουρο κώνο. Στο μέτωπο η διάμετρος είναι

κατάτι μικρότερη από την διάμετρο της εκσκαφής (υπερεκσκαφή) ενώ μικραίνει γραμμικά μέχρι μια ακόμα μικρότερη τιμή στην ουρά του μηχανήματος. Εφαρμόστηκαν διάφορες τιμές υπερεκσκαφής και ουραίου κενού στην παραμετρική διερεύνηση που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η υπερεκσκαφή και η κωνικότητα της ασπίδας. Το μηχάνημα τοποθετείται έκκεντρα στην εκσκαφή, έτσι ώστε στην βάση του να είναι σε επαφή με την παρειά της εκσκαφής.

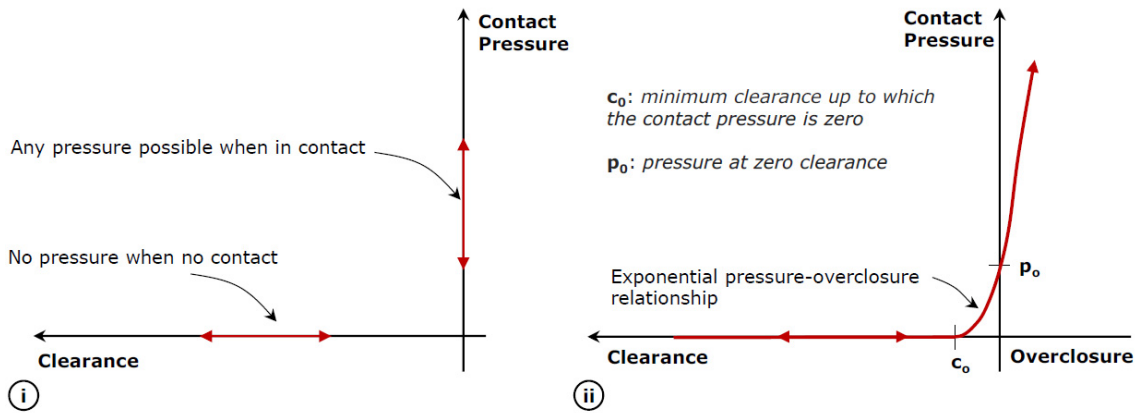


Σχήμα 4.6 Υπερεκσκαφή και κωνικότητα της ασπίδας του TBM στο μοντέλο.

#### 4.5.2.2 Αλληλεπίδραση μηχανήματος με το περιβάλλον έδαφος

Στο μοντέλο δεν υπάρχουν κοινοί κόμβοι μεταξύ στοιχείων του μηχανήματος και στοιχείων του εδάφους. Η αλληλεπίδραση του μηχανήματος και του εδάφους γίνεται μόνο μέσω ενός νόμου διεπιφάνειας που αφορά στην ασπίδα και την παρειά της εκσκαφής και αποτελείται ουσιαστικά από μία σχέση του κενού μεταξύ των δυο επιφανειών και της μεταφερόμενης τάσης επαφής. Για την αλληλεπίδραση της ασπίδας με το περιβάλλον έδαφος ορίζονται δύο επιφάνειες. Η μία επιφάνεια είναι η εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας και η άλλη είναι εσωτερική επιφάνεια των στοιχείων που βρίσκονται στην περίμετρο της εκσκαφής. Στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν η επαπτομενική τάση αμελείται. Όσον αφορά την ορθή δεν υπάρχει όριο στην τάση που μπορεί να μεταδοθεί από την μια επιφάνεια στην άλλη. Ο προεπιλεγμένος από το πρόγραμμα νόμος διεπιφάνειας είναι η σχέση που ονομάζεται ‘hard’ contact. Σε αυτή την περίπτωση όταν το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών είναι μηδέν ή αρνητικό δεν μεταφέρεται καμία δύναμη. Η σχέση φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Λόγω της αριθμητικής αστάθειας που μπορεί να προκαλέσει ένας τέτοιος νόμος διεπιφάνειας, αν και ιδανικός για την περιγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς, δεν υιοθετείται τις αναλύσεις που θα γίνουν. Αντιθέτως, επιλέγεται μια εκθετική σχέση κενού – μεταφερόμενης πίεσης για την οποία ορίζονται τα μεγέθη  $c_0$  και  $p_0$ . Ως  $c_0$  ορίζεται το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών για το οποίο μηδενίζεται η πίεση, ενώ ως  $p_0$  ορίζεται η μεταφερόμενη πίεση όταν μηδενίζεται το κενό. Να σημειωθεί εδώ ότι όσο πιο μικρές τιμές των  $c_0$  και  $p_0$  τόσο

προσεγγίζεται η σχέση ‘Hard’ contact. Οι τιμές των  $c_0$  και  $p_0$  στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν είναι  $10^{-5}$ m και 1kPa αντίστοιχα.



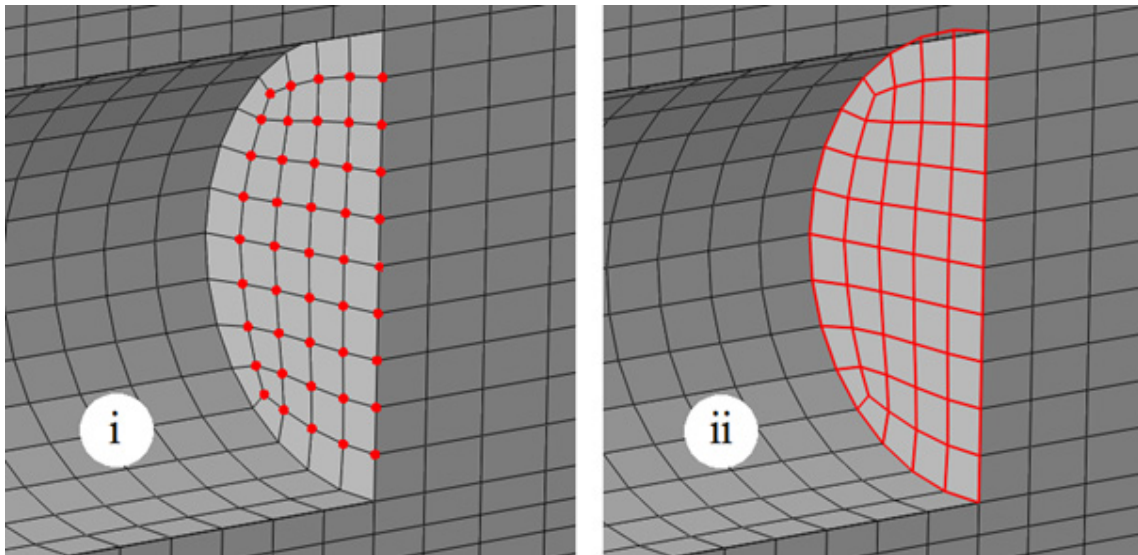
Σχήμα 4.7 (i) ‘Hard’ contact και (ii) εκθετική σχέση πίεσης και πάχος κενού στην διεπιφάνεια ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού

#### 4.5.2.3 Προσομοίωση πίεσης μετώπου

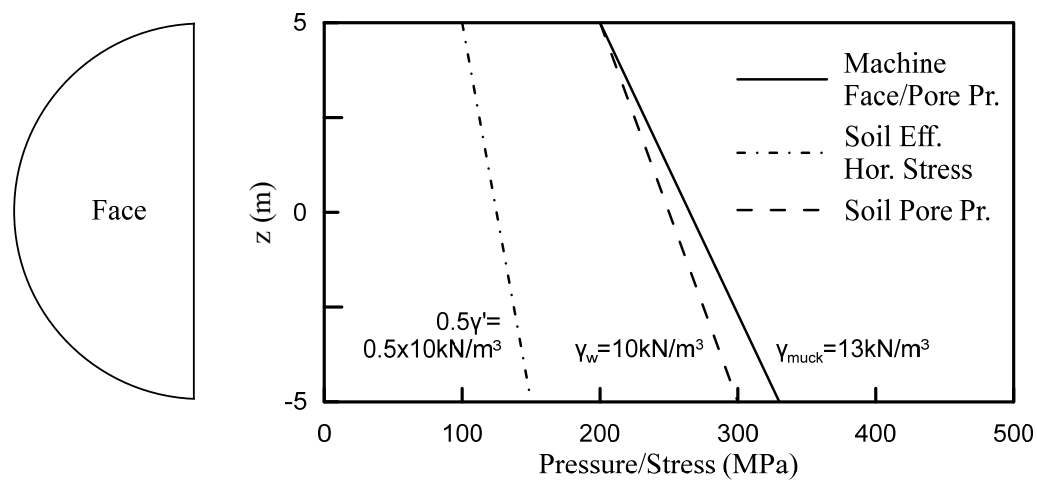
Η πίεση του μετώπου στο μοντέλο προσομοιώνεται με χρήση καταναμημένου φορτίου στα στοιχεία του μετώπου. Το φορτίο αυτό είναι τραπεζοειδές και αυξάνει με κλίση ίση με το ίδιο βάρος του πολφού. Στις αναλύσεις που ακολουθούν έχει γίνει θεώρηση του ίδιου βάρους του πολφού ίσο με  $\gamma_{muck}=13\text{kN/m}^3$ . Η επιλογή του μεγέθους της πίεσης έγινε έτσι ώστε η πίεση μετώπου  $P_{0,muck}$  στην στέψη της σήραγγας να είναι ίδια με την ενεργό κατακόρυφη τάση του εδάφους  $P'_{v,soil,crown}$ . Συνεπώς, έχουμε

$$P_{0,muck} = P'_{v,soil,crown} = (\gamma_{soil} - \gamma_w)(H - D/2) \quad \text{Εξ. 4.1}$$

Όσον αφορά τις πιέσεις των πόρων θεωρούνται ίσες με την πίεση  $P_{0,muck}$ , γίνεται θεώρηση δηλαδή μηδενικών ενεργών τάσεων στο μέτωπο. Οπότε η οι οριακές συνθήκες στους κόμβους των εδαφικών στοιχείων στην επιφάνεια του μετώπου, επιτυγχάνονται με την εισαγωγή πίεσης πόρων ίση με την πίεση του καταναμημένου φορτίου.



Σχήμα 4.8 (i) Κόμβοι εφαρμογής οριακών συνθηκών πίεσης πόρων και (ii) επιφάνεια άσκησης του φορτίου στο μέτωπο



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα σύγκρισης ασκούμενης πίεσης μετώπου και οριακές συνθήκες πίεσης πόρων με ενεργές οριζόντιες τάσεις και πίεση πόρων στο έδαφος.

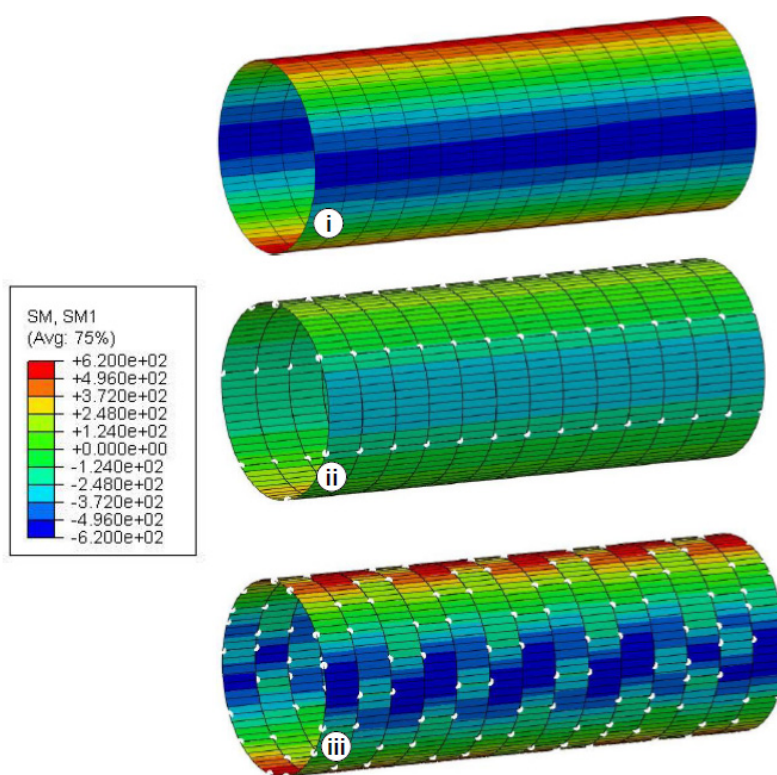
#### 4.5.2.4 Πίεση ρευστών στο κενό

Τέλος, ο πολφός μπεντονίτη και το ένεμα βρίσκονται υπό πίεση. Αυτό πιθανώς να έχει ως συνέπεια την διείσδυση των ρευστών στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Για αυτό θα γίνουν και κάποιες αναλύσεις στις οποίες θα ελέγχεται η επιρροή της πίεσης των ρευστών στο κενό. Η πίεση θα προσομοιωθεί με καταναμημένο φορτίο στα τοιχώματα της εκσκαφής.



### 4.5.3 Προσομοίωση της τελικής επένδυσης

Η τελική επένδυση προσομοιώνεται από στοιχεία κελύφους τύπου S4. Η σύνδεση μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων είναι μονολιθική. Δηλαδή, στο μοντέλο δεν προσομοιώνονται οι αρμοί σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων, αλλά προσομοιώνεται όλη η υποστήριξη ως ένας ενιαίος κύλινδρος. Όπως έχει αναφερθεί, οι αρμοί μεταξύ των στοιχείων μπορούν να χωριστούν σε αρμούς μεταξύ δακτυλίων και σε διαμήκης αρμούς. Είναι διαδεδομένη πρακτική, να τοποθετούνται έτσι τα προκατασκευασμένα στοιχεία της υποστήριξης ώστε οι διαμήκης αρμοί διαδοχικών δακτυλίων να μην συμπίπτουν. Έτσι υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των δακτυλίων όπου μειώνει την ευκαμψία του συστήματος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.10 (Litsas et al. 2015)

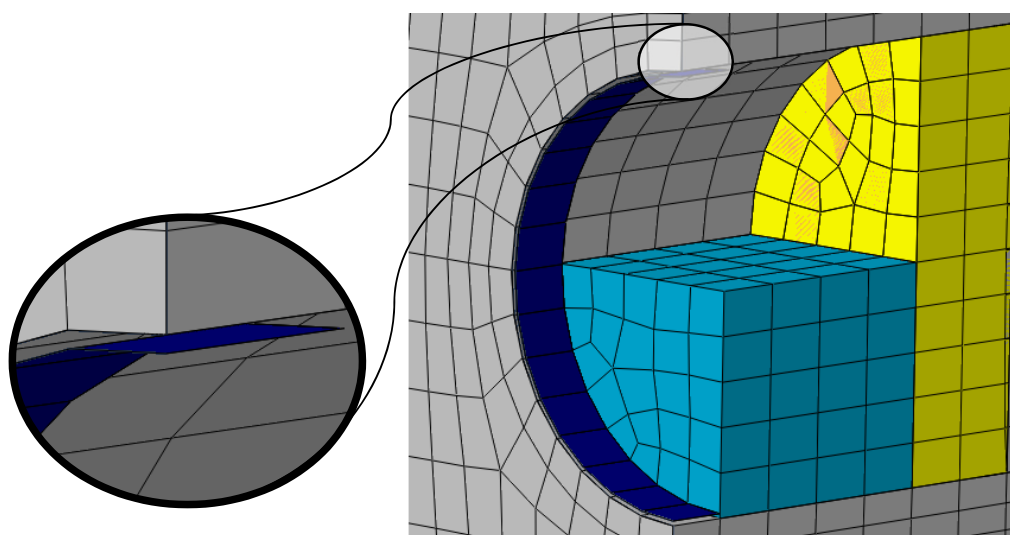


Σχήμα 4.10 Καμπτικές ροπές σε στοιχεία υποστήριξης που προσομοιώνονται με (i) συνεχή κύλινδρο (ii) διαμήκεις αρμούς που συμπίπτουν σε διαδοχικούς δακτυλίους και (iii) διαμήκεις αρμούς που δεν συμπίπτουν (Litsas et al. 2015)

Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συστήματος (iii) δεν διαφέρει και πολύ από την συμπεριφορά του συνεχούς δακτυλίου (i). Έτσι, όπως γίνεται και σε πολλές άλλες έρευνες (Kasper & Meschke 2004; Kasper & Meschke 2006; Nagel & Meschke 2011; Nagel et al. 2012; Lamborghini et al. 2012), υιοθετείται η πρακτική της χρήσης μονολιθικά συνδεδεμένων στοιχείων υποστήριξης.

Στο μοντέλο, κατασκευάζεται κάθε φορά ένα μήκος υποστήριξης που αντιστοιχεί σε ένα μήκος δακτυλίου, στο εσωτερικό τμήμα της ασπίδας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, όπου

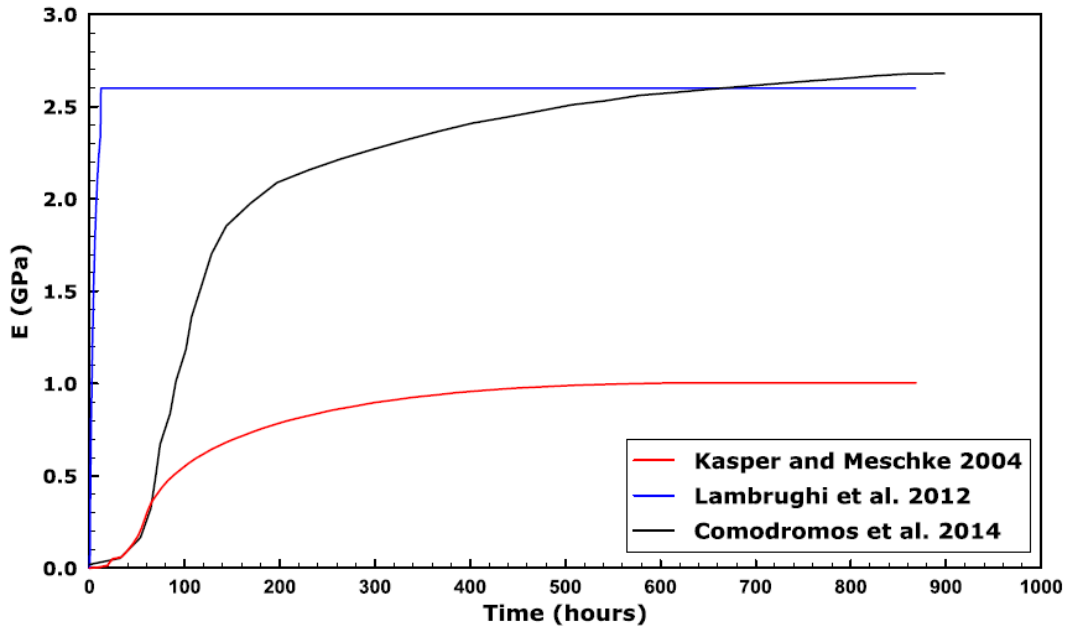
φαίνεται μία τομή του τριδιάστατου μοντέλου στο σημείο που βρίσκεται η ουρά της ασπίδας. Το πάχος της επένδυσης θεωρείται 35cm. Η διάμετρος της επένδυσης επιλέγεται έτσι ώστε να βρίσκεται κεντρικά στην ουρά του μηχανήματος. Τοποθετείται έτσι ώστε να παίρνεται υπ' όψιν το πάχος της ασπίδας και να υπάρχει ακόμα ένα κενό μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας της ασπίδας και της εξωτερικής επιφάνειας της τελικής επένδυσης. Η διάμετρος της επένδυσης διατηρείται σταθερή όταν θα μεταβάλλεται η κωνικότητα της ασπίδας σε παραμετρική διερεύνηση που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως  $E=20\text{GPa}$  και ο λόγος Poisson  $\nu=0.2$ . Η πυκνότητα ορίζεται  $\rho=12.17\text{kg/m}^3$  έτσι ώστε να εξισορροπείται το 80% του βάρους του εκσκαπόμενου υλικού για τον λόγο που αναφέρθηκε και προηγουμένως.



Σχήμα 4.11 Προσομοίωση της τελικής επένδυσης στο μοντέλο.

#### 4.5.4 Προσομοίωση της διαδικασίας εισπίεσης ενέματος

Το ένεμα προσομοιώνεται με εξαπλευρικά οκτακομβικά στοιχεία C3D8. Τα στοιχεία αυτά πληρώνουν το κενό μεταξύ των στοιχείων της υποστήριξης και του περιβάλλοντος εδάφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Το πάχος του ενέματος είναι μεταβλητό καθ' ύψος λόγω της εκκεντρότητας της ουράς του μηχανήματος ως προς την περίμετρο της εκσκαφής, καθώς η βάση της ασπίδας ακουμπάει στο περιβάλλον έδαφος.

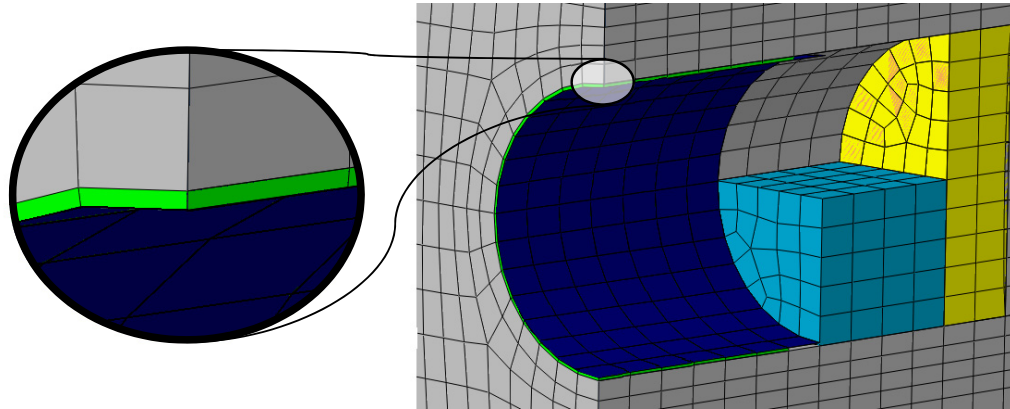


Σχήμα 4.12 Χρονικά εξαρτώμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με Kasper & Meschke (2004), Lambrughi et al. (2012) και Comodromos et al. (2014)

Το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι χρονικά εξαρτώμενο. Η σχέση του μέτρου ελαστικότητας με τον χρόνο έχει περιγραφεί από διάφορους ερευνητές με διαφορετικές καμπύλες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Η συμπεριφορά του ενέματος κατά Kasper & Meschke (2004) και κατά Comodromos et al. (2014) είναι παρόμοια, με διαφορά στην μέγιστη τιμή που είναι 1GPa και 2.7GPa αντίστοιχα. Διαφορετική συμπεριφορά θεωρούν οι Lambrughi et al. (2012), όπου θεωρούν ότι το ένεμα φτάνει στην μέγιστη τιμή της δυσκαμψίας του στις πρώτες 12 ώρες. Για την προσομοίωση της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς κατασκευάζεται μια υπορουτίνα στο UMAT<sup>2</sup> (Abaqus, 2010), όπου τρέχει μαζί με το κυρίως πρόγραμμα και υπολογίζει για κάθε χρονικό βήμα το νέο μέτρο ελαστικότητας του κάθε στοιχείου ενέματος με βάση το χρονικό διάστημα που είναι ενεργοποιημένο. Στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν έχει υιοθετηθεί η συμπεριφορά κατά Kasper & Meschke (2004). Έτσι, η συμπεριφορά σκλήρυνσης του ενέματος προσομοιώνεται ρεαλιστικά, χωρίς απλοποιήσεις και χωρίς να επηρεάζεται το πεδίο των τάσεων των στοιχείων ενέματος, εφόσον δεν γίνονται ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις στοιχείων.

<sup>2</sup>(Hibbitte 2005)





Σχήμα 4.13 Πλήρωση του κενού μεταξύ τελικής επένδυσης και περιβάλλοντος εδάφους με ένεμα στο μοντέλο.

Η πίεση του ενέματος προσομοιώνεται με μια αρχική εντατική κατάσταση που επιβάλλεται στα στοιχεία του ενέματος. Έτσι, λόγω της αρχικής χαμηλής δυσκαμψίας τους τείνουν να διογκωθούν και να πιέσουν τα στοιχεία του εδάφους και της υποστήριξης μέχρι να επέλθει ισορροπία. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου προσομοίωσης της πίεσης ενέματος είναι ότι η πίεση εφαρμόζεται μέσω του πεδίου των τάσεων και όχι με κατανομημένα φορτία ή άλλες απλοποιήσεις. Στις αναλύσεις που θα γίνουν επιλέγονται διάφορες τιμές πίεσης ενέματος που αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο καθώς γίνεται παραμετρική διερεύνηση. Η πίεση ενέματος θεωρείται σταθερή καθ' ύψος και το ίδιο βάρος θεωρείται αμελητέο.

#### 4.5.5 Βήματα της ανάλυσης

Αφού έχουν οριστεί όλα όσα αναφέρονται παραπάνω, δηλαδή αφού οριστούν

- Όλοι οι κόμβοι του μοντέλου
- Όλα τα επιφανειακά και χωρικά στοιχεία του μοντέλου
- Οι ιδιότητες όλων των διαφορετικών υλικών
- Όλες οι απαραίτητες υποομάδες κόμβων και στοιχείων
- Ο νόμος διεπιφάνειας και οι επιφάνειες τις οποίες θα συνδέει
- Οι συνοριακές συνθήκες
- Οι αρχικές συνθήκες (εντατική κατάσταση, πίεση πόρων, βαθμός κορεσμού, δείκτης κενών κ.λπ.)

ξεκινάνε τα βήματα της ανάλυσης στα οποία λαμβάνουν χώρα οι αριθμητικοί υπολογισμοί.

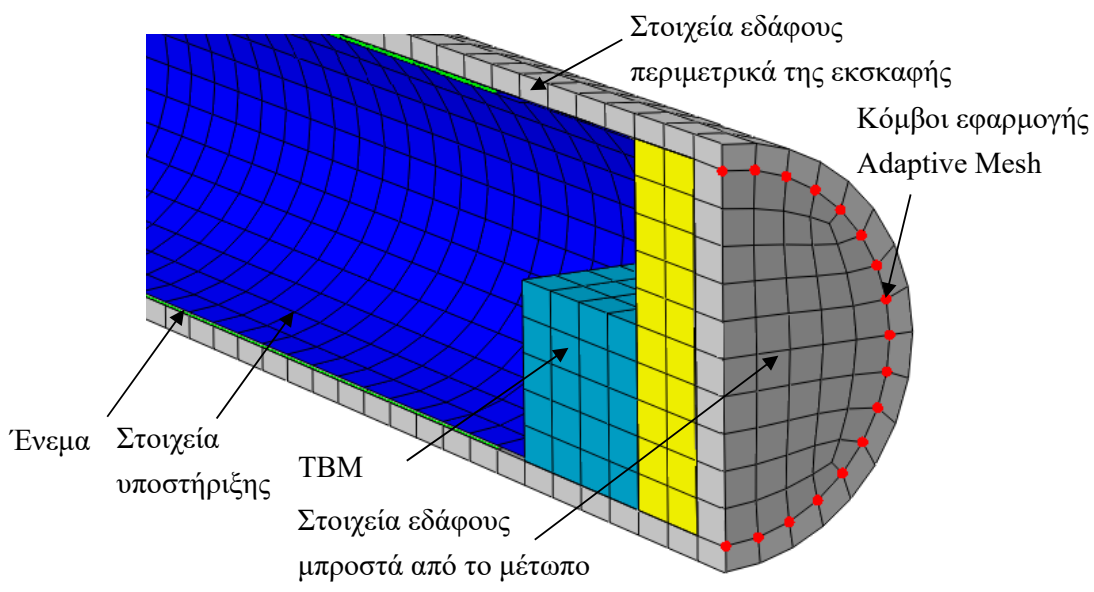
4.5.5.1 Γεωστατικό βήμα

Στο βήμα αυτό απενεργοποιούνται τα στοιχεία του TBM, της υποστήριξης και του ενέματος και επίσης απενεργοποιείται και ο νόμος διεπιφάνειας. Ασκείται φορτίο βαρύτητας κατανεμημένο στον όγκο του εδάφους, θεωρώντας επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με  $10\text{m/s}^2$ .

4.5.5.2 Βήμα εισαγωγής του TBM

Στο βήμα αυτό ενεργοποιείται το TBM και η πρώτη ομάδα στοιχείων της υποστήριξης που αποτελούν τον πρώτο δακτύλιο που βρίσκεται εντός της ασπίδας. Αφαιρούνται οι επτά πρώτες ομάδες στοιχείων εδάφους προς εκσκαφή συνολικού μήκους 10.5m, όσο και το μηχάνημα. Ενεργοποιείται ο νόμος διεπιφάνειας. Γίνεται τροποποίηση των συνοριακών συνθηκών προσθέτοντας τις τιμές για την πίεση των πόρων στο μέτωπο. Ασκείται η πίεση στο μέτωπο. Ασκείται φορτίο βαρύτητας στα στοιχεία του TBM.

Τέλος, όταν συμβαίνουν οι συγκλίσεις γύρω από το μηχάνημα, λαμβάνουν χώρα και μετακινήσεις λόγω αποτόνωσης και μπροστά από το μέτωπο. Αυτό πιθανώς να έχει ως συνέπεια οι εσωτερικοί κόμβοι των περιμετρικών στοιχείων της φέτας εκσκαφής μπροστά ακριβώς από το μέτωπο να έχουν συγκλίνει σε τέτοιο βαθμό, που στο επόμενο βήμα και μετά την προχώρηση του TBM αυτοί να βρίσκονται μέσα από την ασπίδα του μηχανήματος. Σε μια τέτοια περίπτωση, λόγω του νόμου διεπιφάνειας θα υπάρξει μια μετακίνηση των περιμετρικών κόμβων προς την περίμετρο. Αυτό θα οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα με ανυψώσεις στην επιφάνεια. Έτσι, με την τεχνική Adaptive Mesh (Σχήμα 4.14) μηδενίζονται οι μετακινήσεις στους κόμβους της εσωτερικής παρειάς των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται περιμετρικά της αμέσως επόμενης φέτας εκσκαφής.



Σχήμα 4.14 Κόμβοι στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνική του Adaptive Mesh στο μοντέλο.

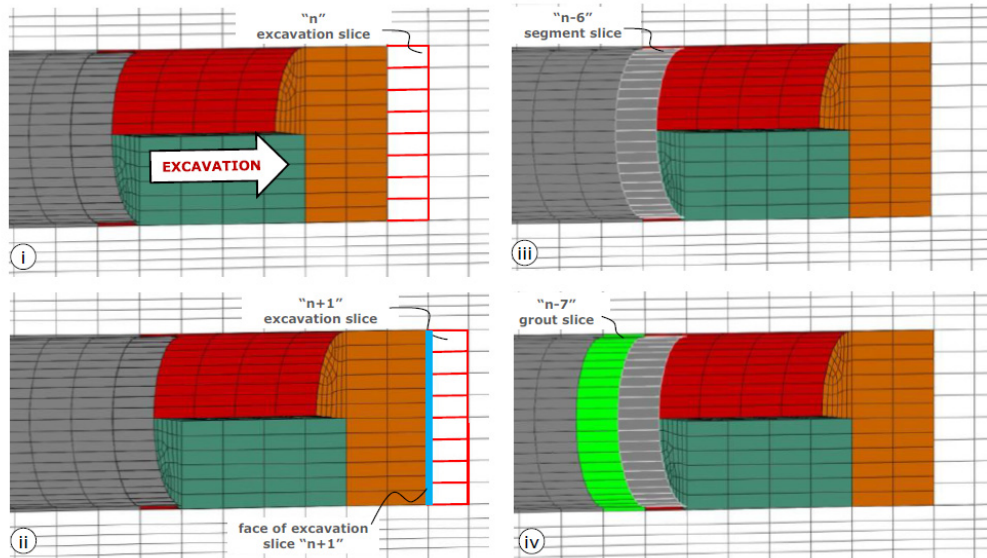
Με αυτή την τεχνική, δεν επηρεάζεται το πεδίο των τάσεων και ουσιαστικά δεν χάνεται καμία πληροφορία. Ακόμα και το άλμα στις μετακινήσεις των περιμετρικών κόμβων μπορεί να διορθωθεί ώστε να έχουμε τις πραγματικές τιμές. Σε περίπτωση που διερευνάται και η επίδραση της πίεσης των ρευστών (πολφός και ένεμα) στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, τότε ασκείται και στην εσωτερική επιφάνεια των εδαφικών στοιχείων της περιμέτρου της εκσκαφής στην περιοχή της ασπίδας, η πίεση που αντιστοιχεί στο σενάριο που διερευνάται (βλέπε επόμενο κεφάλαιο - Σχήμα 5.35).

#### 4.5.5.3 Τυπικό βήμα “n”

Η μηχανοποιημένη όρυξη εμπεριέχει πολλά διαφορετικά βήματα εκσκαφής και κατασκευής (εγκατάσταση της υποστήριξης, προχώρηση του TBM, ενεμάτωση κ.λπ.). Επομένως, τα βήματα της ανάλυσης έχουν ένα επαναληπτικό μοτίβο υποβημάτων μέχρι την ολοκλήρωση της ανάλυσης. Στο Σχήμα 4.15 γίνεται μια ενδεικτική παρουσίαση ενός τυπικού βήματος. Η διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα τυπικό βήμα είναι οι ακόλουθες:

- Η φέτα “n” αφαιρείται (η διάσταση κάθε φέτας στην διαμήκη διεύθυνση είναι ίση με το πάχος του στοιχείου, δηλαδή 1.5m)
- Γίνεται προχώρηση του μηχανήματος κατά 1.5m
- Τραπεζοειδής πίεση μετώπου και συνοριακές συνθήκες πίεσης εφαρμόζονται στη νέα επιφάνεια μετώπου που δημιουργείται (επιφάνεια της φέτας εκσκαφής “n+1”)
- Λόγω της προχώρησης του μηχανήματος, ο δακτύλιος “n-7” που βρισκόταν μέσα από την ασπίδα, εξέρχεται αυτής και ένας νέος δακτύλιος “n-6” ενεργοποιείται μέσα στην ασπίδα, όπου δεν έχει καμία αλληλεπίδραση με τα στοιχεία της ασπίδας που τον περιβάλλουν, και του ασκείται βαρυτικό φορτίο.
- Στο κενό μεταξύ του δακτυλίου “n-7” και του περιβάλλοντος εδάφους ενεργοποιούνται τα στοιχεία του ενέματος. Αρχικά το ένεμα είναι ένα υγρό υπό πίεση η οποία προσομοιώνεται με την επιβολή αρχικής ισοτροπικής τάσης ίσης με την πίεση της ενεμάτωσης. Τα στοιχεία του ενέματος σκληραίνουν όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Έχει γίνει υπόθεση ταχύτητας προχώρησης ίση με 18m/d ώστε να οριστούν οι χρονικά εξαρτώμενες παράμετροι του ενέματος σε κάθε βήμα. Η εισαγωγή και ενεργοποίηση των στοιχείων γίνεται στον αρχικό απαραμόρφωτο φορέα χωρίς να λαμβάνεται υπ’ όψιν η σύγκλιση μεταξύ τοιχώματος εκσκαφής και ασπίδας.
- Γίνονται οι αριθμητικοί υπολογισμοί και υπολογίζεται το νέο πεδίο τάσεων, μετακινήσεις κ.λπ.
- Εφαρμόζεται η τεχνική του Adaptive Mesh στους κόμβους της περιμέτρου της επόμενης φέτας εκσκαφής

- Σε περίπτωση που διερευνάται η επίδραση της πίεσης των ρευστών (πολφός και ένεμα) στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού μεταφέρεται το καταναμημένο φορτίο στα νέα εδαφικά στοιχεία (περιοχή γύρω από την ασπίδα).



Σχήμα 4.15 Ενδεικτική απεικόνιση των υποβημάτων σε ένα τυπικό βήμα ανάλυσης “n” (i) αφαιρούνται η “n” ομάδα στοιχείων προς εκσκαφή (ii) ασκείται η πίεση μετώπου στην “n+1” ομάδα στοιχείων (iii) ενεργοποίηση του δακτυλίου υποστήριξης “n-6” μέσα στην ασπίδα (iv) ενεργοποίηση της ομάδας στοιχείων ενέματος “n-7” (Litsas et al. 2015).

#### 4.5.5.4 Βήμα Steady State

Όταν το μέτωπο φτάσει στην θέση  $Y=130.5\text{m}$  ολοκληρώνεται η διαδικασία εκσκαφής. Σε αυτό το σημείο πριν ολοκληρωθεί η ανάλυση γίνεται ένα τελευταίο υπολογιστικό βήμα με μόνη μεταβολή τη μεταβολή του χρόνου. Αυτό γίνεται για να επέλθει ισορροπία στις πιέσεις των πόρων και να λάβουν χώρα τα φαινόμενα της στερεοποίησης. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο, καθώς ο ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος ( $18\text{m/d}$ ) σε σχέση με την διαπερατότητα του εδάφους ( $10^{-8}\text{m/s}$ ) έχουν ως αποτέλεσμα οι συνθήκες εκσκαφής να είναι αστράγγιστες (ανάπτυξη υποπίεσεων πόρων για τις οποίες θα γίνει λόγος σε επόμενο κεφάλαιο που θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων). Έτσι για να υπολογιστούν οι τελικές καθιζήσεις μετά από την εκτόνωση των υποπίεσεων πόρων, χρειάζεται να περάσει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Συνεπώς, σε αυτό το βήμα μεταβάλλεται μόνο ο χρόνος, έως ότου να έχουν διανυθεί  $10^4\text{h}$ .

## 5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση της μηχανοποιημένης όρυξης σηράγγων με χρήση αριθμητικών μοντέλων, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία στην οποία υπεισέρχεται μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου, είναι η διερεύνηση της επιρροής κάποιων από αυτές, στις επιφανειακές καθιζήσεις αλλά και στις κατακόρυφες μετακινήσεις και τις πιέσεις των πόρων στην στέψη της σήραγγας. Θα παρατηρηθεί με άλλα λόγια, η ευαισθησία των προηγούμενων μεγεθών στην μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, καθώς και των τιμών των εξεταζόμενων παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- Η πίεση του ενέματος πλήρωσης του ουραίου κενού
- Η κωνικότητα της ασπίδας
- Η πίεση των ρευστών (πορφός και ένεμα) που διεισδύουν στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού

Οι αναλύσεις θα είναι συζευγμένες, με ταυτόχρονη επίλυση του μηχανικού και του υδραυλικού προβλήματος. Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές και εμπειρικές λύσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.

### 5.2 ΕΔΑΦΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Στις αναλύσεις που ακολουθούν γίνεται υπόθεση συνεκτικού, ομοιογενούς υλικού, ενώ επίσης θεωρήθηκε ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb (M-C). Στη διάνοιξη σηράγγων, όπου η κατάσταση αστοχίας οφείλεται στη σταδιακή αποτόνωση του υλικού (αποφόρτιση), ίσως ένα κριτήριο αστοχίας που να περιλαμβάνει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας στην αποφόρτιση να είναι πιο κατάλληλο, (βλέπε bounding surface plasticity model, hardening soil model). Ωστόσο, εκτός του ότι το κριτήριο M-C είναι απλό στη χρήση με πολύ δημοφιλείς παραμέτρους (συνοχή  $c$  και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ ), οι

αναλύσεις έχουν ως στόχο συγκριτική εξέταση μεγεθών (π.χ. καθιζήσεις), συνεπώς το κριτήριο M-C κρίνεται ικανοποιητικό για χρήση.

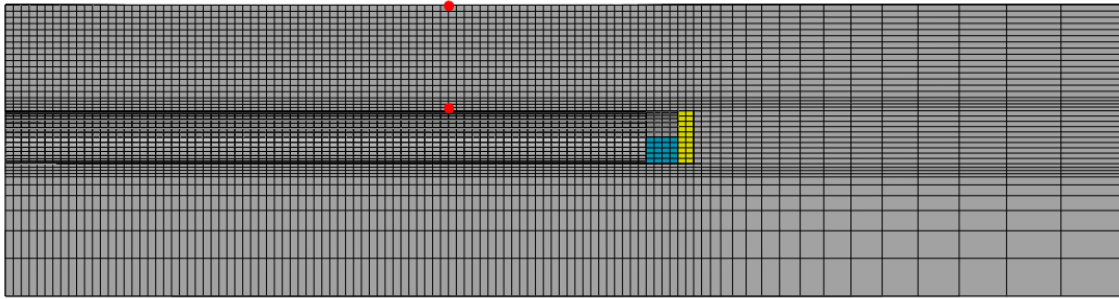
### 5.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΘΗΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι τιμές των παραμέτρων που εισάχθηκαν για την αριθμητική επίλυση με τον υπολογιστικό κώδικα ABAQUS και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η παραμετρική διερεύνηση αφορά στην εξέταση της επιρροής των παραμέτρων αντοχής του εδάφους, της πίεσης του ενέματος, του μεγέθους του ουραίου κενού και της πίεσης των ρευστών που διεισδύουν στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους (πολφός και ένεμα).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα παρουσιαστούν μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων των επιφανειακών καθιζήσεων, των κατακόρυφων μετακινήσεων κοντά στην στέψη της σήραγγας και των πιέσεων πόρων στο ίδιο σημείο, σε συνάρτηση με τους παράγοντες που διερευνώνται. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα με τις μέγιστες καθιζήσεις  $S_{v,max}$  στην στέψη και στην επιφάνεια αλλά και ο λόγος τους, η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής  $R$ , και η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  συναρτήσει του των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Τα αποτελέσματα αφορούν στα ίδια σημεία για όλες τις αναλύσεις. Τα σημεία για τα οποία εξάγονται οι χρονοϊστορίες (σημεία ελέγχου) φαίνονται στο Σχήμα 5.1, ενώ ο Πίνακας 5.1 περιέχει τις ακριβείς συντεταγμένες τους. Επίσης, τα εγκάρσια προφίλ καθιζήσεων και οι πλαστικές παραμορφώσεις αναφέρονται σε τομή που περνάει από αυτά τα σημεία και είναι κάθετη στον άξονα της σήραγγας. Εδώ υπενθυμίζεται ότι ο άξονας  $Y$  διέρχεται από τον άξονα της εκσκαφής και οι άξονες  $X$  και  $Z$  ορίζουν την επιφάνεια από την οποία ξεκινάει το μηχάνημα. Τα συγκεκριμένα σημεία θεωρήθηκαν κατάλληλα, καθώς απέχουν ικανή απόσταση από το όριο ώστε να μην επηρεάζονται από τις οριακές συνθήκες. Ακόμα τα σημεία αυτά, επιλέχθηκαν ώστε να βρίσκονται σε απόσταση από την τελική θέση του μετώπου, με κριτήριο τη σταθεροποίηση των διαγραμμάτων απώλειας όγκου  $V_L(\%)$  και καθίζησης πάνω από τον άξονα της σήραγγας  $S_{v,max}$  μετά και από το τελικό βήμα της ανάλυσης.

Πίνακας 5.1 Συντεταγμένες σημείων που εξετάζονται στις χρονοϊστορίες.

Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
Crown	0	84	5.69
Surface	0	84	25



Σχήμα 5.1 Τα δύο σημεία ελέγχου στην επιφάνεια και κοντά στην στέψη, στα οποία αναφέρονται οι χρονοϊστορίες.

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

$$\frac{\partial U_3}{\partial x} = \frac{U_{3,i} - U_{3,j}}{x_i - x_j} \quad \text{Εξ. 5.1}$$

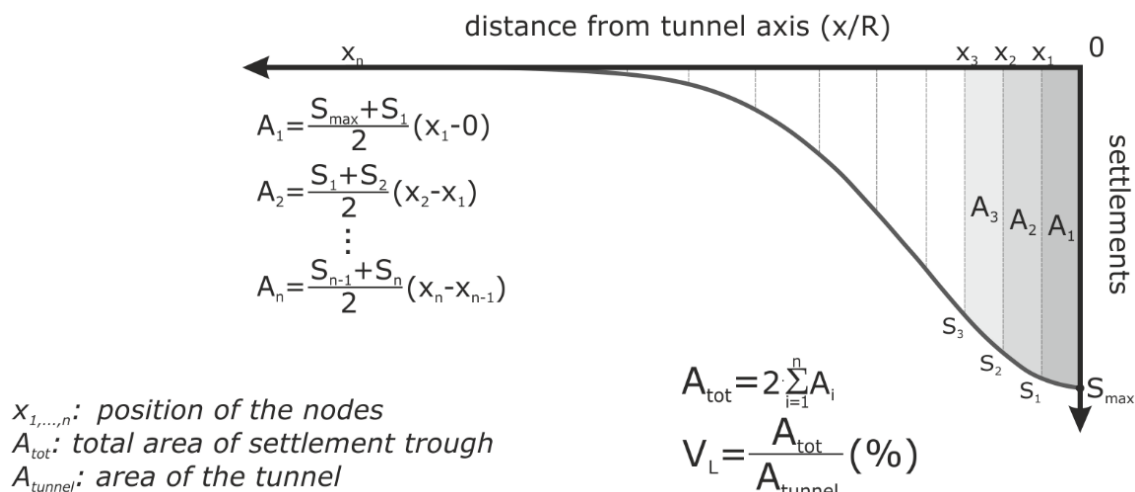
$$\frac{\partial^2 U_3}{\partial x^2} = \frac{\left(\frac{\partial U_3}{\partial x}\right)_i - \left(\frac{\partial U_3}{\partial x}\right)_j}{x_i - x_j} \quad \text{Εξ. 5.2}$$

όπου  $i$  και  $j$  διαδοχικοί κόμβοι στην επιφάνεια και  $U_3$  η κατακόρυφη μετακίνηση. Μια παρατήρηση που πρέπει να γίνει εδώ είναι ότι υπάρχει πεπερασμένος αριθμός διαφορετικών τιμών του  $i$  που μπορούν να προκύψουν με αυτή την μέθοδο, που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες  $x$  των κόμβων στην επιφάνεια του μοντέλου.

Ο υπολογισμός της απώλειας όγκου γίνεται με άθροισμα ορθογωνίων (Σχήμα 5.2), όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση

$$V_L = \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{S_i + S_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1})}{\pi R^2} \quad \text{Εξ. 5.3}$$

όπου  $S_i$  η καθιζήση του εκάστοτε κόμβου, και  $R$  η ακτίνα της εκσκαφής.



Σχήμα 5.2 Υπολογισμός της απώλειας όγκου γνωρίζοντας τις καθιζήσεις στα σημεία των κόμβων του μοντέλου.

### 5.3.1 Επίδραση των γεωτεχνικών παραμέτρων του εδάφους

Οι παράμετροι του κριτηρίου M-C επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε ένα ευρύ φάσμα εδαφικών συνθηκών. Το ίδιο βάρος,  $\gamma$ , ο λόγος Poisson,  $\nu$ , ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$  και ο συντελεστής διαπερατότητας  $k_s$  θεωρούνται σταθερά σε όλες τις αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα έγιναν αναλύσεις για οχτώ διαφορετικές εδαφικές συνθήκες με ονομασίες a έως h, και τιμές παραμέτρων όπως στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων για τα διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Soil	$K_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c$ (kPa)	$E$ (MPa)	$\psi$ (°)	$\nu$	$e$	$C_u$ (kPa)	$K_s$ (m/s)
a			20	10	22.5	3.33			74.9	
b			20	15	24.1	3.33			80.2	
c			20	20	25.7	3.33			85.6	
d	0.5	20	25	20	30.9	4.17	0.3	0.7	103.1	$10^{-8}$
e			25	30	34.1	4.17			113.6	
f			30	30	39.4	5.00			131.2	
g			30	50	45.6	5.00			152	
h			35	70	56.7	5.83			189.1	

Για να χρησιμοποιηθούν ρεαλιστικές τιμές για το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους  $E$ , γίνεται συσχέτιση του με την ισοδύναμη αστράγγιστη διατμητική αντοχή του κάθε εδάφους (Proutzopoulos 2012). Πιο συγκεκριμένα, γίνεται υπόθεση των παραμέτρων διατμητικής



αντοχής ( $c$ ,  $\varphi$ ) και της κατακόρυφης ( $\sigma'_v$ ) και της οριζόντιας ( $\sigma'_h$ ) γεωστατικής ενεργής τάσης ενός στοιχείου στον άξονα της σήραγγας. Υπολογίζεται η πρόσθετη ολική κατακόρυφη τάση που πρέπει να εφαρμοστεί για να συμβεί αστοχία σε αστράγγιστες συνθήκες. Η αναπτυσσομένη υπερπίεση πόρων υπολογίζεται μέσω του τύπου του Skempton (Εξ.5.4) θεωρώντας τιμή της παραμέτρου  $A$  ίσης με  $1/3$ .

$$\Delta\sigma_v = \frac{\sigma'_h N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} - \sigma'_v}{1 + A(N_\varphi - 1)} \quad \text{Εξ. 5.4}$$

$$N_\varphi = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{Εξ. 5.5}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $C_u$  (Εξ.5.6) και τελικώς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι ο Proutzopoulos (2012), βασισμένος στην βιβλιογραφία (Bowles 1997), υπέθεσε ότι  $E=500C_u$ , ωστόσο διαπίστωσε ότι αυτή η σχέση υπερεκτιμάει την στιφρότητα του εδάφους και τελικώς προτείνεται η χρήση της Εξ.5.7.

$$C_u = \frac{\sigma_v + \Delta\sigma_v - \sigma_h}{2} \quad \text{Εξ. 5.6}$$

$$E = 300C_u \quad \text{Εξ. 5.7}$$

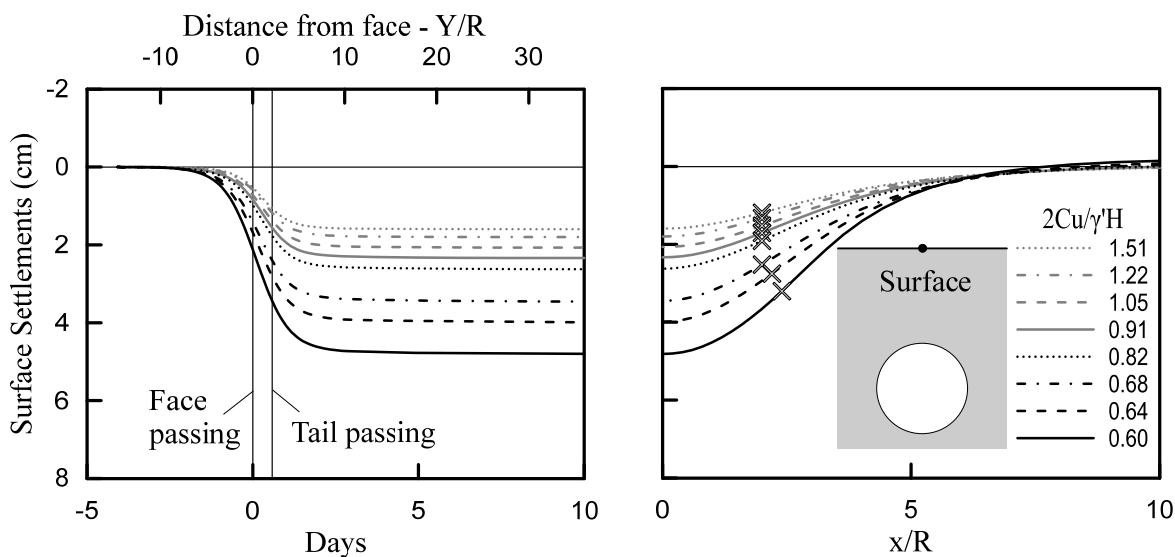
Η διαστολικότητα του εδάφους θεωρήθηκε ίση με το  $1/6$  της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους

$$\psi = \frac{1}{6}\varphi \quad \text{Εξ. 5.8}$$

Για την διερεύνηση της επίδρασης της ποιότητας του εδάφους στα αποτελέσματα, γίνεται χρήση της αδιάστατης παραμέτρου  $2C_u/\gamma'H$ . Οι Sitarenios et al. (2015) και Sitarenios et al. (2016) που κάνουν χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου, αναφέρουν ότι για τιμές  $2C_u/\gamma'H < 1$  παρατηρείται αυξανόμενη αστάθεια στο μέτωπο, ενώ για τιμές  $2C_u/\gamma'H > 1$  δεν παρατηρείται κάποια αστάθεια. Έτσι στην παρούσα διερεύνηση επιλέγονται τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου M-C στο εύρος τιμών της παραμέτρου  $2C_u/\gamma'H$  από 0.6 έως 1.5, ώστε να προσομοιωθούν τόσο ευσταθείς όσο και ασταθείς καταστάσεις..

Αρχικά έγιναν οκτώ αναλύσεις, για τους τύπους εδάφους a (κακές γεωτεχνικές συνθήκες με  $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) έως h (καλές γεωτεχνικές συνθήκες με  $2C_u/\gamma'H=1.51$ ), κρατώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος. Πιο συγκεκριμένα, στις αναλύσεις αυτές η πίεση του ενέματος είναι ίση με την γεωστατική ολική τάση στην στέψη της σήραγγας  $P_{grount}=400\text{kPa}$ , η υπερεκσκαφή και το ουραίο κενό είναι 1cm και 4cm αντίστοιχα, ενώ δεν γίνεται θεώρηση κάποιας πίεσης στο κενό λόγω διείδυσης των υπό πίεση ρευστών.

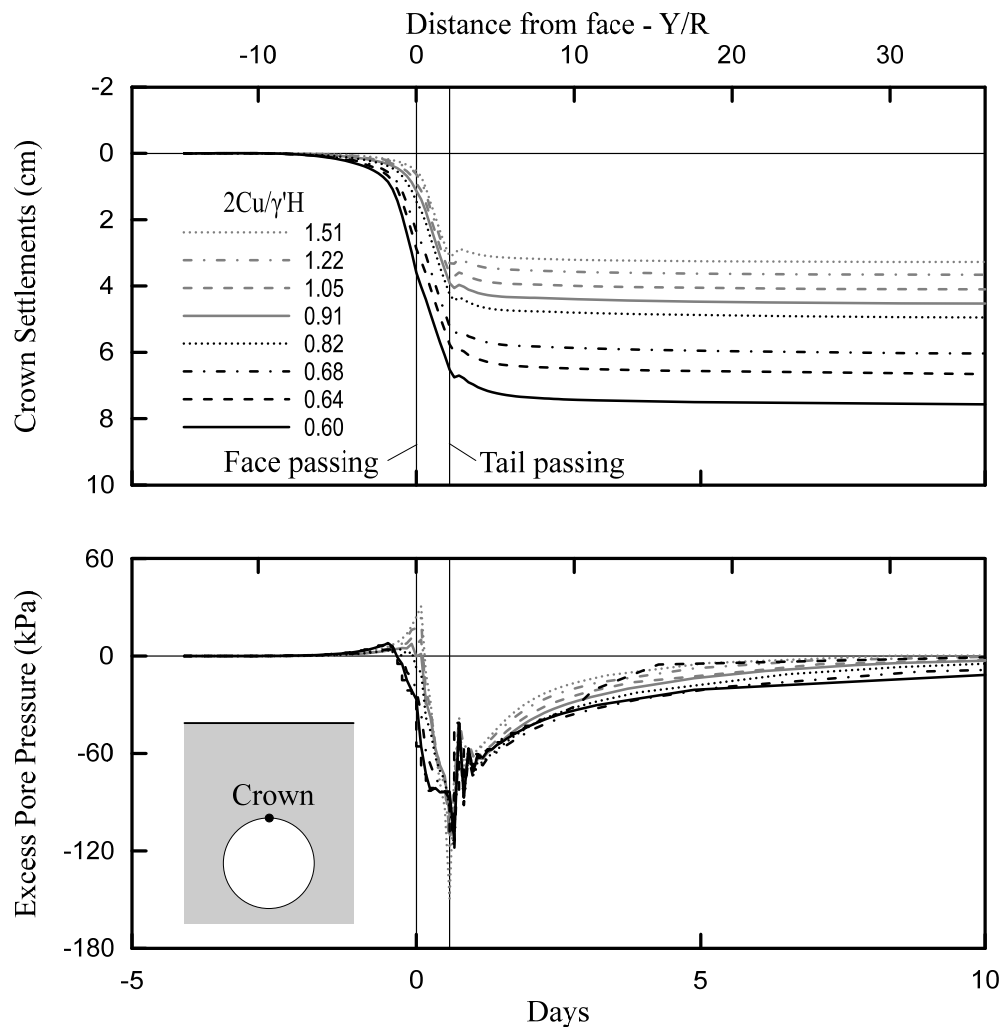
Στο Σχήμα 5.3 φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις συναρτήσει του χρόνου. Ο άξονας του χρόνου έχει τιμή μηδέν την χρονική στιγμή που περνάει το μέτωπο. Ακόμα, το εγκάρσιο προφίλ καθιζήσεων αποτελεί στιγμιότυπο για χρονική στιγμή κοντά στις 10 μέρες (τέλος διαγράμματος της χρονοϊστορίας).



Σχήμα 5.3 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά εδαφικά χαρακτηριστικά, όπου με  $\times$  συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.

Παρατηρείται σημαντική επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους στις επιφανειακές καθιζήσεις με χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες να εύνουν την ανάπτυξη μεγαλύτερων καθιζήσεων. Η επιρροή είναι εμφανής ακόμα και μπροστά από το μέτωπο σε επίπεδο προσύγκλισης. Πιο συγκεκριμένα ανεξαρτήτως ποιότητας εδάφους οι προσυγκλίσεις ξεκινάνε περίπου 45m (4.5 διαμέτρους) μπροστά από το μέτωπο. Επίσης, οι καθιζήσεις παίρνουν την τελική τους τιμή περίπου 45m (4.5 διαμέτρους) πίσω από το μέτωπο ανεξαρτήτως εδαφικών χαρακτηριστικών. Το ποσοστό των καθιζήσεων λόγω προσυγκλίσεων ως προς τις τελικές καθιζήσεις φαίνεται να επηρεάζεται από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ξεκινώντας από 45% των τελικών καθιζήσεων για τις χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες και πέφτοντας στο 35% των τελικών καθιζήσεων για τις ευνοϊκότερες γεωτεχνικές συνθήκες. Κοιτώντας τις καθιζήσεις στην περιοχή της ασπίδας, γίνεται η παρατήρηση αντίστροφης επιρροής των γεωτεχνικών συνθηκών. Για χαμηλής ποιότητας έδαφος, στην περιοχή της ασπίδας συμβαίνουν το 25% των τελικών καθιζήσεων, ενώ αυξάνοντας το  $C_u$  φτάνουν έως και 35% των τελικών καθιζήσεων. Το υπόλοιπο ποσοστό των καθιζήσεων, αφού δηλαδή περάσει το μηχάνημα, φαίνεται να μην επηρεάζεται από τις γεωτεχνικές συνθήκες και είναι σταθερό γύρω στο 30% των τελικών καθιζήσεων. Το σημείο καμπής φαίνεται να μην επηρεάζεται, με μόνη διαφοροποίηση για πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες ( $2C_u/\gamma'H \leq 0.64$ ), κάτι που θα εξεταστεί και στην συνέχεια.

Όσον αφορά στην στέψη της σήραγγας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4 η χρονοϊστορία των κατακόρυφων μετακινήσεων και των πιέσεων πόρων. Ομοίως, όπως και στην επιφάνεια, παρατηρείται σημαντική επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της σήραγγας. Η μεγάλη διαφορά στις κατακόρυφες μετακινήσεις για καλές και κακές γεωτεχνικές συνθήκες εντοπίζεται στις προσυγκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, για το έδαφος a ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) παρατηρούνται κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω προσυγκλίσεων 3.6cm, ενώ για το έδαφος h ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) μόλις 0.5cm. Αντιθέτως, οι καμπύλες της χρονοϊστορίας στην περιοχή της ασπίδας φαίνονται να είναι σχεδόν παράλληλες, με τις κατακόρυφες μετακινήσεις σε αυτή την περιοχή να κυμαίνονται, για όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες, περίπου στα 3cm. Να σημειωθεί ότι 3cm είναι η διαφορά στην διάμετρο της ασπίδας λόγω κωνικότητας (1cm υπερεκκαφή και 4cm ουραίο κενό).



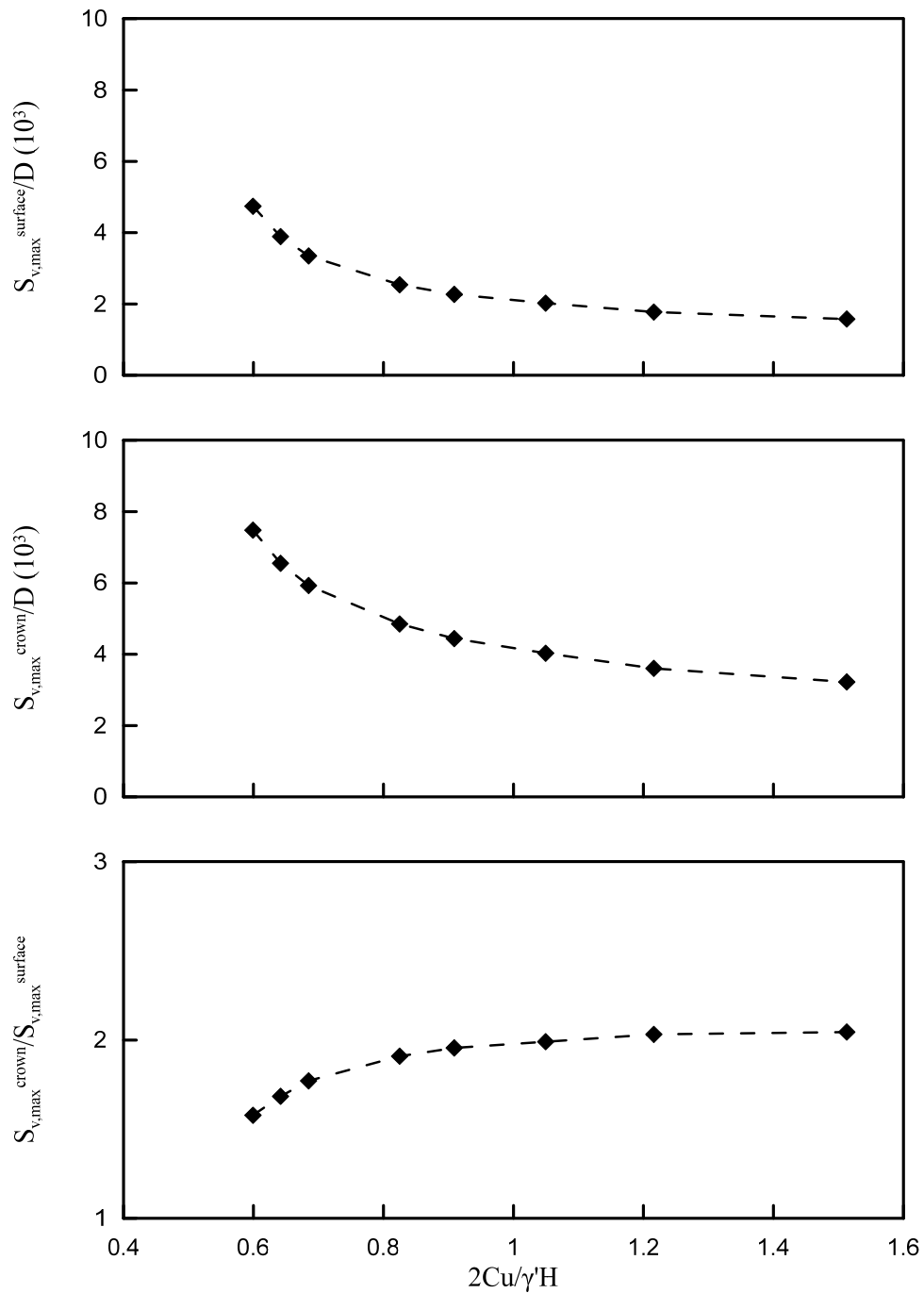
Σχήμα 5.4 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, για τα διαφορετικά εδαφικά χαρακτηριστικά.

Αυτό έχει ως συνέπεια το ποσοστό των κατακόρυφων μετακινήσεων που λαμβάνει χώρα στην περιοχή της ασπίδας ως προς τις ολικές, να ανεβαίνει από 40% στις κακές γεωτεχνικές συνθήκες σε 80% στις καλές γεωτεχνικές συνθήκες. Συνεπώς το μέγεθος των κατακόρυφων μετακινήσεων στην περιοχή της ασπίδας είναι ανεξάρτητο από τις γεωτεχνικές συνθήκες και καθορίζεται μόνο από την κωνικότητα της ασπίδας. Αυτό έρχεται και σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Litsas et al. (2015) για το κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους. Συνεπώς, η κωνικότητα της ασπίδας παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στις καθιζήσεις (βλέπε ενότητα 5.3.3). Επιπρόσθετα, παρατηρείται μία ελαφριά ανύψωση μετά το πέρασμα της ουράς του μηχανήματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της πίεσης του ενέματος στιγμαία. Η ανύψωση έχει ίδιο μέγεθος σε όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες.

Παρατηρώντας τις πιέσεις των πόρων φαίνεται μία αρχική αύξηση που παίρνει μέγιστες τιμές την στιγμή που περνάει το μέτωπο ενώ μετά παρατηρείται μια ξαφνική πτώση και ανάπτυξη αρνητικών υπερπίεσεων (υποπίεσεων) πόρων που σταδιακά εκτονώνονται και επανέρχονται στην κατάσταση ισορροπίας. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k_s$ ) του εξεταζόμενου εδαφικού προφίλ, που οδηγεί σε αστράγγιστες συνθήκες εκσκαφής. Όταν το έδαφος είναι κορεσμένο, για να παραμορφωθεί ένα στοιχείο πρέπει να πάρει ή να διώξει νερό. Η χαμηλή περατότητα όμως εμποδίζει την γρήγορη κίνηση του νερού δια μέσου των πόρων του εδάφους, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υπερπίεσης ή υποπίεσης ανάλογα με την αλλαγή της εντατικής κατάστασης. Έτσι, η αύξηση της πίεση του νερού των πόρων στην στέψη της σήραγγας οφείλεται στην πίεση που ασκείται στο μέτωπο, ενώ η πτώση οφείλεται στην αποτόνωση λόγω του κενού μεταξύ ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους, που οδηγεί το έδαφος να διογκωθεί. Μια ξαφνική αύξηση της πίεσης πόρων μόλις περνάει η ουρά του μηχανήματος οφείλεται στις πίεση του ενέματος. Η αύξηση της πίεσης πόρων κοντά στο μέτωπο, λόγω πίεσης μετώπου, είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές του  $C_u$  (καλές γεωτεχνικές συνθήκες) με μέγιστη τιμή για το έδαφος h ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) τα 30kPa, ενώ για τις χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες (έδαφος a με  $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) τα 8kPa. Επίσης η υποπίεση, που οφείλεται στην τάση για διόγκωση του εδάφους στην περιοχή της ασπίδας λόγω υπερεκσκαφής και ουραίου κενού, είναι μεγαλύτερη για μικρές τιμές του  $C_u$  (κακές γεωτεχνικές συνθήκες). Συνεπώς, η εκτόνωση αυτής της υποπίεσης που γίνεται σταδιακά λόγω στερεοποίησης, για τις καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες θέλει περίπου 8μέρες για να εκτονωθεί ενώ για τις χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες θέλει περίπου 50μέρες.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στην επιφάνεια και στην στέψη, ανηγμένες ως προς την διάμετρο, καθώς και ο λόγος τους, συναρτήσει των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών. Παρατηρείται η επιρροή που έχει στις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις η ποιότητα του εδάφους, όπου όπως αναμενόταν όσο καλύτερεύουν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τόσο μειώνονται και οι παρατηρούμενες μετακινήσεις. Η αύξηση των κατακόρυφων μετακινήσεων δεν έχει γραμμική συσχέτιση με την αντοχή του εδάφους, αλλά η τάση για αύξηση ολοένα και αυξάνεται με την μείωση του  $C_u$ . Πιο συγκεκριμένα, από το έδαφος h ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) στο έδαφος f ( $2C_u/\gamma'H=1.05$ ) η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στην επιφάνεια και στην στέψη

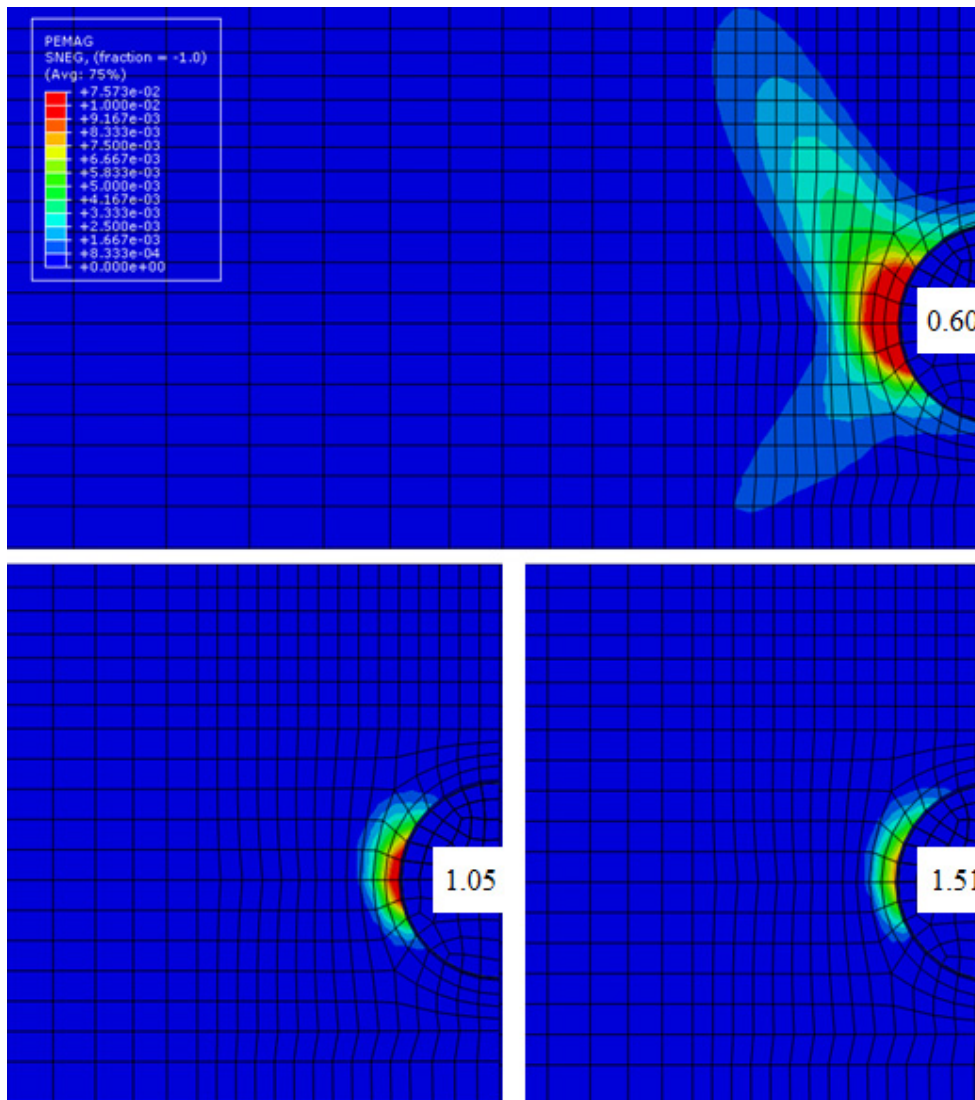
αυξάνεται περίπου κατά 25%. Για ίδια μείωση της αντοχής από το έδαφος f ( $2C_u/\gamma'H=1.05$ ) στο έδαφος α ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) οι κατακόρυφες μετακινήσεις αυξάνονται κατά 85% στην επιφάνεια και κατά 135% στην στέψη.



Σχήμα 5.5 Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

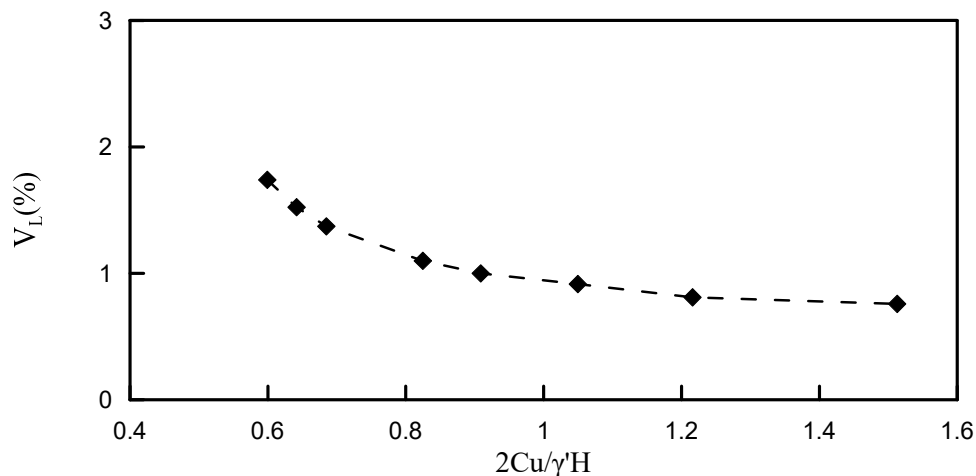
Η τάση για αστάθεια που παρατηρείται για τιμές του αδιάστατου δείκτη αντοχής  $2C_u/\gamma'H \leq 1$  έρχεται σε συμφωνία με βιβλιογραφικές αναφορές (Sitarenios et al. 2015; Sitarenios et al. 2016). Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι ο λόγος της μέγιστης καθίζησης της στέψης προς αυτή της επιφάνειας, παραμένει σταθερός για τις καλές εδαφικές συνθήκες ( $2C_u/\gamma'H > 1$ ), ενώ αρχίζει να αποκλίνει για τιμές  $2C_u/\gamma'H < 1$  και φαίνεται να έχει μία τάση να προσεγγίσει την τιμή 1. Αυτό θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως αλλαγή του μηχανισμού των μετακινήσεων λόγω ανάπτυξης πλαστικών ζωνών και κατά κάποιο τρόπο, τάση της εδαφικής μάζας πάνω από την σήραγγα να καθιζάνει ως ένα ενιαίο μπλοκ. Για αυτό τον λόγο εξετάζονται οι πλαστικές ζώνες που δημιουργούνται για τα εδάφη a, f και h που αντιστοιχούν σε δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  ίσο με 0.60, 1.05 και 1.51 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι πλαστικές ζώνες γύρω από την σήραγγα. Παρατηρείται ότι όντως για τις καλές εδαφικές συνθήκες υπάρχει περιορισμένη έκταση των πλαστικών ζωνών σε σχέση με το έδαφος a. Για  $2C_u/\gamma'H > 1$ , οι συνθήκες μπορούν να χαρακτηριστούν ευνοϊκές καθώς οι πλαστικές ζώνες περιορίζονται σημαντικά. Στις χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες που μελετήθηκαν, φαίνεται οι πλαστικές ζώνες να δημιουργούν μια περιοχή υπό γωνία  $35^\circ$  ως προς την κατακόρυφο (Σχήμα 5.6 και  $2C_u/\gamma'H = 0.60$ ), δηλαδή γωνία  $45^\circ - \phi/2$ , όπου  $\phi$  για το έδαφος a είναι  $20^\circ$ . Εικάζεται ότι για πολύ κακές γεωτεχνικές συνθήκες, αν αυτή η περιοχή φτάσει μέχρι την επιφάνεια ο λόγος των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων σε επιφάνεια και στέψη θα πλησιάσει την τιμή 1.



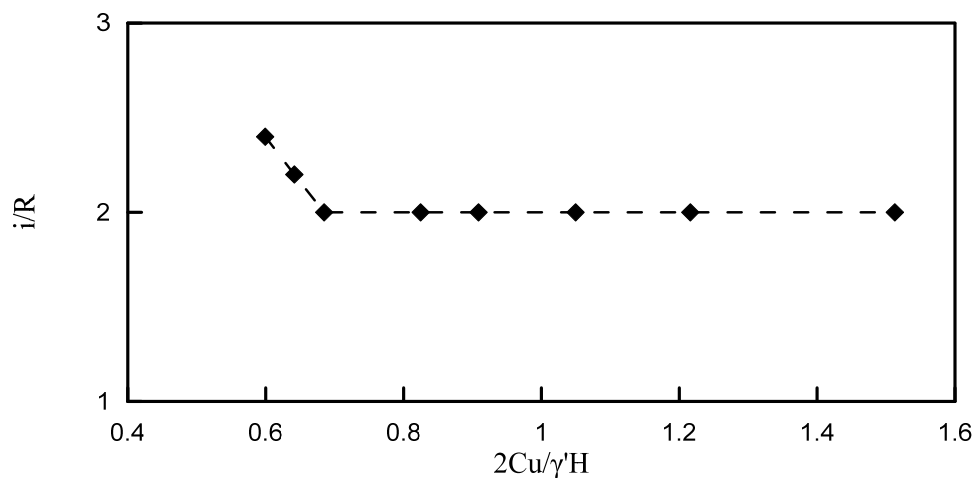
Σχήμα 5.6 Πλαστικές ζώνες σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας, για τα εδάφη a, f και h αντίστοιχα (στο σχήμα φαίνονται οι τιμές του δείκτη  $2C_u/\gamma'H$ ).

Επιπρόσθετα υπολογίζεται η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  για τα διάφορα εδαφικά χαρακτηριστικά που διερευνήθηκαν. Προκύπτει (Σχήμα 5.7) ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η απώλεια όγκου μειώνεται με την αύξησή της αντοχής του εδάφους από  $V_L=1.74\%$  για  $2C_u/\gamma'H=0.60$  σε  $V_L=0.76\%$  για  $2C_u/\gamma'H=1.51$ . Ούτε η απώλεια όγκου φαίνεται να σχετίζεται γραμμικά με το  $C_u$ , αλλά η τάση της για αύξηση αυξάνεται με την μείωση του  $C_u$ . Για μείωση του αδιάστατου δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  από 1.51 σε 1.05 (για  $2C_u/\gamma'H > 1$  θεωρούνται ευνοϊκές γεωτεχνικές συνθήκες) η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  αυξάνει μόνο κατά 0.16%, ενώ για ίδια μείωση του αδιάστατου δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  από 1.05 σε 0.60 η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  αυξάνει κατά 0.82%, αύξηση πάνω από 5 φορές μεγαλύτερη.



Σχήμα 5.7 Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους. Φαίνεται να είναι σταθερό σχεδόν για όλα τα εδαφικά προφίλ. Διαφοροποιείται μόνο στις πολύ χαμηλές ποιότητες που πιθανώς να ευθύνεται όπως σχολιάστηκε προηγουμένως η ανάπτυξη πλαστικών ζωνών που μεταβάλλουν τον μηχανισμό των μετακινήσεων.



Σχήμα 5.8 Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

### 5.3.2 Επίδραση της πίεση του ενέματος

Στα πλαίσια της παρούσας παραμετρικής μελέτης, διερευνήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της πίεσης ενεμάτωσης. Υπενθυμίζεται ότι η πίεση αυτή αναφέρεται στην αρχική ιστροπική τάση που εισάγεται στα στοιχεία του ενέματος στην αρχική τους κατάσταση για να προσομοιωθεί η



τάση εισπίεσης του ενέματος στο ουραίο κενό. Για την ευκολότερη μελέτη της επιρροής της πίεσης ενεμάτωσης εισάγεται η αδιάστατη παράμετρος  $B$ , η οποία ισούται με τον λόγο της πίεσης του ενέματος  $P_{grout}$  προς την γεωστατική ολική τάση  $P_{soil}$  στην στέψη της σήραγγας. Υπολογίζεται με βάση τις Εξ.5.9 και Εξ.5.10

$$B = \frac{P_{grout}}{P_{soil}^{crown}} \quad \text{Εξ. 5.9}$$

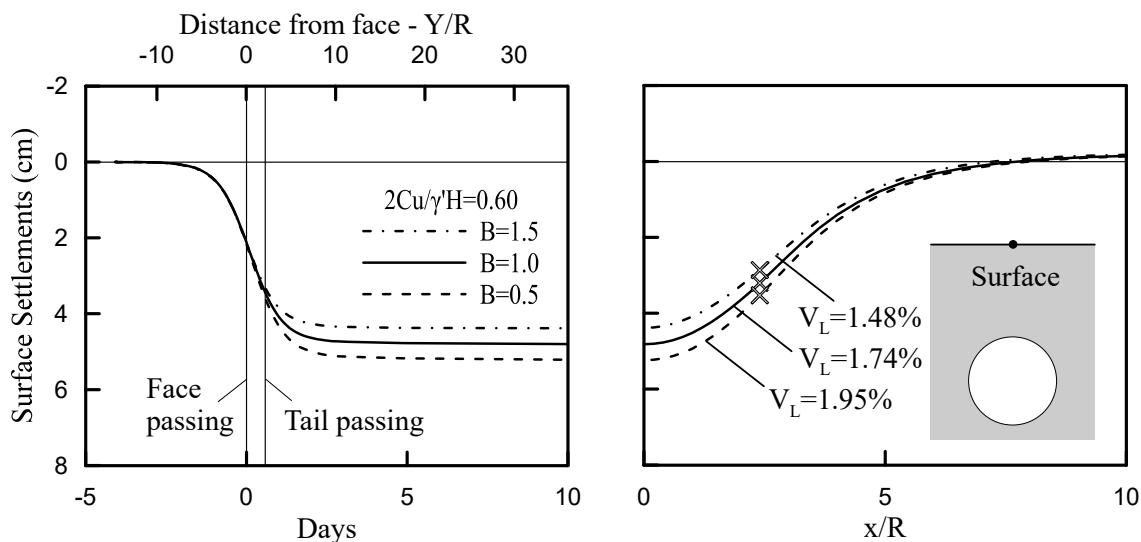
$$P_{soil}^{crown} = \gamma H_{crown} \quad \text{Εξ. 5.10}$$

όπου  $H_{crown}$  η απόσταση της στέψης της σήραγγας από την επιφάνεια. Η παραμετρική διερεύνηση περιέλαβε τιμές της παραμέτρου  $B$  ίσες με 0.5, 1.0 και 1.5 συνδυαζόμενες με τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ (εδάφη a,b και f, που αντιστοιχούν σε δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  ίσο με 0.60, 0.64 και 1.05). Η επιλογή των συγκεκριμένων εδαφικών προφίλ έγινε παίρνοντας υπ' όψιν ότι για μικρότερες τιμές του δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  ο ρυθμός αύξησης των καθιζήσεων αυξάνει (Σχήμα 5.5).

Αρχικά θα παρουσιαστούν για κάθε ποιότητα εδάφους ξεχωριστά οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων και των πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, καθώς και η χρονοϊστορία των καθιζήσεων και το εγκάρσιο στον άξονα προφίλ καθιζήσεων στην επιφάνεια. Έπειτα, θα παρουσιαστούν διαγράμματα με τις μέγιστες καθιζήσεις  $S_{v,max}$ , την απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  και την απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα  $i$ , με την προσθήκη των αποτελεσμάτων της παραμετρικής διερεύνησης που αφορά στη πίεση του ενέματος και θα γίνει σύγκριση.

### 5.3.2.1 Τύπος εδάφους a – $2C_u/\gamma'H=0.60$

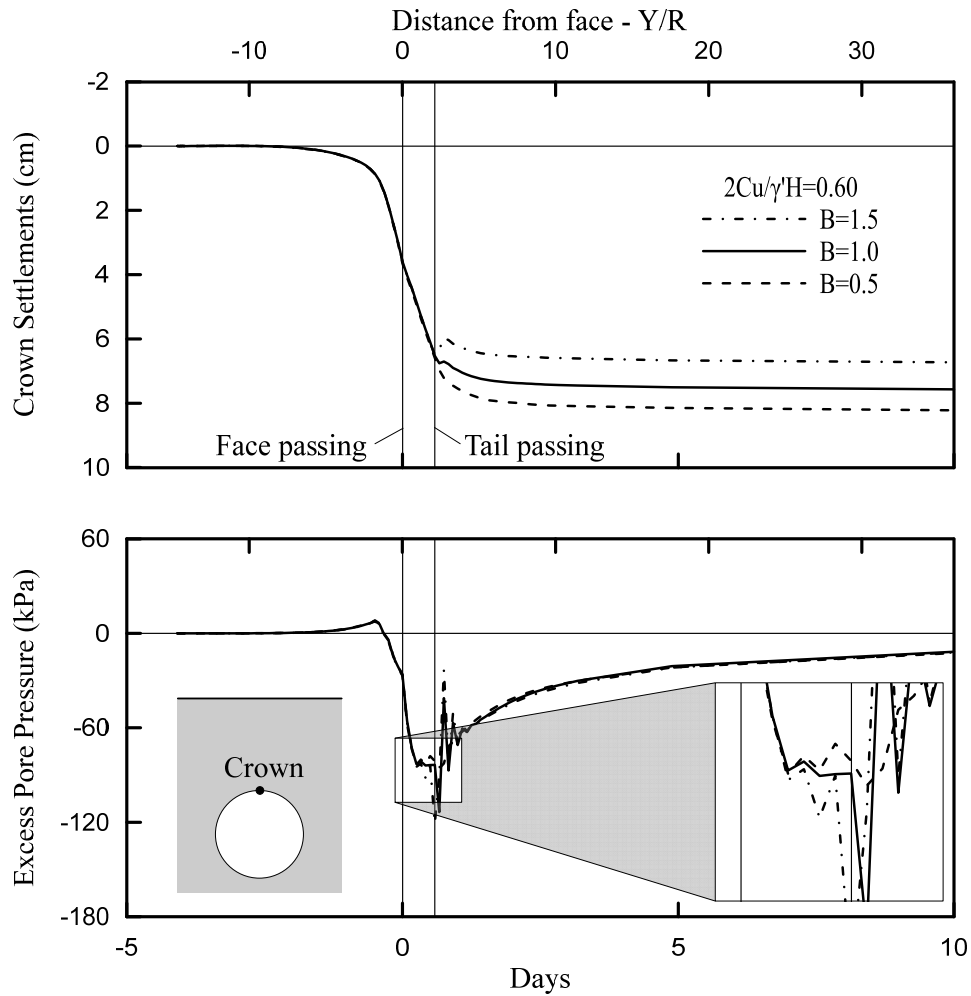
Παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση στην χρονοϊστορία των επιφανειακών καθιζήσεων (Σχήμα 5.9) για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αρχίζει την στιγμή που περνάει η ουρά του μηχανήματος. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς το ένεμα εισάγεται από την ουρά του μηχανήματος. Παρατηρείται μια διαφοροποίηση στις τελικές καθιζήσεις, η οποία όμως είναι μετρίου μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, για αύξηση 50% της πίεσης ενέματος ( $B=1.5$ ) οι ολικές καθιζήσεις μειώνονται κατά περίπου 10%, ενώ για μείωση 50% της πίεσης ενέματος ( $B=0.5$ ) οι ολικές καθιζήσεις αυξάνουν κατά περίπου 10%. Το μέγεθος της επιρροής δικαιολογείται καθώς όπως διαπιστώθηκε στην ενότητα 5.3.1, για  $B=1.0$  και ανεξαρτήτως γεωτεχνικών χαρακτηριστικών περίπου το 70% των καθιζήσεων έχει λάβει χώρα πριν την εισπίεση του ενέματος.



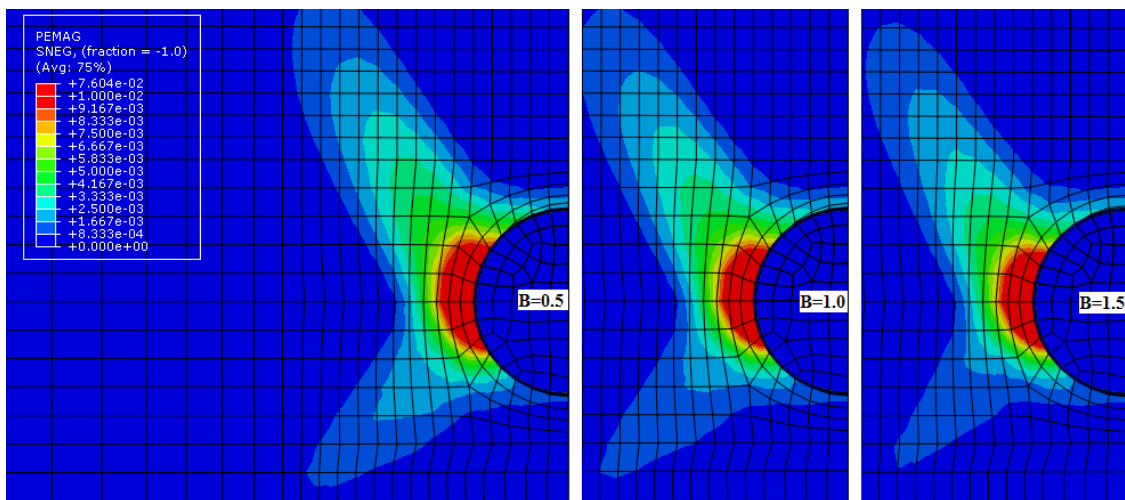
Σχήμα 5.9 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος  $B$  για το έδαφος  $a$ , όπου με  $\times$  συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.

Όσον αφορά στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη που φαίνονται στο Σχήμα 5.10, εκτός του ότι παρατηρείται η πρώτη διαφοροποίηση την στιγμή που περνάει η ουρά του μηχανήματος, φαίνεται πώς όσο αυξάνει η πίεση του ενέματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η στιγμιαία ανύψωση την στιγμή της εισπίεσης, ενώ στην περίπτωση  $B=0.5$  η παρατηρούμενη ανύψωση είναι αμελητέα. Το μέγεθος της επιρροής στις κατακόρυφες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερο στην στέψη, κοντά δηλαδή στην περιοχή εφαρμογή της πίεσης, από ότι στην επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη είναι περίπου  $\pm 8\text{mm}$  ενώ στην επιφάνεια είναι  $\pm 4.5\text{mm}$ . Η ποσοστιαία όμως μεταβολή ως προς τις ολικές κατακόρυφες μετατοπίσεις στη στέψη της σήραγγας είναι  $\pm 10\%$ , ίδια δηλαδή με την μεταβολή στην επιφάνεια. Συνεπώς, από αυτό συμπεραίνεται ότι η μεταβολή στην πίεση ενέματος δεν μεταβάλλει τον λόγο των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων σε επιφάνεια και στέψη. Η πίεση των πόρων φαίνεται να μην επηρεάζεται από την μεταβολή της πίεσης ενέματος. Η μόνη μεταβολή που παρατηρείται είναι μία στιγμιαία λίγο μεγαλύτερη υποπίεση λίγο μπροστά από το σημείο της εισπίεσης ενέματος. Αυτό μπορεί ίσως να αποδοθεί σε τάση για διόγκωση του εδάφους μπροστά από την ουρά του μηχανήματος, που συνδέεται με τις μετακινήσεις που προκαλούνται από την εισπίεση του ενέματος.

Τέλος, δεν παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση στις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.11). Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων έχει λάβει χώρα πριν την εισπίεση του ενέματος



Σχήμα 5.10 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέγη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος  $B$ , για το έδαφος  $a$ .

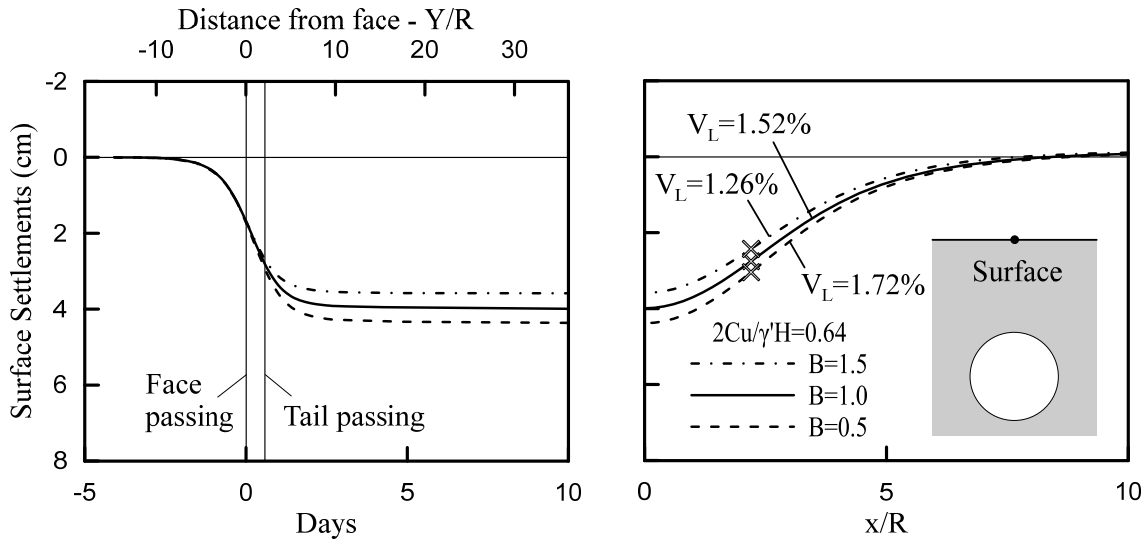


Σχήμα 5.11 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος  $a$ .

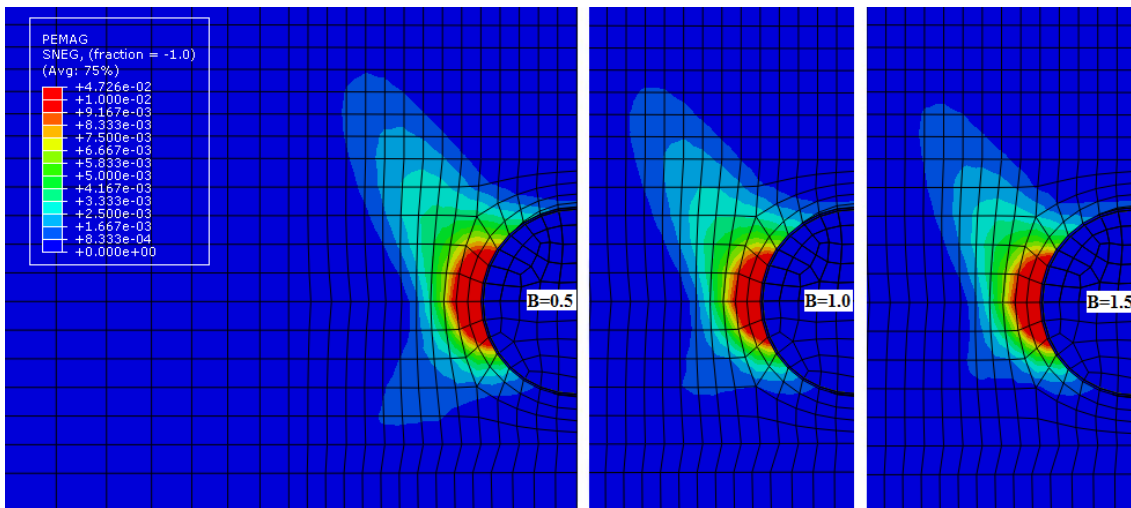
5.3.2.2 Τύπος εδάφους b –  $2C_u/\gamma'H=0.64$

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν και για το έδαφος b είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στην ενότητα 5.3.2.1 για το έδαφος a. Συνεπώς, εδώ δεν θα γίνει ξανά αναλυτικός σχολιασμός των σχημάτων, αλλά θα παρουσιαστούν οι παρατηρήσεις επιγραμματικά.

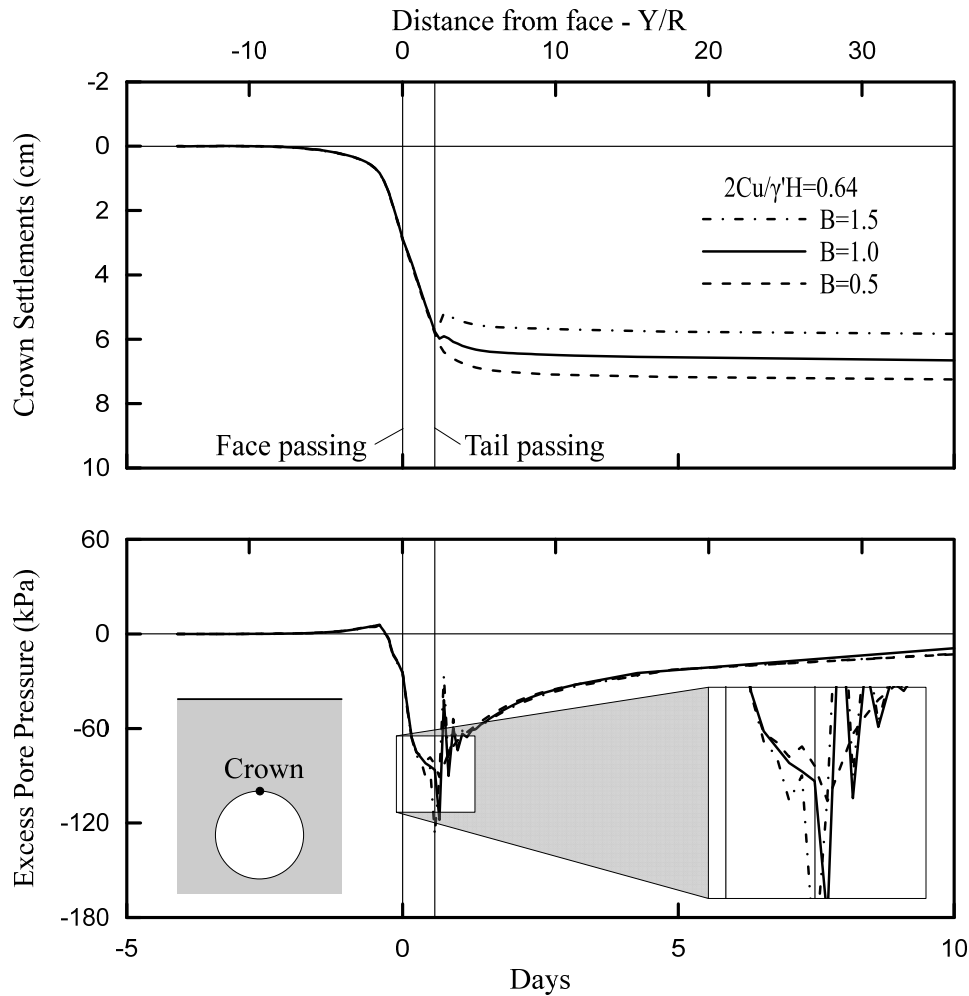
Παρατηρείται μέτρια επιρροή στις κατακόρυφες μετακινήσεις ( $\pm 10\%$ ) και στην επιφάνεια και στην στέψη (Σχήμα 5.12 και Σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.12 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B για το έδαφος b, όπου με × συμβολίζεται το σημείο καμψής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 5.13 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος b.



Σχήμα 5.14 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος  $B$ , για το έδαφος b.

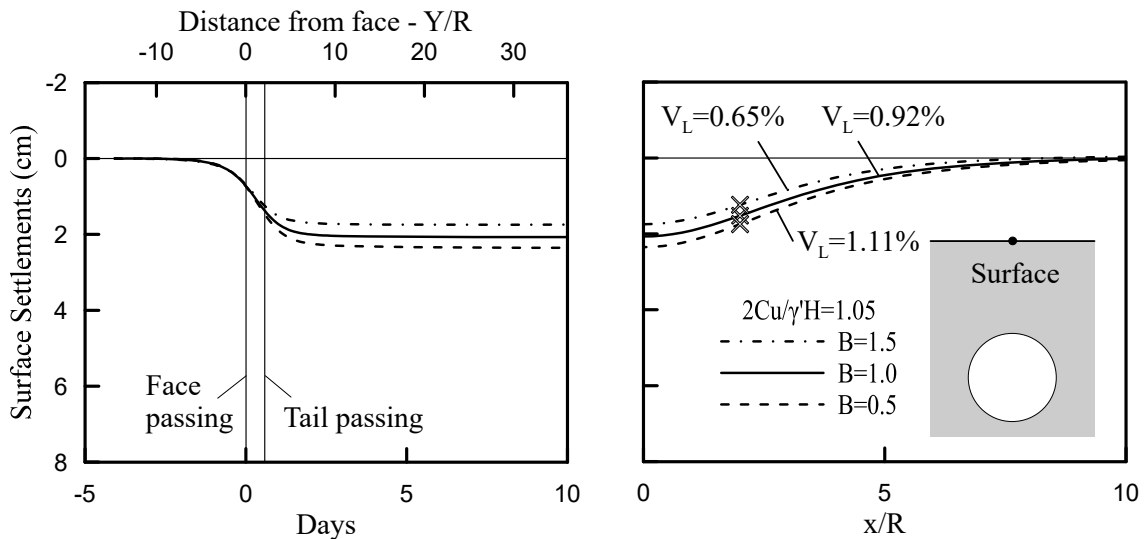
Επίσης, δεν φαίνεται να επηρεάζονται οι πιέσεις των πόρων, εκτός από λίγο μπροστά από το σημείο της εισπίεσης, όπου για τις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη  $B$  στιγμιαία αναπτύσσεται μεγαλύτερη (κατ' απόλυτη τιμή) υποπίεση. Μικρή είναι η επιρροή και για τις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.13).

### 5.3.2.3 Τύπος εδάφους f – $2C_u/\gamma'H=1.05$

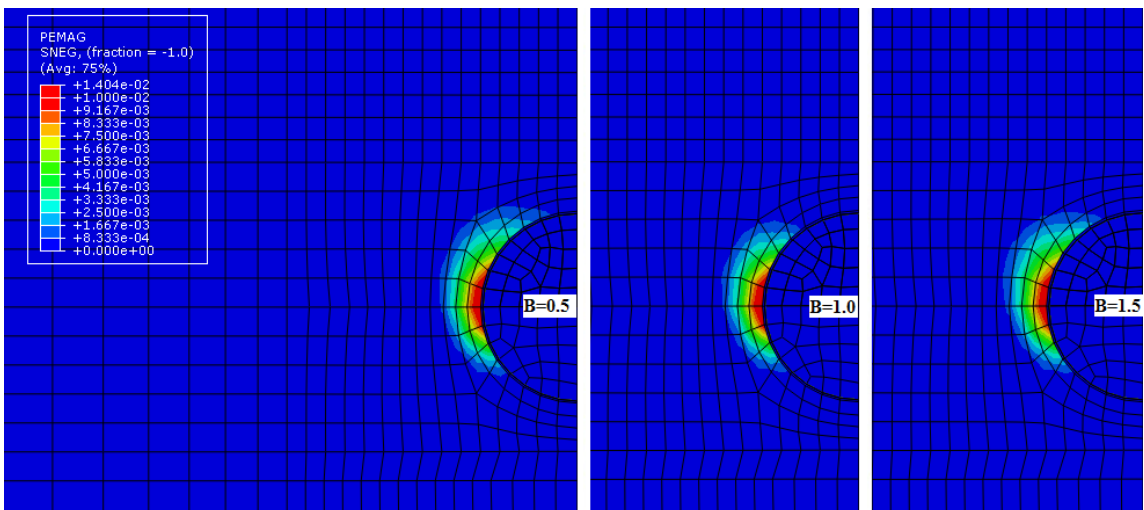
Ομοίως και για το έδαφος f, οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στην ενότητα 5.3.2.1 για το έδαφος a. Συνεπώς, εδώ δεν θα γίνει ξανά αναλυτικός σχολιασμός των σχημάτων, αλλά θα παρουσιαστούν οι παρατηρήσεις επιγραμματικά.

Παρατηρείται μέτρια μεταβολή στις κατακόρυφες μετακινήσεις (περίπου  $\pm 15\%$ ) λίγο μεγαλύτερη από ότι στα εδάφη a και b (περίπου  $\pm 10\%$  και για τα δύο), και στην επιφάνεια και στην στέψη (Σχήμα 5.15 και Σχήμα 5.17). Επίσης, δεν φαίνεται να επηρεάζονται οι πιέσεις των

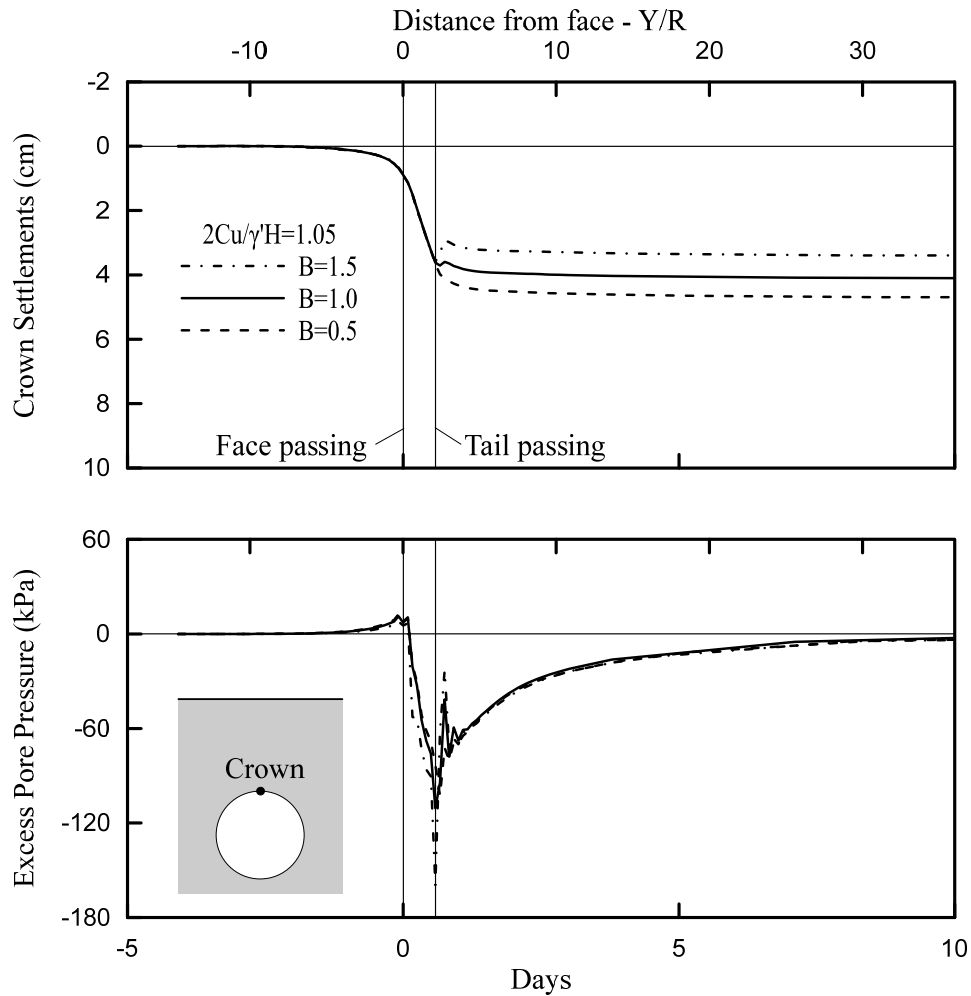
πόρων, εκτός από λίγο μπροστά από το σημείο της εισπίεσης, όπου για τις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη B στιγμιαία αναπτύσσεται μεγαλύτερη (κατ' απόλυτη τιμή) υποπίεση. Η έκταση αυτής της μεταβολής φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερη από ότι στα εδάφη με κακά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (a και b, με  $2C_u/\gamma'H=0.60$  και  $0.64$  αντίστοιχα), καθώς στο έδαφος f ( $2C_u/\gamma'H=1.05$ ) η διαταραχή στις πιέσεις φτάνει μέχρι σχεδόν και το μέτωπο. Μικρή είναι η επιρροή της πίεσης ενέματος και στις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.16)



Σχήμα 5.15 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος B για το έδαφος f, όπου με × συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.



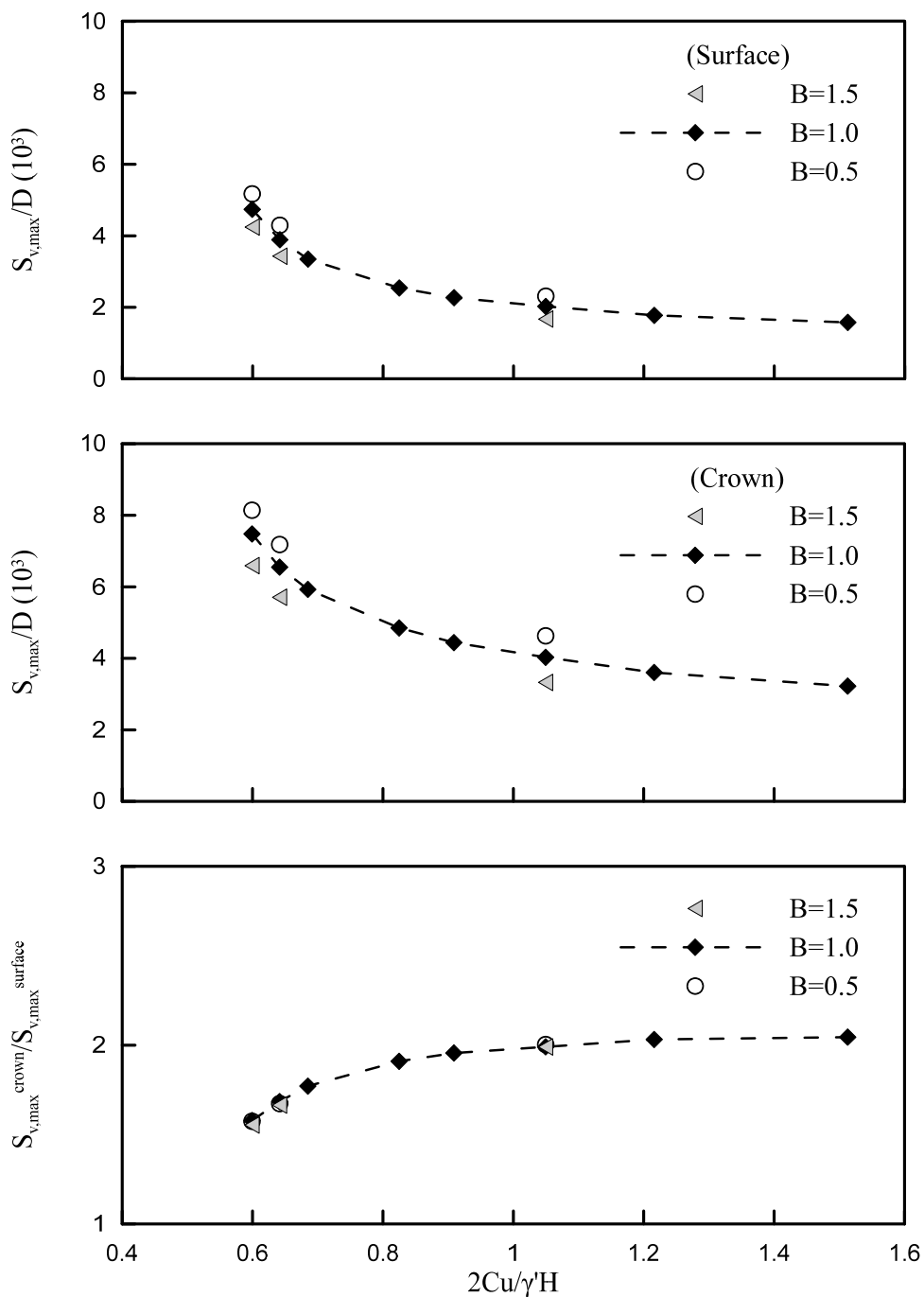
Σχήμα 5.16 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια πίεσης ενέματος στο έδαφος f.



Σχήμα 5.17 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικές τιμές του δείκτη πίεσης ενέματος  $B$ , για το έδαφος  $f$ .

#### 5.3.2.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα για την επιρροή της πίεσης ενέματος

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (Σχήμα 5.18) προκύπτει μεγαλύτερη επιρροή της πίεσης ενέματος στην στέψη, δηλαδή κοντά στην περιοχή εφαρμογής της πίεσης, και μικρότερη επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις.

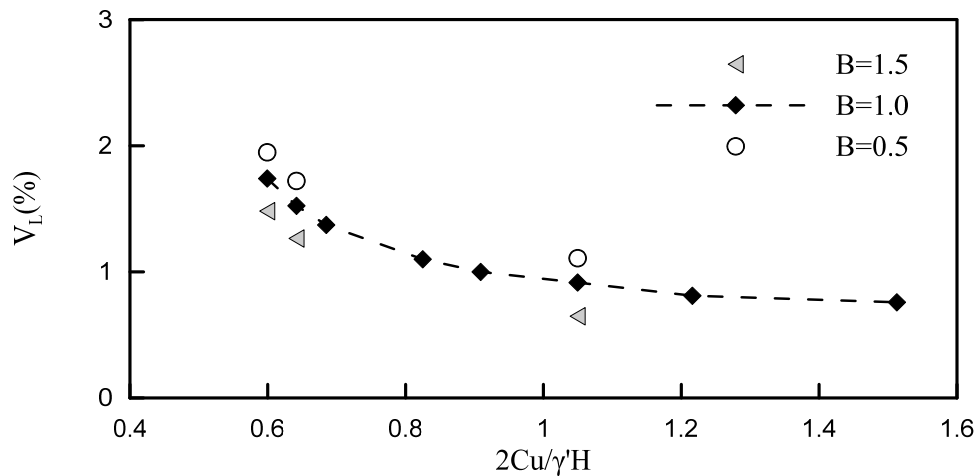


Σχήμα 5.18 Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

Η ποσοστιαία μεταβολή όμως είναι η ίδια για επιφάνεια και στέψη ( $\pm 10\%$  για  $2C_u/\gamma'H=0.60$  &  $0.64$  και  $\pm 15\%$  για  $2C_u/\gamma'H=1.05$ ). Συνεπώς, ο λόγος της μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια προς την μέγιστη καθίζηση στην στέψη παραμένει σταθερός (Σχήμα 5.18).

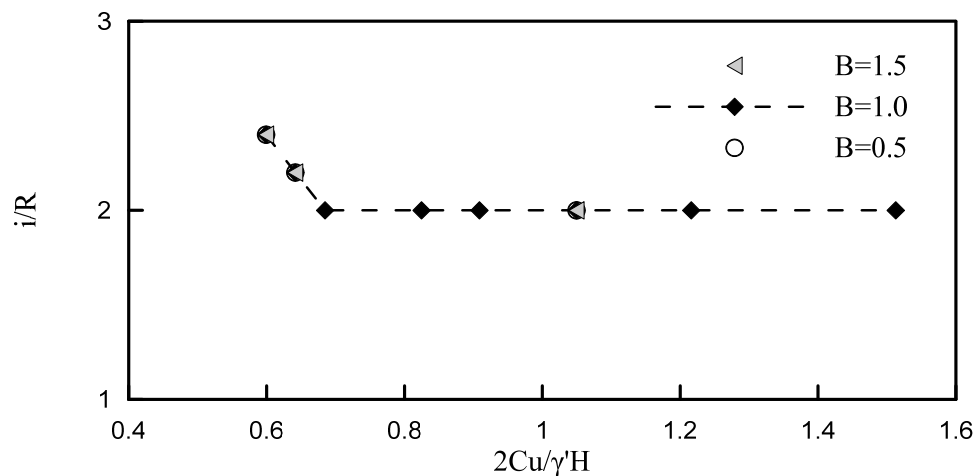


Όσον αφορά την απώλεια όγκου  $V_L(\%)$ , που υπολογίζεται από το εγκάρσιο προφίλ καθιζήσεων (Σχήμα 5.19), παρατηρείται σημαντική επίδραση της πίεσης του ενέματος. Για δείκτη πίεσης ενέματος  $B=1.5$  παρατηρείται μείωση της απώλειας όγκου κατά 0.26~0.27%, ενώ για δείκτη πίεσης ενέματος  $B=0.5$  παρατηρείται αύξηση της απώλειας όγκου κατά 0.19~0.21%. Δεν επηρεάζουν συνεπώς οι γεωτεχνικές συνθήκες, το μέγεθος της μεταβολής της απώλειας όγκου λόγω μεταβολής της πίεσης ενέματος.



Σχήμα 5.19 Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

Τέλος, για την απόσταση του σημείου καμπής  $i$  του εγκάρσιου προφίλ καθιζήσεων από τον άξονα της σήραγγας (Σχήμα 5.20), το συμπέρασμα είναι ότι δεν υπάρχει καμία επιρροή από την μεταβολή της πίεσης του ενέματος



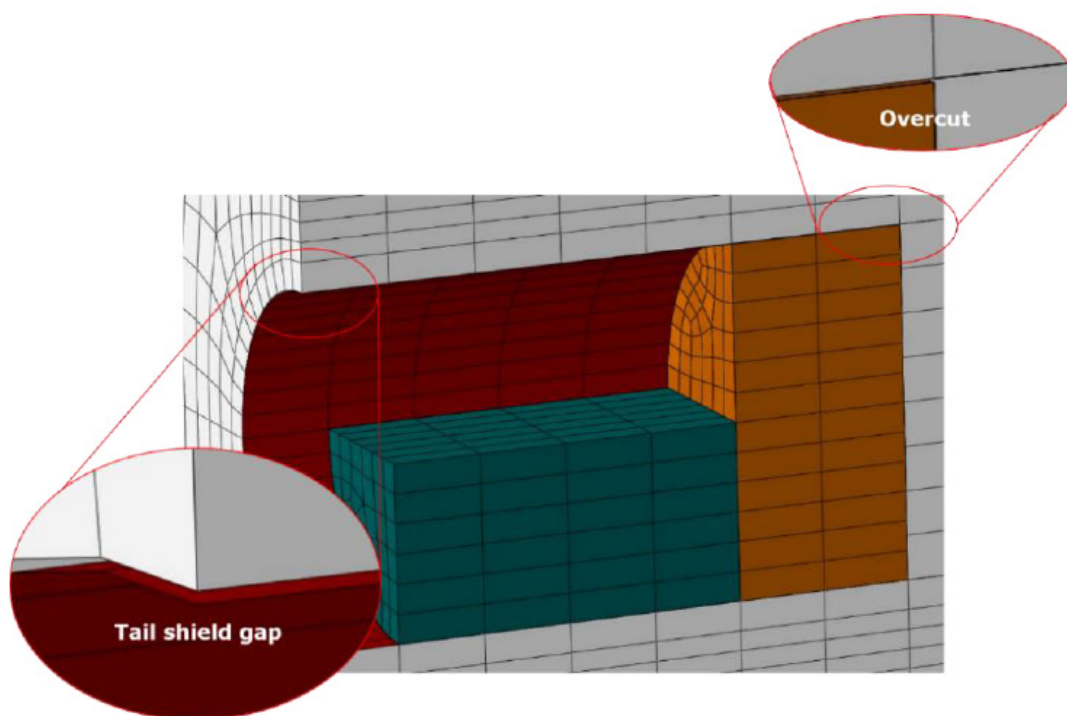
Σχήμα 5.20 Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

### 5.3.3 Επίδραση του ουραίου κενού (Gap) και της υπερεκκαφής

Αντίστοιχα και για το κενό, εξετάζονται πάλι τρεις περιπτώσεις (Πίνακας 5.3). Η μία περίπτωση είναι για υπερεκκαφή 1cm και Gap=2cm (δηλαδή το κενό αυξάνεται λόγω της κωνικότητας κατά 1cm), η δεύτερη για υπερεκκαφή 1cm και Gap=4cm (δηλαδή το κενό αυξάνεται λόγω της κωνικότητας κατά 3cm) και η τρίτη για υπερεκκαφή 2cm και Gap=6cm (δηλαδή το κενό αυξάνεται λόγω της κωνικότητας κατά 4cm). Και εδώ, η διερεύνηση γίνεται για εδαφικά χαρακτηριστικά  $a, b$  και  $f$  που αντιστοιχούν σε δείκτη  $2C_u/\gamma \cdot H$  ίσο με 0.60, 0.64 και 1.05 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3 Περιπτώσεις που διερευνώνται όσον αφορά το μέγεθος του ουραίου κενού του μηχανήματος.

Overcut (cm)	Tail Shield Gap (cm)
1	2
1	4
2	6

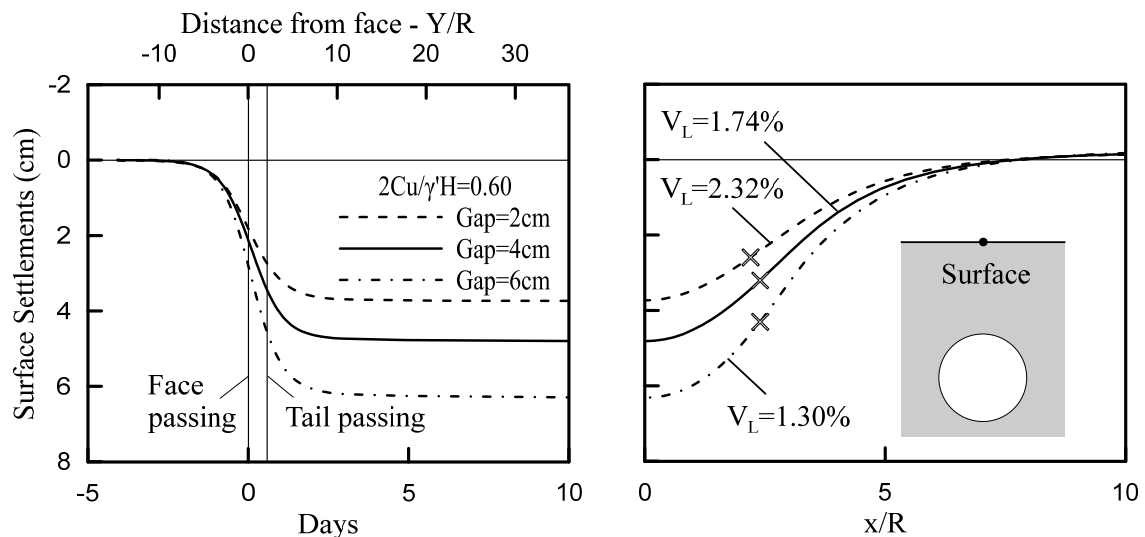


Σχήμα 5.21 Προσομοίωση της υπερεκκαφής και του ουραίου κενού του μηχανήματος (Litsas et al., 2015)

Αρχικά θα παρουσιαστούν για κάθε ποιότητα εδάφους ξεχωριστά οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων και των πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, καθώς και η χρονοϊστορία των καθιζήσεων και το εγκάρσιο στον άξονα προφίλ καθιζήσεων στην επιφάνεια. Έπειτα, θα παρουσιαστούν διαγράμματα με τις μέγιστες καθιζήσεις  $S_{v,max}$ , την απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  και την απόσταση του σημείου καμψής από τον άξονα  $i$ .

### 5.3.3.1 Τύπος εδάφους a – $2C_u/\gamma'H=0.60$

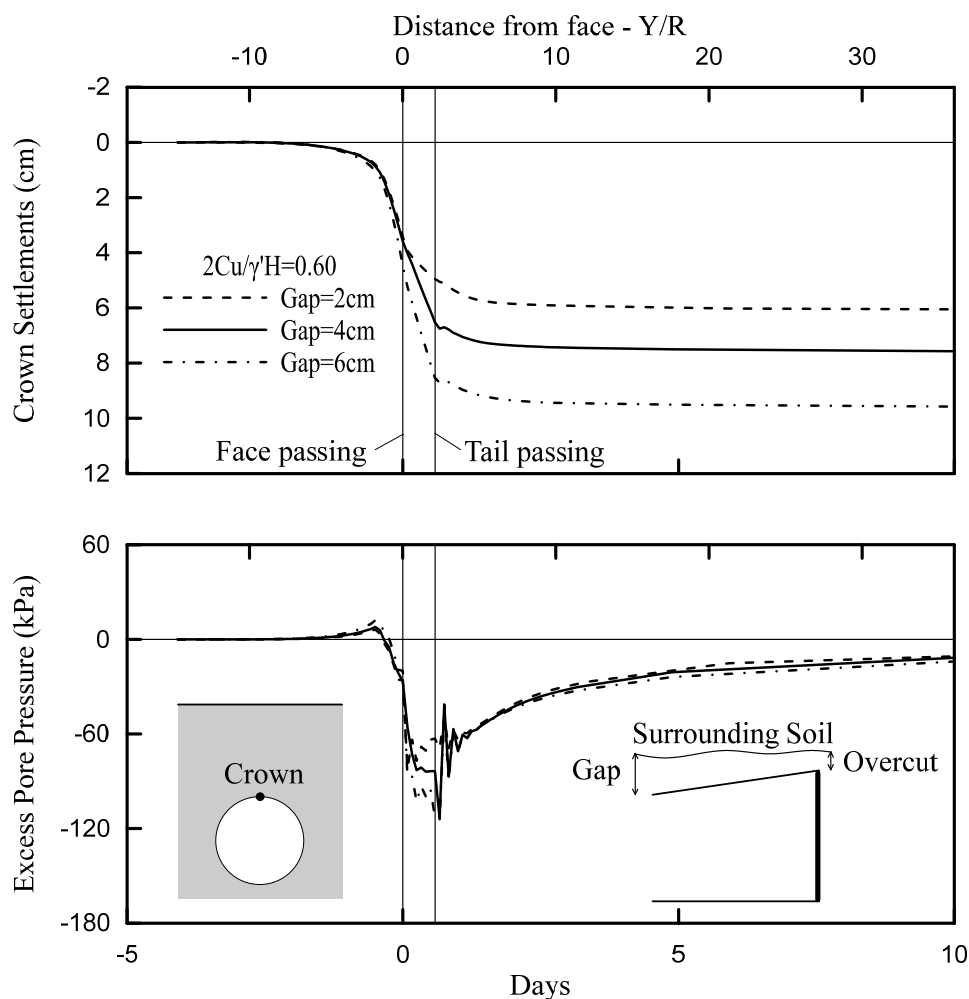
Παρατηρείται σημαντική επιρροή του μεγέθους του κενού στις επιφανειακές καθιζήσεις (Σχήμα 5.22). Η επιρροή του κενού φαίνεται να ξεκινά 20m (2 διάμετροι) μπροστά από το μέτωπο, ενώ σε απόσταση  $>20m$  μπροστά το μέτωπο οι καθιζήσεις είναι ίδιες και για τις τρεις διαφορετικές τιμές του κενού. Το ποσοστό των καθιζήσεων όμως μπροστά από το μέτωπο που οφείλεται στις προσυγκλίσεις παραμένει περίπου στο 45% των ολικών καθιζήσεων και δεν επηρεάζεται από το κενό. Για  $Gap=2cm$  η μείωση στις καθιζήσεις είναι 1.1cm (μείωση κατά 23% για τις ολικές καθιζήσεις) ενώ για  $Gap=6cm$  η αύξηση στις καθιζήσεις είναι 1.5cm (αύξηση κατά 32% στις ολικές καθιζήσεις). Αυτή η μεγαλύτερη μεταβολή (κατ' απόλυτη τιμή) στις καθιζήσεις για  $Gap$  από 4cm σε 6cm σε σχέση με την μεταβολή του  $Gap$  από 4cm σε 2cm, ίσως οφείλεται στην μεγαλύτερης έκτασης πλαστικοποίηση του γεωυλικού (Σχήμα 5.24).



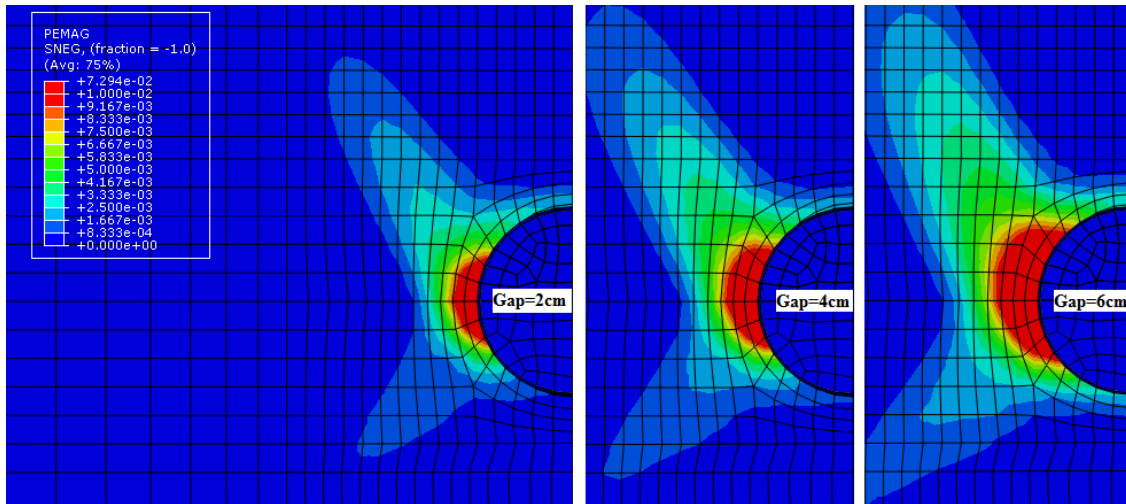
Σχήμα 5.22 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού ( $Gap$ ) για το έδαφος a, όπου με  $\times$  συμβολίζεται το σημείο καμψής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.

Κοιτώντας τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.23), η επιρροή του κενού φαίνεται να ξεκινάει ακριβώς μόλις φτάνει το μέτωπο και όχι νωρίτερα, σε αντίθεση με την επιφάνεια, που όπως διαπιστώθηκε η αρχή της επιρροή του κενού προηγείται του

μετώπου κατά δύο διαμέτρους απόσταση. Η κατακόρυφη μετακίνηση για  $\text{Gap}=2\text{cm}$ ,  $\text{Gap}=4\text{cm}$  και  $\text{Gap}=6\text{cm}$  στην περιοχή της ασπίδας είναι 1.5cm, 3cm και 4cm αντίστοιχα. Είναι πρακτικά ευθείες και για τις περιπτώσεις  $\text{Gap}=4\text{cm}$  και  $6\text{cm}$  είναι παράλληλες με την ασπίδα του μηχανήματος. Παρατηρείται ότι οι επιπρόσθετες κατακόρυφες μετακινήσεις μετά το πέρας της ουράς του μηχανήματος είναι και για τις τρεις περιπτώσεις κενού 1cm. Πρακτικά αν σχεδιάζονταν οι επιπρόσθετες κατακόρυφες μετακινήσεις μετά το πέρας της ουράς της ασπίδας και για τις τρεις περιπτώσεις κενού, οι τρεις καμπύλες θα συμπίπτανε. Ακόμα, εξετάζοντας τις υπερπίεσεις των πόρων, την στιγμή που περνάει η ασπίδα (αλλά και αργότερα κατά την εκτόνωση των υποπίεσεων), φαίνεται ότι αναπτύσσεται μεγαλύτερη υποπίεση για μεγαλύτερο κενό. Αυτό είναι λογικό, καθώς μεγαλύτερο κενό σημαίνει μεγαλύτερη αποτόνωση, συνεπώς τάση για διόγκωση όπου σε συνθήκες αστράγγιστες μεταφράζεται σε στιγμιαία πτώση πίεσης στο νερό των πόρων, η οποία εκτονώνεται αργότερα σταδιακά. Η μεταβολή της πίεσης στην περιοχή της ασπίδας λόγω κενού είναι  $\pm 20\text{kPa}$ .



Σχήμα 5.23 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού ( $\text{Gap}$ ), για το έδαφος α.



Σχήμα 5.24 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος a.

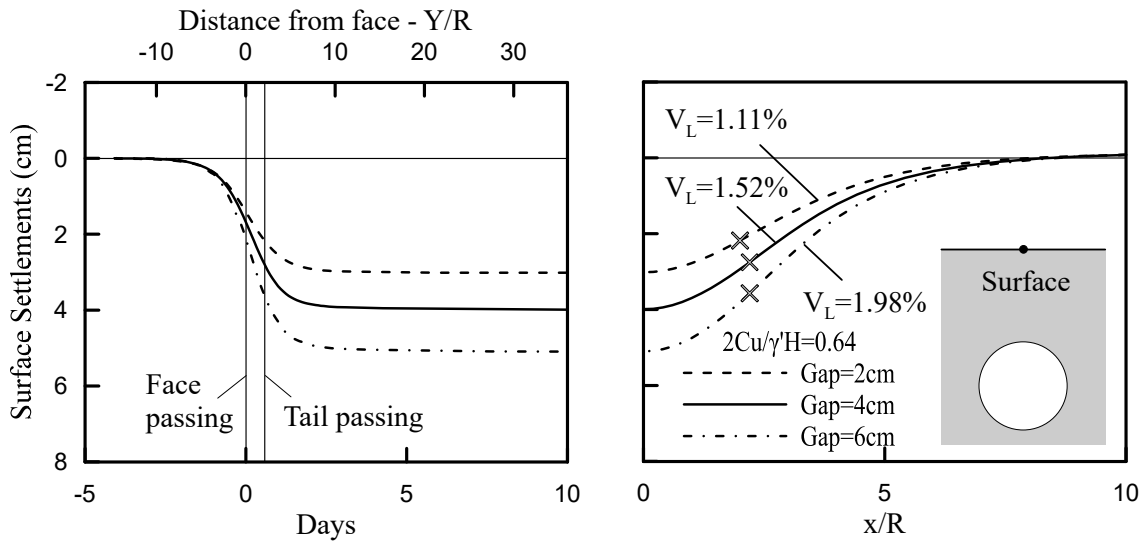
Τέλος, υπάρχει μεγάλη επιρροή στις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.24). Παρατηρείται μεγάλη μείωση στην έκταση των πλαστικών ζωνών με την μείωση του ουραίου κενού. Από αυτό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ένα μεγάλο μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων συμβαίνει την στιγμή διέλευσης του μηχανήματος και είναι άμεσα εξαρτώμενες από την κωνικότητα της ασπίδας.

### 5.3.3.2 Τύπος εδάφους b – $2C_w/\gamma'H=0.64$

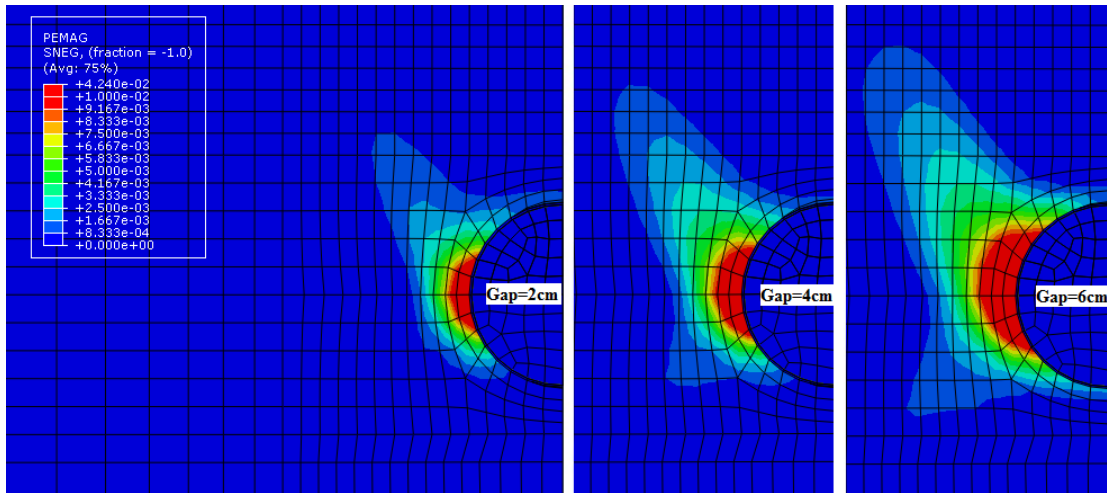
Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν και για το έδαφος b είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στην ενότητα 5.3.3.1 για το έδαφος a. Συνεπώς, εδώ δεν θα γίνει ξανά αναλυτικός σχολιασμός των σχημάτων, αλλά θα παρουσιαστούν οι παρατηρήσεις επιγραμματικά.

Παρατηρείται σημαντική επιρροή του μεγέθους του κενού στις επιφανειακές καθιζήσεις (Σχήμα 5.25). Η επιρροή του κενού φαίνεται να ξεκινάει 2 διαμέτρους μπροστά από το μέτωπο. Το ποσοστό των καθιζήσεων, όμως που οφείλεται στις προσυγκλίσεις δεν επηρεάζεται από το κενό. Για Gap=2cm οι τελικές καθιζήσεις μειώνονται κατά 25%, ενώ για Gap=6cm αυξάνονται κατά 28%.

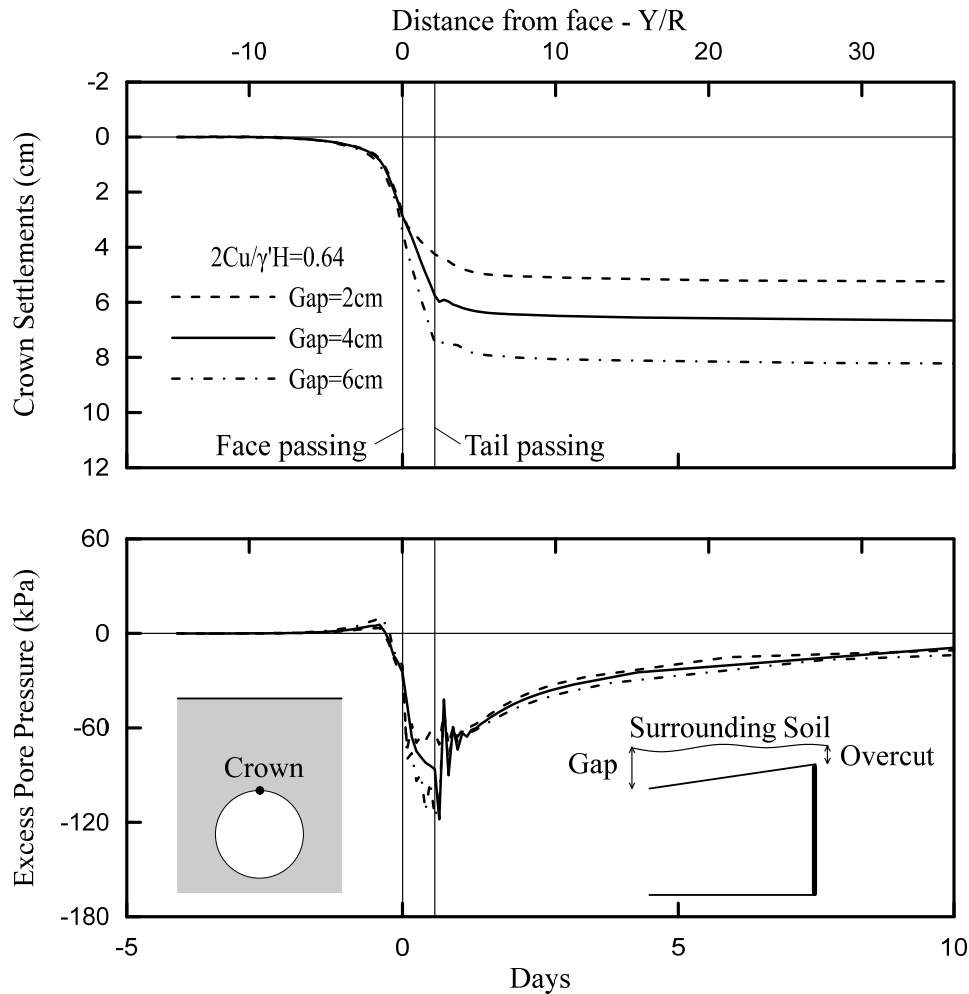
Στις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της σήραγγας (Σχήμα 5.27), η επιρροή του κενού ξεκινάει ακριβώς μόλις φτάνει το μέτωπο. Ακόμα, εξετάζοντας τις υπερπίεσεις των πόρων, την στιγμή που περνάει η ασπίδα (αλλά και αργότερα κατά την εκτόνωση των υποπίεσεων), φαίνεται ότι αναπτύσσεται μεγαλύτερη υποπίεση για μεγαλύτερο κενό. Η μεταβολή της πίεσης στην περιοχή της ασπίδας λόγω κενού είναι  $\pm 25\text{kPa}$ .



Σχήμα 5.25 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) για το έδαφος b, όπου με × συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 5.26 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος b.



Σχήμα 5.27 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέγη της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap), για το έδαφος b.

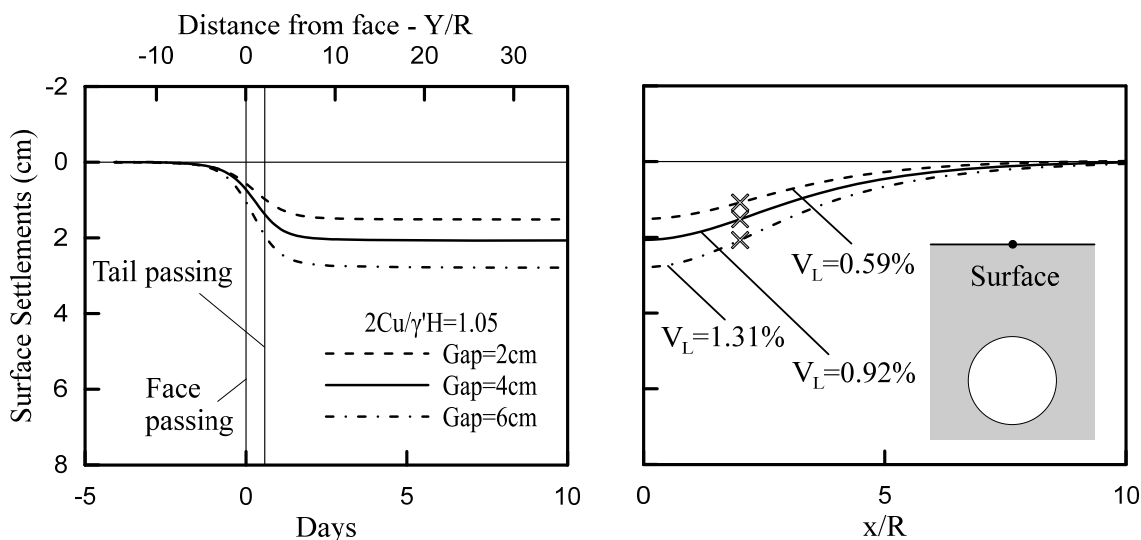
Τέλος, υπάρχει μεγάλη επιρροή στις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.26). Παρατηρείται μεγάλη μείωση στην έκταση των πλαστικών ζωνών με την μείωση του ουραίου κενού.

### 5.3.3.3 Τύπος εδάφους f – $2C_u/\gamma'H=1.05$

Ομοίως, οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν και για το έδαφος f είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν στην ενότητα 5.3.3.1 για το έδαφος a. Συνεπώς, εδώ δεν θα γίνει ξανά αναλυτικός σχολιασμός των σχημάτων, αλλά θα παρουσιαστούν οι παρατηρήσεις επιγραμματικά.

Παρατηρείται σημαντική επιρροή του μεγέθους του κενού στις επιφανειακές καθιζήσεις (Σχήμα 5.28). Η επιρροή του κενού φαίνεται να ξεκινά 2 διαμέτρους μπροστά από το μέτωπο. Το ποσοστό των καθιζήσεων, όμως που οφείλεται στις προσυγκλίσεις ως προς τις τελικές καθιζήσεις,

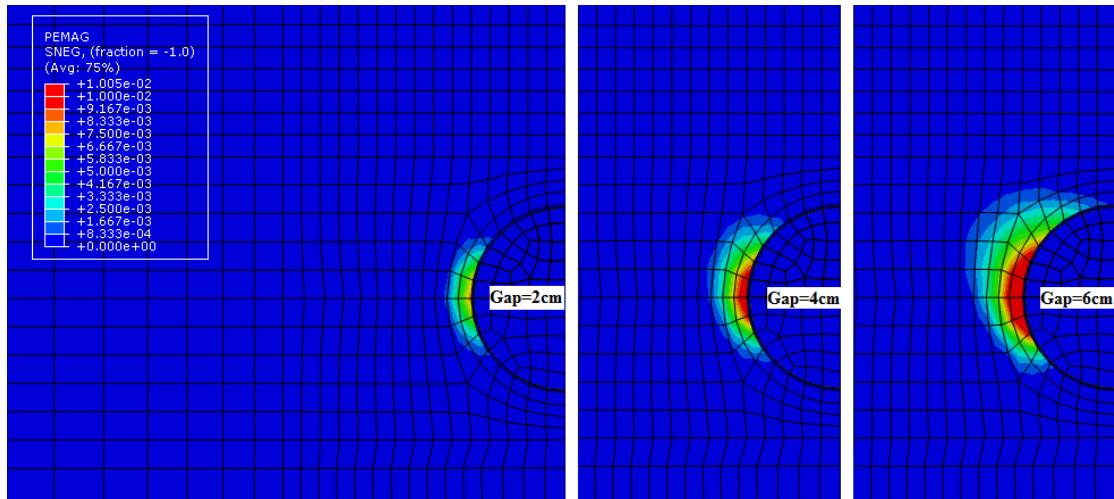
δεν επηρεάζεται από το κενό. Για  $\text{Gap}=2\text{cm}$  οι τελικές καθιζήσεις μειώνονται κατά 27%, ενώ για  $\text{Gap}=6\text{cm}$  αυξάνονται κατά 33%.



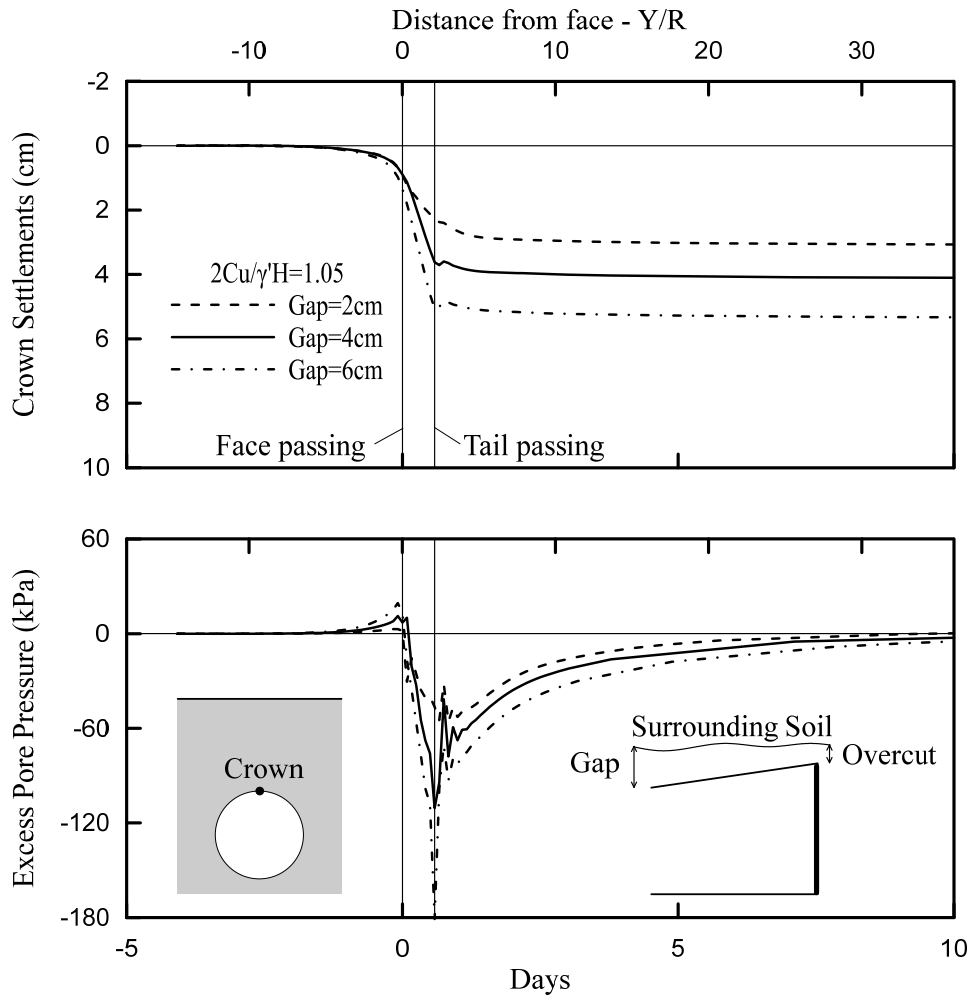
Σχήμα 5.28 Επιφανειακές καθιζήσεις για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) για το έδαφος f, όπου με  $\times$  συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.

Η επιρροή του κενού στις πιέσεις των πόρων (Σχήμα 5.30) είναι πιο ξεκάθαρη στο έδαφος f από ότι στα a και b, όχι μόνο στην περιοχή γύρω από την ασπίδα, αλλά και κοντά στο μέτωπο η πίεση φαίνεται ότι αυξάνει για μεγαλύτερο κενό, ενώ όταν έχει περάσει η ουρά του μηχανήματος, όπου γίνεται η εκτόνωση των υποπίεσεων, η υποπίεση συνεχίζει να είναι μεγαλύτερη. Η μεταβολή της πίεσης στην περιοχή της ασπίδας λόγω κενού είναι  $\pm 60\text{kPa}$ . Τέλος, υπάρχει μεγάλη επιρροή στις πλαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 5.29). Παρατηρείται μεγάλη μείωση στην έκταση των πλαστικών ζωνών με την μείωση του ουραίου κενού.



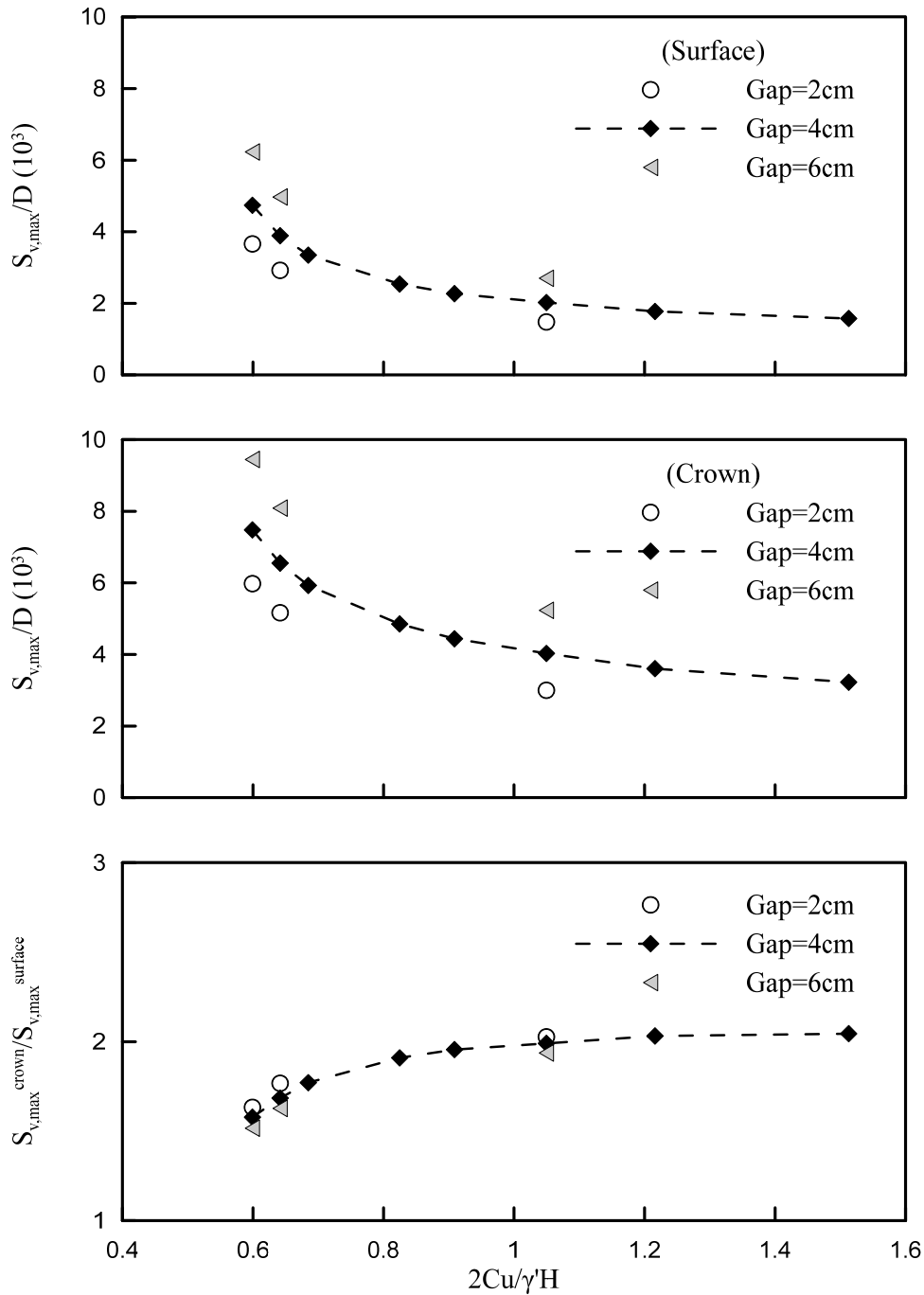


Σχήμα 5.29 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap) στο έδαφος f.



Σχήμα 5.30 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για διαφορετικά μεγέθη του ουραίου κενού (Gap), για το έδαφος f.

5.3.3.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα για την επιρροή του κενού

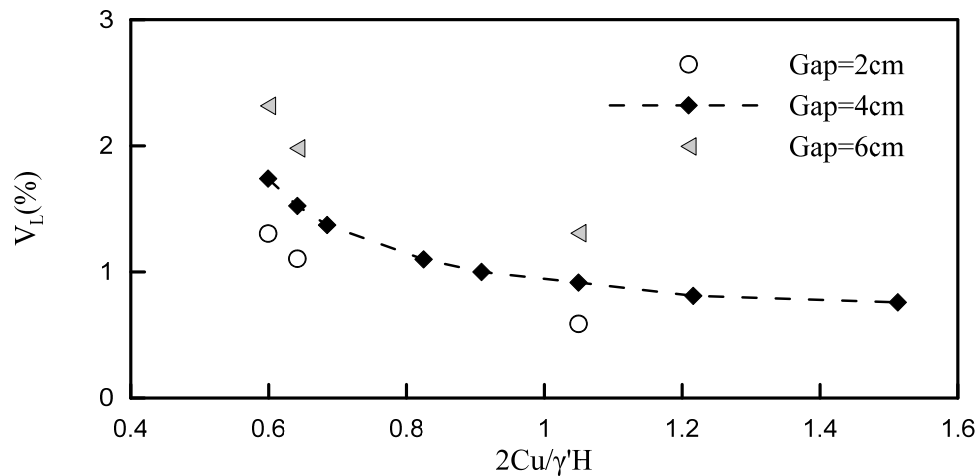


Σχήμα 5.31 Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια, στην στέψη και ο λόγος τους, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

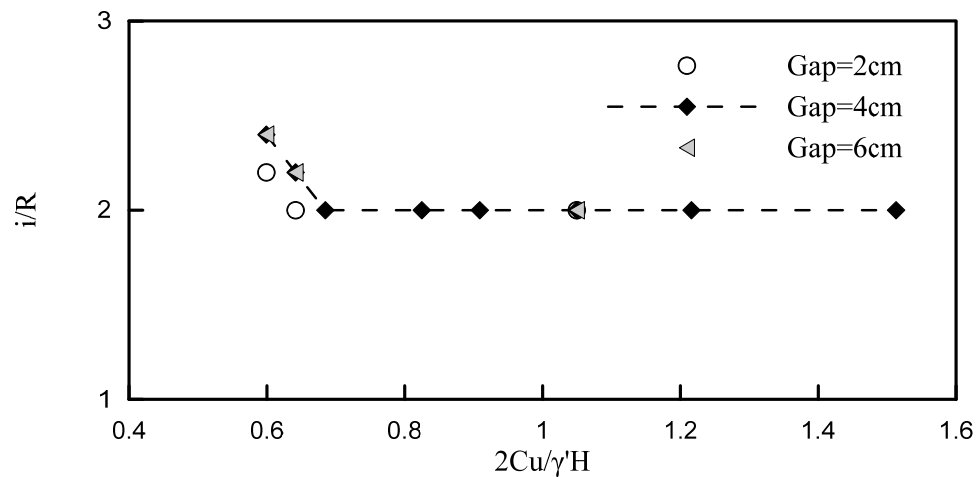
Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (Σχήμα 5.31) προκύπτει μεγαλύτερη επιρροή της πίεσης ενέματος στην στέψη, δηλαδή κοντά στην περιοχή εφαρμογής της πίεσης, και μικρότερη επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις. Για

Gap=2cm οι καθιζήσεις στην επιφάνεια μειώνονται κατά 23~27% ενώ για Gap=6cm οι καθιζήσεις αυξάνουν κατά 28~33%. Στην στέψη της σήραγγας οι κατακόρυφες μετακινήσεις για Gap=2cm μειώνονται κατά 20~26% ενώ για Gap=6cm αυξάνουν κατά 26~30%. Συνεπώς, ο λόγος της μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια προς την μέγιστη καθίζηση στην στέψη παραμένει περίπου σταθερός (Σχήμα 5.31).

Όσον αφορά την απώλεια όγκου  $V_L(\%)$ , που υπολογίζεται από το εγκάρσιο προφίλ καθιζήσεων (Σχήμα 5.32), παρατηρείται σημαντική επίδραση του κενού. Για Gap=2cm η απώλεια όγκου μειώνεται κατά 0.39~0.44% ενώ για Gap=6cm αυξάνει κατά 0.33~0.58% με αυξανόμενη μεταβολή καθώς οι γεωτεχνικές συνθήκες χειροτερεύουν.



Σχήμα 5.32 Μεταβολή της απώλειας όγκου συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.



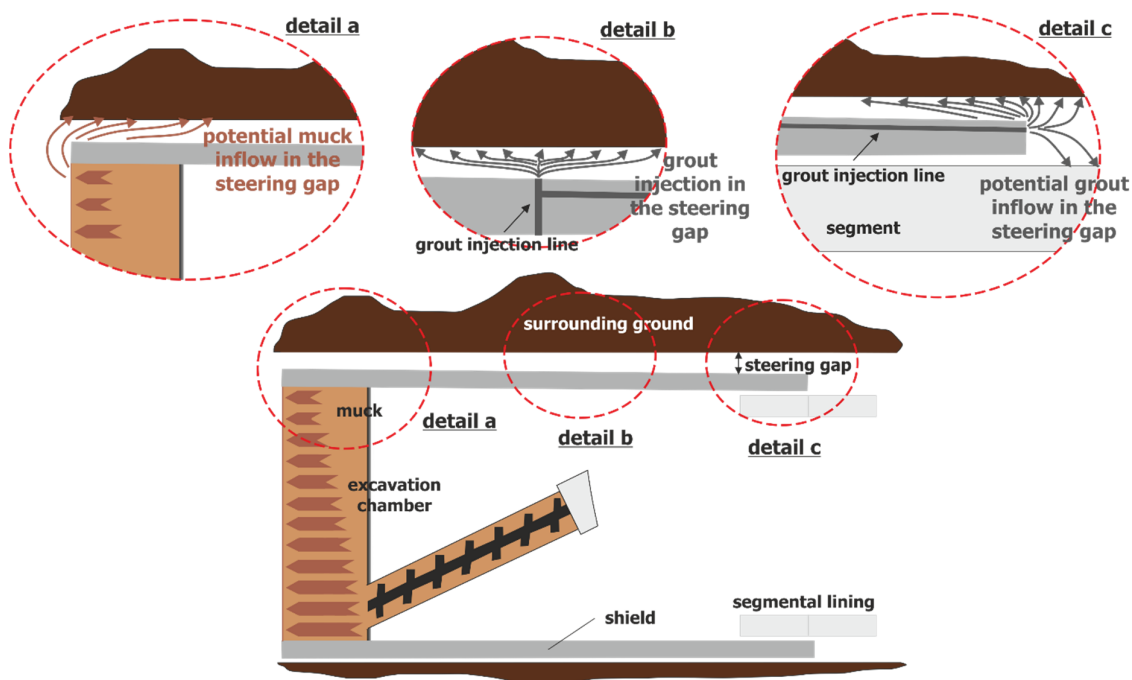
Σχήμα 5.33 Μεταβολή της απόστασης του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα ανηγμένη ως προς την ακτίνα της εκσκαφής, συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους.

Τέλος, για την απόσταση του σημείου καμπής  $i$  του εγκάρσιου προφίλ καθιζήσεων από τον άξονα της σήραγγας (Σχήμα 5.33), το συμπέρασμα είναι ότι δεν υπάρχει καμία επιρροή από

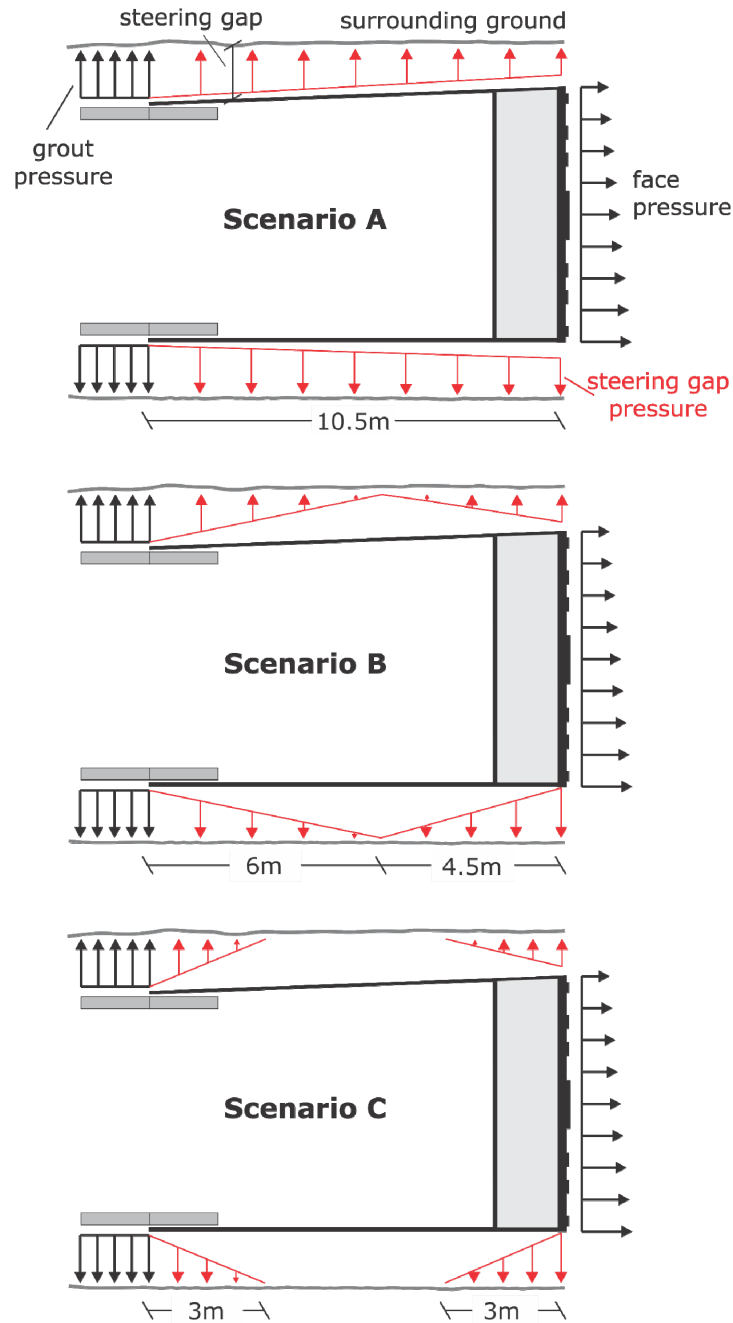
την μεταβολή του κενού εκτός από τιμές του  $2C_u/\gamma'H \leq 0.64$ . για  $Gap=2\text{cm}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί με μείωση του κενού περιορίζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις και έτσι οι τιμές του  $i/R$  πλησιάζουν την σταθερή τιμή 2 που έχουν τα εδάφη με καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες.

### 5.3.4 Επίδραση της πίεσης των ρευστών στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους

Τα ρευστά στο μέτωπο (πολφός) και στην ουρά της ασπίδας (ένεμα) βρίσκονται υπό πίεση. Συνεπώς υπάρχει η δυνατότητα να διεισδύσουν στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Ακόμα, σε μερικές περιπτώσεις γίνεται εισπίεση ενέματος και από το μέσον την ασπίδας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.34. Συνεπώς, έχει κάποιο νόημα να γίνει εισαγωγή αυτής της πίεσης μέσα στο μοντέλο. Επειδή ανάλογα με την πίεση των ρευστών στα όρια, το κενό μπορεί να διατηρείται ανοιχτό για διαφορετικά μήκη μέχρι τα οποία θα γίνεται η διείσδυση των ρευστών (Nagel & Meschke, 2011), γίνεται θεώρηση τριών διαφορετικών σεναρίων πίεσης όπως φαίνεται στην συνέχεια.



Σχήμα 5.34 Διείσδυση των ρευστών υπό πίεση (πολφός και ένεμα) στο κενό μεταξύ της ασπίδας κα του περιβάλλοντος εδάφους.



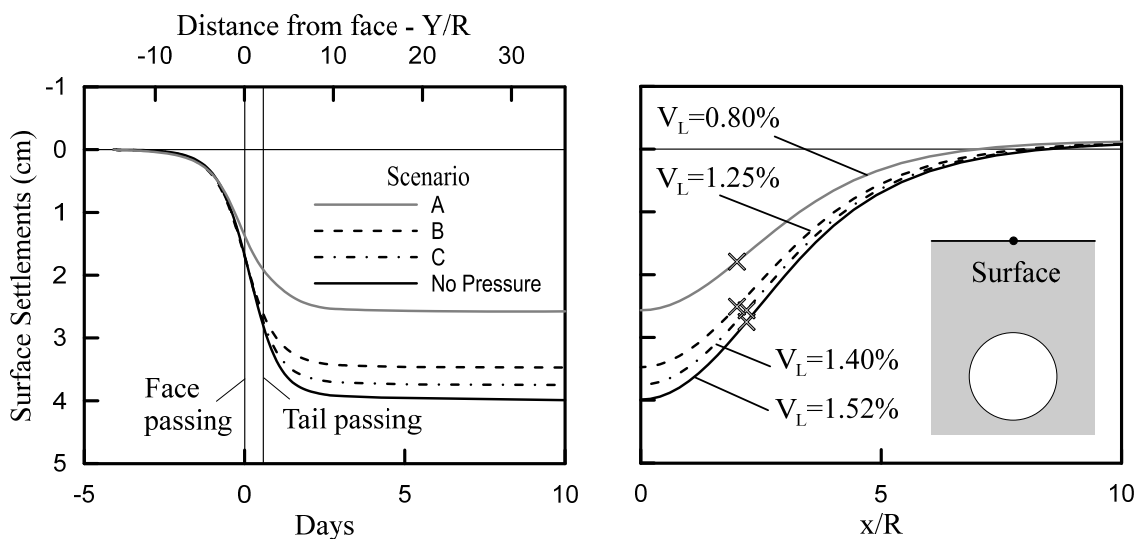
Σχήμα 5.35 Διαφορετικά σενάρια για την πίεση των ρευστών (πολφός και ένεμα) που διεισδύουν υπό πίεση στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους

Στα σενάρια αυτά θεωρείται πίεση στα όρια της εκσκαφής στην περιοχή της ασπίδας, που αλλάζει μέγεθος μόνο κατά την έννοια του άξονα Y (άξονας της σήραγγας), ενώ σε κάθε διατομή κάθετα σε αυτόν η πίεση δεν αλλάζει με το ύψος, αλλά παραμένει σταθερή σε όλη την περίμετρο. Στο σενάριο A η πίεση αλλάζει γραμμικά από την μία άκρη της ασπίδας μέχρι την άλλη, από τιμή ίση με την πίεση του ενέματος από την μία, έως τιμή ίση με την πίεση μετώπου στην στέψη από την άλλη. Στο σενάριο B έχουμε τις ίδιες πιέσεις στα όρια, αλλά μηδενίζονται και οι δύο, καθώς

μειώνονται γραμμικά, σε απόσταση 4.5m από το μέτωπο. Τέλος στο σενάριο C οι πιέσεις μειώνονται γραμμικά μέχρι απόσταση 3m από την κάθε πλευρά αντίστοιχα, όπου και μηδενίζονται.

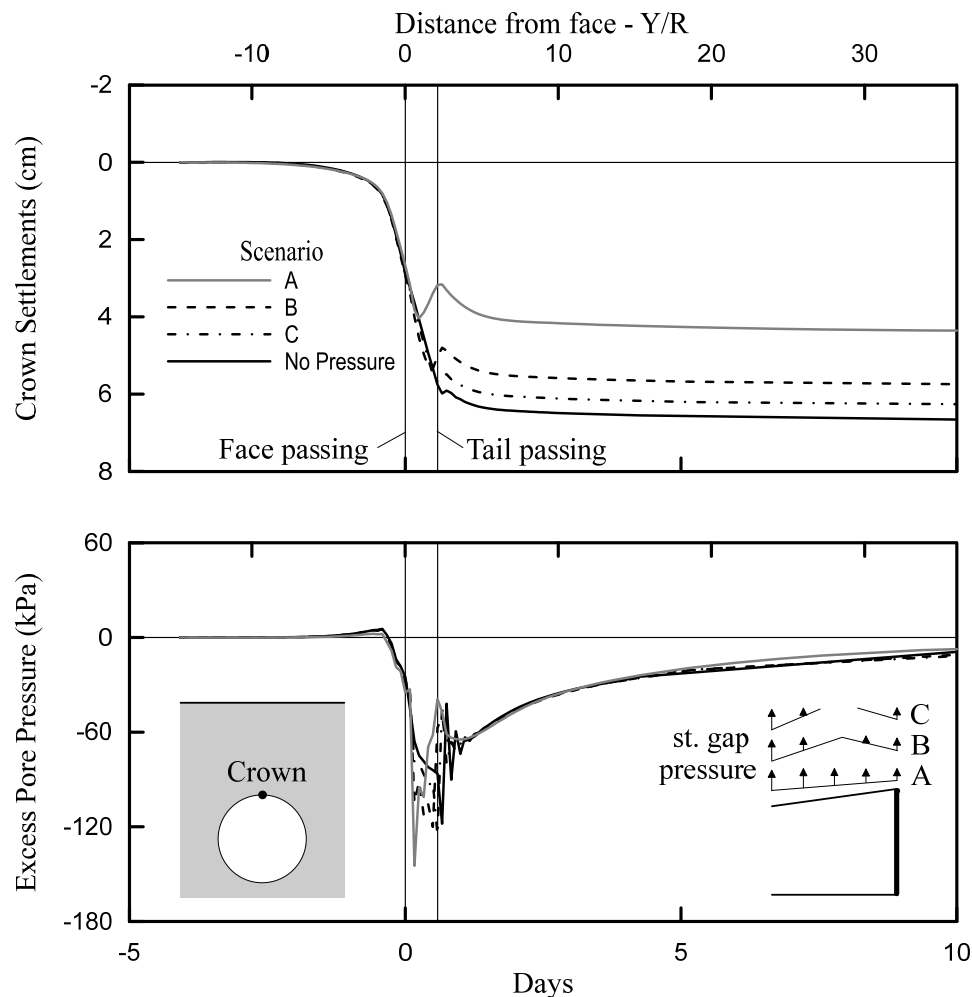
Για την εξέταση της επιρροής της πίεση των ρευστών που διεισδύουν στο κενό (ένεμα και πολφός) έγιναν τρεις αναλύσεις για τα τρία σενάρια που περιεγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα, αλλά και μια ανάλυση χωρίς καθόλου πίεση, για το έδαφος b ( $2C_u/\gamma'H=0.64$ ). Εδώ θα παρουσιαστούν οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων και των πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας, καθώς και η χρονοϊστορία των καθιζήσεων και το εγκάρσιο στον άξονα προφίλ καθιζήσεων στην επιφάνεια.

Όσον αφορά στις καθιζήσεις στην επιφάνεια (Σχήμα 5.36) όσο πηγαίνουμε από το σενάριο της μηδενικής πίεσης ρευστών προς το σενάριο A οι καθιζήσεις μειώνονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση των καθιζήσεων στο σενάριο A είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τα άλλα δυο σενάρια και η επιρροή της φαίνεται να ξεκινά και μπροστά από το μέτωπο σε αντίθεση με τα B και C που φαίνεται να επηρεάζουν μόνο κατά το δεύτερο μισό της ασπίδας. Πιο συγκεκριμένα η επιρροή του σεναρίου A αρχίζει 10m (1 διάμετρο) μπροστά από το μέτωπο. Η μείωση των τελικών καθιζήσεων για το σενάριο C είναι 6%, για το σενάριο B είναι 14% ενώ για το σενάριο A είναι 38%. Η μείωση της απώλειας όγκου  $V_L(\%)$  είναι για το σενάριο A 0.72%, το σενάριο B 0.27% και για το σενάριο C 0.12%. Ο τιμές για την απώλεια όγκου για το κάθε σενάριο πίεσης στο κενό φαίνεται στο Σχήμα 5.36. Επίσης, δεν υπάρχει σημαντική επιρροή στην απόσταση του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας.



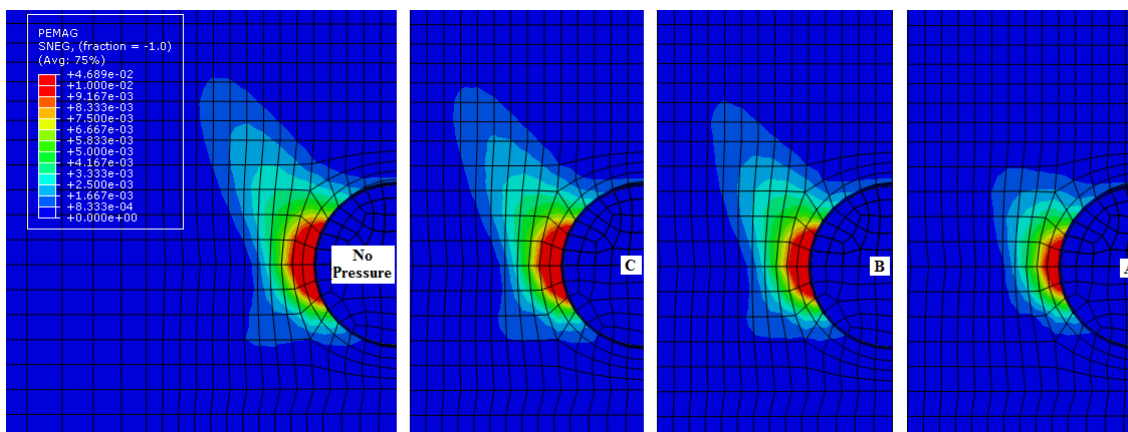
Σχήμα 5.36 Επιφανειακές καθιζήσεις για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, για το έδαφος b, όπου με  $\times$  συμβολίζεται το σημείο καμπής του προφίλ των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.

Όσον αφορά τις κατακόρυφες μετακινήσεις (Σχήμα 5.37) στην στέψη της σήραγγας, παρατηρείται ότι για το σενάριο A ξεκινάει η ανύψωση στην μέση της ασπίδας, ενώ για τα υπόλοιπα σενάρια περίπου στην ουρά της ασπίδας. Οι πιέσεις των πόρων διαφοροποιούνται μόνο στην περιοχή της ασπίδας, όπου για το σενάριο A η μέγιστη υποπίεση αυξάνει κατά 60kPa, για το σενάριο B 35kPa και για το σενάριο C 10kPa. Ακόμα, παρατηρείται ότι για το σενάριο A η πίεση του νερού των πόρων φτάνει στην ελάχιστη τιμή της νωρίτερα από τα υπόλοιπα σενάρια στο πρώτο 1/3 της ασπίδας. Αυτό συμβαίνει γιατί η πίεση στα τοιχώματα από την στιγμή που φτάνει το μηχάνημα και μετά αυξάνει, και πολύ πιο σύντομα το περιβάλλον έδαφος σταματάει να αποτονώνεται και να τείνει να διογκωθεί. Αυτό φαίνεται από το πόσο πιο γρήγορα ξεκινάει να ανασηκώνεται το έδαφος στην στέψη της σήραγγας όπως φαίνεται από την χρονοϊστορία των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη.



Σχήμα 5.37 Χρονοϊστορία κατακόρυφων μετακινήσεων και πιέσεων πόρων στην στέψη της σήραγγας για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, για το έδαφος b.

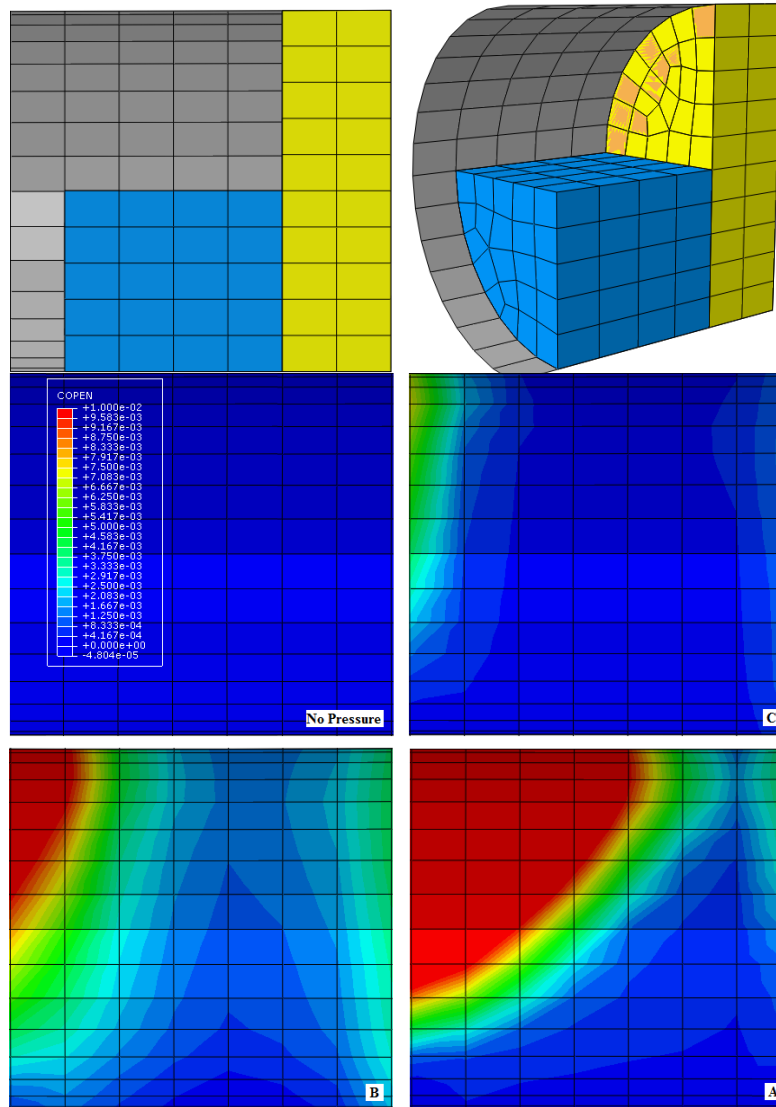
Στο Σχήμα 5.38 φαίνονται οι πλαστικές ζώνες. Στο σενάριο A φαίνεται αισθητή μείωση της έκτασης των πλαστικών ζωνών σε αντίθεση με τα σενάρια B και C. Αυτό είναι σύμφωνο και με τις προηγούμενες παρατηρήσεις, καθώς στο σενάριο A σε αντίθεση με τα άλλα δύο σενάρια η επιρροή είναι εμφανής πολύ νωρίτερα και πριν προλάβουν να αναπτυχθούν μεγάλης έκτασης πλαστικοποιήσεις.



Σχήμα 5.38 Πλαστικές παραμορφώσεις σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για τις τέσσερις περιπτώσεις πίεσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, στο έδαφος b.

Η επιφάνεια επαφής του εδάφους με την ασπίδα (Σχήμα 5.39), είναι σχετικά ικανοποιητική αν και δεν αντικατοπτρίζει ακριβώς τα σενάρια. Μια πιο λεπτομερής λύση θα ήταν η εισαγωγή αλγορίθμου που υπολογίζει την ροή των ρευστών υπό πίεση γύρω από την ασπίδα για μήκος στο οποίο υπάρχει κενό, με θεώρηση ιξώδους συμπεριφοράς των ρευστών και σύζευξη των εξισώσεων που διέπουν την διαμήκη ροή των ρευστών με τον αλγόριθμο επαφής για την διεπιφάνεια ασπίδας εδάφους (Nagel & Meschke, 2011).





Σχήμα 5.39 Επίδραση της πίεσης κενού στο πάχος του κενού (χρωματική κλίμακα για διάφορες τιμές πάχους κενού) μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, όπου με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται και οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από το άνω όριο της κλίμακας (αριστερά είναι η ουρά και δεξιά το μέτωπο).

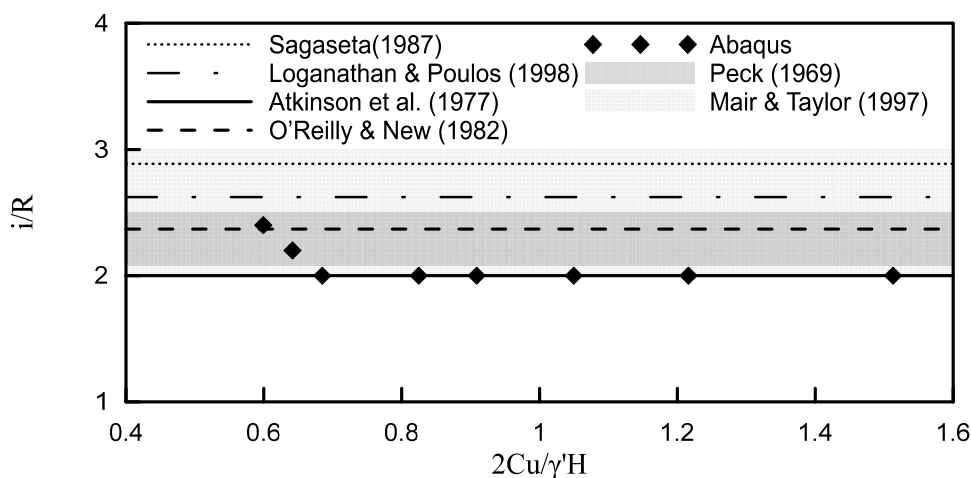
#### 5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Οι τριδιάστατες αναλύσεις με κάποιον αριθμητικό κώδικα (π.χ. Abaqus, FLAC<sup>3D</sup> κ.λπ.), έχουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Συνεπώς η πρόβλεψη των επιφανειακών και υπόγειων καθιζήσεων με άλλες μεθόδους (π.χ. αναλυτικές ή εμπειρικές λύσεις) μπορούν να γλιτώσουν σημαντικό χρόνο. Σε αυτήν την ενότητα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τον κώδικα Abaqus που παρουσιάστηκαν και στις προηγούμενες ενότητες για τα εδάφη a,b,c,d,e,f,g

και  $h$ . Η πίεση ενέματος σε όλες τις αναλύσεις είναι  $P_{\text{grout}} = 400\text{kPa}$ , η υπερεκσκαφή και το ουραίο κενό είναι 1cm και 4cm αντίστοιχα και δεν γίνεται θεώρηση πίεσης ρευστών στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος γεωυλικού.

#### 5.4.1 Πρόβλεψη του σημείου καμπής $i$ για επιφανειακές καθιζήσεις

Η απόσταση  $i$  του σημείου καμπής των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθούς σήραγγας αποτελεί σημαντική παράμετρο στην πρόβλεψη πιθανών ζημιών σε επιφανειακές κατασκευές, καθώς αποτελεί το σημείο εναλλαγής από θλιπτικές σε εφελκύστηκες οριζόντιες επιφανειακές παραμορφώσεις του εδάφους. Στις ενότητες 3.3 και 3.4, παρουσιάζονται αναλυτικές (Sagaseta, 1987; Loganathan & Poulos, 1998) και εμπειρικές (Peck, 1969; Atkinson et al., 1977; O'Reilly & New, 1982; Mair & Taylor, 1997) σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης  $i$  του σημείου καμπής από τον άξονα της σήραγγας. Στο Σχήμα 5.40 φαίνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις οκτώ διαφορετικές εδαφικές συνθήκες.



Σχήμα 5.40 Σύγκριση πρόβλεψης αναλυτικών και εμπειρικών λύσεων για το σημείο καμπής των επιφανειακών καθιζήσεων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Φαίνονται επίσης και οι προβλέψεις των αναλυτικών και εμπειρικών λύσεων για το  $i$ , οι οποίες είναι ανεξάρτητες από την ποιότητα του εδάφους. Οι Mair & Taylor (1997) στην πρόβλεψη τους για τις αργίλους, αλλά και ο Peck (1969) δίνουν ένα εύρος για την τιμή του  $i$ , οπότε στο Σχήμα 5.40 δεν φαίνεται μια γραμμή αλλά μια περιοχή τιμών.

Παρατηρείται ότι οι εμπειρικές λύσεις δίνουν μικρότερες τιμές για το  $i$  από τις αναλυτικές. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι οι αναλυτικές λύσεις είναι ελαστικές, και δεν μπορούν να προβλέψουν συγκεντρωμένες διατμητικές ζώνες πάνω από τον άξονα της σήραγγας που οδηγούν σε αυξημένες τοπικές καθιζήσεις και σε ένα πιο μικρού εύρους προφίλ καθιζήσεων. Οι

εμπειρικές σχέσεις, που βασίζονται σε παρατηρήσεις στο πεδίο, προβλέπουν τιμές για το  $i$  πιο κοντά στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

#### 5.4.2 Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με σχέσεις κατά Mair et al. (1993)

Οι Peck (1969) και Schmidt (1969) βασιζόμενοι σε παρατηρήσεις πεδίου πρότειναν ότι το προφίλ των καθιζήσεων, που προκαλούνται από την διάνοιξη κυκλικής σήραγγας σε μαλακό εδαφικό σχηματισμό, μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μία εξίσωση κανονικής κατανομής (καμπύλη Gauss). Το εγκάρσιο προφίλ των κατακόρυφων μετακινήσεων σε βάθος από την επιφάνεια, θεωρείται συχνά ότι μπορεί να περιγραφεί και αυτό με μία καμπύλη τύπου Gauss με τον ίδιο τρόπο που περιγράφονται και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια. Οι Mair et al. (1993) βασιζόμενοι σε μετρήσεις κατακόρυφων μετακινήσεων κάτω από την επιφάνεια, τονίζουν ότι η παράμετρος  $K$  των O'Reilly & New (1982) αυξάνει με το βάθος. Στο Σχήμα 3.13 είχε παρουσιαστεί η πρόταση των Mair et al. (1993) για την μεταβολή του σημείου καμπής του προφίλ των υπόγειων καθιζήσεων με το βάθος και η μεταβολή της παραμέτρου  $K$  σε αργίλους. Οι σχέσεις που πρότειναν παραθέτοντας ξανά εδώ

$$i/z_0 = 0.175 + 0.325(1 - z/z_0) \quad \text{Εξ. 5.11}$$

$$i = K(z_0 - z) \quad \text{Εξ. 5.12}$$

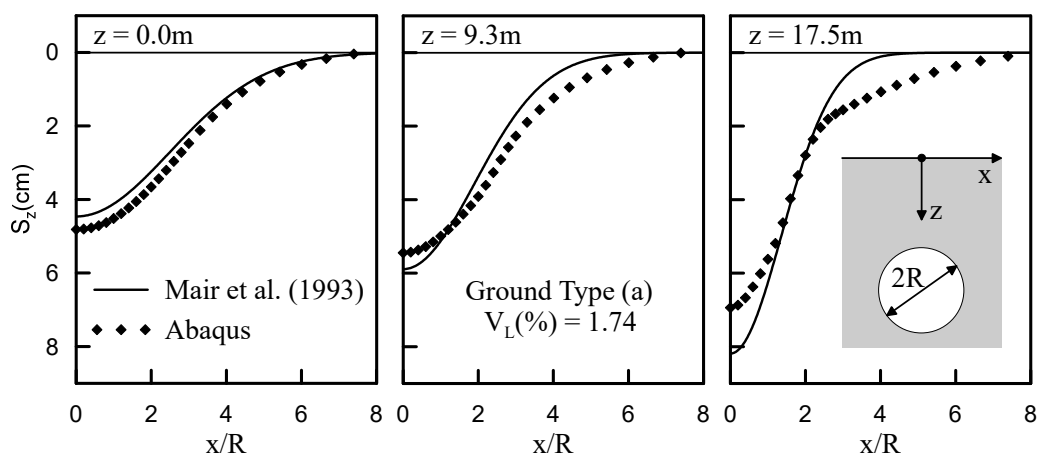
όπου  $z_0$  το βάθος του άξονα της σήραγγας και  $z$  το βάθος στο οποίο υπολογίζεται το προφίλ των καθιζήσεων. Το  $K$  είναι ο συντελεστής αναλογίας. Ο υπολογισμός του προφίλ των καθιζήσεων γίνεται χρησιμοποιώντας την Εξ.5.11 τον υπολογισμό του  $i$  στο επιθυμητό βάθος  $z$  και εκτιμώντας την απώλεια όγκου (πχ. μέσω εμπειρικών συσχετίσεων), υπολογίζεται μέσω των Εξ.3.13 και Εξ.3.14 των Peck (1969) και Schmidt (1969) η μέγιστη καθίζηση  $S_{v,max}$  και το προφίλ των καθιζήσεων  $S_z$  για το βάθος  $z$  από την επιφάνεια για το οποίο υπολογίστηκε το  $i$ .

##### 5.4.2.1 Σύγκριση προφίλ επιφανειακών και υπόγειων καθιζήσεων

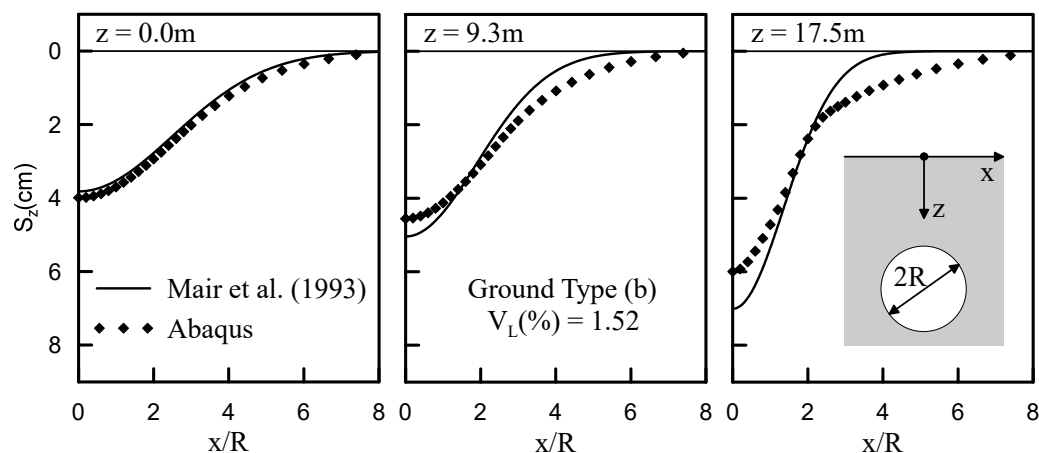
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα τα επιφανειακά και τα υπόγεια, εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας, προφίλ των καθιζήσεων που υπολογίστηκαν με των κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για τις οκτώ διαφορετικές εδαφικές ποιότητες a, b, c, d, e, f, g και h. Η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  που υπολογίστηκε από την κάθε ανάλυση εισάγεται στις εμπειρικές σχέσεις που προτείνουν οι Mair et al. (1993) και γίνεται σύγκριση των προφίλ των καθιζήσεων που προκύπτουν για τις επιφανειακές και τις υπόγειες καθιζήσεις με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Τα προφίλ που αφορούν στις αριθμητικές αναλύσεις αναφέρονται στη διατομή του αριθμητικού προσομοιώματος που αναφέρονται και όλες οι προηγούμενες αναλύσεις που παρουσιάστηκαν σε

αυτό το κεφάλαιο Τα βάθη στα οποία επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα υπόγεια προφίλ των καθιζήσεων είναι  $z=9.3\text{m}$  και  $z=17.5\text{m}$ .

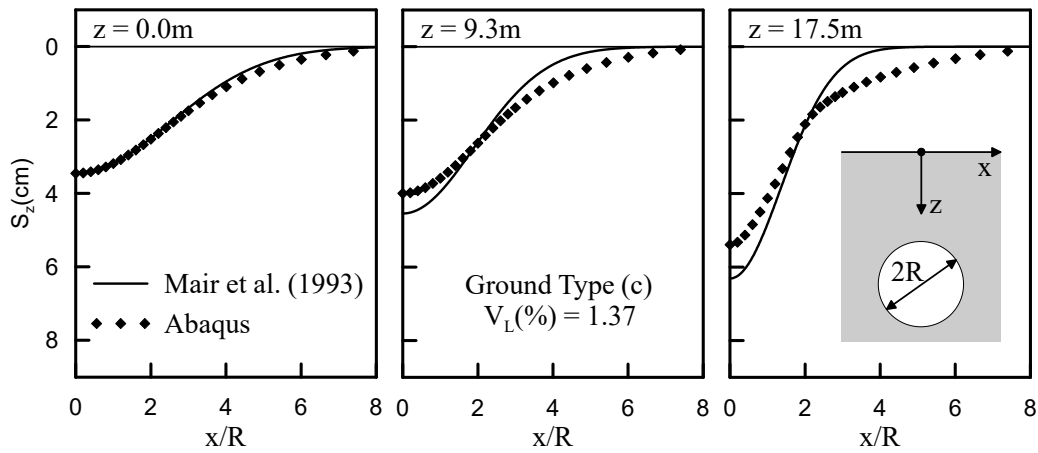
Παρατηρώντας τα διαγράμματα (Σχήμα 5.41 έως Σχήμα 5.48) οι επιφανειακές καθιζήσεις φαίνεται να συσχετίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα, όσο μεγαλώνει το βάθος τόσο περισσότερο αποκλίνει η καμπύλη Gauss από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Η πρόταση των Mair et al. (1993) προβλέπει μεγαλύτερη συγκέντρωση των καθιζήσεων κοντά στην σήραγγα. Ακόμα, είναι εμφανές ότι στο βάθος  $z = 17.5\text{m}$  που βρίσκεται κοντά στην περίμετρο της σήραγγας, το σχήμα του προφίλ των καθιζήσεων αρχίζει να αποκλίνει από το σχήμα μιας καμπύλης Gauss. Αυτό πιθανώς συμβαίνει λόγω της ανάπτυξης πλαστικών ζωνών (Σχήμα 5.6). Στο Σχήμα 5.6 όμως παρατηρείται ότι ήδη από το έδαφος f οι πλαστικές παραμορφώσεις έχουν περιοριστεί σημαντικά. Αντιθέτως, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.48 ακόμα και στις καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες που ερευνήθηκαν (έδαφος h) παρουσιάζεται σημαντική απόκλιση για βάθος  $z = 17.5\text{m}$ .



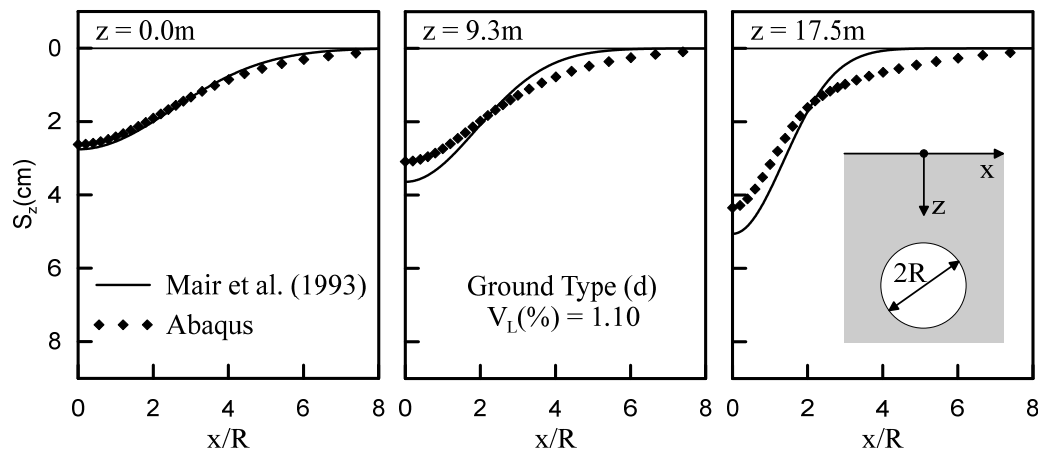
Σχήμα 5.41 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος a.



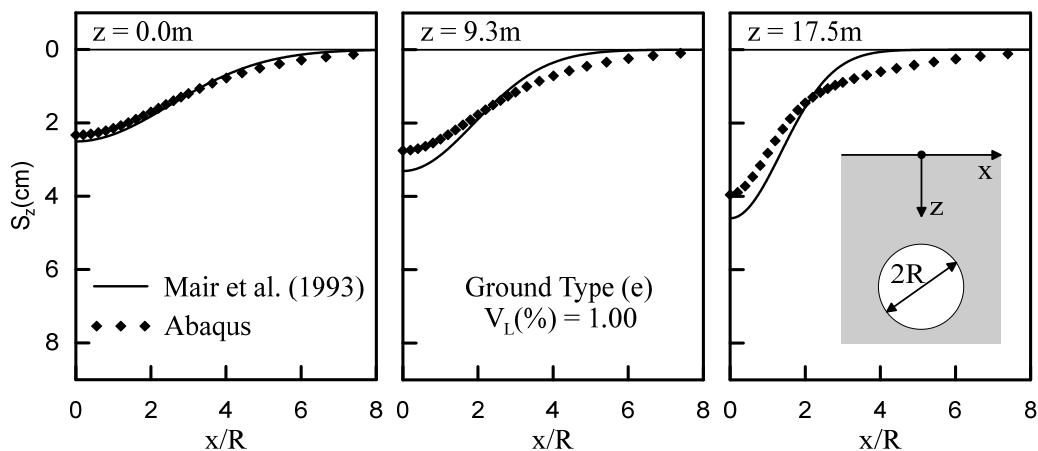
Σχήμα 5.42 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος b.



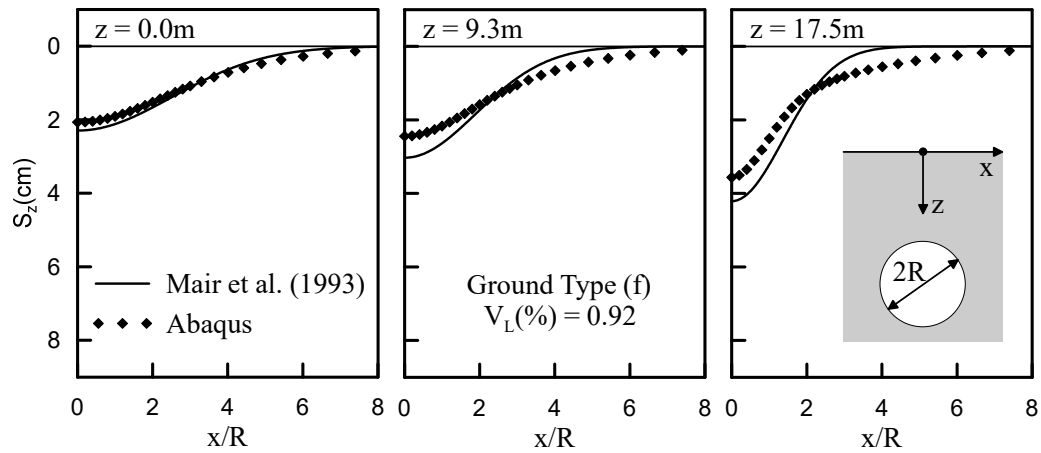
Σχήμα 5.43 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος c.



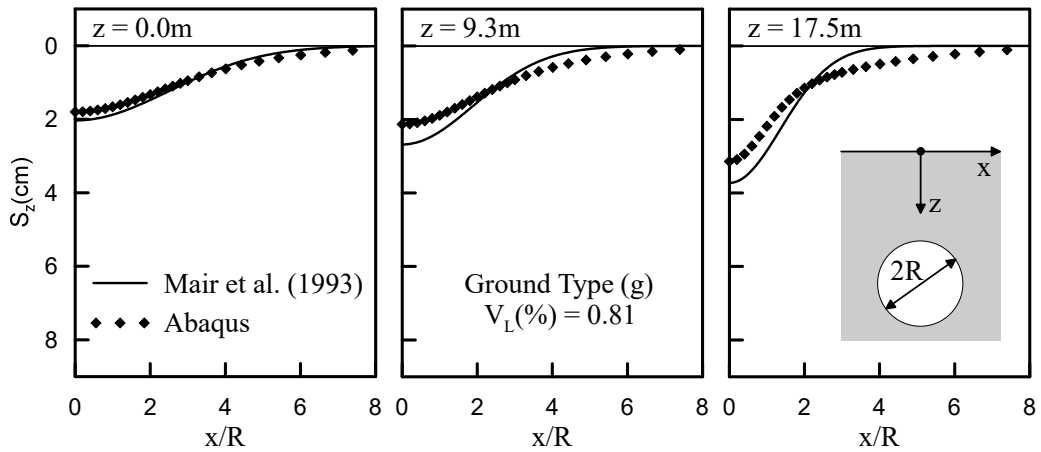
Σχήμα 5.44 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος d.



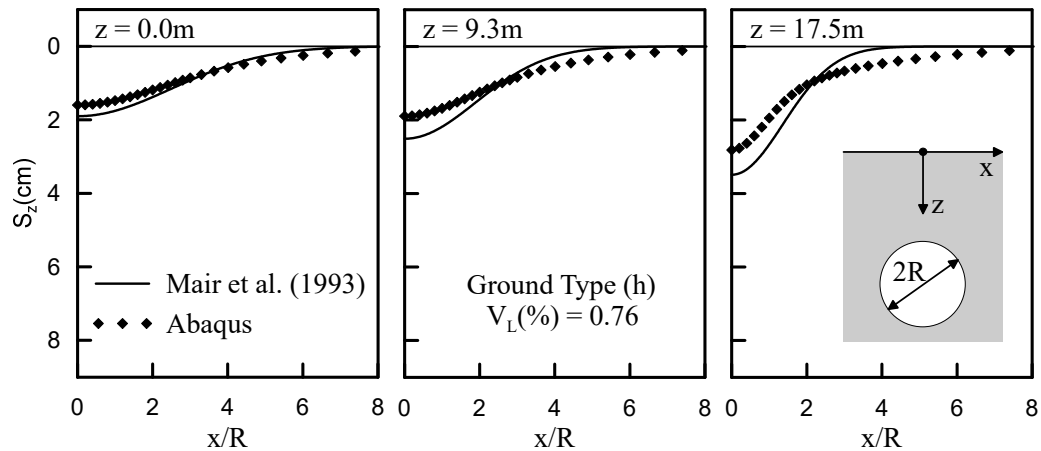
Σχήμα 5.45 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος e.



Σχήμα 5.46 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος f.



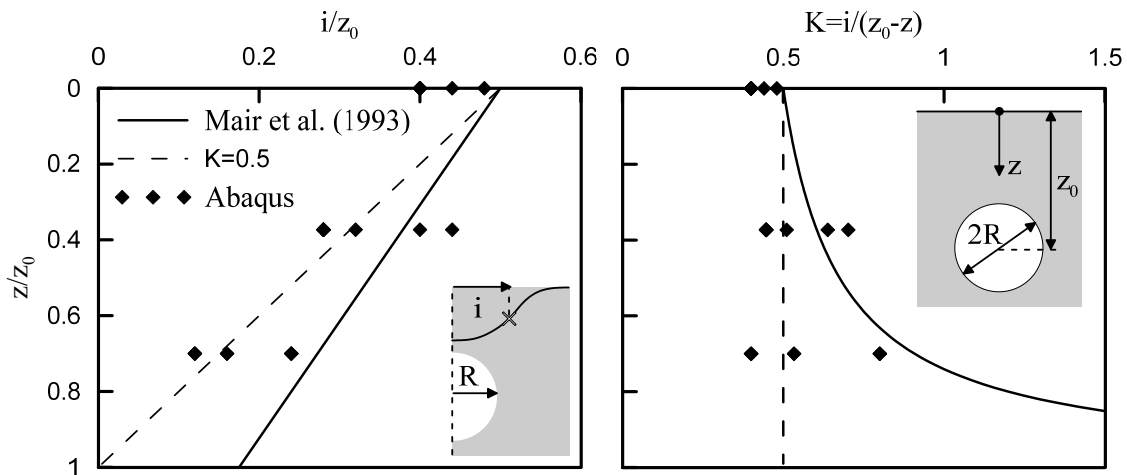
Σχήμα 5.47 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος g.



Σχήμα 5.48 Σύγκριση επιφανειακού και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το έδαφος h.

## 5.4.2.2 Σύγκριση σημείου καμπής επιφανειακών και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων

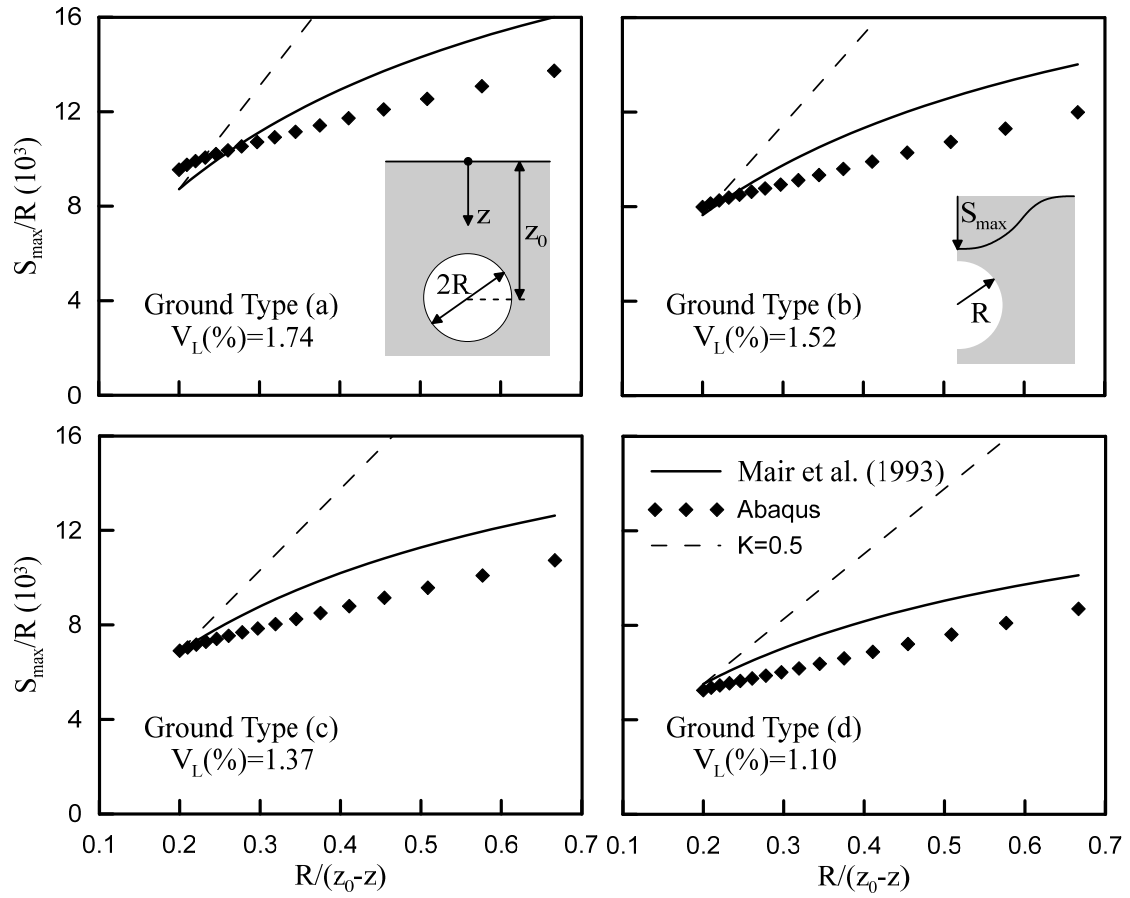
Η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  για κάθε προφίλ καθιζήσεων, που υπολογίστηκε αριθμητικά και παρουσιάστηκε από το Σχήμα 5.41 έως το Σχήμα 5.48, τοποθετείται σε διαγράμματα που συσχετίζουν το  $i$  με το  $z$  (ανηγμένα ως προς το βάθος σήραγγας,  $z_0$ ) στο Σχήμα 5.49. Στο σχήμα φαίνεται επίσης και η πρόταση των Mair et al. (1993) για μεταβαλλόμενο συντελεστή αναλογίας  $K=i/(z_0-z)$  με το βάθος αλλά και με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η υπόθεση σταθερού  $K=0.5$ . Δεν παρατηρείται κάποια ξεκάθαρη υπεροχή της πρότασης των Mair et al. (1993), αντιθέτως οι τιμές φαίνεται να κυμαίνονται περίπου στο εύρος μεταξύ της θεώρησης αυτής και της θεώρησης σταθερού  $K=0.5$ .



Σχήμα 5.49 Σύγκριση σημείων καμπής επιφανειακών και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων που προκύπτουν από την πρόταση των Mair et al. (1993) με τα αριθμητικά αποτελέσματα

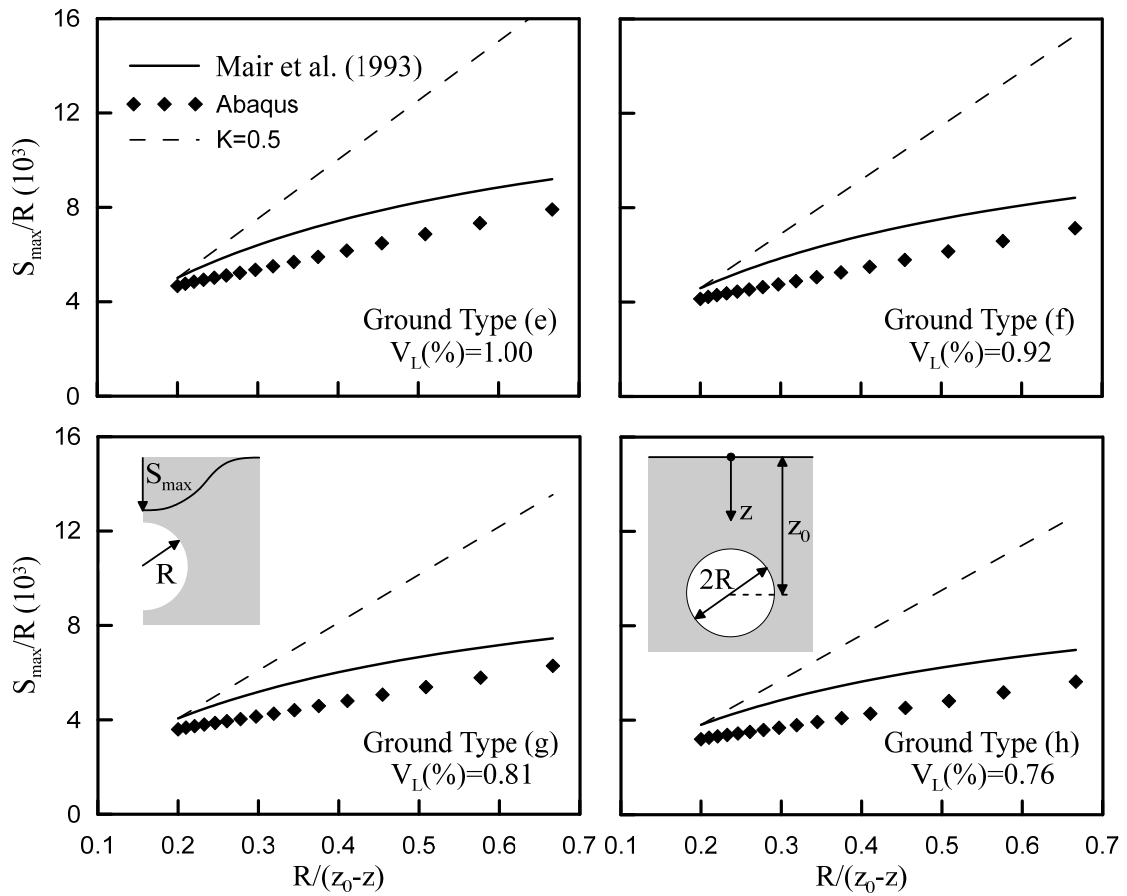
5.4.2.3 Σύγκριση μέγιστης καθιζήσης  $S_{max}$  επιφανειακών και υπόγειων προφίλ καθιζήσεων

Στο Σχήμα 5.50 και στο Σχήμα 5.51 φαίνονται συνολικά οκτώ διαγράμματα, ένα για κάθε διαφορετική ποιότητα εδάφους, στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν πάνω ακριβώς από τον άξονα της σήραγγας για διάφορα βάθη. Στα ίδια διαγράμματα τοποθετούνται και οι προβλέψεις της πρότασης των Mair et al. (1993) αλλά και η ευθεία για  $K=0.5$ . Παρατηρείται αρχικά ότι όσο αυξάνεται το  $z$  η καμπύλη για  $K=0.5$  αποκλίνει πάρα πολύ από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αντιθέτως η καμπύλη που προκύπτει από την πρόταση των Mair et al. (1993) φαίνεται να έχει πολύ ικανοποιητική σύγκλιση ακόμα και για μεγάλα  $z$ . Όσον αφορά στην πρόταση των Mair et al. (1993) το συμπέρασμα που προέκυψε από την μελέτη των προφίλ των καθιζήσεων (ότι όσο μεγαλώνει το βάθος  $z$  όπου διερευνώνται οι καθιζήσεις, η πρόβλεψη αποκλίνει από τα αριθμητικά αποτελέσματα) επιβεβαιώνεται ξανά. Τέλος, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά στη σύγκλιση για τις διαφορετικές ποιότητες εδαφών



Σχήμα 5.50 Σύγκριση πρότασης των Mair et al. (1993) για τις μέγιστες καθιζήσεις  $S_{\max}$  με τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα εδάφη a, b, c και d.





Σχήμα 5.51 Σύγκριση πρότασης των Mair et al. (1993) για τις μέγιστες καθιζήσεις  $S_{max}$  με τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα εδάφη e, f, g και h.



## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, η επίδραση διαφόρων παραμέτρων σχετιζόμενων με την μηχανοποιημένη διάνοιξη αβαθών σηράγγων σε κορεσμένο έδαφος χαμηλής περατότητας, στην προκαλούμενη διαταραχή (μετακινήσεις) στο περιβάλλον γεωυλικό. Πιο συγκεκριμένα διερευνήθηκε η επιρροή (i) των γεωτεχνικών συνθηκών, (ii) της πίεσής εισαγωγής του ενέματος, (iii) του μεγέθους του ουραίου κενού και (iv) της πίεσης των ρευστών στο κενό μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους στις επιφανειακές καθιζήσεις, τις κατακόρυφες μετακινήσεις σε διάφορα βάθη καθώς και στις αναπτυσσόμενες πιέσεις πόρων και τις πλαστικές παραμορφώσεις. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος είναι τα εξής: διάμετρος σήραγγας  $D=10\text{m}$ , και λόγος βάθους προς διάμετρο  $H/D=2.5$ .

#### 6.1.1 Γεωτεχνικές συνθήκες

Διενεργήθηκαν οκτώ αριθμητικές αναλύσεις, για τιμές του αδιάστατου δείκτη αντοχής του εδάφους  $2C_u/\gamma'H$  από 0.60 έως 1.51 κρατώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος. Παρατηρείται σημαντική επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους στα μεγέθη που εξετάστηκαν. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Ανεξαρτήτως της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του εδάφους οι προσυγκλίσεις ξεκινάνε περίπου 4.5 διαμέτρους μπροστά από το μέτωπο, ενώ παίρνουν την τελική τους τιμή περίπου 4.5 διαμέτρους πίσω από το μέτωπο. Το ποσοστό των καθιζήσεων λόγω προσυγκλίσεων κυμαίνεται από 45% ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) έως 35% ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) των τελικών καθιζήσεων. Οι καθιζήσεις στην περιοχή της ασπίδας κυμαίνονται από 25% ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) έως 35% ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) των τελικών καθιζήσεων. Οι καθιζήσεις μετά το πέρας της ουράς είναι το 30% των τελικών καθιζήσεων ανεξαρτήτως  $C_u$ .

- Το μέγεθος των προσυγκλίσεων στην στέψη της σήραγγας κυμαίνονται από 3.6cm ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) έως 0.5cm ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ), ενώ η κατακόρυφη μετακίνηση στην περιοχή της ασπίδας είναι 3cm ανεξαρτήτως  $C_u$  και εξαρτάται μόνο από την κωνικότητα της ασπίδας.
- Η υπερπίεση πόρων στη στέψη όταν περνάει το μέτωπο λόγω της πίεσης του πολφού κυμαίνεται από 8kPa ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ) έως 30kPa ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ). Η υποπίεση που δημιουργείται λόγω αποτόνωσης που προκαλεί η κωνικότητα της ασπίδας είναι μεγαλύτερη για χαμηλότερες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $C_u$ , ενώ η σταδιακή εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων λόγω της διαδικασίας της στερεοποίησης διαρκεί από 8 ημέρες ( $2C_u/\gamma'H=1.51$ ) έως και 50 ημέρες ( $2C_u/\gamma'H=0.60$ ).
- Η αύξηση των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων σε επιφάνεια και στέψη, δεν έχει γραμμική συσχέτιση με την αντοχή του εδάφους. Για δείκτη αντοχής από  $2C_u/\gamma'H=1.51$  έως 1.05 οι μετακινήσεις σε επιφάνεια και στέψη αυξάνουν κατά 25%. Για ίδια μείωση του δείκτη αντοχής από 1.05 σε 0.60, οι μετακινήσεις στην επιφάνεια αυξάνουν κατά 85% και στην στέψη κατά 135%. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η περιοχή τιμών του δείκτη  $2C_u/\gamma'H < 1$  είναι περιοχή αστάθειας, καθώς παρατηρείται απότομη κλιμάκωση του ρυθμού αύξησης των καθιζήσεων. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από την εξέταση της απώλειας όγκου  $V_L$  όπου διαπιστώνεται πενταπλάσια αύξηση για μεταβολή του δείκτη  $2C_u/\gamma'H$  από 1.05 σε 0.6 από ότι για μεταβολή από 1.51 σε 1.05. Επίσης, σταθερός είναι ο λόγος της μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια προς αυτή στη στέψη της σήραγγας για υψηλότερες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $C_u$ , αλλά καθώς οι γεωτεχνικές συνθήκες γίνονται πιο δυσμενείς παρατηρείται τάση του λόγου να πάρει τιμές κοντά στην μονάδα.
- Εξετάζοντας τις πλαστικές παραμορφώσεις (εύρος πλαστικής ζώνης) παρατηρείται περιορισμένη έκταση στην περιοχή  $2C_u/\gamma'H > 1$ , ενώ η έκταση τους μεγαλώνει στην περιοχή αστάθειας  $2C_u/\gamma'H < 1$ .
- Η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από τις γεωτεχνικές συνθήκες.

### 6.1.2 Πίεση ενέματος

Διενεργήθηκαν εννέα αναλύσεις, για τιμές του αδιάστατου δείκτη αντοχής του εδάφους  $2C_u/\gamma'H$  στην περιοχή αστάθειας 0.60, 0.64 και 1.05, και δείκτη πίεσης ενέματος  $B$  ίσο με 0.5, 1.0 και 1.5 για την κάθε εδαφική ποιότητα (δηλαδή πίεση ενέματος 50%, 100% και 150% της γεωστατικής ολικής κατακόρυφης τάσης στην στέψη της σήραγγας). Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος διατηρήθηκαν σταθερά. Παρατηρείται επίδραση της πίεσης ενέματος στα μεγέθη που εξετάστηκαν. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Η επιρροή στις επιφανειακές καθιζήσεις ξεκινάει μετά το πέρας της ουράς του μηχανήματος. Η επιρροή κυμαίνεται από  $\pm 10\%$  (για  $2C_u/\gamma'H=0.60$  & 0.64) έως  $\pm 15\%$  (για

$2C_u/\gamma'H=1.05$ ) στις τελικές μέγιστες καθιζήσεις, για  $\pm 50\%$  μεταβολή στην πίεση ενέματος. Ίδια ποσοστιαία μεταβολή παρατηρείται και στις τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη. Συνεπώς, ο λόγος μετακίνησης σε επιφάνεια και στέψη δεν επηρεάζεται από την πίεση του ενέματος. Ακόμα, την στιγμή της εισπίεσης, παρατηρείται μεγαλύτερη στιγμιαία ανύψωση της στέψης για μεγαλύτερη πίεση ενέματος (για  $B=0.5$  η ανύψωση είναι αμελητέου μεγέθους). Η απώλειά όγκου για  $B=1.5$  μειώνεται κατά  $0.26\sim 0.27\%$ , ενώ η για  $B=0.5$  αυξάνεται κατά  $0.19\sim 0.21\%$ . Η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας δεν επηρεάζεται.

- Δεν παρατηρείται ουσιαστική επιρροή στις πιέσεις των πόρων στην στέψη της σήραγγας. Μοναδική διαφοροποίηση παρατηρείται στην περιοχή της ασπίδας μπροστά από την ουρά, με λίγο μεγαλύτερες (κατ' απόλυτη τιμή) υποπίεσεις για μεγαλύτερη πίεσης ενέματος.
- Δεν παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση στις πλαστικές παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων έχει λάβει χώρα πριν την εισπίεση του ενέματος.

### 6.1.3 Ουραίο κενό

Έγιναν εννέα αναλύσεις, για τιμές του αδιάστατου δείκτη αντοχής του εδάφους  $2C_u/\gamma'H$  στην περιοχή αστάθειας 0.60, 0.64 και 1.05, και ουραίο κενό  $Gap=2\text{cm}$ ,  $4\text{cm}$  και  $6\text{cm}$  για την κάθε εδαφική ποιότητα. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος διατηρήθηκαν σταθερά. Παρατηρείται μεγάλης σημασίας επίδραση του ουραίου κενού στα μεγέθη που εξετάστηκαν. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Η επιρροή του κενού στις επιφανειακές καθιζήσεις ξεκινά 2 διαμέτρους μπροστά από το μέτωπο, ενώ στις μετακινήσεις στην στέψη της σήραγγας ξεκινά την στιγμή που περνάει το μέτωπο. Για κενό  $Gap=2\text{cm}$  οι τελικές καθιζήσεις στην επιφάνεια μειώνονται κατά  $23\sim 27\%$  ενώ για  $Gap=6\text{cm}$  αυξάνονται κατά  $28\sim 33\%$ . Στην στέψη της σήραγγας οι κατακόρυφες μετακινήσεις για  $Gap=2\text{cm}$  μειώνονται κατά  $20\sim 26\%$  ενώ για  $Gap=6\text{cm}$  αυξάνουν κατά  $26\sim 30\%$ . Η μεγαλύτερη μεταβολή (κατ' απόλυτη τιμή) για αύξηση του κενού κατά  $2\text{cm}$  στις τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις, από ότι για μείωση του κενού κατά  $2\text{cm}$  εντοπίζεται στην αυξανόμενη αστάθεια λόγω εκτεταμένης πλαστικοποίησης. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της σήραγγας στην περιοχή της ασπίδας είναι  $1\text{cm}$ ,  $3\text{cm}$  και  $4\text{cm}$ , όσο και η μείωση διαμέτρου της ασπίδας λόγω κωνικότητας. Η απώλεια όγκου  $V_L(\%)$  για  $Gap=2\text{cm}$  μειώνεται κατά  $0.39\sim 0.44\%$  ενώ για  $Gap=6\text{cm}$  αυξάνει κατά  $0.33\sim 0.58\%$  με μεγαλύτερη μεταβολή για χειρότερες γεωτεχνικές συνθήκες. Η απόσταση του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας δεν επηρεάζεται.
- Στην στέψη της σήραγγας, στην περιοχή της ασπίδας αναπτύσσεται μεγαλύτερη υποπίεση για μεγαλύτερο κενό, λόγω της μεγαλύτερης αποτόνωσης. Για  $2C_u/\gamma'H=0.60$  και  $0.64$  μεταβολή στην πίεση πόρων είναι της τάξης του  $\pm 20\sim 25\text{kPa}$ , ενώ για  $2C_u/\gamma'H=1.05$  η μεταβολή φτάνει τα  $\pm 60\text{kPa}$ . Συνεπώς, η μεταβολή στο μέγεθος της υποπίεσης που αναπτύσσεται εξαρτάται και από την ποιότητα του εδάφους και όχι μόνο από το κενό. Πιο

συγκεκριμένα για μεγαλύτερο  $C_u$  παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή στην πίεση για ίδια μεταβολή του ουραίου κενού.

- Παρατηρείται μεγάλη μείωση στην έκταση των πλαστικών ζωνών με την μείωση του ουραίου κενού. Συνεπώς, ένα μεγάλο μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων συμβαίνει την στιγμή διέλευσης του μηχανήματος και είναι άμεσα εξαρτώμενες από την κωνικότητα της ασπίδας.

### 6.1.4 Πίεση ρευστών στο κενό

Διενεργήθηκαν τέσσερις αναλύσεις, με τιμή του αδιάστατου δείκτη αντοχής του εδάφους  $2C_u/\gamma'H=0.64$ , για τέσσερα διαφορετικά σενάρια πίεσης ρευστών (πολφός και ένεμα) λόγω διείσδυσης στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους. Στο σενάριο A θεωρείται γραμμική αύξηση της πίεσης από το μέτωπο προς την ουρά, στο σενάριο B θεωρείται γραμμική μείωση των πιέσεων του πολφού και του ενέματος μέχρι μηδενισμό και των δυο 4.5m πίσω από το μέτωπο και στο σενάριο C θεωρείται μείωση των πιέσεων του πολφού και του ενέματος 3m από το μέτωπο και την ουρά αντίστοιχα. Το τέταρτο σενάριο θεωρεί μηδενική πίεση. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος διατηρήθηκαν σταθερά. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Η επιρροή του σεναρίου A αρχίζει 1 διάμετρο μπροστά από το μέτωπο, σε αντίθεση με τα B και C που φαίνεται να επηρεάζουν μόνο κατά το δεύτερο μισό της ασπίδας. Παρατηρείται ότι για το σενάριο A ξεκινάει η ανύψωση στην μέση της ασπίδας, ενώ για τα υπόλοιπα σενάρια περίπου στην ουρά της ασπίδας. Η μείωση των τελικών καθιζήσεων για το σενάριο C είναι 6%, για το σενάριο B είναι 14% ενώ για το σενάριο A είναι 38%. Η μείωση της απώλειας όγκου  $VL(\%)$  είναι για το σενάριο A 0.72%, το σενάριο B 0.27% και για το σενάριο C 0.12%. Δεν υπάρχει σημαντική επιρροή στην απόσταση του σημείου καμψής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας.
- Οι πιέσεις των πόρων διαφοροποιούνται μόνο στην περιοχή της ασπίδας, όπου για το σενάριο A η μέγιστη υποπίεση αυξάνει κατά 60kPa, για το σενάριο B 35kPa και για το σενάριο C 10kPa. Ακόμα, παρατηρείται ότι για το σενάριο A η πίεση του νερού των πόρων φτάνει στην ελάχιστη τιμή της νωρίτερα από τα υπόλοιπα σενάρια στο πρώτο 1/3 της ασπίδας.
- Στο σενάριο A φαίνεται αισθητή μείωση της έκτασης των πλαστικών ζωνών σε αντίθεση με τα σενάρια B και C. Αυτό αποδίδεται στο ότι η επιρροή του σεναρίου A σε αντίθεση με των άλλων δύο σεναρίων είναι εμφανής πολύ νωρίτερα και πριν προλάβουν να αναπτυχθούν μεγάλης έκτασης πλαστικοποιήσεις.

### 6.1.5 Αναλυτικές και εμπειρικές προβλέψεις

Εξετάζονται οι προβλέψεις για την απόσταση του σημείου καμπής  $i$  από τον άξονα της σήραγγας αναλυτικών και εμπειρικών λύσεων και συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα. Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με την πρόταση των Mair et al. (1993), εισάχθηκε στις εμπειρικές σχέσεις η απώλεια όγκου που υπολογίστηκε στις αριθμητικές αναλύσεις. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Οι εμπειρικές λύσεις δίνουν μικρότερες τιμές για το  $i$  από τις αναλυτικές, πιθανώς γιατί οι αναλυτικές λύσεις είναι ελαστικές, και δεν μπορούν να προβλέψουν συγκεντρωμένες διατμητικές ζώνες πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Οι εμπειρικές σχέσεις, που βασίζονται σε παρατηρήσεις στο πεδίο, προβλέπουν τιμές για το  $i$  πιο κοντά στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν μικρότερες τιμές για το  $i$  και από τις εμπειρικές και από τις αναλυτικές λύσεις.
- Η πρόταση των Mair et al. (1993) για τις επιφανειακές καθιζήσεις φαίνεται να συσχετίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα, όσο μεγαλώνει το βάθος τόσο περισσότερο αποκλίνει η καμπύλη Gauss από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Η πρόταση των Mair et al. (1993) προβλέπει μεγαλύτερη συγκέντρωση των καθιζήσεων κοντά στην σήραγγα για τις υπόγειες καθιζήσεις.
- Ακόμα και στις καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες που μελετήθηκαν, στις οποίες οι πλαστικές ζώνες είναι περιορισμένες σε μια πολύ μικρή περιοχή στις παριές της σήραγγας, συνεχίζει να υπάρχει απόκλιση στο σχήμα των προφίλ για τις καθιζήσεις κοντά στην περίμετρο της σήραγγας.
- Στα αποτελέσματα για το  $i$  σε επιφανειακά και υπόγεια προφίλ που υπολογίστηκαν αριθμητικά, δεν παρατηρείται κάποια ξεκάθαρη υπεροχή της πρότασης των Mair et al. (1993) για μεταβαλλόμενο συντελεστή αναλογίας  $K$  με το βάθος, όπου  $K=i(z_0 - z)$ , αντιθέτως οι τιμές φαίνεται να κυμαίνονται περίπου στο εύρος μεταξύ της θεώρησης αυτής και της θεώρησης σταθερού  $K=0.5$ .
- Όσο αυξάνεται το βάθος η πρόβλεψη με θεώρηση  $K=0.5$  για τις μέγιστες καθιζήσεις πάνω από τον άξονα της σήραγγας αποκλίνει πάρα πολύ από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αντιθέτως η καμπύλη που προκύπτει από την πρόταση των Mair et al. (1993) φαίνεται να έχει πολύ ικανοποιητική σύγκλιση ακόμα και για μεγάλα  $z$ .

### 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα παρατίθενται παρακάτω:

- Προτείνεται η χρήση ενός πιο κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος για αργίλους, με δυνατότητα χρήσης διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας στη φόρτιση και στην αποφόρτιση.
- Διερεύνηση της τυχόν επιρροής του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ .

- Να γίνει έλεγχος επίδρασης της ταχύτητας σκλήρυνσης του ενέματος με χρήση διαφορετικών καμπυλών που περιγράφουν την χρονική εξάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ενέματος.
- Να διενεργηθούν αναλύσεις με διαφορετικές διαμέτρους σήραγγας  $D$  και διαφορετικούς λόγους βάθους προς διάμετρο  $H/D$ .
- Εισαγωγή κατάλληλου αλγορίθμου προσομοίωσης της ροή ρευστών υπό πίεση στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους με χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γκότσης, Π., 2007. *Πεπερασμένα Στοιχεία*, Θεσσαλονίκη.
- Atkinson, J.H., Brown, E.T. & Potts, D.M., 1977. Ground movements near shallow model tunnels in sand. In *Large Ground Movements and Structures: Proc. of the Conference Held at the University of Wales Institute of Science and Technology*. Cardiff, Wales, pp. 372–386.
- Attiko Metro, EPB TBM Doukisis Plakendias station. Available at: [http://www.ametro.gr/?page\\_id=4360&lang=en](http://www.ametro.gr/?page_id=4360&lang=en).
- Attiko Metro, Lining Instalation. Available at: <http://www.ametro.gr/>.
- Bezuijen, A., 2007. Bentonite and grout flow around a TBM. *Tunnels and Tunnelling International*, (JUNE), pp.39–42.
- Bowles, J.E., 1997. *Foundation Analysis and Design Fifth Edition*,
- Cat, Convertible TBM. Available at: <http://www.tbm.cat.com/>.
- Choi, J. & Yoo, C., 2015. TBM segment lining section design of hypothetical subsea tunnels. *J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, 17(1), pp.49–63.
- Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C. & Konstantinidis, G.K., 2014. Numerical Assessment of Subsidence and Adjacent Building Movements Induced by TBM-EPB Tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), p.4014061.
- Cording, E.J. & Hansmire, W., 1975. Displacements around soft ground tunnels. In *General Report: Session IV, Tunnels in soil. "Proc., 5th Panamerican Congr. on Soil Mech. and Found Engrg.* pp. 571–633.
- Dassault Systems, 2010. Abaqus/CAE User Manual. , p.1051.
- Derrick, Separation Plant. Available at: <http://www.derrick.com>.
- Do, N.A. et al., 2013. 3D modelling for mechanized tunnelling in soft ground-influence of the constitutive model. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), pp.863–875.
- Facesupport, Slurry Face Support. Available at: <http://www.facesupport.org/wiki>.
- Franzius, J.N., 2003. Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence. , (October), pp.1–358.

- Hansmire, W.H. & Cording, E.J., 1972. Performance of a Soft Ground Tunnel on the Washington Metro. In *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*. Chicago, Illinois, pp. 271–289.
- Herrenknecht, EPB TBM. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>.
- Herrenknecht, Mixshield TBM. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/mixshield.html>.
- Herrenknecht, Open Single Shield. Available at: <http://konspekta.net/studopediaorg/baza1/198733415721.files/image201.gif>.
- Herrenknecht, Separation plants. Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/additional-equipment/tunnelling-logistics/separation-plants.html>.
- Herrenknecht, Slurry TBM. Available at: <https://www.herrenknecht.com>.
- Hibbitte, K., 2005. ABAQUS user subroutines reference manual. *Hks Inc*. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ABAQUS+User+Subroutines+Reference+Manual#3>.
- Kasper, T. & Meschke, G., 2004. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(14), pp.1441–1460.
- Kasper, T. & Meschke, G., 2006. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), pp.160–171.
- Kavvadas, M. et al., 2013. Report on the State-of-Art with Collection of Data from TBM Tunnelling. *European Research Program NeTTUN*.
- Konspekta, Slurry TBM. Available at: <http://konspekta.net/studopediaorg/baza1/198733415721.files/image203.gif>.
- Lambrughi, A., Medina Rodríguez, L. & Castellanza, R., 2012. Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations. *Computers and Geotechnics*, 40, pp.97–113.
- Lee, K.M., Rowe, R.K. & Lo, K.Y., 1992. Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), pp.929–940.
- Litsas, D., Fortsakis, P. & Kavvadas, M., 2015. 3D simulation of mechanized tunnel excavation. In *3rd Arabian Tunnelling Conference & Exhibition*. Dubai, UAE.
- Loganathan, N. & Poulos, H.G., 1998. Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9), pp.846–856.
- Luttikholt, A., 2007. *Ultimate limit state analysis of a segmented tunnel lining: Results of full-scale tests compared to finite element analysis*. Delft University of Technology.

- Mair, R.J. & Taylor, R.N., 1997. Bored tunnelling in the urban environment (State-of-the-art report and theme lecture). *The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.2353–2385.
- Mair, R.J. & Taylor, R.N., 1993. Prediction of clay behaviour around tunnels using plasticity solutions. *Predictive soil mechanics. Proc. of the Wroth memorial symposium, Oxford, 1992*, pp.449–463. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027795850&partnerID=tZOtx3y1>.
- Mair, R.J., Taylor, R.N. & Bracegirdle, A., 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Géotechnique*, 43(2), pp.315–320.
- MOST Construction Company, 2012. Robbins Company Plant, USA, Manufactured a Tunneling System for Moscow Subway Construction. Available at: <http://en.skmost.ru/press/photo/2012/08/29/robbins-moscow-metro.html>.
- Nagel, F. & Meschke, G., 2011. Grout and bentonite flow around a TBM: Computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(3), pp.445–452. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.12.001>.
- Nagel, F., Stascheit, J. & Meschke, G., 2012. Numerical simulation of interactions between the shield supported tunnel construction process and the response of soft, water saturated soils. *International Journal of Geomechanics*, (December), pp.689–696.
- O'Reilly, M.P. & New, B.M., 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. In *Tunnelling 82. Papers presented at the third International Symposium, organized by the Institution of Mining and Metallurgy*. Institution of Mining & Metallurgy, pp. 173–181.
- Peck, R.G., 1969. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 7(3), pp.225–290.
- Prountzopoulos, G., 2012. *Investigation of the Excavation Face Stability in Shallow Tunnels*. National Technical University of Athens.
- Rankin, W.J., 1988. Ground movements resulting from urban tunnelling: Predictions and effects. *Geological Society London Engineering Geology Special Publications*, 5(1), pp.79–92.
- Robbins, EPB New Delhi Metro. Available at: <http://www.therobbinscompany.com/en/case-study/new-delhi-metro/>.
- Robbins, Gripper TBM. Available at: <http://www.fhwa.dot.gov/>.
- Robbins, Grout Injection. Available at: <http://www.therobbinscompany.com/>.
- Robbins, Open Double Shield. Available at: [http://www.therobbinscompany.com/wp-content/uploads/2010/01/cd\\_ds\\_detail.jpg](http://www.therobbinscompany.com/wp-content/uploads/2010/01/cd_ds_detail.jpg).
- Sagaseta, C., 1987. Analysis of Undrained Soil Deformation Due To Ground Loss. *Geotechnique*, 37(3), pp.301–320.

- Schmidt, B., 1969. *Settlements and Ground Movements Associated with Tunneling in Soil*, University of Illinois. Available at: [https://books.google.gr/books?id=8M8\\_nQEACAAJ](https://books.google.gr/books?id=8M8_nQEACAAJ).
- Seli, EPB - Greece, Thessaloniki Metro. Available at: [http://db.selitunnel.com/4daction/seli\\_news?id=338&page=newsPhotoGallery&lingua=ing](http://db.selitunnel.com/4daction/seli_news?id=338&page=newsPhotoGallery&lingua=ing).
- Sitarenios, P. et al., 2015. Effect of Hydraulic Conditions in controlling the Face in EPB Excavated Tunnels. *SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Region. Proceedings of the 41st World Tunnel Congress*.
- Sitarenios, P., Litsas, D. & Kavvadas, M., 2016. The interplay of face support pressure and soil permeability on face stability in EPB tunnelling. *Proceedings of the 42nd World Tunnel Congress*, pp.1–10.
- The Masterbuilder Bureau, 2014. State of the Art TBM Full Face Driving. Available at: <https://www.masterbuilder.co.in/state-of-the-art-tbm-full-face-driving/>.
- Tunnelseis, EPB TBM. Available at: <http://www.tunnelseis.de/graphics/epb3.jpg>.
- Verruijt, A. & Booker, J.R., 1996. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Géotechnique*, 46(4), pp.753–756. Available at: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geot.1996.46.4.753>.