



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ  
ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΣΚΑΦΗ  
ΣΗΡΑΓΓΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΟΡΤΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Μ.ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016



---

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την αρωγή του κ.Μ.Καββαδά, αναπληρωτή καθηγητή στη σχολή πολιτικών μηχανικών του ΕΜΠ, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεχή του επίβλεψη και την επιστημονική του καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εργασίας. Η εμπειρία του και οι εύστοχες παρατηρήσεις του συνέβαλλαν σημαντικά στην ολοκλήρωση του συγκεκριμένου έργου. Κυρίως, όμως, θέλω να τον ευχαριστήσω για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ υπό την εποπτεία του ώστε να ολοκληρώσω το τελευταίο μέρος των σπουδών μου, μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να εκφράσω στον Δ.Λίτσα, υποψήφιο διδάκτορα του κ.Μ.Καββαδά, για τη συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η αρωγή του ήταν απαραίτητη για την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου έργου και η συμβολή του καθοριστική τόσο σε τεχνικά θέματα, που αφορούσαν στο χειρισμό του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, όσο και σε βασικά θέματα θεωρίας για τη δυνατότητα σωστής ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου, Φίλιππο, και τους γονείς μου για την υποστήριξη τους σε όλο αυτό το διάστημα της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και τους συμφοιτητές μου για την προσφορά τους μέσω της εμπειρίας τους από δικές τους διπλωματικές εργασίες.



---

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i	
Περιεχόμενα.....	iii	
Περίληψη.....	vi	
Abstract.....	vii	
Εισαγωγή.....	viii	
Λίστα Εικόνων.....	x	
Λίστα Διαγραμμάτων.....	xiii	
Λίστα Πινάκων.....	xvi	
<b><u>1</u></b>	<b><u>Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων.....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	Τύποι Μηχανημάτων Ολομέτωπης Κοπής.....	1
1.1.1	Non Shielded Open Face Machine (Gripper TBM).....	1
1.1.2	Shielded Open Face TBM.....	2
1.1.2.1	Single Shield TBM.....	2
1.1.2.2	Double Shield TBM.....	2
1.1.3	EPBM (Earth Pressure Balance Machine).....	3
1.1.4	Slurry Machine.....	4
1.1.5	Convertible Machine.....	4
1.2	EPB (Earth Pressure Balance) Machine.....	5
1.2.1	Βασικά τμήματα EPB.....	5
1.2.1.1	Κεφαλή κοπής (Cutting wheel).....	5
1.2.1.2	Θάλαμος Εκσκαφής (Excavation Chamber).....	7
1.2.1.3	Ατέρμων Κοχλίας (Screw Conveyor).....	7
1.2.1.4	Έμβολα Ώθησης (Thrust Cylinders).....	8
1.2.1.5	Προκατασκευασμένα Στοιχεία Ω.Σ. (Segmental Lining).....	9
1.2.1.6	Εισπίεση ενέματος (Grouting).....	10
1.2.1.7	Πρόσθετα (Additives).....	12
1.2.1.8	Σύστημα Μέτρησης Μάζας και Όγκου των Εκσκαφών (Weighting and volume measuring of the excavated products).....	12
1.2.1.9	Υποστήριξη μετώπου.....	14
1.2.2	Λειτουργία του EPB.....	15
<b><u>2</u></b>	<b><u>Καθιζήσεις.....</u></b>	<b><u>17</u></b>
2.1	Εδαφικές Μετακινήσεις κατά τη Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων.....	17
2.1.1	Εγκάρσια Συμπεριφορά.....	17
2.1.2	Διαμήκης Συμπεριφορά.....	18

2.1.3	Χαρακτηριστικές Παράμετροι των Εδαφικών Καθιζήσεων κατά τη Διάνοιξη Σήραγγας 19	
2.1.4	Μηχανισμοί Αστοχίας και Απώλειας Εδαφικού Όγκου.....	20
2.1.5	Επίδραση του Υδροφόρου Ορίζοντα στις Καθιζήσεις.....	22
<b>3</b>	<b><u>Αριθμητικό Προσομοίωμα .....</u></b>	<b>25</b>
3.1	Εισαγωγή.....	25
3.2	Χαρακτηριστικά Προσομοιώματος .....	25
3.2.1	Γεωμετρία Προσομοιώματος.....	25
3.2.2	Εδαφικές Ιδιότητες .....	26
3.2.3	EPB .....	27
3.2.4	Προκατασκευασμένα Στοιχεία Ω.Σ. (Segmental Lining).....	29
3.2.5	Πίεση στο Μέτωπο.....	30
3.2.6	Ένεμα (Grout).....	35
3.2.6.1	Α' Ομάδα Αναλύσεων .....	35
3.2.6.2	Β' Ομάδα Αναλύσεων .....	38
3.3	Βήματα Αναλύσεων .....	39
3.3.1	Γεωστατικό Βήμα .....	39
3.3.2	Εισαγωγή του EPB .....	40
3.3.3	Βήμα Διάνοιξης της Σήραγγας .....	40
<b>4</b>	<b><u>Επιρροή Εδαφικής Αντοχής στη Διάνοιξη των Σηράγγων .....</u></b>	<b>43</b>
4.1	Ομάδα Βασικών Αναλύσεων.....	43
4.1.1	Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων .....	43
4.1.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	44
4.1.2.1	Ανάλυση τριών εδαφικών προφίλ .....	44
4.1.2.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων όλων των εδαφικών προφίλ .....	52
4.1.2.3	Γενικά Αποτελέσματα.....	55
4.1.3	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	57
<b>5</b>	<b><u>Επιρροή του Ενέματος στη Διάνοιξη των Σηράγγων .....</u></b>	<b>59</b>
5.1	Α' Ομάδα Αναλύσεων .....	59
5.1.1	Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων .....	59
5.1.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	60
5.1.2.1	Αποτελέσματα με βάση την πίεση εισαγωγής του ενέματος.....	60
5.1.2.2	Γενικά Αποτελέσματα.....	70
5.1.3	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	72
5.2	Β' Ομάδα Αναλύσεων .....	75

---

5.2.1	Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων .....	75
5.2.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	76
5.2.3	Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	86
<b>6</b>	<b><u>Συμπεράσματα &amp; Προτάσεις</u></b> .....	<b>89</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	89
6.1.1	Καθιζήσεις .....	89
6.1.2	Πλαστικές Παραμορφώσεις .....	90
6.1.3	Πιέσεις Ενέματος .....	90
6.1.4	Πιέσεις Πόρων .....	90
6.2	Προτάσεις .....	91
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>92</b>

---

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της επιρροής της τεχνολογίας του ενέματος στην ανάπτυξη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας με τη χρήση μηχανήματος EPB σε πλήρως κορεσμένο αργιλικό έδαφος. Συγκεκριμένα, εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις, στόχος των οποίων είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει η αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος καθώς και ο χρόνος σκλήρυνσής του σε συνδυασμό με την εδαφική αντοχή στην εξέλιξη και τις τελικές τιμές των καθιζήσεων. Η προαναφερθείσα διερεύνηση συντελέστηκε μέσω τριάντα τριδιάστατων συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Στο προσομοίωμα περιλαμβάνονται σημαντικές λεπτομέρειες που επηρεάζουν τη διάνοιξη, όπως η κωνικότητα της ασπίδας, η υπερεκσκαφή που εκτελεί το EPB και το τραπεζοειδές φορτίο υποστήριξης του μετώπου. Για το έδαφος, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Παράλληλα, τα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετούνται στην ουρά της ασπίδας μετά από κάθε νέο βήμα εκσκαφής. Η εισαγωγή του ενέματος στο κενό επένδυσης και εδάφους γίνεται με εσωτερική πίεση στα στοιχεία που το απαρτίζουν, ώστε να προσεγγίσουν καλύτερα την αρχική του συμπεριφορά ως ρευστό. Η σκλήρυνση του ενέματος επιτελείται συναρτήσει του χρόνου, ακολουθώντας την προτεινόμενη καμπύλη σκλήρυνσης των Kasper & Meschke, 2004. Έτσι, η συμπεριφορά του ενέματος και η εξέλιξή της εξαρτάται μόνο από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος και την αλληλεπίδρασή του με το έδαφος.

Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα στα οποία αξίζει να αναφερθούμε επιγραμματικά αφορούν στις καθιζήσεις και τις πιέσεις πόρων. Αρχικά, η πίεση εισαγωγής του ενέματος είναι καθοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης και της εξέλιξης των καθιζήσεων, καθώς όσο πιο μικρή είναι η τιμή της πίεσης εισαγωγής, τόσο πιο εκτεταμένες καθιζήσεις αναπτύσσονται. Ο χρόνος σκλήρυνσης της καμπύλης του ενέματος έχει επίσης μεγάλη σημασία για την εξέλιξη των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, όταν το ένεμα σκληραίνει με αργό ρυθμό παρατηρούνται διαφορετικοί μηχανισμοί εκδήλωσης των μετακινήσεων αναλόγως με την αρχική πίεση εισαγωγής. Γενικά σε ακραία σενάρια εισπίεσης, είτε πολύ χαμηλής είτε πολύ υψηλής πίεσης, η αργή σκλήρυνση οδηγεί σε δυσμενή αποτελέσματα, είτε πρόκειται για εκτεταμένες καθιζήσεις είτε για επιφανειακές ανυψώσεις που οξύνουν τις διαφορικές καθιζήσεις για τις υφιστάμενες κατασκευές, σε αντίθεση με την ταχεία σκλήρυνση που ανεξάρτητα με την πίεση εισαγωγής διατηρεί τις καθιζήσεις σε ανεκτά όρια.

Τέλος, οι πιέσεις πόρων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την πίεση εισαγωγής του ενέματος, όσο και από την καμπύλη σκλήρυνσης που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του. Συγκεκριμένα, όσο πιο μεγάλη είναι η πίεση εισαγωγής του ενέματος, τόσο περισσότερο αυξάνονται οι πιέσεις πόρων αμέσως μετά την εισαγωγή του. Παράλληλα, ο χρόνος σκλήρυνσης παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς όσο αυξάνεται αυτός ο χρόνος, δηλαδή όσο περισσότερο το ένεμα βρίσκεται σε ρευστή ή ημι-ρευστή κατάσταση, παρατηρούνται μεγαλύτερες αυξήσεις των πιέσεων πόρων. Αντίθετα, στις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης, η επίδραση του ενέματος είναι μικρότερη στις μεταβολές των πιέσεων πόρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση των υπερπιέσεων και των καθιζήσεων, αφού η εξέλιξη των πιέσεων πόρων κατά τη διάρκεια της διάνοιξης επηρεάζει το φαινόμενο της στερεοποίησης, που είναι ο καθοριστικός παράγοντας ανάπτυξης των καθιζήσεων μετά την εισαγωγή του ενέματος. Γι' αυτό το λόγο παρατηρείται ότι η μεταβολή και συγκεκριμένα η παράταση του χρόνου σκλήρυνσης του ενέματος έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της στερεοποίησης και έτσι οι τελικές καθιζήσεις συντελούνται σε μεταγενέστερο χρόνο.



---

## Abstract

The present diploma thesis deals with the subject of the influence of grout technology in the development of the surface settlements during the construction of a shallow tunnel by an EPB machine in a saturated clay. To be more specific, a set of parametrical analyses were carried out in order to investigate the effect of the grout injection's pressure as well as the grout hardening combined with the undrained shear strength parameter in the progress of the surface settlements. The aforementioned investigation was conducted through numerical 3D-coupled analyses in the Finite Element code Abaqus.

The model includes important details that affect the tunnel's excavation, such as the shield's conicity, the cutterhead's overcut and the trapezoidal loading that supports the tunnel face. The constitutive law adopted for the soil behavior was the elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb yield criterion. Regarding the lining, the segments are installed at the shield's tail at the end of every excavation step. The grout injection's pressure is simulated by internal pressure in the grout elements, in order that the grout act as a fluid in the first hours after its injection. In addition to this, the grout hardens through time by the proposed curve that Kasper & Meschke have introduced in 2004. In this way, the grout behavior will be only affected by the boundary conditions and the interaction of the model's elements.

The most important conclusions that we have reached in the present thesis are about the settlements and the pore pressures. Firstly, the grout injection's pressure has a crucial importance in the progress of the surface settlements, since the larger the pressure is, the more restricted the settlements are. In addition to this, the process of the grout hardening is very important in the settlements' progress. To be more specific, when the grout is being hardened in a slow pace, the injection's pressure determines the failure mechanism. In general, extreme injection's pressures, either high or low, combined with the slow grout hardening leads to undesirable situations, since both extreme settlements and surface heaving can cause significant damage to the local buildings. In the contrary, if the grout is being hardened in a fast pace, it restrains the settlements in valid limits, without any heaving, no matter how large the initial grout pressure is.

Lastly, the pore pressures are affected both by the injection's pressure and the hardening pace that characterizes its behavior. Specifically, the higher the injection pressure is, the higher the increase is in the pore pressures right after the injection. Regarding the hardening, the slow pace is also an important factor in the progress of the pore pressures, as the more the hardening is delayed (the grout remains much time in a liquid, semi-liquid state), the more the pore pressures increase. In the contrary, the fast pace hardening grout leads to lower increases of the pore pressures, as it affects them significantly less. It is also important to remark that there is a direct correlation between the pore pressures and the settlements' development, since the progress of the pore pressures affects the soil solidification, that is the crucial factor of the settlements' development after the grout's injection. As a result, the delay in the grout hardening leads to an equivalent delay in the final settlements' development.

---

## Εισαγωγή

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

Το EPBM έχει το χαρακτηριστικό ότι ασκεί πίεση στο μέτωπο τόσο κατά την προχώρηση, όσο και σε στασιμότητα, εμποδίζοντας έτσι την εξώθηση του εδάφους στο μέτωπο. Αυτή η λειτουργία του είναι πολύ σημαντική και αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών (αναφέρονται στη βιβλιογραφία), καθώς η ανεξέλεγκτη εξώθηση του μετώπου οδηγεί σε εκτεταμένες επιφανειακές καθιζήσεις. Μια επίσης πολύ σημαντική λειτουργία του EPB είναι η εισαγωγή ενέματος στο κενό που δημιουργείται μεταξύ εδάφους και ασπίδας. Συγκεκριμένα, η κεφαλή κοπής εκτελεί μια υπερεκσκαφή της τάξης του ενός εκατοστού ενώ η ασπίδα έχει μια κωνική μορφή καθώς η διάμετρος της είναι μερικά εκατοστά μικρότερη στην ουρά της έναντι της κεφαλής κοπής. Δημιουργείται έτσι ένα κενό, ο βασικός σκοπός του οποίου είναι να μην αναπτύσσονται σημαντικές τριβές μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους, απαιτώντας πολύ μεγάλες δυνάμεις για την προχώρηση του EPB, καθώς επίσης και για να μπορεί το EPB να στρίβει με ορισμένη βέβαια καμπυλότητα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Αυτό το κενό επομένως είναι πρακτικά απαραίτητο για τη λειτουργία του EPB, όμως παράλληλα λειτουργεί ευνοϊκά για την ανάπτυξη παραμορφώσεων και εκδήλωση καθιζήσεων. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου γίνεται με την εισαγωγή ενέματος σε αυτό το κενό στο πίσω μέρος της ασπίδας όπου πλέον έχει τοποθετηθεί η επένδυση των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Το ένεμα εισπνέζεται με ορισμένη πίεση μέσω συστημάτων που βρίσκονται μέσα στην ασπίδα του EPB, και έτσι γεμίζει το κενό που έχει δημιουργηθεί. Η αρχική συμπεριφορά του ενέματος προσεγγίζει αυτή ενός ρευστού, ενώ στη συνέχεια συναρτήσει του χρόνου σκληραίνει αποκτώντας μια πιο στερεή μορφή. Επομένως, οι ιδιότητες του ενέματος και γενικότερα η τεχνολογία του είναι καθοριστικής σημασίας για την εξέλιξη των καθιζήσεων και κατ' επέκταση για τη δυνατότητα διάνοιξης μιας σήραγγας σε αστική περιοχή χωρίς αυτή να προξενήσει προβλήματα στις υφιστάμενες κατασκευές.

Ως εκ τούτου, για την καλύτερη αντιμετώπιση των καθιζήσεων από τη μεριά του ενέματος, είναι πολλή σημαντική η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών του, δηλαδή της αρχικής πίεσης εισαγωγής του ενέματος καθώς και του χρόνου στον οποίο σκληραίνει, αποκτώντας την τελική του αντοχή. Συγκεκριμένα, η επιλογή της πίεσης με την οποία εισάγεται το ένεμα στο κενό καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά του. Για παράδειγμα, χαμηλές τιμές

---

της αρχικής πίεσης σε σχέση με τις τοπικές τάσεις που επικρατούν ενδέχεται να μην προσφέρουν ουσιαστική βελτίωση στον περιορισμό των καθιζήσεων, καθώς αδυνατούν να συγκρατήσουν το έδαφος. Από την άλλη πλευρά, πολύ μεγάλες πιέσεις εισαγωγής, σημαντικά μεγαλύτερες από τις τοπικές τάσεις που επικρατούν στο σημείο εισαγωγής είναι πιθανό να προκαλέσουν το αντίθετο πρόβλημα, δηλαδή να εμποδίσουν την ανάπτυξη των καθιζήσεων και να προκαλέσουν ανυψώσεις στο έδαφος (blow out effect), φαινόμενο που συχνά είναι πολύ πιο δυσμενές από την εξέλιξη μόνο καθιζήσεων. Σε ότι αφορά τη σκλήρυνση του ενέματος, έχει σημασία ο χρόνος στον οποίο θα ολοκληρωθεί, ώστε να αποκτήσει την τελική του μορφή. Πιο συγκεκριμένα, το ένεμα όταν εισάγεται είναι σε μια ρευστή μορφή κατά την οποία δεν μπορεί ουσιαστικά να παραμορφωθεί, ενώ όσο περνάει ο χρόνος αποκτά μια πιο στερεή μορφή με αποτέλεσμα να εκδηλώνονται ορισμένες μετακινήσεις καθώς στερεοποιείται. Παρατεταμένη διάρκεια παραμονής στη ρευστή κατάσταση σε συνδυασμό και με την αντίστοιχη πίεση εισαγωγής του ενέματος είναι πιθανό να οδηγήσει σε δυσμενείς παραμορφώσεις και κυρίως δυσμενείς επιφανειακές μετακινήσεις που είναι και το κρίσιμο μέγεθος κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθούν παραμετρικά τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του ενέματος, δηλαδή η πίεση εισαγωγής και ο χρόνος σκλήρυνσης. Έτσι, θα γίνει κατανοητή η επίδραση που έχουν αυτά τα δύο μεγέθη στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των καθιζήσεων ώστε να καταλήξουμε στο βέλτιστο εύρος για κάθε μια από τις δύο παραμέτρους, ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατόν η διαταραχή που προκαλεί η διάνοιξη μια σήραγγας με χρήση μηχανήματος EPB στο αστικό περιβάλλον. Οι αναλύσεις γίνονται με πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Abaqus, για να εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων αλλά και για να ερμηνευτούν σωστά ορισμένες συμπεριφορές, γίνεται αρχικά μια εκτενής περιγραφή των χαρακτηριστικών του EPBM, ενώ επιπλέον παρουσιάζονται και βασικές έννοιες για τις καθιζήσεις καθώς και αποτελέσματα προηγούμενων δημοσιεύσεων πάνω σε αυτές.

---

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Τυπική αναπαράσταση ανοιχτού, χωρίς ασπίδα TBM(Gripper) ( <a href="http://www.fhwa.dot.gov">http://www.fhwa.dot.gov</a> ) .....	1
Εικόνα 1.2 Απεικόνιση TBM με μονή ασπίδα, με παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων εντός της ασπίδας ( <a href="http://www.herrenknecht.com">http://www.herrenknecht.com</a> ).....	2
Εικόνα 1.3 Απεικόνιση TBM με διπλή ασπίδα, με παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων εντός της ασπίδας ( <a href="http://www.herrenknecht.com">http://www.herrenknecht.com</a> ).....	3
Εικόνα 1.4 Απεικόνιση της ασπίδας του EPB και των βασικών του εξαρτημάτων ( <a href="http://www.fhwa.dot.gov">http://www.fhwa.dot.gov</a> ) .....	3
Εικόνα 1.5 Απεικόνιση της ασπίδας του Slurry Machine και των βασικών του εξαρτημάτων ( <a href="http://www.fhwa.dot.gov">http://www.fhwa.dot.gov</a> ) .....	4
Εικόνα 1.6 Απεικόνιση της ασπίδας ενός convertible machine και των βασικών του εξαρτημάτων τα οποία εντοπίζονται στις κίτρινες κουκκίδες ( <a href="http://www.tbm.cat.com">http://www.tbm.cat.com</a> ).....	5
Εικόνα 1.7 Εικόνα από την Αττικό Μετρό όπου παρουσιάζεται με μπλε χρώμα η κοπτική κεφαλή του EPB που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη του μετρό της Αθήνας ( <a href="http://www.ametro.gr">http://www.ametro.gr</a> ) .....	6
Εικόνα 1.8 Ατέρμων κοχλίας με κεντρικό άξονα (Ltd 2009).....	8
Εικόνα 1.9 Τα έμβολα ωθήσεως εφαρμόζουν στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ωθώντας το EPB προς το μέτωπο ( <a href="http://www.therobbinscompany.com">http://www.therobbinscompany.com</a> ).....	9
Εικόνα 1.10 (a) Επίπεδος σύνδεσμος, (b) και (c) κυρτοί σύνδεσμοι. (Luttikholt 2007) .....	10
Εικόνα 1.11 Ορισμός του κενού που προκύπτει κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων (Loganathan & Poulos 1998).....	11
Εικόνα 1.12 Απεικόνιση της μόνωσης της ασπίδας με τις μεταλλικές βούρτσες και της εισπίεσης του ενέματος μέσω των σωληνώσεων (Kanvadas et al. 2013) .....	12
Εικόνα 1.13 (a),(b) Σαρωτές όγκου με λέιζερ (Kanvadas et al. 2013).....	13
Εικόνα 1.14 (a) Κύλινδροι στις μεταφορικές ταινίες που ζυγίζουν το διερχόμενο υλικό (b) Οθόνες όπου γίνεται η απεικόνιση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τους κυλίνδρους. (Kanvadas et al. 2013) .....	14
Εικόνα 1.15 Υποστήριξη του μετώπου από την ασπίδα του EPB (Peila et al. 2013).....	14
Εικόνα 2.1 Προφίλ εγκάρσιας κατανομής των κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια. ....	17
Εικόνα 2.2 Καθιζήσεις και Οριζόντιες Μετακινήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Franzius 2003) .....	18
Εικόνα 2.3 Προφίλ των επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας .....	19
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση και επεξήγηση των παραμέτρων Ground Loss και Volume Loss. ....	20
Εικόνα 2.5 Απεικόνιση των εδαφικών απωλειών του περιβάλλοντος εδάφους κατά μήκος της ασπίδας του EPB. ....	21
Εικόνα 2.6 (i) Χρονοϊστορία της εξέλιξης των καθιζήσεων στην εδαφική επιφάνεια πάνω από τη σήραγγα, (ii) Προφίλ της εγκάρσιας κατανομής των καθιζήσεων για χαρακτηριστικά χρονικά σημεία (O'Reilly et al. 1992) .....	22

Εικόνα 2.7 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydroshield μηχανήματα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004) .....	23
Εικόνα 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	25
Εικόνα 3.2 Δεσμευμένοι κόμβοι (i) στο κάτω μέρος του προσομοιώματος (ii) στις επιφάνειες y-z (iii) στις επιφάνειες x-z .....	26
Εικόνα 3.3 EPB (i) θάλαμος εκσκαφής (ii) back up trailer (iii) ασπίδα.....	28
Εικόνα 3.4 Τομή της ασπίδας του EPB κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, όπου παρουσιάζεται η κωνικότητα της ασπίδας και οι υπερεσκαφές που επιτελούνται κατά τη λειτουργία του μηχανήματος.....	28
Εικόνα 3.5 (i) Καμπύλη «hard-contact» (ii) Καμπύλη προσέγγισης της «hard-contact» για διευκόλυνση της προσομοίωσής της από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus 2011). .....	29
Εικόνα 3.6 Διαδοχικοί δακτύλιοι προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος για ένα τμήμα της σήραγγας. ....	30
Εικόνα 3.7 Τυπική επιφάνεια στην οποία ασκείται η πίεση στο μέτωπο από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. ....	30
Εικόνα 3.8 Απεικόνιση της πίεσης που ασκεί το EPB ώστε να αντισταθμίσει τις πιέσεις από το μέτωπο, με τη χρήση του συντελεστή A (Sitarenios et al. 2015).....	31
Εικόνα 3.9 Μετρητές ολικών τάσεων (E1-E9) και μετρητές πιέσεων πόρων (W1-W3) στην κεφαλή κοπής του EPB. (Bezuijen et al. 2005).....	33
Εικόνα 3.10 Διαγράμματα ολικών τάσεων και πιέσεων πόρων από τα στοιχεία που προέκυψαν από τους μετρητές στην κεφαλή κοπής του EPB (Bezuijen et al. 2005) .....	34
Εικόνα 3.11 Ομάδες κόμβων στην εκάστοτε επιφάνεια του μετώπου για την εισαγωγή της πίεσης του EPB για τη συγκράτηση του μετώπου.....	34
Εικόνα 3.12 Παρουσίαση της σκλήρυνσης, δηλαδή της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας, στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus.....	36
Εικόνα 3.13 Τομή ενός EPB. Απεικονίζεται πάνω από τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος η δύναμη που ασκούν οι οι βούρτσες ώστε να μην εισέλθει το ένεμα στην ασπίδα. ....	37
Εικόνα 4.1 Παρουσίαση των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της σήραγγας κατά τη διάρκεια διάνοιξής της για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ.....	44
Εικόνα 4.2 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις. ....	45
Εικόνα 4.3 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι εγκάρσιες κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις.....	48
Εικόνα 4.4 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι υδατικές πιέσεις πόρων.....	49
Εικόνα 4.5 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydroshield	

---

μηχάνημα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004) .....	50
Εικόνα 5.1 Παρουσίαση των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάρκεια διάνοιξής της για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. ....	60
Εικόνα 5.2 Παρουσίαση των κατακόρυφων μετακινήσεων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. ....	61
Εικόνα 5.3 Παρουσίαση των πιέσεων πόρων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.....	64
Εικόνα 5.4 Παρουσίαση των εγκάρσιων κατακόρυφων μετακινήσεων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. ....	67
Εικόνα 5.5 Παρουσίαση της σκλήρυνσης, δηλαδή της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης, στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus. ....	78
Εικόνα 5.6 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydroshield μηχάνημα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004) .....	83
Εικόνα 5.7 Παρουσίαση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων για δύο καμπύλες σκλήρυνσης και δύο πιέσεις εισαγωγής από τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. ....	86

---

## Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 Απεικόνιση της πίεσης υποστήριξης του μετώπου για τρεις διαφορετικές τιμές του A και της υδροστατικής και εδαφικής πίεσης του μετώπου.....	32
Διάγραμμα 3.2 Κατανομή εισαγόμενων υδατικών πιέσεων και πίεσης υποστήριξης του μετώπου από το EPB στην επιφάνεια εκσκαφής κάθε βήματος. ....	35
Διάγραμμα 3.3 Απεικόνιση της καμπύλης σκλήρυνσης του ενέματος (i) με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η καμπύλη των Kasper & Meschke, 2004 (ii) με κόκκινο χρώμα η καμπύλη που εισάγεται στο προσομοίωμα.....	36
Διάγραμμα 3.4 Καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος με βάση το χρόνο σκλήρυνσής του για την τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke και για τέσσερις άλλους χρόνους (η κόκκινη καμπύλη ταυτίζεται με την χρυσή).....	38
Διάγραμμα 3.5 Καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος με βάση το χρόνο σκλήρυνσής του για την τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke και για τέσσερις άλλους χρόνους (η κόκκινη καμπύλη ταυτίζεται με την χρυσή).....	39
Διάγραμμα 4.1 Εξέλιξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ. ....	46
Διάγραμμα 4.2 (i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ, (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ. ....	47
Διάγραμμα 4.3 Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ. ....	48
Διάγραμμα 4.4 Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας. ....	50
Διάγραμμα 4.5 (i) Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για τα τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας (ii) Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ (iii) Εξέλιξη των πιέσεων μεταξύ ασπίδας-εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τα τρία εδαφικά προφίλ. (iv) Απεικόνιση του κενού ασπίδας-εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ (Χρησιμοποιείται κοινός άξονας χρόνου για τα τρία διαγράμματα, κάνοντας ουσιαστικά μεγέθυνση στον άξονα των διαγραμμάτων 4.2(ii) και 4.4). ....	51
Διάγραμμα 4.6 Εξέλιξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για όλα τα εδαφικά προφίλ.....	52
Διάγραμμα 4.7(i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για όλα τα εδαφικά προφίλ, (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για όλα τα εδαφικά προφίλ.....	53
Διάγραμμα 4.8 Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για όλα τα εδαφικά προφίλ.....	54
Διάγραμμα 4.9 Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για όλα τα εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας. ....	54
Διάγραμμα 4.10 Μέγιστες τιμές του Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου. ....	55
Διάγραμμα 4.11 Μέγιστες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου.....	56

Διάγραμμα 4.12 Μέγιστες τιμές των καθιζήσεων σε τρεις συγκεκριμένες θέσεις συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου. (Η τιμή $z=0$ αντιστοιχεί στον άξονα της σήραγγας).	56
Διάγραμμα 4.13 Τιμή του σημείου καμπής $i$ στις καμπύλες των επιφανειακών εγκάρσιων καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου.	57
Διάγραμμα 5.1 (i) Εξέλιξη ολικών τάσεων, υδατικών πιέσεων στη στέψη της σήραγγας και πίεσης ενέματος κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. (κοινός άξονας χρόνου για τα διαγράμματα (i),(ii))	62
Διάγραμμα 5.2 (i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος.	63
Διάγραμμα 5.3 Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	65
Διάγραμμα 5.4 Εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. (κοινός άξονας χρόνου για τα διαγράμματα (i),(ii))	66
Διάγραμμα 5.5 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	67
Διάγραμμα 5.6 Παρουσίαση της εξέλιξης των ολικών τάσεων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	68
Διάγραμμα 5.7 Παρουσίαση της εξέλιξης των υπερπιέσεων πόρων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	69
Διάγραμμα 5.8 Μέγιστες τιμές του Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	70
Διάγραμμα 5.9 Μέγιστες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	71
Διάγραμμα 5.10 Τιμή του σημείου καμπής $i$ των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.	71
Διάγραμμα 5.11 Εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για τιμή εισαγωγής $200\text{kPa}$ .	76
Διάγραμμα 5.12 Εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για τιμή εισαγωγής $300\text{kPa}$ .	77
Διάγραμμα 5.13 Εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου αναφοράς κατά τη διάρκεια διάνοιξης σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες και πίεση εισαγωγής $200\text{kPa}$ .	79
Διάγραμμα 5.14 Εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου αναφοράς κατά τη διάρκεια διάνοιξης σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες και πίεση εισαγωγής $300\text{kPa}$ .	79
Διάγραμμα 5.15 Εξέλιξη των ολικών τάσεων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής $200\text{kPa}$ .	80



---

Διάγραμμα 5.16 Εξέλιξη των υπερπιέσεων πόρων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa. ....	81
Διάγραμμα 5.17 Εξέλιξη των ολικών τάσεων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa. ....	82
Διάγραμμα 5.18 Εξέλιξη των υπερπιέσεων πόρων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa. ....	82
Διάγραμμα 5.19 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών μετακινήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις πέντε καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa. ....	84
Διάγραμμα 5.20 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις πέντε καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa. ....	85

---

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1 Δεδομένα των παραμετρικών αναλύσεων με βάση τις εδαφικές ιδιότητες .....	26
Πίνακας 4.1 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.....	43
Πίνακας 5.1 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.....	59
Πίνακας 5.2 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.....	75

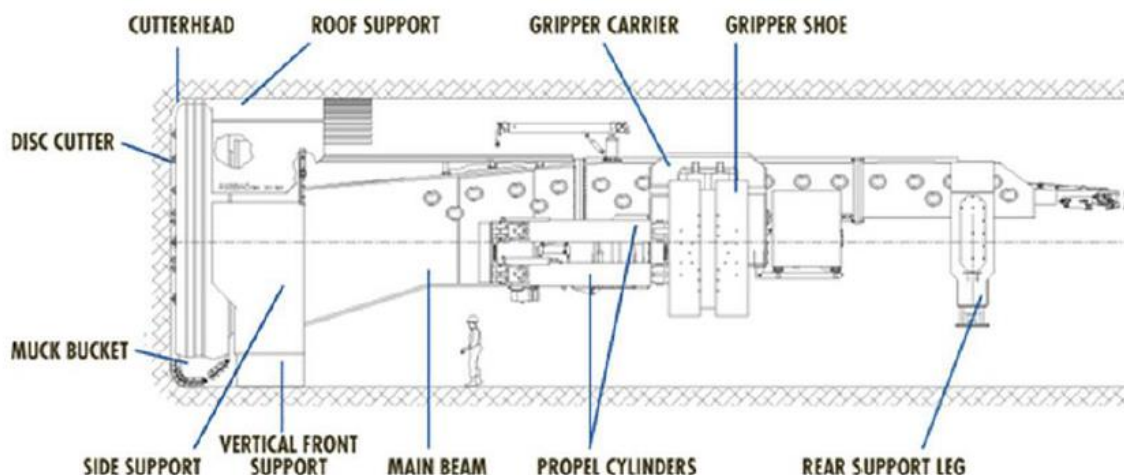
## 1 Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων

Η χρήση των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής έχει πλέον καθιερωθεί σε έργα ευρείας κλίμακας, λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρουν έναντι της συμβατικής εκσκαφής σηράγγων. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητά τους να υποστηρίξουν το μέτωπο, ιδίως σε εδαφικούς σχηματισμούς, μειώνοντας την ανάπτυξη των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων. Επιπλέον, η λειτουργία τους είναι ομαλή, μειώνοντας σημαντικά τις διαταραχές των σχηματισμών που περιβάλλουν τη σήραγγα και την τυχόν επίδραση τους σε κατασκευές που εδράζονται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ παράλληλα οι υπερεκσκαφές είναι σημαντικά λιγότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών μεθόδων. Σε ότι αφορά την υποστήριξη της σήραγγας η ομοιομορφία της εκσκαφής επιτρέπει την τυποποίηση της, παράγοντας που επίσης συντελεί στην ταχύτητα κατασκευής. Ως μειονέκτημα θεωρείται το υψηλό αρχικό κόστος για την αγορά, τη συναρμολόγηση και τοποθέτηση του μηχανήματος στο κατάλληλο βάθος ώστε να είναι έτοιμο για λειτουργία, αλλά σε μεγάλης κλίμακας έργα αντισταθμίζεται από το κέρδος λόγω της τυποποιημένης λειτουργίας του που οδηγεί σε ταχύτερη ολοκλήρωση της σήραγγας έναντι των συμβατικών μέσων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η χρήση του είναι μονόδρομος, όπως στη διάνοιξη σηράγγων μετρό σε αστικό περιβάλλον. Επομένως, είναι προφανές ότι η χρήση αυτών των μηχανημάτων γίνεται από ένα ελάχιστο μήκος διάνοιξης, όπου πλέον είναι ασύμφορη οικονομικά η συμβατική διάνοιξη, καθώς και για περιπτώσεις που θέλουμε να περιορίσουμε κατά το ελάχιστο την επίδραση στο περιβάλλον έδαφος και κατασκευές.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικοί τύποι των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τα πεδία εφαρμογής του κάθε τύπου μηχανήματος καθώς και γίνεται ανάλυση της λειτουργίας του μηχανήματος που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

### 1.1 Τύποι Μηχανημάτων Ολομέτωπης Κοπής

#### 1.1.1 Non Shielded Open Face Machine (Gripper TBM)



Εικόνα 1.1 Τυπική αναπαράσταση ανοιχτού, χωρίς ασπίδα TBM(Gripper) (<http://www.fhwa.dot.gov>)

Πρόκειται για τα μηχανήματα TBM ελεύθερης κεφαλής, χωρίς ασπίδα. Έχουν εφαρμογή σε καλής ποιότητας βραχώμαζα, με μικρά εύρη ρωγμών και ασθενών τμημάτων, ενώ τυχόν υδατικές

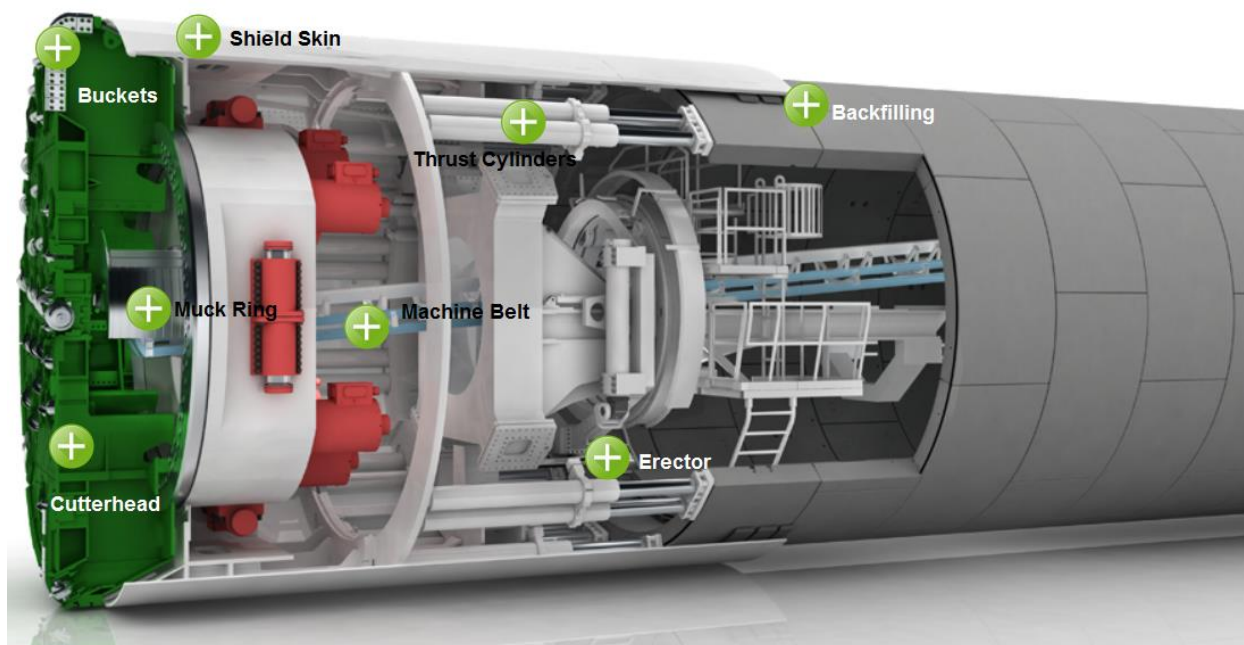
εισροές που οφείλονται στον υδροφόρο ορίζοντα είναι περιορισμένες και ελεγχόμενες. Ουσιαστικά, τόσο το μέτωπο, όσο και τα τοιχώματα της σήραγγας δεν απαιτούν κάποια υποστήριξη, και έτσι συνήθως δεν τοποθετείται κάποια επένδυση στη διατομή που εκσκάπεται. Ως εκ τούτου, η ευστάθεια των ανωτέρω σχηματισμών επιτρέπει στον συγκεκριμένο τύπο TBM να χαρακτηρίζεται από τον ταχύ ρυθμό διάνοιξης της σήραγγας.

### 1.1.2 Shielded Open Face TBM

Τα μηχανήματα TBM με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε σχηματισμούς μέσης ποιότητας βραχώμαζας, με σημαντικές διακλάσεις, ή σε μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς, με τοπικά ασταθή μέτωπα εκσκαφής. Ο ρόλος της ασπίδας είναι να προστατέψει το εσωτερικό του μηχανήματος (λεπτομερής ανάλυση γίνεται παρακάτω), ενώ στο τέλος της ασπίδας γίνεται η τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος που σχηματίζουν κυλινδρική διατομή και αποτελούν την μόνιμη επένδυση της σήραγγας. Ο συγκεκριμένος τύπος TBM διακρίνεται σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες, οι οποίες είναι:

#### 1.1.2.1 Single Shield TBM

Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρή ασπίδα σε μήκος, γεγονός που μειώνει την πιθανότητα να παγιδευτεί λόγω των τάσεων σύνθλιψης που αναπτύσσονται κατά την εκσκαφή. Οι συγκεκριμένες τάσεις είναι σημαντικές κυρίως σε βραχώδεις σχηματισμούς.

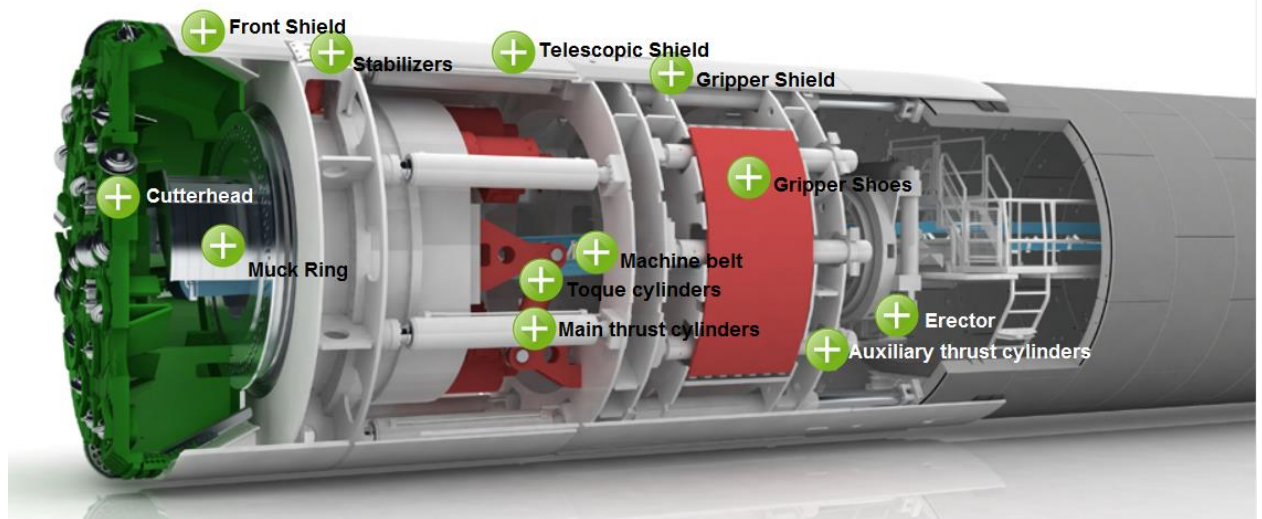


Εικόνα 1.2 Απεικόνιση TBM με μονή ασπίδα, με παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων εντός της ασπίδας (<http://www.herrenknecht.com>)

#### 1.1.2.2 Double Shield TBM

Τα μηχανήματα TBM διπλής ασπίδας έχουν ως ουσιαστική διαφορά με τα αντίστοιχα μονής ασπίδας τον ρυθμό διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η ασπίδα είναι χωρισμένη σε δύο τμήματα με αποτέλεσμα ενώ το εμπρόσθιο τμήμα (που περιλαμβάνει την κεφαλή κοπής) διανοίγει τη σήραγγα, το δεύτερο τμήμα (που περιλαμβάνει την ουρά της ασπίδας) είναι σταθεροποιημένο και τοποθετεί τα στοιχεία σκυροδέματος στα τοιχώματα της σήραγγας. Έτσι, ο συγκεκριμένος

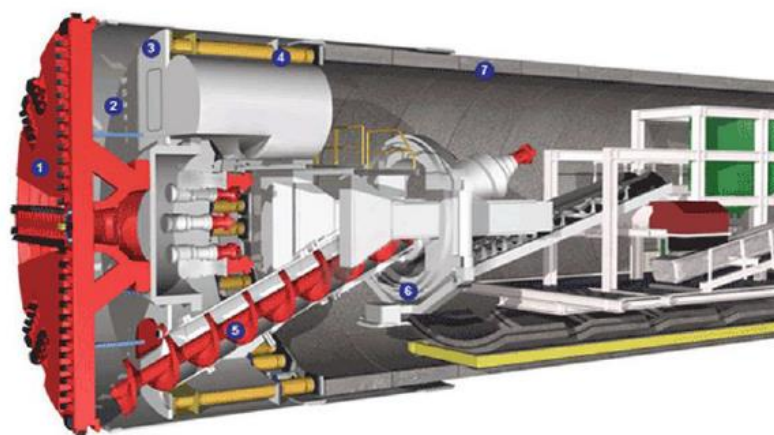
τύπος είναι ταχύτερος στη διάνοιξη της σήραγγας, αλλά ταυτόχρονα λόγω του μεγαλύτερου μήκους της ασπίδας του κινδυνεύει περισσότερο να παγιδευτεί από τις τάσεις σύνθλιψης.



Εικόνα 1.3 Απεικόνιση TBM με διπλή ασπίδα, με παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων εντός της ασπίδας (<http://www.herrenknecht.com>)

### 1.1.3 EPBM (Earth Pressure Balance Machine)

Τα μηχανήματα EPB έχουν πεδίο εφαρμογής σε εδαφικούς κυρίως σχηματισμούς (ενδεχομένως και σε πολύ έντονα κατακερματισμένες βραχώμαζες, χωρίς ουσιαστική αντοχή), με σοβαρά προβλήματα αστάθειας μετώπου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αργιλικά εδάφη και γενικότερα σε μη περατούς εδαφικούς σχηματισμούς. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι ασκούν πίεση στο μέτωπο εκσκαφής ώστε να το σταθεροποιήσουν για να αποφευχθεί αφενός κατάρρευση του μετώπου, αφετέρου να μειωθούν οι εδαφικές μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από την σήραγγα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί μηχάνημα ολομέτωπης εκσκαφής EPB, οπότε και θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα τμήματα του και η λειτουργία του παρακάτω.



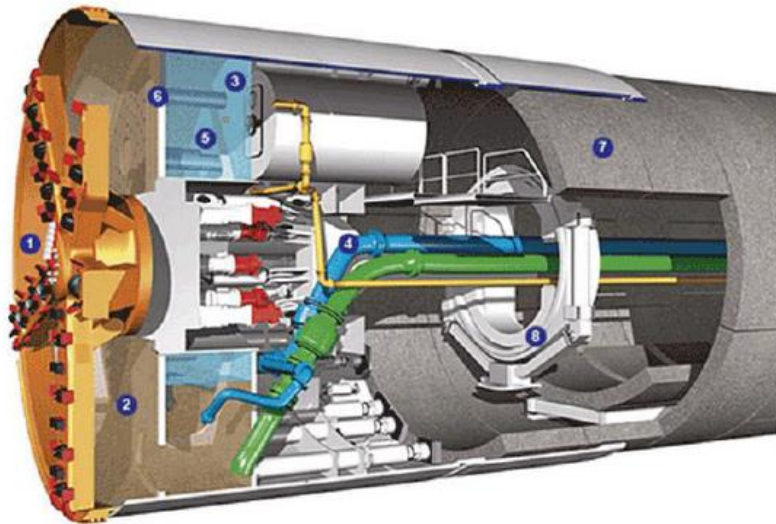
Notes: (1) Cutterhead; (2) excavation chamber; (3) bulkhead; (4) thrust cylinders; (5) screw conveyor; (6) segment erector; and (7) Segmental Lining

Εικόνα 1.4 Απεικόνιση της ασπίδας του EPB και των βασικών του εξαρτημάτων (<http://www.fhwa.dot.gov>)



### 1.1.4 Slurry Machine

Η λειτουργία τους έχει αρκετά κοινά στοιχεία με τα EPB, καθώς και τα δύο ασκούν πίεση στο μέτωπο με σκοπό την εξισορρόπηση των δυνάμεων ανατροπής του μετώπου με τις δυνάμεις ισορροπίας από το μηχάνημα. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο υποστήριξης του μετώπου μέσα από το θάλαμο εκσκαφής. Συγκεκριμένα, τα EPB επιχειρούν σε αργιλώδη εδάφη τα οποία μόλις τοποθετηθούν στον θάλαμο εκσκαφής λειτουργούν ως υποστήριξη για το μέτωπο, χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία, λόγω της συνοχής και της μικρής (στα όρια της μηδενικής) περατότητας που έχουν εκ φύσεως τα συνεκτικά εδάφη. Αντίθετα, τα μηχανήματα slurry επιχειρούν σε πιο κοκκώδεις εδαφικούς σχηματισμούς, με αποτέλεσμα να μην έχουν την απαιτούμενη συνοχή ώστε να λειτουργήσουν ως επαρκή υποστήριξη του μετώπου. Έτσι, είναι υποχρεωτική η προσθήκη ειδικών μιγμάτων, όπως μπετονίτης, τα οποία ανακυκλώνονται συνεχώς με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία ώστε να προστίθενται συνεχόμενα στο υλικό που εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής, προσδίδοντάς του συνοχή και αδιαπερατότητα.

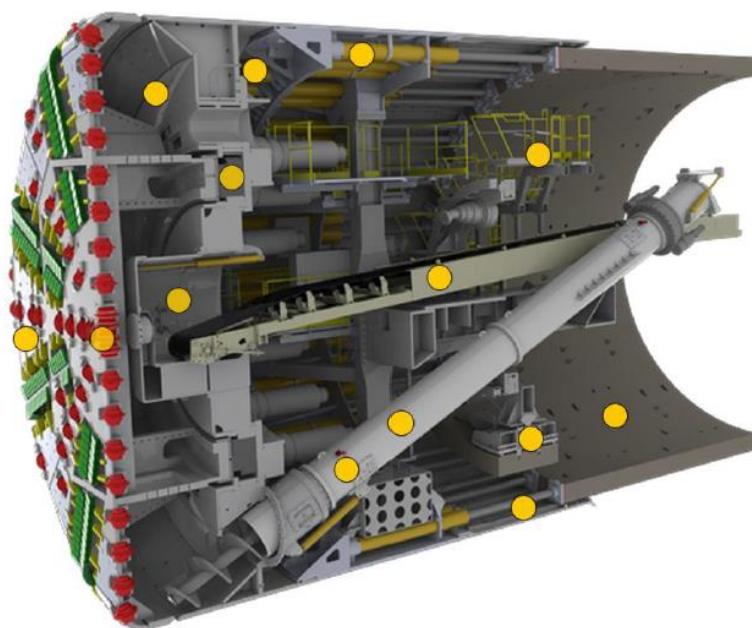


Notes: (1) Cutterhead; (2) excavation chamber; (3) bulkhead; (4) slurry feed line; (5) air cushion; (6) wall; (7) Segmental Lining; and (8) segment erector

*Εικόνα 1.5 Απεικόνιση της ασπίδας του Slurry Machine και των βασικών του εξαρτημάτων* (<http://www.fhwa.dot.gov>)

### 1.1.5 Convertible Machine

Αυτός ο τύπος μηχανημάτων χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις σύνθετων εδαφικών σχηματισμών, όπου πρακτικά υπάρχει σημαντική εναλλαγή από συνεκτικά σε κοκκώδη εδάφη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, κρίνεται αντιοικονομική η χρήση μόνο ενός EPB ή Slurry και προτιμάται η χρήση ειδικού μηχανήματος που λειτουργεί τόσο ως EPB όσο και ως Slurry, ανάλογα με την ποιότητα και τη φύση του εδαφικού σχηματισμού που συναντά κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Εικόνα 1.6 Απεικόνιση της ασπίδας ενός convertible machine και των βασικών του εξαρτημάτων τα οποία εντοπίζονται στις κίτρινες κουκκίδες (<http://www.tbm.cat.com>)

## 1.2 EPB (Earth Pressure Balance) Machine

Το EPB, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι τύπος μηχανήματος που ασκεί πίεση στο μέτωπο, ώστε να το σταθεροποιεί. Επιχειρεί σε αργιλικά εδαφικά στρώματα, σχετικά αδιαπέρατα, όπως για παράδειγμα αργιλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές αντοχές με αποτέλεσμα η υποστήριξη του μετώπου να καθίσταται απαραίτητη. Ως επί το πλείστον, το EPB επιχειρεί επιτυχώς σε αστικές περιοχές (χαρακτηριστικό παράδειγμα οι σήραγγες μετρό), με αποτέλεσμα ο περιορισμός των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους να είναι ο βασικός στόχος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας, αλλά και το κριτήριο που καθορίζει τη δυνατότητα κατασκευής του έργου στο συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ κατά τη σύνταξη της μελέτης. Ουσιαστικά, η υποστήριξη του μετώπου είναι διττής σημασίας, καθώς εξασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου και μειώνει σημαντικά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

### 1.2.1 Βασικά τμήματα EPB

Το EPB είναι ένα μηχάνημα που το συνολικό του μήκος κυμαίνεται σε τάξη μεγέθους περί τα 100m. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά και ανάλυση των τμημάτων που βρίσκονται εντός της ασπίδας (περί τα 10m), καθώς και οι ενέργειες που συντελούνται σε αυτό το τμήμα του μηχανήματος που αποτελούν τη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας και πρακτικά καθορίζουν τη συμπεριφορά του μετώπου και των τοιχωμάτων της σήραγγας. Έτσι, κατά την κατάρτιση του προσομοιώματος εκσκαφής, λαμβάνεται υπόψη η ασπίδα και οι λειτουργίες εντός αυτής, καθώς το πίσω μέρος του EPB βρίσκεται στο ήδη υποστηριγμένο τμήμα της σήραγγας. Τα βασικά τμήματα επομένως της ασπίδας είναι:

#### 1.2.1.1 Κεφαλή κοπής (Cutting wheel)

Η κεφαλή κοπής περιλαμβάνει τα κοπτικά εργαλεία, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η εκσκαφή του μετώπου, κατά την περιστροφή της κεφαλής. Το είδος των κοπτικών εξαρτάται από το έδαφος που πρέπει να εκσκαφτεί στο μέτωπο. Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει για τα κενά που έχει η

ασπίδα ώστε να διέρχεται μέσω αυτών το υλικό που εκσκάπτεται από το μέτωπο. Συγκεκριμένα, μεγάλα κενά προσφέρουν ομοιομορφία στην πίεση υποστήριξης του μετώπου και μειώνουν τον κίνδυνο φραγμού των κενών, όμως σε αστικές περιοχές (όπως αυτές που θα μελετήσουμε) υπάρχει κίνδυνος για σημαντικές παραμορφώσεις λόγω μη αποτελεσματικής συγκράτησης του συνόλου του μετώπου. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται κλειστή κεφαλή κοπής, με λίγα κενά αυξάνεται ο κίνδυνος φραγμού των μικρών κενών, αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή ειδικών χημικών προσθετικών, που αυξάνουν την εργασιμότητα του εδαφικού υλικού. Έτσι, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στηρίζει ικανοποιητικά και αξιόπιστα το μέτωπο, εμποδίζοντας την κατάρρευση μεμονωμένων μαζών, η κλειστή κεφαλή κοπής είναι η πλέον αξιόπιστη λύση σε αστικές περιοχές, όπου πρακτικά οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους καθορίζουν εν πολλοίς τη μελέτη και τη δυνατότητα περαίωσης του έργου.



*Εικόνα 1.7 Εικόνα από την Αττικό Μετρό όπου παρουσιάζεται με μπλε χρώμα η κοπτική κεφαλή του EPB που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη του μετρό της Αθήνας (<http://www.ametro.gr>)*

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στα άκρα του τροχού κοπής υπάρχουν ειδικά κοπτικά εργαλεία, τα οποία ουσιαστικά εκσκάπτουν μεγαλύτερη διάμετρο από την απαιτούμενη, με τη διαφορά αυτή να έγκειται σε τάξη μεγέθους ενός εκατοστού. Έτσι, έχουμε μια υπερεκσκαφή η οποία γίνεται με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του EPB, ώστε να μην αναπτύσσονται τριβές μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και για να μπορεί να στρίβει το EPB με ορισμένη βέβαια καμπυλότητα. Συγκεκριμένα, η ασπίδα του EPB έχει ένα κωνικό σχήμα με τη μέγιστη διάμετρο στο μέτωπο και την ελάχιστη στο πίσω άκρο της, με αποτέλεσμα σε μικρές συγκλίσεις του εδάφους να μην υπάρχει επαφή ασπίδας-εδάφους, ενώ σε περίπτωση μεγάλων συγκλίσεων οι τάσεις που θα αναπτύσσονται λόγω των τριβών στη διεπιφάνεια θα είναι σχετικά μικρές λόγω της αποτόνωσης των ορθών τάσεων που θα οφείλεται στις παραμορφώσεις.

Σε ότι αφορά τα εργαλεία κοπής που τοποθετούνται είτε μπροστά στην κεφαλή κοπής, είτε στα άκρα της, είναι πολύ σημαντική η αντικατάστασή τους όταν αυτή απαιτείται, κυρίως λόγω της φθοράς που υφίστανται κατά την εκσκαφή. Η αντικατάσταση των κοπτήρων είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και δαπανηρή διαδικασία όταν λαμβάνει χώρα στο μέτωπο εκσκαφής, καθώς σε τέτοιες καταστάσεις είναι ιδιαίτερα δυσμενής η υποστήριξη του μετώπου ενώ το EPB



ακίνητοποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να προσφέρει έργο. Έτσι, η βέλτιστη επιλογή είναι η αλλαγή των κοπτήρων και τυχόν συντήρηση του μηχανήματος να γίνεται στους σταθμούς, οι οποίοι κατά το σχεδιασμό έχουν εκσκαφτεί πριν τρυπήσει το μέτωπο το EPB. Παράλληλα, για να εμποδιστεί η ταχεία φθορά των κοπτήρων, λαμβάνονται μέτρα, όπως η ελαχιστοποίηση τριβών μεταξύ ασπίδας-εδάφους καθώς και η υποστήριξη του μετώπου με μικρότερες τάσεις από τις αντίστοιχες γεωστατικές στο συγκεκριμένο βάθος επιτρέποντας ενδεχομένως κάποιες μικρές ελεγχόμενες μετακινήσεις. Έτσι, η κεφαλή κοπής μπορεί να περιστρέφεται χωρίς να απαιτείται πολύ μεγάλη ροπή και κατά συνέπεια μειώνεται η φθορά των κοπτικών.

### **1.2.1.2 Θάλαμος Εκσκαφής (Excavation Chamber)**

Ο θάλαμος εκσκαφής εντοπίζεται αμέσως μετά την κεφαλή κοπής. Σε αυτόν το χώρο εισέρχεται το υλικό που εκσκάπτεται, το οποίο συχνά είναι αναμεμιγμένο με χημικά πρόσθετα, που αυξάνουν την εργασιμότητα του υλικού, αλλά ταυτόχρονα μειώνουν το ειδικό βάρος του. Ο θάλαμος εκσκαφής είναι γεμάτος με εδαφικό υλικό, το οποίο λειτουργεί ως υποστήριξη του μετώπου, σε συνδυασμό με τα έμβολα ώθησης. Πιο συγκεκριμένα, η δύναμη που απαιτείται για την εξισορρόπηση του μετώπου προκύπτει από τα έμβολα ώθησης, η λειτουργία των οποίων αναλύεται παρακάτω. Όμως, η κατανομή αυτής της δύναμης που προσφέρουν τα έμβολα σε όλο το μέτωπο γίνεται μέσω του εδαφικού υλικού που υπάρχει στο θάλαμο εκσκαφής, το οποίο λειτουργεί ουσιαστικά ως το μέσο μετατροπής των σημειακών δυνάμεων των εμβόλων σε επιφανειακή τάση στο μέτωπο. Πολύ σημαντικό ρόλο στον θάλαμο εκσκαφής έχει ο ατέρμων κοχλίας, ο οποίος μεταφέρει το υλικό που εκσκάπτεται μακριά από το μέτωπο εκσκαφής, η θέση του οποίου αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο λειτουργεί είναι από τις πλέον σημαντικές διεργασίες στο EPB.

### **1.2.1.3 Ατέρμων Κοχλίας (Screw Conveyor)**

Ο ατέρμων κοχλίας είναι από τα πλέον σημαντικά τμήματα του EPB, αφού η λειτουργία του καθορίζει εν πολλοίς την επίτευξη της απαιτούμενης υποστήριξης του μετώπου. Ο σκοπός του είναι να μεταφέρει το υλικό εκσκαφής από το θάλαμο εκσκαφής στο πίσω μέρος του EPB, ώστε να απομακρυνθεί με ασφάλεια. Ο ρυθμός περιστροφής του ατέρμονος κοχλίας είναι καθοριστικός αφού λαμβάνοντας υπόψη και το ρυθμό διάνοιξης της σήραγγας, πρέπει να απομακρύνει το υλικό με τέτοια ταχύτητα ώστε ο θάλαμος εκσκαφής να είναι πάντα γεμάτος για την πλήρη υποστήριξη του μετώπου. Έτσι, καθώς η ταχύτητα εκσκαφής έχει γενικά συχνές διακυμάνσεις (λόγω των διαφορετικών καταστάσεων του εδάφους που συναντά), η ταχύτητα του ατέρμονος κοχλίας προσαρμόζεται αναλόγως, ώστε να μην αδειάζει ο θάλαμος εκσκαφής, αλλά ούτε να καθυστερεί η μεταφορά του υλικού εκσκαφής.

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



Εικόνα 1.8 Ατέρμων κοχλίας με κεντρικό άξονα (Ltd 2009)

#### 1.2.1.4 Έμβολα Ωθησης (Thrust Cylinders)

Τα έμβολα ώθησης έχουν ως στόχο τη σταθεροποίηση του EPB κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και παράλληλα να το ωθούν προς το μέτωπο για τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι δυνάμεις από τα έμβολα ώθησης έχουν ως βασικές λειτουργίες τη σταθεροποίηση του μετώπου ασκώντας τις δυνάμεις τους στο έδαφος μέσω του θαλάμου εκσκαφής, και την ώθηση προς τα εμπρός του EPB ώστε να γίνει η εκσκαφή του μετώπου. Γενικά οι δυνάμεις που ασκούν τα έμβολα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να υπερκαλύψουν τις τριβές μεταξύ ασπίδας και του περιβάλλοντος εδάφους. Όμως, πολύ μεγάλες δυνάμεις από τα έμβολα ώθησης δεν είναι επιθυμητές, αφού θα αυξήσουν τις τριβές μεταξύ της κεφαλής κοπής και του μετώπου δυσχεραίνοντας την περιστροφή της κεφαλής, με άμεση συνέπεια τη φθορά των κοπτικών και την ενδεχόμενη αλλαγή τους εν μέσω της διάνοιξης, κατάσταση η οποία είναι ιδιαίτερα προβληματική όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 1.2.1.1 και πρέπει να αποφεύγεται.

Ο καθορισμός των δυνάμεων των εμβόλων εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων και αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Γενικά, η λειτουργία των εμβόλων βελτιστοποιείται όταν η φθορά των κοπτικών της κεφαλής κοπής γίνεται με τέτοιο ρυθμό που επιτρέπει να γίνει η αντικατάσταση τους στους σταθμούς και όχι κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι η σωστή λειτουργία των κοπτικών συνεπάγεται ότι βρίσκονται σε καθεστώς υψηλών θλιπτικών τάσεων, ώστε να έχουν την επιθυμητή αποδοτικότητα, επομένως τα έμβολα ώθησης έχουν μια ελάχιστη δύναμη που πρέπει να ασκούν κατά τη διάνοιξη. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το μήκος και το βάρος ολόκληρου του EPB, καθώς και οι περιβάλλουσες εδαφικές συνθήκες, αφού καθορίζουν την τριβή που θα αναπτυχθεί επιφανειακά με το EPB, την οποία πρέπει να υπερνικήσουν τα έμβολα κατά την προώθηση του μηχανήματος.



Εικόνα 1.9 Τα έμβολα ωθήσεως εφαρμόζουν στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ωθώντας το EPB προς το μέτωπο (<http://www.therobbinscompany.com>)

#### **1.2.1.5 Προκατασκευασμένα Στοιχεία Ω.Σ. (Segmental Lining)**

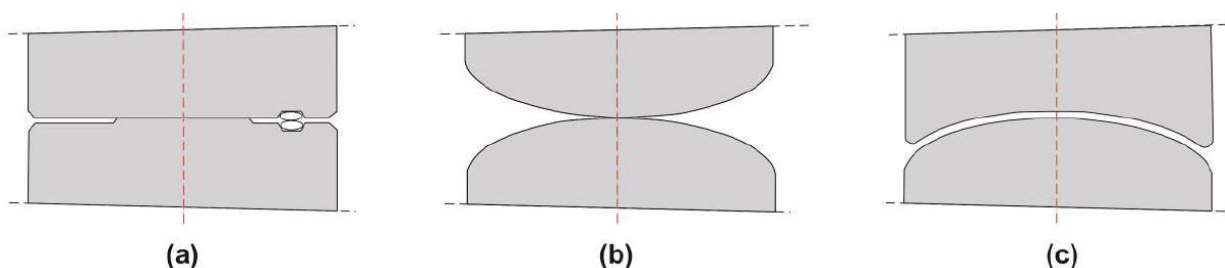
Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν την τελική επένδυση της σήραγγας, η οποία είναι σχεδιασμένη να αναλαμβάνει με ασφάλεια τις στατικές φορτίσεις από το περιβάλλον έδαφος και υδροφόρο ορίζοντα καθώς και τις δυναμικές φορτίσεις, όπως είναι η κίνηση ενός συρμού εντός της σήραγγας, οι σεισμικές δράσεις ή μια έκρηξη. Παράλληλα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις που δέχονται τα προκατασκευασμένα στοιχεία κατά τη διάρκεια λειτουργίας του EPB στη διάνοιξη της σήραγγας. Συγκεκριμένα, τα έμβολα ώθησης εφαρμόζουν και ασκούν πολύ ισχυρές θλιπτικές τάσεις στα προκατασκευασμένα στοιχεία, με αποτέλεσμα να απαιτείται η μελέτη αυτής της φόρτισης.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος δημιουργούν ένα δακτύλιο, ο οποίος ενώνεται με τους αντίστοιχους γειτονικούς. Η σύνδεση των στοιχείων του δακτυλίου, (αλλά και των δακτυλίων μεταξύ τους) γίνεται με αρμούς σύνδεσης, η θέση των οποίων επιδιώκεται να είναι διαφορετική σε κάθε διαδοχικό δακτύλιο, ώστε συνολικά η επένδυση να έχει καλή συμπεριφορά χωρίς πρακτικά αδύναμα σημεία. Πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία έχει η κλειδα, δηλαδή το στοιχείο το οποίο τοποθετείται τελευταίο στην κορυφή κάθε δακτυλίου και ουσιαστικά μεταφέρει τα φορτία που δέχεται η σήραγγα από τα υπερκείμενα στην υπόλοιπη επένδυση και εν τέλει στο περιβάλλον έδαφος.

Σε ορισμένες σήραγγες μετά την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων τοποθετείται ένα δεύτερο στρώμα σκυροδέματος, με σκοπό την ενίσχυση της επένδυσης. Αυτή η τεχνική πλέον έχει απορριφθεί καθώς πέρα από το επιπλέον κόστος (που αυξάνει σημαντικά για το σύνολο της σήραγγας) παρουσιάζει επιπλέον αδυναμίες. Συγκεκριμένα, η ποιότητα της δεύτερης στρώσης

σε συνθήκες εργοταξίου δε μπορεί να ελεγχθεί και είναι πρακτικά υποδεέστερη των προκατασκευασμένων στοιχείων, τα οποία κατασκευάζονται εργοστασιακά με υψηλό επίπεδο ελέγχου. Επιπλέον, με τα προκατασκευασμένα στοιχεία υπάρχει το πλεονέκτημα ότι η επένδυση φτάνει την τελική της αντοχή άμεσα, μόλις η ουρά της ασπίδας παρέλθει από το εκάστοτε στοιχείο. Παράλληλα είναι πιο εύκολο να εντοπιστούν τυχόν διαρροές νερού από τους αρμούς και να επισκευαστούν άμεσα, πριν προκαλέσουν ουσιαστικό πρόβλημα. Τέλος, σε ότι αφορά την ένταση που θα αναπτυχθεί στην επένδυση υπάρχει πολύ μεγάλη αβεβαιότητα για την κατανομή της όταν υπάρχουν δύο στρώσεις, σε αντίθεση με την επένδυση που απαιτείται μόνο από προκατασκευασμένα στοιχεία.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνδεσμολογία μεταξύ των στοιχείων του ίδιου δακτυλίου. Υπάρχει η δυνατότητα για δύο είδη συνδέσμων, επίπεδου και κυρτού. Η ουσιαστική τους διαφορά έγκειται στη μεταφορά καμπτικών τάσεων από το ένα στοιχείο στο άλλο. Συγκεκριμένα, στον επίπεδο σύνδεσμο, όταν υπάρξει ορισμένη περιστροφή του ενός στοιχείου αναπτύσσονται ροπές, οι οποίες ενδέχεται να έχουν σημαντικό μέτρο σε μεγάλες περιστροφές, γεγονός που αποτελεί και το μειονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας. Αντίθετα, στους κυρτούς συνδέσμους η επαφή των δύο στοιχείων γίνεται με καμπύλες επιφάνειες. Έτσι, λειτουργούν ουσιαστικά ως αρθρώσεις με αποτέλεσμα να επιτρέπουν σχετικές περιστροφές των στοιχείων, χωρίς να αναπτύσσονται καμπτικές ροπές.



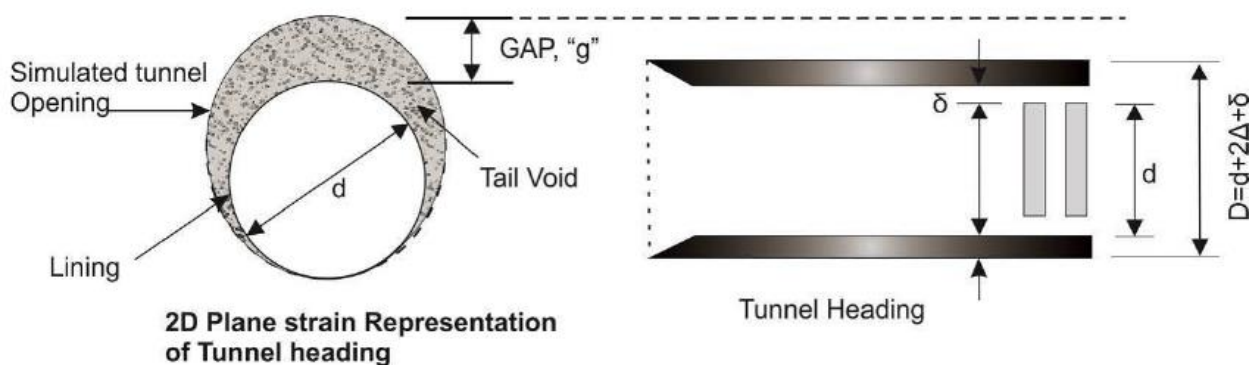
Εικόνα 1.10 (α) Επίπεδος σύνδεσμος, (b) και (c) κυρτοί σύνδεσμοι. (Luttikholt 2007)

### 1.2.1.6 Εισπίεση ενέματος (Grouting)

Κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας δημιουργούνται κενά μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και του περιβάλλοντός εδάφους. Αυτά τα κενά οφείλονται αφενός λόγω της υπερεσκαφής που εκτελεί το EPB καθώς και λόγω της κωνικότητας της ασπίδας (με στόχο τη μείωση των τριβών στην ασπίδα), αφετέρου λόγω της απόστασης που υπάρχει μεταξύ του εξωτερικού τμήματος του EPB και του εσωτερικού τμήματος όπου τοποθετούνται τα προκατασκευασμένα στοιχεία, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η κάλυψη των κενών είναι απαραίτητη, κυρίως για περιορισμό των καθιζήσεων και γίνεται με εισπίεση ενέματος.

Ένας ορισμός του κενού που δημιουργείται μεταξύ εδάφους και επένδυσης δόθηκε από τον (Lee et al. 1992) όπου εξέφρασε το ζητούμενο μέγεθος μέσω της εξίσωσης:  $G = G_p + U_{3D} + w$  όπου το μέγεθος  $G_p$  εκφράζει το φυσικό κενό, συνήθως τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας με τη μέγιστη εξωτερική διάμετρο της επένδυσης, το μέγεθος  $U_{3D}$  την ελαστο-πλαστική παραμόρφωση στο μέτωπο της σήραγγας ενώ το μέγεθος  $w$  λαμβάνει υπόψη τον ανθρώπινο παράγοντα.



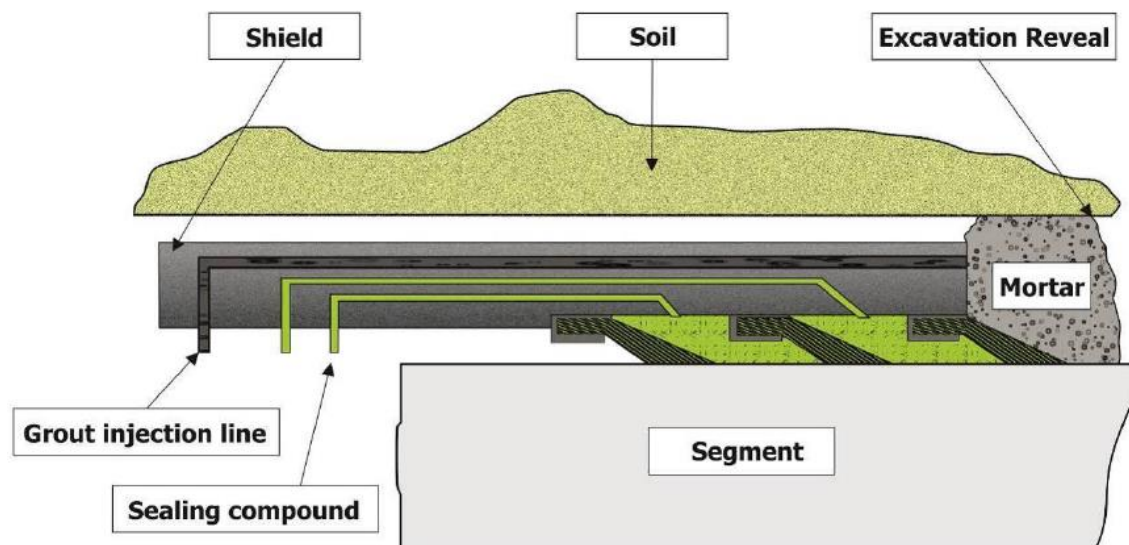


Εικόνα 1.11 Ορισμός του κενού που προκύπτει κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων (Loganathan & Poulos 1998)

Το ένεμα ουσιαστικά είναι ένα μίγμα με κύριο συστατικό τον μπετονίτη, το οποίο αρχικά συμπεριφέρεται ως ρευστό, αλλά έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα στερεοποιείται και γίνεται πρακτικά μια στρώση σκυροδέματος με σημαντική αντοχή. Η αρχική του συμπεριφορά ως ρευστό έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ασυμπίεστο με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει περαιτέρω σύγκλιση του περιβάλλοντος εδάφους, ενώ παράλληλα η απουσία διατμητικών τάσεων δεν επιτρέπει την ανάπτυξη τριβών στην ασπίδα. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το ένεμα ώστε να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά είναι δυνατότητα άντλησης, υψηλή εργασιμότητα καθώς και ταχεία σκλήρυνση, ώστε να αποκτήσει την τελική του μορφή και τις αντοχές του.

Η εισπίεση του ενέματος μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, είτε μέσω προκαθορισμένων κενών στα προκατασκευασμένα στοιχεία, διά μέσου των οποίων διέρχονται σωληνώσεις που εισπνέζουν το ένεμα, είτε με ένα σύστημα σωληνώσεων, το οποίο καταλήγει στην ουρά της ασπίδας, όπου και γίνεται η εισπίεση. Ο δεύτερος τρόπος έχει ευρύτερη εφαρμογή σε μηχανήματα που παρέχουν συνεχή υποστήριξη μετώπου, όπως το EPB, καθώς έχει το πλεονέκτημα της ομοιόμορφης κατανομής του ενέματος μέσω πολλών σημείων εισπίεσης στην περιφέρεια της ουράς της ασπίδας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η στεγάνωση της ασπίδας στην ουρά, ώστε να μην εισχωρήσει το ένεμα σε αυτή, ειδικά σε μεγάλες ποσότητες. Για να επιτευχθεί η στεγάνωση τοποθετούνται ειδικές βούρτσες μεταξύ του εξωτερικού τμήματος του EPB και του προκατασκευασμένου στοιχείου, οι οποίες έχουν και ορισμένη πίεση από αγωγούς λαδιού (ίση με αυτή της πίεσης του ενέματος συνήθως).

Συνολικά οι διαδικασίες που αφορούν την κάλυψη των κενών με ένεμα είναι πολύ σημαντικές και αποτελούν αντικείμενο συνεχούς έρευνας. Τα συνολικά οφέλη που παρουσιάζει αυτή η διαδικασία είναι πολλαπλά. Αρχικά, οι εδαφικές τάσεις μεταφέρονται μέσω του ενέματος πιο ομοιόμορφα στην επένδυση της σήραγγας, με αποτέλεσμα τα προκατασκευασμένα να παραλαμβάνουν τις τάσεις πιο ομοιόμορφα. Επιπλέον, διατηρεί τις υπάρχουσες εδαφικές τάσεις ενώ εμποδίζει τις εδαφικές μετακινήσεις, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Παράλληλα, μέσω του ενέματος προστατεύεται η επένδυση της σήραγγας από τυχόν υλικά που η άμεση επαφή μαζί τους θα προκαλούσε αρνητικές επιπτώσεις. Τέλος, αυξάνει την στεγανότητα της σήραγγας με την προσθήκη στα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ενός αδιαπέρατου στεγανοποιητικού στρώματος.



Εικόνα 1.12 Απεικόνιση της μόνωσης της ασπίδας με τις μεταλλικές βούρτσες και της εισπίεσης του ενέματος μέσω των σωληνώσεων (Kavvadas et al. 2013)

#### 1.2.1.7 Πρόσθετα (Additives)

Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, οι εδαφικές ιδιότητες παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για την πραγματοποίηση της εκσκαφής χωρίς προβλήματα. Έτσι, ορισμένες εδαφικές ιδιότητες πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ ορισμένων ορίων, τα οποία όμως δύσκολα επιτυγχάνονται σε φυσικά εδάφη. Για το λόγο αυτό, εισάγονται στο έδαφος ειδικά πρόσθετα με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες του, ώστε να είναι αποδεκτές για την ομαλή λειτουργία του EPB. Τέτοιες ιδιότητες είναι ο δείκτης πλαστιμότητας και υδαρότητας καθώς και η υγρασία του εδαφικού σχηματισμού σε συνάρτηση με την κοκκομετρία του υλικού. Οι βασικοί τρόποι επέμβασης στην ποιότητα του υπάρχοντος εδαφικού υλικού γίνεται με την εισαγωγή νερού, μπετονίτη και με την προσθήκη ειδικού αφρού, καθένα για διαφορετικό σκοπό. Συγκεκριμένα, η προσθήκη νερού μεταβάλλει τα όρια Atterberg με βάση τις προδιαγραφές που έχουν προκύψει από μελέτες. Ο μπετονίτης βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους, αυξάνοντας τη συνοχή του, συνεισφέροντας στην ευστάθεια του μετώπου. Τέλος, ο αφρός που εισάγεται στο μέτωπο κατά την εκσκαφή έχει ως στόχο την αύξηση της εργασιμότητας του εδάφους, ώστε να διευκολυνθεί η εκσκαφή, μειώνοντας τη φθορά των κοπτικών μέσων.

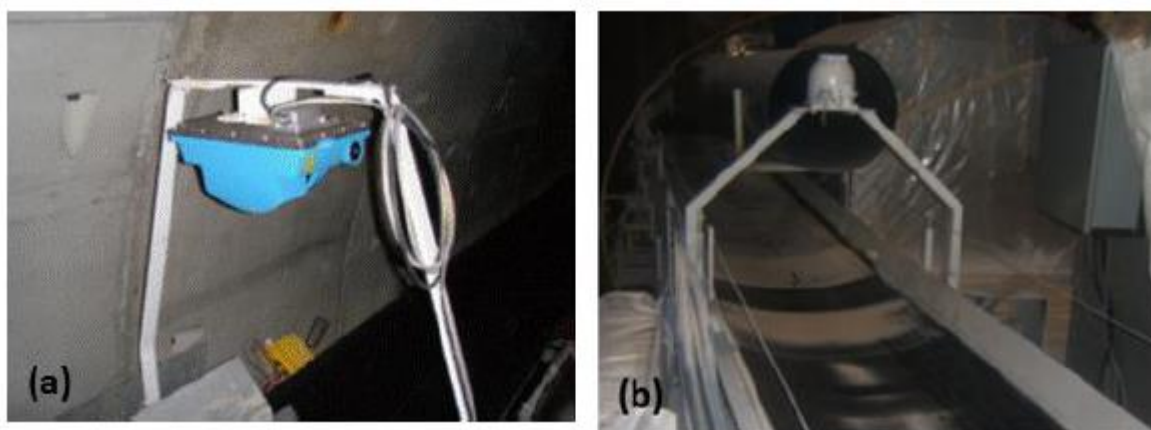
Τα πρόσθετα εισάγονται στο εδαφικό υλικό είτε μέσω της κεφαλής κοπής, διαμέσου σωληνώσεων, είτε στον θάλαμο εκσκαφής. Ουσιαστικά, από την κεφαλή κοπής εισάγονται τα πρόσθετα που αφενός βελτιώνουν την ευστάθεια του μετώπου και αφετέρου διευκολύνουν την εκσκαφή. Αντίθετα, στον θάλαμο εκσκαφής τοποθετούνται πρόσθετα που αφορούν κυρίως τον ικανοποιητικό τρόπο μεταφοράς του υλικού μέσω του ατέρμονος κοχλία και έπειτα μέσω των ταινιών μεταφοράς, έχοντας δώσει κατάλληλες ιδιότητες στο υλικό ώστε οι αποθέσεις του να είναι σε μορφή που δεν προκαλούν προβλήματα.

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

Οι υπερεκσκαφές κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη σωστή λειτουργία του EPB και κατ' επέκταση την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου. Συγκεκριμένα, οι υπερεκσκαφές επηρεάζουν σημαντικά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και επομένως είναι σημαντικό να μετριοούνται κατά τη διάρκεια

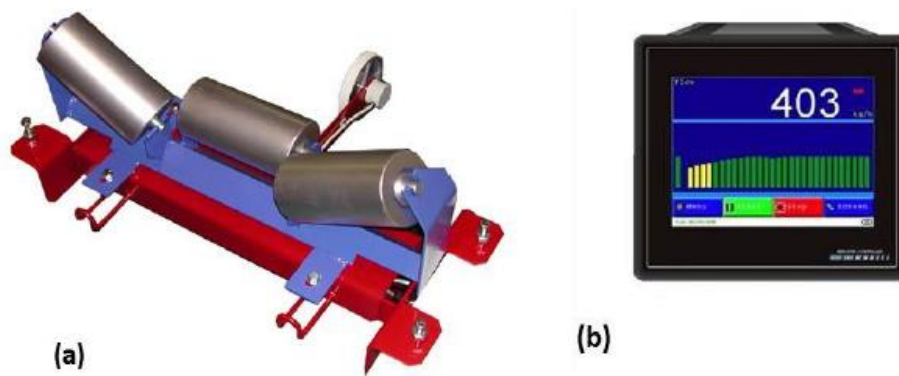
προχώρησης του EPB, ώστε σε περίπτωση σημαντικών αποκλίσεων να λαμβάνεται ειδική μέριμνα. Ουσιαστικά μετριέται η μάζα και ο όγκος του υλικού που εκσκάπτεται και συγκρίνεται με τα θεωρητικά αντίστοιχα μεγέθη που έχουν προκύψει από τη μελέτη. Εφόσον οι αποκλίσεις είναι μικρές και υπάρχει πρακτικά συμφωνία με τη μελέτη, η διάνοιξη γίνεται με επιτυχή τρόπο. Οι μετρήσεις στο σώμα του EPB γίνονται κυρίως μέσω δυο συστημάτων, με Laser Volume Scanner και Mechanical Belt Scales.

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



Εικόνα 1.13 (a),(b) Σαρωτές όγκου με λέιζερ (Kavvadas et al. 2013)

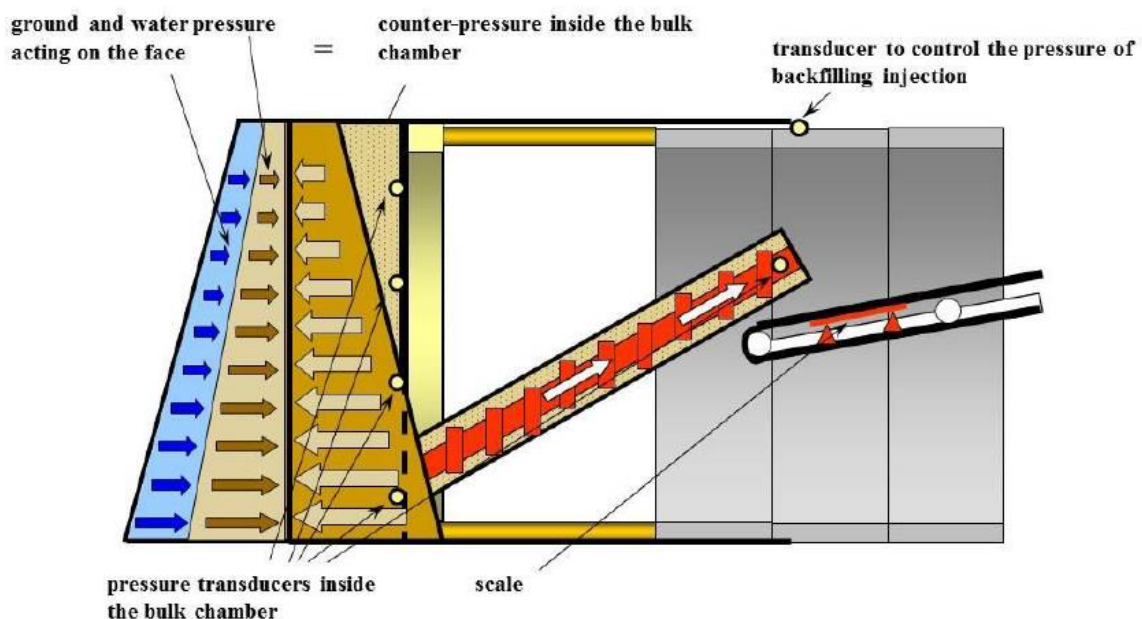
Οι μεταφορικές ταινίες έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα EPB. Σε κάποιο σημείο έχουν ορισμένους κυλίνδρους, οι οποίοι ζυγίζουν το υλικό που διέρχεται πάνω από αυτούς. Ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται μπορούν να τοποθετηθούν κύλινδροι σε περισσότερα από ένα σημεία της μεταφορικής ταινίας. Με βάση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



Εικόνα 1.14 (α) Κύλινδροι στις μεταφορικές ταινίες που ζυγίζουν το διερχόμενο υλικό (β) Οθόνες όπου γίνεται η απεικόνιση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τους κυλίνδρους. (Κανναδάς et al. 2013)

### 1.2.1.9 Υποστήριξη μετώπου

Η υποστήριξη του μετώπου είναι από τις πλέον σημαντικές λειτουργίες του EPB καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των καθιζήσεων που θα αναπτυχθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις για την ευστάθεια του μετώπου που πρέπει να αντιμετωπίσει το EPB είναι οι εδαφικές και οι υδατικές πιέσεις. Ο σκοπός κατά την υποστήριξη του μετώπου δεν είναι η πλήρης εξισορρόπηση των αποσταθεροποιητικών δυνάμεων, καθώς κάτι τέτοιο θα προκαλούσε προβλήματα όπως αναφέρθηκε παραπάνω με τη φθορά των κοπτικών και την τεράστια ροπή που θα απαιτούσε η κεφαλή κοπής για να περιστρέφεται. Αντίθετα, καθορίζονται κάποια όρια μεταξύ των οποίων μπορούν να κινούνται οι σταθεροποιητικές δυνάμεις που προέρχονται από το συνδυασμό της λειτουργίας των εμβόλων με το θάλαμο εκσκαφής και το υλικό που συγκεντρώνεται σε αυτόν, ώστε οι καθιζήσεις που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας να είναι ανεκτές χωρίς να προκαλούν προβλήματα κυρίως στις υπάρχουσες κατασκευές. Τα όρια αυτά δεν αφορούν μόνο την ελάχιστη πίεση αλλά και τη μέγιστη, καθώς πολύ υψηλές τιμές μπορούν να προκαλέσουν αστοχία σε ρηχές σήραγγες, προκαλώντας εκτίναξη του εδάφους μπροστά από το μέτωπο.



Εικόνα 1.15 Υποστήριξη του μετώπου από την ασπίδα του EPB (Peila et al. 2013)



### 1.2.2 Λειτουργία του EPB

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες που εκτελούνται στο EPB, κυρίως στην ασπίδα αφού με βάση αυτές καταρτίζεται το προσομοίωμα, για μια τυπική προχώρηση του EPB. Θεωρούμε ότι το EPB έχει τοποθετηθεί στο κατάλληλο βάθος και παρουσιάζεται η αλληλουχία κινήσεων που επιτελείται για την ολοκλήρωση του τυπικού μέτρου προχώρησης.

Αρχικά, ανάλογα με τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού στο μέτωπο, εισάγονται μέσω σωληνώσεων, ειδικά χημικά πρόσθετα με σκοπό τη διευκόλυνση της εκσκαφής μειώνοντας τη δύναμη περιστροφής που απαιτεί η κεφαλή κοπής καθώς και τη φθορά των κοπτικών. Ουσιαστικά ακόμα και σε ξηρές συνθήκες το μέτωπο εκσκαφής λόγω των προσθέτων έχει μια πιο ρευστή συμπεριφορά για τη διευκόλυνση της εκσκαφής. Στη συνέχεια, τα έμβολα ώθησης τα οποία εφαρμόζουν πάνω στα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος δίνουν την απαραίτητη δύναμη στο EPB ώστε να προχωρήσει προς το μέτωπο. Η δύναμη αυτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπερνικήσει τις πλευρικές τριβές στο EPB από την επαφή με το περιβάλλον έδαφος και να δώσει μια ορισμένη θλίψη στο μέτωπο ώστε να είναι αποδοτική η περιστροφή της κεφαλής κοπής. Καθώς η κεφαλή περιστρέφεται, εκσκάπτει μια σταθερή διατομή, η οποία είναι μερικά εκατοστά μεγαλύτερη από τη διατομή της ασπίδας του EPB. Η υπερεσκαφή αυτή είναι σκόπιμη ώστε να μην αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις μεταξύ εδάφους και ασπίδας και άρα να έχουμε αποδεκτές τριβές. Το εδαφικό υλικό που εκσκάπτεται εισέρχεται στον θάλαμο εκσκαφής, με σκοπό ο θάλαμος να είναι γεμάτος ώστε να υποστηρίζει το μέτωπο ασκώντας του πίεση. Ουσιαστικά ο εδαφικός υλικό του θαλάμου δεν υποστηρίζει άμεσα το μέτωπο, αλλά κατανέμει ομοιόμορφα τις δυνάμεις των εμβόλων, συγκρατώντας το μέτωπο. Παράλληλα, η περίσσεια του εδαφικού υλικού που συσσωρεύεται στον θάλαμο εκσκαφής μεταφέρεται μέσω του ατέρμονος κοχλία και κατ' επέκταση μέσω της μεταφορικής ταινίας εκτός του EPB και γίνεται η απόθεση του σε ειδικές προκαθορισμένες θέσεις. Συχνά, στο θάλαμο εκσκαφής προστίθενται ειδικά πρόσθετα, όπως μπετονίτης ώστε να βελτιώσουν την ποιότητα του εδαφικού σχηματισμού με σκοπό τη διατήρηση σταθερής πίεσης στον θάλαμο και τη σταδιακή μείωση της στον ατέρμονα κοχλία, εξασφαλίζοντας έτσι την ευστάθεια του μετώπου.

Ταυτόχρονα στο πίσω μέρος της ασπίδας του EPB γίνονται δυο διαδικασίες, η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων και η εισαγωγή ενέματος στα κενά μεταξύ στοιχείων και περιβάλλοντος εδάφους. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται τα προκατασκευασμένα στοιχεία, περιμετρικά της ουράς της ασπίδας, σχηματίζοντας έναν πλήρη δακτύλιο. Ουσιαστικά η ολοκλήρωση κάθε δακτυλίου καθορίζει το βήμα προχώρησης του EPB. Αφού ολοκληρωθεί κάθε δακτύλιος με τις απαιτήσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω, εισπιέζεται ένεμα στα κενά που παραμένουν μεταξύ επένδυσης και εδάφους. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλο το μήκος της σήραγγας. Στην πράξη πάντα εμφανίζονται διαφορετικοί εδαφικοί σχηματισμοί κατά τη διάνοιξη της σήραγγας ή άλλες τοπικές γεωλογικές ανωμαλίες, με αποτέλεσμα να απαιτούνται διορθωτικές κινήσεις όπως η αυξομείωση των δυνάμεων των εμβόλων πίεσης και της ταχύτητας του ατέρμονος κοχλία. Όλες αυτές οι διαδικασίες καθορίζονται στην καμπύνα ελέγχου, όπου συγκεντρώνονται όλες οι πληροφορίες από τη λειτουργία του EPB μέσω των αισθητήρων που υπάρχουν σε κάθε σημείο του μηχανήματος.



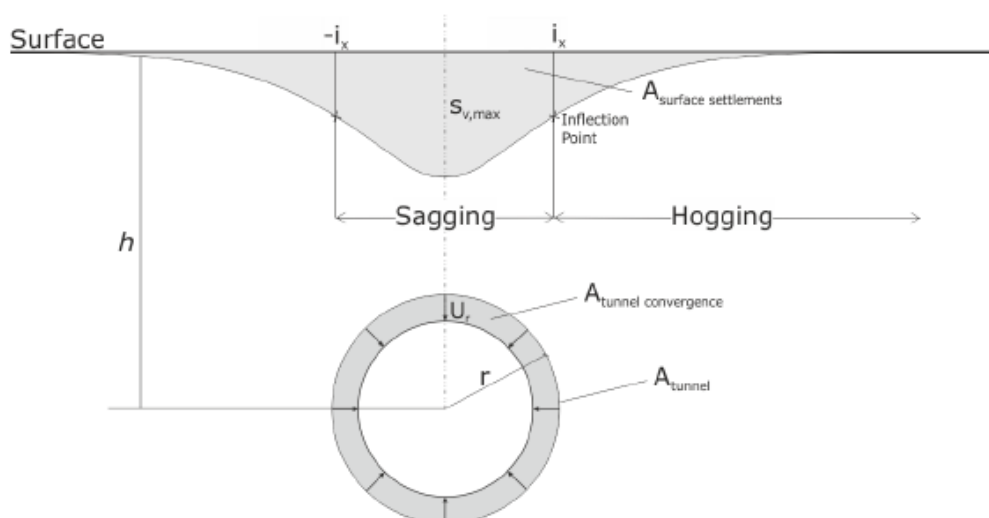
## 2 Καθιζήσεις

Η μεγάλη αστικοποίηση ανά τον κόσμο που παρατηρείται στις μέρες μας έχει οδηγήσει στην ανάγκη για έργα μεταφορών, υδρευτικών και αποχετευτικών συστημάτων. Λόγω της έλλειψης χώρου όμως ιδίως στις μεγάλες πόλεις, η κατασκευή υπογείων έργων καθίσταται μονόδρομος, γεγονός που συνεπάγεται αναπόφευκτες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες σχετικά με τις καθιζήσεις και ορισμένες από τις πιο αξιολογικές μελέτες που έχουν δημοσιευτεί σε αυτό το αντικείμενο. Δίνεται έμφαση στις καθιζήσεις που προκύπτουν από τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγων καθώς και στο ρόλο του νερού σε αυτές, με την ανάπτυξη υπερπιέσεων στα αργιλικά εδάφη.

### 2.1 Εδαφικές Μετακινήσεις κατά τη Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων

#### 2.1.1 Εγκάρσια Συμπεριφορά

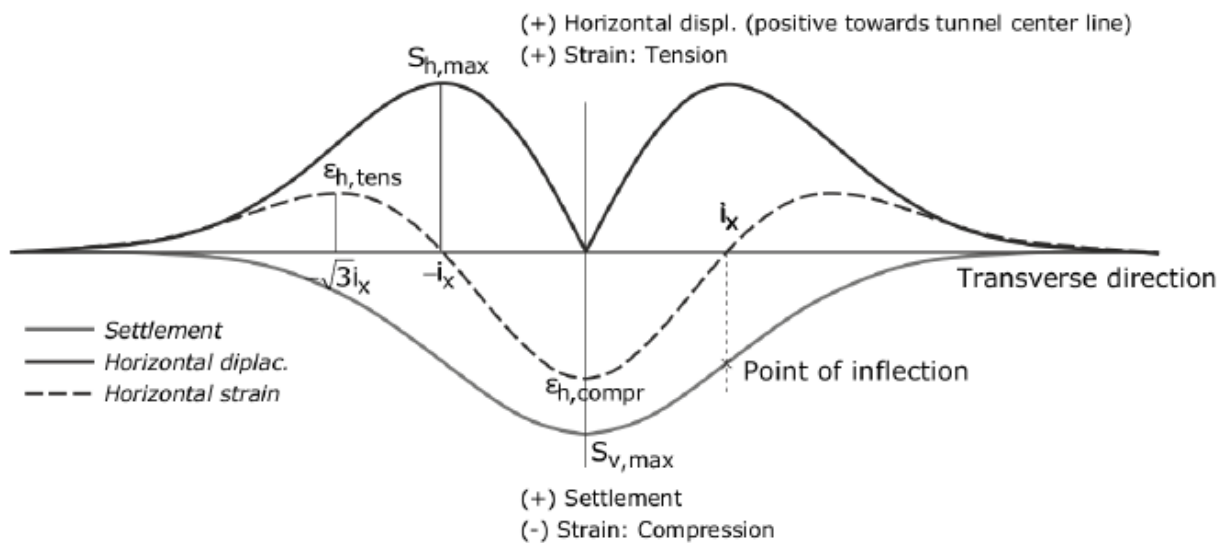


Εικόνα 2.1 Προφίλ εγκάρσιας κατανομής των κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια.

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την κατανομή που ακολουθούν οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Στο μέσο της σήραγγας όπως αναμενόταν εμφανίζεται η μέγιστη καθίζηση, η οποία φθίνει προς τα άκρα. Την τάση αυτή των καθιζήσεων μπορούμε να την περιγράψουμε με την κανονική κατανομή του Gauss, όπως δήλωσε σε σχετική δημοσίευση ο (Peck 1969).

Από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους για τη μελέτη των καθιζήσεων είναι το σημείο καμπής  $i_x$ . Η σημασία του έγκειται στο γεγονός ότι η θέση μιας κατασκευής σε σχέση με το σημείο καμπής μπορεί να καθορίσει το πόσο επικίνδυνη ή όχι είναι η καθίζηση για την ασφάλεια της. Συγκεκριμένα, αν η κατασκευή βρίσκεται πάνω στο σημείο καμπής, η διαφορετική συμπεριφορά των καθιζήσεων στις εκατέρωθεν του σημείου καμπής περιοχές δημιουργεί προβλήματα στη θεμελίωση μέσω της ανομοιομορφίας της έντασης που προκαλεί. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική κλίση που έχουν οι δυο περιοχές, προκαλώντας έτσι αυτή τη συμπεριφορά, όπως διατύπωσαν οι (Losacco et al. 2014; Addenbrooke et al. 1997; Franzius et al. 2005). Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο καμπής είναι ανεξάρτητο του τρόπου διάνοιξης της σήραγγας, καθώς οι κατανομές από ήδη κατασκευασμένες σήραγγες πρακτικώς ταυτίζονται τόσο για συμβατικά μέσα

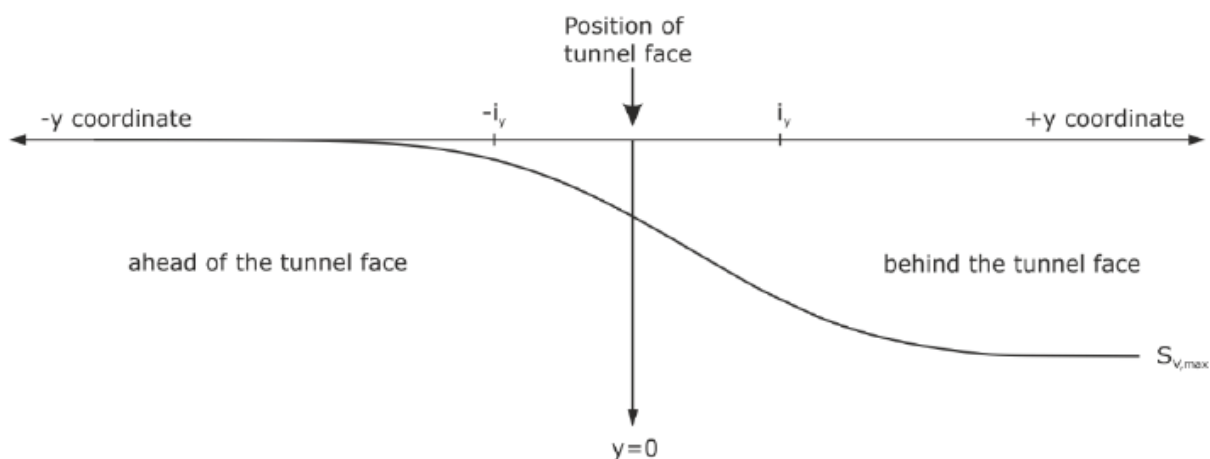
όσο και για μηχανοποιημένη διάνοιξη, σύμφωνα με τις μελέτες των (Kimura & Mair 1981; Mair et al. 1993; O'Reilly & New 1983). Σε ότι αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις υπάρχουν σημαντικά λιγότερα δεδομένα από ότι στις καθιζήσεις. Οι (Mair & Taylor 1997) ανέφεραν ότι σημαντικές ζημιές μπορούν να προκύψουν στις κατασκευές από τις οριζόντιες μετακινήσεις, επομένως καθίστανται εξίσου σημαντικές με τις κατακόρυφες μετακινήσεις και πρέπει να μελετώνται και να λαμβάνονται υπ' όψη κατά το σχεδιασμό των υπογείων έργων. Σύμφωνα με την εικόνα 2.2 από το διάγραμμα του (Franzius 2003) παρατηρούμε ότι η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζεται στα σημεία καμπής, καταδεικνύοντας τη σημασία του σημείου καμπής για την επίδραση του στις υπάρχουσες κατασκευές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανηγμένες παραμορφώσεις μηδενίζονται στο σημείο καμπής.



Εικόνα 2.2 Καθιζήσεις και Οριζόντιες Μετακινήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Franzius 2003)

### 2.1.2 Διαμήκης Συμπεριφορά

Οι καθιζήσεις στη διαμήκη διεύθυνση ακολουθούν τη συμπεριφορά που φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη. Στη θέση  $y=0$  είναι το μέτωπο ενώ προς τις αρνητικές τιμές του  $y$  είναι οι διατομές που δεν έχουν ακόμα εκσκαφτεί. Είναι σαφές ότι η επίδραση από τη διάνοιξη της σήραγγας στις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους δεν περιορίζονται μόνο πίσω από το μέτωπο, αλλά μπροστά όπου ακόμα δεν έχει αφαιρεθεί το εδαφικό υλικό. Ακόμα και με τη χρήση του EPB όπου θεωρητικά μπορούμε να υποστηρίξουμε πλήρως το μέτωπο, είναι δεδομένο ότι θα έχουμε μετακινήσεις, αφού αφενός η διατάραξη που προκαλεί η εκσκαφή στο έδαφος επηρεάζει την υποστήριξη του μετώπου που παρέχεται από το μηχάνημα, αφετέρου για λόγους φθοράς των κοπτικών (που αναλύσαμε στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) οι τάσεις που ασκούνται στο μέτωπο είναι μικρότερες των γεωστατικών επιτρέποντας συγκεκριμένες μικρές μετακινήσεις.



Εικόνα 2.3 Προφίλ των επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας

Οι (Attewell & Woodman 1982) σε δημοσίευση τους αναφέρουν ότι η μέγιστη μετακίνηση ενός σημείου συντελείται κατά 30-50% μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Όμως, αυτή η άποψη δεν είναι απολύτως ακριβής καθώς η τεχνική διάνοιξης της σήραγγας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον τρόπο εκδήλωσης των μετακινήσεων. Συγκεκριμένα, με τη χρήση EPB η εξώθηση του μετώπου περιορίζεται σημαντικά, επιτρέποντας πολύ μικρές μετακινήσεις με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της μέγιστης μετακίνησης να λαμβάνει χώρα πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, λόγω της κωνικότητας της ασπίδας και της παραμόρφωσης της μόνιμης επένδυσης και του ενέματος. Αντίθετα, στην εκσκαφή με συμβατικά μέσα, η μετακίνηση μπροστά από το μέτωπο αποτελεί σημαντικό ποσοστό της τελικής μετακίνησης.

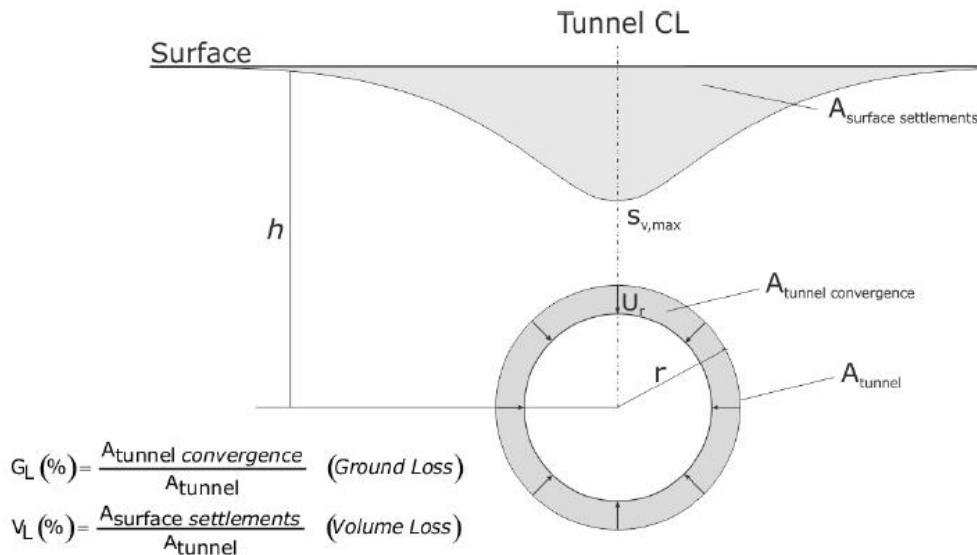
Σε ότι αφορά το σημείο καμπής  $i_y$ , μια ικανοποιητική παραδοχή είναι ότι ταυτίζεται με το αντίστοιχο σημείο καμπής  $i_x$  της εγκάρσιας κατανομής των παραμορφώσεων. Γενικότερα, στη διαμήκη συμπεριφορά, το σημείο καμπής  $i_y$  δεν παρουσιάζει κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν προσφέρει κάποια σημαντική πληροφορία σε αντίθεση με το  $i_x$ , που διαχωρίζει την περιοχή «shagging-hogging». Για το λόγο αυτό, στη βιβλιογραφία όπως και σε αυτή την εργασία όταν γίνεται αναφορά στο σημείο καμπής  $i$ , εννοείται το  $i_x$  για την εγκάρσια κατανομή.

### 2.1.3 Χαρακτηριστικές Παράμετροι των Εδαφικών Καθιζήσεων κατά τη Διάνοιξη Σήραγγας

Κατά την κατασκευή σηράγγων αναπτύσσονται παραμορφώσεις στον εδαφικό σκελετό, οι οποίες συντελούν στην απώλεια του εδαφικού όγκου. Ένας τρόπος να προσδιορίσουμε αυτή τη μεταβολή είναι να εκφράσουμε το λόγο της συνολικής επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του εμβαδού της διατομής της σήραγγας. Ο λόγος αυτός στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως Volume Loss και ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση στην εικόνα 2.4. (Mair et al. 1993)

Μία ακόμα σημαντική πληροφορία που μας ενδιαφέρει να λαμβάνουμε κατά τη διάρκεια της διάνοιξης είναι οι υπερεκσκαφές που συντελούνται. Για το λόγο αυτό ο (Sagasetta 1987) εισήγαγε τον συντελεστή Ground Loss ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του πραγματικού όγκου του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται προς τον θεωρητικό όγκο του εδαφικού υλικού που αναμένεται να αφαιρεθεί κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Στην εικόνα 2.4 φαίνεται πως ορίζονται οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται στους λόγους volume loss και ground loss. Ουσιαστικά, οι ορισμοί αναφέρουν όγκους, αλλά τους ανάγουμε σε όγκους ανά τρέχον μέτρο, οπότε και πρακτικά καταλήγουμε στις επιφάνειες που περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα.

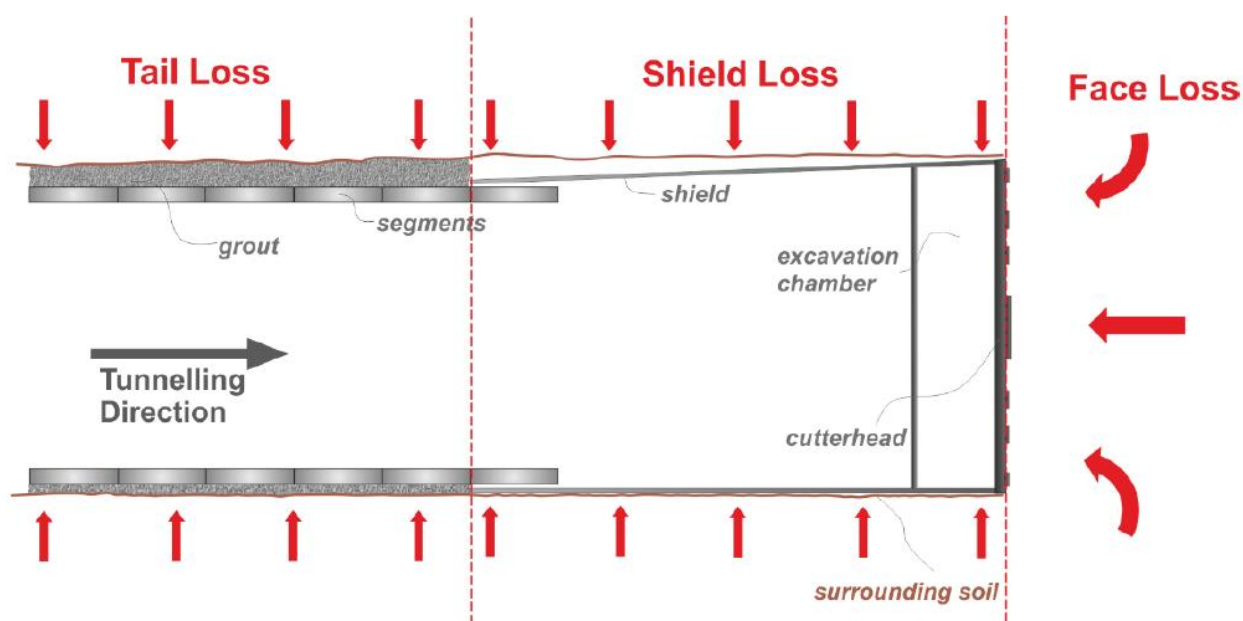


Εικόνα 2.4 Απεικόνιση και επεξήγηση των παραμέτρων Ground Loss και Volume Loss.

Στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται προσδιορισμός των δύο αυτών διαφορετικών παραμέτρων, όπως φαίνεται σε δημοσιεύσεις των (Loganathan & Poulos 1998; Sagaseta 1987; Osman et al. 2006). Όμως, αυτός ο διαχωρισμός δεν έχει πάντα νόημα, καθώς στις αστράγγιστες συνθήκες οι δύο λόγοι  $V_L$  και  $G_L$  ταυτίζονται καθώς το έδαφος συμπεριφέρεται ως ασυμπίεστο και παραμορφώνεται χωρίς μεταβολή του όγκου του. Αντίθετα, η διαφοροποίηση των δύο όρων ξεκινά όταν συντελούνται μακροχρόνια φαινόμενα όπως η στερεοποίηση και ο ερπυσμός.

#### 2.1.4 Μηχανισμοί Αστοχίας και Απώλειας Εδαφικού Όγκου

Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων, είτε με μηχανοποιημένη εκσκαφή είτε με συμβατική μέθοδο, προκαλούνται απώλειες εδαφικού όγκου, οι οποίες συνδέονται με παραμορφώσεις και μετακινήσεις. Οι μηχανισμοί με τους οποίους κινητοποιούνται οι εδαφικές μάζες είναι ιδιαίτερης σημασίας και η κατανόηση τους απαραίτητη ιδίως σε αστικά έργα, όπου ο έλεγχος των μετακινήσεων είναι καθοριστικός για την ασφάλεια των κατασκευών στο χώρο επιρροής της σήραγγας. Μια σειρά ερευνητών όπως οι (Gatti & Cassani 2007; ITA/AITES 2007; Litsas et al. 2014; Loganathan et al. 2000; Sagaseta 1987) για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας στη μηχανοποιημένη εκσκαφή σηράγγων, όρισαν τρεις ανεξάρτητες περιοχές και μελέτησαν κάθε μία ξεχωριστά ως προς τη συμπεριφορά της και το ρόλο της στην απώλεια εδαφικού όγκου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5. Συγκεκριμένα, η περιοχή έχει χωριστεί με βάση τη θέση του EPB και αποτελείται από την περιοχή του μετώπου, της ασπίδας και της ουράς.



Εικόνα 2.5 Απεικόνιση των εδαφικών απωλειών του περιβάλλοντος εδάφους κατά μήκος της ασπίδας του EPB.

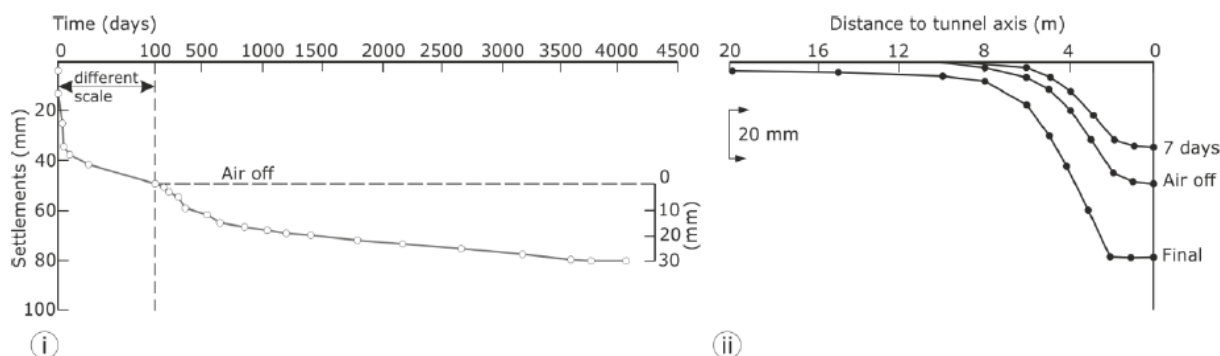
Η απώλεια εδαφικού υλικού στο μέτωπο συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο Face Loss. Σχετίζεται με την εξώθηση του μετώπου καθώς και τις προ-συγκλίσεις που συντελούνται μπροστά από το μέτωπο κατά τη υποστήριξή του με την πίεση που ασκεί το EPB. Ο (Sitarenios et al. 2015) έδειξε τη σημασία της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο, καθώς οι παραμορφώσεις μπροστά από το μέτωπο εξαρτώνται κυρίως από αυτή την παράμετρο. Συγκεκριμένα, αν το έδαφος στο μέτωπο παραμένει στον ελαστικό κλάδο, τότε αναμένονται σχετικά μικρές μετακινήσεις σε όρους εξώθησης και προ-σύγκλισης. Αντίθετα, αν η αντοχή του εδάφους ξεπεραστεί και πλαστικοποιηθεί, θα ακολουθήσουν σημαντικές παραμορφώσεις καθώς και χαλάρωση του μετώπου και του εδάφους μπροστά από αυτό, οδηγώντας σε σημαντικές συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας.

Σε ότι αφορά την ασπίδα του EPB, οι εδαφικές μετακινήσεις που συντελούνται σε αυτό το τμήμα αναφέρονται με τον όρο Shield Loss και σχετίζονται με τη σύγκλιση της διατομής εξαιτίας της υπερεκκακφής που εκτελεί η κεφαλή κοπής και της κωνικότητας της ασπίδας. Οι (Kasper & Meschke 2006; Litsas et al. 2014) μελέτησαν την επιρροή του κενού που υπάρχει μεταξύ ασπίδας και εδάφους στις εδαφικές μετακινήσεις και κατέληξαν ότι μεγαλύτερα κενά συνεπάγονται μεγαλύτερες μετακινήσεις και επιφανειακές καθιζήσεις.

Με τον όρο Tail Loss αναφερόμαστε στις παραμορφώσεις που συντελούνται στον ουρά του EPB όπου έχει τοποθετηθεί η τελική επένδυση. Σχετίζεται με πολλούς παράγοντες όπως είναι η παραμόρφωση των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και του ενέματος, καθώς και λόγω φαινομένων στερεοποίησης και ερπυσμού. Η παραμόρφωση της επένδυσης και του ενέματος αφορούν βραχυχρόνιες συνθήκες, ενώ στερεοποίηση και ερπυσμός μακροχρόνιες. Παρ' όλα αυτά, τοποθετούμε όλες αυτές τις δράσεις στην ίδια κατηγορία καθώς δεν υπάρχει σαφής χρονικός προσδιορισμός των δύο καταστάσεων (βραχυχρόνιες-μακροχρόνιες) ενώ παράλληλα συσχετίζονται σε σημαντικό βαθμό μεταξύ τους. Χαρακτηριστικά, οι (Bernat et al. 1999; Kasper & Meschke 2004; Mair & Taylor 1997; Yi et al. 1993) έδειξαν ότι η εσωτερική πίεση του ενέματος όταν εισπνέζεται περιμετρικά της επένδυσης προκαλεί υπερπίεσεις πόρων επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του εδάφους.

## 2.1.5 Επίδραση του Υδροφόρου Ορίζοντα στις Καθιζήσεις

Οι καθιζήσεις που συντελούνται στην επιφάνεια του εδάφους μετά το πέρας της κατασκευής της σήραγγας είναι καθοριστικής σημασίας σε μαλακές, συμπιεστές αργίλους. Ένας από τους παράγοντες που προκαλεί αυτό το φαινόμενο είναι η ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων κατά τη διάνοιξη και ολοκλήρωση της σήραγγας, η οποία μεταβάλλει το εντατικό πεδίο των ενεργών τάσεων, όπως αναφέρουν οι (Mair & Taylor 1997). Συγκεκριμένα, κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγων, οι υψηλές πιέσεις που εφαρμόζονται στο μέτωπο, καθώς και η εισπίεση του ενέματος στα κενά μεταξύ επένδυσης και εδάφους, ευνοούν την ανάπτυξη μεγάλων υπερπίεσεων περιμετρικά των εξωτερικών τοιχωμάτων. (O'Reilly et al. 1992) έδειξε σε σχετική του δημοσίευση έδειξε ότι οι τελικές μετακινήσεις που οφείλονται σε κατασκευή σήραγγας σταθεροποιούνται αρκετά χρόνια με το πέρας του έργου. Συγκεκριμένα, έκανε επί τόπου μετρήσεις κατά την κατασκευή σήραγγας διαμέτρου 3 μέτρων σε ιλυώδη άργιλο και παρατήρησε ότι οι καθιζήσεις συνέχιζαν να εξελίσσονται για περίπου 10 χρόνια μέχρι να φτάσουν σε ισορροπία. Μάλιστα η αύξηση των καθιζήσεων κατά τη φάση της στερεοποίησης του εδάφους ήταν σημαντική, καθώς σχεδόν διπλασιάστηκε η τελική τιμή τους.



Εικόνα 2.6 (i) Χρονοϊστορία της εξέλιξης των καθιζήσεων στην εδαφική επιφάνεια πάνω από τη σήραγγα, (ii) Προφίλ της εγκάρσιας κατανομής των καθιζήσεων για χαρακτηριστικά χρονικά σημεία (O'Reilly et al. 1992)

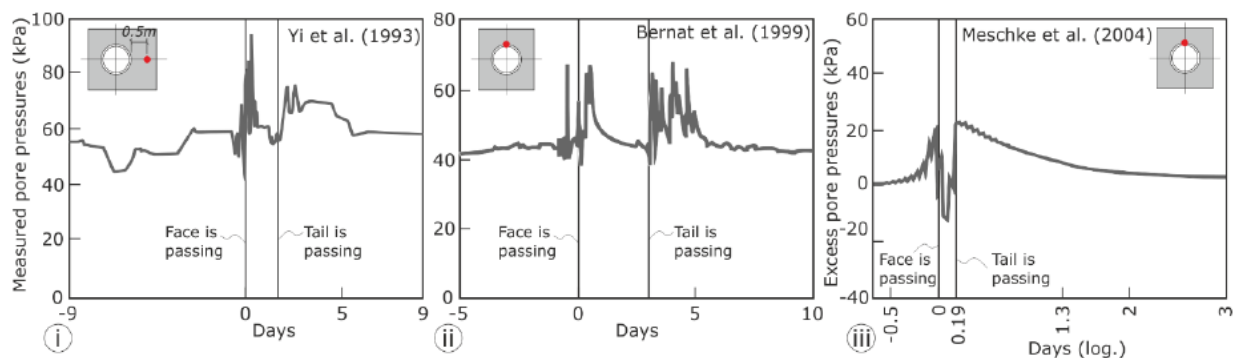
Οι (Mair & Taylor 1997) συγκέντρωσαν τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της σήραγγας. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται παρακάτω:

- Το μέγεθος και η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων που αναπτύσσονται κατά την κατασκευή των σήραγγων.
- Η συμπιεστότητα καθώς και η διαπερατότητα του εδαφικού υλικού, ιδίως σε αργιλικά εδάφη.
- Οι υδραυλικές συννοριακές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα η διαπερατότητα της επένδυσης σε σχέση με τη διαπερατότητα του εδάφους.
- Οι αρχικές υδροστατικές πιέσεις και η κατανομή τους στο έδαφος όπου θα γίνει η διάνοιξη της σήραγγας.
- Το μέγεθος της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο και της πίεσης του ενέματος συγκριτικά με το αρχικό γεωστατικό πεδίο.

Είναι σαφές ότι η ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων είναι ο βασικός λόγος που προκαλεί τις καθιζήσεις μετά το πέρας της κατασκευής του έργου. Οι (Yi et al. 1993) μελετώντας τις πιέσεις πόρων που αναπτύχθηκαν κατά τη διάνοιξη σήραγγας διαμέτρου 4.2m με EPB σε μαλακή άργιλο στη Σανγκάη, κατέληξε ότι η θέση της ασπίδας προκαλούσε αυξομειώσεις στις υδατικές πιέσεις. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονταν υπερπίεσεις λόγω της πίεσης στο μέτωπο και της εισπίεσης



ενέματος στο κενό μεταξύ επένδυσης και περιβάλλοντος εδάφους στον ουρά της ασπίδας, ενώ η κωνικότητα της ασπίδας επέτρεπε μεγαλύτερες καθιζήσεις από αυτές που απαιτούνταν για την εκτόνωση των υπερπιέσεων δημιουργώντας την ανάγκη για την απορρόφηση νερού (suction phenomena), προκαλώντας υποπιέσεις, όπως φαίνεται στα διαγράμματα στην παρακάτω εικόνα. Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνουν δύο ακόμα δημοσιεύσεις, αυτές των (Bernat et al. 1999; Kasper & Meschke 2004). Συγκεκριμένα, ο (Bernat et al. 1999) παρουσίασε στοιχεία από επί τόπου μετρήσεις των υπερπιέσεων πόρων κατά την κατασκευή δύο σηράγγων στη Lyon με τη χρήση μηχανημάτων hydroshield. ενώ οι (Kasper & Meschke 2004) διεξήγαγαν τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, και με τις δύο δημοσιεύσεις να καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα.



*Εικόνα 2.7 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydroshield μηχανήμα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004)*

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημοσίευση των (Finno & Clough 1985), οι οποίοι ήταν από τους πρώτους που διεξήγαγαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία μελετώντας αποκλειστικά τις εδαφικές μετακινήσεις λόγω των υπερπιέσεων πόρων και την εξέλιξη τους στο χρόνο. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών τους αναλύσεων έδειξαν ότι η ανύψωση του εδάφους μέσω της πίεσης του ενέματος μείωνε τις καθιζήσεις στο κενό που δημιουργείται μεταξύ του εδάφους και της ουράς της ασπίδας, αυξάνοντας όμως τις επιφανειακές καθιζήσεις που οφείλονταν στη στερεοποίηση του εδάφους.



## 3 Αριθμητικό Προσομοίωμα

### 3.1 Εισαγωγή

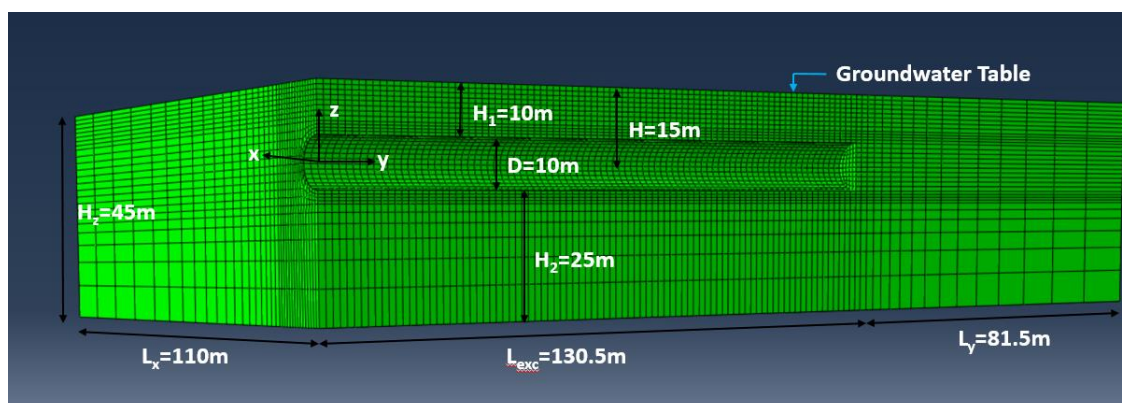
Η διερεύνηση του θέματος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αριθμητικά προσομοιώματα εξαρτάται εν πολλοίς από τις παραδοχές που γίνονται κατά τη δημιουργία του μοντέλου, καθώς ορισμένες παράμετροι τείνουν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα έναντι άλλων, ενώ παράλληλα ιδιαίτερη σημασία έχει η αλληλουχία των βημάτων που εκτελεί το πρόγραμμα ώστε να προσεγγίζει κατά το δυνατόν την πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε η διεθνής βιβλιογραφία σε δημοσιεύσεις που αφορούν διάνοιξη σήραγγων με χρήση μηχανημάτων EPB, έγινε αξιολόγηση των προσομοιωμάτων τους και με βάση αυτά έγινε η κατάστρωση του συγκεκριμένου μοντέλου, βελτιώνοντας ορισμένα χαρακτηριστικά, ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη λεπτομέρεια στα χαρακτηριστικά που αφορούν τη συγκεκριμένη διπλωματική.

Οι αναλύσεις έτρεξαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *simulia* του λογισμικού *abaqus*, και πιο συγκεκριμένα στην έκδοση 6.13. Πρόκειται για τρισδιάστατες συζευγμένες αριθμητικές αναλύσεις, αφού η διάνοιξη σήραγγας είναι ένα κατεξοχήν τριδιάστατο πρόβλημα λόγω της επιρροής που έχει η εκσκαφή στο έδαφος μπροστά από το μέτωπο. Μελετήθηκε παραμετρικά η επίδραση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, όπως η αντοχή του εδάφους καθώς και η πίεση και ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος κυρίως στις καθιζήσεις και στις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια και το πέρας του έργου. Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω, αλλά επιγραμματικά αναφέρεται ότι λήφθηκαν υπόψη λεπτομέρειες που δεν υπήρχαν σε άλλες αναλύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να έχουμε ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικότητας. Έτσι, στον κώδικα προσομοιώνεται η κωνικότητα της ασπίδας, η τραπεζοειδής πίεση που ασκείται στο μέτωπο από την ασπίδα του EPB και η σκλήρυνση του ενέματος συναρτήσει του χρόνου, προσδίδοντας αξιοπιστία στα τελικά αποτελέσματα.

### 3.2 Χαρακτηριστικά Προσομοιώματος

#### 3.2.1 Γεωμετρία Προσομοιώματος

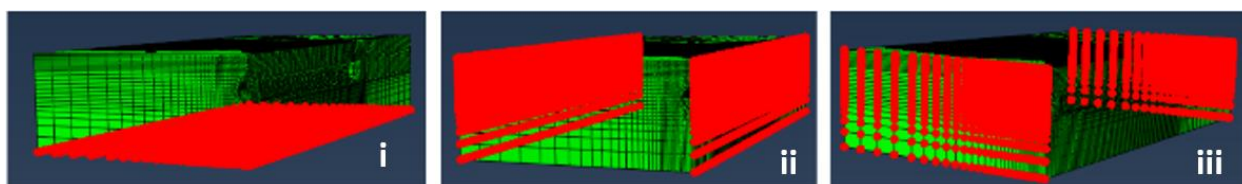
Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται το προσομοίωμα με βάση το οποίο έτρεξαν οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων. Πρόκειται για μια σήραγγα διαμέτρου  $D=10\text{m}$  με τον άξονα της να βρίσκεται σε βάθος  $H=15\text{m}$  ( $H/D=1.5$ ).



Εικόνα 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.

Το μήκος εκσκαφής είναι 130.5m, ενώ μετά την τελευταία εκσκαφή ακολουθούν 81.5m, δηλαδή περίπου απόσταση 8D. Παράλληλα, το πλάτος του μοντέλου είναι 110m, δηλαδή 11D, που αποτελεί επαρκές μέγεθος για τρισδιάστατες αριθμητικές συζευγμένες αναλύσεις ώστε να μην επηρεάζουν οι συνοριακές συνθήκες τα αποτελέσματα. Το ύψος του μοντέλου είναι 45m, επομένως κάτω από τον άξονα της σήραγγας υπάρχει βάθος υποκειμένων 30m.

Το φυσικό πρόβλημα παρουσιάζει συμμετρία κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας. Έτσι, για να μειώσουμε τον υπολογιστικό χρόνο κάθε ανάλυσης επιλέξαμε τη δημιουργία ενός συμμετρικού μοντέλου κατά την επιφάνεια που ορίζουν οι άξονες y και z, έχοντας δεσμεύσει τις μετακινήσεις κατά x στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Επιπλέον δεσμεύσεις έγιναν προς όλες τις διευθύνσεις στους κόμβους του κάτω μέρους του προσομοιώματος, καθώς και στη διεύθυνση y για τις δύο εκατέρωθεν επιφάνειες x-z στα άκρα του προσομοιώματος και στη διεύθυνση x για τις δύο εκατέρωθεν επιφάνειες y-z επίσης στα άκρα του προσομοιώματος.



Εικόνα 3.2 Δεσμευμένοι κόμβοι (i) στο κάτω μέρος του προσομοιώματος (ii) στις επιφάνειες y-z (iii) στις επιφάνειες x-z

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του εδάφους είναι τύπου C3D8P, ώστε να ληφθεί υπόψη η συμβολή των υδατικών πιέσεων καθώς η διερεύνηση γίνεται σε κορεσμένο αργιλικό έδαφος.

### 3.2.2 Εδαφικές Ιδιότητες

Το εδαφικό προφίλ του συγκεκριμένου προσομοιώματος είναι κορεσμένη άργιλος. Έγινε παραμετρική διερεύνηση στις παραμέτρους του Mohr-Coulomb, δηλαδή συνοχή και γωνία τριβής, από τις οποίες προκύπτει η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας.

Πίνακας 3.1 Δεδομένα των παραμετρικών αναλύσεων με βάση τις εδαφικές ιδιότητες

SOIL PARAMETERS									
$K_0$	$\gamma$	PHI	C	E	E stiff	$\psi$	$\nu$	$C_u$	Permeability $K_s$
	(kN/m <sup>3</sup> )	(deg)	(kPa)	(MPa)	(MPa)	(deg)		(kPa)	(m/s)
0.5	20	20	10	14.8	148	3.3	0.3	49.2	1.00E-08
0.5	20	20	15	16.4	164	3.3	0.3	54.5	1.00E-08
<b>0.5</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>17.9</b>	<b>179</b>	<b>3.3</b>	<b>0.3</b>	<b>59.8</b>	<b>1.00E-08</b>
0.5	20	25	20	21.1	211	4.2	0.3	70.3	1.00E-08
0.5	20	25	30	24.3	243	4.2	0.3	80.8	1.00E-08
0.5	20	30	50	33.6	336	5	0.3	112	1.00E-08

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων για κάθε μία από τις έξι αναλύσεις. Ουσιαστικά, ο συντελεστής ωθήσεων, το ειδικό βάρος, ο λόγος poisson και η διαπερατότητα του εδάφους έχουν σταθερή τιμή για όλες τις αναλύσεις, επομένως η διαφορά

των αναλύσεων έγκειται στις παραμέτρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb όπως φαίνεται στον πίνακα. Η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους προκύπτει μέσω των παραμέτρων Mohr Coulomb και των αρχικών γεωστατικών τάσεων. Συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένο τις αρχικές γεωστατικές κύριες τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  ενός εδαφικού στοιχείου στο κέντρο της σήραγγας και τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής  $c$  και  $\varphi$ , υπολογίζεται αρχικά η πρόσθετη τάση  $\Delta\sigma_1$  που απαιτείται για να αστοχήσει σε αστράγγιστες συνθήκες το συγκεκριμένο στοιχείο. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό που περιγράφεται στην παρακάτω εξίσωση έγινε η υπόθεση ότι η τιμή του συντελεστή  $A$  του τύπου του Skempton ισούται με  $1/3$ .

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma_3 \cdot N_\varphi + 2c \cdot \sqrt{N_\varphi} - \sigma_1}{1 + A(N_\varphi - 1)}, \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

$$N_\varphi = \tan^2(45 + \varphi/2), \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους για κάθε έναν συνδυασμό γωνίας τριβής και συνοχής μέσω της εξίσωσης 3.3.

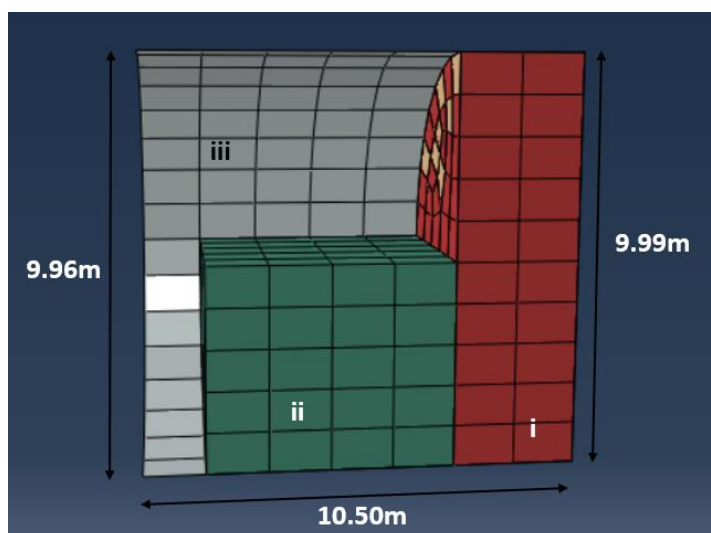
$$Cu = \frac{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Οι συνδυασμοί γωνίας τριβής και συνοχής επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικές εδαφικές συνθήκες και αφορούν κυρίως εδάφη χαμηλής ή μέτριας αντοχής, αφού σε αυτά αναμένονται μεγαλύτερες καθιζήσεις με αποτέλεσμα η εξέλιξη και η αντιμετώπισή τους να παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Λόγω της πολυπλοκότητας των αναλύσεων και του μεγάλου αποθηκευτικού χώρου που απαιτούσαν για την εξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων από κάθε βήμα, επιλέχθηκε μια ανάλυση, η πιο αντιπροσωπευτική με βάση τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ( $c=20\text{kPa}$ ,  $\varphi=20$ ), για την οποία εξάγονται περισσότερες πληροφορίες κατά την εκτέλεση της ανάλυσης έναντι των άλλων, στις οποίες δίνεται έμφαση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία αναλύονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

### 3.2.3 EPB

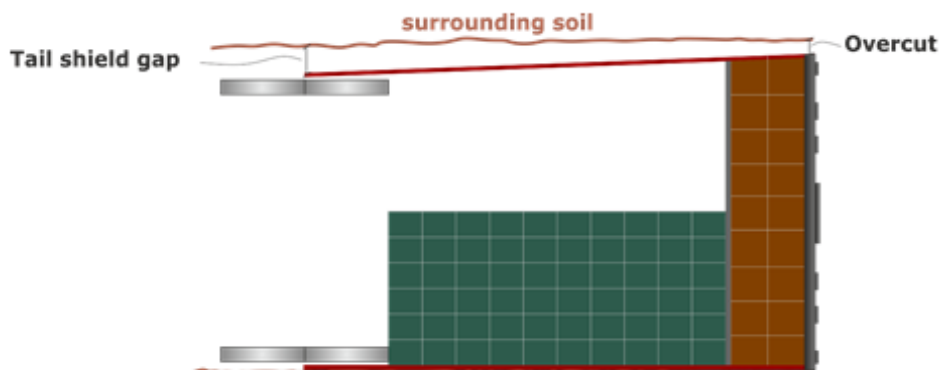
Το EPB διανοίγει σήραγγα διαμέτρου  $D=10\text{m}$ . Για να ληφθούν υπόψη οι υπερεκσκαφές και η κωνικότητα της ασπίδας στο προσομοίωμα το EPB έχει διάμετρο  $9.99\text{m}$  στο μέτωπο και  $9.96\text{m}$  στην ουρά. Λόγω της βαρύτητας, το EPB ακουμπάει στο έδαφος με αποτέλεσμα τα κενά να εμφανίζονται μεταξύ του περιβάλλοντος εδάφους και του πάνω μέρους του μηχανήματος. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η προσομοίωση του EPB. Ο θάλαμος εκσκαφής και ο βοηθητικός θάλαμος αποτελούνται από τρισδιάστατα στοιχεία C3D8, ενώ η ασπίδα προσομοιώνεται με επίπεδα στοιχεία shell πάχους  $0.10\text{m}$ . Λόγω της εφαρμογής του μοντέλου Mohr-Coulomb για τη συμπεριφορά του εδάφους, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας το έδαφος έχει τάση για σημαντική ανύψωση στον πυθμένα της σήραγγας. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η τάση ώστε να υπάρχει μια πιο ρεαλιστική συμπεριφορά στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι. Για παράδειγμα, μια αρκετά διαδεδομένη και αποδεκτή λύση είναι η δημιουργία μιας δύσκαμπτης εδαφικής στρώσης ακριβώς κάτω από τη σήραγγα. Έτσι, το πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας αυτής της στρώσης έχει ως συνέπεια να είναι περιορισμένης έκτασης οι εδαφικές ανυψώσεις του εδάφους στον πυθμένα της σήραγγας, έχοντας βέβαια αλλοιώσει εν μέρει το φυσικό πρόβλημα με την εισαγωγή ενός μεγαλύτερου του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να αντιμετωπιστεί αυτή η τάση για ανύψωση δημιουργείται μια τεχνητή πυκνότητα του χάλυβα της ασπίδας, τέτοια ώστε να εξισορροπείται στο 80% η ελαστική αποτόνωση του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι, θεωρούμε για την ασπίδα πυκνότητα χάλυβα  $\rho_{\text{steel}}=40.4\text{Mg/m}^3$ , ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά έχουν τις τυπικές τιμές τους, δηλαδή μέτρο ελαστικότητας  $E_{\text{steel}}=210\text{GPa}$  και λόγος poisson  $\nu=0.2$ . Αντίθετα για τον θάλαμο εκσκαφής, θεωρούμε μια πλασματική πυκνότητα, σχεδόν μηδενική ώστε να μην επηρεάσει την προσαρμογή στις μετακινήσεις που έχει γίνει μέσω του χάλυβα της ασπίδας. Έτσι, ορίζουμε  $\rho_{\text{exc}}=0.001\text{Mg/m}^3$  με μέτρο ελαστικότητας  $E_{\text{exc}}=60\text{MPa}$  και λόγο poisson  $\nu=0.3$ . Αυτή η θεώρηση δεν επηρεάζει την υποστήριξη του μετώπου, αφού στο προσομοίωμα δεν επιτελείται με την επαφή κεφαλής κοπής (θάλαμος εκσκαφής) και μετώπου, αλλά με την εισαγωγή πίεσης στην επιφάνεια του μετώπου, μέθοδος η οποία αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.



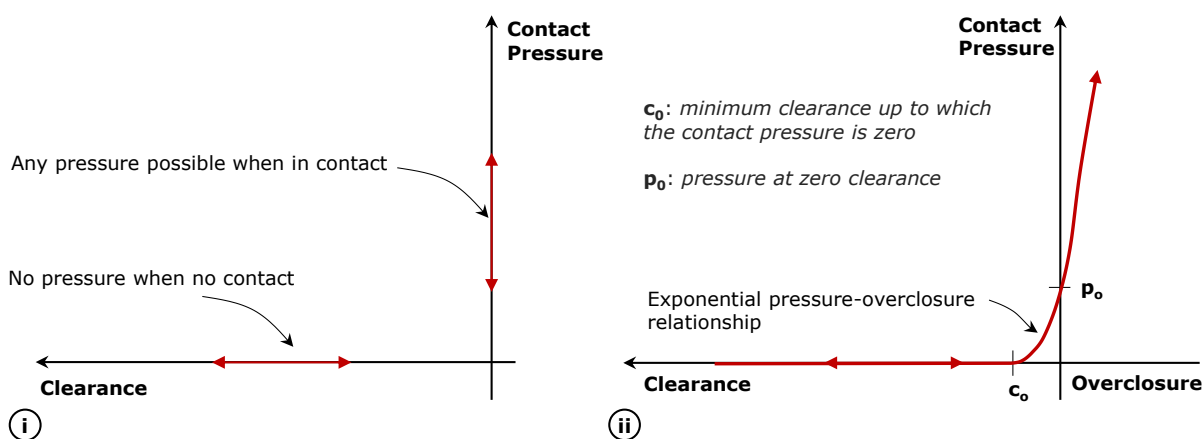
Εικόνα 3.3 EPB (i) θάλαμος εκσκαφής (ii) back up trailer (iii) ασπίδα

Λόγω της κωνικότητας της ασπίδας και της υπερεκσκαφής υπάρχει κενό μεταξύ εδάφους και EPB. Επομένως, μέχρι να έρθει σε επαφή με την ασπίδα του EPB το έδαφος μπορεί να παραμορφώνεται ελεύθερα. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η δυσκαμψία του μηχανήματος καθορίζει την παραμόρφωση του εδάφους, η οποία είναι πρακτικά αμελητέα λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας της ασπίδας.



Εικόνα 3.4 Τομή της ασπίδας του EPB κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, όπου παρουσιάζεται η κωνικότητα της ασπίδας και οι υπερεκσκαφές που επιτελούνται κατά τη λειτουργία του μηχανήματος.

Η προσομοίωση της παραπάνω συμπεριφοράς στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με την εισαγωγή διεπιφάνειας μεταξύ εδάφους και ασπίδας. Η διεπιφάνεια περιγράφεται ιδανικά από τη καμπύλη «hard-contact» που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5(i), όπου όταν έρθουν σε επαφή τα δύο υλικά μπορεί να αναπτυχθεί οποιαδήποτε πίεση μεταξύ τους, αλλά όταν δεν υπάρχει επαφή η αντίστοιχη πίεση είναι μηδενική και το έδαφος παραμορφώνεται ανεξάρτητα. Όμως, η έντονη αλλαγή της καμπύλης περί το σημείο (0,0) προκαλεί συχνά αριθμητικά προβλήματα στο μοντέλο, αφού είναι δύσκολη η προσομοίωση της λόγω των αυστηρών περιορισμών σε αυτό το σημείο. Έτσι, χρησιμοποιείται μια εναλλακτική καμπύλη, η (ii) στην εικόνα 3.5 όπου η πίεση μεταξύ των δύο υλικών αρχίζει να εφαρμόζεται όταν το κενό έχει φτάσει σε μια τιμή  $c_0$  και αυξάνει συνεχώς όσο μειώνεται το κενό μέχρι να γίνει μηδενικό, όπου υπάρχει μια πίεση αναφοράς  $p_0$ . Είναι σαφές ότι όσο μικρότερες είναι οι τιμές του  $c_0$  και  $p_0$  τόσο περισσότερο η καμπύλη (ii) προσεγγίζει την hard-contact καμπύλη, επιτρέποντας τη δυνατότητα της προσομοίωσης της χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά το φυσικό νόημα του προβλήματος. Για τις αναλύσεις της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους  $c_0$  και  $p_0$  οι τιμές  $10^{-6}\text{m}$  και  $1\text{kPa}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 3.5 (i) Καμπύλη «hard-contact» (ii) Καμπύλη προσέγγισης της «hard-contact» για διευκόλυνση της προσομοίωσής της από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus 2011).

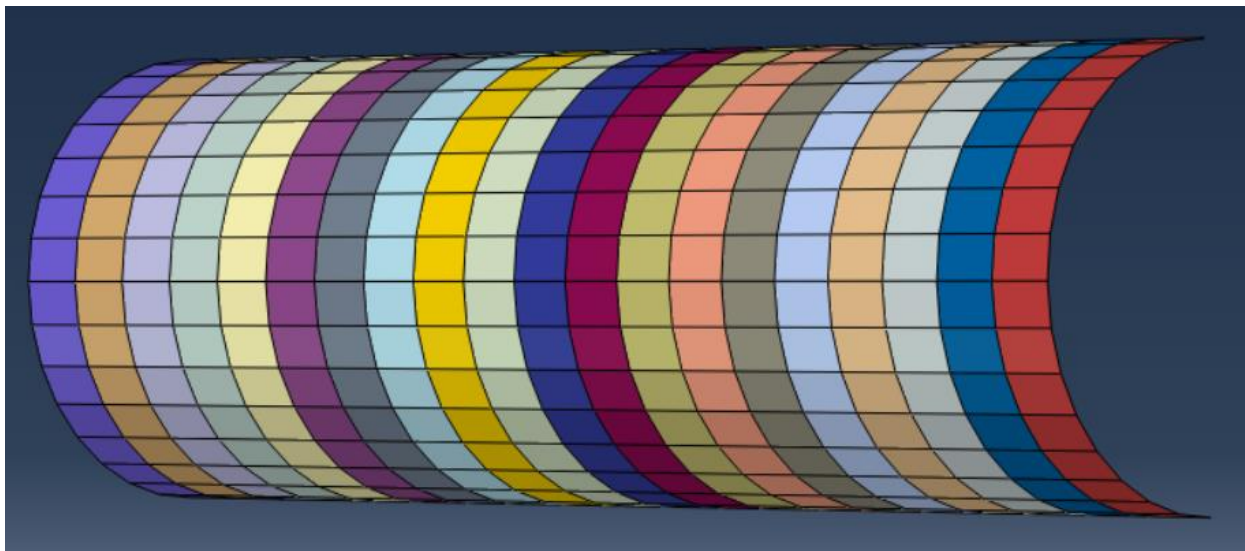
### 3.2.4 Προκατασκευασμένα Στοιχεία Ω.Σ. (Segmental Lining)

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος προσομοιάζονται με ενιαίους δακτυλίους μήκους 1.5m. Λόγω της συμμετρίας του προβλήματος και άρα του προσομοιώματος εισάγονται ημικυκλικού δακτύλιου που έχουν περιορισμένες τις οριζόντιες μετακινήσεις τους στον άξονα συμμετρίας του μοντέλου, δηλαδή στο πάνω και κάτω άκρο του δακτυλίου. Στην πράξη κάθε δακτύλιος αποτελείται από συγκεκριμένα τμήματα προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους. Έχει αποδειχθεί όμως ότι εφόσον οι συνδεσμολογίες διαδοχικών δακτυλίων είναι σε διαφορετικές θέσεις το όλο σύστημα των δακτυλίων λειτουργεί ως ένα ενιαίο σώμα. Επομένως η απλοποιητική παραδοχή που γίνεται για ενιαία προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μήκους 1.5m, χωρίς την εισαγωγή των διαφορετικών τμημάτων και της συνδεσμολογίας, δεν επηρεάζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος προσομοιώνονται με επίπεδα στοιχεία (shell elements) πάχους 0.35m στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της εφαρμογής του μοντέλου Mohr-Coulomb για τη συμπεριφορά του εδάφους, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας το έδαφος έχει τάση για σημαντική ανύψωση στον πυθμένα της σήραγγας. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η τάση ώστε να υπάρχει μια πιο ρεαλιστική συμπεριφορά, εισάγεται μια



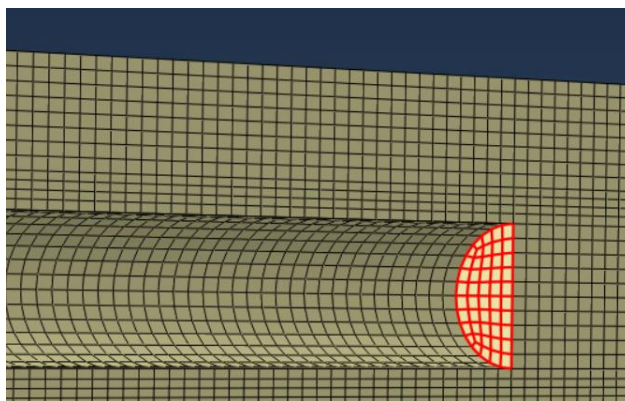
πλασματική πυκνότητα των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (όπως γίνεται και με την ασπίδα του EPB), τέτοια ώστε να εξισορροπείται στο 80% η ελαστική αποτόνωση του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι, θεωρούμε μια πυκνότητα  $\rho_{\text{segment}}=12.17\text{Mg/m}^3$ , ενώ το μέτρο ελαστικότητας έχει μια τυπική τιμή  $E_{\text{segment}}=20\text{GPa}$ .



Εικόνα 3.6 Διαδοχικοί δακτύλιοι προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος για ένα τμήμα της σήραγγας.

### 3.2.5 Πίεση στο Μέτωπο

Στο προσομοίωμα η υποστήριξη του μετώπου μέσω των εμβόλων ωθήσεως και του εδαφικού υλικού του θαλάμου εκσκαφής επιτυγχάνεται με την εισαγωγή πίεσης στην αντίστοιχη επιφάνεια του μετώπου που εκσκάπτεται σε κάθε βήμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7. Ουσιαστικά η προσομοίωση της υποστήριξης δεν γίνεται με την επαφή της ασπίδας του EPB με το μέτωπο, καθώς άλλωστε λόγω του πλασματικού ειδικού βάρους του υλικού του θαλάμου εκσκαφής δε θα είχαμε ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα, υπολογίζουμε τις τάσεις που θα ασκούσε το EPB στο μέτωπο και τις εισάγουμε στο μοντέλο.



Εικόνα 3.7 Τυπική επιφάνεια στην οποία ασκείται η πίεση στο μέτωπο από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο έχει τραπεζοειδή κατανομή, έχοντας ως χαρακτηριστική τιμή την πίεση  $P_0$  στην κορυφή του θαλάμου εκσκαφής, η οποία καθορίζεται από τη δύναμη των



εμβόλων ωθήσεως, το ρυθμό μεταφοράς του υλικού εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία και την πίεση του αέρα που εισάγεται στον θάλαμο. Αυτή την πίεση  $P_0$  τη συσχετίζουμε με την αντίστοιχη υδροστατική πίεση στην κορυφή της διατομής που εκσκάπτεται, ώστε να έχουμε ένα μέγεθος αναφοράς με βάση το οποίο θα μπορεί να συγκριθεί η υποστήριξη του μετώπου σε διαφορετικές συνθήκες, όπως το βάθος διάνοιξης της σήραγγας. Έτσι, εισάγεται ο συντελεστής  $A$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της πίεσης  $P_0$  προς την υδροστατική πίεση στο αντίστοιχο σημείο.

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

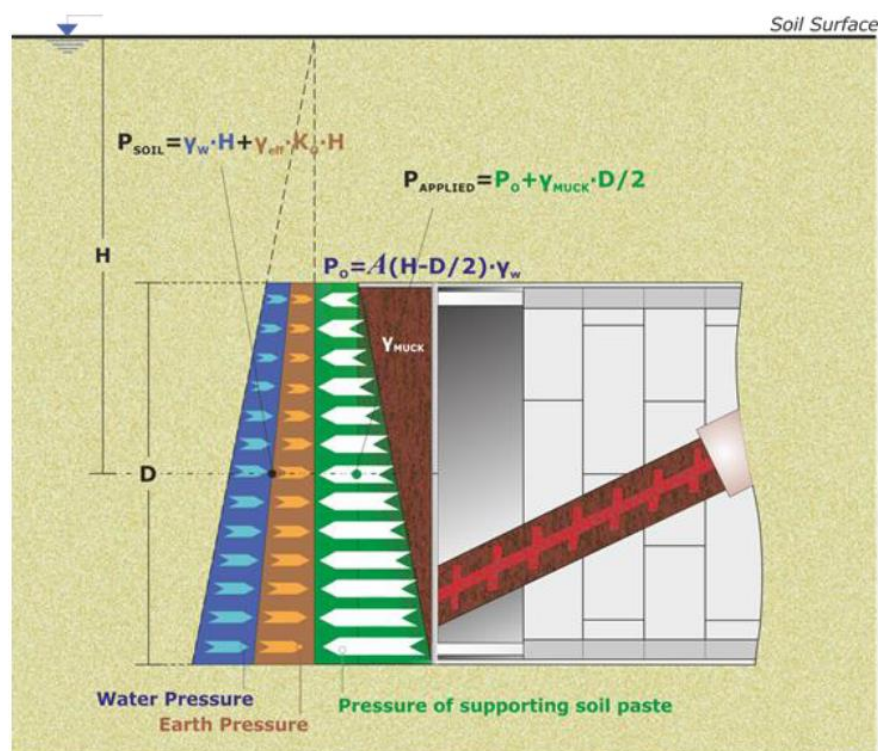
**Εξίσωση 3.4**

Όπου τα αντίστοιχα μεγέθη  $H, D$  περιγράφονται στην εικόνα 3.8.

Η αύξηση της πίεσης του μετώπου γίνεται γραμμικά με το βάθος συναρτήσει του  $\gamma_{muck}$  που αντιστοιχεί στο ειδικό βάρος του υλικού που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής μαζί με τα ειδικά πρόσθετα που του χορηγούνται. Η βασική θέση που υπολογίζεται η πίεση που ασκεί το EPB στο μέτωπο είναι στον άξονα της σήραγγας, ώστε να είναι συγκρίσιμη με την υποστήριξη σε σήραγγας διαφορετικής διαμέτρου και υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 3.5.

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

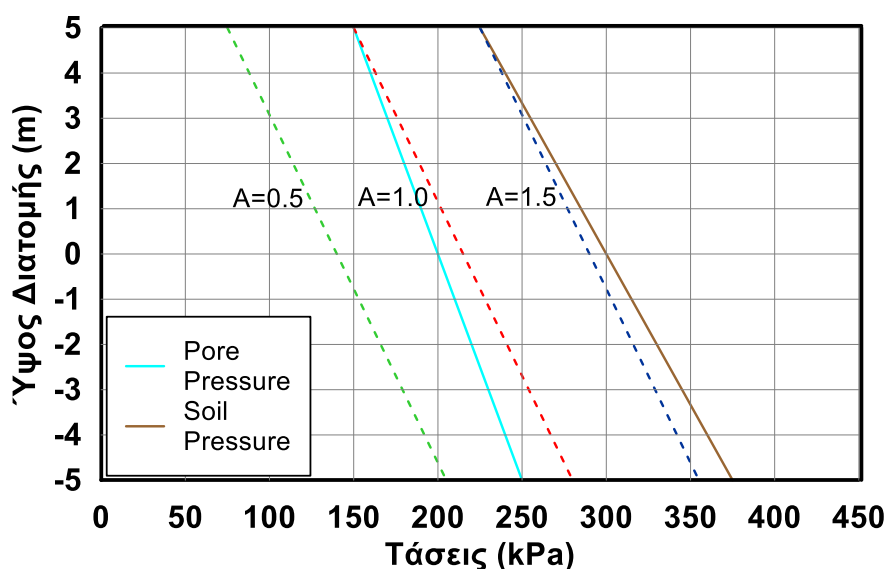
**Εξίσωση 3.5**



Εικόνα 3.8 Απεικόνιση της πίεσης που ασκεί το EPB ώστε να αντισταθμίσει τις πιέσεις από το μέτωπο, με τη χρήση του συντελεστή  $A$  (Sitarenios et al. 2015)

Για παράδειγμα σε ένα προσομοίωμα με  $H/D=2$  και διάμετρο  $D=10\text{m}$ , απεικονίζονται οι τρεις καμπύλες που προσομοιώνουν την υποστήριξη του μετώπου για  $A=0.5$ ,  $A=1.0$  και  $A=1.5$  καθώς και οι υδατικές και εδαφικές πιέσεις στο μέτωπο. Η πίεση της υποστήριξης στο μέτωπο στη στέψη

της σήραγγας για κάθε μία τιμή του συντελεστή  $A$  είναι  $75\text{kPa}(A=0.5)$ ,  $150\text{kPa}(A=1.0)$  και  $225\text{kPa}(A=1.5)$ . Παράλληλα, ο λόγος της πίεσης της υποστήριξης προς τις εδαφικές πιέσεις στον άξονα της διατομής είναι 0.44 για  $A=0.5$ , 0.71 για  $A=1.0$  και 0.97 για  $A=1.5$ . Γενικά μια τιμή του λόγου περί το 0.70 είναι ικανοποιητική για την υποστήριξη του μετώπου. Αντίθετα, μια τιμή που τείνει στο 1.0 αρχικά μοιάζει να εξισορροπεί πλήρως το μέτωπο, αλλά εν τέλει προκαλεί αρκετά προβλήματα στη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας, όπως η φθορά των κοπτικών η οποία αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο (1.2.1.1). Στο διάγραμμα 3.1 παρατηρούμε την κατανομή των πιέσεων υποστήριξης του μετώπου με τις διακεκομμένες γραμμές για τρεις τιμές του  $A$  και τις αντίστοιχες υδροστατικές και εδαφικές πιέσεις του μετώπου. Η ουσιαστική διαφορά των τριών κατανομών έγκειται στην τιμή εκκίνηση τους που πρακτικά καθορίζεται από το  $A$ , καθώς η κλίση είναι σταθερή, αφού εξαρτάται από το ειδικό βάρος του υλικού του θαλάμου εκσκαφής. Παρατηρούμε ότι για  $A=1$  η καμπύλη υποστήριξης έχει την ίδια τιμή με την υδροστατική στη στέψη της σήραγγας ενώ μετά η διαφορά τους ανοίγει λόγω του μεγαλύτερου ειδικού βάρους του υλικού του θαλάμου εκσκαφής έναντι του νερού. Για  $A=1.5$  η κοινή τιμή στη στέψη της καμπύλης υποστήριξης και της εδαφικής πίεσης είναι συμπτωματική για το συγκεκριμένο μόνο βάθος.



Διάγραμμα 3.1 Απεικόνιση της πίεσης υποστήριξης του μετώπου για τρεις διαφορετικές τιμές του  $A$  και της υδροστατικής και εδαφικής πίεσης του μετώπου.

Στις αναλύσεις που εκτελέστηκαν επιλέχτηκε συντελεστής  $A=1$ , δηλαδή η πίεση στην κορυφή του θαλάμου εκσκαφής να είναι ίσος με την αντίστοιχη υδροστατική. Επιπλέον, το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού του θαλάμου λαμβάνεται ίσο με  $\gamma_{\text{muck}}=13\text{kN/m}^3$ , αφού η αρχική τιμή που ήταν  $20\text{kN/m}^3$  μειώνεται σημαντικά λόγω της εκσκαφής του και της πρόσμιξης του με τα πρόσθετα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η εξισορρόπηση του μετώπου περιγράφεται από την εξίσωση 3.6. Όπως έχει αναφερθεί σκοπός της υποστήριξης δεν είναι η πλήρης εξισορρόπηση των αποσταθεροποιητικών δυνάμεων αλλά η συγκράτηση του μετώπου σε ανεκτά όρια, ώστε να αποφευχθεί η ολική πλαστική αστοχία του που θα οδηγούσε σε εκτεταμένες παραμορφώσεις και μετακινήσεις. Έτσι, μέσω της παρακάτω εξίσωσης βλέπουμε το ποσοστό της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο από το EPB σε σχέση με την αντίστοιχη γεωστατική τάση στη συγκεκριμένη θέση.

$$\frac{p_{fs}}{p_{h0}} = \frac{A \cdot \gamma_w \left( H - \frac{D}{2} \right) + \gamma_{muck} \frac{D}{2}}{\gamma_{eff} \cdot H \cdot K_0 + \gamma_w \cdot H}, \text{ όπου:}$$

**Εξίσωση 3.6**

$p_{fs}$ : η πίεση που εφαρμόζεται στο μέτωπο (kPa)

$p_{h0}$ : η οριζόντια πίεση των γαιών του μετώπου (kPa)

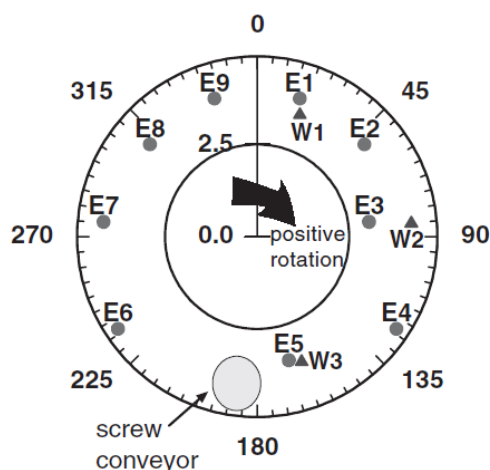
$\gamma_w$ : το ειδικό βάρος του νερού (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{eff}$ : το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{muck}$ : το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού του θαλάμου εκσκαφής (kN/m<sup>3</sup>)

Ο λόγος  $p_{fs}/p_{h0}$  σε όλες τις αναλύσεις της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι 0.73, μια τιμή ικανοποιητική αφού όπως θα φανεί και στα αποτελέσματα προκαλεί τοπικές μόνο πλαστικές παραμορφώσεις στο μέτωπο, περιορίζοντας έτσι τις αναπόφευκτες πρόδρομες καθιζήσεις λόγω των παραμορφώσεων του μετώπου σε ανεκτά όρια.

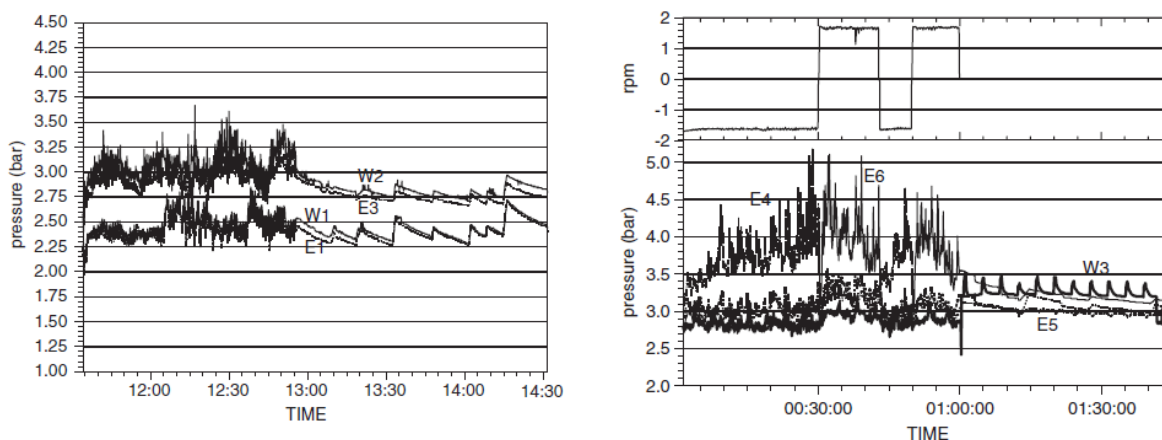
Κατά την προσομοίωση της υποστήριξης του μετώπου είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη και η συμπεριφορά των υδατικών πιέσεων. Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν και παρουσιάζονται σε δημοσίευση του (Bezuijzen et al. 2005) κατά την εκσκαφή του μετώπου αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων οι οποίες σχεδόν ταυτίζονται με τις ολικές τάσεις, με αποτέλεσμα οι ενεργές τάσεις να είναι πρακτικά αμελητέες. Συγκεκριμένα, κατά τη διάνοιξη σήραγγας τοποθετήθηκαν μετρητές στην κεφαλή κοπής του EPB, οι οποίες μετρούσαν τις ολικές τάσεις και τις υδατικές πιέσεις σε συγκεκριμένες θέσεις, όπως φαίνονται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9 Μετρητές ολικών τάσεων (E1-E9) και μετρητές πιέσεων πόρων (W1-W3) στην κεφαλή κοπής του EPB. (Bezuijzen et al. 2005)

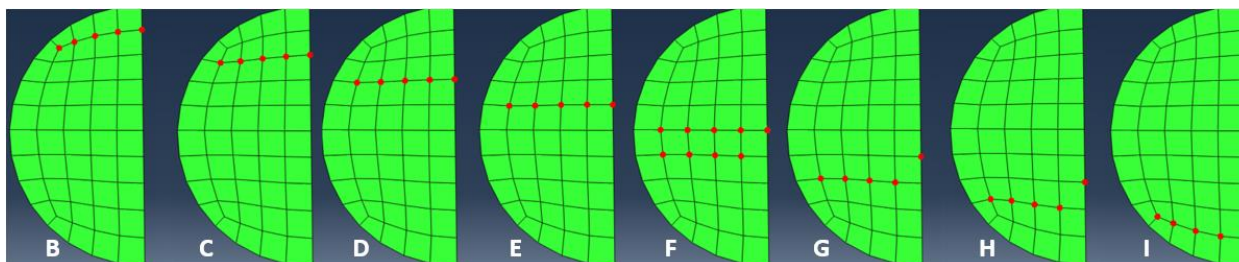
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζονται στην εικόνα 3.10 δείχνουν ότι οι τιμές και η κατανομή των υδατικών πιέσεων και των ολικών τάσεων των οργάνων που βρίσκονται στο ίδιο ύψος πρακτικά ταυτίζονται με αποτέλεσμα οι ενεργές τάσεις να έχουν μηδενιστεί σε όλο το ύψος της ασπίδας του EPB. Ουσιαστικά, το μέτωπο βρίσκεται σε ένα καθεστώς σχεδόν μηδενικής αντοχής. Έτσι, για να συμβαδίζει το προσομοίωμα με τις επί τόπου μετρήσεις και άρα με το φυσικό πρόβλημα, σε κάθε βήμα της εκσκαφής εισάγονται οι υδατικές πιέσεις στην επιφάνεια του

μετώπου, τέτοιες ώστε να έχουν την ίδια τιμή με τις αντίστοιχες ολικές τάσεις, ώστε κατά την εκτέλεση των αναλύσεων να είναι μηδενικές οι ενεργές τάσεις.



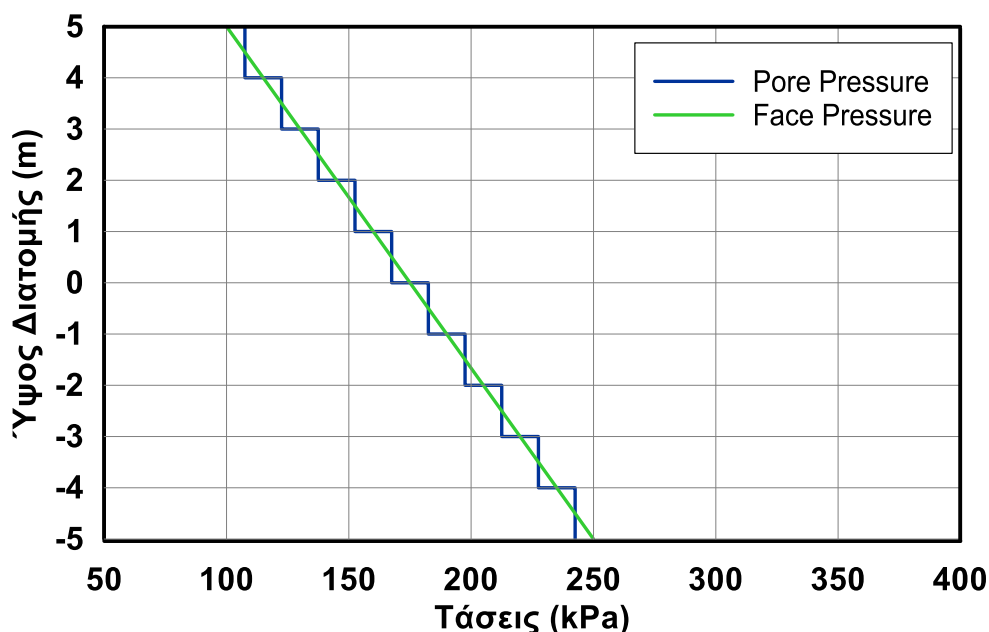
Εικόνα 3.10 Διαγράμματα ολικών τάσεων και πιέσεων πόρων από τα στοιχεία που προέκυψαν από τους μετρητές στην κεφαλή κοπής του EPB (Bezuijen et al. 2005)

Συγκεκριμένα, η επιφάνεια του μετώπου χωρίζεται σε οκτώ ομάδες κόμβων (όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11) και σε καθεμία ομάδα επιβάλλεται η ίδια δύναμη σε όλους τους κόμβους της. Στους εξωτερικούς κόμβους δεν έγινε εισαγωγή της υδατικής πίεσης αφού θα παρέμενε σε αυτούς και μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος αλλοιώνοντας έτσι τα αποτελέσματα σε αντίθεση με τους εσωτερικούς κόμβους, οι οποίοι αφαιρούνται μετά από κάθε βήμα καθώς προσομοιώνουν το έδαφος που εκσκάπτεται από το EPB. Ουσιαστικά, η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων δεν μπορεί να εισαχθεί γραμμικά στο προσομοίωμα, γι' αυτό εισάγεται με μεμονωμένες τιμές στις ομάδες των κόμβων, χωρίς όμως να έχει πρακτικά απόκλιση από την πραγματική συμπεριφορά.



Εικόνα 3.11 Ομάδες κόμβων στην εκάστοτε επιφάνεια του μετώπου για την εισαγωγή της πίεσης του EPB για τη συγκράτηση του μετώπου.

Στο διάγραμμα 3.2 παρουσιάζονται οι κατανομές της εισαγόμενης πίεσης πόρων και της εφαρμοσμένης πίεσης υποστήριξης του μετώπου. Αυτές οι κατανομές εφαρμόζονται στην αντίστοιχη επιφάνεια του μετώπου που εκσκάπτεται σε κάθε βήμα κατά την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας. Παρόλο που δεν έχουν ακριβώς την ίδια κατανομή, προσομοιώνουν το φυσικό πρόβλημα ικανοποιητικά αφού οι ενεργές τάσεις κυμαίνονται σε πολύ μικρές τιμές, οπότε μπορούμε να τις θεωρήσουμε μηδενικές.



Διάγραμμα 3.2 Κατανομή εισαγόμενων υδατικών πιέσεων και πίεσης υποστήριξης του μετώπου από το EPB στην επιφάνεια εκσκαφής κάθε βήματος.

### 3.2.6 Ένεμα (Grout)

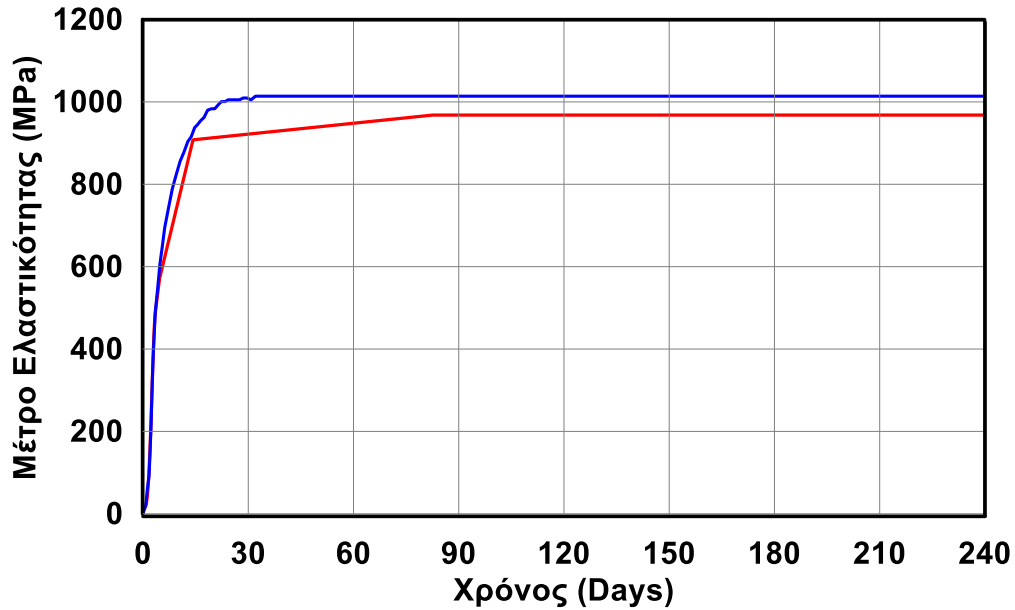
Οι παραμετρικές αναλύσεις στα πλαίσια της διερεύνησης της επιρροής του ενέματος στις καθιζήσεις και στη μεταβολή των εντατικών μεγεθών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες αναλύσεων.

#### 3.2.6.1 Α' Ομάδα Αναλύσεων

Στην πρώτη ομάδα αναλύσεων η σκλήρυνση του ενέματος συναρτήσεως του χρόνου προσομοιώθηκε με την καμπύλη που πρότειναν οι (Kasper & Meschke 2004). Σε αυτή την ομάδα αναλύσεων περιλαμβάνεται η ομάδα βασικών αναλύσεων του κεφαλαίου 4.1 και καθώς και η Α' ομάδα αναλύσεων του κεφαλαίου 5.1. Ουσιαστικά για τις 8 αναλύσεις της ομάδας βασικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη των Kasper & Meschke για τιμή εισαγωγής του ενέματος στα 200kPa, ενώ στην Α' ομάδα αναλύσεων έγιναν 6 αναλύσεις με την ίδια καμπύλη για πίεση εισαγωγής 100kPa και άλλες 6 αναλύσεις για πίεση εισαγωγής 300kPa.

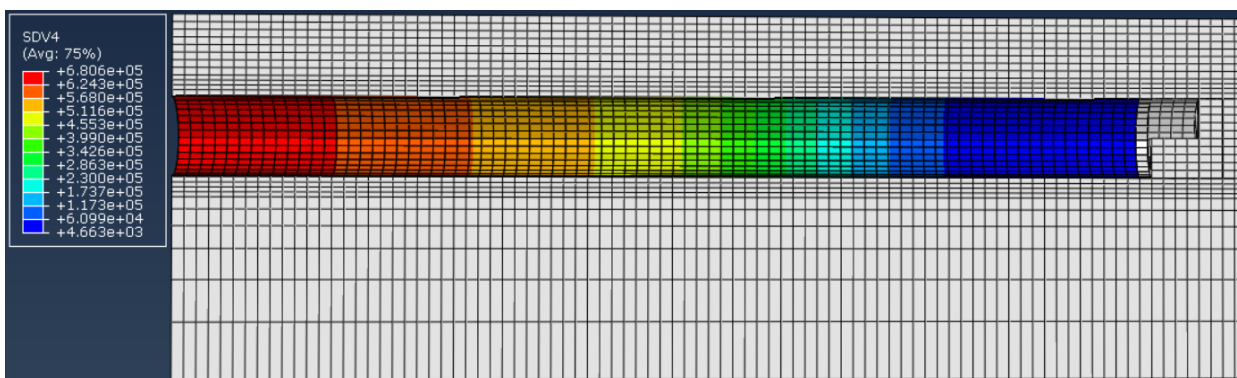
Στη διεθνή βιβλιογραφία ο τρόπος με τον οποίο εισάγεται η καμπύλη της σκλήρυνση του ενέματος ποικίλει. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται δύο ή τρεις καταστάσεις για το ένεμα, μια στερεή, μια ρευστή και μια ενδιάμεση και έτσι η όλη διαδικασία σκλήρυνσης περιγράφεται από τρία στάδια, όπως για παράδειγμα στις δημοσιεύσεις των (Lamborghini et al. 2012; Do et al. 2013; Do et al. 2014). Παρ' όλα αυτά, αυτή η μέθοδος έχει ως αδύνατο σημείο το γεγονός ότι η σκλήρυνση καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των διαφορετικών καταστάσεων που την περιγράφουν, ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός της αλλαγής της συμπεριφοράς του ενέματος από ρευστή σε στερεή.





Διάγραμμα 3.3 Απεικόνιση της καμπύλης σκλήρυνσης του ενέματος (i) με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η καμπύλη των Kasper & Meschke, 2004 (ii) με κόκκινο χρώμα η καμπύλη που εισάγεται στο προσομοίωμα.

Έτσι, στις αναλύσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν έγινε διαχωρισμός της συμπεριφοράς του ενέματος σε διαφορετικές καταστάσεις, αλλά η σκλήρυνση επιτελέστηκε συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία του ενέματος ακολουθούν την κόκκινη καμπύλη του διαγράμματος 3.3 που προσομοιώνει με σχετικά μικρή απόκλιση την καμπύλη των Kasper & Meschke. Ως εκ τούτου, όσο γίνεται η προχώρηση του EPB τόσο περισσότερο σκληραίνουν τα στοιχεία του ενέματος, χωρίς να απαιτείται κάποια εναλλαγή στη συμπεριφορά του ενέματος. Επομένως, υπάρχει το πλεονέκτημα της ομαλής μετάβασης από τη ρευστή στη στερεή κατάσταση του ενέματος επιτρέποντας την καλύτερη προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος.



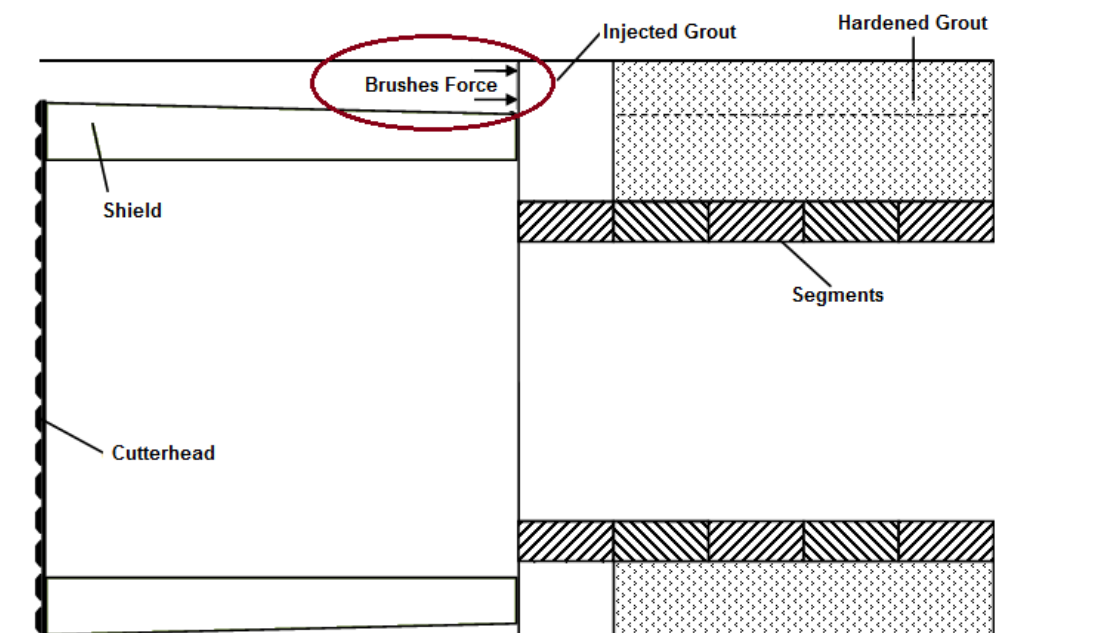
Εικόνα 3.12 Παρουσίαση της σκλήρυνσης, δηλαδή της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας, στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus

Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζεται η σκλήρυνση του ενέματος κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή του

στις αρχικές διατομές που έχουν διανοιχτεί ενώ όσο πλησιάζουμε προς το μέτωπο τόσο μειώνεται η τιμή του.

Η εισπίεση του ενέματος προσομοιώνεται με την εισαγωγή εσωτερικής πίεσης στα αντίστοιχα στοιχεία. Συγκεκριμένα, όταν εισάγεται το ένεμα στο κενό μεταξύ εδάφους και επένδυσης η συμπεριφορά του αρχικά είναι ίδια με ενός ρευστού ασκώντας την ίδια πίεση παντού. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του ενέματος έχουν εισαχθεί στο προσομοίωμα με λόγο poisson  $\nu=0.2$ , και όχι  $\nu=0.5$  που αντιπροσωπεύει τα ρευστά. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι το γεγονός ότι θέλουμε να προσομοιώσουμε την πραγματική συμπεριφορά κατά την οποία το ένεμα προσπαθώντας να εκτονώσει την εσωτερική του πίεση, φορτίζει το περιβάλλον έδαφος, συγκρατώντας και συχνά μειώνοντας τις καθιζήσεις. Αν όμως είχαμε σε αυτά τα στοιχεία λόγο poisson  $\nu=0.5$ , θα παρέμεναν εντελώς αμετάβλητα ως προς τον όγκο τους, αφού μαθηματικά θα ήταν αδύνατο για το πρόγραμμα. Έτσι απορρίφθηκε ως λύση η επιλογή να μεταβάλλεται ο λόγος poisson συναρτήσει του χρόνου όπως γίνεται αντίστοιχα με το μέτρο ελαστικότητας.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της εσωτερικής πίεσης έναντι της εισαγωγής φορτίου για την προσομοίωση της εισπίεσης του ενέματος είναι το γεγονός ότι προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα αφού η εσωτερική πίεση εκτονώνεται συναρτήσει του χρόνου σε συνδυασμό με την σκλήρυνση του ενέματος, τη στιγμή που η εισαγωγή φορτίου θα απαιτούσε καθορισμένη σταδιακή μείωση αυτού του φορτίου. Παράλληλα, η εσωτερική πίεση ασκείται παντού με την ίδια τάση ανεξαρτήτως διεύθυνσης, προσομοιώνοντας έτσι πολύ ικανοποιητικά την αρχική συμπεριφορά του ενέματος ως ρευστό.



Εικόνα 3.13 Τομή ενός EPB. Απεικονίζεται πάνω από τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος η δύναμη που ασκούν οι οι βούρτσες ώστε να μην εισέλθει το ένεμα στην ασπίδα.

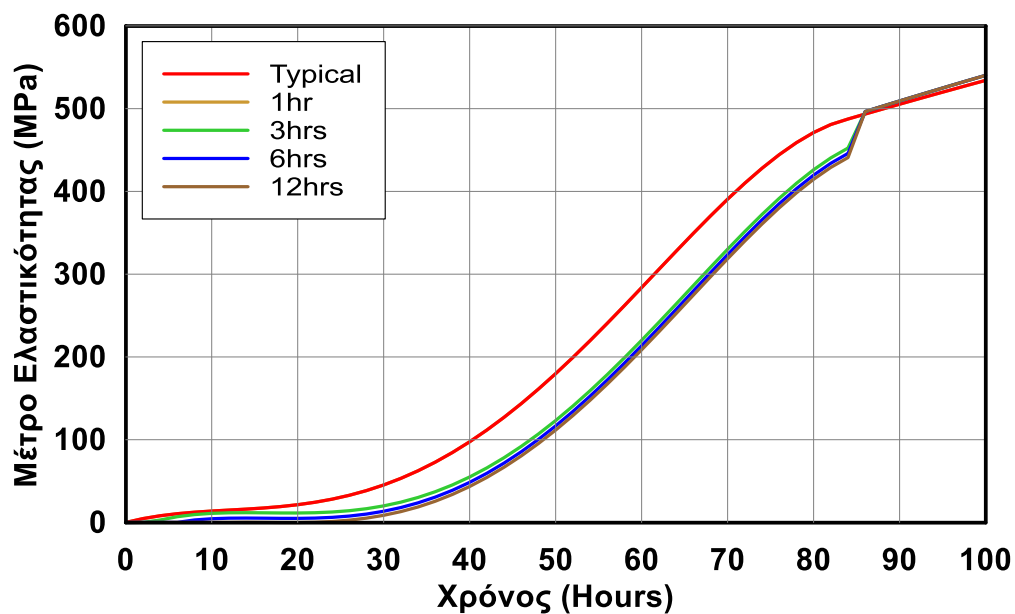
Στην εικόνα 1.12 του κεφαλαίου 1.2.1.6 απεικονίζονται οι ειδικές βούρτσες στην ουρά της ασπίδας του EPB που εμποδίζουν το ένεμα να φτάσει στο μπροστινό μέρος της ασπίδας του EPB. Η προσομοίωση τους είναι ιδιαίτερη σημαντική καθώς συγκρατούν το ένεμα, αφού δεν του επιτρέπουν του να εκτονωθεί, ξεφεύγοντας προς το εμπρόσθιο τμήμα του EPB. Έτσι, η εσωτερική



πίεση που εισάγεται, μη μπορώντας να εκτονωθεί, συγκρατεί το περιβάλλον έδαφος ασκώντας του φορτίο αντίθετο στη φορά των υφιστάμενων καθιζήσεων. Ουσιαστικά οι βούρτσες επιτυγχάνουν τον σκοπό αυτό μέσω της πίεσης που τους ασκείται από ειδικά μονωτικά, συνήθως ειδικά λάδια. Για αυτό το λόγο, στο μοντέλο, δεν προσομοιώνονται οι βούρτσες ως στοιχείο του EPB, αλλά όπως φαίνεται στην έλλειψη στην εικόνα 3.13 εισάγεται ένα καταναμημένο φορτίο στο κενό μεταξύ εδάφους και ασπίδας το οποίο έχει τιμή ίση με την αντίστοιχη πίεση εισαγωγής του ενέματος. Έτσι, αν για παράδειγμα το ένεμα έχει αρχική εσωτερική πίεση 200kPa βρίσκεται στο κενό εδάφους και ασπίδας αντίστοιχη πίεση 200kPa με αποτέλεσμα η μεταβολή της εσωτερικής του πίεσης να οφείλεται στην αλληλεπίδρασή του με τα στοιχεία του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και στη σκλήρυνση που επιτελείται συναρτήσει του χρόνου.

### 3.2.6.2 Β' Ομάδα Αναλύσεων

Στη Β' ομάδα αναλύσεων (κεφάλαιο 5.2) εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις που αφορούν αφενός στην πίεση με την οποία εισάγεται το ένεμα και αφετέρου με τη καμπύλη σκλήρυνσης που ακολουθούν τα στοιχεία του ενέματος. Συγκεκριμένα, όλες οι αναλύσεις έγιναν για ένα συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ ( $c=20\text{kPa}$ ,  $\phi=20$ ). Έτσι, για κάθε μια από τις δύο διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος 200kPa και 300kPa εκτελέστηκαν πέντε αναλύσεις με διαφορετική καμπύλη σκλήρυνσης, οι οποίες παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.4.

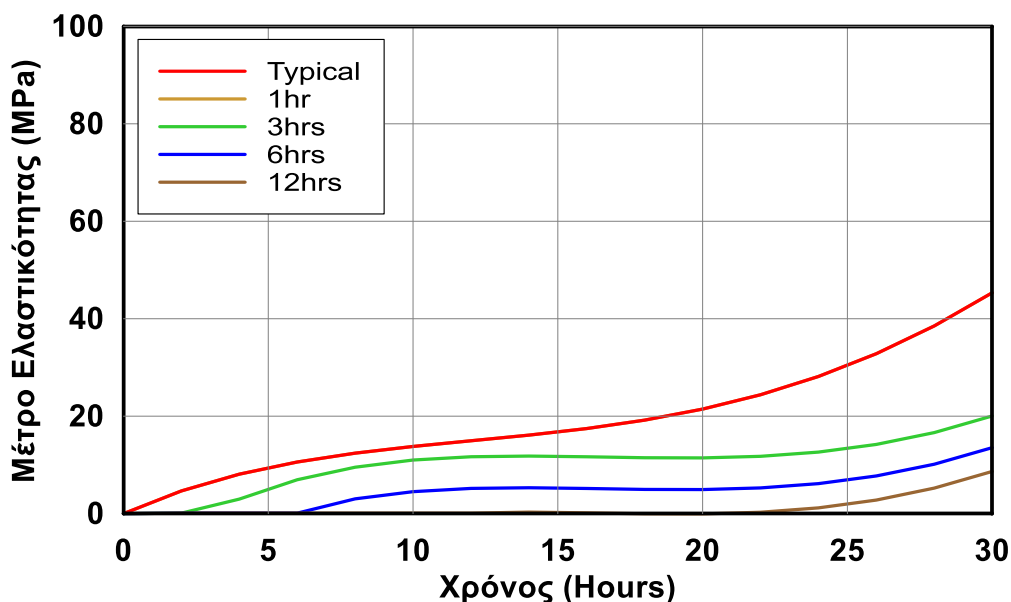


Διάγραμμα 3.4 Καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος με βάση το χρόνο σκλήρυνσής του για την τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke και για τέσσερις άλλους χρόνους (η κόκκινη καμπύλη ταυτίζεται με την χρυσή)

Συγκεκριμένα, έχοντας ως βάση την καμπύλη των Kasper & Meschke η οποία αναφέρεται για λόγους συντομίας στα διαγράμματα ως typical προκύπτουν οι υπόλοιπες τέσσερις καμπύλες τροποποιώντας το χρόνο σκλήρυνσης. Στο διάγραμμα 3.4 βλέπουμε την εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας για χρόνο 100hrs. Παρατηρούμε ότι η τυπική καμπύλη καθώς και η αντίστοιχη της 1hr σχεδόν ταυτίζονται αφού πρακτικά έχουν πολύ κοντινό χρόνο σκλήρυνσης, κάτι που επιβεβαιώνουν και τα αποτελέσματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Σε ότι αφορά τις υπόλοιπες καμπύλες, βλέποντας την εξέλιξη τους σχετικά μακροσκοπικά στο χρόνο λίγο μετά τις 85hrs πρακτικά ταυτίζονται με την τυπική καμπύλη με την ουσιαστική τους διαφορά να έγκειται

στις πρώτες ώρες. Για αυτό το λόγο γίνεται μεγέθυνση του υφιστάμενου διαγράμματος και παρατίθενται τα ίδια μεγέθη για τις πρώτες 30 ώρες στο διάγραμμα 3.5. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη το ένεμα είναι σχεδιασμένο να σκληραίνει σχετικά γρήγορα ώστε να αποκτά ένα συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας σε ορισμένο χρόνο. Κατά αυτή την έννοια οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην σκλήρυνση των 6hrs και 12hrs εισάγονται στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς ώστε να μελετηθεί εκτενέστερα η επίδραση του ενέματος στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των καθιζήσεων.

Όπως και στο διάγραμμα 3.4 η τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke ταυτίζεται πάλι με την καμπύλη σκλήρυνσης 1hr στο διάγραμμα 3.5. Σε ότι αφορά όμως τις υπόλοιπες καμπύλες, των 3hrs, 6hrs και των 12hrs γίνεται σαφής η διαφορά που έχουν στον χρόνο σκλήρυνσής τους και στο μέτρο ελαστικότητας που έχουν λάβει με το πέρας των τριάντα ωρών. Έτσι, αναμένουμε ότι από τις πρώτες κιόλας ώρες από την εισαγωγή του ενέματος με τη διαφορετική καμπύλη θα υπάρξουν διαφορετικές τάσεις στην εξέλιξη των μεγεθών που μελετώνται.



Διάγραμμα 3.5 Καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος με βάση το χρόνο σκλήρυνσής του για την τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke και για τέσσερις άλλους χρόνους (η κόκκινη καμπύλη ταυτίζεται με την χρυσή).

### 3.3 Βήματα Αναλύσεων

Η μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων προσομοιώνεται με μια σειρά επαναλαμβανομένων βημάτων. Αυτά αφορούν βασικά στην εκσκαφή του μετώπου, την υποστήριξη της διατομής με την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος, την προχώρηση του μηχανήματος και την εισαγωγή του ενέματος. Τα βασικά βήματα της ανάλυσης περιγράφονται παρακάτω παρουσιάζοντας την αλληλουχία που εκτελεί το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

#### 3.3.1 Γεωστατικό Βήμα

Είναι το πρώτο βήμα που επιτελείται σε κάθε ανάλυση, στο οποίο επιβάλλεται στο έδαφος το καθεστώς των αρχικών γεωστατικών τάσεων.

### 3.3.2 Εισαγωγή του EPB

Το EPB τοποθετείται στο μοντέλο μετά την ολοκλήρωση του γεωστατικού βήματος. Σε αυτό το βήμα εισάγεται το μηχάνημα στο προσομοίωμα με όλα τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί παραπάνω καθώς επίσης και η διεπιφάνεια μεταξύ περιβάλλοντος εδάφους και ασπίδας του EPB. Πιο συγκεκριμένα, η αλληλουχία των τμημάτων αυτού του βήματος έχει ως εξής:

- Αφαιρείται το έδαφος στο σύνορο του προβλήματος για μήκος που αντιστοιχεί στο μήκος της ασπίδας του EPB. Συγκεκριμένα, αφαιρούνται 7 φέτες εκσκαφής οι οποίες αντιστοιχούν σε 10.5m
- Το EPB εισάγεται στη θέση του εδάφους που έχει αφαιρεθεί, περιλαμβάνοντας όλα τα στοιχεία του, δηλαδή το θάλαμο εκσκαφής, το back up trailer και την ασπίδα, ενώ ενεργοποιείται και η διεπιφάνεια ασπίδας-εδάφους. Η κωνικότητα της ασπίδας και η υπερεκσκαφή της κεφαλής κοπής επιτυγχάνονται γεωμετρικά, καθώς οι διαστάσεις του EPB είναι τέτοιες ώστε να έχει μικρότερη διάμετρο, σταθερά μειούμενη προς την ουρά του μηχανήματος, σε σχέση με τη διατομή που εκσκάπτεται.
- Ενεργοποιείται η πίεση στο μέτωπο από το EPB.
- Εισάγονται οι τιμές των πιέσεων πόρων στις αντίστοιχες ομάδες κόμβων του μετώπου ώστε να βρισκόμαστε σε καθεστώς μηδενικών ενεργών τάσεων.
- Τοποθετείται ο πρώτος δακτύλιος των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, ο οποίος βρίσκεται εσωτερικά της ουράς του EPB, χωρίς να επιδρά ακόμα με το έδαφος, αφού θα χρησιμοποιηθεί ως υποστήριξη μετά την επόμενη προχώρηση του EPB.

### 3.3.3 Βήμα Διάνοιξης της Σήραγγας

Το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το πέρας της ολοκλήρωσης της σήραγγας και είναι επομένως το βασικό τμήμα της ανάλυσης. Για την καλύτερη περιγραφή της διαδικασίας θα θεωρήσουμε ότι η ανάλυση βρίσκεται στο βήμα «n» και ετοιμάζεται να επιτελεστεί το βήμα «n+1».

- Αφαιρείται η εδαφική φέτα εκσκαφής που αντιστοιχεί στο βήμα «n+1» μήκους 1.5m
- Γίνεται προχώρηση του EPB κατά 1.5m, ίση απόσταση δηλαδή με το μήκος των προκατασκευασμένων στοιχείων. Η μετακίνηση του EPB γίνεται με την τοποθέτησή του σε συγκεκριμένους κόμβους, οι οποίοι συσχετίζονται με τους αντίστοιχους εδαφικούς κόμβους που περιβάλλουν το EPB. Η κωνικότητα της ασπίδας και η υπερεκσκαφή της κεφαλής κοπής επιτυγχάνονται γεωμετρικά, καθώς οι διαστάσεις του EPB είναι τέτοιες ώστε να έχει μικρότερη διάμετρο, σταθερά μειούμενη προς την ουρά του μηχανήματος, σε σχέση με τη διατομή που εκσκάπτεται.
- Η πίεση στο μέτωπο μεταφέρεται στην επόμενη εδαφική φέτα εκσκαφής. Έτσι, αφού έχει αφαιρεθεί η «n+1», το νέο μέτωπο είναι η φέτα «n+2» όπου και ασκείται η πίεση.
- Οι τιμές των πιέσεων πόρων στις αντίστοιχες ομάδες κόμβων του μετώπου μεταφέρονται αντίστοιχα στο νέο μέτωπο που αντιστοιχεί στη φέτα «n+2» ώστε να βρισκόμαστε σε καθεστώς μηδενικών ενεργών τάσεων.
- Λόγω της προχώρησης του EPB ο δακτύλιος «n-7» των προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ελευθερώνεται από το EPB και λειτουργεί ως υποστήριξη για τη διατομή που έχει εκσκαφτεί. Παράλληλα, τοποθετείται ο δακτύλιος «n-6» εσωτερικά της ουράς του EPB, χωρίς να επιδρά ακόμα με το έδαφος, αφού θα χρησιμοποιηθεί ως υποστήριξη μετά την επόμενη προχώρηση του EPB.
- Μεταξύ του δακτυλίου «n-7» των προκατασκευασμένων στοιχείων και του εδάφους εισάγονται τα στοιχεία του ενέματος στη φέτα «n-7». Η πίεση του ενέματος

προσομοιώνεται με εισαγωγή ίσης εσωτερικής πίεσης στα στοιχεία του ενέματος η οποία είναι ιστροπική όπως σε ένα ρευστό. Τα στοιχεία του ενέματος ακολουθούν τη συμπεριφορά που καθορίζει η καμπύλη σκλήρυνσης που εισάγεται στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν εκσκαφτεί το απαιτούμενο μήκος για τη σήραγγα. Να σημειωθεί ότι με το πέρας της διάνοιξης της σήραγγας, στο τελευταίο βήμα λόγω του κορεσμένου αργιλικού προφίλ υπάρχει μια επιπλέον ενέργεια που αφορά στην εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων ώστε να επιτελεστεί η στερεοποίηση του εδάφους.



## 4 Επιρροή Εδαφικής Αντοχής στη Διάνοιξη των Σηράγγων

### 4.1 Ομάδα Βασικών Αναλύσεων

#### 4.1.1 Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων

Στον πίνακα 4.1 απεικονίζεται η ομάδα των βασικών αναλύσεων που αποτελείται από 8 αναλύσεις με μεταβολή της εδαφικής αντοχής. Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιείται η καμπύλη σκλήρυνσης που πρότειναν οι Kasper & Meschke, 2004, ενώ το ένεμα εισάγεται σε όλες με πίεση 200kPa, τα οποία αντιστοιχούν στην κατακόρυφη γεωστατική τάση στη θέση της στέψης της σήραγγας πριν τη διάνοιξη της. Επιλέχθηκαν συνδυασμοί συνοχής και γωνίας τριβής ώστε να είναι ρεαλιστικοί προσεγγίζοντας τις συνθήκες στις οποίες επιχειρούν τα EPB, δίνοντας έμφαση στις αργίλους χαμηλής αντοχής, όπου οι καθιζήσεις είναι εκτεταμένες και ο περιορισμός τους κρίσιμος κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Πίνακας 4.1 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.

Εδαφικές Παράμετροι									
A/A	$k_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$	$C_u$ (kPa)	$E$ (Mpa)	$\psi$	$\nu$	$k_s$ (m/s)
a	0.5	20	10	20	49.2	14.76	3.3	0.3	1E-08
b	0.5	20	15	20	54.5	16.35	3.3	0.3	1E-08
c	0.5	20	20	20	59.8	17.94	3.3	0.3	1E-08
d	0.5	20	20	25	70.3	21.09	4.2	0.3	1E-08
e	0.5	20	30	25	80.8	24.25	4.2	0.3	1E-08
f	0.5	20	30	30	91.2	27.35	5.0	0.3	1E-08
g	0.5	20	50	30	112.0	33.59	5.0	0.3	1E-08
h	0.5	20	70	35	141.8	42.54	5.8	0.3	1E-08

Παράμετροι Ενέματος		
Grout Pressure (kPa)	Τελική Αντοχή (Mpa)	Καμπύλη Σκλήρυνσης Kasper & Meschke, 2004
200	970	

Παράμετροι Προκατασκευασμένων Στοιχείων Ω.Σ.				
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$E$ (Gpa)	$\nu$	Μήκος Στοιχείου (m)	Πάχος Στοιχείου (cm)
12.17	20	0.2	1.5	35

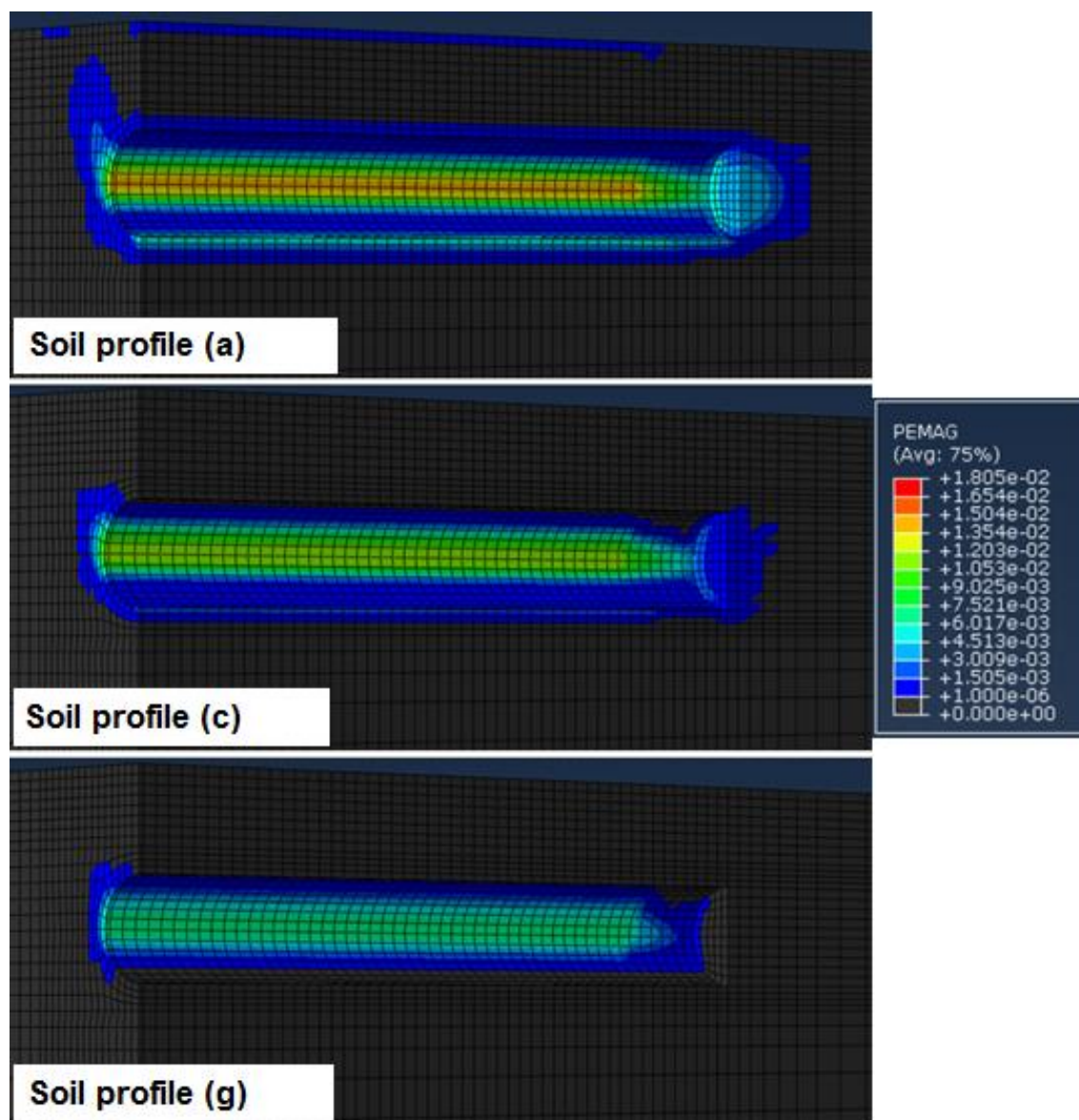
Παράμετροι Ασπίδας				
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$E$ (Gpa)	$\nu$	Μήκος Ασπίδας (m)	Πάχος Ασπίδας (cm)
40.4	210	0.2	10.5	10

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα γίνει εκτενής αναφορά τριών εδαφικών προφίλ και κατόπιν θα παρουσιαστούν τα βασικά αποτελέσματα και για τις οκτώ αναλύσεις. Έτσι, θα παρουσιαστούν εκτενέστερα τα εδαφικά προφίλ με  $C_u=49.2\text{kPa}$ ,  $C_u=59.8\text{kPa}$  και  $C_u=112.0\text{kPa}$ , δηλαδή από δυσμενέστερες σε ευμενέστερες συνθήκες.

## 4.1.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

### 4.1.2.1 Ανάλυση τριών εδαφικών προφίλ

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, αρχικά θα παρουσιαστούν τρία εδαφικά προφίλ. Από τον πίνακα 4.1 προκύπτει η ονομασία κάθε καμπύλης με ένα σύμβολο για καλύτερη εποπτεία. Στην προκειμένη περίπτωση είναι **(a):  $C_u=49.2\text{kPa}$** , **(c):  $C_u=59.8\text{kPa}$** , **(g):  $C_u=112.0\text{kPa}$** .

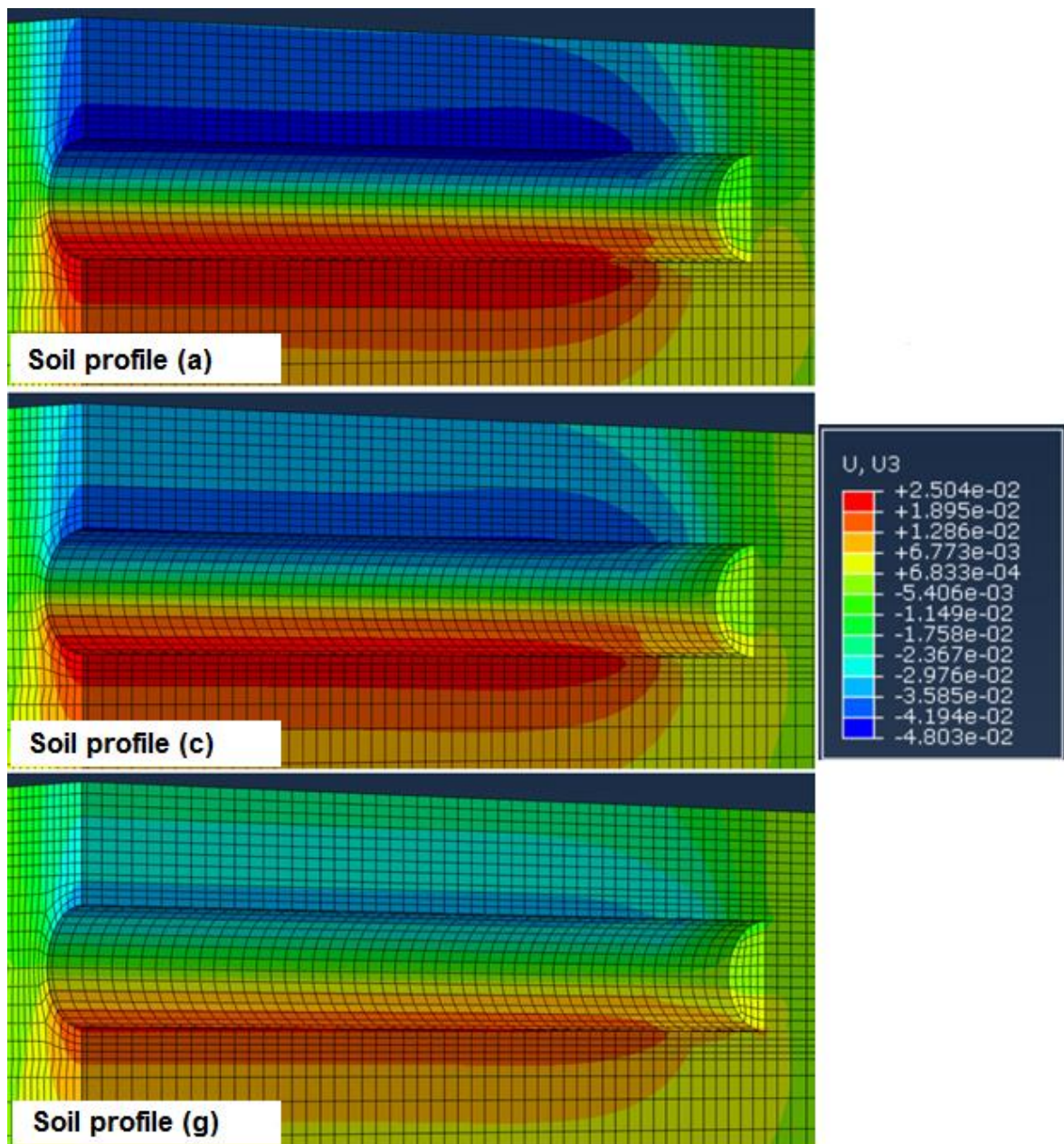


Εικόνα 4.1 Παρουσίαση των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της σήραγγας κατά τη διάρκεια διάνοιξής της για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας στα τρία επιλεγμένα εδαφικά προφίλ, με (a) η άργιλος με τη χαμηλότερη αντοχή και (g) η άργιλος με την υψηλότερη αντοχή. Είναι σαφές ότι στο εδαφικό προφίλ (a) έχουμε πολύ πιο εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις από τα άλλα δύο προφίλ. Το μέσο προφίλ (c) έχει αισθητά καλύτερη συμπεριφορά από το (a), ενώ στην άργιλο υψηλής αντοχής οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι πολύ περιορισμένες. Και στα τρία εδαφικά προφίλ παρατηρούμε ότι το μέτωπο βρίσκεται σε ένα καθεστώς μικρής πλαστικοποίησης, ιδίως στα

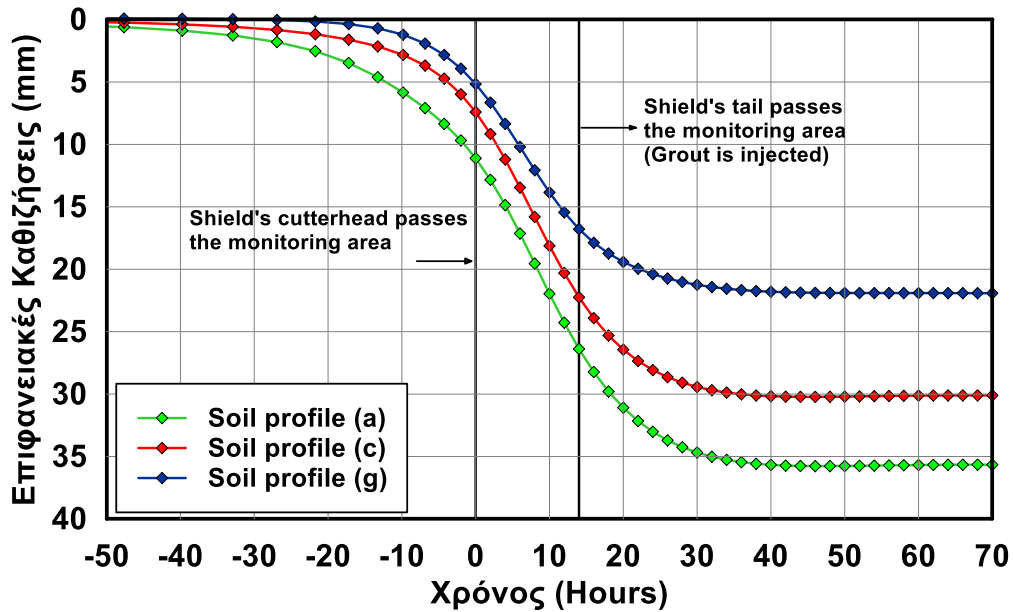


προφίλ (c) και (g), επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η πίεση στο μέτωπο είναι επαρκής, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2.5.



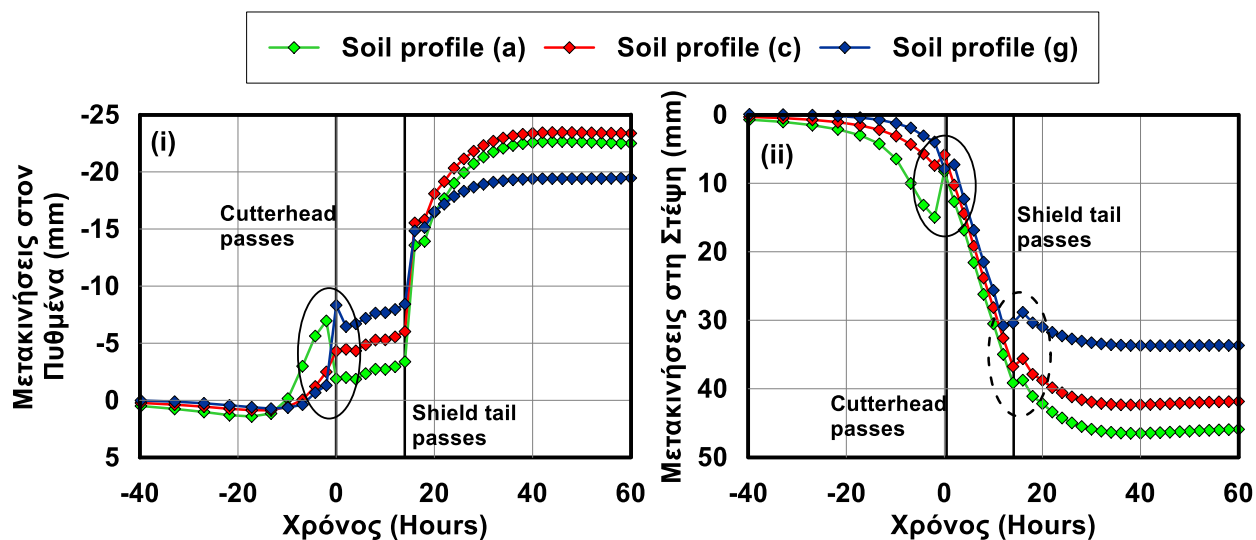
Εικόνα 4.2 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις.

Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζονται για τα τρία επιλεγμένα εδαφικά προφίλ οι κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις. Είναι εμφανές ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις μειώνονται δραστικά όσο αυξάνεται η ποιότητα του εδάφους, ενώ αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρούμε στη στέψη και τον πυθμένα της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η ανύψωση του πυθμένα και η υποχώρηση της στέψης της σήραγγας είναι μεγαλύτερες στο πρώτο εδαφικό προφίλ χαμηλής αντοχής σε σύγκριση με τις αργίλους υψηλότερης αντοχής που προσομοιώνονται στα άλλα δυο εδαφικά προφίλ.



Διάγραμμα 4.1 Εξέλιξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με EPB για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Στο διάγραμμα 4.1 παρατηρούμε την εξέλιξη των καθιζήσεων ενός επιφανειακού σημείου για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Ουσιαστικά για  $t=0$  είναι η χρονική στιγμή που το EPB περνάει από το σημείο αναφοράς και βλέπουμε την εξέλιξη της καθίζησης για το συγκεκριμένο σημείο πριν φτάσει σε αυτό το EPB, αλλά και καθώς απομακρύνεται. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή μειώνονται σημαντικά οι καθιζήσεις που αναπτύσσονται σε όλη τη διάρκεια της εκσκαφής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναλογία μεταξύ της καθίζησης του σημείου αναφοράς τη στιγμή που η κεφαλή κοπής διέρχεται από αυτό και της τελικής καθίζησης του ίδιου σημείου, καθώς και στα τρία προφίλ κυμαίνεται από 0.24% έως 0.30%. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι ο μεγάλος όγκος των καθιζήσεων εκδηλώνεται στο διάστημα μεταξύ της εκσκαφής του μετώπου από την κεφαλή κοπής και της εισαγωγής του ενέματος στην ουρά της ασπίδας. Αυτό οφείλεται εν πολλοίς στην κωνικότητα της ασπίδας που ευνοεί την ανάπτυξη καθιζήσεων μέχρι ενός ορίου και στην απουσία του ενέματος σε αυτό το διάστημα, που θα δυσχέραινε την εκτόνωση των καθιζήσεων. Μετά την εισαγωγή του ενέματος, οι καθιζήσεις αρχίζουν να σταθεροποιούνται με μια αύξηση περίπου 25% σε σχέση με τις καθιζήσεις τη στιγμή της εισαγωγής. Αυτές οι καθιζήσεις μετά το πέρας της ασπίδας αναπτύσσονται κυρίως λόγω της στερεοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους αλλά και του ενέματος. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά το ένεμα, όταν εισάγεται στο κενό εδάφους και επένδυσης συμπεριφέρεται ως ρευστό και είναι πρακτικά απαραμόρφωτο, όσο όμως σκληραίνει και αποκτά μια πιο στερεά μορφή έχει τη τάση να παραμορφωθεί λόγω της στερεοποίησης του, επιτρέποντας έτσι την εκδήλωση καθιζήσεων, οι οποίες όμως είναι γενικά περιορισμένες και εντός ανεκτών ορίων.



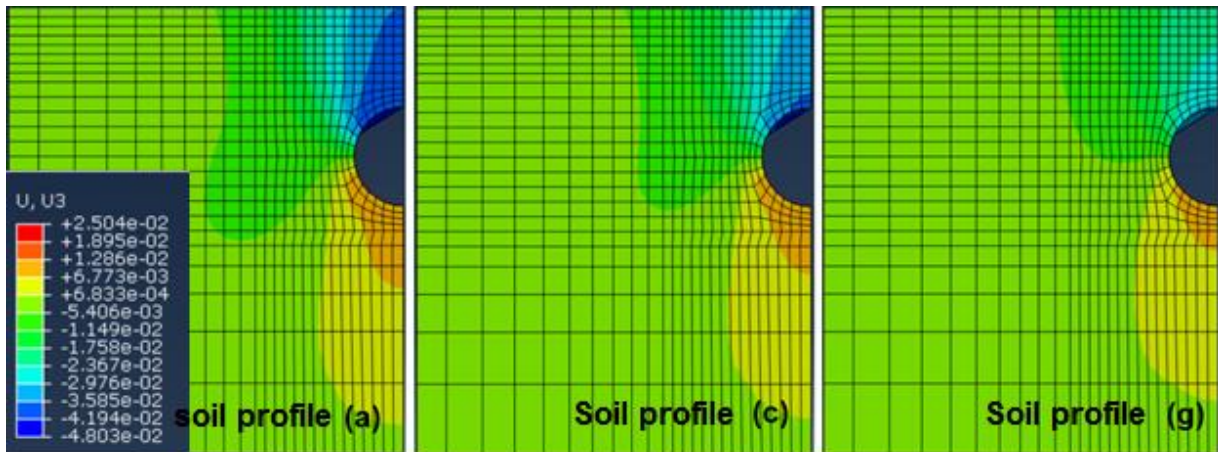
Διάγραμμα 4.2 (i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ, (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις του πυθμένα στο διάγραμμα (i) καθώς και οι μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας στο διάγραμμα (ii) για ένα τυχόν σημείο στον πυθμένα και τη στέψη αντίστοιχα. Στο διάγραμμα (i) παρατηρούμε τη γενικά μεγάλη ανύψωση του πυθμένα, η οποία αυξάνει για τις χαμηλής αντοχής αργίλου (a) και (c) ενώ περιορίζεται στην υψηλής αντοχής άργιλο (g). Η μεγάλη αυτή ανύψωση των 2 έως 2.4 εκατοστών οφείλεται στο καταστατικό προσομοίωμα, το οποίο δε λαμβάνει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας για τη φόρτιση και αποφόρτιση. Μάλιστα στην έλλειψη στο διάγραμμα (i) βλέπουμε τη σημαντική ανύψωση του πυθμένα, η οποία μετά πέφτει απότομα λόγω της εμφάνισης της ασπίδας η οποία έχει πολύ μεγάλο ειδικό βάρος (αναλύεται στο κεφάλαιο 3.2.3) ώστε να εξισορροπήσει τη μεγάλη με ρεαλιστική αποτόνωση. Αντίστοιχα μετά το πέρας της ασπίδας οι μετακινήσεις αυξάνονται πάλι σημαντικά.

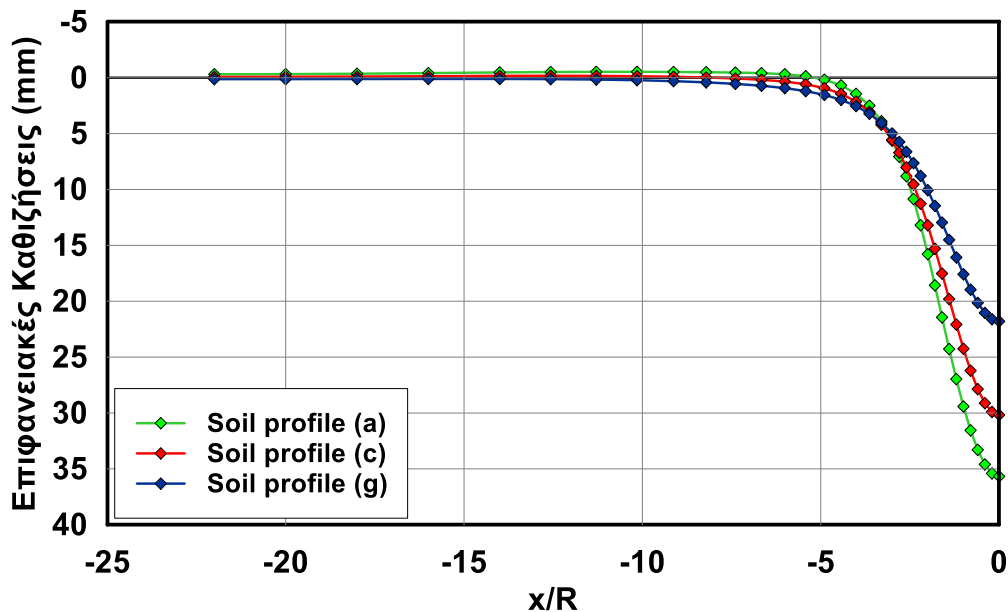
Στο διάγραμμα 4.2 (ii) παρατηρούμε στην πρώτη έλλειψη με την «κανονική γραμμή» μια αδυναμία του προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι για το πολύ κακό εδαφικό προφίλ (a) όταν εισάγεται η ασπίδα, υπάρχει μια απότομη μείωση της δεδομένης μετακίνησης σε αυτό το σημείο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δεδομένη μετακίνηση είναι μεγαλύτερη του κενού που υπάρχει στην αρχή της ασπίδας, δηλαδή μεγαλύτερη του ενός εκατοστού. Έτσι, για λόγους συμβατότητας της εισαγωγής της ασπίδας, το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων μειώνει τη μετακίνηση στην οριακή τιμή που μπορεί να έχει, περί το ένα εκατοστό. Αυτή η αδυναμία θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη συνεχή διακριτοποίηση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε βήμα εκκαφής (remeshing). Όμως, κάτι τέτοιο απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ, κάνοντας πολύ χρονοβόρες τις αναλύσεις χωρίς να προσφέρει πρακτικά σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα των εδαφικών μετακινήσεων. Αντίθετα, η έλλειψη με τη διακεκομμένη γραμμή είναι δείγμα της ορθής λειτουργίας του μοντέλου. Συγκεκριμένα, βλέπουμε μια μείωση των υφιστάμενων μετακινήσεων στη στέψη της σήραγγας σε όλα τα εδαφικά προφίλ, η οποία συντελείται αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος. Συγκεκριμένα, το ένεμα έχοντας μια σημαντική εσωτερική πίεση 200kPa ουσιαστικά φορτίζει τη στέψη αντίρροπα των καθιζήσεων μειώνοντας προσωρινά τις τιμές τους. Παρόλα αυτά η σκλήρυνση και κατά συνέπεια η στερεοποίηση του ενέματος έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση των τελικών καθιζήσεων στη στέψη της σήραγγας.



Η εικόνα 4.3 παρουσιάζει τις καθιζήσεις σε μια εγκάρσια τομή στα τρία επιλεγμένα προφίλ (a),(c) και (g). Είναι σαφές ότι οι καθιζήσεις περιορίζονται όσο αυξάνεται η αντοχή του εδάφους, όπως αντίστοιχα παρατηρήθηκε και κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Επιπλέον, φαίνεται ότι η επιρροή της σήραγγας στις καθιζήσεις περιλαμβάνει μικρότερο χώρο στα καλύτερης ποιότητας εδαφικά αργιλικά προφίλ.



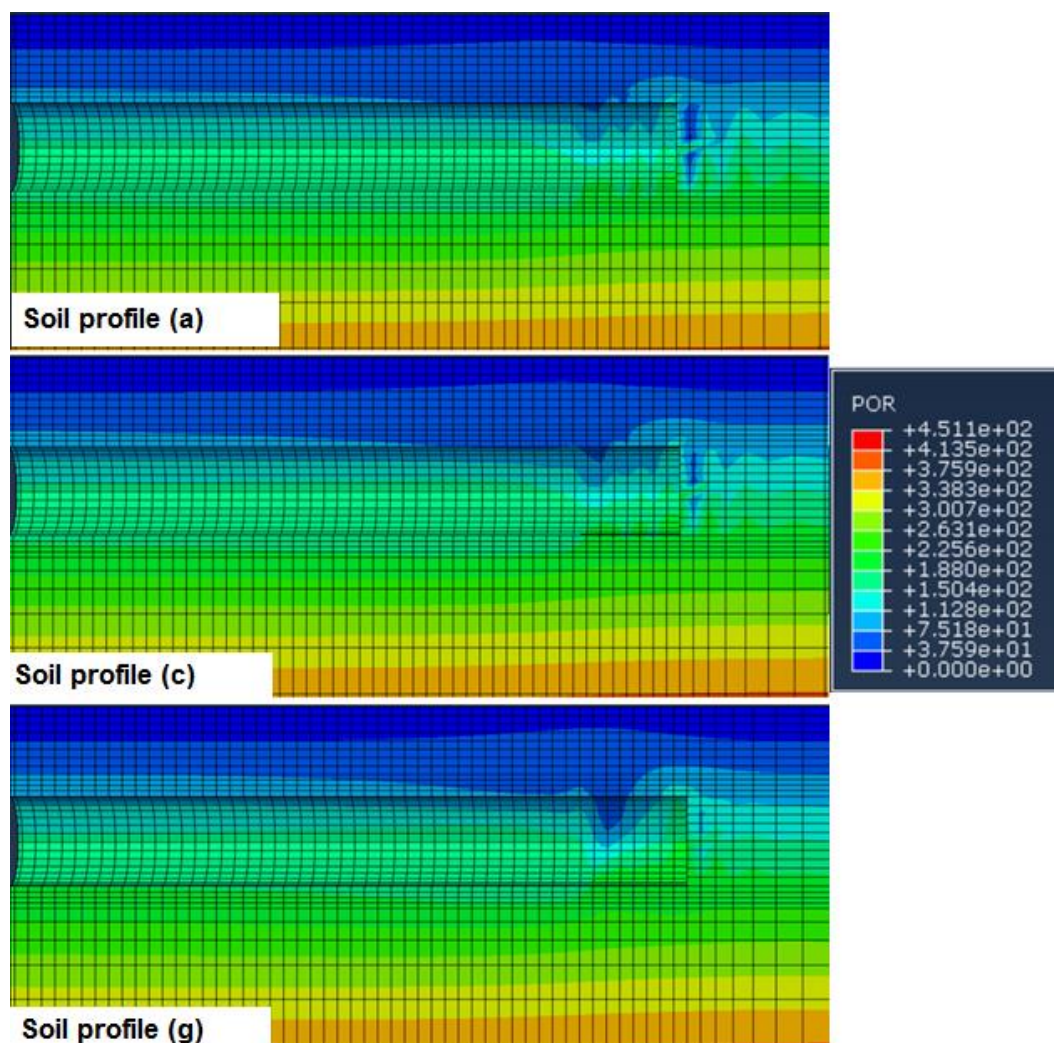
Εικόνα 4.3 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι εγκάρσιες κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις.



Διάγραμμα 4.3 Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

Στο διάγραμμα 4.3 παρατηρούμε τη μορφή της καμπύλης των εγκάρσιων καθιζήσεων. Η μέγιστη τιμή της καθιζήσης για κάθε εδαφικό προφίλ εμφανίζεται πάνω από το κέντρο της σήραγγας και ταυτίζεται με τη αντίστοιχη της διαμήκου κατανομής αφού το συγκεκριμένο σημείο είναι κοινό και για τις δύο καμπύλες. Επιπλέον παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η εδαφική αντοχή, τόσο πιο απότομη είναι η καμπύλη των καθιζήσεων. Έτσι, αριστερά του σημείου καμπής παρατηρούμε ότι οι καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες (έστω και σε μικρό βαθμό) για την καμπύλη (g), δηλαδή με  $C_u=112.0\text{kPa}$ , ενώ δεξιά του σημείου καμπής οι καθιζήσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες για τα μικρής αντοχής εδαφικά προφίλ, δηλαδή τις καμπύλες (a) και (g). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον

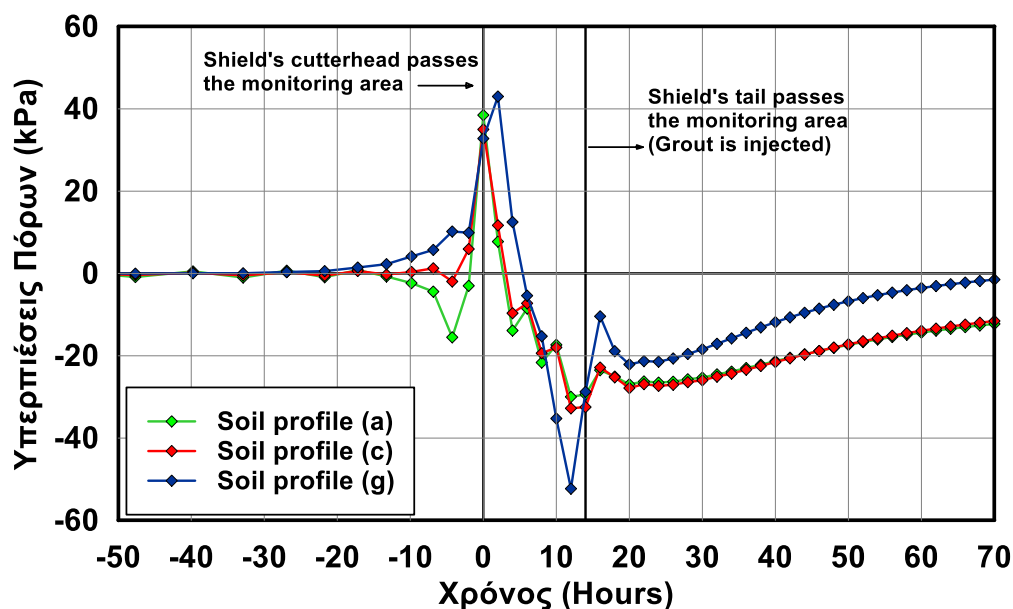
παρουσιάζει το γεγονός ότι και στα τρία εδαφικά προφίλ η επιρροή των καθιζήσεων σταματάει πρακτικά σε απόσταση 5R, στην προκειμένη περίπτωση 25m, ανεξαρτήτως από την εδαφική αντοχή χαρακτηρίζει κάθε ένα από αυτά. Έτσι, κατά την εγκάρσια διεύθυνση φαίνεται ότι η ζώνη επιρροής των καθιζήσεων είναι ανεξάρτητη της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.



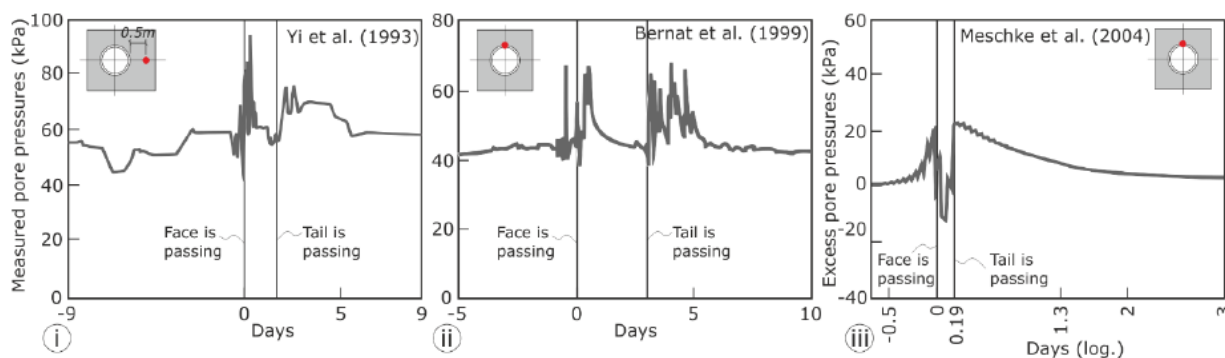
Εικόνα 4.4 Εδαφικά προφίλ από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου παρουσιάζονται οι υδατικές πιέσεις πόρων.

Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα. Οι ουσιαστικές μεταβολές εμφανίζονται και στα τρία εδαφικά προφίλ στο χώρο κοντά στο μέτωπο, όμως τα δύο πρώτα προφίλ παρουσιάζουν πιο ομαλές διακυμάνσεις από το τρίτο. Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη αυτών των διακυμάνσεων στη στέψη της σήραγγας για τα τρία εδαφικά προφίλ. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις υπερπιέσεις πόρων από τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας που παρουσιάζονται στην εικόνα 4.5. Γενικά, και οι τρεις καμπύλες ακολουθούν κάποια κοινά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα βλέπουμε την ανάπτυξη υπερπιέσεων τη στιγμή που η κεφαλή κοπής φτάνει στο μέτωπο ενώ αμέσως μετά την εκσκαφή υπάρχει απότομη πτώση στις υδατικές πιέσεις με ανάπτυξη πλέον υποπιέσεων μέχρις ότου γίνει η εισαγωγή του ενέματος όπου υπάρχει αύξηση της πίεσης και σταδιακή επιστροφή στις υδροστατικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών εδαφικών προφίλ. Αρχικά, παρατηρούμε ότι περίπου 5 ώρες πριν την εκσκαφή, στην

άργίλο με τη χαμηλότερη αντοχή υπάρχει μια υποπίεση της τάξης των 15kPa, τη στιγμή που η μέσης ποιότητας άργιλος παραμένει στις υδροστατικές συνθήκες και η υψηλής αντοχής άργιλος έχει αναπτύξει υπερπίεση της τάξης των 10kPa. Επίσης, βλέπουμε ότι η καμπύλη (g) παρουσιάζει τα δύο ακρότατα στο διάγραμμα, και μάλιστα αναπτύσσει υποπίεση 40% μεγαλύτερη από τις άλλες δύο καμπύλες.



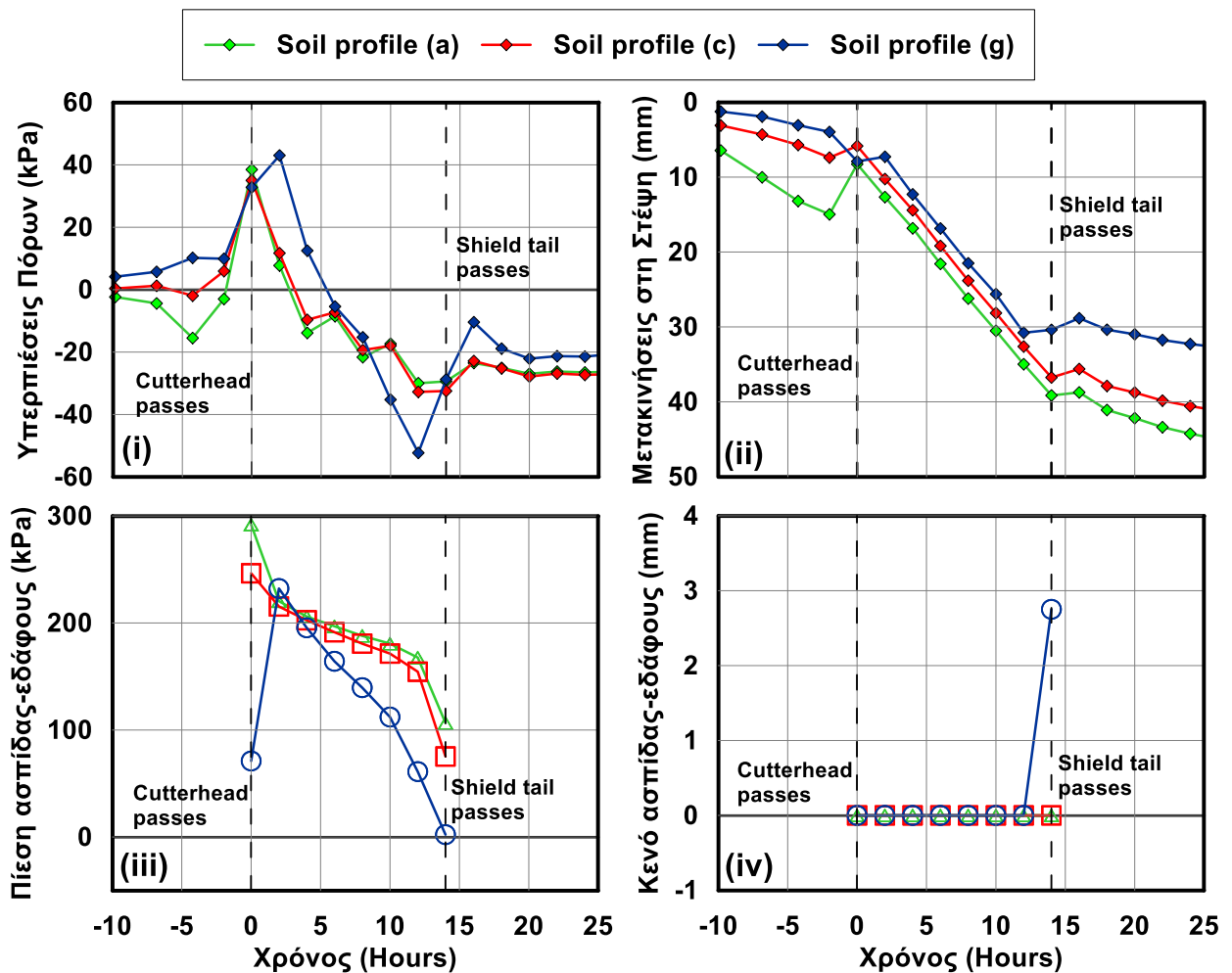
Διάγραμμα 4.4 Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας.



Εικόνα 4.5 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydrosshield μηχανήματα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004)

Για να ερμηνεύσουμε αυτή την περίεργη συμπεριφορά μεταξύ των αργίλων κακής ποιότητας (a και c) και των αργίλων καλής ποιότητας (g), θα χρησιμοποιήσουμε τις πληροφορίες από το διάγραμμα 4.5. Ουσιαστικά αποτελεί μεγέθυνση του διαγράμματος 4.4 και του διαγράμματος 4.2(ii) ενώ εισάγονται επιπλέον πληροφορίες που αφορούν στο κενό ασπίδας και εδάφους και στην αντίστοιχη πίεση που αναπτύσσεται μεταξύ εδάφους και ασπίδας. Παρατηρούμε στο διάγραμμα (iv) που απεικονίζει το κενό εδάφους και ασπίδας ότι στα δύο χαμηλής ποιότητας εδαφικά προφίλ το κενό είναι μόνιμως μηδέν, δηλαδή υπάρχει επαφή ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους. Κατά συνέπεια, το έδαφος έχει την τάση να παραμορφωθεί, αλλά εμποδίζεται από την πολύ δύσκαμπτη ασπίδα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα (ii) που βλέπουμε τη

σταθερή κλίση της πράσινης και κόκκινης καμπύλης, η οποία ουσιαστικά είναι η κωνικότητα του EPB και τις αντίστοιχες μετακινήσεις να ταυτίζονται με τα αντίστοιχα κενά ασπίδας και εδάφους σε κάθε θέση. Ως εκ τούτου, αναπτύσσεται πίεση ανάμεσα στο παραμορφωμένο έδαφος και την ασπίδα, η οποία παρουσιάζεται στο διάγραμμα (iii). Η πτώση της πίεσης στα δύο πρώτα εδαφικά προφίλ οφείλεται στην κωνικότητα της ασπίδας, η οποία επιτρέπει εκτόνωση ενός εκατοστού στο εμπρόσθιο μέρος της και τέσσερα εκατοστά στην ουρά, με αποτέλεσμα προς το πίσω μέρος να υπάρχει μικρότερη τάση για αποτόνωση και άρα μικρότερη πίεση.



Διάγραμμα 4.5 (i) Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για τα τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας (ii) Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη της σήραγγας για τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ (iii) Εξέλιξη των πιέσεων μεταξύ ασπίδας-εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τα τρία εδαφικά προφίλ. (iv) Απεικόνιση του κενού ασπίδας-εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ (Χρησιμοποιείται κοινός άξονας χρόνου για τα τρία διαγράμματα, κάνοντας ουσιαστικά μεγέθυνση στον άξονα των διαγραμμάτων 4.2(ii) και 4.4).

Αντίθετα, στην πολύ καλή άργιλο με την υψηλή αστράγγιστη διατμητική αντοχή παρατηρούμε ότι στο πίσω μέρος της ασπίδας αναπτύσσεται ένα κενό λίγο μεγαλύτερο των 2.5mm (διάγραμμα iv). Το μέγεθος είναι πρακτικά πολύ μικρό, αλλά σημαίνει ότι το έδαφος βρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας χωρίς να θέλει άλλες μετακινήσεις. Αυτό καταδεικνύεται και στο διάγραμμα (iii) όπου βλέπουμε την πίεση πρακτικά να μηδενίζεται στο πέρας του EPB καθώς και στο διάγραμμα (ii) καθώς οι μετακινήσεις ξεφεύγουν από τη σταθερή κλίση της κωνικότητας του EPB και σταθεροποιούνται λίγο πριν την ουρά του EPB. Αυτή η κατάσταση ισορροπίας στην οποία

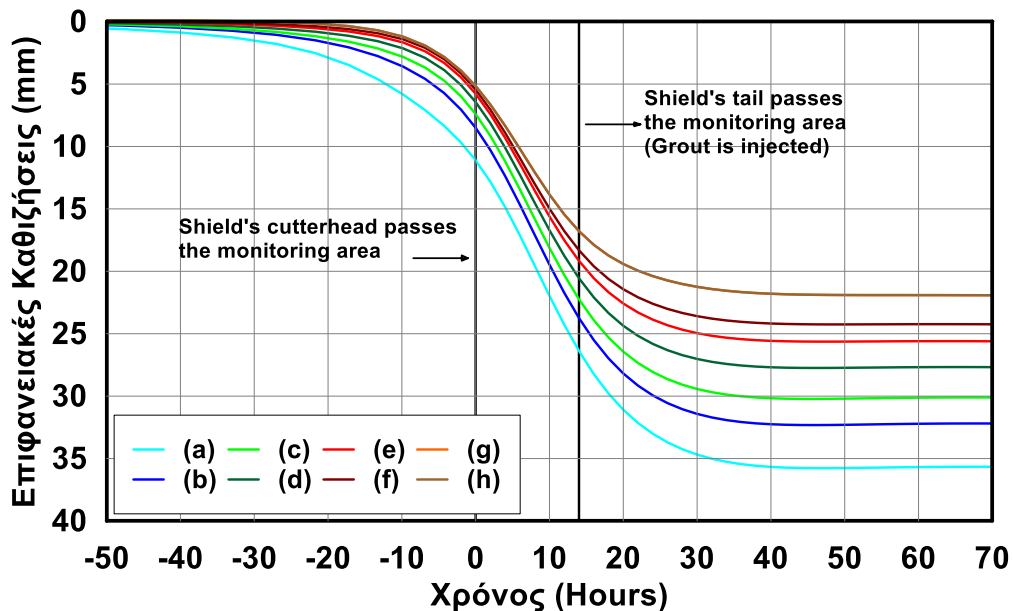


βρίσκεται το έδαφος χωρίς να συγκρατείται πρακτικά από την ασπίδα στο πίσω μέρος του EPB συνεπάγεται την ύπαρξη φαινομένων αναρρόφησης (suction phenomenon). Αυτά τα φαινόμενα έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη έντονων υποτιέσεων πόρων, αφού δημιουργείται στο έδαφος η ανάγκη για νερό, το οποίο δεν υπάρχει στην περιοχή.

#### 4.1.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων όλων των εδαφικών προφίλ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και από τις 8 βασικές αναλύσεις. Ο συμβολισμός κάθε καμπύλης από (a) έως (h) εξηγείται στον πίνακα 4.1, αλλά αναφέρεται ότι η αντοχή κάθε εδαφικού προφίλ αυξάνεται όσο κινούμαστε από την καμπύλη (a) στην καμπύλη (h). Επιπλέον για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων, οι τέσσερις πρώτες καμπύλες που αναπαριστούν τις αργίλους χαμηλότερης αντοχής σχεδιάζονται με μπλε και πράσινες αποχρώσεις, ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις καμπύλες της υψηλής αντοχής είναι σε κόκκινες και πορτοκαλί αποχρώσεις.

Στο διάγραμμα 4.6 παρουσιάζεται η διαμήκης εξέλιξη των καθιζήσεων για τις οκτώ βασικές αναλύσεις. Είναι εμφανές ότι η τάση που ακολουθούν οι καμπύλες επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα από τις αντίστοιχες καμπύλες του ίδιου διαγράμματος όπου γινόταν ανάλυση τριών εδαφικών προφίλ. Συγκεκριμένα, η καθίζηση που έχει επιτελεστεί σε ένα σημείο της επιφάνειας μέχρι να φτάσει η κεφαλή κοπής σε αυτό είναι μικρή σε σύγκριση με τη συνολική καθίζηση του ίδιου σημείου στο πέρας της διάνοιξης της σήραγγας, της τάξης του 25-30%, ενώ η μεγαλύτερη κλίση στη καμπύλη και κατ' επέκταση αύξηση παρατηρείται στο διάστημα μεταξύ εκσκαφής και εισαγωγής ενέματος. Σημειώνεται ότι οι δύο τελευταίες καμπύλες (g) και (h) πρακτικά ταυτίζονται, γι' αυτό και δεν είναι ευδιάκριτες στο διάγραμμα.

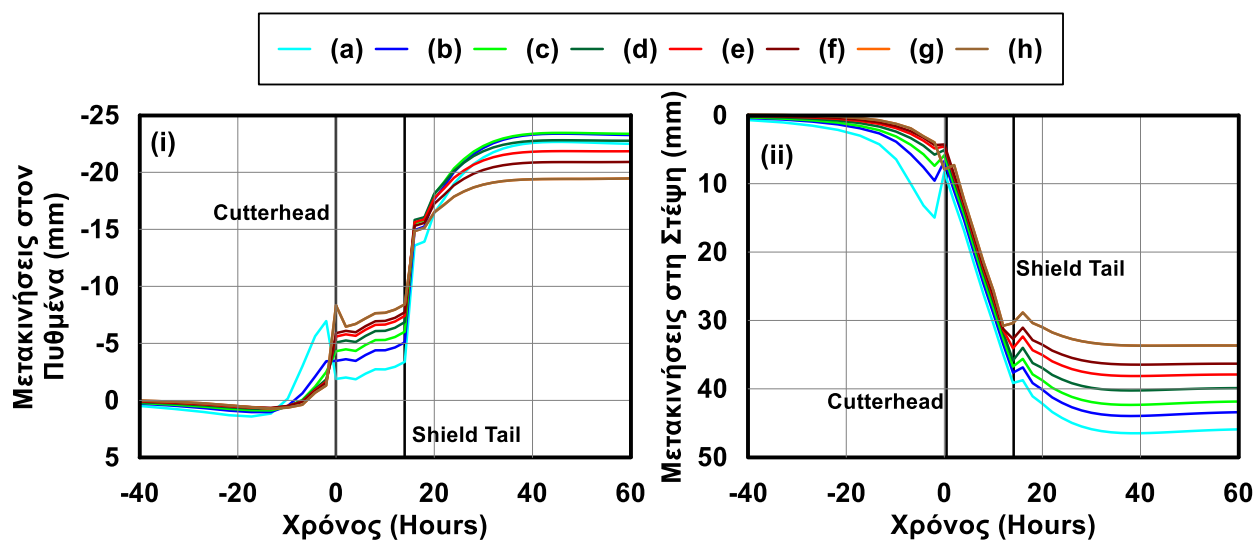


Διάγραμμα 4.6 Εξέλιξη των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για όλα τα εδαφικά προφίλ.

Στα διαγράμματα 4.7 παρουσιάζονται στο (i) οι μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας και στο (ii) οι μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για τις οκτώ βασικές αναλύσεις. Παρατηρούμε ότι οι τάσεις που ακολουθούν οι καμπύλες επιβεβαιώνουν τα αρχικά συμπεράσματα του κεφαλαίου 4.1.2.1 στο αντίστοιχο διάγραμμα. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα (i) βλέπουμε τις μεγάλες καθιζήσεις που αναπτύσσονται λόγω του καταστατικού προσομοιώματος, το οποίο δε λαμβάνει

διαφορετικό μέτρο φόρτισης και αποφόρτισης της αργίλου. Έτσι, οι καμπύλες χαμηλής αντοχής (με την καμπύλη (a) να αντιστοιχεί στη μικρότερη αστράγγιστη διατμητική αντοχή και την καμπύλη (g) να αντιστοιχεί στη μέγιστη) παρουσιάζουν μεγαλύτερες τελικές μετακινήσεις, αλλά και πιο έντονες μεταβολές κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας. Παρατηρούμε ότι στις χαμηλής αντοχής αργίλους πριν τη χρονική στιγμή  $t=0$  που το EPB διέρχεται από το σημείο αναφοράς υπάρχει σημαντική ανύψωση του πυθμένα ενώ αμέσως κατά τη διέλευση του EPB με το πολύ μεγάλο πλασματικό ειδικό βάρος, υπάρχει σημαντική μείωση της ανύψωσης. Αντίθετα, οι αργίλοι καλύτερης ποιότητας έχουν μια πιο ομαλή συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην υψηλή τους αντοχή που τους επιτρέπει να αντιστέκονται περισσότερο τόσο στην αρχική τάση για ανύψωση, όσο και στην μεγάλη πίεση που τους ασκεί το EPB με το πολύ μεγάλο ειδικό βάρος που έχει εισαχθεί ώστε να αντιμετωπιστούν οι μεγάλες ανυψώσεις του πυθμένα.

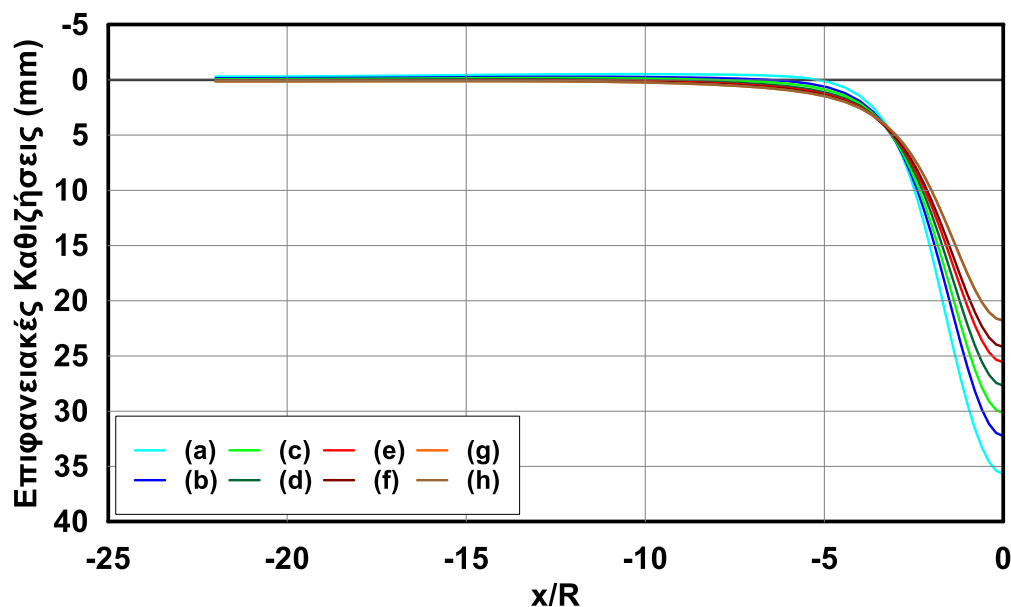
Σε ότι αφορά το διάγραμμα 4.7 (ii) αντίστοιχα παρατηρούμε για τη χρονική στιγμή  $t=0$  την αδυναμία που επισημάνθηκε στο αντίστοιχο διάγραμμα 4.2 (ii) του προηγούμενου κεφαλαίου. Συγκεκριμένα, στις χαμηλής αντοχής αργίλους όπου οι κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη είναι μεγαλύτερες του κενού του EPB στην κεφαλή κοπής, υπάρχει μια μείωση των δεδομένων αυτών των μετακινήσεων για λόγους συμβατότητας στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (έγινε εκτενής ανάλυση στο διάγραμμα 4.2 (ii) του κεφαλαίου 4.1.2.1). Αντίθετα, για  $t=14$ hrs, δηλαδή τη στιγμή που εισάγεται το ένεμα παρατηρούμε την αναμενόμενη μείωση των μετακινήσεων λόγω της πίεσης που ασκεί το ένεμα σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά του ως ρευστό που δεν του επιτρέπει να παραμορφωθεί. Στη συνέχεια, οι κατακόρυφες μετακινήσεις αυξάνονται λόγω της στερεοποίησης του ενέματος και του περιβάλλοντος εδάφους, χωρίς όμως να αναφερόμαστε σε εκτεταμένες μετακινήσεις, καθώς είναι εντός ανεκτών ορίων. Όπως είναι φυσικό, οι μετακινήσεις είναι μικρότερες για τις υψηλής αντοχής αργίλους και εκτενέστερες για τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις χαμηλής ποιότητας αργίλους. Σημειώνεται ότι οι κατανομές των αργίλων (g) και (h) σχεδόν ταυτίζονται λόγω των παραπλήσιων τιμών τους.



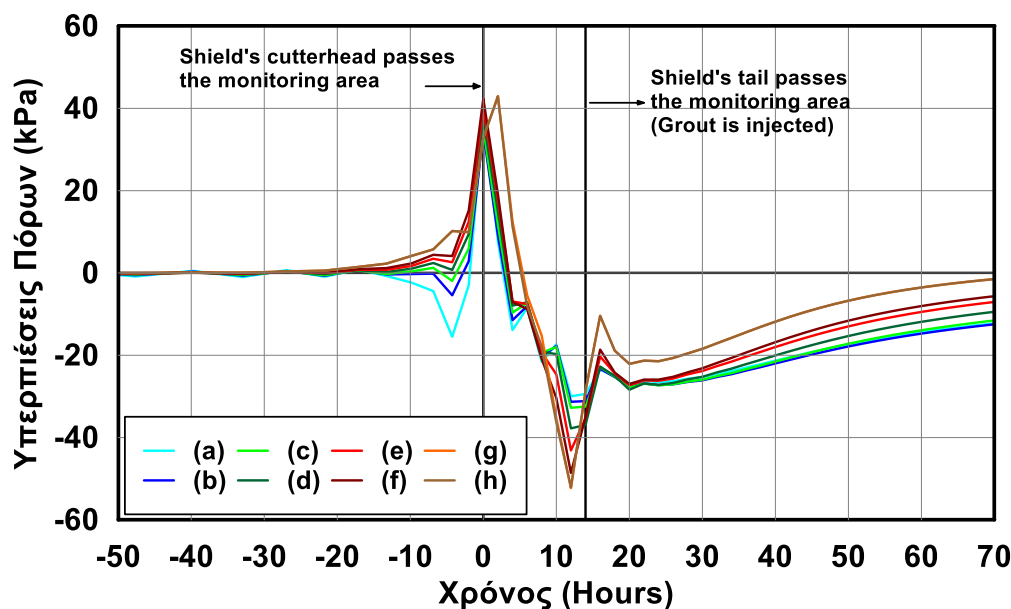
Διάγραμμα 4.7(i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για όλα τα εδαφικά προφίλ, (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για όλα τα εδαφικά προφίλ.

Στο διάγραμμα 4.8 συγκεντρώνονται οι καμπύλες των εγκάρσιων καθιζήσεων των οκτώ αναλύσεων, όπου τα βασικά συμπεράσματα από το προηγούμενο κεφάλαιο επιβεβαιώνονται. Παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η εδαφική αντοχή, τόσο πιο απότομη είναι η καμπύλη των καθιζήσεων. Έτσι, αριστερά του σημείου καμπής παρατηρούμε ότι οι καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες (έστω και σε μικρό βαθμό) για τις κόκκινες καμπύλες, ενώ δεξιά του σημείου καμπής

οι καθιζήσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες για τις μικρής αντοχής αργίλους, δηλαδή τις μπλε καμπύλες. Παράλληλα η επιρροή των καθιζήσεων σταματάει πρακτικά σε απόσταση 5R, στην προκειμένη περίπτωση 25m, σε όλες τις καμπύλες ανεξαρτήτως από την εδαφική αντοχή χαρακτηρίζει καθεμία από αυτές. Έτσι, κατά την εγκάρσια διεύθυνση φαίνεται ότι η ζώνη επιρροής των καθιζήσεων είναι ανεξάρτητη της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.



Διάγραμμα 4.8 Εδαφικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια τομή για όλα τα εδαφικά προφίλ.



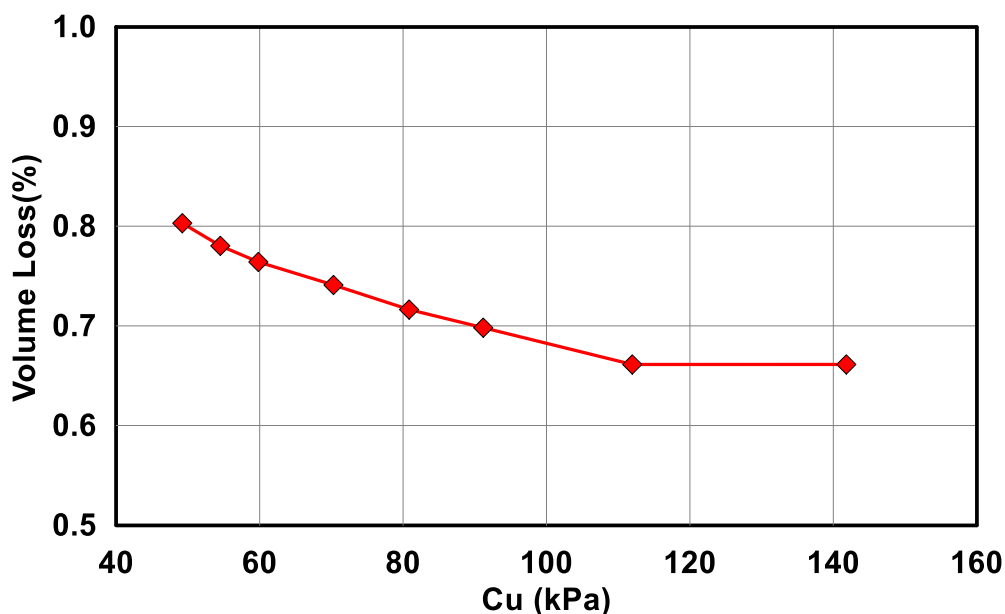
Διάγραμμα 4.9 Εξέλιξη της ανάπτυξης των υδατικών πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB για όλα τα εδαφικά προφίλ στη στέψη της σήραγγας.

Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζεται η μεταβολή των πιέσεων πόρων για τις οκτώ βασικές αναλύσεις. Παρατηρούμε πριν την εκσκαφή τη διαφορετική συμπεριφορά που έχουν οι υψηλής αντοχής άργιλοι με την ανάπτυξη υπερπίεσεων και οι χαμηλής αντοχής με την ανάπτυξη υποπίεσεων, όπως επισημάνθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, πριν την εισαγωγή

του ενέματος οι υποπιέσεις των σιφρών αργίλων είναι σημαντικά μεγαλύτερες των αντίστοιχων στις μαλακές αργίλους, ενώ γενικότερα φαίνεται ότι οι μεταβολές των πιέσεων πόρων είναι πιο έντονες όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου.

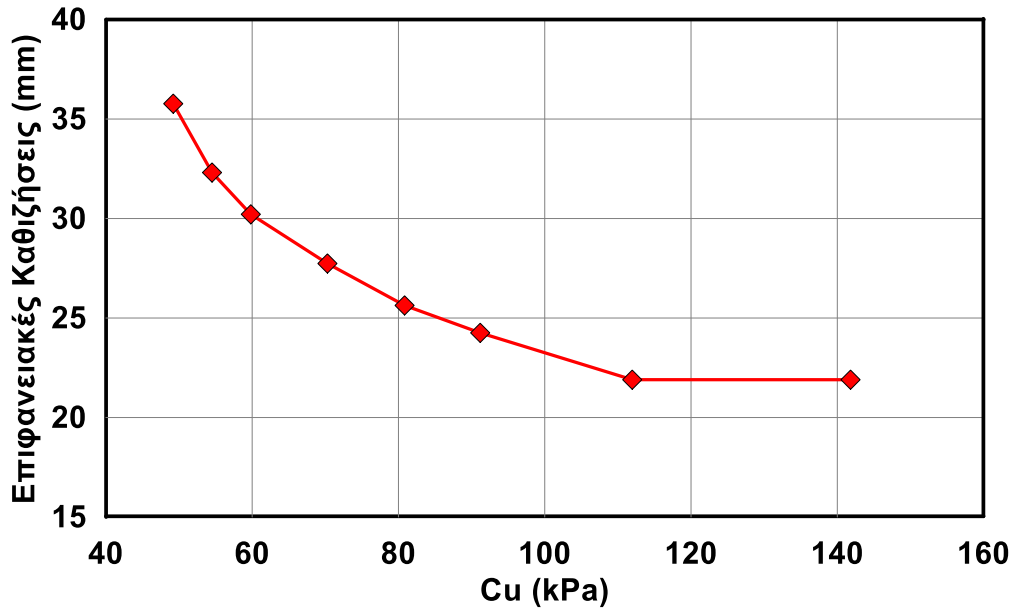
#### 4.1.2.3 Γενικά Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα συγκεντρωτικά διαγράμματα από τη βασική ομάδα αναλύσεων.



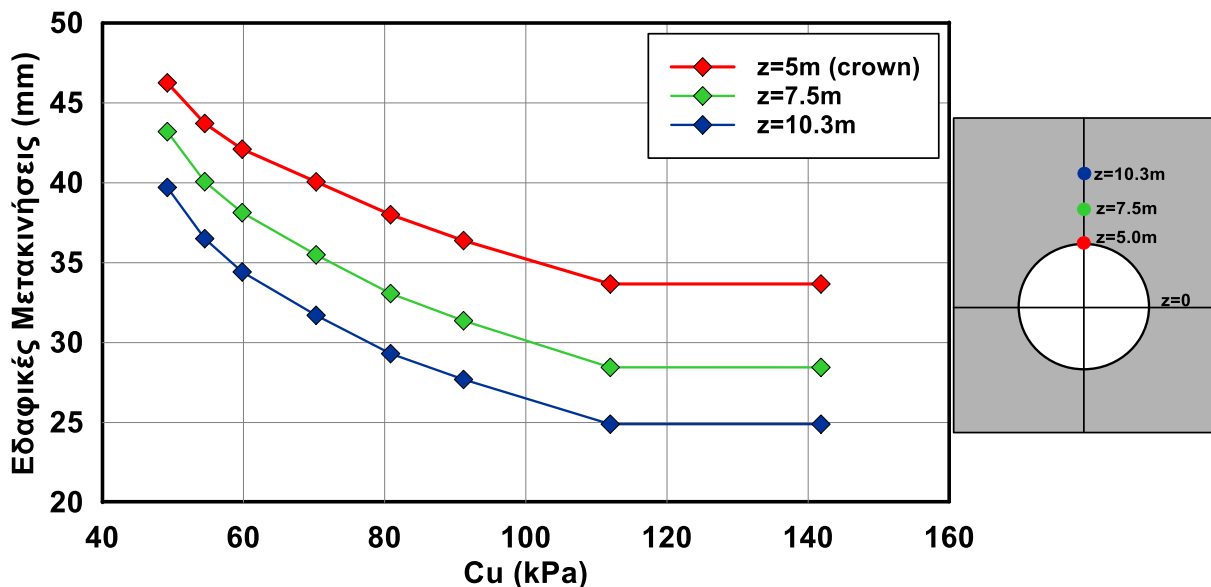
Διάγραμμα 4.10 Μέγιστες τιμές του Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου.

Στο διάγραμμα 4.10 παρουσιάζεται ο συντελεστής Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής Volume Loss ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της συνολικής εγκάρσιας επιφανειακής καθίζησης προς το εμβαδόν της διατομής της σήραγγας (αναλυτικότερα περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.1.3). Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους μειώνεται ο συντελεστής Volume Loss, δηλαδή είναι μικρότερη η επιρροή της διάνοιξης της σήραγγας στον εδαφικό σκελετό του περιβάλλοντος εδάφους. Επιπλέον, όταν η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ξεπεράσει τα 100kPa, η τιμή του συντελεστή αρχίζει να συγκλίνει σε μια τιμή λίγο πάνω από 0.65%, δείχνοντας έτσι ότι η διαφορά των δύο αναλύσεων με  $Cu=112.0\text{kPa}$  και  $Cu=141.8\text{kPa}$  δεν έχουν ουσιαστική μεταβολή στα τελικά αποτελέσματα.



Διάγραμμα 4.11 Μέγιστες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου.

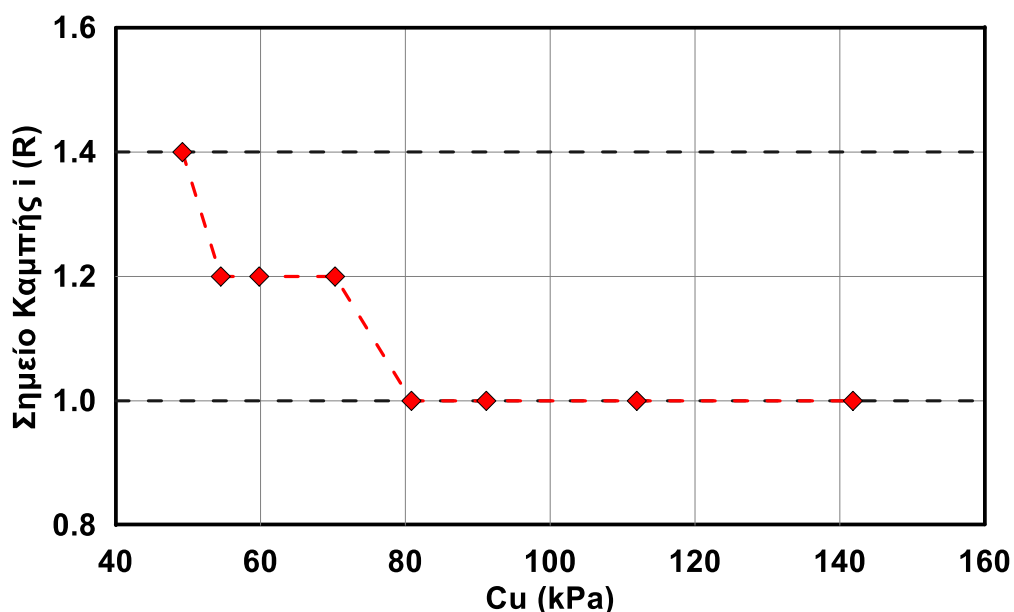
Στο διάγραμμα 4.11 παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους, οι καθιζήσεις μειώνονται σημαντικά, φτάνοντας μέχρι και σε μείωση της τάξης του 50%. Όμως, όπως και στο διάγραμμα 4.10, παρατηρούμε ότι η αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μετά την τιμή των 100kPa, στις δύο τελευταίες αναλύσεις, δεν έχει ουσιαστική διαφορά στην τιμή των καθιζήσεων, καθώς αυτές συγκλίνουν σε μια συγκεκριμένη ελάχιστη καθίζηση, η οποία ως ένα βαθμό προκαλείται και από τη γενικότερη διαταραχή του περιβάλλοντος εδάφους κατά την εκσκαφή.



Διάγραμμα 4.12 Μέγιστες τιμές των καθιζήσεων σε τρεις συγκεκριμένες θέσεις συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου. (Η τιμή  $z=0$  αντιστοιχεί στον άξονα της σήραγγας).

Στο διάγραμμα 4.12 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων σε τρεις συγκεκριμένες θέσεις για τις οκτώ βασικές αναλύσεις. Σημειώνεται ότι η θέση  $z=0$  αντιστοιχεί στον

άξονα της σήραγγας ενώ οι υπόλοιπες θέσεις απέχουν από τον άξονα 5m (στέψη της σήραγγας), 7.5m καθώς και 10.30m. Οι τρεις καμπύλες ακολουθούν την ίδια τάση που παρουσιάζει και η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων (διάγραμμα 4.11), με τη σταδιακή μείωση των μετακινήσεων όσο αυξάνεται η διατμητική αντοχή της αργίλου μέχρι να σταθεροποιηθεί η καθεμία σε μια συγκεκριμένη μετακίνηση. Όπως αναμενόταν, οι μετακινήσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές στη στέψη της σήραγγας ενώ μειώνονται στη θέση των 7.5m και ακόμα περισσότερο στη θέση των 10.30m, δηλαδή όσο πλησιάζουν στην επιφάνεια του εδάφους.



Διάγραμμα 4.13 Τιμή του σημείου καμπής  $i$  στις καμπύλες των επιφανειακών εγκάρσιων καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου.

Στο διάγραμμα 4.13 παρουσιάζονται οι τιμές των σημείων καμπής στις καμπύλες των επιφανειακών καθιζήσεων για τις οκτώ βασικές αναλύσεις. Όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.1, το σημείο καμπής έχει πρακτικά την ίδια τιμή για τις διαμήκεις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς και για τις εγκάρσιες, αλλά η σημασία αυτής της παραμέτρου έγκειται στην εγκάρσια κατανομή των καθιζήσεων. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, τόσο μειώνεται η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα της σήραγγας κατά την εγκάρσια διεύθυνση, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το διάγραμμα 4.8, όπου οι καμπύλες αργίλου υψηλής αντοχής παρουσίαζαν αλλαγή της καμπυλότητάς τους πιο κοντά στον άξονα της σήραγγας έναντι των αργίλων χαμηλής αντοχής. Γενικά πάντως βλέπουμε ότι το σημείο καμπής κινείται στα όρια των τιμών 1.0 έως 1.4 σε ακτίνες, έχοντας σχετικά μικρή διακύμανση σε σχέση με τα άλλα μεγέθη.

#### 4.1.3 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βασική ομάδα αναλύσεων. Συγκεκριμένα:

- Η ανάπτυξη των καθιζήσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση είναι άμεση συνάρτηση της εδαφικής αντοχής, αφού όπως παρατηρήσαμε μειώνονται όσο περισσότερο αυξάνει η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Ανεξαρτήτως βέβαια της εδαφικής αντοχής, τα ποσοστά της τελικής καθιζήσεως στα διάφορα στάδια διάνοιξης της σήραγγας είναι σταθερά. Συγκεκριμένα, μέχρι να φτάσει το EPB στο σημείο αναφοράς, αναπτύσσεται περίπου το 30% της τελικής

καθίζησης, το οποίο οφείλεται σε προσυγκλίσεις του εδάφους λόγω της εκσκαφής μπροστά από αυτό. Στη συνέχεια, στο χρονικό διάστημα από την εκσκαφή του μετώπου στο σημείο αναφοράς μέχρι τη διέλευση της ουράς της ασπίδας (όπου γίνεται η εισαγωγή του ενέματος) από το σημείο αναφοράς, αναπτύσσεται περίπου το 45% της τελικής καθίζησης. Αυτό επηρεάζεται σημαντικά από την υπερεσκαφή που εκτελεί το EPB καθώς και από την κωνικότητα της ασπίδας η οποία πρακτικά ευνοεί μετακινήσεις μέχρι να έρθει σε επαφή το έδαφος με την ασπίδα. Τέλος, μετά την εισαγωγή του ενέματος, εξελίσσεται το 25% της τελικής καθίζησης και οφείλεται στη στερεοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και του ενέματος. (Διαγράμματα 4.1, 4.6, 4.11, Εικόνα 4.2)

- Στην εγκάρσια διεύθυνση παρατηρήσαμε σε αντιστοιχία με τη διαμήκη, ότι όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή, τόσο μικρότερη τελική καθίζηση θα αναπτυχθεί. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η κατανομή είναι πιο απότομη όταν η αντοχή είναι χαμηλή, όπως επίσης ότι το πλάτος επιρροής των εγκάρσιων καθιζήσεων είναι πρακτικά το ίδιο για όλες τις κατανομές, ανεξαρτήτως της εδαφικής αντοχής. (Διαγράμματα 4.3, 4.8, Εικόνα 4.3)
- Οι πλαστικές παραμορφώσεις επίσης επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την εδαφική αντοχή. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή, μειώνονται εντυπωσιακά οι πλαστικές παραμορφώσεις του περιβάλλοντος εδάφους γύρω από τη σήραγγα. Σημειώνεται ότι το μέτωπο σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε είχε πλαστικοποιηθεί ελεγχόμενα, χωρίς δηλαδή εκτεταμένες αστοχίες, κρίνοντας ορθή τη πίεση υποστήριξη που επιλέχτηκε. (Εικόνα 4.1)
- Σε ότι αφορά τις πιέσεις πόρων παρατηρήσαμε ότι η διάνοιξη της σήραγγας προκαλεί συγκεκριμένες μεταβολές σε αυτό το μέγεθος. Αρχικά, κατά την εκσκαφή του μετώπου στο σημείο αναφοράς αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων. Στη συνέχεια, κατά τη διέλευση της ασπίδας μέχρι την εισαγωγή του ενέματος, αναπτύσσονται υποπιέσεις οι οποίες οφείλονται στην δυνατότητα του εδάφους να παραμορφωθεί λόγω του χώρου που του προσφέρει η υπερεσκαφή και η κωνικότητα της ασπίδας. Προσπαθώντας να διατηρήσει τον όγκο του εδάφους, το νερό αναπτύσσει σημαντικές υποπιέσεις ώστε να αντισταθεί στην τάση διόγκωσης του εδάφους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στις αργίλους υψηλής αντοχής παρατηρούμε να αναπτύσσονται μεγαλύτερες υποπιέσεις σε αυτό το διάστημα, καθώς προς την ουρά της ασπίδας ενδέχεται να ισορροπήσουν πριν έρθουν σε επαφή με την ασπίδα. Τέλος, μετά την εισαγωγή του ενέματος, οι υποπιέσεις μειώνονται (περισσότερο όσο αυξάνει η εδαφική αντοχή), χωρίς όμως να φτάσουν σε σημείο να γίνουν υπερπιέσεις, μέχρις ότου να εκτονωθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα σχετικά με τις πιέσεις πόρων και την εξέλιξή τους έρχονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία. (Διαγράμματα 4.4, 4.5, 4.9, Εικόνα 4.4, 4.5)
- Η παράμετρος του Volume Loss κυμαίνεται από 0.65% έως 0.80% για όλες τις αναλύσεις, που είναι ένα λογικό εύρος τιμών αφού στη μηχανοποιημένη διάνοιξη σιηράγγων αυτή η παράμετρος δεν ξεπερνάει το 1.0%. Παρατηρούμε ότι μειώνεται όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή, αλλά γενικά παραμένει σε μικρές τιμές ανεξαρτήτως της εδαφικής αντοχής, δείχνοντας ότι η μηχανοποιημένη διάνοιξη σιηράγγων ασκεί σημαντικά μικρότερη επιρροή στο περιβάλλον έδαφος από αντίστοιχες συμβατικές μεθόδους. (Διάγραμμα 4.10).



## 5 Επιρροή του Ενέματος στη Διάνοιξη των Σηράγγων

### 5.1 Α' Ομάδα Αναλύσεων

#### 5.1.1 Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων

Στον πίνακα 5.1 απεικονίζεται η ομάδα των παραμετρικών αναλύσεων που αποτελείται από 12 αναλύσεις με μεταβολή της εδαφικής αντοχής (έξι εδαφικά προφίλ) και της πίεσης του ενέματος (100kPa και 300kPa). Στον πίνακα αναφέρεται και η πίεση του ενέματος των 200kPa για λόγους πληρότητας, αφού αυτές οι αναλύσεις περιλαμβάνονται στην προηγούμενη ομάδα αναλύσεων (κεφάλαιο 4.1). Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιείται η καμπύλη σκλήρυνσης που πρότειναν οι Kasper & Meschke, 2004. Επιλέχτηκαν συνδυασμοί συνοχής και γωνίας τριβής ώστε να είναι ρεαλιστικοί προσεγγίζοντας τις συνθήκες στις οποίες επιχειρούν τα EPB, δίνοντας έμφαση στις αργίλους χαμηλής αντοχής, όπου οι καθιζήσεις είναι εκτεταμένες και ο περιορισμός τους κρίσιμος κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Λόγω της πολυπλοκότητας των αναλύσεων και του μεγάλου αποθηκευτικού χώρου που απαιτούσαν για την εξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων από κάθε βήμα, επιλέχθηκε η ανάλυση (c), η πιο αντιπροσωπευτική με βάση τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ( $c=20\text{kPa}$ ,  $\phi=20$ ), για την οποία εξάγονται περισσότερες πληροφορίες κατά την εκτέλεση της ανάλυσης έναντι των άλλων.

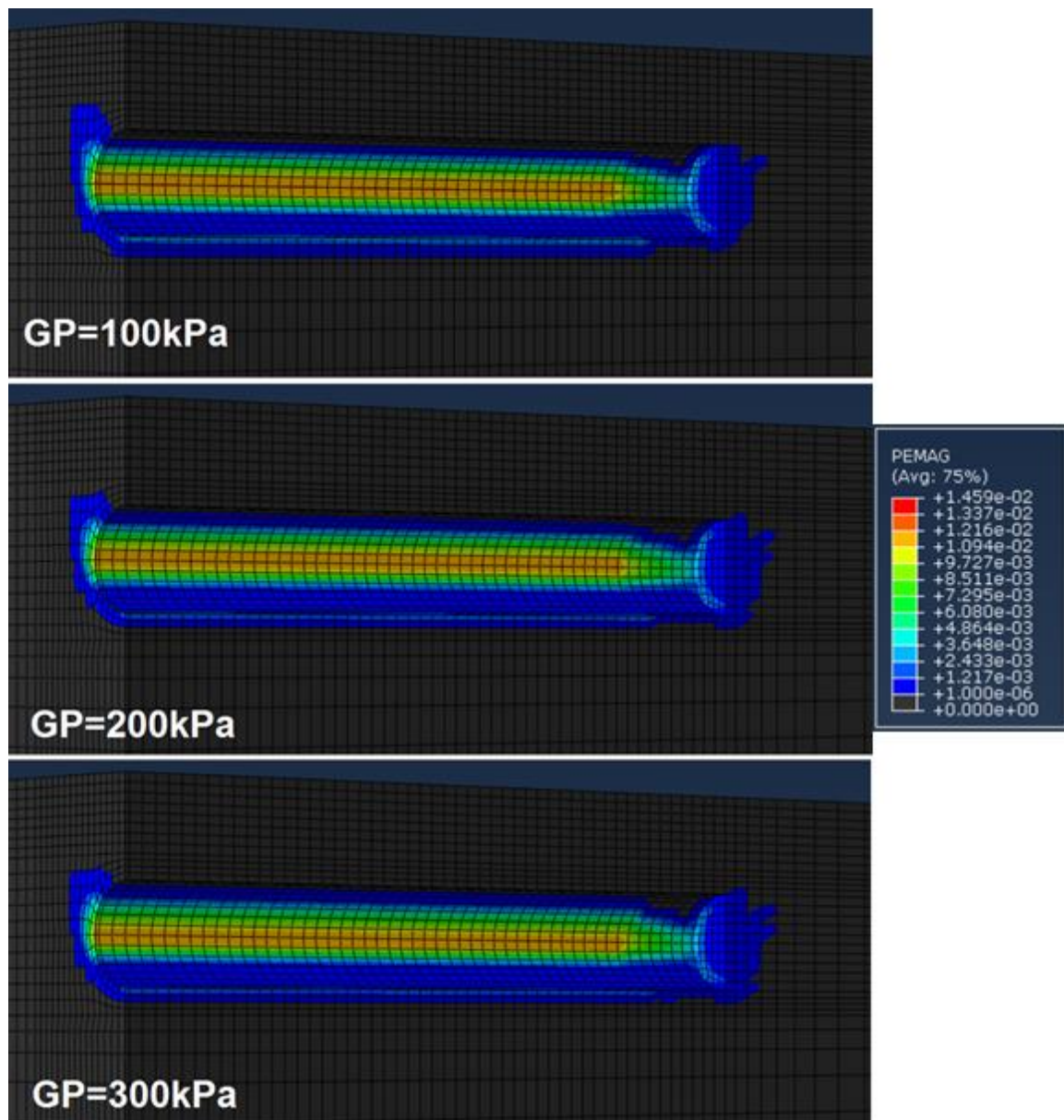
*Πίνακας 5.1 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.*

Εδαφικές Παράμετροι									
A/A	$K_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$	$C_u$ (kPa)	E (Mpa)	$\psi$	$\nu$	$k_s$ (m/s)
a	0.5	20	10	20	49.2	14.76	3.3	0.3	1E-08
b	0.5	20	15	20	54.5	16.35	3.3	0.3	1E-08
c	0.5	20	20	20	59.8	17.94	3.3	0.3	1E-08
d	0.5	20	20	25	70.3	21.09	4.2	0.3	1E-08
e	0.5	20	30	25	80.8	24.25	4.2	0.3	1E-08
f	0.5	20	50	30	112.0	33.59	5.0	0.3	1E-08
Παράμετροι Ενέματος									
Grout Pressure (kPa)		Τελική Αντοχή (Mpa)			Καμπύλη Σκλήρυνσης				
100		970			Kasper & Meschke, 2004				
200		970			Kasper & Meschke, 2004				
300		970			Kasper & Meschke, 2004				
Παράμετροι Προκατασκευασμένων Στοιχείων Ω.Σ.									
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	E (Gpa)	$\nu$	Μήκος Στοιχείου (m)			Πάχος Στοιχείου (cm)			
12.17	20	0.2	1.5			35			
Παράμετροι Ασπίδας									
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	E (Gpa)	$\nu$	Μήκος Ασπίδας (m)			Πάχος Ασπίδας (cm)			
40.4	210	0.2	10.5			10			

## 5.1.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

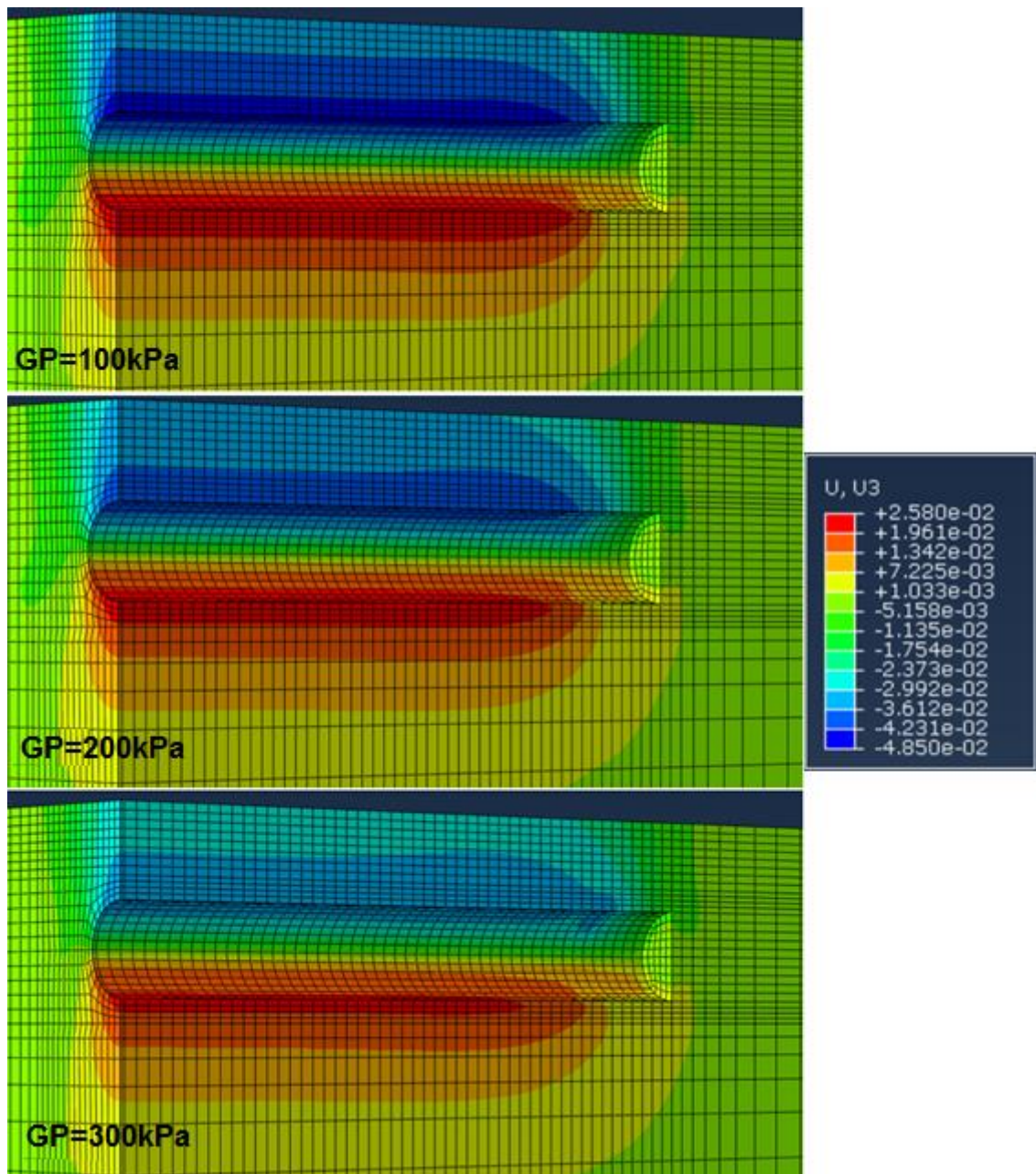
### 5.1.2.1 Αποτελέσματα με βάση την πίεση εισαγωγής του ενέματος

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Δίνεται έμφαση στην ποιοτική διαφορά των αποτελεσμάτων για τις τρεις πιέσεις, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του ενέματος στις καθιζήσεις και τα εντατικά μεγέθη κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας. Έτσι, όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο αφορούν στο εδαφικό προφίλ (c) με παραμέτρους αντοχής  $c=20\text{kPa}$  και  $\phi=20$  ως αντιπροσωπευτικό για τις συνήθεις συνθήκες που επιχειρεί το EPB, όπου ο περιορισμός των μετακινήσεων είναι κρίσιμος.



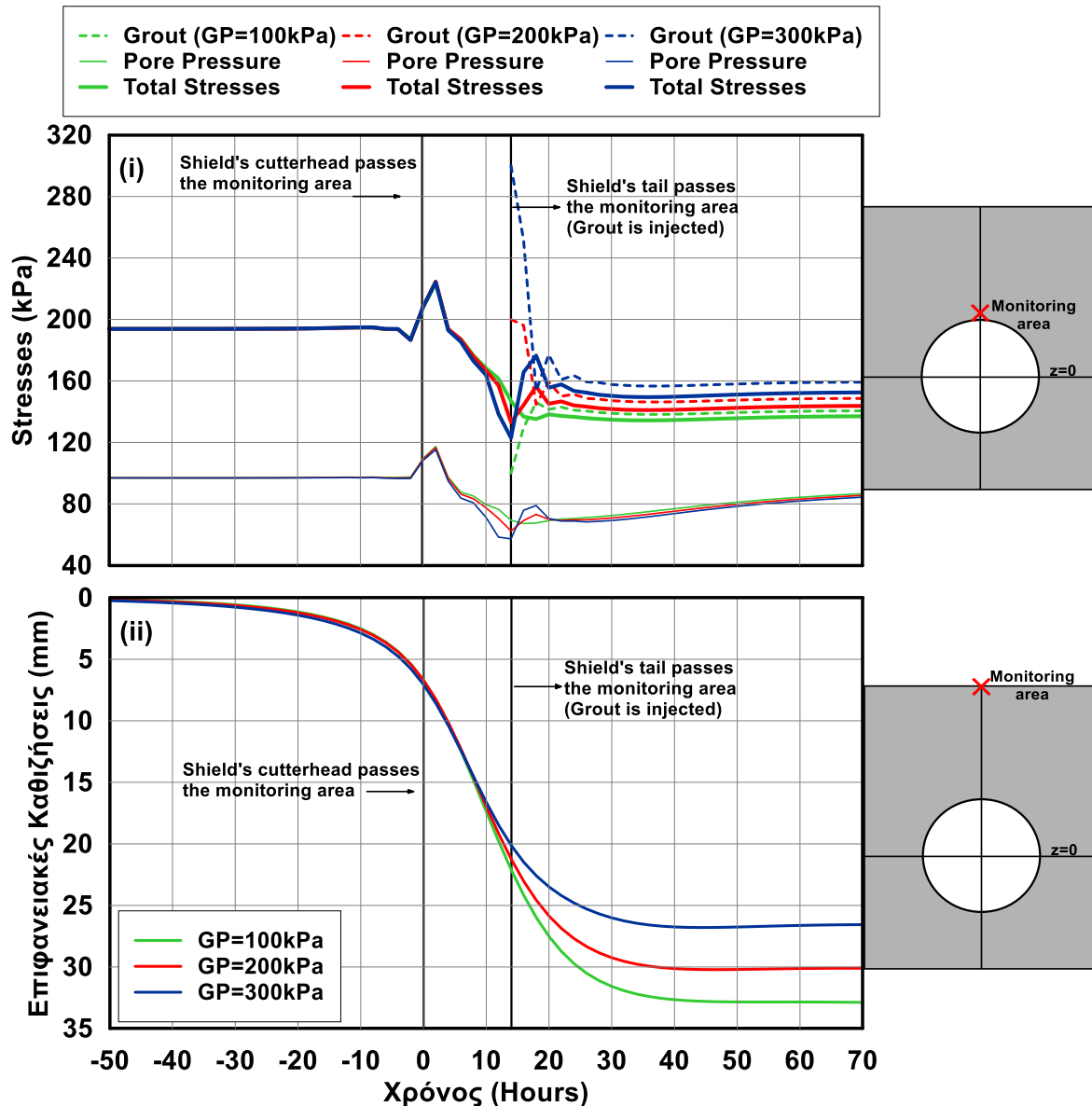
Εικόνα 5.1 Παρουσίαση των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάρκεια διάνοιξης της για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.

Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο εδαφικό προφίλ (c) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος. Παρατηρούμε ότι και για τις τρεις αρχικές πιέσεις του ενέματος, οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται έχουν παρόμοια μορφή και μέγεθος. Έτσι, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη εικόνα 4.1 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πίεση εισαγωγής του ενέματος έχει μικρή επιρροή στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων, αφενός επειδή η εδαφική αντοχή αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα που καθορίζει εν πολλοίς το πόσο εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις θα αναπτυχθούν στο περιβάλλον έδαφος και αφετέρου επειδή η πλαστικοποίηση του εδάφους συντελείται κυρίως κατά την εκσκαφή του μετώπου και τη διέλευση της ασπίδας.



Εικόνα 5.2 Παρουσίαση των κατακόρυφων μετακινήσεων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζονται οι καθιζήσεις που αναπτύσσονται για το εδαφικό προφίλ (c) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής. Είναι σαφές ότι οι καθιζήσεις μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνει η πίεση εισαγωγής του ενέματος τόσο όσο αφορά στην ανύψωση του πυθμένα, όσο και στη στέψη της σήραγγας καθώς και στις επιφανειακές εδαφικές καθιζήσεις που είναι και το πιο κρίσιμο μέγεθος σε ότι αφορά τις μετακινήσεις.

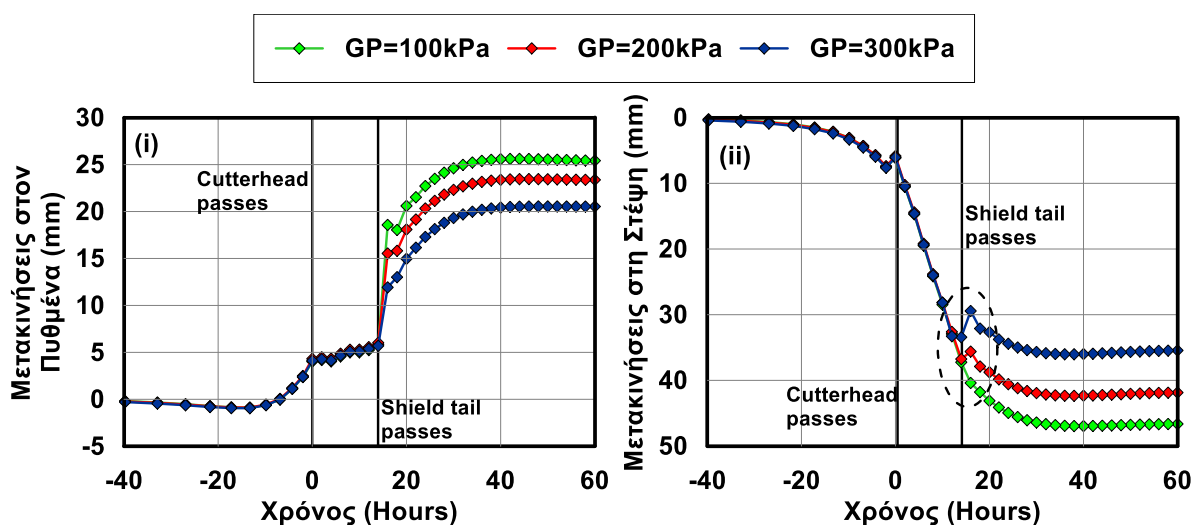


Διάγραμμα 5.1 (i) Εξέλιξη ολικών τάσεων, υδατικών πιέσεων στη στέψη της σήραγγας και πίεσης ενέματος κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος, (ii) Εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. (κοινός άξονας χρόνου για τα διαγράμματα (i),(ii))

Στο διάγραμμα 5.1 (i) βλέπουμε την εξέλιξη των ολικών τάσεων, υδατικών πιέσεων ενός σημείου στη στέψη της σήραγγας και της πίεσης του ενέματος κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες καθιζήσεις στον ίδιο χρόνο. Πριν αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, πρέπει να αναφερθεί ότι η πίεση εισαγωγής των 200kPa αντιστοιχεί στην αρχική γεωστατική κατακόρυφη τάση στη θέση της στέψης της σήραγγας, ενώ οι άλλες δύο τιμές των 100kPa και 300kPa είναι συγκριτικά με τα



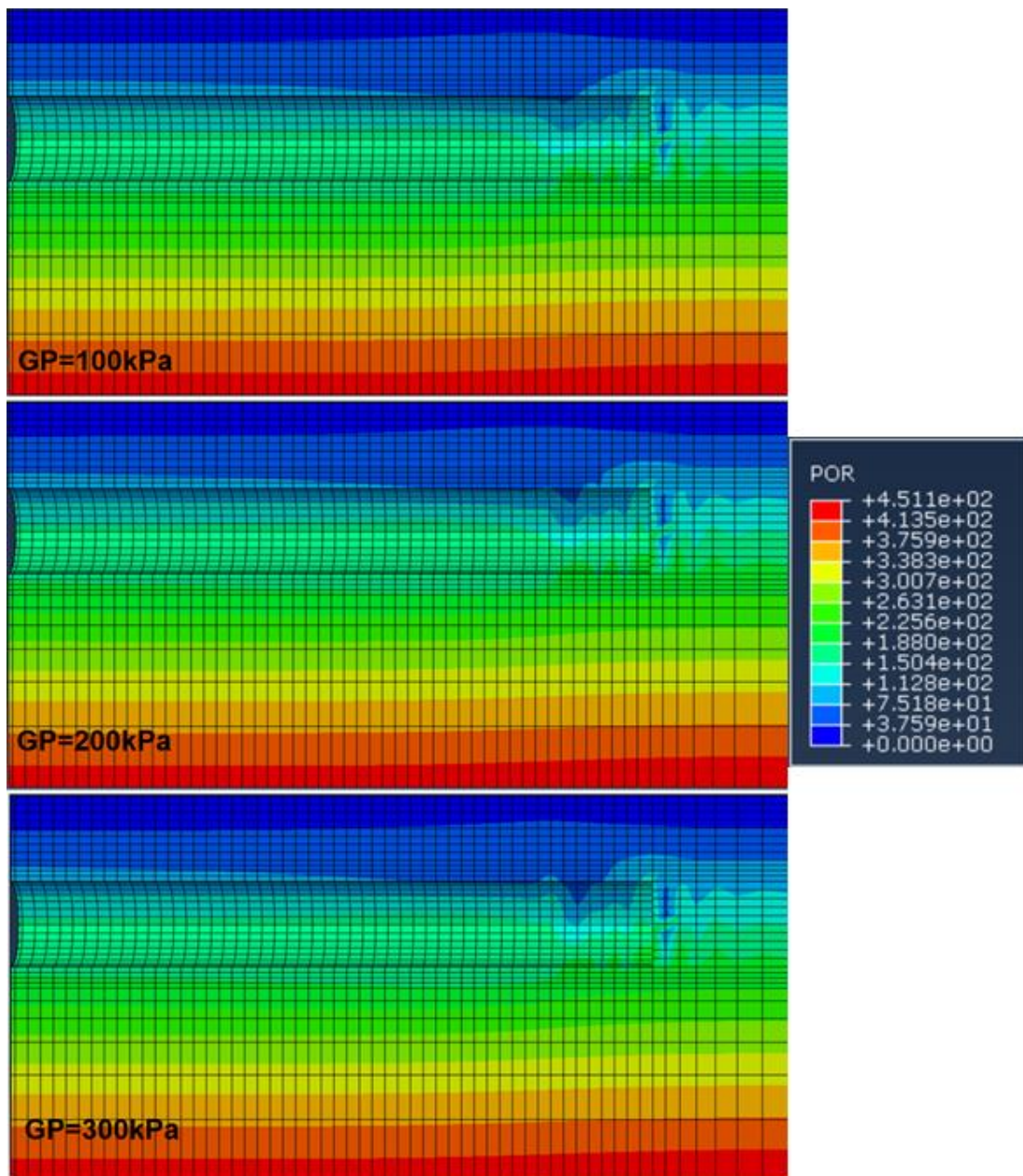
200kPa μειωμένη και αυξημένη κατά 50% αντίστοιχα. Αρχικά μελετώντας την εξέλιξη της εσωτερικής πίεσης του ενέματος, παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως της αρχικής τους τιμής καταλήγουν σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών από 140 έως 160kPa. Παρόλα αυτά η εξέλιξη τους είναι σημαντικά διαφορετική. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι μετά την εισαγωγή του ενέματος με πίεση 300kPa, υπάρχει μια σημαντική πτώση της τάσης του φτάνοντας περίπου τα 160kPa με ταυτόχρονη όμως άνοδο των ολικών τάσεων κατά 50kPa. Αντίθετα, μετά την εισαγωγή των 100kPa (τιμής σημαντικά μικρότερης της αρχικής γεωστατικής τάσης στη συγκεκριμένη θέση) παρατηρείται αύξηση της πίεσης του ενέματος με ταυτόχρονη μείωση των ολικών τάσεων μέχρι να φτάσουν σε ισορροπία τα δύο μεγέθη. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στα 200kPa παρουσιάζει πιο κοντινή συμπεριφορά στην αντίστοιχη των 300kPa με πιο μικρές όμως μεταβολές των μεγεθών. Γενικά, και οι τρεις καμπύλες καταλήγουν σε σχεδόν κοινή τιμή μεταξύ πίεσης ενέματος και ολικών τάσεων. Σε ότι αφορά τις καμπύλες των ολικών τάσεων, παρατηρούμε την κοινή τους πτώση μετά την εκσκαφή του μετώπου, αλλά η πτώση αυτή αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική πίεση του ενέματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στις υδατικές πιέσεις, οι οποίες επεξηγούνται καλύτερα στο παρακάτω διάγραμμα. Οι καθιζήσεις περιγράφονται στο διάγραμμα 5.1 (ii), όπου είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του ενέματος τόσο μικρότερες είναι οι τελικές καθιζήσεις. Παρατηρούμε ότι πριν την εισαγωγή του ενέματος οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, ενώ μετά την εισαγωγή αρχίζει η ουσιαστική απόκλιση των τριών καμπυλών, με την καμπύλη των 300kPa να έχει τη μικρότερη τιμή της τάξεως των 27mm και την καμπύλη των 100kPa να έχει τη μεγαλύτερη καθίζηση της τάξεως των 33mm.



Διάγραμμα 5.2 (i) Μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8kPa$ ) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος (ii) Μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8kPa$ ) για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος

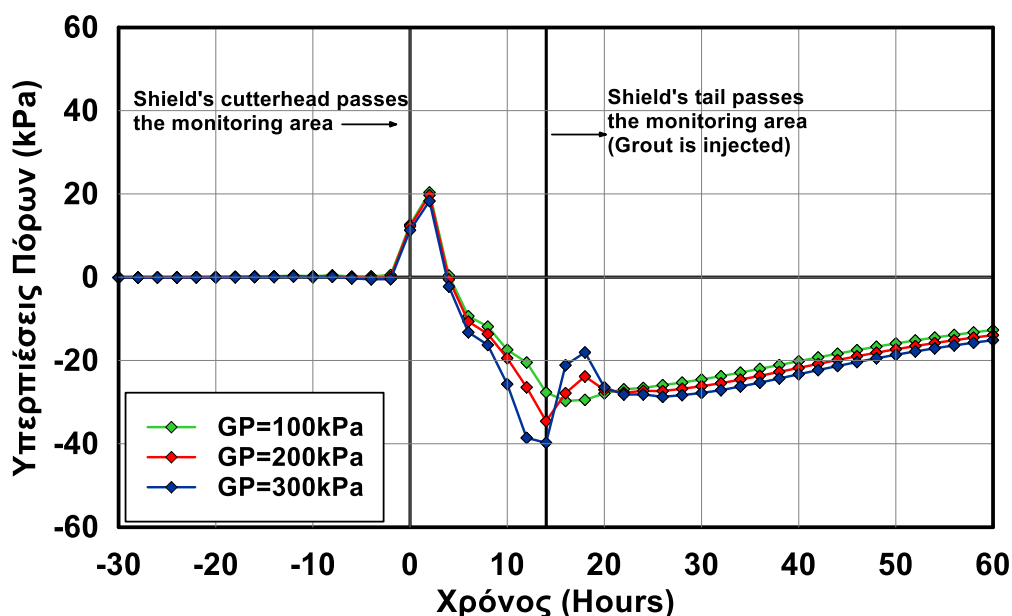
Στο διάγραμμα 5.2 (i) παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στον πυθμένα της σήραγγας για το εδαφικό προφίλ (c) για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Μέχρι την εισαγωγή του ενέματος, δεν παρατηρείται καμία διαφοροποίηση, αφού πρακτικά μέχρι εκείνο το σημείο όλα τα δεδομένα στις τρεις αναλύσεις είναι κοινά. Μετά την εισαγωγή του ενέματος είναι σαφές ότι όσο πιο μεγάλη είναι η αρχική πίεση του ενέματος, τόσο μικρότερη μετακίνηση αναπτύσσεται στον πυθμένα. Στο διάγραμμα 5.2 (ii) παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας για το εδαφικό προφίλ (c) για πίεση εισαγωγής του ενέματος 100, 200 και 300kPa. Σε αντιστοιχία με τον πυθμένα παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση των τριών καμπυλών επιτελείται πρακτικά κατά την εισαγωγή του ενέματος, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t=14hrs$  που η ουρά της ασπίδας διέρχεται από το σημείο αναφοράς. Στη διακεκομμένη έλλειψη φαίνεται η επιρροή της πίεσης του ενέματος, καθώς για τα 300kPa παρατηρούμε μείωση της υφιστάμενης μετακίνησης, ενώ στα 100kPa η τάση της

καμπύλης φαίνεται να μην επηρεάζεται σημαντικά από το ένεμα, αφού οι μετακινήσεις συνεχίζουν να αυξάνονται χωρίς κάποια τοπική μεταβολή. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται εν μέρει από το διάγραμμα 5.1 (i) όπου παρατηρούμε ότι η πίεση των 100kPa κατά την εισαγωγή του ενέματος είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ολική τάση, αδυνατώντας έτσι να συγκρατήσει πρακτικά το περιβάλλον έδαφος. Αντίθετα για τις καμπύλες των 200kPa και 300kPa που τη στιγμή της εισαγωγής του ενέματος, η αρχική πίεση του είναι μεγαλύτερη από την τοπική ολική τάση στη στέψη της σήραγγας είναι εμφανής η συγκράτηση του εδάφους με τοπική προσωρινή μείωση των υφιστάμενων μετακινήσεων. Είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του ενέματος, τόσο μεγαλύτερη προσωρινή μείωση των υφιστάμενων μετακινήσεων παρατηρείται, καθώς επίσης μειώνεται και η τελική σύγκλιση των μετακινήσεων της στέψης.



Εικόνα 5.3 Παρουσίαση των πιέσεων πόρων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8\text{kPa}$ ) κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.

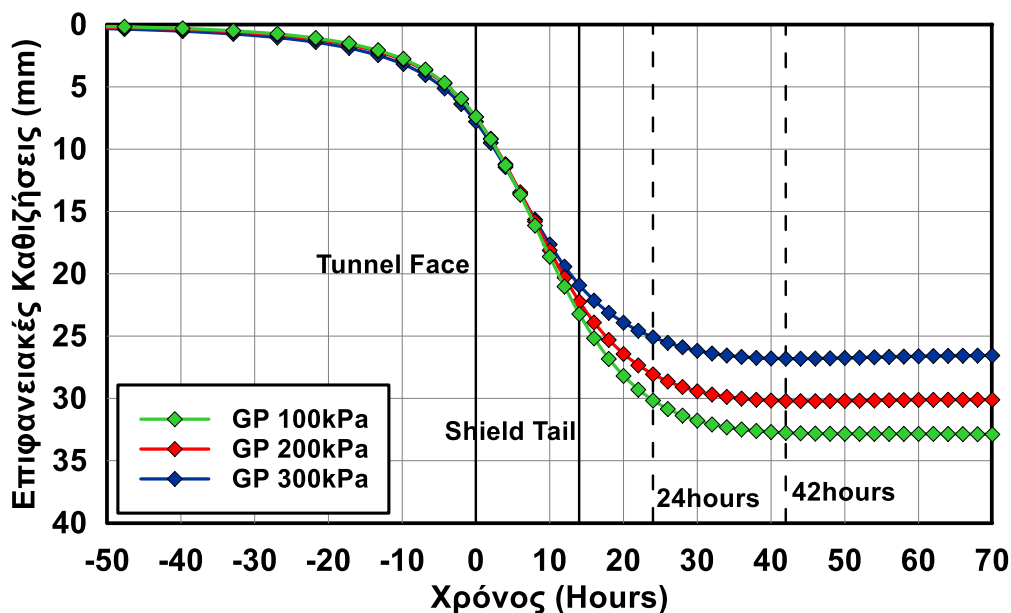
Στην εικόνα 5.3 παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας. Είναι εμφανές ότι η περιοχή ενδιαφέροντος έγκειται στο χώρο της ασπίδας του EPB και κατ' επέκταση του μετώπου όπου παρουσιάζονται οι σημαντικές μεταβολές των πιέσεων πόρων. Η καλύτερη εμποπτεία της εξέλιξης των πιέσεων πόρων γίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί αλλά είναι ήδη αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η πίεση εισαγωγής του ενέματος, παρατηρούνται πιο έντονες μεταβολές στις πιέσεις πόρων.



Διάγραμμα 5.3 Εξέλιξη υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.

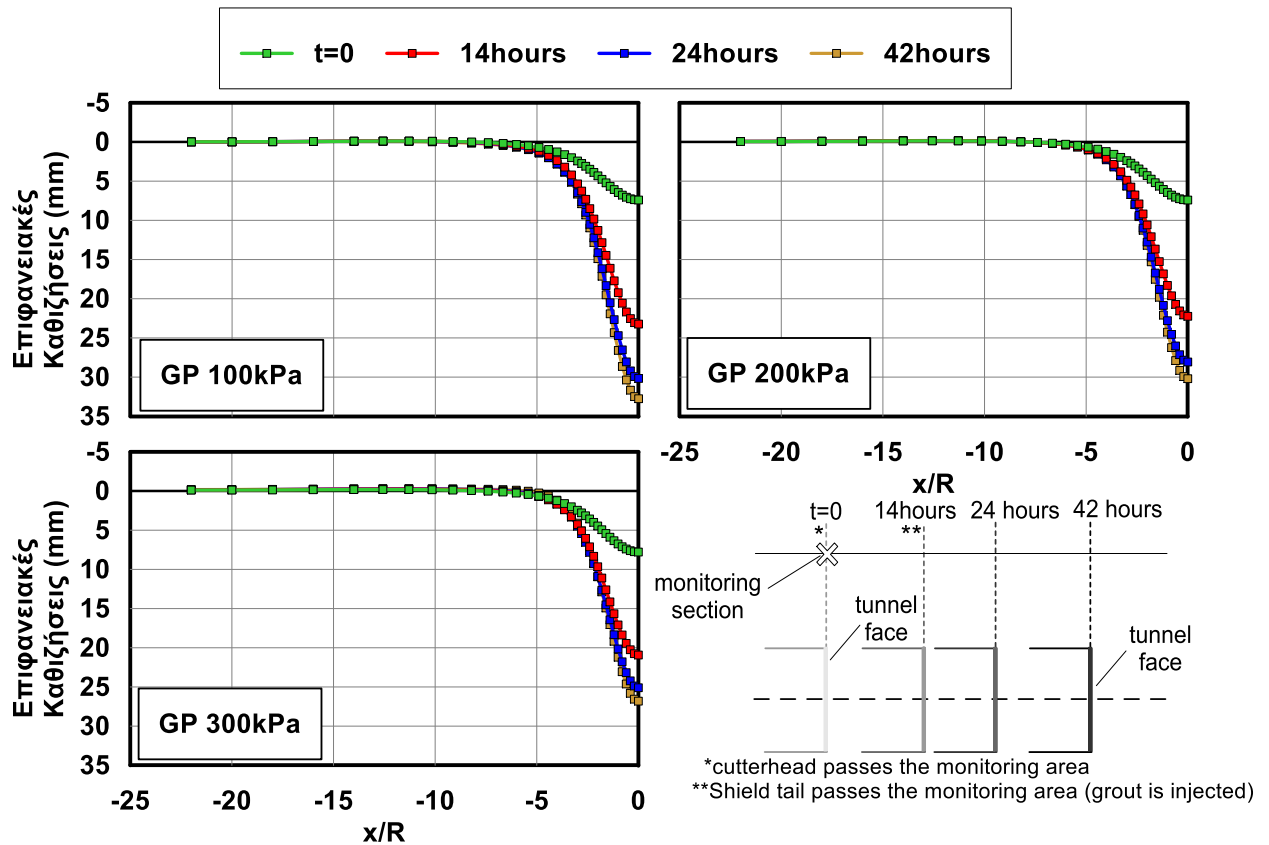
Στο διάγραμμα 5.3 βλέπουμε την εξέλιξη των υπερπιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Το ενδιαφέρον στο διάγραμμα συγκεντρώνεται εκατέρωθεν του άξονα εισαγωγής του ενέματος, καθώς εκεί εντοπίζονται οι ουσιαστικές διαφορές στην ανάπτυξη των υπερπιέσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι μετά την εισαγωγή του ενέματος οι καμπύλες των 200kPa και 300kPa έχουν ανοδική πορεία, με την μπλε καμπύλη να έχει σχεδόν διπλάσια κλίση. Αντίθετα η καμπύλη των 100kPa παραμένει σταθερή για το μικρό διάστημα που οι άλλες δύο αυξάνονται απότομα, λόγω της μικρής αρχικής πίεσης του ενέματος, που είναι μικρότερης της αντίστοιχης ολικής τάσης στη στέψη εκείνη τη στιγμή. Ιδιαίτερη σημασία έχει η εξέλιξη των υπερπιέσεων πόρων στο διάστημα μεταξύ εκσκαφής και εισαγωγής του ενέματος. Πάρα το γεγονός ότι μέχρι την εισαγωγή του ενέματος οι συνθήκες είναι θεωρητικά οι ίδιες, παρατηρούμε αποκλίσεις στις τρεις καμπύλες, και συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του ενέματος, τόσο μεγαλύτερες υποπίεσεις αναπτύσσονται, δηλαδή υπάρχει μεγαλύτερη απαίτηση για νερό. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη διαταραχή που έχει προκύψει από τις προηγούμενες εισαγωγές του ενέματος στα στοιχεία της στέψης που έχουν προηγηθεί. Συγκεκριμένα, η πίεση του ενέματος φορτίζει το έδαφος πάνω από το EPB σαν έναν ανεστραμμένο θεμέλιο, με αποτέλεσμα όσο μεγαλύτερη πίεση ασκείται, τόσο πιο πολύ νερό να φεύγει από αυτή την περιοχή (που ακόμα δεν έχει εισαχθεί ένεμα σε αυτή). Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αυτή η έλλειψη σε νερό με την ανάπτυξη υποπιέσεων πριν την εισαγωγή του ενέματος.



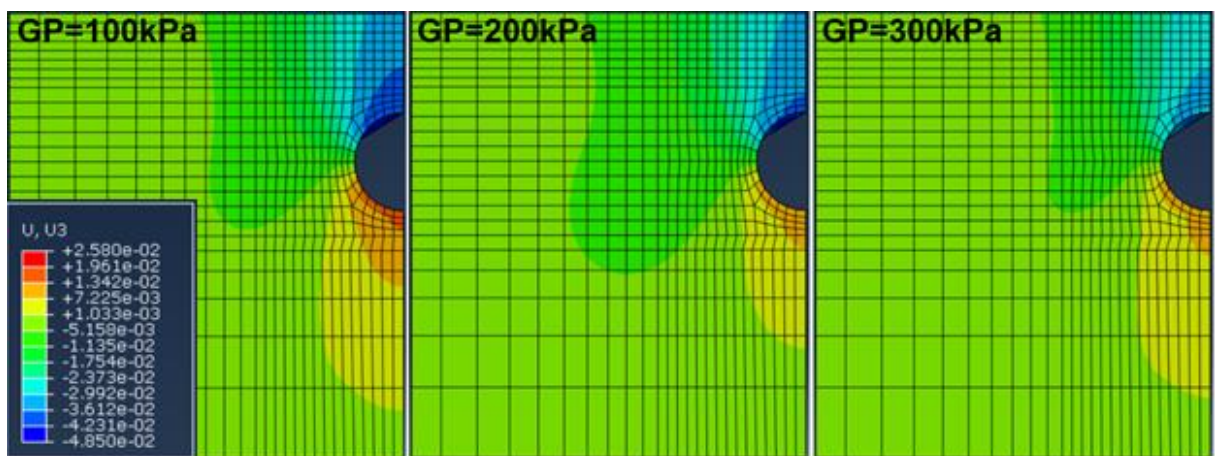


Διάγραμμα 5.4 Εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. (κοινός άξονας χρόνου για τα διαγράμματα (i), (ii))

Στο διάγραμμα 5.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη των καθιζήσεων ενός σημείου στην επιφάνεια του εδάφους για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος. Εμφανίζονται τέσσερις τομές στο διάγραμμα, οι οποίες αφορούν στη στιγμή  $t=0$  που η κεφαλή κοπής διέρχεται από το μέτωπο, τη στιγμή  $t=14\text{hrs}$  που η ουρά της ασπίδας διέρχεται από το σημείο μελέτης καθώς και  $t=24\text{hrs}$  και  $t=42\text{hrs}$  μετά την εκσκαφή του μετώπου. Στο διάγραμμα 5.5 που ακολουθεί για κάθε μία από τις τρεις πιέσεις του ενέματος παρουσιάζεται η εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων για τις τέσσερις παραπάνω χρονικές στιγμές. Παρατηρούμε ότι η εγκάρσια κατανομή των καθιζήσεων για  $t=0$ , δηλαδή όταν η κεφαλή κοπής του EPB φτάνει στο σημείο αναφοράς, είναι πρακτικά η ίδια και για τις τρεις πιέσεις του ενέματος, αφού καθοριστικό μέγεθος για αυτή την κατανομή είναι η κοινή πίεση στο μέτωπο για τις τρεις καμπύλες, και όχι η πίεση του ενέματος που εισάγεται σχετικά μακριά από το μέτωπο. Στις υπόλοιπες τρεις θέσεις που περιγράφονται στα παρακάτω διαγράμματα είναι η σαφής η μείωση των καθιζήσεων σε όλες τις κατανομές όσο αυξάνεται η πίεση του ενέματος. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι το άνοιγμα στις καμπύλες των καθιζήσεων αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο αναφοράς. Χαρακτηριστικά, για  $t=14\text{hrs}$ , δηλαδή όταν η ουρά της ασπίδας διέρχεται από το σημείο αναφοράς, βλέπουμε ότι η μέγιστη καθίζηση για τα 100kPa είναι περίπου 23mm και για την πίεση των 300kPa κυμαίνεται στα 21mm. Όμως, όταν έχουν περάσει 42 ώρες από τη στιγμή που το EPB πέρασε το σημείο αναφοράς παρατηρούμε ότι η διαφορά ανοίγει καθώς στα 100kPa η μέγιστη καθίζηση είναι 33mm, ενώ στα 300kPa περιορίζεται στα 27mm, διαφορά τρεις φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ουρά της ασπίδας. Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο είναι το γεγονός ότι όλες οι κατανομές για όλες τις χρονικές στιγμές αλλά και για τις τρεις πιέσεις του ενέματος παρουσιάζουν την ίδια ζώνη επιρροής καθώς σε απόσταση πέντε ακτινών, δηλαδή 25m, στην εγκάρσια διεύθυνση οι καθιζήσεις είναι πρακτικά μηδενικές. Τέλος, από το διάγραμμα 5.4 βλέπουμε ότι τη χρονική στιγμή που το EPB απέχει 42hours από το σημείο αναφοράς η καμπύλη των καθιζήσεων έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί, οπότε η κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων θα είναι η τελική κατανομή. Έτσι, παρατηρώντας στο διάγραμμα 5.5 τη σύγκλιση των κατανομών των 24hrs και 42hrs για όλες τις πιέσεις του ενέματος, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι μετά το πέρας της πρώτης ημέρας από τη στιγμή που έγινε η εκσκαφή μιας διατομής μπορούμε να έχουμε μια ξεκάθαρη εικόνα για τις τελικές τιμές των καθιζήσεων και κατ' επέκταση την καλή πορεία του έργου ή την απαίτηση διορθωτικών κινήσεων.



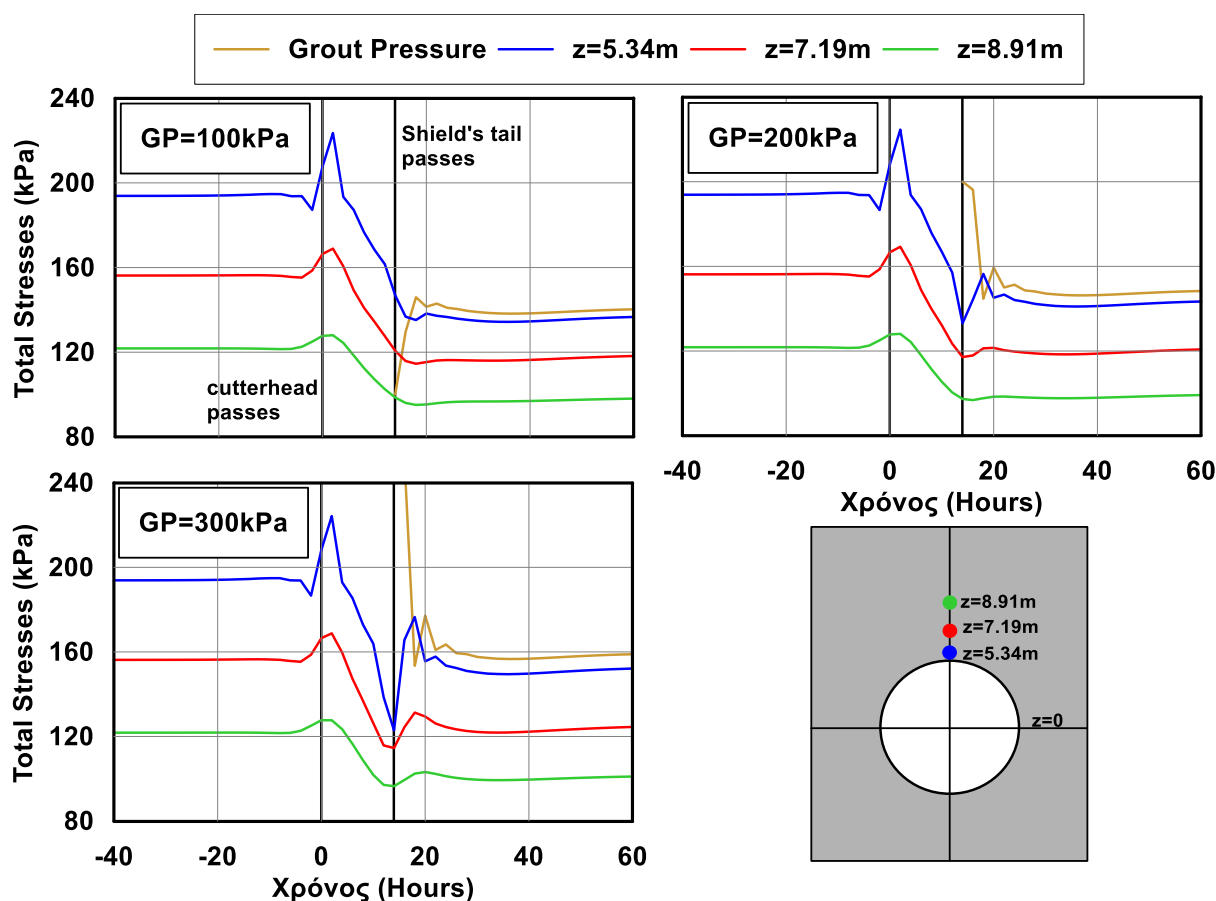
Διάγραμμα 5.5 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.



Εικόνα 5.4 Παρουσίαση των εγκάρσιων κατακόρυφων μετακινήσεων για το ίδιο εδαφικό προφίλ ( $C_u=59.8kPa$ ) κατά τη διάνοξη της σήραγγας για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο διάγραμμα 5.6 γίνεται παρουσίαση της εξέλιξης των ολικών τάσεων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Είναι χαρακτηριστικό ότι και στις τρεις πιέσεις του ενέματος όσο απομακρυνόμαστε από τη στέψη της σήραγγας, τόσο πιο λίγο επηρεάζονται τα εντατικά μεγέθη των αντίστοιχων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι όλες οι μεταβολές των καμπυλών είναι πιο ομαλές στη θέση  $z=7.19m$  και ειδικά στη θέση  $z=8.91m$ . Επίσης, είναι εμφανές ότι η πτώση των ολικών τάσεων πριν την εκσκαφή και στο πέρας της διάνοξης είναι σημαντικά μικρότερη στις θέσεις πάνω από τη στέψη της σήραγγας.

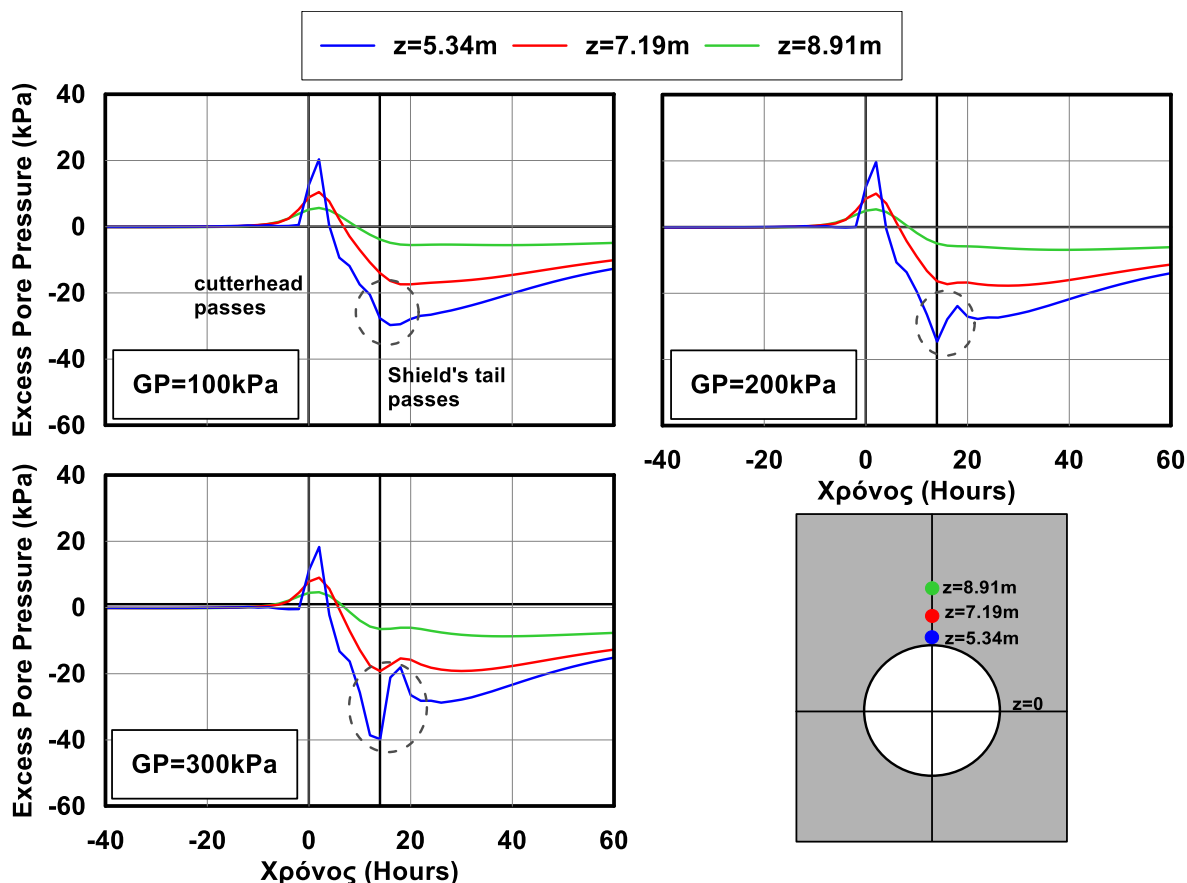
Ενδεικτικά, για την πίεση των 200kPa η πτώση των ολικών τάσεων στη στέψη της σήραγγας είναι της τάξης των 40kPa, ενώ στη θέση  $z=8.91\text{m}$  είναι της τάξης των 20kPa. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στο ύψος των 8.91m έχει πρακτικά την ίδια εξέλιξη και για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις, καταλήγοντας και στις τρεις περιπτώσεις στην τιμή των 100kPa, καθώς και το γεγονός ότι οι αντίστοιχες καμπύλες στα 7.19m έχουν παρόμοια συμπεριφορά, και καταλήγουν σε τάσεις περί των 120kPa. Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η ουσιαστική επιρροή της διαφορετικής πίεσης του ενέματος στην τελική τιμή των εντατικών μεγεθών περιορίζεται σε μια ζώνη γύρω από τη στέψη της σήραγγας, όπου παρατηρούμε και τις σημαντικές διακυμάνσεις στις τρεις καμπύλες που αντιστοιχούν στα 5.34m. Επιπλέον στο διάστημα πριν και μετά την εισαγωγή του ενέματος παρατηρούμε ότι ακόμα και οι πολύ έντονες διακυμάνσεις στη στέψη της σήραγγας για τα 300kPa εξομαλύνονται σε μεγάλο βαθμό ήδη από την καμπύλη των 7.19m για την αντίστοιχη πίεση. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε μία απόσταση 2m και άνω από τη στέψη της σήραγγας οι μεταβολές των εντατικών μεγεθών οφείλονται κυρίως στη γενικότερη διαταραχή που προκαλεί στο περιβάλλον έδαφος η διάνοιξη της σήραγγας και σε μικρότερο βαθμό στην αρχική πίεση του ενέματος, η οποία επηρεάζει έντονα την περιοχή γύρω από την επένδυση της σήραγγας.



Διάγραμμα 5.6 Παρουσίαση της εξέλιξης των ολικών τάσεων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.

Στο διάγραμμα 5.7 γίνεται παρουσίαση της εξέλιξης των υπερπιέσεων πόρων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα των ολικών τάσεων (4.17) είναι σαφές ότι και στις τρεις πιέσεις του ενέματος όσο απομακρυνόμαστε από τη στέψη της σήραγγας, τόσο πιο λίγο επηρεάζονται οι υδατικές πιέσεις, και σε άποψη μεγεθών, δηλαδή αναπτύσσονται μικρότερες υπερπιέσεις, και σε άποψη απότομων

μεταβολών των αντιστοιχων καμπυλών. Σε αντιστοιχία με τις ολικές τάσεις, οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις θέσεις  $z=7.19\text{m}$  και  $z=8.91\text{m}$  παρουσιάζουν πολύ κοντινή συμπεριφορά, με τις όποιες διαφορές να εντοπίζονται κοντά στη χρονική στιγμή της εισαγωγής του ενέματος. Αντίθετα, παρατηρούμε σημαντικές διαφορές στην ανάπτυξη των υπερπλίσεων στη στέψη της σήραγγας, ειδικά στις περιοχές που επισημαίνονται με τις διακεκομμένες ελλείψεις, όπου έχουμε πολύ έντονες διακυμάνσεις.



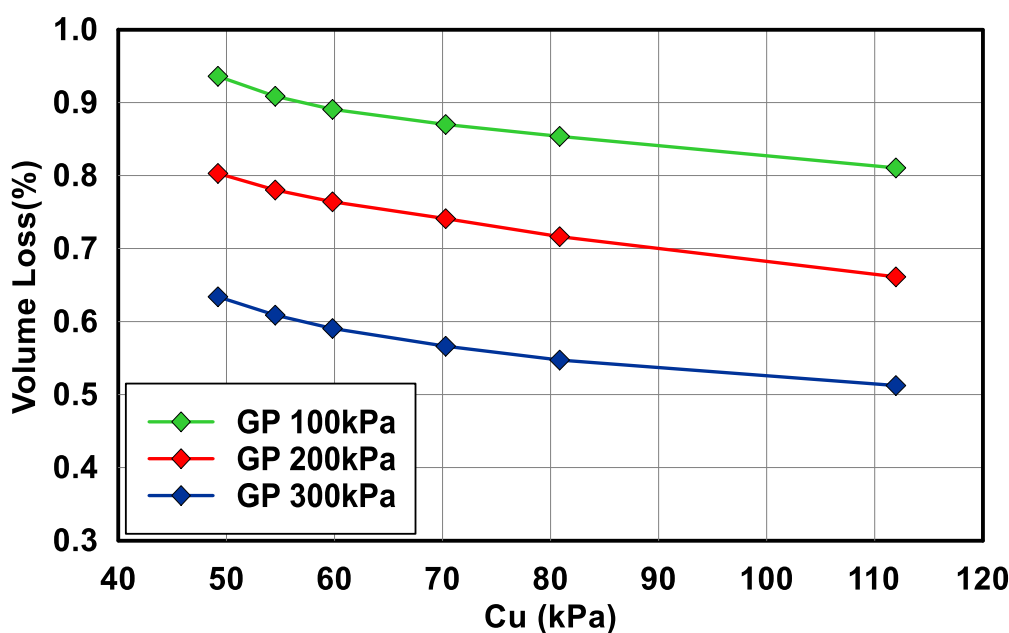
Διάγραμμα 5.7 Παρουσίαση της εξέλιξης των υπερπλίσεων πόρων για τρία σημεία σε διαφορετικό ύψος για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.

Συγκεκριμένα, στην καμπύλη της πίεσης των 100kPa μετά την εισαγωγή του ενέματος παρατηρούμε μια πολύ ομαλή αύξηση των υπερπλίσεων πόρων, μέχρις ότου μηδενιστούν. Αντίθετα, στην καμπύλη των 300kPa αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος, υπάρχει μια απότομη αύξηση της τάξης των 20kPa, αλλά πριν η καμπύλη αρχίζει σταδιακά να συγκλίνει στο μηδέν, υπάρχει μια μικρή πτώση. Ουσιαστικά όλη αυτή η διαφορά οφείλεται στο συνδυασμό της αρχικής εσωτερικής πίεσης και της σκλήρυνσης του ενέματος. Αρχικά, το ένεμα έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα η εκτόνωση της πίεσης του να απαιτεί μεγάλες μετακινήσεις, σημαντικά μεγαλύτερες από το κενό επένδυσης και εδάφους. Έτσι, η περίσσεια πίεση που δεν μπορεί να εκτονωθεί μέσω μετακινήσεων μεταφράζεται σε φόρτιση του περιβάλλοντος εδάφους προκαλώντας τις διακυμάνσεις του διαγράμματος. Συγκεκριμένα, όταν εισάγεται η πίεση των 100kPa οι ολικές τάσεις στη στέψη της σήραγγας είναι μεγαλύτερες, της τάξεως των 150kPa, γι' αυτό παρατηρούμε την ομαλή συμπεριφορά. Αντίθετα, όταν εισάγονται τα 300kPa, η τοπική ολική τάση είναι περίπου 120kPa, με αποτέλεσμα να ασκείται σημαντική επιπλέον πίεση και να αυξάνονται ραγδαία οι πιέσεις πόρων. Η μείωση των υδατικών τάσεων που παρατηρείται στο διάγραμμα των 300kPa λίγο μετά την απότομη αύξησή τους οφείλεται στην σκλήρυνση του ενέματος και τη μετατροπή της συμπεριφοράς του από ρευστό σε πιο στερεό. Έτσι, το ένεμα

μπορεί πλέον να μειώσει τον όγκο του, εκτονώνοντας μερικώς την πίεση που ασκεί και άρα την αύξηση των υδατικών πιέσεων.

### 5.1.2.2 Γενικά Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα συγκεντρωτικά διαγράμματα από την Α' ομάδα αναλύσεων. Σημειώνεται ότι για την πίεση εισαγωγής των 200kPa έχουμε οκτώ αναλύσεις με οκτώ διαφορετικά Cu τα οποία παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 4.1.2.3. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο για λόγους καλύτερης εποπτείας παρουσιάζονται οι τιμές για έξι Cu στις καμπύλες των 200kPa ώστε να είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες καμπύλες των 100 και 300kPa.

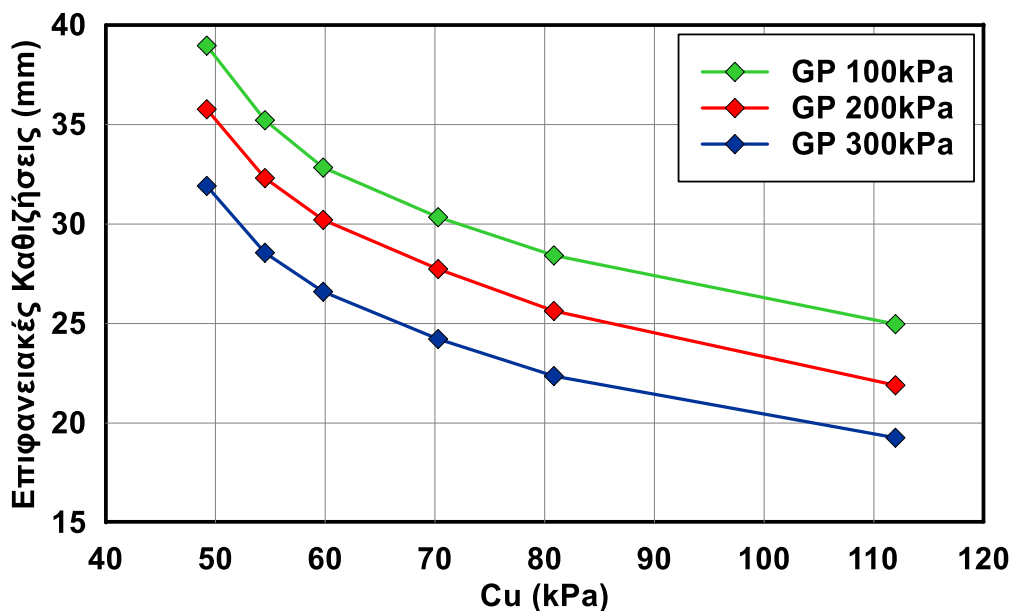


Διάγραμμα 5.8 Μέγιστες τιμές του Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.

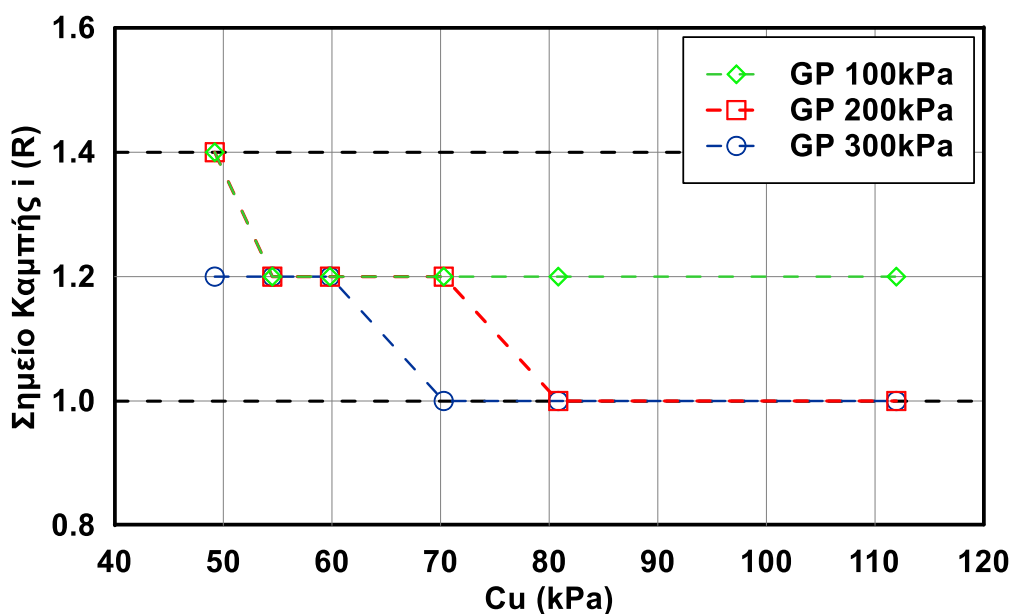
Στο διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται ο συντελεστής Volume Loss συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις του ενέματος. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής Volume Loss ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της συνολικής εγκάρσιας επιφανειακής καθίζησης προς το εμβαδόν της διατομής της σήραγγας (αναλυτικότερα περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.1.3). Αρχικά, παρατηρούμε και για τις τρεις καμπύλες ότι όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους μειώνεται ο συντελεστής Volume Loss, δηλαδή είναι μικρότερη η επιρροή της διάνοιξης της σήραγγας στον εδαφικό σκελετό του περιβάλλοντος εδάφους. Παράλληλα, για σταθερή τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση εισαγωγής του ενέματος, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής, αφού η μεγάλη πίεση εισαγωγής συνεπάγεται μικρότερες καθιζήσεις κατά μήκος της σήραγγας.

Στο διάγραμμα 5.9 παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και των τριών διαφορετικών πιέσεων εισαγωγής του ενέματος. Παρατηρούμε ότι και για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής όσο αυξάνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους, οι καθιζήσεις μειώνονται σημαντικά, φτάνοντας μέχρι και σε μείωση της τάξης του 40%. Παράλληλα, έχοντας ως καμπύλη αναφοράς αυτή που αντιστοιχεί στην πίεση των 200kPa, παρατηρούμε ότι οι αντίστοιχες κατανομές των 100 και 300kPa ακολουθούν την ίδια τάση, όντας

μετατοπισμένες προς τα πάνω και κάτω αντίστοιχα. Γενικά, σε όλα τα διαγράμματα που αφορούν μετακινήσεις είναι σαφής η μείωση των καθιζήσεων για αύξηση των πιέσεων εισαγωγής του ενέματος.



Διάγραμμα 5.9 Μέγιστες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.



Διάγραμμα 5.10 Τιμή του σημείου καμπής  $i$  των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος.

Στο διάγραμμα 5.10 παρουσιάζονται οι τιμές των σημείων καμπής στις καμπύλες των επιφανειακών καθιζήσεων για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος. Όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.1, το σημείο καμπής έχει πρακτικά την ίδια τιμή για τις διαμήκεις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς και για τις εγκάρσιες, αλλά η σημασία αυτής της παραμέτρου έγκειται στην εγκάρσια κατανομή των καθιζήσεων. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αστράγγιστη



διατμητική αντοχή, τόσο μειώνεται η απόσταση του σημείου καμψής από τον άξονα της σήραγγας κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Παρόλα αυτά, βλέπουμε ότι γενικά δεν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές σε αυτό το μέγεθος (κινείται από 1.0 έως 1.4), ειδικά στις περιπτώσεις των 100 και 300kPa όπου το σημείο καμψής κινείται μεταξύ δύο τιμών.

### 5.1.3 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα αποτελέσματα που προέκυψαν από την Α' ομάδα αναλύσεων. Συγκεκριμένα:

- Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των καθιζήσεων στη διαμήκη διεύθυνση κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας επηρεάζονται σημαντικά από την πίεση εισαγωγής του ενέματος. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος, τόσο μειώνονται οι τελικές καθιζήσεις που αναπτύσσονται. Σημειώνεται ότι η διαφορά στις κατανομές των καθιζήσεων για κοινό εδαφικό προφίλ εμφανίζεται λίγο πριν την εισαγωγή του ενέματος, αφού αρκετά πριν από αυτή την κατάσταση οι συνθήκες είναι ουσιαστικά κοινές. (Διαγράμματα 5.1, 5.4, 5.9, Εικόνα 5.2)
- Στην εγκάρσια διεύθυνση παρατηρούμε αντίστοιχη εικόνα με τη διαμήκη. Συγκεκριμένα, οι καθιζήσεις μειώνονται για μεγαλύτερη πίεση εισαγωγής του ενέματος. Εξάιρεση αποτελεί η εικόνα στο μέτωπο. Συγκεκριμένα, όταν η κεφαλή κοπής διέρχεται από το σημείο αναφοράς η κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων είναι κοινή αφού η διαφορά των αναλύσεων έγκειται στην πίεση εισαγωγής του ενέματος η οποία συντελείται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το εκάστοτε μέτωπο, οπότε πρακτικά δεν το επηρεάζει. Επιπλέον, βλέποντας την κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μέχρις ότου να σταθεροποιηθεί, παρατηρούμε ότι στο πρώτο 24ωρο από τη στιγμή που η κεφαλή κοπής πέρασε το σημείο αναφοράς έχουμε σχεδόν την τελική εικόνα της κατανομής της καθίζησης του. (Διάγραμμα 5.5, Εικόνα 5.4)
- Οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας παρατηρούμε ότι δεν επηρεάζονται από την πίεση εισαγωγής του ενέματος. Συγκεκριμένα, και για τις τρεις πιέσεις εισαγωγής του ενέματος, 100, 200 και 300kPa, η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων ήταν ίδια, συμπεραίνοντας ότι αφενός ο καθοριστικός παράγοντας για το συγκεκριμένο μέγεθος είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και γενικότερα η αντοχή του εδάφους και αφετέρου ότι η πλαστικοποίηση του εδάφους συντελείται κυρίως κατά την εκσκαφή του μετώπου και τη διέλευση της ασπίδας. (Εικόνα 5.1)
- Η πίεση εισαγωγής του ενέματος έχει σημαντική επιρροή στις μεταβολές των πιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Συγκεκριμένα, παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνει η πίεση εισαγωγής του ενέματος έχουμε μεγαλύτερες υποπίεσεις πριν την εισαγωγή αλλά και μεγαλύτερη αύξηση των πιέσεων πόρων αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος. Ουσιαστικά, όταν το ένεμα εισάγεται με μεγάλη πίεση, ασκεί ένα σημαντικό φορτίο στο έδαφος, με αποτέλεσμα αυτή η φόρτιση να οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων πόρων. Παράλληλα, αυτό το μεγάλο φορτίο προκαλεί μια μεγάλη διατάραξη του περιβάλλοντος εδάφους μπροστά από το EPB. Έτσι, φαίνεται να απομακρύνεται νερό από το έδαφος εξαιτίας αυτής της διαταραχής, με αποτέλεσμα όταν προωθηθεί το μηχάνημα να παρατηρούνται μεγαλύτερες υποπίεσεις στις μεγάλες πιέσεις εισαγωγής του ενέματος, αφού απαιτείται περισσότερο νερό από όσο υπάρχει στην περιοχή. (Διαγράμματα 5.1, 5.3, Εικόνα 5.3)
- Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε από τη συγκεκριμένη ομάδα αναλύσεων είναι η ζώνη στην οποία φαίνεται να έχει μεγάλη επιρροή η πίεση του ενέματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήσαμε ότι περίπου σε μια ζώνη 2m από την τελική επένδυση η πίεση του ενέματος

είναι ο καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τις μεταβολές των πιέσεων πόρων και κατ' επέκταση και των ολικών τάσεων. Αντίθετα έξω από αυτή την περιοχή τα εντατικά μεγέθη επηρεάζονται λιγότερο την πίεση του ενέματος και οι μεταβολές τους οφείλονται εν πολλοίς στη διαταραχή που προκαλεί η διάνοιξη της σήραγγας. (Διαγράμματα 5.6, 5.7)

- Η παράμετρος του Volume Loss παρατηρούμε ότι μειώνεται όσο αυξάνεται η εδαφική αντοχή καθώς και όσο αυξάνεται η πίεση εισαγωγής του ενέματος. Γενικά, κυμαίνεται κάτω από το 1% για όλες τις αναλύσεις, ανεξαρτήτως εδαφικής αντοχής και αρχικής πίεσης του ενέματος, βλέποντας ότι κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων περιορίζεται σημαντικά η διαταραχή του περιβάλλοντος εδάφους. (Διάγραμμα 5.8)



## 5.2 Β' Ομάδα Αναλύσεων

### 5.2.1 Περιγραφή Βασικών Παραμέτρων Αναλύσεων

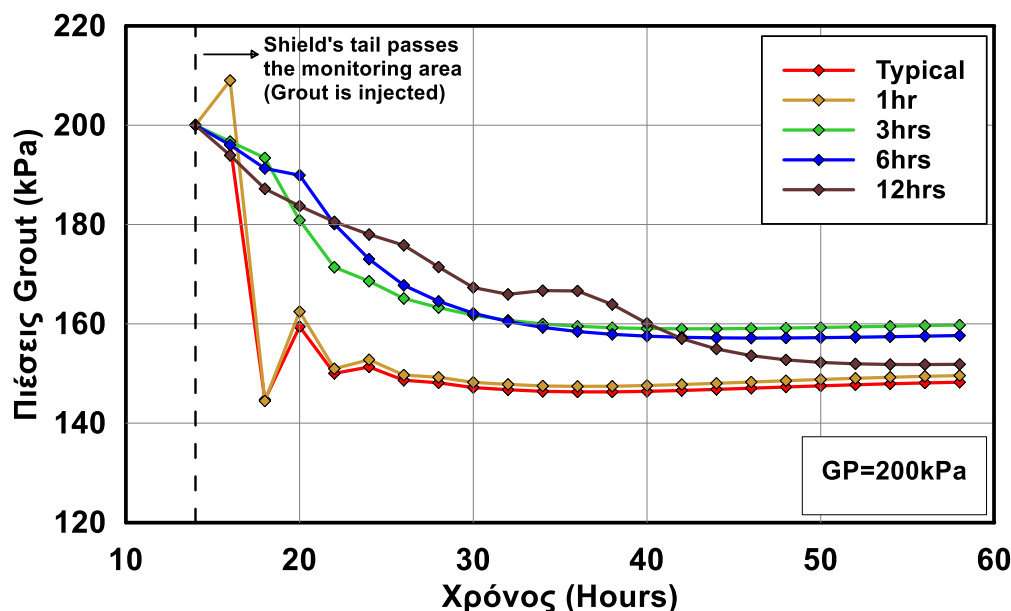
Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι αναλύσεις της Β' Ομάδας. Πρόκειται για παραμετρικές αναλύσεις με μεταβολή της εισαγωγής της πίεσης του ενέματος (200 και 300kPa) καθώς και με μεταβολή του χρόνου σκλήρυνσης του ενέματος, μέσω των καμπυλών σκλήρυνσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ως καμπύλη αναφοράς αυτή των Kasper & Meschke, 2004 και στη συνέχεια τροποποιήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές, με βάση το χρόνο σκλήρυνσής τους. Οι καμπύλες αυτές περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.2.6.2. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι καμπύλες των 6 και 12 ωρών σκλήρυνσης δεν είναι ρεαλιστικές υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του EPB. Έτσι, η χρήση τους στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει κυρίως επιστημονικό ενδιαφέρον, για να γίνει πιο κατανοητή η επιρροή του ενέματος και ως προς το χρόνο σκλήρυνσης στα βασικά μεγέθη. Σε ότι αφορά το εδαφικό προφίλ, επιλέχθηκε μια χαμηλής αντοχής άργιλος, με  $c=20\text{kPa}$  και  $\phi=20$ . Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ομάδες αναλύσεων επιλέχθηκε ένα εδαφικό προφίλ, αφού στόχος της συγκεκριμένης ομάδας είναι να βρεθεί η επιρροή του χρόνου σκλήρυνσης και γενικότερα της τεχνολογίας του ενέματος στα βασικά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

*Πίνακας 5.2 Παρουσιάζονται όλες οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την Ομάδα Αναλύσεων.*

Εδαφικές Παράμετροι								
$K_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$	$C_u$ (kPa)	$E$ (Mpa)	$\psi$	$\nu$	$k_s$ (m/s)
0.5	20	20	20	59.8	17.94	3.3	0.3	1E-08
Παράμετροι Ενέματος								
Grout Pressure (kPa)			Τελική Αντοχή (Mpa)		Καμπύλη Σκλήρυνσης			
200			970		Kasper & Meschke, 2004			
200			970		1hr			
200			970		3hrs			
200			970		6hrs			
200			970		12hrs			
300			970		Kasper & Meschke, 2004			
300			970		1hr			
300			970		3hrs			
300			970		6hrs			
300			970		12hrs			
Παράμετροι Προκατασκευασμένων Στοιχείων Ω.Σ.								
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$E$ (Gpa)	$\nu$	Μήκος Στοιχείου (m)		Πάχος Στοιχείου (cm)			
12.17	20	0.2	1.5		35			
Παράμετροι Ασπίδας								
$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$E$ (Gpa)	$\nu$	Μήκος Ασπίδας (m)		Πάχος Ασπίδας (cm)			
40.4	210	0.2	10.5		10			

## 5.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις δύο διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής του ενέματος και για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης. Δίνεται έμφαση στην ποιοτική διαφορά των αποτελεσμάτων, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του ενέματος στις καθιζήσεις και τα εντατικά μεγέθη κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας.

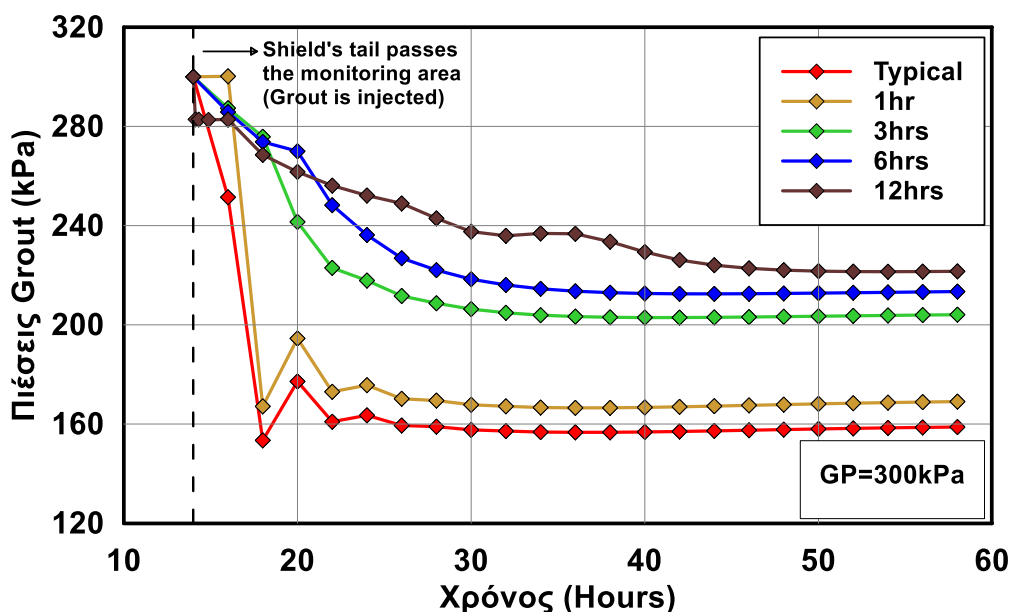


Διάγραμμα 5.11 Εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για τιμή εισαγωγής 200kPa.

Στο διάγραμμα 5.11 παρατηρούμε την εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για αρχική πίεση εισαγωγής 200kPa. Η χρονική στιγμή  $t=0$  αντιστοιχεί στην εκσκαφή της διατομής κάτω από το σημείο αναφοράς, ενώ η εισαγωγή του ενέματος γίνεται τη χρονική στιγμή  $t=14$ hrs, όταν δηλαδή διέρχεται από το σημείο αναφοράς η ουρά της ασπίδας. Παρατηρούμε ότι η τυπική καμπύλη των Kasper & Meschke (κόκκινη) και η καμπύλη σκλήρυνσης σε 1hr (χρυσή) παρουσιάζουν μια απότομη πτώση της αρχικής τους πίεσης και συγκλίνουν σχετικά γρήγορα σε μια τιμή περίπου στα 150kPa. Αντίθετα, οι καμπύλες σκλήρυνσης των 3,6 και 12hrs έχουν μια πιο ομαλή πτώση της αρχικής τους πίεσης και συγκλίνουν πιο αργά στην τελική τους τιμή που είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δύο πρώτων καμπυλών. Ο λόγος που συντελείται αυτή η πιο αργή-ομαλή πτώση στις καμπύλες που σκληραίνουν πιο αργά είναι το γεγονός ότι παραμένουν σε μια ρευστή κατάσταση περισσότερη ώρα. Έτσι, το ένεμα σε αυτές τις καμπύλες είναι σχετικά अपαραμόρφωτο τις πρώτες ώρες, επομένως διατηρεί πιέσεις κοντά στην αρχική του. Από την άλλη μεριά, οι καμπύλες του Meschke και της 1hr σκληραίνουν πολύ πιο γρήγορα αποκτώντας μια πιο στερεή μορφή, με αποτέλεσμα να έχουν ένα μεγάλο μέτρο ελαστικότητας από τις πρώτες ώρες. Έτσι, για να εκτονώσουν την αρχική τους πίεση απαιτούνται μικρές παραμορφώσεις, οι οποίες πλέον μπορούν να εκδηλωθούν αφού έχει στερεοποιηθεί το ένεμα και έτσι παρατηρείται αυτή η απότομη πτώση στην πίεση των στοιχείων του ενέματος αυτών των δύο καμπυλών.

Στο διάγραμμα 5.12 παρατηρούμε την εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για αρχική πίεση εισαγωγής 300kPa. Η χρονική στιγμή  $t=0$  αντιστοιχεί στην εκσκαφή της διατομής κάτω από το σημείο αναφοράς, ενώ η εισαγωγή του ενέματος γίνεται τη χρονική στιγμή  $t=14$ hrs, όταν δηλαδή διέρχεται από το σημείο αναφοράς η ουρά της ασπίδας.

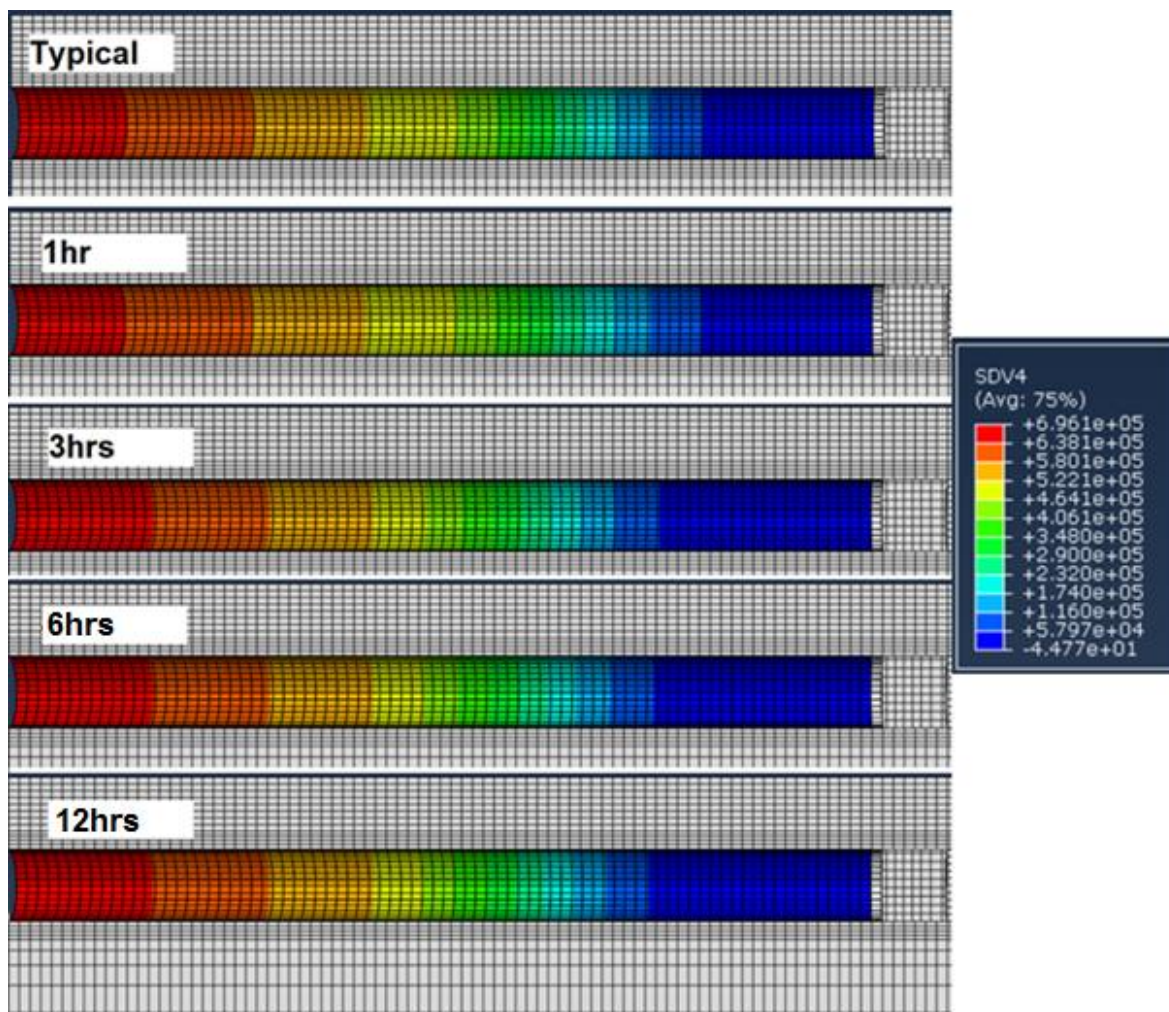
Σε αντιστοιχία με το διάγραμμα 5.11 μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τις πρώτες δύο καμπύλες, του Meschke και της 1hr, και τις υπόλοιπες τρεις, των 3,6 και 12hrs. Παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτες καμπύλες παρουσιάζουν απότομη πτώση ενώ οι υπόλοιπες τρεις που σκληραίνουν με πιο αργό ρυθμό έχουν μια πιο ομαλή μείωση της αρχικής τους πίεσης καταλήγοντας σε μια τιμή περί των 210kPa, έναντι 160kPa των δύο άλλων καμπυλών (Typical και 1hr) που σκληραίνουν πιο γρήγορα.



Διάγραμμα 5.12 Εξέλιξη της πίεσης του ενέματος για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης για τιμή εισαγωγής 300kPa.

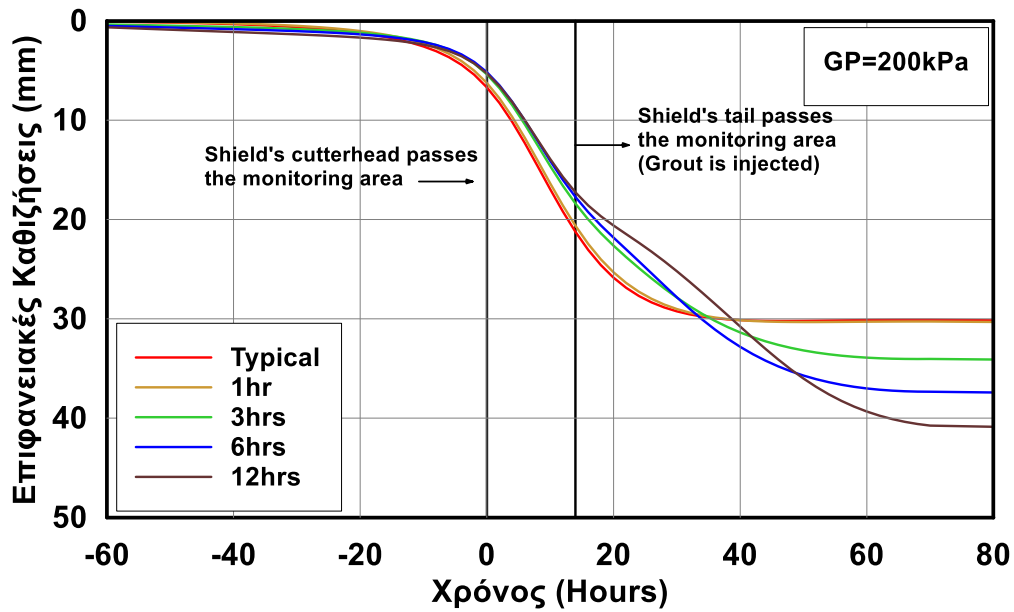
Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζονται πέντε στιγμιότυπα από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus, όπου βλέπουμε την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το EPB. Τα στιγμιότυπα αυτά είναι πρακτικά ανεξάρτητα από την αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος, αφού αφορούν μόνο στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Από αυτά τα στιγμιότυπα προκύπτει ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που πρακτικά επιβεβαιώνει τα παραπάνω διαγράμματα. Ουσιαστικά κοντά στο μέτωπο με το μπλε χρώμα απεικονίζεται το ένεμα που βρίσκεται σε σχετικά ρευστή κατάσταση. Παρατηρούμε ότι τα δύο πρώτα στιγμιότυπα έχουν περίπου την ίδια μπλε περιοχή, επιβεβαιώνοντας έτσι την παρόμοια συμπεριφορά που παρατηρήσαμε στα διαγράμματα 5.11 και 5.12. Παράλληλα, τα στιγμιότυπα των 3,6 και 12hrs έχουν επίσης σχεδόν την ίδια μπλε περιοχή, η οποία συναντάται σε μεγαλύτερο μήκος από την αντίστοιχη των δύο πρώτων στιγμιότυπων. Έτσι, βλέπουμε ότι πρακτικά ομαδοποιούνται οι καμπύλες των Meschke και της παραλλαγής της 1hr, όπως αντίστοιχα και οι τρεις καμπύλες που αντιστοιχούν στις παραλλαγές των 3,6 και 12hrs. Αντίθετα, βλέπουμε ότι στην αρχή της σήραγγας, όπου πλέον έχει περάσει αρκετός χρόνος από την εισαγωγή του ενέματος και οι πέντε καμπύλες έχουν παρόμοια κόκκινη περιοχή. Σημειώνεται ότι η τυπική καμπύλη σε αντιστοιχία με τις άλλες τέσσερις σκληραίνει στις 2 ώρες που είναι ένα κρίσιμο μέγεθος στις συγκεκριμένες αναλύσεις αφού είναι ο χρόνος στον οποίο γίνεται η τυπική προχώρηση του EPB που αντιστοιχεί στο μήκος ενός δακτυλίου προκατασκευασμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.





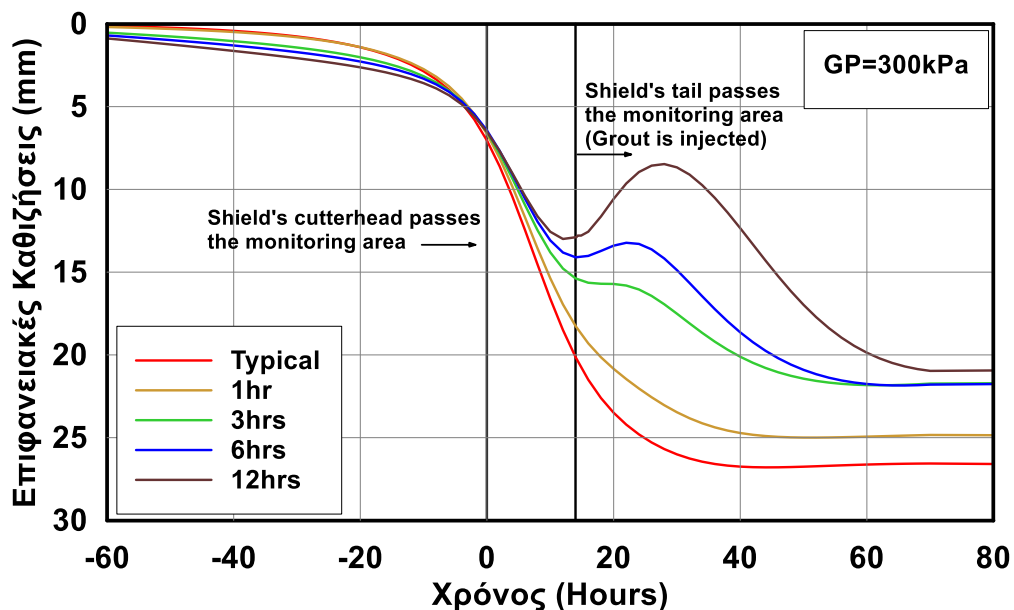
Εικόνα 5.5 Παρουσίαση της σκλήρυνσης, δηλαδή της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης, στον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus.

Στα διαγράμματα 5.13 και 5.14 παρατηρούμε την εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου αναφοράς κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες και πίεση εισαγωγής 200kPa και 300kPa αντίστοιχα. Στο πρώτο διάγραμμα που αντιστοιχεί στα 200kPa βλέπουμε μια σαφή μείωση των καθιζήσεων όσο πιο γρήγορα σκληραίνει το ένεμα. Εξαίρεση αποτελούν οι καμπύλες του Meschke και της παραλλαγής της 1hr καθώς πρακτικά ταυτίζονται στο διάγραμμα, λόγω της σχεδόν ίδιας καμπύλης σκλήρυνσης που έχουν, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.4 και 3.5 του κεφαλαίου 3.2.6.2. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι από τη στιγμή της εισαγωγής του ενέματος για  $t=14\text{hrs}$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $t=30\text{hrs}$ , η καθίζηση του επιφανειακού σημείου είναι μικρότερη όσο πιο αργά σκληραίνει το ένεμα. Στη συνέχεια όμως, οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην αργή σκλήρυνση αυξάνουν τις μετακινήσεις τους αλλάζοντας τελείως την εικόνα που επικρατεί τις πρώτες ώρες μετά την εισαγωγή του ενέματος. Αυτή η καθυστέρηση στην εκδήλωση των τελικών καθιζήσεων για τις καμπύλες των 3,6 και 12hrs οφείλεται στο γεγονός ότι οι καθιζήσεις εκδηλώνονται κυρίως κατά τη στερεοποίηση του ενέματος. Έτσι, όσο πιο πολύ αργεί να επέλθει η σκλήρυνση, αντίστοιχα καθυστερεί και η στερεοποίηση, άρα και οι μετακινήσεις.



Διάγραμμα 5.13 Εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου αναφοράς κατά τη διάρκεια διάνοιξης σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες και πίεση εισαγωγής 200kPa.

Στο διάγραμμα 5.14 που παρουσιάζεται η εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου για πίεση εισαγωγής 300kPa παρατηρούμε μια διαφορετική συμπεριφορά με το αντίστοιχο διάγραμμα των 200kPa.

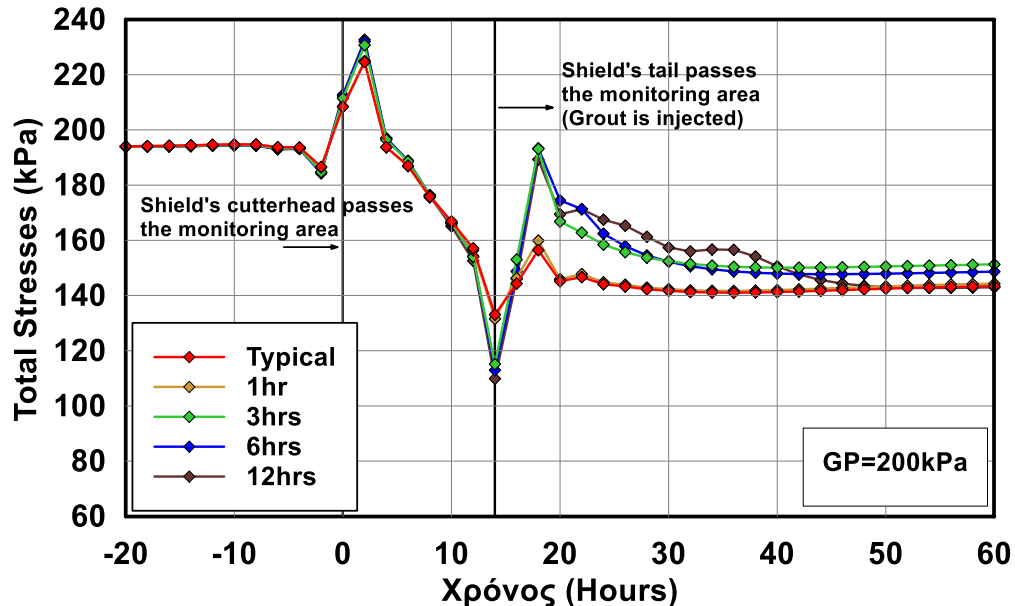


Διάγραμμα 5.14 Εξέλιξη της καθίζησης ενός επιφανειακού σημείου αναφοράς κατά τη διάρκεια διάνοιξης σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες και πίεση εισαγωγής 300kPa.

Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι οι τελικές καθιζήσεις μειώνονται όσο αυξάνεται ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος, γεγονός που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τα αποτελέσματα για τα 200kPa. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι καμπύλες των 3,6 και 12hrs μετά την εισαγωγή του ενέματος στο χρονικό διάστημα από  $t=20$ hrs έως  $t=40$ hrs, δηλαδή γενικά περίπου μια μέρα μετά την εισαγωγή του ενέματος. Σε αυτό το διάστημα παρατηρούμε μια σημαντική μείωση των υφιστάμενων καθιζήσεων, προκαλώντας ουσιαστικά τοπικές ανυψώσεις του εδάφους (blow-out

effect). Ο λόγος που εκδηλώνεται αυτή η συμπεριφορά είναι ο συνδυασμός της υψηλής πίεσης εισαγωγής του ενέματος, σημαντικά μεγαλύτερης από την τοπική ολική τάση στην περιοχή, και της αργής σκλήρυνσης του ενέματος, που έχει ως αποτέλεσμα να είναι σε μια ρευστή κατάσταση για περισσότερο χρόνο. Έτσι, η υψηλή πίεση λειτουργεί ως ένα σημαντικό φορτίο στο περιβάλλον έδαφος το οποίο έχει αντίθετη φορά με τις καθιζήσεις, και το οποίο ασκείται για μεγάλο χρόνο αφού όντας σε σχετικά ρευστή κατάσταση δεν μπορεί να εκτονώσει πλήρως την αρχική πίεση. Ως εκ τούτου, το υψηλό αυτό φορτίο προκαλεί αλλαγή της διεύθυνσης των μετακινήσεων στην επιφάνεια, οδηγώντας σε τοπική ανύψωση, η οποία σε μεγάλες τιμές μπορεί να αποδειχθεί δυσμενέστερη από αντίστοιχη εκδήλωση καθιζήσεων. Ουσιαστικά, βλέπουμε ότι για τις καμπύλες αργής σκλήρυνσης (3,6 και 12hrs) έχουμε διαφορετικό μηχανισμό εκδήλωσης των καθιζήσεων για τις δύο διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής, δηλαδή των 200 και 300kPa.

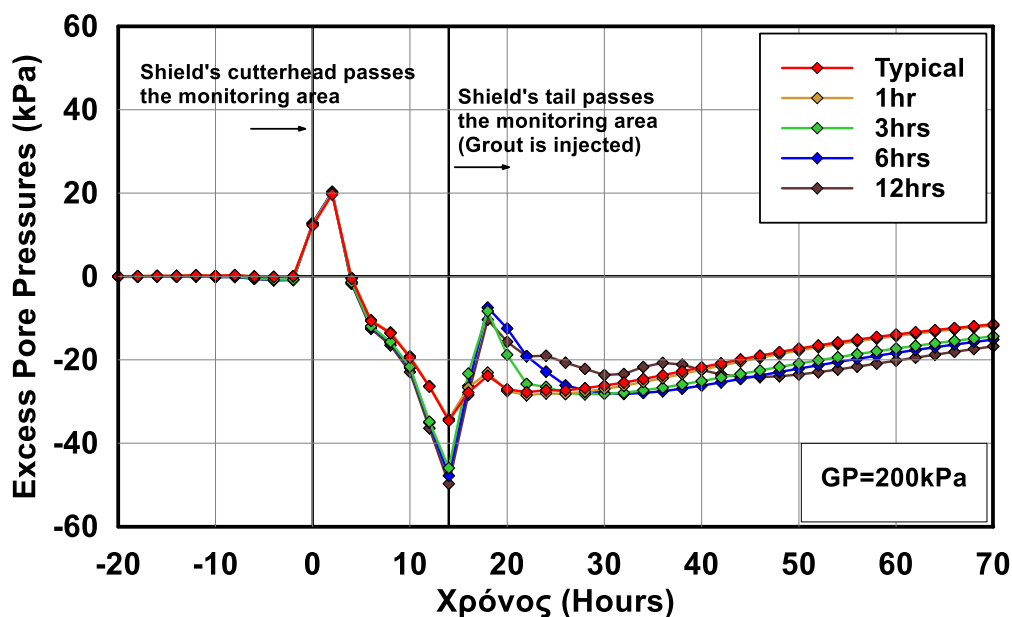
Στο διάγραμμα 5.15 παρατηρούμε την εξέλιξη των ολικών τάσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa. Σε συνέχεια των συμπερασμάτων των προηγούμενων διαγραμμάτων 5.11 και 5.12 παρατηρούμε την ομαδοποίηση των καμπύλων του Meschke και της 1hr, καθώς και των καμπυλών των 3,6 και 12hrs. Οι ουσιαστικές μεταβολές εμφανίζονται λίγο πριν την εισαγωγή του ενέματος, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t=14$ hrs, όπου η θέση της ουράς της ασπίδας βρίσκεται στη θέση του σημείου αναφοράς. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στις καμπύλες των 3,6 και 12hrs υπάρχουν πολύ έντονες μεταβολές των ολικών τάσεων με απότομη πτώση πριν την εισαγωγή του ενέματος, ενώ αμέσως μετά την εισαγωγή υπάρχει μια αύξηση της τάξης των 80kPa σε λίγες μόνο ώρες. Αντίστοιχα, στην τυπική καμπύλη καθώς και αυτή της 1hr η αύξηση ήταν μόλις της τάξεως των 30kPa. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις μεταβολές των πιέσεων πόρων.



Διάγραμμα 5.15 Εξέλιξη των ολικών τάσεων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa.

Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 5.16 βλέπουμε την ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παρατηρούμε ότι λίγο πριν την εισαγωγή του ενέματος αναπτύσσονται μεγαλύτερες υποπίεσεις στις καμπύλες των 3,6 και 12hrs έναντι των άλλων δύο, ενώ αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος οι αντίστοιχες υποπίεσεις μειώνονται σημαντικά, αφού από την τιμή -50kPa καταλήγουν στην τιμή -10kPa. Αυτή η αύξηση των τιμών στις καμπύλες που

αντιστοιχούν στην αργή σκλήρυνση (3,6 και 12hrs) οφείλεται στην πίεση που ασκεί το ένεμα στο περιβάλλον έδαφος για μεγάλο διάστημα, αφού λόγω της αργής σκλήρυνσης λειτουργεί ως σχετικά ρευστό που δε μπορεί να παραμορφωθεί και άρα να εκτονώσει την πίεση του άμεσα. Παράλληλα όλη αυτή η συμπεριφορά έχει ως αποτέλεσμα να διαταράσσει το περιβάλλον έδαφος, με αποτέλεσμα λίγο πριν την εισαγωγή του ενέματος να υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για νερό, που φαίνεται με τις μεγάλες υποπίεσεις, στις καμπύλες των 3,6 και 12hrs. Αντίθετα, οι καμπύλες του Meschke και της 1hr λόγω της ταχείας τους σκλήρυνσης προκαλούν μικρότερη διαταραχή στο περιβάλλον έδαφος, έχοντας έτσι πιο ομαλές μεταβολές των πιέσεων πόρων.



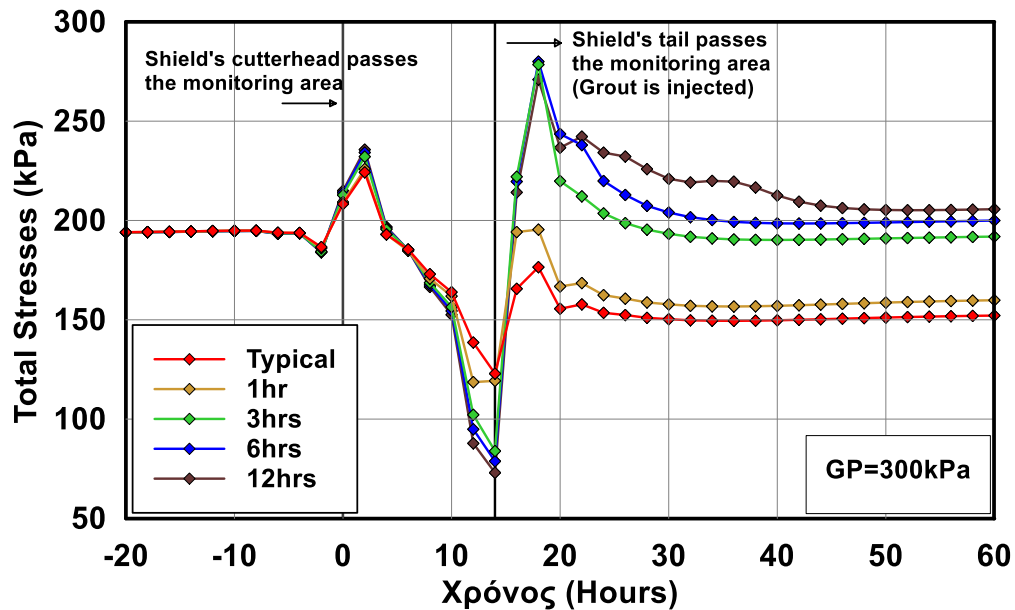
Διάγραμμα 5.16 Εξέλιξη των υπερπιέσεων πόρων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa.

Στο διάγραμμα 5.17 παρατηρούμε την εξέλιξη των ολικών τάσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa. Παρατηρούμε ότι παρόλο που και σε αυτό το διάγραμμα υπάρχει μια σχετικά κοινή συμπεριφορά για την ομάδα καμπύλων του Meschke και της παραλλαγής της 1hr, είναι εμφανής η διαφορά τους μετά την εισαγωγή του ενέματος, σε αντίθεση με τα προηγούμενα διαγράμματα. Συνολικά βέβαια, βλέπουμε ξανά μια κοινή πορεία για αυτές τις δύο καμπύλες, όπως αντίστοιχα και για αυτές των 3,6 και 12hrs. Συγκεκριμένα, η μεγάλη αρχική πίεση του ενέματος έχει οδηγήσει σε πολύ μεγάλες αυξήσεις των ολικών τάσεων της τάξης των 200kPa μετά την εισαγωγή του ενέματος στις καμπύλες αργής σκλήρυνσης, τη στιγμή που η τυπική καμπύλη περιορίζεται σε 50kPa και η 1hr σε 75kPa. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το αντίστοιχο διάγραμμα 5.15 για τα 200kPa. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι ολικές τάσεις στις καμπύλες 3,6 και 12hrs μετά την εισαγωγή εκτοξεύονται σε τιμές σημαντικά μεγαλύτερες των αρχικών γεωστατικών μαρτυρώντας έτσι μεγάλες υπερπίεσεις πόρων.

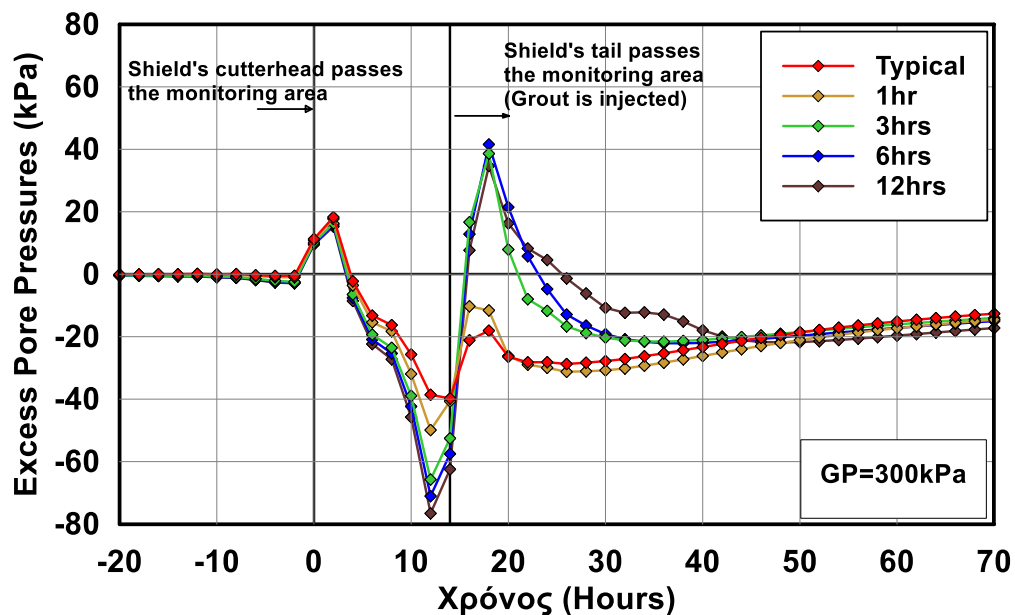
Πράγματι, στο διάγραμμα 5.18 βλέπουμε ότι οι καμπύλες αργής σκλήρυνσης έχουν αναπτύξει υπερπίεσεις πόρων της τάξης των 40kPa αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος. Σε όλα τα διαγράμματα υπερπιέσεων πόρων στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μετά την εισαγωγή του ενέματος υπήρχε αύξηση των πιέσεων, αλλά σε όλα αυτά η τελική τιμή παρέμενε αρνητική. Έτσι, στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι σαφές ότι επειδή ασκείται στο έδαφος ένα πολύ μεγάλο φορτίο (λόγω της αρχικής πίεσης των 300kPa) για μεγάλο χρονικό διάστημα (λόγω της αργής



σκλήρυνσης του ενέματος) οι υποπίεσεις μετατρέπονται σε μερικές ώρες μόνο σε σημαντικές υπερπίεσεις. Παρατηρούμε βέβαια, ότι μετά από ένα διάστημα οι υπερπίεσεις μειώνονται απότομα με αποτέλεσμα να γίνουν ξανά υποπίεσεις, λόγω της τελικής σκλήρυνσης του ενέματος. Μάλιστα από τη χρονική στιγμή  $t=40\text{hrs}$ , περίπου μια ημέρα δηλαδή από την εισαγωγή του ενέματος ( $t=14\text{hrs}$ ) οι πέντε καμπύλες συγκλίνουν. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλη αυτή η επίδραση που ασκεί η υψηλή πίεση του ενέματος όταν αργεί να σκληρύνει έχει ως αποτέλεσμα οι τελικές ολικές τάσεις να είναι πρακτικά ίδιες με τις αρχικές γεωστατικές στη θέση στη στέψη, φορτίζοντας με μεγαλύτερα φορτία την τελική επένδυση.

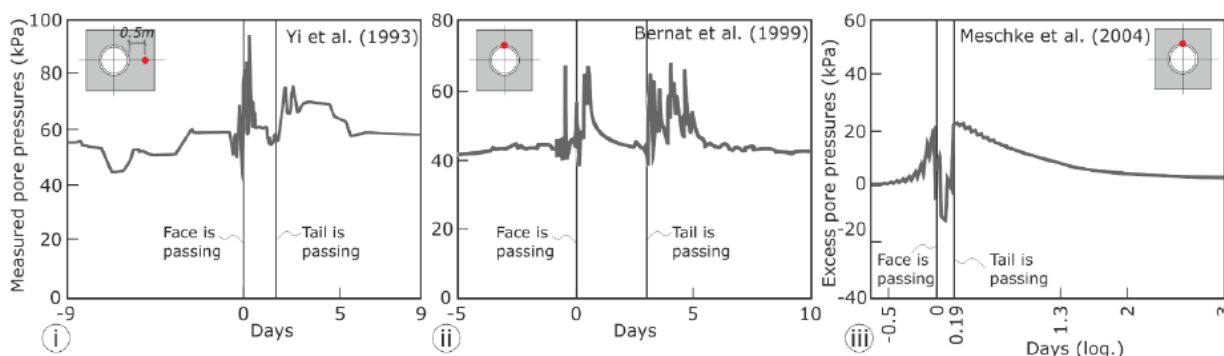


Διάγραμμα 5.17 Εξέλιξη των ολικών τάσεων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa.



Διάγραμμα 5.18 Εξέλιξη των υπερπίεσεων πόρων ενός σημείου της στέψης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa.

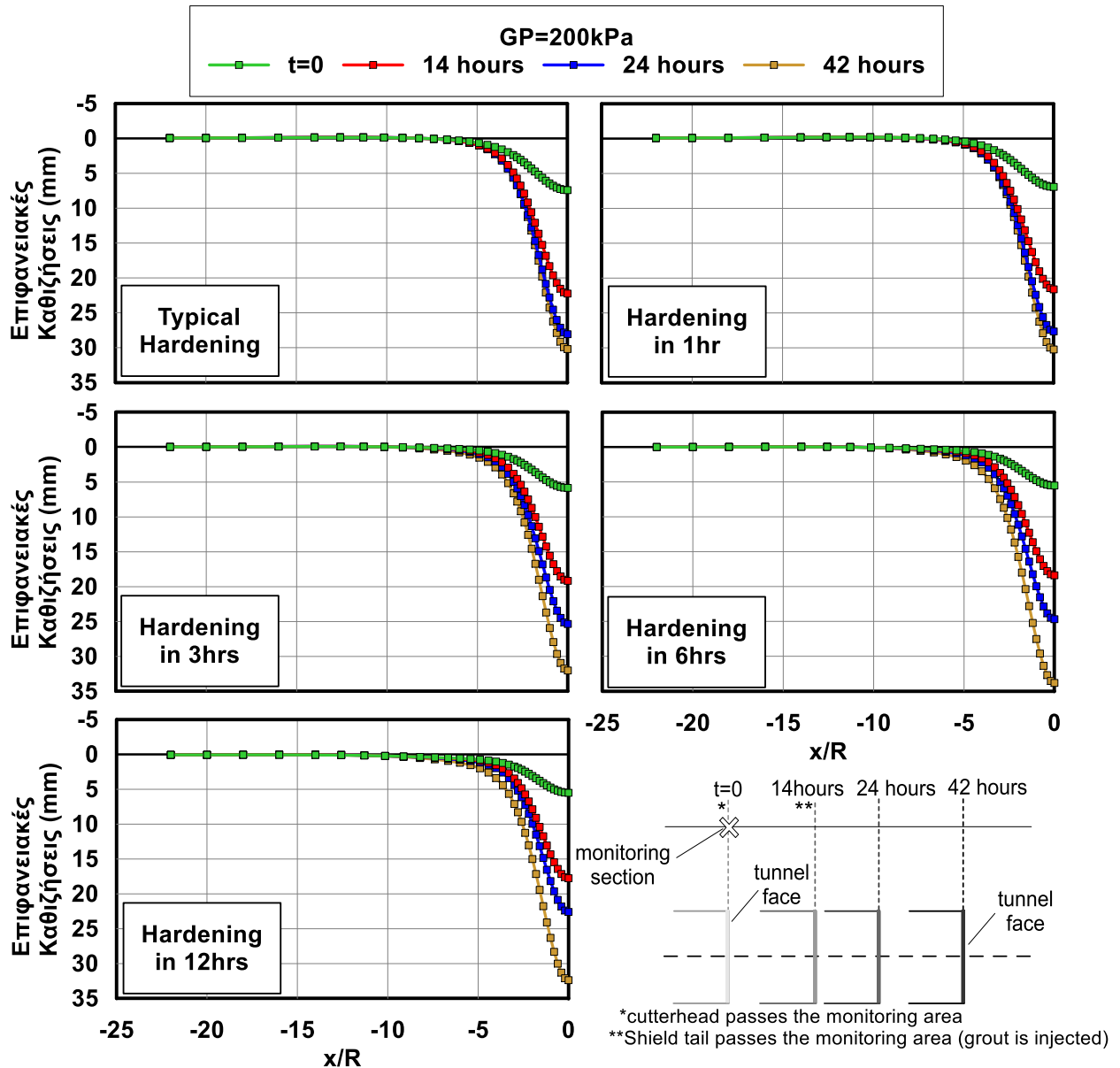
Στην εικόνα 5.6 παρατίθενται χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία που αφορούν την εξέλιξη των πιέσεων πόρων στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με χρήση μηχανήματος EPB. Τα αποτελέσματα από τον (Bernat et al. 1999) και τον (Kasper & Meschke 2004) που αφορούν στην εξέλιξη των πιέσεων πόρων στη στέψη έρχονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ως προς την τάση που παρουσιάζουν στην εξέλιξη των μεγεθών.



Εικόνα 5.6 Εξέλιξη πιέσεων πόρων (i) κοντά στο πλάι της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με EPB στη Σανγκάη (Yi et al. 1993) (ii) στη στέψη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη της με hydroshield μηχανήμα (Bernat et al. 1999) (iii) στη στέψη της σήραγγας με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Kasper & Meschke 2004)

Στο διάγραμμα 5.19 απεικονίζονται οι εγκάρσιες επιφανειακές μετακινήσεις σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές, που παρουσιάζονται στο σκαρίφημα, για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για αρχική πίεση ενέματος 200kPa. Παρατηρούμε ότι στις δύο πρώτες καμπύλες μετά το πρώτο 24ωρο από τη στιγμή που η κεφαλή κοπής του EPB διέρχεται από το σημείο αναφοράς, έχουμε μια σαφή εικόνα της μορφής της τελικής καμπύλης, αφού όταν πλέον σταθεροποιηθεί στις 42ώρες υπάρχει μόνο μια μικρή αύξηση των μέγιστης καθίζησης της τάξης των 2mm. Αντίθετα στις καμπύλες που η σκλήρυνση του ενέματος επιτελείται σε 3,6 ή 12hrs βλέπουμε ότι παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή στις κατακόρυφες μετακινήσεις που αντιστοιχούν στις 24 και 42 ώρες. Ουσιαστικά αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην αργή σκλήρυνση του ενέματος, που όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, παραμένοντας περισσότερη ώρα στη ρευστή κατάσταση όπου δε μπορεί να παραμορφωθεί, δεν επιτρέπει την εκδήλωση σημαντικών καθιζήσεων μέχρι να αρχίσει να στερεοποιείται. Έτσι, στις καμπύλες που αντιστοιχούν στο ένεμα αργής σκλήρυνσης ένα μεγάλο ποσοστό της τελικής καθίζησης επιτυγχάνεται μετά τις 24ώρες σε αντίθεση με τις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης. Γι' αυτό το λόγο, στις 24 ώρες μετά τη διέλευση της κεφαλής κοπής του EPB από το σημείο αναφοράς, οι καθιζήσεις στο ένεμα ταχείας σκλήρυνσης (typical και 1hr) είναι μεγαλύτερες από τις καθιζήσεις στο ένεμα αργής σκλήρυνσης (3,6 και 12hrs), σε αντίθεση με τις 42 ώρες που αυτή η κατάσταση έχει αντιστραφεί. Σε ότι αφορά τη χρονική στιγμή  $t=0$ , δηλαδή τη στιγμή που η κεφαλή κοπής του EPB διέρχεται από το σημείο αναφοράς, παρατηρούμε ότι η κατανομή των εγκάρσιων κατακόρυφων μετακινήσεων είναι πρακτικά η ίδια. Ουσιαστικά, για  $t=0$  το σημείο αναφοράς βρίσκεται στη θέση του μετώπου της σήραγγας, το οποίο πρακτικά δεν επηρεάζεται από το ένεμα, αφού η εισαγωγή του ενέματος γίνεται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το μέτωπο.

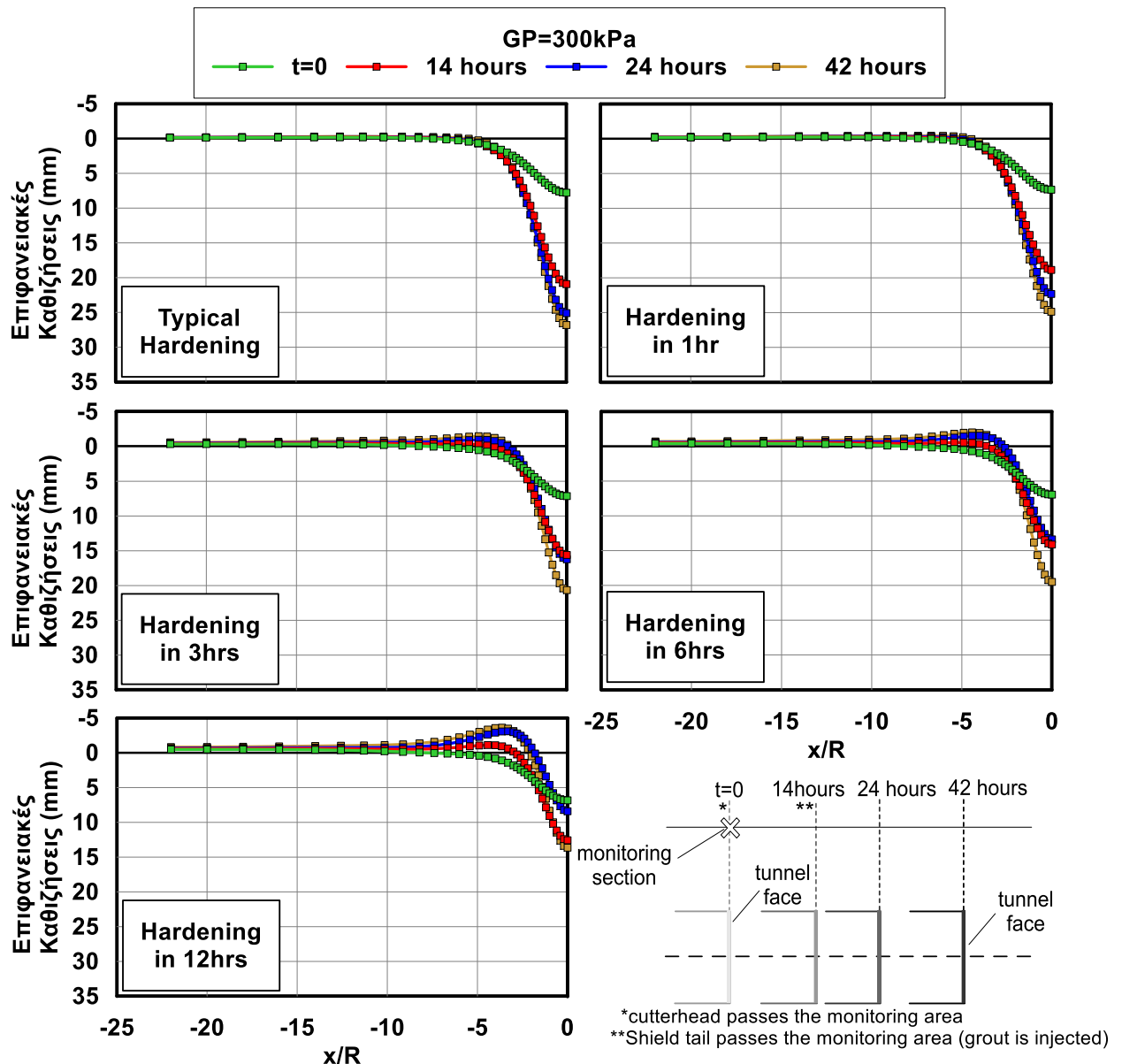




Διάγραμμα 5.19 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών μετακινήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις πέντε καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 200kPa.

Στο διάγραμμα 5.20 απεικονίζονται οι εγκάρσιες επιφανειακές μετακινήσεις σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές, που παρουσιάζονται στο σκαρίφημα, για τις πέντε διαφορετικές καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για αρχική πίεση ενέματος 300kPa. Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα του αντίστοιχου διαγράμματος 5.19 για την πίεση εισαγωγής των 200kPa, παρατηρούμε ότι οι κατανομές των καμπυλών του Meschke (typical) και της 1hr έχουν την ίδια μορφή τόσο στα 200 όσο και στα 300kPa με τη διαφορά βέβαια ότι για πίεση εισαγωγής 300kPa οι καθιζήσεις είναι μικρότερες. Εκεί που παρατηρείται μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά για τη μορφή των μετακινήσεων για πιέσεις εισαγωγής 200 και 300kPa είναι στο ένεμα αργής σκλήρυνσης. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος, και άρα όσο περισσότερο χρόνο το ένεμα διατηρείται σε μια κατάσταση όπου έχει σχετικά ρευστή συμπεριφορά υπάρχει μείωση της τελικής καθίζησης, και κυρίως τοπικές ανυψώσεις του εδάφους, η μελέτη των οποίων είναι πολλή σημαντική. Ο λόγος που εκδηλώνεται αυτή η συμπεριφορά είναι ο συνδυασμός της υψηλής πίεσης εισαγωγής του ενέματος, σημαντικά μεγαλύτερης από την τοπική ολική τάση στην περιοχή, και της αργής σκλήρυνσης του ενέματος,

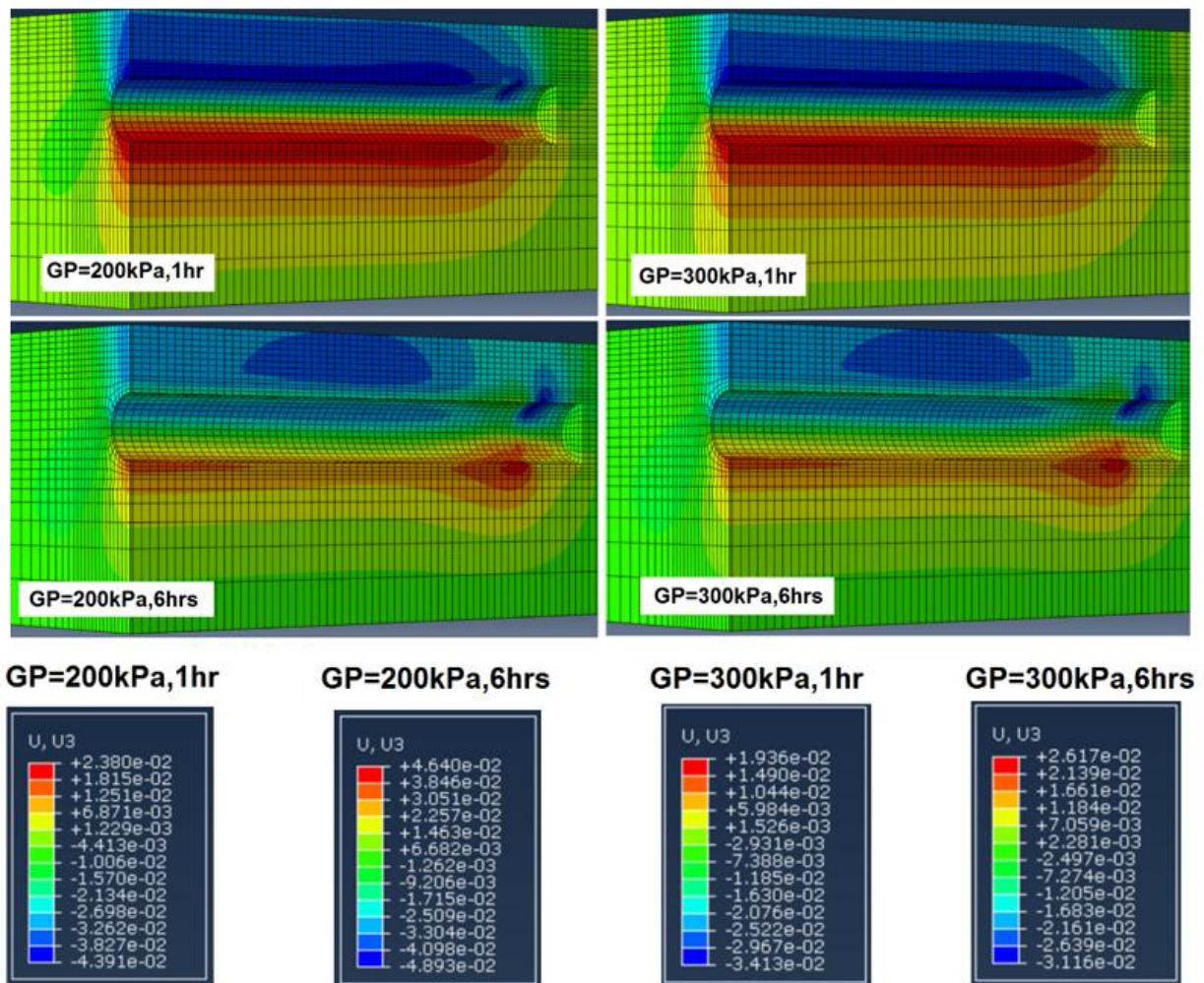
που έχει ως αποτέλεσμα να είναι σε μια ρευστή κατάσταση για περισσότερο χρόνο. Έτσι, η υψηλή πίεση λειτουργεί ως ένα σημαντικό φορτίο στο περιβάλλον έδαφος το οποίο έχει αντίθετη φορά με τις καθιζήσεις, και το οποίο ασκείται για μεγάλο χρόνο αφού όντας σε σχετικά ρευστή κατάσταση δεν μπορεί να εκτονώσει πλήρως την αρχική πίεση. Ως εκ τούτου, το υψηλό αυτό φορτίο προκαλεί ανυψώσεις στο έδαφος, οι οποίες αυξάνονται από 1 έως 4 χιλιοστά όσο αυξάνεται ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος για τις καμπύλες των 3,6 και 12hrs. Οι ανυψώσεις αυτές προκαλούν πολλά προβλήματα εν γένει και πολλές φορές είναι δυσμενέστερες ακόμα και από σχετικά εκτεταμένες καθιζήσεις, αφού οξύνουν το πρόβλημα των διαφορικών καθιζήσεων επηρεάζοντας τις υφιστάμενες κατασκευές.



Διάγραμμα 5.20 Εξέλιξη των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές για τις πέντε καμπύλες σκλήρυνσης του ενέματος για πίεση εισαγωγής 300kPa.

Στην εικόνα 5.7 βλέπουμε χαρακτηριστικά τέσσερα στιγμιότυπα από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus. Παρατηρούμε την εντελώς διαφορετική κατανομή που έχουν οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την ίδια πίεση εισαγωγής αλλά για διαφορετική καμπύλης

σκλήρυνσης, έχοντας επιλέξει μια ταχείας σκλήρυνσης (1hr) και μία αργής σκλήρυνσης (6hrs), επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διαγράμματα αυτού του κεφαλαίου.



Εικόνα 5.7 Παρουσίαση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων για δύο καμπύλες σκλήρυνσης και δύο πιέσεις εισαγωγής από τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

### 5.2.3 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται ορισμένα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη Β' ομάδα αναλύσεων. Συγκεκριμένα:

- Η κατανομή των επιφανειακών μετακινήσεων στη διαμήκη διεύθυνση για τις πέντε καμπύλες σκλήρυνσης παρουσιάζει πολύ σημαντικές διαφορές για τις δύο διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής, 200 και 300kPa. Συγκεκριμένα, για τα 200kPa οι τελικές καθιζήσεις αυξάνονται όσο περισσότερο διαρκεί ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος, ενώ σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου έχουν σταθερή διεύθυνση. Αντίθετα, στα 300kPa παρατηρούμε ότι οι καμπύλες αργής σκλήρυνσης (3,6,12hrs) μετά την εισαγωγή του ενέματος οδηγούν σε τοπικές ανυψώσεις του εδάφους, αλλάζοντας έτσι τη διεύθυνση των προηγούμενων μετακινήσεων. Έτσι, οι τελικές καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες για τις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης (typical, 1hr), οι οποίες δεν παρουσιάζουν ούτε στα 300kPa ανύψωση του εδάφους. Ουσιαστικά δημιουργείται διαφορετικός μηχανισμός εκδήλωσης των επιφανειακών

μετακινήσεων με βάση την αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος. (Διαγράμματα 5.13, 5.14, Εικόνα 5.6)

- Στην εγκάρσια διεύθυνση οι κατακόρυφες επιφανειακές καθιζήσεις παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή των διαμηκών. Έτσι, στα 200kPa παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος σκλήρυνσης, τόσο περισσότερο αυξάνει η τελική τιμή των μετακινήσεων. Ενδιαφέρον παρατηρείται στο γεγονός ότι λόγω της αργής σκλήρυνσης, το μεγαλύτερο ποσοστό των τελικών καθιζήσεων συντελείται αρκετά πιο αργά στο ένεμα αργής σκλήρυνσης (όπου η στερεοποίηση του ενέματος ολοκληρώνεται πιο αργά) από ότι στις καμπύλες του ενέματος ταχείας σκλήρυνσης. Η εικόνα στα 300kPa είναι τελείως διαφορετική. Συγκεκριμένα, οι καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά με τις αντίστοιχες των 200kPa έχοντας βέβαια μικρότερες συγκλίσεις. Στις καμπύλες όμως που αντιστοιχούν στο ένεμα αργής σκλήρυνσης η κατανομή είναι τελείως διαφορετική έχοντας τοπικές ανυψώσεις οι οποίες αυξάνονται όσο αυξάνει ο χρόνος σκλήρυνσης του ενέματος. (Διαγράμματα 5.19, 5.20, Εικόνα 5.6)
- Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση των καθιζήσεων γίνεται σαφές ότι η αργή σκλήρυνση του ενέματος σε συνδυασμό με υψηλή πίεση εισαγωγής του ενέματος οδηγεί σε πολλή δυσμενή συμπεριφορά του εδάφους. Συγκεκριμένα, οι ανυψώσεις του εδάφους (blow out effect) είναι ιδιαίτερα δυσμενείς για τις υφιστάμενες κατασκευές αφού οξύνει τις διαφορικές καθιζήσεις. (Διαγράμματα 5.13, 5.14, 5.19, 5.20, Εικόνα 5.6)
- Η εξέλιξη της πίεσης του ενέματος επηρεάζεται σημαντικά από το χρόνο σκλήρυνσής του. Συγκεκριμένα, ανεξάρτητα από την πίεση εισαγωγής παρατηρούμε ότι για τις καμπύλες αργής σκλήρυνσης το ένεμα ισορροπεί σε μεγαλύτερη τάση από ότι στις αντίστοιχες καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης. Έτσι, φορτίζεται η τελική επένδυση με μεγαλύτερο φορτίο, αυξάνοντας επομένως το κόστος της, αφού πρέπει να παραλάβει μεγαλύτερες τάσεις. Σημειώνεται βέβαια ότι για τα 300kPa η ισορροπία του ενέματος γίνεται σε μεγαλύτερη τάση από ότι αντίστοιχα στα 200kPa. (Διαγράμματα 5.11, 5.12)
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υπερπιέσεις πόρων. Και για τις δύο πιέσεις εισαγωγής του ενέματος, είναι εμφανές ότι για τις καμπύλες αργής σκλήρυνσης (3,6 και 12hrs) αναπτύσσονται μεγαλύτερες υποπιέσεις πόρων πριν την εισαγωγή του ενέματος και παράλληλα μεγαλύτερες αυξήσεις των υφιστάμενων πιέσεων πόρων αμέσως μετά την εισαγωγή του, σε αντίθεση με τις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης (typical και 1hr). Παρόλα αυτά, για τα 300kPa παρατηρούμε ότι στις καμπύλες αργής σκλήρυνσης, αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος η αύξηση των υφισταμένων πιέσεων πόρων οδηγεί σε υπερπιέσεις, σε αντίθεση με τα 200kPa όπου παρά τη μεγάλη αύξηση, οι πιέσεις πόρων παραμένουν σε αρνητικές τιμές. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο πολύ μεγάλο φορτίο που ασκεί η μεγάλη πίεση του ενέματος για τα 300kPa έναντι των 200kPa στο περιβάλλον έδαφος για μεγάλη χρονική διάρκεια, λόγω της αργής σκλήρυνσής του. (Διαγράμματα 5.16, 5.18)



## 6 Συμπεράσματα & Προτάσεις

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από όλες τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα, γίνονται προτάσεις για μελλοντικές διπλωματικές εργασίες ώστε να διερευνηθούν περαιτέρω ορισμένες παράμετροι.

### 6.1 Συμπεράσματα

#### 6.1.1 Καθιζήσεις

Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας έχει άμεση συσχέτιση, με όλα τα μεγέθη που μελετήθηκαν παραμετρικά, δηλαδή την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, την αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος καθώς και της καμπύλης σκλήρυνσης του ενέματος. Συγκεκριμένα:

- Η αύξηση της εδαφικής αντοχής συνεπάγεται μειωμένες καθιζήσεις από την αρχή της διάνοιξη της σήραγγας, δηλαδή τόσο στις προσυγκλίσεις του εδάφους, όσο και στις μετακινήσεις μετά τη διάνοιξη της διατομής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ανεξαρτήτως της εδαφικής αντοχής το ποσοστό των καθιζήσεων επί της τελικής τιμής είναι σταθερό για όλες τις τιμές σε ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία. Συγκεκριμένα, μέχρι να φτάσει το EPB στο σημείο αναφοράς, αναπτύσσεται περίπου το 30% της τελικής καθίζησης. Στη συνέχεια, στο χρονικό διάστημα από την εκσκαφή του μετώπου στο σημείο αναφοράς μέχρι τη διέλευση της ουράς της ασπίδας από το σημείο αναφοράς (όπου γίνεται η εισαγωγή του ενέματος), αναπτύσσεται περίπου το 45% της τελικής καθίζησης. Αυτό το ποσοστό επηρεάζεται σημαντικά από την υπερεκσκαφή που εκτελεί το EPB καθώς και από την κωνικότητα της ασπίδας η οποία πρακτικά ευνοεί μετακινήσεις μέχρι να έρθει σε επαφή το έδαφος με την ασπίδα. Τέλος, μετά την εισαγωγή του ενέματος, εξελίσσεται το 25% της τελικής καθίζησης και οφείλεται στη στερεοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και του ενέματος.
- Η πίεση εισαγωγής του ενέματος είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης και της εξέλιξης των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, έχει μεγάλη σημασία η τιμή της αρχικής πίεσης του ενέματος με την οποία εισπιέζεται στο κενό ασπίδας και εδάφους. Εφόσον είναι μικρότερο από τις τοπικές ολικές τάσεις στο χώρο που εισάγεται, η συνεισφορά του καταλήγει να είναι πολλή μικρή, αφού δεν μπορεί πρακτικά να συγκρατήσει το έδαφος και εκδηλώνονται σημαντικές καθιζήσεις. Αντίθετα, τιμές μεγαλύτερες των τοπικών ολικών τάσεων οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα αφού αναπτύσσουν μικρότερες καθιζήσεις. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική πίεση εισαγωγής του ενέματος, τόσο μικρότερες καθιζήσεις αναπτύσσονται στο πέρας της διάνοιξης.
- Ο χρόνος σκλήρυνσης της καμπύλης του ενέματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, όταν το ένεμα σκληραίνει με αργό ρυθμό παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στις καθιζήσεις ανάλογα με την πίεση εισαγωγής. Για πιέσεις αντίστοιχες με τις γεωστατικές τάσεις στη θέση της στέψης της σήραγγας πριν τη διάνοιξη της, η αργή σκλήρυνση οδηγεί σε εκτεταμένες καθιζήσεις, σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες καθιζήσεις για τις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης. Αντίθετα, για πίεση εισαγωγής σημαντικά μεγαλύτερης από τη γεωστατική τάση στη θέση της στέψης της σήραγγας πριν τη διάνοιξη της, η εξέλιξη των επιφανειακών μετακινήσεων είναι τελείως διαφορετική, αφού παρατηρούμε σημαντικές ανυψώσεις για τις καμπύλες που αντιστοιχούν στο ένεμα αργής σκλήρυνσης. Έτσι, είναι σαφές ότι και στις δύο περιπτώσεις η αργή σκλήρυνση οδηγεί σε δυσμενή αποτελέσματα, είτε πρόκειται για εκτεταμένες καθιζήσεις είτε για επιφανειακές ανυψώσεις που οξύνουν τις



διαφορικές καθιζήσεις για τις υφιστάμενες κατασκευές, σε αντίθεση με την ταχεία σκλήρυνση που ανεξάρτητα με την πίεση εισαγωγής διατηρεί τις καθιζήσεις σε ανεκτά όρια, χωρίς επιπλέον να παρατηρείται ανύψωση του εδάφους.

### 6.1.2 Πλαστικές Παραμορφώσεις

Σε ότι αφορά την πλαστικοποίηση του εδάφους κατά μήκος της διάνοιξης της σήραγγας, καταλήξαμε ότι δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την πίεση εισαγωγής του ενέματος. Για διαφορετικές πιέσεις ενέματος, αλλά ίδια αστράγγιστη διατμητική αντοχή, οι πλαστικές παραμορφώσεις παρουσίαζαν την ίδια εικόνα. Αντίθετα, όταν η διατμητική αντοχή μεταβαλλόταν, παρατηρούσαμε έντονες αλλαγές στις πλαστικές παραμορφώσεις συμπεραίνοντας ότι αφενός ο κρίσιμος παράγοντας για το συγκεκριμένο μέγεθος είναι η εδαφική αντοχή και όχι η πίεση του ενέματος και αφετέρου ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις εκδηλώνονται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους πριν την εισαγωγή του ενέματος, κατά τη διέλευση της ασπίδας. Σε αντιστοιχία με τις καθιζήσεις, οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους αυξάνονται σημαντικά όσο μειώνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

### 6.1.3 Πιέσεις Ενέματος

Παράλληλα, είναι σαφές από τα αποτελέσματα ότι η εξέλιξη της πίεσης του ενέματος επηρεάζεται σημαντικά από την αρχική πίεση του ενέματος αλλά και από το χρόνο σκλήρυνσής του. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά την αρχική πίεση, έχει ιδιαίτερη σημασία για την εξέλιξη της πίεσης του ενέματος η αρχική πίεση εισαγωγής σε σχέση με τις τοπικές ολικές τάσεις στο χώρο εισαγωγής. Αν η αντίστοιχη πίεση είναι μικρότερη από τις τοπικές ολικές τάσεις, η ισορροπία του ενέματος θα επέλθει σε μικρότερη τάση από ότι θα ισορροπούσε για μεγαλύτερες αρχικές πιέσεις. Κατά αυτή την έννοια, η μικρή πίεση εισαγωγής φορτίζει την τελική επένδυση με μικρότερο φορτίο, αλλά επιτρέπει εκτενείς καθιζήσεις με αποτέλεσμα να μην είναι επιθυμητή. Σχετικά με τη σκλήρυνση του ενέματος, στις καμπύλες αργής σκλήρυνσης το ένεμα ισορροπεί σε μεγαλύτερη τάση από ότι στις αντίστοιχες καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης. Έτσι, φορτίζεται η τελική επένδυση με μεγαλύτερο φορτίο, αυξάνοντας επομένως το κόστος της, αφού πρέπει να παραλάβει μεγαλύτερες τάσεις. Έτσι, σε συνδυασμό με τα προβλήματα που προκαλούνται στις επιφανειακές μετακινήσεις από την αργή σκλήρυνση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ταχεία σκλήρυνση του ενέματος είναι ξεκάθαρα πιο επιθυμητή.

### 6.1.4 Πιέσεις Πόρων

Η εξέλιξη των πιέσεων πόρων μπορεί να διαχωριστεί σε τρία σημεία. Συγκεκριμένα, έχει ενδιαφέρον η συμπεριφορά των πιέσεων πόρων κατά την εκσκαφή του μετώπου από το EPB, κατά τη διάρκεια προχώρησης του EPB και τέλος μετά την εισαγωγής του ενέματος. Έτσι, τα συμπεράσματα για κάθε μια κατάσταση είναι:

- Τη στιγμή που το EPB φτάνει στο μέτωπο δημιουργούνται υπερπιέσεις πόρων στη θέση της στέψης της σήραγγας. Αυτές οφείλονται στην πίεση που ασκεί το EPB καθώς και στη γενικότερη αναταραχή που προκαλεί στο χώρο γύρω από τη σήραγγα η εκσκαφή του μετώπου. Σε ότι αφορά την επιρροή του προσομοιώματος, η ανύψωση ορισμένων κόμβων του μετώπου ώστε να υπάρχει συμβατότητα με το EPB (αναλύεται στο διάγραμμα 4.2(ii)), ενδέχεται να συνεισφέρει επίσης σε αυτή την αύξηση των πιέσεων πόρων.
- Αμέσως μετά την εκσκαφή του μετώπου και μέχρι την εισαγωγή του ενέματος, δηλαδή στη διάρκεια που η ασπίδα διέρχεται από το σημείο αναφοράς, παρατηρείται έντονη πτώση των πιέσεων πόρων, αναπτύσσοντας σημαντικές υποπιέσεις. Αυτές οφείλονται στο κενό μεταξύ ασπίδας και περιβάλλοντος εδάφους, που έχει δημιουργηθεί από τις υπερεκσκαφές της

κεφαλής κοπής και την κωνικότητα της ασπίδας. Έτσι, η τάση του εδάφους να παραμορφωθεί μέσω αυτού του κενού οδηγεί σε φαινόμενα αναρρόφησης (suction phenomenon) που συνεπάγονται σημαντικές υποτιπίσεις.

- Μετά την εισαγωγή του ενέματος, οι πιέσεις πόρων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την πίεση εισαγωγής του, όσο και από την καμπύλη σκλήρυνσης που ακολουθεί το ένεμα. Συγκεκριμένα, το ένεμα στις πρώτες ώρες μετά την εισαγωγή του θέλοντας να εκτονώσει την εσωτερική του πίεση, προσπαθεί να παραμορφωθεί. Όμως, λόγω του πολύ μικρού μέτρου ελαστικότητας που έχει τις πρώτες ώρες, χρειάζεται πολύ περισσότερο χώρο από το κενό επένδυσης και εδάφους με αποτέλεσμα σχεδόν όλη η εσωτερική του πίεση να εκφράζεται σε φόρτιση του εδάφους. Είναι προφανές ότι η φόρτιση αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική πίεση του ενέματος, με αποτέλεσμα οι πιέσεις πόρων να αυξάνονται αμέσως μετά την εισαγωγή του ενέματος, με μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρούμε στις πιο μεγάλες πιέσεις εισαγωγής. Παράλληλα, ο χρόνος σκλήρυνσης παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς στις καμπύλες που αντιστοιχούν στο ένεμα αργής σκλήρυνσης, η φόρτιση του εδάφους από το ένεμα παραμένει περισσότερο χρόνο, οδηγώντας σε μεγαλύτερες αυξήσεις των πιέσεων πόρων. Αντίθετα, στις καμπύλες ταχείας σκλήρυνσης, η γρήγορη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος, έχει ως αποτέλεσμα οι υφιστάμενες μικρές παραμορφώσεις του ενέματος να επαρκούν για την εκτόνωση της πίεσης του και έτσι ο χρόνος φόρτισης του εδάφους μειώνεται σημαντικά, όπως και η επίδραση του στις πιέσεις πόρων, οδηγώντας σε μικρότερες αυξήσεις.

## 6.2 Προτάσεις

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα παρατίθενται παρακάτω:

- Αρχικά, σε ότι αφορά το μοντέλο, προτείνεται η χρήση ενός πιο κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος για αργίλους, όπως το Cam Clay ή το modified Cam Clay ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα που προκύπτει στις καθιζήσεις από το κοινό μέτρο φόρτισης και αποφόρτισης.
- Παράλληλα, προτείνεται η διακριτοποίηση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων μετά από κάθε βήμα εκσκαφής (remeshing), ώστε οι προσυγκλίσεις που συμβαίνουν μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής να είναι συμβατές με την μετέπειτα εισαγωγή του EPB, ώστε να έχουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε ότι αφορά τις μετακινήσεις γύρω από τη σήραγγα.
- Διερεύνηση της τυχόν επιρροής του  $K_0$  καθώς και της διαπερατότητας των εδαφικών σχηματισμών στις καθιζήσεις σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τιμές της αρχικής πίεσης εισαγωγής του ενέματος, αλλά και τις καμπύλες σκλήρυνσης.
- Επιπρόσθετες αναλύσεις για διαφορετικό ύψος υπερκειμένων ( $H/D=2$  ή  $H/D=3$ ), ώστε να εισάγουμε και αυτή την πληροφορία στα αποτελέσματα.
- Παραμετρικές αναλύσεις που θα αφορούν στην υπερεκσκαφή που εκτελεί το EPBM καθώς και στην κλίση της ασπίδας, ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή αυτών των δύο μεγεθών στην εξέλιξη των επιφανειακών μετακινήσεων.
- Τέλος, έρευνα γύρω από τα φαινόμενα που επηρεάζουν τις πιέσεις πόρων και κατ' επέκταση των καθιζήσεων, όπως τα φαινόμενα αναρρόφησης (suction phenomena), θα βοηθούσε στην καλύτερη κατανόηση ορισμένων αποτελεσμάτων κατά τη διάνοιξη σηράγγων.

## Βιβλιογραφία

- Addenbrooke, T.I., Potts, D.M. & Puzrin, A.M., 1997. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Geotechnique*, 47(3), pp.693–712.
- Attewell, P.B. & Woodman, J.P., 1982. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil : Attewell, P B; Woodman, J P *Ground Engng*, V15, N8, Nov 1982, P13–22, 36. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(5), p.148.
- Bernat, S., Cambou, B. & Dubois, P., 1999. Assessing a soft soil tunnelling numerical model using field data. *Geotechnique*, 49(4), pp.427–452.
- Bezuijen, A. et al., 2005. Pressure gradients at the tunnel face of an Earth Pressure Balance shield. In *Underground Space Use. Analysis of the Past and Lessons for the Future, Two Volume Set*. Taylor & Francis.
- 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.
- Do, N.-A. et al., 2014. Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: The influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9(4), pp.673–694.
- Finno, R.J. & Clough, G.W., 1985. EVALUATION OF SOIL RESPONSE TO EPB SHIELD TUNNELING. *J. Geotech. Eng.* 111, pp.155–173.
- Franzius, J.N., 2003. Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence.
- Franzius, J.N., Potts, D.M. & Burland, J.B., 2005. The influence of soil anisotropy and  $K_0$  on ground surface movements resulting from tunnel excavation. *Geotechnique*, 55(3), pp.189–199.
- Gatti, M.C. & Cassani, G., 2007. Ground loss control in EPB TBM tunnel excavation, in: *Underground Space - The 4th Dimension of Metropolises*. In *33rd World Tunnel Congress. Prague, Czech*. pp. 1141–1146.
- ITA/AITES, 2007. Settlements induced by tunneling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- 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. In *European Research Program NeTTUN*. Athens, Greece.

- 
- Kimura, T. & Mair, R.J., 1981. CENTRIFUGAL TESTING OF MODEL TUNNELS IN SOFT CLAY. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, pp.319–322.
- 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. et al., 2014. 3D Numerical simulation of shield tunnelling with emphasis on the influence of the tail gap. In *Tunnelling in a Challenging Environment: Proceedings of the 2nd Eastern European Tunnelling Conference*. Athens, Greece. pp. 1–9.
- 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.
- Loganathan, N., Poulos, H.G. & Bustos-Ramirez, 2000. Estimation of ground loss during tunnel excavation. In *GeoEng2000*. Melbourne, AUstralia.
- Losacco, N., Burghignoli, A. & Callisto, L., 2014. Uncoupled evaluation of the structural damage induced by tunneling. *Geotechnique*, 64(8), pp.646–656.
- Ltd, 2009. G.A.H. Ground Control for Slurry TBM Tunnelling (2009). *GEO Report No. 249:[57]*.
- Luttikholt, A., 2007. Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining - Results of Full-scale Tests Compared to Finite Element Analysis.
- Mair, R.J. & Taylor, R.N., 1997. Bored tunnelling in the urban environment (State-of-the-art report and theme lecture). In *The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. pp. 2353–2385.
- Mair, R.J., Taylor, R.N. & Bracegirdle, A., 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique*, 43(2), pp.315–320.
- O'Reilly, M.P., Mair, R.J. & Alderman, G.H., 1992. Long-term settlements over tunnels: an eleven-year study at Grimsby : O'Reilly, M P; Mair, R J; Alderman, G H Proc Tunnelling '91, London, 14–18 April 1991P55–64. Publ London: Elsevier, 1991. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(2), p.A96.
- O'Reilly, M.P. & New, B.M., 1983. 831153 Settlement above tunnels in the United Kingdom — their magnitude and prediction : In: Tunnelling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, 7–11 June 1982, P173–181. Publ London: IMM, 1982. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(1), p.A18.
- Osman, A.S., Bolton, M.D. & Mair, R.J., 2006. Predicting 2D ground movements around tunnels in undrained clay. *Geotechnique* 56, pp.597–604.

- Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. In *7th Int. Conf. Soil Mech. Mexico City*. pp. 225–290.
- Peila, D., Picchio, A. & Chierigato, A., 2013. Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, pp.55–66.
- Sagaseta, C., 1987. ANALYSIS OF UNDRAINED SOIL DEFORMATION DUE TO GROUND LOSS. *Geotechnique*, 37(3), pp.301–320.
- Sitarenios, P. et al., 2015. Effect of Hydraulic Conditions in controlling the Face in EPB Excavated Tunnels. In *SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Region. Proceedings of the 41st World Tunnel Congress. Dubrovnik, Croatia*.
- Yi, X., Rowe, K. & Lee, K.M., 1993. Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield. *Canadian geotechnical journal*, 30(3), pp.476–490.
- <http://www.ametro.gr>, Web Page.
- <http://www.fhwa.dot.gov>, Web Page.
- <http://www.herrenknecht.com>, Web Page.
- <http://www.tbm.cat.com>, Web Page.
- <http://www.therobbinscompany.com>, Web Page.