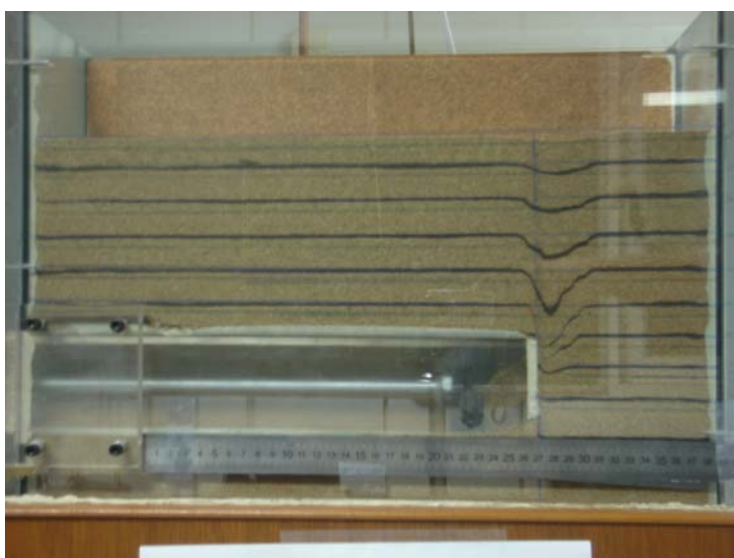




*Πολυτεχνείο Κρήτης*

*Τμήμα Ορυκτών Πόρων*

**Μελέτη Ευστάθειας Αβαθών Σηράγγων με την βοήθεια  
Αναλογικής Συσκευής και Αναλυτικών Μεθόδων**



**Διπλωματική Εργασία**

**Παύλου Βαρδουλάκη**

Εξεταστική επιτροπή :

**Γ.Εξαδάκτυλος - Καθηγητής (Επιβλέπων Καθηγητής)**

**Ζ.Αγιουτάντης - Καθηγητής**

**Δρ. Ε.Στειακάκης - ΕΕΔΙΠ**

**Χανία, Απρίλιος 2007**

## Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως θέμα την πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της κατάρρευσης μετώπου σήραγγας σε χαλαρά εδάφη. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσθηκε ειδική συσκευή για την προσομοίωση της σταδιακής αστοχίας άμμου μπροστά από το μέτωπο αβαθούς κυκλικής-κυλινδρικής σήραγγας εξαιτίας της χαλάρωσης της υποστύλωσης του μετώπου σε κλίμακα 1:100 περίπου. Για την εξαγωγή εμπειρικών αναλυτικών σχέσεων μεταξύ της υποχώρησης του μετώπου και των καθιζήσεων της άμμου σε διάφορους ορίζοντες για διαφορετικά βάθη της σήραγγας εφαρμόσθηκε η θεωρία της Διαστασιολογικής Ανάλυσης (Dimensional Analysis Theory). Οι σχέσεις αυτές είναι χρήσιμες στην κατασκευή αβαθών σηράγγων των οποίων η συμπεριφορά παρακολουθείται με ενόργανες μετρήσεις αλλά και ως πειράματα αναφοράς για τον έλεγχο της ακρίβειας αριθμητικών προγραμμάτων από υπολογιστικά προγράμματα.

Μια τέτοια σύγκριση γίνεται με δύο εμπορικούς αριθμητικούς κώδικες.



## Περιεχόμενα

<b>1<sup>ο</sup> Εισαγωγή</b>	<b>σελ. 5</b>
<b>2<sup>ο</sup> Μέθοδοι Εκσκαφής Σηράγγων</b>	<b>σελ. 6</b>
2.1 Γενικά	σελ. 6
2.2 Ιστορική Αναδρομή	σελ. 6
2.3 NATM	σελ. 10
Φιλοσοφία Μεθόδου και Εναλλακτικές Ονομασίες	σελ. 10
2.4 TBM	σελ. 13
2.4.1 Περιγραφή Μεθόδου	σελ. 14
2.4.2 Εκσκαφή σε Κατοικημένες Περιοχές ή κοντά στην Επιφάνεια	σελ. 15
2.5 Μέθοδοι Όρυξης χωρίς Τάφρο	σελ. 19
Περιγραφή της Μεθόδου	σελ. 21
2.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Μεθόδων	σελ. 23
2.6.1 Γενικά	σελ. 23
2.6.2 Πλεονέκτημα και Μειονεκτήματα Μεθόδων Διάνοιξης	σελ. 23
2.6.2.1 Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής (TBMs)	σελ. 23
2.6.2.2 Μηχανήματα Σημειακής Κοπής (Roadheaders)	σελ. 26
2.6.2.3 Διάνοιξη Μικροσηράγγων με Ταυτόχρονη Υδραυλική Προώθηση	
Σωλήνων	σελ. 28
<b>3<sup>ο</sup> Σκοπός της διπλωματικής</b>	<b>σελ. 30</b>
3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	σελ. 30
3.2 Εδαφική καθίζηση	σελ. 31
Κατανόμη της Διαταραχής	σελ. 32
3.3 Ανασκόπηση Προηγούμενων Μελέτων	σελ. 33
3.4 Μηχανισμοί Αστοχίας	σελ. 36
3.5 Πραγματικό Παράδειγμα Αστοχίας	σελ. 38
<b>4<sup>ο</sup> Περιγραφή της πειραματικής συσκευής</b>	<b>σελ. 40</b>
4.1 Πειραματική Συσκευή	σελ. 40
4.2 Στάδια Πειράματος	σελ. 42
<b>5<sup>ο</sup> Διαστασιολογική ανάλυση αποτελεσμάτων</b>	<b>σελ. 50</b>
5.1 Θεωρία Διάχυσης της Μετατόπισης	σελ. 50
5.2 Νόμοι Κλίμακας	σελ. 53
5.3 Διερεύνηση Γενικών Σχέσεων	σελ. 59

<b>6<sup>ο</sup> Αριθμητικό μοντέλο της αβαθούς σήραγγας</b>	<b>σελ. 63</b>
6.1 Γενικά	σελ. 63
6.2 Παραμετροί Μοντέλου	σελ. 65
6.3 Συγκριση Αποτελεσμάτων του Flac3D με Πειραματικά Αποτελέσματα	σελ. 70
<b>7<sup>ο</sup> Συμπεράσματα</b>	<b>σελ. 71</b>
<b>8<sup>ο</sup> Βιβλιογραφία</b>	<b>σελ. 72</b>
 <b>Παράρτημα Α</b>	 <b>σελ. Ι</b>

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός μίας εκσκαφής είναι ένα σύνθετο γεωτεχνικό πρόβλημα. Πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες όπως πχ. οι διαστάσεις και γεωμετρία του ανοίγματος, οι προσδοκώμενες γεωλογικές συνθήκες, προκειμένου να επιλεγεί το βελτιστο μηχάνημα εκσκαφής.

Σήμερα χρησιμοποιούνται πολλοί τρόποι διάνοιξης αβαθών σηράγγων. Οι γνωστότερες και οι πιο διαδεδομένες είναι οι ακόλουθες :

- Η μέθοδος εκσκαφής Cut and Cover
- Η μέθοδος NATM
- Η μέθοδος TBM

Τι γίνεται όμως όταν η σήραγγα αστοχεί στο μετωπο ή σε περιοχή γύρω από την σήραγγα; Πως διαδίδεται η αστοχία αυτή στην επιφάνεια; Υπάρχει κάποιο βάθος από το οποίο και κάτω η αστοχία αυτή παύει να επηρεάζει την επιφάνεια;

Η εργασία αυτή διερευνά την διάδοση αυτής της αστοχίας και ελέγχει αν τα υπολογιστικά πακέτα ευρείας χρήσης (εν προκειμένω το πακέτο Flac3D) μπορούν να παραστήσουν ικανοποιητικά μια τέτοια αστοχία.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Μέθοδοι Εκσκαφής Σηράγγων

#### 2.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός μίας υπόγειας εκσκαφής και της υποστήριξης αυτής είναι ένα σύνθετο γεωτεχνικό πρόβλημα. Ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη πολλούς παράγοντες όπως πχ. τις διαστάσεις και την γεωμετρία του ανοίγματος, τις προσδοκώμενες γεωλογικές συνθήκες, το χρονοδιάγραμμα του έργου κ.α., προκειμένου να επιλεγεί το πιο κατάλληλο σύστημα εκσκαφής. Με βάση τις παραμέτρους αυτές αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι διάνοιξης των σηράγγων, κοινός σκοπός των οποίων είναι η εξόρυξη του εδάφους ή πετρώματος, η υποστήριξη του υπογείου ανοίγματος, η ασφάλεια και η μονιμότητα του έργου.

#### 2.2 Ιστορική Αναδρομή

Ο Marc Isambard Brunel<sup>1</sup> θεωρείται από πολλούς ο εμπνευστής των αβαθών σηράγγων καθώς επίσης (και είναι) ο εμπνευστής των συγχρόνων μηχανημάτων εκσκαφής με την χρήση ασπίδας. Η ανακάλυψη του Brunel υλοποιήθηκε, επειδή συνδύασε τους εξής δυο παράγοντες:

- Την παρατήρηση ότι το σκουλήκι που παρασιτεί στα ξύλα των πλοίων είχε την ικανότητα να τα διατρυπά με μια περιστροφική κίνηση.
- Την διαπίστωση ότι τα μικρά ανοίγματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα σε σαθρά-χαλαρά εδάφη από τα αντίστοιχα μεγάλα ανοίγματα.

Έτσι γεννήθηκε η βασική ιδέα των σύγχρονων σηράγγων. Η πρώτη μηχανή εκσκαφής σχεδιάστηκε με σκοπό να ορύξει την πλήρη διατομή του μετώπου των σηράγγων. Αναπτύχθηκε από τον Maus στην Ιταλία το 1846. Η μέθοδος δράσης των κοπτικών εργαλείων, ήταν κρουστική και όχι περιστροφική. Ένα σχέδιο μηχανήματος περιστροφικής ολομέτωπου κοπής, κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αρχικά το 1875 από τον Beaumont.

---

<sup>1</sup> Απεβίωσε τον Δεκ. 12, 1849, Λονδίνο, Αγγλία

Μετανάστης Γάλλος μηχανικός και εφευρέτης ο οποίος έλυσε το πρόβλημα της εκσκαφής σηράγγων κάτω από νερό

Αυτό το σχέδιο βελτιώθηκε από τον English με πατέντα το 1880, και τα συγκεκριμένα μηχανήματα επιλέχθηκαν για να ξεκινήσουν τη διάνοιξη της σήραγγας Channel και από τις δύο πλευρές των χωρών, Αγγλία και Γαλλία (Sinha, 1991). Στα επόμενα χρόνια, υπήρξε ανάπτυξη στον εξοπλισμό της συνεχούς μηχανικής εκσκαφής, αλλά κατά το τέλος της δεκαετίας του 1920 επήλθε το τέλος αυτής της "έκρηξης" της ευρηματικότητας για τον εξοπλισμό εκσκαφής σηράγγων. Η μόνη περίοδος ταχείας προόδου στο μηχανοποιημένο εξοπλισμό εκσκαφής, συγκρίσιμη με τη δραστηριότητα κατά το 19ο και τις αρχές το 20<sup>ου</sup> αιώνα, ήταν στην αρχή της δεκαετίας του '50 με το πρώτο μηχανήμα ολομέτωπης κοπής, που σχεδιάστηκε από τον James S. Robbins και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Robbins (Seattle, Washington).

Η εξόρυξη των πετρωμάτων με χρήση μηχανημάτων συνεχούς κοπής διαδόθηκε περισσότερο με τη σταδιακή βελτίωση του σχεδιασμού τους. Αυτή η βελτίωση είχε σαν συνέπεια την επέκταση της εφαρμογής τους σε πετρώματα υψηλής αντοχής και σε περιπτώσεις δύσκολων γεωτεχνικών συνθηκών (πχ. μικτή γεωλογία) (Sinha, 1991).

Σχεδόν κάθε εξάρτημα σε ένα μηχανήμα ολομέτωπης κοπής, έχει γίνει πιο αξιόπιστο και οι ρυθμοί εκσκαφής έχουν βελτιωθεί εντυπωσιακά την περίοδο 1960 - 1990. Οι πρόσφατα αναπτυγμένες προστατευμένες κοπτικές κεφαλές, επιτρέπουν τη χρήση TBM σε κατακερματισμένο έδαφος και σε μέτωπα ανομοιογενούς γεωλογίας, όπου η εκσκαφή με TBM παλιά θεωρούνταν αδύνατη. Οι τάσεις προς την αυξανόμενη αυτοματοποίηση, τη χρήση της ρομποτικής, και την εφαρμογή μικροεπεξεργαστών για τον έλεγχο απόδοσης της εξόρυξης, συνεχίζονται στον κλάδο των υπόγειων τεχνικών έργων. Αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης εξοπλισμού, σε βελτιωμένα ποσοστά προόδου και ασφάλειας, και σε ευκαιρίες για τη βελτιστοποίηση απόδοσης (Sinha, 1991).

Πέρα από τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, υπάρχουν και τα μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders) τα οποία όμως ακολουθούν ασυνεχή κύκλο εργασίας. Για τον λόγο αυτό, ορισμένοι κατατάσσουν την χρήση των roadheaders στην Νέα Αυστριακή Μέθοδο (New Austrian Tunneling Method – NATM), επειδή η φάση της υποστήριξης είναι η ίδια με της NATM.



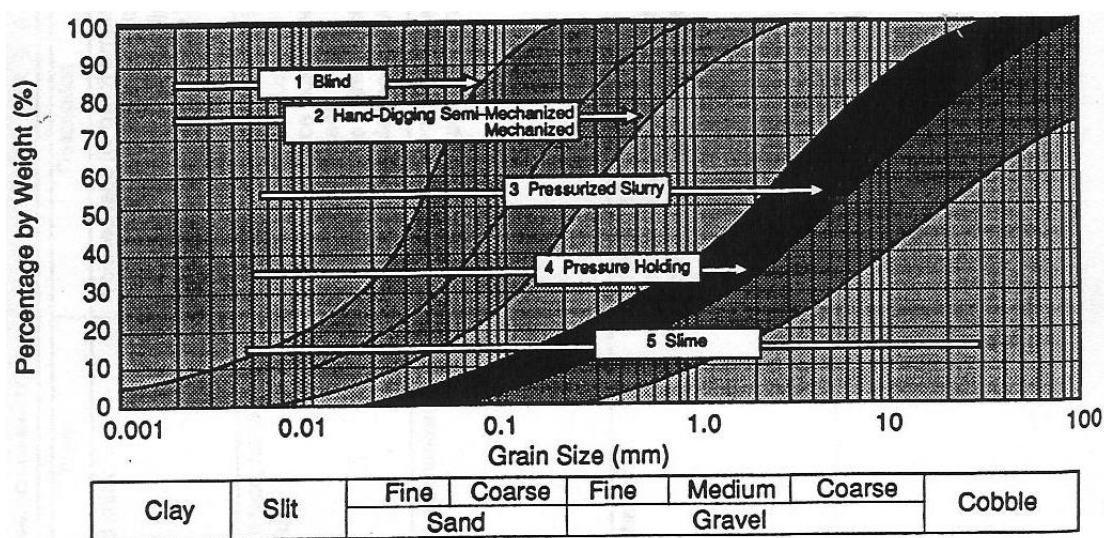
Η χρήση μηχανημάτων σημειακής κοπή σε υπόγεια έργα, γίνεται εδώ και 30 χρόνια. Οι πρώτες εμφανίσεις των μηχανημάτων ήταν σε διάνοιξη σηράγγων ή στοών σε ανθρακωρυχεία, των οποίων τα μέτωπα περνούσαν από σχηματισμούς με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Στην Ευρώπη, η χρήση τους διαδόθηκε κατά τη δεκαετία του 1940.

Όλα τα μηχανήματα διάνοιξης αβαθών σηράγγων αποτελούνται από πέντε βασικά μέρη.

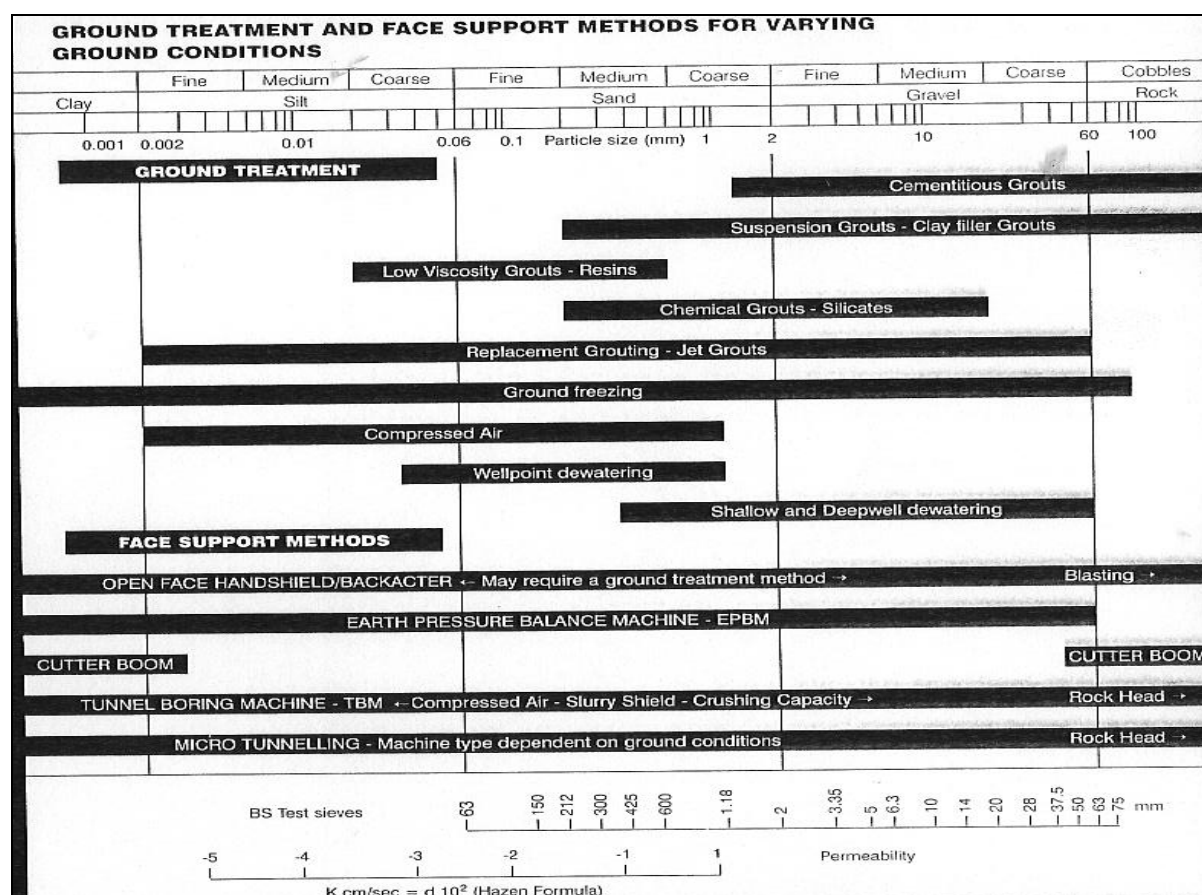
- *Την περιστρεφόμενη κεφαλή*, επί της οποίας είναι προσαρμοσμένα τα κοπτικά άκρα και, όταν κρίνεται απαραίτητο, ένας μηχανισμός προστατευτικών καλυμμάτων.
- *Το κύριο σώμα*, όπου βρίσκονται οι κινητήρες ώθησης, τα πέδιλα στήριξης οι πλευρικές αγκυρώσεις, οι δαγκάνες σταθεροποίησης, η αίθουσα του χειριστή, τα υδραυλικά και ηλεκτρικά συστήματα, οι μηχανές, οι γεννήτριες, η πλατφόρμα εργασίας και το σύστημα αποκομιδής του εξορυσσόμενου πετρώματος.
- *Η ουρά*, στην οποία βρίσκονται ανυψωτικοί μηχανισμοί για την εγκατάσταση της επένδυσης, η πλατφόρμα τσιμεντενέσεων (grouting platform), τα υδραυλικά συστήματα αγκυρώσεων (shove jacks), το σύστημα μεταφορέων και άλλα βοηθητικά συστήματα
- *Το μηχανήμα ώθησης του κοπτικού*, που βρίσκεται συνήθως περιμετρικά της ασπίδας και εντός αυτής. Συνήθως αποκτούν ώθηση από την αντίδραση που ασκούν στην μόνιμη υποστήριξη που βρίσκεται πίσω από το κοπτικό.
- *Μπροστά από το κοπτικό άκρο* βρίσκεται συχνά μια ασπίδα η οποία παρέχει προστασία στους εργάτες που εργάζονται στο μέτωπο. Σε μηχανήματα ολομέτωπης κοπής τέτοια ασπίδα δεν υπάρχει και η σταθερότητα του μετώπου ελέγχεται από το κοπτικό άκρο.

Η επιλογή του κοπτικού μηχανήματος απαιτεί την προσεκτική μελέτη των εδαφικών συνθηκών, το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, το μέγεθος της σήραγγας καθώς επίσης και το τι εδαφικό υλικό υπάρχει στην συγκεκριμένη περιοχή όπου πρόκειται να γίνει το έργο. Τα ακόλουθα διαγράμματα δείχνουν την δυνατότητα εφαρμογής ενός κοπτικού ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου (Εικόνα 2.1) καθώς και τις συνήθειες

μεθόδους εξυγίανσης που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.1-Επιλογή μεθόδου εκσκαφής ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου (Bickel,O.John )



Εικόνα 2.2:Επιλογή μεθόδου εκσκαφής και μέτρα εξυγίανσης ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου

## 2.3 NATM

Η NATM είναι προσέγγιση μιας φιλοσοφίας που ενσωματώνει τις αρχές της συμπεριφοράς των εδαφών κάτω από συνθήκες φόρτισης και της καταγραφής της συμπεριφοράς του υπογείου έργου κατά την διάρκεια κατασκευής του. Στην πραγματικότητα η NATM δεν περιλαμβάνει καθορισμένο τρόπο κατασκευών και υποστήριξης .

### 2.3.1 Φιλοσοφία Μεθόδου και Εναλλακτικές Ονομασίες

Όταν οι μηχανικοί των υπογείων μιλούν για την NATM, πολλές φορές εννοούν διαφορετικά πράγματα επειδή ορισμένοι την ορίζουν σαν μια ιδιαίτερη τεχνική εκσκαφής, ενώ άλλοι την θεωρούν σαν ένα είδος «φιλοσοφίας κατασκευής». Πρόσφατα αυτό έγινε ακόμα πιο πολύπλοκο με την ένταξη νέων όρων καθώς και εναλλακτικών ονομάτων όταν εξετάζονται κάποια χαρακτηριστικά της μεθόδου. Αυτό έχει γίνει λόγω της ολοένα αυξανόμενης χρήσης της μεθόδου, ιδίως στις ΗΠΑ και κυρίως σε χαλαρά εδάφη.

Πέρα από το όνομα «*New Austrian Tunneling Method*» (NATM) έχουν δοθεί και άλλοι χαρακτηρισμοί για την μέθοδο αυτή, για παράδειγμα, «*Sequential Excavation Method*» (SEM) ή «*Sprayed Concrete Lining*» (SCL). Εκτός τούτου στην Ιαπωνία γίνεται χρήση και άλλων ονομάτων όπως, «*Centre Dividing Wall*», ή «*Cross Diaphragm Method*» (και των δυο οι συντμήσεις είναι CDM), καθώς επίσης «*Upper Half Vertical Subdivision method*» (UHVS). Από ότι φαίνεται η βιομηχανία κατασκευών σηράγγων αδυνατεί να ορίσει ένα κοινά αποδεκτό όνομα για την μέθοδο.

Όπως ορίζεται από την Αυστριακή Ένωση Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων:

« Η NATM συνιστά μια μέθοδο όπου το περιβάλλον πέτρωμα ή εδαφος μιας σήραγγας ενοποιούνται σε ένα δακτυλιοειδές σύστημα υποστήριξης. Έτσι οι υποστηριζόμενοι σχηματισμοί θα αποτελούν τμήμα της υποστήριξης της σήραγγα .»

Ο πιο αναγνωρισμένος ορισμός της NATM (Anon., 1980) έχει ως εξής :

*«Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων βασίζεται στη θεώρηση ότι το πέτρωμα που περιβάλλει ένα υπόγειο άνοιγμα γίνεται φέρον στοιχείο της κατασκευής μέσω της ενεργοποίησης ενός φέροντος δακτυλίου του πετρώματος».*

Κάνοντας κριτική στη μέθοδο, ο Konaří (1994) παρατηρεί ότι κάθε μέθοδος κατασκευής σηράγγων, από αρχαιοτάτων χρόνων, κάνει χρήση της φέρουσας λειτουργίας του πετρώματος. Όσο για το φέροντα δακτύλιο και την ενεργοποίησή του, παρατηρεί ότι αυτοί οι όροι είναι τόσο αμφίσημοι ώστε να μην είναι εφαρμόσιμοι από επιστημονική άποψη. Παρ'όλα αυτά πολλοί μηχανικοί αναφέρονται στην NATM όταν γίνεται η χρήση εκτοξευομένου σκυροδέματος για την αρχική παραλλαγή των τάσεων και των μετατοπίσεων μιας εκσκαφής ανοιχτού μετώπου. Ιδίως όταν αναφέρονται σε χαλαρά εδάφη, ο όρος NATM μπορεί να είναι παραπλανητικός. Όπως έχει επισημάνει ο Emit Brown : *«Η NATM μπορεί να αναφέρεται τόσο στην φιλοσοφία σχεδιασμού όσο και στη μέθοδο κατασκευής»* Σύμφωνα τέλος με τον E. Brown τα κυρία χαρακτηριστικά της φιλοσοφίας σχεδιασμού είναι τα ακόλουθα:

- Γίνεται η μέγιστη χρήση της αντοχής του εδάφους γύρω από την σήραγγα
- Η ροή των τάσεων του εδάφους γύρω από την σήραγγα γίνεται με ελεγχόμενη παραμόρφωση του εδάφους .
- Η αρχική επένδυση της σήραγγας που τοποθετείται έχει σαν χαρακτηριστικό τον έλεγχο παραμορφώσεων και η εγκατάστασή της γίνεται σε συγκεκριμένο χρόνο μετά την εκσκαφή.
- Γίνεται εγκατάσταση οργάνων τα οποία θα καταγράφουν τις παραμορφώσεις στην αρχική επένδυση.

Όταν ο όρος NATM χρησιμοποιείται σαν μέθοδος κατασκευής, τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Η σήραγγα διανοίγεται με αλληλουχία εκσκαφής και υποστήριξης, αν και τα στάδια εκσκαφής μπορούν να μεταβάλλονται κατα περίπτωση.

- Η αρχική υποστήριξη της σήραγγας γίνεται με εκτοξευόμενο ινοσκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια και καμιά φορά με τσιμεντενέσεις και αγκυρώσεις .
- Η μόνιμη επένδυση συνήθως ‘καλουπώνεται’ μέσα στην σήραγγα.

Από τα παραπάνω διακρίνεται ότι η NATM δεν είναι συγκεκριμένη κατασκευαστική μέθοδος ούτε είναι θεωρητικά επαρκώς θεμελιωμένη. Παρ’ όλα αυτά πάρα πολλά έργα κατασκευάστηκαν με ασφάλεια και οικονομία χρησιμοποιώντας την NATM ως μέθοδο κατασκευής. Ωστόσο για την μοντελοποίηση της δόθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον L. von Rabcewicz το 1948.

## 2.4 TBM

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (*Tunnel boring machines*, TBM) χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σηράγγων μέσα σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς (Εικόνα 2.3). Μπορεί να χρησιμοποιηθούν το ίδιο αποτελεσματικά για τη διάνοιξη μέσα από σκληρά ή χαλαρά πετρώματα ή εδάφη. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1m έως και 15m.



Εικόνα 2.3: TBM κατά την έξοδο του από την διάνοιξη σήραγγας σε βραχομάζα

Οι σήραγγες οι οποίες έχουν διάμετρο μικρότερη του 1m είναι πιο πιθανό να διανοιχθούν με οριζόντια κατευθυνόμενη όρυξη ή με τη χρήση της μεθόδου Pipe Jacking, παρά με TBM. Τα TBM χρησιμοποιούνται σαν εναλλακτικά στις μεθόδους διάτρησης και ανατίναξης.

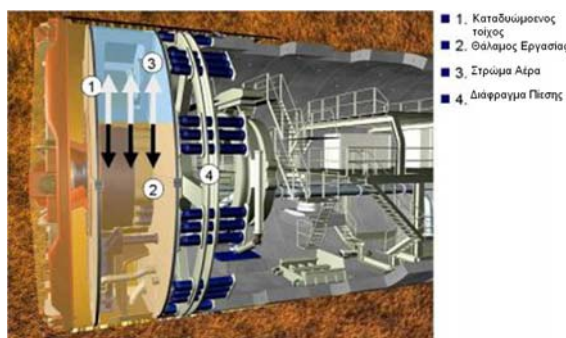
Τα πρώτα κοπτικά μηχανήματα ήταν κατά κύριο λόγο μεταλλικοί σωλήνες οι οποίοι υποστήριζαν το περιβάλλον, στη σήραγγα, εδαφικό υλικό. Διαφορετικές τεχνολογίες είχαν αναπτυχθεί, στο παρελθόν, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τόσο «ενδιάμεσης σκληρότητας» όσο και «δύσκολα» εδάφη. Κατά την εκσκαφή θραύσματα των πετρωμάτων καθώς και σωματίδια σκόνης υπάρχουν εν αιωρήσει στο μέτωπο της εκσκαφής. Για το λόγο αυτό έγινε επιτακτική η ανάγκη για εγκατάσταση

μηχανημάτων που απομάκρυναν τη σκόνη από το μέτωπο, τα οποία εν συντομία είναι:

- Η ροή νερού στο κοπτικό άκρο
- Ένα φίλτρο πίσω από το κοπτικό, και
- Μια συσκευή αναρρόφησης της σκόνης

#### 2.4.1 Περιγραφή Μεθόδου

Ένα TBM συνήθως αποτελείται από ένα ή δυο ασπίδες, μεταλλικούς κυλίνδρους και από συστήματα υποστήριξης. Στο ένα άκρο της ασπίδας τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ένας θάλαμος στον οποίο, ανάλογα με τον τύπο του κοπτικού, τα θραύσματα κοπής ανακατεύονται με πολφό (slurry) ή μένουν ως έχουν και μεταφέρονται στην έξοδο της σήραγγας. Η επιλογή της κοπτικής κεφαλής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Πίσω από το θάλαμο βρίσκονται μια σειρά από υδραυλικοί γρύλοι (Εικόνα 2.4), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση του μηχανήματος. Η κίνηση του μηχανήματος θυμίζει πολύ αυτή ενός γεωσκώληκα. Οι γρύλοι τοποθετούνται στην επένδυση της σήραγγας που βρίσκεται πίσω από το μηχάνημα και εν συνεχεία το ωθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 2.4:Τμήματα ενός TBM

Η κοπτική κεφαλή του TBM περιστρέφεται με γωνιακές ταχύτητες από 1 έως 10 rpm. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες καθώς και από τις δυνατότητες του μηχανήματος. Ανάλογα με τη γεωλογία μπορεί η σήραγγα να υποστηριχθεί ή να αφηθεί ανυποστήρικτη. Η υποστήριξη γίνεται με την εισαγωγή προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος, οι οποίοι τοποθετούνται στη θέση τους καθώς το μηχάνημα προωθείται προς τα εμπρός.

Τα σύγχρονα TBM έχουν ενιαία κοπτική κεφαλή. Η επιλογή μονής ή διπλής ασπίδας εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής καθώς και από την ταχύτητα προχώρησης. Διπλές ασπίδες χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη όπου απαιτείται μεγάλη ταχύτητα προχώρησης. Αντίστοιχα η μονή ασπίδα χρησιμοποιείται σε σκληρά, συμπαγή εδάφη.

#### **2.4.2 Εκσκαφή σε Κατοικημένες Περιοχές ή κοντά στην Επιφάνεια**

Η εκσκαφή σε κατοικημένη περιοχή είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση υπογείου έργου καθώς πρέπει η ελεύθερη επιφάνεια να μείνει όσο είναι δυνατό αδιατάραχτη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αποφευχθεί η καθίζηση του εδαφους. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό εφικτό είναι με την διατήρηση της εδαφικής πίεσης στο βάθος εκσκαφής. Η εδαφοπίεσεις πρέπει να παρεμένουν σταθερές τόσο κατά την διάρκεια του έργου όσο και μετά το πέρας των εργασιών κατασκευής. Βεβαία αυτό δεν κάτι ιδιαίτερα εύκολο καθώς συχνά παρατηρείται η παρουσία δυο τύπων εδαφους στο μέτωπο, για παράδειγμα, η παρουσία υλικού υψηλής αντοχής και συνοχής στο πόδι της σήραγγας και η παρουσία ενός πιο χαλαρού υλικού (π.χ διαβρωμένου υλικού ή άμμου) στη στέψη της σήραγγας. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μηχανήματα θετικής ώθησης. Σχετικά υπάρχουν τρεις συνήθεις τύποι αντιμετώπισης με τη χρήση:

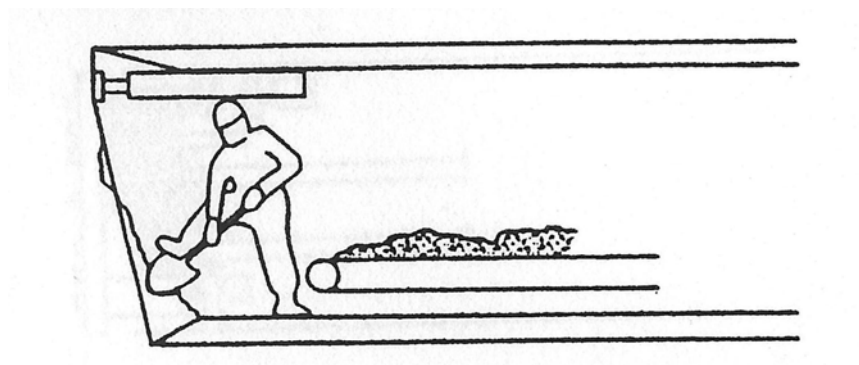
- Πεπιεσμένου αέρα (CA)
- Πολφού μπετονίτη (BS), και
- Της «ισορροπίας πίεσης γαιών» (Earth Pressure Balance, EPB)

Ο μέθοδος πεπιεσμένου αέρα είναι η παλαιότερη, αλλά παύει σιγά-σιγά να χρησιμοποιείται λόγω των δυσκολιών και προβλημάτων υγείας, στο χώρο εργασίας. Οι άλλοι δυο τύποι διάνοιξης (BS και EPB) είναι προτιμώτεροι από τις μεθόδους ανοιχτού μετώπου σε κατοικημένες περιοχές και παρέχουν κατά πολύ καλύτερο έλεγχο της εδαφικής μετατόπισης. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες κατηγορίες κοπτικών μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα:



### *1. Ασπίδες ανοιχτού μετώπου*

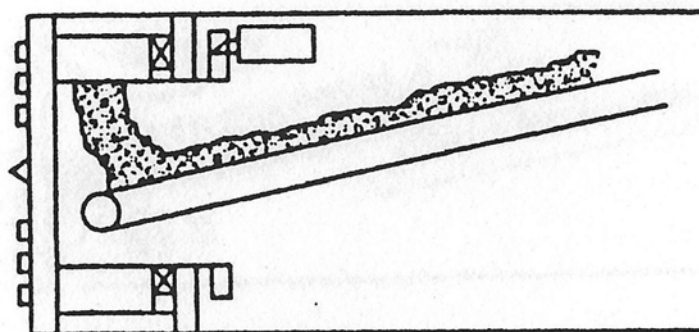
Εάν το μέτωπο είναι σταθερό, για παράδειγμα, σε αργιλικά εδάφη, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι λεγόμενες «ανοιχτές ασπίδες». Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με κοπτικά μηχανήματα, τα οποία κόβουν και απομακρυνθούν το εδαφικό υλικό από το μέτωπο. Το υλικό αυτό, με την σειρά του, απομακρύνεται με την βοήθεια ταινιόδρομων από το μέτωπο.



Εικόνα 2.5: Ασπίδες ανοιχτού μετώπου (Bickel,O.John )

### *2. Ασπίδες με μηχανική υποστήριξη*

Η υποστήριξη του μετώπου γίνεται με μια σχεδόν, κλειστή, κοπτική κεφαλή. Οι πλάκες που βρίσκονται μεταξύ των ακτίνων είναι ελαστικά υποστηριζόμενες και εισπιέζονται στο μέτωπο. Το χαλαρωμένο εδαφικό υλικό απομακρύνεται διαμέσου των ανοιγμάτων που υπάρχουν ανάμεσα στα κοπτικά. Το υλικό έπειτα απομακρύνεται με ταινιόδρομους .



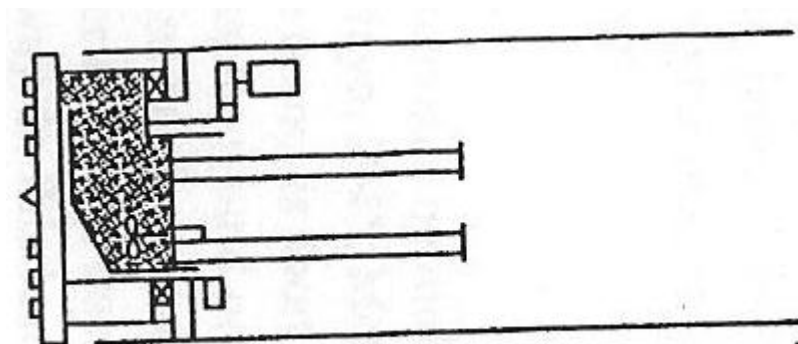
Εικόνα 2.6: Ασπίδες με μηχανική υποστήριξη (Bickel,O.John )

### 3. Ασπίδες με την χρήση πεπιεσμένου αέρα

Εάν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη υπογείου ύδατος, τότε αυτό πρέπει να κρατηθεί μακριά από το μέτωπο με την χρήση πεπιεσμένου αέρα και μηχανικά μέσα, εκτός αν μπορεί να γίνει ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Στον πεπιεσμένο αέρα υποβάλλεται είτε ολόκληρη η σήραγγα, είτε μονό το κοπτικό μηχάνημα, το οποίο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλα διαφράγματα έτσι, ώστε μονό ο θάλαμος εργασίας να βρίσκεται υπό πίεση.

### 4. Ασπίδες με την χρήση πολφού ή νερού

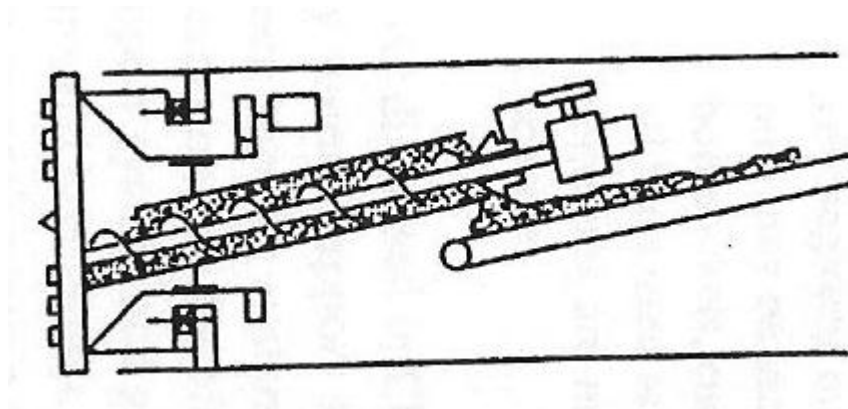
Στην περίπτωση της ασπίδας με πολφό το μέτωπο της σήραγγας συγκρατείται από ένα ρευστό που βρίσκεται υπό πίεση. Ανάλογα με την διαπερατότητα που απαντάται στο μέτωπο, γίνεται η επιλογή του είδους του πολφού που θα χρησιμοποιηθεί. Η πυκνότητα του πολφού καθώς και η κινητικότητα του μπορεί να ποικίλουν, ανάλογα με τα στερεά που υπάρχουν στο μείγμα. Η χρήση του μπετονίτη έχει δείξει ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική.



Εικόνα 2.7: Ασπίδες με χρήση πολφού ή νερού (Bickel,O.John )

### 5. Ασπίδες με ισορροπία πίεσης γαιών

Το μέτωπο συγκρατείται με τη χρήση των γαιών που έχουν προέλθει από την εκσκαφή. Ο θάλαμος εργασίας, που βρίσκεται υπό πίεση (το πολύ 5 atm), είναι διαχωρισμένος από την υπόλοιπη σήραγγα με τη χρήση στεγανών διαφραγμάτων. Το εδαφικό υλικό απομακρύνεται, από το μέτωπο, με τη χρήση κοπτικών, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην κοπτική κεφαλή και στην συνέχεια με τη χρήση κοχλίας, ο οποίος τα μεταφέρει στην ατμοσφαιρική πίεση και μακριά από το μέτωπο.



Εικόνα 2.8: Ασπίδες με ισορροπία γαιών (Bickel, O. John )

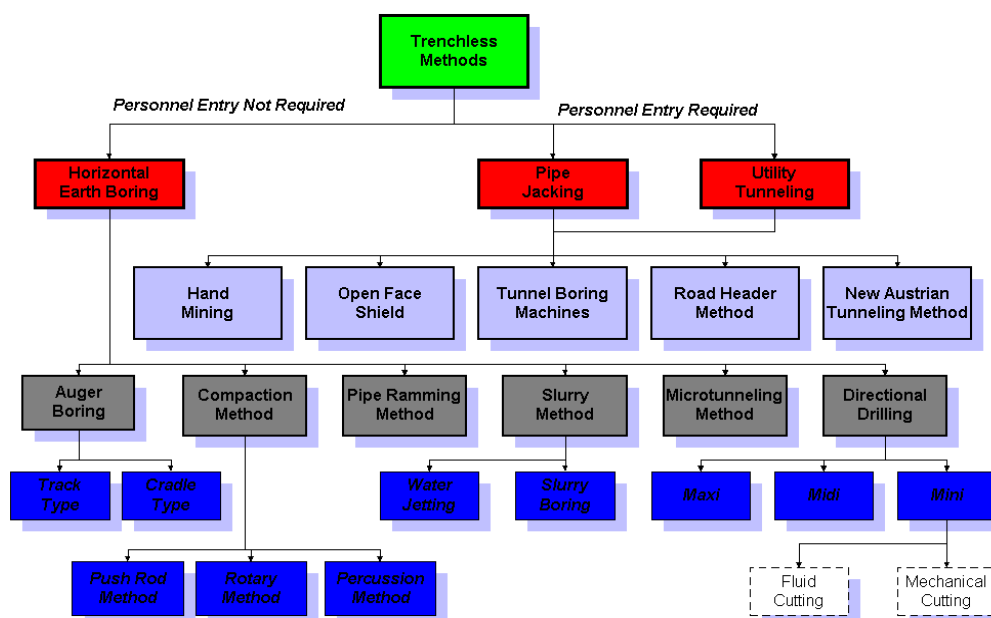
Η μέθοδος EPB βασίζεται στη χρήση των ορυγμένων γαιών στην υποστήριξη του μετώπου. Κάτω από κανονικές συνθήκες αυτό απαιτεί τη χρήση εδαφικού υλικού, του οποίου η συνεκτικότητα κυμαίνεται από συμπαγής σε χαλαρή, και που θα έρθει σε επαφή με το εδαφικό υλικό πλαστικοποιώντας το και διευκολύνοντας έτσι στην απομάκρυνση του.

Η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής καθώς και η προχώρηση αυτού μεταβάλλονται, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες ανάμειξης και πλαστικοποίησης του εδάφους. Αυτό γίνεται με σκοπό να αποφευχθεί η περιστροφή χωρίς κοπή του κοπτικού. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν πολφό ή νερό, αυτή η μέθοδος εκσκαφής έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται θάλαμο διαχωρισμού και ως εκ τούτου δεν απαιτείται χώρος εντός του κοπτικού για τα μηχανήματα αυτά. Λόγω της ισορροπίας μεταξύ της ταχύτητας προχώρησης και της ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη απομάκρυνση εδαφικού υλικού και κατά συνέπεια η πίεση στο μέτωπο είναι και αυτή ελεγχόμενη.

## 2.5 Μέθοδοι Όρυξης χωρίς Τάφρο

Οι μέθοδοι όρυξης χωρίς τάφρο (TEC-Trenchless Excavation Construction) περιλαμβάνουν όλες τις μεθόδους τοποθέτησης εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας, κάτω από την επιφάνεια χωρίς τη διάνοιξη ανοιχτών τάφρων Στην Εικόνα 2.9 αποτυπώνονται σχηματικά οι μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων όπως αυτές διατίθενται και εφαρμόζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό το σύστημα χωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες :

- Μέθοδος Horizontal Earth Boring (HEB)
- Pipe Jacking (PJ)
- Αγωγοί κοινής ωφέλειας ( Utility Tunneling-UT)



Εικόνα 2.9: Μέθοδοι μικροσηράγγων

Η μέθοδος HEB περιλαμβάνει μεθόδους στις οποίες η διάνοιξη της τρύπας επιτυγχάνεται μέσω μηχανοκίνητου εξοπλισμού χωρίς της παρουσία προσωπικού στο όρυγμα. Οι άλλες δύο μέθοδοι (PJ-UT) απαιτούν την παρουσία του προσωπικού, κατά την διάρκεια της εκσκαφής και της θεμελίωσης του μηχανήματος μέσα στο όρυγμα.

Παρ' όλα αυτά η μέθοδος Pipe Jacking έχει διαφοροποιηθεί από την μέθοδο των αγωγών κοινής ωφέλειας στον τομέα της υποστήριξης. Η μέθοδος Pipe Jacking χρησιμοποιεί προκατασκευασμένους σωλήνες (Εικόνα 2.10). Τα υδραυλικά έμβολα συστέλλονται και η σωλήνα τοποθετείται στο τέλος του αγωγού από όπου και προωθείται ολόκληρος ο αγωγός .

Από την άλλη στους αγωγούς κοινής ωφέλειας, παρόλο που χρησιμοποιούν τον ίδιο εκσκαπτικό εξοπλισμό, η μέθοδος υποστήριξης του ορύγματος διαφέρει. Κατ' αρχάς κατασκευάζεται στο εργοτάξιο και περιλαμβάνει τσιμεντένιες πλάκες καθώς και χαλύβδινους δακτυλίους με ενδιάμεση ξύλινη υποστήριξη.



Εικόνα 2.10: Προκατασκευασμένοι σωλήνες ομβρίων υδάτων

Δεν υπάρχει μέθοδος TEC που να μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση. Είναι σημαντικό ο κατασκευαστής, ο σχεδιαστής, η ρυθμιστική ομάδα του έργου και γενικά οποιοσδήποτε ασχολείται με τις μεθόδους TEC, να γνωρίζουν τις δυνατότητες της κάθε μεθόδου καθώς κάποιες μέθοδοι προσφέρουν μεγαλύτερη ευκινησία από κάποιες άλλες. Λόγω των συνεχώς αυξανόμενων ανάγκων να εγκαθίστανται αγωγοί γενικής χρήσεως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, αυξάνεται και η ανάγκη για όργανα υψηλής ακριβείας. Βέβαια οι συνθήκες μπορεί να διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση. Για παράδειγμα: Α) μέθοδοι που είναι κατάλληλες για συμπαγή άργιλο μπορεί να μην είναι κατάλληλες για υγρή άμμο, και Β) η ακρίβεια που απαιτείται για την κατασκευή αποχετευτικού αγωγού δεν είναι συνήθως η ίδια για αγωγούς που φέρουν καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος ή σωλήνες γαιαερίου, υψηλής πίεσης.

### 2.5.1 Περιγραφή της Μεθόδου

Η διάνοιξη μικροσηράγγων με ταυτόχρονη υδραυλική προώθηση σωλήνων (pipe jacking), είναι μια μέθοδος εγκατάστασης, επιδιόρθωσης ή αντικατάστασης υπόγειων αγωγών, οχετών κλπ. Ισχυροί υδραυλικοί προωθητές χρησιμοποιούνται για να ωθήσουν τις ειδικά κατασκευασμένες σωλήνες μέσα στο έδαφος πίσω από τον εκσκαφέα παράλληλα με την εκσκαφή. Η μέθοδος αυτή προσφέρει έναν ευέλικτο, συμπαγή, υδατοστεγή και ολοκληρωμένο αγωγό όσο αυτός διανοίγεται.



Εικόνα 2.11: Φρεάρ εργασίας

Δεν υπάρχει κανένα θεωρητικό όριο για το μήκος του αγωγού που θα κατασκευαστεί, παρόλο που η γεωτεχνικές παράμετροι και τα οικονομικά του έργου μπορεί να δώσουν περιορισμούς. Οδηγοί σε μήκος μερικών εκατοντάδων μέτρων ή σε τόξο έχουν πλέον καθιερωθεί σαν ρουτίνα. Ένας αριθμός συστημάτων διάνοιξης είναι πλέον διαθέσιμα στην αγορά. Σε αυτά περιλαμβάνονται χειροκίνητα, μηχανοκίνητα, και μέσω τηλεχειρισμού. Οι κατασκευαστικές ανοχές είναι συμβατές με άλλες μεθόδους διάνοιξης σηράγγων και η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ελάχιστη υπερεκσκαφή και κατά συνέπεια καλύτερη εδαφική υποστήριξη.

Οι μέθοδοι εκσκαφής είναι πανομοιότυποι με αυτές άλλων τρόπων διάνοιξης σηράγγων χρησιμοποιώντας είτε χειροκίνητο είτε μηχανοκίνητο τρόπο διάνοιξης. Επίσης ασπίδες, υποστήριξη εκσκαφής και μετώπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα μεγάλο εύρος εδαφών. Προκειμένου να εγκατασταθεί ένας αγωγός με αυτή τη μέθοδο απαιτούνται ένα πηγάδι προώθησης και ένα πηγάδι υποδοχής, στο τέλος του αγωγού, απ' όπου θα ανασυρθεί ο εκσκαφέας. Οι διαστάσεις και η κατασκευή του φρεάτιου προώθησης μπορεί να ποικίλει σύμφωνα με τις απαιτήσεις, είτε οικονομικές, είτε τεχνικές, με τις πρώτες να παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο.

Η μηχανοποιημένη εκσκαφή μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερα φρεάτια προώθησης από ότι η χειροκίνητη εκσκαφή, ενώ το φρεάρ υποδοχής έχει σαφώς μικρότερες διαστάσεις προκειμένου να αντιμετωπιστούν πιθανές δυσκολίες τοποθέτησης του. Ένας τοίχος ώσης κατασκευάζεται ώστε μέσω της αντίδρασης, που προκαλείται από την δράση των εμβόλων, να προωθείται αγωγός. Σε χαλαρά εδάφη πάσσαλοι ή άλλοι τρόποι θεμελίωσης της πλάτης μπορεί να απαιτηθούν προκειμένου να αυξηθεί η δύναμη αντίδρασης του τοίχου ώσης. Σε περιοχές όπου το βάθος εκσκαφής δεν είναι αρκετό ώστε να κατασκευαστεί τοίχος ώσης, η αντίδραση της ώσης πρέπει να αντισταθμιστεί με άλλου είδους θεμελιώσεις που να μπορούν να παραλάβουν οριζόντια φορτία.

Έμβολα υψηλής υδραυλικής πίεσης δίνουν ικανοποιητικές δυνάμεις ώσης προκειμένου να προωθηθούν τσιμεντένιοι αγωγοί. Η διάμετρος του εμβόλου καθώς και μήκος του εμβόλου προσαρμόζονται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισοκατανομή των δυνάμεων στον αγωγό, τοποθετείται ένας δακτύλιος ανάμεσα στα έμβολα και την σωλήνα. Τα έμβολα ρυθμίζονται ώστε να έχουν την ίδια δύναμη και επιμήκυνση. Ο αριθμός των εμβόλων μπορεί να ποικίλει (πάντα ζυγός αριθμός) ανάλογα με το μέγεθος του αγωγού, τον τύπο του εδάφους, την δύναμη των εμβόλων και το συνολικό μήκος του αγωγού .

## **2.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Μεθόδων**

### **2.6.1 Γενικά**

Στην ενότητα αυτή θα παρατεθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μιας από τις μεθόδους που περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα θα γίνει και μια σύγκριση των μεθόδων όσο αφορά βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τον σχεδιασμό διάνοιξης μιας σήραγγας, όπως είναι το κόστος, ο χρόνος κατασκευής, οι επιδράσεις στην βραχομάζα και τα περιβάλλοντα πετρώματα .

### **2.6.2 Πλεονέκτημα και Μειονεκτήματα Μεθόδων Διάνοιξης**

#### **2.6.2.1 Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής**

Η χρήση των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής πραγματοποιείται όταν πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις όπως (Εξαδάκτυλος, Γ, 2004):

- Τα πετρώματα δεν είναι πολύ σκληρά
- Οι ιδιότητες των πετρωμάτων δεν μεταβάλλονται σημαντικά
- Οι απαιτούμενες γωνίες καμπυλότητας του άξονα της στοάς είναι σχετικά μεγάλες

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των εκσκαφών με μηχανές ολομέτωπου κοπής είναι τα ακόλουθα:

- Η ταχύτητα προχώρησης είναι μεγάλη (ιδιαίτερα σε μαλακά και όχι πολύ συνεκτικά πετρώματα)
- Τα περιβάλλοντα πετρώματα καθώς και η προς εξόρυξη βραχομάζα παραμένουν αδιατάρακτα
- Οι παρειές της εκσκαφής είναι λείες
- Συνήθως δεν απαιτείται πρόσθετη εργασία για την περαιτέρω διαμόρφωση της διατομής της εκσκαφής
- Η ευθυγραμμία της στοάς δύναται να ελέγχεται ασφαλέστερα και ακριβέστερα
- Απαιτείται λιγότερο προσωπικό ανά βάρδια.
- Η ασφάλεια γενικά είναι καλύτερη και ειδικότερα για τους εργαζόμενους στο μέτωπο της εκσκαφής



- Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν υπάρχουν διακοπές στην συνεχή διαδικασία κοπής - υποστήριξης
- Επιτυγχάνεται απολύτως το επιθυμητό μέγεθος της διατομής με ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak)
- Μπορεί να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη της πορείας προόδου και είναι εφικτός ο σωστός χαρακτηρισμός των υπογείων συνθηκών.
- Η πορεία της εκσκαφής ελέγχεται ηλεκτρονικά με αισθητήρες laser και η απόκλιση από την προκαθορισμένη μηκοτομή είναι από ελάχιστη έως μηδαμινή
- Μπορούν να συλλεχθούν μετρήσεις των ιδιοτήτων της βραχομάζας από αισθητήρες που βρίσκονται στην κοπτική κεφαλή
- Η λειτουργία γίνεται χωρίς έντονους κραδασμούς, επομένως δεν υφίστανται σχεδόν καθόλου ανησυχία για τις εδαφικές δονήσεις.
- Η εκσκαφή της επιφάνειας όρυξης είναι ομαλή, οπότε έχουμε μειωμένο ποσοστό σκόνης, μικρότερο κόστος επένδυσης, μείωση ρίσκου για την εισροή νερών.
- Η αποκομιδή του θρυμματισμένου υλικού (muck) είναι εύκολη και επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποίηση αυτού.
- Γενικότερα το κόστος διάνοιξης μιας σήραγγας με TBM είναι τελικά μικρότερο από το κόστος που θα υπήρχε αν ακολουθούνταν άλλη μέθοδος όρυξης

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των εκσκαφών με μηχανές ολομέτρου κοπής είναι τα ακόλουθα (Οικονομόπουλος, 1975) :

- Η αρχική επένδυση κεφαλαίου για τον εξοπλισμό είναι ιδιαίτερα υψηλή
- Τα μηχανήματα κατασκευάζονται κατά παραγγελία και για συγκεκριμένες συνθήκες
- Ο χρόνος παράδοσης του εξοπλισμού είναι μεγάλος
- Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρή ευκινησία και μεγάλη περίοδο εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας.
- Οι μεγάλοι χρόνοι κινητοποίησης και η μικρή κινητικότητα του βαρύ εξοπλισμού, καθιστούν τις διαδικασίες του TBM γενικά πολύ δαπανηρές, για μικρού μήκους σήραγγες
- Υφίστανται αδυναμία ευχερούς αντιμετώπισης μεταβαλλόμενων συνθηκών εξόρυξης (σκληρότητα, υδροφορία, κ.λπ.)

- Οι μετατροπές στα εν λόγω μηχανήματα είναι περιορισμένης ικανότητας, σε περίπτωση αλλαγής των γεωλογικών συνθηκών.
- Υφίστανται αδυναμία εφαρμογής της μεθόδου για την όρυξη σκληρών σχηματισμών, η όρυξη με TBM δεν εφαρμόζεται σε όλα τα πετρώματα.
- Δεν υπάρχει ποικιλία στη διάμετρο και στο σχήμα της εκσκαφής, το TBM διανοίγει μόνο κυκλικές διατομές
- Σε πολύ σκληρό πέτρωμα αναμένονται, μειωμένα ποσοστά διείδυσης και αύξηση των δαπανών σε κοπτικά για σκληρό και λείο πέτρωμα.
- Η διαδικασία δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Σε περίπτωση διακοπής των εργασιών του TBM, το χρονικό αυτό διάστημα της διακοπής, μπορεί να αποβεί καταστρεπτικό για τον προγραμματισμό του έργου. Ο κατασκευαστής πρέπει να καταφέρει να διατηρήσει τη συνεχή λειτουργία του TBM, δεδομένου ότι ολόκληρη η διαδικασία διάνοιξης εξαρτάται από αυτό.
- Είναι δύσκολη η εγκατάσταση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, με αποτέλεσμα η λειτουργία του TBM να καθίσταται ευάλωτη, στην περίπτωση διαταραχής του εδάφους. Η άμεση πρόσβαση στο μέτωπο της βραχομάζας για τη διάνοιξη διατηρημάτων, τη τσιμεντένεση, και την προσωρινή υποστήριξη, είναι δύσκολη με τα περισσότερα μηχανήματα.
- Η προσπάθεια μεταπώλησης ή επαναχρησιμοποίησης ενός TBM είναι εξαιρετικά δύσκολη, με αποτέλεσμα τα περισσότερα των μηχανημάτων να αποσυντίθενται σε παλιοσίδερα ή να θάβονται στην ίδια τους την εκσκαφή, κοντά στην σήραγγα που χρησιμοποιήθηκαν.
- Για λόγους σχεδιασμού, είναι σημαντικό να ληφθούν τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, υπόψη κατά την μελέτη εκσκαφής με TBM. Η εμπειρία των παθημάτων που γίνονται μαθήματα, από τη κάθε σύμβαση έργου σήραγγας, διευκολύνει το σχεδιασμό των εργολάβων και βελτιστοποιεί τη χρήση του εξοπλισμού.

### 2.6.2.2 Μηχανήματα Σημειακής Κοπής

Κάποια από τα μειονεκτήματα των TBM μπορούν να αρθούν με την χρήση των μηχανημάτων σημειακής κοπής. Οι μηχανές σημειακής κοπής έχουν, γενικά, τα ίδια πλεονεκτήματα με τα άλλες διατάξεις μηχανικής όρυξης σηράγγων, αν και μειονεκτούν σε σχέση με τα TBM σε πολύ μικρές τιμές αντοχής πετρώματος και σε σχέση με τα δισκοειδή κοπτικά σε πολύ μεγάλες. Παρόλα αυτά, στα όρια λειτουργίας τους, τα μηχανήματα σημειακής κοπής προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα (Εξαδάκτυλος, Γ, 2004) :

- Έχουν ευελιξία κατά την διάνοιξη της διατομής της σήραγγας. Ενώ ένα TBM μπορεί να δημιουργήσει μόνο μια κυκλική διατομή συγκεκριμένης διαμέτρου, τα μηχανήματα σημειακής κοπής μπορούν να παράγουν μια μεγάλη ποικιλία μεγεθών και σχημάτων διατομών.
- Ακόμα, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις περισσότερες τροποποιήσεις της μεθόδου εκσκαφής.
- Το μέτωπο παραμένει προσβάσιμο, για οποιεσδήποτε μετρήσεις, χωρίς περιορισμούς σημείου μέτρησης και χωρίς σημαντική επιβράδυνση των εργασιών.
- Η επένδυση, σε σύγκριση με τα TBM είναι πολύ χαμηλότερη, με δυνατότητα δημιουργίας διατομής παρόμοιου μεγέθους. Το κόστος του Roadheader είναι της τάξεως του 15 (μεγάλες διατομές) με 30 % (μικρές διατομές) ενός TBM.
- Πολύ συχνά, τέτοια μηχανήματα είναι διαθέσιμα για ενοικίαση, πράγμα που τα κάνει ελκυστικά και για κατασκευές μικρότερου προϋπολογισμού.
- Η εκκίνηση της διάνοιξης είναι άμεση. Οι μηχανές σημειακής κοπής μπορούν να λειτουργήσουν από την πρώτη στιγμή που φτάνουν στο εργοτάξιο, καθώς δεν απαιτείται σημαντική συναρμολόγηση.
- Η αποκομιδή του προϊόντος επιτυγχάνεται με πτύο και η μεταφορά του γίνεται με ταινιόδρομο, που είναι προσαρτημένα πάνω στο μηχανήμα, με αποτέλεσμα να μην σταματάει η διαδικασία όρυξης
- Οι χρόνοι παράδοσης είναι πολύ μικρότεροι καθώς φτάνουν τους 3 –6 μήνες για ένα καινούργιο μηχανήμα, ενώ για μεταχειρισμένα οι χρόνοι αυτοί είναι ακόμα μικρότεροι.

- Τα τα μηχανήματα σημειακής κοπής έχουν την ικανότητα ελιγμών κατά την όρυξη διασταυρώσεων σηράγγων (σήραγγα της Μάγχης).

Ωστόσο και η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποια αδύνατα σημεία. Τα κυριότερα των μειονεκτημάτων είναι τα εξής:

- Ο χρόνος εκσκαφής είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο ενός TBM
- Η διαδικασία είναι ασυνεχής καθώς μετά την όρυξη του μετώπου θα πρέπει να τοποθετηθεί η προσωρινή υποστήριξη σύμφωνα με την τεχνική της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM)
- Τα μηχανήματα αυτά δεν έχουν εφαρμογή σε πολύ σκληρά πετρώματα. Το όριο εκσκαφής τους είναι τα πετρώματα με αντοχή της τάξης των 110 MPa.
- Σε πολύ σκληρό πέτρωμα αναμένονται, μειωμένα ποσοστά διείσδυσης και αύξηση των δαπανών σε κοπτικά για σκληρό και λείο πέτρωμα.
- Λόγω της απόξεσης παράγεται μεγάλη ποσότητα σκόνης και η εργασία στο μέτωπο καθίσταται εξαιρετικά δυσμενής
- Η επιφάνεια στο μέτωπο και τις παρειές της διάνοιξης δεν είναι λεία, με αποτέλεσμα να πρέπει να επέμβει αποξεστήρας για την τελική διαμόρφωση της διατομής
- Η πορεία της εκσκαφής σε σχέση με την προκαθορισμένη θα πρέπει να ελέγχεται ξεχωριστά από την όρυξη, με αποτέλεσμα την επέκταση του χρόνου κατασκευής

Τα μηχανήματα σημειακής κοπής είναι μια παραπλήσια τεχνική εξόρυξης με αυτή του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μικρού προϋπολογισμού και όταν έχουν να αντιμετωπίσουν εναλλασσόμενες συνθήκες στο μέτωπο εκσκαφής. Ωστόσο η διαδικασία είναι ασυνεχής, και ο ρυθμός όρυξης σημαντικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο με TBM.

### **2.6.2.3 Διάνοιξη Μικροσηράγγων με Ταυτόχρονη Υδραυλική Προώθηση Σωλήνων**

Η μέθοδος Pipe Jacking μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλους τους τύπους εδαφών. Μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια σε μεγάλο βαθμό. Λόγω του γεγονότος ότι ο χειριστής του μηχανήματος βρίσκεται μπροστά στο μέτωπο ή εποπτεύει με την χρήση κάμερας, έχει την δυνατότητα άμεσης επέμβαση στην περίπτωση που απαντάται αλλαγή στην σύσταση του υπεδάφους. Στην περίπτωση που απαντώνται μη καταγεγραμμένα αντικείμενα, μπορούν εύκολα να αναγνωρισθούν και να απομακρυνθούν. Ακόμα η μέθοδος παρουσιάζει πολλές διαφορετικές παραλλαγές ανάλογα με τον τύπο του υπεδάφους. Ακόμα η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

- Είναι φιλική προς το περιβάλλον και εφαρμόζεται χωρίς κανένα πρόβλημα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές .
- Πολλές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου αυτής εντοπίζονται κάτω από δρόμους, αυτοκινητόδρομους, σιδηροδρομικές γραμμές ή αεροδρόμια. Δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ καμία επίπτωση στην κατασκευή των σηράγγων ή στην λειτουργεί τους.
- Δεν χρειάζεται ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα .
- Έχει την ελάχιστη δυνατή ενόχληση στην γύρω περιοχή.
- Έχει την δυνατότητα 24-ώρης λειτουργίας (αθόρυβη μέθοδος με δραστική μείωση της ποσότητας των εκσκαφών)
- Δυνατότητα κατασκευής του αγωγού με μεγαλύτερη ακρίβεια λόγω συνεχούς καταγραφής της θέσης της κοπτικής κεφαλής.
- Ανάλογα με τις συνθήκες των πετρωμάτων, παρουσιάζει δυνατότητα χρησιμοποίησης κεφαλής διατρήσεως ανοιχτού ή κλειστού τύπου για μεγαλύτερη απόδοση.

Όμως όπως κάθε μέθοδος έχει και αυτή τα μειονεκτήματά της. Πιο αναλυτικά, η μέθοδος Pipe Jacking είναι εξειδικευμένη εφαρμογή και για αυτό τον λόγο απαιτεί πολύ καλή οργάνωση και συγχρονισμό. Παρόλο που οι εργασίες αυτές (συντονισμός, προπαρασκευή) μπορούν να εκτελεστούν σε μια ακτίνα γύρω από το έργο, απαιτείται όλες οι αλλαγές διευθύνσεις να γίνονται από το φρεάτιο εκσκαφής. Οι σωλήνες και τα βαγονέτα που χρησιμοποιούνται σε αυτή την μέθοδο πρέπει να είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να αντέχουν μεγάλα θλιπτικά φορτία. Γι'αυτό δεν μπορούν όλοι οι τύποι αγωγών και βαγονέτων να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη μέθοδο.

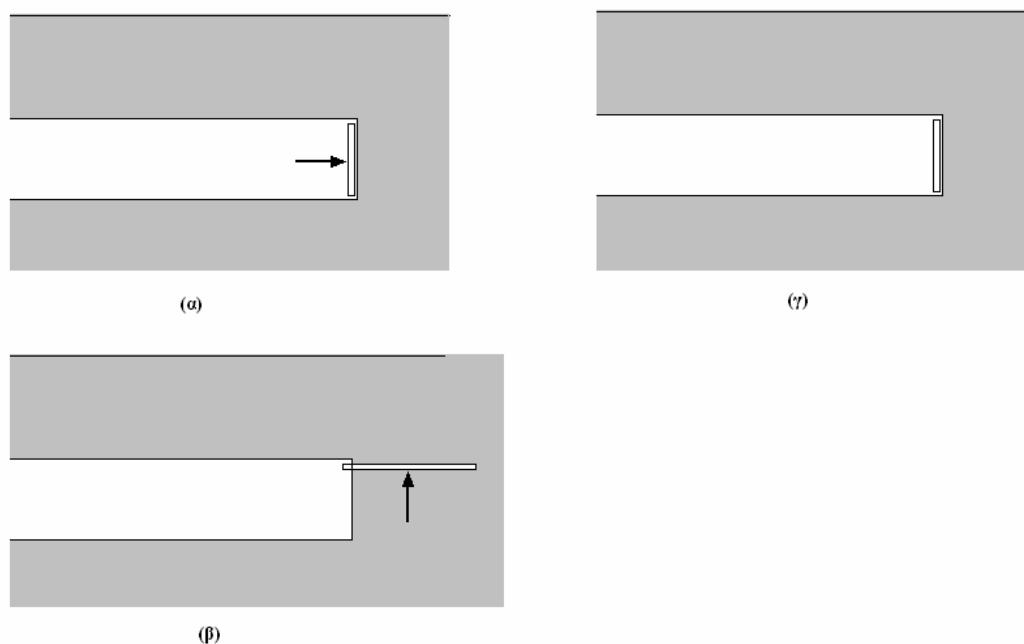
## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την φάση της κατασκευής αβαθών σηράγγων είναι η αστοχία του μετώπου εκσκαφής. Η κατασκευή αβαθών σηράγγων δεν είναι ίδια όπως οι επιφανειακές γεωτεχνικές κατασκευές, όπου επέρχεται φυσική ισορροπία δυνάμεων, μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους, μετά από την ολοκλήρωση της κατασκευής με την εμφάνιση πεπερασμένων συνήθως καθιζήσεων που είναι αναγκαίες για την παραλαβή των φορτίων. Στις υπόγειες κατασκευές όπως οι σήραγγες γίνεται έντονη διαταραχή της υπάρχουσας ισορροπίας, που συνίσταται κυρίως στην αφαίρεση εδαφικών μαζών και την δημιουργία ενός τρισδιάστατου κενού . Οι έκταση και ένταση της προσχεδιασμένης αυτής διαταραχής δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητές.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των υπόγειων κατασκευών είναι, ότι το στάδιο στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη παραλαβή φορτίων από την κατασκευή δεν βρίσκεται ούτε στην έναρξη των εργασιών αλλά ούτε στο πέρας αυτών. Το στάδιο που μεσολαβεί ανάμεσα στα δυο προαναφερθέντα είναι αυτό που παρουσιάζει τη μέγιστη επικινδυνότητα. Για να κατανοήσει κανείς ποσό ‘ευαίσθητο’ είναι αυτό το ενδιάμεσο στάδιο, αρκεί να καταλάβει ότι η σωστή υποστήριξη της σήραγγας και η προκύπτουσα ανακατανομή των τάσεων γύρω από αυτήν είναι οι παράγοντες που καθορίζουν και το χρόνο ζωής της. Η υποστήριξη και παραλαβή των φορτίων μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους (Εικόνα 3.1):

- Υποστήριξη στο μέτωπο της σήραγγας
- Υποστήριξη μακριά από το μέτωπο
- Καθόλου



Εικόνα 3.1: α) Υποστηριζόμενο μέτωπο (TBM) β) Προστατευόμενο μέτωπο (NATM) γ) Ανυποστήρικτο (ενδοτικό) μέτωπο (forepoling)

### 3.2 Εδαφική Καθίζηση

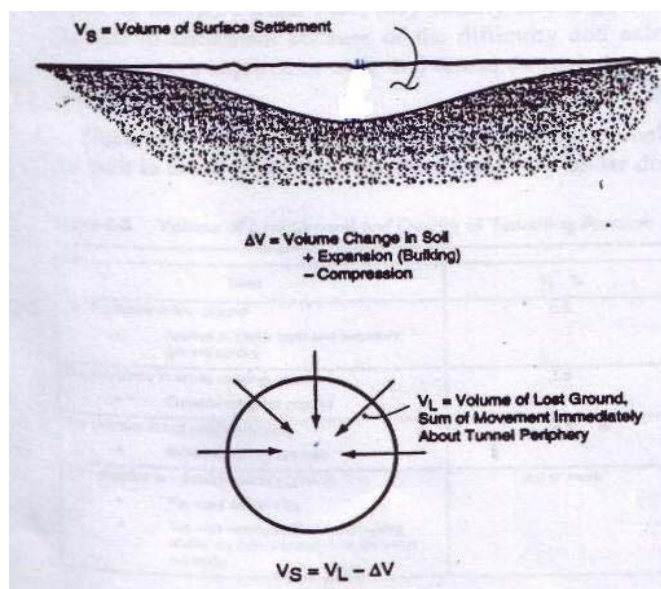
Μέχρι την δεκαετία του 1970 δεν είχαν αποκτηθεί πολλά δεδομένα σχετικά με την μετακίνηση των εδαφών γύρω από την σήραγγα. Από τότε μέχρι σήμερα τα δεδομένα ολοένα και αυξάνουν αλλά η αλλαγή επήλθε κυρίως χάρη στις μετρήσεις που έγιναν στις σήραγγες της Βαλτιμόρης και της Ουάσινγκτον D.C. Εκεί ορίστηκαν οι ακόλουθες ποσότητες (Bickel, O. John):

- Μεταβολή του όγκου ( $\Delta V$ ), δηλαδή η αύξηση ή μείωση του όγκου των γαιών λόγω της διανοίξης της σήραγγας.
- Μεταβολή του όγκου γαιών στην επιφάνεια ( $V_s$ )
- Μεταβολή του όγκου γαιών στο μέτωπο της σήραγγας ( $V_L$ )

Η σχέση μεταξύ των τριών παραπάνω όγκων είναι πολύπλοκη και δεν έχει ξεκαθαριστεί τελείως (Εικόνα 3.2). Παρόλα αυτά στις περισσότερες των περιπτώσεων γίνεται η υπόθεση ότι η μεταβολή του όγκου στην επιφάνεια λόγω της υποχώρισης είναι ίδια με την μεταβολή του όγκου στο μέτωπο της σήραγγας. Η υπόθεση αυτή είναι απόρροια της αρχής διατήρησης της μάζας και βρίσκει εφαρμογή στις περισσότερες



των περιπτώσεων, όπου η εμφανιζόμενη αύξηση ή μείωση του όγκου είναι αμελητέα (π.χ. αργιλικά υλικά).



Εικόνα 3.2- Σχηματική αναπαράσταση των τριών ογκομεταβολών (Bickel, O. John )

### 3.2.1 Κατανόηση της Διαταραχής στο Χώρο

Για μία μονή σήραγγα η διαταραχή που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια είναι συνήθως ίση με την διαταραχή που λαμβάνει χώρα εντός της σήραγγας. Στις περισσότερες περιπτώσεις το σχήμα αυτής της διαταραχής στην επιφάνεια λαμβάνει τη μορφή μιας ανεστραμμένης Γκαουσιανής κατανομής (καμπάνας). Η υπόθεση αυτή χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων μελετητών αρχικά από τους Peck (1969) και Schmidt (1969) με σκοπό να συγκρίνουν τις μετρήσεις που είχαν γίνει σε διάφορες σήραγγες .

### 3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση παλαιότερων εργασιών

Στο παρελθόν έχουν γίνει διαφορές μελέτες για τις επιπτώσεις της αστοχίας του μετώπου σήραγγας. Στην εργασία των Atkinson & Potts (1977) έγινε μια διερεύνηση, όπου συμπεραίνεται ότι το κάτω όριο της πίεσης που πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο γεωυλικού χωρίς συνοχή προκειμένου αυτό να μην αστοχήσει δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

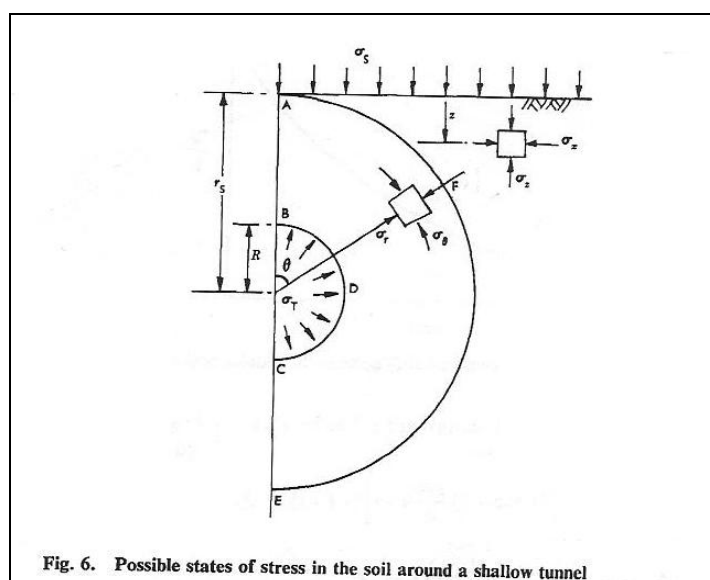
$$\frac{\sigma_T}{2\gamma R} = \frac{\mu}{(\mu^2 - 1)}$$

όπου

- $\sigma_T$  είναι η τάση που εφαρμόζεται στο μέτωπο
- $\gamma$  είναι το μοναδιαίο βάρος του εδάφους
- $R$  είναι η ακτίνα της σήραγγας
- $\mu = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ , όπου  $\phi$  η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

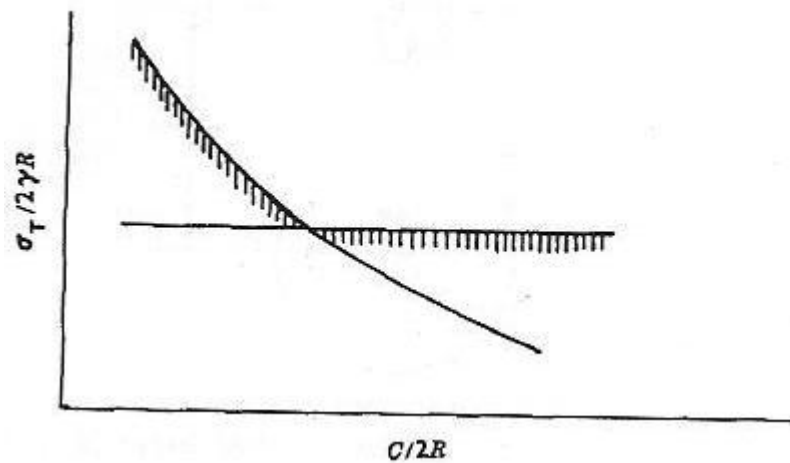
Αντιστοίχα κατέληξαν σε έναν τυπο που εκφράζει το άνω όριο της πίεσης που πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο προκειμένου να μην έχουν εδαφική διοόγκωση μπροστά από το μέτωπο :

$$\frac{\sigma_T}{2\gamma R} = \frac{1}{4 \cos \phi} \cdot \left( \frac{1}{\tan \phi} + \phi - \frac{\pi}{2} \right)$$

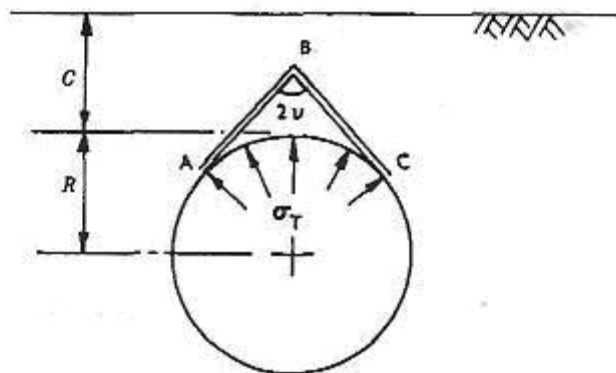


Εικόνα 3.3 Απλουστευμένες εντατικές καταστάσεις γύρω από την σήραγγα (Atkinson & Potts, 1977)

Επίσης καταλήγουν σε ένα διάγραμμα στο οποίο σημειώνούν ότι πρέπει οι λύσεις των παραμετρικών εξισώσεων του κάτω οριακού θεωρήματος να βρίσκονται πάνω από τις γραμμοσκιασμένες καμπύλες (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4 : Οι λύσεις των παραμετρικών εξισώσεων πρέπει να βρίσκονται πάνω από τις γραμμοσκιασμένες καμπύλες. (Atkinson & Potts, 1977)

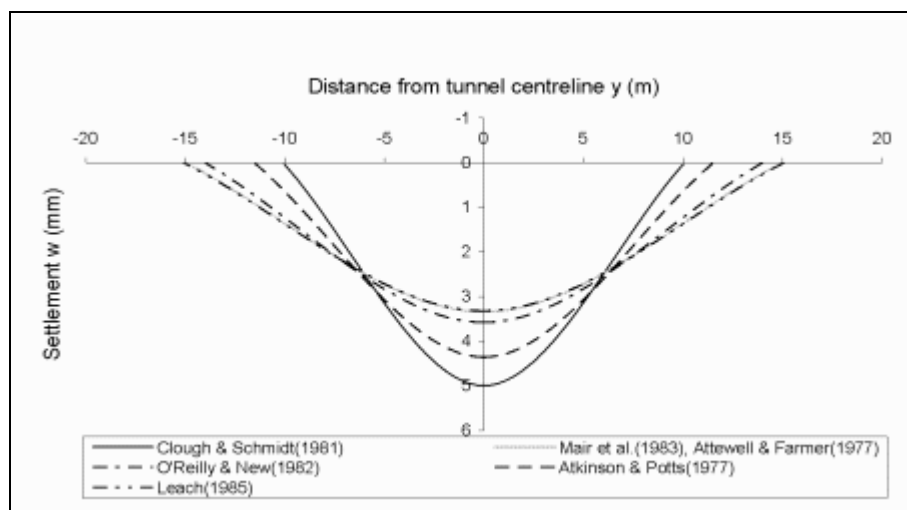


Εικόνα 3.5: Μηχανισμός κατάρρευσης για την επίλυση με το άνω οριακό θεώρημα (Atkinson & Potts, 1977)

Οι Wooi Long Tan & Apothegm Garage Ramjet (2003), κάνουν μια διερεύνηση για τις επιπτώσεις της αστοχίας, του μετώπου, στην ελεύθερη επιφάνεια. Στην εργασία τους αναφέρουν τους εμπειρικούς τύπους που έχουν κατά καιρούς διατυπωθεί από διαφόρους ερευνητές (Πίνακας 3.1), ως προς την κατανομή της καθίζησης στην επιφάνεια., και ότι σχεδόν όλες οι σχέσεις προσεγγίζουν την Γκαουσιανή κατανομή (Εικόνα Εικόνα 3. 3.6).

Reference	$i$	Basis for empirical solution
Peck (1969)	$i/R = (z_o/2R)^n$ ( $n=0.8 - 1.0$ )	Field observations
Attewell and Farmer (1974)	$i/R = (z_o/2R)^n$ ( $a=1, n=1$ )	Field observations of UK tunnels
Clough and Schmidt (1981)	$i/R = (z_o/2R)^n$ ( $a=1, n=0.8$ )	Field observations of UK tunnels
O'Reilly and New (1982)	$i = 0.43z_o + 1.1m$ (cohesive soil ( $3 \leq z_o \leq 34m$ )) $i = 0.43z_o + 1.1m$ (cohesive soil ( $3 \leq z_o = 34m$ )) $i = 0.28z_o - 0.1m$ (granular soil ( $6 \leq z_o \leq 10m$ ))	Field observations of UK tunnels
Atkinson and Potts (1977)	$i = 0.25(z_o + R)$ (loose sand) $i = 0.25(z_o + R)$ (loose sand) $i = 0.25(1.5z_o + 0.5R)$ (dense and OC clay)	Field observations and model tests
Leach (1985)	$i = (0.57 + 0.45z_o) \pm 0.01m$	For sites where consolidation effects are insignificant
Mair et al. (1983)	$i = 0.5z_o$	Field observations and centrifuge tests

Πίνακας 3.1: Εμπειρικοί τύποι για την κατανομή της καθίζησης (Wooi Leong Tan 2003)



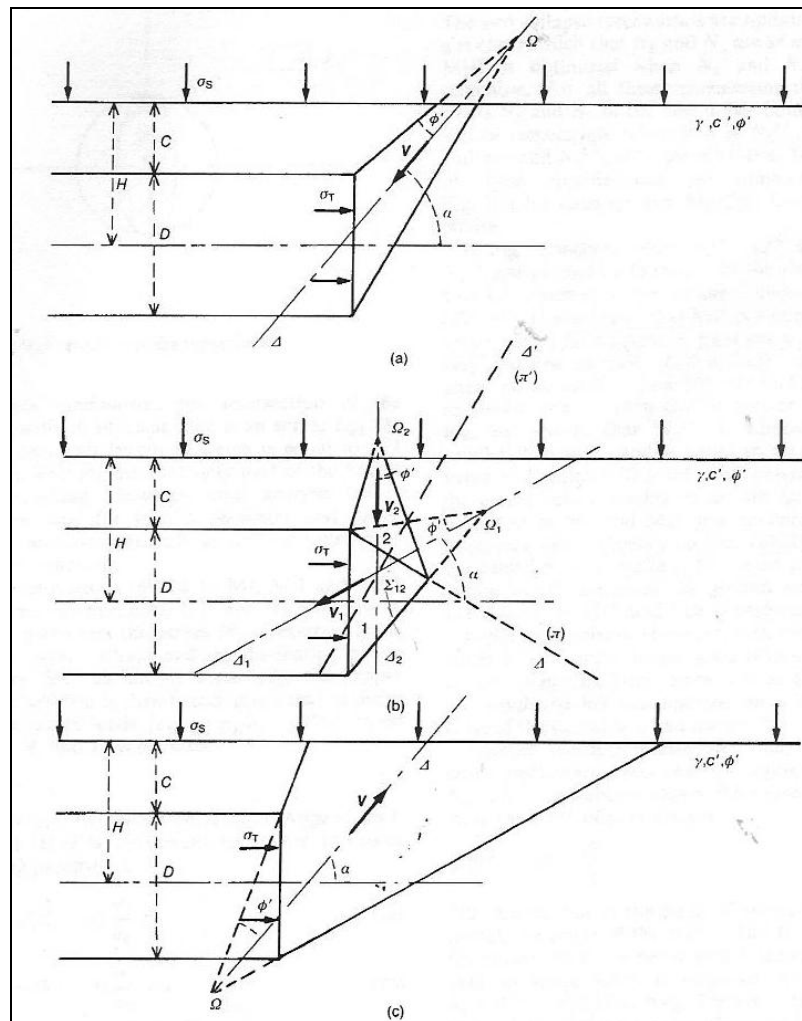
Εικόνα 3.6: Γραφική αναπαράσταση των γκαουσιανών κατανομών ((Wooi Leong Tan 2003)

### 3.4 Μηχανισμοί Αστοχίας

Ο Leca & Dormieux (1983) παρουσιάζουν τους τρεις κύριους μηχανισμούς αστοχίας που μπορούν να παρατηρηθούν στις αβαθείς σήραγγες, που βρίσκονται μέσα σαθρό, χαλαρό εδαφικό υλικό το οποίο παρουσιάζει μικρή έως καθόλου συνεκτικότητα (Εικόνα 3.7)

Πιο αναλυτικά στην Εικόνα 3.7 παρατηρούνται τρεις μηχανισμοί αστοχίας. Οι μηχανισμοί τύπου (α) και (β) επισημαίνονται όταν παρατηρείτε κατάρρευση μετώπου της σήραγγας (ενεργητική φόρτιση) ενώ ο μηχανισμός (γ) παρατηρείται όταν η πίεση στο μέτωπο είναι μεγαλύτερη από την πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα στρωματά στη σήραγγα. (παθητική φορτίση).

Αστοχία λόγω καθίζησης παρατηρείται λόγω της δημιουργίας ενός κόλπου κώνου (σχήμα α) και δυο κώνων (σχήμα β). Παρόλο που οι μηχανισμοί (α) και (β) είναι πιο πιθανοί κατά την διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας, ο μηχανισμός (γ) δεν πρέπει να παραβλέπεται ειδικότερα όταν η σήραγγα διανοίγεται σε πολύ μικρά βάθη, σε χαλαρά ή αποσαθρωμένα εδάφη όπου η τάση που εφαρμόζεται στο μέτωπο, για την συγκράτηση του εδάφους, είναι τόσο μεγάλη που μπορεί το έδαφος μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής να ανυψωθεί. Φαινόμενα αυτού του είδους έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν (Clough *et al.*, 1983).



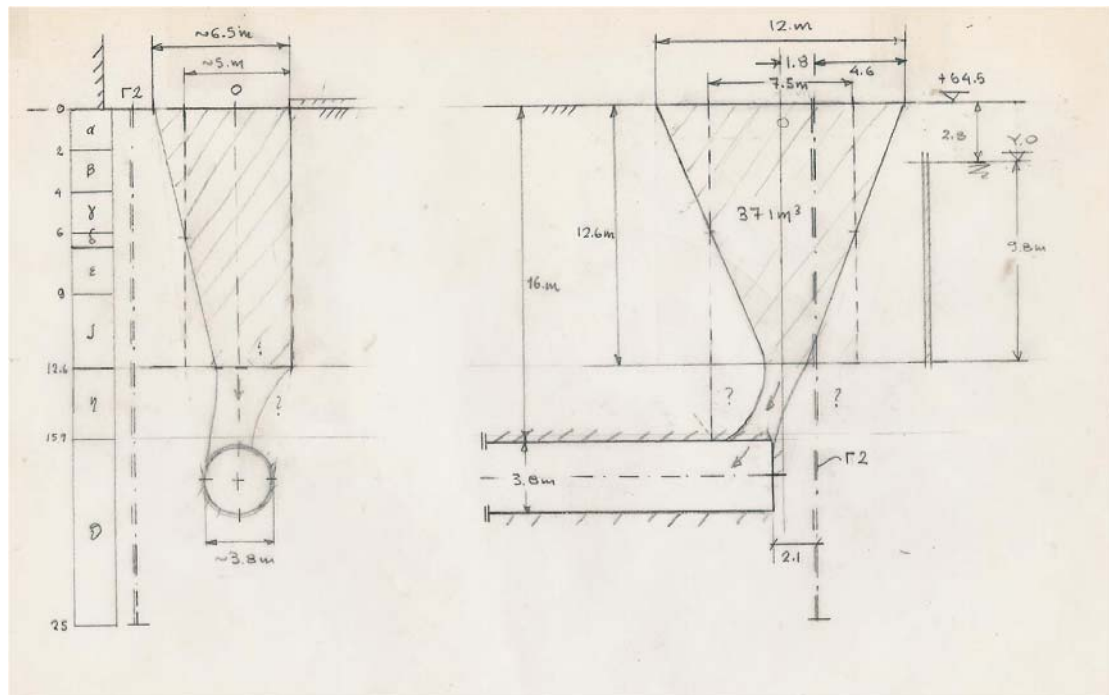
Εικόνα 3.7: Κώνοι αστοχίας σε θεωρητικό μοντέλο αβαθούς σήραγγας (Leca & Dormieux, 1983)

### 3.5 Πραγματικό Παράδειγμα Αστοχίας

Στην Εικόνα 3.8 δίνουμε ένα παράδειγμα δημιουργίας επιφανειακού κρατήρα που είναι το αποτέλεσμα μίας κατάρρευσης μετώπου σήραγγας κατά την φάση κατασκευής. Η σήραγγα είχε διάμετρο περί τα 4m και βάθος από την επιφάνεια 16 m . Ο κρατήρας στην επιφάνεια του οδοστρώματος είχε περίπου ελλειπτικό ίχνος με το μήκος του μεγάλου και μικρού άξονα γύρω στα 12m και 6.5m αντίστοιχα. Από τον όγκων των εδαφικών υλικών που εισέρρευσαν στην σήραγγα έγινε μία πρώτη προσεγγιστική εκτίμηση του όγκου της κρατήρα της κατάπτωσης (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.8: Εμφάνιση επιφανειακού κρατήρα λόγω κατάρρευσης του μετώπου μίας σήραγγας κατά την φάση εκσκαφής.



Εικόνα 3.9: Εκτίμηση κώνου αστοχίας από το ισοζύγιο μαζών (Ι.Βαρδουλάκης, 2006)



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Περιγραφή της Πειραματικής Συσκευής

Η πειραματική προσομοίωση της αστοχίας μετώπου αβαθούς σήραγγας έγινε εν προκειμένω με τη κατασκευή και χρήση κατασκευής ενός «αμμοκιβωτίου» (sandbox). Η τεχνική χρήσης πειραμάτων αυτού του τύπου είναι αρκετά διαδεδομένη στη Γεωμηχανική και την τεκτονική Γεωλογία (Terzaghi 1936, McClay 1990, Exadaktylos et al. 2003, Crook et al. 2006 ).

#### 4.1 Πειραματική Συσκευή

Καταρχήν σχεδιάστηκε πειραματική συσκευή με σκοπό την προσομοίωση του μηχανισμού κατάρρευσης αβαθούς σήραγγας σε χαλαρό έδαφος (πολύ μικρής συνοχής). Το πείραμα, σύμφωνα με τις διαστάσεις της πειραματικής συσκευής, προσομοιώνει πραγματικές κατασκευές αβαθών σηράγγων, σε κλίμακα περίπου 1/100, αφού τα πιο αντιπροσωπευτικά βάθη εκσκαφής είναι συνήθως της τάξης των 3.5 m ως 14 m. Το πρόβλημα που μελετάμε εδώ είναι συμμετρικό ως προς κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της σήραγγας. Με βάση αυτήν την παρατήρηση και το γεγονός ότι η συσκευή οφείλει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει οπτικές μετρήσεις στο συγκεκριμένο επίπεδο συμμετρίας (ή μηκοτομή), προσομοιώθηκε μονό η μισή διάταξη (Εικόνα 4.1 και Εικόνα 4.2).

Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκε άμμος της οποίας οι ιδιότητες έχουν ως εξής:

- Γωνία εσωτερικής τριβής  $\varphi = 36,48^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας  $E = 30 - 120 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson  $\nu = 0.3$  (εγινε παρδοχή)
- Ειδικό βάρος άμμου  $\gamma = 2.7 \text{ g/cm}^3$

Για την καλύτερη προσομοίωση η συσκευή σχεδιάσθηκε και ακολούθως κατασκευάστηκε με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. (εικόνες 4.1, 4.2)

- Κλίμακα μελέτης: 1:100 περίπου
- Διαστάσεις: (μήκος x πλάτος x ύψος ) :  $54 \times 152 \times 60 \text{ cm}^3$
- Υλικό κατασκευής: Ξύλο αδιάβροχο.



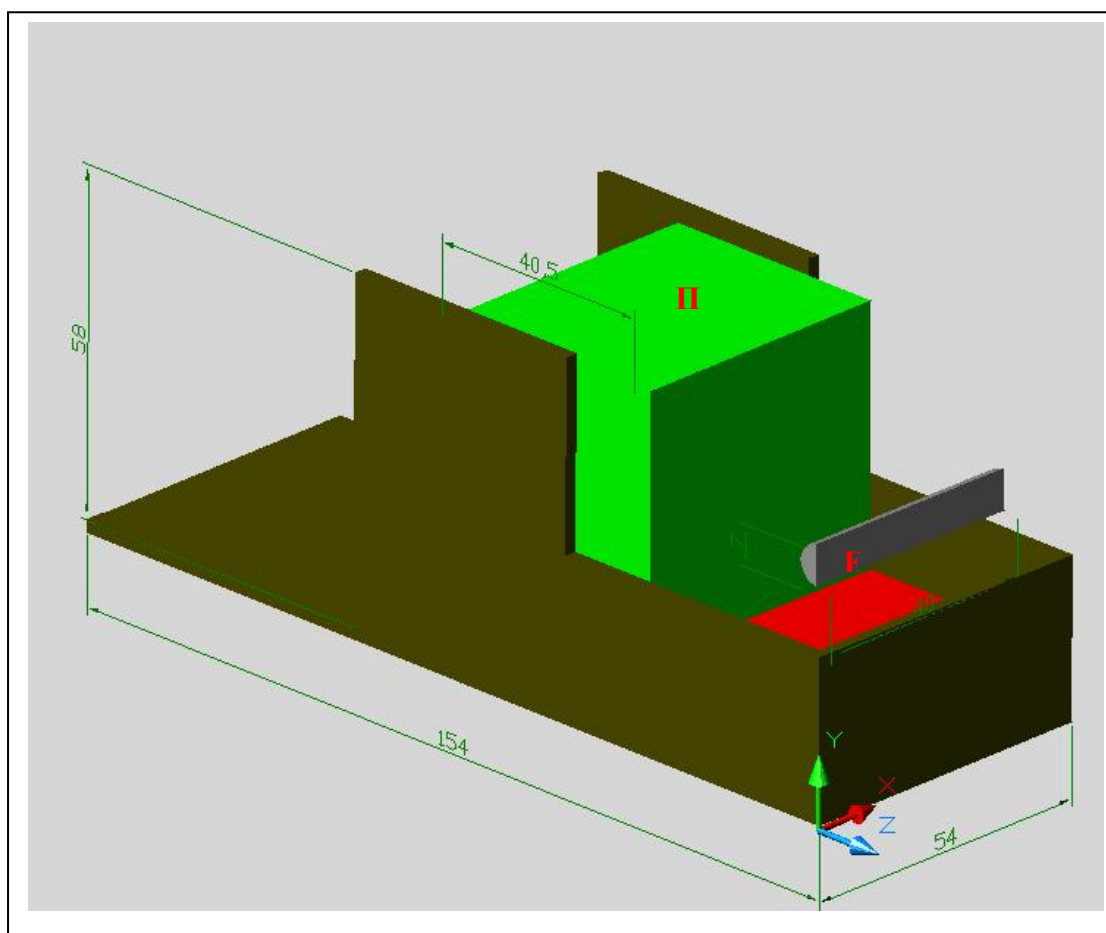
Εικόνα 4.1: Κοντινή άποψη ξύλινης κατασκευής «αμμοκιβωτίου» (sandbox) κατά την πρώτη φάση της κατασκευής αυτού

<i>Τύπος τζαμιού</i>	<i>Μήκος × Πλάτος (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Πάχος (cm)</i>	<i>Τεμάχια</i>
<i>Plexiglas</i>	100 × 55	1	2
<i>Plexiglas</i>	47,7 × 55	1	1
<i>Κρύσταλλο</i>	100 × 55	0,3	2
<i>Κρύσταλλο</i>	47,7 × 55	0,3	1

Πίνακας 1: Διαστάσεις και τύποι υάλων που χρησιμοποιήθηκαν

Ακολουθώς τοποθετήθηκαν πλευρικά της συσκευής διπλά τζάμια για την μακροσκοπική παρακολούθηση της σήραγγας:

Εξωτερικά τοποθετήθηκαν τζάμια από Plexiglas και εσωτερικά τοποθετήθηκαν κρύσταλλα των οποίων οι διαστάσεις φαίνονται στον προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 1). Η χρήση των κρυστάλλων επιβάλλεται διότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ χαλαζίακης άμμου και της αμόρφου υάλου είναι αισθητά πιο χαμηλή από ότι μεταξύ άμμου και Plexiglas. Επιπλέον τα κρύσταλλα δεν χαράσσονται από τους κόκκους της άμμου, γεγονός που επιτρέπει τη λήψη ευκρινών φωτογραφιών του μηχανισμού κατάρρευσης του μετώπου της σήραγγας. Ακολουθώς διαμορφώθηκε στο πλάι μια οπή διαμέτρου 7 cm μέσα στην οποία τοποθετήθηκε σωλήνας από Plexiglas. Μέσα στον σωλήνα αυτό τοποθετήθηκε έμβολο που είχε τη δυνατότητα να μετακινείται αξονικά κατά μήκος του σωλήνα. Έτσι επιτεύχθηκε η ελεγχόμενη αστοχία μετώπου, με την μετακίνηση του εμβόλου εσωτερικά της σήραγγας.



Εικόνα 4.2: Σχεδιασμός μοντέλου στο AutoCAD

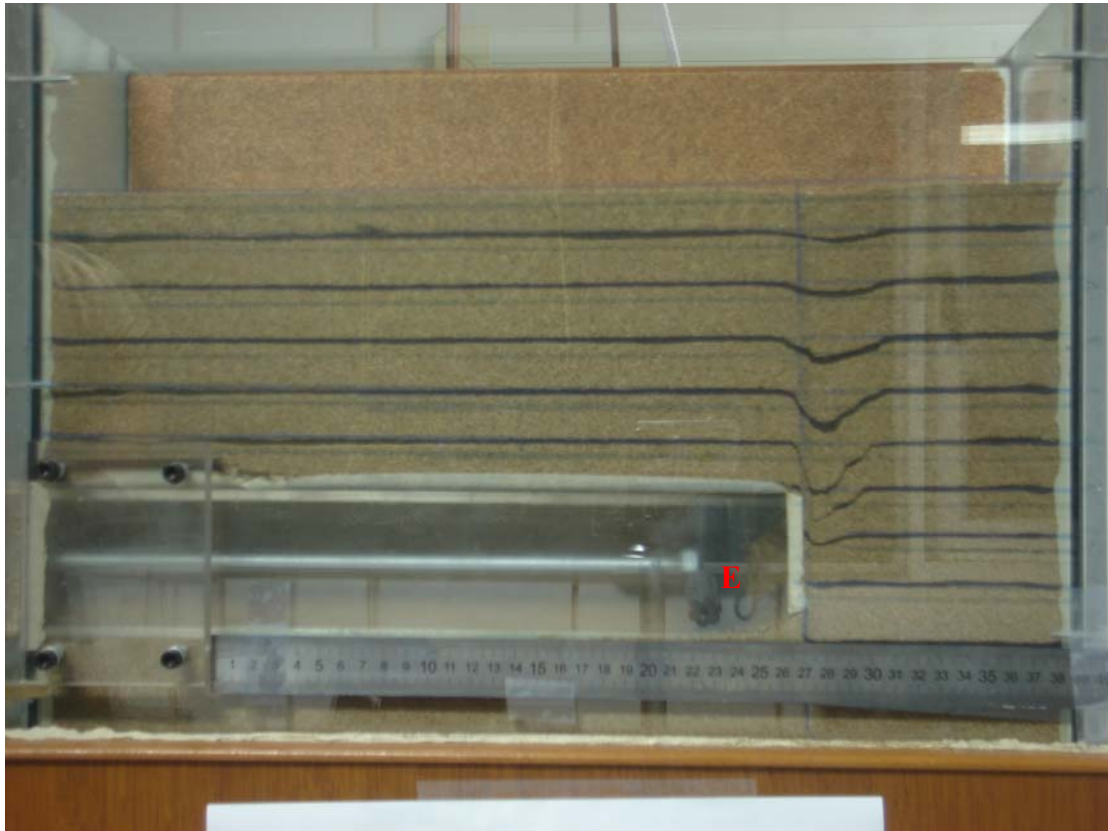
## 4.2 Στάδια Πειράματος

Αρχικά τοποθετείται η πλάτη της συσκευής (II) (Εικόνα 4.2) σε καθορισμένη απόσταση από την σήραγγα. Στα συγκεκριμένα πειράματα τοποθετήθηκε σε απόσταση ίση με  $1.5 D$ , όπου  $D$  η διάμετρος της σήραγγας, η οποία έχει κατασκευαστεί με  $D = 7$  cm. Έπειτα τοποθετήθηκε η άμμος χύδην μέσα στο κιβώτιο με την χρήση χωνιού (Εικόνα 4.3). Ο λόγος που έγινε χύδην η τοποθέτηση της άμμου ήταν για να επιτευχθεί χαλαρή διαστρωμάτωση της άμμου.



Εικόνα 4.3 : Μεταλλικό χωνί καταιονισμού άμμου

Η διαδικασία διάστρωσης της άμμου γίνεται τμηματικά σε καθορισμένα ύψη. Ανά καθορισμένα πάχη διακόπτεται ο καταιονισμός της άμμου και δημιουργείται οριζόντια επιφάνεια με την χρήση αναρροφητήρα και ειδικής συσκευής η οποία επιτρέπει ελεγχόμενη επίτευξη οριζόντιας ελεύθερης επιφανείας. Στο σημείο αυτό τοποθετήθηκαν λεπτές στρώσεις χρωματισμένης άμμου, με spray μαύρου χρώματος, κοντά στη επιφάνεια παρατήρησης η οποία δημιουργεί το απαιτούμενο οπτικό ίχνος που με την σειρά του μας επιτρέπει να μετρήσουμε τις τυχόν καθιζήσεις στο συγκεκριμένο επίπεδο. Στα πειράματα που πραγματοποιήσαμε οι λεπτές στρώσεις άμμου απείχαν μεταξύ τους κατά 1.5 - 2 cm (Εικόνα 4.4 ). Το τελικό επίπεδο διαστρωμάτωσης καθοριζόταν από τον λόγο σήραγγας ( $H/D$ ) που θέλαμε να επιτύχουμε. Συνολικά έγιναν 9 πειράματα και μελετηθήκαν οι λόγοι υψους υπερκειμένων προς την διάμετρο της σήραγγας ( $H/D$ ) ίσους με 0.5 , 1, 2 .

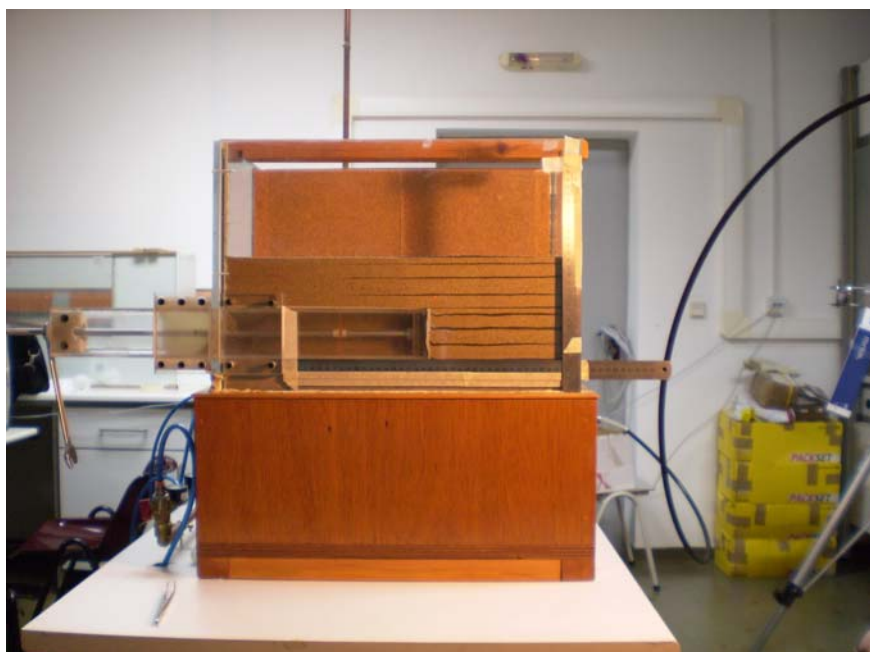


Εικόνα 4.4 Άποψη του προσομοιώματος της αστοχίας μετώπου αβαθούς σήραγγας. Το υλικό προσομοίωσης είναι άμμος. Στην φωτογραφία είναι εμφανής δημιουργία η χωνοειδούς μηχανισμού κατάρρευσης εμπρός και άνωθεν του μετώπου.

Αφού επιτεύχθηκε το επιθυμητό ύψους διαστρωμάτωσης άρχισε η εξόλκευση του εμβόλου (Ε) (Εικόνες 4.3,4.3) με σταθερό ρυθμό περιστροφής του κοχλία. Ο ρυθμός περιστροφής ήταν αργός και έτσι αποφεύχθηκε η δημιουργία υποπίεσης μεταξύ εμβόλου και άμμου .

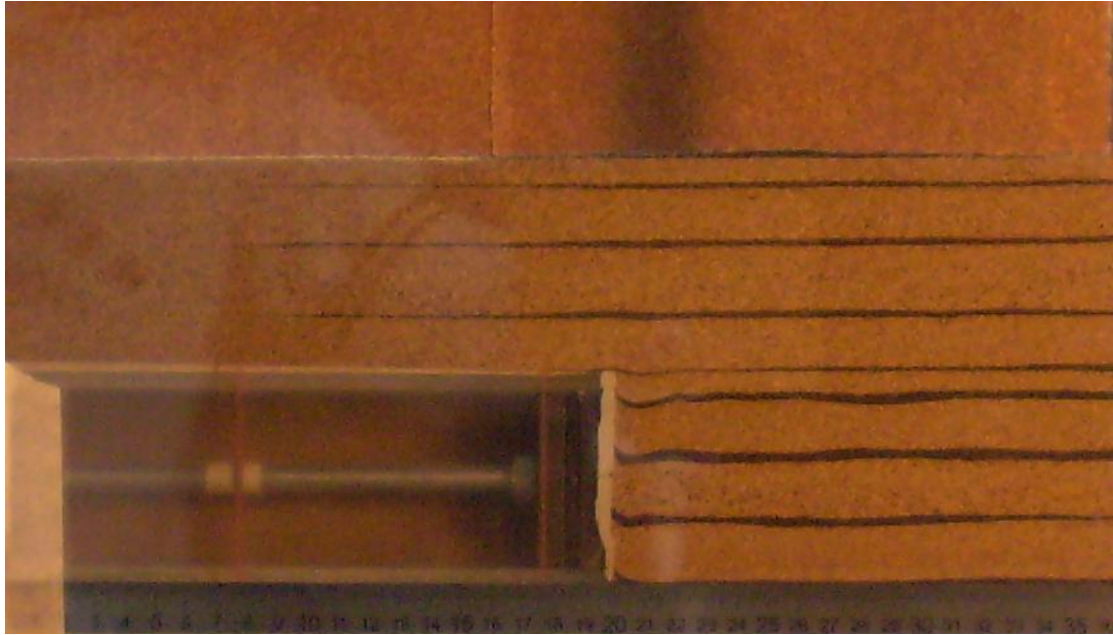
Σε τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονταν φωτογραφίες έτσι ώστε να μπορεί, αργότερα, κατά την επεξεργασία αυτών να βρεθεί η συσχέτιση μεταξύ υποχώρησης μετώπου (εμβόλου) και κατανομής καθιζήσεων μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας.

Οι ακόλουθες φωτογραφίες (Εικόνες 4.5-4.12) παρουσιάζουν διαδοχικά στάδια ενός πειράματος με λόγο  $H/D=1$ .

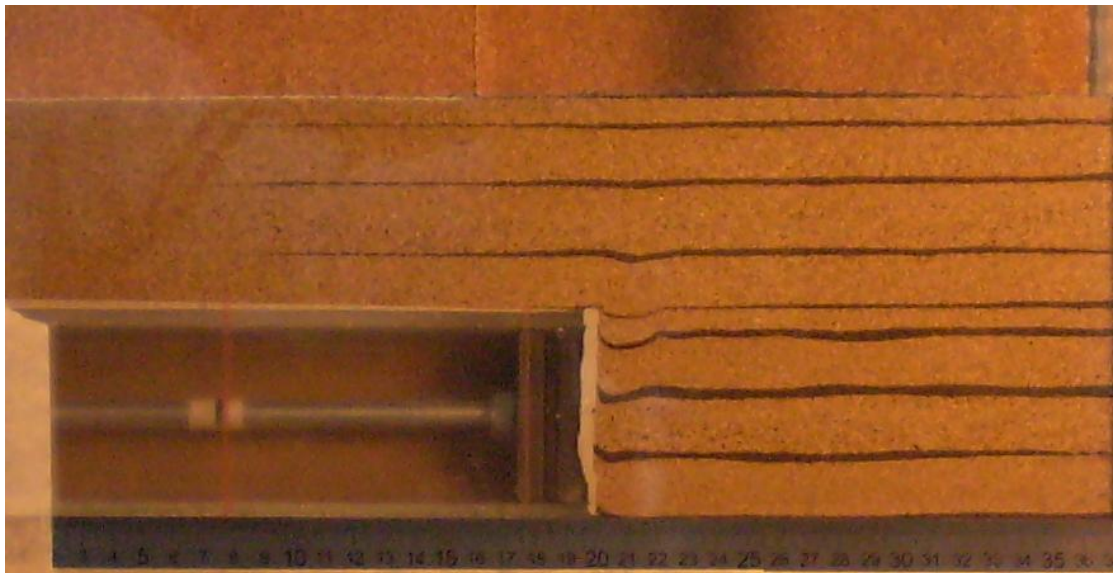


Εικόνα 4.5 Έναρξη της πειραματικής διαδικασίας με λόγο  $H/D=1$

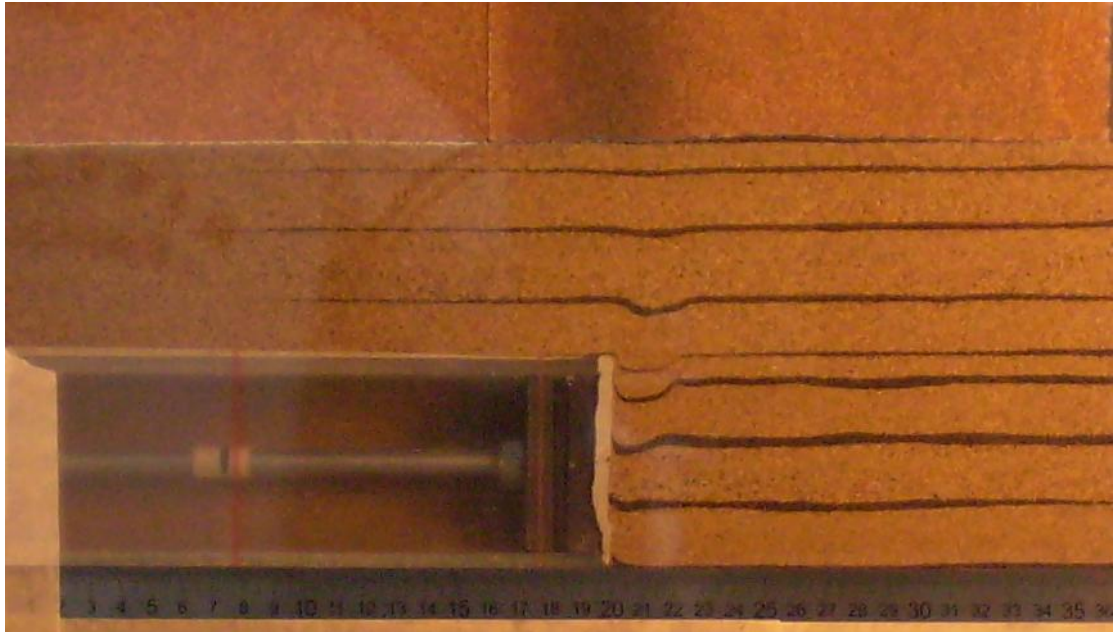




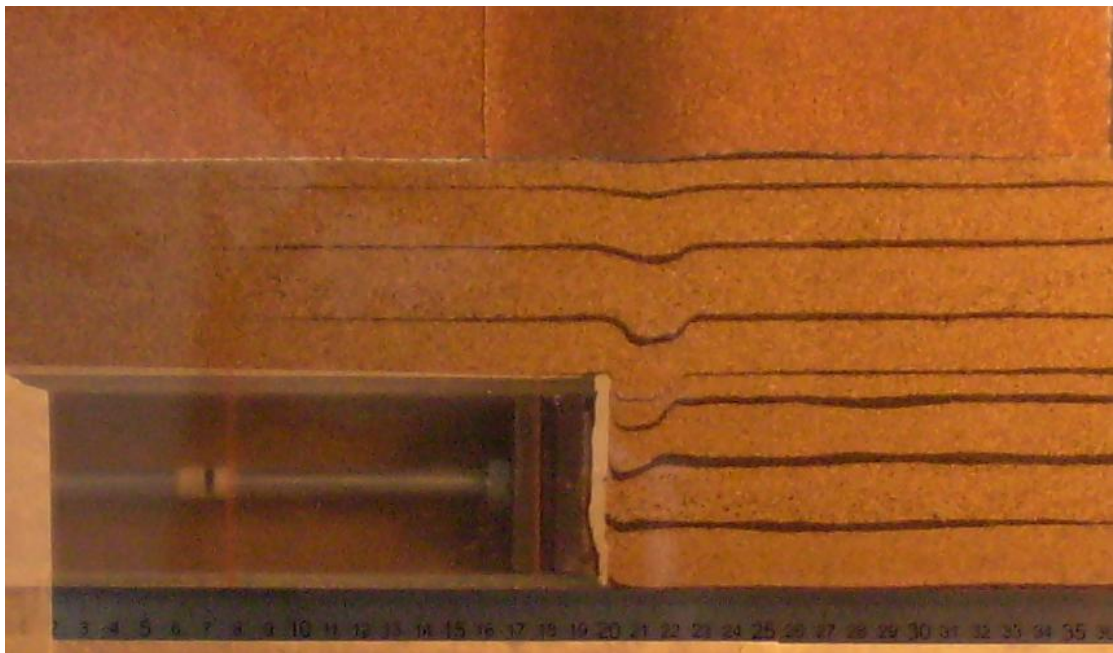
Εικόνα 4.6 Έναρξη της διαταραχής (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 2 mm)



Εικόνα 4.7 Διαταραχή των πλησίων στην σήραγγα στωμάτων (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 4 mm)

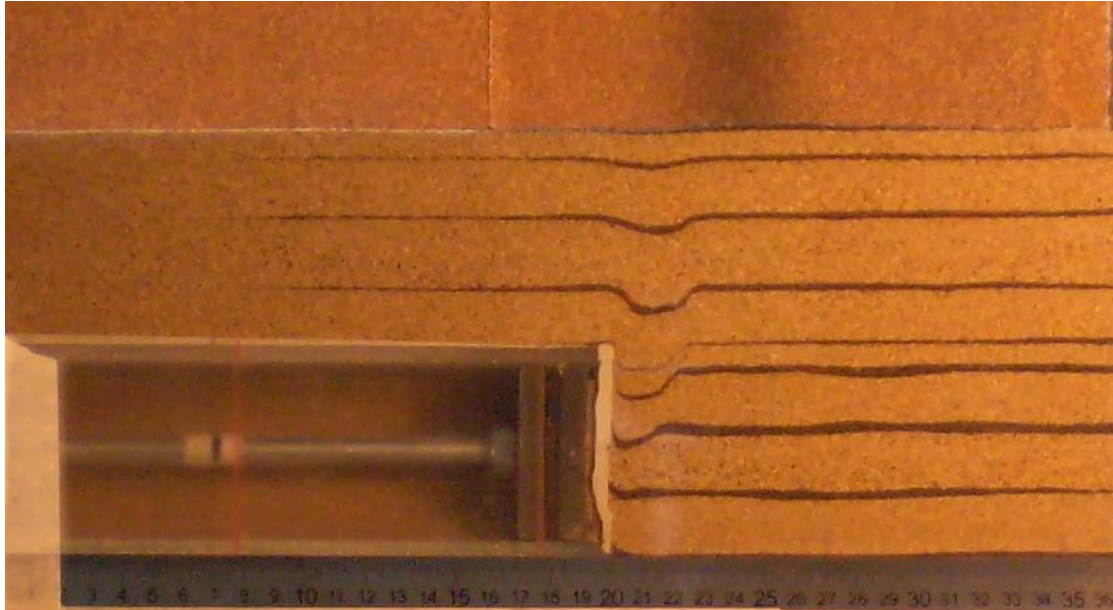


Εικόνα 4.8 Εμφάνιση διαταραχής (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 6 mm)

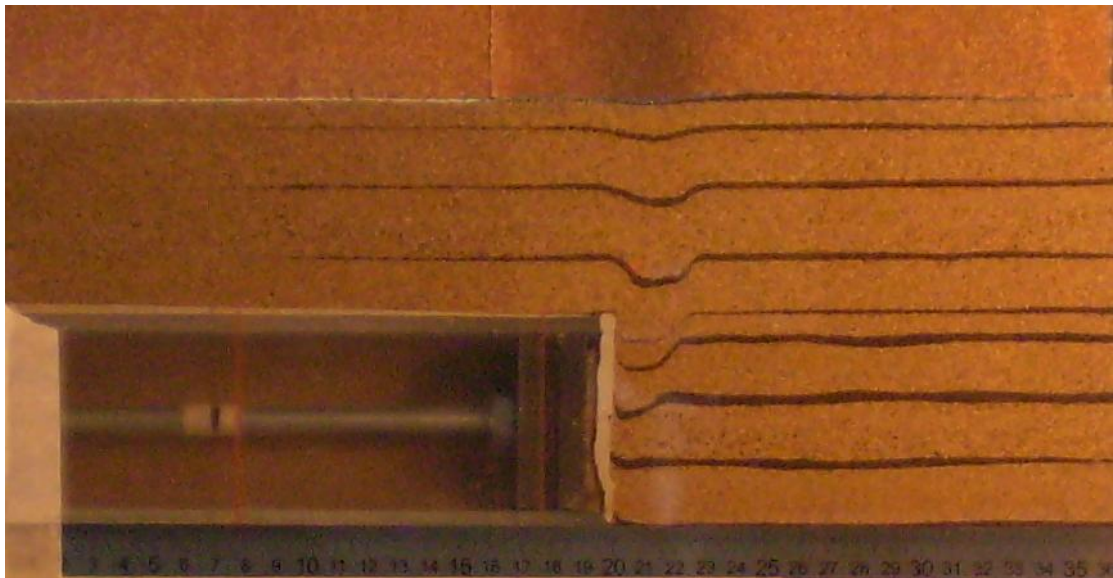


Εικόνα 4.9 Διάχυση της διαταραχής στα ανώτερα στρώματα (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 8 mm)

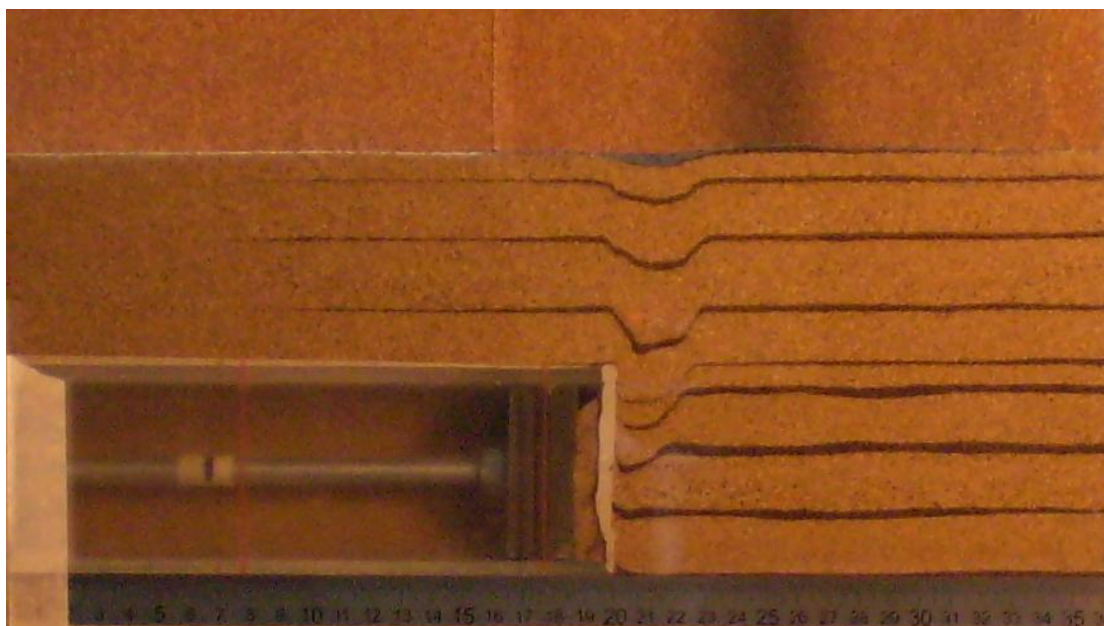




Εικόνα 4.10 Αρχή δημιουργίας κώνου αστοχίας (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 10 mm)



Εικόνα 4.11 Εμφάνιση της αστοχίας στην επιφάνεια (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 12 mm)



Εικόνα 4.12 Λήξη του πειράματος. Είναι ξεκάθαρη η δημιουργία του κώνου αστοχίας (Συνολική μετακίνηση εμβόλου 24 mm)

Η επεξεργασία των φωτογραφιών και η ποσοτικοποίηση των οπτικών μετρήσεων έγινε με τη χρήση του λογισμικού AutoCAD. Τα δεδομένα μετεπεξεργάστηκαν με το λογισμικό Excel ώστε να διερευνηθούν οι συσχετισμοί μεταξύ των διαφορών αδιάστατων παραμέτρων που καθορίζουν το πρόβλημα μπορούν να μετρηθούν από όλα τα πειράματα. Ο στόχος της επεξεργασίας αυτής είναι η διατύπωση εμπειρικών σχέσεων και νομογραμμάτων τα οποία στην τελική φάση της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν για τον ορθολογικό σχεδιασμό των παραμετρικών αναλύσεων με την χρήση του προγράμματος Flac3D.

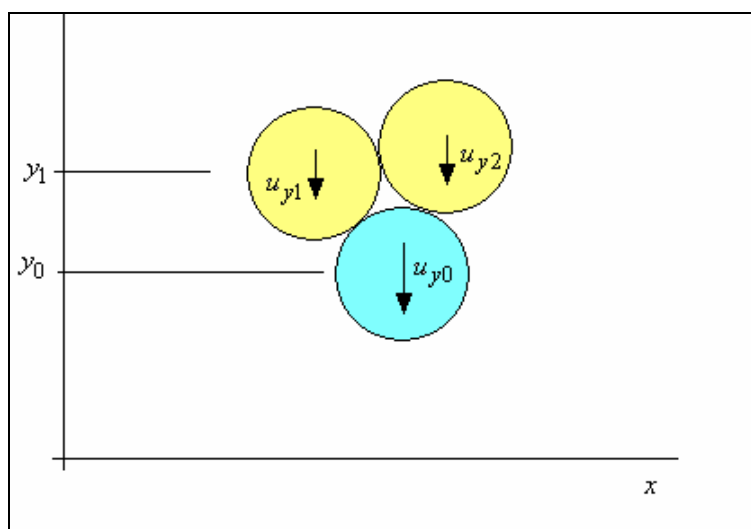
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Διαστασιολογική Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Από τη φωτογράφιση των διαφόρων σταδίων κάθε πειράματος και την εισαγωγή των φωτογραφιών αυτών στο προγράμμα AutoCAD υπολογισθήκαν οι μετατοπίσεις της άμμου που σημειώθηκαν κατά την μετακίνηση του εμβόλου (με ακρίβεια της τάξης των 1-2 mm). Στα διαγράμματα που ακολουθούν έγινε μια προσπάθεια να βρεθεί μια σχέση, εκφρασμένη με αδιάστατους όρους σύμφωνα με το θεώρημα του Buckingham, η οποία να περιέχει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Κυρίως μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η μετατόπιση στα υπερκείμενα στρώματά.

#### 5.1 Θεωρία Διάχυσης της Μετατόπισης

Σύμφωνα με τις εργασίες των Litwinszyn (1974), Dimova (1990) και Vardoulakis et al.(2004) γίνεται η ακόλουθη υπόθεση: Η μετατόπιση  $w_0$  ενός κόκκου σε κάποιο βάθος  $y_0$  συμπαρασύρει την μετατόπιση δύο υπερκειμένων κόκκων σε βάθος  $y_1 \approx y_0 - D_{grain}$  κατά κάποιο κλάσμα αυτής, π.χ.  $w_1 \approx w_2 \approx (1/2)w_0$  (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Σχηματική παράσταση της προς τα άνω διάχυσης της μετατόπισης

Κατ' επέκταση υποθέτουμε γενικώς ότι η οποιαδήποτε μετακίνηση των κόκκων σε κάποιο βάθος δεν διαδίδεται μόνο κατακορύφως αλλά και «διαχέεται» πλευρικά. Έτσι στα ακολουθιά τρία διαγράμματα (Σχήματα 1-3) παρουσιάζονται οι γραφικές

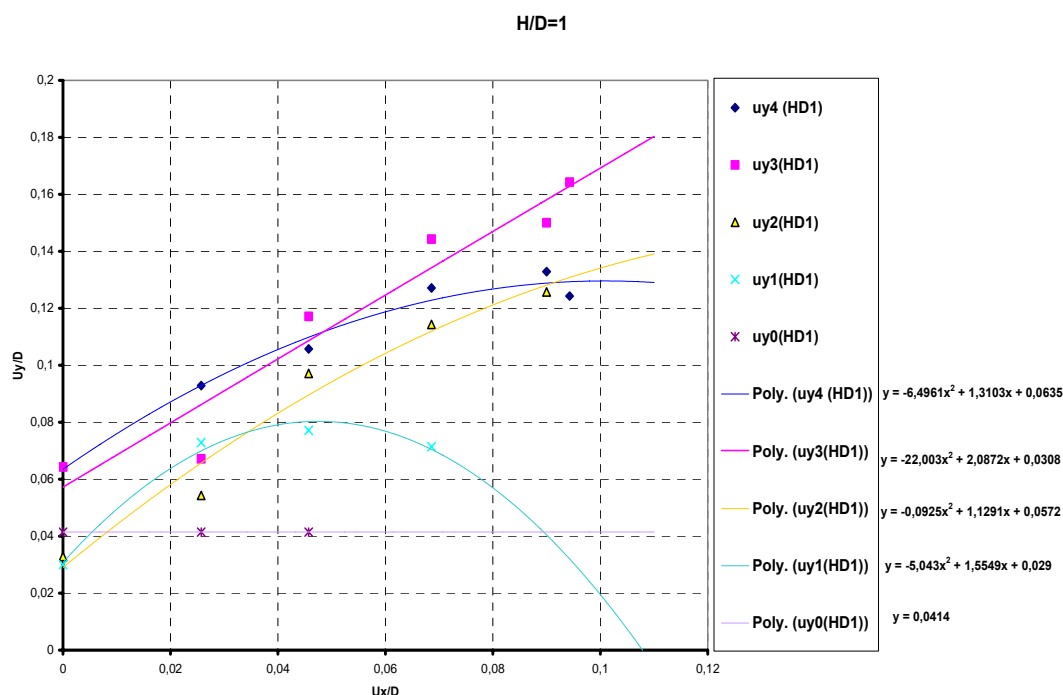
παραστάσεις των κατακόρυφων μετατοπίσεων συνάρτηση της οριζόντιας μετακίνησης του εμβόλου.

Καταρχήν ορίσθηκε συγκεκριμένο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Στα συγκεκριμένα πειράματα επιλέχθηκε η ελεύθερη επιφάνεια ως επιπεδο αναφοράς, όπου μετρήθηκε το απόλυτο υψόμετρο  $y$  του κάθε στρώματος. Έτσι αναπαρασταθήκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις σε 3 διαφορετικά υψόμετρα συνάρτησε της οριζόντιας μετατόπισης του εμβόλου (οπου  $H$  το βάθος ταφής,  $D=7$  cm η διάμετρος της σήραγγας) .

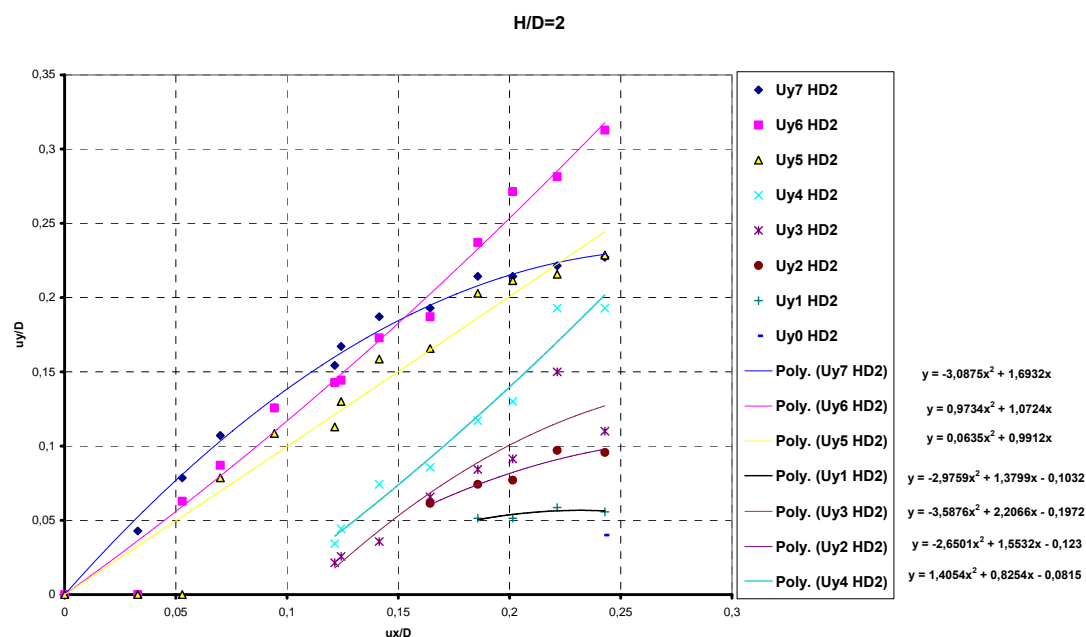
Από τα διαγράμματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 1-3, για το κάθε πείραμα ξεχωριστά, παρατηρείται ότι η διάδοση της μετατόπισης στα ανώτερα στρώματα εκφράζεται με την μορφή μιας δευτεροβάθμιας εξίσωσης της μορφής

$$\frac{u_y(y;u_x)}{D} = a \left( \frac{u_x}{D} \right)^2 + b \frac{u_x}{D} + c \quad (5.1)$$

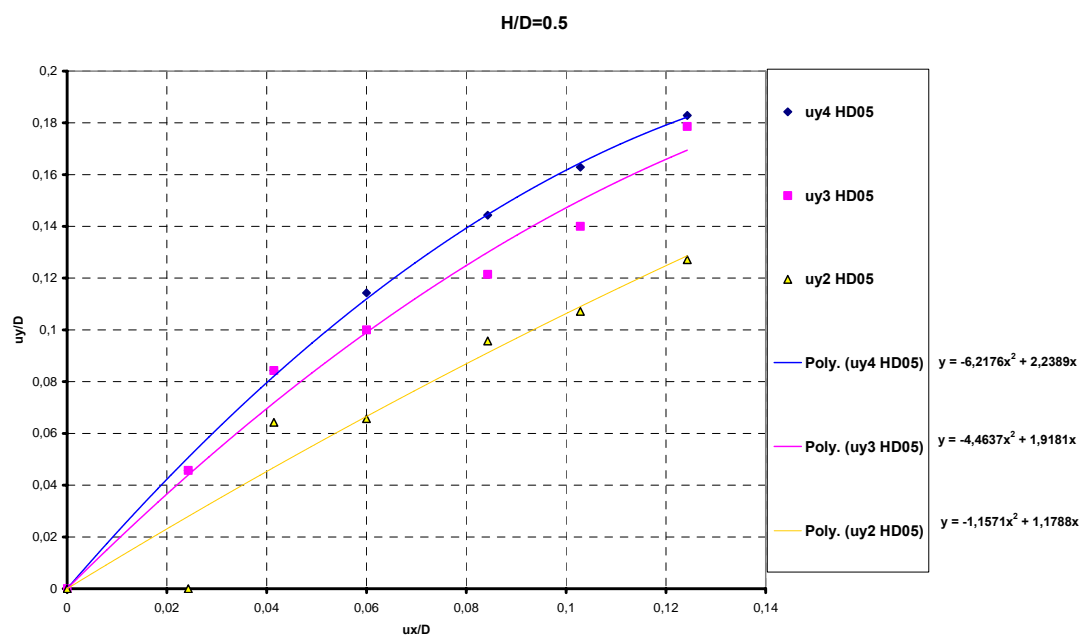
όπου  $u_y(y)$  είναι η κατακόρυφη μετατόπιση σε υψομετρικό ορίζοντα  $y$ ,  $u_x$  είναι η οριζόντια μετατόπιση του εμβόλου,  $D$  συμβολίζεται την διάμετρο της σήραγγας και  $a, b, c$  αδιάστατοι συντελεστές.



Σχήμα 1: Κατανομή της αδιάστατης κατακόρυφης μετατοπισης για λογο  $H/D=1$  στα στρώματα σε σχέση με την αδιάστατη μετακίνηση του εμβόλου



Σχήμα 2: Κατανομή της αδιάστατης κατακόρυφης μετατοπίσης για λογο H/D=2 στα στρώματα για κάθε αδιάστατη οριζόντια μετακίνηση του εμβόλου



Σχήμα 3: Κατανομή της αδιάστατης κατακόρυφης μετατοπίσης για λογο H/D=0.5 στα στρώματα για κάθε αδιάστατη οριζόντια μετακίνηση του εμβόλου

## 5.2 Νόμοι Κλίμακας

Για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για πρακτικές εφαρμογές σε πραγματική κλίμακα εφαρμόστηκε η θεωρία της Διαστασιολογικής Ανάλυσης. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή θεωρήθηκε ότι η κατακόρυφη καθίζηση  $u_y$  των διαφόρων στρώσεων είναι συνάρτηση της αρχικής τους θέσης  $y$ , της οριζόντιας μετατόπισης του εμβόλου  $u_x$  και των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προβλήματος. Αυτά είναι: η διάμετρος  $D$  της σήραγγας και το βάθος στέψης της σήραγγας  $H$  (Εικόνα 5.2). Συνεπώς

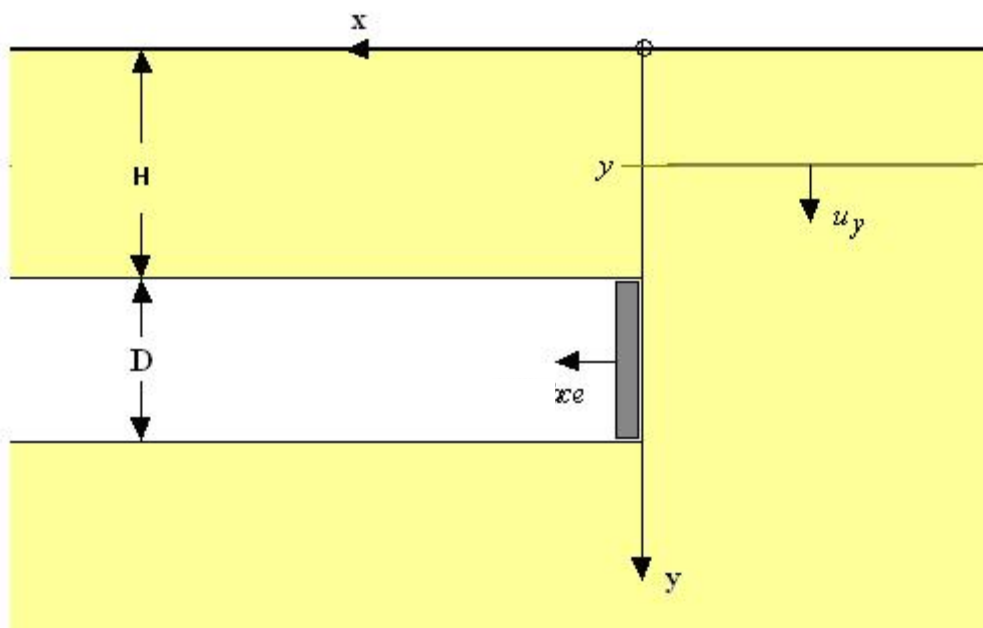
$$u_y = f(y, u_x, D, H) \quad (5.2)$$

Όλες οι παράμετροι του προβλήματος έχουν διαστάσεις μήκους. Το θεμελιώδες θεώρημα-Π του Buckingham, της διαστασιολογικής ανάλυσης προβλέπει τα εξής (Hornung, 2006): Έστω  $N_1$  ο αριθμός των ανεξάρτητων αδιάστατων μεταβλητών του προβλήματος,  $N_2$  ο αριθμός των διαστατοποιημένων μεταβλητών και  $N_3$  ο αριθμός των τυπικών διαστάσεων που χρειάζονται για να δημιουργήσει κανείς τις διαστάσεις των διαστασιοποιημένων μεταβλητών. Τότε:

$$N_1 = N_2 - N_3 \quad (5.3)$$

Σύμφωνα με την Εξ. (5.2) εδώ έχουμε  $N_2 = 5$  και  $N_3 = 1$ , οπότε  $N_1 = 5 - 1 = 4$  και ως εκ τούτου, η αδιάστατη μορφή της (5.2) είναι η εξής

$$\frac{u_y}{D} = f_2\left(\frac{y}{D}, \frac{u_x}{D}, \frac{H}{D}\right) \quad (5.4)$$



Εικόνα 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος

Για παραδειγμα : Για την πειραματική διάταξη με λόγο  $H/D=1$  και έστω ότι η στρώση μελέτης είναι η επιφανειακή, δηλαδή  $y/D=1$ , έχουμε :

$$\frac{u_y}{D} = f_3\left(\frac{u_x}{D}\right) \quad (5.5)$$

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα σχήματα 1-3, προκύπτει η ακόλουθη εμπειρική σχέση που αποτελεί επίσης την λύση προβλημάτων διάχυσης που διέπονται από την εξίσωση που είναι της μορφής  $\left(\nabla^2 u_y = \frac{\partial u_x}{\partial t}\right)$  (Poisson et.al), όπου  $t$  ο χρόνος ή στην περίπτωση αυτού του προβλήματος  $y$  :

$$\frac{u_y}{D} = b + a\sqrt{\frac{y}{D}} \quad (5.6)$$

Οι σταθερές  $a$  (κλίση) και  $b$  (αποτέμνουσα) λήφθηκαν από κάθε πείραμα με συγκεκριμένο λόγο  $H/D$  (Σχήματα 4-6) και εξετάστικαν πώς αυτά εξαρτώνται από το συγκεκριμένο λόγο  $H/D$ . Δηλαδή αναπαραστήθηκαν γραφικά για  $H/D = (ct)$ ,  $y/H = (ct)$  τα δεδομένα με διαγράμματα της μορφής

$$\begin{aligned} a &= f_a(u_x), \\ b &= f_b(u_x) \end{aligned} \quad (5.7)$$

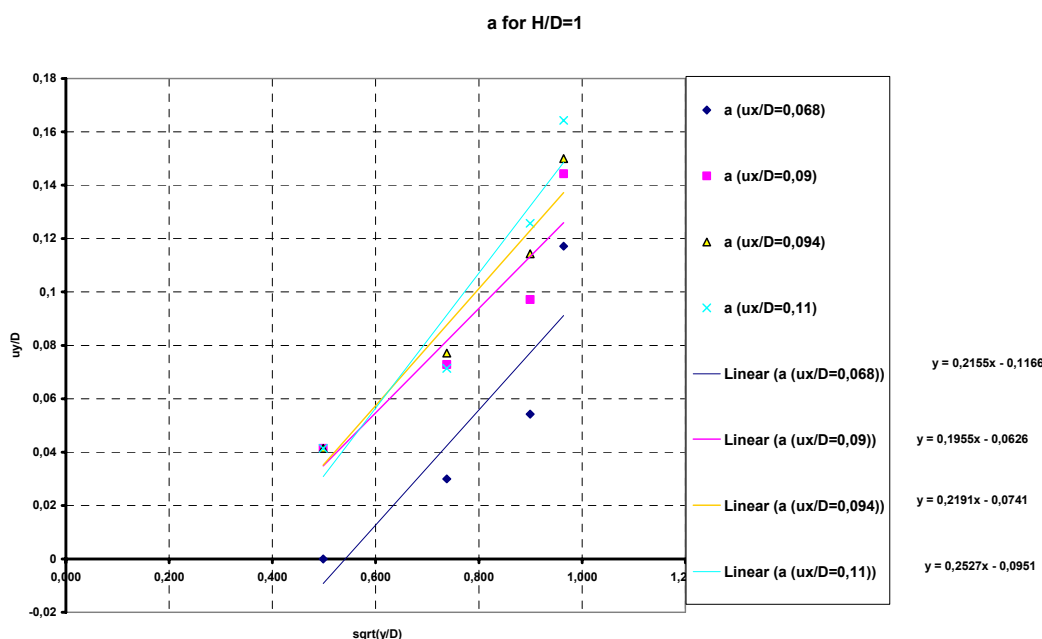


Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση πως οι παράμετροι  $a$  και  $b$  των εξισώσεων αυτών εξαρτώνται από το  $u_x/D$ . Από το σχήμα 7 που ακολουθεί διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής  $a$  εμφανίζει οριζόντια κατανομή γύρω από την μέση τιμή  $\bar{a}$  καθώς επίσης και μια αποτομή αυξηση σε μια δεδομένη μετατόπιση, η οποία μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο λαμβάνει χώρα εκεί. Δηλαδή σε εκείνη την περιοχή μετατοπίσεων  $u_x$  εμφανίζεται η ραγδαία μετάδοση του φαινομένου, ενώ σε ακόλουθες μετακινήσεις του εμβόλου το σύστημα (άμμος, σήραγγα) δείχνει να έχει επανέλθει σε ισορροπία.

Από την άλλη πλευρά η αποτέμνουσα  $b$  (Σχήμα 8) παρουσιάζει μια αύξουσα κατανομή με εξίσωση της μορφής :

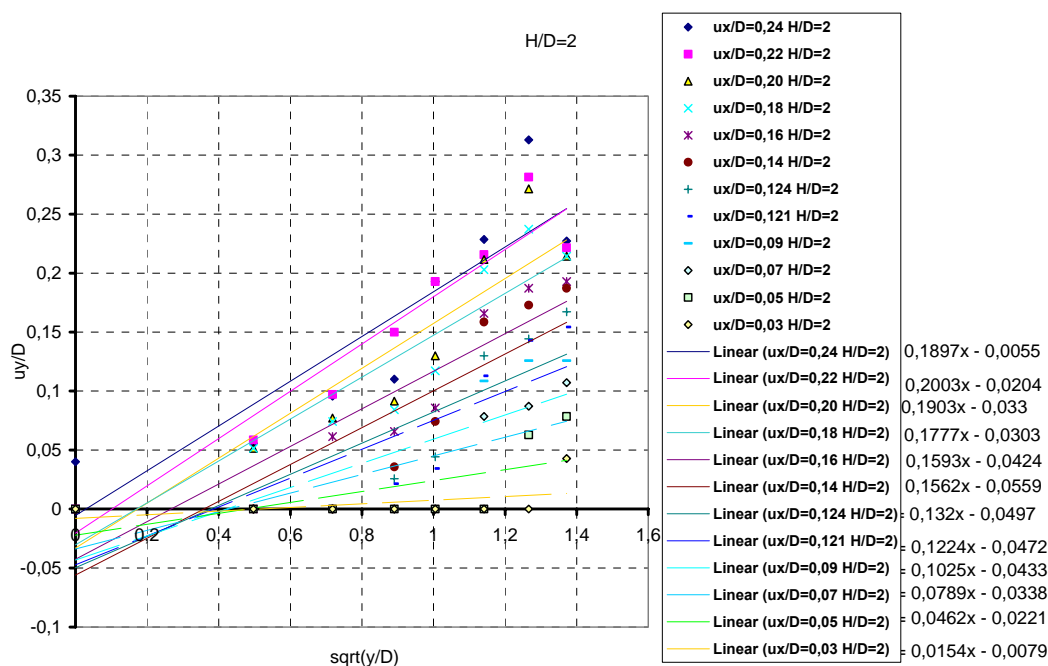
$$y = cx + d \quad (5.8)$$

οπού  $c$  η κλίση της ευθείας και  $d$  το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα των  $b$ .

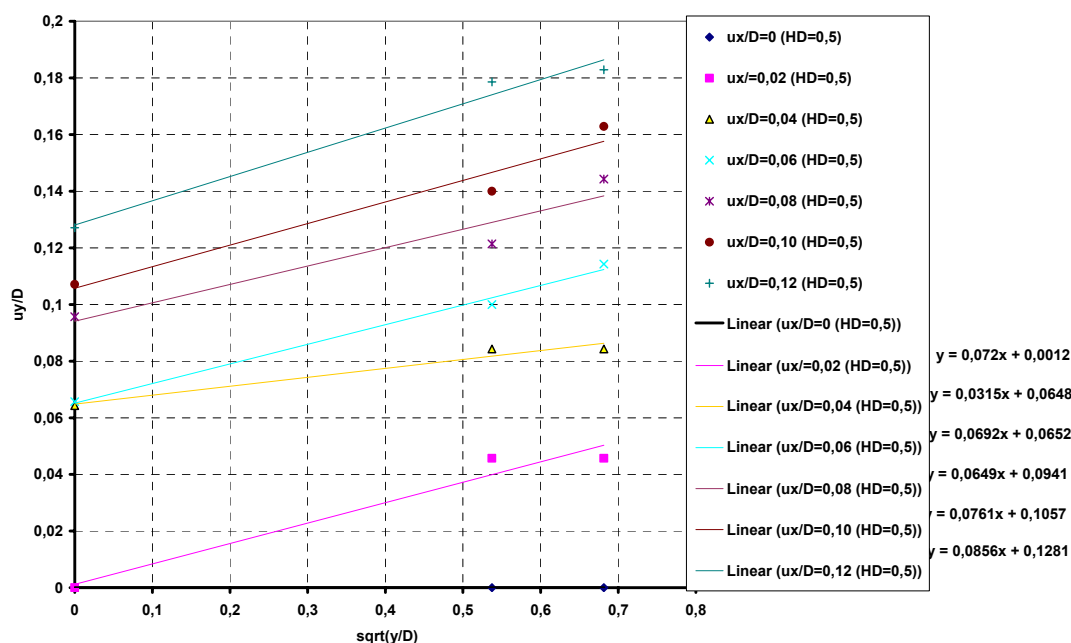


Σχήμα 4 : Εξάρτηση της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης στρώσης από την αδιάστατη υψομετρική θέση της για διάφορες οριζόντιες μετατοπίσεις του εμβόλου για  $H/D=1$

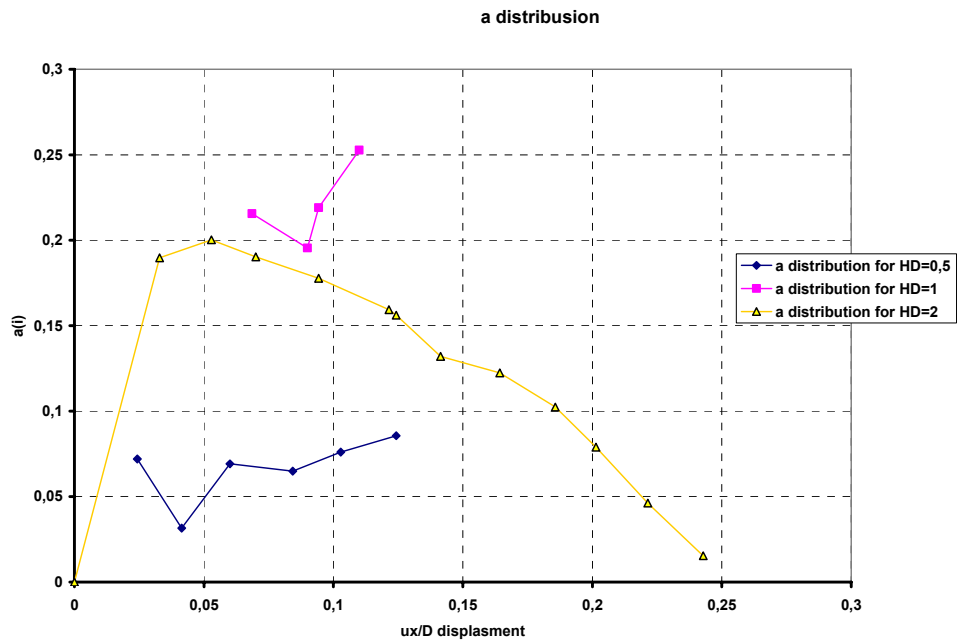




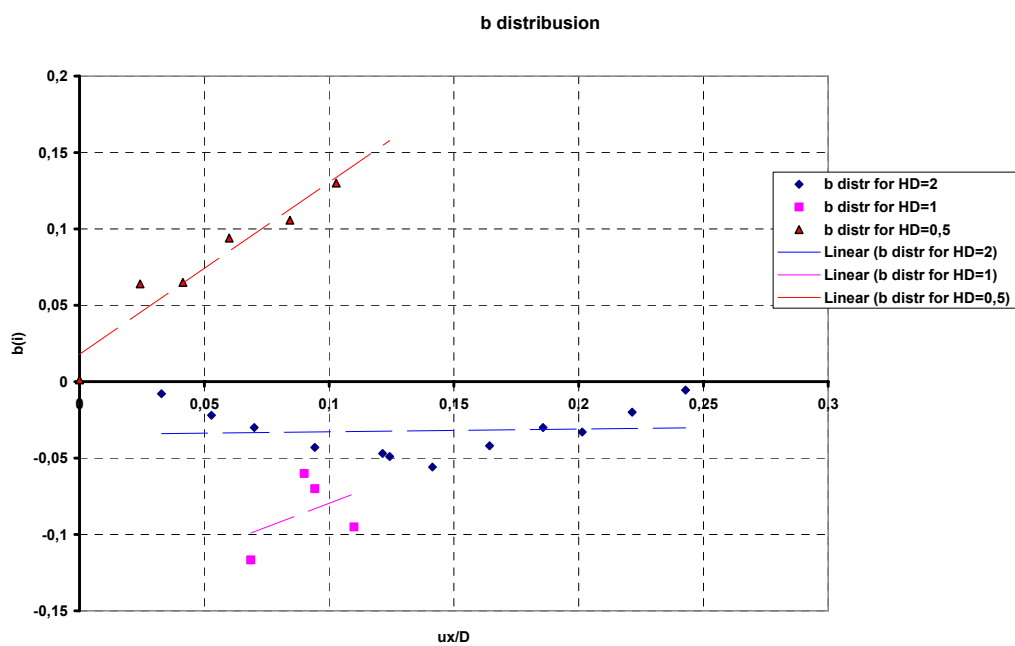
Σχήμα 5: Εξάρτηση της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης στρώσης από την αδιάστατη υψομετρική θέση της για διάφορες οριζόντιες μετατοπίσεις του εμβόλου για  $H/D=2$



Σχήμα 6: Εξάρτηση της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης στρώσης από την αδιάστατη υψομετρική θέση της για διάφορες οριζόντιες μετατοπίσεις του εμβόλου για  $H/D=0.5$

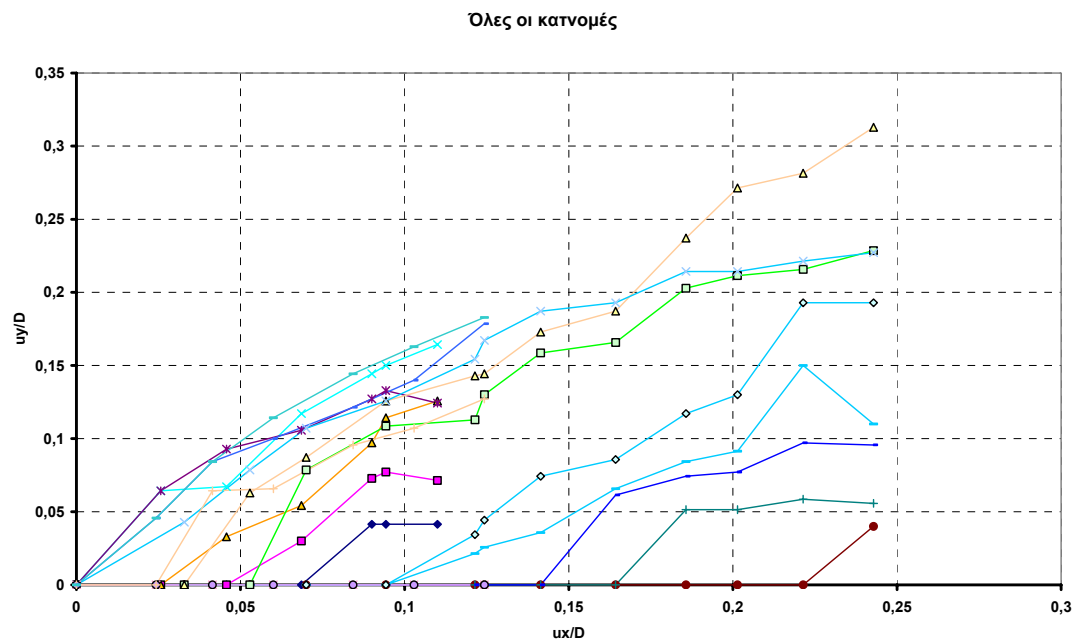


Σχήμα 7 : Εξάρτηση της κλίσης  $a$  από την οριζόντια μετατόπιση υποχώρησης του εμβόλου σε κάθε πείραμα



Σχήμα 8: Εξάρτηση της αποτέμνουσας  $b$  από την οριζόντια μετατόπιση υποχώρησης του εμβόλου σε κάθε πείραμα

Τέλος αν βάλουμε όλες τις καμπύλες σε ένα διάγραμμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 9, βλέπουμε ότι υπάρχει επαναληψιμότητα στα πειράματα.

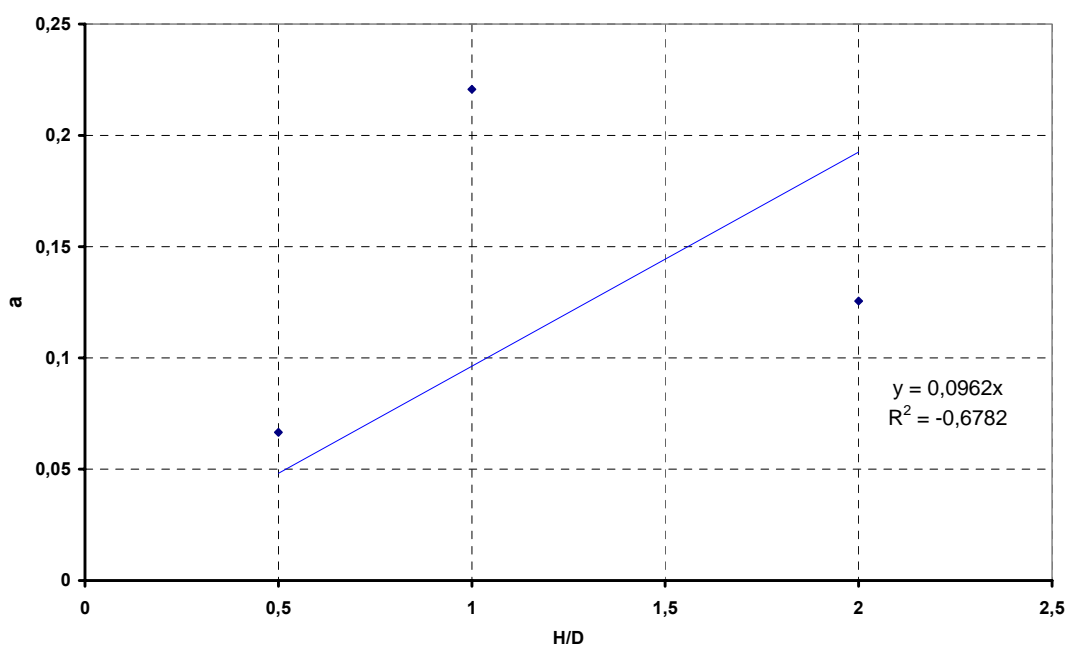


Σχήμα 9: Συνεκτικό διάγραμμα όλων των αδιάστατων μετατοπίσεων  $u_y/D$  για όλους τους λόγους  $H/D$  συναρτήσει της αδιάστατης οριζόντιας μετατόπισης  $u_x/D$

### 5.3 Διερεύνηση Εξαγωγής Γενικών Σχέσεων

Η μέση τιμή της κλίσης  $\bar{a}$  της εξίσωσης (5.7) παριστάται από μια ευθεία γραμμή, που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, η οποία παρουσιάζεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση (σχήμα 10), και βρέθηκε ότι είναι ίση με :

$$\bar{a} \cong 0.1 \cdot \left( \frac{H}{D} \right) \quad (5.9)$$



Σχήμα 10: Κατανομή μέσων τιμών αποτεμνουσών καθε πειράματος συναρτήσει του βάθους ταφής H/D

Ακολούθως η αποτεμνουσα  $b$  υπολογίστηκε με βάση την υπόθεση ότι η εξίσωση που πρέπει να εκφράζει το συντελεστή  $b$  είναι της μορφής:

$$b = b \left( \frac{u_x}{D}, \frac{H}{D} \right) \quad (5.10)$$

Η εξίσωση (5.9) έτσι γράφεται :

$$\frac{u_y}{D} = b + a \sqrt{\frac{y}{D}} \xrightarrow{a \cong 1/10 \frac{H}{D}} \frac{u_y}{D} = b + \frac{1}{10} \left( \frac{H}{D} \right) \cdot \sqrt{\frac{y}{D}} \quad (5.11)$$

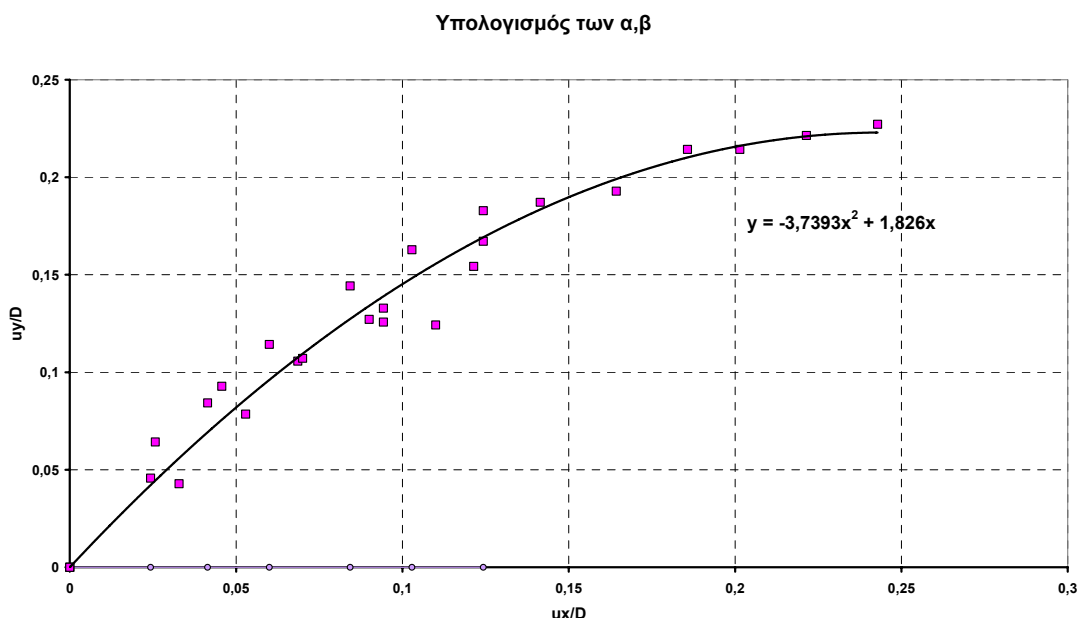
Γιά  $y = H$  η εξίσωση (5.11) δίνει:

$$\frac{u_y}{D} = b + \frac{1}{10} \cdot \left( \frac{H}{D} \right) \cdot \sqrt{\frac{y}{D}} \xrightarrow[\frac{u_y \neq H}{D \neq D}]{y=0} \frac{u_y}{D} = b + \frac{1}{10} \cdot \left( \frac{H}{D} \right)^{3/2} \quad (5.12)$$

Έτσι για  $u_y/D$  ως προς  $u_x/D$  ανεξάρτητο του  $y/D$  (βλ. Σχήμα 9) καταλήγουμε ότι το  $b$  εκφράζεται από μια εξίσωση της μορφής:

$$b \cong -\frac{1}{10} \cdot \left( \frac{H}{D} \right)^{3/2} + \alpha \cdot \frac{u_x}{D} + \beta \cdot \left( \frac{u_x}{D} \right)^2 \quad (5.13)$$

Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστες  $\alpha, \beta$  της εξίσωσης (5.13) εντοπιστικαν οι καμπύλες που έχουν ίδιο  $y/D$  στο σχήμα 9. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 11) παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις  $u_x/D$  για  $y=H$ , δηλαδή στη στέψη της σήραγγας, για να βρούμε τα  $\alpha$  και  $\beta$ .



Σχήμα 11: Γραφική αναπαράσταση των αδιάστατων μετατοπίσεων  $u_y/D$  για τους τρεις λόγους  $H/D$  και για  $y/D=0$ , συναρτήσει της αδιάστατης οριζόντιας μετατόπισης  $u_x/D$ , από όπου υπολογίζονται οι σταθερές  $\alpha, \beta$

Οπότε

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 1.826 \\ \beta = -3.7393 \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

Έτσι η εξίσωση 5.14 γίνεται:

$$\begin{aligned} b &\cong -\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{3/2} + \alpha \cdot \frac{u_x}{D} + \beta \cdot \left(\frac{u_x}{D}\right)^2 \xrightarrow[\beta=-3.7393]{\alpha=1.826} \\ b &\cong -\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{3/2} + 1.83 \cdot \frac{u_x}{D} - 3.74 \cdot \left(\frac{u_x}{D}\right)^2 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Εν τέλει η εξίσωση που δίνει την αδιάστατη καθίζηση σε σχέση με την αδιάστατη οριζόντια μετατόπιση του μετώπου για κάθε υψομετρικό ορίζοντα και λόγο H/D λαμβάνει την ακόλουθη απλή μορφή:

$$\frac{u_y}{D} = -\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{H}{D}\right) \left\{ \frac{\sqrt{H} - \sqrt{y}}{\sqrt{D}} \right\} + 1.83 \cdot \frac{u_x}{D} - 3.74 \cdot \left(\frac{u_x}{D}\right)^2 + C \geq 0 \quad (5.16)$$

Έχοντας την τελική εξίσωση της διάχυσης (5.16) έγινε ανάστροφη ανάλυση των μετρήσεων των πειραμάτων, ώστε να βρεθεί η ακρίβεια της εξίσωσης, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Απο την ανάστροφη ανάλυση βρέθηκε ότι η εξίσωση (5.16) περιγράφει, το φαινόμενο της διάχυσης κατά την χαλάρωση του της αβαθούς σήραγγας. Η σταθερά C της (5.16) υπολογίζεται κάθε φορά έτσι ώστε να δίνει θετικές τιμές της αδιάστατης καθίζησης, όταν η προβλεπόμενη καμπύλη για C=0 δίνει σχεδόν όλες τις τιμές της αρνητικές. Για αυτό το λόγο προστέθηκε η διορθωτική σταθερά C στο αριστερό μέλος της σχέσης (5.16).

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>**

### **Αριθμητικό Μοντέλο της Αβαθούς Σήραγγας**

#### **6.1 Γενικά**

Για την προσομοίωση των αναλογικών πειραμάτων και τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων κατά την προσομοίωση του της χαλάρωσης του μετώπου της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (FDM). Συγκεκριμένα, στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FLAC3D που αναπτύχθηκε από τον Peter Cundall και την Itasca Consulting Group, Inc. στην Minnesota, 1986.

Κατά τη μέθοδο αυτή το έδαφος προσομοιώνεται με τη βοήθεια τριδιάστατων στοιχείων τα οποία μορφώνουν ένα πλέγμα. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται με τον προκαθορισμένο νόμο τάσεων-παραμορφώσεων και τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις ή συννοριακές συνθήκες. Η εκσκαφή προσομοιώνεται με την αφαίρεση των στοιχείων εκείνων του πλέγματος που καταλαμβάνουν το χώρο της διατομής και το βήμα προχώρησής της. Σε κάθε κόμβο επιλύονται οι εξισώσεις κίνησης χρησιμοποιώντας την έννοια των διαδοχικών βημάτων για την προσέγγιση της τελικής λύσεως. Σε κάθε φάση εκσκαφής το πρόγραμμα χρησιμοποιεί για την επίλυση κατάλληλη επαναληπτική μέθοδο, θεωρώντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα της προηγούμενης επίλυσης και τις μηχανικές-γεωμετρικές ιδιότητες του φορέα. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται, μέχρις ότου το μέγεθος της “ανισορροπίας” εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων γίνει μικρότερο από κάποιο προκαθορισμένο κλάσμα της αρχικής “ανισορροπίας”. Η αρχική “ανισορροπία” δημιουργείται λόγω των αφαιρέσεων τμημάτων της σήραγγας.

Κατά την ανάλυση το έδαφος θεωρήθηκε ως ομογενές συνεχές ελαστο-πλαστικό (Mohr-Coulomb) μέσο. Η εισαγωγή της αρχικής εντατικής κατάστασης έγινε με τη θεώρηση λιθοστατικών τάσεων. Σε κάθε στοιχείο οι κατακόρυφες τάσεις υπολογίστηκαν από το βάρος του γεωϋλικού άνωθεν αυτού. Οι οριζόντιες τάσεις υπολογίζονται ως ποσοστό των κατακόρυφων τάσεων με βάση το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων  $K_o = \frac{\nu}{1-\nu}$ . Τα μέτρα υποστύλωσης προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια άκαμπτων στοιχείων (ελαστικά στοιχεία με μέτρο παραμορφωσιμότητας πολύ μεγαλύτερο του περιβάλλοντος γεωϋλικού).

Η διακριτοποίηση του ομοιώματος δίνεται στην Εικόνα 5.1

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν στην κατάσταση και ανάλυση του προβλήματος, επιγραμματικά αναφέρονται στη συνέχεια.

- Εισαγωγή γεωμετρίας, συνδεσμολογίας στοιχείων και οριακών συνθηκών προσομοιώματος
- Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών και στοιχείων υποστύλωσης
- Προσομοίωση της εκσκαφής ή των φάσεων εκσκαφής σε βήματα, όπου η κάθε φάση επίλυσης στηρίζεται στα αποτελέσματα (τάσεις-παραμορφώσεις) της προηγούμενης επίλυσης (φάσης εκσκαφής).
- Επιλεκτική εξαγωγή αποτελεσμάτων (μετατοπίσεων).



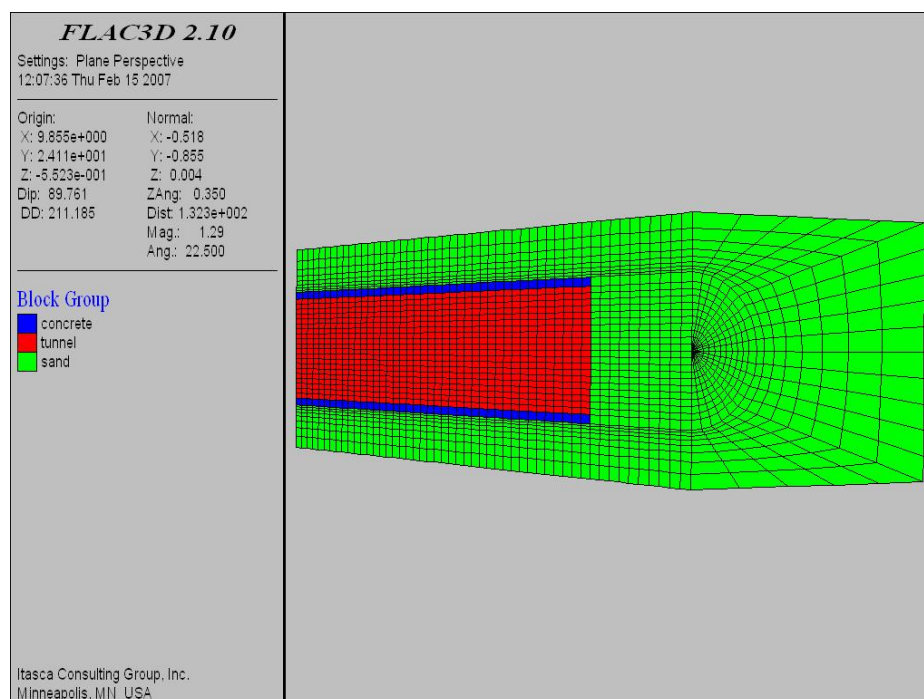
## 6.2 Παράμετροι Μοντέλου

Στο μοντέλο που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών Flac3D™ οριστήκαν οι ακόλουθες παράμετροι:

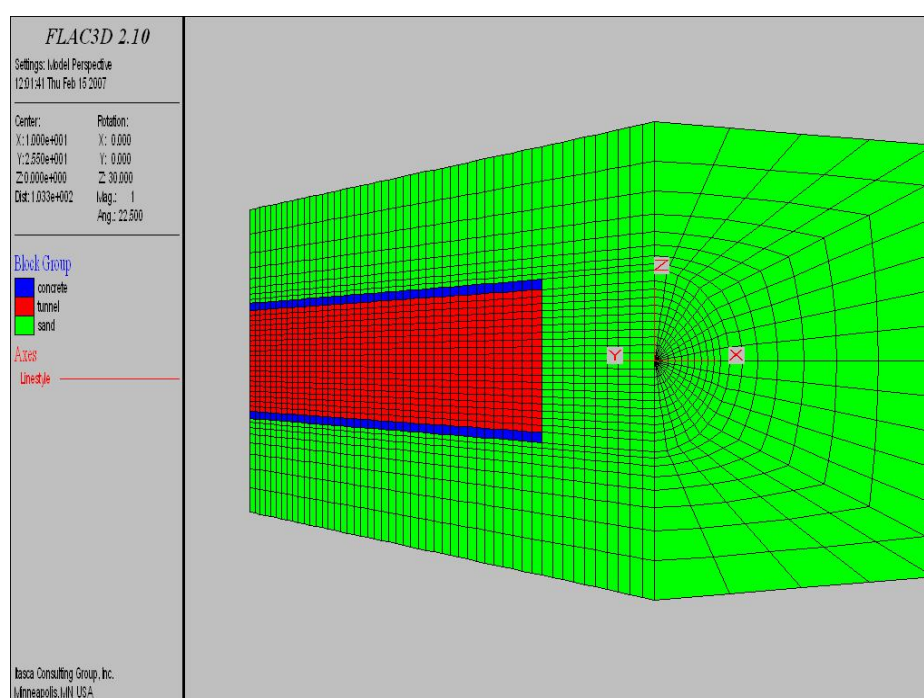
$$\begin{array}{ll}
 D = 7 \text{ m} & \nu = 0.3 \\
 L = 41 \text{ m} & E = 120 \text{ MPa} \\
 d = 0.5 \text{ m} & G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 46.15 \text{ MPa} \\
 x = 30 \text{ m} & K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = 100 \text{ MPa} \\
 y = 10 \text{ m} & \\
 \rho = 0,021 \text{ MPa/m} & 
 \end{array}$$

Όπου: ***D*** η διάμετρος της σήραγγας, ***L*** το μήκος της υποστηριγμένης σήραγγας, ***d*** το πάχος της σκυρόδεσης, ***x*** η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας, ***y*** η απόσταση από το μέτωπο της σήραγγας, ***ν*** ο λόγος Poisson της άμμου, ***E*** το μέτρο ελαστικότητας του Young, ***G*** η σταθερά Lamé ή αλλιώς το μέτρο διάτμησης, το ***K*** το μέτρο συμπίεσης της άμμου, και ***ρ*** η πυκνότητα της άμμου.

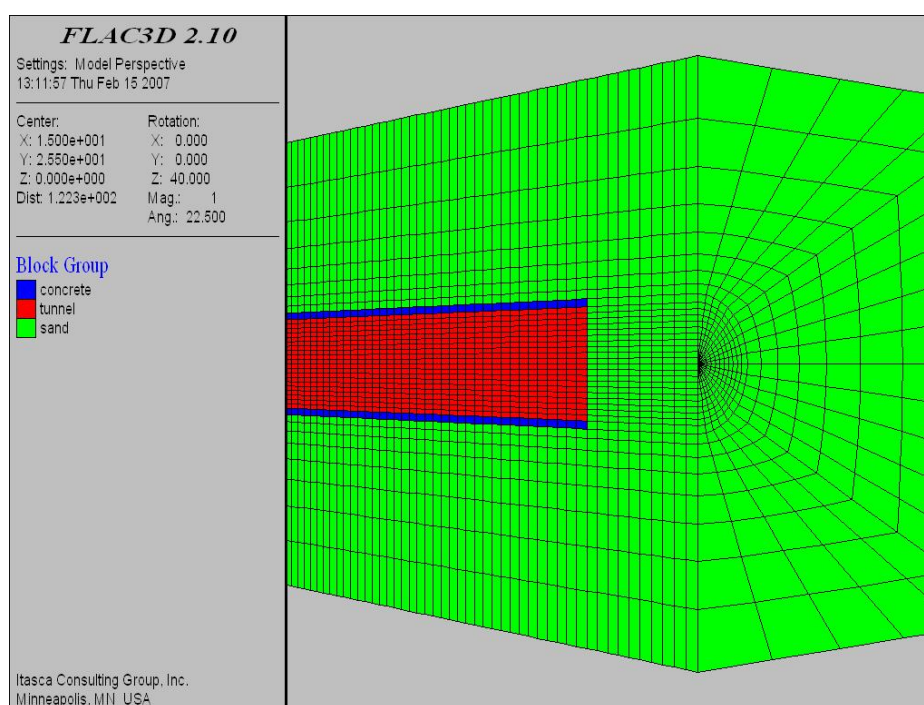
Στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν οι τρεις λόγοι H/D που εξετάστηκαν με την αυτοσχέδια πειραματική συσκευή.



Εικόνα 5.2: Προσομοίωμα στο Flac3D για λόγο H/D=0.5



Εικόνα 5.1: Προσομοίωμα στο Flac3D για λόγο H/D=1



Εικόνα 5.3: Προσομοίωμα στο Flac3D για λόγο  $H/D=2$

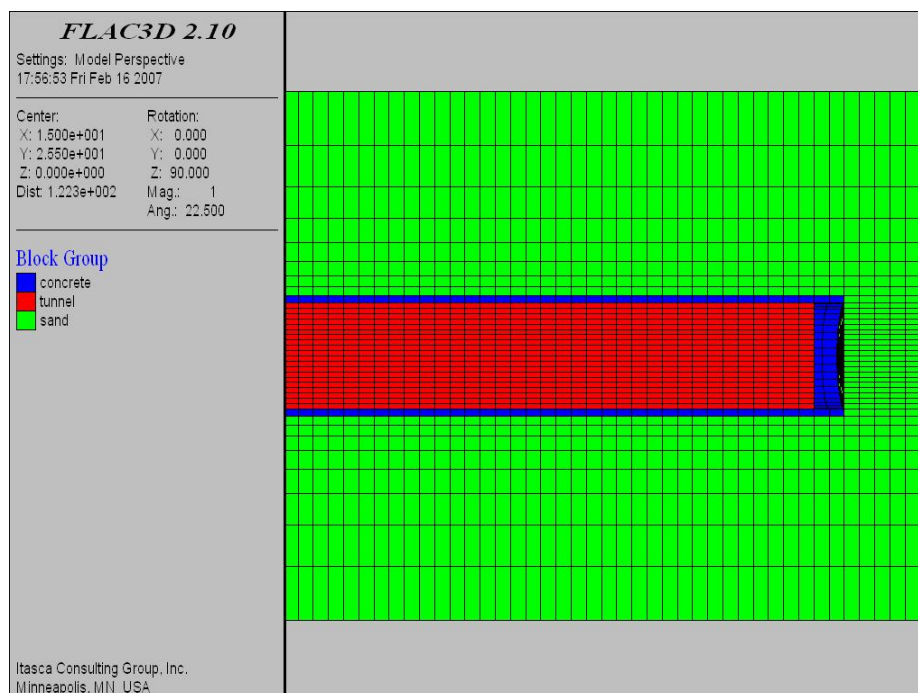
Στα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζονται τρία χρώματα :

- Πράσινο, που αντιπροσωπεύει την άμμο
- Μπλε, που αντιπροσωπεύει την μόνιμη υποστήριξη περιμετρικά της σήραγγας
- Κόκκινο, που αντιπροσωπεύει την υποστήριξη του μετώπου

Για την καλύτερη προσομοίωση του πειράματος ορίσαμε ότι τη μόνιμη επένδυση της σήραγγας καθώς και την υποστήριξη του μετώπου, έχουν παραμέτρους ελαστικότητας και αντοχής που είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες της άμμου. Έτσι επιτεύχθηκε η ‘ακαμψία’ των δυο αυτών τμημάτων στις παραμορφώσεις που θα δέχονταν από την περιβαλλουσα άμμο.

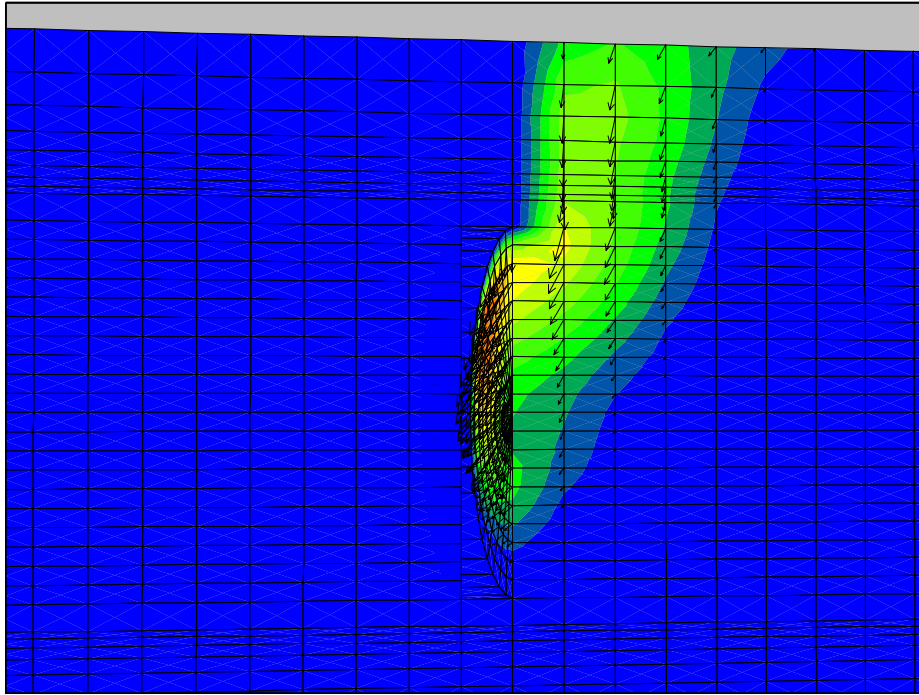
Έπειτα η άμμος αφέθηκε να ισορροπήσει, με την παρουσία μονό της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g$  δημιουργώντας έτσι το αρχικό εντατικό πεδίο της άμμου.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η μετακίνηση του εμβόλου (εικόνα 5.4) με την αφαίρεση του εσωτερικού της σήραγγας (κόκκινο χρώμα) και ακολούθησε η επίλυση του μοντέλου και η παρουσίαση των τελικών μετατοπίσεων που έλαβαν χώρα για την συγκεκριμένη μετατόπιση του εμβόλου. (εικόνες 5.5, 5.6, 5.7)

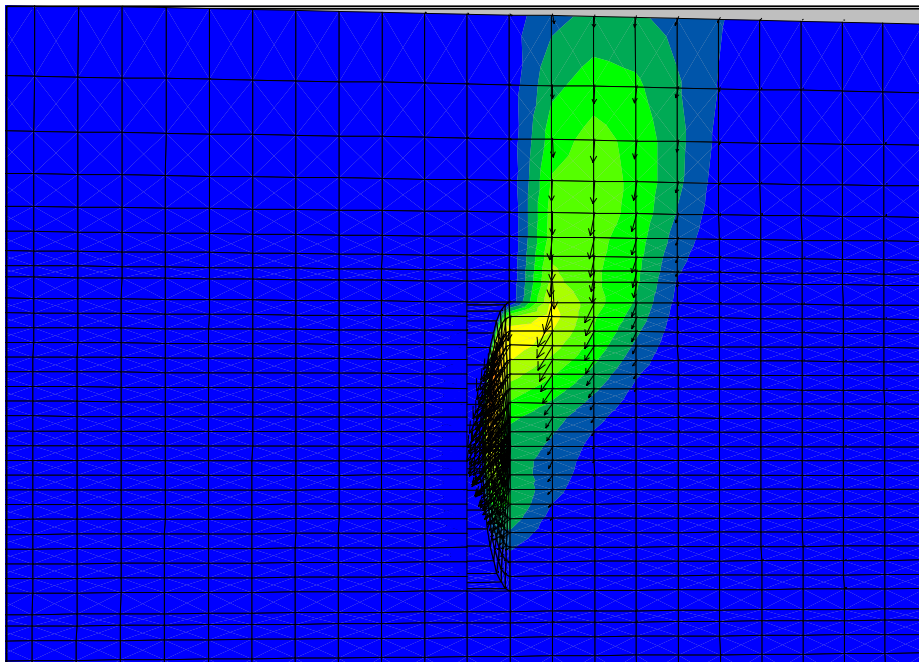


Εικόνα 5.4: Μετακίνηση του μετώπου κατά  $y = 1\text{m}$

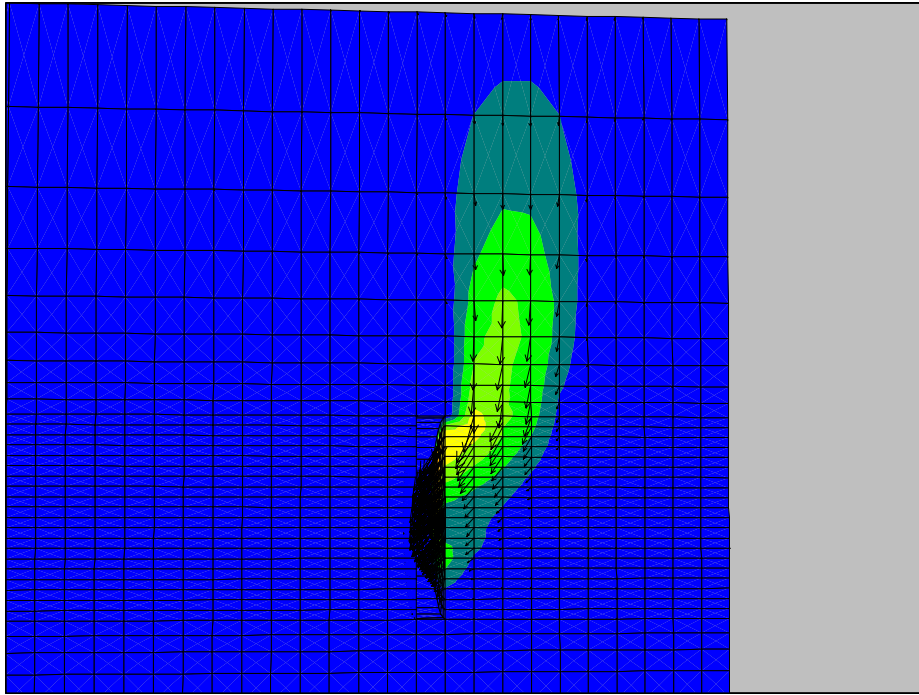
Στη συνέχεια επιλύθηκαν από το πρόγραμμα τα τρία μοντέλα και ακολούθως λάβαμε τις ακολουθίες λύσεις των τριών μοντέλων που παρουσιάζονται γραφικά στις εικόνες 5.5-5.7. Οι κώνοι αστοχίας μπροστά και πάνω από το μέτωπο μοιάζουν με τους αντίστοιχους κώνους αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά την πειραματική επίλυση της αστοχίας μετώπου (βλ. Εικόνα 4.4 και 4.12)



Εικόνα 5.5: Μορφή του κώνου αστοχίας σε μοντέλο Flac3D με λόγο  $H/D=0.5$  για  $u_x/D=0.14$



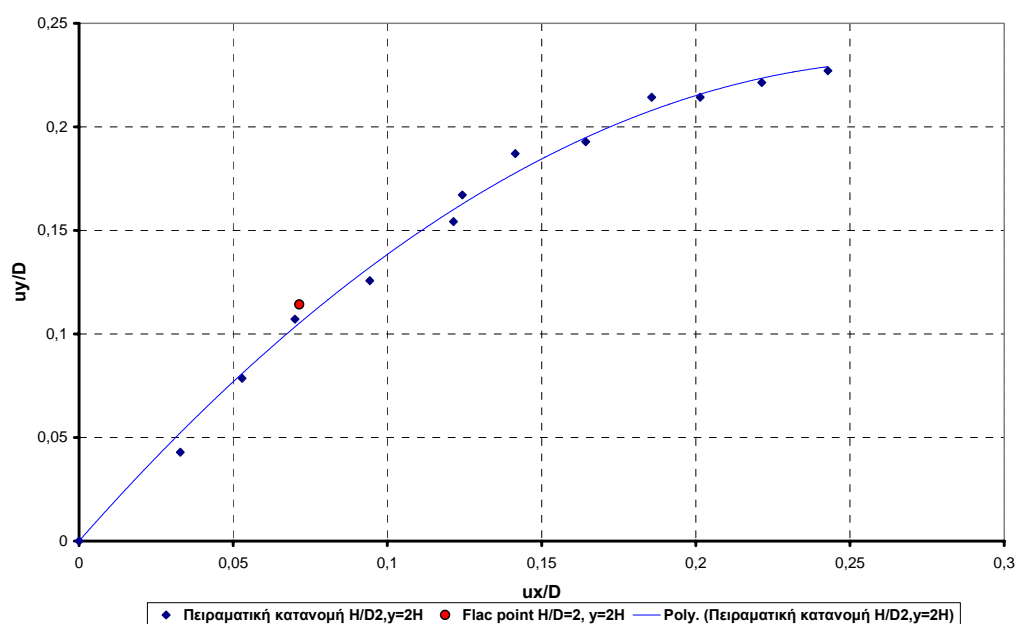
Εικόνα 5.6: Μορφή του κώνου αστοχίας σε μοντέλο Flac3D με λόγο  $H/D=1$  για  $u_x/D=0.14$



Εικόνα 5.7: Μορφή του κώνου αστοχίας σε μοντέλο Flac3D με λόγο  $H/D=2$  για  $u_x/D=0.14$

### 6.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων του Flac3D με Πειραματικά Αποτελέσματα

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έβγαλε το Flac3D λήφθηκαν οι μετατοπίσεις συγκεκριμένων σημείων από τον κάναβο του μοντέλου, των οποίων ήταν γνώστες οι συντεταγμένες, και στην συνέχεια αυτές τοποθετήθηκαν στο σχήμα 8 και έγινε η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για  $H/D=2$ .



Σχήμα 12: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων, για δεδομένο ύψος  $y$  και λόγο  $H/D$ , με την τιμή που έδωσε το Flac3D για δεδομένη μετατόπιση  $u_x/D$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 το σημείο που ληφθηκε από το Flac3D, είχε το ίδιο απόλυτο ύψος με την  $U_{y7}$  (στέψη της σήραγγας) και παρουσιάζει τιμή κοντά στη γραμμική τάσης αυτής.

Από τα παραπάνω φαίνεται σε πρώτη φάση ότι η αριθμητική και η πειραματική λύση βρίσκονται σε συμφωνία.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό την μελέτη του φαινομένου αστοχίας μετώπου αβαθών σηράγγων που έχει παρατηρηθεί στην πράξη εξαιτίας ελλειπών υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας. Στα πλαίσια της μελέτης του φαινομένου έγινε μια προσπάθεια να διερευνηθεί ποσοτικά η επίδραση που έχει η χαλάρωση του μετώπου στις καθιζήσεις που δημιουργούνται μπροστά και πάνω από την σήραγγα και να κατασκευαστεί μια εξίσωση η οποία να μπορεί να ‘προβλέπει’ το φαινόμενο. Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κατάλληλη πειραματική συσκευή (αμμοκιβώτιο με μηχανισμούς προσομοίωσης χαλάρωσης μετώπου σήραγγας).

Ακολούθως εκτελέστηκαν αρκετά πειράματα για βάθη σηράγγων  $H/D=0.5$ , 1 και 2, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί τόσο η αντιστοιχία με την πραγματικότητα (τυπικά βάθη κατασκευής ‘αβαθών’ σηράγγων κυμαίνονται από 3,5m έως 20m) όσο και η επαναληψιμότητα των πειραματικών δεδομένων. Η επεξεργασία των πειραμάτων προς εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων, έγινε με την βοήθεια του AutoCAD. Τέλος διεξήχθη σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων όρυξης σηράγγων με την βοήθεια του Flac3D.

Από την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση του φαινομένου χαλάρωσης του μετώπου μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η πειραματική συσκευή, με τον τρόπο που αυτή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, έδειξε ότι μπορεί να προσομοιώσει των ‘κώνο’ αστοχίας που παρατηρείται σε αβαθείς σήραγγες, όταν το έδαφος είναι χαμηλής έως μηδενικής συνεκτικότητας.
- Η καταστατική εξίσωση που κατασκευάστηκε ‘προβλέπει’, στις περισσότερες των περιπτώσεων, το μέγεθος των καθιζήσεων του εδάφους μπροστά και πάνω από το μέτωπο της σήραγγας για δεδομένη χαλάρωση του μετώπου.
- Το υπολογιστικό πρόγραμμα Flac3D έδειξε ότι ένα πρόγραμμα ευρείας χρήσης στη Γεωτεχνική Μηχανική έχει την δυνατότητα να υπολογίζει σωστά και με σχετικά μεγάλη ακρίβεια τις μετατοπίσεις που εμφανίζονται στην



στέψη της σήραγγας, καθώς, σε εκείνη την περιοχή εμφανίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα.

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

### Βιβλιογραφία

#### Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Atkinson, J.H. and Potts, D.M. (1977), '*Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil*', Géotechnique **27**, No.2, pp 203-215
2. Bickel, O. John, Kuesel, R. Thomas, King, H. Elwyn.: *Tunneking Enginnering Handbook* /second edition/ Chapter 6
3. Exadaktylos G. E., Vardoulakis. I., Stavropoulou M.C. and Tsombos, P. (2003), '*Analogue and numerical modeling of normal fault patterns produced due to slip along a detachment zone.*' Tectonophysics, **376**, pp 117-134.
4. Crook, A.J.L., Willson, S.M. Yu, J.G. and Owen, D.R.J. (2006). '*Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments.*' Journal of Structural Geology, **28**, pp 729–744.
5. Dimova, V.L. (1990), '*Some Direct and Inverse Problems in Applied Geomechanics*' University of Mining & Geology, Sofia,.
6. Hornung H.G. '*Dimensional Analysis*', Dover, 2006
7. Leca, E and Dormieux, L. (1990), '*Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material*', Géotechnique **40**, No.4, pp 581-606
8. Litwiniszyn, J. (1974), '*Stochastic Methods in the Mechanics of Granular Bodies.*' Springer-Verlag, Wien,
9. Lunardi, Pietro (2000), '*The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils*'

10. McClay, K.R.(1990), '*Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies.*' Marine and Petroleum Geology, 7, 206–233.
11. Tarkoy, P., J., (1995), '*Comparing TBMs with drill and blast excavation*', Tunnels & Tunneling, 27(10), pp 41-44
12. Tarkoy, P., J., and Wagner, J., (1988), '*Backing up a TBM*', Tunnels & Tunneling, 20(10), pp 27-32
13. Tarkoy, P., J., (1986), '*Practical geotechnical and engineering properties of tunnel boring machine performance analysis and prediction*', Tunnels & Tunneling, N1087, pp 62-78
14. Tarkoy, P., J., (1981), '*Tunnel boring machine performance as a function of local geology*', International Association of Engineering Geology, V18, N2, pp 169-186
15. Tarkoy, P., J., and Byram, J., (1988), '*The advantages of tunnel boring: a qualitative / quantitative comparison of D&B and TBM excavation*', Tunnels & Tunneling, 20(10)
16. Terzaghi, K.v.(1936), '*Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trap-door*'. Proc. Int Conf. Soil. Mechanics., Cambridge, Mass., I, 307-311.
17. Vardoulakis, I., Vairaktaris, E., Papamichos, E. (2004), '*Subsidence Diffusion-Convection: I. Direct Problem.*' Comput. 'Methods Appl. Mech. Engrg', **193**, pp 2745–2760.
18. Wooi Leong Tan and Pathegama Gamage Ranjith (2003), '*Parameters and Considerations in soft ground Tunneling*', EJGE, <http://www.ejge.com/2003/Ppr0344/Ppr0344.htm>

## Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ., (2002), *‘Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων’*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Εξαδάκτυλος, Γ. και Σταυροπούλου, Μ., (2004), *‘Σχεδιασμός και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων’*, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Εξαδάκτυλος, Γ. και Μπαράκος, Γ., (2004), *‘Παράρτημα Κεφαλαίου 4 – Μηχανική Εξόρυξη Πετρωμάτων’*, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
4. Καββαδάς, Μ., (2005), *‘Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων’*, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Μπούνου, Α., (2005), *‘Διαχείριση Κινδύνου σε Υπόγεια Έργα’*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. Μπαράκος, Ε.Γεώργιος (2006), *‘Συγκριτική Αξιολόγηση των Μεθόδων Εξόρυξης Σηράγγων’ Εργασία στα πλαίσια μεταπτυχιακού μαθήματος*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

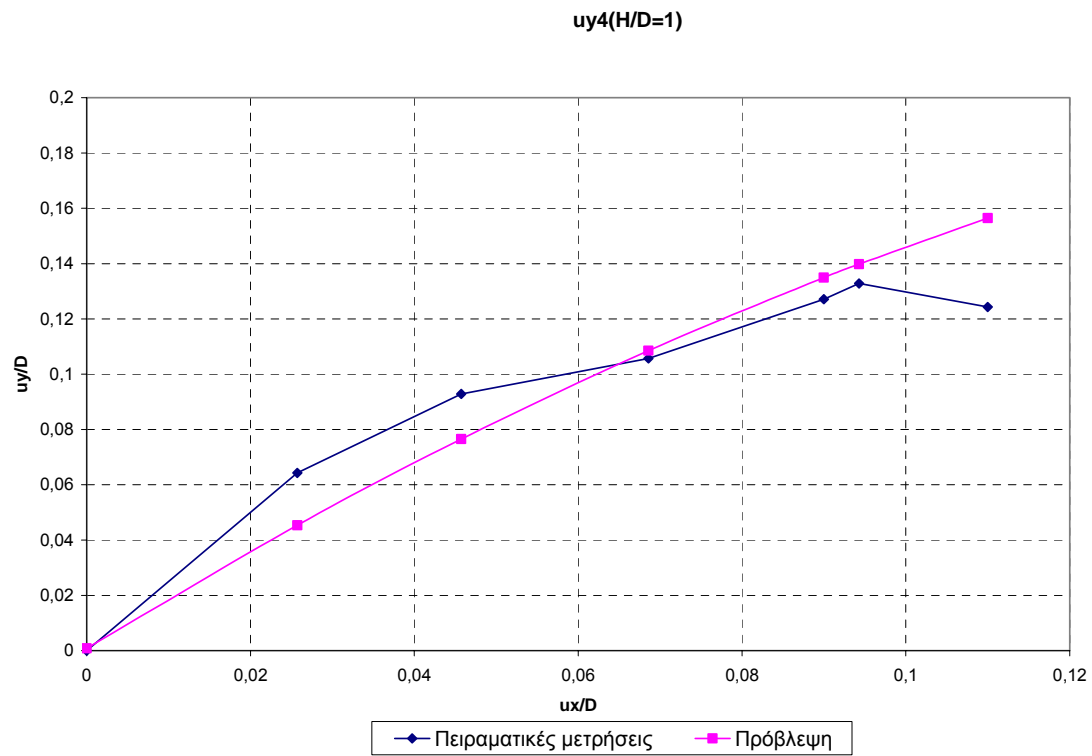
### **Δικτυακοί Τόποι**

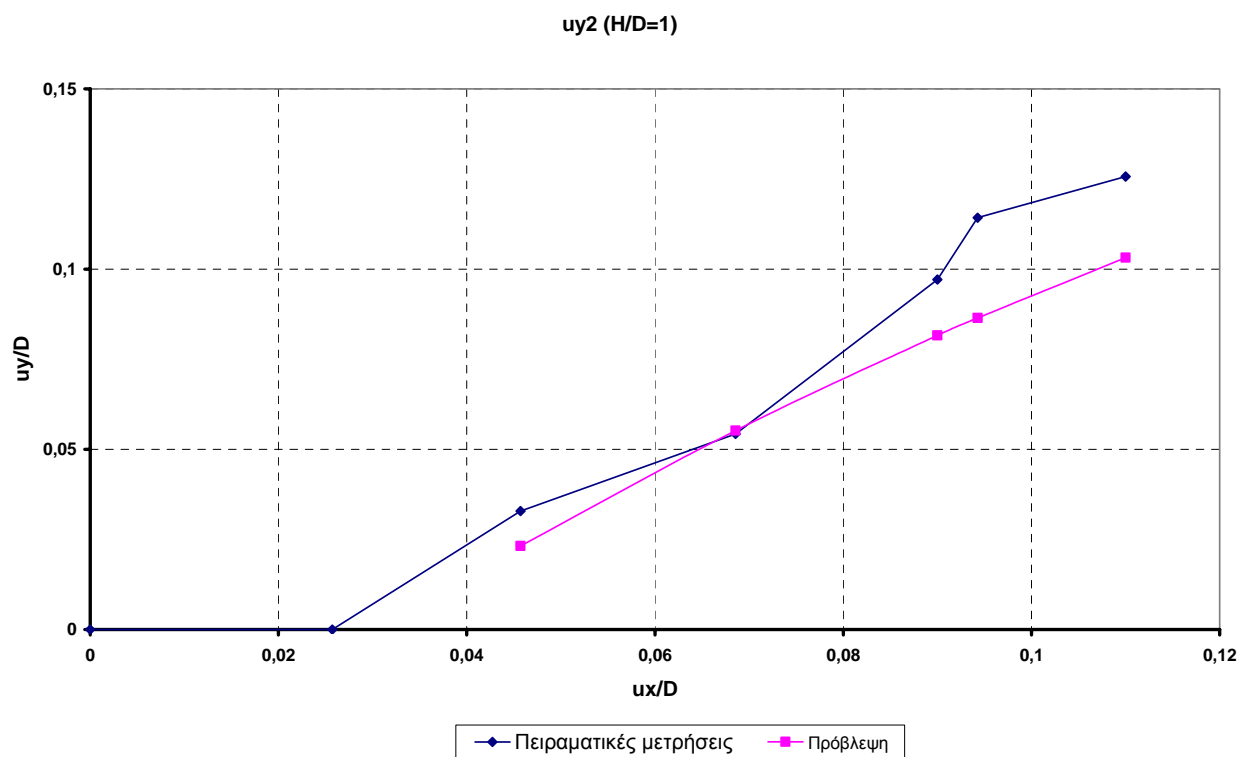
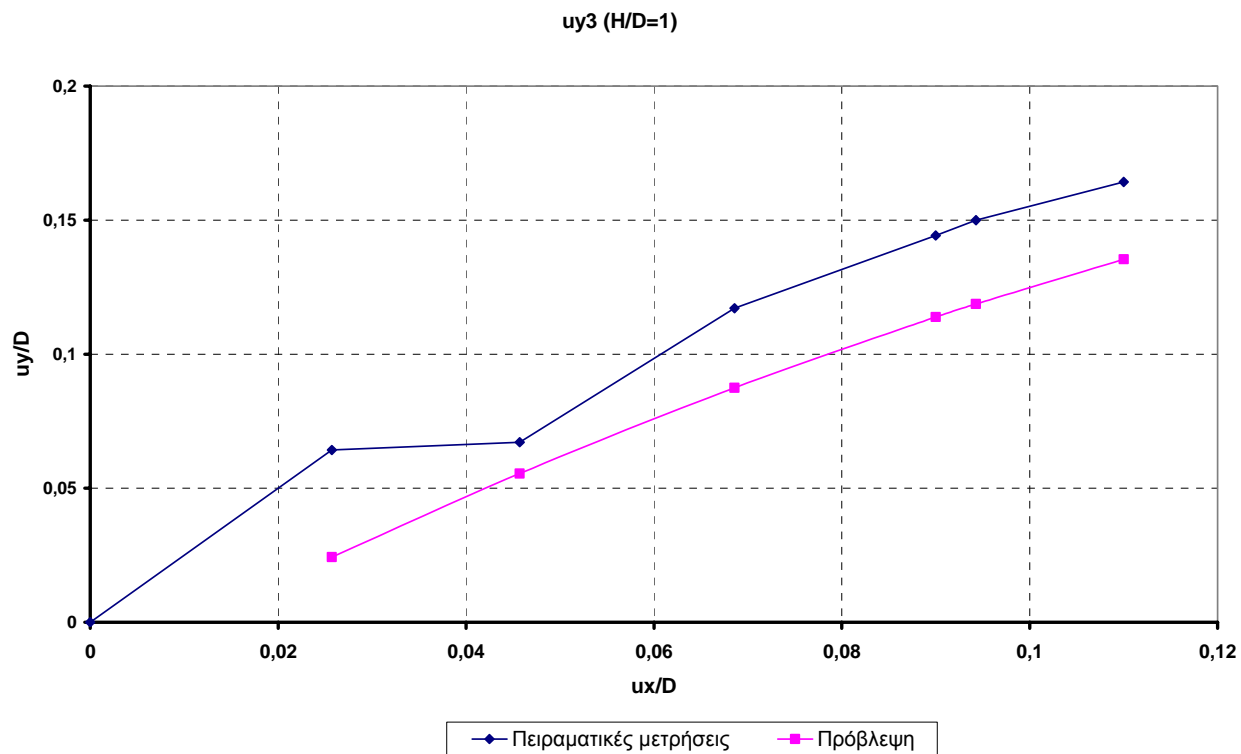
1. [www.mining-technology.com](http://www.mining-technology.com)
2. [www.tbmdata.com](http://www.tbmdata.com)
3. [www.tbmexchange.com](http://www.tbmexchange.com)
4. [www.tee.gr](http://www.tee.gr)
5. [www.tunconstruct.org](http://www.tunconstruct.org)
6. [www.tunnels.com](http://www.tunnels.com)
7. [www.robbinstbm.com](http://www.robbinstbm.com)
8. [www.pipejacking.org/](http://www.pipejacking.org/)
9. [www.jacobssf.com/articles/2002%20Romero%20NATM.pdf](http://www.jacobssf.com/articles/2002%20Romero%20NATM.pdf)

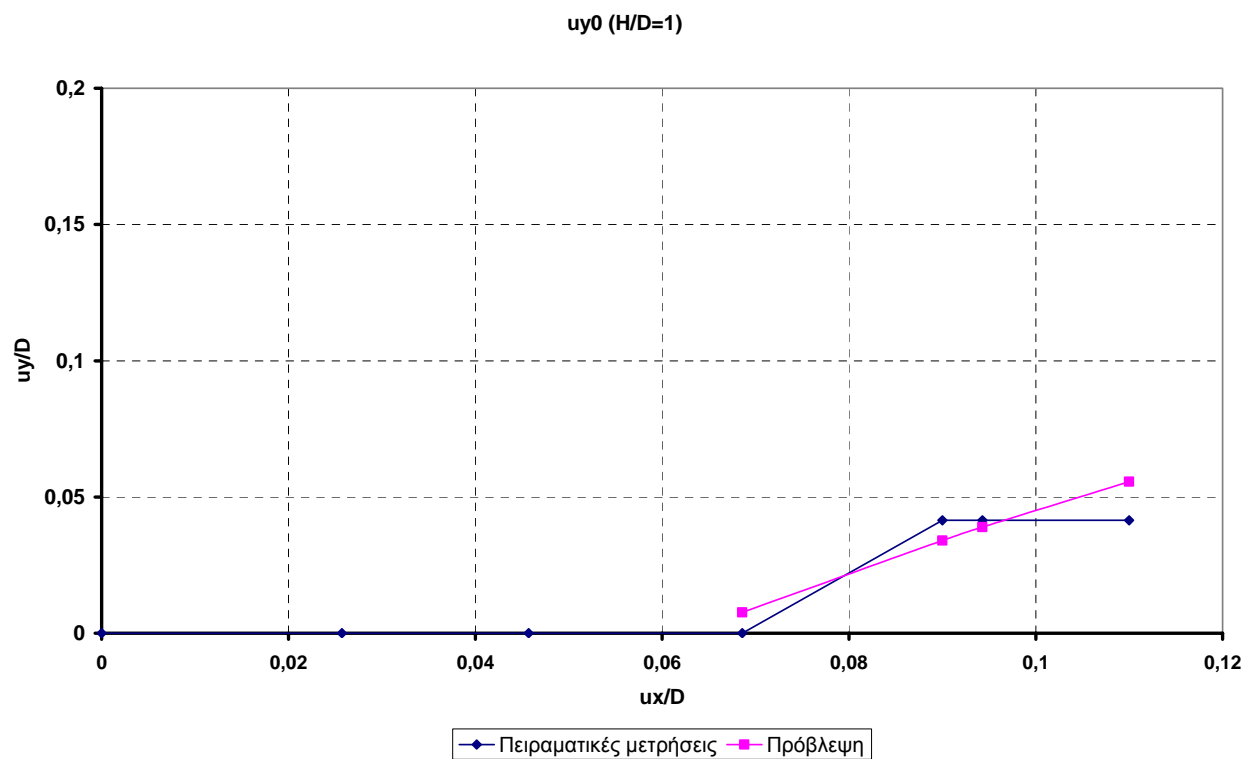
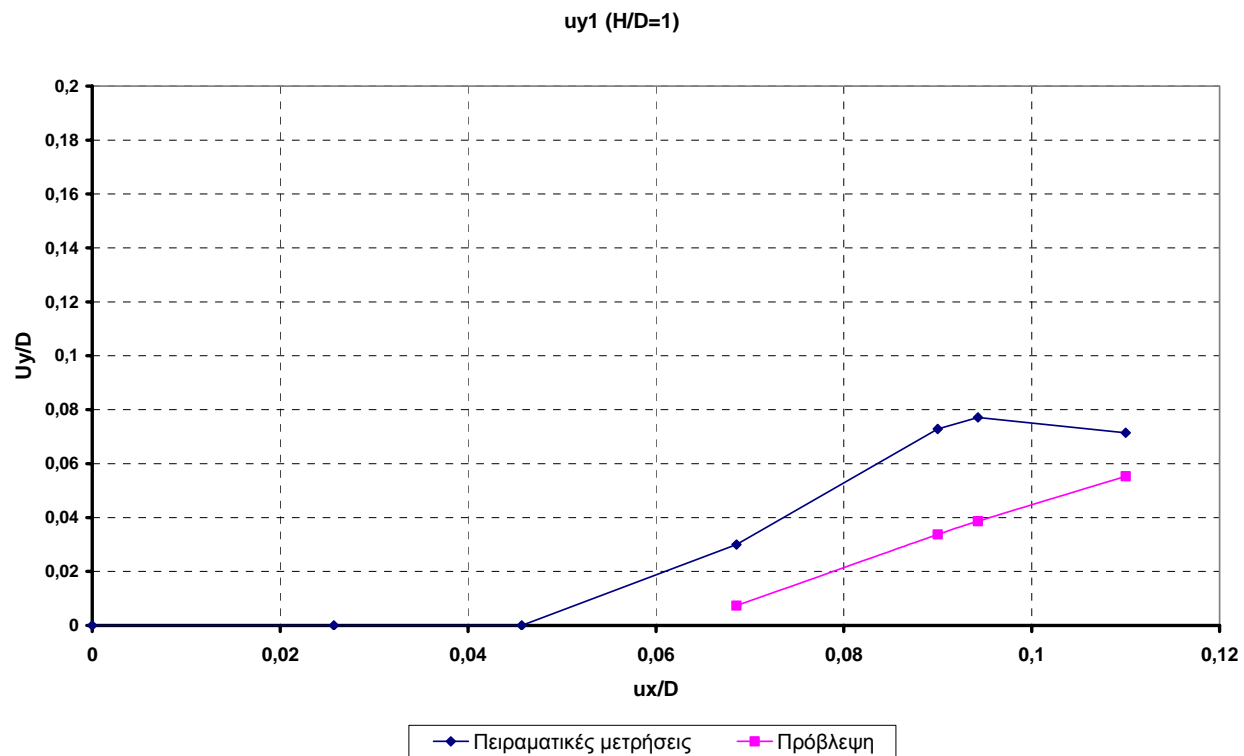
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες που προκύπτουν από την χρήση της εξίσωσης 7.9 για τις μετατοπίσεις  $u_x$  του εκάστοτε λόγου  $H/D$ .

- Για  $H/D=1$

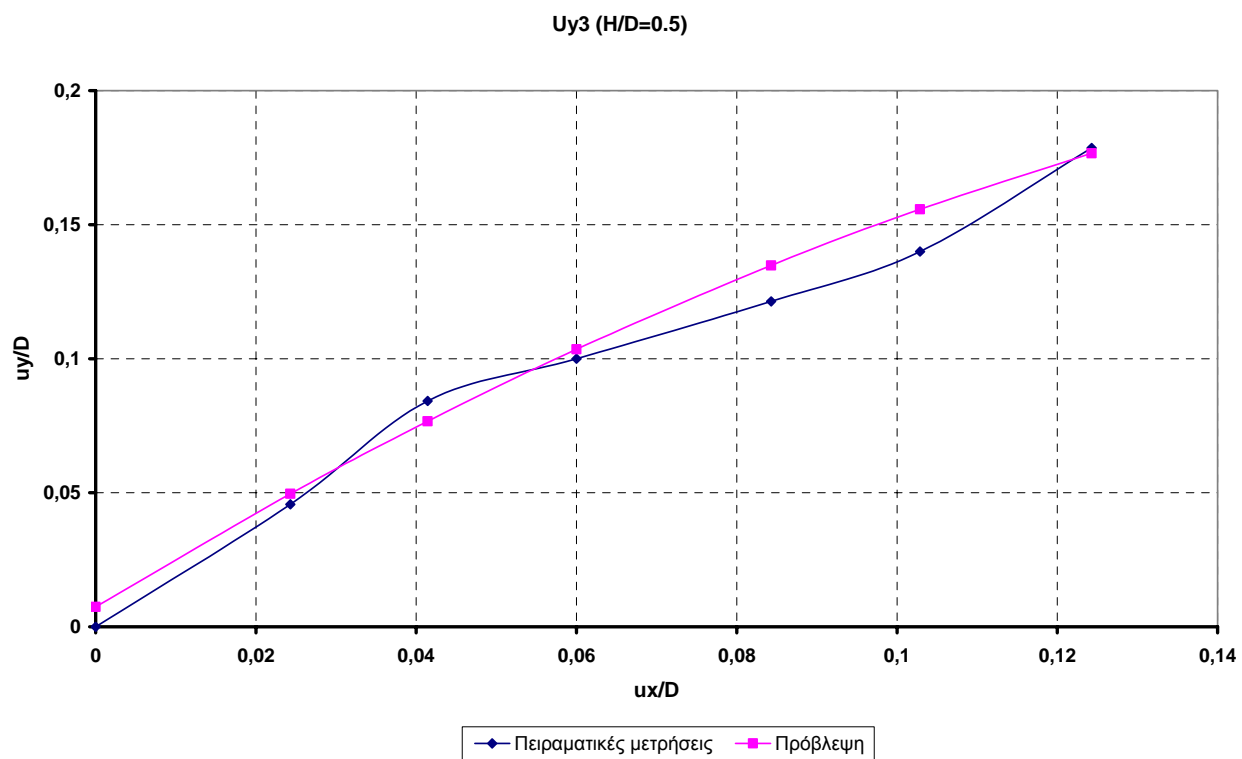
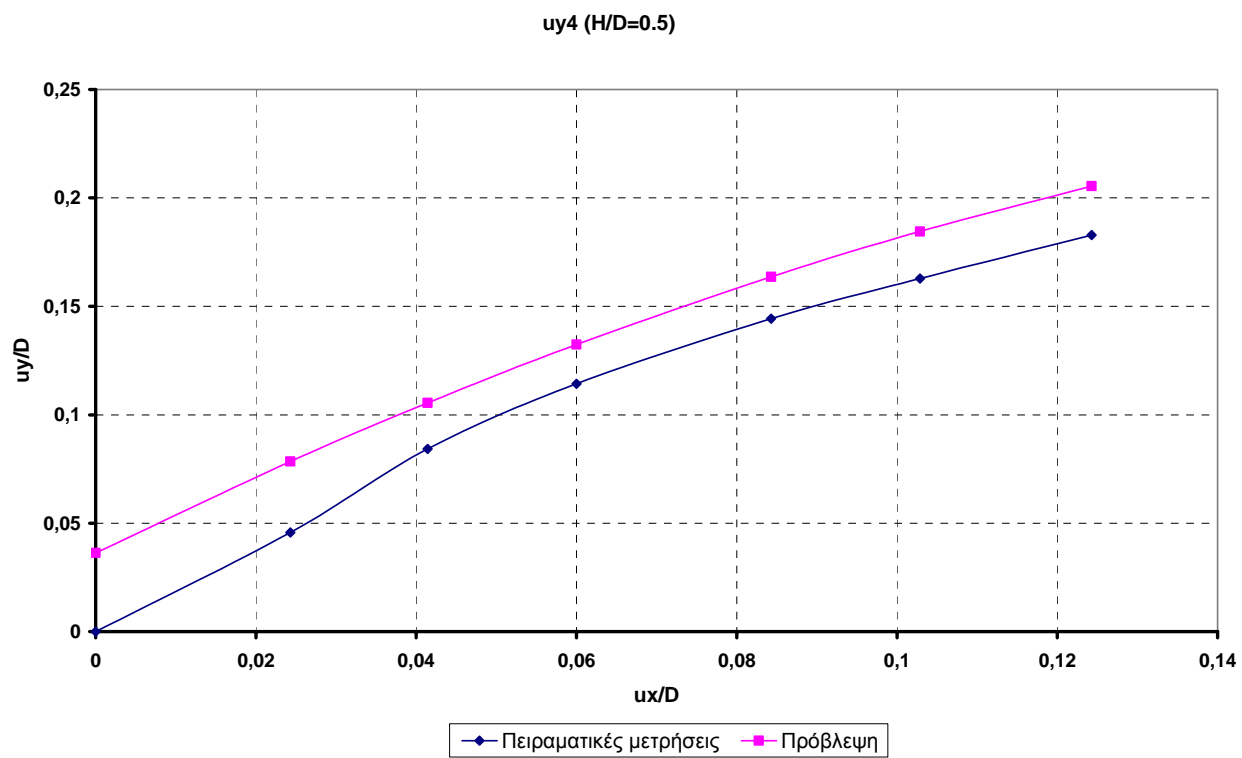


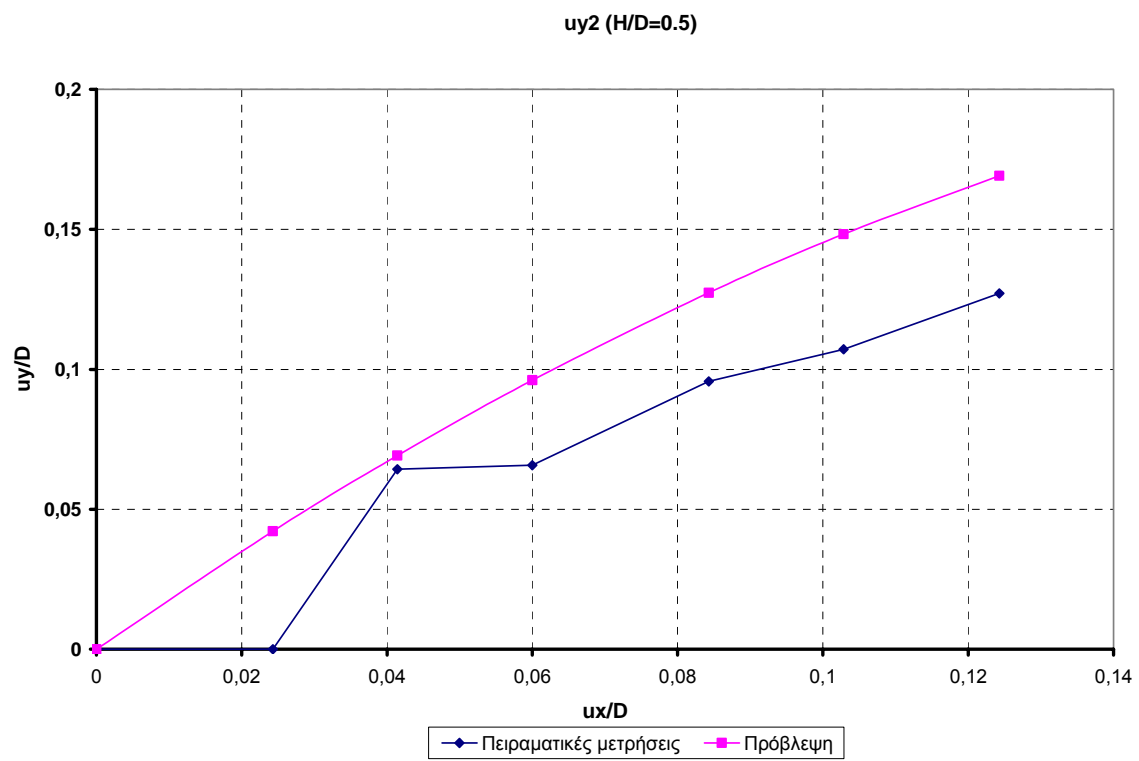






- Για  $H/D=0.5$





- Για  $H/D=2$

