



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αριθμητική προσομοίωση της επιρροής αβαθών σηράγγων στην εκδήλωση
επιφανειακών καθιζήσεων**

Υπεύθυνος Καθηγητής: *Μιχαήλ Καθβαδάς, Καθηγητής ΕΜΠ*

Μαρία Αργυροπούλου

ΑΘΗΝΑ 2020



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

POSTGRADUATE PROGRAMME IN ANALYSIS AND DESIGN OF
EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE

GEOTECHNICAL DEPARTMENT

FINITE ANALYSIS IN UNDERGROUND WORKS

MASTER THESIS

**NUMERICAL INVESTIGATION IN SURFACE SETTLEMENTS DUE TO SHALLOW
TUNNEL EXCAVATION**

Supervisor: *M. Kavvadas, Professor NTUA*

Maria Argiropoulou

ATHENS 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αριθμητική προσομοίωση της επιρροής αβαθών σηράγγων στην εκδήλωση
επιφανειακών καθιζήσεων**

Μαρία Αργυροπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις /3/2020

Μιχαήλ Καββαδάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Βησσαρίων Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2020

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην διερεύνηση της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης αστικών (ρηχών) σηράγγων. Κατά την διάνοιξη τέτοιων σηράγγων, συχνά παρατηρούνται φαινόμενα μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων, τα οποία προκαλούν ελαφριές έως πολύ σοβαρές βλάβες στις υπερκείμενες κατασκευές.

Αρχικά, γίνεται παρουσίαση της μεθόδου διάνοιξης αστικών σηράγγων, τόσο με μηχανικά μέσα (NATM), όσο και με μηχανοποιημένη όρυξη (TBM).

Στην συνέχεια παρατίθενται οι εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί διεθνώς έως και σήμερα, με σκοπό την εκτίμηση και υπολογισμό τόσο των επιφανειακών καθιζήσεων, όσο και των παραγόμενων σε αυτών μεγεθών, όπως η απώλεια εδαφικού όγκου λόγω εκσκαφής.

Ακολουθεί αριθμητική διερεύνηση με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.2019 (RocScience) της επιρροής της διάνοιξης αστικής σήραγγας σε ασθενή εδαφικά υλικά, στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων. Η παραμετρική διερεύνηση εξετάζει την επιρροή του ύψους των υπερκείμενων γαιών, την επιρροή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων και του βαθμού αποτόνωσης του εδαφικού υλικού λόγω της εκσκαφής της σήραγγας.

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες από εμάς σχέσεις υπολογισμού των επιφανειακών καθιζήσεων και των παραγόμενων μεγεθών, λόγω της διάνοιξης αστικής σήραγγας.

Τέλος, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις σχέσεις που έχουν εξαχθεί, σε εφαρμογή σε μελέτη περίπτωσης (case study) σε αστική σήραγγα του Μετρό της Αθήνας, όπου αποδεικνύεται η πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων των σχέσεων που προταθήκαν με τα επιτόπου μετρηθέντα αποτελέσματα.

Abstract

The present diploma thesis studies the surficial settlements due to shallow tunnel excavation. During the excavation process of such (shallow) tunnels, it is not unusual to measure substantial surficial settlements, with devastating effects on overlying structures and lifelines.

The initial part of the thesis focuses on the excavation methods of shallow tunnels, both by means of mechanized techniques (TBM) and conventional mechanical techniques (NATM).

Next follows, the novel empirical correlations, in the international literature to date, giving the surficial settlements and volume loss due to the excavation process.

The numerical analyses work by means of the F.E. commercial code RS2.2019 (RocScience) and study the surficial settlements due to shallow tunneling in weak soils. The thesis sheds light in the effect of overburden height, lateral earth coefficient at rest and deconfinement in the development of the surficial settlements and volume loss.

The following section proposes new relationships for the surficial settlements and volume loss as a function of the deconfinement, geometrical and mechanical soil parameters.

The present thesis concludes with a case study, applying the aforementioned developed relationships in a shallow tunnel excavated in the Athens Metro area. The proposed relationships are shown to perform well compared to the observations.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Μιχαήλ Καββαδά για την άψογη συνεργασία μας. Το μεταπτυχιακό του μάθημα <<Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων>>, κατανοητό, ουσιώδες και ενδιαφέρον αποτέλεσε μεγάλο παράγοντα ώστε να εμβαθύνω τις γνώσεις μου στο Γεωτεχνικό Τομέα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και κατ' επέκταση την επιλογή του θέματος της εργασίας μου.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτρη Γεωργίου Διδάκτορα του Γεωτεχνικού Τομέα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ για την συνεργασία μας. Και ένα μεγάλο ευχαριστώ που αφιέρωσε μέρος του προσωπικού του χρόνου για την επίτευξη αυτού του εγχειρήματος. Με δίδαξε τη χρήση του προγράμματος RS2.2019 και με βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου, παρέχοντας τις επιστημονικές του γνώσεις και επιλύοντας κάθε πρόβλημα που πρόκυπτε. Συνέβαλε με τις υποδείξεις του στην ολοκλήρωση και στην οργάνωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα ευχαριστώ οφείλω στους νέους μου φίλους από το μεταπτυχιακό με τους οποίους συνεργάστηκα καθ' όλη τη διάρκεια του προγράμματος και μοιράστηκα όμορφες στιγμές χαράς και άγχους μαζί τους.

Ευχαριστώ επίσης, τη τριμελή επιτροπή μου, το κ. Μιχαήλ Καββαδά, Αχιλλέα Παπαδημητρίου και Βησσαρίων Παπαδόπουλο που αφιέρωσαν χρόνο για την παρακολούθηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Άννα και Άγγελο και στον αδερφό μου Ιωάννη όπου με τη βοήθεια τους χάραξα το δρόμο μου έως εδώ. Είναι εκεί, πάντα και παντού. Ελπίζω να φαίνομαι πάντα αντάξιά τους.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες.....	v
Λίστα Εικόνων	ix
Λίστα Σχημάτων	x
Λίστα Πινάκων	xii
Λίστα Διαγραμμάτων.....	xii
1. Εισαγωγή	1
2. Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων	5
2.1. Μέθοδος NATM.....	5
2.1.1. Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής	5
2.1.2. Η φιλοσοφία της τεχνικής-αρχές	7
2.1.3. Η εφαρμογή της τεχνικής.....	10
2.1.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM.....	13
2.1.5. Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM.....	13
2.2. Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων –TBM.....	14
2.2.1. Περιγραφή της μεθόδου.....	14
2.2.2. Παράγοντες οι οποίοι ευνοούν την επιλογή του TBM.....	16
2.2.3. Παράγοντες που αποτρέπουν την επιλογή του TBM.....	16
2.2.4. Επιλογή μεταξύ συμβατικής διάνοιξης NATM ή με TBM	16
2.2.5. Γενικά χαρακτηριστικά του TBM.....	17
2.2.6. Μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων για εδαφικούς σχηματισμούς.....	18
2.2.7. Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB)	21
2.2.7.1. Αρχή λειτουργίας EPB	21
2.2.7.2. Υποστήριξη Μετώπου	23
2.2.7.3. Εισπίεση Αφρού	24
2.2.7.4. Κύρια μέρη μηχανήματος EPB – TBM	25
2.2.8. Μηχάνημα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield).....	26
2.2.8.1. Κύρια μέρη μηχανήματος Slurry – TBM.....	27

2.2.9.	Κατασκευή επένδυσης σήραγγας με TBM.....	29
3.	Εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων	31
3.1.	Επέκταση μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους.....	33
3.2.	Καθιζήσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη σήραγγας με συμβατικά μέσα.....	34
3.3.	Καθιζήσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα (TBM).....	36
3.3.1.	Καθιζήσεις εμπρός και πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.....	37
3.3.2.	Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας.....	37
3.3.3.	Καθιζήσεις στο ουριαίο τμήμα της ασπίδας.....	38
3.3.4.	Καθιζήσεις εξαιτίας των παραμορφώσεων της επένδυσης	38
3.4.	Εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού των επιφανειακών καθιζήσεων	38
3.4.1.	Εκτίμηση μέγιστης καθίζησης (s_{max})	39
3.4.2.	Εκτίμηση σημείου καμπής (i).....	40
3.4.3.	Εκτίμηση απώλειας επιφανειακού εδαφικού όγκου (V_s)	42
3.4.4.	Εκτίμηση απώλειας εδαφικού όγκου γύρω από την σήραγγα (V_l).....	45
4.	Αριθμητική διερεύνηση της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων.....	47
4.1.	Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων	47
4.1.1.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος	49
4.1.2.	Μηχανικές παράμετροι	51
4.1.2.1.	Μηχανικές παράμετροι εδάφους	52
4.1.2.2.	Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης	52
4.1.3.	Βασικές παραδοχές.....	54
4.1.3.1.	Καταστατικό κριτήριο αστοχίας εδάφους.....	54
4.1.3.2.	Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης.....	54
4.1.3.3.	Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού	54
4.1.3.4.	Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_l)..	57
4.1.4.	Στάδια προσομοίωσης.....	58
4.1.5.	Συνοριακές συνθήκες.....	60
4.2.	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων.....	60
4.2.1.	Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (s_{max}) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ).....	61

4.2.2. Απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_l) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ)	74
4.2.3. Απώλεια επιφανειακού εδαφικού όγκου – volume loss (V_s) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ)	80
4.2.4. Σημείο καμψής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o)	86
5. Μόρφωση σχέσεων εκτίμησης επιφανειακών καθιζήσεων και παράγωγων μεγεθών	89
5.1. Δημιουργία συντελεστή αντοχής εδάφους N_λ	90
5.2. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_l) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s)	94
5.3. Συσχέτιση της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (s_{max}) με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_λ) 100	
5.4. Συσχέτιση της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (s_{max}) με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_l).....	106
5.5. Συσχέτιση του σημείου καμψής (i) με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_l).....	108
6. Μελέτη Περίπτωσης – Case Study	115
6.1. Ανάστροφη αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 13+075	117
7. Συμπεράσματα - Προτάσεις	125
8. Βιβλιογραφία	129

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. 1. Κατάρρευση περιπτέρου επί της οδού Πανεπιστημίου, λόγω αστοχίας μετώπου της υποκείμενης σήραγγας Μετρό (Πηγή: tanea.gr).	2
Εικόνα 1. 2. Κατάρρευση οδοστρώματος επί της Λεωφόρου Δουκίσσης Πλακεντίας, λόγω αστοχίας μετώπου υποκείμενης σήραγγας (Πηγή: in.gr).	3
Εικόνα 1. 3. Επιρροή της διάνοιξης αστικών σηράγγων σε υπερκείμενες κατασκευές (Πηγή: R. Bucek).	4
Εικόνα 2. 1. Κατασκευή κλειστού δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Πηγή: Ergose S.A.).....	12
Εικόνα 2. 2. Κοπτική κεφαλή TBM (Πηγή: Herrenknecht AG).....	15
Εικόνα 2. 3. EPB – TBM κατά την επέκταση της Γραμμής 3 της Αττικό Μετρό προς Πειραιά (Πηγή: Αττικό Μετρό).	19
Εικόνα 2. 4. Slurry – TBM κατά την κατασκευή το μετρό της Mumbai (Πηγή: ROBBINS).....	20
Εικόνα 2. 5. Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία - segments (Πηγή: Mesalmalat).	30
Εικόνα 3. 1. Επίδραση της κατασκευής της Γραμμής 2 του μετρό της Αθήνας σε επιφανειακή κατασκευή (Πηγή: tanea.gr).....	32
Εικόνα 4 1. Διακριτοποίηση προσομοιώματος.....	48
Εικόνα 4 2. Προσομοίωση αποτόνωσης εδαφικού υλικού.	59
Εικόνα 4 3. Προσομοίωμα με την τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης.....	59
Εικόνα 4 4.Συνοριακές συνθήκες στα όρια του μοντέλου.....	60
Εικόνα 6. 1. Μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων (EPB – TBM) κατά την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Πηγή: ametro.gr).	116
Εικόνα 6. 2. Προσομοίωμα Χ.Θ. 13+075.....	121

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2. 1. Εξέλιξη συγκλίσεων σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (κατά Panet) (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	9
Σχήμα 2. 2. Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, βάσει μεθόδου NATM (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	10
Σχήμα 2. 3. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας (Πηγή: CivilEngineering.com)	11
Σχήμα 2. 4. Επιλογή τύπου TBM, βάσει τύπου εδάφους (Πηγή: Y.L. Zheng et al.)	17
Σχήμα 2. 5. Επιλογή τύπου μηχανήματος ανάλογα με την κοκκομετρία του εδάφους (Πηγή: ΤΕΕ).	20
Σχήμα 2. 6. Επιλογή τύπου μηχανήματος ανάλογα με την διαπερατότητα του εδάφους (Πηγή: ΤΕΕ). ..	21
Σχήμα 2. 7. Τρόπος υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με μηχανήμα EPB – TBM (Πηγή:UTM).	24
Σχήμα 2. 8. Σχηματική απεικόνιση του μηχανήματος εξισορρόπησης πίεσης - EPB (Πηγή: Herrenknecht AG).	25
Σχήμα 2. 9. Σχηματική απεικόνιση του μηχανήματος αιωρήματος πολφού - Slurry (Πηγή: Herrenknecht AG).	28
Σχήμα 2. 10. Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) επίπεδος σύνδεσμος (plane joint), (b) και (c) σύνδεσμοι με καμπύλη επιφάνεια (convex joints)(Πηγή: Luttkiholt).	30
Σχήμα 3. 1. Εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης ρηχής σήραγγας (Πηγή: Carles Camos).	31
Σχήμα 3. 2. Πρωτεύον τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA-CET).	33
Σχήμα 3. 3. Δευτερεύον τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA-CET).	34
Σχήμα 3. 4. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου αστοχίας του μετώπου σηράγγων (Πηγή. Α. Σοφιανός).	35
Σχήμα 3. 5. Τρόπος λειτουργίας των μεθόδων προενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	36
Σχήμα 3. 6. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου εκδήλωσης των καθιζήσεων κατά μήκος του TBM (Πηγή: Wan et al., 2017).	37
Σχήμα 3. 7. Σχηματική απεικόνιση της εκδήλωσης καθιζήσεων και των παραγωγών μεγεθών κατά την διάνοιξη ρηχής σήραγγας (Πηγή: A. Marto).....	39
Σχήμα 3. 8. Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά Gauss (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	40

Σχήμα 3. 9. Επίδραση της θέσης ανωδομής σε σχέση με το σημείο καμπής (Πηγή: M. Masosonore)..	41
Σχήμα 3. 10. Συσχέτιση εδαφικής απώλειας όγκου με συντελεστή υπερφόρτισης (Πηγή. Β. Παπαδόπουλος).	44
Σχήμα 3. 11. Σχηματική απεικόνιση της απώλειας όγκου εκσκαφής (Πηγή: Jinyang Fu).....	45
Σχήμα 3. 12. Απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής, ανάλογα τον τύπο του εδάφους (Πηγή: Andrea Franza).	45
Σχήμα 4 1 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υποστήριξης σήραγγας TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.).	53
Σχήμα 4 2. Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb.	54
Σχήμα 4 3. Τυπική σύγκλισης – αποτόνωσης (Πηγή: Μ. Καββαδάς).....	55
Σχήμα 4 4. Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	56
Σχήμα 4 5. Μεταβολή βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καββαδάς).	56
Σχήμα 4 6. Σχηματική απεικόνιση προσδιορισμού απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL).	57
Σχήμα 4 7. Γεωστατικές συνθήκες – αρχικό στάδιο προσομοίωσης.	58
Σχήμα 5. 1 Γραφική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της εκσκαφής.	89
Σχήμα 6. 1. Επέκταση της Γραμμής 2 της Αττικό Μετρό Α.Ε. «Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» (Πηγή: ametro.gr).	115
Σχήμα 6. 2. Εγκάρσια τομή καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 13+075 (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).....	117
Σχήμα 6. 3. Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους για το Τμήμα Γ (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).	118
Σχήμα 6. 4. Στρωματογραφία περί την Χ.Θ. 13+075 (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).....	119

Λίστα Πινάκων

Πίνακα 3. 1. Παράμετρος K ανάλογα των τύπο του εδάφους, σύμφωνα με τους O' Reilly and New (1982).....	42
Πίνακας 6. 1. Γεωτεχνικές παράμετροι Τμήματος Γ (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).....	118
Πίνακας 6. 2. Αποτελέσματα θεωρητικού υπολογισμού για case study.....	121
Πίνακας 6. 3. Μετρούμενα μεγέθη από αριθμητική ανάλυση case study.	122
Πίνακας 6. 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρητικού και αναλυτικού υπολογισμού.	123

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4 1. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=1.5$ και $K_0=1$	61
Διάγραμμα 4 2. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=1.5$ και $K_0=1$	62
Διάγραμμα 4 3. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=1.5$ και $K_0=1$	62
Διάγραμμα 4 4. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=1.5$ και $K_0=1$	63
Διάγραμμα 4 5. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$	63
Διάγραμμα 4 6. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$	64
Διάγραμμα 4 7. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$	64
Διάγραμμα 4 8. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$	65
Διάγραμμα 4 9. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=2$ και $K_0=1$	65
Διάγραμμα 4 10. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=2$ και $K_0=1$	66
Διάγραμμα 4 11. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=2$ και $K_0=1$	66

Διάγραμμα 4 12. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=2$ και $K_0=1$.	67
Διάγραμμα 4 13. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.	67
Διάγραμμα 4 14. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.	68
Διάγραμμα 4 15. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.	68
Διάγραμμα 4 16. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.	69
Διάγραμμα 4 17. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=3$ και $K_0=1$.	69
Διάγραμμα 4 18. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=3$ και $K_0=1$.	70
Διάγραμμα 4 19. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=3$ και $K_0=1$.	70
Διάγραμμα 4 20. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=3$ και $K_0=1$.	71
Διάγραμμα 4 21. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=3$ και $K_0=0.5$.	71
Διάγραμμα 4 22. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=3$ και $K_0=0.5$.	72
Διάγραμμα 4 23. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=3$ και $K_0=0.5$.	72
Διάγραμμα 4 24. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=3$ και $K_0=0.5$.	73
Διάγραμμα 4 25. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=1$.	74
Διάγραμμα 4 26. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$.	75
Διάγραμμα 4 27. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=2$ και $K_0=1$.	76

Διάγραμμα 4 28. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=2$ και $K_0=0.5$	77
Διάγραμμα 4 29. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=3$ και $K_0=1$	78
Διάγραμμα 4 30. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (VL) για λόγο $H/D=3$ και $K_0=0.5$	79
Διάγραμμα 4 31. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=1$	80
Διάγραμμα 4 32. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$	81
Διάγραμμα 4 33. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=2$ και $K_0=1$	82
Διάγραμμα 4 34. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=2$ και $K_0=0.5$	83
Διάγραμμα 4 35. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=3$ και $K_0=1$	84
Διάγραμμα 4 36. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (Vs) για λόγο $H/D=3$ και $K_0=0.5$	85
Διάγραμμα 4 37. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_0), για λόγο $H/D=1.5$	86
Διάγραμμα 4 38. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_0) για λόγο $H/D=2$	87
Διάγραμμα 4 39. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_0) για λόγο $H/D=3$	88
Διάγραμμα 5 1. Μεταβολή των μετακινήσεων προς το αριστερό σύνορο του μοντέλου.	49
Διάγραμμα 5 2. Μεταβολή των μετακινήσεων προς το δεξιό σύνορο του μοντέλου.	50
Διάγραμμα 5 3. Μεταβολή των μετακινήσεων προς το κάτω σύνορο του μοντέλου.	50
Διάγραμμα 5 1. Μεταβολή του συντελεστή αντοχής εδάφους N_L σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης.	91
Διάγραμμα 5 2. Γραφική απεικόνιση Σχέση 5.2.	92
Διάγραμμα 5 3. Συσχέτιση VL με N_L για $K_0=1$	93
Διάγραμμα 5 4. Συσχέτιση VL με N_L για $K_0=0.5$	94

Διάγραμμα 5 5. Συσχέτιση VL με VS για $K_0=1$	95
Διάγραμμα 5 6. Συσχέτιση VL με VS για $K_0=0.5$	96
Διάγραμμα 5 7. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=1$	97
Διάγραμμα 5 8. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=0.5$	97
Διάγραμμα 5 9. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=1$	98
Διάγραμμα 5 10. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=0.5$	98
Διάγραμμα 5 11. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=1$	99
Διάγραμμα 5 12. Συσχέτιση VL με VS για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=0.5$	99
Διάγραμμα 5 13. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για $K_0=1$	101
Διάγραμμα 5 14. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για $K_0=0.5$	102
Διάγραμμα 5 15. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=1$	103
Διάγραμμα 5 16. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=0.5$	103
Διάγραμμα 5 17. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=1$	104
Διάγραμμα 5 18. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=0.5$	104
Διάγραμμα 5 19. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=1$	105
Διάγραμμα 5 20. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με Νλ για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=0.5$	105
Διάγραμμα 5 21. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με VL για $K_0=1$	107
Διάγραμμα 5 22. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με VL για $K_0=0.5$	108
Διάγραμμα 5 23. Συσχέτιση $(i/S_{max})\%$ με VL για $K_0=1$	109
Διάγραμμα 5 24. Συσχέτιση $(i/S_{max})\%$ με VL για $K_0=0.5$	110
Διάγραμμα 5 25. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=1$	111
Διάγραμμα 5 26. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=0.5$	111
Διάγραμμα 5 27. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=1$	112
Διάγραμμα 5 28. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 2$ και $K_0=0.5$	112
Διάγραμμα 5 29. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=1$	113
Διάγραμμα 5 30. Συσχέτιση i/S_{max} με VL για λόγο $H/D= 3$ και $K_0=0.5$	113
Διάγραμμα 6. 1. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για την Χ.Θ. 13+075, βάσει αναλυτικού υπολογισμού.	122
Διάγραμμα 7. 1. Συσχέτιση καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων από αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, με προτεινόμενη καμπύλη κατά Peck.	125
Διάγραμμα 7. 2. Συσχέτιση VL με VS,	126
Διάγραμμα 7. 3. Συσχέτιση πραγματικού VL με θεωρητικού VS,	127

1. Εισαγωγή

Η ανάγκη του ανθρώπου για ανάπτυξη των δραστηριοτήτων του και προσπάθεια κάλυψης των καθημερινών του αναγκών, τον ωθεί στην κατασκευή νέων και επέκταση των υπάρχοντων υποδομών, ώστε να καλυφθούν οι παραπάνω ανάγκες. Η δυνατότητα έδρασης αυτών επί της επιφανείας του εδάφους, κρίνεται σε αρκετές περιπτώσεις δυσχερής και τεχνικοοικονομικά ασύμφορη, με αποτέλεσμα να απαιτείται η ανάπτυξη υπόγειων έργων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο μητροπολιτικός σιδηρόδρομος (Μετρό) του οποίου η ανάπτυξη εντός του αστικού ιστού επιβάλλει την υπογειοποίηση του στις περισσότερες πόλεις παγκοσμίως.

Η υπόγεια ανάπτυξη, συνδέεται άμεσα με την κατασκευή μεγάλων σιδηρόδρομων. Τις περισσότερες φορές αυτές οι υποδομές κατασκευάζονται εντός αστικού ιστού, με αποτέλεσμα να διέρχονται κάτω από σημαντικά κτίρια και μνημεία, όπως αρχαιολογικούς χώρους, διατηρητέα κτήρια και κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι περισσότεροι από αυτούς του χώρους, προστατεύονται από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (UNESCO), με αποτέλεσμα να καθίσταται μεγάλη ανάγκη για πολύ λεπτομερή και προσεκτική κατασκευή των υπογείων έργων, όταν αυτά διέρχονται κάτω ή τοποθετούνται παρακείμενα αυτών των χώρων. Η εκπόνηση των έργων απαιτεί και επιβάλλει τον λεπτομερή σχεδιασμό τους, εξασφαλίζοντας επαρκή βαθμό επιτελεστικότητας, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας.

Στην Αθήνα, η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πόλεις παγκοσμίως, για τα ιστορικά της μνημεία και τους αρχαιολογικούς της χώρους, έχει κατασκευαστεί ακριβώς από κάτω ένα μεγάλο δίκτυο μητροπολιτικού σιδηροδρόμου (Μετρό), όπου σύντομα πρόκειται να επεκταθεί (κατασκευή Γραμμής 4).

Όλες οι επερχόμενες επεκτάσεις θα πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά, ώστε να αποφευχθούν αστοχίες, οι οποίες θα εκδηλωθούν στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα την πρόκληση σοβαρών ζημιών, έως και καταστροφή των παραπάνω χώρων ιστορικής σημασίας. Επίσης οποιαδήποτε αστοχία, θα έχει άμεσο αντίκτυπο στο προϋπολογισμό του έργου, αυξάνοντάς τον κατακόρυφα, καθώς και στο χρονοδιάγραμμα του έργου, όπου θα προκληθούν μεγάλες καθυστερήσεις.

Αστοχίες του μετώπου των υπό διάνοιξη σιδηρόδρομων, που προκάλεσαν σοβαρές ζημιές στην επιφάνεια του εδάφους, είχαν προκληθεί κατά την κατασκευή της βασικής γραμμής του Μετρό της Αθήνας (Γραμμές 2 & 3).

Συγκεκριμένα, προκλήθηκε κατάρρευση περιπτέρου επί της οδού «Πανεπιστημίου» στο κέντρο της Αθήνας, όταν διανοιγόταν η σήραγγα ακριβώς από κάτω, στις 4/10/1997 (**Εικόνα 1.1**). Η αιτία της κατάρρευσης αυτής, αποδόθηκε σε αστοχία μετώπου της υπό διάνοιξη σήραγγας. Επίσης παρόμοιο περιστατικό συνέβη στις 8/1/2003 (**Εικόνα 1.2**), κατά την διάνοιξη της σήραγγας της Γραμμής 3, κάτω από την Λεωφόρο Δουκίσσης Πλακεντίας, στην περιοχή Χαλανδρίου Αττικής. Η αστοχία προκλήθηκε λόγω αστάθειας της υπό διάνοιξη σήραγγας, με αποτέλεσμα να εκδηλωθούν έντονες επιφανειακές καθιζήσεις/ μετακινήσεις και να τραυματιστεί ένας πολίτης, ο οποίος διερχόταν από το σημείο.

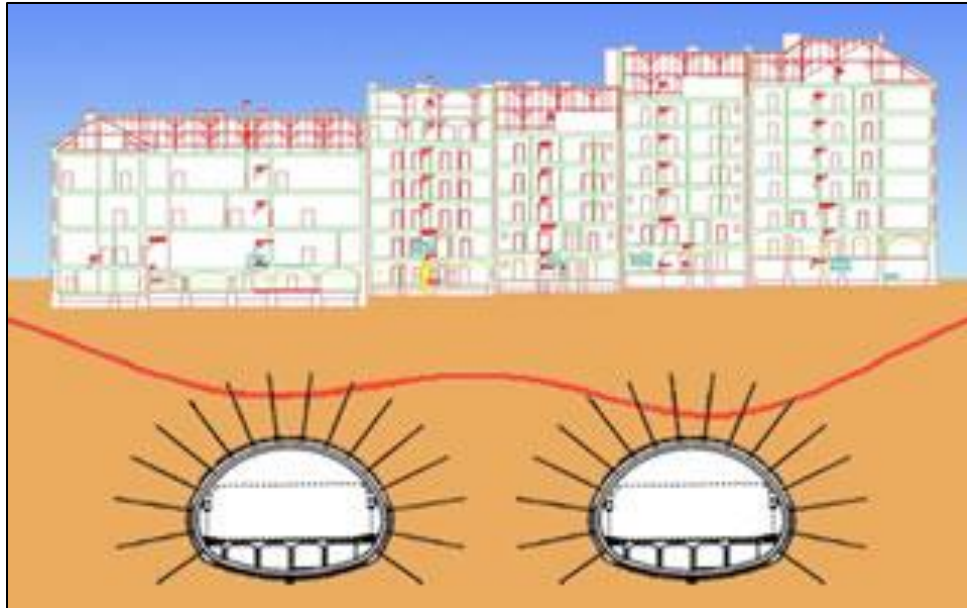


Εικόνα 1. 1. Κατάρρευση περιπτέρου επί της οδού Πανεπιστημίου, λόγω αστοχίας μετώπου της υποκείμενης σήραγγας Μετρό (Πηγή: tapea.gr).



Εικόνα 1. 2. Κατάρρευση οδοστρώματος επί της Λεωφόρου Δουκίσσης Πλακεντίας, λόγω αστοχίας μετώπου υποκείμενης σήραγγας (Πηγή: in.gr).

Σοβαρό επίσης πρόβλημα που προκύπτει από την διάνοιξη αβαθών σηράγγων εντός αστικού ιστού, είναι η εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων, όπου πιθανώς θα επιφέρουν προβλήματα σε υπερκείμενες κατασκευές.



Εικόνα 1. 3. Επιρροή της διάνοιξης αστικών σηράγγων σε υπερκείμενες κατασκευές (Πηγή: R. Buseck).

Συνήθως στην κατασκευή μητροπολιτικού σιδηροδρόμου (Μετρό), ο άξονας της σήραγγας επιλέγεται να διέλθει κάτω από οδούς, έτσι ώστε οι μέγιστες καθιζήσεις να προκληθούν κάτω από το οδόστρωμα το οποίο επισκευάζεται εύκολα και όχι κάτω από κατασκευές, που ίσως προκληθούν σοβαρές ζημιές στον φέροντα οργανισμό τους.

Παρόλα αυτά, πολλές φορές υπάρχει μεγάλη ακτίνα επιρροής της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων, αρκετά μετρά από τον άξονα της σήραγγας.

Για τον λόγο αυτό θα πρέπει πριν από τον σχεδιασμό τέτοιων σηράγγων, να ελέγχεται και να εκτιμάται η επιρροή των καθιζήσεων, ώστε να μην προκαλούνται πρόβλημα στις υπερκείμενες ανωδομές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί να διερευνήσει το φαινόμενο εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω απλουστευμένων σχέσεων εκτίμησης, οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπόγειας εκσκαφής, όσο και την συμπεριφορά του περιβάλλοντος γεωυλικού.

2. Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

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

Δεδομένης της γεωμετρίας εκσκαφής, των αναμενομένων γεωτεχνικών συνθήκων που θα συναντήσει η σήραγγα, των υπερκειμένων, του σκοπού της σήραγγας και του κεφαλαίου επένδυσης για την κατασκευή της, σήμερα εφαρμόζονται οι ακόλουθες μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων:

- Σήραγγες με εκσκαφή και επανεπίχωση (cut & cover)
- Συμβατική διάνοιξη σηράγγων:
 - ✓ Μέθοδος N.A.T.M.
 - ✓ Μέθοδος ADECO – RS
 - ✓ Μέθοδος SCL
- Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων (TBM)

Στην παρούσα εργασία θα γίνει περιγραφή της μεθόδου NATM και της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης σηράγγων, διότι αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν ευρεία εφαρμογή σήμερα στην κατασκευή υπογείων έργων.

2.1. Μέθοδος NATM

2.1.1. Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής

Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων - NATM (New Austrian Tunneling Method), αποτελεί ένα συνδυασμό της συμβατικής διάνοιξης σηράγγων και την εφαρμογή των συμβατικών μέτρων άμεσης υποστήριξης. Η μέθοδος περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων με εκτεθειμένο μέτωπο και υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευμένο σκυρόδεμα ή και αγκύρια βράχου, οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη των σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές τις δεκαετίας του 1960.

Ο όρος NATM επινοήθηκε από τον L.v. Rabcewicz το 1962. Την αποκάλεσε "νέα" για να ορίσει την εν λόγω μέθοδο ως μια διαφορετική προσέγγιση κατασκευής σηράγγων από την έως τότε γνωστή μέθοδο

και την ονόμασε "Αυστριακή" για να υπογραμμίσει το γεγονός ότι οι Αυστριακοί μηχανικοί διαδραμάτισαν αποφασιστικό ρόλο στην ανάπτυξή της. Ο Rabcewicz συνόψισε την κεντρική ιδέα της NATM ως την ανάγκη κατανόησης ότι το έδαφος είναι το πραγματικά φέρον στοιχείο ενώ η γραμμή υποστήριξης προσδίδει ενίσχυση στην επιφάνεια της βραχομάζας. Η διατήρηση και η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο είναι ο κύριος στόχος στη σύγχρονη σηραγγοποιία . Η χρήση της NATM ενισχύει την ικανότητα αυτουποστήριξης του βράχου ή του εδάφους κινητοποιώντας την αντοχή της περιβάλλουσας γεωμάζας.

Σε περαιτέρω ανάλυση, η NATM δεν είναι μέθοδος, δεν είναι νέα , και δεν είναι αποκλειστικά Αυστριακή. Ο πρώτος της όρος υιοθετήθηκε μόνο και μόνο για να διαχωρίσει τη νέα φιλοσοφία κατασκευής σηράγγων από την παλαιά μέθοδο που χρησιμοποιούσε σπονδυλωτές πλαισιακές κατασκευές και ξύλινη επένδυση. Συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία της NATM, όπως αγκύρια, προϋπήρχαν, το δε εκτοξευμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε στην Αυστρία (Runserau) επιτυχώς το 1955. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της.

Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευμένο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου.

Συχνά η NATM αποκαλείται και μέθοδος εκτοξευμένου σκυροδέματος, λόγω της χρήσης αυτής της τεχνολογίας στην αποτροπή της αποσυμπίεσης και της διάβρωσης και αποσάθρωσης της βραχομάζας, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση άλλων μέτρων υποστήριξης. Η τεχνολογία του εκτοξευμένου σκυροδέματος εφευρέθηκε από τον C.A. Akeley στο Σικάγο το 1907 και εισήχθη το 1955 στην σηραγγοποιία από τον Αυστριακό μηχανικό A.Brunner, αφού προηγουμένως (1848) είχε αποτολμηθεί στην περιοχή της Πράγας η χρήση ενός πρωτόλειου κονιάματος με ταχεία απόκτηση της αντοχής του.

Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα είναι ένα ξηρό , υγρό ή ύφυγρο κονίαμα άμμου/τσιμέντου, με αδρανή συνήθως 10mm και μέχρι 25mm, σε άμεση επαφή με την γεώμαζα και παραμορφούμενο με αυτήν, είναι δε γνωστό παγκοσμίως ως gunitite, καθώς διοχετεύεται με πεπιεσμένο αέρα και εφαρμόζεται συνήθως σε μικρού πάχους στρώσεις έχοντας μεν τις ιδιότητες του σκυροδέματος , αποκτώντας όμως ταχύτατα την αντοχή του (50% μέσα σε 12 το πολύ ώρες). Εν τω μεταξύ η τεχνολογία των ηλώσεων ανεπτύχθη

ραγδαία, ώστε να αποτελέσει ένα εύκαμπτο μέσο υποστήριξης που συνεπάγεται πλευρική παρεμπόδιση στην κατακλυσμένη βραχόμαζα.

Η NATM είναι επί της ουσίας μια τεχνική αντιμετώπισης των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά την υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων σε σκληρό βράχο έως μαλακό έδαφος, όπου η ανάλυση έχει ρόλο βοηθητικό- επιβεβαιωτικό. Η συνεχής προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες υποβοηθείται από εκτεταμένες οργανομετρήσεις, εξ 'ου και η NATM συχνά αναφέρεται ως παρατηρητική μέθοδος (observational method κατά τον Peck). Οι οργανομετρήσεις αναφέρονται στη σύγκλιση των παρειών, την καθίζηση της οροφής και άλλες μετρήσεις παραμορφώσεων, δυνάμεων και τάσεων, η κυριότερη από τις οποίες είναι η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος του εκτοξευμένου σκυροδέματος προκειμένου να ανιχνευθεί μια επερχόμενη αστοχία. Ο Sauer (1988) υποδεικνύει ότι η αυξημένη συχνότητα των μετρήσεων έχει περισσότερη αξία από την υψηλότερη ακρίβεια των οργάνων.

2.1.2. Η φιλοσοφία της τεχνικής-αρχές

Η NATM θεωρεί ότι κάθε διατομή αποτελείται από ένα δακτύλιο βραχόμαζας (το τμήμα εκείνο της βραχόμαζας που επηρεάζεται από την κατασκευή) και από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Θεωρεί δηλαδή το δακτύλιο της βραχόμαζας όχι μόνο ως στοιχείο φόρτισης, αλλά και ως φέρον στοιχείο συγχρόνως. Επιχειρεί δηλαδή την ενεργοποίηση ενός ποσοστού της αντοχής της βραχόμαζας, μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, έτσι ώστε να επιτύχει τον βέλτιστο σχεδιασμό του έργου, όσον αφορά στην ασφάλεια και την οικονομικότητα.

Οι βασικές αρχές που συνιστούν την NATM, είναι οι ακόλουθες:

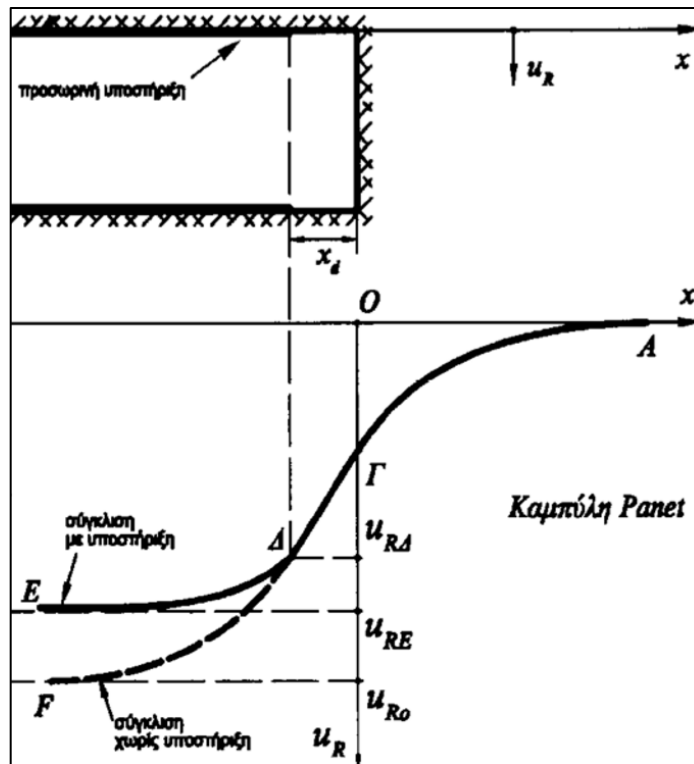
- Διατήρηση της αντοχής του εδάφους ή του βράχου που περιβάλλει την διατομή της σήραγγας και κινητοποίηση της αντοχής στον μέγιστο δυνατό βαθμό.
- Η κινητοποίηση της αντοχής μπορεί να επιταχθεί με την ελεγχόμενη παραμόρφωση του εδάφους. Θα πρέπει να αποφεύγονται υπερβολικές παραμορφώσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια αντοχής ή μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις.
- Τα αρχικά (προσωρινά) μέτρα υποστήριξης περιλαμβάνουν συστηματικές ηλώσεις/αγκυρώσεις βράχου και τόξου υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα σε στρώσεις λεπτού πάχους. Αυτή η "προσωρινή υποστήριξη" είναι η "επένδυση" που δρα ως κέλυφος και αναλαμβάνει ήδη φορτία. Οι εργασίες μόνιμης υποστήριξης (τελικής επένδυσης) διεξάγονται σε μεταγενέστερο στάδιο και κατασκευάζονται με οπλισμούς και σκυρόδεμα επί τόπου εγχεόμενο που ενισχύει την κατασκευή και αναλαμβάνει τα τελικά φορτία.

- Το κλείσιμο του δακτυλίου θα πρέπει να πραγματοποιείται σε κατάλληλο χρονικό διάστημα που ποικίλει ανάλογα τις συνθήκες εδάφους ή του βράχου.
- Απαραίτητες είναι οι εργαστηριακές δοκιμές και η γεωτεχνική παρακολούθηση (οργανομετρήσεις) της παραμόρφωσης των μέτρων υποστήριξης και του εδάφους.
- Οι εμπλεκόμενοι στον σχεδιασμό, εφαρμογή και επίβλεψη της κατασκευής με NATM πρέπει να έχουν κατανοήσει την μέθοδο αυτή και να συνεργάζονται για την επίλυση των προβλημάτων που ανακύπτουν.
- Το μήκος του ανυποστήρικτου ανοίγματος θα πρέπει να είναι μικρότερο δυνατό.
- Η σήραγγα διανοίγεται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος). Έτσι μειώνονται οι πιέσεις της βραχώμαζας στην άμεση υποστήριξη (τόσο περισσότερο όσο αυξάνει η σύγκλιση του τοιχώματος). Έαν η σύγκλιση αυξηθεί όμως υπέρμετρα, μπορεί να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και αύξηση των πιέσεων.

Η εφαρμογή της μεθόδου, έχει άμεση επιρροή στην εξέλιξη των συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής. Συγκεκριμένα:

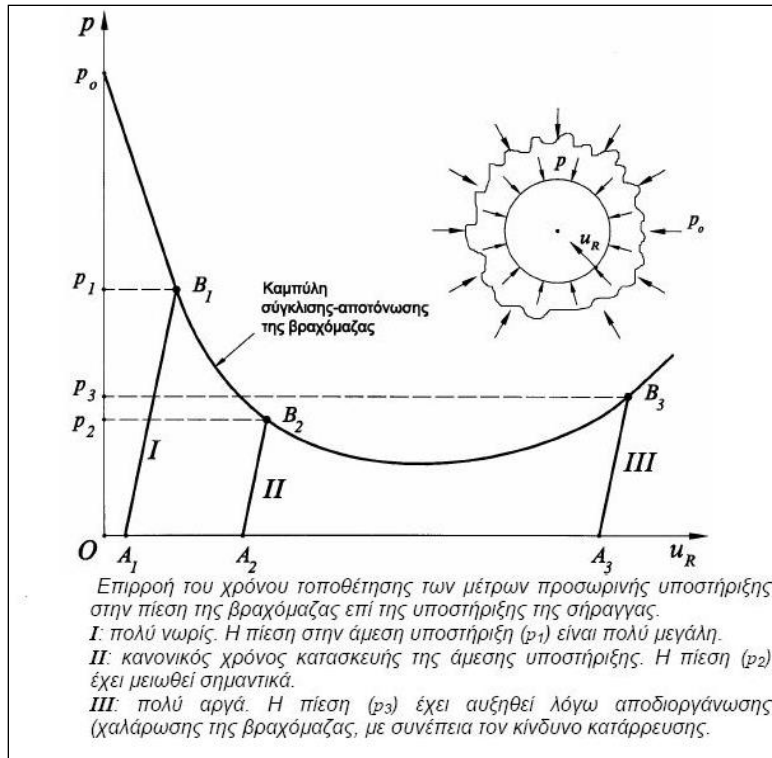
- Ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής.
- Η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής.

Η εξέλιξη των συγκλίσεων κατά τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2. 1. Εξέλιξη συγκλίσεων σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (κατά Panet) (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

Η φιλοσοφία της NATM βασίζεται στις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης, σύμφωνα με τις οποίες όσο η σήραγγα αποτονώνεται (αύξηση μετακινήσεων/παραμορφώσεων) τόσο μειώνεται η πίεση που καλείται να παραλάβει η υποστήριξη. Αυτό συμβαίνει έως ένα οριακό σημείο όπου η αποτόνωση είναι τόσο μεγάλη που επιφέρει αποδιοργάνωση της βραχομάζας, μικρές ή μεγαλύτερες καταπτώσεις τεμαχών και λύση της συνέχειας του υλικού, επομένως πέραν αυτού του σημείου η πίεση αυξάνεται απότομα. Η NATM βασίζεται στην εύρεση της “χρυσής τομής”, δηλαδή του σημείου όπου η αποτόνωση δεν είναι τόσο μεγάλη για να δημιουργηθεί αστοχία/αποδιοργάνωση της εδαφικής μάζας, αλλά επαρκώς μεγάλη ώστε η πίεση που αναλαμβάνουν τα μέτρα υποστήριξης να είναι τα ελάχιστα δυνατά. Η περιγραφή της παραπάνω λογικής φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**, όπου παρουσιάζεται μια καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και διάφορες περιπτώσεις τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης, οι οποίες αντιστοιχούν στις θέσεις I, II & III.



Σχήμα 2. 2. Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, βάσει μεθόδου NATM (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

2.1.3. Η εφαρμογή της τεχνικής

Η συνήθης εφαρμογή της NATM είναι η διάνοιξη της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της “τελικής επένδυσης” της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας).

Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευμένο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Μάλιστα, σύμφωνα με τον Murthy (1994), ένα συγκεκριμένο έργο σήραγγας δεν χρειάζεται να εμπεριέχει κάθε στοιχείο που προτείνει η NATM ούτε και είναι δυνατόν προκειμένου να κατηγοριοποιείται ετυμολογικά ως έργο NATM.

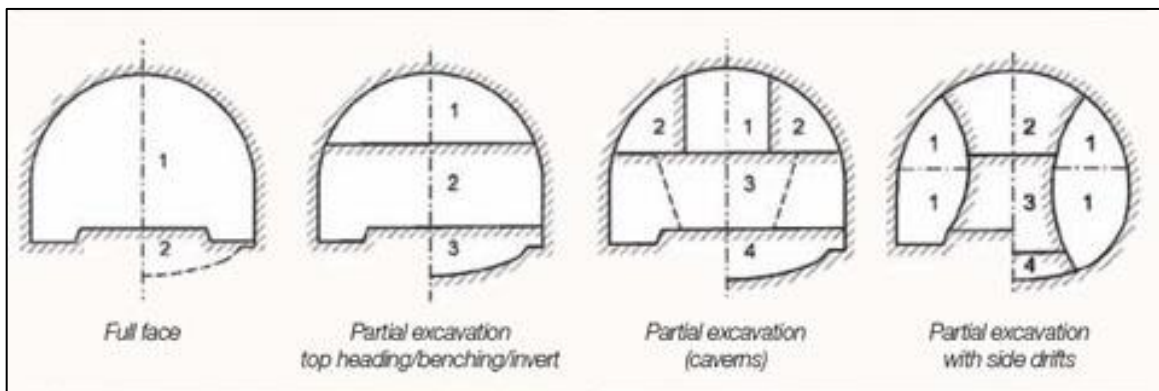
Κατ’ επέκταση, οι προδιαγραφές σχεδιασμού που περιλαμβάνονται σε μια σύμβαση NATM δεν θα πρέπει να εκληφθούν παρά ως οδηγός, ή έστω ως ένα σύνολο των πλέον κατάλληλων και πιθανών

συνθηκών, από τις οποίες ο μηχανισμός επί τόπου του έργου θα επιλέξει την αρμόζουσα για να αντιμετωπίσει τα εκάστοτε προκύπτοντα προβλήματα.

Στην φάση της εκσκαφής, σκοπός της άμεσης υποστήριξης είναι η ευστάθεια του μετώπου και του δακτυλίου της σήραγγας μέχρι την εφαρμογή των μέτρων της τελικής επένδυσης. Τα φαινόμενα αστάθειας του μετώπου παρουσιάζονται σε βραχώμαζες με πολύ φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και σε βραχώμαζες με ασυνεχείς, οι οποίες έχουν δυσμενή προσανατολισμό ως προς το μέτωπο και τα τοιχώματα της σήραγγας και πολύ χαμηλές τιμές των μηχανικών παραμέτρων αντοχής τους. Τέτοια φαινόμενα είναι πιθανόν να προκαλέσουν αύξηση των συγκλίσεων ή αστοχία του μετώπου. Τα φαινόμενα αστάθειας του δακτυλίου είναι η εκδήλωση υπερβολικά μεγάλων συγκλίσεων, η αστοχία με μορφή σφηνών και η ολοκληρωτική αστοχία της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών στην συμβατική μέθοδο χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση διάφοροι τρόποι εκσκαφής της διατομής :

- **Εκσκαφή της διατομής σε φάσεις**

Η εκσκαφή της διατομής γίνεται σε δύο ή περισσότερες φάσεις (**Σχήμα 2.3**) ώστε να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση της βραχώμαζας, ο περιορισμός των συγκλίσεων, η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου και η χρήση των λιγότερων δυνατών μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Η τμηματική εκσκαφή αποσκοπεί στην σταδιακή ανακατανομή του τασικού πεδίου μέχρι την τελική ισορροπία, αποφεύγοντας προς τούτο απότομες διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας. Τα βήματα εκσκαφής κατά άξονα της σήραγγας είναι μικρά, ενώ γίνεται χρήση ελεγχόμενων ανατινάξεων, μηχανών PFM's ή κοινών εκσκαπτικών μέσων, αναλόγως των παρουσιαζόμενων συνθηκών εκσκαψιμότητας.



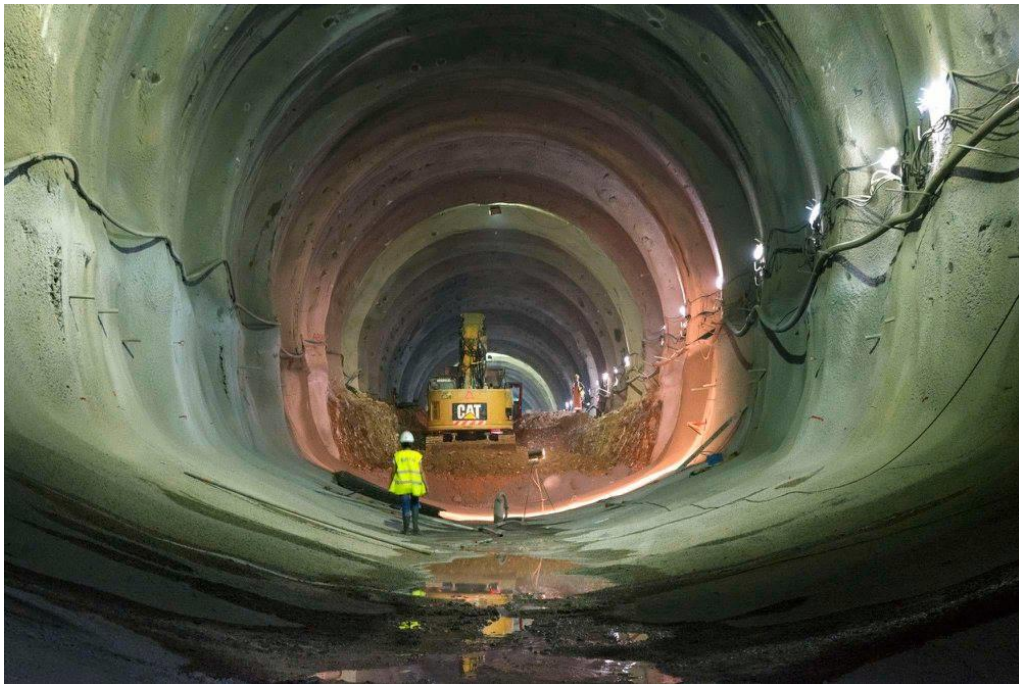
Σχήμα 2. 3. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας (Πηγή: CivilEngineering.com) .

- **Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης σε μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.**

Η άμεση υποστήριξη αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της συνολικής στρατηγικής υποστήριξης (εκπροσωπεί μερικώς έως πλήρως την ολική απαιτούμενη υποστήριξη). Επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξης 1-2 m ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και ο περιορισμός των συγκλίσεων σε τέτοιο βαθμό ώστε η βραχώμαζα να αυτουποστηριχθεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

- **Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής.**

Σε περιπτώσεις βραχώμαζας με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δημιουργείται κλειστός δακτύλιος (**Εικόνα 2.1**) με τη διαμόρφωση στο δάπεδο ανάστροφου τόξου και τη σκυροδέτησή του.



Εικόνα 2. 4. Κατασκευή κλειστού δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Πηγή: Ergose S.A.)

- **Ολομέτωπη εκσκαφή με άμεσο κλείσιμο της διατομής με μόνιμη υποστήριξη.**
- **Γεωτεχνική παρακολούθηση της συμπεριφοράς των σπράγγων.**

Η παρακολούθηση της σήραγγας με συστήματα μετρήσεων παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της διαδικασίας ανακατανομής των τάσεων. Η σήραγγα είναι ένα έργο ζωντανό, που συνεχώς παρέχει νέα στοιχεία κατά την κατασκευή του, τα οποία είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε αναθεώρηση της αρχικής μελέτης, όσον αφορά στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (ανάστροφες αναλύσεις).

2.1.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

Η μέθοδος N.A.T.M:

- Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία στην φάση κατασκευής, ευελιξία που αναφέρεται στην προσαρμογή των μέσων υποστήριξης στις εκάστοτε παρουσιαζόμενες γεωτεχνικές συνθήκες στο μέτωπο εκσκαφής.
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
- Με κριτήριο τον χρόνο κατασκευής και το κατασκευαστικό κόστος προκύπτει διαφοροποίηση μεταξύ σηράγγων μικρού μήκους και μεγάλου μήκους. Η τεχνική NATM δείχνει να είναι προσφορότερη σε σήραγγες μικρού μήκους, λ.χ. μερικών δεκάδων μέτρων.
- Η μέθοδος NATM ευνοείται σε σήραγγες με διαφοροποιούμενη διατομή , λ.χ. τοπικές διαπλατύνσεις σε ζώνες προσωρινής στάθμευσης , διασταυρώσεις σηράγγων, εσοχές αναστροφής οχημάτων, κ.ά. Η τεχνική της NATM επιτρέπει διαμόρφωση της διατομής της σήραγγας και της μορφολογίας της διατομής κατά το δοκούν.
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).
- Δεν απαιτεί μεγάλη οικονομική επένδυση.

2.1.5. Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM

- Ο σημαντικότερος κίνδυνος κατά την εφαρμογή της NATM παρουσιάζεται στο μέτωπο εκσκαφής ο οποίος κατανέμει τις τάσεις επί το ευμενέστερων. Οι οργανομετρήσεις δεν εξασφαλίζουν την ευστάθεια του μετώπου , ενώ η ασφάλεια της ολοκληρωμένης προσωρινής υποστήριξης συναρτάται σε μεγάλο βαθμό με την ερμηνεία των μετρήσεων.
- Ο κίνδυνος αστοχιών είναι σημαντικά μεγάλος στις τεχνικές NATM.

- Η εφαρμογή της NATM σε σκληρά πετρώματα (με χρήση εκρηκτικών) συνεπάγεται προχώρηση της τάξεως των 8 έως 15 m/ημέρα (σε δύο βάρδιες), ενώ σε μαλακά πετρώματα η αντίστοιχη προχώρηση είναι 2 έως 3 m με μηχανικό εκσκαφέα , και 4 έως 5 m με RoadHeaders. Άρα η προχώρηση είναι μικρή σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Στην NATM η ασφάλεια των εργαζομένων είναι χαμηλότερη.
- Η NATM έχει υψηλό κόστος προσωπικού.

2.2. Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων –TBM

2.2.1. Περιγραφή της μεθόδου

Η ανάγκη για εκμηχανισμένη κατασκευή μια μεγάλης μήκους σήραγγας και για αποφυγή δονήσεων και αλληλεπίδρασης με τις κατασκευές στην περίπτωση αστικών σηράγγων, αποτελούν βασικό παράγοντα για διάνοιξη της σήραγγας με μια μηχανή ολομέτρωτης διάτρησης (Tunnel Boring Machine - TBM).

Τα TBM είναι επιμήκη μηχανήματα, κυκλικής διατομής κατά κανόνα (κάτι που περιορίζει τη γεωμετρία της διατομής που μπορούν να διανοίξουν) που φέρουν κοπτικά στην κεφαλή τους, έχουν προσαρτημένο σύστημα ταινιοδρόμου με το οποίο μεταφέρουν πίσω το εκσκαπτόμενο υλικό, ενώ ενδέχεται τα τελευταία 10~12m να είναι προστατευμένα από χαλύβδινη ασπίδα. Επίσης έχουν τεράστιο αρχικό κόστος. Ωστόσο, έχουν μεγάλους ρυθμούς προχώρησης, γεγονός που τα καθιστά πιο συμφέροντα από οικονομική άποψη σε μεγάλου μήκους σήραγγες όπου μπορούν να αποσβέσουν το κόστος τους. Ανάλογα το υλικό που εκσκάβουν, προσαρμόζονται τόσο τα κοπτικά της κεφαλής τους όσο και το αν θα ασκείται πίεση στο μέτωπο ταυτόχρονα με την εκσκαφή ή όχι

Το μπροστινό μέρος του TBM είναι μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή (**Εικόνα 2.2**) διαμέτρου από 3 έως 5 m, που ταιριάζει στη διάμετρο της σήραγγας. Στην κοπτική κεφαλή είναι στερεωμένοι κοπτικοί δίσκοι, διαμέτρου από 11” έως 20”, οι οποίοι επιτυγχάνουν τη βέλτιστη διατήρηση του πετρώματος. Καθώς περιστρέφεται η κοπτική κεφαλή, υδραυλικά έμβολα ωθούν, μέσω της κεφαλής, τα κοπτικά στο πέτρωμα. Η μεταφορά αυτής της υψηλής ώσης μέσω των κυλιόμενων δίσκων δημιουργεί ρηγματώσεις στο βράχο προκαλώντας αποκόλληση θραυσμάτων από το μέτωπο της σήραγγας. Η στήριξη του μετώπου από καταπτώσεις, εφόσον απαιτείται, επιτυγχάνεται από την ίδια την κοπτική κεφαλή. Οι μηχανές αυτές περιβάλλονται από μικρή ασπίδα στο πρόσθιο τμήμα της μηχανής που προστατεύει το χώρο αυτό από καταπτώσεις του περιβάλλοντος πετρώματος. Η μηχανή πακτώνεται με ένα σύστημα ωστήρων (grippers) στα πλευρικά τοιχώματα, ενώ τα έμβολα ώσης εκτείνονται, επιτρέποντας στην κύρια

δοκό την προώθηση του TBM. Στη περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή υπάρχουν κάδοι(buckets) οι οποίοι μαζεύουν και αποθέτουν τα μπάζα σε έναν ιμάντα μεταφοράς στο εσωτερικό της κύριας δοκού. Στη συνέχεια τα μπάζα μεταφέρονται στο πίσω μέρος της μηχανής για αποκόμιση από τη σήραγγα. Στο τέλος της διαδρομής ώσης η μηχανή επανατοποθετείται για τον επόμενο κύκλο διάτρησης. Ιδανική λύση για ανεπένδυτες σήραγγες είναι ο ανοικτός σχεδιασμός των TBM κύριας δοκού που επιτρέπει τη γρήγορη πρόσβαση ακριβώς πίσω από τη κεφαλή κοπής για την εγκατάσταση της υποστήριξης με ήλους, πλέγματα , χαλύβδινα τόξα κ.α. Πρόκειται για τυπικές μηχανές βράχου με κατάλληλο πεδίο εφαρμογής ποιότητες πετρώματος από πολύ καλό-ισχυρό έως μέτριο-ελαφρά διακλασμένο. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος βασίζεται στην ποιότητα του πετρώματος, αλλά και σε κριτήρια οικονομικά ή διαθεσιμότητας της μηχανής.



Εικόνα 2. 5. Κοπτική κεφαλή TBM (Πηγή: Herrenknecht AG).

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής αναπτύχθηκαν αρχικά για την εκσκαφή μαλακών σχηματισμών. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας επεκτάθηκε η χρήση των μηχανών αυτών σε σκληρά πετρώματα, έτσι ώστε ο χαρακτηρισμός του βράχου να απαιτεί αναθεώρηση. Η ανάπτυξη των μηχανών αυτών έχει σα συνέπεια στα μεγαλύτερα τεχνικά έργα διάνοιξης σπηραγγών να επιλέγεται σαν πρώτη λύση η εκσκαφή με μία τέτοια μηχανή, εκτός εάν η σκληρότητα του πετρώματος ξεπερνά τις δυνατότητες των κοπτικών της μηχανής.

2.2.2. Παράγοντες οι οποίοι ευνοούν την επιλογή του TBM

- Επαρκή γεωλογικά στοιχεία, διότι ένα TBM δεν έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε ποικιλία γεωλογικών συνθηκών.
- Γεωλογικά στοιχεία που δείχνουν σχετική ομοιομορφία της ποιότητας και της συμπεριφοράς του πετρώματος σε όλη τη διάνοιξη.
- Πέτρωμα όχι υπερβολικά σκληρό ή λειαντικό.
- Κυκλική διατομή της σήραγγας ή της στέψης. Μια μη κυκλική διατομή, όπως ένα πέταλο με κυκλική στέψη, συνήθως μπορεί να διανοιχτεί κυκλικό και στη συνέχεια να διερευνηθεί με μηχανική σφύρα ή με διάτρηση ανατίναξη.
- Διάνοιξη ενός μετώπου, εκτός αν το μέγεθος της σήραγγας εννοεί τη χρήση δεύτερου.
- Μακριές σήραγγες. Η διάνοιξη πρέπει να είναι μεγάλου μήκους, γενικά πάνω από 1000 m, ώστε να επιτρέπει τις μεγάλες αρχικές δαπάνες για την αγορά του TBM.

2.2.3. Παράγοντες που αποτρέπουν την επιλογή του TBM

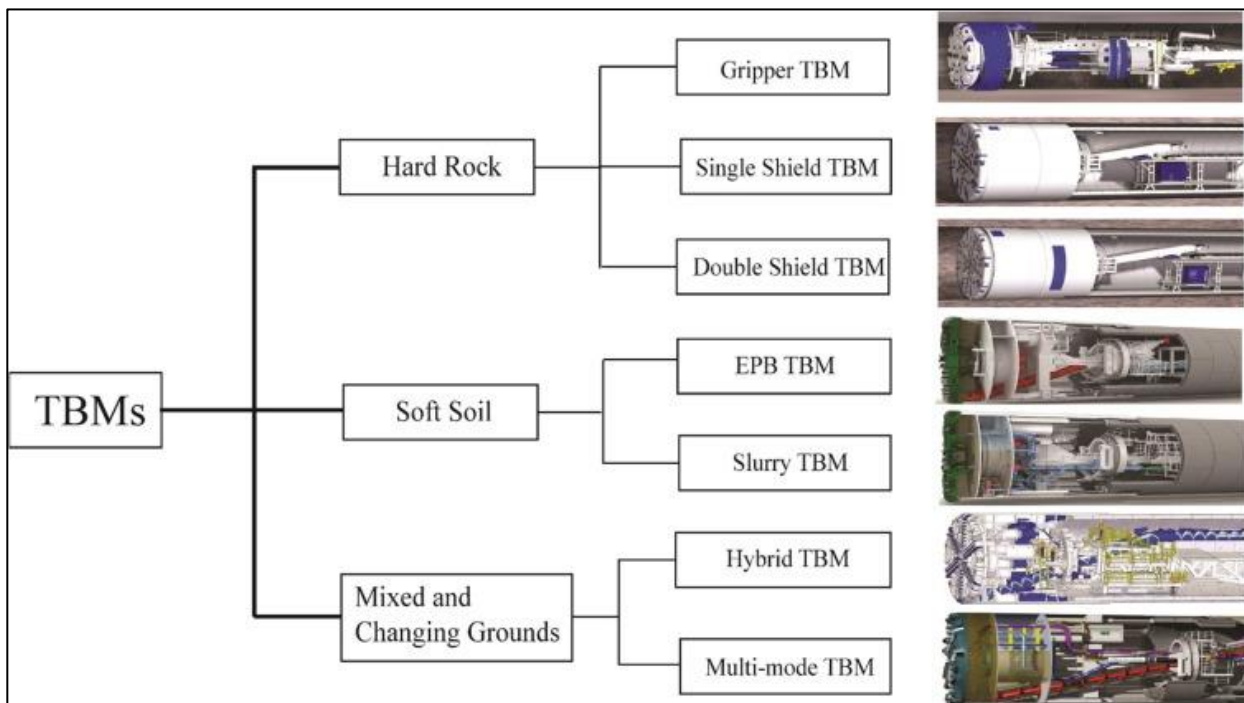
- Εκσκαφή μικτού μετώπου ή πιθανότητα αυτής.
- Πολύ σκληρό, λειαντικό ή διογκούμενο πέτρωμα.
- Μικρού μήκους σήραγγας.
- Μεταβλητή γεωμάζα η οποία απαιτεί συχνές αλλαγές στις μεθόδους διάνοιξης.
- Περιοχές με τεκτονικά ρήγματα. Σε αυτή τη περίπτωση ένα TBM μπορεί να παγιδευτεί από μετατόπιση του πετρώματος πίσω από το μέτωπο.
- Μικρός χρόνος ευστάθειας πετρώματος.

2.2.4. Επιλογή μεταξύ συμβατικής διάνοιξης NATM ή με TBM

Κάθε έργο είναι διαφορετικό, για αυτό το λόγο απαιτείται σωστή κρίση, ζυγίζοντας έτσι όλους τους παράγοντες όπου θα οδηγήσουν στην τελική απόφαση. Η επιλογή του τύπου της μηχανής γίνεται βάση αξιολόγησης των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών στη ζώνη διέλευσης της σήραγγας, των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής της σήραγγας και της χάραξης, των περιορισμών και όρων που επιβάλλονται από περιβαλλοντικές ρυθμίσεις και άδειες, των συνθηκών ευστάθειας στο μέτωπο και στη διατομή της σήραγγας των απαιτήσεων χρονισμού τοποθέτησης των μέτρων άμεσης στήριξης και των χρονικών περιορισμών για την παράδοση της σήραγγας.

2.2.5. Γενικά χαρακτηριστικά του TBM

Τα Μηχανήματα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σήραγγας (TBM) **Σχήμα 2.4** με ασπίδα ή χωρίς ασπίδα (TBM), απομακρύνουν το σκληρό έδαφος εκσκαφής με τη χρήση κοπτικών και προωθούν το μηχάνημα πιέζοντας τα προκατασκευασμένα στοιχεία ή υποστηρίζοντας τον ειδικό εξοπλισμό πλευρικών στοιχείων συγκράτησης του μηχανήματος.



Σχήμα 2. 4. Επιλογή τύπου TBM, βάσει τύπου εδάφους (Πηγή: Y.L. Zheng et al.)

Γενικά, η χρήση μίας ολομέτωπης κοπής TBM απαιτεί το μήκος της σήραγγας όπου θα χρησιμοποιηθεί να είναι μεγάλο. Αυτό οφείλεται τόσο στο κόστος αγοράς ενός τέτοιου μηχανήματος, όσο και στο κόστος συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης του. Επομένως για να δικαιολογηθεί η αγορά του πρέπει να αποσβέσει τα χρήματα που δαπανήθηκαν, δηλαδή να διανοίξει μεγάλου μήκους σήραγγες.

Τα Μηχανήματα Ολομέτωπης κοπής με Ασπίδα “ TBM-S” είναι εξοπλισμένα με σώμα κλειστής ασπίδας και χρησιμοποιούνται σε εδάφη με συμπαγή βράχο καθώς και σε εδάφη με χαμηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής (εύθραυστος βράχος).

Για μικρούς χρόνους ευστάθειας μετώπου η μηχανή συνδυάζεται με ασπίδα. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανής με ασπίδα εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες. Όταν το έδαφος στο οποίο πρόκειται να διανοιχθεί η σήραγγα είναι χαμηλής αντοχής αντιμετωπίζονται έντονα προβλήματα καθιζήσεων στην

επιφάνεια του εδάφους πάνω και γύρω από τη στέψη της σήραγγας. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν το πάχος των υπερκείμενων είναι μικρό. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατό να δημιουργηθούν ζημιές στις υπερκείμενες κατασκευές (κτίρια, δρόμους κ.τ.λ.).

Σημαντικές λύσεις στα προβλήματα αυτού του τύπου ήρθαν να δώσουν τα μηχανήματα E.P.B (Earth Pressure Balance). Τα μηχανήματα αυτά πιέζουν το μέτωπο εκσκαφής χωρίς να το αφήνουν να χαλαρώσει, αποτρέποντας τη μετάδοση μιας πιθανής χαλάρωσης πάνω και γύρω από τη σήραγγα, γεγονός που αποτελεί συνήθως την αιτία των επιφανειακών καθιζήσεων.

Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως μικρή υδροπερατότητα, πλαστικά χαρακτηριστικά, μικρό υπερκείμενο και παρουσία κατασκευών στην επιφάνεια, απαιτούν την επιλογή μια μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα.

2.2.6. Μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων για εδαφικούς σχηματισμούς

Η χρήση μηχανημάτων ανοιχτού τύπου γίνεται σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή πραγματοποιείται σε βραχώμαζα καλών χαρακτηριστικών (υψηλό RMR και GSI). ***Στις αστικές περιοχές, όπου συνήθως οι σχηματισμοί δεν αποτελούνται από βράχους υψηλών αντοχών και τα όρια επιφανειακών καθιζήσεων είναι πολύ αυστηρά, τα μηχανήματα τα οποία χρησιμοποιούνται είναι είτε με ασπίδα, είτε ακόμη συχνότερα, μηχανήματα που εφαρμόζουν πίεση στο μέτωπο.***

Η κατασκευή σηράγγων σε κορεσμένα εδάφη διεξάγεται χρησιμοποιώντας συχνά κλειστές ασπίδες που περιορίζουν τον κίνδυνο κατάρρευσης του μετώπου μέσα από τη συνεχή υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Η εφαρμογή μιας τεχνικής με ασπίδα σε λιγότερο σταθερό, μαλακό έδαφος παρέχει σταθερότητα στη σήραγγα, αλλά ταυτόχρονα απαιτεί την υποστήριξη του μετώπου. Ο κύριος λόγος της εμφάνισης των TBM κλειστού μετώπου ήταν η δυνατότητα εκσκαφής σε κοκκώδη εδάφη, κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα χωρίς τη χρήση πεπιεσμένου αέρα για τη συγκράτηση του νερού. Επιπλέον, υπήρξε η ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος εδαφικών συνθηκών όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα TBM. Πλέον, η μηχανοποιημένη διάνοιξη με TBM κλειστού μετώπου πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε μαλακό έδαφος, ενώ πριν από την εισαγωγή των μηχανών κλειστού μετώπου αυτό δε θα ήταν δυνατό. Τα τελευταία χρόνια έχουν καθιερωθεί δύο τύποι μηχανών διάνοιξης σηράγγων με ασπίδα για μαλακά εδάφη:

- Το σύστημα με ασπίδα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους με λάσπη (**Earth Pressure Balance Shield**) (*Εικόνα 2.3*) λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη, ιδιαίτερα σε αργιλώδη-ιλυώδη και ιλυώδη-αμμώδη. Κατά την εκσκαφή το εδαφικό υλικό χρησιμοποιείται προσωρινά για την υποστήριξη του μετώπου. Η βασική λειτουργία του συστήματος είναι η εκσκαφή του πετρώματος συνδυασμένη με τον άμεσο έλεγχο του μετώπου και του εδάφους γύρω από την περιφέρεια, με ταυτόχρονη υποστήριξη, ακολουθούμενη από την απομάκρυνση των μπαζών και την τοποθέτηση του μόνιμου συστήματος υποστήριξης.



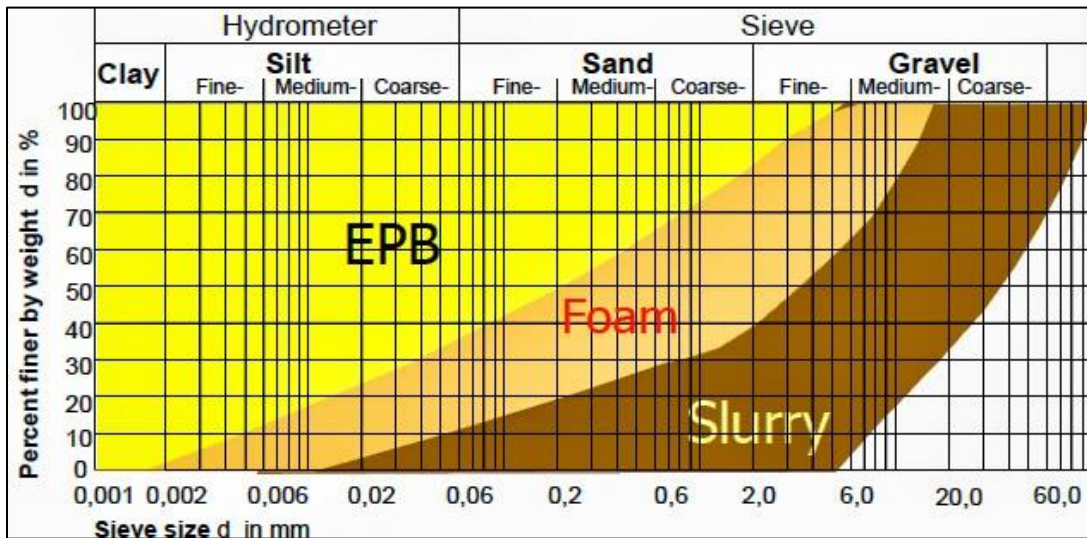
Εικόνα 2. 6. EPB – TBM κατά την επέκταση της Γραμμής 3 της Αττικό Μετρό προς Πειραιά (Πηγή: Αττικό Μετρό).

- Το σύστημα με ασπίδα πολφού (**Slurry Shield**) (*Εικόνα 2.4*), στο οποίο το μέτωπο υποστηρίζεται με τη βοήθεια πολφού μπεντονίτη, και χρησιμοποιείται κυρίως σε διηθούμενα με νερό, αμμώδη και αμμοχαλικώδη εδάφη.



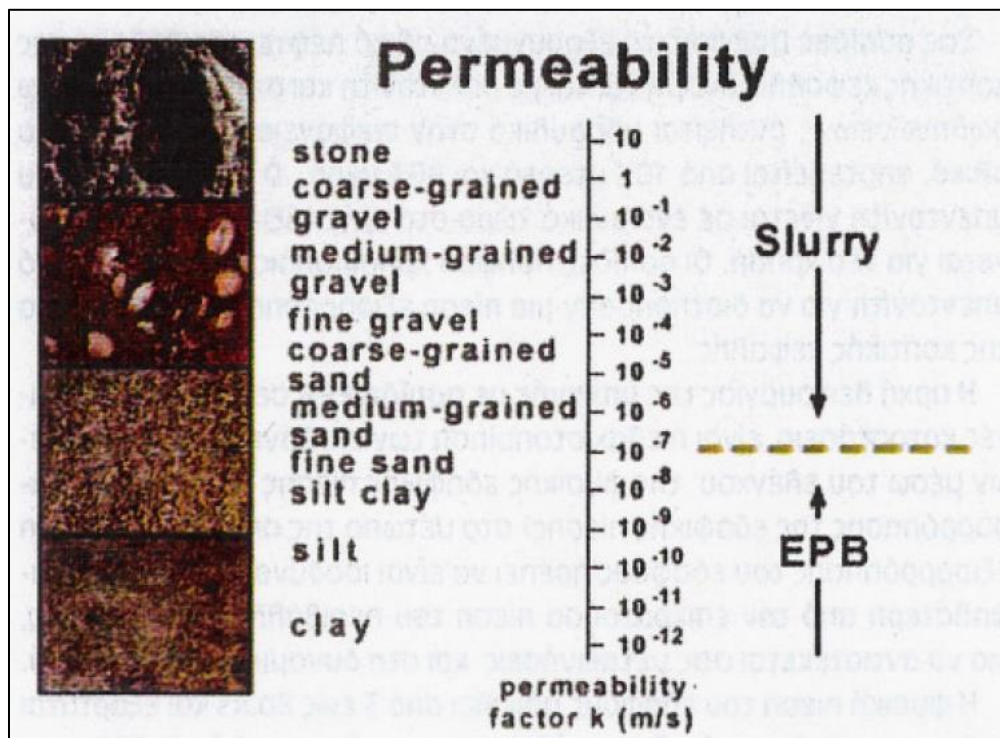
Εικόνα 2. 7. Slurry – TBM κατά την κατασκευή το μετρό της Mumbai (Πηγή: ROBBINS).

Ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου τύπου ασπίδας TBM που θα εφαρμοστεί σε ένα έργο είναι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του εδάφους. Στο **Σχήμα 2.5** απεικονίζεται η καμπύλη του επιτρεπόμενου εύρους εφαρμογής των μηχανημάτων EPB και Slurry.



Σχήμα 2. 5. Επιλογή τύπου μηχανήματος ανάλογα με την κοκκομετρία του εδάφους (Πηγή: TEE).

Επίσης καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή μηχανήματος μεταξύ EPB και Slurry TBM, αποτελεί η διαπερατότητα του εδαφικού σχηματισμού. Στο **Σχήμα 2.6** αποτυπώνεται το όριο λειτουργίας μεταξύ των δυο τύπων μηχανημάτων.



Σχήμα 2. 6. Επιλογή τύπου μηχανήματος ανάλογα με την διαπερατότητα του εδάφους (Πηγή: ΤΕΕ).

2.2.7. Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB)

Το Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) (με διάμετρο εκσκαφής που κυμαίνεται από μικρή έως μέση , έχει εξελιχθεί σε προχωρημένο τεχνολογικό επίπεδο μηχανικής και καταλαμβάνει σήμερα τα δύο τρίτα της αγοράς των μηχανημάτων παγκοσμίως. Η τυπική διάμετρος του μηχανήματος κυμαίνεται από 2 έως 14 και πλέον μέτρα.

2.2.7.1. Αρχή λειτουργίας EPB

Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος , σε χαλαρά εδάφη και σε αποσαθρωμένο βράχο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων μέσω του ελέγχου της γεωστατικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του

περιβάλλοντος εδάφους, για να αντιστέκεται στις μετακινήσεις και στη δυναμική εισροή νερού. Η γεωστατική πίεση του εδάφους ποικίλει από 1 έως 4 bar και εξαρτάται από την πίεση του ύδατος των πόρων και από το ύψος των υπερκείμενων.

Η εξισορρόπηση του μετώπου καθώς και το EPB, επιτυγχάνεται κρατώντας τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμονα κοχλία μεταφοράς των προϊόντων εκσκαφής, γεμάτο με το υλικό εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, για να διατηρηθεί ο έλεγχος των προϊόντων εκσκαφής με το EPB, η εκσκαφή ξεκινά περιστρέφοντας την κοπτική κεφαλή και ρυθμίζοντας τον ατέρμονα κοχλία το άνοιγμα της θύρας αποκομιδής του υλικού. Καθώς τα έμβολα προώθησης του μηχανήματος εκτείνονται, τα προϊόντα εκσκαφής γεμίζουν το θάλαμο της κεφαλής κοπής με αποτέλεσμα το έδαφος μπροστά από το EPB και μέσα στην κοπτική κεφαλή να είναι υπό πίεση. Οι κυψέλες μέτρησης της πίεσης του εδάφους, που βρίσκονται μέσα στον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μετρούν την πίεση του εδάφους. Εάν η πίεση υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, οι υδραυλικά ελεγχόμενες θύρες εκτόνωσης της πίεσης, που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο ατέρμονα κοχλία, αναγκάζονται να ανοίξουν και επιτρέπουν στο υλικό εκσκαφής να περάσει από τις θύρες αυτές στην πρώτη μεταφορική ταινία.

Με αυτόν τον τρόπο, το έδαφος εκσκάπτεται με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων, τα οποία βρίσκονται επί της κοπτικής κεφαλής και εν συνεχεία πιέζεται προς τον θάλαμο εκσκαφής μέσω ανοιγμάτων, τα οποία βρίσκονται και αυτά επί της κοπτικής κεφαλής. Κατά συνέπεια, υφίσταται ανάμειξη το εκσκαφθέν υλικό με το ήδη υπάρχον στο θάλαμο εκσκαφής. Η πίεση των υδραυλικών κυλίνδρων μεταφέρεται μέσω του τοιχώματος διαχωρισμού στον εδαφικό πολφό, ώστε να αποφευχθεί μια ατυχής είσοδος εδαφικού υλικού από το μέτωπο της σήραγγας μέσα στον θάλαμο. Όταν ο εδαφικός πολφός μέσα στο θάλαμο εκσκαφής δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω, τότε επέρχεται η ισορροπία. Η τρέχουσα πίεση στο μέτωπο της σήραγγας αντιστοιχεί στην ώθηση ηρεμίας. Μια αύξηση της πίεσης του εδαφικού πολφού οδηγεί σε ανύψωση εδάφους μπροστά από την ασπίδα. Αντιστοίχως η μείωση της πίεσης οδηγεί σε ανάπτυξη καθιζήσεων. Με τη βοήθεια του κοχλία μεταφοράς, το υλικό εκσκαφής μεταφέρεται από τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής στην ταινία μεταφοράς σε ατμοσφαιρική πίεση. Για να υφίσταται μια τέτοιου είδους μεταφορά χωρίς την χρήση θυρίδας, η περατότητα του νερού στον εδαφικό πολφό πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί ροή μέσα στο κοχλία μεταφοράς.

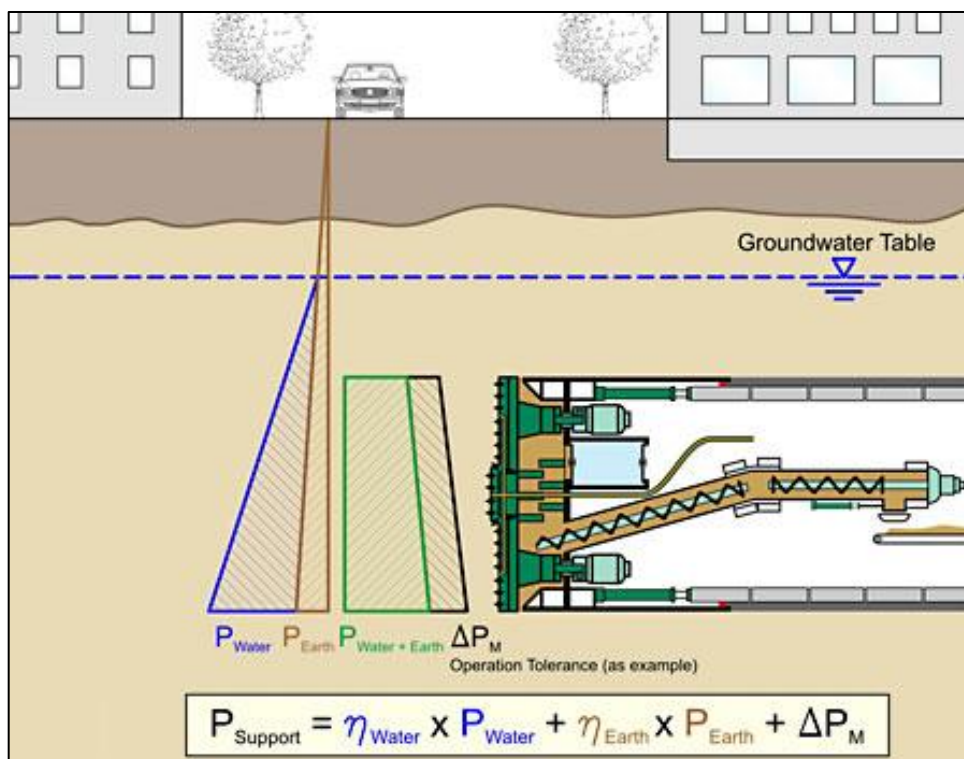
Κατά τη διάρκεια εκσκαφής με δεδομένη ταχύτητα, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται αλλάζοντας τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοχλία μεταφοράς. Όταν το υλικό εκσκαφής εκφορτώνεται με υψηλότερο ρυθμό τότε η πίεση πέφτει. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν ο ρυθμός εκφόρτωσης μειώνεται. Με τη βοήθεια αισθητήρων πίεσης εγκατεστημένων σε διάφορα επίπεδα στο τοίχωμα διαχωρισμού, η

πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται συνεχώς από το κέντρο ελέγχου. Σκοπός είναι να διατηρείται η πίεση του εδαφικού πολφού σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια εκσκαφής. Η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής πρέπει να αντισταθμίζει την εδαφική πίεση ώστε να μην αναπτύσσονται καθιζήσεις και ανεξέλεγκτη ροή υλικού.

2.2.7.2. Υποστήριξη Μετώπου

Στο Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB), το μέσο υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας είναι το εκσκαφθέν υλικό, το οποίο βελτιώνεται με υγρά πρόσθετα ή πλαστικοποιητές. Μπροστά από την κεφαλή κοπής, εισπνέζονται υλικά σταθεροποίησης στο θάλαμο ώστε να επιτευχθεί επαρκής και ομοιόμορφη συνεκτικότητα των υλικών εκσκαφής. Τα υλικά σταθεροποίησης προκαλούν ομογενοποίηση του εκσκαφθέντος υλικού. Τείνουν να μειώσουν την εμφανή πυκνότητα λόγω κακής πλήρωσης και επιπλέον οδηγούν σε μείωση της διατμητικής αντοχής της ιλύος.

Κατά την προχώρηση του EPB, η κατάσταση εξισορρόπησης επιτυγχάνεται όταν το έδαφος στο οποίο έχουν προστεθεί σταθεροποιητές στο θάλαμο της κεφαλής κοπής φθάσει στη μέγιστη πυκνότητα ώστε η ενεργή πίεση και ο όγκος του υλικού που εξάγεται από τον ατέρμονα κοχλία να εξισορροπεί το αντίστοιχο <<θεωρητικό>> υλικό που απομακρύνεται από την κεφαλή κοπής. Η πίεση που εφαρμόζεται από το μέτωπο κοπής (**Σχήμα 2.7**) κατά την προώθηση των EPB πρέπει να αντιστοιχεί στην πίεση του εδάφους εκσκαφής, μειώνοντας τη πιθανότητα να συμβούν περιστατικά τα οποία θα οδηγήσουν σε αστάθεια του μετώπου ή καθίζηση στην επιφάνεια.



Σχήμα 2. 7. Τρόπος υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με μηχανήμα EPB – TBM (Πηγή:UTM).

2.2.7.3. Εισπίεση Αφρού

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής της σήραγγας, θα εμφανιστούν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπου με βάση αυτά, η δυνατότητα εκτίμησης των παραμέτρων ρύθμισης του αφρού είναι οι ακόλουθες:

- Λόγος Εισπίεσης Αφρού (FIR), 60%
- Λόγος Διόγκωσης Αφρού (FER), 8:1

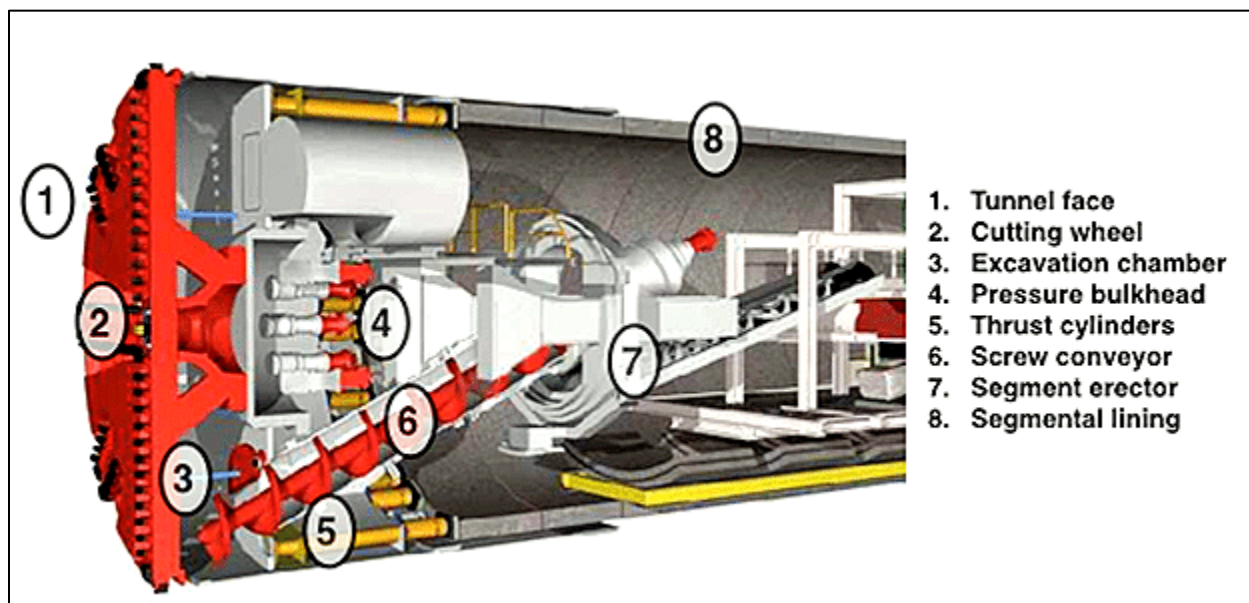
Είναι σημαντικό να υπάρξει η σωστή επιλογή του λόγου εισπίεσης αφρού για τη ρύθμιση των προϊόντων εκσκαφής. Σε υπερβολικά μεγέθη τιμή FIR, ο αφρός εντός του υλικού των προϊόντων εκσκαφής, είναι σε πλεόνασμα και δε μπορεί να ενσωματωθεί. Σε λόγο διόγκωσης αφρού 8:1, η ποσότητα του αέρα σε 1 m³ αφρού θα είναι 8 m³ και εάν ο λόγος εισπίεσης αφρού υπερβαίνει την περιοριστική τιμή, μέρος του αέρα θα είναι ελεύθερο να κινηθεί στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής που είναι υπό πίεση. Ο αφρός που χρησιμοποιείται στη διάνοιξη της σήραγγας είναι στην ουσία ένα αέριο, που διαχέεται στο υγρό υπό μορφή φυσαλίδων. Δημιουργείται με την χρήση δραστικού μέσου μείωσης της επιφανειακής τάσης, στο σημείο επαφής αέρα και ύδατος. Οι ιδιότητες του αφρού σχετίζονται με το ρυθμό διαστολής του. Η

εφαρμογή του αφρού στο έδαφος εκσκαφής αυξάνει την πλήρωση του θαλάμου κεφαλής κοπής, την ταχύτητα του μηχανήματος διάνοιξης, ενώ μειώνει την τριβή και τη ροπή στρέψης.

Η χρήση πρόσμικτων σε αργιλώδη εδάφη μειώνει τα προβλήματα απόφραξης, κολλημάτων και μεταφοράς υλικών ενώ αυξάνει τη ταχύτητα διάνοιξης. Επίσης, η χρήση των πολυμερών βελτιώνει τη δομή στεγανότητας του εδάφους και μειώνει την περιεκτικότητα σε υγρό και τις καθιζήσεις.

2.2.7.4. Κύρια μέρη μηχανήματος EPB – TBM

Βάσει του **Σχήματος 2.8** δύναται η δυνατότητα να παρουσιαστούν τα κύρια μέρη του μηχανήματος EPB και παράλληλα να περιγράψει η λειτουργία του.



Σχήμα 2. 8. Σχηματική απεικόνιση του μηχανήματος εξισορρόπησης πίεσης - EPB (Πηγή: Herrenknecht AG).

- Το έδαφος εκσκάπτεται με την κοπτική κεφαλή (cutter head) (1), πάνω στη οποία υπάρχουν τα κοπτικά εργαλεία (2) και οι απαραίτητες οπές ώστε να έχει τη δυνατότητα να εκκενώνεται το μέτωπο από το υλικό της εκσκαφής.
- Η περιοχή της ασπίδας πίσω από την κοπτική κεφαλή είναι γνωστή ως θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber) (3) και χωρίζεται με ένα διάφραγμα πίεσης από την περιοχή της ασπίδας με ατμοσφαιρική πίεση (pressure bulkhead) (4). Το εκσκαπτόμενο υλικό, πέφτει από τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής, στο θάλαμο εκσκαφής. Η διεύθυνση του εδάφους, από το μέτωπο της σήραγγας στον θάλαμο εκσκαφής, ελέγχεται από τη δύναμη που ασκούν τα

κυλινδρικά έμβολα ώθησης (thrust cylinders) (5) στο έδαφος μέσω του διαφράγματος πίεσης. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν το εδαφικό υλικό, στο θάλαμο εκσκαφής, δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω από την πίεση των υπερκειμένων και την υδροστατική πίεση.

- Το υλικό της εκσκαφής απομακρύνεται από τον θάλαμο εκσκαφής μέσω ενός ατέρμονα κοχλία (screw conveyor) (6). Το ποσό των υλικών που απομακρύνεται ελέγχεται από την ταχύτητα του κοχλία και από το άνοιγμα στην πάνω μεριά του οδηγού, εντός του οποίου βρίσκεται ο ατέρμονας κοχλίας. Η πίεση στον θάλαμο εκσκαφής ελέγχεται από την εξισορρόπηση του ρυθμού προχώρησης της μηχανής και του ρυθμού απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία. Ο ατέρμονας κοχλίας μεταφέρει το υλικό της εκσκαφής σε μία μεταφορική ταινία (conveyor belt), η οποία το μεταφέρει εκτός της σήραγγας.
- Για την επένδυση των σηράγγων συνήθως χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος (lining segments) (8), τα οποία τοποθετούνται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης από τον μηχανισμό τοποθέτησης (erectors) (7), στην περιοχή της ασπίδας, πίσω από το διάφραγμα πίεσης. Στη συνέχεια, γίνεται ενεμάτωση των κενών ανάμεσα στην εξωτερική πλευρά των προκατασκευασμένων στοιχείων και στο περιβάλλον γεωυλικό, από ανοίγματα που υπάρχουν στο πίσω μέρος του μηχανήματος ή πάνω στα προκατασκευασμένα στοιχεία.

Τέλος, να σημειωθεί πως οι δυνάμεις ώθησης πρέπει να υπερνικούν την αντίδραση από την εκσκαφή, την πίεση υποστήριξης στο μέτωπο και την τριβή που ασκείται στην ασπίδα του μηχανήματος. Η δύναμη περιστροφής είναι σχετικά μεγάλη (συγκριτικά με τα Slurry TBM), διότι η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται εντός του θαλάμου, ο οποίος είναι γεμάτος με τα υλικά της εκσκαφής.

2.2.8. Μηχάνημα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield)

Τα μηχανήματα πολφού αποτελούν κατηγορία των μηχανημάτων με ασπίδα, ειδικά σχεδιασμένα για διάνοιξη σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς και για θεωρητικά ιδανικότερη διαχείριση των εδαφικών συνθηκών, συγκριτικά με τα μηχανήματα EPB, καθώς έχουν τη δυνατότητα βελτίωσης της εδαφικής μάζας στο μέτωπο της εκσκαφής. Τα πλέον πρόσφορα εδάφη για την χρήση μηχανήματος πολφού είναι τα αδρόκοκκα μαλακά, τα αμμώδη και τα λεπτόκοκκα εδάφη, κυρίως κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και με διάμετρο εκσκαφής από 2 ως 14 και πλέον μέτρα.

Στα μηχανήματα πολφού, η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απευθείας μέσω της άντλησης του αιωρήματος των υλικών εκσκαφής, από τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής διαχωρίζεται από την υπόλοιπη σήραγγα μέσω ενός αεροστεγούς διαφράγματος. Ο σχεδιασμός μέγιστης πίεσης στα τοιχώματα του διαφράγματος της κεφαλής κοπής είναι ≈ 7 bars. Η

απαιτούμενη πίεση για τη στήριξη του μετώπου, ρυθμίζεται με τον έλεγχο της ταχύτητας παροχής του μπετονίτη μέσω των αντλιών τροφοδοσίας και με τον έλεγχο της ταχύτητας άντλησης των υλικών εκσκαφής. Η άντληση του αιωρήματος για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής καθώς και η παρουσία των υπογείων υδάτων και του μπετονίτη δημιουργούν μία κρούστα σφράγισης του εδάφους εκσκαφής. Η κρούστα αυτή, σφραγίζει το μέτωπο της εκσκαφής σχηματίζοντας μία μεμβράνη, μέσω της οποίας μεταφέρεται στο μέτωπο της σήραγγας η πίεση του μηχανήματος πολφού.

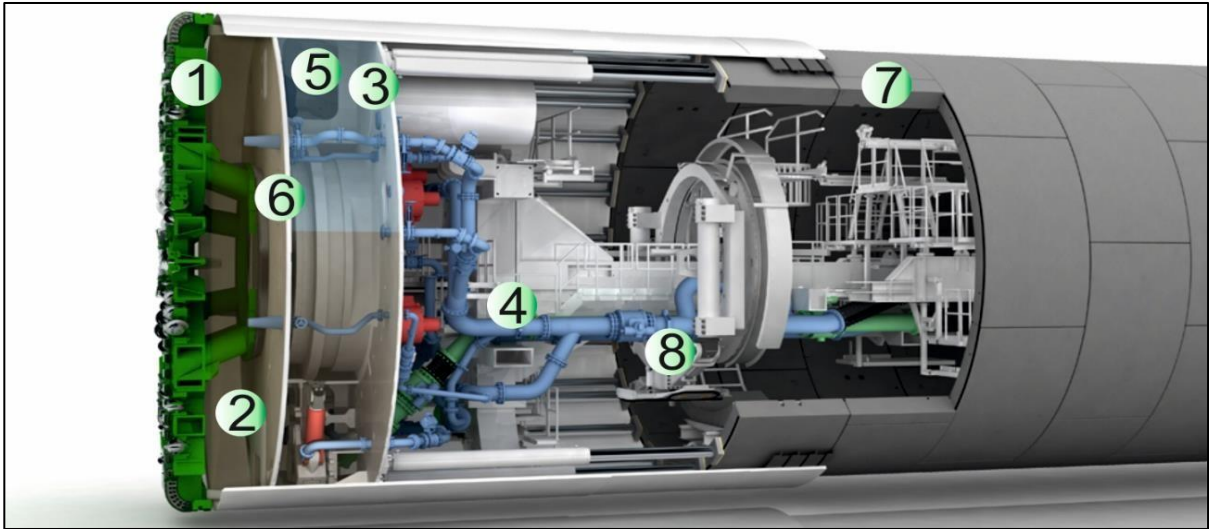
Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με υδραυλικές αντλίες μέσω των σωλήνων του εναιωρήματος, και οδηγούνται στη μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται σε εργοτάξιο εκτός της σήραγγας, όπου και διαχωρίζεται το γεωυλικό από τον μπετονίτη.

Το μέγεθος των ογκόλιθων ή των βράχων που μπορεί να μεταφερθεί μέσα από τις σωληνώσεις του συστήματος απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής, χωρίς να αποφράσσεται, είναι περίπου το 1/3 της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης (το μέγεθος κυμαίνεται από $\approx 7,5$ έως 15 cm). Η μείωση του μεγέθους των ογκόλιθων επιτυγχάνεται μέσω των δίσκων κοπής και των θραυστήρων (κυλινδρικού τύπου, κωνικού τύπου ή τύπου σιαγώνας) που βρίσκονται στον θάλαμο της κεφαλής κοπής. Συχνότερα εφαρμόζεται ο θραυστήρας τύπου σιαγώνας, διότι έχει μεγάλα ανοίγματα και έχει τη δυνατότητα να δέχεται μεγάλα σε διαστάσεις τεμάχια ογκόλιθων.

Η χρήση μηχανημάτων πολφού σε αργιλώδη εδάφη ενέχει τον κίνδυνο εμπλοκής των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής, του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των υλικών εκσκαφής. Στις περιπτώσεις χαλαρών, μη συνεκτικών εδαφών, όπως για παράδειγμα χαλίκια, άμμος και εξαιρετικά ρηγματωμένος βράχος, σε συνδυασμό με μεγάλη διαπερατότητα και υψηλή στάθμη υπογείων υδάτων, είναι πιθανόν να απαιτείται στήριξη του μετώπου με τη χρήση μπετονιτικού εναιωρήματος.

2.2.8.1. Κύρια μέρη μηχανήματος Slurry – TBM

Βάσει του **Σχήματος 2.9** δύναται η δυνατότητα να παρουσιαστούν τα κύρια μέρη του μηχανήματος EPB και παράλληλα να περιγράψει η λειτουργία του.



Σχήμα 2. 9. Σχηματική απεικόνιση του μηχανήματος αιωρήματος πολφού - Slurry (Πηγή: Herrenknecht AG).

- Κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχάνημα πολφού, στο μέτωπο της εκσκαφής το έδαφος εκσκάπτεται με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής (cutter head) (1) μέσα στο αιώρημα μπετονίτη και στη συνέχεια το έδαφος αναμειγνύεται με το αιώρημα του μπετονίτη.
- Η περιοχή της ασπίδας εντός της οποίας η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται είναι γνωστή ως θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber) (2) και είναι διαχωρισμένη με ένα διάφραγμα πίεσης (pressure bulkhead) (3) από την περιοχή της ασπίδας, που είναι υπό ατμοσφαιρική πίεση.
- Το αιώρημα μπετονίτη διοχετεύεται με μία γραμμή τροφοδοσίας (feed line) (4) στον θάλαμο εκσκαφής, μέσω πίεσης αέρα (air cushion) (5) εξισορροπώντας τις εδαφικές και υδροστατικές πιέσεις. Έτσι αποτρέπεται η μη ελεγχόμενη διείσδυση του εδάφους ή ο κίνδυνος αστάθειας του μετώπου της σήραγγας. Για αυτόν τον λόγο ο θάλαμος εκσκαφής, πίσω από την κοπτική κεφαλή, χωρίζεται από το διάφραγμα πίεσης με έναν «τοίχο» (submerged wall) (6). Η περιοχή από τον «τοίχο» αυτό, ως το διάφραγμα πίεσης είναι γνωστή ως θάλαμος πίεσης.

Το μίγμα του εκσκαπόμενου υλικού και του αιωρήματος του μπετονίτη μεταφέρεται εκτός της σήραγγας, στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού. Προκειμένου να εμποδίζεται τυχών εμπλοκή στο κύκλωμα τροφοδοσίας και να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των αντλιών μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού, τοποθετείται ένα κόσκινο μπροστά από τον σωλήνα αναρρόφησης για να εμποδίσει την πρόσβαση μεγάλων τεμαχίων.

2.2.9. Κατασκευή επένδυσης σήραγγας με TBM

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας εξυπηρετεί και εξασφαλίζει την κατασκευαστική αρτιότητα, την ανθεκτικότητα και λειτουργικότητα στο εσωτερικό της σήραγγας. Σχεδιάζεται έτσι ώστε να λαμβάνει φορτία που αναπτύσσονται από το περιβάλλον έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, τις τυχηματικές δράσεις (π.χ. εκρήξεις, φωτιά) και σεισμικά φορτία.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι από σκυρόδεμα (segmentets) (**Εικόνα 2.5**), εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη δημιουργία ενός κυκλικού δακτυλίου. Βασικό χαρακτηριστικό της τελικής επένδυσης αποτελεί ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων μεταξύ των στοιχείων (ring joints). Τα σημεία σύνδεσης είναι κάθετα στα στοιχεία και κατά μήκος της σήραγγας ανάμεσα στα στοιχεία. Υπάρχουν πολλών ειδών σχήματα προκατασκευασμένων στοιχείων, παρόλα αυτά τα ορθογωνικά στοιχεία είναι τα συνήθη χρησιμοποιούμενα, με κάθε δακτύλιο υποστήριξης συνήθως να φτιάχνεται με πέντε έως οκτώ στοιχεία. Η επιλογή εγκατάστασης προκατασκευασμένων στοιχείων στην επένδυση παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Εξασφαλίζουν υψηλή κατασκευαστική ποιότητα, καθώς υπάρχει η δυνατότητα βιομηχανικού ελέγχου.
- Με την τοποθέτησή τους έχουν ήδη αναπτύξει την τελική φέρουσα ικανότητά τους.
- Τυχόν διαρροές στα σημεία σύνδεσης μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν άμεσα.
- Ο υπολογισμός των φορτίων που δρουν στους δακτυλίους περιλαμβάνει λιγότερο βαθμό αβεβαιότητας.

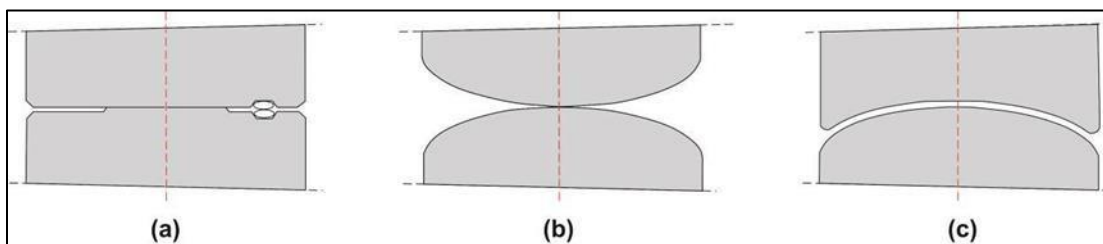
Γενικά, η φιλοσοφία στο σχεδιασμό των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης δε διαφέρει σημαντικά από τον σχεδιασμό τελικής επένδυσης συμβατικής σήραγγας. Εξαιτίας της μηχανοποιημένης όρυξης, η τελική επένδυση πρέπει να είναι σε θέση να παραλάβει και το θλιπτικό φορτίο των υδραυλικών εμβόλων. Το ελάχιστο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων προκειμένου να παραλάβουν τη δύναμη των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του EPB κυμαίνεται μεταξύ των 20-50 cm.



Εικόνα 2. 8. Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία - segments (Πηγή: Mesalmalat).

Όπως προαναφέρθηκε, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων αποτελούν τα σημεία σύνδεσης τους (**Σχήμα 2.10**). Στην πράξη έχουν διαπιστωθεί δύο τύποι σημείων σύνδεσης των στοιχείων της επένδυσης, τα επίπεδα σημεία σύνδεσης plane joint (flat contact surface) και τα κυρτά σημεία (convex joint). Η βασική τους διαφοροποίηση έγκειται στην ικανότητά τους να μεταφέρουν καμπτικές ροπές από στοιχείο σε στοιχείο.

Στην περίπτωση των plane joints, όταν συμβεί μία στροφή, το κενό μεταξύ των στοιχείων τείνει να κλείσει και καμπτικές ροπές μεταφέρονται μεταξύ των στοιχείων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι ότι σε μεγάλες στροφές αναπτύσσονται υψηλές ροπές κάμψης και οι εξωτερικές παρειές των στοιχείων έρχονται σε επαφή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ζημιά στην κατασκευή. Όταν αναμένονται μεγάλες στροφές πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό ο δεύτερος τύπος συνδέσμων.



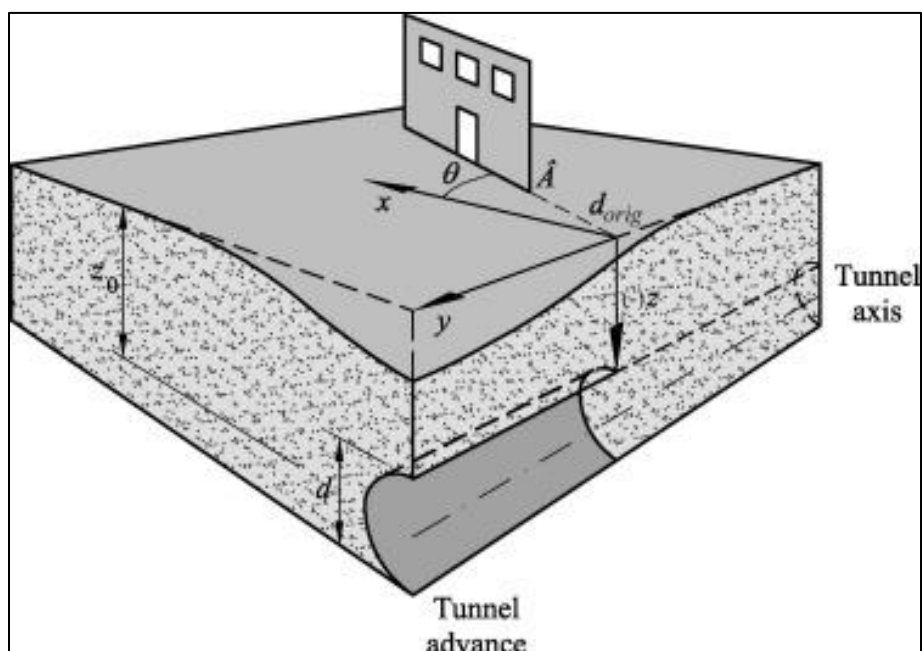
Σχήμα 2. 10. Απεικόνιση διαφορετικών τύπων σύνδεσης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης των σηράγγων (a) επίπεδος σύνδεσμος (plane joint), (b) και (c) σύνδεσμοι με καμπύλη επιφάνεια (convex joints) (Πηγή: Luttikholt).

3. Εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγων

Η συσχέτιση των επιφανειακών καθιζήσεων και του βάθους της σήραγγας, δεν είναι ούτε απλή, ούτε γραμμική. Στην πραγματικότητα οι εδαφικές μετακινήσεις εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων όπως:

- γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες
- γεωμετρία της διατομής της σήραγγας και βάθος αυτής
- μέθοδος όρυξης
- ποιότητα των εργασιών καθώς και της διαχείρισης αυτών

Συνεπώς μία αβαθής σήραγγα θα έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στις επιφανειακές κατασκευές (**Σχήμα 3.1**), εν σχέση με μία η οποία ορύσσεται σε μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 3. 1. Εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης ρηχής σήραγγας (Πηγή: Carles Camos).

Η κατασκευή μιας σήραγγας, αναπόφευκτα θα επηρεάσει το υφιστάμενο εντατικό πεδίο καθώς και τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Η μεταβολή αυτή του φυσικού εντατικού πεδίου συνήθως συνοδεύεται από μία ταχεία μετατόπιση του μετώπου προς το εσωτερικό της σήραγγας (εκβολή μετώπου) και από την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας. Σε μαλακά συνεκτικά εδάφη, είναι επιπλέον δυνατή η παρατήρηση παραμορφώσεων ως αποτέλεσμα της αλλαγής της πίεσης των πόρων, γεγονός το οποίο

επίσης οφείλεται στην εξέλιξη των εργασιών της κατασκευής. Η έκταση, ο προσανατολισμός και η θέση των εδαφικών μετακινήσεων γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, εξαρτώνται από τις γεωτεχνικές συνθήκες οι οποίες απαντώνται, τις υφιστάμενες γεωστατικές τάσεις και επιφανειακά φορτία, τις υδρογεωλογικές συνθήκες καθώς και από τις τεχνικές οι οποίες εφαρμόζονται τόσο για την διάνοιξη όσο και την υποστήριξη του ανοίγματος. Στις περιοχές όπου υπερβαίνεται η αντοχή της εδαφομάζας, παρατηρούνται σημαντικές μετακινήσεις τόσο από πλευρά έκτασης όσο και επιτάχυνσης. Πιθανό αποτέλεσμα αυτών είναι η δημιουργία επιφανειών διάτμησης (ολίσθησης) στην εδαφομάζα, με επιζήμιες επιπτώσεις αναφορικά με την απαίτηση υποστήριξης (φορτία βαρύτητας) αλλά και περιορισμού των εδαφικών μετακινήσεων. Συνήθως, η κατασκευή ενός ανυποστηρικτού ανοίγματος σε μαλακό έδαφος οδηγεί σε μεγάλης έκτασης εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν την δημιουργία μίας ζώνης αστοχίας πίσω από το μέτωπο. Σε εδάφη με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, η ζώνη αυτή είναι δυνατό να επεκταθεί προς την περιοχή μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας και να εκδηλωθεί έως την επιφάνειά του εδάφους, προκαλώντας προβλήματα στις υπερκείμενες κατασκευές (Εικόνα 3.1).

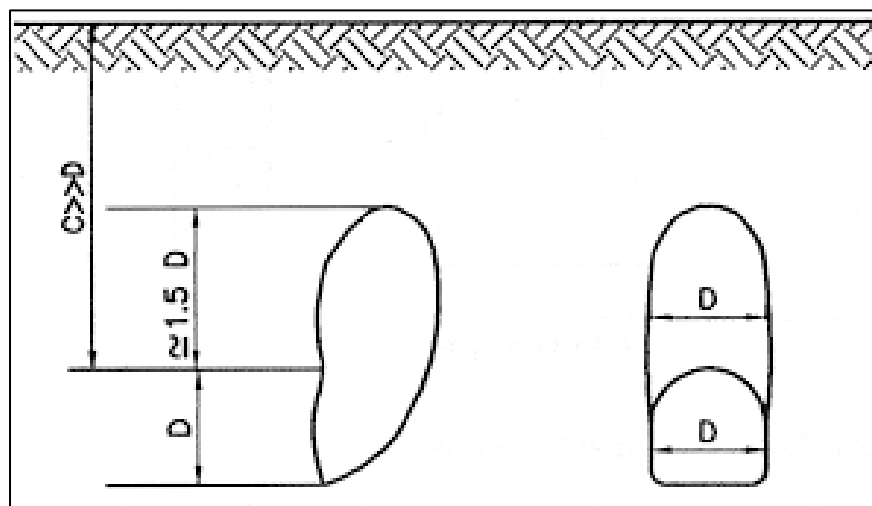


Εικόνα 3. 1. Επίδραση της κατασκευής της Γραμμής 2 του μετρό της Αθήνας σε επιφανειακή κατασκευή (Πηγή: tanea.gr).

3.1. Επέκταση μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους

Οι εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες ξεκινούν στην υπό διάνοιξη σήραγγα τείνουν να επεκταθούν στην επιφάνεια. Βάση των επί τόπου μετρήσεων και παρατηρήσεων έχουν αναγνωρισθεί δύο τύποι επέκτασης των μετακινήσεων. Οι τύποι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση, σε ένα εγκάρσιο επίπεδο, του βαθμού της επέκτασης των μετακινήσεων οι οποίες αρχικά εμφανίζονται στο υπόγειο άνοιγμα (Pantet, 1991).

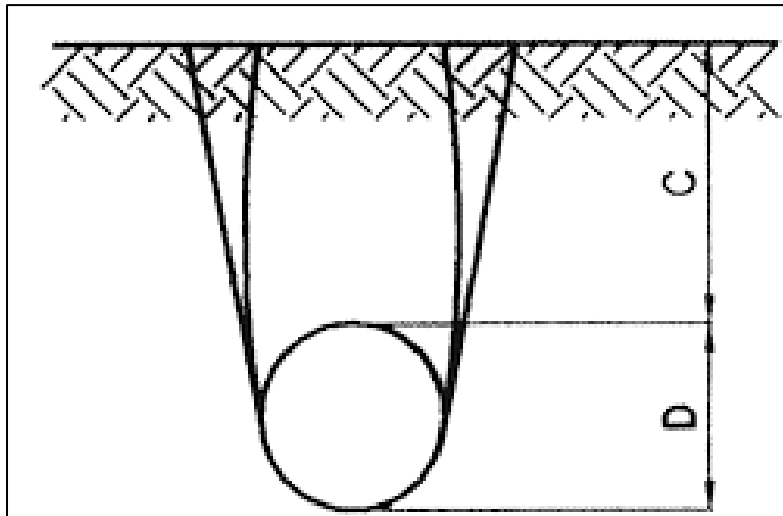
- **Πρωτεύων τύπος (Σχήμα 3.2):** Ο τύπος αυτός λαμβάνει χώρα καθώς οι εδαφικές τάσεις (επί τόπου) αποτονώνονται στο μέτωπο. Χαρακτηρίζεται από την δημιουργία μιας ζώνης χαλάρωσης, υπερκείμενης της εκσκαφής. Το ύψος αυτής της ζώνης τυπικά κυμαίνεται μεταξύ του 100- 150% της διαμέτρου του ανοίγματος και το πλάτος αυτής είναι περίπου ίσο με μία διάμετρο. Δύο ζώνες σύνθλιψης σχηματίζονται εκατέρωθεν κατά μήκος της κάθετης διεύθυνσης. Σε βαθύτερες σήραγγες (λόγος $C/D > 2.5$), η επίδραση της διάνοιξης στην επιφάνεια περιορίζεται (Cording & Hansmire, 1975; Leblais & Bochon, 1991; Pantet, 1991).



Σχήμα 3. 2. Πρωτεύων τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA- CET).

Δευτερεύων τύπος (Σχήμα 3.3): Ο τύπος αυτός λαμβάνει χώρα όταν το εδαφικό κάλυμμα είναι μικρού πάχους (λόγος $C/D < 2.5$) και για υποστήριξη ανοίγματος ανεπαρκής. Αυτό οδηγεί στην διαμόρφωση ενός ενιαίου εδαφικού τεμάχους (μπλόκ) το οποίο ορίζεται από δύο ή περισσότερες ζώνες διάτμησης οι

οποίες επεκτείνονται από την σήραγγα προς την επιφάνεια. Οι εδαφικές μετακινήσεις στην επιφάνεια άνω της σήραγγας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές οι οποίες παρουσιάζονται στο άνοιγμα.

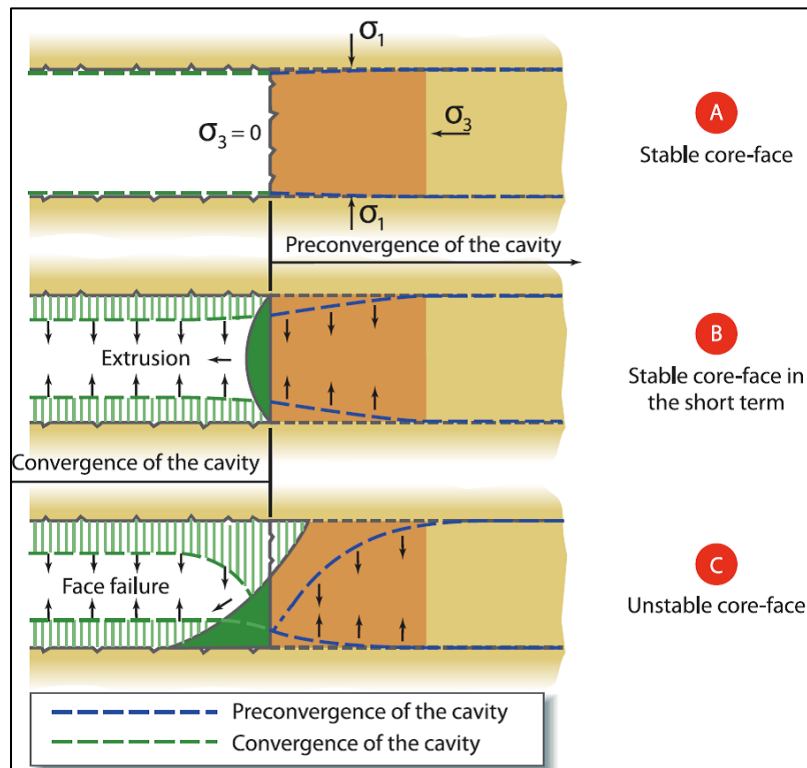


Σχήμα 3.3. Δευτερεύον τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA- CET).

3.2. Καθιζήσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη σήραγγας με συμβατικά μέσα

Κατά την προώθηση της εκσκαφής το έδαφος μπροστά από το μέτωπο αποτονώνεται σταδιακά, και τελικά η μία πλευρική τάση μηδενίζεται, άρα το έδαφος εκεί παραμορφώνεται λόγω της κατακόρυφης τάσης, τόσο ακτινικά (προσύγκλιση) όσο και προς το εσωτερικό της σήραγγας (λόγω φαινομένου Poisson) υπό τη μορφή εξώθησης.

Σύμφωνα με τον Lunardi (2000) η NATM δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε αβαθείς σήραγγες σε αστικό περιβάλλον, όπου το βασικό κριτήριο σχεδιασμού αποτελεί ο περιορισμός των παραμορφώσεων του εδάφους λόγω της διάνοιξης, ενώ η NATM εξ' ορισμού έχει στόχο την ανάπτυξη παραμορφώσεων έτσι ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης τόσο όσο χρειάζεται ώστε να μπορούν να τη προσφέρουν τα μέτρα υποστήριξης. Σύμφωνα με τον Lunardi, το κλειδί για μια επιτυχημένη διάνοιξη σε δυσμενείς συνθήκες είναι η διατήρηση της ευστάθειας μετώπου μέσω του περιορισμού των μετατοπίσεων του πυρήνα προώθησης, δηλαδή του όγκου εδάφους μπροστά από το μέτωπο σε απόσταση έως και μία περίπου διάμετρο (**Σχήμα 3.4**).



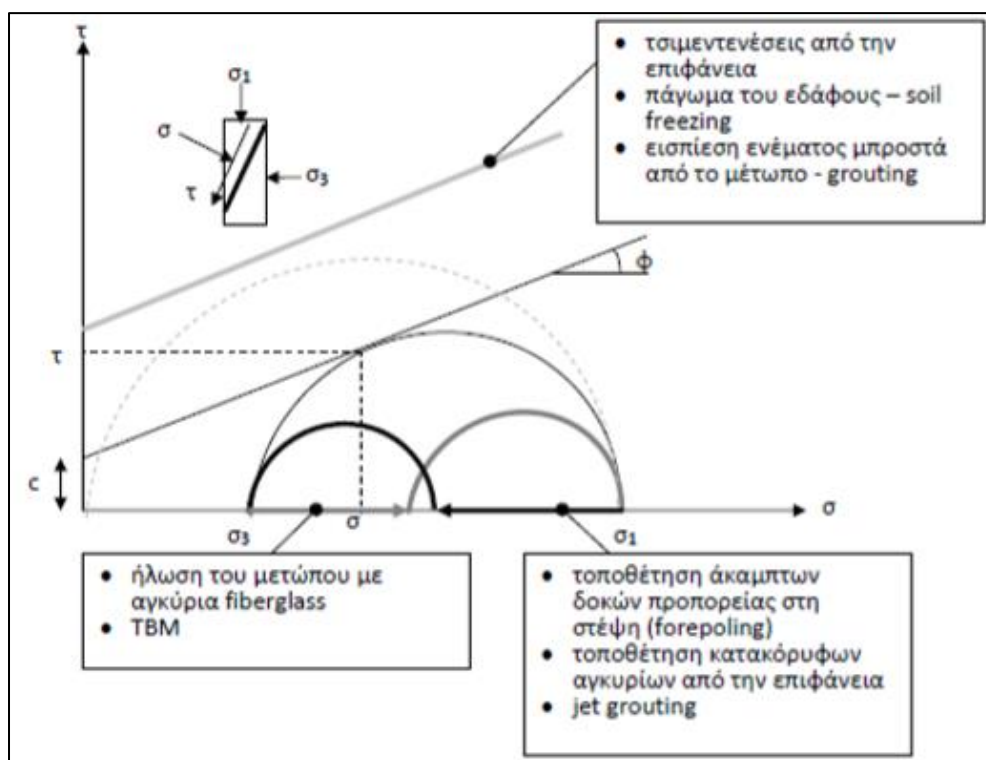
Σχήμα 3. 4, Σχηματική απεικόνιση του τρόπου αστοχίας του μετώπου σηράγγων (Πηγή. Α. Σοφιανός).

Για την αποφυγή των μεγάλων εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής και κατ' επέκταση την εκδήλωση μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων, απαιτείται ενίσχυση του εδάφους μπρος από το μέτωπο εκσκαφής ή προ ενίσχυση του.

Τα μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν είναι τα ακόλουθα:

- Πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων από την επιφάνεια του εδάφους, για ενίσχυση του εδάφους εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής.
- Πάγωμα του εδάφους για αύξηση της συνοχής του εδάφους.
- Τοποθέτηση δοκών προπορείας (forepole umbrella) στο μέτωπο εκσκαφής για μείωση της κύριας τάσης σ_1 εμπρός από αυτό.
- Τοποθέτηση αγκυριών μετώπου από υαλόνημα (Fiberglass) στο μέτωπο εκσκαφής για αύξηση της πλευρικής τάσης σ_3 στο μέτωπο.

Ο τρόπος λειτουργίας των παραπάνω μέτρων, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.5**.



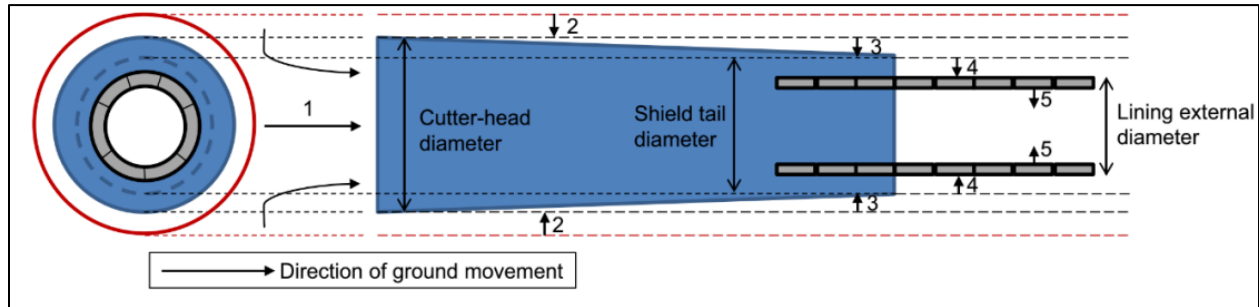
Σχήμα 3. 5. Τρόπος λειτουργίας των μεθόδων προενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

3.3. Καθιζήσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα (TBM)

Οι καθιζήσεις οι οποίες προκαλούνται από την διάνοιξη σήραγγων με μηχανοποιημένες μεθόδους οι οποίες προϋποθέτουν την χρήση ασπίδας, διακρίνονται ως εξής:

- Καθιζήσεις εμπρός και πίσω από το μέτωπο (1)
- Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας (2)
- Καθιζήσεις στο ουραίο τμήμα της ασπίδας (3)
- Καθιζήσεις εξαιτίας των παραμορφώσεων της επένδυσης (5)

Η απεικόνιση της εκδήλωσης των παραπάνω καθιζήσεων κατά μήκος του TBM, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.6**.



Σχήμα 3. 6. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου εκδήλωσης των καθιζήσεων κατά μήκος του TBM (Πηγή: Wan et al., 2017)

3.3.1. Καθιζήσεις εμπρός και πίσω από το μέτωπο εκσκαφής

Οι καθιζήσεις στην περιοχή του μετώπου οφείλονται σε εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται έμπροσθεν και άνω της ασπίδας με φορά προς το άνοιγμα. Οι μετακινήσεις αυτές εξαρτώνται από τον βαθμό ενδοτικότητας της υποστήριξης στο μέτωπο της σήραγγας, τις ιδιότητες του εδάφους, και το καθεστώς των υπογείων υδάτων.

3.3.2. Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας

Οι καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας κυρίως οφείλονται στα κάτωθι:

- Υπερεκσκαφή η οποία πραγματοποιείται από περιφερειακά τοποθετημένα κοπτικά και αποσκοπεί στην μόρφωση ελαφρά μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτήν της ασπίδας προς απομείωση της δύναμης τριβής επί του τοιχώματος αυτής καθώς και στην διευκόλυνση στην προχώρηση του μηχανήματος σε καμπύλη τροχιά.
- Δυσχέρεια στην καθοδήγηση της ασπίδας, ειδικά σε σχέση με την τάση που αυτή έχει να βυθίζεται, χαρακτηριστικό το οποίο επιβάλλει την οδήγησή της υπό κλίση ανοδική. Επιπρόσθετα η τάση της ασπίδας να στρέφεται, οδηγεί σε εκσκαφή πλατύτερη από το μηχάνημα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόκλιση της πραγματικής από την θεωρητική διατομή. Απομείωση της διατομής της ασπίδας (κωνικότητα, εφόσον υφίσταται)
- Τραχύτητα της κοπτικής κεφαλής, η οποία σε συνέργια με τις δυνάμεις τριβής και την διάτμηση του εδαφικού υλικού να ενεργοποιήσουν μετακινήσεις μπροστά από το μέτωπο και άνω της κεφαλής.

3.3.3. Καθιζήσεις στο ουραίο τμήμα της ασπίδας

Στο ουραίο τμήμα της ασπίδας, δημιουργείται κενό μεταξύ της περιφέρειας της εκσκαφής και της εξωτερικής περιφέρειας της προκατασκευασμένης υποστήριξης εξαιτίας παραγόντων όπως:

- Η δημιουργία κενού κατά μήκος της ασπίδας.
- Το πάχος της ουραίας ασπίδας το οποίο διακυμαίνεται αναλόγως του τύπου αυτής και της διαμέτρου της σήραγγας
- Του διάκενου μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας της ουραίας ασπίδας και της εξωτερικής επιφάνειας του προκατασκευασμένου στοιχείου υποστηρίξεως.

Το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων εξαρτάται από την κατάλληλη πλήρωση του κενού στην ουραία ασπίδα.

3.3.4. Καθιζήσεις εξαιτίας των παραμορφώσεων της επένδυσης

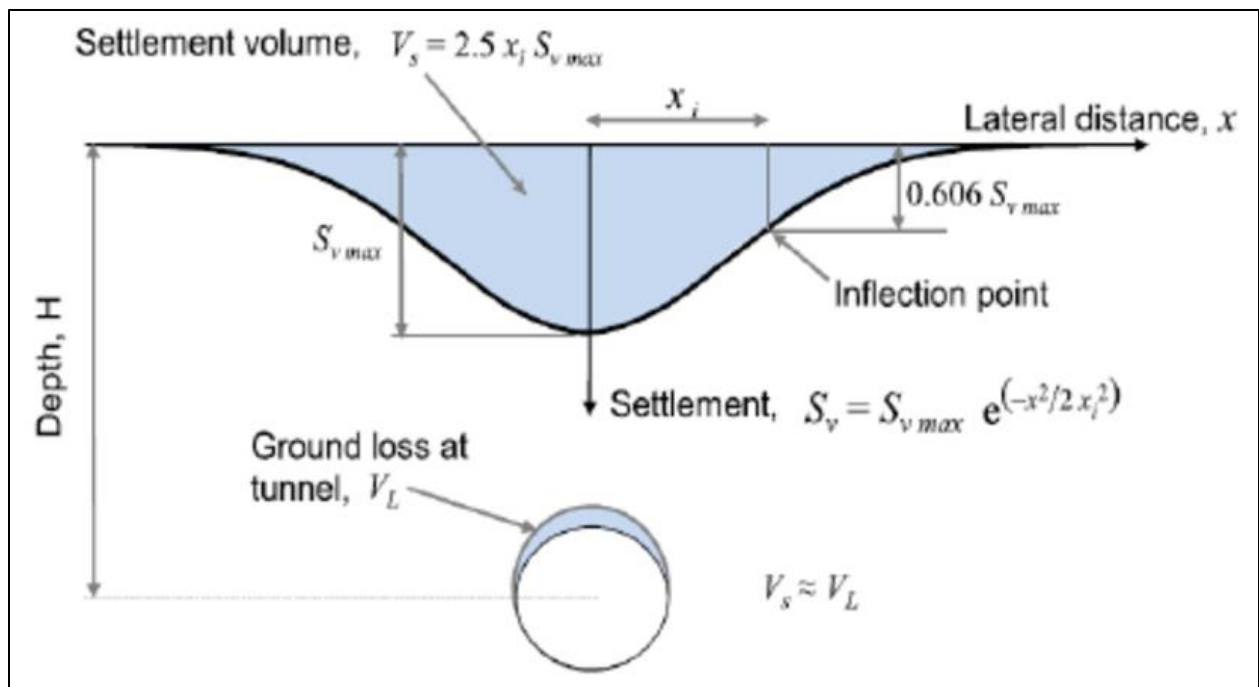
Τα τοποθετούμενα στην ουραία ασπίδα προκατασκευασμένα από σκυρόδεμα στοιχεία της υποστήριξης πρέπει να είναι ικανής αντοχής ώστε να παραλάβουν το φορτίο το οποίο δημιουργούν τα έμβολα προώθησης. Η ακτινική παραμόρφωση της υποστήριξης παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα εφόσον το δημιουργούμενο διάκενο στην ουραία ασπίδα είναι επαρκώς ενεματωμένο.

3.4. Εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού των επιφανειακών καθιζήσεων

Λόγω της μεγάλης σημασίας που έχει η εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων σε περίπτωση αστικών σηράγγων, στην ασφάλεια των υπερκείμενων κατασκευών, πολλοί ερευνητές έχουν εστιάσει στο συγκεκριμένο αντικείμενο και έχουν προτείνει διάφορες εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης των καθιζήσεων. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν βασιστεί σε αποτελέσματα από διάνοιξη σηράγγων σε αστικούς ιστούς.

Από τις μεθόδους αυτές προκύπτουν τα ακόλουθα μεγέθη (Σχήμα 3.7):

- Μέγιστη καθίζηση (s_{max})
- Σημείο καμπής (i)
- Απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s)
- Απώλεια εδαφικού όγκου γύρω από την σήραγγα (V_l)



Σχήμα 3. 7. Σχηματική απεικόνιση της εκδήλωσης καθιζήσεων και των παραγωγών μεγεθών κατά την διάνοιξη ρηχής σήραγγας (Πηγή: A. Marto)

3.4.1. Εκτίμηση μέγιστης καθίζησης (s_{max})

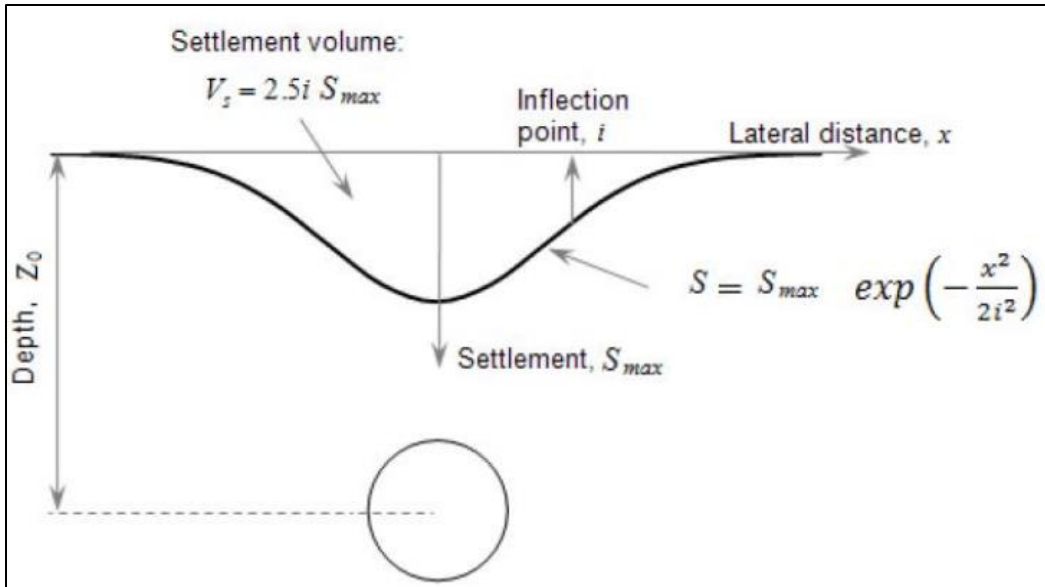
Η κατανομή της υποχώρησης (s) της επιφάνειας του εδάφους κατά τη διατομή της σήραγγας μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας καμπύλης τύπου Gauss (settlement trough), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.8**:

$$s = s_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

όπου:

- ✓ x = η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας
- ✓ s_{max} = η μέγιστη υποχώρηση που συμβαίνει στον άξονα της σήραγγας ($x = 0$)
- ✓ i = η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας όπου η καμπύλη της υποχώρησης παρουσιάζει

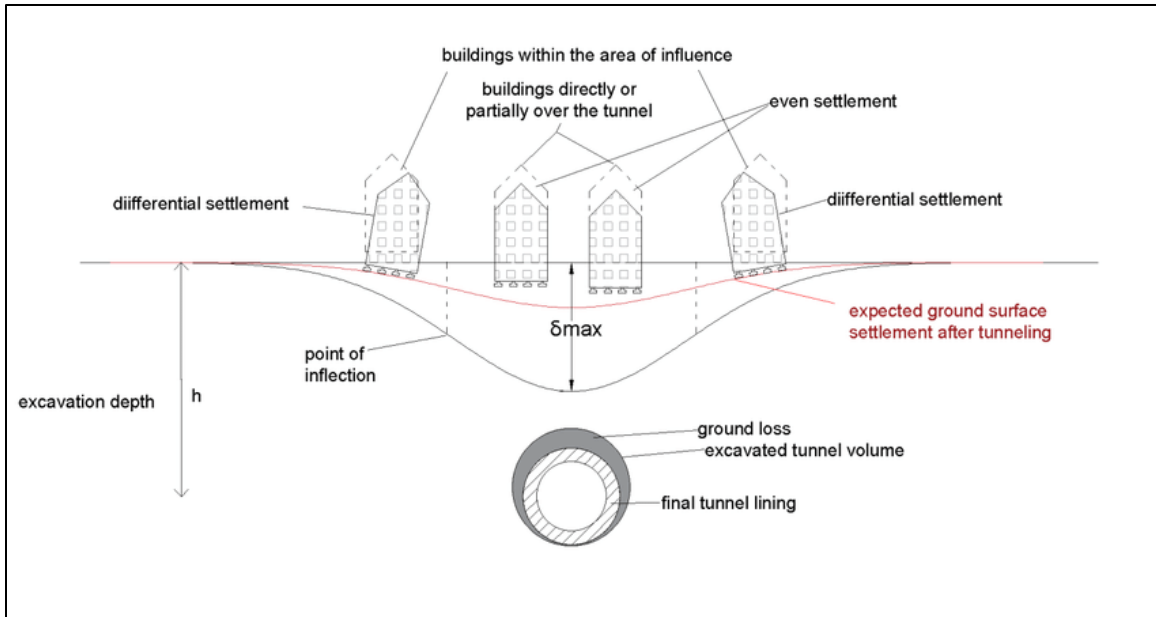
τη μέγιστη κλίση $\left(\frac{d^2s}{dx^2} = 0\right)$.



Σχήμα 3. 8. Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά Gauss (Πηγή: Μ. Καθθαδάς).

3.4.2. Εκτίμηση σημείου καμπής (i)

Σημαντικός είναι ο προσδιορισμός της θέσης του σημείου καμπής (i) στο προφίλ της καμπύλης καθιζήσεων, καθώς στο σημείο αυτό υπάρχει άμεσος κίνδυνος σε επιφανειακές κατασκευές, διότι στρέφονται τα κοίλα της καμπύλης, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος για κατασκευή που εδράζεται εκατέρωθεν του σημείου αυτού, λόγω διαφορικής καθίζησης (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3. 9. Επίδραση της θέσης ανωδομής σε σχέση με το σημείο καμπής (Πηγή: M. Masosonore).

Αρχικά οι ερευνητές Reilly and New (1982), πρότειναν ότι το σημείο καμπής (i), προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις, συναρτήσει του βάθους της σήραγγας (z_0):

✓ Για σήραγγες σε αργίλους:

$$i = 0.43z_0 + 1.1$$

✓ Για σήραγγες σε άμμους:

$$i = 0.28z_0 - 0.1$$

Στην συνέχεια οι ερευνητές Reilly and New (1982), επέκτειναν τις προηγούμενες σχέσεις, γενικεύοντάς τες για διαφόρους τύπους εδάφους, μέσω της παραμέτρου K , όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.1**. Η σχέση που προτείναν είναι:

$$i = Kz_0$$

Ground conditions	Ground support method in tunnels	Trough width parameter, constant, K
Stiff fissured clay	Shield or none	0.4 - 0.5
Glacial deposits	Shield in free air	0.5 - 0.6
Glacial deposits	Shield in compressed air	0.5 - 0.6
Recent silty clay deposits ($C_u = 10 - 40 \text{ KN/m}^2$)	Shield in free air	0.6 - 0.7
Recent silty clay deposits ($C_u = 10 - 40 \text{ KN/m}^2$)	Shield in compressed air	0.6 - 0.7

Πίνακα 3. 1. Παράμετρος K ανάλογα των τύπο του εδάφους, σύμφωνα με τους O' Reilly and New (1982).

3.4.3. Εκτίμηση απώλειας επιφανειακού εδαφικού όγκου (V_s)

Η απώλεια εδαφικού όγκου ανά μονάδα μήκους της σήραγγας στην επιφάνεια του εδάφους, κατ' ουσία ο όγκος ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων, υπολογίζεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dx = \sqrt{2\pi} i s_{\max}$$

Συνεπώς προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την απώλεια εδαφικού όγκου:

$$V_s = \sqrt{2\pi} i s_{\max}$$

Οι ερευνητές Clough and Schmidt (1981), πρότειναν τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της απώλειας εδαφικού όγκου, βάσει δεδομένων που είχαν από πραγματικές μετρήσεις (Σχήμα 3.10).

$$\frac{V_s}{V} = a \times e^{N-1}$$

, όπου:

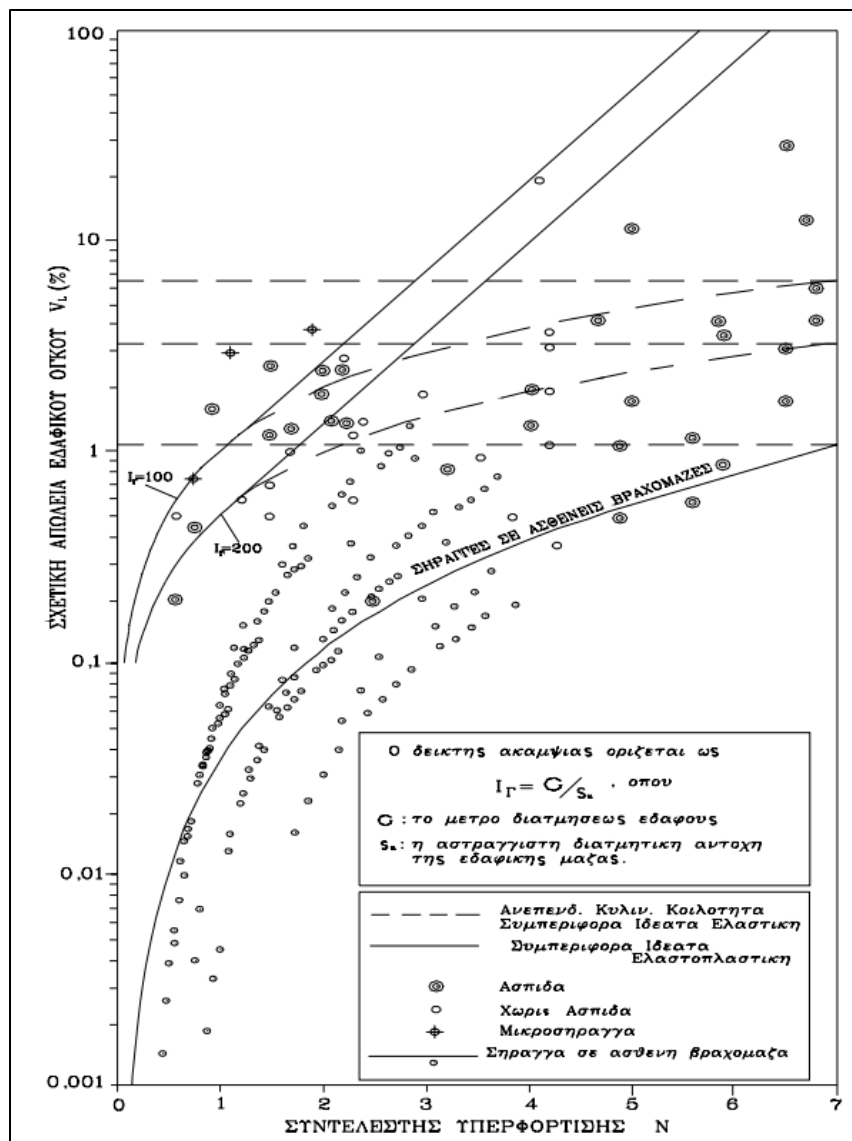
- ✓ **V_s**: απώλεια εδαφικού όγκου
- ✓ **V**: όγκος σήραγγας, ανά τρέχον μετρό της διατομής της
- ✓ **α**: συντελεστής που αντιστοιχεί στον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας, όπου:
 - **α= 0.002** για συνήθη επιμέλεια διάνοιξης
 - **α= 0.004** για μεγάλη επιμέλεια διάνοιξης
- ✓ **N**: συντελεστής υπερφόρτισης

Ο συντελεστής υπερφόρτισης N, προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$N = \frac{2(p_o - p_i)}{\sigma_{cm}}$$

, όπου:

- ✓ **p_o**: γεωστατικές τάσεις
- ✓ **p_i**: ισοδύναμη πίεση υποστήριξης
- ✓ **σ_{cm}**: αντοχή εδάφους, όπου για εδάφη: $\sigma_{cm} = 2 \times c \times \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$



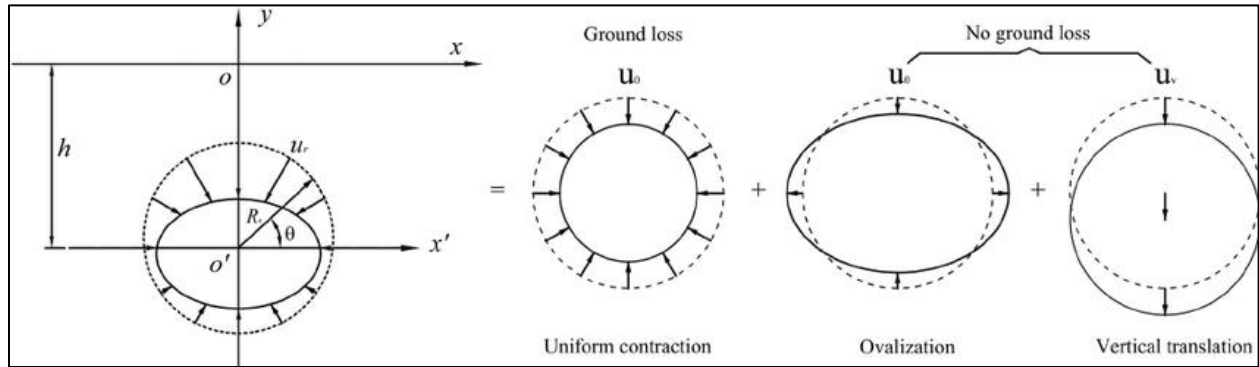
Σχήμα 3. 10. Συσχέτιση εδαφικής απώλειας όγκου με συντελεστή υπερφόρτισης (Πηγή: Β. Παπαδόπουλος).

Να σημειωθεί ότι από τα μέχρι και σήμερα δεδομένα από κατασκευή ρηχών σηράγγων, έχει προκύψει ότι η απώλεια εδαφικού όγκου κυμαίνεται:

- ✓ **0.5 – 1%**: για διάνοιξη με TBM
- ✓ **0.8 – 1.5%**: για διάνοιξη με συμβατική μέθοδο

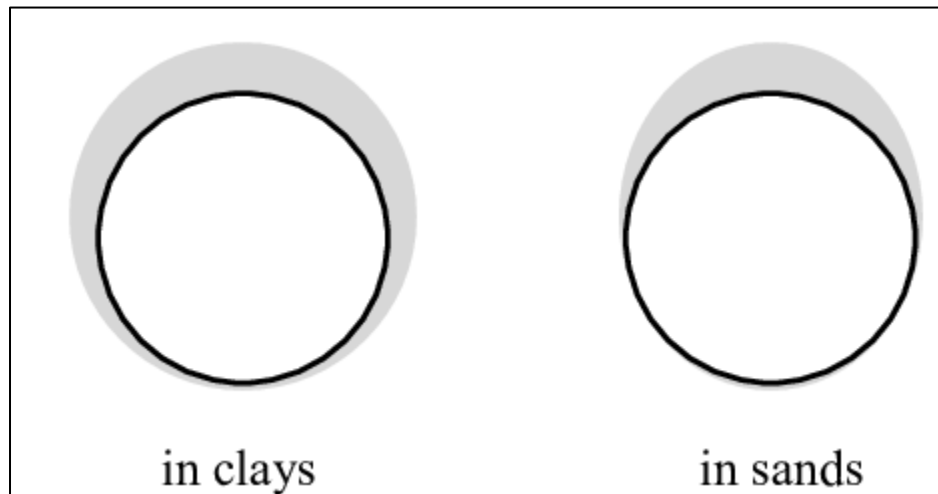
3.4.4. Εκτίμηση απώλειας εδαφικού όγκου γύρω από την σήραγγα (V_L)

Η απώλεια εδαφικού όγκου γύρω από την σήραγγα, ορίζεται ως τον όγκο που χάνεται ανά τρέχον μετρό σήραγγας, προς τον αρχικό όγκο της εκσκαφής ανά τρέχον μετρό σήραγγας, μέχρι την ισορροπία των μετακινήσεων στην υποστήριξή της (**Σχήμα 3.11**).



Σχήμα 3. 11. Σχηματική απεικόνιση της απώλειας όγκου εκσκαφής (Πηγή: *Jinyang Fu*).

Ο τρόπος εδαφικής απώλειας περιμετρικά της εκσκαφής, διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (**Σχήμα 3.12**).



Σχήμα 3. 12. Απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής, ανάλογα τον τύπο του εδάφους (Πηγή: *Andrea Franza*).

Οι περισσότεροι ερευνητές, θεωρούν ότι εδαφική απώλεια εδαφικού όγκου γύρω από την εκσκαφή (V_L), είναι περίπου ίδια με την επιφανειακή εδαφική απώλεια όγκου (V_s), δηλαδή: $V_L \sim V_s$.

4. Αριθμητική διερεύνηση της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων

Από τις μέχρι σήμερα έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο αντικείμενο της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθών σηράγγων, έχουν προκύψει εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού των αντιστοίχων μετρούμενων μεγεθών, όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.

Με την δυνατότητα που υπάρχει σήμερα μέσω των κωδίκων πεπερασμένων στοιχείων, μας δίνεται η δυνατότητα να διερευνήσουμε περαιτέρω το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, μέσω αριθμητικών αναλύσεων που λαμβάνουν διάφορες και ανεξάρτητες μεταξύ τους παραμέτρους, όπως τα γεωμετρικά στοιχεία της εκσκαφής καθώς και τις μηχανικές παραμέτρους του γεωυλικού.

Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιούνται με την χρήση Η/Υ, όπου σήμερα λόγω της αυξημένης υπολογιστικής ισχύς, δίνεται η δυνατότητα των άμεσων υπολογισμών, ακόμα και σε συνέθετα μοντέλα.

4.1. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

Για τις αριθμητικές αναλύσεις μας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων **RS2. 2019** του οίκου Rocscience Inc., όπου αποτελεί ένα σύγχρονο γενικό γεωτεχνικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει η επιστημονική ομάδα του Καθηγητή κ. Μ. Καββαδά, η οποία ασχολείται σε θέματα διάνοιξης σηράγγων.

Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις και όχι τριδιάστατες, δεδομένου ότι η σήραγγα είναι ένα γραμμικό έργο στο χώρο, καθώς και το περιβάλλον εδαφικό υλικό δεν μεταβάλλεται στην τρίτη διάσταση, με αποτέλεσμα οι παραπάνω λόγοι να μας οδηγήσουν σε πραγματοποίηση διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Επίσης, επειδή δεν γίνεται διερεύνηση σε επίδραση της διάνοιξης της σήραγγας σε υπερκείμενες κατασκευές, δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η τρίτη διάστασή. Τέλος το προνόμιο των διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, έναντι των τριδιάστατων, είναι ο υπολογιστικός χρόνος ο οποίος στις τριδιάστατες αναλύσεις αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με τις διδιάστατες.

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν:

- **Προσομοίωση εδάφους**

Γραμμικά τρικομβικά πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου επίπεδης παραμόρφωσης (*continuum plane strain elements*).

- **Προσομοίωση υποστήριξης**

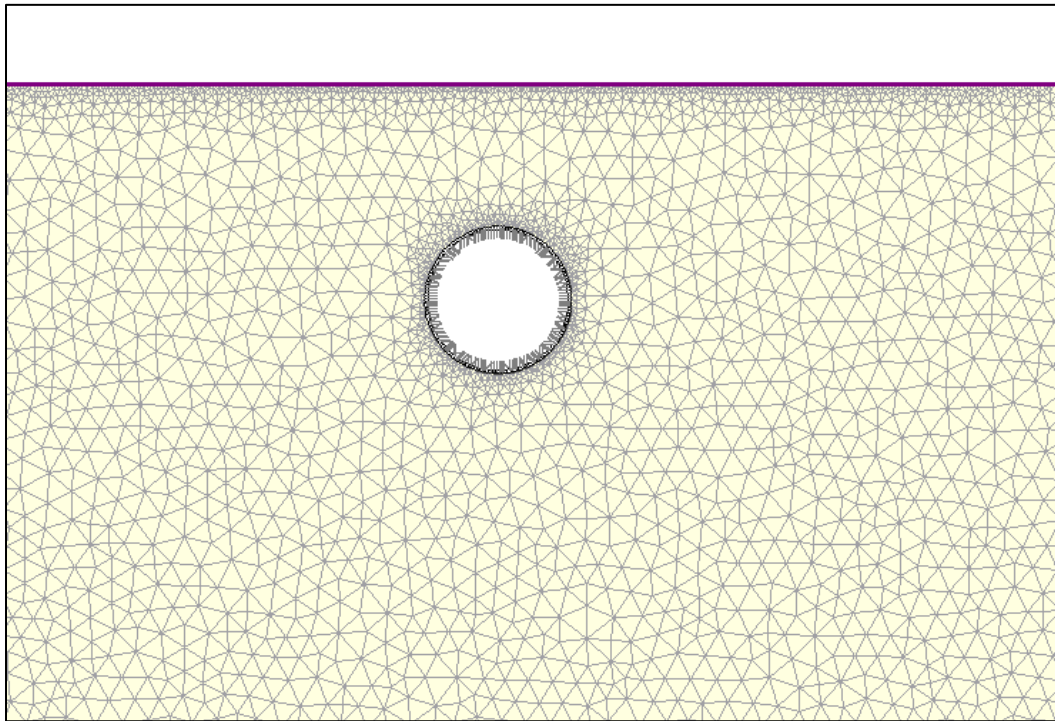
Στοιχεία δοκού (*beam elements*).

Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζεται το σύνολο των στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, ανάλογα τα υπερκείμενα.

Υπερκείμενα	Κόμβοι (Nodes)	Στοιχεία (Elements)
15m	3900	7386
20m	3938	7476
30m	4423	8461

Πίνακας 4 1. Σύνολο πεπερασμένων στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων αριθμητικών αναλύσεων.

Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.1**.



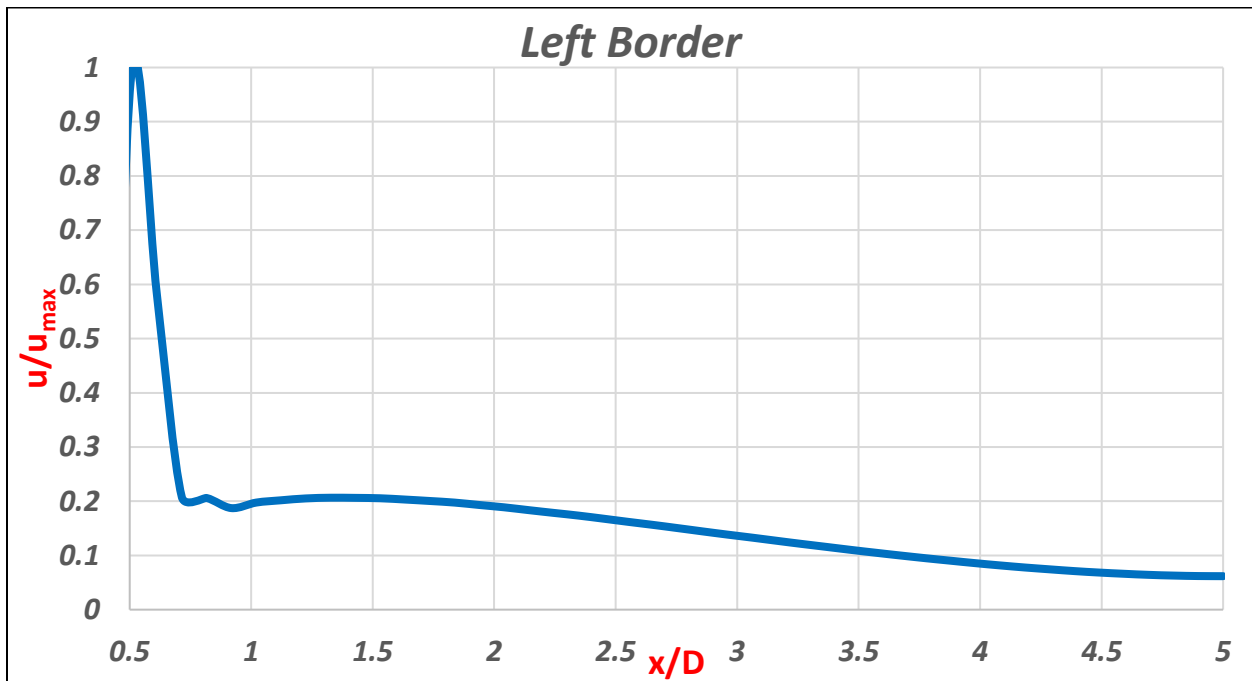
Εικόνα 4 1. Διακριτοποίηση προσομοιώματος.

4.1.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος

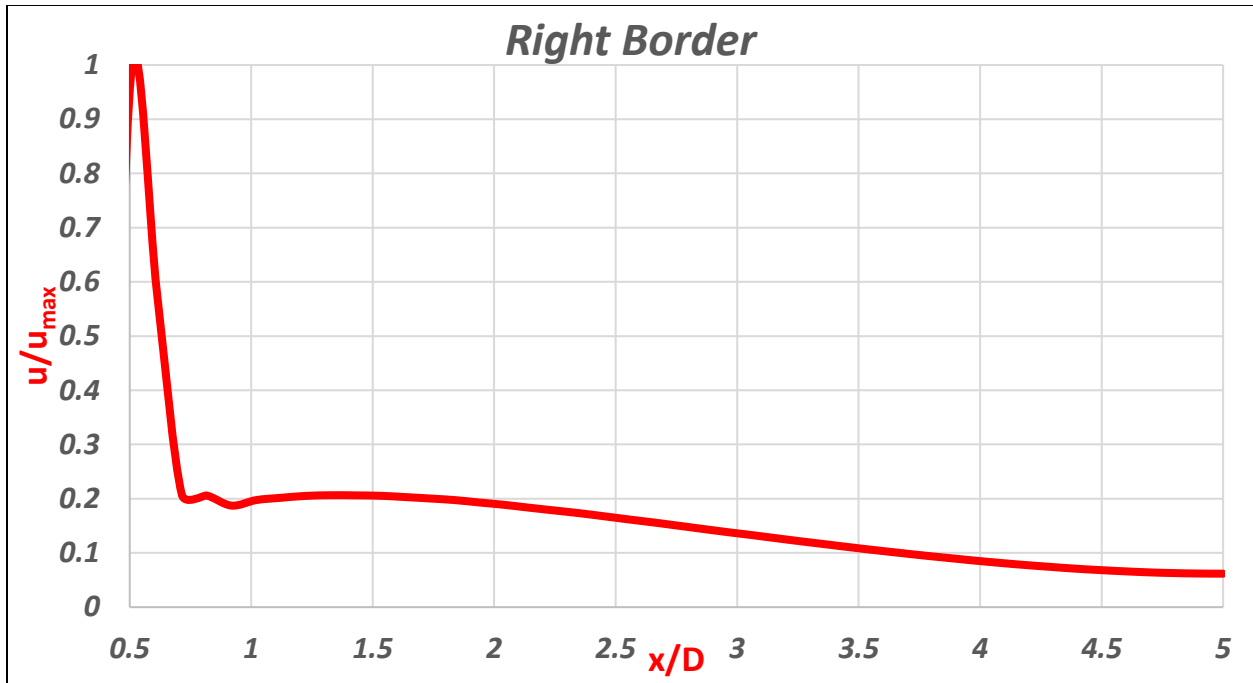
Οι διαστάσεις του αριθμητικού προσομοιώματος μεταβάλλονται ανάλογα τα υπερκείμενα της εκάστοτε εκσκαφής. Συγκεκριμένα πραγματοποιήσαμε αναλύσεις με τρία διαφορετικά υπερκείμενα. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα υπερκείμενα μετρούνται από τον άξονα της σήραγγας έως την επιφάνεια του εδάφους.

Στις αναλύσεις μας προσομοιώσαμε κυκλική διατομή διαμέτρου $D=10m$, η οποία αποτελεί μια σύνηθη διάμετρο αστικής σήραγγας, όπως αυτές που διανοίγονται σε έργα μετρό.

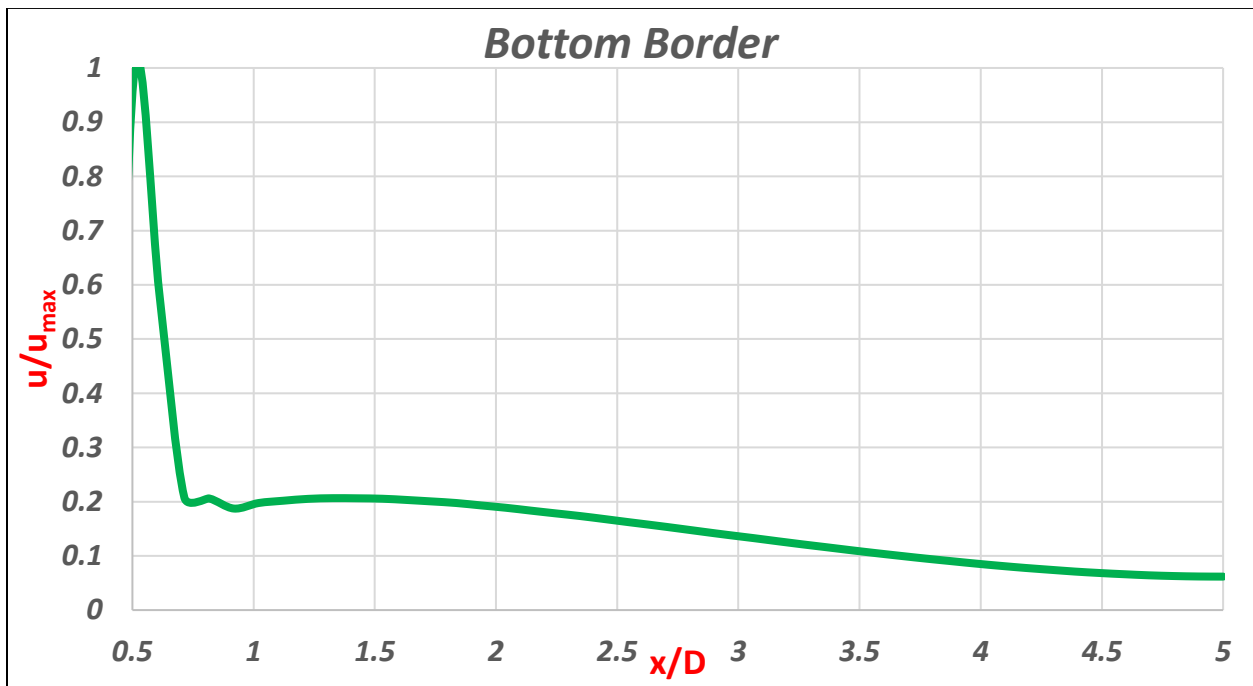
Τα σύνορα του προσομοιώματος, ορίστηκαν σε ικανές αποστάσεις ($4 - 5D$) σε σχέση με την εκσκαφή έτσι ώστε να αναπτύσσονται πλήρως οποιεσδήποτε μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής και ταυτόχρονα να μην υπάρχει επίδραση των συνόρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων (boundary effect). Στα **Διαγράμματα 5.1-5.3** παρουσιάζεται η μεταβολή των μετακινήσεων περιμετρικά της εκσκαφής από αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεών μας, σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο της εκσκαφής.



Διάγραμμα 5 1.Μεταβολή των μετακινήσεων προς το αριστερό σύνορο του μοντέλου.



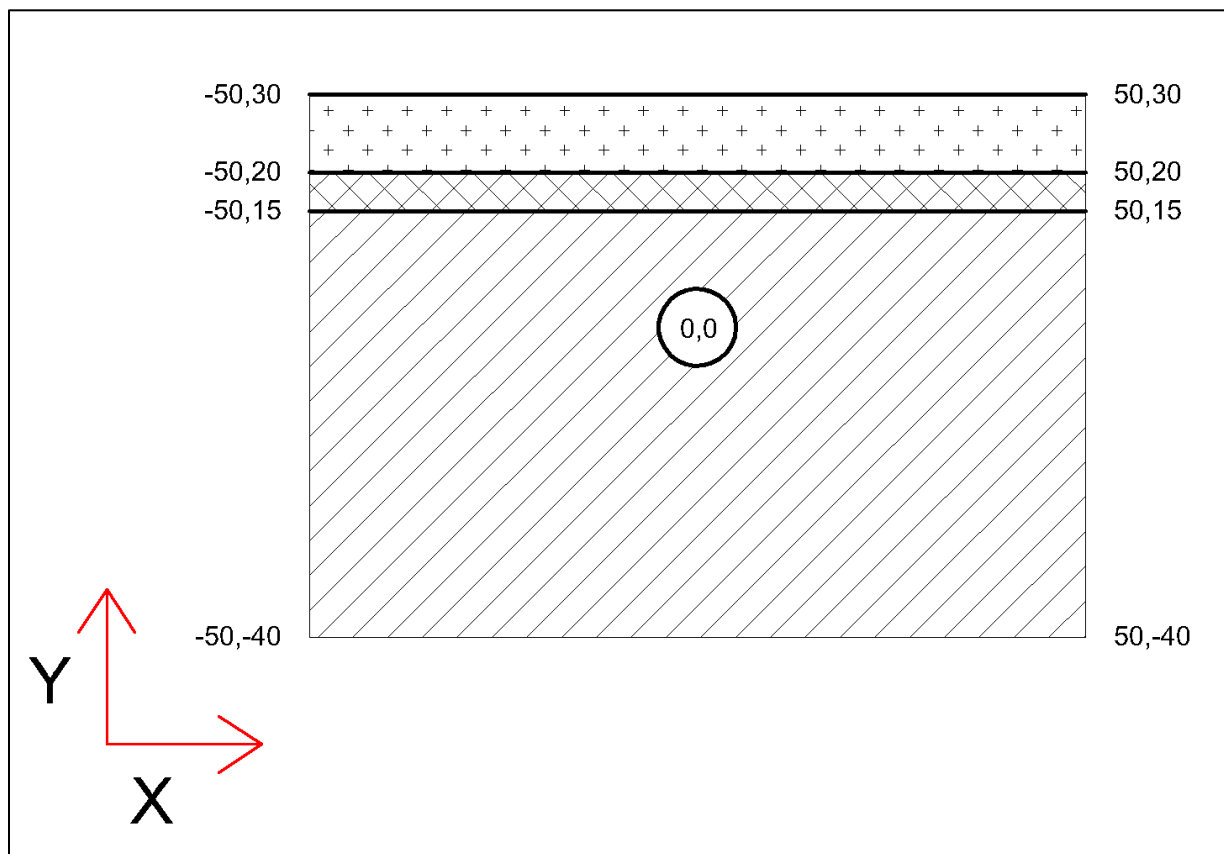
Διάγραμμα 5 2. Μεταβολή των μετακινήσεων προς το δεξιό σύνορο του μοντέλου.



Διάγραμμα 5 3. Μεταβολή των μετακινήσεων προς το κάτω σύνορο του μοντέλου.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι σε απόσταση μεγαλύτερη από 4D σταθεροποιούνται οι μετακινήσεις, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει επίδραση της απόστασης των συνόρων στα αποτελέσματά μας, διότι τα όρια του μοντέλου έχουν οριστεί σε μεγαλύτερη απόσταση.

Οι διαστάσεις του μοντέλου μεταβάλλονται ανάλογα τα υπερκείμενα ($H=15,20,30$ m). Συγκεκριμένα ο άξονας της σήραγγας ορίστηκε στο σημείο $(0,0)$ ενώ τα πλευρικά όρια αριστερά και δεξιά της εκσκαφής ορίστηκαν σε απόσταση 5D, ενώ το κάτω όριο σε απόσταση 4D. Οι διαστάσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.1**.



Σχήμα 4. 1. Διαστάσεις προσομοιώματος.

4.1.2. Μηχανικές παράμετροι

Στο μοντέλο της προσομοίωσης εισήχθησαν μηχανικές παράμετροι τόσο για την συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους της εκσκαφής, όσο και της υποστήριξης του υπογείου ανοίγματος. Στην συνέχεια παρατίθενται οι μηχανικές παράμετροι για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και των μέτρων υποστήριξης.

4.1.2.1. Μηχανικές παράμετροι εδάφους

Συνολικά προσομοιωθήκαν τέσσερις (4) τύποι εδάφους. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων εδαφών, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2**.

Να σημειωθεί ότι η γωνιά διαστολικότητας (δ), ορίστηκε ως το (1/4) της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Έδαφος	Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής φ (°)	Γωνία διαστολικότητας δ (°)	Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)
S1	20	15	20	5	56800
S2	20	20	20	5	59400
S3	20	20	25	6.25	62100
S4	20	30	25	6.25	76100

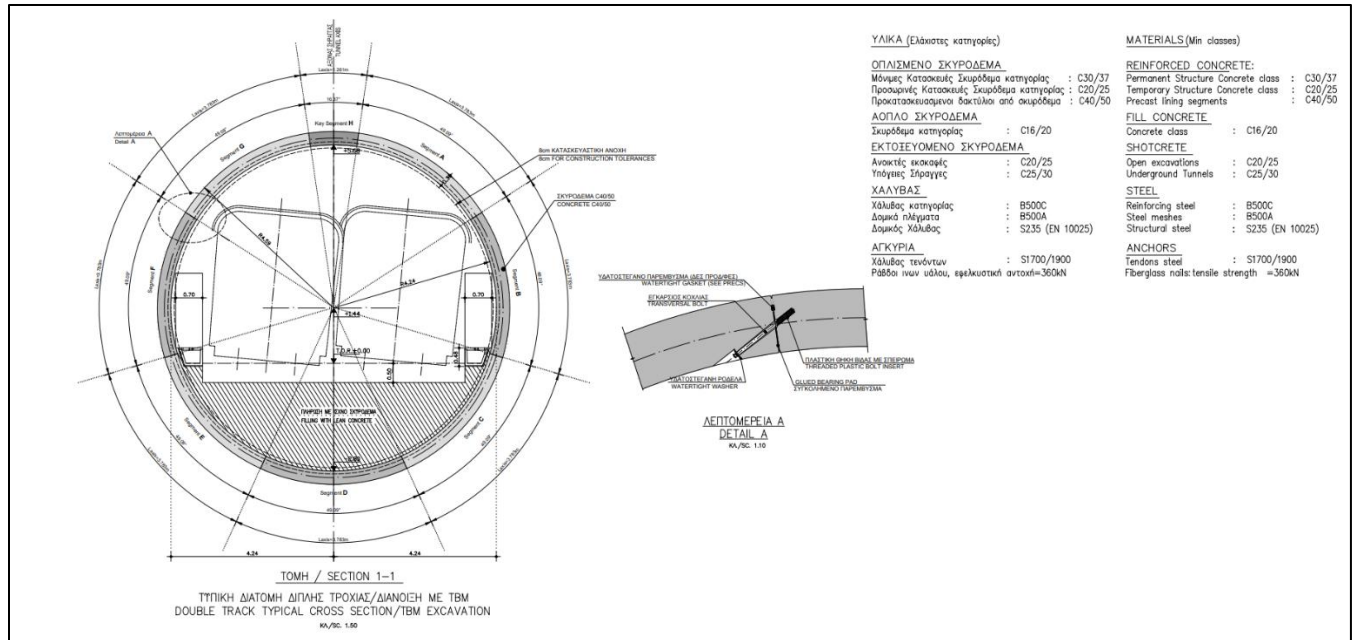
Πίνακας 4 2. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.

4.1.2.2. Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης

Η υποστήριξη του υπογείου ανοίγματος, πραγματοποιήθηκε με έγχυτο σπλισμένο σκυρόδεμα - segments, όπως η υποστήριξη των σηράγγων κατά την διάνοιξη με μηχανοποιημένη όρυξη – TBM (**βλέπε Κεφ. 2.2.13**).

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανικά και κατασκευαστικά στοιχεία που θα εφαρμοστούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας TBM της Αττικό Μετρό Α.Ε. κατά την επέκταση της Γραμμής 4 (‘‘Άλσος Βεΐκου – Γουδί).

Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των segments.



Σχήμα 4 1 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υποστήριξης σήραγγας TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.).

Οι μηχανικές παράμετροι της υποστήριξης που προσομοιωθήκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Ποιότητα	C 40/50
Ειδικό Βάρος γ_{conc} (kN/m ³)	25
Λόγος Poisson ν	0.25
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	35
Πάχος t (cm)	35

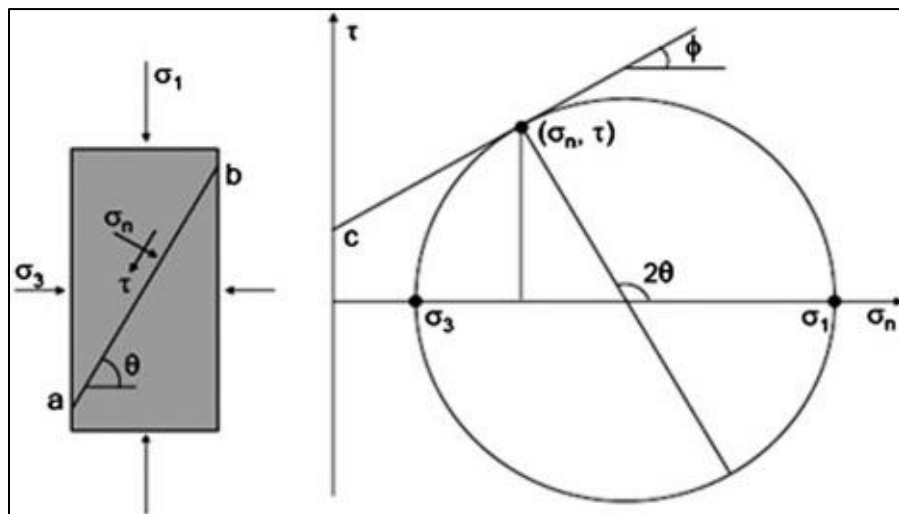
Πίνακας 4 3. Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος.

4.1.3. Βασικές παραδοχές

4.1.3.1. Καταστατικό κριτήριο αστοχίας εδάφους

Το καταστατικό κριτήριο Mohr-Coulomb ελέγχει την ελαστοπλαστική μηχανική συμπεριφορά του γεωυλικού, ενώ η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα ελέγχει (ελαστικές) τασικές διαδρομές εντός της ελαστικής περιοχής.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, πρόκειται για το γραμμικό κριτήριο Coulomb, το οποίο αναφέρεται και ως κριτήριο των Coulomb-Navier, ή Mohr-Coulomb. Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n , στο επίπεδο αυτό (**Σχήμα 4.2**).



Σχήμα 4.2. Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb.

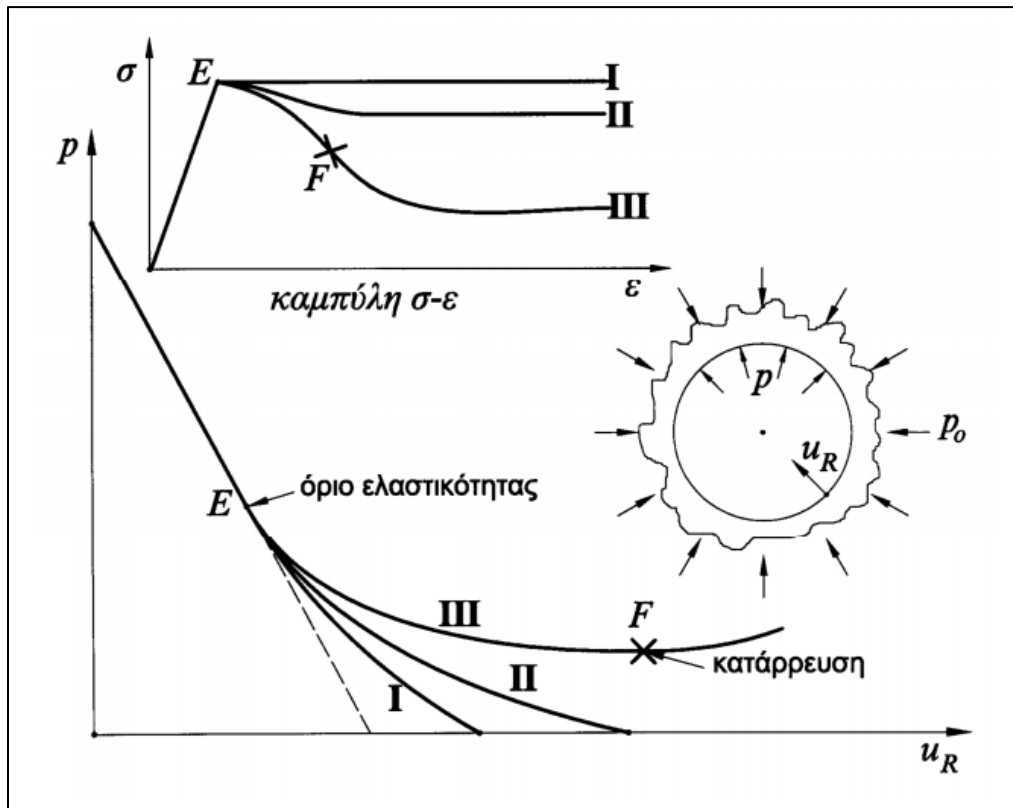
4.1.3.2. Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης

Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώθηκαν ως ισότροπα γραμμικώς ελαστικά, συμπεριλαμβανομένου του ειδικού βάρους της επένδυσης.

4.1.3.3. Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού

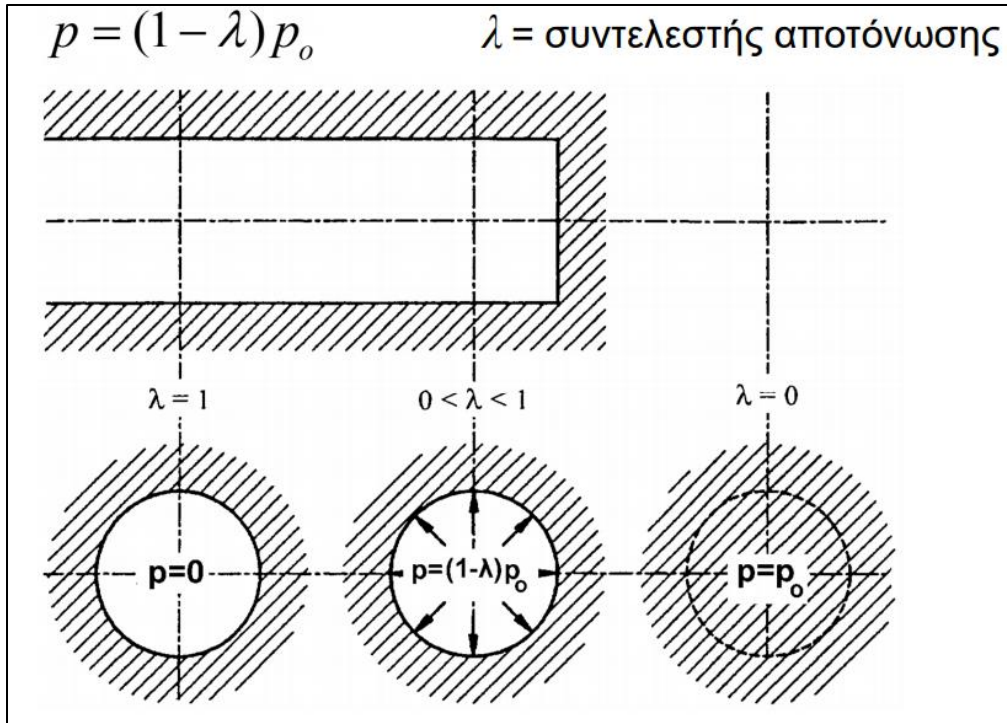
Επειδή πραγματοποιούμε διδιάστατες (2D) αριθμητικές αναλύσεις, πρέπει να λάβουμε υπόψιν τον παράγοντα της τρίτης διάστασης, ως προς την χαλάρωση του γεωυλικού σε σχέση με το μέτωπο της

εκκαφής. Η τρίτη διάσταση θα ληφθεί υπόψιν με την χρήση του βαθμού αποτόνωσης (λ), όπου στο **Σχήμα 4.3**, παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης.

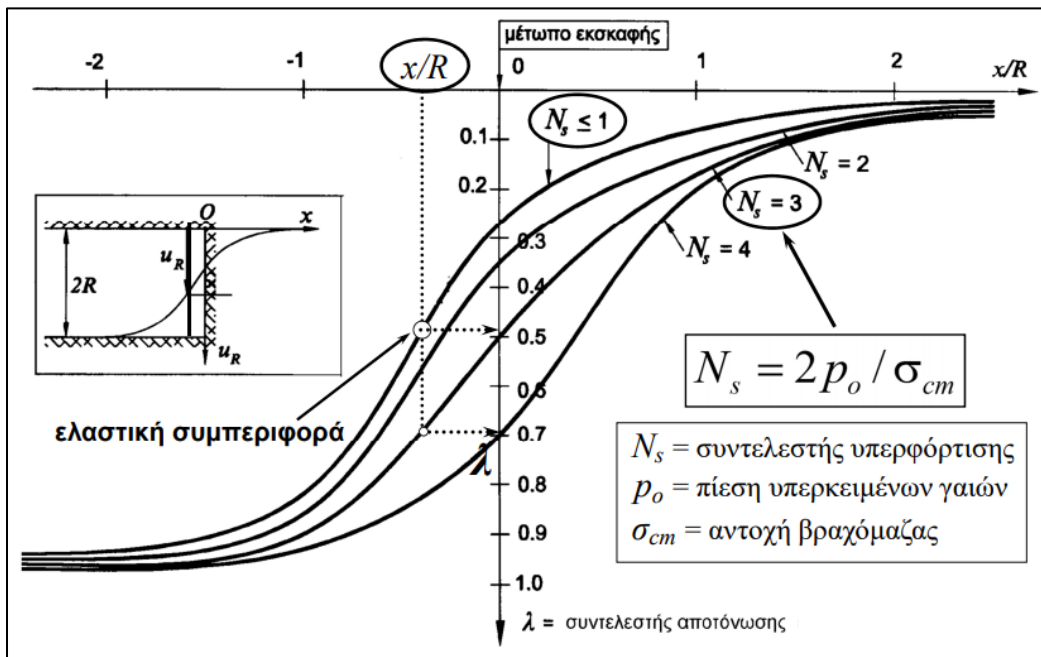


Σχήμα 4.3. Τυπική σύγκλιση – αποτόνωσης (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

Στο **Σχήμα 4.4** και **4.5** παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης (λ), σε σχέση με το μέτωπο εκκαφής.



Σχήμα 4 4. Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

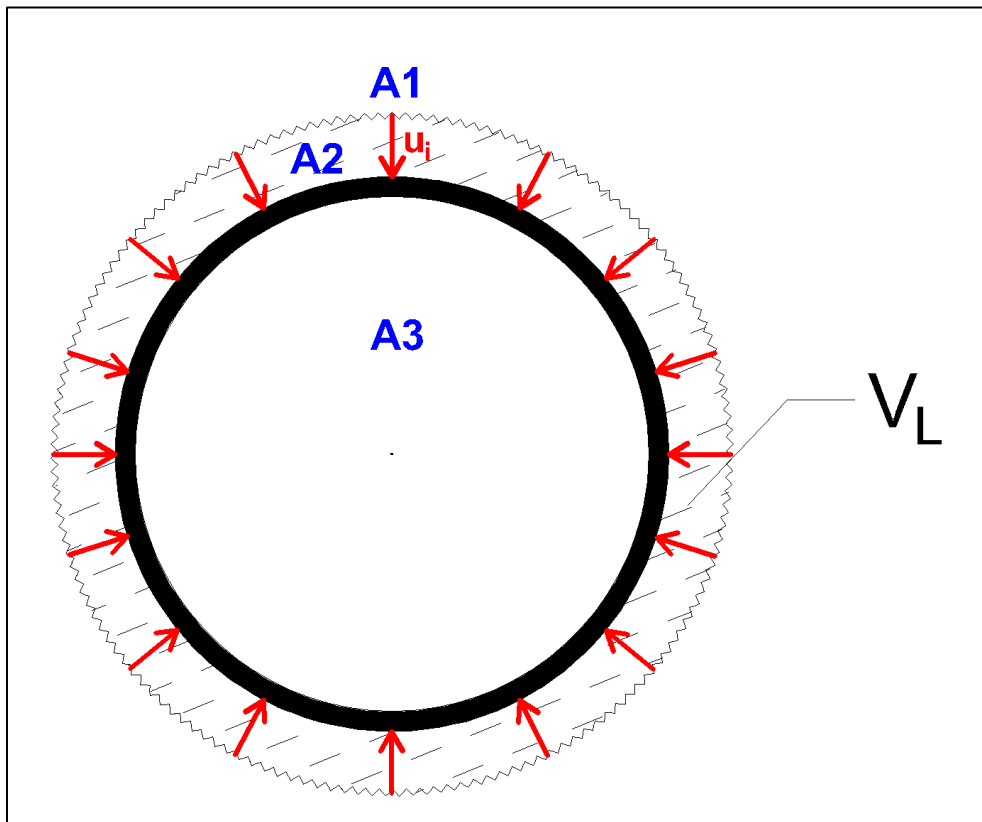


Σχήμα 4 5. Μεταβολή βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Μ. Καθβαδάς).

4.1.3.4. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_L)

Η απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L), υπολογίστηκε ως η μέση εδαφική απώλεια ανά τρέχον μέτρο εκσκαφής. Συγκεκριμένα από τις συγκλίσεις που μετριοούνται μετά τη τοποθέτηση της υποστήριξης, υπολογίζεται το εμβαδόν της νέας διατομής με την υποστήριξη (**A3**) ως το αρχικό εμβαδόν της εκσκαφής (**A1**) μείον τον δακτύλιο (**A2**) του εδαφικού υλικού όπου έχει χαθεί κατά την εκσκαφή. Ο δακτύλιος αυτός προκύπτει από το μέσο όρο των συγκλίσεων.

Στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής.

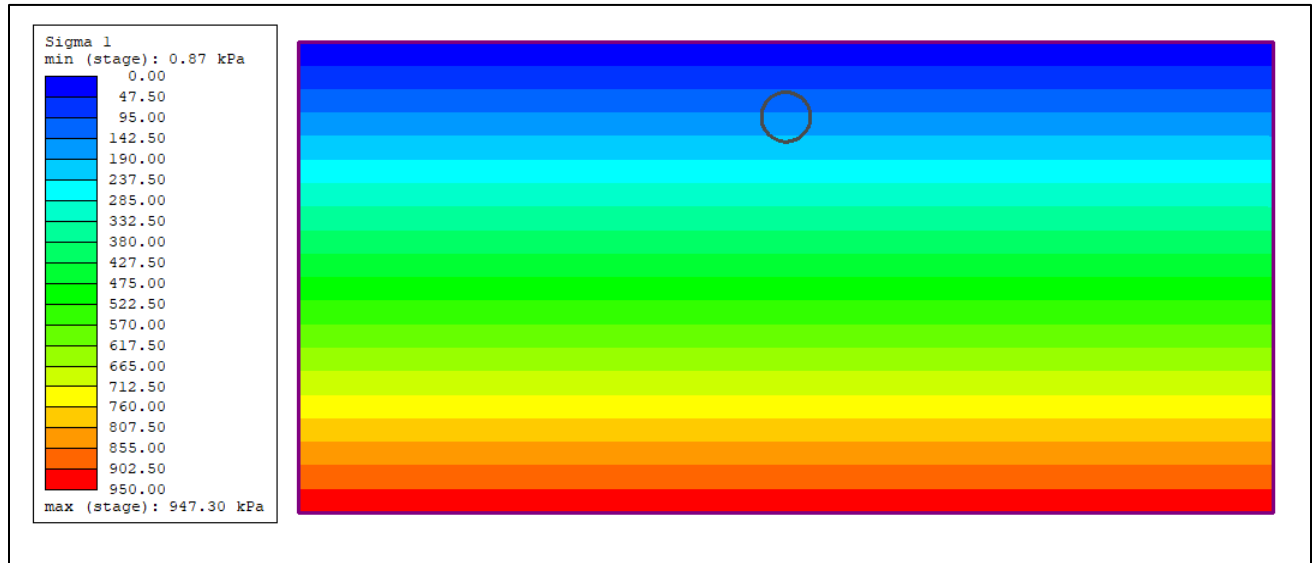


Σχήμα 4.6. Σχηματική απεικόνιση προσδιορισμού απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L).

4.1.4. Στάδια προσομοίωσης

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρία (3) στάδια.

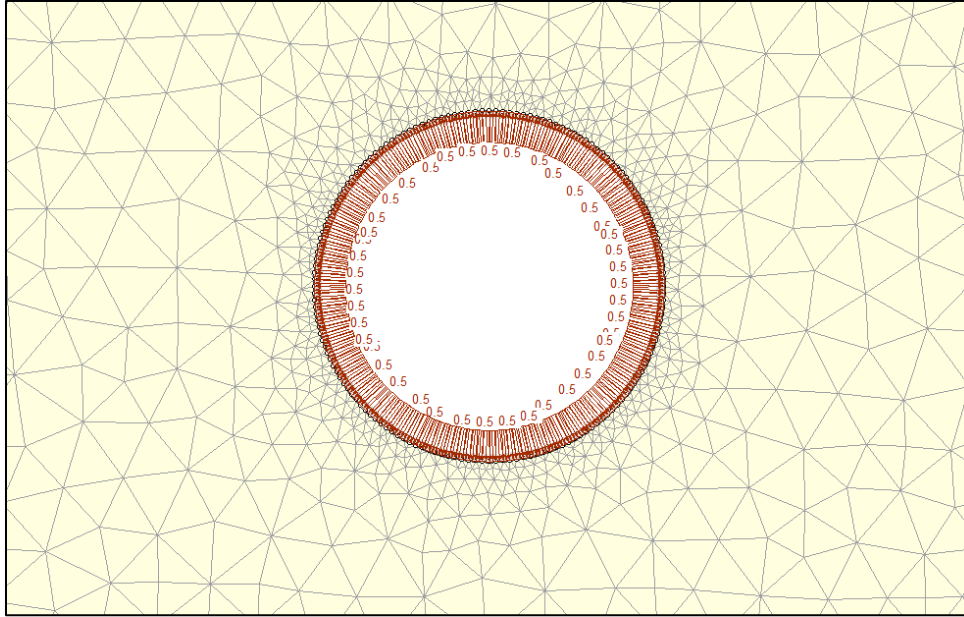
- **1^ο Στάδιο (Γεωστατικές συνθήκες)**



Σχήμα 4 7. Γεωστατικές συνθήκες – αρχικό στάδιο προσομοίωσης.

- **2^ο Στάδιο (Εκσκαφή και αποτόνωση)**

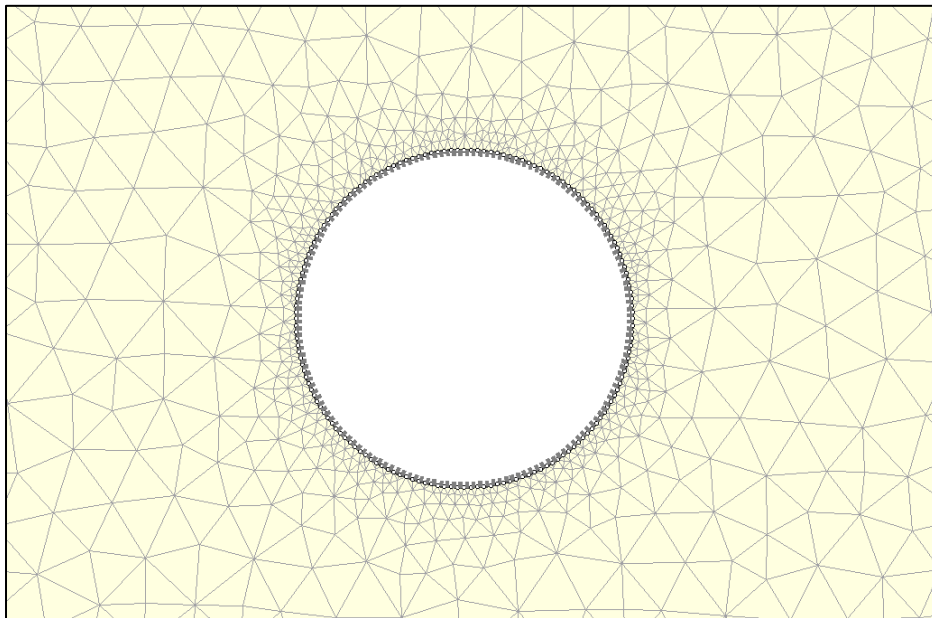
Όπως περιγράφεται στην ενότητα **4.1.3.3** η τρίτη διάταξη στις αναλύσεις μας, υπεισέρχεται μέσω του συντελεστή αποτόνωσης (λ). Η αποτόνωση προσομοιώνεται μέσω εσωτερικής πίεσης p_i , σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: $p_i = (1 - \lambda) \times p_o$. Στην **Εικόνα 4.2** παρουσιάζεται ο τρόπος προσομοίωσης της αποτόνωσης του εδαφικού υλικού, μέσω της εσωτερικής πίεσης p_i .



Εικόνα 4 2. Προσομοίωση αποτόνωσης εδαφικού υλικού.

- **3^ο Στάδιο (Τοποθέτηση υποστήριξης)**

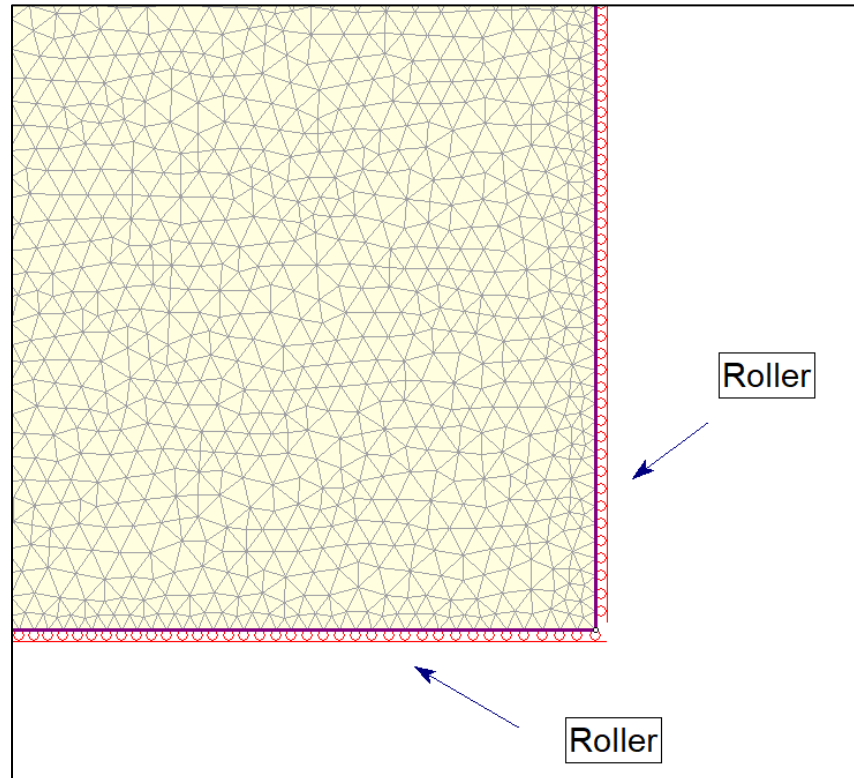
Η υποστήριξη τοποθετείται σε συνθήκες εντατικού πεδίου που έχει διαμορφωθεί μετά την αποτόνωση. Στην *Εικόνα 4.3* παρουσιάζεται το προσομοίωμα με την τοποθέτηση της υποστήριξης.



Εικόνα 4 3. Προσομοίωμα με την τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης.

4.1.5. Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα όρια του μοντέλου είναι κυλίσεις, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.4**. Χρησιμοποιήθηκαν κυλίσεις, διότι επιθυμούμε να επιτρέπεται η κίνηση της εδαφικής μάζας μόνο παράλληλα στον άξονα των κυλίσεων και όχι κάθετα σε αυτόν.



Εικόνα 4 4. Συνοριακές συνθήκες στα όρια του μοντέλου.

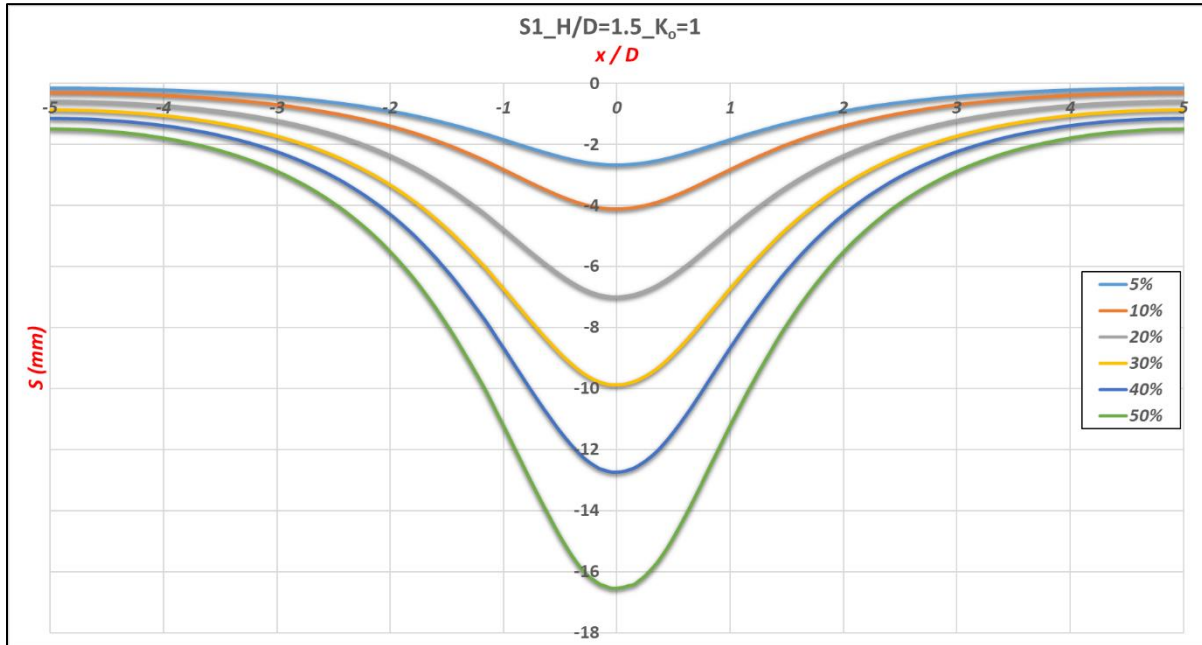
4.2. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, ανάλογα με:

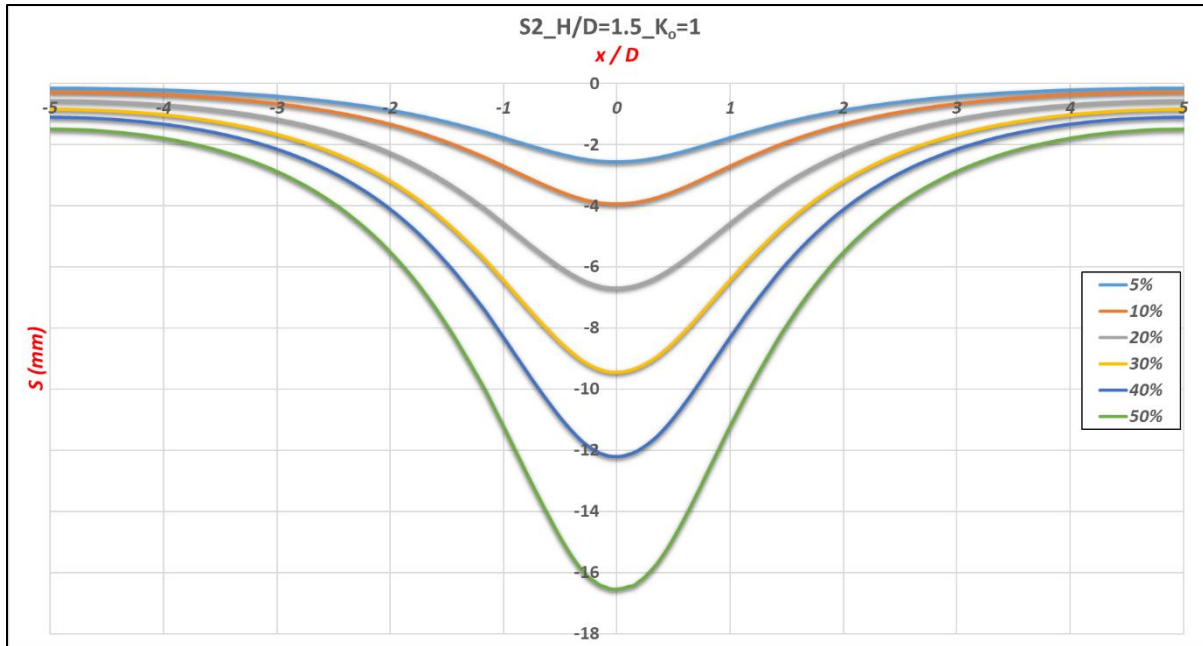
- **Υπερκείμενα προς διάμετρο εκσκαφής (H/D).**
- **Τύπο εδάφους ($S1, S2, S3, S4$).**
- **Βαθμό αποτόνωσης (λ).**
- **Συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o).**
- **Απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L).**

4.2.1. Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (s_{max}) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ)

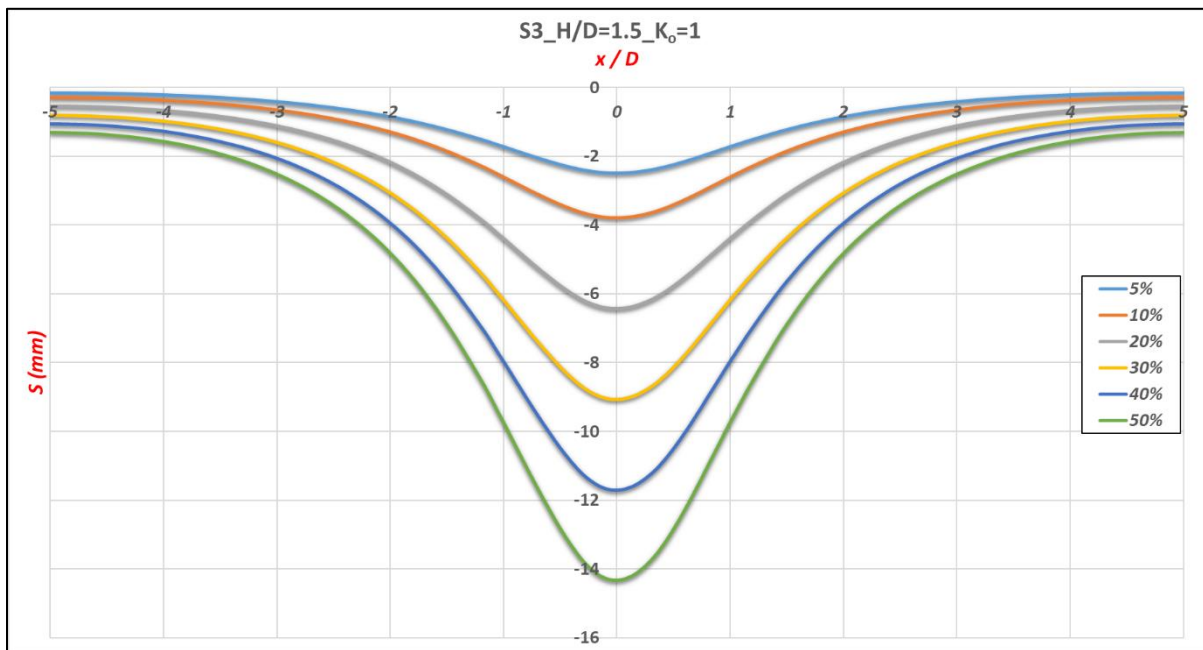
- Για λόγο ($H/D= 1.5$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0= 1$)



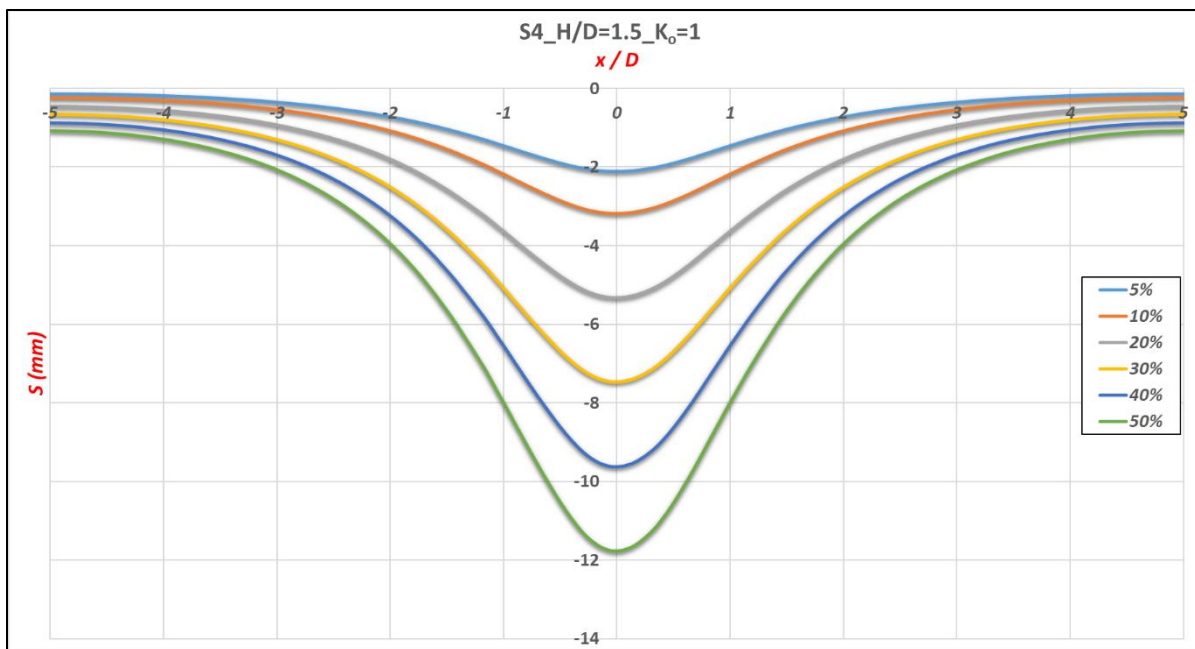
Διάγραμμα 4 1. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=1.5$ και $K_0=1$.



Διάγραμμα 4 2. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=1.5$ και $K_o=1$.

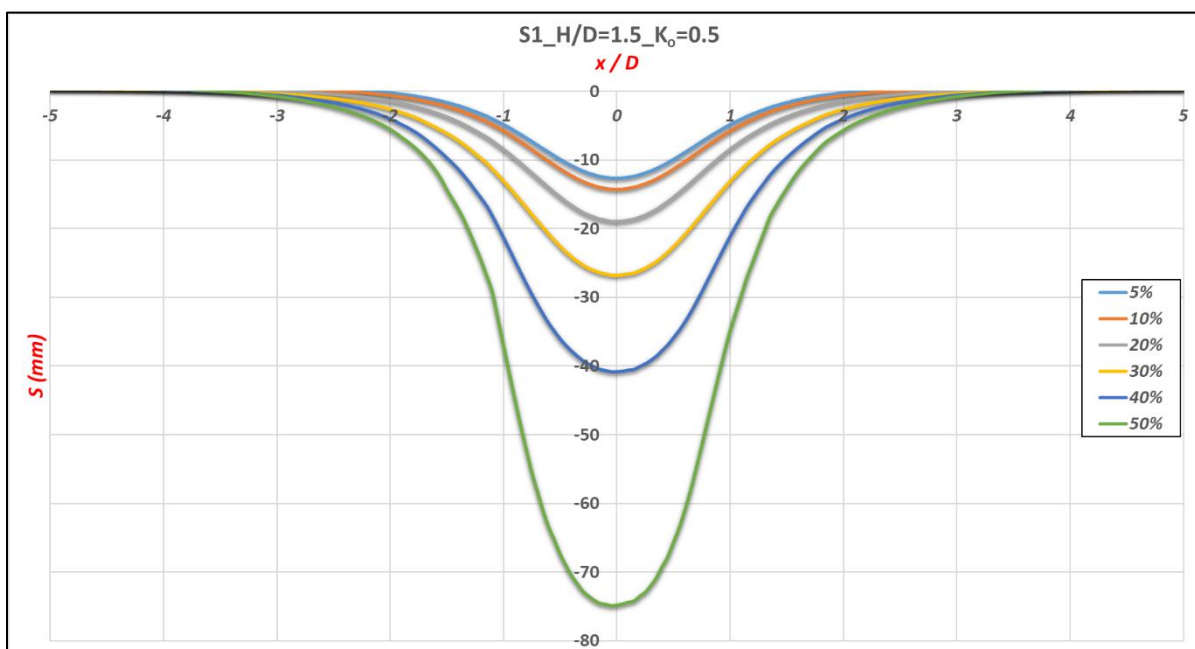


Διάγραμμα 4 3. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=1.5$ και $K_o=1$.

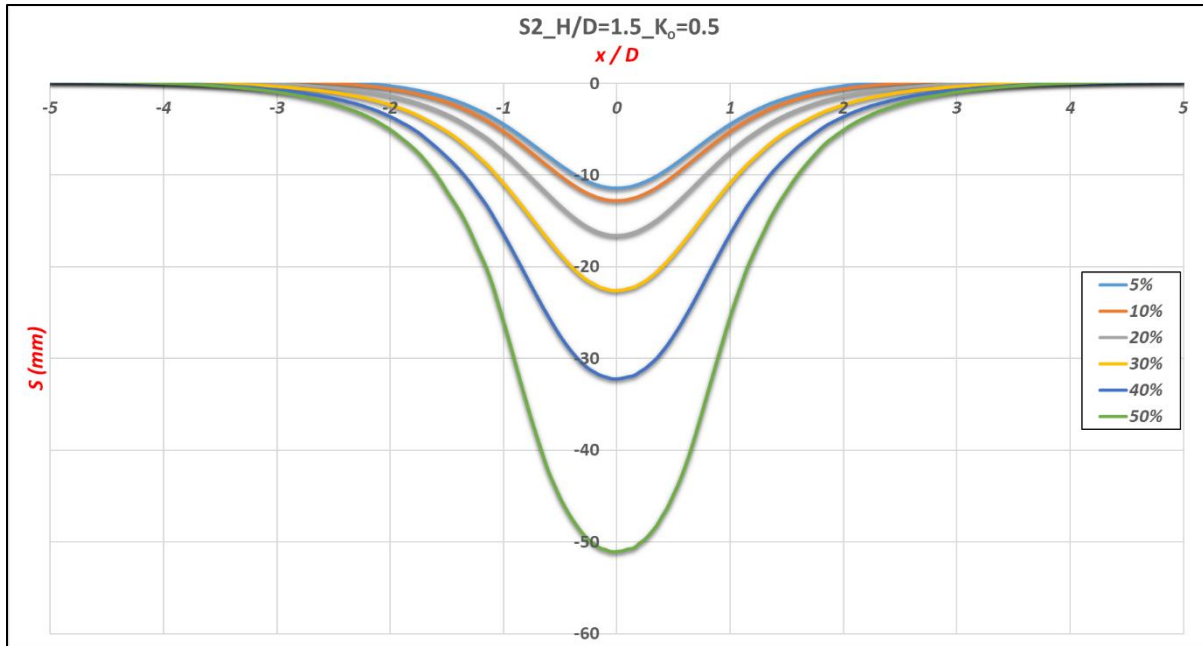


Διάγραμμα 4 4. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=1.5$ και $K_o=1$.

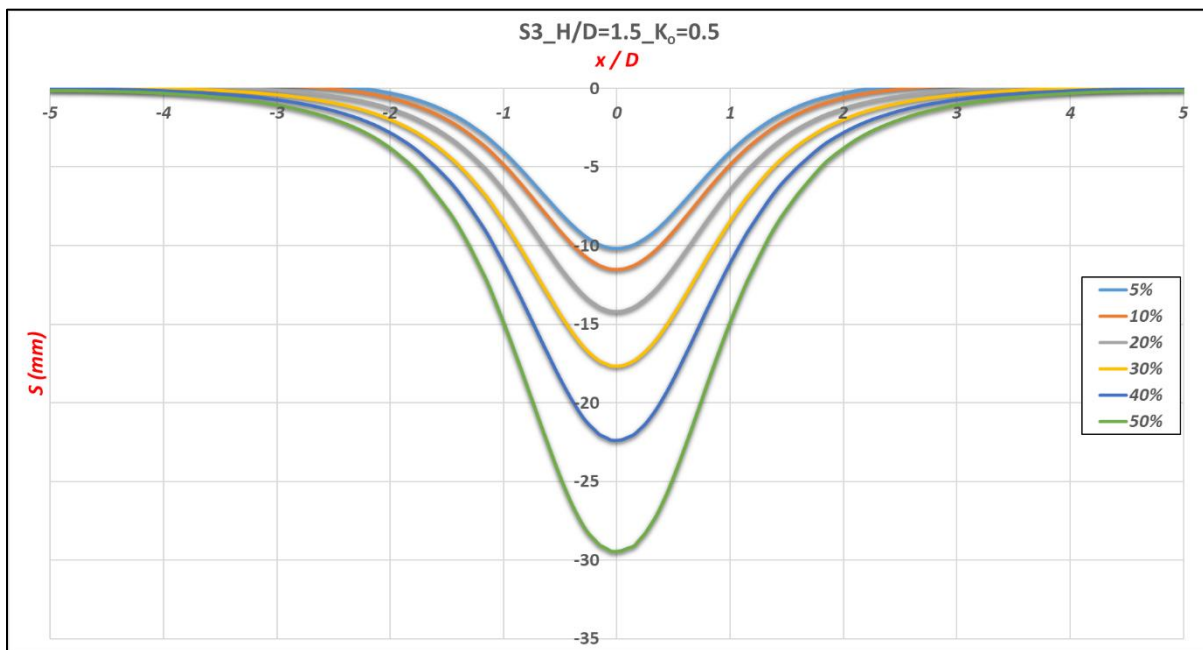
- Για λόγο ($H/D= 1.5$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o= 0.5$)



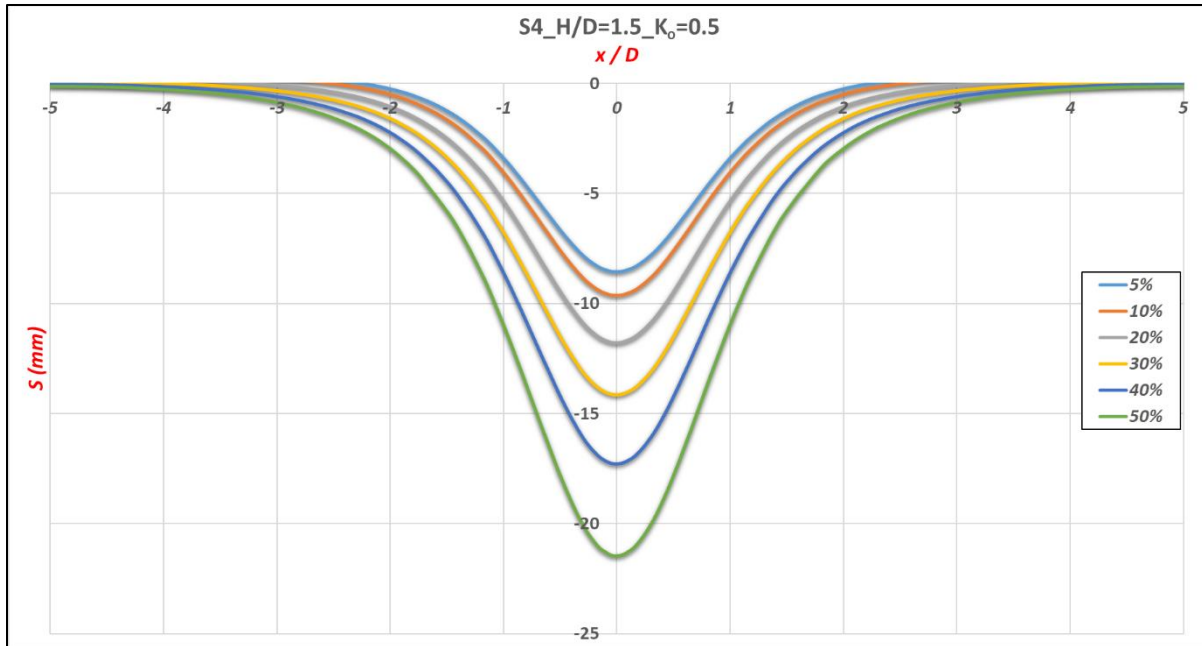
Διάγραμμα 4 5. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=1.5$ και $K_o=0.5$.



Διάγραμμα 4 6. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$.

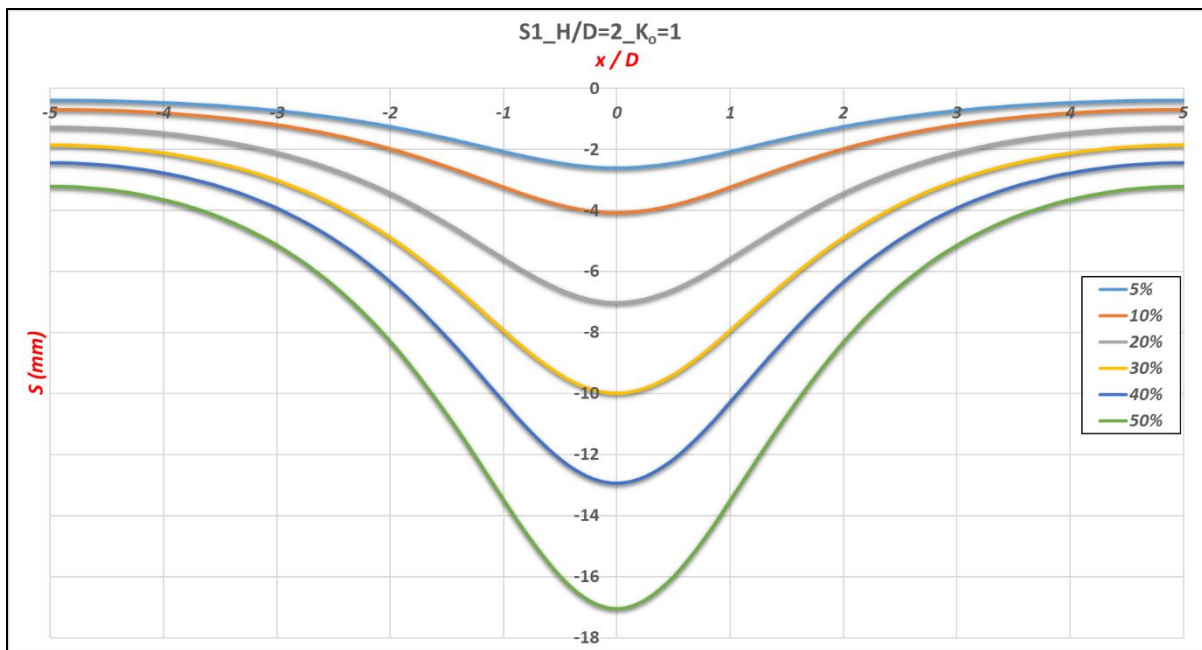


Διάγραμμα 4 7. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$.

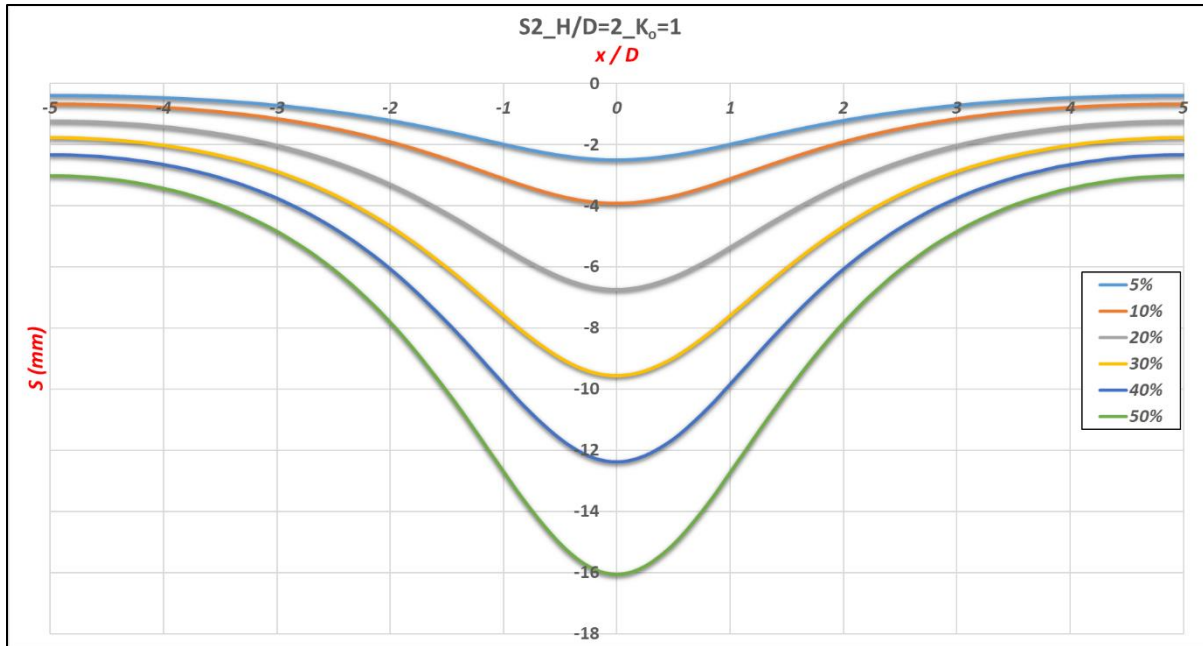


Διάγραμμα 4 8. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=1.5$ και $K_o=0.5$.

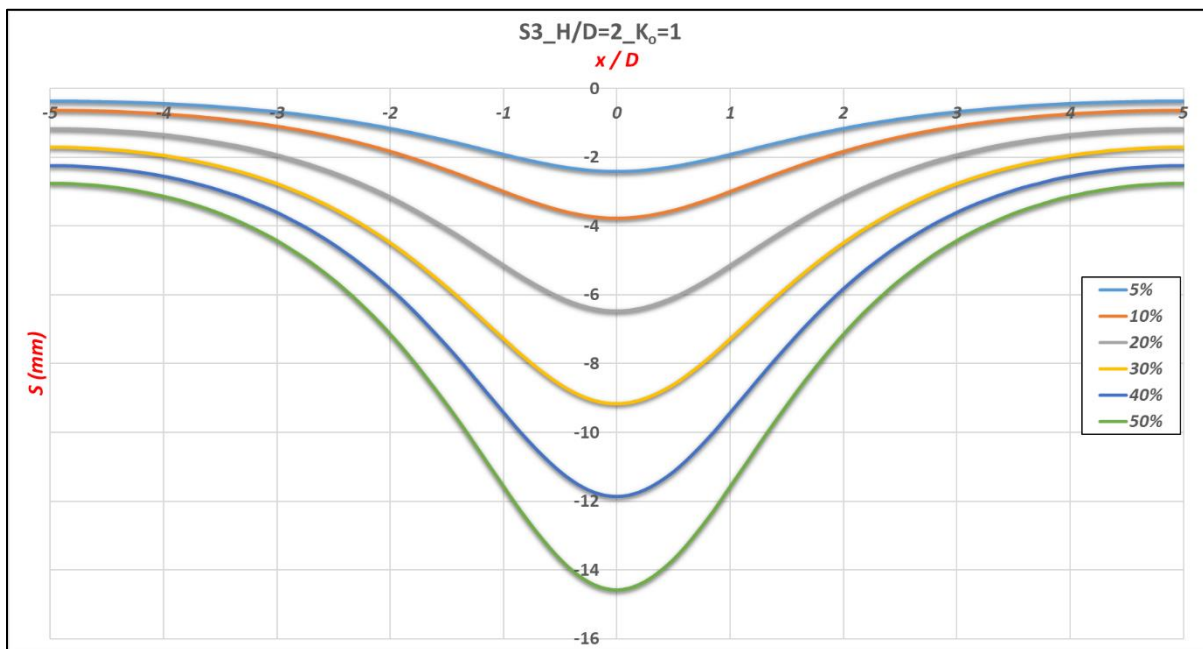
- Για λόγο ($H/D= 2$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o= 1$)



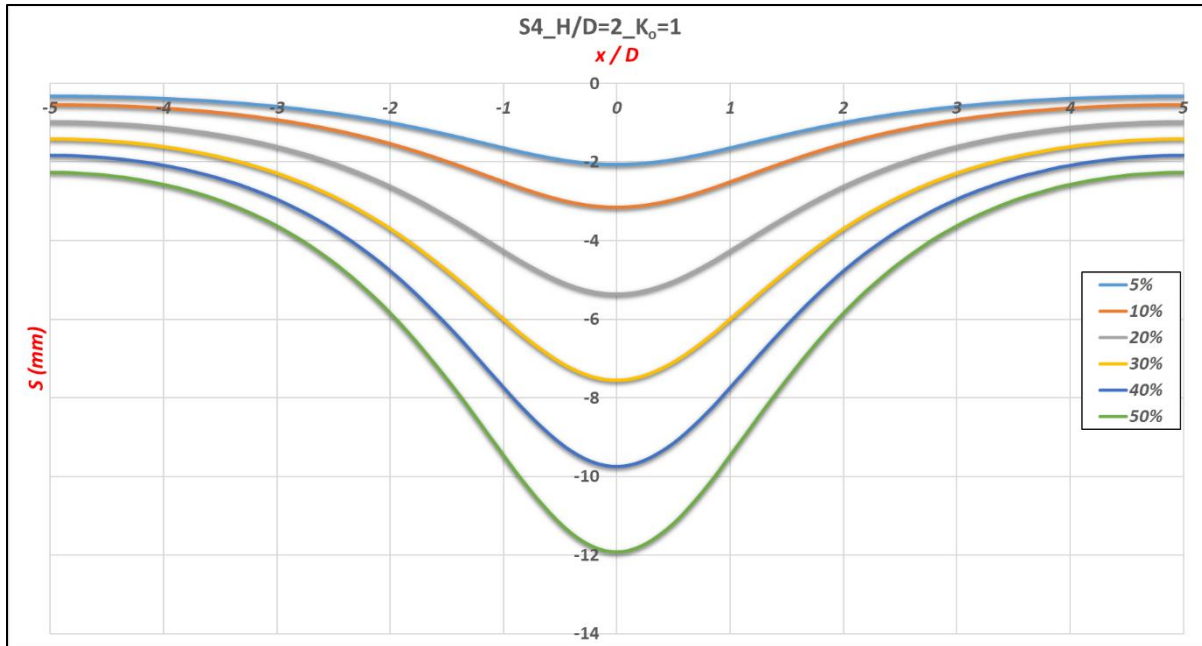
Διάγραμμα 4 9. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=2$ και $K_o=1$.



Διάγραμμα 4 10. Μεταβολή επιφανειακών κατιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=2$ και $K_o=1$.

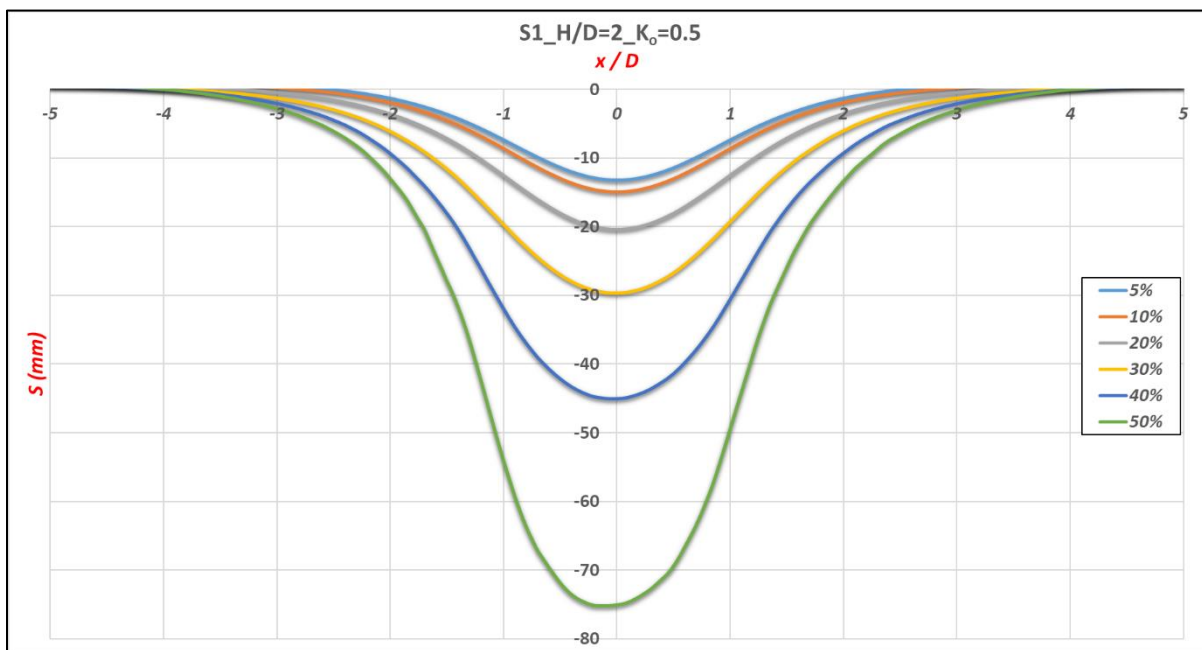


Διάγραμμα 4 11. Μεταβολή επιφανειακών κατιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=2$ και $K_o=1$.

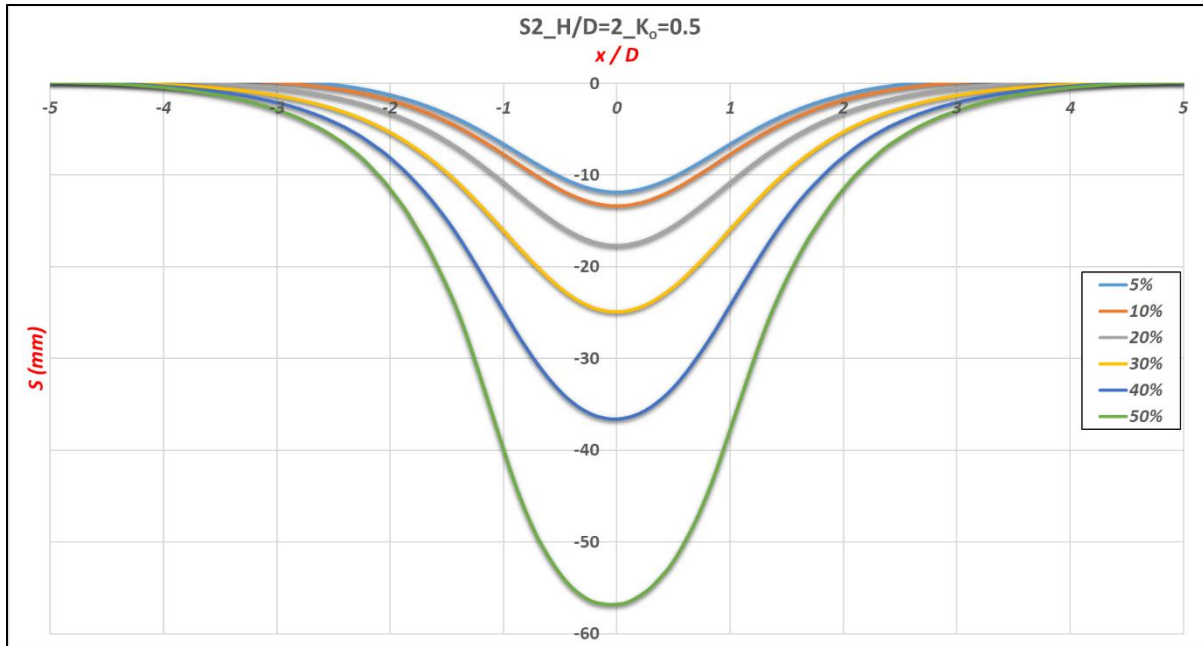


Διάγραμμα 4.12. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=2$ και $K_o=1$.

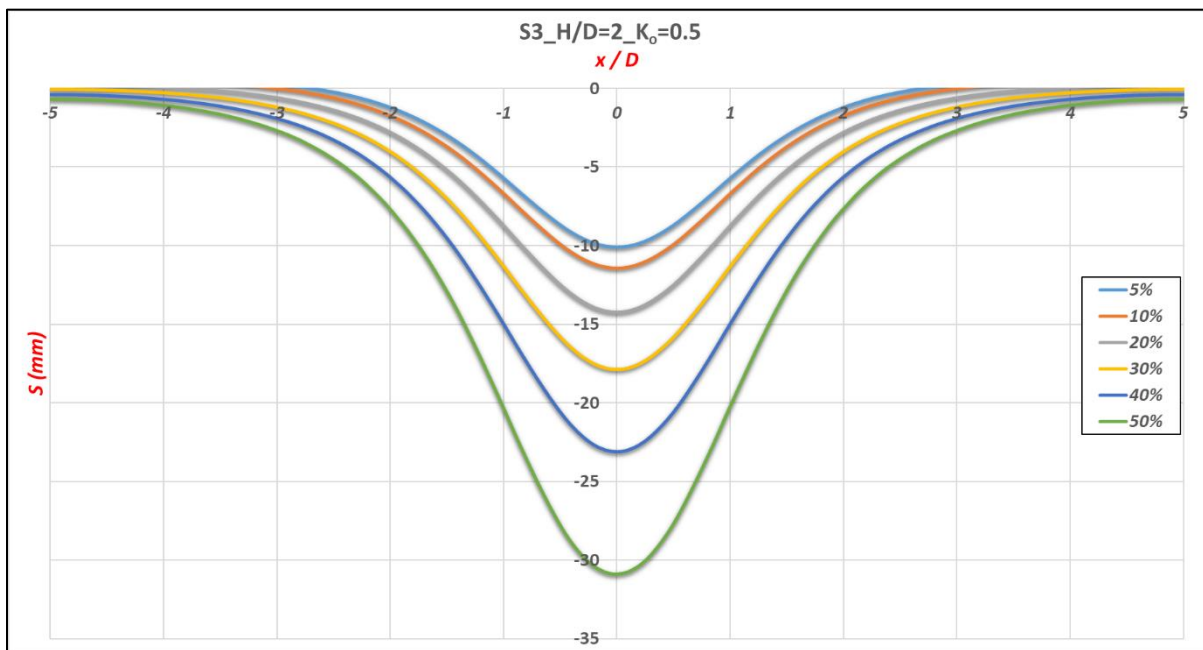
- Για λόγο ($H/D=2$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o=0.5$)



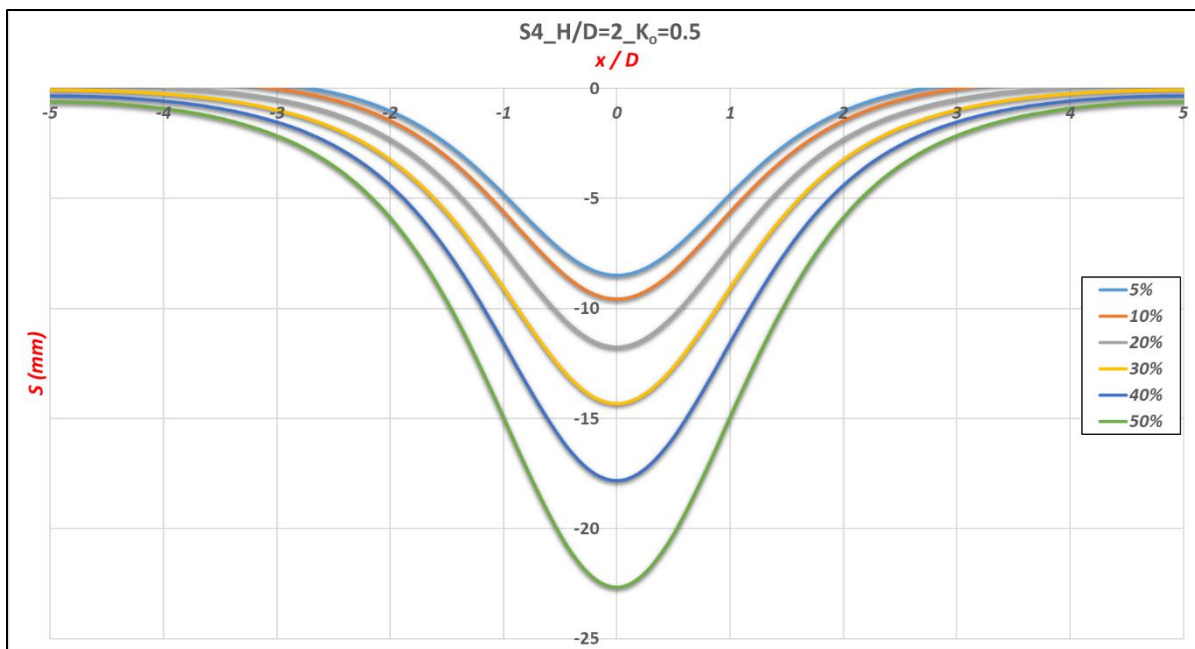
Διάγραμμα 4.13. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=2$ και $K_o=0.5$.



Διάγραμμα 4 14. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.

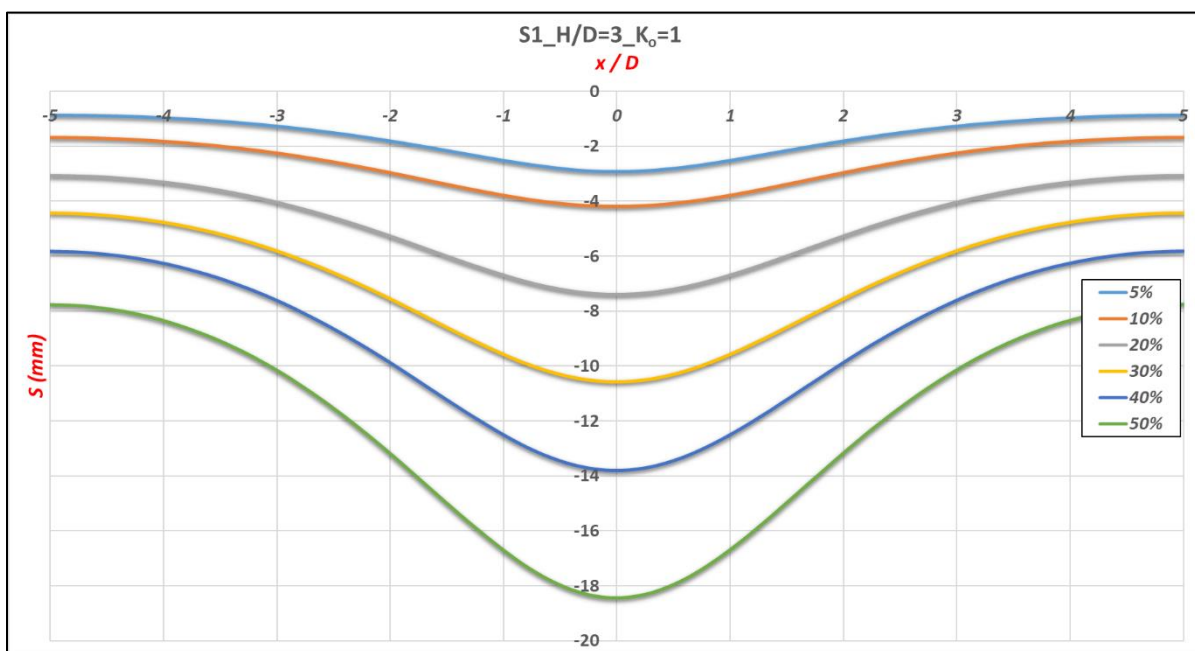


Διάγραμμα 4 15. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=2$ και $K_0=0.5$.

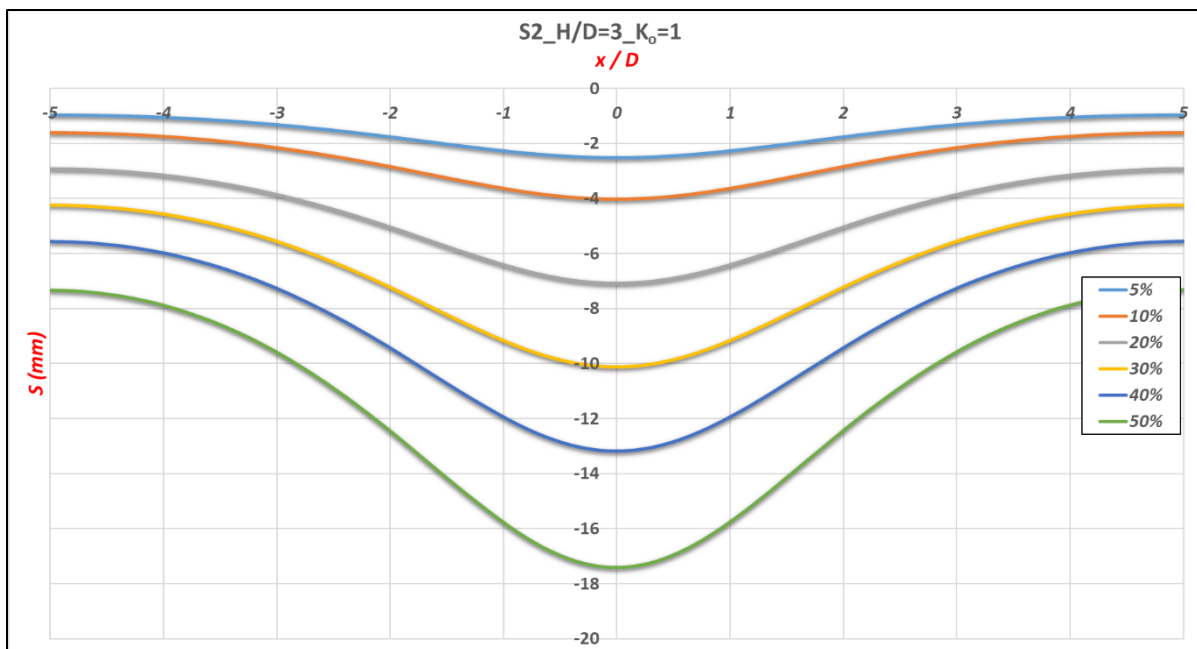


Διάγραμμα 4 16. Μεταβολή επιφανειακών καδιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=2$ και $K_o=0.5$.

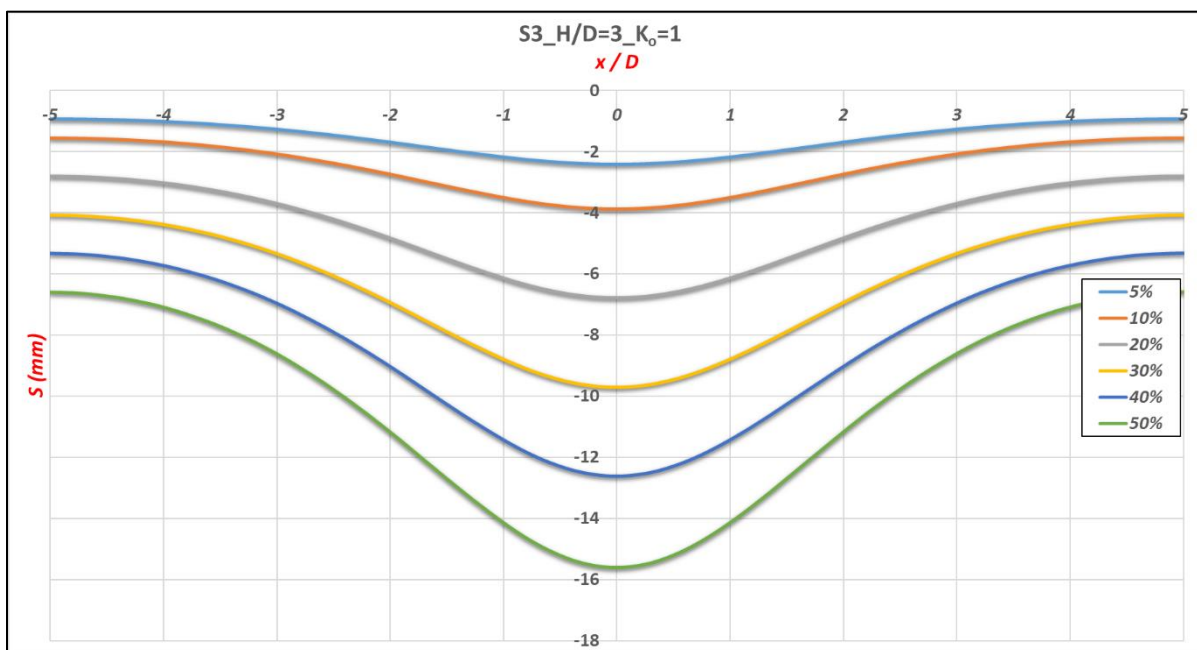
- Για λόγο ($H/D= 3$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o= 1$)



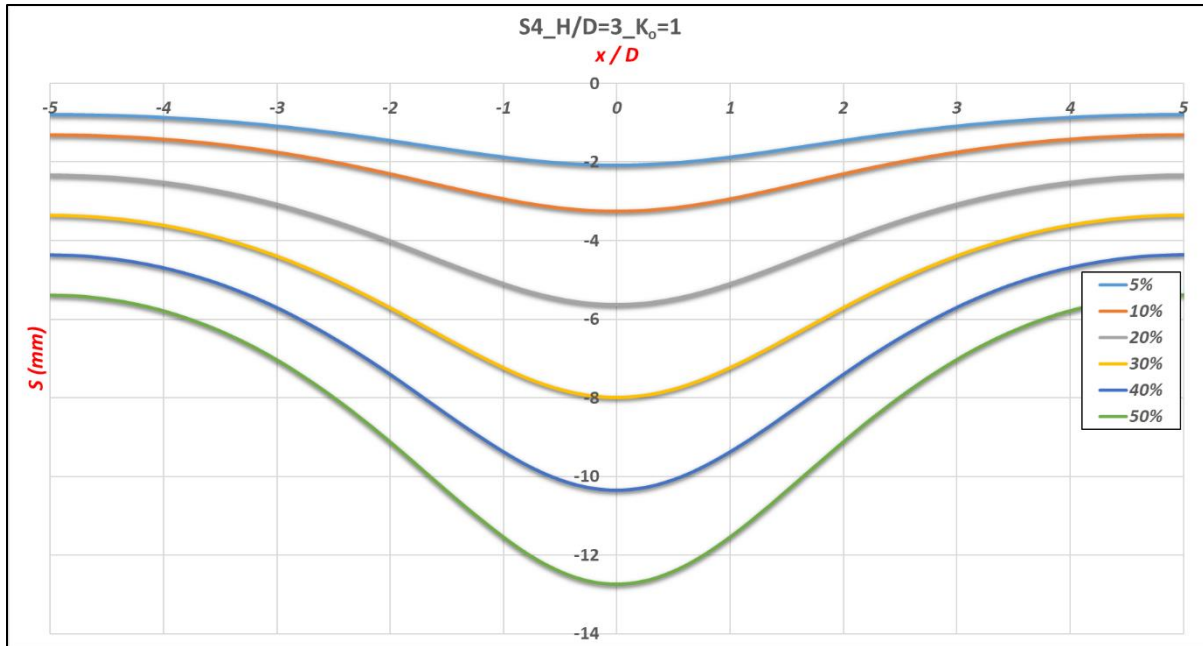
Διάγραμμα 4 17. Μεταβολή επιφανειακών καδιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=3$ και $K_o=1$.



Διάγραμμα 4.18. Μεταβολή επιφανειακών κατιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=3$ και $K_0=1$.

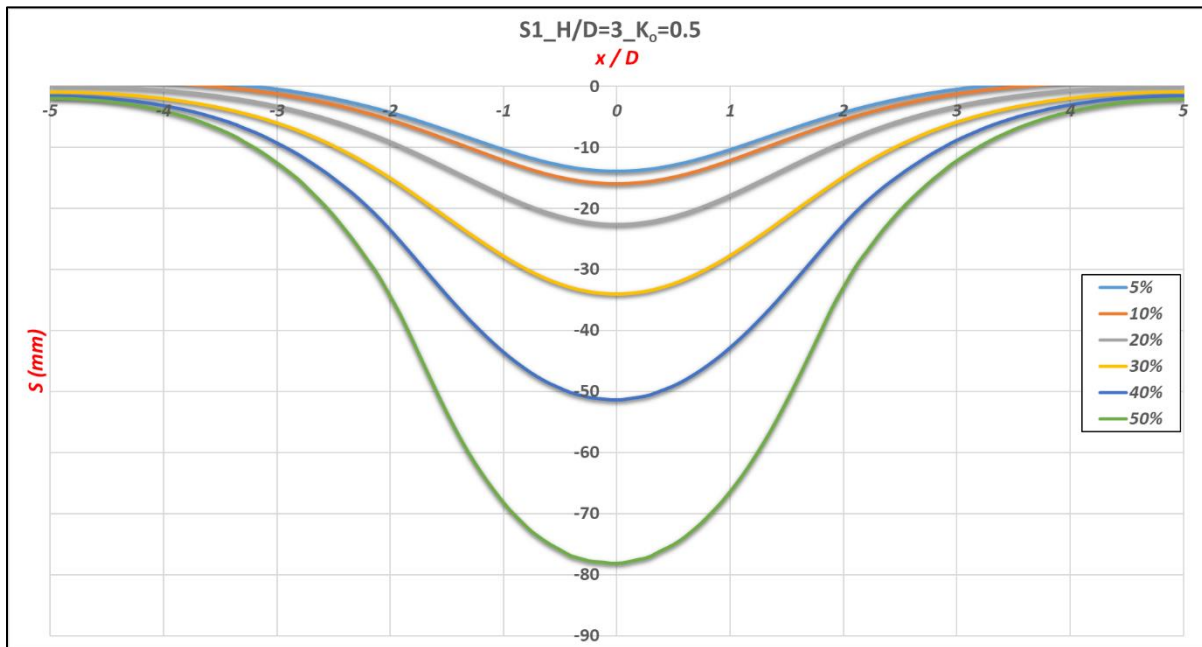


Διάγραμμα 4.19. Μεταβολή επιφανειακών κατιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=3$ και $K_0=1$.

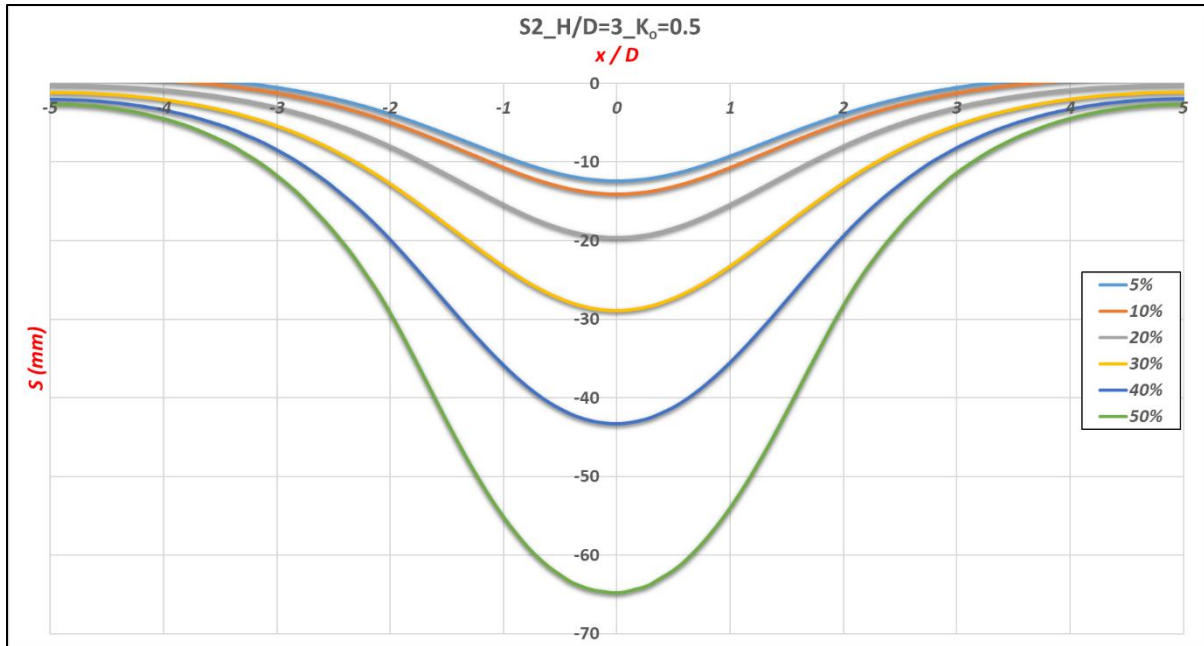


Διάγραμμα 4 20. Μεταβολή επιφανειακών καδιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=3$ και $K_o=1$.

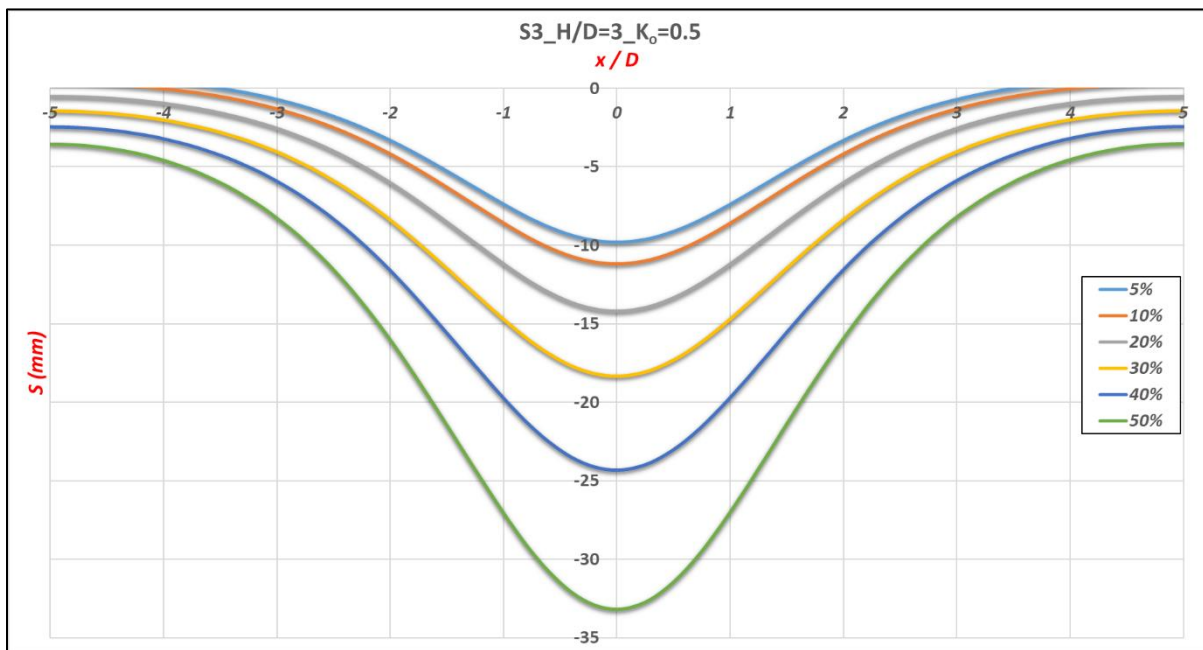
- Για λόγο ($H/D= 3$) και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o= 0.5$)



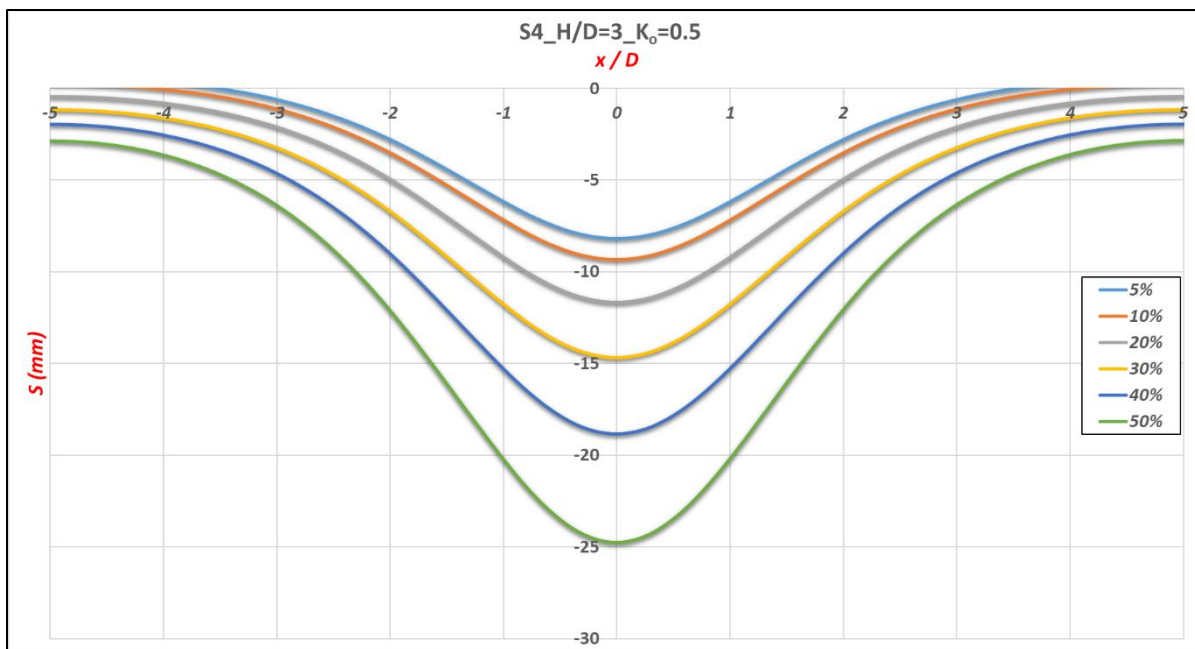
Διάγραμμα 4 21. Μεταβολή επιφανειακών καδιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S1 με $H/D=3$ και $K_o=0.5$.



Διάγραμμα 4.22. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S2 με $H/D=3$ και $K_o=0.5$.



Διάγραμμα 4.23. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S3 με $H/D=3$ και $K_o=0.5$.



Διάγραμμα 4 24. Μεταβολή επιφανειακών καθιζήσεων με τον βαθμό αποτόνωσης για έδαφος S4 με $H/D=3$ και $K_o=0.5$.

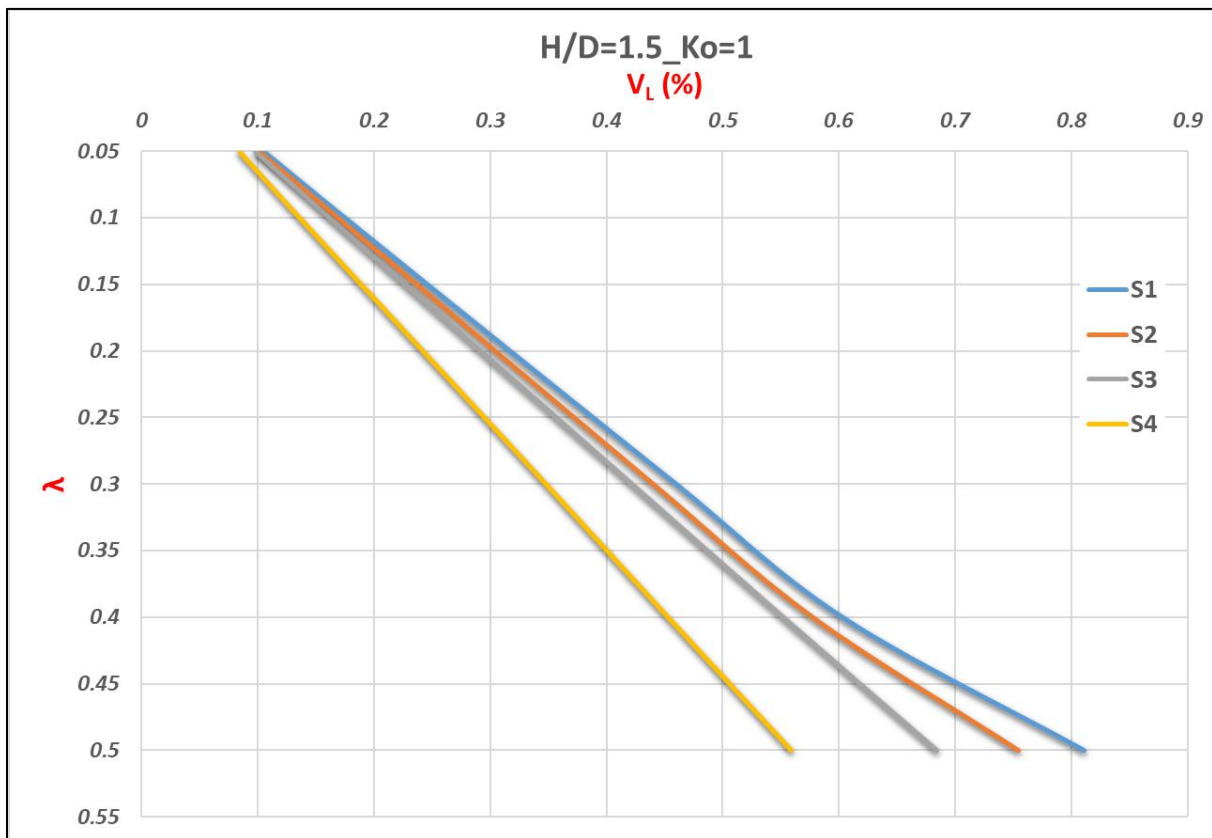
Από τα παραπάνω Διαγράμματα (4.1 – 4.24), μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μεταβολή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) από 1 σε 0.5, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιφανειακών καθιζήσεων σε ποσοστό περί τα 80%. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός, όπου στην περίπτωση όπου έχουμε $K_o=1$ συμβαίνει το φαινόμενο της «πλευρικής περίσφιξης», γεγονός όπου δεν επιτρέπει στο έδαφος να παραμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου έχουμε $K_o=0.5$ όπου εκεί η περίσφιξη είναι μικρότερη και επιτρέπει την εκδήλωση μεγαλύτερων παραμορφώσεων.
- Στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων $K_o=0.5$, η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων έχει το σημείο καμπής πολύ κοντά στον άξονα της σήραγγας, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων είναι $K_o=1$, όπου εκεί το σημείο καμπής είναι πολύ πιο μακριά από τον άξονα της σήραγγας.
- Σε όλα τα εδάφη που προσομοιώθηκαν και σε όλου τους συνδυασμούς υπερκείμενων γαιών, παρατηρούμε ότι με την αύξηση της αποτόνωσης, υπάρχει περίπου σταθερός ρυθμός αύξησης των επιφανειακών καθιζήσεων, όπου είναι αναμενόμενο διότι γίνεται μεγαλύτερη χαλάρωση του γεωυλικού.

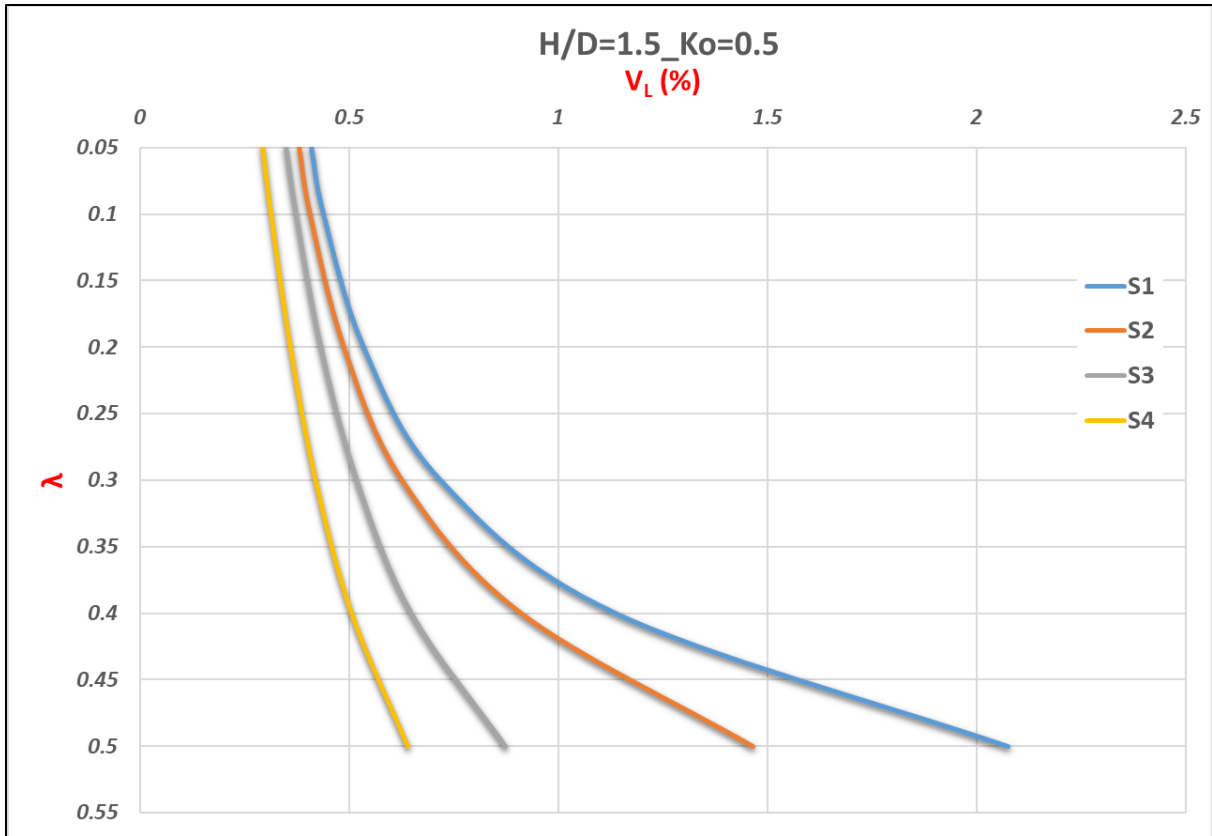
- Παρατηρήθηκε ότι για βαθμό αποτόνωσης του γεωυλικού μεγαλύτερο από 30%, παρατηρείται απότομη αύξηση στην εκδήλωση των επιφανειών καθιζήσεων.
- Τέλος παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται το ύψος των υπερκείμενων γαιών, υπάρχει μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων και αυτό είναι αναμενόμενο, διότι απομακρυνόμαστε από την ζώνη επιρροής της εκσκαφής, όπου στα μικρά υπερκείμενα βρισκόμαστε εντός αυτής.

4.2.2. Απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_L) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ)

- Για λόγο ($H/D=1.5$)

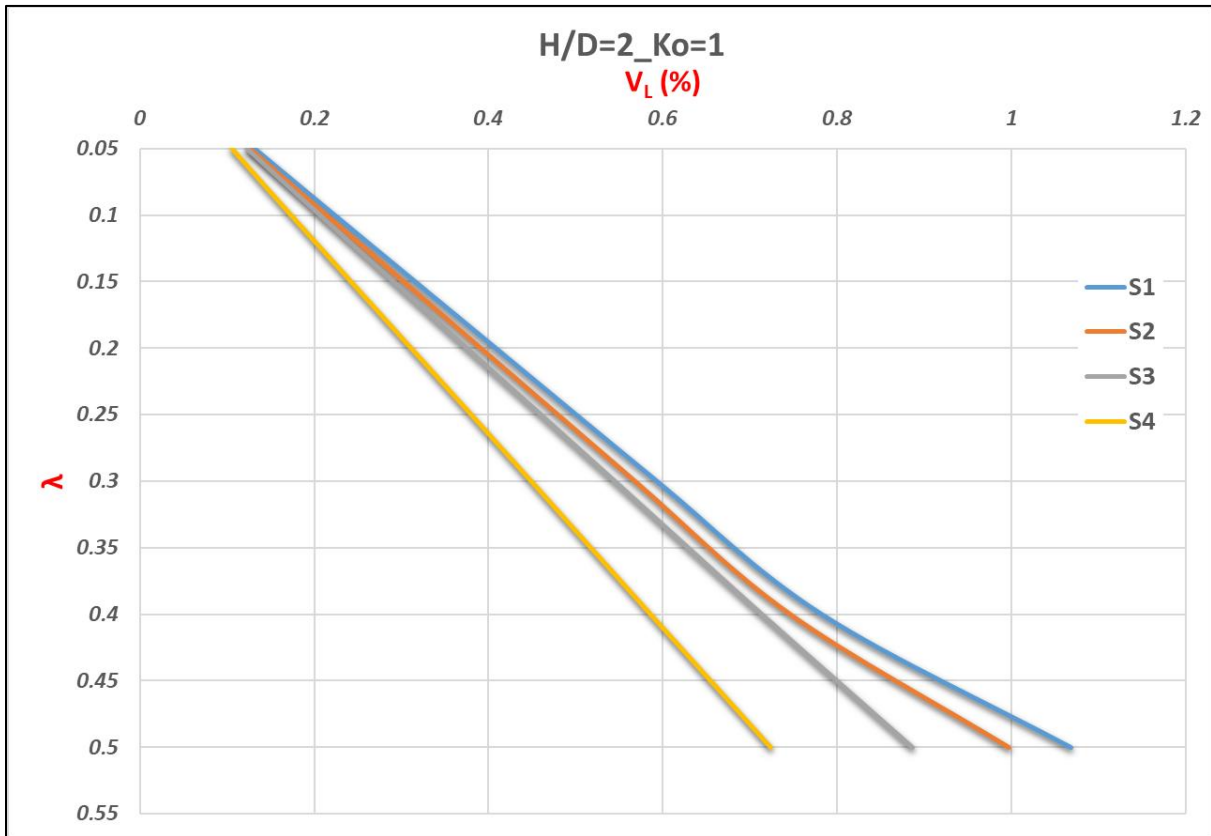


Διάγραμμα 4 25. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=1$.

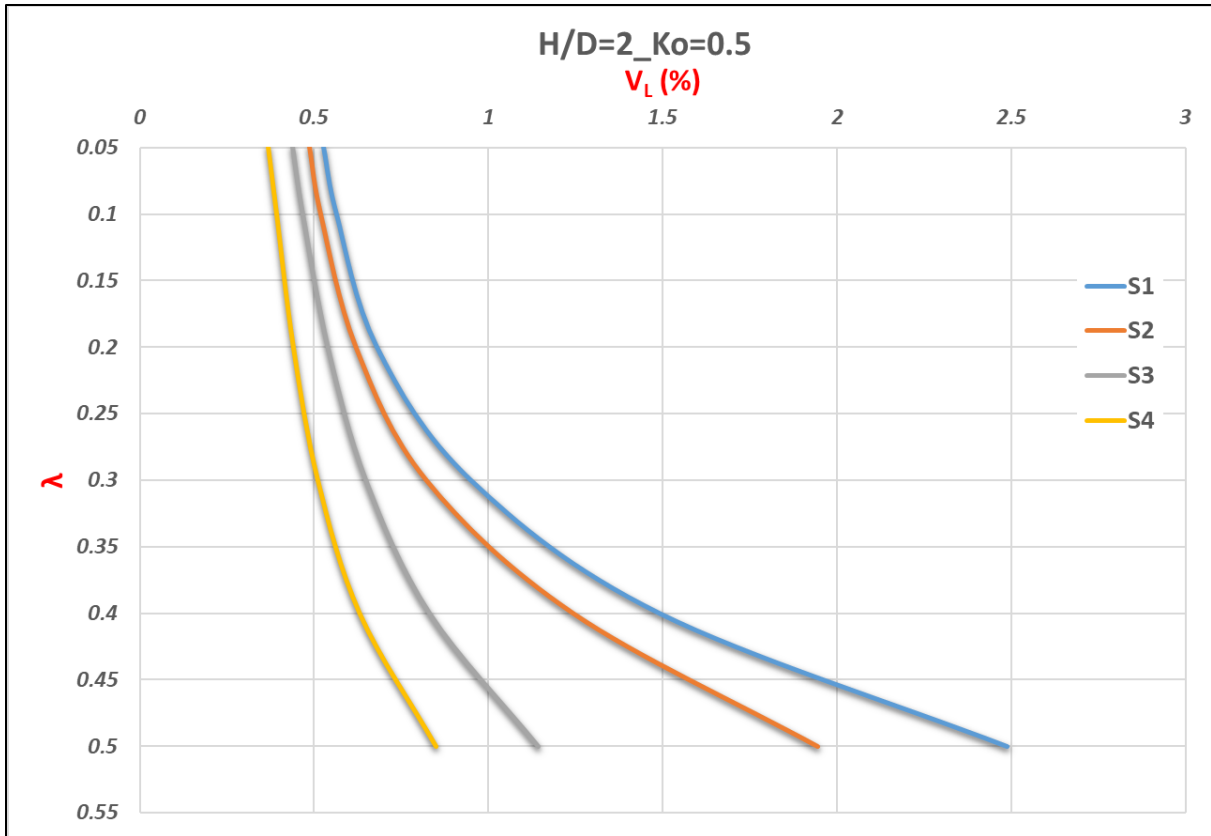


Διάγραμμα 4 26. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_0=0.5$.

- Για λόγο (H/D= 2)

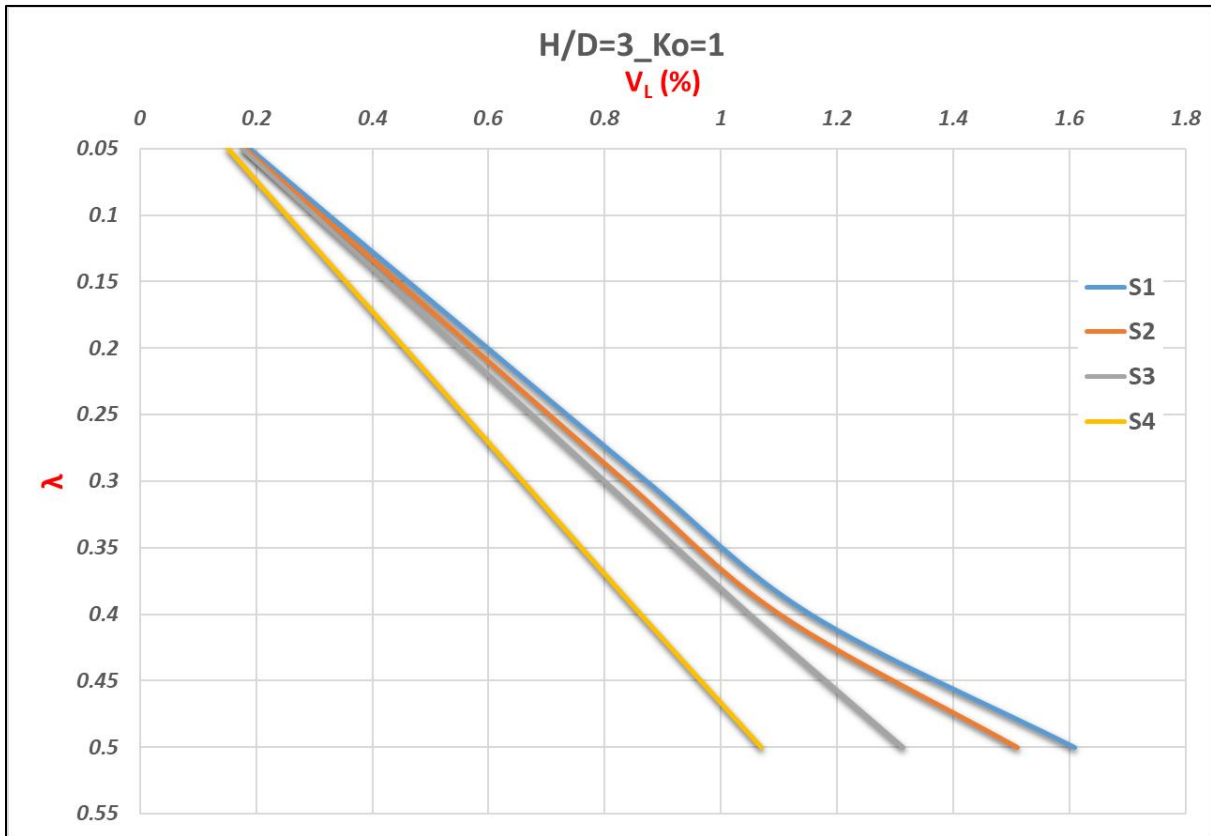


Διάγραμμα 4 27. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο H/D=2 και $K_0=1$.

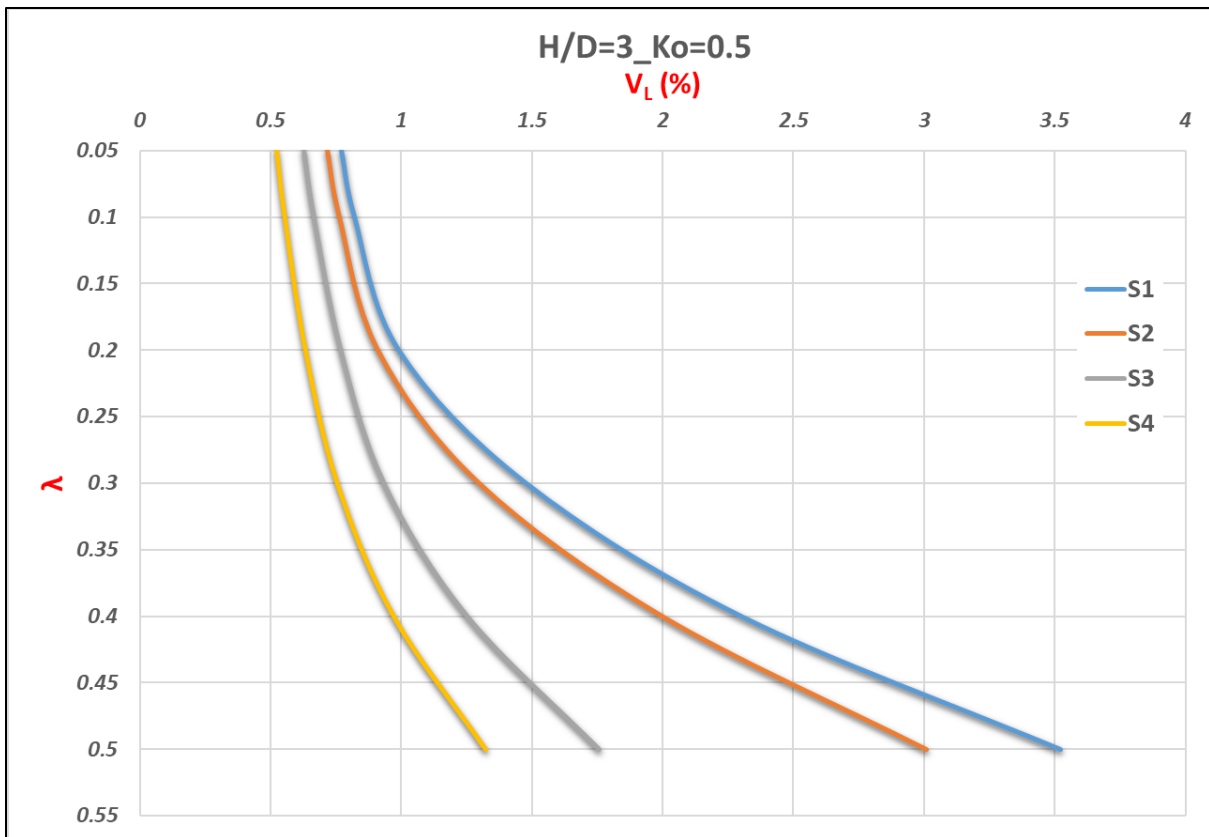


Διάγραμμα 4 28. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο $H/D=2$ και $K_0=0.5$.

- Για λόγο (H/D= 3)



Διάγραμμα 4 29. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο H/D=3 και $K_o=1$.



Διάγραμμα 4.30. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου ground loss (V_L) για λόγο $H/D=3$ και $K_0=0.5$.

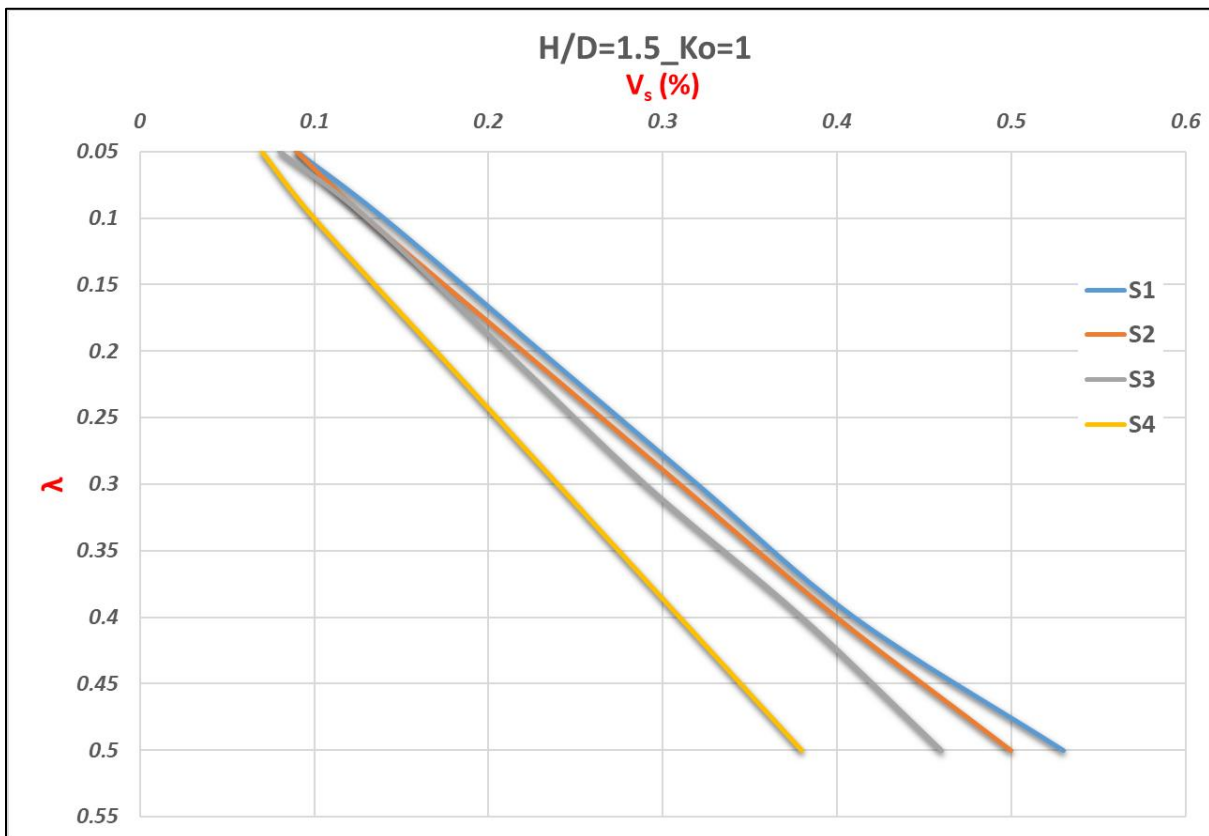
Από τα παραπάνω Διαγράμματα (4.25 – 4.30), μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα εδάφη S3,S4 για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0= 1$, συμπεριφέρονται ελαστικά, διότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου, σε αντίθεση με τα εδάφη S1,S2 όπου για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0= 1$, συμπεριφέρονται ελαστικά έως αποτόνωση 30% και έπειτα ελαστοπλαστικά για μεγαλύτερο βαθμό αποτόνωσης, διότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, διότι τα εδάφη S3,S4 έχουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από τα εδάφη S1,S2.
- Επίσης παρατηρείτε ότι για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0= 0.5$, για όλα τα εδάφη, η συμπεριφορά τους είναι ελαστοπλαστική, διότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου.

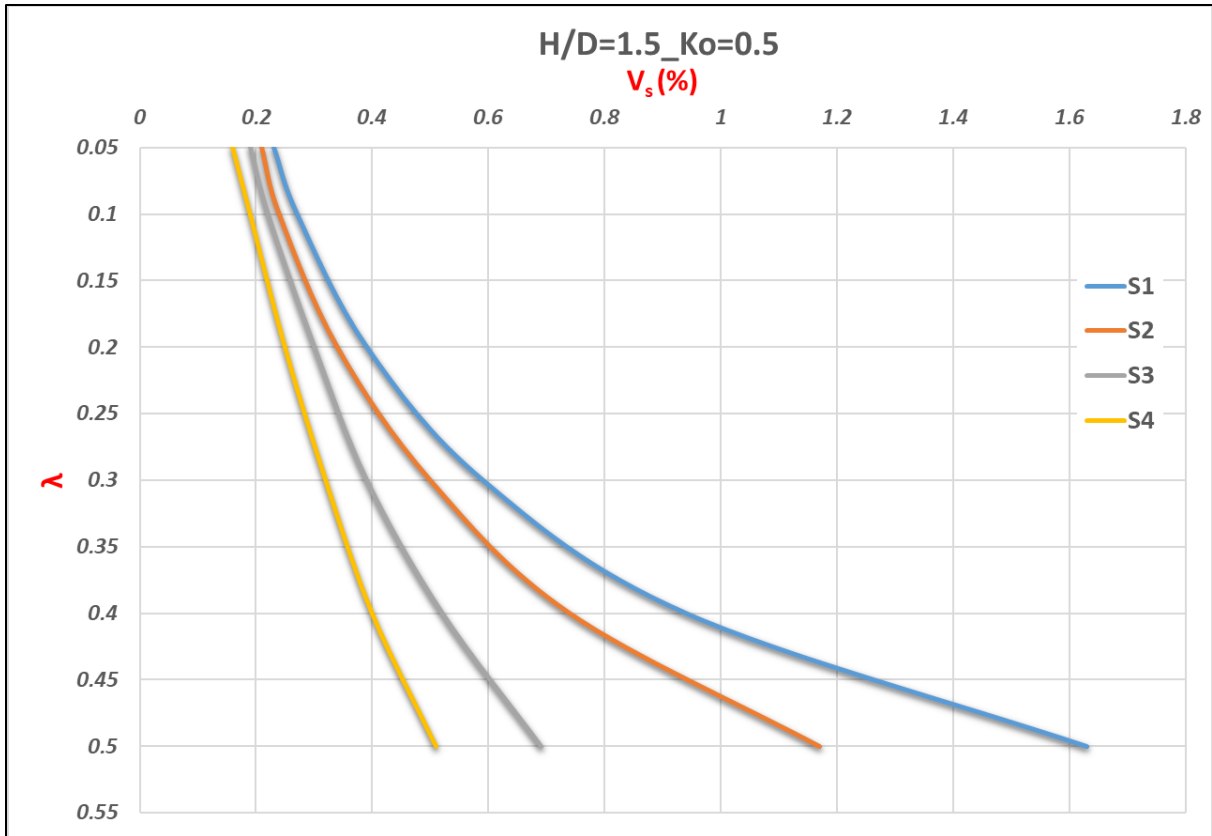
- Παρατηρείτε ότι η μεταβολή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) από 1 σε 0.5, προκαλεί αύξηση της απώλειας όγκου (V_L) για όλου τους λόγους H/D και για όλα τα εδάφη, διότι χάνεται το φαινόμενο της «πλευρικής περίσφιξης», όπως έχει αναλυθεί στις περιπτώσεις με την μέγιστη καθίζηση (s_{max}).

4.2.3. Απώλεια επιφανειακού εδαφικού όγκου – volume loss (V_s) σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης (λ)

- Για λόγο ($H/D=1.5$)

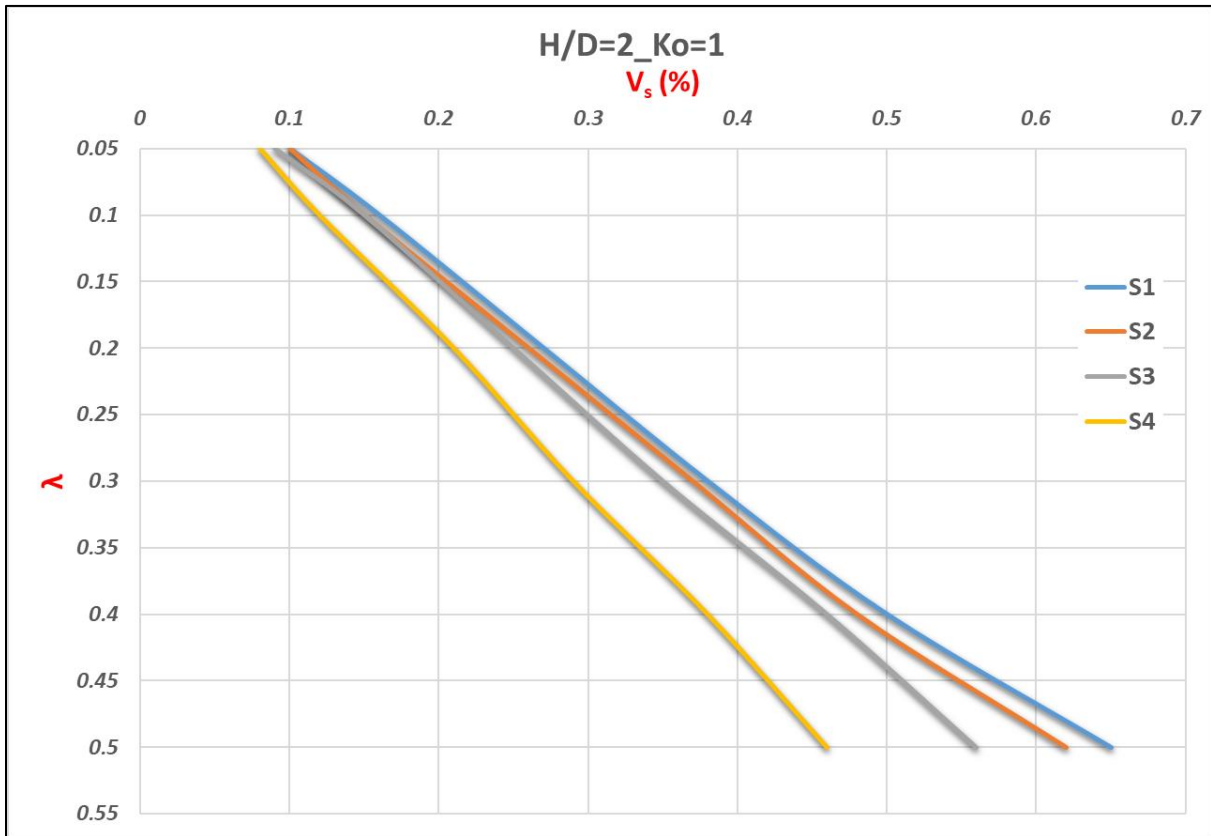


Διάγραμμα 4 31. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_o=1$.

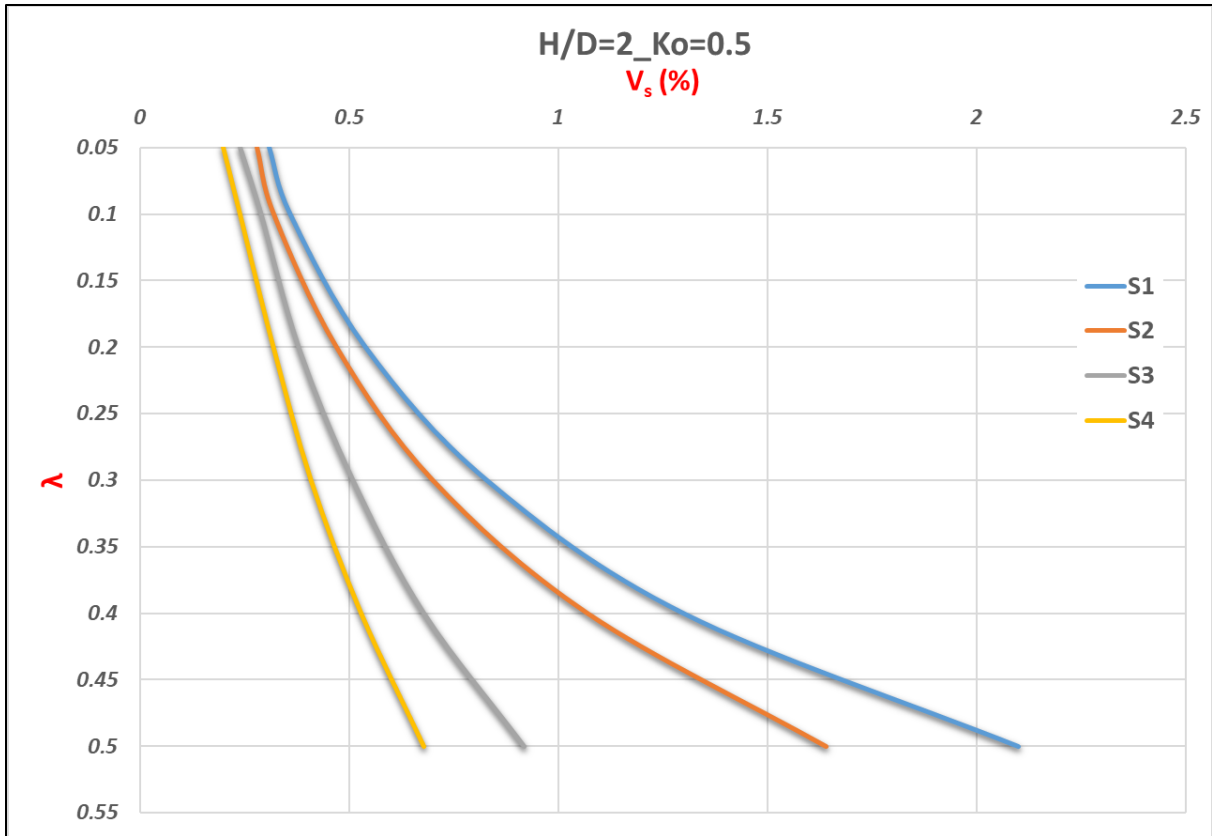


Διάγραμμα 4 32. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο $H/D=1.5$ και $K_o=0.5$.

- Για λόγο (H/D= 2)

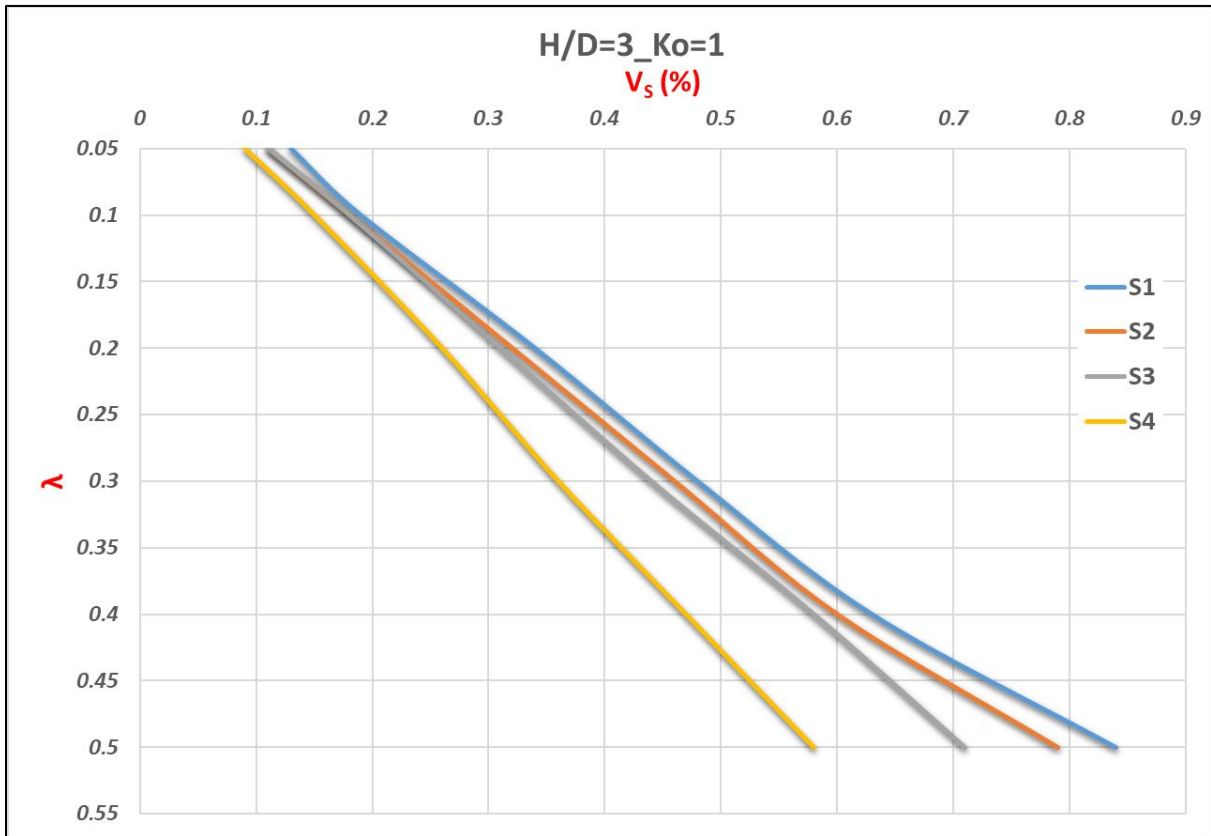


Διάγραμμα 4 33. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο H/D=2 και $K_o=1$.

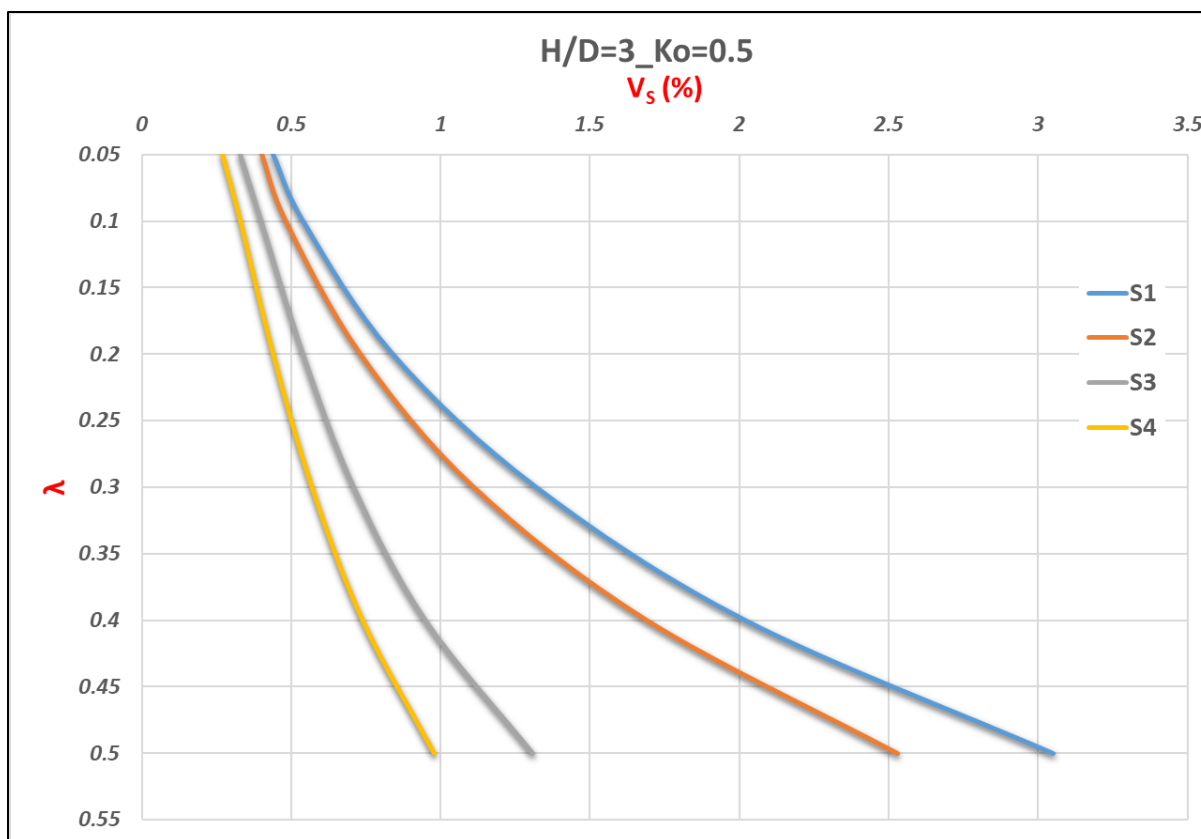


Διάγραμμα 4 34. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο $H/D=2$ και $K_o=0.5$.

- Για λόγο (H/D= 3)



Διάγραμμα 4 35. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο H/D=3 και $K_o=1$.



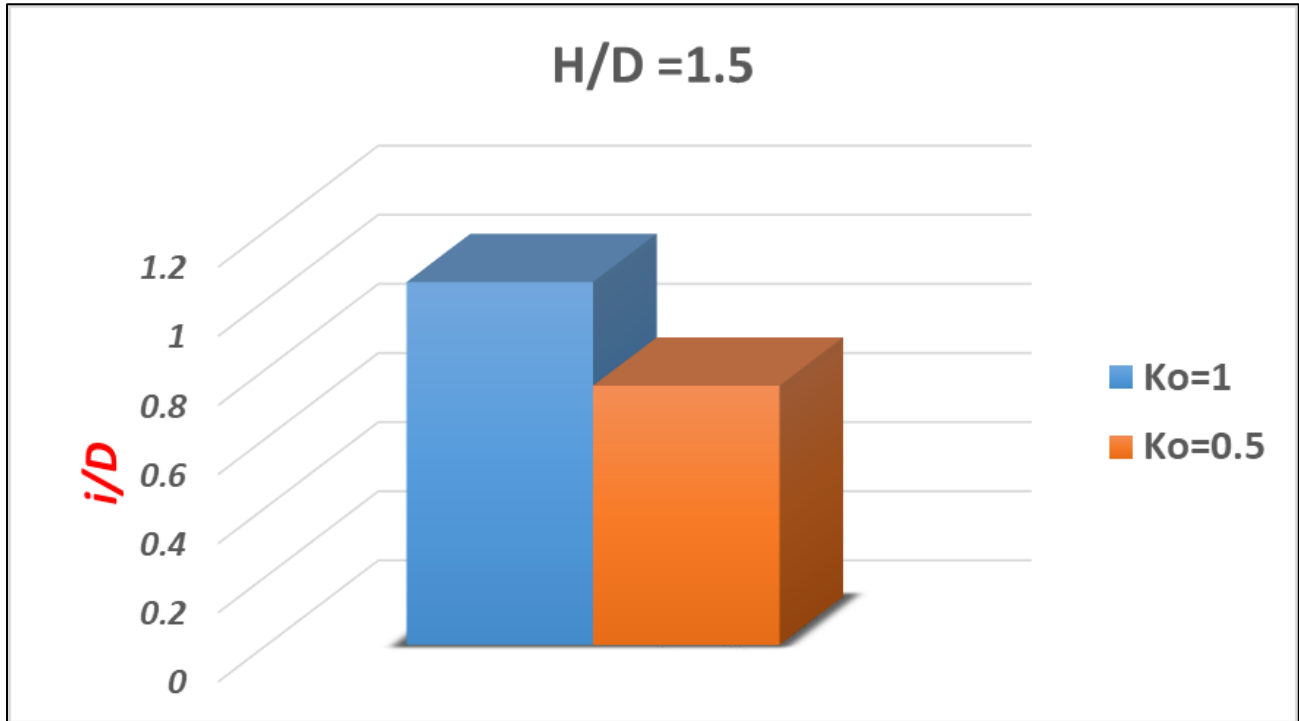
Διάγραμμα 4.36. Συσχέτιση βαθμού αποτόνωσης (λ) με την απώλεια όγκου volume loss (V_s) για λόγο $H/D=3$ και $K_o=0.5$.

Από τα παραπάνω Διαγράμματα (4.31 – 4.36), μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

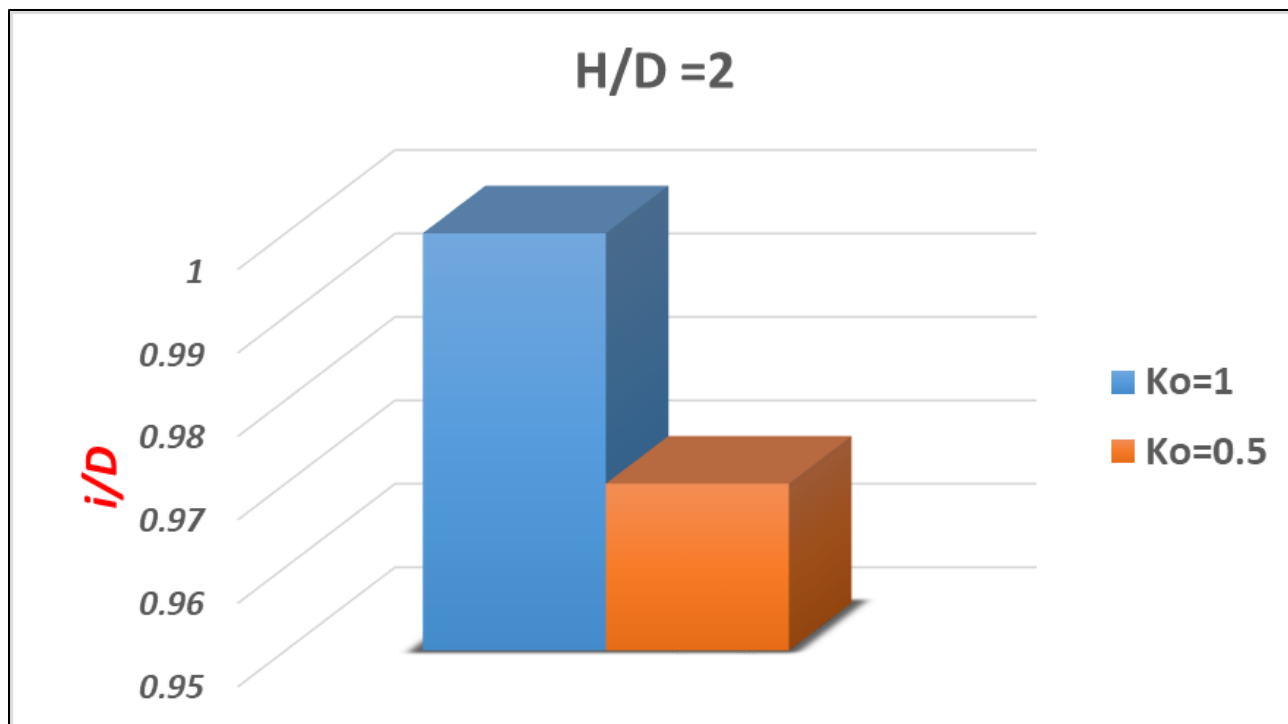
- Τα εδάφη S3,S4 για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_o= 1$, συμπεριφέρονται ελαστικά, διότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου, σε αντίθεση με τα εδάφη S1,S2 όπου για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_o= 1$, συμπεριφέρονται ελαστικά έως αποτόνωση 40% και έπειτα ελαστοπλαστικά για μεγαλύτερο βαθμό αποτόνωσης, διότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, διότι τα εδάφη S3,S4 έχουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από τα εδάφη S1,S2.
- Επίσης παρατηρείται ότι για όλους του λόγους H/D και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_o= 0.5$, για όλα τα εδάφη, η συμπεριφορά τους είναι ελαστοπλαστική, διότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού αποτόνωσης και απώλειας όγκου.

- Παρατηρείται ότι η μεταβολή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) από 1 σε 0.5, προκαλεί αύξηση της απώλειας όγκου (V_s) για όλου τους λόγους H/D και για όλα τα εδάφη, διότι χάνεται το φαινόμενο της «πλευρικής περίσφιξης», όπως έχει αναλυθεί στις περιπτώσεις με την μέγιστη καθίζηση (s_{max}).

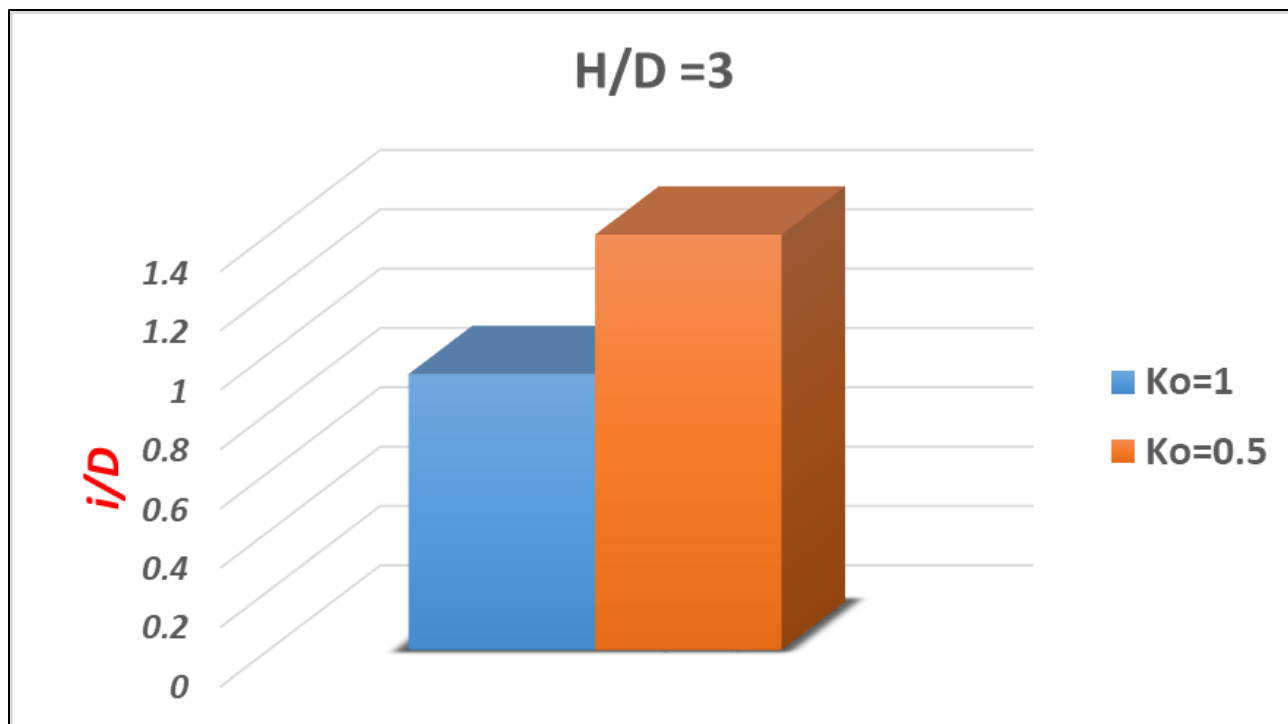
4.2.4. Σημείο καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o)



Διάγραμμα 4 37. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o), για λόγο $H/D=1.5$.



Διάγραμμα 4 38. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) για λόγο $H/D=2$.



Διάγραμμα 4.39. Συσχέτιση σημείου καμπής καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων (i/D) σε σχέση με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) για λόγο $H/D=3$.

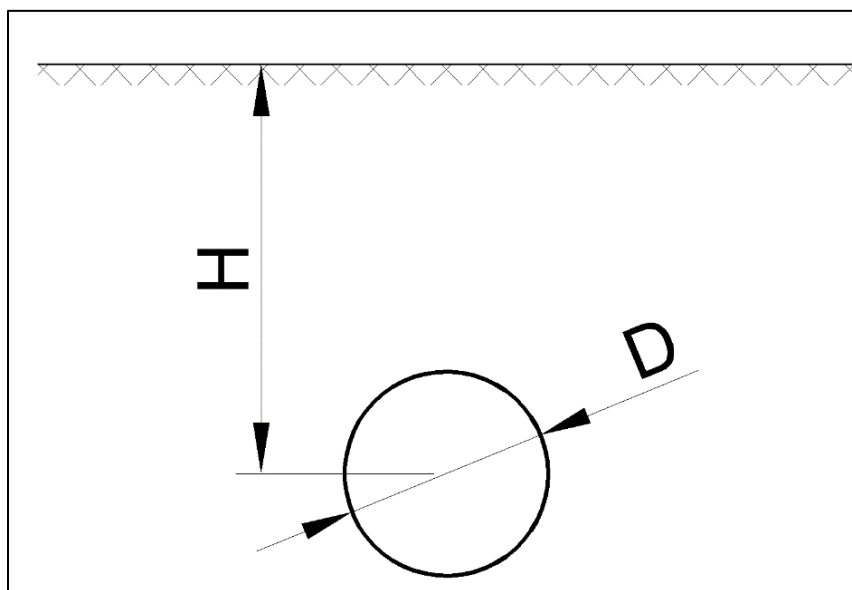
Από τα παραπάνω Διαγράμματα (4.37 – 4.39), μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το σημείο καμπής (i) της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων μεταβάλλεται ανάλογα τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_o) και το ύψος των υπερκείμενων γαιών.
- Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος H/D , μειώνεται ο λόγος (i/D) για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o=1$, ενώ για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o=0.5$, ο λόγος (i/D) αυξάνεται.

5. Μόρφωση σχέσεων εκτίμησης επιφανειακών καθιζήσεων και παράγωγων μεγεθών

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται παράθεση των μαθηματικών σχέσεων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων του **Κεφαλαίου 4** και έχουν ως σκοπό τον προσδιορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων και των παράγωγων μεγεθών που προκύπτουν λόγω της διάνοιξης αβαθών σηράγγων.

Οι σχέσεις που μορφώθηκαν είναι αδιαστατοποιημένες και λαμβάνουν υπόψιν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών (συνοχή (c), γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής (υπερκείμενα (H) και διάμετρο εκσκαφής (D)). Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τα υπερκείμενα λαμβάνονται πάντα από το μέσο του υπόγειου ανοίγματος, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.1**.



Σχήμα 5. 1 Γραφική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της εκσκαφής.

Ο σκοπός που μορφώθηκαν αυτές οι σχέσεις, είναι η ενίσχυση ή βελτίωση των εμπειρικών σχέσεων που ισχύουν μέχρι και σήμερα (**Κεφάλαιο 3^ο**) με νέα δεδομένα και δυνατότητες που προκύπτουν από την δυνατότητα της προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μεθοδολογία εξαγωγής αυτών των μαθηματικών σχέσεων, βασίστηκε στην συσχέτιση μεταξύ δυο μεγεθών και σύνδεσή τους μεσώ της κατάλληλης μαθηματικής συνάρτησης (στην πλειοψηφία εκθετική συνάρτηση). Στην συνέχεια οι όροι της συνάρτησης αδιαστατοποιήθηκαν μέσω των κατάλληλων γεωτεχνικών ή γεωμετρικών μεγεθών.

5.1. Δημιουργία συντελεστή αντοχής εδάφους N_λ

Ο συγκεκριμένος συντελεστής, συσχετίζεται με τον συντελεστή υπερφόρτισης N (Κεφάλαιο 3.4.3), με την διαφορά ότι ο συντελεστής N_λ συμπεριλαμβάνει και την ισοδύναμη πίεση υποστήριξης p_i της εκσκαφής, η οποία προκύπτει βάσει της αποτόνωσης (λ) του περιβάλλοντος εδάφους, από την σχέση:

$p_i = (1 - \lambda) \times p_o$, όπου p_o : το γεωστατικό πεδίο στο επίπεδο της εκσκαφής.

Ο συντελεστής αντοχής εδάφους παρουσιάζεται στην **Σχέση 5.1**.

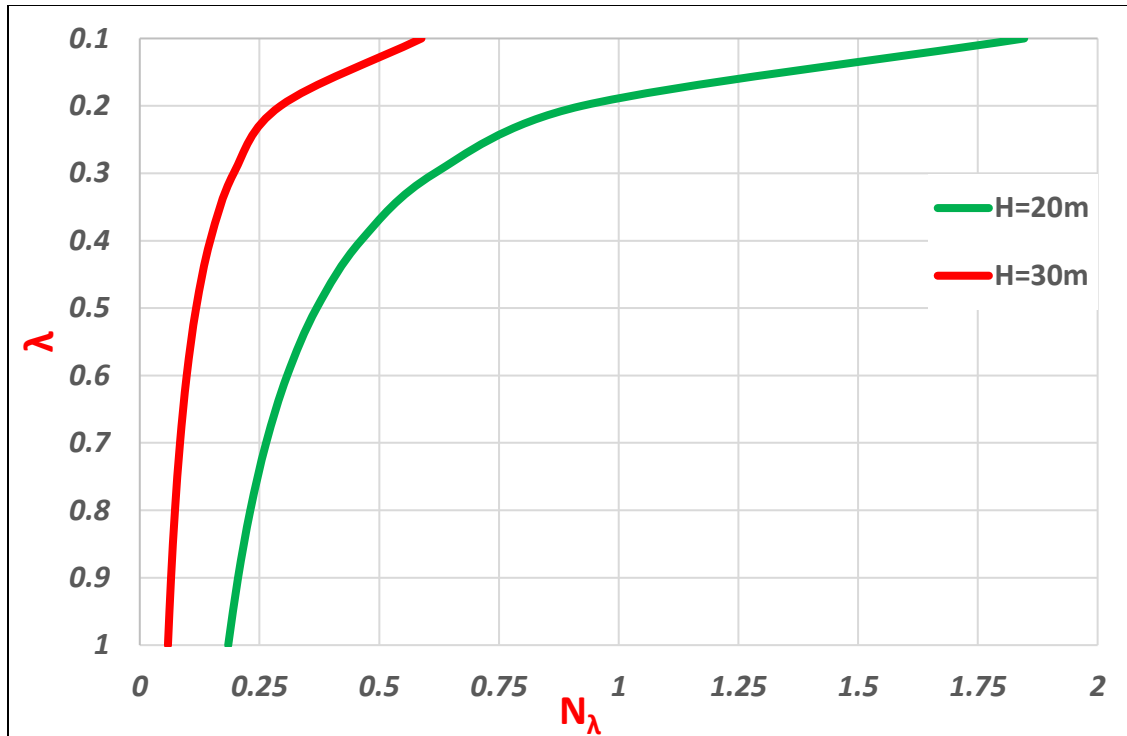
$$N_\lambda = \frac{\sigma_{cm}}{\lambda \times p_o}$$

Σχέση 5. 1. Συντελεστής αντοχής εδάφους.

,όπου:

- $\sigma_{cm} = 2 \times c \times \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$
- $p_o = 0.5 \times (1 + K_o) \times \gamma \times H$
- λ = συντελεστής αποτόνωσης

Για έδαφος με συνοχή $c=20 \text{ kPa}$, γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=25^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma= 20 \text{ kN/m}^3$, η μεταβολή του συντελεστή αντοχής εδάφους N_λ σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης λ για δύο υπερκείμενα ($H=20, 30\text{m}$), παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 5.1**.



Διάγραμμα 5 4. Μεταβολή του συντελεστή αντοχής εδάφους N_{λ} σε σχέση με τον βαθμό αποτόνωσης.

5.1. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_L) με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_{λ})

Με βάση τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, έγινε συσχέτιση της εδαφικής απώλειας όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L) με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_{λ}), καθώς με τις μέχρι και σήμερα έρευνες, η απώλεια εδαφικού όγκου (V_L) δεν έχει εκτιμηθεί, παρά μόνο μετριέται κατά την διάνοιξη σήραγγας με TBM, από τον όγκο των υλικών εκσκαφής.

Η συσχέτιση της απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_L) με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_{λ}), συνδέεται με την **Σχέση 5.2**.

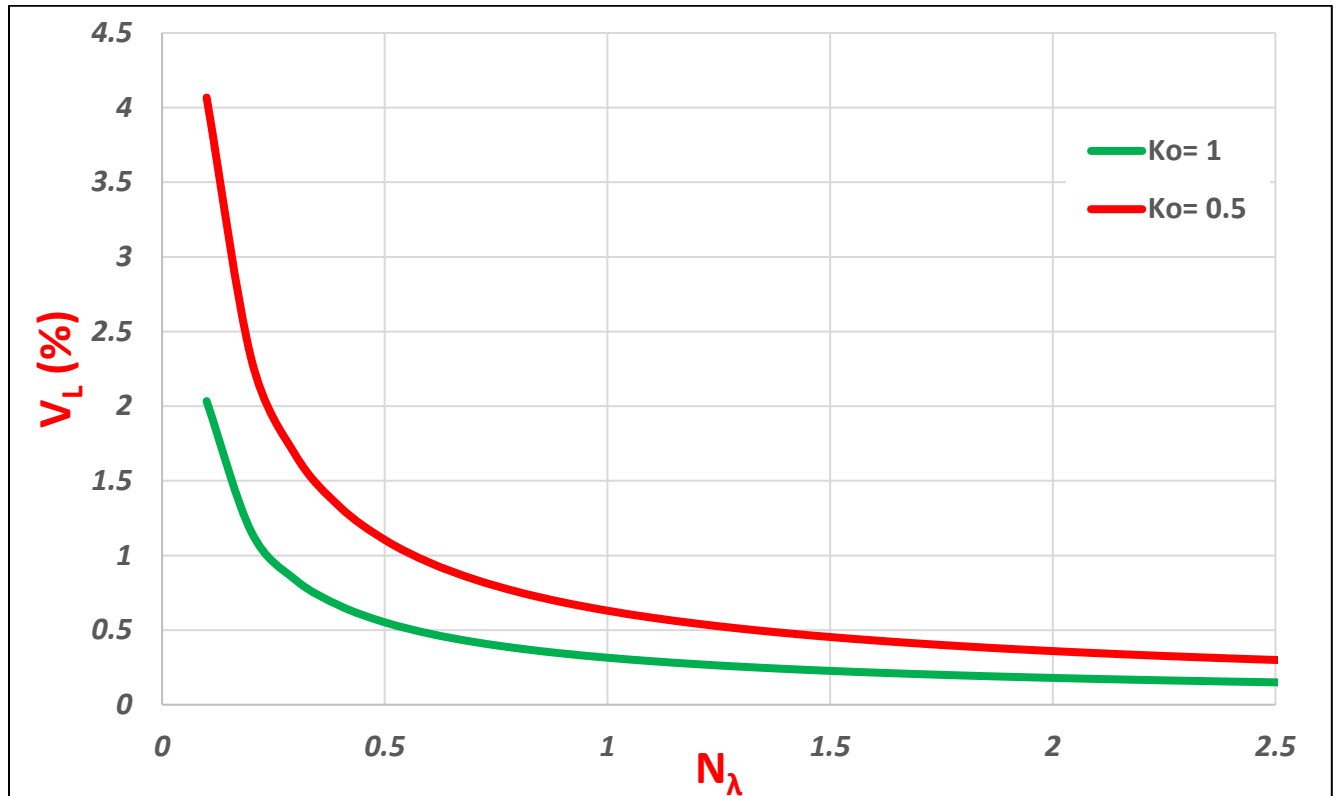
$$V_L(\%) = a \times N_{\lambda}^{-0.81}$$

Σχέση 5. 2. Συσχέτιση V_L με N_{λ} .

, όπου:

- $\alpha = \frac{0.315}{K_o}$

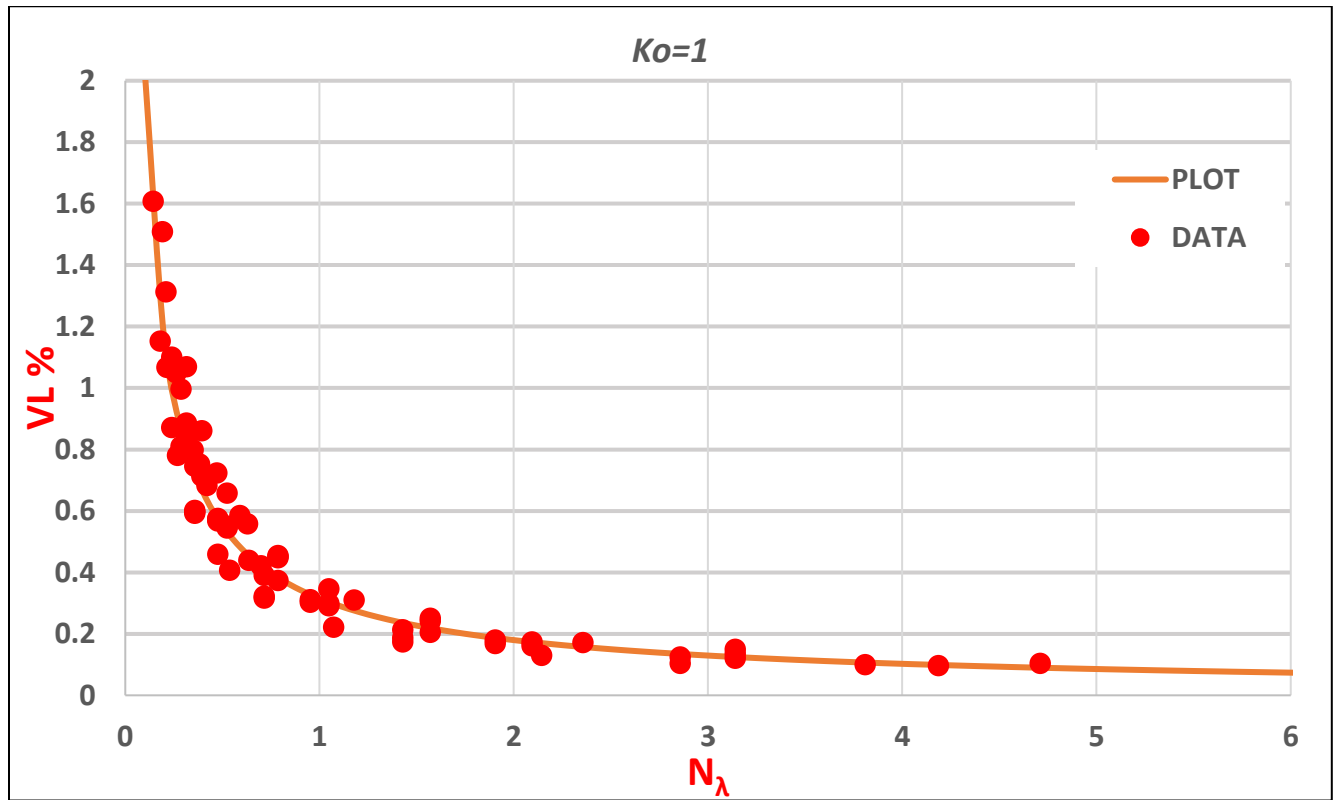
Στα **Διάγραμμα 5.2**, αποτυπώνεται η **Σχέση 5.2**.



Διάγραμμα 5 5. Γραφική απεικόνιση Σχέση 5.2.

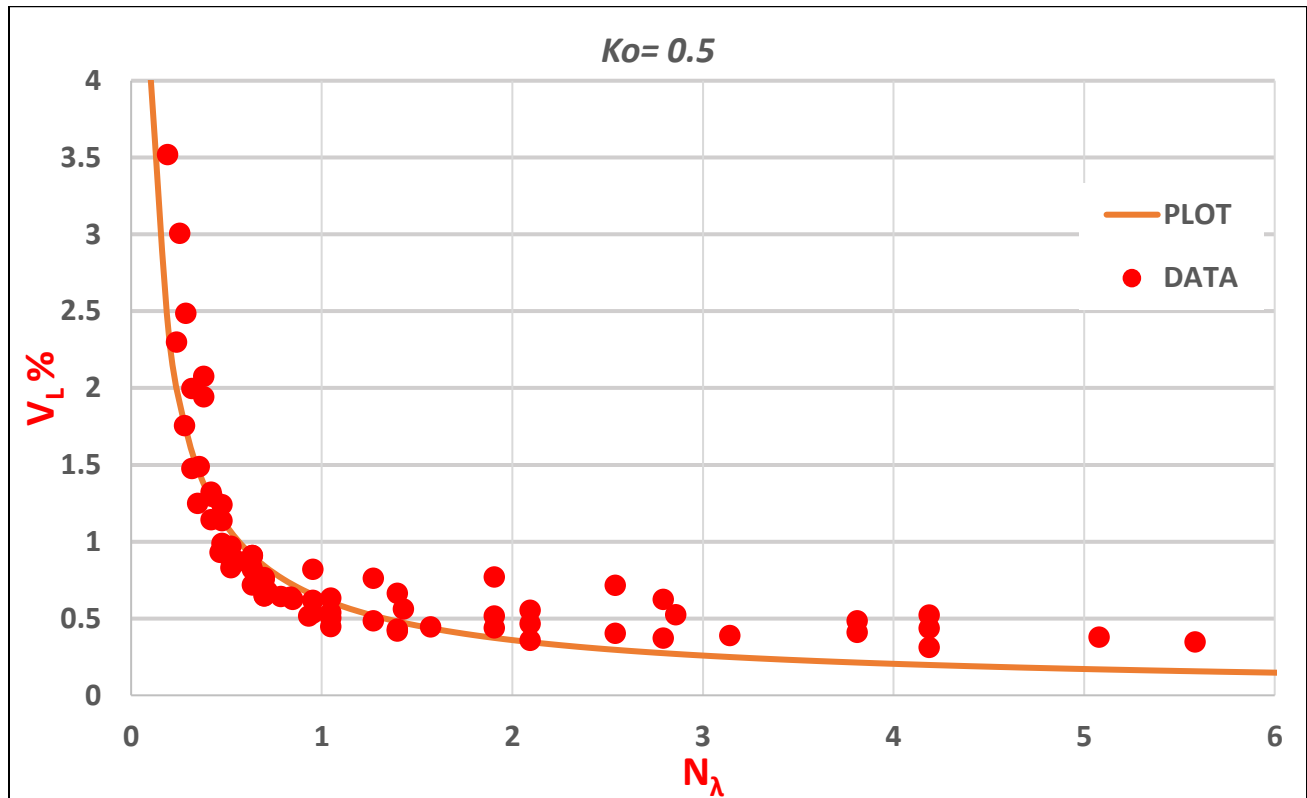
Στην συνέχεια παρατίθενται τα **Διαγράμματα 5.3 -5.4**, όπου παρουσιάζεται η **Σχέση 5.2**, σε σύγκριση με τα δεδομένα των αναλύσεων (**DATA**) για λόγους $H/D= 1.5, 2, 3$ με $D= 10m$, για όλους τους τύπους εδαφών (**Πίνακας 4.2**).

✓ Συσχέτιση για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 1$)



Διάγραμμα 5 6. Συσχέτιση V_L με N_λ για $K_o=1$.

✓ Συσχέτιση για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 0.5$)



Διάγραμμα 5 7. Συσχέτιση V_L με N_λ για $K_0=0.5$.

5.2. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_L) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s)

Με βάση τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, έγινε συσχέτιση της εδαφικής απώλειας όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s), καθώς με τις μέχρι και σήμερα έρευνες, οι περισσότεροι ερευνητές συνδέουν την εδαφική απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s), με την εδαφική απώλεια όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_s). Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων του **4^{ου} Κεφαλαίου**, προέκυψε ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο προαναφερθέντων όγκων και συνεπώς η παρούσα εργασία στράφηκε στην εύρεση της κατάλληλης συσχέτισης μεταξύ αυτών των δύο όγκων.

Η συσχέτιση της απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής – ground loss (V_L) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s), συνδέεται με την **Σχέση 5.3**.

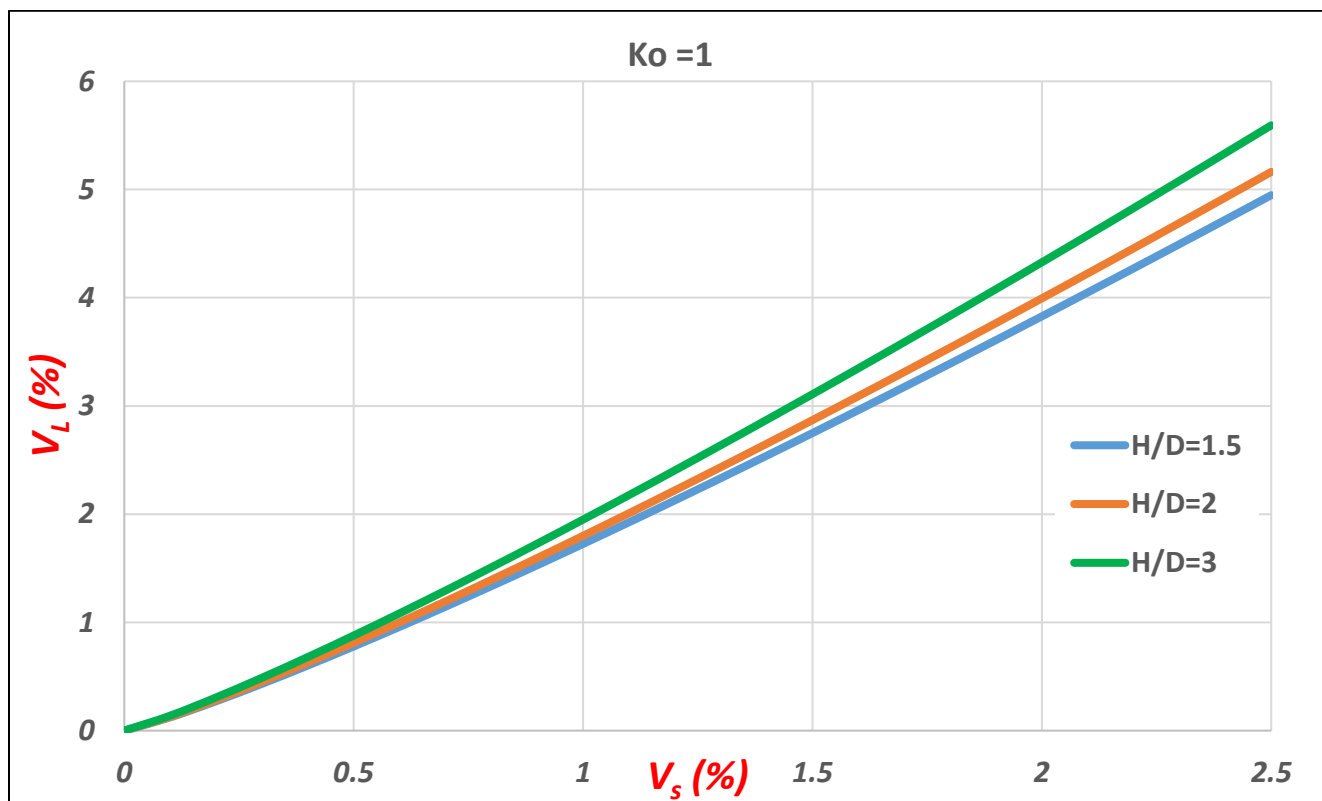
$$V_L(\%) = a \times V_s(\%)^b$$

Σχέση 5. 3. Συσχέτιση VL με VS.

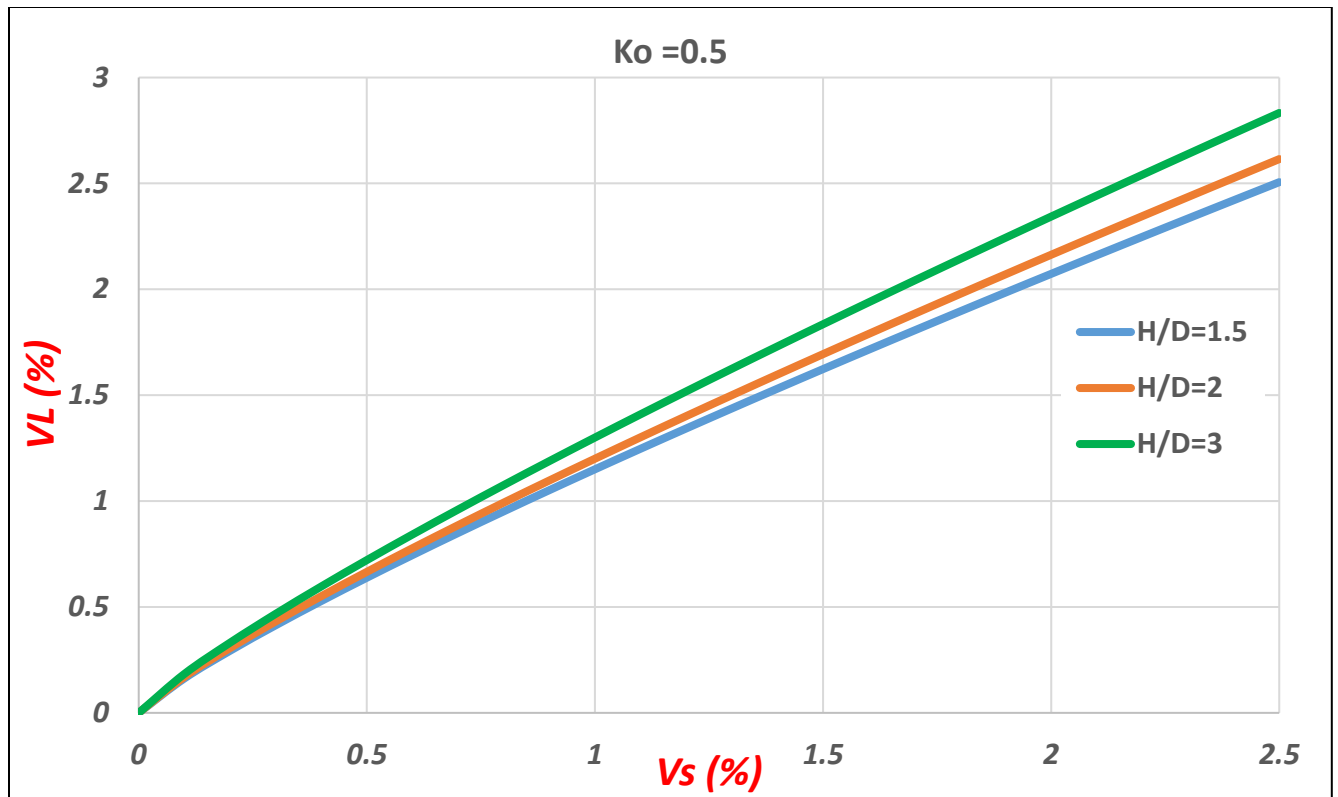
, όπου:

- $a = (0.5 + K_o) \times (1 + 0.1 \times \frac{H}{D})$
- $b = (0.6 \times K_o) + 0.55$

Στα **Διαγράμματα 5.5 – 5.6**, αποτυπώνεται η **Σχέση 5.3**.



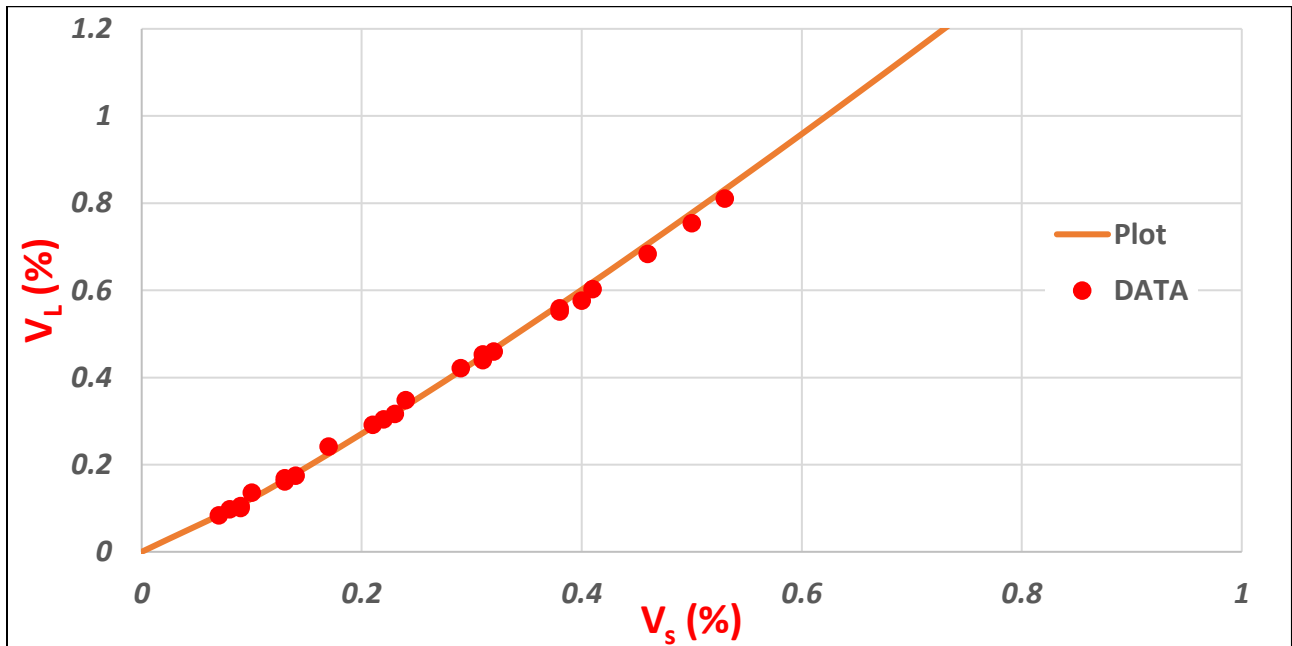
Διάγραμμα 5 8. Συσχέτιση VL με VS για Ko=1.



Διάγραμμα 5 9. Συσχέτιση V_L με V_s για $K_o=0.5$.

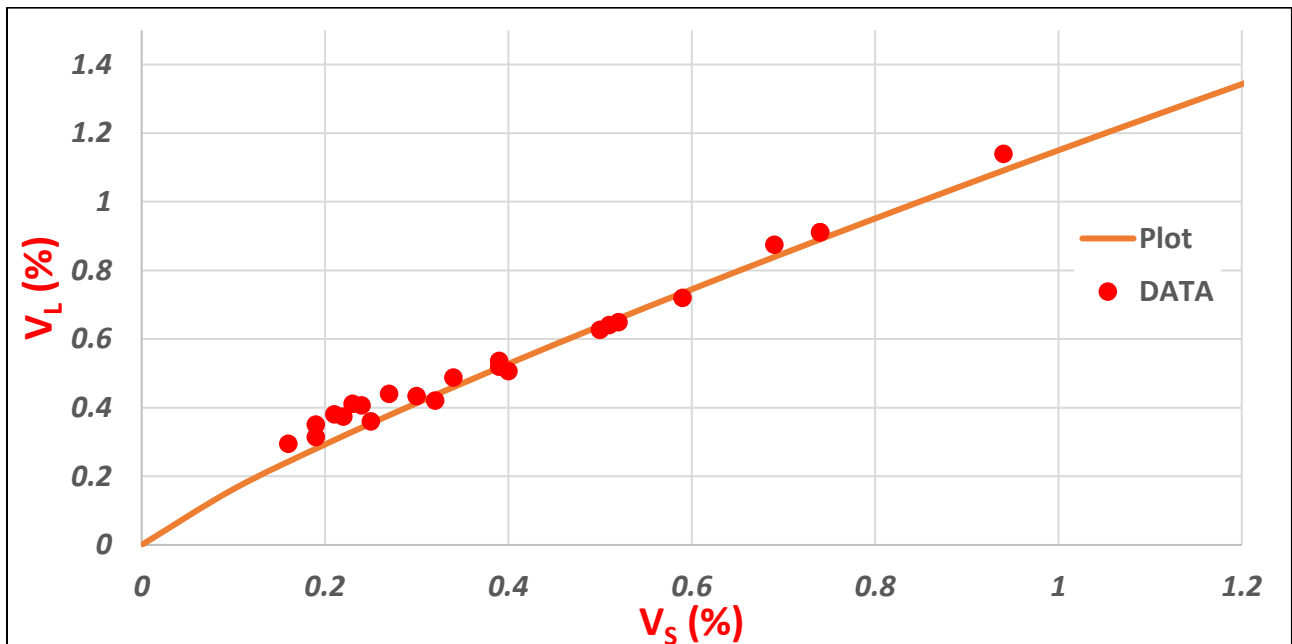
Στην συνέχεια παρατίθενται τα **Διαγράμματα 5.7 -5.12**, όπου παρουσιάζεται η **Σχέση 5.3**, σε σύγκριση με τα δεδομένα των αναλύσεων (**DATA**) για λόγους **H/D= 1.5, 2, 3** με **D= 10m**, για όλους τους τύπους εδαφών (**Πίνακας 4.2**).

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 1$)



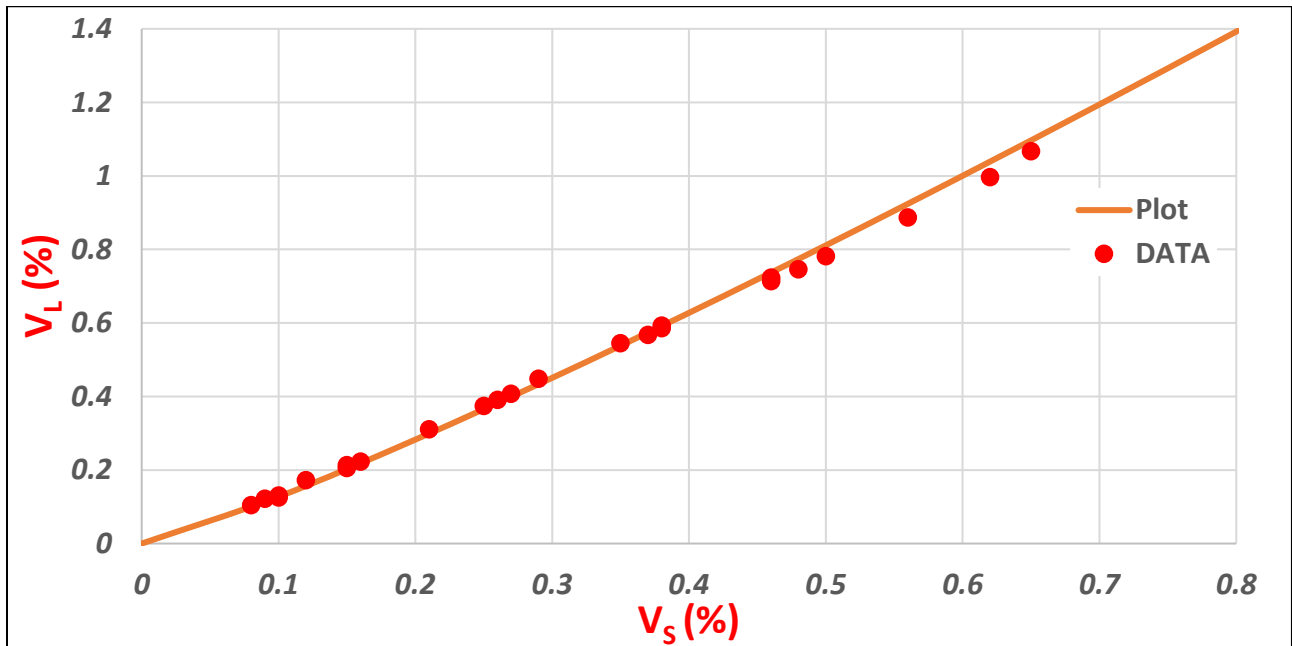
Διάγραμμα 5 10. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 0.5$)



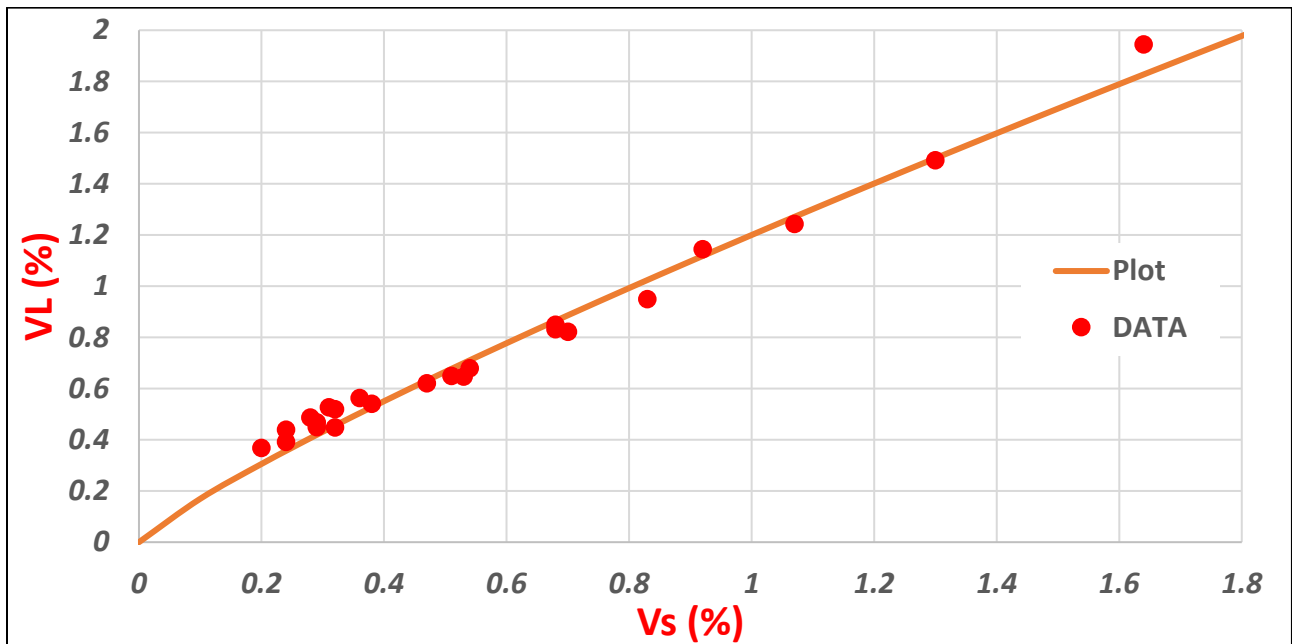
Διάγραμμα 5 11. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D= 1.5$ και $K_0=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 1$)



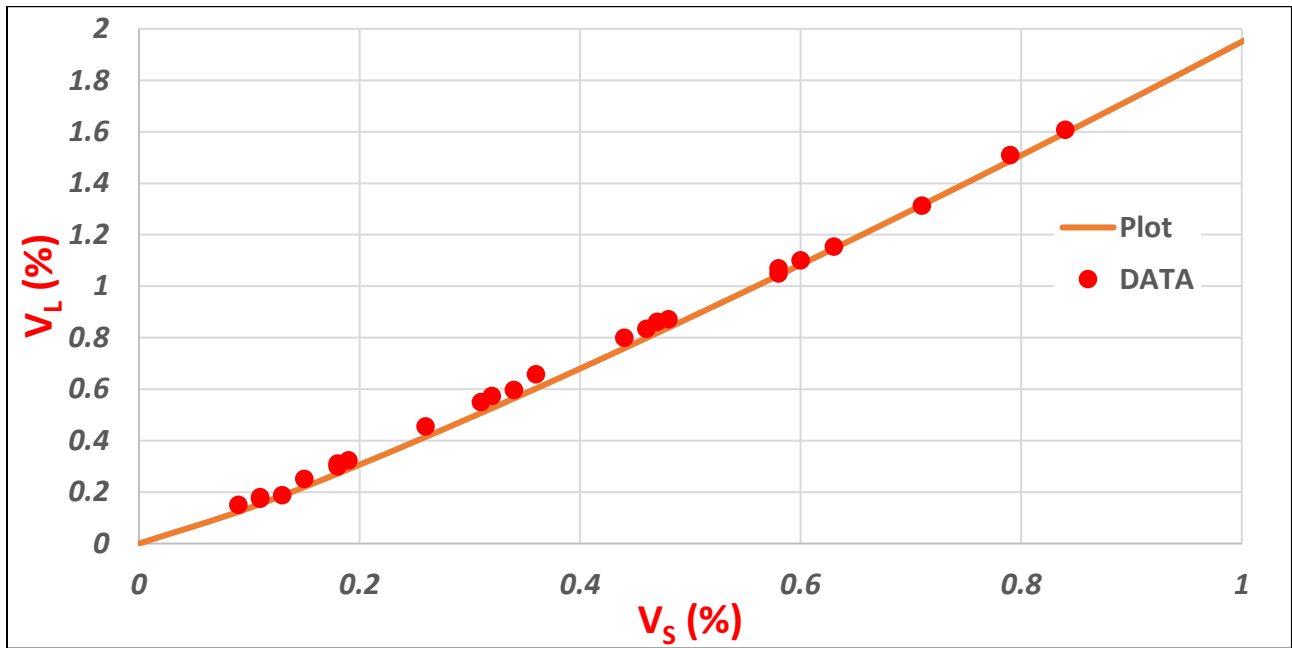
Διάγραμμα 5 12. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D=2$ και $K_0=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 0.5$)



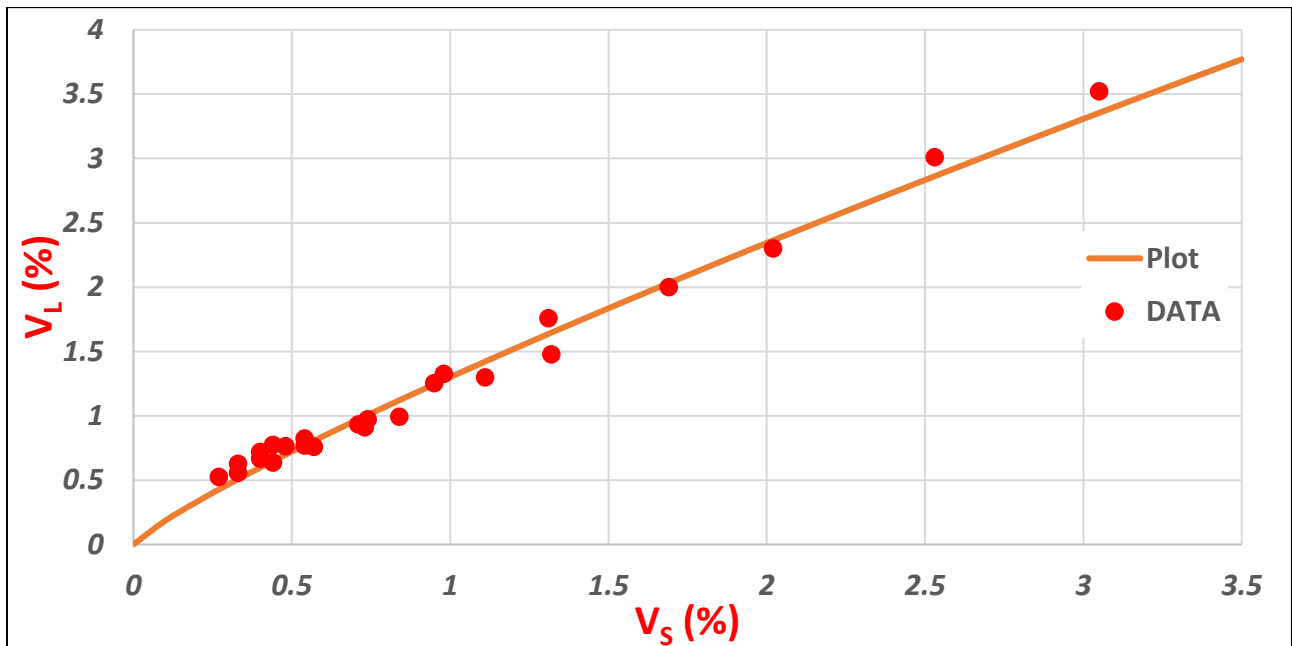
Διάγραμμα 5 13. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D=2$ και $K_0=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 1$)



Διάγραμμα 5 14. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D=3$ και $K_0=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 0.5$)



Διάγραμμα 5 15. Συσχέτιση V_L με V_S για λόγο $H/D=3$ και $K_0=0.5$.

5.3. Συσχέτιση της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (s_{max}) με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_λ)

Με βάση τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, έγινε συσχέτιση της μέγιστης εδαφικής καθίζησης (s_{max}) που προκαλείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_λ), όπου έχει ορισθεί στην **Ενότητα 5.1**. Σύμφωνα με τις μέχρι σήμερα έρευνες, οι ερευνητές έχουν προτείνει συσχέτιση της μέγιστης καθίζησης (s_{max}) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s) (**Κεφάλαιο 3.4.3**). Για τον λόγο αυτό η παρούσα εργασία, στράφηκε σε περαιτέρω έρευνα στην συγκεκριμένη θεματική περιοχή.

Η συσχέτιση της μέγιστης εδαφικής καθίζησης (s_{max}) αδιαστατοποιημένη προς την διάμετρο της εκσκαφής (D) σε σχέση με τον συντελεστή αντοχής εδάφους (N_λ), συνδέεται με την **Σχέση 5.4**

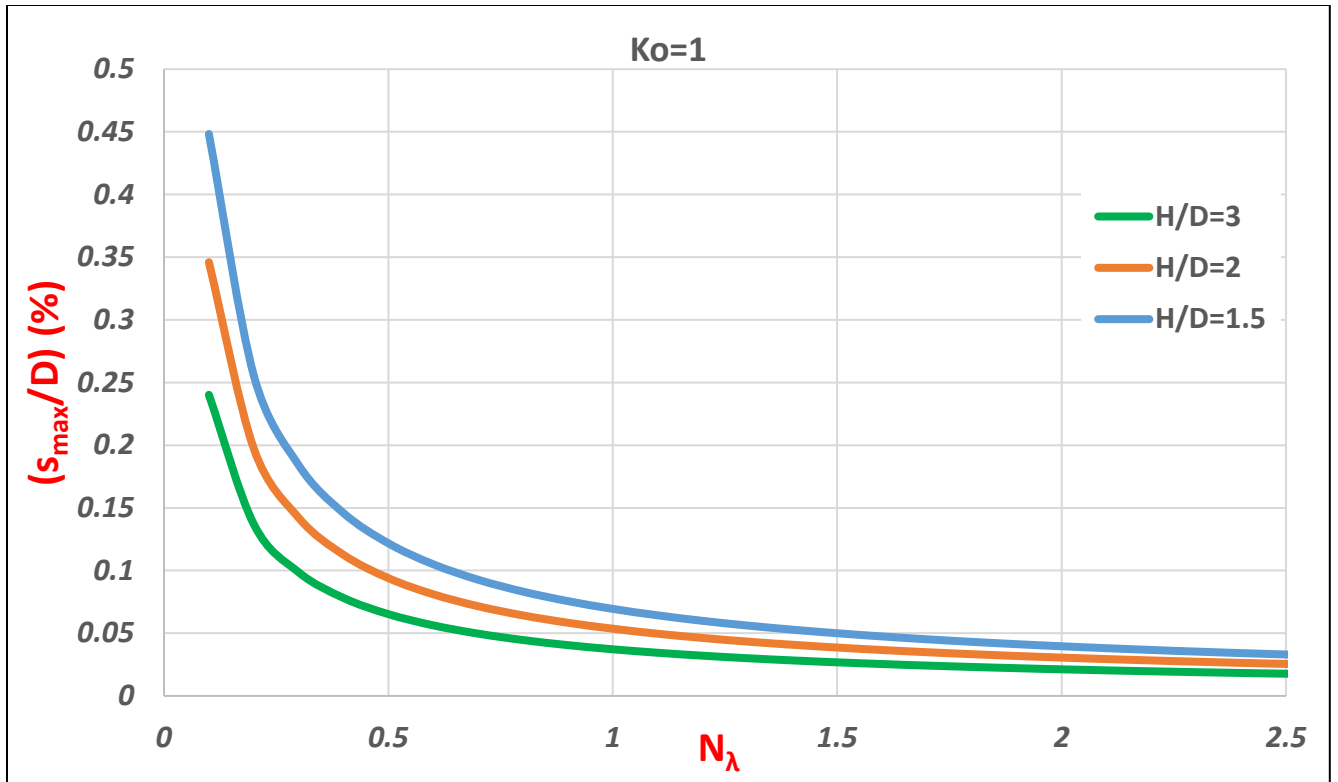
$$\left(\frac{s_{max}}{D}\right) (\%) = a \times N_\lambda^{-0.81}$$

Σχέση 5. 4. Συσχέτιση V_i με V_s .

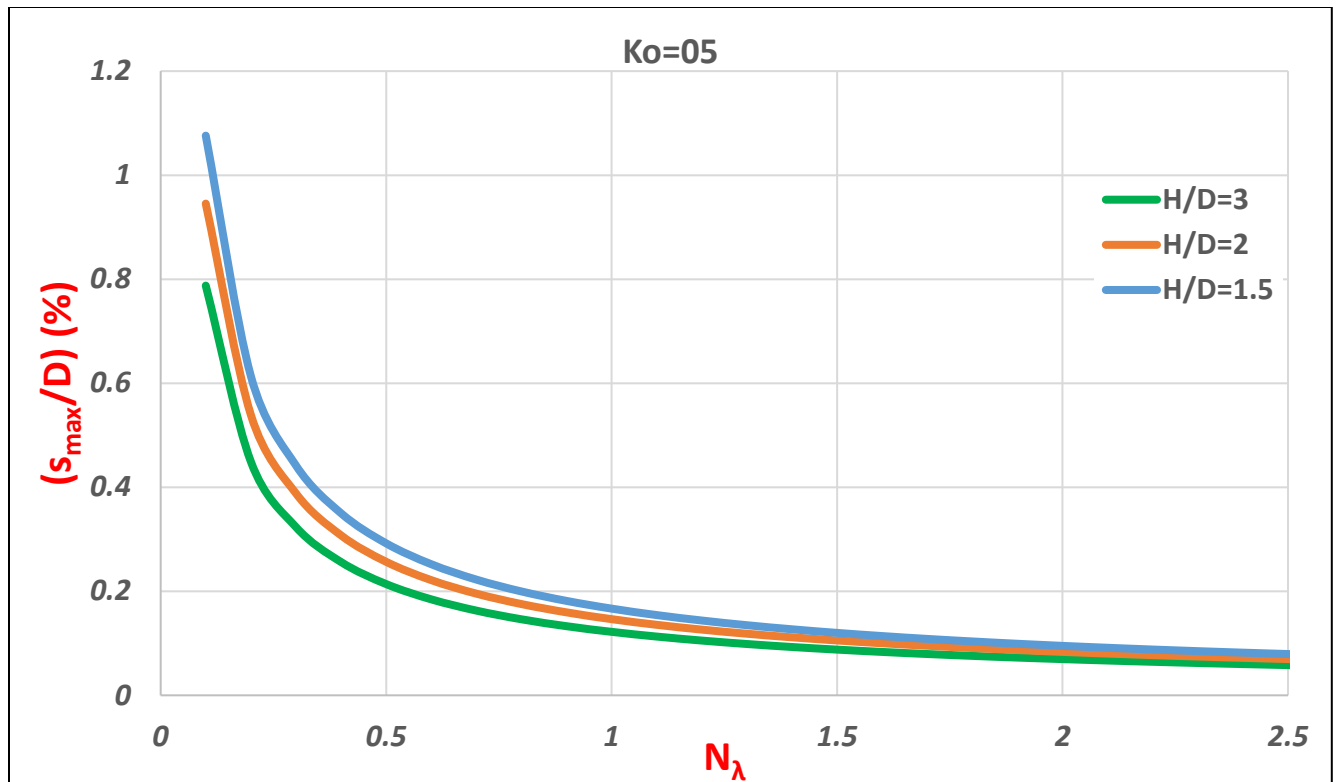
, όπου:

- $a = \frac{\left(\frac{H}{D}\right)^{-b}}{10 \times K_o}$
- $b = 0.9 \times K_o$

Στα **Διαγράμματα 5.13 – 5.14**, αποτυπώνεται η **Σχέση 5.4**.



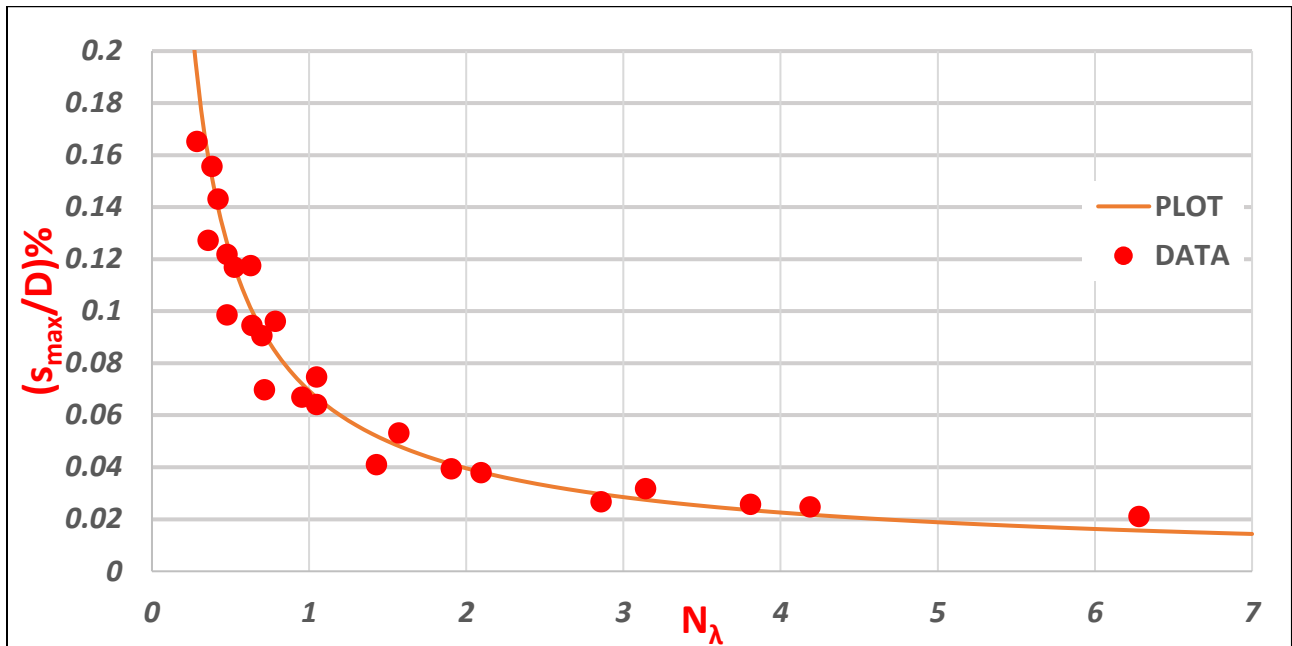
Διάγραμμα 5 16. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για $Ko=1$.



Διάγραμμα 5 17. Συσχέτιση $(S_{\max}/D)\%$ με N_λ για $Ko=0.5$.

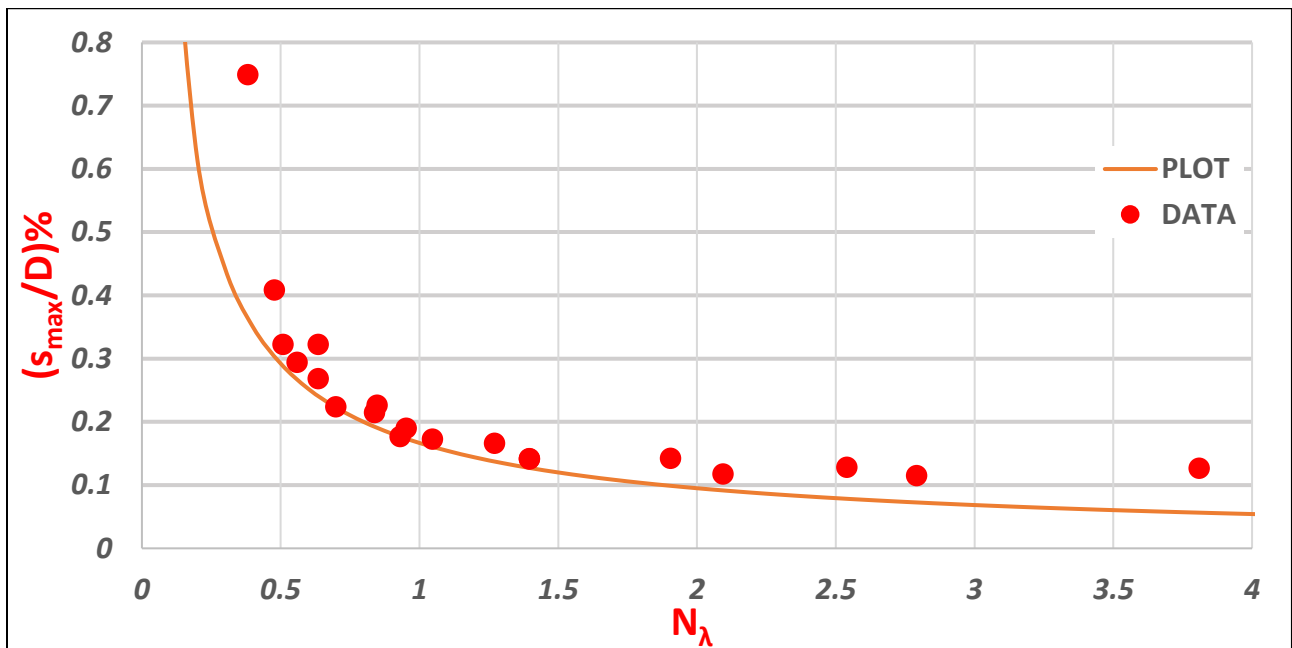
Στην συνέχεια παρατίθενται τα **Διαγράμματα 5.15 -5.20**, όπου παρουσιάζεται η **Σχέση 5.4**, σε σύγκριση με τα δεδομένα των αναλύσεων (**DATA**) για λόγους **H/D= 1.5, 2, 3** με **D= 10m**, για όλους τους τύπους εδαφών (**Πίνακας 4.2**).

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 1$)



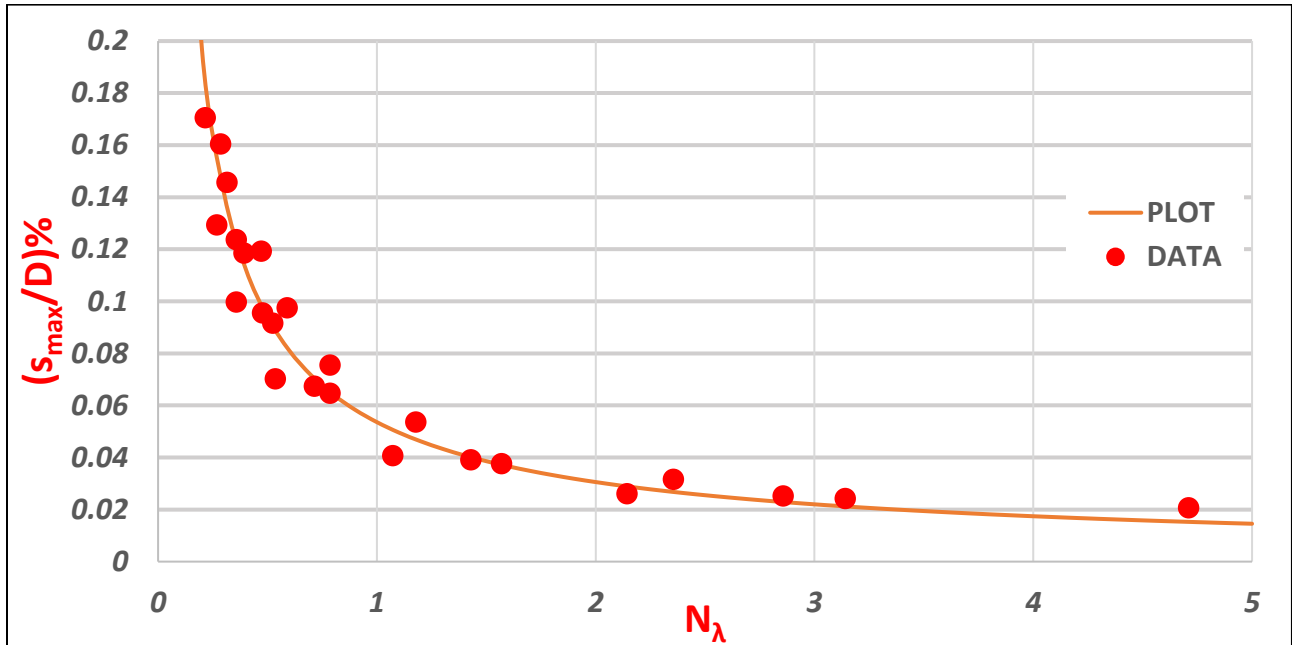
Διάγραμμα 5 18. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=1.5$ και $K_o=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 0.5$)



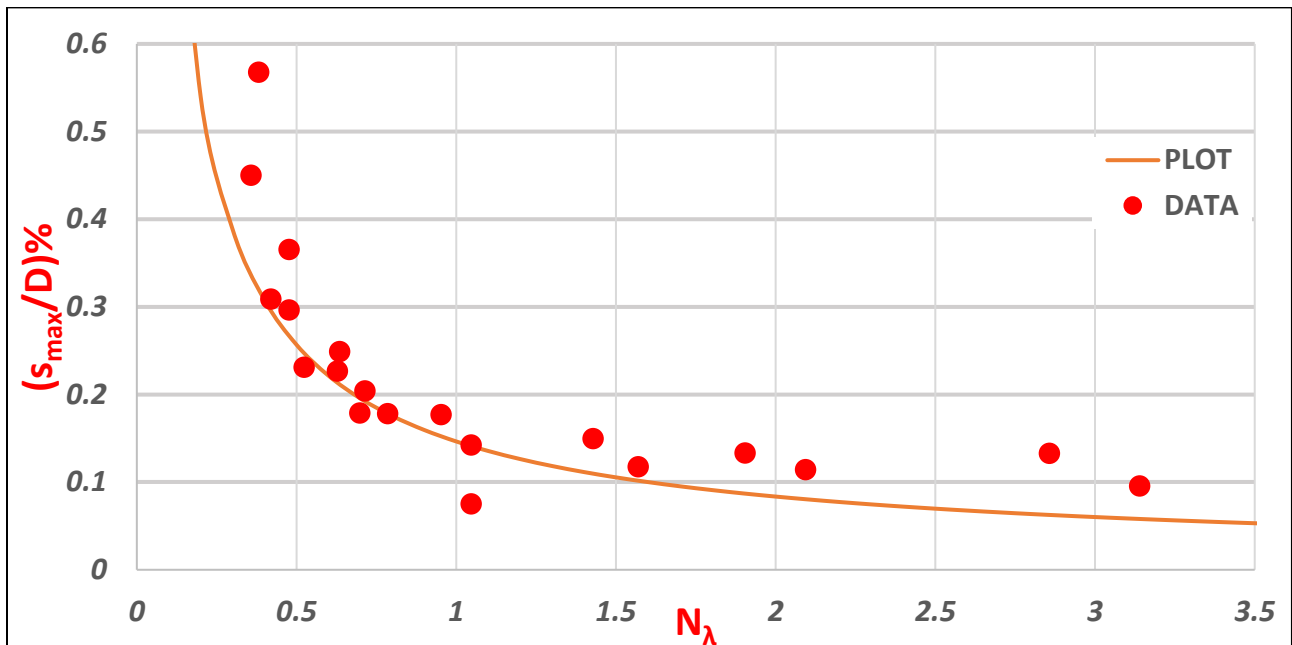
Διάγραμμα 5 19. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=1.5$ και $K_o=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 1$)



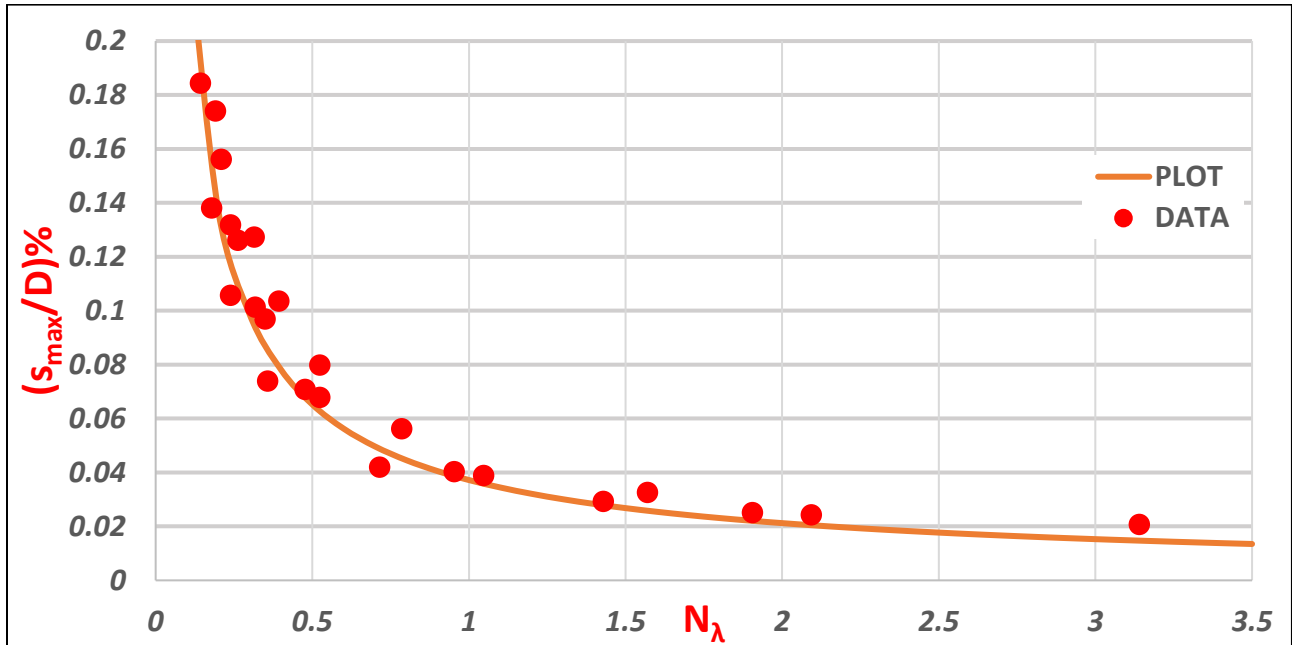
Διάγραμμα 5 20. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=2$ και $K_0=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_0 = 0.5$)



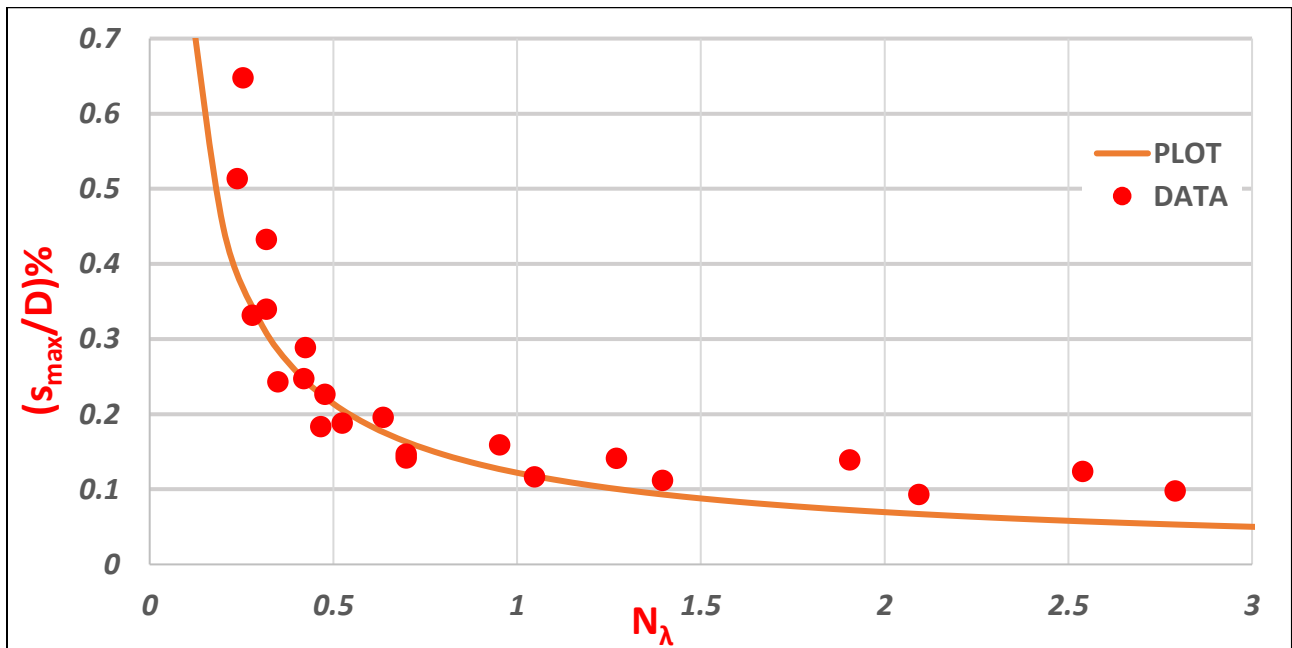
Διάγραμμα 5 21. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=2$ και $K_0=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($Ko = 1$)



Διάγραμμα 5 22. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=3$ και $Ko=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($Ko = 0.5$)



Διάγραμμα 5 23. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με N_λ για λόγο $H/D=3$ και $Ko=0.5$.

5.4. Συσχέτιση της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (s_{max}) με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_L)

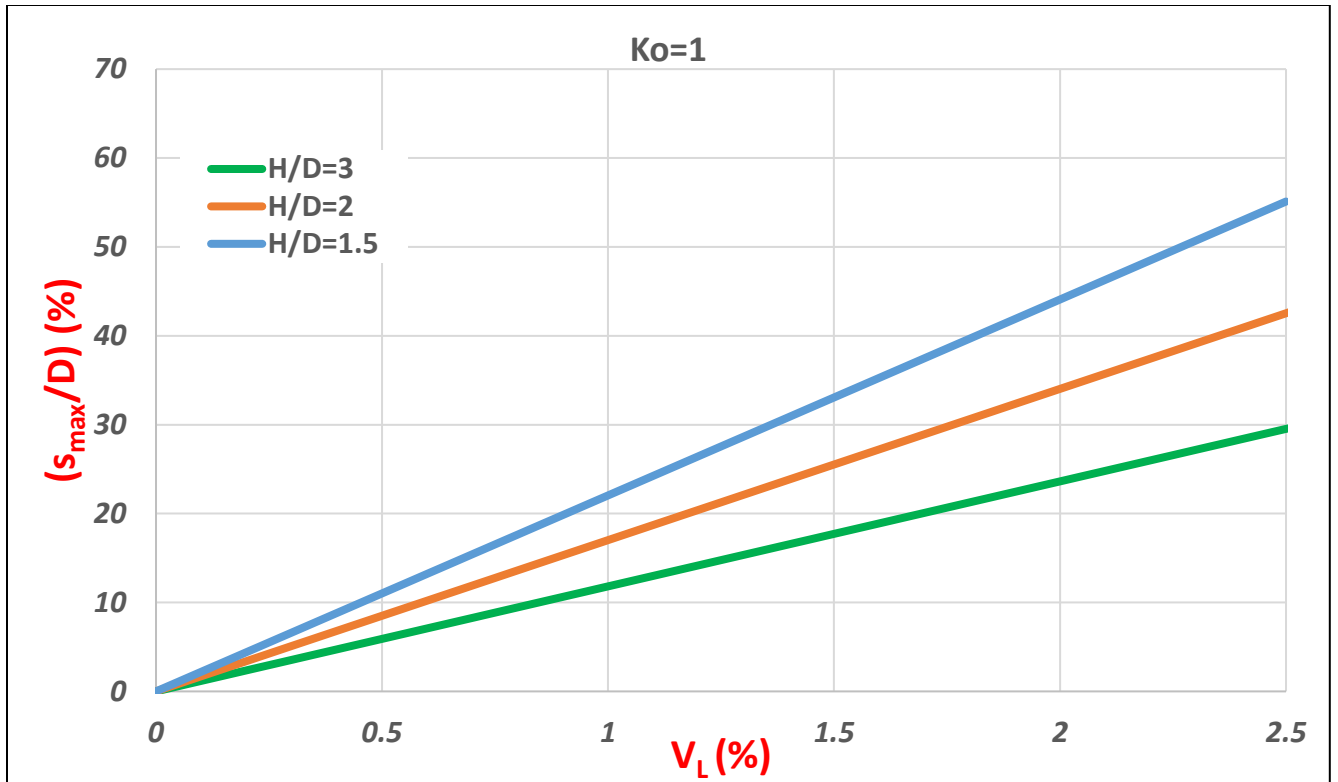
Με βάση τις παραγόμενες σχέσεις (**Σχέση 5.2 και 5.4**), μέσω μαθηματικής επίλυσης, έγινε συσχέτιση της μέγιστης εδαφικής καθίζησης που προκαλείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L). Σύμφωνα με τις μέχρι σήμερα έρευνες, οι ερευνητές έχουν προτείνει συσχέτιση της μέγιστης καθίζησης (s_{max}) με την απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s) και όχι την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L). Για τον λόγο αυτό η παρούσα εργασία, στράφηκε σε περαιτέρω έρευνα στην συγκεκριμένη θεματική περιοχή.

Η συσχέτιση της μέγιστης εδαφικής καθίζησης (s_{max}) αδιαστατοποιημένη προς την διάμετρο της εκσκαφής (D) σε σχέση με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L), συνδέεται με την **Σχέση 5.5**

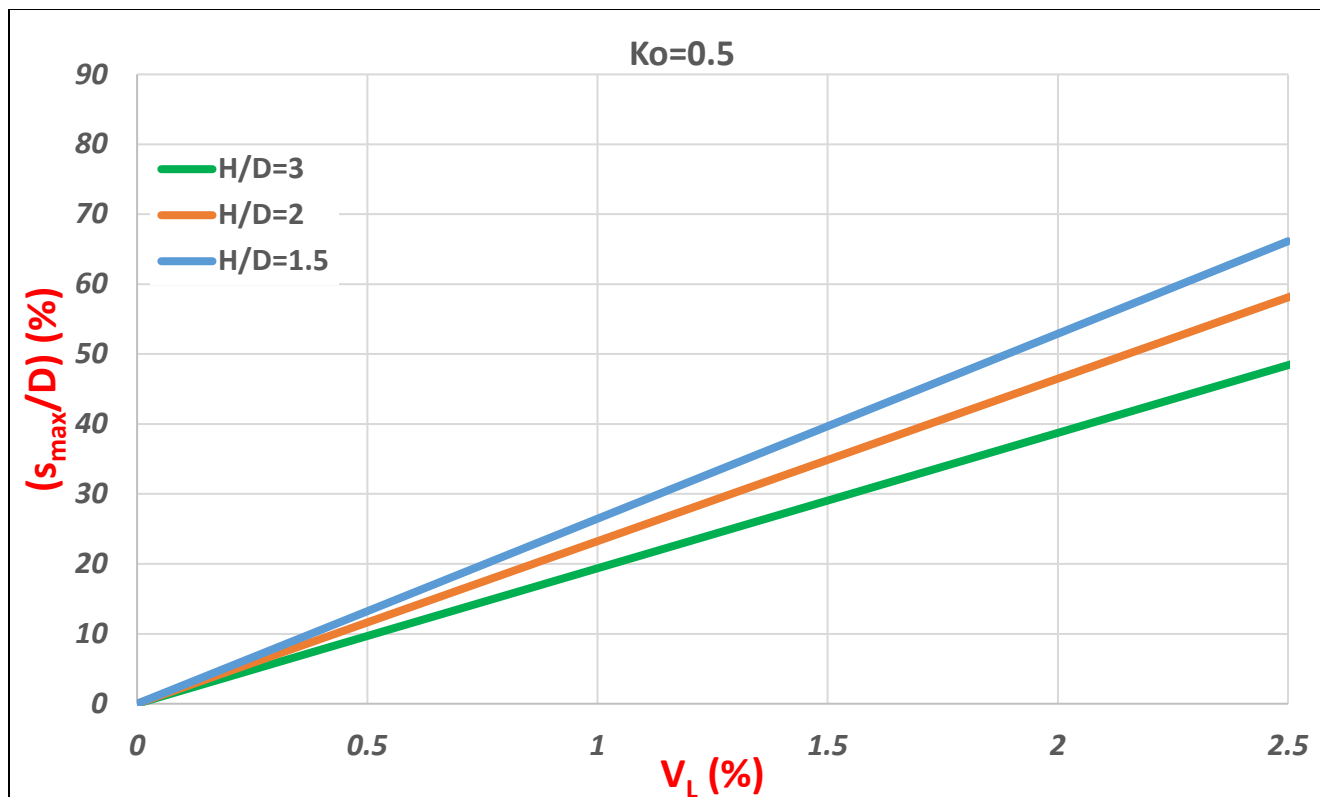
$$\left(\frac{s_{max}}{D} \right) \left(\frac{V_L}{V_L} \right) (\%) = 31.75 \times \left(\frac{H}{D} \right)^{-0.9 \times K_o}$$

Σχέση 5. 5. Συσχέτιση (s_{max}/D)% με V_L .

Στα **Διαγράμματα 5.21 – 5.22**, αποτυπώνεται η **Σχέση 5.5**.



Διάγραμμα 5 24. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με V_L για $Ko=1$.



Διάγραμμα 5 25. Συσχέτιση $(S_{max}/D)\%$ με V_L για $Ko=0.5$.

5.5. Συσχέτιση του σημείου καμπής (i) με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της σήραγγας – ground loss (V_L)

Με βάση τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, έγινε συσχέτιση του σημείου καμπής (i) της καμπύλης καθιζήσεων που προκαλείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά τη εκσκαφής (V_L). Σύμφωνα με τις μέχρι σήμερα έρευνες, οι ερευνητές έχουν προτείνει τρόπους εκτίμησης του σημείου καμπής (i) της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Για τον λόγο αυτό η παρούσα εργασία, στράφηκε σε περαιτέρω έρευνα στην συγκεκριμένη θεματική περιοχή, με σκοπό να επεκτείνει την μέχρι τώρα έρευνα.

Η συσχέτιση του σημείου καμπής (i) της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων αδιαστατοποιημένη προς την μέγιστη εδαφική καθίζηση (s_{max}) διάμετρο της εκσκαφής (D) σε σχέση με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά τη εκσκαφής (V_L), συνδέεται με την **Σχέση 5.6**

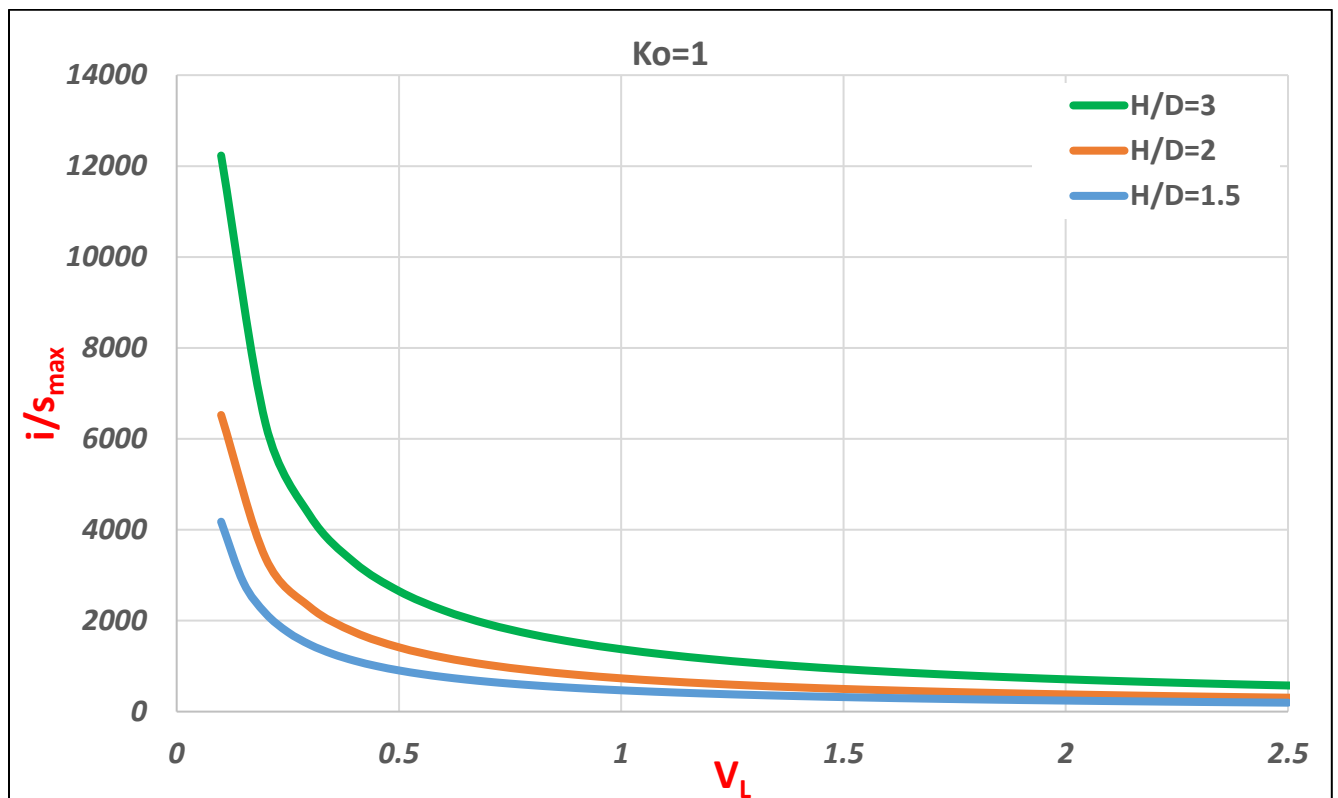
$$\left(\frac{i}{s_{max}}\right) = a \times V_L^{-0.95}$$

Σχέση 5. 6. Συσχέτιση i με V_L .

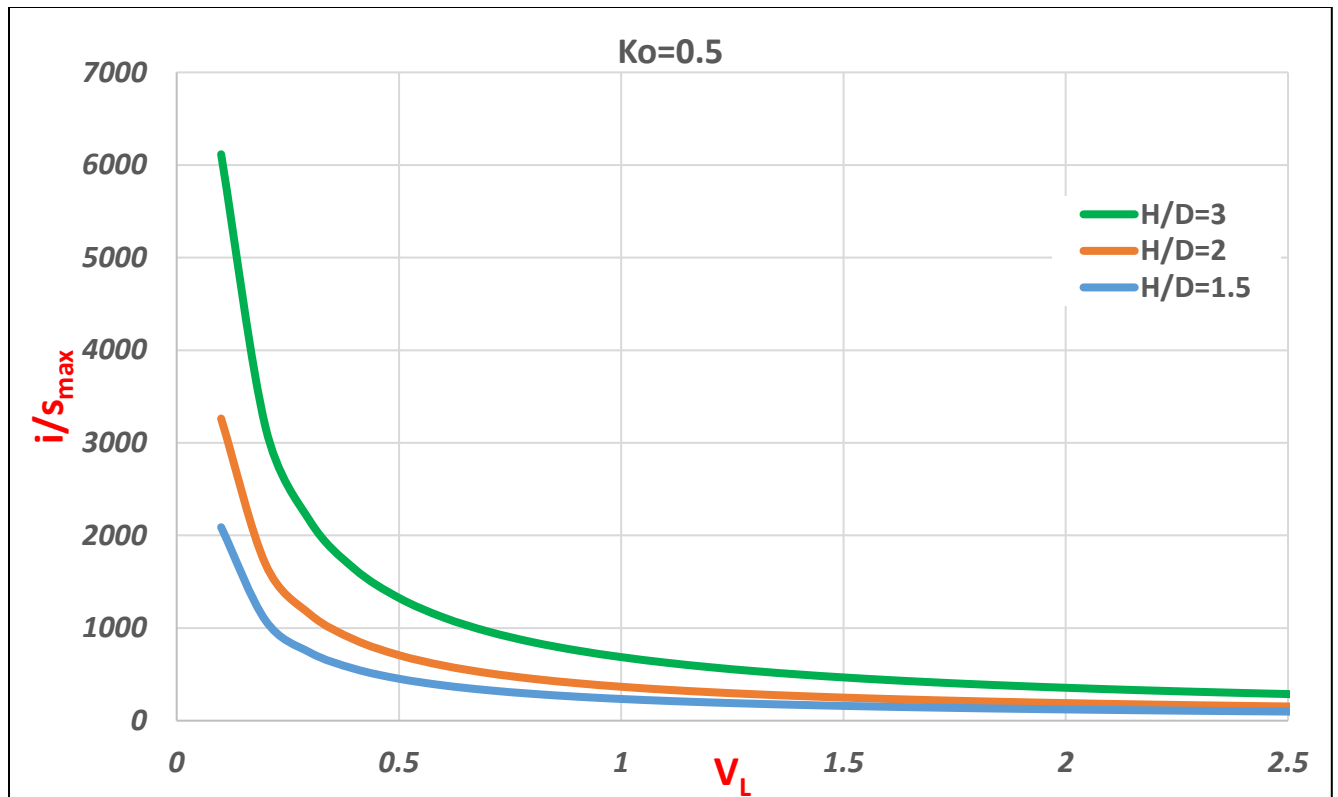
, όπου:

- $\alpha = 250 \times K_o \times \left(\frac{H}{D}\right)^{1.55}$

Στα Διαγράμματα 5.23 – 5.24, αποτυπώνεται η Σχέση 5.6.



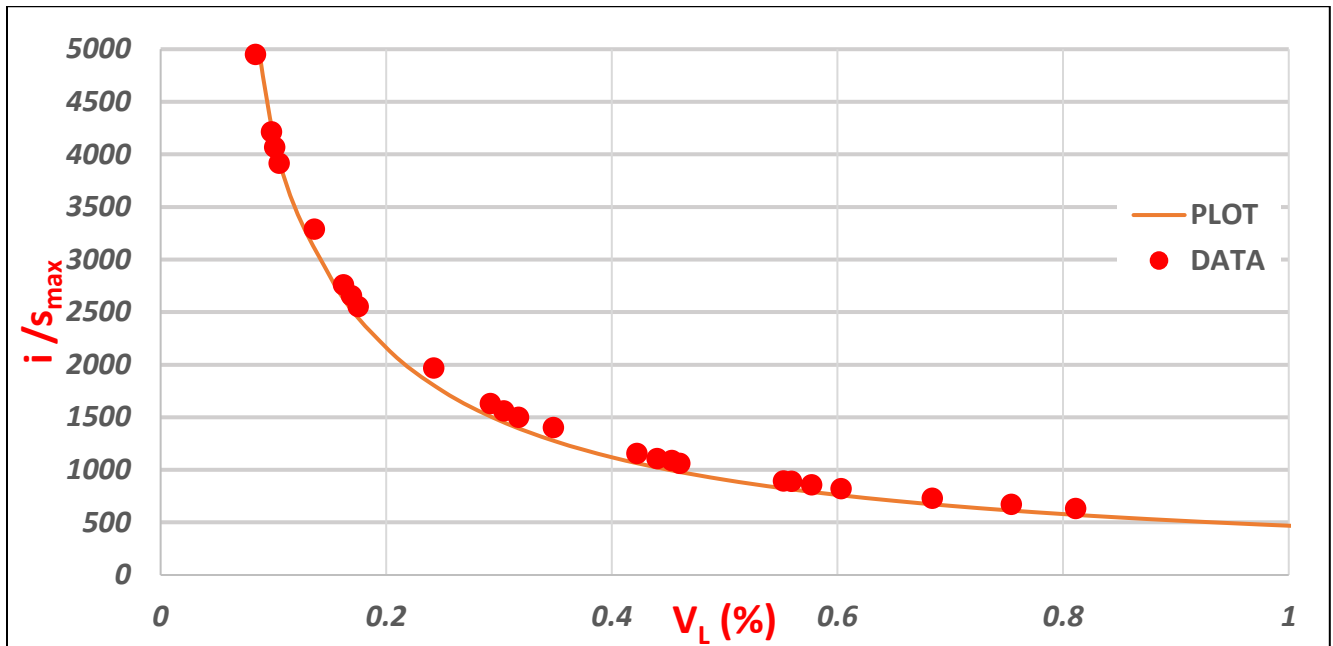
Διάγραμμα 5 26. Συσχέτιση $(i/s_{max})\%$ με V_L για $K_o=1$.



Διάγραμμα 5 27. Συσχέτιση (i/s_{max})% με V_L για $Ko=0.5$.

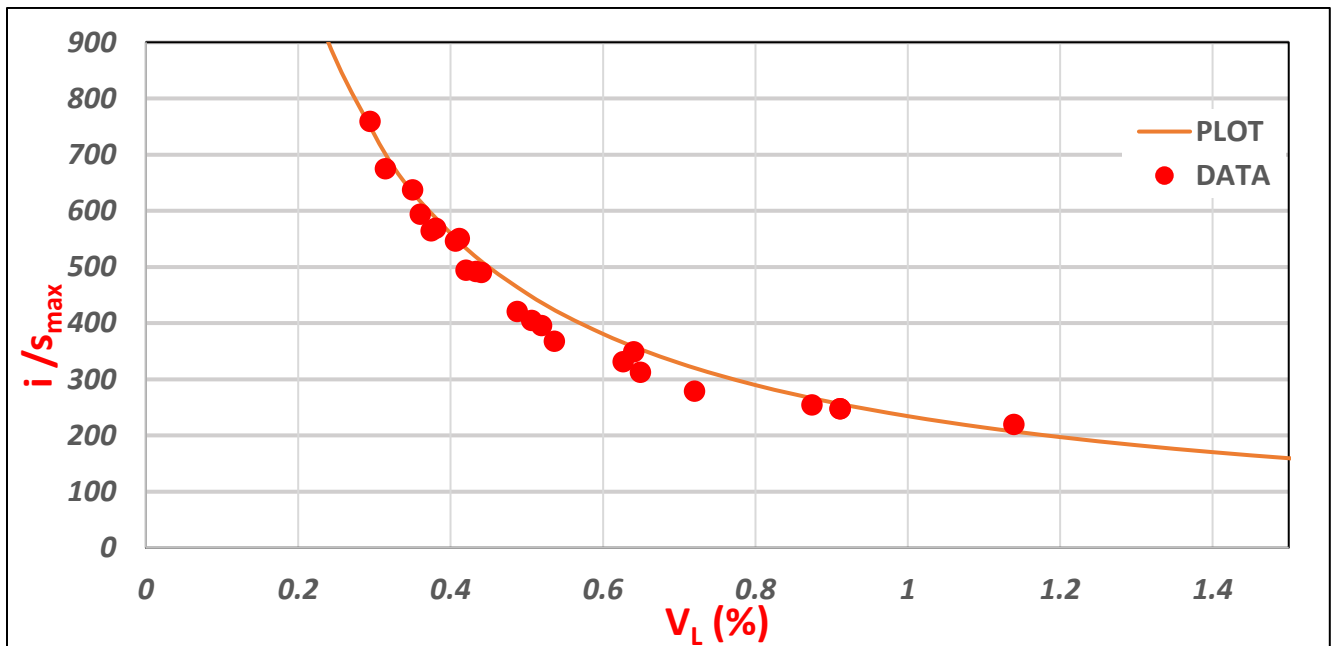
Στην συνέχεια παρατίθενται τα **Διαγράμματα 5.25 -5.30**, όπου παρουσιάζεται η **Σχέση 5.6**, σε σύγκριση με τα δεδομένα των αναλύσεων (**DATA**) για λόγους **H/D= 1.5, 2, 3** με **D= 10m**, για όλους τους τύπους εδαφών (**Πίνακας 4.2**).

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($Ko = 1$)



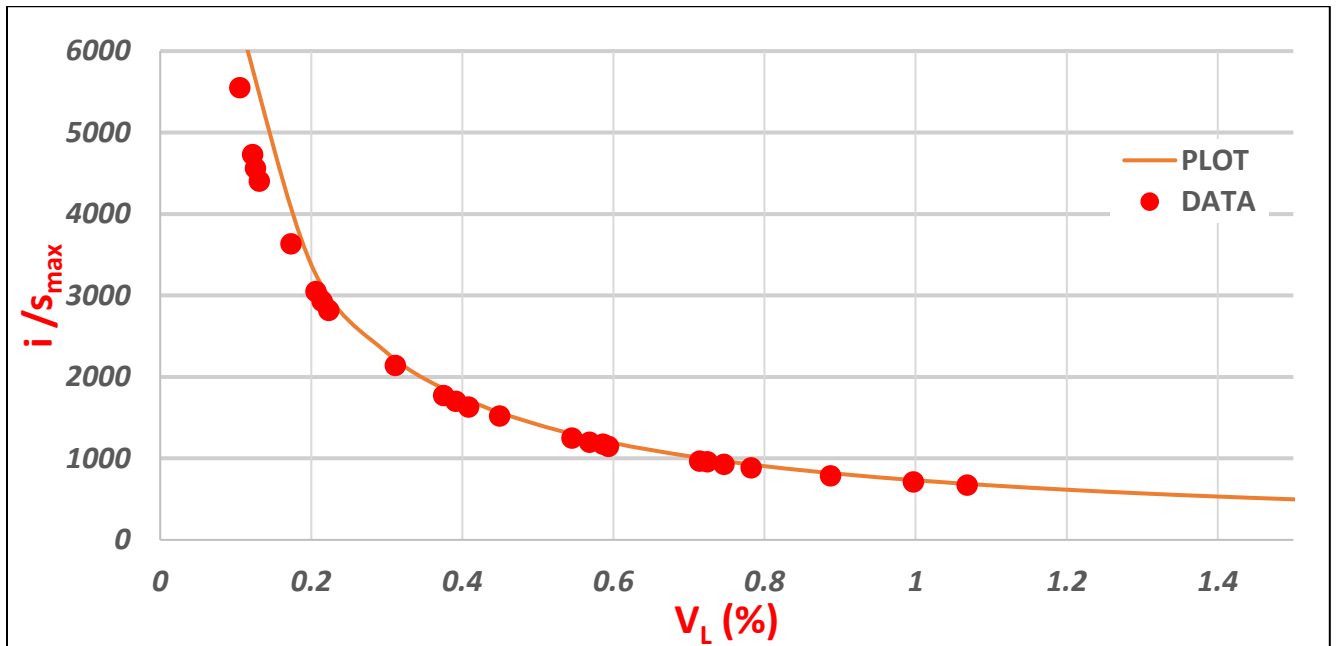
Διάγραμμα 5 28. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=1.5$ και $Ko=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=1.5$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($Ko = 0.5$)



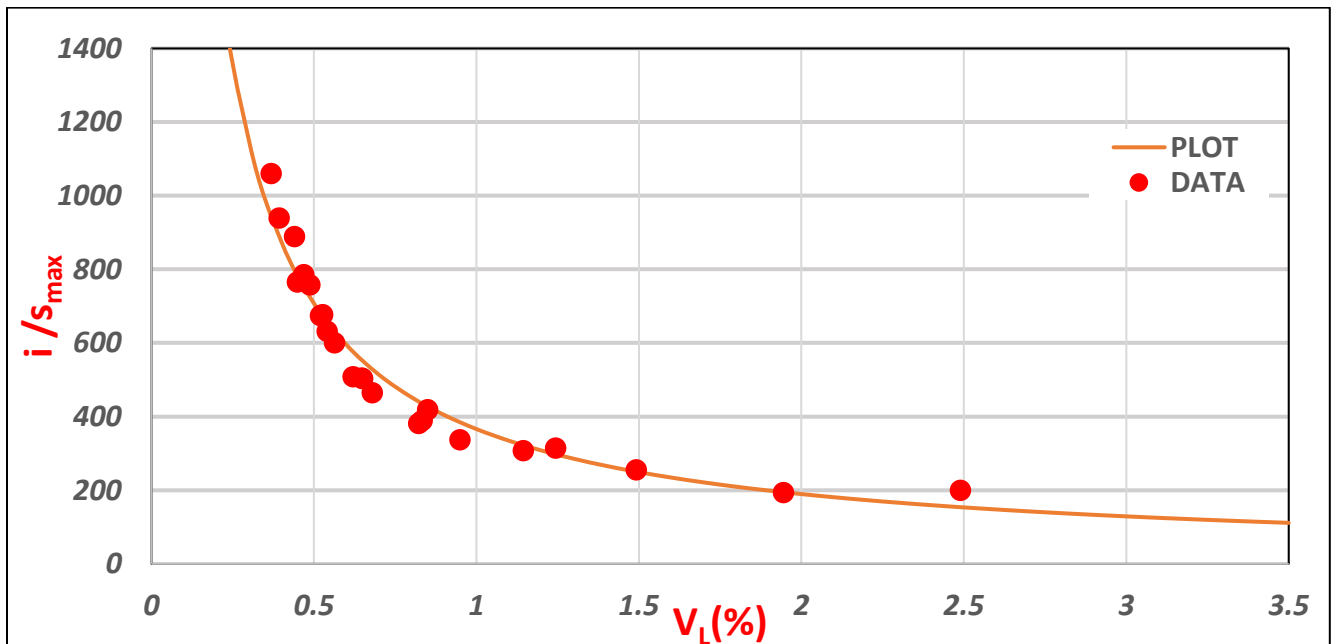
Διάγραμμα 5 29. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=1.5$ και $Ko=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 1$)



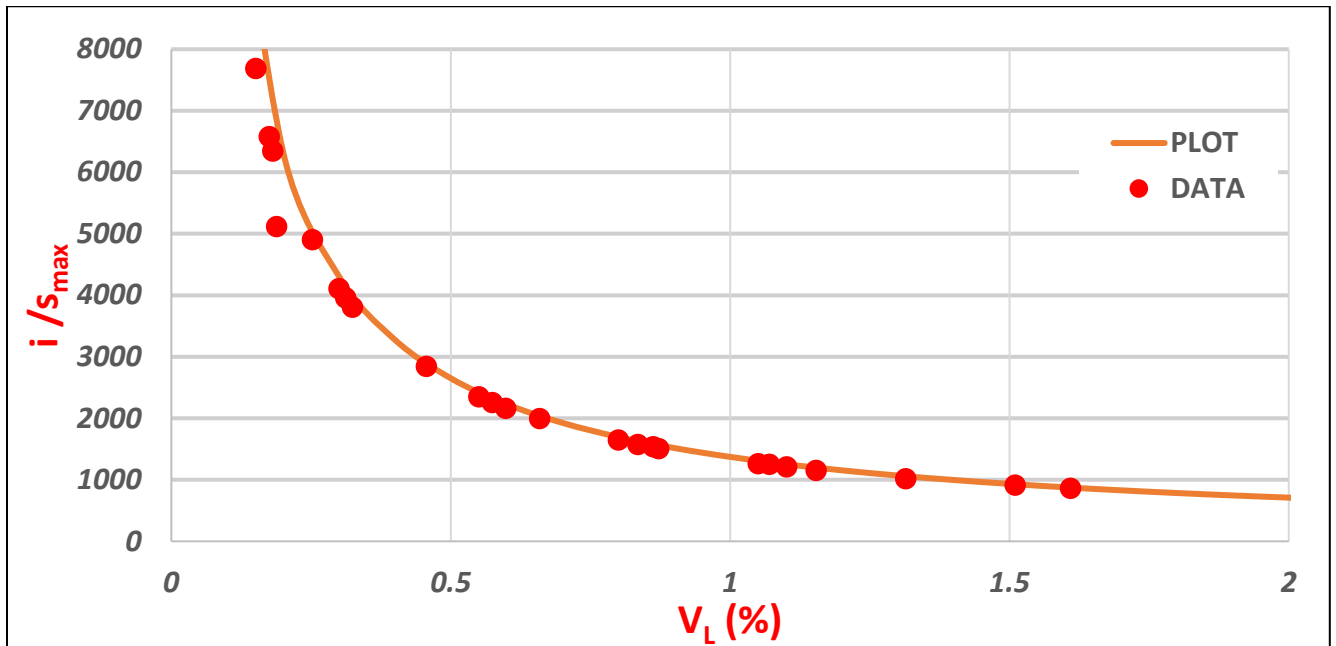
Διάγραμμα 5 30. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=2$ και $K_o=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=2$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 0.5$)



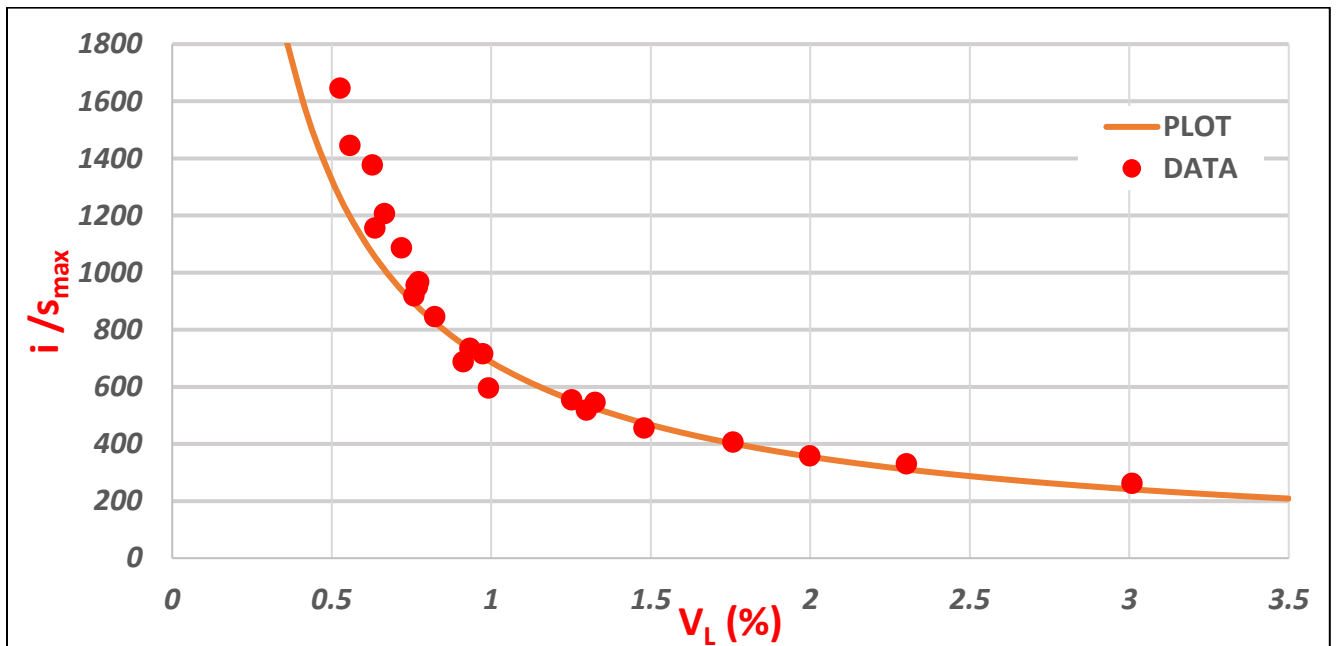
Διάγραμμα 5 31. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=2$ και $K_o=0.5$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 1$)



Διάγραμμα 5 32. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=3$ και $K_o=1$.

✓ Συσχέτιση για λόγο $H/D=3$ και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ($K_o = 0.5$)



Διάγραμμα 5 33. Συσχέτιση i/S_{max} με V_L για λόγο $H/D=3$ και $K_o=0.5$.

6. Μελέτη Περίπτωσης – Case Study

Στον παρόν κεφάλαιο θα εξετασθεί η εφαρμογή και η αποτελεσματικότητα των σχέσεων που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στο **Κεφάλαιο 5**. Συγκεκριμένα επιλέγουμε να εφαρμόσουμε τις σχέσεις που προτάθηκαν, στην περίπτωση της διάνοιξης της σήραγγας της Αττικό Μετρό Α.Ε, της επέκτασης της Γραμμής 2 (Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό).

Το έργο επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα Άγιος Δημήτριος - Ελληνικό, δημοπρατήθηκε τον Οκτώβριο του 2004. Περιλάμβανε την κατασκευή υπόγειας σιδηροδρομικής γραμμής μήκους 5,5 χλμ. με 4 νέους σταθμούς (ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, ΑΛΙΜΟΣ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ), η οποία προκρίθηκε έναντι της εναλλακτικής πρότασης που προέβλεπε την κατασκευή γέφυρας πάνω από την Λεωφόρο Βουλιαγμένης (**Σχήμα 6.1**).



Σχήμα 6. 1. Επέκταση της Γραμμής 2 της Αττικό Μετρό Α.Ε. «Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» (Πηγή: ametro.gr).

Ανάδοχος του έργου ανακηρύχθηκε η κοινοπραξία ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε. - SIEMENS A.G. - VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJECTS. Το έργο είχε συνολικό προϋπολογισμό 350 εκατομμύρια ευρώ και η κατασκευή του ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2007 με την εκσκαφή του Σταθμού ΕΛΛΗΝΙΚΟ. Τον Μάρτιο του ίδιου έτους ξεκίνησε η διάνοιξη της σήραγγας, η χάραξη της οποίας ακολουθεί τον οδικό άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης, με TBM (**Εικόνα 6.1**).



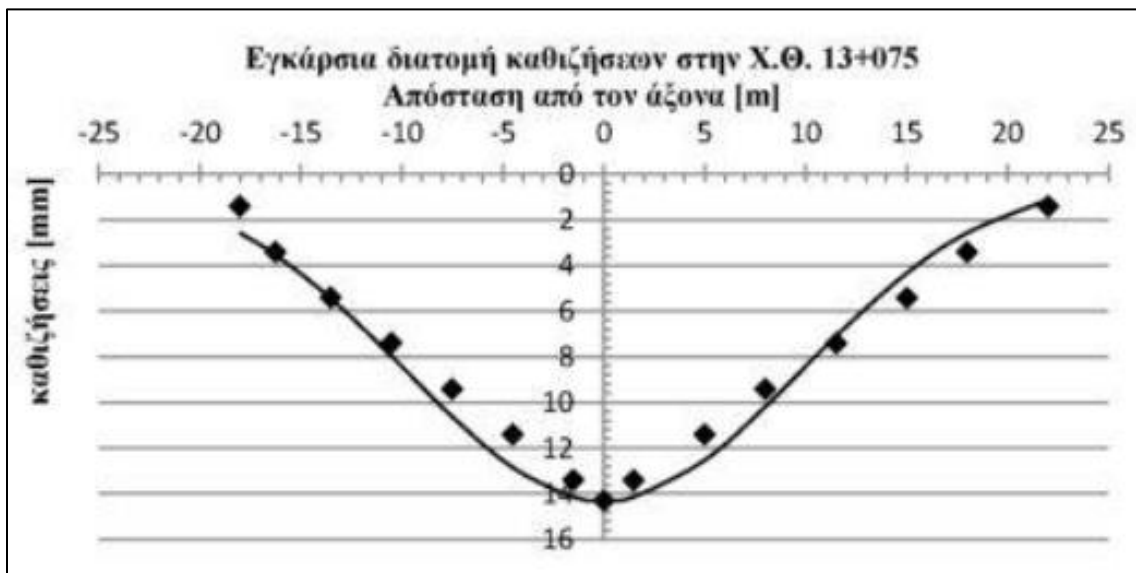
Εικόνα 6. 1. Μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων (EPB – TBM) κατά την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Πηγή: ametro.gr).

Το TBM ολοκλήρωσε την διαδρομή του στο Σταθμό ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ τον Σεπτέμβριο του 2008, έχοντας κατασκευάσει 4.650μ. σήραγγας και τον Ιανουάριο του 2009 ολοκληρώθηκε και η αποσυναρμολόγησή του.

Οι σταθμοί, τα φρέατα αερισμού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς και ο χώρος εναπόθεσης συρμών κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του ανοικτού ορύγματος με κοπή και επανεπίχωση. Οι σταθμοί έχουν μήκος 110 μ. και αποτελούνται από 3 επίπεδα με εισόδους και εξόδους και από τις δύο πλευρές της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Το έργο επίσης περιλαμβάνει και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών για τις ανάγκες λειτουργίας της επέκτασης. Η νέα επέκταση τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούλιο του 2013.

6.1. Ανάστροφη αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 13+075

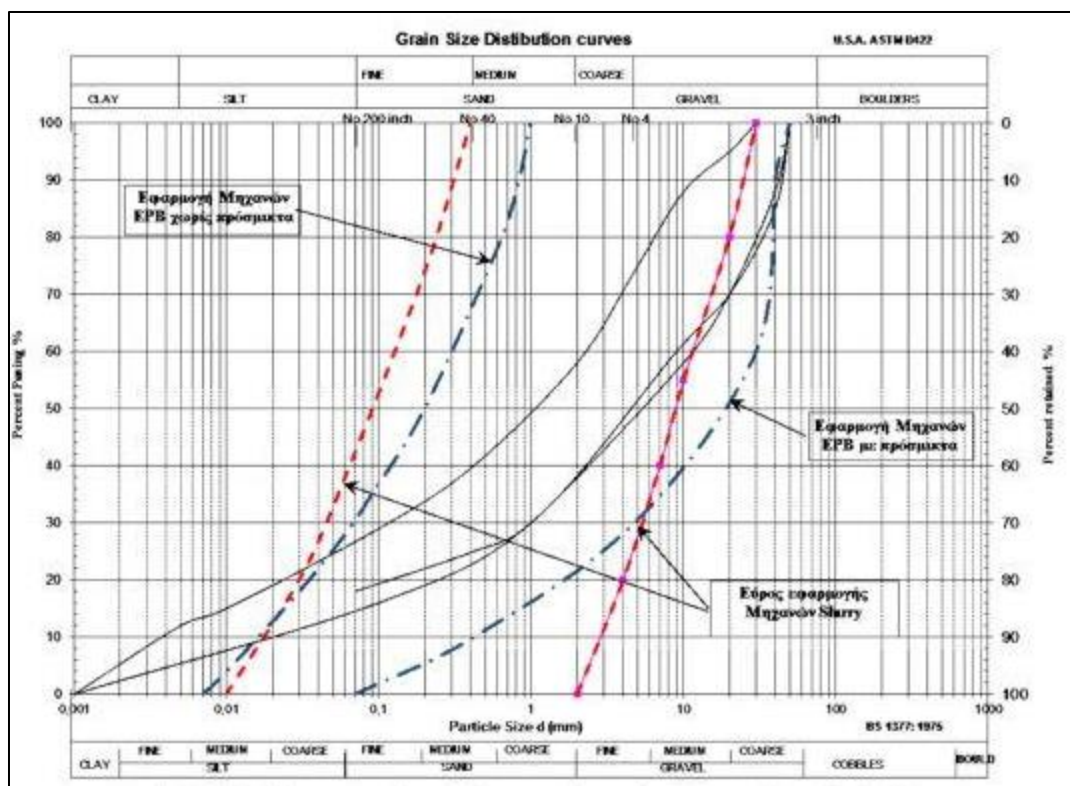
Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη Χ.Θ., διότι στην συγκεκριμένη θέση αναπτύχθηκαν μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η μετρηθείσα καμπύλη καθιζήσεων.



Σχήμα 6. 2. Εγκάρσια τομή καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 13+075 (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).

Το συγκεκριμένο τμήμα της επέκτασης ανήκει στο Τμήμα Γ όπου έχει συνολικό μήκος 1686m και εκτείνεται από την Χ.Θ. 13+336 έως την Χ.Θ. 11+650 όπου αντιστοιχεί στο μεσοδιάστημα των σταθμών «Αργυρούπολη» και «Άλιμος».

Στο συγκεκριμένο τμήμα ο εδαφικός σχηματισμός που συναντήθηκε είναι μαργαϊκός ασβεστόλιθος, ψαμμίτης, χάλικες κακής και καλής διαβάθμισης με ιλύ και άμμο και αργιλώδη άμμο. Σύμφωνα με το σύστημα AUSCS ο σχηματισμός ταξινομήθηκε ως: GP-GM, SC, GM, GW-GM. Η κοκκομετρική καμπύλη του συγκεκριμένου σχηματισμού παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.3** και οι γεωτεχνικές παράμετροι της συγκεκριμένης ενότητας στον **Πίνακα 6.1**.



Σχήμα 6. 3. Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους για το Τμήμα Γ (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).

Ειδικό βάρος εδάφους γ (kN/m^3)	23
Συνοχή c (kPa)	20
Γωνία εσωτερικής τριβής φ ($^\circ$)	32
Γωνία διαστολικότητας δ ($^\circ$)	8
Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	65
Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0	0.5
Διαπερατότητα εδάφους k (m/sec)	1×10^{-7}

Πίνακας 6. 1. Γεωτεχνικές παράμετροι Τμήματος Γ (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).

Η διάμετρος εκκαφής της σήραγγας είναι D=9.47m ενώ η υποστήριξη γίνεται με δακτυλίους οπλισμένου σκυροδέματος (segments), με ιδιότητες όπως αυτές που περιγράφονται στον **Πίνακα 4.3**.

Η στρωματογραφία του εδάφους στην Χ.Θ. 13+075, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.4**.

ΑΡΧΙΚΟ ΦΥΣΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ INITIAL GROUND LEVEL	±0,00	(+81,10)
Σχηματισμός 1 : Τεχνητές Επιχώσεις Formation 1 : Man made deposits	-0,80	(+80,30)
Σχηματισμός 5.1 : Συνεκτικά κορήματα Formation 5.1 : Cohesive recent scree	-5,00	(+56,10)
Σχηματισμός 9.1 : Μανδύας Αποσάθρωσης Μαργ. Ασβεστόλιθου - Ψαμμίτη Formation 9.1 : Weathered Mantle of Marly Limestone - Sandstone		
Σ.Υ.Ν. (GWL)	-6,00	(+55,10)
Σχηματισμός 9.2 α,β,γ : Μαργαϊκός ασβεστόλιθος έως ψαμμίτης Formation 9.2 a, b, c : Marly limestone - sandstone	-19,00	(+42,10)
Σχηματισμός 10.3 α,β,γ : Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος Formation 10.3 a,b,c : Black clayey schist		
T.O.R. (Ερυθρά χάραξης)	-21,20	(+41,70)
	-28,00	(+33,10)

Σχήμα 6. 4. Στρωματογραφία περί την Χ.Θ. 13+075 (Πηγή: Σ. Κουκουτάς).

6.1.1. Θεωρητικός υπολογισμός

Δεδομένου ότι η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση στην συγκεκριμένη θέση μετρήθηκε $s_{max}=14.7mm$ και για διάμετρο σήραγγας $D=9.47m$, χρησιμοποιήθηκε η **Σχέση 5.4 (Κεφάλαιο 5)**, όπου προκύπτει $N_\lambda=0.8738$.

$$\left(\frac{S_{max}}{D}\right) (\%) = a \times N_\lambda^{-0.81} \rightarrow N_\lambda = \mathbf{0.8738}$$

Για $N_\lambda=0.8738$, σύμφωνα με την **Σχέση 5.2 (Κεφάλαιο 5)**, η απώλεια όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L %) υπολογίστηκε σε **0.703%**.

$$V_L(\%) = a \times N_\lambda^{-0.81} \rightarrow V_L = \mathbf{0.703\%}$$

Για $N_\lambda=0.8738$, σύμφωνα με την **Σχέση 5.1 (Κεφάλαιο 5)**, ο βαθμός αποτόνωσης (λ) προκύπτει $\lambda=0.226$.

$$N_\lambda = \frac{\sigma_{cm}}{\lambda \times p_o} \rightarrow \lambda = \mathbf{0.225}$$

Για $V_L=0.703\%$ σύμφωνα με την **Σχέση 5.3 (Κεφάλαιο 5)**, η απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους (V_s %) υπολογίστηκε σε **0.521%**.

$$V_L(\%) = a \times V_s(\%)^b \rightarrow V_s = \mathbf{0.521\%}$$

Για $V_L=0.703\%$ και $s_{max}=14.7mm$ σύμφωνα με την **Σχέση 5.6 (Κεφάλαιο 5)**, η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα της σήραγγας (i) υπολογίστηκε σε $i=8.95m$.

$$\left(\frac{i}{S_{max}}\right) = a \times V_L^{-0.95} \rightarrow i = \mathbf{8.95m}$$

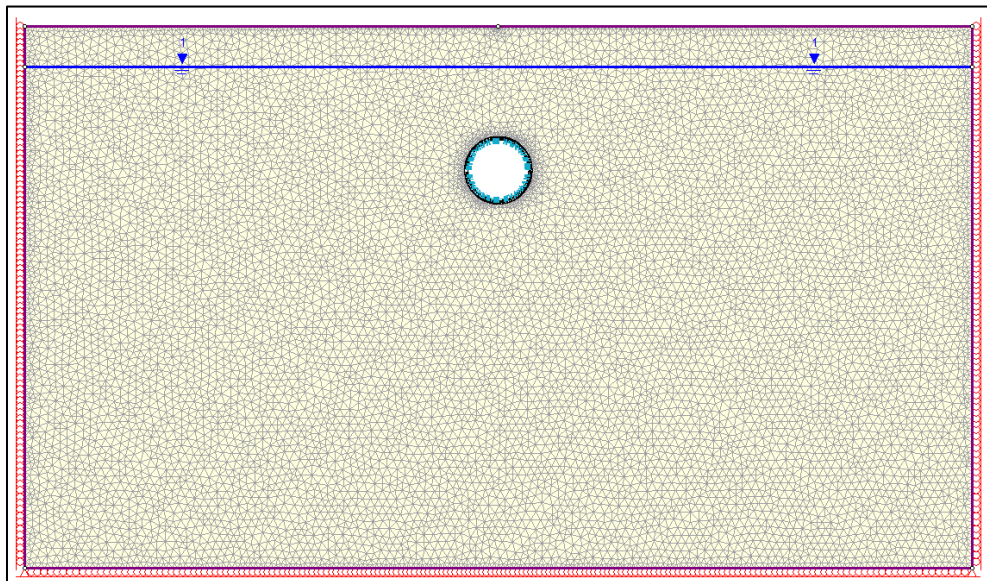
Συνοψίζοντας προκύπτουν οι ακόλουθες παράμετροι, βάση του θεωρητικού υπολογισμού, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.2**.

N_λ	0.8738
λ (%)	22.5
V_L (%)	0.703
V_s (%)	0.521
i (m)	8.95

Πίνακας 6. 2. Αποτελέσματα θεωρητικού υπολογισμού για case study.

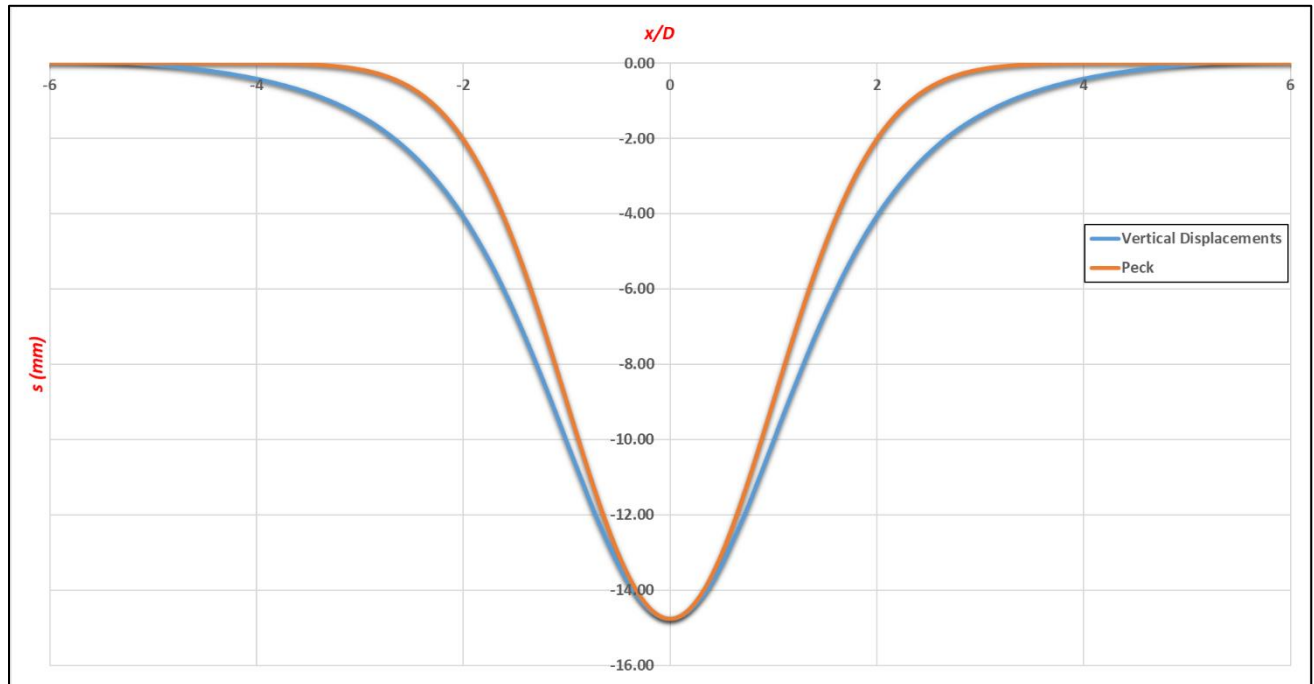
6.1.2. Αναλυτικός υπολογισμός

Βάση των γεωμετρικών δεδομένων της Χ.Θ. 13+075 (**Σχήμα 6.4**) και των γεωτεχνικών παραμέτρων της συγκεκριμένης θέσης (**Πίνακας 6.1**), προσομοιώθηκε η συγκεκριμένη θέση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2. 2019, με τις βασικές παραδοχές όπως περιεγράφηκαν στην **Ενότητα 4.13**. Το προσομοίωμα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.2**.



Εικόνα 6. 2. Προσομοίωμα Χ.Θ. 13+075.

Στο **Διάγραμμα 6.1** παρουσιάζεται η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως προκύπτει από τα την αριθμητική ανάλυση, όπου εντός αυτού παρουσιάζεται και η καμπύλη που προτείνει ο Peck (**Ενότητα 3.4.1**).



Διάγραμμα 6. 1. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για την Χ.Θ. 13+075, βάσει αναλυτικού υπολογισμού.

Επίσης στον **Πίνακα 6.3**, παρουσιάζονται τα υπόλοιπα μεγέθη που υπολογίστηκαν βάση της αριθμητικής ανάλυσης.

S_{max} (mm)	14.76
V_L (%)	0.637
V_s (%)	0.452
i (m)	9.5

Πίνακας 6. 3. Μετρούμενα μεγέθη από αριθμητική ανάλυση case study.

Συνοψίζοντας, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 6.4, τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων πλησιάζουν πολύ τα αποτελέσματα των προτεινόμενων σχέσεων του Κεφαλαίου 5, γεγονός που επαληθεύει τις σχέσεις που προτάθηκαν.

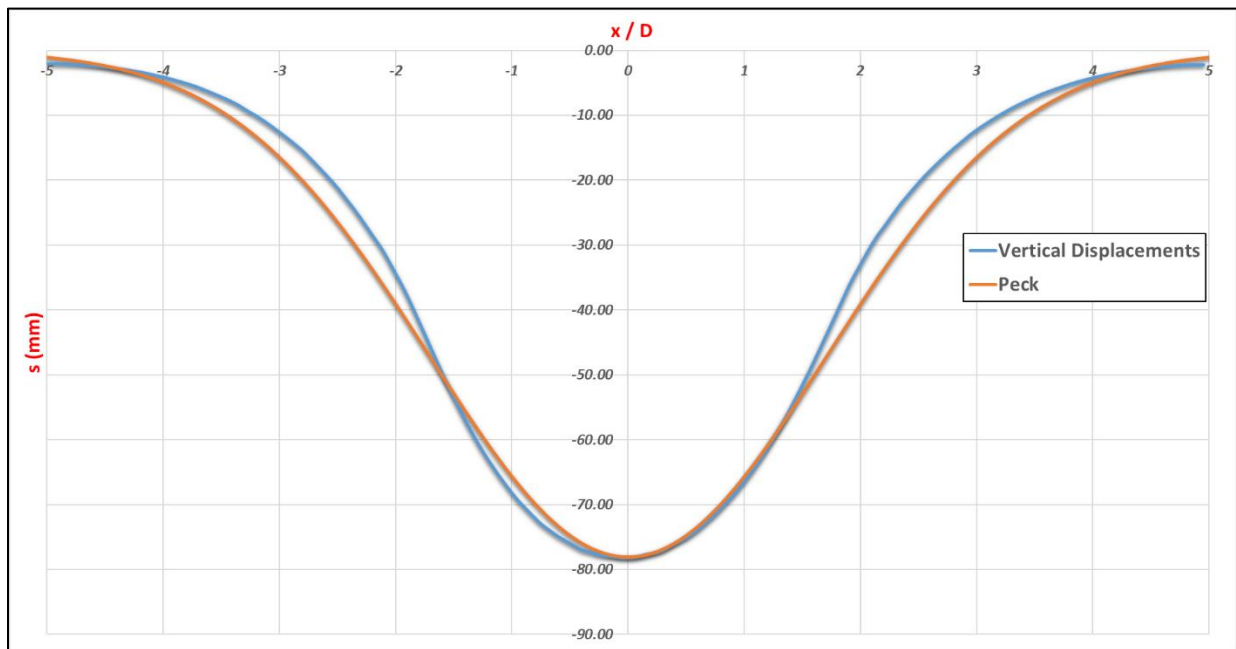
	<i>Θεωρητικός Υπολογισμός</i>	<i>Αναλυτικός Υπολογισμός</i>
<i>S_{max} (mm)</i>	<i>14.7</i>	<i>14.76</i>
<i>V_L (%)</i>	<i>0.703</i>	<i>0.637</i>
<i>V_s (%)</i>	<i>0.521</i>	<i>0.452</i>
<i>i (m)</i>	<i>8.95</i>	<i>9.5</i>

Πίνακας 6. 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρητικού και αναλυτικού υπολογισμού.

7. Συμπεράσματα - Προτάσεις

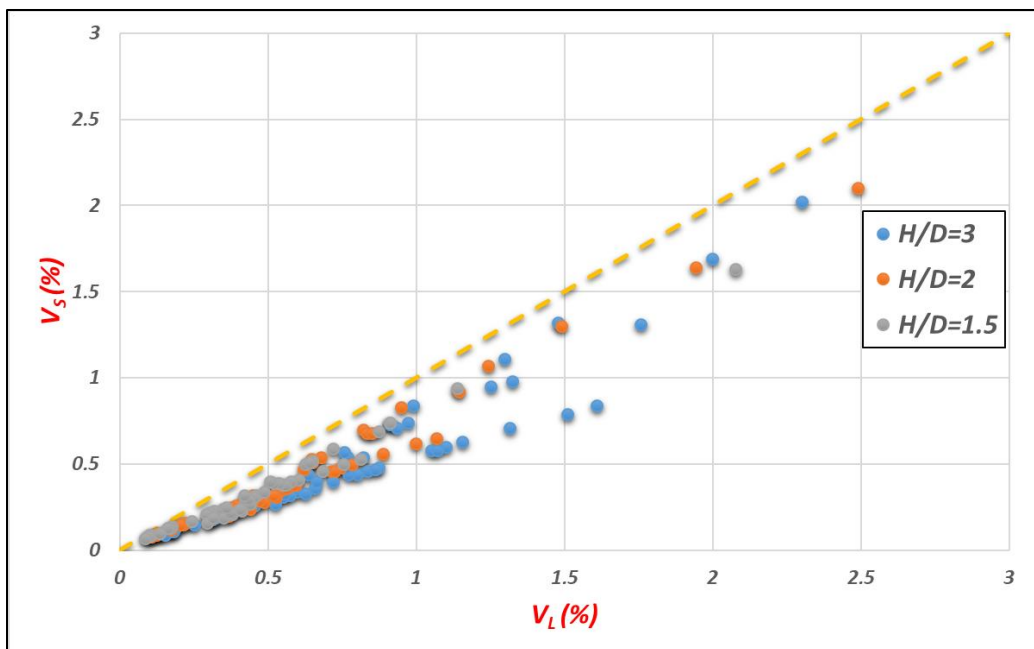
Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την συγκεκριμένη εργασία, εντοπίζονται στις εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη ρηχών σηράγγων και την σύγκρισή τους με τις προτεινόμενες από την παρούσα εργασία, σχέσεις.

- Αρχικά παρατηρούμε ότι η εμπειρική σχέση του Peck (1969) με την οποία αποδίδεται η κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων υπό μορφή καμπύλης Gauss, βρίσκει πλήρη ταύτιση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το **Διάγραμμα 7.1**, όπου παρουσιάζεται το profile των καθιζήσεων σε ένα ασθενές έδαφος για μεγάλη απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (ground loss).



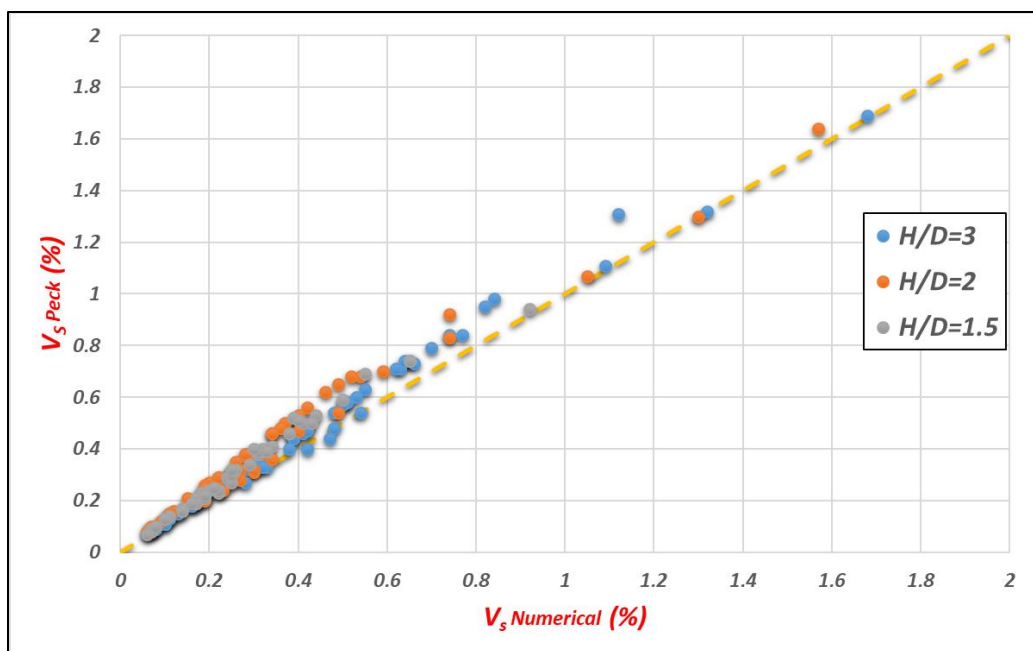
Διάγραμμα 7. 1. Συσχέτιση καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων από αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, με προτεινόμενη καμπύλη κατά Peck.

- Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση της απώλειας επιφανειακού εδαφικού όγκου (volume loss) V_s με την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (volume loss) V_L (γραμμική σχέση), όπως προτείνουν οι περισσότεροι ερευνητές μέχρι και σήμερα. Η συσχέτισή τους παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 7.2**.



Διάγραμμα 7. 2. Συσχέτιση V_L με V_S

- Παρατηρούμε ότι η θεωρητική απώλεια επιφανειακού εδαφικού όγκου (volume loss) V_S κατά Peck (1969), βρίσκει πλήρη ταύτιση με τον αντίστοιχη απώλεια όγκου που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις, όπως παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 7.3**.



Διάγραμμα 7. 3. Συσχέτιση πραγματικού V_L με θεωρητικού V_S .

- Όπως περιγράφηκε στην **Ενότητα 4.2.4**, το σημείο καμπής (i) της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων, επηρεάζεται από το ύψος των υπερκείμενων γαιών και τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων.
- Από την μελέτη περίπτωσης (case study), που πραγματοποιήθηκε στο **Κεφάλαιο 6**, παρατηρούμε ότι οι προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού των επιφανειακών καθιζήσεων της παρούσας εργασίας, βρίσκουν εφαρμογή και ταύτιση με πραγματικές μετρήσεις.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία προτείνει την συνέχιση της έρευνας σε θέματα εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης ρηχών σήραγγων, με περαιτέρω διερεύνηση:

- **Της επιρροής της διαμέτρου της σήραγγας.**
- **Της επιρροής της υποστήριξης της σήραγγας.**
- **Της μεθόδου εκσκαφής της σήραγγας (π.χ. μέθοδος NATM).**
- **Της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας (E) στο μέγεθος των προκαλούμενων καθιζήσεων.**
- **Της επιρροής υδροφόρου ορίζοντα στην μορφή και το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων.**

8. Βιβλιογραφία

- Rowe, R. K., K. Y. Lo, and G. J. Kack. "A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground." *Canadian geotechnical journal* 20.1 (1983): 11-22.
- Gunn, M. J. "The prediction of surface settlement profiles due to tunnelling." *Predictive soil mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium held at St Catherine's College, Oxford, 27-29 July 1992*. Thomas Telford Publishing, 1992.
- Mair, R. J., R. N. Taylor, and A. Bracegirdle. "Subsurface settlement profiles above tunnels in clays." *Geotechnique* 43.2 (1993): 315-320.
- Fang, Y. S., J. S. Lin, and C. S. Su. "An estimation of ground settlement due to shield tunnelling by the Peck–Fujita method." *Canadian geotechnical journal* 31.3 (1994): 431-443.
- Kavvadas, M., et al. "Experiences from the construction of the Athens Metro." *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London*. 1996.
- Mihalís, I., and M. Kavvadas. "Ground movements caused by TBM tunnelling in the Athens Metro Project." *Proc. Int. Symp. on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 1999.
- Ercelebi, S. G., H. Copur, and I. OcaK. "Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM." *Environmental Earth Sciences* 62.2 (2011): 357-365.
- Chakeri, Hamid, Yılmaz Ozcelik, and Bahtiyar Unver. "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB." *Tunnelling and Underground Space Technology* 36 (2013): 14-23.
- Ξανθούλη, Μαρία-Γαρυφαλλιά Ε. *Παραμετρική ανάλυση επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης αβαθούς σήραγγας*. BS thesis. 2011.
- Δημακόπουλος, Αθανάσιος Π. *Μελέτη των καθιζήσεων λόγω διάνοιξης δίδυμης σήραγγας μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Αγία Σοφία-Πανεπιστήμιο*. MS thesis. 2011.
- Βώβου, Θεοδώρα Δ. *Επιτελεστικότητα των μηχανών EPB κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Η περίπτωση του Μετρό Θεσσαλονίκης*. BS thesis. 2014.
- Μονεμβασιώτη, Κατερίνα Σ. *Διερεύνηση Επιφανειακών Καθιζήσεων Προκληθεισών από Μηχανοποιημένη Διάνοιξη σε Μαλακό Έδαφος: Επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό*. MS thesis. 2014.
- Κουκουτάς, Στυλιανός. "Επιτελεστικότητα Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής Διάνοιξης Αβαθών Σηράγγων." (2016).
- Σημειώσεις μαθήματος «Αβαθείς Σήραγγες, Αντιστηρίξεις, Καθιζήσεις στη επιφάνεια του εδάφους», Β. Παπαδόπουλος, Ε.Μ.Π., 2017.