



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Δ.Π.Μ.Σ. «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ
ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΑΒΑΘΟΥΣ
ΣΗΡΑΓΓΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ Β.ΓΡΑΙΚΟΥΣΗ

ΕΠΙΒΛΗΠΕΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μ.ΚΑΒΒΑΛΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2020

Στους γονείς μου

Περίληψη

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη των καθιζήσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε ρηχή σήραγγα κυκλικής διατομής και γίνεται παραμετρική διερεύνηση διαφόρων μεγεθών σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και της εντατικής της κατάστασης.

Κατά τη συμβατική διάνοιξη χρησιμοποιούνται μέτρα υποστήριξης για την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Συνήθως αγκύρια μετώπου από υαλονήματα (fiberglass) και δοκοί προπορείας (forepoles). Κατά τη μηχανοποιημένη προσφέρεται η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης από τις μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM.

Σκοπός της εργασίας είναι να εξαχθούν τα αποτελέσματα των καθιζήσεων όπως περιγράφονται από την καμπύλη Gauss και να συγκριθούν με τις καθιζήσεις από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε. Ακόμα, συσχετίζονται τα παρακάτω μεγέθη, μέγιστη καθίζηση $S_{n,max}$, το σημείο καμπής i , ο όγκος εδάφους που χάνεται στη διατομή της σήραγγας λόγω των συγκλίσεων των τοιχωμάτων κατά την διάνοιξη (GL %) καθώς και η ευστάθεια μετώπου με τον δείκτη ευστάθειας L_f όπως προτάθηκε από τον Προυντζόπουλο (2012).

Δημιουργήθηκε μοντέλο σήραγγας στο πρόγραμμα PHASE2D και κατόπιν επιλύθηκε ένα πλήθος παραμετρικών αναλύσεων σε εδάφη με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, για τέσσερα υπερκείμενα, δύο τιμές του δείκτη οριζοντίων ωθήσεων K_0 και πέντε τιμές αποτόνωσης λ . Διερευνήθηκε η επιρροή διαφόρων παραμέτρων πάνω στις μετατοπίσεις.

Λέξεις Κλειδιά: σήραγγα, καθιζήσεις, μηχανοποιημένη διάνοιξη, αστικό περιβάλλον, σημείο καμπής, απώλεια όγκου εδάφους, συντελεστής ευστάθειας μετώπου, Phase2D, Peck, καμπύλη Gauss

Abstract

Abstract

This thesis is about the study of tunnel induced settlements in the transverse settlement trough for a shallow tunnel with circle section.

During the tunnel excavation (without TBM) there is the demand of supporting the face with two usually applied methods either with fiberglass or with forepoles. During mechanized excavation with TBM and Shield Machines the support pressure for the stability of the opening is offered by the shields and generally via the operation of TBMs.

The purpose of the analyses is to correlate the surface settlements in the transverse which direction are described from the exponential Gauss equation, with the results of the FEA program. Moreover, correlations between several parameters have been conducted. These parameters are max settlement $S_{v,max}$ in the transverse direction, the inflection point i , the amount of ground loss at the opening during the converge of the tunnel walls during the excavation and also the stability ratio of (Proutzopoulos 2012)

A tunnel model was created on Phase2D software and various sets of parametrical analyses were run on various soil profiles with different mechanical characteristics. The soil profiles are examined in terms of two values of the horizontal stress factor K_0 , four excavation depths and five values of stress relief factor λ . The impact on surface settlements and face extrusion was put to test due to the above parameters.

Key-Words: shallow tunnel, surface settlements, TBM, urban tunnelling, inflection point, ground loss, volume loss stability face ratio , Phase2D,Peck,Gauss exponential equation

Ευχαριστίες

Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, κ. Μιχάλη Καββαδά, που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντάς μου την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Κυρίως όμως, τον ευχαριστώ θερμά για την κατανόηση και τον χρόνο που μου έδωσε για την ολοκλήρωσή της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Γεωργίου για όλη τη συνεργασία μας. Με έμαθε να χειρίζομαι το Phase στα πλαίσια αυτής της εργασίας αυτής και με βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Τέλος, αυτήν την εργασία την οφείλω στους γονείς μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή.....	15
1.1 Σημασία της διάνοιξης στις καθιζήσεις	15
1.1.1 Επιφανειακές καθιζήσεις	16
1.1.2 Κατηγοριοποίηση των καθιζήσεων	17
1.1.3 Παράγοντες επιρροής της απώλειας εδαφικού όγκου (VL)	18
1.1.4 Πλήρωση με ένεμα στο δακτυλιοειδές κενό.....	21
1.1.5 Ορισμός απώλειας εδάφους και απώλειας όγκου	21
Κεφάλαιο 1.2 - Σημασία καθιζήσεων (κτίρια).....	23
Κεφάλαιο 1.3: Ανάγκη αριθμητικής διερεύνησης	28
1.3.1 Μέθοδος Gap	30
1.3.2 Μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης (Converge-Confinement Method –λ- ή –β- μέθοδος).....	33
1.3.2.1 Μετάθεση του τρισδιάστατου προβλήματος σε δύο διαστάσεις	34
1.3.2.1 a Διάνοιξη σε έδαφος(βραχώμαζα)-κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	36
1.3.2.1 b Διάνοιξη σε άρρηκτο βράχο-κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown	37
1.3.2.2 Καμπύλες “Panet” σε υποστηριζόμενη σήραγγα	39
1.3.3 Μέθοδος προοδευτικής χαλάρωσης (Progressive Softening Method)	40
1.3.4 Μέθοδος απώλειας όγκου εδάφους Volume Loss	41
Κεφάλαιο 1.4- Εμπειρική Διερεύνηση	42
1.4 Διερεύνηση των καθιζήσεων	42
1.4.1 Εισαγωγή	42
1.4.2 Μηχανισμοί αστοχίας.....	43
1.4.3 Διάδοση των εδαφικών μετακινήσεων στην ελεύθερη εδαφική επιφάνεια	44
1.4.4 Βήματα εκτίμησης των καθιζήσεων.....	45
1.4.5 Καθιζήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Peck & Schmidt)	46
1.5.6 Υπολογισμός S_v, \max και $S_v(x)$ μέσω του (VL) και (Vs)	49
1.4.7 Οριζόντιες μετακινήσεις στην εγκάρσια διεύθυνση.....	50
1.4.8 Μέγιστη καθίζηση S_{\max}	53
1.4.9 Απώλεια όγκου V_{loss}	53
1.4.10 Σημείο καμψής.....	57
Κεφάλαιο 2: Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων.....	61
2.1 Διάνοιξη με μηχανικά μέσα TM(Tunnel Machines)	61

2.2	Επιλογή της μεθόδου διάνοιξης.....	62
2.2.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μηχανοποιημένης διάνοιξης	63
2.2.2	Διάνοιξη σύμφωνα με την Οδηγία του «ΕΛΟΤ»	64
2.3	Διάνοιξη με μηχανές σημειακής προσβολής PFM (Partial Face Machines)	66
2.4	Διάνοιξη με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machines).....	68
2.4.1	Γενικά στοιχεία.....	68
2.4.2	Βασικές Αρχές.....	69
2.4.3	Σχηματική ταξινόμηση των μηχανών	70
2.5	Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM χωρίς ασπίδα	74
2.6	Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM με ασπίδα.....	75
2.7	Συστατικά μέρη των μηχανών TBM	76
2.7.1	Σύστημα διάτρησης-Κοπτική Κεφαλή (boring system-cutting head)	76
2.7.2	Σύστημα Αποκομιδής Υλικού	80
2.7.3	Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης της μηχανής (main drive)	81
2.7.4	Κύριο Εφέδρανο (main bearing).....	81
2.8	Σύστημα προώθησης και στήριξης της μηχανής (thrust and clamping)	82
2.8.1	Σε μηχανή TBM- Griper με σύστημα μονής πάκτωσης.....	83
2.8.2	Σε μηχανή TBM-Gripper με σύστημα διπλής πάκτωσης.....	87
2.9	Υποστήριξη Μετώπου	88
2.10	Στήριξη της βραχόμαζας (Support)	90
2.11	Η μόνιμη επένδυση στην μηχανοποιημένη διάνοιξη	95
2.11.1	Διαστάσεις των προκατασκευασμένων στοιχείων	97
2.11.2	Κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων- segments	99
2.11.3	Διάταξη των προκατασκευασμένων στοιχείων	101
2.11.4	Δακτύλιος τύπου Universal	103
2.12	Διάνοιξη με μηχανές ολομέτωπης κοπής με ασπίδες SM	104
2.12.1	Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM με ασπίδα.....	104
2.12.2	Βασικές αρχές.....	105
2.12.3	Μέθοδοι υποστήριξης του μετώπου	106
2.13	Ταξινόμηση των Μηχανών	108
2.14	Μηχανές κύριας δοκού	112
2.14.1	Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα οροφής: TBM-GS.....	112
2.14.2	Μηχανή διεύρυνσης (Reamer TBM) χωρίς ασπίδα	113
2.14.3	TBM μερικής ασπίδας, TBM-G-S	114

2.15 Μηχανές με ασπίδα ολομέτωπης κοπής και μερικής κοπής.....	116
2.15.1 Μηχάνημα χωρίς στήριξη μετώπου (SM_T1)	116
2.15.2 Μηχάνημα μερικής στήριξης μετώπου (OFS, SM_T2)	117
2.15.3 Μηχάνημα πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air, SM_T3, SM_V3)	117
2.15.4 Μηχανή στήριξης μετώπου με αιώρημα (SM_T4).....	118
2.15.5 Διπλής ασπίδας TBM (Double Shield Machine)	118
2.15.6 TBM εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB, SM-V5)	120
2.15.7 TBM Πολφού (Slurry Shield Machine).....	125
2.16 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή μεταξύ EPBs και SPBs.....	128
2.17 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και ομοιότητες σχεδιασμού	130
2.18 Εξισορρόπηση πίεσης μετώπου	130
2.19 Πρόσθετα και επιλογή μηχανής υποστήριξης μετώπου.....	131
2.20 Βασικά κριτήρια επιλογής.....	131
2.21 Παραδείγματα κατασκευής σηράγγων με χρήση μηχανών EPB και SPB	132
Κεφάλαιο 3: Αριθμητικές Αναλύσεις	134
3.0 Περιγραφή εργασίας.....	134
3.1 Περιγραφή μοντέλου	134
3.1.1 Περιγραφή Υλικών.....	138
3.1.1α Σκυρόδεμα	138
3.1.1β Έδαφος	138
3.2 Αποτελέσματα	139
3.2.1 Μετατοπίσεις-Καθιζήσεις	139
3.2.1.1 Αναφορά στο συντελεστή ευστάθειας μετώπου Προυντζόπουλος (2012).....	142
3.2.2 Αποτόνωση της σήραγγας.....	144
3.2.3 Καθιζήσεις στην εγκάρσια διεύθυνση	146
3.2.4 Σημείο Καμπής i	155
3.2.5 Συσχέτιση GL με το συντελεστή αποτόνωσης λ	159
3.2.6 a -Συσχέτιση GL(%) με το συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_f	163
3.2.6 b- Συσχέτιση προτεινόμενης σχέσης GL(%) με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_f	168
3.2.7 Συσχέτιση $S_{v,max}/D$ με την απώλεια όγκου εδάφους (GL %)	173
3.2.8 Συσχέτιση $S_{v,max}/i$ με την απώλεια όγκου εδάφους (GL %).....	174
Βιβλιογραφία	176

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή

1.1 Σημασία της διάνοιξης στις καθιζήσεις

Η διάνοιξη σήραγγας σε μαλακό έδαφος αναπόφευκτα προκαλεί εδαφικές μετακινήσεις (καθιζήσεις). Η μηχανοποιημένη διάνοιξη είναι συνυφασμένη με την απώλεια εδαφικού υλικού (Ground Loss) το οποίο συνδέεται με τις μετακινήσεις, /υποχωρήσεις των τοιχωμάτων της, κατά την διέλευση της μηχανής, ως αποτέλεσμα της διαταραχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την αποτόνωση των επί τόπου τάσεων. Η διαταραχή συμβαίνει μέχρι να προσφερθεί η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και την μόνιμη επένδυση και την αποκατάσταση της ισορροπίας. Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την αποκατάσταση της ισορροπίας τα τοιχώματα της σήραγγας συγκλίνουν σε απόσταση 0.50 έως 0.75 D μπροστά από το μέτωπο, στο μέτωπο έχει συμβεί το 25 με 35 % της συνολικής σύγκλισης και ολοκληρώνονται πίσω από το μέτωπο σε απόσταση 1.5D. Κατά την εκσκαφή το ανυποστήριχτο ή μερικώς υποστηριγμένο έδαφος γύρω από τη σήραγγα μετακινείται προς το εσωτερικό της λόγω της αποτόνωσης των τάσεων κατά την προώθηση της μηχανής και λόγω των μικρών κενών μεταξύ των τμημάτων της μηχανής TBM με το περιβάλλον, έως ότου τα μέτρα υποστήριξης και η μόνιμη επένδυση να προσφέρουν την παθητική στήριξη στην βραχώμαζα και αποκαταστήσουν την ισορροπία.

Κατά την εκσκαφή με την προχώρηση των εδαφικών μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας αφαιρείται μεγαλύτερος όγκος υλικού από τον θεωρητικό όγκο εδάφους. Η επιπλέον ποσότητα του όγκου που χάνεται ονομάζεται απώλεια εδαφικού όγκου (V_L). Ορίζεται ως ο ποσοστιαίος % λόγος του όγκου εδάφους ανά μονάδα μήκους (m^3/m) που χάνεται προς το εμβαδόν της διατομής m_2 . Ο όγκος που χάνεται στο βάθος εκσκαφής προκαλεί αλυσιδωτές μετακινήσεις που φτάνουν μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους και εκδηλώνονται ως καθιζήσεις στην επιφάνεια (V_s). Οι επιφανειακές καθιζήσεις συνδέονται με τον όγκο απώλειας εδάφους ο οποίος ξεκινάει με την διάνοιξη της σήραγγας και μέχρι την αποκατάσταση της ισορροπίας έχει μετατοπιστεί προς την εκσκαφή.

Το μέγεθος του όγκου του εδάφους που αφαιρείται περίξ του μετώπου εκσκαφής και του περιβάλλοντος γύρω από τη σήραγγα επηρεάζει η ποιότητα της βραχώμαζας και η μέθοδος διάνοιξης. Προγενέστερη εμπειρία από μηχανές διάνοιξης έδειξε ότι σε κοκκώδη και μαλακές αργίλους εδάφη η χρήση των μηχανών κλειστού μετώπου Slurry TBM και EPB TBM πετυχαίνει μεγαλύτερο ποσοστό ελέγχου των καθιζήσεων και μικρές τιμές V_L . Στα κοκκώδη τάξεως $V_L < 0.5$ % και σε μαλακές αργίλους από 1% έως 2% χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μακροχρόνιες καθιζήσεις. Ακόμα καταγραφές της **Ata** (1996) έδειξαν τιμές V_L μεταξύ 0,2 έως 1% σε σήραγγα διαμέτρου 9,48m, βάθους 16m σε αμμώδες έδαφος διανοιγμένη με TBM πολφού. Στους περισσότερους εδαφικούς σχηματισμούς ο όγκος της σκάφης των

επιφανειακών καθιζήσεων (V_s) οριακά ισούται με την απώλεια όγκου εδαφικού υλικού μέσα στη σήραγγα (V_L). Στην περίπτωση διάνοιξης αβαθούς σήραγγας σε έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, προκύπτει ότι η απώλεια του όγκου των επιφανειακών καθιζήσεων (V_s), ισούται με την απώλεια του όγκου μέσα στην σήραγγα (V_L), ενώ υπό στραγγισμένες συνθήκες ισχύει ότι (V_s) < (V_L) εξαιτίας της διαστολικότητας των εδαφών εκτιμώντας ότι (V_s)=0.7 (V_L) Σε χαλαρά κοκκώδη η ψαθυρά υλικά εκτιμάται λόγω αρνητικής διαστολικότητας (V_s)>(V_L).

1.1.1 Επιφανειακές καθιζήσεις

Σύμφωνα με της **Peck** (1969) και **Ward&Pender** (1981) τρεις είναι οι πιο σημαντικές προϋποθέσεις για τον ορθό σχεδιασμό και κατασκευή μιας σήραγγας.

i) η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής

ii) οι μετακινήσεις του εδάφους που σε αστικό περιβάλλον δεν πρέπει να προκαλούν μη αποδεκτές βλάβες στα κτίρια και σε υπόγειες κατασκευές.

iii) η επιτελεστικότητα της τελικής επένδυσης προσωρινή ή μόνιμη που να φέρει επαρκώς τα φορτία του εδάφους επί της και της παραμορφώσεις της αν κατασκευάζεται γειτονικά μια άλλη σήραγγα

Οι πρώτες δύο είναι κρίσιμες σε αστικό περιβάλλον και μεγαλύτερη έμφαση δίνεται σε αυτές. Η παρούσα διπλωματική εστιάζει της μετακινήσεις κατά την διάνοιξη ρηχής σήραγγας. Οι μετακινήσεις που προκαλούνται από την διάνοιξη και την σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας σε μαλακό έδαφος (αργιλικά εδάφη, μαλακός βράχος που χρήζουν υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής), μπορεί να επηρεάσουν της υπερκείμενες και υφιστάμενες υπόγειες κατασκευές. Η εκσκαφή σε χαμηλό βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια επηρεάζει κυρίως σε αστικό περιβάλλον εντονότερα της καθιζήσεις της υπέργειες κατασκευές από ότι οι σήραγγες σε μεγάλα βάθη. Καθίσταται αναγκαία η εκτίμηση του μεγέθους των επιφανειακών καθιζήσεων κυρίως σε αστικό περιβάλλον για τον έλεγχο/περιορισμό της για να αποφεύγονται μη αποδεκτές βλάβες σε υφιστάμενα κτίρια και σε υπάρχουσες υπόγειες, της δίκτυα κοινής ωφέλειας.

Η εκδήλωση και το μέγεθος της σκάφης των καθιζήσεων από την κατασκευή υπογείων έργων εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων. Παράμετροι που μπορούν να συσχετιστούν ποσοτικά με εμπειρικές και αναλυτικές σχέσεις και οι υπόλοιποι παράμετροι που δεν μπορεί να εκτιμηθεί εκ των προτέρων η επίδρασή της στην σκάφη των καθιζήσεων, γιατί εξαρτώνται από της απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου. Οι μέθοδοι πρόβλεψης των εδαφικών μετακινήσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας βασίζονται σε αναλυτικές σχέσεις ,εμπειρικές και σε αριθμητικές.

Παράμετροι επιρροής σκάφης επιφανειακών καθιζήσεων

Εκείνοι που η επιρροή της μπορεί να αναλυθεί με εμπειρικές, ημι-αναλυτικές σχέσεις

1. Η ποιότητα της βραχώμαζας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους
2. Το βάθος εκσκαφής του υπογείου έργου από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους
3. Το μέγεθος της εκσκαφής

Εκείνοι που εξαρτώνται από της εκάστοτε απαιτήσεις του έργου

4. Η μέθοδος διάνοιξης, δηλαδή συνεχής ολομέτωπη διάνοιξη μηχανοποιημένη με TBM ή διάνοιξη με συμβατικές μεθόδους NATM με εκσκαφή σε επιμέρους φάσεις και διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής ή διάνοιξη με εκσκαφή και επανεπίκωση Cut and Cover
5. Τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης, το είδος της, η πυκνότητα και ο τρόπος εφαρμογής της (π.χ. η απόσταση κατασκευής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής)
6. Οι διαδικασίες για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής ανάλογα με την μέθοδο διάνοιξης. Κατά την NATM με δοκούς προπορείας (forepoling), με αγκύρια βράχου κατά τον άξονα της σήραγγας κλπ και ατά την μηχανοποιημένη με την πίεση που ασκεί το μηχάνημα TBM στο μέτωπο κατά την διέλευσή του.
7. Τα βελτιωτικά μέσα εδάφους, της η κατασκευή πιλοτικής σήραγγας, χρήση τσιμεντενέσεων κ.λ.π (**Καβαβάδας Μ., 2005**)

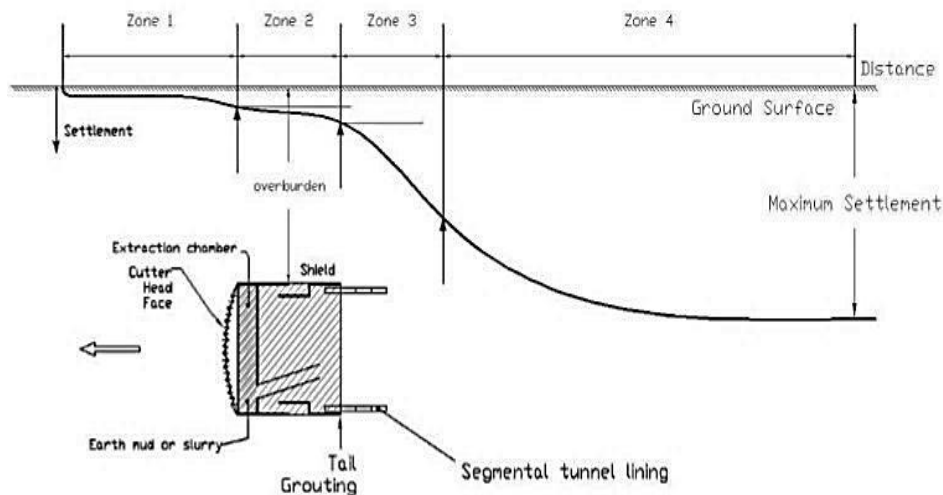
1.1.2 Κατηγοριοποίηση των καθιζήσεων

Οι καθιζήσεις που οφείλονται στην μηχανοποιημένη διάνοιξη διακρίνονται σε:

- Άμεσες καθιζήσεις που εμφανίζονται κατά την εκσκαφή και εξαρτώνται από την ευστάθεια μετώπου, την κωνικότητα της ασπίδας, το ρυθμό προχώρησης, το χρονικό διάστημα μέχρι την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης και το χρόνο πλήρωσης με ένεμα στο ουραίο διάκενο και σκλήρυνσής του. Οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας αρχίζουν να εμφανίζονται σε απόσταση 0.50 έως 0.75D μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, στο μέτωπο φτάνουν από 25%έως 35% της συνολικής και παύουν με την σκλήρυνση του ενέματος στο ουραίο διάκενο. Οι καθιζήσεις λόγω της παραμόρφωσης της μόνιμης επένδυσης σε ρηχή σήραγγα μεγάλης διαμέτρου.
- Οι μακροχρόνιες καθιζήσεις που εκδηλώνονται σε μεγάλο χρονικό διάστημα και οφείλονται σε φαινόμενα ερπυσμού, γήρανσης και στερεοποίησης

Οι επιμέρους μετακινήσεις διαμήκεις και ακτινικές που εμφανίζονται κατά την κατασκευή και λειτουργία της υπόγειου έργου συνοδεύουν τμηματικές απώλειες εδαφικού υλικού κατά την διέλευση του TBM που θα αναλυθούν παρακάτω. Συνοπτικά οι μετακινήσεις κατά μήκος της διάνοιξης διακρίνονται της: **(Σχήμα 1.1.2)**

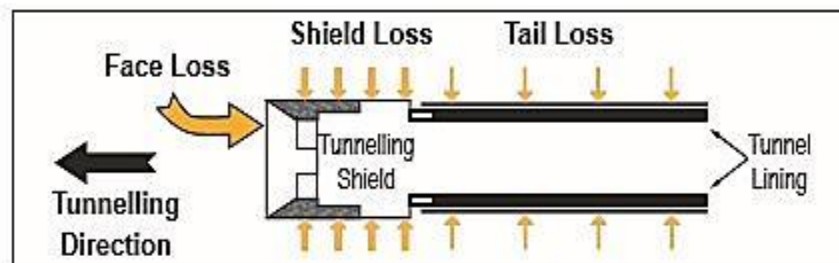
- Πρώιμες (Ζώνη 1)
- Μετακινήσεις στο μέτωπο εκσκαφής (Ζώνη 2)
- Μετακινήσεις κατά το μήκος της ασπίδας κατά την διέλευση της μηχανής (Ζώνη 3)
- Μετακινήσεις στο δακτυλιοειδές κενό , το κενό μεταξύ του δακτυλίου μόνιμης επένδυσης και του ουραίου τμήματος της ασπίδας (Ζώνη 4)
- Τις χρόνιες λόγω ερπυσμού ή στερεοποίησης μετά την διέλευση της μηχανής (Ζώνη 5)



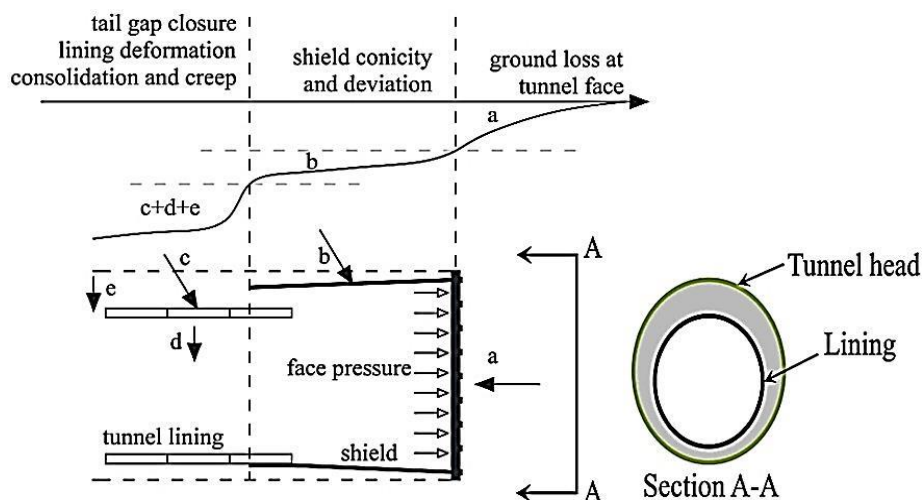
Σχήμα 1.1.2: Μετακινήσεις κατά την διέλευση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα, (Κουκουτάς Σ.,2015)

1.1.3 Παράγοντες επιρροής της απώλειας εδαφικού όγκου (VL)

Οι μετακινήσεις κατά της εργασίες εκσκαφής οδηγούν σε επιμέρους απώλειες όγκου εδαφικού υλικού κατά μήκος της διάνοιξης. Το μέγεθος εκείνων των μετακινήσεων που προκαλούν την επιπλέον απώλεια εδάφους κατά της εργασίες εκσκαφής επηρεάζεται από την ποιότητα εδάφους, το ρυθμό προχώρησης της μηχανής, την διάμετρο της σήραγγας, την μέθοδο διάνοιξης και την τελική επένδυση. Κατά την προχώρηση της μηχανής οι απώλειες εδαφικού όγκου διακρίνονται σε απώλειες στο μέτωπο εκσκαφής “face loss- V_f ”, στο σώμα της ασπίδας “shield loss- V_s ”, στο ουραίο τμήμα της ασπίδας “tail loss- V_t ” με συνιστώσες της ακόλουθες βασικές παραμέτρους (Σχήμα 1.1.3. α) και (Σχήμα 1.1.3 β). Το άθροισμα των ακτινικών συγκλίσεων (στο σώμα της ασπίδας και στο ουραίο τμήμα της) και των συγκλίσεων στο μέτωπο εκσκαφής συνιστούν το ολικό (V_L), $V_L = V_f + V_t + V_s$.



Σχήμα 1.1.3 α: Πηγές απώλειας εδαφικού υλικού, (Loganathan N., 2011)



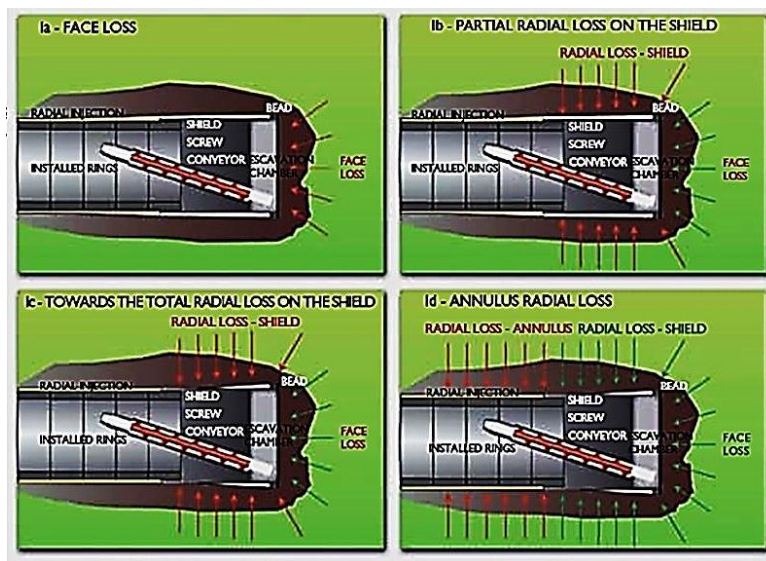
Σχήμα 1.1.3 β: Παράγοντες που συμβάλλουν στην απώλεια εδαφικού όγκου (V_L)

Οι βασικές παράμετροι είναι:

- Η απώλεια μετώπου εκσκαφής αφορά την παραμόρφωση του εδάφους μπροστά από το μέτωπο, πριν την άφιξη της μηχανής λόγω της αποσυμπίεσης στο μέτωπο της σήραγγας. Η πιθανότητα εμφάνιση αυτών των καθιζήσεων περιορίζεται από την πίεση που ασκεί το TBM στο μέτωπο εκσκαφής. Ακόμα, κατά την άφιξη της μηχανής και την απόξεση του εδαφικού υλικού από της περιστρεφόμενους δίσκους της κοπτικής κεφαλής του TBM αφαιρείται υλικό από το μέτωπο, αλλάζει το πεδίο τάσεων στο έδαφος. Η διαταραχή του γεωστατικού πεδίου τάσεων στο μέτωπο εκσκαφής του TBM δημιουργεί της συνθήκες όπου επιτρέπεται της διαμήκεις μετακινήσεις του εδάφους να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του μετώπου εκσκαφής “Face Loss” (Σχήμα 1.1.3 α). Οι μετακινήσεις αυτές εξαρτώνται από της γεωτεχνικές συνθήκες, της μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, την ταχύτητα εφαρμογής των μέτρων στήριξης του μετώπου και τη δυσκαμψία της και περιορίζονται από την πίεση που ασκεί η μηχανή στο μέτωπο.
- Η απώλεια στο χώρο της ασπίδας κατά την διέλευση της μηχανής αφορά την ακτινική μετακίνηση του εδάφους στο κενό που έχει δημιουργηθεί γύρω από το σώμα της ασπίδας από την υπερεκσκαφή της μηχανής TBM. Η καθίζηση μπορεί να είναι σημαντική σε μεγάλη υπερεκσκαφή που δημιουργούν οι δίσκοι κοπής στο μέτωπο εκσκαφής. Η υπερεκσκαφή συμβαίνει στο μέτωπο για να μειωθούν οι τριβές στην διεπιφάνεια επαφής περιβάλλοντος εδάφους και ασπίδας του TBM για ευχέρεια διέλευσης της ασπίδας. Δύο λόγοι συμβάλλουν στην υπερεκσκαφή μικρής κοιλότητας περί του μετώπου. Πρώτα η υπερεκσκαφή που οφείλεται στην κωνικότητα της ασπίδας με τη διάμετρο της κοπτικής κεφαλής να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από την διάμετρο της εκσκαφής. Αυτό επιτυγχάνεται με δίσκους κοπής “beads” που είναι εγκατεστημένοι στην εξωτερική περίμετρο της κοπτικής κεφαλής για να μην εγκλωβιστεί η ασπίδα με την προχώρηση της μηχανής TBM.

Μετά την προχώρηση των κεφαλής το έδαφος μετακινείται ακτινικά στο κενό που δημιουργήθηκε από το κέλυφος της ασπίδας και την υπερεκσκαφή “Shield Loss” (Σχήμα 1.1.3 β-β) με μερική ακτινική μετακίνηση εντός του κενού-partial radial loss. Αναλόγως το ρυθμό παραμόρφωσης του εδάφους σε σχέση με το ρυθμό προχώρησης της μηχανής, η εκσκαφθείσα περίμετρος μπορεί να περικλείσει όλο το ουραίο διάκενο (Σχήμα 1.1.3 γ-γ)-total radial loss. Το άθροισμα των ακτινικών συγκλίσεων ορίζεται ως ακτινική απώλεια όγκου “radial loss”. Η πλοήγηση της ασπίδας βοηθείται από την υπερεκσκαφή σε καμπύλη και ευθύγραμμη χάραξη και αντιστοίχως οδηγεί σε καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας.

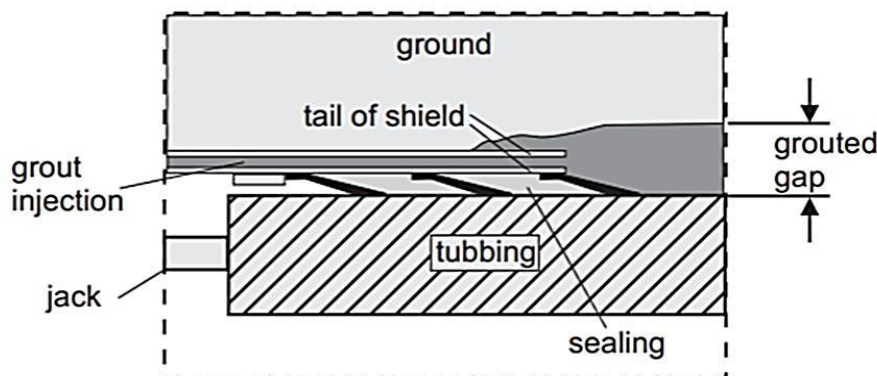
- Η απώλεια στο χώρο της επένδυσης αφορά την καθίζηση που συμβαίνει στο δακτυλιοειδές κενό που σχηματίζεται στο ουραίο τμήμα της ασπίδας μεταξύ του περιβάλλοντος εδάφους και του εγκατεστημένου δακτυλίου της μόνιμης επένδυσης. Η μόνιμη επένδυση με δακτυλίους μορφωμένους από την σύνθεση προκατασκευασμένων τόξων έχει μικρότερη διάμετρο από την ασπίδα και κατασκευάζεται στο εσωτερικό της με ανύψωση των τόξων. Το έδαφος που βρίσκεται στο σχηματιζόμενο δακτυλιοειδές κενό (annular gap) μεταξύ του δακτυλίου και του περιβάλλοντος εδάφους πληρούται με έγχυση τσιμεντενέματος –grout injection- υπό πίεση εξαρτώμενη από την πίεση στήριξης του μετώπου ή με μίγμα μπετονίτη-bentonite slurry- για τον έλεγχο ακτινικών συγκλίσεων στην μόνιμη επένδυση και την μεταβίβαση ομοιόμορφων φορτίων επί της. Η ταυτόχρονη ενεμάτωση και πλήρωση κατά την προχώρηση της μηχανής είναι ικανή να περιορίσει την καθίζηση. Ωστόσο ακτινικές μετακινήσεις –συγκλίσεις μπορεί να συμβούν στο χρονικό διάστημα μέχρι την πλήρη σφράγιση του διακένου ή αν δεν έχει σφραγιστεί καταλλήλως το κενό και μέχρι την επαρκή σκλήρυνση του τσιμεντενέματος έτσι ώστε να αντιστέκεται της εδαφικές πιέσεις. Αυτές οι συγκλίσεις συμβάλλουν στην απώλεια εδαφικού όγκου που γίνεται στο δακτυλιοειδές κενό “Annulus Radial Loss” (Σχήμα 1.1.3 δ-δ).



Σχήμα 1.1.3:: Βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην απώλεια εδαφικού όγκου(V_L), (Guglielmetti et. al,)

1.1.4 Πλήρωση με ένεμα στο δακτυλιοειδές κενό

Ο έλεγχος των μετακινήσεων στο μέτωπο γίνεται με τα TBM κλειστού μετώπου με ασπίδα EPB, Slurry, Compressed Air. Ο έλεγχος των συγκλίσεων στο σώμα της ασπίδας και στο ουραίο τμήμα της ασπίδας γίνεται με εισπίεση τσιμεντενέματος από κατάλληλους υποδοχείς που βρίσκονται πίσω από την ασπίδα στο δακτυλιοειδές κενό και σε δεύτερη φάση στα προκατασκευασμένα στοιχεία της μόνιμης επένδυσης. Ακόμα στο κενό μεταξύ του τελευταίου εγκατεστημένου δακτυλίου και της ασπίδας υπάρχουν βούρτσες για μόνωση (Σχήμα 1.1.4).



Σχήμα 1.1.4 : Πλήρωση με ένεμα υπό πίεση στο δακτυλιοειδές κενό στην ουρά της ασπίδας, (Moller S. , 2006)

1.1.5 Ορισμός απώλειας εδάφους και απώλειας όγκου

Συχνά της αναλυτικές και εμπειρικές μεθόδους αναφέρονται οι όροι απώλεια εδάφους G_L (Ground Loss) και απώλεια όγκου V_L (Volume Loss). Η απώλεια όγκου εδάφους (VL) είναι ο ποσοστιαίος λόγος % του όγκου στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή του όγκου ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων (V_s) και «χάνεται» λόγω της καθίζησης, ανά μέτρο μήκους ως της τον όγκο ανά μέτρο μήκους της διανοιχθείσας διατομής της σήραγγας (Εξ 1.1)

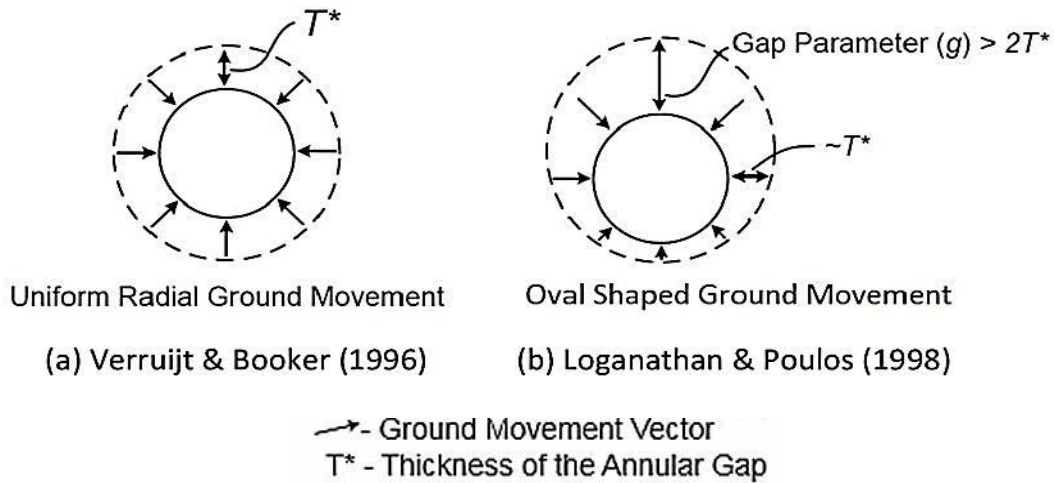
$$VL(\%) = \frac{A_{surface\ settlements}}{A_{tunnel}} * 100 \quad \text{Εξ.1.1}$$

Ο Sagaseta (1987) όρισε την απώλεια εδάφους (G_L) ως παράμετρο που ποσοτικοποιεί την υπερεκσκαφή σε αρχικά ισότροπο, ομοιογενές ασυμπιεστο έδαφος σε μικρό βάθος, (Εξ.1.2)

$$GL(\%) = \frac{A_{tunnel\ convergence}}{A_{tunnel}} * 100 \quad \text{Εξ.1.2}$$

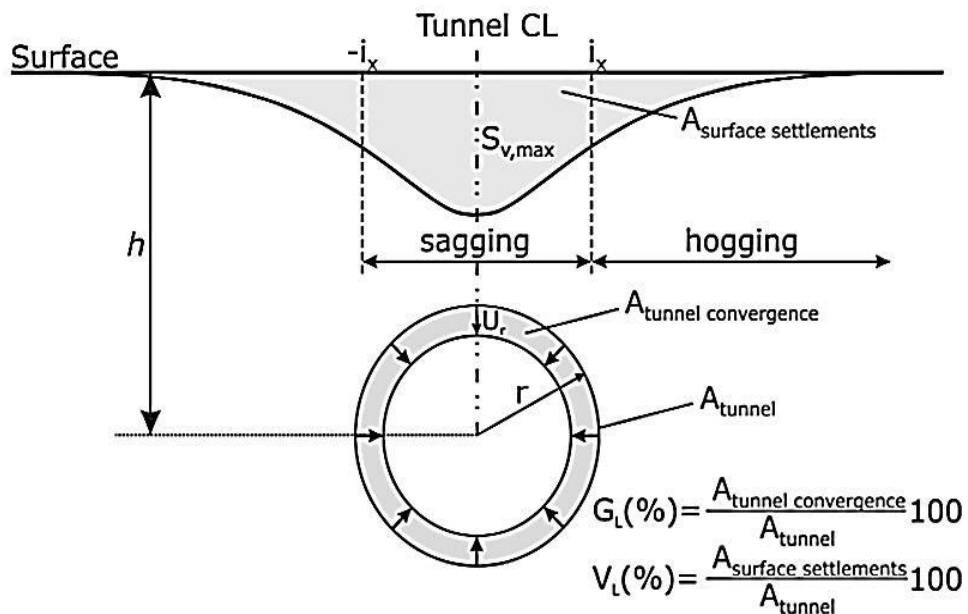
Οι Verruijt and Booker (1996) παρουσίασαν κλειστές αναλυτικές σχέσεις σε ομογενή ελαστικό ημίχωρο χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση τη μέθοδο του Sagaseta (1987) και πρέτειναν ομοιόμορφη κατανομή των μετακινήσεων γύρω από τη σήραγγα. Οι Loganathan

& Poulos (1998) στηριζόμενοι στη μέθοδο του «χάσματος» (gap) τροποποίησαν την μέθοδο των **Verruijt and Booker** πρότειναν ότι η εκτίμηση της απώλειας εδάφους βασίζεται στην ελλειψοειδή ακτινική μετακίνηση εδάφους στην στέψη της σήραγγας, υιοθετώντας την σταδιακή αλλαγή της διατομής από κυκλική σε ελλειψοειδή (**Σχήμα 1.1.5 α**)



Σχήμα 1.1.5α: Κυκλικές και ελλειψοειδείς δομές μετακινήσεων γύρω από τη σήραγγα (Loganathan N., 2011)

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει η ταύτιση των δύο παραμέτρων σε αστράγγιστες συνθήκες για να ισχύει η παραδοχή της ισόογκης παραμόρφωσης (**Σχήμα 1.1.5 β**)



Σχήμα 1.1.5β: Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L) και απώλεια εδάφους (G_L), (Κυριακόπουλος Θ., 2017)

Κεφάλαιο 1.2 - Σημασία καθιζήσεων (κτίρια)

Σημαντικό πρόβλημα κατά την διάνοιξη σηράγγων είναι οι καθιζήσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Αφορούν της αβαθείς σήραγγες σε αστικό περιβάλλον. Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια οφείλονται της οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους λόγω της εκσκαφής γύρω από το μέτωπο εκσκαφής και η διάδοσή της φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους στην περίπτωση αβαθών σηράγγων. Αυτές οι μετακινήσεις μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος, στην εξάπλωση, στην ταχύτητα διάδοσης και προκαλούν βλάβες σε υφιστάμενες κατασκευές υφιστάμενες, υπόγεια δίκτυα κοινής ωφέλειας, κτίρια. Τα κτίρια που βρίσκονται πλησίον της υπό κατασκευής σήραγγας υπόκεινται σε ομοιόμορφες καθιζήσεις ή ανυζήσεις, διαφορικές καθιζήσεις, ολικές ή διαφορικές στροφές που με τη σειρά της οδηγούν σε βλάβες με την ανάπτυξη εμφανών ρωγμών οι οποίες μπορεί να τα πλήξουν αισθητικά, λειτουργικά και στατικά τα εν λόγω κτίρια.

Οι βλάβες με τη μορφή εμφανών ρηγματώσεων στα κτίρια δημιουργούνται από την υπέρβαση κάποιων επιτρεπόμενων τιμών εφελκυστικών παραμορφώσεων. Διάφορες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί βασίστηκαν σε παρατηρήσεις διαφορετικών τύπων κτιρίων και συσχέτισαν της επιτρεπόμενες τιμές παραμορφωσιακών μεγεθών με το βαθμό σοβαρότητας της βλάβης που αυτές προκαλούσαν στα υπό εξέταση κτίρια. Ως εκ τούτου η πρόβλεψη των μετακινήσεων (καθιζήσεων) στην επιφάνεια του εδάφους και η εκτίμηση του μεγέθους της επίδρασής της της υφιστάμενες κατασκευές σε όρους βλαβών καθίσταται αναγκαία ειδικά σε αστικό περιβάλλον.

Μεθοδολογίες συσχέτισης μετακινήσεων με βλάβες στα κτίρια

Διάφορες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί που συσχετίζουν τα παραμορφωσιακά μεγέθη (μετακινήσεις) του εδάφους με την επίδρασή της σε ένα υφιστάμενο κτίριο. Η ταξινόμηση των βλαβών στα κτίρια με βασική παράμετρο την ανάπτυξη σε αριθμό και το άνοιγμα των ρωγμών, κατά τον **Burland** (1977) έγινε αρχικά με κριτήριο την ευκολία στην εξωτερική και εσωτερική επισκευή της ορατής ζημιάς, το άνοιγμα των ρωγμών, της πληγέντες κατασκευές από πλινθοδομή, όχι σε κατασκευές σπλισμένου σκυροδέματος, βαθμονομώντας της βλάβες σε αισθητικές, λειτουργικότητας και στατικής σημασίας.

Αντικαθιστώντας το μόλις προηγούμενο κριτήριο της κρίσιμης εφελκυστικής παραμόρφωσης ο **Burland** (1977) εισήγαγε το κριτήριο της οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης σε κτίρια από διάφορα υλικά και όρια λειτουργικότητας.

Αξιοποιώντας την ιδέα των διαφορετικών ορίων εφελκυστικής παραμόρφωσης οι **Boscarding & Cording** (1989) διεύρυναν την μέγιστη επιτρεπτή καθίζηση των κτιρίων βάσει των επιτρεπτών ορίων εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_{lim} %) πρότειναν την προσθήκη της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης ϵ_h του εδάφους της παραμορφώσεως των κτιρίων (στο μοντέλο δοκού των **Burland & Wroth**) για τον καθορισμό της κρίσιμης εφελκυστικής παραμόρφωσης της κατασκευής. Επιτρέποντας την πρόβλεψη μιας πιθανής βλάβης σε

τοιχοποιία εάν η επιβαλλόμενη γωνιακή παραμόρφωση και η άμεσα εφαρμοσμένη εφελκυστική παραμόρφωση μπορούν να καθοριστούν, που και οι δύο είναι συνιστώσες των εδαφικών μετακινήσεων.

Έφτιαξαν διάγραμμα αλληλεπίδρασης που συσχετίζε την γωνιακή παραμόρφωση με την ανοιγμένη οριζόντια παραμόρφωση για διάφορες κατηγορίες βλαβών στα κτίρια.

Προσομοίωση κτιρίου ή φέροντα τοίχου με το μοντέλο της ισοδύναμης δοκού

Από της μεθοδολογίες που συσχετίζουν της μετακινήσεις του εδάφους στη θεμελίωση των κτιρίων και της προκαλούμενες βλάβες σε αυτά, είναι ευρέως διαδεδομένη αυτή των Burland & Wroth (1974). Κατά την οποία το κτίριο ή της τοίχος του από φέρουσα τοιχοποιία συμπεριφέρεται της μια «ιδεατή» δοκός και προσομοιώνεται με το μοντέλο «ιδεατής» δοκού, ως δηλαδή μία ισοδύναμη αβαρής «υψίκορμος δοκός» επί του εδάφους με πλάτος L , ύψος H και μοναδιαίο πάχος. Στην «δοκό» ελέγχεται η ανάπτυξη ρωγμών από της προκληθείσες εφελκυστικές παραμορφώσεις σε συνθήκες κάμψης και διάτμησης. Δηλαδή, του κτιρίου που υπόκειται της καθιζήσεις του εδάφους και ακολουθεί την καμπύλη καθιζήσεων. Ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης της δοκού για ένα δεδομένο παραμορφωμένο σχήμα της θεμελίωσης του κτιρίου για να προκύψει ο λόγος της σχετικής μετατόπισης Δ/L του κτιρίου.

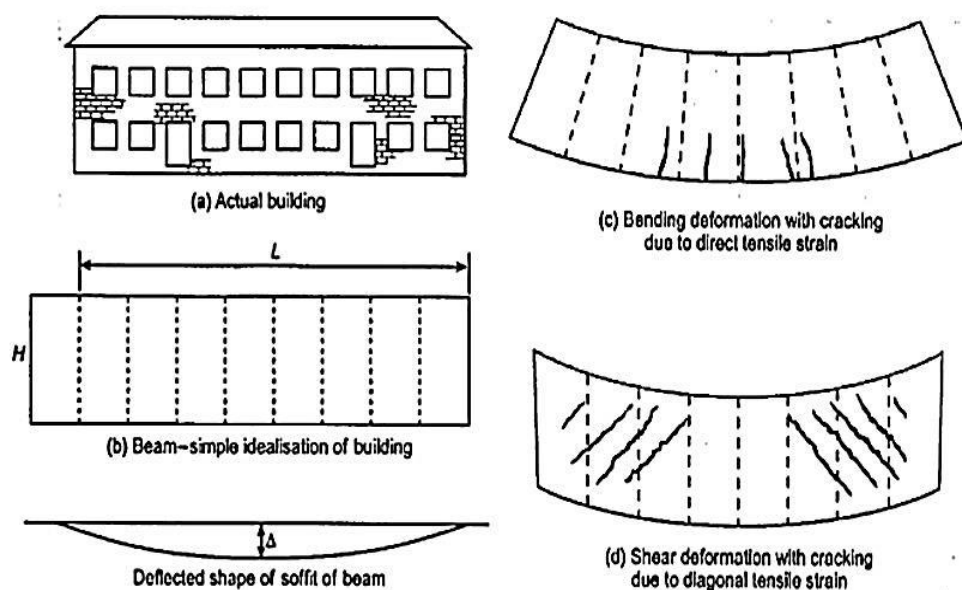
Η δοκός θεωρείται ισότροπη με γραμμικά ελαστική συμπεριφορά με την διεύθυνση του άξονά της κάθετη ως της τον άξονα της σήραγγας. Το ύψος H λαμβάνεται από την θεμελίωση μέχρι το κατώτερο όριο της στέγης του κτιρίου και το πλάτος L είναι το άνοιγμα του κτιρίου και βρίσκεται εντός του εύρους της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων. Μπορεί να είναι μέρος του ανοίγματος και εκτός της καμπύλης καθιζήσεων αλλά αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση του κτιρίου με το μοντέλο της «ιδεατής» δοκού.

Θεώρησαν ότι η «δοκός», δηλαδή το κτίριο, ρηγματώνεται από την ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων σε συνθήκες κάμψης και διάτμησης. Αρχικά με την υιοθέτηση της κρίσιμης τιμής εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_{crit}) ως βασική παράμετρο για την ανάπτυξη των ρωγμών και αργότερα το (1977) κατέληξαν ότι είναι η υπέρβαση των επιτρεπόμενων τιμών εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_{lim}) σε κάμψη και διάτμηση που οδηγεί στο μηχανισμό ανάπτυξης εμφανών ρωγμών, το οποίο και επικράτησε.

Παραμόρφωση της προσομοιώματος της «δοκού»-κτιρίου

Για τον καθορισμό του μεγέθους της οριακής εφελκυστικής παραμορφώσεως (ϵ_{lim}) και άρα του κριτηρίου έναρξης των εμφανών ρηγματώσεων θα πρέπει να προσδιορίσουμε τον τρόπο παραμορφώσεως της «δοκού». Δύο είναι οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μιας δοκού, οι οποίοι προκαλούν στην δοκό την ανάπτυξη εφελκυσμού: α) εφελκυσμός από καθαρή κάμψη, όπου η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση εμφανίζεται στην κατώτερη εξωτερική «ίνα» της δοκού και β) από καθαρή διάτμηση, όπου η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση συμβαίνει κατά τη διαγώνιο με κλίση 45° της δοκού (**Σχήμα 1.2 α**). Γενικά, και οι δύο μηχανισμοί παραμορφώσεως της δοκού συμβαίνουν ταυτόχρονα και ο υπολογισμός των εφελκυστικών παραμορφώσεων από κάμψη και διάτμηση είναι απαραίτητος για να καταστεί ο κρίσιμος από της δύο μηχανισμούς παραμόρφωσης της «δοκού» την εύρεση της

κρίσιμης μορφής. Απλοποιητικά οι δύο ανωτέρω αιτίες πρόκλησης του μηχανισμού δημιουργίας των εφελκυστικών παραμορφώσεων, θεωρούνται χωριστά



Σχήμα 1.2 α: Ρηγματώση «δοκού» από κάμψη και διάτμηση, (Mair et al. 2004)

Παρατηρήσεις σε σχέση με την κρίσιμη εφελκυστική παραμόρφωση

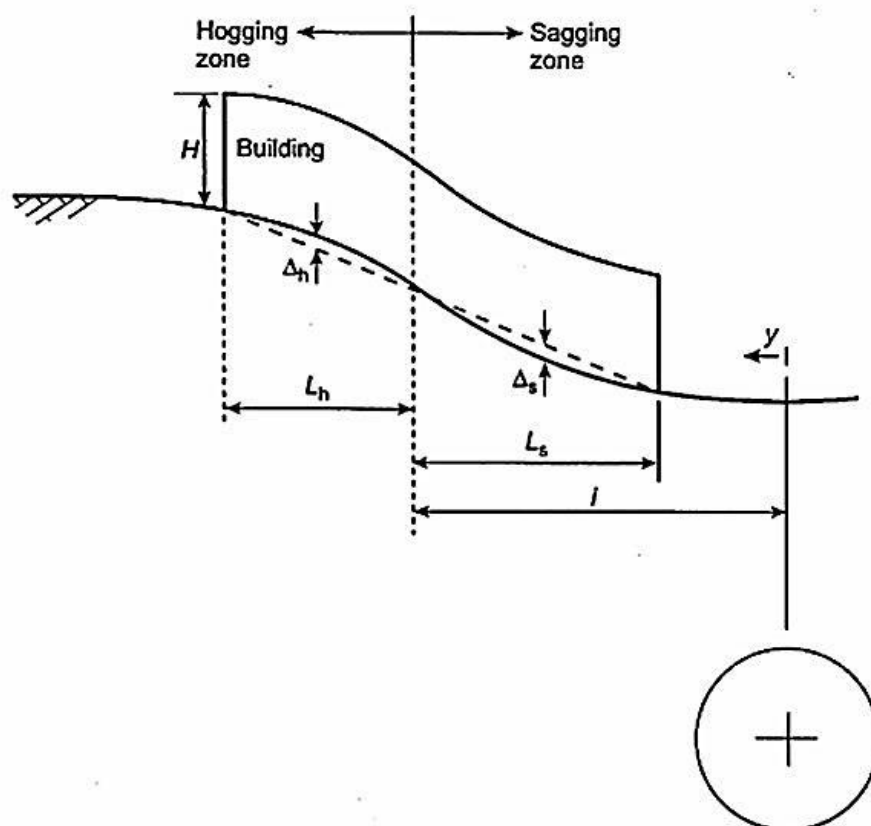
Οι **Burland και Wroth** (1974) ανάλογα το υλικό κατασκευής, ο μηχανισμός έναρξης των ρηγματώσεων συνδυάζεται άμεσα με την μέση τιμή της οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης και διατύπωσαν της ακόλουθες παρατηρήσεις για διάφορους τύπους κατασκευών:

1. Οι μέσες τιμές οριακών εφελκυστικών παραμορφώσεων, ϵ_{lim} για της οποίες παρατηρήθηκαν εμφανείς ρηγματώσεις σε κτίρια με φέρουσα τοιχοποιία ήταν της τάξεως 0.05% έως 0.1%.
2. Σε δοκούς από σπλισμένο σκυρόδεμα η έναρξη δημιουργίας εμφανών ρωγμών συνέβαινε σε μικρότερες τιμές εφελκυστικών παραμορφώσεων μεταξύ 0.03% και 0.05%.
3. Η δημιουργία εμφανών ρηγματώσεων δεν αντιπροσωπεύει απαραίτητως ένα αυστηρό όριο λειτουργικότητας των κτιρίων. Με την προϋπόθεση οι εν λόγω ρηγματώσεις να ελέγχονται ως της την εξέλιξη του μεγέθους της, μπορεί να γίνει αποδεκτή η ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων σε ένα κτίριο, μεγαλύτερων από εκείνες που καθορίζουν την εμφάνιση ορατών ρωγμών.

Θέση ουδέτερου άξονα της δοκού και παραμόρφωση κτιρίου

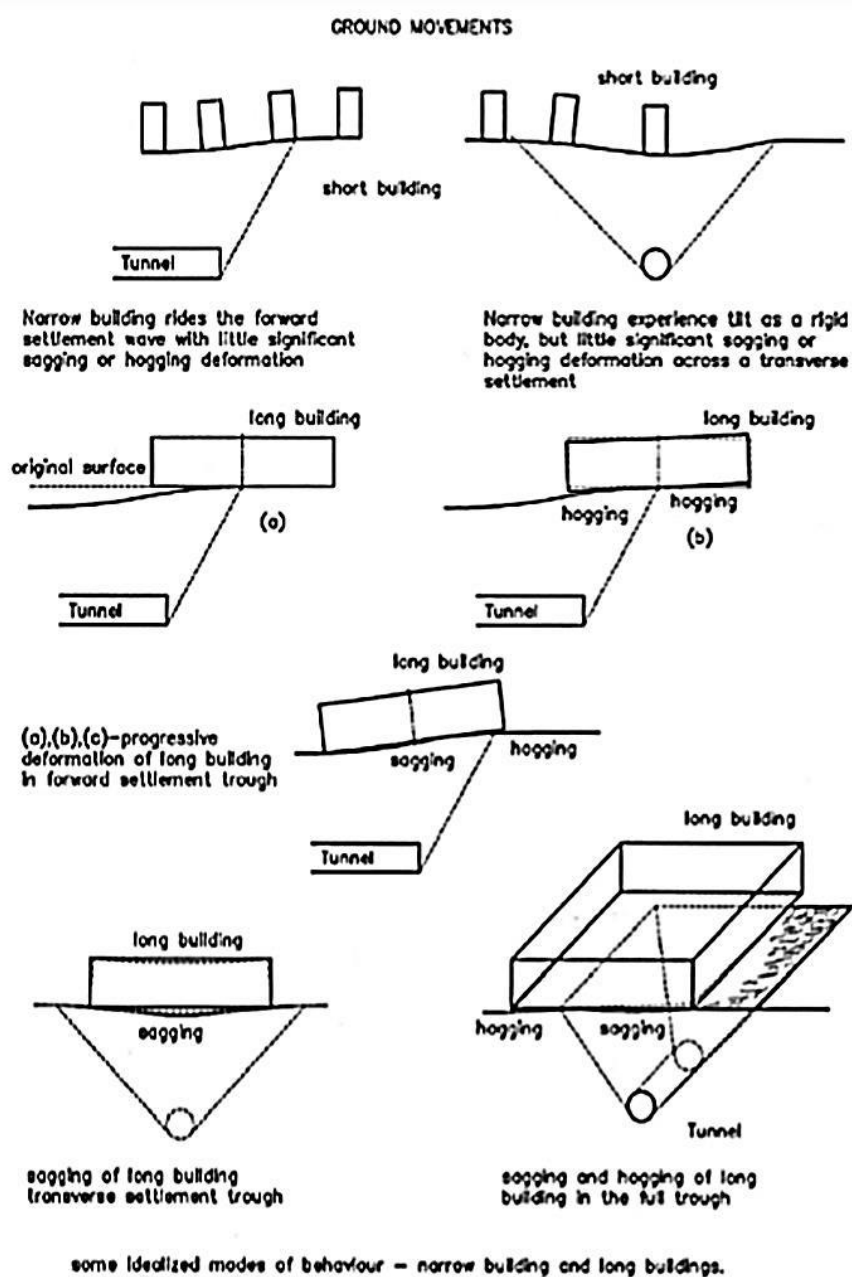
Το άνοιγμα της δοκού L για κτίριο εντός της «ιδεατής» καμπύλης καθιζήσεων που συνδέει τα στοιχεία θεμελίωσης διακρίνεται σε δύο ζώνες εκατέρωθεν του σημείου καμπής, στη ζώνη με συνθήκες κάμψης και στη ζώνη με συνθήκες κύρτωσης και ονομάζεται (L_s) και (L_h) αντιστοίχως. Αυτό συμβαίνει αναλόγως τη παραμόρφωση της δοκού και συγκεκριμένα της θέσης του «ουδέτερου άξονά» της σε σχέση με τη φορά που έχουν τα κοίλα της καμπύλης καθιζήσεων που συνδέει τα στοιχεία θεμελίωσης στο σημείο καμπής.

Κατά της **Burland και Wroth** (1974) όταν η καμπύλη καθιζήσεων που συνδέει τα στοιχεία θεμελίωσης στην παραμορφωμένη «δοκό» έχει τα κοίλα της τα κάτω (συνθήκες κύρτωσης, Hogging zone), ο ουδέτερος άξονας του προσομοιώματος της «δοκού» θεωρείται ότι συμπίπτει με την εξωτερική ίνα της. Η εν λόγω παραδοχή αιτιολογείται από το γεγονός ότι τα στοιχεία της θεμελίωσης παρουσιάζουν ικανή ακαμψία κατά την παραμόρφωση της και οι καθιζήσεις στα άκρα της «δοκού» (κτιρίου) είναι μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν περί το μέσον της. Αντίθετα εάν η ιδεατή καμπύλη των καθιζήσεων που συνδέει τα στοιχεία της θεμελίωσης έχει τα κοίλα της τα άνω (συνθήκες κάμψης, Sagging zone), ο ουδέτερος άξονας του προσομοιώματος της «δοκού» θεωρείται ότι βρίσκεται στο μέσον του ύψους της. Στην περίπτωση αυτή οι καθιζήσεις περί το μέσον της «δοκού» (κτιρίου) είναι μεγαλύτερες από εκείνες που αντιστοιχούν στα άκρα του (**Σχήμα 1.2 β**).



Σχήμα 1.2 β: Παραμόρφωση κτιρίου λόγω εκσκαφής σήραγγας, (Mair et al. 1996)

Η απόκριση τυπικών κτιρίων της μετακινήσεις του εδάφους φαίνεται στο (Σχήμα 1.2 γ)



Σχήμα 1.2 γ: Απόκριση κτιρίων προσομοιωμένων με το μοντέλο της «ιδεατής δοκού» στο διαμήκες και εγκάρσιο προφίλ της σκάφης των επιφανειακών καθιζήσεων, μετά από (Attewell et al., 1986).

Κεφάλαιο 1.3: Ανάγκη αριθμητικής διερεύνησης

Η διάνοιξη με μηχανήματα σε μαλακό έδαφος αναπόφευκτα οδηγεί της μετακινήσεις του εδάφους και κατ' επέκταση απώλεια εδαφικού όγκου. Η πρόβλεψη των μετακινήσεων και η αλληλεπίδρασή της με της κατασκευές είναι μείζονος σημασίας κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή αβαθούς σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, αφού μπορούν να επηρεάσουν τη στατική λειτουργία των γειτνιαζουσών κατασκευών. Συνεπώς είναι σκόπιμη η μείωση/έλεγχος των εδαφικών μετακινήσεων με εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους.

Αριθμητικές μέθοδοι

Η διερεύνηση με χρήση αριθμητικών μεθόδων (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές, συνοριακών συνθηκών) υπερέχει με κατάλληλες παραδοχές σχεδιασμού, των εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων καθώς επιτρέπει την αξιοποίηση πολλών παραμέτρων τόσο της κατασκευής όσο και των εδαφικών συνθηκών (γεωμετρία κατασκευής, αρχικό πεδίο τάσεων, συμπεριφορά του εδάφους, στάδια εκσκαφής, πολλαπλές σήραγγες και άλλα), σε μια ανάλυση προσομοιώνει με κατάλληλα καταστατικά μοντέλα την ετερογένεια του εδάφους, χρησιμοποιεί συνοριακές συνθήκες όμοιες με της πραγματικές, για τον υπολογισμό των μετακινήσεων ή άλλων μεγεθών για κάθε σημείο του εδάφους.

Ακόμα ένα προτέρημα των αριθμητικών μεθόδων προκύπτει από την χρήση της σε μια αντίστροφη ανάλυση με πραγματικά δεδομένα ωφελεί στην έκβαση γεωμηχανικών παραμέτρων, τροποποίηση των εμπειρικών μεθόδων και εξήγηση δεδομένων που έχουν αποκτηθεί από επί τόπου μετρήσεις. Για της σήραγγες είναι αποτελεσματικές κυρίως στην συμπεριφορά του εδάφους ως συνεχές μέσο, επιτάσσοντας την προσοχή της μη-γραμμικότητάς του .

Εμπειρικές Μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί της ακόλουθες συνθήκες:

- Συνθήκες ελεύθερου πεδίου (greenfield settlements), συνθήκες που δεν λαμβάνεται υπόψη η δυσκαμψία των υφιστάμενων κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους.
- Μονή σήραγγα, ή πολλαπλές χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ της
- Ομογενές έδαφος
- Βραχυπρόθεσμες συνθήκες. Οι μετακινήσεις στα λεπτόκοκκα εδάφη εξελίσσονται με τη πάροδο του χρόνου, λόγω της στερεοποίησης.

Όταν της εμπειρικές μεθόδους καλύπτονται οι παραπάνω συνθήκες τότε είναι κατάλληλες για μια πρώτη εκτίμηση του προφίλ των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά την

κατασκευή μιας σήραγγας. Αυτές οι μέθοδοι αναπτύχθηκαν από παρατηρήσεις και μετρήσεις που με τη σειρά της οδήγησαν σε νόμους εμπειρικούς για την εκτίμηση της κατανομής και του εύρους των εδαφικών μετακινήσεων ως συνάρτηση απλών παραμέτρων.

Κύρια προϋπόθεση για τη σωστή εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων είναι η επιλογή κατάλληλων τιμών για της παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι λαμβάνουν υπόψη:

- τη μέθοδο διάνοιξης,
- το μέγεθος και βάθος της εκσκαφής,
- της εδαφικές συνθήκες ,
- το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα,
- την απώλεια εδαφικού όγκου ή τη σύγκλιση των τοιχωμάτων.

Εάν δεν καλύπτονται οι παραπάνω συνθήκες για την εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων, τότε η πρόβλεψη των εδαφικών καθιζήσεων γίνεται με αναλυτικές μεθόδους (κλειστού τύπου σχέσεις) και με αριθμητικές(τα πεπερασμένα στοιχεία). Της, η ισορροπία της βραχώμαζας μετά την εκσκαφή μπορεί να υπολογιστεί με δύο συμβατικές μεθόδους με την προσομοίωση του εδάφους ως συνεχές μέσο. Αυτές είναι οι:

- αναλυτικές
- πεπερασμένα στοιχεία

Οι αναλυτικές μέθοδοι ή λύσεις κλειστού τύπου αναλύουν το πρόβλημα των καθιζήσεων με μαθηματικές εξισώσεις. Βασίζονται σε παραδοχές της:

- Η διατομή της σήραγγας θεωρείται κυκλική επενδεδυμένη ή όχι
- η θεώρηση ομοιογενούς εδάφους και η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής θεωρείται ότι έχει τέλεια πρόσφυση
- το μέσο θεωρείται άπειρο (σήραγγες σε μεγάλο βάθος) ή ημι-άπειρο (σήραγγες σε μικρό βάθος)
- θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης
- η πρωτογενής κατάσταση ισότροπη ή ανισότροπη
- συμπεριφορά του εδάφους γραμμικά ελαστική ή ελαστική – τελείως πλαστική

Ανάλυση σε δύο διαστάσεις (2D FE)

Η διάνοιξη μιας σήραγγας είναι τρισδιάστατο πρόβλημα που εμπεριέχει την αλλαγή του τασικού πεδίου και την παραμόρφωση του εδάφους και της τρεις διαστάσεις. Για λόγους απλοποίησης η πιο συχνή προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων είναι η δισδιάστατη ανάλυση 2D FEM φέρνοντας νοητό επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας. Η δισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία βασίζεται στην καμπύλη κανονικής κατανομής Gauss (**Peck 1969**) και είναι παρόμοια με την αναλυτική προσέγγιση της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης.

Επομένως η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των σηράγγων γίνεται με τη βοήθεια μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης και με διαδοχικές επιλύσεις προσεγγίζεται η επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος.

Ωστόσο σε ρηχές σήραγγες και σε μη συνεκτικά εδάφη ειδικά όταν εμπλέκονται και μηχανισμοί αστοχίας οι δισδιάστατες αριθμητικές μέθοδοι μπορεί να οδηγήσουν σε υποεκτίμηση του μεγέθους της μέγιστης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους και στην υπερεκτίμηση του πλάτους της σκάφης των επιφανειακών καθιζήσεων εκφρασμένη από το σημείο καμπής (i , infection point).

Αυτό συμβαίνει γιατί τείνουν να καταναίμουν της προσκληθείσες από την διάνοιξη μετακινήσεις σε περιοχή μεγαλύτερου εύρους σε αντίθεση με αυτήν που προκύπτει από της εμπειρικές .

Οι πιο σημαντικές μέθοδοι 2D FEM είναι:

- Η μέθοδος gap
- Η μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης (μέθοδος λ)
- Η μέθοδος της προοδευτικής χαλάρωσης
- Η μέθοδος του volume loss

1.3.1 Μέθοδος Gap

Ο **Rowe & Kark** (1983) εισήγαγαν την ιδέα μιας παραμέτρου που θα μπορεί μέσω δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων να υπολογίζει της εδαφικές μετακινήσεις με διεύθυνση της το εσωτερικό της σήραγγας (V_L) πριν την εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης ,μέχρι το έδαφος να κλείσει το κενό που σχηματίζεται ανάμεσα στην επένδυση και το αρχικό όριο εκσκαφής. Η κάθετη απόσταση από το όριο εκσκαφής έως και την επένδυση ονομάζεται “gap”. Οι **Lee & Rowe** (1992) προσπάθησαν να την ποσοτικοποιήσουν με χρήση τρισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε έδαφος ελαστικό τελείως πλαστικό, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δισδιάστατη μέθοδο. Η παράμετρος “gap” εκφράζει το κενό μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας και της εξωτερικής διαμέτρου της μόνιμης επένδυσης (G_p) λαμβάνοντας υπόψη την τρισδιάστατη ελαστοπλαστική παραμόρφωση του μετώπου της σήραγγας (U_{3D}) και τον παράγοντα ποιότητας εργασίας (w) ,της φαίνεται στο **(Σχήμα 1.3.1 α)**.

Οι τάσεις στο όριο εκσκαφής σταδιακά μειώνονται και ταυτόχρονα ελέγχονται οι επικόμβιες μετακινήσεις. Όταν οι επικόμβιες μετακινήσεις καλύψουν το κενό, ενεργοποιείται η αλληλεπίδραση εδάφους-επένδυσης σε αυτόν τον κόμβο. Η κύρια δυσκολία της μεθόδου έγκειται στην εκτίμηση της τιμής του κενού. Οι **Lee & Rowe** (1992) έχουν προτείνει της κάτωθι σχέσεις για την παράμετρο “Gap”:

Η παράμετρος “ gap “ υπολογίζεται από την εξίσωση (Εξ.1.3.1):

$$g = G_p + U_{3D} + w \quad \text{Εξ.1.3.1}$$

όπου:

- w : ο παράγοντας ποιότητας της εργασίας
- G_p : η διαφορά μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας της μηχανής διάνοιξης και της εξωτερικής διαμέτρου της επένδυσης (lining)

Για σήραγγα κυκλικής διατομής η παράμετρος “Gr” δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Εξ.1.3.2):

$$Gr = 2\Delta + \delta \quad (\text{Εξ.1.3.2})$$

όπου: Δ είναι το πάχος της ασπίδας στο ουραίο τμήμα και δ είναι το πάχος υπερεκκαφής λόγω εκτροπής της επένδυσης

- U_{3D} : Η τρισδιάστατη παραμόρφωση του μετώπου της σήραγγας και υπολογίζεται από την εξίσωση (Εξ.1.3.3):

$$U_{3D} = \frac{K}{2} * \delta\chi \quad (\text{Εξ.1.3.3})$$

όπου: K: ο συντελεστής αντίστασης του εδάφους στην εκκαφή (0,7 – 0,9 για σκληρές έως μαλακές αργίλους και 1 για πολύ μαλακές αργίλους) και

$\delta\chi$: η διείδυση του εδάφους στο μέτωπο εκκαφής που δίνεται από την εξίσωση (Εξ.1.3.4):

$$\delta\chi = \frac{\Omega * R * P_o}{E} \quad (\text{Εξ.1.3.4})$$

με :

Ω : αδιάστατος παράγοντας που υπολογίζεται από τα διαγράμματα των Lee & Rowe

R : η ακτίνα της σήραγγας

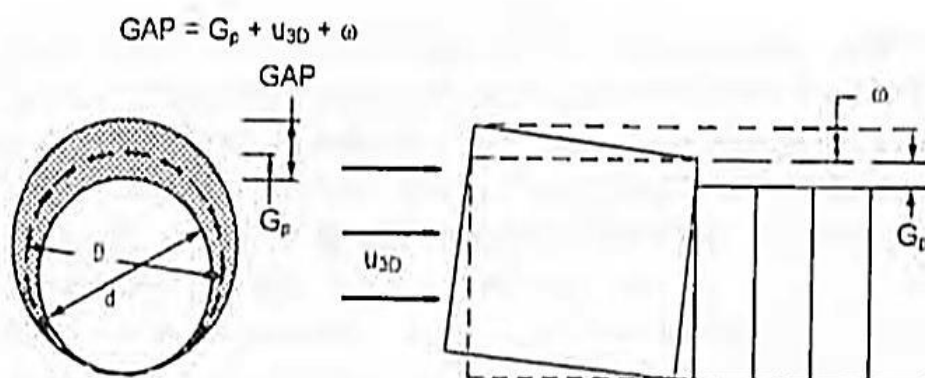
Po : η συνολική πίεση στο μέτωπο εκκαφής ,Po= Ko Pv + Pw + Pi

Ko : ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων

Pv : η κατακόρυφος ενεργός τάση

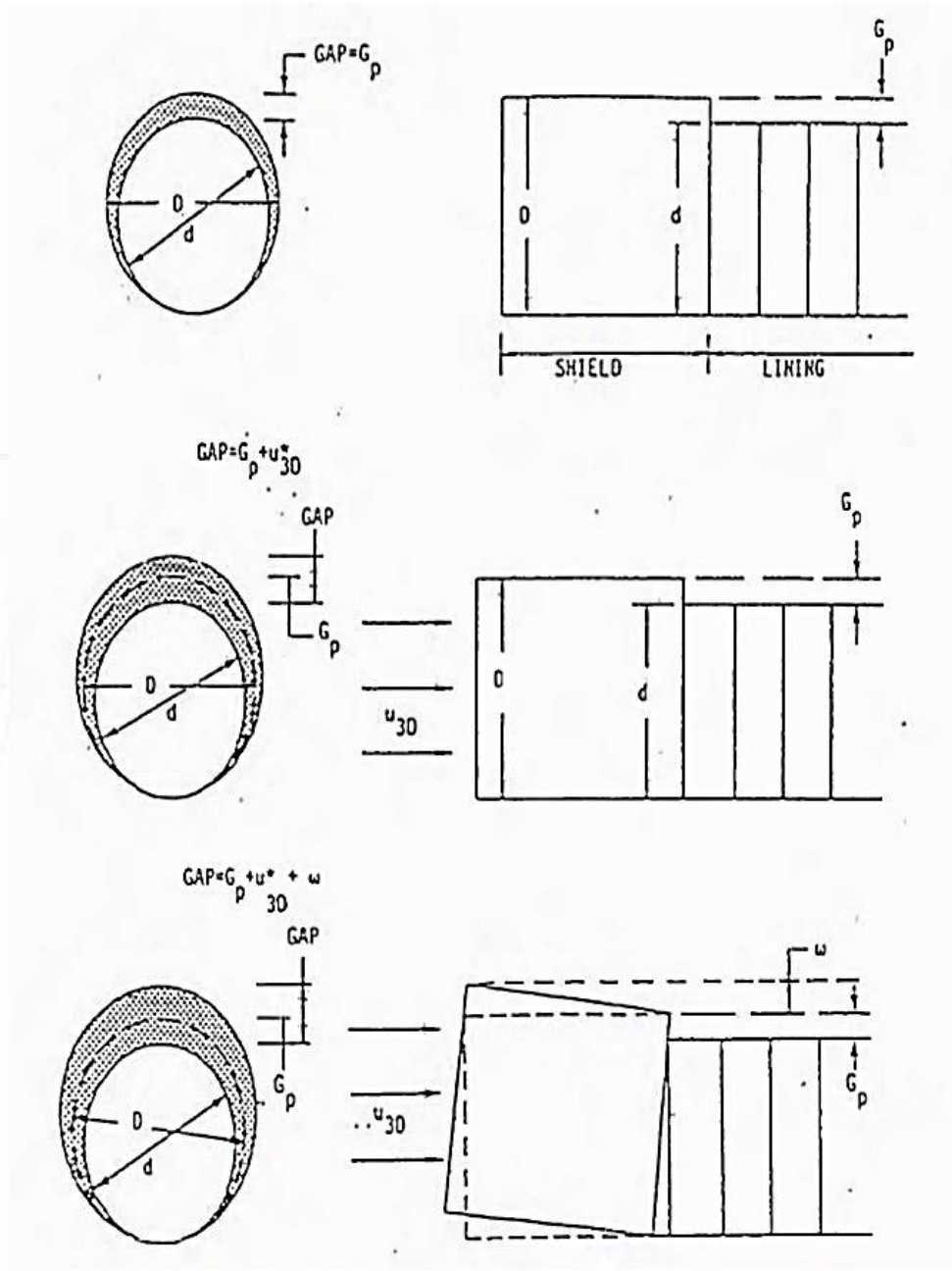
Pw : η πίεση του νερού των πόρων

Pi : η πίεση υποστήριξης στην σήραγγα



Σχήμα 1.3.1 α: Σκαρίφημα της παραμέτρου “gap” σε διάνοιξη ανοιχτού μετώπου (Rowe et al 1983).

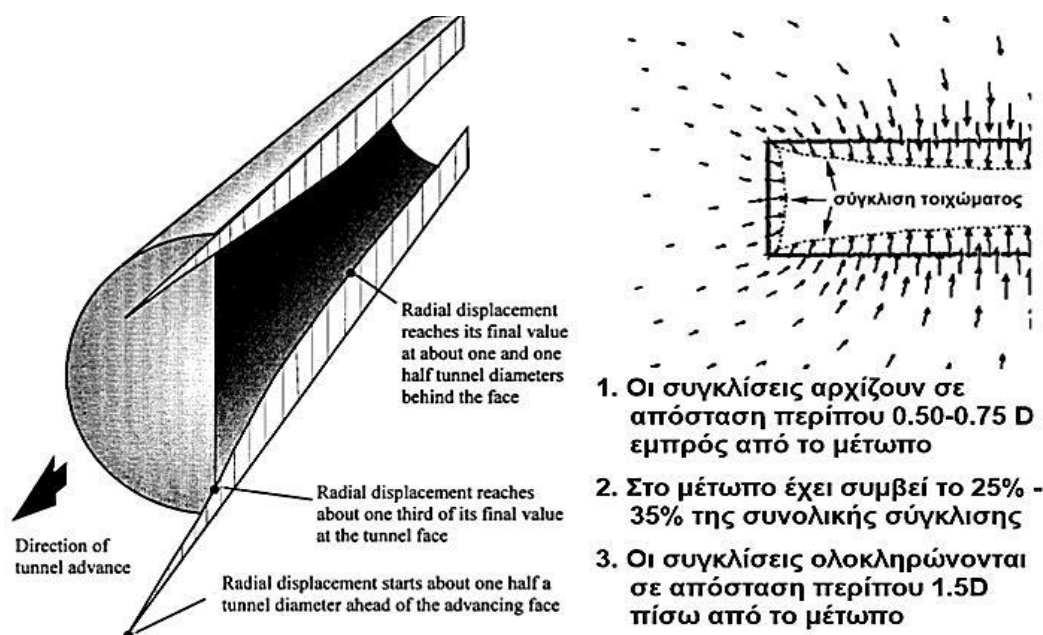
Όταν η διάνοιξη γίνεται με μεθόδους κλειστού μετώπου, δηλαδή η υποστήριξη του μετώπου προσφέρεται πλήρως από την ασπίδα των μηχανών ολομέτωπης κοπής, συνήθως με μηχανές εδαφικής πίεσης EPB, ή μίγματος πολφού υπό πίεση SPB, οι παράγοντες U_{3D} και w πρακτικά μηδενίζονται. Η παράμετρος “gap” εξαρτάται αποκλειστικά από την διαφορά της εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας και της διαμέτρου της τελικής επένδυσης, δηλαδή από τον παράγοντα “ G_p ” (Σχήμα 1.3.1 β)



Σχήμα 1.3.1 β: Σκαρίφημα της παραμέτρου “gap” σε διάνοιξη i) κλειστού μετώπου, ii) μερικής στήριξης μετώπου, iii) ανοιχτού μετώπου, (Συριόπουλος Γ., 2007)

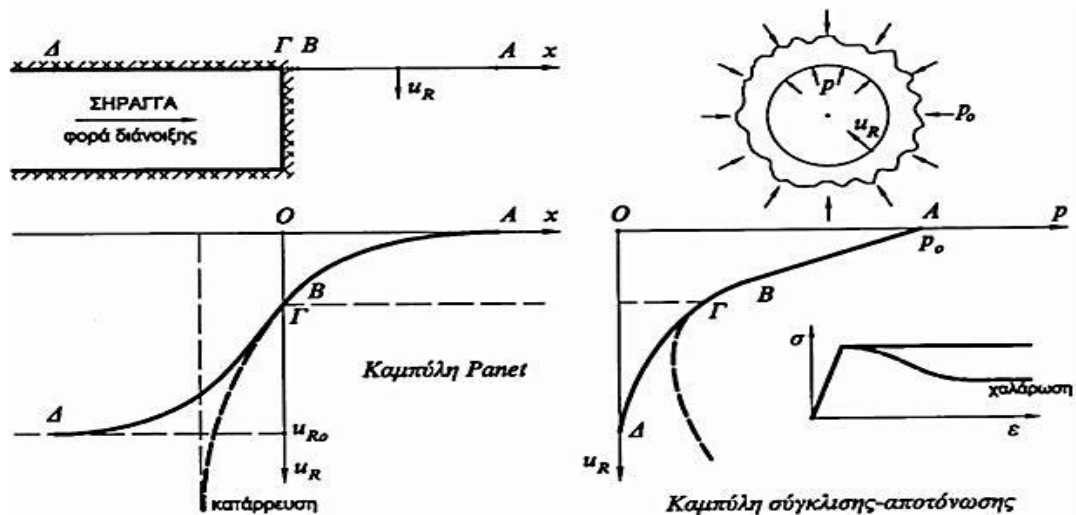
1.3.2 Μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης (Converge-Confinement Method - λ - ή - β -μέθοδος)

Η καμπύλη απόκρισης εδάφους γνωστή ως “Fenner-Pacher” ή «Μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης (φορτία επί της επένδυσης και ενδοσιμότητα της) βάσει των συγκλίσεων u_R των τοιχωμάτων της ανυποστήριχτης σήραγγας μπροστά από το μέτωπο και στο μέτωπο εκσκαφής που συμβαίνουν κατά της εργασίες εκσκαφής μέχρι να τοποθετηθούν τα μέτρα υποστήριξης σε κατάλληλες αποστάσεις (x) από το μέτωπο. (Σχήμα 1.3.2 α). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης (u_R), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, έχει συμβεί μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας.



Σχήμα 1.3.2 α: Εξέλιξη διαδοχικών συγκλίσεων των τοιχωμάτων της ανυποστήριχτης σήραγγας με βάση την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής, Καββαδάς, Μ. (2004)

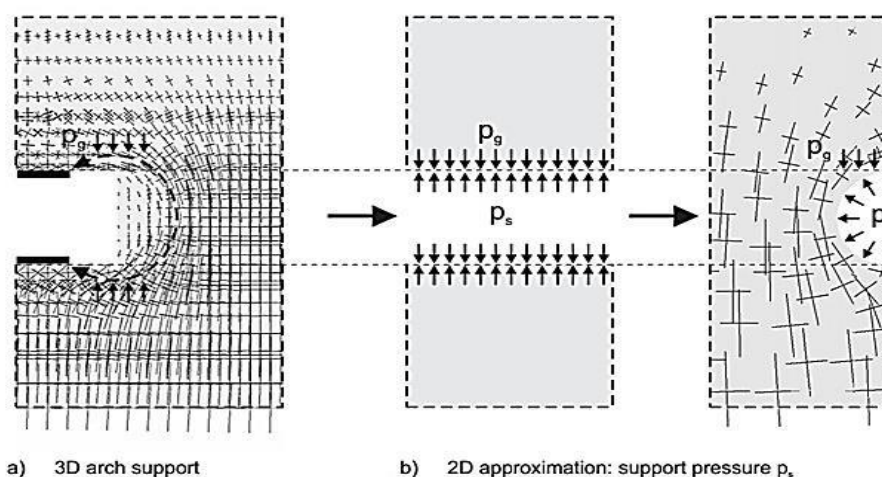
Κατά τη διάνοιξη σήραγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το (Σχήμα 1.3.2 β) παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα $[x - u_R]$ όπου (u_R) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και (x) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης $[p-u_R]$. Συνεπώς, σε κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης Panet $[x-u_R]$ μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος (u_R). Για τη συγκεκριμένη τιμή (u_R) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης (p), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση (p_0). Η πίεση (p) ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” επειδή προκαλεί μέσω της χαλάρωσης της βραχώμαζας την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. (Καββαδάς Μ. 2004)



Σχήμα 1.3.2 β: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλη Panet σε ανυποστήριχτη σήραγγα, Καββαδάς. Μ, (2004)

1.3.2.1 Μετάθεση του τρισδιάστατου προβλήματος σε δύο διαστάσεις

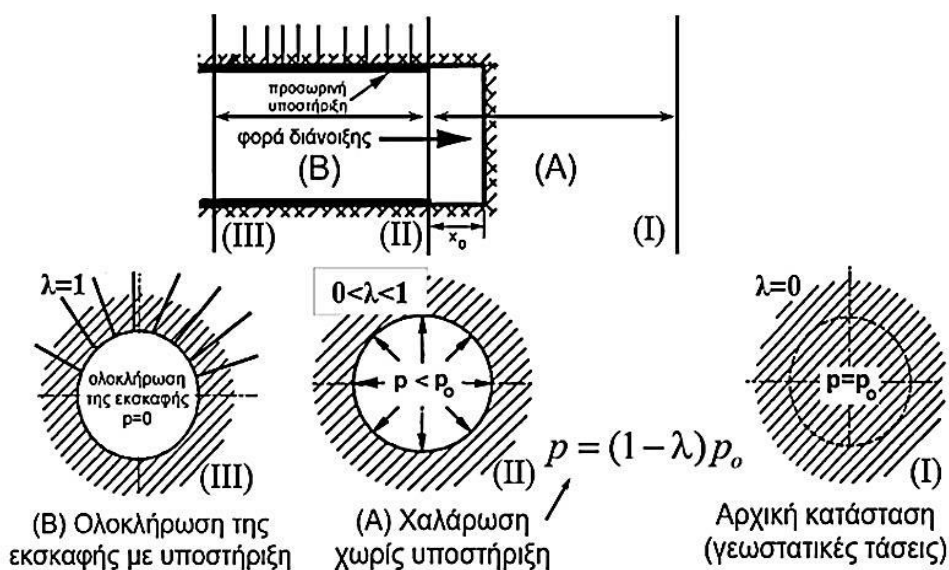
Επειδή το πρόβλημα της σύγκλισης της βραχόμαζας είναι τρισδιάστατο και κάπως πρέπει να προσομοιωθεί η μεταφορά των γεωστατικών φορτίων (P_g ή P_o) γύρω από την διατομή της ανυποστήριχτης σήραγγας σε δύο διαστάσεις, εισήχθη η τεχνητή έννοια της "ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης" (P_s ή P) (Σχήμα 1.3.2.1 α).



Σχήμα 1.3.2.1 α: 3D πεδίο τάσεων (φυσικό «εδαφικό τόξο»)(P_g ή P_o) σε ανυποστήριχτο άνοιγμα και προσέγγισή του από 2D προσομοίωση μέσω της «ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης» (P_s ή P) υποστήριξης εντός της ανυποστήριχτης σήραγγας, (International Journal of Geoenineering Case Histories ©, Vol. 3, Issue 3, p.166 <http://casehistories.geoengineer.org>)

Η σύγκλιση των τοιχωμάτων του εδάφους παρουσιάστηκε από τη μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης η οποία ανήγαγε σε δύο διαστάσεις την τρισδιάστατη παραμόρφωση του εδάφους γύρω από το άνοιγμα της σήραγγας, εισάγοντας μια νοητή παράμετρο, αυτή της «ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης υποστήριξης» (p) το μέγεθος της οποίας ποσοτικοποιείται με τον αδιάστατο συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων (λ) κατά την εκσκαφή, (Σχήμα 1.3.2.1 β). Δηλαδή προσομοιώνεται η χαλάρωση της βραχώμαζας από την εκσκαφή με την μείωση κατά βαθμό λ των αρχικών γεωστατικών τάσεων (P_0) σε (P) που τελικώς μηδενίζεται $p=0$.

Για γεωστατική τάση (p_0) που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής και γύρω από τη σήραγγα, η εξισορροπούσα ισοδύναμη τάση (p) για οποιοδήποτε ποσοστό αποτόνωσης (λ) είναι: $p = (1-\lambda) \cdot p_0$. Επομένως, αρκεί σε ένα δισδιάστατο πρόβλημα, να αντικατασταθεί το έδαφος στη διατομή της σήραγγας με την ισοδύναμη πίεση $p_i = (1-\lambda) \cdot p_0$. Το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ορθή επιλογή του συντελεστή εξασθένησης τάσεων (λ), όπου $\lambda \in [0,1]$ και $\lambda = 1 - p/p_0$



Σχήμα 1.3.2.1 β: Διάνοιξη και πίεση προσωρινής υποστήριξης “ p ” συναρτήσει του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων « λ », (Καββαδάς Μ, 2004)

1.3.2.1 a Διάνοιξη σε έδαφος(βραχώμαζα)-κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Η κατανομή των τάσεων γύρω από την σήραγγα σε γαιώδες έδαφος (άργιλος-ιλλύς-άμμος-χάλικες) ακολουθεί της κάτωθι παραδοχές:

- Κυκλική σήραγγα ακτίνας R μεγάλους μήκους κατά τον άξονα z
- Επίπεδη παραμόρφωση κατά τον άξονα της σήραγγας z
- Ισότροπη αρχική γεωστατική εντατική κατάσταση ($\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi} = \sigma_r$)
- Λόγω της επίπεδης παραμόρφωσης και ισότροπης συμπεριφοράς το πρόβλημα γίνεται μονοδιάστατο με μεταβολή μόνο ως της ακτίνα της
- Έδαφος ελαστικό τελείως πλαστικό με μηχανικά χαρακτηριστικά τη συνοχή c, γωνία τριβής ϕ , μέτρο ελαστικότητας E
- Αστοχία εδάφους με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb με παραμέτρους τη συνοχή c και γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (Σχήμα 1.3.2.1 a), το οποίο συνδέει γραμμικά ($\tau = a\sigma + b$) την ορθή με την διατμητική κύρια τάση στο εδαφικό στοιχείο

Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c \rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 K + \sigma_{cm} \rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 K + 2c \sqrt{N\phi} \quad \text{Εξ.1.4.5}$$

όπου:

$$\sigma_{cm} = 2c \sqrt{k} = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad \text{Εξ.1.4.6}$$

$$N\phi \equiv k = \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Εξ.1.4.7}$$

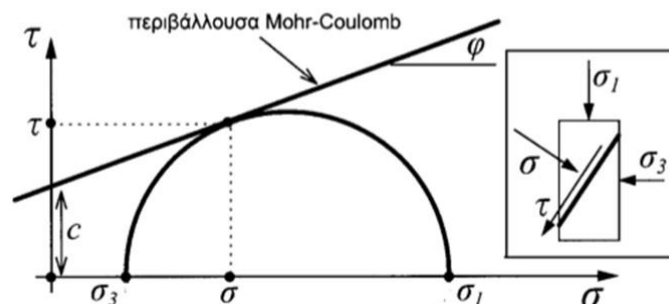
όπου,

σ_{cm} : μονοαξονική θλιπτική αντοχή βραχώμαζας(έδαφος)

Η σ_{cm} μπορεί να υπολογιστεί και από τον εμπειρικό τύπο:

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right) \quad \text{Εξ.1.4.8}$$

όπου, σ_{ci} : μονοαξονική αντοχή αρραγούς βράχου, να υπολογίζεται εργαστηριακά και GSI: δείκτης ποιότητας βραχώμαζας



Σχήμα 1.3.2.1 a: Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Mohr-Coulomb(Καββαδάς Μ., 2004)

1.3.2.1 b Διάνοιξη σε άρρηκτο βράχο-κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Η διάνοιξη σε βράχο ακολουθεί της προηγούμενες παραδοχές με τη διαφορά της μηχανικές παραμέτρους. Η αντοχή αρραγούς βράου (σ σε Μρα) είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή του εδάφους (σ σε Μρα) και συγκεκριμένα η αντοχή άρρηκτου βράχου(συμπαγές πέτρωμα) προσδιορίζεται από την με την αντοχή σε ανεμπόδιση μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}) εξαρτώμενη από την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος (mi) η οποία προκύπτει εργαστηριακά και το μέτρο ελαστικότητας E. Η εντατική κατάσταση των βράχων περιγράφεται από το καταστατικό προσομοίωμα παραβολικής μορφής Hoek & Brown το οποίο περιλαμβάνει συνολικά της παραμέτρους σ_{ci}, m_b, s και α, με τις τρεις τελευταίες να εκφράζουν τον βαθμό αποσάθρωσης της βραχώμαζας.

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14*D}\right),$$
$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3*D}\right)$$

Όπου:

GSI: δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας

m_b, s : Παράμετροι της αντοχής της βραχομάζας πριν τη διαρροή

α : Παράμετρος που λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0.5, 0.67]

D: συντελεστής διαταραχής της βραχώμαζας. Παίρνει τιμές από D=0 για εξόρυξη χωρίς καμία διαταραχή έως D=1 για πλήρη διαταραχή.

Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown:

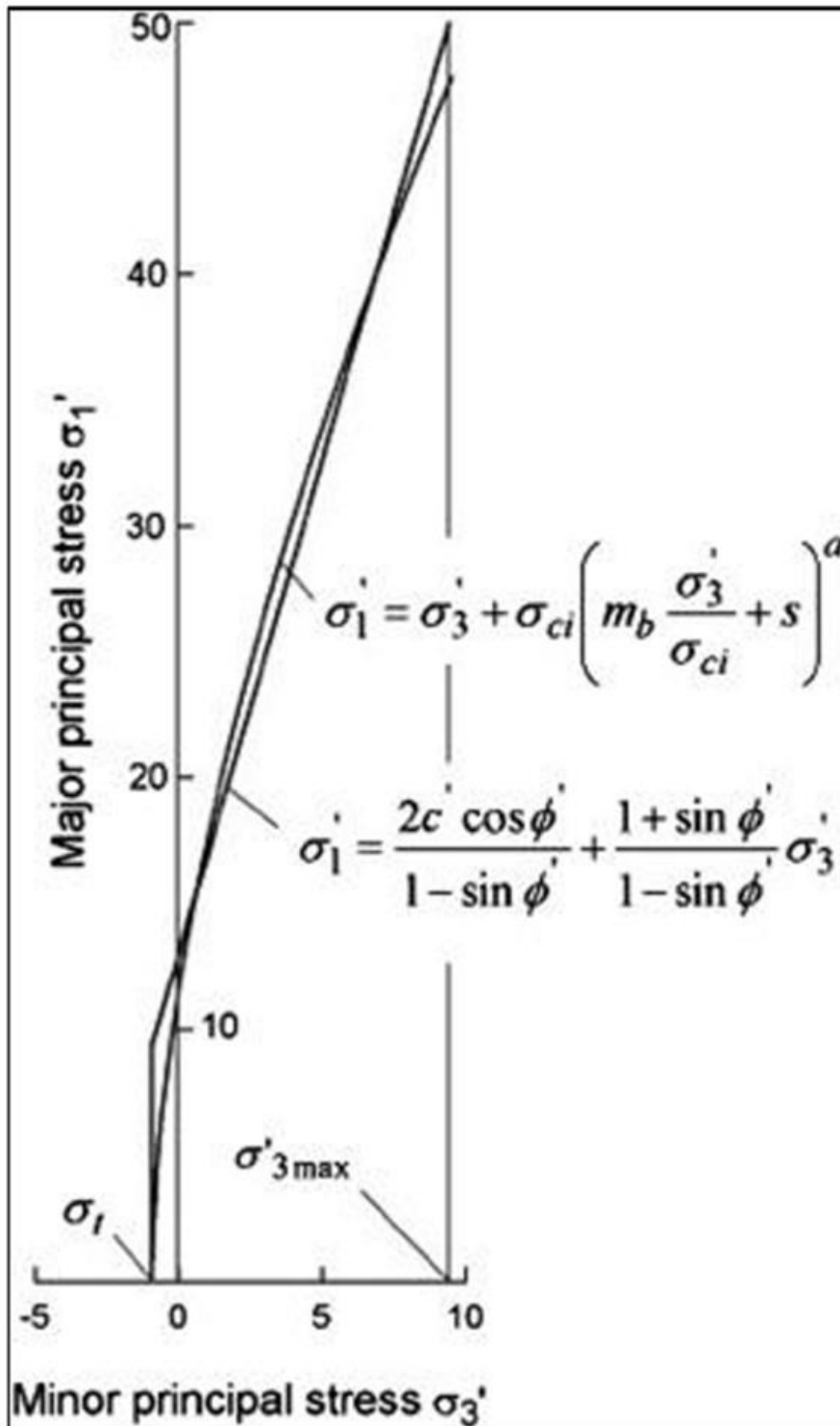
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

όπου:

σ₁, σ₃ = μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

σ_{ci} = μοναξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (χωρίς ασυνέχειες)

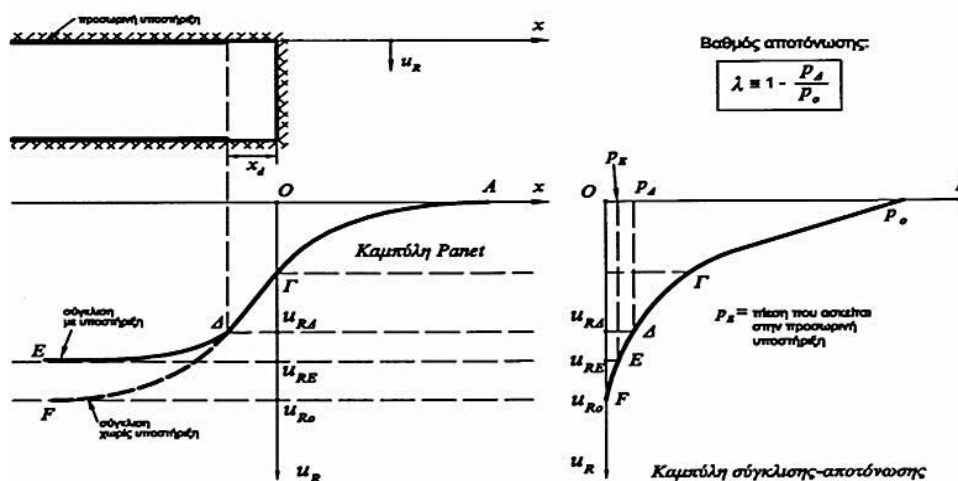
Αρκετά προγράμματα μη-γραμμικής ανάλυσης δεν έχουν ενσωματωμένο το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το Mohr-Coulomb. Τότε η συσχέτιση των δύο κριτηρίων είναι απαραίτητη, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c, φ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων στη περιβάλλουσα αστοχίας κατά Hoek-Brown που η καμπύλη της μπορεί να προσεγγιστεί με μια ευθεία (**Σχήμα 1.3.2.1b**)



Σχήμα 1.3.2.1 b: Γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown (Καββαδάς Μ.,2004)

1.3.2.2 Καμπύλες “Panet” σε υποστηριζόμενη σήραγγα

Η επιλογή του (λ) με βάση την θέση (x) που θα τοποθετηθούν τα μέτρα υποστήριξης (καμπύλες Panet, 1995), (Σχήμα 1.3.2.2). Έως ότου τοποθετηθούν τα μέτρα υποστήριξης δημιουργείται η αναμενόμενη βάσει των καμπυλών Panet, σύγκλιση (u_R) την οποία καλούνται να παραλάβουν. Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι αγκύρια και βλήτρα, χαλύβδινα πλαίσια, στρώση από άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με το (Σχήμα 1.3.2 α) ένα ποσοστό της σύγκλισης συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο αλλά και με ταχείς ρυθμούς στο μέτωπο (Σχήμα 1.3.2 β) επομένως τα μέτρα υποστήριξης που καλούνται να παραλάβουν τα φορτία της διαταραγμένης βραχώμαζας ειδικά σε περιπτώσεις κακής ποιότητας βραχώμαζας πρέπει να εφαρμόζονται σε κοντινή από το μέτωπο απόσταση, τάξεως 1-2m.



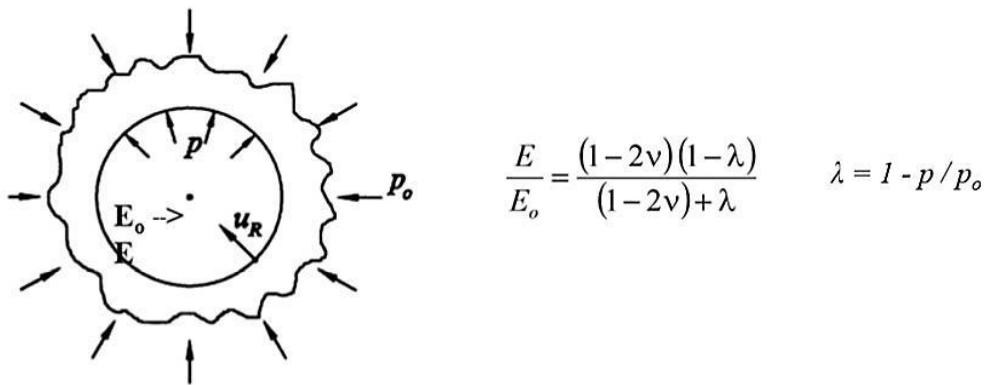
Σχήμα 1.3.2.2: Καμπύλη Panet και θέση μέτρων υποστήριξης, (Καββαδάς Μ., 2004)

Έτσι θα προκύψει η σύγκλιση της σήραγγας έως ότου μπουν τα μέτρα αυτά. Στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μπορεί να αντικατασταθεί με τα πραγματικά μέτρα υποστήριξης, συνήθως αγκύρια, στρώση ινοπλισμένου ή άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μεταλλικά πλαίσια. Όσο η σήραγγα αποτονώνεται αυξάνονται οι μετακινήσεις (u_R) του εδάφους της το εσωτερικό της σήραγγας (συγκλίσεις τοιχωμάτων) και τόσο μειώνεται η πίεση που καλείται να παραλάβει η υποστήριξη. Τα μέτρα υποστήριξης ενδίδουν λίγο πριν ισορροπήσουν και προκαλείται επιπλέον σύγκλιση. Η τελική προκύπτει μέχρι και την ισορροπία των μέτρων υποστήριξης.

1.3.3 Μέθοδος προοδευτικής χαλάρωσης (Progressive Softening Method)

Μια εναλλακτική μέθοδος της σύγκλισης –αποτόνωσης είναι αυτή της προοδευτικής χαλάρωσης του εδάφους κατά την εκσκαφή η οποία αναπτύχθηκε από τον **Swoboda** (1979). Στηρίζεται στην σταδιακή μείωση της ακαμψίας του εδάφους πριν την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Επιτελείται μέσω της σταδιακής μείωσης του μέτρου ελαστικότητας E (από E_0 σε E) με ένα συντελεστή εξασθένησης β στο εσωτερικό της διατομής της σήραγγας η οποία προκαλεί την σύγκλιση των τοιχωμάτων ισοδυναμώντας με μείωση της εσωτερικής πίεσης από (P_0) σε (P), (μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης), **(Σχήμα 1.3.3)**.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου χαλάρωσης συγκαταλέγεται η εφαρμογή της σε μη-κυκλικές σήραγγες, ανισότροπη γεωστατική κατάσταση, πολλαπλές φάσεις εκσκαφής, σε όλα τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 1.3.3 : Σταδιακή μείωση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας (E_0) σε (E) και σύγκλιση των τοιχωμάτων (Καββαδάς Μ.,2004).

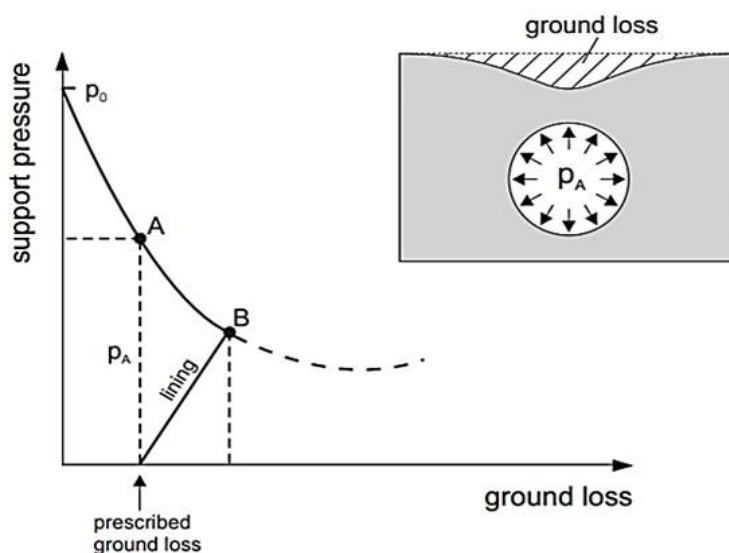
Τιμές του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχεί στον ισοδύναμο συντελεστή αποτόνωσης λ

λ	p/p_0	Τιμές του E/E_0 για		
		$\nu = 0.25$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.35$
0.20	0.80	0.571	0.533	0.480
0.30	0.70	0.438	0.400	0.350
0.40	0.60	0.333	0.300	0.257
0.50	0.50	0.250	0.222	0.187
0.60	0.40	0.182	0.160	0.133
0.70	0.30	0.125	0.109	0.090
0.80	0.20	0.077	0.067	0.054
0.90	0.10	0.036	0.031	0.025

1.3.4 Μέθοδος απώλειας όγκου εδάφους Volume Loss

Είναι μέθοδος όμοια της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης, με τη διαφορά ότι προκαθορίζεται η ποσότητα της απώλειας εδάφους που πρόκειται να υπάρξει μετά την κατασκευή της σήραγγας. Εφόσον οι τιμές των παραμέτρων εξασθένησης είναι αβέβαιες και ο έλεγχος των καθιζήσεων στην διάνοιξη με μηχανές με ασπίδα επιτυγχάνεται από τον έλεγχο της απώλειας εδάφους (GL), οι **Addenbrooke et al** (1997) βασιζόμενοι στην τιμή της απώλειας εδάφους GL (%) της ορίστηκε στο Κεφάλαιο 1.1.6, (σχέση 1.2) πρότειναν στην θέση των παραγόντων εξασθένησης τον προκαθορισμό από τον μελετητή του μεγέθους της απώλειας όγκου εδάφους σε σχέση με την εκσκαφή, πριν την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης.

Υπέθεσαν αστράγγιστες συνθήκες (παραδοχή ισόογκης παραμόρφωσης) κατά την οποία ο όγκος που περικλείεται στην καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων (V_s) ισούται με την απώλεια του όγκου που χάνεται κατά την εκσκαφή (G_L), (**Σχήμα 1.3.4**)



Σχήμα 1.3.4: Απομείωση των τάσεων με την μέθοδο προκαθορισμένης απώλειας εδαφικού όγκου (Addenbrooke et al, 1997) σε σχέση με την καμπύλη απόκρισης του εδάφους (Moller S., 2006)

Συνοπτική περιγραφή της μεθόδου

Το (**σχήμα 1.3.4**) παρουσιάζει σε δύο φάσεις υπολογισμού την μείωση των τάσεων συναρτήσει της απώλειας όγκου εδάφους, υιοθετώντας την καμπύλη εδαφικής απόκρισης. Στην πρώτη φάση η αρχική γεωστατική πίεση υποστήριξης στο όριο εκσκαφής (P_0) μειώνεται σταδιακά μέχρι η τιμή της απώλειας όγκου εδάφους να φτάσει την προκαθορισμένη τιμή, σημείο A το οποίο αντιστοιχεί στην πίεση υποστήριξης (p_A), τότε εγκαθίσταται η επένδυση. Μετά την εγκατάσταση της επένδυσης (δεύτερη φάση υπολογισμού), επιπλέον ποσότητα απώλειας όγκου εδάφους συμβαίνει μέχρι την αποκατάσταση της ισορροπίας (σημείο B). Ωστόσο αυτή η τιμή απώλειας εδάφους θα είναι μικρότερη της τιμής από την πρώτη φάση, λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας της επένδυσης από την ακαμψία του εδάφους.

Κεφάλαιο 1.4- Εμπειρική Διερεύνηση

1.4 Διερεύνηση των καθιζήσεων

Πολλοί επιστήμονες διερεύνησαν την ανάπτυξη των καθιζήσεων στην ελεύθερη επιφάνεια (green field settlements), από παρατηρήσεις και μετρήσεις: Peck (1969), Cording and Hansmire (1975), Clough and Schmidt (1981), Ward and Pender (1981), O'Reilly and New (1982), Attewell et al (1986), Rankin (1988), Uriel and Sagaseta (1989), Cording (1991), New and O'Reilly (1991), and Fujita (1989, 1994).

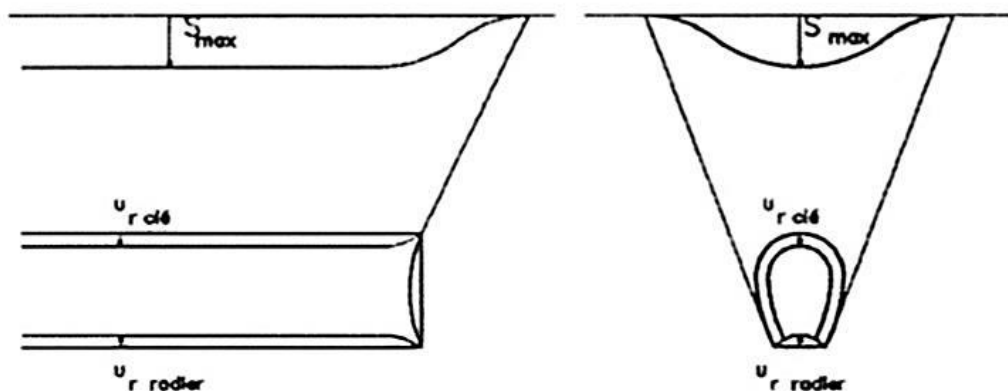
1.4.1 Εισαγωγή

Η συσχέτιση του βάθους διάνοιξης μιας σήραγγας και των επιφανειακών καθιζήσεων που προκαλούνται εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων της:

- Το γεωλογικό και γεωτεχνικό προφίλ εδάφους και της υδρολογικές συνθήκες
- Το βάθος εκσκαφής και γεωμετρία της σήραγγας
- Τη μέθοδο διάνοιξης
- Την ποιότητα της εργασίας

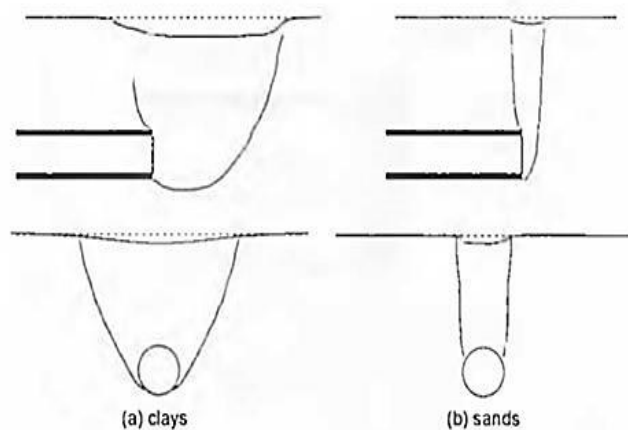
Είναι βέβαιο ότι μια ρηχή σήραγγα επηρεάζει πολύ περισσότερο τον όγκο των επιφανειακών καθιζήσεων

Η κατασκευή μιας σήραγγας αναπόφευκτα επηρεάζει το επί τόπου πεδίο τάσεων συνοδευόμενο με μετακινήσεις του εδάφους της το εσωτερικό της σήραγγας και συγκλίσεις των τοιχωμάτων της κατά την προχώρηση της μηχανής διάνοιξης, (**Σχήμα 1.4.1 α**).



Σχήμα 1.4.1 α:Μετακινήσεις στο όριο εκσκαφής της σήραγγας(ITA/AITES, Report 2007)

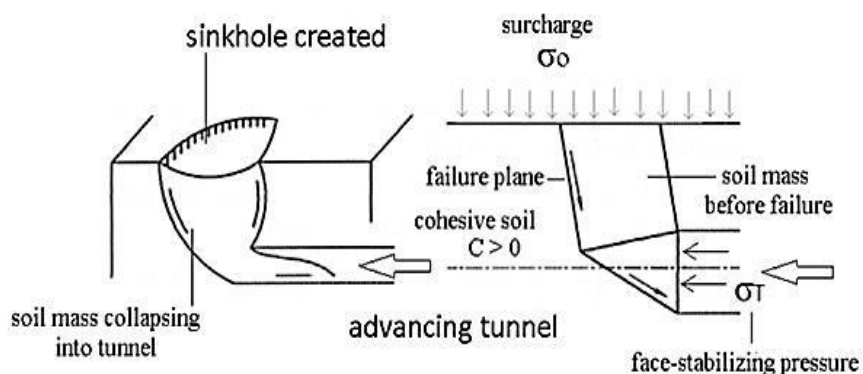
Η κατασκευή μιας ανυποστήριχτης σήραγγας σε αργιλικά, ιλυώδη εδάφη οδηγεί σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις οδηγώντας σε ζώνη αστοχίας μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής (**Σχήμα 1.4.1 β,α**). Σε αμμώδη βραχώμαζα η ζώνη αστοχίας μπορεί να διαδοθεί επάνω από το μέτωπο εκσκαφής (**Σχήμα 1.4.1 β,β**).Οι μηχανισμοί αστοχίας συσχετίζονται με την ευστάθεια του μετώπου.



Σχήμα 1.4.1 β: Μηχανισμοί αστοχίας βασισμένοι σε πειράματα (Mair, 1979, Chambon & Corte, 1994),(Mair & Taylor 1997 Theme Lecture)

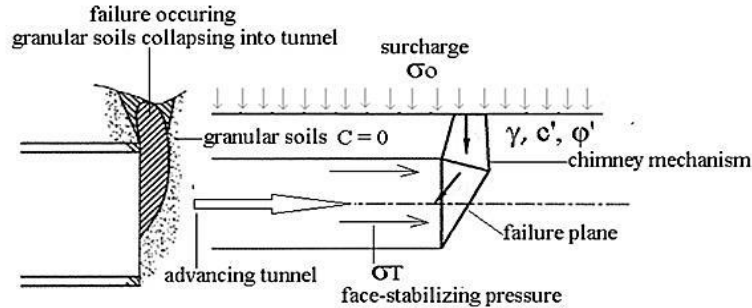
1.4.2 Μηχανισμοί αστοχίας

Στα συνεκτικά εδάφη (της αργιλικά) η ζώνη αστοχίας ξεκινάει από το ανάστροφο τόξο της σήραγγας και εξαπλώνεται επάνω και εκτός επιπέδου μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια με την εδαφική μάζα να ολισθαίνει με μορφή «πηγαδιού» μέσα στη σήραγγα σχηματίζοντας στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους κοιλότητα πλάτους μεγαλύτερου μιας διαμέτρου (Σχήμα 1.4.2 α)



Σχήμα 1.4.2 α: Μηχανισμός αστοχίας μετώπου σε συνεκτικό έδαφος

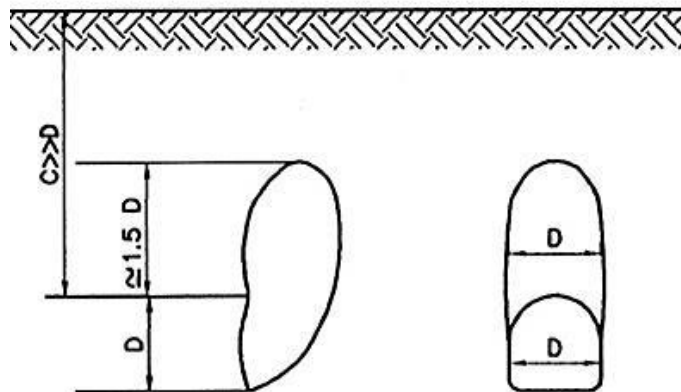
Στα μη συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη η αστοχία μετώπου τείνει να έχει μορφή τύπου «καμινάδας» με το μηχανισμό να διαδίδεται σχεδόν κάθετα από το μέτωπο εκσκαφής της την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 1.4.2 β).



Σχήμα 1.4.2 β: Μηχανισμός αστοχίας μετώπου σε μη συνεκτικό έδαφος

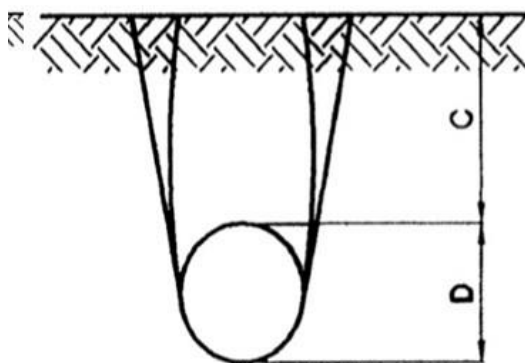
1.4.3 Διάδοση των εδαφικών μετακινήσεων στην ελεύθερη εδαφική επιφάνεια

Οι εδαφικές μετακινήσεις τείνουν να φτάνουν στην ελεύθερη επιφάνεια με δύο μορφές με βάση συμπεράσματα που έχουν προκύψει από μετρήσεις. Διακρίνονται στην κύρια και δευτερεύουσα μορφή σε εγκάρσιο στη διατομή επίπεδο (**Pantet, 1991**). Η κύρια (**Σχήμα 1.4.3α**) συμβαίνει με την απελευθέρωση των τάσεων στο μέτωπο εκσκαφής. Χαρακτηρίζεται από μια ζώνη χαλάρωσης πάνω από την εκσκαφή, το ύψος της οποίας κυμαίνεται από 1-1,5 φορές την διάμετρο της σήραγγας και σε πλάτος περίπου μιας διαμέτρο. Για βαθιές σήραγγες με λόγο υπερκείμενου εδάφους μέχρι την στέψη της σήραγγας C και διάμετρο D , ($C/D > 2.5$), κατά της (**Cording and Hansmire, 1975; Leblais and Bochon, 1991; Pantet, 1991**) η επιρροή της εκσκαφής στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη.



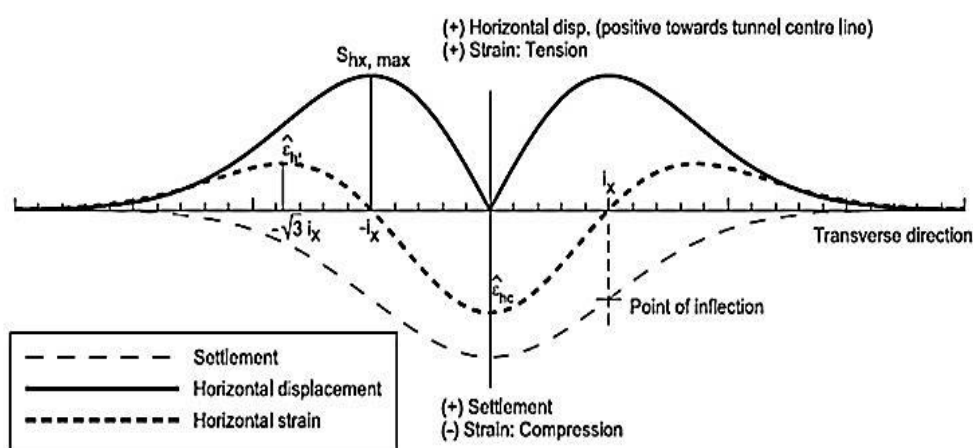
Σχήμα 1.4.3 α: Κύρια μορφή σε εγκάρσια διατομή (ITA/AITES, Report 2007).

Η δευτερεύουσα μορφή (**Σχήμα 1.4.3 β**) συμβαίνει υποεπιφανειακά, όταν η σήραγγα είναι κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια με λόγο ($C/D < 2.5$) και ανεπαρκή υποστήριξη. Με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της στερεού βραχοτεμαχίου οριοθετημένου από διατμητικά επίπεδα που ξεκινάνε από την σήραγγα και καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους. Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια πάνω από το άνοιγμα της σήραγγας είναι της τάξης μεγέθους με αυτές που δημιουργούνται στο όριο εκσκαφής.



Σχήμα 1.5.3 β: Δευτερεύουσα μορφή σε εγκάρσια διατομή (ITA/AITES, Report 2007) .

Αυτοί οι μηχανισμοί απόκρισης του εδάφους οδηγούν της εγκάρσιες και οριζόντιες μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους κατά την διάνοιξη της σήραγγας και συνιστούν την σκάφη των επιφανειακών καθιζήσεων (Σχήμα 1.4.3 γ)



Σχήμα 1.4.3 γ: Οριζόντιες μετακινήσεις και παραμορφώσεις μαζί με την εγκάρσια σκάφη καθιζήσεων (Lecture Notes by Dr Billota E., 2014-2015)

1.4.4 Βήματα εκτίμησης των καθιζήσεων

(1) εκτίμηση του όγκου εδάφους που χάνεται στο όριο εκσκαφής (V_e). Με την μέθοδο σύγκλισης –αποτόνωσης, μέσω του συντελεστή εξασθένισης « λ » μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της σύγκλισης των τοιχωμάτων. Στη διάνοιξη με μηχανές με ασπίδα ο συντελεστής λ

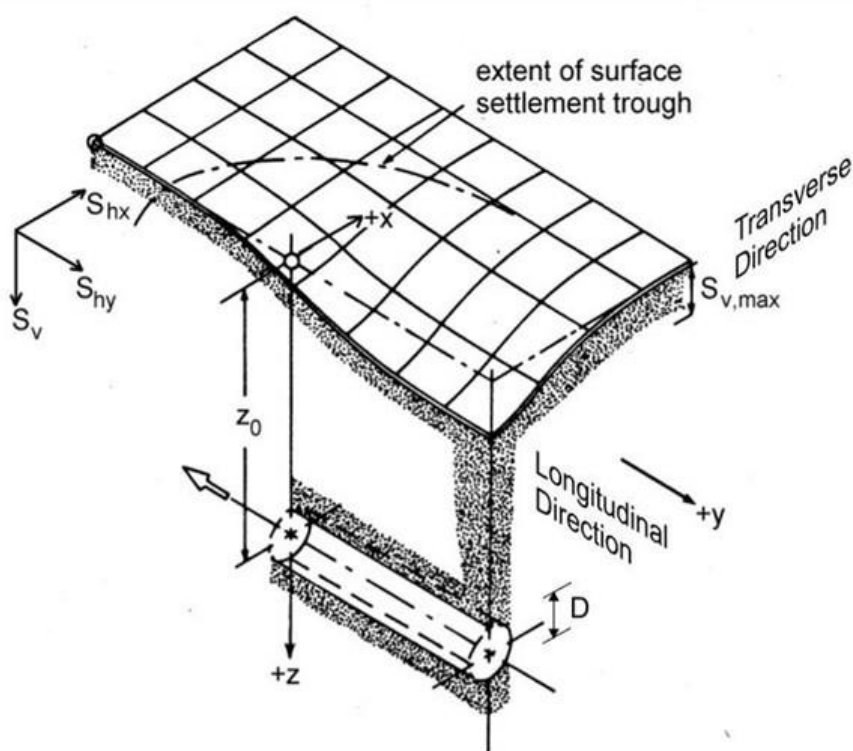
(2) εκτίμηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια (V_s). Γίνεται η παραδοχή ασυμπίεστου εδάφους οπότε επικρατούν συνθήκες ισόογκης παραμόρφωσης και ο όγκος των

επιφανειακών καθιζήσεων (V_s) ισούται με τον όγκο εδάφους που χάνεται στο μέτωπο εκσκαφής(V_e). Αυτή η παραδοχή έχει εφαρμογή σε ρηχή σήραγγα σε συνεκτικό έδαφος.

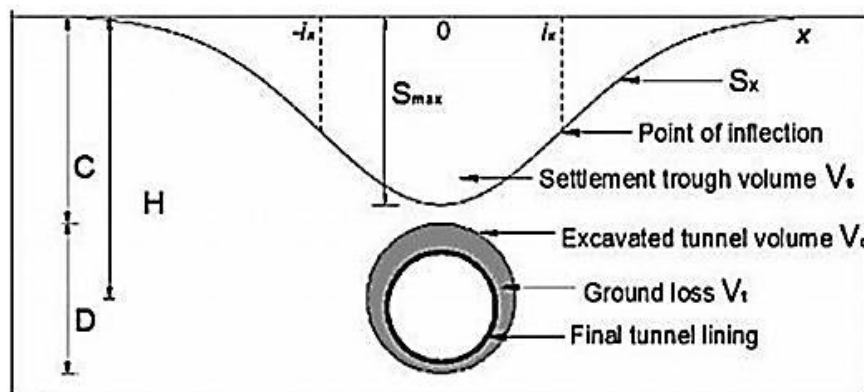
(3) καθορισμός εγκάρσιου πλάτους (K_z) της καμπύλης καθιζήσεων και βάθους μέσω της μέγιστης εδαφικής καθίζησης s_{max}

1.4.5 Καθιζήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Peck & Schmidt)

Οι εμπειρικές μέθοδοι ακολουθούν την καμπύλη κανονικής κατανομής του Gauss για την μορφή που θα έχει το προφίλ των καθιζήσεων, της αυτή προτάθηκε από τον **Peck**(1969). Για την περίπτωση μονής σήραγγας σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (green-filled conditions) οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους εκδηλώνονται με τη μορφή της καμπύλης Gauss στην εγκάρσια του άξονα της σήραγγας (**Σχήμα 1.4.5 α**). Ακολουθώντας την έρευνα από τον **Martos** (1958) η οποία στηρίχτηκε σε παρατηρήσεις των καθιζήσεων σε εξορυκτικές εκσκαφές ο οποίος πρότεινε ότι θα μπορούσε να αναπαρασταθεί με τον εκθετικό νόμο της καμπύλης του Gauss, οι **Peck** (1968) & **Schmidt** (1974) βασιζόμενοι σε παρατηρήσεις πεδίου έδειξαν ότι οι μόνιμες καθιζήσεις εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας που προκαλούνται από την διάνοιξη κυκλικής σήραγγας σε μαλακό εδαφικό σχηματισμό, ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη κανονικής κατανομής Gauss και περιγράφονται επαρκώς από μιας εξίσωση κανονικής κατανομής. (**Σχήμα 1.4.5 β**)



Σχήμα 1.4.5α: Τρισδιάστατη απεικόνιση των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους (Attewell et al, 1986)



Σχήμα 1.4.5 β: Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων της περιγράφεται από την καμπύλη Gauss και χαρακτηριστικά μεγέθη της καμπύλης

Η προσέγγιση των (Peck & Schmidt) δεν έχει θεωρητική λύση αλλά μπορεί χονδροειδώς να εκτιμήσει το προφίλ των καθιζήσεων πάνω από μονή σήραγγα. Σύμφωνα με την προσέγγιση της κανονικής κατανομής, οι επιφανειακές καθιζήσεις εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας για επιφανειακό προφίλ με άξονες (xz) της δίνονται από την σχέση:

$$Sv(x) = Sv, max * \exp\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right) \quad \text{Εξ.1.4.1}$$

όπου:

$Sv(x)$: είναι η καθίζηση σε κάθε θέση x από τον άξονα συμμετρίας

Sv, max : είναι η μέγιστη καθίζηση ακριβώς πάνω από το κέντρο του άξονα της σήραγγας (για $x=0$)

$i_{(x)}$: η παράμετρος εγκάρσιου πλάτους, σημείο αλλαγής καμπυλότητας της κατανομής Gauss

Σύμφωνα με το άνω (Σχήμα 1.4.5 β) D είναι η διάμετρος της σήραγγας, H το βάθος εκσκαφής από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κέντρο της σήραγγας (ή z0) και C είναι το υπερκείμενο έδαφος από την επιφάνεια μέχρι τη στέψη της σήραγγας.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τη μορφή των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και όχι το μέγεθος της καθίζησης. Τα μεγέθη Sv, max και i θεωρούνται γνωστά. Συνηθίζεται να εκτιμάται πρώτα η απώλεια εδαφικού όγκου (VL) μέσω εμπειρικών συσχετίσεων και έπειτα να γίνεται εκτίμηση του i από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης Gauss. Με γνωστά τα (Sv, max , i και VL) μπορεί να υπολογιστεί το εγκάρσιο προφίλ των καθιζήσεων.

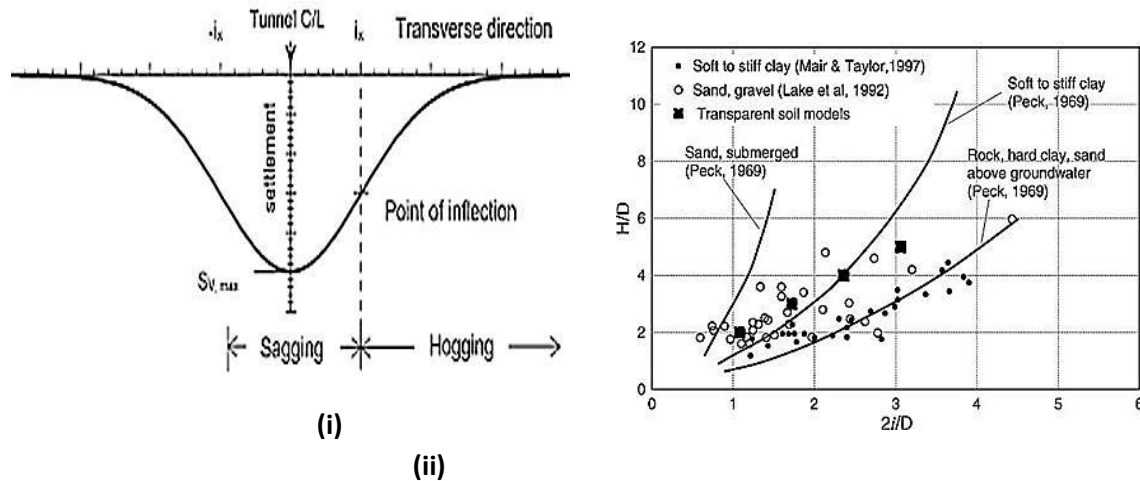
$$VL(\%) = \frac{\sqrt{2\pi} * i * Sv, max}{\pi R^2} \quad \text{Εξ.1.4.2}$$

Η παράμετρος i εκφράζει την οριζόντια απόσταση του σημείου αλλαγής της καμπυλότητας της κατανομής των καθιζήσεων από τον κεντρικό άξονα της σήραγγας. Στο σημείο καμψής παρουσιάζεται η μέγιστη κλίση της καμπύλης και διαχωρίζεται η ζώνη κάμψης (sagging)

από την ζώνη κύρτωσης(hogging), (Σχήμα 1.4.5 γ (i)). Ο Peck (1969) συσχέτισε το σημείο καμπής i με την διάμετρο της σήραγγας D και το βάθος εκσκαφής z_0 , για διάφορα εδάφη σε σχέση με την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, της φαίνεται στο (Σχήμα 1.4.5 γ (ii)).

$$\frac{2i}{D} = \left(\frac{H}{D}\right)^{0.8-1.0}$$

Εξ1.4.3



Σχήμα 1.4.5γ (i): Προφίλ καθιζήσεων στην εγκάρσια διεύθυνση x , διαχωρισμός των κοίλων της καμπύλης καθιζήσεων από το σημείο καμπής i σε ζώνη κάμψης (sagging) και ζώνη κύρτωσης (hogging), (ii) σχέση μεταξύ $2i/D$ και ανηγμένο βάθος σήραγγας H/D για διάφορα εδάφη (Peck 1969)

Διάφοροι ερευνητές έκαναν παρόμοιες συσχετίσεις (Cording and Hansmire, 1975; Clough and Schmidt, 1981; Fujita, 1981; O'Reilly and New, 1982; Rankin, 1988)

Υπολογισμός V_s

Η περιοχή εντός της καμπύλης Gauss εξ' ορισμού ισούται με 1 και εκφράζει την πιθανότητα η μεταβλητή x να έχει τιμή από $-\infty$ έως $+\infty$. Το μέγεθος του όγκου καθιζήσεων που περικλείεται από την καμπύλη καθιζήσεων (V_s) μετρούμενο ανά μονάδα μήκους, αριθμητικά είναι ίσο με το εμβαδόν της καμπύλης Gauss. Συνεπώς με ολοκλήρωση της σχέσης (1.5.1) έχουμε:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v(x) dx = \sqrt{2\pi} * i_x * S_{v,max} \cong 2.5 * i_x * S_{v,max} \quad \text{Εξ.1.4.4}$$

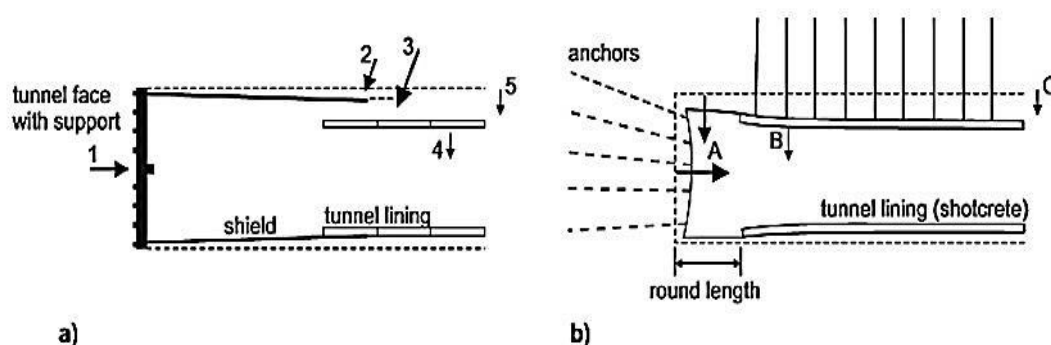
Το μέγεθος του (V_s) αυστηρά εξαρτάται από το έδαφος που εκσκάπτεται κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Η παραπάνω εξίσωση (εξ. 1.4) εύκολα υπολογίζεται αν ξέρουμε δύο παραμέτρους, το $S_{v,max}$ και το σημείο καμπής i .

1.5.6 Υπολογισμός $S_{v,max}$ και $S_v(x)$ μέσω του (VL) και (Vs)

Η εκτίμηση της μέγιστης υποχώρησης του εδάφους στην επιφάνεια $S_{v,max}$ ως της το κέντρο της διατομής της σήραγγας εκτιμάται από την κατάλληλη επιλογή της απώλειας εδαφικού όγκου (V_L , Volume Loss). Ο όγκος των καθιζήσεων ανά μονάδα μήκους στην ελεύθερη επιφάνεια (V_s) προκαλείται από την απώλεια εδάφους (V_t ή Ground Loss, G_L).

V_t ή G_L ανά μονάδα μήκους είναι το σύνολο των εδαφικών μετακινήσεων κατά την προχώρηση της μηχανής και των συγκλίσεων τοιχωμάτων στη σήραγγα μετά την κατασκευή της. Λόγω των συγκλίσεων του εδάφους χάνεται έδαφος και για να αναπληρωθεί και διανοιχθεί η επιθυμητή (θεωρητική) διάμετρος της σήραγγας (V_o) εκσκαπεται με υπέρ-εκσκαφή της επιπλέον όγκος εδάφους. Της ο επιπλέον όγκος εδάφους ανά μονάδα μήκους ονομάζεται (V_L) ο οποίος εξαρτάται από την ποιότητα του εδάφους και την ύπαρξη αστράγγιστων ή στραγγισμένων συνθηκών.

Οι συνιστώσες των μετακινήσεων κατά της **Mair & Taylor (1997)** σε κλειστού μετώπου ολομέτωπη διάνοιξη με ασπίδα και συμβατική διάνοιξη φαίνονται στο **(Σχήμα 1.4.6)** και έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 1.1.3.



Σχήμα 1.4.6: Συνιστώσες μετακίνησης εδάφους α) κατά την μηχανοποιημένη διάνοιξη με ασπίδα (Mair & Taylor, 1997), β) σε διάνοιξη χωρίς υποστήριξη μετώπου

Σε αστράγγιστες συνθήκες

Σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ($k_s < 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$) αργιλικά εδάφη, η διάνοιξη θεωρείται ότι γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Τότε η επιπλέον απώλεια εδάφους στη σήραγγα (VL) ανά μονάδα μήκους σε σχέση με την θεωρητική (V_o) ανά μονάδα μήκους ισούται με τον όγκο των επιφανειακών καθιζήσεων (V_s) ανά μονάδα μήκους, $VL \cong VS$ Συνηθίζεται ο υπολογισμός της επιπλέον ποσότητας εδάφους σε όγκο ανά μονάδα μήκους (VL) να γίνεται ως εξής:

$$VL(\%) = \frac{V_s}{V_o} (\%) = \frac{V_s}{A_{tunnel}} (\%) = \frac{V_s}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} (\%) \quad \text{Εξ.1.4.5}$$

Η ποσότητα VL εκφράζεται ως ποσοστό της θεωρητικού όγκου εκσκαφής

Σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ($k_s < 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$) η διάνοιξη της σήραγγας μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Έτσι, ο όγκος απώλειας εδάφους της

σήραγγας (VL) ανά μονάδα μήκους (δηλαδή το εμβαδόν της διατομής) περιγράφεται από την άνω καμπύλη εκθετικής μορφής (καμπύλη Gauss) με μέγιστο σημείο το Sv,max στο κέντρο συμμετρίας της και σημείο καμπής σε αποστάσεις +/- i (x) από το κέντρο συμμετρίας της και υπολογίζεται με ολοκλήρωσης της σχέσης (Εξ.1.5.1) και είναι:

$$VL \cong \frac{VS}{Vo} \cong \frac{Vs}{Atunnel} \cong \frac{Sv,max * i_x * \sqrt{2\pi}}{\frac{\pi * D^2}{4}} \Rightarrow Sv, max \cong \frac{Atunnel}{(i_x * \sqrt{2\pi})} * VL \quad \text{Εξ.1.4.6}$$

Από της εξισώσεις (1.5.1),(1.5.4),(1.5.5)και(1.5.6) η εξίσωση των εγκάρσιων μετακινήσεων συναρτήσει της απώλειας όγκου εδάφους είναι:

$$Sv(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} * \frac{VL * D^2}{4 * i_x} * \exp\left(-\frac{x^2}{2 * i_x^2}\right) \quad \text{Εξ.1.4.7}$$

Από την (Εξ.1.7) για δεδομένη διάμετρο D οι καθιζήσεις εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας εξαρτώνται από την παράμετρο απώλειας επιπλέον όγκου εδάφους (VL) και την οριζόντια απόσταση από το κέντρο της διατομής έως το σημείο καμπής (i). Συγκεντρωτικά οι καθιζήσεις εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας είναι συνάρτηση των $s=f(VL,i,D,t)$:

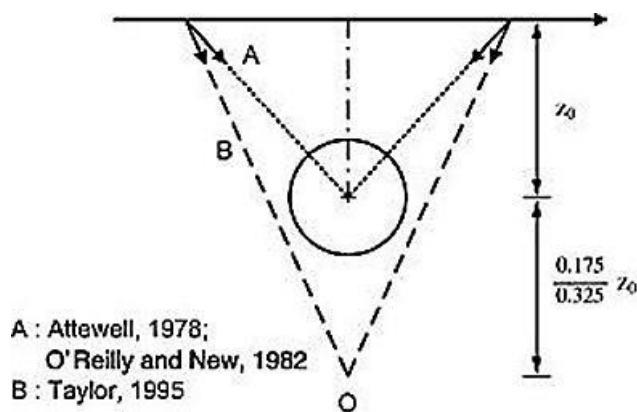
- πρόσθετης από τη θεωρητική εδαφικής απώλειας VL
- του σημείου καμπής i
- διάμετρο της σήραγγας
- το υπερκείμενο έδαφος πάνω από τη στέψη της σήραγγας

Στραγγισμένες συνθήκες

Σε στραγγισμένες συνθήκες ($k_s > 5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$), της πυκνή άμμος ο όγκος της επιφάνειας των καθιζήσεων ανά μονάδα μήκους στην καμπύλη Gauss είναι λίγο μικρότερος από τον όγκο απώλειας εδάφους (VL) ανά μονάδα μήκους, λόγω της επιρροής της γωνίας διαστολικότητας (δ) (Cording and Hansmire, 1975).

1.4.7 Οριζόντιες μετακινήσεις στην εγκάρσια διεύθυνση

Βλάβες στα κτίρια και σε υπόγειες κατασκευές μπορεί να προκληθούν και από την επιρροή οριζόντιων μετακινήσεων .Ωστόσο υπάρχουν καταγραφές σε οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους. Οι Attewell (1978) & New and O'Reilly (1982) παρατήρησαν ότι τα διανύσματα των οριζόντιων μετακινήσεων του εδάφους σε αργιλικά εδάφη έχουν φορά της το κέντρο της σήραγγας (Σχήμα 1.4.7 α)



Σχήμα 1.4.7 α: Διανύσματα μετακινήσεων σε αργιλικά εδάφη με κατεύθυνση της τον άξονα της σήραγγας και σε σημείο κάτω από αυτόν, αναλόγως της παραμέτρου του εγκάρσιου πλάτους. (Attewell, 1978 , O'Reilly και New, 1982, Taylor, 1995).

Από αυτή την παρατήρηση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατανομή των οριζοντίων μετακινήσεων ακολουθεί την καμπύλη του Gauss, και ο υπολογισμός της γίνεται μέσω από την (Εξ.1.4.1) του Peck για εγκάρσια διεύθυνση τον άξονα x.

$$S_h(x) = \frac{x}{z_0} * Sv(x) \quad \text{Εξ.1.4.8}$$

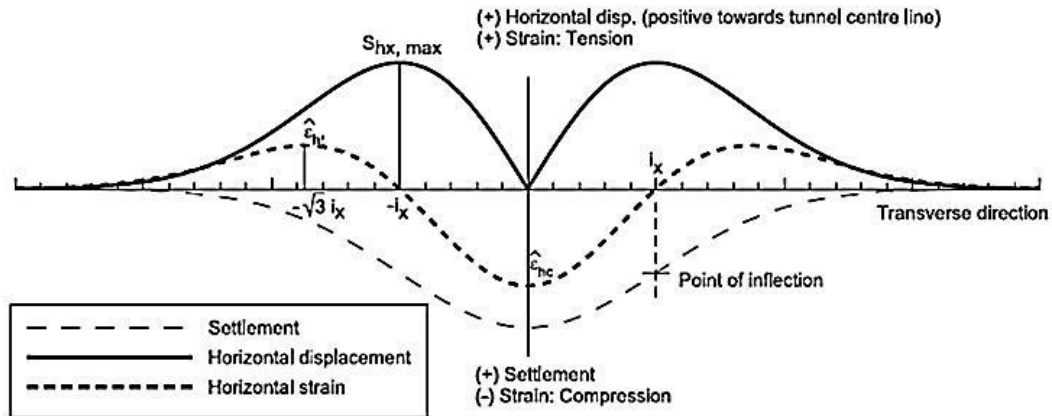
Από της εξισώσεις (1.4.1), (1.4.4) η εξίσωση (1.4.8) μπορεί να γραφτεί:

$$S_h(x) = \frac{x}{z_0} * Sv, max * exp\left(-\frac{x^2}{i_x^2}\right) = \frac{x}{z_0} * \frac{Atunnel}{(i_x * \sqrt{2\pi})} * VL * exp\left(-\frac{x^2}{i_x^2}\right) \quad \text{Εξ.1.4.9}$$

Από το (Σχήμα 1.4.8 α) φαίνεται ότι η οριζόντια μετακίνηση λαμβάνει την μέγιστη τιμή της στο σημείο καμπής. Παραγωγίζοντας την εξίσωση (Εξ. 1.8) η οριζόντια παραμόρφωση ισούται με:

$$\epsilon_h(x) = \frac{d}{dx} S_h(x) \quad \text{Εξ.1.4.10}$$

Η κατανομή των οριζοντίων μετακινήσεων $S_h(x)$ και παραμορφώσεων $\epsilon_h(x)$ στην εγκάρσια διεύθυνση x μαζί με της καθιζήσεις $S_v(x)$ φαίνονται στο **(Σχήμα 1.4.7 β)**



Σχήμα 1.4.7 β: Οριζόντιες επιφανειακές μετακινήσεις και παραμορφώσεις στην εγκάρσια διεύθυνση μαζί με την καμπύλη καθιζήσεων.

Παρατηρείται η ανάπτυξη θλιπτικής ζώνης ανάμεσα στα σημεία καμπής $+i_x$ και $-i_x$ καθώς και εφελκυστικής ζώνης για $(x < -i_x)$ και για $(x > +i_x)$ με τη μέγιστη τιμή θλιπτικής παραμόρφωσης (ϵ_{hc}) να συμβαίνει στο κέντρο του άξονα της σήραγγας για $x=0$ και η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση (ϵ_{ht}) να συμβαίνει για $x=\sqrt{3} i_x$.

Η κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων δίνεται από την σχέση:

$$\frac{S_h}{S_{hmax}} = 1.65 \frac{x}{i} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad \text{Εξ. 1.4.11}$$

Η θεωρητική μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετακίνησης $S_{h,max}$ θεωρείται ίση με $0.61Ks_{max}$ και συμβαίνει στο σημείο αλλαγής της καμπυλότητας της κατανομής Gauss, σημείο καμπής. Το οποίο επιβεβαιώνεται από παρατηρήσεις πεδίου από της **(Cording and Hansmire (1975) & Attewell (1978))**. Με βάση την σχέση (8) και ότι εάν η παράμετρος του εγκάρσιου πλάτους K είναι σταθερή με το βάθος, τότε οι καθιζήσεις και οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι ίσες και αντίθετες.

Διαφοροποίηση της παραμέτρου i με το βάθος z επηρεάζει την κατανομή οριζόντιων και εγκάρσιων μετακινήσεων. Σε αργιλικά εδάφη υπό συνθήκες σταθερού εδαφικού όγκου προέκυψε από πειράματα από τον **(Taylor, 1995)** ότι για μεταβολή του συντελεστή i με το βάθος z , τα διανύσματα των οριζόντιων μετακινήσεων θα πρέπει να κατευθύνονται σε ένα σημείο, έστω O , το οποίο βρίσκεται κάτω από το κέντρο του άξονα της σήραγγας σε απόσταση $z = \frac{0.175}{0.325} z_0$, της φαίνεται στο **(Σχήμα 1.4.8 α)** και σύμφωνα με την (Εξ.1.4.8) η κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων είναι η ακόλουθη:

$$S_h(x) = \frac{x}{z_0+z} * Sv(x) = \frac{x}{\left(1+\frac{0.175}{0.325}\right)*z_0} * Sv(x) \quad \text{Εξ.1.4.12}$$

1.4.8 Μέγιστη καθίζηση S_{max}

Διάφορες εμπειρικές σχέσεις έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό της παραμέτρου S_{max} .

Οι **Attewell & Farmer** (1977) πρότειναν την μέγιστη καθίζηση ανεξάρτητη της μεθόδου διάνοιξης και βάθους εκσκαφής της παρακάτω:

$$S_{max} = \frac{D}{1000} * \left(\frac{K*D}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Εξ.1.4.13}$$

με σταθερές $K=10$ και $n=0.67$

Οι **Oteo & Sagaseta** (1982) λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο βάρος του εδάφους και της ελαστικές ιδιότητες του εδάφους, το μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν , πρότειναν την σχέση:

$$S_{max} = \frac{\gamma * D^2}{E} * (0.85 - \nu) \quad \text{Εξ.1.4.14}$$

Ο **Descoeudres** (1991) για ολομέτωπη εκσκαφή με ασπίδα σε αργιλικά και χονδρόκοκκα αμμώδη εδάφη πρότεινε :

$$S_{max} = 6.208 * 10^{-3} * D * \left(\frac{H}{D} - 0.5 \right)^{-0.57} \quad \text{για αργιλικά εδάφη} \quad \text{Εξ.1.4.15}$$

$$S_{max} = 9.9 * 10^{-3} * D * \left(\frac{H}{D} - 0.5 \right)^{-0.974} \quad \text{για χονδρόκοκκη άμμο} \quad \text{Εξ.1.4.16}$$

όπου H το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το κέντρο του άξονα της σήραγγας, D η διάμετρος εκσκαφής

Οι Γαλλικές προδιαγραφές σήραγγοποιίας **AFTES** πρότειναν την σχέση:

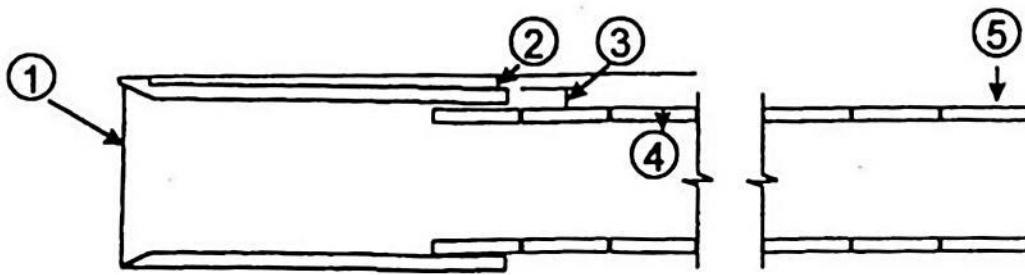
$$S_{max} = K * \lambda * \frac{\gamma * R^2}{E} \quad \text{Εξ.1.4.17}$$

όπου K παράμετρος εξαρτώμενη από το πεδίο τάσεων, της εδαφικές συνθήκες, λ ο συντελεστής αποτόνωσης των τάσεων, R η ακτίνα εκσκαφής, γ το φαινόμενο βάρος του εδάφους, E το μέτρο ελαστικότητας του Young.

1.4.9 Απώλεια όγκου V_{loss}

Η υπερ-εκσκαφή κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας μαζί με της μετακινήσεις του εδάφους και της συγκλίσεις των τοιχωμάτων οδηγούν στην εκσκαφή μεγαλύτερου όγκου εδάφους από τον θεωρητικό που αντιστοιχεί στην επιθυμητή διάμετρο της σήραγγας. Η επιπλέον ποσότητα εκφράζεται από την τιμή της απώλειας όγκου V_L . Ο Attewell διαχωρίζει την ως

Την τιμή του V_L ατά την διάνοιξη με ασπίδα ορίζουν οι τέσσερις πρώτες συνιστώσες, της φαίνονται στο ακόλουθο **(Σχήμα 1.4.9 α)**. Η Πέμπτη ισχύει για μακροχρόνιες καθιζήσεις που δεν εξετάζουν οι εμπειρικές μέθοδοι. Ωστόσο αναφέρεται στην καθίζηση λόγω στερεοποίησης σε λεπτόκοκκα εδάφη με ιδιαίτερη σημασία σε μαλακή άργιλο.



Σχήμα 1.4.9 α:Καθιζήσεις κατά την διάνοιξη με μηχανή με ασπίδα (Attewell et al.,1986)

1. καθιζήσεις στο μέτωπο και μπροστά (face loss) από την αποτόνωση των τάσεων μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Εξαρτώνται από την υποστήριξη από το θάλαμο εργασίας στο μέτωπο εκσκαφής και της υδρογεωλογικές συνθήκες. Μπορεί να περιοριστούν με της μηχανές ολομέτωπης κοπής με ασπίδα, της εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB shield, ή πολφού Slurry shield

2. καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας. Οφείλονται κυρίως στην υπέρ-εκσκαφή από τα κοπτικά εργαλεία τα οποία είναι τοποθετημένα περιφερειακά στην εξωτερική διάμετρο της κοπτικής κεφαλής. Για να εκσκάπτουν μεγαλύτερη διάμετρο από αυτήν της ασπίδας της μηχανής TBM και έτσι να μειώνονται οι τριβές μεταξύ περιβάλλοντος εδάφους και ασπίδας, διευκολύνοντας την πλοήγηση της μηχανής. Εξαρτώνται από το πάχος των κοπτικών υπέρ-εκσκαφής και της πιθανά προβλήματα πλοήγησης της μηχανής TBM εκτός της χάραξης της σήραγγας

3. καθιζήσεις στην ουρά της ασπίδας. Οι οποίες δημιουργούνται

- από την αλλαγή του πάχους της ασπίδας αναλόγως αν πρόκειται για μονή ή διπλή ασπίδα και κυρίως
- από το ουραίο κενό (tail void) που σχηματίζεται μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου μόνιμης επένδυσης (δακτύλιοι από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος) και της εσωτερικής διαμέτρου της ασπίδας, κατά τη διάρκεια τοποθέτησης της μόνιμης επένδυσης και μετά την τοποθέτησή της εντός του σώματος της ασπίδας. Η απώλεια εδαφικού όγκου στο κενό αυτό μπορεί να περιοριστεί με έγχυση κονιάματος. Καθιζήσεις μετά την έγχυση κονιάματος πίσω από την επένδυση μπορεί να συμβούν λόγω αργοπορημένης σκλήρυνσής του ή μη επαρκούς πλήρωσης του κενού.

4. καθιζήσεις από εκτροπή της μόνιμης επένδυσης από υπέρβαση της αντοχής της της δυνάμεις ώθησης των υδραυλικών εμβόλων που αντιστηρίζονται σε αυτήν. Η μόνιμη επένδυση είναι δακτύλιοι από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος τοποθετημένα εντός του σώματος της ασπίδας που εξυπηρετούν ως έδραση των εμβόλων ώσης για την προχώρηση της μηχανής. Συνεπώς πρέπει να ανθίστανται επαρκώς της δυνάμεις ώσης από τα έμβολα όταν αυτά ενεργοποιούνται.

5. μακροχρόνιες καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης σε λεπτόκοκκα εδάφη

Το μέγεθος της απώλειας όγκου εδάφους ανά μονάδα μήκους (V_L) για αστράγγιστες συνθήκες της ορίστηκε ως (V_s/V_o) εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την μέθοδο διάνοιξης και κυρίως το συντελεστή υπερφόρτισης N_s . Διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την εκτίμηση του συντελεστή απώλειας εδαφούς (Peck, 1969; Cording and Hansmire, 1975; Clough and Schmidt, 1981; O'Reilly and New, 1982; Attewell et al, 1986; Uriel and Sagaseta, 1989; Mair, 1996).

$$N_s = \frac{\sigma_v - p_a}{\sigma_c / 2} \quad \text{Εξ.1.4.18}$$

όπου,

σ_v : η κατακόρυφη αρχική γεωστατική τάση στον άξονα της σήραγγας

p_a : η πίεση που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής, (της στην διάνοιξη με TBM)

σ_c : αντοχή της βραχόμαζας/εδάφους σε μονοαξονική θλίψη.

Στην περίπτωση αστοχίας κατά Mohr-Coulomb ισχύει,

$$\sigma_c = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{Εξ.1.4.19}$$

Οι **Clough and Schmidt** (1981) πρότειναν για διάνοιξη σε αργιλικά εδάφη εμπειρική σχέση μεταξύ του συντελεστή υπερφόρτισης N_s και του συντελεστή εδαφικής απώλειας V_L , ($V_L = V_s/V_o$), **(Σχήμα 1.5.9 β)**

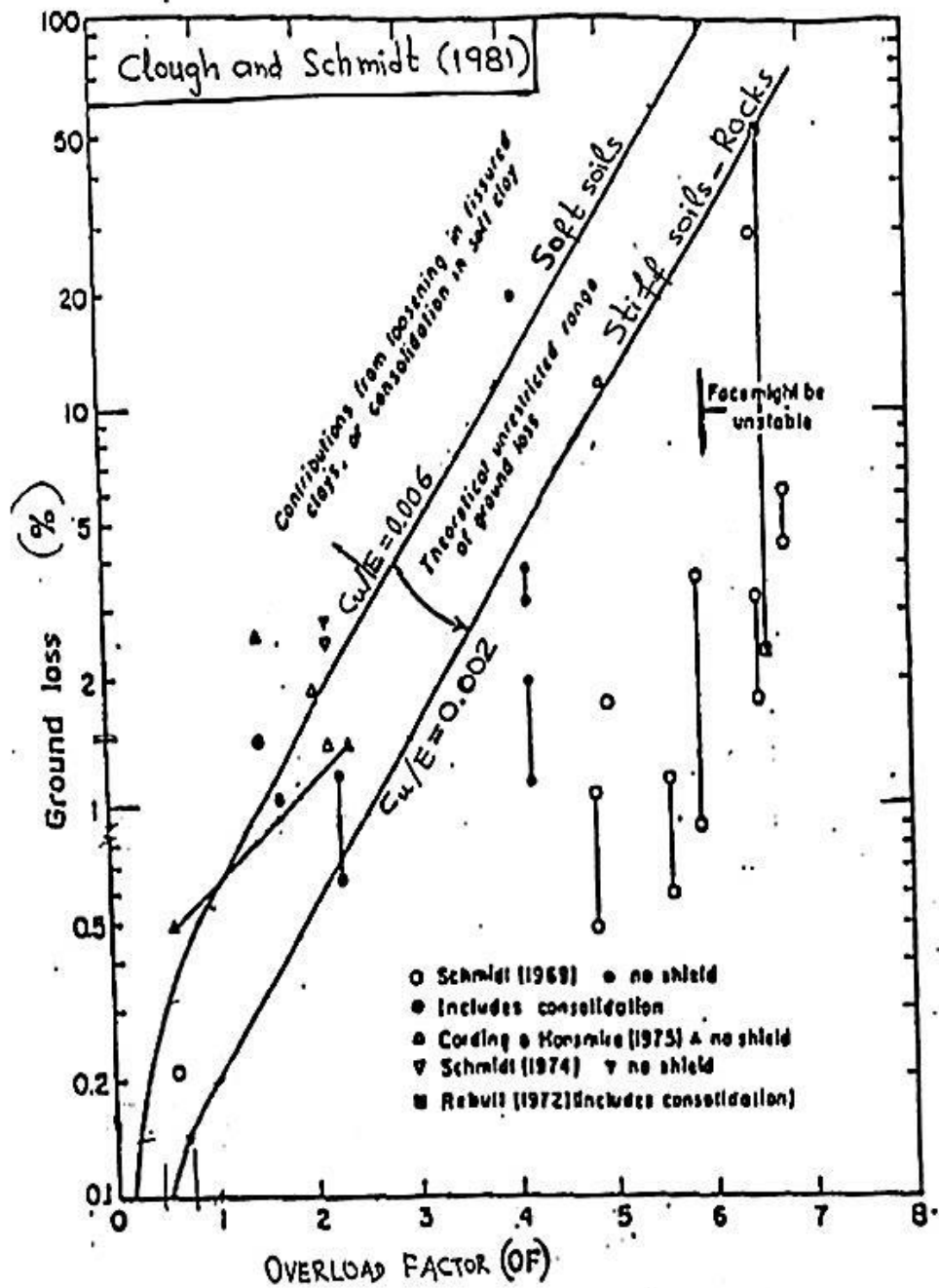
(α) Για προσεκτική κατασκευή του έργου:

$$\frac{V_s}{V_o} = 0.002 \exp(N_s - 1) \quad \text{Εξ.1.4.20α}$$

(β) Για συνήθη επιμέλεια κατασκευής του έργου:

$$\frac{V_s}{V_o} = 0.004 \exp(N_s - 1) \quad \text{Εξ.1.4.20β}$$

Για τιμές του $N_s < 1$, η βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα παραμένει στην ελαστική περιοχή με ευσταθές μέτωπο και απώλεια όγκου περί το 1%. Για τιμές του $2 < N_s < 4$ γύρω από τη σήραγγα αναπτύσσονται πλαστικές ζώνες με πιθανές τιμές απώλειας όγκου εδάφους 10%, ενώ η χρήση μηχανής με ασπίδα μπορεί να περιορίσει την απώλεια κατά 2-3%. Για $4 < N_s < 6$ αυξάνονται οι πλαστικές υποχωρήσεις και η χρήση μηχανής με ασπίδα είναι αναγκαία. Τέλος, για τιμές του $N_s > 6$ συνήθως παρουσιάζονται προβλήματα λόγω αστάθειας (κατάρρευσης) του μετώπου εκσκαφής και μπορεί να αποτραπεί με κατάλληλη πίεση υποστήριξης από μηχανή με λειτουργία πολφού υπό πίεση slurry, μηχανή πεπιεσμένου αέρα και μηχανή εξισορρόπησης γαιών EPB.



Σχήμα 1.4.9 β: Συσχέτιση του συντελεστή εδαφικής απώλειας με το συντελεστή υπερφόρτισης

Προηγούμενες καταγραφές τιμών VI

Στην διάνοιξη «κλειστού» μετώπου με ασπίδα οι μηχανές EPB ή Slurry προσφέρουν την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης με αποτέλεσμα ο συντελεστής υπερφόρτισης να είναι σχεδόν μηδενικός και οι καθιζήσεις στο μέτωπο εκσκαφής που οφείλονται στην

αποτόνωση των τάσεων είναι πολύ μικρές με συντελεστή $VL < 1\%$. Η βασική αιτία της απώλειας εδάφους στη μαλακή άργιλο είναι η επιρροή του ουραίου κενού (tail void). Στα αμμώδη οι (Leblais & Bochon, 1991) κατέγραψαν τιμές VL τάξεως 0.2-0.9% σε σήραγγες διαμέτρου 9.25m σε βάθος εκσκαφής 52m και σε σήραγγες όπου η στέψη τους έφτανε βάθος μόλις τα 7.2m τιμές VL εύρους 0.8-1.3%.

Κατά το TC28 συμπόσιο στο Λονδίνο με θεματολογία τις καθιζήσεις από μηχανοποιημένη διάνοιξη, διεξήχθησαν τα συμπεράσματα, i) Για διάνοιξη «ανοιχτού» μετώπου με ασπίδα στην σιφνή άργιλο του Λονδίνου οι τιμές VL κυμαίνονται από 1 έως 2%, ii) Για διάνοιξη «κλειστού» μετώπου με χρήση μηχανών με ασπίδες λειτουργίας EPB, ή Slurry επιτυγχάνεται ο περιορισμός των καθιζήσεων, ειδικά σε αμμώδη εδάφη με μικρές τιμές VL τάξεως 0.5% και σε αργιλώδη τάξεως VL από 1 έως 2% (χωρίς την επιρροή της στερεοποίησης)

1.4.10 Σημείο καμψής

Peck & Attewell

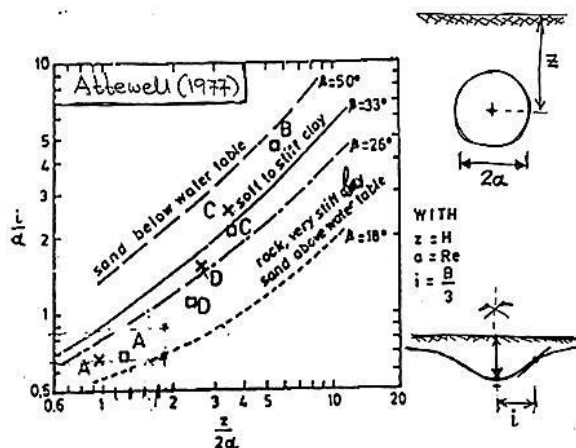
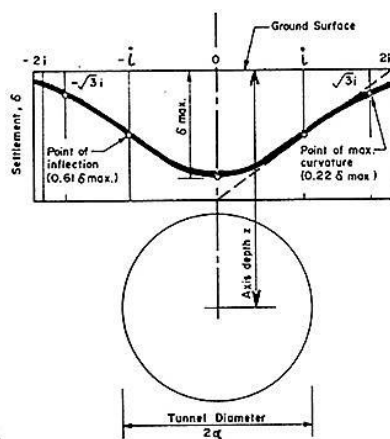
Σύμφωνα με το προφίλ καθιζήσεων που πρότεινε ο Peck το εύρος της καμπύλης των καθιζήσεων καθορίζεται από το μέγεθος (i) και εξαρτάται (εκτός από το είδος του εδάφους) από το βάθος (z) του άξονα της σήραγγας κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Από τις εργασίες των Peck et al (1969) και του Attewell (1977) μπορούν να διατυπωθούν οι εξής εμπειρικές σχέσεις για κυκλική σήραγγα ακτίνας α, (Σχήμα 1.4.10 α, β)

A) Για μαλακή συμπαγή άργιλο

$$\frac{i}{\alpha} = \left(\frac{z}{2\alpha}\right)^{0.8} \quad \text{Εξ.1.4.21α}$$

B) Για σκληρή άργιλο, μαλακό βράχο και ψαθυρό έδαφος (άμμος), πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

$$\frac{i}{\alpha} = 0.6 \left(\frac{z}{2\alpha}\right)^{0.5} \quad \text{Εξ.1.4.21β}$$



α) Καμπύλη καθιζήσεων

β) Καμπύλες Attewell (1977)

Σχήμα 1.4.10 α: Χαρακτηριστικά καμπύλης Gauss, για την περιγραφή των επιφανειακών καθιζήσεων (Peck & Schmidt, 1969), β) σχέση μεταξύ i/α και ανηγμένο βάθος σήραγγας $z/2\alpha$ για διάφορα εδάφη (Attewell 1977)

Οι **Attkinson et. Pots** (1977), έλαβαν υπόψη το βάθος εκσκαφής και πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις για πυκνά αργλικά εδάφη (Εξ.1.4.21α) και χαλαρά αμμώδη (Εξ.1.4.21β)

$$i = 0.25(1.5z_o + 0.5R) \quad \text{Εξ.1.4.22α}$$

$$i = 0.25(z_o + R) \quad \text{Εξ.1.4.22β}$$

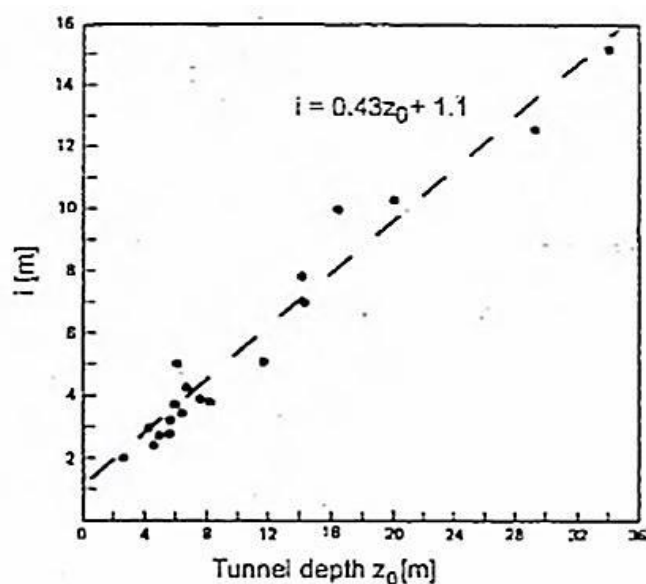
όπου R η ακτίνα της σήραγγας

Οι **O'Reilly & New** (1982) υποστήριξαν ότι το σημείο καμπής είναι ανεξάρτητο της μεθόδου διάνοιξης, της διαμέτρου της σήραγγας αλλά εξαρτημένο από το βάθος εκσκαφής z_o . Βασιζόμενοι στην μεθοδολογία του Peck(1969),επεξεργαζόμενοι διαθέσιμα δεδομένα έδειξαν γραμμική σχέση μεταξύ του σημείου καμπής i και του βάθους εκσκαφής z_o ,

$$i = Kz_o \quad \text{Εξ.1.4.23}$$

όπου, K παράμετρος που εξαρτάται από την ποιότητα του εδάφους και παίρνει τιμές μεταξύ 0.4 έως 0.70 για σήραγγες σε άργιλο και 0.20 έως 0.30 για σήραγγες σε άμμο

Οι O'Reilly & New έπειτα από γραμμική παρεμβολή σε δεδομένα από 21 περιπτώσεις κατασκευής σηράγγων σε συνεκτικά εδάφη και 16 σε μη-συνεκτικά παρουσίασαν γραφικά την παράμετρο i σε σχέση με το βάθος εκσκαφής z_o όπως φαίνεται στο **(Σχήμα 1.4.10 γ)**



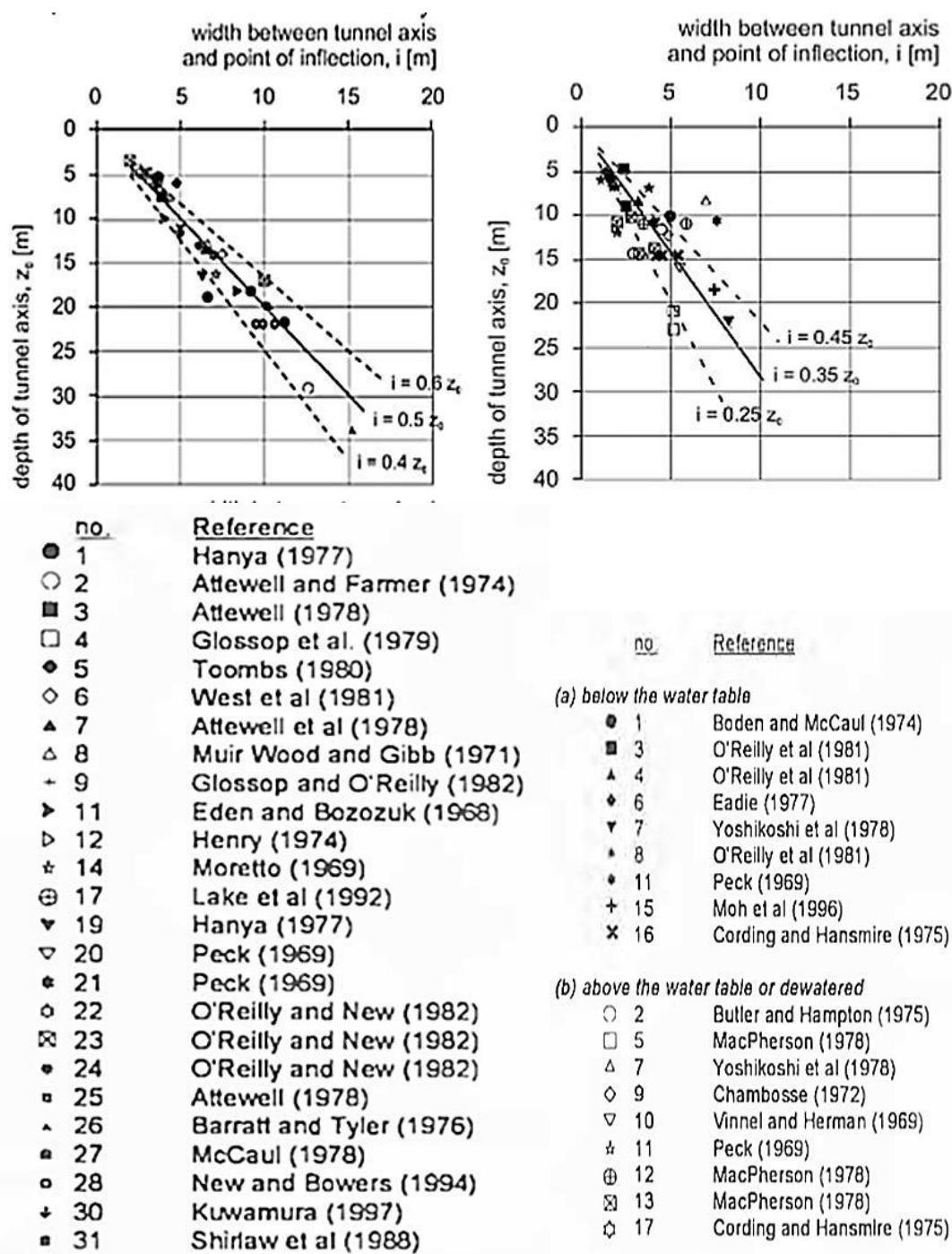
Σχήμα 1.4.10 γ: Συσχέτιση σημείου καμπής με το βάθος σήραγγας z_o στα συνεκτικά εδάφη.

Και πρότειναν δύο σχέσεις για συνεκτικά εδάφη και μη-συνεκτικά, τις εξής:

A) για συνεκτικά εδάφη,
 $i = 0.43z_o + 1.1 \quad 3 \leq z_o \leq 34 \quad \text{Εξ.1.4.24α}$

B) για μη-συνεκτικά
 $i = 0.43z_o - 0.12 \quad 6 \leq z_o \leq 10 \quad \text{Εξ.1.4.24β}$

Οι **Mair & Taylor** (1997) βασιζόμενοι στην υπόθεση των O'Reilly & New συσχέτισαν το σημείο καμπής i με το βάθος για συνεκτικά και μη-συνεκτικά εδάφη (**Σχήμα 1.4.10 δ**). Το διάγραμμα για τις αργίλους επιβεβαιώνει ότι μια τιμή $K=0.50$ είναι ικανοποιητική με το εύρος να κυμαίνεται $K = 0.40 \sim 0.60$. Στα μη-συνεκτικά εδάφη η παράμετρος K κυμαίνεται από $K = 0.25 \sim 0.45$, με τη μέση τιμή $K=0.35$



Σχήμα 1.4.10 δ: Απόσταση σημείου καμπής i συναρτήσει του βάθους εκσκαφής z_0 α) σε συνεκτικά (αργίλικά) εδάφη, β) σε μη-συνεκτικά (αμμώδη), (Mair & Taylor, 1997)

Έχουν προταθεί και άλλες εμπειρικές σχέσεις της απόστασης του σημείου καμπής συναρτήσει του βάθους της σήραγγας, όπως φαίνονται συγκεντρωτικά στο (Σχήμα 1.4.10 ε)

Authors	Empirical Eq.	i (m)
Peck (1969)	$n_1 = 0.8$	6.95
	$i/R = (Z_0/2R)^{n_2}$	7.33
	$n_2 = 0.9$	
	$n_3 = 1.0$	7.75
Farmer and Attewell (1974)	$i/R = (Z_0/2R)$	7.75
Cording and Hansmire (1975)	$2i/D = (Z_0/D)^{0.8}$	6.95
Atkinson and potts (1977)	$i = 0.25 (1.5 Z_0 + 0.5 R)$	6.37
Glossop (1978)	$i = 0.5 Z_0$	7.75
Mair et al. (1981)	$i = 0.5 Z_0$	7.75
Schmidt and Clough (1981)	$i/R = (Z_0/2R)^{0.8}$	6.95
O'Reilly and New (1982)	$i = 0.43 Z_0 + 1.1$	7.77
Mail et al. (1983)	$i = 0.5 Z_0$	7.75
Herzog (1985)	$i = 0.4 Z_0 + 1.92$	8.12
Leach (1986)	$i = (0.45 Z_0 + 0.57) + 1.01$	8.54
	$i = (0.45 Z_0 + 0.57) - 1.01$	6.54
Rankin (1988)	$i = 0.5 Z_0$	7.75
Arioglu ₁ (1992)	$i_1 = 0.40 Z_0 + 0.6$	6.8
Arioglu ₂ (1992)	$i_2 = 0.386 Z_0 + 2.84$	8.82
Arioglu ₃ (1992)	$i_3 = 0.9 \left(\frac{D}{2} \right) \times \left(\frac{Z_0}{D} \right)^{0.8}$	6.53
Mair and Taylor (1997)	$\frac{i}{z_0} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)$	7.75
Lee (1999)	$\frac{i}{R} = 0.58 \left[\frac{Z_0}{2R} \right] + 1$	9
Hamza et al. (1999)	$i = 0.43 z_0 + 1.1$	7.77

Σχήμα 1.4.10 ε: Εμπειρικές σχέσεις σημείου καμπής συναρτήσει του βάθους z_0 και της διαμέτρου D , (Farshad Kolivand, Reza Rahmannedjad, IGMGE)

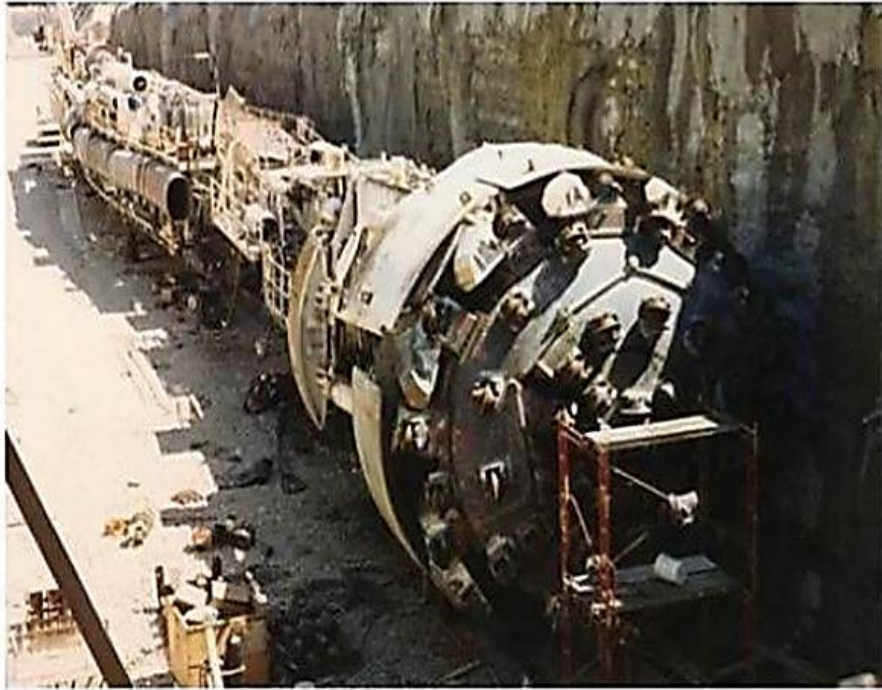
Κεφάλαιο 2: Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων

2.1 Διάνοιξη με μηχανικά μέσα TM(Tunnel Machines)

Η εξέλιξη μετά την δημιουργία της ασπίδας πεπιεσμένου αέρα του Greathead (1880) για την κατασκευή σήραγγας κάτω από τον ποταμό Hudson τα TBM, σηματοδοτείται με την κατασκευή των μηχανών βάσει δύο κατευθύνσεων εκείνα για σκληρό βράχο και εκείνα για συνεκτικά μαλακά εδάφη. Σε σκληρούς γεωσχηματισμούς με το μέτωπο ευσταθές η εκσκαφή γινόταν με ανοιχτού τύπου μηχανές χωρίς ασπίδα και την υποστήριξη όπισθεν του μετώπου γινόταν όπως στις συμβατικές μεθόδους (μέχρι το 1950 με χαλύβδινα πλαίσια και ξυλοδεσιές), έπειτα για την αντιμετώπιση ετερογενών εδαφικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε η μονή ασπίδα (single-shield TBM). Τέλος, έγινε η προσθήκη διπλής ασπίδας (double shield TBM) με το πλεονέκτημα η προώθηση της μηχανής να επιλέγεται να γίνει με δύο ανεξάρτητους μεταξύ τους τρόπους, βάσει των γεωλογικών συνθηκών. Η προώθηση να επιτελείται είτε με έμβολα ώθησης που επενεργούν στην εγκατεστημένη τελική επένδυση είτε από έμβολα ώθησης που επενεργούν στα τοιχώματα της σήραγγας.

Εν γένει υπήρχε ο διαχωρισμός των μηχανών για σκληρό βράχο με τα Hard Rock TBM χωρίς ασπίδα (όταν δεν χρειάζεται η περιφερειακή υποστήριξη της σήραγγας λόγω καλής ποιότητας βραχώμαζας) και των μηχανημάτων με ασπίδα σε μαλακά εδάφη Soft Ground TBM για την συγκράτηση τόσο του μετώπου όσο και των τοιχωμάτων της σήραγγας. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κατασκευάστηκαν ειδικά TBM εξοπλισμένα με τις λειτουργίες ενός Soft Ground TBM για τον έλεγχο των εδαφικών καθιζήσεων και την μικρότερη διαταραχή της γεωμάζας γύρω από υπόγειο άνοιγμα, αλλά και με τα κοπτικά μέσα εκσκαφής σε σκληρό έδαφος. Ενδεικτικό παράδειγμα το TBM με υδροασπίδα (Hydroshield) στην εκσκαφή της σήραγγας EOLE στο Παρίσι. Η ανάγκη για εκσκαφή σε συνθήκες εδάφους και υπόγειων υδάτων που μεταβάλλονται, από σκληρά συμπαγή πετρώματα μέχρι χαλαρά εδάφη (κερματισμένα, συνθλίβοντα πετρώματα-εδάφη), κοκκώδη και διογκούμενα, οδήγησε στις σύγχρονες μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM με ή χωρίς ασπίδα και στις μηχανές TBM μετατρέπομενου τρόπου λειτουργίας(Adaptable shield machines).

Οι αρχές της διαδοχικής διάνοιξης (όρυξη, υποστήριξη) με μηχανικά μέσα χρησιμοποιούν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέτρο άμεσης ενίσχυσης και υποστήριξης της βραχώμαζας με την εφαρμογή του Ε.Σ. σε εδάφη συνεκτικά με ανεμπόδιση αντοχή ακέραιου πετρώματος $USC=6 \text{ Mpa}$ μέχρι βράχους υψηλής αντοχής $USC=120 \text{ MPa}$, **(σύμφωνα με AFTES 1978, Κωστόπουλος.Σ)**. Η υπόγεια διάνοιξη επιχειρείται είτε με χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής του μετώπου **(Σχήμα 2.1 α)** τα TBM με ασπίδα (μονή ή διπλή) και χωρίς ασπίδα όταν η βραχώμαζα είναι πολύ καλής ποιότητας και το μέτωπο καθίσταται ευσταθές είτε με τις μηχανές με βραχίονα ο οποίος φέρει κοπτικά μέσα τα οποία σημειακά προσβάλλουν το μέτωπο (Partial Face Machines PFM's) **(Σχήμα 2.1β)**. Στα μηχανικά μέσα με βραχίονα ανήκουν οι φρέζες(Roadheader), οι σφύρες πρόσκρουσης και οι εκσκαφείς **(Σχήμα 2.1 γ)**



Σχήμα 2.1 α: TBM στο σιδηροδρομικό σταθμό Mockingbird-Dallas,1992(Sauer G.)



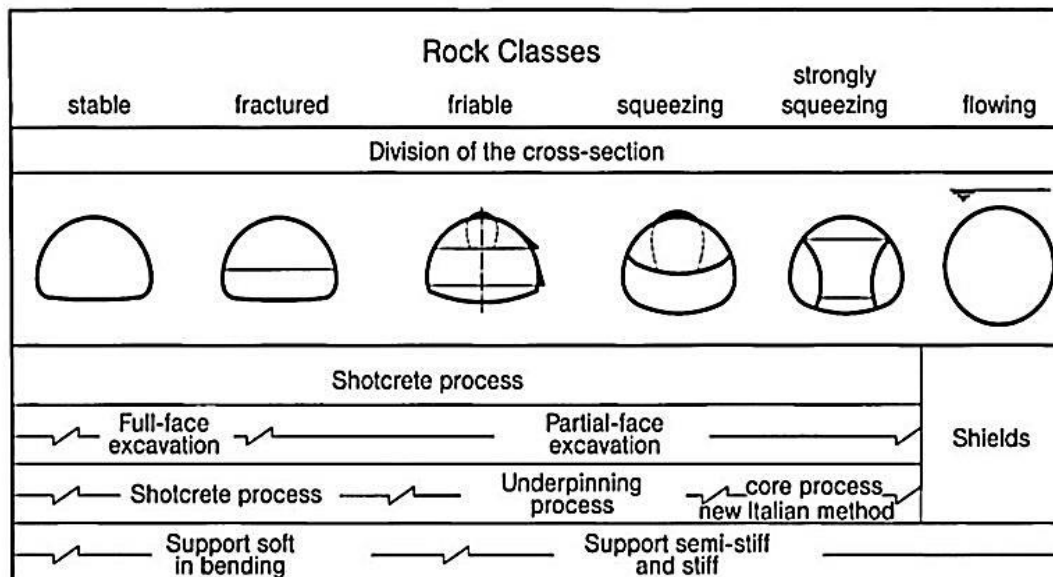
Σχήμα 2.1.β: Φρέζα(Roadheader)-Jersey, Exchange Place Station,2002(Sauer G.)

Σχήμα 2.1.γ Εκσκαφέας-Heathrow Tunnel-Λονδίνο,1994(Sauer G.)

2.2 Επιλογή της μεθόδου διάνοιξης

Η επιλογή της μεθόδου εξόρυξης επηρεάζεται από τον τεκτονισμό της βραχώμαζας και την αντοχή της. Κατά τους Whittaker&Frith (1990),η βραχώμαζα διαίρεται σε έξι κατηγορίες,

σταθερή, θρυμματιζόμενη, συνθλίβουσα, εκρέουσα, ρέουσα και διογκούμενη. Βάσει της συμπεριφοράς της γεωμάζας ο Maidl, 2013 επιμερίζει την διατομή προς εκσκαφή όπως φαίνεται στο (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων σκυροδέματος με βάση την κατηγορία γεωμάζας, (Maidl et.al 2013)

2.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μηχανοποιημένης διάνοιξης

Πριν την επιλογή της μηχανής προηγείται σχετική μελέτη εφαρμογής με την εκπόνηση προκαταρκτικής μελέτης και γεωτεχνικής έρευνας. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την μέθοδο διάνοιξης και την επιλογή κάθε μηχανήματος είναι κυρίως οι αναμενόμενες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην ζώνη διέλευσης της σήραγγας, η θέση του υδροφόρου οριζοντα ως προς την σήραγγα, η διάμετρος της διατομής, η χάραξη της καμπύλης, οι συνθήκες ευστάθειας στο μέτωπο και στη διατομή της σήραγγας καθώς και οι απαιτήσεις σε χρόνο για τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης και παράδοσης του έργου.

Επιπλέον παράμετρος είναι το υψηλότερο κόστος επένδυσης διάνοιξης με TBM έναντι της συμβατικής λύσης το οποίο αντισταθμίζεται από υψηλό ρυθμό προχώρησης της μηχανής σε συνδυασμό με σημαντικό μήκος σήραγγας. Σε σκληρά πετρώματα αν χρειαστεί συχνή αλλαγή στα κοπτικά εργαλεία λόγω συνεχούς φθοράς τους η διαδικασία διάνοιξης μπορεί συστηματικά να διακόπτεται με επακόλουθο να μειώνεται ο ρυθμός απόδοσης της μηχανής. Επίσης αρνητικά επηρεάζουν στο χρόνο προχώρησης τα πρόσθετα μέτρα στήριξης του εδάφους σε ρηξιγενείς ζώνες. Σε σχέση με το περιβάλλον γύρω από την σήραγγα επηρεάζουν οι προηγούμενες υπόγειες κατασκευές, τα επιτρεπόμενα όρια των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και άλλα. Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης, η επιλογή κατάλληλου μηχανήματος TBM, ο εξοπλισμός της μηχανής και τα μέτρα στήριξης, τα τυχόν

διατρητικά συστήματα για γεωλογικές έρευνες έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής υπάγονται στην ευθύνη του Αναδόχου.

2.2.2 Διάνοιξη σύμφωνα με την Οδηγία του «ΕΛΟΤ»

Η Οδηγία του «ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009» ακολουθεί τις προδιαγραφές της Γαλλικής Ένωσης Σηραγγοποιίας “AFTES” και ταξινομεί τα μηχανικά μέσα υπόγειας διάνοιξης με βάση την δυνατότητα της πίεσης υποστήριξης που μπορούν να προσφέρουν στο μέτωπο εκσκαφής και περιφερειακά στις παρειές της σήραγγας κατά την διάνοιξη και εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης.

Έτσι, διακρίνονται τρεις περιπτώσεις i)καμία υποστήριξη, (μηχανή χωρίς ασπίδα), ii)μόνο περιφερειακή υποστήριξη στην εκσκαπτόμενη διατομή και iii)περιφερειακή υποστήριξη στην διατομή και πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.

Στην πρώτη (i) κατηγορία ανήκουν οι μηχανές που δεν χρειάζεται η άμεση παθητική και συνεχή υποστήριξη ,λόγω ποιότητας γεωυλικού και είναι,

- οι μηχανές με κοπτική διάταξη επί βραχίονα, ο οποίος φέρει κεφαλή εξοπλισμένη με κοπτικά μέσα και η εκσκαφή γίνεται με σαρώματα της κεφαλής επί του μετώπου, καθοδηγούμενη από τον βραχίονα
- οι μηχανές TBM κύριας κεντρικής δοκού (Main beam ανοικτό περιφερειακά TBM-G) φέρει διάταξη κοπτική κεφαλή η οποία εκσκάπτει ολόκληρο το μέτωπο σε μια διαδρομή και μπορεί να κινείται σύμφωνα και αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού. Η ώθηση της κεφαλής γίνεται μέσω των υδραυλικών εδράνων προώθησης (ή σιαγώνες) στηριζόμενων στις παρειές της σήραγγας (ωστήρες πάκτωσης)
- και οι μηχανές διεύρυνσης σηράγγων(Reamer TBM).

Οι μηχανές με κοπτική διάταξη επί βραχίονα περιλαμβάνουν τις φρέζες (Roadheaders) με κοπτική κεφαλή, διαμήκη ή εγκάρσια, τους κλασσικούς μηχανικούς εκσκαφείς και τους εκσκαφείς με σφύρα πρόσκρουσης. Το ανοικτό TBM κύριας κεντρικής δοκού TBM-G λειτουργεί με την αλληλουχία δύο φάσεων, την εκσκαφή όπου τα έδρανα παραμένουν σταθερά και ενεργοποιημένα.

Μετά την εκσκαφή ανασύρονται για το νέο βήμα προχώρησης. Είναι κατάλληλες μηχανές για βραχώδεις σχηματισμούς με μονοαξονική αντοχή βράχου $UCS > 120 \text{MPa}$, όπου η προσθήκη ασπίδας δεν καθίσταται αναγκαία.

Η διάταξη της κεφαλής προβλέπεται για ανοχή των συγκλίσεων να μπορεί να δημιουργεί υπερεκσκαφή σε συνθλίβοντα γεωυλικά. Παρόμοια λειτουργεί και το Reamer TBM, με τη διαφορά ότι διευρύνει την τελική διατομή της σήραγγας από μια κεντρική πιλοτική σήραγγα στα τοιχώματα της οποίας επενεργούν ακτινικά τα έδρανα και προωθείται η μηχανή.

Στην δεύτερη κατηγορία(ii) ανήκουν οι μηχανές ολομέτωπης κοπής με ασπίδα, ανοικτού τύπου που σημαίνει δεν υπάρχει ενδιάμεσος θάλαμος, το διάφραγμα, και η πρόσβαση στο μέτωπο εκσκαφής είναι συνεχής. Εξασφαλίζουν περιφερειακά μέσω της ασπίδας τα τοιχώματα της σήραγγας κατά την διάρκεια της εκσκαφής.

- μηχανές TBM με ασπίδα και σιαγώνες με όμοιο τρόπο λειτουργίας με αυτόν των μηχανών κύριας δοκού. Μετακινούνται μέσα σε κυλινδρική ασπίδα που περιβάλλει το σύστημα προώθησης και η ασπίδα υποστηρίζει παθητικά την περίμετρο της διατομής.
- μηχανές TBM ολομέτωπης διάνοιξης με διπλή αρθρωτή ασπίδα, με πέδιλα στήριξης με έδραση στις παρειές της σήραγγας και δύο ομάδες εμβόλων ώθησης. Τα κύρια έμβολα (main longitudinal thrust) της κοπτικής κεφαλής που παρατάσσονται μεταξύ εμπρόσθιας και οπίσθιας ασπίδας και τα βοηθητικά έμβολα (auxiliary) προώθησης της μηχανής στο πίσω τμήμα της ασπίδας.
Η προχώρηση της μηχανής και εκσκαφή συμβαίνει ταυτόχρονα με την εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης δακτυλίου. Σε κάθε κύκλο εκσκαφής και συναρμολόγησης του δακτυλίου, αποσύρονται τα πέδιλα στήριξης (longitudinal grippers) από τα τοιχώματα και τα κύρια έμβολα της κοπτικής κεφαλής προεκτείνονται ώστε να ωθήσουν προς τα εμπρός την κοπτική κεφαλή και την οπίσθια ασπίδα στηριζόμενα στον τελευταίο εγκατεστημένο δακτύλιο. Στην προώθηση της μηχανής τα πέδιλα στήριξης αντιστηρίζουν την μηχανή ασκώντας πλευρική πίεση στα τοιχώματα, σε περίπτωση όμως αδυναμίας ανάληψης της πίεσής τους από χαμηλή αντοχή του γεωυλικού, τα βοηθητικά έμβολα (auxiliary thrust) της πίσω ασπίδας ενεργοποιούνται στηριζόμενα στην επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία ωθώντας το μηχανήμα με την προέκτασή τους προς τα εμπρός. Έτσι, η προώθηση της μηχανής εξαρτάται από τον τύπο εδάφους που συναντάται.
- Και μηχανές TBM με τμηματική ασπίδα που εξοπλίζονται με κοπτική κεφαλή ολομέτωπης κοπής, ή με κοπτική διάταξη επί βραχίονα.

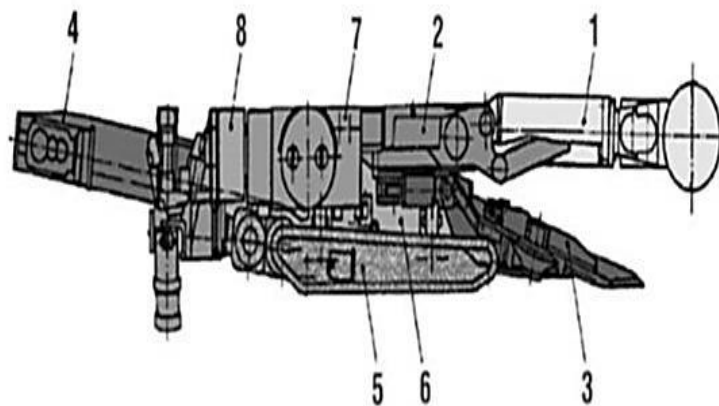
Στην τρίτη κατηγορία (iii) ανήκουν οι μηχανές ολομέτωπης κοπής άμεσης υποστήριξης στο μέτωπο και περιφερειακά, κλειστού μετώπου (με την παρεμβολή διαφράγματος εκατέρωθεν της κοπτικής κεφαλής και του θαλάμου εκσκαφής) με ασπίδα. Η στήριξη στο μέτωπο γίνεται με την κοπτική κεφαλή:

- ωθώντας με σταθερό ρυθμό το ορυσσόμενο εδαφικό υλικό μπροστά στο γεωυλικό του μετώπου (TBM με μηχανική υποστήριξη), τα προϊόντα εκσκαφής διέρχονται μέσα από ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής
- με ασπίδα πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο εκσκαφής ως αντιστάθμιση της γεωστατικής και υδροστατικής πίεσης του μετώπου (Compressed Air TBM)
- με ασπίδα αιωρήματος μπετονίτη ή άλλου μίγματος/πολφού (Slurry TBM)
- με ασπίδα εξισορρόπησης της εδαφικής-γεωστατικής και υδροστατικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM) με την ελεγχόμενη εισπίεση στο θάλαμο κοπτικής κεφαλής μίγματος γεωυλικού με νερό. Ο έλεγχος της πίεσης στο θάλαμο γίνεται με την ρύθμιση της ταχύτητας απαγωγής του εκσκαπτόμενου γεωυλικού μέσω της ρύθμισης περιστροφής του ατέρμονα κοχλία
- μετατρέπομένου-μικτού τύπου λειτουργίας (Mixed shield TBM) με την επιλογή να λειτουργήσουν είτε ως ανοικτού τύπου είτε ως κλειστού τύπου τροποποιώντας αναλόγως τον μηχανικό εξοπλισμό υποστήριξης και αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, με τη διαμόρφωση να γίνεται εντός της σήραγγας. Η μετατροπή από υποστήριξη μετώπου με πολφό (Slurry) σε υποστήριξη με EPB γίνεται σε διάστημα μιας-

δύο ημερών και από ανοικτό σε κλειστό τύπο λειτουργίας Slurry/EPB. Από ανοικτό σε πολφού για την αποκομιδή η μετατροπή είναι η απενεργοποίηση της μεταφορικής ταινίας του ανοικτού τύπου και η έναρξη με απευθείας άντλησης μέσω σωληνώσεων. Από ανοικτό σε EPB με την απενεργοποίηση της μεταφορικής ταινίας και έναρξη του συστήματος υδραυλικής μεταφοράς, ατέρμων κοχλίας που περιστρέφεται.

2.3 Διάνοιξη με μηχανές σημειακής προσβολής PFM (Partial Face Machines)

Πρόκειται για διαδοχική διάνοιξη σε μαλακούς σχηματισμούς, ασθενείς γεωμάζες, όπου απαιτείται υποστήριξη μετά την εκσκαφή έτσι ώστε η διαταραχή της περιβάλλουσας γεωμάζας να είναι η ελάχιστη δυνατή και να μην υπάρχουν προβλήματα αστάθειας της διατομής. Οι μηχανές σημειακής προσβολής μετώπου φρέζες (Roadheader), (Σχήμα 2.3 α), οι σφύρες πρόσκρουσης και οι εκσκαφείς είναι μηχανές με βραχίονα(boom,μπούμα) ο οποίος φέρει μία ή δύο κοπτικές κεφαλές εφοδιασμένες με οδόντες. Τα σύγχρονα PFM's είναι εξοπλισμένα και με βραχίονες που φέρουν διατρητικά συστήματα οπών για την εγκατάσταση άμεσης υποστήριξης με ηλώσεις.

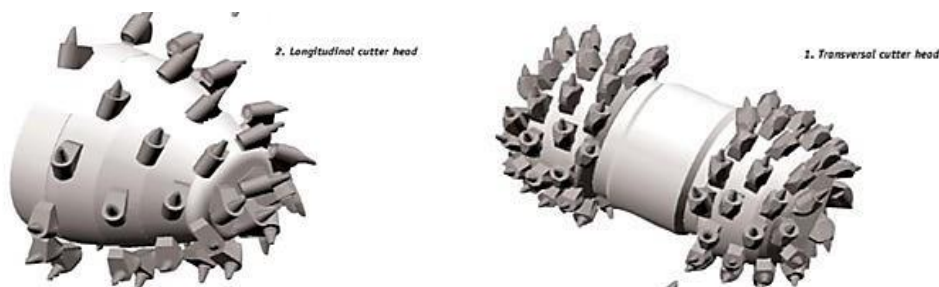


Σχήμα 2.3 α Roadheader Alpine Miner 100 (TamRock S.1999)

- 1) βραχίονας cutter boom, 2) πυργίσκος turret, 3) διάταξη αυτοφόρτωσης loading device
- 4) μεταφορικός ιμάντας chain conveyor, 5) ερπύστριες crawler track
- 6) πλαίσιο base frame, 7) ηλεκτρικός εξοπλισμός electric equipment
- 8) υδραυλικός εξοπλισμός hydraulic equipment

Οι φρέζες με κριτήριο τον τρόπο κοπής του πετρώματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες μηχανές άλεσης(milling) και μηχανές άρρωσης(ripping)

- την κοπτική κεφαλή συνήθως κωνικού σχήματος (ή τύπου μύλου,milling) εφοδιασμένη με κοπτήρες και η οποία περιστρέφεται παράλληλα στον βραχίονα(boom)που την φέρει, έτσι ώστε η κοπή να είναι διαμήκης, λειτουργία άλεσης (**Σχήμα 2.3 β**),
- την κοπτική κεφαλή τύπου μύλου με τις κοπτικές κεφαλές να περιστρέφονται περί άξονα κάθετο στο βραχίονα(boom), Roadheader, λειτουργία άρρωσης (**Σχήμα 2.3 γ**).



(β)

(γ)

Σχήμα 2.3 β Διαμήκης κοπτική κεφαλή, λειτουργία άλεσης (Tamrock S., 1999)

Σχήμα 2.3 γ .Εγκάρσια κοπτική κεφαλή, λειτουργία άρρωσης (Tamrock S., 1999)

Δύναται η εναλλαγή των κοπτικών τους εργαλείων στο μέτωπο ένεκα διαφοροποίησης των εδαφικών σχηματισμών, με τυπικό παράδειγμα το (Multi-Tool Miner,MTM), που τα καθιστά ευέλικτα σε εναλλασσόμενες γεωλογικές συνθήκες εκεί που το TBM προκύπτει ως αντιοικονομική λύση. Χρησιμοποιούνται στην αρχή εκσκαφής σηράγγων, στην εξόρυξη σε διασταυρώσεις σηράγγων λόγω της ευελιξίας τους, σε φρέατα, σε βοηθητικές προσθήκες και σε άλλα υπόγεια ανοίγματα κάθε μεγέθους και σχήματος διατομής. Οι βασικές λειτουργίες τους είναι η εκσκαφή, η αποκομιδή του εδαφικού υλικού, η μεταφορά του στον ατέρμων αλυσωτό μεταφορέα και η πλοήγηση της μηχανής. Τα περισσότερα Roadheader είναι εξοπλισμένα με την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή εφοδιασμένη με οδόντες, υδραυλικό βραχίονα που κινείται εγκάρσια στο μέτωπο εκσκαφής, πυργίσκοι που επιτρέπουν την οριζόντια κίνηση της κοπτικής κεφαλής, τη διάταξη αυτοφόρτωσης του ορυσσόμενου γεωυλικού τους είναι. Τα TBM πλεονεκτούν στο πεδίο εφαρμογής τους γιατί σχεδιάζονται να αποκρίνονται στις συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες του έργου, από σκληρό βράχο μέχρι μαλακά μη-συνεκτικά εδάφη έως εδαφικά μείγματα έναντι των PFM που παράγονται σε συγκεκριμένους τύπους και επιλέγεται το κατάλληλο για το κάθε έργο.

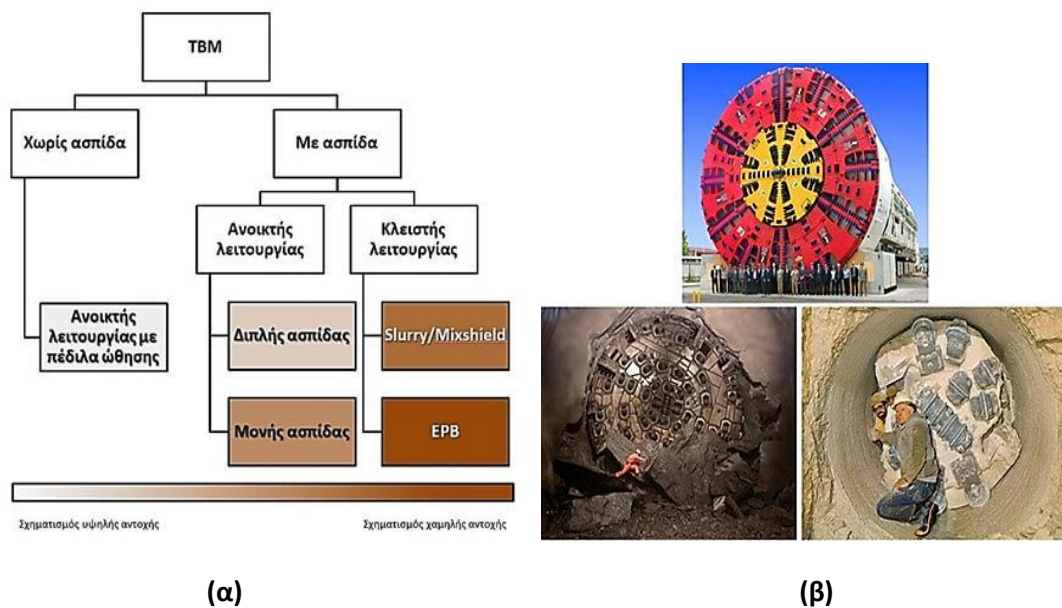
2.4 Διάνοιξη με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machines)

2.4.1 Γενικά στοιχεία

Ιστορικά, οι μηχανές ολομέτωπης κοπής στα τέλη του 1800 είχαν σχεδιαστεί για μαλακό έδαφος με διάφορες παραλλαγές χωρίς να προσφέρουν στήριξη στο μέτωπο, μέχρι το 1950 που έγινε η πραγματική ανάπτυξη των μηχανών για σκληρά πετρώματα από τον μεταλλειολόγο μηχανικό James S. Robbins με τη μηχανή TBM στο φράγμα του Oahe 1953 διαμέτρου 8m και του πρώτου ανοιχτού gripper TBM τμε κοπτικούς δίσκους ως μοναδικό εργαλείο στον ποταμό Humber στον Καναδά, διαμέτρου 3,27m το 1957. (Maidl et al., 2008)

Μηχανή διάτρησης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για υπόγεια εκσκαφή σκληρού πετρώματος, στην οποία το μέτωπο εκσκαφής ήταν ευσταθές. Αρχικά οι μηχανές ολομέτωπης κοπής μελετήθηκαν για την εφαρμογή τους σε συνεκτικά εδάφη, μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς (Soft Ground TBM) και με την εξέλιξη της μεταλλευτικής και τη μελέτη της βραχομηχανικής από το 1950 επεκτάθηκε η χρήση τους και σε σκληρά πετρώματα (Hard Rock TBM) και πλέον υπάρχει και μικτού τύπου TBM.

Στα Soft Ground TBM ανήκουν τα μηχανήματα με ασπίδες (SM) και στα Hard Ground TBM τα TBM χωρίς ασπίδα, TBM-Single Gripper και TBM-Double Gripper. Οι απαιτήσεις διάνοιξης σε ετερογενή εδάφη με ασθενείς γεωλογικούς σχηματισμούς, ή βραχώδεις και την παρουσία ύδατος οδήγησαν στην ανάπτυξη κατάλληλων μηχανημάτων διάνοιξης, τα μηχανήματα με ασπίδα (SM) και τις μηχανές διάτρησης σηράγγων (TBM, Tunnel Boring Machines), (Σχήμα 2.4.1 α,β). Τα οποία με την εξέλιξη της μηχανοποιημένης διάνοιξης καταστάθηκαν ικανά να ανταποκριθούν στις διαφορετικές γεωτεχνικές απαιτήσεις.



Σχήμα 2.4.1 α: Εύρος εφαρμογής τύπων TBM βάσει ποιότητας εδάφους-αντοχής
Σχήμα 2.4.1 β: TBM διαφορετικής διαμέτρου

2.4.2 Βασικές Αρχές

Πρόκειται για αυτοματοποιημένες μονάδες διάνοιξης μεγάλου μήκους σηράγγων σε συμπαγείς βράχους όσο και σε αποσαθρωμένους και σε μαλακά εδάφη και διαμέτρου από 5 έως 15m ,μπορεί να φτάσουν και τα 19m. Οι ρυθμοί προχώρησης μπορεί να ξεπεράσουν τα 30m/ημέρα. Η αυτοματοποιημένη εκτέλεση των λειτουργιών τους, όπως η εκσκαφή, η υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων της σήραγγας, η αποκομιδή του εκσκαπόμενου υλικού και η τοποθέτηση της τελικής επένδυσης πλεονεκτεί χρονικά των συμβατικών μεθόδων διάνοιξης συμβάλλοντας σε μεγαλύτερους ρυθμούς προχώρησης κατά την εκσκαφή.

Τα μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων διακρίνονται γενικά σε εκείνα που διατρούν τα συμπαγή πετρώματα που είναι τα TBM με ωσθήρες πάκτωσης και στις μηχανές TM με ασπίδα που εφαρμόζονται σε μαλακό έδαφος και παρέχουν προσωρινή υποστήριξη στην κοιλότητα που εκσκάπτεται, προστασία στον μηχανολογικό εξοπλισμό και στο εργατικό προσωπικό. Ειδικά, μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τον τρόπο κοπής του πετρώματος από την κοπτική κεφαλή των μηχανών σε μηχανές που διατρούν όλο το μέτωπο (ολομέτωπης κοπής), ή μερικής υποστήριξης του μετώπου, ανάλογα με το είδος της κοπτικής κεφαλής(περιστρεφόμενη ή μη) και του τρόπου στήριξης και προώθησης της μηχανής (με πέδιλα στήριξης ή προκατασκευασμένα στοιχεία-δακτύλιοι επένδυσης). Τα μηχανήματα που ευρέως χρησιμοποιούνται είναι:

- Μηχανήματα εκσκαφής σε σκληρό βράχο (TBM)
- Μηχανήματα εκσκαφής σε σκληρό –μέτριο βράχο με πέδιλα στήριξης-grippers-(TBM-G)
- Μηχανήματα με ασπίδες μερικής μηχανικής υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής
- Μηχανήματα εξισορρόπησης της πίεσης γαιών (EPBs) και χρήσης αφρού (Foam EPBs)
- Μηχανήματα στήριξης μετώπου με χρήση πολφού μπετονίτη (B.Slurry)
- Μηχανήματα στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air)
- TBM με υδροασπίδες (Hydraulic)
- TBM με ασπίδες μικτού τύπου (Mixshield)

Έχουν διαφορετικό σχεδιασμό ,τρόπο λειτουργίας και μηχανολογικό εξοπλισμό. Ο οποίος είναι φτιαγμένος στη βάση των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων του εδάφους που αναμένεται να συναντηθούν. Με τις τεχνολογικές εξελίξεις και την εμπειρία από την ευρέως εφαρμογή των μηχανών διάνοιξης, έχει επιτευχθεί ο συγκερασμός των δύο τύπων [TBM] και [SM] σε ένα ενιαίο μηχάνημα TBM το οποίο περιλαμβάνει τις τεχνικές και τα χαρακτηριστικά και των δύο τύπων , επιτυγχάνοντας την διάνοιξη σε ευρύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών.

Τα κοινά τους τμήματα είναι:

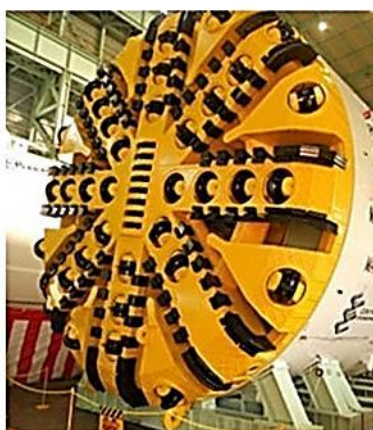
- η κεφαλή κοπής με τα κοπτικά εργαλεία ,
- το σύστημα παροχής ισχύος
- το σύστημα ώθησης της κεφαλής και στήριξης του μηχανήματος με τα υδραυλικά έμβολα ή και πέδιλα στήριξης κατά την διάρκεια εκσκαφής
- το σύστημα αποκομιδής του εδαφικού υλικού και μεταφοράς του
- το σύστημα πλοήγησης.
- Ο υποστηρικτικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει σύστημα εγκατάστασης μόνιμης επένδυσης , μέτρων άμεσης υποστήριξης του εδάφους
- ασπίδα προστασίας των εργαζομένων

Οι σύγχρονες μηχανές TBM χρησιμοποιούνται κυρίως σε αστικό περιβάλλον προσφέροντας την δυνατότητα ελέγχου των επιφανειακών καθιζήσεων ενώ αποφεύγεται ο κίνδυνος κατάρρευσης του μετώπου. Με την διεθνή εμπειρία από προηγούμενα έργα την εξέλιξη της τεχνολογίας και της δυνατότητας μηχανών διάτρησης μικτού τύπου –μετατρέπόμενης λειτουργίας να αποκρίνονται σε μεγάλο εύρος γεωλογικών απαιτήσεων , οι σύγχρονες σήραγγες διανοίγονται από μηχανές ολομέτωπης κοπής διαμέτρου άνω των 14m.

Hard rock TBM



Soft ground TBM



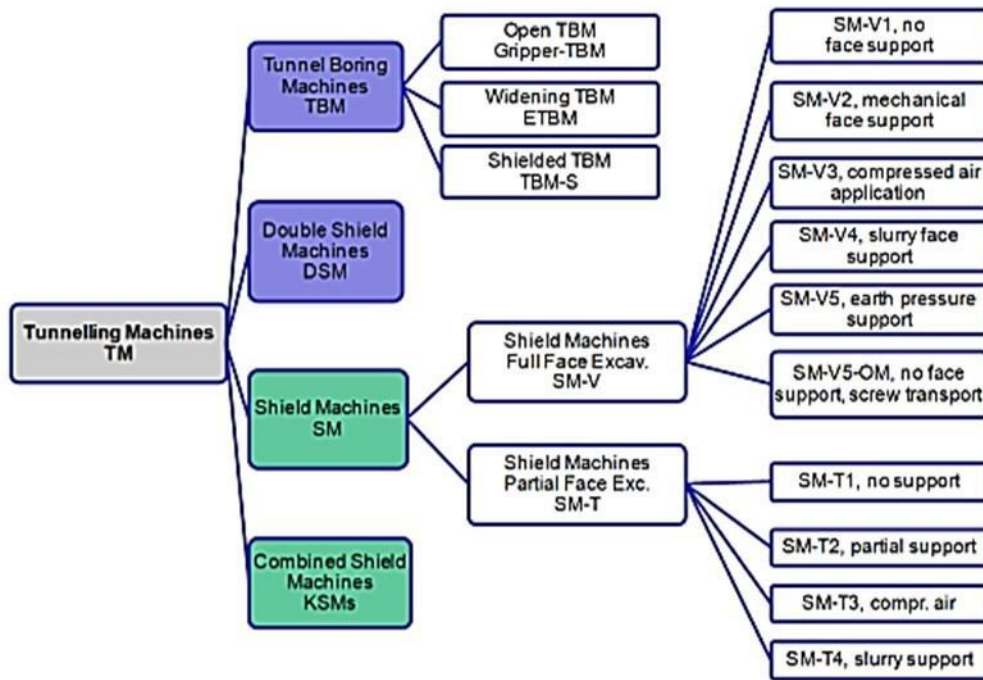
Slurry / Mixshield
(opening ratio 10-30 %)

EPB
(opening ratio 30-40 %)

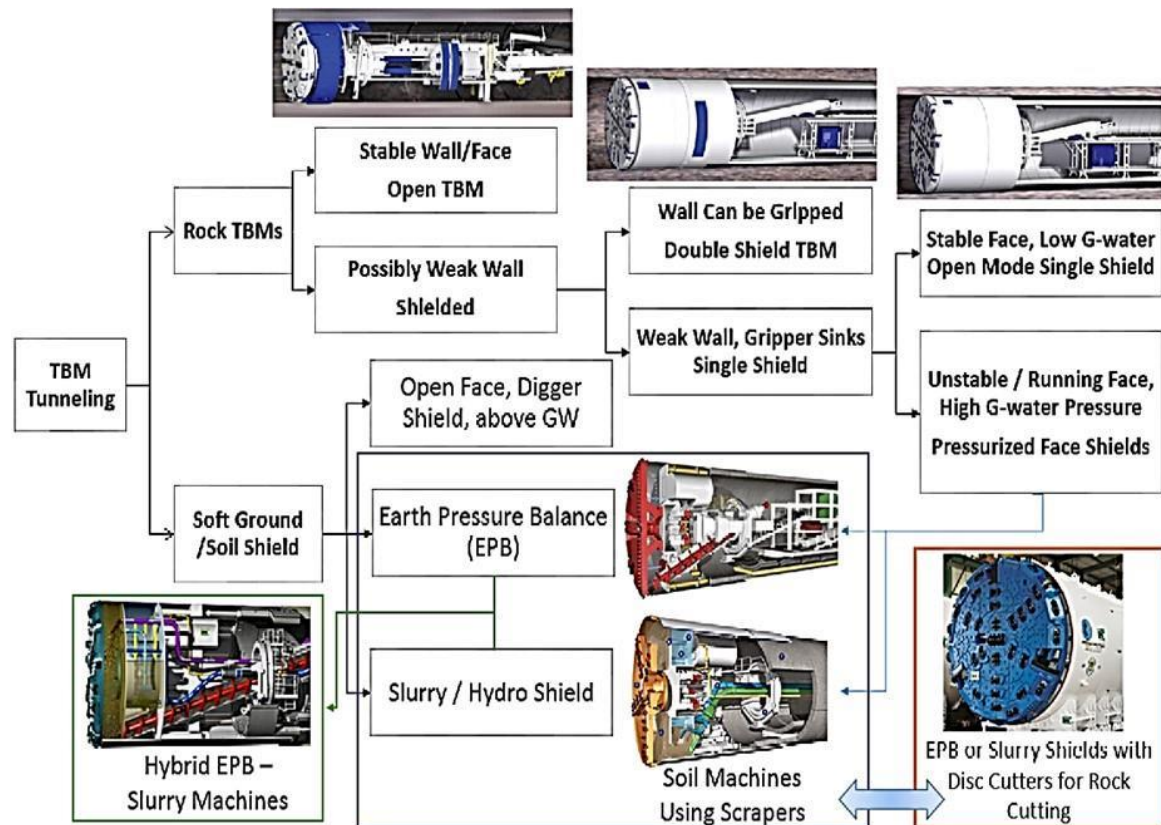
Σχήμα 2.4.2 α: Κοπτικές κεφαλές διαφόρων τύπων TBM

2.4.3 Σχηματική ταξινόμηση των μηχανών

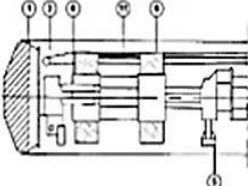

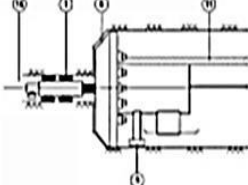

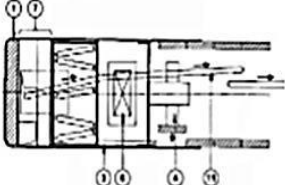

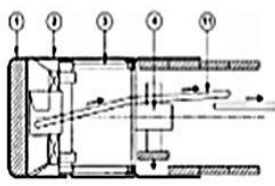

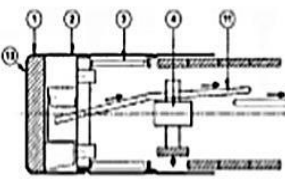

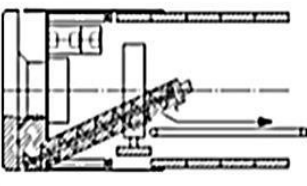

Η ταξινόμηση τους βάσει των Γερμανικών Προδιαγραφών της Γερμανικής Επιτροπής Υπόγειων Κατασκευών "DAUB" φαίνεται στο (Σχήμα 2.4.3 α) και στο (Σχήμα 2.4.3 α'). Είδη TBM αναλόγως της φύσης εδάφους φαίνονται στο (Σχήμα 2.4.3 β).



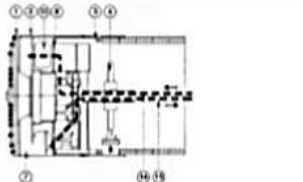

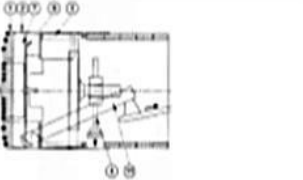

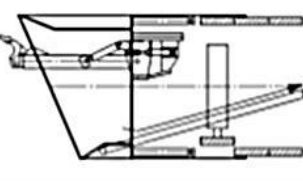

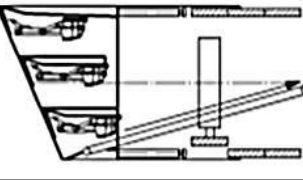

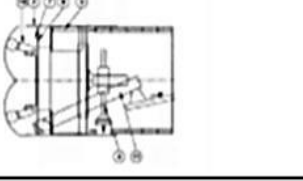

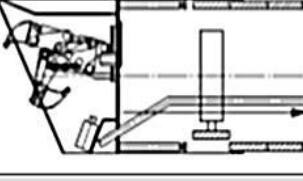

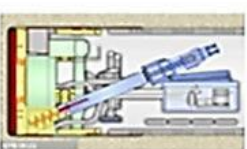

Σχήμα 2.4.3 α: Ταξινόμηση TBM βάσει προδιαγραφών της DAUB. Πηγή: DAUB



Σχήμα 2.4.3 β: Τύποι TBM με βάση την κατηγορία εδάφους που εκσκάπτουν.

Brief description	Illustration (example)	
Tunnel boring machines (TBM)		
<p>TBM Tunnelbohrmaschine ohne Schild Tunnel boring machine</p>		
<p>ETBM Erweiterungstunnelbohrmaschine Extension tunnel boring machine</p>		
Double shield machines (DSM)		
<p>DSM Doppelschildmaschine Double shield machine</p>		
Shield machines (SM)		
<p>SM-V1 ohne Stützung Without support</p>		
<p>SM-V2 mechanische Stützung Mechanical support</p>		
<p>SM-V3 Druckluftbeaufschlagung Full-face and compressed air application</p>		

Σχήμα 2.4.3 α': Σύνοψη των μηχανών διάνοιξης σηράγγων βάσει της DAUB

Brief description	Illustration (example)	
<p>SM-V4 Flüssigkeitsstützung Full-face and slurry support</p>		
<p>SM-V5 Erddruckstützung Full-face and earth pressure balance support</p>		
<p>SM-T1 ohne Stützung Partial excavation and without support</p>		
<p>SM-T2 Teilstützung Partial excavation and partial support</p>		
<p>SM-T3 Druckluftbeaufschlagung Partial excavation and compressed air application</p>		
<p>SM-T4 Flüssigkeitsstützung Partial excavation and slurry support</p>		
Convertible shield machines (KSM)		
<p>KSM Kombinationsschildmaschinen Convertible shield machines</p>		

Legend:

- | | | | |
|------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 1. cutting wheel | 2. shield skin | 3. cylinders | 4. erector |
| 5. support foot | 6. gripper | 7. excavation chamber | 8. pressure bulkhead |
| 9. openings | 10. excavation tool | 11. muck clearance | 12. carriage |
| 13. air bubble | 14. suspension feed | 15. suspension return | 16. pilot tunnel |

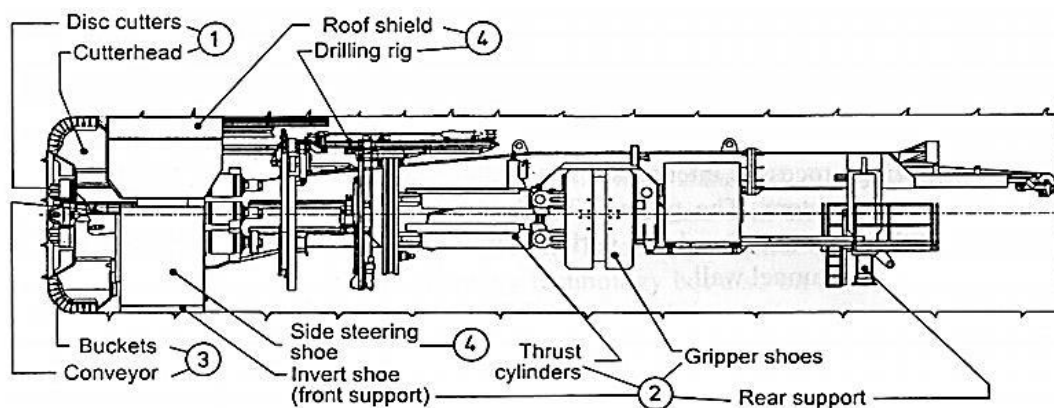
Σχήμα 2.4.3 α': Σύνοψη των μηχανών διάνοιξης σήραγγων βάσει της DAUB

2.5 Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM χωρίς ασπίδα

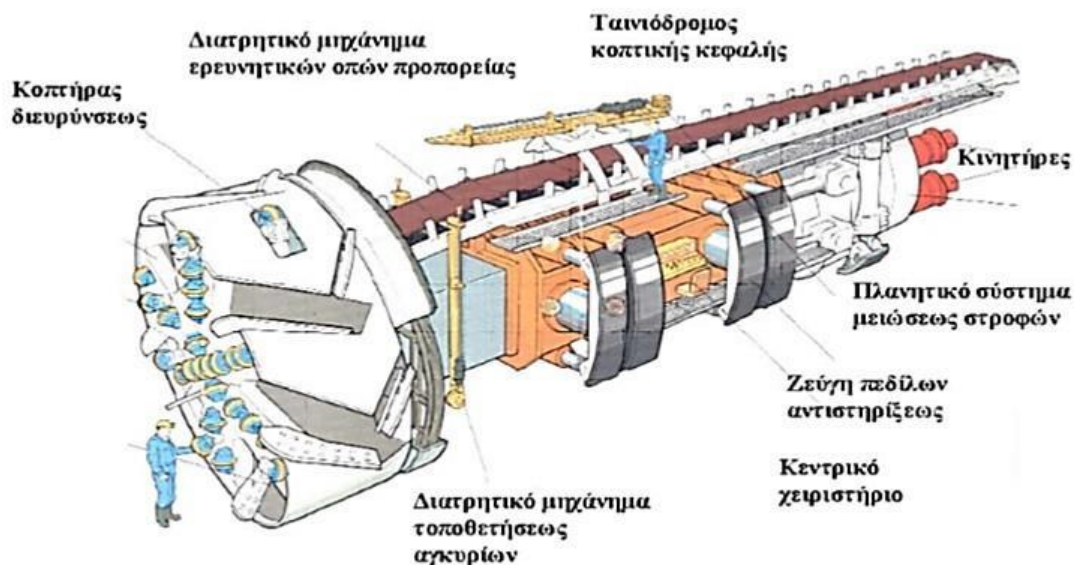
Τα σύγχρονα TBM αποτελούνται από τέσσερα βασικά τμήματα που το καθένα εμπεριέχει κατάλληλο εξοπλισμό. Αυτά είναι:

- το σύστημα συνεχούς διάτρησης (boring system) με την κεφαλή
- το σύστημα προώθησης της μηχανής και αντιστήριξής της(thrust and clamping),
- το σύστημα αποκομιδής του εκσκαπτόμενου υλικού(muck removal),
- το σύστημα υποστήριξης (support), (Maidl et al.,2008)

με τα τρία τελευταία να επιτελούνται κατά σειρά (Σχήμα 2.5 α, α'). Το κάθε τμήμα επιτελεί τις δικές του λειτουργίες αλλά καθολικά για την διάνοιξη οι διεργασίες των τμημάτων είναι σειριακά αλληλοεξαρτώμενες μεταξύ τους και αναγκαία συμβατές με το ρυθμό προχώρησης του τυμπάνου προώθησης της μηχανής ελεγχόμενες από το σύστημα πλοήγησης και τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, προς αποφυγή ή διόρθωση λαθών που θα καθυστερούσαν αυξάνοντας το κόστος του έργου.



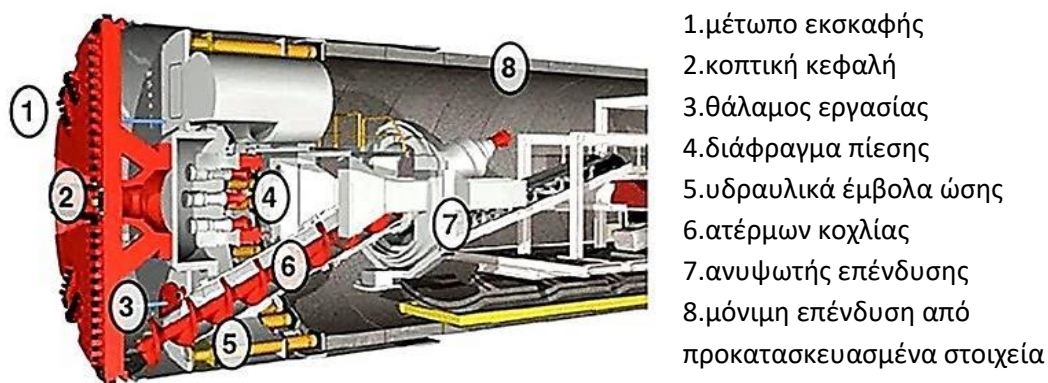
Σχήμα 2.5 α: TBM με μονό σύστημα πάκτωσης, Single Gripper TBM, (Maidl et al.,2013)



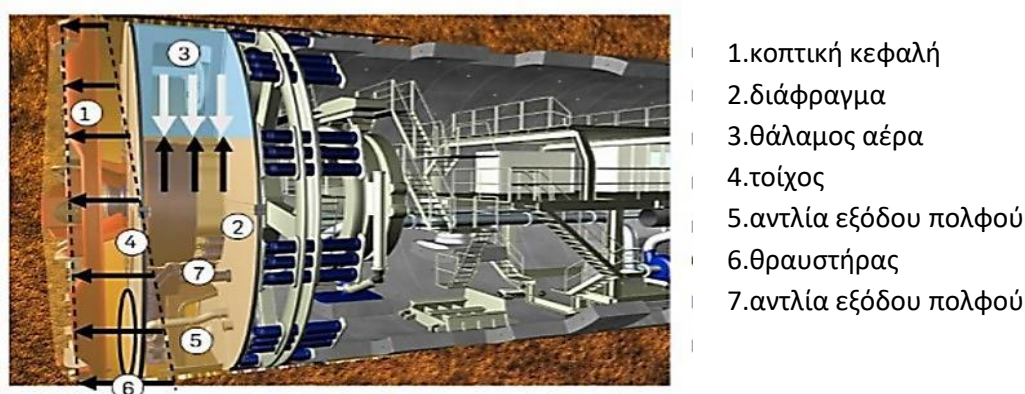
Σχήμα 2.5 α': TBM με διπλό Χ σύστημα πάκτωσης, (Καλιαμπάκος Δ.)

2.6 Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM με ασπίδα

Ένα TBM με ασπίδα μία ή δύο ασπίδες έχει τα ίδια βασικά τέσσερα συστήματα που αναφέρθηκαν με την διαφορά της διαφορετικής λειτουργίας τους στο μηχανολογικό εξοπλισμό και στον τρόπο λειτουργίας των τεσσάρων συστημάτων τους. Στην ασπίδα τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ο θάλαμος εργασίας όπου μεταφέρονται τα θραύσματα και είτε ανακατεύονται με πολφό slurry είτε ως έχουν μεταφέρονται με το σύστημα αποκομιδής στην έξοδο της μηχανής. Πίσω από το θάλαμο είναι το κύριο εφέδρανο με σύστημα κινητήρων μετάδοσης κίνησης της κεφαλής και τα υδραυλικά έμβολα ώσης. Η μετάδοση της κίνησης γίνεται με κυλινδρικούς γρούλους που δίνουν την απαιτούμενη ροπής στρέψης στην κεφαλή και η προώθηση της γίνεται από τα υδραυλικά έμβολα ώσης τα οποία στηρίζονται στην επένδυση της σήραγγας και με την επιμήκυνσή τους ωθούν τη μηχανή στην αντίθετη κατεύθυνση. Ακόμα το TB έχει τα συστήματα αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, τον ανυψωτή για την εγκατάσταση μόνιμης επένδυσης (Σχήμα 2.6 α,β) και πέδιλα στήριξης.



Σχήμα 2.6 α: Earth Pressure Balance Shield Machine, EPB, (Herrenknecht)



Σχήμα 2.6 β: Slurry Shield Machine, (Herrenknecht)

2.7 Συστατικά μέρη των μηχανών TBM

2.7.1 Σύστημα διάτρησης-Κοπτική Κεφαλή (boring system-cutting head)

Το σύστημα διάτρησης της μηχανής γίνεται μέσω του τυμπάνου προώθησης με φορέα την κοπτική κεφαλή(cutting head) και φέρει τα κοπτικά εργαλεία. Η κοπτική κεφαλή συντίθεται από συγκολλημένες μεταλλικές πλάκες και διατάξεις υποδοχής των κοπτικών μέσων σε κατάλληλες θέσεις. Τα κοπτικά εργαλεία είναι οδόντες(pick-axe),κυλιόμενοι κοπτικοί δίσκοι(roller disk cutters) σε σκληρό πέτρωμα, σιαγώνες σύνθλιψης σε μαλακά εδάφη ή σε μίξη με σκληρό, και σιαγώνες εκχωμάτωσης σε συνεκτικά εδάφη που φτυαρίζουν τα θραύσματα. Οι δίσκοι είναι μονοί, διπλοί ή και κωνικού σχήματος με δόντια(bits cutters), (Σχήμα 2.7.1 α).



Σχήμα 2.7.1 α: Κοπτικά εργαλεία: μονός δίσκος κοπής, δίσκος με δόντια

Η ταχύτητα περιστροφής της εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού δίσκου που είναι ανάλογη της ακτινικής του απόστασης από το κέντρο της κεφαλής. Η κεφαλή (τύμπανο προώθησης) περιστρέφεται και στις δύο διευθύνσεις των δεικτών του ρολογιού με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής από 4 έως 5 περιστροφές/λεπτό για διαμέτρους σηράγγων 10m, (ή αντίστοιχα 140 έως 160m/λεπτό γωνιακή ταχύτητα στην περιφέρεια της κεφαλής) ή και δεν περιστρέφεται καθόλου. Η προχώρηση του TBM μετά την πλήρη περιστροφή της κεφαλής κοπής ονομάζεται διεϊσδυση και εισχωρεί από 4 έως 15 mm/περιστροφή.

Τα κοπτικά τύπου οδόντα εδράζονται σε περιστρεφόμενη υποδοχή που στρέφεται τόσο στον άξονα της όσο και γύρω από τον κεντρικό άξονα του τυμπάνου προώθησης, αποφλοιώνοντας με την κίνηση των κεφαλών το γεωσχηματισμό. Συνήθως εφαρμόζονται στην εξωτερική περίμετρο της κοπτικής κεφαλής για λόγους υπερ-εκσκαφής και επειδή διαγράφουν μεγαλύτερη διαδρομή, η διάρκεια ζωής τους είναι μικρότερη και χρήζουν αλλαγής πιο νωρίς. Η ροπή στρέψης στην κεφαλή κοπής προσδίδεται μέσω υδραυλικών κινητήρων στο γρανάζι του κυρίου εφεδράνου. Το σχήμα της κεφαλής δεν είναι πάντα ίδιο. Σε διαμέτρους των TBM κάτω των 5m μπορεί να είναι θολωτή, ενώ σε TBM μεγάλες διαστάσεων διαμέτρου επίπεδη και στα μηχανήματα EPB με διάμετρο άνω των 12m τοποθετούνται δύο ομόκεντρες κεφαλές περιμετρικά της κεντρικής μικρής κοπτικής κεφαλής η οποία περιστρέφεται ανεξάρτητα και με αυξημένη ταχύτητα.

Η απόσταση των υποδοχών των δίσκων αλλά και η διάμετρος των δίσκων επιλέγονται βάσει της φύσης του εδάφους της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του βράχου σ_c [MPa] αλλά και με την ευκολία κοπής (cut ability). Ενδεικτικά το εύρος που αποδίδουν οι κοπτικοί

δίσκοι σε πετρώματα κυμαίνεται από $\sigma_c=50$ έως $\sigma_c=340$ [MPa] και δύναμη ώθησης στο μέτωπο από 100KN. Οι διαστάσεις διαμέτρου των δίσκων ποικίλλουν από 17'' σε TBM μεγάλης διαμέτρου και σε εξαιρετικές περιπτώσεις 19''(432 εως 483mm) σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μέχρι 20''(500mm). Παλαιότερα ξεκίνησαν από 6''(150mm),αργότερα σε 10'',12'' επιτρέποντας δύναμη ώθησης 100-120KN. Για την ανάγκη κοπής σε σκληρό βράχο φτιάχτηκαν δίσκοι διαμέτρου 15^{1/2}'',17'' με δύναμη ώθησης 250KN μέχρι 19'' και δύναμη ώθησης 350KN, αυξάνοντας έτσι την φέρουσα ικανότητα των δίσκων αλλά και το χρόνο ζωής τους. Σε TBM με κεφαλή κοπής διαμέτρου άνω των 4m, οι δίσκοι μπορούν και αλλάζονται από πίσω από την κεφαλή.

Οι διατάξεις υποδοχής (κύλινδροι από κράμα χάλυβα) των κοπτήρων είναι το κέντρο, το μέτωπο στο οποίο τοποθετούνται περιστρεφόμενοι κοπτικοί δίσκοι ανάλογα με την σκληρότητα του εδάφους και η εξωτερική παρειά εξοπλισμένη με κοπτικά υπερ-εκσκαφής που εκτείνονται και μεγαλώνουν την μετωπική εκσκαφή για καλύτερη διέλευση της μηχανής, σε ομοιογενές πλαστικό έδαφος ,χαλαρή άμμο. Η κεφαλή (τύμπανο προώθησης) περιστρέφεται και ταυτόχρονα ωθεί/πιέζει τους δίσκους επί του μετώπου. Οι δίσκοι και τα δόντια παρατάσσονται ακτινικά στην κεφαλή ώστε κυλιόμενοι επί του βράχου να διεισδύουν σε αυτόν και να χαράσσουν ομόκεντρες αύλακες στο μέτωπο εκσκαφής όσο η κεφαλή περιστρέφεται **(Σχήμα 2.7.1 β, γ, Σοφιανός Α.Ι)**.



(β)



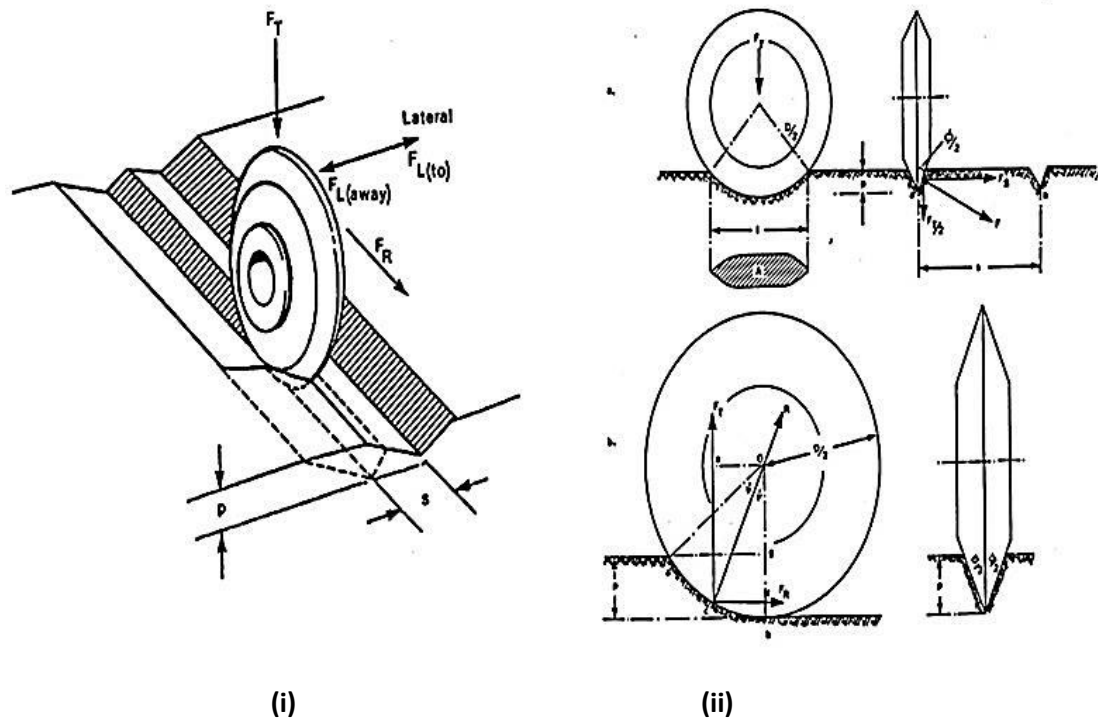
(γ)

Σχήμα 2.7.1 β, Διάταξη κοπτικών TBM οίκου Robbins, (Σοφιανός Α.Ι)

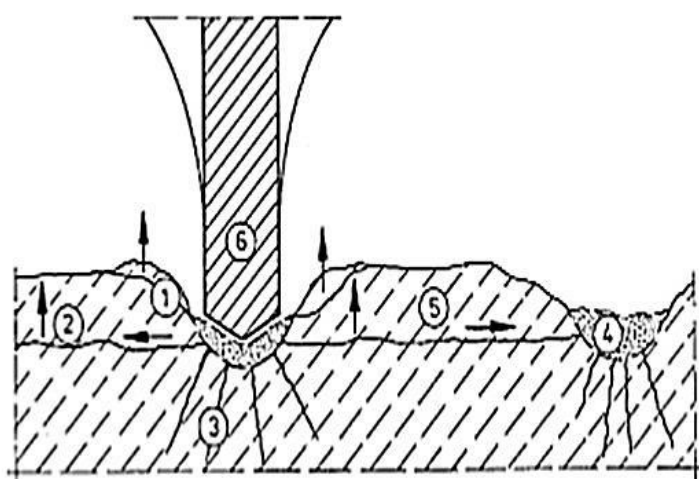
Σχήμα 2.7.1 γ, Χάραξη ομόκεντρων αυλάκων TBM οίκου Robbins, (Σοφιανός Α.Ι)

Το πόσο διεισδύουν έχει να κάνει με την σκληρότητα του πετρώματος, την απόσταση μεταξύ των κοπτήρων, την γωνία τριβής τους και την δύναμη που ασκούν επί του μετώπου

εκσκαφής. Ο δίσκος κινείται μέσα στο πέτρωμα σε μια κυκλική τροχιά (Σχήμα 2.7.1 δ) και όταν η πίεση αιχμής του δίσκου υπερβαίνει την θλιπτική αντοχή του βράχου τοπικά τον αλέθει. Κατά την διείσδυση των δίσκων αναπτύσσονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις μεταξύ των γειτονικών δίσκων (απόσταση kerf/spacing) που οδηγούν στην αποδιοργάνωση και κατόπιν θραύση του βράχου σε θραύσματα (rock chipping), (Σχήμα 2.7.1 ε, Σχήμα 2.7.1 στ).



Σχήμα 2.7.1 δ: Δυνάμεις που ασκούνται στο δίσκο (i), βάθος διείσδυσης (ii), Σοφιανός Α.Ι)



1,2: σχισμή λόγω εφελκυστικής θραύσης

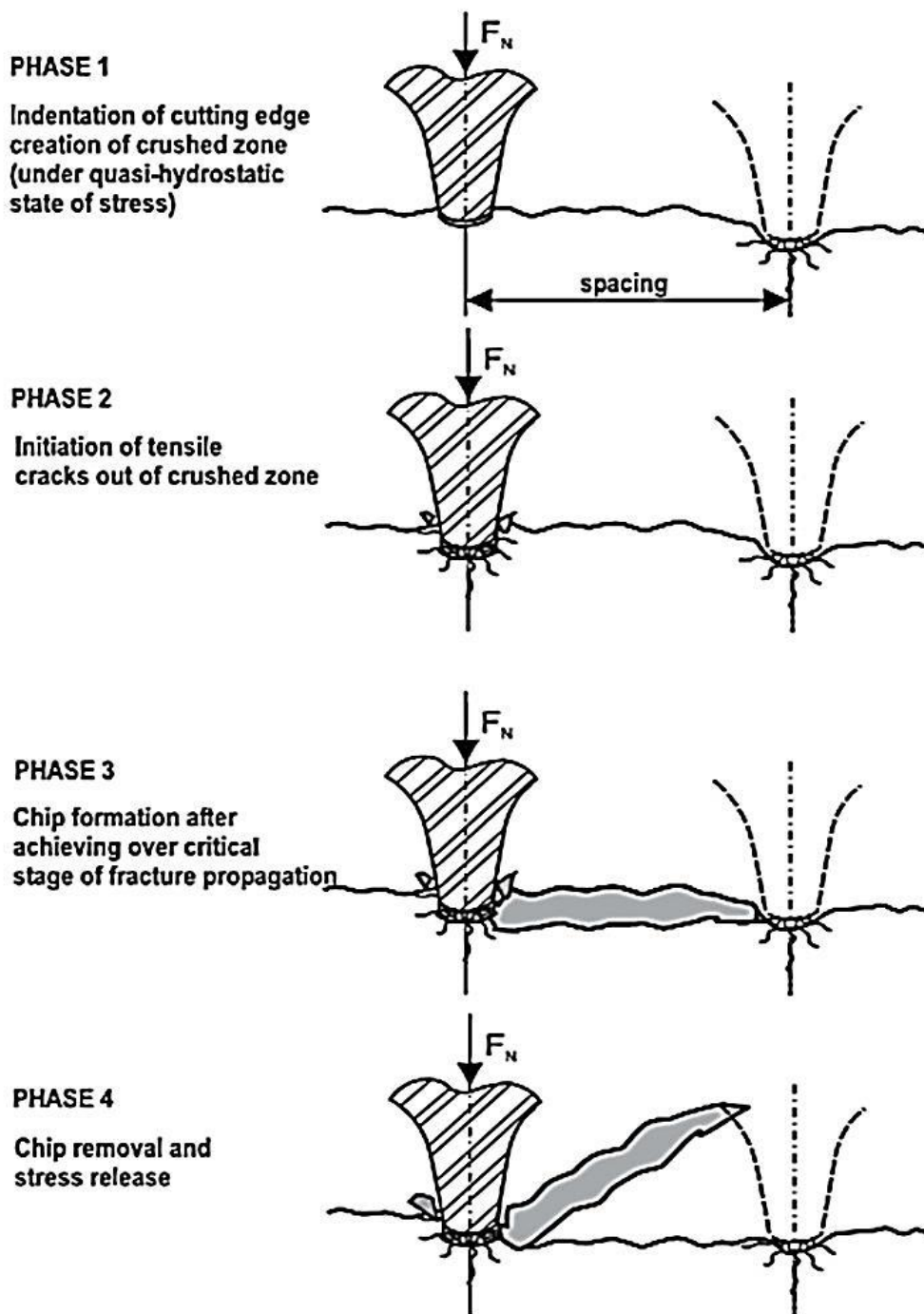
3: ακτινική θραύση τοπικά κάτω από τον δίσκο

4: διάχυση υλικού έξω από την γειτονική υποδοχή

5: τυπικό σχήμα θραύσματος βράχου(chip)

6. κοπτικός δίσκος σχεδόν σταθερού πάχους στην κοπτική περιοχή

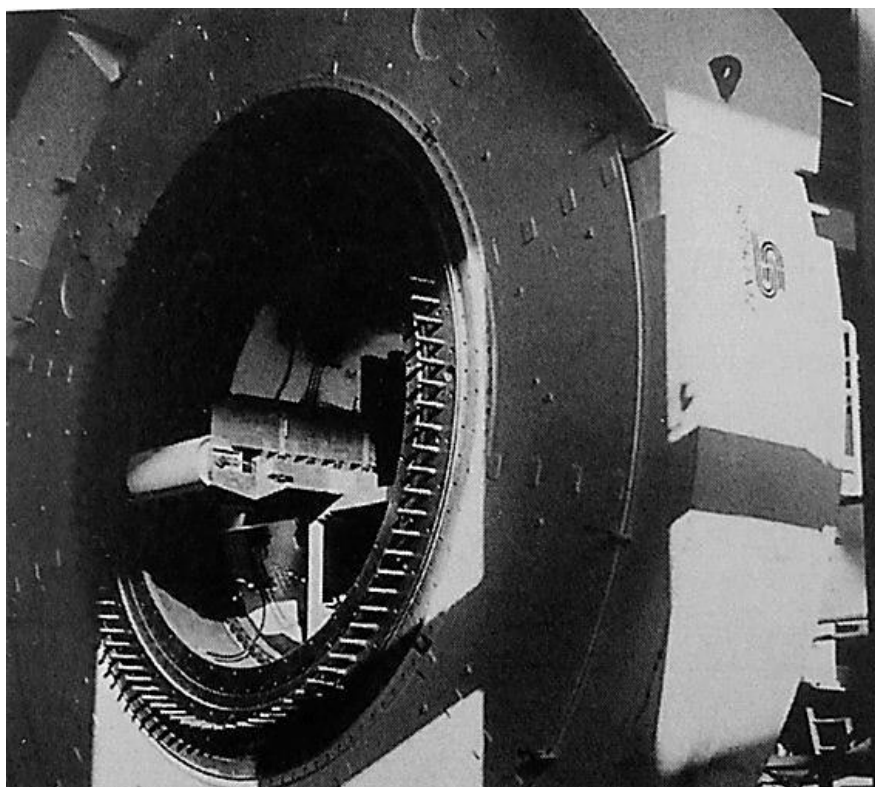
Σχήμα 2.7.1 ε: Διάγραμμα διαδικασίας κοπής από δίσκο σε πέτρωμα, (Maidl et al., 2013)



Σχήμα 2.7.1 στ: Κοπή από δίσκο σε πέτρωμα, (Tamrock S., 1999) 1^ο στάδιο: διείσδυση-δημιουργία ζώνης θραύσης, 2^ο στάδιο: θραύσματα εκτός τοπικής ζώνης, 3^ο στάδιο: σχηματισμός κομματιών βράχου(chips)μετά την διάδοση της θραύσης, 4^ο στάδιο: αποκόλληση θραυσμάτων με απελευθέρωση τάσεων.

2.7.2 Σύστημα Αποκομιδής Υλικού

Τα προϊόντα εκσκαφής όταν οι δίσκοι κοπής εκσκάπτουν το πέτρωμα πέφτουν στο ανάστροφο της σήραγγας. Αυτά συλλέγονται από κάδους (buckets) που είναι εγκατεστημένοι στην εξωτερική περίμετρο της κεφαλής οι οποίοι περιστρέφονται μαζί της. Από τους κάδους πέφτουν σε χοάνες και ολισθαίνουν μέσω ανοιγμάτων της κεφαλής στον ιμάντα μεταφοράς (belt conveyor) κατά την αριστερόστροφη περιστροφή της κεφαλής +60° και δεξιόστροφη -60°. και εναποθέτονται σε βαγονέτα (musk cars) χωρητικότητας 2.5 έως 20m³, ταινιόδρομο μεταφοράς, αυτοκίνητα-φορητά μεταφοράς και οδηγούνται έξω από την σήραγγα σε χώρο απόθεσης. Τα TBM μεγάλης διαμέτρου επιτρέπουν εγκατάσταση του ιμάντα μεταφοράς κεντρικά της κεφαλής, **(Σχήμα 2.7.2)** ενώ στα TBM μικρής διαμέτρου λόγω ανεπάρκειας χώρου τοποθετείται πάνω από το κύριο εφέδρανο. Ο ιμάντας μεταφοράς έχει πλάτος εξαρτώμενο από τον αριθμό των κάδων (buckets), την μέγιστη διείσδυση των κοπτικών και την ταχύτητα του ιμάντα εμπειρικά όχι μεγαλύτερη από 1.3m/s, καθώς μεγαλύτερες ταχύτητες μειώνουν τη διάρκεια ζωής του. Προβλήματα στους κάδους και στον ιμάντα πιθανό να προκύψουν από συσσώρευση λεπτόκοκκου συνεκτικού υλικού, λάσπης ή λόγω εμφράξεων από τεμάχια βράχου μεγάλου μεγέθους. Σε εδάφη με μεγάλη εισροή υδάτων στο μέτωπο εκσκαφής τα προϊόντα εκσκαφής γίνονται λάσπη και εγκαθίστανται ατέρμονες κοχλίες(screw conveyor) ή αντλίες για την μεταφορά τους. Σε μικρές ζώνες ρηγμάτων ή όπου η παρουσία νερού μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην υποστήριξη βελτιωτικά εδάφους συνιστώνται όπως τσιμεντενέσεις, κατασκευή αποστραγγιστικών οπών, πριν την έναρξη εργασιών.

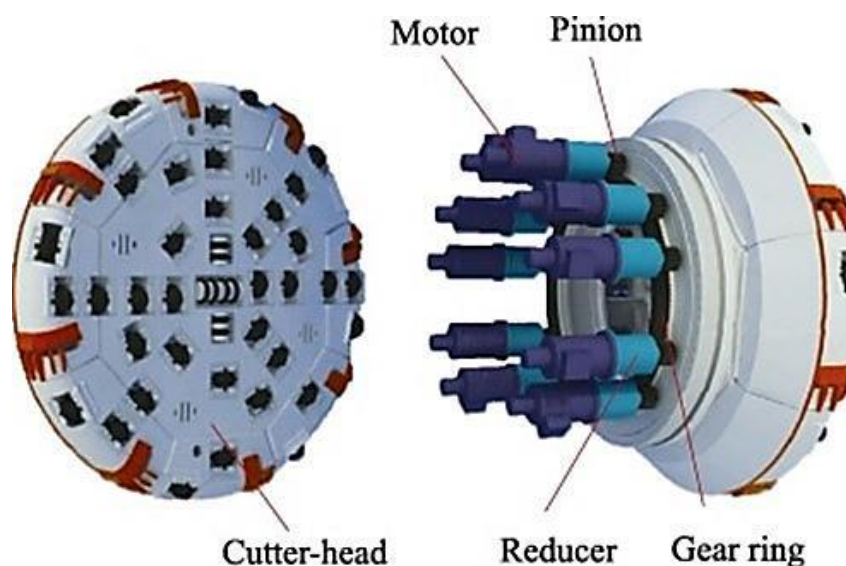


Σχήμα 2.7.2: Ιμάντας μεταφοράς κεντρικά τοποθετημένος στην κεφαλή-Gripper TBM S-155 (Herrenknecht), (Maidl et. al., 2008)

2.7.3 Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης της μηχανής (main drive)

Παράλληλα με την αύξηση της διαμέτρου των κοπτικών δίσκων και της αντίστοιχης δύναμης ώθησης, αναπτύχθηκε η δυνατότητα μεγαλύτερης ροπής στρέψης της κεφαλής του τυμπάνου προώθησης από το 1970. Το σύστημα παροχής ισχύος των TBM αποτελείται από υδραυλικούς ή ηλεκτρικούς κινητήρες δια μέσου συμπλέκτη και κιβωτίου ταχυτήτων (**Σχήμα 2.7.3**). Την ροπή στρέψης στην κεφαλή δίνει ένα οδοντωτό γρανάζι, του εφεδράνου της κεφαλής, συνδεδεμένο υδραυλικά με άλλα περιφερειακά γρανάζια. Τα συστήματα μετάδοσης της κίνησης είναι:

- με ηλεκτρική κίνηση με τελείως κλειστούς υδρόψυκτους κινητήρες, συχνά δύο ταχυτήτων και με δύο ταχύτητες περιστροφής,
- με ηλεκτρική κίνηση με έλεγχο συχνότητας και συνεχώς προσαρμοζόμενο έλεγχο περιστροφών σε ευρύ φάσμα
- με συνδυασμό ηλεκτρικής-υδραυλικής κίνησης. Υδραυλικές αντλίες ηλεκτρικά κινούμενες παρέχουν στους υδραυλικούς κινητήρες του κυρίου μηχανισμού κίνησης την απαιτούμενη ποσότητα λαδιού και πίεση άντλησης. Με την υδραυλική κίνηση συνεχώς ελέγχεται και ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής, σε όλο το φάσμα λειτουργίας των κινητήρων.



Σχήμα 2.7.3: Σύστημα παροχής ισχύος στην κεφαλή κοπής.

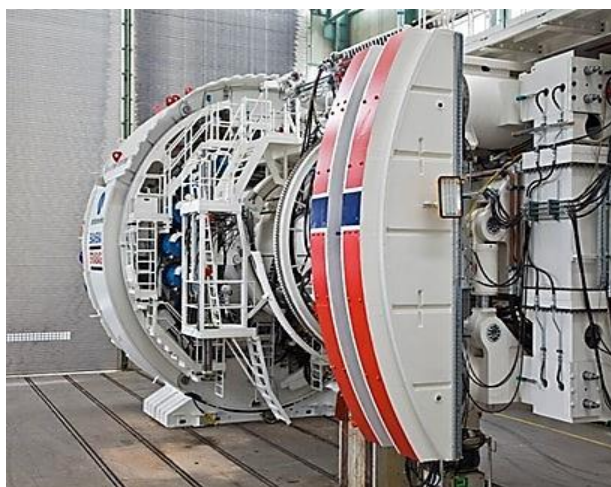
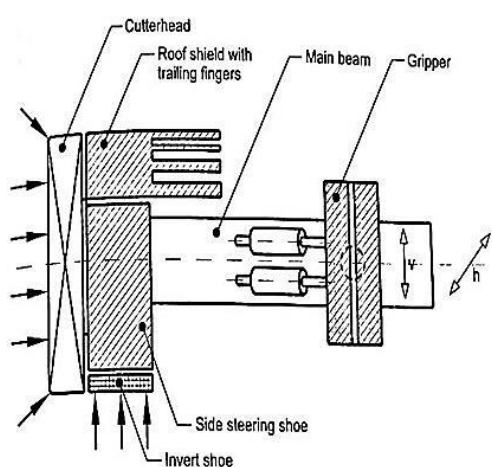
2.7.4 Κύριο Εφέδρανο (main bearing)

Αναλαμβάνει τις αντιδράσεις στα φορτία των κοπτικών, φόρτισης με εκκεντρότητες από αστοχίες και τυχόν καταρρεύσεις μετώπου. Ο χρόνος ζωής τους εξαρτάται από το σύστημα σφράγισης(seal). Το σύστημα σφράγισης δεν πρέπει να ξεραίνεται γιατί γρήγορα θα χάσει τη λειτουργία του με επακόλουθο τη αστοχία του εφεδράνου. Έτσι τα χείλη της σφράγισης πρέπει να κινούνται μέσα σε μια μεμβράνη γράσου. (Maidl et al., 2008)

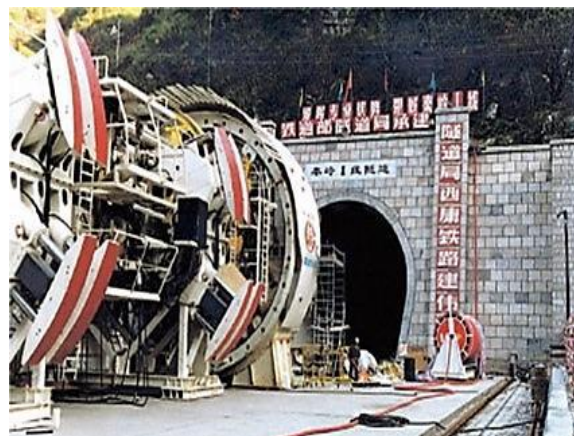
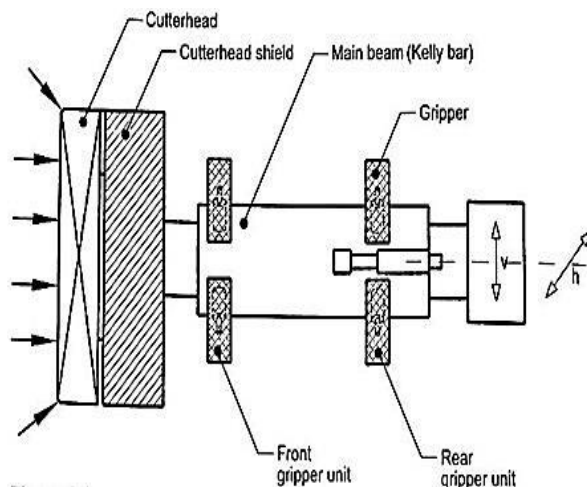
2.8 Σύστημα προώθησης και στήριξης της μηχανής (thrust and clamping)

Γενικά

Βασική λειτουργία για το σχεδιασμό των TBM κατά την εκσκαφή είναι η εξασφάλιση της στήριξης του θόλου μεταξύ του ανυποστήριχτου ανοίγματος και της κοπτικής κεφαλής και η απαιτούμενη δύναμη προώθησης για την πορεία διάνοιξης. Η δύναμη προώθησης με φορά αξονική μεταφέρεται μέσω συστήματος πάκτωσης στο βράχο. Δύο είναι τα κυρίαρχα συστήματα από τις κατασκευάστριες εταιρείες “Robbins and Herrenknecht”, “Jarva and Wirth”. Οι δύο πρώτες δημιούργησαν το απλό πλευρικό σύστημα (side clamping) όπου το κύριο σώμα της μηχανής γλιστράει επί ολισθαίνοντα πεδίου (sliding shoe) που μοιάζει με ασπίδα με διακοπτόμενα μέρη (partial shield) ,(Σχήμα 2.8 α, α’<https://tunnels-infrastructure.com/ulrikentunnel-tunnel-norway-tbm/>). Οι άλλες δύο κατασκευάστριες έφτιαξαν το χιαστί σύστημα X-type clamping, όπου οι εμπρόσθιοι και οι οπίσθιοι ωστήρες δημιουργούν μαζί με το κύριο σώμα της μηχανής μια μονάδα(Outer Kelly) μέσα στην οποία εδράζεται η κύρια δοκός του TBM με μορφή κοίλης ορθογωνικής διατομής(Inner Kelly) η οποία δοκός ολισθαίνει επί κυλιόμενων εδράνων (Σχήμα2.8 β,β’ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779815301954>).



Σχήμα 2.8 α, α’:TBM μονής πάκτωσης πλευρικής, Maidl (2008)

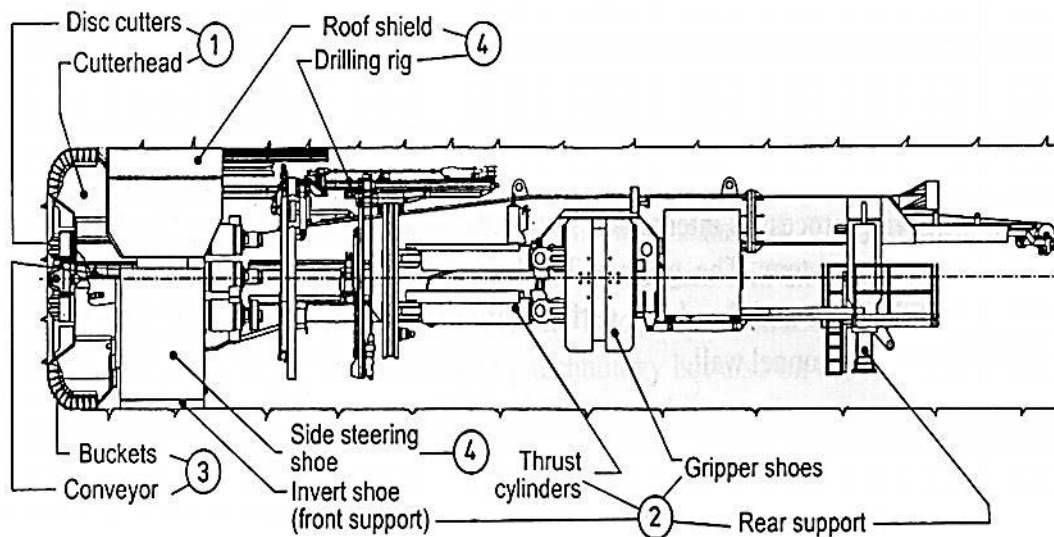


Σχήμα 2.8 β, β': TBM με χιαστί πάκτωση, Maidl (2008)

2.8.1 Σε μηχανή TBM- Griper με σύστημα μονής πάκτωσης

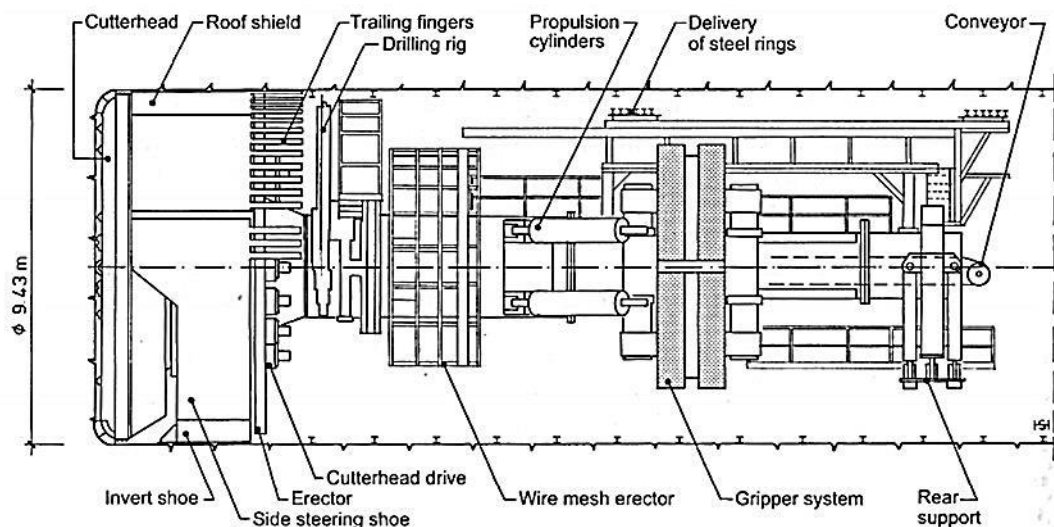
Πρόκειται για TBM γνωστό ως «ανοιχτού τύπου» έχει πεδίο εφαρμογής σε ευσταθή πετρώματα, συμπαγείς βράχους μη σημαντικό χρόνο αυτό-υποστήριξης και προτιμάται ως οικονομική λύση όταν η βραχώμαζα που διατρέεται δεν χρήζει ανάγκης μέσω άμεσης υποστήριξης. Παραλλαγή του ανοιχτού τύπου TBM δίνεται στο (Σχήμα 2.8.1 α) TBM με μερική ασπίδα προστασίας και πλευρικά πέδιλα καθοδήγησης (with partial shield -side steering shoe). Η ασπίδα όλων των τύπων Gripper TBM λειτουργεί ως μέσο μόνο για προστασία έναντι κατάπτωσης βραχοτεμαχίων και του προσωπικού, δεν έχει στατικό χαρακτήρα.

Η κοπτική κεφαλή με τα αντίστοιχα εργαλεία κοπής, περιστρέφεται σταθερά με 2,5m/s γωνιακή ταχύτητα και ωθείται επί του μετώπου από τα υδραυλικά έμβολα προχώρησης συνδεδεμένα με τα πέδιλα στήριξης (gripper shoe). Η δύναμη ώθησης της κεφαλής με διεύθυνση αξονική υπολογίζεται από τις δυνάμεις στα κοπτικά και τις αντιστάσεις τριβής στο κύριο σώμα της μηχανής. Η δύναμη αυτή μεταφέρεται δια μέσου του συστήματος πάκτωσης στα τοιχώματα της σήραγγας. Η προχώρηση της κεφαλής με τη μονάδα κίνησης της μηχανής γίνεται μέχρι ένα όριο της τάξεως 1,5 έως 2m το πολύ και εξαρτάται από την επιμήκυνση των υδραυλικών εμβόλων προχώρησης.



Σχήμα 2.8.1 α: TBM με μονό σύστημα πάκτωσης, Single Gripper TBM, (Maidl et al., 2013)

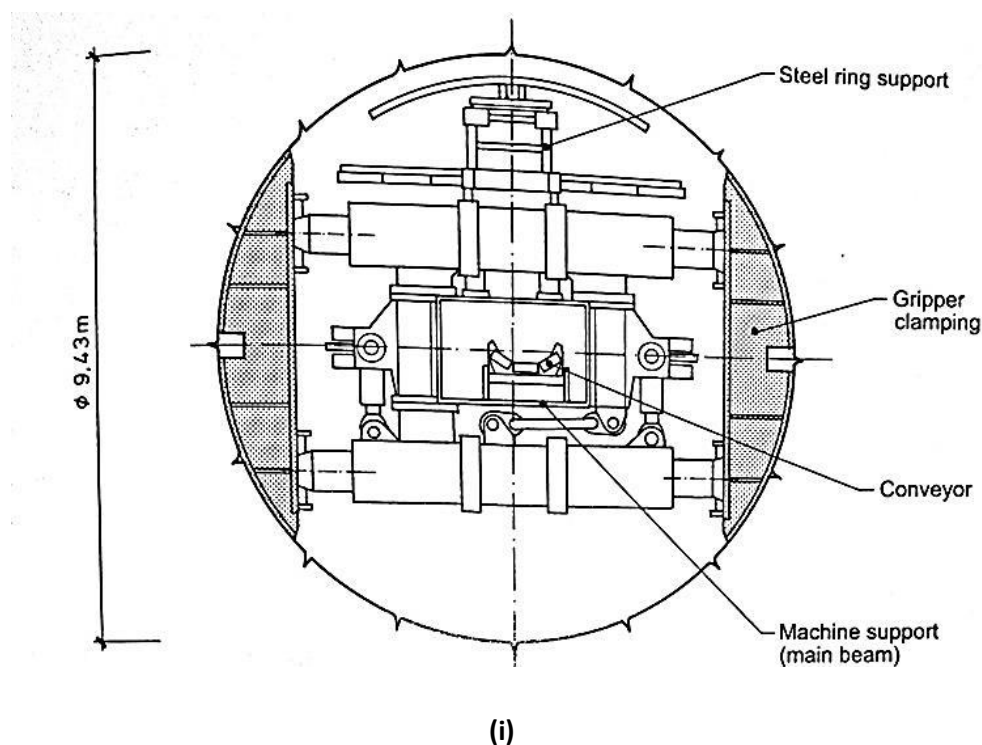
Το σύστημα πάκτωσης αποτελείται από ζεύγη ωστήρων τα οποία είναι διαμήκη υδραυλικά έμβολα προχώρησης που φέρουν καμπύλα πέδιλα (τους ωστήρες) οι οποίοι ασκούν πλευρική πίεση στα τοιχώματα της σήραγγας τόση ώστε το να συγκρατούν το μηχάνημα στην σχεδιασμένη χάραξη. Η καμπύλη στο σχήμα των πεδίων βοηθά στο να ταιριάζει στην καμπυλότητα της σήραγγας. Λόγω του χώρου που απαιτεί η έδραση των ωστήρων η εφαρμογή τους γίνεται σε σκληρούς βράχους όπου το τοίχωμα της σήραγγας είναι ελεύθερο.



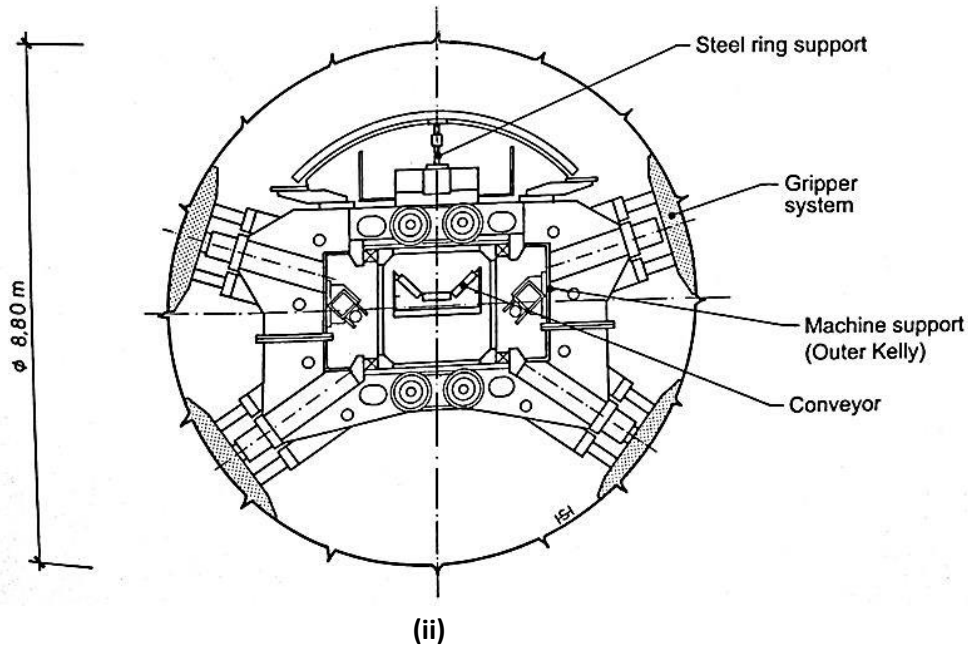
Σχήμα 2.8.1 β: TBM με μονό σύστημα πάκτωσης, (Main Beam TBM S-167 by Herrenknecht, ϕ 9.43), Maidl et al. (2008).

Τα ζεύγη μπορεί να είναι σε μία ή σε δύο διατομές (**Σχήμα 2.8.1 γ -i**), (**Σχήμα 2.8.1 δ -ii**) αντίστοιχα. Δύο τύποι μηχανισμών πάκτωσης έχουν αναπτυχθεί. Το σύστημα της πλευρικής πάκτωσης σε μία διατομή από τους οίκους Robbins και Herrenknecht, όπου το σώμα της μηχανής ολισθαίνει σε συρόμενο πέδιλο (**Σχήμα 2.8.1 γ-i**) και το σύστημα με χιαστί πάκτωση σε δύο διατομές που ανέπτυξαν οι οίκοι Java και Wirth όπου σχηματίζεται με τους χιαστί ωστήρες το εξωτερικό κέλυφος, εντός του οποίου διαμορφώνεται το εσωτερικό κέλυφος (Kelly), η κύρια δοκός με μορφή κοίλης ορθογωνικής διατομής και στηρίζεται επί ολισθαινόντων εδράνων (**Σχήμα 2.8.1 δ-ii**). Η κοπτική κεφαλή εδράζεται στην κοίλη διατομή.

Το σύστημα μονής πάκτωσης με πλευρικούς ωστήρες είναι πιο ανθεκτικό, πλεονεκτεί στις γεωλογικούς σχηματισμούς που απαιτείται υποστήριξη μιας και διαθέτει περισσότερο χώρο γύρω από τη μηχανή. Είναι κατάλληλο σε συνθήκες εδάφους όπου η βραχώμαζα τείνει να αστοχεί στη στέψη της σήραγγας. Οι δυνάμεις από τα πέδιλα στήριξης στα τοιχώματα της σήραγγας είναι διπλάσιες σε μέτρο της δύναμης ώσης της μηχανής, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα η εφαρμογή τους στα πετρώματα να οδηγεί σε αστοχίες. Γενικά, οι ωστήρες πάκτωσης καταπονούν το πέτρωμα λόγω εναλλασσόμενης συνεχόμενα φόρτισης –αποφόρτισης του πετρώματος.



(i)
**Σχήμα 2.8.1 γ (i), Σύστημα ωστήρων πάκτωσης
(i) Πλευρική πάκτωση σε μια διατομή - side clamping, μονό σύστημα πάκτωσης**



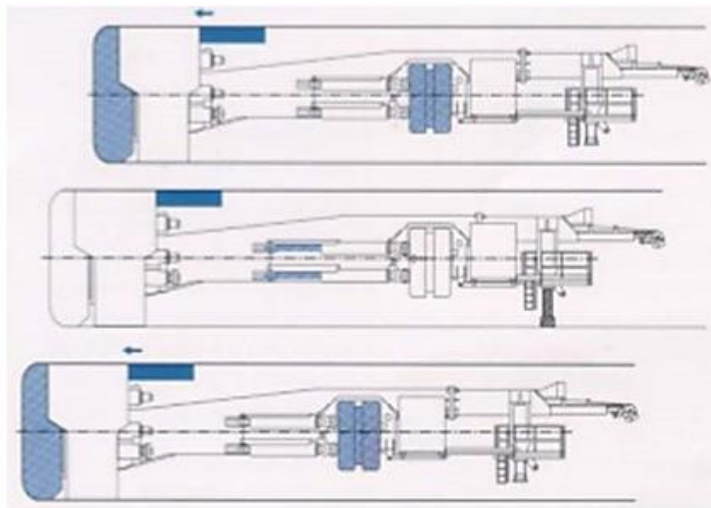
Σχήμα 2.8.1 δ (ii): Σύστημα ωστήρων πάκτωσης

(ii) Χιαστί πάκτωση σε δύο διατομές- X type clamping, διπλό σύστημα πάκτωσης

Προχώρηση του TBM

Το TBM μονής πάκτωσης πριν από την εκκίνηση νέας διαδρομής (stroke) διευθύνεται με τη βοήθεια του μηχανισμού στήριξης. Η μηχανή απαιτεί μετατόπιση και ύστερα τοποθέτηση της μονάδας πάκτωσης για νέα διαδρομή (**Σχήμα 2.8.1 ε**). Η λειτουργία είναι κυκλικά επαναλαμβανόμενη διαδικασία, διάτρηση-προχώρηση των ωστήρων-διάτρηση και συνεχής μέχρι η κοπτική κεφαλή να εισχωρήσει έως 1,8m ή 2m σε σύγχρονα TBM. Η εκσκαφή γίνεται όσο τα υδραυλικά έμβολα προχώρησης είναι σε λειτουργία. Κατά την διάνοιξη τα έμβολα εκτείνονται με τους κύριους ωστήρες (τα πέδιλα) που φέρουν να εδράζονται στα τοιχώματα της σήραγγας.

Μόλις η προχώρηση της μηχανής ξεπεράσει ένα όριο η περιστροφή της κεφαλής και η εκσκαφή σταματάνε και αποσύρονται τα πέδιλα στήριξης, ώστε να προχωρήσει η μηχανή μπροστά. Κατά την απόσυρση των πεδίων στήριξης από τα τοιχώματα της σήραγγας, η μηχανή σταθεροποιείται από την υποστήριξη που προσφέρουν είτε ένα δεύτερο ζεύγος ωστήρων (TBM-X type) ή είτε τα πόδια (rear support) που εκτείνονται κάθετα έως το έδαφος.

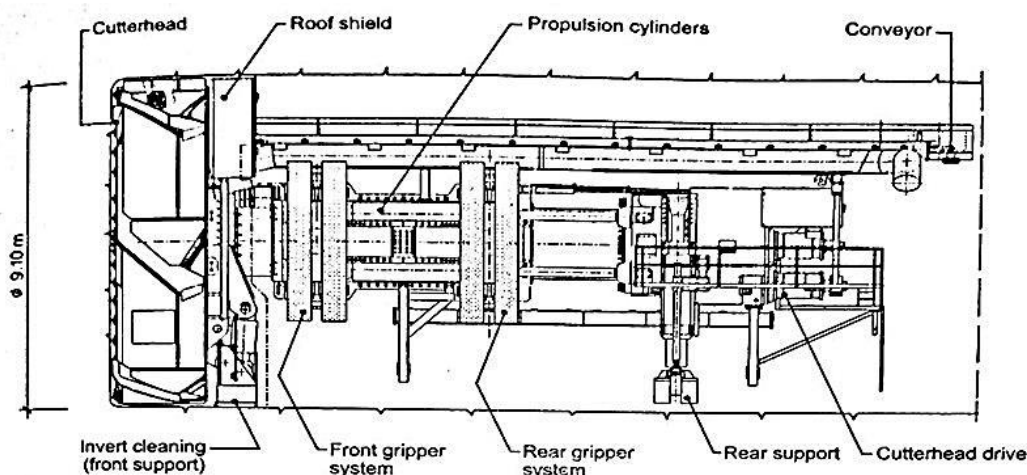


Σχήμα 2.8.1 ε: Πορεία προχώρησης TBM-Gripper Wirth System, (Σοφιανός Α.Ι)

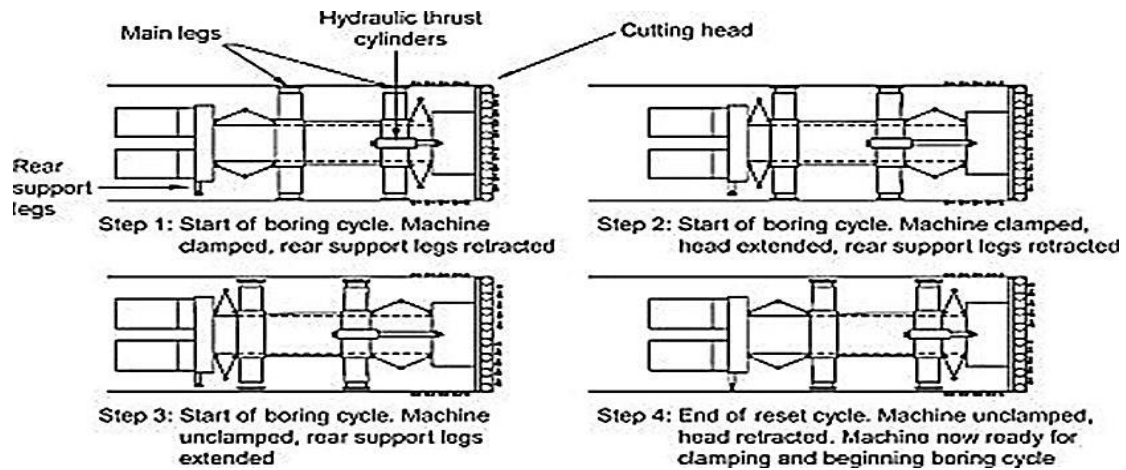
Στο σύστημα μονής πάκτωσης η συγκράτηση της μηχανής γίνεται μόνο κατά την περιστροφή/εκσκαφή ενώ στο σύστημα διπλής πάκτωσης το TBM συγκρατείται στη θέση του σε κάθε διαδρομή. Η αποκομιδή του υλικού γίνεται μέσω ιμάντα μεταφοράς κεντρικά τοποθετημένου στην κοπτική κεφαλή (Σχήμα 2.2.4) και καταλήγει στο οπίσθιο τμήμα.

2.8.2 Σε μηχανή TBM-Gripper με σύστημα διπλής πάκτωσης

Αντίθετα από το TBM μονής πάκτωσης, στο TBM διπλής (Σχήμα 2.8.2 α) το εξωτερικό κέλυφος σταθεροποιείται από τους ωστήρες και χρησιμοποιείται το εσωτερικό κέλυφος στο οποίο η κύρια δοκός ολισθαίνει επί κοίλης διατομής (Σχήμα 2.2.8.2 β). Η πλοήγηση κατά την διάνοιξη είναι δύσκολη και γι' αυτό διαγράφουν πολυγωνικές χαράξεις. Υπερτερούν έναντι των TBM μονής στην καλύτερη/ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στα τοιχώματα της σήραγγας σε κακά εδάφη. Η αποκομιδή είναι ίδια με του TBM μονής πάκτωσης.



Σχήμα 2.8.2 α: TBM με διπλό σύστημα πάκτωσης-TBM (Kelly TBM MK 27 by Atlas Copco ϕ 9.10), Maidl et al. (2008).

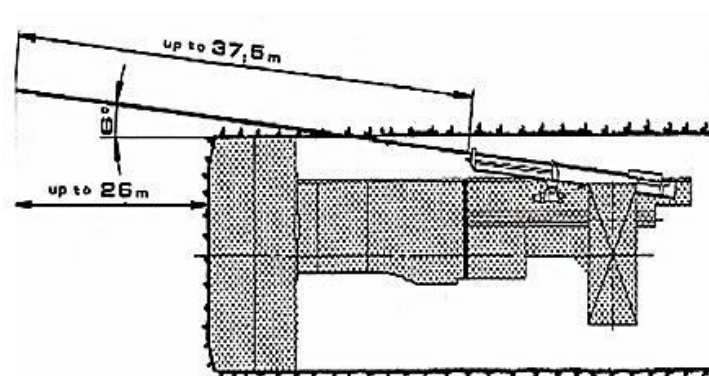


Σχήμα 2.8.2 β: Πορεία προχώρησης TBM-Double Gripper, Whittaker & Frith (1999)

2.9 Υποστήριξη Μετώπου

Όσο αφορά την υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται με TBM με ασπίδες είτε με TBM με ασπίδες που λειτουργούν βοηθητικά έναντι κατάπτωσης βράχων ή προστασίας του προσωπικού και επιβάλλονται στοιχεία άμεσης υποστήριξης του θόλου. Σε χαλαρά εδάφη με ρηγματωμένες ζώνες επιβάλλεται η χρήση μέτρων άμεσης υποστήριξης κοντά στο μέτωπο εκσκαφής με γραμμικά στοιχεία ή και επιφανειακά. Ο εξοπλισμός της άμεσης στήριξης πετρώματος βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή για να τοποθετούνται όσο πιο κοντά γίνεται στο μέτωπο εκσκαφής.

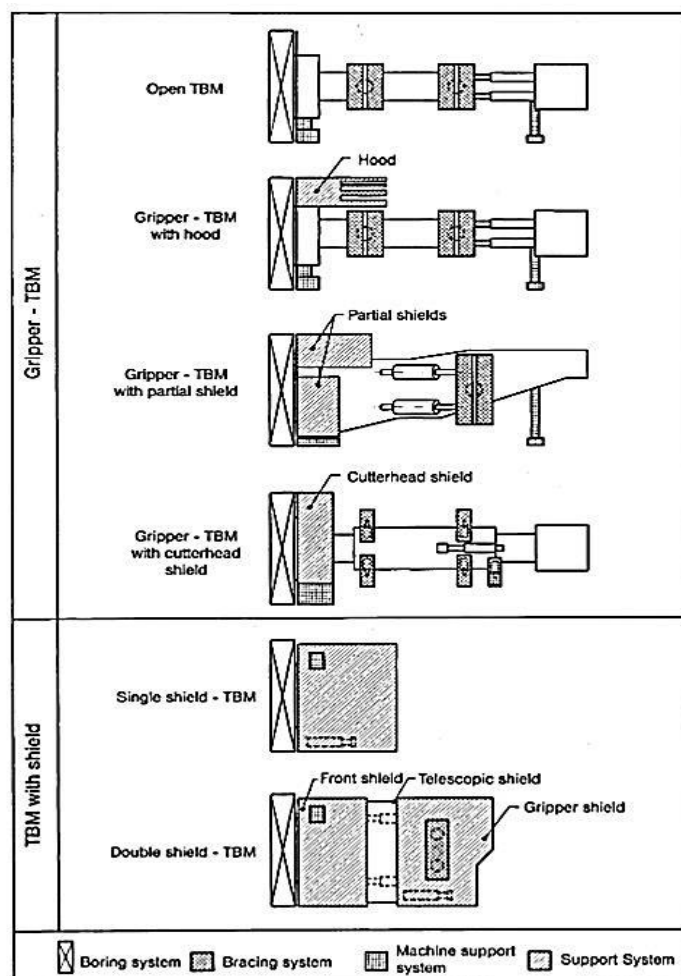
Αποτελείται από γραμμικά στοιχεία εφελκυσμού, αγκύρια βράχου, επιφανειακά στοιχεία υποστήριξης όπως ανυψωτές πλασιών, πλέγματος και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η μονάδα για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα βελτιωτικά εδάφους όπως διατρητικά εισπίεσης ενέματος βρίσκονται κοντά στην κύρια δοκό. Πίσω από την ασπίδα βρίσκονται διατρητικά γεωτρήσεων και προ-πορείας με σκοπό την διερεύνηση των γεωτεχνικών συνθηκών, σε περίπτωση ανάγκης βελτίωσης εδάφους μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής με χρήση τσιμεντενέσεων ή ελαφρών δοκών προ-πορείας (spiles) (Σχήμα 2.9 α).



Σχήμα 2.9 α: Διάταξη διατρητικών για βελτίωση εδάφους (TamRock,1999)

Επίσης στο πυθμένα των TBM-G βρίσκεται ανάστροφο προκατασκευασμένο στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα και λειτουργεί ως προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη για τον απαραίτητο εξοπλισμό (τροχιές συρμού εξυπηρέτησης, σωληνώσεις αποχέτευσης, τροχιές για τον σιδηροδρομικό μεταφορέα). Τα κοπτικά εργαλεία της κεφαλής εισχωρούν στη βραχώμαζα κατά την περιστροφή της κεφαλής και την δύναμη πίεσης επί του μετώπου. Καθώς η μηχανή προχωράει αντιστηρίζεται στα τοιχώματα της σήραγγας είτε στην μόνιμη επένδυση για να μεταδώσει την απαιτούμενη δύναμη ώθησης στην κεφαλή και τη ροπή. Η δύναμη ώθησης και η ροπή μεταφέρονται είτε έμμεσα δια μέσου διαμήκους συστήματος πάκτωσης που πιέζουν ακτινικά τα τοιχώματα της σήραγγας, είτε άμεσα με στήριξη στα προκατασκευασμένα στοιχεία της μόνιμης επένδυσης(segmental lining).

Η πρώτη περίπτωση στήριξης, η έμμεση, γίνεται από τα TBM «ανοικτού τύπου» ή αλλιώς TBM-Gripper, και η δεύτερη μέθοδος στήριξης, η άμεση, γίνεται από τις μηχανές με ασπίδα, TBM-Shield. Τα TBM επιμερίζονται με βάση την στήριξη στα Gripper και στα TBM με ασπίδες. Τα gripper επιμερίζονται σε: Ανοικτού τύπου Open TBM, με ασπίδα οροφής TBM with hood, με ασπίδα μερική TBM with partial shield και σε TBM με ασπίδα cutterhead shield TBM.(Σχήμα 2.9 β).



Σχήμα 2.9 β : Διάκριση TBM με βάση το σύστημα στήριξης του μετώπου. Source: Maidl et. al (2013)

2.10 Στήριξη της βραχόμαζας (Support)

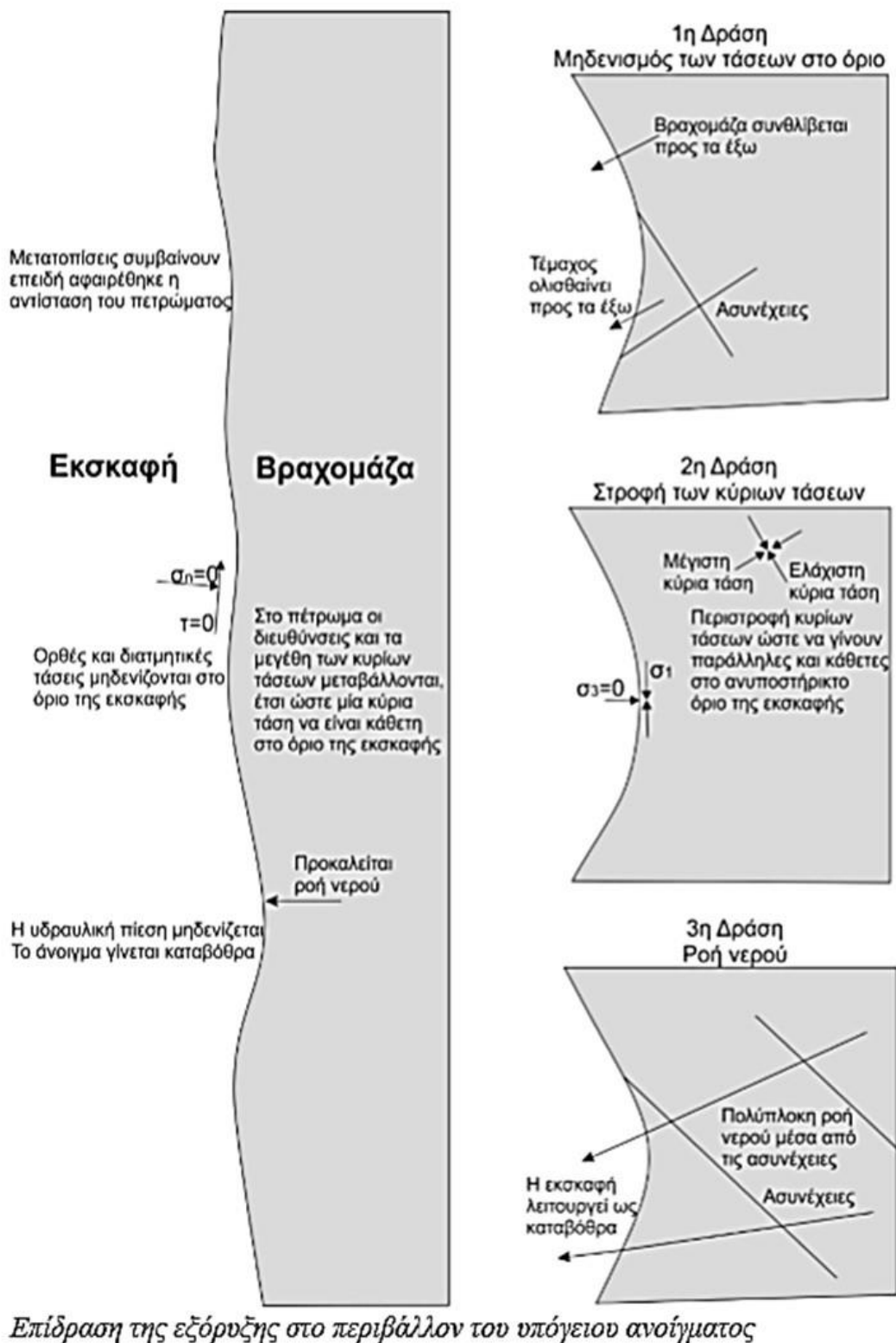
Εξαρχής η βραχόμαζα και γενικά το έδαφος είναι μέσο ανισότροπο, ανομοιογενές και βρίσκεται εξ'αρχής σε τασικό και παραμορφωσιακό καθεστώς ισορροπίας, το φυσικό καθεστώς τάσεων (in situ stress field) ή πρωτογενές πεδίο τάσεων ή πρωτογενής πίεση, πριν από την οποιαδήποτε μεταβολή της κατάστασης ισορροπίας του. Το φυσικό καθεστώς προέρχεται από το τεκτονικό καθεστώς, δηλαδή την γεωλογική ιστορία της γεωμάζας με τις εγκλωβισμένες λιθοστατικές πιέσεις και το γεωστατικό καθεστώς (ίδιο βάρος των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων).

Η διαδικασία διάνοιξης στη γεωμάζα για την κατασκευή ενός υπογείου έργου επιδρά ως δευτερογενής πίεση στο αρχικό φυσικό πεδίο τάσεων με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται οι ακόλουθες δράσεις.

Πρώτη, κατά την εκσκαφή της γεωμάζας οι τάσεις στις παρειές του πετρώματος στο όριο εκσκαφής μηδενίζονται, μηδενίζεται η αντίσταση του πετρώματος με αποτέλεσμα το βραχοτεμάχιο ολισθαίνει προς τα έξω και η βραχόμαζα ακολούθως συνθλίβεται προς την ίδια φορά.

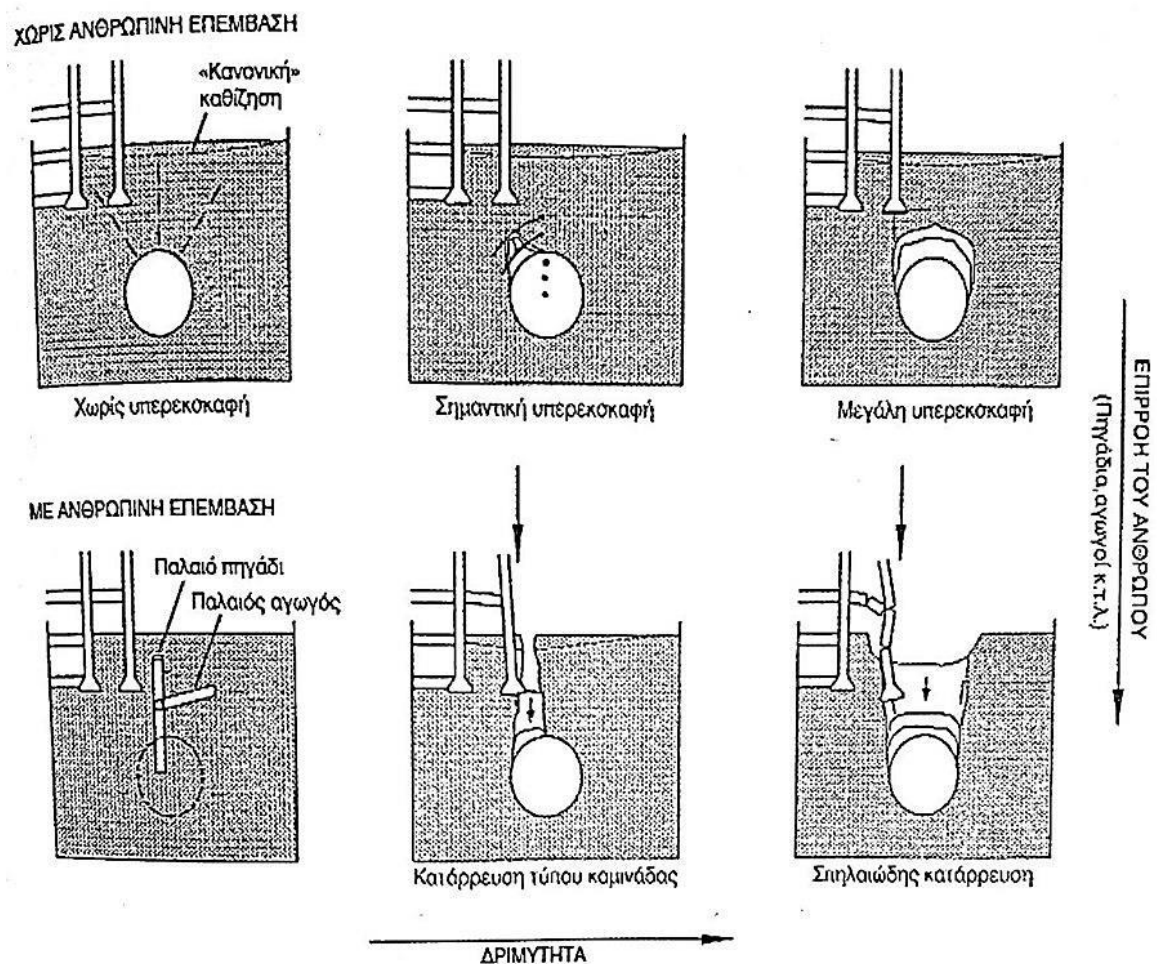
Δεύτερη δράση αλλάζει η διεύθυνση του τασικού πεδίου με την μέγιστη « σ_1 » και ελάχιστη κύρια « σ_3 » τάση να γίνονται κάθετη και παράλληλη αντιστοίχως στο όριο εκσκαφής.

Τρίτη όταν υπάρχει νερό η υδραυλική πίεση στο όριο εκσκαφής μηδενίζεται και το νερό μέσα από τις ασυνέχειες της βραχόμαζας καταλαμβάνει την εκσκαφή, **(Σοφιανός Α.Ι, 2018)** **(Σχήμα 2.10 α).**



Σχήμα 2.10 α: Επίδραση της εξόρυξης στο περιβάλλον του υπόγειου ανοίγματος, (Σοφιανός Α.Ι. 2018).

Η απόκριση της γεωμάζας στην επιβαλλόμενη διαταραχή της αρχικής της τασικής ισορροπίας είναι διαδικασία χρονικά εξελισσόμενη και επηρεάζεται από, το αρχικό πεδίο τάσεων, τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, την εισροή ή όχι του νερού τη γεωμετρία της σήραγγας και την επιλογή της τεχνικής διάνοιξής της (ολομέτρωτη, τμηματική, μέσα υποστήριξης και χρόνος μέχρι την εγκατάστασή τους). Κατά την διάνοιξη σήραγγας η επιβαλλόμενη στην γεωμάζα διαταραχή συμβαίνει με την αφαίρεση ακαριαία ή σταδιακά του εδαφικού υλικού και την υποκατάστασή από ένα εύκαμπτο στατικό σύστημα, την υποστήριξη, πιο παραμορφώσιμο από την γεωμάζα που αφαιρέθηκε παρουσία χρονικών καθυστερήσεων μέχρι την εγκατάσταση των μέτρων υποστήριξης. Η χρονική καθυστέρηση συμβάλλει στην ανάπτυξη διαφορικών μετακινήσεων τόσο στη γεωμάζα όσο και με την εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων που επηρεάζουν τις υπάρχουσες ανωδομές και υπόγειες κατασκευές με κρισιμότερο κίνδυνο την κατάρρευσή τους λόγω υπερεκσκαφής σε διάνοιξη αβαθούς σήραγγας (Σχήμα 2.10 β).



Σχήμα 2.10 β: Μηχανισμοί γένεσης μετακινήσεων στη γεωμάζα κατά τη ν διάνοιξη αβαθών σήραγγων στον Αθ. Σχιστόλιθο (Birch et. Al,1996), (Κωστόπουλος Σ. 2013).

Οι διαφορικές μετακινήσεις οδηγούν σε καινούρια τασικά πεδία προοδευτικά αναπτυσσόμενα. Η υποστήριξη στόχο έχει αφενός τον έλεγχο των μετακινήσεων για την αποφυγή κατάρρευσης ή αστοχίας και την ανεκτό των παραμορφώσεων στη γεωμάζα στο προβλεπόμενο χρόνο ζωής του έργου, αφετέρου την βελτίωση της ευστάθειας την διατήρηση της φέρουσας ικανότητας της γεωμάζας στο όριο εκσκαφής καθώς και την κινητοποίηση της αντοχής της βραχόμαζας ώστε να καταστεί αυτοφερόμενη μορφώνοντας η ίδια η βραχόμαζα έναν αυτουποστηριζόμενο φέροντα δακτύλιο ο οποίος αναλαμβάνει τα υπερκείμενα φορτία στο εκάστοτε όριο εκσκαφής. Η υποστήριξη λειτουργεί προσδίδοντας τριαξονική αντοχή μέσω των κατασκευαστικών στοιχείων που την ενισχύουν, συνήθως ηλώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος και προκατασκευασμένων στοιχείων (segments) από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα στην μηχανοποιημένη διάνοιξη. Για τον έλεγχο των μετακινήσεων το κριτήριο παραμόρφωσης είναι κρισιμότερο του κριτηρίου θραύσης. Οι μετακινήσεις στα υπόγεια έργα εξαρτώνται από το χρόνο ,γεωμετρία της εκσκαφής, την ακαμψία της κατασκευής, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της γεωμάζας, την ύπαρξη νερού και τη μεταβολή του, την κατασκευή της υποστήριξης και τα τυχαία φορτία. **(Κωστόπουλος Σ)**. Με κριτήριο την μετακίνηση και βάση την αρχή της αυτουποστήριξης συνοδεία του χρόνου αυτουποστήριξης οι υπόγειες κατασκευές διακρίνονται σε κατασκευές υποκείμενες σε ενεργητική και υποκείμενες σε παθητική υποστήριξη.

Στην ενεργητική υποστήριξη η βραχόμαζα καθίσταται σταθερή στο εσωτερικό της και η υποστήριξη ενισχύει τοπικά κάθε τμήμα γύρω από το όριο εκσκαφής κινητοποιώντας την αντοχή της βραχόμαζας πέριξ του ανοίγματος με την επιβολή ορθής δύναμης στις παρειές των ασυνεχειών της βραχόμαζας δημιουργώντας συνθήκες πλευρικής παρεμπόδισης άρα φορτίζοντας την γεωμάζα τριαξονικά. Παραδείγματα τέτοιων στοιχείων ενίσχυσης είναι οι ηλώσεις-bolts, τα καρφιά-nails, τα βλήτρα-dowels, τα αγκύρια εφελκυσμού- tendon anchors τα οποία μεταβιβάζουν τα φορτία τους στην βραχόμαζα σε όλο το μήκος τους και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που προσδίδει συνοχή στην υπόγεια εκσκαφή με την πλήρωση των ασυνεχειών και παρεμποδίζοντας την περαιτέρω αποδιοργάνωση της βραχόμαζας. Τα φορτία μεταφέρονται σε γειτονικούς ευσταθείς γεωσχηματισμούς μέσω των διατμητικών τάσεων και το δομικό πλέγμα συνήθως T131 ή χαλύβδινες ίνες (35Kg/m³- 65 Kg/m³) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δίνει εφελκυστική αντοχή και πλαστιμότητα.

Στην παθητική υποστήριξη η βραχόμαζα σταθεροποιείται εξωτερικά και παράγει δράση γύρω από το όριο εκσκαφής την οποία καλείται να παραλάβουν εκείνα τα δομικά στοιχεία τα οποία φέρουν είτε εξ' ολοκλήρου είτε μερικώς τα φορτία της βραχόμαζας ή τεμαχίων αυτής και η αντίστασή τους είναι μεγαλύτερη της αντίστασης της βραχόμαζας. Αυτά είναι τα μεταλλικά πλαίσια το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με υγρή ή ξηρή μέθοδο, ο οπλισμός με την τοποθέτησή του από ικρίωμα **(Σχήμα 2.10 γ)** και η τελική μόνιμη επένδυση που κατασκευάζεται από οπλισμένο έγχυτο σκυρόδεμα με χρήση ειδικού φορείου (μεταλλότυπος) **(Σχήμα 2.10 δ)** ή από προκατασκευασμένα τόξα από οπλισμένο σκυρόδεμα (precast elements). Στις εργασίες της τελικής επένδυσης συμπεριλαμβάνεται και το σύστημα υδατοστεγάνωσης με γεωύφασμα και γεωμεμβράνη



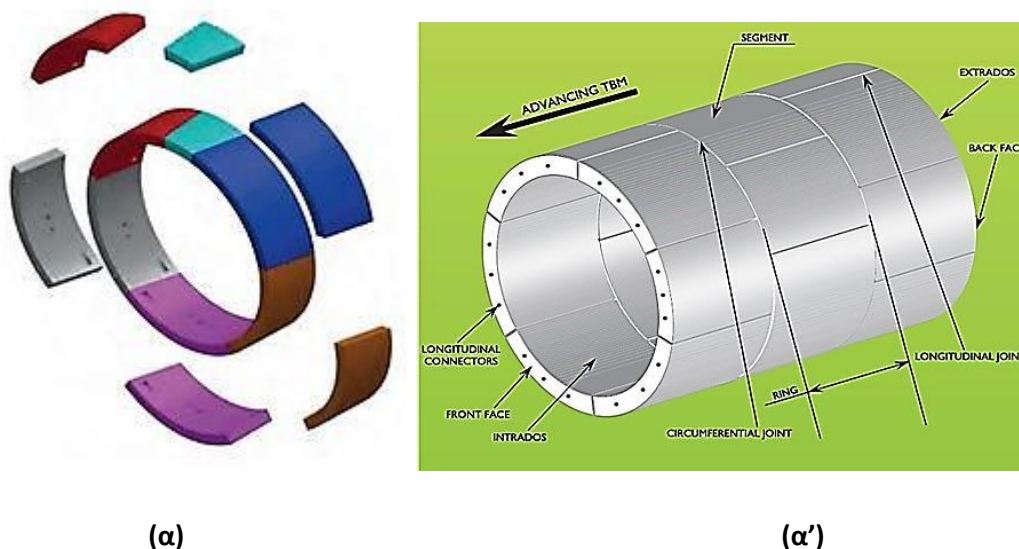
Σχήμα 2.10 γ: Τοποθέτηση οπλισμού με χρήση ειδικού κριώματος, (Σοφιανός Α.Ι, 2018).



Σχήμα 2.10 δ: Σπαστός μετακινούμενος μεταλλότυπος, (Σοφιανός Α.Ι, 2018)

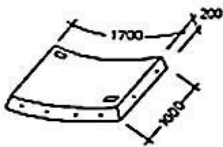
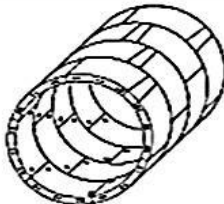


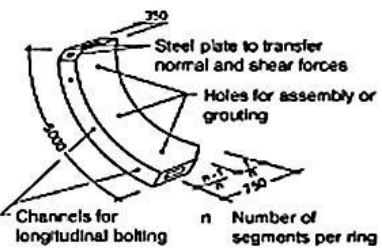
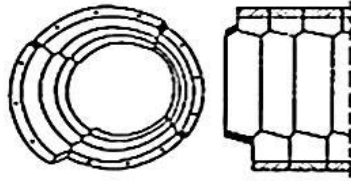
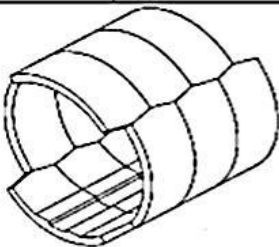
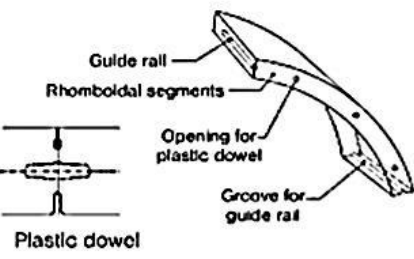
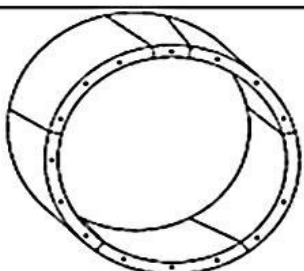
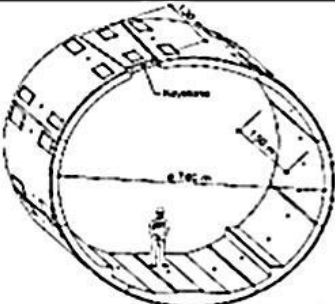
2.11 Η μόνιμη επένδυση στην μηχανοποιημένη διάνοιξη

Οι σήραγγες που διανοίγονται ολομέτωπα με ασπίδες επενδύονται με τόξα σπλισμένου σκυροδέματος ή με ίνες σπλισμού τα οποία συνδέονται μεταξύ τους φτιάχνοντας την τελική μορφή της επένδυσης, τους δακτυλίους μόνιμης επένδυσης (**Σχήμα 2.11 α, α'**). Αποτελούν στατικό στοιχείο και την τελική επιφάνεια του εσωτερικού της σήραγγας. Λόγω της γεωμετρίας τους επιτρέπεται η ευθύγραμμη και καμπύλη χάραξη της σήραγγας και βάσει της γεωμετρίας τους χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες τραπεζοειδή, εξαγωνικά (ή κυψέλες), τετραγωνικά και ρομβοειδή (**Σχήμα 2.11 β'**) ή και περισσότερες (**Σχήμα 2.11 β**)

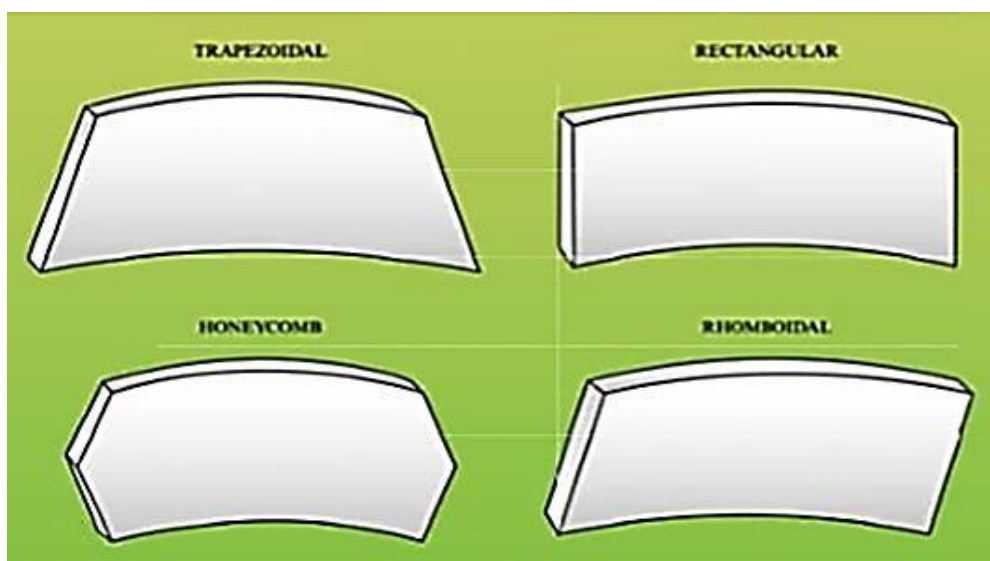


Σχήμα 2.11 α: Μόρφωση δακτυλίου 5+1 από 5 βασικά τεμάχια και 1 για την κλείδα(key segment) για διάμετρο σήραγγας 6m. (ITA Working Group 2, Guidelines, 2000).

Σχήμα 2.11 α': Ονοματολογία δακτυλίου, τέμαχος segment, πλάτος δακτυλιδιού ring, διαμήκεις και περιφερειακοί αρμοί longitudinal & circumferential joint, διαμήκεις σύνδεσμοι longitudinal connectors, πρόσοψη στη διεύθυνση προχώρησης front face και πίσω όψη back face, εσωτερικά τοιχώματα και εξωτερικά intrados & extrados. (**Guglielmetti V. et al. 2007**).

	Single segment	Construction of pipes
Block segment		
Cassette segment		
Spiral segment		
Hexagonal segment		
Rhomboidal and trapezoidal segment		
Expanding segment		

Σχήμα 2.11 β: Κατηγορίες προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Maidl et al, 2013)



Σχήμα 2.11 β': Βασικές κατηγορίες προκατασκευασμένων στοιχείων, (Guglielmetti V. et al. 2007).

Με τα μηχανήματα TBM-Gripper η προσωρινή υποστήριξη εξασφαλίζεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με την επένδυση να τοποθετείται αργότερα.

Στις μηχανές με ασπίδα και κυλίνδρους ώσης η δύναμη για την ώθηση της μηχανής προέρχεται από τα έμβολα ώσης που σπρώχνουν τον τελευταίο δακτύλιο της τελικής επένδυσης.

2.11.1 Διαστάσεις των προκατασκευασμένων στοιχείων

Πάχος

Τα τόξα ή εν γένει τα προκατασκευασμένα στοιχεία παράγονται σε διάφορα πλάτη και πάχη. Το πάχος πρέπει να είναι τόσο ώστε να μπορεί να αναλαμβάνει τη δύναμη στήριξης των εμβόλων επί αυτού, συνήθεις τιμές είναι μεταξύ 20 και 50 cm. Πιο μεγάλες διατομές χρειάζονται παχύτερα τόξα με το πάχος τους να εξαρτάται από τα κριτήρια σχεδιασμού και τις φορτίσεις.

Μήκος

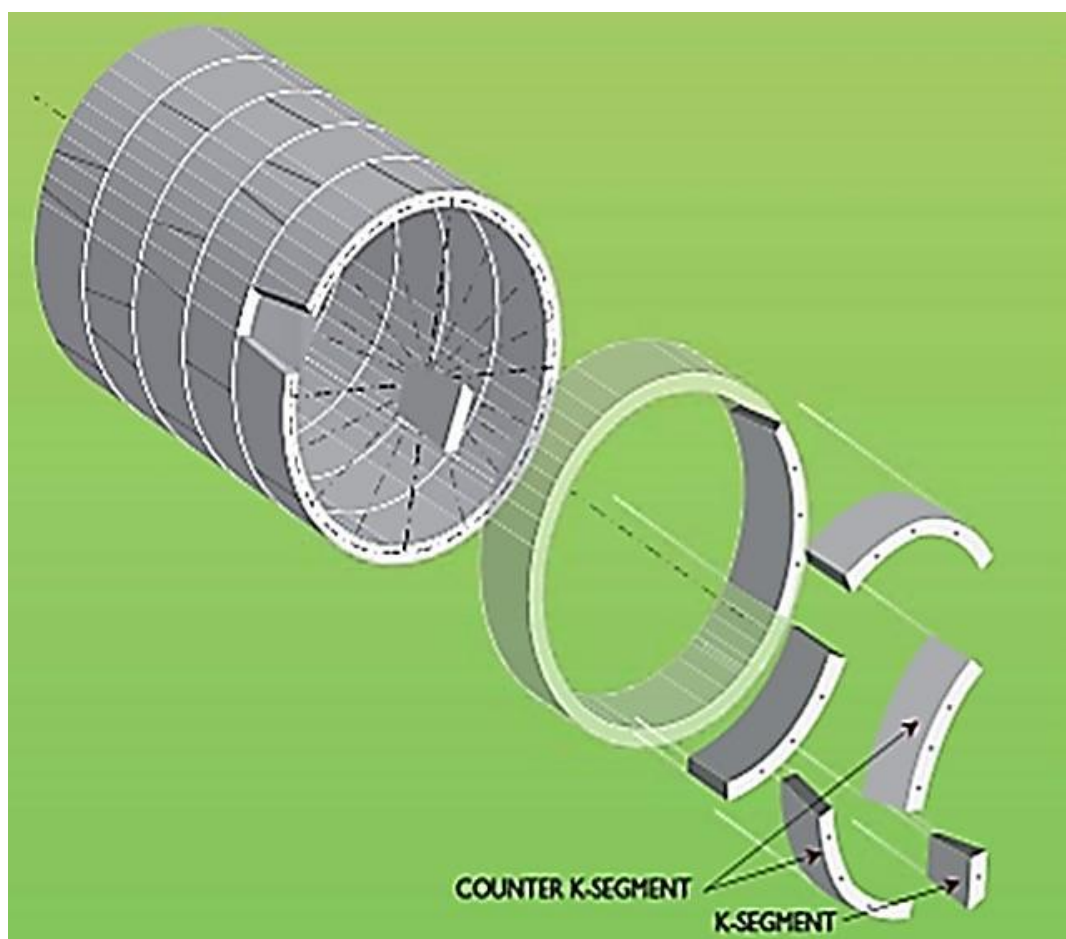
Ένα άλλο χαρακτηριστικό κύριο των δακτυλίων είναι ο αριθμός των αρμών που αλλάζει με το μήκος των προκατασκευασμένων τόξων. Τα τόξα με μεγάλο μήκος έχουν λιγότερους αρμούς με αποτέλεσμα την δημιουργία πιο δύσκαμπτου δακτυλίου, έναντι των τόξων μικρότερου μήκους άρα με περισσότερα σε αριθμό τόξα και αρμούς. Το μεγάλο μήκος επιτυγχάνει στη μείωση του εξοπλισμού για τις συνδέσεις και έτσι μείωση του κόστους παραγωγής και η ταχύτητα κατασκευής του δακτυλίου αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο τα τόξα μικρού μήκους πλεονεκτούν στην μεταφορά τους και στην διαδικασία ανύψωσής τους από τον ανυψωτή erector πίσω από την ασπίδα του TBM.

Λεπτότητα «λ»

Βασική παράμετρος καθορισμού του μήκους του τόξου είναι η λεπτότητα slenderness «λ» και ορίζεται ως την αναλογία μεταξύ του καμπύλου μήκους του τόξου σε σχέση με το πάχος του με συνήθεις τιμές λεπτότητας από 8 έως 13 για τόξα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με τα τόξα από ίνες FRC (fiber reinforced concrete) έχουν επιτευχθεί τιμές από 10 έως και 13, (ITA –WG2,2000, Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Lining).

Επιλογή μήκους τόξων-σύνθεση δακτυλίου

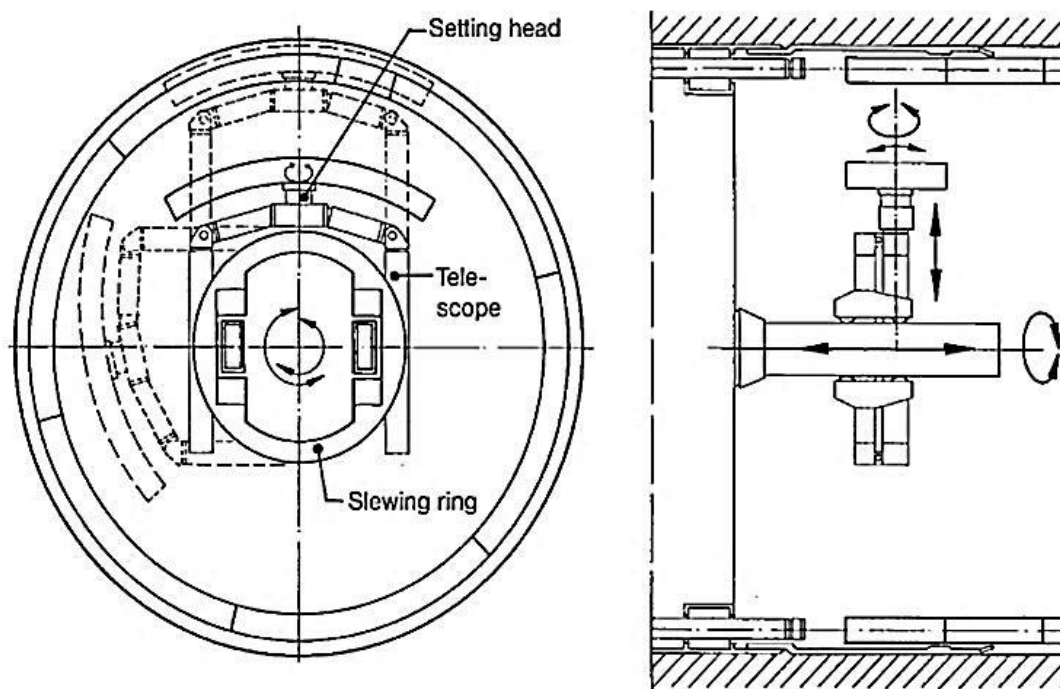
Ανάλογα με την διάμετρο της διατομής επιλέγεται ο αριθμός των τόξων για τον σχηματισμό του δακτυλίου και το μήκος των τόξων κυμαίνεται από 0,75m έως 2,50m. Σε μικρές διαμέτρους από 6 έως 7m επιλέγεται μήκος τόξου 1,50m με την αύξηση στα 2,0m σε διαμέτρους άνω των 9m. Σε διάμετρο από 6 έως 8m επιλέγονται είτε 6 τόξα μεγάλου μήκους είτε 8 τόξα με πολύ μικρό μήκος. Για σήραγγες από 8 έως 11m διάμετρο η λύση των 7+1 επιλέγεται, 7 βασικά τόξα και 1 ως κλειδί για το κλείσιμο του δακτυλίου. Σε μεγαλύτερες διαμέτρους 9 έως 11m σπάνε τα τόξα σε 8 βασικά-segments και άλλα δύο ως κλειδί-key segment το ένα και ως counter key segment (Σχήμα 2.11.1 α) και για διαμέτρους από 14m και άνω η λύση 9+1 είναι συνήθης (ITA –WG2,2000, Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Lining).



Σχήμα 2.11.1 α : Προσομοίωση δακτυλίου, (Guglielmetti V. et al. 2007).

2.11.2 Κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων- segments

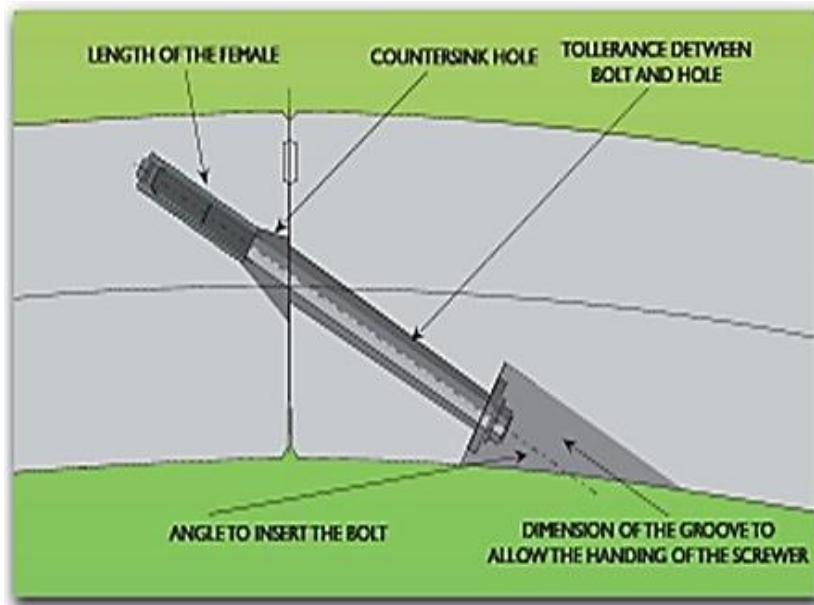
Η κατασκευή του δακτυλίου γίνεται μέσα στο ουραίο τμήμα της ασπίδας του TBM από τον ανυψωτή που τοποθετεί τα προκατασκευασμένα τόξα σε κατάλληλες θέσεις ξεκινώντας από το πρώτο και τοποθετώντας στο τέλος το κομμάτι key segment πάντα απέναντι από το counter key segment/K-segment. Ο ανυψωτής μετακινείται και στους έξι βαθμούς ελευθερίας μετακίνηση κατά x, y, z και με τις αντίστοιχες τρεις στροφές περί αυτών. Ο ανυψωτής φέρει την κεφαλή τοποθέτησης των τόξων (Σχήμα 2.11.2 α)



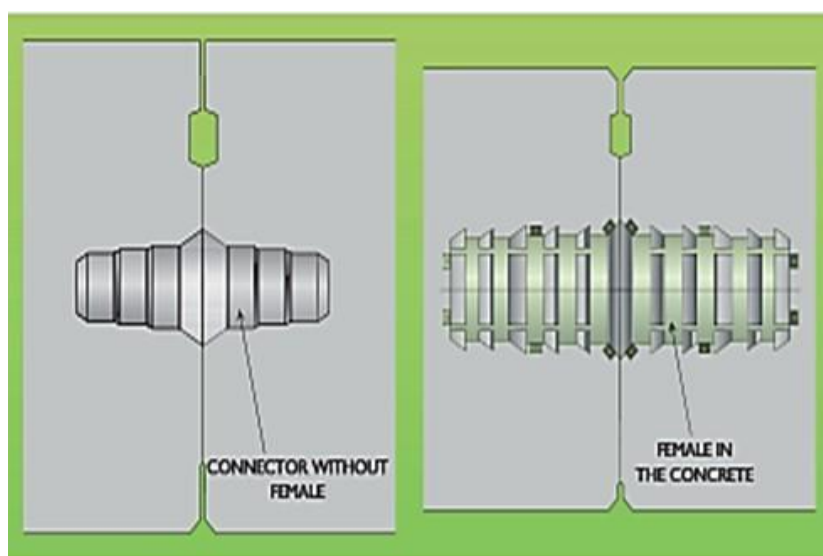
Σχήμα 2.11.2 α: Ανυψωτής (erector) τόξων δακτυλίου, (Maidl et al. 2013)

Συνδέσεις

Το στοιχείο που τοποθετείται στην κλείδα K-segment με μεγέθους μικρότερου από τα υπόλοιπα έχει σχήμα τραπεζοειδές και με την μεγαλύτερη πλευρά του έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής. Οι συνδέσεις μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων και των δακτυλίων είναι συνδέσεις διαμήκεις με ράβδους/ηλώσεις (**Σχήμα 2.11.2 i**) και εγκάρσιες με βλήτρα (**Σχήμα 2.11.2 ii**). Στην κατηγορία των ράβδων bolts πρώτα τοποθετείται το στοιχείο segment και έπειτα ακολουθεί η είσοδος και σύσφιξη των ήλων. Λειτουργεί σαν λύση καλύτερα σε τετραγωνικά στοιχεία.



Σχήμα 2.11.2 i: Τομή υποδοχής ήλου, (Guglielmetti V. et al. (2007).



Σχήμα 2.11.2 ii: Τομή υποδοχής βλήτρου, (Guglielmetti V. et al. 2007).

2.11.3 Διάταξη των προκατασκευασμένων στοιχείων

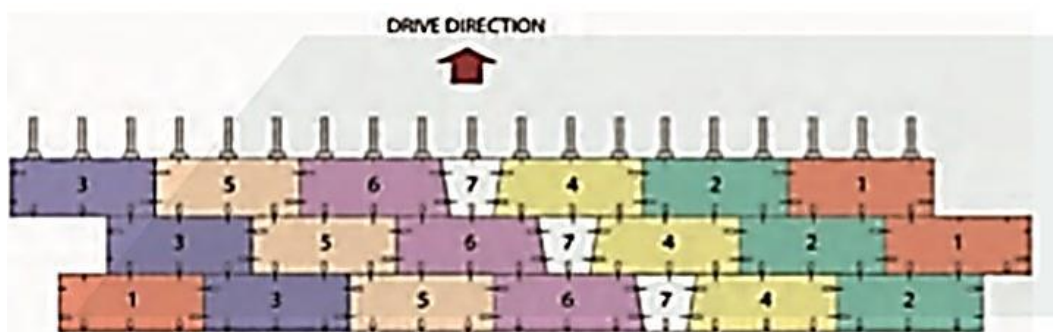
Οι βασικές τέσσερις εξ' αυτών κατηγορίες είναι τα τετραγωνικά, εξαγωνικά, τραπεζοειδή και ρομβικά.

- Εξαγωνικά ή κυψέλες (hexagonal or honeycombs) τα στοιχεία λειτουργούν το καθένα ως στοιχείο οροφής key-segment, λόγω του σχήματος δεν χρειάζεται αρμός μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων και προσομοιάζεται ως συνεχές σύστημα πιο δύσκαμπτο. Λόγω της γεωμετρίας τους η χρήση περιβλήματος gasket για υδατοστεγανότητα δεν είναι εφικτή, ωστόσο συμβάλλουν σε αυξημένους ρυθμούς προχώρησης (ITA –WG2,2000, **Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Lining**). Σε μικρές διαμέτρους οι δακτύλιοι σχηματίζονται από τέσσερα στοιχεία ίδιου σχήματος τοποθετημένα το ανάστροφο απέναντι με της οροφής και με αντίστοιχο τρόπο τα πλευρικά στοιχεία (**Σχήμα 2.11.3 α**) Μόνο το ανάστροφο στοιχείο μπορεί να διαφέρει στο σχεδιασμό. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται η δυσχέρεια τους λόγω του μεγέθους τους σε μεγάλες διαμέτρους σήραγγες και στην μεταφορά τους. Χρησιμοποιούνται σε διαμέτρους έως 4,50m (**Maidl et al. 2008**)



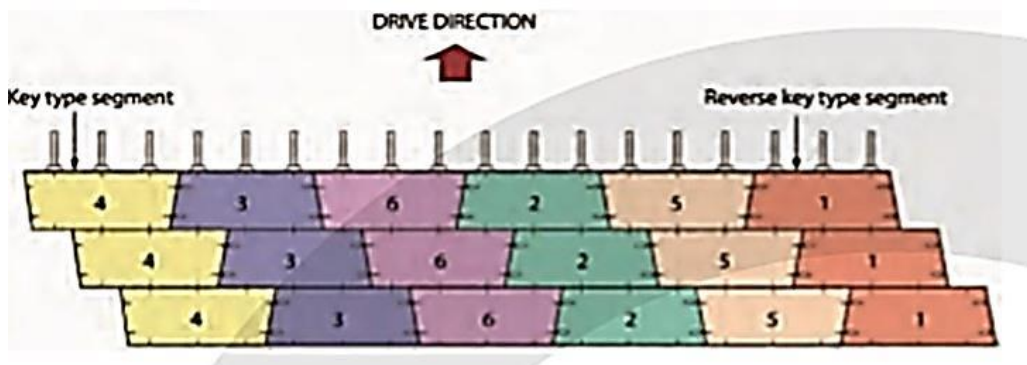
Σχήμα 2.11.3 α: Διάταξη εξαγωνικού συστήματος, (ITA-WG2,2000)

- Τετραγωνικά (rectangular), είναι τετραγωνικά στοιχεία με το στοιχείο οροφής να λειτουργεί σαν σφήνα, σαν σύστημα προσφέρει υδατοστεγάνωση και με πλεονέκτημα την απλή γεωμετρία των αρμών. Το κύριο μειονέκτημα είναι σε περίπτωση που τα βλήτρα είναι τοποθετημένα ήδη στα στοιχεία είναι δύσκολη η συναρμολόγηση των στοιχείων χωρίς να επηρεαστεί το παρέμβυσμα (gasket) του γειτονικού στοιχείου καθιστώντας τη σύνδεση με ηλώσεις καλύτερη λύση. Διάταξη του συστήματος φαίνεται στο (**Σχήμα 2.11.3 β**)



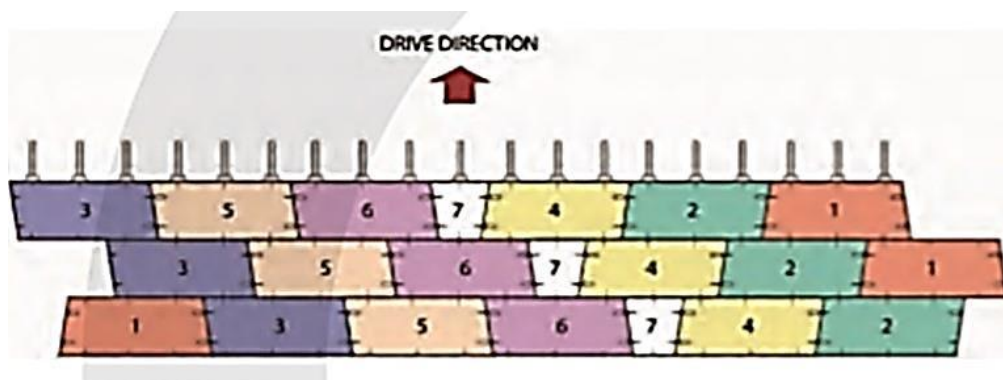
Σχήμα 2.11.3 β: Διάταξη τετραγωνικών στοιχείων,(ITA-WG2,2000)

- Τραπεζοειδή (trapezoidal), τα μισά από αυτά τοποθετούνται ως counter-key segment, με τη μια τους πλευρά μεγαλύτερη να εφάπτεται στο αμέσως προηγούμενο τοποθετημένο και τα άλλα μισά ως key segment, με τη μικρότερη πλευρά του στοιχείου να εφάπτεται στο αμέσως προηγούμενο εγκατεστημένο στοιχείο. Η διάταξη φαίνεται στο **(Σχήμα 2.11.3 γ)** Πρώτα τοποθετούνται τα counter key στοιχεία και έπειτα τα κενά καλύπτονται από την εγκατάσταση των key στοιχείων. Το βασικό μειονέκτημα του συστήματος είναι κατά την προχώρηση με TBM για να διατηρηθεί σταθερός βαθμός διεύθυνσης στο βράχο απαιτούνται ώσσης από τα έμβολα ώθησης μεγαλύτερες δυνάμεις ώσσης οι οποίες προβάλλονται στα στοιχεία counter μέχρι να εγκατασταθούν τα key segments. Στα θετικά του συστήματος είναι η δυνατότητα χρήσης εναλλασσόμενων στοιχείων ως key segment.



Σχήμα 2.11.3 γ: Διάταξη τραπεζοειδών στοιχείων, (ITA-WG2,2000)

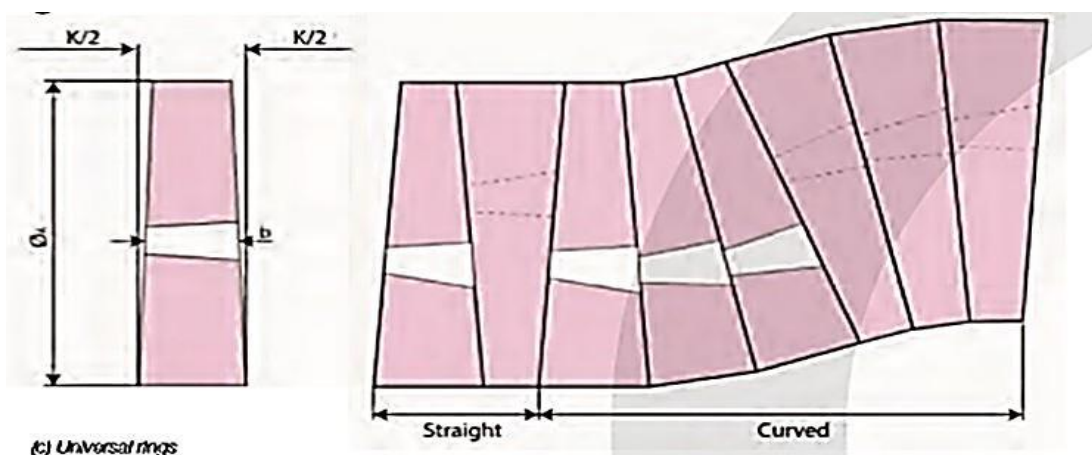
- Ρομβοειδή(rhomboidal), αποτελείται από παραλληλόγραμμα στοιχεία με το key segment και counter key segment να έχουν σχήμα τραπεζοειδές. Πρώτα τοποθετείται το counter key τραπεζοειδές στοιχείο και ακολουθούν εναλλάξ τα υπόλοιπα δεξιά και αριστερά του counter key μορφώνοντας έτσι τον δακτύλιο. Η διάταξη φαίνεται στο **(Σχήμα 2.11.3 δ)**.



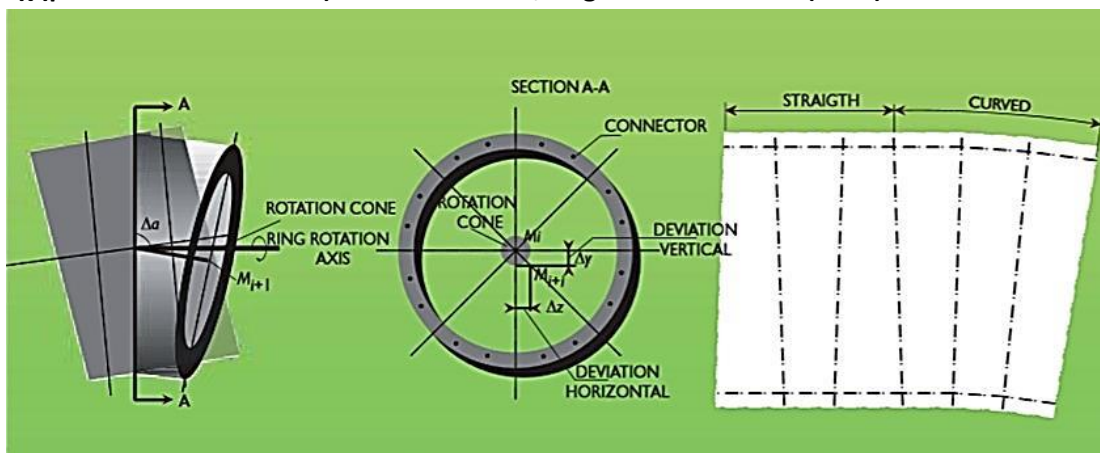
Σχήμα 2.2.3.8 στ: Διάταξη ρομβοειδών-παραλληλόγραμμων στοιχείων, (ITA-WG2,2000)

2.11.4 Δακτύλιος τύπου Universal

Τέλος, η σύγχρονη τάση είναι να επικρατεί το στοιχείο τύπου Universal γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευθύγραμμα και καμπύλα τμήματα της σήραγγας χάρη στο γεωμετρικό χαρακτηριστικό του, την κωνικότητά του, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου μήκους του. Αυτή η διαφορά του επιτρέπει να ακολουθήσει την χάραξη της σήραγγας ως έχει διορθώνοντας με την γεωμετρία του τυχόν αποκλίσεις, λάθη που οφείλονται στην προχώρηση της μηχανής TBM. Οι δακτύλιοι αυτοί συναρμολογούνται με επιμέρους στοιχεία τα οποία έχουν διαφορετικές τις δύο απέναντι πλευρές και μπορούν να ακολουθούν οριζόντια καμπύλη και εγκάρσια καμπύλη την ίδια χρονική στιγμή όπως φαίνεται στο (Σχήμα 2.11.4 α). Για την ακολουθία ευθύγραμμης χάραξης της σήραγγας πρέπει ο ένας δακτύλιος να περιστραφεί κατά 180° σε σχέση με τον αμέσως προηγούμενο και τοποθετώντας το key segment και στην κορυφή και στη βάση του δακτυλίου (Σχήμα 2.11.4 β). Το κάθε στοιχείο του δακτυλίου τοποθετείται δίπλα στο άλλο στοιχείο του δακτυλίου με διαφορά κατά την έννοια του μήκους 10mm. Η ανοχή στις διαμέτρους που μετρώνται στις διάφορες διευθύνσεις σε έναν τοποθετημένο δακτύλιο είναι τάξης 2% της ονομαστικής διαμέτρου του δακτυλίου (όχι μικρότερες ή μεγαλύτερες από 2% της δ_{nom})



Σχήμα 2.11.4 α: Δακτύλιος τύπου Universal, Guglielmetti V. et al. (2007)



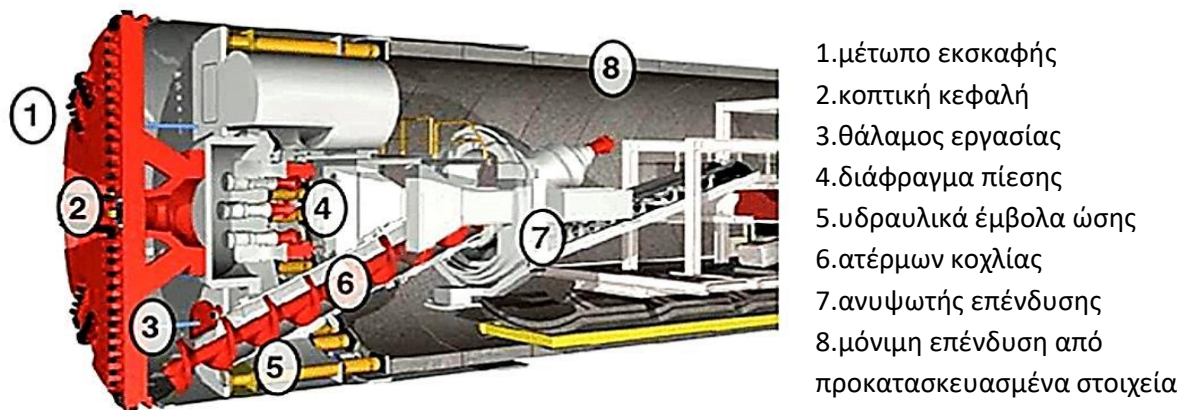
Σχήμα 2.11.4 β: Ευθύγραμμη και Καμπύλη χάραξη σε δακτύλιο Universal, Guglielmetti V. et al. (2007)

2.12 Διάνοιξη με μηχανές ολομέτωπης κοπής με ασπίδες SM

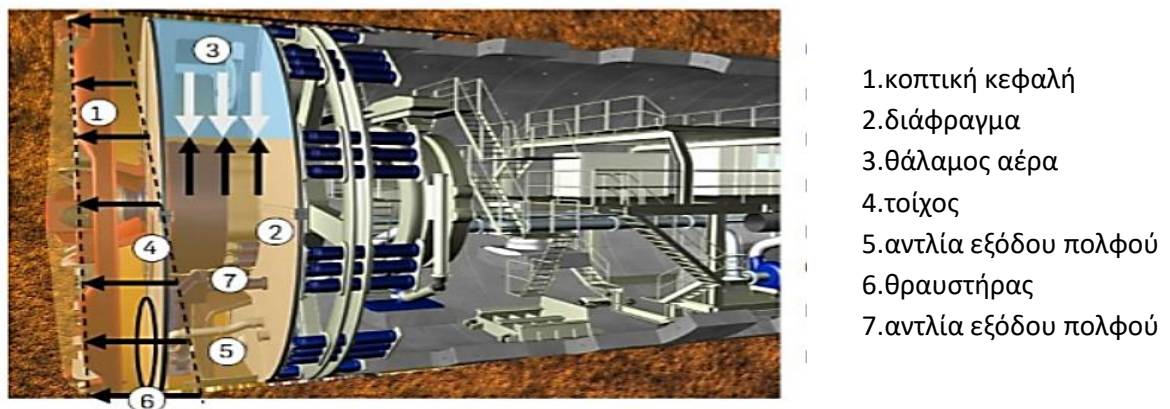
2.12.1 Βασικά Μέρη μηχανής ολομέτωπης κοπής-TBM με ασπίδα

Ένα TBM με ασπίδα μία ή δύο ασπίδες έχει τα ίδια βασικά τέσσερα συστήματα που αναφέρθηκαν με την διαφορά της διαφορετικής λειτουργίας τους στο μηχανολογικό εξοπλισμό και στον τρόπο λειτουργίας των τεσσάρων συστημάτων τους. Στην ασπίδα τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ο θάλαμος εργασίας όπου μεταφέρονται τα θραύσματα και είτε ανακατεύονται με πολφό slurry είτε ως έχουν μεταφέρονται με το σύστημα αποκομιδής στην έξοδο της μηχανής. Πίσω από το θάλαμο είναι το κύριο εφέδρανο με σύστημα κινητήρων μετάδοσης κίνησης της κεφαλής και τα υδραυλικά έμβολα ώσης.

Η μετάδοση της κίνησης γίνεται με κυλινδρικούς γρύλους που δίνουν την απαιτούμενη ροπής στρέψης στην κεφαλή και η προώθηση της γίνεται από τα υδραυλικά έμβολα ώσης τα οποία στηρίζονται στην επένδυση της σήραγγας και με την επιμήκυνσή τους ωθούν τη μηχανή στην αντίθετη κατεύθυνση. Ακόμα το TB έχει τα συστήματα αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, τον ανυψωτή για την εγκατάσταση μόνιμης επένδυσης (Σχήμα 2.12.1 α, β) και πέδιλα στήριξης.



Σχήμα 2.2.2 α: Earth Pressure Balance Shield Machine, EPB, (Herrenknecht)



Σχήμα 2.12.1 β: Slurry Shield Machine, (Herrenknecht)

2.12.2 Βασικές αρχές

Τα μηχανήματα διάνοιξης σήραγγων διακρίνονται γενικά σε εκείνα που διατρούν σε συμπαγή πετρώματα τα TBM με ωστήρες πάκτωσης και σε μηχανές TBM με ασπίδα που εφαρμόζονται σε μαλακό έδαφος και παρέχουν προσωρινή υποστήριξη στην κοιλότητα που εκσκάπτεται, προστασία στον μηχανολογικό εξοπλισμό και στο εργατικό προσωπικό.

Η ασπίδα είναι χαλύβδινη κυλινδρική κατασκευή που περιβάλλει ολομέτωπα ή μερικώς τα μηχανήματα TBM και οδηγείται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας συγχρόνως με την εκσκαφή του εδάφους. Λειτουργεί ως μέσο προσωρινής στήριξης μετώπου όταν αυτό απαιτείται βάσει της ευστάθειας του μετώπου και περιφερειακά παθητικά στηρίζοντας τα τοιχώματα της σήραγγας μέσω της αντίστασης της ασπίδας στο περιβάλλον γεωυλικό.

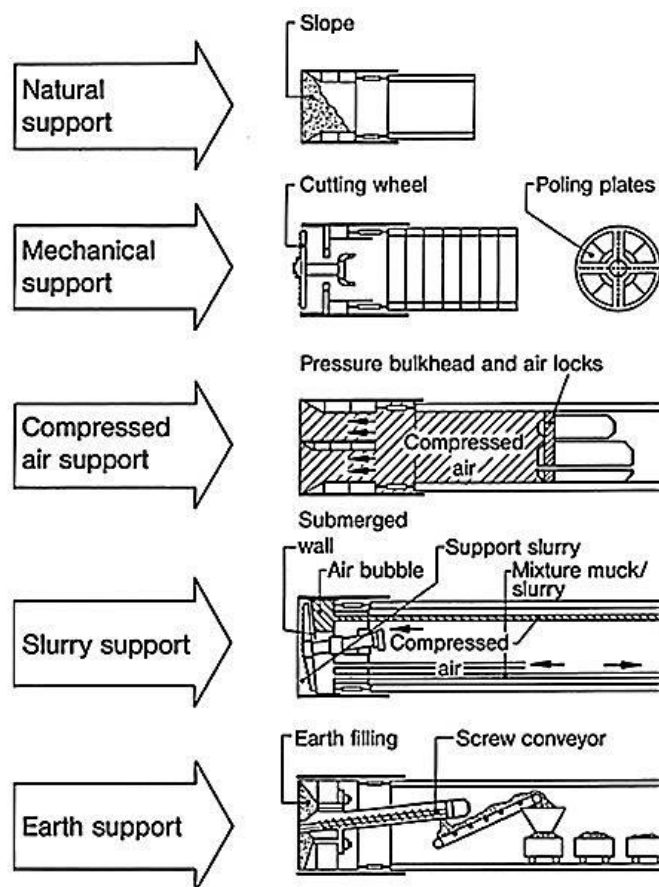
Το πεδίο εφαρμογής μηχανών με ασπίδα είναι σε πέτρωμα ασταθές, εύθρυπτα πετρώματα, πετρώματα (ενδεικτικά αναφέρονται, εύρος RQD μεταξύ 10 και 50%, θλιπτική αντοχή βράχου μεταξύ 5 και 50 [MPa]), χαλαρό έδαφος που βρίσκεται παρουσία ή μη υδροφόρου ορίζοντα και σε έδαφος που δεν προσφέρεται για να αντέξει τις δυνάμεις από τους ωστήρες πάκτωσης και η αντιστήριξη της μηχανής γίνεται μέσω των εμβόλων που στηρίζονται στο τελευταίο δακτύλιο της μόνιμης επένδυσης, τα segments. Η ασπίδα πρέπει κατά την προώθησή της να αντιστέκεται στο περιβάλλον έδαφος και να συγκρατεί την ενδεχόμενη εισροή υπόγειων υδάτων.

Η βασική διαφορά των μηχανών διάτρησης TBM με τις μηχανές με ασπίδα είναι η μη συνεχόμενη διάτρηση-υποστήριξη με μεταλλικά πλαίσια, ολισθαίνοντα πλαίσια, δικτυωτά πλαίσια, αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από τα πρώτα και η συνεχής εκσκαφή-υποστήριξη από τις μηχανές με ασπίδα. Τα TBM αποκόπτουν τον βράχο και σταθεροποιούνται με τους ωστήρες πάκτωσης με την στήριξη της σήραγγας να γίνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και σε απόσταση περί τα 10-15m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, ενώ στις μηχανές με ασπίδα παράλληλα με την εκσκαφή τοποθετείται η υποστήριξη με προκατασκευασμένα στοιχεία segments μέσα στο προστατευτικό ουραίο τμήμα της ασπίδας. Μέχρι την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης από τα segments η κοιλότητα εκσκαφής υποστηρίζεται παθητικά από την ασπίδα. Σε περιπτώσεις έντονης αστάθειας του πετρώματος η στήριξη στα TBM γίνεται ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή και λαμβάνονται μέτρα προενίσχυσης μετώπου με ελαφρές δοκούς (spiles).

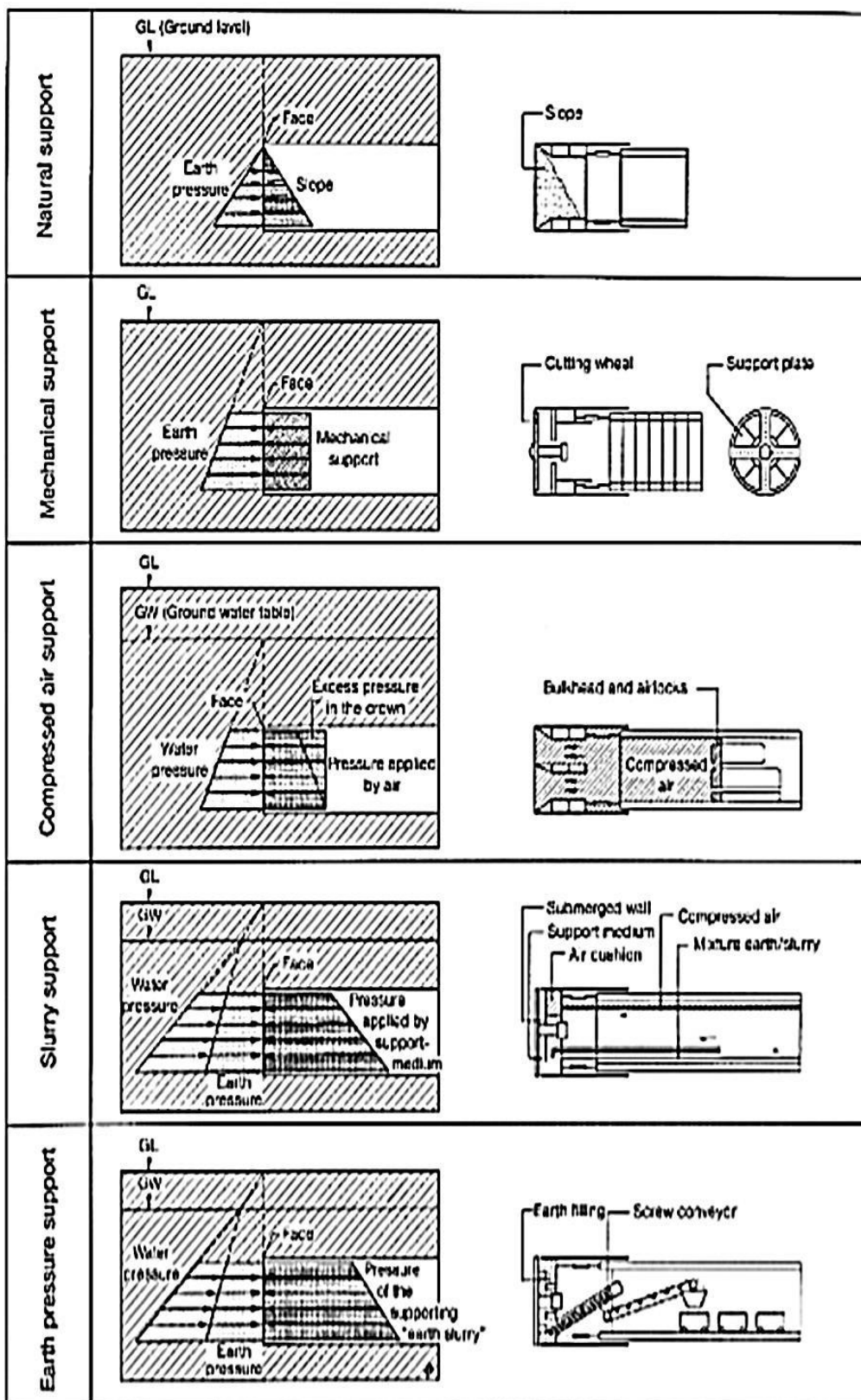
Η προώθηση της μηχανής γίνεται με την πίεση των εμβόλων στα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης. Η κίνηση της μηχανής εκσκαφής γίνεται όταν έχει ολοκληρωθεί ο προηγούμενος κύκλος κατασκευής της υποστήριξης έτσι ώστε κάθε φορά να ολοκληρώνεται ένας κύκλος εκσκαφής και κατασκευής της υποστήριξης (**ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009**).

2.12.3 Μέθοδοι υποστήριξης του μετώπου

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μηχανών με ασπίδα είναι ο τρόπος στήριξης του μετώπου εκσκαφής αναλόγως την ποιότητά του και στηρίζοντας το μέτωπο ελέγχονται οι μετακινήσεις πέριξ της κοιλότητας. Ενιαίο καθολικό σύστημα ταξινόμησης των μηχανών δεν έχει ακόμα επιτευχθεί από τις διεθνείς επιστημονικές αρχές. Η κατάταξη των μηχανών με βάση τις Γερμανικές αρχές της DAUB βάσει του είδους υποστήριξης στο μέτωπο και συγκράτησης του νερού στο μέτωπο διακρίνονται σε πέντε συστήματα υποστήριξης. Αυτά είναι η συμβατική στήριξη, η μηχανική υποστήριξη, η χρήση πεπιεσμένου αέρα, η χρήση πολφού και η εξισορρόπηση μέσω εδαφικής πίεσης όπως φαίνεται στο ακόλουθο (Σχήμα 2.12.3 α, α'). Σημαντική παράμετρος στην επιλογή της μηχανής με ασπίδα είναι η μέθοδος διάνοιξης την οποία ο Ανάδοχος επιλέγει μαζί με τις εργασίες έναρξης και λήξης της εκσκαφής. Ο Ανάδοχος είναι υπεύθυνος για την μέθοδο μεταφοράς και συναρμολόγησης της μηχανής και της ασπίδας, της μεθόδου διάνοιξης μαζί με τον βοηθητικό εξοπλισμό και τα βελτιωτικά μέσα εδάφους, υπεύθυνος για τις διατάξεις ώθησης της μηχανής, τον προσδιορισμό γεωλογικών συνθηκών, προσδιορισμό κρυμμένων υπόγειων κατασκευών, ορίζει την μέθοδο παρακολούθησης απωλειών εδαφικού όγκου πέριξ του μετώπου κατά την διάνοιξη και την ενόργανη παρακολούθηση των καθιζήσεων. Πριν από την έναρξη εργασιών εξασφαλίζει την ορθή λειτουργία των μηχανών, των συστημάτων μεταφοράς των άμεσης υποστήριξης και της τελικής επένδυσης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009).



Σχήμα 2.12.3 α: Μέθοδοι στήριξης του μετώπου και συγκράτησης του νερού στο μέτωπο εκσκαφής,(Maidl et al, 2011)



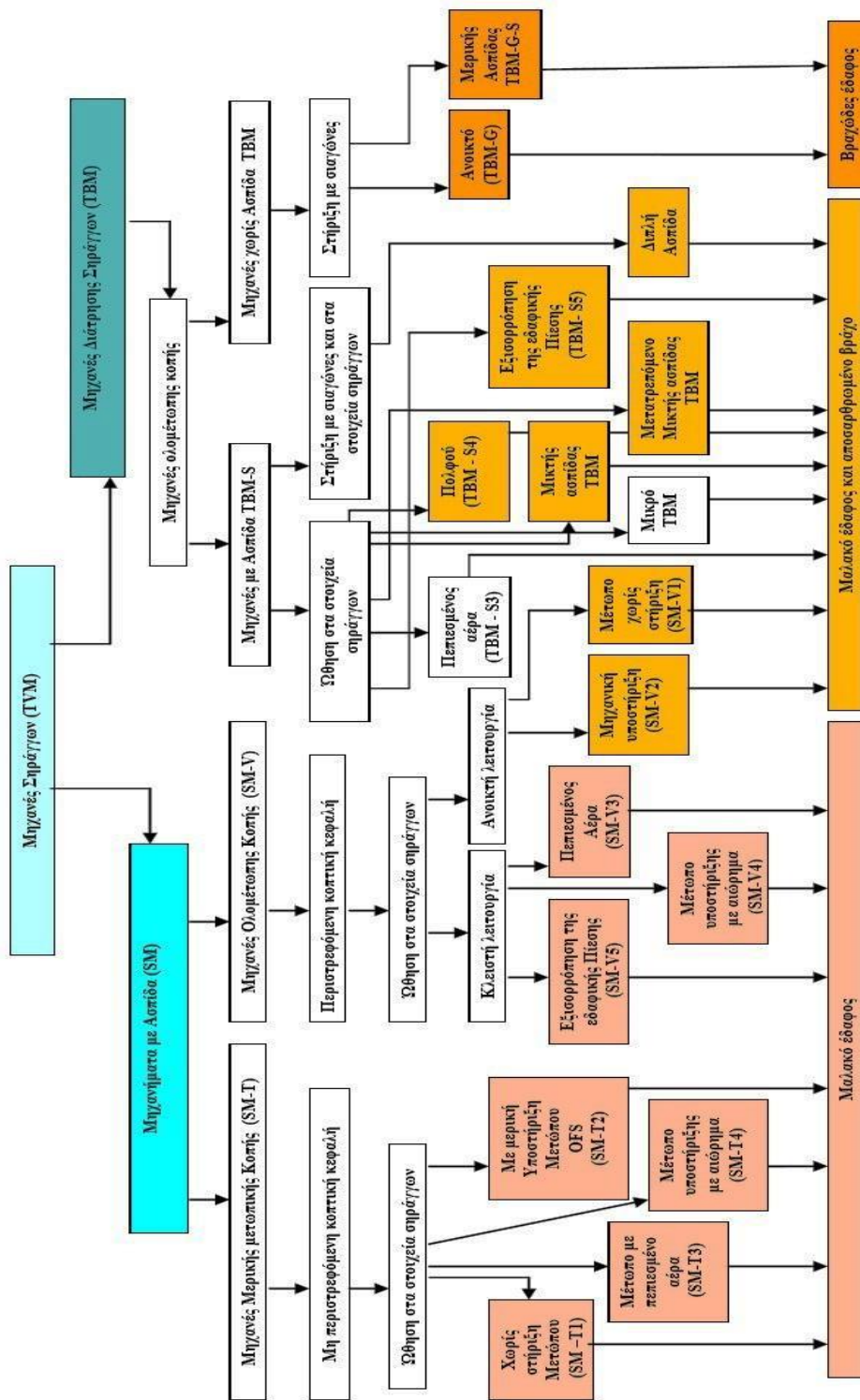
Σχήμα 2.12.3 α' :Μέθοδοι στήριξης του μετώπου και συγκράτησης του νερού, (Maidl et al, 2013)

Με κριτήριο την υποστήριξη του μετώπου κατά τον “ **Northfield (1998)**” διακρίνονται σε ανοικτού μετώπου πλήρους και κλειστού, **(Κωστόπουλος Σ.)**

- Ανοικτού μετώπου, όπου το μέτωπο εκσκαφής είναι σταθερό κάθετο ή με απότομη κλίση και δεν απαιτείται υποστήριξη μέσω της μηχανής. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε βραχώδεις σχηματισμούς, σταθερά συνεκτικά εδάφη όπως στιφρές αργίλους και σε μαλακούς βράχους όπου αναμένεται υψηλός ρυθμός προχώρησης της τάξεως 200mm/min. Μηχανές με ασπίδα χωρίς υποστήριξη μετώπου είναι οι μηχανές σημειακής προσβολής PFM's που φέρουν κοπτικό βραχίονα , οι φρέζες Roadeaders, οι υδραυλικές τσάπες. Το ορυσσόμενο υλικό μεταφέρεται μέσω μεταφορικού ιμάντα. Το ανυποστήρικτο τμήμα μεταξύ της κοιλότητας εκσκαφής και της περιβάλλουσας βραχώμαζας («φέρων δακτύλιος») υποστηρίζεται μερικώς από την ασπίδα έναντι πιθανών καταπτώσεων βράχων.
- Πλήρους μετώπου, όταν το μέτωπο είναι ανυποστήρικτο με εφαρμογή των μηχανών σε συνεκτικά εδάφη. Η διάνοιξη γίνεται ενιαία με περιστρεφόμενο τύμπανο την κοπτική κεφαλή η οποία φέρει τα κοπτικά εργαλεία δίσκους οδόντες. Χρησιμοποιούνται σε αυτή την μέθοδο διάνοιξης οι μηχανές TBM-Gripper Shield.
- Κλειστού μετώπου, όπου ο χώρος της κοπτικής κεφαλής που είναι υπό πίεση απομονώνεται από το σώμα της υπόλοιπης ασπίδας μέσω ενός στεγανού διαφράγματος. Στον κλειστό χώρο της κεφαλής υπάρχει πεπιεσμένος αέρας με πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, , (υπερβαρικός θάλαμος εργασίας) ή πολφός αιωρήματος μπετονίτη, είτε και λάσπη. Εφαρμόζονται οι ασπίδες κλειστού μετώπου εφόσον το ασταθές μέτωπο δεν υποστηρίζεται επαρκώς από τη κοπτική κεφαλή που το πιέζει καθώς εισχωρούν τα κοπτικά εργαλεία με τρόπο σαν να το συγκρατούν, ή όταν υπάρχουν εισρέοντα νερά . Αναλόγως της μεθόδου πίεσης στο μέτωπο οι ασπίδες κλειστού μετώπου χωρίζονται σε:
 - α) πεπιεσμένου αέρα - Compressed Air Shield
 - β) αιωρήματος πολφού μπετονίτη – Slurry Pressure Balance TBM
 - γ) εδαφικής αντισταθμιστικής πίεσης μέσω λάσπης, ή μέσω αφρού ή μέσω αφρού συνοδεία πολυμερών με πίεση νερού ή μέσω αφρού με πολυμερή και νερού χωρίς πίεση - Earth Pressure Balance TBM

2.13 Ταξινόμηση των Μηχανών

Από τις διεθνείς κοινότητες δεν υπάρχει ενιαίο σύστημα διάκρισης των μηχανών. Η ταξινόμηση των μηχανών διάνοιξης σηράγγων, σύμφωνα με τις Γερμανικές, Ελβετικές και Αυστριακές προδιαγραφές φαίνεται **(Σχήμα 2.13 α)**. Οι μηχανές διάνοιξης σηράγγων [TVM] διακρίνονται σε Μηχανές μαλακών σχηματισμών με ασπίδα [SM] και σε μηχανές σκληρών πετρωμάτων [TBM]. Η διάκριση αυτή μεταξύ των μηχανών TBM και SM, βασίζεται σε διαφορές στον υποστηρικτικό εξοπλισμό, καθώς και στις τεχνικές κοπής που χρησιμοποιούν.

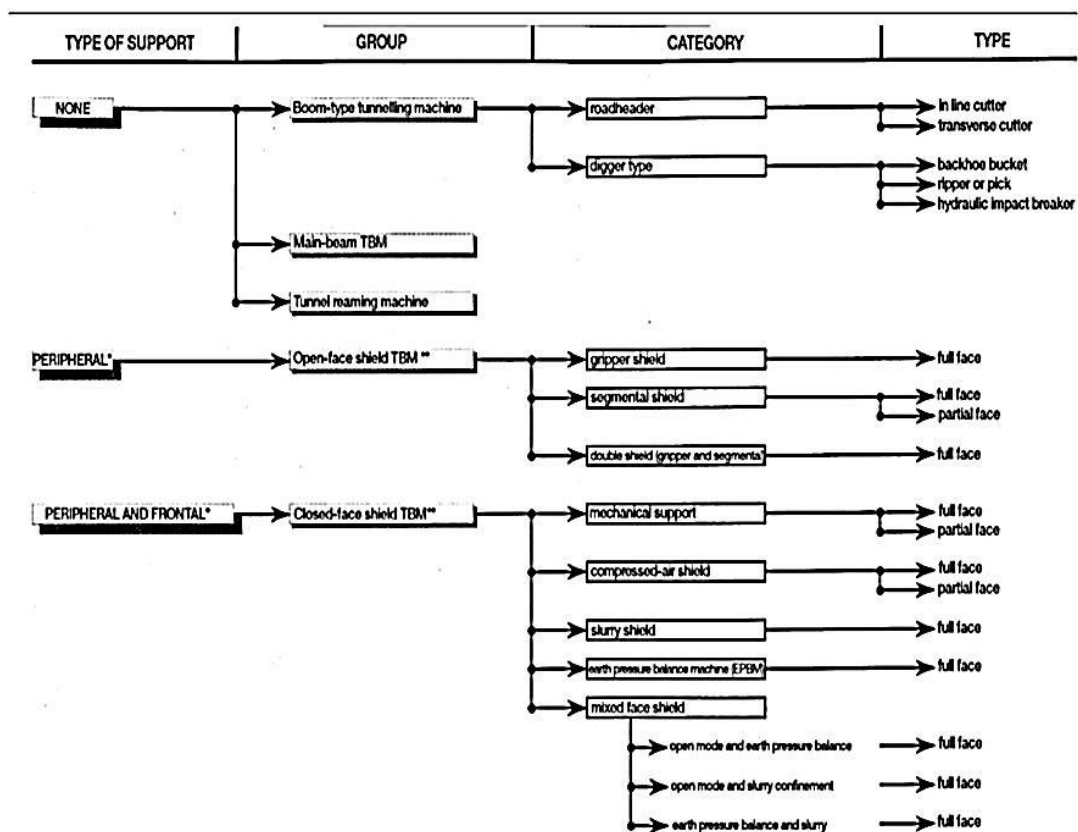


Κατάταξη TBM κατά DAUB, OGG, FGSV, SLA

Σχήμα 2.13 α : Διάκριση μηχανών σύμφωνα με τις προδιαγραφές της DAUB, (Σοφιανός Α.Ι, 2017)

Κατά τη Γαλλική Ένωση Σηραγγοποιίας (AFTES) (Σχήμα 2.13 β) διακρίνονται με βάση το σύστημα στήριξης της μηχανής κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Την ίδια ταξινόμηση ακολουθεί και η ελληνική προδιαγραφή (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009). Η στήριξη της μηχανής στο μέτωπο και τα τοιχώματα της σήραγγας μπορεί να είναι:

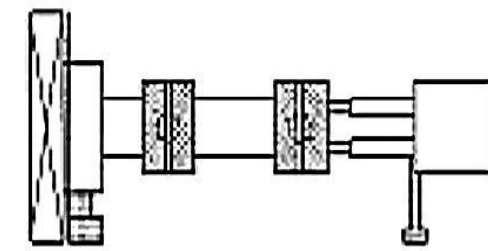
- i) καθόλου στήριξη (μηχανή χωρίς ασπίδα)
- ii) στήριξη μόνο στα τοιχώματα περιφερειακή (ανοιχτή ασπίδα)
- iii) στήριξη στο μέτωπο και στα τοιχώματα με κλειστό σύστημα πίεσης (κλειστή ασπίδα)



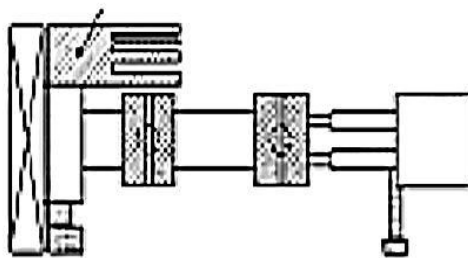
Σχήμα 2.13 β. Ταξινόμηση Μηχανών κατά τις γαλλικές προδιαγραφές με βάση την στήριξη που προσφέρουν στο μέτωπο εκσκαφής. Πηγή: ITA

Στην πρώτη κατηγορία είναι οι μηχανές κύριας κεντρικής δοκού χωρίς ασπίδα και προωθούνται με ωσθήρες πάκτωσης όπως φαίνονται στο (Σχήμα 2.13 γ). Αυτά είναι

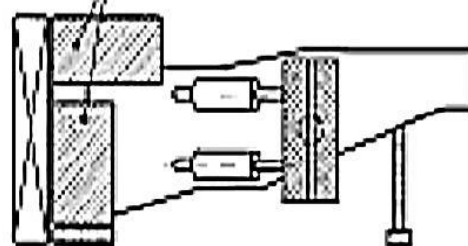
- (α) τα TBM-G περιφερειακά ανοιχτά
- (β) τα TBM με ασπίδα οροφής για προστασία από καταπτώσεις βράχων
- (γ) τα TBM με ασπίδα οροφής και πλευρικά πέδιλα αντιστήριξης της μηχανής
- (δ) τα TBM GS με ασπίδα στην κοπτική κεφαλή



(α) Περιφερειακά ανοικτό (TBM-G)



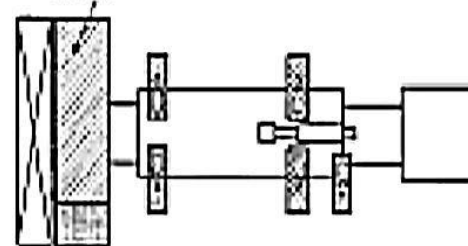
(β) TBM με ασπίδα οροφής



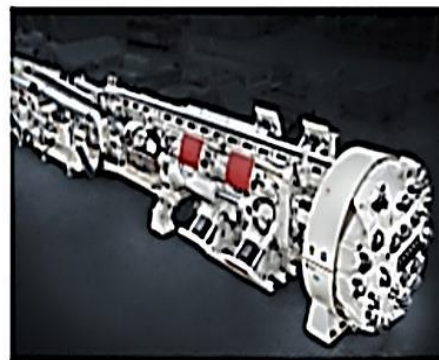
(γ) TBM με ασπίδα οροφής και πλευρικά πέδιλα καθοδήγησης



TBM Robbins



(δ) TBM με ασπίδα κοπτικής κεφαλής (TBM-GS)



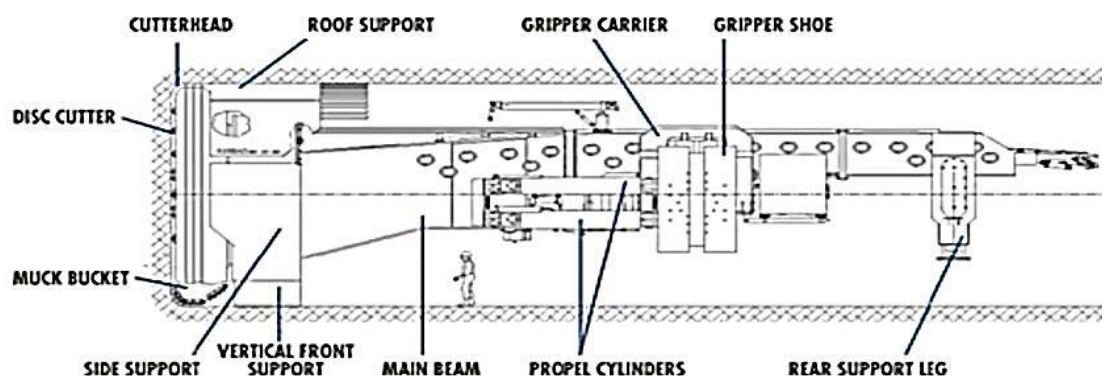
Σχήμα 2.13 γ: TBM για σκληρά πετρώματα με ωστήρες πάκτωσης, (Σοφιανός Α.Ι,2017)

2.14 Μηχανές κύριας δοκού

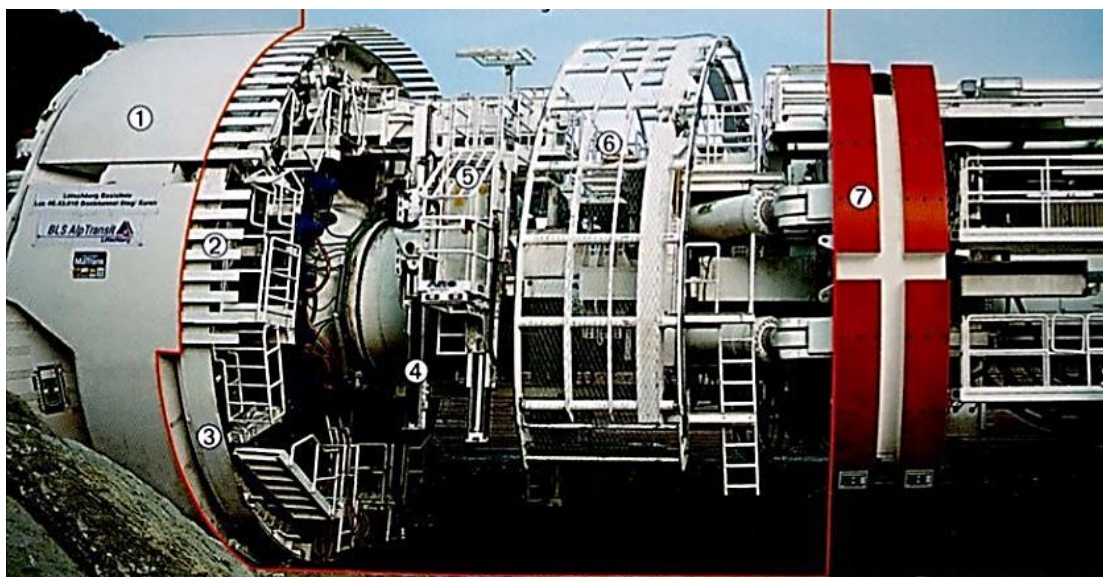
2.14.1 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα οροφής: TBM-GS

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής που δεν διαθέτουν ασπίδα και η προώθησή τους γίνεται με ωστήρες πάκτωσης-Grippers- τύπου TBM-G λειτουργούν με ανοικτό μέτωπο διάτρησης. Η προώθηση τη μηχανής επιτυγχάνεται μέσω υδραυλικών πεδύλων. Η εκσκαφή πραγματοποιείται με κοπτική περιστρεφόμενη κεφαλή εξοπλισμένη με δίσκους κοπής οι οποίοι που ασκούν την απαιτούμενη πίεση στο πέτρωμα για την διάνοιξη της σήραγγας. Εφαρμόζονται σε σκληρά αρηγμάτιστα πετρώματα με μέση έως υψηλή ευστάθεια του μετώπου και από 2 έως 14m διάμετρο εκσκαφής. Η ευστάθεια του μετώπου μπορεί να υποστηριχθεί με προσωρινά μέτρα στήριξης όπως αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ο εξοπλισμός του Gripper TBM περιλαμβάνει τέσσερα συστήματα:

- Το σύστημα διάτρησης, την κεφαλή κοπής εξοπλισμένη με περιστρεφόμενους δίσκους κοπής αναλόγως της σκληρότητας του βράχου
- Η προώθηση της μηχανής επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την πλευρική αντιστήριξη με τα πέδιλα στήριξης ένα ζεύγος ή δύο τύπου χιαστί, τα οποία ασκούν πλευρική δύναμη επί των τοιχωμάτων της σήραγγας.
- Σύστημα εγκατάστασης μέτρων υποστήριξης αγκυρίων, δομικού πλέγματος, μεταλλικών πλαισίων
- Θάλαμο εργασίας του προσωπικού
- Σύστημα μεταφορικής ταινίας
- Σύστημα πλοήγησης και μετάδοσης κίνησης της κεφαλής με υδραυλικό, ηλεκτρικό σύστημα κινητήρων.



Σχήμα 2.14.1 α: Διαμήκης τομή ανοιχτού Gripper Main Beam TBM χωρίς ασπίδα (Robbins Company TBM).



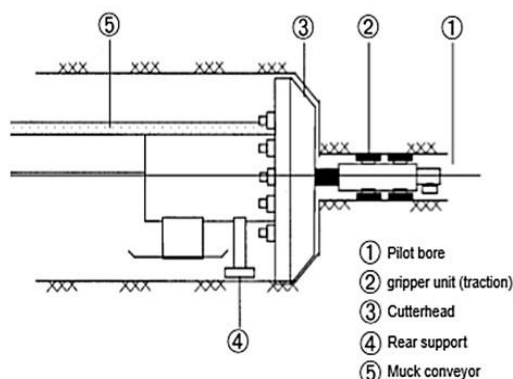
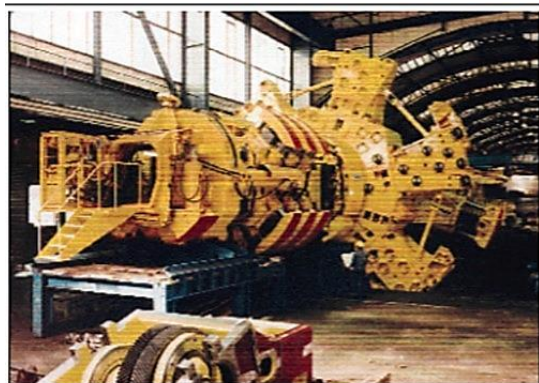
Σχήμα 2.14.1 α': Τμήματα TBM-GS 1)προστασία της κεφαλής, 2)λωρίδες προστασίας, 3)ανυψωτής πλαισίων, 4)διατρητικά αγκυριών, 5)οροφές ασφαλείας, 6)ανυψωτής δομικού πλέγματος, 7)ζεύγος ωστήρων πάκτωσης, (Σοφιανός Α.Ι, 2017)

2.14.2 Μηχανή διεύρυνσης (Reamer TBM) χωρίς ασπίδα

Ανήκουν στις μηχανές οριζόντιας όρυξης χωρίς πλήρη κυκλική ασπίδα (Σχήμα 2.14.2) με διάμετρο κοπτικής κεφαλής από 1 έως 8m και προωθούνται με ωστήρες πάκτωσης. Χρησιμοποιούνται πιλοτικά για την διεύρυνση μιας αξονικής μικρότερης σήραγγας που πρωτίστως είχε διανοιχθεί με TBM. Το πεδίο εφαρμογής τους ποικίλλει σε βραχώμαζες ποιότητας από πολύ σκληρό συμπαγή βράχο έως μέτριο έδαφος. Η λειτουργία τους είναι ίδια με αυτή του TBM χωρίς ασπίδα, με εξοπλισμό που περιλαμβάνει τα κάτωθι:

- Περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή διεύρυνσης στοών μέσω διευθυντικής στοάς και με τα κοπτικά εργαλεία τοποθετημένα στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή (Σχήμα..)
- Δύο ζεύγη ωστήρων πάκτωσης εντός της διευθυντικής στοάς και μπροστά από την κοπτική κεφαλή διεύρυνσης
- Έμβολα πρόωθησης
- Το σύστημα πλοήγησης και ο ηλεκτρικός, μηχανικός, υδραυλικός εξοπλισμός
- Αποκομιδή των εδαφικών υλικών

Η διεύρυνση μέσω της διευθυντικής στοάς έχει πλεονεκτήματα όπως, την διερεύνηση του εδάφους με την προχώρηση της μηχανής, την στερεοποίηση του εδάφους με χαμηλή αντοχή πριν την πλήρη εκσκαφή, την αποστράγγιση του εδάφους πριν την εκσκαφής

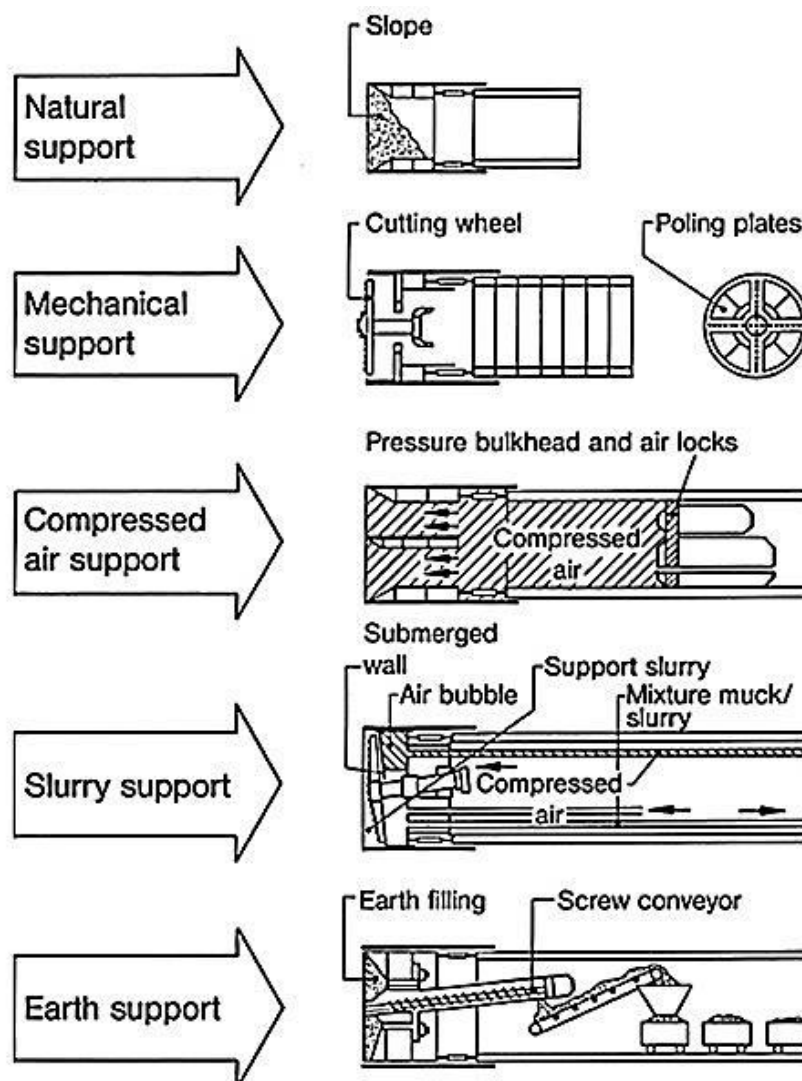


Σχήμα 2.14.2: Διάνοιξη σήραγγας με διεύρυνση, Sauges Tunnel (Switzerland), Τομή Reamer TBM , (AFTES)

2.14.3 TBM μερικής ασπίδας, TBM-G-S

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα είναι εξοπλισμένα είτε με κλειστού τύπου ασπίδα είτε με ανοιχτή, η διάκριση γίνεται βάσει της κεφαλής κοπής που διαθέτει διαφορετικά κοπτικά εργαλεία αναλόγως της ποιότητας της βραχώμαζας. Τα κλειστού τύπου είναι εξοπλισμένα με σώμα κλειστής ασπίδας και έχουν εύρος εφαρμογής σε συμπαγή έως εύθραυστο βράχο με σταθερό μέτωπο. Τα ανοιχτής λειτουργίας μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα TBM-G-S είναι ίδια με τα μηχανήματα κύριας δοκού “main beam TBM” με τη διαφορά ότι τα πρώτα περιβάλλονται από την ασπίδα. Η ασπίδα μπορεί να είναι μονή ή και να διαιρείται σε δύο μέρη κατά το μήκος του μηχανήματος μεικτή. Χρησιμοποιούνται σε χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες, στις περιπτώσεις που τα TBM Gripper δεν μπορούν να εφαρμοστούν όταν η περιβάλλουσα βραχώμαζα αδυνατεί να αναλάβει τις τάσεις των πεδίων στήριξης στα τοιχώματά της.

Έτσι, σε βραχώμαζες χαμηλής θλιπτικής αντοχής και σε διαταραγμένους εδαφικούς σχηματισμούς με ασταθή μέτωπα η υποστήριξη του μετώπου με μηχανική υποστήριξη καθίσταται αναγκαία και επιτυγχάνεται με το κέλυφος της ασπίδας που καλύπτει όλο το μηχανήμα και η οποία λειτουργεί ως προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. Εν γένει τα μηχανήματα με ασπίδες έχουν εφαρμογή σε εύθραυστα πετρώματα (ενδεικτικά αναφέρονται, εύρος RQD μεταξύ 10 και 50%, θλιπτική αντοχή βράχου μεταξύ 5 και 50 [MPa]) με ή άνευ παρουσία υδάτων και ασταθές μέτωπο που πρέπει να υποστηριχθεί. Αναλόγως την ποιότητα της βραχώμαζας επιλέγεται ο μηχανισμός στήριξης του μετώπου. Μέθοδοι υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής φαίνονται στο **(Σχήμα 2.14.3 α)**



Σχήμα 2.14.3: Μέθοδοι στήριξης μετώπου εκσκαφής κατά Maidl (1995)

Σε περίπτωση που το μέτωπο είναι ευσταθές, το μηχάνημα TBM-G-S είναι εξοπλισμένο με ασπίδα ανοιχτής λειτουργίας η οποία προσφέρει άμεση υποστήριξη στα εκτεθειμένα τοιχώματα της σήραγγας ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή, ενώ δεν δύναται η υποστήριξη στο μέτωπο. Σε αντίθετη περίπτωση ασταθούς μετώπου χρησιμοποιείται κλειστό σύστημα που υποστηρίζει περιμετρικά τα τοιχώματα και το μέτωπο. Στην ανοιχτή λειτουργία η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος φέρει εργαλεία κοπής που αφαιρούν το έδαφος και η αποκομιδή του γεωυλικού επιτελείται με την βοήθεια μεταφορικών ταινιών.

Στην κλειστή λειτουργία η υποστήριξη μετώπου γίνεται από μια σχεδόν κλειστή κεφαλή κοπής με την εδαφική μάζα που εξορύσσεται να διαπερνά από σχισμές μεταβλητού ανοίγματος και απομακρύνεται με ταινίες μεταφοράς. Η τελική μόνιμη επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος, ενώ το σύστημα υποσύλωσης τοποθετείται κάτω από το «ουραίο» τμήμα “tail skin- sealing” της ασπίδας. Η μόνιμη τελική επένδυση μέσω των υδραυλικών κυλίνδρων θραύσης, χρησιμεύει ως βάση για την δύναμη πρόωσης.

2.15 Μηχανές με ασπίδα ολομέτωπης κοπής και μερικής κοπής

Οι μηχανές με ασπίδα μερικής κοπής και ολομέτωπης κοπής παρέχουν προσωρινή στήριξη στο μέτωπο εκσκαφής αλλά και στη σήραγγα περιφερειακά. Εφαρμόζονται σε ασταθές έδαφος, συμπαγή βράχο με μικρή ευστάθεια, εύθρυπτο βράχο και χαλαρά εδάφη με ή χωρίς την παρουσία υπόγειων υδάτων. Τέλος, η προώθηση των μηχανών αυτών γίνεται με έμβολα που πιέζουν τα προκατασκευασμένα στοιχεία της μόνιμης επένδυσης.

Τα πλεονεκτήματα στις μηχανές ολομέτωπης κοπής είναι

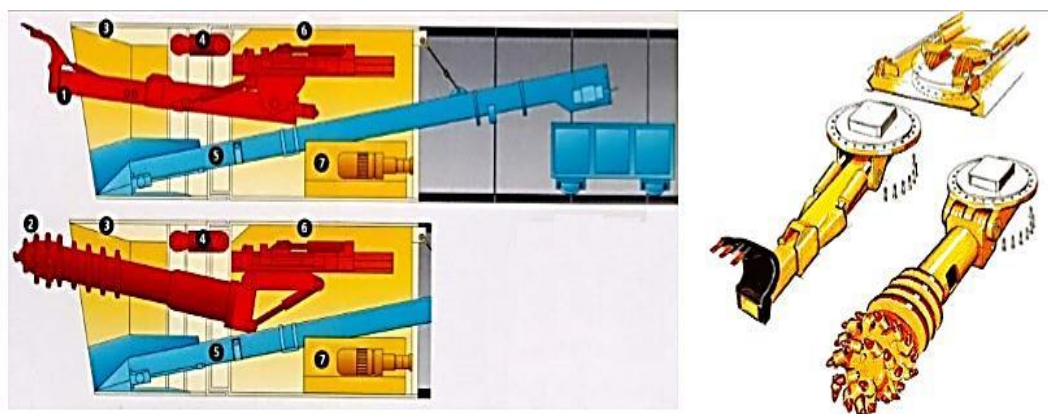
- Η εκσκαφή γίνεται με ακρίβεια χωρίς υπέρ-εκσκαφές
- Το περίγραμμα του μετώπου κατά την διάνοιξη παραμένει αμετάβλητο
- Επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί προχώρησης

2.15.1 Μηχάνημα χωρίς στήριξη μετώπου (SM_T1)

Είναι μηχάνημα μερικής κοπής αποτελούμενο από ανοιχτή ασπίδα και εργαλείο εξόρυξης βραχίονας φρέζας ή εκσκαφέας. Τα προϊόντα εκσκαφής μεταφέρονται διαμέσου τηλεσκοπικών κάδων προσαρτημένων σε κάθε πλευρά της κεφαλής σημειακής κοπής, στη χοάνη του ατέρμονα κοχλίας ο οποίος και τα αποθέτει στον μεταφορικό ιμάντα. Ο ατέρμων μεταφορικός κοχλίας είναι εδράζεται στην εμπρόσθια και οπίσθια ασπίδα. Τυπικά παραδείγματα αυτών των μηχανών δίνονται στα (Σχήμα 2.15.1 α, β)



Σχήμα 2.15.1 α: Μηχανή μερικής κοπής με ασπίδα SM-T1 (Σοφιανός Α.Ι, 2018)



Σχήμα 2.15.1 β: Κοπτικά μέσα (εκσκαφέας και φρέζα), 1-εκσκαφέας, 2-βραχίονας φρέζας, 3-ασπίδα, 4-έμβολο, 5-μεταφορικός ιμάντας, (Σοφιανός Α.Ι, 2018)

2.15.2 Μηχάνημα μερικής στήριξης μετώπου (OFS, SM_T2)

Είναι μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου χρησιμοποιείται σε μαλακά λυώδη εδάφη και σε συνεκτική άργιλο. Αποτελείται από την εμπρόσθια και οπίσθια ασπίδα. Το περίβλημα της ασπίδας. Η εμπρόσθια ασπίδα περιλαμβάνει πλάκες προ-πορείας, τον βραχίονα κοπής, τους τηλεσκοπικούς κάδους φόρτωσης, διατρητικά, τα έμβολα στήριξης του μετώπου, την καμπίνα χειρισμών και τον ατέρμων κοχλία. Η οπίσθια τον μηχανικό εξοπλισμό ανύψωσης για την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης, τα σημεία έγχυσης ενέματος, και το σύστημα άντλησης των υδάτων. Η αποκομιδή των μπαζών είναι ίδια με αυτήν της μηχανής SM-T1. Το μειονέκτημα της μηχανής ανοιχτού μετώπου είναι η αδυναμία ελεγχόμενης στήριξης του μετώπου με αποτέλεσμα απερχόμενες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 2.15.2: Ασπίδες SM-T2, ε βραχίονα εκσκαφέα και βραχίονα φρέζας διαμέτρου 9495mm που χρησιμοποιήθηκε για την διάνοιξη 1911m στη γραμμή 2 του μετρό της Αθήνας, (Σοφιανός Α.Ι, 2018)

2.15.3 Μηχάνημα πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air, SM_T3, SM_V3)

Το εύρος εφαρμογής και στις δύο μηχανές είναι είναι μαλακά εδάφη κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα χαμηλής διαπερατότητας.

- Στην μηχανή SM_T3 η εκσκαφή γίνεται μερικώς στο μέτωπο από κατάλληλους βραχίονες (εκσκαφείς ή φρέζες). Η στήριξη του μετώπου γίνεται από την πίεση που ασκεί ο θάλαμος εκσκαφής χωριζόμενος με διάφραγμα τοποθετημένο πίσω από την κοπτική κεφαλή, από το υπόλοιπο σώμα της μηχανής. Ο θάλαμος είναι σε υπερβαρικό περιβάλλον.
- Στην μηχανή SM_V3 η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα στο μέτωπο. Η εξισορρόπηση των υδροστατικών πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής γίνεται είτε διαμέσου της άσκησης αντίστοιχης πίεσης αέρα (περιβάλλον υπερβαρικό εντός του μετώπου εκσκαφής) από την ασπίδα, παράλληλα με την εκσκαφή γεωμάζας από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, είτε το μηχάνημα κατασκευάζεται με διάφραγμα έτσι ώστε μόνο η κεφαλή κοπής να είναι υπό πίεση. Το διάφραγμα διαχωρίζει τον θάλαμο εκσκαφής (excavation chamber) από το υπόλοιπο σώμα της μηχανής.

Η αποκομιδή των προϊόντων γίνεται και στα δύο μηχανήματα από τον υπερβαρικό θάλαμο δια μέσω του ατέρμων μεταφορικού κοχλία.

2.15.4 Μηχανή στήριξης μετώπου με αιώρημα (SM_T4)

Ανήκει στα μηχανήματα μερικής κοπής μετώπου με ασπίδα, όπου ο θάλαμος εκσκαφής απομονώνεται μέσω του διαφράγματος από το υπόλοιπο σώμα της μηχανής. Ο θάλαμος πληρώνεται με αιώρημα εγχυόμενου υπό πίεση από αντλίες τροφοδοσίας. Η πίεση του αιωρήματος ρυθμίζεται από την ταχύτητα παροχής των αντλιών. Η εκσκαφή ομοίως γίνεται από τα κοπτικά μέσα της περιστρεφόμενης κοπτικής κεφαλής. Και το υλικό εκσκαφής διοχετεύεται μέσω του συστήματος αντλιών τροφοδοσίας-αναρρόφησης.

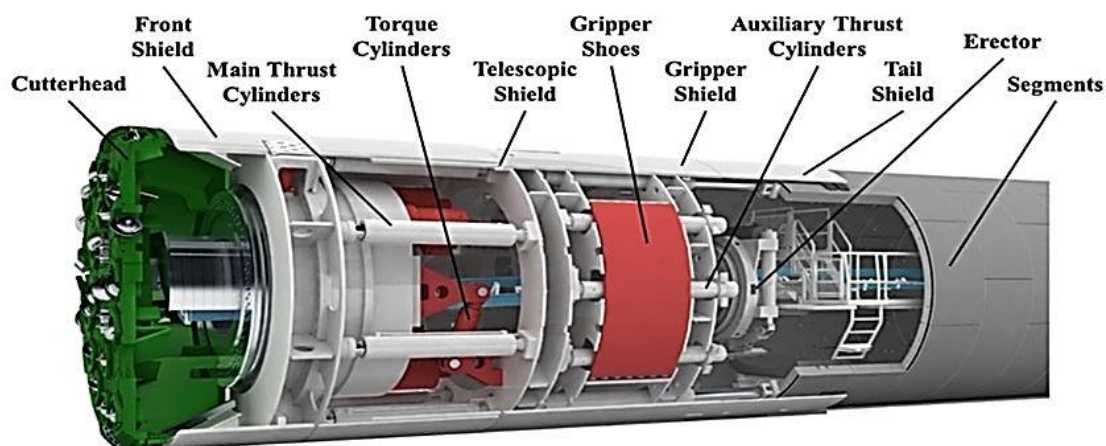
2.15.5 Διπλής ασπίδας TBM (Double Shield Machine)

Ανήκει στην κατηγορία λειτουργίας με πλήρες μέτωπο διάτρησης με δύο ομάδες εμβόλων. Το κύριο πεδίο εφαρμογής είναι η βραχύμαζα με χαρακτηριστικά που κυμαίνονται από εξαιρετική μέχρι μέτριας ποιότητας βράχου. Στα μηχανήματα αυτά η ασπίδα καταμερίζεται σε δύο μέρη, στο εμπρόσθιο τμήμα το οποίο και περιλαμβάνει την κοπτική κεφαλή και στο οπίσθιο τμήμα που περιλαμβάνει τον συρμό υποστήριξης. Οι δύο ασπίδες συνδέονται μεταξύ τους μέσω της τηλεσκοπικής κεντρικής μονάδας. Η οπίσθια ασπίδα εντάσσει στο εσωτερικό της τα πέδιλα αντιστήριξης και με τα έμβολα ώσης (**Σχήμα 2.15.5 α**)

Η λειτουργία αυτής της μηχανής μοιάζει με εκείνη του TBM χωρίς ασπίδα, αλλά πλεονεκτεί στον γρήγορο ρυθμό προώθησης της μηχανής, με τη δυνατότητα συνεχούς κύκλου εργασιών χάρη στη λειτουργία του διπλού συστήματος προώθησης της μηχανής. Με τη βοήθεια του οποίου του προχωράει η μηχανή ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Συγκεκριμένα, τα κύρια έμβολα της κοπτικής κεφαλής τα οποία διατάσσονται μεταξύ εμπρόσθιας και οπίσθιας ασπίδας και συνεργαζόμενα με την τηλεσκοπική μονάδα, εκτείνονται για να ωθήσουν προς τα εμπρός την κοπτική κεφαλή, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται η εκσκαφή και η εγκατάσταση της επένδυσης με τα στοιχεία υποστήριξης σκυροδέματος, με τη βοήθεια του ανυψωτή

Η προώθηση της μηχανής γίνεται με δύο συστήματα. Το πρώτο σύστημα αποτελείται από τα κύρια έμβολα μεταξύ της εμπρόσθιας και οπίσθιας ασπίδας και το δεύτερο σύστημα αποτελείται από πέδιλα ακτινικής αντιστήριξης (grippers shoes) που επενεργούν στα τοιχώματα της σήραγγας και υπάρχουν βοηθητικά έμβολα που επενεργούν στα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης. Το τελευταίο κομμάτι τοποθετημένου δακτυλίου της σήραγγας στο ουραίο τμήμα της ασπίδας λειτουργεί ως το επίπεδο έδρασης των εμβόλων ώθησης ασπίδας (**Σχήμα 2.15.5 β**). Αφού ολοκληρωθεί ένας κύκλος διάνοιξης (διαδρομή εκσκαφής και τοποθέτηση δακτυλίου), τα πέδιλα στήριξης ανασύρονται και η οπίσθια ασπίδα αντιστήριξης –gripper shield- ωθείται εμπροσθεν από τα έμβολα ώθησης της ασπίδας που εδράζονται στον τελευταίο τοποθετημένο δακτύλιο.

Το πλεονέκτημα της διπλής ασπίδας είναι η ταυτόχρονη προώθηση της μηχανής με την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης.



Σχήμα 2.15.5 α: Τυπική δομή και συστατικά μέρη ενός TBM διπλής ασπίδας
(www.herrenknecht.com)

Τα κύρια τμήματα εξοπλισμού της μηχανής διάνοιξης είναι:

- Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή με τους δίσκους κοπής στο εμπρόσθιο τμήμα, “cutterhead”
- Δακτύλιος εναπόθεσης εξορυγμένου εδαφικού υλικού, “muck ring”
- Εμπρόσθια ασπίδα “front shield” που περικλείει την κοπτική κεφαλή και το βασικό σύστημα πλοήγησης
- Σταθεροποιητές που μειώνουν τις δονήσεις κατά την εκσκαφή και κατ’ επέκταση μειώνεται η φθορά μεμονωμένων συστατικών, “stabilizers”
- Τηλεσκοπική ασπίδα, “telescopic shield” η οποία περιβάλλει την εμπρόσθια ασπίδα “front shield” και την οπίσθια ασπίδα αντιστήριξης “gripper shield”
- Τα κύρια έμβολα ώθησης, “torque cylinders” που επενεργούν στην ασπίδα αντιστήριξης και ωθούν την κοπτική κεφαλή προς τα εμπρός για την διάνοιξη της σήραγγας
- Οι κύλινδροι ροπής που αντισταθμίζουν τις ροπές της κοπτικής κεφαλής
- Σύστημα αποκομιδής εδαφικού υλικού με ταινία μεταφοράς
- Ασπίδα αντιστήριξης, “gripper shield” η οποία περιλαμβάνει τα πέδιλα ακτινικής αντιστήριξης, βοηθητικά έμβολα ώθησης και το ουραίο κέλυφος.
- Πέδιλα αντιστήριξης, “gripper shoes” που ωθούν την διπλή ασπίδα αντίφορα της διάνοιξης με τη βοήθεια των βοηθητικών εμβόλων ώθησης
- Βοηθητικά έμβολα ώθησης, “auxiliary thrust cylinders” που εξασφαλίζουν την θέση των προκατασκευασμένων στοιχείων από σκυρόδεμα της μόνιμης επένδυσης, ενώ ωθούν προς τα εμπρός την ασπίδα αντιστήριξης.



Σχήμα 2.15.5 β: Πέδιλα έδρασης των εμβόλων ώθησης του TBM στο τελευταίο προκατασκευασμένο δακτύλιο της μόνιμης επένδυσης (Αττικό Μετρό,2011)

2.15.6 TBM εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB, SM-V5)

2.15.6.1 Εισαγωγή

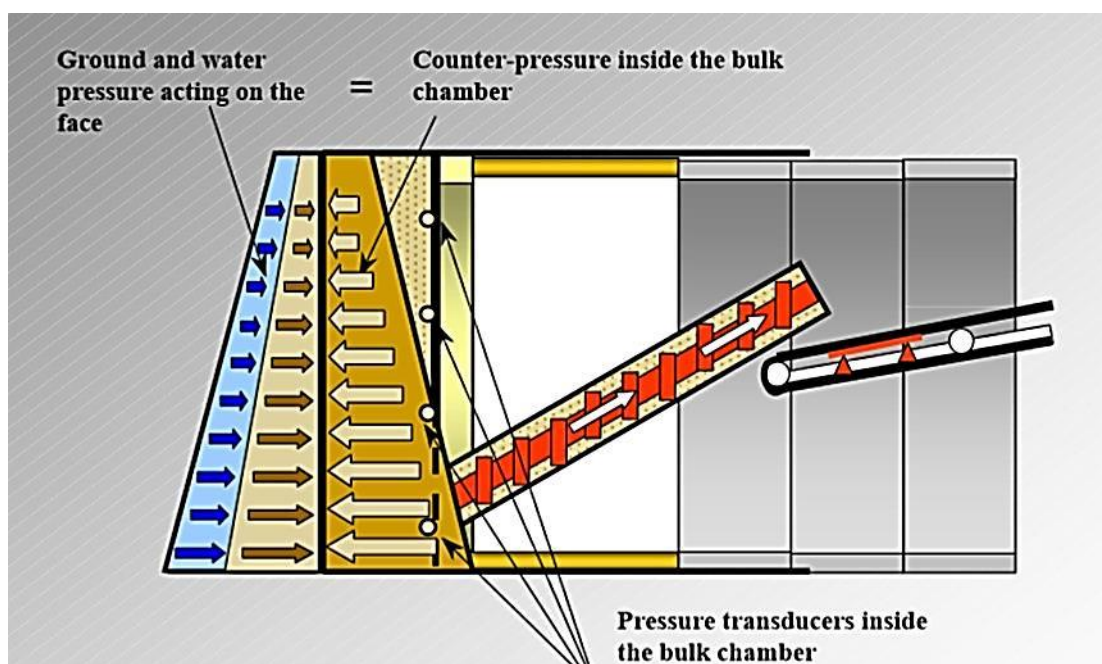
Πρόκειται για μηχανές με διάφραγμα υπό πίεση που ξεκίνησαν στα μέσα της δεκαετίας του 1970 στην Ιαπωνία σε συνεκτικά εδάφη πολύ υψηλής πλαστικότητας. Βασίζονται στη λειτουργία της τυφλής ασπίδας (blind shield, μη ορατού μετώπου) Το έδαφος δεν εκσκάπτεται με κοπτικά εργαλεία, αλλά εξαναγκάζεται από την πίεση που ασκείται από τα έμβολα ώσης, να εισέρθει μέσα από ένα ρυθμιζόμενο άνοιγμα που υπάρχει στο διάφραγμα πίεσης της ασπίδας και τελικά ωθείται προς τα πίσω. Ο έλεγχος των καθιζήσεων γίνεται με την ρύθμιση του ανοίγματος, στο διάφραγμα πίεσης έτσι ώστε το έδαφος που εκσκάπτεται να ισούται με τον θεωρητικό όγκο εκσκαφής. (Σχήμα 2.15.6.1).



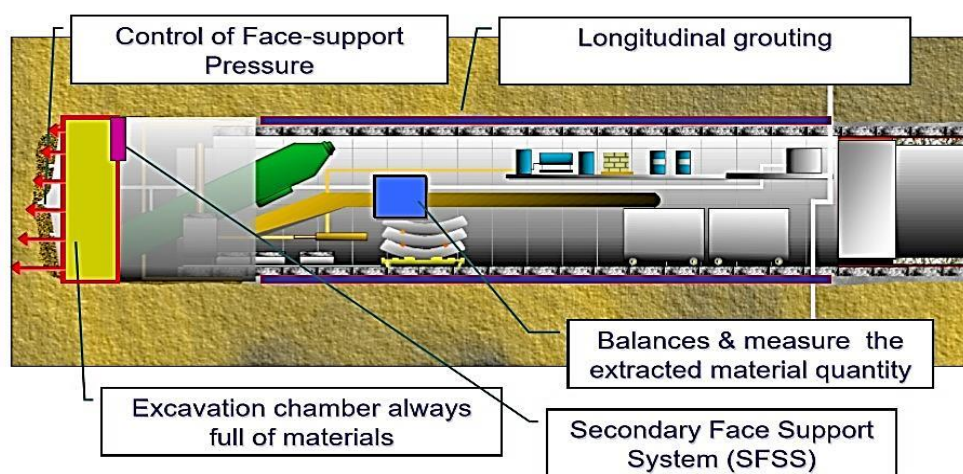
Σχήμα 2.15.6.1 : Ασπίδα εδαφικής πίεσης για την ευστάθεια μετώπου, Katsushika Ward, Tokyo, 1976 (jsce,2001)

2.15.6.2 Λειτουργία του EPB

Το μέτωπο εκσκαφής υποστηρίζεται μέσω πολφού από το ίδιο εδαφικό υλικό που εκσκάπτεται αντισταθμίζοντας μέσω του ανοίγματος στο διάφραγμα πίεσης τις υδατικές πιέσεις και γεωστατικές πιέσεις του περιβάλλοντος εδάφους (Σχήμα 2.15.6.2α). Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή που είναι εξοπλισμένη με διάφορα εργαλεία πιέζει το μέτωπο της εκσκαφής και σκάβει το υλικό. Το χώμα εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής μέσω των ανοιγμάτων, όπου αναμιγνύει με το έδαφος που είναι ήδη εκεί. Γίνεται η ανάμειξη των υλικών μέχρι να έχει την απαιτούμενη υφή. Το διάφραγμα μεταφέρει την πίεση των κυλίνδρων και ωθεί το εύπλαστο έδαφος. Όταν η πίεση του εδάφους από το θάλαμο εκσκαφής ισούται με την πίεση του περιβάλλοντος εδάφους και των υπόγειων υδάτων, η απαραίτητη ισορροπία έχει επιτευχθεί.



Σχήμα 2.15.6.2 α: Λειτουργία εξισορρόπησης γαιών



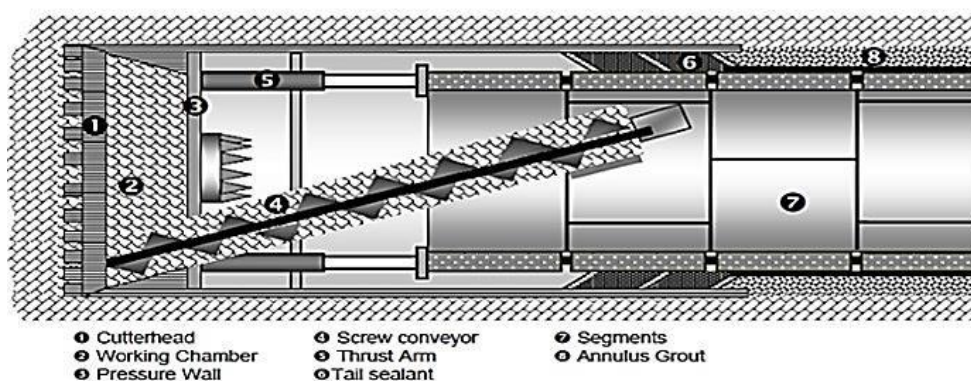
Σχήμα 2.15.6.2 α': EPB και βασικοί παράμετροι λειτουργίας

Η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος προσβάλλει το μέτωπο σε όλη της επιφάνεια του και όχι σημειακά , μέσω της περιστροφικής της κίνησης. Η κεφαλή κοπής ωθείται προς τα εμπρός μέσω υδραυλικών εμβόλων. Ο θάλαμος εκσκαφής τώρα διαχωρίζεται από το μέτωπο της σήραγγας μέσω ενός διαφράγματος πίεσης.

Το γεωυλικό εκσκάπτεται μέσω των κοπτικών μέσων που είναι τοποθετημένα στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή και εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής, μέσω των ανοιγμάτων που βρίσκονται σε αυτήν , αποτίθεται μέσα στο θάλαμο εκσκαφής. Έπειτα το γεωυλικό απομακρύνεται από το θάλαμο εκσκαφής μέσω ενός ατέρμονα κοχλία. Όταν το υλικό πληρώσει το θάλαμο, ο ατέρμονας κοχλίας περιστρέφεται με συγκεκριμένο ρυθμό που ορίζεται είτε χειροκίνητα είτε μέσω λογισμικού, και το υλικό απομακρύνεται από το θάλαμο. Ο όγκος του υλικού που πρέπει να απομακρυνθεί εξαρτάται από το πόσο μεγάλη θα είναι η πίεση που πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση αυτή μετράται από ειδικούς αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο διάφραγμα (pressure wall).

Ο χειριστής του μηχανήματος μπορεί να καθορίσει αν χρειάζεται αύξηση ή μείωση της πίεσης υποστήριξης μεταβάλλοντας το ρυθμό απομάκρυνσης του γεωυλικού. Αν επιζητείται μεγαλύτερη πίεση επί του μετώπου , ο ρυθμός απομάκρυνσης του υλικού μειώνεται και αντίστροφα.

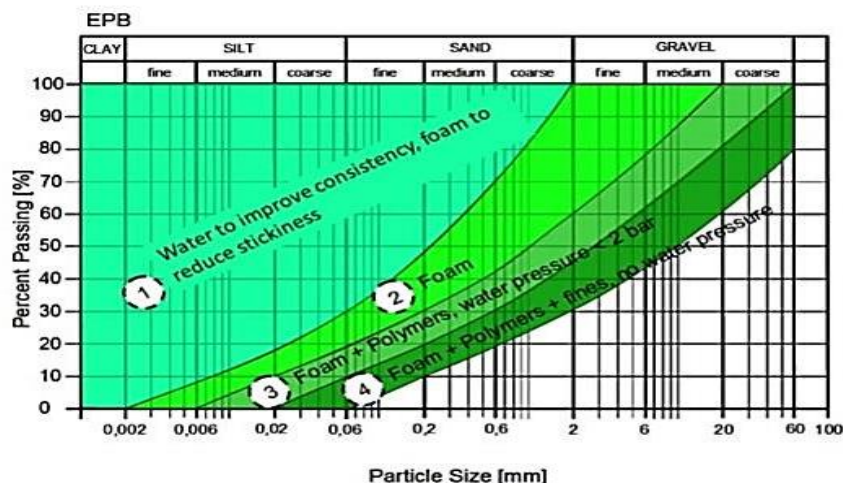
Τυπική τομή ενός μηχανήματος EPB (Earth Pressure Balance) φαίνεται στο **(Σχήμα 2.15.6.2 β)**



Σχήμα 2.15.6.2 β: Σκαρίφημα τομής μηχανής EPB

Ο πολφός του εδαφικού υλικού που απομακρύνεται με πίεση από το θάλαμο εκσκαφής μέσω του ατέρμονα κοχλία εναποτίθεται εκτός σήραγγας υπό ατμοσφαιρική πίεση. Σημειώνεται ότι η πίεση που μετράται στο διάφραγμα είναι διαφορετική από τη πίεση που ασκείται στο μέτωπο. Ειδικότερα στη περιοχή γύρω από τον ατέρμονα κοχλία η πίεση που μετράται είναι αρκετά μικρότερη λόγω της διαφοράς δυναμικού που επικρατεί στο θάλαμο εκσκαφής.

Στο ακόλουθο **(Σχήμα 2.15.6.2 γ)** δίνεται η περιοχή εφαρμογής των EPB με βάση την κοκκομετρία του εδάφους



Σχήμα 2.15.6.2 γ :Πεδίο εφαρμογής EPB και ανάγκη χρήσης βελτιωτικών εδάφους βάσει της κοκκομετρίας

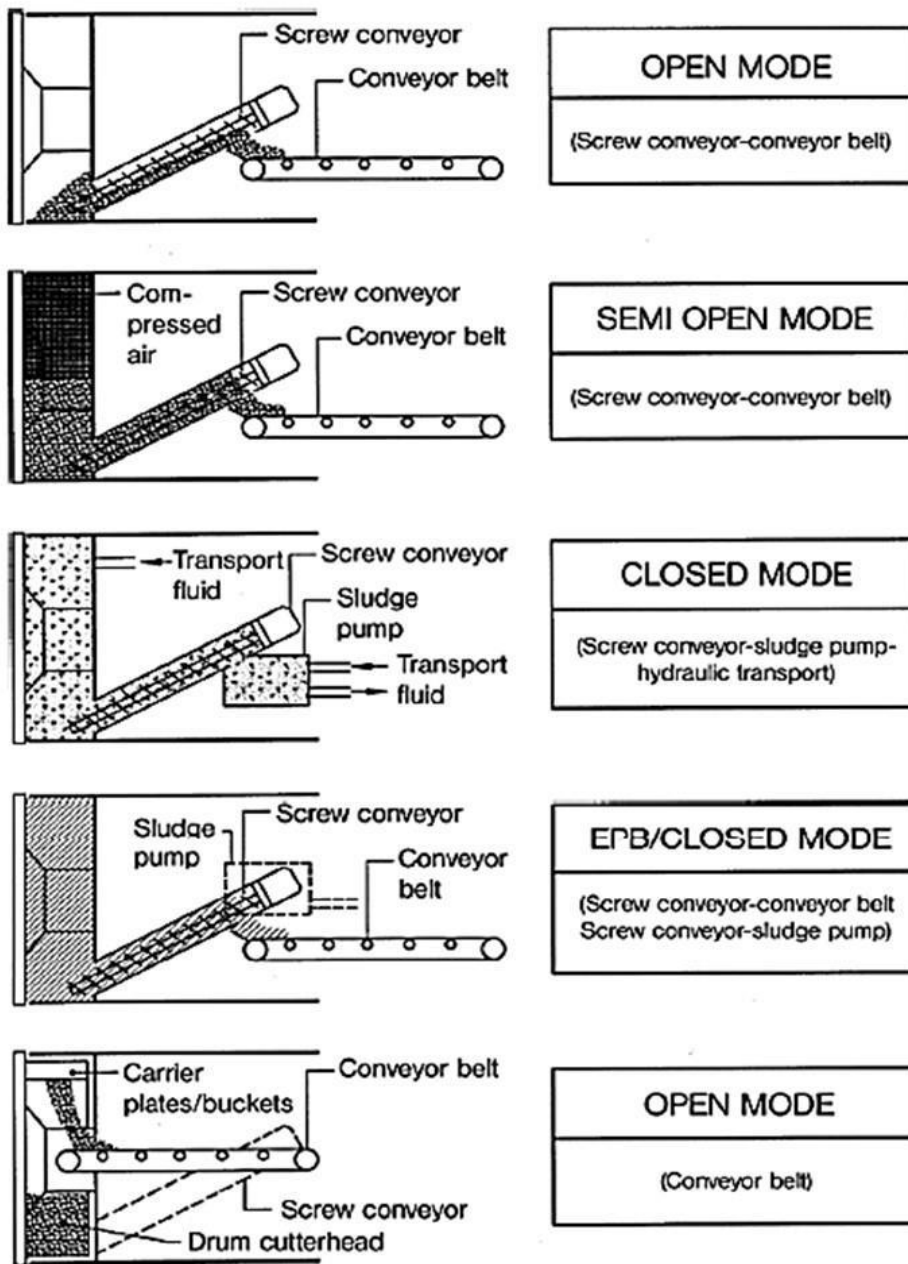
Συσκευή καταγραφής δεδομένων

Στα μηχανήματα TBM-EPB υπάρχει η συσκευή καταγραφής δεδομένων για να ελέγχει, καταγράφει όλες τις παραμέτρους εκσκαφής. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση αισθητήρων πίεσης που είναι τοποθετημένοι στον κενό χώρο στο θάλαμο εκσκαφής, στον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία για τη μέτρηση των ποσοτήτων και όγκου αποκομιδής υλικών εκσκαφής. Ακόμα υπάρχουν αισθητήρες εισπίεσης του ενέματος και μετρητές ροής του ενέματος πλήρωσης του δακτυλιοειδούς κενού τοποθετημένοι πίσω από την μόνιμη επένδυση. Ακόμα ελέγχονται η ταχύτητα περιστροφής και ροπή της κοπτικής κεφαλής, ο ρυθμός διείδυσης, η ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία και η πίεση στα έμβολα ώσης για την προχώρηση της μηχανής.



Σχήμα 2.15.6.2 δ:Η οθόνη ελέγχου σε EPB μηχανή

Τα EPB έχουν τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας, την ανοιχτή, την ημι-ανοιχτή υπό πίεση λειτουργία, την κλειστή λειτουργία και την κλειστή κατάσταση λειτουργίας EPB, όπως φαίνονται στο (Σχήμα 2.15.6.2 ε)



Σχήμα 2.15.6.2 ε: Καταστάσεις λειτουργίας μηχανημάτων EPB

2.15.7 TBM Πολφού (Slurry Shield Machine)

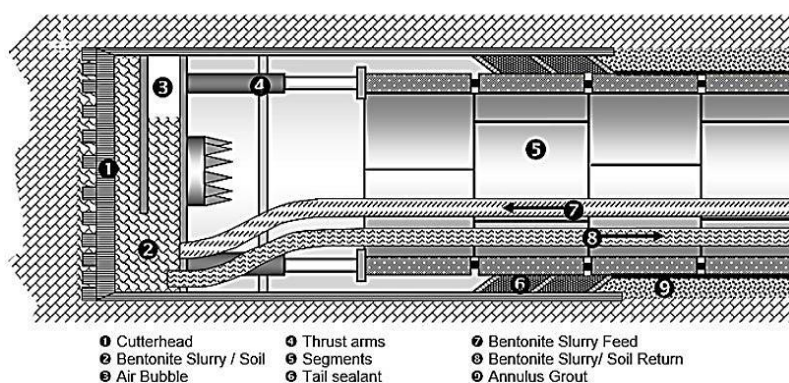
2.15.7.1 Λειτουργία του Slurry (SM-V4)

Στις μηχανές αυτές η στήριξη του μετώπου εφαρμόζεται από αιώρημα υπό πίεση. Το αιώρημα μπορεί να είναι από μπετονίτη ή άλλο πολυμερές αναλόγως την διαπερατότητα του υπεδάφους και το κατάλληλο για το υπέδαφος ιζώδες.

Όπως και η μηχανή EPB έτσι και αυτού του τύπου μηχανές έχουν στεγανό διάφραγμα υπό πίεση που διαχωρίζει το σώμα της μηχανής από το θάλαμο εκσκαφής. Η κοπτική κεφαλή εκσκάπτει με τα κοπτικά εργαλεία το έδαφος και η υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω πολφού (slurry) το οποίο είναι εναιώρημα μπετονίτη, ή αργίλου.

Ο πολφός στήριξης δημιουργεί μια μεμβράνη (cake) ελαφρώς διαπερατή από αέρα, στο μέτωπο της εκσκαφής η οποία διευκολύνει τη στήριξη του εδάφους κατά τη χρήση αέρα ή υγρού πεπιεσμένου. Αυτό το εναιώρημα πολφού υπό μορφή μεμβράνης ασκεί την απαιτούμενη πίεση στο μέτωπο. Το αιώρημα πολφού διοχετεύεται μέσω αντλίας στο θάλαμο εκσκαφής. Το έδαφος που εκσκάπτεται αναμιγνύεται με τον πολφό μπετονίτη ή αργίλου και το μείγμα αυτό αποτελεί τα μπάζα. Τα μπάζα μεταφέρονται μέσω υδραυλικής αντλίας από το θάλαμο εκσκαφής σε μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται στην επιφάνεια. Η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης ρυθμίζεται με τον καθορισμό των ποσοτήτων που αντλούνται από τις αντλίες τροφοδοσίας και απαγωγής και βάσει της ταχύτητας παροχής των αντλιών τροφοδοσίας-αναρρόφησης. Η κρούστα φίλτρου (η μεμβράνη που στηρίζει το μέτωπο) μπορεί να κατέβει πλήρως ή και μερικώς και να αντικατασταθεί με πεπιεσμένο αέρα (Σχήμα 1.15.7.1 δ)

Στο (Σχήμα 2.15.7.1 α) φαίνεται σχηματικά η τομή μηχανής με ασπίδα Slurry

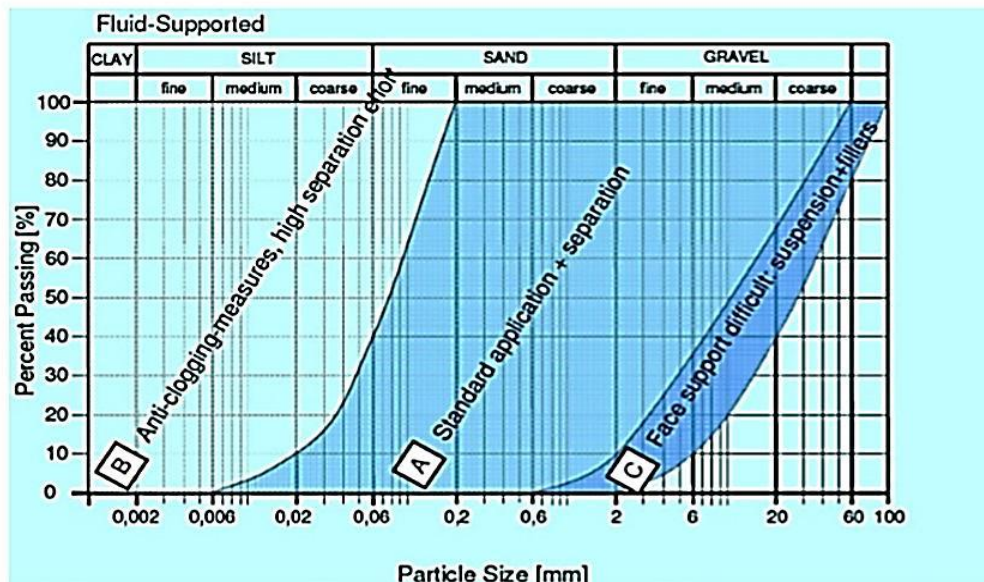


Σχήμα 2.15.7.1 α: Σκαρίφημα τομής μηχανής με ασπίδα Slurry

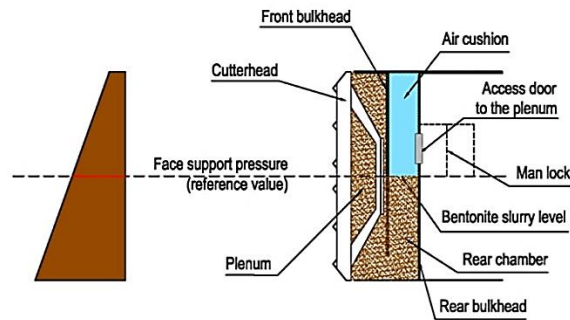


Σχήμα 2.15.7.1 β: Ασπίδα πολφού

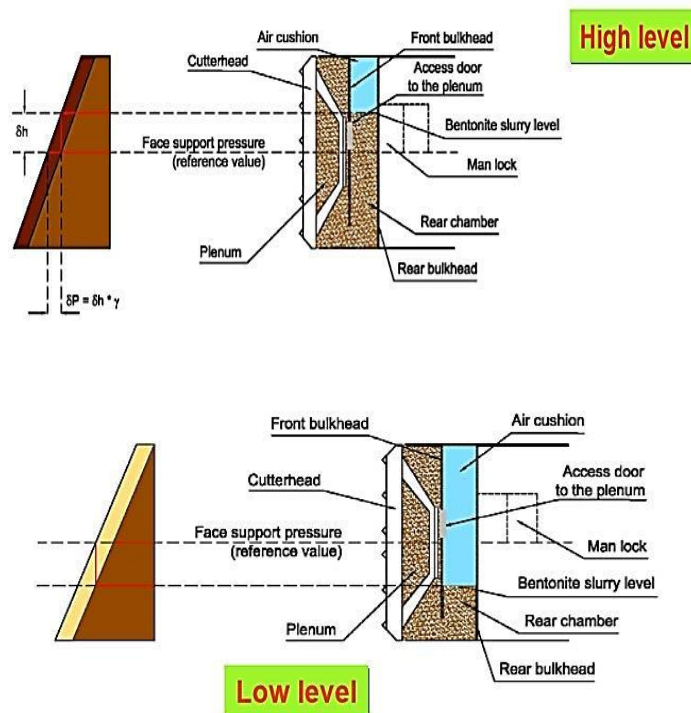
Οι μηχανές πολφού χρησιμοποιούνται σε μαλακά εδάφη με τον υδροφόρο ορίζοντα να πρέπει να είναι πάνω από τη στέψη της σήραγγας γιατί τα πολύ διαπερατά εδάφη παρεμποδίζουν την ανάπτυξη της μεμβράνης και τη μεταφορά πίεσης υποστήριξης. Για μεγάλη διαπερατότητα $K_s > 5 \cdot 10^{-3}$ m/s, μπορεί το εναιώρημα μπετονίτη να ρεύσει ανεξέλεγκτα στο έδαφος. Το πεδίο εφαρμογής τους μπορεί να αναπτυχθεί με προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού ή πρόσθετου για τη βελτίωση των ροϊκών ιδιοτήτων.



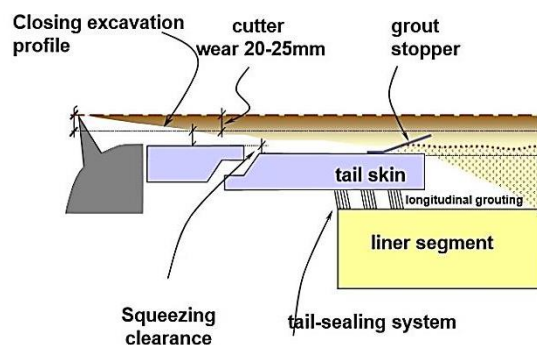
Σχήμα 2.15.7.1 γ: Εύρος εφαρμογής πρόσμικτων σε μηχανές πολφού



Σχήμα 2.15.7.1 δ: Πίεση υποστήριξης (στάθμη του πολφού μπετονίτη στο κέντρο της κοπτικής κεφαλής, θέση ισορροπίας), (Guglielmetti V., 2012)



Σχήμα 2.15.7.1δ: Στάθμες πολφού μπετονίτη και επιρροή στην πίεση υποστήριξης μετώπου, (Guglielmetti V., 2012)

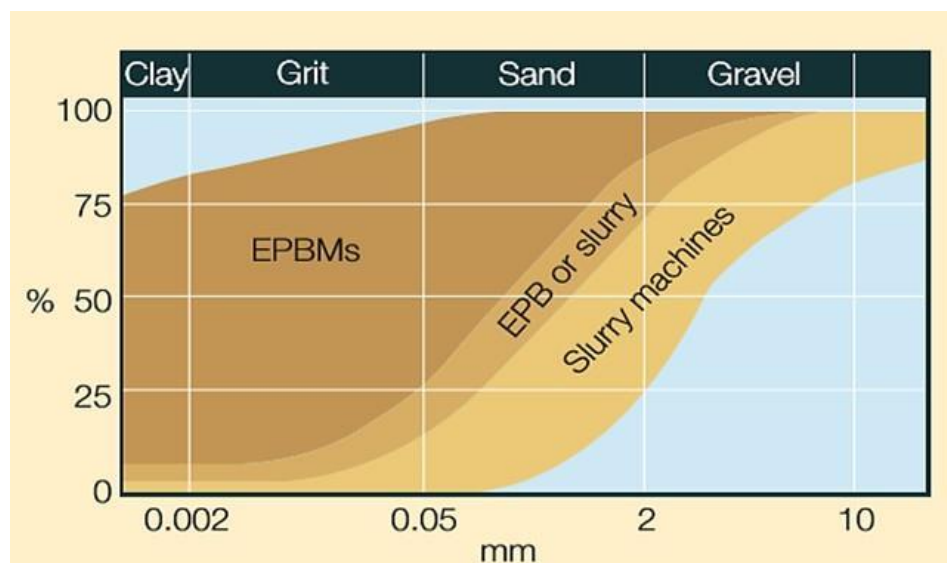


Σχήμα 2.15.3 ε: Πλήρωση δακτυλιοειδές κενού πίσω από την μόνιμη επένδυση σε μηχανή EPB και σε μηχανή Slurry, (Guglielmetti V., 2012)

2.16 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή μεταξύ EPBs και SPBs

Κοκκομετρική διαβάθμιση

Με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού που εξορύσσεται επιλέγεται η καταλληλότητα της μηχανής με αιώρημα πολφού ή της μηχανής με εδαφική αντισταθμιστική πίεση. Το (**Σχήμα 2.16 α**) δείχνει τις εδαφικές συνθήκες για την επιλογή μεταξύ των δύο μηχανών.



Σχήμα 2.16 α: Επιλογή ασπίδας βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης εδάφους, (British Tunnelling Society, Harding Lecture 2010).

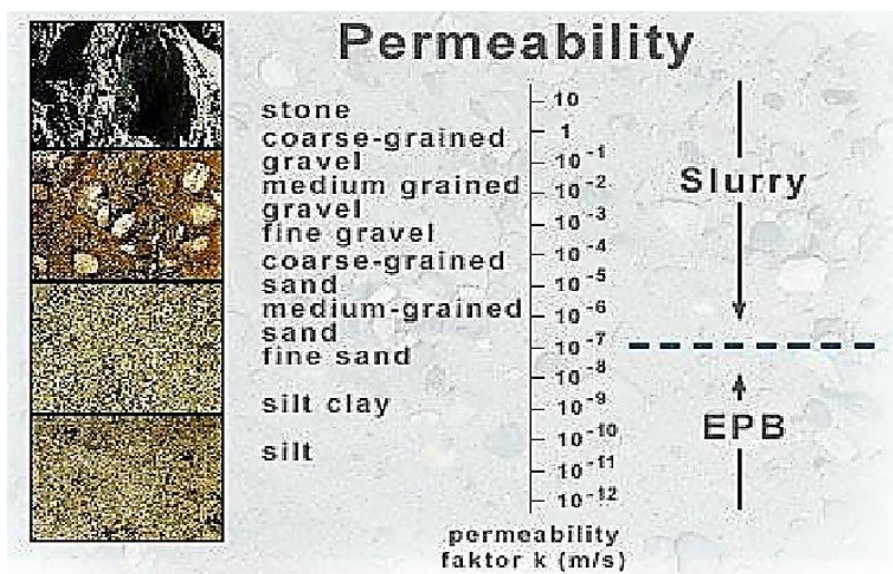
Οι μηχανές με ασπίδα λειτουργίας με αιώρημα πολφού Slurry Machines κατά κανόνα είναι κατάλληλες σε κοκκώδη εδάφη, ενώ οι μηχανές με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB Machines σε αργιλικά, συνεκτικά εδάφη. Αυτό συμβαίνει στη μηχανή με λειτουργία πολφού λόγω της δυσκολίας της μονάδας διαχωρισμού να διαχωρίσει το κλάσμα αργίλου από μπετονίτη όταν το αιώρημα πολφού κατέχεται από υψηλή περιεκτικότητα σε κλάσμα με λεπτόκοκκα κάτω των 60μm (άργιλος και ιλύς) και στην μηχανή εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης της δυσκολίας να ελεγχθεί και διατηρηθεί καταλλήλως η πίεση του ατέρμονα κοχλία όταν το διερχόμενο ποσοστό του λεπτόκοκκου ορυσσόμενου εδαφικού υλικού είναι μικρότερο του 10 με 15%. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν είναι τα λεπτομερή μείγματα στις μηχανές EPBS που μέχρι τα μέσα του 1980 χρησιμοποιούνταν νερό, πολυμερή, μπετονίτης στην κοπτική κεφαλή ή στον θάλαμο πίσω από αυτήν και αργότερα προστέθηκε η χρήση αφρού υπό πίεση από τους Ιάπωνες με ιξώδες που βοήθησε στην ομογενοποίηση στερεών και υγρών παράγοντας σημαντική μείωση στην απαιτούμενη ροπής στρέψης της κοπτικής κεφαλής. Κύριας σημασίας στην επιλογή είναι διαπερατότητα «Ks» του εδάφους.

Διαπερατότητα

Θεωρείται τα μηχανήματα τύπου EPB κατάλληλα σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας «κ» μεταξύ (10^{-9} έως 10^{-6})m/sec. Με την δυνατότητα και σε μεγαλύτερη διαπερατότητα «κ= 10^{-5} m/sec» υπό την αύξηση της χρήσης πρόσμικτων (αφρός, πολυμερή). Και τις μηχανές πολφού να είναι κατάλληλες σε εδάφη με υψηλή διαπερατότητα εύρους 10^{-7} m/sec έως 10^{-3} m/sec. Ενδεικτικές τιμές συντελεστή διαπερατότητας φαίνονται στο (Σχήμα 2.16 β) και το πεδίο εφαρμογής των EPB και SPB στο (Σχήμα 2.16 γ)

Χαρακτηρισμός	Συντελεστής Διαπερατότητας	
	k (cm/sec) or	k (m/sec)
Υψηλή	$k \geq 10^{-1}$	$k \geq 10^{-3}$
μεσαία	$10^{-3} \leq k < 10^{-1}$	$10^{-5} \leq k < 10^{-3}$
Μεσαία προς χαμηλή	$10^{-4} \leq k < 10^{-3}$	$10^{-6} \leq k < 10^{-5}$
Χαμηλή προς πολύ χαμηλή	$10^{-5} \leq k < 10^{-4}$	$10^{-7} \leq k < 10^{-6}$
Πολύ χαμηλή	$10^{-7} \leq k < 10^{-5}$	$10^{-9} \leq k < 10^{-7}$
Αδιαπέραστος σχηματισμός	$k < 10^{-7}$	$k < 10^{-9}$

Σχήμα 2.16 β: Συντελεστής διαπερατότητας, (ΕΕΣΥΕ)



Σχήμα 2.16 γ: Πεδίο εφαρμογής μηχανών βάσει της διαπερατότητας εδάφους (Maidl 1995)

Έλεγχος των καθιζήσεων

Ως προς τον παράγοντα των καθιζήσεων και οι δύο τύποι μηχανών ικανοποιούν τον έλεγχο του εδαφικού όγκου που χάνεται Volume loss σε ποσοστό κάτω του 1% με προοπτική μείωσής του σε 0,5%. Ιστορικά παραδείγματα είναι η χρήση EPB διαμέτρου 9,5m στην σιδηροδρομική σήραγγα St Clair River Tunnel στον Καναδά με Vloss μικρότερου από1%, στη σήραγγα του Heathrow όπου χρησιμοποιήθηκε πεπιεσμένος αέρας στην κοπτική κεφαλή αντί για εναιώρημα πολφού και επετεύχθη απώλεια εδαφικού όγκου Vloss= 0,5%.

2.17 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και ομοιότητες σχεδιασμού

Στα πλεονεκτήματα των μηχανών EPB μεταξύ άλλων συγκαταλέγονται:

- το απλούστερο σύστημα εκμάθησης λειτουργίας και συντήρησής του
- περιορίζεται η απώλεια εδαφικού όγκου Vloss σε περίπτωση κατάρρευσης του μετώπου εκσκαφής
- μπορεί να αξιοποιήσει την δυνατότητα αυτό-στήριξης εδάφους σε ανοικτή κατάσταση λειτουργίας
- Ταχύτερος ρυθμός διάνοιξης καλύτερη απόδοση παραγωγής έναντι των μηχανών με πολφό
- χαμηλότερο κόστος επένδυσης
- μικρότερη κατανάλωση προσθέτων
- λιγότερος απαιτούμενος χώρος για την συναρμολόγηση της μηχανής και τη λειτουργία της.

Αντίστοιχα τα θετικά των μηχανών με πολφό SPB είναι:

- η προκαθορισμένη και ελεγχόμενη από το σύστημα πίεση στο μέτωπο εκσκαφής
- απαιτείται μικρότερη ροπή στρέψης και ισχύς στην κοπτική κεφαλή
- όλο το εκσκαφθέν γεωυλικό με τη μορφή πολφού μεταφέρεται διαμέσου αντλιών στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να εκτίθεται εντός της μηχανής
- δυνατότητα εγκατάστασης θραυστήρα στο θάλαμο εκσκαφής επιτρέποντας σε οποιαδήποτε μάζα με δυσκολία να περάσει από το υδραυλικό σύστημα αποκομιδής να συντρίβεται.

Στις ομοιότητες σχεδιασμού των TBM EPB και SPB οφείλεται η εναλλαγή συστημάτων από το ένα μηχάνημα απ' ευθείας στο άλλο με μικρή ή καθόλου μετατροπή στον σχεδιασμό. Οι ομοιότητες αφορούν τις κύριες δομές, την ακολουθία ικριώματος, το σύστημα προώθησης και το σύστημα μόνιμης επένδυσης από προκατασκευασμένους δακτυλίους.

Στα αρνητικά των μηχανών EPB συγκαταλέγονται τα εξής:

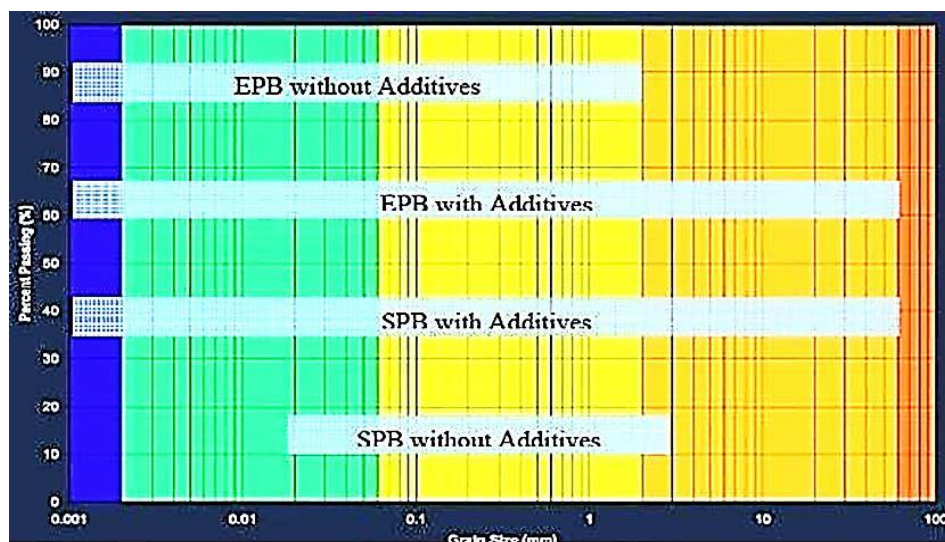
- απαιτείται η χρήση πρόσμικτων
- δυσχερής οδήγηση
- μεγαλύτερες καθιζήσεις σε ανοικτό τρόπο λειτουργίας
- απαίτηση μεγαλύτερης ροπής και μέτριας δύναμης στην κοπτική κεφαλή
- απαιτείται προμελέτη υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης στην κοπτική κεφαλή κατά την ώθηση του μηχανήματος.

2.18 Εξισορρόπηση πίεσης μετώπου

Επιπλέον και οι δύο τύποι μηχανών συμβάλλουν στον έλεγχο των καθιζήσεων στο μέτωπο εκσκαφής με τις μηχανές πολφού να διατηρούν τον έλεγχο των μετακινήσεων πέριξ του μετώπου μέσω του ελέγχου της πίεσης πολφού, τις ιδιότητες ροής του και την πυκνότητά του στο θάλαμο εκσκαφής. Ενώ η μηχανή εδαφικής εξισορρόπησης των τάσεων μέσω του ίδιου του εδαφικού υλικού που εξορύσσεται κατά την διάρκεια της διάνοιξης με το ταίριασμα των ρυθμών άντλησης, ταχύτητα άντλησης, των εκσκαφθέντων υλικών.

2.19 Πρόσθετα και επιλογή μηχανής υποστήριξης μετώπου

Με τη χρήση προσθέτων και στις δύο μηχανές μεγαλώνει το γεωλογικό εύρος εφαρμογής τους. Τυπικά οι μηχανές τύπου EPB εφαρμόζονται σε λεπτόκοκκα υδαρή εδάφη με μέτρια έως μικρή διαπερατότητα και οι τύπου Slurry σε μικτή ή αδρή διαβάθμιση κόκκων εδάφη. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στα πολυμερή και στα συστήματα έγχυσης με πολυμερή τόσο τα EPB και Slurry μηχανήματα έχουν την δυνατότητα να εκσκάπτουν μεγαλύτερο εύρος εδαφικών συνθηκών όπως φαίνεται στο ακόλουθο (Σχήμα 2.19) σε σημείο που η ποιότητα του εδάφους να μην κρίνεται ως ο κρισιμότερος παράγοντας για την επιλογή μεταξύ των δύο μηχανών .

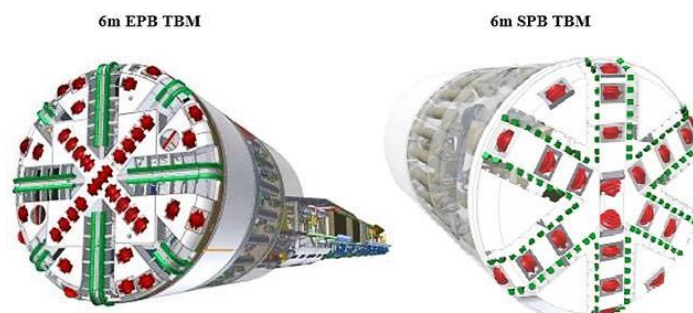


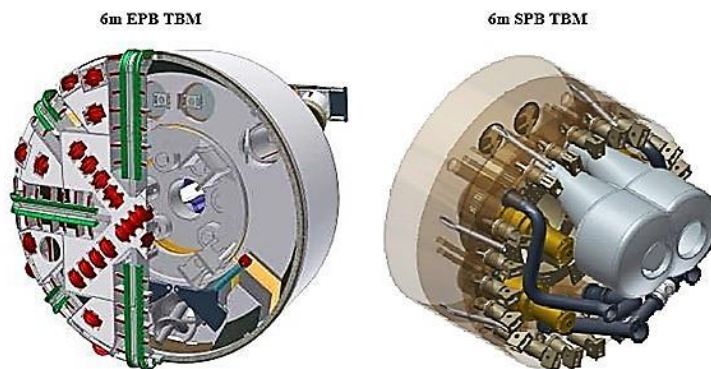
Σχήμα 2.19: Εύρος εφαρμογής EPB και SPB με και χωρίς προσθήκη προσθέτων,(Lovat. P, 2007)

2.20 Βασικά κριτήρια επιλογής

Τα κριτήρια για την επιλογή μεταξύ των δύο μηχανών (Σχήμα 2.20) είναι πολυάριθμα. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα που εξετάζονται είναι:

- συνολική απαίτηση ισχύος
- συνολικό κόστος εξοπλισμού
- απόθεση των υλικών εκσκαφής
- υπολογισμός της πίεσης υποστήριξης για έλεγχο των καθιζήσεων
- χρήση και διαθεσιμότητα των προσθέτων
- απαιτούμενο μέγεθος περιοχής για την εκσκαφή
- ταχύτητα διάνοιξης

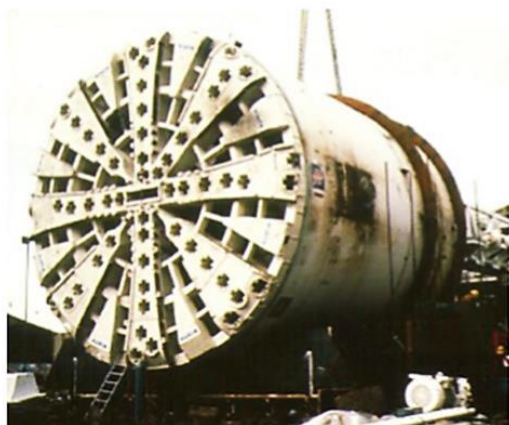




Σχήμα 2.20: Απεικόνιση EPB και SPB, Φ6m, (Lovat. P, 2007)

2.21 Παραδείγματα κατασκευής σηράγγων με χρήση μηχανών EPB και SPB

- Η υποθαλάσσια σήραγγα της Μάγχης που χρονολογείται η κατασκευή της στο διάστημα 1987-1990 με την διάνοιξη από EPB διαμέτρου 8.7m της κατασκευάστριας βιομηχανίας Kawasaki Robbins. Οι υδροστατικές πιέσεις έφτασαν τα 10bar.
- Η μεταγενέστερη σιδηροδρομική σήραγγα St Clair River Tunnel στον Καναδά κατασκευάστηκε στα μέσα του 1990 αντικαθιστώντας την αρχική σήραγγα η οποία κατασκευάστηκε το 1880. Για τη νέα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε EPB διαμέτρου 9.5m της κατασκευάστριας βιομηχανίας Lovat.
- Η σιδηροδρομική σήραγγα Storebael στην Δανία κατασκευάστηκε στο διάστημα από 1989 έως 1995, χρησιμοποιώντας τέσσερις μηχανές EPB της κατασκευάστριας Howden διαμέτρου 8,75m (**Σχήμα 2.21 α**) και πίεση στήριξης στο μέτωπο τάξης 7,5bar.
- Το μετρό της Κοπεγχάγης μήκους 7Km δίδυμης σήραγγας που κατασκευάστηκε στις αρχές του 2000 με δύο NFM EPB διαμέτρου 5,76m (**Σχήμα 2.21 β**) με την δυσκολία στο άνοιγμα μεταξύ των μεταλλικών πλακών της κοπτικής κεφαλής (open area) να είναι πολύ μικρό μόλις 23% με το εδαφικό υλικό να σφηνώνεται στην κοπτική κεφαλή.



(α)



(β)

Σχήμα 2.21 α: Storebaelt EPBM $\Phi 8.75\text{m}$, (British Tunnelling Society, Harding Lecture 2010).

Σχήμα 2.21 β: Κοπεγχάγη Μετρό EPB $\Phi 5,76\text{m}$, (British Tunnelling Society, Harding Lecture 2010).

- Οι οδικές σήραγγες στον αυτοκινητόδρομο M30 της Μαδρίτης με χρονολογία κατασκευής από το 2004 έως 2008 με χρήση δύο μηχανών EPB των βιομηχανιών Herrenknecht (Σχήμα 2.21 γ) και Kawasaki. Η Herrenknecht αξιοποίησε την τεχνολογία της αντίθετης περιστροφής μεταξύ των δύο κοπτικών κεφαλών στο EPB με την κεντρική κεφαλή του να έχει έναν κοχλία μεταφοράς του εκσκαπτόμενου γεωυλικού και την εξωτερική κεφαλή με δύο κοχλίες μεταφοράς που αφαιρούσαν το εναπομείναν εδαφικό μείγμα. Η Kawasaki χρησιμοποίησε EPB μονής κοπτικής κεφαλής με ίδιους ρυθμούς προχώρησης διάνοιξης με την πρώτη.
- Η σιδηροδρομική γραμμή Groene Hart στην Ολλανδία κατασκευάστηκε στις αρχές του 2000 χρησιμοποιώντας μηχανή SPB διαμέτρου $14,87\text{m}$ της κατασκευάστριας NFM (Σχήμα 2.21 δ).



(γ)



(δ)

Σχήμα 2.21 γ: EPB $\Phi 15.2\text{m}$ - για τον M30 αυτοκινητόδρομο- Herrenknecht, (British Tunnelling Society, Harding Lecture 2010).

Σχήμα 2.21 δ: Groene Hart Rail Tunnel NFM EPB $\Phi 14.87\text{m}$, (British Tunnelling Society, Harding Lecture 2010).

Κεφάλαιο 3: Αριθμητικές Αναλύσεις

3.0 Περιγραφή εργασίας

Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθούν οι καθιζήσεις εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας όπως προέκυψαν εμπειρικά με τη σχέση του Peck και με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$, για τέσσερα ύψη υπερκείμενων (από την στέψη της σήραγγας) $H=5\text{m}$, $H=10\text{m}$, $H=15\text{m}$ και $H=20\text{m}$, σε 8 εδάφη φορτισμένα με $K_0=0.5$ και $K_0=1$. Η διατομή είναι κυκλική (**Σχήμα 3α**). Οι αναλύσεις θα είναι παραμετρικές ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, με αντοχή εδάφους από πολύ ασθενές έδαφος ($\phi=20^\circ$ και $c=10\text{kPa}$) έως πολύ ισχυρό έδαφος ($\phi=35^\circ$ και $c=70\text{kPa}$).

Η εκσκαφή γίνεται ύστερα από αποτόνωση λ . Μελετώνται πέντε περιπτώσεις αποτόνωσης σε όλα τα εδάφη, $\lambda=5\%$, $\lambda=10\%$, $\lambda=20\%$, $\lambda=30\%$ και $\lambda=50\%$ (**Σχήμα 3β**). Η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η αποτόνωση λ και το δεύτερο βήμα η υποστήριξη της διατομής με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιωμένο ως beam element με πάχος $t=35\text{cm}$ (**Σχήμα 3γ**).

3.1 Περιγραφή μοντέλου

Τα εδαφικά μοντέλα είναι τέσσερα, λόγω των επιλεγμένων βαθέων εκσκαφής (**Σχήμα 3.1 α**)

Για τα υπερκείμενα εδάφη με ύψος $H=5\text{m}$ μετρημένο από τη στέψη της σήραγγας, το εδαφικό μοντέλο έχει ύψος 50m , πηγαίνοντας από $+10\text{m}$, με $+0\text{m}$ να είναι το κέντρο του άξονα της σήραγγας στο $-4D=-4*10\text{m}=-40\text{m}$

Για τα υπερκείμενα εδάφη με ύψος $H=10\text{m}$ μετρημένο από τη στέψη της σήραγγας, το εδαφικό μοντέλο έχει ύψος 55m , πηγαίνοντας από $+15\text{m}$, με $+0\text{m}$ να είναι το κέντρο του άξονα της σήραγγας στο $-4D=-4*10\text{m}=-40\text{m}$

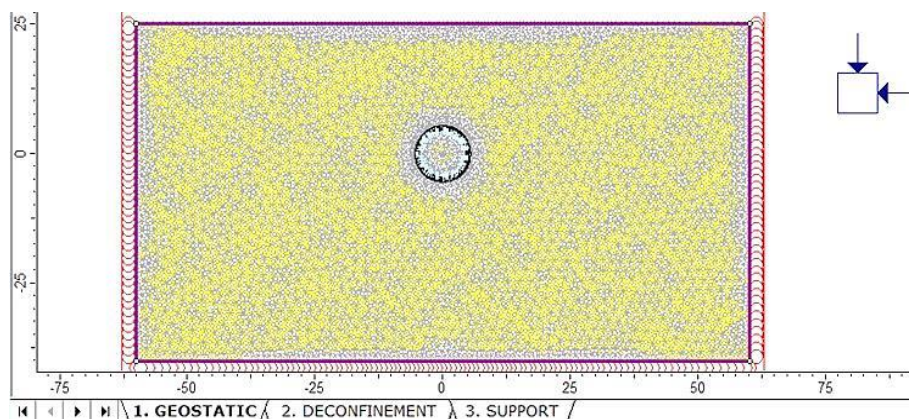
Για τα υπερκείμενα εδάφη με ύψος $H=15\text{m}$ μετρημένο από τη στέψη της σήραγγας, το εδαφικό μοντέλο έχει ύψος 60m , πηγαίνοντας από $+20\text{m}$, με $+0\text{m}$ να είναι το κέντρο του άξονα της σήραγγας στο $-4D=-4*10\text{m}=-40\text{m}$

Για τα υπερκείμενα εδάφη με ύψος $H=20\text{m}$ μετρημένο από τη στέψη της σήραγγας, το εδαφικό μοντέλο έχει ύψος 65m , πηγαίνοντας από $+25\text{m}$, με $+0\text{m}$ να είναι το κέντρο του άξονα της σήραγγας στο $-4D=-4*10\text{m}=-40\text{m}$

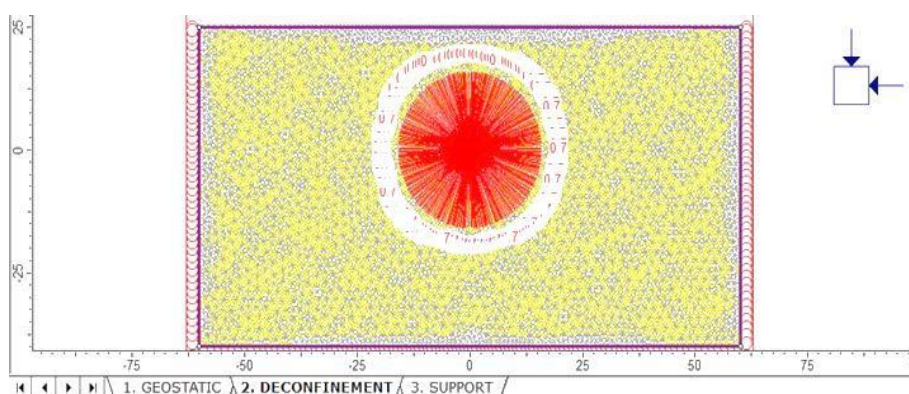
Και τα 4 εδαφικά μοντέλα κατά τον άξονα x έχουν το ίδιο μήκος 120m , $-6D$ αριστερά από το κέντρο του άξονα της σήραγγας και $+6D$ δεξιά από το άξονα της σήραγγας.

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες στην κάτω κομβοσειρά δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (άξονας z) και στις κομβοσειρές πλευρικά του μοντέλου δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις κατά την διαμήκη έννοια (άξονας x). Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τριγωνικά εξακομβικά με σταθερό μέγεθος. Συγκεκριμένα, γύρω από τη διατομή της

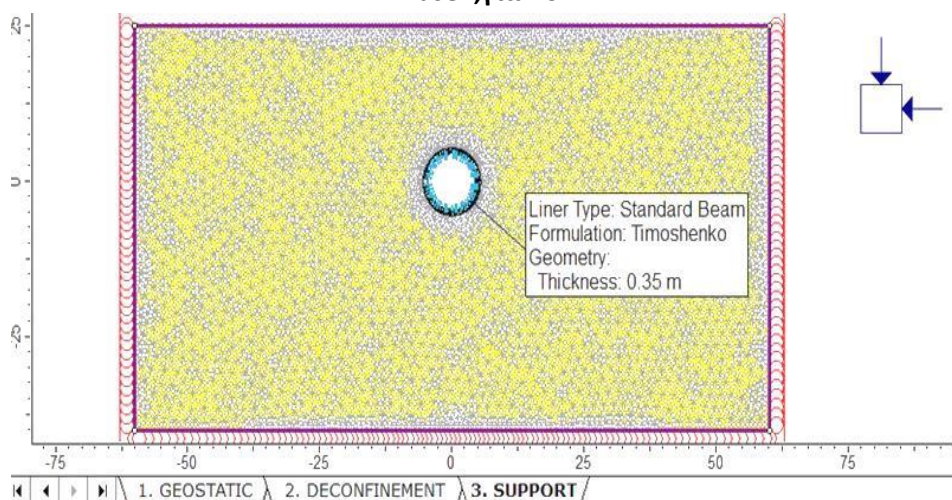
σήραγγας και σε απόσταση περίπου 1.5m, καθώς και στην επιφάνεια του εδάφους και στις ακραίες κομβοσειρές είναι πυκνότερα σε σχέση με την ευρύτερη περιοχή του μοντέλου.



Σχήμα 3α :1^ο στάδιο, κυκλική διατομή στο περιβάλλον του Phase2,για $K_0=1$ και γεωστατικό πεδίο τάσεων

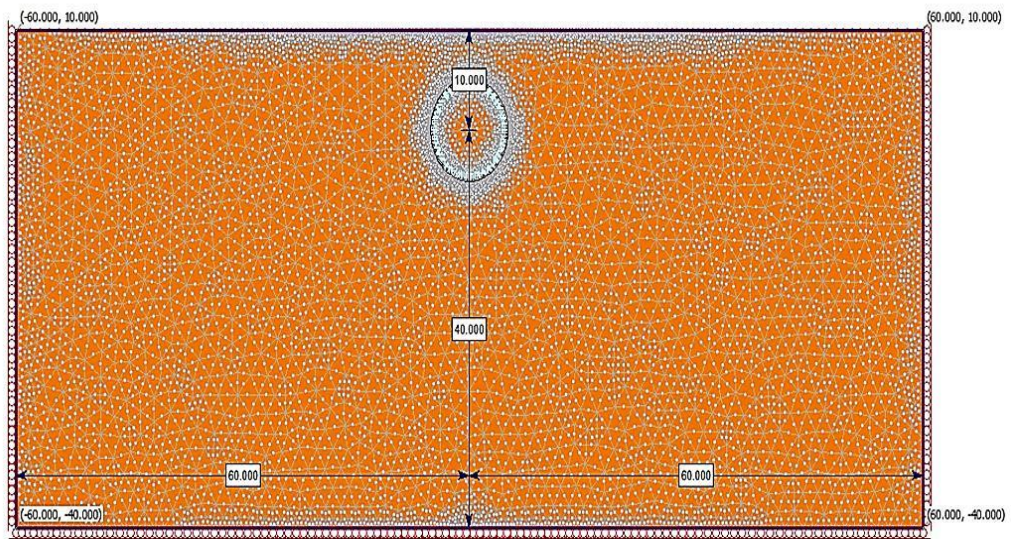


Σχήμα 3β: 2^ο στάδιο, αποτόνωση (DE confinement) για $\lambda=30\%$, στο περιβάλλον του Phase2,για $K_0=1$

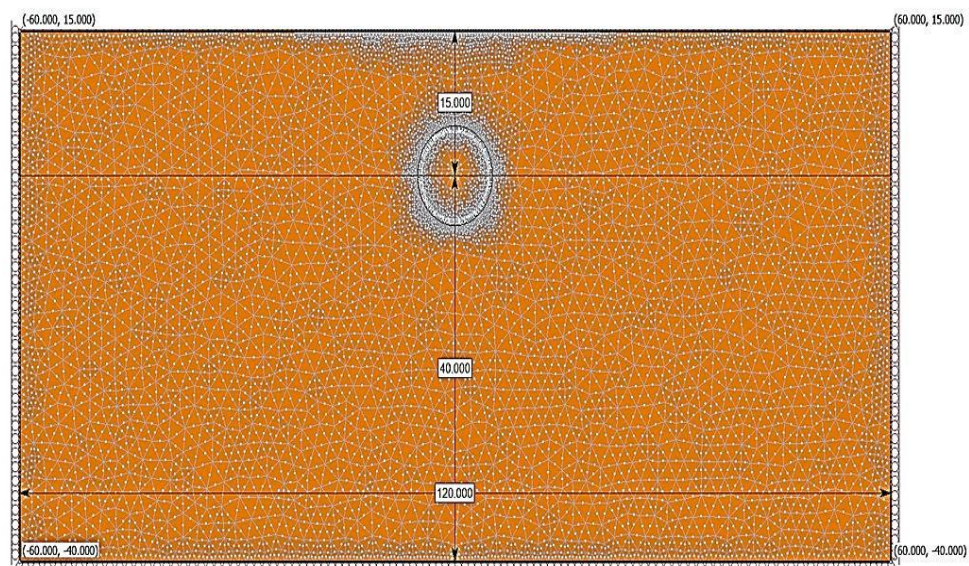


Σχήμα 3γ: 3^ο στάδιο, υποστήριξη με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο περιβάλλον του Phase2,για $K_0=1$

- Υπερκείμενο $H=10\text{m}$, από το κέντρο του άξονα της σήραγγας

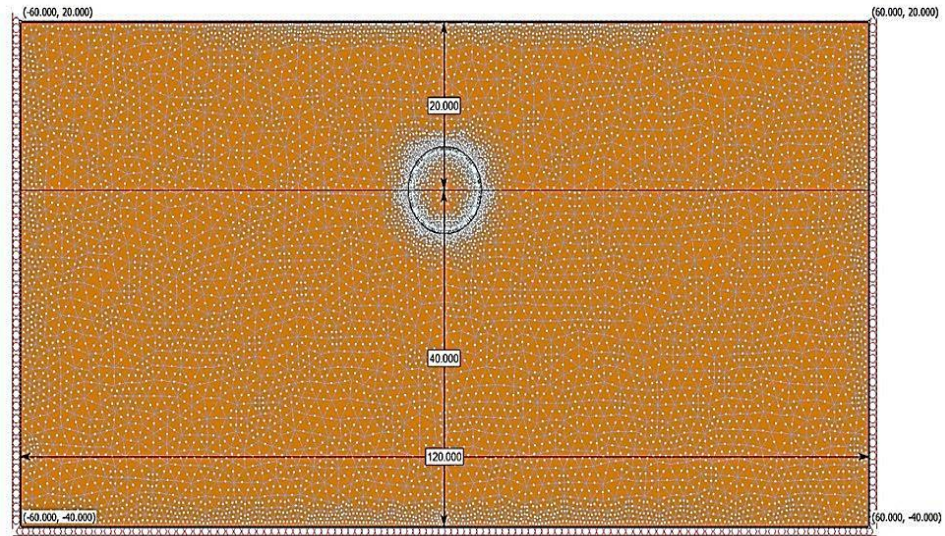


- Υπερκείμενο $H=15\text{m}$, από το κέντρο του άξονα της σήραγγας

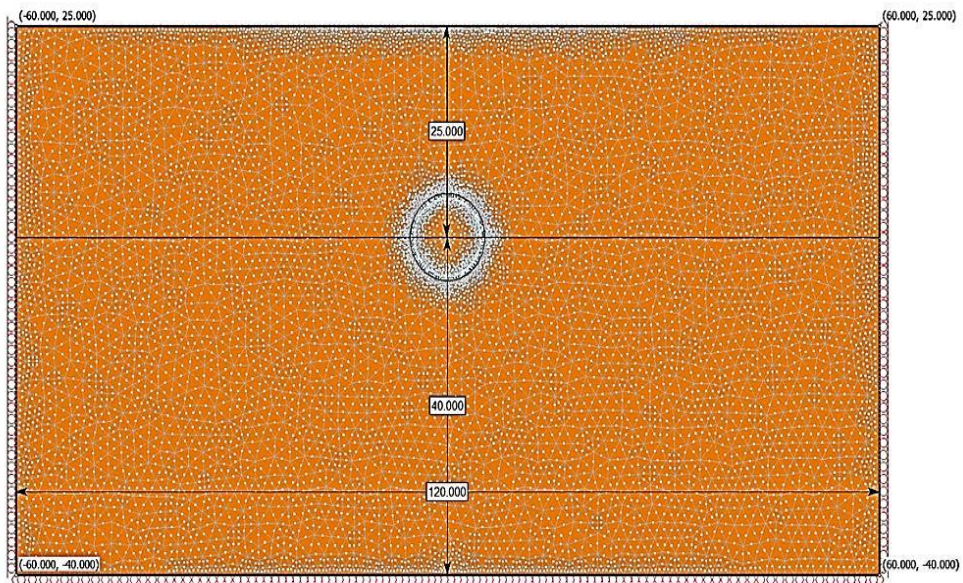


Σχήμα 3.1 α: Τομή μοντέλων, υπερκειμένων $H=10\text{m}$, $H=15\text{m}$

- Υπερκείμενο $H=20,m$ από το κέντρο του άξονα της σήραγγας



- Υπερκείμενο $H=25,m$ από το κέντρο του άξονα της σήραγγας



Σχήμα 3.1 α: Τομή μοντέλων, υπερκειμένων $H=20m$, $H=25m$

3.1.1 Περιγραφή Υλικών

3.1.1α Σκυρόδεμα

Αμέσως μετά την εκσκαφή κάθε διατομής σήραγγας, ταυτόχρονα με την εκσκαφή της επόμενης διατομής δηλαδή, τοποθετείται πάντα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ποιότητα C30/37 ,πάχους $t=35\text{cm}$, μέτρου ελαστικότητας $E=33\text{GPa}$, λόγο Poisson $\nu=0.25$ με συμπεριφορά γραμμική-ελαστική και τοποθετήθηκε σε όλη την περίμετρο της σήραγγας. Όταν η σήραγγα εκσκάπτεται σε δύο φάσεις, τότε σκυρόδεμα θα εκτοξεύεται και στο πάτωμα (invert) της πρώτης φάσης το οποίο μετά θα καθαιρείται κατά την εκσκαφή της δεύτερης φάσης. Λόγω μεγάλου πάχους σκυροδέματος και ρηχού βάθους σήραγγας, άρα και μικρού βάρους υπερκειμένων γαιών, δεν υπάρχει φόβος αστοχίας ή/και πλαστικοποίησης του υλικού.

3.1.1β Έδαφος

Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται υπό στεγνές/στραγγισμένες συνθήκες, θεωρώντας ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι κάτω από το επίπεδο εκσκαφής. Συνήθως στα ρηχά εδάφη λόγω κατασκευής δικτύων αποστράγγισης, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κάτω από το επίπεδο εκσκαφής. Στην εργασία εξετάζονται 8 διαφορετικά εδάφη με μηχανικά χαρακτηριστικά που δείχνουν κακής ποιότητας έδαφος έως αρκετά ισχυρό έδαφος σε αύξουσα σειρά . Όλα τα εδάφη έχουν ίδιο ειδικό βάρος $\gamma=20\text{KN/m}^3$, γωνία τριβής φ° που κυμαίνεται από 20° έως 25° , $\varphi \in (20^\circ, 35^\circ)$ και συνοχή c που κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 70 KPa , $c \in (10\sim 70 \text{ KPa})$, γωνία διαστολικότητας δ , ελήφθη $\delta = \frac{\varphi}{4}$ σταθερή για όλα τα εδάφη. Ο λόγος Poisson ελήφθη ίδιος και για τα 8 εδάφη, ίσος με $\nu = 0.333$. Όλα τα εδάφη εξετάστηκαν με το συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων να παίρνει δύο τιμές, $K_o = 0.5$ και $K_o = 1$ και με κριτήριο αστοχίας το κριτήριο Mohr-Coulomb. Συνεπώς εξετάστηκαν 16 εδάφη συνολικά με ονομασία από έδαφος 1 έως έδαφος 16. Οι αναλύσεις έγιναν και για τις δύο τιμές του K_o , αν και η τιμή του $K_o=0.5$ είναι αντιπροσωπευτική για ρηχές σήραγγες. Το μέτρο ελαστικότητας E του εδάφους θεωρήθηκε ίσο με 500 φορές την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u του (Bowles 1997)

$$E = 500 * c_u$$

Εξ.3.1

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1 παρακάτω

Πίνακας 1:Μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών

Μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών								
Κωδικός εδάφους	K_0	γ	ϕ	δ	c	c_u	E	ν
(-)	(-)	(KN/m ³)	(ο)	(ο)	(kPa)	(kPa)	(Μpa)	(-)
έδαφος-1a	0.5	20	20	5	10	113.6	56.8	0.333
έδαφος-2b	0.5	20	20	5	15	118.8	59.4	0.333
έδαφος-3c	0.5	20	20	5	20	124.2	62.1	0.333
έδαφος-4d	0.5	20	25	6.25	20	152.2	76.1	0.333
έδαφος-5e	0.5	20	25	6.25	30	162.8	81.4	0.333
έδαφος-6f	0.5	20	30	7.5	30	191.2	95.6	0.333
έδαφος-7g	0.5	20	30	7.5	50	212	106	0.333
έδαφος-8h	0.5	20	35	8.75	70	260	130	0.333
έδαφος-9a	1	20	20	5	10	113.6	56.8	0.333
έδαφος-10b	1	20	20	5	15	118.8	59.4	0.333
έδαφος-11c	1	20	20	5	20	124.2	62.1	0.333
έδαφος-12d	1	20	25	6.25	20	152.2	76.1	0.333
έδαφος-13e	1	20	25	6.25	30	162.8	81.4	0.333
έδαφος-14f	1	20	30	7.5	30	191.2	95.6	0.333
έδαφος-15g	1	20	30	7.5	50	212	106	0.333
έδαφος-16h	1	20	35	8.75	70	260	130	0.333

3.2 Αποτελέσματα

3.2.1 Μετατοπίσεις-Καθιζήσεις

Οι αναλύσεις που έγιναν αφορούν 80 αναλύσεις για:

- τα εδάφη 1 έως και 8
- κάθε υπερκείμενο έδαφος H_i ($i=10,15,20,25$)m,
- δύο τιμές K_0 ($K_0 = 0.5, K_0 = 1$) και
- πέντε τιμές αποτόνωσης λ_i , ($i=5,10,20,30,50$)%

και συνολικά για όλα τα υπερκείμενα εδάφη είναι 320 αναλύσεις και διεξήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2.

Ύστερα τα αποτελέσματα από το Phase2 συγκρίνονται με χρήση της εξ. του Gauss με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου excel. Η εξ. Gauss αφορά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους που περικλείονται από την καμπύλη Gauss.

Ως προς τις καθιζήσεις $S_v(x)$ στην εγκάρσια διεύθυνση , άξονας x

Οι καθιζήσεις $S_v(x)$ που μελετήθηκαν είναι στην εγκάρσια διεύθυνση, άξονας x , (transverse surface settlement profiles) ακριβώς πάνω από το κέντρο του άξονα της σήραγγας, (θέση $x = 0$), όπου οι μετακινήσεις είναι οι μέγιστες S_v, max . Έγιναν διαγράμματα των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων $S_v(x)$ ως προς τα υπερκείμενα εδάφη $H_i, (i=10,15,20,25)$ m από το κέντρο του άξονα της σήραγγας και ανηγμένα στη διάμετρο της σήραγγας D , (H_i/D).

Υπενθυμίζεται η Εξ. Καμπύλης Gauss για την μορφή των εγκάρσιων επιφανειακών καθιζήσεων όπως έδειξαν οι (Peck & Schmidt) να έχουν τέτοια μορφή:

$$S_v(x) = S_v, max * \exp\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right) \quad \text{Εξ. 3.2.1}$$

Ως προς το σημείο καμπής i

Ακόμα συσχετίζεται το σημείο καμπής i με το βάθος των υπερκειμένων (H_i/D) και για τις δύο τιμές K_o .

Το σημείο καμπής i από τους (O'Reilly % New, 1982)

$$i = Kz_o \quad \text{Εξ.3.2.2}$$

Με z_o το βάθος εκσκαφής έως το κέντρο της σήραγγας, δηλαδή το βάθος για τα υπερκείμενα (H_i)

Ως προς τον όγκο εδάφους στην επιφάνεια V_s

Ακόμα, υπολογίζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου ο όγκος ανά μονάδα μήκους (δηλαδή το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη Gauss) των εγκάρσιων καθιζήσεων (V_s) στην επιφάνεια του εδάφους, ο οποίος υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της Εξ.3.2.1

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v(x) dx = \sqrt{2\pi} * i_x * S_v, max \cong 2.5 * i_x * S_v, max \quad \text{Εξ.3.2.3}$$

Και συγκρίνεται με τον όγκο ανά μονάδα μήκους (GLoss) που διεξήχθη από τα αποτελέσματα των συγκλίσεων στη διατομή της σήραγγας από το Phase2

Υπενθυμίζεται η Εξ. που δίνει την απώλεια όγκου εδάφους ανά μονάδα μήκους λόγω των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας

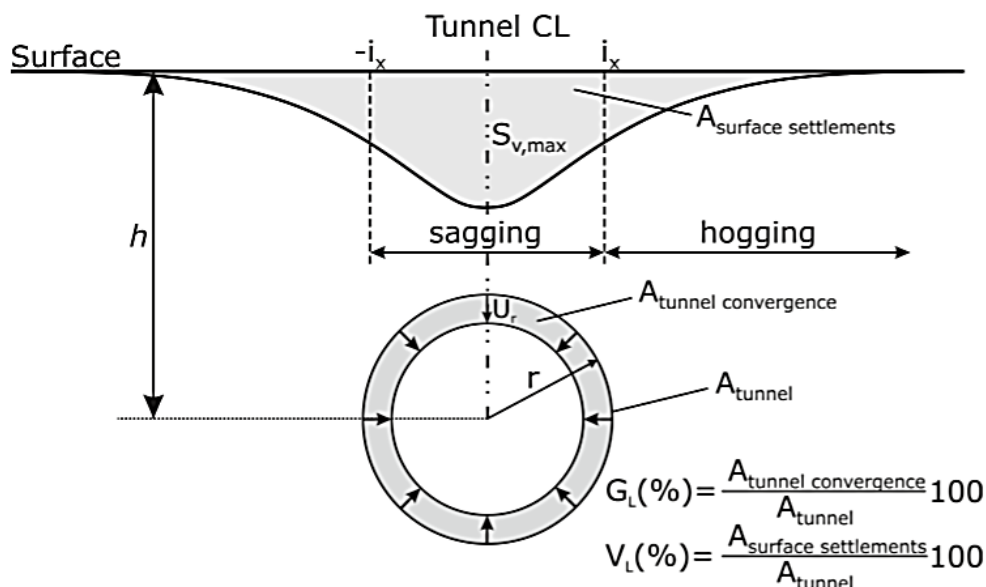
$$GL (\%) = \frac{A_{tunnel\ convergence}}{A_{tunnel}} * 100 \quad \text{Εξ.3.2.4α}$$

Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε ως εξής:

$$GL (\%) = 1 - \left[\left(1 - \frac{2 * U_{average}}{D} \right)^2 \right] \quad \text{Εξ.3.2.4β}$$

Όπου, $U_{average}$ η προκύπτουσα από το Phase2 τιμή της σύγκλισης των τοιχωμάτων

Υπενθυμίζεται η καμπύλη εγκάρσιων καθιζήσεων με τα μεγέθη $V_L(\%)$, $G_L(\%)$



Τέλος,

Ως προς τον όγκο που χάνεται στη διατομή από τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων (Gloss %)

- έγιναν διαγράμματα συσχέτισης του με τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης N_s , για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 . Διάγραμμα ($G_L(\%)$ - $\lambda(\%)$)
- έγιναν διαγράμματα συσχέτισης του με το συντελεστή υπερφόρτισης N_s , συναρτήσει των τιμών του συντελεστή αποτόνωσης λ , για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 . Διάγραμμα ($G_L(\%)$ - N_s)
- έγιναν διαγράμματα συσχέτισης του με το συντελεστή ευστάθειας μετώπου L_f (Προυντζόπουλος 2012) συναρτήσει των τιμών του συντελεστή αποτόνωσης λ , για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 . Διάγραμμα ($G_L(\%)$ - L_f)
- διεξήγαμε μια εμπειρική σχέση που συσχετίζει τον όγκο Gloss(%) με τον αδιάστατο δείκτη ευστάθειας μετώπου L_f (Προυντζόπουλος 2012) και έγιναν τα διαγράμματα $G_L(\%)$ με τον δείκτη L_f , συναρτήσει των τιμών του συντελεστή αποτόνωσης λ , για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 . Διάγραμμα ($G_L(\%)$ - L_f)

Η εμπειρική σχέση που διεξήχθη είναι η παρακάτω:

$$GL(\%) = \alpha * \Lambda f^{-b} \quad \text{Εξ.3.2.5}$$

όπου:

$$\alpha = (\lambda * \frac{H}{D})^{\Lambda} K_o \quad \text{Εξ.3.2.6}$$

$$b = \frac{0.1}{K_o} * e^c \quad \text{Εξ.3.2.7}$$

$$C = K_o^{(1-\lambda)} \quad \text{Εξ.3.2.8}$$

- Έγιναν διαγράμματα συσχέτισής του με την μέγιστη καθίζηση Sv, max ανηγμένη ως προς την διάμετρο της σήραγγας D. Η μέγιστη καθίζηση συμβαίνει πάνω από το κέντρο του άξονα της σήραγγας. Πάλι, για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_o .Διάγραμμα ($Sv, max/D$ (%)- $GL(\%)$)
- Έγιναν διαγράμματα συσχέτισής του με την μέγιστη καθίζηση Sv, max ανηγμένη ως προς το σημείο καμψής i . Πάλι, για όλα τα υπερκείμενα εδάφη και τις δύο τιμές του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_o .Διάγραμμα ($Sv, max/i$ (%)- $GL(\%)$)

3.2.1.1 Αναφορά στο συντελεστή ευστάθειας μετώπου Προυντζόπουλος (2012)

Ο Προυντζόπουλος εξέφρασε την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής U_h (οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου) με μια αδιάστατη παράμετρο την $\Omega f, Area$ συναρτήσσει των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και του βάθους εκσκαφής. Για αυτό, χρησιμοποίησε δύο αδιάστατες παραμέτρους, ΛF και $\Omega f, area$ τα οποία αντιπροσωπεύουν αδιάστατα τη γεωτεχνική κατάσταση και την εξώθηση του μετώπου αντίστοιχα. Ο δείκτης ευστάθειας μετώπου είναι :

$$\Lambda_F = \frac{5.25 * c * (N_\varphi)^\alpha}{\gamma * H^{1-b} * D^b} = \frac{5.25 * c * (\tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}))^\alpha}{\gamma * H^{1-b} * D^b} \quad \text{Εξ.3.2.9}$$

όπου,

$$\alpha = 0.59 + 0.16 * \frac{H}{D} \quad \text{Εξ.3.2.10}$$

$$b = \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.37} \quad \text{Εξ.3.2.11}$$

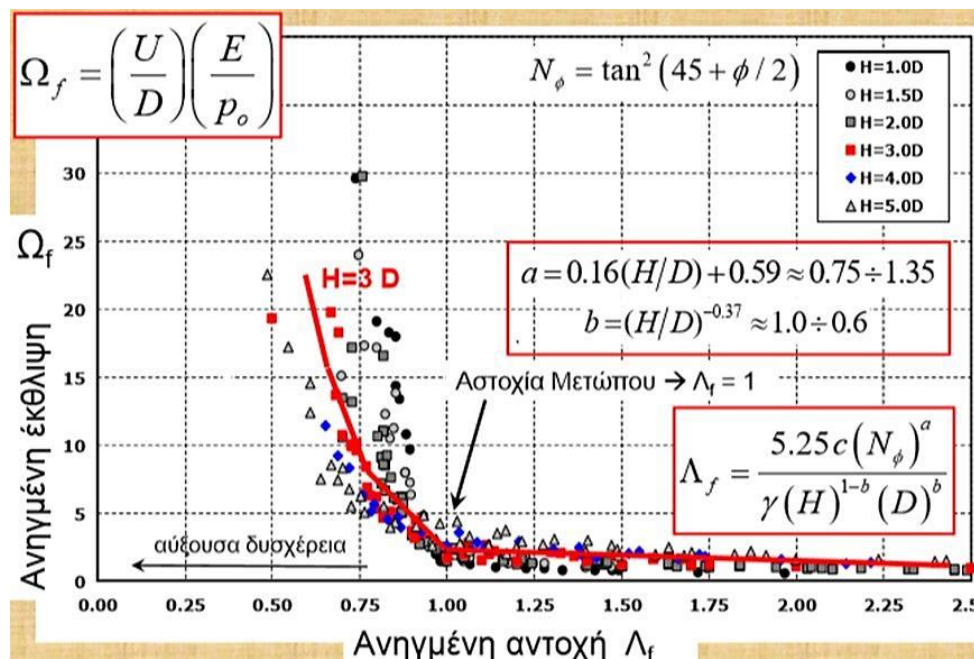
Η έκθλιψη εκφράστηκε μέσω της παραμέτρου $\Omega f, area$

$$\Omega f, area = \frac{E_{soil} * U_h}{D * P_o} \quad \text{Εξ.3.2.12}$$

όπου Uh είναι η οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου, E_{soil} είναι το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους και P_o είναι η μέση γεωστατική τάση η οποία υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$P_o = \frac{1+K_o}{2} * \gamma * H \quad \text{Εξ.3.2.13}$$

Η συσχέτιση των δύο αυτών αδιάστατων παραμέτρων Λ_f και Ω_f , *area* για ρηχές σήραγγες βάθους $H/D \leq 5$ φαίνεται στο Σχήμα(3.2.1.1 α)



Με προτεινόμενη συσχέτιση Λ_f με Ω_f μέσω της εξίσωσης:

$$\Omega_f, area = \frac{40}{\left(\frac{H}{D}\right) * (\Lambda_f + B)^C} + 0.6 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.4} \quad \text{Εξ.3.2.14}$$

Όπου,

$$B = 0.23 * \left(\frac{H}{D}\right)^{0.425} \quad \text{Εξ.3.2.15}$$

$$C = \frac{16 * D}{H} \quad \text{Εξ.3.2.16}$$

3.2.2 Αποτόνωση της σήραγγας

Η αποτόνωση της σήραγγας έγινε μέσα από την εφαρμογή εσωτερικής πίεσης στα τοιχώματα της σήραγγας ίση με $p_i = p_o \cdot (1 - \lambda)$ για $\lambda = 5\%$, $\lambda = 10\%$, $\lambda = 20\%$, $\lambda = 30\%$ και $\lambda = 50\%$. Επειδή το πρόγραμμα Phase2 διαβάζει τιμές αποτόνωσης ως $(1 - \lambda)$ εισήχθησαν οι τιμές απομείωσης των γεωστατικών τάσεων όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2**

Για αποτόνωση	Phase2D
λ (%)	$(1 - \lambda)$ %
5	0.95
10	0.90
20	0.80
30	0.70
50	0.50

Πίνακας 2: Αντιστοιχίες τιμών αποτόνωσης λ

Για τα εδάφη 1 έως και 8, η μέση γεωστατική τάση p_o για το βάθος εκσκαφής από τον άξονα της σήραγγας μετρημένο $H = 10\text{m}$, συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o = 0.5$ και κοινό για όλα τα εδάφη ειδικό βάρος $\gamma = 20\text{(kN/m}^3\text{)}$ είναι:

$$p_o = \frac{1 + k_o}{2} * \gamma * z = \frac{1 + 0.5}{2} * 20 * 10 = 225 \text{ kPa.}$$

Η αποτόνωση $\lambda = 5\% = 0.05$ αντιστοιχεί σε απομείωση της p_o κατά $(1 - \lambda) * p_o$:

$$p_i = (1 - 0.05) * 225 = 213.75 \text{ kPa}$$

Αντίστοιχα προκύπτουν οι αποτονώσεις για τα υπόλοιπα υπερκείμενα εδάφη στα βάθη εκσκαφής $H = 15\text{m}$, $H = 20\text{m}$, $H = 25\text{m}$. Συγκεντρωτικά παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8, $H = 10\text{m}$, $K_o = 0.5$	Για αποτόνωση	Phase2D	p_o (kPa)	$(1 - \lambda) * p_o$ (kPa)
	λ (%)	$(1 - \lambda)$ %	225	
	5	0.95		213.75
	10	0.90		202.5
	20	0.80		180
	30	0.70		157.5
	50	0.50		112.5

Πίνακας 2α: Αποτόνωση λ_i , για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής $H = 10\text{m}$ και $K_o = 0.5$

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8, $H = 15\text{m}$, $K_o = 0.5$	Για αποτόνωση	Phase2D	p_o (kPa)	$(1 - \lambda) * p_o$ (kPa)
	λ (%)	$(1 - \lambda)$ %	300	
	5	0.95		285
	10	0.90		270
	20	0.80		240
	30	0.70		210
	50	0.50		150

Πίνακας 2β: Αποτόνωση λ_i , για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής $H = 15\text{m}$ και $K_o = 0.5$

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8 H=20m, Ko=0.5	Για αποτόνωση	Phase2D	ρ_0 (kPa)	(1-λ)* ρ_0 (kPa)
	λ (%)	(1-λ) %	375	
	5	0.95		356.25
	10	0.90		337.5
	20	0.80		300
	30	0.70		262.5
	50	0.50		187.5

Πίνακας 2γ: Αποτόνωση λi, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=20m και Ko=0.5

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8, H=25m, Ko=0.5	Για αποτόνωση	Phase2D	ρ_0 (kPa)	(1-λ)* ρ_0 (kPa)
	λ (%)	(1-λ) %	450	
	5	0.95		427.5
	10	0.90		405
	20	0.80		360
	30	0.70		315
	50	0.50		225

Πίνακας 2δ: Αποτόνωση λi, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=25m και Ko=0.5

Για Ko=1

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8 H=10m, Ko=1	Για αποτόνωση	Phase2D	ρ_0	(1-λ)* ρ_0
	λ (%)	(1-λ) %	300	
	5	0.95		285
	10	0.90		270
	20	0.80		240
	30	0.70		210
	50	0.50		150

Πίνακας 2α': Αποτόνωση λi, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=10m και Ko=1

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8 H=15m, Ko=1	Για αποτόνωση	Phase2D	ρ_0	(1-λ)* ρ_0
	λ (%)	(1-λ) %	400	
	5	0.95		380
	10	0.90		360
	20	0.80		320
	30	0.70		280
	50	0.50		200

Πίνακας 2β': Αποτόνωση λi, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=15m και Ko=1

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8 H=20m, Ko=1	Για αποτόνωση	Phase2D	p_o (kPa)	$(1-\lambda)*p_o$ (kPa)
	λ (%)	(1- λ) %	500	
	5	0.95		475
	10	0.90		450
	20	0.80		400
	30	0.70		350
	50	0.50		250

Πίνακας 2γ': Αποτόνωση λι, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=20m και Ko=1

Για όλα τα εδάφη από 1 έως και 8 H=25m, Ko=1	Για αποτόνωση	Phase2D	p_o	$(1-\lambda)*p_o$
	λ (%)	(1- λ) %	600	
	5	0.95		570
	10	0.90		540
	20	0.80		480
	30	0.70		420
	50	0.50		300

Πίνακας 2δ' : Αποτόνωση λι, για υπερκείμενα εδάφη σε βάθος εκσκαφής H=25m και Ko=1

3.2.3 Καθιζήσεις στην εγκάρσια διεύθυνση

Από το σύνολο των καθιζήσεων που αναλύθηκαν επιλέχθηκαν χάριν συντομίας οι καθιζήσεις S_v που αντιστοιχούν στα εδάφη 1,3 και 7 με $K_o=0.5$ και $K_o=1$, βάθη εκσκαφής 10m και 15m από το κέντρο του άξονα της σήραγγας σε διαγράμματα συσχετισμένες με την ανηγμένη απόσταση x ως προς την διάμετρο D . Ενώ στους Πίνακες 3 και 4, περιλαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης καθιζήσης S_v, \max για τα εδάφη 1,3 και 7 και όλα τα βάθη εκσκαφής. Προέκυψαν από το πρόγραμμα Phase2D και με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου excel έγιναν τα διαγράμματα.

Όμοια μορφή καθιζήσεων παρατηρήθηκε και για τα υπόλοιπα εδάφη στα αποτελέσματα από το υπολογιστικό φύλλο excel, με στενό εύρος καμπής για τα εδάφη με φόρτιση $K_o=0.5$. Ενώ για φόρτιση $K_o=1$ παρατηρήθηκε στο υπολογιστικό φύλλο excel για όλα τα εδάφη ευρύτερο εγκάρσιο πλάτος και σημαντικά μικρότερες τιμές καθιζήσεων λόγω της τριαξονικής καταπόνησης

Παρατηρούμε για $K_o=1$ λόγω της τριαξονικής καταπόνησης που βρίσκονται τα εδάφη λόγω μεγαλύτερης οριζόντιας τάσης εδάφους, οι καθιζήσεις και η απώλεια όγκου μειώνονται. Ακόμα το εύρος των καθιζήσεων «απλώνει» λόγω της αύξησης της οριζόντιας απόστασης i από το κέντρο της σήραγγας. σε σχέση με το εύρος για $K_o=0.5$.

Σύμφωνα με τους (Dolezalova 2002, Franzius 2005 κ.α.), η μικρή τιμή στον δείκτη K_o οδηγεί σε μικρότερες πλευρικές πιέσεις άρα και μικρότερη εδαφική δυσκαμψία γύρω από τη σήραγγα. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης καθιζήσης, επομένως δημιουργία πιο στενού προφίλ καθιζήσεων με μικρότερη απόσταση σημείου καμπής i και μεγαλύτερη απώλεια όγκου εδάφους.

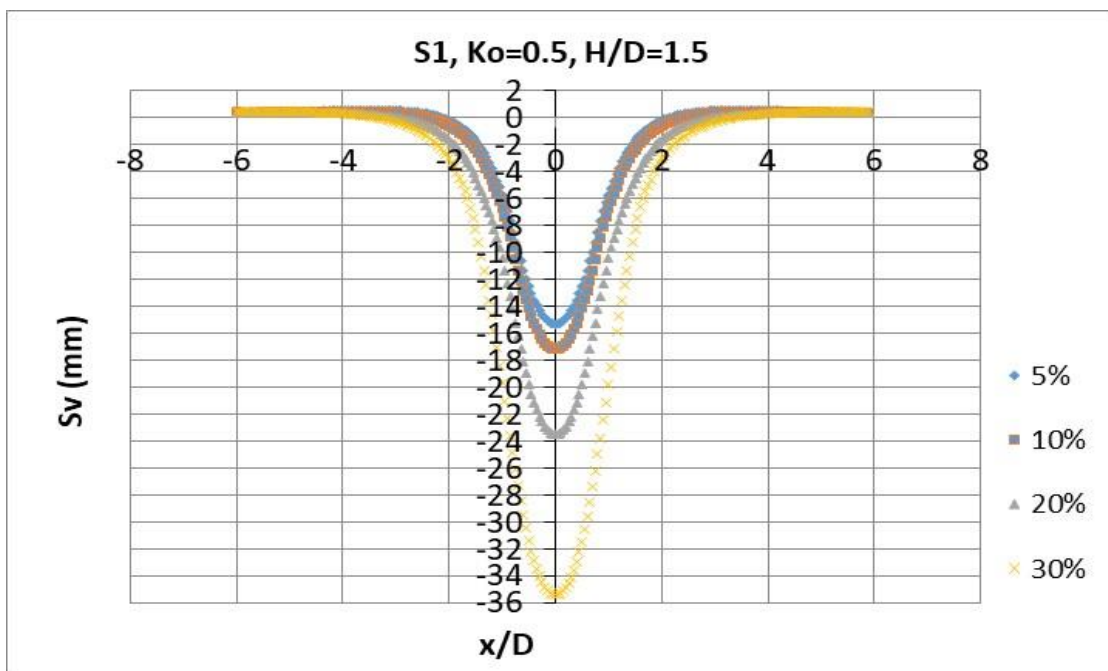
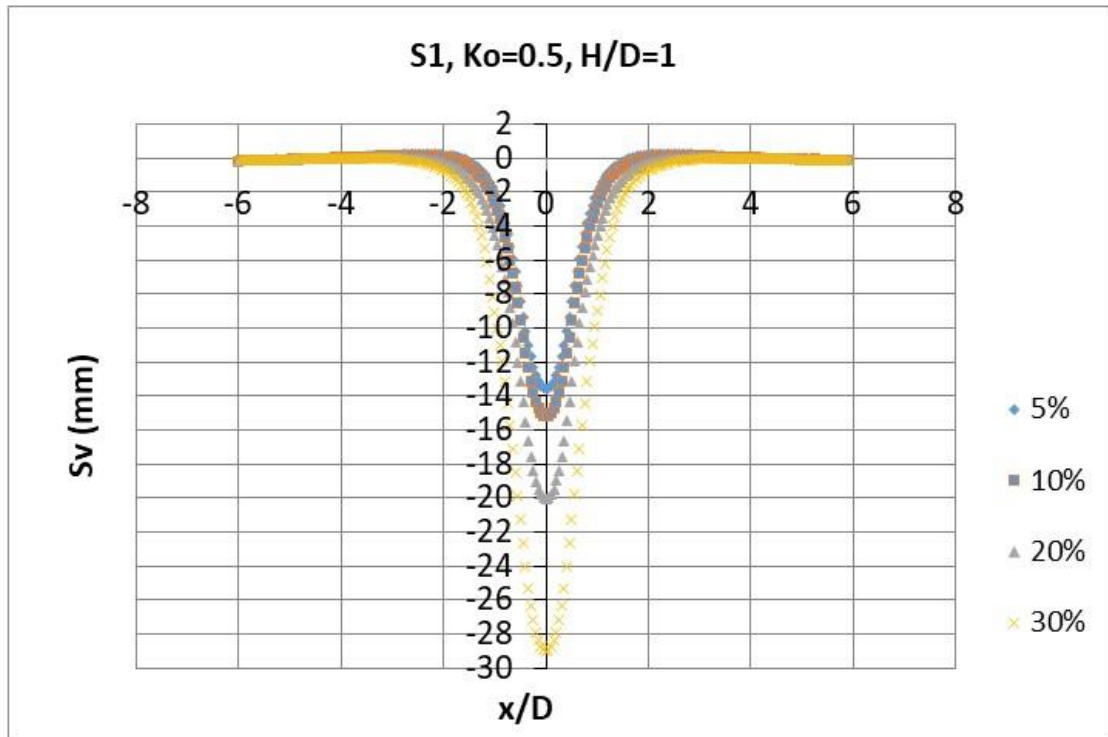
- **Εδάφη 1,3 και 7, $K_0=0.5$, $H=10m$, $H=15m$, $H=20m$ και $H=25m$**

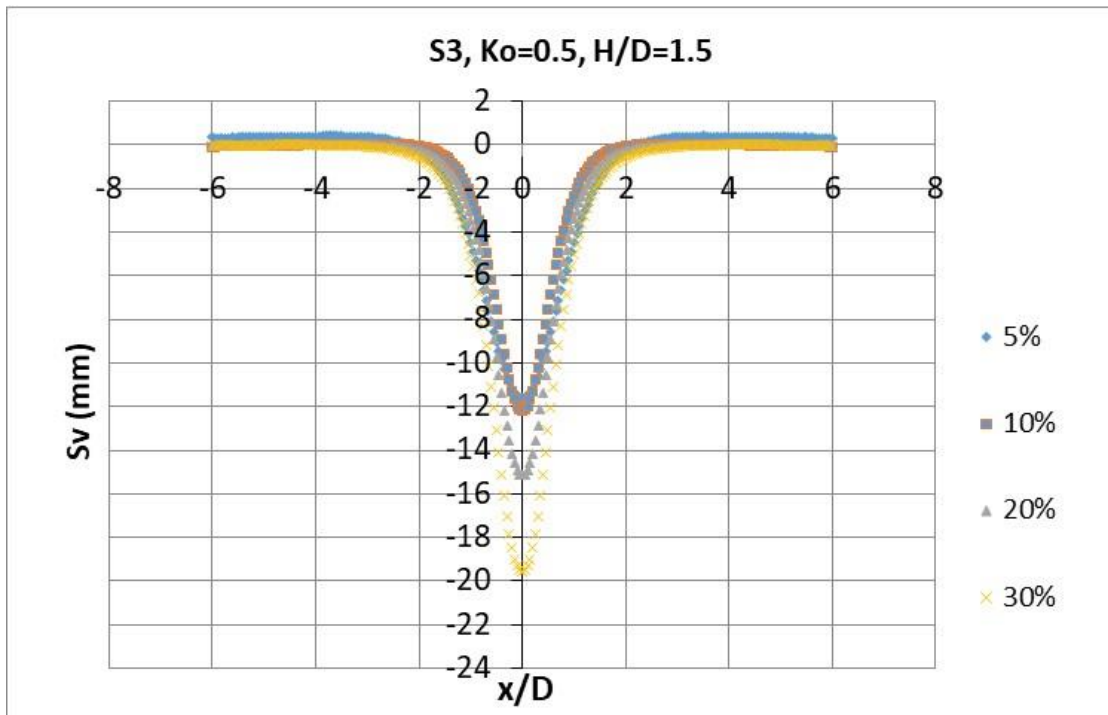
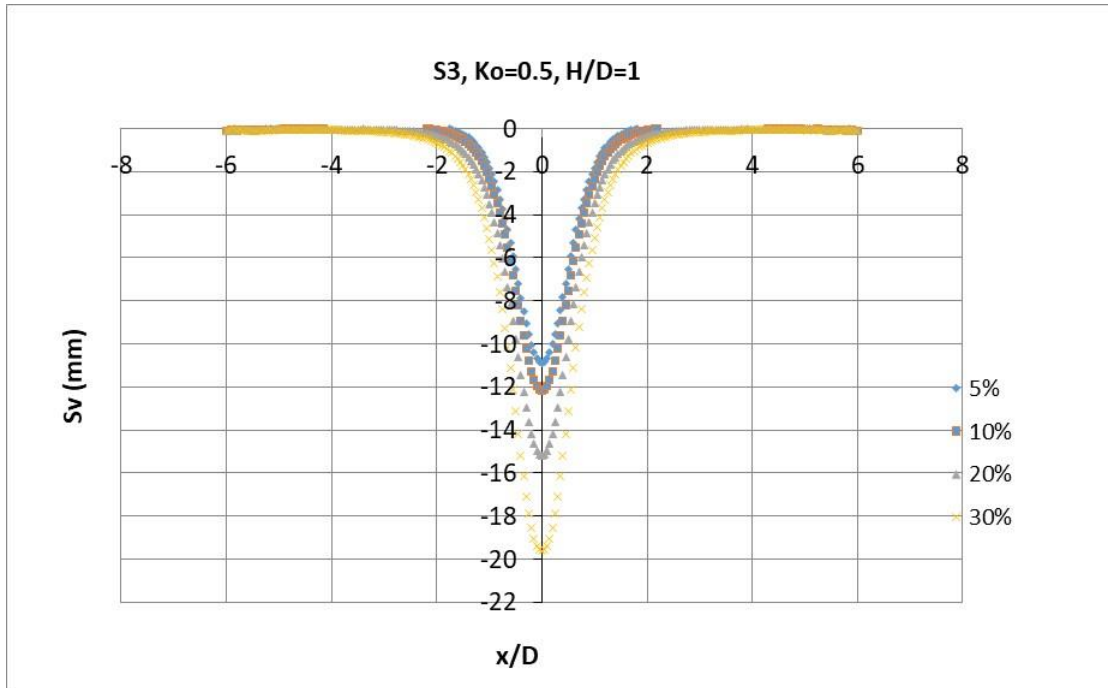
Δίνονται στον Πίνακα 3 οι τιμές της μέγιστης καθίζησης για τα εν λόγω εδάφη και παρακάτω τα διαγράμματα των καθιζήσεων που ακολουθούν την καμπύλη Gauss, για τα βάθη υπερκειμένων $H=5$ και $H=10m$ από την στέψη της σήραγγας

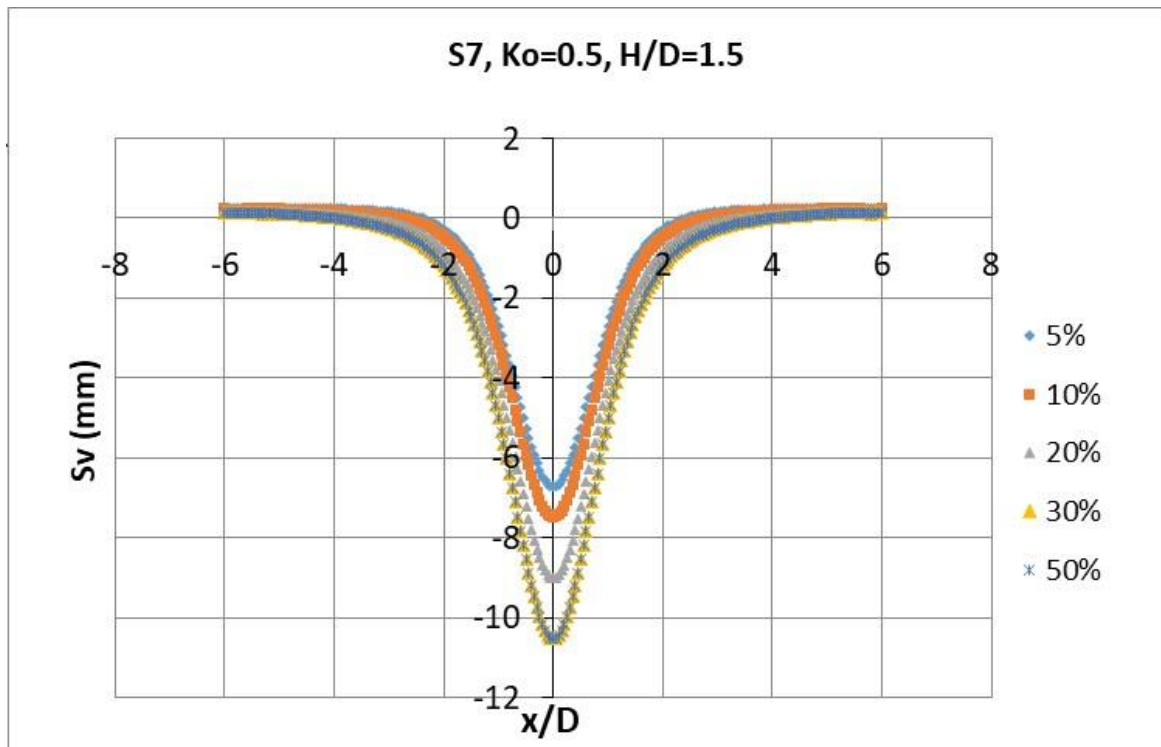
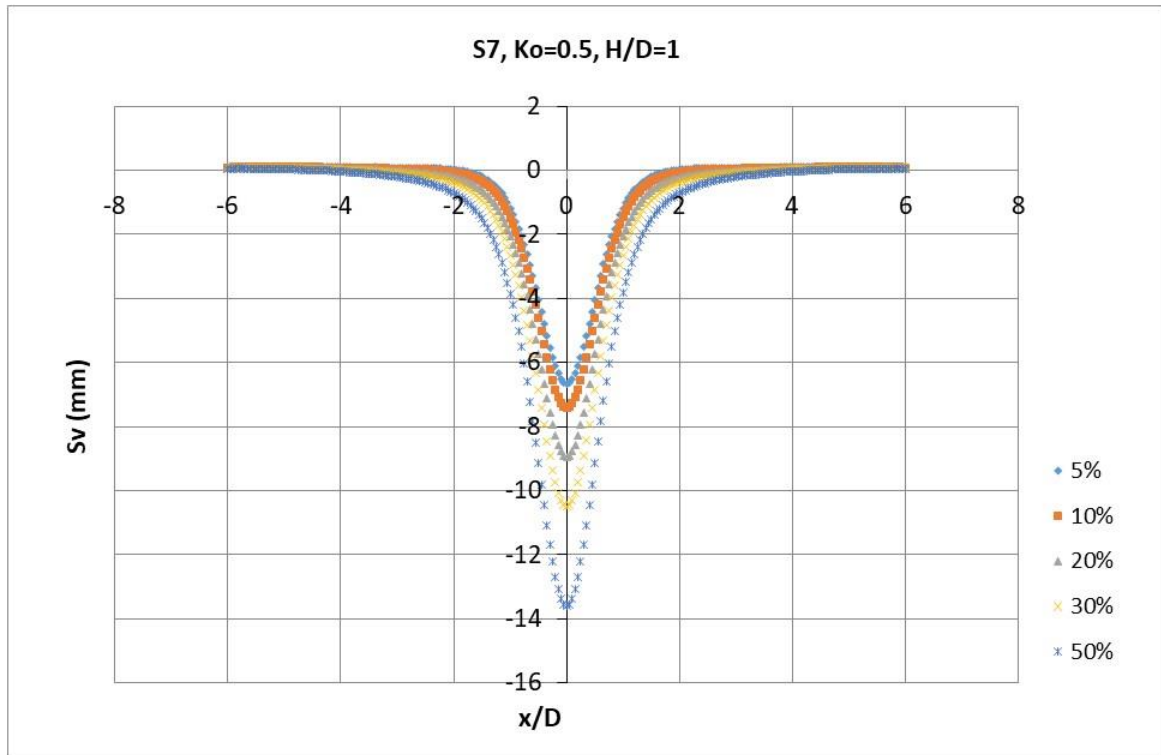
Η ανάλυση για το έδαφος 1 για $\lambda=50\%$ ήταν αδύνατον να επιλυθεί.

Πίνακας 3

Έδαφος 1 (S1)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	13.6	15.34	20.07	29.04
H=15m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	15.34	17.21	23.48	35.43
H=20m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	16.26	18.36	25.79	39.46
H=25m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	16.99	19.25	27.60	42.52
Έδαφος 3 (S3)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	10.9	12.2	15.23	19.63
H=15m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	11.67	13.02	16.80	22.87
H=20m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	12.28	13.70	18.11	25.72
H=25m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	12.76	14.30	19.32	28.36
Έδαφος 7 (S7)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	6.66	7.42	8.95	10.49
H=15m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	6.73	7.49	9.01	10.54
H=20m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	6.70	7.47	9	10.53
H=25m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	6.63	7.40	8.95	10.51





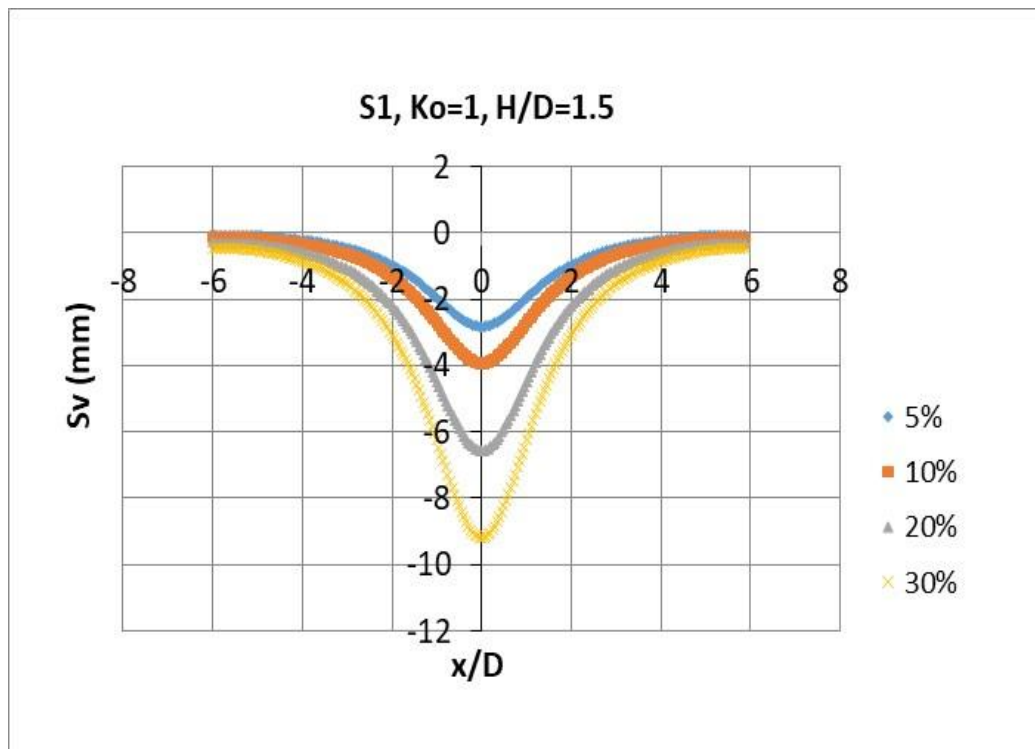
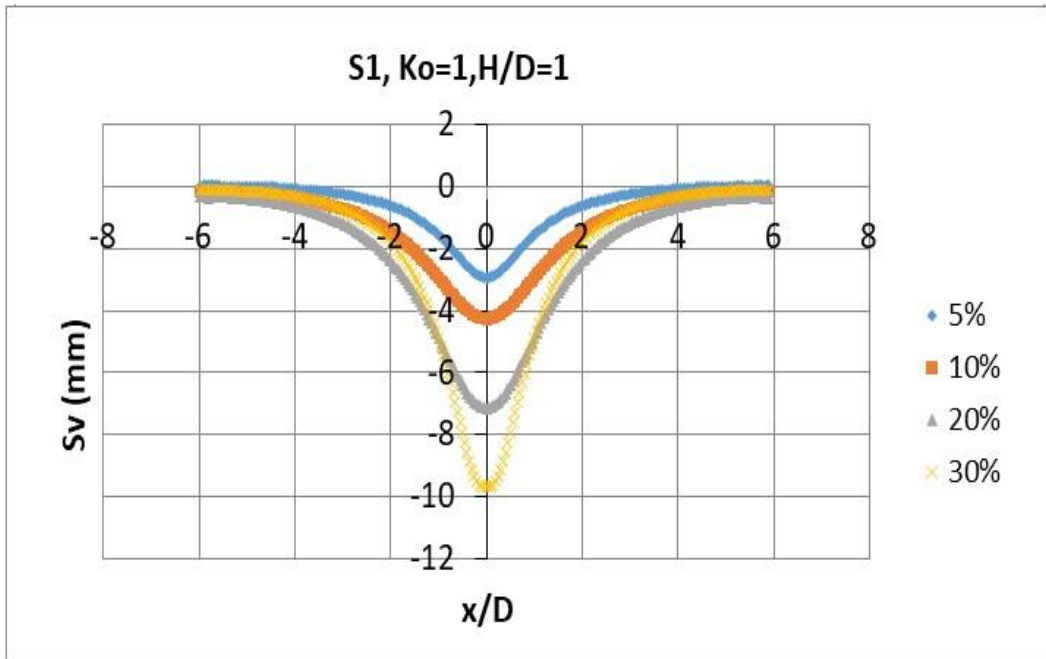


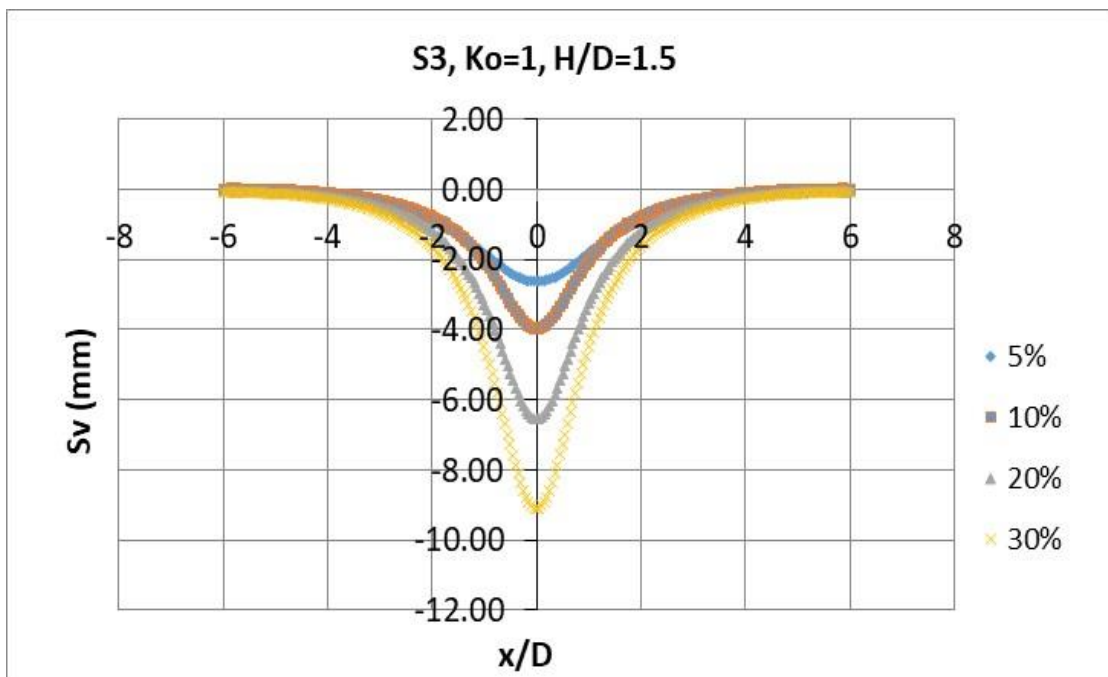
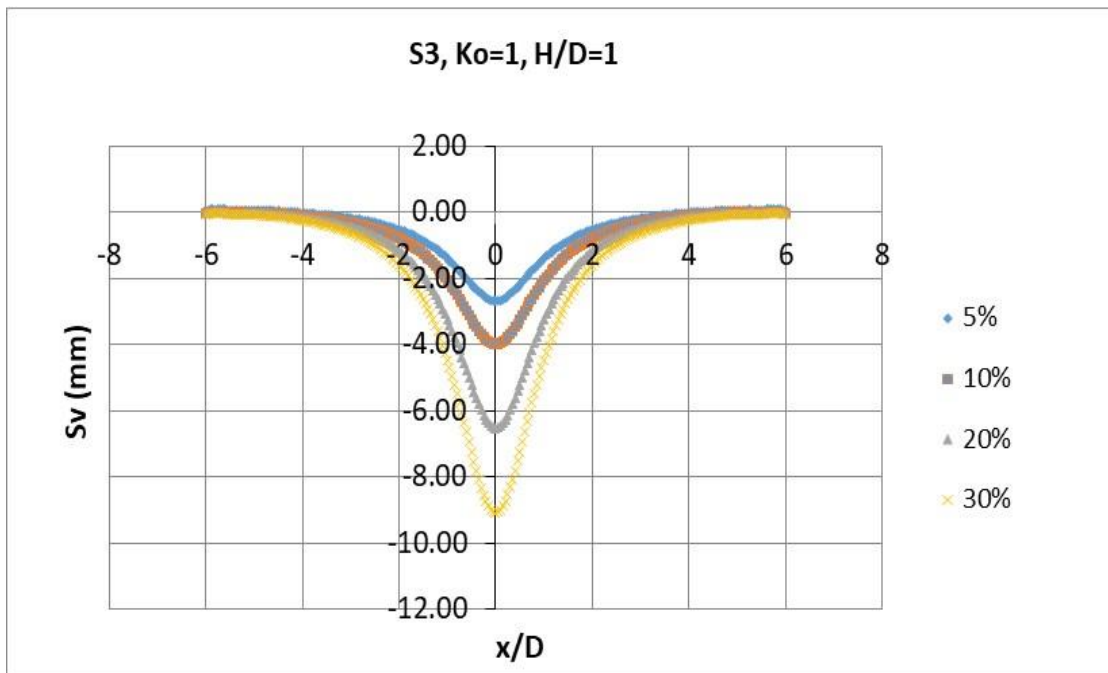
- **Εδάφη 1,3 και 7, $K_0=1$, $H=10m$, $H=15m$, $H=20m$ και $H=20m$**

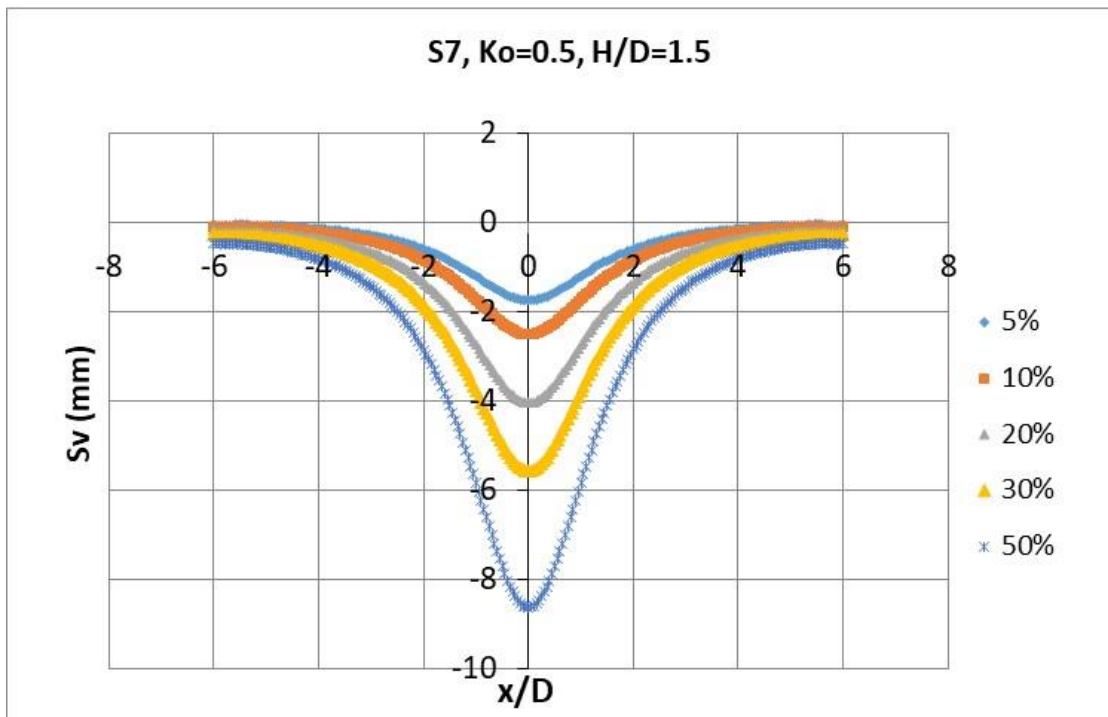
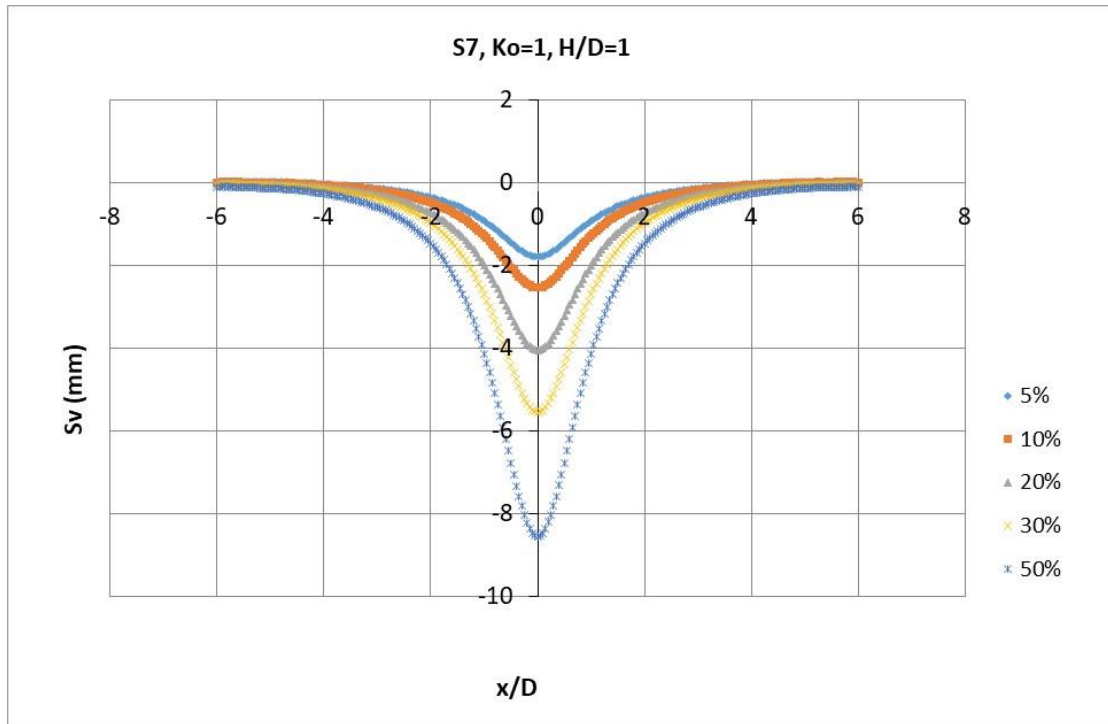
Δίνονται στον Πίνακα οι τιμές της μέγιστης καθίζησης για τα εν λόγω εδάφη και παρακάτω τα διαγράμματα των καθιζήσεων που ακολουθούν την καμπύλη Gauss, για τα βάθη υπερκειμένων $H=5$ και $H=10m$ από την στέψη της σήραγγας

Πίνακας 4

Έδαφος 1 (S1)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	2.92	4.27	7.14	9.68
H=15m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.83	3.95	6.57	9.2
H=20m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.73	4.2	7.13	10.05
H=25m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.67	4.17	7.16	10.16
Έδαφος 3 (S3)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	2.72	4	6.56	9.13
H=15m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.63	3.95	6.57	9.20
H=20m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.54	3.88	6.56	9.23
H=25m				
$S_{v,max}$ (mm)	2.49	3.85	6.59	9.32
Έδαφος 7 (S7)				
H=10m	$\lambda=5\%$	$\lambda=10\%$	$\lambda=20\%$	$\lambda=30\%$
$S_{v,max}$ (mm)	1.80	2.55	4.05	5.55
H=15m				
$S_{v,max}$ (mm)	1.75	2.51	4.04	5.57
H=20m				
$S_{v,max}$ (mm)	1.69	2.47	4.02	5.57
H=25m				
$S_{v,max}$ (mm)	1.66	2.45	4.04	5.62







3.2.4 Σημείο Καμπής *i*

Για όλα τα βάθη εκκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (H/D) συσχετίζεται το σημείο καμπής για $Ko=0.5$ και $Ko=1$ (Σχήμα 3.2.4 α)

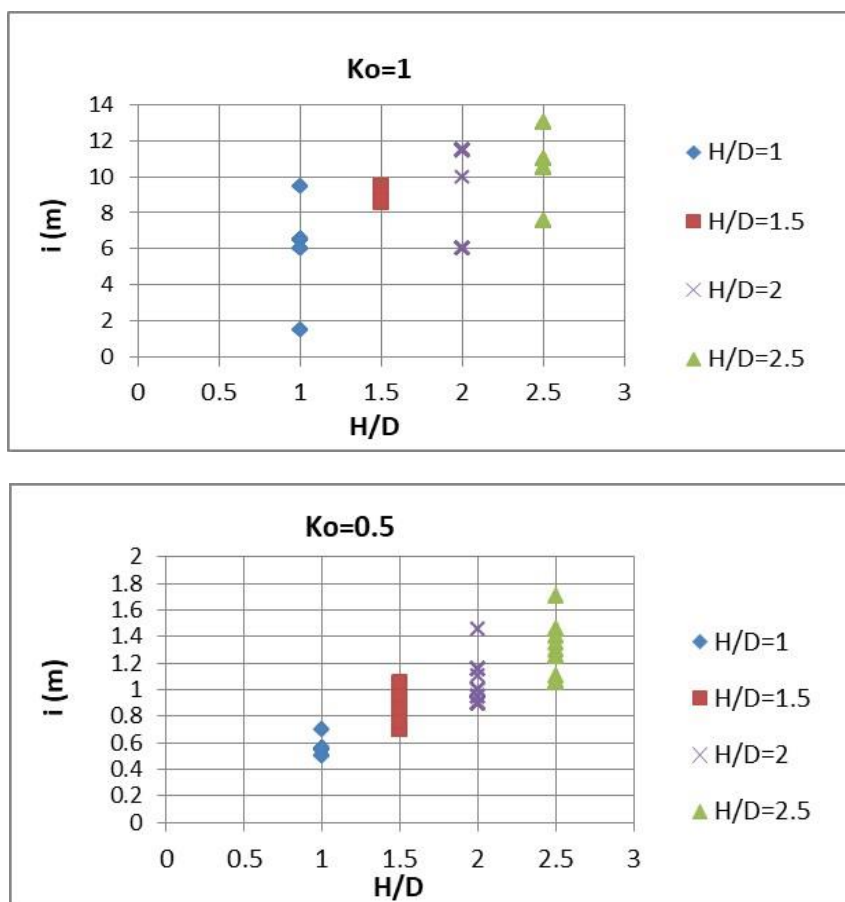
Το σημείο καμπής βρέθηκε στο πέρας κάθε ανάλυσης ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

Σχηματίστηκαν τα προφίλ των κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας. Βρέθηκε ο λόγος dy/dx για κάθε πεπερασμένο διάστημα dx σε όλη την περιοχή της καμπύλης Gauss. Ύστερα υπολογίστηκε ο λόγος $\frac{dy^2}{dx}$ και εκεί που ο λόγος των ημιτόνων του πεπερασμένου διαστήματος $dx, (i - 1)$ και του πεπερασμένου διαστήματος $dx, (i + 1)$, δηλαδή του προηγούμενου διαστήματος και του αμέσως επόμενου διαστήματος dx , ισούται με τη μονάδα, τότε βρίσκονται οι πιθανές θέσεις των σημείων καμπής. Η μικρότερη θέση από τις πιθανές είναι το ζητούμενο.

Θέση j πιθανού σημείου καμπής i από τα όρια της καμπύλης του μοντέλου $x=0$ έως $x=60m$:

$$\frac{\sin(d_{x,i+1})}{\sin(d_{x,i-1})} = 1, \min \sum_{x=0}^{x=60} j = i, (\forall x \in [-60, +60])$$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται το σημείο καμπής i συναρτήσει των υπερκείμενων ανηγμένα ως προς τη διάμετρο D (H/D), με την αναλογική αύξησή του όσο το βάθος εκκαφής (H/D) αυξάνει.



Σχήμα 3.2.4 α: Σημείο καμπής i συναρτήσει του βάθους εκκαφής.

Ακόμα συσχετίστηκε το σημείο καμπής ανηγμένο ως προς τη διάμετρο D με το συντελεστή υπερφόρτισης N_s , για αποτόνωση $\lambda=20\%$, για όλα τα βάθη εκσκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο (H/D) και $K_o=0.5$ και $K_o=1$. Παρατηρούμε ότι για αύξηση του συντελεστή υπερφόρτισης το σημείο καμπής είναι σταθερό, συνεπώς δεν επηρεάζεται από την μεταβολή του N_s . Όμοια συμπεριφορά αναμένεται και για τις υπόλοιπες τιμές αποτόνωσης λ .

Ακόμα παρατηρείται όσο το βάθος εκσκαφής αυξάνει το σημείο καμπής αυξάνει αναλογικά, συγκεκριμένα:

- $i(H/D=1, K_o=0.5) = 0.55$ και $i(H/D=1, K_o=1) = 0.65$.
- $i(H/D=1.5, K_o=0.5) = 0.70$ και $i(H/D=1.5, K_o=1) = 0.95$
- $i(H/D=2, K_o=0.5) = 0.90$ και $i(H/D=1.5, K_o=1) = 1.15$
- $i(H/D=1.5, K_o=0.5) = 1.05$ και $i(H/D=1.5, K_o=1) = 1.05$

Γενικά, ισχύει $i(K_o=1) > i(K_o=0.5)$, με αποτέλεσμα το εύρος της καμπύλης των καθιζήσεων να αυξάνει και οι καθιζήσεις για $K_o=1$ να είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές για $K_o=0.5$.

Για $K_o=0.5$ τα εδάφη 1 έως 3 παρατηρήθηκαν από το υπολογιστικό φύλλο να έχουν $S_{v,max}$ από 20.07mm έως 15.23mm για $\lambda=20\%$ και υπερκείμενο $H/D=1$ με το σημείο καμπής να λαμβάνει τιμές $i/D=0.55$ για $K_o=0.5$ και για $K_o=1$ το σημείο καμπής «απλώνει» με $i/D=0.65$.

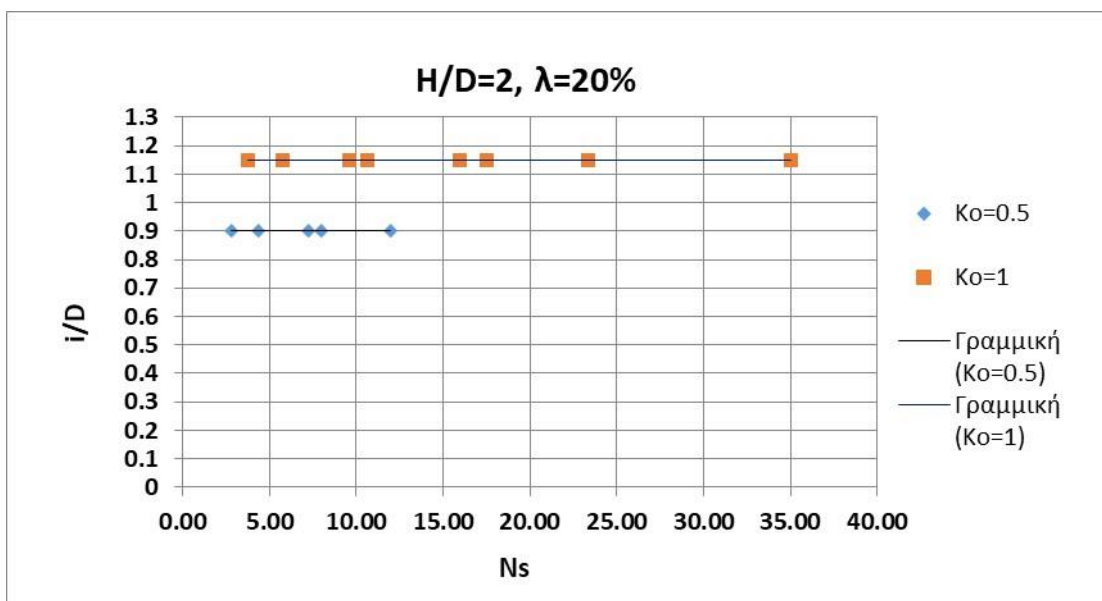
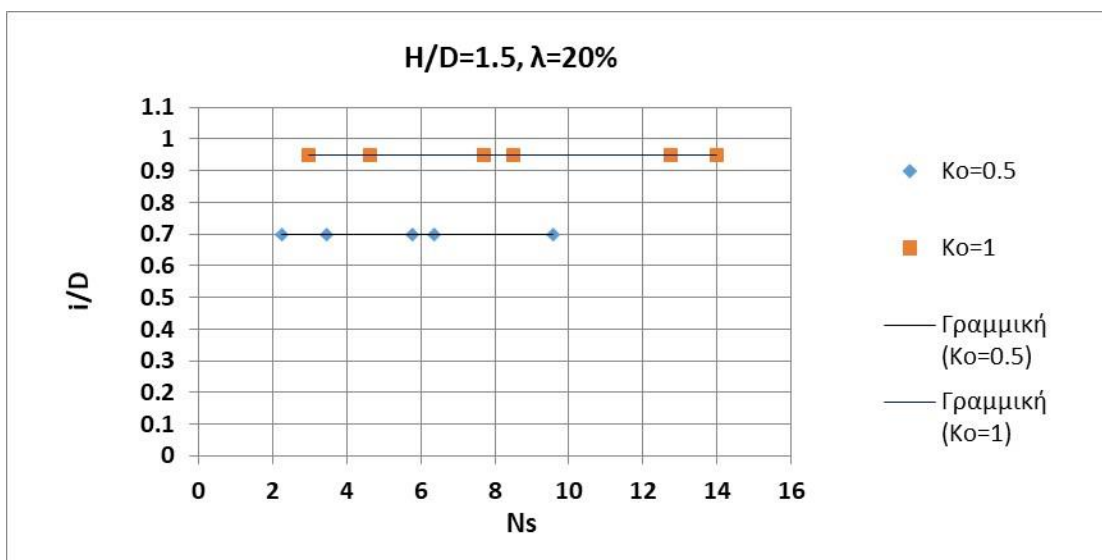
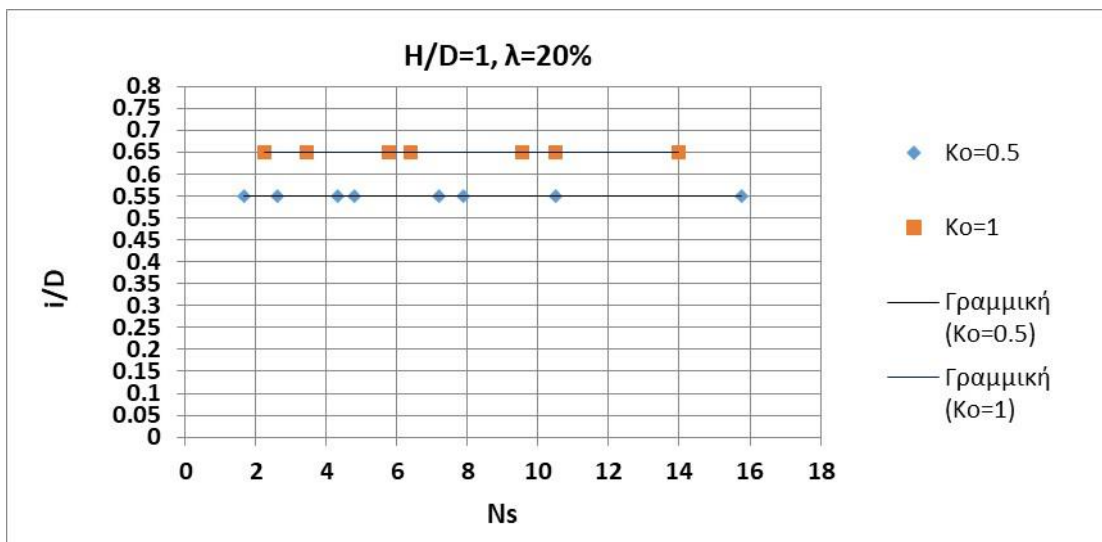
όπου

$$N_s = \frac{2 * P_o}{\sigma_{cm}} = \frac{2 * p_o}{2 * c \sqrt{K}} = \frac{P_o}{c \sqrt{N \varphi}} \quad \text{Εξ.3.2.17}$$

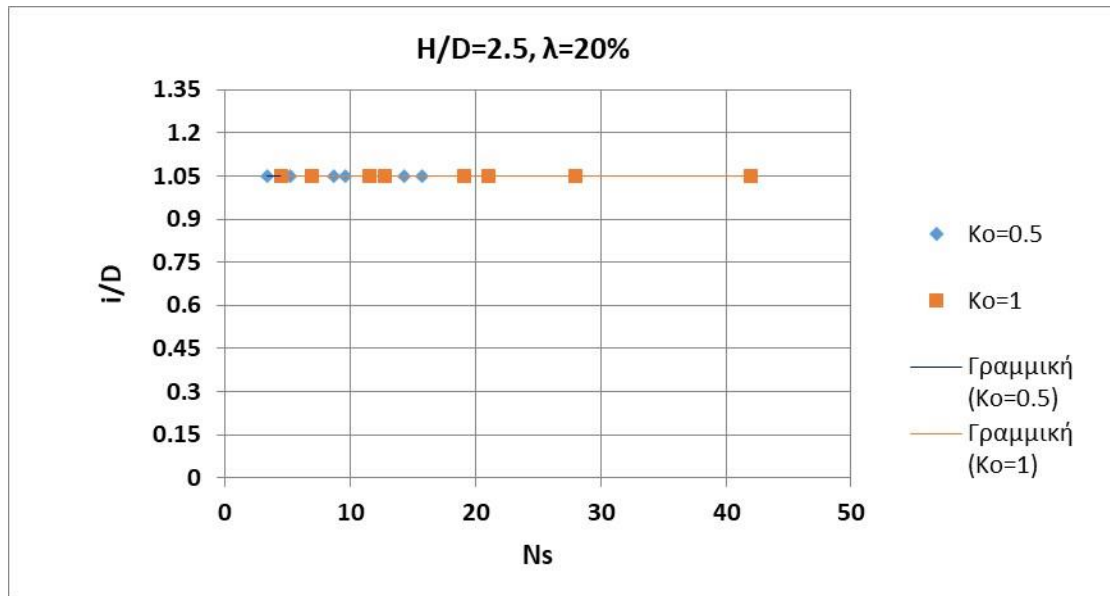
$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \geq 1$$

Πίνακας 5: Συντελεστής Υπερφόρτισης N_s

Συντελεστής υπερφόρτισης N_s							
Κωδικός εδάφους	K_o	ϕ	$N\phi$	$N_s (H=10m)$	$N_s (H=15m)$	$N_s (H=20m)$	$N_s (H=25m)$
(-)	(-)	(degrees)	(rad)	(-)	(-)	(-)	(-)
έδαφος-1a	0.5	20	2.039	15.75	21.01	26.26	31.51
έδαφος-2b	0.5	20	2.039	10.5	14	17.51	21.01
έδαφος-3c	0.5	20	2.039	7.88	10.5	13.13	15.75
έδαφος-4d	0.5	25	2.464	7.17	9.56	11.95	14.33
έδαφος-5e	0.5	25	2.464	4.78	6.37	7.96	9.56
έδαφος-6f	0.5	30	3	4.33	5.77	7.22	8.66
έδαφος-7g	0.5	30	3	2.6	3.46	4.33	5.2
έδαφος-8h	0.5	35	3.69	1.67	2.23	2.79	3.35
έδαφος-9a	1	20	2.039	21.01	28.01	35.01	42.01
έδαφος-10b	1	20	2.039	14	18.67	23.34	28.01
έδαφος-11c	1	20	2.039	10.5	14	17.51	21.01
έδαφος-12d	1	25	2.464	9.56	12.74	15.93	19.11
έδαφος-13e	1	25	2.464	6.37	8.49	10.62	12.74
έδαφος-14f	1	30	3	5.77	7.7	9.62	11.55
έδαφος-15g	1	30	3	3.46	4.62	5.77	6.93
έδαφος-16h	1	35	3.69	2.23	2.97	3.72	4.46



Σχήμα 3.2.4 β: Σημείο καμπής i ανηγμένο ως προς τη διάμετρο D συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης N_s .

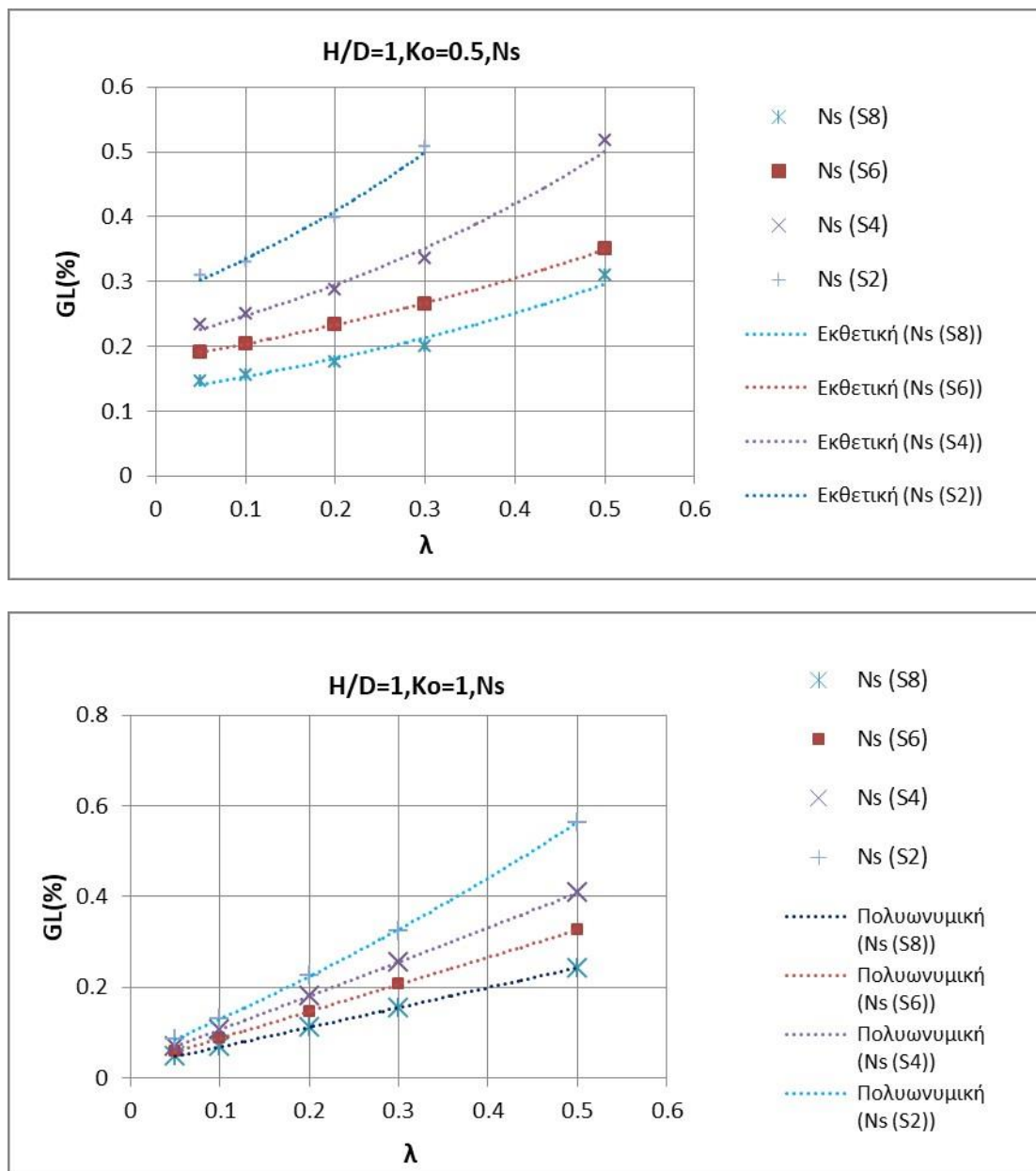


Σχήμα 3.2.4 β:Σημείο καμπής i ανηγμένο ως προς τη διάμετρο D συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης N_s .

3.2.5 Συσχέτιση GL με το συντελεστή αποτόνωσης λ

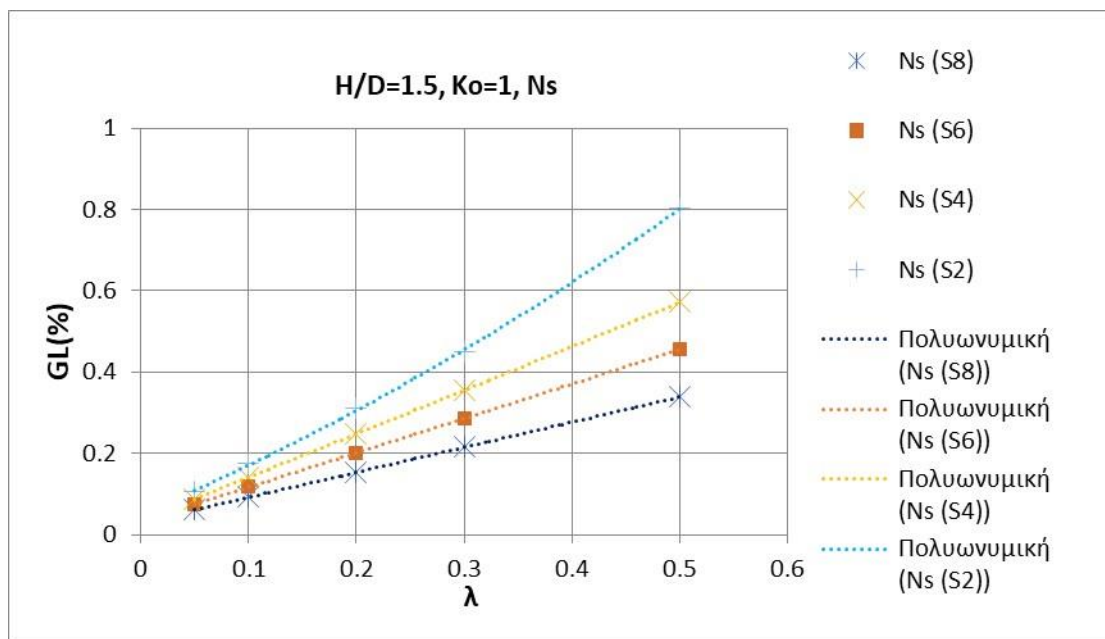
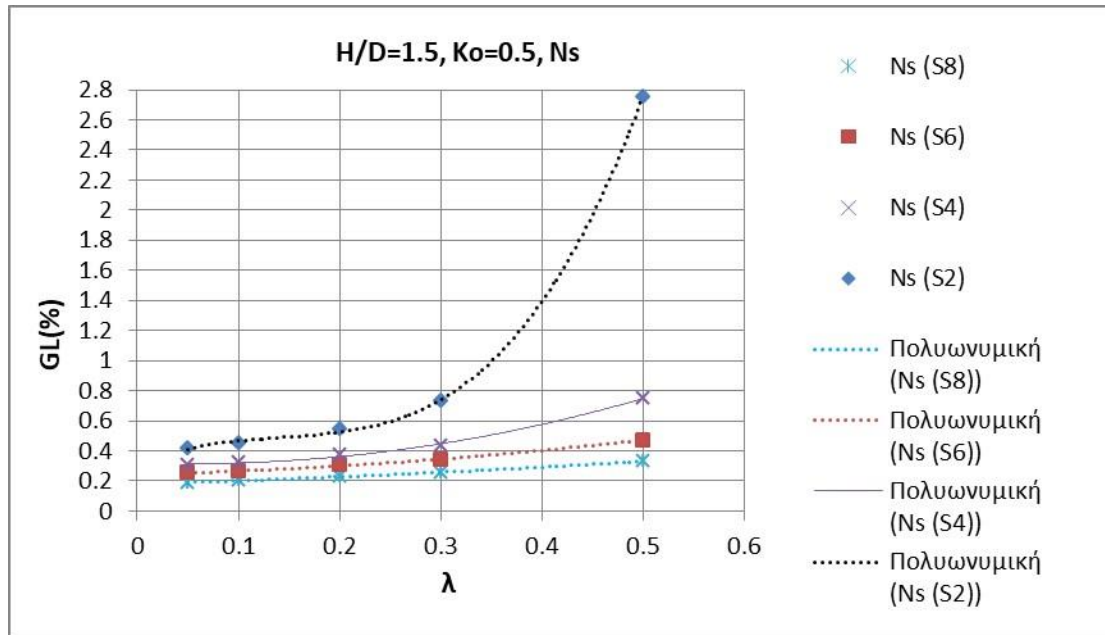
Για όλα τα βάθη εκσκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (H/D) συσχετίζεται το σημείο καμπής για $Ko=0.5$ και $Ko=1$ (Σχήμα 3.2.5 α)

Εδάφη 2,4,6,8 για υπερκείμενο $H=10m, Ko=0.5$ και $Ko=1$



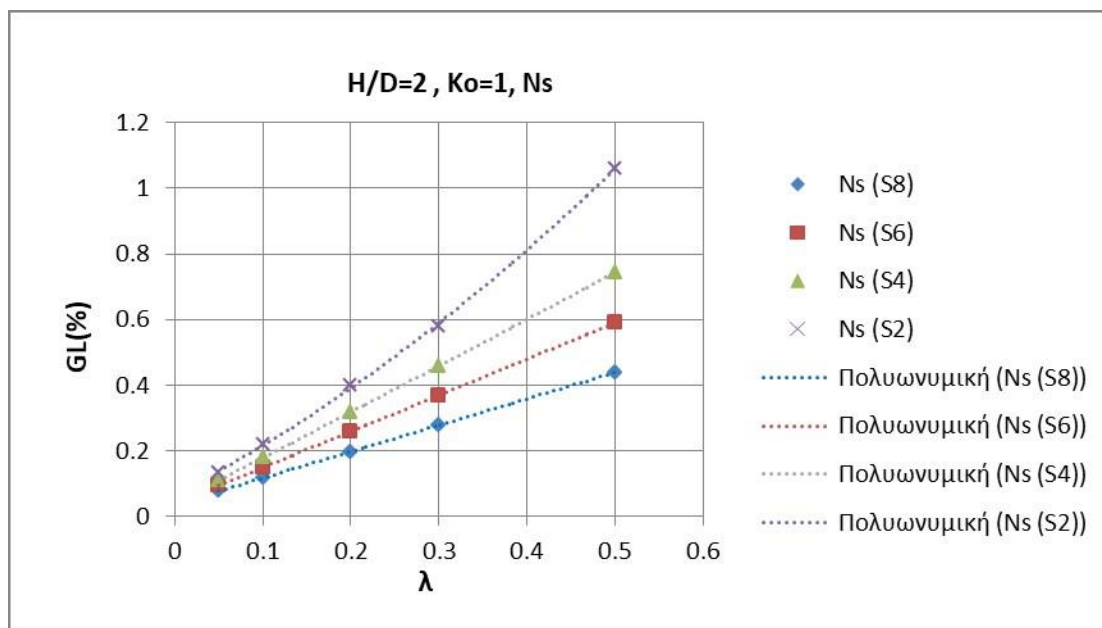
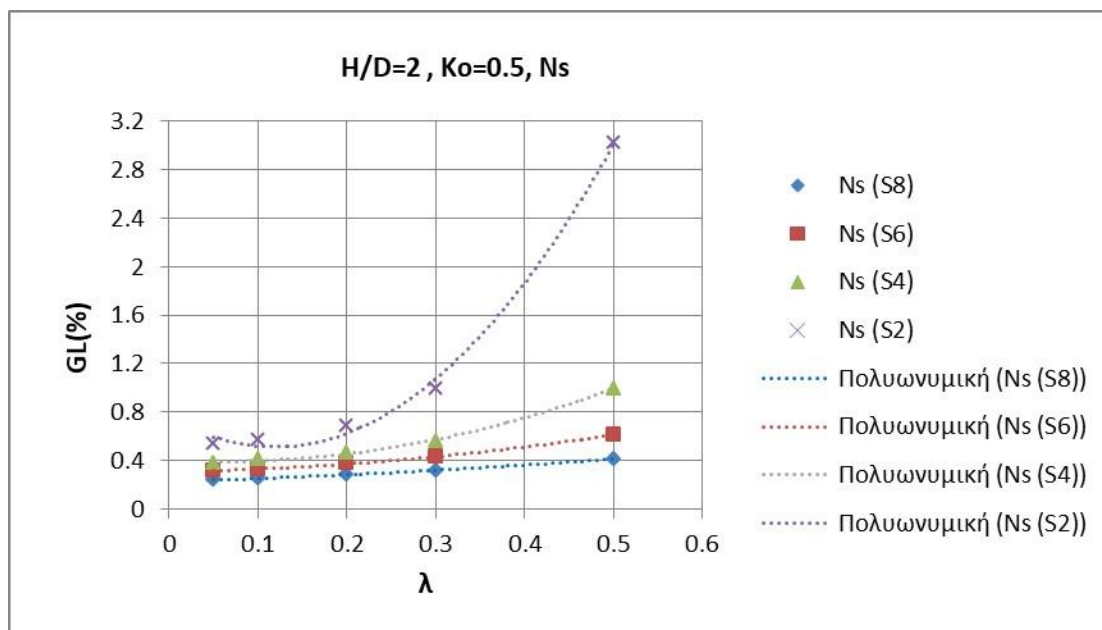
Σχήμα 3.2.5 α: Συσχέτιση GL(%) με τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , για $H=10m$ συναρτήσει του Ns

Εδάφη 2,4,6,8 για υπερκείμενο $H=15m, K_o=0.5$ και $K_o=1$



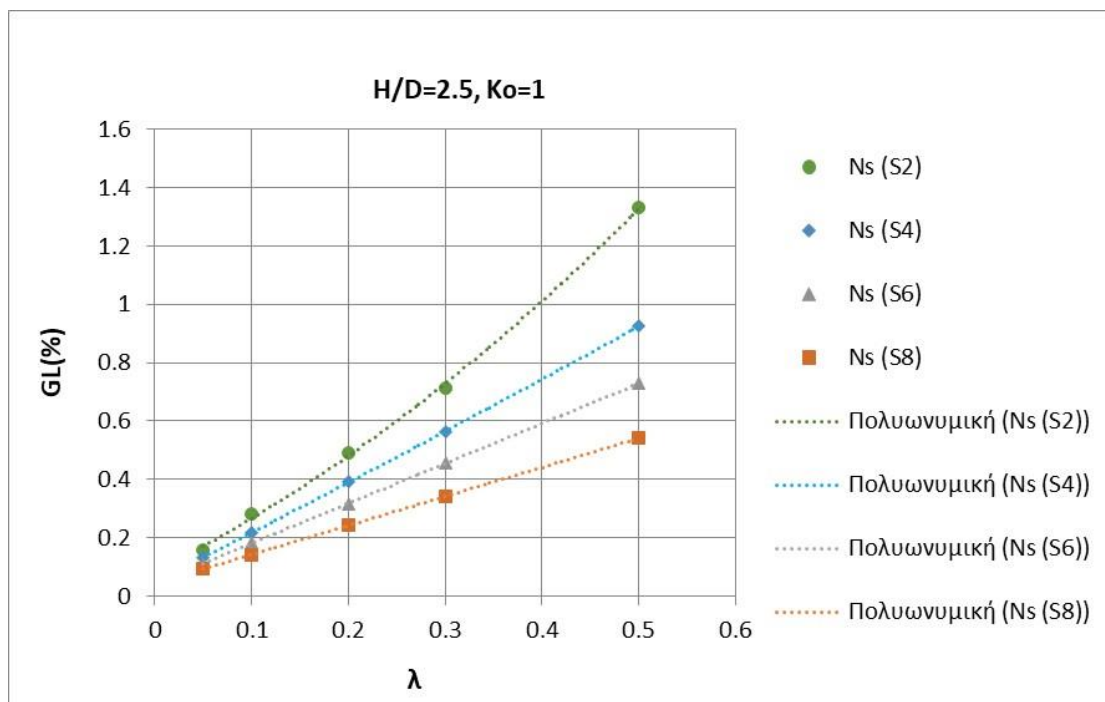
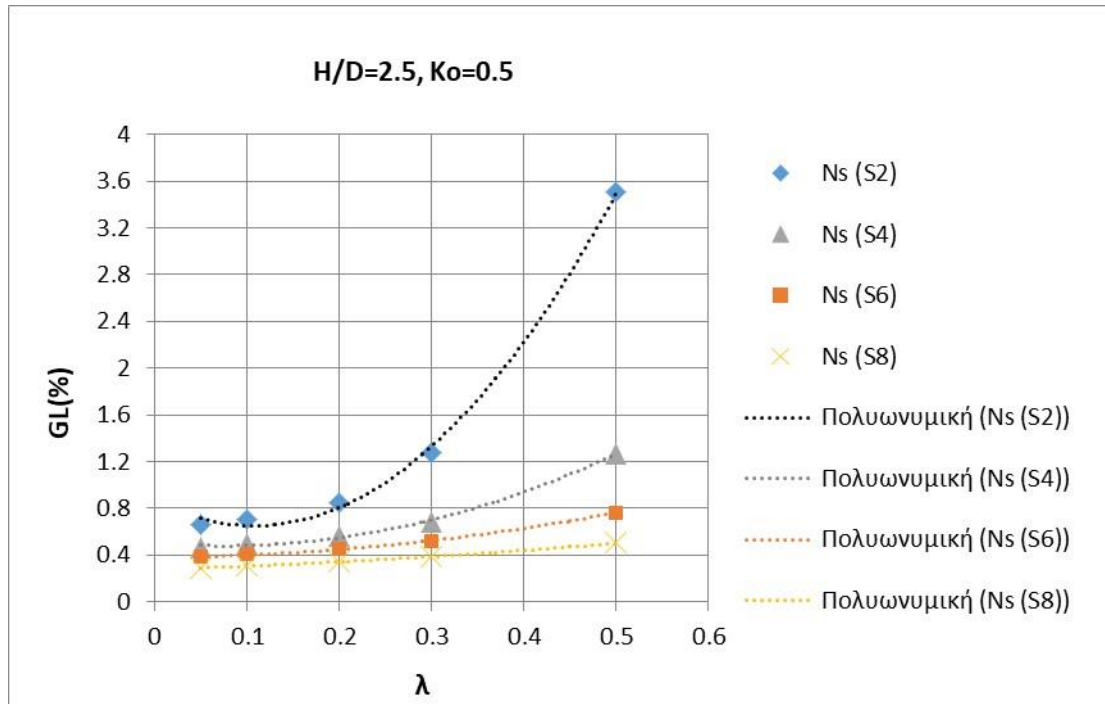
Σχήμα 3.2.5 α: Συσχέτιση $GL(\%)$ με τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , για $H=15m$, συναρτήσει του N_s

Εδάφη 2,4,6,8 για υπερκείμενο $H=20m, K_o=0.5$ και $K_o=1$



Σχήμα 3.2.5 α: Συσχέτιση $GL(\%)$ με τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , για $H=20m$ συναρτήσει του N_s

Εδάφη 2,4,6,8 για υπερκείμενο $H=25m, K_o=0.5$ και $K_o=1$



Σχήμα 3.2.5 α: Συσχέτιση GI(%) με τις τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ , για $H=25m$ συναρτήσει του N_s

3.2.6 α -Συσχέτιση GL(%) με το συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λf

Για όλα τα βάθη εκσκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (Hi/D) , D=10m συσχετίζεται ο όγκος εδάφους ανά μονάδα μήκους στο άνοιγμα της σήραγγας (GL %) για Ko=0.5 και Ko=1 με το δείκτη ευστάθειας του Προυντζόπουλου για λ=5%, λ=10%, λ=20%, λ=30% και λ=50% . Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή ευστάθειας κατά Προυντζόπουλο για τα υπερκείμενα Hi μετρούμενα από το κέντρο του άξονα της σήραγγας. Υπενθυμίζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις,

$$A_F = \frac{5.25 * c * (N_\varphi)^\alpha}{\gamma * H^{1-b} * D^b} = \frac{5.25 * c * \left(\tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)\right)^\alpha}{\gamma * H^{1-b} * D^b} \quad \text{Εξ.3.2.9}$$

όπου,

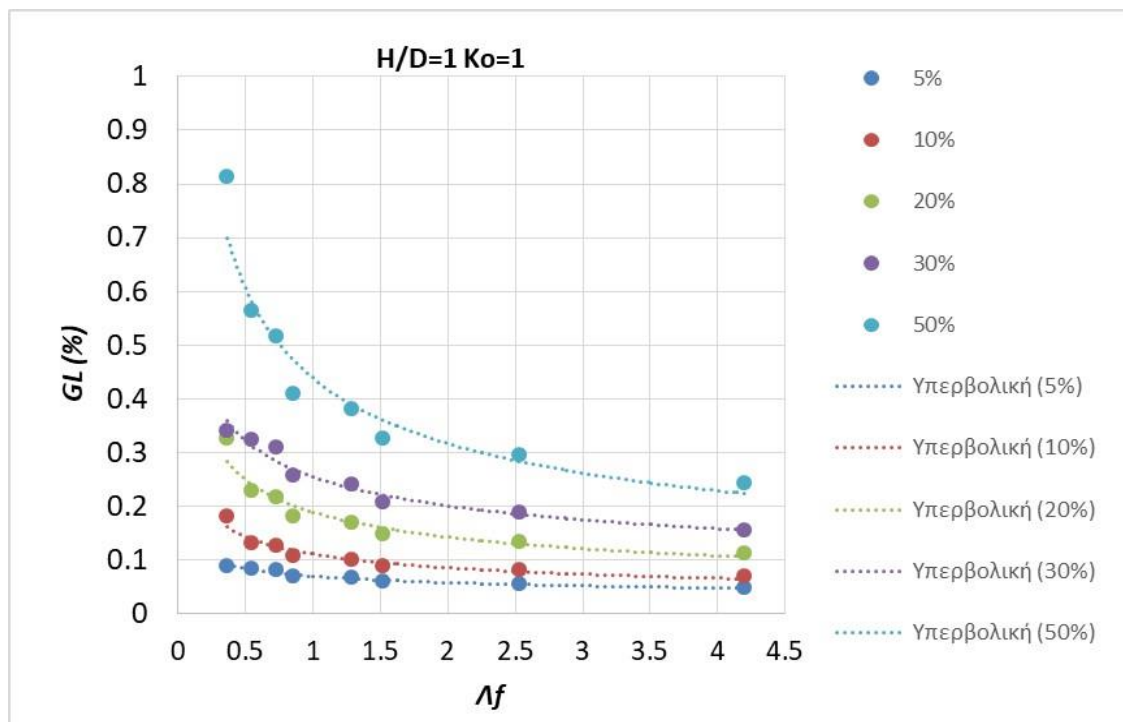
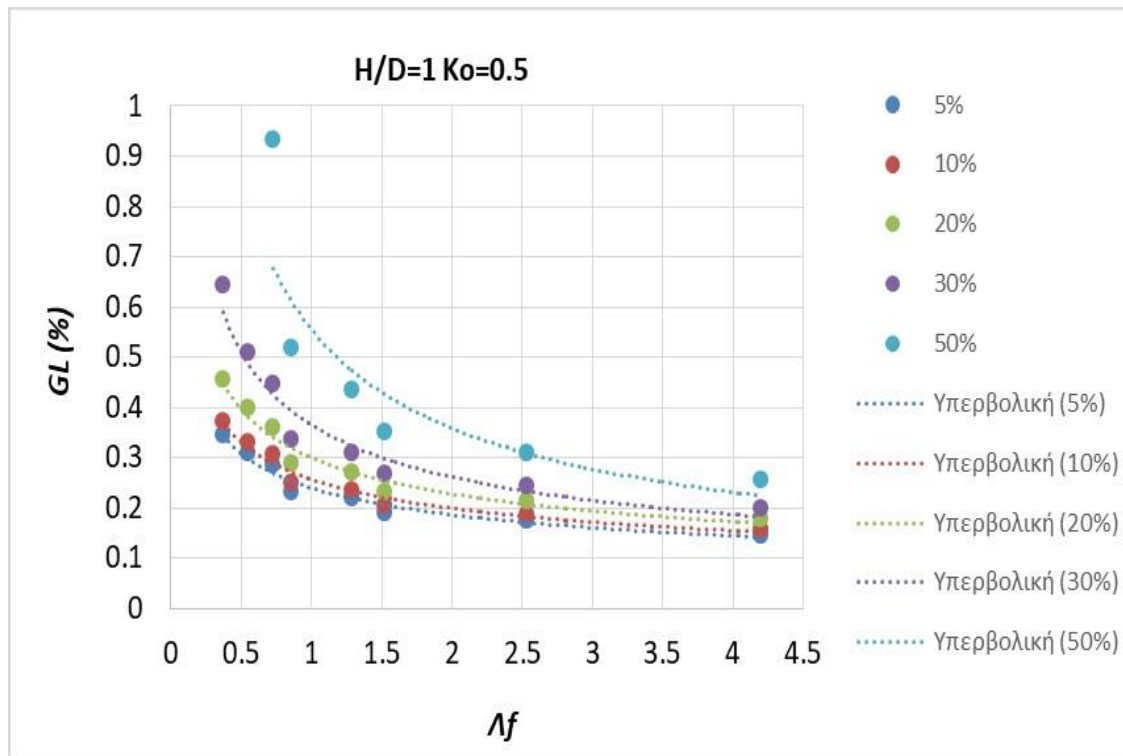
$$\alpha = 0.59 + 0.16 * \frac{H}{D} \quad \text{Εξ.3.2.10}$$

$$b = \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.37} \quad \text{Εξ.3.2.11}$$

Πίνακας 6: Συντελεστής ευστάθειας Λf (Προυντζόπουλος) και συντελεστής υπερφόρτισης Ns

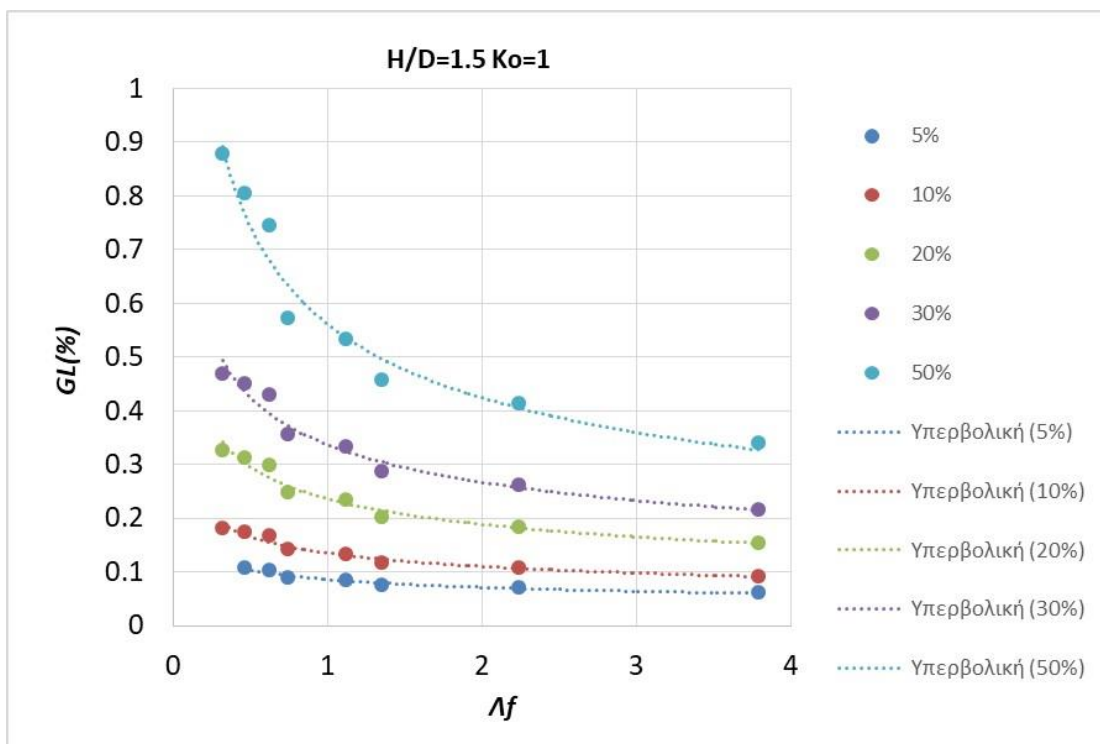
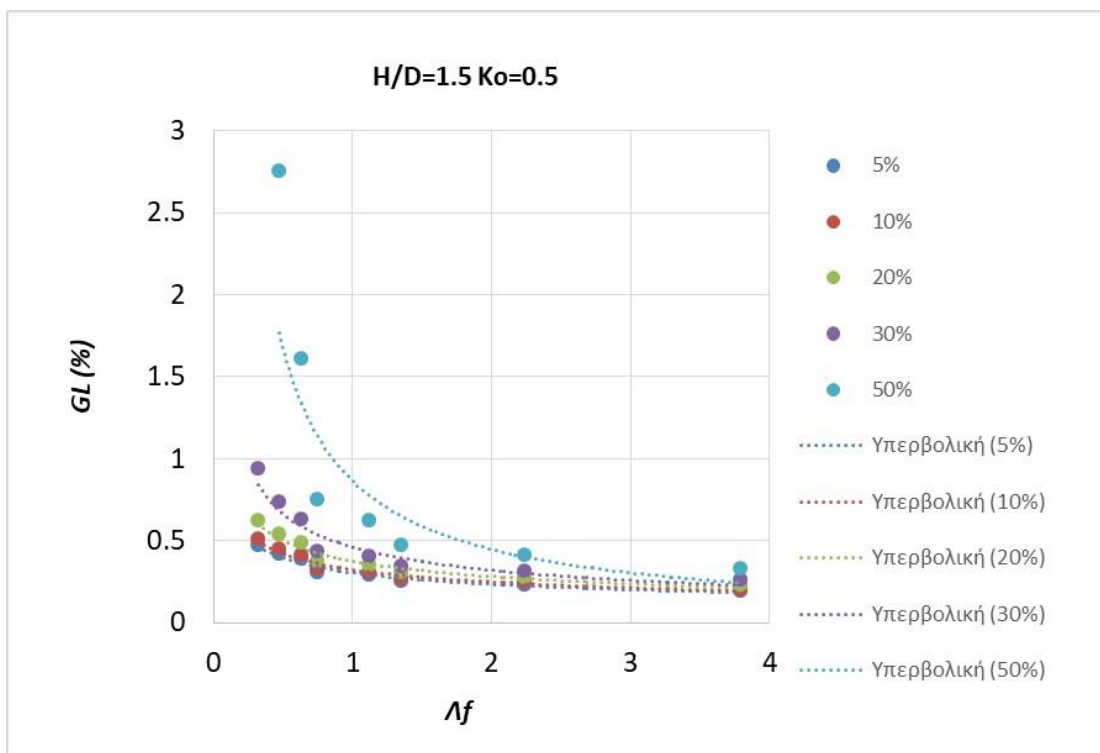
Συντελεστής ευστάθειας μετώπου Λf και Συντελεστής υπερφόρτισης Ns									
Κωδικός εδάφους	Ko	Ns (H=10m)	Λf(H=10m)	Ns (H=15)m	Λf(H=15m)	Ns (H=20)m	Λf(H=20m)	Ns (H=25)m	Λf(H=25m)
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
έδαφος-1a	0.5	15.75	0.37	21.01	0.32	26.26	0.28	31.51	0.26
έδαφος-2b	0.5	10.5	0.55	14	0.47	17.51	0.42	21.01	0.38
έδαφος-3c	0.5	7.88	0.73	10.5	0.63	13.13	0.56	15.75	0.51
έδαφος-4d	0.5	7.17	0.86	9.56	0.75	11.95	0.68	14.33	0.63
έδαφος-5e	0.5	4.78	1.29	6.37	1.12	7.96	1.02	9.56	0.94
έδαφος-6f	0.5	4.33	1.52	5.77	1.35	7.22	1.23	8.66	1.16
έδαφος-7g	0.5	2.6	2.53	3.46	2.24	4.33	2.06	5.2	1.94
έδαφος-8h	0.5	1.67	4.2	2.23	3.79	2.79	3.54	3.35	3.38
έδαφος-9a	1	21.01	0.37	28.01	0.32	35.01	0.28	42.01	0.26
έδαφος-10b	1	14	0.55	18.67	0.47	23.34	0.42	28.01	0.38
έδαφος-11c	1	10.5	0.73	14	0.63	17.51	0.56	21.01	0.51
έδαφος-12d	1	9.56	0.86	12.74	0.75	15.93	0.68	19.11	0.63
έδαφος-13e	1	6.37	1.29	8.49	1.12	10.62	1.02	12.74	0.94
έδαφος-14f	1	5.77	1.52	7.7	1.35	9.62	1.23	11.55	1.16
έδαφος-15g	1	3.46	2.53	4.62	2.24	5.77	2.06	6.93	1.94
έδαφος-16h	1	2.23	4.2	2.97	3.79	3.72	3.54	4.46	3.38

- Βάθος εκσκαφής $H=10\text{m}$ από το κέντρο της σήραγγας



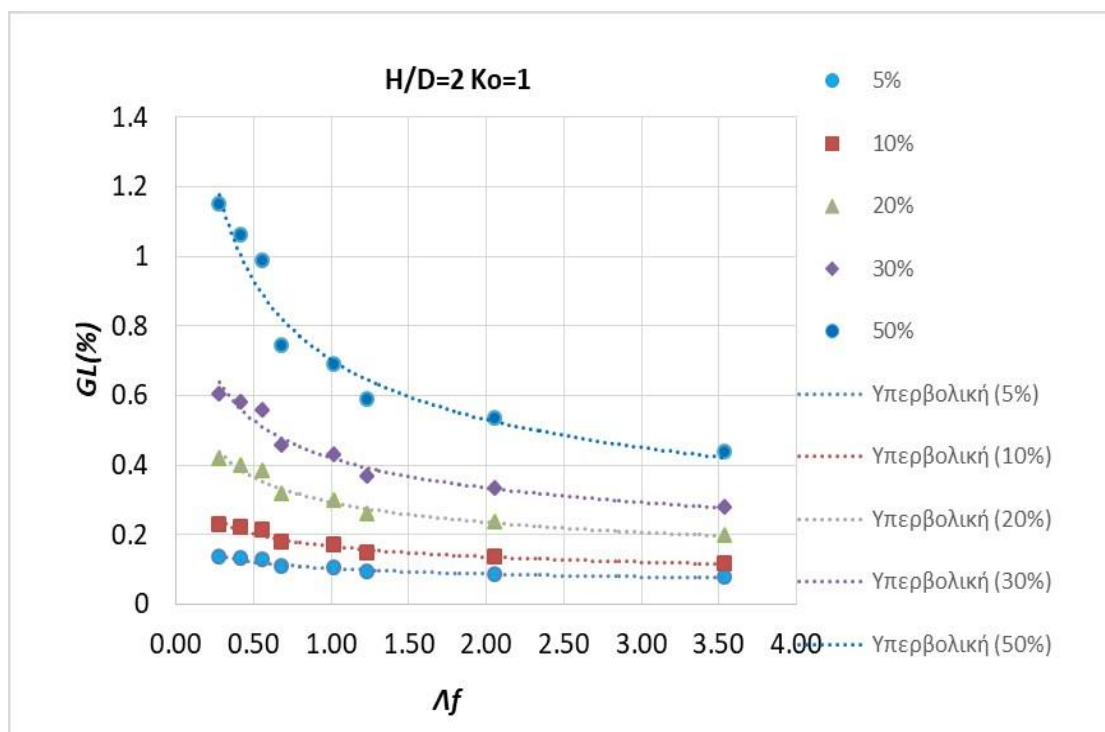
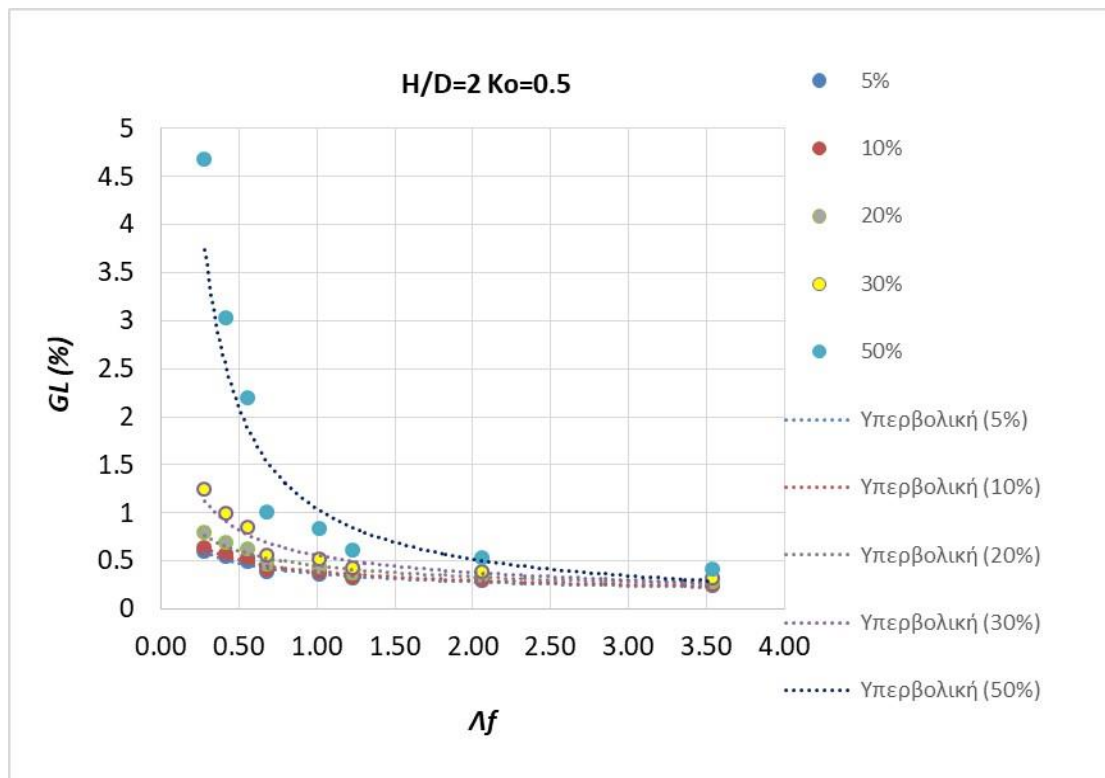
Σχήμα 3.2.6 α: Συσχέτιση GL (%) με το δείκτη ευστάθειας Λf , για βάθος εκσκαφής $H=10\text{m}$

- Βάθος εκσκαφής $H=15\text{m}$ από το κέντρο της σήραγγας



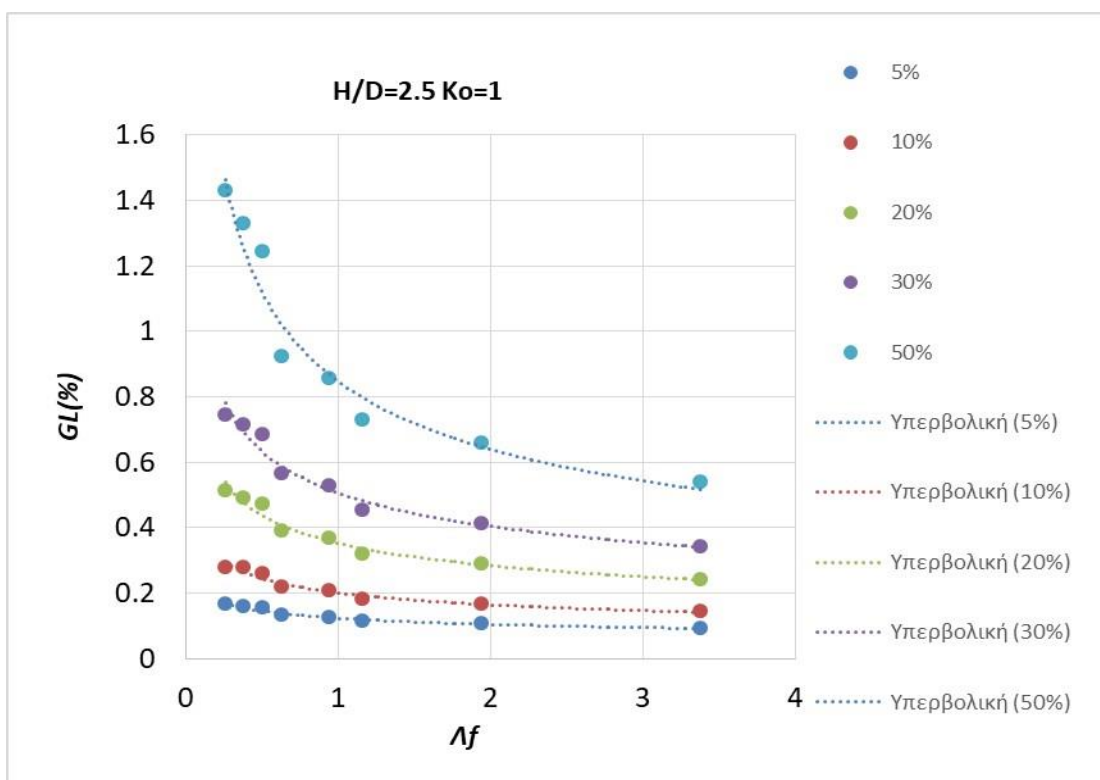
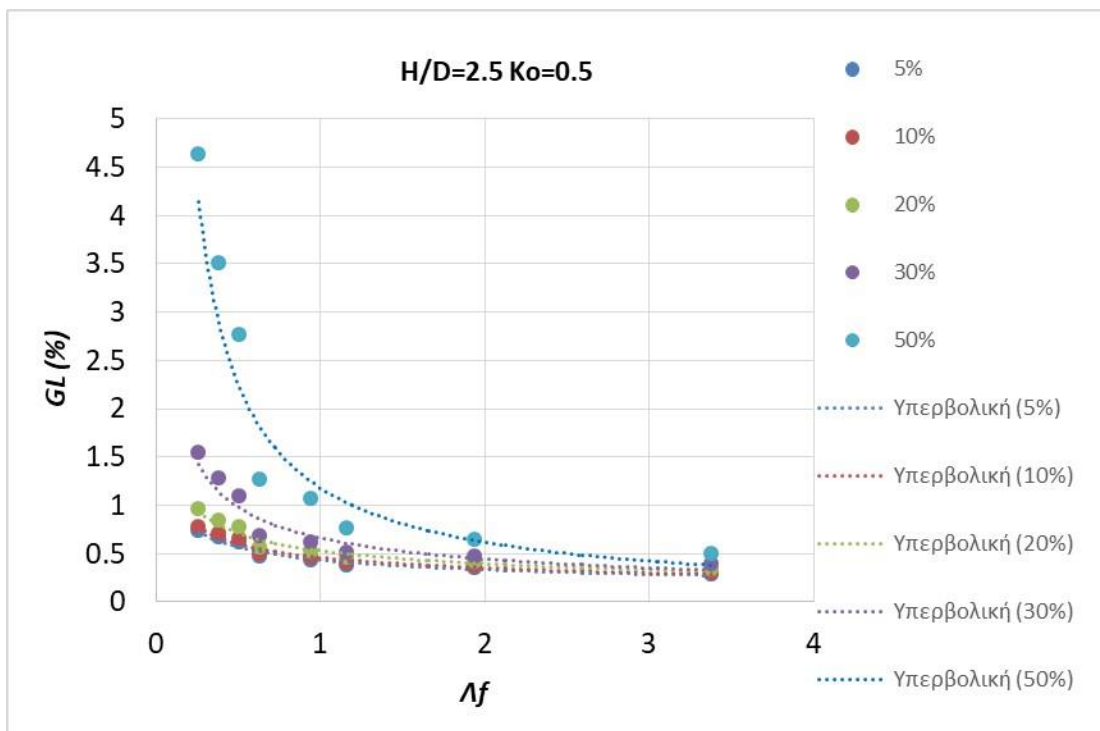
Σχήμα 3.2.6 β:Συσχέτιση $GL(\%)$ με το δείκτη ευστάθειας Λf , για βάθος εκσκαφής $H=15\text{m}$

- Υπερκείμενο H=20m από το κέντρο της σήραγγας



Σχήμα 3.2.6 γ: Συσχέτιση GL(%) με το δείκτη ευστάθειας Λf , για βάθος εκσκαφής H=20m

- Υπερκείμενο $H=25m$ από το κέντρο της σήραγγας



Σχήμα 3.2.6 δ:Συσχέτιση $GL(\%)$ με το δείκτη ευστάθειας Λf , για βάθος εκσκαφής $H=25m$

3.2.6 b- Συσχέτιση προτεινόμενης σχέσης GL(%) με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λf

Από την εξ. 3.2.5 που διεξήχθη με τη βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου excel για όλες τις τιμές αποτόνωσης λ_i ($i=5,10,20,30,50$)% και για όλα τα υπερκείμενα H_i/D ($i=1,1.5,2,2.5$) παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα που έγιναν από το excel. Παρατηρείται εκθετική μείωση του όγκου απώλειας εδάφους (GL %) για αύξηση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λf.

$$GL(\%) = \alpha * \Lambda f^{-b} \quad \text{Εξ.3.2.5}$$

όπου:

$$\alpha = \left(\lambda * \frac{H}{D}\right)^{K_o} \quad \text{Εξ.3.2.6}$$

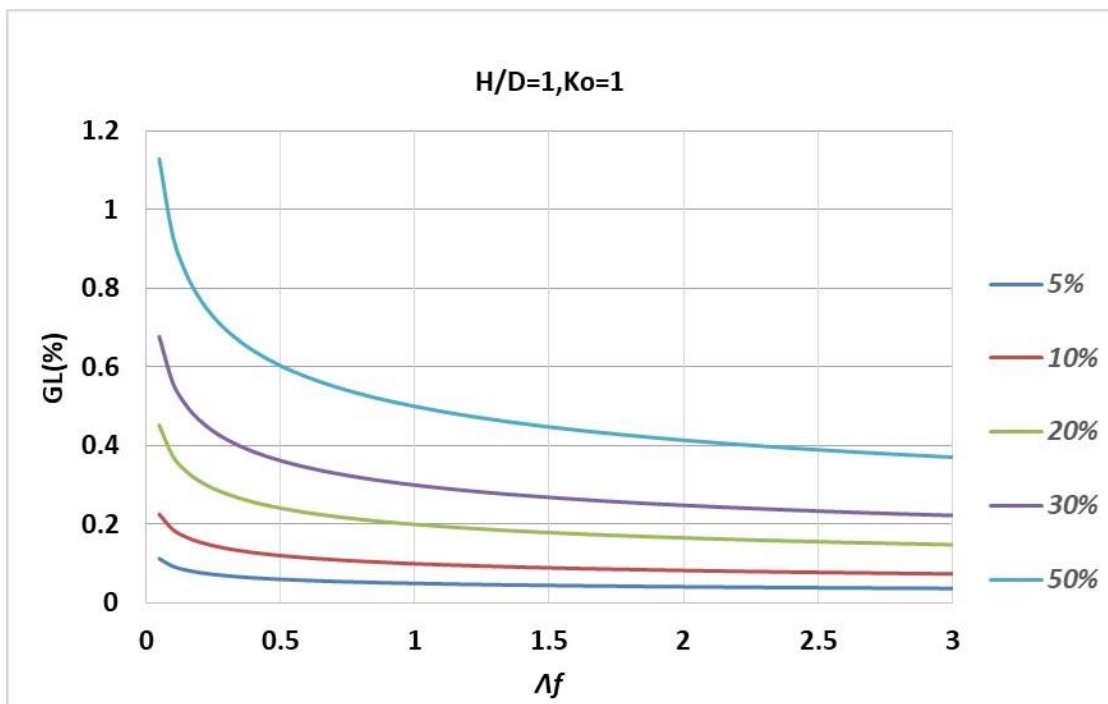
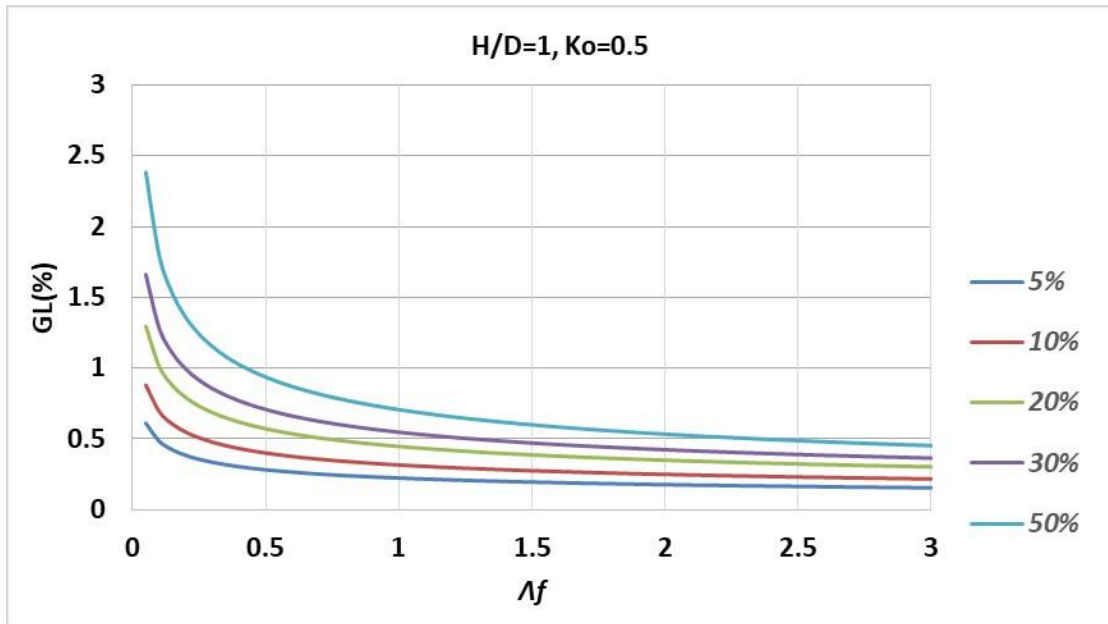
$$b = \frac{0.1}{K_o} * e^c \quad \text{Εξ.3.2.7}$$

$$c = K_o^{(1-\lambda)} \quad \text{Εξ.3.2.8}$$

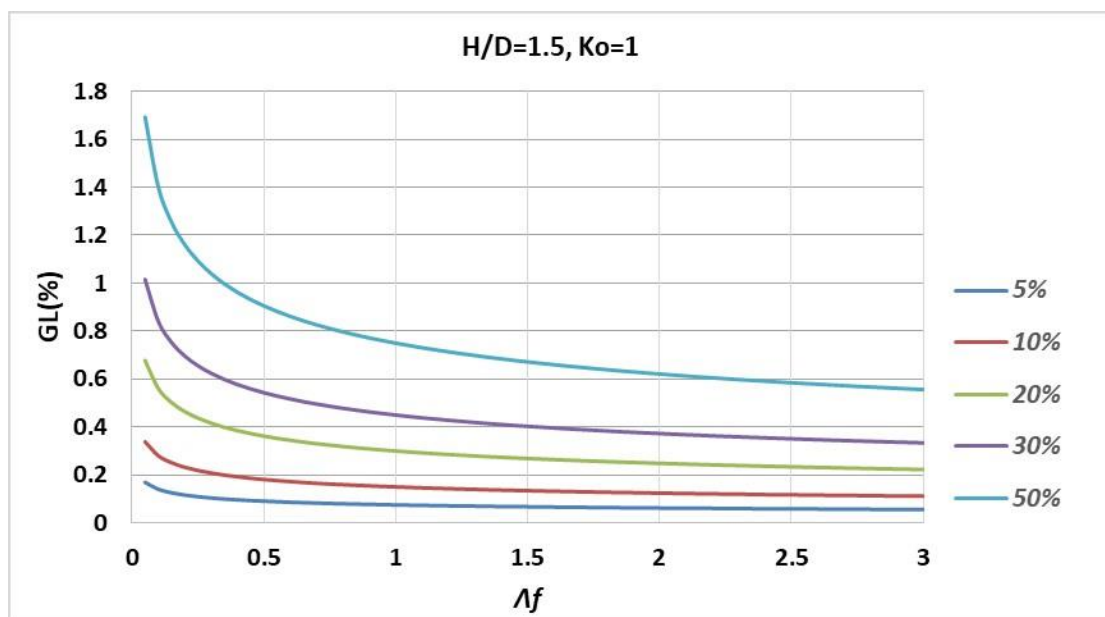
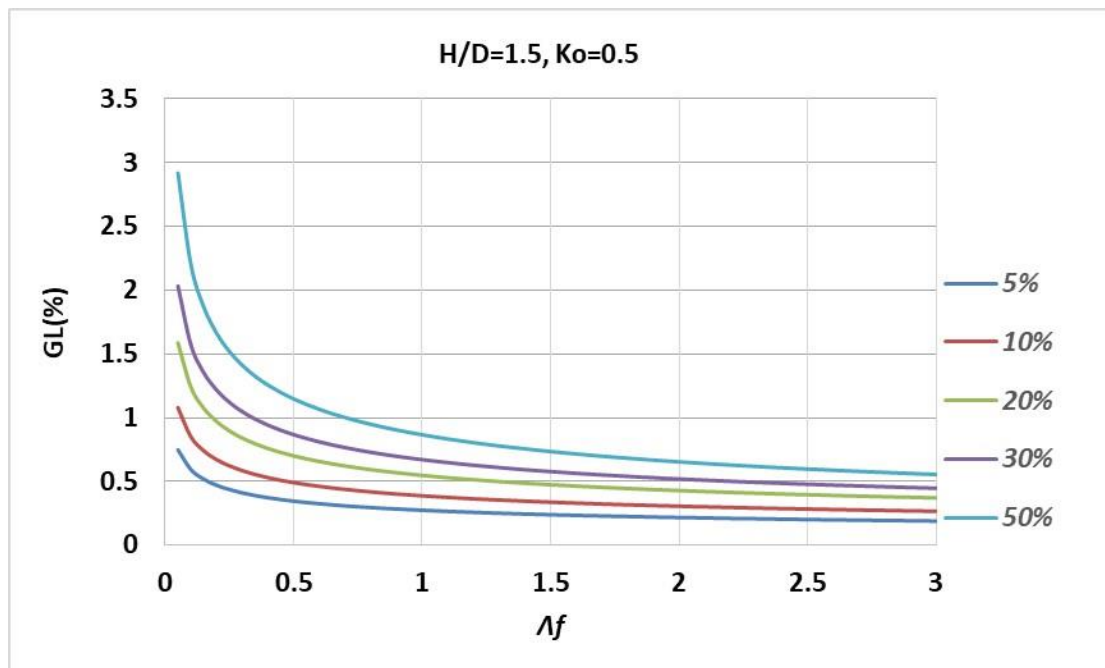
Πίνακας 7: Συντελεστής ευστάθειας μετώπου (Προυντζόπουλος) για όλα τα βάθη εκσκαφής και υπερκείμενα εδάφη

Συντελεστής ευστάθειας μετώπου Λf					
Κωδικός εδάφους	Ko	Λf(H=10m)	Λf(H=15m)	Λf(H=20m)	Λf(H=25m)
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
έδαφος-1a	0.5	0.37	0.32	0.28	0.26
έδαφος-2b	0.5	0.55	0.47	0.42	0.38
έδαφος-3c	0.5	0.73	0.63	0.56	0.51
έδαφος-4d	0.5	0.86	0.75	0.68	0.63
έδαφος-5e	0.5	1.29	1.12	1.02	0.94
έδαφος-6f	0.5	1.52	1.35	1.23	1.16
έδαφος-7g	0.5	2.53	2.24	2.06	1.94
έδαφος-8h	0.5	4.2	3.79	3.54	3.38
έδαφος-9a	1	0.37	0.32	0.28	0.26
έδαφος-10b	1	0.55	0.47	0.42	0.38
έδαφος-11c	1	0.73	0.63	0.56	0.51
έδαφος-12d	1	0.86	0.75	0.68	0.63
έδαφος-13e	1	1.29	1.12	1.02	0.94
έδαφος-14f	1	1.52	1.35	1.23	1.16
έδαφος-15g	1	2.53	2.24	2.06	1.94
έδαφος-16h	1	4.2	3.79	3.54	3.38

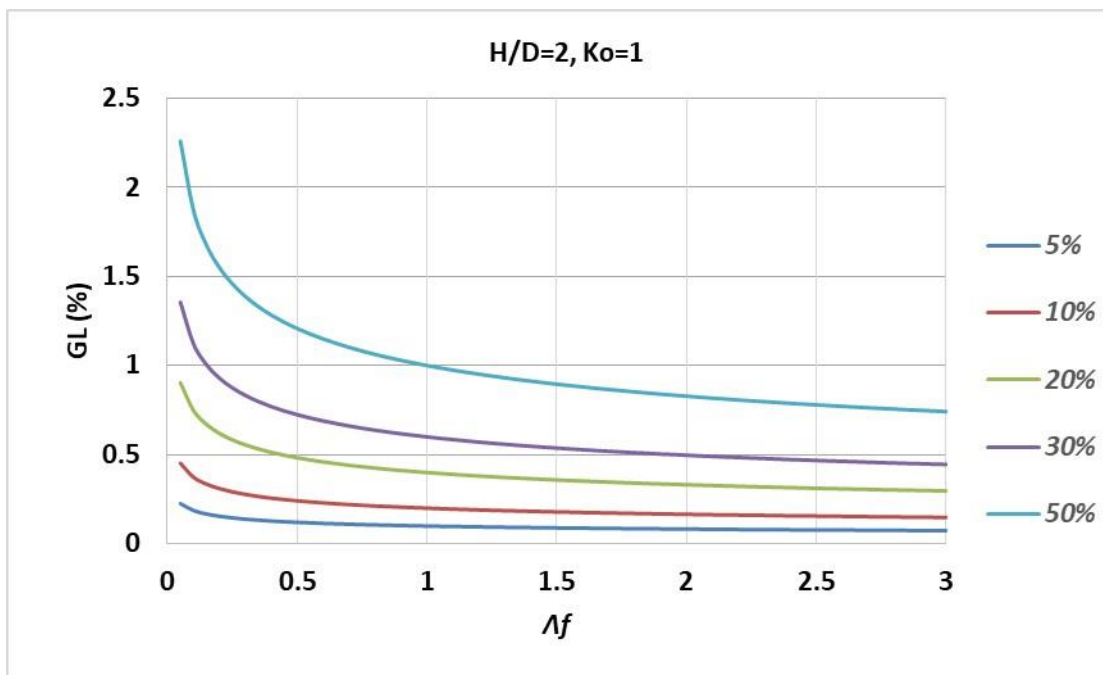
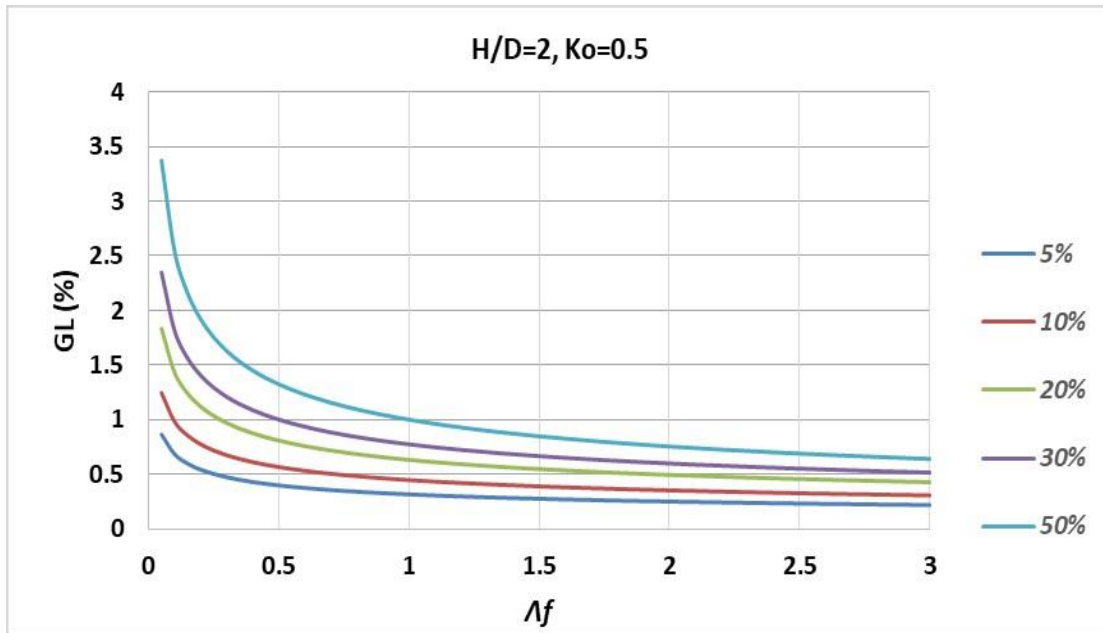
- Υπερκείμενο $H/D=1$ μετρούμενο από το κέντρο του άξονα της σήραγγας, ($D=10m$)



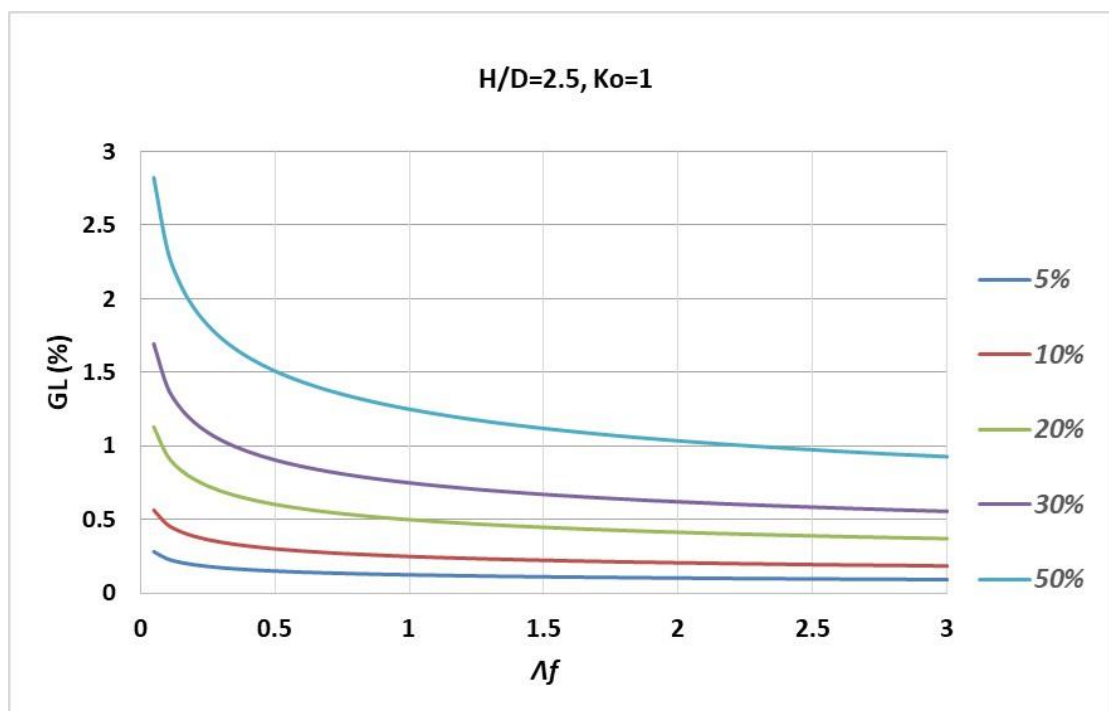
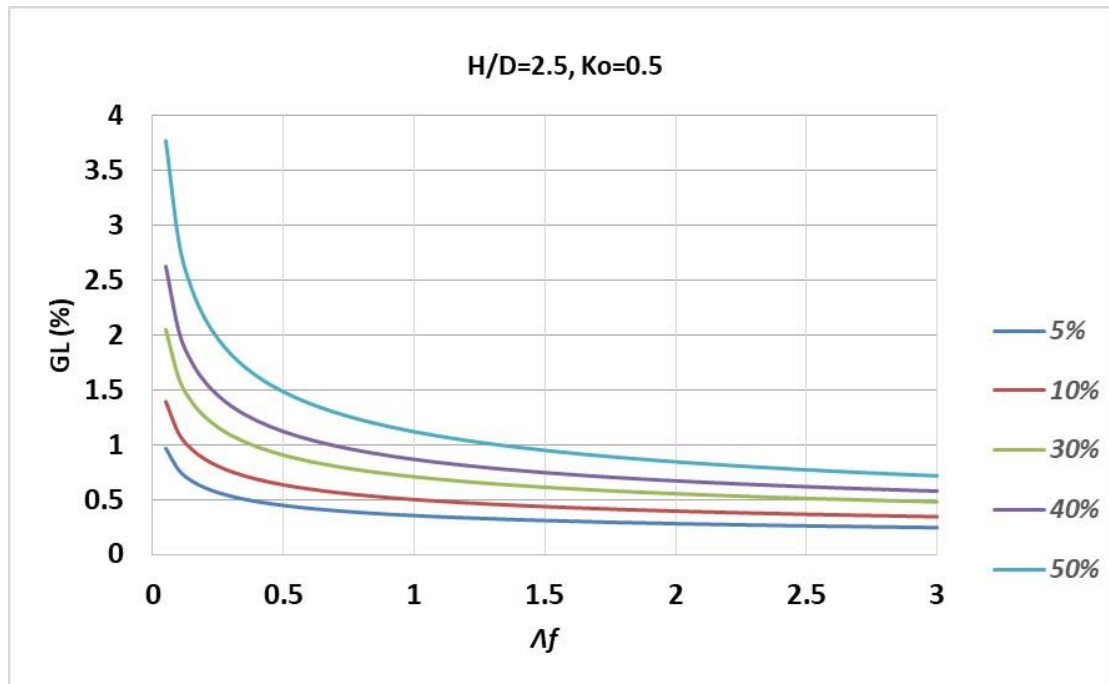
- Υπερκείμενο $H/D=1.5$ μετρούμενο από το κέντρο του άξονα της σήραγγας, ($D=10m$)



- Υπερκείμενο $H/D=2$ μετρούμενο από το κέντρο του άξονα της σήραγγας, ($D=10\text{m}$)

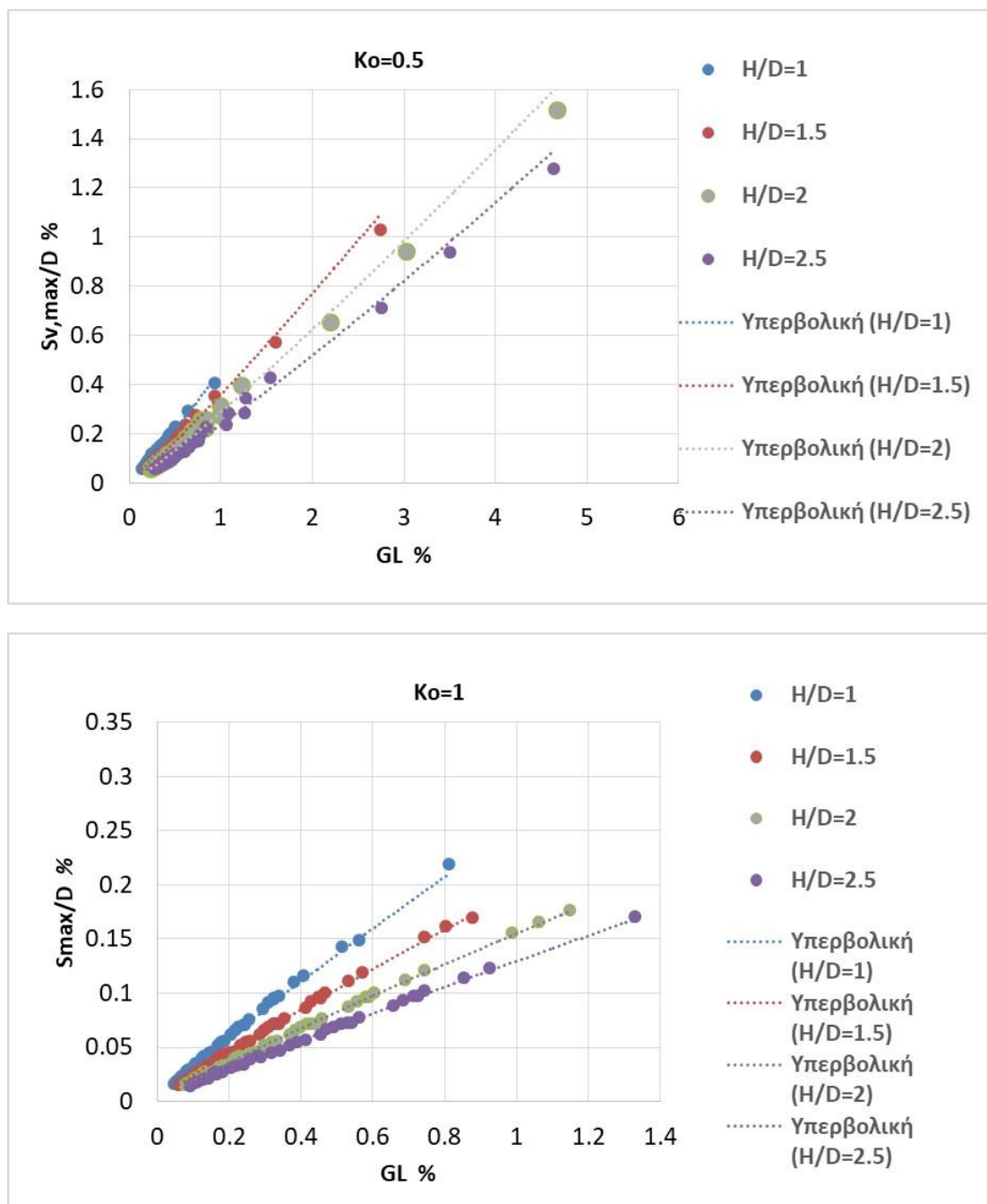


- Υπερκείμενο $H/D=2.5$ μετρούμενο από το κέντρο του άξονα της σήραγγας, ($D=10m$)



3.2.7 Συσχέτιση $S_{v,max}/D$ με την απώλεια όγκου εδάφους (GL %)

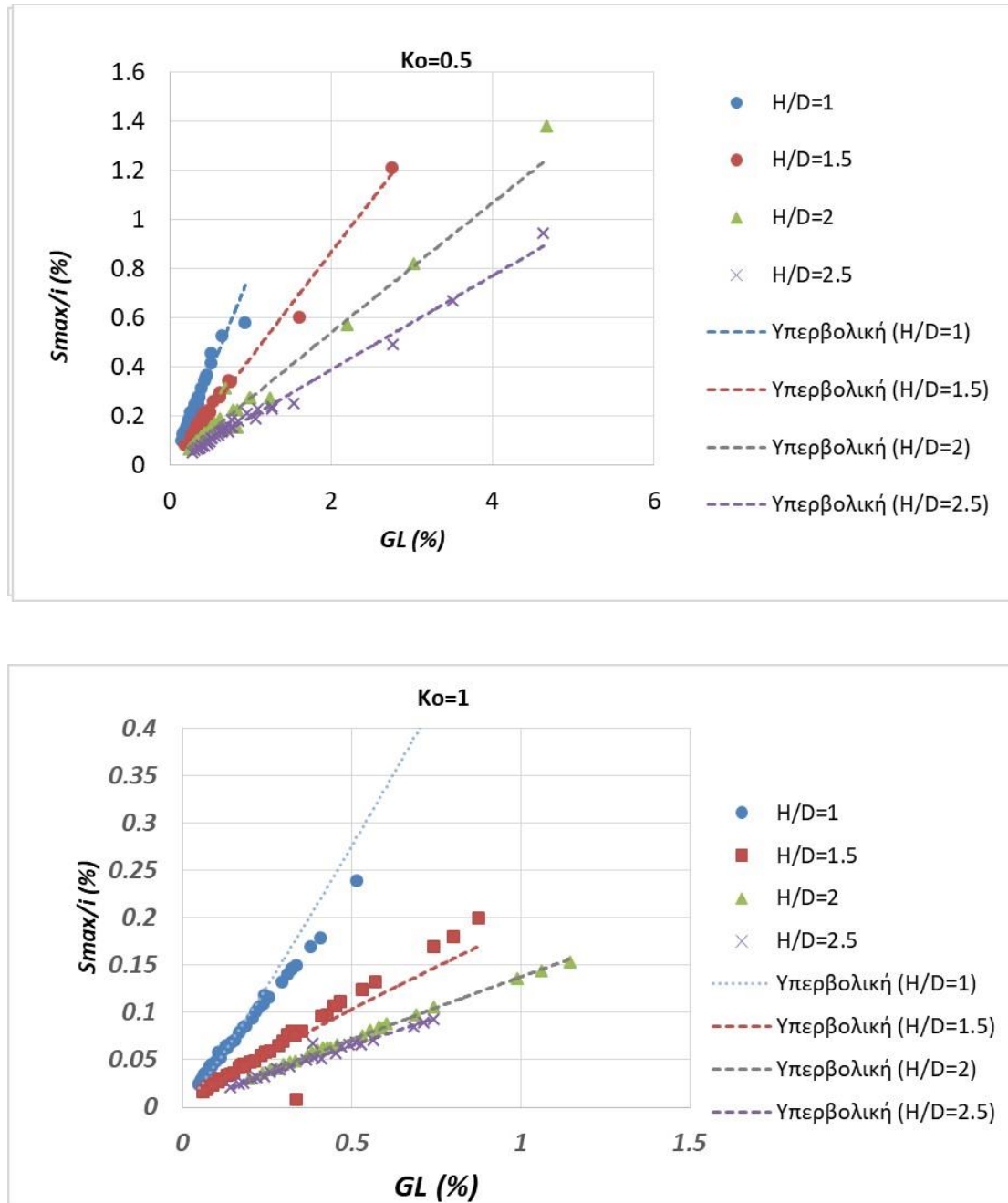
Για όλα τα βάθη εκσκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (H/D) συσχετίζεται η μέγιστη καθίζηση $S_{v,max}$ που συμβαίνει πάνω από το κέντρο τους άξονα της σήραγγας για $x=0$, στην εγκάρσια διεύθυνση (άξονας x) με τον όγκο εδάφους ανά μονάδα μήκους στο άνοιγμα της σήραγγας (GL %) για $K_o=0.5$ και $K_o=1$ (Σχήμα 3.2.7 α)



Σχήμα 3.2.7 α: Συσχέτιση $S_{v,max}/D$ με τον όγκο απώλειας εδάφους GL(%)

3.2.8 Συσχέτιση $S_{v,max}/i$ με την απώλεια όγκου εδάφους (GL %)

Για όλα τα βάθη εκσκαφής ανηγμένα ως προς τη διάμετρο της σήραγγας (H/D) συσχετίζεται η μέγιστη καθίζηση $S_{v,max}$ ανηγμένη ως προς το σημείο καμπής i . Η $S_{v,max}$ συμβαίνει πάνω από το κέντρο τους άξονα της σήραγγας για $x=0$, στην εγκάρσια διεύθυνση (άξονας x) με τον όγκο εδάφους ανά μονάδα μήκους στο άνοιγμα της σήραγγας (GL %) για $K_o=0.5$ και $K_o=1$ (Σχήμα 3.2.8 α)



Σχήμα 3.2.8 β: Συσχέτιση $S_{v,max}/i$ με τον όγκο απώλειας εδάφους GL (%)

Βιβλιογραφία

- 1) Γεωργίου Δ., Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, “Κατασκευή Σιδηροδρομικής Σήραγγας Παναγοπούλας”, Ε.Μ.Πολυτεχνείο, 2015
- 2) ΕΛΟΤ «ΠΕΤΕΠ 12-02-01-02», « Διάνοξη Σηράγγων με Μηχανικά Μέσα Ολομέτωπης ή Σημειακής Κοπής», Έκδοση 1^η, Μάιος 2006
- 3) ΕΕΣΥΕ, «Ταξινόμηση της Μηχανικής Διάτρησης Σηράγγων»
- 4) Ραχμάνη Κ.Α. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, «Διερεύνηση των Καθιζήσεων σε Αβαθείς Σήραγγες με Συμβατική και Μηχανοποιημένη Μέθοδο Εκσκαφής σε Αστικό Περιβάλλον»,Ε.Μ.Πολυτεχνείο,2013
- 5) Συριόπουλος Γ.,Διπλωματική Εργασία,»Ανάλυση Σηράγγων-Εμπειρικές,Αναλυτικές και Αριθμητικές Μέθοδοι», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,2007
- 6) Καββαδάς Μ, “Πρόσφατες Εξελίξεις στον Σχεδιασμό Συγκοινωνιακών Σηράγγων”, Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.), Ιανουάριος 2012
- 7) Καββαδάς Μ, “Υπολογιστικές Μέθοδοι Υπογείων Έργων- Σημειώσεις Μαθήματος”, Εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2012.
- 8) Κουκουτάς Σ.Π., Διδακτορική Διατριβή, «Επιτελεστικότητα Μηχανών Ολομέτωπης Διάνοξης Αβαθών Σηράγγων»,Ε.Μ.Πολυτεχνείο , Ιούνιος 2015
- 9) Κυριακόπουλος Θ., Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, «Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Ενεμάτωσης και της Κωνικότητας της Ασπίδας του ΤΒΜστη Μηχανοποιημένη Εκσκαφή Σηράγγων», Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2017
- 10) Κωστόπουλος Σ. Δ., «Σήραγγες», Εκδόσεις ΙΩΝ, 2013
- 11) Λίτσας Δ., Διδακτορική Διατριβή, «Διερεύνηση των Εδαφικών Μετακινήσεων Λόγω Μηχανοποιημένης Εκσκαφής σε Αστικό Περιβάλλον», Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Μάιος 2018
- 12) Προυντζόπουλος Γ., Διδακτορική Διατριβή, “Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων”, Ε.Μ.Πολυτεχνείο, 2012.
- 13) Προυντζόπουλος Γ. και Καββαδάς Μ, “Ευστάθεια και Παραμορφώσεις Μπροστά από το Μέτωπο Εκσκαφής Σηράγγων, Σύγκριση Αριθμητικών Αναλύσεων με Αναλυτική Μέθοδο”, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, 29/09 – 1/10 2010

- 14) Σιταρένιος Π. και Καββαδάς Μ, “Επιρροή της Χαλάρωσης της Βραχώμαζας στη Διάνοιξη Σηράγγων”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- 15) Σοφιανός Α., “Υποστήριξη Υπογείων Έργων- Σημειώσεις Μαθήματος”, Εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014
- 16) Σοφιανός Α., “Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων- Σημειώσεις Μαθήματος”, Εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018
- 17) Τσαπέκης Ι. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, «Ανάλυση Ευστάθειας Μετώπου Αβαθούς Σήραγγας με Χρήση Δοκών Προπορείας (Forepoles) & Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)», Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Ιανουάριος 2019
- 18) Bilotta E. “Tunnelling and Underground Structures”, Lecture Notes, Università Degli Studi di Napoli Federico II, 2014-2015
- 19) British Tunnelling Society, “Alastair B., “Harding Lecture 2010”, Απρίλιος 2010
- 20) Burland J.B and Mair R.J and Standing J.R., “Ground performance and building response due to tunneling”
- 21) Burland J.B, “The assessment of the risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations” Presentation, Imperial College London,
- 22) DAUB, “Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground”, Version 10, 2016, ITA/AITES
- 23) DAUB, “Recommendations for the Selection of Tunneling Machines”, Version 10, 2010.
- 24) Farshad K. and Reza R., “Determination of settlement trough width and optimization of soil behavior parameters based on the design of experiment method (DOE)”, Volume 52, No. 1, pp. 7-15, doi: [10.22059/ijmge.2017.240572.594693](https://doi.org/10.22059/ijmge.2017.240572.594693)
- 25) Guglielmetti V. “Mechanized Tunnelling in Urban Areas”, 2008
- 26) Hor. B and Caudron. M. Heib. M., “Experimental analysis of the impact of ground movements on surface structure”, Pan-America conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Toronto : Canada (2011)
- 27) ITA Working Group 2, “Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings”, ITA/AITES Report No22, April 2019
- 28) ITA Working Group No 14, “Guidelines for Selecting TBMs for Soft Ground”

- 29) ITA/AITES, WG Research, "Settlements induced by tunneling in Soft Ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 22 pp.119–149, 2007
www.elsevier.com/locate/tust
- 30) Loganathan N.P, "An Innovative Method For Assessing Tunneling-Induced Risks To Adjacent Structures", January 2012
- 31) Lovat P.R. "TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines", "Νέες Εξελιγμένες Μέθοδοι Μηχανικής Διάνοιξης Σηράγγων", TEE, Αθήνα, 1 Φεβρουαρίου, 2007
..
- 32) Maidl. B. "Handbook of Tunnel Engineering", volume I:Structures and Methods,Ernst & Sohn March 2013
- 33) Maidl.B. "Hardrock Tunnel Boring Machines", Ernst & Sohn, 2008
- 34) Mair R.J and Taylor R.N., "Centrifuge modelling of ground movements due to tunnelling in layered ground", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Rotterdam, <https://www.issmge.org/publications/online-library,1996>
- 35) Mair R. J. and Atkinson J. H., "Soil Mechanics Aspects of Soft Ground Tunnelling", Ground Engineering, Volume 19, No. 3, pp. 20-38, July 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)91257-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)91257-8)
- 36) Mair. R.J and Taylor.R.N., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Hamburg), Theme Lecture: "Bored Tunneling in the Urban Environment", <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- 37) Moller. S. Thesis, "Tunnel induced Settlements and Structural Forces in Linings",University Stuttgart, 2006
- 38) Sandvik Tamrock Corp "Rock Ecvation Handbook",1999
- 39) Sauer G. and Walter A.,"Tunnelling and beyond",2003
- 40) Whittaker B.N and Frith.R.C, "Tunnelling, Design, Stability and Construction", The Institution of Mining and Metallurgy,1990

