ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΤΜΗΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΠΡΟΒΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

Τριμελής Επιτροπή :

Μαρίνος Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής

Παπαδημητρίου Αχιλλέας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Γερόλυμος Νικόλαος , Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

Copyright © Προβόπουλος Νικόλαος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Μιχάλη Καββαδά, με τον οποίον για άλλη μια φορά είχαμε μια άψογη συνεργασία. Τόσο το μάθημά του περί βραχομηχανικής και σηράγγων, κατανοητό, ουσιώδες και ενδιαφέρον, όσο και η ενασχόληση της επιστημονικής του ομάδας με τις σήραγγες τα τελευταία χρόνια, ήταν αυτά που με οδήγησαν να επιλέξω το θέμα της εργασίας αυτής. Η συνεργασία μας βασίστηκε για άλλη μια φορά στην άμεση επικοινωνία που είχαμε και στις κατευθυντήριες γραμμές που έθετε σε κάθε στάδιο της εργασίας ώστε να μορφωθεί αυτό το τελικό αποτέλεσμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κ. Μαρίνο Βασίλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την άριστη συνεργασία μας στην εκπόνησή της.

Παράλληλα, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες μου προς τους κ.κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου και Νικόλαο Γερόλυμο, καθηγητές μου σε μαθήματα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., τόσο για την άριστη ποιότητα της διδασκαλίας των μαθημάτων τους όσο και για την παρουσία τους στην Τριμελή Επιτροπή της παρούσας διπλωματικής.

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

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους φίλους μου και στην κοπέλα μου Ειρήνη, που ήταν όλοι τους πάντα δίπλα μου, σε ευχάριστες αλλά και δυσάρεστες στιγμές, στιγμές που όμως όλες μαζί συνέβαλλαν στην επίτευξη του στόχου μου, που δεν ήταν άλλος από την παρούσα διπλωματική , κάνοντας το ταξίδι μου στην σχολή έως εδώ ακόμα πιο ευχάριστο!

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, στους γονείς μου Γιώργο και Ξανθή, που δίχως την συμπαράστασή τους δεν θα είχα καταφέρει να ανταπεξέλθω στο μακρύ αυτό ταξίδι της γνώσης και να φτάσω σε αυτό εδώ το σημείο. Ελπίζω να φαίνομαι πάντα αντάξιός τους.

Πίνακας περιεχομένων

I. Περίληψη xv

II. Abstract xvii

1. Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη Σηράγγων 1

2. Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων 5

2.1. Μέθοδος NATM 5

2.1.1. Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής 5

2.1.2. Η φιλοσοφία της τεχνικής 7

2.1.3. Η εφαρμογή της τεχνικής 8

2.1.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM 11

2.1.5. Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM 11

2.2. Μέθοδος SCL (Sprayed Concrete Lining) 12

2.2.1. Τύπος 1 13

2.2.2. Τύπος 2 14

2.2.3. Τύπος 3 14

2.2.4. Τύπος 4 15

3. Τμηματική Διάνοιξη Σηράγγων 17

3.1. Σημασία της τμηματικής διάνοιξης σηράγγων 17

3.2. Παραδείγματα τμηματικής διάνοιξης σηράγγων 18

3.3. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης 21

3.3.1. Κοχλίωση πετρωμάτων 21

3.3.2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) 22

3.3.3. Χαλύβδινα Πλαίσια 24

3.3.4. Δικτυωτές δοκοί 25

3.3.5. Προενίσχυση μετώπου εκσκαφής με δοκούς προπορείας (forepoling) 25

3.3.6. Μηχανήματα συμβατικής διάνοιξης σηράγγων 27

4. Αριθμητική διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σηράγγων 37

4.1. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων 37

4.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος 38

4.2.1. Μηχανικές παράμετροι 39

4.2.1.1. Μηχανικές παράμετροι εδάφους 39

4.2.1.2. Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης 39

4.3. Γεωμετρία εκσκαφής 41

4.4. Βασικές παραδοχές 43

4.4.1. Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb 43

4.4.2. Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης 43
4.4.3. Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωϋλικού 43
4.4.4. Στάδια προσομοίωσης 47
4.4.5. Συνοριακές συνθήκες 49
4.4.6. Μετρούμενα Μεγέθη 49
5. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τρεις Φάσεις με Τελικό Ανάστροφο Τόξο 53
5.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής 54
5.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής 61
5.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων 64
5.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη 67
6. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τρεις Φάσεις με Προσωρινό και Τελικό Ανάστροφο Τόξο ... 71
6.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής 72
6.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής 79
6.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων 82
6.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη 85
7. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τέσσερις Φάσεις με Προσωρινό και Τελικό Ανάστροφο Τόξο 88
7.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής 90
7.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής 98
7.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων 101
7.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη 106
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 110
9. Βιβλιογραφία 120

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.Υπόγειο σύστημα ύδρευσης διαμέσου σηράγγων (qanat) 1
Εικόνα 2. Ευπαλίνειο όρυγμα (Πυθαγόρειο Σάμου). 2
Εικόνα 3. Σήραγγα Malpas, Γαλλία (έναρξη κατασκευής περί το 1679) 3
Εικόνα 4.Σήραγγες Gotthard,Ελβετία (έναρξη κατασκευής περί το 1872) 4
Εικόνα 5. Τμηματική εκσκαφή διατομής βάσει μεθόδου NATM (Y. Zhang). 9
Εικόνα 6. Κατασκευαστική αλληλουχία βάσει μεθόδου NATM (I. Ocak). 10
Εικόνα 7. Διαμόρφωση τελικού ανάστροφου τόξου – invert (ΕΡΓΟΣΕ). 10
Εικόνα 8. Πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης σηράγγων (GEOKON). 11
Εικόνα 9. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 1 (D. Masin). 14
Εικόνα 10. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 3 (Gall Zeidler Consultants). . 15

Εικόνα 11. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 4 (DR. Sauer & Partners). 15
Εικόνα 12. Γεωμετρία εκσκαφής υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Αττικό Μετρό). 18
Εικόνα 13. Τυπική διατομή προσωρινής υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Αττικό Μετρό). 19
Εικόνα 14. Τμηματική εκσκαφή άνω ημιδιατομής υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Δ. Γεωργίου). 19
Εικόνα 15. Φρέαρ και υπόγειο άνοιγμα Chinatown Station (Dr. Sauer & Partners). 20
Εικόνα 16. Κατασκευαστική αλληλουχία υπόγειου ανοίγματος Chinatown Station (Dr. Sauer & Partners). 21
Εικόνα 17. Αγκύριο βράχου (S.Yan). 22
Εικόνα 18 Εκσκαφή μετώπου σήραγγας με εκσκαφέα υπογείων έργων (Δ. Γεωργίου) 28
Εικόνα 19 Διαστάσεις εκσκαφέα R944C της LIEBHERR (www.liebherr.com) 29
Εικόνα 20 Δυνατές διαστάσεις εκσκαφής LIEBHERR R944C (www.liebherr.com) 29
Εικόνα 21 Τυπική διάταξη εξόρυξης και φόρτωσης εξορυσσόμενου υλικού σε φορτηγό όχημα από Roadheader (NHG Equipment) 30
Εικόνα 22 a) Roadheader με κοπτική κεφαλή εγκάρσιας κοπής b) Roadheader με κοπτική κεφαλή διαμήκους κοπής (S. Evren Seker). 31
Εικόνα 23 Sandvik MR340-360 Roadheader (www.sandvik.com) 31
Εικόνα 24 Διαστάσεις Sandvik MR360 Roadheader (www.sandvik.com) 32
Εικόνα 25 Διαστάσεις διάνοιξης διατομής μηχανήματος Sandvik MR360 Roadheader (www.sandvik.com) 32
Εικόνα 26 Διατρητικά φορεία τύπου Jumbo για την τοποθέτηση αγκυρίων βράχου (www.sandvik.com) 33
Εικόνα 27 Χαρακτηριστικά- Διαστάσεις διατρητικών φορείων Atlas Copco-Epiroc Boomer S2 (www.epiroc.com) 33
Εικόνα 28 Χειροκίνητη εκτόξευση σκυροδέματος (SCA) 34
Εικόνα 29 Αυτόματη εκτόξευση σκυροδέματος (www.putzmeister.com) 34
Εικόνα 30 Haggloader (www.epiroc.com) 35
Εικόνα 31 Διαστάσεις Epiroc 10-HR Haggloader (www.epiroc.com) 35
Εικόνα 32 Φορτηγό CATERPILLAR AD-45 (www.caterpillar.com) 36
Εικόνα 33 Διαστάσεις φορτηγού CATERPILLAR AD-45 (www.caterpillar.com) 36
Εικόνα 34. Διακριτοποίηση προσομοιώματος 38
Εικόνα 35. Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. 43
Εικόνα 36. Τυπική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (Μ. Καββαδάς). 44

Εικόνα 37. Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής. 44
Εικόνα 38. Μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής. 45
Εικόνα 39. Γεωστατικές συνθήκες - Αρχικό στάδιο προσομοίωσης. 47
Εικόνα 40. Προσομοίωση αποτόνωσης εδαφικού υλικού. 48
Εικόνα 41. Προσομοίωμα με την τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης. 48
Εικόνα 42. Συνοριακές συνθήκες στα όρια του προσομοιώματος. 49
Εικόνα 43. Χαρακτηριστικά σημεία λήψης μετρήσεων περιμετρικά της εκσκαφής. 50
Εικόνα 44. Βασικά μεγέθη που συνδέονται με την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σηράγγων (ASCE Library). 51
Εικόνα 45. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τρεις φάσεις με την κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (invert). 53
Εικόνα 46. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50. 55
Εικόνα 47. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50. 55
Εικόνα 48.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m 57
Εικόνα 49.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m 57
Εικόνα 50.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α' Φάσης.. 58
Εικόνα 51.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης.. 59
Εικόνα 52.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Γ' Φάσης . 59
Εικόνα 53.Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής της άνω ημηδιατομής (top heading) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 60
Εικόνα 54. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής του τελικού ανάστροφου τόξου (invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 61
Εικόνα 55. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1. 62
Εικόνα 56.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1 62
Εικόνα 57.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 63
Εικόνα 58.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Β' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 63
Εικόνα 59. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής της άνω ημιδιατομής (top heading) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 64

Εικόνα 60. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής του τελικού ανάστροφου τόξου (invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 65

Εικόνα 61. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε δύο φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert). 71

Εικόνα 62. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50 72

Εικόνα 63. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50 73

Εικόνα 64. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m 75

Εικόνα 65. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m 75

Εικόνα 66. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου. 76

Εικόνα 67. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης εκσκαφής. 76

Εικόνα 68. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στην κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου. 77

Εικόνα 69. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 78

Εικόνα 70. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 78

Εικόνα 71. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1. 79

Εικόνα 72. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1 80

Εικόνα 73. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 80

Εικόνα 74. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος του ανάστροφου τόξου (invert) στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 81

Εικόνα 75. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Β' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 81

Εικόνα 76. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 5,7. 82

Εικόνα 77. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 4,3. 83

Εικόνα 78. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Εδώ διακρίνεται η υποδιαίρεση της Α' φάσης εκσκαφής.....89
Εικόνα 79. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Εδώ διακρίνεται η ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής.....90
Εικόνα 80. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50.....91
Εικόνα 81. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50.....91
Εικόνα 82. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m.....93
Εικόνα 83. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m.....93
Εικόνα 84. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α1' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου.....95
Εικόνα 85. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α2' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου.....95
Εικόνα 86. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης εκσκαφής.....96
Εικόνα 87. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στην κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου.....96
Εικόνα 88. Ανύσματα πλευρικών μετακινήσεων (horizontal displacements) κατά την ολοκλήρωση του προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.....97
Εικόνα 89. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής (top heading) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 , για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.....97
Εικόνα 90. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.....98
Εικόνα 91. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1.....99
Εικόνα 92. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1.....99
Εικόνα 93. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α1' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 100
Εικόνα 94.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α2'Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1. 100

Εικόνα 95. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Γ' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,Ko=1. 101

Εικόνα 96. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 5,7..... 102

Εικόνα 97. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 4,3..... 102

Εικόνα 98. Ανάπτυξη μέγιστης καμπτικής ροπής (M_{max}) στο έδαφος S2, H=30m, Ko=1 στην περιοχή της προσωρινής εκσκαφής μεταξύ των δύο επιμέρους τμημάτων της Α' φάσης εκσκαφής (top heading) 107

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1. Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου..... 41

Σχήμα 2. Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου. 42

Σχήμα 3. Διάνοιξη διατομής σε τέσσερις (4) φάσεις με διαμοιρασμό της Α΄ φάσης σε δυο επιμέρους φάσεις και κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου. 42

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Σύνολο πεπερασμένων στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων αριθμητικών αναλύσεων. ... 38

Πίνακας 2. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού. 39

Πίνακας 3. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος. 40

Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες δικτυωτών πλαισίων. 40

Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες αγκυρίων. 40

Πίνακας 6. Βαθμός αποτόνωσης (λ) στο σημείο εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης, βάσει της μεθόδου Chern et al. (1998). 46

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 56

Διάγραμμα 2. Μεταβολή του λόγου (U/U_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (Ns) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 60

Διάγραμμα 3. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 65

Διάγραμμα 4. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S2 με υπερκείμενα H=15m. 66

Διάγραμμα 5. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 67

Διάγραμμα 6. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 68

Διάγραμμα 7. Μέγιστες καμπτικές ροπές (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 68

Διάγραμμα 8. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 69

Διάγραμμα 9. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 74

Διάγραμμα 10. Μεταβολή του λόγου (U/U_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 77

Διάγραμμα 11. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο. 83

Διάγραμμα 12. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S3 με υπερκείμενα H=30m. 84

Διάγραμμα 13. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 85

Διάγραμμα 14. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 86

Διάγραμμα 15. Μέγιστη καμπτική ροπή (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 86

Διάγραμμα 16. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 87

Διάγραμμα 17. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 92

Διάγραμμα 18. Συσχέτιση του λόγου συγκλίσεων (U/U_{max}) στα επιμέρους στάδια εκσκαφής, σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 94

Διάγραμμα 19. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 103

Διάγραμμα 20. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S3 με υπερκείμενα H=30m. 104

Διάγραμμα 21. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τα επιμέρους στάδια εκσκαφής του εδάφους S1 με υπερκείμενα H=15m και Ko=0,5. 105

Διάγραμμα 22. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 106

Διάγραμμα 23. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 107

Διάγραμμα 24. Μέγιστη καμπτική ροπή (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 108

Διάγραμμα 25. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο. 109

Διάγραμμα 26. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s). 110

Διάγραμμα 27. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1. 111

Διάγραμμα 28. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert). 112

Διάγραμμα 29. Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης των μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας..... 113

Διάγραμμα 30. Συσχέτιση μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων (S_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert)..... 114

Διάγραμμα 31. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert). 114

Διάγραμμα 32. Συσχέτιση μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1. 115

Διάγραμμα 33. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1..... 116

Διάγραμμα 34. Συσχέτιση μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονική δύναμης (N_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert)..... 117

Διάγραμμα 35. Συσχέτιση μέγιστης αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής (M_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert)..... 117

Διάγραμμα 36. Συσχέτιση αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης στην προσωρινή υποστήριξη (N_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1. 118

Διάγραμμα 37. Συσχέτιση αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής στην προσωρινή υποστήριξη (M_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1. 119

I. Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ως βασικό αντικείμενο την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η τμηματική εκσκαφή αστικής (ρηχής) σήραγγας στην εκδήλωση των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω εκσκαφής. Η διάνοιξη αστικών σηράγγων είναι πολύ κρίσιμη για την ασφάλεια των υπερκείμενων κατασκευών, ειδικά όταν αυτή διέρχεται σε αστικό ιστό. Η παρούσα εργασία εξετάζει περιπτώσεις διάνοιξης σηράγγων πεταλοειδούς διατομής, σύμφωνα με την συμβατική μέθοδο διάνοιξης σηράγγων και βασίζεται στις αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων (NATM).

Για την διερεύνηση της επίδρασης που θα έχει η διάνοιξη της σήραγγας στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων, γίνεται διαμερισματοποίηση της επιφάνειας εκσκαφής σε περισσότερες από μία φάσεις εκσκαφής, με την κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου. Γίνεται χρήση του διδιάστατου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2- Rocscience, εφαρμόζοντας την τεχνική της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις εκσκαφής της σήραγγας, όπου σε καμία από αυτές δεν λαμβάνεται υπόψιν η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής:

- ✓ Διάνοιξη διατομής εκσκαφής σε τρεις (3) φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο
- ✓ Διάνοιξη διατομής εκσκαφής σε τρεις (3) φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο
- ✓ Διάνοιξη διατομής εκσκαφής σε τέσσερις (4) φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο

Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, γίνεται καταγραφή των συγκλίσεων, επιφανειακών καθιζήσεων και αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών στην προσωρινή υποστήριξη.

Τέλος γίνεται παράθεση των βασικών συμπερασμάτων της εργασίας και των προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

II. Abstract

The main purpose of the present thesis is the investigation of the tunnel's multiple phase excavation in cases of an urban (shallow) tunnel on the surficial settlements due to the excavation. When tunnels are excavated underneath urban structures, the tunnel excavation is characterized as critical. The present thesis examines cases of non- circular tunnel excavation, according to the conventional tunneling method and is based on the principles of the New Austrian Tunnelling Method (NATM).

To investigate the effect of the tunnel excavation in the surficial settlements, the excavation area is derived in more than one excavation phases, with the construction of a temporary and final invert. The present investigation is based on two-dimensional numerical analysis on the finite element software RS2-Rocscience, applying the technique of the convergence-confinement method. In all the examined cases, no tunnel face pre – support is taken into account. Parametric numerical analysis examined the following cases:

- ✓ Tunnel excavation in three (3) phases with construction of the final tunnel invert
- ✓ Tunnel excavation in three (3) phases with construction of both temporary and final tunnel invert
- ✓ Tunnel excavation in four (4) phases with construction of both temporary and final tunnel invert

In all the examined cases, tunnel convergence, surficial settlements and primary lining loads are recorded.

Finally, the main conclusion of the present thesis and future work recommendations are presented.

1. Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη Σηράγγων

Σήραγγα ορίζεται η οριζόντια ή παραοριζόντια τεχνητά σκαμμένη υπόγεια δίοδος. Αντιθέτως, οι κατακόρυφοι αγωγοί ονομάζονται φρέατα και σχετίζονται κυρίως με την μεταλλευτική βιομηχανία .

Μια από τις αρχαιότερες υποβρύχιες σήραγγες κατασκευάσθηκε περίπου το 2160 π.Χ. από τους Βαβυλωνίους κάτω από τον ποταμό Ευφράτη για να συνδέσει το βασιλικό παλάτι της Βασίλισσας Σεμίραμις με το ναό του αντίστοιχου Δία. Η σήραγγα είχε μήκος περίπου 920m, είχε διατομή 3.6m×4.5m, και επένδυση από τοιχοποιία με θολωτή αψίδα στεγανοποιημένη με ασφαλτικό κονίαμα. Ο ποταμός εκτράπηκε προκειμένου να επιτρέψει την κατασκευή με κοπή και επανεπίχωση, μια μέθοδος η οποία σήμερα είναι γνωστή ως cut and cover.

Το 700 π.Χ. οι Ιρανοί προκειμένου να υδρεύσουν περισσότερες περιοχές, εφηύραν τα λεγόμενα qanat (κανάτ),όπως φαίνονται στην **Εικόνα 1,** ένα σύστημα σηράγγων και πηγαδιών καθένα από τα οποία εκτεινόταν σε μήκος 5 έως 6 χιλιομέτρων περίπου.

Εικόνα 1.Υπόγειο σύστημα ύδρευσης διαμέσου σηράγγων (qanat)

Στην χώρα μας όμως, το Ευπαλίνειο όρυγμα **(Εικόνα 2)** αποτελεί μια από τις κυριότερες αρχαίες σήραγγες. Είναι μια σήραγγα μήκους 1.036 μέτρων κοντά στο Πυθαγόρειο της Σάμου, η οποία κατασκευάστηκε κατά τον 6ο αιώνα π.Χ. για να χρησιμεύσει σαν υδραγωγείο. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ήταν ότι ανοίχθηκε ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές του βουνού: το όρυγμα αυτό ήταν αμφίστομον , όπως το χαρακτήρισε ο Ηρόδοτος, χάρις στον οποίον έγινε γνωστό. Οι δυο σήραγγες συναντήθηκαν περίπου στο μέσον με αξιοθαύμαστη ακρίβεια, κάτι που ήταν σημαντικό επίτευγμα για τα τεχνολογικά δεδομένα της εποχής.

Εικόνα 2. Ευπαλίνειο όρυγμα (Πυθαγόρειο Σάμου).

Ικανότατοι στον τομέα της διάνοιξης σηράγγων αποδείχτηκαν και οι Ρωμαίοι, οι οποίοι ολοκλήρωσαν κάποιες από τις πρώτες οδικές σήραγγες. Τρανό παράδειγμα η σήραγγα μεταξύ Νάπολης και Ποτσουόλης , μήκους 1.450 m ,πλάτους 7,5 m και ύψους 9 m.

Η πτώση όμως της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας οδήγησε σε μαρασμό την σηραγγοποιΐα , η οποία περιορίστηκε σε στρατιωτικό και μεταλλευτικό επίπεδο, μέχρι περίπου τον 17^{ο} Αιώνα μ.Χ. Εκείνη την περίοδο η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μετακινήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνδυασμό με την εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων και την κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους από τον Coulomb οδηγούν εκ νέου στην άνθισή της.

Στο Malpas της Γαλλίας περί το 1679 πραγματοποιείται μια από τις πρώτες χρήσεις πυρίτιδας για την ανατίναξη του βράχου, όπου αντί να παρακαμφθεί ο ορεινός όγκος κατασκευάσθηκε μέσα σε τόφφους σήραγγα με μήκος 157m και διατομή 6.7 × 8.2m **(Εικόνα 3)**. Εν συνεχεία , ενάμιση αιώνα αργότερα ξεκινούν οι μεγάλες σιδηροδρομικές σήραγγες με μερικές εξ'αυτών να είναι : η σήραγγα Box που διανοίχτηκε με μεγάλες δυσκολίες από εισρέοντα νερά, μεταξύ 1836 και 1851, μέσα σε ωόλιθους, μάργες, ιλύες και αργίλους, η σήραγγα που κατασκευάσθηκε στο Hauenstein της Ελβετίας μεταξύ 1853-58 καθώς και τα 10 km σηράγγων στην Ιταλία.

Εικόνα 3. Σήραγγα Malpas, Γαλλία (έναρξη κατασκευής περί το 1679)

Το μεγαλύτερο στοίχημα για την ένωση των σιδηροδρόμων της Κεντρικής Ευρώπης αποτελούσε η οροσειρά των Άλπειων. Η χρήση αεροσυμπιεστή και αερόσφυρας οδήγησε στην κατασκευή της σήραγγας του Frejus που έχει μήκος 13.7 km και βρίσκεται σήμερα μεταξύ Ιταλίας και Γαλλίας (1857-1871). Αμέσως μετά, το 1872, άρχισε η διάνοιξη της σήραγγας του Gotthard στην Ελβετία που έχει μήκος 15km και μέγιστο βάθος υπερκειμένων 1800m **(Εικόνα 4)**. Για την εξόρυξή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά δυναμίτης. Το έργο με μεγάλες δυσκολίες περατώθηκε το 1882. Η κατασκευάστρια εταιρείαόμως καταστράφηκε οικονομικά, και εκατοντάδες εργαζομένων μεταξύ των οποίων και ο ίδιος ο ανάδοχος, μηχανικός Favre , πέθαναν πριν την ολοκλήρωσή του έργου. Η σήραγγα του Arlberg μήκους 10.3km, η οποία ενώνει την Αυστρία με την Ελβετία, άρχισε να κατασκευάζεται το 1880 και περατώθηκε το 1884. Διανοίχτηκε με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και μεταξύ των καινοτομιών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βελτιωμένες μηχανές διάτρησης και η χρήση ηλώσεων για τη στήριξη των πετρωμάτων. Αμέσως μετά, το 1898, άρχισε να κατασκευάζεται η μήκους 19.8 km και μέγιστου βάθους υπερκειμένων 2150 m σήραγγα του Simplon μεταξύ Ιταλίας και Ελβετίας. Είναι δίδυμη σήραγγα (αντί για τις μέχρι τότε διπλής τροχιάς μονές σήραγγες), εκ των οποίων ο πρώτος κλάδος ολοκληρώθηκε το 1906 και ο δεύτερος τέθηκε σε λειτουργία το 1921. Η ενέργεια για τη διάνοιξη της σήραγγας παράγονταν από υδροηλεκτρικό έργο που κατασκευάστηκε επί τούτοις. Εφαρμόστηκε η παλαιά Αυστριακή μέθοδος και κατά την κατασκευή της αντιμετωπίσθηκαν θερμοκρασίες πετρώματος και πηγών νερού μέχρι και 55.4°C. Επίσης οι εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις οδήγησαν σε συμπεριφορά πετρώματος εκρηκτική και συνθλίβουσα, που αντιμετωπίσθηκαν με την τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων. (Σοφιανός, 2017)

Εικόνα 4.Σήραγγες Gotthard,Ελβετία (έναρξη κατασκευής περί το 1872)

2. Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

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

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

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

Στην παρούσα εργασία θα γίνει περιγραφή της μεθόδου NATM και της μεθόδου SCL.

2.1. Μέθοδος NATM

2.1.1. Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής

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

Ο όρος NATM επινοήθηκε από τον L.v. Rabcewicz το 1962. Την αποκάλεσε ”νέα” για να ορίσει την εν λόγω μέθοδο ως μια διαφορετική προσέγγιση κατασκευής σηράγγων από την έως τότε γνωστή μέθοδο και την ονόμασε ’’Αυστριακή’’ για να υπογραμμίσει το γεγονός ότι οι Αυστριακοί μηχανικοί διαδραμάτισαν αποφασιστικό ρόλο στην ανάπτυξή της. Ο Rabcewicz συνόψισε την κεντρική ιδέα της NATM ως την ανάγκη κατανόησης ότι το έδαφος είναι το πραγματικά φέρον στοιχείο ενώ η γραμμή υποστήριξης προσδίδει ενίσχυση στην επιφάνεια της βραχομάζας. Η διατήρηση και η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο είναι ο κύριος στόχος στη σύγχρονη σηραγγοποιία . Η χρήση της NATM ενισχύει την ικανότητα αυτοϋποστήριξης του βράχου ή του εδάφους κινητοποιώντας την αντοχή της περιβάλλουσας γεωμάζας.

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

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

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

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

Η ΝΑΤΜ είναι επί της ουσίας μια τεχνική αντιμετώπισης των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά την υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων σε σκληρό βράχο έως μαλακό έδαφος, όπου η ανάλυση έχει ρόλο βοηθητικό- επιβεβαιωτικό. Η συνεχής προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες υποβοηθείται από εκτεταμένες οργανομετρήσεις, εξ 'ου και η ΝΑΤΜ συχνά αναφέρεται ως παρατηρητική μέθοδος (observational method κατά τον Peck). Οι οργανομετρήσεις αναφέρονται στη σύγκλιση των παρειών, την καθίζηση της οροφής και άλλες μετρήσεις παραμορφώσεων, δυνάμεων

και τάσεων , η κυριότερη από τις οποίες είναι η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος του εκτοξευμένου σκυροδέματος προκειμένου να ανιχνευθεί μια επερχόμενη αστοχία. Ο Sauer (1988) υποδεικνύει ότι η αυξημένη συχνότητα των μετρήσεων έχει περισσότερη αξία από την υψηλότερη ακρίβεια των οργάνων.

2.1.2. Η φιλοσοφία της τεχνικής

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

- ✓ Διατήρηση της αντοχής του εδάφους ή του βράχου που περιβάλλει την διατομή της σήραγγας και κινητοποίηση της αντοχής στον μέγιστο δυνατό βαθμό.
- ✓ Η κινητοποίηση της αντοχής μπορεί να επιταχθεί με την ελεγχόμενη παραμόρφωση του εδάφους. θα πρέπει να αποφεύγονται υπερβολικές παραμορφώσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια αντοχής ή μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις.
- ✓ Τα αρχικά (προσωρινά) μέτρα υποστήριξης περιλαμβάνουν συστηματικές ηλώσεις/αγκυρώσεις βράχου και τόξου υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε στρώσεις λεπτού πάχους. Αυτή η ΄΄προσωρινή υποστήριξη΄΄ είναι η ΄΄επένδυση΄΄ που δρα ως κέλυφος και αναλαμβάνει ήδη φορτία. Οι εργασίες μόνιμης υποστήριξης (τελικής επένδυσης)| διεξάγονται σε μεταγενέστερο στάδιο και κατασκευάζονται με οπλισμούς και σκυρόδεμα επί τόπου εγχεόμενο που ενισχύει την κατασκευή και αναλαμβάνει τα τελικά φορτία.
- ✓ Το κλείσιμο του δακτυλίου θα πρέπει να πραγματοποιείται σε κατάλληλο χρονικό διάστημα που ποικίλει ανάλογα τις συνθήκες εδάφους ή του βράχου.
- ✓ Απαραίτητες είναι οι εργαστηριακές δοκιμές και η γεωτεχνική παρακολούθηση (οργανομετρήσεις) της παραμόρφωσης των μέτρων υποστήριξης και του εδάφους.
- ✓ Οι εμπλεκόμενοι στον σχεδιασμό, εφαρμογή και επίβλεψη της κατασκευής με ΝΑΤΜ πρέπει να έχουν κατανοήσει την μέθοδο αυτή και να συνεργάζονται για την επίλυση των προβλημάτων που ανακύπτουν.
- ✓ Το μήκος του ανυποστήρικτου ανοίγματος θα πρέπει να είναι μικρότερο δυνατό.
- ✓ Η σήραγγα διανοίγεται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος). Έτσι μειώνονται

οι πιέσεις της βραχόμαζας στην άμεση υποστήριξη (τόσο περισσότερο όσο αυξάνει η σύγκλιση του τοιχώματος). Έαν η σύγκλιση αυξηθεί όμως υπέρμετρα, μπορεί να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχόμαζας και αύξηση των πιέσεων.

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

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

2.1.3. Η εφαρμογή της τεχνικής

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

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

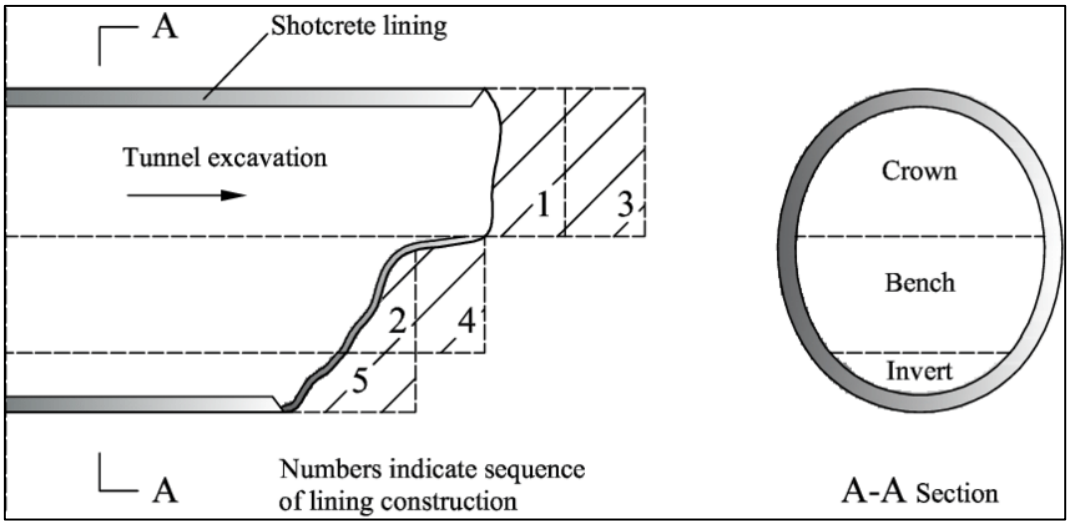
Κατ’ επέκταση , οι προδιαγραφές σχεδιασμού που περιλαμβάνονται σε μια σύμβαση NATM δεν θα πρέπει να εκληφθούν παρά ως οδηγός , ή έστω ως ένα σύνολο των πλέον κατάλληλων και πιθανών συνθηκών, από τις οποίες ο μηχανισμός επί τόπου του έργου θα επιλέξει την αρμόζουσα για να αντιμετωπίσει τα εκάστοτε προκύπτοντα προβλήματα.

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

αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών στην συμβατική μέθοδο χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση διάφοροι τρόποι εκσκαφής της διατομής :

Εκσκαφή της διατομής σε φάσεις

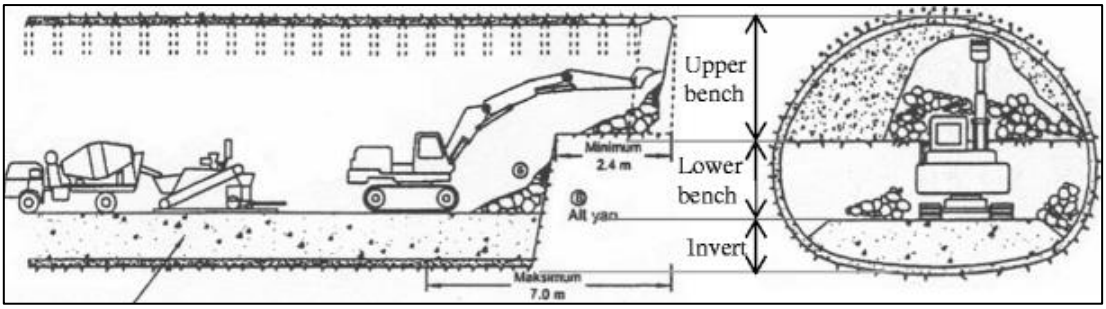
Η εκσκαφή της διατομής γίνεται σε δύο ή περισσότερες φάσεις ώστε να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση της βραχόμαζας, ο περιορισμός των συγκλίσεων, η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου και η χρήση των λιγότερων δυνατών μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Η τμηματική εκσκαφή αποσκοπεί στην σταδιακή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



Εικόνα 5. Τμηματική εκσκαφή διατομής βάσει μεθόδου NATM (Y. Zhang).

Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης σε μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής

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



Εικόνα 6. Κατασκευαστική αλληλουχία βάσει μεθόδου NATM (I. Ocak).

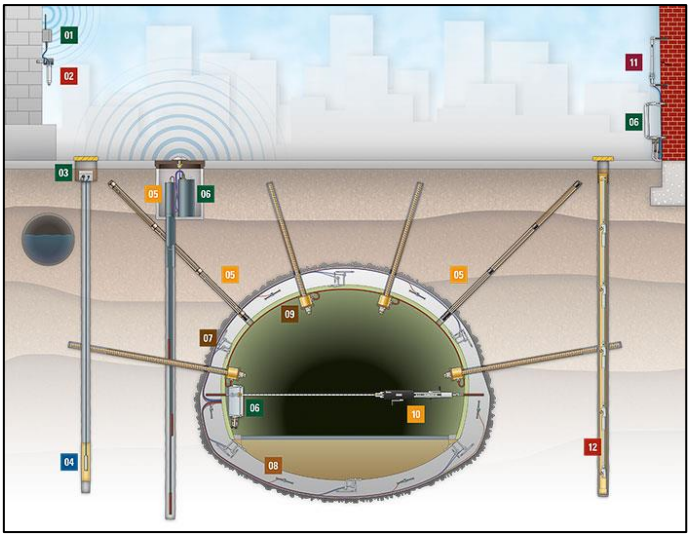
<u>Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής</u>

Σε περιπτώσεις βραχόμαζας με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δημιουργείται κλειστός δακτύλιος με τη διαμόρφωση στο δάπεδο ανάστροφου τόξου και τη σκυροδέτησή του.

Εικόνα 7. Διαμόρφωση τελικού ανάστροφου τόξου – invert (ΕΡΓΟΣΕ).

<u>Γεωτεχνική παρακολούθηση της συμπεριφοράς των σηράγγων</u>

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



Εικόνα 8. Πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης σηράγγων (GEOKON).

2.1.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

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

2.1.5. Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Ο σημαντικότερος κίνδυνος κατά την εφαρμογή της NATM παρουσιάζεται στο μέτωπο εκσκαφής ο οποίος κατανέμει τις τάσεις επί το ευμενέστερων. Οι οργανομετρήσεις δεν εξασφαλίζουν την

ευστάθεια του μετώπου , ενώ η ασφάλεια της ολοκληρωμένης προσωρινής υποστήριξης συναρτάται σε μεγάλο βαθμό με την ερμηνεία των μετρήσεων.

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

2.2. Μέθοδος SCL (Sprayed Concrete Lining)

Η διάνοιξη αβαθών σηράγγων πραγματοποιείται συνήθως σε εδαφικούς χαλαρούς σχηματισμούς. Ο συνδυασμός χαμηλής ποιότητας γεωμάζας και μικρού βάθους δεν επιτρέπει την επιτυχή λειτουργία θόλου πάνω από τη διάνοιξη. Επίσης, κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις αστικές περιοχές ο περιορισμός των καθιζήσεων είναι ύψιστης σημασίας για την αποφυγή ζημιών στις ανωδομές . Για τον περιορισμό των καθιζήσεων θα πρέπει η γεωμάζα να παραμορφώνεται όσο το δυνατό λιγότερο. Σήμερα στη Βρετανία χρησιμοποιείται και ο όρος SCL (Sprayed Concrete Lining) , για να χαρακτηρίσει συμβατικές μεθόδους διάνοιξης, αβαθών αστικών σηράγγων σε μαλακά πετρώματα, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η SCL αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων κατά τη διάνοιξη του μετρό του Λονδίνου.

Η SCL είναι μια μέθοδος διάνοιξης με διαδοχικές φάσεις εκσκαφής και τοποθέτησης προσωρινής επένδυσης από ψεκασμένο σκυρόδεμα με, ή χωρίς, δομικό πλέγμα, ίνες, δικτυωτά τόξα, ήλους και δοκίδες προπορείας. Οι λεπτομέρειες της άμεσης στήριξης καθορίζονται εκ των προτέρων από το μελετητή και επιβεβαιώνονται με ενόργανη παρακολούθηση. Ο έλεγχος της σύγκλισης και της καθίζησης επιτυγχάνεται κυρίως με τον περιορισμό του μήκους της προχώρησης ανά στάδιο και με τη παροχή γρήγορου κλεισίματος του αναστρόφου τόξου. Στα σχετικά δύστροπα και ικανά στρώματα, όπως η άργιλος του Λονδίνου, η τρέχουσα πρακτική επιτρέπει γενικά την ολομέτωπη διάνοιξη σε σήραγγες με διατομή μέχρι 30 m2 εκτός αν η παρουσία υδροφόρων στρωμάτων ή η εγγύτητα των κτηρίων υπαγορεύει διαφορετικά. Κατά την προώθηση του πλήρους μετώπου υιοθετείται συνήθως μία βαθμιδωτή μηκοτομή όπως και στη NATM με μία προπορευόμενη άνω ημιδιατομή, μια ακολουθούσα βαθμίδα και ένα ανάστροφο τόξο.

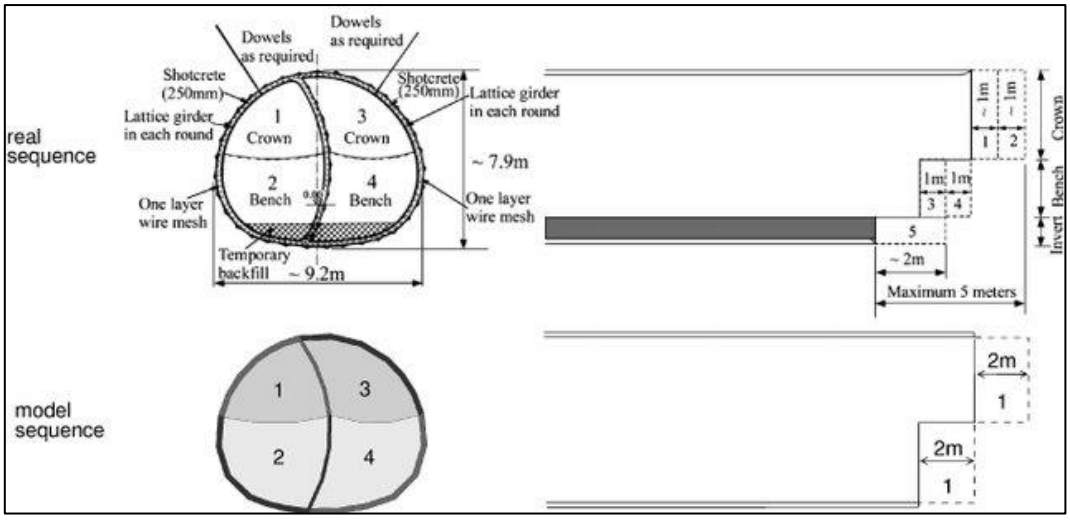
Οι μεγαλύτερες διατομές πρέπει να υποδιαιρούνται για να επιτύχουν ένα ή περισσότερους από τους ακόλουθους στόχους:

- ✓ Μείωση της εκτεθειμένης επιφάνειας του μετώπου για τον καλύτερο έλεγχό της σταθερότητας του μετώπου, της σύγκλισης και της καθίζησης.
- ✓ Μείωση του όγκου της εκσκαφής, του οπλισμού και του ψεκασμένου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης, ώστε να παρέχεται ταχύτερα η υποστήριξη.
- ✓ Ταχύτερο κλείσιμο του δακτυλίου σε κάθε ένα από τα τμήματα υποδιαίρεσης του μετώπου.

Για μέτωπα εκσκαφής, εμβαδού μεγαλύτερου από 30 m^2, συστήνονται τέσσερις βασικές ακολουθίες εκσκαφής όπως περιγράφονται κατωτέρω.

2.2.1. Τύπος 1

Η μέθοδος δύναται να θεωρηθεί ως εκσυγχρονισμός της παλαιάς μεθόδου του πυρήνα. Το μέτωπο διαιρείται σε τρία μέρη, δύο πλευρικές στοές και ένα κεντρικό πυρήνα. Οι πλευρικές στοές προχωρούν ταυτόχρονα, με κάθε μέτωπο να υποδιαιρείται σε άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο τόξο. Όπου απαιτείται, ο μελετητής δύναται να θέσει όρια υστέρησης της προχώρησης σε κάθε παράλληλη στοά .Τα εξωτερικά τοιχώματα των στοών ενσωματώνουν δομικό πλέγμα και δικτυωτά τόξα που βοηθούν στην ορθή διατήρηση της μορφής. Προσωρινή επένδυση από ψεκασμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται στα εσωτερικά τοιχώματα των στοών και εάν δεν εγκαθίστανται τα δικτυωτά τόξα εκεί, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οδηγοί για να επιτευχθεί το απαιτούμενο περίγραμμα. Επιτρέποντας καθυστέρηση περίπου 25m πίσω από τα μέτωπα των εξωτερικών στοών (για μια ονομαστική τελειωμένη διάμετρο 9 μ), το μέτωπο της κεντρικής στοάς ακολουθεί υποδιαιρεμένο πάλι ως άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο. Το ψεκασμένο σκυρόδεμα της προσωρινής επένδυσης των εσωτερικών τοιχωμάτων θραύεται, οι αρμοί καθαρίζονται, το πλέγμα και τα δικτυωτά τόξα επεκτείνονται και σκυρόδεμα ψεκάζεται για να διαμορφωθεί ο πλήρης δακτύλιος. Τα δικτυωτά τόξα συνήθως έχουν μετωπικές συνδέσεις. Η σημασία επίτευξης συνέχειας στις συνδέσεις είναι μεγάλη, ιδιαίτερα μέσα στο ανάστροφο όπου η επιχωμάτωση μπορεί να εμποδίζει τη σωστή επιθεώρηση



Εικόνα 9. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 1 (D. Masin).

2.2.2. Τύπος 2

Σε αυτή τη διαδοχική διάνοιξη, ένα προσωρινό τοίχωμα διαιρεί το μέτωπο στα δύο. Κάθε μισό υποδιαιρείται σε άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο και η εκσκαφή της διεύρυνσης καθυστερεί περίπου 25 μ πίσω από τη πλευρική στοά σε μια σήραγγα ονομαστικής διαμέτρου 9m. Πάλι, απαιτείται η διατήρηση του σωστού περιγράμματος του προσωρινού τοιχώματος. Με την προχώρηση της διεύρυνσης, το κεντρικό τοίχωμα θραύεται, το πλέγμα και το δικτυωτό τόξο εγκαθίσταται και ψεκασμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται για την ολοκλήρωση του δακτυλίου. Πρόσθετη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή κατασκευή του αρμού στο ανάστροφο, σύμφωνα με τη μελέτη.

2.2.3. Τύπος 3

Αυτή η διαδοχική διαδικασία, που είναι πιο κατάλληλη για μαλακό βράχο απ’ ότι για την άργιλο, αρχίζει με μία κεντρική στοά στέψης που ακολουθείται αμέσως από την εκσκαφή της βαθμίδας στο πλήρες πλάτος της. Την προχώρηση κάθε επιμέρους τμήματος ακολουθεί η εγκατάσταση δομικού πλέγματος και δικτυωτών τόξων και ο ψεκασμός με σκυρόδεμα. Το τοίχωμα διευρύνεται στη βάση της βαθμίδας ώστε να παρέχεται στήριξη στο τόξο της στέψης, και μπορεί να ενσωματώνει πέλματα των δικτυωτών τόξων ώστε να διατηρείται επαρκής υποστήριξη της αψίδας κατά τη διάρκεια της επόμενης εκσκαφής του ανάστροφου.

Εικόνα 10. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 3 (Gall Zeidler Consultants).

2.2.4. Τύπος 4

Η διαδοχική αυτή διάνοιξη ξεκινάει με την ολομέτωπη προχώρηση μιας κυκλικής ή περίπου κυκλικής στοάς οδηγού, που ακολουθείται αργότερα από τη διεύρυνση στο πλήρες μέγεθος της σήραγγας. Η οδηγός στοά μπορεί να είναι περίπου ομόκεντρος ή μπορεί να μοιράζεται ένα κοινό ανάστροφο τόξο με την σήραγγα διεύρυνσης, έτσι ώστε το ανάστροφο της οδηγού να διατηρείται και να ενσωματώνεται στην επένδυση της διεύρυνσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα τέτοιων στοών οδηγών είναι: η ευκολία διάνοιξής τους στη χάραξη της σήραγγας, η αποφυγή των αρμών στο ανάστροφο τόξο, και η δράση βλήτρου της οδηγού στοάς που μειώνει την απώλεια όγκου κατά τη διεύρυνση. Διαφορετική μέθοδος με προπορευόμενη διάνοιξη στοάς προπορείας στη στέψη και υποθεμελίωση της επένδυσης, εφαρμόσθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας Schulwald.

Εικόνα 11. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας βάσει μεθόδου SCL – Type 4 (DR. Sauer & Partners).

3. Τμηματική Διάνοιξη Σηράγγων

3.1. Σημασία της τμηματικής διάνοιξης σηράγγων

Κατά την συμβατική διάνοιξη σηράγγων μηχανικά μέσα, η διαμερισματοποίηση του μετώπου εκσκαφής σε πολλαπλές φάσεις (τμηματική εκσκαφή), αποτελεί μια συνήθη πρακτική στην διάνοιξη της σήραγγας. Εξαίρεση αποτελεί η μέθοδος διάνοιξης σηράγγων ADECO -RS, όπου η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται ολομέτωπα με την προϋπόθεση ότι έχει εξασφαλιστεί η σταθερότητα του μετώπου εκσκαφής, ενώ η μόνιμη επένδυση της σήραγγας ακολουθεί ελάχιστα μέτρα πιο πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής.

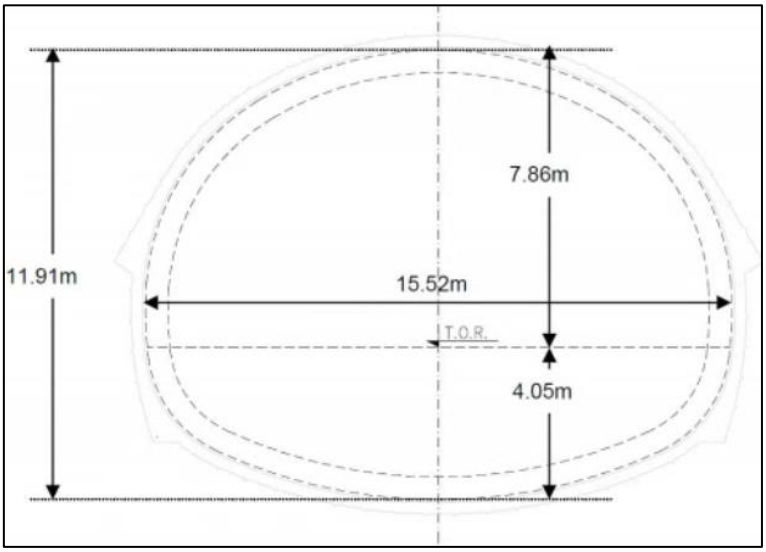
Οι βασικότεροι λόγοι που οδηγούν στην τμηματική διάνοιξη της σήραγγας, είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ **Εξασφάλιση σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής**: Με την τμηματική διάνοιξη της διατομής, διαμορφώνεται μέτωπο εκσκαφής μικρών διαστάσεων, το οποίο μπορεί να ελεγχθεί εύκολα και να μην αστοχήσει. Σε περιπτώσεις που αναμένεται αστοχία του μετώπου εκσκαφής, η διάνοιξη της σήραγγας σε πολλαπλές φάσεις με σκοπό την διαμόρφωση μικρότερων μετώπων, αποτελεί συνήθη πρακτική.
- ✓ **Έλεγχος επιφανειακών καθιζήσεων**: Σε περιπτώσεις διάνοιξης αστικών σηράγγων σε ασθενής εδαφικούς σχηματισμούς, προτιμάται να πραγματοποιηθεί διάνοιξη της σήραγγας σε πολλαπλές φάσεις εκσκαφής, με σκοπό να γίνει καλύτερος έλεγχος του ρυθμού διαμόρφωσης των επιφανειακών καθιζήσεων, ώστε να αποφευχθούν αστοχίες σε υπερκείμενες κατασκευές.
- ✓ **Εκσκαφή σε συνθλίβον πέτρωμα**: Σε περιπτώσεις διάνοιξης σήραγγας σε βραχόμαζες που αναμένεται να αναπτύξουν φαινόμενα σύνθλιψης (squeezing rock), προτιμάται να γίνεται διάνοιξη της σήραγγες σε περισσότερες από μια φάσεις εκσκαφής, ώστε να υπάρχει «έλεγχος» της διατομής εκσκαφής και να γίνεται τμηματική και όχι ακαριαία φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.
- ✓ **Εκσκαφή σε μεγάλων ανοιγμάτων (caverns)**: Σε περιπτώσεις διάνοιξης υπόγειων ανοιγμάτων μεγάλων διαστάσεων, όπως υπόγειοι σταθμοί Μετρό, προτιμάται να γίνει τμηματική διάνοιξη της διατομής, ώστε να ελέγχεται καλύτερα τόσο το μέτωπο εκσκαφής όσο και η διατομή εκσκαφής.

3.2. Παραδείγματα τμηματικής διάνοιξης σηράγγων

Υπόγειος σταθμός Νίκαια – Αττικό Μετρό

Ο υπόγειος σταθμός της Αττικό Μετρό «Νίκαια» που αποτελεί τμήμα της επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό Αθηνών «Αγία Μαρίνα – Δημοτικό Θέατρο Πειραιά», χωροθετείται στην πλατεία «Αγίου Νικολάου» Νίκαιας. Τμήμα του σταθμού κατασκευάστηκε υπογείως με την μέθοδο της συμβατικής διάνοιξης σηράγγων και την τμηματική εκσκαφής. Λόγω των μεγάλων διαστάσεων του υπογείου ανοίγματος, όσο και του μικρού ύψους υπερκείμενων γαιών, προτιμήθηκε η τμηματική διάνοιξη της διατομής σε τέσσερις (4) φάσεις εκσκαφής. Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε εντός του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστολίθου με τιμές δείκτη GSI= 20 - 40.



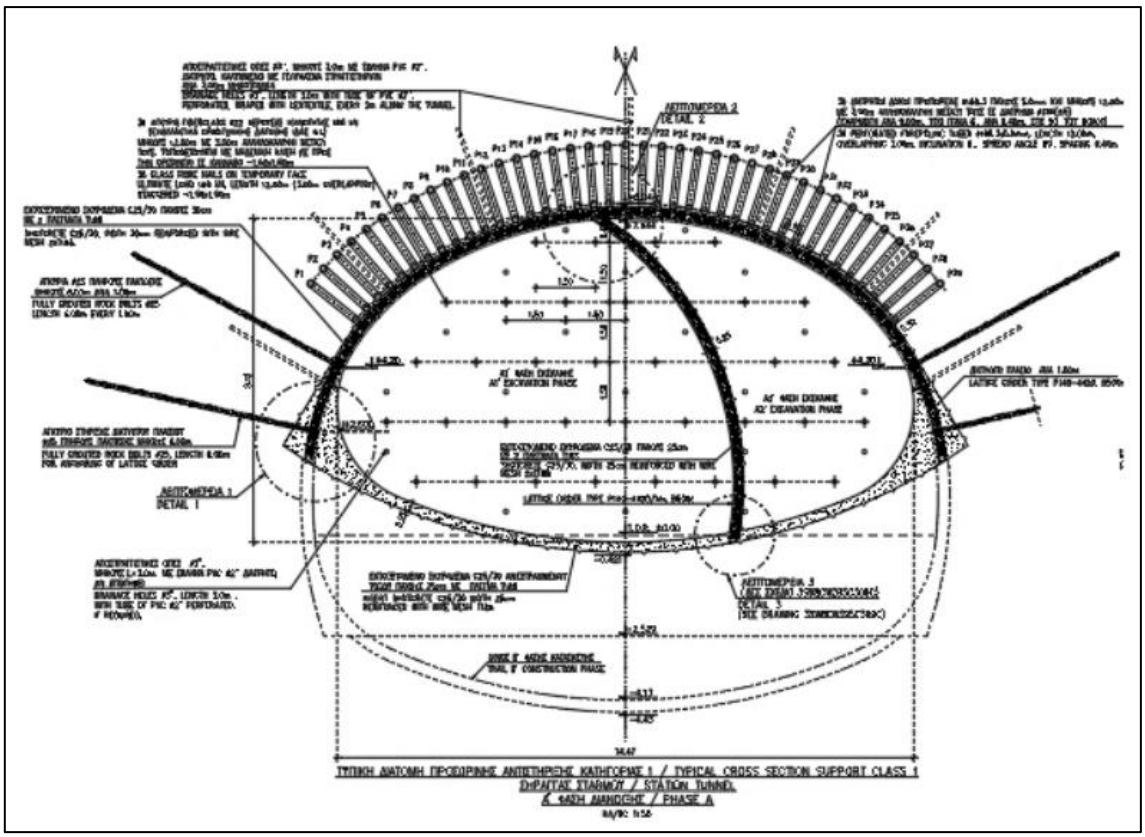
Εικόνα 12. Γεωμετρία εκσκαφής υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Αττικό Μετρό).

Η διάνοιξη της σήραγγας, πραγματοποιήθηκε στις ακόλουθες φάσεις εκσκαφής:

- ✓ Διάνοιξη αριστερού τμήματος άνω ημιδιατομής (top heading)
- ✓ Διάνοιξη δεξιού τμήματος άνω ημιδιατομής (top heading)
- ✓ Διάνοιξη βαθμίδας (bench)
- ✓ Διάνοιξη τελικού ανάστροφου τόξου (invert)

Η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας περιλάμβανε:

- ✓ Δοκούς προπορείας (forepoling) στο μέτωπο της εκσκαφής
- ✓ Αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass
- ✓ Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- ✓ Αγκύρια βράχου
- ✓ Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders)



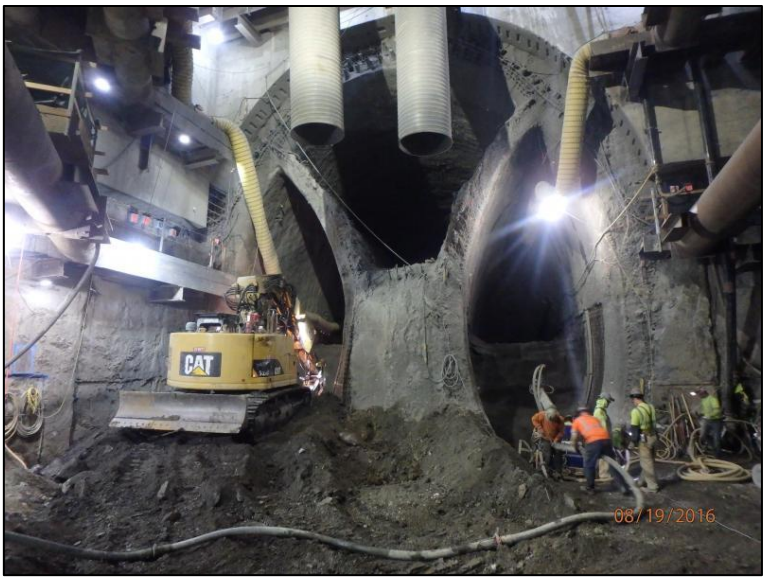
Εικόνα 13. Τυπική διατομή προσωρινής υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Αττικό Μετρό).

Εικόνα 14. Τμηματική εκσκαφή άνω ημιδιατομής υπόγειου ανοίγματος σταθμού Νίκαιας (Δ. Γεωργίου).

<u>Υπόγειος σταθμός Chinatown – San Francisco</u>

Ο υπόγειος σταθμός Chinatown αποτελεί τμήμα της επέκτασης του μετρό του San Francisco. Κατασκευάστηκε κάτω από πολυσύχναστη περιοχή με πολλές υπερκείμενες κατασκευές και οδούς, ελάχιστα μέτρα πάνω από την στέψη της σήραγγας. Η διάνοιξη του σταθμού πραγματοποιήθηκε

μέσω της πρόσβασης από ένα φρέαρ και στην συνέχεια με συμβατική διάνοιξη του υπόγειου ανοίγματος σε οκτώ (8) φάσεις εκσκαφής. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη της σήραγγας ήταν σκληροί άργιλοι και άμμοι.



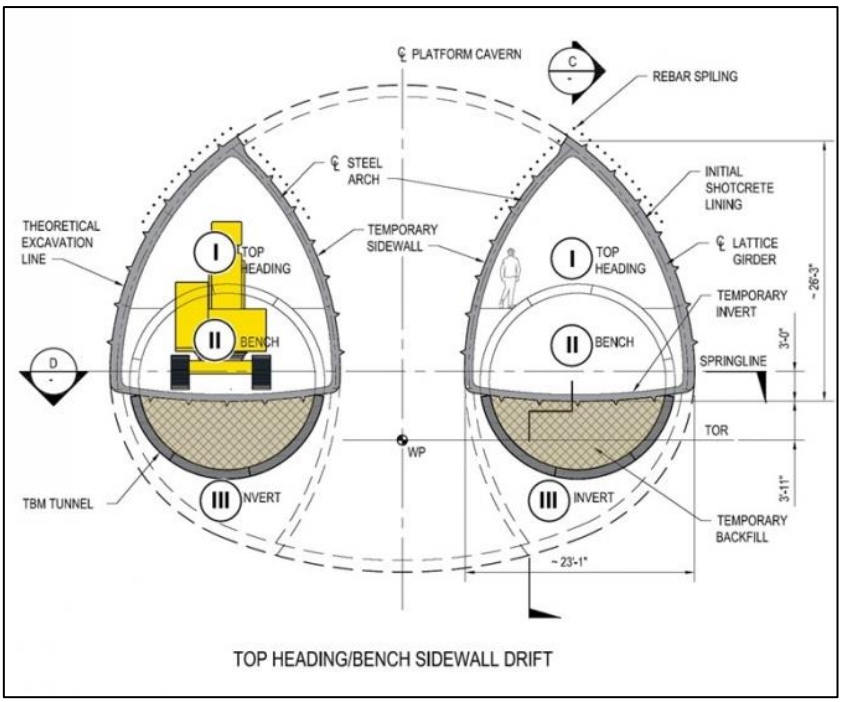
Εικόνα 15. Φρέαρ και υπόγειο άνοιγμα Chinatown Station (Dr. Sauer & Partners).

Η διάνοιξη της σήραγγας, πραγματοποιήθηκε στις ακόλουθες φάσεις εκσκαφής:

- ✓ Διάνοιξη άνω ημιδιατομής (top heading) αριστερού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη βαθμίδας (bench) αριστερού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη τελικού ανάστροφου τόξου (invert) αριστερού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη άνω ημιδιατομής (top heading) δεξιού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη βαθμίδας (bench) δεξιού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη τελικού ανάστροφου τόξου (invert) δεξιού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη άνω ημιδιατομής (top heading) κεντρικού τμήματος
- ✓ Διάνοιξη βαθμίδας (bench) και τελικού ανάστροφου τόξου (invert) κεντρικού τμήματος

Η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας περιλάμβανε:

- ✓ Ράβδους προπορείας (spiling) στο μέτωπο της εκσκαφής
- ✓ Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- ✓ Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders)



Εικόνα 16. Κατασκευαστική αλληλουχία υπόγειου ανοίγματος Chinatown Station (Dr. Sauer & Partners).

3.3. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Τα μέτρα που λαμβάνονται για την ασφαλή διέλευση μέσα από ένα υπόγειο άνοιγμα αλλά και για την διατήρηση του σχήματος του αναφέρονται στην βιβλιογραφία με τον όρο υποστήριξη ή κατά την ξένη βιβλιογραφία ως support. Οι σύγχρονες τεχνικές σταθεροποίησης έχουν σκοπό να μετακυλίσουν όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο μέσα από το πέτρωμα. Επομένως ο όρος υποστήριξη έχει ως κυριότερους σκοπούς :

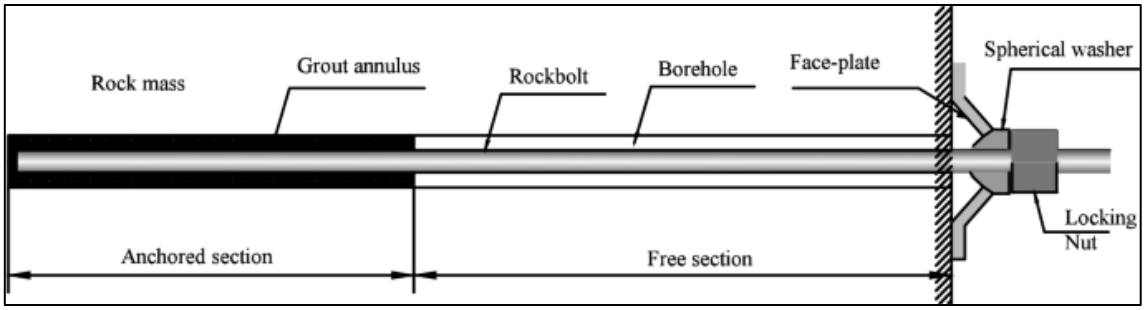
- ✓ Να ενισχύσει (reinforce) το πέτρωμα με την ενεργοποίηση και την διατήρηση της προϋπάρχουσας αντοχής της βραχόμαζας (mobilized strength).
- ✓ Να υποστηρίξει (support) το φορτίο μεμονωμένων τμημάτων της οροφής και των παρειών που έχουν αποκολληθεί από την βραχόμαζα.

3.3.1. Κοχλίωση πετρωμάτων

Το πέτρωμα γύρω από το άνοιγμά του δεν έχει συνήθως την δυνατότητα να παραλαμβάνει σημαντικές εφελκυστικές ή διατμητικές δυνάμεις. Ωστόσο η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται με τη βοήθεια χαλύβδινων διαμήκων ράβδων που αναλαμβάνουν σημαντικό μέρος αυτών των δυνάμεων. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται με τους όρους βλήτρο, ήλος, καρφί και αγκύριο. Επικρατέστερη ονομασία , όμως , είναι ο γενικός όρος rockbolt. Μια τυπική διαδικασία τοποθέτησης ενός κοχλία περιγράφεται με τα εξής στάδια :

- ✓ Όρυξη διατρήματος κατάλληλου μήκους και κατάλληλης διαμέτρου

- ✓ Επιμελής καθαρισμός του διατρήματος
- ✓ Εισαγωγή του κοχλία και του υλικού αγκύρωσης
- ✓ Τοποθέτηση του περικόχλιου και της πλάκας εφαρμογής τάσεων
- ✓ Τάνυση του κοχλία



Εικόνα 17. Αγκύριο βράχου (S.Yan).

Περαιτέρω, οι κοχλίες διακρίνονται ανάλογα με την προένταση της μεταλλικής ράβδου στους προεντεταμένους (rockbolts) και στους μη προεντεταμένους (dowel) και ανάλογα με τον τύπο της κοχλίωσης σε κοχλίες σημειακής και κατανεμημένης αγκύρωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ακόλουθοι τύποι κοχλιών :

- ✓ Προεντεταμένοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα
- ✓ Προεντεταμένοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης με αναπτυσσόμενο κέλυφος (expansion shell)
- ✓ Προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο
- ✓ Προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη
- ✓ Μη προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο
- ✓ Μη προεντεταμένοι διαχωριζόμενοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (split set)
- ✓ Μη προεντεταμένοι σωληνοειδείς κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (swellex)
- ✓ Μη προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο αποτελούμενοι από ένα ή περισσότερα συρματόσχοινα (cable bolts)

3.3.2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Η εκτόξευση σκυροδέματος ή αλλιώς gunite αποτελεί μια μορφής προσωρινής υποστήριξης σηράγγων η οποία όμως έχει την δυνατότητα ενσωμάτωσης στην τελική ή μόνιμη επένδυση της σήραγγας.

Για να ευσταθεί ο όρος εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- ✓ Τσιμέντο
- ✓ Νερό

- ✓ Λεπτόκοκκα αδρανή έως 10 mm
- ✓ Εφαρμογή αυτού με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα

Η παρασκευή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται είτε ως ξηρό μείγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο της εκτόξευσης είτε ως υγρό μείγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη γίνεται στον αναδευτήρα κατά την Παρασκευή του μίγματος. Μέχρι σήμερα η μέθοδος ξερής μίξης χρησιμοποιείται συχνότερα επειδή ο εξοπλισμός είναι ελαφρύτερος και οικονομικότερος. Τα ξηρά υλικά μπορούν να μεταφερθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η επένδυση σε εξοπλισμό της μεθόδου υγρής μίξης είναι τουλάχιστον τριπλάσια της αντίστοιχης της ξηρής. Εν τούτοις ο κατασκευαστής που επιθυμεί γρήγορη πρόοδο των εργασιών προτιμά την υγρή μίξη, που έχει οικονομικότερη αναπήδηση, ενώ προσφέρει δυνατότητα προμήθειας υλικού σε μεγάλες ποσότητες από μονάδα παραγωγής σκυροδέματος . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνει κανείς παραγωγή έως και 20 m3 /h ειδικά όταν χρησιμοποιούνται τηλεχειριζόμενες αυτοματοποιημένες μηχανές. Ένα παράδειγμα ανάμιξης για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2250-2350 kg είναι :

- ✓ Τσιμέντο 400-450 kg
- ✓ Αδρανή 1600-1700 kg
- ✓ Παιπάλη πυριτίου (micro-silica) 30-50 kg
- ✓ Επιταχυντής πήξεως 10-15 kg
- ✓ Νερό 200-250 kg

Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζολάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)2) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζολάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης (rebound) κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχόμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm.

Η αντοχή και η πλαστιμότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα (wire mesh reinforcement). Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-60 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους:

- ✓ Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση (rebound) του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
- ✓ Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση (corrosion) επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.

- ✓ Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ότι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχόμαζας είναι αρκετά ανώμαλη.

Η εκτόξευση του παραγόμενου σκυροδέματος διακρίνεται σε χειρωνακτική και σε μηχανική. Με τον κλασσικό χειρωνακτικό τρόπο απαιτείται ο χειριστής του ακροφυσίου, ο οποίος εκτοξεύει πάντα κάθετα και σε απόσταση ενός μέτρου το σκυρόδεμα και ικριώματα ή υδραυλικές πλατφόρμες. Όμως η παραγόμενη ποσότητα υλικού δεν είναι πάντα η καλύτερη δυνατή, η κάλυψη δεν είναι ομοιόμορφη και ο χρόνος εφαρμογής συνήθως αρκετά μεγαλύτερος. Επομένως, η ανάγκη για ομοιομορφία κάλυψης και ταχύτητα έφερε στο προσκήνιο το αυτοματοποιημένο τηλεχειριζόμενο σύστημα εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ένας βραχίονας ψεκασμού πλεονεκτεί ειδικά στις κατασκευές σηράγγων, καθόσον όχι μόνον αντικαθιστά τον χειριστή του ακροφυσίου αλλά δίνει και τη δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης της ικανότητας της μηχανής. Τούτο σημαίνει ότι ο χρόνος εκτόξευσης μπορεί να μειωθεί στο μισό, ο δε χρόνος κατασκευής μεγάλων σηράγγων μπορεί να μειωθεί κατά 10 - 15 %, με αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος ενοικίασης όλου του εξοπλισμού.

3.3.3. Χαλύβδινα Πλαίσια

Τα πλαίσια γενικά είναι σκελετοί που περιβάλλουν και συγκρατούν κάποιο αντικείμενο προς στερέωση. Το χαλύβδινο τόξο (rib) είναι πάντα καμπύλος φορέας και μπορεί να αποτελεί τμήμα πλαισίου. Συνήθως τοποθετείται για την στήριξη του θόλου της στοάς. Εφόσον η οροφή της στοάς είναι επίπεδη, τότε ο φορέας που είναι σε επαφή με αυτήν και την στηρίζει ονομάζεται (ευθύγραμμη) δοκός (beam). Ο στύλος (post) είναι ευθύγραμμος και κατακόρυφος συνήθως φορέας, αποτελεί δε συνήθως τμήμα πλαισίου.

Οι απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα από τον οποίο δημιουργούνται πλαίσια είναι (Έδραση, 2005) :

- ✓ Υψηλή τάση διαρροής
- ✓ Υψηλή αντοχή
- ✓ Ολκιμότητα
- ✓ Ικανότητα ψυχρής επανέλασης

Τα πλεονεκτήματα στην χρήση χαλύβδινου πλαισίου είναι :

- ✓ Τυποποίηση των εκάστοτε απαιτήσεων για κάθε έργο
- ✓ Δυνατότητα προκατασκευής της υποστήριξης
- ✓ Άμεση φέρουσα ικανότητα εφόσον είναι σε επαφή με το πέτρωμα
- ✓ Κατακόρυφη η λοξή τοποθέτηση ανάλογα με την διαμόρφωση του μετώπου
- ✓ Καλύτερη εποπτεία της διαμόρφωσης της διατομής της σήραγγας

Τα μειονεκτήματα στην χρήση πλαισίου είναι :

- ✓ Δυσκολία χειρισμού βαριών διατομών
- ✓ Η δυσκαμψία του πλαισίου
- ✓ Σημαντικός χρόνος παράδοσης των πλαισίων

Το πλαίσιο αποτελείται από δύο τεμάχια: το «καπέλο» το οποίο τοποθετείται στην οροφή της σήραγγας και τα δύο (2) ελεύθερα άκρα – ποδαρικά στα οποία στηρίζεται το καπέλο και τα οποία πατάνε στο πέτρωμα των τοιχωμάτων της σήραγγας για να έχουμε καλύτερη στήριξη. Συνήθως τοποθετείται πρώτα το καπέλο και ύστερα τα ποδαρικά του πλαισίου.

3.3.4. Δικτυωτές δοκοί

Οι δικτυωτές δοκοί (lattice girder) αποτελούνται από συγκολλημένες ράβδους οπλισμού οι οποίες έρχονται προκατασκευασμένες στην θέση τοποθέτησής τους . Με την ενσωμάτωση τους σε επένδυση από έγχυτο ή εκτοξευμένο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται η δυνατότητα ανάληψης από την προσωρινή ή τελική επένδυση εφελκυστικών τάσεων. Οι δοκοί αυτοί προσφέρουν κατά την διάνοιξη όπως και τα χαλύβδινα τόξα προστασία στους εργαζομένους και βοήθεια στην διαμόρφωση της διατομής του ανοίγματος.

Παραλλαγή των δικτυωτών δοκών αποτελούν οι νευρώσεις οπλισμού του εκτοξευμένου σκυροδέματος (RRS). Πρόκειται για παράλληλους ραβδοχάλυβες συνδεδεμένους με εγκάρσιες ράβδους οι οποίοι ενσωματώνονται στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα και δημιουργούν νευρώσεις σε επίπεδα κάθετα στον άξονα της σήραγγας. Πλεονεκτούν των δικτυωτών δοκών ως προς την ακαμψία, στην ευκολία τοποθέτησης, τον τρόπο σύνδεσης και δεν απαιτούν σημαντικό πάχος επένδυσης. Αντιθέτως η αρχική ευκαμψία τους αποτελεί μειονέκτημα τόσο στην προσφορά ικανοποιητικής υποστήριξης μέχρι την σκλήρυνση του σκυροδέματος της νεύρωσης όσο και στην βοήθεια διαμόρφωσης της διατομής του ανοίγματος.

3.3.5. Προενίσχυση μετώπου εκσκαφής με δοκούς προπορείας (forepoling)

Η διάνοιξη σηράγγων μέσα σε δυσμενείς γεωτεχνικά συνθήκες , όπως είναι η διέλευση μέσα από ασθενείς σχηματισμούς, ζώνες ρηγμάτων και περιοχές με μικρό υπερκείμενο μέσα σε αστικές περιοχές, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, ιδιαίτερα όταν οι επιτόπου τάσεις είναι υψηλές. Κατά τη κατασκευή σηράγγων στις συνθήκες αυτές παρατηρούνται σημαντικά προβλήματα, κυρίως στην περιοχή του μετώπου διάνοιξης. Η τεχνική των δοκών προπορείας είναι μία τεχνική προενίσχυσης των φτωχών εδαφών που βρίσκονται μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας, ώστε η εκσκαφή να γίνει υπό ασφαλείς συνθήκες. Η εφαρμογή της τεχνικής συνίσταται στην κατασκευή ενός

δακτυλίου υποοριζόντιων δοκών μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης, οι οποίοι σχηματίζουν ένα τόξο στο έδαφος έξω και πάνω από το περίγραμμα της επικείμενης εκσκαφής και λειτουργούν ως μία επιτόπου υποστήριξη που τοποθετείται πριν από την εκσκαφή.

Η πιο παλιά αναφορά για κατασκευή ενός τύπου ομπρέλας προπορείας είναι το 1975 από δύο Ιταλούς μηχανικούς τον Fastoli και τον Pastore. Οι δύο αυτοί μηχανικοί αναφέρουν για την προενίσχυση της οροφής ενός σπηλαίου στην είσοδο και την έξοδο του. Η επόμενη αναφορά για την εφαρμογή της μεθόδου κατασκευής ομπρέλας προπορείας είναι το 1976 στην Ιταλία για τις ανάγκες διάνοιξης δρόμου. Ακόμα το 1978 αναφέρεται άλλη μια οδική σήραγγα υπό με χρήση της μεθόδου κατασκευής της ομπρέλας προπορείας.

Η μέθοδος στηρίζεται στο ότι η περιοχή του σχηματισμού που ενισχύεται από τις δοκούς αποκτά αυξημένα μηχανικά χαρακτηριστικά . Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ανοίγονται αρχικά οπές με το κατάλληλο διατρητικό μηχάνημα και εν συνεχεία τοποθετούνται δοκοί (χαλύβδινοι σωλήνες), με μια ελαφριά κλίση 5º με 10º ως προς τον οριζόντιο άξονα της σήραγγας, στην περιφέρεια της σήραγγας. Οι δοκοί αυτοί μετά την τοποθέτηση τους, πληρώνονται με σκυρόδεμα.

Αναλυτικότερα το δαχτυλίδι που δημιουργείται μεταξύ της δοκού και του εδάφους πληρώνεται με σκυρόδεμα χαμηλής πίεσης ενώ μέσα στις δοκούς εισπιέζεται σκυρόδεμα με υψηλή πίεση μέσω κατάλληλων βαλβίδων που τοποθετούνται εντός αυτών. Οι δοκοί έχουν συνήθως οπές ανά 2 μέτρα στην επιφάνειά τους. Έτσι το σκυρόδεμα που εισέρχεται διαχέεται σε όλο το πέτρωμα είτε από τις οπές είτε από το άλλο άκρο της δοκού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σταθεροποίηση του εδάφους καθώς και το πλήρωμα με σκυρόδεμα, ρωγμών, διακλάσεων ή εν γένει ασυνεχειών που πιθανόν να υπάρχουν στην δομή του πετρώματος.

Το μέτωπο της σήραγγας στη συνέχεια προχωρά, υπό την προστασία της ομπρέλας προπορείας. Κάθε βήμα εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας, για την προχώρηση της, ακολουθείται από την τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων των οποίων το μέγεθος και το διάστημα είναι συνάρτηση του τύπου του εδάφους και της ομπρέλας προπορείας που έχει κατασκευασθεί. Η συνήθης απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων ομπρελών προπορείας ποικίλλει από 4 μέτρα έως 10 μέτρα.

Το μήκος της ομπρέλας προπορείας (μήκος των δοκών) εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

- ✓ Τη διάσταση της διατομής της σήραγγας
- ✓ Τα χαρακτηριστικά του εδάφους
- ✓ Τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό

Συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθείται είναι :

- ✓ Τοποθέτηση και εγκατάσταση στο σωστό σημείο με βάση την τοπογραφική μελέτη.

- ✓ Διάτρηση (διάμετρος 140mm με 200mm) και τοποθέτηση χαλύβδινων δοκών (εξωτερικής διαμέτρου μεταξύ 70 και 180mm και πάχους μεταξύ 4 και 10mm).
- ✓ Τοποθέτηση ενός λάστιχου κατά μήκος της δοκού (από άκρη έως άκρη).
- ✓ Πλήρωση των δοκών με σκυρόδεμα.
- ✓ Τοποθέτηση κάποιου τύπου υποστήριξης (π.χ. πλαίσιο ή πλέγμα) και εκτόξευση σκυροδέματος.

3.3.6. Μηχανήματα συμβατικής διάνοιξης σηράγγων

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της επιστήμης η συμβατική διάνοιξη σηράγγων διευκολύνθηκε με την ολοένα αυξανόμενη εμφάνιση νέων μηχανημάτων που βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην διάνοιξη σηράγγων λόγω των ειδικών απαιτήσεων που αυτή χρειάζεται και των διαστάσεων που πρέπει να έχουν αυτά τα μηχανήματα. Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει η παρουσίαση των μηχανημάτων έργου που βοηθούν στην διάνοιξη διατομών πολλαπλών φάσεων και ειδικότερα πεταλοειδών διατομών. Πιο συγκεκριμένα έχουμε :

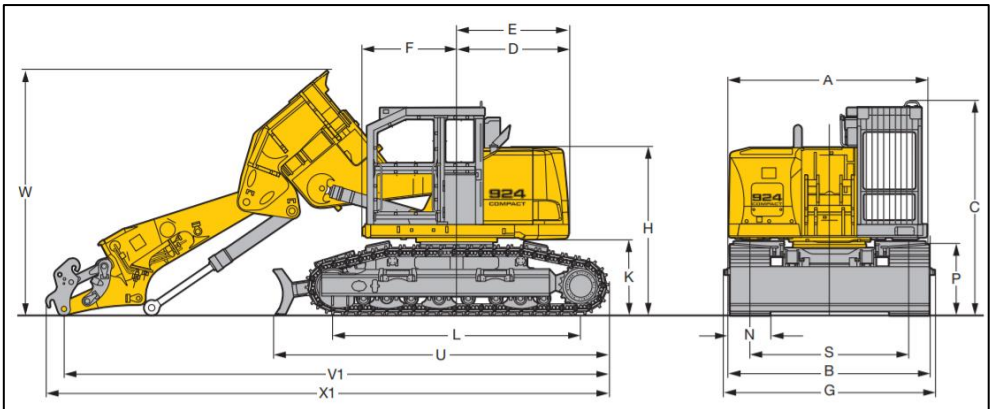
- ✓ **Εκσκαφέας υπογείων έργων:**

Πρόκειται για το πιο σύνηθες μηχάνημα εκσκαφής σηράγγων σε πτωχές ή κατακερματισμένες βραχόμαζες ή εδαφικούς σχηματισμούς, κατά την συμβατική διάνοιξη σηράγγων. Με τα μηχανήματα αυτά, επιτυγχάνεται μικρός ρυθμός παραγωγής. Οι εκσκαφείς υπογείων έργων ή τσάπες, φέρουν μικρό κοπτικό άκρο στην άκρη του βραχίονα, με το οποίο εκσκάπτουν το γεωϋλικό στο μέτωπο εκσκαφής.

Με τον εκσκαφέα υπογείων έργων, μπορεί να διανοιχθεί οποιασδήποτε μορφής διατομή εκσκαφής. Επίσης σε περίπτωση που συναντηθεί ισχυρό πέτρωμα, στον εκσκαφέα προσαρμόζεται υδραυλική σφυρά, με σκοπό την εξόρυξη του πετρώματος.

Εικόνα 18 Εκσκαφή μετώπου σήραγγας με εκσκαφέα υπογείων έργων (Δ. Γεωργίου)

Παράδειγμα ενός ειδικού εκσκαφέα αποτελεί ο R944C της LIEBHERR, που αυτή τη στιγμή εννέα από αυτούς χρησιμοποιούνται στην διάνοιξη της σιδηροδρομικής σήραγγας κάτω από την πόλη της Στουτγάρδης στην Γερμανία. Χρησιμοποιείται για διανοίξεις 5-7 μέτρων ύψους περίπου με βήμα προχώρησης 1,60 έως 2,10 μέτρα. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες με τις βασικές διαστάσεις του καθώς επίσης και τις δυνατές διαστάσεις εκσκαφής του.

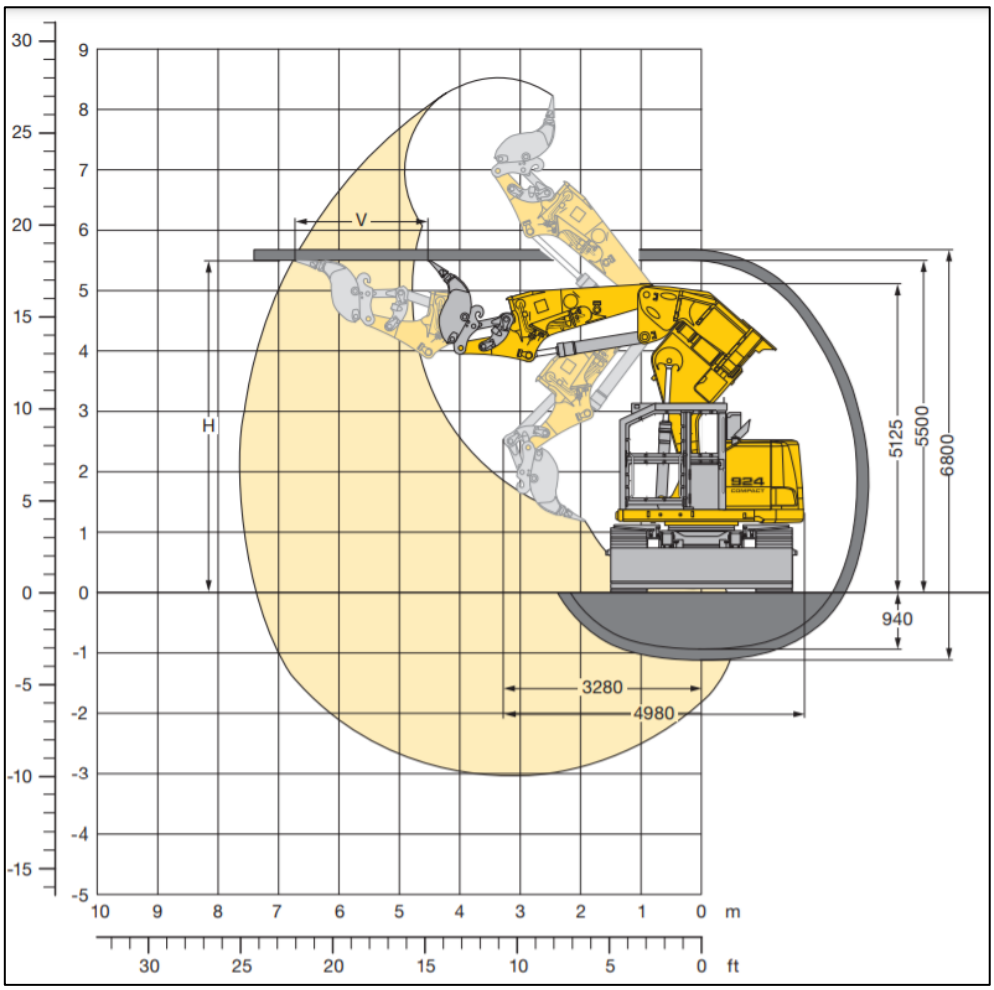


	mm
A	2,990
C	3,230
D	1,690
E	1,690
F	1,415
H	2,525
K	1,145
L	3,750
P	1,065
S	2,400
U	5,070
N	600
B	3,000
G	3,160

Boom 3.03 m with 2 x 45° Rotator and Stick 3.20 m	mm
V	8,080
V1	8,240
W	3,860
W1	3,710
X	8,360
X1	8,510

Boom 3.30 m with 2 x 45° Rotator and Stick 4.20 m	mm
V	9,300
W	4,000
X	9,600

Εικόνα 19 Διαστάσεις εκσκαφέα R944C της LIEBHERR (www.liebherr.com)



Εικόνα 20 Δυνατές διαστάσεις εκσκαφής LIEBHERR R944C (www.liebherr.com)

- ✓ **Roadheader – φρέζα:**

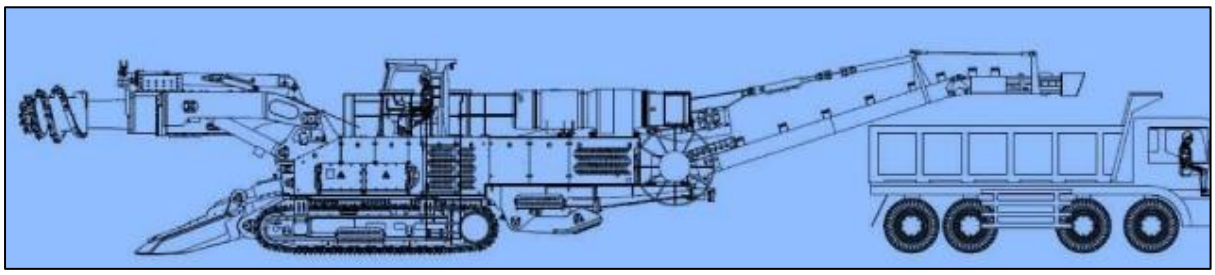
Πρόκειται για μηχάνημα εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας το οποίο απομακρύνει ταυτόχρονα το εκσκαπτώμενο υλικό πίσω από το μηχάνημα, μέσω συστήματος έλικα και μεταφορικής ταινίας που διαθέτει. Συγκεκριμένα το roadheader, φέρει βραχίονα στον οποίον εφαρμόζονται δύο ειδών κοπτικές κεφαλές:

- Κεφαλή διαμήκους κοπής: Στις μηχανές με κεφαλή διαμήκους κοπής ο άξονας περιστροφής της κοπτικής κεφαλής είναι παράλληλος με τον πρόβολο.
- Κεφαλή εγκάρσιας κοπής: Στις μηχανές με διπλή κεφαλή εγκάρσιας κοπής (κεφαλή διπλού τυμπάνου) η κοπτική κεφαλή διαμορφώνεται ως διπλό περιστρεφόμενο τύμπανο με τους δύο κοπτικούς κυλίνδρους εκατέρωθεν του άξονα του προβόλου.

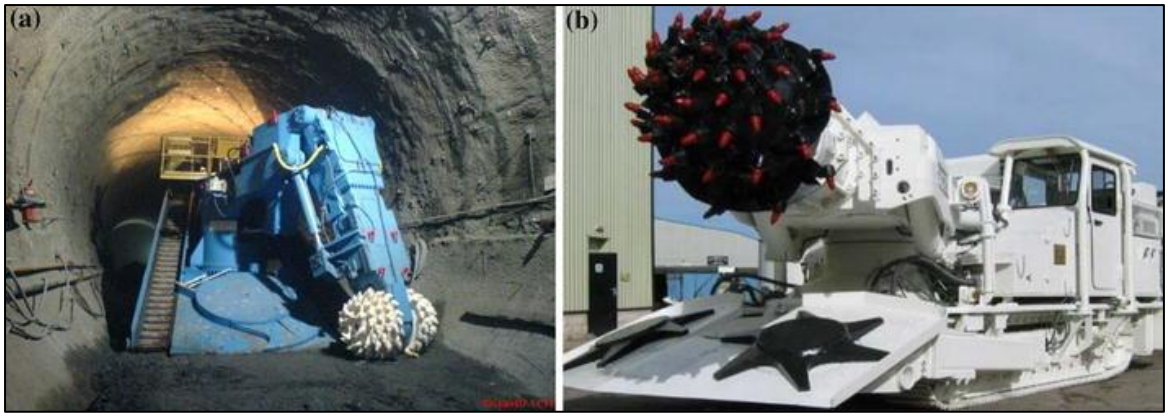
Να σημειωθεί πως η δύναμη που ασκεί το μηχάνημα στην κοπτική κεφαλή για την εξόρυξη του πετρώματος, οφείλεται στο ίδιο βάρος και τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσει το μηχάνημα με το έδαφος έδρασης.

Μέσω της μεταφορικής ταινίας που διαθέτει το μηχάνημα, το εξορυσσόμενο υλικό ταυτόχρονα με την εκσκαφή του μετώπου, φορτώνεται πίσω από το μηχάνημα σε φορτηγά οχήματα, επιτυγχάνοντας έτσι μεγάλους ρυθμούς παραγωγής.

Να σημειωθεί, επίσης, ότι το μηχάνημα αυτό είναι κατάλληλο για εκσκαφή μετρίων έως συνεκτικών πετρωμάτων και όχι εδαφικών αργιλικών σχηματισμών, διότι το εδαφικό υλικό προσκολλάται στην κοπτική κεφαλή και εμποδίζει την εξόρυξη.



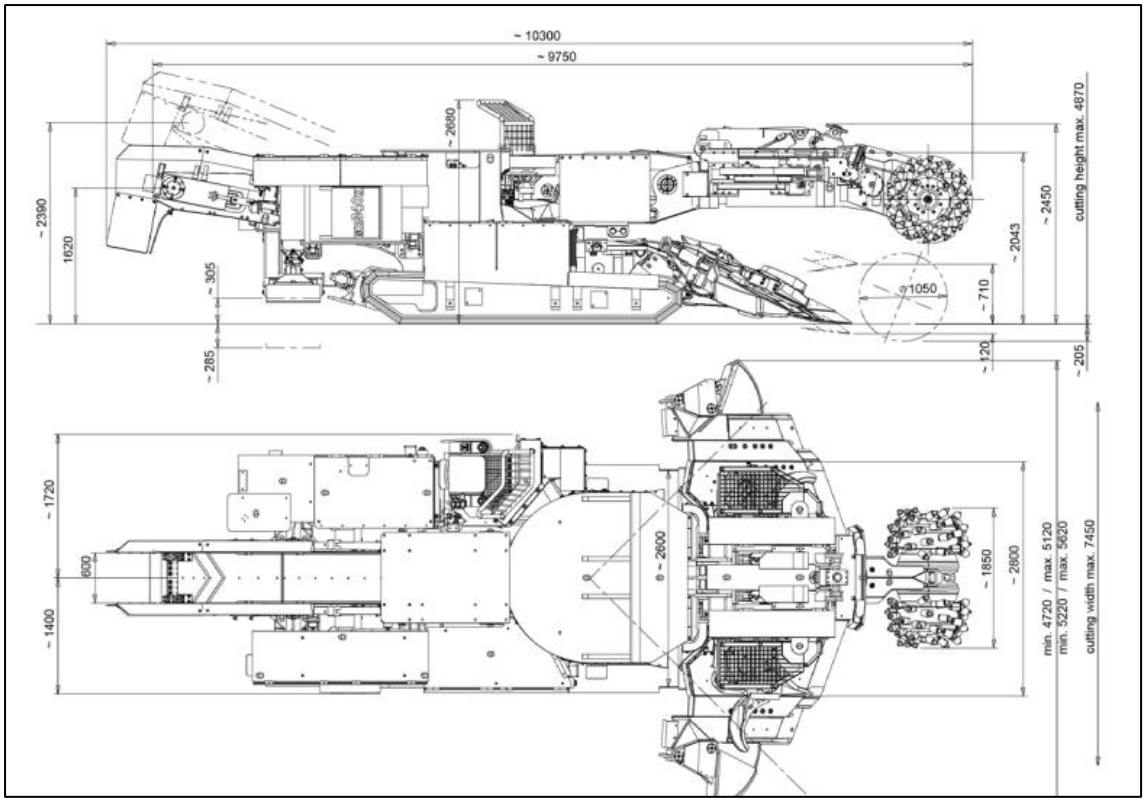
Εικόνα 21 Τυπική διάταξη εξόρυξης και φόρτωσης εξορυσσόμενου υλικού σε φορτηγό όχημα από Roadheader (NHG Equipment)



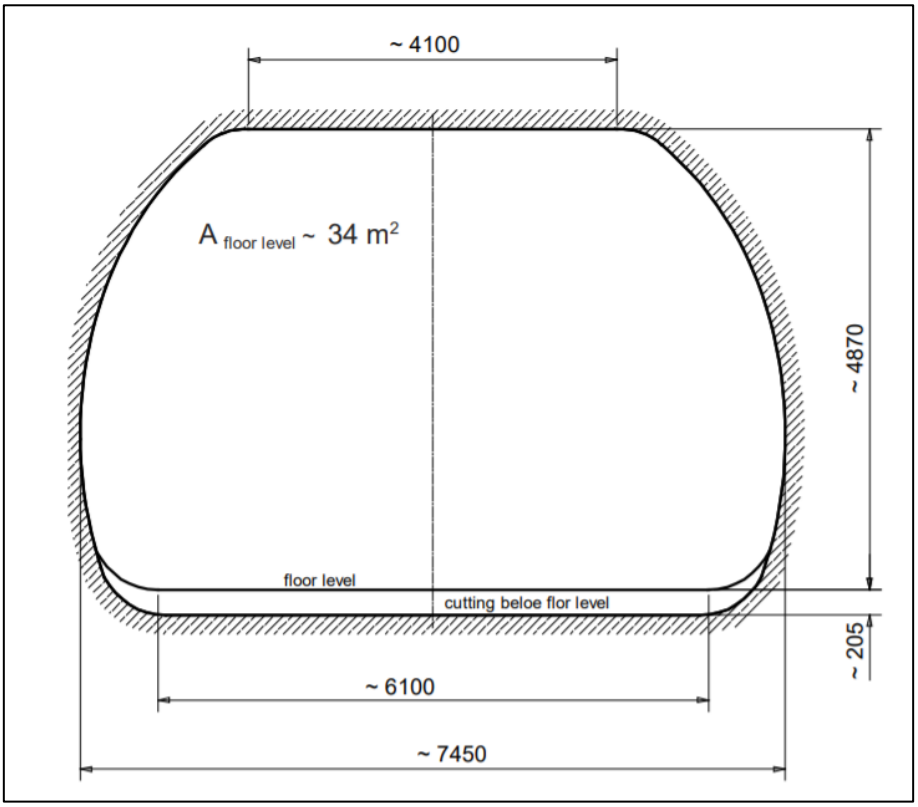
Εικόνα 22 a) Roadheader με κοπτική κεφαλή εγκάρσιας κοπής b) Roadheader με κοπτική κεφαλή διαμήκους κοπής (S. Evren Seker).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός Roadheader για μικρές και μεσαίες διατομές αποτελεί ο MR360 της Sandvik με λιγότερα από 3 μέτρα συνολικό ύψος και δυνατότητα διάνοιξης διατομών από 18-35 m^2.

Εικόνα 23 Sandvik MR340-360 Roadheader (www.sandvik.com)



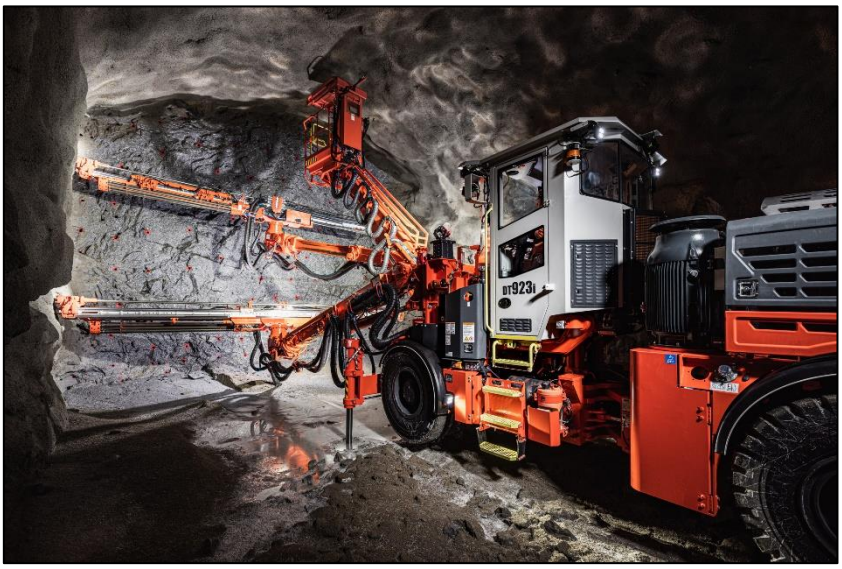
Εικόνα 24 Διαστάσεις Sandvik MR360 Roadheader (www.sandvik.com)



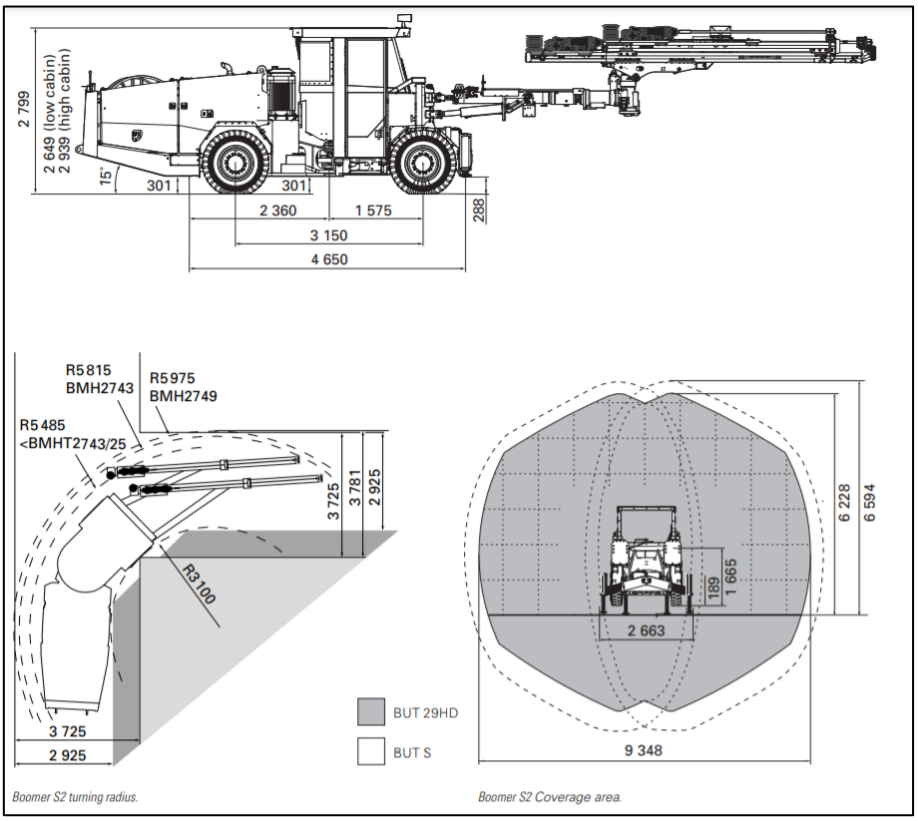
Εικόνα 25 Διαστάσεις διάνοιξης διατομής μηχανήματος Sandvik MR360 Roadheader (www.sandvik.com)

- ✓ **Διατρητικό φορείο τύπου Jumbo :**

Πρόκειται για το μηχάνημα διάτρησης για την τοποθέτηση των αγκυρίων βράχου περιμετρικά της εκσκαφής, καθώς και για την διάτρηση του μετώπου σκάφης για τοποθέτηση αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass ή για την διάτρηση των διατρημάτων ανατίναξης. Τα μηχανήματα αυτά, ανάλογα την διατομή της σήραγγας, μπορούν να φέρουν περισσότερα από ένα διατρητικά στελέχη (μπούμα).



Εικόνα 26 Διατρητικά φορεία τύπου Jumbo για την τοποθέτηση αγκυρίων βράχου (www.sandvik.com)



Εικόνα 27 Χαρακτηριστικά- Διαστάσεις διατρητικών φορείων Atlas Copco-Epiroc Boomer S2 (www.epiroc.com)

- ✓ **Αντλία εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) :**

Πρόκειται για το μηχάνημα εκτόξευσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος περιμετρικά της εκσκαφής. Η εκτόξευση πραγματοποιείται είτε με χειροκίνητο τρόπο, είτε αυτοματοποιημένα με την αντλία. Τα μηχανήματα αυτά φέρουν ειδικό ακροφύσιο από το οποίο γίνεται ταυτόχρονη εκτόξευση σκυροδέματος και επιταχυντή, για την ταχεία πήξη του σκυροδέματος.

Εικόνα 28 Χειροκίνητη εκτόξευση σκυροδέματος (SCA)

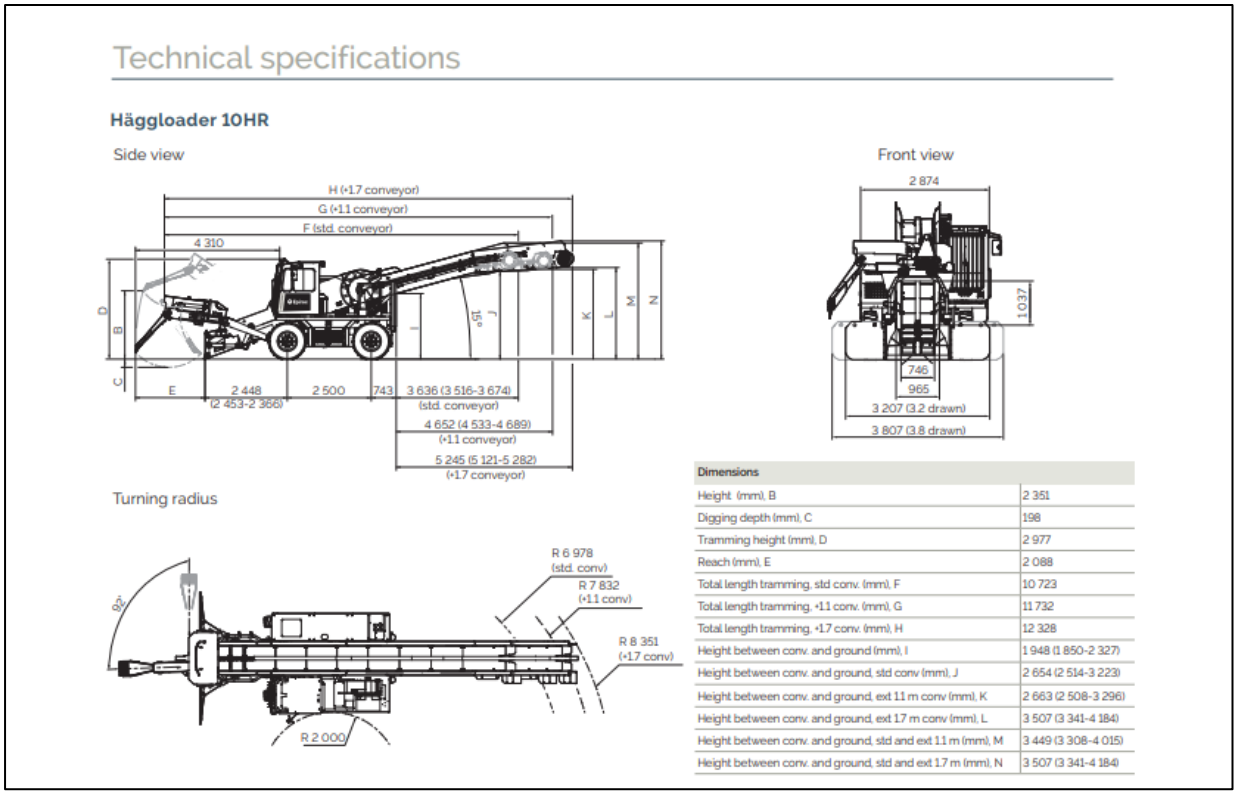
Εικόνα 29 Αυτόματη εκτόξευση σκυροδέματος (www.putzmeister.com)

- ✓ **Haggloader:**

Μια ειδική κατηγορία μηχανημάτων υπογείων έργων είναι τα haggloaders τα οποία διευκολύνουν κατά πολύ την συμβατική διάνοιξη σηράγγων, καθώς οι μεγάλες αρπάγες που διαθέτουν , σε συνδυασμό με την μεγάλη εμβέλεια τους απομακρύνουν πολύ γρήγορα το εξορυσσόμενο υλικό ακόμα και αν πρόκειται για βράχους μεγάλων διαστάσεων. Επίσης δύναται οι αρπάγες να

αντικατασταθούν με σκοπό την μετατροπή του μηχανήματος σε τυπικό εκσκαφέα που όμως ταυτόχρονα απομακρύνει το εξορυσσόμενο υλικό προς φόρτωση σε παρακείμενα φορτηγά.

Εικόνα 30 Haggloader (www.epiroc.com)



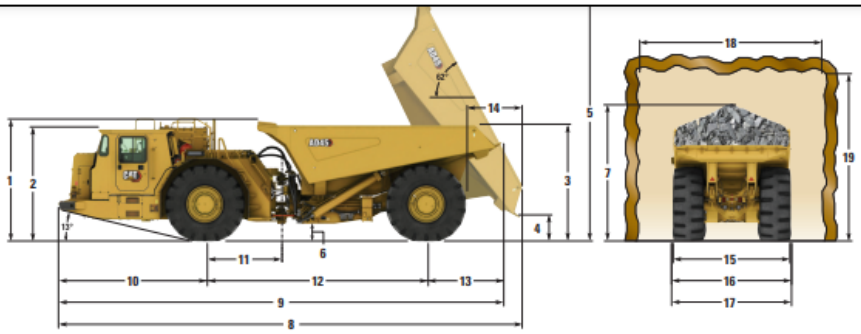
Dimensions	
Height (mm), B	2 351
Digging depth (mm), C	198
Tramming height (mm), D	2 977
Reach (mm), E	2 088
Total length tramming, std conv. (mm), F	10 723
Total length tramming, +11 conv. (mm), G	11 732
Total length tramming, +17 conv. (mm), H	12 328
Height between conv. and ground (mm), I	1 948 (1 850-2 327)
Height between conv. and ground, std conv (mm), J	2 654 (2 514-3 223)
Height between conv. and ground, ext 11 m conv (mm), K	2 663 (2 508-3 296)
Height between conv. and ground, ext 17 m conv (mm), L	3 507 (3 341-4 184)
Height between conv. and ground, std and ext 11 m (mm), M	3 449 (3 308-4 015)
Height between conv. and ground, std and ext 17 m (mm), N	3 507 (3 341-4 184)

Εικόνα 31 Διαστάσεις Epiroc 10-HR Haggloader (www.epiroc.com)

- ✓ **Φορτηγά υπογείων έργων :**

Στην συμβατική διάνοιξη σηράγγων δεν χρησιμοποιούνται κλασσικά φορτηγά για την μεταφορά και απομάκρυνση του εξορυσσόμενου υλικού, αλλά ειδικά φορτηγά όσο δυνατόν χαμηλότερου ύψους και μεγάλης ευχέρειας κινήσεων στην στενότητα των σηράγγων.

Εικόνα 32 Φορτηγό CATERPILLAR AD-45 (www.caterpillar.com)



	307-1156 Dump Body		267-5319 Dump Body (STD)		275-0710 Dump Body		361-8300 Ejector Body	
Body Capacity	18.0 m³	23.5 yd³	21.3 m³	27.9 yd³	25.1 m³	32.8 yd³	22.9 m³	29.9 yd³
	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
1 Height – Top of Empty Body	2830	111.4	3035	119.5	3181	125.2	3464	136.4
2 Height – Top of ROPS	2820	111.0	2820	111.0	2820	111.0	2820	111.0
3 Height – Body Loading	2720	107.1	2924	115.1	3070	120.9	3177	125.1
4 Height – Dump Clearance**	659	25.9	659	25.9	659	25.9	961	37.8
5 Height – Top of Raised Body	6019	237.0	6361	250.4	6607	260.1	—	—
6 Height – Ground Clearance	441	17.4	441	17.4	441	17.4	441	17.4
7 Height – Top of Load (SAE 2:1)	3424	134.8	3628	142.8	3834	150.9	3920	154.3
8 Length – Maximum Overall Length	11 535	454.1	11 620	457.5	11 680	459.8	12 125	477.4
9 Length – Overall Body Down	11 196	440.8	11 196	440.8	11 196	440.8	11 325	445.9
10 Length – Front Axle to Front Bumper	3720	146.5	3720	146.5	3720	146.5	3720	146.5
11 Length – Front Axle to Hitch	1920	75.6	1920	75.6	1920	75.6	1920	75.6
12 Length – Wheel Base	5570	219.3	5570	219.3	5570	219.3	5570	219.3
13 Length – Rear Axle to Tail	1906	75.0	1906	75.0	1906	75.0	2035	80.1
14 Length – Rear Wheel to Raised Body	1275	50.2	1275	50.2	1275	50.2	1835	72.2
15 Width – Overall Tire	3020	118.9	3020	118.9	3020	118.9	3020	118.9
16 Width – Machine with Body	3020	118.9	3020	118.9	3200	126.0	3200	126.0
17 Width – Machine without Body	3020	118.9	3020	118.9	3020	118.9	3020	118.9
18 Recommended Clearance Width*	4500	177.2	4500	177.2	4500	177.2	4500	177.2
19 Recommended Clearance Height*	4500	177.2	4500	177.2	4500	177.2	4500	177.2

Εικόνα 33 Διαστάσεις φορτηγού CATERPILLAR AD-45 (www.caterpillar.com)

4. Αριθμητική διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σηράγγων

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

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

4.1. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

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

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

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι προσομοίωση των στοιχείων έγινε ως ακολούθως:

- ✓ **<u>Προσομοίωση εδάφους</u>**

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

- ✓ **Προσομοίωση υποστήριξης**

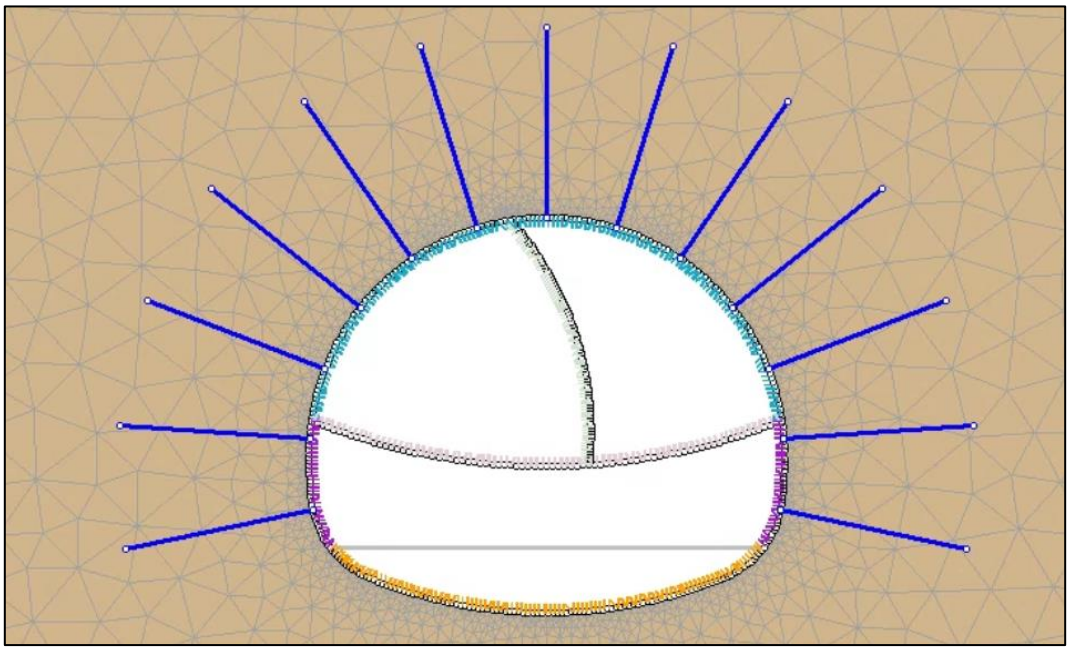
Στοιχεία δοκού (*beam elements*).

Στον ***Πίνακα 1*** παρουσιάζεται το σύνολο των στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιηθήκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, ανάλογα τα υπερκείμενα.

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

Υπερκείμενα	*Κόμβοι (Nodes)*	*Στοιχεία (Elements)*
15m	10923	21273
30m	12388	24251
40m	13553	26596

Τυπική διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων, παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα:



Εικόνα 34. Διακριτοποίηση προσομοιώματος

4.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος

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

Στις αναλύσεις προσομοιώθηκε διατομή μέγιστης διαμέτρου **D=10m**, η οποία αποτελεί μια συνήθη διάμετρο αστικής σήραγγας, όπως αυτές που διανοίγονται σε έργα μετρό.

Τα σύνορα του προσομοιώματος, ορίστηκαν σε ικανές αποστάσεις (**7D**) σε σχέση με την εκσκαφή έτσι ώστε να αναπτύσσονται πλήρως οποιεσδήποτε μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής και ταυτόχρονα να μην υπάρχει επίδραση των συνόρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων (boundary effect).

4.2.1. Μηχανικές παράμετροι

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

4.2.1.1. Μηχανικές παράμετροι εδάφους

Συνολικά προσομοιωθήκαν τρεις (3) τύποι εδάφους. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων εδαφών, παρουσιάζονται στον ***Πίνακα 2.***

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

Πίνακας 2. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.

Έδαφος	*Ειδικό βάρος* ***γ*** *(kN/m³)*	*Συνοχή* ***c*** *(kPa)*	*Γωνία τριβής* ***φ*** *(°)*	*Γωνία διαστολικότητα* ***δ*** *(°)*	*Μέτρο ελαστικότητας* ***E*** *(MPa)*
S1	*20*	*25*	*25*	*6,25*	*120*
S2	*20*	*30*	*25*	*6,25*	*150*
S3	*20*	*30*	*30*	*7,50*	*170*

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, ελήφθη συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o) με τιμές 0,5 και 1.

4.2.1.2. Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης

Η προσωρινή υποστήριξη της εκσκαφής, σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις περιλάμβανε ένα συνδυασμένο κέλυφος υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete), δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) και αγκυρώσεις (bolts). Ο παραπάνω συνδυασμός προσωρινής υποστήριξης, εφαρμόζεται συχνά σε αστικές σήραγγες μετρό, όπως στο Μετρό της Αθήνας.

- **<u>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)</u>**

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ως στοιχείο κελύφους (beam element) περιμετρικά της εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι λόγω της εφαρμογής μεταλλικών δομικών πλεγμάτων κατά την

εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ελήφθην υπόψιν η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτού που ελήφθη υπόψιν στις προσομοιώσεις, είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 3. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Πάχος (**t**)	30cm περιμετρικά, 15cm προσωρινό ανάστροφο τόξο
Μέτρο ελαστικότητας (**E**)	15 GPa
Αντοχή σε θλίψη (**σ_c**)	20 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό (**σ_t**)	4 MPa
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **<u>Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders)</u>**

Για την ενίσχυση της προσωρινής υποστήριξης, αλλά κυρίως την όπλιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το κέλυφος του σκυροδέματος ενισχύθηκε με τα δικτυωτά πλαίσια, δημιουργώντας έναν σύμμικτο φορέα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δικτυωτών πλαισίων που ελήφθησαν υπόψιν στις προσομοιώσεις, είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες δικτυωτών πλαισίων.

Τύπος	Lattice girder 4bar #140,Φ20
Απόσταση τοποθέτησης (L)	1m (βήμα προχώρησης)
Μέτρο ελαστικότητας (E)	200 GPa
Ακαμψία (I)	$8,07 \times 10^{-6}$ m^4
Εμβαδό (A)	$12,56 \times 10^{-4}$ m^2
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **<u>Αγκυρώσεις (bolts)</u>**

Για την ενίσχυση της προσωρινής υποστήριξης, αλλά κυρίως για τον περιορισμό των συγκλίσεων, εφαρμόστηκε συστηματική αγκύρωση των τοιχωμάτων της σήραγγας. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων που ελήφθησαν υπόψιν στις προσομοιώσεις, είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες αγκυρίων.

Τύπος	Ολόσωμης πάκτωσης
Διάμετρος (d)	25mm
Μήκος (L)	4m
Κάνναβος	1,5 x 1,0
Μέτρο ελαστικότητας (E)	200 GPa

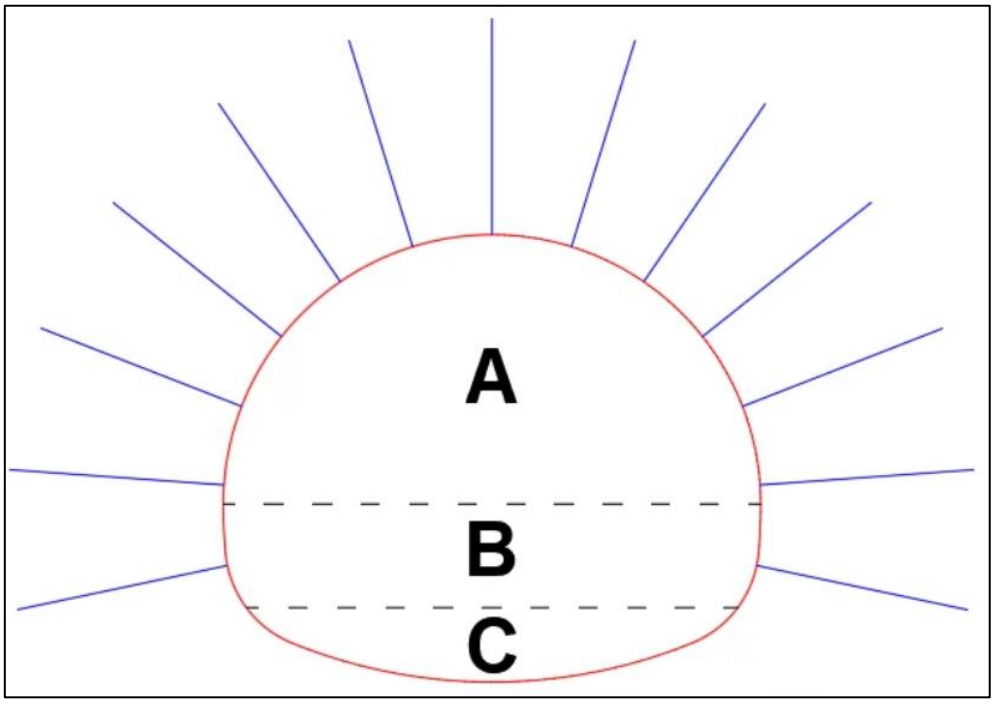
Φέρουσα ικανότητα (f_u)	270kN
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

4.3. Γεωμετρία εκσκαφής

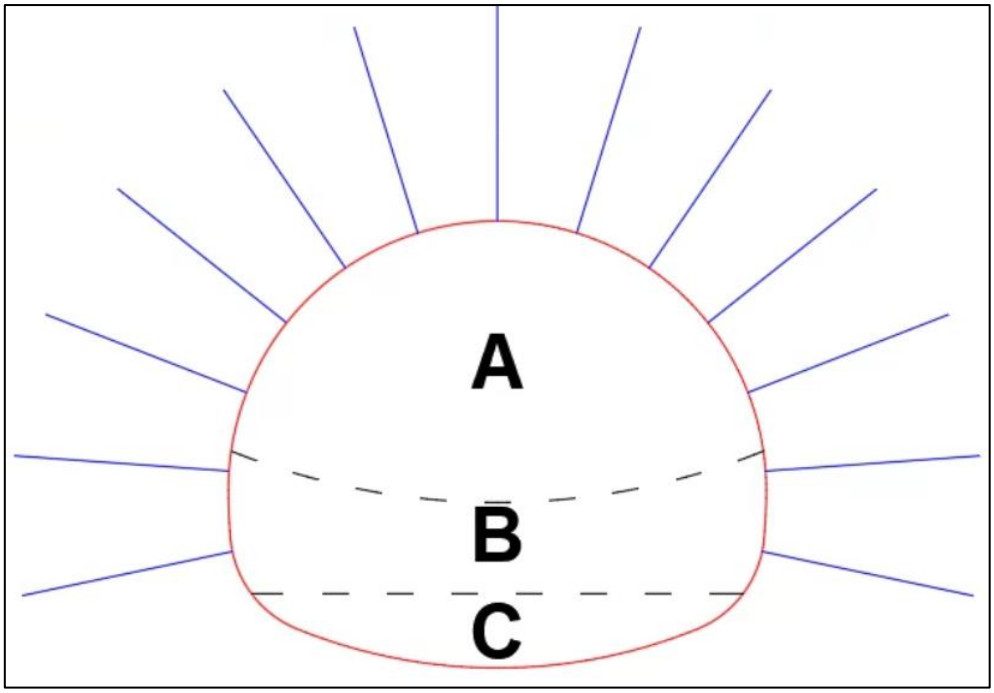
Στις παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, έγινε προσομοίωση πεταλοειδούς διατομής εκσκαφής, ισοδύναμης διαμέτρου D= 10m. Η διάνοιξη της σήραγγας, βασίστηκε στην μεθοδολογία της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων (NATM), όπου εξετάστηκε η διάνοιξη της σήραγγας με τους ακόλουθους τρόπους:

- ✓ Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (top heading – bench - invert)
- ✓ Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου (top heading – bench - invert)
- ✓ Διάνοιξη διατομής σε τέσσερις (4) φάσεις με διαμοιρασμό της Α΄ φάσης σε δυο επιμέρους φάσεις και κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου (top heading 1 – top heading 2 – bench - invert)

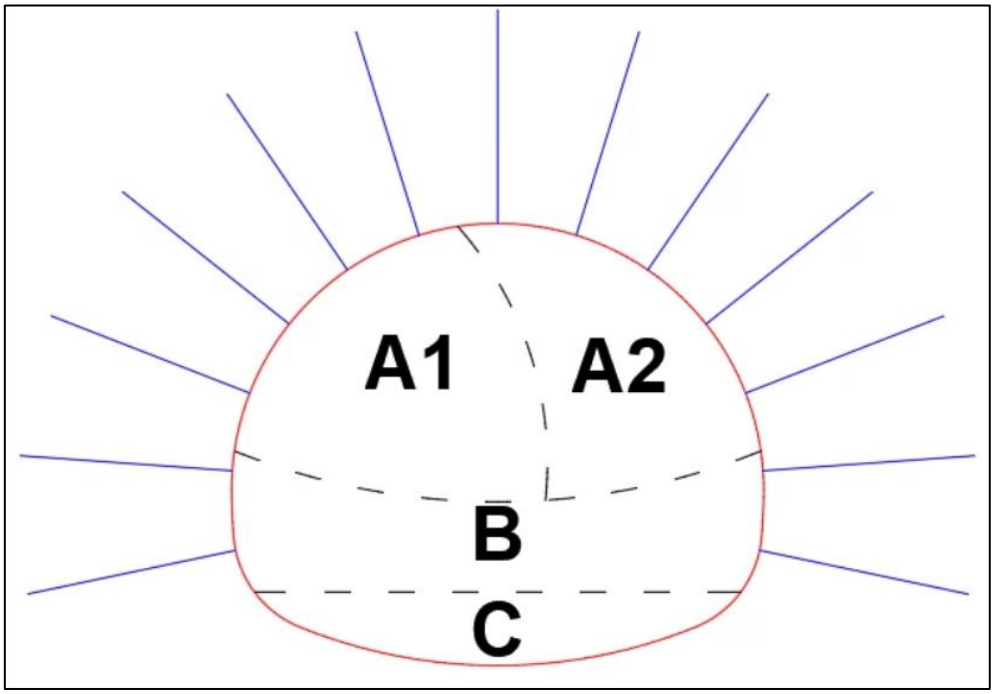
Στην συνέχεια παρατίθενται οι τυπικές διατομές εκσκαφής που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1. Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου.



Σχήμα 2. Διάνοιξη διατομής σε τρεις (3) φάσεις με κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου.



Σχήμα 3. Διάνοιξη διατομής σε τέσσερις (4) φάσεις με διαμοιρασμό της Α΄ φάσης σε δυο επιμέρους φάσεις και κατασκευή προσωρινού και τελικού ανάστροφου τόξου.

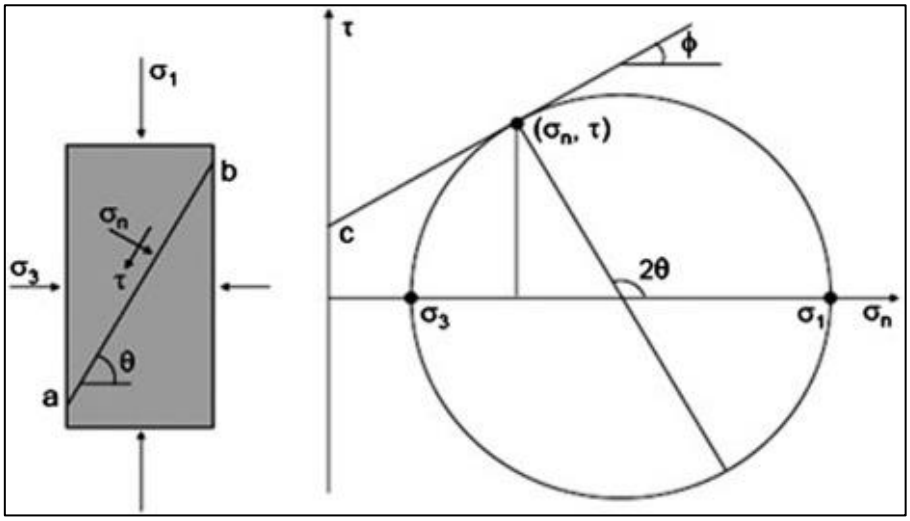
Να σημειωθεί ότι σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις, λόγω των ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, το βήμα προχώρησης της εκσκαφής ορίστηκε σε L= 1m.

4.4. Βασικές παραδοχές

4.4.1. Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb

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

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, πρόκειται για το γραμμικό κριτήριο Coulomb, το οποίο αναφέρεται και ως κριτήριο των Coulomb-Navier, ή Mohr-Coulomb. Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωϋλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση **τ** σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n, στο επίπεδο αυτό (***Εικόνα 35***).



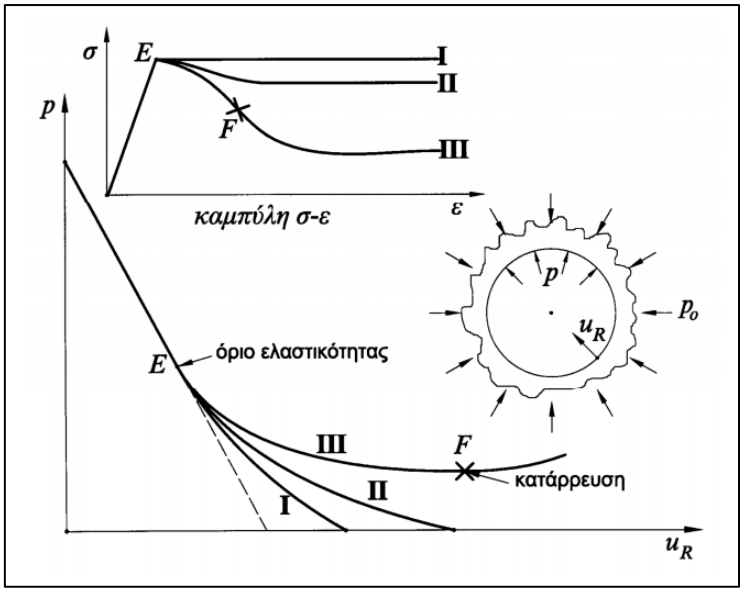
Εικόνα 35. Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.

4.4.2. Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης

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

4.4.3. Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωϋλικού

Επειδή πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες (2D) αριθμητικές αναλύσεις, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο παράγοντας της τρίτης διάστασης, ως προς την χαλάρωση του γεωϋλικού σε σχέση με το μέτωπο της εκσκαφής. Η τρίτη διάσταση θα ληφθεί υπόψιν με την χρήση του βαθμού αποτόνωσης (λ), όπου στην ακόλουθη Εικόνα, παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης.



Εικόνα 36. Τυπική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (Μ. Καββαδάς).

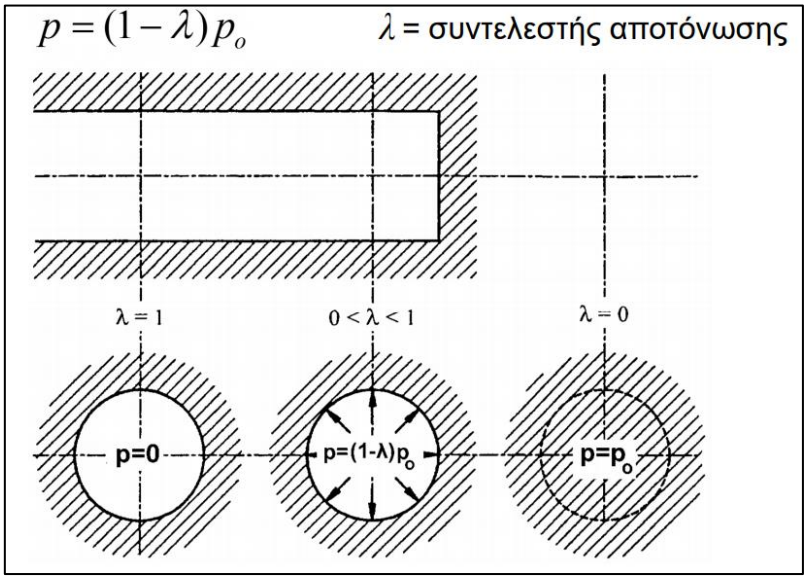
Ως βαθμός αποτόνωσης (λ), ορίζεται ο ακόλουθος λόγος:

$$\boldsymbol{\lambda} = 1 - \frac{p_i}{p_o}$$

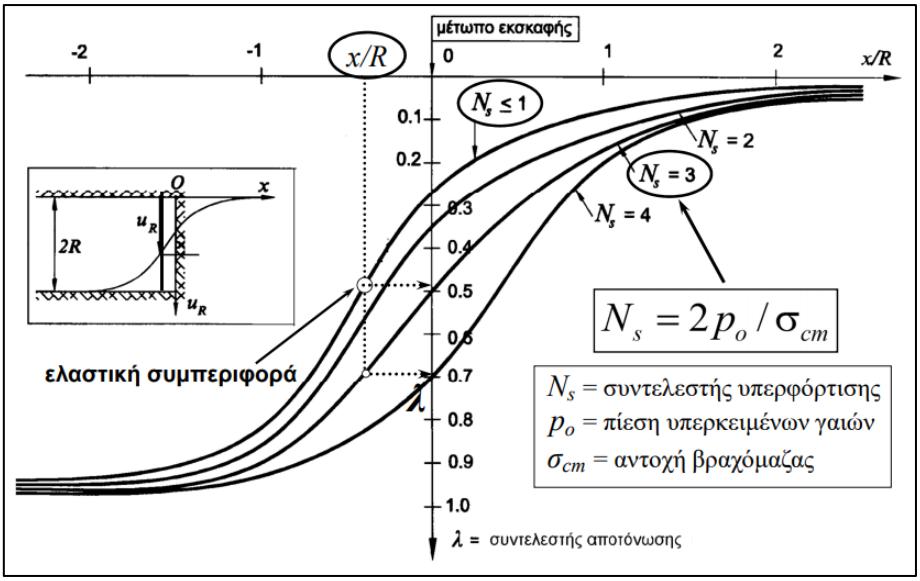
, όπου:

- **p_i**: η ισοδύναμη πίεση εσωτερικής υποστήριξης της εκσκαφής
- **p_o**: η γεωστατική τάση στο επίπεδο της εκσκαφής

Στις **Εικόνες 37** και **38** παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης (λ), σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής.



Εικόνα 37. Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής.



Εικόνα 38. Μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής.

Η μορφή και το μέγεθος των συγκλίσεων (u_R) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (x) μπορούν να εκτιμηθούν μέσω εμπειρικών σχέσεων ή ακόμα καλυτέρα μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης αριθμητικών αναλύσεων στα προκαταρτικά στάδια σχεδιασμού των σηράγγων, εφαρμόζονται κυρίως οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDP methods). Στην συνέχεια γίνεται παράθεση δύο βασικών μεθόδων εξέλιξης των συγκλίσεων κατά μήκος τους άξονα της σήραγγας:

<u>Panet (1995)</u>

Σύμφωνα με τον Panet (1995) η σύγκλιση $u_R(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση (x < 0) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση x = 0) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{u_R(x)} = u_R(o) + [u_{R\infty} - u_R(o)] \times \left\{1 - \left[\frac{m}{m + \xi \times (-x/R)}\right]\right\}$$

, όπου:

- ✓ **$u_R(o)$**: η σύγκλιση της σήραγγας στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής (x = 0).
- ✓ **$u_{R\infty}$**: η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ **m**: συντελεστής μεταξύ 0.75 – 0.9.
- ✓ **ξ**: ο λόγος της ελαστικής ($u^e{}_{R\infty}$) προς την ελαστοπλαστική ($u_{R\infty}$) τελική σύγκλιση.
- ✓ **x**: η απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ **R**: η ακτίνα της σήραγγας.

Chern et al. (1998)

Σύμφωνα με το Chern et al. (1998) η σύγκλιση $u_R(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση (x/R) με τιμές x < 0 εντός της σήραγγας και τιμές x > 0 εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{u_R(x)} = u_{R\infty} \times \left[1 + \exp\left(0.91 \times \frac{x}{R}\right)\right]^{-1.7}$$

, όπου:

- ✓ $\mathbf{u_{R\infty}}$: η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ **x**: η απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ **R**: η ακτίνα της σήραγγας.

Με την εφαρμογή οποιασδήποτε από τις δύο προηγούμενες εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του διαμήκους προφίλ μετακινήσεων και σε συνδυασμό με μία καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός αποτόνωσης (λ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος *Chern et al. (1998)*. Για βήμα προχώρησης 1m, εκτιμήθηκε ο βαθμός αποτόνωσης (λ) στην θέση x= -1m ο οποίος ελήφθη υπόψιν και στις προσομοιώσεις, όπως παρατίθεται ακολούθως:

Πίνακας 6. Βαθμός αποτόνωσης (λ) στο σημείο εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης, βάσει της μεθόδου Chern et al. (1998).

Έδαφος	Υπερκείμενα (H)	K_0	λ	1 - λ
S1	15m	0,5	0,79	0,21
		1	0,84	0,16
	30m	0,5	0,90	0,10
		1	0,92	0,08
	40m	0,5	0,92	0,08
		1	0,94	0,06
S2	15m	0,5	0,75	0,25
		1	0,81	0,19
	30m	0,5	0,88	0,12
		1	0,91	0,09
	40m	0,5	0,91	0,09
		1	0,93	0,07
S3	15m	0,5	0,70	0,30

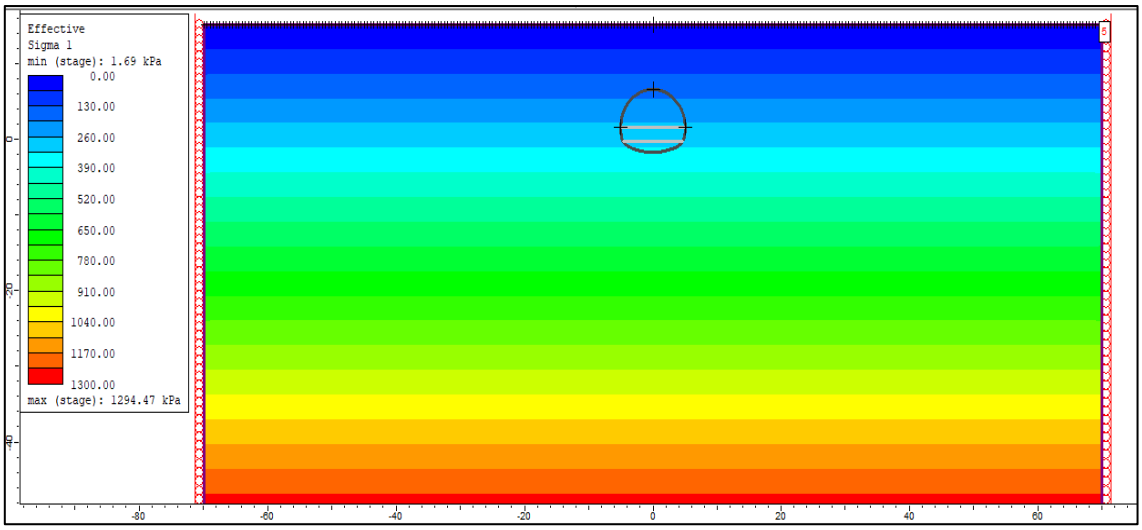
Έδαφος	Υπερκείμενα (Η)	K_0	λ	1 - λ
		1	0,77	0,23
	30m	0,5	0,85	0,15
		1	0,89	0,11
	40m	0,5	0,89	0,11
		1	0,92	0,08

Να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις τμηματικής εκσκαφής, χρησιμοποιείται ο ίδιος βαθμός αποτόνωσης (λ) σε κάθε φάση εκσκαφής.

4.4.4. Στάδια προσομοίωσης

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρία (3) βασικά στάδια :

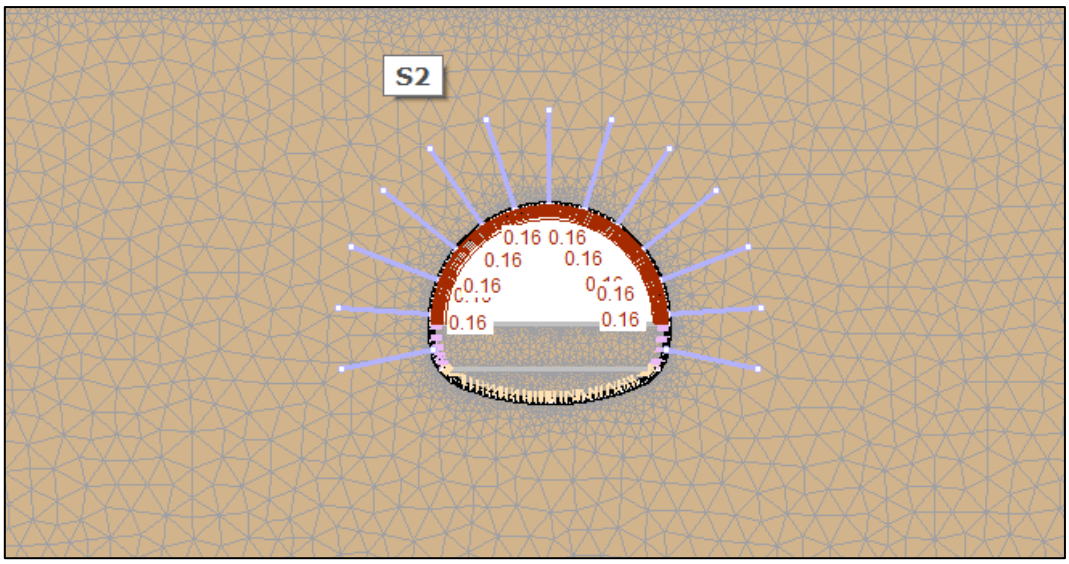
- ✓ <u>1ο Στάδιο (Γεωστατικές συνθήκες)</u>



Εικόνα 39. Γεωστατικές συνθήκες - Αρχικό στάδιο προσομοίωσης.

- ✓ <u>2ο Στάδιο (Εκσκαφή και Αποτόνωση)</u>

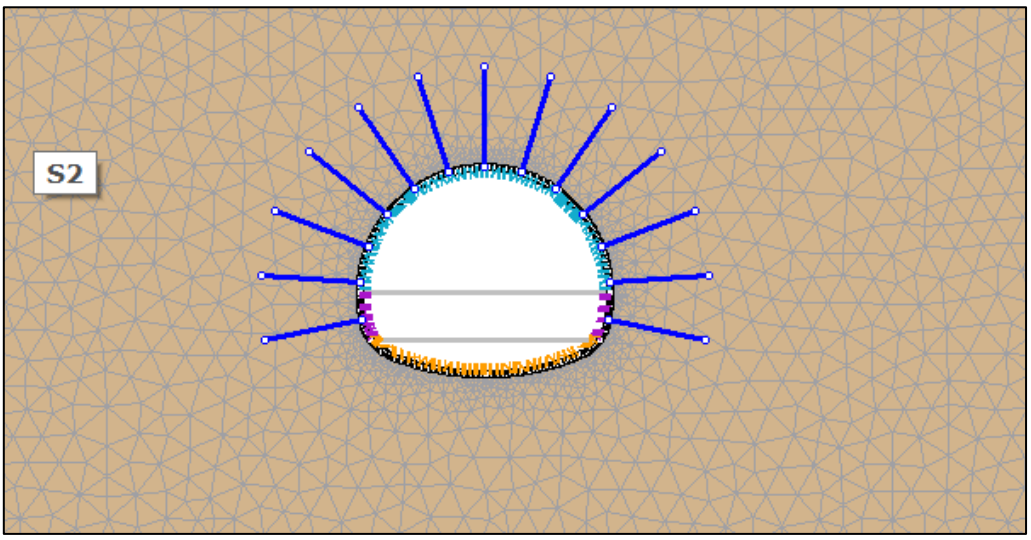
Όπως περιγράφεται στην ενότητα ***4.1.3.3*** η τρίτη διάσταση στις αναλύσεις μας, υπεισέρχεται μέσω του συντελεστή αποτόνωσης (**λ**). Η αποτόνωση προσομοιώνεται μέσω εσωτερικής πίεσης $\mathbf{p_i}$, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: $\boldsymbol{p_i = (1 - \lambda) \times p_o}$. Στην ***Εικόνα 40*** παρουσιάζεται ο τρόπος προσομοίωσης της αποτόνωσης του εδαφικού υλικού, μέσω της εσωτερικής πίεσης p_i.



Εικόνα 40. Προσομοίωση αποτόνωσης εδαφικού υλικού.

✓ <u>3ο Στάδιο (Τοποθέτηση υποστήριξης)</u>

Η υποστήριξη τοποθετείται σε συνθήκες εντατικού πεδίου που έχει διαμορφωθεί μετά την αποτόνωση. Στην ***Εικόνα 41*** παρουσιάζεται το προσομοίωμα με την τοποθέτηση της υποστήριξης.



Εικόνα 41. Προσομοίωμα με την τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης.

Για το στάδιο της τοποθέτησης της προσωρινής υποστήριξης, ελήφθη υπόψιν η σκλήρυνση – ωρίμανση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την υποδιαίρεση του σταδίου αυτού σε τρία (3) επιμέρους στάδια, όπου γίνεται σταδιακή αύξηση της αντοχής και του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα τα υποστάδια είναι τα ακόλουθα:

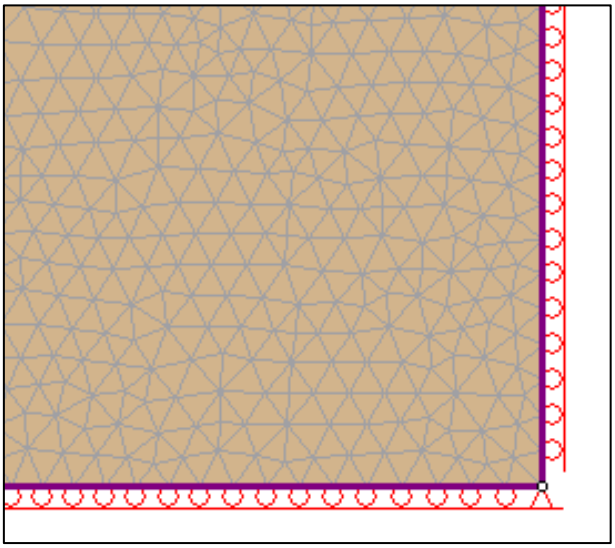
i) Εφαρμογή αγκυρώσεων και δικτυωτών πλαισίων. Πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 50% του τελικού και αντοχή 10% της τελικής του αντοχής.

ii) Αύξηση πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο 100% του τελικού και αύξηση αντοχής στο 50% της τελικής του αντοχής.

iii) Αύξηση αντοχής εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο 100% της τελικής του αντοχής.

4.4.5. Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα όρια του μοντέλου είναι κυλίσεις και αρθρώσεις μόνο στα δύο κάτω άκρα του μοντέλου όπως παρουσιάζεται στην ***Εικόνα 42.*** Χρησιμοποιήθηκαν κυλίσεις, διότι επιθυμούμε να επιτρέπεται η κίνηση της εδαφικής μάζας μόνο παράλληλα στον άξονα των κυλίσεων και όχι κάθετα σε αυτόν.

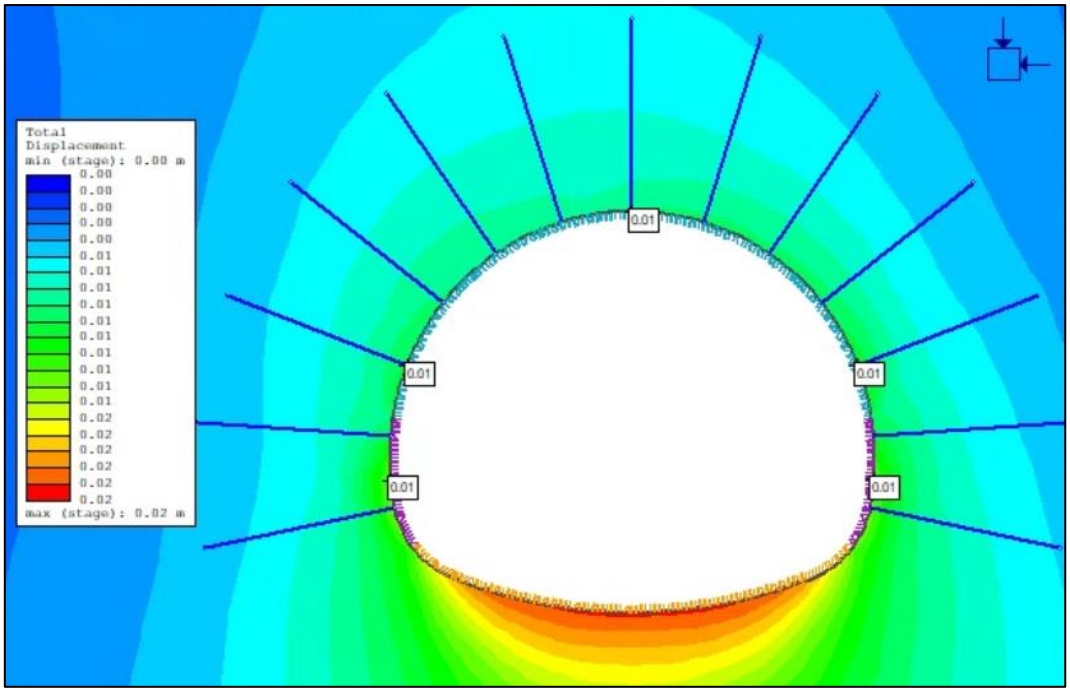


Εικόνα 42. Συνοριακές συνθήκες στα όρια του προσομοιώματος.

4.4.6. Μετρούμενα Μεγέθη

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, μετρήθηκαν τα ακόλουθα μεγέθη σε χαρακτηριστικές θέσεις στην περίμετρο της εκσκαφής και την επιφάνεια του εδάφους, όπως παρουσιάζεται στην ***Εικόνα 43***.

- ✓ Ολικές μετακινήσεις (total displacements) – περίμετρος εκσκαφής
- ✓ Κατακόρυφες μετακινήσεις / καθιζήσεις (vertical displacements) – επιφάνεια εδάφους



Εικόνα 43. Χαρακτηριστικά σημεία λήψης μετρήσεων περιμετρικά της εκσκαφής.

Επίσης στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης, μετρήθηκαν τα ακόλουθα εντατικά μεγέθη αυτής:

- ✓ Αξονικές δυνάμεις (axial forces)
- ✓ Καμπτικές ροπές (bending moment)
- ✓ Διατμητικές τάσεις (shear forces)

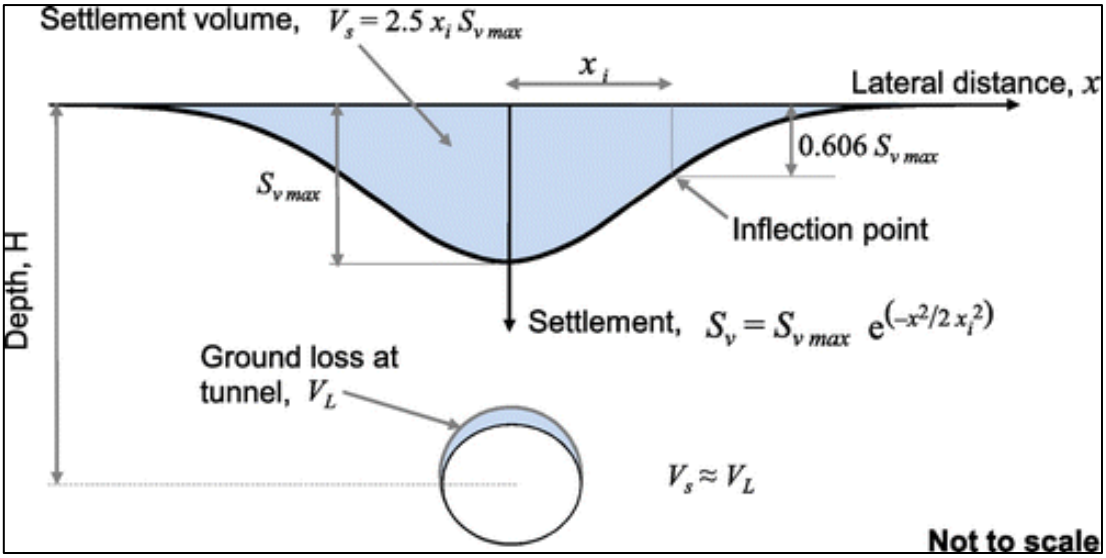
Από τα παραπάνω μεγέθη εκτιμήθηκε η μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (**e_{max}**) της προσωρινής υποστήριξης, ως ακολούθως:

$$\boldsymbol{e_{max}} = \frac{M_{max}}{N_{max}}$$

, όπου:

- **M_{max}**: η μέγιστη αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή στο κέλυφος της υποστήριξης
- **N_{max}**: η μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη στο κέλυφος της υποστήριξης

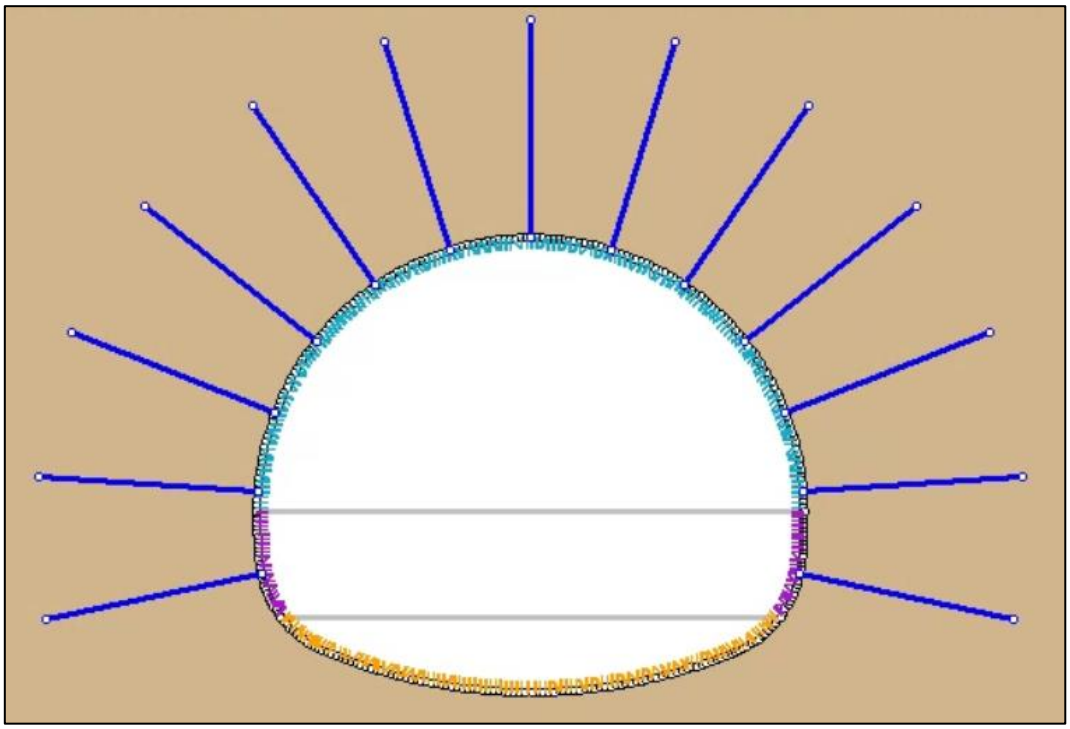
Τέλος εκτιμήθηκε τόσο η απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (**ground loss -V_L**), όσο και η απώλεια εδαφικού όγκου λόγω καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους (**volume loss – V_s**), σχηματική απεικόνιση των οποίων παρατίθεται στην συνέχεια. Ο υπολογισμός του ground loss (V_L) δίδεται ως εξαγόμενο μέγεθος του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ενώ ο υπολογισμός του volume loss (V_s) εκτιμήθηκε μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων.



Εικόνα 44. Βασικά μεγέθη που συνδέονται με την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σηράγγων (ASCE Library).

5. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τρεις Φάσεις με Τελικό Ανάστροφο Τόξο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αριθμητική διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σήραγγας, σε τρεις φάσεις εκσκαφής με την κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (invert), όπως της διατομής του Σχήματος 1 (βλ. Κεφάλαιο 4.3). Η αριθμητική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε αστικές (ρηχές) σήραγγες, με το ύψος των υπερκείμενων γαιών (H) από τον άξονα της σήραγγας, να λαμβάνει τιμές 15, 30 και 40m. Στις αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώθηκαν περιπτώσεις εδαφών με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας αποτελούταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t= 30cm, δικτυωτά πλαίσια και αγκυρώσεις. Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό αριθμητικό προσομοίωμα του παρόντος κεφαλαίου. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δεν ελήφθη υπόψιν οποιαδήποτε μορφή προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που σίγουρα θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση τόσο των συγκλίσεων της σήραγγας όσο και της εκδήλωσης των επιφανειακών καθιζήσεων.



Εικόνα 45. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τρεις φάσεις με την κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (invert).

5.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής

Από το σύνολο των αναλύσεων του συγκεκριμένου κεφαλαίου, παρατηρήθηκε ότι κατά την τμηματική διάνοιξη της εκσκαφής, σημαντικό μέρος των τελικών συγκλίσεων έχει ήδη αναπτυχθεί από την εκσκαφή της Α΄ φάσης εκσκαφής (top heading). Επίσης όπως είναι αναμενόμενο, σε ασθενή εδάφη το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων της σήραγγας είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι σε αντίστοιχες συνθήκες διάνοιξης με εδάφη καλύτερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και με την αύξηση του ύψους των υπερκείμενων γαιών, όπου οι συνθήκες διάνοιξης γίνονται δυσμενέστερες και οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες, από ότι σε πιο ρηχές σήραγγες. Αυτό μπορεί να εκφραστεί καλύτερα, μέσω του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s):

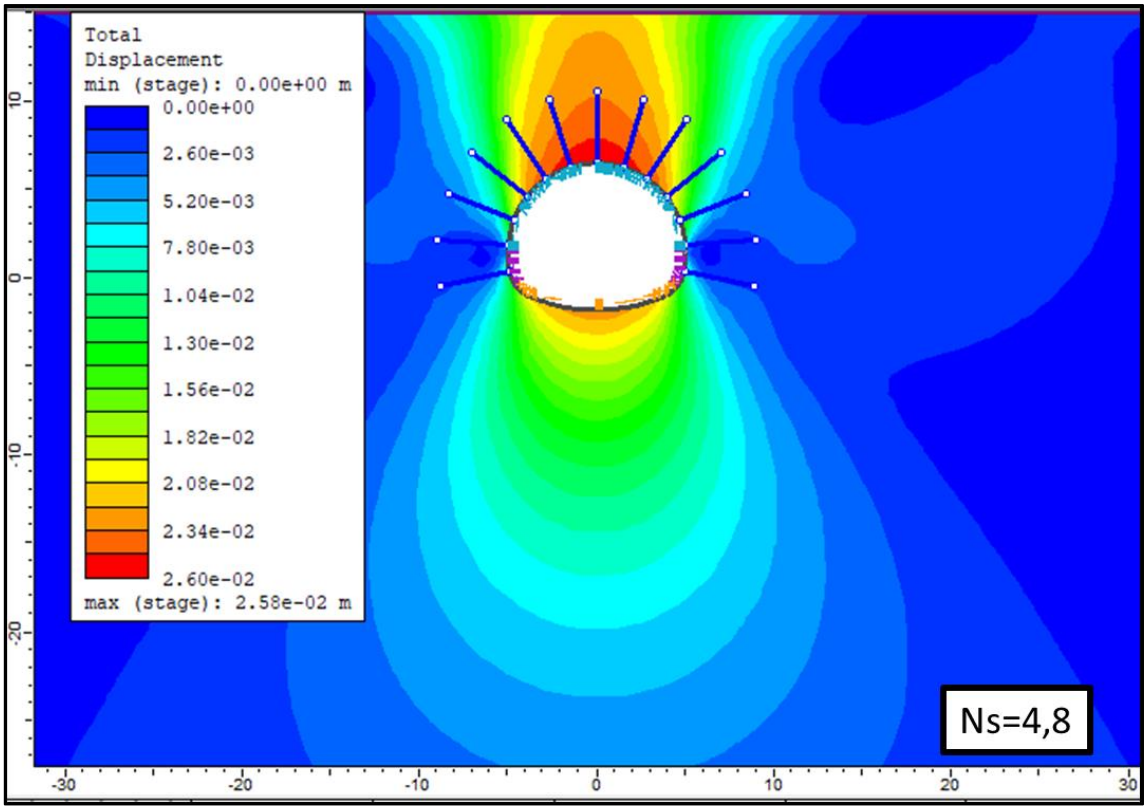
$$\boldsymbol{N_s = \frac{2 \times p_o}{\sigma_{cm}}}$$

, όπου:

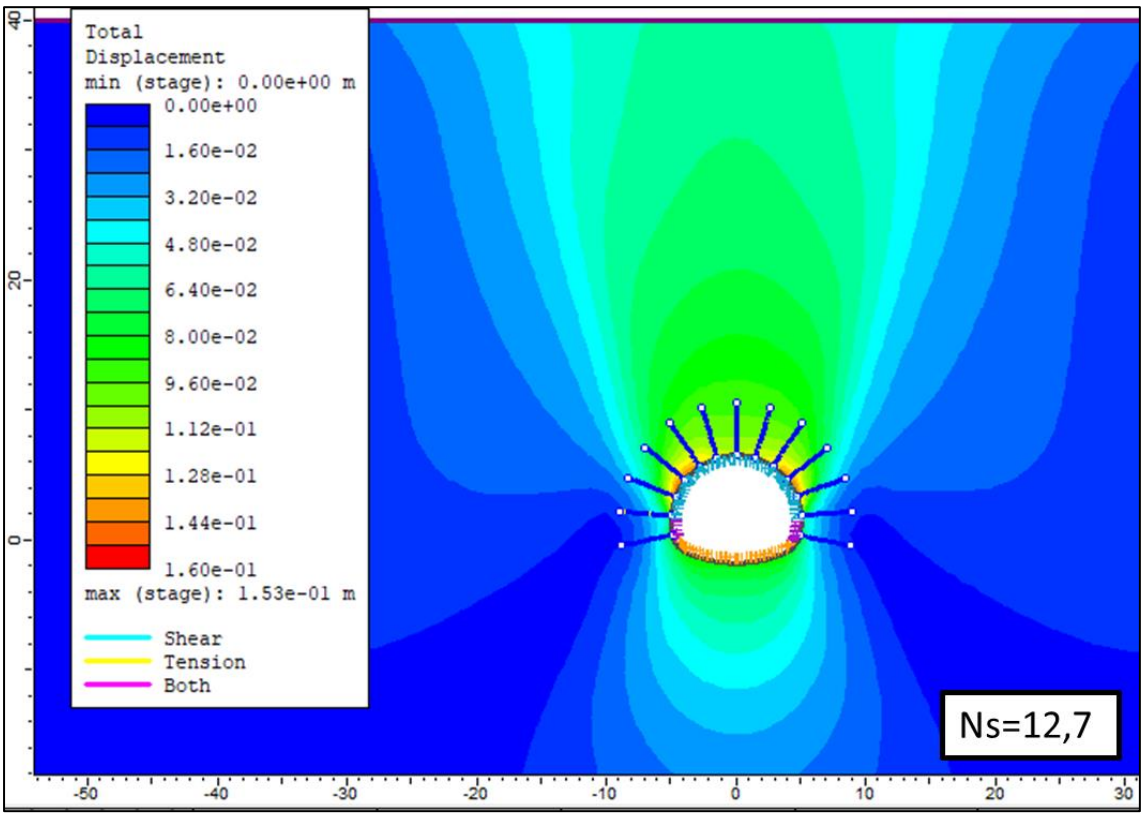
- ✓ $\boldsymbol{p_o} = 0.5 \times (1 + K_o) \times \gamma \times H$
- ✓ $\boldsymbol{\sigma_{cm}} = 2 \times c \times tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι όσο ο συντελεστής υπερφόρτισης εδάφους (N_s) αυξάνει, τόσο πιο δυσμενείς συνθήκες διάνοιξης θα έχουμε και συνεπώς θα αναμένουμε μεγαλύτερες συγκλίσεις στην σήραγγα.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, βάσει του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s).

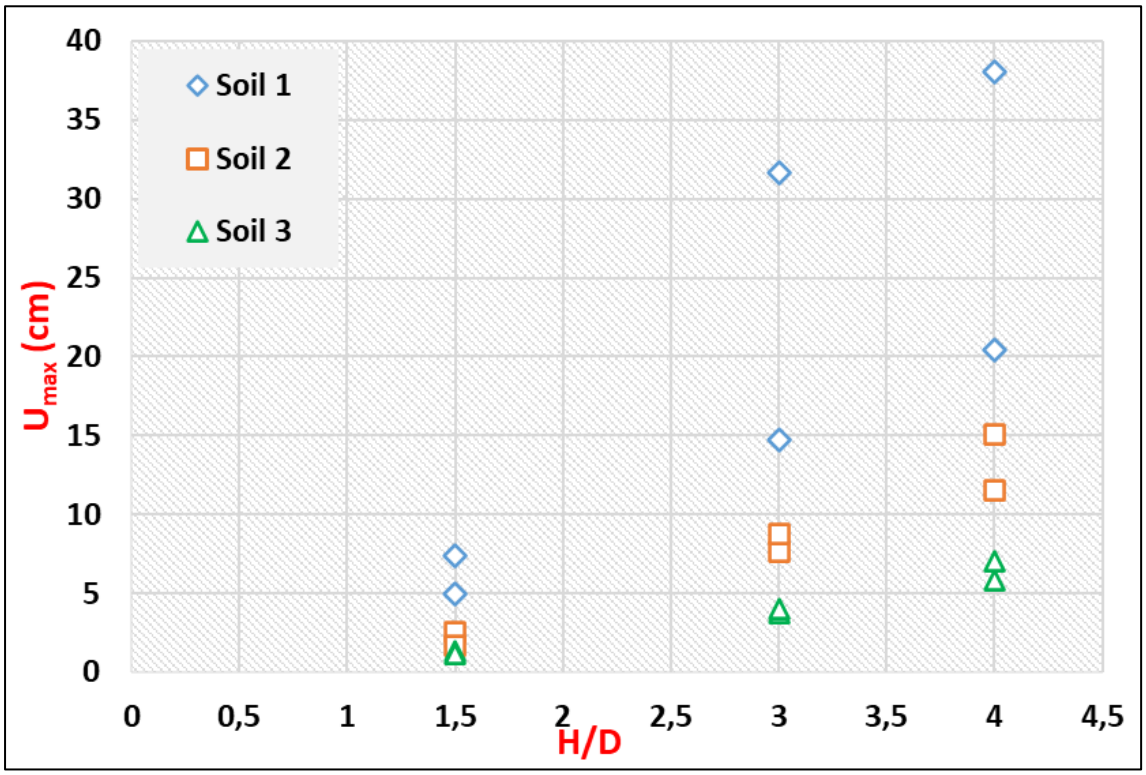


Εικόνα 46. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50.



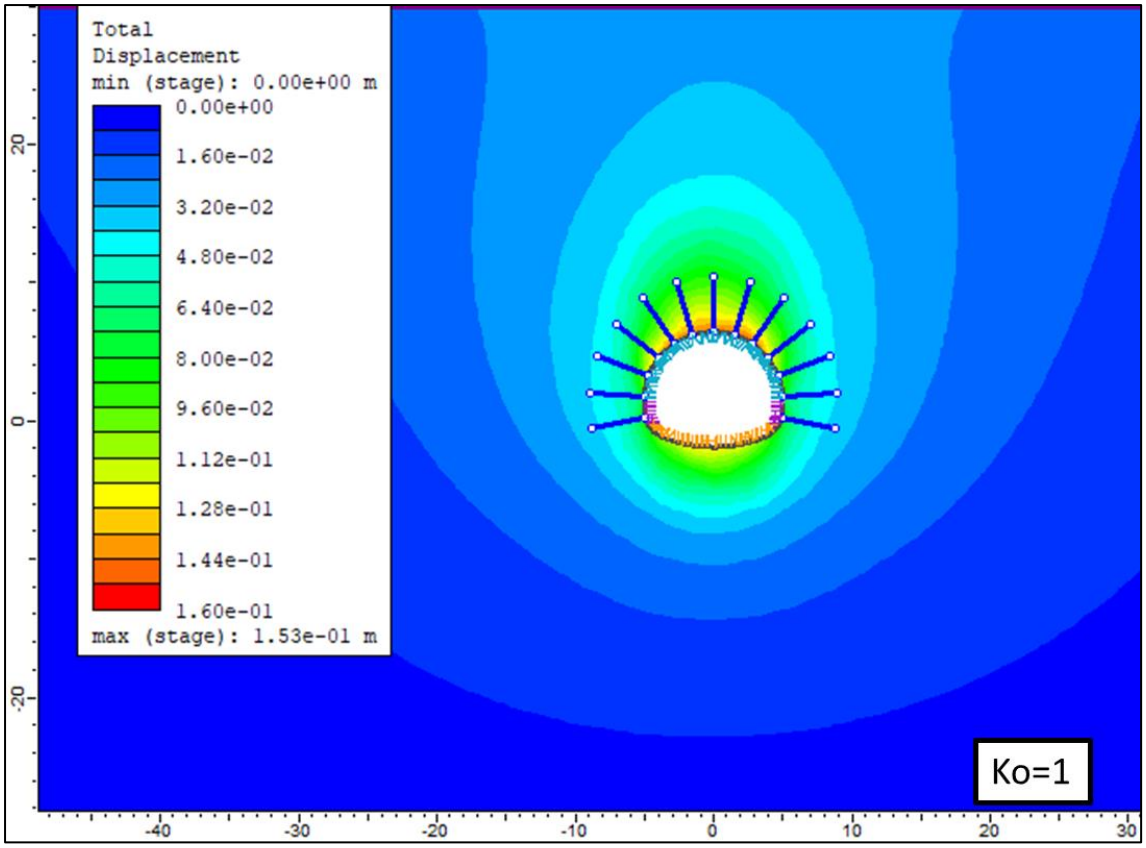
Εικόνα 47. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50

Η επιρροή του ύψους των υπερκείμενων γαιών (H), στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, παρουσιάζεται στο ακόλουθο Διάγραμμα, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

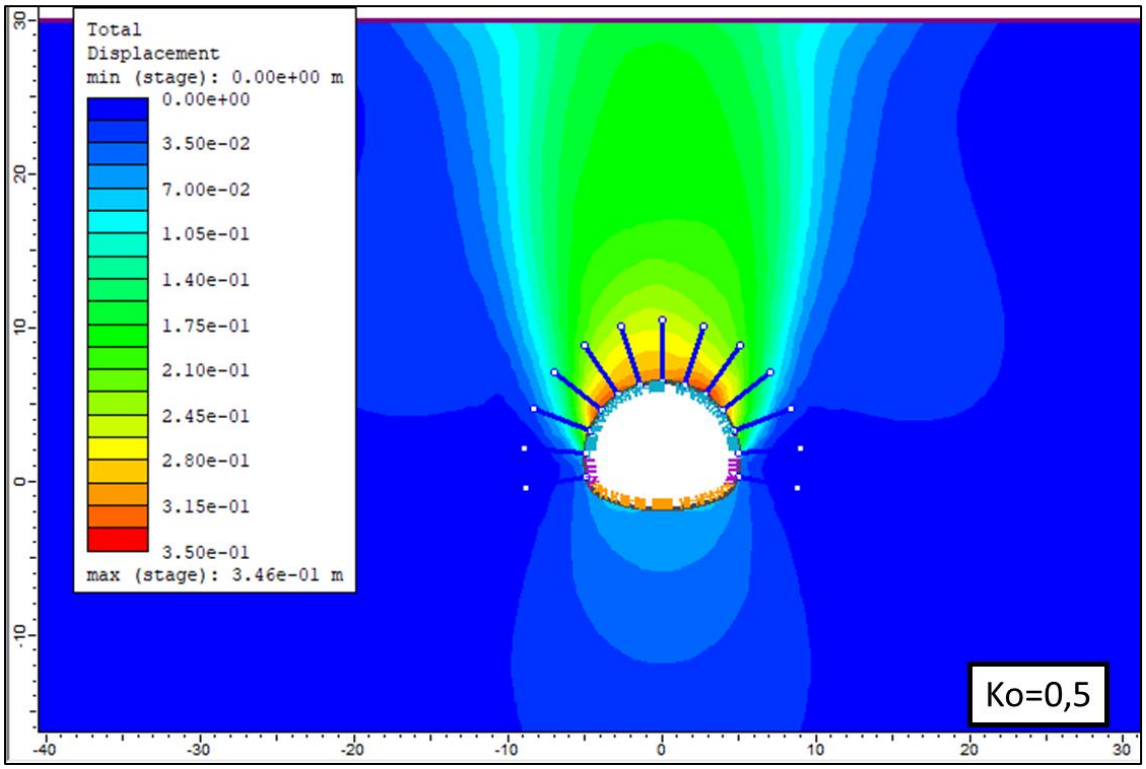


Διάγραμμα 1. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι πολύ σημαντική είναι και η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων (K_o) στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων και στην θέση εμφάνισης της μέγιστης σύγκλισης. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των αναλύσεων διαπιστώθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων είναι K_o = 0,5, οι αναπτυσσόμενες συγκρίσεις είναι μεγαλύτερες αριθμητικά για όλους τους τύπους των εδαφών από ότι στις περιπτώσεις για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1. Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη σύγκλιση (u_{max}) αναπτύσσεται στην στέψη της σήραγγας, με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις εδαφών με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1, όπου η μέγιστη σύγκλιση αναπτύχθηκε στις παρειές της εκσκαφής.

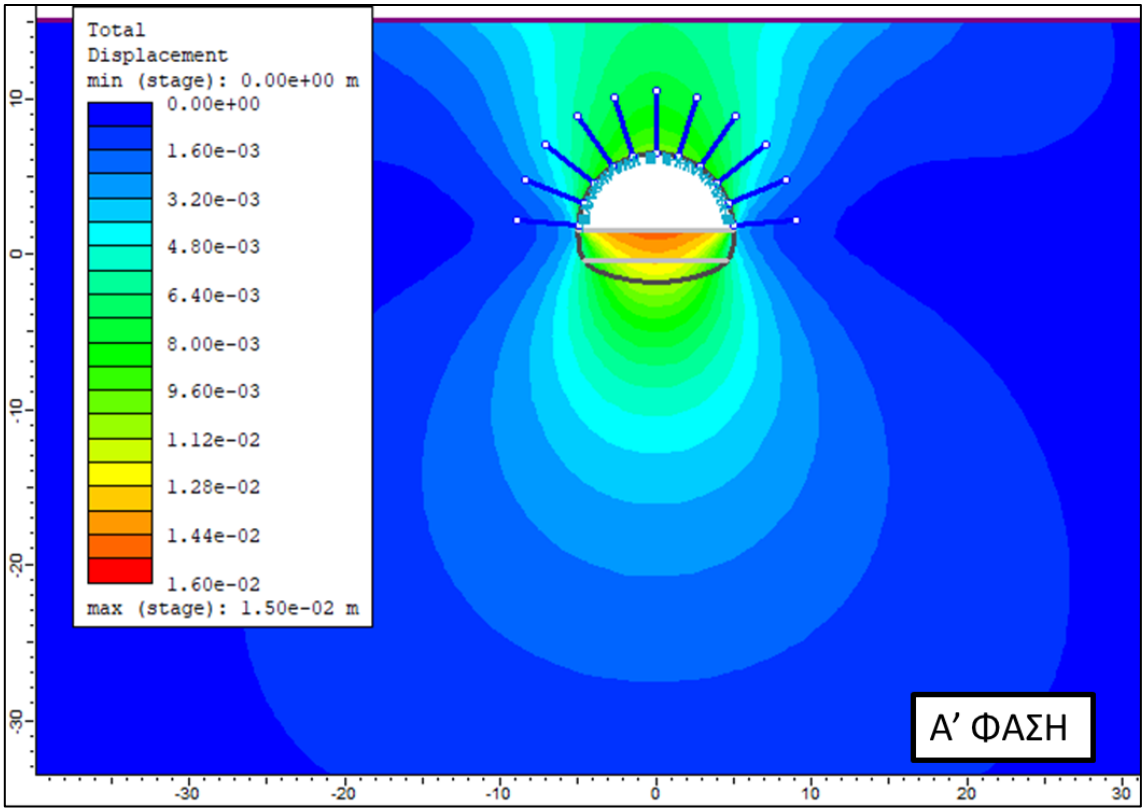


Εικόνα 48.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m

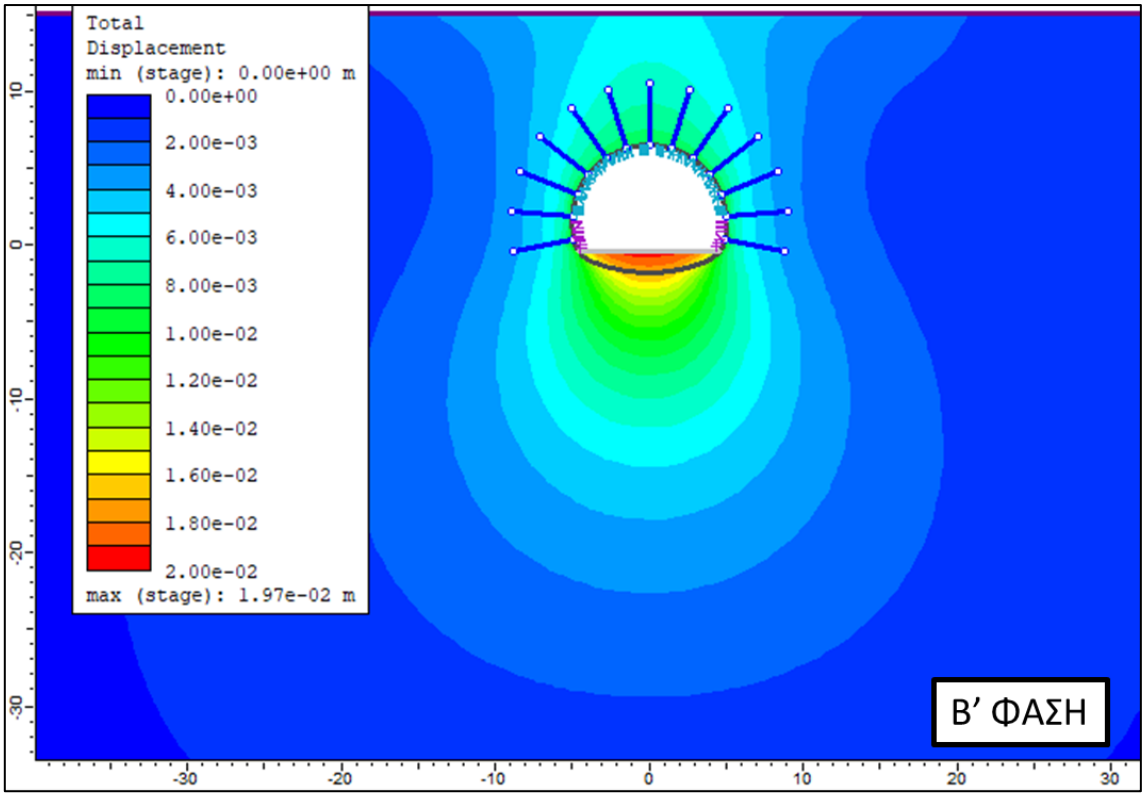


Εικόνα 49.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m

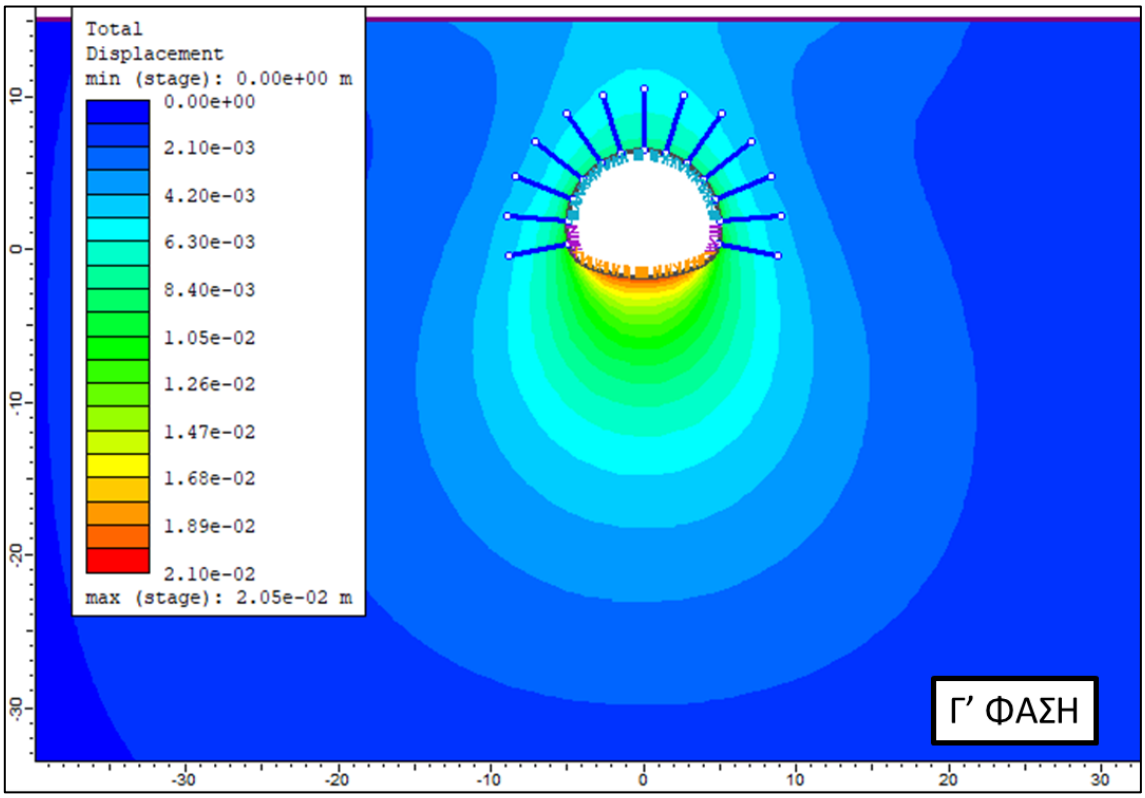
Επίσης από τις αριθμητικές αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι κατά την εκσκαφή της Α' φάσης εκσκαφής αναπτύσσεται μεγάλο μέρος των τελικών συγκλίσεων (u_{max}) σε σχέση με το ποσοστό αυτών όταν γίνει εκσκαφή της Β' φάσης (bench) και του τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Αυτό το συμπέρασμα, αποτυπώνεται στις ακόλουθες Εικόνες το αντίστοιχο διάγραμμα.



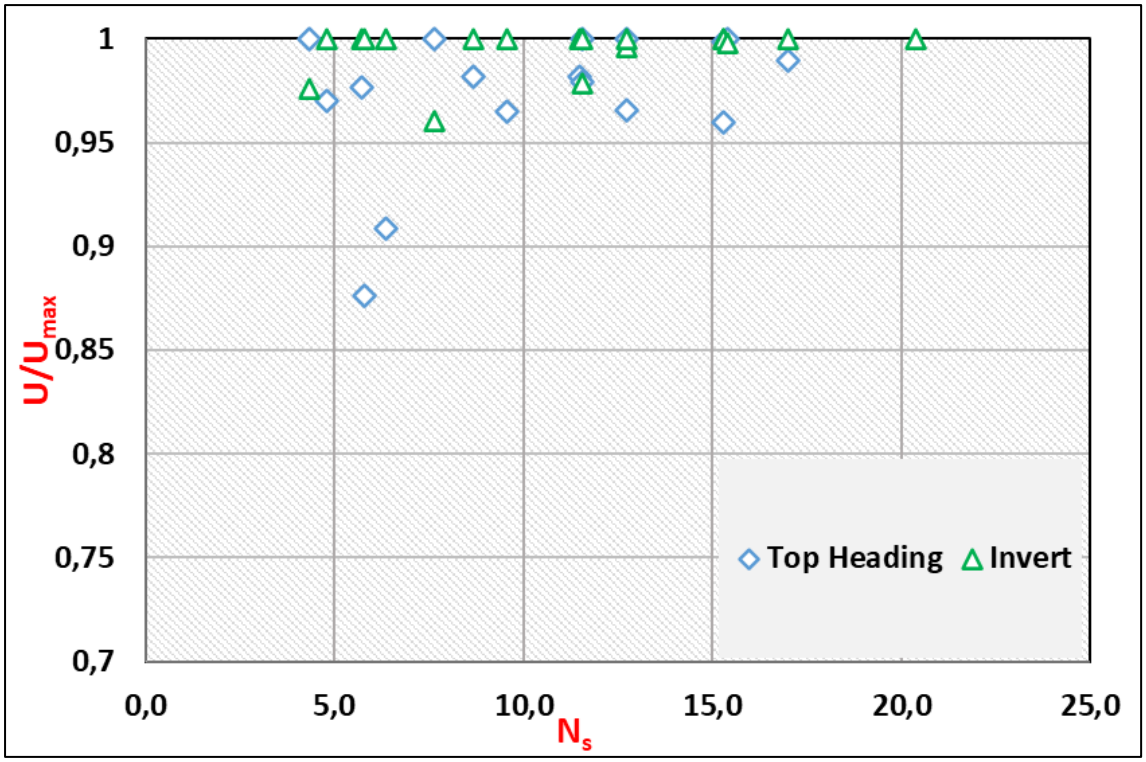
Εικόνα 50.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α' Φάσης



Εικόνα 51.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης

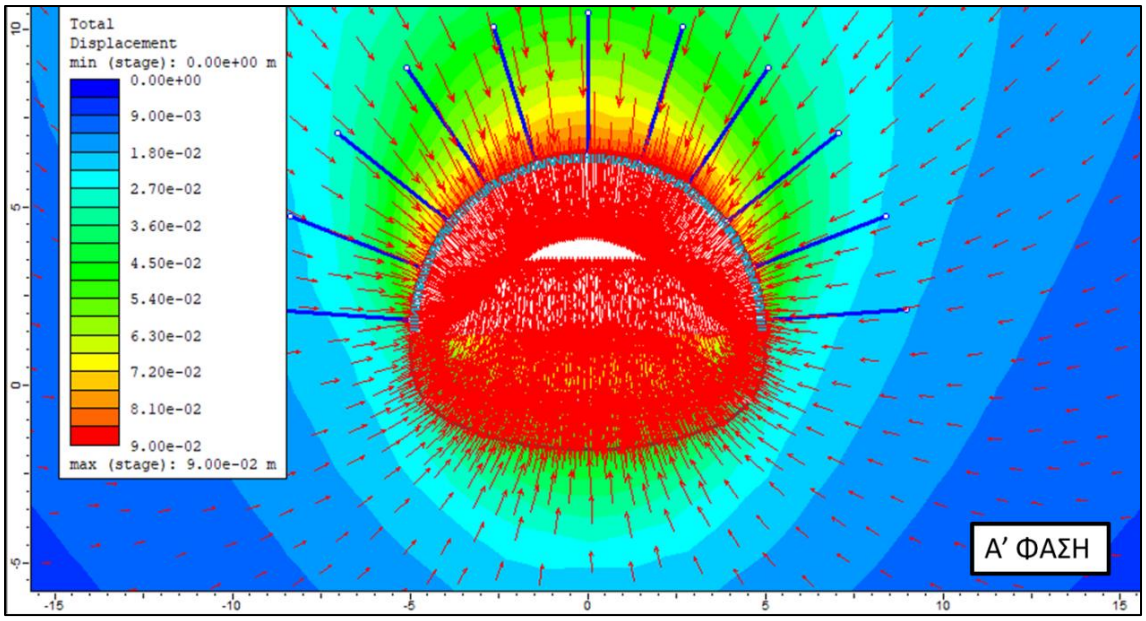


Εικόνα 52.Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Γ' Φάσης

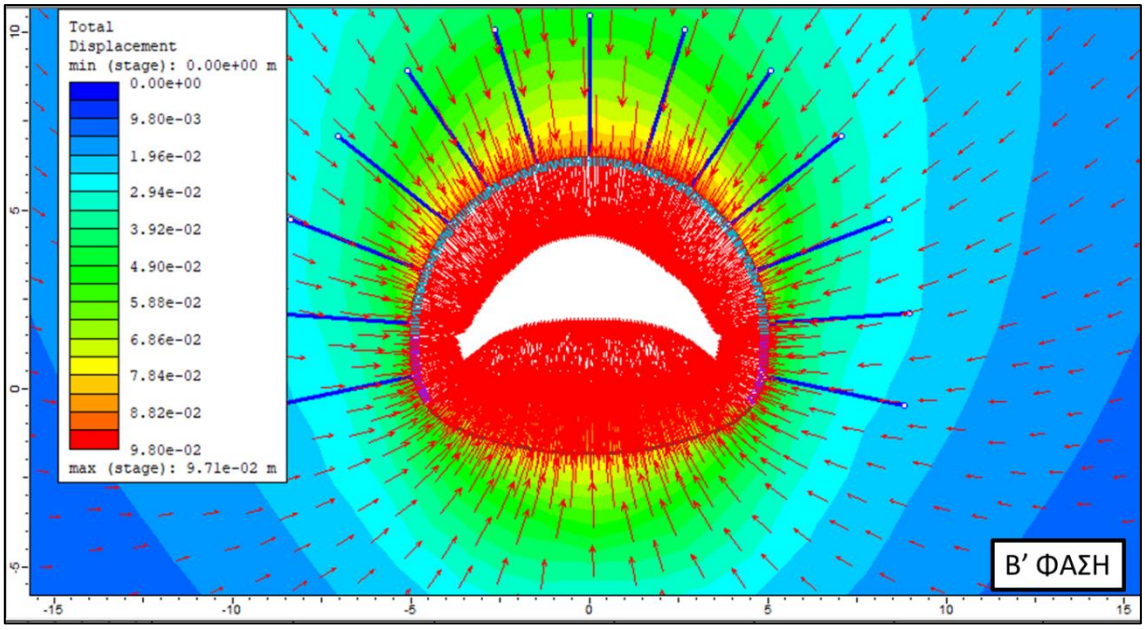


Διάγραμμα 2. Μεταβολή του λόγου (U/U_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (Ns) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

Τέλος από το σύνολο των αναλύσεων του κεφαλαίου αυτού, διαπιστώθηκε ότι τόσο στο προσωρινό δάπεδο τόσο της Α΄ φάσης εκσκαφής (top heading), όσο και στο δάπεδο της Β΄ φάσης (bench) υπήρχε ανύψωση του δαπέδου, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 53.Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής της άνω ημιδιατομής (top heading) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.



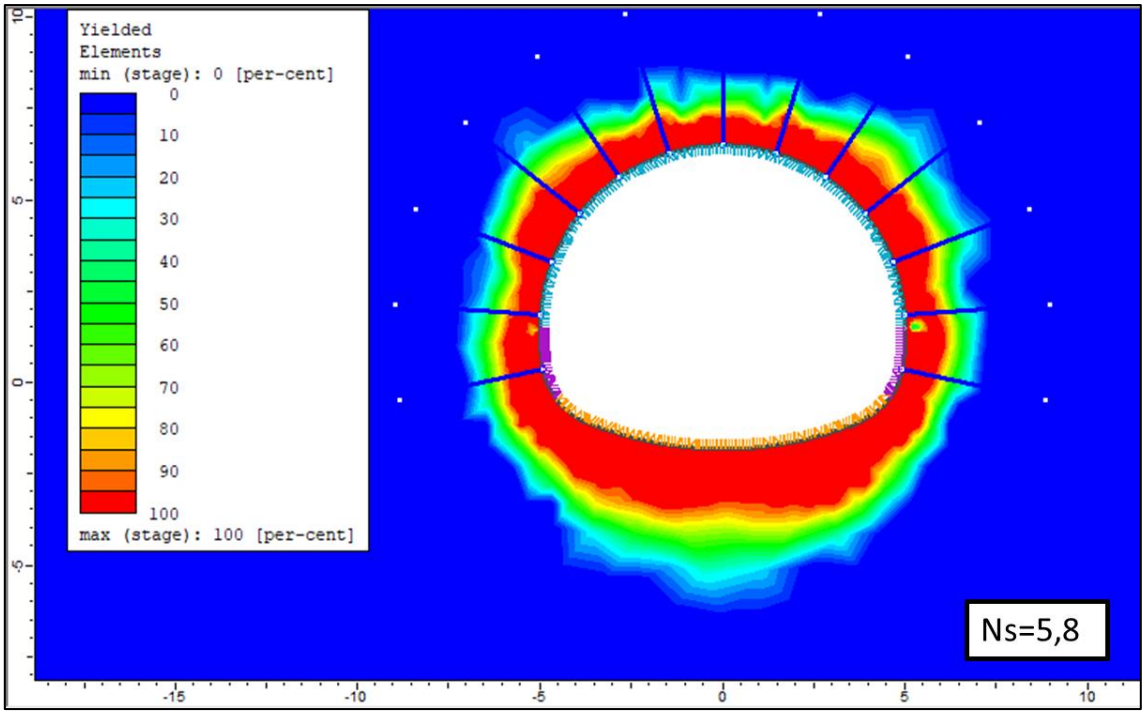
Εικόνα 54. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής του τελικού ανάστροφου τόξου (invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός της στροφής των τάσεων στην περιοχή του δαπέδου, επειδή υπάρχει η πλευρική παρεμπόδιση λόγω της προσωρινής υποστήριξης και οι τάσεις «ανακουφίζονται» στο ελεύθερο τμήμα της εκσκαφής που είναι το δάπεδο και προκαλούν την ανύψωσή του.

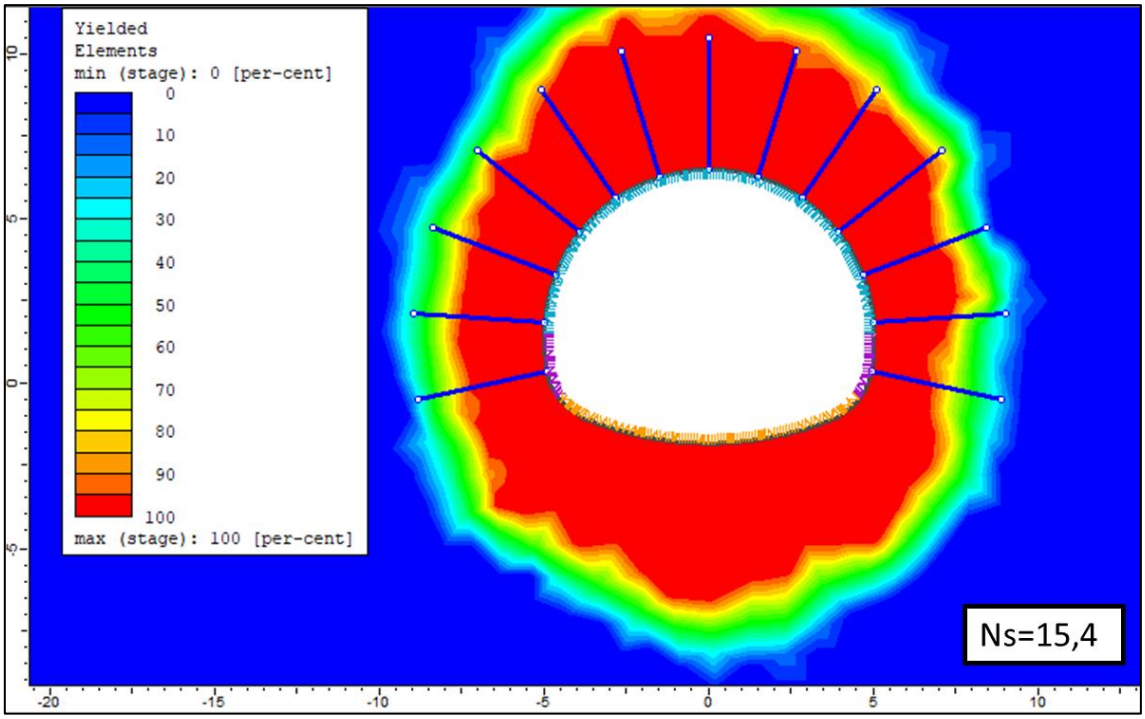
5.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας και καθώς το μέτωπο εκσκαφής προηγείται, έμπροσθεν αυτού αρχίζουν να αναπτύσσονται προσυγκλίσεις, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος αυτών να έχει αναπτυχθεί στην περιοχή του μετώπου, της τάξης του 30% των τελικών. Σε περιπτώσεις ασθενούς εδάφους και μεγάλου ύψους υπερκείμενων γαιών, το έδαφος τείνει να αστοχήσει με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς οι συγκλίσεις που αναπτύσσονται πλέον είναι εκτός της ελαστικής περιοχής και συνεπώς θα αναπτυχθεί πλαστική ζώνη, όπου το εύρος της θα είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, αυτό επιβεβαιώνεται και στις ακόλουθες εικόνες, όπου καταγράφεται η αύξηση του εύρους της πλαστικής ζώνης όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

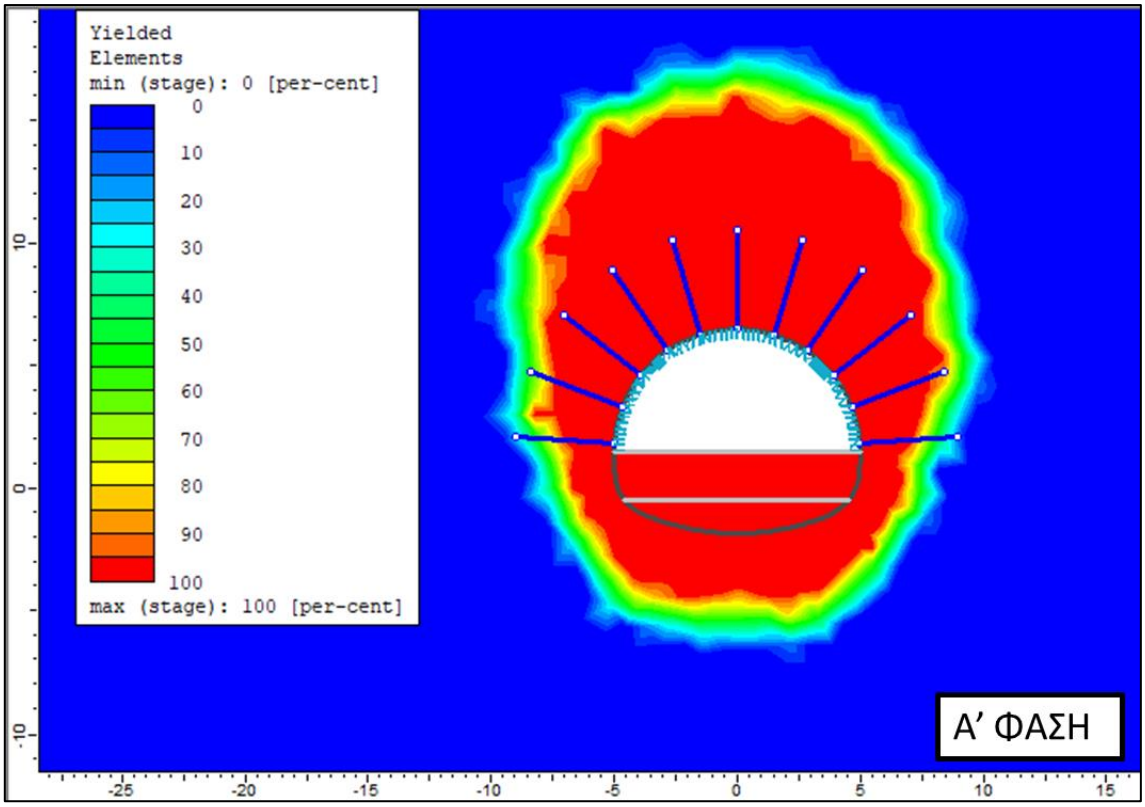


Εικόνα 55. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1.

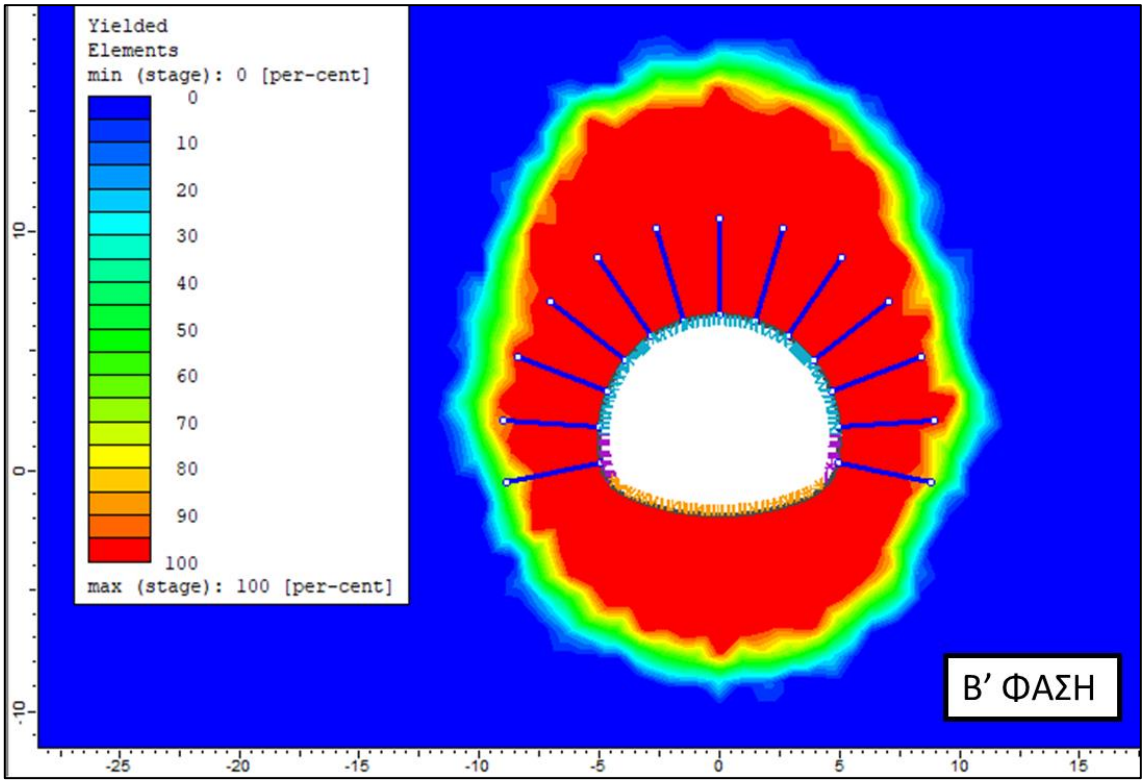


Εικόνα 56.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1.

Επίσης κατά την τμηματική εκσκαφή, διαπιστώθηκε ότι καθώς αναπτύσσεται η εκσκαφή, υπάρχει και ανάλογη ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 57.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.

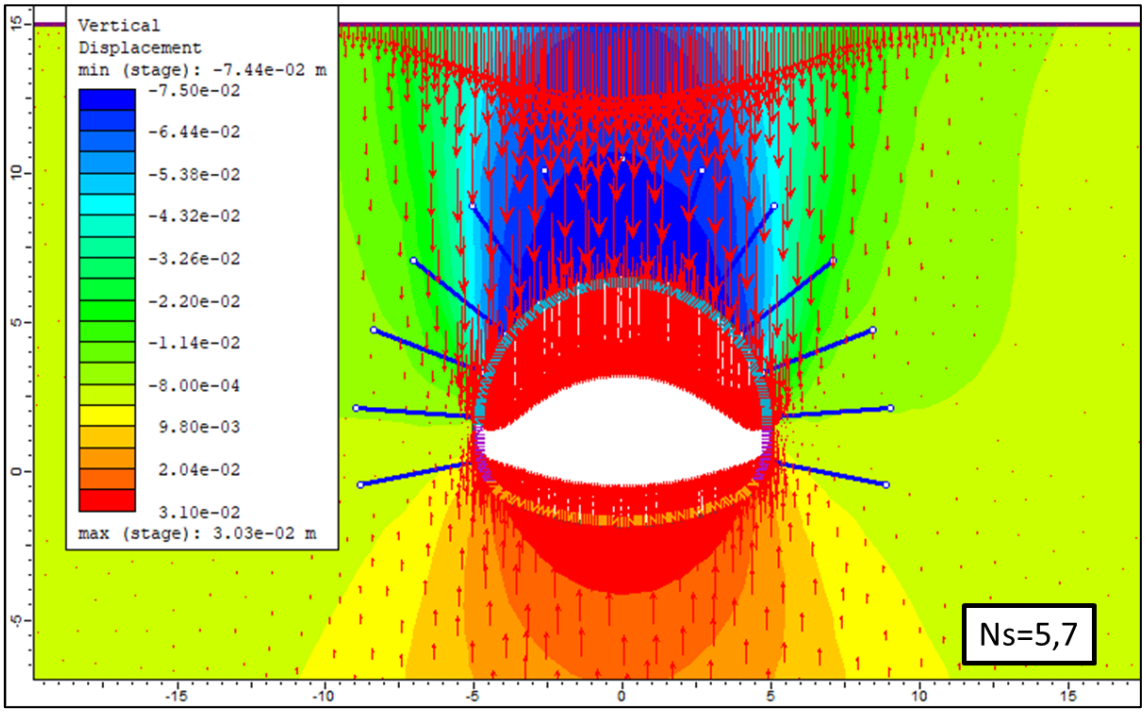


Εικόνα 58.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Β' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.

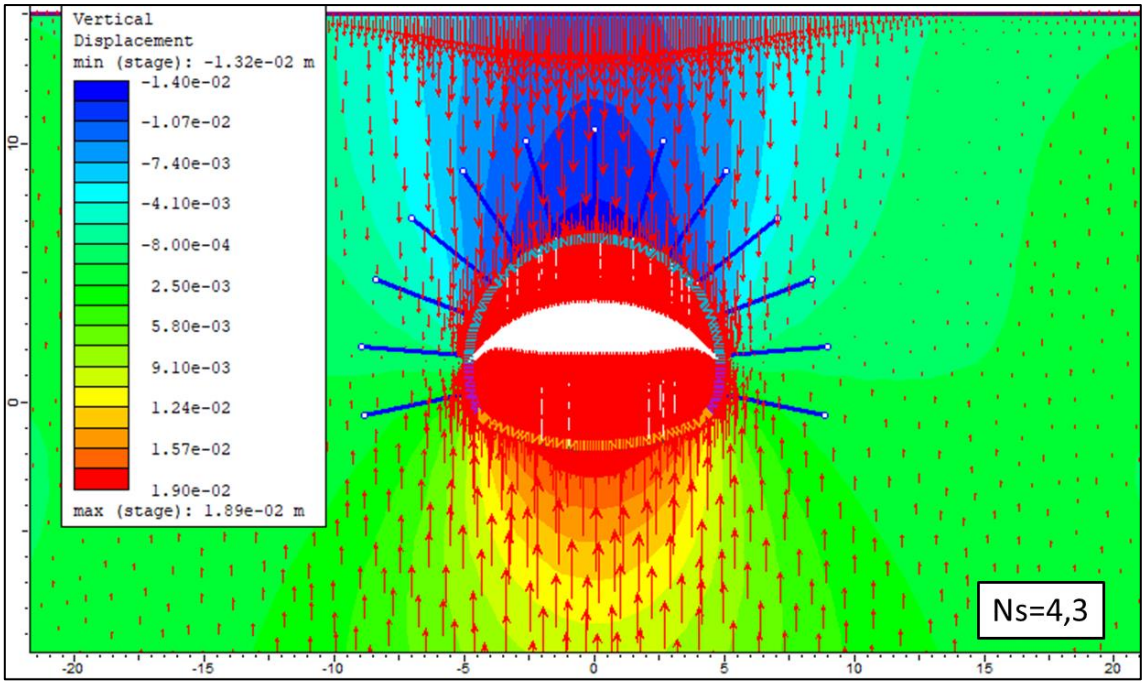
Τέλος από τις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου , προέκυψε ότι το μέγιστο εύρος πλαστικής ζώνης είναι ***7,35 m.***

5.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων

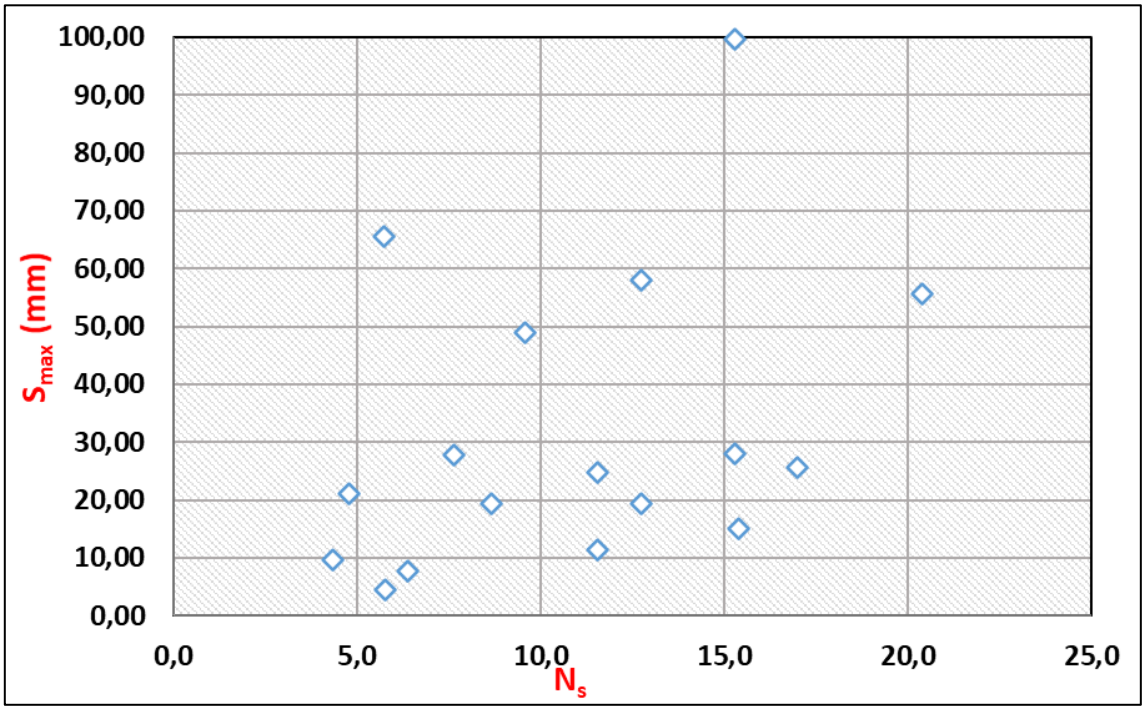
Λόγω της εξέτασης εκσκαφών σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, υπάρχει άμεση επιρροή αυτών στην επιφάνεια, μέσω της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων (s). Συγκεκριμένα, λόγω της απώλειας εδαφικής μάζας από την εκσκαφή της σήραγγας, θα προκληθεί ανάπτυξη επιφανειακής καθίζησης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απώλεια, δηλαδή μεγάλες συγκλίσεις της εκσκαφής, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι καθιζήσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις ακόλουθες Εικόνες και αντικατοπτρίζεται καλύτερα στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Εικόνα 59. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής της άνω ημιδιατομής (top heading) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.



Εικόνα 60. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση εκσκαφής του τελικού ανάστροφου τόξου (invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

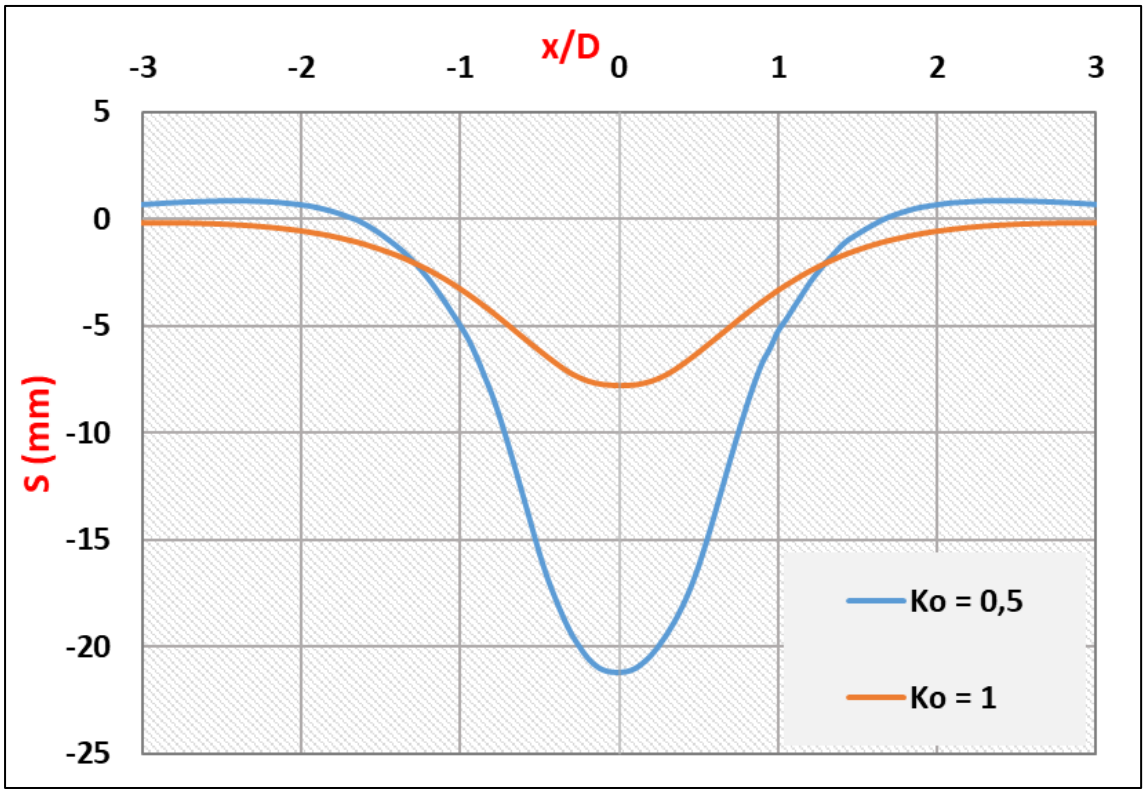


Διάγραμμα 3. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

Από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι αναπτύσσεται μια καμπύλη καθιζήσεων μορφής Gauss, με την μέγιστη βύθιση (καθίζηση) να αναπτύσσεται ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν συνθήκες ελεύθερου πεδίου (green field) και δεν υπάρχουν

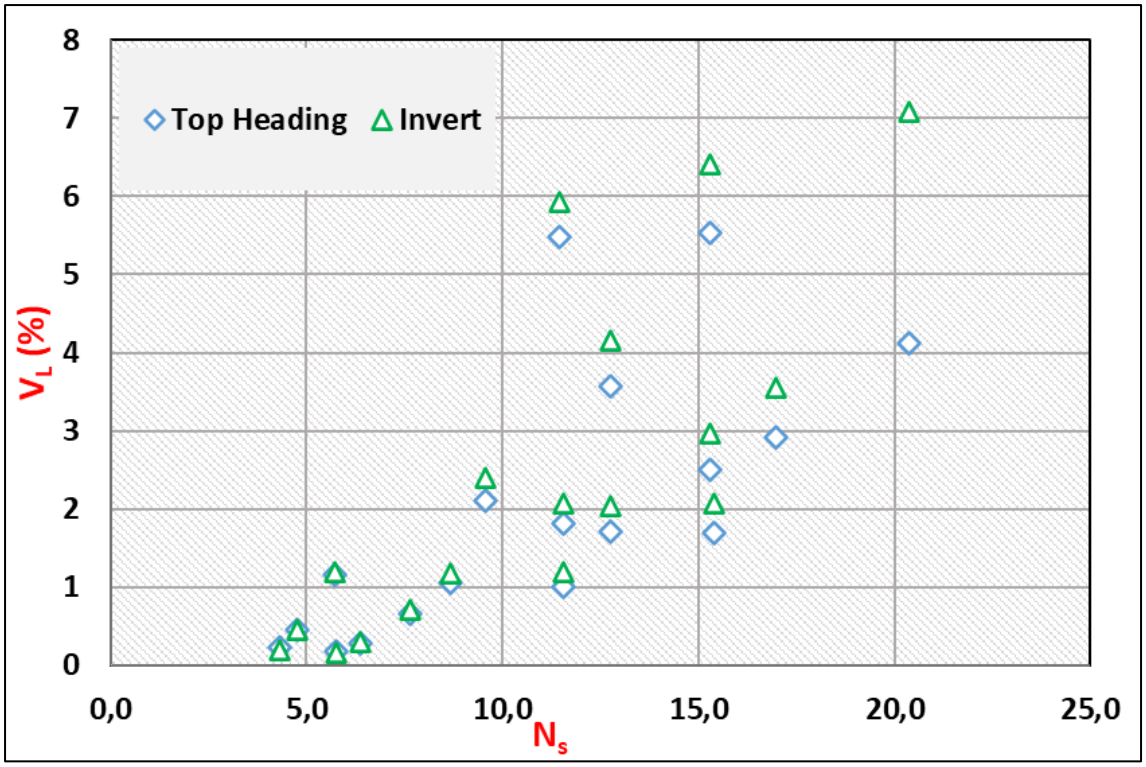
υπερκείμενες κατασκευές ή άλλες σήραγγες, ώστε να προκαλείται άλλης μορφής καμπύλη καθιζήσεων.

Μια βασική παράμετρος που έχει επιρροή στην μορφή και το μέγεθος των καθιζήσεων (s) είναι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o). Με βάσει τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι όταν ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_o = 0,5 οι καθιζήσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες και η καμπύλη παρουσιάζει εκτεταμένη βύθιση, από ότι στην περίπτωση όπου το K_o = 1 όπου εκεί οι καθιζήσεις είναι μικρότερες και η καμπύλη είναι ομαλή χωρίς μεγάλη βύθιση. Το συμπέρασμα αυτό αποτυπώνεται στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Διάγραμμα 4. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S2 με υπερκείμενα H=15m.

Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα, αποτυπώνεται η επιρροή της επιφάνειας εκσκαφής (φάσεις εκσκαφής) στο ποσοστό της απώλειας εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής. Συγκείμενα προκύπτει το συμπέρασμα, ότι ήδη από την Α' φάση εκσκαφής έχει προκληθεί σημαντική απώλεια εδαφικού όγκου (V_L), όπου σε ασθενή εδάφη φτάνει και σε ποσοστό της τάξης του 5%.

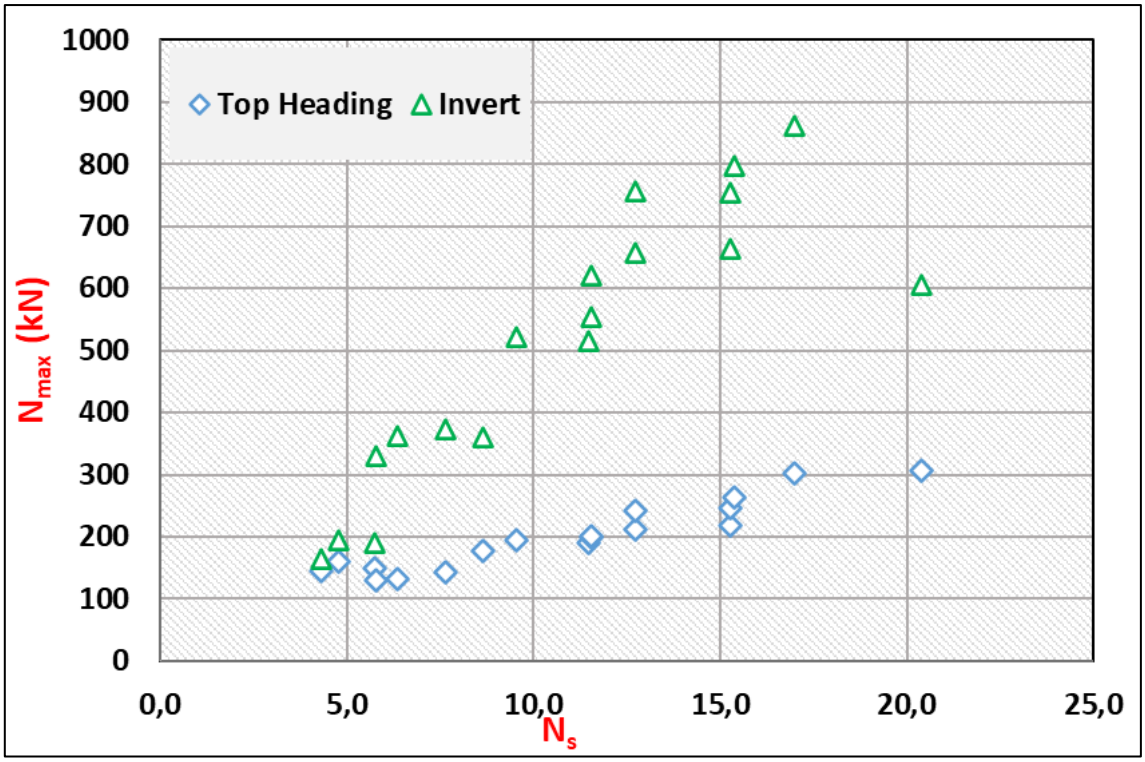


Διάγραμμα 5. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

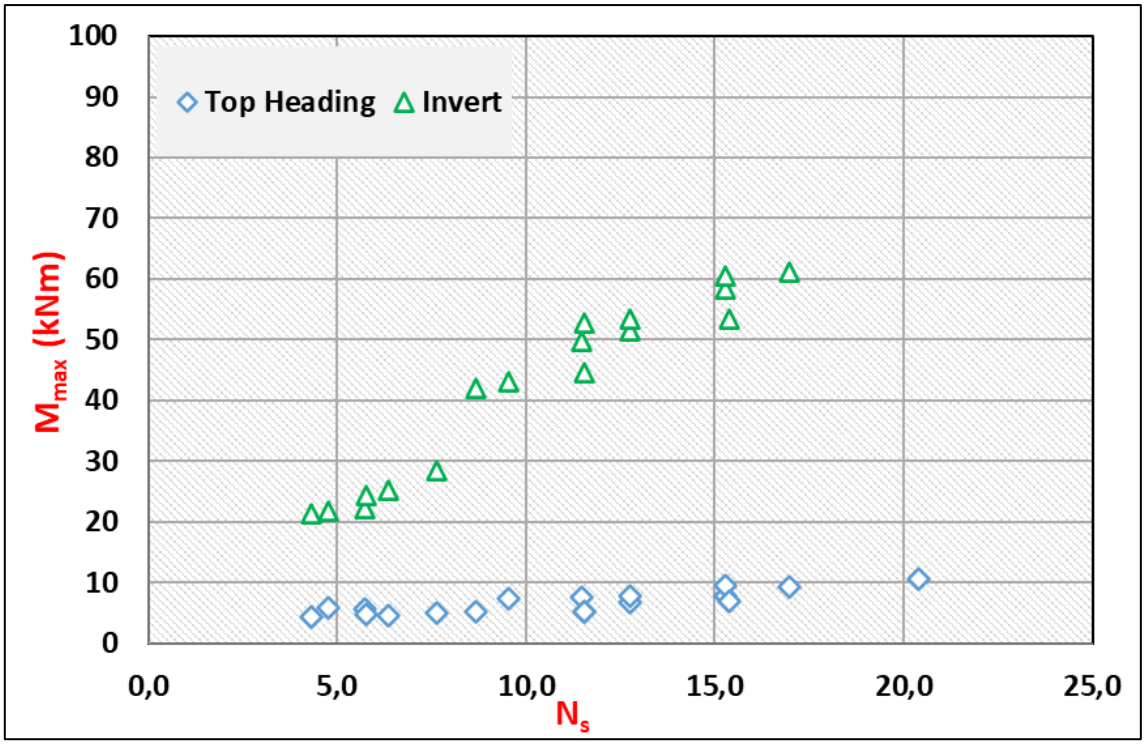
5.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη

Από το σύνολο των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκε καταγραφή της μέγιστης αξονικής δύναμης (axial force), καθώς και της μέγιστης καμπτικής ροπής (bending moment) σε κάθε στάδιο εκσκαφής.

Αρχικά διαπιστώθηκε, ότι οι μέγιστες καμπτικές ροπές σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις αναπτύσσονται πάντα στην γωνία μεταξύ του δαπέδου εργασίας και της προσωρινής υποστήριξης, λόγω του σχηματισμού αυτής της γωνίας. Επίσης η θέση της μέγιστης αξονικής δύναμης στην προσωρινή υποστήριξη δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται τόσο σε μορφή (θλιβόμενη ή εφελκυόμενη περιοχή) καθώς και σε θέση στην περίμετρο της εκσκαφής, με την πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν να βρίσκεται στις παρειές αυτής. Στα ακόλουθα Διαγράμματα παρουσιάζονται τα μέγιστα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη της προσωρινής υποστήριξης, που καταγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

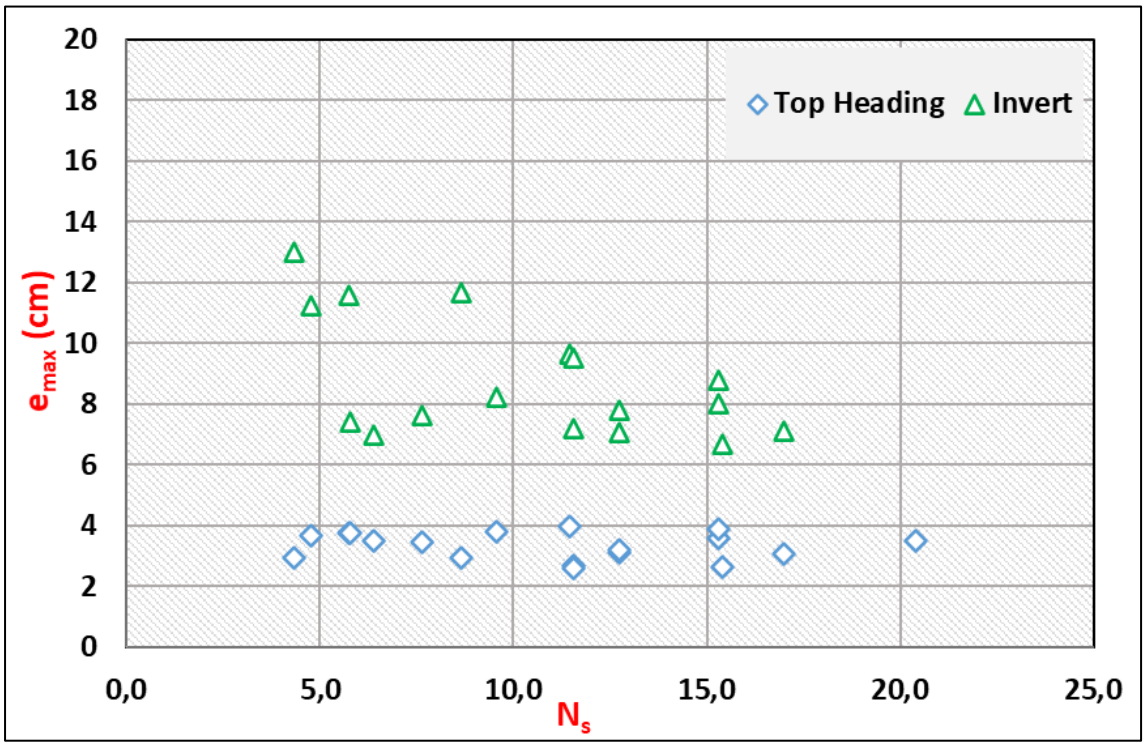


Διάγραμμα 6. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.



Διάγραμμα 7. Μέγιστες καμπτικές ροπές (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

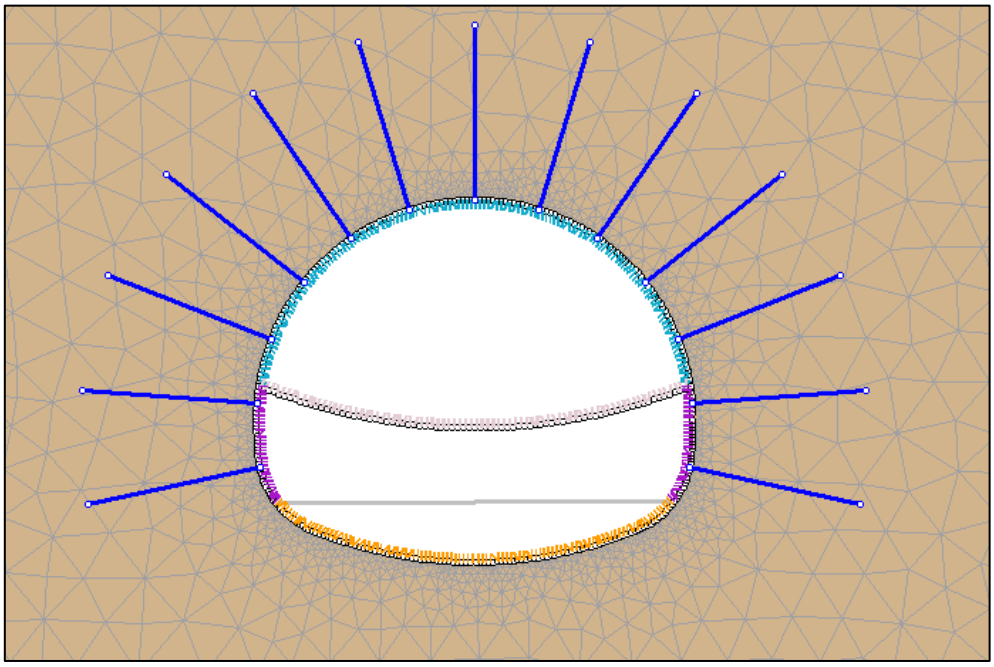
Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) που αναπτύχθηκε στην προσωρινή υποστήριξη των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου.



Διάγραμμα 8. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

6. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τρεις Φάσεις με Προσωρινό και Τελικό Ανάστροφο Τόξο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αριθμητική διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σήραγγας, σε τρεις φάσεις εκσκαφής με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert), όπως της διατομής του Σχήματος 2 (βλ. Κεφάλαιο 4.3). Η αριθμητική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε αστικές (ρηχές) σήραγγες, με το ύψος των υπερκείμενων γαιών (H) από τον άξονα της σήραγγας, να λαμβάνει τιμές 15, 30 και 40m. Στις αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώθηκαν περιπτώσεις εδαφών με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας αποτελούταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t= 30cm, δικτυωτά πλαίσια και αγκυρώσεις. Στο προσωρινό ανάστροφο τόξο, το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μοναδική υποστήριξη, ήταν 15cm. Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό αριθμητικό προσομοίωμα του παρόντος κεφαλαίου. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δεν ελήφθη υπόψιν οποιαδήποτε μορφή προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που σίγουρα θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση τόσο των συγκλίσεων της σήραγγας όσο και της εκδήλωσης των επιφανειακών καθιζήσεων.

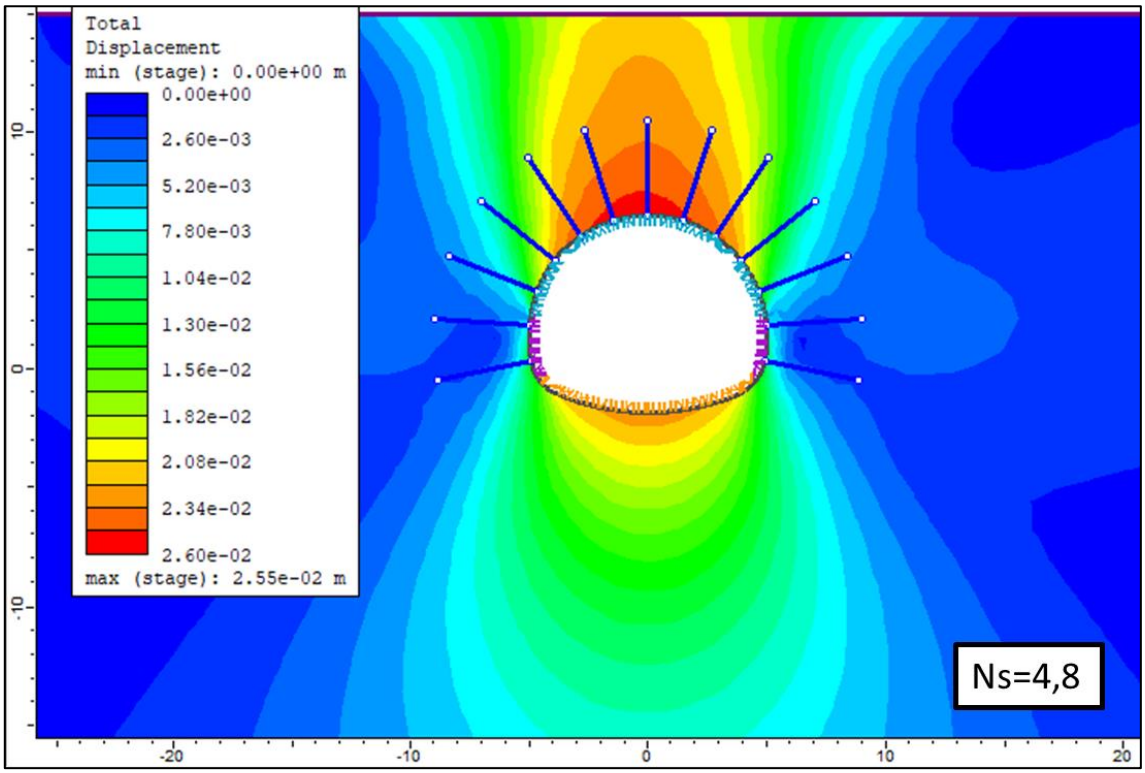


Εικόνα 61. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε δύο φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert).

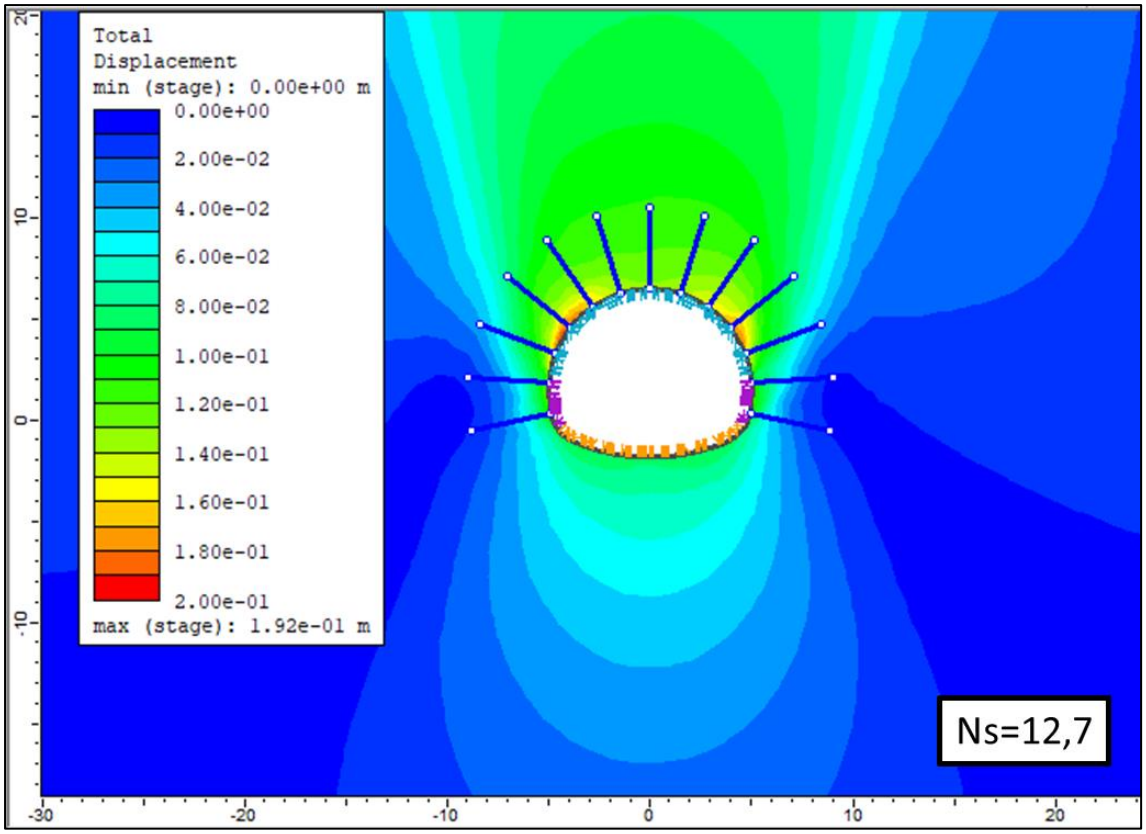
6.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής

Από το σύνολο των αναλύσεων του συγκεκριμένου κεφαλαίου, παρατηρήθηκε ότι κατά την τμηματική διάνοιξη της εκσκαφής, σημαντικό μέρος των τελικών συγκλίσεων έχει ήδη αναπτυχθεί από την εκσκαφή της Α΄ φάσης εκσκαφής (top heading) και την σκυροδέτηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου. Επίσης όπως είναι αναμενόμενο, σε ασθενή εδάφη το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων της σήραγγας είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι σε αντίστοιχες συνθήκες διάνοιξης με εδάφη καλύτερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και με την αύξηση του ύψους των υπερκείμενων γαιών, όπου οι συνθήκες διάνοιξης γίνονται δυσμενέστερες και οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες, από ότι σε πιο ρηχές σήραγγες. Αυτό μπορεί να εκφραστεί καλύτερα, μέσω του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), όπως αυτός έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5.1.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, βάσει του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s).

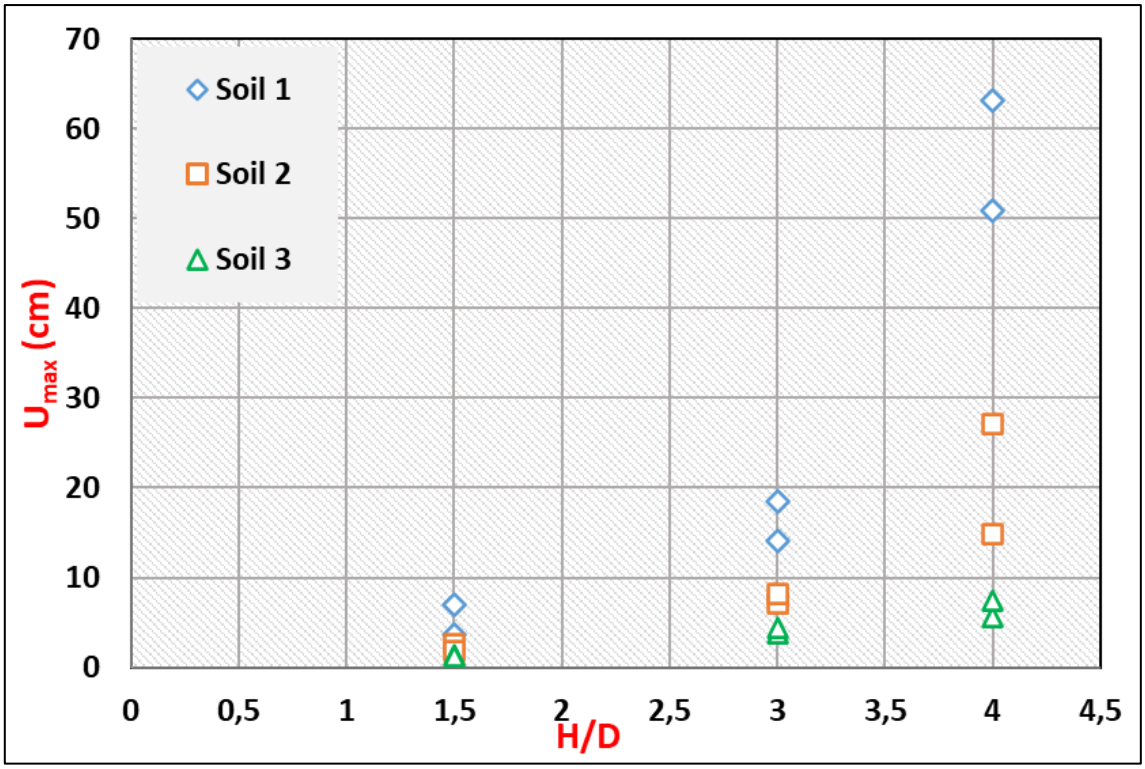


Εικόνα 62. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50



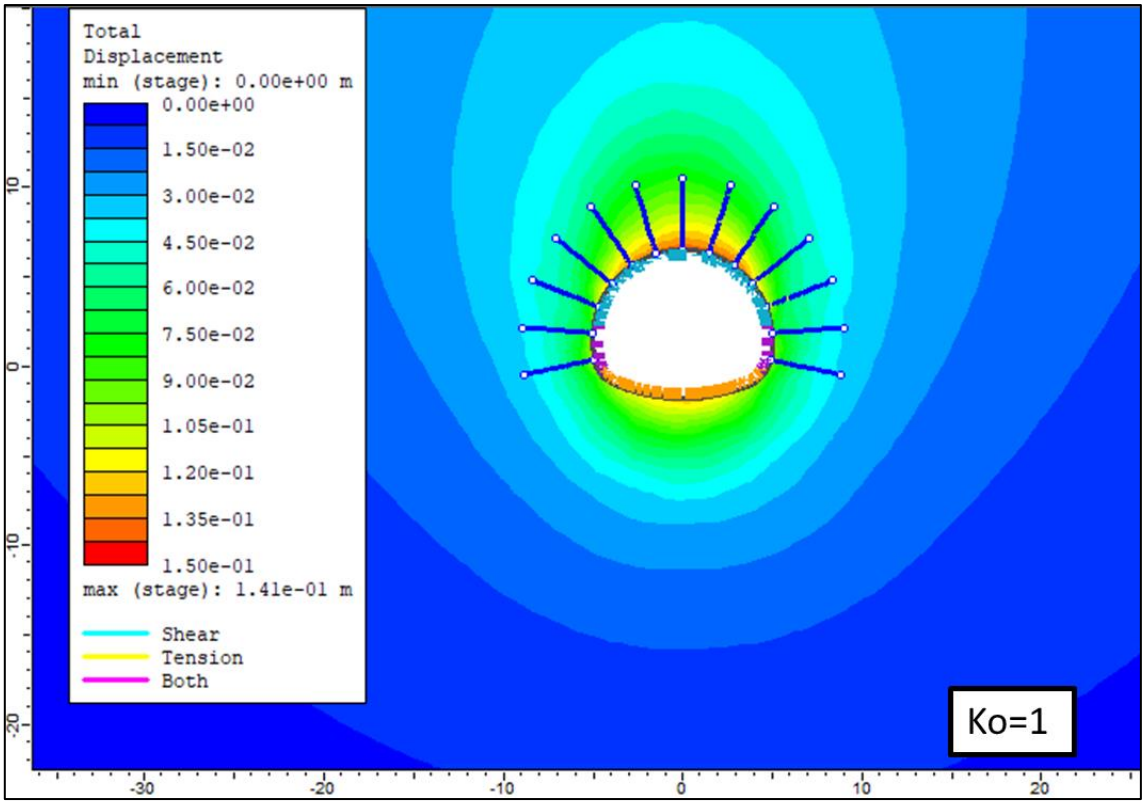
Εικόνα 63. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50

Η επιρροή του ύψους των υπερκείμενων γαιών (Η), στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, παρουσιάζεται στο ακόλουθο Διάγραμμα, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

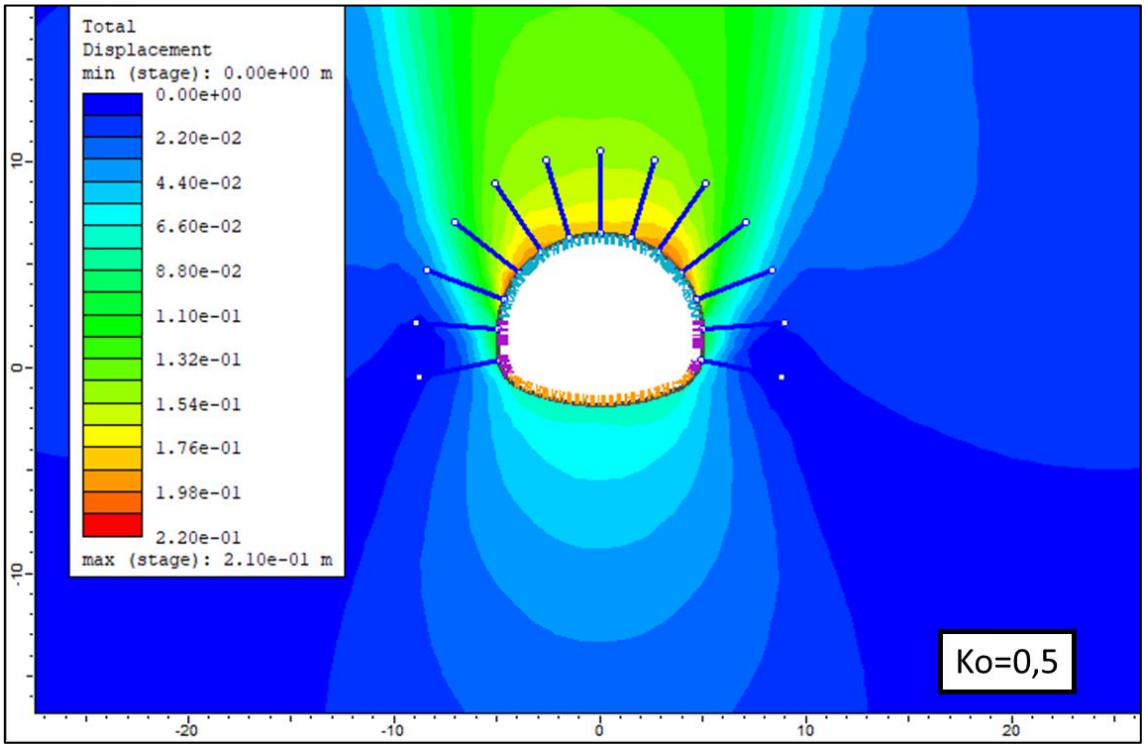


Διάγραμμα 9. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι πολύ σημαντική είναι και η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων (K_o) στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων και στην θέση εμφάνισης της μέγιστης σύγκλισης. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των αναλύσεων διαπιστώθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων είναι K_o = 0,5, οι αναπτυσσόμενες συγκρίσεις είναι μεγαλύτερες αριθμητικά για όλους τους τύπους των εδαφών από ότι στις περιπτώσεις για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1. Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη σύγκλιση (u_{max}) αναπτύσσεται στην στέψη της σήραγγας, με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις εδαφών με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1, όπου η μέγιστη σύγκλιση αναπτύχθηκε στις παρειές της εκσκαφής.



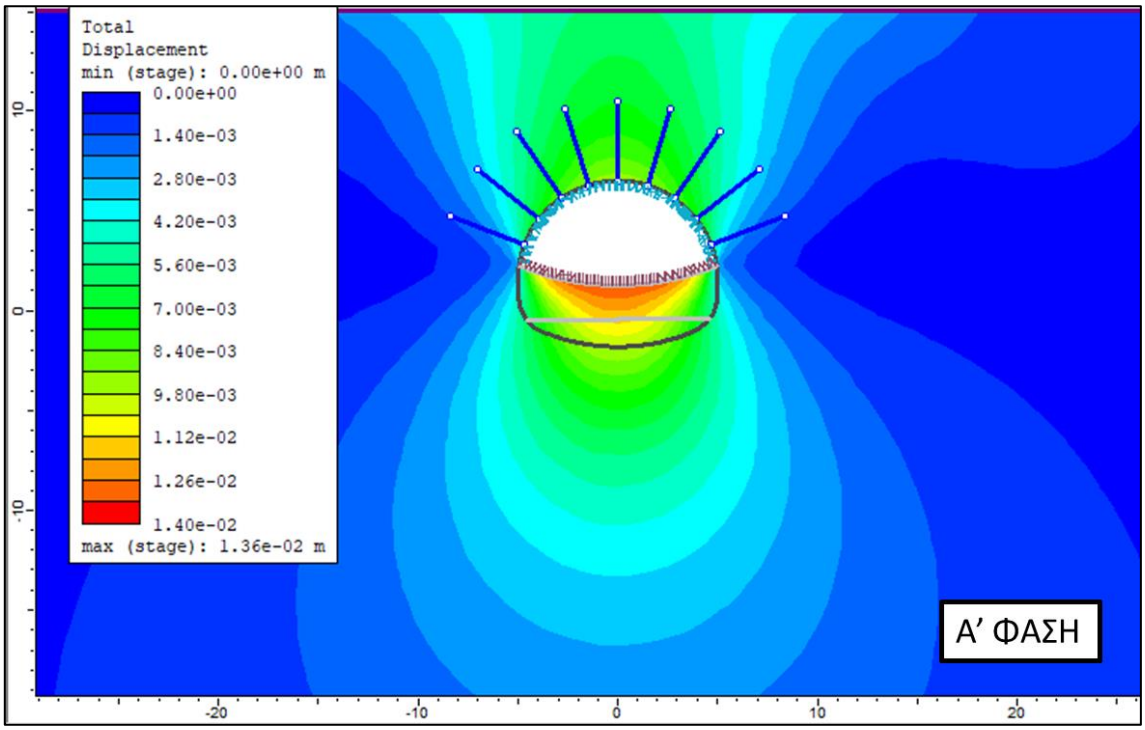
Εικόνα 64. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m



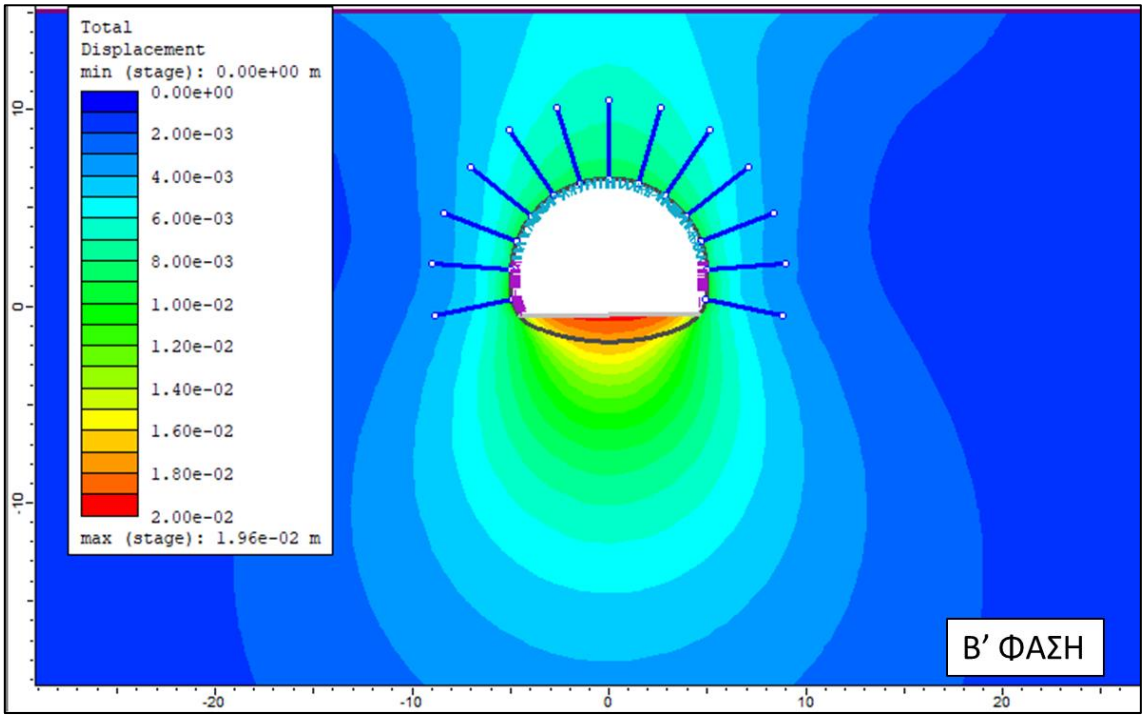
Εικόνα 65. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m

Επίσης από τις αριθμητικές αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι κατά την εκσκαφή της Α’ φάσης εκσκαφής και την σκυροδέτηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, αναπτύσσεται μεγάλο μέρος των τελικών

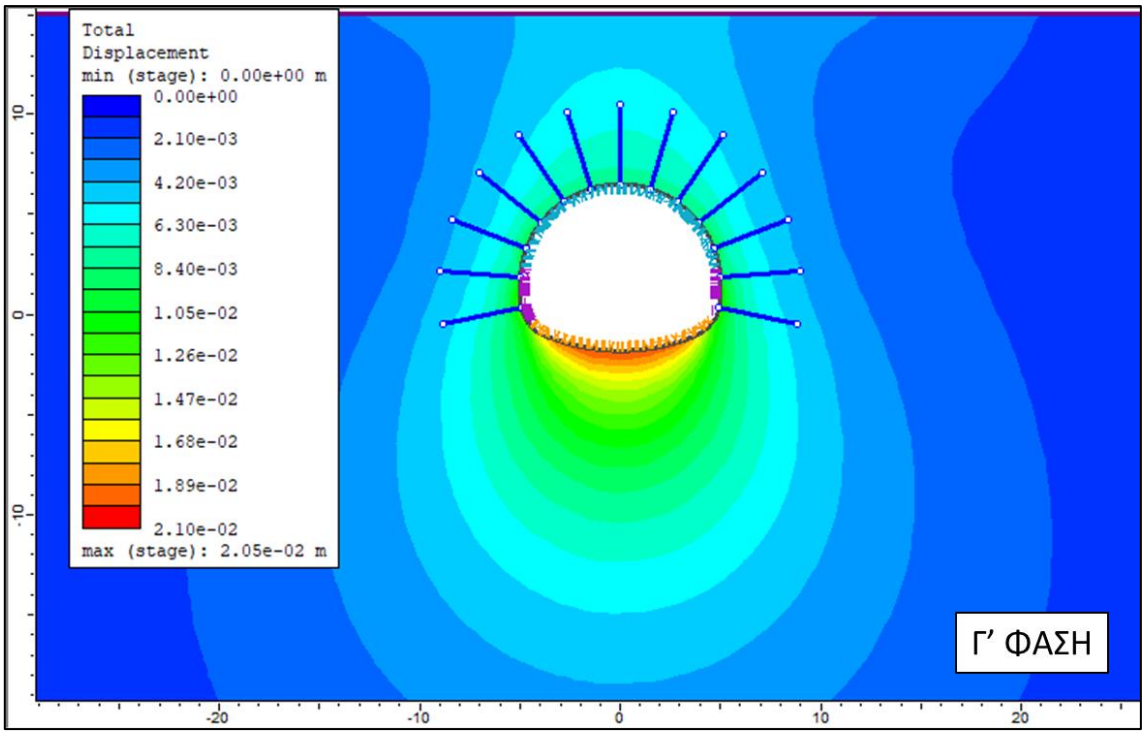
συγκλίσεων (u_{max}) σε σχέση με το ποσοστό αυτών όταν γίνει εκσκαφή της Β' φάσης (bench) και του τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Αυτό το συμπέρασμα, αποτυπώνεται στις ακόλουθες Εικόνες το αντίστοιχο διάγραμμα.



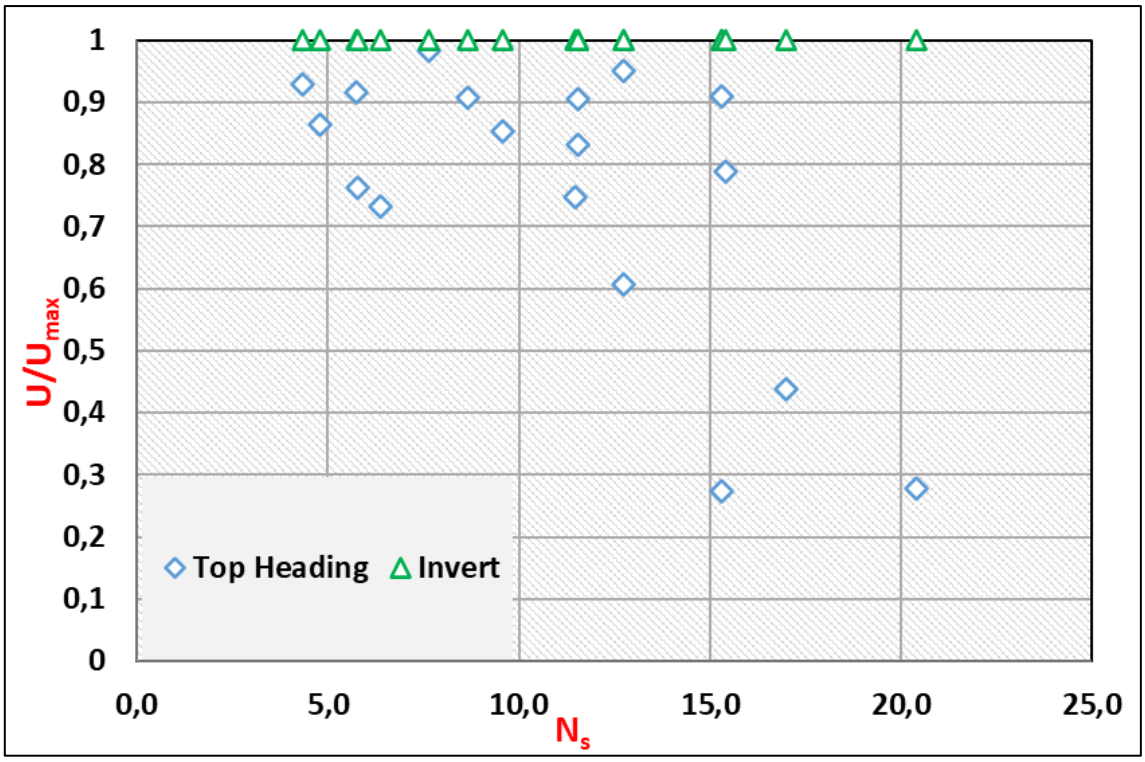
Εικόνα 66. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Α' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου.



Εικόνα 67. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης εκσκαφής.

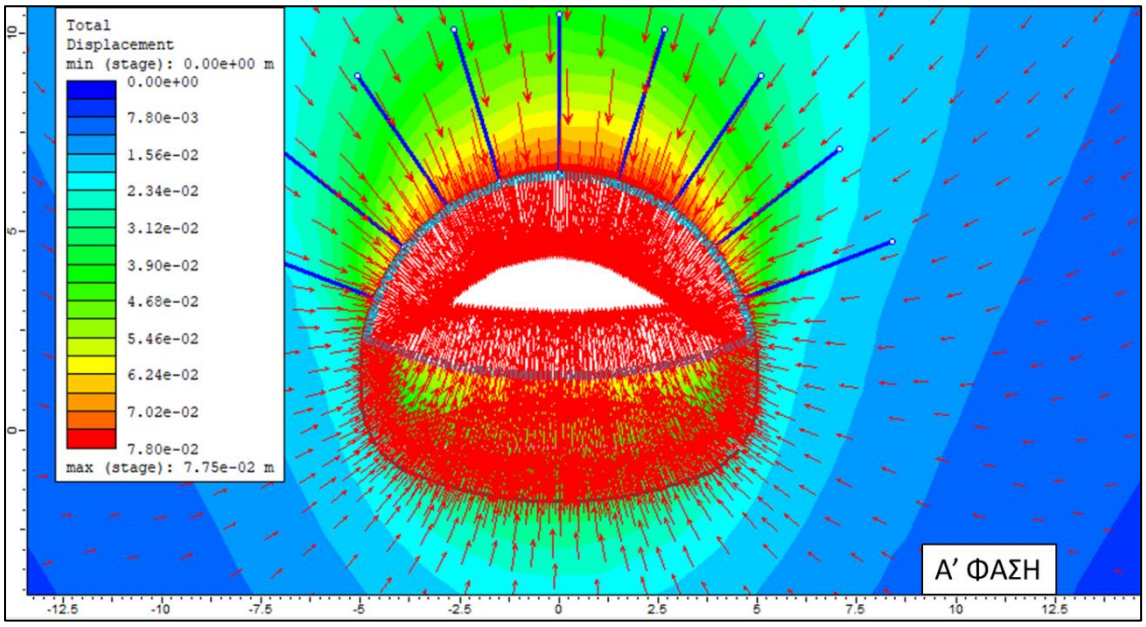


Εικόνα 68. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στην κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου.

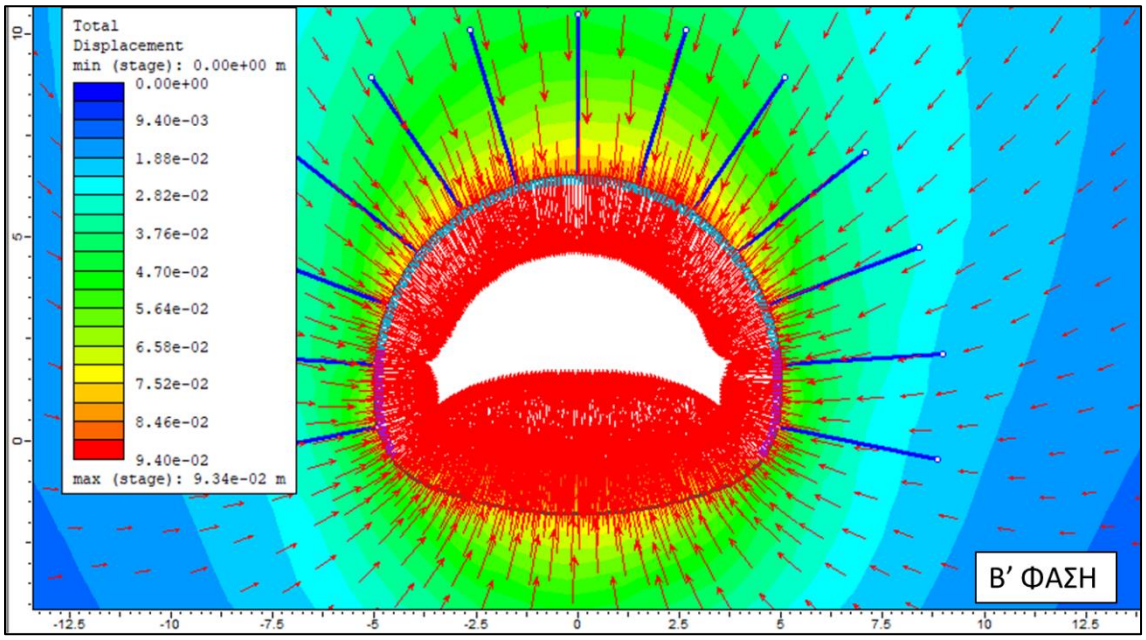


Διάγραμμα 10. Μεταβολή του λόγου (U/U_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

Τέλος από το σύνολο των αναλύσεων του κεφαλαίου αυτού, διαπιστώθηκε ότι τόσο στο προσωρινό ανάστροφο τόξο (temporary invert), όσο και στο τελικό ανάστροφο τόξο (final invert) υπήρχε ανύψωση του δαπέδου, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 69. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.



Εικόνα 70. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

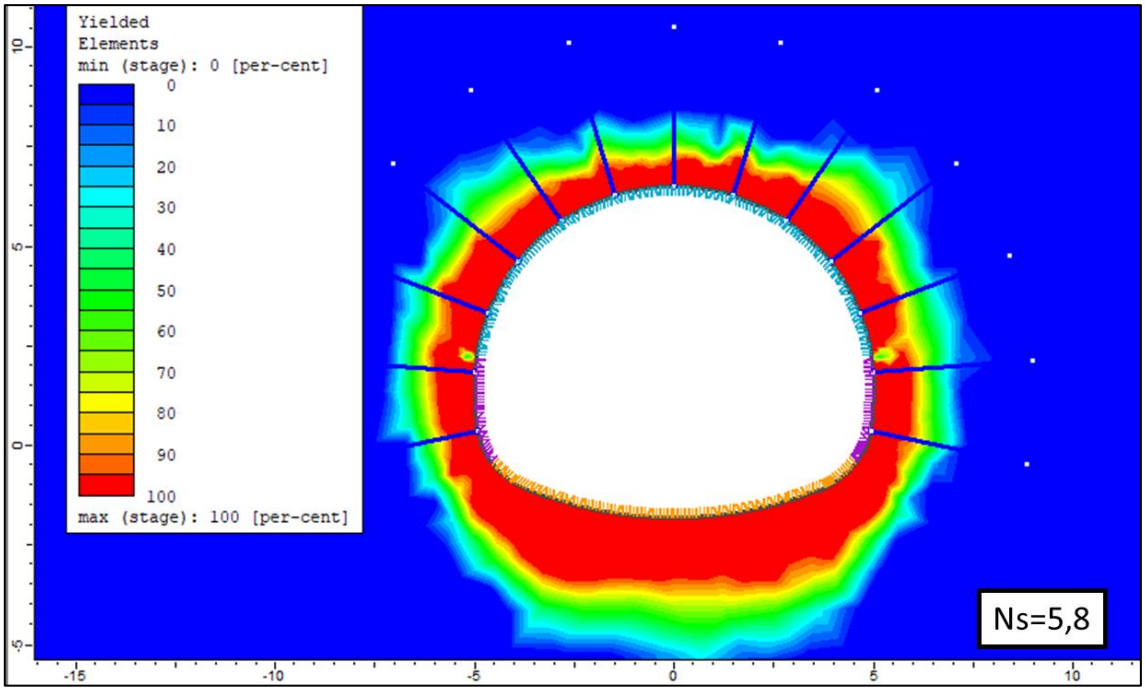
Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός της στροφής των τάσεων στην περιοχή του δαπέδου, επειδή υπάρχει η πλευρική παρεμπόδιση λόγω της προσωρινής υποστήριξης και οι τάσεις

«ανακουφίζονται» στο ελεύθερο τμήμα της εκσκαφής που είναι το δάπεδο και προκαλούν την ανύψωσή του.

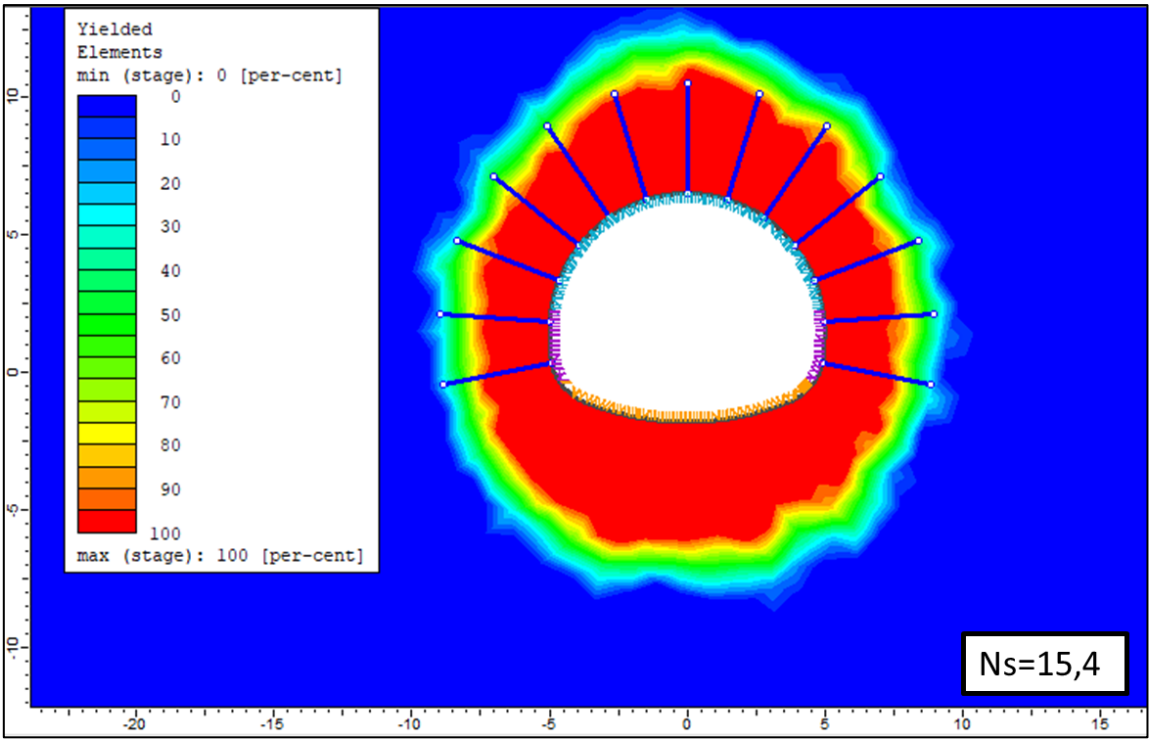
6.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας και καθώς το μέτωπο εκσκαφής προηγείται, έμπροσθεν αυτού αρχίζουν να αναπτύσσονται προσυγκλίσεις, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος αυτών να έχει αναπτυχθεί στην περιοχή του μετώπου, της τάξης του 30% των τελικών. Σε περιπτώσεις ασθενούς εδάφους και μεγάλου ύψους υπερκείμενων γαιών, το έδαφος τείνει να αστοχήσει με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς οι συγκλίσεις που αναπτύσσονται πλέον είναι εκτός της ελαστικής περιοχής και συνεπώς θα αναπτυχθεί πλαστική ζώνη, όπου το εύρος της θα είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, αυτό επιβεβαιώνεται και στις ακόλουθες εικόνες, όπου καταγράφεται η αύξηση του εύρους της πλαστικής ζώνης όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

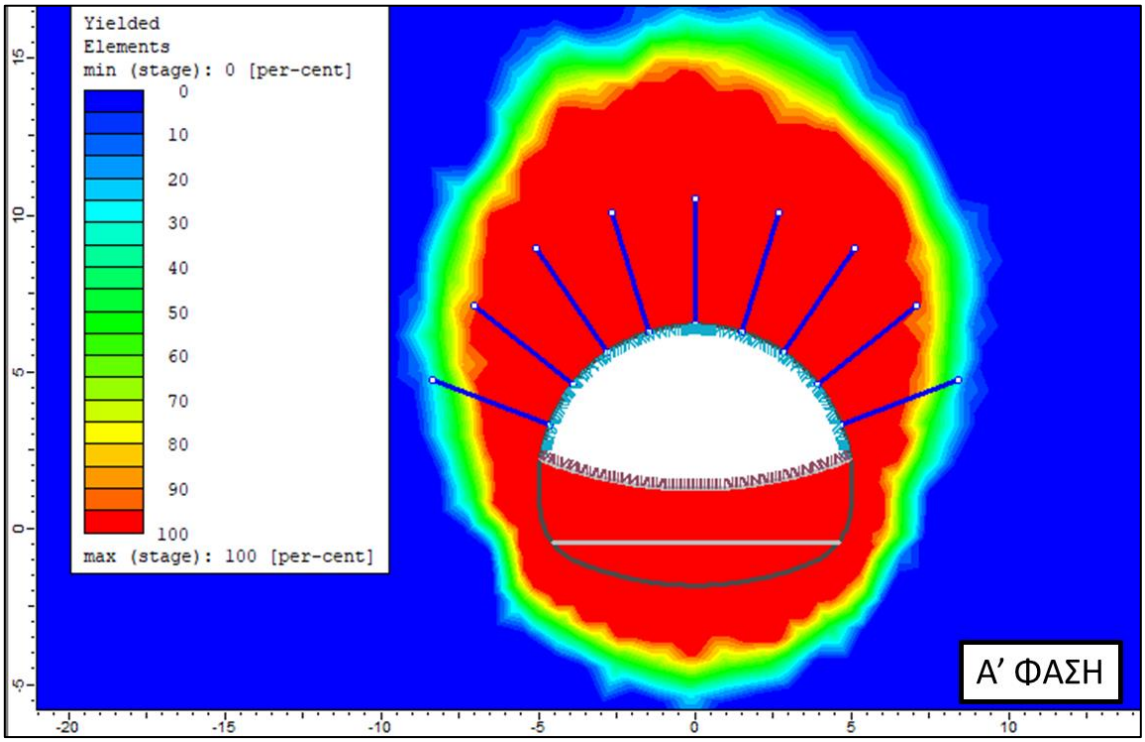


Εικόνα 71. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1.

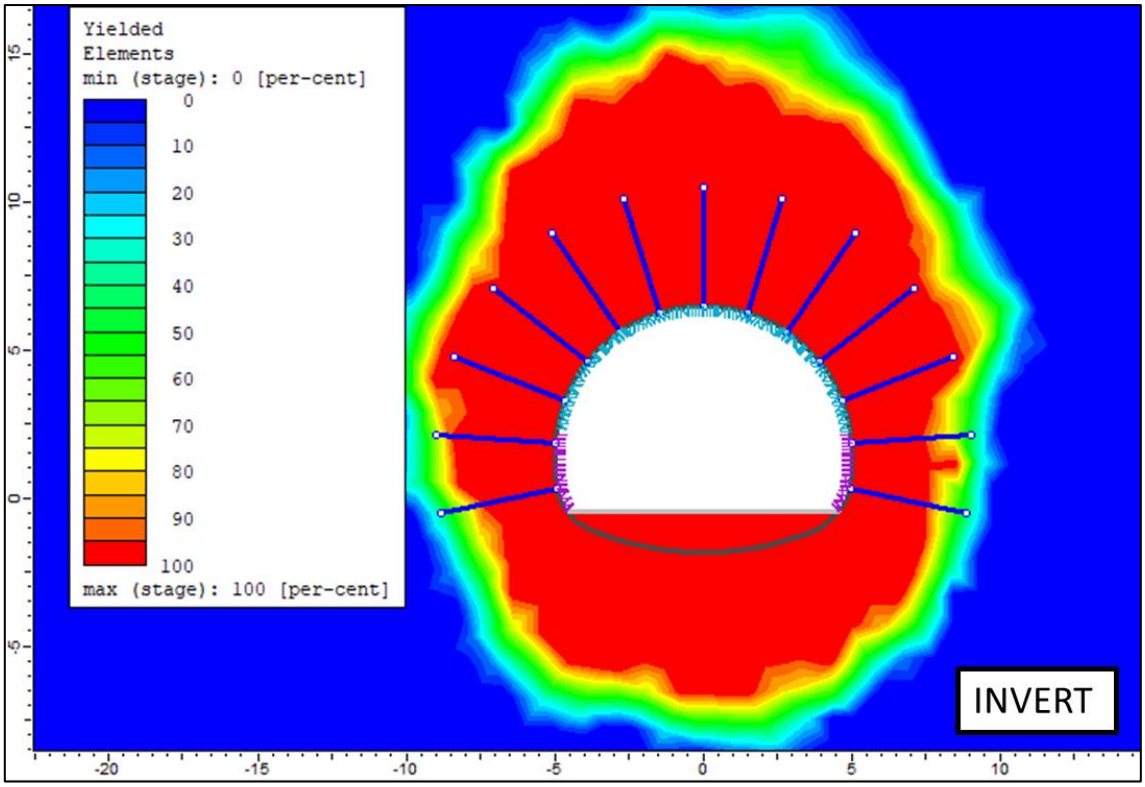


Εικόνα 72. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1.

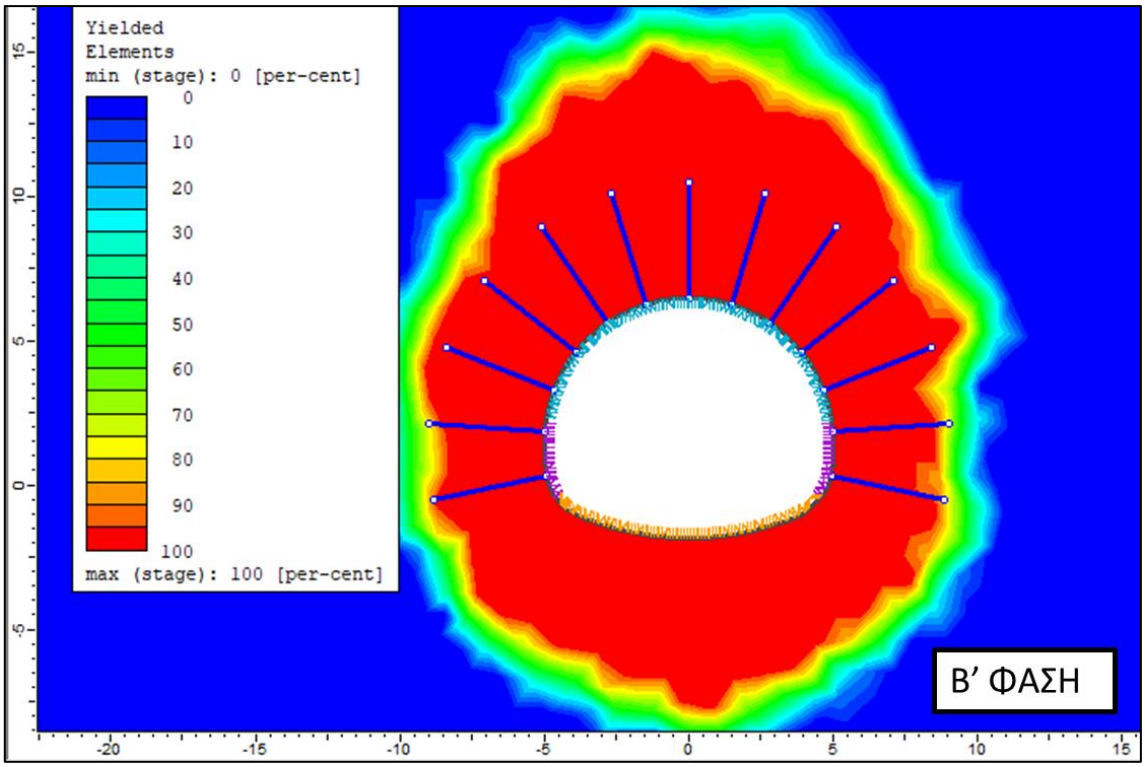
Επίσης κατά την τμηματική εκσκαφή, διαπιστώθηκε ότι καθώς αναπτύσσεται η εκσκαφή, υπάρχει και ανάλογη ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 73. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Α' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.



Εικόνα 74. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος του ανάστροφου τόξου (invert) στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.

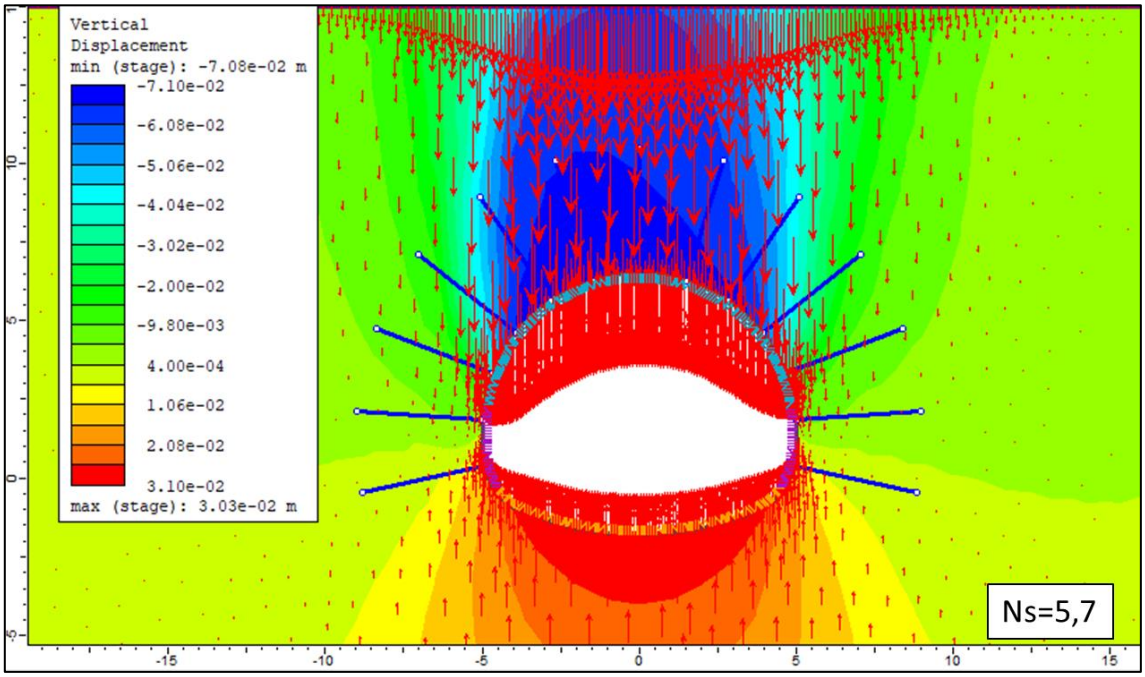


Εικόνα 75. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Β' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.

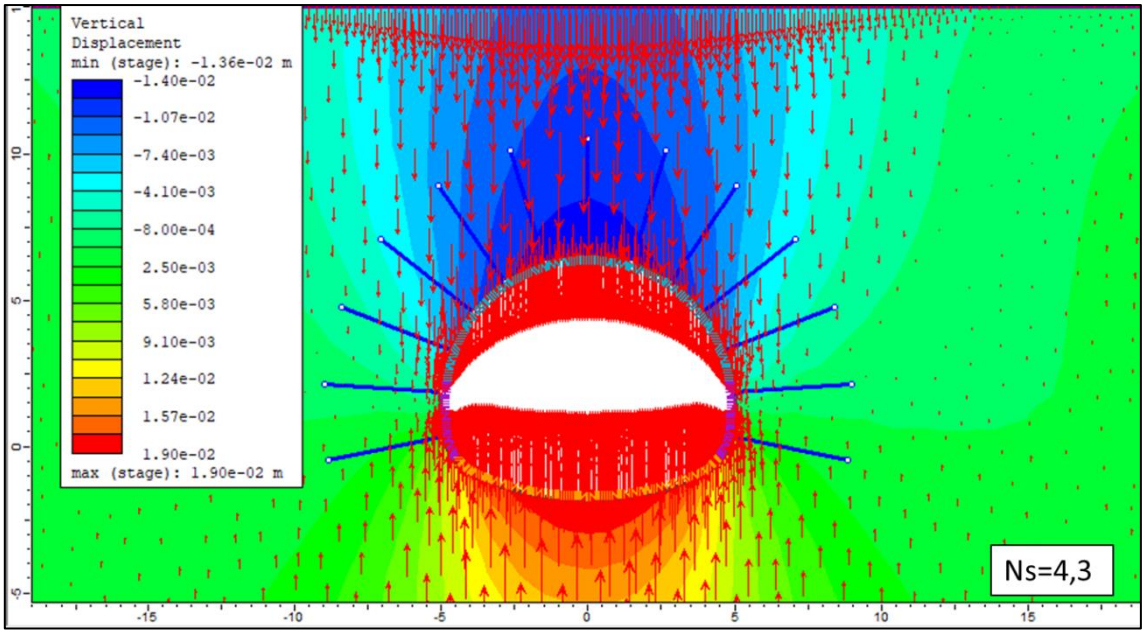
Τέλος από τις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, προέκυψε ότι το μέγιστο εύρος πλαστικής ζώνης είναι **7,90 m**.

6.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων

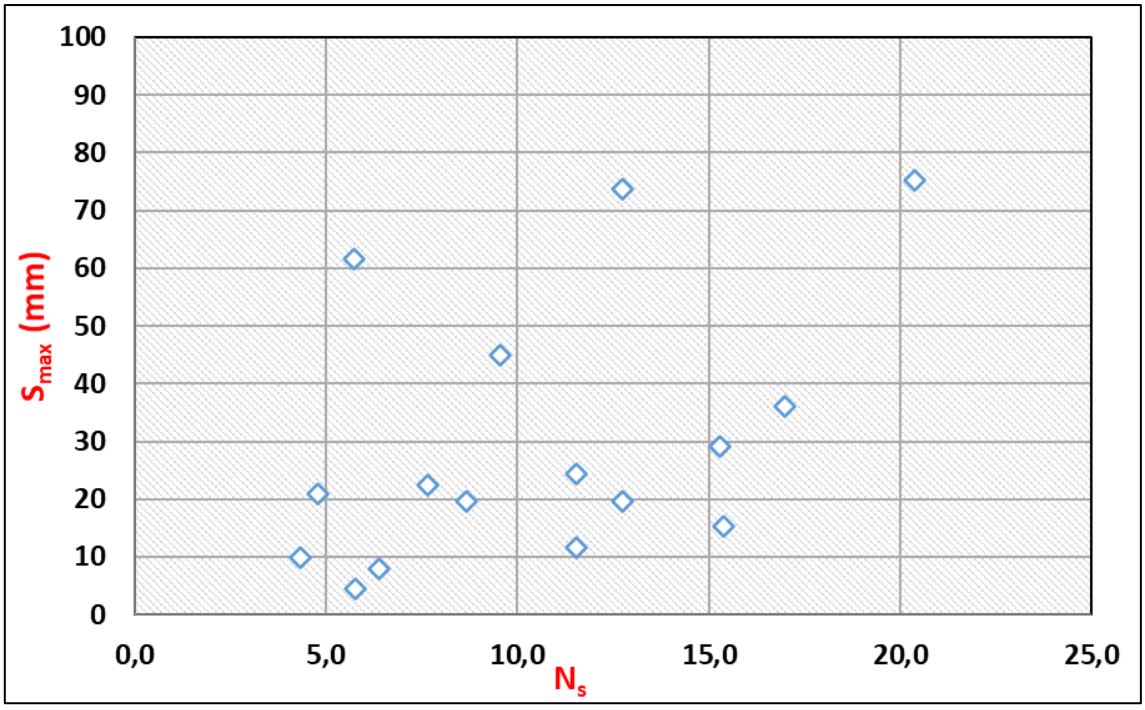
Λόγω της εξέτασης εκσκαφών σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, υπάρχει άμεση επιρροή αυτών στην επιφάνεια, μέσω της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων (s). Συγκεκριμένα, λόγω της απώλειας εδαφικής μάζας από την εκσκαφή της σήραγγας, θα προκληθεί ανάπτυξη επιφανειακής καθίζησης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απώλεια, δηλαδή μεγάλες συγκλίσεις της εκσκαφής, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι καθιζήσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις ακόλουθες Εικόνες και αντικατοπτρίζεται καλύτερα στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Εικόνα 76. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 5,7.



Εικόνα 77. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 4,3.

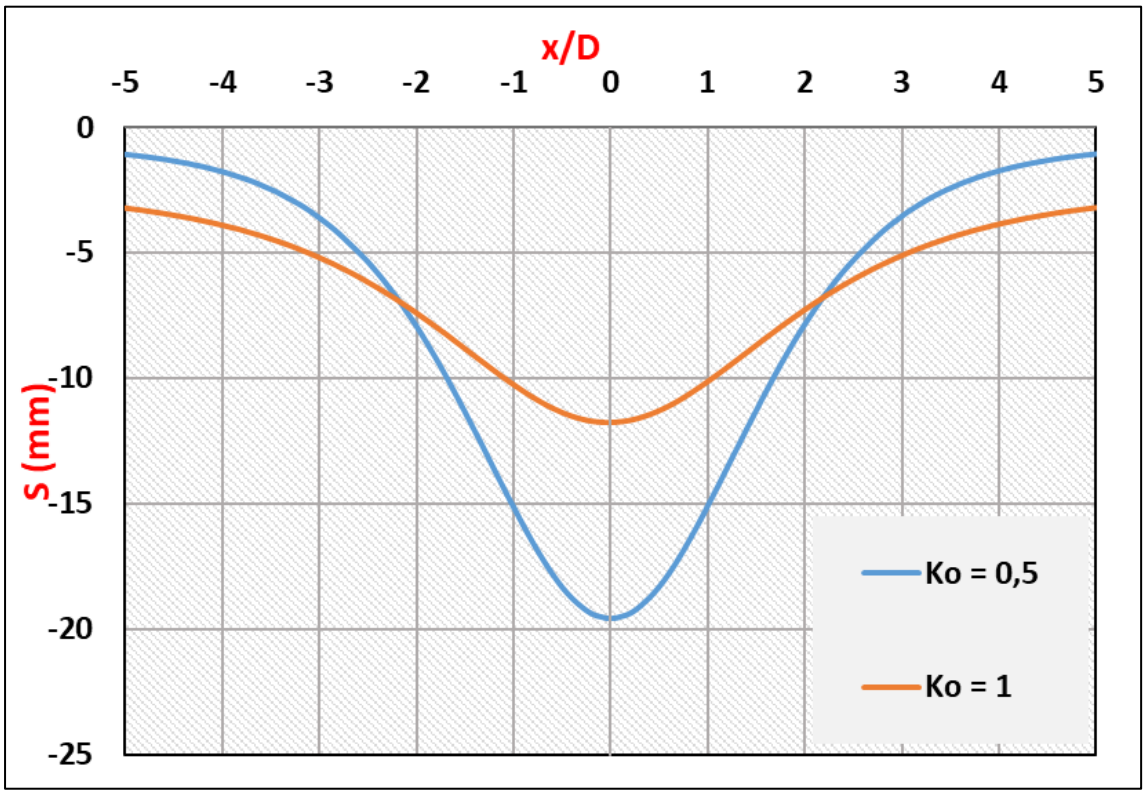


Διάγραμμα 11. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με τελικό ανάστροφο τόξο.

Από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι αναπτύσσεται μια καμπύλη καθιζήσεων μορφής Gauss, με την μέγιστη βύθιση (καθίζηση) να αναπτύσσεται ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν συνθήκες ελεύθερου πεδίου (green field) και δεν υπάρχουν

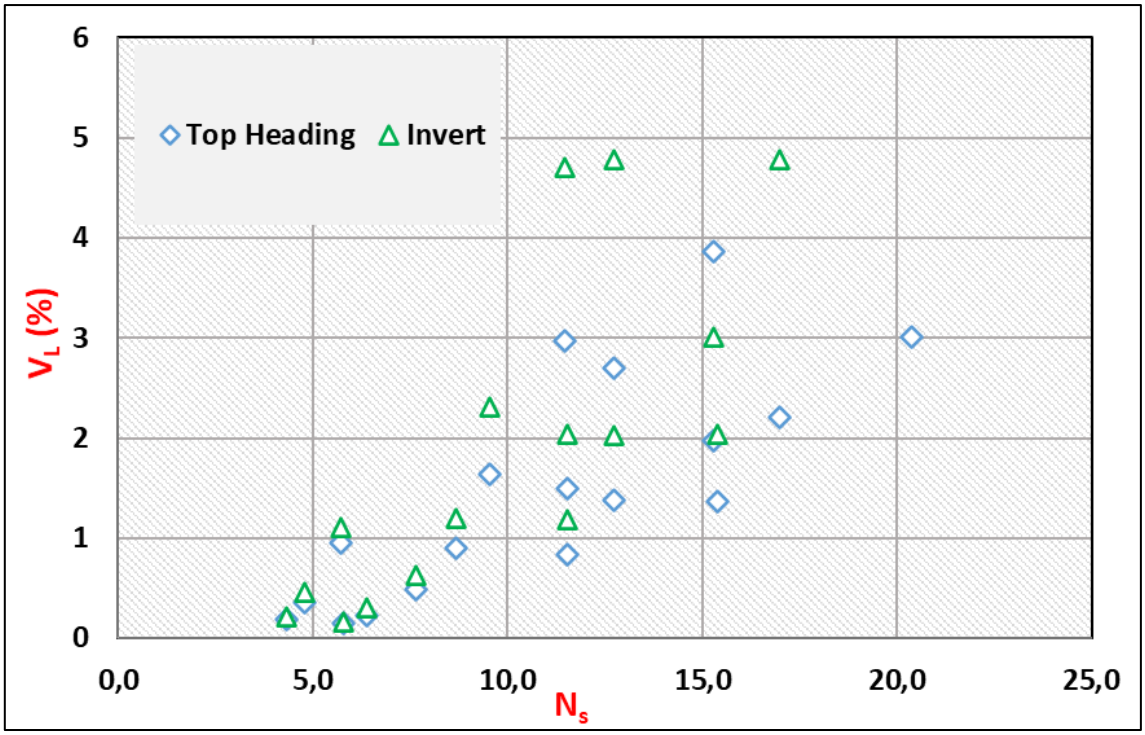
υπερκείμενες κατασκευές ή άλλες σήραγγες, ώστε να προκαλείται άλλης μορφής καμπύλη καθιζήσεων.

Μια βασική παράμετρος που έχει επιρροή στην μορφή και το μέγεθος των καθιζήσεων (s) είναι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o). Με βάσει τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι όταν ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_o = 0,5 οι καθιζήσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες και η καμπύλη παρουσιάζει εκτεταμένη βύθιση, από ότι στην περίπτωση όπου το K_o = 1 όπου εκεί οι καθιζήσεις είναι μικρότερες και η καμπύλη είναι ομαλή χωρίς μεγάλη βύθιση. Το συμπέρασμα αυτό αποτυπώνεται στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Διάγραμμα 12. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S3 με υπερκείμενα H=30m.

Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα, αποτυπώνεται η επιρροή της επιφάνειας εκσκαφής (φάσεις εκσκαφής) στο ποσοστό της απώλειας εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής. Συγκείμενα προκύπτει το συμπέρασμα, ότι ήδη από την Α' φάση εκσκαφής έχει προκληθεί σημαντική απώλεια εδαφικού όγκου (V_L), όπου σε ασθενή εδάφη φτάνει και σε ποσοστό της τάξης του 4%.

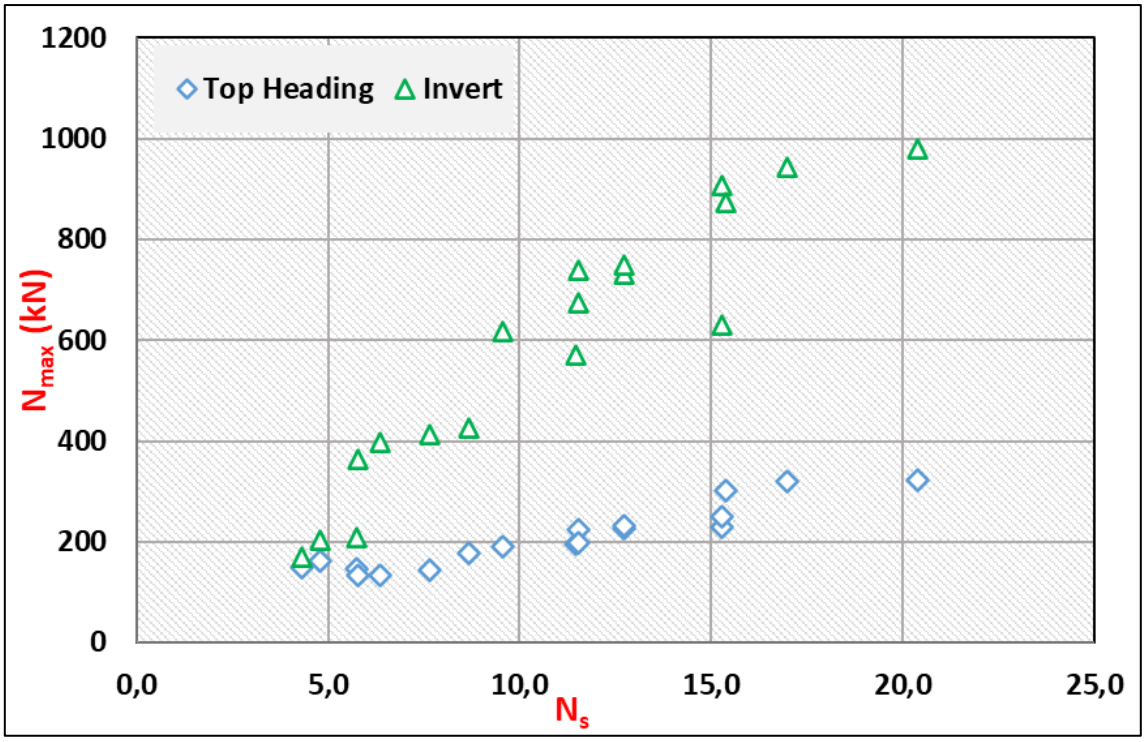


Διάγραμμα 13. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

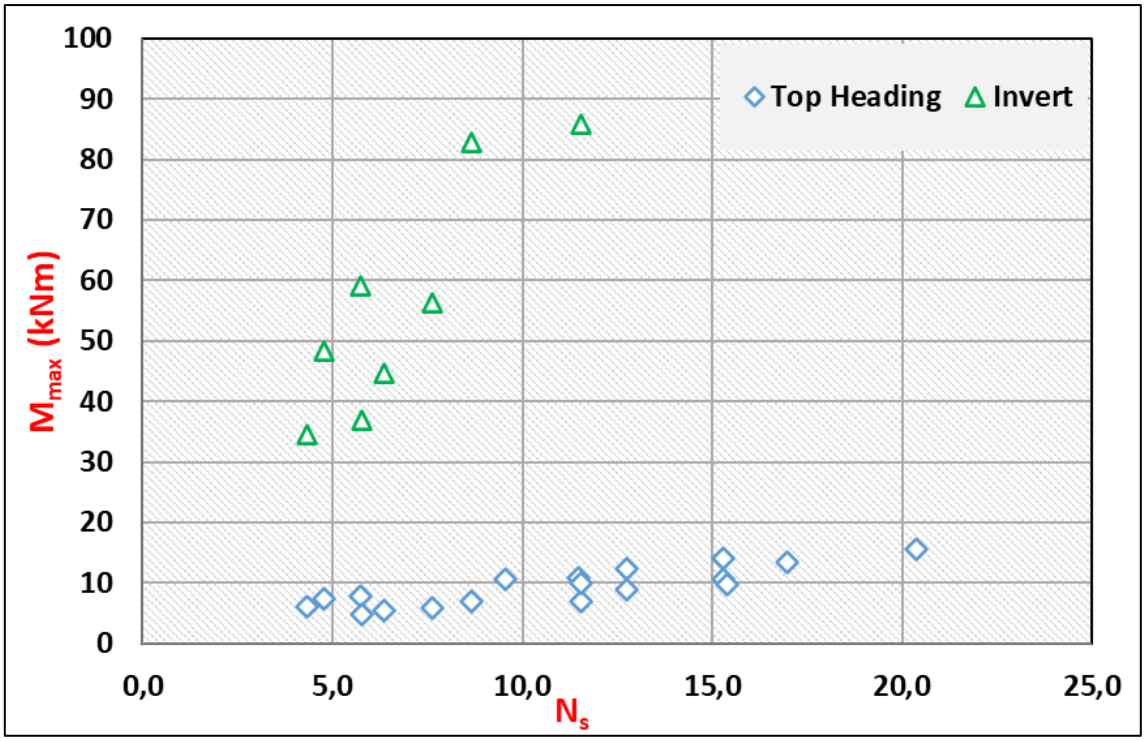
6.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη

Από το σύνολο των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκε καταγραφή της μέγιστης αξονικής δύναμης (axial force), καθώς και της μέγιστης καμπτικής ροπής (bending moment) σε κάθε στάδιο εκσκαφής.

Αρχικά διαπιστώθηκε, ότι οι μέγιστες καμπτικές ροπές σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις αναπτύσσονται πάντα στην γωνία μεταξύ του δαπέδου εργασίας και της προσωρινής υποστήριξης, λόγω του σχηματισμού αυτής της γωνίας. Επίσης η θέση της μέγιστης αξονικής δύναμης στην προσωρινή υποστήριξη δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται τόσο σε μορφή (θλιβόμενη ή εφελκυόμενη περιοχή) καθώς και σε θέση στην περίμετρο της εκσκαφής, με την πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν να βρίσκεται στις παρειές αυτής. Στα ακόλουθα Διαγράμματα παρουσιάζονται τα μέγιστα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη της προσωρινής υποστήριξης, που καταγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

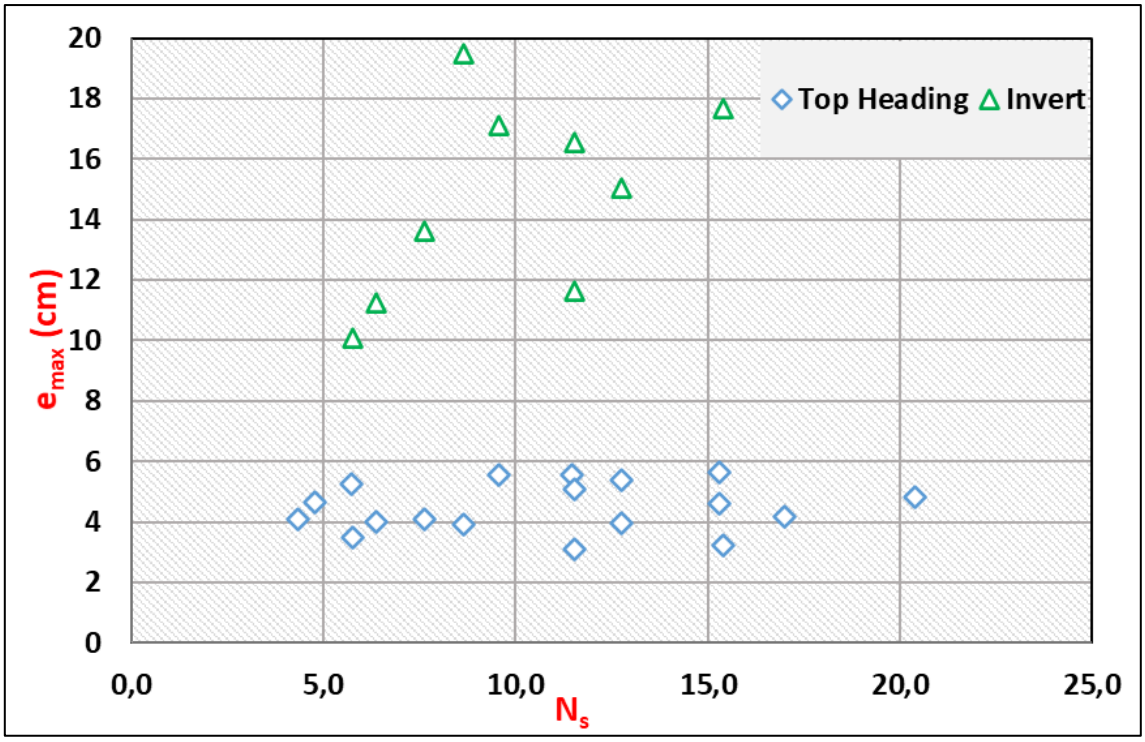


Διάγραμμα 14. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.



Διάγραμμα 15. Μέγιστη καμπτική ροπή (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) που αναπτύχθηκε στην προσωρινή υποστήριξη των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου.

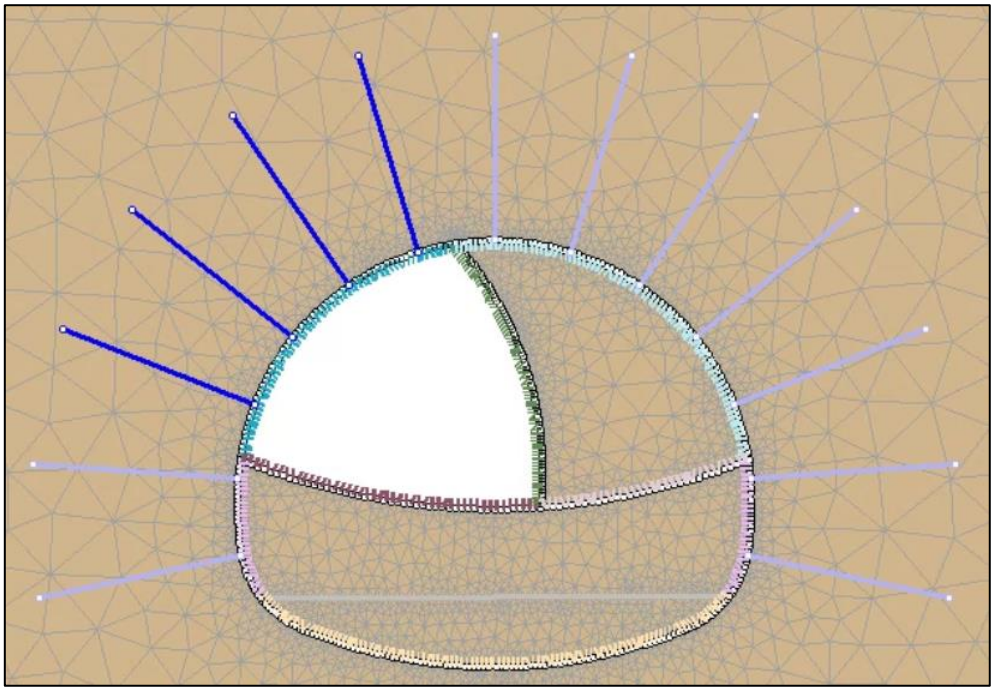


Διάγραμμα 16. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

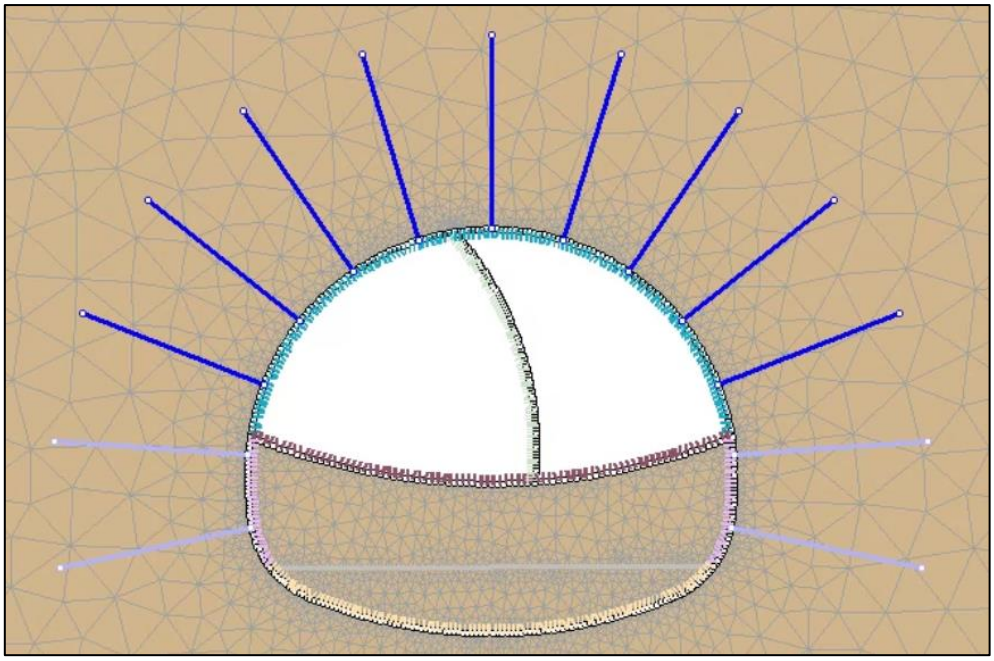
7. Τμηματική Εκσκαφή Σήραγγας σε Τέσσερις Φάσεις με Προσωρινό και Τελικό Ανάστροφο Τόξο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αριθμητική διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σήραγγας, σε τέσσερις φάσεις εκσκαφής με την υποδιαίρεση της Α' φάσης εκσκαφής (top heading) σε δύο τμήματα και την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert), όπως της διατομής του Σχήματος 3 (βλ. Κεφάλαιο 4.3). Η αριθμητική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε αστικές (ρηχές)

σήραγγες, με το ύψος των υπερκείμενων γαιών (H) από τον άξονα της σήραγγας, να λαμβάνει τιμές 15, 30 και 40m. Στις αριθμητικές αναλύσεις προσομοιώθηκαν περιπτώσεις εδαφών με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας αποτελούταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t= 30cm, δικτυωτά πλαίσια και αγκυρώσεις. Στο προσωρινό ανάστροφο τόξο, το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μοναδική υποστήριξη, ήταν 15cm, ενώ στα προσωρινά τοιχώματα των ενδιάμεσων φάσεων στην Α' φάση εκσκαφής (top heading), τοποθετήθηκε δικτυωτό πλαίσιο και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t= 20cm, το οποίο καθαιρέθηκε στην συνέχεια. Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό αριθμητικό προσομοίωμα του παρόντος κεφαλαίου, όπου φαίνεται η τμηματική υποδιαίρεση της Α' φάσης εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δεν ελήφθη υπόψιν οποιαδήποτε μορφή προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που σίγουρα θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση τόσο των συγκλίσεων της σήραγγας όσο και της εκδήλωσης των επιφανειακών καθιζήσεων.



Εικόνα 78. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Εδώ διακρίνεται η υποδιαίρεση της Α' φάσης εκσκαφής.

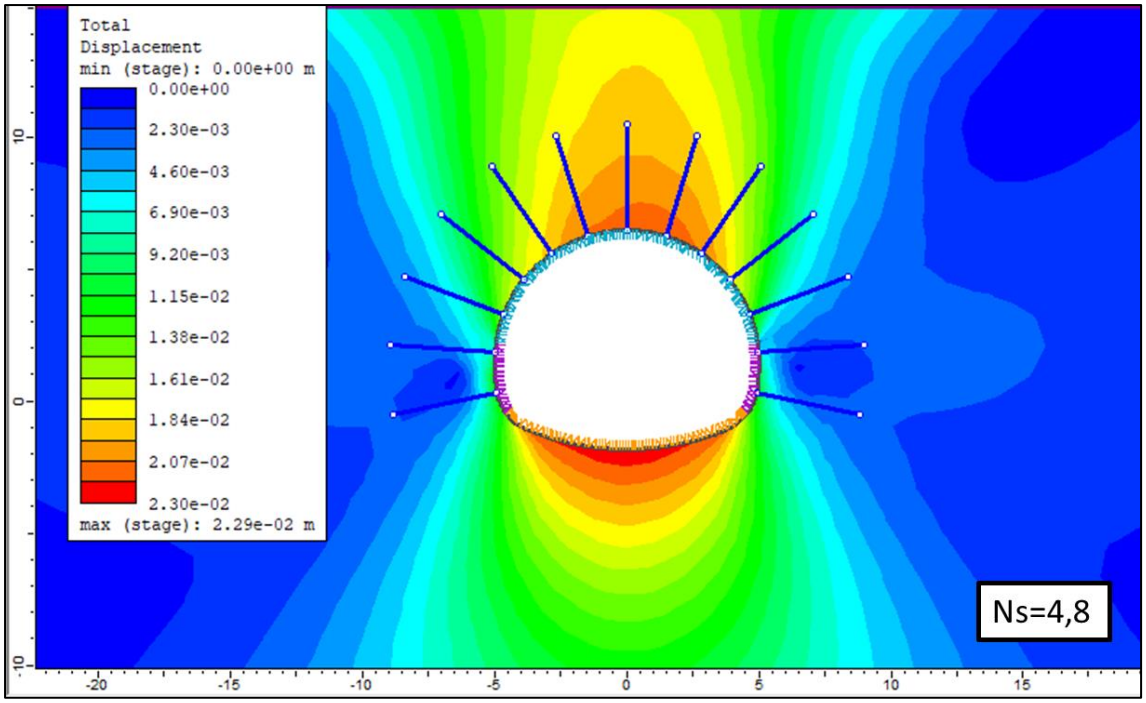


Εικόνα 79. Αριθμητικό προσομοίωμα της τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με την κατασκευή προσωρινού αλλά και τελικού ανάστροφου τόξου (invert). Εδώ διακρίνεται η ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής.

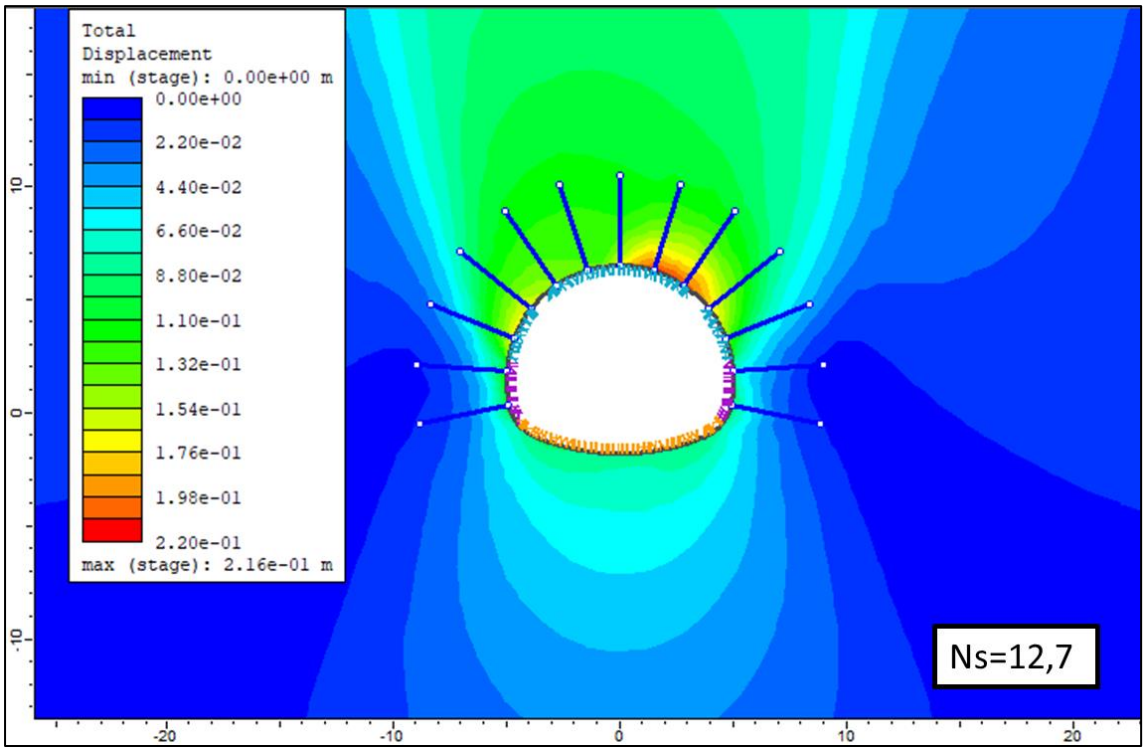
7.1. Ανάπτυξη Συγκλίσεων Περιμετρικά της Εκσκαφής

Από το σύνολο των αναλύσεων του συγκεκριμένου κεφαλαίου, παρατηρήθηκε ότι κατά την τμηματική διάνοιξη της εκσκαφής και ειδικότερα κατά την υποδιαίρεση της Α΄ φάσης εκσκαφής, σημαντικό μέρος των τελικών συγκλίσεων έχει ήδη αναπτυχθεί. Επίσης όπως είναι αναμενόμενο, σε ασθενή εδάφη το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων της σήραγγας είναι πολύ μεγαλύτερα από ότι σε αντίστοιχες συνθήκες διάνοιξης με εδάφη καλυτέρων μηχανικών χαρακτηριστικών. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και με την αύξηση του ύψους των υπερκείμενών γαιών, όπου οι συνθήκες διάνοιξης γίνονται δυσμενέστερες και οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες, από ότι σε πιο ρηχές σήραγγες. Αυτό μπορεί να εκφραστεί καλύτερα, μέσω του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), όπως αυτός έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5.1.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, βάσει του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s).

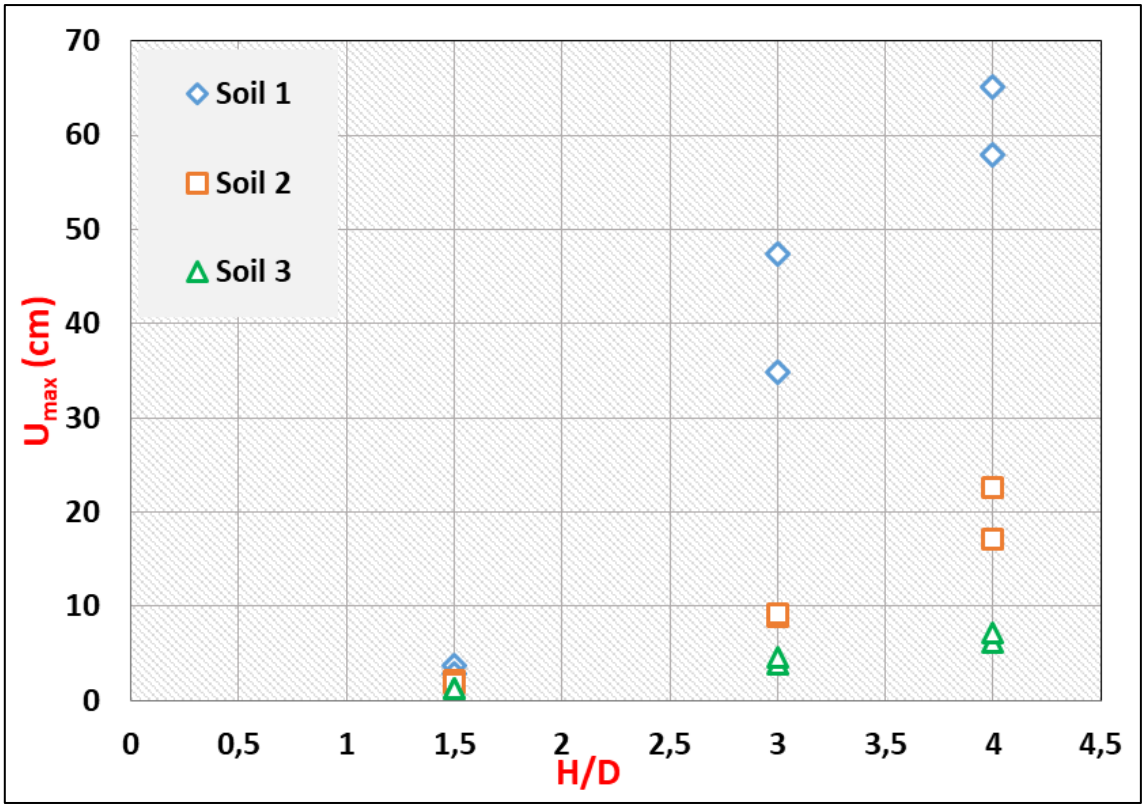


Εικόνα 80. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S2, H=15m , K_o=0,50



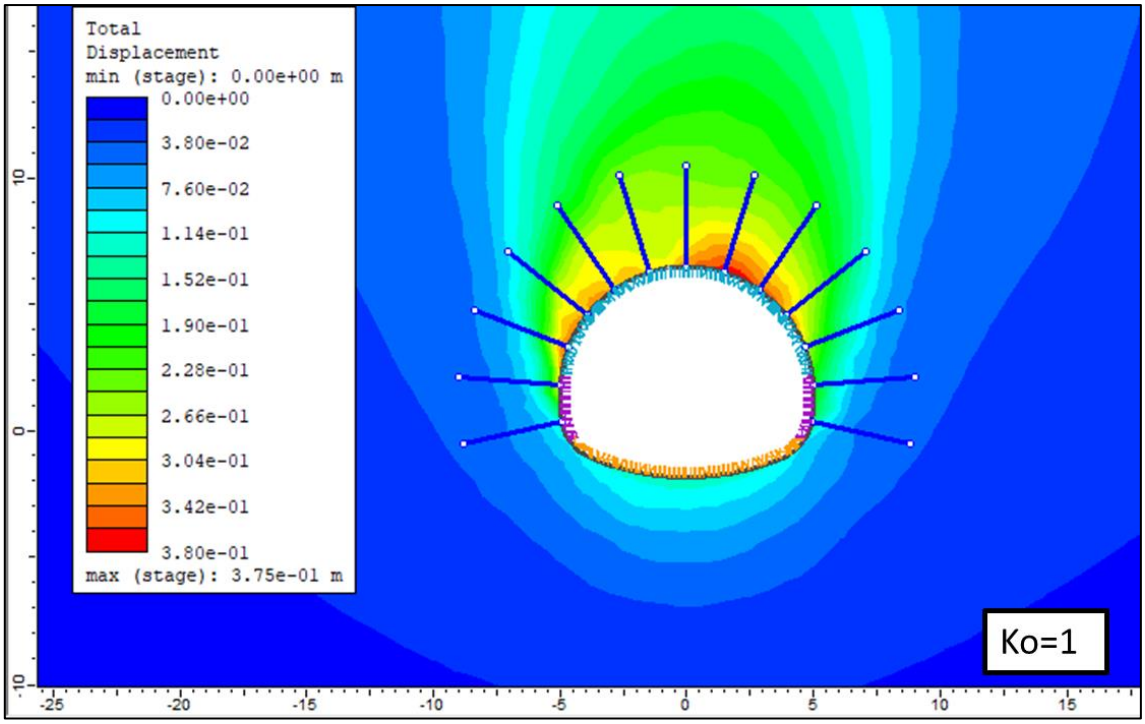
Εικόνα 81. Συγκλίσεις (total displacements) για το έδαφος S2, H=40m , K_o=0,50

Η επιρροή του ύψους των υπερκείμενων γαιών (Η), στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής, παρουσιάζεται στο ακόλουθο Διάγραμμα, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

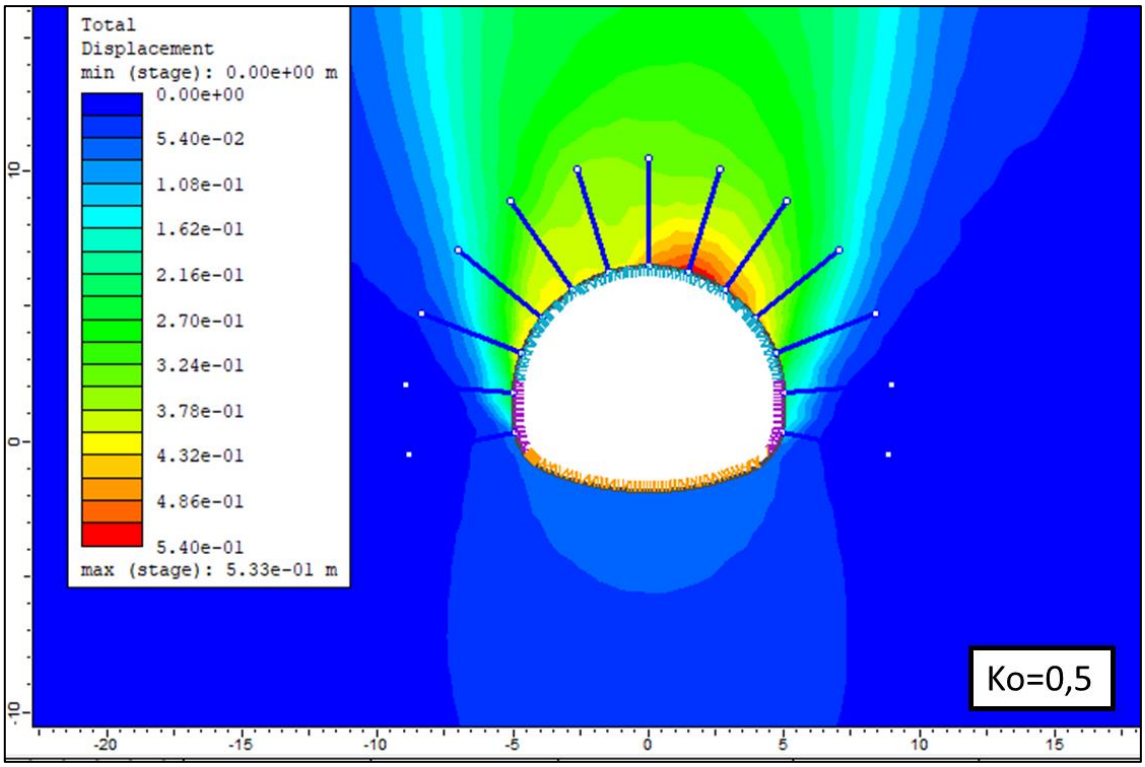


Διάγραμμα 17. Συσχέτιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης σύγκλισης (U_{max}) σε σχέση με τον λόγο H/D για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι πολύ σημαντική είναι και η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων (K_o) στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων και στην θέση εμφάνισης της μέγιστης σύγκλισης. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των αναλύσεων διαπιστώθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_o = 0,5, οι αναπτυσσόμενες συγκρίσεις είναι μεγαλύτερες αριθμητικά για όλους τους τύπους των εδαφών από ότι στις περιπτώσεις για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1. Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφάλαιού, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη σύγκλιση (u_{max}) αναπτύσσεται στην στέψη της σήραγγας, με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις εδαφών με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o = 1, όπου η μέγιστη σύγκλιση αναπτύχθηκε στις παρειές της εκσκαφής.



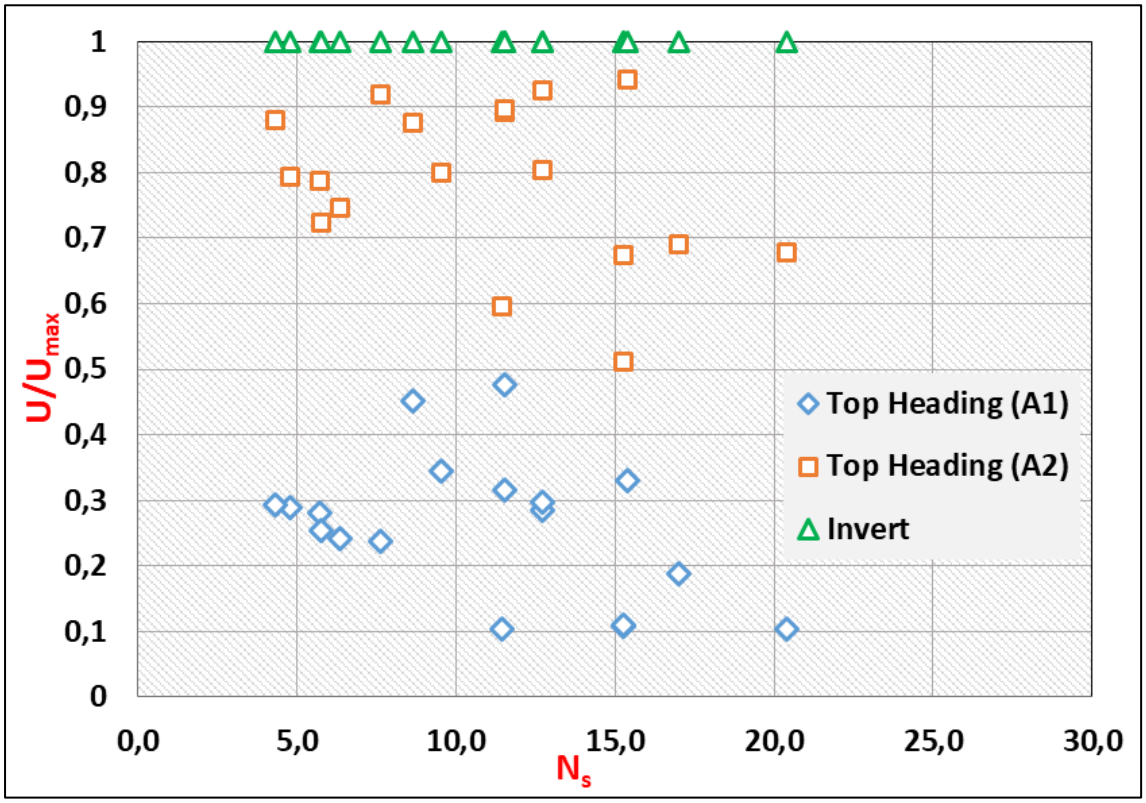
Εικόνα 82. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m



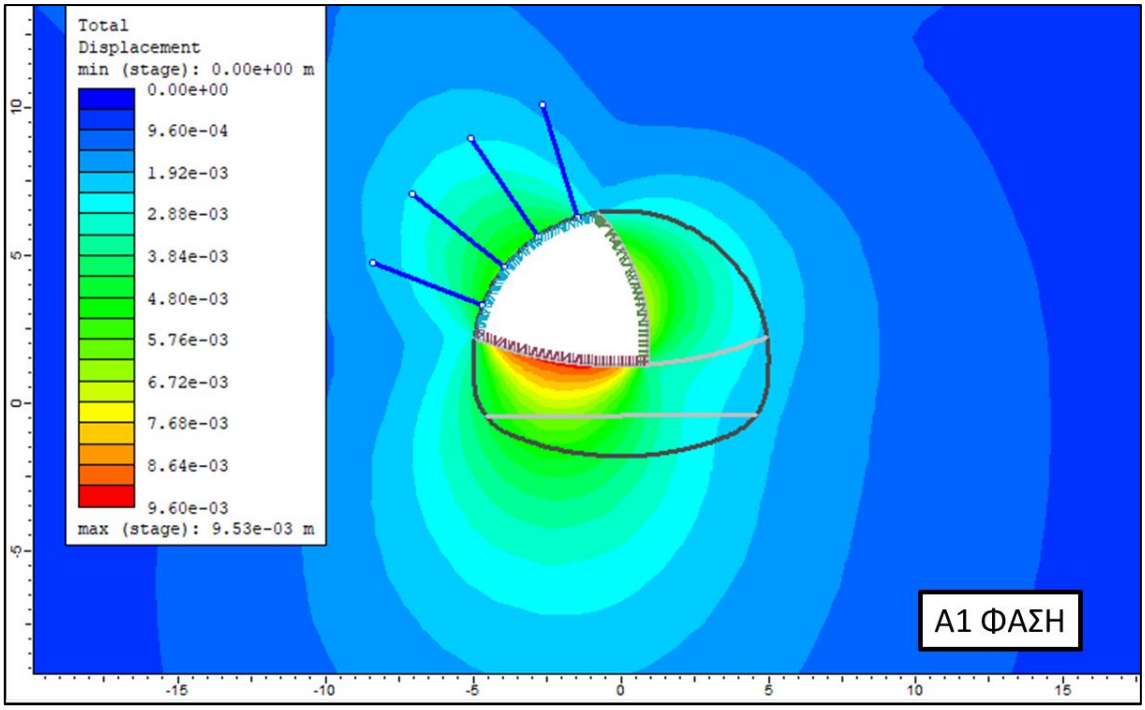
Εικόνα 83. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S1, H=30m

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, ότι είδη από την εκσκαφή του πρώτου μισού τμήματος της άνω ημιδιατομής (top heading), μεγάλο ποσοστό των τελικών συγκλίσεων έχει αρχίσει να αναπτύσσεται, όπως αποτυπώνεται και στο ακόλουθο Διάγραμμα. Στην συνέχεια με την ολοκλήρωση και των

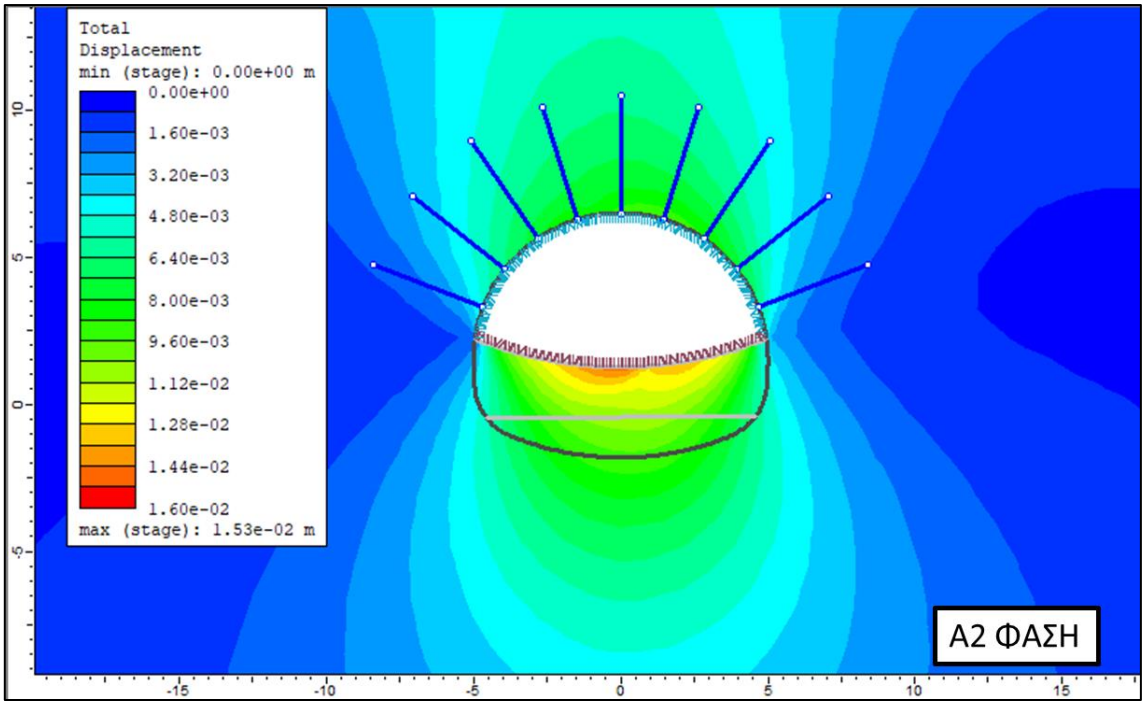
επόμενων σταδίων εκσκαφής, αναπτύσσεται και το υπόλοιπο ποσοστό των μετακινήσεων, όπως αποτυπώνεται στις ακόλουθες Εικόνες.



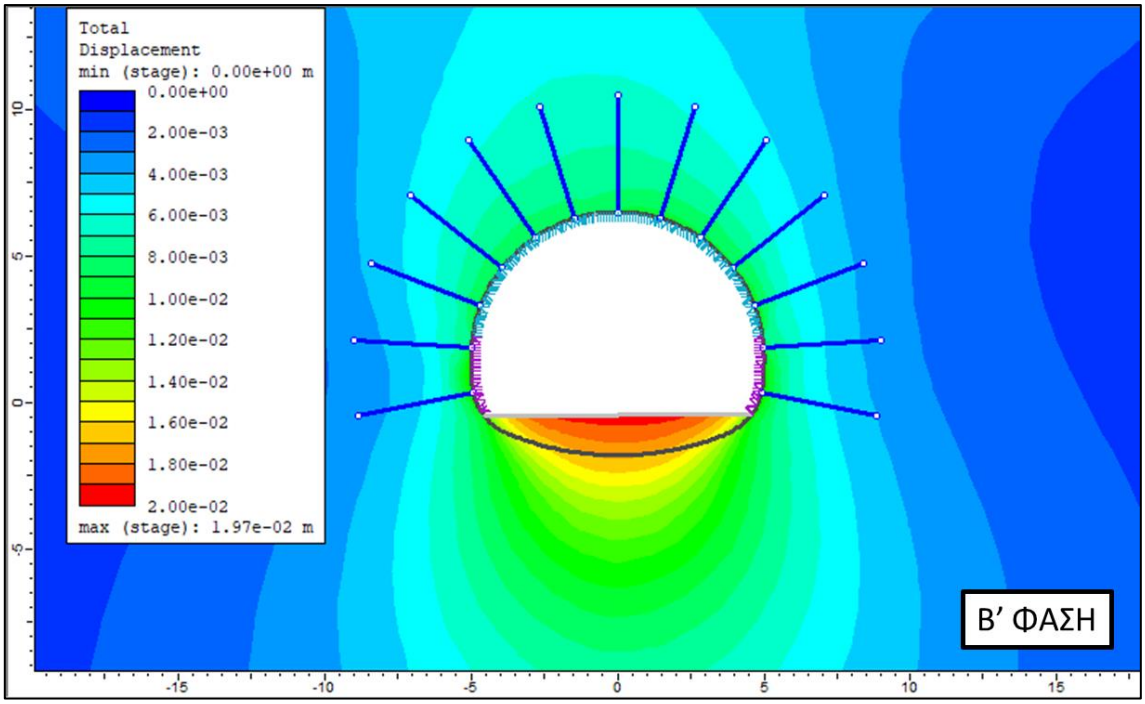
Διάγραμμα 18. Συσχέτιση του λόγου συγκλίσεων (U/U_{max}) στα επιμέρους στάδια εκσκαφής, σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.



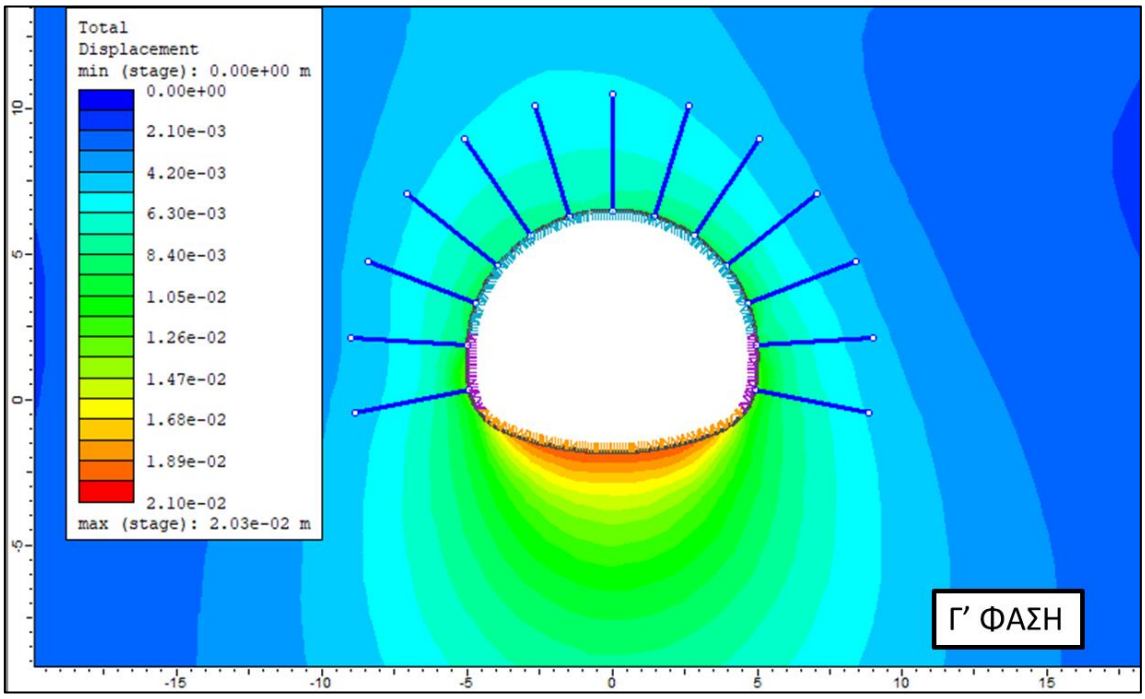
Εικόνα 84. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της A1' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου.



Εικόνα 85. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της A2' Φάσης και την κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου.



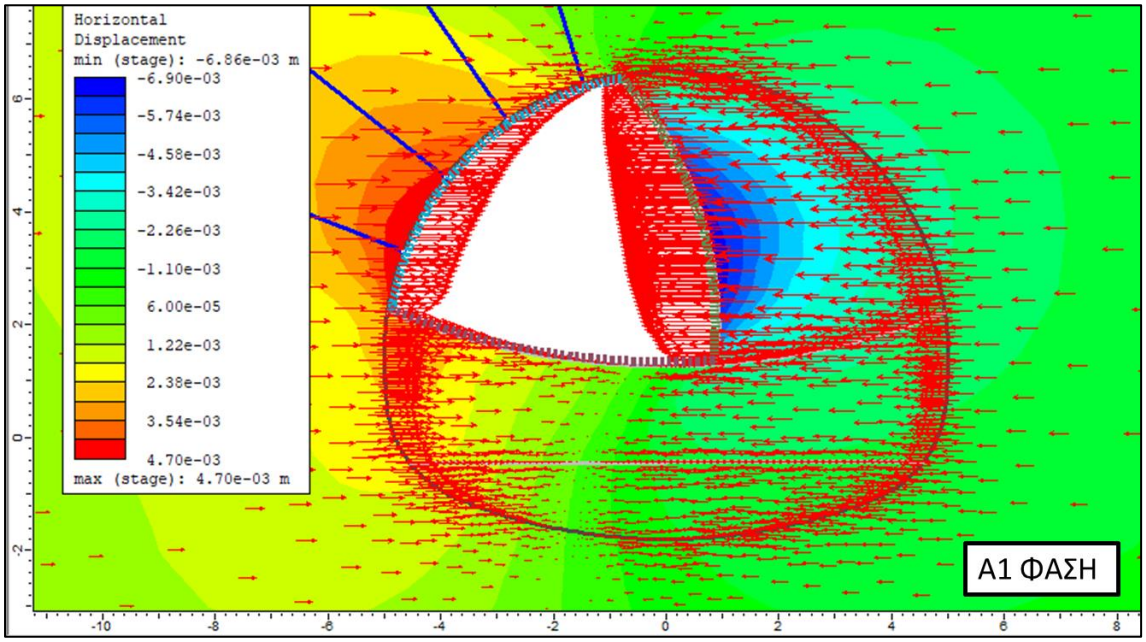
Εικόνα 86. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στο τέλος της Β' Φάσης εκσκαφής.



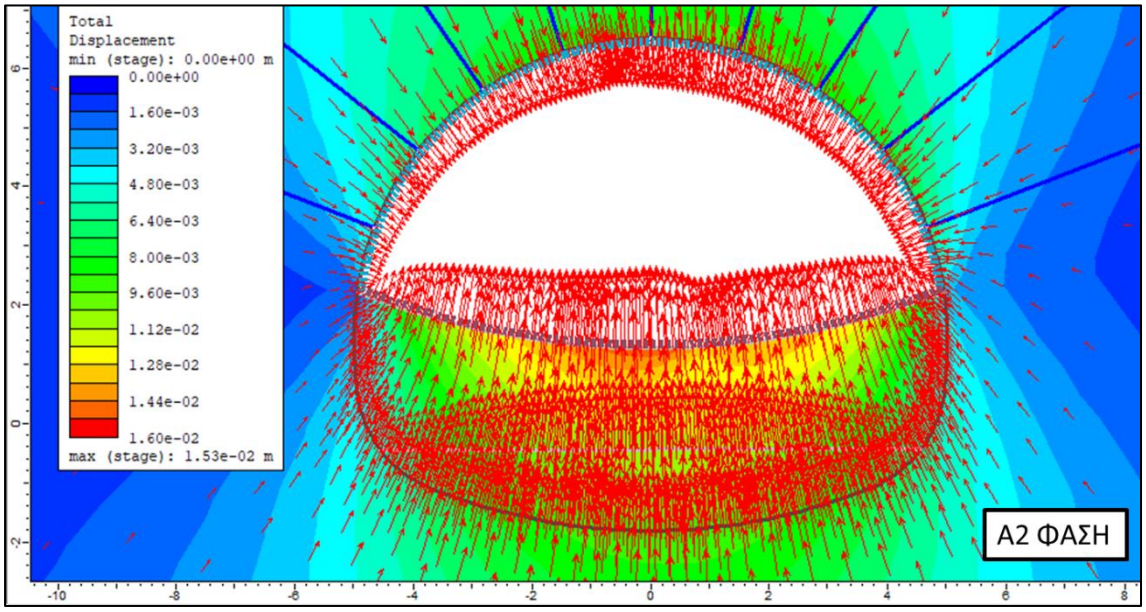
Εικόνα 87. Συγκλίσεις (total displacements) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 στην κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου.

Τέλος από το σύνολο των αναλύσεων του κεφαλαίου αυτού, διαπιστώθηκε ότι τόσο στο προσωρινό ανάστροφο τόξο (temporary invert), όσο και στο τελικό ανάστροφο τόξο (final invert) υπήρχε ανύψωση του δαπέδου, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες. Το φαινόμενο αυτό επίσης είναι

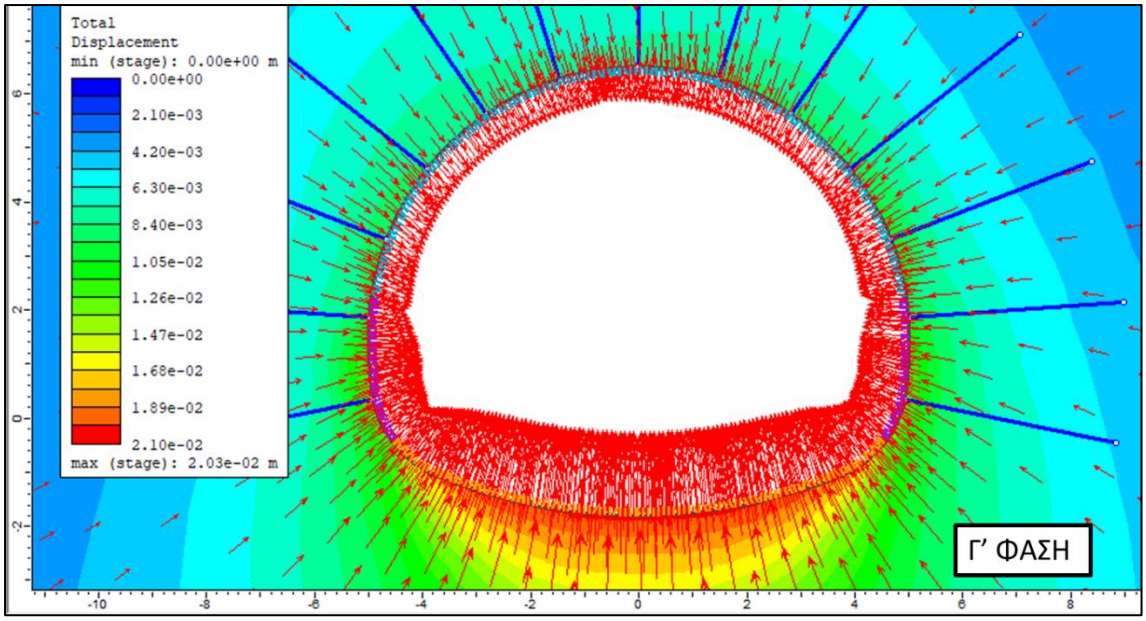
έντονο υπό την μορφή πλευρικών μετακινήσεων κατά το αρχικό στάδιο εκταφής του πρώτου ήμισυ της άνω ημιδιατομής (top heading).



Εικόνα 88. Ανύσματα πλευρικών μετακινήσεων (horizontal displacements) κατά την ολοκλήρωση του προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.



Εικόνα 89. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής (top heading) στο έδαφος S3, H=15m , K_o=1 , για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.



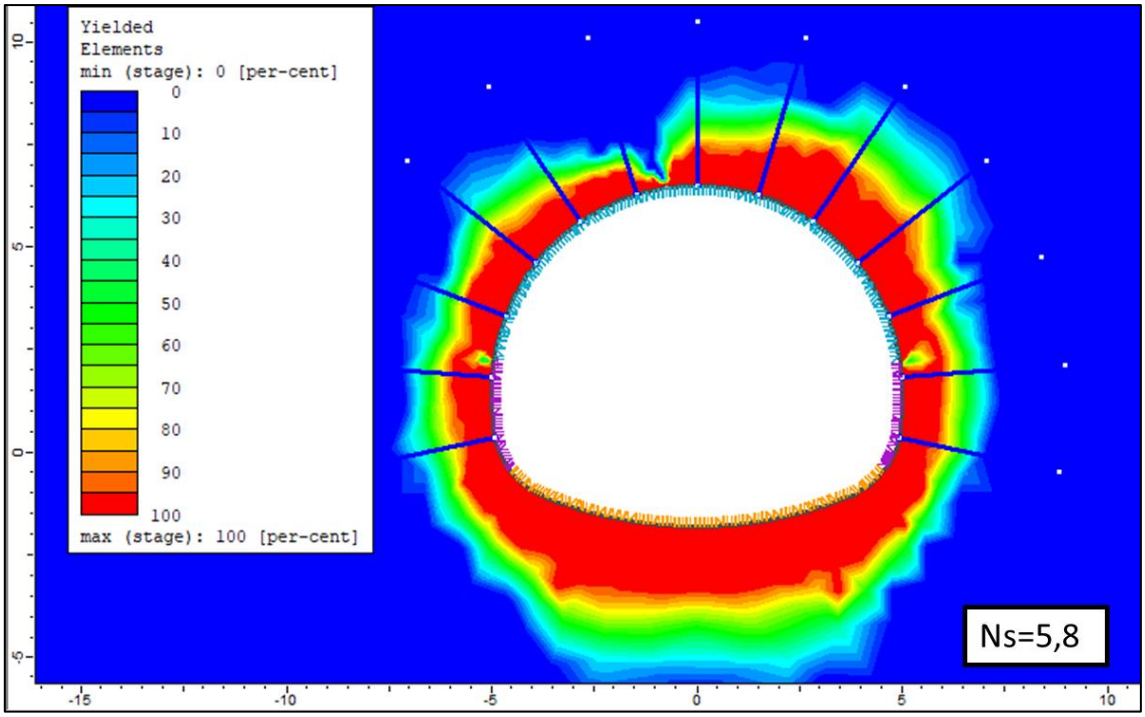
Εικόνα 90. Ανύσματα μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση του τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με τελικό ανάστροφο τόξο.

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός της στροφής των τάσεων στην περιοχή του δαπέδου, επειδή υπάρχει η πλευρική παρεμπόδιση λόγω της προσωρινής υποστήριξης και οι τάσεις «ανακουφίζονται» στο ελεύθερο τμήμα της εκσκαφής που είναι το δάπεδο και προκαλούν την ανύψωσή του.

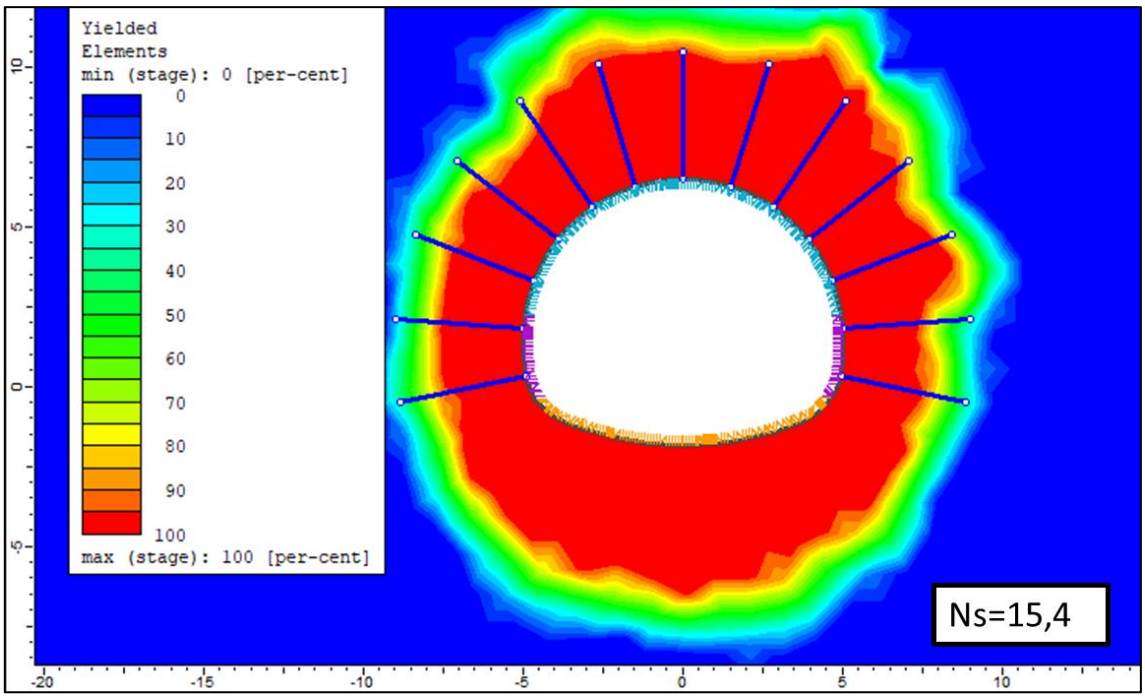
7.2. Ανάπτυξη Πλαστικής Ζώνης Πέριξ της Εκσκαφής

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας και καθώς το μέτωπο εκσκαφής προηγείται, έμπροσθεν αυτού αρχίζουν να αναπτύσσονται προσυγκλίσεις, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος αυτών να έχει αναπτυχθεί στην περιοχή του μετώπου, της τάξης του 30% των τελικών. Σε περιπτώσεις ασθενούς εδάφους και μεγάλου ύψους υπερκείμενων γαιών, το έδαφος τείνει να αστοχήσει με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς οι συγκλίσεις που αναπτύσσονται πλέον είναι εκτός της ελαστικής περιοχής και συνεπώς θα αναπτυχθεί πλαστική ζώνη, όπου το εύρος της θα είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

Από τις αριθμητικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, αυτό επιβεβαιώνεται και στις ακόλουθες εικόνες, όπου καταγράφεται η αύξηση του εύρους της πλαστικής ζώνης όσο αυξάνει ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).

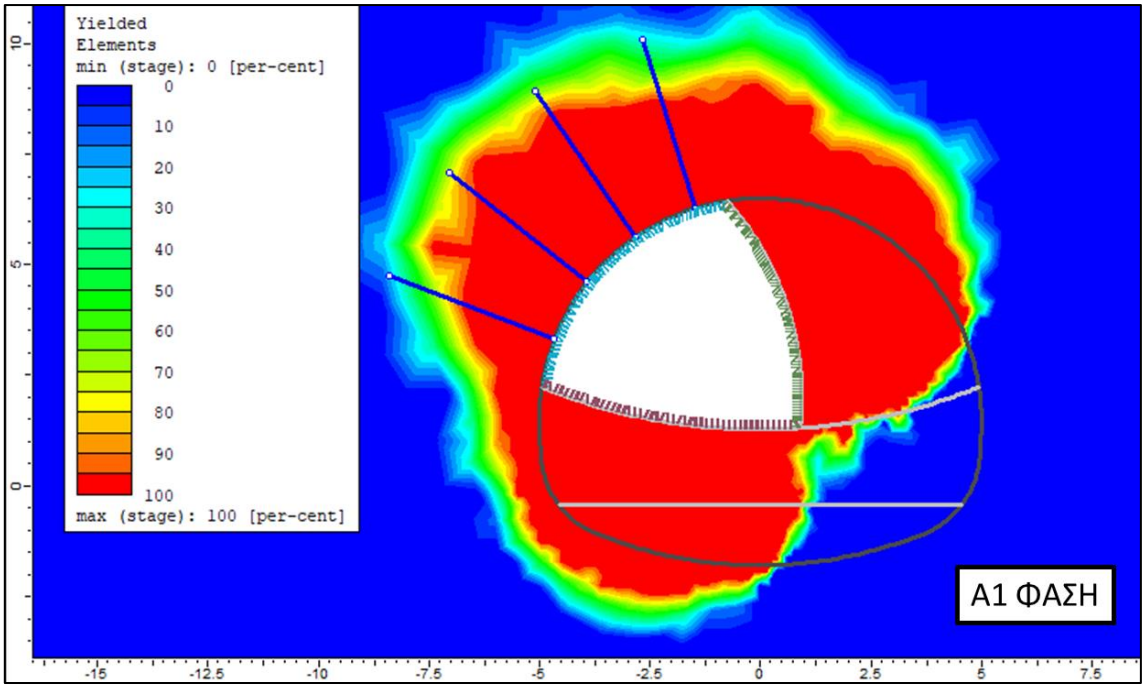


Εικόνα 91. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο έδαφος S3 , H=15m, K_o=1.

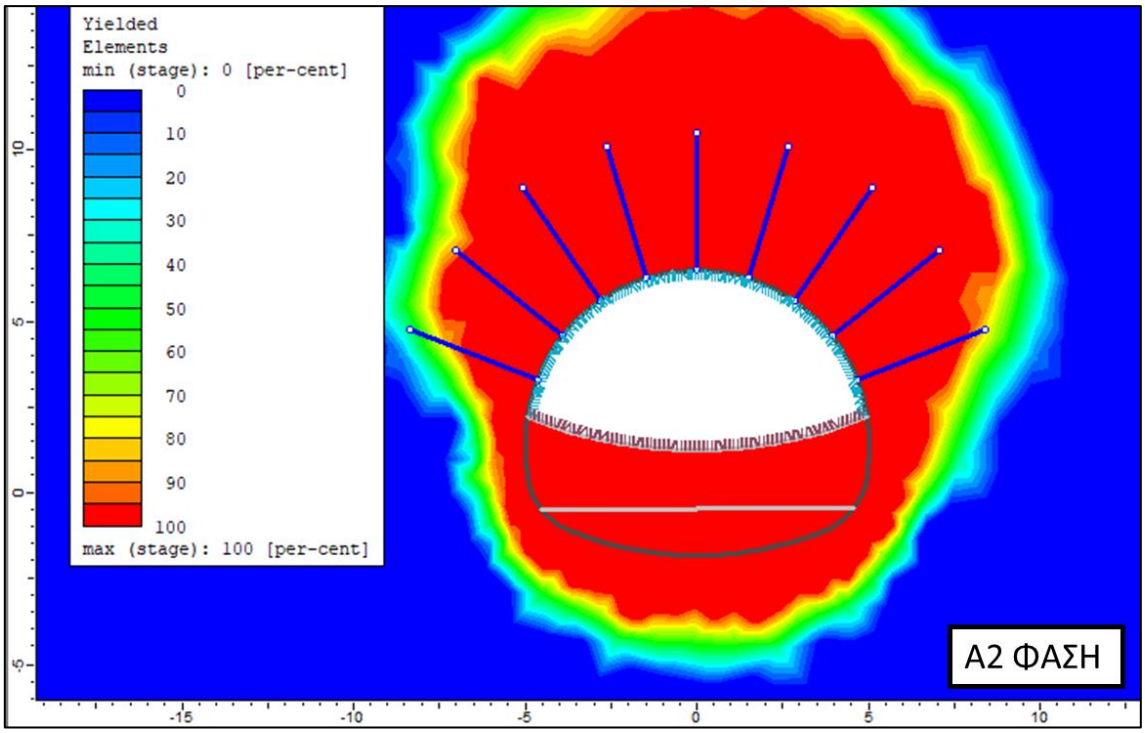


Εικόνα 92. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής για το έδαφος S3,H=40m,K_o=1.

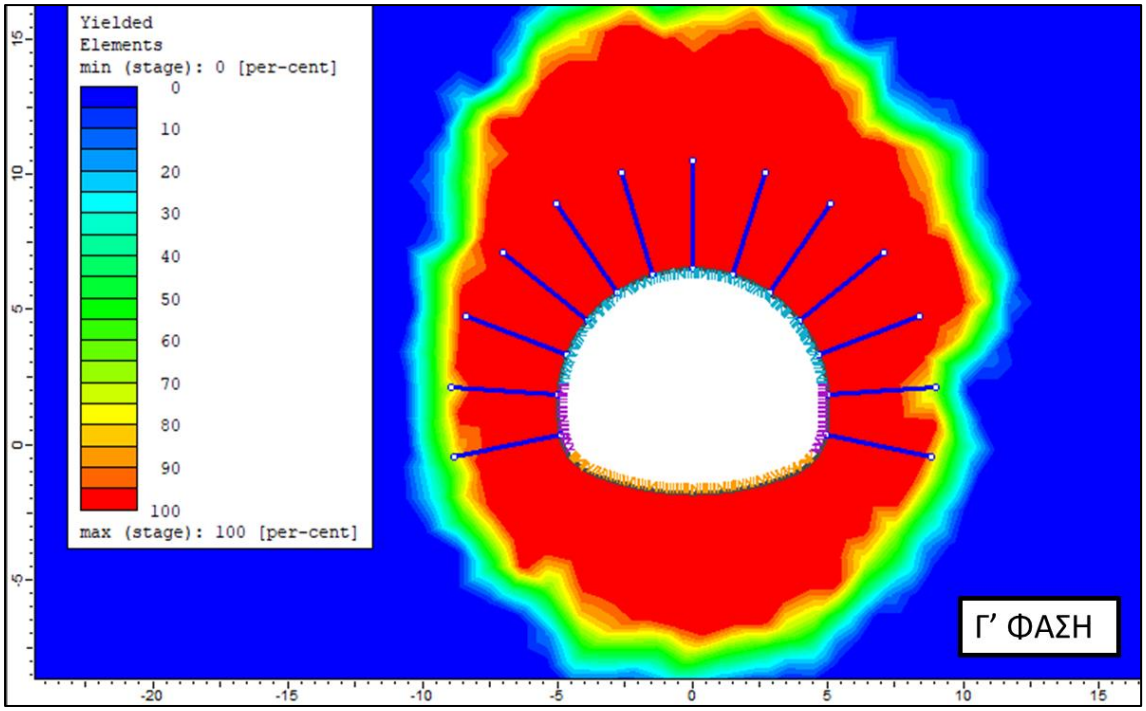
Επίσης κατά την τμηματική εκσκαφή, διαπιστώθηκε ότι καθώς αναπτύσσεται η εκσκαφή, υπάρχει και ανάλογη ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 93. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της A1' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.



Εικόνα 94.Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της A2'Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,K_o=1.

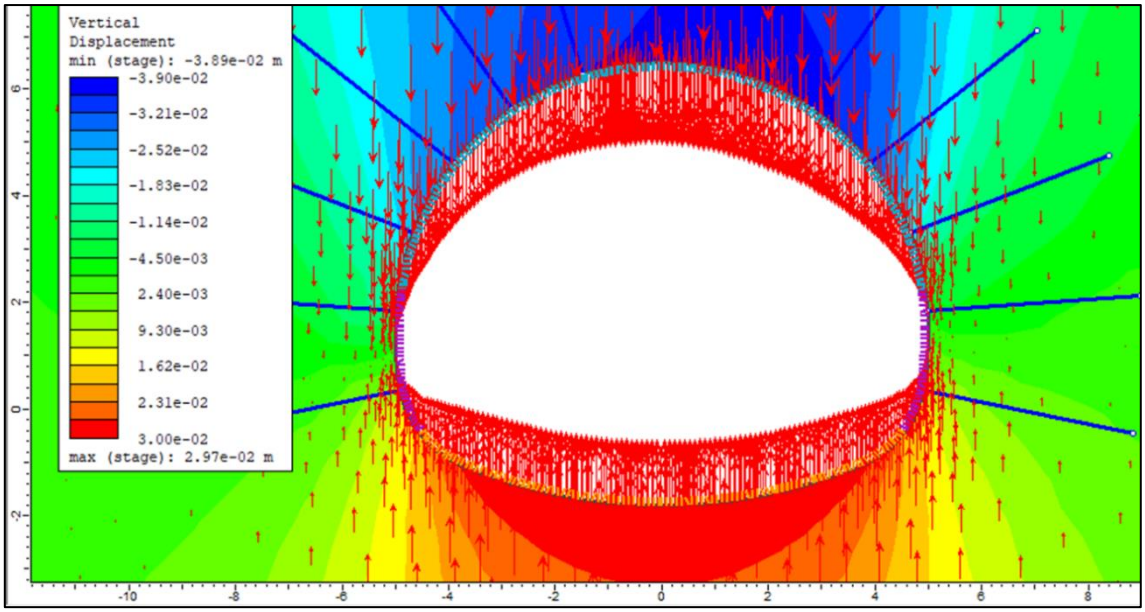


Εικόνα 95. Πλαστική ζώνη πέριξ της εκσκαφής στο τέλος της Γ' Φάσης στο έδαφος S2,H=30m,Ko=1.

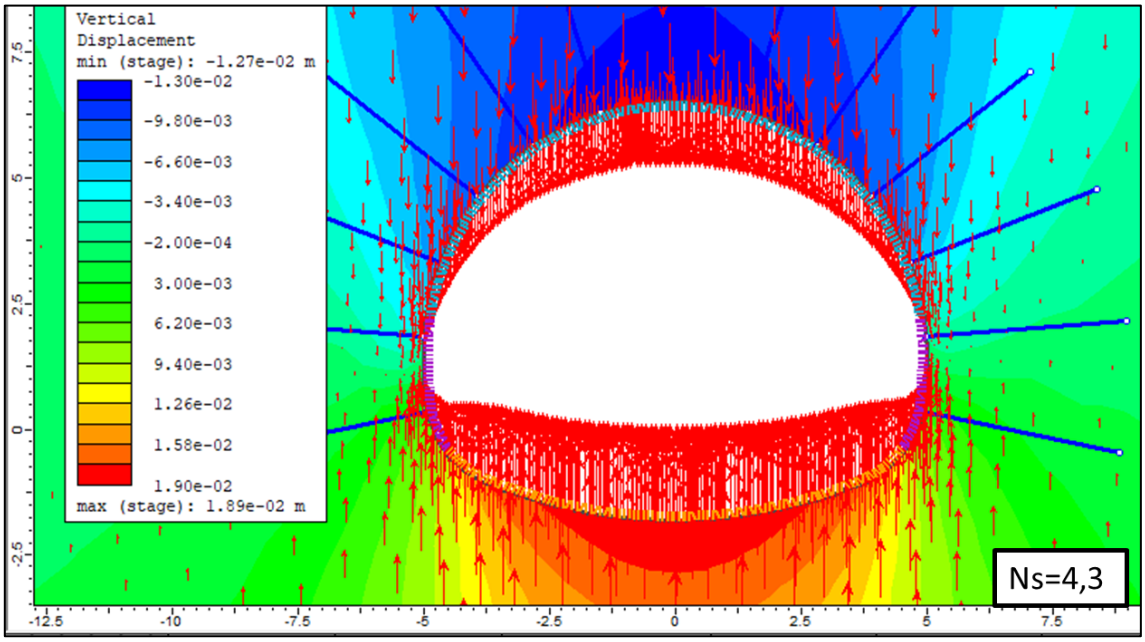
Τέλος από τις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, προέκυψε ότι το μέγιστο εύρος πλαστικής ζώνης είναι **8,15 m**.

7.3. Ανάπτυξη Επιφανειακών Καθιζήσεων

Λόγω της εξέτασης εκσκαφών σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, υπάρχει άμεση επιρροή αυτών στην επιφάνεια, μέσω της εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων (s). Συγκεκριμένα, λόγω της απώλειας εδαφικής μάζας από την εκσκαφή της σήραγγας, θα προκληθεί ανάπτυξη επιφανειακής καθίζησης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απώλεια, δηλαδή μεγάλες συγκλίσεις της εκσκαφής, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι καθιζήσεις. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις ακόλουθες Εικόνες και αντικατοπτρίζεται καλύτερα στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Εικόνα 96. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 5,7.

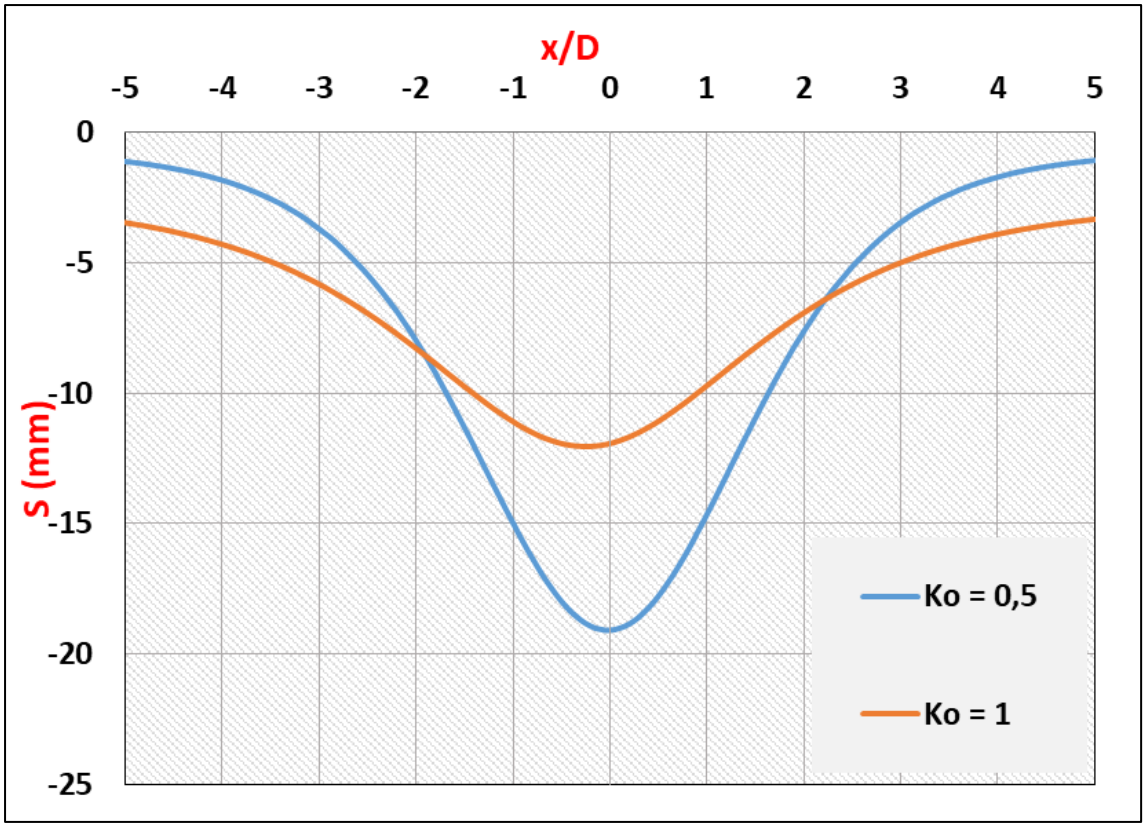


Εικόνα 97. Ανύσματα κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο και συντελεστή υπερφόρτισης N_s= 4,3.

Διάγραμμα 19. Μέγιστες αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (S_{max}) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

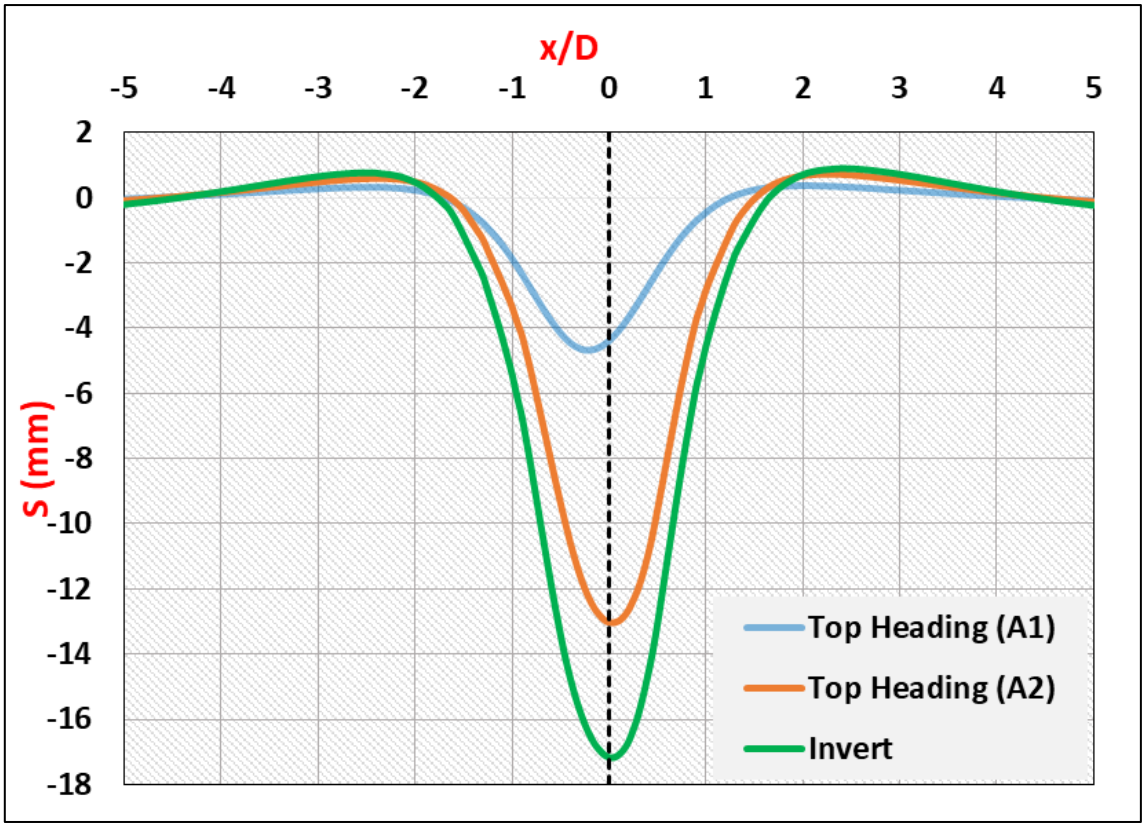
Από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι αναπτύσσεται μια καμπύλη καθιζήσεων μορφής Gauss, με την μέγιστη βύθιση (καθίζηση) να αναπτύσσεται ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν συνθήκες ελεύθερου πεδίου (green field) και δεν υπάρχουν υπερκείμενες κατασκευές ή άλλες σήραγγες, ώστε να προκαλείται άλλης μορφής καμπύλη καθιζήσεων.

Μια βασική παράμετρος που έχει επιρροή στην μορφή και το μέγεθος των καθιζήσεων (s) είναι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o). Με βάσει τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι όταν ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων είναι K_o = 0,5 οι καθιζήσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες και η καμπύλη παρουσιάζει εκτεταμένη βύθιση, από ότι στην περίπτωση όπου το K_o = 1, όπου εκεί οι καθιζήσεις είναι μικρότερες και η καμπύλη είναι ομαλή χωρίς μεγάλη βύθιση. Το συμπέρασμα αυτό αποτυπώνεται στο ακόλουθο Διάγραμμα.



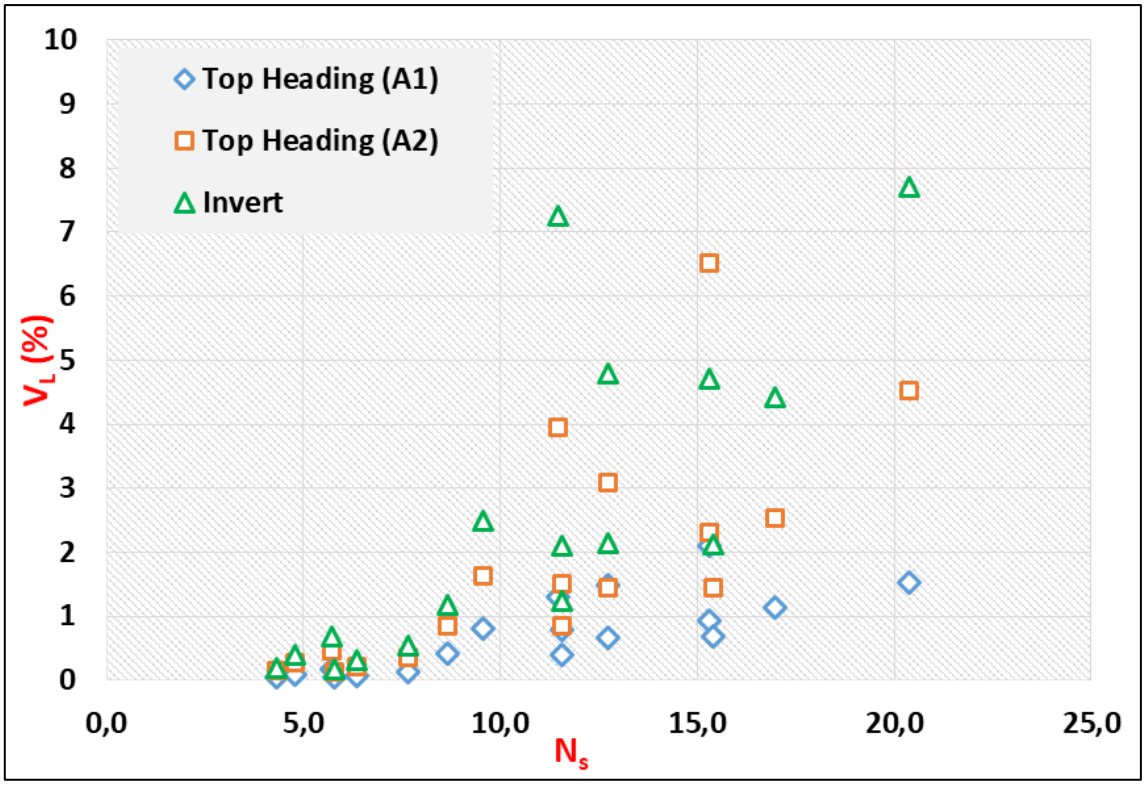
Διάγραμμα 20. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τον συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών (K_o) του εδάφους S3 με υπερκείμενα H=30m.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα αποτυπώνεται η καμπύλη καθιζήσεων, για ασθενή εδαφικό σχηματισμό, όπου καταγράφεται η εξέλιξη και η μορφή της καμπύλης καθιζήσεων για τα διάφορα στάδια εκσκαφής.



Διάγραμμα 21. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (s), συναρτήσει του λόγου x/D σε σχέση με τα επιμέρους στάδια εκσκαφής του εδάφους S1 με υπερκείμενα H=15m και Ko=0,5.

Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα, αποτυπώνεται η επιρροή της επιφάνειας εκσκαφής (φάσεις εκσκαφής) στο ποσοστό της απώλειας εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής. Συγκείμενα προκύπτει το συμπέρασμα, ότι ήδη από την ολοκλήρωση της Α1' φάσης εκσκαφής έχει προκληθεί σημαντική απώλεια εδαφικού όγκου (V_L), όπου σε ασθενή εδάφη φτάνει και σε ποσοστό της τάξης του 4%.

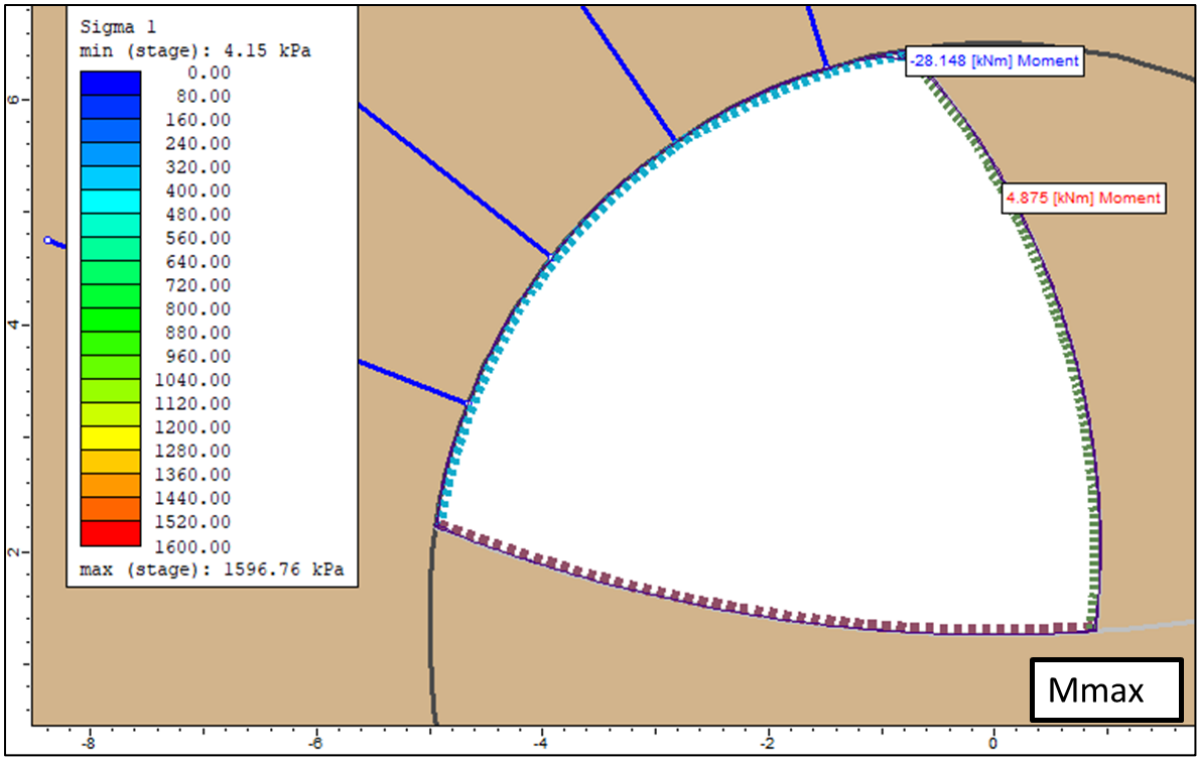


Διάγραμμα 22. Απώλεια εδαφικού όγκου πέριξ της εκσκαφής (V_L) ανά φάση εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

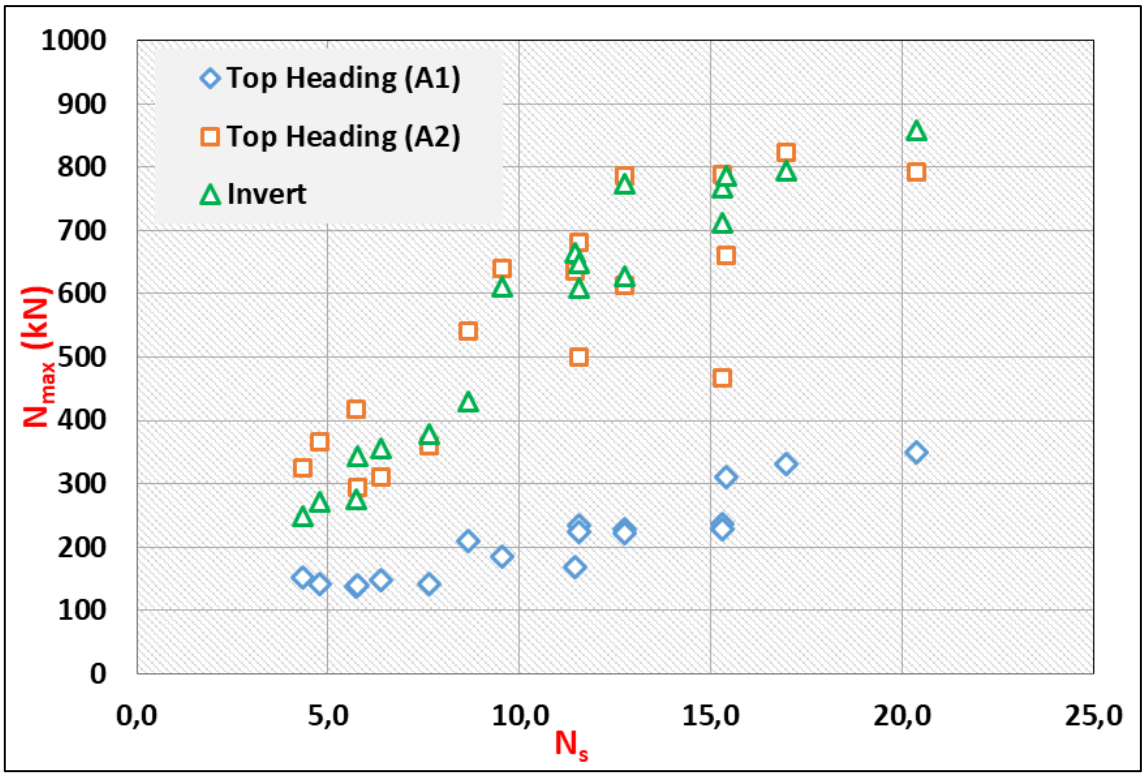
7.4. Ανάπτυξη Εντατικών Μεγεθών στην Προσωρινή Υποστήριξη

Από το σύνολο των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκε καταγραφή της μέγιστης αξονικής δύναμης (axial force), καθώς και της μέγιστης καμπτικής ροπής (bending moment) σε κάθε στάδιο εκσκαφής.

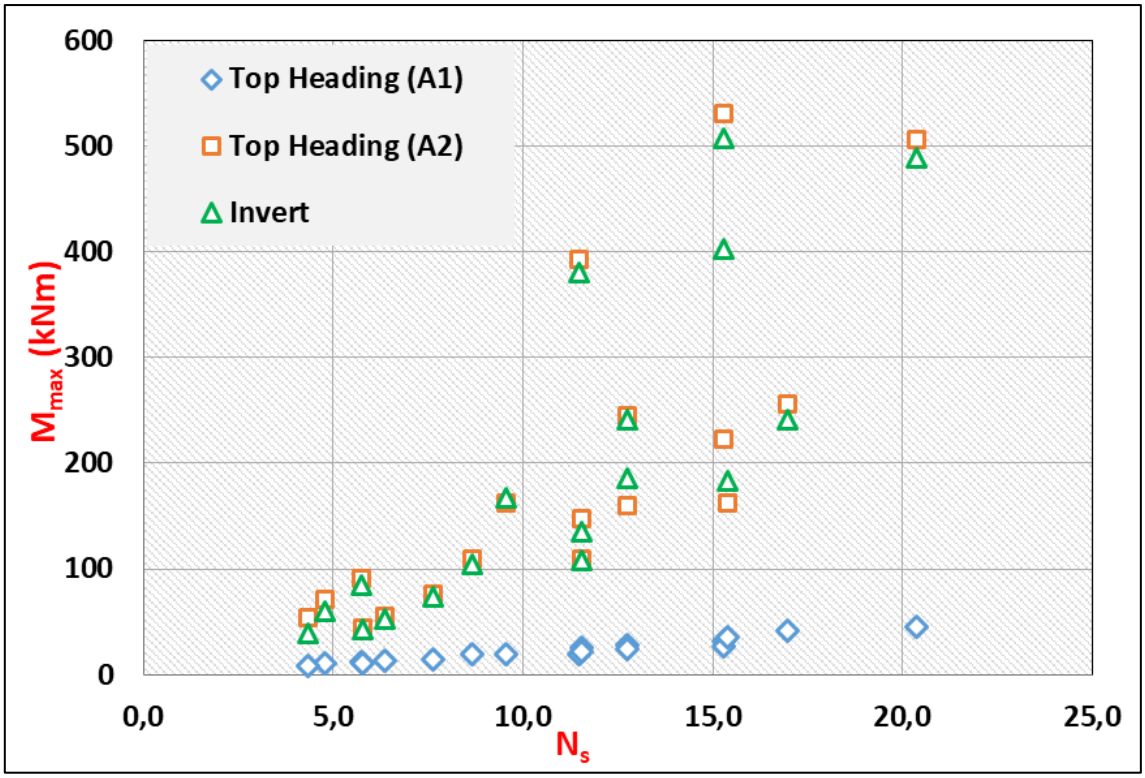
Αρχικά διαπιστώθηκε, ότι οι μέγιστες καμπτικές ροπές σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις αναπτύσσονται πάντα στην γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο επιμέρους φάσεων της Α' φάσης εκσκαφής, όπως αποτυπώνεται και στην ακόλουθη Εικόνα. Επίσης η θέση της μέγιστης αξονικής δύναμης στην προσωρινή υποστήριξη δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται τόσο σε μορφή (θλιβόμενη ή εφελκυόμενη περιοχή) καθώς και θέση στην περίμετρο της εκσκαφής, με την πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν να βρίσκεται στις παρειές αυτής. Στα ακόλουθα Διαγράμματα παρουσιάζονται τα μέγιστα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη της προσωρινής υποστήριξης, που καταγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο.



Εικόνα 98. Ανάπτυξη μέγιστης καμπτικής ροπής (M_{max}) στο έδαφος S2, H=30m, Ko=1 στην περιοχή της προσωρινής εκσκαφής μεταξύ των δύο επιμέρους τμημάτων της Α' φάσης εκσκαφής (top heading)

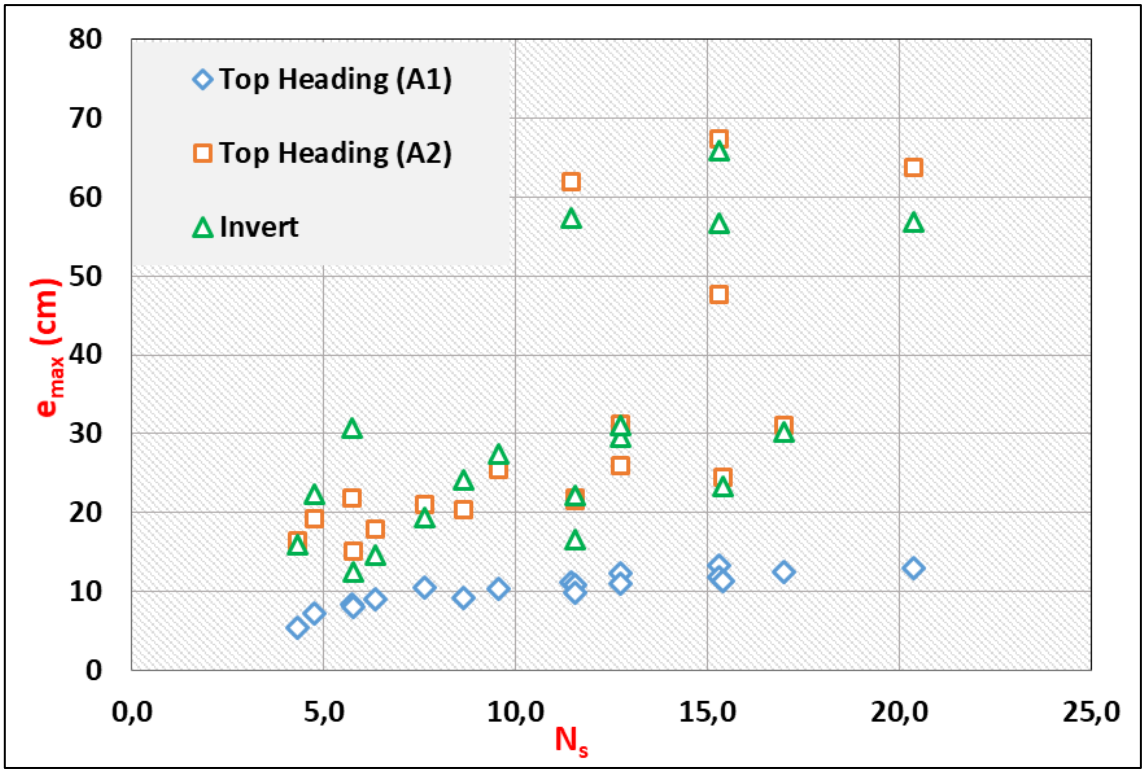


Διάγραμμα 23. Μέγιστες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.



Διάγραμμα 24. Μέγιστη καμπτική ροπή (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

Τέλος στο ακόλουθο Διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) που αναπτύχθηκε στην προσωρινή υποστήριξη των αναλύσεων του παρόντος κεφαλαίου.



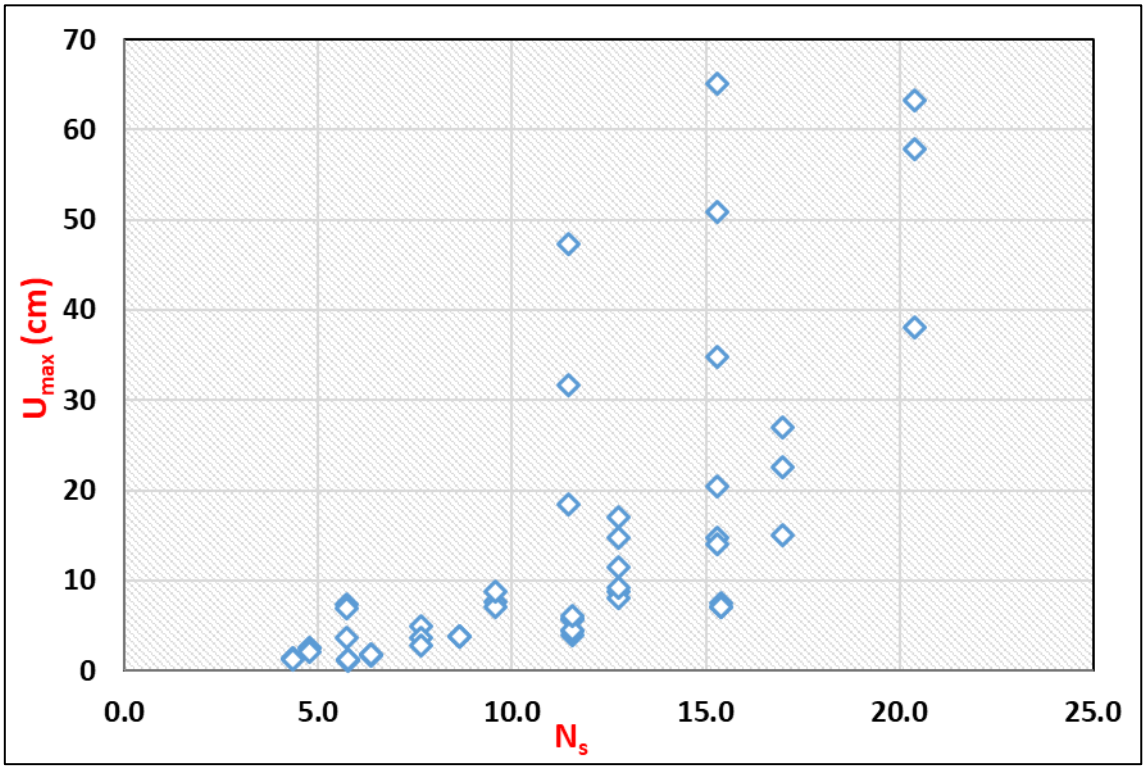
Διάγραμμα 25. Μέγιστη κατασκευαστική εκκεντρότητα (e_{max}) της προσωρινής υποστήριξης σε σχέση με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s) για περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε τέσσερις φάσεις με προσωρινό και τελικό ανάστροφο τόξο.

8. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παράθεση των βασικών συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας, που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων σχετικά με την εξέταση της τμηματικής διάνοιξης αστικών σηράγγων. Τα συμπεράσματα της εργασίας αφορούν το μέγεθος των συγκλίσεων, τις αναπτυσσόμενες επιφανειακές καθιζήσεις και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στην προσωρινή υποστήριξη ανά μέθοδο εκσκαφής. Για λόγους παρουσίασης, τα συμπεράσματα θα παρατεθούν ανά θεματική ενότητα.

- **<u>Αναπτυσσόμενες συγκλίσεις εκσκαφής</u>**

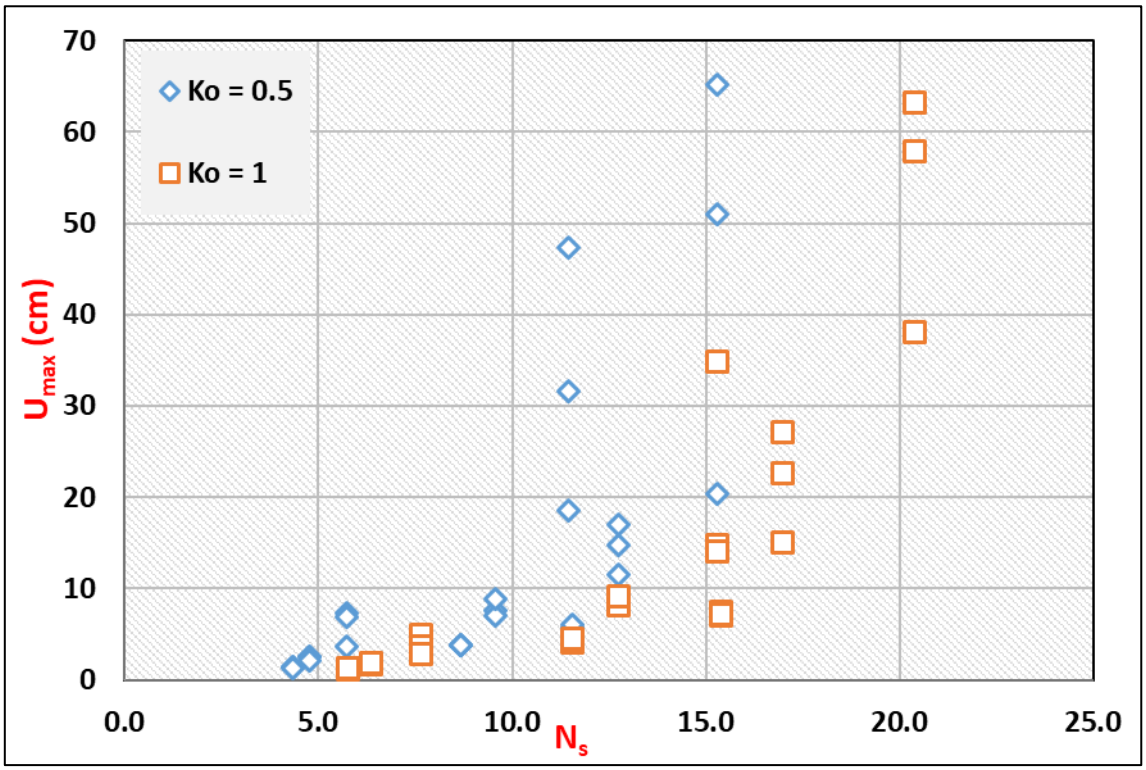
Από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώθηκε ότι όσο πιο ασθενής είναι η εκσκαπτόμενη βραχόμαζα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι συγκλίσεις της εκσκαφής, λόγω της πλαστικής ζώνης που αναπτύσσεται πέριξ της εκσκαφής και οδηγεί σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Στο ακόλουθο Διάγραμμα παρουσιάζεται αυτό το βασικό συμπέρασμα, όπου διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής υπερφόρτισης εδάφους (N_s), τόσο πιο μεγάλες είναι οι τελικές συγκλίσεις (U_{max}).



Διάγραμμα 26. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s).

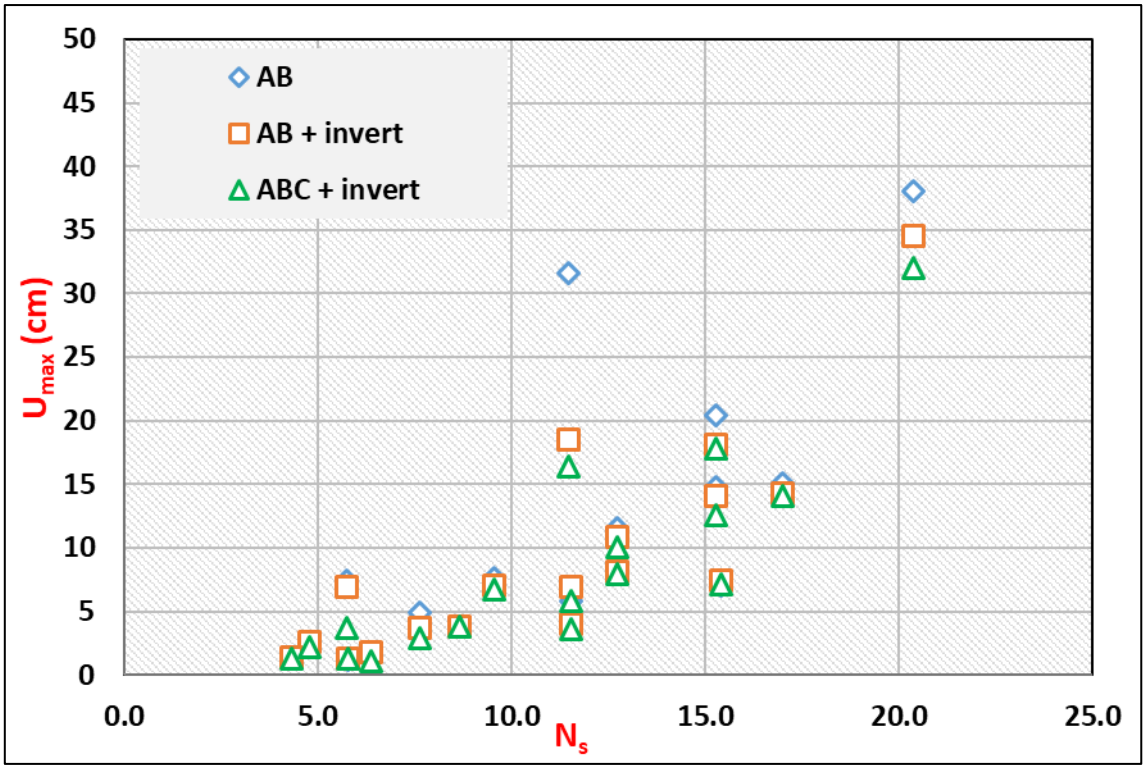
Από το παραπάνω Διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι για τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους **Ns > 12**, υπάρχει ραγδαία αύξηση των συγκλίσεων, γεγονός που σημαίνει ότι η εκσκαφή τείνει να αστοχήσει και συνεπώς θα απαιτεί πιο δύσκαμπτη και ισχυρότερη υποστήριξη.

Επίσης από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε ότι για τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων **K_o= 0.5**, θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες συγκλίσεις από ότι στην περίπτωση που ο συντελεστής είναι **K_o= 1**, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Διάγραμμα.



Διάγραμμα 27. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1.

Από τις αριθμητικές αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι όταν θα πραγματοποιηθεί τμηματική διάνοιξη της σήραγγας σε περισσότερες φάσεις εκσκαφής, τότε οι τελικές μέγιστες συγκλίσεις (U_{max}) θα μειωθούν από ότι να γινόταν διάνοιξη μόνο σε δύο φάσεις. Επίσης προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι υπάρχει σημαντική συνεισφορά του προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) στην μείωση των τελικών συγκλίσεων της εκσκαφής, καθώς με την κατασκευή του η διατομή «ισορροπεί» κατά την διάνοιξη και έχει ως αποτέλεσμα να μην αναπτυχθούν πολύ μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Η συνεισφορά αυτή του ανάστροφου τόξου, βάσει του ακόλουθου Διαγράμματος, είναι σημαντική σε περιπτώσεις πολύ ασθενών εδαφών (μεγάλες τιμές N_s). Επίσης η μείωση των διαστάσεων της εκσκαφής, σε περιπτώσεις ασθενούς εδάφους θα οδηγήσει σε περιορισμό των συγκλίσεων και αυτό διότι θα γίνεται και καλύτερος έλεγχος του μετώπου εκσκαφής που καθορίζει το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων.



Διάγραμμα 28. Συσχέτιση μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert).

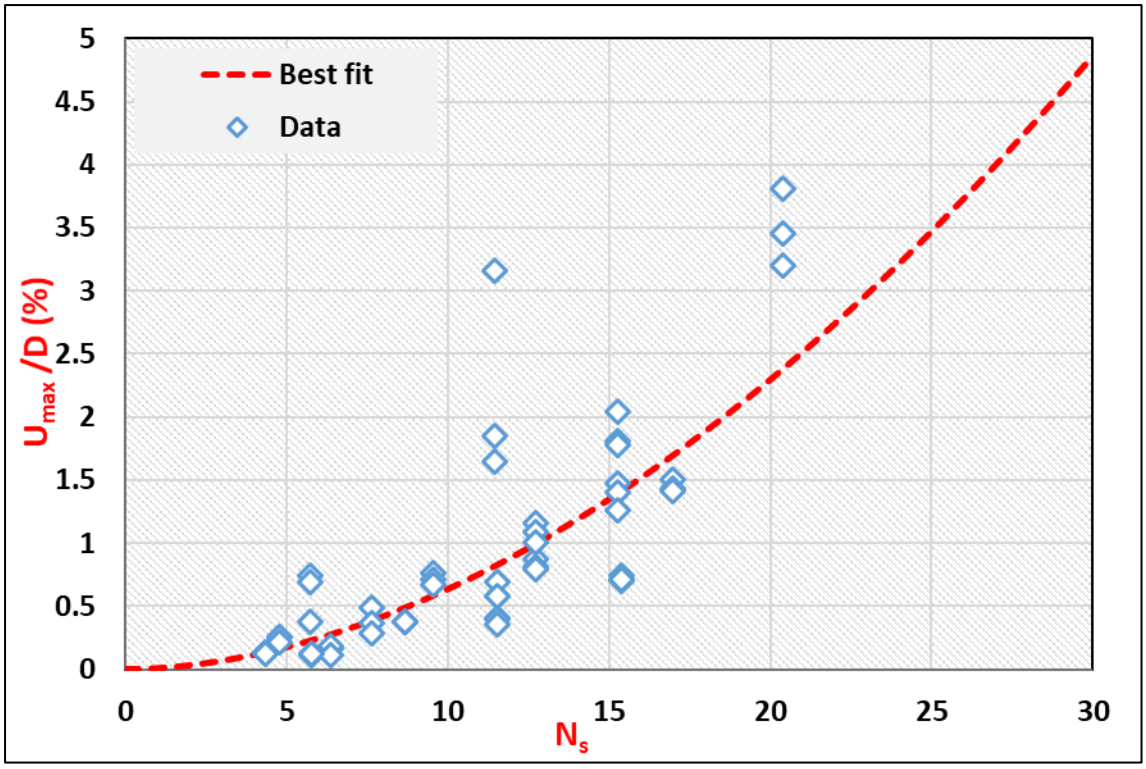
Τέλος, με βάσει το Διάγραμμα 28, προτείνεται η ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση των τελικών μέγιστων συγκλίσεων εκσκαφής (**U_{max}**), βάσει του συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (**N_s**). Η γραφική απεικόνιση αυτής της συσχέτισης, παρατίθεται στο ακόλουθο Διάγραμμα.

$$\frac{\boldsymbol{U_{max}}}{\boldsymbol{D}}(\%) = 0.009 \times {N_s}^{1.85}$$

, όπου:

- ✓ **U_{max}**: η μέγιστη αναπτυσσόμενη σύγκλιση στην εκσκαφή (με υποστήριξη)
- ✓ **D**: η ισοδύναμη διάμετρος της εκσκαφής
- ✓ **N_s**: ο συντελεστής υπερφόρτισης εδάφους

Να σημειωθεί ότι η παραπάνω σχέση βρίσκει εφαρμογή για προσωρινή υποστήριξη από αγκυρώσεις, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δικτυωτά πλαίσια, με τις ιδιότητες αυτών που περιγράφονται στην Ενότητα 4.2.1.2. Μεταβολή της προσωρινής υποστήριξης θα προκαλέσει διαφορετικές τελικές συγκλίσεις.



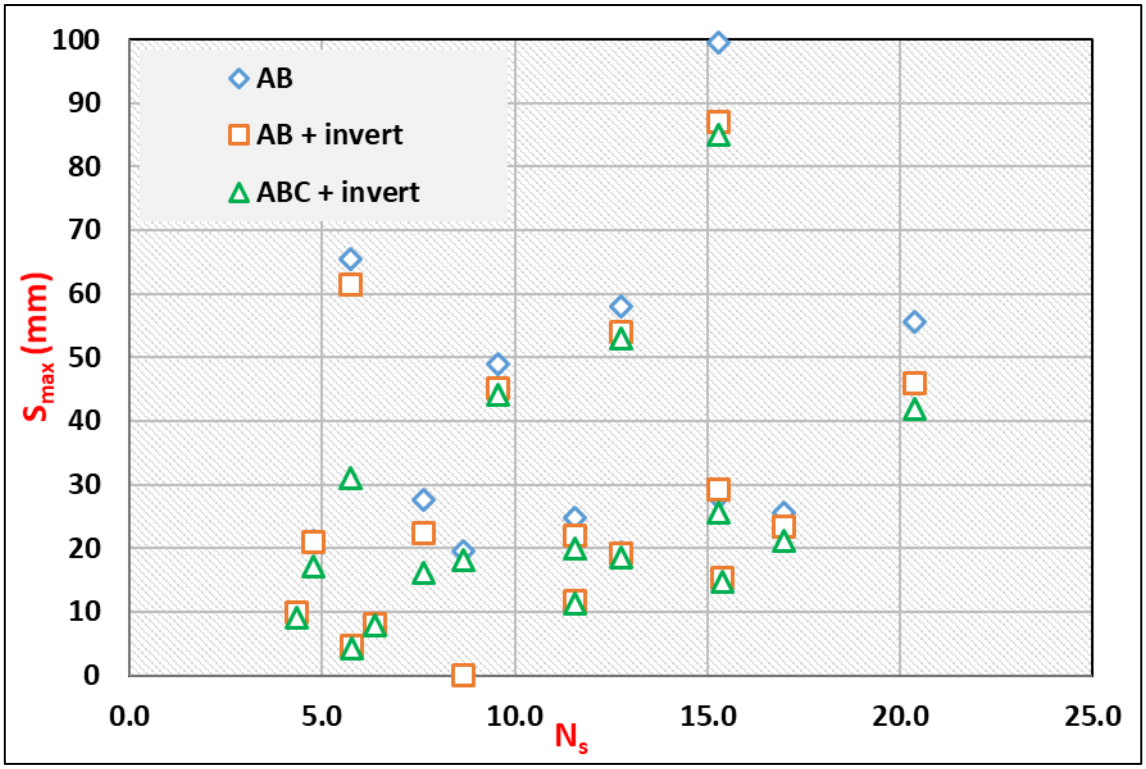
Διάγραμμα 29. Γραφική απεικόνιση της συσχέτισης των μέγιστων συγκλίσεων (U_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

- **<u>Αναπτυσσόμενες επιφανειακές καθιζήσεις και απώλεια εδαφικού όγκου</u>**

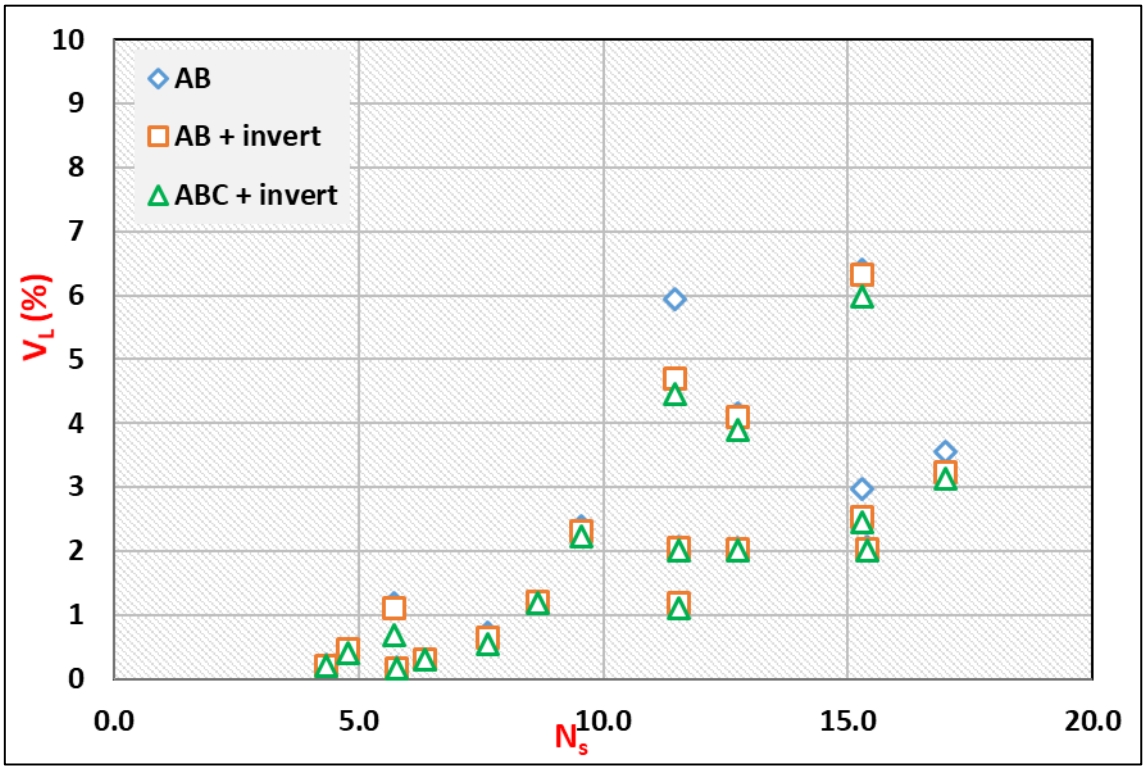
Από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώθηκε ότι όσο πιο ασθενής είναι η εκσκαπτόμενη βραχόμαζα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι επιφανειακές καθιζήσεις που θα προκληθούν όπως και στην περίπτωση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων γύρω από την εκσκαφή.

Στα ακόλουθα Διαγράμματα παρουσιάζεται αυτό το βασικό συμπέρασμα, τόσο για τις μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις (**S_{max}**) όσο και για την απώλεια εδαφικού όγκου (**V_L**). Στα Διαγράμματα τα δύο αυτά μεγέθη συσχετίζονται με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), όπου όσο αυξάνεται η τιμή του, τόσο αυξάνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις και η απώλεια του εδαφικού όγκου.

Επίσης στα ακόλουθα Διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι η μείωση των διαστάσεων της εκσκαφής (τμηματική – φάσεις), δεν συνεισφέρει σημαντικά στην μείωση των τελικών καθιζήσεων και την αντίστοιχη απώλεια εδαφικού όγκου, καθώς για διάνοιξη διατομής σε περισσότερες από δυο φάσεις, δεν παρατηρείται σημαντική μείωση στα υπό εξέταση μεγέθη.

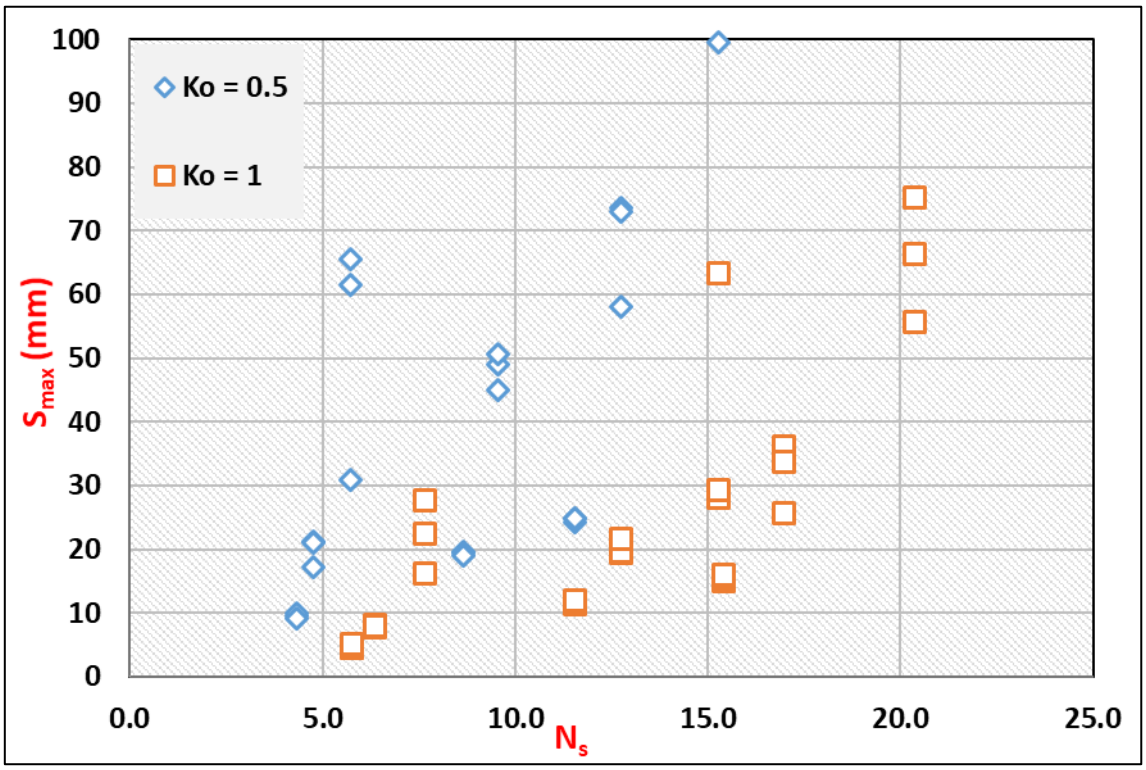


Διάγραμμα 30. Συσχέτιση μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων (S_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert).

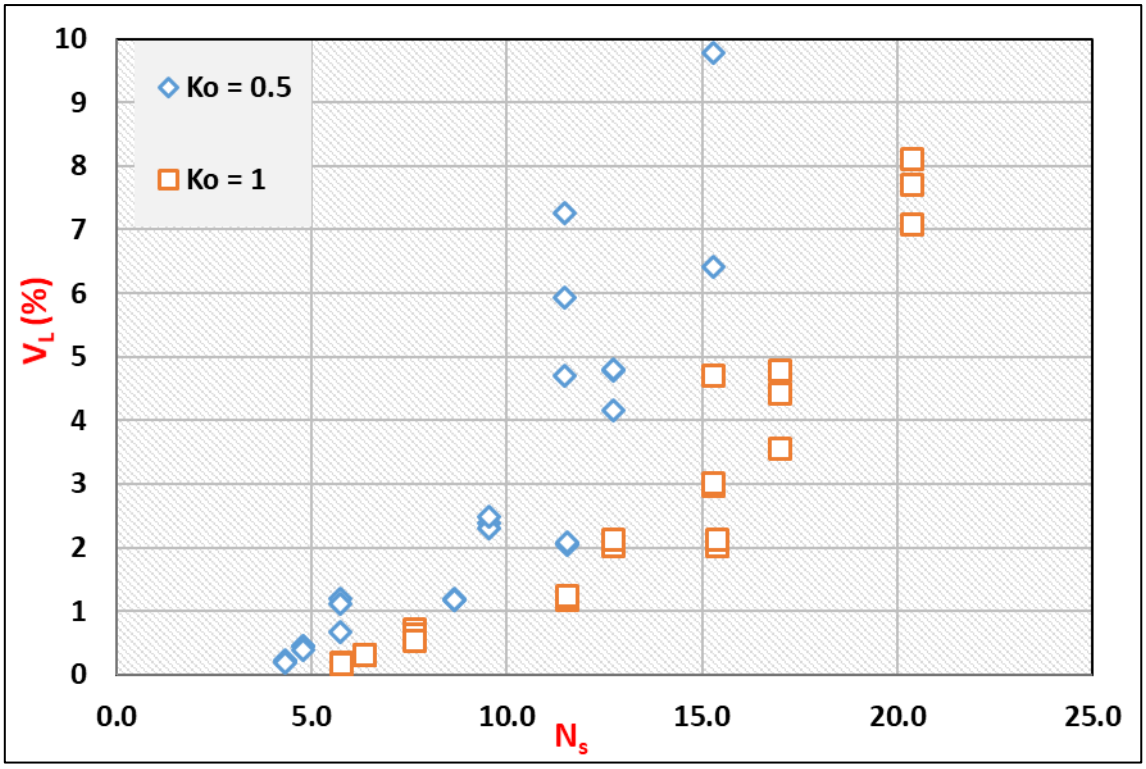


Διάγραμμα 31. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert).

Επίσης όπως και στην περίπτωση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων πέριξ της εκσκαφής, έτσι και στην περίπτωση των αναπτυσσομένων επιφανειακών καθιζήσεων (**S_{max}**) και στην απώλεια εδαφικού όγκου (**V_L**), παρατηρήθηκε ότι για τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων **K_o= 0.5**, τα παραπάνω υπό εξέταση μεγέθη λαμβάνουν μεγαλύτερες από ότι για την περίπτωση που ο συντελεστής είναι **K_o= 1**, όπως φαίνεται και στα ακόλουθα Διαγράμματα.



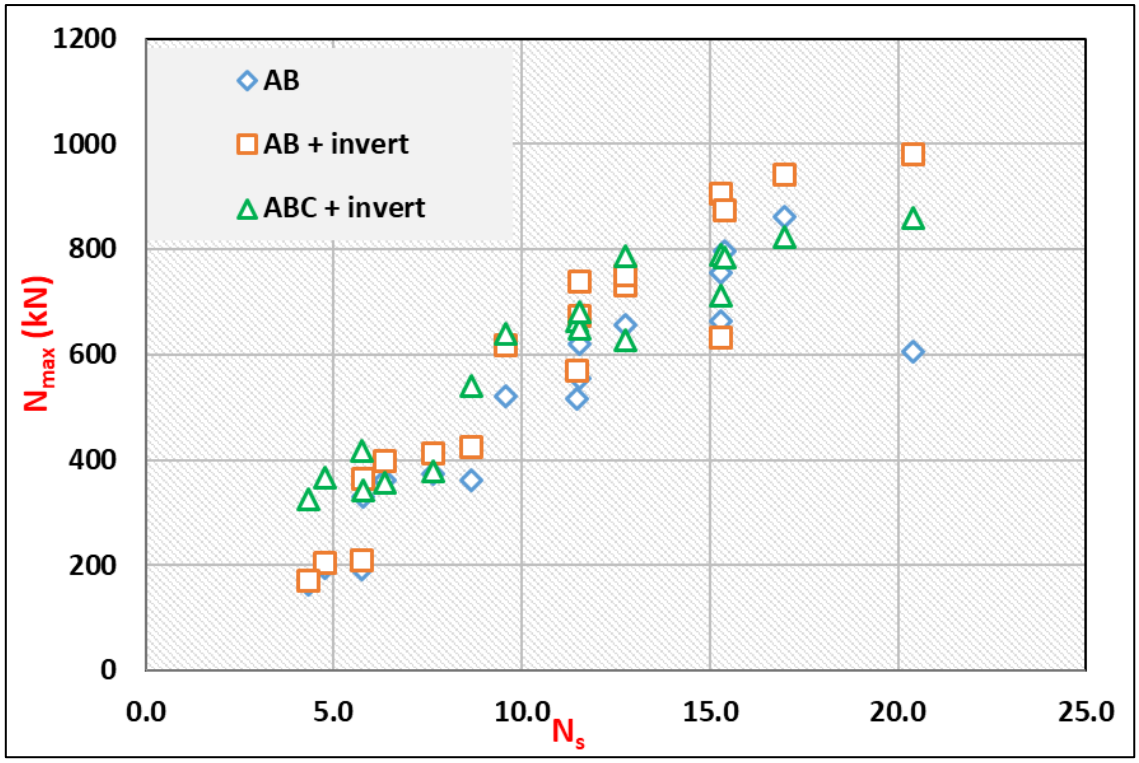
Διάγραμμα 32. Συσχέτιση μέγιστης επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1.



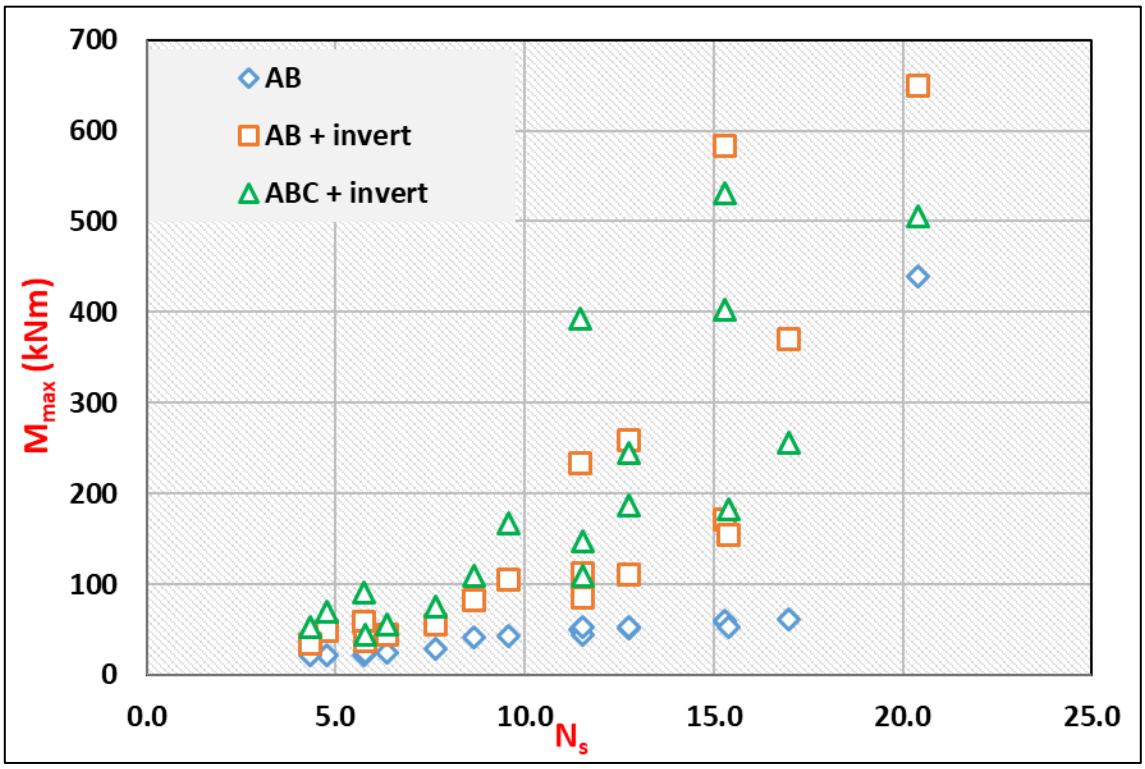
Διάγραμμα 33. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1.

- **<u>Αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στην προσωρινή υποστήριξη</u>**

Από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε καταγραφή τόσο της μέγιστης αξονικής δύναμης (N_{max}) όσο και της μέγιστης αναπτυσσόμενης καμπτική ροπής (M_{max}) στην προσωρινή υποστήριξη. Με βάσει τα ακόλουθα Διαγράμματα, αρχικά συμπεραίνεται ότι όσο πιο ασθενές είναι το εκσκαπτόμενο έδαφος (μεγάλες τιμές N_s), τόσο μεγαλύτερα είναι τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στην προσωρινή υποστήριξη της εκσκαφής. Επίσης, όταν πραγματοποιείται τμηματική εκσκαφή με κατασκευή ενδιάμεσων φάσεων ή προσωρινού ανάστροφου τόξου, υπάρχει σημαντική αύξηση στις τιμές των εντατικών μεγεθών από ότι να μην γινόταν η κατασκευή τους. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι με την κατασκευή του ανάστροφου τόξου σχηματίζεται μη ομαλή επιφάνεια στην εκσκαφή (γωνία), όπου είναι υπεύθυνη για την αύξηση των εντατικών μεγεθών.

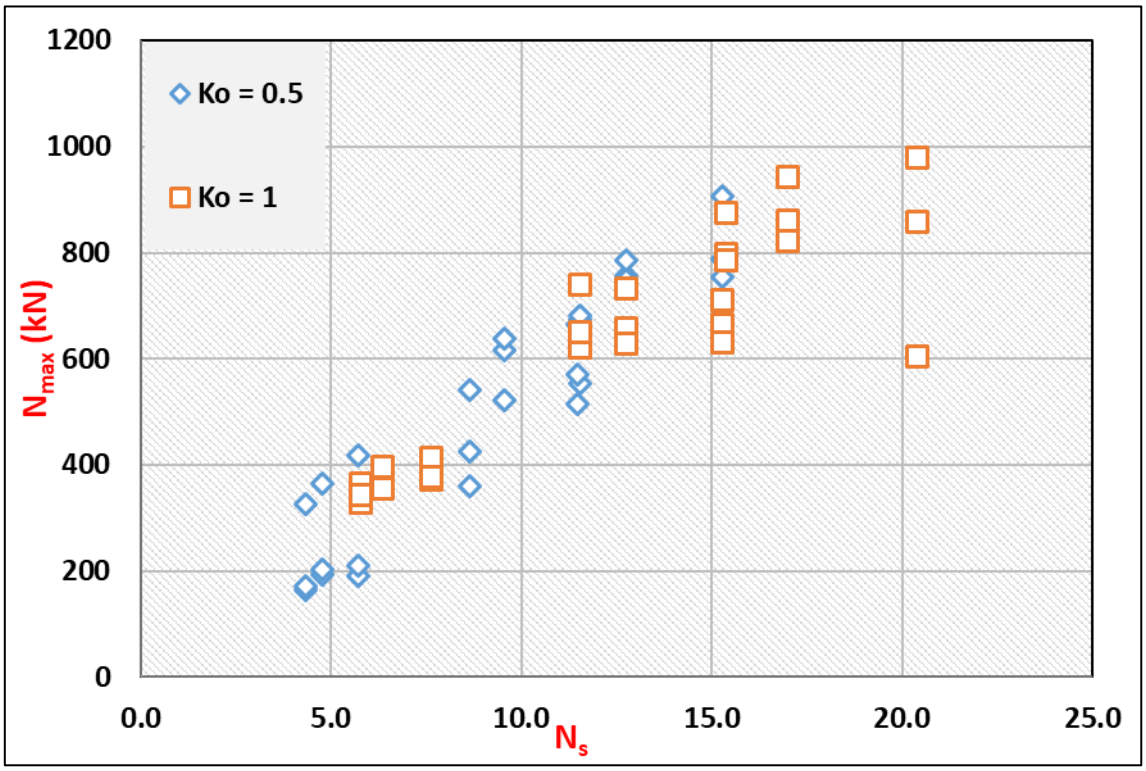


Διάγραμμα 34. Συσχέτιση μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονική δύναμης (N_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert).

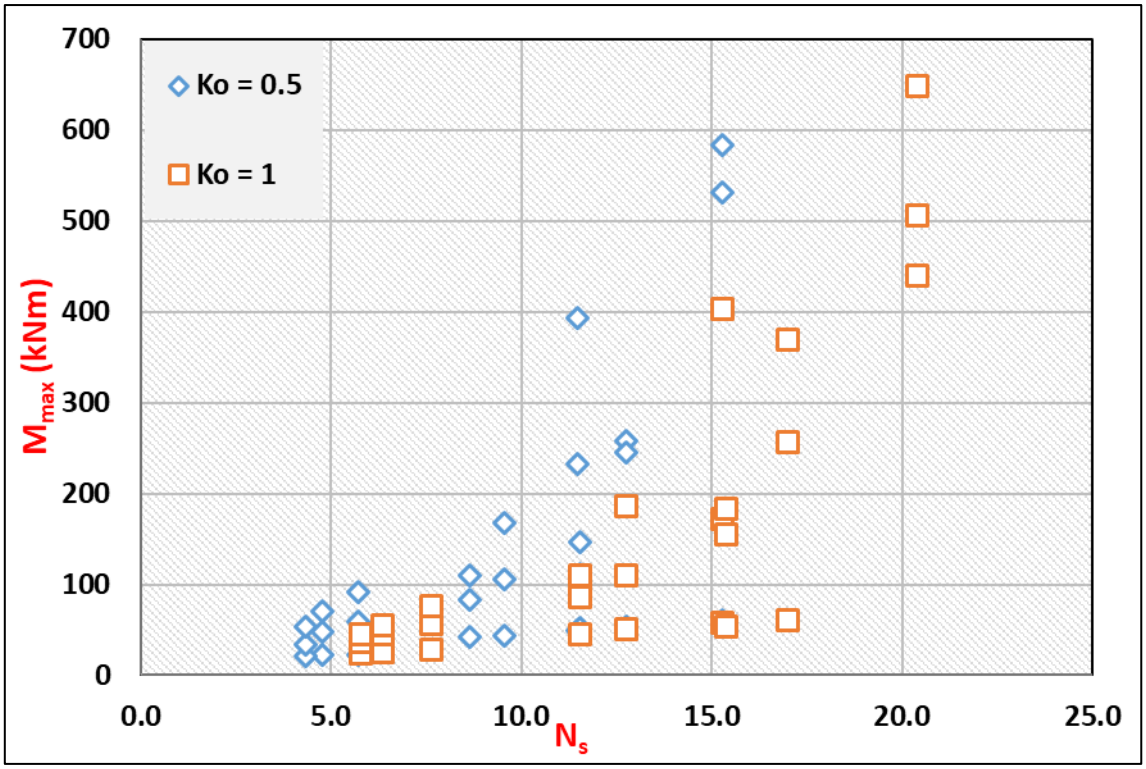


Διάγραμμα 35. Συσχέτιση μέγιστης αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής (M_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για διάφορες περιπτώσεις διάνοιξης (AB: τρεις φάσεις και invert, AB + invert: τρεις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert, ABC + invert: τέσσερις φάσεις και προσωρινό και τελικό invert).

Τέλος από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o) δεν έχει σημαντική επιρροή στις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις (N_{max}) της προσωρινής υποστήριξης, σε αντίθεση με την περίπτωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών (M_{max}) της προσωρινής υποστήριξης, όπου με βάσει τα ακόλουθα Διαγράμματα, παρατηρείται ότι για τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o=0.5, θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες καμπτικές ροπές από ότι στην περίπτωση όπου είναι K_o=1.



Διάγραμμα 36. Συσχέτιση αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης στην προσωρινή υποστήριξη (N_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1.



Διάγραμμα 37. Συσχέτιση αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής στην προσωρινή υποστήριξη (M_{max}) με τον συντελεστή υπερφόρτισης εδάφους (N_s), για τιμές συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων K_o =0.5 ή 1.

Τέλος η παρούσα εργασία, παρουσιάζει τις ακόλουθες **<u>προτάσεις για μελλοντική έρευνα</u>**:

- ✓ Διερεύνηση της επιρροής της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής στα παραγόμενα συμπεράσματα της εργασίας.
- ✓ Διερεύνηση της επιρροής της τμηματικής διάνοιξης σήραγγας στις προκαλούμενες συγκλίσεις και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στην υποστήριξη, για περιπτώσεις βαθύτερης εκσκαφής.
- ✓ Επέκταση της μεθοδολογίας της τμηματικής διάνοιξής σηράγγων και σε περιπτώσεις μεγαλύτερων υπογείων ανοιγμάτων, σε ασθενή εδάφη.

9. Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία:

- ✓ Γεωργίου, Δημήτριος. "*Κατασκευή σιδηροδρομικής σήραγγας Παναγοπούλας*." (2015).
- ✓ Καββαδάς, Μ. "*Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων*." *Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα* (2005).
- ✓ Σοφιανός, Αλέξανδρος. "*Υποστήριξη υπόγειων έργων.*" (2015).
- ✓ Σοφιανός, Αλέξανδρος. "*Διάνοιξη Σηράγγων*." (2018).
- ✓ ΕΡΓΟΣΕ

Διεθνής βιβλιογραφία:

- ✓ Hoek, E. Numerical modeling for shallow tunneling in weak rock. Discussion paper 3, 2004.
- ✓ Hoek, E., et al. "Rock-Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses." H. Evert, Practical Rock Engineering. Rocscience (2007).
- ✓ Lunardi, Pietro. Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS). Springer Science & Business Media, 2008.
- ✓ Marinos, Paul, and Evert Hoek. "GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation." ISRM international symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000.
- ✓ Marinos, P. V. "Geological behaviour of rock masses in underground excavations." Bulletin of the geological society of Greece 43.3 (2010): 1238-1247.
- ✓ Zheng, Y. L., Q. B. Zhang, and J. Zhao. "Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining." Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016): 287-299.
- ✓ ASCE Library
- ✓ Dr. Sauer & Partners
- ✓ Gall Zeidler Consultants
- ✓ Geokon
- ✓ www.sandvik.com
- ✓ www.liebherr.com
- ✓ www.epiroc.com
- ✓ www.putzmeister.com

- ✓ www.caterpillar.com
- ✓ Rocscience
- ✓ Robbins TBM
- ✓ Acciona Ghella Joint Venture