



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ
ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ
ΕΚΣΚΑΣΦΗΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΙΧΑΗΛ ΚΑΒΒΑΔΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΤΟΥΝΑ ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΑΘΗΝΑ 2021



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
POSTGRADUATE PROGRAMME IN DESIGNING AND
CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS**

MASTER THESIS

**NUMERICAL INVESTIGATION IN INFLUENCE OF THE
TUNNEL FACE AREA ON THE TUNNEL FACE STABILITY**



SUPERVISOR: M. KAVVADAS, PROFESSOR NTUA

TOUNA CHATZINIKOLAOU EVANGELIA PANAGIOTA

ΑΘΗΝΑ 2021

Copyright © Χατζηνικολάου Ευαγγελία, 2021

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 θα απευθύνονται προς στο συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στο παρόν έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν την επίσημη θέση του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	13
Περίληψη	15
Abstract	17
Thesis Review	18
1^ο Κεφάλαιο : Εισαγωγή	24
1.1 Σκοπός της Εργασίας	24
1.2 Δομή της Εργασίας	25
2^ο Κεφάλαιο : Γενικά Περί Σηράγγων.....	27
2.1 Τι είναι σήραγγα	28
2.2 Γεωτεχνική Ταξινόμηση και Σχεδιασμός	29
2.2.1 Σύστημα RQD κατά Deere 1964	29
2.2.2 Σύστημα Q κατά Barton 1971	31
2.2.3 Σύστημα RMR κατά Bieniawski 1989	35
2.2.4 Σύστημα GSI κατά Hoek & Marinos 2000	38
2.3 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων	43
2.3.1 Μηχανοποιημένη Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων	43
2.3.2 Μέθοδος Διάνοιξης με Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut & Cover)	45
2.3.3 Συμβατικές Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων	47
3^ο Κεφάλαιο : Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων (NATM)	49
3.1 Ιστορική Αναδρομή της Μεθόδου NATM	49
3.2 Περιγραφή της Μεθόδου NATM	49
4^ο Κεφάλαιο : Ολομέτωπη Διάνοιξη ADECO - RS	54
4.1 Ιστορική Αναδρομή της Μεθόδου ADECO – RS	54
4.2 Περιγραφή της Μεθόδου ADECO – RS	54
5^ο Κεφάλαιο : Έλεγχος της Ευστάθειας του Μετώπου	62

5.1 Εκσκαφή σε Πολλαπλές Φάσεις	63
5.2 Προυποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Αγκύρια Fiberglass	64
5.3 Προυποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Δοκούς Προπορείας Forepole	66
5.4 Συντελεστής Ασφάλειας κατά Γεωργίου Δ. (2021)	68
6° Κεφάλαιο : Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις	72
6.1 Σκοπός των Αριθμητικών Αναλύσεων	72
6.2 Περιγραφή του Προσομοιώματος των Αριθμητικών Αναλύσεων	73
6.3 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά του Μοντέλου	75
6.4 Περιγραφή των Υλικών που Προσομοιώνονται	79
6.4.1 Χαρακτηριστικά Γεωυλικών	79
6.4.2 Χαρακτηριστικά Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (Gunit)	80
6.4.3 Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Ολόσωμης Πάκτωσης (Rock Bolts)	81
6.4.4 Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)	81
6.4.5 Χαρακτηριστικά Δοκών Προπορείας (Forepoles)	83
7° Κεφάλαιο : Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις για Ρηχές Σήραγγες	87
7.1 Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας	87
7.2 Συγκλίσεις της Σήραγγας	101
7.3 Καθιζήσεις της Σήραγγας	104
8° Κεφάλαιο : Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις για Βαθιές Σήραγγες	108
8.1 Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας	108
8.2 Συγκλίσεις της Σήραγγας	123
9° Κεφάλαιο : Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	128
9.1 Συμπεράσματα	128
9.2 Προτάσεις	132
Βιβλιογραφία	134

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 0 : Total extrusion reduction for each of under study cases independently of tunnel overburden height H/D .
- Σχήμα 1 : Περιγραφή RQD & Αριθμητικό Παράδειγμα
- Σχήμα 2 : Μέτρα υποστήριξης σήραγγας διαμέτρου 6–12 m βάσει του συστήματος ταξινόμησης RQD
- Σχήμα 3 : Τιμές παραμέτρων μεθόδου Q κατά Barton
- Σχήμα 4 : Τιμές συντελεστή ασφάλειας ESR
- Σχήμα 5 : Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης βάσει μεθόδου Q
- Σχήμα 6 : Βαθμονόμηση Μεθόδου RMR
- Σχήμα 7 : Διόρθωση RMR λόγω σχετικού προσανατολισμού σήραγγας και ασυνεχειών & χαρακτηρισμός βραχώμαζας
- Σχήμα 8 : Χρόνος αυτουποστήριξης σήραγγας βάσει RMR
- Σχήμα 9 : Μέτρα άμεσης υποστήριξης βάσει RMR
- Σχήμα 10 : Πίνακας GSI, Hoek & Marinos 2000
- Σχήμα 11 : Συσχέτιση των παραμορφώσεων της σήραγγας & του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επικρατούσες γεωστατικές τάσεις
- Σχήμα 12 : Μέτρα προσωρινής υποστήριξης βάσει του μεγέθους των παραμορφώσεων
- Σχήμα 13 : Συσχέτιση του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επικρατούσες γεωστατικές τάσεις με τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων, παρουσία της προσφερόμενης από την υποστήριξη πίεση p_i
- Σχήμα 14 : Κατηγορίες TBM που επιλέγονται ανάλογα με τη σκληρότητα του εδάφους & τα μηχανικά του χαρακτηριστικά (Πηγή: Μιχαλακαόπουλος, 2015)
- Σχήμα 15 : Ποσοστό απόδοσης του επιλεγμένου τύπου TBM ανάλογα του βαθμού RMR (Πηγή: Μιχαλακαόπουλος, 2015)
- Σχήμα 16 : Απεικόνιση των μεθόδων Α. Από κάτω προς τα επάνω & Β. Από πάνω προς τα κάτω διάνοιξης (Πηγή: railsystem.net)
- Σχήμα 17 : Χαρακτηριστική Καμπύλη Σύγκλισης Αποτόνωσης & Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης

των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχύμαζας επί των άμεσων μέτρων

Σχήμα 18 : Παραμορφώσεις πλησίον του μετώπου εκσκαφής

Σχήμα 19 (α) : Σημείο Α εκτός ζώνης επιρροής του μετώπου

Σχήμα 19 (β) : Σημείο Α επί του προχωρούντος έμπροσθεν τυρήνα

Σχήμα 19 (γ) : Σημείο Α επί της παρειάς της εκσκαφής

Σχήμα 20 : Αριστερά η προυποστήριξη ή προβελτίωση έμπροσθεν του μετώπου & Δεξιά η άμεση υποστήριξη σε κοντινή απόσταση από το διανοιγμένο μέτωπο

Σχήμα 21 : Μηκοτομή και Εγκάρσια Τομή Διάνοιξης με χρήση υποοριζόντιων εδαφοπασσάλων (Επάνω) & με τεχνική πρότμησης της περιφέρειας (Κάτω)

Σχήμα 22 : Στάδια τμηματικής εκσκαφής για ποικίλους αριθμούς φάσεων

Σχήμα 23 : Μηχανισμός λειτουργίας αγκυρίων Fiberglass

Σχήμα 24 : Προενίσχυση μετώπου με αγκύρια fiberglass

Σχήμα 25 : Στήριξη ομπρέλας Forepole στο Βόρειο Μέτωπο Εξόδου της Σήραγγας Σ2.1 του κάθετου άξονα 70 Εγνατίας Οδού

Σχήμα 26 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο NATM

Σχήμα 27 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο τύπου ADECO-RS

Σχήμα 28 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο τύπου ADECO-RS

Σχήμα 29 : Όρια που τέθηκαν κατά την προσομοίωση συναρτήσει της διαμέτρου D

Σχήμα 30 : Εδάφη που προσοιώθηκαν στις Ρηχές σήραγγες

Σχήμα 31 (α) : Εδάφη που προσοιώθηκαν στις Βαθιές σήραγγες

Σχήμα 31 (β) : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εδαφών που προσοιώθηκαν στις Βαθιές σήραγγες

Σχήμα 32 : Χαρακτηριστικά Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος

Σχήμα 33 : Χαρακτηριστικά Περιμετρικών Αγκυρίων

Σχήμα 34 : Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Μετώπου

Σχήμα 35 : Χαρακτηριστικά Δοκών Προπορείας

Σχήμα 36 : Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης & Προενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής.

Σχήμα 37 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

Σχήμα 38 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την

τμηματική διάνοξη.

Σχήμα 39 : Επιρροή του λόγου των υπερκειμένων H/D στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικές περιπτώσεις χαμηλών υπερκειμένων.

Σχήμα 40 : Σύγκριση της συνεισφοράς των αγκυρίων μετώπου Fiberglass στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, έναντι του ανυποστήρικτου κατά την τμηματική εκσκαφή, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου.

Σχήμα 41 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Σχήμα 42 : U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για ανυποστήρικτο και υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

Σχήμα 43 (α) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής.

Σχήμα 43 (β): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..

Σχήμα 44 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass & δοκούς προπορείας Forepole.

Σχήμα 45 (α) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής.

Σχήμα 45 (β) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..

Σχήμα 46 : Σύγκριση της συνεισφοράς των δοκών προπορείας Forepole σε συνδιασμό με τη χρήση αγκυρίων μετώπου Fiberglass, έναντι της χρήσης μόνο ακυρίων μετώπου, στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου.

Σχήμα 47 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 3 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων, για ανυποστήρικτο (άνω αριστερά), για υποστηριγμένο με Fiberglass (άνω δεξιά) & για υποστηριγμένο με συνδιασμό αγκυρίων Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole (κάτω) μέτωπο, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου

Σχήμα 48 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την ολομέτωπη διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Σχήμα 49 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 4 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων στην

τμηματική εκσκαφή, για ανυποστήρικτο μέτωπο, για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο, για υποστηριγμένο μέτωπο με συνδιασμό αγκυρίων Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole και για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο ολομέτωπης διάνοιξης.

- Σχήμα 50 : Μείωση της εξώθησης στην τμηματική εκσκαφή με χρήση αγκυρίων μετώπου, αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας, καθώς και ολομέτωπη διάνοιξη σε σχέση με την Α' Φάση εκσκαφής του ανυποστήρικτου μετώπου.
- Σχήμα 51 : Μεταβολή των μέγιστων προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{F_0} .
- Σχήμα 52 : Μεταβολή των προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{F_0} .
- Σχήμα 53 : Επιρροή των μέτρων υποστήριξης στη διακύμανση των συγκλίσεων
- Σχήμα 54 : Επιφανειακές Καθιζήσεις κατά μήκος το άξονα της σήραγγας.
- Σχήμα 55 : Επιφανειακές Καθιζήσεις εγκάρσια του άξονα της σήραγγα για τη μισή διατομή της σήραγγας.
- Σχήμα 56 : Επιρροή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των εδαφών στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.
- Σχήμα 57 : Επιρροή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων του εδάφους στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.
- Σχήμα 58 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη.
- Σχήμα 59 : Επιρροή των αγκυρίων μετώπου Fiberglass στη μείωση των εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.
- Σχήμα 60 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.
- Σχήμα 61 (α) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής.
- Σχήμα 61 (β) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..
- Σχήμα 62 : Συνεισφορά των αγκυρίων μετώπου Fiberglass καθώς και ο συνδιασμός αυτών με τις δοκούς προπορείας Forepoles, στη μείωση των εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.
- Σχήμα 63 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την

τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass & δοκούς προπορείας Forepole σε βαθιές σήραγγες.

- Σχήμα 64 (α) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α΄ φάσης εκσκαφής για βαθιές σήραγγες.
- Σχήμα 64 (β) : Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής για βαθιές σήραγγες.
- Σχήμα 65 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F_0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την ολομέτωπη διάνοιξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.
- Σχήμα 66 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 4 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων στην τμηματική εκσκαφή, για ανυποστήρικτο μέτωπο, για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο, για υποστηριγμένο μέτωπο με συνδιασμό αγκυρίων Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole και για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο ολομέτωπης διάνοιξης για βαθιές σήραγγες.
- Σχήμα 67 : Μείωση της εξώθησης στην τμηματική εκσκαφή με χρήση αγκυρίων μετώπου, αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας, καθώς και ολομέτωπη διάνοιξη σε σχέση με την Α΄ Φάση εκσκαφής του ανυποστήρικτου μετώπου.
- Σχήμα 68 : Μεταβολή των αναπτυσσόμενων εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του ανυποστήρικτου του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη (αριστερά) και του υποστηριζόμενου με αγκύρια Fiberglass (δεξιά) κατά την ολομέτωπη διάνοιξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για το ίδιο πτωχό εδάφος.
- Σχήμα 69 : Αστοχία μετώπου σήραγγας λόγω των μεγάλων τιμών εξώθησης που αναπτύχθηκαν στο μέτωπο για υπερκείμενα $H=200$ m.
- Σχήμα 70 : Μεταβολή των μέγιστων προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{F_0} .
- Σχήμα 71 : Μεταβολή των προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{F_0} .
- Σχήμα 72 : Επιρροή των μέτρων υποστήριξης στη διακύμανση των συγκλίσεων
- Σχήμα 73 : Σύγκριση των μεθόδων Adeco – RS & NATM σε όρους διανοιγμένων μέτρων σήραγγας ανά μήνα
- Σχήμα 74 : Συνολικές μειώσεις εξώθησης μετώπου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις υποστήριξης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο ανεξάρτητα του λόγου H/D

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτείται η ολοκλήρωση της φοιτησής μου στο Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κλείνοντας το εν λόγω ακαδημαϊκό κεφάλαιο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ακόλουθο κύκλο ανθρώπων που υπήρξαν συνοδοιπόροι μου σε αυτή την προσπάθεια :

- ✓ Τον καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Μιχαήλ Καββαδά για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα.
- ✓ Τον διδάκτορα κ. Δημήτρη Γεωργίου για την ενεργό παρουσία του και τη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέφερε μέσα από μία ευχάριστη συνεργασία.
- ✓ Όλους τους καθηγητές του Δ.Π.Μ.Σ., για το μεράκι με το οποίο ανταποκρίθηκαν σε ένα ακόμη ακαδημαϊκό έτος, με αρκετές ιδιαιτερότητες και δυσκολίες λόγω συνθηκών.
- ✓ Την τριμελή επιτροπή η οποία απαρτίζεται πέραν του επιβλέποντος κ. Μ. Καββαδά, και από τους καθηγητές κυρίους Π. Νομικό και Α. Παπαδημητρίου, για το χρόνο που αφιέρωσαν στην παρακολούθηση της εργασίας μου.
- ✓ Τη Νάνσυ, τη Γωγώ, τη Μαρία, το Μανώλη, τον Αλέξη για την παρουσία τους διά ζώσης και εξ αποστάσεως.
- ✓ Τους συνεργάτες μου κ. Σ. Μπορονκάυ και Β. Λαμπρίτσιο για την κατανόηση που έδειξαν στον εργασιακό χώρο έως το πέρας της παρούσας εργασίας.
- ✓ Τέλος, την οικογένεια μου για την πάσης φύσεως στήριξη που μου παρείχαν στην χάραξη της μέχρι τώρα πορείας μου, με ιδιαίτερη μνεία στον πιο αγαπημένο μου άνθρωπο, τον παππού μου Γεώργιο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα εκ των σπουδαιότερων αντικειμένων της σημερινής μηχανικής αποτελεί η διάνοιξη σηράγγων. Για τους μελετητές σημαντικό προβλημα προς επίλυση αποτελεί η εξώθηση του μετώπου που πραγματοποιείται κατά τη διάνοιξη του υπόγειου έργου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση της εκδήλωσης εξωθήσεων οι οποίες συναρτώνται της επιφάνειας του μετώπου της σήραγγας που διανοίγεται, εφαρμόζοντας ως προϋποστήριξη μετώπου τα αγκύρια μετώπου (Fiberglass) με ταυτόχρονη ή μη εφαρμογή δοκών προπορείας (Forepoles), άλλοτε κατά την ολομέτωπη διάνοιξη κατ' εφαρμογή των βασικών αρχών της μεθόδου Adeco – RS, και άλλοτε κατά την τμηματική εκσκαφή βασιζόμενη στη μέθοδο NATM.

Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκαν τρισδιάστατες αναλύσεις στο στατικό λογισμικό πρόγραμμα Simulia Abaqus v.2018, στο οποίο και μορφώθηκε ένα 3D προσομοίωμα, στο οποία δόθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ενώ προς οικονομία υπολογιστικού χρόνου προσομοιώθηκε μόνο το ήμισυ της σήραγγας αξιοποιώντας την ως προς Y άξονα συμμετρία της .

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν είναι το μέγεθος των εξωθήσεων του μετώπου, οι προ - συγκλίσεις αλλά και επιφανειακές καθιζήσεις για τις δύο εναλλακτικές μεθόδους διάνοιξης. Όλα τα παραπάνω μεγέθη συναρτώνται του συντελεστή ασφαλείας, όπως αυτός ορίζεται από τη σχέση του Γεωργίου Δ. (2021), ανάλογα με την πυκνότητα του κανάββου αγκυρίων μετώπου, του ύψους των υπερκειμένων γαιών αλλά και του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K_0 .

ABSTRACT

One of the most important achievements of the modern engineering is tunnel excavation. For the researchers, a great problem that they have to solve is extrusions that take place on the surface of the face during the excavation procedure.

The present diploma thesis, studies the extrusions of the tunnel face, related to the area of the tunnel surface, which is supported by fiberglass with simultaneous or non-use of forepoling, either in full face excavation by using the main principles of Adeco - RS method of excavation, or in partial excavation by applying some of NATM's method principles.

To find this purpose, 3D analyses were run in, using the static software program Simulia Abaqus v.2018, were a 3D model performed by giving it as inputs all the necessary geometrical and geotechnical characteristics, while for economy of calculation time only the half part of the tunnel was simulated by taking advantage of the tunnel's symmetry on the Y axis.

The results that we extracted, were tunnel face extrusion, tunnel closure and surface settlements for the two alternative methods of excavation. All the upper quantities are related to the safety factor which is given by Georgiou D. et all (2021) reserach, as a function of fiberglass grid's density, the surface height and the horizontal soil stresses factor K_0 .

THESIS REVIEW

The present master thesis project conducts an investigation on the influence of the partial excavation (NATM) on the amelioration of stability of the tunnel surface. NATM method, constitutes a very famous way of tunnel's drilling, not only because of its facility during the procedure, but also because of the low budget solution that offers in case of absence of temporary support measures. By using the basic principles of NATM method, there is progressive addition of support measurements, starting with the non-supported tunnel surface, continuing with the addition of fiberglass with specific density on it, and completing with the Forepoles' addition combined with the fiberglass.

However, there is another one method which is not that fabulous method in tunnelling engineering and it is called as Adeco -RS. Through that method, we are allowed to drill into the tunnel, by excavating full face and having provided fully and earlier the tunnel face support measures. Among the parameters that are applied in this method, this thesis is conducted by adopting only fiberglass on the face area. Thus, the main goal of this project is the investigation of the influence of all these parameters (tunnelling methods and support measurements) on the tunnel face extrusion.

For the elaboration of this thesis, three – dimensional analyses were performed in the software Simulia ABAQUS v.2018. A 3D simulation was created in the software for which its geometric characteristics were defined, while the half tunnel was simulated for economy of calculation volume and time. In addition, results were obtained for different soil types, heights and horizontal soil stresses factor.

More specifically, in all of the analyses the temporary measurements and the pre – reinforcement that are simulated are the following:

- ✓ Shotcrete
- ✓ Rock bolts

- ✓ Fiberglass
- ✓ Forepoling Umbrella

The under-study cases are described following:

- ✓ Partial excavation in two faces (Top – Heading & Bench), based on NATM's principles. The distance between the two faces is defined as $1.5 \cdot D$ (where D is the diameter of the tunnel face), so as to avoid the influence of the Bench on the tunnel face stability. That distance is based on the investigation thesis of D. Georgiou & I. Tsapekis entitled as <<Numerical Analysis of Tunnel Face Stability in Shallow Tunnels by using Forepoling Umbrella and Fiberglass>>. The simulation is about Shallow tunnels with tunnel overburden height measured by the tunnel axis $H = 20$ & 40 m ή $H/D = 2$ & 4 respectfully and equivalent tunnel diameter $D = 10$ m. The analyzes were run for the two different cases of horizontal stresses factor: $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$.
 1. The tunnel is excavated and the tunnel face is unsupported (UNS).
 2. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported by Fiberglass (FG).
 3. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported not only by Fiberglass (FG) but also by Forepoling Umbrella (FP).
- ✓ Application of the main principles of Adeco – RS method, which allow us to excavate the tunnel in one face, for Shallow Tunnels with tunnel overburden height measured by the tunnel axis $H = 20$ & 40 m ή $H/D = 2$ & 4 and equivalent tunnel diameter $D = 10$ m. The analyzes were run for the two different cases of horizontal stresses factor: $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$.

1. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported by Fiberglass (FG).
- ✓ Partial excavation in two faces (Top – Heading & Bench), based on NATM's principles. The distance between the two faces is defined as $1.5 \cdot D$ (where D is the diameter of the tunnel face), so as to avoid the influence of the Bench on the tunnel face stability. The simulation is about Deep tunnels with tunnel overburden height measured by the tunnel axis $H = 100$ & 200 m ή $H/D = 10$ & 20 respectfully and tunnel diameter $D = 10$ m. The analyzes were run for the two different cases of horizontal stresses factor: $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$.
1. The tunnel is excavated and the tunnel face is unsupported (UNS).
 2. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported by Fiberglass (FG).
 3. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported not only by Fiberglass (FG) but also by Forepoling Umbrella (FP).
- ✓ Application of the main principles of Adeco – RS method, which allow us to excavate the tunnel in one face, for Deep Tunnels with tunnel overburden height measured by the tunnel axis $H = 100$ & 200 m ή $H/D = 10$ & 20 respectfully and tunnel diameter $D = 10$ m. The analyzes were run for the two different cases of horizontal stresses factor: $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$.
1. The tunnel is excavated and the tunnel face is supported by Fiberglass (FG).

Among the main conclusions that we resulted in, are the following:

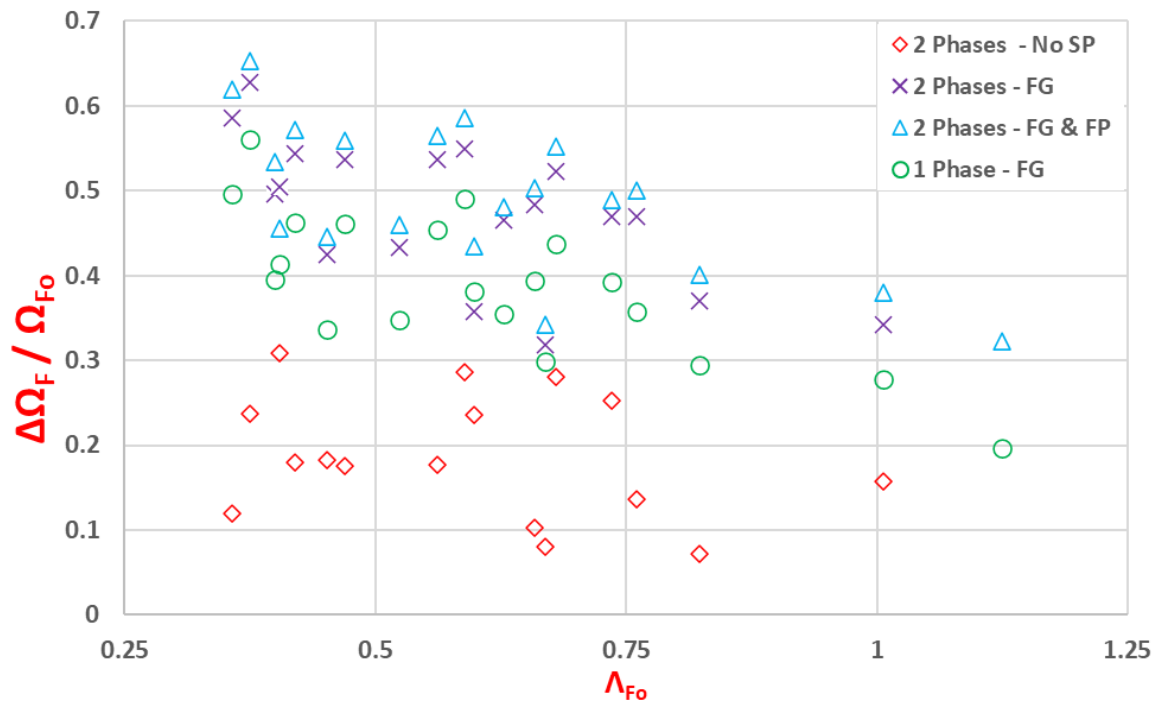
- ✓ The partial method in two faces without support measurements, achieved a great reduction of the face extrusion which is close to 30% for the shallow tunnels and a bit higher for the deep ones.

-
- ✓ After the support of the face with fiberglass, both in shallow and in deep tunnels, the results were close enough. Specifically, for shallow tunnels with overburden height $H/D \leq 4$, the extrusion reduced about 65 %, while for deep ones with overburden height $H/D \leq 20$, the extrusion reduced about 55 %.

 - ✓ After the extra face enchantment not only by fiberglass but also by Forepoling umbrella $\Phi 114.3/100.3$, keeping constant the axial distance between them at 50 cm, the observed change of the extrusion was almost zero.

 - ✓ As for the Full-Face excavation, based on Adeco – RS method, the given results were extremely satisfactory, as for the shallow tunnels the achieved reduction was up to 60 %, and for the deep ones this percentage is almost 45%. The main point that has to be mentioned is that through this method, achieved the same percentage of reduced extrusion with the partial excavation with support meters. That conclusion, make Adeco – RS a financially advantageous method.

 - ✓ Summarizing all the previous results, the following diagram helps reader to create a schematic illustration of them, and understand how the extrusion reduce, as the temporary support meters augment. This way, it is easier to realize the fact that Full Face method gives equivalent results to Partial one, independently of the tunnel overburden height.



Σχήμα 0 : Total extrusion reduction for each of under study cases independently of tunnel overburden height H/D.

- ✓ Concerning the percentage of reduction of the surface settlements, as they have been given for the shallow tunnels, the application either of fiberglass or of the combination of fiberglass and forepoles achieved gratefully low prices.
- ✓ As for the pre – convergence, their development seemed to be limited enough, especially in the case of Adeco -RS, and followingly in the combination of Forepole & Fiberglass.
- ✓ An important fact that has to be mentioned is that the density of fiberglass should be augmented, as some of the analyses misfired.
- ✓ After all, independently that Adeco – RS method has applied mainly in deep tunnels, it has also given great results in shallow tunnels.

1^ο Κεφάλαιο

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Οι σύγχρονες αστικές ανάγκες καθιστούν ολοένα και πιο απαραίτητη την κατασκευή υπόγειων έργων και την διάνοιξη σηράγγων, κατασκευές που όμως αποτελούνται από διαδικασίες αυξημένου κόστους αλλά και κινδύνου για το προσωπικό που τις κατασκευάζει καθώς και ιδιαίτερα χρονοβόρες.

Για τους μελετητές σημαντικό προβλημα προς επίλυση αποτελεί η ευστάθεια του μετώπου που πραγματοποιείται κατά τη διάνοιξη του υπόγειου έργου, καθότι κατά την προχώρηση αυτού, πραγματοποιείται ανακατανομή των τάσεων στη περιβάλλουσα βραχώμαζα, η οποία με τη σειρά της επιφέρει μετακινήσεις αυτής. Σε περιπτώσεις βαθιών σηράγγων, τούτες οι μετακινήσεις, εάν δεν είναι ικανές να επιφέρουν αστοχία της κατασκευής, δεν επιφέρουν άλλα προβλήματα, όμως σε περιπτώσεις χαμηλών υπερκειμένων όπως συμβαίνει στις αστικές σήραγγες, η όποια μετακίνηση συνδέεται με σωρό άλλων προβλημάτων.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση της επιρροής της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής που διανοίγεται με εφαρμογή αγκυρίων μετώπου Fiberglass καθώς και συνδιασμό των Fiberglass με δοκούς προπορείας Forepoles, ως μέτρα άμεσης υποστήριξης. Έτσι, μελετήθηκαν και θα παρουσιαστούν οι εξωθήσεις του μετώπου εκσκαφής, καθώς και οι εγκάρσιες και κατά μήκος του άξονα επιφανειακές καθιζήσεις του εδάφους, για διαδοχική εφαρμογή των παραπάνω μέτρων υποστήριξης, για εδάφη με διαφορετικά πτωχής ποιότητας χαρακτηριστικά, σε βάθη υπερκειμένων τέτοια, ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για ρηχή, όσο και για βαθιά διάνοιξη σήραγγας, για τις δύο περιπτώσεις επιφάνειας του μετώπου: ολομέτωπη και τμηματική.

1.2 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από εννέα στο σύνολο κεφάλαια, τα οποία και αποδίδουν τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο εδράζεται η μελέτη, όσο και το πειραματικό.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής καθώς και για τον τρόπο με τον οποίο αυτή δομείται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται συνοπτικά ο ορισμός της σήραγγας και η πορεία της σηραγγοποιίας μέσα στα χρόνια, περιγράφονται ορισμένες εκ των σπουδαιότερων γεωτεχνικών ταξινομήσεων, ενώ τέλος παρουσιάζονται οι επικρατέστερες μέθοδοι διάνοιξης που εφαρμόζονται.

Το τρίτο κεφάλαιο αποδίδει αναλυτικότερα την Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM), συμπεριλαμβανομένου του τρόπου λειτουργίας της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται τόσο η ιστορική αναδρομή όσο και η φιλοσοφία πάνω στην οποία στηρίζεται η μέθοδος Adeco – RS.

Το πέμπτο κεφάλαιο εμπεριέχει επιγραμματικά τις μεθόδους που εφαρμόζονται γενικά για τον έλεγχο της ευστάθειας του διανοιγώμενου μετώπου, και πιο αναλυτικά εκείνες τις μεθόδους που εφαρμόζονται στο προσομοίωμα της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, γίνεται ιδιαίτερη μνεία στον συντελεστή ασφαλείας που εφαρμόστηκε σύμφωνα με την νεοευρεθείσα σχέση κατά Γεωργίου Δ. (2021).

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται πλήρης αναφορά στον τρόπο με τον οποίο στήθηκε το μοντέλο με βάση το τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με το οποίο ήρθαν σε πέρας οι αναλύσεις. Σε υποκεφάλαια αυτού, δίνονται όλες οι πληροφορίες / λεπτομέρειες σχετικά με τις διαστάσεις του μοντέλου, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων εδαφών, υλικών, υπερκείμενων γαιών και μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρατίθενται τα πρώτα αποτελέσματα που αφορούν στις ρηχές σήραγγες. Συγκεκριμένα, δίνονται εικόνες και διαγράμματα μεγέθους των εξωθήσεων που προκύπτουν, αλλά και σχολιασμοί αυτών, για την σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών επιφανειών μετώπου που επιλέχθηκαν (πλήρες μέτωπο και Α΄ Φάση Εκσκαφής), αυξανομένων των μέτρων

υποστήριξης και των υπερκειμένων γαιών. Επιπλέον αυτών, δίνονται και οι μετακινήσεις στη στέψη του μετώπου καθώς και οι επιφανειακές καθιζήσεις.

Στο όγδοο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν στις βαθιές σήραγγες. Όμοια με το προηγούμενο κεφάλαιο, δίνονται σχηματικά και διαγραμματικά οι προκύπτουσες εξωθήσεις, συγκλίσεις και καθιζήσεις, οι οποίες υπόκεινται σε σχολιασμό για την σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών επιφανειών μετώπου που επιλέχθηκαν.

Το έννατο και τελευταίο κεφάλαιο, αποτελείται από τα εφ' όλης της εργασίας συμπεράσματα που προέκυψαν, αλλά και από σκέψεις για πιθανή μελλοντική έρευνα.

Η διπλωματική αυτή εργασία θα κλείσει με την βιβλιογραφικές πηγές που αξιοποιήθηκαν, και η οποία αποτελείται από βιβλία, χειρόγραφες σημειώσεις, άρθρα, διδακτορικές διατριβές και διπλωματικές εργασίες.

2^ο Κεφάλαιο

Γενικά περί Σηράγγων

2.1 Τι είναι Σήραγγα

Ο ίδιος ο όρος σήραγγα έχει τις ρίζες του στην αρχαιότητα, όπου και χρησιμοποιείτο για να αποδοθεί οποιαδήποτε κοιλότητα δημιουργείτο εντός βράχων λόγω της παρουσίας του νερού της βροχής ή του θαλασσινού νερού. Σήμερα, ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάθε όρυγμα τεχνητό ή φυσικό, το οποίο έχει σχήμα στοάς σε οποιοδήποτε υπόγειο τμήμα της γης (κάτω από την επιφάνεια της γης, της θάλασσας, κάποιας λίμνης ή ποταμού), το οποίο έχει διανοιχθεί με τεχνητό τρόπο με σκοπό την αξιοποίηση του για συγκοινωνιακούς σκοπούς (διέλευση σιδηροδρόμων ή οδικών αξόνων), για την αξιοποίηση υπάρχοντος μεταλλεύματος, για την καθοδήγηση υδάτινων πόρων, για την παραγωγή ενέργειας, για την διέλευση ιών, καλωδίων κτλ.

Η ιστορία των σηράγγων στη χώρα μας, έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα με κάποια εκ των δημοφιλέστερων έργων αυτά του Ευπαλίνειου ορύγματος τον 6^ο αι. π.Χ. και την υδραυλική σήραγγα του Πεισίστρατου, ενώ μέχρι σήμερα έχουν έρθει σε πέρας εκατοντάδες έργα που μετρούν συνολικά πάνω από 350 km στον ελλαδικό χώρο.

2.2 Γεωτεχνική Ταξινόμηση και Σχεδιασμός

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας αποτελεί ένα κεφάλαιο με το οποίο έχουν ασχοληθεί πολλοί μελετητές στο παρελθόν. Συγκεκριμένα, δύναται να πραγματοποιηθεί με θεώρηση της βραχώμαζας ως ενός υλικού σύνθετου και ομοιογενούς με χαρακτηριστικές ιδιότητες όμοιες με αυτές του στερεού σώματος, οι οποίες καθορίζονται βάσει της ταξινόμησης του υλικού. Κατά την ταξινόμηση αυτή και προκειμένου το εν λόγω υλικό να διαφοροποιείται από το άρρηκτο και ομοιογενές πέτρωμα, ονομάζεται βραχώμαζα. Ορισμένα από τα κυριότερα συστήματα ταξινόμησης που έχουν αναπτυχθεί και ευρέως χρησιμοποιηθεί είναι το σύστημα RQD (Deere 1964), το Q (Barton 1971), το RMR (Bieniawski 1989) και το GSI (Hoek & Marinos 2000):

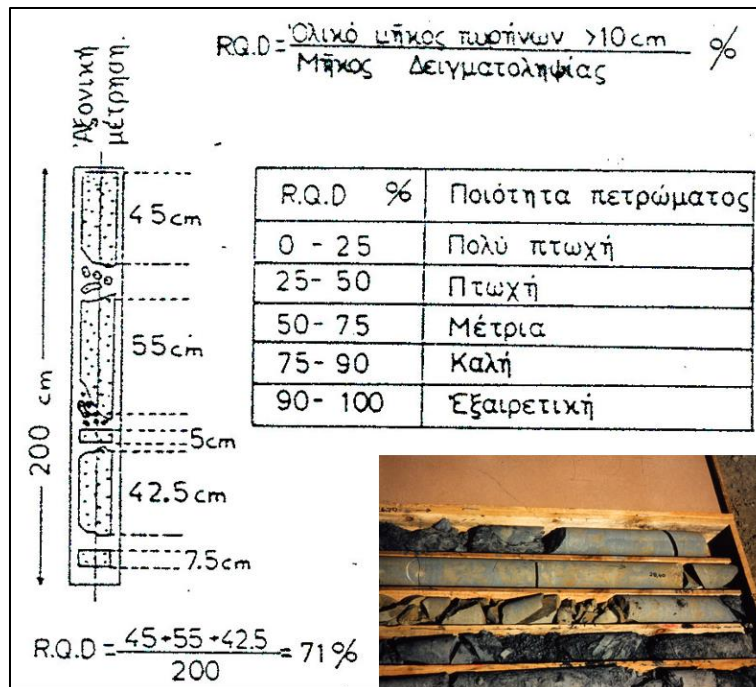
2.2.1 Σύστημα RQD κατά Deere 1964

Η μαθηματική σχέση που αντικατοπτρίζει το σύστημα RQD είναι η :

$$RQD = \frac{\sum(\text{τμήματα μήκους} \geq 10 \text{ cm})}{\sum(\text{όλων των τμημάτων του δείγματος})} \times 100\%$$

Το αποτέλεσμα του παραπάνω κλάσματος είναι αυτό που θα δώσει τον τελικό χαρακτηρισμό βάσει των 5 ακόλουθων περιπτώσεων (Σχήμα 1):

- $RQD = 0 - 25 \%$ → Πολύ Πτωχής Ποιότητας Βραχώμαζα
- $RQD = 25 - 50 \%$ → Πτωχής Ποιότητας Βραχώμαζα
- $RQD = 50 - 75 \%$ → Μέτριας Ποιότητας Βραχώμαζα
- $RQD = 75 - 90 \%$ → Καλής Ποιότητας Βραχώμαζα
- $RQD = 90 - 100 \%$ → Εξαιρετικής Ποιότητας Βραχώμαζα



Σχήμα 1 : Περιγραφή RQD & Αριθμητικό Παράδειγμα

Ακολούθως, ο Deere δημιούργησε τον ακόλουθο Πίνακα του Σχήματος 2 , βάσει του οποίου καταλήγει στην εκτίμηση της ποσότητας των τριών διαφορετικών μέτρων άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια ή/και μεταλλικά πλαίσια), ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας που θα αποδώσει το κριτήριο RQD και τον τρόπο διάνοιξης (με χρήση εκρηκτικών υλών ή με όρυξη με μηχανικά μέσα). Έτσι προτείνει τον ακόλουθο Πίνακα του Σχήματος 2 , ο οποίος όμως απαντάται κατ'αποκλειστικότητα σε σήραγγες ανοίγματος διαμέτρου 6 – 12 μέτρων (αρκετά συνηθισμένο εύρος).

Rock Quality	Construction Method	Steel Sets		Rock Bolt		Shotcrete		Additional Supports
		Weight of Steel Sets	Spacing	Spacing of Pattern Bolt	Additional Requirements	Total Thickness (cm)		
						Crown	Sides	
Excellent RQD > 90	Boring Machine	Light	None to occasional	None to Occasional	Rare	None to Occasional	None	None
	Drilling & Blasting	Light	None to Occasional	None to Occasional	Rare	None to Occasional	None	None
Good RQD 75 to 90	Boring Machine	Light	Occasional to 1.5 to 1.8m	Occasional to 1.5 to 1.8m	Occasional mesh and straps	Local Application 5 to 7.5cm	None	None
	Drilling & Blasting	Light	1.5 to 1.8m	1.5 to 1.8m	Occasional mesh or straps	Local application 5 to 7.5cm	None	None
Fair RQD 50 to 75	Boring Machine	Light to Medium	1.5 to 1.8m	1.2 to 1.8m	Mesh and straps as required	5 to 10cm	None	Rock bolts
	Drilling & Blasting	Light to Medium	1.2 to 1.5m	0.9 to 1.5m	Mesh and straps as required	10cm or more	10cm or more	Rock bolts
Poor RQD 25 to 50	Boring Machine	Medium circular	0.6 to 1.2m	0.9 to 1.5m	Anchorage may be hard to obtain. Considerable mesh and straps required	10 to 15cm	10 to 15cm	Rockbolt as required (1.2 to 1.8m center to center)
	Drilling & Blasting	Medium to Heavy circular	0.2 to 1.2m	0.6 to 1.2m	as above	15 cm or more	15cm or more	as above
Very Poor RQD < 25	Boring Machine	Medium to Heavy Circular	0.6m	0.6 to 1.2m	Anchorage may be impossible. 100 percent mesh and straps required	15cm or more on whole section		Medium sets as required
	Drilling & Blasting	Heavy circular	0.6m	0.9m	as above	15cm or more on whole section		Medium to heavy sets as required
Very Poor Squeezing and Swelling Ground	Both methods	Very Heavy circular	0.6m	0.6 to 0.9m	Anchorage may be impossible. 100 per cent mesh and straps required	15cm or more on whole section		Heavy sets as required

Σχήμα 2 : Μέτρα υποστήριξης σήραγγας διαμέτρου 6–12 m βάσει του συστήματος ταξινόμησης RQD

2.2.2 Σύστημα Q κατά Barton 1971

Η μέθοδος Q κατά Barton, αποτελεί ένα τρόπο ταξινόμησης ευρέως διαδεδομένο και εξαιρετικά αξιόπιστο που όμως απαντάται κατ' αποκλειστικότητα σε βραχώμαζες με καλά χαρακτηριστικά καθότι η μέθοδος απορρέει από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μόνο σε καλής ποιότητας υλικά του βόρειου σκανδιναβικού χώρου. Συνεπώς, η εν λόγω μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στα πτωχής ποιότητας εδαφικά υλικά που επικρατούν στον ελλαδικό χώρο όπως είναι ο αργιλικός σχιστόλιθος, καθότι τα αποτελέσματα που θα δώσει θα είναι ιδιαίτερα συντηρητικά.

Η μαθηματική έκφραση που αποδίδει την ταξινόμηση κατά Barton είναι :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Όπου

Q : Η ποιότητα της βραχόμαζας

J_n : Ο βαθμός από τον αριθμό οικογενειών ασυνεχειών

J_r : Ο αριθμός τραχύτητας ασυνεχειών

J_a : Ο αριθμός εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων και του υλικού πλήρωσης

J_w : Ο συντελεστής αναγωγής νερού των ασυνεχειών

SRF : Ο συντελεστής αναγωγής των τάσεων

$\min(RQD) = 10\%$

Όπως φαίνεται δίνεται ιδιαίτερη μνεία στις ασυνέχειες της βραχόμαζας, καθώς συνυπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ αυτών, η τραχύτητά τους, η ποιότητα των τοιχωμάτων τους, ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών, ενώ εισάγονται τόσο η επιρροή της παρουσίας υπόγειου ύδατος, όσο και το καθεστώς των τάσεων που επικρατεί στην περιοχή διάνοιξης.

Οι παραπάνω παράμετροι παίρνουν τιμές ανάλογες του παρακάτω Πίνακα του Σχήματος 3.

RQD (Rock Quality Designation)		Jn (joint set number)	
Very poor	RQD = 0 - 25%	Massive, no or few joints	Jn = 0.5 - 1
Poor	25 - 50	One joint set	2
Fair	50 - 75	One joint set plus random joints	3
Good	75 - 90	Two joint sets	4
Excellent	90 - 100	Two joint sets plus random joints	6
Notes:		Three joint sets	9
(i) Where RQD is reported or measured as < 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q		Three joint sets plus random joints	12
(ii) RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate		Four or more joint sets, heavily jointed, "sugar-cube", etc.	15
		Crushed rock, earthlike	20
		Notes: (i) For tunnel intersections, use (3.0 x Jn); (ii) For portals, use (2.0 x Jn)	

Jr (joint roughness number)		Jr (joint roughness number)	
a) Rock-wall contact,		c) No rock-wall contact when sheared	
b) rock-wall contact before 10 cm shear		Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact	Jr = 1.0
Discontinuous joints	Jr = 4	Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact	1.0
Rough or irregular, undulating	3	Notes:	
Smooth, undulating	2	i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m	
Slickensided, undulating	1.5	ii) Jr = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength	
Rough or irregular, planar	1.5	Note: i) Descriptions refer to small scale features, and intermediate scale features, in that order	
Smooth, planar	1.0		
Slickensided, planar	0.5		

Ja (joint alteration number)		Ja (joint alteration number)	
Contact between joint walls	JOINT WALL CHARACTER		Condition
	CLEAN JOINTS	Healed or welded joints:	filling of quartz, epidote, etc.
		Fresh joint walls:	no coating or filling, except from staining (rust)
	COATING OR THIN FILLING	Slightly altered joint walls:	non-softening mineral coatings, clay-free particles, etc.
Friction materials:		sand, silt, calcite, etc. (non-softening)	
Some or no wall contact	FILLING OF:		Some wall contact
	Type		No wall contact
	Friction materials	sand, silt calcite, etc. (non-softening)	Thin filling (< 5 mm)
	Hard cohesive materials	compacted filling of clay, chlorite, talc, etc.	Thick filling
Soft cohesive materials	medium to low overconsolidated clay, chlorite, talc		
Swelling clay materials	filling material exhibits swelling properties		

Jw (joint water reduction factor)		Jw (joint water reduction factor)	
Dry excavations or minor inflow, i.e. < 5 l/min locally		$p_w < 1 \text{ kg/cm}^2$	Jw = 1
Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings		1 - 2.5	0.66
Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints		2.5 - 10	0.5
Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings		2.5 - 10	0.3
Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time		> 10	0.2 - 0.1
Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay		> 10	0.1 - 0.05
Notes: (i) The last four factors are crude estimates. Increase Jw if drainage measures are installed			
(ii) Special problems caused by ice formation are not considered			

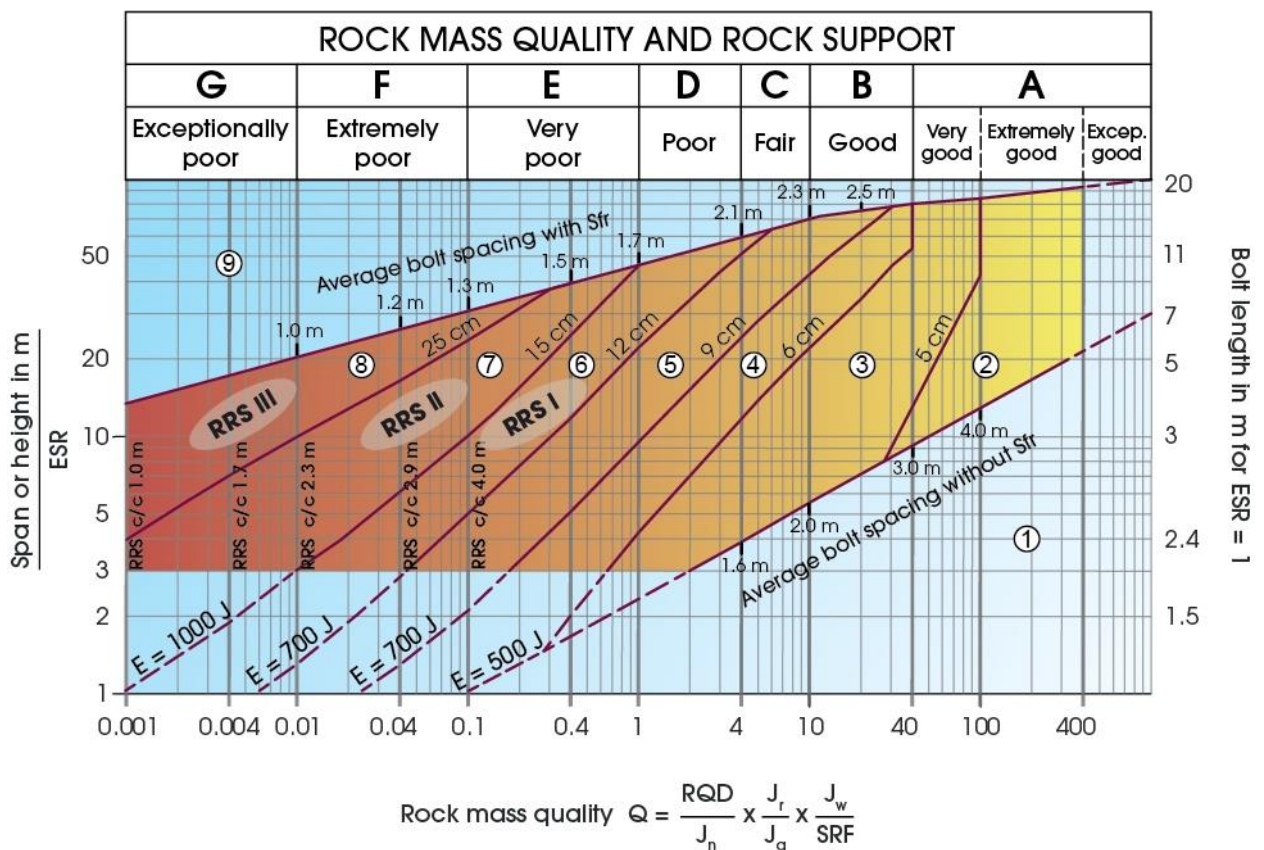
SRF (Stress Reduction Factor)		SRF (Stress Reduction Factor)	
Weakness zones intersecting excavation	Multiple weakness zones with clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)		SRF = 10
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation < 50 m)		5
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)		2.5
	Multiple shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)		7.5
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation < 50 m)		5
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation > 50 m)		2.5
Loose, open joints, heavily jointed or "sugar-cube", etc. (any depth)			5
Note: (i) Reduce these SRF values by 25 - 50% if the relevant shear zones only influence, but do not intersect the excavation.			
Competent rock, rock stress problems	Low stress, near surface, open joints	$\sigma_c / \sigma_1 > 200$	$\sigma_0 / \sigma_c < 0.01$
	Medium stress, favourable stress condition	200 - 10	0.01 - 0.3
	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability, may be except for walls	10 - 5	0.3 - 0.4
	Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	5 - 3	0.5 - 0.65
	Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3 - 2	0.65 - 1
	Heavy rock burst (strain burst) and immediate dynamic deformation in massive rock	< 2	> 1
Notes: (ii) For strongly anisotropic stress field (if measured): when $5 < \sigma_1 / \sigma_3 < 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$			
(iii) Few case records available where depth of crown below surface is less than span width. Suggest SRF increase from 2.5 to 5 for low stress cases			
Squeezing rock	Plastic flow of incompetent rock under the influence of high pressure	Mild squeezing rock pressure	1 - 5
		Heavy squeezing rock pressure	> 5
Swelling rock	Chemical swelling activity depending on presence of water	Mild swelling rock pressure	5 - 10
		Heavy swelling rock pressure	10 - 15

Σχήμα 3 : Τιμές παραμέτρων μεθόδου Q κατά Barton

Ακολούθως, γίνεται συσχέτιση της τιμής Q με τη μέγιστη διάσταση του ανοίγματος της σήραγγας προς ένα συντελεστή ασφαλείας ESR που παίρνει τιμή ανάλογα με το είδος της εκσκαφής όπως φαίνεται στον Πίνακα του Σχήματος 4 . Τα προτεινόμενα μέτρα προκύπτουν από το νόμογράφημα του Σχήματος 5 .

Type or use of underground opening	ESR
Temporary mine openings	3.5
Vertical shafts, rectangular and circular respectively	2.0 - 2.5
Water tunnels, permanent mine openings, adits, drifts	1.6
Storage caverns, road tunnels with little traffic, access tunnels, etc.	1.3
Power stations, road and railway tunnels with heavy traffic, civil defence shelters, etc.	1.0
Nuclear power plants, railroad stations, sport arenas, etc.	0.8

Σχήμα 4 : Τιμές συντελεστή ασφαλείας ESR



$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Σχήμα 5 : Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης βάσει μεθόδου Q

2.2.3 Σύστημα RMR κατά Bieniawski 1989

Το πληρέστερο μέχρι τότε σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας, καθότι σε αυτό συμπεριλαμβάνονταν παράμετροι οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας, είναι αυτό που προτάθηκε από τον Bieniawski, RMR.

Αναλυτικότερα, η μέθοδος RMR (Rock Quality Rating), βαθμονομεί την βραχώμαζα σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους, τις αθροίζει, διορθώνει το αποτέλεσμα βάσει της φοράς διάνοιξης της σήραγγας σε σχέση με τις υπάρχουσες ασυνέχειες της βραχώμαζας, και το τελικό αποτέλεσμα αντιστοιχίζεται στην από πολύ πτωχής έως άριστης ποιότητας βραχώμαζα. Οι παράμετροι βάσει των οποίων η μέθοδος RMR κατατάσει την βραχώμαζα είναι:

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος, σ_{ci} .
- Το RQD της βραχώμαζας.
- Η συχνότητα των ασυνεχειών.
- Η κατάσταση των ασυνεχειών (πάχος ανοίγματος, βαθμός τραχύτητας, παρουσία υλικού πλήρωσης).
- Η παρουσία ροής υπόγειου νερού.

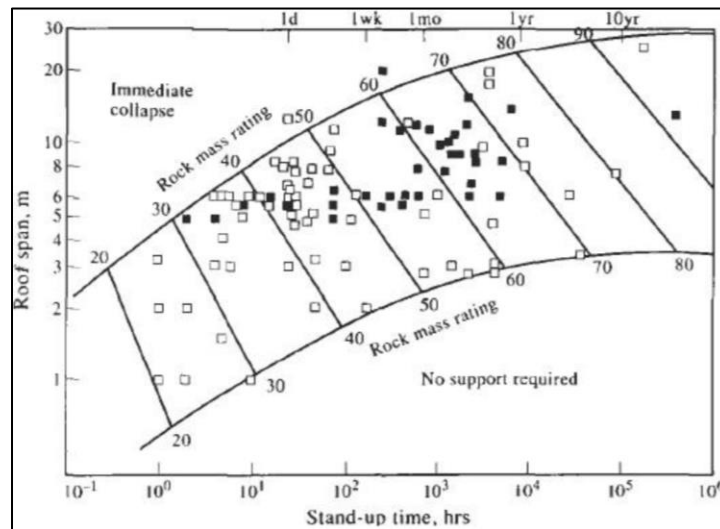
Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακα του Σχήματος 6 , με την ακόλουθη διόρθωση λόγω προσανατολισμού της σήραγγας ως προς τις ασυνέχειες να δίνεται στον πίνακα του Σχήματος 7, όπου χαρακτηρίζεται ως ευμενής ή δυσμενής. Τέλος, στην εικόνα του Σχήματος 8 , παρουσιάζεται αναλυτικότερα η αντιστοίχιση της βαθμολογίας σε ισοδύναμες τεχνικές παραμέτρους όπως η συνοχή c , η γωνία τριβής ϕ και ο χρόνος αυτουποστήριξης της σήραγγας.

1	Αντοχή συμπαγούς πετρώματος	Δείκτης αντοχής φορτίσεως αιχμής (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προτιμώμενη δοκιμή ανεμπίδιστη θλίψη		
		Αντοχή σε ανεμπίδιστη θλίψη (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Βαθμός	15	12	7	4	2	1	0	
2	Ποιότητα πυρήνα RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Βαθμός	20	17	13	8	3			
3	Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)	>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	0,06			
	Βαθμός	20	15	10	8	5			
4	Κατάσταση διακλάσεων	Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχές χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Μαλακά τοιχώματα	Επιφάνεια ολισθήσεως (slickensided) ή υλικό πληρώσεως <5mm ή διακλάσεις ανοικτές 1-5mm. Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό πληρώσεως >5mm ή διακλάσεις ανοικτές >5mm. Συνεχείς διακλάσεις			
		Βαθμός	30	25	20	10	0		
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10m μήκους σήραγγας	Καμιά	<10 l/min	1/min 10-25	25-125 l/min	>125 l/min		
		Τμή κλάσματος πίεσεως νερού διακλάσεων δια της μέγιστης κύριας τάσης	ή	ή	ή	ή	ή		
		Γενικές συνθήκες	0	0,0-0,1	0,0-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Βαθμός	Εντελώς στεγνό	λίγο υγρό	Υγρό μόνο	Νερό κάτω από μέτρια πίεση	Σοβαρά προβλήματα νερού			
		15	10	7	4	0			

Σχήμα 6 : Βαθμονόμηση Μεθόδου RMR

Β. Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών						
Διεύθυνση και κλίση διακλάσεων	Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	
Βαθμός	Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12
	Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60
Γ. Ταξινόμηση βραχομάζας και βαθμολογία της (πρόσθεση των μερικών βαθμολογιών)						
Κατηγορία	I	II	III	IV	V	
Χαρακτηρισμός	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή	
Βαθμολογία	100-81	80-61	60-41	40-21	<20	
Δ. Τεχνική σημασία ταξινόμησης						
Κατηγορία	I	II	III	IV	V	
Μέσος χρόνος διατηρήσεως διατομής	10 χρόνια για άνοιγμα 15m	6 μήνες για 8m άνοιγμα	1 εβδομάδα για 5m άνοιγμα	10 ώρες για 2,5m άνοιγμα	30min για 1m άνοιγμα	
Συνοχή βραχομάζας	>400 (kPa)	300-400	200-300	100-200	<100	
Γωνία τριβής βραχομάζας (μείρες)	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	<15°	

Σχήμα 7 : Διόρθωση RMR λόγω σχετικού προσανατολισμού σήραγγας και ασυνεχειών & χαρακτηρισμός βραχομάζας



Σχήμα 8 : Χρόνος αυτοποστήριξης σήραγγας βάσει RMR

Ο Bieniawski προτείνει το ρυθμό προχώρησης καθώς και τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης της βραχώμαζας αναλογικά με την κατάταξη της βραχώμαζας. Οι παρατηρήσεις που κάνει, αφορούν στην απόσταση εφαρμογής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο διάνοιξης αλλά και στον αριθμό των φάσεων εκσκαφής του μετώπου. Τα προτεινόμενα μέτρα είναι το πάχος αλλά και η θέση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι διαστάσεις του καννάβου και οι θέσεις των αγκυριών & η εφαρμογή πλαισίων με τις μεταξύ τους αποστάσεις. Η παραπάνω διαστασιολόγηση συνοψίζεται στο ακόλουθο πίνακα του Σχήματος 9 .

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V – Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

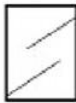





Σχήμα 9 : Μέτρα άμεσης υποστήριξης βάσει RMR

2.2.4 Σύστημα GSI κατά Hoek & Μαρίνος 2000

Ο δείκτης GSI (Geological Strength Index) πρωτοεισήχθη από τους Π. Μαρίνο και Ε. Hoek. Η ταξινόμηση της βραχώμαζας βάσει του συστήματος GSI χαρακτηρίζεται ως εύχρηστη, διότι στηρίζεται στην παρατήρηση δύο παραγόντων: 1. Της κατάστασης των ασυνεχειών και 2. Του βαθμού κερματισμού της βραχώμαζας.

Το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει ο δείκτης κυμαίνεται μεταξύ του 0 για πτωχής ποιότητας βραχώμαζες και του 100 για εξαιρετικά καλής ποιότητας βραχώμαζες. Η χρήση του δείκτη GSI επεκτείνεται και στην εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας βάσει του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002), όπως το μέτρο ελαστικότητας E_m και την ισοδύναμη αντοχή της σε μονοαξονική θλίψη σ_{cm} .

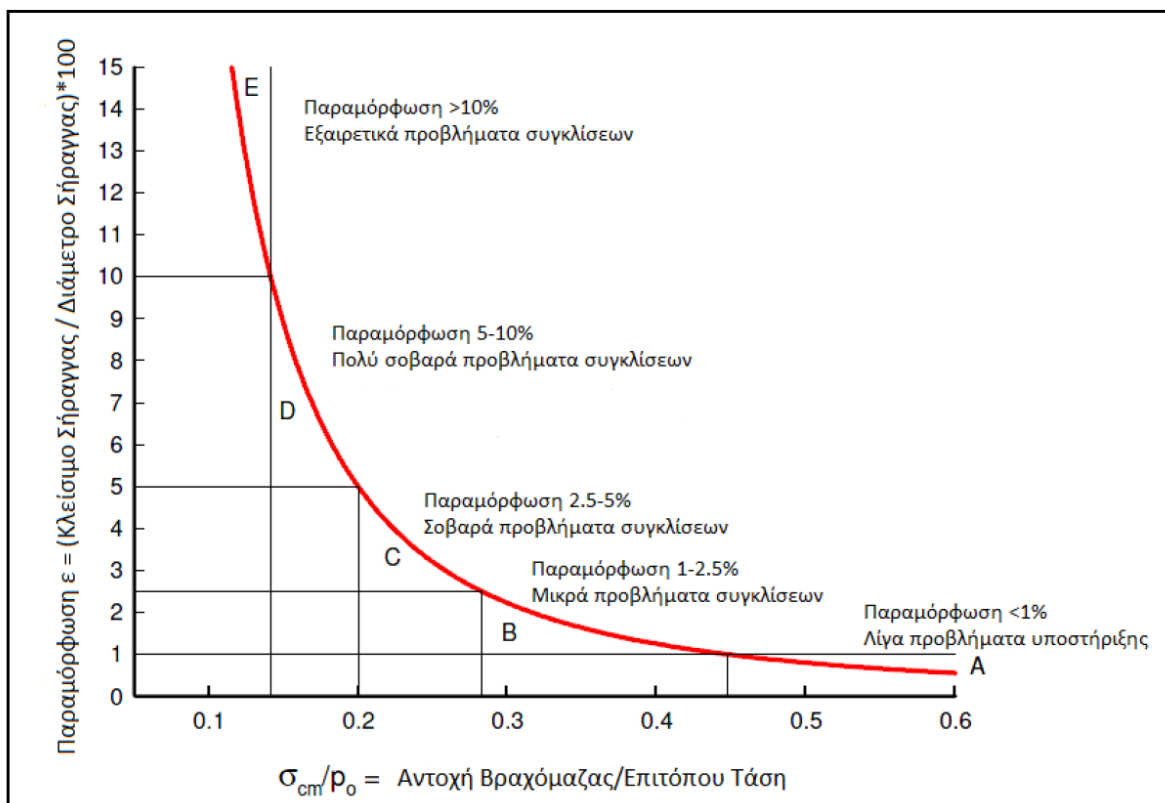
Η αρχική έκδοση του συστήματος ταξινόμησης GSI (2000, παρουσιάζεται στο Σχήμα 10, ενώ στην πορεία μορφώθηκαν αρκετές εκδοχές του πιο εξειδικευμένες σε συγκεκριμένους τύπους πετρωμάτων όπως είναι η μολάσσα και ο φλύσχης, βάσει συλλογής στοιχείων από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάνοιξη των σηράγγων της κύριου άξονα της Εγνατίας Οδού.

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90				N/A	N/A
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70				
 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60				
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			50			
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				40		
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>					30	
						20
						10
					N/A	N/A

Σχήμα 10 : Πίνακας GSI, Hoek & Marinos 2000

Η χρήση του δείκτη περιορίζεται σε περιοχές με ομοιογενείς βραχώμαζες όπου η ενδεχόμενη αστοχία θα είναι τασικής μορφής και αντενδείκνυται για βραχώμαζες που παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία με πιθανή την βαρυτικής μορφής αστοχία. Μειονέκτημα του εν λόγω πίνακα αποτελεί το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψιν την παρουσία νερού στη βραχώμαζα, και η επίδρασή του μπορεί να συμπεριληφθεί με την προς τα δεξιά του πίνακα μετακίνηση της τιμής.

Οι ίδιοι μελετητές προχώρησαν και στη συσχέτιση μεταξύ των συγκλίσεων των τοιχωμάτων που προέκυπταν από παρατήρηση στις υπο κατασκευή σήραγγες και του λόγου αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας σ_{cm} προς την επί τόπου γεωστατική τάση p_0 , με τα δύο αυτά μεγέθη να συνδέονται μεταξύ τους μέσω της καμπύλης του Σχήματος 11, δίνοντας τα προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης του πίνακα του Σχήματος 12.

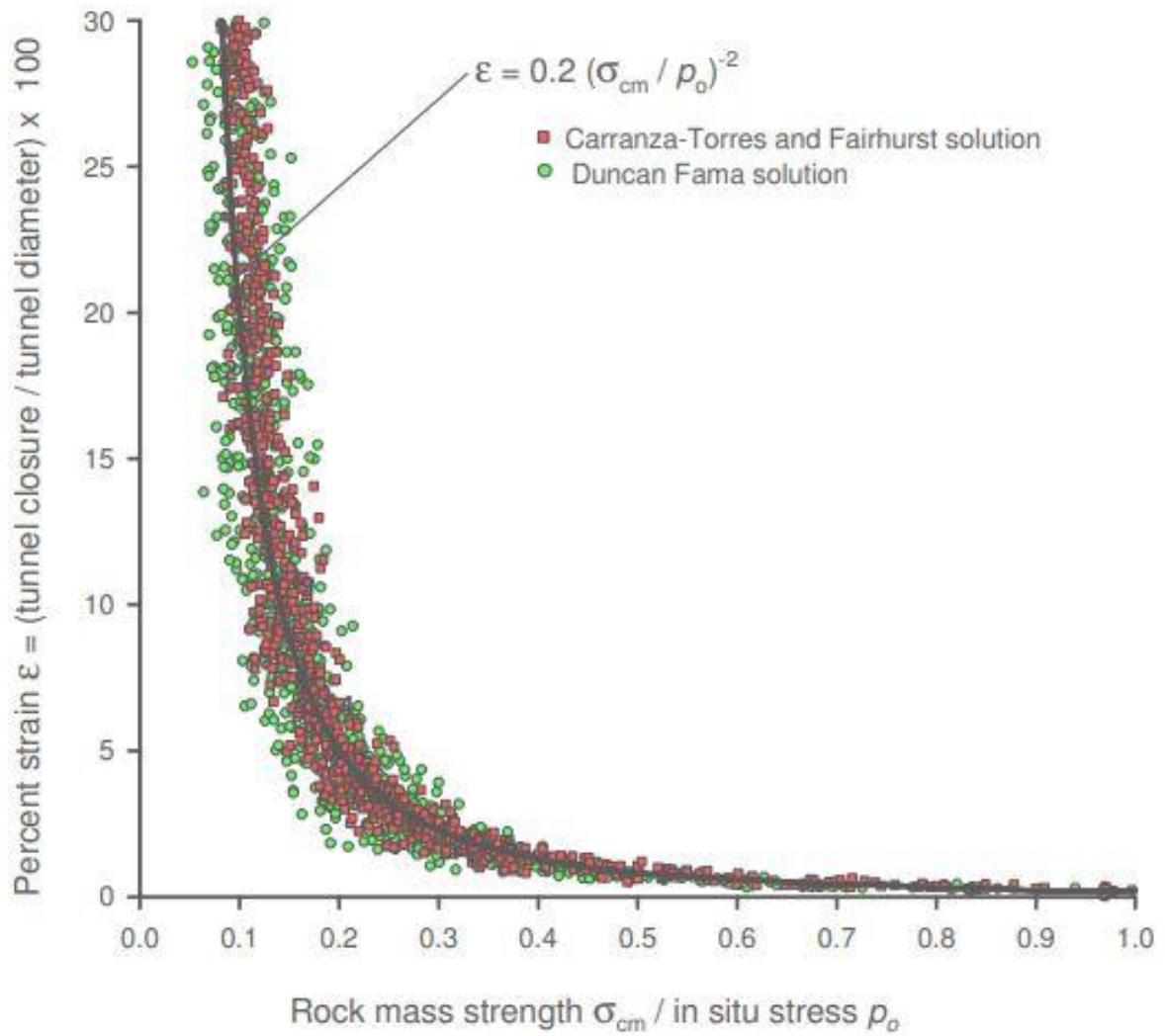


Σχήμα 11 : Συσχέτιση των παραμορφώσεων της σήραγγας & του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επικρατούσες γεωστατικές τάσεις

	Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος υποστήριξης
A	Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχώμαζας.	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυριών ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική.
B	1 έως 2,5	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχήματισμού της πλαστικής ζώνης στη βραχώμαζα που περιβάλλει τη σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκυρία και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για πρόσθετη ασφάλεια.
C	2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικώς επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
D	5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και, αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προπορείας, ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
E	Μεγαλύτερη του 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμα αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων.

Σχήμα 12 : Μέτρα προσωρινής υποστήριξης βάσει του μεγέθους των παραμορφώσεων

Τέλος, για δεδομένη τιμή πίεσης p_i , που παρέχεται από την επιλεγμένη υποστήριξη, παρουσιάζεται μέσω του διαγράμματος του Σχήματος 11, ο περιορισμός των συγκλίσεων για δεδομένη τιμή του λόγου σ_{cm} / p_o αυξανόμενης της p_i , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13 : Συσχέτιση του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επικρατούσες γεωστατικές τάσεις με τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων, παρουσία της προσφερόμενης από την υποστήριξη πίεση p_i

2.3 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

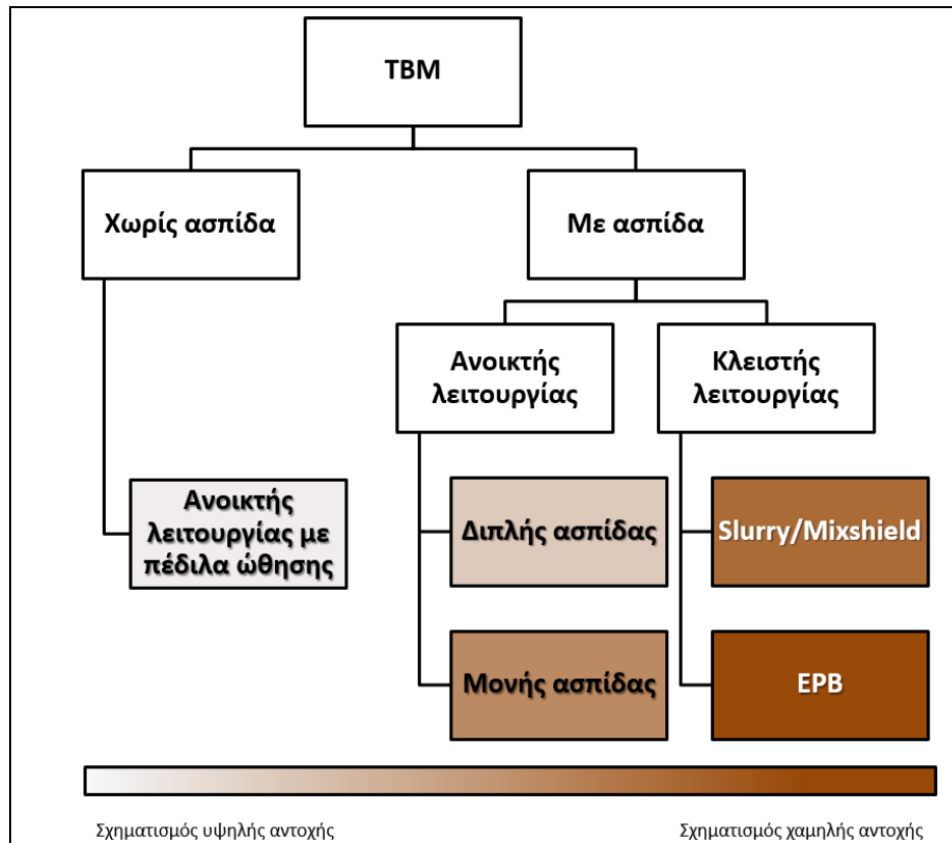
Οι επικρατούσες τεχνικές διάνοιξης μιας σήραγγας σήμερα είναι η μηχανοποιημένη μέθοδος, η μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut & Cover) και η συμβατικές μέθοδοι (N.A.T.M., ADECO – RS και SCL).

2.3.1 Μηχανοποιημένη Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων

Κατά τη μηχανοποιημένη μέθοδο εκσκαφής χρησιμοποιούνται μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων γνωστά και ως TBM (Tunnel Boring Machine). Με αυτά εκσκάπτονται σήραγγες κυκλικής διατομής με εφαρμογή κεφαλής διαμέτρου περίπου ίσης με αυτή της σήραγγας, η οποία είναι εξοπλισμένη με εργαλεία κοπής των οποίων το είδος, η διάταξη και η πυκνότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την σκληρότητα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Το υλικό που αποσπάται, εισέρχεται εντός των ανοιγμάτων της κεφαλής από όπου και απομακρύνεται μέσω κατάλληλου συστήματος ταινιών. Κατά την εκσκαφή, τα τοιχώματα περιμετρικά της σήραγγας πίσω από την κεφαλή υποστηρίζονται με προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα τα οποία αποτελούν και τη μόνιμη επένδυση.

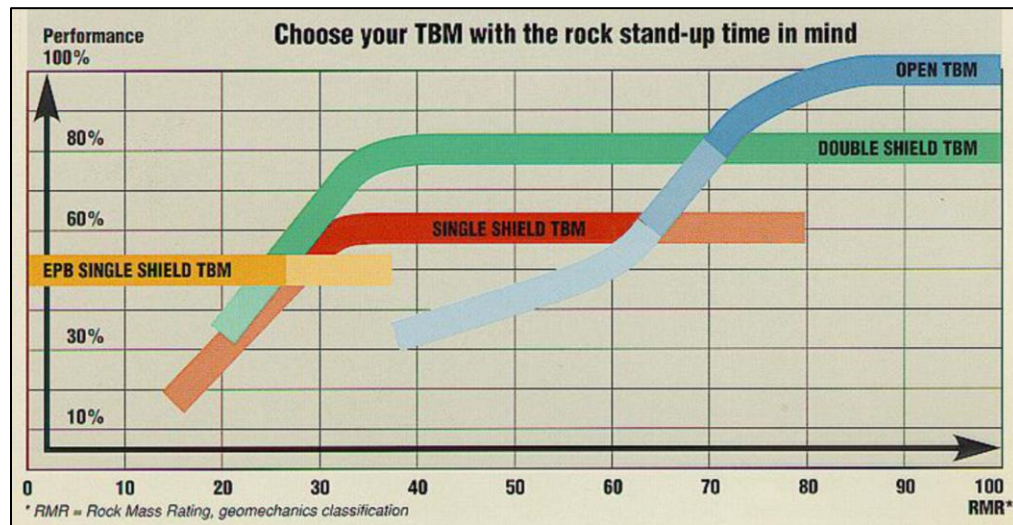
Τα TBM μπορεί να διαθέτουν ασπίδα που δύναται να είναι μονή ή διπλή με σκοπό την εξασφάλιση της προχώρησης του μηχανήματος και την προστασία του τμήματος της σήραγγας που εκσκάπτεται πίσω από την κεφαλή έως την επένδυση της σήραγγας, ενώ υπάρχουν και μηχανήματα χωρίς ασπίδα.

Άλλη κατηγοριοποίηση τους αφορά στη ποιότητα και την κατάσταση του υλικού εκσκαφής, με τα Hard Rock TBMs να χρησιμοποιούνται σε βραχώμαζες υψηλής σκληρότητας, τα μηχανήματα μονής ή διπλής ασπίδας για υλικά με μέτρια έως πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και τα Soft Ground TBMs να βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις εδαφοποιημένου υλικού και να διακρίνονται σε Slurry TBMs και σε EPB (Earth Pressure Balance). Κύριο χαρακτηριστικό των τελευταίων είναι η άσκηση πίεσης στο μέτωπο που διανοίγεται με σκοπό να το υποστηρίξουν αποτρέποντας την ύπαρξη πιθανών επιφανειακών καθιζήσεων. Η ποικιλία τύπων των TBM ανάλογα με τη σκληρότητα αλλά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών, παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 14 .



Σχήμα 14 : Κατηγορίες TBM που επιλέγονται ανάλογα με τη σκληρότητα του εδάφους & τα μηχανικά του χαρακτηριστικά
(Πηγή: Μιχαλακαόπουλος, 2015)

Είναι εμφανές λοιπόν, πως για την επιλογή του κατάλληλου ανά την περίπτωση τύπου TBM, πρέπει να υπάρχει πλήρης εικόνα από άποψη γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, ώστε να παρέχεται η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση η οποία και μπορεί να προσδιορισθεί ως ένα βαθμό και από το κάτωθεν διάγραμμα του Σχήματος 15 , συναρτήσει του βαθμού ποιότητας που προκύπτει μέσω RMR.



Σχήμα 15 : Ποσοστό απόδοσης του επιλεγμένου τύπου TBM ανάλογα του βαθμού RMR
(Μιχαλακαόπουλος, 2015)

(Πηγή:

Κλείνοντας την παραπάνω μέθοδο διάνοιξης θα ανεφερθούν ως μειονεκτήματά της :

- Η αδυναμία χρήσης τους σε βραχώμαζα με συχνές εναλλαγές στη γεωλογία του περιβάλλοντος σχηματισμού.
- Η αδυναμία χρήσης τους σε περιπτώσεις όπου έχει προδιαγραφεί από το μελετητή η διάνοιξη σήραγγας διαφορετικού σχήματος διατομής από το κυκλικό.
- Το υψηλό κόστος μίσθωσης του μηχανήματος.
- Ο κίνδυνος επιλογής λάθους τύπου TBM.

2.3.2 Μέθοδος Διάνοιξης με Εκσκαφή και Επανεπίκωση (Cut & Cover)

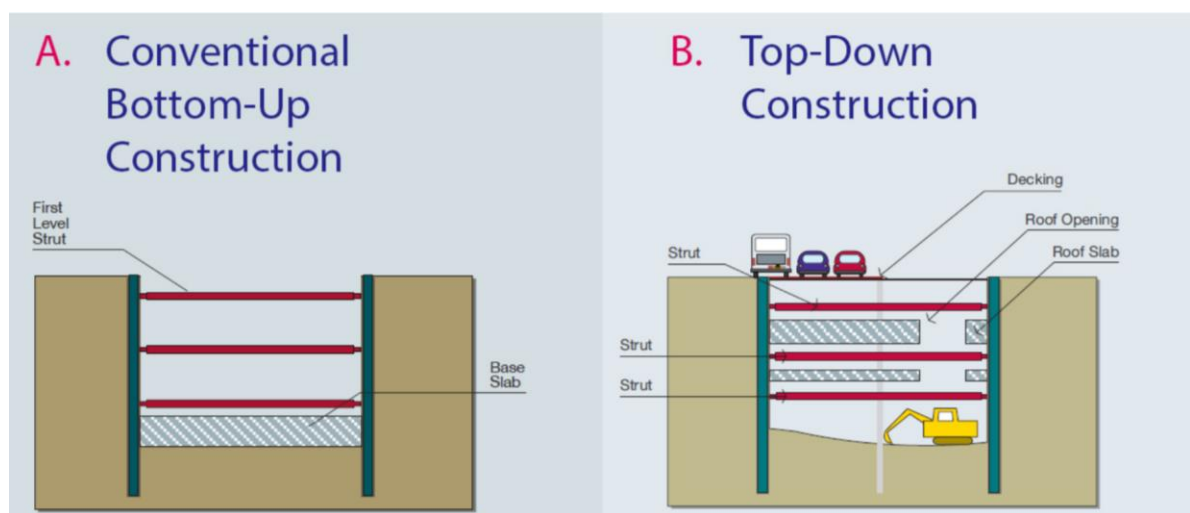
Κατά την μέθοδο εκσκαφής και επανεπίκωσης (Cut & Cover), το κέλυφος της σήραγγας βρίσκεται εξ ολοκλήρου στο εσωτερικό του διανοιχθέντος ορύγματος και στη συνέχεια καλύπτεται με υλικό πλήρωσης μόλις το κέλυφος της σήραγγας ολοκληρωθεί. Η μέθοδος βρίσκεται

ευρεία χρήση σε περιπτώσεις διάνοιξης ρηχής σήραγγας και η εκσκαφή από την επιφάνεια είναι εφικτή, αποδεκτή και οικονομική. Η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται για την κατασκευή υπόγειων διαβάσεων, τμημάτων πρόσβασης σε ορυχεία και σε σήραγγες. Η μέθοδος διακρίνεται σε δύο υπομεθόδους:

- Την μέθοδο (Bottom – Up) από κάτω προς τα επάνω διάνοιξη
- Την μέθοδο (Top – Down) από επάνω προς τα κάτω διάνοιξη.

Για βάθη μεταξύ 30 – 40 m, η Cut & Cover μέθοδος είναι συνήθως η πιο οικονομική λύση συγκριτικά με τη μηχανοποιημένη και τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης. Η σήραγγα είναι συνήθως σχεδιασμένη ως μία άκαμπτη δομή σχήματος ορθογωνικού πλαισίου. Σε αστικές περιοχές, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου, η σήραγγα κατασκευάζεται εντός μιας γραμμής εκσκαφής όπου το όρυγμα υποστηρίζεται προσωρινά από κάποιον τοίχο αντιστήριξης.

Οι δύο αυτές υποπεριπτώσεις της Cut & Cover περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως αλλά και μέσω των δύο εικόνων Α. και Β. του Σχήματος 16 .



Σχήμα 16 : Απεικόνιση των μεθόδων Α. Από κάτω προς τα επάνω & Β. Από πάνω προς τα κάτω διάνοιξης
(Πηγή: railsystem.net)

Όπως φαίνεται και στην εικόνα Α. του Σχήματος 16, κατά την από Bottom – Up μέθοδο, εκσκάπτεται μία τάφρος από την επιφάνεια εντός της οποίας κατασκευάζεται η σήραγγα και στη συνέχεια το κενό μεταξύ σήραγγας και φυσικού αναγλύφου πληρώνεται και η επιφάνεια αποκαθίσταται. Η τάφρος μπορεί να διαμορφωθεί είτε με ανοιχτή κοπή (δηλαδή με κεκλιμένες προς τα πίσω πλευρές δίχως υποστήριξη), είτε με κατακόρυφες επιφάνειες με εφαρμογή μέτρων στήριξης της εκσκαφής.

Αντίστοιχα, στη Top – Down μέθοδος κατασκευής που εμφανίζεται στην εικόνα Β, του Σχήματος 16, προηγείται η κατασκευή των τοιχωμάτων της σήραγγας. Η υποστήριξη της εκσκαφής είναι συχνά και τα τελικά δομικά τοιχώματα της σήραγγας. Ακολουθούν τα δευτερεύοντα φινιρίσματα τοίχων μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Η οροφή είναι ήδη κατασκευασμένη και σε συναρμογή με την αντιστήριξη της εκσκαφής. Η επιφάνεια αποκαθίσταται πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής, και το υπόλοιπο της εκσκαφής ολοκληρώνεται υπό την προστασία της υπερκείμενης πλάκας οροφής. Μετά την ολοκλήρωσή της, το δάπεδο πλέον αποτελεί ενιαίο κέλυφος με τα τοιχεία και εγκαθίστανται τα τελειώματα στην ολοκληρωμένη κατασκευή.

2.3.3 Συμβατικές Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

Σήμερα, οι πιο κοινές συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης που πραγματοποιούνται με την χρήση μηχανικών μεσών ή με χρήση εκρηκτικών υλών για την εξόρυξη της γεώμαζας, είναι η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων (NATM), η ιταλική μέθοδος ή μέθοδος ολομέτωπης διάνοιξης (ADECORS) και η αγγλική μέθοδος ή μέθοδος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Sprayed Concrete Lining – SCL). Στην συνέχεια γίνεται περιγραφή της μεθόδου NATM και ADECORS, οι οποίες και θα αξιολογηθούν κατά την αριθμητική διερεύνηση στην παρούσα εργασία.

3^ο Κεφάλαιο

Νέα Αυστριακή Μέθοδος Σηράγγων (NATM)

3.1 Ιστορική Αναδρομή της Μεθόδου NATM

Η ‘Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων’ (New Austrian Tunnelling Method – NATM), αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη μέθοδο διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης.

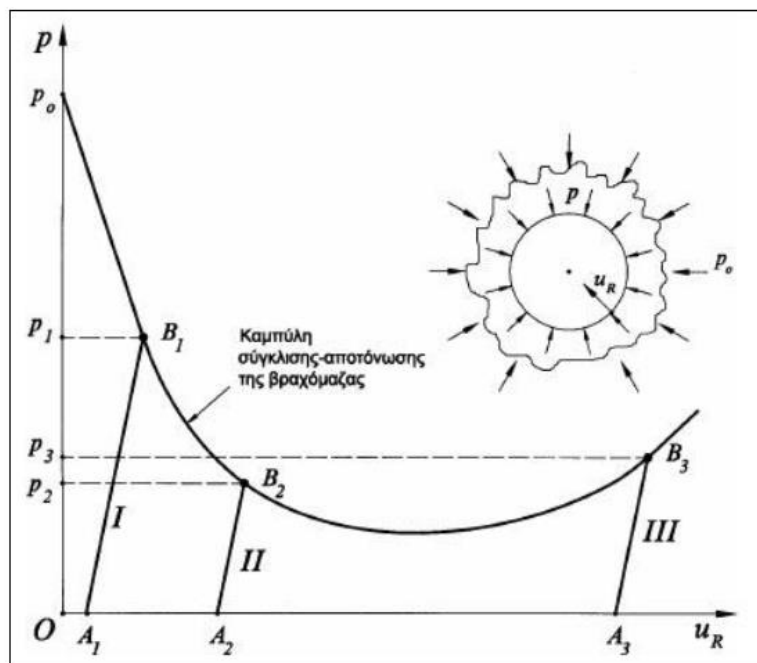
Η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε στο διάστημα 1957 – 1965 στην Αυστρία από τους Αυστριακούς μηχανικούς Rabcewicz, Mueller, Pacher & Brunner, ενώ εφαρμόζεται σχεδόν καθολικά ήδη από το 1960 στην περιοχή των Αυστριακών Άλπεων.

Αν και δεν υπάρχει γενικά αποδεκτός ορισμός της μεθόδου NATM, ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο της εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης σε αυτό με μηχανικά μέσα), και την υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις.

3.2 Περιγραφή της Μεθόδου NATM

Η NATM βασίζεται στην τοξωτή λειτουργία του εδάφους, με τον εδαφικό ιστό να παραλαμβάνει και να μεταβιβάζει τα υπερκείμενα γεωστατικά φορτία στην περίμετρο του ανοίγματος της σήραγγας, με τρόπο τέτοιο ώστε η άμεση υποστήριξη που θα τοποθετηθεί να υποστηρίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα χωρίς να επιφορτίζεται με το πλήρες γεωστατικό φορτίο.

Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται η NATM, είναι η αρχή της αποτόνωσης των γεωστατικών τάσεων κατά την διάνοιξη της σήραγγας και της ελεγχόμενης χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας με την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης για τον περιορισμό των συγκλίσεων. Η αρχή αυτή περιγράφεται με την μέθοδο της σύγκλισης – αποτόνωσης (λ), όπου καθώς αυξάνεται ο βαθμός αποτόνωσης των τάσεων, προκαλείται αύξηση των συγκλίσεων. Η αποτόνωση των τάσεων δεν πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο οριακό σημείο πέραν του οποίου επέρχεται μεγάλη αύξηση των πιέσεων με αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας. Το οριακό λοιπόν αυτό σημείο είναι εκείνο όπου η αποτόνωση θα είναι μεν μεγάλη ώστε η πίεση που θα παραληφθεί από τα μέτρα υποστήριξης να είναι η ελάχιστη δυνατή, όχι όμως τόσο μεγάλη ώστε να επέλθει αστοχία του εδαφικού υλικού. Η παραπάνω αρχή, γίνεται πιο κατανοητή μέσω της Εικόνας του Σχήματος 17 στο οποίο διαφαίνεται η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για τρεις διαφορετικές χρονικές θέσεις τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης I, II, & III.



Σχήμα 17 : Χαρακτηριστική Καμπύλη Σύγκλισης Αποτόνωσης & Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί των άμεσων μέτρων

Στο ως άνω Σχήμα παρουσιάζονται για τις τρεις επιλεγμένες θέσεις τα εξής:

Θέση I: Εσπευσμένη τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, τα οποία θα κληθούν να παραλάβουν ιδιαίτερα μεγάλη πίεση P₁.

Θέση III: Καθυστερημένη τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, η οποία επιφέρει και πάλι μεγάλη πίεση P₃, με κίνδυνο την αστοχία λόγω αποδιοργάνωση της βραχώμαζας.

Θέση II: Ιδανικός χρόνος τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, τα οποία θα κληθούν να παραλάβουν μια χαμηλή πίεση P₂.

Τα κύρια στοιχεία που χαρακτηρίζουν την παραπάνω τη μέθοδο είναι τα εξής :

- Η προχώρηση της εκσκαφής μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία, δύο ή/και περισσότερες φάσεις (τμηματική εκσκαφή) έτσι ώστε να μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής και άρα και οι επερχόμενες συγκλίσεις (όπως θα δειχθεί και σχηματικά σε επόμενο υποκεφάλαιο). Τούτο συνδράμει στη σταδιακή ανακατανομή του τασικού πεδίου έως την τελική ισορροπία, αποφεύγοντας τις απότομες διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας. Τα βήματα εκσκαφής είναι μικρά της τάξης του 1 έως 3 μέτρων αναλόγως των εδαφικών συνθηκών, ενώ η προχώρηση πραγματοποιείται είτε με χρήση εκσκαπτικών μηχανημάτων, είτε με εφαρμογή ελεγχόμενων ανατινάξεων.
- Η κινητοποίηση της εγγενούς αντοχής της βραχώμαζας, με την άμεση υποστήριξη να συνδράμει στην αυτουποστήριξη του εδαφικού υλικού/βράχου.
- Η υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας (“προσωρινή”) γίνεται άμεσα με χρήση :
 1. Εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το οποίο δύναται να είναι Συμβατικό – Απλό, Οπλισμένο με ίνες χάλυβα ή Οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα
 2. Αγκυρίων/Ηλών, τα οποία δύναται να είναι Παθητικά (rock-bolts) ή Προεντεταμένα (tensioned cables)

3. Μεταλλικών πλεγμάτων
4. Χαλύβδινων πλαισίων
5. Συνδιασμός των ανωτέρω

Σε μεταγενέστερο χρόνο εφαρμόζονται και τα μέτρα της μόνιμης υποστήριξης που αποτελούνται από επί τόπου εγχέομενο σκυρόδεμα και οπλισμούς, σχεδιασμένα με τρόπο τέτοιο ώστε να υποτιμηθεί πλήρως η ύπαρξη των προσωρινών.

- Το κλείσιμο του δακτυλίου εκσκαφής με την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδεματος στο σύνολο της διατομής (δηλ. και στο δάπεδο). Η διαμόρφωση του εν λόγω δακτυλίου συντελεί στον περιορισμό των συγκλίσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας ιδιαίτερα όταν η περιβάλλουσα βραχόμαζα έχει πτωχά χαρακτηριστικά. Σημειώνεται πως η σκυροδέτηση του δαπέδου δεν απαιτείται σε διάνοιξη σήραγγας με καλής ποιότητας βραχόμαζα.
- Η ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχόμαζας είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτευχθεί ελεγχόμενη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας με εφαρμογή των άμεσων μέτρων υποστήριξης σε κατάλληλη από το μέτωπο απόσταση.

4^ο Κεφάλαιο

Ολομέτωπη Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων ADECO - RS

4.1 Ιστορική Αναδρομή της Μεθόδου ADECO – RS

Η ADECO – RS (Analysis of Controlled Deformations in Rocks & Soils), είναι μία φιλοσοφία σχεδιασμού, η οποία σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συμβατικές μεθόδους διάνοιξη, θέτει στο επίκεντρο του σχεδιασμού των σηράγγων τις παραμορφώσεις που εκδηλώνονται στον πυρήνα της εκσκαφής, αναλύοντας τες εις βάθος έτσι ώστε να βρεθεί ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου αυτών.

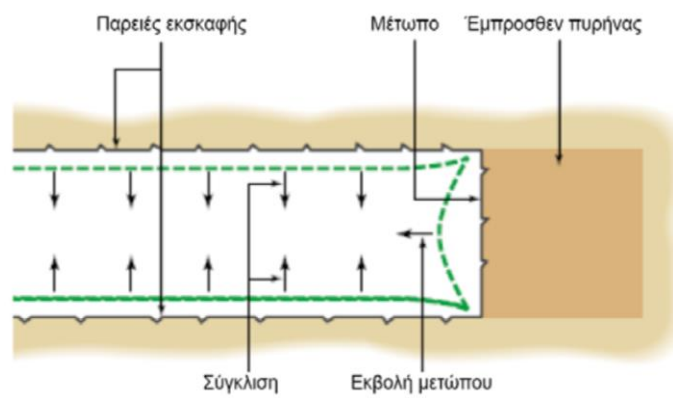
Εξασφαλίζοντας την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, η σήραγγα δύναται να διανοιχθεί ολομέτωπα, μειώνοντας έτσι το κόστος και τον χρόνο διάνοιξής της.

4.2 Περιγραφή της Μεθόδου ADECO - RS

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς, η ολομέτωπη διάνοιξη επιτρέπει το γρήγορο κλείσιμο του δακτυλίου της επένδυσης, την αποφυγή ζωνών φόρτισης – αποφόρτισης που δημιουργούνται από τα αλληπάλληλα επιμέρους μέτωπα της τμηματικής διάνοιξης και της καθαίρεσης των προσωρινών αναστροφών τόξων, την κίνηση του εξοπλισμού σε ένα επίπεδο καθώς και την επιτάχυνση της κατασκευής. Αποτρεπτικό παράγοντα αποτελεί η αστάθεια και η επικινδυνότητα του μετώπου που υφίσταται σε μεγάλης επιφάνειας ανοίγματα, εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

Τόσο η θεωρητική όσο και η πειραματική προσέγγιση του μηχανισμού με τον οποίο λειτουργεί η γεώμαζα έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής (πυρήνας προώθησης) κατά τη διάνοιξη του ανοίγματος, θεωρεί πως η πάσης φύσης παραμόρφωση (προ σύγκλιση, σύγκλιση και εξώθηση του

μετώπου), συνδέεται άρρηκτα με την ανοχή του έμπροσθεν πυρήνα σε πιθανή παραμόρφωση. Διευκρινίζεται πως με τον όρο “ έμπροσθεν πυρήνας” νοείται η γεώμαζα που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο, με γεωμετρία που προσεγγίζει αυτά του πραγματικού ανοίγματος της σήραγγας (βλ. Σχήμα 18).

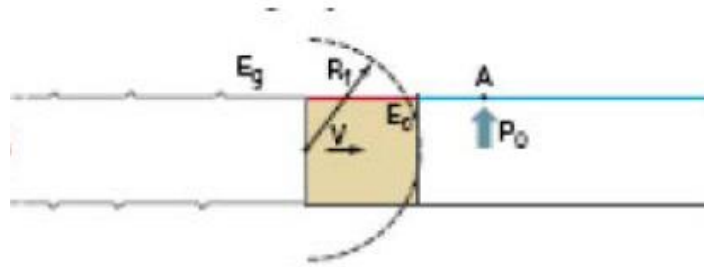


Σχήμα 18: Παραμορφώσεις πλησίον του μετώπου εκσκαφής

Αναλυτικότερα, η ADECO-RS αποδίδει τις εντός διανοιγμένου τμήματος συγκλίσεις, στην προσύγκλιση του έμπροσθεν πυρήνα, και αυτό αποτελεί το κλειδί της θεωρίας της μεθόδου.

Έστω ένα τυχαίο σημείο A, τοποθετημένο στη στέψη του θεωρητικού ανοίγματος που πρόκειται να εκσκαφτεί. Το σημείο αυτό υφίσταται ακτινική μετατόπιση προς το εσωτερικό της διατομής. Ας δούμε την πορεία αυτού του σημείου. Όσο το σημείο αυτό βρίσκεται σε απόσταση από το μέτωπο περίπου ίση ή μεγαλύτερη της μίας διαμέτρου της σήραγγας (απόσταση δηλαδή στην οποία δεν θεωρείται πως υπάρχει επιρροή λόγω διάνοιξης), η εντατική του κατάσταση παραμένει αμετάβλητη (βλ. Σχήμα 19 (α)). Καθώς η διάνοιξη πλησιάζει το σημείο A, η ακτινική πίεση αυξάνεται και έτσι ωθεί το σημείο προς το εσωτερικό του μελλοντικού ανοίγματος, με το μέγεθος της ακτινικής παραμόρφωσης του A, να συνδέεται τόσο με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της γεώμαζας, όσο και με τις πιέσεις εντός και εκτός της σήραγγας (βλ. Σχήμα 19 (β)). Μετά το πέρασ

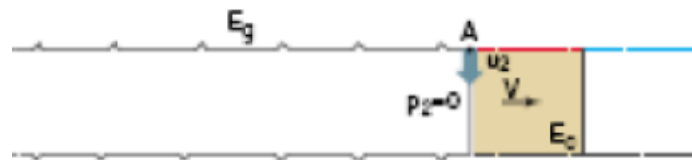
του μετώπου από το σημείο A, αυτό θα συνεχίσει να παραμορφώνεται ακτινικά (βλ. Σχήμα 19 (γ)).



Σχήμα 19 (α): Σημείο A εκτός της ζώνης επιρροής του μετώπου

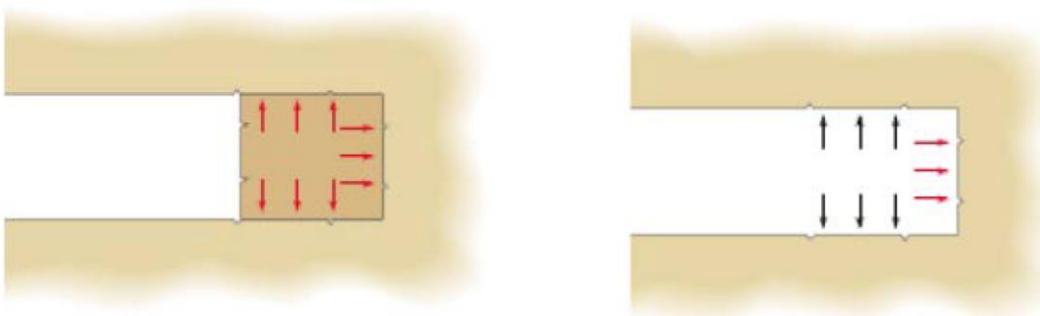


Σχήμα 19 (β): Σημείο A επί του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα



Σχήμα 19 (γ): Σημείο A επί της παρειάς της εκσκαφής

Πλέον, η συμπεριφορά της περιβάλλουσας βραχώμαζας θα συνδέεται με το ιστορικό των πιέσεων και παραμορφώσεων που έχει δεχτεί η γεωμάζα, την ακτινική πίεση της υποστήριξης που εφαρμόστηκε αλλά και τα χαρακτηριστικά της γεωμάζας πίσω από την επένδυση. Προκειμένου λοιπόν να εξασφαλισθεί η ευστάθεια της σήραγγας, είναι σημαντικό να μειωθούν στο μέγιστο δυνατό οι όποιες προϋπάρχουσες παραμορφώσεις, μέσω της διασφάλισης της δυστροπίας του προσωρούς εμπροσθεν πυρήνα, που για να συμβεί θα πρέπει πέρα από α μέτρα της άμεσης υποστήριξης, να τεθούν και μέτρα προυποστήριξης ή προβελτίωσης με τρόπο που παρίσταται στο Σχήμα 20.

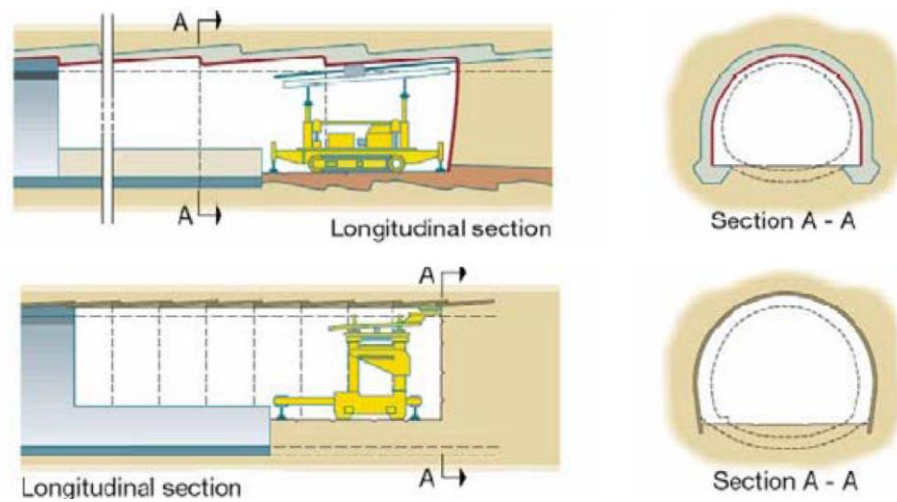


Σχήμα 20: Αριστερά η προυποστήριξη ή προβελτίωση εμπροσθεν του μετώπου & Δεξιά η άμεση υποστήριξη σε κοντινή απόσταση από το διανοιγμένο μέτωπο

Από τα παραπάνω λοιπόν, συνάγεται πως πρέπει να γίνουν οι εξής έλεγχοι :

1. Έλεγχος του πυρήνα εμπροσθεν του μετώπου που μπορεί να πραγματοποιηθεί με επεμβάσεις που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

α. Ενέργειες που αποσκοπούν στην προστασία με μείωση της φόρτισης του πυρήνα με προυποστήριξη του, όπως είναι η εφαρμογή υποοριζόντιων εδαφοπασσάλων (Jet Grouting) ή κελύφους άοπλου ή ινοπλισμένου σκυροδέματος το οποίο τοποθετείται με τεχνικές πρότμησης (Precutting), ενέργειες που φαίνονται στα ακόλουθα δύο Σχήματα 21. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δεν προσομοιώνονται οι δύο αυτές εναλλακτικές ενέργειες επομένως και δεν αναπτύσσονται περαιτέρω.



Σχήμα 21: Μηκοτομή και Εγκάρσια Τομή Διάνοιξης με χρήση υποοριζόντιων εδαφοπασσάλων (Επάνω) & με τεχνική πρότμησης της περιφέρειας (Κάτω)

β. Ενέργειες ενίσχυσης που ως στόχο έχουν την απευθείας επέμβαση στη συνεκτικότητα του υλικού του πυρήνα μπροστά από το μέτωπο, ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Οι ενέργειες αυτές λέγονται μέθοδοι προβελτίωσης με συνήθη και κύριο εκπρόσωπο τους την εφαρμογή αγκυρίων από υαλοίνες (Fiberglass). Τα αγκύρια μετώπου όπως αλλιώς ονομάζονται, είναι σημαντικό να επιλέγονται έτσι ώστε να παρέχουν την ιδανική πρόσφυση με την περιβάλλουσα βραχώμαζα, ώστε να επιτευχθεί η σωστή μεταβίβαση των φορτίων από τους ήλους στη γεωμάζα.

2. Έλεγχος του μετώπου πίσω από αυτό, με επιβολή δύσκαμπτης υποστήριξης προκειμένου να διατηρηθεί άμεμπτο το πλεονέκτημα που προσδόθηκε από την προενίσχυση του προχωρούντος έμπροσθεν του μετώπου πυρήνα, κάτι που ανθίσταται στις παραδοσιακές μεθόδους που επιθυμούν την ελεγχόμενη παραμόρφωση.

Στην εν λόγω μέθοδο, η βραχώμαζα ταξινομείται βάσει της συμπεριφοράς της και ως προς την ευστάθεια σε τρεις κατηγορίες A, B & C.

Στην κατηγορία A, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως μακροπρόθεσμα σταθερή με το εντατικό πεδίο γύρω από την εκσκαφή να είναι μικρότερο από την αντοχή του περιβάλλοντος πετρώματος. Οι συγκλίσεις είναι ελαστικές και εκδηλώνονται άμεσα, ενώ το μέτωπο είναι σταθερό με συμπεριφορά βράχου.

Στην κατηγορία B, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως βραχυπρόθεσμα σταθερή, με το εντατικό πεδίο γύρω από την εκσκαφή να είναι πιθανό να υπερβεί την αντοχή της βραχώμαζας, σχηματίζοντας το φαινόμενο ασπίδας γύρω από αυτή. Εν δυνάμει απαιτούνται μέτρα προβελτίωσης έμπροσθεν του μετώπου, και συγκεκριμένα στον πυρήνα μπροστά από το μέτωπο και στην περίμετρο της εκσκαφής με σκοπό την διατήρηση των συγκλίσεων εντός αποδεκτών τιμών. Το μέτωπο θεωρείται βραχυχρόνια ευσταθές με συμπεριφορά συνεκτικού εδάφους.

Στην κατηγορία C, το εντατικό πεδίο είναι πολύ μεγαλύτερο της αντοχής της βραχώμαζας, και επομένως δεν επιτρέπει τη δημιουργία του φαινομένου ασπίδας. Ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης είναι ελάχιστος, επομένως τα μέτρα προβελτίωσης εφαρμόζονται πριν από το μέτωπο, ώστε να αυξηθεί η αντοχή του πετρώματος. Το μέτωπο θεωρείται ασταθές με συμπεριφορά χαλαρού εδάφους.

Στις τελευταίες δύο κατηγορίες η παρουσία υδροφορίας οφείλει να αντιμετωπίζεται με τις κατάλληλες αποστραγγιστικές μεθόδους.

Συνολικά, οι φάσεις της μελέτης κατασκευής με τη μέθοδο Adeco – RS, είναι οι εξής :

- *Φάση αξιολόγησης*, όπου καθορίζονται πλήρως τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας ώστε να μπορεί να προβλεφθεί η μηχανικής της συμπεριφορά.
- *Φάση διάγνωσης*, όπου τα άνωθεν στοιχεία αξιοποιούνται ώστε να γίνει η κατανομή της σήραγγας σε κάποια από τις κατηγορίες A, B ή C. Αυτή η διάκριση γίνεται μέσω γεωστατικών αναλύσεων χωρίς να ληφθεί υπόψιν η άμεση υποστήριξη κατά τη διάνοιξη.

- *Φάση θεραπείας*, όπου προσδιορίζονται βάσει της προηγούμενης κατάταξης, οι ενέργειες με τις οποίες θα επιτευχθεί η σταθερότητα της σήραγγας.

- *Φάση Κατασκευής*, στην οποία εμπεριέχονται:
 - ✓ *Φάση διάνοιξης*, κατά την οποία κατασκευάζεται η σήραγγα.
 - ✓ *Φάση παρακολούθησης*, όπου ελέγχεται η συμπεριφορά της σήραγγας κατά τη διάνοιξη αυτής και μετά την ολοκλήρωση της.

5^ο Κεφάλαιο

Έλεγχος της Ευστάθειας του Μετώπου

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχιών κατά την διάνοιξη της σήραγγας το μέτωπο εκσκαφής, χρήζει υποστήριξης, με στόχο είτε να προκληθεί μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr – Coulomb προς τα πάνω, είτε να απομακρυνθεί ο κύκλος Mohr από την αστοχία, γεγονός που σηματοδοτεί την αύξηση της πλευρικής τάσης σ_3 ή μείωση της κατακόρυφης τάσης σ_1 , ή συνδιασμό των δύο.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον παραπάνω σκοπό είναι οι ακόλουθες:

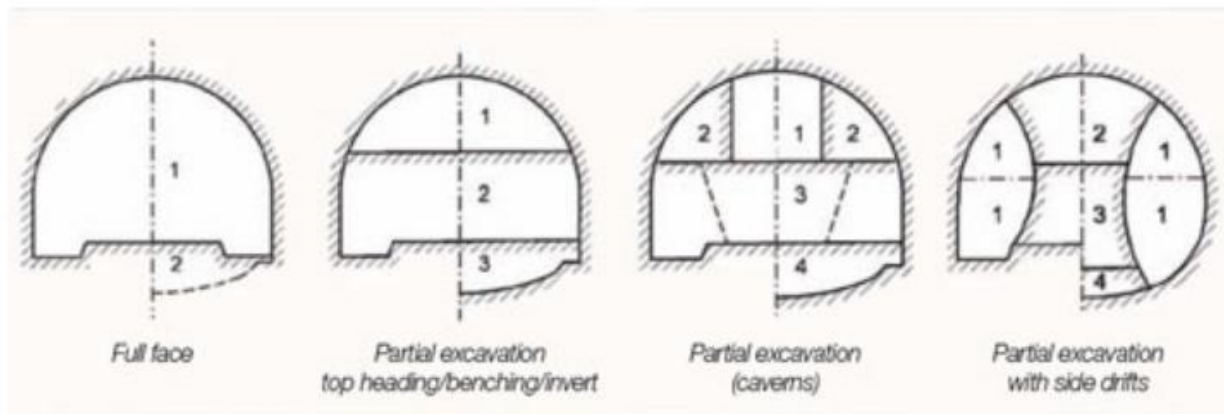
1. Η πραγματοποίηση τμηματικής εκσκαφής, δηλαδή η εκσκαφή του μετώπου σε πολλαπλές φάσεις με σκοπό τη μείωση της επιφάνειας του μετώπου και άρα της εξώθησης αυτού.
2. Η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια από υαλόνημα (fiberglass) για τη διατήρηση της υψηλής τιμής της πλευρικής τάσης σ_3 .
3. Η τοποθέτηση άκαμπτων δοκών προπορείας στη στέψη (forepoling), για τη μείωση της τιμής της κατακόρυφης τάσης σ_1 .
4. Η τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυριών από την επιφάνεια με σκοπό τη μείωση της σ_1 .
5. Η τοποθέτηση ράβδων προπορείας (spiling) με σκοπό τη βελτίωση της ευστάθειας της οροφής (ravelling)
6. Η εφαρμογή συνεχών ομπρελών προστασίας (jet grouting, pre - excavation), με στόχο και πάλι τη μείωση της σ_1 .
7. Η βελτίωση των παραμέτρων αντοχής της βραχώμαζας, με εφαρμογή τσιμεντενέσεων, παγώματος (freezing) και αποστράγγισης σε περιπτώσεις ανάδυσης νερού υπό πίεση.
8. Ο συνδιασμός των παραπάνω, που είναι και η συνήθης τακτική.

Από τις προαναφερόμενες μεθόδους, στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται οι πρώτες τρεις, ήτοι η τμηματική εκσκαφή, η εφαρμογή αγκυριών από υαλόνημα (fiberglass), εφαρμογή δοκών προπορείας (forepoling) & ο συνδιασμός αυτών.

5.1 Εκσκαφή σε Πολλαπλές Φάσεις

Συνήθη μέθοδο διάνοιξης αποτελεί η τμηματική εκσκαφή σε περιπτώσεις όπου επιδιώκεται τόσο η μείωση των εξωθήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, όσο και η μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων κυρίως σε αβαθείς σήραγγες.

Η εν λόγω μέθοδος έχει λόγο ύπαρξης σε εδάφη με πτωχά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, προκειμένου να υπάρξει καλύτερος έλεγχος της επιφάνειας του διανοιγόμενου μετώπου. Έτσι, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των φάσεων που επιλέγεται από το μελετητή τόσο μικρότερη η επιφάνεια του μετώπου που διανοίγεται κάθε φορά. Ο αριθμός των τμημάτων στα οποία διαιρείται η διάνοιξη ποικίλει ανάλογα με το ύψος των υπερκείμενων γαιών αλλά και με το πόσο εδαφοποιημένη είναι η βραχώμαζα που καλείται ο κατασκευαστής να αντιμετωπίσει, με το εύρος τους να βρίσκεται μεταξύ της συνήθους τμηματικής εκσκαφής σε δύο φάσεις έως και έξι φάσεις σε πιο ακραίες περιπτώσεις (βλ. Σχ. 22).

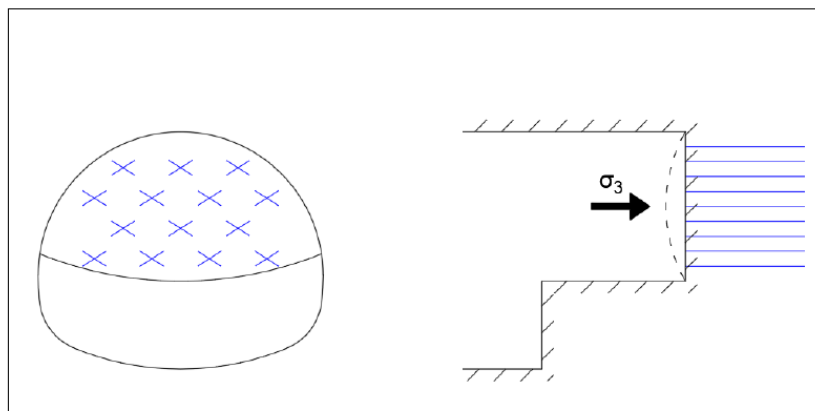


Σχήμα 22: Στάδια τμηματικής εκσκαφής για ποικίλους αριθμούς φάσεων.

5.2 Προυποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Αγκύρια Μετώπου - Fiberglass

Τα αγκύρια μετώπου εξασφαλίζουν αύξηση της πλευρικής τάσης σ_3 , με στόχο την επίτευξη ευστάθειας μέσω της πίεσης συγκράτησης που αναπτύσσεται σε αυτό.

Τα fiberglass, συχνά συναντώνται ως ορθογωνικά στοιχεία από υαλόνημα, τα οποία τοποθετούνται στο μέτωπο εκσκαφής παρέχοντας παθητική προστασία και συγκράτηση του μετώπου έναντι αστοχίας που δύναται να προκληθεί λόγω της υφιστάμενης εξώθησης. Χάρει στη φύση του υλικού τους, τα εν λόγω αγκύρια χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές ελαστικότητας και εφελκυστικής αντοχής. Το μέτωπο έχει την τάση να παραμορφώνεται προς το εσωτερικό της σήραγγας, ενώ τα αγκύρια αυτά, τα οποία είναι καλά πακτωμένα σε ισχυρό έδαφος μακριά από το μέτωπο, φέρουν αντίσταση στην προκαλούμενη παραμόρφωση του εδαφικού υλικού, ενώ λόγω της συνάφειας με την περιβάλλουσα βραχώμαζα αναπτύσσονται οι κατάλληλες διατμητικές τάσεις και δυνάμεις τριβής έτσι ώστε το μέτωπο να συγκρατηθεί. Τιουτοτρόπως, η αρχικώς μηδενικής πλευρική τάση σ_3 αρχίζει να αυξάνεται και να προκαλεί τη συγκράτηση του μετώπου, όπως φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 23 .



Σχήμα 23 : Μηχανισμός λειτουργίας αγκυρίων Fiberglass.

Ζητούμενο κατά τη διαστασιολόγηση τους είναι η προσφερόμενη τάση σ_3 δίχως να φτάσουν στη διαρροή τους. Ένας συνήθης τετραγωνικός κάρναβος που χρησιμοποιείται σε ελληνικά υπόγεια έργα, είναι 1 αγκύριο ανά 4 m^2 για περιπτώσεις εδάφους με καλής ποιότητας χαρακτηριστικά, ενώ η πυκνότητα αυτή αυξάνει στο 1 αγκύριο ανά 1 m^2 για πτωχότερα εδάφη. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων κυμαίνεται μεταξύ 150 – 200 kN. Επιπλέον, προκειμένου να εξασφαλισθεί η συγκράτηση του όγκου – σφήνας αστοχίας στο μέτωπο όταν αυτό τείνει να ολισθήσει, δίνεται κάποιο μήκος αλληλεπικάλυψης (overlap area) μεταξύ των διαδοχικών αγκυρίων, το οποίο για τα δεδομένα των ελληνικών έργων κυμαίνεται μεταξύ των 3 – 4 m.

Ως προς τη διαδικασία της εφαρμογής τους, έπειτα από την κατασκευή διατηρημάτων με κατάλληλο διατηρητικό φορείο Jumbo, τα αγκύρια τοποθετούνται εντός των οπών και στη συνέχεια ακολουθεί ενεμάτωση αυτών, με το αποτέλεσμα να φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 24.



Σχήμα 24: Προενίσχυση μετώπου με αγκύρια fiberglass

Ως προς τη διάταξη του ίδιου του αγκυρίου, αυτό αποτελείται από μία πλάκα από υαλονήματα με επίστρωση από χαλαζιακή άμμο, ένα κεντραδόρο και ένα σωληνάκι ενεμάτωσης. Ρόλος της χαλαζιακής άμμου είναι η ενίσχυση των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσεται σε όλο το μήκος του αγκυρίου, ενώ αυτός του κεντραδόρου είναι η σωστή ευθύγραμμη και τοποθέτηση του αγκυρίου εντός του διατρήματος. Το σωληνάκι χρησιμεύει για την εισπίεση του ενέματος το οποίο μόλις φτάσει στην άλλη άκρη του σωλήνα, δηλαδή στο τέλος του διατρήματος, υπερχειλίζει και ξεκινά να πληρώνει το διάτρημα από το τέλος του προς την αρχή του.

5.3 Προυποστήριξη του Μετώπου εκσκαφής με Δοκούς Προπορείας - Forepole

Οι δοκοί προπορείας αποτελούν στοιχεία μεγάλου μήκους, που λειτουργούν με τρόπο τέτοιο ώστε να προστατεύουν το μέτωπο εκσκαφής έναντι αστοχίας από πιθανή αποκόλληση υπό τη μορφή σφήνας του υπερκείμενου εδαφικού υλικού το οποίο και συγκρατούν.

Ο μηχανισμός υποστήριξης της ομπρέλας από δοκούς προπορείας, είναι η υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής κατά τις δύο διευθύνσεις (διαμήκη και εγκάρσια) της σήραγγας, μορφώνοντας έτσι ένα τοξωτής μορφής κέλυφος υποστήριξης. Οι εν λόγω δοκοί λειτουργούν ως αμφιέριστες δοκοί οι οποίες παραλαμβάνουν ένα μέρος του υπερκείμενου γεωστατικού φορτίου. Η λειτουργία αμφιέριστης δοκού οφείλεται στις δύο στηρίξεις αυτών, με την στήριξη έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής να εδράζεται σε αδιατάραχτη βραχώμαζα, ενώ η όπισθεν του μετώπου στήριξη εδράζεται σε χαλίβδινα πλαίσια, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα του Σχήματος 25.



Σχήμα 25: Στήριξη ομπρέλας Forepole στο Βόρειο Μέτωπο Εξόδου της Σήραγγας Σ2.1 του κάθετου άξονα 70 Εγνατίας Οδού

Η παραλαβή μέρους των φορτίων των υπερκειμένων από τις δοκούς προπορείας, περιορίζονται οι εδαφικές καθιζήσεις, βελτιώνεται η ευστάθεια του μετώπου, μέσω της μείωσης της κατάκορφης τάσης εμπρός από το μέτωπο, και την αποφόρτιση της εδαφικής μάζας εμπρός από το μέτωπο, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το έδαφος δεν θα αστοχήσει λόγω μεγάλων φορτίων.

Σήμερα, οι δοκοί προπορείας που χρησιμοποιούνται στα εργοτάξια έχουν συνήθη τιμή διαμέτρου που κυμαίνεται μεταξύ 70 – 193.7 mm, πάχους μεταξύ 5 – 10 mm και μήκους 12 m.

Η ομπρέλα από δοκούς προπορείας που διαμορφώνεται, τοποθετείται στη στέψη της σήραγγας, σχηματίζοντας τόξο 120°. Οι δοκοί τοποθετούνται σε αξονικές αποστάσεις μεταξύ τους από 40 έως 60 cm, ενώ το μήκος αλληλεπικάλυψης (overlap area) μεταξύ δύο διαδοχικών ομπρελών από δοκούς προπορείας (forepole umbrella) εμπειρικά συνηθίζεται να είναι περίπου 3 – 4 m.

Στην πράξη, συνηθίζεται η εφαρμογή διάταξης δοκών προπορείας διαμέτρου Φ114/101 ή Φ139.7/125.7 με αξονική μεταξύ αυτών απόσταση 30 έως 40 cm και μήκος αλληλεπικάλυψης μεταξύ 3 – 4 m.

5.4 Συντελεστής Ασφάλειας κατά Γεωργίου Δ. 2020-21

Κατά τη διερεύνηση ευστάθειας του μετώπου οι Γεωργίου Δ., Καλός Α. και Καββαδάς Μ. κατέληξαν σε ένα κοινό εύρος τιμών ενός συντελεστή ασφάλειας Λ_{Fo} , ο οποίος ανταποκρίνεται τόσο σε ρηχές σήραγγες (των οποίων τα υπερκείμενα δεν ξεπερνούν τα την τιμή των 30m), όσο και σε βαθιές σήραγγες (με μέγιστη τιμή υπερκειμένων τα 200 m).

Οι αναλύσεις που υλοποιήθηκαν ήταν τρισδιάστατες βάσει του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση αφορά σε ολομέτωπη διάνοιξη σήραγγας διατομής πεταλοειδούς σχήματος με άμεση υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε ότι αφορά τα καταστατικά κριτήρια που εφαρμόστηκαν, για τις μεν ρηχές σήραγγες θεωρήθηκε πως το γεωυλικό ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb για εδαφικές συνθήκες, ενώ για τις δε βαθιές εφαρμόστηκε το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown με προσομοίωση του γεωυλικού ως βραχώμαζα.

Αποτέλεσμα των αναλύσεων ήταν ο συντελεστής ασφάλειας Λ_{Fo} που προαναφέρθηκε, και ο οποίος όταν βισκεται εντός του εύρους $(\infty, \mathbf{1})$ το μέτωπο χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ασταθές, ενώ αντίστοιχα για το εύρος $[\mathbf{1}, \infty)$ το μέτωπο χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ευσταθές.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας Λ_{Fo} , βασίζεται στην σχέση :

$$\Lambda_{Fo} = \frac{3.8 \times \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \frac{2}{3} K_o}}$$

όπου :

σ_{cm} : Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του εδάφους ή της βραχώμαζας

γ : Το ειδικό βάρος του εδάφους ή της βραχώμαζας

H : Το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας

D : Η διάμετρος της σήραγγας

K_o : Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

Η εξώθηση του ανυποτήρικτου μετώπου εκσκαφής Ω_F προκύπτει αδιαστατοποιημένη βάσει της παρακάτω σχέσης :

$$\Omega_F = 1.4 \times (\Lambda_{Fo})^{-1.2}$$

όπου : $\Omega_F = \left(\frac{U_h}{D}\right) \times \left(\frac{E}{p_o}\right)$ και

U_h : Η μετρούμενη εξώθηση του μετώπου εκσκαφής

D : Η διάμετρος της σήραγγας

E : Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ή της βραχώμαζας

p_o : Η γεωστατική τάση ίση με $0.5 \times (1+K_o) \times \gamma \times H$

Ο παραπάνω συντελεστής ασφάλειας έχει εφαρμογή και σε περιπτώσεις ενίσχυσης του μετώπου με αγκύρια από υαλόνημα (Fiberglass), τόσο σε ρηχές όσο και σε βαθιές σήραγγες, με την ακόλουθη σχέση :

$$A_F = A_{F0} \times \left[1 + 0.75 \times \left(\frac{P_{u,FG}}{\sigma_{cm}} \right)^\alpha \right]$$

όπου :

$$P_{u,FG} = \frac{n F_u}{A} \text{ και}$$

n : Ο αριθμός αγκυρίων μετώπου

F_u : Η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων μετώπου

A : Το εμβαδό διατομής υποστηριγμένο με αγκύρια μετώπου

$$\alpha = 0.13 \times \frac{H}{D}$$

όπου:

H : Το ύψος των υπερκειμένων

D : Η διάμετρος της σήραγγας

Η ίδια σχέση που αποδίδει αδιάστατες τις εξωθήσεις του ανυποστήρικτου μετώπου ισχύει και για το προυποστηριγμένο με αγκύρια Fiberglass μέτωπο.

6^ο Κεφάλαιο

Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις

6.1 Σκοπός των Αριθμητικών Αναλύσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μία σειρά από τριδιάστατες (3D) αριθμητικές αναλύσεις, που ως στόχο έχουν τη διερεύνηση των διαστάσεων εκσκαφής στις προκαλούμενες εξωθήσεις του μετώπου. Συγκεκριμένα έγινε διερεύνηση της ολομέτωπης διάνοιξης εκσκαφής, βασιζόμενοι στις αρχές της μεθόδου ADECO RS και της τμηματικής διάνοιξης βασιζόμενοι στην μέθοδο NATM.

Για τις αναλύσεις αυτές, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS v.2018. Πρόκειται για γενικής χρήσης πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με δυνατότητα σχεδίασης προσομοιωμάτων τόσο σε δύο διαστάσεις (2D), όσο και σε τρεις διαστάσεις(3D), δίνοντας λύσεις σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων του Πολιτικού Μηχανικού και όχι μόνο..

Λόγω του σύνθετου προβλήματος της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, καθώς και της συμπεριφοράς των μέτρων προϋποστήριξης αυτού, έγινε προσομοίωση του προβλήματος μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (3D).

6.2 Περιγραφή του Προσομοιώματος των Αριθμητικών Αναλύσεων

Στο σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, επιλέχθηκε η άμεση (προσωρινή) υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος από αγκύρια βράχου (Rock bolts) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Shotcrete).

Για την προενίσχυση του μετώπου εκσκαφής, εφαρμοστήκαν αγκύρια από υαλόνημα (Fiberglass) και ο συνδιασμός αυτών με την ομπρέλα δοκών προπορείας (Forepoling Umbrella).

Οι αναλύσεις που υλοποιήθηκαν διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

1. Τμηματική εκσκαφή σε δύο φάσεις (Top – Heading & Bench), βασιζόμενοι την μέθοδο διάνοιξης NATM. Η απόσταση μεταξύ των δυο φάσεων εκσκαφής, ορίστηκε σε $1.5 \cdot D$ (όπου D η διάμετρος της σήραγγας), με σκοπό να περιοριστεί η επίδραση της δεύτερης φάσης εκσκαφής στην ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Η παραπάνω απόσταση βασίστηκε στην έρευνα των (Δ. Γεωργίου & Ι.Τσαπέκη, «Ανάλυση Ευστάθειας Μετώπου Αβαθούς Σήραγγας με χρήση Δοκών Προπορείας και Αγκυρίων Μετώπου» . Η προσομοίωση αφορά σε Αβαθείς - Επιφανειακές σήραγγες με ύψος υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας $H = 20$ & 40 m ή $H/D = 2$ & 4 , για διάμετρο σήραγγας $D = 10$ m. Οι αναλύσεις υλοποιήθηκαν για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$

- Η σήραγγα διανοίγεται, και το μέτωπο εκσκαφής παραμένει ανυποστήρικτο (UNS) .
- Η σήραγγα διανοίγεται και γίνεται υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής από αγκύρια μετώπου, τύπου fiberglass (FG).
- Η σήραγγα διανοίγεται και γίνεται υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής τόσο από αγκύρια μετώπου, τύπου fiberglass (FG) όσο και από ομπρέλα δοκών προπορείας (FP).

2. Εφαρμογή Μεθόδου ADECO – RS με ολομέτωπη διάνοιξη σε μία φάση, για Αβαθείς - Επιφανειακές σήραγγες με ύψος υπερκείμενων γαιών $H = 20$ & 40 m ή $H/D = 2$ & 4 , για διάμετρο σήραγγας $D = 10$ m. Οι αναλύσεις υλοποιήθηκαν για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$

- Η σήραγγα διανοίγεται, και γίνεται η υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής από αγκύρια μετώπου τύπου Fiberglass.

3. Τμηματική εκσκαφή σε δύο φάσεις βασιζόμενοι την μέθοδο διάνοιξης NATM Η απόσταση μεταξύ των δυο φάσεων εκσκαφής, ορίστηκε και πάλι σε $1.5 \cdot D$ (όπου D η διάμετρος της σήραγγας), με σκοπό να περιοριστεί η επίδραση της δεύτερης φάσης εκσκαφής στην ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Η προσομοίωση αφορά Βαθιές σήραγγες με ύψος υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας $H = 100 \text{ \& } 200 \text{ m}$ ή $H/D = 10 \text{ \& } 20$ αντίστοιχα, για ισοδύναμη διάμετρο σήραγγας $D = 10 \text{ m}$. Οι αναλύσεις υλοποιήθηκαν για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$

- Η σήραγγα διανοίγεται, και το μέτωπο εκσκαφής παραμένει ανυποστήρικτο (UNS) .
- Η σήραγγα διανοίγεται και γίνεται υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής από αγκύρια μετώπου, τύπου fiberglass (FG).
- Η σήραγγα διανοίγεται και γίνεται υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής τόσο από αγκύρια μετώπου, τύπου fiberglass (FG) όσο και από ομπρέλα δοκών προπορείας (FP).

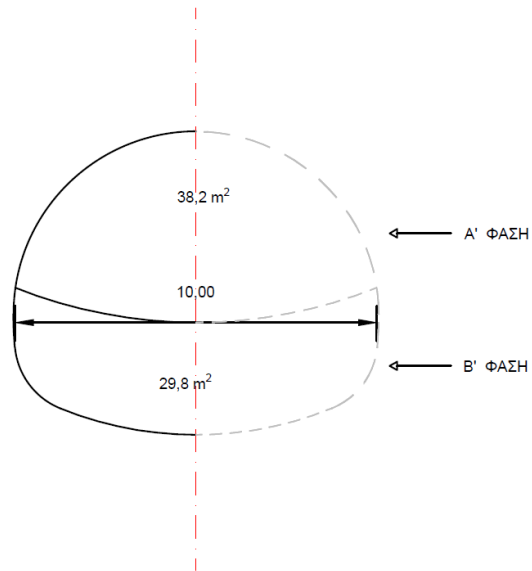
4. Εφαρμογή Μεθόδου ADECO – RS με ολομέτωπη διάνοιξη σε μία φάση, για Βαθιές σήραγγες με ύψος υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας $H = 100 \text{ \& } 200 \text{ m}$ ή $H/D = 10 \text{ \& } 20$, για διάμετρο σήραγγας $D = 10 \text{ m}$. Οι αναλύσεις υλοποιήθηκαν για τις δύο περιπτώσεις του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o = 0.5$ και $K_o = 1.0$

- Η σήραγγα διανοίγεται, και γίνεται η υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής από αγκύρια μετώπου τύπου Fiberglass

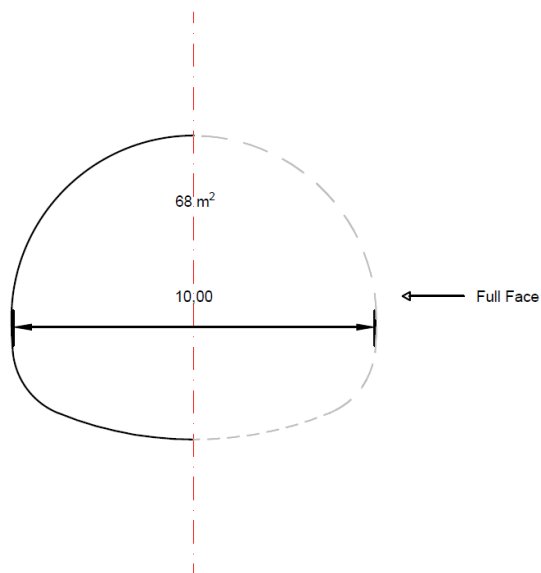
6.3 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Τα στοιχεία (elements) τα οποία διαμορφώνουν το μοντέλο είναι κυβικά στοιχεία με οκτώ κόμβους (nodes), ένα σε κάθε κορυφή. Η ακρίβεια στην προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της βραχύμαζας εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα των στοιχείων, όσο και από το μέγεθός τους στις περιοχές ενδιαφέροντος. Από τους ίδιους παράγοντες εξαρτάται και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται ώστε να υλοποιηθεί η αριθμητική ανάλυση. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ του βέλτιστου υπολογιστικού χρόνου και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάστηκε, μορφώθηκε έτσι, ώστε να είναι αραιότερος σε περιοχές μακριά από τον άξονα της σήραγγας που δεν αντλείται πληροφορία, και πυκνότερος στις περιοχές ενδιαφέροντος. Λόγω συμμετρίας της διατομής της σήραγγας ως προς τον κατακόρυφο της άξονα, προσομοιώθηκε η μισή διατομή για μείωση του υπολογιστικού χρόνου και όγκου δεδομένων.

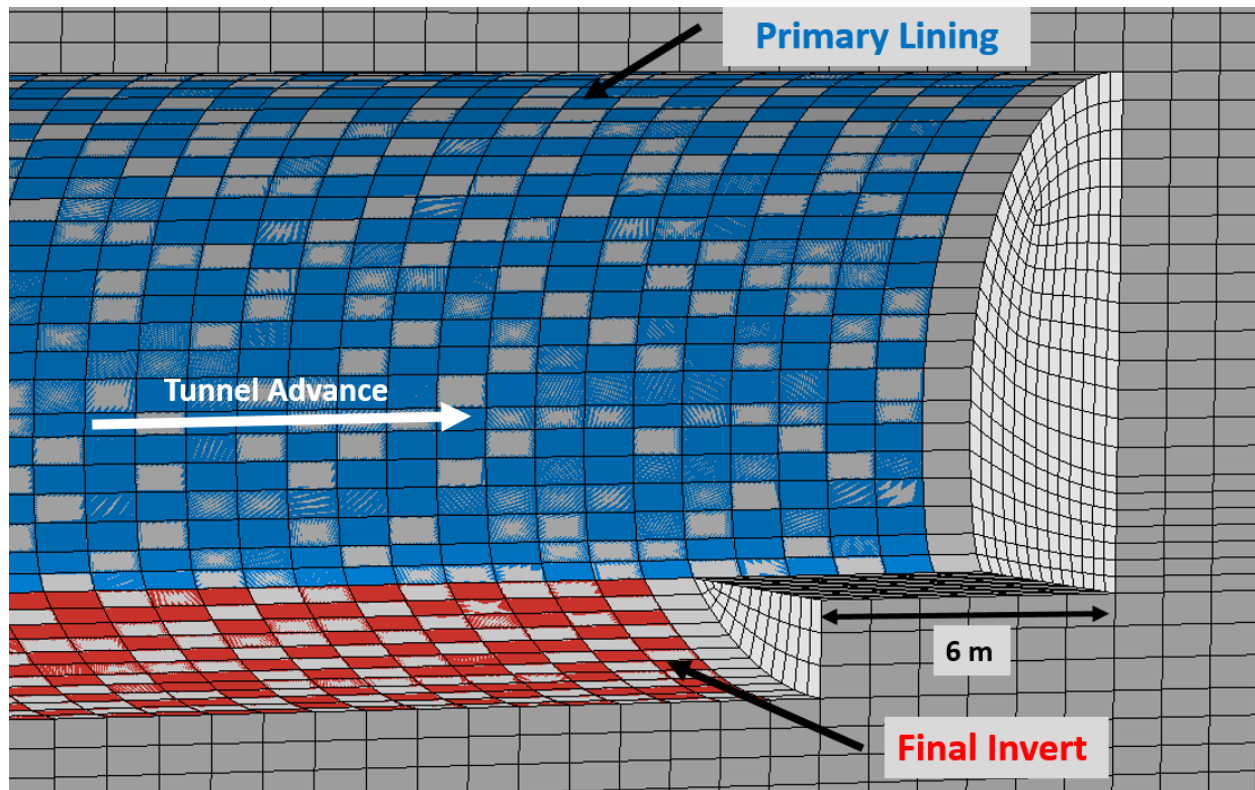
Η σήραγγα που προσομοιώνεται είναι πεταλοειδούς διατομής και ισοδύναμης διαμέτρου $D = 10$ m και εκσκάπτεται άλλοτε σε δύο στάδια (A: Top – Heading & B: Bench), και άλλοτε ολομέτωπα (Full Face), όπως παρουσιάζεται και στα δύο ακόλουθα Σχήματα 26 και 27.



Σχήμα 26 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο NATM



Σχήμα 27 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο τύπου ADECO-RS



Σχήμα 28 : Διατομή προς Εξέταση με μέθοδο τύπου ADECO-RS

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα του Σχήματος 28, το τελικό μόνιμο ανάστροφο τοποθετείται 6 m πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής και επιλέγεται να είναι ακαμπτο

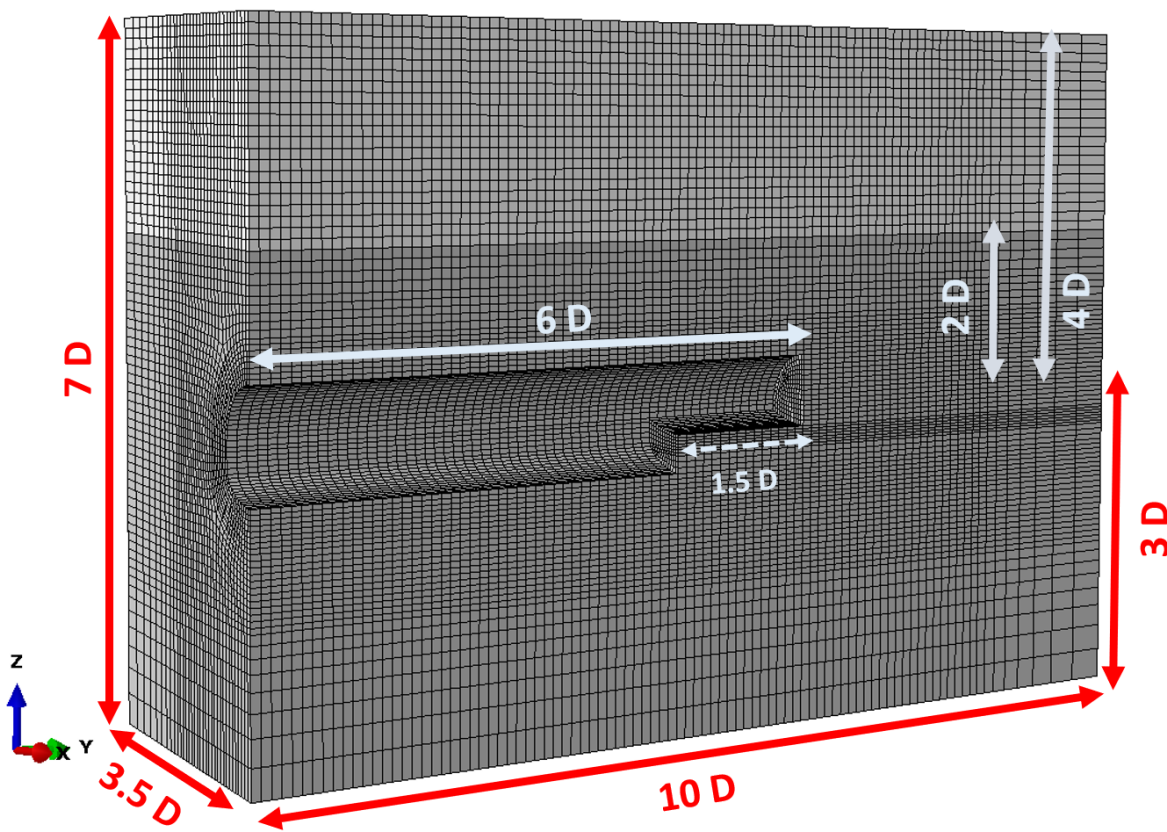
Ως προς τη όρια εκατέρωθεν της διατομής των δύο μοντέλων, στα αριθμητικά προσομοιώματα, εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα :

1. Το άνω όριο ορίζεται στα 30 m (3D), άνωθεν του άξονα της σήραγγας.
2. Το κάτω όριο ορίζεται στα 40 m (4D), κάτω από τον άξονα της σήραγγας.
3. Το εκατέρωθεν όριο ορίστηκε στα 60 m (6D), από τον άξονα της σήραγγας.

Σε όλες τις προσομοιώσεις, ελήφθη μήκος διάνοιξης ίσο με 6 D, ώστε να απαλείφει τυχόν φαινόμενο επιρροής συνόρων (boundary effect). Για τον λόγο αυτό δεν αξιοποιούνται τα δεδομένα

από τα πρώτα 10 m ($1 * D$) διάνοιξης και σε αυτό το μήκος σε όλες τις αναλύσεις έγινε ολομέτωπη διάνοιξη με ταυτόχρονη εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης.

Για εποπτικούς λόγους παρατίθεται η παραπάνω περιγραφή και γραφικά μέσω της εικόνας του Σχήματος 29.



Σχήμα 29 : Όρια που τέθηκαν κατά την προσομοίωση συναρτήσει της διαμέτρου D .

6.4 Περιγραφή Υλικών που προσομοιώνονται

6.4.1 Χαρακτηριστικά Γεωυλικών

Για την προσομοίωση του εδαφικού υλικού έγινε χρήση του Κριτηρίου Αστοχίας Mohr – Coulomb (M/C), γνωστό και ως Coulomb – Navier, ένα από τα πιο απλά κριτήρια που εφαρμόζεται για την προσομοίωση του γεωυλικού κατά την αστοχία. Επιλέχθηκε το M/C λόγω της γραμμικής ελαστικής, πλήρως πλαστικής συμπεριφοράς των τριών εδαφικών υλικών.

Για τις περιπτώσεις χαμηλών και βαθιών υπερκειμένων, τα γεωυλικά που προσομοιώθηκαν έχουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στους πίνακες των δύο επόμενων Σχημάτων 30 και 31 (α).

	S ₁	S ₂	S ₃
c (kPa)	20	20	25
φ (°)	22.5	25	25
δ (°)	5.6	6.25	6.25
E (kPa)	8000	100000	120000
γ(Kn/m ³)	20	20	20

Σχήμα 30 : Εδάφη που προσοιώθηκαν στις Ρηχές σήραγγες

	S ₄	S ₅
GSI	30	40
γ(Kn/m ³)	23	23
E (MPa)	1400	1400
σ _{ci} (MPa)	7	7

Σχήμα 31 (α) : Εδάφη που προσοιώθηκαν στις Βαθιές σήραγγες

Για την άρση των μηχανικών χαρακτηριστικών στις βαθιές σήραγγες χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RocLab της RocScience, με εφαρμογή του καταστατικού κριτηρίου Mohr – Coulomb για εδαφοποιημένα υλικά. Οι παράμετροι αντοχής όπως αυτές προέκυψαν δίνονται στους δύο επόμενους πίνακες του Σχήματος 31 (β).

S ₄			S ₅		
H (m)	100	200	H (m)	100	200
c (kPa)	151	230	c (kPa)	186	281
φ (°)	25.822	21.188	φ (°)	28.869	23.891
E (kPa)	113.936	113.936	E (kPa)	223.513	223.513
γ(Kn/m ³)	23	23	γ(Kn/m ³)	23	23

Σχήμα 31 (β) : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εδαφών που προσοιώθηκαν στις Βαθιές σήραγγες

6.4.2 Χαρακτηριστικά Εκτοξευόμενο Σκυροδέματος (Gunite)

Το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που προσομοιώθηκε σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις, τοποθετούταν ένα βήμα πίσω από το εκάστοτε μέτωπο εκσκαφής. Η κατηγορία σκυροδέματος επιλέχθηκε να είναι C30/37 και πάχους στρώσης $t = 30$ cm με το οποίο γίνεται κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου (invert) από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 15$ cm καθότι αυτό αργότερα θα καθαιρεθεί. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως το τελικό ανάστροφο τόξο λήφθηκε ως ένα δύσκαμπτο στοιχείο πάχους 1m, άοπλο, κατηγορίας C30/37. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ορίστηκε ως $E_c = 15$ GPa, προσομοιώνοντας το νωπό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ ο λόγος Poisson έλαβε την τιμή $\nu = 0.2$. Το εν λόγω μέτρο άμεσης υποστήριξης εφαρμόστηκε και στις δύο μεθόδους διάνοιξης. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με στοιχεία κελύφους (shell elements).

Τα παραπάνω συνοψίζονται και στον Πίνακα του Σχήματος 32 .

Στοιχεία Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος	
Πάχος στρώσης, t (cm)	30
Μέτρο Ελαστικότητας, E _c (GPa)	15
Λόγος Poisson, ν	0.2
Κατηγορία	C30/37
Συμπεριφορά	Elastic

Σχήμα 32 : Χαρακτηριστικά Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος

6.4.3 Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Βράχου (Rock bolts)

Στις περιπτώσεις τμηματικής εκσκαφής της σήραγγας, έγινε ενίσχυση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από αγκύρια βράχου (Rock bolts). Συγκεκριμένα, για τα αγκύρια προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δικτυώματος (truss elements) μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων (nodes) του εδαφικού υλικού.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για τα αγκύρια είναι αυτά του πίνακα του Σχήματος 33 .

Στοιχεία Αγκυρίων Βράχου (Rockbolts)	
Διάμετρος, d (mm)	25
Μήκος, L (m)	6
Κάνναβος, χxy	1.5 x 1
Μέτρο Ελαστικότητας, Es (GPa)	200
Όριο Διαρροής, fy (MPa)	500
Συμπεριφορά	Elastoplastic
Λόγος Poisson, ν	0.25

Σχήμα 33 : Χαρακτηριστικά Περιμετρικών Αγκυρίων

6.4.4 Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)

Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο της θεωρίας, τα αγκύρια μετώπου είναι μεγάλου μήκους στοιχεία που εφαρμόζονται σε κάνναβο τέτοιο ώστε να συμβάλλουν στη βελτίωση της εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής του γεωυλικού, προσφέροντας την ανάλογη πίεση μετώπου. Στην παρούσα εργασία μορφώθηκαν δύο διαφορετικοί κάνναβοι αγκυρίων, ένας για κάθε μέθοδο διάνοιξης, ενώ διευκρινίζεται πως στη Β' φάση της τμηματικής εκσκαφής δεν τοποθετούνται.

Στην τμηματική εκσκαφή εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα:

Για τις μεν ρηχές σήραγγες με λόγο $H/D = 2$ έως 4 , 1 αγκύριο / 2 m^2 με μήκος αλληλεπικάλυψης 6 m , μόνο κατά την διάνοιξη του Top-Heading, ενώ για τις δε βαθιές με λόγο $H/D = 10$ έως 20 , η πυκνότητα αυξάνεται στο 1 αγκύριο / 1 m^2 με ίδιο μήκος αλληλεπικάλυψης και μόνο κατά την Α' φάση εκσκαφής. Να σημειωθεί πως η παραπάνω τιμή αλληλεπικάλυψης των Fiberglass, απορρέει βάσει των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξαν οι διπλωματικές εργασίες των Γεωργακόπουλου Γεωργίου και Διακουμή Ευασταθίας με τίτλους ‘‘Αριθμητική Διερεύνηση του Βέλτιστου Τρόπου Εφαρμογής των Μέτρων Ευστάθειας του Μετώπου σε Βαθιές Σήραγγες’’ και ‘‘Αριθμητική Διερεύνηση του Βέλτιστου Τρόπου Εφαρμογής των Μέτρων Ευστάθειας του Μετώπου σε Ρηχές Σήραγγες’’, αντίστοιχα

Στην ολομέτωπη εκσκαφή, εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα:

Για τις μεν ρηχές σήραγγες με λόγο $H/D = 2$ έως 4 τοποθετείται 1 αγκύριο / 2 m^2 με μήκος αλληλεπικάλυψης 10 m , ενώ για τις δε βαθιές με λόγο $H/D = 10$ έως 20 , η πυκνότητα αυξάνεται στο 1 αγκύριο / 1 m^2 με ίδιο μήκος αλληλεπικάλυψης.

Το εν λόγω μήκος προκύπτει βιβλιογραφικά βάσει της προσεγγίσεων του Lunardi, καθώς και των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξαν

Βάσει των δεδομένων της εταιρείας ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ, τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων αγκυρίων μετώπου έχουν ως ακολούθως:

Στοιχεία Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)	
Διατομή (mm)	Ορθογωνική 40 x 5
Επιφάνεια, A (mm ²)	200
Όριο Θραύσης (kN)	200
Μέτρο Ελαστικότητας, E _{fiber} (GPa)	40
Συμπεριφορά	Elastoplastic
Λόγος Poisson, ν	0.3

Σχήμα 34 : Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Μετώπου

6.4.5 Χαρακτηριστικά Δοκών Προπορείας (Forepoles)

Αναφορικά με την εφαρμογή δοκών προπορείας αυτοί επιλέχθηκε να είναι 30 τεμάχια στο σύνολο της διατομής, δηλαδή 15 στη μισή διατομή που προσομοιώθηκε, και διαθέτουν τα κάτωθι χαρακτηριστικά του πίνακα του Σχήματος 35 .

Στοιχεία Δοκών Προπορείας (Forepoles)	
Διατομή	Φ114.3/100.3
Αξονική Απόσταση, s (cm)	50
Όριο Διαρροής (kN)	235
Μέτρο Ελαστικότητας, E_{fp} (GPa)	200
Συμπεριφορά	Elastoplastic
Λόγος Poisson, ν	0.25
Ειδικό Βάρος γ_{steel} (kN/m ³)	78.5
Περιοχή Κάλυψης	60°

Σχήμα 35 : Χαρακτηριστικά Δοκών Προπορείας

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως για την εφαρμογή των Forepoles, απαιτείται η τοποθέτηση πλαισίων πάνω στα οποία θα εδράσουν τα πρώτα. Η προσομοίωση αυτών δεν πραγματοποιήθηκε άμεσα στο μοντέλο, αλλά έμμεσα, χρησιμοποιώντας την ελαστικότητα που ένα πλαίσιο προσφέρει κατά την εφαρμογή του.

Έτσι έγινε ο υπολογισμός των σύμμικτων ιδιοτήτων που παρέχονται από τη συνεργασία του υλικού του χάλυβα του πλαισίου με το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται ως ακολούθως :

Για τα μεταλλικά πλαίσια HEB 140 είναι γνωστά τα παρακάτω:

- $A_s = 0,004296 \text{ m}^2$
- $E_s = 200 \text{ GPa}$
- $I_s = 1.509 \times 10^{-5} \text{ m}^4$

Για το σκυρόδεμα αντοχής C30/37 υπολογίζονται τα παρακάτω :

- $A_c = b h - A_s = 1\text{ m} \times 0.3\text{ m} - 0,004296\text{ m}^2 = 0,295704\text{ m}^2$
- $E_c = 15\text{ GPa} \Rightarrow f_c = 30\text{ MPa}$
- $I_c = - I_s = - 1.509 \times 10^{-5}\text{ m}^4 = 2.23491 \times 10^{-3}\text{ m}^4$

Διαιρώντας κατά μέλη τους τύπους των σύμμικτων ιδιοτήτων που ακολουθούν προκύπτει το ισοδύναμο εμβαδόν :

$$E_{eq}I_{eq} = E_c I_c + E_s I_s$$

$$E_{eq}A_{eq} = E_c A_c + E_s A_s$$

Όπου:

E_{eq}, E_c, E_s : Μέτρο ελαστικότητας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

I_{eq}, I_c, I_s : Ροπή αδράνειας ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

A_{eq}, A_c, A_s : Εμβαδόν ισοδύναμης διατομής, σκυροδέματος, χάλυβα

$$\frac{I_{eq}}{A_{eq}} = \frac{E_c I_c + E_s I_s}{E_c A_c + E_s A_s} = 6,90 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

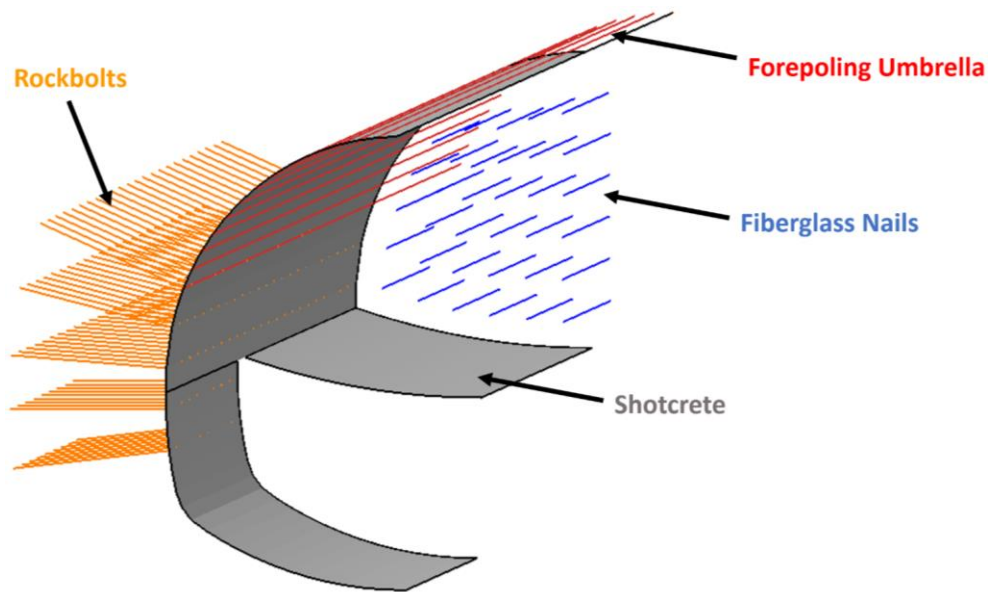
Ακολούθως υπολογίζονται ο πάχος t_{eq} η αντοχή σ_{eq} και το μέτρο ελαστικότητας του σύμμικτου υλικού :

$$- I_{eq} = \frac{A_{eq} \times t_{eq}^2}{12} \Rightarrow t_{eq} = 288\text{ m}$$

$$- \sigma_{eq} = \frac{f_c A_c + f_s A_s}{A_{eq}} = 38,96\text{ GPa}$$

$$- E_{eq} = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{A_{eq}} = 18,4\text{ MPa}$$

Το σύνολο των παραπάνω μέτρων άμεσης υποστήριξης αλλά και προενίσχυσης του μετώπου παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 36 .



Σχήμα 36 : Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης & Προενίσχυσης του Μετώπου Εκσκαφής.

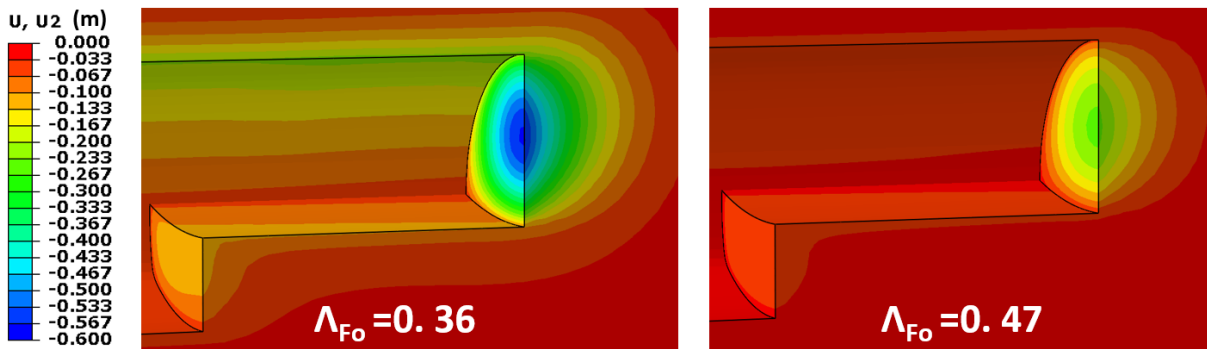
7^ο Κεφάλαιο

Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις για Ρηχές Σήραγγες

7.1 Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας

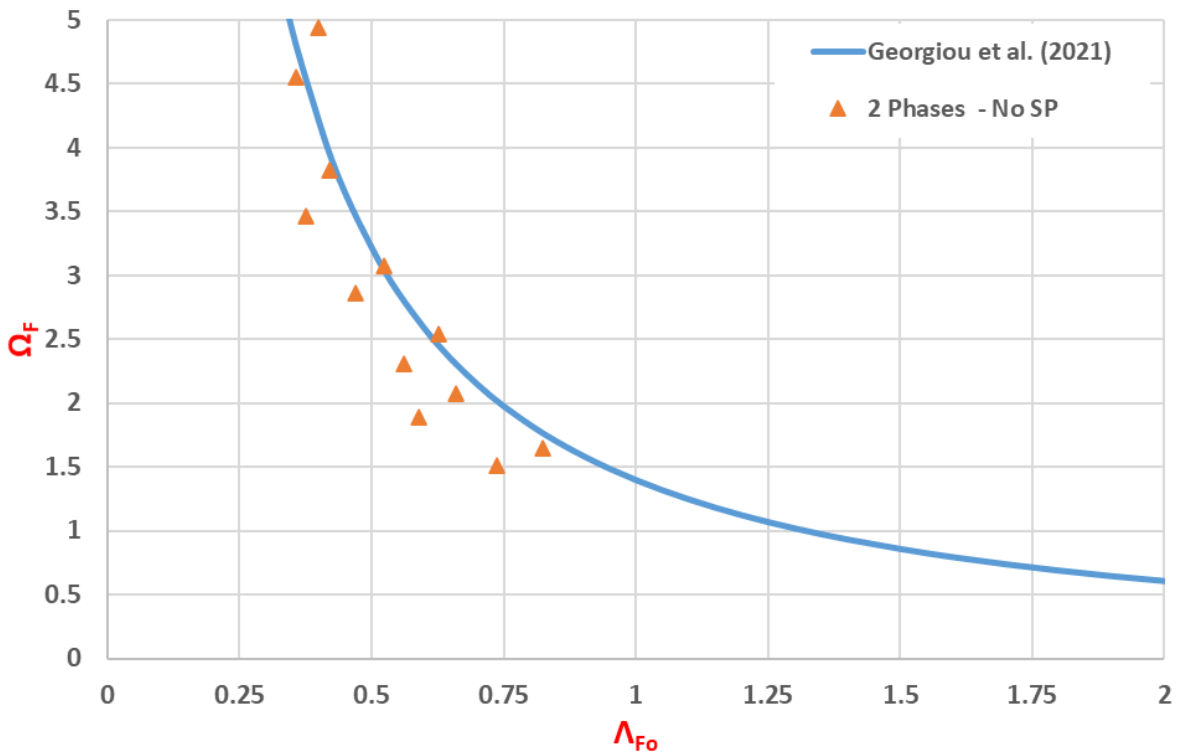
Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά διερευνάται η ευστάθεια του αρχικώς ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής κάνοντας τμηματική εκσκαφή στο οποίο προσαρμόζονται σταδιακά τα μέτρα της υποστήριξης σε ρηχές σήραγγες για διαδοχικά υπερκείμενα από τον άξονα της σήραγγας τα 20 και 40 μ. για εδάφη με πτωχά χαρακτηριστικά όπως αναφέρονται και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η ίδια διερεύνηση πραγματοποιείται και για την ολομέτωπη διάνοιξη της σήραγγας για εδάφη με τα ίδια χαρακτηριστικά και υπερκείμενα.

Γενικά, αναμένεται σε περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγων, να λάβουμε μεγάλες τιμές της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής. Αυτό επαληθεύτηκε από το σύνολο των αναλύσεων, με χαρακτηριστικό το ακόλουθο πρώτο παράδειγμα, βλέποντας την εικόνα του Σχήματος 37, στο οποίο αναπαριστώνται οι εξωθήσεις για τις δύο ακραίες περιπτώσεις εδάφους παρατηρούμε πως καθώς βελτιώνονται οι συνθήκες του εδάφους και άρα αυξάνεται ο συντελεστής Λ_{F_0} , επέρχεται μείωση των εξωθήσεων.



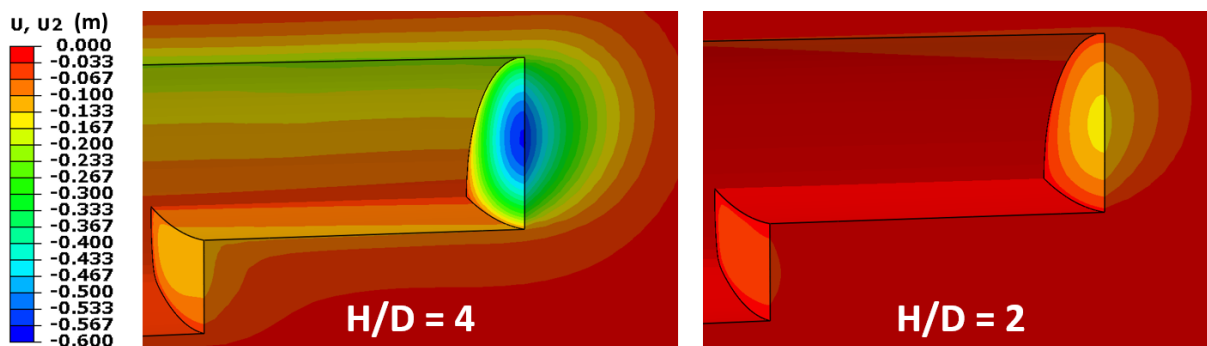
Σχήμα 37 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνεται και μέσω του ακόλουθου διαγράμματος συσχέτισης της εξώθησης του μετώπου συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} .



Σχήμα 38 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη.

Κατά παρόμοιο τρόπο η αύξηση των υπερκειμένων και άρα του λόγου H/D που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή του Ns , δηλαδή μικρότερη τιμή του Λ_{Fo} , για την ίδια αντοχή εδάφους που αναφέρονται οι δύο παραπάνω εικόνες του Σχήματος 38, η φόρτιση αυξάνει δίνοντας μεγαλύτερες εξωθήσεις (Σχ. 39 αριστερά), οδηγώντας σε γρηγορότερη αστοχία του εδάφους.

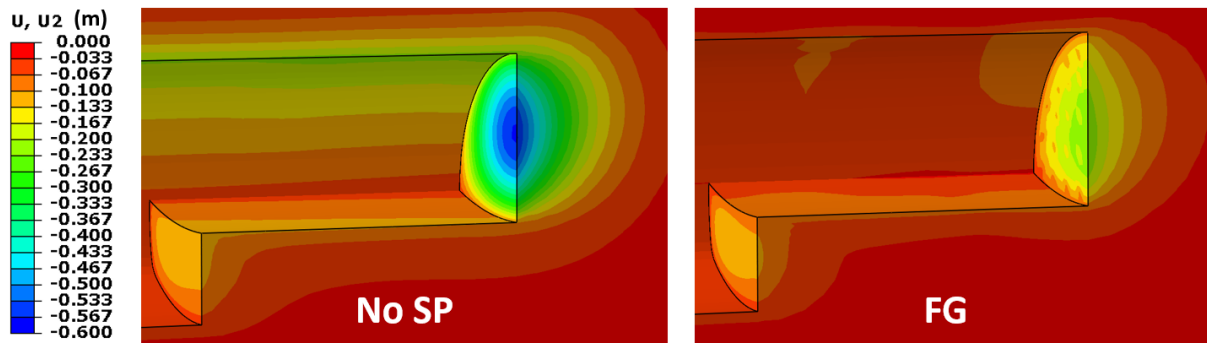


Σχήμα 39 : Επιρροή του λόγου των υπερκειμένων H/D στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικές περιπτώσεις χαμηλών υπερκειμένων.

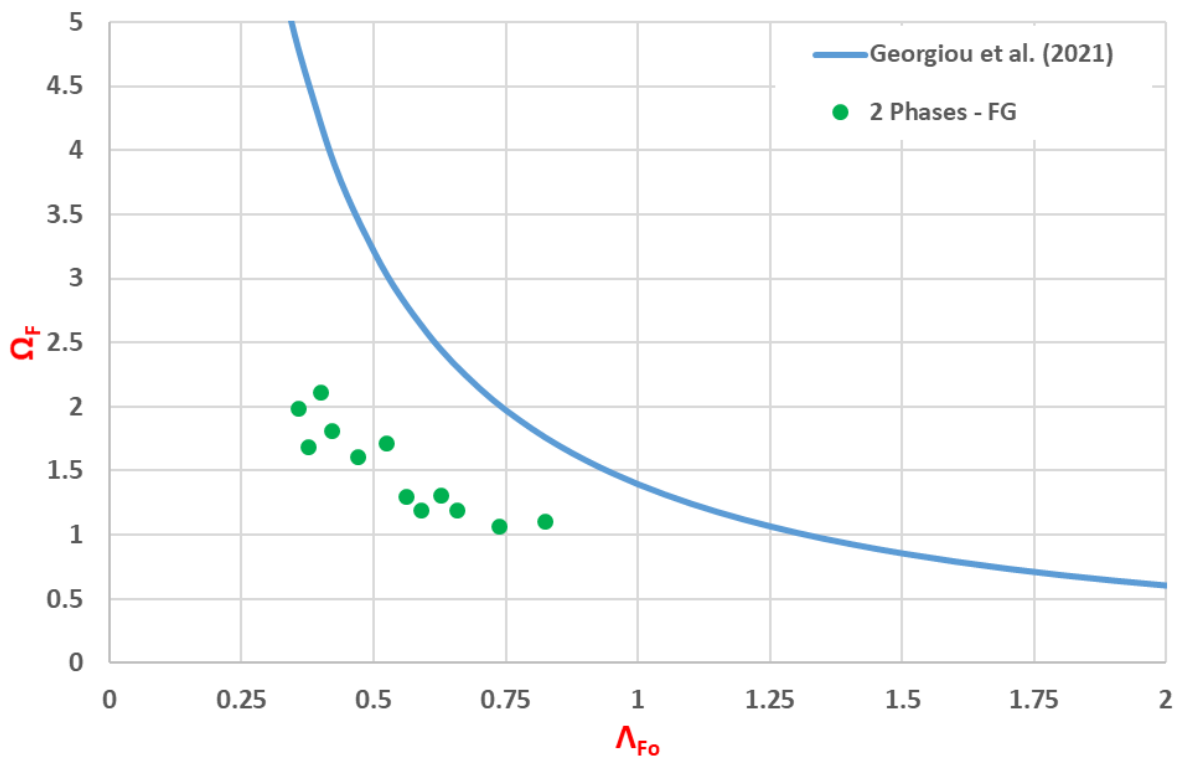
Εύκολα λοιπόν συμπεραίνει κανείς πως μόνο με εφαρμογή της τμηματικής εκσκαφής και χωρίς το κόστος περαιτέρω μέτρων υποστήριξης μειώνονται σημαντικά οι εξωθήσεις.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθεί πως έγινε προσπάθεια υλοποίησης αναλύσεων ολομέτωπης διάνοιξης σε ανυποστήρικτο μέτωπο, οι οποίες ωστόσο δεν ήρθαν σε πέρας καθότι έδιναν πολύ μεγάλες συγκλίσεις.

Στη συνέχεια, στην ίδια διατομή σήραγγας διανοιγμένη με τμηματική εκσκαφή, εφαρμόστηκαν αγκύρια μετώπου Fiberglass, τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στο υποκεφάλαιο 6.4.4, σε κάρνα 1 αγκύριο / 2 m². Σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα του Σχήματος 40, είναι ιδιαίτερα σημαντική η συνεισφορά των αγκυρίων μετώπου στη μείωση των εξωθήσεων ($\Delta\Omega_F$) συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες του ανυποστήρικτου μετώπου.

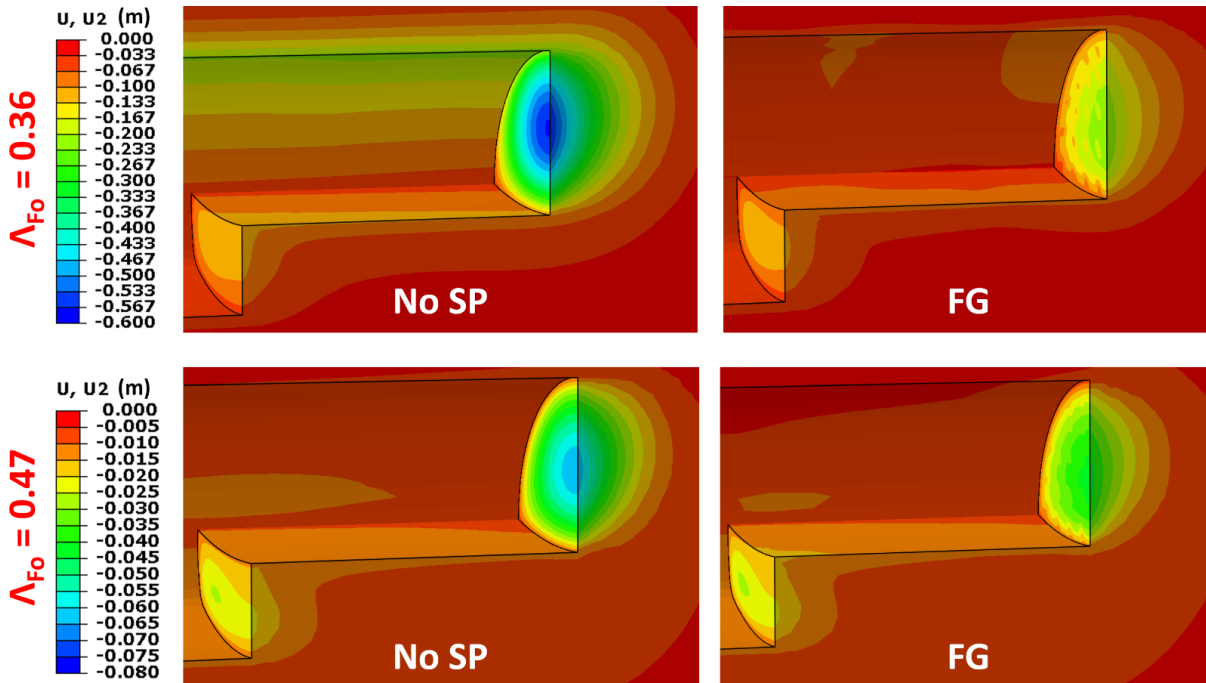


Σχήμα 40 : Σύγκριση της συνεισφοράς των αγκυρίων μετώπου Fiberglass στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, έναντι του ανυποστήρικτου κατά την τμηματική εκσκαφή, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου.



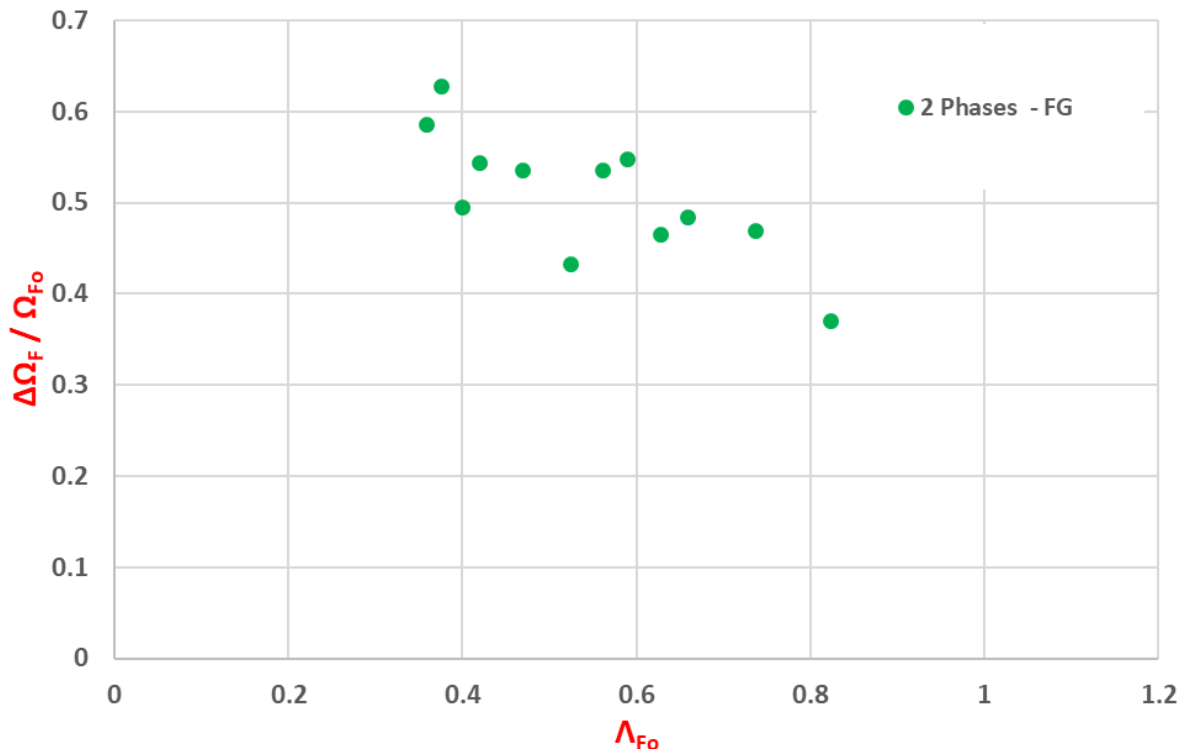
Σχήμα 41 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Η ίδια ιδιαίτερα αισθητή συνεισφορά των Fiberglass στη μείωση των εξωθήσεων ($\Delta\Omega_F$) φαίνεται και στις εικόνες του Σχήματος 42, που ακολουθεί, και μάλιστα ανεξάρτητα της κατάστασης του εδάφους, δηλαδή για διαφορετικά Λ_{F0} , με μεγαλύτερη την επιρροή αυτή στα ασθενέστερα εδάφη.

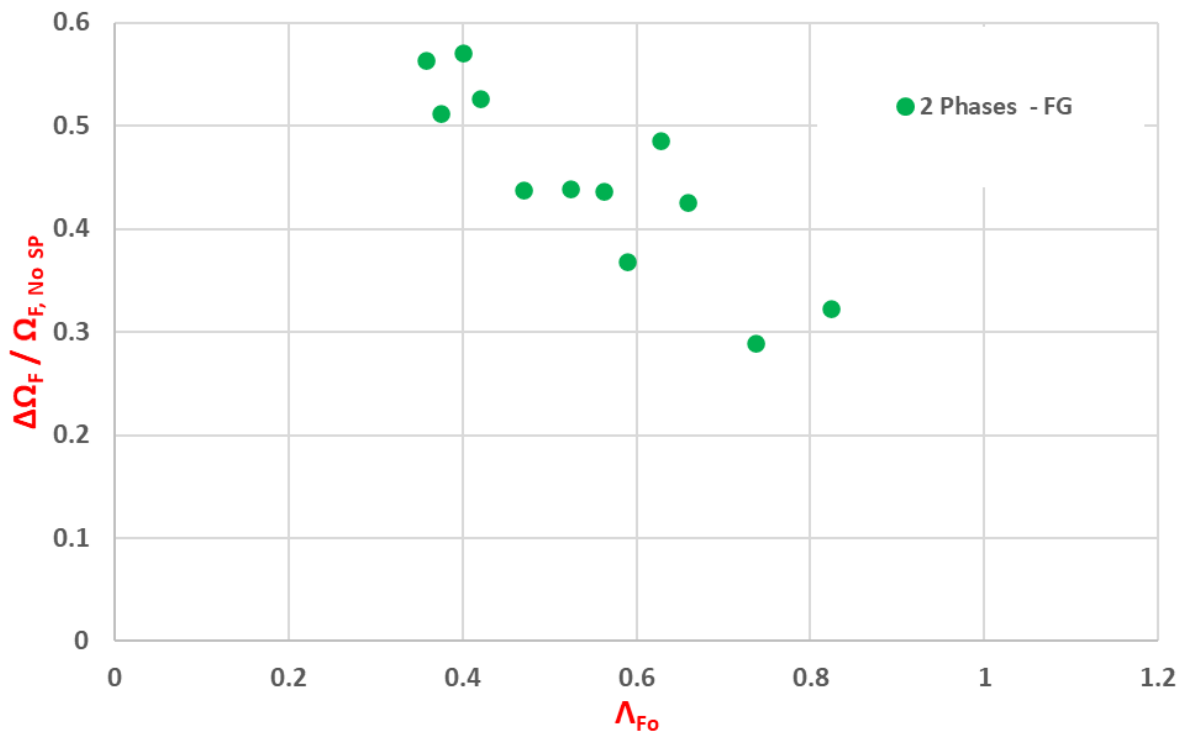


Σχήμα 42 : U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για ανυποστήρικτο και υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

Το συνολικό αποτέλεσμα της μείωσης της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής όταν αυτό υποστηρίχθηκε με αγκύρια Fiberglass, μπορεί να αποτυπωθεί στο ακόλουθα διαγράμματα 43 (α) και 43 (β), όπου στο 43 (α) γίνεται σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, με αναφορά στην Α' φάση εκσκαφής, ενώ στη 43 (β), γίνεται αντίστοιχη σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρισκτο μέτωπο, με αναφορά αυτή τη φορά σε ολόκληρη την ισοδύναμη διάμετρο της εκσκαφής, εάν δηλαδή διανοιγόταν ολομέτωπα. Η μείωση που παρουσιάζεται είναι θεαματική καθώς φτάνει σε ποσοστό της τάξης του 60 %.

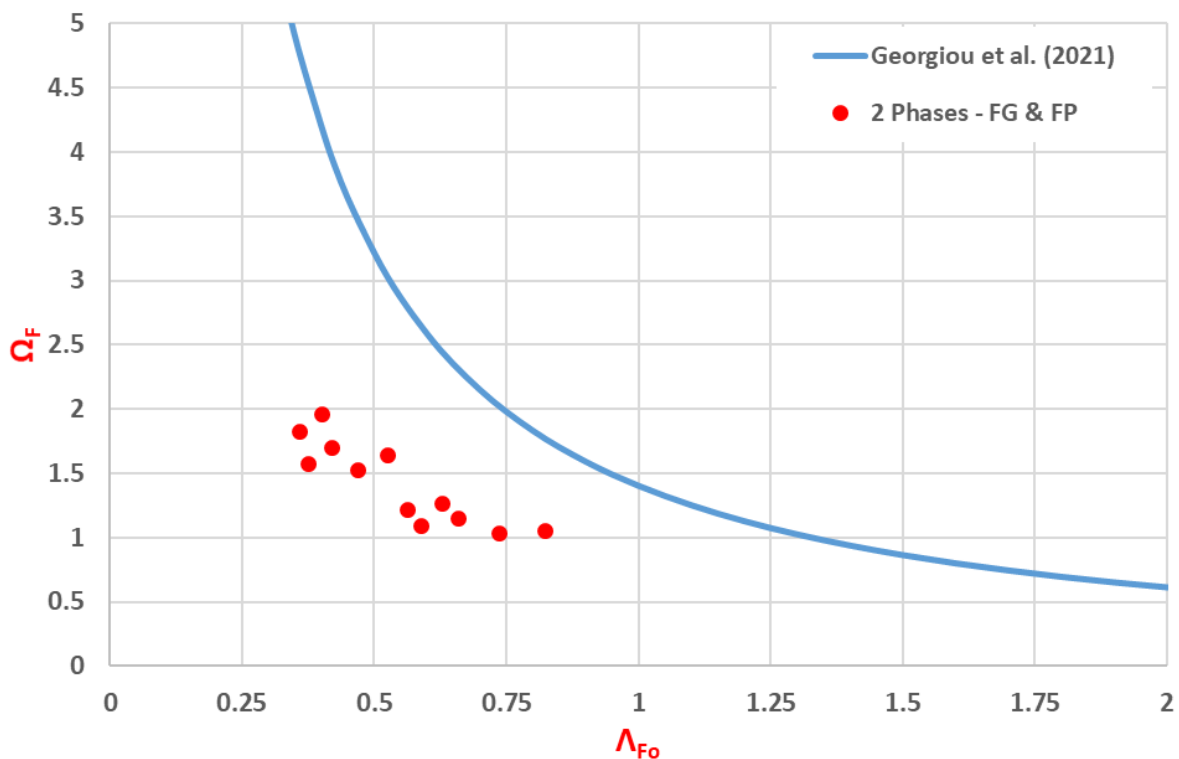


Σχήμα 43 (α): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α΄ φάσης εκσκαφής.



Σχήμα 43(β): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..

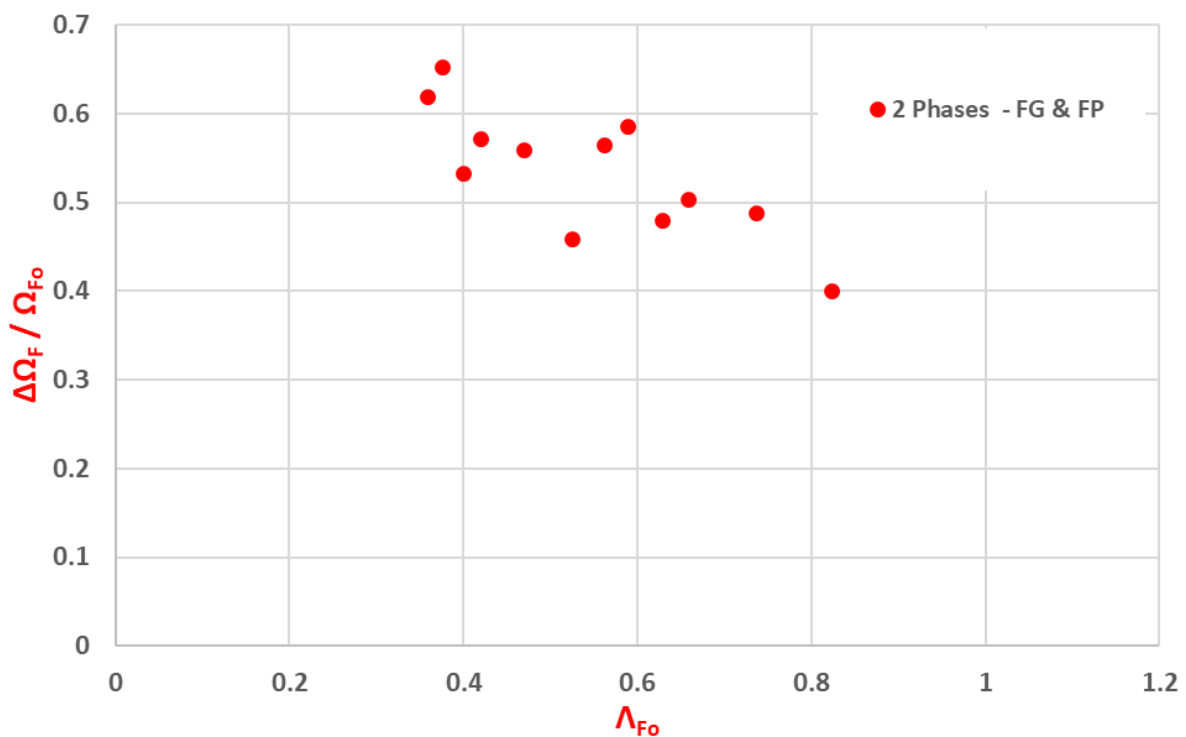
Στη συνέχεια, το μέτωπο στο οποίο έχουν εφαρμοσθεί τα αγκύρια Fiberglass, ενισχύεται από την τοποθέτηση δοκών προπορείας των οποίων τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 6.4.5. Η συνολική δράση του παραπάνω συνδιασμού, όπως φαίνεται και στην εικόνα του Σχήματος 44, δίνει μία μείωση των εξωθήσεων ανάλογη αυτής που προκύπτει μόνο από την εφαρμογή των Fiberglass.



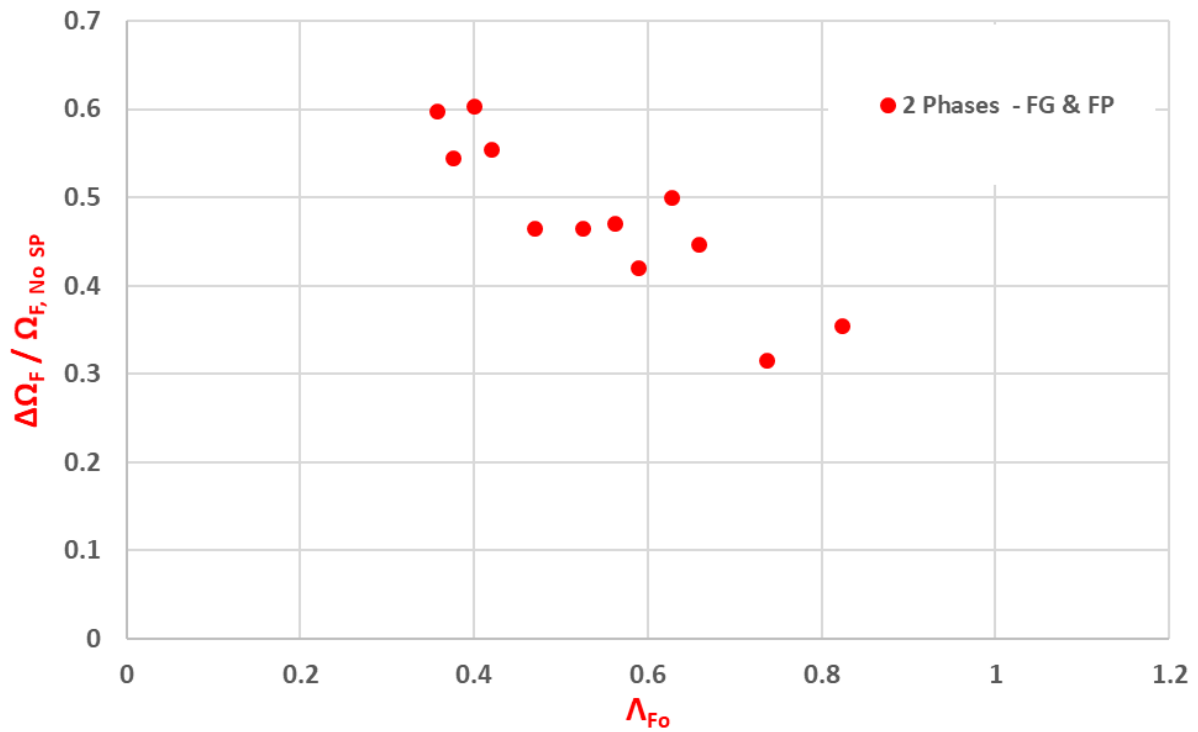
Σχήμα 44 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass & δοκούς προπορείας Forepole.

Από την αντίστοιχη σύγκριση του περιορισμού των εξωθήσεων που έδωσαν τα αγκύρια μετώπου με το συνδιασμό των εν λόγω αγκυρίων με τα Forepoles, προκύπτει πως το Forepoling δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στη μείωση των εξωθήσεων και μάλιστα ανεξάρτητα από τις εδαφικές συνθήκες. (βλ. Σχ.46).

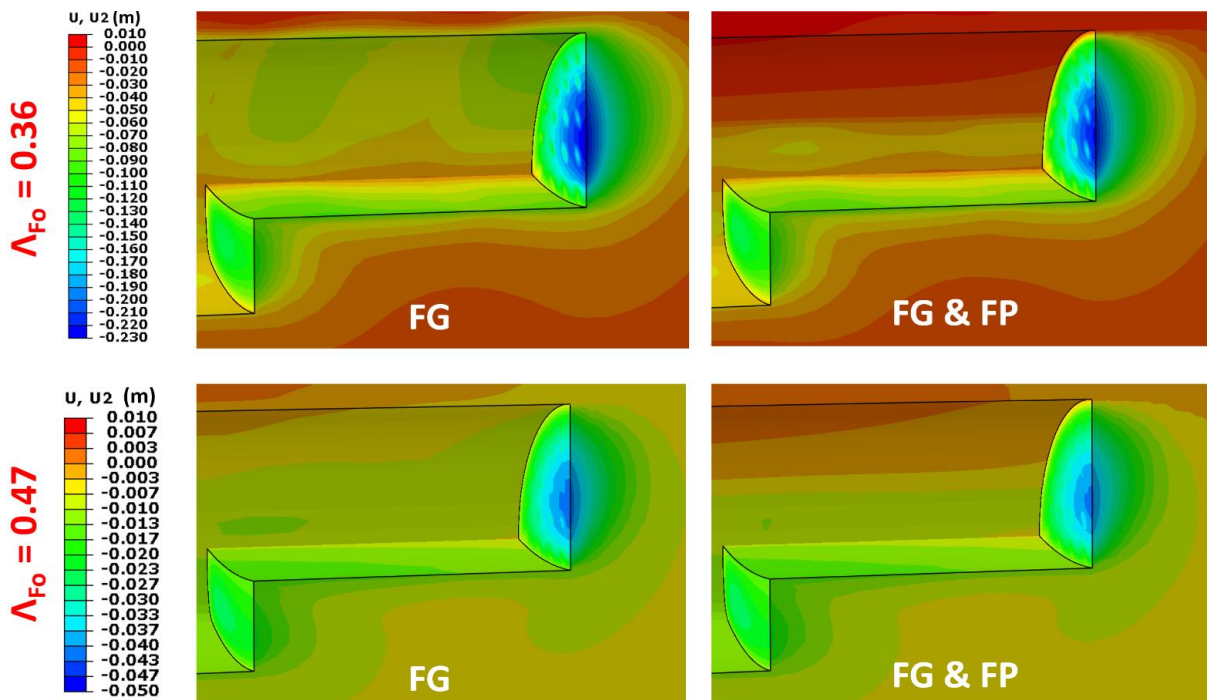
Όπως στην περίπτωση εφαρμογής αγκυρίων μετώπου, έτσι και τώρα κατά των συνδιασμό αυτών με τις δοκούς προπορείας, γίνεται η σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, με αναφορά στην Α' φάση εκσκαφής (βλ. Σχήμα 45 (α)), ενώ στη 45 (β), γίνεται αντίστοιχη σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, με αναφορά αυτή τη φορά σε ολόκληρη την ισοδύναμη διάμετρο της εκσκαφής, εάν δηλαδή διανοιγόταν ολομέτωπα. Η επερχόμενη μείωση λόγω της εφαρμογής αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας ξεπερνά ελάχιστα το ποσοστό του 65 %.



Σχήμα 45 (α): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής.

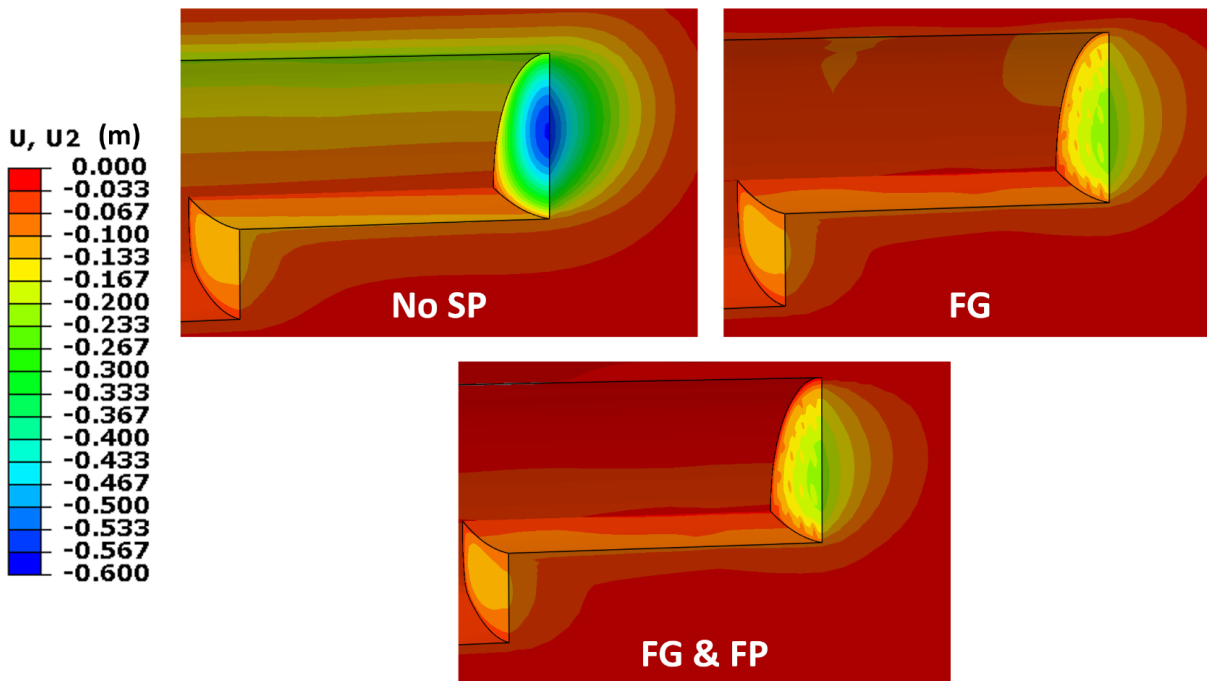


Σχήμα 45 (β): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..



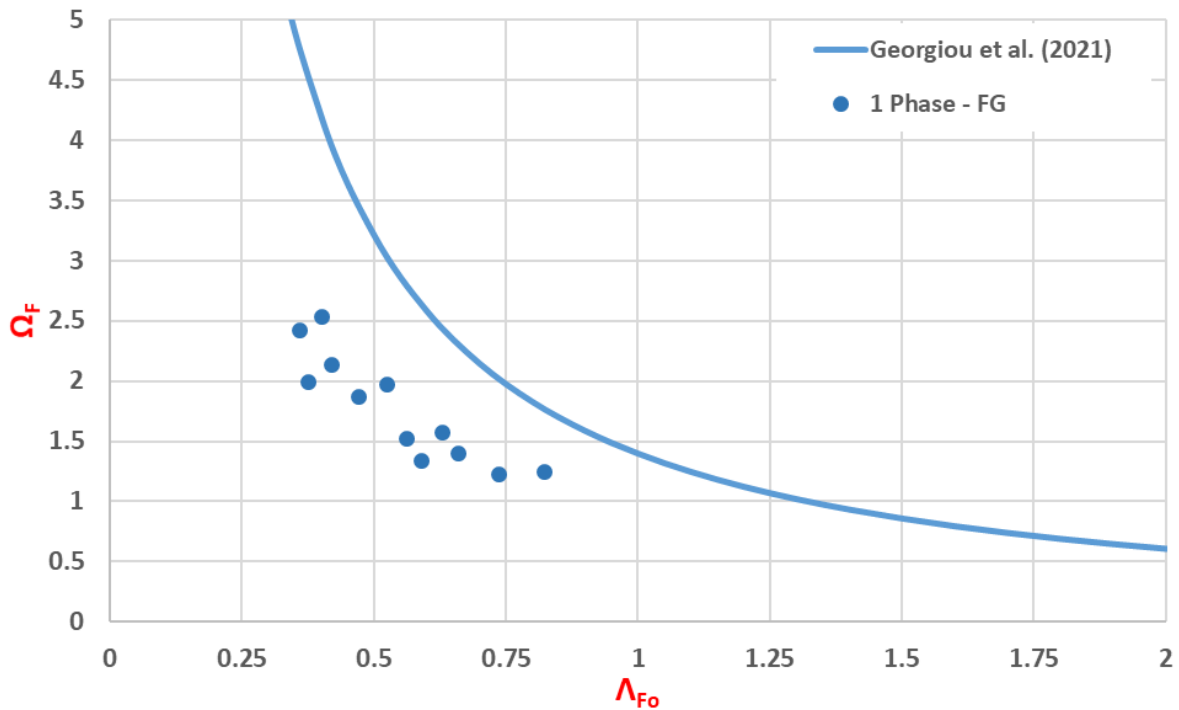
Σχήμα 46 : Σύγκριση της συνεισφοράς των δοκών προπορείας Forepole σε συνδιασμό με τη χρήση αγκυρίων μετώπου Fiberglass, έναντι της χρήσης μόνο αγκυρίων μετώπου, στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου.

Τελικά, όλα τα παραπάνω συμπίπτουν στην ακόλουθη εικόνα του Σχήματος 47 , κάνοντας πλέον ορατή τη διαφορά ως προς τον περιορισμό των εξωθήσεων που επέρχεται σταδιακά αρχικά με την τμηματική εκσκαφή, στη συνέχεια με την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου και τέλος με την εφαρμογή δοκών προπορείας.



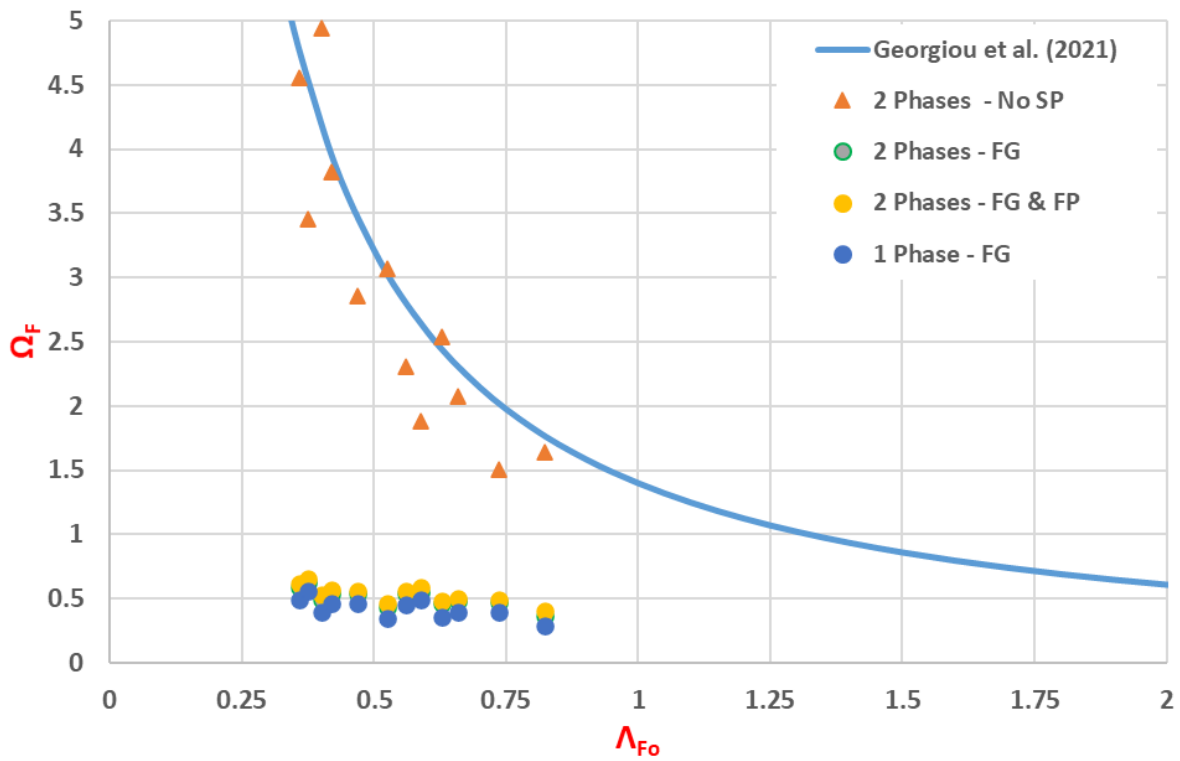
Σχήμα 47 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 3 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων, για ανυποστήρικτο (άνω αριστερά), για υποστηριγμένο με Fiberglass (άνω δεξιά) & για υποστηριγμένο με συνδιασμό αγκυρίων Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole (κάτω) μέτωπο, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου

Τέλος, επιχειρείται η ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adeco – RS με μοναδική προενίσχυση του μετώπου αυτή των αγκυρίων Fiberglass που σε αντίθεση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα, μας δίνει ποσοστά μείωσης της εξώθησης ανάλογα αυτών της εφαρμογής αγκυρίων μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα του Σχήματος 48 .

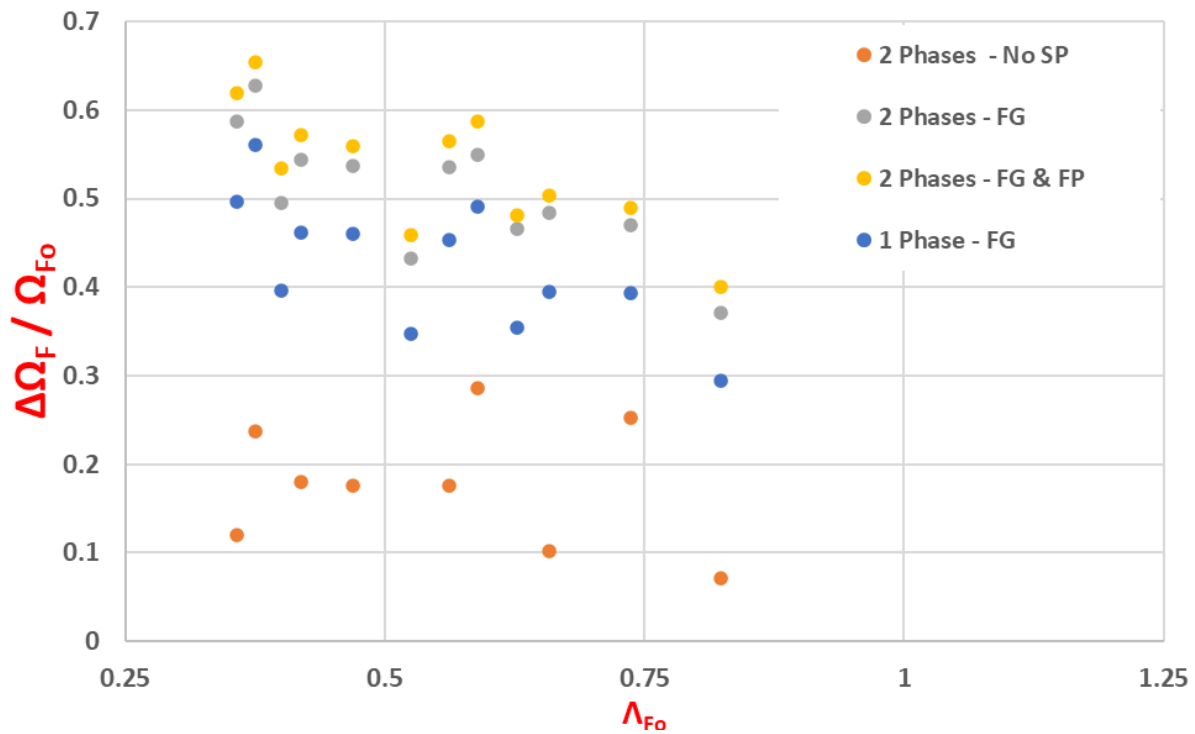


Σχήμα 48 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την ολομέτωπη διάνοιξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Η σύγκριση όλων των διαφορετικών περιπτώσεων που υλοποιήθηκαν γίνεται ακόμη πιο ορατή μέσω του παρακάτω διαγράμματος του Σχήματος 49 , με τη χρωματική διαφοροποίηση της κάθε περίπτωσης.



Σχήμα 49 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 4 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων στην τμηματική εκσκαφή, για ανυποστήρικτο μέτωπο, για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο, για υποστηριγμένο μέτωπο με συνδιασμό αγκυρίων Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole και για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο ολομέτωπης διάνοιξης.



Σχήμα 50 : Μείωση της εξώθησης στην τμηματική εκσκαφή με χρήση αγκυρίων μετώπου, αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας, καθώς και ολομέτωπη διάνοιξη σε σχέση με την Α' Φάση εκσκαφής του ανυποστήρικτου μετώπου.

Το αποτέλεσμα της σύγκρισης που μας δίνουν τα τελευταία δύο διαγράμματα και κυρίως το τελευταίο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθότι είναι πλέον εμφανής η ισοδύναμη μείωση των εξωθήσεων της ολομέτωπης διάνοιξης με απλή εφαρμογή αγκυρίων μετώπου, με αυτή της τμηματικής εκσκαφής και την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας. Η θεαματική αυτή διαπίστωση επιφέρει τόσο τη μείωση του χρόνου για την ολοκλήρωση της διάνοιξης, όσο και τη μείωση του κόστους αυτής.

7.2 Συγκλίσεις της Σήραγγας

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα πραγματευτεί η παρουσίαση της μεταβολής των τελικών συγκλίσεων που λαμβάνουν χώρα στη σήραγγα συναρτήσει της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, αλλά και σε σχέση με τον ίδιο τον τρόπο διάνοιξης, δηλαδή την επιφάνεια που διανοίγεται.

Αρχικά, θα αποδοθεί η σύγκλιση ακριβώς στο μέτωπο της εκσκαφής. Η εν λόγω θέση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς εκεί εδράζεται η υποστήριξη και σε αυτό το σημείο μας δίνει την πραγματική σύγκλιση του εδάφους και όχι αυτή της υποστήριξης. Η μέγιστη αυτή μετακίνηση (U_{max}) που αναπτύσσεται πίσω από τη σήραγγα μπορεί να ληφθεί ίση με έως και 4 διαμέτρους πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής, ενώ μπορεί να ισορροπήσει σε οποιοδήποτε σημείο αυτού του εύρους. Πρέπει στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι η μέγιστη μετακίνηση U_{max} , είναι μία εικονική προσέγγιση και δεν μπορούμε να στηρίξουμε σε αυτή κάποιο πολύ βασικό συμπέρασμα, διότι εξαρτάται από τη δυσκαμψία της υποστήριξης, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι δυσκαμψία της υποστήριξης, τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή της μετακίνησης που θα λάβουμε. Ωστόσο, μία γενική σύγκριση μπορεί να γίνει καθότι παντού έχει τοποθετηθεί η ίδια υποστήριξη.

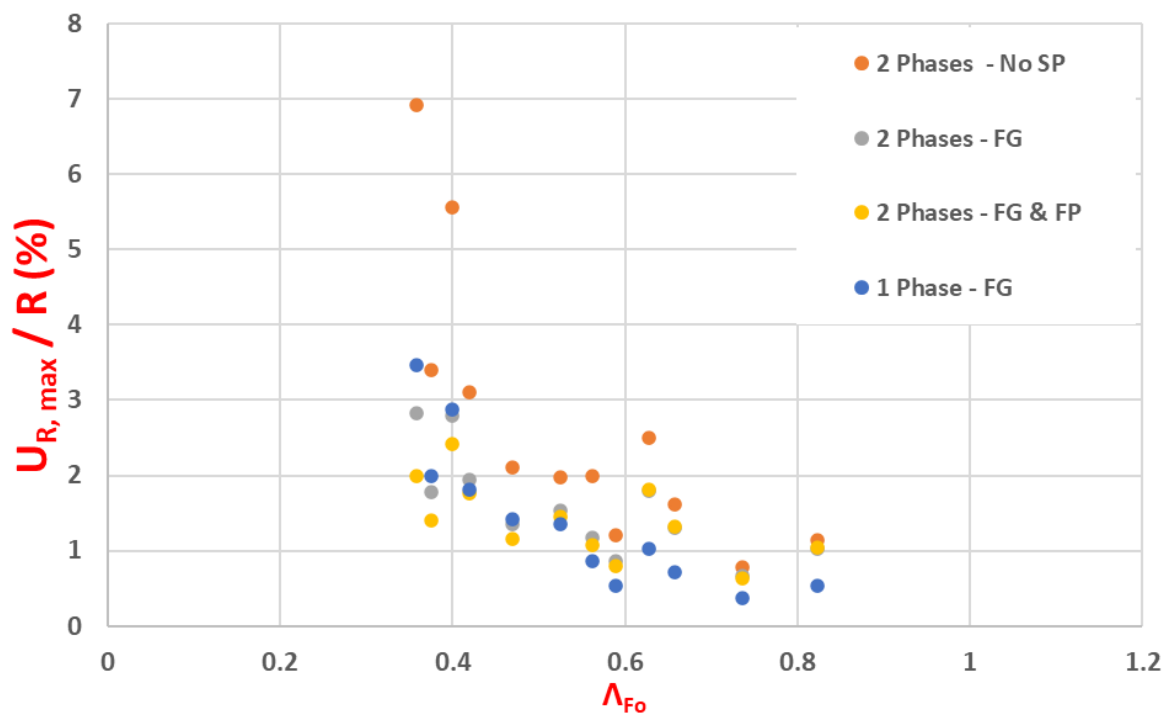
Αρχικά, για τα τρία εδάφη με τα διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και για κάθε μία περίπτωση υποστήριξης αυτών, μορφώνεται το διάγραμμα του Σχήματος 51 που ακολουθεί και το οποίο συναρτάται της ανοιγμένης τιμής $\frac{U_{R,max}}{R}$, με το R να αντιστοιχεί στην ακτίνα ολόκληρης της διατομής ($R=5$ m) και για τις δύο μεθόδους.

Η κύρια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι πως όσο πιο πτωχά είναι τα χαρακτηριστικά του εδάφους, δηλαδή, όσο μειώνεται ο συντελεστής Λ_{F_0} καθιστώντας όλο και πιο ασταθές το μέτωπο, παρουσιάζεται αύξηση των συγκλίσεων του μετώπου, όπως είναι και αναμενόμενο.

Επιπλέον, διαπιστώνεται πως οι μετακινήσεις του ανυποστήρικτου μετώπου διανοιγμένου σε δύο φάσεις βρίσκονται στα ανώτερα σημεία του διαγράμματος (σημεία με κόκκινη σήμανση), σε

αντίθεση με τα υπόλοιπα, ενώ καθώς αυξάνονται τα μέτρα υποστήριξης οι αντίστοιχες μετακινήσεις "πεφτουν" ομοιόμορφα σε χαμηλότερες θέσεις.

Κάτι στο οποίο αξίζει να σταθούμε, είναι τα αποτελέσματα των προσυγκλίσεων που απέδωσε η ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adeco – RS στο μέτωπο, με την οποία αυτές μειώθηκαν σε βαθμό ανάλογο αυτού της τμηματικής εκσκαφής με εφαρμογή Fiberglass και Forepoles.

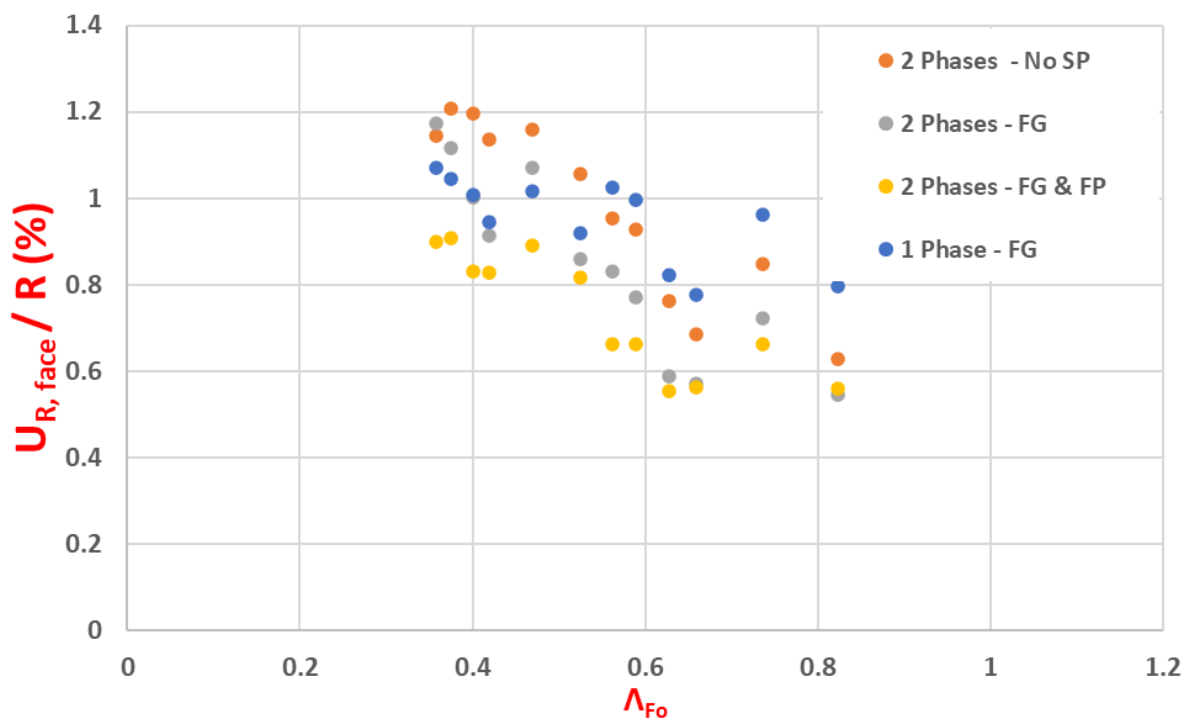


Σχήμα 51 : Μεταβολή των μέγιστων προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{Fo} .

Εν συνεχεία, κατά παρόμοιο τρόπο παρουσιάζονται στο ακόλουθο γράφημα του Σχήματος 52 οι αντίστοιχες μετακινήσεις, συναρτήσει αυτή τη φορά της ανοιγμένης τιμής του λόγου $\frac{U_{R, face}}{R}$ και με την ακτίνα R να αντιστοιχεί στην ακτίνα του διανοιγμένου τμήματος κάθε φορά.

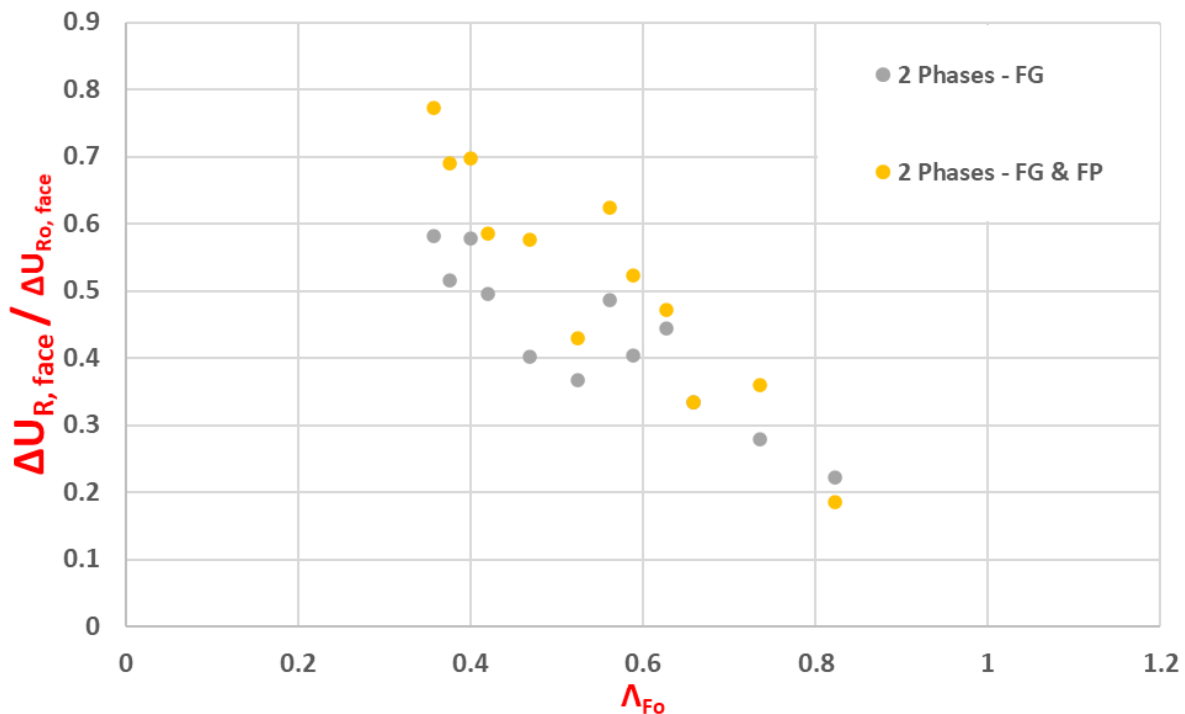
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως τα σημεία που αντιστοιχούν στην ολομέτωπη διάνοιξη (σημεία με μπλε σήμανση), βρίσκονται ψηλότερα στο διάγραμμα, παρουσιάζουν δηλαδή μεγαλύτερες προσυγκλίσεις, γεγονός που αποδίδεται στην μεγαλύτερη επιφάνεια του μετώπου που διανοίγεται, έναντι της τμηματικής εκσκαφής.

Επιπλέον, όμοια με πριν, καθώς μειώνεται η τιμή του Λ_{Fo} , αυξάνουν οι τιμές των προσυγκλίσεων, ενώ και πάλι αυτές τείνουν να μειώνονται καθώς αυξάνουν τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 52 : Μεταβολή των προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{Fo} .

Σε επόμενο στάδιο ελέγχεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τα μέτρα υποστήριξης στην τιμή της εκάστοτε σύγκλισης. Όπως προκύπτει από το σχετικό διάγραμμα του Σχήματος 53, αριθμητικά επιτυγχάνεται μείωση των μετακινήσεων στη στέψη της τάξης του 60 - 70 %, μόνο τοποθετώντας τα μέτρα υποστήριξης.



Σχήμα 53 : Επιρροή των μέτρων υποστήριξης στη διακύμανση των συγκλίσεων

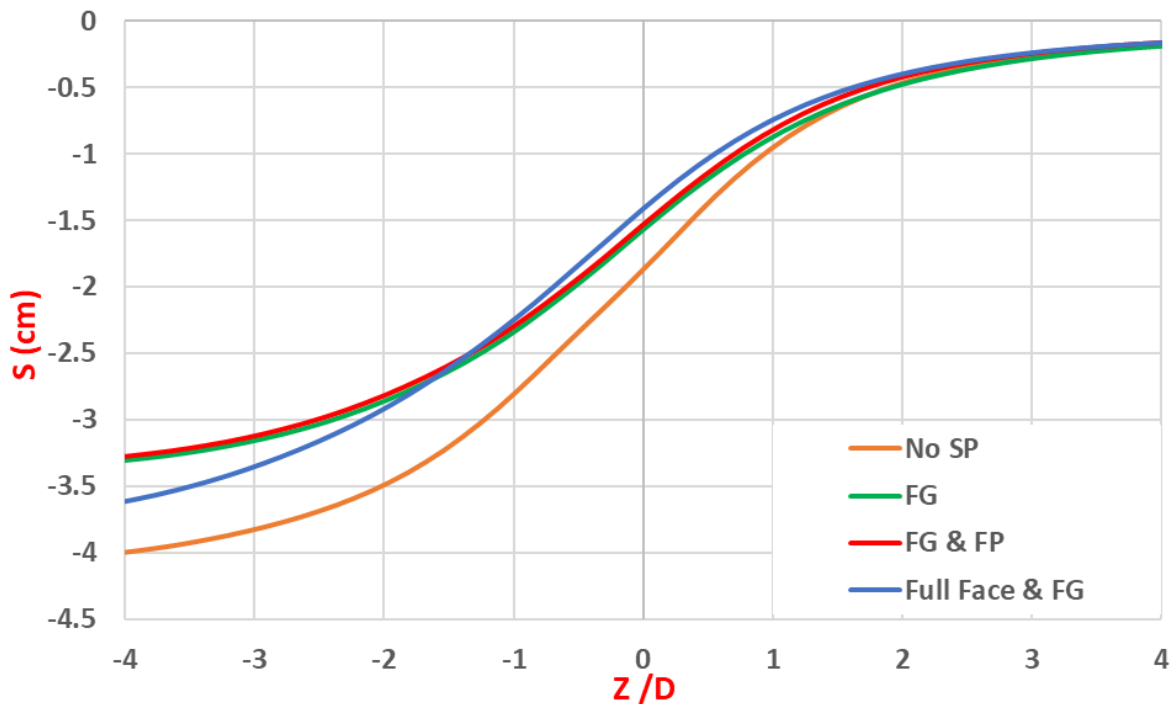
7.3 Καθιζήσεις της Σήραγγας

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται οι καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα κατά το διαμήκη και κατά τον εγκάρσιο άξονα.

Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα του Σχήματος 54, παρατηρούμε πως μεταβάλλονται οι καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, καθώς και πώς αυτές μειώνονται με την εφαρμογή των μέτρων της προσωρινής υποστήριξης.

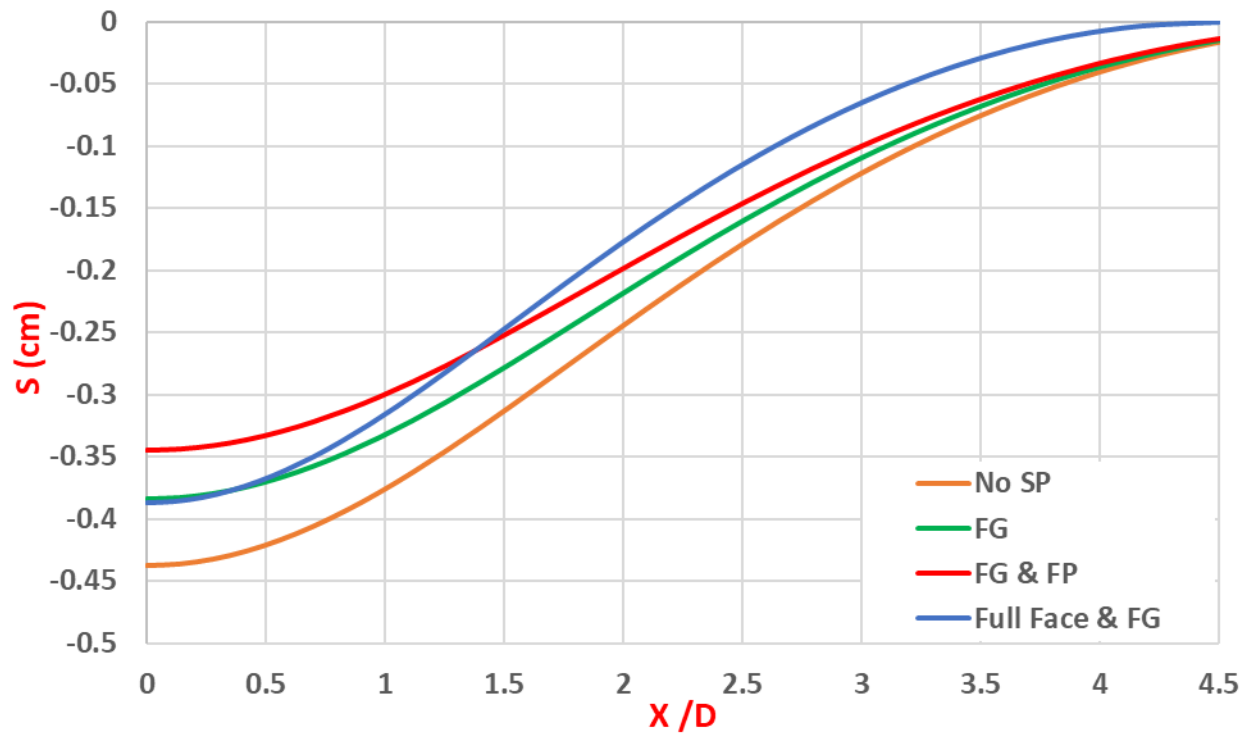
Και πάλι η ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adeco – RS δίνει αισθητά μικρή τιμή της επιφανειακής καθίζησης, σχεδόν ισάξια των καθιζήσεων της τμηματικής εκσκαφής, παρότι αναμένετο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας που διανοίγεται να επιφέρει και μεγαλύτερη καθίζηση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως οι εν λόγω συγκλίσεις δεν έχουν απαραίτητα ισορροπήσει στο μήκος των τεσσάρων διαμέτρων ($4 \cdot D$) που παρουσιάζεται στο σχήμα, αλλά αυτό μπορεί να συμβεί σε ακόμα μεγαλύτερη απόσταση από το μέτωπο.



Σχήμα 54 : Επιφανειακές Καθιζήσεις κατά μήκος το άξονα της σήραγγας.

Ομοίως, δίνονται και οι επιφανειακές καθιζήσεις εγκάρσια του άξονα της σήραγγας για το ήμισυ της διατομής, με τις καμπύλες του Σχήματος 55, να επαληθεύουν τα αποτελέσματα του προηγούμενου Σχήματος 54 . Το γεγονός αυτό καθιστά την ολομέτωπη διάνοιξη με εφαρμογή Fiberglass μία ασφαλή επιλογή διάνοιξης εντός του αστικού ιστού, σε σχέση με την τμηματική και συνεκτιμώντας πάντα τα ανεκτά όρια καθίζησης που διαφέρουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους.



Σχήμα 55 : Επιφανειακές Καθιζήσεις εγκάρσια του άξονα της σήραγγα για τη μισή διατομή της σήραγγας.

Και στα δύο παραπάνω Σχήματα 54 & 55 αξίζει να σημειωθεί η εξαιρετική μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων του ανυποστήρικτου μετώπου, έπειτα από την ενίσχυσή του με αγκύρια Fiberglass και ακόμη περισσότερο με την εφαρμογή και των δοκών Forepoles.

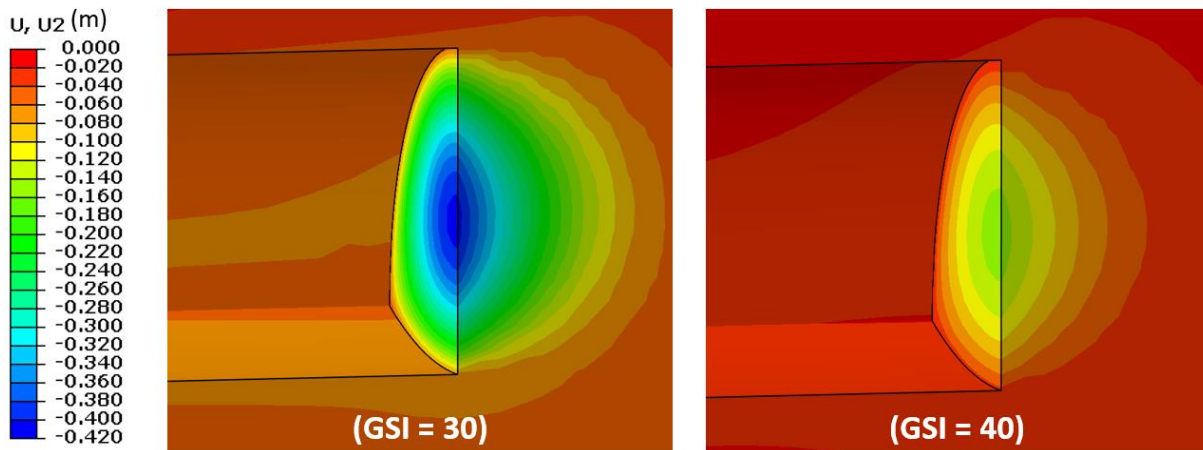
8^ο Κεφάλαιο

Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Επιφάνειας του Μετώπου στις Προκαλούμενες Εξωθήσεις για Βαθιές Σήραγγες

8.1 Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής της Σήραγγας

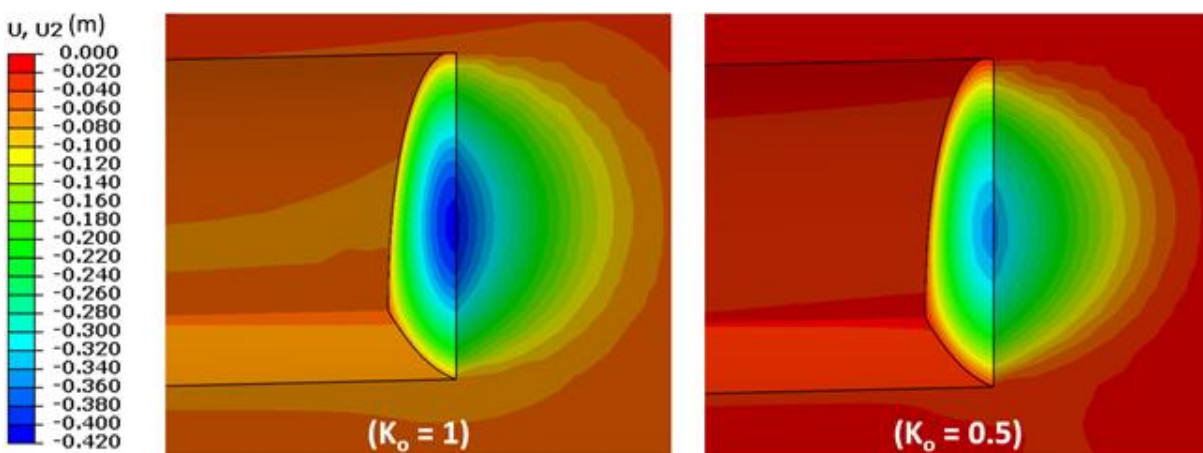
Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά διερευνάται η ευστάθεια του αρχικώς ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής στο οποίο προσαρμόζονται σταδιακά τα μέτρα της υποστήριξης κάνοντας τμηματική εκσκαφή σε βαθιές σήραγγες για διαδοχικά υπερκείμενα από τον άξονα της σήραγγας τα 100 και 200 μ. για εδάφη με πτωχά χαρακτηριστικά όπως αναφέρονται και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Η ίδια διερεύνηση πραγματοποιείται και για την ολομέτωπη διάνοιξη της σήραγγας για εδάφη με τα ίδια χαρακτηριστικά και υπερκείμενα.

Γενικά, αναμένεται σε περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου σιράγγων, να λάβουμε μεγάλες τιμές της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, ιδιαίτερα όταν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους πτωχαίνουν. Αυτό επαληθεύτηκε από το σύνολο των αναλύσεων, με χαρακτηριστικό το ακόλουθο πρώτο παράδειγμα, βλέποντας την εικόνα του Σχήματος 56, στο οποίο αναπαριστώνται οι προκαλούμενες εξωθήσεις για τις δύο περιπτώσεις εδαφών χαμηλής ποιότητας. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως για διάνοιξη σε δύο φάσεις και το ίδιο βάθος υπερκειμένων με λόγο $H/D = 10$, το έδαφος με GSI 30 (αριστερά) ανταποκρίνεται δυσμενέστερα στις εξωθήσεις του μετώπου σε σχέση με το έδαφος με GSI 40 (αριστερά).



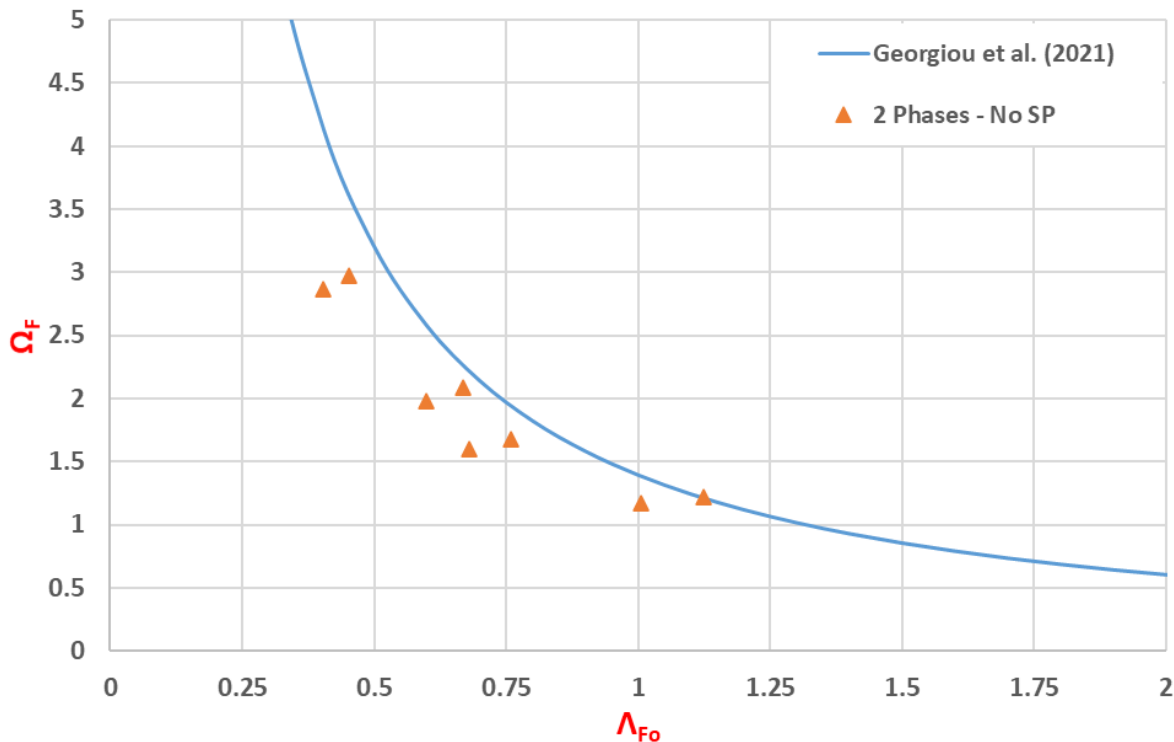
Σχήμα 56 : Επίρροή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των εδαφών στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

Την παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνει και η ακόλουθη εικόνα του Σχήματος 57, όπου παρατηρούμε πως για για το ίδιο αυτή τη φορά έδαφος, με τον ίδιο λόγο $H / D = 10$, κατά την τμηματική εκσκαφή σε ανυποστήρικτες συνθήκες μετώπου, ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_o του εδάφους, διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη των εξωθήσεων του μετώπου, με τις μικρότερες τιμές του, να λειτουργούν πιο ευνοικά έναντι της τάσης του μετώπου για εξώθηση.



Σχήμα 57 : Επίρροή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων του εδάφους στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

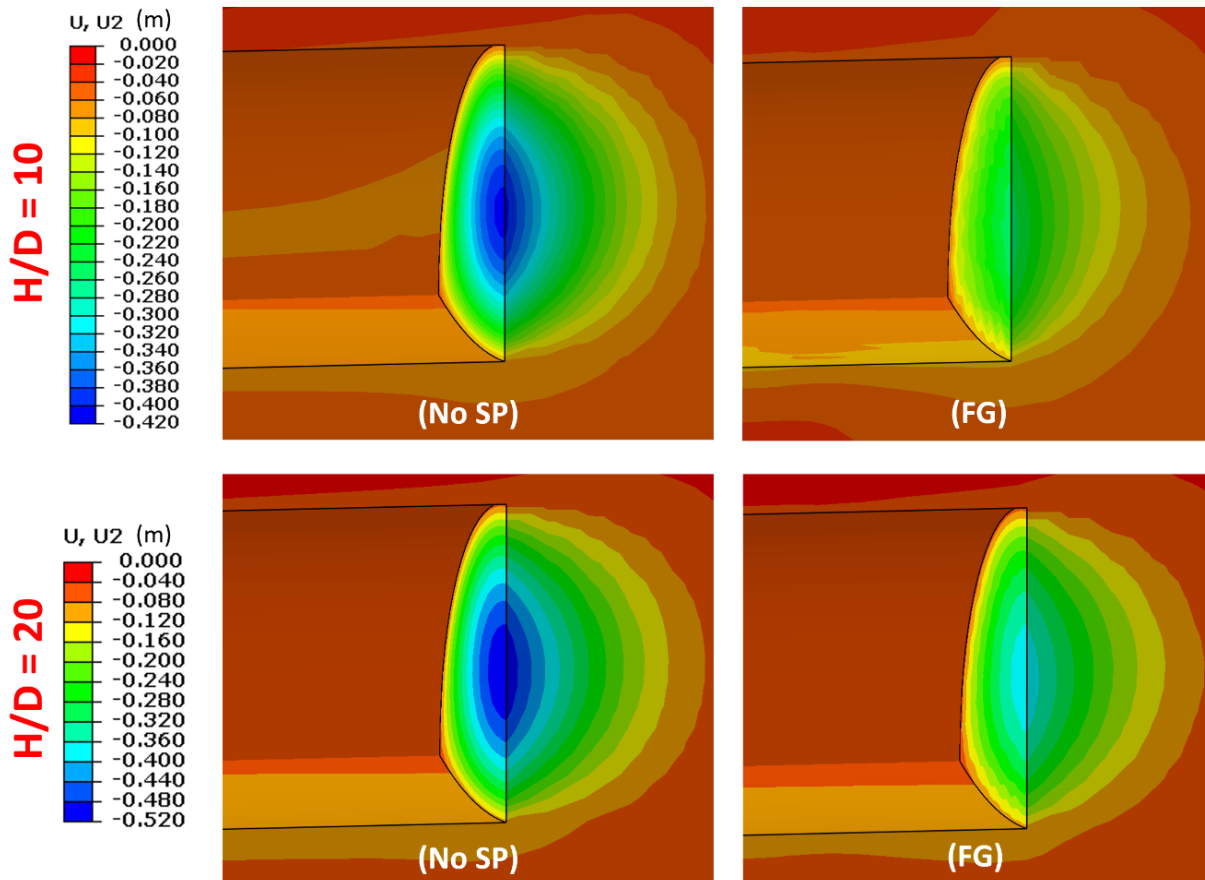
Το ίδιο συμπέρασμα προύπτει και από το παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 58, καθότι οι εξωθήσεις όλων των σημείων του ανυποστήρικτου μετώπου κινούνται εξαιρετικά κοντά στην καμπύλη του συντελεστή ασφαλείας.



Σχήμα 58 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{F0} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη.

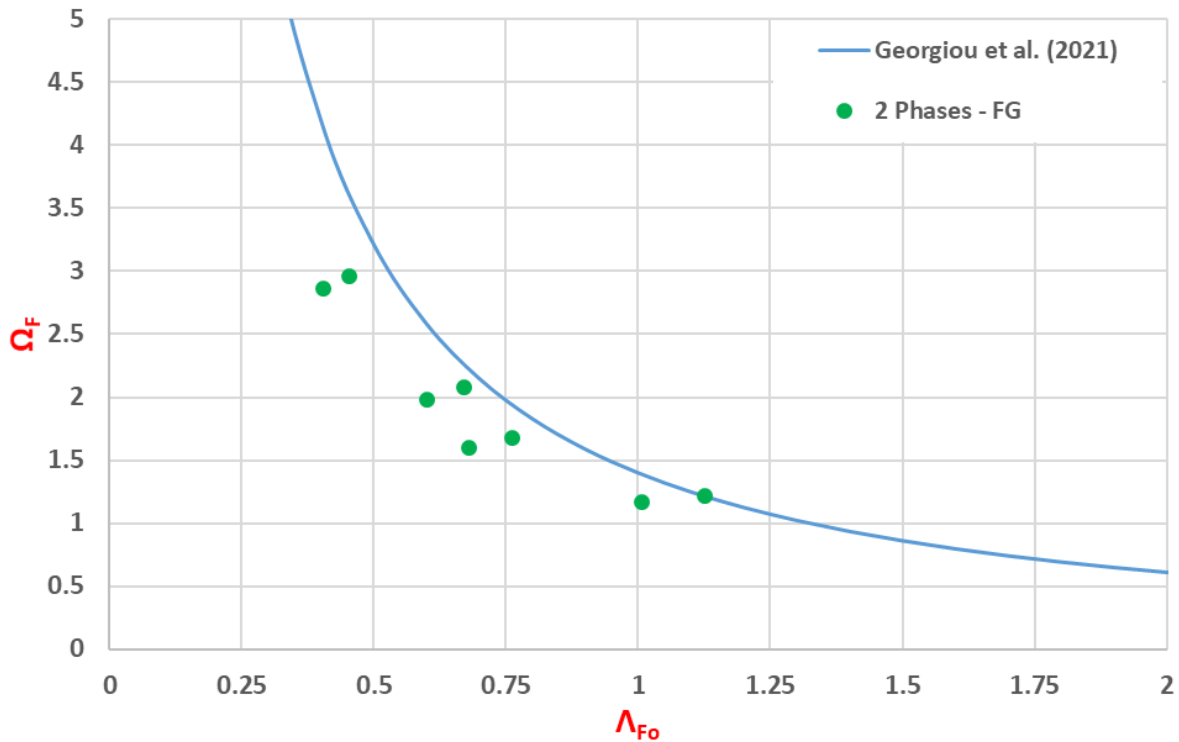
Εν συνεχεία, και ασχολούμενοι ακόμα με την τμηματική εκσκαφή, επιχειρείται η τοποθέτηση των αγκυρίων μετώπου Fiberglass ως προενίσχυση της επιφάνειας που διανοίγεται. Έτσι, όπως διαπιστώνεται και μέσω των τεσσάρων εικόνων του Σχήματος 59, στις οποίες αναπαρίσταται η ίδια βραχόμαζα σε διαφορετικά βάθη γαιών από την επιφάνεια του εδάφους, η παρουσία των Fiberglass στο μέτωπο στην πρώτη, περίπτωση βάθους λόγου $H / D = 10$, σχεδόν υποδιπλασιάζει τις εξωθήσεις, ενώ στην δεύτερη, με λόγο $H / D = 20$, οι εξωθήσεις μειώνονται όχι στον ίδιο βαθμό αλλά στα $\frac{3}{4}$ της αρχικής τους τιμής, ποσόστό αρκετά ικανοποιητικό.

Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε πως η αποτελεσματικότητα των αγκυρίων μετώπου είναι εξαιρετική και στις βαθιές σήραγγες, ωστόσο παρουσιάζει μία πτωτική τάση αυξανόμενων των υπερκείμενων γαιών.



Σχήμα 59 : Επιρροή των αγκυρίων μετώπου Fiberglass στη μείωση των εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωγά εδάφη.

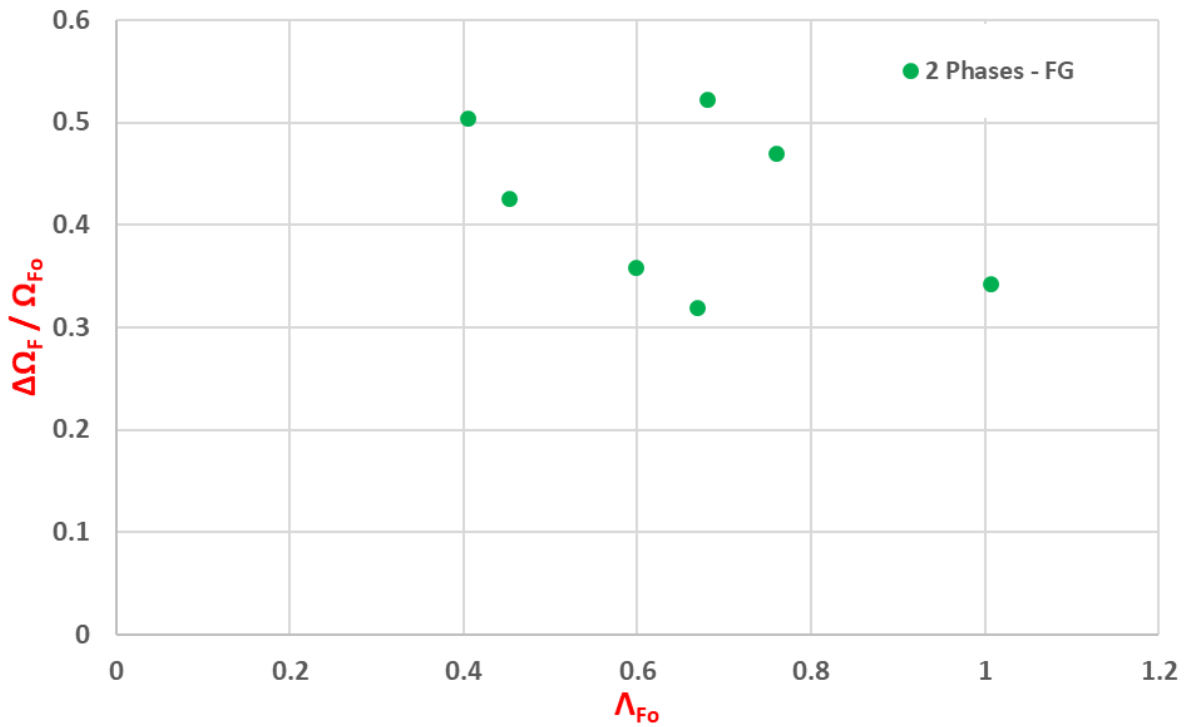
Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και διαγραμματικά, μέσω της απομάκρυνσης των σημείων από την καμπύλη Λ_{F0} , του κάτωθι Σχήματος 60 . .



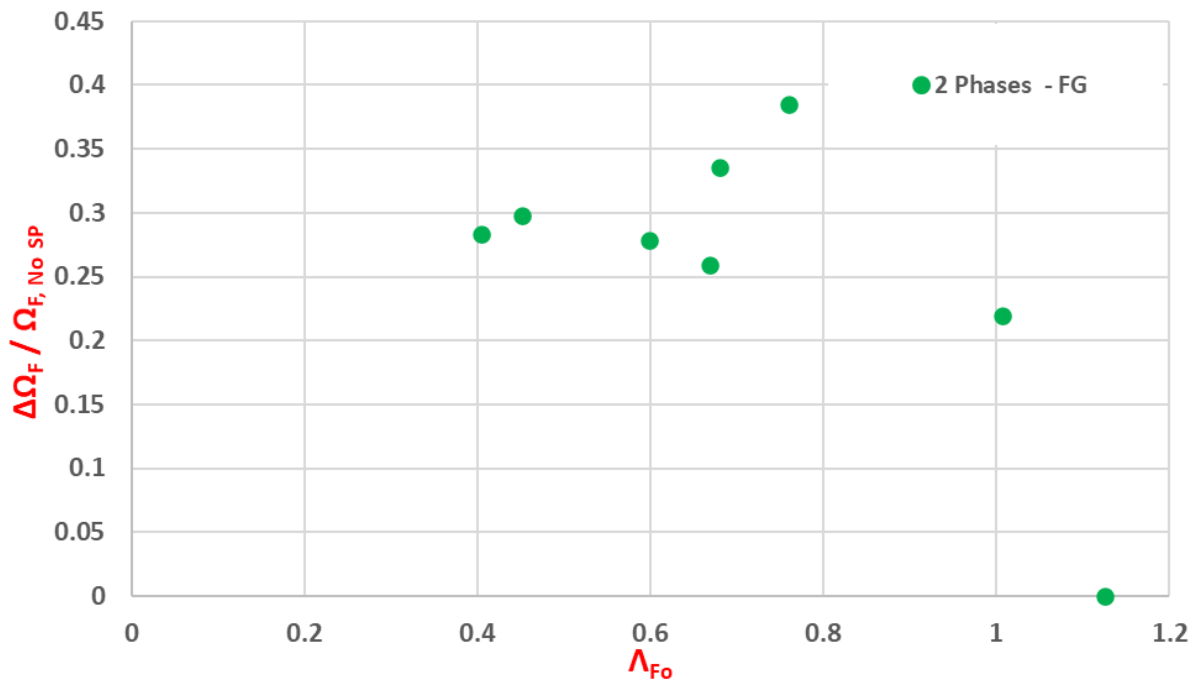
Σχήμα 60 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Η ίδια ιδιαίτερα αισθητή συνεισφορά των Fiberglass στη μείωση των εξωθήσεων ($\Delta\Omega_F$) φαίνεται και στις εικόνες του Σχήματος 60, που ακολουθεί, και μάλιστα ανεξάρτητα της κατάστασης του εδάφους, δηλαδή για διαφορετικά Λ_{Fo} , με μεγαλύτερη την επιρροή αυτή στα ασθενέστερα εδάφη.

Το συνολικό αποτέλεσμα της μείωσης της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής όταν αυτό υποστηρίχθηκε με αγκύρια Fiberglass, μπορεί να αποτυπωθεί στο ακόλουθα διαγράμματα 61 (α) και 61 (β), όπου στο 61 (α) γίνεται σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήριστο μέτωπο, με αναφορά στην Α' φάση εκσκαφής, ενώ στη 61 (β), γίνεται αντίστοιχη σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήριστο μέτωπο, με αναφορά αυτή τη φορά σε ολόκληρη την ισοδύναμη διάμετρο της εκσκαφής, εάν δηλαδή διανοιγόταν ολομέτωπα. Η μείωση που παρουσιάζεται είναι θεαματική καθώς φτάνει σε ποσοστό της τάξης του 60 %.



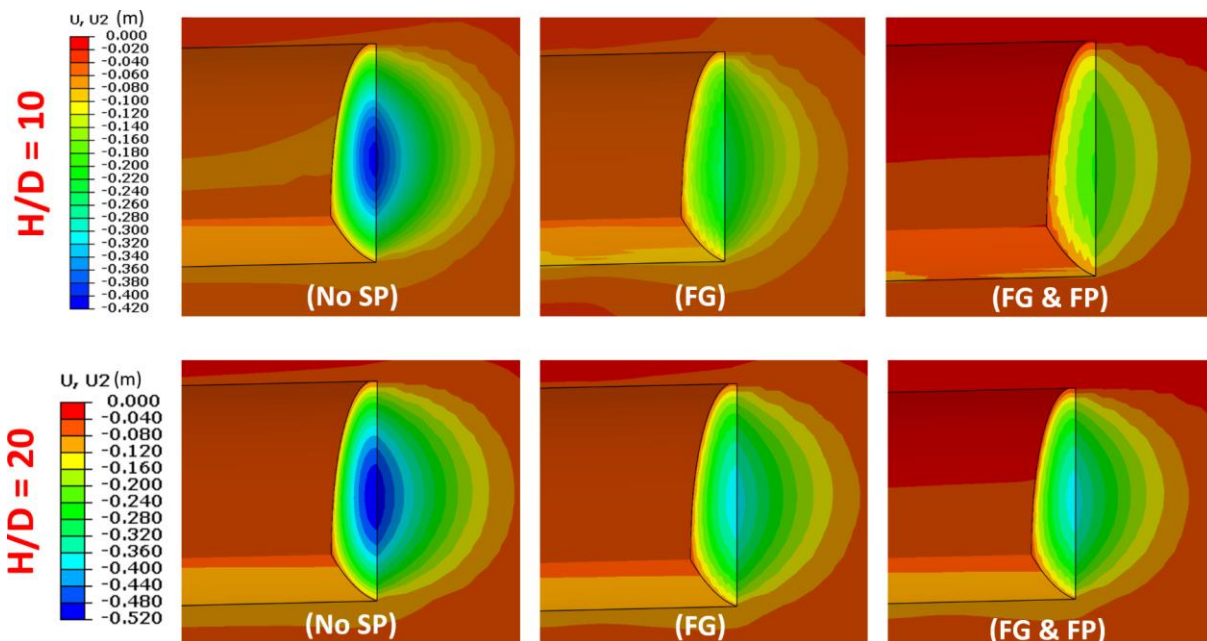
Σχήμα 61 (α): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής.



Σχήμα 61 (β): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Fiberglass μετώπου σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής..

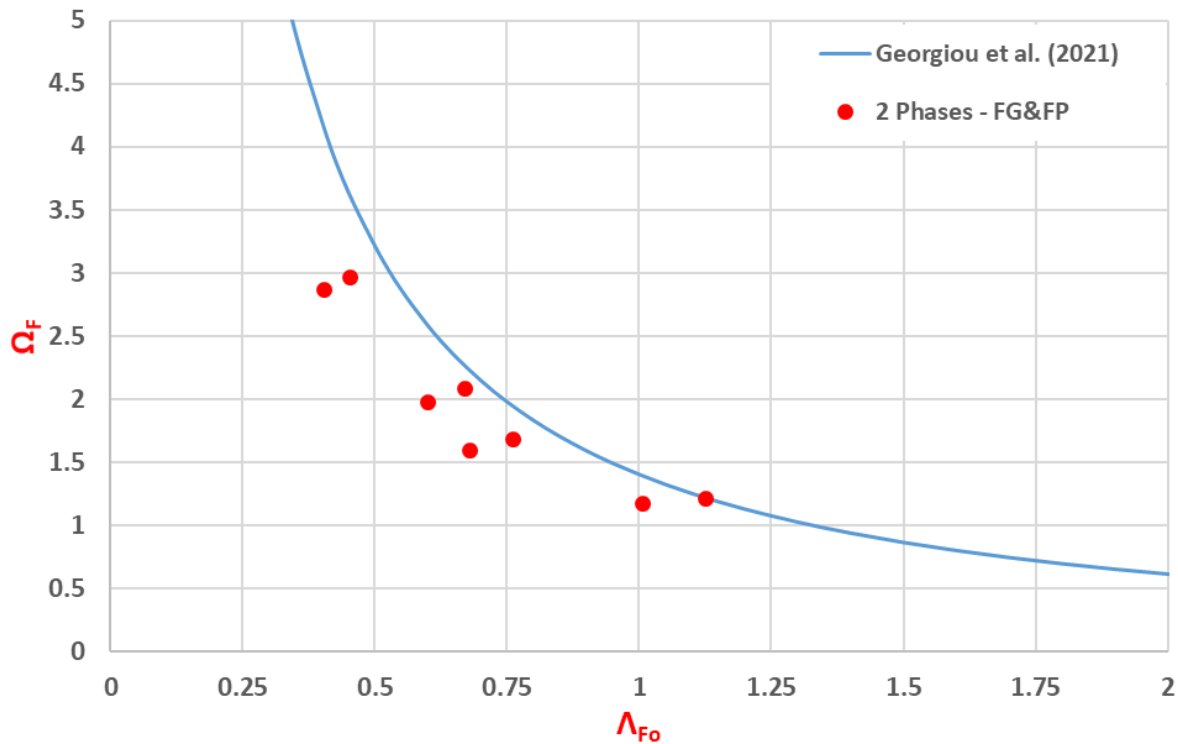
Ακολούθως, η λειτουργία των αγκυρίων μετώπου (Fiberglass) θα ενισχυθεί από την πρόσθετη τοποθέτηση δοκών προπορείας (Forepoles) στη στέψη της σήραγγας, ενέργεια που όμως δεν αναμένεται να επιφέρει κάποιο αξιόπαινο αποτέλεσμα καθώς η λειτουργία τους δεν συνίσταται τόσο στην διατήρηση της πλευρικής τάσης σ_3 , όσο στη μείωση της κατακόρυφης σ_1 .

Όπως παρατηρούμε και στις διαδοχικές εικόνες του Σχήματος 62, το ίδιο έδαφος και στα δύο επιλεγμένα βάθη, ενώ ανταποκρίνεται θεαματικά στην τοποθέτηση των αγκυρίων μετώπου, η συνεισφορά των δοκών προπορείας είναι σχεδόν ανύπαρκτη.



Σχήμα 62 : Συνεισφορά των αγκυρίων μετώπου Fiberglass καθώς και ο συνδιασμός αυτών με τις δοκούς προπορείας Forepoles, στη μείωση των εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για δύο διαφορετικά πτωχά εδάφη.

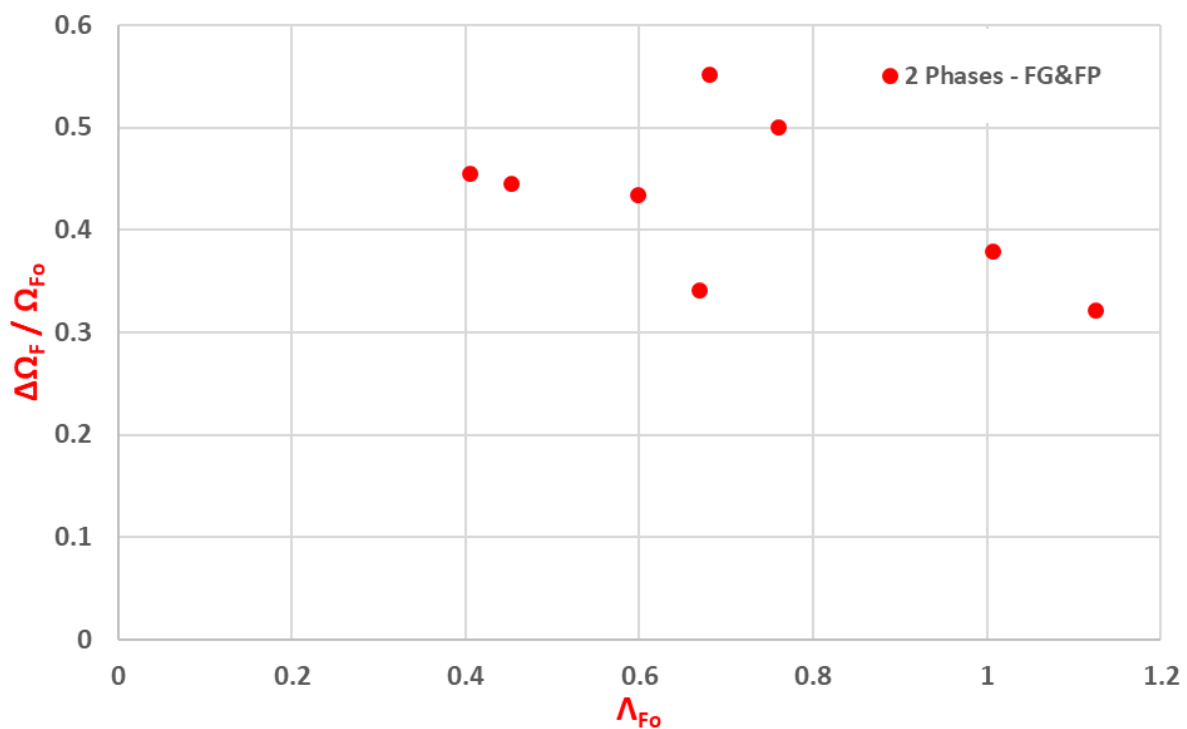
Μέσω της διαγραμματικής αναπαράστασης που ακολουθεί (Σχ. 63), αποδεικνύεται πως η συνεισφορά του Forepoling είναι ισχνή.



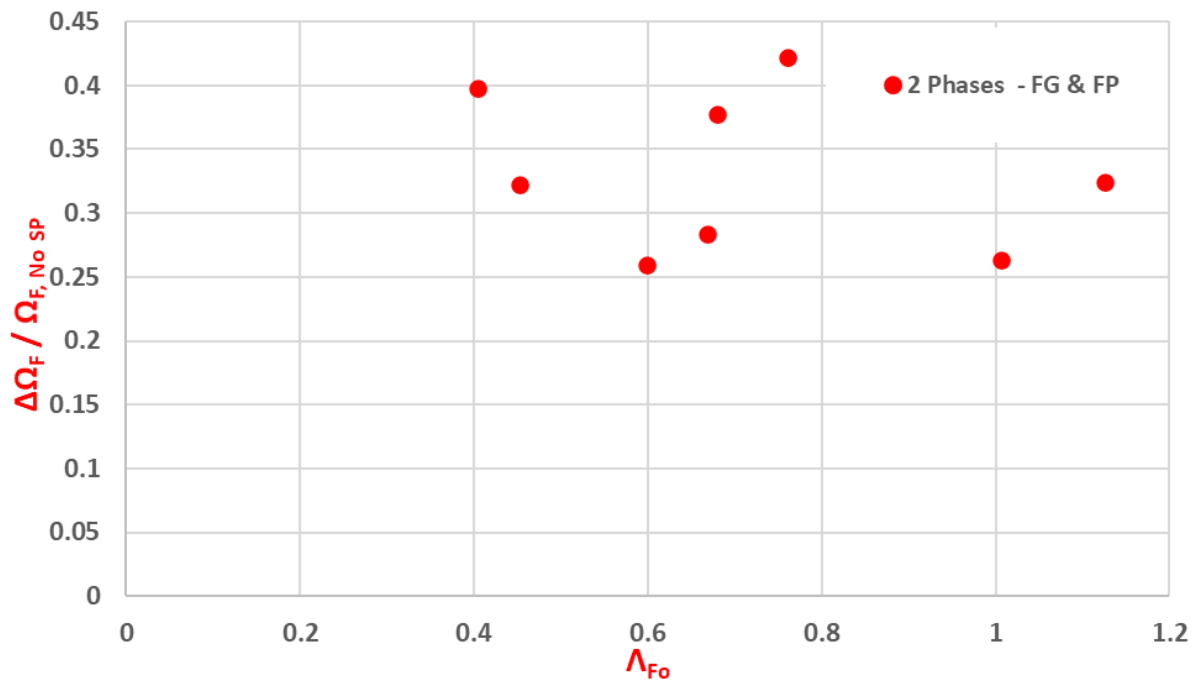
Σχήμα 63 : Επιρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass & δοκούς προπορείας Forepole σε βαθιές σήραγγες.

Από την αντίστοιχη σύγκριση του περιορισμού των εξωθήσεων που έδωσαν τα αγκύρια μετώπου με το συνδιασμό των εν λόγω αγκυρίων με τα Forepole, προκύπτει πως το Forepoling δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στη μείωση των εξωθήσεων και μάλιστα ανεξάρτητα από τις εδαφικές συνθήκες.

Όπως στην περίπτωση εφαρμογής αγκυρίων μετώπου, έτσι και τώρα κατά των συνδιασμό αυτών με τις δοκούς προπορείας, γίνεται η σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, με αναφορά στην Α' φάση εκσκαφής (βλ. Σχήμα 64 (α)), ενώ στη 64 (β), γίνεται αντίστοιχη σύγκριση της μείωσης της εξώθησης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο, με αναφορά αυτή τη φορά σε ολόκληρη την ισοδύναμη διάμετρο της εκσκαφής, εάν δηλαδή διανοιγόταν ολομέτωπα. Η επερχόμενη μείωση λόγω της εφαρμογής αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας ξεπερνά ελάχιστα το ποσοστό του 55 %.



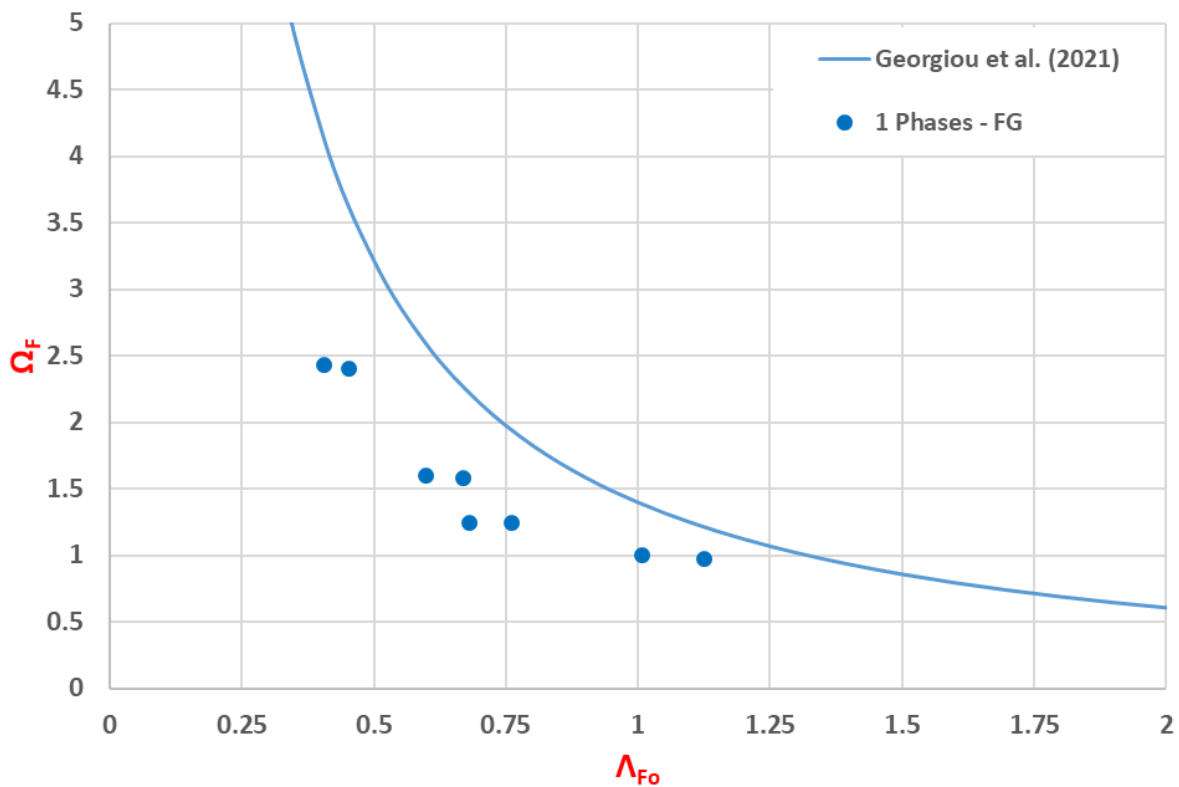
Σχήμα 64 (α): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για την διατομή της Α' φάσης εκσκαφής για βαθιές σήραγγες.



Σχήμα 64 (β): Συνολική μείωση της εξώθησης του ενισχυμένου με αγκύρια Foberglass μετώπου σε συνδιασμό με δοκούς προπορείας (Forepole) σε σχέση με το ανυποστήρικτο για ολόκληρη την ισοδύναμη διατομή εκσκαφής για βαθιές σήραγγες.

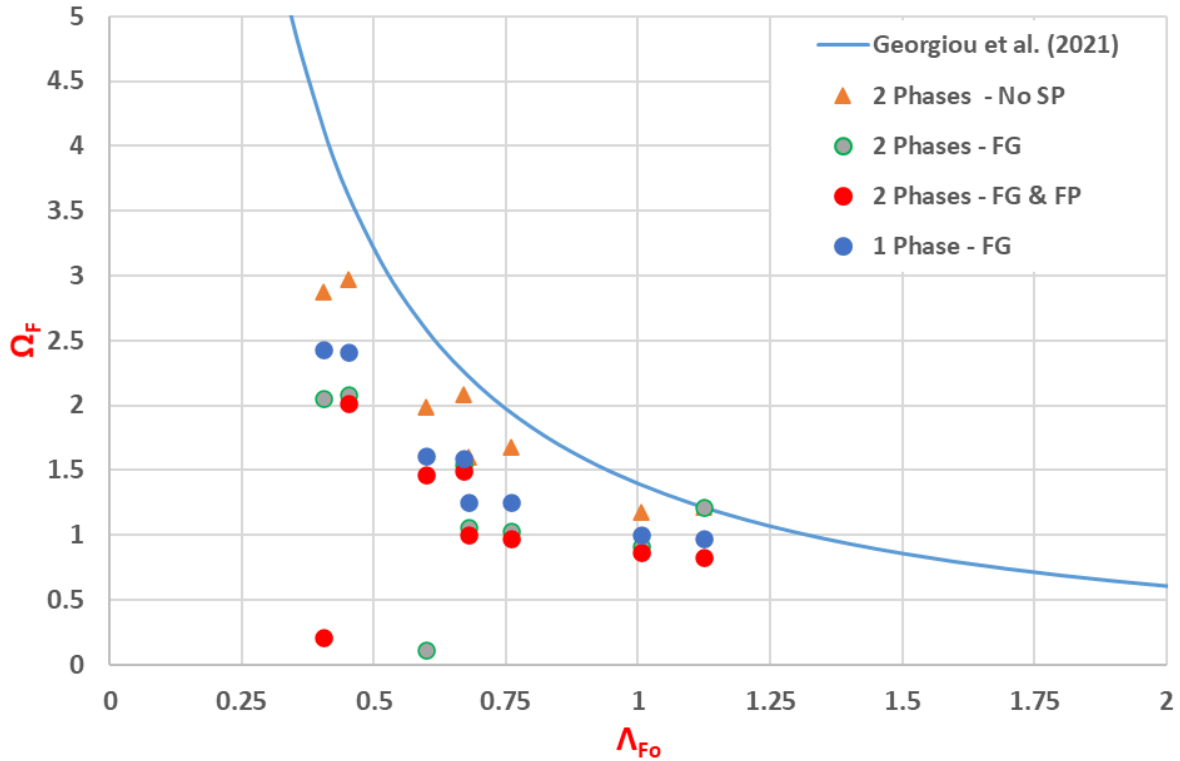
Πλησιάζοντας στο πέρας της διερεύνησης, επιδιώκεται η ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adeco – RS με απλή εφαρμογή αγκυρίων μετώπου.

Το ποσοστό μείωσης της εξώθησης που επιτυγχάνεται είναι αξιόλογο καθώς από την τιμή $\Omega_F = 3$ έπεσε στην τιμή $\Omega_F = 2,5$, σύμφωνα και με το διάγραμμα του Σχήματος 65.

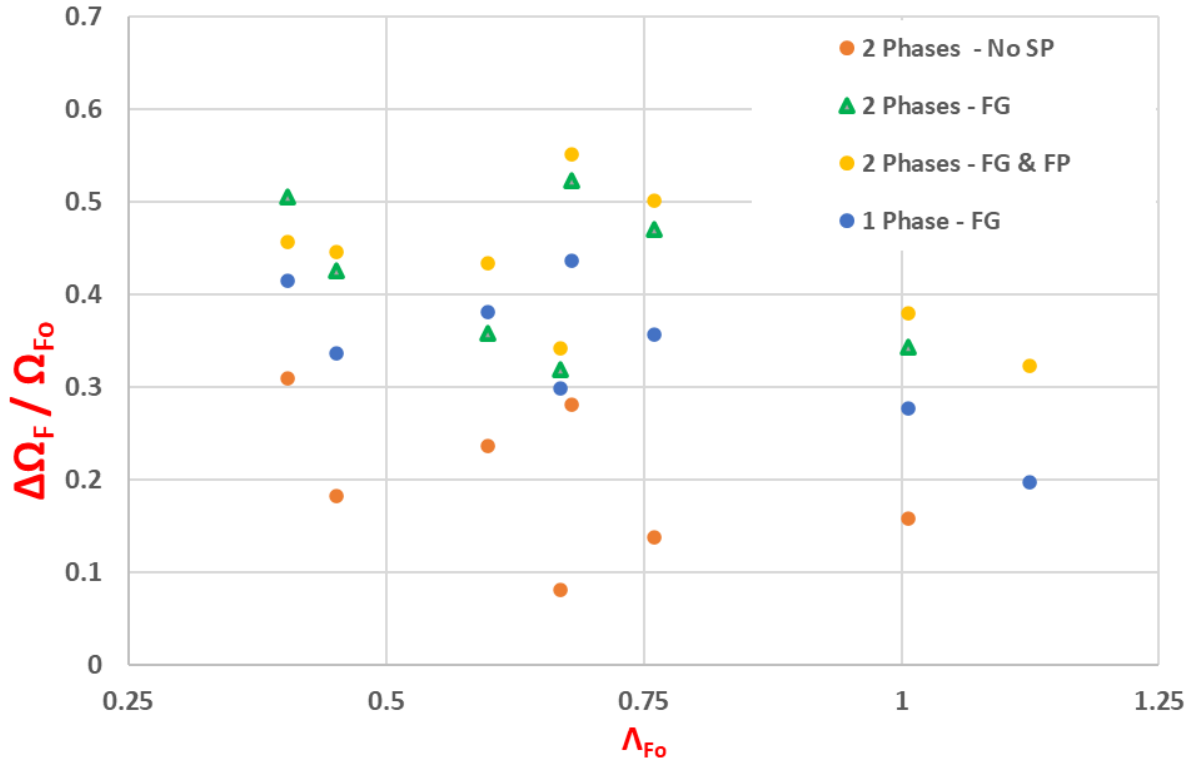


Σχήμα 65 : Επίρροή του συντελεστή ασφαλείας Λ_{Fo} στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής κατά την ολομέτωπη διάνοιξη για μέτωπο ενισχυμένο με αγκύρια Fiberglass.

Η σύγκριση όλων των διαφορετικών περιπτώσεων που υλοποιήθηκαν γίνεται ακόμη πιο ορατή μέσω του παρακάτω διαγράμματος του Σχήματος 66, με τη χρωματική διαφοροποίηση της κάθε περίπτωσης.



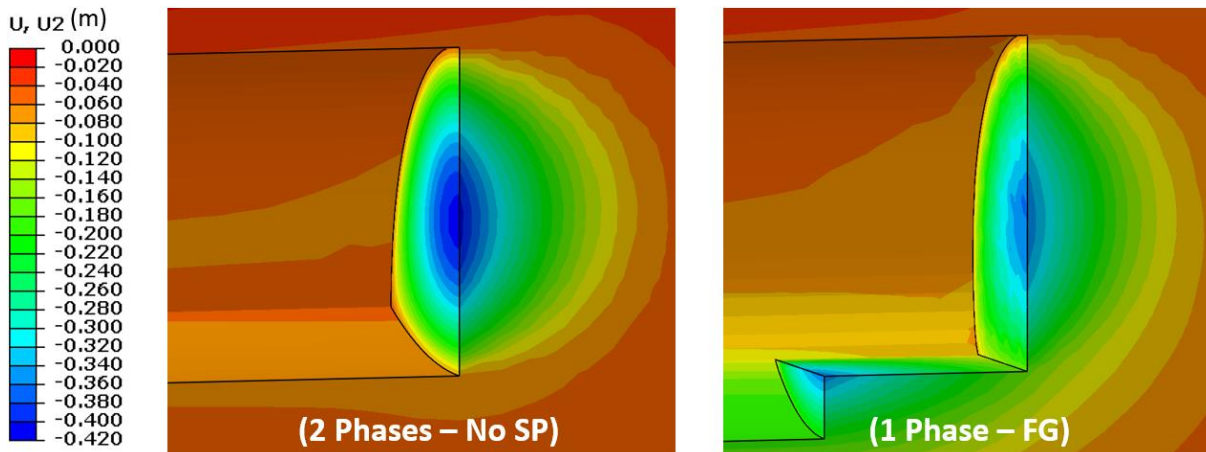
Σχήμα 66 : Σύγκριση της συνεισφοράς των 4 τρόπων διάνοιξης στην ανάπτυξη των εξωθήσεων στην τμηματική εκσκαφή, για ανυποστήρικτο μέτωπο, για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο, για υποστηριγμένο μέτωπο με συνδιασμό αγκυριών Fiberglass – δοκών προπορείας Forepole και για υποστηριγμένο με Fiberglass μέτωπο ολομέτωπης διάνοιξης για βαθιές σήραγγες.



Σχήμα 67 : Μείωση της εξώθησης στην τμηματική εκσκαφή με χρήση αγκυρίων μετώπου, αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας, καθώς και ολομέτωπη διάνοιξη σε σχέση με την Α' Φάση εκσκαφής του ανυποστήρικτου μετώπου.

Το αποτέλεσμα της σύγκρισης που μας δίνουν τα τελευταία δύο διαγράμματα και κυρίως το τελευταίο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθότι είναι πλέον εμφανής η ισοδύναμη μείωση των εξωθήσεων της ολομέτωπης διάνοιξης με απλή εφαρμογή αγκυρίων μετώπου, με αυτή της τμηματικής εκσκαφής και την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου και δοκών προπορείας. Η θεαματική αυτή διαπίστωση επιφέρει τόσο τη μείωση του χρόνου για την ολοκλήρωση της διάνοιξης, όσο και τη μείωση του κόστους αυτής.

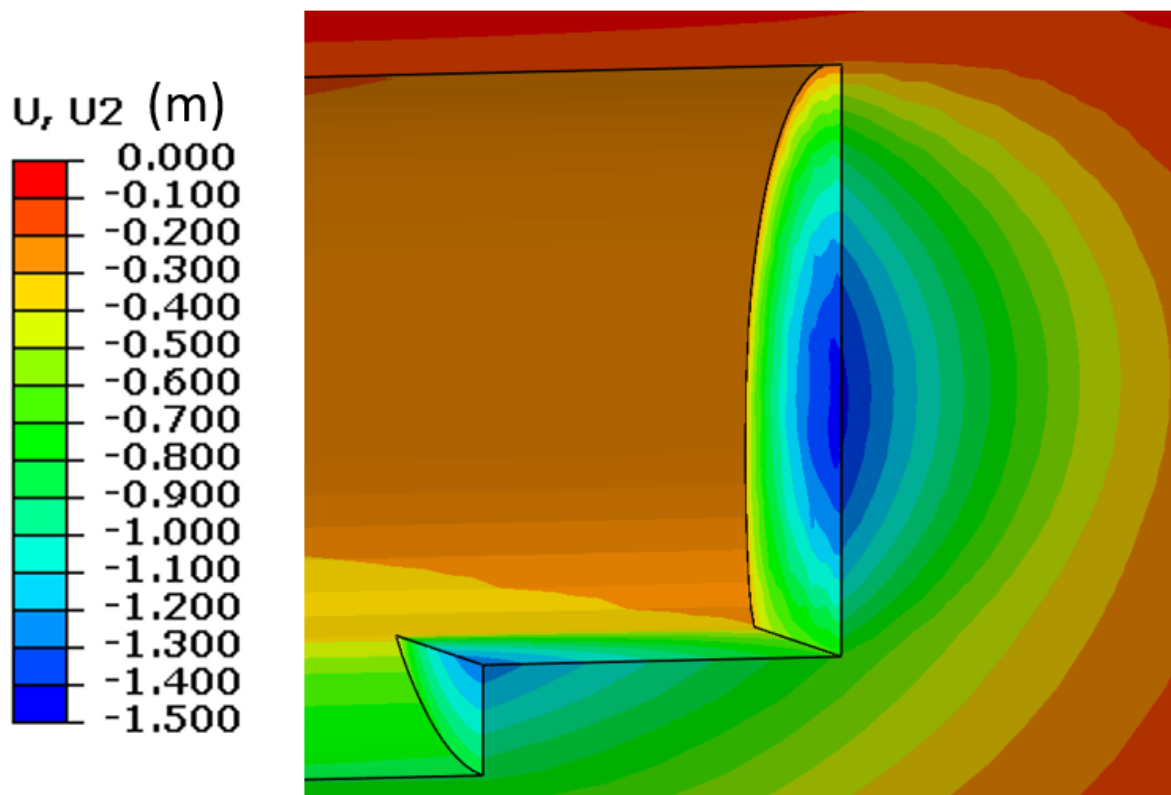
Επαληθεύεται πως σε βάθος υπερκειμένων $H = 100$ m, η μέθοδος αυτή καταφέρνει να μειώσει αισθητά τις εξωθήσεις σύμφωνα με το Σχήμα 68 .



Σχήμα 68 : Μεταβολή των αναπτυσσόμενων εξωθήσεων του εδάφους στην περιοχή του ανυποστήρικτου του μετώπου εκσκαφής κατά την τμηματική διάνοξη (αριστερά) και του υποστηριζόμενου με αγκύρια Fiberglass (δεξιά) κατά την ολομέτωπη διάνοξη, όπου U_2 οι οριζόντιες μετακινήσεις του μετώπου για το ίδιο πτωχό εδάφος.

Συγκρινομένων των αποτελεσμάτων της μείωσης των εξωθήσεων κατά τη διάνοξη με ολομέτωπη μέθοδο σε σχέση με την τμηματική πάντα κατ' εφαρμογή αγκυρίων μετώπου, η δεύτερη δείχνει να πετυχαίνει μεγαλύτερη μείωση (περίπου 0.24 m, σύμφωνα με το Σχήμα 59), έναντι της πρώτης (με εξωθήσεις τις τάξης των 0.34 m, σύμφωνα με το Σχήμα 68). Τούτο, ίσως αναστραφόταν με πύκνωση του καννάβου αγκύρωσης του μετώπου, ωστόσο, συνεκτιμώντας τη μείωση στο χρόνο διάνοιξης ολομέτωπα έναντι της αντίστοιχης σε δύο φάσεις, εάν η τιμή μείωσης που επιτυγχάνει βρίσκεται εντός ανεκτών ορίων τότε με βεβαιότητα είναι προτιμότερη.

Τέλος, η αντίστοιχη προσπάθεια επιδιώκεται και σε βάθος 200 m, όπου όμως επέρχεται η πλήρης αστοχία της σήραγγας, με την τιμή των εξωθήσεων να ανέρχεται στο 1.5 m όπως μας υποδεικνύει η εικόνα του Σχήματος 69. Συνεπώς, δεν τίθεται λόγος σύγκρισης με άλλες περιπτώσεις, ωστόσο και πάλι, η κατάσταση αυτή ενδεχομένως και να βελτιωνόταν εάν προχωρούσαμε σε πύκνωση του καννάβου αγκύρωσης του μετώπου με αγκύρια τύπου Fiberglass.



Σχήμα 69: Αστοχία μετώπου σήραγγας λόγω των μεγάλων τιμών εξώθησης που αναπτύχθηκαν στο μέτωπο για υπερκείμενα $H=200$ m.

8.2 Συγκλίσεις της Σήραγγας

Κατά αντιστοιχία με το υποκεφάλαιο 7.2 θα παρουσιαστεί η μεταβολή των τελικών συγκλίσεων του μετώπου της σήραγγας συναρτήσει της προυποστήριξης του μετώπου εκσκαφής και τον τρόπο διάνοιξης.

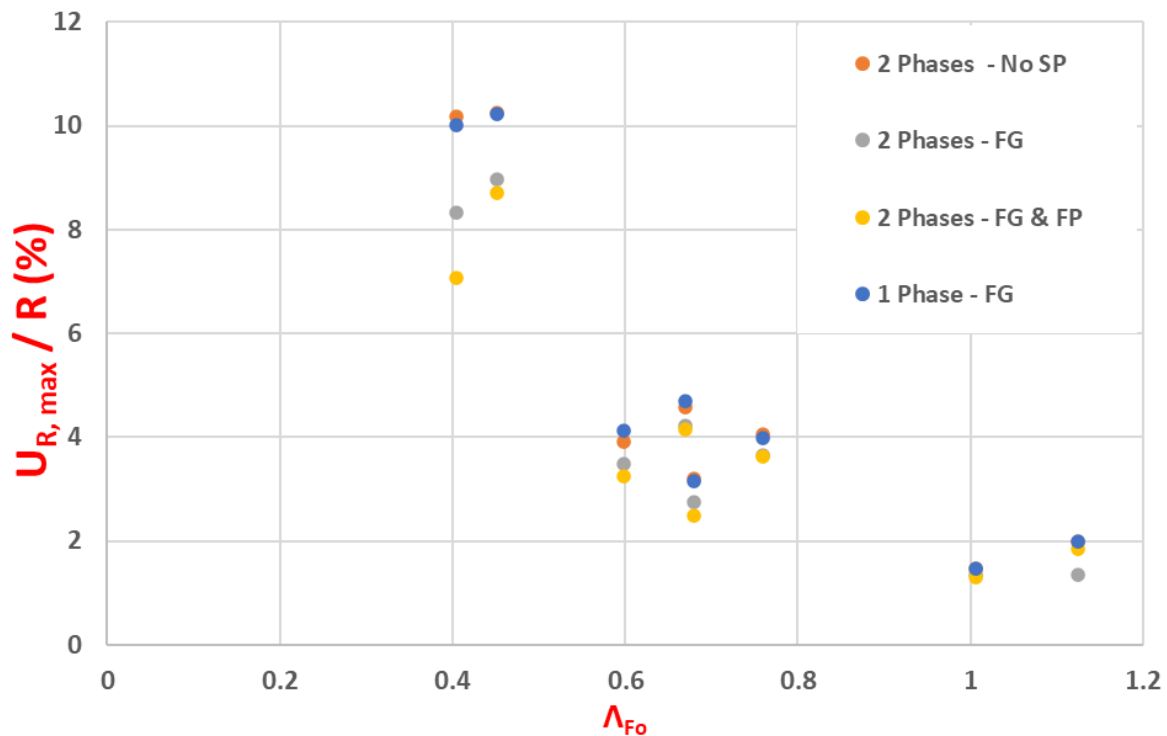
Θα δοθεί η σύγκλιση ακριβώς στο μέτωπο της εκσκαφής, εκεί όπου εδράζεται η υποστήριξη ώστε να πάρουμε την πραγματική σύγκλιση του εδάφους και όχι αυτή της υποστήριξης. Η μέγιστη αυτή μετακίνηση (U_{max}) μπορεί να ισορροπήσει σε οποιοδήποτε σημείο του εύρους των τεσσάρων διαμέτρων ή και πέραν αυτού, ενώ αποτελεί μία εικονική προσέγγιση και δεν μπορούμε να στηρίζουμε σε αυτή κάποιο πολύ βασικό συμπέρασμα, διότι εξαρτάται από τη δυσκαμψία της υποστήριξης, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι δυσκαμψία της υποστήριξης, τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή της μετακίνησης που θα λάβουμε. Ωστόσο, μία γενική σύγκριση μπορεί να γίνει καθότι παντού έχει τοποθετηθεί η ίδια υποστήριξη.

Αρχικά, για τα τρία εδάφη με τα διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και για κάθε μία περίπτωση υποστήριξης αυτών, μορφώνεται το διάγραμμα του Σχήματος 70 που ακολουθεί και το οποίο συναρτάται της ανοιγμένης τιμής $\frac{U_{R,max}}{R}$, με το R να αντιστοιχεί στην ακτίνα ολόκληρης της διατομής ($R=5$ m) και για τις δύο μεθόδους.

Η κύρια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι πως όσο πιο πτωχά είναι τα χαρακτηριστικά του εδάφους, δηλαδή, όσο μειώνεται ο συντελεστής Λ_{F0} καθιστώντας όλο και πιο ασταθές το μέτωπο, παρουσιάζεται αύξηση των συγκλίσεων του μετώπου, όπως είναι και αναμενόμενο.

Επιπλέον, διαπιστώνεται πως οι μετακινήσεις του ανυποστήρικτου μετώπου διανοιγμένου σε δύο φάσεις βρίσκονται στα ανώτερα σημεία του διαγράμματος (σημεία με κόκκινη σήμανση), σε αντίθεση με τα υπόλοιπα, ενώ καθώς αυξάνονται τα μέτρα υποστήριξης οι αντίστοιχες μετακινήσεις "πεφτουν" ομοιόμορφα σε χαμηλότερες θέσεις.

Κάτι στο οποίο αξίζει να σταθούμε, είναι τα αποτελέσματα των προσυγκλίσεων που απέδωσε η ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adeco – RS στο μέτωπο, με την οποία αυτές μειώθηκαν σε βαθμό ανάλογο αυτού της τμηματικής εκσκαφής χωρίς υποστήριξη μετώπου.

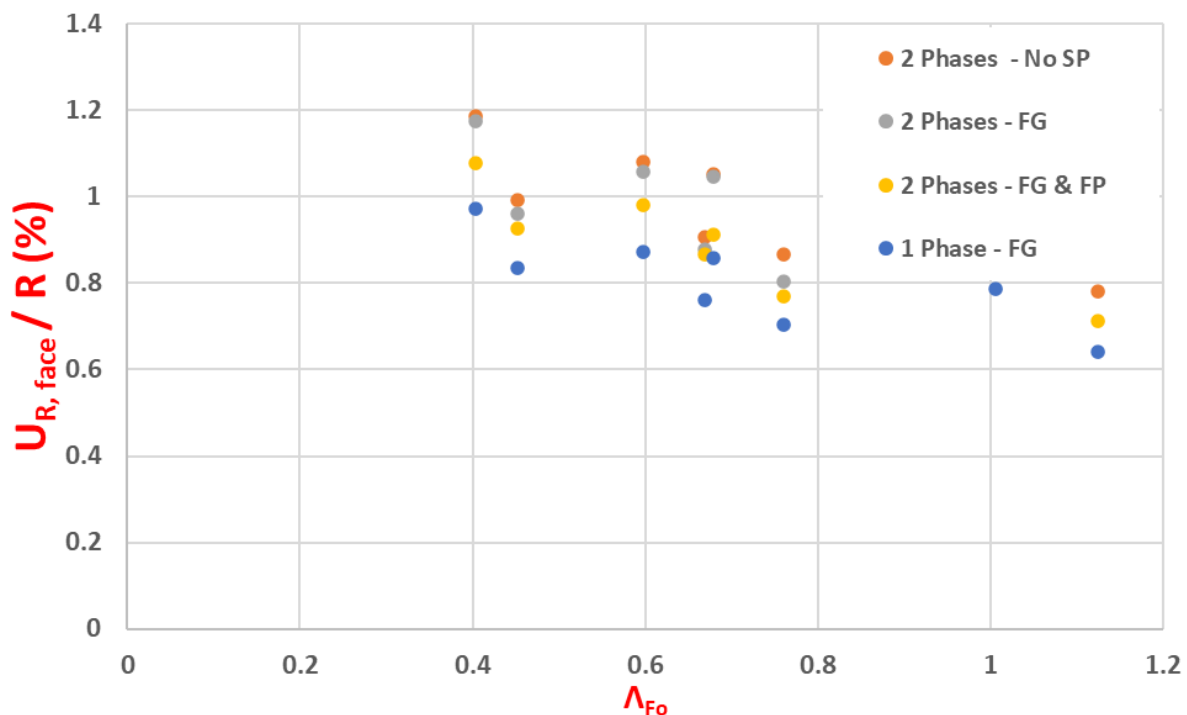


Σχήμα 70 : Μεταβολή των μέγιστων προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{Fo} .

Εν συνεχεία, κατά παρόμοιο τρόπο παρουσιάζονται στο ακόλουθο γράφημα του Σχήματος 71 οι αντίστοιχες μετακινήσεις, συναρτήσει αυτή τη φορά της ανοιγμένης τιμής του λόγου $\frac{U_{R,face}}{R}$ και με την ακτίνα R να αντιστοιχεί στην ακτίνα του διανοιγμένου τμήματος κάθε φορά.

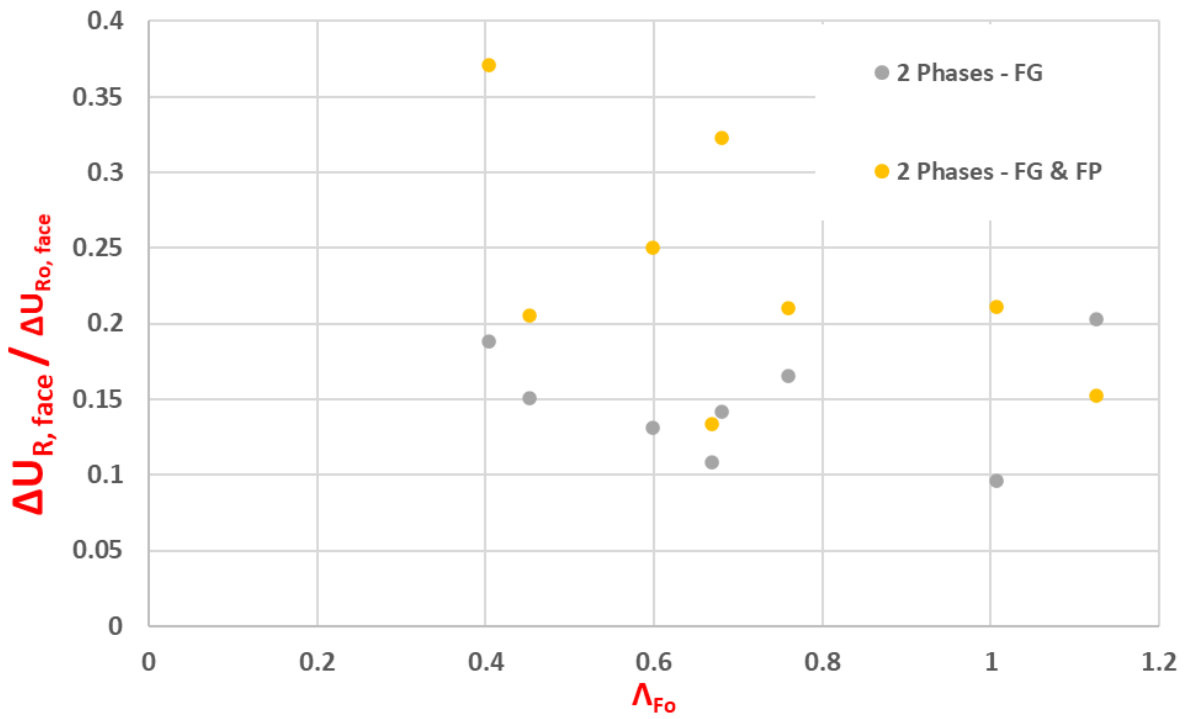
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως τα σημεία που αντιστοιχούν στην ολομέτωπη διάνοιξη (σημεία με μπλε σήμανση), βρίσκονται χαμηλά στο διάγραμμα, παρουσιάζουν δηλαδή μικροτερες προσυγκλίσεις και μάλιστα θεαματικά πιο μικρές τιμές αφού όπως φαίνεται δίνουν καλύτερα ποσοστά ακόμη και από την τμηματική εκσκαφή με εφαρμογή αγκυριων μετώπου και δοκών προπορείας.

Επιπλέον, όμοια με πριν, καθώς μειώνεται η τιμή του Λ_{Fo} , αυξάνουν οι τιμές των προσυγκλίσεων, ενώ και πάλι αυτές τείνουν να μειώνονται καθώς αυξάνουν τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 71 : Μεταβολή των προσυγκλίσεων στην περιοχή του μετώπου της εκσκαφής για τις επιλεγμένες μεθόδους διάνοιξης και υποστήριξης του μετώπου μεταβαλλόμενου του συντελεστή Λ_{Fo} .

Σε επόμενο στάδιο ελέγχεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τα μέτρα υποστήριξης στην τιμή της εκάστοτε σύγκλισης. Όπως προκύπτει από το σχετικό διάγραμμα του Σχήματος 72, αριθμητικά επιτυγχάνεται μείωση των μετακινήσεων στη στέψη της τάξης του 30 %, μόνο τοποθετώντας τα μέτρα υποστήριξης.



Σχήμα 72 : Επιρροή των μέτρων υπστήριξης στη διακύμανση των συγκλίσεων

9^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα & Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

9.1 Συμπεράσματα

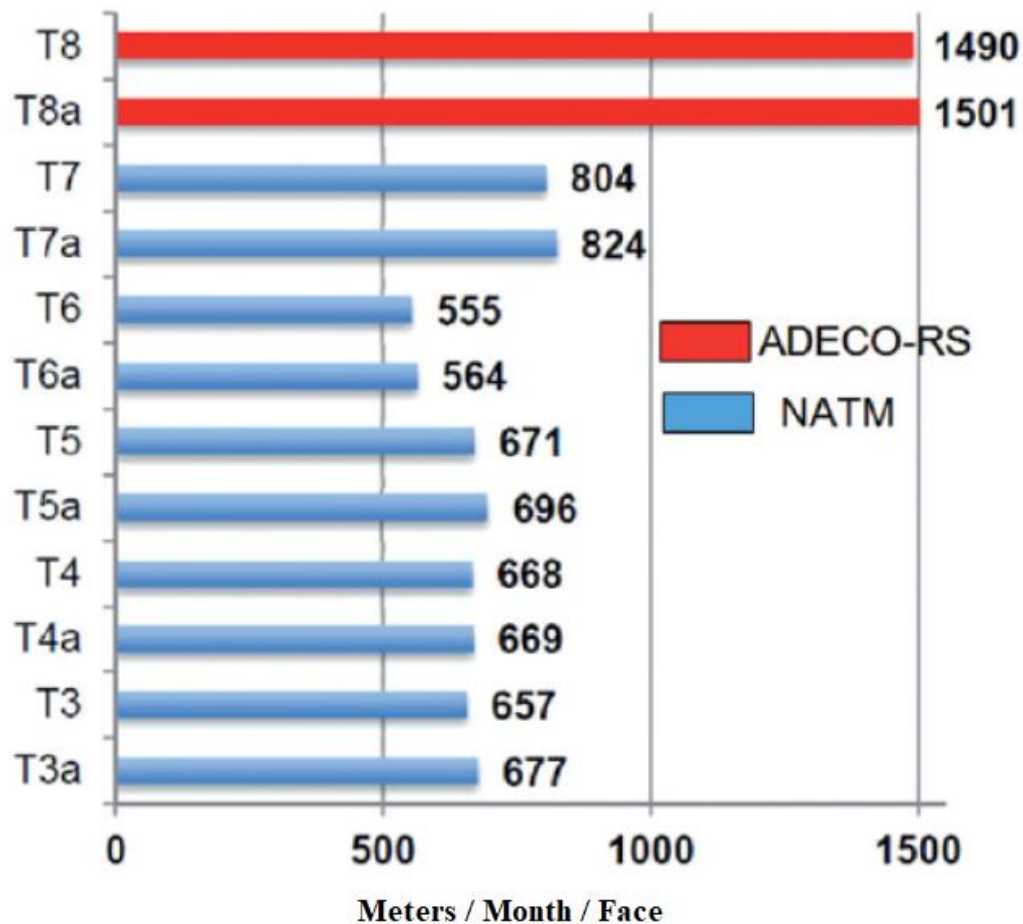
Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρατεθούν επιγραμματικά τα συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν εκτενέστερα στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα συμπεράσματα αυτά εστιάζουν κυρίως γύρω από τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

- Σε περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σε δύο φάσεις σε ανυποστήρικτο μέτωπο, επιτεύχθηκε μείωση της τιμής της εξώθησης της τάξης του 30 % για τις ρηχές και ελαφρώς μεγαλύτερο για τις βαθιές.
- Κατά την υποστήριξη του μετώπου με αγκύρια μετώπου Fiberglass, τόσο στις ρηχές όσο και στις βαθιές σήραγγες ήταν εξαιρετικά κοντά. Συγκεκριμένα, στις ρηχές σήραγγες με λόγο υπερκείμενων γαιών $H/D \leq 4$, η μείωση ανήλθε στο 65 %, ενώ για τις βαθιές σήραγγες με λόγο υπερκείμενων γαιών $H/D \leq 20$, η μείωση ανήλθε σχεδόν στο 55 %.
- Ακολούθως, αφότου το μέτωπο ενισχύσηθηκε πλέον των αγκυρίων μετώπου και με δοκούς προπορείας Forepoles Φ114.3/100.3 και λαμβάνοντας σταθερές τις μεταξύ τους αποστάσεις στα 50 cm, παρατηρήθηκαν σχεδόν μηδενική η μεταβολή της μείωσης της εξώθησης τόσο στις αβαθείς όσο και στις ρηχές σήραγγες. Επομένως, θεωρούμε πως είναι

αμελητέα η συνεισφορά των δοκών προπορείας ως συνδιαστικό μέτρο με τα αγκύρια μετώπου Fiberglass.

- Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ολομέτωπη εκσκαφή βασιζόμενη στην μέθοδο Adeco – RS. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε πως τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν θεαματικά πολύ καλά, δεδομένου ότι επετεύχθη μείωση της τιμής της εξώθησης σχεδόν της τάξης του 60 % για τις ρηχές με λόγο υπερκείμενων γαιών $H/D \leq 4$ και 45 % για τις βαθιές με λόγο υπερκείμενων γαιών $H/D \leq 20$. Το βασικότερο συμπέρασμα και κύριο σημείο το οποίο πρέπει να αναφερθεί είναι πως επετεύχθη η ίδιας τάξης μείωση με την αντίστοιχη τμηματική και εφαρμογή αγκυρίων μετώπου.

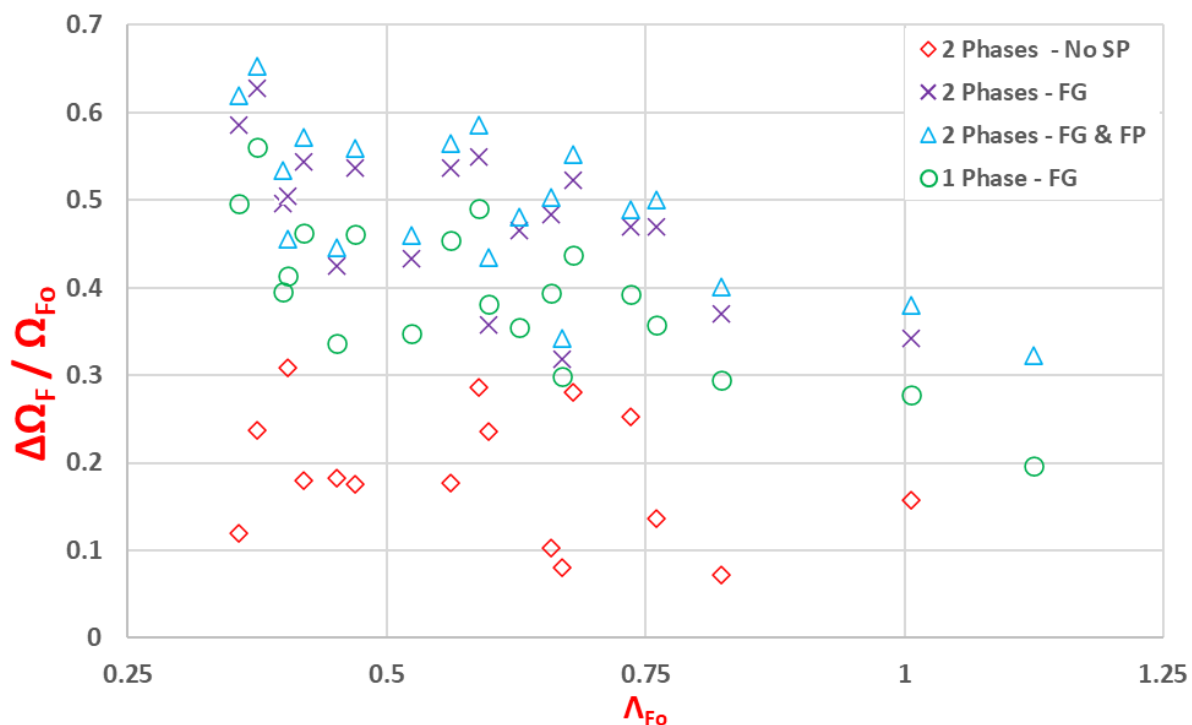
Τούτο, καθιστά το σχεδιασμό βάσει αυτής της μεθόδου πολύ σημαντικό διότι πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος διάνοιξης μίας σήραγγας. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η έννοια του κόστους μεταξύ της τμηματικής εκσκαφής και της ολομέτωπης υπό τις προϋποθέσεις που τέθηκαν για την κάθε μία, παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα του Σχήματος 73 , που δημιουργήθηκε από τον Lunardi.



Σχήμα 73 : Σύγκριση των μεθόδων Adeco – RS & NATM σε όρους διανοιγμένων μέτρων σήραγγας ανά μήνα

Στο παραπάνω διάγραμμα, όπου με μπλε χρώμα συμβολίζεται η εκσκαφή σε πολλαπλές της φάσεις NATM, ενώ με κόκκινο η ολομέτωπη διάνοιξη βασιζόμενη στην Adeco – RS γίνεται εμφανές το μεγάλο βήμα προχώρησης και άρα ο μεγάλος μηνιαίος ρυθμός προχώρησης. Έμμεσα λοιπόν, το διάγραμμα αυτό μεταφράζεται σε όρους μειωμένου κόστους κατασκευής μέσω της μείωσης του χρόνου διάνοιξης.

- ✓ Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω σε ένα εμπειριστατομένο διάγραμμα διάγραμμα, αυτό του Σχήματος 74, απεικονίζεται το κύριο συμπέρασμα της παρούσας εργασίας, κατά το οποίο η μείωση του μεγέθους των εξωθήσεων με την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου σε ολομέτωπη διάνοιξη τύπου Adecco – RS είναι ισάξια με αυτή που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αγκυρίων μετώπου ή το συνδιασμό αυτών με δοκούς προπορείας με τμηματική διάνοιξη τύπου NATM και τούτο ισχύει ανεξάρτητα από το ύψος των υπερκείμενων γαιών



Σχήμα 74 : Συνολικές μειώσεις εξώθησης μετώπου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις υποστήριξης σε σχέση με το ανυποστήρικτο μέτωπο ανεξάρτητα του λόγου H/D.

- ✓ Αναφορικά με τα ποσοστά μείωσης των καθιζήσεων, όπως αυτά μελετήθηκαν στις αβαθείς σήραγγες, παρατηρήθηκε εξαιρετική μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων είτε το μέτωπο υποστηριζόταν με αγκύρια μετώπου Fiberglass, είτε συνδιαστικά με Fiberglass και δοκούς προπορείας Forepoles.

- ✓ Ως προς το μέγεθος των προσυγκλίσεων, η ανάπτυξη τους έδειξε να περιορίζεται αρκετά, και ιδιαίτερα στην εφαρμογή της μεθόδου τύπου Adeco - RS και ακολούθως στο συνδιασμό των μεθόδων Forepole με Fiberglass.
- ✓ Σημαντικό σημείο στο οποίο θα πρέπει να γίνει αναφορά είναι πως προτείνεται η πύκνωση του καννάβου αγκυρίων μετώπου, διότι σε ορισμένες εκ των αναλύσεων παρατηρήθηκαν αστοχίες του μετώπου εκσκαφής, γεγονός που συνεπάγεται άμεσα τούτη την ενίσχυση ώστε να επέλθει ευστάθεια του μετώπου.
- ✓ Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος Adeco – RS έχει κατεξοχήν δοκιμαστεί σε βαθιές σήραγγες, επέφερε αξιόλογα αποτελέσματα και στις αβαθείς σήραγγες για τις οποίες η βιβλιογραφία δεν διαθέτει πλούσιο υλικό.

9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Τέλος, ενδιαφέρουσα θεματολογία για μελλοντική διερεύνηση είναι η εξής :

- Η εξέταση της επιρροής της παρουσίας νερού στο μέτωπο της εκσκαφής καθότι στην παρούσα μελέτη δεν λήφθηκε υπόψιν.
- Η διερεύνηση και των υπόλοιπων παραμέτρων της μεθόδου Adeco – RS στην εξώθηση του μετώπου, όπως είναι οι δοκοί προπορείας και η μέθοδος του Jet Grouting, καθώς στην εργασία υιοθετήθηκε μόνο η βασική της παράμετρος, αυτή των αγκυρίων μετώπου.
- Η μελέτη της επιρροής της εφαρμογής των δοκών προπορείας χωρίς κάποιο άλλο συνδιαστικό μέτρο υποστήριξης κατά την τμηματική διάνοιξη,
- Η εκτενέστερη διερεύνηση της τμηματικής εκσκαφής σε πολύ ασθενή εδάφη, για αριθμό πέραν των δύο φάσεων διάνοιξης (πχ τρεις, τεσσερις φάσεις, κτλ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καββαδάς Μ. (2012), *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων*, Σημειώσεις Μαθήματος, Ε.Μ.Π., Δ.Π.Μ.Σ. Σ.Κ.Υ.Ε.
2. Νομικός Π. (2015), *Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
3. Σοφιανός Α. (2015), *Υποστήριξη Υπογείων Έργων*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
4. Σοφιανός Α. (2018), *Διάνοιξη Σηράγγων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
5. Γεωργίου Δ., Τσαπέκης Ι. & Καββαδάς Μ., *Διερεύνηση της Επιρροής των Μέτρων Υποστήριξης στην Ευστάθεια του Μετώπου Αβαθών Σηράγγων*.
6. Τσαπέκης Ι. (2019), *Ανάλυση Ευστάθειας Μετώπου Αβαθούς Σήραγγας με Χρήση Δοκών Προπορείας (Forepoles) & Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
7. Αργυροπούλου Μ. (2020), *Αριθμητική Προσομοίωση της Επιρροής Αβαθών Σηράγγων στην Εκδήλωση Επιφανειακών Καθιζήσεων*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
8. Διακουμή Ε. (2020), *Αριθμητική Διερεύνηση του Βέλτιστου Τρόπου Εφαρμογής Μέτρων Ευστάθειας Μετώπου σε Ρηχές Σήραγγες*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
9. ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε. Ελληνικός Γεωτεχνικός Εξοπλισμός, *Στοιχεία Αγκύρωσης και Ενισχύσεων Υαλονημάτων*.