



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών και ΜΤΒΜ μεθόδων διάνοιξης σηράγγων εκτροπής φραγμάτων - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

Ντεμίρογλου Χριστίνα, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Μαρίνος Β., Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α.Μ.: 0712201505

Τριμελής επιτροπή:

Μαρίνος Β., Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπενάρδος Α., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νομικός Π., Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
MINING AND METALLURGICAL ENGINEERING, CIVIL ENGINEERING & RURAL,
SURVEYING AND GEOINFORMATICS ENGINEERING
INTERDISCIPLINARY POSTGRADUATE PROGRAM “DESIGN & CONSTRUCTION OF
UNDERGROUND WORKS”**

“Techno-economic comparison of conventional and MTBM methods for dam diversion tunnels - The case of the diversion tunnel of Triantafyllia dam”.

Ntemiroglou Christina, Civil Engineer N.T.U.A.

Supervisor: Marinos B., Assistant Professor N.T.U.A.

A.M.: 0712201505

Examination committee

Marinos B., Assistant Professor N.T.U.A.

Benardos A., Professor N.T.U.A.

Nomikos P., Professor N.T.U.A.



Athens, February 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Αντικείμενο και στόχοι	7
1.2 Διαθέσιμα δεδομένα και εκτελεσθείσες εργασίες	7
1.3 Διάρθρωση εργασίας	8
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	9
2.1 Σήραγγες φραγμάτων	9
2.2 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων	10
2.2.1 Διάνοιξη σηράγγων βραχυδών σχηματισμών με συμβατικά μηχανικά μέσα.....	10
2.2.2 Διάνοιξη σηράγγων με μηχανοποιημένη όρυξη	15
2.2.3 Σύγκριση συμβατικών και μηχανικών μεθόδων διάνοιξης.....	29
2.3 Κατηγορίες φραγμάτων	29
2.3.1 Φράγματα σκυροδέματος	30
2.3.2 Γεωφράγματα	35
2.4 Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο υδρολογικού σχεδιασμού σήραγγας εκτροπής	37
2.5 Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο υδραυλικού σχεδιασμού σήραγγας εκτροπής	43
3 ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ	47
3.1 Περιοχή μελέτης	47
3.2 Γεωλογική έρευνα και εργασίες	47
3.2.1 Στρωματογραφία	49
3.3 Γεωλογικό υπόβαθρο	53
3.4 Γεωτεχνική έρευνα και εργασίες – Όπως εκτελέστηκαν	58
3.4.1 Σκοπός και περιεχόμενο της γεωτεχνικής έρευνας.....	58
3.4.2 Λεκάνη κατάκλυσης.....	59
3.4.3 Φύση και δομή του βραχώδους υποβάθρου	59
3.4.4 Δοκιμαστική στοά	62
3.4.5 Σήραγγα εκτροπής – εκκένωσης.....	63
3.4.6 Εργασίες υπαίθρου.....	64

3.5	Υδρολογική μελέτη – Όπως εκτελέστηκε	65
3.6	Υδραυλική μελέτη – Όπως εκτελέστηκε	70
3.7	Υφιστάμενα έργα – Όπως κατασκευάστηκαν	71
3.7.1	Σώμα φράγματος	72
3.7.2	Ανάντη πρόφραγμα	73
3.7.3	Υπερχειλιστής	73
3.7.4	Έργο ενίσχυσης του ταμιευτήρα από τη λεκάνη της Ελάτειας	74
3.7.5	Σήραγγα εκτροπής – Έργο υδροληψίας – Εκκενωτής πυθμένα	75
4	ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ	81
4.1	Σύγχρονη γεωτεχνική αξιολόγηση	81
4.2	Προτεινόμενη υδρολογική προσέγγιση	87
4.3	Προτεινόμενη υδραυλική προσέγγιση	92
4.4	Η επίδραση της διαμέτρου της σήραγγας εκτροπής στη διόδευση του πλημμυρικού όγκου	94
4.5	Σενάριο I – Συμβατική μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας εκτροπής και χωμάτινο φράγμα (υφιστάμενη κατάσταση)	97
4.5.1	Έλεγχος ευστάθειας σφηνών	99
4.5.2	Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Εκσκαφή με τη μέθοδο drill & blast.....	100
4.5.3	Αποτελέσματα αναλύσεων	114
4.5.4	Χρόνος και προϋπολογισμός	119
4.6	Σενάριο II – Διάνοξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο micro-tunneling και χωμάτινο φράγμα	121
4.6.1	Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Διάνοξη με τη μέθοδο micro-TBM.....	121
4.6.2	Αποτελέσματα αναλύσεων	130
4.6.3	Χρόνος και προϋπολογισμός	133
4.7	Σενάριο III - Σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο micro-tunneling και κατασκευή φράγματος RCC	135
4.7.1	Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Διάνοξη με τη μέθοδο micro-TBM.....	135
4.7.2	Αποτελέσματα αναλύσεων	143
4.7.3	Χρόνος και προϋπολογισμός	147
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	149
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	149
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	151

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	153
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	155

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το πέρας της ιδιότητας μου ως φοιτήτρια στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Β. Μαρίνο, Επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος ως επιβλέπωντας, διαδραμάτισε καίριο ρόλο στην εξέλιξη της εργασίας. Πρόκειται για έναν άνθρωπο που αντλεί ζωή από την εκπαιδευτική διαδικασία και μεταλαμπαδεύει τις γνώσεις και την εμπειρία του έμπρακτα και αποτελεσματικά, χάρη τόσο στη μεταδοτικότητα του, όσο και στην άμεση και επί τόπου επαφή των φοιτητών με μεγάλα υπόγεια – υπό κατασκευή – έργα.

Επιπλέον, η υλοποίηση της παρούσας εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς την συμβολή της κ. Σέρας Λαζαρίδου, Πρόεδρο του Ευρωπαϊκού οργανισμού της ICOLD και Senior Partner της εταιρείας Υδροεξυγιαντική Λ. Σ. Λαζαρίδης & ΣΙΑ Ε.Ε., χάρη τόσο στην παραχώρηση στοιχείων της οριστική μελέτης του έργου όσο και στην πολύτιμη επιστημονική της καθοδήγηση.

Στη συνέχεια, οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτρη Γεωργίου, ο οποίος συνέβαλε δραστικά στην επίλυση προβλημάτων κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης καθώς και στον εμπλουτισμό της εργασίας με επιπλέον ερευνητικά συμπεράσματα, χάρη στις ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στον κ. Α. Ευστρατιάδη, Επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος αποτέλεσε θεμέλιο λίθο από τα προπτυχιακά ακόμα έτη μέχρι και σήμερα, με την ενεργή του στήριξη και την παροχή γνώσεων και εμπειριών, τόσο στο επιστημονικό όσο και στο ανθρωπιστικό αντικείμενο.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια Διδάκτωρ Γεωργία – Κωνσταντίνα Σακκή για την επιστημονική συμβολή της σε καίρια υπολογιστικά σημεία, καθώς και για την υποστηρικτική της συνεισφορά σε όλη τη διάρκεια του κύκλου των μεταπτυχιακών σπουδών.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Α. Μπενάρδο, καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος συνεισέφερε ενεργά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, χάρη στις καίριες επιστημονικές παρατηρήσεις του.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω και τον κ. Π. Νομικό, καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος αποτέλεσε πηγή έμπνευσης καθόλη της διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών, με τις διαλέξεις του και με την επαφή μας με καταξιωμένα άτομα του αντικειμένου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την καθοριστική τους στήριξη, τόσο καθόλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών ετών όσο και στην όμορφη συνέχεια του επόμενου κεφαλαίου.

Ντεμίρογλου Χριστίνα,

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υδραυλικές σήραγγες αποτελούν από τα σημαντικότερα έργα στην εύρυθμη λειτουργία ενός φράγματος, ενώ ειδικά οι σήραγγες εκτροπής αποσκοπούν στην εξασφάλιση ξηρών συνθηκών κατά την κατασκευή και χρησιμοποιούνται και ως αγωγοί υδροληψίας ή ακόμα και εκκένωσης κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Επιπρόσθετα, καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό μιας σήραγγας εκτροπής διαδραματίζει ο τύπος του φράγματος και συγκεκριμένα ο ρυθμός κατασκευής αυτού, ο οποίος επηρεάζει την περίοδο επαναφοράς των υδραυλικών υπολογισμών. Σκοπός της εν λόγω εργασίας, είναι η τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών και μηχανικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και πιο συγκεκριμένα της συμβατικής μεθόδου εκσκαφής και της μηχανοποιημένης όρυξης με microTBM. Αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε το φράγμα της Τριανταφυλλιάς στη Φλώρινα, στο οποίο εκτείνεται γεωλογικό γνευσιακό υπόβαθρο. Κεντρικές συνιστώσες της παρούσας εργασίας, αποτέλεσαν τόσο η ανάλυση της υδρολογικής διαδικασίας όσο και ο υδραυλικός και στη συνέχεια γεωτεχνικός σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής, λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Με αφετηρία την επίδραση του τύπου του φράγματος στην απαιτούμενη διάμετρο της σήραγγας εκτροπής και λαμβάνοντας υπόψιν τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής του και την πιθανότητα αστοχίας, καθορίστηκαν οι υπό εξέταση εναλλακτικές διάμετροι αυτής. Κατόπιν δημιουργίας της τεχνικογεωλογικής τομής βάσει των στοιχείων των γεωτρήσεων και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναφορικά με τη γεωλογία και την τεκτονική της περιοχής μελέτης, προσδιορίστηκαν οι μετακινήσεις και απαιτούμενη υποστήριξη με χρήση κατάλληλων λογισμικών στις κρίσιμες περιοχές των στομιών και των ρηγμάτων, ενώ ειδικά για τη περίπτωση μηχανοποιημένης όρυξης με microTBM εξετάστηκε η εφαρμοσιμότητα του εκάστοτε τύπου μηχανήματος. Τέλος, προσδιορίστηκε το αντίστοιχο κόστος για το εκάστοτε σενάριο και ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

Hydraulic tunnels the most important structures for the proper operation of a dam, and especially diversion tunnels are designed to play a dual role. During its construction ensure dry conditions, they are also used as water intake tunnels or even evacuators during the operation phase of the project. However, both the type and the construction rate of the dam are crucial components in the design of the diversion tunnel, while this rate influences the return period of both hydrologic and hydraulic calculations. The aim of this research is the techno - economic comparison of conventional excavation method and the mechanized excavation with microTBM. The case study of this research was the Triantafyllia dam, located in Greece, which is characterized by a geological gneiss underground. The central components of this study were both the analysis of the hydrological process and the hydraulic and then geotechnical design of the diversion tunnel, considering the characteristics and peculiarities of the surrounding rock mass. Starting from the influence of the type of dam on the required diameter of the diversion tunnel and taking into account the required construction time and the probability of failure, the alternative diameters of the diversion tunnel were determined. Moreover, following the creation of the technical - geological section based on the drilling data and the literature review regarding the geology and tectonics of the study area, the displacements and required support were determined using appropriate software in the critical areas of the openings and faults. Additionally, especially for the case of mechanized drilling with microTBM the applicability of each type of machine was examined. Finally, the corresponding costs for each scenario were determined and the results were compared.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχοι

Οι υδραυλικές σήραγγες αποτελούν ένα από τα πλέον σημαντικά έργα στο σύνολο των συνοδών έργων ενός φράγματος. Οι σήραγγες αυτές διακρίνονται σε σήραγγες υδροληψίας, εκκένωσης ταμειυτήρα και σε σήραγγες εκτροπής, οι λειτουργίες των οποίων συνδυάζονται και αλληλοκαλύπτονται μετά το πέρας της ολοκλήρωσης των κατασκευαστικών εργασιών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σήραγγες εκτροπής καθώς ο σωστός σχεδιασμός τους και η εύρυθμη λειτουργία τους εξασφαλίζουν ξηρές συνθήκες, απαιτούμενες για την άρτια κατασκευή του φράγματος. Όπως διαπιστώνεται, η διάμετρος της σήραγγας εκτροπής είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον υδραυλικό σχεδιασμό του έργου, καθοριστικό παράγοντα στον οποίο αποτελεί το μέγεθος της περιόδου επαναφοράς η οποία κατ' επέκταση είναι έντονα εξαρτώμενη από τον τύπο του φράγματος καθώς σχετίζεται μέσω του ρίσκου της αστοχίας με τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής του.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτενέστερη εξέταση της εξάρτησης των παραπάνω μεγεθών και επιπλέον η τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών και μηχανικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και πιο συγκεκριμένα της συμβατικής μεθόδου εκσκαφής και της μηχανοποιημένης όρυξης με microTBM για διάφορες διαμέτρους σήραγγας εκτροπής.

Το παραπάνω πλαίσιο, εφαρμόζεται για την περίπτωση του φράγματος της Τριανταφυλλιάς, στο οποίο εκτείνεται γεωλογικό γνευσιακό υπόβαθρο μέτριας τεκτονικής καταπόνησης.

1.2 Διαθέσιμα δεδομένα και εκτελεσθείσες εργασίες

Τα πρωτογενή δεδομένα της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν από την προμελέτη και από την οριστική μελέτη του φράγματος της Τριανταφυλλιάς (Υδροεξυγιαντική Λ. Σ. Λαζαρίδης & ΣΙΑ Ε.Ε., 1999) και επεξεργάστηκαν και αξιοποιήθηκαν για την γεωτεχνική αξιολόγηση με στόχο την πρόταση νέων εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού της σήραγγας εκτροπής.

Πιο αναλυτικά, στα πρωτογενή δεδομένα συμπεριελήφθησαν σχέδια όπως οι οριζοντιογραφίες και οι τυπικές διατομές του φράγματος και της σήραγγας εκτροπής, η γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας εκτροπής, τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και ειδικότερα φωτογραφικό υλικό από τα γεωλογικά κασάκια, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών όπως κοκκομετρικές αναλύσεις, δοκιμή σε εφελκυσμό (Brazilian test), δοκιμή σημειακής φόρτισης (point load test), δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression test) καθώς και αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών και συγκεκριμένα δοκιμών διαπερατότητας (Lugeon, Maag). Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμα ήταν τα τεύχη των υδρολογικών και των υδραυλικών υπολογισμών του έργου καθώς και η τεχνική έκθεση αυτού.

Κατά τη διεξαγωγή της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν γεωτεχνικά λογισμικά για τον έλεγχο της ευστάθειας των σφηνών (Unwedge, Rocscience Inc.) και για τη μελέτη του γεωτεχνικού προσομοιώματος τόσο για τη διερεύνηση της αντοχής της άμεσης υποστήριξης όσο και για τον υπολογισμό των συγκλίσεων και των τελικών παραμορφώσεων έπειτα από τη διάνοιξη (RS2, Rocscience Inc.).

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 1** γνωστοποιούνται το αντικείμενο και στόχοι της εν λόγω εργασίας καθώς και τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα. Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθενται βιβλιογραφικά στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, με τα βασικά είδη φραγμάτων καθώς επίσης συνοψίζονται τα βασικά θεωρητικά υπόβαθρα υδρολογικού και υδραυλικού σχεδιασμού σήραγγας εκτροπής. Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά το προς μελέτη έργο, ήτοι το φράγμα της Τριανταφυλλιάς και τα συνοδά έργα αυτού καθώς και τα βασικότερα στοιχεία της γεωλογικής, της γεωτεχνικής, της υδρολογικής και της υδραυλικής μελέτης του έργου, όπως αυτά αποσπάρστηκαν από την οριστική μελέτη του έργου. Στο **Κεφάλαιο 4** αναπτύσσεται η νέα προτεινόμενη γεωτεχνική αξιολόγηση και αναλύεται η νέα εκσυγχρονισμένη υδρολογική και η νέα υδραυλική προσέγγιση. Εν συνεχεία, αναπτύσσεται το σύνολο των πεπερασμένων αναλύσεων των εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού της σήραγγας εκτροπής και συγκεκριμένα η περίπτωση διάνοιξης αυτής με συμβατική μέθοδο διάνοιξης και η κατασκευή χωμάτινου τύπου φράγματος, η περίπτωση διάνοιξης με τη μέθοδο micro-tunneling και ο χωμάτινος τύπος φράγματος και η διάνοιξη με τη μέθοδο micro-tunneling και η κατασκευή φράγματος κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC). Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Σήραγγες φραγμάτων

Τα βασικά συνοδά έργα ενός φράγματος είναι τα έργα υπερχειλίσης, τα έργα υδροληψίας και τα έργα εκτροπής. Πιο αναλυτικά, τα έργα υπερχειλίσης εξαρτώνται από τον τύπου του φράγματος καθώς στην περίπτωση φραγμάτων από σκυρόδεμα, τα έργα αυτά τοποθετούνται πάνω στο σώμα του φράγματος ενώ στα γεωφράγματα είναι τοποθετημένα πλευρικά σε σήραγγα ή σε πρανές. Τα έργα υδροληψίας εξαρτώνται κυρίως από τις εξυπηρετούμενες χρήσεις νερού και συνδυάζονται πολλές φορές με τα έργα εκτροπής ή ακόμη και με τα έργα εκκένωσης. Τέλος, τα έργα εκτροπής επιτυγχάνουν τη φραγή του ποταμού ανάντη και την εκτροπή της κοίτης αυτού, ενώ τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά συνδέονται άμεσα με το χρόνο κατασκευής του φράγματος καθώς και την επιλογή του τύπου αυτού. Συνήθως η εκτροπή επιτυγχάνεται μέσω ενός προσωρινού προφράγματος ανάντη του φράγματος ή ενσωματωμένου στο κυρίως έργο σε συνδυαστική λειτουργία με μία σήραγγα ή μια διώρυγα.

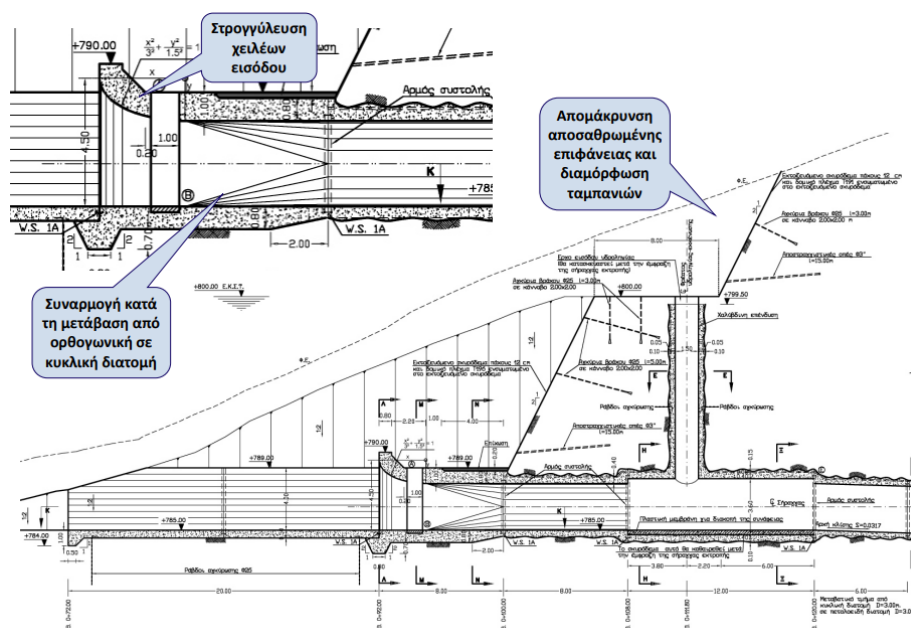
Πιο αναλυτικά, τα συστήματα εκτροπής είναι προσωρινά έργα που αποσκοπούν στην εξασφάλιση ξηρών συνθηκών με απώτερο στόχο την επιτυχή διεξαγωγή των κατασκευαστικών διαδικασιών του φράγματος. Τα συνήθη έργα αυτού του τύπου περιλαμβάνουν το πρόφραγμα και τον αγωγό εκτροπής. Οι επιλογές των χαρακτηριστικών του συστήματος εκτροπής βασίζονται σε τεχνικοοικονομικά δεδομένα, στους προβλεπόμενους χρόνους εκτέλεσης των εργασιών, στις κλιματικές συνθήκες και στα επιτρεπόμενα επίπεδα διακινδύνευσης. Τυπικό εύρος τιμών περιόδου επαναφοράς για πλημμύρα σχεδιασμού τέτοιων έργων είναι τα 10 - 50 έτη.

Οι αγωγοί εκτροπής είναι έργα μεταφοράς που εξασφαλίζουν την ομαλή μεταφορά νερού από τα ανάντη προς τα κατόντη της θέσης κατασκευής του φράγματος. Συνήθως έχουν τη μορφή σηράγγων, οχετών, ανοιχτών αγωγών ή σωληνωτών αγωγών (για διαμέτρους μικρότερων των 2.5 m). Η έναρξη της εκτροπής πραγματοποιείται με την κατασκευή ενός προσωρινού αναχώματος το οποίο καθαιρείται κατά την ολοκλήρωση του έργου, ενώ στο πέρας της κατασκευής του αγωγού εκτροπής πραγματοποιείται έμφραξη αυτού. Συχνά εξετάζεται η περίπτωση επαναξιοποίησης του αγωγού μετά την ολοκλήρωση του φράγματος, όπως για χρήση σχετική με την υδροληψία, την εκκένωση του ταμιευτήρα, την προσαγωγή οικολογικής παροχής ή ακόμα και την υδροηλεκτρική παραγωγή.

Οι σήραγγες εκτροπής είθισται να κατασκευάζονται σε κάποιο από τα αντερείσματα του φράγματος και συνήθως έχουν διαμέτρους μεγαλύτερες των 3 m. Βασικός γνώμονας κατά τη σχεδιάσή τους είναι η χάραξη μεγάλων ευθύγραμμων τμημάτων και η σύνδεση αυτών μέσω κυκλικών τόξων, αποσκοπώντας στον περιορισμό των τοπικών απωλειών. Οι σήραγγες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής ενώ σε αρκετές περιπτώσεις επιδιώκεται η διάνοιξη και από τα δύο στόμια, προκειμένου να περιοριστεί ο χρόνος της κατασκευαστικής διαδικασίας. Τέλος, σημειώνεται ότι η πεταλοειδής διατομή είναι ευνοϊκότερη ως προς τη μεταφορά φερτών (Ευστρατιάδης, Α. 2021).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η είσοδος του έργου εκτροπής. Πιο αναλυτικά πρόκειται για μια γεωμετρία προσαρμοσμένη στον αγωγό, ενώ το δάπεδο εισόδου είναι 1-3 m πιο πάνω από την κοίτη του ποταμού. Η είσοδος φέρει καθοδηγητικούς τοίχους που αποσκοπούν στην ομαλά επιταχυνόμενη ροή του νερού προς το στόμιο εισόδου του αγωγού. Επιπλέον, υπάρχουν μεσόβαθρα για την κατανομή των φορτίων των δοκών έμφραξης, σε περιπτώσεις μεγάλου ανοίγματος.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 2.1: Είσοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Τριανταφυλλιάς (Από Ευστρατιάδης, Α. 2021)

Αναφορικά με την έξοδο του έργου εκτροπής σημειώνεται ότι η στάθμη της και κατ' επέκταση η κλίση είναι κατάλληλη ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις υδραυλικής λειτουργίας του, να μη δημιουργεί κίνδυνο υποσκαφής στη θέση εκβολής και να επιτυγχάνει την απαιτούμενη καταστροφή ενέργειας. Η έμφραξη της σήραγγας εκτροπής πραγματοποιείται μέσω πώματος – μόνιμης κατασκευής από σκυρόδεμα – που αγκυρώνεται στη θέση της κατασκευής. Στην περιοχή αυτή εξασφαλίζεται η στεγάνωση μέσω εκτέλεσης τσιμεντενέσεων. Πιο αναλυτικά, για την έμφραξη της σήραγγας εκτροπής αρχικά πραγματοποιείται προσωρινή έμφραξη της εισόδου με θυροφράγματα, έπειτα ακολουθεί η κατασκευή του πώματος, και τέλος αίρεται η προσωρινή έμφραξη και εκτελούνται τσιμεντενέσεις μεταξύ πώματος και επένδυσης για την πλήρωση των κενών σκυροδέτησης.

Από τα παραπάνω κρίνεται σαφής η τεράστια συσχέτιση μεταξύ του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος ενδιαφέροντος, της σήραγγας εκτροπής, της διάνοιξης αυτής και του τύπου του φράγματος, επομένως κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση των βασικότερων μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και τα πεδία εφαρμογής τους, στην επόμενη ενότητα.

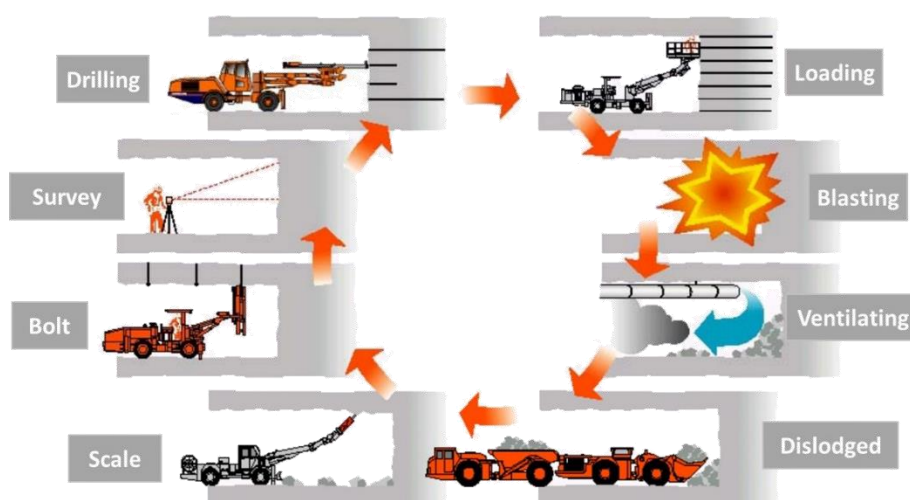
2.2 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

2.2.1 Διάνοιξη σηράγγων βραχωδών σχηματισμών με συμβατικά μηχανικά μέσα

Η όρυξη πετρωμάτων για την κατασκευή σηράγγων πραγματοποιείται παραδοσιακά με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης (Εικόνα 2.2). Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πετρώματα μεγάλου φάσματος και συγκεκριμένα από χαμηλής αντοχής, όπως μάρμες, άργιλοι, γύψοι, κρητίδες μέχρι και σκληρότερα πετρώματα, όπως γρανίτης, γνεύσιος, βασάλτης και χαλαζίας, χαρακτηριστικό που της προσδίδει ιδιαίτερο πλεονέκτημα ιδιαίτερα στην περίπτωση μεταβαλλόμενων γεωμορφολογικών συνθηκών. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι της εκμηχανισμένης διάνοιξης που αναπτύσσεται παρακάτω, είναι η απουσία απαίτησης ιδιαίτερως ακριβούς εξοπλισμού για σήραγγες μικρού μήκους, η αποφυγή μεγάλης φθοράς των κοπτικών των δίσκων κοπής στην περίπτωση ιδιαίτερως σκληρών πετρωμάτων και η δυνατότητα διαμόρφωσης πολύ μεγάλης διατομής ή ακόμη και διατομής διαφορετικής της κυκλικής (Σοφιανός, Α., 2018).

Κατά το σχεδιασμό της ανατίναξης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην πραγματοποίηση μεγάλων βημάτων προχώρησης, στην επίτευξη λεπτομερών περιγραμμάτων διατομής και στην ελαχιστοποίηση των προβλημάτων λόγω δονήσεων. Ωστόσο, οι εργασίες διεξάγονται διαδοχικά γεγονός που συνεπάγεται μικρότερη ταχύτητα προχώρησης συγκριτικά με εκείνη της εκμηχανισμένης διάνοιξης, στην οποία οι εργασίες εκτελούνται συγχρόνως.

Γενικώς, η μικρότερη διάσταση σήραγγας προκειμένου να είναι εφικτή η κίνηση ατόμων και μηχανημάτων στο εσωτερικό αυτής ανέρχεται στο 1.5 m πλάτος και 1.5m - 2.0 m ύψος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται επιτυχώς σε ανοίγματα τουλάχιστον 3.0 m - 3.5 m ώστε να υπάρχει ευκολία τοποθέτησης και κίνησης του εξοπλισμού, ενώ για διαμέτρους 5.0 m - 5.5 m η διάνοιξη εκτελείται με τη μέγιστη ταχύτητα.



Εικόνα 2.2: Κύκλος εργασιών διάνοιξης με τη μέθοδο «διάτρηση-ανατίναξη» (Από TAMROCK, 1999)

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται είτε ολομέτωπα είτε σε δύο φάσεις, οπότε προπορεύεται η διάνοιξη της άνω ημιδιατομής και ακολουθεί η βαθμίδα. Η επιλογή του αριθμού των φάσεων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η ποιότητα της βραχώμαζας, το μέγεθος της διατομής και ο διαθέσιμος εξοπλισμός. Η μέθοδος αυτή ανήκει στις συμβατικές (conventional) ή διαδοχικές (sequential) μεθόδους διάνοιξης κατά τις οποίες η διάνοιξη της κάθε φάσης πραγματοποιείται διαδοχικά στα εξής στάδια:

1. Τοπογραφική σήμανση διατρημάτων
2. Όρυξη διατρημάτων
3. Γόμωση διατρημάτων
4. Απομάκρυνση διατρητικών φορείων
5. Πυροδότηση-ανατίναξη
6. Αερισμός για την απομάκρυνση αερίων της ανατίναξης
7. Αποκόλληση επισφαλών όγκων
8. Απομάκρυνση μπαζών
9. Στήριξη του πετρώματος

Η όρυξη των διατρημάτων στο πέτρωμα επιτυγχάνεται κυρίως με κρουστική δύναμη, η οποία παλαιότερα προερχόταν από πνευματικά συστήματα ενώ με την εισαγωγή των υδραυλικών συστημάτων μειώθηκε το κόστος διατρητικών στελεχών ανά μονάδα μήκους διατρήματος, περιορίστηκε το ενεργειακό κόστος, μειώθηκε η ένταση του παραγόμενου θορύβου, βελτιώθηκε η ορατότητα στο χώρο εργασίας λόγω

περιορισμού των αερίων εξάτμισης, αυξήθηκε η δυνατότητα αυτοματοποίησης και ελέγχου των διαδικασιών από απόσταση και κατέστη εφικτή η άμεση αντίδραση στις αλλαγές των συνθηκών διάτρησης (Σοφιανός, Α., 2018).

Ο εξοπλισμός διάτρησης είναι είτε χειροκίνητος (Εικόνα 2.3), όπως αεροσφύρες στηριζόμενες σε εκτεινόμενη βάση, είτε μηχανοκίνητος, όπως υδραυλικές σφύρες (Εικόνα 2.4) στηριζόμενες σε βραχίονες που μεταφέρονται σε αυτοκινούμενα φορεία, τα οποία κινούνται σε τροχιές ή είναι ελαστικοφόρα. Η επιλογή του διατρητικού εξοπλισμού βασίζεται στη δυνατότητα κάλυψης του συνόλου της διατομής της σήραγγας.



Εικόνα 2.3: Χειρωνακτική διάτρηση (Από TBG &STUVA, 1989)



Εικόνα 2.4: Εκμηχανισμένη διάτρηση (Από Tunnel Business Magazine)

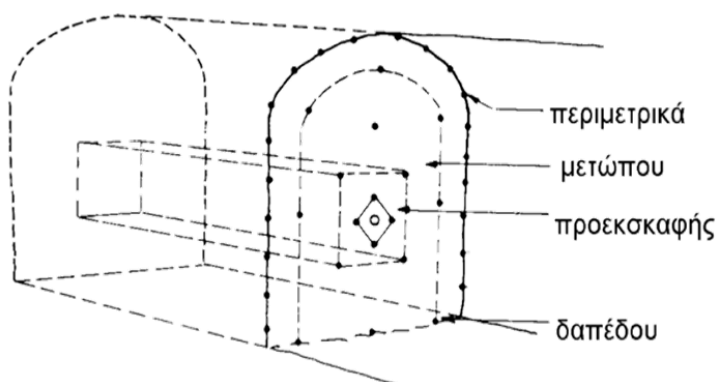
Η διάταξη των διατρημάτων ανατίναξης (blasting pattern) εξαρτάται από τις διαστάσεις της διατομής, το σχήμα της, τη διάμετρο των διατρημάτων, τις γεωλογικές συνθήκες, τη διατρησιμότητα και τη θραυσιμότητα του πετρώματος, τις αναμενόμενες διαρροές νερού, τη διαθεσιμότητα και τον τύπο των εκρηκτικών και των πυροδοτητών, το διατρητικό εξοπλισμό, τις τελικές ποιοτικές απαιτήσεις ακριβείας της διατομής και τον περιορισμό των παραγόμενων δονήσεων (Σοφιανός, Α., 2018).

Τα διατρήματα στο μέτωπο διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Εικόνα 2.5) – τα διατρήματα προεσκαφής (cut), κύριας εκσκαφής (stope) και περιμέτρου (contour). Πιο αναλυτικά, τα διατρήματα προεσκαφής δημιουργούν ελεύθερη επιφάνεια ανακλάσεως του κρουστικού κύματος από τις εκρήξεις των γύρω υπονόμων της κύριας εκσκαφής, τα οποία με τη σειρά τους εκρήγνυνται με τρόπο ώστε να εξορύξουν το πέτρωμα σε όλη σχεδόν τη διατομή της σήραγγας αφήνοντας μόνο περιμετρικά μικρό πάχος πετρώματος. Τέλος, τα περιμετρικά διατρήματα αποσκοπούν στη διάνοιξη της διατομής της σήραγγας με ακρίβεια και στην αποφυγή ρωγμάτωσης ή χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

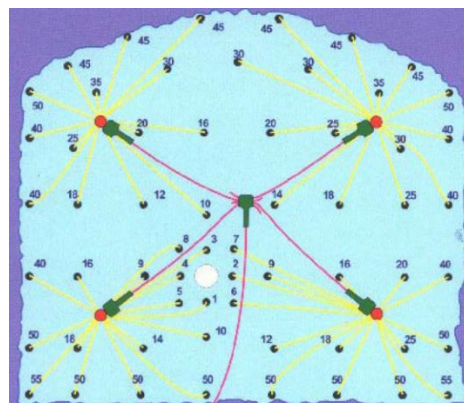
Αναφορικά με την πυροδότηση, σε κάθε βήμα προχώρησης οι υπόνομοι εκρήγνυνται από μέσα προς τα έξω με χρονική σειρά. Οι καθυστερήσεις έναυσης επιτυγχάνονται με χρήση επιβραδυντικών καψυλλίων, τα οποία φέρουν αρίθμηση που αυξάνεται με το χρόνο επιβράδυνσης. Με το πέρας της γόμωσης των διατρημάτων, οι αγωγοί ενώνονται σε συνδέσμους που καταλήγουν στους πυροδοτές και κατόπιν απομάκρυνσης των εργαζομένων από το μέτωπο, από προστατευμένη θέση πυροδοτείται η ανατίναξη του μετώπου (Εικόνα 2.6).

Ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκτέλεση της συγκεκριμένης μεθόδου, απαιτείται να δοθεί στις παραγόμενες δονήσεις ιδιαίτερα στην περίπτωση ανατινάξεων κάτω από πυκνοκατοικημένες περιοχές, καθώς είναι πιθανή η πρόκληση βλαβών στα υφιστάμενα κτίσματα. Η μέγιστη σεισμική ενέργεια προέρχεται από την

έκρηξη στα διατρήματα προεκκαφής, καθώς σε αυτά είναι συγκεντρωμένη η περισσότερη ενέργεια. Ωστόσο, είναι εφικτός ο περιορισμός της μέσω της αύξησης του όγκου των κενών διατρημάτων καθώς και της μείωσης της εκλυόμενης ενέργειας ανά χρόνο καθυστέρησης, που επιτυγχάνεται με διατρήματα μικρού μήκους και καψύλλια τέτοια ώστε ανά πάσα στιγμή η ποσότητα της ταυτόχρονα εκρηγνυόμενης εκρηκτικής ύλης να είναι αποδεκτή σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις.



Εικόνα 2.5: Είδη διατρημάτων (Από Karanam και Misra, 1998)



Εικόνα 2.6: Διάταξη καψυλλίων στο μέτωπο (Από NONEL, 2003)

Κατά το πέρας της ανατίναξης, εντείνεται η λειτουργία του συστήματος εξαερισμού της σήραγγας προκειμένου να απομακρυνθούν τα παραγόμενα τοξικά αέρια, πραγματοποιείται έλεγχος του αποτελέσματος καθώς και ο εντοπισμός τυχόν χαλαρών επισφαλών πετρωμάτων στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας και η απομάκρυνσή τους με τη μέθοδο του ξεσκάρωματος. Στη συνέχεια, εκτελείται η διαδικασία αποκόμισης των μπαζών μέσω φορητών ή μεταφορικών ιμάντων. Τέλος, πραγματοποιείται η άμεση στήριξη της περιβάλλουσας βραχώμαζας προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των εργαζομένων και η αντίσταση του πετρώματος έναντι γεωστατικών πιέσεων και ακολούθως τοποθετείται η τελική επένδυση.

Μια εναλλακτική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων είναι η διάνοιξη με συμβατικά μηχανικά μέσα η οποία ενδείκνυται σε περιπτώσεις εκσκαφής πτωχής ποιότητας σχηματισμών στους οποίους είναι πιθανό να παρατηρηθούν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας του μετώπου καθώς και σε μαλακά υλικά, όπου δεν είναι αποδοτική ή ακόμη και επιτρεπτή η χρήση εκρηκτικών (ΕΛΟΤ, 2009).

Συνήθη πρακτική αποτελεί η τμηματική εξόρυξη της διατομής σε πολλαπλά μέτωπα, ώστε να μειωθεί το ενεργό μέγεθος του ανοίγματος και να βελτιωθούν οι συνθήκες ευστάθειας. Η μέθοδος της διαδοχικής διάνοιξης με μηχανικά μέσα ανήκει στη γενικότερη κατηγορία μεθόδων εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που επί της ουσίας είναι μέθοδοι που το χρησιμοποιούν ως το βασικό μέτρο υποστήριξης. Η διαδικασία της κατασκευής περιλαμβάνει τις φάσεις εξόρυξης και υποστήριξης.

Χαρακτηριστικοί τύποι μηχανικών μέσων είναι οι φρέζες (roadheaders) που χρησιμοποιούνται σε συμπαγείς σχηματισμούς, οι εκσκαφείς/τσάπες (excavators) που χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς σχηματισμούς και οι σφύρες που βρίσκουν εφαρμογή κατά την τοπική εκσκαφή σκληρών πετρωμάτων, συνήθως στην περιφέρεια του ανοίγματος.

Οι φρέζες (roadheaders) δύνανται να εξορύσσουν πετρώματα αντοχής έως 120 MPa και διατομές που δεν ξεπερνούν τα 42 m². Μια συμβατική φρέζα αποτελείται από το φορείο που κινείται πάνω σε ερπύστριες, τον

βραχίονα και την κοπτική κεφαλή, η οποία αποτελείται από κοπτικά που είναι κατασκευασμένα από καρβίδιο βολφραμίου και διατάσσονται σπειροειδώς. Τα όρια σκληρότητας του εξορυσσόμενου πετρώματος εξαρτώνται από την ικανότητα κοπής των κοπτήρων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν ορισμένοι τύποι μηχανών που ενσωματώνουν στην κεφαλή εκτοξευτές υψηλής πίεσης ύδατος χάρη στους οποίους υποβοηθείται η κοπή του πετρώματος. Στη συνέχεια, τα μπάζα συλλέγονται σε ειδικά διαμορφωμένα ποδιά και προωθούνται σε μεταφορικό ιμάντα για την απομάκρυνσή τους.

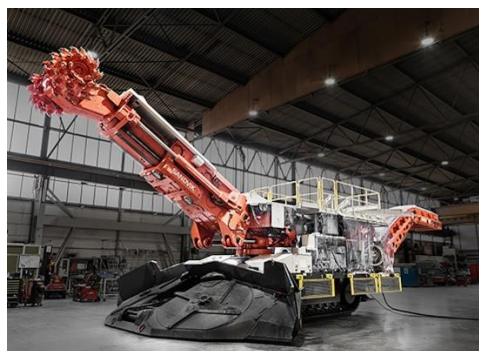
Οι φρέζες διακρίνονται σε τέσσερις ομάδες, τις μηχανές με κεφαλή διαμήκουσ κοπής (Εικόνα 2.7) (σπειροειδής κεφαλή) στις οποίες η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του βραχίονα και κόβει το πέτρωμα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας, τις μηχανές με κεφαλή εγκάρσιας κοπής (Εικόνα 2.8) (κεφαλή διπλού τυμπάνου) στις οποίες η κοπτική κεφαλή διαμορφώνεται ως διπλό περιστρεφόμενο τύμπανο με τους δύο κοπτικούς κυλίνδρους εκατέρωθεν του διαμήκουσ άξονα του προβόλου να περιστρέφονται περί άξονα κάθετο στον βραχίονα, τις μηχανές που φέρουν ένα ή περισσότερους βραχίονες με κοπτικές κεφαλές στερεωμένους σε ασπίδα και τις μηχανές με μεγάλη κεφαλή εγκάρσιας κοπής, η οποία αποτελείται από ένα πλαίσιο τοποθετημένο πάνω σε ερπύστριες και έναν κοντό βραχίονα στον οποίο εφαρμόζεται κατακόρυφα ένας τροχός με κοπτικούς δίσκους στην περιφέρειά του. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η αρχή της κοπής των κεφαλών εγκάρσιας κοπής υπερέχει σε λειτουργικές ιδιότητες των κεφαλών διαμήκουσ κοπής ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμπαγών πετρωμάτων. Μια προσεγγιστική αντιστοιχία ισχύος κοπής και αντοχής του προς εξόρυξη πετρώματος σε θλίψη, παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Αντιστοιχία ισχύος κοπής και αντοχής εξορυσσόμενου πετρώματος (Από Σοφιανός, 2018)

Ισχύς κοπής (kW)	Αντοχή σε θλίψη (Μρα)
100	80
200	100
400	120



Εικόνα 2.7: Φρέζα διαμήκουσ κοπής (Από sanyglobal.com)



Εικόνα 2.8: Φρέζα εγκάρσιας κοπής (Από rocktechnology.sandvik)

Οι εκσκαφείς (backhoes) (Εικόνα 2.9) αποτελούνται από το φορείο που κινείται πάνω σε ελαστικοφόρους τροχούς ή σε ερπύστριες, τον βραχίονα και τον κάδο εκσκαφής. Οι εκσκαφείς των υπόγειων έργων είναι ειδικά κατασκευασμένοι και φέρουν βραχίονα που δύναται να περιστρέφεται και κατά τον άξονα της σήραγγας ώστε να διαμορφώνει την περιφέρεια αυτής.

Η σφύρα (Εικόνα 2.10) έχει αρκετά μικρή απόδοση και χρησιμοποιείται σε σκληρά πετρώματα, σε περιπτώσεις όπου απαγορεύονται οι ανατινάξεις, υπάρχει κίνδυνος υποεκσκαφής είτε ακόμα και για το θρυμματισμό βραχωδών όγκων εντός μαλακών σχηματισμών.



Εικόνα 2.9: Εκσκαφέας σηράγγων (Από liebherr.com)



Εικόνα 2.10: Σφύρα σηράγγων (Από ksdrillrig.com)

Τα σύγχρονα μηχανήματα σημειακής κοπής είναι εξοπλισμένα με διατρητικό μηχάνημα για την κατασκευή διερευνητικών ή ενισχυτικών διατρημάτων στο μέτωπο και στα τοιχώματα για την τοποθέτηση των αγκυριών. Επιπρόσθετα, εξοπλίζονται και με διατάξεις τοποθέτησης τόξων και προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος, ενώ τα μεγαλύτερα μηχανήματα φέρουν διάταξη εκτόξευσης σκυροδέματος. Ο χειρισμός των διατάξεων αυτών πραγματοποιείται μέσω υδραυλικού συστήματος που επιτρέπει και τον απομακρυσμένο χειρισμό τους. Για την καθοδήγηση των μηχανημάτων εφαρμόζονται συστήματα Η/Υ και δέσμες laser (Σοφιανός, Α., 2018).

Η συμβατική διάνοιξη σηράγγων εκτός αστικών περιοχών πραγματοποιείται με τις μεθόδους εκτοξευμένου σκυροδέματος οι οποίες ακολουθούν τις αρχές της νέας αυστριακής μεθόδου (NATM) ή της νέας ιταλικής μεθόδου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η νέα αυστριακή μέθοδος οι οποία βασίζεται στις εξής πέντε αρχές:

1. Η αντοχή της βραχώμαζας γύρω από τη σήραγγα πρέπει να ενεργοποιηθεί σκόπιμα στη μεγαλύτερη δυνατή έκταση, επιτρέποντας την παραμόρφωσή της.
2. Τοποθετείται κατάλληλη ελαφριά, εύκαμπτη υποστήριξη με λεπτή πρώτη στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλους αμέσως μετά την εκσκαφή.
3. Πραγματοποιούνται μετρήσεις των μετακινήσεων και των πιέσεων αμέσως μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
4. Απαιτείται κλείσιμο του ανάστροφου τόξου προκειμένου να επιτευχθεί ο μηχανισμός κελύφους.
5. Η μόνιμη υποστήριξη εκτελείται σε ένα μεταγενέστερο στάδιο.

Τέλος, επισημαίνεται πως η NATM εφαρμόζεται είτε με ολομέτωπη εκσκαφή, είτε με τμηματική εκσκαφή της διατομής και προπορευόμενη τη διάνοιξη της ερευνητικής στοάς, είτε με προπορευόμενη εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, είτε με διάνοιξη και στήριξη επιμέρους τμημάτων της διατομής.

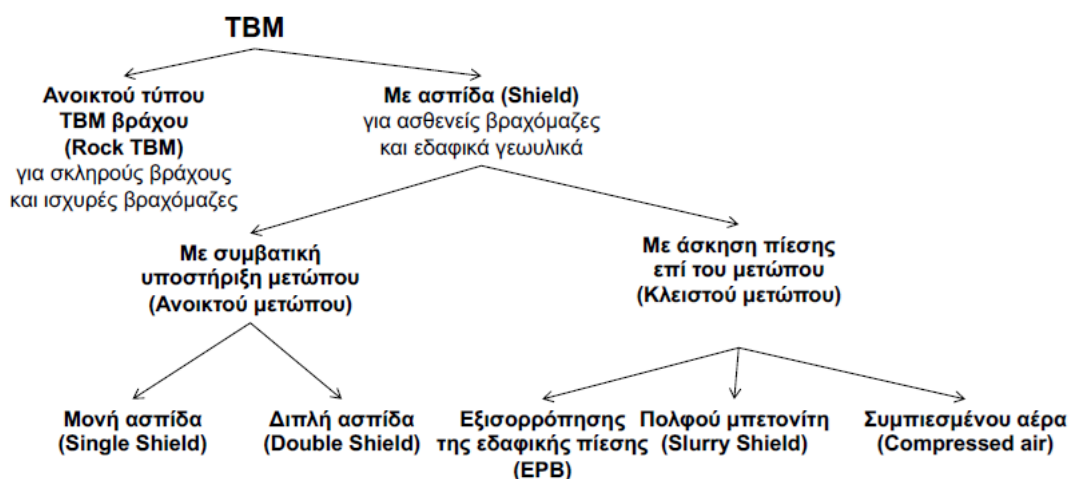
2.2.2 Διάνοιξη σηράγγων με μηχανοποιημένη όρυξη

Τα κυριότερα κριτήρια επιλογής μηχανημάτων εκσκαφής είναι κυρίως γεωλογικού και γεωτεχνικού χαρακτήρα. Πιο αναλυτικά, το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής μελέτης, ήτοι οι γεωμορφολογικές συνθήκες στο χώρο της σήραγγας, τα γεωλογικά και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των γεωυλικών καθώς και το

καθεστώς των υπόγειων νερών, συνδέονται άμεσα με την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, των τοιχωμάτων της σήραγγας και τον έλεγχο των καθιζήσεων. Άλλα κριτήρια είναι η θέση της σήραγγας (αστική ή μη), το μήκος της και τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, η αλληλεπίδραση του προς διάνοιξη υπόγειου έργου με υφιστάμενες υπέργειες κατασκευές, το χρονοδιάγραμμα καθώς και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (θόρυβος, δονήσεις). Ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή μηχανήματος για τη μηχανική όρυξη ενός υπόγειου έργου αποτελεί ο τύπος του γεωυλικού. Πιο αναλυτικά, ένα γεωυλικό ενδέχεται να είναι είτε ισχυρός βράχος – ισχυρή βραχώμαζα, είτε ασθενής βράχος – ασθενής βραχώμαζα που λόγω κερματισμού, αποσάθρωσης ή/και χαμηλής αντοχής του πετρώματος παρουσιάζει μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης, είτε έδαφος (αδρομερές, λεπτομερές ή μικτό) που χαρακτηρίζεται από μηδενικό ή πολύ μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης. (Μαρίνος, Β., 2021).

2.2.2.1 Είδη μηχανημάτων μηχανικής διάνοιξης σηράγγων

Τα TBM (Tunnel Boring Machines) διακρίνονται σε επιμέρους τύπους ανάλογα με το προς εκσκαφή γεωυλικό, σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα της εικόνας 2.11. Οι διάμετροι των διανοιγόμενων σηράγγων με μηχανικές μεθόδους ποικίλουν από μικρότερες του 1 m, που εκτελούνται μέσω της μεθόδου microtunneling, έως περίπου 20 m. Επίσης, είναι ιδανικά για χρήση εντός αστικών περιοχών καθώς δεν προκαλούν οχλήσεις στις υπέργειες κατασκευές, ενώ συνεπάγονται μικρότερο κόστος επένδυσης της σήραγγας λόγω των λείων τοιχωμάτων αυτής. (Singh, P., 2014).

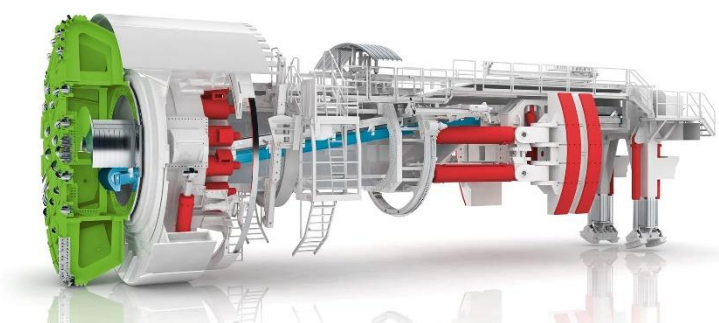


Εικόνα 2.11: Εκσκαφείας σηράγγων (Από Μαρίνος, Β., 2021)

Η διαδικασία εξόρυξης του πετρώματος ξεκινά με την εφαρμογή μιας δύναμης ώθησης στην κοπτική κεφαλή και στα κοπτικά δίσκων και συνεχίζεται με τη διείδυση των κοπτικών στη βραχώμαζα προκειμένου να ξεκινήσει η δημιουργία ρωγμών στο πέτρωμα και η παραγωγή μικρών βραχοτεμαχίων. Στη συνέχεια, η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται προκειμένου να εφαρμοστεί ροπή με απώτερο στόχο την απομάκρυνση των χαλαρών βραχοτεμαχίων τα οποία συλλέγονται από τους περιφερειακούς κάδους της κοπτικής κεφαλής. Ταυτόχρονα, το υλικό εξόρυξης μεταφέρεται στη χοάνη της κοπτικής κεφαλής και στη συνέχεια στον ιμάντα μεταφοράς από όπου και απομακρύνεται με το εκάστοτε σύστημα εκφόρτωσης και πραγματοποιείται η αποκομιδή του στην είσοδο της σήραγγας. Οι δύο κύριες κατηγορίες TBM είναι είτε ανοικτού τύπου (Rock TBM) είτε φέρουν ασπίδα (Shield), τα χαρακτηριστικά και οι υποκατηγορίες των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Ανοιχτού τύπου - TBM βράχου (Rock TBM):

Τα TBM βράχου (ανοιχτού τύπου) είναι γνωστά και με την ονομασία gripper TBM. Τα μηχανήματα αυτά είναι κατάλληλα για βραχώμαζες όπου δεν απαιτείται προσωρινή υποστήριξη ή εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο της σήραγγας. Ωστόσο, παρέχουν τη δυνατότητα υποστήριξης μέσω αγκυρώσεων, χαλύβδινων τόξων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 2.12: TBM βράχου ανοιχτού τύπου (Από herrenknecht.com)

Η έναρξη της διαδικασίας διάνοιξης σηματοδοτείται με το «γράφωμα» του μηχανήματος στα τοιχώματα της σήραγγας και με την επέκταση των ωστήρων πάκτωσης, ενώ ολοκληρώνεται με την κατάλληλη προχώρηση της κοπτικής κεφαλής. Έπειτα, οι εμπρόσθιες και οι οπίσθιες υποστηρίξεις εκτείνονται και οι ωστήρες πάκτωσης υποχωρούν, ενώ το μηχάνημα ολισθαίνει ελαφρώς προς τα εμπρός. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η ευθυγράμμιση του με τη χρήση των οπίσθιων υποστηρίξεων ενώ οι ωστήρες πάκτωσης εκτείνονται με ταυτόχρονη υποχώρηση των υποστηρίξεων, προετοιμάζοντας το μηχάνημα για τον επόμενο κύκλο διάνοιξης. Πινακοποιημένα το πεδίο εφαρμογή του παρουσιάζεται στην εικόνα 2.13.

ΣΚΛΗΡΟΣ ΒΡΑΧΟΣ/ HARD ROCK						
Αντοχή (MPa) Rock compressive strength	0-5 -	5-25 o	25-50 +	50-100 +	100-250 +	>250 o
Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) Rock quality designation	πολύ πτωχή very poor 0 – 25	πτωχή poor 25 – 50	μέτρια fair 50 – 75	καλή good 75 – 90	εξαιρετική excellent 90 – 100	
Τοξινόμηση RMR Rock Mass Ratio	πολύ πτωχή very poor < 20	πτωχή poor 21 – 40	μέτρια fair 41 – 60	καλή good 61 – 80	πολύ καλή very good 81 – 100	
Εισροές για 10m μήκους σήραγγας (l/min) Water inflow 10 m tunnel	0	0-10	10-25	25-125	>125	
Δείκτης φθοράς Cerchar (CAI) Abrasiveness (CAI)	δχι πολύ φθοροποιό not very abrasive 0,3 – 0,5	ελαφρώς φθοροποιό slightly abrasive 0,5 – 1	φθοροποιό abrasive 1 – 2	πολύ φθοροποιό very abrasive 2 – 4	εξαιρετικό φθοροποιό extremely abrasive 4 – 6	
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
o	Δυνατή εφαρμογή / Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή / Application critical

Recommendations for the selection of TBM by DAUB 2011

Εικόνα 2.13: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής Gripper TBM – Σκληρός βράχος (Από Papouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσαρμογή του εν λόγω μηχανήματος σε προβλήματα που ενδέχεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη. Πιο αναλυτικά, σε περίπτωση διέλευσης ρηγμάτων είναι εφικτή η βελτίωση της βραχόμαζας με χρήση τοιμεντενέσεων, στην περίπτωση λεπτοπλακωδών στρωμάτων σε παραοριζόντια διάταξη είναι εφικτή η εφαρμογή άμεσης υποστήριξης πίσω από την κεφαλή, σε περίπτωση αστάθειας του τοιχώματος κατά την εφαρμογή πεδίων επιτυγχάνεται η ενίσχυση με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σφηνών, ενώ τοπικές αστάθειες μετώπου αντιμετωπίζονται με βελτίωση - ενίσχυση και προϋποστήριξη. Επιπλέον, σε περίπτωση ψαθυρής θραύσης ή και εκτινάξεων πετρωμάτων σε μεγάλα βάθη (rock burst), είναι εφικτή η κοπή των τεμαχίων στο μέτωπο μέσω της κεφαλής ή ακόμα και η εφαρμογή διατάξεων, όπως αγκύρια τύπου swellax και πλέγμα, προκειμένου να υλοποιηθεί η άμεση υποστήριξη του μετώπου. Τέλος, στην περίπτωση παραμορφώσιμου - συνθλίβοντος πετρώματος, παρέχεται η δυνατότητα υπερδιάτρησης (5-20 cm) και υποστήριξης πίσω από το μηχανήμα με ενδίδουσα προσωρινή υποστήριξη (πχ. Ολισθαίνοντα πλαίσια) (Μαρίνος, Β., 2021).

Με ασπίδα TBM (Shield TBM):

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα TBMs ανοιχτού και κλειστού τύπου, τα οποία επιτυγχάνουν τη διάνοιξη μέσω συμβατικής υποστήριξης και με άσκηση πίεσης επί του μετώπου, αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά:

Με συμβατική υποστήριξη μετώπου (ανοιχτού μετώπου):

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τα TBM μονής ασπίδας (single shield TBMs) και τα TBM διπλής ασπίδας (double shield TBMs). Πιο αναλυτικά:

Τα TBM μονής ασπίδας (εικόνα 2.17) βρίσκουν εφαρμογή σε ασθενείς βραχόμαζες και σε εδαφικά γεωυλικά. Προσφέρουν άμεση υποστήριξη με το μηχανισμό θόλου σήραγγας και η ώθηση τους πραγματοποιείται μέσω εφαρμογής πίεσης των εμβόλων επί των προκατασκευασμένων στοιχείων από σκυρόδεμα (segments). Η λειτουργία τους ξεκινάει με εκσκαφή μήκους ίσο με το μήκος της διαδρομής των εμβόλων ώθησης και ολοκληρώνεται με την οπισθοχώρηση των εμβόλων και την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων για τη συναρμολόγηση του δακτυλίου της μόνιμης επένδυσης. Στις εικόνες 2.14 και 2.15 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι των βραχομαζών στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή.

Τα μηχανήματα αυτά σε περίπτωση αστάθειας μετώπου παρέχουν δυνατότητες βελτίωσης και προϋποστήριξης, ενώ σε συνθήκες συστηματικής αστάθειας του μετώπου επιλέγεται ειδικός σχεδιασμός της κοπτικής κεφαλής, η οποία είναι επίπεδη, με την ελάχιστη δυνατή τριβή κατά την περιστροφή, με κοπτικά που δεν προεκβάλλουν και με δυνατότητα πρόσβασης στο μέτωπο, ενώ επίσης είναι εφικτή η εφαρμογή μεγάλης ροπής στρέψης με χαμηλή ταχύτητα. Επιπλέον σε περίπτωση εναλλαγών πετρωμάτων διαφορετικής αντοχής επιλέγεται κοπτική κεφαλή με κατάλληλο συνδυασμό κοπτικών εργαλείων, ενώ επίσης παρέχεται η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας. Επιπρόσθετα, στις υδροφόρες ζώνες, είναι εφικτή η εκτέλεση τοιμεντενέσεων ακόμη και αποστραγγιστικών διατρήσεων. Τέλος, σε περίπτωση συνθλίβοντος πετρώματος, υπάρχει η δυνατότητα υπερδιάτρησης και προχώρησης με αύξηση της δύναμης ώθησης επί των προκατασκευασμένων στοιχείων καθώς επίσης η λίπανση της ασπίδας με μπετονίτη. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προστασία της κεφαλής έναντι καταπτώσεων της οροφής, ενώ βασικό μειονέκτημα αποτελεί η τοποθέτηση της επένδυσης καθώς παρατηρούνται καθυστερήσεις στην εκσκαφή.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

ΣΚΛΗΡΟΣ ΒΡΑΧΟΣ/ HARD ROCK						
Αντοχή (MPa) Rock compressive strength	0-5	5-25	25-50	50-100	100-250	>250
Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) Rock quality designation	πολύ πτωχή very poor 0 – 25	πτωχή poor 25 – 50	μέτρια fair 50 – 75	καλή good 75 – 90	εξαιρετική excellent 90 – 100	
Ταξινόμηση RMR Rock Mass Ratio	πολύ πτωχή very poor < 20	πτωχή poor 21 – 40	μέτρια fair 41 – 60	καλή good 61 – 80	πολύ καλή very good 81 – 100	
Εισροές για 10m μήκους σήραγγας (l/min) Water inflow 10 m tunnel	0	0-10	10-25	25-125	>125	
Δείκτης φθοράς Cerchar (CAI) Abrastiveness (CAI)	όχι πολύ φθοροποιό not very abrasive 0,3 – 0,5	ελαφρώς φθοροποιό slightly abrasive 0,5 – 1	φθοροποιό abrasive 1 – 2	πολύ φθοροποιό very abrasive 2 – 4	εξαιρετικά φθοροποιό extremely abrasive 4 – 6	
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
ο	Δυνατή εφαρμογή/ Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή/ Application critical

Εικόνα 2.14: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής single shield TBM – Σκληρό έδαφος (Από Papouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

ΜΑΛΑΚΟ ΈΔΑΦΟΣ / SOFT SOIL					
Λεπτόκοκκο κλάσμα (<0,06mm) Fine grain fraction (DIN 18195)	<5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	>40 %	
Περσατότητα k (m/s) Permeability (DIN 18130)	πολύ υψηλή very highly permeable > 10 ⁻²	μέση έως υψηλή strongly permeable 10 ⁻³ – 10 ⁻⁴	χαμηλή έως μέση permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	αδιαπέρατο - χαμηλή slightly permeable < 10 ⁻⁶	
Δείκτης Συνεκτικότητας (Ic) Consistency Index (DIN 18122)	πολύ μαλακό - μαλακό pasty 0 – 0,5	σταθερό firm 0,5 – 0,75	σφιγρό stiff 0,75 – 1,0	πολύ σφιγρό Very stiff/ semi-solid 1,0 – 1,25	σκληρό hard 1,25 – 1,5
Πυκνότητα Storage density (DIN 18125)	πυκνά dense	μετριας πυκνά medium dense	χαλαρά loose		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high	
Συντελεστής φθοράς LCPC-index ABR (g/t) Abrastiveness	πολύ χαμηλός very low 0 – 500	χαμηλός low 500 – 1000	μέτρια medium 1000 – 1500	υψηλός high 1500 – 2000	πολύ υψηλός very high > 2000
Ευθραυστότητα LCPC-index BR (%) Breakability	πολύ χαμηλός very low 0 – 25	χαμηλός low 25 – 50	μέτρια medium 50 – 75	υψηλός high 75 – 100	πολύ υψηλός very high > 100

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
ο	Δυνατή εφαρμογή/ Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή/ Application critical

Εικόνα 2.15: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής single shield TBM – Μαλακό έδαφος (Από Papouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

Τα TBM διπλής ασπίδας (double shield TBMs) (εικόνα 2.18) βρίσκουν εφαρμογή σε πετρώματα με εναλλαγές καλής και πτωχής ποιότητας. Συγκεκριμένα, εκτελούν συνεχή λειτουργία με διάτρηση και υποστήριξη μέσω τις εφαρμογής των πεδίων και διακεκομμένη λειτουργία (όπως και στην περίπτωση μονής ασπίδας) με ώθηση από τα προκατασκευασμένα στοιχεία, στην περίπτωση πετρωμάτων καλής και κακής ποιότητας, αντίστοιχα. Στην εικόνα 2.16 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι για TBM διπλής ασπίδας.

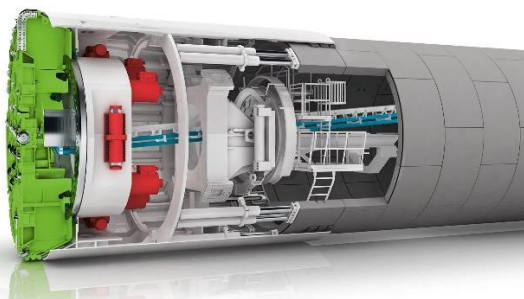
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

ΣΚΛΗΡΟΣ ΒΡΑΧΟΣ/ HARD ROCK						
Αντοχή (MPa) Rock compressive strength	0-5	5-25	25-50	50-100	100-250	>250
	ο	ο	+	+	ο	ο
Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) Rock quality designation	πολύ πτωχή very poor 0 – 25	πτωχή poor 25 – 50	μέτρια fair 50 – 75	καλή good 75 – 90	εξαιρετική excellent 90 – 100	
	ο	+	+	ο	ο	
Ταξινόμηση RMR Rock Mass Ratio	πολύ πτωχή very poor < 20	πτωχή poor 21 – 40	μέτρια fair 41 – 60	καλή good 61 – 80	πολύ καλή very good 81 – 100	
	ο	+	+	ο	ο	
Εισροές για 10m μήκους σήραγγας (l/min) Water inflow 10 m tunnel	0	0-10	10-25	25-125	>125	
	+	+	+	ο	-	
Δείκτης φθοράς Cerchar (CAI) Abrasiveness (CAI)	όχι πολύ φθοροποιό not very abrasive 0,3 – 0,5	ελαφρώς φθοροποιό slightly abrasive 0,5 – 1	φθοροποιό abrasive 1 – 2	πολύ φθοροποιό very abrasive 2 – 4	εξαιρετικά φθοροποιό extremely abrasive 4 – 6	
	+	+	+	ο	ο	
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high		
	+	+	ο	ο		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	
	+	-	-	-	-	

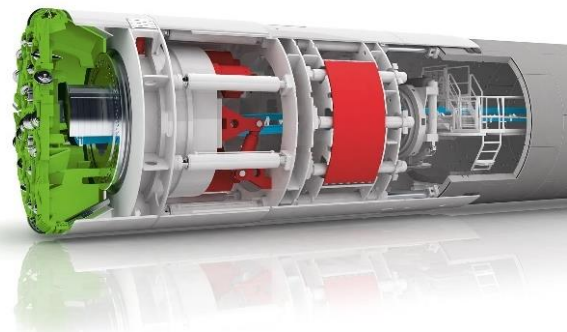
+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
ο	Δυνατή εφαρμογή / Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή / Application critical

Εικόνα 2.16: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής double shield TBM – Σκληρός βράχος (Από Parouli & Marinis 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

Στην περίπτωση συνθλιβόντων πετρωμάτων μειονεκτούν λόγω του μήκους της ασπίδας ωστόσο πλεονεκτούν σε καλής ποιότητας πετρώματα που μπορούν να δεχτούν την πίεση των πεδίων, χάρη στη συνεχή τους λειτουργία. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι στην περίπτωση παγίδευσής τους ελευθερώνονται ευκολότερα καθώς είναι εφικτή η πρόσβαση από το τηλεσκοπικό τμήμα.



Εικόνα 2.17: TBM με μονή ασπίδα (Από herrenknecht.com)



Εικόνα 2.18: TBM με διπλή ασπίδα (Από herrenknecht.com)

Με άσκηση πίεσης επί του μετώπου (κλειστού μετώπου):

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τα μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB), τα μηχανήματα πολφού μπεντονίτη (slurry shield) και τα μηχανήματα συμπιεσμένου αέρα (compressed air). Πιο αναλυτικά:

Τα TBM κλειστού τύπου σήμερα επικρατούν έναντι των υπολοίπων μηχανημάτων κυρίως σε αστικές περιοχές καθώς επιτυγχάνουν πολύ αξιόπιστο έλεγχο του εδάφους και των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά τη

διάνοιξη. Στις ορεινές σήραγγες η χρήση τους περιορίζεται καθώς η δράση τους μπορεί να αντικατασταθεί και από κατάλληλα ρυθμισμένα μηχανήματα ανοιχτού τύπου (Μαρίνος, Β., 2021).

Τα μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) βρίσκουν εφαρμογή σε σχηματισμούς όπου επικρατούν λεπτόκοκκα και μικρής διαπερατότητας γεωυλικά, ωστόσο η εφαρμογή τους δυσχεραίνεται στην περίπτωση αδρόκοκκων σχηματισμών και υψηλών υδροστατικών πιέσεων. Σημαντική παράμετρος είναι η πυκνότητα των εκσκαπτόμενων γεωυλικών στο θάλαμο για την κατάλληλη κατεργασία τους με χημικά πρόσθετα και τη δημιουργία προσωρινής τεχνητής συνοχής σε κοκκώδη υλικά. Στις εικόνες 2.19 και 2.20 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικοί παράμετροι για μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB), για εφαρμογή σε σκληρό βράχο και σε μαλακά εδάφη, αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα μηχανήματα χαρακτηρίζονται από τρεις καταστάσεις λειτουργίας και συγκεκριμένα την ανοιχτή, την κλειστή και την ημι-ανοιχτή διατομή. Το εκσκαπτόμενο υλικό απομακρύνεται από τον πληρωμένο θάλαμο μέσω του περιστρεφόμενου κοχλία με συγκεκριμένο ρυθμό και στη συνέχεια μέσω της μεταφορικής ταινίας ή βαγονέτων, μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους. Η υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής πραγματοποιείται μέσω των εκσκαπτόμενων γεωυλικών στο θάλαμο εκσκαφής. Για την εύρυθμη λειτουργία του μηχανήματος απαιτείται το υλικό αυτό να είναι εύπλαστο γεγονός που επιτυγχάνεται με προσθήκη επιπλέον χημικών πρόσθετων. Ο έλεγχος της ποσότητας που απομακρύνεται σε σχέση με την προχώρηση του μηχανήματος είναι καθοριστικής σημασίας, διότι τα EBM TBMs ασκούν πίεση στο μέτωπο από τις τάσεις που μεταφέρονται από το εκσκαφέν υλικό το οποίο γεμίζει υπό πίεση πλήρως το θάλαμο εργασίας.

Η δράση του μηχανήματος αυτού δυσχεραίνεται σε αρκετές περιπτώσεις. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση ογκολίθων οι κοπτικοί δίσκοι φθείρονται και είναι πιθανή η εμπλοκή του ατέρμονα κοχλία. Επιπλέον, σε μεικτές συνθήκες μετώπου (συνδυασμός βράχου και εδάφους) υπάρχει υψηλότερος κίνδυνος αστάθειας και μεγαλύτερη φθορά της κοπτικής κεφαλής, ενώ ταυτόχρονα στην περίπτωση υψηλού υδροστατικού φορτίου και υψηλή περατότητα δυσχεραίνεται η δημιουργία κατάλληλου πώματος για τον κοχλία του EPB. Τέλος, σε αδρομερές γεωυλικό παρουσία υπόγειων νερών ο έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου είναι περιορισμένος, παρατηρείται μεγαλύτερη φθορά στην κοπτική κεφαλή και δυσκολία στην εισπίεση συμπιεσμένου αέρα, γεγονός που συνεπάγεται διακύμανση και μη γραμμική κατανομή της πίεσης υποστήριξης.

ΣΚΛΗΡΟΣ ΒΡΑΧΟΣ / HARD ROCK						
Αντοχή (MPa) Rock compressive strength	0-5	5-25	25-50	50-100	100-250	>250
Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) Rock quality designation	πολύ πτωχή very poor 0-25	πτωχή poor 25-50	μέτρια fair 50-75	καλή good 75-90	εξαιρετική excellent 90-100	-
Ταξινόμηση RMR Rock Mass Ratio	πολύ πτωχή very poor < 20	πτωχή poor 21-40	μέτρια fair 41-60	καλή good 61-80	πολύ καλή very good 81-100	-
Εκροές για 10m μήκους σήραγγας (l/min) Water inflow 10 m tunnel	0	0-10	10-25	25-125	>125	-
Δείκτης φθοράς Cerchar (CAI) Abrashness (CAI)	όχι πολύ φθοροποιό not very abrasive 0,3-0,5	ελαφρώς φθοροποιό slightly abrasive 0,5-1	φθοροποιό abrasive 1-2	πολύ φθοροποιό very abrasive 2-4	εξαιρετικά φθοροποιό extremely abrasive 4-6	-
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high	-	-
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	-

+	Κύρια πεδία εφαρμογής / Main field of application
o	Δυνατή εφαρμογή / Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή / Application critical

Εικόνα 2.19: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής EPB – Σκληρός βράχος (Από Papouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σηράγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

ΜΑΛΑΚΟ ΕΔΑΦΟΣ / SOFT SOIL					
Λεπτόκοκκο κλάσμα (<0,06mm) Fine grain fraction (DIN 18196)	<5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	>40 %	
Παράτοξη k (m/s) Permeability (DIN 18120)	πολύ υψηλή very highly permeable > 10 ⁻²	μέση έως υψηλή strongly permeable 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	χαμηλή έως μέση medium permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	αδίοπερο - χαμηλή slightly permeable < 10 ⁻⁶	
Δείκτης Συνεπικότητας (Ic) Consistency Index (DIN 18122)	πολύ μαλακό - μαλακό pasty 0 – 0,5	σταθερό firm 0,5 – 0,75	σφιγρό stiff 0,75 – 1,0	πολύ σφιγρό Very stiff/semi-solid 1,0 – 1,25	σκληρό hard 1,25 – 1,5
Πυκνότητα Storage density (DIN 18125)	πυκνό dense	μετριας πυκνό medium dense	χαλαρό loose		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high	
Συντελεστής φθοράς LCPC-index ABR (g/t) Abrasive ness	πολύ χαμηλός very low 0 – 500	χαμηλός low 500 – 1000	μέτρια medium 1000 – 1500	υψηλός high 1500 – 2000	πολύ υψηλός very high > 2000
Ευθραυστότητα LCPC-index BR (%) Breakability	πολύ χαμηλός very low 0 – 25	χαμηλός low 25 – 50	μέτρια medium 50 – 75	υψηλός high 75 – 100	πολύ υψηλός very high > 100

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
ο	Δυνατή εφαρμογή/ Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή/ Application critical

Εικόνα 2.20: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής EPB – Μαλακό έδαφος (Από Parouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

Τα μηχανήματα πολφού μπεντονίτη (slurry shield) είναι κατάλληλα για διάνοιξη σε μη συνεκτικά εδαφικά υλικά, αδρόκοκκους σχηματισμούς ακόμα και σε μεικτές γεωλογικές συνθήκες και εν γένει σε γεωυλικά τα οποία απαιτούν υποστήριξη του μετώπου σε υδαρή μορφή όπου και πραγματοποιείται χρήση αιωρήματος μπεντονίτη, ενώ η εφαρμογή τους δυσχεραίνεται στην περίπτωση εδαφικών σχηματισμών με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων διότι δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός και η ανακύκλωση του πολφού μπεντονίτη. Η ασκούμενη πίεση στο μέτωπο προέρχεται από το αιώρημα πολφού μπεντονίτη και συμπιεσμένου αέρα που βρίσκεται στο θάλαμο της κεφαλής. Συγκεκριμένα, η περιοχή γύρω από το μέτωπο εκσκαφής είναι πλήρως κορεσμένη με το αιώρημα μπεντονίτη ενώ η περιοχή πίσω από το μεταλλικό τοίχο είναι μερικώς πληρωμένη από τον πολφό καλύπτοντας μόλις τα αξονικά τμήματα της κοπτικής κεφαλής και συγχρόνως το αιώρημα κρατείται σε συγκεκριμένη στάθμη μέσω του συμπιεσμένου αέρα. Η παροχή του μπεντονίτη πραγματοποιείται μέσω σωλήνα τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.23. Κατά τη διάνοιξη το εκσκαφέν γεωυλικό αναμειγνύεται με το αιώρημα μπεντονίτη και αντλείται μέσω συστήματος σωληνώσεων και αντλιών προς τις επιφανειακές εγκαταστάσεις διαχωρισμού.

Το μηχάνημα αυτό πλεονεκτεί έναντι του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB). Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση ογκολίθων υπάρχει μικρότερη φθορά στους κοπτικούς δίσκους λόγω της ταυτόχρονης δράσης του συστήματος θραύσης πετρωμάτων στην περιοχή το ανάστροφου τόξου του θαλάμου και του διαποτισμού του γεωυλικού από πολφό μπεντονίτη. Επιπλέον, σε μεικτές συνθήκες βραχώμαζας στην περιοχή του μετώπου (συνδυασμός βράχου και εδάφους), υπάρχει καλύτερος έλεγχος της πίεσης υποστήριξης που συνεπάγεται την καθορισμένη και γραμμική κατανομή της. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση σημαντικών μεταβολών της ποιότητας του γεωυλικού κατά μήκος της χάραξης της διανοιγόμενης σηράγγας είναι εφικτή η διττή λειτουργία του μηχανήματος (είτε EPB είτε slurry) σε ανοιχτό και κλειστό τρόπο. Στην εικόνα 2.21 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι για τα μηχανήματα πολφού μπεντονίτη (slurry shield).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι άργιλοι με υψηλό δείκτη πλαστικότητας δημιουργούν προβλήματα δημιουργίας σφαιρικών συμπακνωμάτων στην περίπτωση των Slurry TBM ενώ απαιτούν κατάλληλες ρυθμίσεις στην περίπτωση των EPB TBM. Επίσης, στην περίπτωση διάνοιξης σε λεπτόκοκκους σχηματισμούς (πχ. ιλύς, άργιλος) απαιτείται η χρήση αιωρήματος μπεντονίτη με προσθήκη ειδικών πολυμερών και άλλων πρόσμικτων που βοηθούν στο διαχωρισμό του εκσκαπόμενου υλικού από το αιώρημα μπεντονίτη. Επιπρόσθετα, σημειώνεται πως το κόστος μεταφοράς των προϊόντων εκσκαφής είναι υψηλότερο (Μαρίνος, Β., 2021). Τέλος, στην εικόνα 2.24 παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής τόσο των όσο και των, ανάλογα με το ποσοστό του διερχόμενου υλικού.

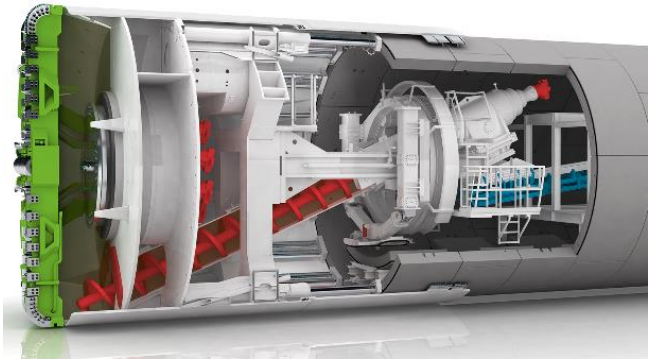
ΜΑΛΑΚΟ ΕΛΑΦΟΣ / SOFT SOIL						
Λεπτόκοκκο κλάσμα (<0,06mm) Fine grain fraction (DIN 18130)	<5 %	5 - 15 %	15 - 40 %	>40 %		
Περσάτοτητα k (m/s) Permeability (DIN 18130)	πολύ υψηλή very highly permeable > 10 ⁻²	μέση έως υψηλή strongly permeable 10 ⁻² - 10 ⁻⁴	χαμηλή έως μέση low permeable 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	αδυσπέρατα - χαμηλή slightly permeable < 10 ⁻⁶		
Δείκτης Συμμεκτικότητας (I _c) Consistency Index (DIN 18122)	πολύ μαλακό - ραλικό pasty 0 - 0,5	σταθερό firm 0,5 - 0,75	σφιγρό stiff 0,75 - 1,0	πολύ σφιγρό Very stiff/semi-solid 1,0 - 1,25	σκληρό hard 1,25 - 1,5	
Πυκνότητα Storage density (DIN 18120)	πυκνό dense	μετρώς πυκνό medium dense	χαλαρό loose			
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high		
Συντελεστής φθοράς LCPC-index ABR (g/t) Abrasive index	πολύ χαμηλός very low 0 - 500	χαμηλός low 500 - 1000	μέτρια medium 1000 - 1500	υψηλός high 1500 - 2000	πολύ υψηλός very high > 2000	
Ευθραυστότητα LCPC-index BR (%) Breakability	πολύ χαμηλός very low 0 - 25	χαμηλός low 25 - 50	μέτρια medium 50 - 75	υψηλός high 75 - 100	πολύ υψηλός very high > 100	
ΣΚΛΗΡΟΣ ΒΡΑΧΟΣ / HARD ROCK						
Αντοχή (MPa) Rock compressive strength	0-5	5-25	25-50	50-100	100-250	>250
Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) Rock quality designation	πολύ πτωχή very poor 0 - 25	πτωχή poor 25 - 50	μέτρια fair 50 - 75	καλή good 75 - 90	εξαιρετική excellent 90 - 100	
Ταξινόμηση RMR Rock Mass Ratio	πολύ πτωχή very poor < 20	πτωχή poor 21 - 40	μέτρια fair 41 - 60	καλή good 61 - 80	πολύ καλή very good 81 - 100	
Εισροές για 10m μήκους σηράγγας (l/min) Water inflow 10m tunnel	0	0-10	10-25	25-125	>125	
Δείκτης φθοράς Cerchar (CAI) Abrasive index (CAI)	όχι πολύ φθοροποιό not very abrasive 0,3 - 0,5	ελαφρώς φθοροποιό slightly abrasive 0,5 - 1	φθοροποιό abrasive 1 - 2	πολύ φθοροποιό very abrasive 2 - 4	εξαιρετικά φθοροποιό extremely abrasive 4 - 6	
Διόγκωση Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high		
Πίεση υποστήριξης (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4	

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
o	Δυνατή εφαρμογή / Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή / Application critical

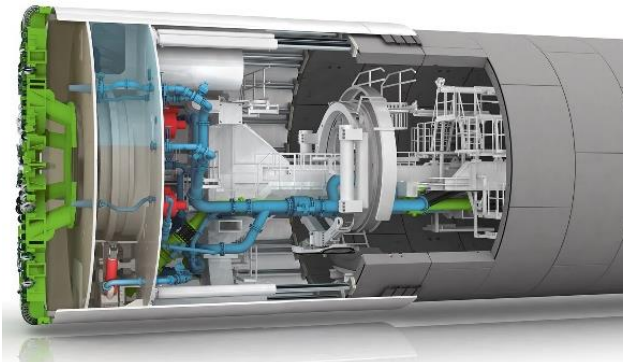
* Basis: recommendations for the estimation of TBM cutters

Εικόνα 2.21: Γεωτεχνικοί παράμετροι επιλογής Slurry Shield (Από Papouli & Marinos 2023, Τροποποιημένο από DAUB 2021)

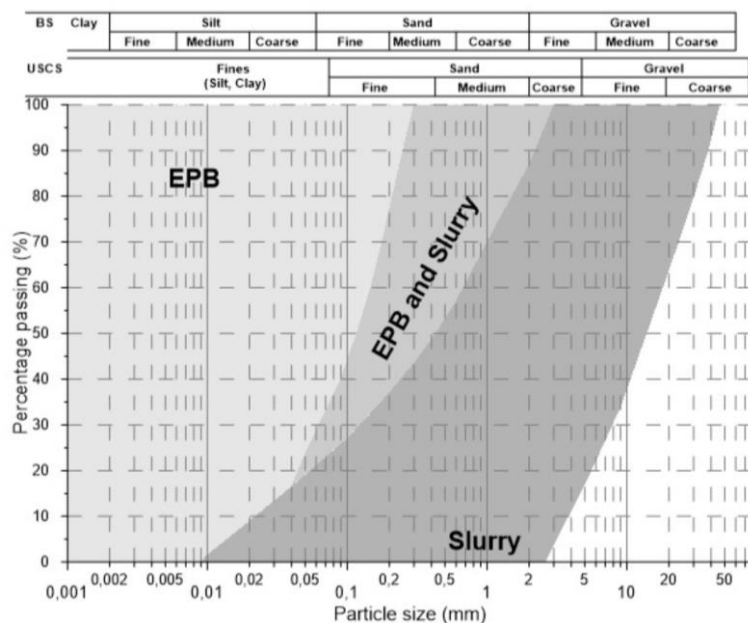
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 2.22: EPB TBM (Από herrenknecht.com)



Εικόνα 2.23: Slurry Shield TBM (Από herrenknecht.com)



Εικόνα 2.24: Πεδίο εφαρμογής EBM και Slurry (Από Langmaack, 2002)

Η οριστικοποίηση της επιλογής και η προσαρμογή των στοιχείων λειτουργίας των προαναφερθέντων μηχανημάτων καθορίζεται από τις επικρατούσες γεωλογικές καταστάσεις και από την παρουσία υπόγειου νερού. Πιο συγκεκριμένα, εναλλαγές σε διαφορετικής ποιότητας γεωυλικό, παρουσία ασθενούς σχηματισμού σε άμεσα γειτονικό περιβάλλον, ζώνες ρηγμάτων, καρστικές καταστάσεις, συνθλιβόντα πετρώματα ή ακόμη και ισχυρά πετρώματα με έντονα φαινόμενα ψαθυρής θραύσης σε μεγάλα βάθη, σε συνδυασμό με την ύπαρξη υδάτων, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του μηχανήματος TBM.

2.2.2.2 Μέθοδος Microtunneling

Η μέθοδος Microtunneling ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία μεθόδων μη κατευθυνόμενης διάτρησης όπως επίσης και η μέθοδος Pipejacking. Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, η οποία είναι ιδανική για αβαθείς σήραγγες (βάθος μικρότερο από 25 m), μια σειρά από υδραυλικά πιστόνια χρησιμοποιούνται για να ωθήσουν προκατασκευασμένα τεμάχια αγωγού εντός του εδάφους. Βασικά της πλεονεκτήματα, είναι η μεγάλη ταχύτητα εγκατάστασης και η δυνατότητα εφαρμογής ακόμα και σε εδάφη παρουσία υδάτων, χάρη στο οποίο είναι εφικτή η αξιοποίησή της για την εγκατάσταση δικτύου αγωγών κάτω από υφιστάμενες

υπέργειες κατασκευές αποφεύγοντας την παρεμπόδιση της εύρυθμης λειτουργία τους. Βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η απαίτηση φρεάτων στην αρχή και στο πέρας της διανοιγόμενης σήραγγας, η τακτική συντήρηση του συνόλου της εγκατάστασης, η σχετικά μικρή ταχύτητα διάνοιξης και το μεγάλο κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού. Ο όρος Microtunneling αφορά σήραγγες μικρής διαμέτρου, οι οποίες διανοίγονται με τηλεκατευθυνόμενα μηχανήματα χωρίς την ανάγκη παρουσίας προσωπικού εντός της σήραγγας (Ράζος, 2012), και συγκεκριμένα σήραγγες με διάμετρο μικρότερη από μια ορισμένη τιμή. Αναλυτικότερα, η εσωτερική διάμετρος του αγωγού είναι μικρότερη από 0.90 m, ενώ στον ελληνικό χώρο η μικρότερη εσωτερική διάμετρος αγωγού που να επιτρέπει την εργασία ανθρώπων στο εσωτερικό του ανέρχεται στα 1.20 m. Με την πάροδο των ετών, η μέθοδος microtunneling χρησιμοποιείται επίσης για τη διάνοιξη σηράγγων διαμέτρου 2.00 και 3.00 m (Wilkinson, D., 1999) καθώς και για σήραγγες σε αρκετά μεγαλύτερα βάθη (>60 m), ενώ δεν απαιτεί την κατασκευή φρεατίων στην αρχή και το πέρας της σήραγγας, αλλά αντιθέτως μόνο ενός φρεατίου στην αρχή της, γεγονός που εξοικονομεί χώρο, χρόνο και χρήματα. Τέλος, βασικό πλεονέκτημα της είναι η δυνατότητα διάνοιξης σηράγγων μεγαλύτερου μήκους από εκείνες της μεθόδου pipejacking, ωστόσο μειονεκτεί ως προς το υψηλό κόστος σε εξειδικευμένο εξοπλισμό και τις διαταραχές στις υπέργειες δραστηριότητες, λόγω της υποχρεωτικής διάνοιξης πιλοτικής σήραγγας.

Συνοψίζοντας, τόσο η μέθοδος Pipejacking και όσο και η μέθοδος Microtunneling παρουσιάζουν ορισμένες ειδοποιούς διαφορές. Πιο αναλυτικά, η μεν πρώτη πραγματοποιείται με έμπηξη σωλήνων στο έδαφος ενώ η δε δεύτερη με διάνοιξη σήραγγας αρχικά και έπειτα με έμπηξη των σωλήνων. Επιπλέον, στην περίπτωση της μεθόδου Microtunneling η διανοιγόμενη διάμετρος είναι μεγαλύτερη όπως επίσης και το συνολικό μήκος της διάνοιξης. Ως προς το κόστος η μέθοδος Microtunneling είναι ακριβότερη ωστόσο αυτό εξαρτάται και από την εκάστοτε περίπτωση. Τέλος, η όχληση στην επιφάνεια είναι μηδενική, σε αντίθεση με την μέθοδο Pipe jacking όπου απαιτείται μεγαλύτερη έκταση εγκατάστασης στην επιφάνεια καθώς και εκσκαφή διαδοχικών φρεατίων.

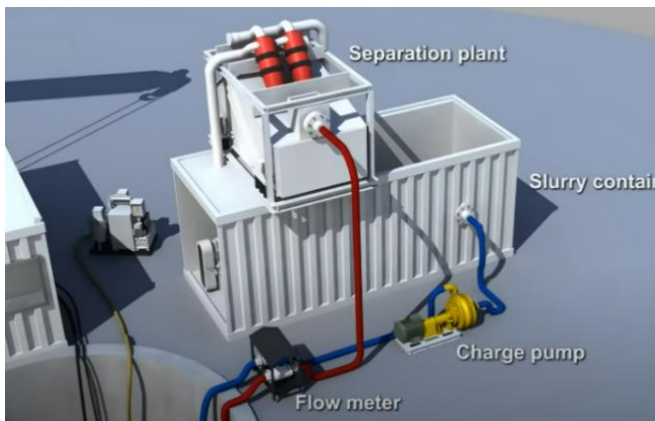
Αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή των προκατασκευασμένων στοιχείων. Το θέμα αυτό μελετήθηκε από τους Charman και Ichioka (1999) και τους Rohner and Hoch (2010) προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή λόγω της ενδεχομένης υψηλής συγκέντρωσης τάσεων κατά την ώθησή τους και η επίδραση της χρήσης λιπαντικών (Shou et al., 2010).

Οι μηχανές διάνοιξης που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο microtunneling είναι αρκετά παρόμοιες με τα TBMs αλλά σε μικρότερη κλίμακα (MTBMs) και συγκεκριμένα ποικίλουν με μήκη από 0.60 έως 1.50 m. Συνήθως ο χειριστής ελέγχει τη μηχανή από ένα δωμάτιο ελέγχου στην επιφάνεια του εδάφους. Οι περισσότερες μηχανές επίσης έχουν βιντεοκάμερες μέσω των οποίων είναι εφικτός ο έλεγχος των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται στον άξονα ανύψωσης και στις εγκαταστάσεις χωρισμού. Ο χειριστής ελέγχει το MTBM στο φρέαρ εκκίνησης από την ασφάλεια του δωματίου ελέγχου που είναι συνήθως τοποθετημένο στην επιφάνεια του εδάφους, δίπλα στο φρέαρ εκκίνησης, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 2.25. Στη μέθοδο αυτή, η προώθηση της διατρητικής μηχανής πραγματοποιείται μέσω των σωλήνων που είναι τοποθετημένες στο πίσω μέρος της και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου φθάσει η διατρητική μηχανή στο φρέαρ άφιξης. Στην εικόνα 2.26 φαίνεται η διάταξη του φρέατος έναρξης και διακρίνεται ο θάλαμος ελέγχου της διατρητικής μηχανής (control container).

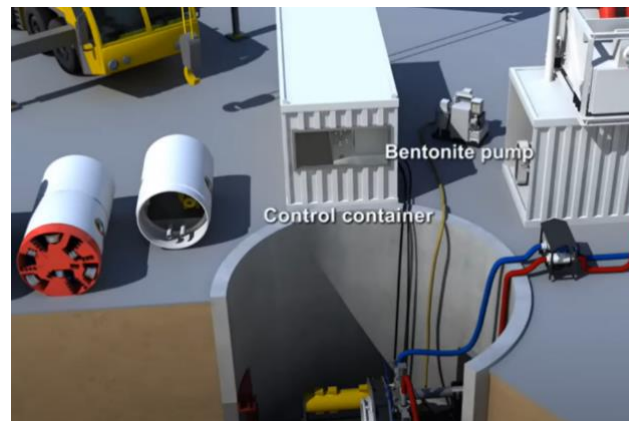
Η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του σωλήνα του διατρητικού μηχανήματος και του εδάφους ελαχιστοποιείται μέσω της υπερκοπής που συνεπάγεται αύξηση της απόστασης μεταξύ της εσωτερικής άκρης της σήραγγας και της εξωτερικής άκρης του σωλήνα καθώς και μέσω της χρήσης λιπαντικού, όπως πηλός μπεντονίτη, το οποίο εγχέεται στο προαναφερθέν κενό. Εν προκειμένω το λιπαντικό αποκτά και

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

υποστηρικτική δράση καθώς αποτρέπει το χάσμα από την κατάρρευση. Παρόλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις το μέγεθος της δύναμης τριβής παραμένει αρκετά μεγάλο, γεγονός που συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις στην ασκούμενη δύναμη για την προώθηση του διατρητικού μηχανήματος. Κατ' επέκταση, απαιτείται η ύπαρξη μεγάλου φρέατος εκκίνησης (Εικόνα 2.27) κατάλληλο ώστε να περιέχει τις κατάλληλες υδραυλικές συσκευές μέσω των οποίων θα παραχθούν αυτές οι δυνάμεις. Η διάνοιξη με τη μέθοδο microtunneling πραγματοποιείται μεταξύ δύο φρεάτων. Εκτός από το φρέαρ εκκίνησης, τα μικρότερα φρέατα αποκαλούμενα «ενδιάμεσα φρέατα», μπορούν να παρεμβληθούν μεταξύ των σωλήνων της σήραγγας, χωρίζοντας τον κάθε ένα σε δύο τμήματα. Η τριβή στα τμήματα μεταξύ του ενδιάμεσου φρέατος και της εισόδου της σήραγγας συμβάλλει στην αντίσταση του σωλήνα έναντι ολίσθησης προς τα πίσω. Έτσι, ενώ ο σωλήνας της γραμμής πίσω από το ενδιάμεσο φρέαρ δεν κινείται, τα τμήματα εκείνα μπροστά από αυτό λαμβάνουν την πρόσθετη δύναμη ώθησης (Σίββας, 2014).



Εικόνα 2.25: Σκαριφηματική απεικόνιση μεθόδου Microtunneling (Από mtsp perforator.com)



Εικόνα 2.26: Σκαριφηματική απεικόνιση μεθόδου Microtunneling (Από geostructures.com)

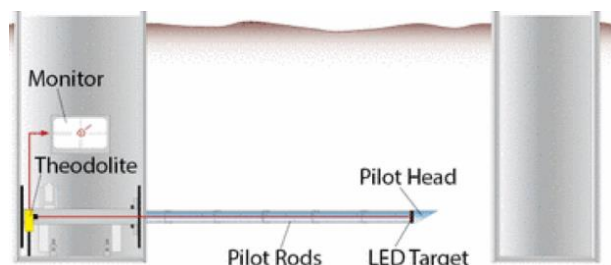
Στη συνέχεια, με κριτήριο τον τρόπο απομάκρυνσης των αδρανών διακρίνονται τρεις τύποι της μεθόδου microtunneling και συγκεκριμένα το συστημα πιλοτικού σωλήνα pilot Tube micro-Tunneling (PTMT), το σύστημα με ατέρμονο κοχλία (auger) και το σύστημα με μηχανήμα πίεσης πολφού (slurry) (Γκούτης κ.ά.,2021).



Εικόνα 2.27: MicroTBM στο φρέατο εισόδου (Από sika.com)

Πιο αναλυτικά, κατά τη μέθοδο διάτρησης με πιλοτικό σωλήνα PTMT (Εικόνα 2.28), διανοίγεται αρχικά μια πιλοτική σήραγγα μεταξύ δύο φρεατίων, του φρεατίου εργασίας και του φρεατίου άφιξης, χάρη στην ώθηση

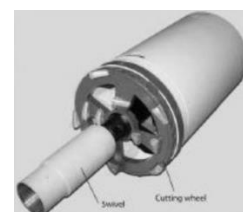
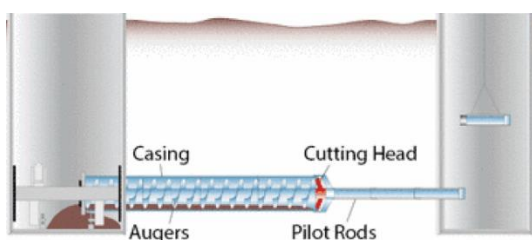
και στην περιστροφή εντός του εδάφους των στελεχών της διατρητικής στήλης. Η κεφαλή (Εικόνα 2.29) του πιλοτικού αγωγού φέρει κατάλληλο εξάρτημα χάρη στο οποίο είναι εφικτή η αλλαγή της κατεύθυνσής της. Η στήλη αυτή πρακτικά αποτελεί τον οδηγό τον οποίο θα ακολουθήσουν οι σωλήνες της τελικής επένδυσης. Η καθοδήγηση αυτών των πιλοτικών στελεχών πραγματοποιείται με συστήματα laser.



Εικόνα 2.28: Πιλοτική διάτρηση PTMT (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Εικόνα 2.29: Κεφαλή πιλοτικής διάτρησης PTMT (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η διεύρυνση της πιλοτικής διάτρησης και συγκεκριμένα η αντικατάσταση της πιλοτικής κεφαλής από την κεφαλή διεύρυνσης, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.30. Διακρίνονται δύο είδη κεφαλών διερεύνησης – οι παθητικές (Εικόνα 2.31) και οι ενεργητικές (Εικόνα 2.32). Οι παθητικές κεφαλές συνδέουν μέσω ισχυρών χαλύβδινων βραχιόνων τα στελέχη της πιλοτικής διάτρησης με τη σωλήνωση προστασίας (casing tubes), η οποία περιέχει και τους ατέρμονες κοχλίες, εντός των οποίων υπάρχει ειδικό κοπτικό εργαλείο που αναμοχλεύει και χαλαρώνει το έδαφος το οποίο στη συνέχεια οδηγείται εντός της σωλήνωσης χάρη στην κίνηση των κοχλίων και έπειτα στο φρέαρ εργασίας για την απομάκρυνσή του. Οι ενεργητικές κεφαλές σχεδιάστηκαν για τη διάνοιξη σε σκληρότερα και πυκνότερα εδάφη. Η σύνδεση μιας ενεργητικής κεφαλής με τα στελέχη της πιλοτικής διατρητικής στήλης πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης διάταξης ώστε να μην μεταφέρεται η περιστροφή από την κοπτική κεφαλή προς τα στελέχη. Η κεφαλή εκσκάπτει πλήρως το έδαφος και το οδηγεί μέσω του κοχλία στο φρεάτιο εργασίας. Τέλος, οι σωλήνες προστασίας εξωθούνται προς το φρεάτιο άφιξης και απομακρύνονται προς την επιφάνεια, ενώ αντικαθίστανται από τους σωλήνες τελικής επένδυσης.



Εικόνα 2.30: Διεύρυνση της πιλοτικής διάτρησης (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Εικόνα 2.31: παθητική κεφαλή διεύρυνσης (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Εικόνα 2.32: ενεργητική κεφαλή διεύρυνσης (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Η μέθοδος διάτρησης με ατέρμονα κοχλία είναι η πιο απλή μέθοδος εκσκαφής και περιλαμβάνει σύνολο κοχλίων εντός ενός μεταλλικού αγωγού που αποτελεί την τελική επένδυση της διάτρησης, στο εμπρόσθιο τμήμα της οποίας τοποθετείται ειδική κοπτική κεφαλή. Στο φρέαρ εργασίας είναι εγκατεστημένο κατάλληλο μηχάνημα που ωθεί το σωλήνα και τους κοχλίες και χάρη στη δεξιόστροφη περιστροφική του κίνηση απομακρύνονται τα εκσκαμμένα υλικά. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία ελέγχου της πίεσης στο μέτωπο γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για σκληρά εδάφη και εδάφη με υψηλές υδροστατικές

δυνάμεις. Τέλος, είναι εφικτή η δυνατότητα κατεύθυνσης της εκσκαφής χάρη στην τεχνολογία laser και ραδιοκυμάτων.



Εικόνα 2.33: Κεφαλή μηχανήματος ατέρμονα κοχλία κατά την τοποθέτηση (Από Γκούτης κ.ά.,2021)



Εικόνα 2.34: Κεφαλή μηχανήματος ατέρμονα κοχλία κατά την εγκατάσταση (Από Γκούτης κ.ά.,2021)

Η μέθοδος διάτρησης με μηχανήμα πίεσης πολφού είναι η πλέον κατάλληλη σε περιπτώσεις δύσκολων εδαφικών συνθηκών και υψηλών φορτίων νερού, όπου οι προαναφερθείσες τεχνικές είναι αδύνατον να εφαρμοστούν. Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα αιώρημα μπεντονίτη με νερό ή ένα ειδικά σχεδιασμένο τεχνητό πολυμερές με νερό, που είναι αποθηκευμένο σε επιφανειακές κατάλληλα στεγανές δεξαμενές. Χάρη στον πολφό παρέχεται η κατάλληλη υποστήριξη στο μέτωπο της εκσκαφής και πραγματοποιείται η μεταφορά των εκσκαπτόμενων προϊόντων προς την επιφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα, το προαναφερθέν αιώρημα αντλείται έως τον κοπτικό θάλαμο μέσω κατάλληλων σωλήνων εντός της μικροσήραγγας και τίθεται υπό την εκάστοτε απαιτούμενη πίεση ώστε να συμβάλει στην υποστήριξη του διανοιγόμενου μετώπου. Στο θάλαμο κοπής, ο πολφός αναμειγνύεται με το εκσκαπτόμενο έδαφος και συμβάλει στην απομάκρυνσή του. Τέλος, μέσω κατάλληλου θραυστήρα εξασφαλίζει το κατάλληλο μέγεθος των τεμαχίων που εισέρχονται στη γραμμή επιστρεφόμενου υλικού.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η συνεχής λειτουργία μέχρι την πλήρη ώθηση ενός προκατασκευασμένου σωλήνα, γεγονός που αιτιολογεί την υψηλή της απόδοση συγκριτικά με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Αξίζει να σημειωθεί πως σε συμβατικές μεθόδους εκσκαφής η διαδικασία αυτή είναι διακοπτόμενη και διαρκεί περισσότερο καθώς αποτελείται από 6-9 κύκλους εκσκαφής καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει διαδικασίες ανέλκυσης των προϊόντων εκσκαφής στην επιφάνεια του φρεατίου και τη μεταφορά του κάδου μεταφοράς στη θέση φόρτωσης.

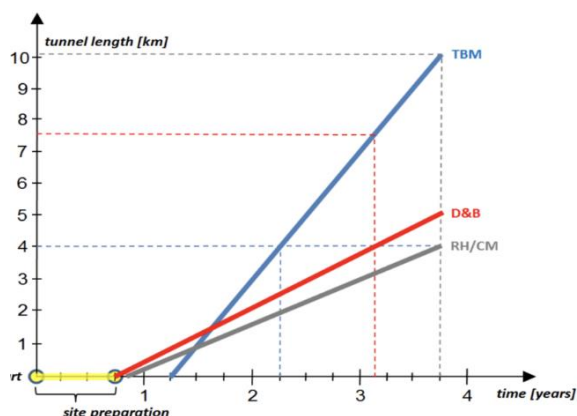
Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη διήθηση του αιωρήματος στο μέτωπο εκσκαφής και συγκεκριμένα στην επίδραση αυτής στην ευστάθειά του. Πιο αναλυτικά, όπως έχει αποδειχθεί από επιστημονικές έρευνες, η διήθηση μειώνει την αποτελεσματικότητα στην υποστήριξη. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση χαλαρής άμμου το διηθημένο αιώρημα ενδέχεται να προκαλέσει υπερβολικές πιέσεις πόρων και υγροποίηση του εδάφους, γεγονός που κρίνεται καταστροφικό για τη διαδικασία της διάνοιξης (Broere, W. 2015). Αυτό επηρεάζει σημαντικά την απαιτούμενη ελάχιστη και μέγιστη απαιτούμενη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής.

Δύο ενδεικτικά παραδείγματα διάνοιξης σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο microtunneling είναι αυτά της περίπτωσης Bisagno στην Ιταλία και της Thalwil στην Αυστρία. Η σήραγγα εκτροπής Bisagno είναι πεταλοειδούς διατομής, διαμέτρου 9.5 m και συνολικού μήκους 6.65 km. Διαθέτει τέσσερα σημεία εισροών και η έξοδος της είναι στη θάλασσα Tirreno επιτυγχάνοντας έτσι την ελαχιστοποίηση των υπολειμματικών

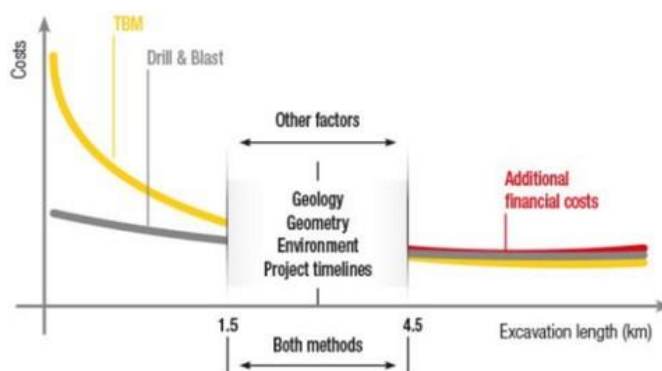
πλημμυρών που έχουν τη δυνατότητα εναπόθεσης ιζημάτων στη σιράγγα. Αντίστοιχα, η σιράγγα εκτροπής Thalwil έχει διάμετρο 6.60 m και συνολικό μήκος περί τα 2 km. Εκτρέπει την πλημμύρα από τον ποταμό Sihl προς τη λίμνη της Ζυρίχης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός του έργου εισόδου ο οποίος έχει προκύψει κατόπιν βελτιστοποίησης βάσει της ροής στην κατασκευή εξόδου, χάρη στον οποίο ελαχιστοποιείται και πάλι η απόθεση ιζημάτων στο εσωτερικό της σιράγγας (Nugroho, J., κ.ά., 2022).

2.2.3 Σύγκριση συμβατικών και μηχανικών μεθόδων διάνοιξης

Οι μέθοδοι μηχανικής εκσκαφής πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σιράγγων, υπό ορισμένες συνθήκες. Πιο αναλυτικά, σε ομοιογενείς γεωτεχνικές συνθήκες επιτυγχάνουν ταχύτερους ρυθμούς διάνοιξης (Εικόνα 2.35), σε περιπτώσεις μεγάλου μήκους σιράγγων επιτυγχάνουν μικρότερο λειτουργικό κόστος και περιορισμένο κόστος προσωπικού (Εικόνα 2.36), ωστόσο χαρακτηρίζονται από υψηλά κόστη αρχικής επένδυσης. Επιπλέον, ενώ υπάρχουν εκσκαπτικά μηχανήματα πρακτικά για όλους τους τύπους εδαφών, παρατηρείται σημαντικό πρόβλημα σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενων γεωτεχνικών συνθηκών, όπου αυξάνεται υπερβολικά το κόστος επένδυσης των μηχανημάτων αυτών. Τέλος, η ευστάθεια του μετώπου ελέγχεται καλύτερα με εφαρμογή των μεθόδων μηχανικής σε κρίσιμες περιπτώσεις, όπως λ.χ. σε εδάφη μικρής αντοχής, χάρη στη δυνατότητα εισροής νερού και άσκησης πίεσης μέσω της κεφαλής.



Εικόνα 2.35: Χρονική σύγκριση μεθόδων συμβατικής, εκμηχανισμένης διάνοιξης σιράγγων και ανατινάξεων (Από robbinstbm.com)



Εικόνα 2.36: Οικονομική σύγκριση μεθόδων συμβατικής, εκμηχανισμένης διάνοιξης σιράγγων και ανατινάξεων (Από robbinstbm.com)

2.3 Κατηγορίες φραγμάτων

Η κατασκευή ενός φράγματος αποσκοπεί στο σχηματισμό ενός ταμιευτήρα που ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί για καταναλωτικές χρήσεις (ύδρευση, άρδευση), αποθήκευση και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, αντιπλημμυρική προστασία, συγκράτηση φερτών ακόμα και για έμμεσα οφέλη τουριστικής αξιοποίησης. Τα φράγματα διακρίνονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, σε φράγματα από σκυρόδεμα και σε γεωφράγματα.

Τα φράγματα από σκυρόδεμα ανάλογα με τον τρόπο ανάληψης των φορτίων διακρίνονται σε φράγματα βαρύτητας, αντηριδωτά και τοξωτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα φράγματα σκυροδέματος είναι επί της ουσίας φράγματα βαρύτητας με εξαίρεση τα τοξωτά και τα αντηριδωτά, τα οποία μεταφέρουν τις υδροστατικές δυνάμεις στα πλευρικά αντερείσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φράγματα βαρύτητας ονομάζονται έτσι λόγω του καθοριστικού ρόλου που διαδραματίζει το ίδιο βάρος τους στη λειτουργία τους.

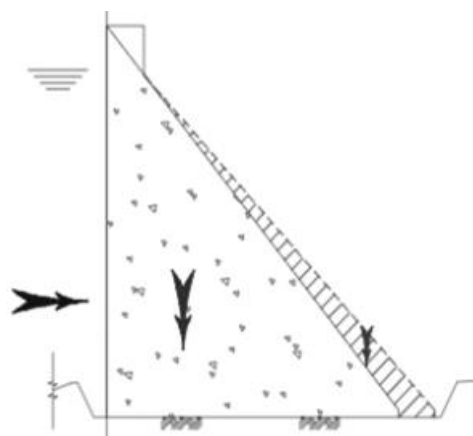
Διακρίνονται σε συμπαγή, που διαχωρίζονται σε λιθόκτιστα, συμβατικού δονούμενου σκυροδέματος (CVC), κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC) και αξονοσυμμετρικά κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (ΑΚΣΕ). Τα φράγματα βαρύτητας αντιστέκονται στα φορτία που τα καταπονούν και που τείνουν να τα μετακινήσουν ή ακόμη και να τα ανατρέψουν, λόγω ανάπτυξης δυνάμεων τριβής και συνάφειας του υλικού του φράγματος με τη θεμελίωσή του, χάρη στο ίδιο βάρος τους.

Τα γεωφράγματα ανάλογα με τα υλικά κατασκευής διακρίνονται σε χωμάτινα (embankment dams) που αποτελούνται κυρίως από εδαφικά υλικά, αμμοχάλικα ποταμών και πλευρικά κορήματα και σε λιθόρριπτα (rockfill dams) τα οποία αποτελούνται ως επί το πλείστον από προϊόντα εκσκαφής λατομείου και προϊόντα εκσκαφών βράχου. Επιπλέον, τα χωμάτινα φράγματα διακρίνονται σε ομοιογενή και σε διαζωνισμένα ενώ τα λιθόρριπτα ενδέχεται να φέρουν αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα και επιπλέον η ανάντη στεγάνωση τους να υλοποιείται με πλάκα σκυροδέματος ή μεμβράνη. (Ευστρατιάδης Α., 2021)

2.3.1 Φράγματα σκυροδέματος

Βασικές απαιτήσεις κατά την κατασκευή ενός φράγματος βαρύτητας (Εικόνα 2.37) είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου και η μείωση κόστους, μέσω της κατασκευής απότομων παρειών του σώματος του φράγματος, η επίτευξη υψηλότερης αντοχής του υλικού σε θλίψη και σε εφελκυσμό σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες τάσεις και τέλος η στεγανότητα η οποία εξασφαλίζεται μέσω τόσο της χρήσης υλικών χαμηλής διαπερατότητας όσο και της ελαχιστοποίησης των ρωγμών (Ευστρατιάδης Α., 2021).

Στην περίπτωση των φραγμάτων βαρύτητας απαιτείται υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο (κονίες) ώστε να επιτυγχάνεται αντοχή σε εφελκυσμό και χαμηλή διαπερατότητα του σώματος του φράγματος. Ωστόσο, η υψηλή αυτή περιεκτικότητα σε κονίες συνεπάγεται υψηλό κόστος ανά κυβικό μέτρο καθώς και σημαντική έκλυση θερμότητας, μειονεκτήματα που αντιμετωπίζονται μέσω της τεχνολογίας των μονόλιθων στην περίπτωση φραγμάτων συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος και των αρμών σε φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος, τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντικά περιορισμένο κόστος και χρόνο κατασκευής.



Εικόνα 2.37: Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας (Από Κύρου, Κ., 2022)



Εικόνα 2.38: Φράγμα Μαραθώνα (Από en.wikipedia.org)

2.3.1.1 Φράγματα συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος (CVC : Conventionally Vibrated Concrete)

Τα φράγματα συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος (CVC), διακρίνονται σε τοξωτά και σε αντηριδωτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα η συγκεκριμένη κατηγορία φραγμάτων είναι αρκετά σπάνια λόγω του μεγάλου κόστους κατασκευής καθώς και των ακατάλληλων βραχομαζών θεμελίωσής τους.

Ως βασικό υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται το άοπλο σκυρόδεμα που χαρακτηρίζεται από χονδρόκοκκα αδρανή μεγάλου όγκου και μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Τα φράγματα αυτά εξασφαλίζουν χαμηλή υδατοπερατότητα με την προϋπόθεση κατάλληλου σχεδιασμού και συντήρησης σκυροδέματος. Κατά τη διαδικασία της κατασκευής πραγματοποιείται η διαμόρφωση ανεξάρτητων μονόλιθων που συνδέονται με κλείδες και διαχωρίζονται με κατακόρυφους αρμούς ενώ ανάλογα με την τεχνική κατασκευής δημιουργούνται και διαμήκεις αρμοί οι οποίοι αποτελούν τις ασθενείς περιοχές του φράγματος. Βασικός απαιτούμενος έλεγχος στα φράγματα τέτοιου τύπου είναι ο έλεγχος των επιπτώσεων της εξώθερμης αντίδρασης του τσιμέντου. Ωστόσο, η εφαρμογή των φραγμάτων CVC έχει διακοπεί στην πράξη λόγω υψηλού κόστους, μεγάλου χρόνου κατασκευής και αυξημένων απαιτήσεων σε εξειδικευμένο εξοπλισμό και εργατικό δυναμικό (Ευστρατιάδης Α., 2021).

Τα τοξωτά φράγματα (Εικόνα 2.39) είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και φέρουν τη μορφή τόξου ή ασπίδας, ενώ η υδροστατική πίεση ενισχύει την κατασκευή και την ωθεί προς τη βάση ή ακόμα και προς τις παρειές. Πιο αναλυτικά παρατηρείται η μεταφορά των φορτίσεων στα αντερείσματα ενώ απουσιάζει η οποιαδήποτε συνεισφορά του ίδιου βάρους στην ανάληψη των φορτίων. Ιδανικά αυτός ο τύπος φράγματος ενδείκνυται για περιπτώσεις στενών κοιλάδων τύπου V με απότομα πρανή και συμπαγή βραχώδη πετρώματα. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η οικονομικότητα και η ευκολία στην κατασκευή λόγω της λεπτότητας του σώματος τους, καθώς και η μεγαλύτερη αντοχή στην αστοχία λόγω υπερπήδησης συγκριτικά με τις άλλες μορφές φραγμάτων. Ωστόσο, εμφανίζουν υψηλές απαιτήσεις βραχώδους υποβάθρου και εξαιρετικά εξειδικευμένο προσωπικό (Ευστρατιάδης κ.ά., 2021).

Τα αντηριδωτά φράγματα (Εικόνα 2.40) είναι επίσης κατασκευασμένα από σκυρόδεμα, και το σώμα τους μπορεί να είναι ίσιο ή καμπύλο. Τα περισσότερα φράγματα αυτού του τύπου είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάρη στο ίδιο βάρος τους ωθούνται προς το έδαφος, μεταβιβάζοντας τις υδροστατικές δυνάμεις σε αυτό δια μέσου των αντηρίδων, οι οποίες ενισχύουν την αντίστασή τους σε ανατροπή. Ο συγκεκριμένος τύπος φράγματος ενδείκνυται για την περίπτωση μεγάλων κοιλάδων με συμπαγή βραχώμαζα. Συγκριτικά με τα συμβατικά φράγματα βαρύτητας είναι πιο οικονομικά καθώς απαιτούν λιγότερο όγκο σκυροδέματος (30%-50%), έχουν μικρότερες απαιτήσεις ως προς την ίδια τη θεμελίωση και τα έργα αποστράγγισης αυτής, παρουσιάζουν μικρότερες ανωστικές πιέσεις χάρη στη στήριξη των αντηρίδων και παρέχουν τη δυνατότητα τοποθέτησης του σταθμού παραγωγής μεταξύ των αυτών. Ωστόσο, η κατασκευή τους απαιτεί έντονη χρήση ξυλοτύπων και μεταλλότυπων και εξειδικευμένο προσωπικό, ενώ η συντήρησή τους ομοίως χαρακτηρίζεται από μεγάλα κόστη (Ευστρατιάδης Α., 2021).



Εικόνα 2.39: Τοξωτό φράγμα Morrow Point (Από en.wikipedia.org)



Εικόνα 2.40: Αντηριδωτό φράγμα Roselend (Από en.wikipedia.org)

2.3.1.2 Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC : Roller Compacted Concrete)

Τα φράγματα που είναι κατασκευασμένα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, διεθνώς γνωστά και ως φράγματα RCC, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα κατασκευής (Εικόνα 2.41). Βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η δυνατότητα κατασκευής τους χωρίς χρήση ξυλοτύπων και οπλισμού, η αδιαπέρατη φύση του σώματος του φράγματος, η ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων ψύξης και δόνησης του συμβατικού σκυροδέματος, καθώς και η δυνατότητα χρήσης παραπροϊόντων της βιομηχανίας, όπως ιπτάμενες τέφρες, σκωρίες ή φυσικές ποζολάνες με ταυτόχρονη μείωση της χρήσης τσιμέντου.

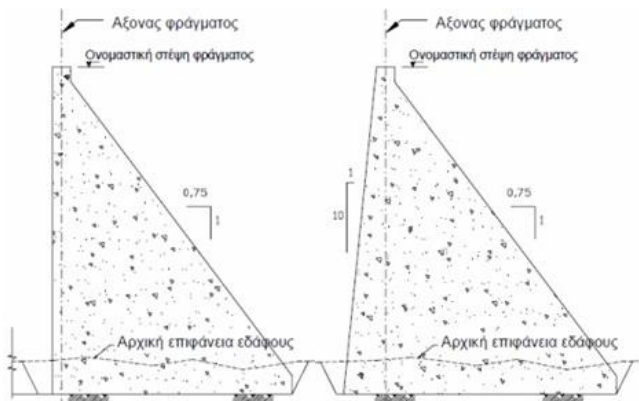
Πιο αναλυτικά, η κατασκευαστική λογική τους βασίζεται στη χρήση εξοπλισμού και μεθόδων που εφαρμόζονται σε χωματουργικές εργασίες, στη συνεχή μεταφορά υλικών με μεταφορικές ταινίες, στη διάστρωση σε παρα-οριζόντιες στρώσεις πάχους 30 cm και στη συμπύκνωση των υλικών κατασκευής με δονητικό κυλινδρο-συμπυκνωτή, γεγονός που τα χαρακτηρίζει με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα κατασκευής, όπως αποδεικνύεται και με τα ενδεικτικά παραδείγματα του πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές περιπτώσεις φραγμάτων κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC) βάσει του χρόνου κατασκευής (Από Ευστρατιάδης, Α., 2021)

Όνομα φράγματος	Χώρα	Ύψος (m)	Όγκος RCC (m ³)	Χρόνος κατασκευής (μήνες)	Μέγιστη ημερήσια κατασκευή (m ³)
Olivenhain	Αμερική	97	1070	8.8	12250
U. Stillwater	Αμερική	91	1125	9	8415
Ralco	Χιλή	155	1596	20.9	6860

Τα φράγματα αυτά διακρίνονται σε φράγματα υψηλής περιεκτικότητας σε κονίες (High-Paste) και σε φράγματα ισχνού RCC. Η ανάντη παρειά των φραγμάτων High-Paste RCC διαμορφώνεται κατακόρυφη ή τεθλασμένη και δεν απαιτεί στεγάνωση λόγω της αδιαπερατότητας του σώματος του φράγματος. Η διάστρωση και η συμπύκνωση κατά την κατασκευαστική διαδικασία εκτελούνται χωρίς διακοπή σε στρώσεις των 30 cm. Επιπρόσθετα, παρατηρείται αντοχή σε ισχυρές σεισμικές καταπονήσεις λόγω της δυνατότητας ανάλυσης εφελκυστικών τάσεων. Βασικές απαιτήσεις στην περίπτωση του συγκεκριμένου τύπου φράγματος, αποτελούν ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος των υλικών και των μεθόδων κατασκευής, η λεπτομερής θερμική

μελέτη για τον προσδιορισμό του πλήθους των αρμών συστολής-διαστολής καθώς και η επιβολή περιορισμών στη θερμοκρασία του μίγματος (Ευστρατιάδης Α., 2021). Στον αντίποδα, τα φράγματα ισχνού RCC συνήθως διαμορφώνονται σε συμμετρική διατομή ενώ απαιτούν την τοποθέτηση στεγανωτικού στοιχείου ανάντη. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω θερμοκρασίας είναι μικρότερες συγκριτικά με εκείνες του high paste RCC λόγω μικρότερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Τέλος το ισχνό RCC είναι λιγότερο ψαθυρό περιορίζοντας κατά αυτό τον τρόπο τον κίνδυνο ρηγμάτωσης (Κούμουλος και Κοργιαλός, 2008). Τέλος, τα φράγματα βαρύτητας από λιθόδεμα, σκυρόδεμα RCC και ισχνό RCC σχεδιάζονται με κατακόρυφη ή παρακατακόρυφη την ανάντη παρειά, ενώ η κατάντη παρειά σχηματίζεται με κλίση περίπου ίση με 0.75:1.



Εικόνα 2.41: Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Από Μουτάφης, Ν.Ι., Σημειώσεις μαθήματος «Υδραυλικές κατασκευές – Φράγματα», Ε.Μ.Π., 2014)



Εικόνα 2.42: Φράγμα Πλατανόβρυσης (Από poseidongreece.com)

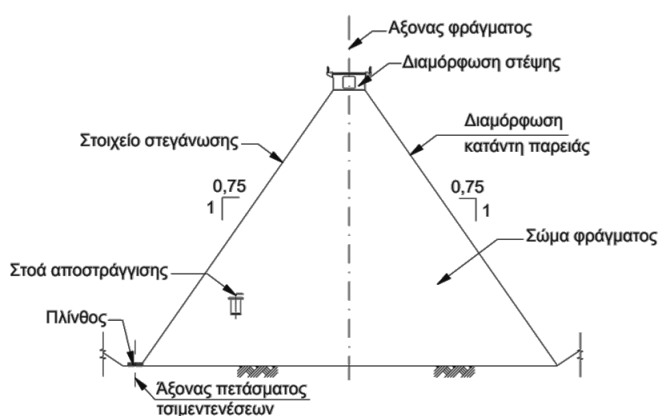
Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των φραγμάτων RCC είναι η ικανότητα παραλαβής σημαντικών εφελκυστικών τάσεων, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητάς τους σε υδραυλικές κονίες. Πιο αναλυτικά, ακόμα και στην περίπτωση χαμηλής περιεκτικότητας διαθέτουν μεγάλη διατομή και μεγάλη επιφάνεια θεμελίωσης οπότε και δεν παρατηρείται ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων ενώ επίσης είναι εφικτή η θεμελίωση ακόμη και σε μέτριας ποιότητας βράχους.

Επιπρόσθετα, τόσο στην περίπτωση υψηλής όσο και στην περίπτωση χαμηλής περιεκτικότητας σε υδραυλικές κονίες, είναι εφικτή η ενσωμάτωση του υπερχειλιστή στο φράγμα, γεγονός που συνεπάγεται σημαντική οικονομική και λειτουργική βελτίωση στο έργο, καθώς η κατασκευαστική διαδικασία απαλλάσσεται από πρόσθετες εκσκαφές και σκυροδέματα για τη κατασκευή των υπερχειλιστών στα αντερείσματα, δεν απαιτείται η χρήση εκχειλιστών σηράγγων και είναι εφικτός ο προσανατολισμός των έργων υπερχειλίσης και αποτόνωσης ενέργειας ως προς την κοίτη του ποταμού. Τέλος παρέχεται η δυνατότητα αποτόνωσης σημαντικού ποσοστού της ενέργειας της πλημμύρας στο κατάντη πρηνές του φράγματος, μέσω πιθανής βαθμιδωτής κατασκευής. Ωστόσο, σημειώνεται ο κίνδυνος υποσκαφής λόγω της αποτόνωσης της ενέργειας της πλημμύρας κοντά στον κατάντη πόδα θεμελίωσης του φράγματος, γεγονός που προκαλεί χρονική αλληλεξάρτηση της κατασκευής του φράγματος και του εκχειλιστή και συνεπάγεται περιορισμούς στην επιλογή θέσης τοποθέτησης του σταθμού παραγωγής.

2.3.1.3 Φράγματα σκληρού επιχώματος (hardfill dams)

Βασικά υλικά κατασκευής του σώματος φράγματος σκληρού επιχώματος (Εικόνα 2.43) είναι ένα μείγμα αδρανών – τσιμέντου – νερού καθώς και πρόσμικτα όπως τέφρα και υδραυλικές κονίες. Κύριο συστατικό

προς ανεύρεση είναι τα αδρανή, για τα οποία ωστόσο δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις, ενώ ως προς την προέλευση τους διακρίνονται σε θραυστά, αμμοχάλικα, κορήματα και αλλούβια. Χάρη στο χαμηλό επίπεδο τάσεων στη θεμελίωση δεν απαιτείται υψηλή αντοχή της περιβάλλουσας βραχώδους επομένως είναι εφικτή η κατασκευή φραγμάτων σκληρού επιχώματος σε ευρύ φάσμα πετρωμάτων. Επιπρόσθετα, παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής τους σε περιοχές υψηλών σεισμικών καταπονήσεων, λόγω της απουσίας εφελκυστικών τάσεων στο σώμα του φράγματος ακόμη και στην περίπτωση σεισμού.



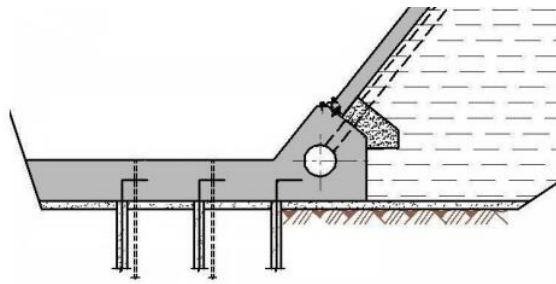
Εικόνα 2.43: Τυπική διατομή αξονοσυμμετρικού φράγματος βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκληρό επιχώμα (Από Ευστρατιάδης, Α., 2021)



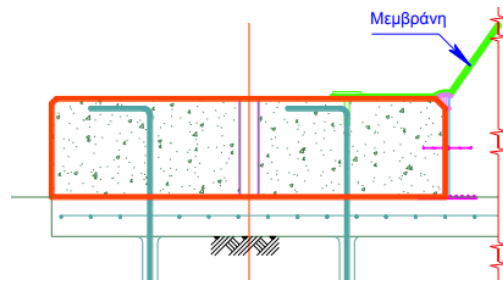
Εικόνα 2.44: Φράγμα Κόρης - Γεφύρι (Από ΧiakosLaos.gr)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μικρή αναλογία τσιμέντου στο μίγμα καθώς ελαχιστοποιεί την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία ενυδάτωσης και κατ' επέκταση των κίνδυνο ρηγμάτωσης, ενώ επιπλέον συνεισφέρει τόσο στην ανάπτυξη συνθηκών βέλτιστης υγρασίας για την ικανοποιητική συμπίκνωση του μίγματος με κοινά μηχανήματα όσο και στην ταυτόχρονη εξασφάλιση ικανοποιητικής αντοχής. Επιπλέον, η μικρή αναλογία σε τσιμέντο προσδίδει στο σώμα του φράγματος πορώδες της τάξης του 15%, κάνοντας το ιδιαίτερα διαπερατό, γεγονός που συνεπάγεται τη φυσική αποστράγγιση και την αποφυγή ανάπτυξης πίεσης πόρων στο εσωτερικό του σώματος του φράγματος, ενώ συγχρόνως καθίσταται υποχρεωτική η κατασκευή στεγανού στοιχείου στην ανάντη παρειά, όπως λ.χ. πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, μεμβράνη ή ακόμη και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε φράγματα μικρού ύψους ή ακόμα και την κατασκευή πλίνθου, που πρακτικά αποτελεί έργο έδρασης του ανάντη στεγανωτικού στοιχείου το οποίο χαρακτηρίζεται από σημαντικές κατασκευαστικές απαιτήσεις. Σχετικά με τη στεγανοποίηση της ανάντη παρειάς του φράγματος σημειώνεται ότι η ανάπτυξη ρωγμών είναι αποδεκτή, δεν επηρεάζει την ευστάθεια του φράγματος και επιτρέπει την περιορισμένη διήθηση νερού. Βασική απαίτηση αποτελεί η αποστράγγιση καπάντη του στεγανοποιητικού στοιχείου λόγω ανάπτυξης πιέσεων κατά τον καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή της πλίνθου φράγματος σκληρού επιχώματος προηγείται της κατασκευής του ίδιου του φράγματος. Η διαμόρφωση των εκσκαφών θεμελίωσης φράγματος και πλίνθου πραγματοποιείται με χρήση αγκυρώσεων, οπλισμού, σκυροδέτηση της πλίνθου χωρίς αρμούς, τσιμεντενέσεις πετάσματος και τοποθέτηση τάπητα. Η διαμόρφωση της ίδιας της πλίνθου σύμφωνα με τον τύπο στεγανοποίησης της ανάντη παρειάς του φράγματος πραγματοποιείται με πλάκα σκυροδέματος ή με μεμβράνη, όπως παρουσιάζεται σκαριφηματικά στις εικόνες 2.45 και 2.46.



Εικόνα 2.45: Στεγανοποίηση ανάντη παρειάς φράγματος με πλάκα σκυροδέματος (Από Φράγματα-Μουτάφης-Παπανικολάου)



Εικόνα 2.46: Στεγανοποίηση ανάντη παρειάς φράγματος με μεμβράνη (Από Φράγματα-Μουτάφης-Παπανικολάου)

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαδικασία διάστρωσης και συμπύκνωσης ενός φράγματος σκληρού επιχώματος. Πιο αναλυτικά, η διάστρωση πραγματοποιείται σε στρώσεις χωρίς διακοπή και χωρίς απαιτήσεις επεξεργασίας μεταξύ των στρώσεων, ενώ η συμπύκνωση είναι εφικτή με χρήση κατάλληλου δονητικού οδοστρωτήρα. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη εγκιβωτισμού του υλικού του σκληρού επιχώματος στο εκάστοτε δάπεδο εργασίας για την κατάλληλη συμπύκνωσή του. Εφικτός στόχος είναι η κατασκευή δύο στρώσεων ανά ημέρα που πρακτικά επιτρέπει την κατασκευή φράγματος ύψους 50 μέτρων σε 60 μέρες. Η ταχεία αυτή ανύψωση περιορίζει τις απαιτούμενες παραδοχές σχεδιασμού του συστήματος εκτροπής, το οποίο είναι εφικτό και να καταργηθεί στην περίπτωση του εν λόγω τύπου φράγματος (σκληρού επιχώματος) καθώς είναι υπερπηδητό. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση φραγμάτων RCC οι στρώσεις έχουν πάχος 30 cm με τάση για αύξηση ενώ στα φράγματα σκληρού επιχώματος το πάχος τους ανέρχεται στα 40-50 cm με εφικτό στόχο είναι ακόμα και οι 2 στρώσεις την ημέρα που αντιστοιχεί σε ρυθμό κατασκευής που ανέρχεται στα 80 cm/d.

Στη συνέχεια, ακολουθεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση περί των γεωφραγμάτων. Σημειώνεται πως συνηθέστερα είναι προτιμότερη η κατασκευή φράγματος σκληρού επιχώματος και όχι γεωφράγματος, καθώς έτσι σημειώνεται σημαντική μείωση του κόστους του υπερχειλιστή και του συστήματος εκτροπής, αλλά και η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατασκευής.

2.3.2 Γεωφράγματα

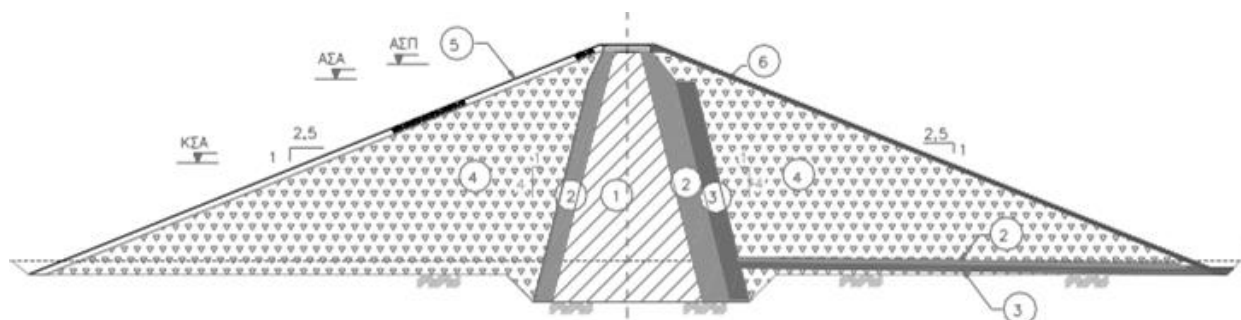
Τα γεωφράγματα διακρίνονται σε χωμάτινα και σε λιθόρριπτα. Τα μεν πρώτα διαχωρίζονται σε ομοιογενή και διαζωνισμένα, ενώ τα δε δεύτερα σε φράγματα με αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα και σε φράγματα με ανάντη στεγάνωση η οποία επιτυγχάνεται με χρήση πλάκας σκυροδέματος ή με μεμβράνη.

2.3.2.1 Χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα θεωρούνται εύκολα στην κατασκευή τους και είναι οικονομικά, ενώ επίσης μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε μορφή κοιλάδας ανεξαρτήτως της ποιότητας του εδάφους θεμελίωσης. Αποτελούνται από γαιώδη υλικά της περιοχής, τα οποία διαστρώνονται κατά ζώνες από διαβαθμισμένο υλικό. Στο κέντρο του σώματος του φράγματος κατασκευάζεται ένας αδιαπέραστος πυρήνας από αργιλικό υλικό και ακολουθούν οι εξωτερικές ζώνες, που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του έργου. Οι ζώνες αυτές είναι: α) η μεταβατική ζώνη με πάχος 2.5 – 4.0 m και τοποθετείται αμέσως μετά τον πυρήνα ο οποίος συνιστάται από φίλτρο διαβαθμισμένου αμμοχάλικου και β) η ζώνη από χονδρόκοκκα υλικά όπως κροκάλες και χαλίκια, με κλίση πρανών που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού, τις συνθήκες ροής, την ποιότητα του εδάφους, τη θέση του αδιαπέρατου πυρήνα και τη σεισμικότητα της περιοχής. Τέλος, πάνω

από τη ζώνη αυτή τοποθετείται η λιθορριπή προστασίας η οποία αποτελείται από ευμεγέθη τεμάχια βράχων (Αγαλανιώτου, 2006).

Τα χωμάτινα φράγματα (Εικόνα 2.47) φέρουν επαρκείς ποσότητες υλικού χαμηλής διαπερατότητας ενώ επίσης για τον συγκεκριμένο τύπο φράγματος απαιτείται η κατασκευή έργων αποστράγγισης. Επιπρόσθετα, είθισται στην περίπτωση χωμάτινου φράγματος να ενσωματώνεται το κιβωτοειδές πρόφραγμα στη μεγαλύτερη κατασκευή του επιχώματος του φράγματος που περιλαμβάνεται στο σχεδιασμένο φράγμα. Επίσης, τα φράγματα αυτά είναι μη υπερχειλιζόμενα γεγονός που συνεπάγεται την ανάγκη κατασκευής υπερχειλιστή που θα συμβάλλει στην αποσυμφόρηση του ταμιευτήρα από την ενδεχόμενη πλημμύρα. Είναι προφανές ότι η υπερχειλίση σε χωμάτινα φράγματα εκτός του ανοίγματος του υπερχειλιστή μπορεί να έχει ιδιαίτερα καταστροφικές συνέπειες και συνεπώς για λόγους ασφάλειας απαιτείται η διαστασιολόγηση ενός υπερχειλιστή ικανού να παροχετεύει πλημμυρικές παροχές αιχμής τουλάχιστον της τάξης των 100 ετών.



Εικόνα 2.47: Τυπική διατομή χωμάτινου φράγματος (Από Ι.Π. Στεφανάκος, Σημειώσεις μαθήματος)

Πίνακας 2.3: Υπόμνημα εικόνας 2.9

Ζώνη 1 - Πυρήνας	Αδιαπέρατα υλικά
Ζώνη 2 - Φίλτρο	Διαβαθμισμένο αμμόδες υλικό
Ζώνη 3 - Στραγγιστήριο	Διαβαθμισμένο χαλικώδες υλικό
Ζώνη 4 - Κελύφη	Αμμοχάλικα, κορήματα, κερματισμένος βράχος
Ζώνη 5 - Κυματοπροστασία	Ογκόλιθοι - Τρόχμαλοι
Ζώνη 6 - Κατάντη ζώνη προστασίας	Λίθοι - κροκάλες



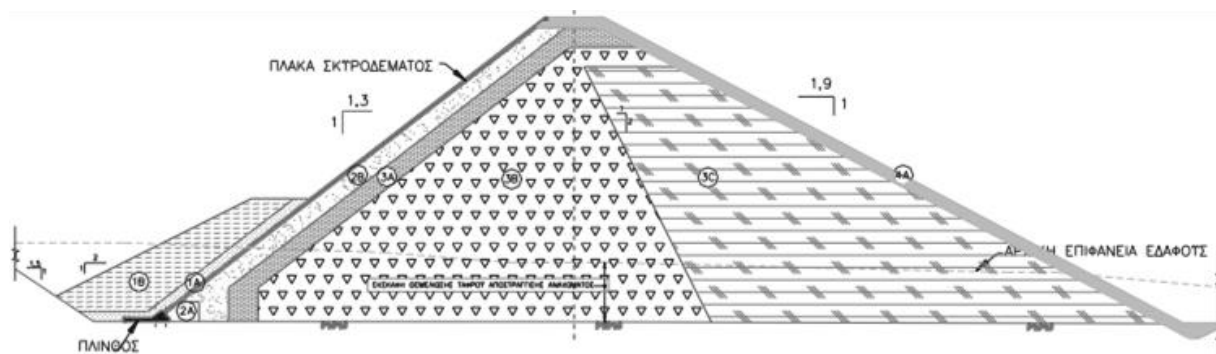
Εικόνα 2.48: Φράγμα Ιλαρίωνα (Από ypethe.gr)



Εικόνα 2.49: Φράγμα Κρεμαστών (Από <https://www.agrinionews.gr/>)

2.3.2.2 Λιθόρριπτα φράγματα

Τα λιθόρριπτα φράγματα (2.50) είναι απλουστευμένης μορφής χωμάτινα φράγματα. Για την κατασκευή τους δεν χρειάζεται ζωνώδης διάταξη διαβαθμισμένων υλικών, καθώς το κύριο σώμα του φράγματος συνίσταται από χονδρόκοκκα υλικά ποτάμιας προέλευσης ή από βραχώδη υλικά, που μεταφέρονται από δανειοθαλάμους (λατομεία) της γύρω περιοχής. Τα λιθόρριπτα φράγματα με αδιαπέρατο στοιχείο διακρίνονται σε αυτά με αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα και σε αυτά που φέρουν ανάντη πλάκα στεγάνωσης (Αθανασόπουλος κ.ά., 2006). Βασικά μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου φραγμάτων είναι η απαίτηση υψηλής ποιότητας εδάφους θεμελίωσης και η απαγόρευση υπερπήδησής τους, γεγονός που συνεπάγεται την ανάγκη κατασκευής υπερχειλιστή. (Βγενοπούλου. Ε., 2015)



Εικόνα 2.50: Τυπική διατομή λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (Από Ι.Π. Στεφανάκος, Σημειώσεις μαθήματος)

Πίνακας 2.4: Υπόμνημα εικόνας 2.50

Ζώνη 1Α – Ιλυώδες υλικό	Ζώνη 3Α – Μεταβατική ζώνη λιθορριπής
Ζώνη 1Β – Οποιοδήποτε υλικό	Ζώνη 3Β – Λιθορριπή (υψηλή συμπίκνωση)
Ζώνη 2Α – Λεπτόκοκκο φίλτρο	Ζώνη 3C – Λιθορριπή (μέτρια συμπίκνωση)
Ζώνη 2Β – Φίλτρο / Διαβαθμισμένο υλικό	Ζώνη 4Α – Κατάντη ζώνη προστασίας / Λίθοι ή κροκάλες

2.4 Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο υδρολογικού σχεδιασμού σήραγγας εκτροπής

Η επιλογή του τύπου του φράγματος καθώς και η διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής αυτού, προϋποθέτουν αρχικά τη διεξαγωγή μιας ορθής υδρολογικής μελέτης, επομένως κρίθηκε σκόπιμη η σύνοψη και παρουσίαση του ανάλογου θεωρητικού υποβάθρου. Ως υδρολογία πλημμυρών νοείται ο κλάδος της τεχνικής υδρολογίας που εστιάζει στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα από την έναρξη μιας ισχυρής καταιγίδας μέχρι το πέρας της απορροής που οφείλεται στο συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής (Ευστρατιάδης, κ.ά., 2013).

Η εκτίμηση του υδατικού δυναμικού μιας λεκάνης απορροής βασίζεται είτε στην ανάλυση δείγματος παρατηρημένων παροχών στη θέση φράγματος που προϋποθέτει τη λειτουργία υδρομετρικού σταθμού για ικανό διάστημα, ο οποίος θα είναι εξοπλισμένος με όργανο συνεχούς καταγραφής της στάθμης του ποταμού και τη διεξαγωγή συστηματικών μετρήσεων με απώτερο στόχο την κατάρτιση αξιόπιστων σχέσεων στάθμης – παροχής, είτε στην έμμεση εκτίμηση της παροχής μέσω υδρολογικών μοντέλων που μετασχηματίζουν τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε απορροή. Εναλλακτικά, είναι εφικτή η μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας από άλλες θέσεις, με την προϋπόθεση ότι η λεκάνη ενδιαφέροντος και η λεκάνη

στην οποία υπάρχουν μετρήσεις έχουν παρόμοια υδρολογική απόκριση λόγω παρόμοιων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών (Ευστρατιάδης, κ.ά., 2021).

Σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (ετήσιες ή υπερετήσιες) η διαφορά ανάμεσα στη βροχόπτωση και στην απορροή μιας λεκάνης ονομάζεται υδρολογική απώλεια και περιλαμβάνει τη μετατροπή του νερού σε υδρατμούς μέσω των διαδικασιών της εξάτμισης και της διαπνοής. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να περιλαμβάνει και μεταφορές νερού εκτός της λεκάνης, λόγω υπόγειων διαφυγών ή ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Επιπρόσθετα, στη χρονική κλίμακα της πλημμύρας (ώρα ή ημέρα) οι ποσοτικές διαφορές μεταξύ των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της επιφανειακής απορροής περιλαμβάνουν συνιστώσες όπως διάφορες μορφές κατακράτησης και εδαφική διήθηση, τα οποία ονομάζονται υδρολογικά ελλείμματα. Σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα, ένα μέρος τους μετατρέπεται σε υδρολογικές απώλειες, δηλαδή σε εξάτμιση και διαπνοή, και το υπόλοιπο σε απορροή, επιφανειακή και υπόγεια. Τα ανωτέρω περιγράφονται σχηματικά στην εικόνα 2.51 (Ευστρατιάδης, κ.ά., 2013).



Εικόνα 2.51: Οι υδρολογικές εργασίες κατά τη διάρκεια πλημμύρας (Ευστρατιάδης, κ.ά., 2013)

Ο όρος κατακράτηση αναφέρεται στην παρεμπόδιση τμήματος της βροχής να φτάσει στο έδαφος λόγω παρεμβολής της χλωρίδας και στην επιφανειακή παγίδευση της επιφανειακής απορροής από τις μικροκοιλότητες του εδαφικού αναγλύφου. Το τμήμα της βροχής που παρεμποδίζεται στη συνέχεια είτε εξατμίζεται, είτε απορροφάται από τη χλωρίδα, είτε καταλήγει στο έδαφος. Επιπρόσθετα, ως διήθηση ορίζεται η διεργασία εισχώρησης του νερού που προέρχεται από τη βροχόπτωση, την τήξη του χιονιού ή την άρδευση, στο έδαφος.

Οι όμβριες καμπύλες αποτελούν σχέσεις έντασης, διάρκειας και περιόδου επαναφοράς της βροχής οι οποίες έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση των παρατηρημένων ακραίων υψών ή εντάσεων βροχής. Η κατασκευή τους στηρίζεται σε δεδομένα εντάσεων βροχής για διάρκειες που κυμαίνονται από 10-30 λεπτά έως και 24-48 ώρες. Στη γενική περίπτωση η συναρτησιακή σχέση των όμβριων καμπυλών είναι της μορφής 2.1, όπου i η μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας d για περίοδο επαναφοράς T , $a(T)$ και $b(d)$ είναι κατάλληλες συναρτήσεις της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας αντίστοιχα, η οποία μετασχηματίζεται ισοδύναμα στη σχέση 2.2 (Koutsoyiannis et al. 1998), όπου λ , ψ , θ , κ , η παράμετροι που προσδιορίζονται κατόπιν στατιστική επεξεργασίας των μεγίστων υψών βροχής με εφαρμογή κατανομής GEV.

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (2.1)$$

$$i = \frac{\lambda(T^k - \psi)}{\left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^n} \quad (2.2)$$

Προκειμένου οι όμβριες καμπύλες να αναφέρονται στην έκταση της λεκάνης απαιτείται η αναγωγή των σημειακών εντάσεων (ή υψών) βροχής στις αντίστοιχες επιφανειακές της λεκάνης απορροής, με χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ή επιφανειακής ομοιομόρφισης, φ γνωστό και ως ARF (2.3).

$$\varphi = \max \left(1 - \frac{(0.048A)^{0.36-0.01 \ln(A)}}{d^{0.35}}, 0.25 \right) \quad (2.3)$$

Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού μιας λεκάνης αφορά στη χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Συνηθέστερα προτείνονται η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού και η συναφής μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ, η οποία και χρησιμοποιείται ευρύτατα. Πιο συγκεκριμένα, εφόσον έχουν προσδιοριστεί τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση τις κατάλληλες όμβριες καμπύλες, τα ύψη αυτά διατάσσονται ώστε να προκύπτει ρεαλιστικός αλλά και δυσμενής συνδυασμός (στη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ) ή ο δυσμενέστερος συνδυασμός με τη μεγαλύτερη πλημμυρική αιχμή (στη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης). Στη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας βροχής και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.

Η λεκάνη απορροής παρουσιάζει ορισμένα ειδικά φυσικά γνωρίσματα που επηρεάζουν τη διαδικασία του μετασχηματισμού των κατακρημνισμάτων σε απορροή καθώς και το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης, τα οποία είναι γνωστά με τον όρο φυσιογραφικά χαρακτηριστικά και διακρίνονται σε μορφολογικά (γεωμετρία, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο) και εδαφολογικά, στις χρήσεις γης και στην φυτοκάλυψη, χαρακτηριστικά που προφανώς παρουσιάζουν μεγάλη χωρική ετερογένεια.

Ως επιφανειακή απορροή ορίζεται η ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας κατά μήκος των φυσικών υδατορεμάτων. Σε κάθε διατομή ενός υδατορέματος ορίζεται η αντίστοιχη λεκάνη απορροής ή υδρολογική λεκάνη, η οποία αποτελεί το φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Διακρίνονται τέσσερις διαδρομές για να φτάσει το νερό στο υδατόρεμα: τα άμεσα κατακρημνίσματα που πέφτουν στην επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου και μετατρέπονται άμεσα σε επιφανειακή απορροή, η επίγεια ροή που αναφέρεται στη δισδιάστατη ροή που πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, η υποδερμική ροή που περιγράφει διάφορους τύπους πλευρικών υπεδάφινων ροών και η υπόγεια ροή που αναφέρεται στο νερό που διηθείται προς τα κατώτερα εδαφικά στρώματα και φτάνει στη ζώνη όπου το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού οδηγώντας στο σχηματισμό υπόγειων υδροφορέων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάκριση της επιφανειακής απορροής σε δύο συνιστώσες, την άμεση ή ταχεία ή πλημμυρική απορροή που περιλαμβάνει την άμεση κατακρήμνιση, την επίγεια, την υποδερμική, μέρος της υπόγειας ροής (υπό προϋποθέσεις) και τη βασική ή βραδεία απορροή που οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο μηχανισμό της υπόγειας ροής.

Το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή είναι γνωστό ως ενεργός βροχόπτωση, i_e . Το ύψος της υπολογίζεται βάσει της σχέσης 2.7 όπου h το ύψος της συνολικής βροχόπτωσης και h_{a0} το ύψος των ελλειμμάτων. Για τον προσδιορισμό της ενεργού βροχόπτωσης ευρέως διαδεδομένη είναι η μέθοδος SCS-CN της Soil Conservation Service (1972), σύμφωνα με την οποία για ένα αρχικό διάστημα όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης μετατρέπεται εξολοκλήρου σε έλλειμμα χωρίς να δίνει ενεργή βροχόπτωση και το επιπλέον

ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια της μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , η οποία είναι γνωστή με τον όρο μέγιστη δυνητική κατακράτηση (2.4). Η τιμή της παραμέτρου S εκτιμάται συναρτήσει του αριθμού καμπύλης απορροής (CN) της λεκάνης, ο οποίος εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης αυτής καθώς και από τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας, ενώ λαμβάνει τιμές από 0 έως 100, με συνηθέστερες τις τιμές του πίνακα 2.5. Για τον προσδιορισμό του αριθμού CN , απαιτείται η κατάταξη του εδάφους σε κατηγορία A, B, C ή D για μεγάλους, μέσους, μικρούς και πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, αντίστοιχα και ο προσδιορισμός των προηγούμενων συνθηκών υγρασίας στους τύπους I, II και III για ξηρές, μέσες και υγρές συνθήκες.

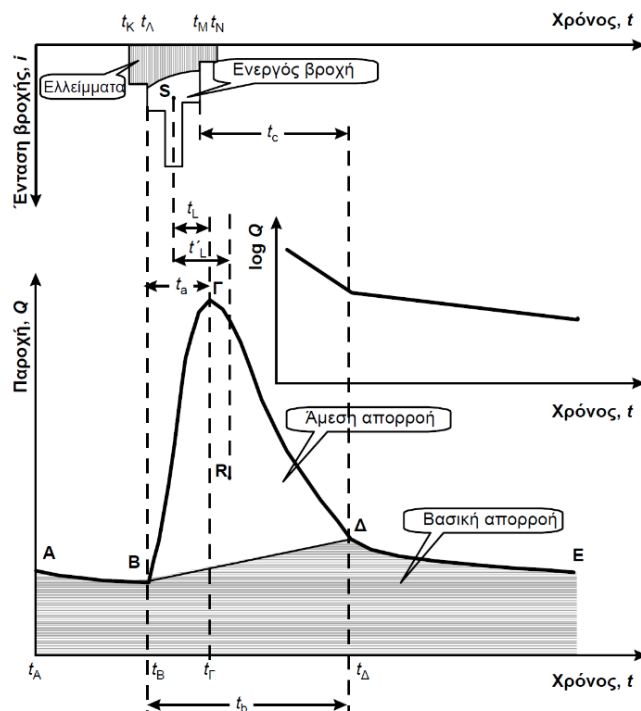
$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.4)$$

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2.5)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (2.6)$$

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (2.7)$$

Τα παραπάνω συνοψίζονται σχηματικά στην εικόνα 2.52, όπου διακρίνεται ένα απλό πλημμυρικό υδρογράφημα (χρονοσειρές παροχής) και το αντίστοιχο υετόγραμμα (χρονοσειρά ύψους ή έντασης βροχής) με τα χαρακτηριστικά χρονικά μεγέθη, τα οποία είναι η διάρκεια πλημμύρας, ο χρόνος βάσης t_b , ο χρόνος ανόδου t_a , ο χρόνος υστέρησης t_L , ο κεντροβαρικός χρόνος υστέρησης t_L' και ο χρόνος συγκέντρωσης t_c , ήτοι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου αυτής και πρακτικά αντιστοιχεί στο διάστημα από τη λήξη της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι τη λήξη της άμεσης απορροής.



Εικόνα 2.52: Σκαρίφημα απλού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο υετόγραμμα και τα χαρακτηριστικά χρονικά μεγέθη (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Στη συνέχεια, βάσει του μοναδιαίου υδρογραφήματος της λεκάνης για διάρκεια ίση με την χρονική διακριτότητα της ενεργούς βροχόπτωσης Δt και της γνωστής πλέον ενεργούς βροχόπτωσης h_t , ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος πραγματοποιείται βάσει της αρχής της επαλληλίας. Πιο αναλυτικά, για κάθε στοιχειώδες χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$ παράγεται το επί μέρους υδρογράφημα, κατόπιν πολλαπλασιασμού του ενεργού ύψους βροχής με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος, και τέλος το τελικό πλημμυρογράφημα με άθροιση των επιμέρους υδρογραφημάτων.

Συνοψίζοντας, η συνήθης διαδικασία υπολογισμού του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού ξεκινάει από την παραγωγή των όμβριων καμπυλών κατόπιν στατιστικής ανάλυσης των μέγιστων ετήσιων εντάσεων βροχής για διαφορετικές διάρκειες και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης βάσει των γεωμορφολογικών της χαρακτηριστικών. Έπειτα, ορίζεται η διάρκεια βροχής ως πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης και παράγεται το υετόγραμμα σχεδιασμού για τη δεδομένη περίοδο επαναφοράς βάσει συνήθως της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Έπειτα τα σημειακά αυτά ύψη βροχής ανάγονται σε επιφανειακά με τη χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής φ και από τη συνολική επιφανειακή βροχόπτωση που προκύπτει αφαιρούνται οι υδρολογικές απώλειες της λεκάνης, λαμβάνοντας υπόψιν το ενεργό υετογράφημα και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα. Τέλος, βάσει της αρχής της επαλληλίας υπολογίζεται το πλημμυρογράφημα της λεκάνης από το ενεργό υετόγραμμα και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα και κατόπιν προστίθενται σε αυτό οι λοιπές συνιστώσες της απορροής, ώστε να εξαχθεί το τελικό υδρογράφημα σχεδιασμού.

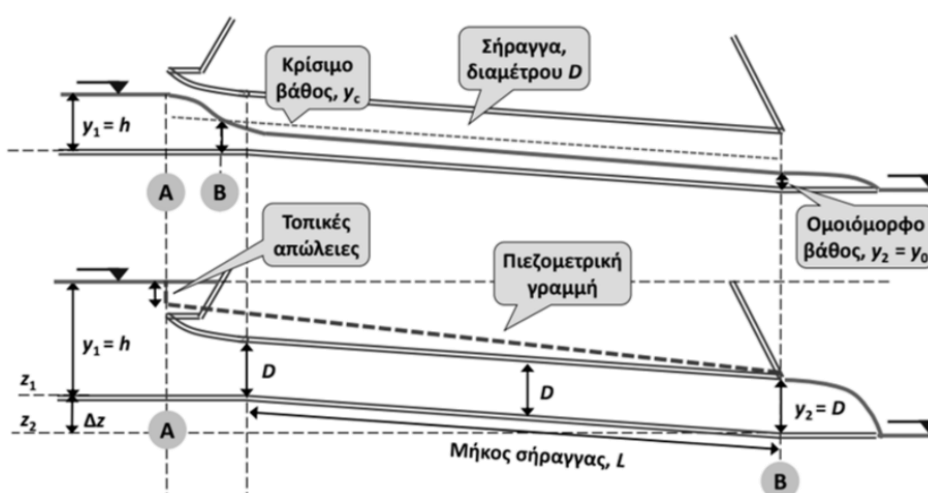
Πίνακας 2.5: Τυπικές τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής CN κατά SCS για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας τύπου II (Κουτσογιάννης, 2011)

Περιγραφή χρήσης γης	Υδρολογική κατάσταση	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Γυμνό έδαφος		77	86	91	94
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε κεκλιμένο έδαφος	Φτωχή	72	81	88	91
	Καλή	67	78	85	89
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε βαθμίδες	Φτωχή	66	74	80	82
	Καλή	62	71	78	81
Καλλιέργειες σιτηρών σε κεκλιμένο έδαφος	Φτωχή	65	76	84	88
	Καλή	63	75	83	87
Καλλιέργειες σιτηρών σε βαθμίδες	Φτωχή	61	72	79	82
	Καλή	59	70	78	81
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε κεκλιμένο έδαφος	Φτωχή	66	77	85	89
	Καλή	58	72	81	85
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε βαθμίδες	Φτωχή	63	73	80	83
	Καλή	51	67	76	80
Δενδρόκηποι ή δενδροκαλλιέργειες	Φτωχή	57	73	82	86
	Μέτρια	43	65	76	82
	Καλή	35	58	72	79
Δάση	Φτωχή	45	66	77	83
	Μέτρια	36	60	73	79
	Καλή	30	55	70	77
Χορτολιβαδικές εκτάσεις	Φτωχή	68	79	86	89
	Μέτρια	49	69	79	84
	Καλή	39	61	74	80
Δρόμοι					
Χωματόδρομοι	Καλή	72	82	87	89
Χαλικόστρωτοι	Φτωχή	76	85	89	91

2.5 Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο υδραυλικού σχεδιασμού σήραγγας εκτροπής

Πρωταρχικός σκοπός της σήραγγας εκτροπής είναι η προστασία του φράγματος κατά τη φάση κατασκευής του. Η ανάσχεση της πλημμύρας πραγματοποιείται στη λεκάνη κατάκλυσης ανάντη του προφράγματος. Η ροή στη σήραγγα αρχικά έχει ελεύθερη επιφάνεια και στη συνέχεια εκτελείται υπό πίεση. Πρακτικά η διαστασιολόγηση της σήραγγας και του προφράγματος αποτελεί πρόβλημα οικονομοτεχνικής βελτιστοποίησης, καθώς να μεν μεγαλύτερες διαστάσεις των έργων αυτών συνεπάγονται μεγαλύτερη ασφάλεια, ωστόσο μεταφράζονται και σε υψηλά κόστη κατασκευής. Η οικονομοτεχνική αυτή βελτιστοποίηση αποτελεί και κύριο πυρήνα της παρούσας εργασίας.

Όπως προαναφέρθηκε, η μόνιμη ομοιόμορφη ροή διακρίνεται σε ροή υπό πίεση και σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση ροής υπό πίεση η διατομή αποτελεί καθαρά γεωμετρικό μέγεθος και δεν εξαρτάται από τα υδραυλικά μεγέθη της ροής, ενώ αντιθέτως η κλίση ενέργειας είναι υδραυλικό μέγεθος το οποίο μάλιστα μεταβάλλεται με τη ροή. Τέλος, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι αγωγοί υπό πίεση είναι κυκλικής διατομής, γεγονός που συνεπάγεται τόσο την απλούστερη δυνατή γεωμετρία της ροής και τη μαθηματική περιγραφή της από το μέγεθος της διαμέτρου D , όσο και την ομοιομορφία αυτής, έστω και τμηματικά. Στην περίπτωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια η κλίση ενέργειας είναι καθαρά γεωμετρικό μέγεθος και ίση με την κλίση του πυθμένα του αγωγού, ενώ η διατομή είναι υδραυλικό μέγεθος που μεταβάλλεται με την παροχή και η ομοιομορφία της ροής δεν είναι δεδομένη.



Εικόνα 2.53: Υδραυλική σήραγγας εκτροπής (Από Ευστρατιάδης, Α., 2021)

Στην εικόνα 2.53 παρουσιάζονται σκαριφήματα ροής με ελεύθερη επιφάνεια και ροής υπό πίεση, στο άνω και στο κάτω τμήμα, αντίστοιχα. Επεξηγηματικά, όπου y_1 και y_2 τα βάθη ροής στην είσοδο και στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής, h το υδραυλικό φορτίο και b το ενεργό πλάτος της διατομής εισόδου. Διακρίνονται τρεις τύποι ροής εντός της σήραγγας εκτροπής, η ροή με ελεύθερη επιφάνεια, η μεταβατική ροή (ασταθής) και η ροή υπό πίεση, στις οποίες ισχύουν οι σχέσεις 2.8, 2.9 και 2.10, αντίστοιχα.

$$h \leq 1.2 D \quad (2.8)$$

$$1.2 D \leq h \leq 1.5 D \quad (2.9)$$

$$h \geq 1.5 D \quad (2.10)$$

Πιο αναλυτικά, αν επαληθεύεται η σχέση 2.8 και ικανοποιούνται οι υποθέσεις οριζόντιου πυθμένα και μηδενικής ανάντη ταχύτητας (ταμειυτήρας), ορθογωνικής διατομής εισόδου ενεργού πλάτους b , συντελεστή τοπικών απωλειών $k \approx 0.1$ και υπερκρίσιμη ροή (ομοιόμορφο βάθος < κρίσιμο βάθος), η ροή χαρακτηρίζεται ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια και η σχέση στάθμης παροχής δίνεται από τη σχέση 2.11 (Ευστρατιάδης, Α, κ.ά, 2021),

$$Q = \lambda h^{\frac{3}{2}} \quad (2.11)$$

όπου το υδραυλικό φορτίο h και το κρίσιμο βάθος δίνονται από τις σχέσεις 2.12 και 2.13, αντίστοιχα. Το υδραυλικό φορτίο στην περίπτωση της ροής με ελεύθερη επιφάνεια, υπολογίζεται επίσης βάσει της σχέσης 2.14, όπου z η στάθμη του ύδατος ανάντη της εκτροπής και $z_{\epsilon\iota\sigma}$ το υψόμετρο στην είσοδο της σήραγγας εκτροπής.

$$h = y_c + \frac{(1+k)v_c^2}{2g} \quad (2.12)$$

$$y_c = \frac{2h}{3+k} \quad (2.13)$$

$$h = z - z_{\epsilon\iota\sigma} \quad (2.14)$$

Επιπλέον, για ροή υπό πίεση, η σχέση στάθμης – παροχής δίνεται από τη σχέση 2.15,

$$Q = \mu(h + \Delta z - D)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

όπου Δz η υψομετρική διαφορά των πυθμένων διατομών εισόδου και εξόδου, D η διάμετρος της σήραγγας εκτροπής, h το υδραυλικό φορτίο ανάντη και μ το συντελεστής που υπολογίζεται βάσει της σχέσης 2.16. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση ροής υπό πίεση, το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται βάσει της σχέσης 2.17, όπου $z_{\epsilon\xi}$ το υψόμετρο στο έργο εξόδου της σήραγγας και D η διάμετρος αυτής.

$$\mu = \frac{1}{\frac{8}{\pi^2 g D^4} + \frac{k}{2g A_{\epsilon\iota\sigma}^2} + \frac{4^{10/3} n_0^2 L}{\pi^2 D^{16/3}}} \quad (2.16)$$

$$h = z - z_{\epsilon\xi} - D \quad (2.17)$$

Στην παραπάνω σχέση, όπου n_0 παρουσιάζεται ο συντελεστής τραχύτητας για ολική πλήρωση της σήραγγας και λαμβάνει τις τιμές 0.014 για επένδυση από σκυρόδεμα, 0.022 για επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και 0.030 σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει επένδυση.

Για μεγαλύτερη συνέπεια στην υπολογιστική διαδικασία χρησιμοποιείται η γενικευμένη εξίσωση Manning, σύμφωνα με τη σχέση 2.18, ενώ για μεγάλες διαμέτρους και ταχύτητες ισχύουν οι σχέσεις 2.19, 2.20 και 2.21.

$$J = \frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 D^{5+\beta}} \quad (2.18)$$

$$\beta = 0.25 + 0.0006 \epsilon_* + \frac{0.024}{1 + 0.42 \epsilon_*} \quad (2.19)$$

$$\gamma = \left(\frac{0.083}{1 + 0.42 \epsilon_*} \right) \quad (2.20)$$

$$N = 0.00757(1 + 2.47 \epsilon_*)^{0.14} \quad (2.21)$$

Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning και η ισοδύναμη τραχύτητα ε συνδέονται μέσω της ακόλουθης προσεγγιστικής σχέσης.

$$n_0 \approx \frac{1}{26} \varepsilon^6 \quad (2.22)$$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο όρος των απωλειών που αποτελεί ουσιαστικά άθροισμα των γραμμικών και των τοπικών απωλειών κατά μήκος της σήραγγας. Πιο αναλυτικά, οι γραμμικές απώλειες h_f οφείλονται στις τριβές κατά μήκος της ροής και για κυκλικούς αγωγούς υπό πίεση, διαμέτρου D , υπολογίζονται από τη σχέση 2.23, η οποία αποτελεί μετασχηματισμό της σχέσης των Darcy & Weisbach (1858) (2.24), όπου J η υδραυλική κλίση του αγωγού και R η υδραυλική ακτίνα, η οποία στην περίπτωση κυκλικού αγωγού ισούται με $R/4$. Η εξίσωση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα χάρη στην διαστατική της ομοιογένεια και στην εφαρμογή της ανεξαρτήτως είδους ρευστού και συνθηκών ροής (Ευστρατιάδης, Α. κ.ά., 2023).

$$h_f = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (2.23)$$

$$J = \frac{fV^2}{8Rg} \quad (2.24)$$

Οι τοπικές απώλειες h_L εμφανίζονται στις θέσεις γεωμετρικών μεταβολών και είναι γνωστές επίσης με τον όρο δευτερεύουσες απώλειες ή απώλειες σχήματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι γεωμετρικές μεταβολές προκαλούν στροβίλους (αποκόλληση της ροής), με αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης της τύρβης. Συνεπώς, οι τοπικές απώλειες οφείλονται στην παραγωγή τύρβης, καθώς η κινητική ενέργεια του ρευστού μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω συνεκτικότητας, και όχι σε τριβές, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των γραμμικών απωλειών (Ευστρατιάδης, Α. κ.ά., 2023). Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται μέσω της σχέσης 2.25 όπου k ο συντελεστής τοπικών απωλειών ο οποίος αυξάνει όσο μεγαλύτερη είναι η γεωμετρική μεταβολή κατά μήκος της σήραγγας. Βάσει των παραπάνω, οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε έναν αγωγό δίνονται από τη σχέση 2.26, όπου k_t οι συντελεστές τοπικών απωλειών, V_t οι ταχύτητες στις αντίστοιχες θέσεις, f_t οι συντελεστές γραμμικών απωλειών και L_t και D_t γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μήκος και διάμετρος) του κάθε τμήματος.

$$h_L = \frac{kV^2}{2g} \quad (2.25)$$

$$\Delta h_f = \sum (k_t V_t^2 / 2g) + \sum (f_t L_t V_t^2 / (2g D_t)) \quad (2.26)$$

Σχετικά με τον προσδιορισμό του συντελεστή τοπικών απωλειών k διακρίνονται μεταξύ άλλων η περίπτωση της απότομης διαστολής (περίπτωση κυκλικών διατομών και είσοδος σε δεξαμενή) και η περίπτωση απότομης συστολής (συγκλίνουσα ροή), στις οποίες ο ζητούμενος συντελεστής k υπολογίζεται βάσει των σχέσεων 2.27 και 2.28 (εμπειρική σχέση White, 1994).

$$k = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right], D_1 < D_2 \quad (2.27)$$

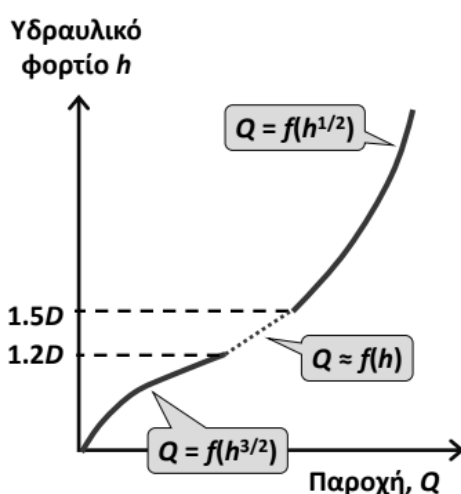
$$k = 0.42 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right], \frac{D_2}{D_1} < 0.76 \quad (2.28)$$

Εν συνεχεία, θεμελιώδους σημασίας κατά τον υδραυλικό σχεδιασμό σηράγγων εκτροπής είναι η επιλογή της περιόδου επαναφοράς του πλημμυρογραφήματος εισόδου. Συγκεκριμένα, η περίοδος επαναφοράς

επιλέγεται βάσει ενός αποδεκτού επιπέδου διακινδύνευσης (risk) σύμφωνα με τη σχέση 2.29, όπου T η περίοδος επαναφοράς και N ο αναμενόμενος χρόνος εκτέλεσης του έργου. Το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο διακινδύνευσης για έργα εκτροπής ανέρχεται στο 25%.

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (2.29)$$

Για τη διόδευση πλημμύρας από τη σήραγγα εκτροπής απαραίτητα δεδομένα εισόδου είναι το πλημμυρογράφημα εισροής I_t , η σχέση στάθμης – αποθέματος της λεκάνης κατάκλυσης $S = S(z)$, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διατομής εισόδου (ενεργό πλάτος b , εμβαδό καθαρής διατομής A_{in} και ο συντελεστής τοπικών απωλειών k), τα χαρακτηριστικά μεγέθη της σήραγγας, όπως το μήκος της L , η διάμετρος της D και ο συντελεστής τραχύτητας n_0 και τέλος η υψομετρική διαφορά Δz μεταξύ των πυθμένων των διατομών εισόδου και εξόδου.



Εικόνα 2.54: Μοντέλο διόδευσης σήραγγας εκτροπής ανάλογα το είδος ροής (Από Ευστρατιάδης, Α., 2021)

Πιο αναλυτικά, η υπολογιστική διαδικασία ξεκινάει με την κατάρτιση της σχέσης στάθμης – παροχής της σήραγγας εκτροπής ($Q = Q(h)$), ανάλογα αν η ροή χαρακτηρίζεται ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια ή ως ροή υπό πίεση. Σημειώνεται ότι για ενδιάμεσες καταστάσεις η ροή θεωρείται ασταθής και η σχέση στάθμης – παροχής θεωρείται προσεγγιστικά γραμμική. Στη συνέχεια, σε κάθε χρονικό βήμα επιλύεται το μοντέλο διόδευσης ανάλογα του τρέχοντος υδραυλικού φορτίου h . Από την επίλυση αυτή, προκύπτει μια μέγιστη τιμή του υδραυλικού φορτίου h , από το οποίο καθορίζεται το ύψος του προφράγματος έπειτα από κατάλληλη προσθήκη ενός ελεύθερου περιθωρίου (freeboard) μέχρι τη στέψη (Ευστρατιάδης, Α, κ.ά, 2021).

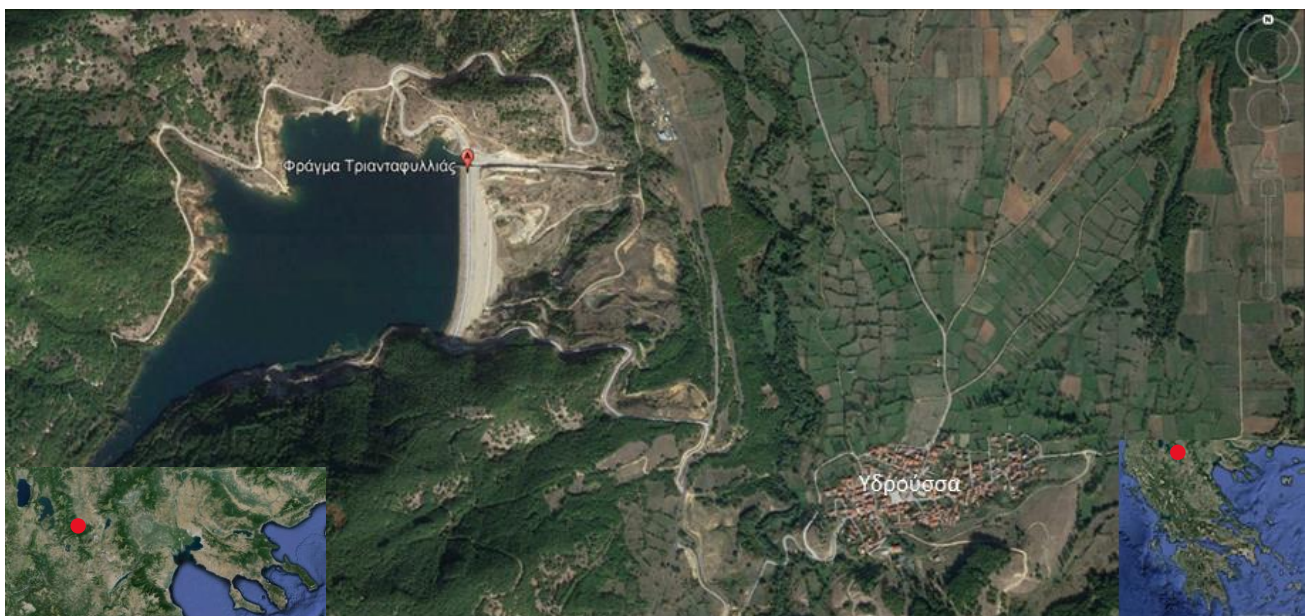
3 ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ

3.1 Περιοχή μελέτης

Το φράγμα της Τριανταφυλλιάς είναι κατασκευασμένο επί του ομώνυμου χειμάρρου περί τα 2 km ανάντη της εξόδου αυτού στην πεδιάδα της Φλώρινας και σε απόσταση 1.5 km βορειοδυτικά του οικισμού της Άνω Υδρούσας (Εικόνα 3.1). Το έργο απέχει περίπου 10 km από τη Φλώρινα, η πεδιάδα της οποίας εκτείνεται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του ομώνυμου νομού, στα βορειοδυτικά της δυτικής Μακεδονίας. Η όλη έκταση του έργου περικλείεται δυτικά από την οροσειρά του Βέρνου και βόρεια, νότια και ανατολικά από εκτάσεις της πεδιάδας της Φλώρινας. Το έργο τροφοδοτείται από τους ποταμούς Δροσοπηγής και Βιτίσιου (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015).

Το υψόμετρο της υπό άρδευση έκτασης κυμαίνεται από +650 έως +740. Χαρακτηριστικό της λεκάνης αυτής είναι το κυματοειδές της ανάγλυφο που οφείλεται στο συνδυασμό σημαντικών εδαφικών ανωμαλιών, λοφωδών εξάρσεων και της κοίλης διαμόρφωσης του λεκανοπεδίου. Η μορφολογία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη σύγκλιση του αναγλύφου προς τα χαμηλότερα υψόμετρα του λεκανοπεδίου που διαρρέονται από τον ποταμό Σακουλέβα (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015).

Σκοπός του έργου είναι η αποθήκευση νερού για τις αρδευτικές και τις υδρευτικές ανάγκες τις πεδιάδας της Φλώρινας καθώς και η οικολογική παροχή, η οποία ανέρχεται σε όγκο ίσο με 1 hm³ ετησίως κατά τους μήνες της αρδευτικής περιόδου. Συγκεκριμένα από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο προβλέπεται βάσει της υφιστάμενης μελέτης συνεχής παροχή περί τα 0.1 m³/s από τον εκκενωτή προς το χειμάρρο Τριανταφυλλιάς μέσω αγωγού Φ300 ο οποίος καταλήγει στη λεκάνη καταστροφής ενέργειας του εκκενωτή (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015).



Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης (Google earth)

3.2 Γεωλογική έρευνα και εργασίες

Σύμφωνα με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωλογικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή έδρασης του φράγματος, αυτή καλύπτεται από αποθέσεις κοίτης και αναβαθμίδας πάχους 0.30 -

2.00 m οι οποίες αποτελούνται από ιλυώδεις - αργιλώδεις άμμους και ιλυώδεις αργίλους με κυμαινόμενα ποσοστά χαλίκων, κροκάλων και ογκολίθων γνευσίου, μέγιστης διαμέτρου 90 cm, καθώς και από μανδύα αποσάθρωσης του υποκείμενου και αποσαθρωμένου γνευσίου.

Στη φάση οριστικής μελέτης του έργου διεξήχθη εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν δεκαεννέα δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στη ζώνη έδρασης του φράγματος με παράλληλη απόληψη χαρακτηριστικών δειγμάτων, διανοίχθηκαν οκτώ ερευνητικά φρέατα και τρία ορύγματα στη ζώνη έδρασης του φράγματος, πενήντα δύο ερευνητικά φρέατα στις περιοχές των δανειοθαλάμων απόληξης γεωυλικών κατασκευής του φράγματος με παράλληλη δειγματοληψία, λήφθηκαν δείγματα από δύο λατομεία ασβεστολίθου της ευρύτερης περιοχής του έργου, διανοίχτηκε ερευνητική στοά στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος, μήκους 50 m, και τέλος εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα ερευνητικών γεωτρήσεων, ερευνητικών φρεάτων και ασβεστολιθικών λατομείων. Για τους ερευνητικούς σκοπούς της παρούσας εργασίας απομονώθηκαν μόνο οι γεωτρήσεις G1, G6, G10 και G12 που εκτελέστηκαν στο δεξιό αντέρεισμα, όπου και κατασκευάστηκε η σήραγγα εκτροπής.

Οι εγκεκριμένες θέσεις των γεωτρήσεων βρίσκονται στην πλειοψηφία τους σε σημεία μη προσπελάσιμα, και για την προσέγγιση αυτών από γεωτρώπανα χρησιμοποιήθηκε προωθητήρας τύπου D8 τόσο για τη βελτίωση του υπάρχοντος δικτύου όσο και για τη διάνοιξη νέων οδών προσπέλασης. Το υψόμετρο, οι συντεταγμένες, το βάθος και η θέση των γεωτρήσεων ενδιαφέροντος (G1, G6, G10, G12) συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.1, ενώ στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η οριζοντιογραφική τους θέση και η θέση τους ως προς τη σήραγγα εκτροπής.



Εικόνα 3.2: Οριζοντιογραφική απεικόνιση γεωτρήσεων και σήραγγας εκτροπής (Google earth)

Για τις γεωτρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα περιστροφικά γεωτρώπανα τύπου Long Year, Craellious D750 και Joy 22. Κύριο μέλημα κατά τη διατρητική διαδικασία αποτέλεσε η εξασφάλιση του μέγιστου ποσοστού πυρηνοληψίας και η μείωση κατ' ελάχιστον του θρυμματισμού, τις απόπλυσης και της διαταραχής των γεωυλικών. Η διάτρηση πραγματοποιήθηκε με συνεχή πυρηνοληψία μέσω δειγματοληπτών με κοπτικό άκρο βίδα ή διαμάντι, ανάλογα με το σχηματισμό, καθώς και μέσω του διαιρετού δειγματολήπτη στη δοκιμή τυποποιημένης διείσδυσης (SPT) σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 101-83 (ΚΕΔΕ). Κατά τη

διάρκεια της διάτρησης απολήφθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα εν ξηρώ, ενώ η αποθέρμανση της διατρητικής στήλης πραγματοποιήθηκε μέσω της κυκλοφορίας νερού.

Πίνακας 3.1: Στοιχεία γεωτρήσεων Γ1, Γ6, Γ10, Γ12 της οριστικής μελέτης

Όνομα	Θέση	Απόλυτο υψόμετρο (m)	X	Y	Βάθος (m)	Κλίση (°)	Βάθος πιεζομέτρου (m)	Εκτέλεση
Γ ₁	Άξονας – δεξιό αντέρεισμα	+845.12	-777.93	-5124.61	60.00	90	60	ΓΕΟPLAN ΕΠΕ
Γ ₆	Δεξιό αντέρεισμα	+870.33	-745.24	-5175.56	95.00	90	95.00	ΓΕΟPLAN ΕΠΕ
Γ ₁₀	Δεξιό αντέρεισμα	+820.59	-531.61	-5045.48	35.00	90	35.00	ΓΕΟPLAN ΕΠΕ
Γ ₁₂	Δεξιό αντέρεισμα	+825.18	-993.11	-5076.06	35.00	90	35.00	ΓΕΟPLAN ΕΠΕ

Η γεώτρηση Γ1 εκτελέστηκε για τον έλεγχο των συνθηκών έδρασης του φράγματος καθώς και για τον έλεγχο των συνθηκών διαπερατότητας του υπεδάφους, η γεώτρηση Γ6 για τη διερεύνηση του καθεστώτος των υπόγειων νερών, την παρακολούθηση της δίαιτας των νερών και τη διερεύνησης περατότητας του γνευσίου και τέλος οι γεωτρήσεις Γ10 και Γ12 για την εκτίμηση του πάχους των πλευρικών κορημάτων καθώς και του βάθους αποσάθρωσης του υποκείμενου γνευσιακού υπόβαθρου, αντίστοιχα.

Οι πυρήνες που ελήφθησαν από κάθε γεώτρηση τοποθετήθηκαν σε ξύλινα κιβώτια και φωτογραφήθηκαν. Οι σχετικές φωτογραφίες και αναλυτικά η περιγραφή της στρωματογραφίας παρουσιάζεται στην υποενότητα 3.2.1. Έπειτα συγκεντρώθηκαν σε ημερήσια δελτία οι καιρικές συνθήκες, ο χαρακτηρισμός του γεωλογικού σχηματισμού, η προχώρηση, το είδος του κοπτικού, οι ενδεχόμενες σωληνώσεις προστασίας των τοιχωμάτων της γεώτρησης και επιπλέον αποτιμήθηκαν η πυρηνοληψία και ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος RQD, ο αριθμός των διακλάσεων ανά μέτρο, η κλίση τους καθώς και ο βαθμός αποσάθρωσής τους.

3.2.1 Στρωματογραφία

Τα στρώματα που συναντήθηκαν στις εκτελεσθείσες γεωτρήσεις ενδιαφέροντος, συγκεντρώνονται στους πίνακες 3.2 έως 3.5. Ενδεικτικά, φωτογραφικό υλικό από τα κασάκια της γεώτρησης Γ1, παρουσιάζεται στις εικόνες 3.3 έως 3.16.

Πίνακας 3.2: Στρωματογραφία γεώτρησης Γ1

Βάθος	Περιγραφή
0.00-4.15	Άμμος ιλυώδης καστανού χρώματος με μικρούς χάλικες
4.15-14.15	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος και τοπικά κατακερματισμένος, ελαφρά ως μέτρια αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
14.15-14.60	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κατακερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με αργιλικό υλικό πλήρωσης και οξειδωμένες διακλάσεις
14.60-19.60	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής έως κερματισμένος, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

19.60-20.40	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις. Καταγράφηκε ασυνέχεια 1 cm υπό κλίση 75°-90°, πληρωμένη με αργιλικό υλικό
20.40-40.00	Εναλλαγές Γνευσίου και Γνευσιοψαμμίτη, με φλέβες χαλαζία, συμπαγών έως κερματισμένων, υγιών έως ελαφρά αποσαθρωμένων, με οξειδωμένες διακλάσεις
40.00-48.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος έως κατακερματισμένος, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος με οξειδωμένες διακλάσεις
48.00-60.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
60.00	Τέλος γεώτρησης



Εικόνα 3.3: βάθος 0.00-4.15



Εικόνα 3.4: βάθος 4.15-8.05



Εικόνα 3.5: Βάθος 8.05-12.30



Εικόνα 3.6: Βάθος 12.30-16.15



Εικόνα 3.7: Βάθος 16.15-20.35



Εικόνα 3.8: Βάθος 20.35-24.20

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 3.9: Βάθος 24.20-27.40



Εικόνα 3.10: Βάθος 27.40-32.25



Εικόνα 3.11: Βάθος 32.25-34.40



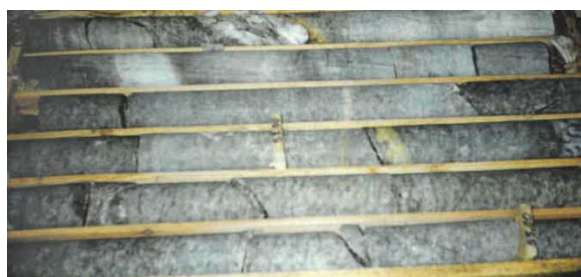
Εικόνα 3.12: Βάθος 34.40-40.40



Εικόνα 3.13: Βάθος 40.40-45.00



Εικόνα 3.14: Βάθος 45.00-50.10



Εικόνα 3.15: Βάθος 50.10-55.15



Εικόνα 3.16: Βάθος 55.15-60.60

Φωτογραφικό υλικό από τα κασάκια της γεώτρησης Γ6, παρουσιάζεται στις εικόνες **0.1** έως **0.22**, του παραρτήματος.

Πίνακας 3.3: Στρωματογραφία γεώτρησης Γ6

Βάθος	Περιγραφή
0.00-2.40	Άμμος ιλυώδης με χάλικες
2.40-8.50	Γνεύσιος κερματισμένος, αρκετά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
8.50-15.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κατακερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, κυρίως στις διακλάσεις. Τοπικά παρατηρούνται ζώνες χαμηλότερου κερματισμού.
15.00-16.60	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
16.60-20.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος έως κατακερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
20.00-35.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής έως κερματισμένος στις οξειδωμένες διακλάσεις, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
35.00-41.70	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κατακερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
41.70-47.30	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις, με μια περιορισμένη ζώνη κερματισμού
47.30-60.00	Εναλλαγές γνευσίου-γνευσιοψαμμίτη, με φλέβες χαλαζία, συμπαγών τοπικά κερματισμένων, ελαφρά αποσαθρωμένων, με οξειδωμένες διακλάσεις
60.00-63.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής, ελαφρά αποσαθρωμένος με οξειδωμένες διακλάσεις
63.00-65.00	Εναλλαγές γνευσίου-γνευσιοψαμμίτη, με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις και περιορισμένες ζώνες κερματισμού.
65.00-73.50	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος έως κατακερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
73.50-84.50	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος, συμπαγής έως κερματισμένος, υγιής με οξειδωμένες διακλάσεις
84.50-87.40	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, κερματισμένος, υγιής με οξειδωμένες διακλάσεις
87.40-95.00	Γνεύσιος με φλέβες χαλαζία, συμπαγής, τοπικά κερματισμένος, υγιής με ελαφρώς οξειδωμένες διακλάσεις
95.00	Τέλος γεώτρησης

Πίνακας 3.4: Στρωματογραφία γεώτρησης Γ10

Βάθος	Περιγραφή
0.00-2.00	Άμμος ιλυώδης κόκκινου χρώματος
2.00-3.20	Γνεύσιος τελείως αποσαθρωμένος
3.20-4.50	Γνεύσιος κατακερματισμένος, μέτρια αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
4.50-9.40	Γνεύσιος συμπαγής έως κερματισμένος, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις. Οι ασυνέχειες είναι πληρωμένες με αργιλικό υλικό
9.40-13.80	Γνεύσιος συμπαγής, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
13.80-20.00	Γνεύσιος συμπαγής έως κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις

20.00-35.00	Γνεύσιος συμπαγής, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις και περιορισμένες ζώνες κερματισμού.
35.00	Τέλος γεώτρησης

Φωτογραφικό υλικό από τα κασάκια της γεώτρησης Γ10, παρουσιάζεται στις εικόνες 0.23 έως 0.29, του παραρτήματος.

Πίνακας 3.5: Στρωματογραφία γεώτρησης Γ12

Βάθος	Περιγραφή
0.00-2.10	Αργιλοϊλύς καστανού χρώματος με χάλικες
2.10-3.50	Γνεύσιος τελείως αποσαθρωμένος
3.50-5.20	Γνεύσιος συμπαγής έως κερματισμένος, ελαφρά έως μέτρια κερματισμένος με οξειδωμένες διακλάσεις
5.20-6.90	Εναλλαγές απλιτικού – βιοτιτικού γνευσίου, σε στρωματίδια των 5-10 cm, κερματισμένος έως συμπαγής, ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
6.90-7.40	Απλιτικός γνεύσιος συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
7.40-18.50	Γνεύσιος συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις και με εμφανίσεις βιοτιτικού γνευσίου και περιορισμένης ζώνης κερματισμού
18.50-27.50	Γνεύσιος συμπαγής έως κερματισμένος, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις και περιορισμένη ζώνη κερματισμού
27.50-33.00	Γνεύσιος συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος με οξειδωμένες διακλάσεις
33.00-34.20	Γνεύσιος κατακερματισμένος, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, με οξειδωμένες διακλάσεις
34.20-35.00	Γνεύσιος συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος με οξειδωμένες διακλάσεις
35.00	Τέλος γεώτρησης

Φωτογραφικό υλικό από τα κασάκια της γεώτρησης Γ12, παρουσιάζεται στις εικόνες 0.30 έως 0.36, του παραρτήματος.

3.3 Γεωλογικό υπόβαθρο

Σύμφωνα με τη γεωλογική έκθεση της Προμελέτης και τις εκθέσεις του συμβούλου καθηγητή κ. Π. Μαρίνου η ευρύτερη περιοχή, δομείται από μεταμορφωμένα, παλαιοζωικής ηλικίας πετρώματα της Πελαγονικής Ζώνης. Το γνευσιο - σχιστολιθικό υπόβαθρο καλύπτεται σε μεγάλη έκταση από αποσαθρωμένα πλευρικά κορήματα και παλαιότερες ποτάμιες αποθέσεις. Συγκεκριμένα, το βραχώδες υπόβαθρο στη θέση του φράγματος αποτελείται από γνεύσιους - γρανιτογνεύσιους με παρεμβολές αμφιβολιτικών και βιοτιτικών σχιστόλιθων, ενώ εμφανίζονται απλιτικές φλέβες και συγκεντρώσεις σε φακοειδή κυρίως μορφή. Ειδικότερα, στο αριστερό αντέρεισμα και την κοίτη επικρατούν σε μεγάλο ποσοστό γνεύσιοι και γρανιτογνεύσιοι, ενώ αμφιβολιτικοί και βιοτιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζονται ως ενστρώσεις μικρού πάχους. Στο δεξί αντέρεισμα, η ποσοστιαία εμφάνιση και το πάχος των αμφιβολιτικών – βιοτιτικών σχιστόλιθων αυξάνεται, ενώ του βραχώδους υποβάθρου υπέρκειται μανδύας αποσάθρωσης μικρού πάχους. Επίσης, επιφανειακά και σε μεγάλη έκταση παρατηρούνται πλευρικά κορήματα και παλιότερες ποτάμιες αποθέσεις αμμοϊλυδούς

σύστασης. Τα υλικά του χαλαρού καλύμματος παρουσιάζουν ιδιαίτερη εξάπλωση στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος.

Ο γνεύσιος ανήκει στην κατηγορία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, όπως και οι αμφιβολίτες, οι σχιστόλιθοι, τα μάρμαρα και οι χαλαζίτες. Ως προς τον ιστό του χαρακτηρίζεται ως ζωνώδης ή σχιστοφυής ενώ ως προς την εξωτερική γεωμετρία διακρίνεται από τη στρωμάτωση. Από τεχνικής άποψης συμπεριφέρεται όπως τα πυριγενή πετρώματα, εμφανίζοντας υψηλές αντοχές χάρη στην εξαιρετική αλληλοεμπλοκή μεταξύ του χαλαζία, του αστριού και των μαρμαρυγιών, αποσαθρωσιμότητα και ρωγμάτωση και κατά περιπτώσεις φέρει πρόσθετα ασθενή ορυκτά. Αξίζει να αναφερθεί πως η αντοχή του μειώνεται σημαντικά λόγω της αποσάθρωσης του αστριού που αργιλοποιείται σε καολίνη.

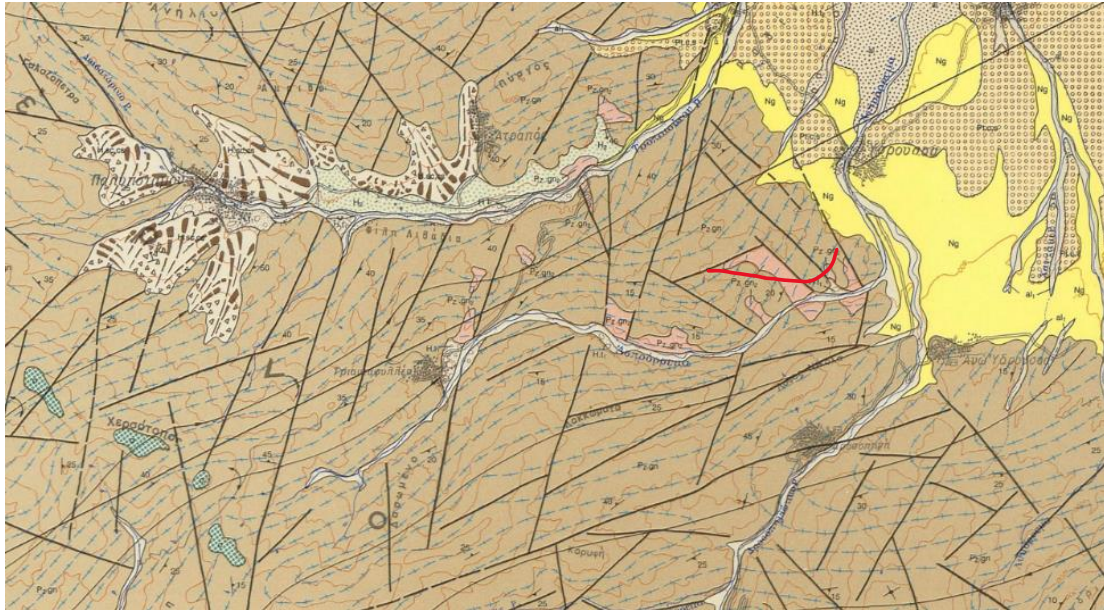
Σε γενικές γραμμές το περιβάλλον του γνευσίου χαρακτηρίζεται από υψηλές αντοχές, ετερογένεια λόγω της γνευσιακής υφής, ακανόνιστη αποσάθρωση τόσο στο βάθος όσο και στην οριζόντια διεύθυνση λόγω του έντονου και άναρχου κερματισμού ενώ οι ζώνες διάτμησης σχηματίζουν έντονα κερματισμένες και αποσαθρωμένες ζώνες σημαντικού πάχους (10 m) που αποτελούνται από υπολειμματικά τεμάχη αποσαθρωμένου γνευσίου ανάμεικτα με αποσαθρωμένα – αργιλοποιημένα γεωυλικά.

Η τεκτονική συμπεριφορά του γνευσίου χαρακτηρίζεται ως αρκετά καλή με υψηλές παραμέτρους αντοχής, οι οποίες μειώνονται σημαντικά στις ζώνες αποσάθρωσης. Εν γένει είναι αδιαπέρατοι σχηματισμοί, πλην των κερματισμένων ζωνών, και κατά συνέπεια δεν παρουσιάζουν προβλήματα στεγανότητας στους ταμιευτήρες. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις συστήνεται η εκτέλεση υπόγειου διαφράγματος κάτω και γύρω από το φράγμα ανάλογα με την πυκνότητα και το βάθος των ρωγμών. Τέλος, η σχιστότητα χρίζει ιδιαίτερης αντιμετώπισης στην περίπτωση διάνοιξης σήραγγας ή κατασκευής πρσανούς.

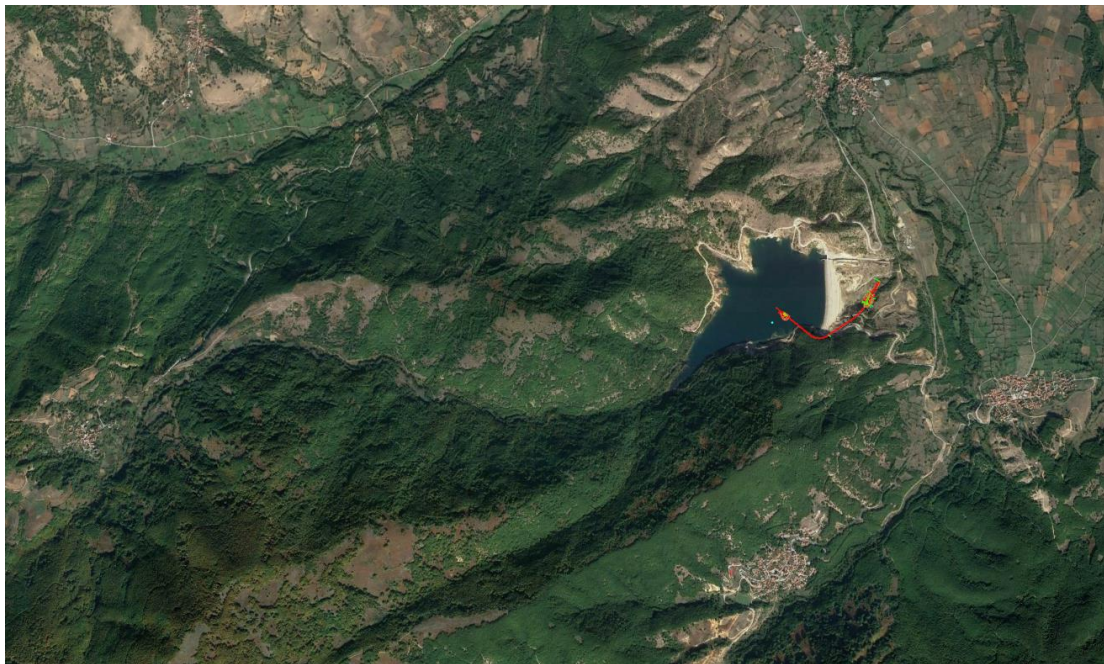
Επιπλέον, η τεκτονική δομή της περιοχής, εκφράζεται από την πτυχογόνο και τη ρηγματογόνο τεκτονική. Συγκεκριμένα, στο κάτω μέρος του δεξιού αντερείσματος συναντάται ένα διαμήκες ρήγμα με μία ζώνη διαταραχής πλάτους 0.5 m – 1.0 m. Η διαταραχή αυτή για την ομαλή διεξαγωγή του έργου αποκαταστάθηκε με μια τυπική εξυγίανση στη φάση εκσκαφής και ενισχύθηκε με διάφραγμα τσιμεντενέσεων. Γενικά είναι γεγονός ότι η βραχόμαζα του γνευσίου παρουσιάζει μέτρια ρηγμάτωση χάρη στην οποία παρουσιάζει υψηλές αντοχές, μικρή παραμορφωσιμότητα και μικρές διαπερατότητες. Οι τιμές *RQD* λαμβάνουν μέτριες έως υψηλές τιμές, με απομειωμένες τιμές στις ζώνες έντονης ρωγμάτωσης.

Στην εικόνα 3.17 παρουσιάζεται τμήμα του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ στο οποίο απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σιράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 3.17: Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος (Από Ινστιτούτο γεωλογικών και μεταλλευτικών ερευνών)



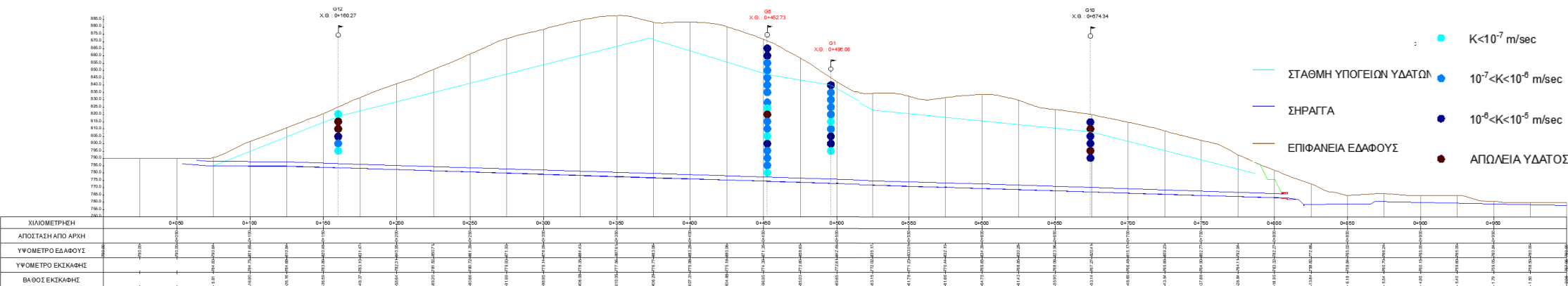
Εικόνα 3.18: Σήραγγα εκτροπής φράγματος Τριανταφυλλιάς (Google earth)

Στην περιοχή της θεμελίωσης του φράγματος, οι γνεύσιοι - γρανιτογνεύσιοι (με παρεμβολές σχιστόλιθων) συνθέτουν βραχώμαζα καλής έως πολύ καλής ποιότητας. Η γενικότερη περατότητα του χώρου κάτω από το φράγμα χαρακτηρίζεται μέτρια έως μικρή, ενώ σε περιοχές που εντοπίζονται υψηλότερες τιμές περατότητας, εκτελέστηκαν διαφράγματα τσιμεντενέσεων. Η μηκοτομή όπου παρουσιάζεται ο συντελεστής διαπερατότητας k στις γεωτρήσεις Γ1, Γ6, Γ10 και Γ12 παρουσιάζεται στην εικόνα 3.19.

Στην περιοχή των αντερεισμάτων, κατόπιν μετρήσεων παρατηρήθηκαν χαμηλές τιμές πιεζομετρίας. Συγκεκριμένα, στο αριστερό αντέρεισμα η χαμηλή θέση της πιεζομετρικής γραμμής σε συνδυασμό με την ύπαρξη δύο χαμηλών αυχένων και τη μικρή παρεμβαλλόμενη ράχη που διαχωρίζει τον ταμειυτήρα από τη γειτονική λεκάνη, οδήγησε στην απαίτηση εκτεταμένης κουρτίνας τσιμεντενέσεων με στόχο την

ελαχιστοποίηση των υπόγειων διαφυγών από τον ταμειευτήρα προς την πλευρική λεκάνη. Στο δεξί αντέρεισμα, σχεδιάστηκε ομοίως κουρτίνα τσιμεντενέσεων, μέτριας έκτασης λόγω περιορισμένων πλευρικών διαφυγών. Αναφορικά με την εκδήλωση ερπυστικών συμπεριφορών, δεν διαπιστώθηκαν ιδιαίτερα φαινόμενα αστάθειας στα πρανή με εξαίρεση έναν επιδερμικό ερπυσμό επί του δεξιού αντερείσματος, φαινόμενο που συναντάται συχνά σε κολλουβιακά υλικά που προέρχονται από αλλουβιακούς μανδύες, τα οποία εν προκειμένω είναι μικρού πάχους και επομένως επιδρούν αμυδρά στην ευστάθεια του πρανούς. Προσεγγιστικά, η πιεζομετρική γραμμή κατά μήκος της σήραγγας εκτροπής παρουσιάζεται στην εικόνα 3.19.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 3.19: Μηκοτομή κατανομής συντελεστή διαπερατότητας k μηχανήματος micro-TBM (Civil 3D, 2020)

3.4 Γεωτεχνική έρευνα και εργασίες – Όπως εκτελέστηκαν

Γενικά, η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα υπόκειται σε διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή του έτους, την ένταση των βροχοπτώσεων, το βάθος της διάτρησης και τους σχηματισμούς που συναντώνται. Επομένως στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας κρίθηκε αναγκαία η χρήση πιεζομετρικών σωλήνων εντός των γεωτρήσεων με στόχο την μακροχρόνια παρακολούθηση της στάθμης του νερού. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν με χρήση ηλεκτρονικού σταθμημέτρου στα πιεζόμετρα των γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Στάθμες νερού στα πιεζόμετρα των γεωτρήσεων Γ1, Γ6, Γ10, Γ12 της οριστικής μελέτης

Όνομα	10/11/1997	12/11/1997	18/11/1997	26/11/1997	2/12/1997	13/5/1998
Γ ₁	-	-	53.70	55.25	-	56.08
Γ ₆	71.30	71.43	72.30	72.86	-	73.00
Γ ₁₀	-	-	-	-	23.00	-
Γ ₁₂	-	-	-	-	28.00	-

Ο γνεύσιος, πέτρωμα που επικρατεί στην περιοχή του έργου, χαρακτηρίζεται από χαμηλή πρωτογενή διαπερατότητα. Ωστόσο, λόγω ενός ανεπτυγμένου δικτύου ασυνεχειών παρουσιάζει δευτερογενή διαπερατότητα που κυμαίνεται από χαμηλότερες έως υψηλότερες τιμές. Με στόχο τον προσδιορισμό της διαπερατότητας του γνευσίου καθώς και της μελέτης της απόκρισης του πετρώματος στην κυκλοφορία του νερού υπό την επενέργεια υδροστατικού φορτίου, εκτελέστηκαν δοκιμές εισπιέσεων κατά Lugeon.

3.4.1 Σκοπός και περιεχόμενο της γεωτεχνικής έρευνας

Μέσω της διαδικασίας αξιολόγησης των γεωτεχνικών δεδομένων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός προβληματικών συνθηκών και ο προσδιορισμός των τρόπων αντιμετώπισής τους ώστε να εξασφαλίζονται προϋποθέσεις στεγανότητας και ευστάθειας. Πιο αναλυτικά, εν προκειμένω απαιτείται η εξασφάλιση της στεγανότητας της λεκάνης κατάκλισης καθώς και η ευστάθεια των πρανών της, η ασφαλής θεμελίωση του φράγματος και η γενικότερη ευστάθεια του έργου και η εφικτή από τεχνικής και οικονομικής άποψης κατασκευή του συνόλου του έργου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η γεωτεχνική μελέτη στην περιοχή της θέσης του φράγματος και συγκεκριμένα η αξιολόγηση της φύσης και της δομής του βραχώδους υποβάθρου, το πάχος της ζώνης εξαλλοίωσης καθώς και η έκταση της ζώνης κάμψης στα αντερείσματα, το βάθος διαχωρισμού μεταξύ των υγιών βραχοσχηματισμών με περιορισμένες – ή μη – ασυνέχειες και του υγιούς υποβάθρου και τέλος η διαπερατότητα της βραχώμαζας κάτω από το σώμα του φράγματος, ειδικά στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος.

Για τους σκοπούς της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας, ακολούθως αναλύονται τα στοιχεία των γεωτρήσεων και τα εργαστηριακά αποτελέσματα κυρίως στην περιοχή της σήραγγας εκτροπής, ήτοι στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος.

3.4.2 Λεκάνη κατάκλυσης

Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης, κυρίαρχη είναι η εμφάνιση παλαιοζωικής ηλικίας έντονα μεταμορφωμένων πετρωμάτων και συγκεκριμένα γνευσίων, γρανιτογνευσίων, σχιστόλιθων και αμφιβολιτών που υπάγονται στην πελαγονική γεωτεκτονική ζώνη. Οι γνεύσιοι, οι γρανιτογνεύσιοι και οι σχιστόλιθοι της ευρύτερης περιοχής παρουσιάζονται με έντονες πτυχές διευθύνσεων BBA-NNΔ έως B-N και ΔΔN-AAB έως Δ-A, στην επικρατούσα και στην δευτερεύουσα διεύθυνση, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη προμελέτη του έργου και τις σχετικές γεωλογικές αξιολογήσεις, το βραχώδες υπόβαθρο καλύπτεται από πλευρικά κορήματα και αποσαθρώματα μικρού πάχους, κυρίως στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος όπως επίσης και στο υψηλότερο τμήμα του δεξιού αντερείσματος. Επιπλέον, η περιοχή της κοίτης καλύπτεται από υλικά παλαιότερων ποτάμιων αναβαθμίδων, με πάχος στρώσης σχετικά μικρό. Αναφορικά με τις συνθήκες στεγανότητας της λεκάνης κατάκλυσης αυτές παρουσιάζονται ευνοϊκές καθώς η γνευσιακή βραχώμαζα έχει μικρή διαπερατότητα. Τέλος, σύμφωνα με την εκτίμηση του καθ. Π. Μαρίνου, οι συνθήκες ευστάθειας των αντερείσμάτων της λεκάνης κατάκλυσης διαφαίνονται καλές.

3.4.3 Φύση και δομή του βραχώδους υποβάθρου

Από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν στην περιοχή του φράγματος όσο και των αντερείσμάτων, κρίθηκε σαφής η ύπαρξη τεκτονισμένου περιβάλλοντος στην περιοχή της ζώνης έδρασης του φράγματος. Επιπρόσθετα, οι ασυνέχειες (σχιστότητα, διαρρήξεις, διακλάσεις) που συναντήθηκαν στην περίπτωση του γνευσίου, υποδηλώνουν την ψαθυρή μηχανική του συμπεριφορά. Τέλος, είναι πιθανή η κυκλοφορία υπόγειου νερού και η κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στα επιφανειακά στρώματα, χωρίς ωστόσο να είναι σαφές το αντίστροφο φαινόμενο, ήτοι η ύπαρξη μεγάλου βαθμού αποσάθρωσης σε όλες τις ζώνες κερματισμού. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στην ύπαρξη παρακατακόρυφων διακλάσεων, οι οποίες αποτρέπουν τη διασύνδεση των ασυνεχειών με το περιβάλλον και την ευρύτερη κυκλοφορία νερού.

Ο βαθμός κερματισμού του γνευσίου ποικίλει σε όλο το βάθος που εξετάστηκε. Η κατάσταση της βραχώμαζας στο δεξιό αντέρεισμα χαρακτηρίζεται συμπαγής έως κερματισμένη με τιμές του RQD να κυμαίνονται από 25% έως 98% και τοπικά κερματισμένη ($RQD < 25\%$). Οι ζώνες κερματισμού είτε έχουν σημαντικό πάχος (θέσεις Γ1, TR1), εμφανιζόμενες ακόμα και σε σχετικά μεγάλα βάθη, είτε έχουν μικρό πάχος και εμφανίζονται κατ' εξαίρεση σε μεγάλο σχετικά βάθος (θέση TR2), είτε τέλος έχουν μικρό πάχος αλλά απαντώνται σε συχνή εναλλαγή με ζώνες ασθενέστερου κερματισμού (θέση Γ6). Ο κερματισμός είναι λιγότερο εμφανής στον πόδα του δεξιού αντερείσματος, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται εντελώς η παρεμβολή κερματισμένων ζωνών.

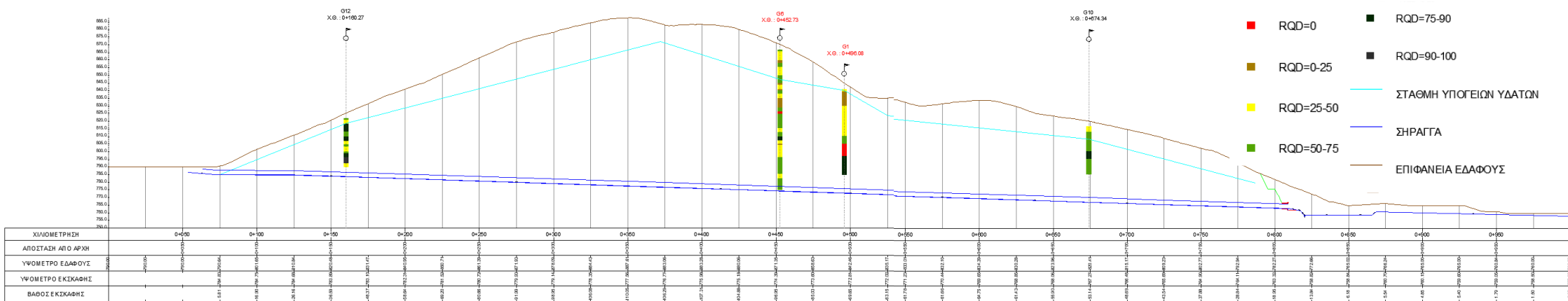
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατηγοριοποίηση των βραχωδών δειγμάτων κατά *ISRM*. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την κατάταξη αυτή, στην κατηγορία I ανήκουν δείγματα υγιή που δεν φέρουν ίχνη αποσάθρωσης, στην κατηγορίας II κατατάσσονται δείγματα ελάχιστα αποσαθρωμένα με την αποσάθρωση να περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών, ενώ στην κατηγορία III διακρίνονται ολίγον αποσαθρωμένα δείγματα με έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού. Επιπρόσθετα, στην κατηγορία IV ανήκουν τα μετρίως αποσαθρωμένα δείγματα με εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού χωρίς όμως αυτό να χάνει την ευθρυπτότητα του, στην κατηγορία V τα έντονα αποσαθρωμένα δείγματα με πλήρη αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, στην κατηγορία VI τα πλήρως αποσαθρωμένα δείγματα όπου χαρακτηρίζονται από πλήρη αποσάθρωση και

μεγάλη ευθρυπτότητα με διατήρηση ωστόσο της υφής και της δομής και τέλος διακρίνεται το έδαφος όπου η υφή και η δομή του υλικού έχει καταστραφεί και αποτελεί πλέον υπολειμματικό σχηματισμό.

Ειδικότερα, στη γεώτρηση Γ1 η βραχώμαζα εμφανίζεται κερματισμένη μέχρι βάθους 25 m περίπου με μέσο όρο RQD περί το 15 %. Εν συνεχεία, ακολουθεί κερματισμένο έως ελαφρώς κερματισμένο πέτρωμα ($RQD \approx 40$) μέχρι το βάθος των 40 m κάτω από το οποίο απαντάται πλήρως κατακερματισμένη ζώνη ($RQD < 10$) πάχους 8 m. Τέλος από το βάθος των 48 m μέχρι το πέρας της γεώτρησης ο μέσος όρος του δείκτη RQD ισούται με 75%. Ελαφρά έως μέτρια αποσάθρωση παρατηρείται στη γεώτρηση Γ1 μέχρι βάθους 14 m, ήτοι κατηγορίας II-III κατά ISRM.

Στη γεώτρηση Γ6 παρουσιάζονται μεγάλες αυξομειώσεις του δείκτη RQD , από 0 έως 70% μέχρι βάθους 45 m περίπου, σε βάθος ίσο με 65 m περίπου η βραχώμαζα παρουσιάζεται ελαφρώς έως μέτρια κερματισμένη με μέσο όρο RQD περί το 60%, ενώ μεσολαβεί ασθενέστερη ζώνη από βάθος 65 έως 72 m με RQD περί το 35%. Τέλος, η βραχώμαζα εμφανίζεται και πάλι πιο συμπαγής με RQD περί το 55% - 60% στο τέλος της γεώτρησης, με εξαίρεση μια λεπτή ασθενέστερη ζώνη στο βάθος των 85 m. Αποσαθρωμένη ζώνη εντοπίστηκε μέχρι το βάθος των 35 m και τέλος, ήτοι κατηγορίας III κατά ISRM. Η σχετική μηκοτομή που απεικονίζεται ο βαθμός κερματισμού RQD στις επιμέρους γεωτρήσεις, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.20.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 3.20: Μηκοτομή κατανομής βαθμού RQD (Civil 3D, 2020)

3.4.4 Δοκιμαστική στοά

Πριν τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη δοκιμαστικής στοάς στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος, μήκους 53 m, πλάτους ανοίγματος στη βάση ίσο με 2.5 m και στην οροφή ίσο με 2 m, και ύψους 2.5 m.

Η διάνοιξη της δοκιμαστικής στοάς εκτελέστηκε με εξόρυξη με κρουστική αεροσφύρα στα πρώτα 5 m, στα επόμενα 10 m με χρήση εκρηκτικών και μικρά βήματα προχώρησης, στα επόμενα 15 m με εκρηκτικά σε γενικά σκληρό πέτρωμα και στα υπόλοιπο μήκος της με εκρηκτικά και κανονική προχώρηση.

Κατά την εκσκαφή δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα άμεσης υποστήριξης εκτός από ορισμένες θέσεις όπου παρατηρήθηκε αποκόλληση του πετρώματος από την οροφή. Ο χρόνος αυτοϋποστήριξης του πετρώματος είναι υψηλός, γεγονός που προσδίδει τη δυνατότητα τοποθέτηση της υποστήριξης με υστέρηση και συγκεκριμένα έως και κατά 8-10 μέτρα από το μέτωπο. Η υποστήριξη τοποθετήθηκε ανά 1.5 - 2.0 m με χρήση στρογγυλή ξυλείας καστανιάς με διάμετρο στοιχείων πλαισίου ίση με 16 - 20 cm ενώ για την επένδυση χρησιμοποιήθηκε η ίδια ξυλεία σε σχιστή μορφή.

Εντός της στοάς συναντήθηκαν αποκλειστικά γνευσιακά πετρώματα της κατηγορίας των γρανιτογενέσιων. Πιο αναλυτικά, στο τμήμα από 0 έως 5.5 m, επικρατεί ο λευκοκρατικός μαρμαρυγιακός γνεύσιος με αραιή σχιστότητα, μέτρια αποσαθρωμένος, με πυκνές συστηματικές διακλάσεις, μήκους μέχρι 2 m και ανοίγματος έως 1 cm πληρωμένες με συνεκτικό αργιλοαμμώδες υλικό καθώς επίσης παρατηρήθηκε η εμφάνιση νερού στην οροφή υπό μορφή στάγδην ροής. Στη συνέχεια, στο τμήμα 5.5 έως 15 m, συναντήθηκε λευκοκρατικός μαρμαρυγιακός γνεύσιος με σαφώς ασθενέστερη σχιστότητα και αραιότερο δίκτυο διακλάσεων, ενώ γενικά πρόκειται για πέτρωμα με καλά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, στο τμήμα 15 έως 29 m, εμφανίστηκε λευκοκρατικός ως μελανοκρατικός γνεύσιος σε συμπαγείς πάγκους, με διαφαινόμενη σχιστότητα (γρανιτογενέσιος). Η βραχώμαζα τεμνόμενη από αραιές, κλειστές διαρρήξεις παρουσιάζεται υγιής με υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Στο επόμενο τμήμα, ήτοι από 29 m έως 40 m, το πέτρωμα δεν διαφέρει από αυτό του προηγούμενου τμήματος, καθώς πρόκειται για μελανοκρατικούς συμπαγείς γρανιτογενέσιους με ατελή σχιστότητα και αραιές διαρρήξεις πληρωμένες πάντα με συνεκτικό αργιλοαμμώδες υλικό, ενώ και πάλι παρατηρείται εμφάνιση νερού στην οροφή υπό μορφή στάγδην ροής. Στο τελευταίο τμήμα (40 m – 53 m) συναντήθηκε μελανοκρατικός γρανιτογενέσιος με συμπαγείς υγιείς πάγκους με μηχανικά χαρακτηριστικά γενικά ομοιογενή και υψηλές τιμές, ενώ ο βαθμός διάρρηξης είναι ασθενής και η αποσάθρωση περιορίζεται στα τοιχώματα των ασυνεχειών.

Συμπερασματικά, πρόκειται για απλή λιθολογική σύσταση καθώς αποκλειστικά σε όλο το μήκος της δοκιμαστικής στοάς συναντώνται γνεύσιοι. Η μηχανική συμπεριφορά των γρανιτογενευσιακών πετρωμάτων είναι σε γενικές γραμμές πολύ καλή στα τεχνικά έργα. Ως προς το δίκτυο των ασυνεχειών, οι ασυνέχειες εμφανίζονται κλειστές ή παρουσιάζουν άνοιγμα μικρού εύρους, και έχουν μικρή πυκνότητα.

Το μέτριο αυτό δίκτυο ασυνεχειών αποτελείται από επίπεδα σχιστότητας και διάρρηξης, όπως προαναφέρθηκε. Οι ασυνέχειες αυτές μελετήθηκαν μέσω 100 συστηματικών μετρήσεων σε όλο το μήκος της δοκιμαστικής στοάς σε συνδυασμό με την πυκνότητα, το άνοιγμα και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, τη φύση των επιφανειών και την παρουσία νερού. Από τα παραπάνω κατέστη σαφές ότι το γνευσιακό πέτρωμα διασχίζεται από μέτριο δίκτυο ασυνεχειών που αλληλοτεμνόμενες τείνουν να αποχωρήσουν τη γνευσιακή βραχώμαζα σε επιμέρους τμήματα μικρών διαστάσεων και επίσης δεν παρατηρούνται τάσεις χαλάρωσης της γνευσιακής βραχώμαζας λόγω χαμηλής διατμητική αντοχής και υψηλής γωνίας τριβής, στη μικρή επέκταση

των ασυνεχειών και στο μικρό άνοιγμα αυτών. Ένα ακόμα ευνοϊκό στοιχείο για τις μηχανικές συνθήκες της ερευνητικής στοάς αποτέλεσε η ισχυρή κλίση των επιπέδων διάρρηξης, της τάξης των 55° - 80°.

3.4.5 Σήραγγα εκτροπής – εκκένωσης

Η σήραγγα εκτροπής – εκκένωσης κατασκευάστηκε στο δεξί αντέρεισμα του φράγματος με πρηνή των μετώπων της ύψους 25 m. Η σήραγγα διέρχεται από γνεύσιο καλής έως μέτριας ποιότητας ο οποίος ταξινομήθηκε κατά Bieniawski. Παρατηρήθηκε, επιπλέον, η ύπαρξη σημαντικού αριθμού κατακόρυφων ασυνεχειών και χαμηλή τιμή του δείκτη πετρώματος RQD , γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την υψηλή αντοχή και την καλή γενικότερη εικόνα του πετρώματος.

Η εκτίμηση της περατότητας της βραχώμαζας στην περιοχή της σήραγγας εκτροπής υπό την αναμενόμενη υδροστατική πίεση κατά τη φάση λειτουργίας του έργου έγινε με την παραδοχή ότι στα αντερείσματα επέρχεται κορεσμός του πετρώματος σε απόλυτο υψόμετρο ίσο με τη μέγιστη στάθμη πλημμύρας, λόγω της εισροής του νερού μέσω των ασυνεχειών.

Για κάθε εξεταζόμενο βάθος (τμήμα 5 m), εκτιμήθηκε η πρόσθετη υδροστατική πίεση ($P_{\text{προσθ. υδροστ}}$) καθώς και η υδροστατική πίεση ($P_{\text{υδρ}}$), η οποία ασκείται στο μέσο κάθε τμήματος, λαμβάνοντας υπόψιν τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Ως μέγιστη υδροστατική πίεση σε κάθε βάθος κατά τη φάση λειτουργίας του φράγματος ορίστηκε το άθροισμα των δύο προηγούμενων πιέσεων.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας ως προς την υδροδιαπερατότητα έγινε βάσει της μορφής των διαγραμμάτων Lugeon και συγκεκριμένα της γραμμικότητας αυτών και της σχετικής θέσης των δύο κλάδων, λαμβάνοντας υπόψιν και τις υδροστατικές πιέσεις $P_{\text{υδρ. max}}$ που ασκούνται κατά τη φάση λειτουργίας του έργου.

Η περατότητα της βραχώμαζας προσδιορίζεται με τρεις δυνατές δοκιμές – τη δοκιμή Lugeon, τη δοκιμή σταθερού φορτίου (Lefranc) και τη δοκιμή πίπτοντος φορτίου (Maag). Πιο αναλυτικά, κατά τη δοκιμή Lugeon μετριέται η απορροφούμενη ποσότητα νερού σε συνάρτηση με το χρόνο στο εισπνεζόμενο τμήμα μήκους 3 έως 5 m, με διάφορες βαθμίδες πίεσεως, που εφαρμόζονται αρχικά με αύξουσα και στη συνέχεια με φθίνουσα σειρά και συνίσταται στην περίπτωση βραχωδών σχηματισμών. Κατά τη δοκιμή Lefranc μετράται η παροχή του νερού σε συνάρτηση με το χρόνο που διοχετεύεται στη γεώτρηση ώστε η στάθμη του νερού μέσα στη σωλήνωση τη επένδυσης να είναι σταθερή και συνίσταται σε εδάφη καλής περατότητας. Τέλος, κατά τη δοκιμή Maag, μετριέται η πτώση της στάθμης μέσα στη σωληνωμένη γεώτρηση σε συνάρτηση με το χρόνο και συνίσταται σε περιπτώσεις εδαφών μικρής περατότητας (Μαρίνος, Β., 2021). Εν προκειμένω, η περατότητα της εξεταζόμενης βραχώμαζας προσδιορίστηκε με εκτέλεση δοκιμής Lugeon.

Στο δεξιό αντέρεισμα, στο οποίο είναι κατασκευασμένη η σήραγγα εκτροπής, όπως προαναφέρθηκε, εκτελέστηκαν οι γεωτρήσεις Γ1, Γ6, Γ10 και Γ12. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δοκιμής Lugeon κατέσπει σαφής η ελαστική συμπεριφορά της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Επιπλέον παρατηρείται ότι η απότομη αύξηση της απορρόφησης σημειώνεται σε πιέσεις υψηλότερες αυτών που εφαρμόζεται στη φάση λειτουργίας του έργου, γεγονός που υποδηλώνει την πιθανότητα θραύσης του πετρώματος. Τέλος, είναι σαφές ότι η συμπεριφορά του εν λόγω αντερείσματος κατά τη φάση λειτουργίας, αναμένεται να είναι εκείνη που παρατηρείται σε καθεστώς χαμηλότερων πιέσεων.

Στην πλειοψηφία τους οι σχηματισμοί παρουσιάζουν αρκετά χαμηλή περατότητα, της τάξης του 10^{-5} έως 10^{-7} cm/sec. Πιο συγκεκριμένα, πολύ χαμηλή περατότητα παρουσιάζουν οι σχηματισμοί που συναντώνται στη γεώτρηση Γ1 σε βάθη 10-15 m και 20-55 m, στη γεώτρηση Γ12 σε βάθη 5-10 m και 30-35 m και στη γεώτρηση Γ6 σε βάθη 5-15 m, 25-30 m και 55-95 m. Ιδιαίτερα μικρή περατότητα, ήτοι πολύ μικρότερη από 10^{-7} cm/sec συναντάται στις γεωτρήσεις Γ1, Γ12 και Γ6 σε βάθη 15-20 m, 10-20 m και 25-30 m, 15-25 m και 45-55 m, αντίστοιχα. Είναι πιθανό αυτές οι μικρές τιμές περατότητας να οφείλονται σε απουσία διασύνδεσης των ασυνεχειών με το περιβάλλον. Σχηματισμοί με απορροφήσεις μεγαλύτερες από 10^{-5} cm/sec παρατηρούνται σπανιότερα, ωστόσο συναντήθηκαν στις γεωτρήσεις Γ1 και Γ12 σε βάθη 5-10 m και 20-25 m, αντίστοιχα.

Συμπεραίνεται βάσει των παραπάνω ότι μικρές τιμές περατότητας σημειώνονται σε βάθη όπου ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας είναι υψηλός και αντίστοιχα μεγάλες περατότητες εμφανίζονται σε ζώνες κερματισμού. Ωστόσο, περιπτώσεις κερματισμένων ζωνών με χαμηλές τιμές περατότητας εξηγούνται λόγω πιθανών παρακατακόρυφων διακλάσεων, οι οποίες ελαττώνουν τον δείκτη *RQD* ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν σε ορισμένες περιπτώσεις τη διασύνδεση των ασυνεχειών με το περιβάλλον και κατά συνέπεια την κυκλοφορία του νερού δια μέσω αυτών.

3.4.6 Εργασίες υπαίθρου

Για τη διάνοιξη των ερευνητικών φρεάτων και ορυγμάτων χρησιμοποιήθηκε μηχανικός ελαστικοφόρος εκσκαφέας τύπου JCB. Μετά το πέρας της διάνοιξης κάθε φρέατος περιγράφηκαν οι στρώσεις και ελήφθησαν διαταραγμένα δείγματα από κάθε στρώση. Το αντίστοιχο φωτογραφικό υλικό παρουσιάζεται στις εικόνες 3.21 έως 3.24. Στα δείγματα των φρεάτων εκτελέστηκαν δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών χαρακτηριστικών και συγκεκριμένα, δοκιμές προσδιορισμού της φυσικής υγρασίας, κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα και προσδιορισμός των ορίων Atterberg.

Τα φρεάτια T1 και T2 διανοίχτηκαν σε επιλεγμένες θέσεις, κατά μήκος των οδών προσπέλασης προς τις γεωτρήσεις Γ10 και Γ12, κατάντη και ανάντη του φράγματος αντίστοιχα. Οριζοντιογραφική απεικόνιση των ορυγμάτων T1 και T2 απεικονίζεται στην εικόνα 3.2. Στόχος της εκσκαφής των ορυγμάτων αυτών αποτέλεσε ο προσδιορισμός του πάχους των επιφανειακών χαλαρών στρώσεων και η διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με τα ερπυστικά φαινόμενα και με τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του υλικού της περιοχής για την κατασκευή του φράγματος. Η στρωματογραφική περιγραφή των φρεάτων συνοψίζεται στους πίνακες 3.7 και 3.8.

Πίνακας 3.7: Στρωματογραφική περιγραφή ορύγματος T1

Βάθος (m)	περιγραφή
0.00-0.20	Φυτική γη
0.20-0.80	Μανδύας αποσάθρωσης γνευσίου
0.80-1.60	Πολύ αποσαθρωμένος γνεύσιος
1.60-3.50	Γνεύσιος ελαφρά αποσαθρωμένος

Πίνακας 3.8: Στρωματογραφική περιγραφή ορύγματος T2

Ανατολική παρειά		Δυτική παρειά	
Βάθος (m)	περιγραφή	Βάθος (m)	περιγραφή
0.00-0.10	Φυτική γη	0.00-0.10	Φυτική γη
0.10-0.80	Μανδύας αποσάθρωσης γνευσίου	0.10-1.70	Μανδύας αποσάθρωσης γνευσίου
0.80-1.30	Πολύ αποσαθρωμένος γνεύσιος	1.70-2.30	Πολύ αποσαθρωμένος γνεύσιος
1.30-3.60	Γνεύσιος ελαφρά αποσαθρωμένος	2.30-3.40	Γνεύσιος ελαφρά αποσαθρωμένος



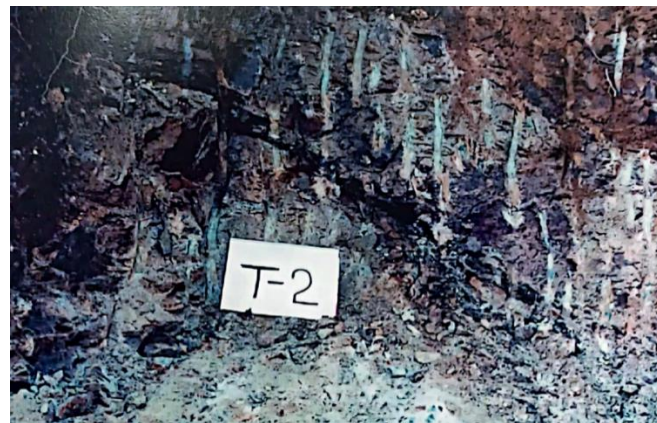
Εικόνα 3.21: Όρυγμα T1



Εικόνα 3.22: Όρυγμα T1



Εικόνα 3.23: Όρυγμα T2



Εικόνα 3.24: Όρυγμα T2

3.5 Υδρολογική μελέτη – Όπως εκτελέστηκε

Το παρόν κεφάλαιο συντάχθηκε βάσει των στοιχείων της Υδρολογικής μελέτης του φράγματος της Τριανταφυλλιάς (Υδροεξυγιαντική κ.ά., 1999). Γενικά, η υδρολογική διερεύνηση αφορά στον προσδιορισμό των μεγεθών σχεδιασμού του υπερχειλιστή και της σήραγγας εκτροπής του φράγματος καθώς και στην εκτίμηση των απολήψιμων όγκων νερού. Ο ταμιευτήρας του φράγματος της Τριανταφυλλιάς συλλέγει επιπλέον των νερών της ανάντη λεκάνης και τα νερά της παρακείμενης λεκάνης της Ελάτειας μέσω έργου εκτροπής. Συνεπώς, οι λεκάνες ενδιαφέροντος είναι η λεκάνη της Τριανταφυλλιάς ανάντη του φράγματος

και η λεκάνη της Ελάτειας ανάντη του έργου εκτροπής. Οι λεκάνες αυτές αποτελούν τμήματα της ευρύτερης λεκάνης του ρέματος Υδρούσας που βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά της υδρολογικής λεκάνης της Φλώρινας.

Πίνακας 3.9: Γεωγραφικά στοιχεία των λεκανών ενδιαφέροντος

Λεκάνη	Έκταση (km ²)	Μέσο υψόμετρο (m)
Τριανταφυλλιά στη θέση του φράγματος	18.9	1230
Ελάτεια στη θέση του έργου εκτροπής	37.6	1115
Υδρούσα	61.8	1325

Αναφέρεται ότι η λεκάνη απορροής της Υδρούσας αναπτύσσεται σε σχετικά μεγάλα υψόμετρα (από +750 έως +2100 m). Από γεωλογικής άποψης δομείται από γνευσίους, σχιστόλιθους, αμφιβολίτες και μεταμορφωμένα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα παλαιοζωικής ηλικίας. Η επιφανειακή απορροή της λεκάνης είναι ιδιαίτερα καλή χάρη στη φύση των πετρωμάτων σε συνδυασμό με το πάχος του τάπητα που έχει σχηματιστεί στο παρελθόν από τα φύλλα των δένδρων, και υφίσταται σημαντική αναρρύθμιση και υστέρηση ως προς τη γενεσιουργό βροχοπτώση. Η αναρρύθμιση αυτή οφείλεται επίσης στην εμφάνιση των κατακρημνισμάτων υπό μορφή χιονιού. Από άποψη φυτοκάλυψης στη λεκάνη της Υδρούσας απαντώνται αραιά δάση κωνοφόρων, θαμνώδης βλάστηση και γυμνό έδαφος κυρίως στα υψηλότερα τμήματα.

Τα έργα του φράγματος αναπτύσσονται στην κλειστή υδρολογική λεκάνη του Ασπρορέματος, σε απόσταση 2 km περίπου κατάντη της εξόδου του χειμάρρου Τριανταφυλλιάς στην Πεδιάδα της Φλώρινας. Το εμβαδό της υδρολογικής λεκάνης είναι ίσο με 18.90 km², το μέσο υψόμετρο της ανέρχεται στα +1230.00 m, το μήκος της κύριας μισγάγγειας ισούται με 7.5 km, ενώ το υψόμετρο της εξόδου της λεκάνης ανέρχεται στα +941 m. Σύμφωνα με την υδρολογική μελέτη του έργου, ελήφθησαν υπόψιν στοιχεία υδρομετρήσεων στην Υδρούσα καθώς και στοιχεία βροχοπτώσεων μέχρι το έτος 1997, ενώ με πιο σύγχρονες μεθοδολογίες διερευνήθηκαν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού του έργου του φράγματος (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015). Η υδρολογική διερεύνηση βασίστηκε σε δεδομένα βροχοπτώσεων που λήφθηκαν από την ΕΜΥ και το ΥΠΓΕ, δεδομένα μετεωρολογικών μεταβλητών από την ΕΜΥ, δεδομένα παροχής από τη ΔΕΗ και δεδομένα από παλαιότερες μελέτες (Υδροσύστημα κ.ά., 1990, 1995). Στις παλαιότερες μελέτες εξετάστηκαν βροχομετρικά μετεωρολογικά δεδομένα από 11 σταθμούς (Ακρίτα, Αχλάδα, Βεύη, Δροσοπηγή, Άνω Καλλινίκη, Παπαδιά, Πολυπόταμος, Σκοπός, Τροπαιούχος, Φλάμπουρο, Φλώρινα) της λεκάνης της Φλώρινας, ενώ μετεωρολογικά δεδομένα ελήφθησαν από 3 σταθμούς (Άνω Καλλινίκη, Τροπαιούχος και Φλώρινα).

Η έλλειψη των βροχογράφων στη λεκάνη της Τριανταφυλλιάς οδήγησε στην λήψη δεδομένων βροχής από το σταθμό της Φλώρινας, γεγονός που επέφερε μικρό σφάλμα σε σχέση με τις υπόλοιπες αβεβαιότητες στην εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών. Η όμβρια καμπύλη του βροχογράφου Φλώρινας παρουσιάζεται στη σχέση 3.30. Πρόκειται για όμβρια καμπύλη σημειακής βροχοπτώσεως η οποία αποτέλεσε τη βάση της όμβριας καμπύλης της λεκάνης της Τριανταφυλλιάς μέσω πολλαπλασιασμού με τον συντελεστή ομοιομόρφισης (3.31) (Κουτσογιάννης, 1997), όπου A είναι η έκταση της λεκάνης σε km² και d η διάρκεια της βροχοπτώσεως σε πρώτα λεπτά της ώρας. Για α ίσο με 0.22 και β ίσο με 0.28, προέκυψε η όμβρια καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για τη λεκάνη της Τριανταφυλλιάς (3.32), όπου i είναι η ένταση της βροχοπτώσεως σε mm/hr, d η διάρκεια της σε hr και T η περίοδος επαναφοράς.

$$i = \frac{1}{0.1318} \left(2.250 - \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (3.30)$$

$$r = 1 - \alpha A^\beta d^{-0.37} \quad (3.31)$$

$$i = (1 - 0.501(60d)^{-0.37}) \left(\frac{1}{0.1318} \right) (2.250 - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))) d^{-0.772} \quad (3.32)$$

Για την επιλογή της περιόδου επαναφοράς ελήφθησαν υπόψιν οι ελληνικές προδιαγραφές εκπόνησης μελετών αντιπλημμυρικών έργων (Π.Δ. 696,1974) σύμφωνα με τις οποίες προτείνεται περίοδος επαναφοράς 50 ετών και επίσης η προσωρινή λειτουργία της σήραγγας εκτροπής μόνο κατά τη διάρκεια κατασκευής του φράγματος σύμφωνα με το οποίο γίνεται αποδεκτή μικρότερη περίοδος επαναφοράς, έστω 20 ετών. Έτσι, εξετάστηκαν οι περίοδοι επαναφοράς 20, 50 και 100 ετών.

Για την εκτίμηση της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης (Probable Maximum Precipitation ή PMP) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hershfield (1961,1965), η οποία προτάθηκε από τον οργανισμό World Meteorological Organization (WMO, 1986) και βασίζεται σε δείγματα ετήσιων μεγίστων του μεγέθους ενδιαφέροντος. Το ύψος της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης h_m δίνεται από τη σχέση 3.33, όπου m η μέση τιμή των παρατηρημένων ετήσιων μεγίστων βροχοπτώσεων, s η τυπική απόκλιση τους και k_m συντελεστής συχνότητας. Οι εκτιμήσεις αυτές της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης υπέστησαν νέα επεξεργασία ώστε να είναι αξιοποιήσιμες για την κατάρτιση των υετογραμμάτων σχεδιασμού. Η επεξεργασία αυτή βασίστηκε στη σχέση 3.34, όπου α και n παράμετροι.

$$h_m = m + k_m s \quad (3.33)$$

$$h_m(d) = \alpha d^n \quad (3.34)$$

Οι παράμετροι α και n θεωρήθηκαν ίσες με 185.1 και 0.816 αντίστοιχα, έπειτα από χάραξη της ευθείας στους λογαρίθμους του ύψους και της διάρκειας της βροχόπτωσης λαμβάνοντας υπόψιν δύο περιοριστικές διατάξεις: τη διατήρηση του ύψους της 24ωρης PMP που θεωρείται πιο αξιόπιστη και τη διατήρηση της δεκαπεντάλεπτης PMP που αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για την εκτίμηση της μέγιστης πλημμυρικής παροχής.

Για την κατάρτιση των πλημμυρογραφήματων σχεδιασμού, αρχικά προσδιορίστηκαν τα υετογράμματα σχεδιασμού, έπειτα υπολογίστηκαν τα υετογράμματα ωφέλιμης βροχόπτωσης με εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών οι οποίες αφαιρέθηκαν από τη συνολική βροχόπτωση και προέκυψαν τα πλημμυρογραφήματα της άμεσης απορροής με συνέλιξη των υετογραμμάτων ωφέλιμης βροχόπτωσης και του μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΜΥ) της λεκάνης. Τέλος, στο πλημμυρογράφημα αυτό προστέθηκε η συνιστώσα της βασικής απορροής από όπου και σχηματίστηκε το τελικό πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση των τεταγμένων του ΜΥ η οποία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Snyder, καθώς υπήρχε έλλειψη δεδομένων στη λεκάνη ενδιαφέροντος (απουσία σταθμηγράφου για την καταγραφή των διακυμάνσεων της στάθμης του υδατορέματος σε συνεχή χρονική βάση), ενώ υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα σε άλλη θέση στην ίδια ευρύτερη λεκάνη ή σε γειτονικές λεκάνες επομένως πραγματοποιήθηκε μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας. Η μέθοδος αυτή, αφορά συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα με χαρακτηριστικά που εκτιμώνται από πραγματικά δεδομένα.

Για την πλήρη μορφή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα της Αμερικάνικης υπηρεσίας Soil Conservation Service (SCS) που δίνεται σε αδιάστατη μορφή σε ποσοστά του χρόνου ανόδου και της παροχής αιχμής. Ο χρόνος ανόδου του ΜΥ, T_p ,

δίνεται από τη σχέση 3.37, όπου t_p ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης και t_r η διάρκεια της βροχόπτωσης. Αναφέρεται ότι ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης συνδέεται με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης t_c με τη σχέση 3.36. Ο χρόνος συγκέντρωσης εκτιμήθηκε κατά Giandotti σύμφωνα με τη σχέση 3.35, όπου A η έκταση της λεκάνης σε km^2 , L το μήκος του κύριου υδατορέματος σε km , H_m το μέσο υψόμετρο της λεκάνης σε m και H_0 το υψόμετρο στο σημείο εξόδου της λεκάνης. Η παροχή αιχμής του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS δίνεται από τη σχέση 3.38.

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m - H_0}} \quad (3.35)$$

$$t_p = 0.6t_c \quad (3.36)$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (3.37)$$

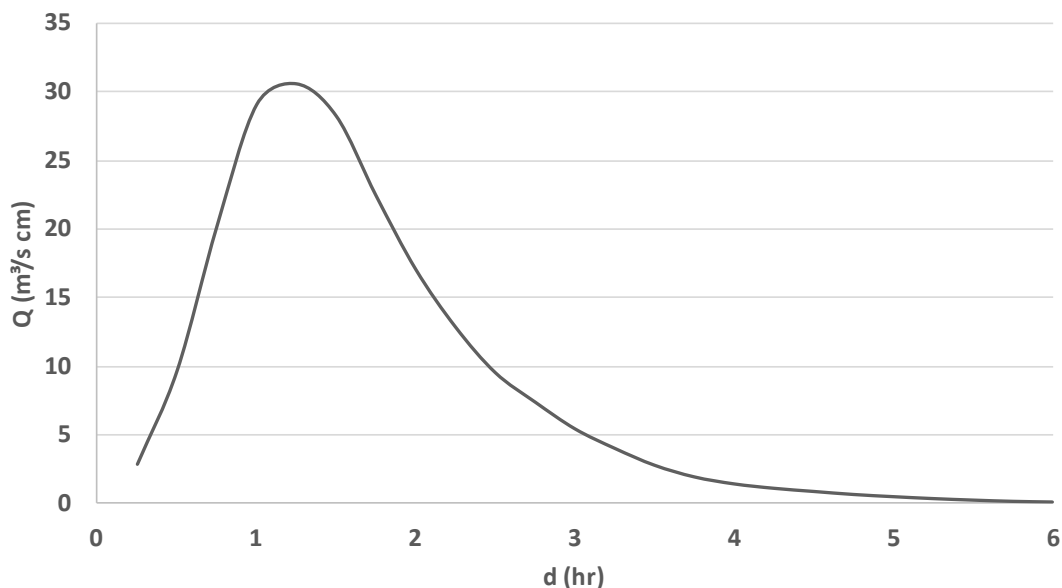
$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad (3.38)$$

Η διάρκεια του ΜΥ επιλέχθηκε ίση με 15 min βάσει εκτιμήσεων του χρόνου ανόδου, σύμφωνα με τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν. Στον πίνακα 3.10 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της λεκάνης της Τριανταφυλλιάς καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ΜΥ, το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 3.25.

Πίνακας 3.10: Εκτίμηση των στοιχείων του ΜΥ της λεκάνης της Τριανταφυλλιάς

Έκταση λεκάνης A (km^2)	18.90
Μήκος κύριας μισογάγγειας (km)	7.50
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	1230
Υψόμετρο εξόδου λεκάνης (m)	941
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (hr)	2.1
Χρόνος ανόδου κατά Giandotti για διάρκεια 0.25 h (hr)	1.4

Σύμφωνα με τις υδρομετεωρολογικές συνθήκες τις λεκάνης ενδιαφέροντος λήφθηκε κρίσιμη διάρκεια βροχόπτωσης ίση με 24 ώρες. Για την κατάρτιση των υετογραμμάτων σχεδιασμού, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δυσμενέστερης διαδοχής των τμηματικών υψών βροχόπτωσης που προτάθηκε από την Αμερικάνικη Υπηρεσία (USBR, 1977). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, με βάση την όμβρια καμπύλη της επιφανειακής βροχόπτωσης υπολογίστηκαν τα τμηματικά ύψη βροχόπτωσης τα οποία διατάχτηκαν κατά τρόπο ώστε να ακολουθούν τον τρόπο διάταξης των τεταγμένων του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το υετόγραμμα που προέκυψε αντιστράφηκε χρονικά και λήφθηκε το τελικό υετόγραμμα που μεγιστοποιεί την παροχή αιχμής του τελικού υδρογραφήματος.



Εικόνα 3.25: Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης Τριανταφυλλιάς (Υδροεξυγιαντική κ.ά., 1999)

Η ωφέλιμη βροχόπτωση υπολογίστηκε βάσει της μεθόδου SCS η οποία λαμβάνει ως παραδοχές την ισότητα του λόγου της πραγματικής αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη προς τη μέγιστη δυνατή αποθήκευση με το λόγο του όγκου του νερού που απορρέει προς το μέγιστο δυνατό όγκο απορροής και ότι οι αρχικές απώλειες σε όγκους νερού που δεν διατίθενται για απορροή ισούνται με το 20% του μέγιστου δυνατού όγκου αποθήκευσης. Η ωφέλιμη βροχόπτωση P_e υπολογίστηκε βάσει της σχέσης 3.39, όπου P η συνολική βροχόπτωση, S η μέγιστη δυνατή κατακράτηση (3.40), όπου οι υπολογισμοί είναι πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις μονάδες του αμερικάνικου συστήματος.

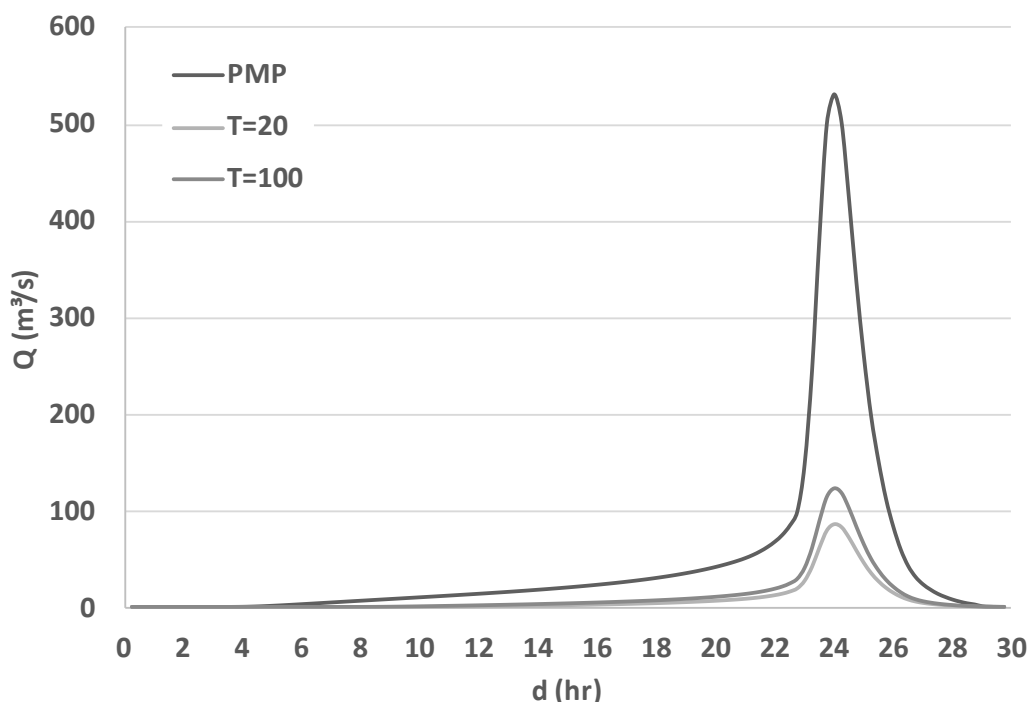
$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3.39)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3.40)$$

Σύμφωνα με την SCS, όπως αναπτύχθηκε στην υποενότητα 2.4 η παράμετρος CN λαμβάνει τιμές ανάλογα με το είδος της φυτοκάλυψης της υπό μελέτη λεκάνης, τον τύπο του εδάφους και την επεξεργασία αυτού. Οι προτεινόμενες τιμές αναφέρονται σε μέσες συνθήκες υγρασίας (II), και είναι εφικτή η μετατροπή του για υγρές συνθήκες (III) και για ξηρές (I). Εν προκειμένω ελήφθησαν υγρές συνθήκες υγρασίας και η μετατροπή έγινε βάσει της σχέσης 2.6, επομένως για CN_{II} ίσο με 71.8 προέκυψε CN_{III} ίσο με 85.4.

Για την εκτίμηση της βασικής ροής λήφθηκε υπόψη η εξέταση των ημερήσιων παρατηρημένων παροχών στη θέση της Υδρούσας τους ανοιξιάτικους μήνες που εμφανίζεται η απορροή από την τήξη του χιονιού, η οποία ανάχθηκε στη λεκάνη της Τριανταφυλλιάς με τιμή ίση με $1.17 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που θεωρήθηκε αμελητέα σε σχέση με τις τιμές της μέγιστης πλημμυρικής παροχής οπότε και δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω εξέτασή της. Επομένως, έγινε αποδεκτή η τιμή $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Τα τελικά πλημμυρογραφήματα εισόδου για το σχεδιασμό της σήραγγας εκτροπής παρουσιάζονται στην εικόνα 3.26 για περιόδους επαναφοράς 20 και 100, καθώς και για την περίπτωση της μέγιστης πιθανής κατακρήμνισης (PMP).



Εικόνα 3.26: Πλημμυρογραφήματα εισόδου για το σχεδιασμό της σήραγγας εκτροπής (Υδροεξυγιαντική κ.ά., 1999)

3.6 Υδραυλική μελέτη – Όπως εκτελέστηκε

Σύμφωνα με την οριστική υδραυλική μελέτη (Υδροσύστημα κ.ά., 1999), ο υπολογισμός της ανάσχεσης της πλημμύρας βασίστηκε στην εξίσωση συνέχειας, όπου I η παροχή εισροής, Q η παροχή εκροής, S ο όγκος ταμειυτήρα και t ο χρόνος.

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.41)$$

Οι παροχές εισροής προέκυψαν από τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα, όπως αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2, ενώ οι παροχές εκροής από την εκάστοτε σχέση υδραυλικού φορτίου – παροχής, ανάλογα με το είδος της ροής. Πιο αναλυτικά, η ροή χαρακτηρίζεται ως ροή υπό πίεση για στάθμη μεγαλύτερη από z_{limit} , ενώ για μικρότερες τιμές της στάθμης χαρακτηρίζεται ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Το όριο αυτό (z_{limit}) υπολογίστηκε βάσει της σχέσης 3.42, όπου z_{in} είναι το υψόμετρο στην είσοδο της σήραγγας και D η διάμετρος αυτής.

$$z_{limit} = z_{in} + 1.5D \quad (3.42)$$

Στην περίπτωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια, όπου η κλίση του πυθμένα της σήραγγας εκτροπής συνεπάγεται υπερκρίσιμη ροή για όλες τις παροχές, ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε από τα ανάντη με τη θεώρηση ότι η παροχετευτικότητα είναι τέτοια ώστε στην είσοδο της σήραγγας το βάθος ροής να είναι ίσο με το κρίσιμο y_c , συν μια εκτίμηση απωλειών ίση με το 20% του φορτίου. Επομένως, για δεδομένη γεωμετρία σήραγγας ισχύει η σχέση 3.43, όπου z_{in} το υψόμετρο στην είσοδο της σήραγγας, y_c το κρίσιμο βάθος ροής, C_c ο συντελεστής εκτίμησης των απωλειών, V_c η ταχύτητα για βάθος ροής ίσο με το κρίσιμο και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

$$H_{\tau\alpha\mu} = z_{in} + y_c + \frac{(1 + C_c)V_c^2}{2g} \quad (3.43)$$

Βάσει της σχέσης αυτής για γνωστή παροχή υπολογίστηκε η αντίστοιχη στάθμη ταμιευτήρα και προέκυψε η ζητούμενη σχέση στάθμης – παροχής για την περίπτωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια.

Στην περίπτωση ροής υπό πίεση, εφαρμόστηκε το θεώρημα Bernoulli ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα ανάντη και στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής, όπου z_{in} το υψόμετρο στην είσοδο της σήραγγας, V η ταχύτητα στην έξοδο της σήραγγας και Δh_f το σύνολο των απωλειών, ήτοι το άθροισμα των γραμμικών και των τοπικών απωλειών. Το σύνολο των απωλειών υπολογίζεται από τη σχέση 2.26.

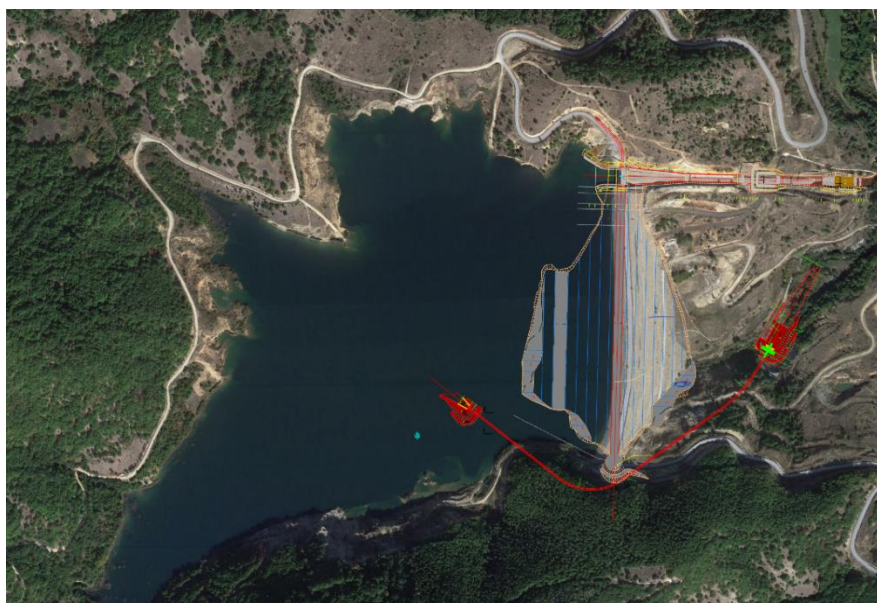
$$H_{\tau\alpha\mu} = z_{in} + \frac{V^2}{2g} + \Delta h_f \quad (3.44)$$

Κατόπιν αριθμητικής επίλυσης της σχέσης 3.44, υπολογίστηκε η διερχόμενη παροχή για δεδομένη στάθμη ταμιευτήρα, για έναν εύρος της στάθμης του ταμιευτήρα μεταξύ των ορίων +789.50 και +800.00, που αντικατοπτρίζουν αντίστοιχα τη στάθμη στην είσοδο της σήραγγας, ίση με $1.5D$ και τη στέψη του προφράγματος, αντίστοιχα.

Τέλος για ενδιάμεσες τιμές της στάθμης η ροή είναι ασταθής με φαινόμενα δημιουργίας και μεταφοράς φυσαλίδων εγκλωβισμένου αέρα. Για το εν λόγω τμήμα, η εκροή προέκυψε κατόπιν προσαρμογής κατάλληλης καμπύλης κατ' εκτίμηση, μεταξύ των σταθμών +788.00 και +789.50.

3.7 Υφιστάμενα έργα – Όπως κατασκευάστηκαν

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται η περιγραφή και τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη για το κύριο φράγμα της Τριανταφυλλιάς και τα συνοδά του έργα, ήτοι το πρόφραγμα, τον υπερχειλιστή, το έργο ενίσχυσης του ταμιευτήρα από τη λεκάνη της Ελάτειας, τη σήραγγα εκτροπής, την υδροληψία και τον εκκενωτή πυθμένα. Η οριζοντιογραφική απεικόνιση των έργων αυτών παρουσιάζεται στην εικόνα 3.27.



Εικόνα 3.27: Γενική οριζοντιογραφία υφιστάμενης κατάστασης (Από Οριστική μελέτη έργου)

3.7.1 Σώμα φράγματος

Το φράγμα της Τριανταφυλλιάς είναι λιθόρριπτο με κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα. Τα βασικά του χαρακτηριστικά μεγέθη συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Χαρακτηριστικά μεγέθη φράγματος

Ονομαστική στέψη	+844.00
Ύψος από τη θεμελίωση του πυρήνα	75.00
Υψόμετρο θεμελίωσης πυρήνα	+769.00
Μήκος στέψης	510.00
Πλάτος στέψης	16.00
ΑΣΛ	+841.50
ΚΣΛ	+800.00
Όγκος σώματος φράγματος (m ³)	2.6 x 10 ⁶
Κλίσεις πρανών αναχώματος	2:1 (H:V) ανάντη & 1.8:1 (H:V) κατόντη

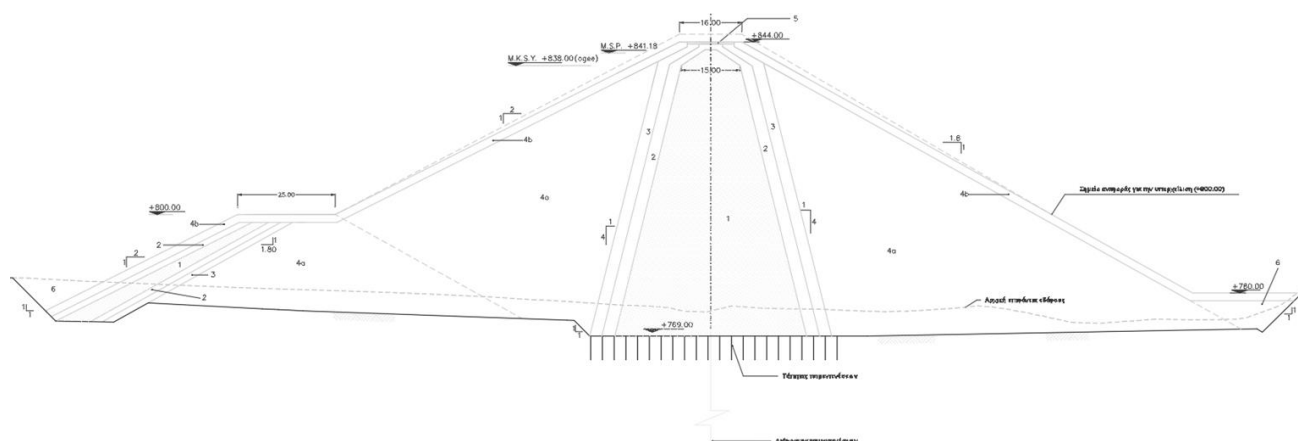
Πιο αναλυτικά, το ανάχωμα του φράγματος διακρίνεται στις ορισμένες κύριες ζώνες και η τυπική του διατομή παρουσιάζεται στην εικόνα 3.28. Συγκεκριμένα, η Ζώνη 1 αποτελείται από τον κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα που είναι κατασκευασμένος από υλικά αποθέσεων της κοίτης και των αναβαθμίδων ή από υλικά του μανδύα αποσάθρωσης του γνευσίου με κλίση 1:4 (H:V). Εκατέρωθεν του πυρήνα, τοποθετείται φίλτρο πάχους 3.00 m από υλικά δανειοθαλάμου ή από λατομεία (Ζώνη 2). Μεταξύ του φίλτρου και του σώματος στήριξης εκατέρωθεν τοποθετείται στραγγιστήριο – μεταβατική ζώνη, πάχους 3.00 m από υλικά δανειοθαλάμου ή λατομεία (Ζώνη 3). Τα προαναφερθέντα σώματα στήριξης – λιθορριπές, συνίσταται από υλικά εξόρυξης του γνευσίου της περιοχής, μέγιστης διάστασης 0.90 m (Ζώνη 4α) και τα σώματα στήριξης – λιθορριπές – εξωτερικές ζώνες Ζώνη 4β) ομοίως από υλικά εξόρυξης του γνευσίου της περιοχής, μέγιστης διάστασης 1.20 m. Επιπρόσθετα, στη στέψη του φράγματος υπάρχει η ζώνη οδοστρωσίας (Ζώνη 5). Τέλος, στη ζώνη 6 συναντάται η τυχαία επίχωση, που πρακτικά αποτελεί τη ζώνη πλήρωσης στο κατόντη και στο ανάντι πόδι του φράγματος.

Πίνακας 3.12: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα

Εμβαδό (km ²)	0.536
Όγκος (hm ³)	11.70
ΑΣΛ (m)	+838.00
ΚΣΛ (m)	+800.00
Εμβαδό στην ΑΣΛ (km ²)	0.486
Όγκος στην ΑΣΛ (hm ³)	10.08
Ωφέλιμος όγκος (hm ³)	9.56

Η έδραση του φράγματος πραγματοποιήθηκε σε υγιές γνευσιακό υπόβαθρο έπειτα από την αφαίρεση των επιφανειακών και αποσαθρωμένων στρώσεων. Όπως επιβεβαιώνεται και από τα βιβλιογραφικά στοιχεία του Κεφαλαίου 2, ο συγκεκριμένος τύπος φράγματος κρίθηκε ο καταλληλότερος σύμφωνα με τις γεωλογικές, τις σεισμικές και τις γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής, καθώς τα φράγματα αυτού του τύπου είναι

προσαρμόσιμα στις γεωμορφολογικές παραμορφώσεις χωρίς να χάνουν τη συνέχειά τους και αξιοποιούν υλικά κατασκευής που είναι διαθέσιμα στην ευρύτερη περιοχή (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015).



Εικόνα 3.28: Τυπική διατομή φράγματος Τριανταφυλλιάς (Από Οριστική μελέτη έργου)

Για την εξασφάλιση της στεγανοποίησης και της αποφυγής απώλειας υλικού του πυρήνα, στη θεμελίωση του φράγματος εκτελέστηκαν τσιμεντενέσεις τάπητα και τσιμεντενέσεις κουρτίνας (διάφραγμα τσιμεντενέσεων). Επιπλέον, στην περιοχή των αντρείσμάτων πραγματοποιήθηκαν τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης από την επιφάνεια και από τις δύο στοές τσιμεντενέσεων – αποστραγγίσεων που κατασκευάστηκαν ανά μία σε κάθε αντρείσμα. Τέλος αναφέρεται πως το δίκτυο των τσιμεντενέσεων καθώς και το δίκτυο των αποστραγγίσεων εκτείνεται στην κοίτη σε μέγιστο βάθος περί τα 60 m.

Στα αντρείσματα προβλέφθηκε η εγκατάσταση συσκευών ελέγχου πλευρικής μετακίνησης (κλισιόμετρα), ενώ στα πρηνή των εκσκαφών των μόνιμων έργων, ήτοι του υπερχειλιστή, του έργου εξόδου του εκκενωτή πυθμένα και του κατάντη πόδα του φράγματος, προβλέφθηκε η εγκατάσταση πιεζομέτρων. Επιπλέον, στο ίδιο το σώμα του φράγματος εγκαταστάθηκαν ειδικές συσκευές, οι οποίες προσδιορίζουν την πλευρική μετακίνηση και την εσωτερική καθίζηση, υδραυλικά καθιζήσιμετρα, γραμμικά μηκυνσιόμετρα και ειδικά στον πυρήνα, πνευματικά πιεζόμετρα σωληνωτού τύπου. Επίσης, στον πυρήνα και στο φίλτρο του φράγματος καθώς και στη θεμελίωση αυτού, τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά και πνευματικά πιεζόμετρα. Στη θεμελίωση, στη στέψη, στα αντρείσματα, στο κατάντη πόδι και σε απόσταση τουλάχιστον 1 km κατάντη του φράγματος, εγκαταστάθηκαν επιταχυνσιογράφοι τύπου εξισορρόπησης δύναμης, ενώ στα πρηνή εκσκαφής και στα φυσικά πρηνή μηκυνσιόμετρα βράχου ενός ή πολλαπλών σημείων.

3.7.2 Ανάντη πρόφραγμα

Το κύριο ανάντη πρόφραγμα αποτελείται από κεκλιμένο πυρήνα (Ζώνη 1), από λεπτόκοκκα φίλτρα εκατέρωθεν του πυρήνα (Ζώνη 2), από μεταβατική ζώνη – στραγγιστήριο (Ζώνη 3) και από σώματα στήριξης Ζώνη 4 και 5, όπως και το ανάχωμα του κύριου φράγματος στο οποίο και ενσωματώθηκε, ενώ η Ζώνη 4β συνεχίζεται και στο κυρίως ανάντη πρόφραγμα ως τη θεμελίωσή του. Η στέψη του προφράγματος ανέρχεται στα +800.00 m και το πλάτος της ισούται με 25.00 m. Ο πυρήνας του είναι κεκλιμένος με κλίση 2:1 και ελάχιστο πάχος στέψης ίσο με 2 m. Στην ανάντη παρεία του προφράγματος, μεταξύ της ζώνης 1 και της ζώνης 4β παρεμβάλλεται μια μεταβατική ζώνη (Ζώνη 2), ενώ στην κατάντη παρεία η διάταξη είναι όπως και στο ανάχωμα του φράγματος δηλαδή εμφανίζονται κατά σειρά οι ζώνες 1, 2, 3 και 4α (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015).

3.7.3 Υπερχειλιστής

Γενικά η λειτουργία ενός υπερχειλιστή αποσκοπεί στην προστασία του φράγματος κατά τη φάση λειτουργίας και στην ομαλή προσαγωγή των πλημμυρών στην περιοχή κατάντη του φράγματος, η ανάσχεση των οποίων πραγματοποιείται εντός του ταμιευτήρα. Κατά το σχεδιασμό του υπερχειλιστή απαιτείται ο προσδιορισμός της μέγιστης παροχής εκροής που καθορίζει τις διαστάσεις τόσο του ίδιου όσο και των συναφών έργων, καθώς και της ανώτατης στάθμης πλημμύρας που καθορίζει το ύψος του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη μια εύλογη απόσταση για το ελεύθερο περιθώριο της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος. Σημειώνεται πως η περίοδος επαναφοράς του πλημμυρογράφηματος εισόδου για το σχεδιασμό υπερχειλιστή κυμαίνεται από 1000 έως 10000 έτη (Ευστρατιάδης, 2021).

Το φράγμα της Τριανταφυλλιάς διαθέτει μετωπικό υπερχειλιστή ο οποίος είναι τοποθετημένος στο αριστερό αντέρεισμα αυτού και τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον πίνακα 3.13. Ο υπερχειλιστής αποτελείται από τη διάταξη υπερχείλισης τύπου ogee, από την κεκλιμένη διώρυγα μεταβλητής διατομής, από το έργο αποτόνωσης (flip bucket) και από το έργο διόδευσης πλημμυρικών παροχών. Επίσης, ο δεξιός καθοδηγητικός τοίχος διαμορφώθηκε με τον κλασικό τρόπο σύμφωνα με τις προδιαγραφές USBR, ενώ ο αριστερός φέρει μεγάλο ανάπτυγμα λόγω του ιδιόμορφου τοπογραφικού αναγλύφου. Τέλος, στην άνω πλευρά του υπερχειλιστή και συγκεκριμένα στην προέκταση της στέψης του φράγματος κατασκευάστηκε οδική γέφυρα πλάτους 6.50 m.

Πίνακας 3.13: Χαρακτηριστικά στοιχεία υπερχειλιστή και διώρυγας απαγωγής

Υπερχειλιστής		Διώρυγα απαγωγής	
Στέψη (m)	+838.00	Υψόμετρο εισόδου (m)	+834.00
Πλάτος (συμπεριλαμβανομένου του βάρους) (m)	31.50	Πλάτος στέψης (m)	30
Πλάτος (καθαρό) (m)	30.00	Μεταβλητό πλάτος σε μήκος 100 m (m)	30 έως 14
Παροχή σχεδιασμού εκροής (m ³ /s)	375	Σταθερό πλάτος σε μήκος 110 m (m)	14

3.7.4 Έργο ενίσχυσης του ταμιευτήρα από τη λεκάνη της Ελάτειας

Το έργο ενίσχυσης αποτελείται από το ρουφράχτη της Δροσοπηγής ο οποίος είναι κατασκευασμένος σε απόσταση 800 m κατάντη του οικισμού. Το εν λόγω έργο αποτελείται από ένα τυπικό φράγμα υπερχείλισης – εκτροπής, μήκους στέψης 10.00 m και ύψους 3.00 m. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του έργου εμπλουτισμού συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14: Χαρακτηριστικά στοιχεία έργου εμπλουτισμού

Διαστάσεις διατομής διώρυγας (m x m)	Ορθογωνική, 2.00 x 1.00
Τύπος διώρυγας	Από οπλισμένο σκυρόδεμα
Μήκος (km)	2.5
Παροχευτικότητα (m ³ /s)	2.5

Στο άνω τμήμα του έργου αυτού κατασκευάστηκε διώρυγα που φέρει κατάλληλα διαμορφωμένη εσχάρα, ώστε να επιτυγχάνεται η συλλογή των υδάτων και η μεταφορά τους στο αριστερό άκρο του ρουφράχτη όπου και βρίσκεται το φρεάτιο της υδροληψίας, από το οποίο μέσω της διώρυγας εκτροπής μήκους 2.46 km το νερό καταλήγει στον ταμιευτήρα της Τριανταφυλλιάς. Τέλος, σημειώνεται η κατασκευή οδού παραπλεύρως της διώρυγας εμπλουτισμού.

3.7.5 Σήραγγα εκτροπής – Έργο υδροληψίας – Εκκενωτής πυθμένα

Στο στάδιο προμελέτης προτάθηκε η κατασκευή ορθογωνικού οχετού εκτροπής κάτω από το σώμα του φράγματος, ωστόσο η λύση της σήραγγας εκτροπής θεωρήθηκε ασφαλέστερη, σύμφωνα με τη γεωτεχνική έρευνα και μελέτη που διεξήχθη. Έτσι, κατασκευάστηκε σήραγγα εκτροπής πεταλοειδούς διατομής, στην περιοχή του δεξιού αντερείσματος τα χαρακτηριστικά μεγέθη της οποίας συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.15. Σύμφωνα με την οριστική μελέτη του έργου, η λειτουργία της σήραγγας εκτροπής μετά την περάτωση των εργασιών της κατασκευής του φράγματος είναι συνδυαστική και περιλαμβάνει την υδροληψία για άρδευση και τη λειτουργία του εκκενωτή πυθμένα.

Πίνακας 3.15: Χαρακτηριστικά μεγέθη της σήραγγας εκτροπής

Μήκος από μέτωπο σε μέτωπο (m)	704.77
Υψόμετρο εισόδου (m)	+785.00
Υψόμετρο εξόδου (m)	+763.20
Κατά μήκος κλίση της σήραγγας	3.17 %
Εσωτερική διάμετρος	3.00 m, πεταλοειδής διατομή
Επένδυση	Από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 30 cm
Παροχή για στάθμη ταμιευτήρα +797.50 (m ³ /s)	62.98
Μέσο προσωρινής έμφραξης εισόδου	Θυρόφραγμα
Μέσο οριστικής έμφραξης	Πώμα σκυροδέματος με αγωγό και θυρόφραγμα εκκένωσης

Το έργο υδροληψίας κατασκευάστηκε στο δεξί αντέρεισμα σε κατάλληλα διαμορφωμένη παγκίνα πλάτους 8.00 m, σε στάθμη +800.00 m, η οποία αποτελεί την κατώτατη στάθμη υδροληψίας. Το έργο αυτό έχει τη μορφή ορθογωνίου παραλληλογράμμου και φέρει τρία ανοίγματα, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει δύο εγκοπές για την εγκατάσταση των εσχάρων και των θυροφραγμάτων έμφραξης καθώς και ένα κατακόρυφο φρέαρ διαμέτρου 1.50 m με χαλύβδινη επένδυση που καταλήγει στη σήραγγα εκτροπής μέσω κατάλληλης συναρμογής. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υδροληψίας συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.16.

Πίνακας 3.16: Χαρακτηριστικά μεγέθη της υδροληψίας

Αριθμός ανοιγμάτων	3
Διαστάσεις ανοιγμάτων (m)	1.50 x 2.00
Υψόμετρο πυθμένα (Κ.Σ.Υ.) (m)	+800.00
Κατά μήκος κλίση της σήραγγας	3.17 %

Ο εκκενωτής πυθμένα αποτελείται από χαλύβδινο αγωγό διαμέτρου 1.00 m εδρασμένο πάνω σε ειδικά διαμορφωμένα στηρίγματα από οπλισμένο σκυρόδεμα στο δεξί τμήμα της σήραγγας. Η μέση παροχή του αγωγού εκκένωσης και ο χρόνος εκκένωσης του ταμιευτήρα εκτιμήθηκαν σε 7 m³/s και 15 ημέρες, αντίστοιχα. Αναφορικά, η λειτουργία του ρυθμίζεται δια μέσω ενός ολισθαίνοντος θυροφράγματος υψηλής πίεσης διαστάσεων 0.80 m x 0.60 m και μια δικλείδα τύπου πεταλούδας Φ1000 στο κτίριο ελέγχου και λειτουργίας, το οποίο βρίσκεται στο κατάντη άκρο της σήραγγας εκτροπής. Στο τέλος του χαλύβδινου αγωγού, εγκαταστάθηκε βαλβίδα τύπου Howell – Bungler διαμέτρου Φ800 για την καταστροφή ενέργειας. Σημειώνεται ότι η ίδια διάταξη ασφαλείας προβλέφθηκε και στο σύστημα υδροληψίας άρδευσης (Βασιλειάδης, κ.ά., 2015). Από τον αγωγό του εκκενωτή κατασκευάστηκε διακλάδωση με χαλύβδινο αγωγό Φ300 χάρη στον οποίο επιτυγχάνεται ο εμπλουτισμός του χειμάρρου της Τριανταφυλλιάς με την

απαιτούμενη οικολογική παροχή. Τα χαρακτηριστικά του εκκενωτή πυθμένα συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.17.

Πίνακας 3.17: Χαρακτηριστικά μεγέθη του εκκενωτή πυθμένα

Μέγιστη παροχετευτικότητα, πλήρως ανοιχτή βαλβίδα, στάθμη λίμνης στα +838.00 (m ³ /s)	8.13
Μέση παροχή εκκενωτή (m ³ /s)	7.00
Χρόνος εκκένωσης ταμιευτήρα (μέρες)	15
Υψόμετρο εισόδου (m)	+800.00
Υψόμετρο εξόδου (άξονας βαλβίδας Howell Bungler) (m)	+764.20

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υποστήριξη των πρανών των εκσκαφών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης αγκυρίων βράχου, εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δομικού πλέγματος και προεντεταμένων αγκυρώσεων μήκους 15 m, όπου απαιτηθεί. Επίσης στα πρανή των εκσκαφών προβλέπονται αποστραγγιστικές οπές μήκους 15 m επενδεδυμένες με διάτρητους πλαστικούς σωλήνες. Τέλος, η γεωτεχνική παρακολούθηση επιτυγχάνεται μέσω της εγκατάστασης οργάνων και συγκεκριμένα κυττάρων μέτρησης του φορτίου των πλαισίων και των αγκυρώσεων καθώς και κοχλιών μέτρησης της σύγκλισης της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

3.7.5.1 Σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής

3.7.5.1.1 Μέθοδος εκσκαφής της σήραγγας εκτροπής

Γενικά, στις περιοχές των στομιών της σήραγγας δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα δεδομένου ότι η ποιότητα της βραχώμαζας στη χειρότερη περίπτωση είναι μέτρια, γεγονός που συνεπάγεται την αποφυγή μεγάλων εκσκαφών κατά τη διαμόρφωσή τους. Επιπλέον, η βραχώμαζα που συναντάται κατά την εκσκαφή του υπόλοιπου τμήματος της σήραγγας αναμένεται να είναι αντίστοιχα εξαιρετικής ποιότητας, γεγονός που συνεπάγεται την αποφυγή κινδύνου εμφάνισης υπερεκσκαφών ή καταπτώσεων. Βάσει των ανωτέρω, κατά την οριστική μελέτη κρίθηκε σκόπιμη η διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με χρήση της μεθόδου της ήπιας ανατίναξης (smooth blasting) σε συνδυασμό με τη μέθοδο της γραμμικής διάτρησης (line drilling) στο όριο εκσκαφής της σήραγγας και εναλλακτικά ο συνδυασμός της ήπιας ανατίναξης με την προρηγμάτωση (presplitting) στο όριο της εκσκαφής. Σημειώνεται πως τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη μέθοδος χαρακτηρίζονται από μειωμένες υπερεκσκαφές κατά την ανατίναξη. Ωστόσο, μείζονος σημασίας είναι η ανάπτυξη συγκλίσεων της διατομής λόγω της αποτόνωσης των τάσεων αμέσως μετά την εκσκαφή.

3.7.5.1.2 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης βραχώμαζας βάσει οριστικής μελέτης

Κατά την οριστική μελέτη, ο προσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης βασίστηκε σε εμπειρικές μεθόδους (Bieniawski, Barton) λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθος της σήραγγας και το είδος της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Πιο αναλυτικά, το ελάχιστο μήκος των εφαρμοζόμενων αγκυρίων προσδιορίστηκε από την ακόλουθη σχέση του Barton (3.45), όπου D το άνοιγμα της σήραγγας και ESR αριθμός που σχετίζεται με το είδος του υπόγειου έργου. Εν προκειμένω για τις σήραγγες νερού, λαμβάνει την τιμή 1.6.

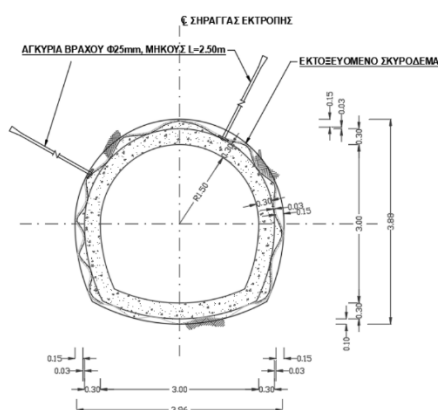
$$L = 2 + 0.15 \frac{D}{ESR} \quad (3.45)$$

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

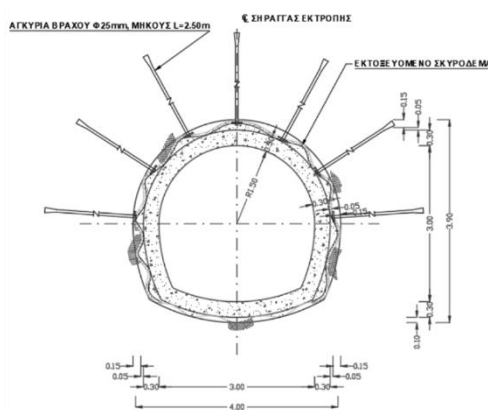
Σύμφωνα με την οριστική μελέτη, για την προσωρινή υποστήριξη της διανοιγόμενης σήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δομικό μεταλλικό πλέγμα και δικτυωτά πλαίσια. Λεπτομέρειες σχετικές με την τοποθέτησή τους συγκεντρώνονται στον πίνακα 3.18 ανά κατηγορία βραχώμαζας, ενώ στις εικόνες 3.29 - 3.31 παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές της σήραγγας συμπεριλαμβανομένων των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Πίνακας 3.18: μέτρα προσωρινής υποστήριξης

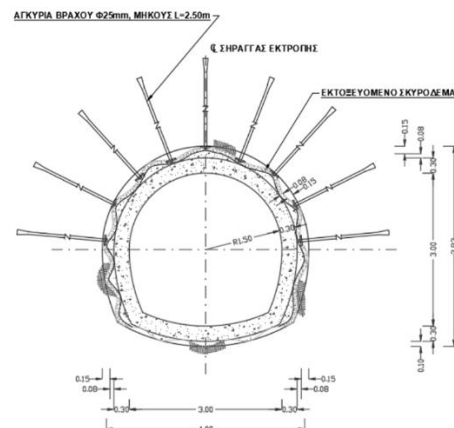
Κατηγορία πετρώματος	II	III	IV
Αγκύρια βράχου	Πλήρως τσιμενταρισμένα, $\Phi 25$, $L=2.50$	Πλήρως τσιμενταρισμένα, $\Phi 25$, $L=2.50$ κάρναβος 2.0x2.0, με δακτυλίου εναλλάξ	Πλήρως τσιμενταρισμένα, $\Phi 25$, $L=2.50$ κάρναβος 1.5x1.5, με δακτυλίου εναλλάξ
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πάχος 3.0 cm σε μία στρώση	Συνολικό πάχος 5cm σε δύο στρώσεις 3 cm και 2cm αντίστοιχα	Συνολικό πάχος 8cm σε τρεις στρώσεις 2 cm και 3cm και 3cm αντίστοιχα
Δομικό πλέγμα	-	T139 στο θόλο και στα τοιχώματα	T139 στο θόλο και στα τοιχώματα
Δικτυωτά πλαίσια	-	-	10 cm x 10 cm στην οροφή και στα τοιχώματα με 3 Φ 25 $\Phi 8/20$ ανά πλαίσιο
Βήμα προχώρησης	4.00 m	3.00 m	2.00 m



Εικόνα 3.29: Κατηγορία βράχου II – Διατομή S2



Εικόνα 3.30: Κατηγορία βράχου III – Διατομή S3



Εικόνα 3.31: Κατηγορία βράχου IV – Διατομή S4

3.7.5.1.3 Φέρουσα ικανότητα μέτρων υποστήριξης βραχώμαζας

Οι δύο βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της περιβάλλουσας βραχώμαζας και των μέτρων υποστήριξης είναι η ακαμψία των μέτρων αυτών, που κατ' επέκταση καθορίζει το μέγεθος των παραμορφώσεων, και η μέγιστη πίεση υποστήριξης που δύναται να παραλάβει το κάθε μέτρο.

Πιο αναλυτικά, για τα αγκύρια βράχου η ακαμψία K_b τους και η μέγιστη πίεση $P_{sb,max}$ που μπορούν να δεχτούν, δίνονται από τις σχέσεις 3.46 και 3.47, αντίστοιχα,

$$\frac{1}{K_b} = \frac{S^2}{R} \left(\frac{4L}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right) \quad (3.46)$$

$$P_{sb,max} = \frac{T_{bf}}{S^2} \quad (3.47)$$

όπου d_b είναι η διάμετρος των αγκυριών ίση με 25 mm, E_b το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 207 GPa, L το ελεύθερο μήκος του αγκυρίου ίσο με 2.50 m, T_{bf} η αντοχή εξόλκευσης του αγκυρίου ίση με 0.10 MN, Q η σταθερά παραμόρφωσης του αγκυρίου ίση με 0.143 m/MN, S η διάσταση του καννάβου και R η ακτίνα της σήραγγας ίση με 1.90 m, σύμφωνα με τα στοιχεία της οριστικής μελέτης.

Αναφορικά με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα η ακαμψία K_c και η μέγιστη πίεση $P_{sc,max}$ που μπορεί να δεχτεί, δίνονται από τις σχέσεις 3.48 και 3.49, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, το μέτρο ελαστικότητας E_c του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ισούται με 10000 MPa, ο λόγος Poisson ν ισούται με 0.25 και η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη σ_c με 5 MPa, σύμφωνα με τα στοιχεία της οριστικής μελέτης.

$$K_c = \frac{E[R^2 - (R - t_c)^2]}{(1+\nu_c)[(1-2\nu_c)R^2 + (R - t_c)^2]} \quad (3.48)$$

$$P_{sc,max} = \frac{\sigma_c}{2} \left(1 - \frac{(R - t_c)^2}{R^2} \right) \quad (3.49)$$

Επιπλέον, για τον προσδιορισμό της ακαμψίας και της φέρουσας ικανότητας των πλαισίων τύπου Lattice Girder, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωσή τους από δοκό από σπλισμένο σκυρόδεμα με την παραδοχή πλαισιακής λειτουργίας. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε μια διατομή τριγωνική, βάσης 10 cm, ύψους 8 cm και απόστασης 80 cm, σπλισμένη με 3Φ25. Η ακαμψία και η φέρουσα ικανότητα των πλαισίων δίνονται από τις σχέσεις 3.50 και 3.51, αντίστοιχα,

$$\frac{1}{K_s} = \frac{SR}{E_s A_s} + \frac{SR^3}{E_s I_s} \left(\frac{\theta(\theta + \sin\theta \cos\theta)}{2 \sin^2 \theta} - 1 \right) + \frac{2S\theta t_b}{E_b w^2} \quad (3.50)$$

$$P_{ss,max} = \frac{3A_s I_s \sigma_{ys}}{2SR\theta(3I_s + xA_s(R - t_b - \frac{x}{2})(1 - \cos\theta))} \quad (3.51)$$

όπου w το πλάτος του πλαισίου ίσο με 0.10 m, x το ύψος του ίσο με 0.08 m, A_s η επιφάνεια του πλαισίου ίση με 0.004 m², I_s η ροπή αδράνειας του πλαισίου ίση με 1.42x10⁻⁶ m⁴. Επιπρόσθετα, το μέτρο ελαστικότητας της μεικτής διατομής θεωρήθηκε συντηρητικά ίσο με 10000 MPa, η αντοχή σ_{ys} λήφθηκε ίση με 35 MPa, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σφήνωσης ίσο με 10000 MPa, η απόσταση των πλαισίων ίση με 0.80 m, η ημιγωνία θ μεταξύ των σημείων σφήνωσης 11.25° και το πάχος σφήνωσης t_b ίσο με 0.10 m, σύμφωνα με τα στοιχεία της οριστικής μελέτης. Βάσει των ανωτέρω, για διατομή πλευράς 10 cm και απόστασης 0.80 m, η ακαμψία K_s προέκυψε ίση με 19.54 MPa και η φέρουσα ικανότητα $P_{ss,max}$ ίση με 0.0662 MPa.

3.7.5.1.4 Έλεγχος επάρκειας μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Το φορτίο που ασκείται στα αγκύρια, στις στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στα πλαίσια υπολογίστηκε βάσει της σχέσης 3.52, όπου i είναι ο δείκτης που αντιστοιχεί στην υποστήριξη μέσω αγκυριών (b), μέσω εκτοξευόμενου σκυροδέματος (c) και μέσω πλαισίων (s), P το φορτίο που αντιστοιχεί στη

συγκεκριμένη κατηγορία της βραχώμαζας, ενώ και στις τρεις περιπτώσεις ο παρονομαστής είναι κοινός και ισούται με την συνολική ακαμψία K_{all} των μέσων προσωρινής υποστήριξης που εγκαθίστανται στη διατομή ενδιαφέροντος. Προκειμένου να είναι επαρκή τα μέτρα υποστήριξης, απαιτείται το φορτίο τους (P_i) να είναι μικρότερο ή ίσο από τη φέρουσα ικανότητά τους, η οποία υπολογίστηκε στην υποενότητα 3.7.5.1.3. Από τα ανωτέρω, σύμφωνα με την οριστική μελέτη του έργου, τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης στη σήραγγα μελέτης κρίθηκαν επαρκή.

$$P_i = \frac{K_i P}{K_{all}} \quad (3.52)$$

Τέλος, αναφέρεται ότι η επάρκεια των μέτρων υποστήριξης κατά κατηγορία πετρώματος επιβεβαιώθηκε επιπλέον με το πρόγραμμα PHASE η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ανάλυση τάσεων – παραμορφώσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

3.7.5.2 Έλεγχος συγκλίσεων

Κατά την οριστική μελέτη, για την εκτίμηση της σύγκλισης των διατομών ανά κατηγορία πετρώματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PHASE. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν τρεις διατομές, μια για κάθε κατηγορία πετρώματος, ωστόσο και στις τρεις περιπτώσεις θεωρήθηκε ύψος υπερκείμενων γαιών ίσο με το μέγιστο, ήτοι ίσο με 110 m.

3.7.5.3 Έλεγχος παραμορφώσεων

Ο έλεγχος των παραμορφώσεων των διατομών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το χρόνο μεσολάβησης μεταξύ της εκσκαφής και της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης. Ο έλεγχος αυτός είναι ακόμα πιο κρίσιμος όσο μεγαλύτερες αναμένεται να είναι οι παραμορφώσεις, δηλαδή στις περιοχές όπου εμφανίζεται πέτρωμα χαμηλότερης ποιότητας. Κατά την οριστική μελέτη, οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιήθηκαν μέσω της χρήσης του προγράμματος PHASE στην περίπτωση μεσολάβησης χρόνου μεταξύ εκσκαφής, ετεροχρονισμένης καθώς και άμεσης τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης.

3.7.5.4 Τελική επένδυση σήραγγας εκτροπής

Για το σχεδιασμό της τελικής επένδυσης της σήραγγας εκτροπής έγιναν ορισμένες βασικές παραδοχές. Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 και χάλυβας ποιότητας S500. Η επικάλυψη του οπλισμού του δαπέδου και των τοιχωμάτων θεωρήθηκε ίση με 5 cm και 3 cm, αντίστοιχα. Για σεισμική επιτάχυνση 0.12 g εκτιμήθηκε η οριζόντια μετατόπιση της κλείδας και υπολογίστηκε η ένταση του φορέα της σήραγγας για την εν λόγω μετατόπιση. Επίσης, εκτιμήθηκε πολύ μικρό εύρος ρωγμής και συγκεκριμένα ίσο με 0.20 mm. Τέλος, το πάχος της τελικής επένδυσης καθορίστηκε βάσει του συνδυασμού των δυσμενέστερων φορτίσεων ίσο με 30 cm σε όλες τις κατηγορίες πετρώματος, ενώ ειδικά στην περίπτωση πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζας, θεωρήθηκε ίσο με 40 cm στην περιοχή του πυθμένα. Οι συνδυασμοί αυτοί έλαβαν υπόψιν τα φορτία του βράχου, το ίδιο βάρους του σκυροδέματος και τις υδροστατικές πιέσεις λόγω του υδροφόρου ορίζοντα, για ύψος νερού ίσο με 25 m.

Τα φορτία λόγω υδροστατικών πιέσεων υπολογίστηκαν βάσει της σχέσης 3.53, όπου γ (0.010 kg/cm^3) το ειδικό βάρος νερού και h (m) το ύψος της στήλης ύδατος, επομένως για στάθμες υδροφόρου ίσες με 25 m και 60 m προέκυψαν φορτία νερού ίσα με 0.25 MPa και 0.60 MPa, αντίστοιχα.

$$P = \gamma h \quad (3.53)$$

Τέλος, η οριζόντια μετακίνηση δ λόγω σεισμού υπολογίστηκε βάσει της σχέσης 3.54, όπου γ η γωνιακή παραμόρφωση που δίνεται από τη σχέση 2.20, D η διάμετρος της σήραγγας και τ η μέση διατμητική τάση λόγω σεισμού που υπολογίζεται βάσει της σχέσης 3.56, όπου G το μέτρο διάτμησης, σ_o η ολική κατακόρυφη τάση στο βάθος της σήραγγας και R_d δίνεται από τη σχέση 3.57,

$$\delta = \gamma D \quad (3.54)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3.55)$$

$$\tau = 0.65 \frac{\alpha}{g} \sigma_o R_d \quad (3.56)$$

$$R_d = 1 - 0.01z \quad (3.57)$$

όπου z το μέγιστο βάθος της σήραγγας.

Τέλος, κατά την οριστική μελέτη η διαστασιολόγηση της τελικής επένδυσης έγινε με χρήση του προγράμματος FRAME, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη μέθοδο των μετακινήσεων. Ο φορέας θεωρήθηκε ραβδωτός με τρεις βαθμούς ελευθερίας ενώ η περιβάλλουσα βραχόμαζα μοντελοποιείται με ελατήρια ακαμψίας ανάλογης προς το μέτρο ελαστικότητας της εκάστοτε κατηγορίας πετρώματος, σύμφωνα με τη σχέση 3.58,

$$K = \frac{EI_i}{D} \quad (3.58)$$

όπου I_i το μήκος της ράβδου και D η διάμετρος της σήραγγας. Μετά το τέλος της κατασκευής της μόνιμης επένδυσης, πραγματοποιήθηκαν τσιμεντενέσεις επαφής και σταθεροποίησης, όπου κρίθηκε απαραίτητο.

4 ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

4.1 Σύγχρονη γεωτεχνική αξιολόγηση

Βάσει του γεωλογικού χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, καθώς και των στοιχείων των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης, σχεδιάστηκε η γεωλογική μηκοτομή της προς εξέταση σήραγγας. Βάσει της οριζοντιογραφίας της εικόνας 3.2, παρατηρήθηκε ότι οι γεωτρήσεις που αντικατοπτρίζουν αντιπροσωπευτικά την εικόνα του γεωλογικού υποβάθρου για τη σήραγγα εκτροπής είναι οι γεωτρήσεις Γ10 και Γ12.

Βάσει των παραπάνω στοιχείων προέκυψε η γεωλογική μηκοτομή που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής αναμένεται να συναντηθούν καλής ποιότητας βραχώμαζες, γνευσιακής και γρανιτογνευσιακής φύσεως, ενώ στη χιλιομετρική θέση 0+495 αναμένεται να συναντηθεί ρήγμα, όπως είναι σαφές από το γεωλογικό χάρτη αλλά και από τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας.

Για την ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών του γνευσίου και του γρανιτογνευσίου κατά μήκος της χάραξης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI), καθώς τόσο ο γνεύσιος όσο και ο γρανιτογνεύσιος έχουν ξεκάθαρη βραχώδη δομή.

Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής *GSI* (V. Marinos, 2007) προσδιορίστηκε βάσει του διαγράμματος 4.1, λαμβάνοντας υπόψιν τη δομή και το βαθμό αποσάθρωσης της βραχώμαζας. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι μεγαλύτερος βαθμός αποσάθρωσης παρουσιάστηκε στην περιοχή των στομίων (κατηγορία III), ενώ στο υπόλοιπο μήκος της σήραγγας η αποσάθρωση θεωρήθηκε κατηγορίας II. Αναφορικά με τη δομή της βραχώμαζας, θεωρήθηκε σε γενικές γραμμές διαταραγμένη – στρωματώδης – πτυχωμένη και ελαφρώς τεμαχώδης – αδιατάρακτη – στρωματώδης στις περιοχές εκτός των στομίων, των διεπιφανειών γνευσίων και γρανιτογνευσίων και του ρήγματος. Οι δείκτες γεωλογικής αντοχής *GSI* ανά τεχνικογεωλογική ενότητα καθώς και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά, συνοψίζονται στον πίνακα 4.1.

Βάσει των ανωτέρω, για το σχεδιασμό της σήραγγας αυτής θεωρήθηκαν τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες και τη δομή της εκάστοτε βραχώμαζας. Πιο αναλυτικά, η TEI αναφέρεται στη γνευσιακή βραχώμαζα που συναντάται στα στόμια, η TEII στη γνευσιακή και στη γρανιτογνευσιακή βραχώμαζα με καλές μηχανικές ιδιότητες, ενώ η TEIII στα σημεία επαφής γνευσίου και γρανιτογνευσίου καθώς και στην περιοχή του ρήγματος, όπου οι μηχανικές ιδιότητες είναι σημαντικά απομειωμένες.

Αναλυτικότερα, για την κάθε περίπτωση τεχνικογεωλογικής ενότητας ισχύουν τα εξής:

Στην TEI, ήτοι στην περιοχή των στομίων, θεωρήθηκε μεγαλύτερος βαθμός αποσάθρωσης (κατηγορία III) και διαταραγμένη/στρωματώδης/πτυχωμένη βραχώμαζα όπως είναι εμφανές και από τις εικόνες 0.36 και 0.29 και βάσει των στοιχείων της οριστικής μελέτης περί αποσάθρωσης. Επομένως, βάσει του διαγράμματος 4.1, αντιστοιχίστηκε δείκτης γεωλογικής αντοχής (*GSI*) στο διάστημα 30-40.

Στην TEII, ήτοι στα τμήματα όπου συναντάται υγιής γνεύσιος και γρανιτογνεύσιος, η αποσάθρωση είναι εμφανώς μικρότερη (κατηγορία II) βάσει των δεδομένων της οριστικής μελέτης ενώ η δομή θεωρείται άρρηκτη ή τεμαχώδης/αδιατάρακτη στρωματώδης, όπως είναι εμφανές και από την εικόνα 3.16. Συνεπώς, βάσει του διαγράμματος 4.1, θεωρήθηκε δείκτης γεωλογικής αντοχής (*GSI*) στο διάστημα 70-80.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σηράγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

Τέλος, στην TEIII όπου χαρακτηρίζεται από γνεύσιο και γρανιτογενέσιο στη διεπιφάνεια και στην περιοχή του ρήγματος, η αποσάθρωση είναι και πάλι μέτρια (κατηγορία II), μικρότερη από εκείνη της TEII, ενώ ως προς τη δομή χαρακτηρίστηκε ως διαταραγμένη/στρωματώδης/πτυχωμένη βραχώμαζα όπως είναι εμφανές και από τις εικόνες 0.22. Έτσι, βάσει του διαγράμματος 4.1, θεωρήθηκε δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI) στο διάστημα 40-50.



Εικόνα 4.1: Δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI για αποσαθρωμένες γνευσιακές βραχώμαζες (V. Marinos, 2007)

Πίνακας 4.1: Εύρος δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI ανά τεχνικογεωλογική ενότητα

TE	Περιγραφή	Δομή	Κατηγορία αποσάθρωσης	Εύρος GSI
TEI	Γνεύσιος στην περιοχή των στομιών	BDS	III	30-40
TEII	Γνεύσιος ή γρανιτογενέσιος	I-M	II	70-80
TEIII	Γνεύσιος ή γρανιτογενέσιος στη διεπιφάνεια και στην περιοχή του ρήγματος	BDS	II	40-50

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό απαραίτητο για τη γεωτεχνική αξιολόγηση της βραχώμαζας είναι η σταθερά m_i η οποία σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά τριβής του γεωυλικού και η τιμή της σχετίζεται με τον ιστό αυτού και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων του. Ο προσδιορισμός του βασίστηκε στη μέθοδο των Hoek and Marinos

(2000) (εικόνα 4.2) που λαμβάνει υπόψιν αποτελέσματα από εργαστηριακές δοκιμές. Πιο αναλυτικά, για την TEI (περιοχή στομίων) θεωρήθηκε m_i ίση με 23 (28-5) καθώς οι μηχανικές ιδιότητες του γνευσίου εκεί είναι πιο εξασθενημένες, στην TEII (υγής γνεύσιος και υγής γρανιτογνεύσιος) θεωρήθηκε τιμή m_i ίση με 28 και τέλος στην TEIII (περιοχή ρήγματος) ελήφθη τιμή σταθεράς m_i ίση με 23 και πάλι λόγω εξασθενημένων μηχανικών ιδιοτήτων.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates *	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias *		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Spartic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
Organic					Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated**			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5 Granodiorite (29 ± 3)		
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic		Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)

Εικόνα 4.2: Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Από Hoek and Marinos, 2000)

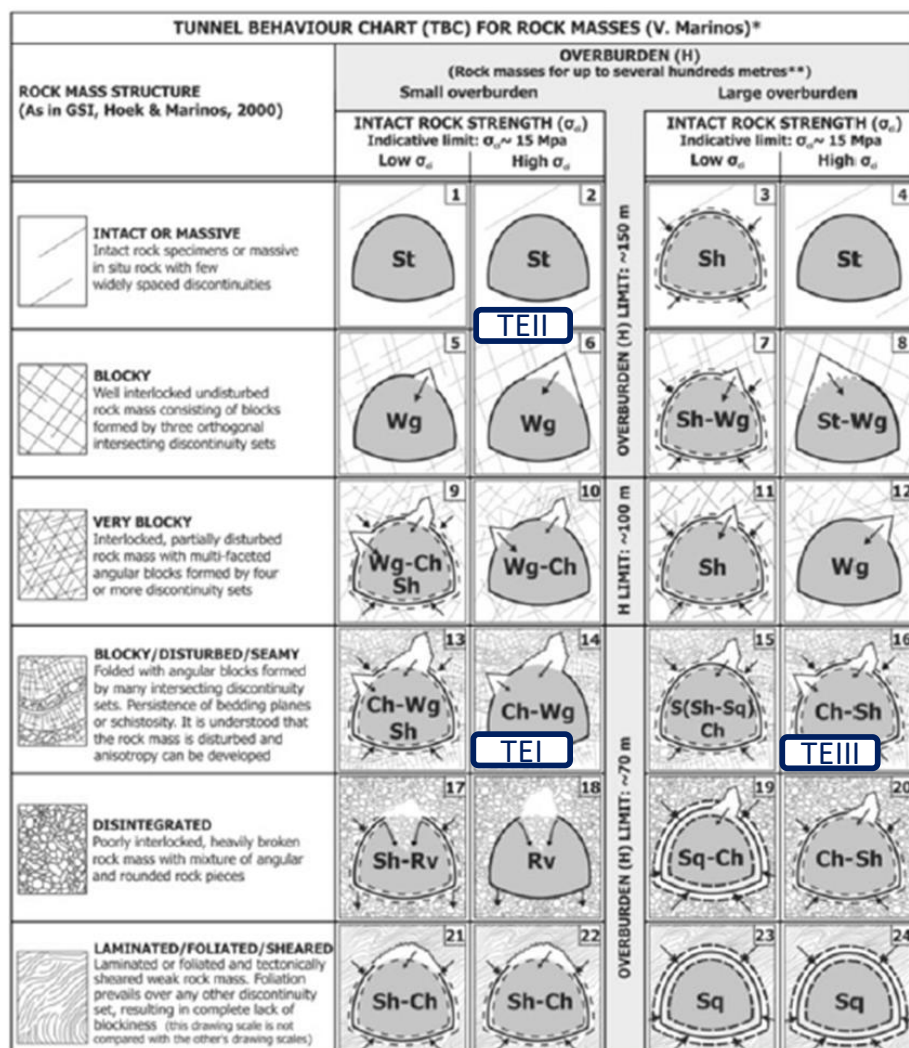
Αναφορικά με την παραμορφωσιμότητα γενικά ισχύει ότι βραχώμαζα του γνευσίου έχει γενικώς μέτρια ρηγμάτωση γεγονός που της προσδίδει μικρές τιμές παραμορφωσιμότητας. Από τα δεδομένα της οριστικής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψιν την εξασθένηση των μηχανικών ιδιοτήτων της άρρηκτης βραχώμαζας, θεωρήθηκαν προσεγγιστικά οι τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ίσης με 12, 5 και 2.5 GPa για τις TEI, TEII και TEIII, αντίστοιχα.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της γεωτεχνικής αξιολόγησης προσδιορίστηκε το μέγεθος της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ανά TE βάσει των εργαστηριακών δοκιμών (point load test) που εκτελέστηκαν κατά την οριστική μελέτη. Από τα δεδομένα της οριστικής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψιν την εξασθένηση των μηχανικών ιδιοτήτων της άρρηκτης βραχώμαζας, θεωρήθηκαν προσεγγιστικά οι τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ίσης με 40, 110 και 60 MPa για τις TEI, TEII και TEIII, αντίστοιχα.

Τέλος, το μέτρο ελαστικότητας το φαινόμενο ειδικό βάρος της βραχώμαζας θεωρήθηκε ίσο με 0.026 MN/m³, βάσει των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής μελέτης.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

Λαμβάνοντας υπόψιν τη δομή, το μέγιστο ύψος των υπερκείμενων και τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci} του άρρηκτου βράχου, βάσει του διαγράμματος μηχανισμών αστοχίας της εικόνας 4.3 προσδιορίστηκαν οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας ανά ΤΕ. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4.2.



Εικόνα 4.3: Μηχανισμοί αστοχίας (Από Hoek and Marinos, 2000)

Πίνακας 4.2: Μηχανισμοί αστοχίας ανά τεχνικογεωλογική ενότητα

ΤΕ	Περιγραφή	Δομή	Μέγιστο ύψος υπερκείμενων (m)	Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Μηχανισμός αστοχίας
TEI	Γνεύσιος στην περιοχή των στομιών	BDS	33	40	Ch - Wg
TEII	Γνεύσιος ή γρανιτογνεύσιος	I-M	107	110	Wg - St
TEIII	Γνεύσιος ή γρανιτογνεύσιος στη διεπιφάνεια και στην περιοχή του ρήγματος	BDS	95	60	Ch - Sh

Αναφορικά με τους συμβολισμούς των μηχανισμών αστοχίας υπενθυμίζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικότερα, ο τύπος αστοχίας Ch – Wg περιλαμβάνει την κατάπτωση τύπου καμινάδας σε συνδυασμό με σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας. Η βραχώμαζα είναι έντονα κερματισμένη διατηρώντας στις περισσότερες περιπτώσεις τη δομή της ενώ συνήθως παρουσιάζει ανοιχτή

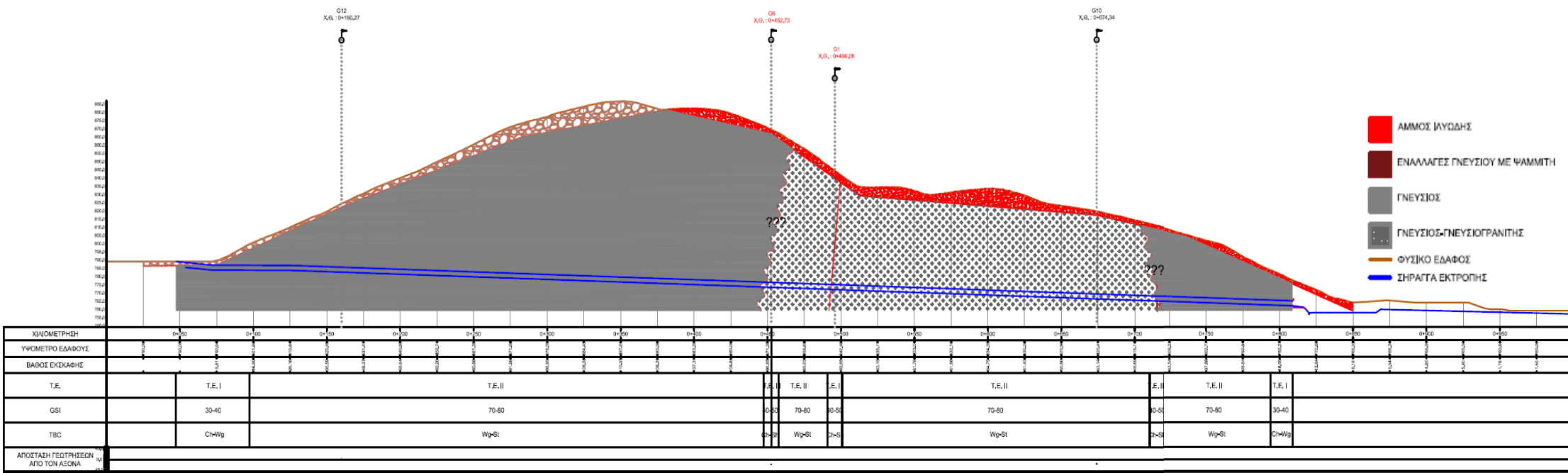
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

διατομή χωρίς καλό αλληλοκλείδωμα. Η δομή αυτή σε συνδυασμό με τις μικρές πλευρικές τάσεις ενδέχεται προοδευτικά να οδηγήσει σε καταπτώσεις και προοδευτικά σε υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας.

Ο τύπος αστοχίας $Wg - St$ συναντάται σε ευσταθείς διατομές με τοπικές βαρυτικές αστοχίες, οι οποίες ενδέχεται να χαρακτηρίζονται από σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας. Τέλος, ο μηχανισμός $Ch - Sh$ περιλαμβάνει την αστοχία τύπου καμινάδας που συνδυάζεται με μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις και με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνες μικρής έκτασης περιμετρικά της σήραγγας.

Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται συνοπτικά στην παρακάτω γεωλογική μηκοτομή.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.4: Γεωλογική μηκτομή σήραγγας εκτροπής (Civil 3D, 2020)

4.2 Προτεινόμενη υδρολογική προσέγγιση

Λόγω της εξέλιξης της επιστήμης της υδρολογίας από την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η οριστική μελέτη του φράγματος της Τριανταφυλλιάς (1999), κρίθηκε σκόπιμος ο επαναπροσδιορισμός των πλημμυρογραφημάτων εισόδου της σήραγγας εκτροπής για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς ανάλογα με το χρόνο κατασκευής της σήραγγας εκτροπής, βάσει νέων βελτιωμένων μεθόδων.

Με χρήση του λογισμικού QGIS 2023 χαράχτηκε εκ νέου η λεκάνη απορροής του φράγματος Τριανταφυλλιάς (εικόνα 4.5), η έκταση της οποίας μετρήθηκε ίση με 18.6 km, το μέγιστο μήκος της κύριας μισγάγγειας ίσο με 9.7 km, το μέσο υψόμετρο λεκάνης ίσο +1230 και το υψόμετρο στην έξοδο αυτής ίσο με +941. Βάσει των στοιχείων αυτών και της σχέσης 3.35 υπολογίστηκε χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti ίσος με 2.3 hr.



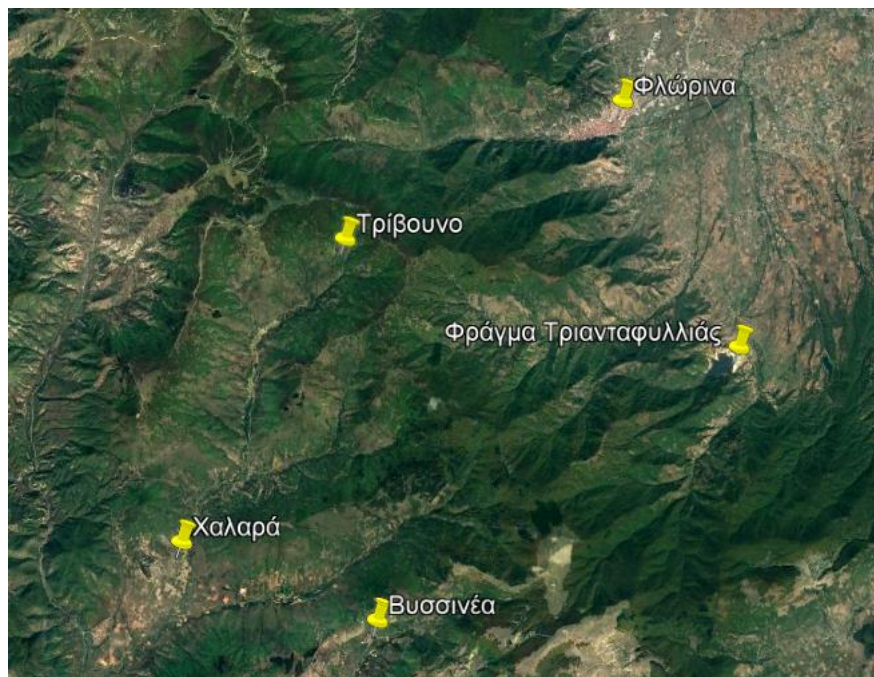
Εικόνα 4.5: Η λεκάνη απορροής του φράγματος της Τριανταφυλλιάς (Από QGIS)

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά και στην υποενότητα 2.4, βασική προϋπόθεση για την κατασκευή του υδρολογικού σχεδιασμού αποτελεί η κατασκευή των όμβριων καμπυλών της λεκάνης απορροής που εξετάζεται. Προς απλοποίηση της διαδικασίας για τους σκοπούς της εν λόγω εργασίας, επιλέχθηκαν οι επικαιροποιημένες όμβριες καμπύλες του 2018 από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για το Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Μακεδονίας, όπου ανήκει το φράγμα της Τριανταφυλλιάς (EL09). Κατά τον υπολογισμό του υετογράμματος σχεδιασμού λήφθηκαν υπόψιν οι όμβριες καμπύλες τεσσάρων γειτονικών σταθμών του φράγματος και συγκεκριμένα των σταθμών Τρίβουνο, Χαλαρά, Βυσσινέα και Φλώρινα, οι συντελεστές λ , ψ , κ , η και θ των οποίων συνοψίζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές βροχομετρικών και βροχογραφικών σταθμών

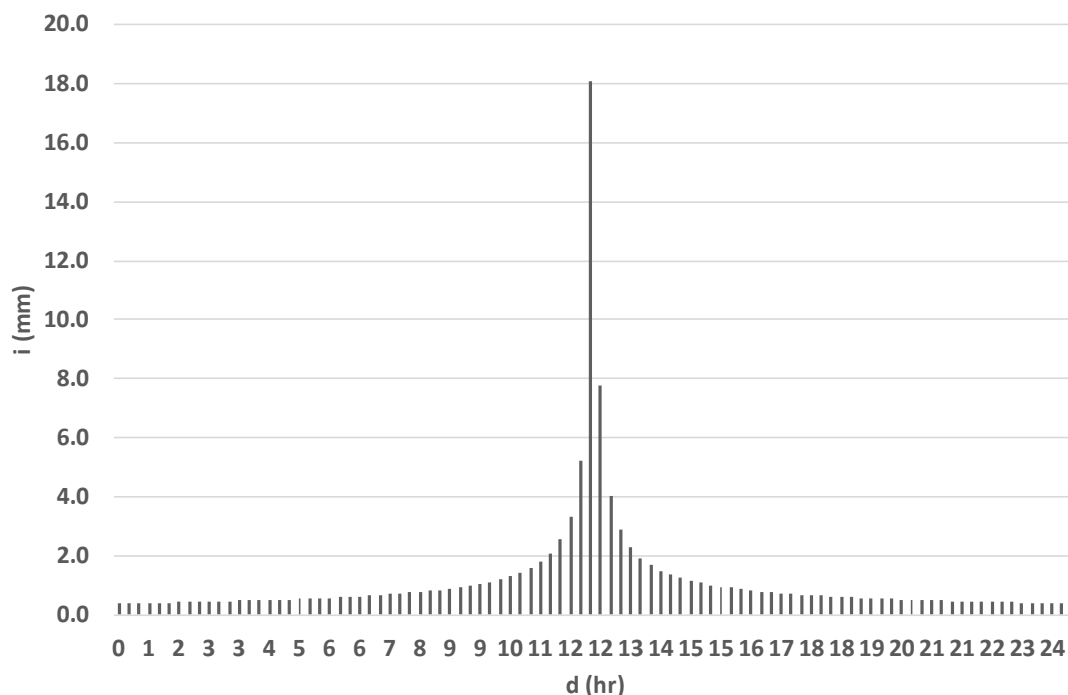
Σταθμός	λ	ψ	κ	η	θ
Τρίβουνο	223.17	0.6	0.126	0.686	0.076
Χαλαρά	289.19	0.74	0.063	0.686	0.076
Βυσσινέα	209.22	0.54	0.126	0.686	0.076
Φλώρινα	265.48	0.69	0.126	0.686	0.076

Η επιλογή της περιόδου επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού της σήραγγας εκτροπής βασίστηκε στις ελληνικές προδιαγραφές εκπόνησης αντιπλημμυρικών έργων και στη διεθνή και ελληνική συνήθη πρακτική καθώς και στην κρίση μηχανικού ανάλογα με τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής της σήραγγας. Για τον προσδιορισμό του υετογράμματος σχεδιασμού θεωρήθηκε διάρκεια πλημμυρικού επεισοδίου ίση με 24 ώρες και περίοδος επαναφοράς 100 έτη. Με χρήση της σχέσης 2.2 υπολογίστηκε η σημειακή ένταση της βροχής σε κάθε έναν από τους σταθμούς αυτούς. Προς απλούστευση της διαδικασίας, οι σταθμοί θεωρήθηκαν ισοβαρείς (συντ. βάρους 25% έκαστος) και αποφεύχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου Thiessen για τον καλύτερο προσδιορισμό των συντελεστών βάρους του κάθε σταθμού. Στη συνέχεια, η σημειακή αυτή ένταση ανάχθηκε σε επιφανειακή με χρήση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής (*ARF*) που υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση 2.3.



Εικόνα 4.6: Δίκτυο διαθέσιμων βροχομετρικών και βροχογραφικών σταθμών (Google Earth)

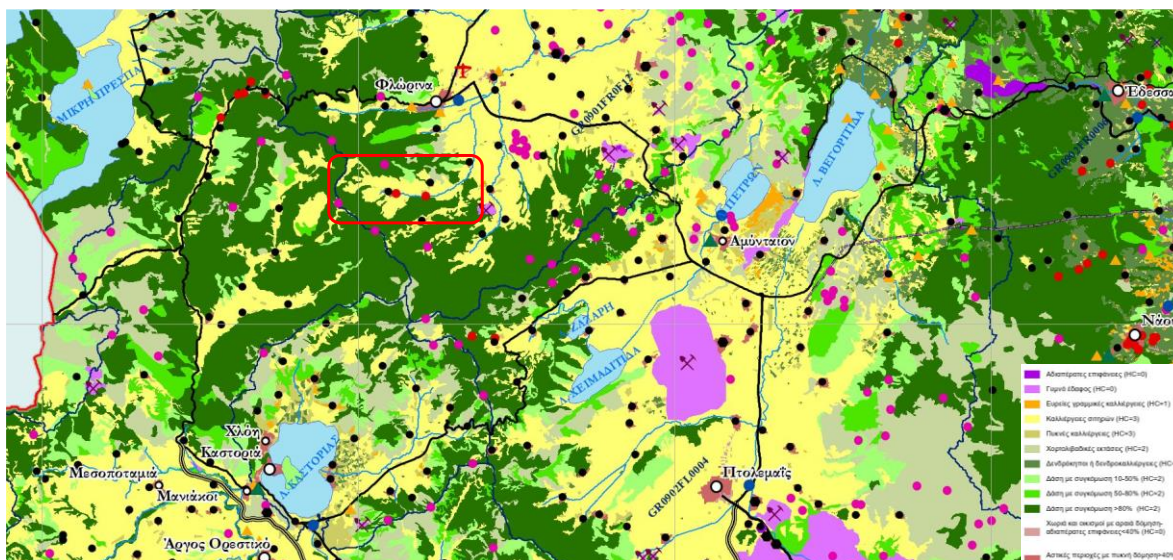
Τα τμηματικά ύψη βροχής διατάχτηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ ώστε να παραχθεί το υετόγραμμα σχεδιασμού, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7 και αντιστοιχεί σε ύψος βροχής ίσο με 109.5 mm.



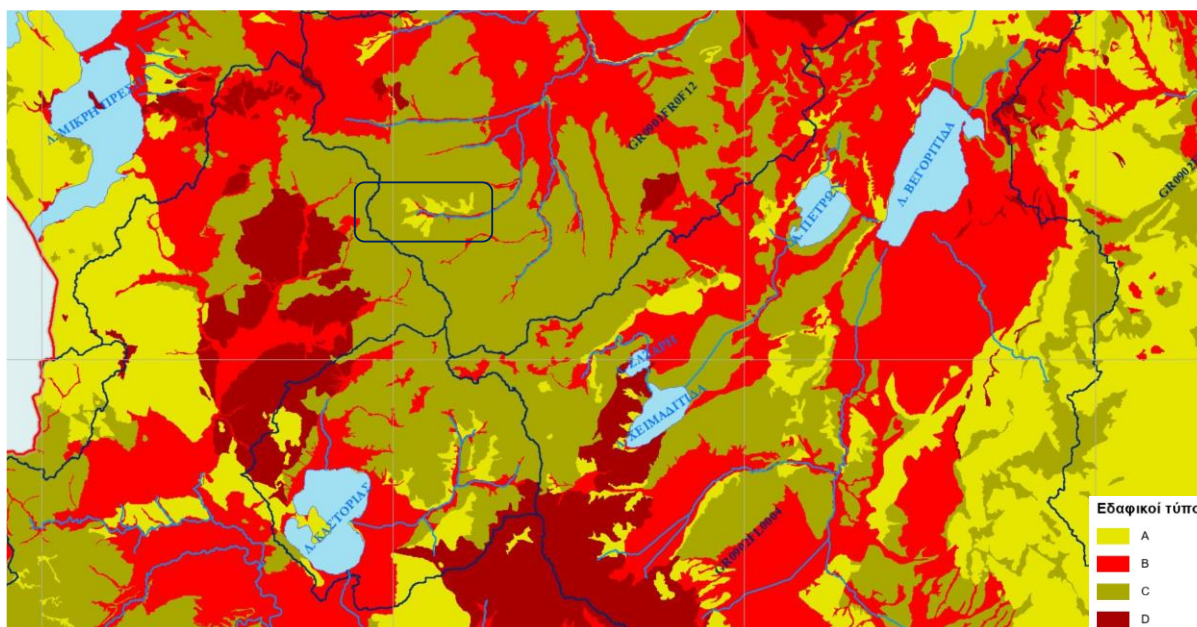
Εικόνα 4.7: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=100$

Στη συνέχεια για το μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή, προσδιορίστηκε ο αριθμός καμπύλης της λεκάνης (CN), για τύπο εδάφους C (Εικόνα 4.9), συνθήκες προηγούμενης υγρασίας II και θεωρώντας ότι η λεκάνη ενδιαφέροντος αποτελείται από δάση χωρίς βοσκή (50%), από δάση με μέτρια βοσκή (73%) και από χορτολίβαδα (5%), σύμφωνα με τον χάρτη χρήσεων γης (Εικόνα 4.8). Αξίζει να αναφερθεί ότι η λεκάνη ενδιαφέροντος κατατάσσεται στην κατηγορία C ως προς τον εδαφολογικό τύπο, καθώς πρόκειται για εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται σχηματισμοί αργιλο-ιλυδούς σύστασης, μάργες, φλυσχικοί σχηματισμοί, οφιόλιθοι, γάββροι, σπιλίτες, σερπεντίνες, αρενίτες, και μερικώς αποσαθρωμένα μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως σχιστόλιθοι, γνεύσιοι και φυλλίτες. Βάσει των στοιχείων αυτών ο αριθμός καμπύλης για τη λεκάνη ενδιαφέροντος υπολογίστηκε ίσος με 71.8 λαμβάνοντας υπόψιν τα στοιχεία του πίνακα 2.5. Στη συνέχεια, με χρήση της σχέσης 2.4, προσδιορίστηκε η μέγιστη δυνητική κατακράτηση ίση με 99.8 mm και το ύψος των αρχικών απωλειών θεωρήθηκε ίσο με το 20% αυτής, ήτοι 20.0 mm. Τα μεγέθη αυτά διορθώθηκαν θεωρώντας ύψος αρχικών απωλειών ίσο με 5%, σύμφωνα με τη σχέση 4.59, όπου CN ο διορθωμένος αριθμός καμπύλης και CN_{ref} ο αριθμός καμπύλης για αρχικό ύψος απωλειών ίσο με 20%. Η διόρθωση αυτή δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με την εδαφική κατακράτηση I_a και την υπεδαφική κατακράτηση S . Ο τελικός διορθωμένος αριθμός καμπύλης υπολογίστηκε ίσος με 64.2 επομένως η μέγιστη δυνητική κατακράτηση επαναυπολογίστηκε ίση με 141.6 mm και το ύψος των αρχικών απωλειών ίσο με 7.1 mm. Αξίζει να επισημανθεί η σημαντική διαφοροποίηση του αριθμού καμπύλης CN συγκριτικά με την αντίστοιχη επιλογή της οριστικής μελέτης, όπου ο αριθμός CN είχε θεωρηθεί ίσος με 85.4, που συνεπάγεται περίπου 20 μονάδες διαφορά από την προτεινόμενη υδρολογική προσέγγιση.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σηράγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.8: Χάρτης χρήσεων γης (Από Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας)



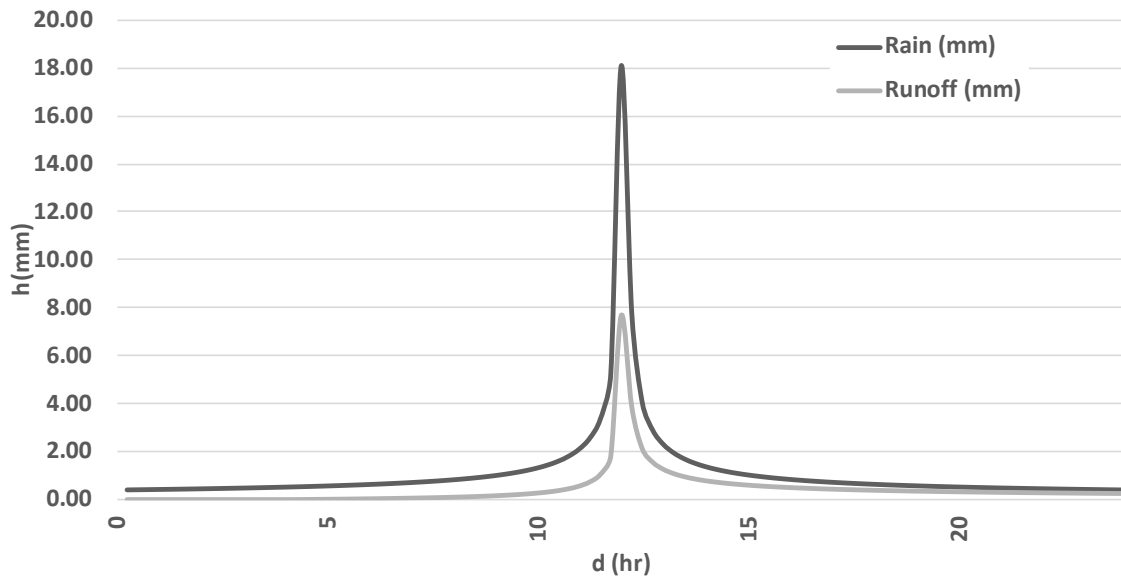
Εικόνα 4.9: Εδαφολογικός χάρτης (Από Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας)

Βάσει των ανωτέρω και του υετογράμματος σχεδιασμού, με χρήση της σχέσης 2.7 προσδιορίστηκε το υετόγραμμα ενεργούς βροχόπτωσης που απορρέει στη λεκάνη.

$$CN = \frac{CN_{ref}}{1.42 - 0.0042CN_{ref}} \quad (4.59)$$

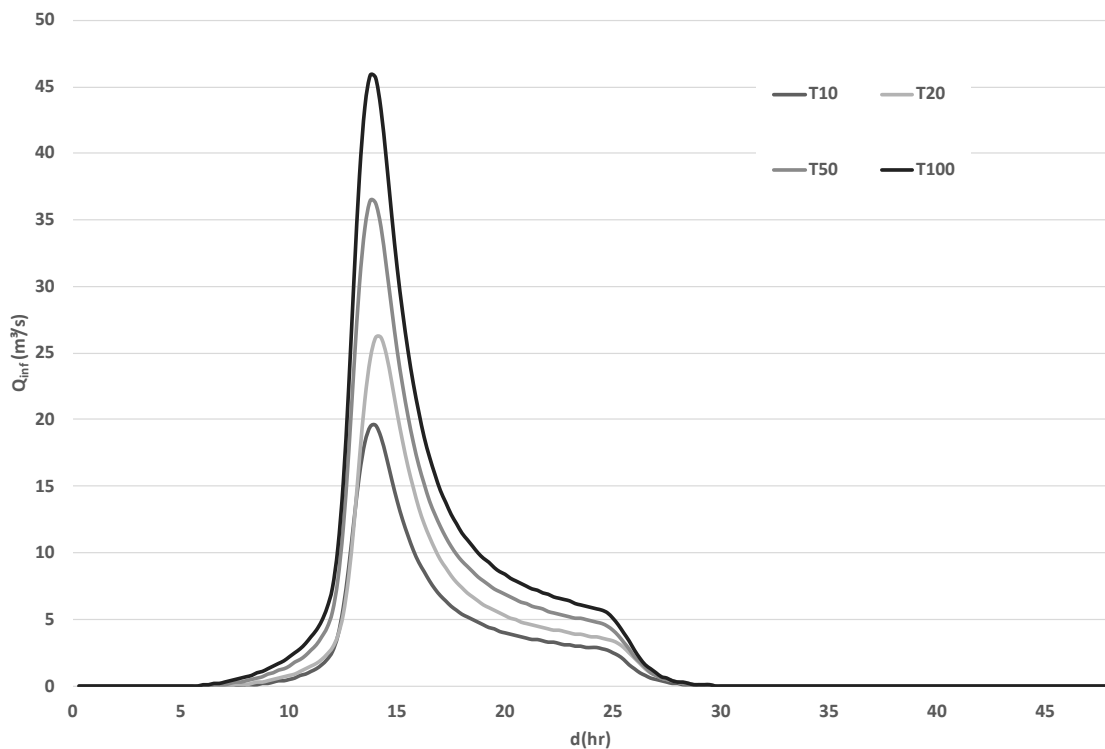
Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται το υετόγραμμα σχεδιασμού (rain) και το υετόγραμμα ενεργούς βροχόπτωσης (runoff). Όπως είναι προφανές, η διαφορά τους αποτελεί το σύνολο των απωλειών.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.10: Υετόγραμμα σχεδιασμού και υετόγραμμα ενεργούς βροχής για $T=100$

Κατόπιν χρήσης του λογισμικού HEC-HMS του Τμήματος Μηχανικών του Αμερικάνικου στρατού, προσδιορίστηκαν τα πλημμυρογράφημα της λεκάνης για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών με χρήση μοναδιαίου υδρογραφήματος τύπου PRF 484, και τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, προσδιορίστηκαν τα πλημμυρογράφημα σχεδιασμού που παρουσιάζονται στην εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11: Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών

4.3 Προτεινόμενη υδραυλική προσέγγιση

Ο υδραυλικός σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής, βασίστηκε στα πλημμυρογραφήματα που αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών, όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 4.2. Για το κάθε πλημμυρογράφημα, πραγματοποιήθηκε η διόδευση της πλημμύρας μέσω κατάλληλου υδραυλικού μοντέλου που συντάχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της R Studio.

Αρχικά, θεωρήθηκε χρονικό βήμα ίσο με 15 min και αρχική στάθμη ίση με το υψόμετρο του στομίου εισόδου της σήραγγας, ήτοι +785.0 m. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε ο συντελεστής ελεύθερης ροής, λ , βάσει της σχέσης 4.60, όπου w το πλάτος του έργου εισόδου (4.61) και k ο συντελεστής τοπικών απωλειών, ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 0.3. Επίσης υπολογίστηκε η στάθμη z_f μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια της ροής, βάσει της σχέσης 4.62.

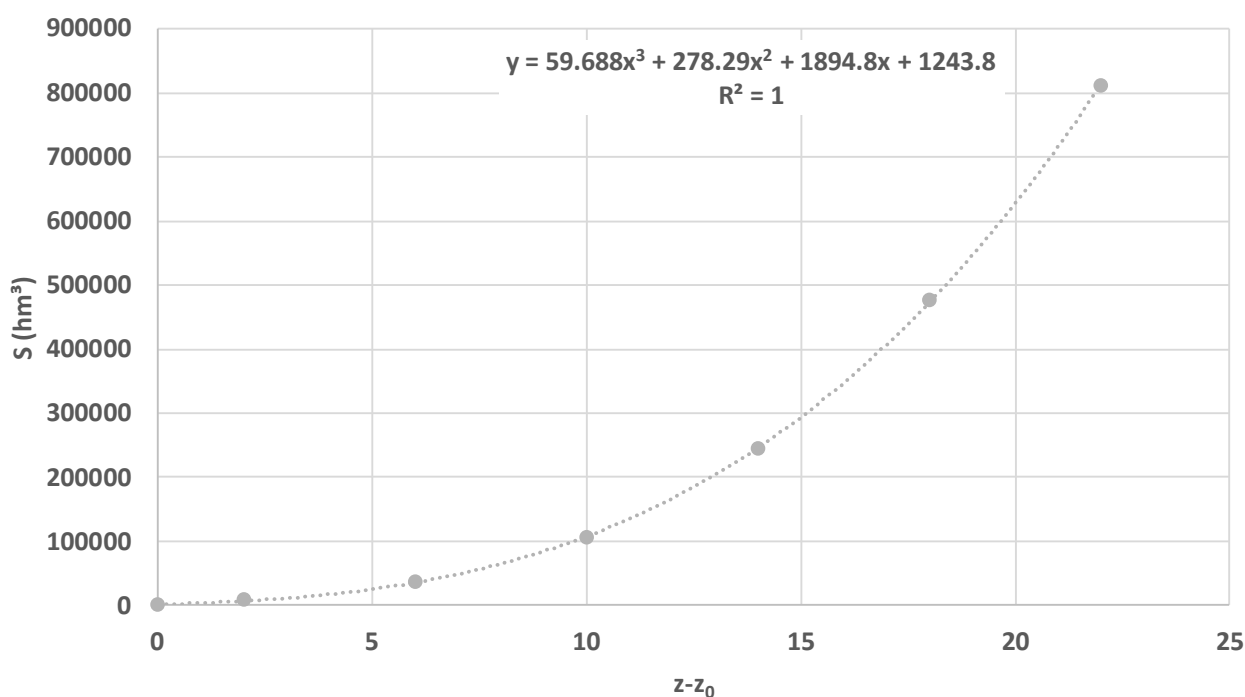
$$\lambda = w \sqrt{\frac{8g}{(3+k)^3}} \quad (4.60)$$

$$w = 0.8D \quad (4.61)$$

$$z_f = 1.2D + z_{εισ} \quad (4.62)$$

Κατά την εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών της σήραγγας εκτροπής απαραίτητη είναι η σχέση στάθμης και χωρητικότητας του ταμιευτήρα, ο οποίος πρόκειται να σχηματιστεί κατόπιν της ολοκλήρωσης του έργου, προκειμένου να προσδιοριστεί η χωρητικότητα του για τις διάφορες στάθμες που θα παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια του εκάστοτε πλημμυρικού επεισοδίου. Η κατάρτιση της καμπύλης στάθμης – χωρητικότητας του ταμιευτήρα της Τριανταφυλλιάς, βασίστηκε σε δεδομένα της Οριστικής μελέτης (Υδροσύστημα κ. ά., 1995) και η μαθηματική της έκφραση παρουσιάζεται στη σχέση 4.63, όπου z_0 το υψόμετρο του πυθμένα.

$$S = 59.67(z - z_0)^3 + 278.29(z - z_0)^2 + 1894.8(z - z_0) + 1243.8, \quad 782 < z < 804 \quad (4.63)$$



Εικόνα 4.12: Σχέση στάθμης - όγκου ταμιευτήρα Τριανταφυλλιάς

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η παροχή εκροής, σύμφωνα με τον τύπο της ροής, ήτοι εάν πρόκειται για ροή με ελεύθερη επιφάνεια ή υπό πίεση. Πιο αναλυτικά, όπως κατέστη σαφές και στην υποενότητα 2.5, η διάκριση της ροής πραγματοποιείται βάσει της σχέσης του υδραυλικού φορτίου h με τις τιμές $1.2D$ και $1.5D$, όπου D η διάμετρος της σήραγγας.

Στην περίπτωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια, η παροχή εκροής υπολογίστηκε βάσει της σχέσης 2.11, όπου λ και h ο συντελεστής ελεύθερης ροής και το υδραυλικό φορτίο, αντίστοιχα. Στην περίπτωση ροής υπό πίεση, η παροχή εκροής βασίστηκε στην επίλυση του δεύτερου θεμελιώδους προβλήματος της υδραυλικής, σύμφωνα με το οποίο λαμβάνοντας ως δεδομένα εισόδου το μήκος της σήραγγας (L), την τραχύτητα (k_s), την κινηματική συνεκτικότητα (ν), το συντελεστή τοπικών απωλειών (h_f) και τη διάμετρο της σήραγγας (D), υπολογίζεται η ταχύτητα (V) και κατ' επέκταση η παροχή εκροής (Q).

Η διαφοροποίηση της παρούσας υδραυλικής προσέγγισης με εκείνη της οριστικής μελέτης εστιάζεται στον υπολογισμό των απωλειών Δh και συγκεκριμένα στην συμπερίληψη τόσο των τοπικών όσο και των γραμμικών απωλειών. Όπως προαναφέρθηκε, στην οριστική μελέτη οι γραμμικές απώλειες υπολογίστηκαν με τη χρήση της εξίσωσης του Manning, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις περιπτώσεις ροής με ελεύθερη επιφάνεια, ενώ δίνει προσεγγιστικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις ροής υπό πίεση (Rai κ.ά., 2016). Στην προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Darcy-Weisbach (4.64), όπου h_f οι γραμμικές απώλειες, f ο συντελεστής τριβών, L το μήκος της σήραγγας, V η ταχύτητα ροής, D η διάμετρος της σήραγγας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Αρχικά, θεωρώντας μηδενικές τοπικές απώλειες ($h_L = 0$) κατά το πρώτο βήμα, οι ολικές απώλειες ενέργειας θεωρήθηκαν ίσες με την διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο θέσεων, Δh και κατόπιν προσδιορίστηκαν οι γραμμικές απώλειες ενέργειας (h_f). Στη συνέχεια, επιλύθηκε η σχέση Darcy-Weisbach ως προς την ταχύτητα η οποία αντικαταστάθηκε στη σχέση του αριθμού Reynolds και προέκυψε η τελική ισοδύναμη σχέση 4.66. Έπειτα υπολογίστηκε η ποσότητα $Re\sqrt{f}$ και με χρήση της σχέσης Colebrook-White (4.67) υπολογίστηκε ο συντελεστής τριβών f . Βάσει της σχέσης 4.64 υπολογίστηκε η ταχύτητα ροής και η παροχή (4.68) και τέλος προσδιορίστηκαν οι ζητούμενες τοπικές απώλειες βάσει της σχέσης 2.25.

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g} \quad (4.64)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4.65)$$

$$Re = \left(\frac{2gh_f}{L}\right)^{0.5} \left(\frac{D^{1.5}}{\nu}\right) \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (4.66)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (4.67)$$

$$Q = \frac{V\pi D^2}{4} \quad (4.68)$$

Στο δεύτερο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με τη διαφορά ότι οι γραμμικές απώλειες θεωρήθηκαν ίσες με τη διαφορά του υδραυλικού φορτίου απομειωμένη κατά τις τοπικές απώλειες του προηγούμενου βήματος. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε κατόπιν σύγκλισης του συντελεστή τριβών f , από όπου προέκυψε και η επιθυμητή τιμή της παροχής εκροής.

Για τιμές του υδραυλικού φορτίου στο διάστημα $1.2D$ και $1.5D$, πρόκειται για ενδιάμεση ροή και η εκροή υπολογίζεται μέσω γραμμικής παλινδρόμησης βάσει των παροχών εκροής με ελεύθερη επιφάνεια και υπό πίεση.

$$Q = Q_{\text{ελεύθερη ροή}} + \frac{(Q_{\text{υπό πίεση}} - Q_{\text{ελεύθερη ροή}})(Z - Z_{\text{ελεύθερη ροή}})}{Z_{\text{υπό πίεση}} - Z_{\text{ελεύθερη ροή}}} \quad (4.69)$$

4.4 Η επίδραση της διαμέτρου της σήραγγας εκτροπής στη διόδευση του πλημμυρικού όγκου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών, εξετάστηκε η επίδραση της διαμέτρου της σήραγγας εκτροπής στη διόδευση του πλημμυρικού όγκου δια μέσου αυτής, και συγκεκριμένα συγκεντρώθηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως η παροχή αιχμής κατά την έξοδο ($Q_{\text{max out}}$), το μέγιστο ύψος νερού ανάντη της εισόδου της σήραγγας (h_{max}), και το ύψος του προφράγματος, σε προγραμματιστικό περιβάλλον R. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις αυτές συνοψίζονται στους πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6.

Πίνακας 4.4: Συγκριτικά αποτελέσματα για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών και διάμετρο $D=1.5$ m.

T	$Q_{\text{max out}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$h_{\text{max}} \text{ (m)}$	Ύψος προφράγματος (m)
10	12.14	+790.13	8.1
20	12.67	+792.36	10.4
50	13.29	+795.12	13.1
100	13.73	+797.17	15.2

Πίνακας 4.5: Συγκριτικά αποτελέσματα για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών και διάμετρο $D=2.0$ m.

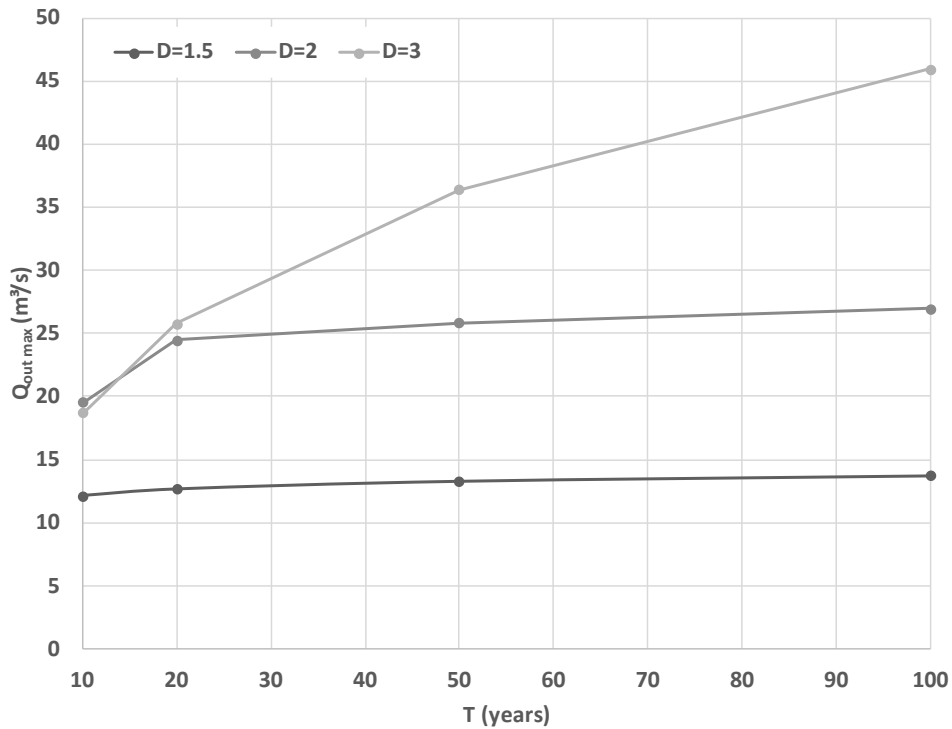
T	$Q_{\text{max out}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$h_{\text{max}} \text{ (m)}$	Ύψος προφράγματος (m)
10	19.56	+787.82	5.8
20	24.44	+788.30	6.3
50	25.84	+791.02	9.0
100	26.96	+793.28	11.3

Πίνακας 4.6: Συγκριτικά αποτελέσματα για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 50 και 100 ετών και διάμετρο $D=3.0$ m.

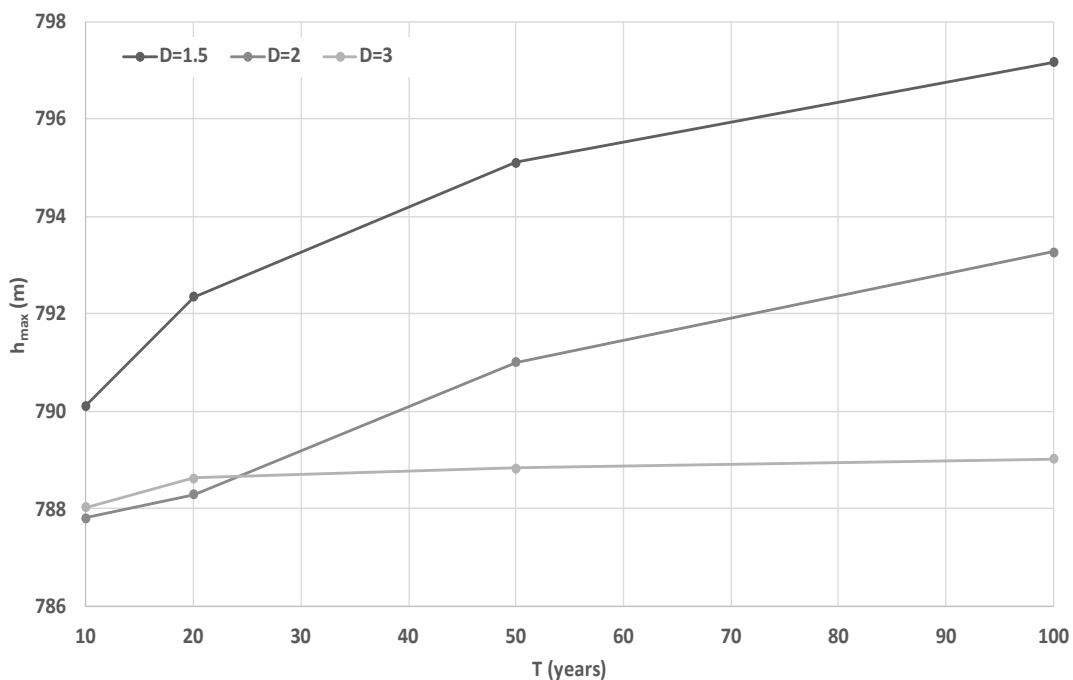
T	$Q_{\text{max out}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$h_{\text{max}} \text{ (m)}$	Ύψος προφράγματος (m)
10	18.73	+788.03	6.0
20	25.77	+788.63	6.6
50	36.41	+788.84	6.8
100	45.94	+789.03	7.0

Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων, στις εικόνες 4.13 και 4.14 παρουσιάζεται η σχέση της περιόδου επαναφοράς T με τη μέγιστη παροχή εκροής ($Q_{\text{max out}}$) και με το μέγιστο ύψος ύδατος ανάντη της σήραγγας (h_{max}), για τις διάφορες διαμέτρους αυτής (1.5, 2.0 και 3.0 m).

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.13: Γραφική απεικόνιση μέγιστης παροχής εκροής συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς T για διάμετρο σήραγγας 1.5, 2.0 και 3.0 m.



Εικόνα 4.14: Γραφική απεικόνιση μέγιστης στάθμης ύδατος ανάντη της σήραγγας εκτροπής συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς T για διάμετρο 1.5, 2.0 και 3.0 m.

Από τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα είναι εμφανής η επίδραση της διαμέτρου στη διόδευση της πλημμυρικής παροχής και η σημαντική ανάσχεση που πραγματοποιείται με τη μείωση της διαμέτρου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των ανωτέρω από οικονομική και χρονική σκοπιά, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της διαμέτρου στη μέθοδο κατασκευής (συμβατική ή micro-tunneling) και στην επιλογή της περιόδου επαναφοράς, θέμα που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία.

Συνοψίζοντας, καθοριστικό παράγοντα στην επιλογή της διαμέτρου της σήραγγας εκτροπής αποτελεί ο χρόνος ολοκλήρωσης των κατασκευών του φράγματος. Πιο αναλυτικά, λαμβάνοντας υπόψιν τον ημερήσιο ρυθμό ανύψωσης του φράγματος ανάλογα με τον τύπο του, επιλέγεται πλημμυρογράφημα σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς τέτοια ώστε το ρίσκο υπέρβασης να είναι εντός ορισμένων αποδεκτών ορίων. Το ρίσκο αυτό υπολογίζεται βάσει της σχέσης 2.29, όπου N ο αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης του έργου και T η περίοδος επαναφοράς.

Στην περίπτωση κατασκευής χωμάτινου φράγματος ισχύει ότι ο ρυθμός κατασκευής του ανέρχεται περί τα 10 cm/day, ενώ στην περίπτωση φράγματος RCC ο ρυθμός ανύψωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος και ισούται περί τα 30 cm/day. Επομένως, για το δεδομένο φράγμα ύψους 75 m, στην περίπτωση του χωμάτινου τύπου η ολοκλήρωσή του αναμένεται σε 4 χρόνια ενώ στην περίπτωση RCC σε 2 χρόνια, έχοντας συνυπολογίσει και στις δύο περιπτώσεις ένα έτος επιπλέον, για τυχόν απρόβλεπτα προβλήματα.

Βάσει των παραπάνω στοιχείων υπολογίστηκε πως λαμβάνοντας υπόψιν πλημμυρογράφημα περιόδου επαναφοράς 100 ετών, στην περίπτωση χωμάτινου φράγματος προκύπτει επίπεδο διακινδύνευσης ίσο με 3.9% που ανήκει στα αποδεκτά όρια. Αντίστοιχα, προκειμένου να επιτευχθεί ίδιο επίπεδο διακινδύνευσης και στην περίπτωση του φράγματος RCC, επιλέχθηκε η περίοδος επαναφοράς των 50 ετών, καθώς αντιστοιχεί σε επίπεδο διακινδύνευσης ίσο με 4.0%.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις αναλύσεις του υποκεφαλαίου 4.4, θεωρήθηκε εύλογη η επιλογή διαμέτρου σήραγγας εκτροπής ίση με 3.0 m και περιόδου επαναφοράς 100 ετών, στην περίπτωση χωμάτινου τύπου φράγματος. Επιπλέον, στην περίπτωση κατασκευής φράγματος RCC επιλέχθηκε διάμετρος σήραγγας εκτροπής ίση με 2.0 m και όχι 1.5 m καθώς, όπως αποδείχθηκε στην υποενότητα 4.4, στην περίπτωση αυτή το ύψος του προφράγματος είναι κατά 4 m μικρότερο, επομένως προτιμητέο από οικονομικής άποψης. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση του φράγματος RCC η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού επιλέχθηκε ίση με 50 έτη.

Συνοψίζοντας, τα σενάρια που επιλέχθηκε να εξεταστούν είναι τα εξής:

- Σενάριο 1: Χωμάτινος τύπος φράγματος, διάμετρος σήραγγας εκτροπής ίση με 3 m και διάνοιξη αυτής με τη συμβατικά μέσα
- Σενάριο 2: Χωμάτινος τύπος φράγματος, διάμετρος σήραγγας εκτροπής ίση με 3 m και διάνοιξη αυτής με τη micro-TBM
- Σενάριο 3: RCC φράγμα, διάμετρος σήραγγας εκτροπής ίση με 2.0 m και διάνοιξη αυτής με τη micro-TBM

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των σεναρίων αυτών, οι τελικές διατομές υποστήριξης βάσει των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων καθώς και η κοστολόγηση ανά περίπτωση.

4.5 Σενάριο Ι – Συμβατική μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας εκτροπής και χωμάτινο φράγμα (υφιστάμενη κατάσταση)

Δεδομένου ότι η γνευσιακή βραχώμαζα εμφανίζει ασυνέχειες, κρίθηκε σκόπιμη η εξέταση της ευστάθειας αυτών με τη χρήση του προγράμματος Unwedge της RocScience Inc. . Όπως είναι εμφανές και από την οριζοντιογραφία της σήραγγας εκτροπής (3.2), η υπό εξέταση σήραγγα δεν διατηρεί την ίδια διεύθυνση σε όλο το μήκος της, επομένως εξετάστηκε η ευστάθεια των σφηνών σε δύο τμήματα Α και Β, στις χιλιομετρικές θέσεις 0+000 έως 0+375 και 0+375 έως 0+780, αντίστοιχα. Η διεύθυνση στο εκάστοτε τμήμα μετρήθηκε ίση με 130° και 55°, αντίστοιχα, ενώ η κατά μήκος κλίση είναι κοινή και ίση με 2°. Η γωνία τριβής λήφθηκε ίση με 32° και η συνοχή ίση με 0.06 MPa, σύμφωνα με τα στοιχεία της οριστικής μελέτης της δοκιμαστικής στοάς. Τα στοιχεία των ασυνεχειών που μελετήθηκαν, συνοψίζονται στον πίνακα 4.7. Επιπρόσθετα το μήκος των διακλάσεων θεωρήθηκε ίσο με ένα βήμα προχώρησης, ήτοι 3 m εν προκειμένω.

Πίνακας 4.7: Στοιχεία επίπεδων ασυνεχειών

α/α διάκλασης	Προσανατολισμός
J1	55/025
J2	75/195
J3	80/300
J4	75/115

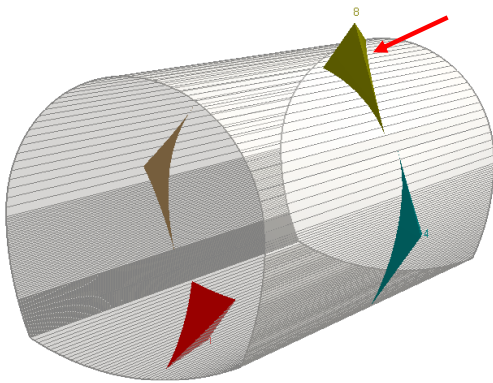
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των διακλάσεων J1 έως J4 συγκεντρώνονται στους πίνακες 4.8 και 4.9 και ενδεικτικά παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα ομοιώματα στις περιπτώσεις των ολισθαίνοντων σφηνών. Σημειώνεται ότι με κόκκινο χρώμα στους παρακάτω πίνακες σημειώνονται οι συνδυασμοί στους οποίους απαιτείται υποστήριξη με χρήση αγκυρίων.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα Unwedge – Περιοχή Α

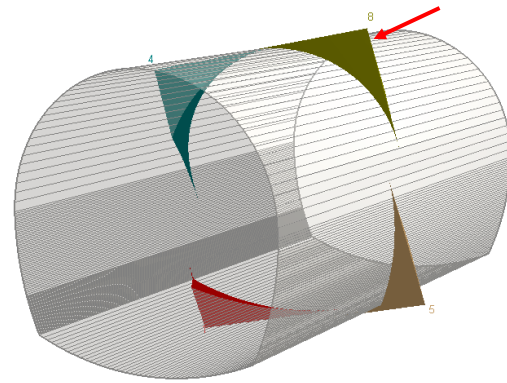
α/α συνδυασμού	Διάκλαση Α	Διάκλαση Β	Διάκλαση Γ	SF	Όγκος (m ³)	Βάρος (ton)	Ύψος σφήνας (m)	Θέση επί της περιμέτρου
1	J1	J2	J3	0.00	0.151	0.450	0.59	Οροφή
2	J2	J3	J4	0.00	0.034	0.112	0.58	Πάνω δεξιά
3	J1	J2	J4	3.59	0.268	0.787	0.80	Πάνω δεξιά
4	J1	J3	J4	6.31	0.806	2.360	2.42	Πάνω δεξιά

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Unwedge – Περιοχή Β

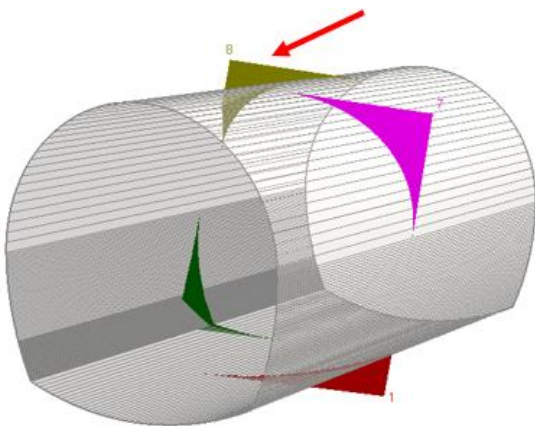
α/α συνδυασμού	Διάκλαση Α	Διάκλαση Β	Διάκλαση Γ	SF	Όγκος (m ³)	Βάρος (ton)	Ύψος σφήνας (m)	Θέση επί της περιμέτρου
1	J2	J3	J4	0.00	0.092	0.225	0.61	Οροφή
2	J1	J2	J3	0.00	0.047	0.225	0.46	Οροφή
3	J1	J3	J4	5.00	0.333	1.012	1.24	Πάνω δεξιά
4	J1	J2	J4	7.85	0.138	0.450	0.71	Πάνω αριστερά



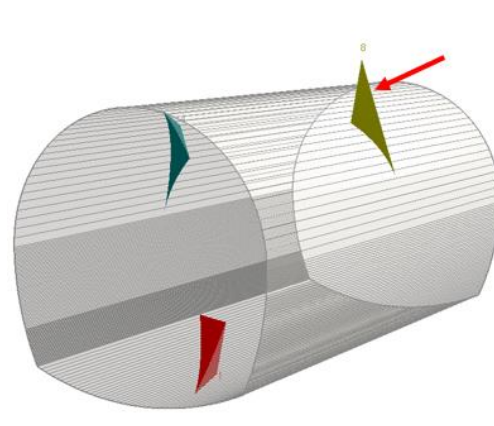
Εικόνα 4.15: Περιοχή Α – Συνδυασμός J1 J2 J3



Εικόνα 4.16: Περιοχή Α – Συνδυασμός J2 J3 J4



Εικόνα 4.17: Περιοχή Β – Συνδυασμός J1 J2 J3



Εικόνα 4.18: Περιοχή Β – Συνδυασμός J2 J3 J4

4.5.1 Έλεγχος ευστάθειας σφηνών

Τα απαιτούμενα αγκύρια για τη συγκράτηση των επισημασμένων σφηνών προσδιορίστηκαν και πάλι μέσω του προγράμματος Unwedge. Πιο αναλυτικά, εξετάστηκαν οι συνδυασμοί J1 J2 J3 και J2 J3 J4 για την περιοχή Α και ο συνδυασμός J2 J3 J4 για την περιοχή Β, ενώ η σφήνα που προκύπτει κατά το συνδυασμό J1 J2 J3 θεωρήθηκε πολύ μικρή για να αποτελέσει λόγο τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης.

Για τους τρεις συνδυασμούς εξετάστηκε η τοποθέτηση αγκυρίων swellex της ELEBOR, εφελκυστικής αντοχής ίσης με 0.12 MN, μήκους 2 m, τοποθετημένα σε κάναβο 2 x 3 (2 m περιμετρική απόσταση ανά 3 m βήμα προχώρησης). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τους προαναφερθέντες συνδυασμούς παρουσιάζονται στους πίνακες 4.8 και 4.9 και ενδεικτικά παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα ομοιώματα.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα Unwedge – Περιοχή Α – Συνδυασμός J1 J2 J3

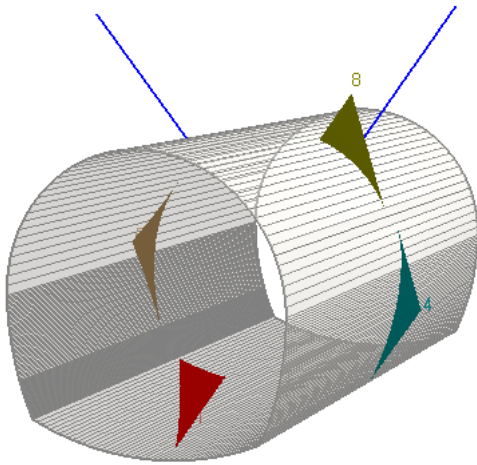
α/α συνδυασμού	Διάκλαση Α	Διάκλαση Β	Διάκλαση Γ	SF	Όγκος (m ³)	Βάρος (ton)	Ύψος σφήνας (m)	Θέση επί της περιμέτρου
1	J1	J2	J3	13.80	0.151	0.450	0.59	Οροφή

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα Unwedge – Περιοχή Α – Συνδυασμός J2 J3 J4

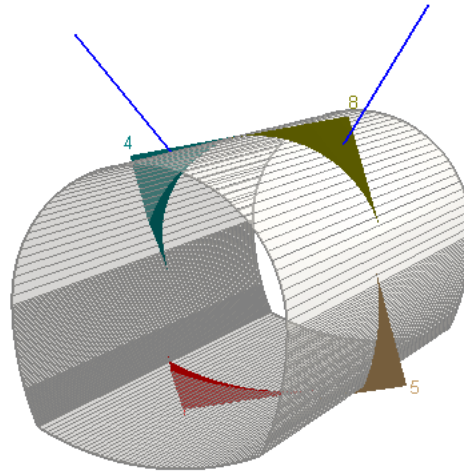
α/α συνδυασμού	Διάκλαση Α	Διάκλαση Β	Διάκλαση Γ	SF	Όγκος (m ³)	Βάρος (ton)	Ύψος σφήνας (m)	Θέση επί της περιμέτρου
1	J2	J3	J4	61.01	0.034	0.112	0.50	Πάνω δεξιά

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα Unwedge – Περιοχή Β – Συνδυασμός J2 J3 J4

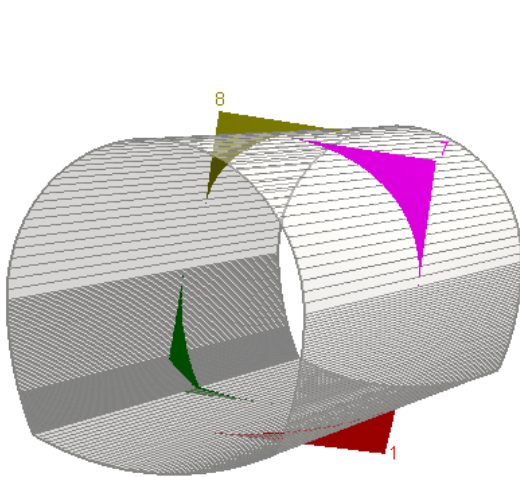
α/α συνδυασμού	Διάκλαση Α	Διάκλαση Β	Διάκλαση Γ	SF	Όγκος (m ³)	Βάρος (ton)	Ύψος σφήνας (m)	Θέση επί της περιμέτρου
1	1	3	4	5.00	0.333	1.012	1.24	Πάνω δεξιά
2	1	2	4	7.85	0.138	0.450	0.71	Πάνω αριστερά
3	2	3	4	7.91	0.092	0.225	0.61	Οροφή
4	1	2	3	9.84	0.047	0.225	0.46	Οροφή



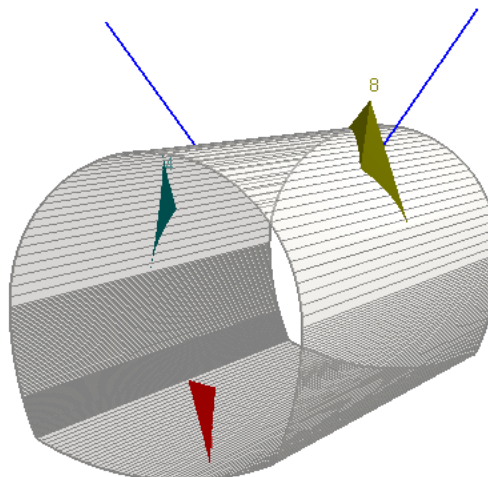
Εικόνα 4.19: Περιοχή Α – Συνδυασμός J1 J2 J3



Εικόνα 4.20: Περιοχή Α – Συνδυασμός J2 J3 J4



Εικόνα 4.21: Περιοχή Β – Συνδυασμός J1 J2 J3



Εικόνα 4.22: Περιοχή Β – Συνδυασμός J2 J3 J4

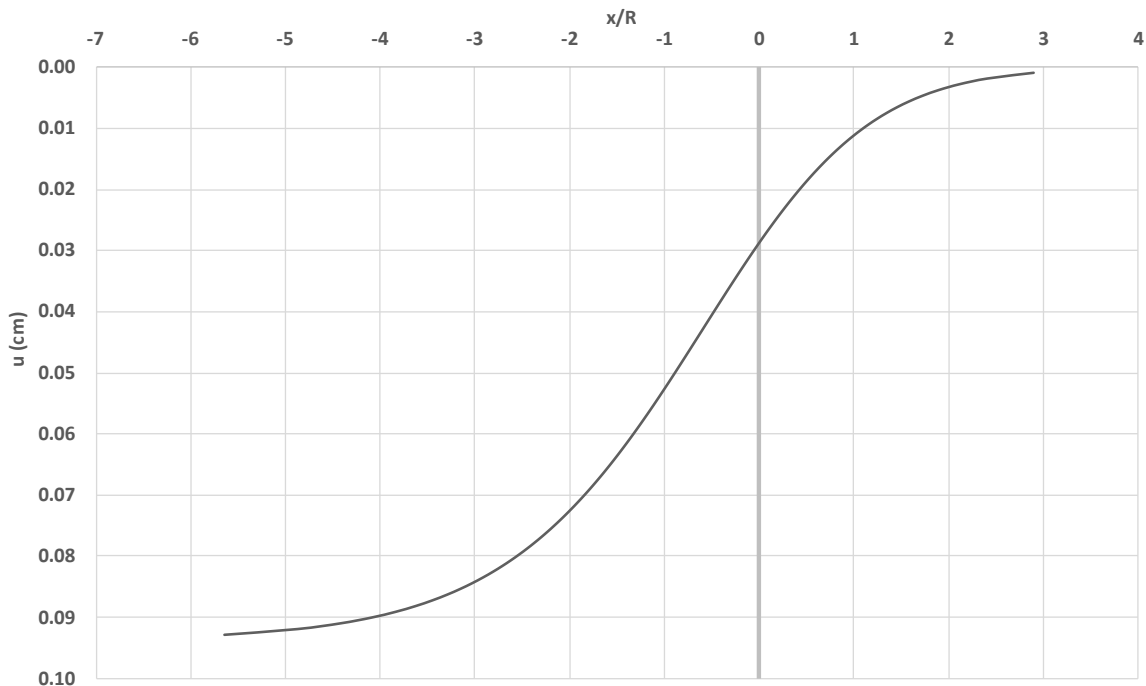
Η επάρκεια των αγκυριών αυτών καθώς και το πάχος του απαιτούμενου εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τα απαραίτητα πλαίσια, εξετάστηκαν με χρήση του προγράμματος RS2 της RocScience Inc. .

4.5.2 Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Εκσκαφή με τη μέθοδο drill & blast

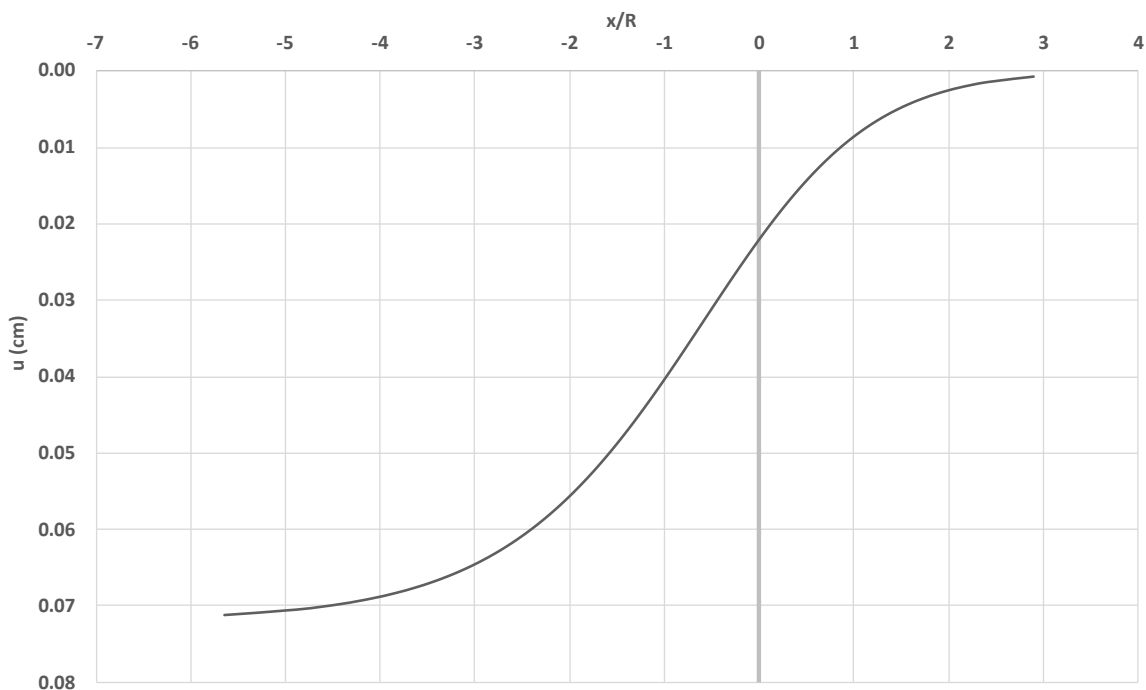
Πιο αναλυτικά, για τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με συμβατικά μέσα προτείνονται δύο διατομές άμεσης υποστήριξης, Α και Β, που εφαρμόζονται στις καλής ποιότητας βραχώμαζες και στις δυσμενέστερες περιοχές των στομίων, του ρήγματος και των διεπαφών γνεύσιου και γρανιτογνεύσιου, αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γνεύσιο (Χ.Θ. 0+350), η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γρανιτο-γνεύσιο (Χ.Θ. 0+475) και η περιοχή του ρήγματος σε περιβάλλον γρανιτο-γνεύσιου (Χ.Θ. 0+495). Για τις περιοχές αυτές, διαμορφώθηκαν οι καμπύλες διαμήκους

προφίλ μετακινήσεων (εικόνες 4.23, 4.24 και 4.25) και διαμήκου ανάπτυξης του βαθμού αποτόνωσης (εικόνες 4.29, 4.30 και 4.31), βάσει της μεθόδου Chern et al 1998.

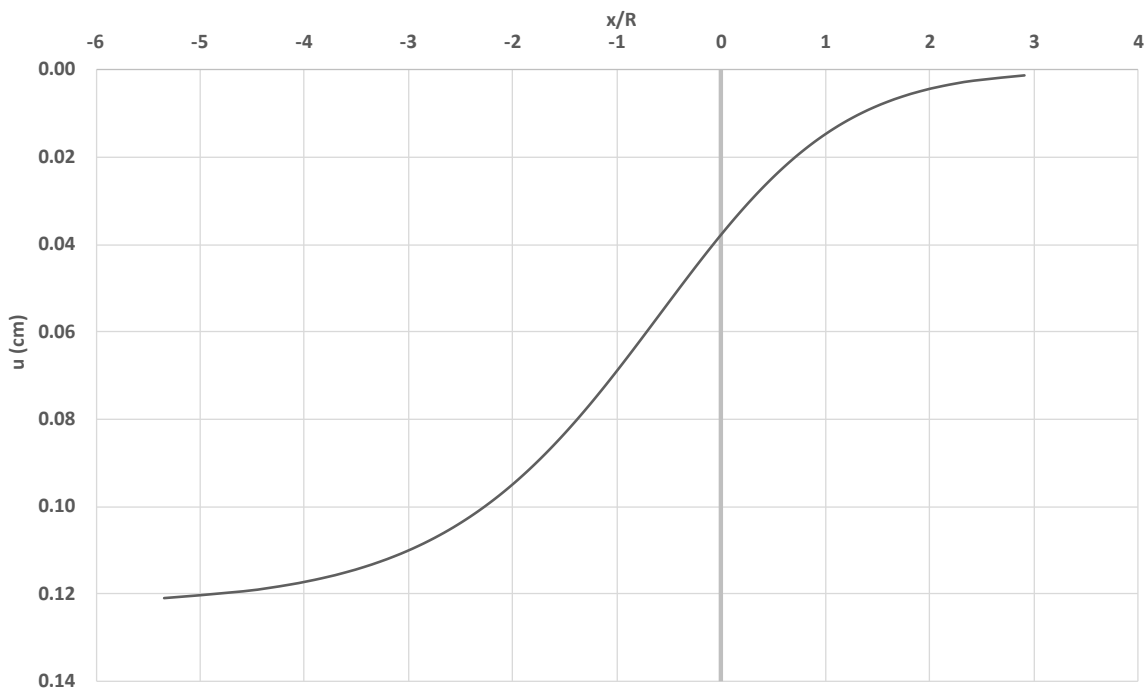


Εικόνα 4.23: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 1

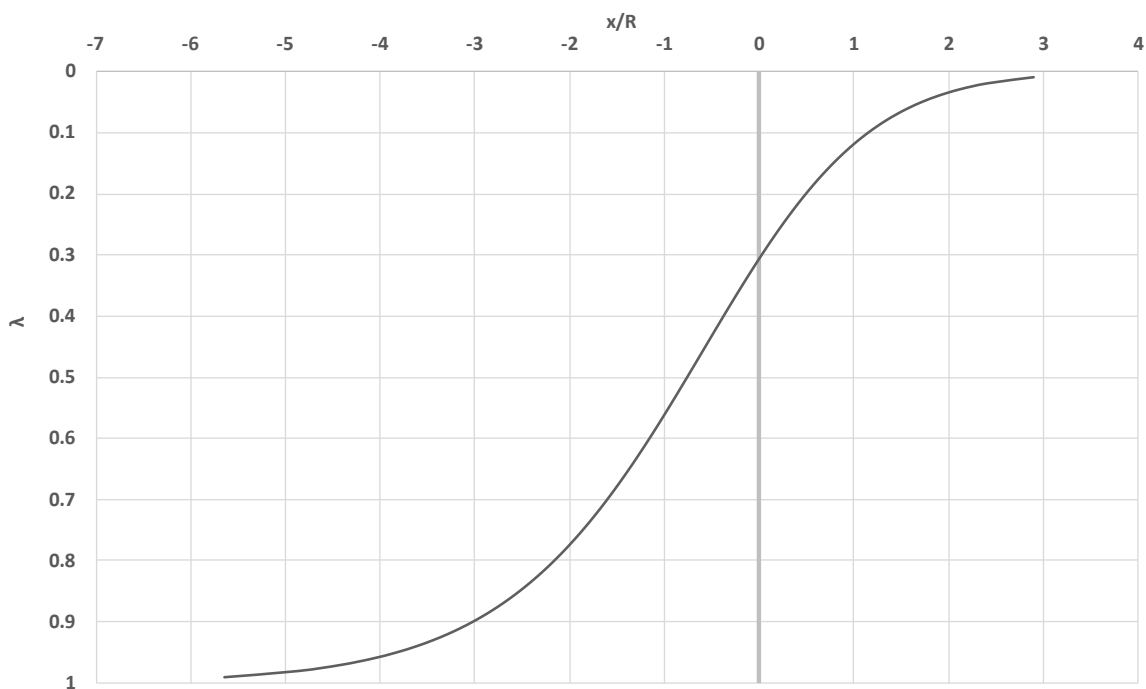


Εικόνα 4.24: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 2

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

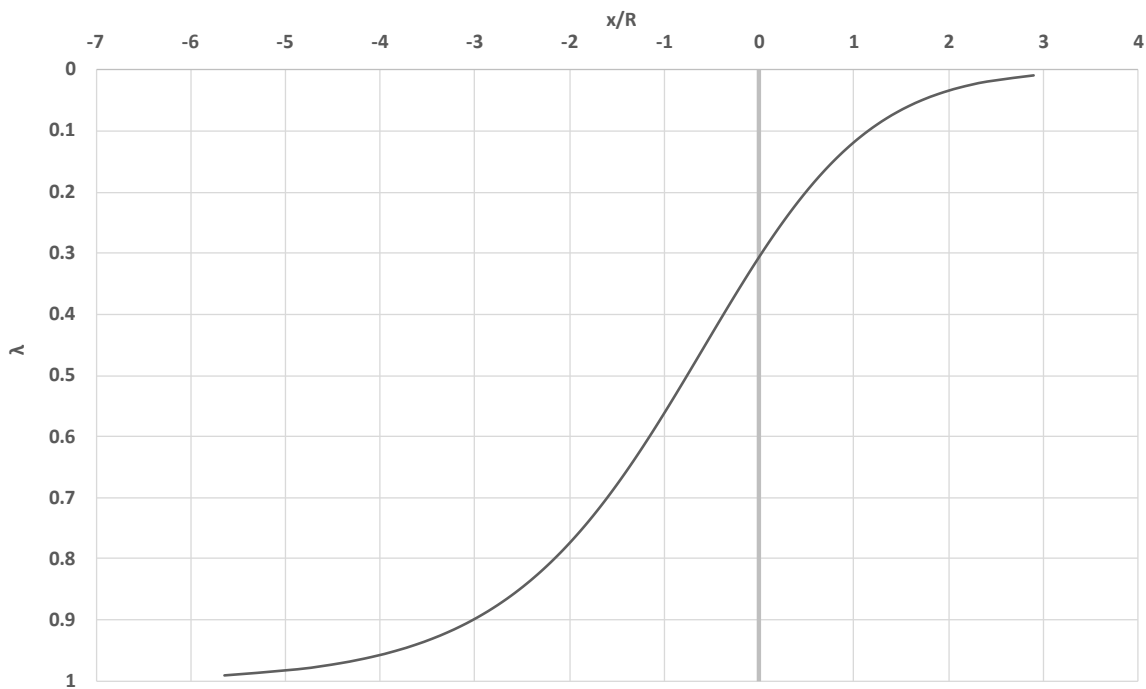


Εικόνα 4.25: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 3

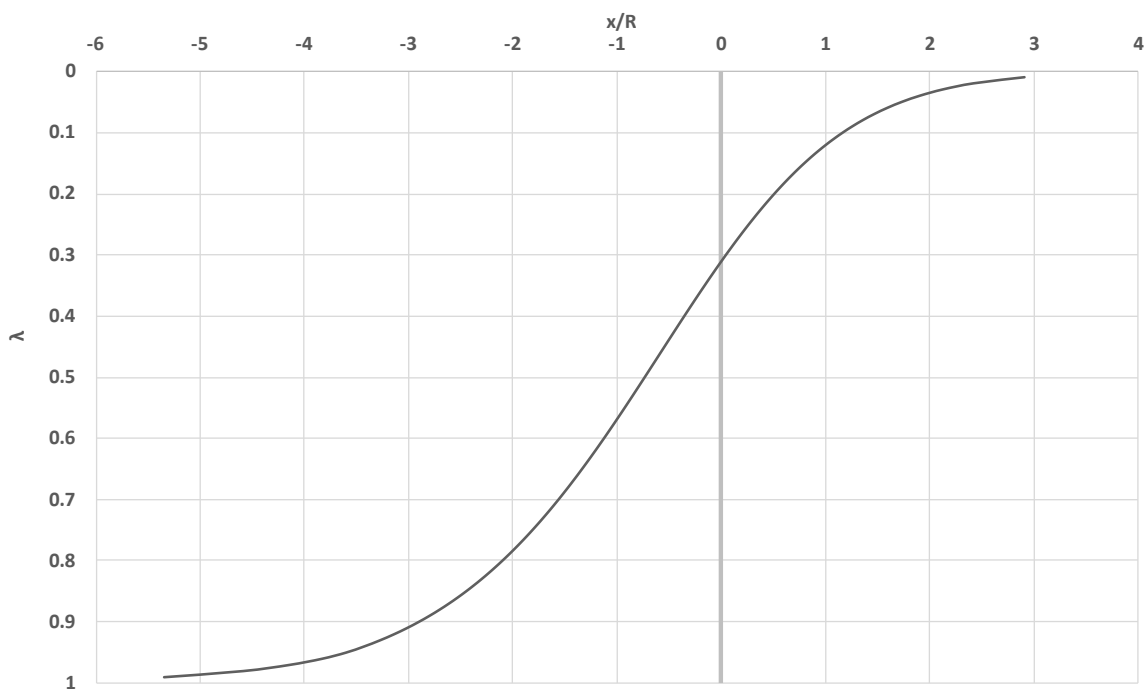


Εικόνα 4.26: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 1

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



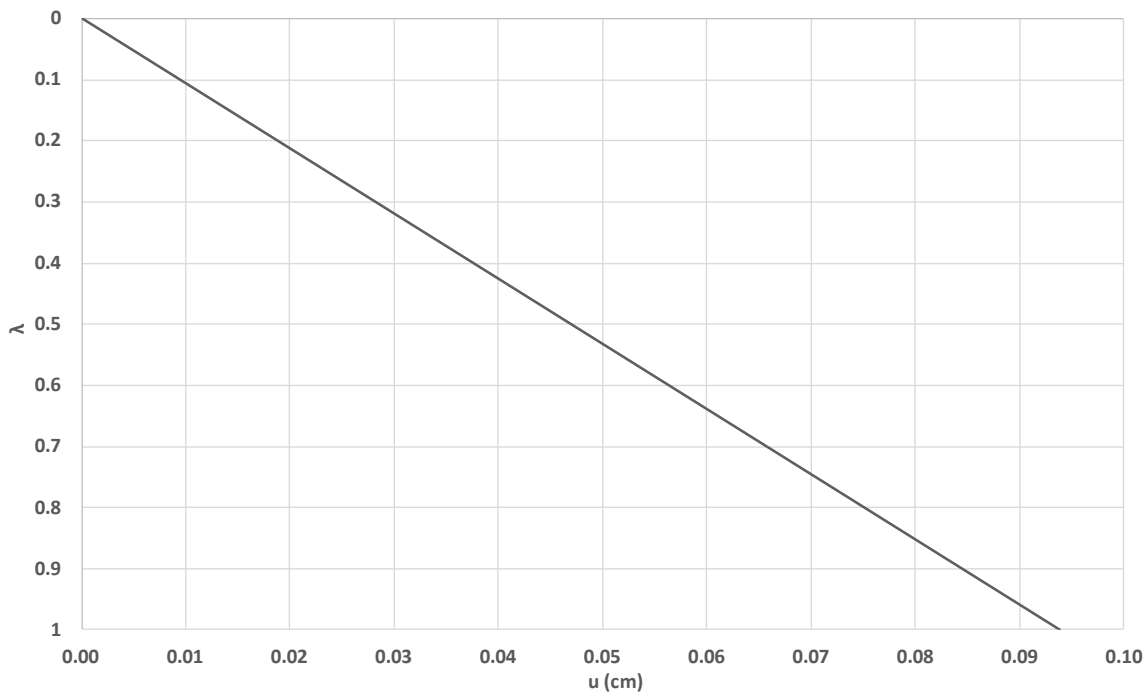
Εικόνα 4.27: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 2



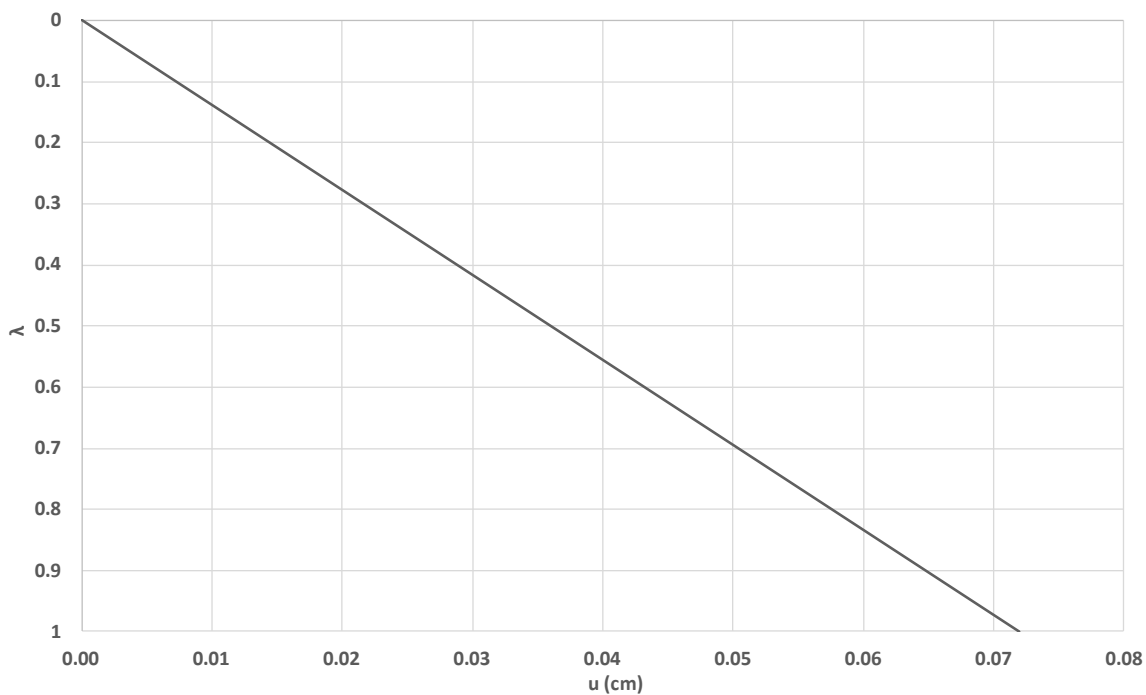
Εικόνα 4.28: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 3

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για ανυποστήρικτη εκσκαφή και για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος.

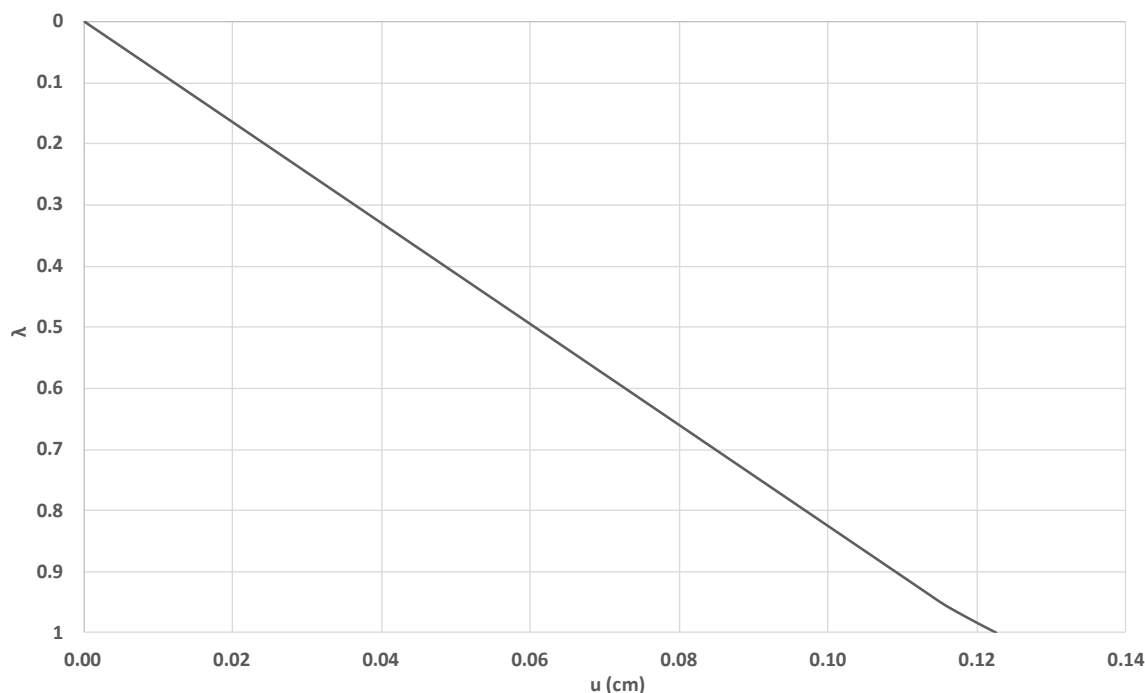
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.29: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (u - λ) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+350) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 1



Εικόνα 4.30: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (u - λ) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+475) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 2



Εικόνα 4.31: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 3

Σύμφωνα με τα διαγράμματα $\lambda-x/R$, προέκυψε ο βαθμός αποτόνωσης λ και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E σε διάφορες θέσεις από το μέτωπο, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.14. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η σήραγγα ανοίγεται ολομέτωπα σε μία φάση, απαιτήθηκε ο προσδιορισμός του βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση από το μέτωπο ίση με ένα βήμα προχώρησης, ήτοι 3 m, ενώ στην περίπτωση του ρήγματος των διεπαφών και των στομιών σε αποστάσεις ίσες με 1.5 m, 3 και 4.5 m καθώς ελήφθη υπόψιν το φαινόμενο της σκλήρυνσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων RS2, ορίστηκαν ίσα με έξι διαμέτρους περιμετρικά της εκσκαφής. Στον πίνακα 4.13, παρατίθενται οι συντεταγμένες των προσομοιωμάτων (οι οποίες προφανώς είναι κοινές και στα τρία σημεία ενδιαφέροντος).

Πίνακας 4.13: Συντεταγμένες προσομοιώματος (κοινές για τις αναλύσεις 1,2,3)

Σημείο	Άξονας Χ	Άξονας Υ
1	18	18
2	18	-18
3	-18	-18
4	-18	18

Στις αναλύσεις 1 και 2 που αναφέρονται στην TEII και συγκεκριμένα στις θέσεις μέγιστων υπερκειμένων σε περιβάλλον υγιούς γνευσίου και υγιούς γρανιτο-γνεύσιου (Χ.Θ. 0+375 και 0+475), η τρίτη διάσταση ελήφθη υπόψιν μέσω του βαθμού αποτόνωσης (λ) εφαρμόζοντας τη μέθοδο της χαλάρωσης με το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E) του εδάφους, σύμφωνα με τη σχέση 4.70, όπου E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας και E το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για τον επιθυμητό βαθμό αποτόνωσης λ .

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1 - 2\nu)(1 - \lambda)}{(1 - 2\nu) + \lambda} \quad (4.70)$$

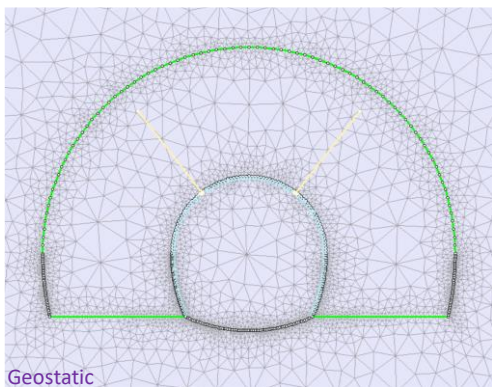
Πίνακας 4.14: Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος

Σημείο ενδιαφέροντος	Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (m)	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	E (MPa)	Περιγραφή
TEII – 0+350 Ανάλυση 1	0.00	0.30	937.51	Μέτωπο εκσκαφής
	-3.00	0.77	193.77	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης
	-6.00	0.95	32.68	Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEII – 0+475 Ανάλυση 2	0.00	0.30	937.51	Μέτωπο εκσκαφής
	-3.00	0.77	193.77	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης
	-6.00	0.95	32.68	Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEIII – 0+495 Ανάλυση 3	0.00	0.31	81.59	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.57	38.75	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης
	-3.00	0.79	16.19	
	-4.50	0.91	6.25	Προχώρηση μετώπου εκσκαφής

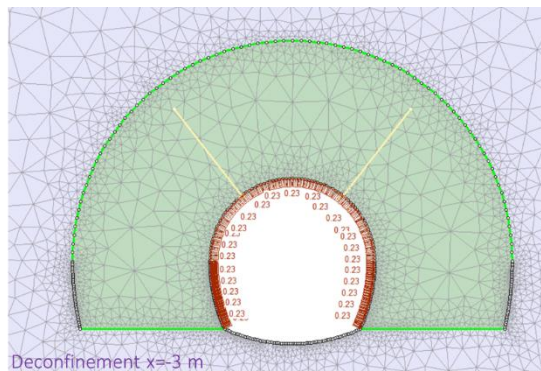
Στην προσομοίωση 3 που αναφέρεται στην TEIII και συγκεκριμένα στις θέσεις διεπαφής γνευσίου και γρανιτο-γνευσίου, στη θέση του ρήγματος και στα στόμια, ελήφθη υπόψιν το φαινόμενο της σκλήρυνσης – ωρίμανσης του σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε η ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με πάχος 50 % του τελικού πάχους και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 25% της τελικής. Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τελικό του πάχος και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 50% της τελικής. Τέλος, θεωρήθηκε αύξηση της αντοχής (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική του αντοχή, ήτοι στο 100%. Τα στάδια της προσομοίωσης που ακολουθήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.15.

Οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές παρουσιάζονται ανά ανάλυση και στάδιο στις εικόνες 4.32 έως 4.43.

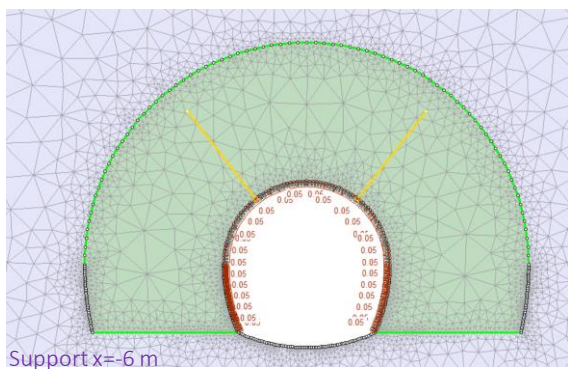
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σηράγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



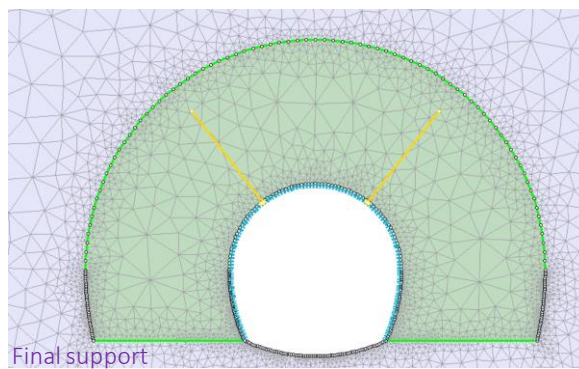
Εικόνα 4.32: Ανάλυση 1 – Στάδιο 1



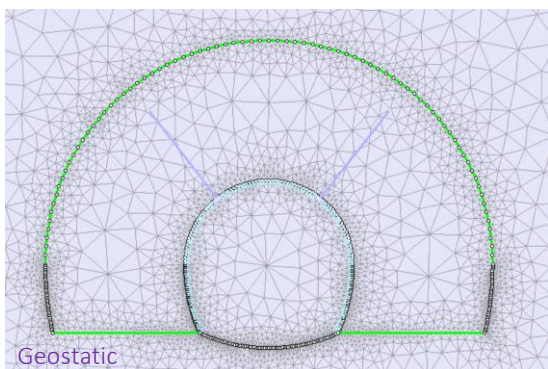
Εικόνα 4.33: Ανάλυση 1 – Στάδιο 2



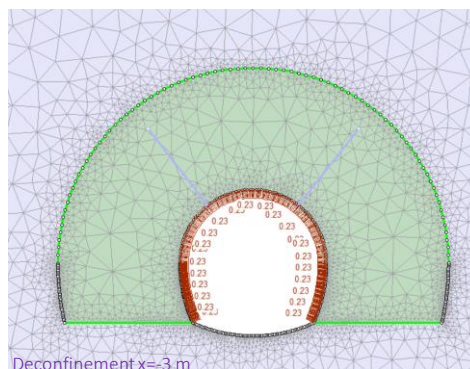
Εικόνα 4.34: Ανάλυση 1 – Στάδιο 3



Εικόνα 4.35: Ανάλυση 1 – Στάδιο 4

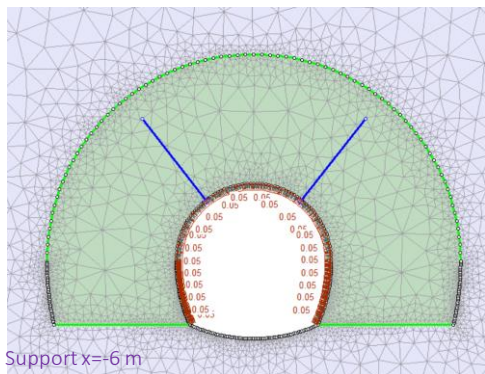


Εικόνα 4.36: Ανάλυση 2 – Στάδιο 1

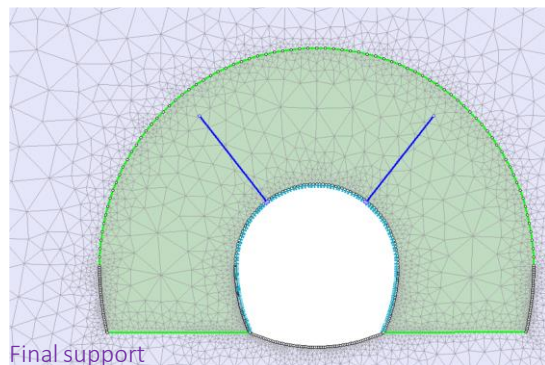


Ανάλυση 2 – Στάδιο 2

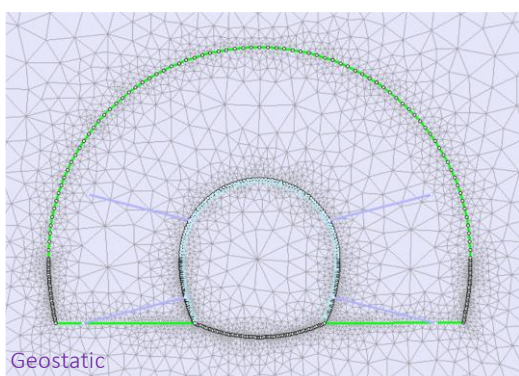
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σηράγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



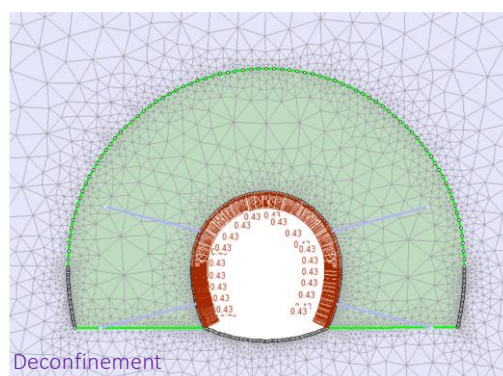
Εικόνα 4.37: Ανάλυση 2 – Στάδιο 3



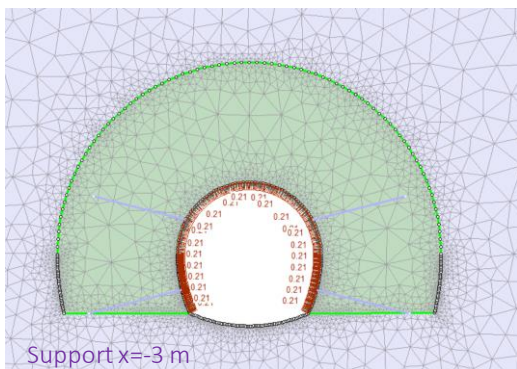
Εικόνα 4.38: Ανάλυση 2 – Στάδιο 4



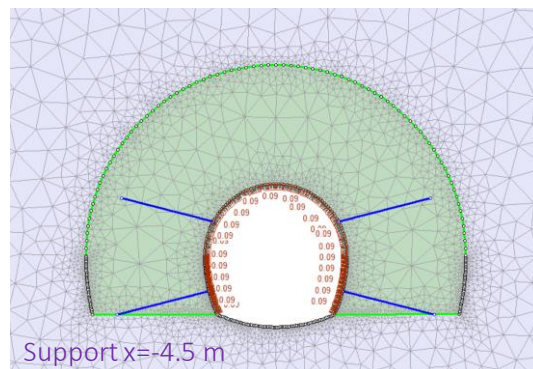
Εικόνα 4.39: Ανάλυση 3 – Στάδιο 1



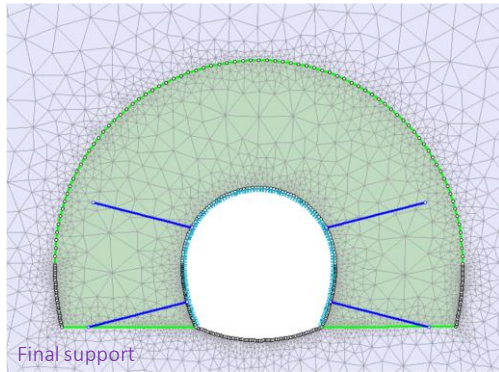
Εικόνα 4.40: Ανάλυση 3 – Στάδιο 2



Εικόνα 4.41: Ανάλυση 3 – Στάδιο 3



Εικόνα 4.42: Ανάλυση 3 – Στάδιο 4



Εικόνα 4.43: Ανάλυση 3 – Στάδιο 5

Κατά τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις υιοθετήθηκαν ορισμένες βασικές παραδοχές. Συγκεκριμένα, αναφορικά με το έδαφος η βραχώμαζα προσομοιώθηκε ελαστοπλαστικά, θεωρώντας ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωυλικού, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.17.

Πίνακας 4.15: Στάδια ανάλυσης 1 -TEII – Χ.Θ. 0+350 (Ανάλυση 1) και Στάδια ανάλυσης 2 -TEII – Χ.Θ. 0+475 (Ανάλυση 2) (κοινά)

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Αποτόνωση εκσκαφής με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης από το μέτωπο ($x=-3.00$ m)
3	Σκλήρυνση προσωρινής υποστήριξης με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας με υιοθέτηση βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση δύο βημάτων προχώρησης από το μέτωπο ($x=-6.00$ m). Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι ίσο με το 100% του τελικού πάχους αυτής, ενώ η αντοχή της ίση με το 25% της τελικής
4	Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της εκσκαφής. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού και η αντοχή αυτής στο 100% της τελικής, αντίστοιχα

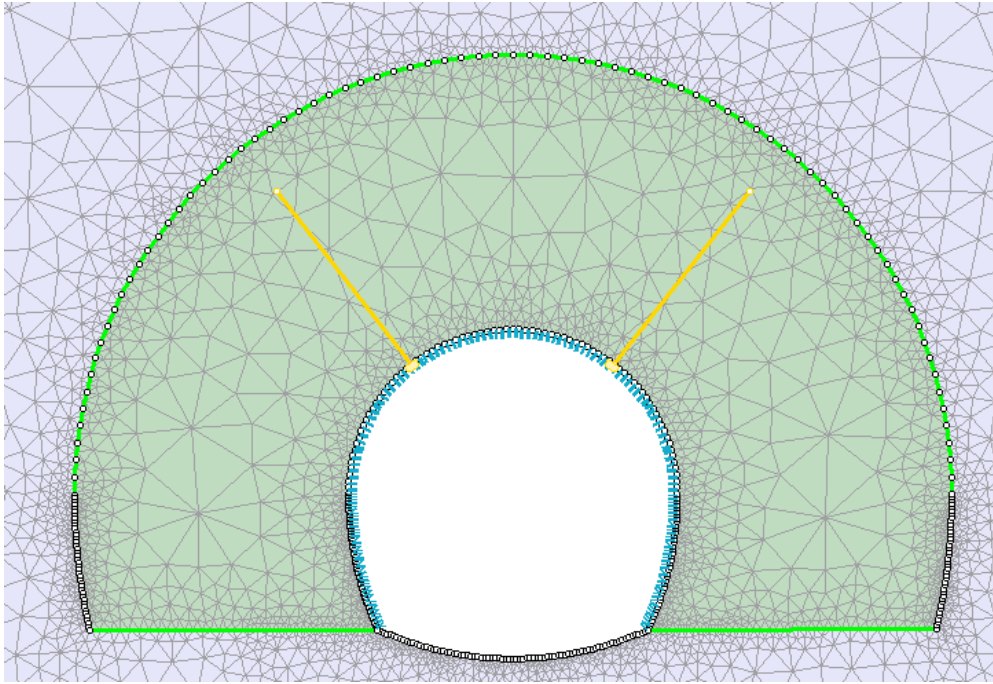
Πίνακας 4.16: Στάδια ανάλυσης 3 -TEIII – Χ.Θ. 0+495

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Αποτόνωση εκσκαφής με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης από το μέτωπο ($x=-1.50$ m)
3	Εφαρμογή προσωρινής υποστήριξης και εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας με υιοθέτηση βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση δύο βημάτων προχώρησης από το μέτωπο ($x=-3.00$ m). Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι ίσο με το 50% του τελικού πάχους αυτής, ενώ η αντοχή της ίση με το 25% της τελικής
4	Σκλήρυνση προσωρινής υποστήριξης με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας με υιοθέτηση βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση δύο βημάτων προχώρησης από το μέτωπο ($x=-3.00$ m). Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι ίσο με το 100% του τελικού πάχους αυτής, ενώ η αντοχή της ίση με το 50% της τελικής
5	Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της εκσκαφής. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού και η αντοχή αυτής στο 100% της τελικής, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού RS2, ο βαθμός διαταραχής D λόγω εκσκαφής εφαρμόζεται σε όλη την έκταση του γεωυλικού. Όπως είναι προφανές, αυτό δεν έχει λογική υπόσταση καθώς η επίδραση της εκσκαφής και η επακόλουθη διαταραχή της βραχώμαζας συγκεντρώνονται σε μια ζώνη διαταραχής, πάχους 2.5 m περιμετρικά της εκσκαφής (Georgiou et al., 2023), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.44.

Επίσης, επισημαίνεται ότι εφαρμόστηκε η παραδοχή σύμφωνα με την οποία η γωνία διασταλτικότητας δ είναι προσεγγιστικά ίση με το 25 % της γωνίας τριβής φ του γεωυλικού, καθώς και η παραδοχή ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ανέρχεται στο 4% της αντοχής του σε θλίψη (Καββαδάς)

Η υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος επιτυγχάνεται με το συνδυασμό δύο διατομών άμεσης υποστήριξης Α και Β. Πιο αναλυτικά, η διατομή Α περιλαμβάνει ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) πάχους ίσο με το ελάχιστο κατά ΟΜΟΕ και αγκύρια διαστελλόμενου τύπου (Swellax). Επιπλέον, η διατομή Β περιλαμβάνει ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μεταλλικών πλαισίων (lattice girder) και αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης. Οι ιδιότητες των μέτρων υποστήριξης και για τις δύο προτεινόμενες διατομές Α και Β, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.18.



Εικόνα 4.44: Ζώνη διαταραχής με $D \neq 0$ περιμετρικά της εκσκαφής

Πίνακας 4.17: Ιδιότητες γεωυλικού

Παράμετρος	TEII	TEIII
Ειδικό βάρος (γ) (MN/m^3)	0.026	0.026
Βαθμός διαταραχής βραχώμαζας (D)	0.5	0.5
Μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας (E_m) (MPa)	2187.2	192.2
Αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) (MPa)	110	30
Αντοχή βραχώμαζας (σ_{cm}) (MPa)	34.2	2.9
GSI	70	40
Παράμετρος (m_i)	28	28
Λόγος Poisson (ν)	0.25	0.25
Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_o)	0.8	0.8
Γωνία τριβής (ϕ)	40	35
Διαστολικότητα (δ)	10	8.75

Πίνακας 4.18: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	A	B
Πάχος (t) (m)	0.05	0.15
Μέτρο ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) (MPa)	15000	15000
Λόγος Poisson (ν)	0.20	0.20
Θλιπτική αντοχή (f_{ck}) (MPa)	20	20
Εφελκυστική αντοχή (f_{ctm})	3	3
Ειδικό βάρος (γ_{shot}) (MN/m ³)	0.025	0.025
Συμπεριφορά	Ελαστική	Ελαστική
Αγκύρια διαστελλόμενου τύπου (Swelllex)		
Διάμετρος (d) (mm)	35	-
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel}) (MPa)	200000	-
Φέρουσα ικανότητα (P_u , tensile) (MN)	0.32	-
Μήκος (L)	2	-
Κάνναβος	1x3	-
Συμπεριφορά	Πλαστική	-
Αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης (Fully bonded bolts)		
Διάμετρος (d)	-	25
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel})	-	200000
Φέρουσα ικανότητα (P_u , tensile)	-	0.16
Μήκος (L)	-	2
Κάνναβος	-	1x1.5
Συμπεριφορά	-	Πλαστική
Μεταλλικά πλαίσια		
Τύπος	-	Lattice girder
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel}) (MPa)	-	200000
Εμβαδόν (A) (m ²)	-	0.00104
Ροπή αδρανείας (I) (m ⁴)	-	1.35e-06
Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πλαισίων (m)	-	1.5
Συμπεριφορά	-	Ελαστική

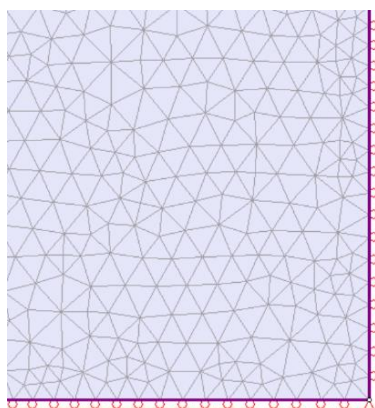
Επισημαίνεται ότι η διατομή άμεσης υποστήριξης τύπου Β συμπεριλαμβάνει και δοκούς προπορείας τύπου spiling μήκους 12 μέτρων λόγω των αρκετά πτωχών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας στη περιοχή του ρήγματος.

Ως προς τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (3 nodes triangles elements). Το σύνολο των στοιχείων και των ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.19.

Πίνακας 4.19: Σύνολο στοιχείων και κόμβων προσομοιώματος

Στοιχεία (elements)	15840
Κόμβοι (nodes)	8103

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν κυλίσσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα Χ όσο και κατά τον άξονα Υ και τοπικές αρθρώσεις (pins) στα σημεία τομής των αξόνων Χ και Υ, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.45.



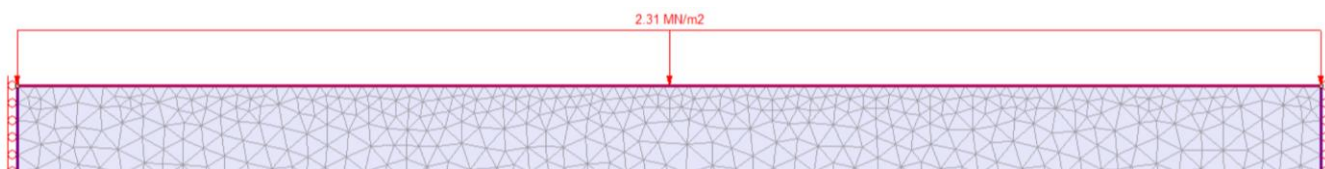
Εικόνα 4.45: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

Για την προσομοίωση της βραχώμαζας άνω του ανωτέρου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος, το οποίο όπως προαναφέρθηκε ισούται με έξι φορές τη διάμετρο της σήραγγας, εφαρμόστηκε ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο P , όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά για την προσομοίωση 1 στην εικόνα 4.46. Ο υπολογισμός του φορτίου έγινε βάσει της σχέσης 4.71, όπου ΔH η υψομετρική διαφορά μεταξύ της φυσικής στάθμης του εδάφους και του ανώτερου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος και γ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας. Το ύψος των υπερκειμένων για τις αναλύσεις καθώς και το τελικό φορτίο P , συνοψίζονται στον πίνακα 4.20.

$$P = \Delta H \gamma \quad (4.71)$$

Πίνακας 4.20: Μέγεθος ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου

	Ανάλυση 1	Ανάλυση 2	Ανάλυση 3
Ύψος υπερκειμένων (m)	107	82	69
Ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (MN/m ²)	2.314	1.664	1.326

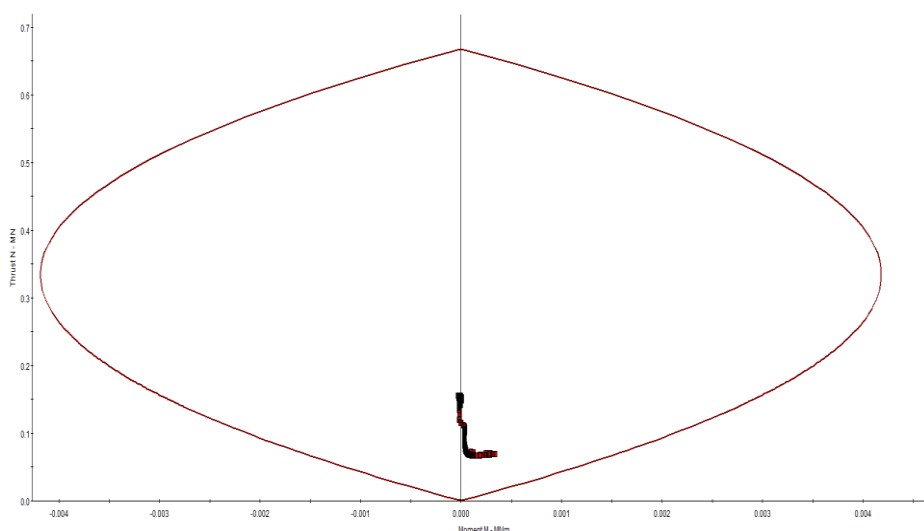


Εικόνα 4.46: Προσομοίωση ανώτερης βραχόμαζας από το αριθμητικό προσομοίωμα με τη χρήση ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου – Ανάλυση 1

4.5.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

4.5.3.1 ΤΕΙΙ – ΧΘ 0+350 – Ανάλυση 1

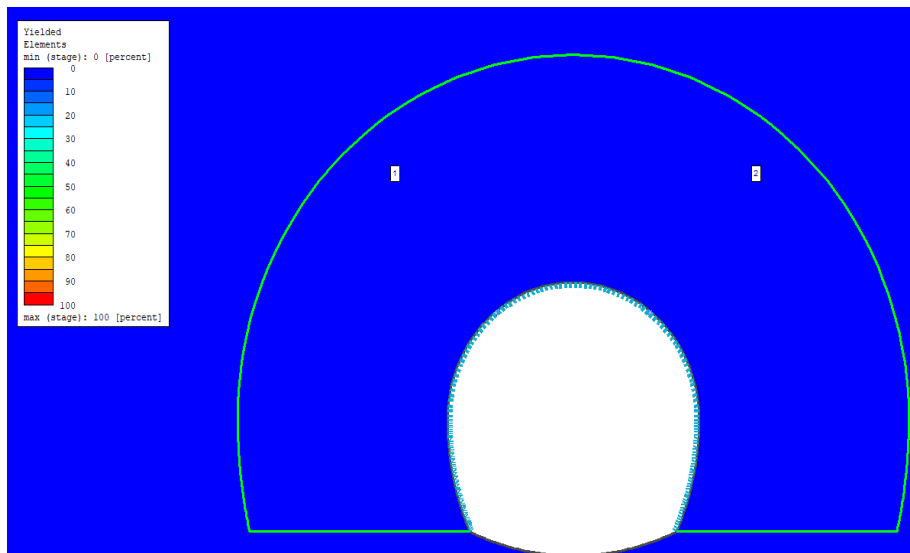
Αρχικά προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 5 cm (ελάχιστο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ΟΜΟΕ) και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.47 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.47: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 1

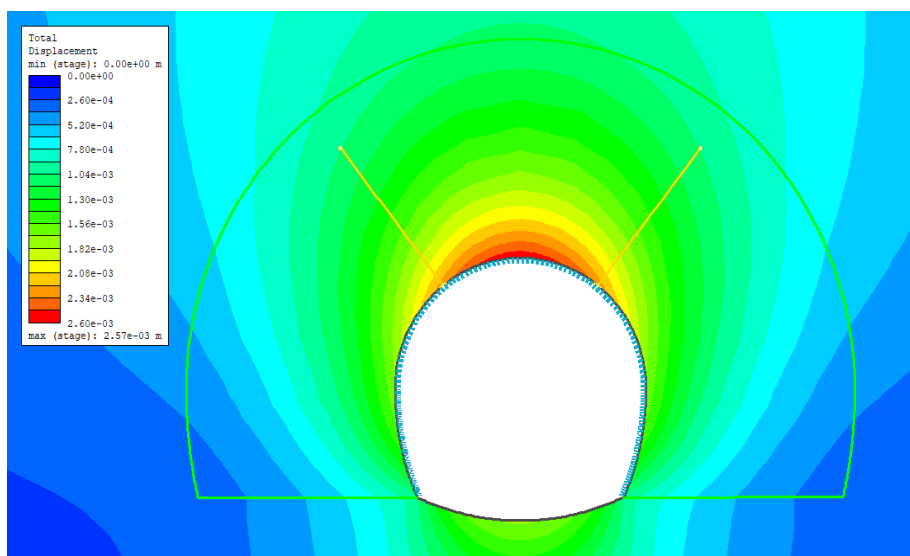
Επίσης, δεν παρατηρήθηκε καμία αστοχία των αγκυρώσεων διαστελλόμενου τύπου (swellex) της οροφής, μήκους 2 m, καθώς επίσης αυτά πακτώνονται σε υγιή περιοχή για μήκος μεγαλύτερη από 1 m, όπως είναι σαφές από την εικόνα 4.48. Επιπρόσθετα, με την ολοκλήρωση της εκσκαφής δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη πέριξ αυτής.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.48: Περιοχή πάκτωσης περιμετρικών αγκυρώσεων – Ανάλυση 1

Με βάση την εν λόγω προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.49.



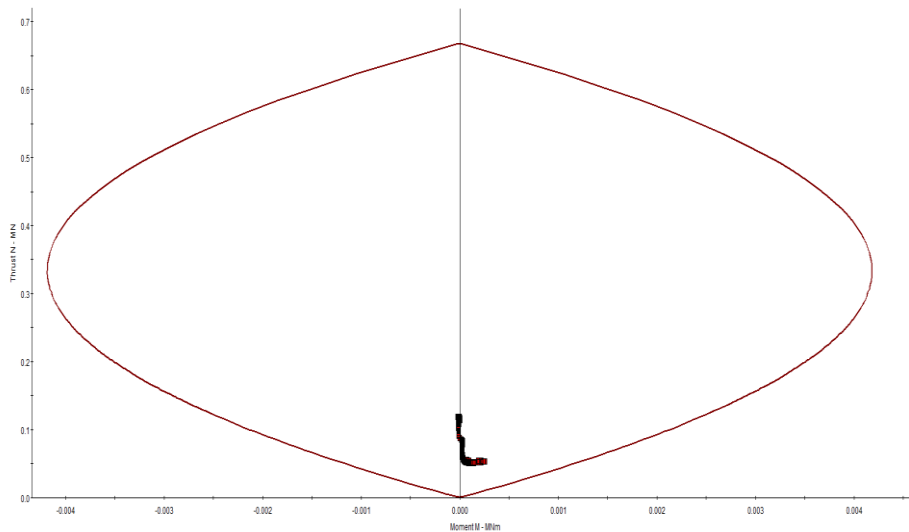
Εικόνα 4.49: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 1

Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη υπολογίστηκαν ίσες με 3 mm στη στέψη και 1 mm στις παρειές.

4.5.3.2 ΤΕΙΙ – ΧΘ 0+475 – Ανάλυση 2

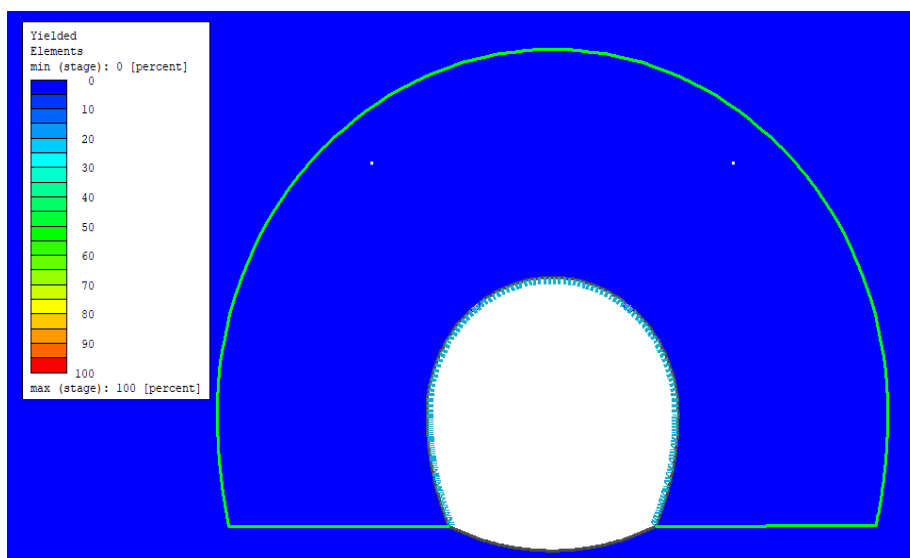
Αρχικά έγινε προσομοίωση της προσωρινής υποστήριξης για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 5 cm (ελάχιστο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά ΟΜΟΕ) και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα

αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.50 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.50: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 2

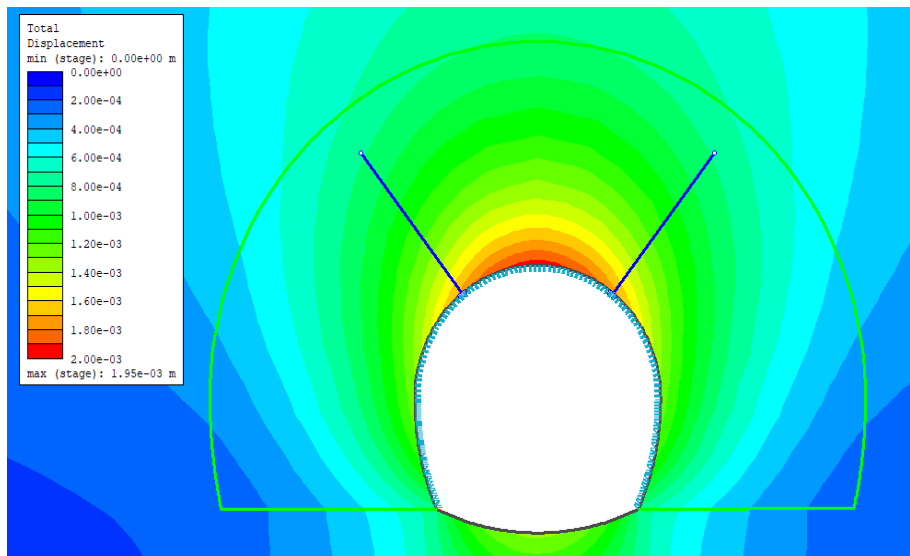
Επίσης, δεν παρατηρείται καμία αστοχία των αγκυρώσεων διαστελλόμενου τύπου (swellex) της οροφής, μήκους 2 m, καθώς επίσης αυτά πακτώνονται σε υγιή περιοχή για μήκος μεγαλύτερη από 1 m, όπως είναι σαφές από την εικόνα 4.51. Επιπρόσθετα, με την ολοκλήρωση της εκσκαφής δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη πέριξ αυτής.



Εικόνα 4.51: Περιοχή πάκτωσης περιμετρικών αγκυρώσεων – Ανάλυση 2

Με βάσει την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.52. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 2 mm στη στέψη και 1 mm στις παρειές.

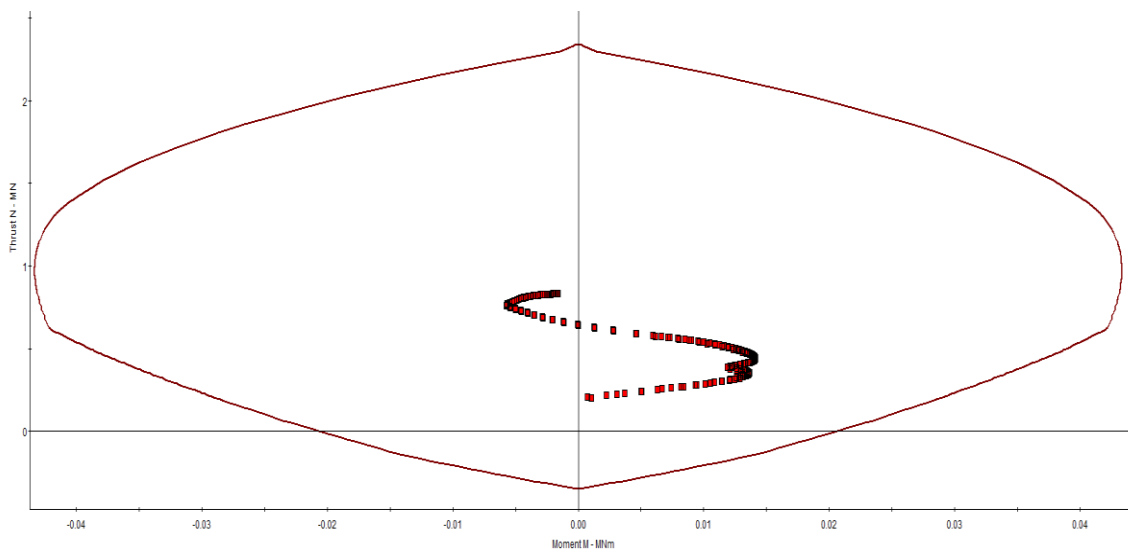
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.52: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 2

4.5.3.3 ΤΕΙΙΙ – ΧΘ 0+495 – Ανάλυση 3

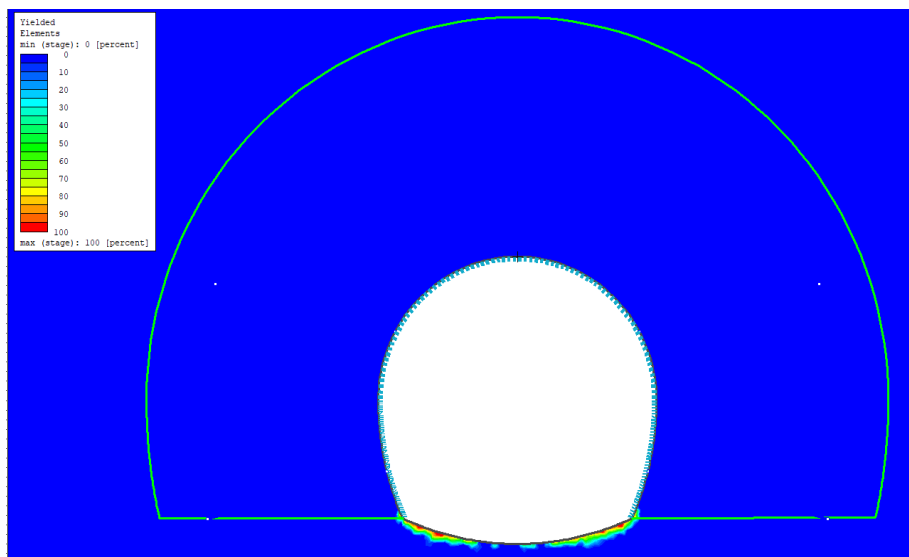
Αρχικά έγινε προσομοίωση της προσωρινής υποστήριξης για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 15 cm και την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων τύπου Lattice Girder. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.53 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.53: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 3

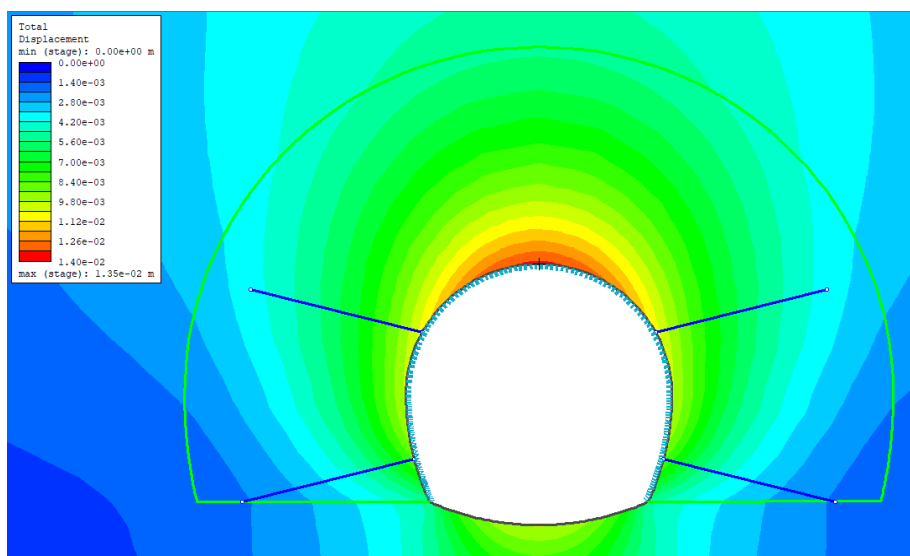
Επίσης, δεν παρατηρήθηκε καμία αστοχία των αγκυρώσεων ολόσωμης πάκτωσης, μήκους 2 m, καθώς επίσης αυτά πακτώνονται σε υγιή περιοχή για μήκος μεγαλύτερη από 1 m, όπως είναι σαφές από την εικόνα 4.54.

Επιπρόσθετα, με την ολοκλήρωση της εκσκαφής αναπτύσσεται πλαστική ζώνη στην περιοχή του πυθμένα, πάχους περί τα 0.10 m.



Εικόνα 4.54: Περιοχή πάκτωσης περιμετρικών αγκυρώσεων – Ανάλυση 3

Με βάση την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.52. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 1.4 mm στη στέψη και 0.7 mm στις παρειές.



Εικόνα 4.55: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 3

Συνοψίζοντας, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης ανά σημείο ενδιαφέροντος συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.21.

Πίνακας 4.21: Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης

	Ανάλυση 1 & 2 - TEII	Ανάλυση 3 - TEIII
Φάσεις διάνοιξης	1	1
Βήμα Προχώρησης	3	1.5
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	5	15
Αγκυρώσεις	Swellex, 320 kN, L=2 m, 1.0 x 3.0 m	Ολόσωμης πάκτωσης, 160 kN, L=2 m, 1.0 x 1.5 m
Πλαίσια	-	Lattice Girder, 3 bar, #50, 18.26 mm / Βήμα προχώρησης

4.5.4 Χρόνος και προϋπολογισμός

Αντικείμενο ενδιαφέροντος στο παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί ο προσδιορισμός του απαιτούμενου κόστους και του απαιτούμενου χρόνου για τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο drill and blast. Βάσει τις τεχνικογεωλογικής τομής καθορίστηκαν τα τμήματα που εφαρμόζονται οι εκάστοτε διατομές άμεσης υποστήριξης, και αναλυτικά τα μήκη και τα ποσοστά εφαρμογής συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.22. Θεωρώντας μέσο βήμα προχώρησης προσεγγιστικά ίσο με 4 m την ημέρα (2 βάρδιες ανά ημέρα), η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης της διάνοιξης προσδιορίστηκε στις 191 μέρες. Βάσει των περιγραφικών τιμολογίων του δημοσίου σύμφωνα με το Ν. 4412/2016 (Φ.Ε.Κ. 147 Α / 8-8-2016), το συνολικό κόστος για τη διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνοντας υπόψιν τις φορτοεκφορτώσεις και μεταφορές των βραχωδών υλικών, τις εκσκαφές, τα μέτρα υποστήριξης και το εργατικό προσωπικό προσδιορίστηκε ίσο με 6.4 εκ. ευρώ. Αναλυτικά οι υπολογισθείσες ποσότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.23. Επισημαίνεται ότι στους υπολογισμούς ελήφθησαν υπόψιν οι τιμές για έργα συνολικού προϋπολογισμού υψηλότερου των 5 εκ. €.

Πίνακας 4.22: Μήκος εφαρμογής διατομών άμεσης υποστήριξης – Σενάριο Ι

Διατομή	Από	Εώς	Μήκος εφαρμογής (m)	Ποσοστό εφαρμογής
A	97.31	447.48	350.17	87.5 %
	457.48	490.83	33.35	
	500.83	710.17	209.34	
	720.17	793.77	73.6	
B	47.31	97.31	50	12.5 %
	793.77	808.77	15	
	447.48	457.48	10	
	490.83	500.83	10	

Πίνακας 4.23: Επιμέρους υπολογισμοί ποσοτήτων για κοστολόγηση – Σενάριο Ι

Κωδικός	Σύντομη περιγραφή	Κωδικός αναθ/σης	Μον. μέτρησης	Έργα >5.0 εκ €	Ποσότητα μελέτης	€
1.01	Χρήση πινακίδων εργοταξιακής σήμανσης.	ΟΙΚ 6541	μήνας	7.6	7.0	76
2.02	Φορτοεκφόρτωση βραχωδών υλικών ή καθαυρεθέντος οπλισμένου ή άοπλου σκυροδέματος με την μεταφορά σε οποιαδήποτε απόσταση	ΥΔΡ 6072	m ³	0.38	5382.4	2045
ΥΣΦ 3.03	Εκσκαφές υπαίθριες στομιών σηράγγων σε έδαφος πάσης φύσεως	ΥΔΡ-6063	m3	2.2	459.5	1 011
ΥΣΦ 3.04	Εκσκαφή (διάνοιξη) σηράγγων ωφέλιμης διατομής έως και 12,0 m2 σε γεωλογικούς σχηματισμούς πάσης φύσεως με συμβατικά μέσα	ΥΔΡ-7020	m3	47.5	4923.0	233 842
ΥΣΦ 4.05	Αγκύρια βράχου διαστελλόμενου χαλυβδοσωλήνα συνεχούς πάκτωσης τύπου SWELLEX (SWX) εφελκυστικής αντοχής 200 kN	ΥΔΡ-7025	μμ	20.9	890.0	18 601
ΥΣΦ 4.11.01	Απλές ράβδοι αγκύρωσης από χάλυβα οπλισμών B500C διαμέτρου Φ25 mm	ΥΔΡ-7025	μμ	17.1	508.0	8 687
ΥΣΦ 4.14	Δοκοί προπορείας ελαφρού τύπου (spilling)	ΥΔΡ-7106	kg	2.4	1479690.1	3 551 256
ΥΣΦ 4.18	Προμήθεια και εγκατάσταση μεταλλικών δικτυωτών υποστηλωμάτων (lattice girders)	ΥΔΡ-7027	kg	1.52	777070.0	1 181 146
ΥΣΦ 4.20.02	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε υπόγεια έργα	ΥΔΡ-7016.9	m3	133	47.6	6 330
	Εργαζόμενοι					1 375 200
Σύνολο						6 378 171

Σημειώνεται ειδικά για το κόστος του εργατικού προσωπικού ότι ελήφθη υπόψιν η παραδοχή οκτάωρης βάρδιας και μέσο ωρομίσθιο ίσο με 30 €.

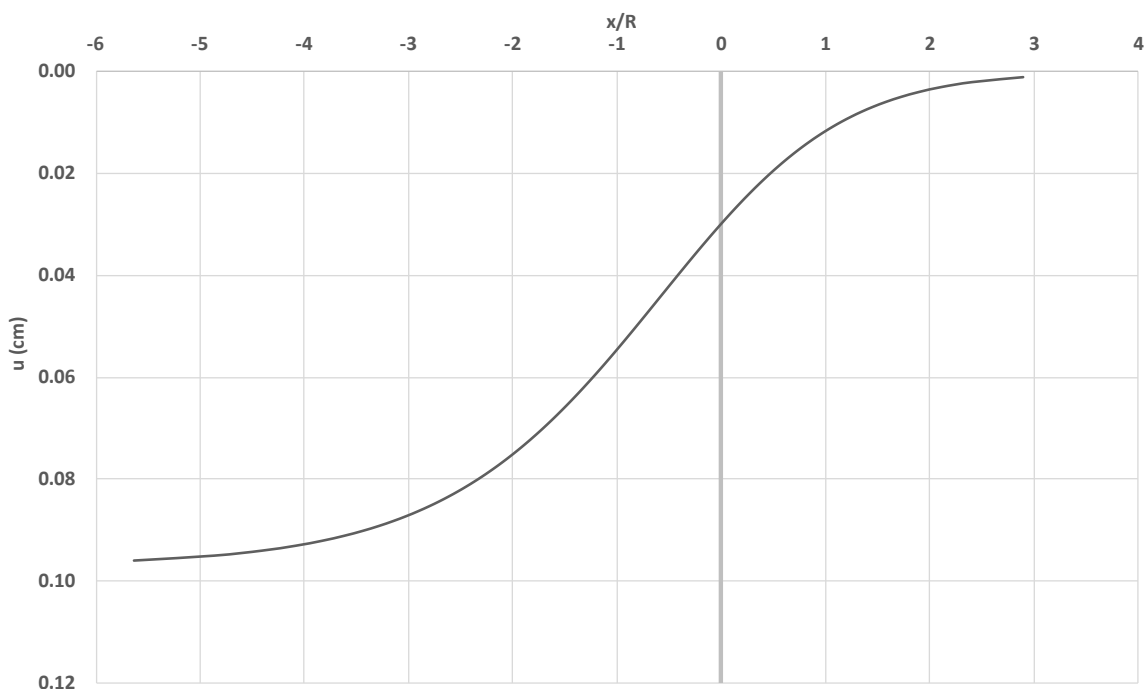
4.6 Σενάριο II – Διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο micro-tunneling και χωμάτινο φράγμα

Σε αυτό το σενάριο εξετάστηκε η διάνοιξη τη σήραγγας με τη μέθοδο micro-TBM. Προκειμένου να υπάρξει υδραυλική συνέπεια μεταξύ των σεναρίων I και II και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, υπολογίστηκε η ισοδύναμη υδραυλική ακτίνα της σήραγγας θεωρώντας εν προκειμένω κυκλική διατομή, διαμέτρου ίση με 3.1 m.

4.6.1 Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Διάνοιξη με τη μέθοδο micro-TBM

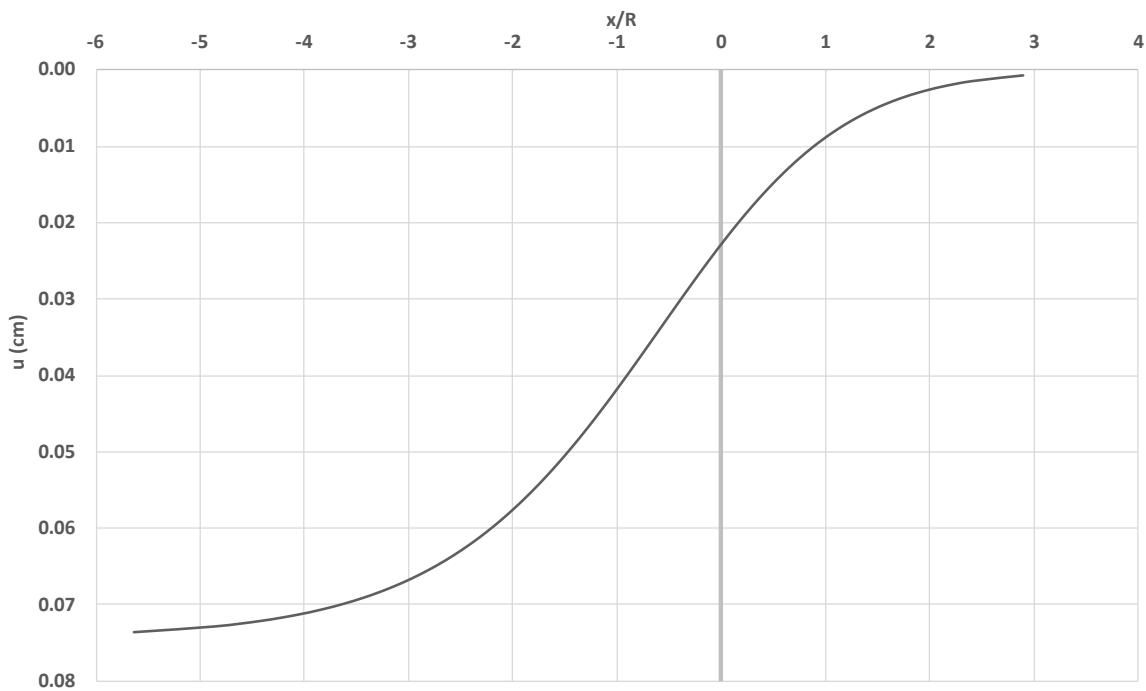
Για τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο micro-TBM, εξετάστηκε η διατομή Γ, που εφαρμόζεται τόσο στις καλής ποιότητας βραχώμαζες όσο και στις δυσμενέστερες περιοχές των στομιών, του ρήγματος και των διεπαφών γνεύσιου και γρανιτογνεύσιου.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γνεύσιο (Χ.Θ. 0+350), η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γρανιτο-γνεύσιο (Χ.Θ. 0+475) και η περιοχή του ρήγματος σε περιβάλλον γρανιτο-γνεύσιου (Χ.Θ. 0+495). Για τις περιοχές αυτές, διαμορφώθηκαν οι καμπύλες διαμήκους προφίλ μετακινήσεων (εικόνα 4.56, 4.57 και 4.58) και διαμήκους ανάπτυξης του βαθμού αποτόνωσης (εικόνες 4.59, 4.60 και 4.61), βάσει της μεθόδου Chern et al 1998.

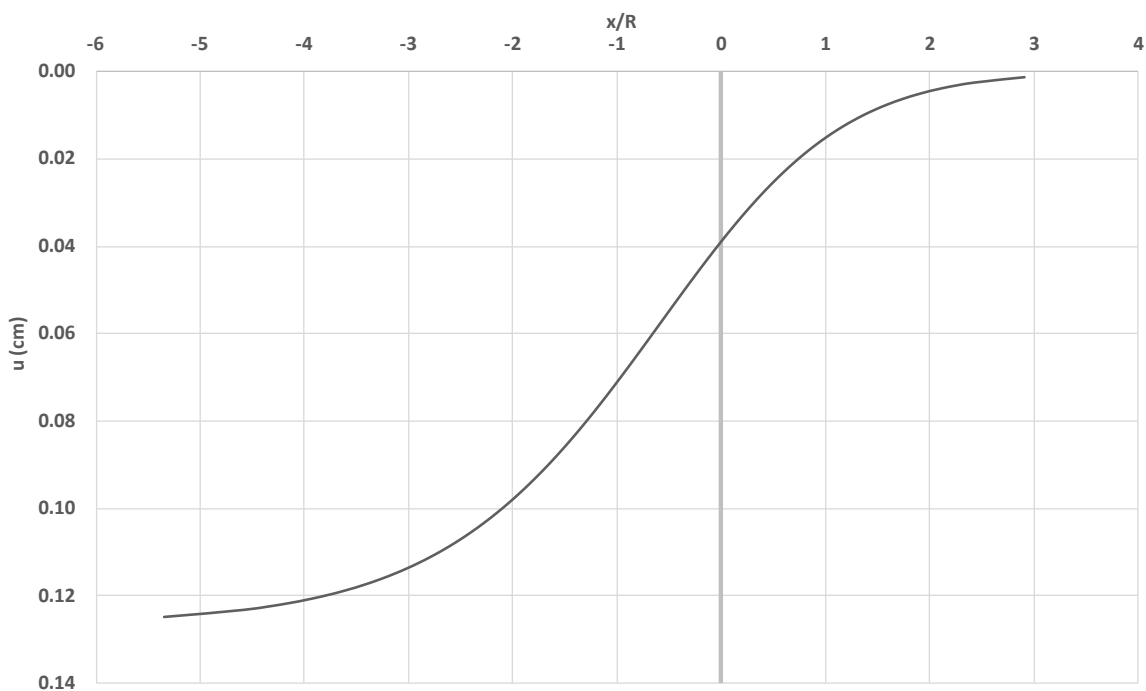


Εικόνα 4.56: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη TEII (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 4

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

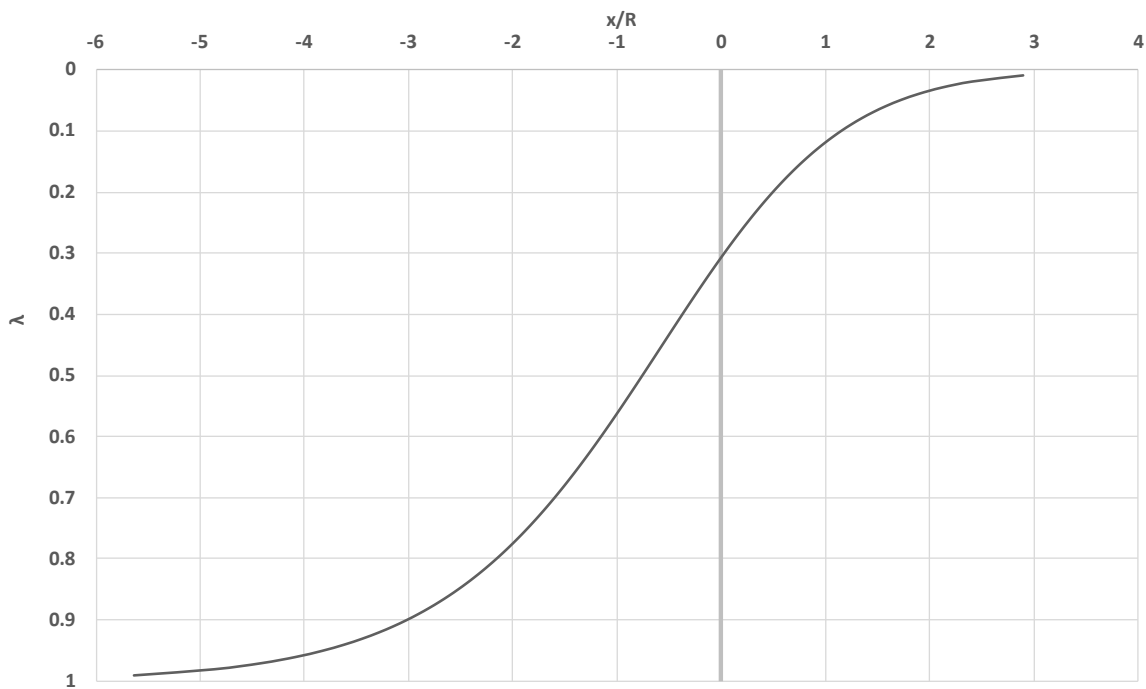


Εικόνα 4.57: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη TEII (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 5

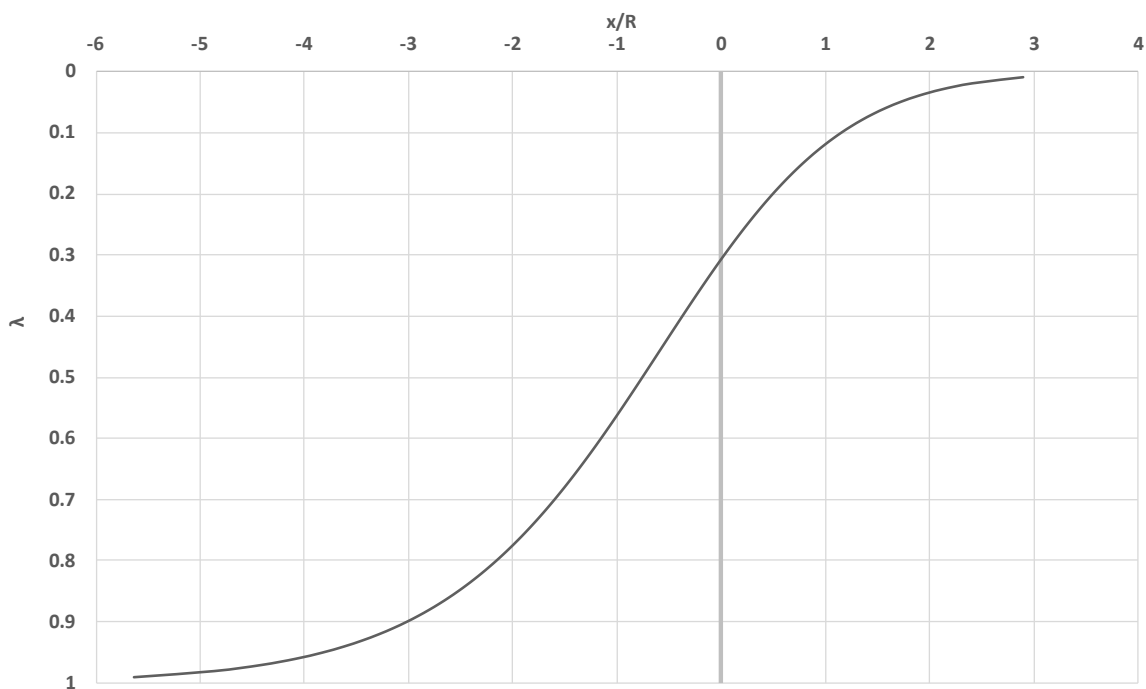


Εικόνα 4.58: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 6

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σιράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

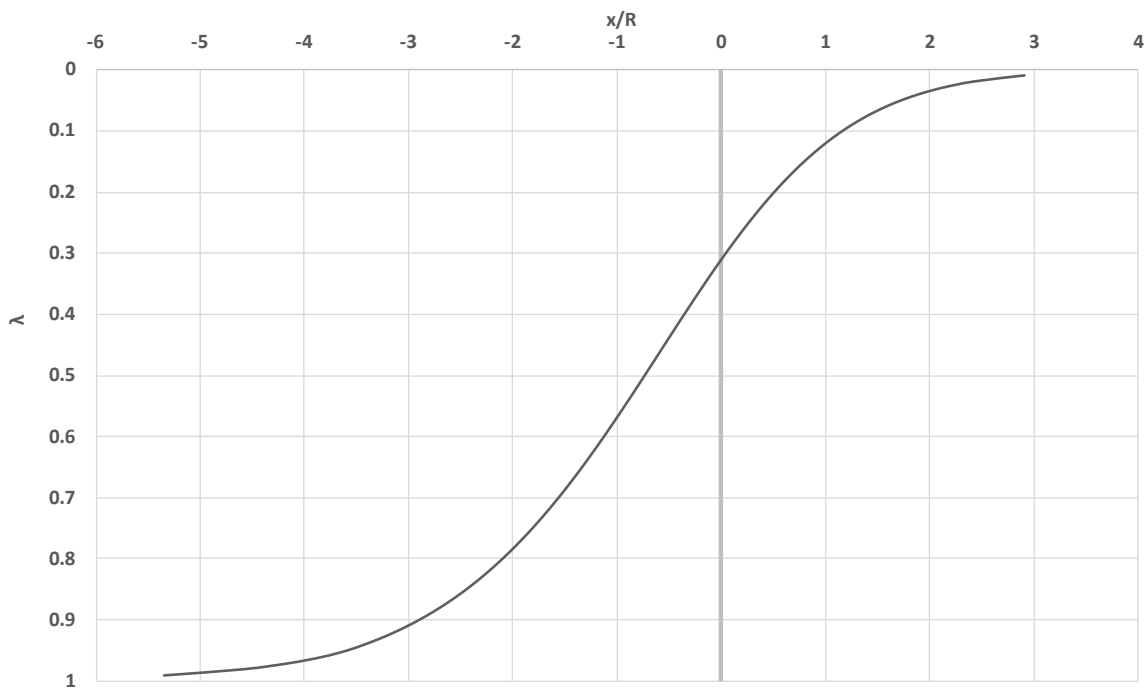


Εικόνα 4.59: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 4



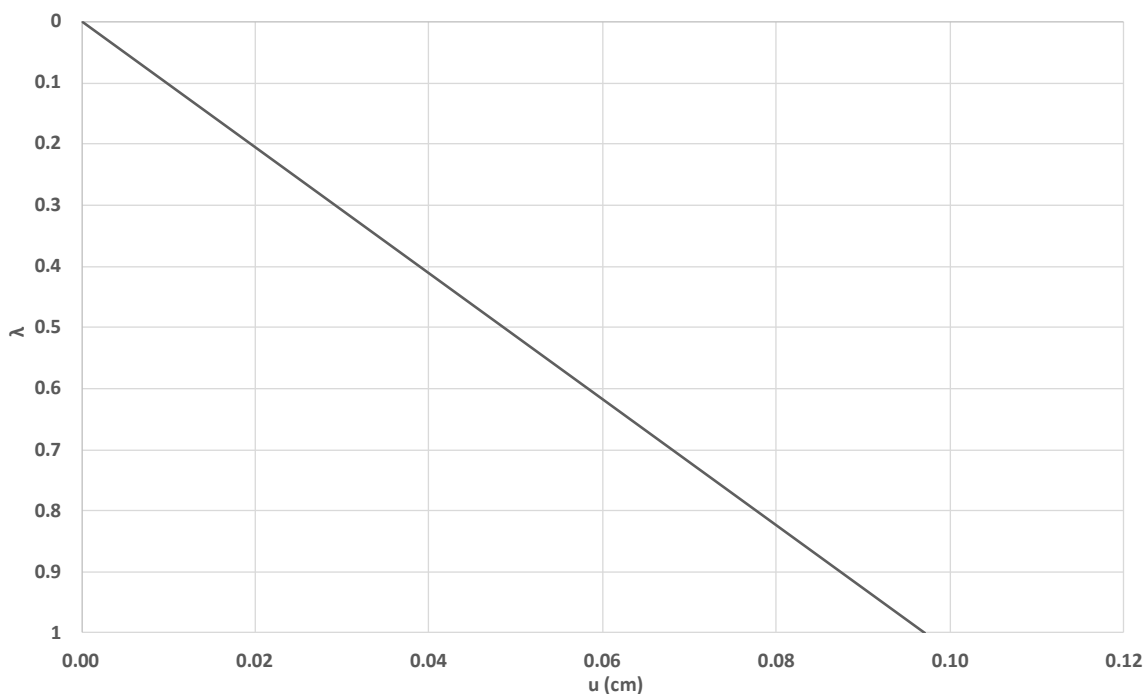
Εικόνα 4.60: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 5

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



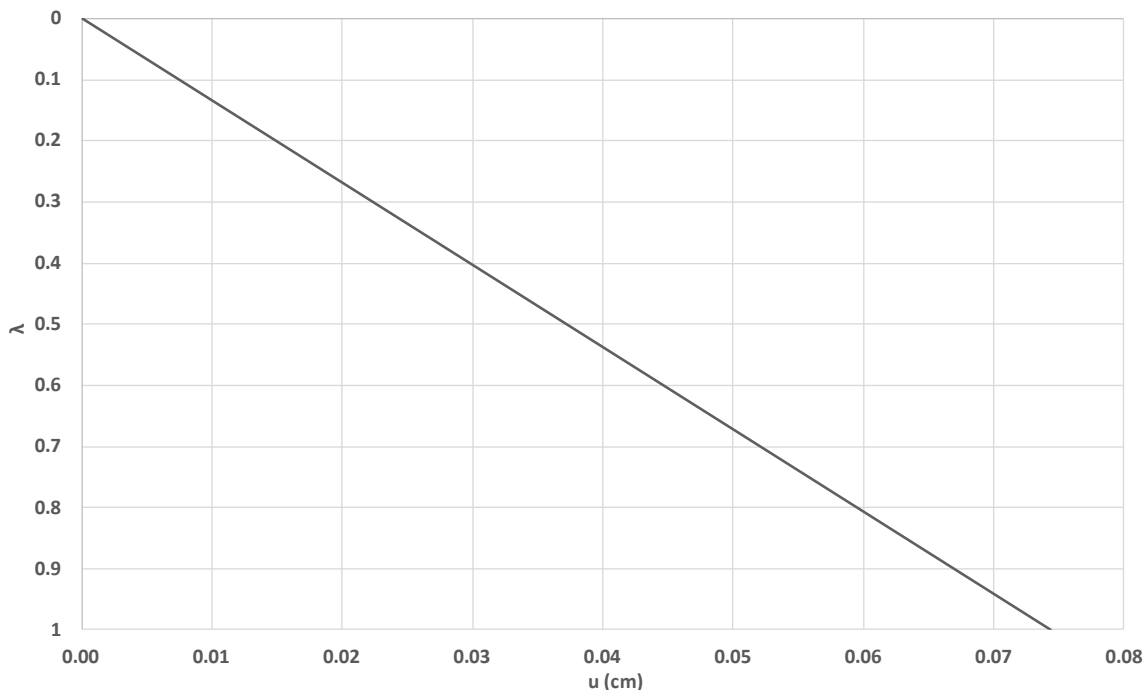
Εικόνα 4.61: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 6

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για ανυποστήρικτη εκσκαφή και για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος.

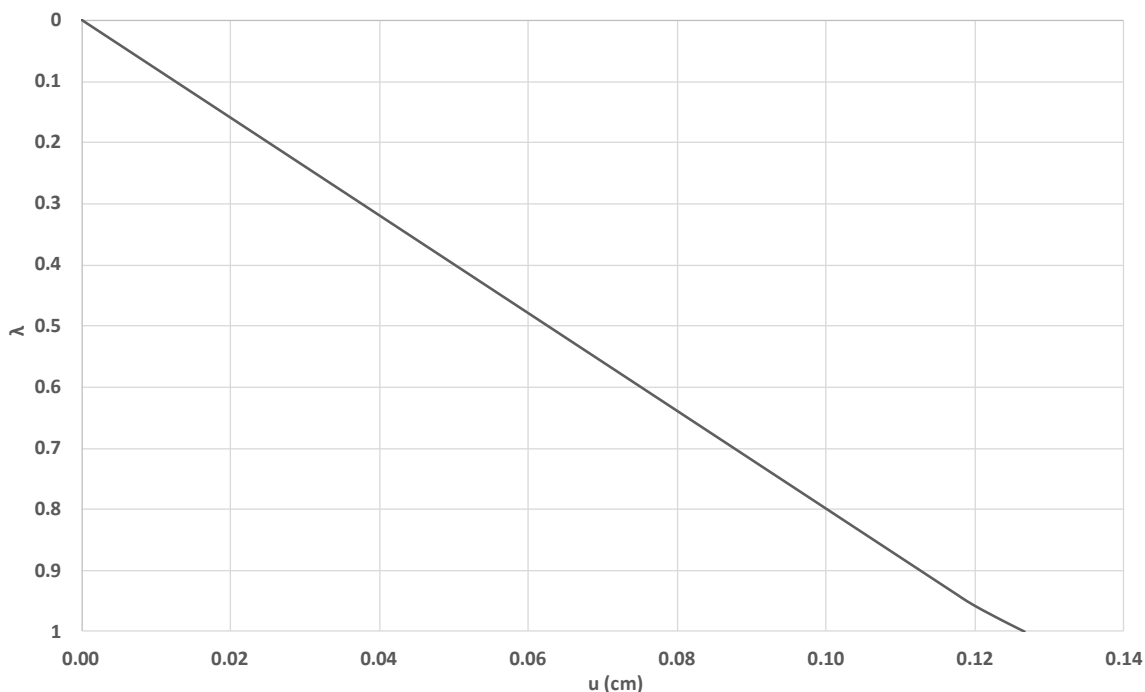


Εικόνα 4.62: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για τη TEII (Χ.Θ. 0+350) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 4

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.63: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+475) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 5



Εικόνα 4.64: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+495) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 6

Σύμφωνα με τα διαγράμματα $\lambda - x/R$, προέκυψε ο βαθμός αποτόνωσης λ και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E σε διάφορες θέσεις από το μέτωπο, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.24. Πιο

συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η σήραγγα ανοίγεται ολομέτωπα σε μία φάση, απαιτήθηκε ο προσδιορισμός του βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση ίση με το βήμα προχώρησης ήτοι 1.5 m.

Πίνακας 4.24: Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος

Σημείο ενδιαφέροντος	Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (m)	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	E (MPa)	Περιγραφή
TEII – 0+350 Ανάλυση 4	0.00	0.30	1570.57	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.55	774.77	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEII – 0+475 Ανάλυση 5	0.00	0.30	1570.57	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.55	774.77	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEIII – 0+495 Ανάλυση 6	0.00	0.31	169.40	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.55	82.62	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής

Οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές παρουσιάζονται ανά ανάλυση και στάδιο στις εικόνες 0.37 έως 0.44.

Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων RS2, ορίζονται ίσα με έξι διαμέτρους περιμετρικά της εκσκαφής. Στον πίνακα 4.25, παρατίθενται οι συντεταγμένες των προσομοιωμάτων (οι οποίες προφανώς είναι κοινές και στα τρία σημεία ενδιαφέροντος).

Πίνακας 4.25: Συντεταγμένες προσομοιώματος (κοινές για τις αναλύσεις 4,5,6)

Σημείο	Άξονας Χ	Άξονας Υ
1	18.6	18.6
2	18.6	-18.6
3	-18.6	-18.6
4	-18.6	18.6

Στις αναλύσεις 4, 5 και 6, η τρίτη διάσταση ελήφθην υπόψιν μέσω του βαθμού αποτόνωσης (λ) εφαρμόζοντας τη μέθοδο της χαλάρωσης με το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E) του εδάφους, σύμφωνα με τη σχέση 4.70, όπου E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας και E το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για τον επιθυμητό βαθμό αποτόνωσης λ .

Τα στάδια της προσομοίωσης που ακολουθήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.26 και είναι κοινά για τις αναλύσεις 4, 5 και 6.

Πίνακας 4.26: Στάδια αναλύσεων 4, 5 και 6

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Αποτόνωση εκσκαφής με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης από το μέτωπο ($x=-1.50$ m)
3	Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της εκσκαφής. Εφαρμογή και ενεργοποίηση της προσωρινής υποστήριξης.

Κατά τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις υιοθετήθηκαν ορισμένες βασικές παραδοχές. Συγκεκριμένα, υπενθυμίζεται όπως και στις αναλύσεις του σεναρίου I, πως η βραχόμαζα προσομοιώθηκε ελαστοπλαστικά, θεωρώντας ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωυλικού, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.17.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με το σενάριο I, όπου η διάνοιξη πραγματοποιείται με τη μέθοδο εκσκαφής – ανατίναξης (drill and blast) γεγονός που προσδίδει στη βραχόμαζα διαταραχή ($D=0.5$), εν προκειμένω στο σενάριο II, η διάνοιξη γίνεται με micro-TBM γεγονός που αφήνει τη βραχόμαζα αδιατάρακτη ($D=0$).

Η υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος επιτυγχάνεται με τη διατομή άμεσης υποστήριξης τύπου Γ, η οποία αποτελείται από ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete), οι ιδιότητες του οποίου συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.27.

Πίνακας 4.27: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Γ
Πάχος (t) (m)	0.30
Μέτρο ελαστικότητας ($E_{\text{shotcrete}}$) (MPa)	30000
Λόγος Poisson (ν)	0.20
Θλιπτική αντοχή (f_{ck}) (MPa)	25
Εφελκυστική αντοχή (f_{ctm})	3.75
Ειδικό βάρος (γ_{shot}) (MN/m ³)	0.025
Συμπεριφορά	Ελαστική

Θεμελιώδες στοιχείο του καθορισμού της άμεσης υποστήριξης είναι η επιλογή του μηχανήματος micro-TBM που επιλέγεται για τη διάνοιξη της σήραγγας ενδιαφέροντος. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας του εκάστοτε micro-TBM όπως παρουσιάζεται στη μηχανοτομή της εικόνας 4.66. Από τη διερεύνηση αυτή και βάσει τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μηχανήματος διάνοιξης, θεωρήθηκε ως πλέον κατάλληλο το micro-Rock TBM, καθώς στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας εμφανίζει καλή συμπεριφορά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή του ρήγματος στη Χ.Θ. 0+495, όπου και σημειώνεται πιθανότητα ύπαρξης νερών. Σε εκείνη την περιοχή κρίνεται σκόπιμη η εκτέλεση οριζόντιων γεωτρήσεων (prop drilling) και η προσεκτική εξέταση της ροής του νερού. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται η τοπική εγκατάσταση πιεζομέτρων και στη συνέχεια η άντληση των εν λόγω υδάτων, ή η κατασκευή

δεξαμενών στην περίπτωση μικρών πιέσεων. Οι οριζόντιες αυτές γεωτρήσεις εκτελούνται είτε δίπλα από τη διάνοιξη κατόπιν κατασκευής κατάλληλης βοηθητικής στοάς είτε στον άξονα της διάνοιξης με χρήση του ίδιου του micro-TBM.

Επίσης σημειώνεται η πιθανότητα αναγκαίας διάνοιξης των πρώτων μέτρων της σήραγγας μελέτης με τη συμβατικά μέσα και κατόπιν η είσοδος του μηχανήματος micro-TBM λόγω του σχετικά μικρού ύψους των υπερκείμενων στην περιοχή των στομών.

Ως προς τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (3 nodes triangles elements). Το σύνολο των στοιχείων και των ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.28.

Πίνακας 4.28: Σύνολο στοιχείων και κόμβων προσομοιώματος

Στοιχεία (elements)	11080
Κόμβοι (nodes)	5729

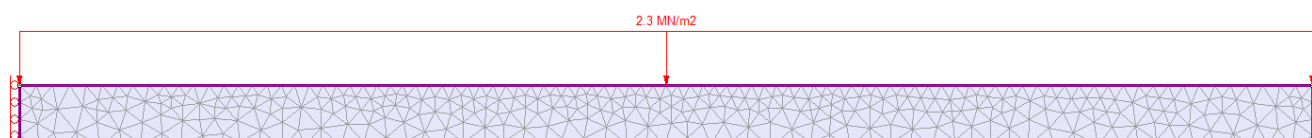
Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν κυλίσσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα X όσο και κατά τον άξονα Y και τοπικές αρθρώσεις (pins) στα σημεία τομής των αξόνων X και Y, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.45, ομοίως με τις αναλύσεις του σεναρίου I.

Υπενθυμίζεται επίσης ότι για την προσομοίωση της βραχόμαζας άνω του ανωτέρου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος, το οποίο όπως προαναφέρθηκε ισούται με έξι φορές τη διάμετρο της σήραγγας, εφαρμόστηκε ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο P , όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά για την προσομοίωση 4 στην εικόνα 4.65. Ο υπολογισμός του φορτίου έγινε βάσει της σχέσης 4.71, όπου ΔH η υψομετρική διαφορά μεταξύ της φυσικής στάθμης του εδάφους και του ανώτερου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος και γ το ειδικό βάρος της βραχόμαζας.

Το ύψος των υπερκείμενων για τις αναλύσεις καθώς και το τελικό φορτίο P , συνοψίζονται στον πίνακα 4.29.

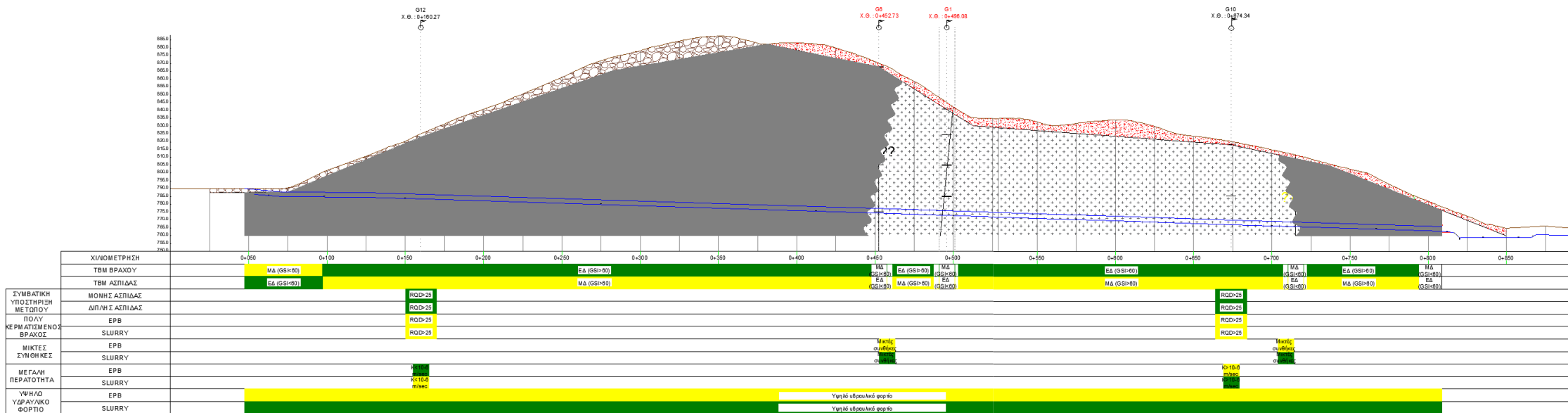
Πίνακας 4.29: Μέγεθος ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου - Σενάριο II

	4	5	6
Ύψος υπερκείμενων (m)	107	82	69
Ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (MN/m ²)	2.298	1.648	1.310



Εικόνα 4.65: Προσομοίωση ανώτερης βραχόμαζας από το αριθμητικό προσομοίωμα με τη χρήση ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου – Ανάλυση 4

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

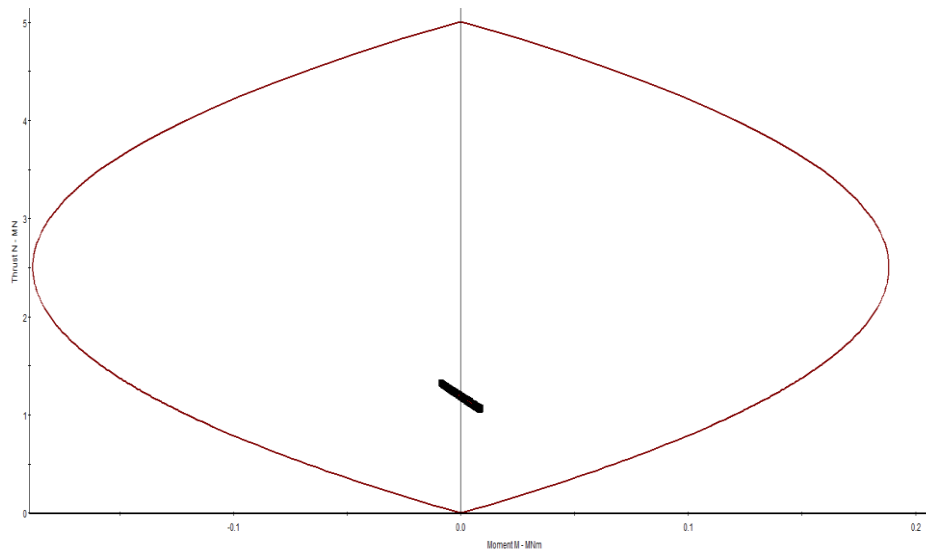


Εικόνα 4.66: Μηκοτομή επιλογής μηχανήματος micro-TBM (Civil 3D, 2020)

4.6.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

4.6.2.1 ΤΕΙΙ – ΧΘ 0+350 – Ανάλυση 4

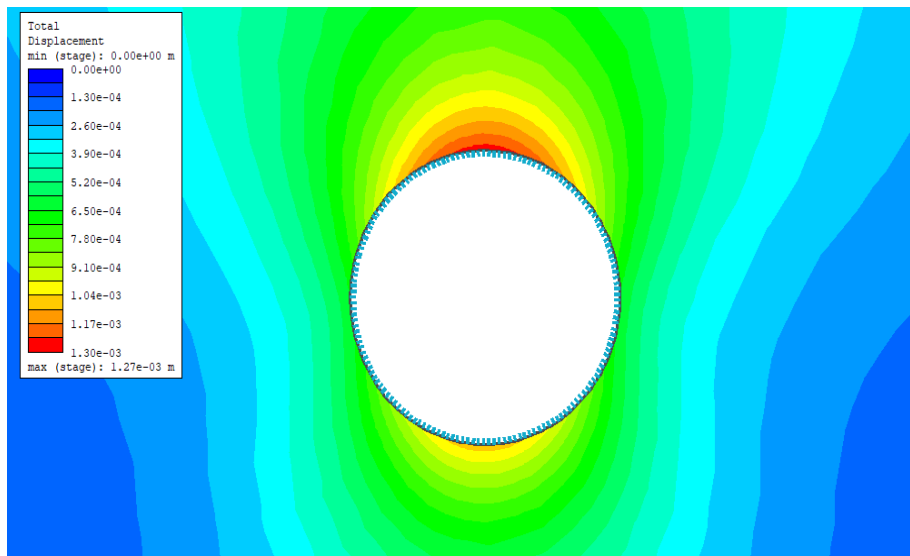
Αρχικά προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.67 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.67: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 4

Με βάσει την εν λόγω προσωρινή υποστήριξη, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.68. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 1.3 mm στη στέψη και 0.6 mm στις παρειές.

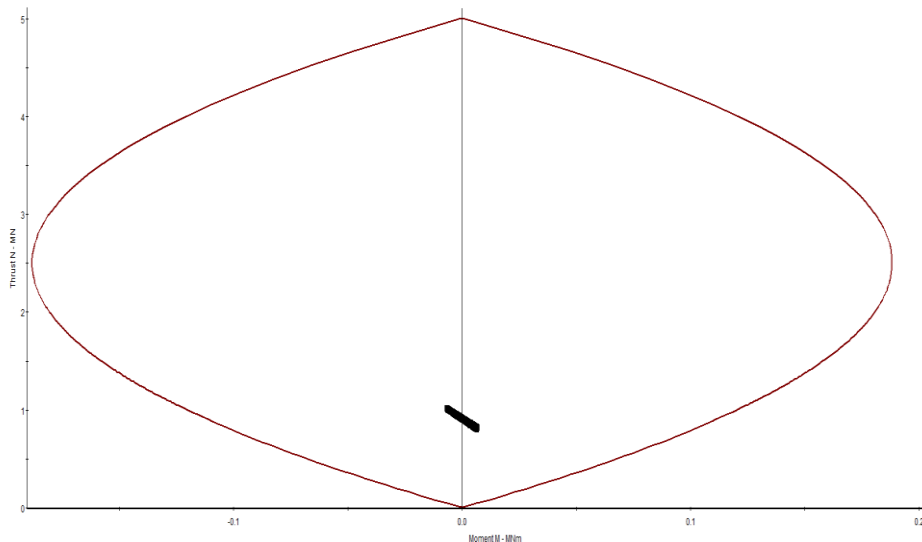
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.68: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 4

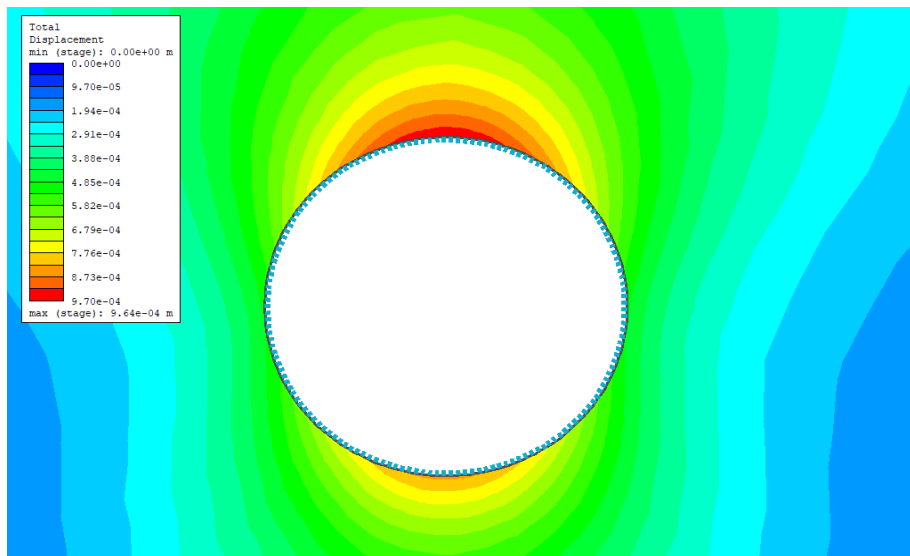
4.6.2.1 ΤΕΙΙ – ΧΘ 0+475 – Ανάλυση 5

Ομοίως και με την περίπτωση της ανάλυσης 4, αρχικά προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.69 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.69: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 5

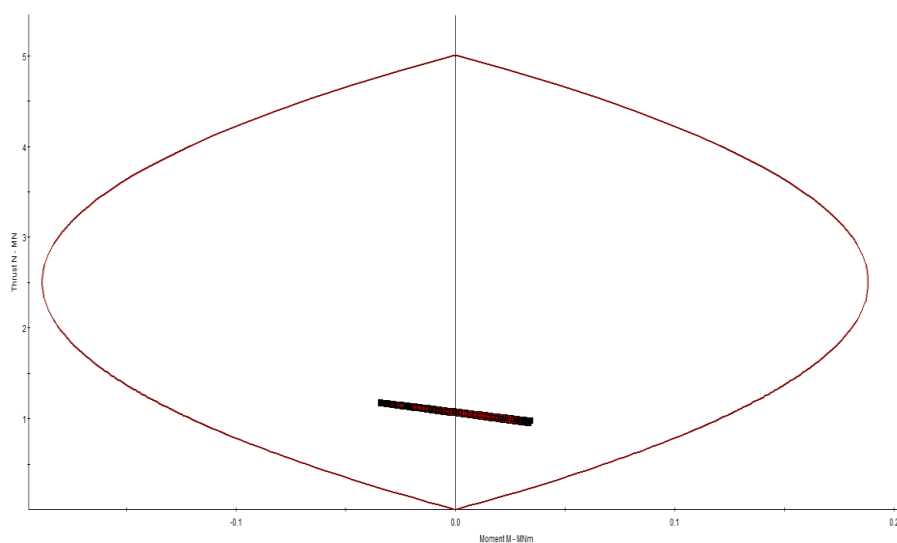
Με βάση την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.70. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας είναι ίσες με 1 mm στη στέψη και 0.5 mm στις παρειές.



Εικόνα 4.70: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 5

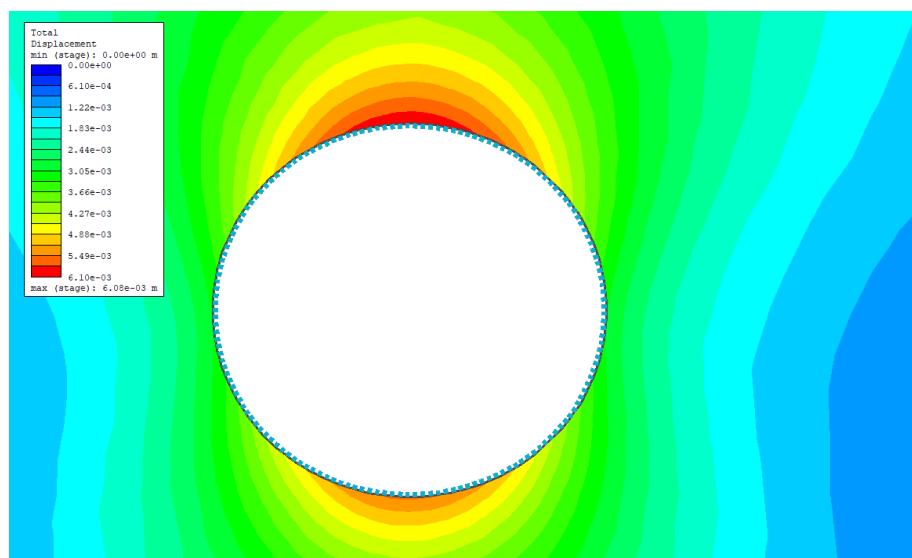
4.6.2.1 ΤΕΙΙΙ – ΧΘ 0+495 – Ανάλυση 6

Ομοίως με τις αναλύσεις 4 και 5, αρχικά προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.71 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.71: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 6

Με βάση την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.72. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 6 mm στη στέψη και 3 mm στις παρειές.



Εικόνα 4.72: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 6

Συνοψίζοντας, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης ανά σημείο ενδιαφέροντος παρουσιάζονται στον πίνακα 4.30.

Πίνακας 4.30: Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης

	Αναλύσεις 4,5,6
Φάσεις διάνοιξης	1
Βήμα Προχώρησης	1.50
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (cm)	30

4.6.3 Χρόνος και προϋπολογισμός

Αντικείμενο ενδιαφέροντος στο παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί ο προσδιορισμός του απαιτούμενου κόστους και του απαιτούμενου χρόνου για τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο microtunneling. Θεωρώντας έναν εύλογο ρυθμό προχώρησης ίσο με 15 m/day και μια προσαύξηση της τάξης του 30% λόγω των απρόβλεπτων η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης της διάνοιξης προσδιορίστηκε στις 51 μέρες. Βάσει των περιγραφικών τιμολογίων του δημοσίου σύμφωνα με το Ν. 4412/2016 (Φ.Ε.Κ. 147 Α / 8-8-2016), το συνολικό κόστος για τη διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνοντας υπόψιν τις εκσκαφές των στομιών, τη διάνοιξη με τη χρήση microTBM, την αγορά, την εγκατάσταση και τη συντήρηση του μηχανήματος, το κόστος του σκυροδέματος για την υποστήριξη και το εργατικό προσωπικό προσδιορίστηκε ίσο με 2.1 εκ. ευρώ. Αναλυτικά οι υπολογισθείσες ποσότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.23. Επισημαίνεται ότι στους υπολογισμούς ελήφθησαν υπόψιν οι τιμές για έργα συνολικού προϋπολογισμού υψηλότερου των 5 εκ. €.

Πίνακας 4.31: Επιμέρους υπολογισμοί ποσοτήτων για κοστολόγηση – Σενάριο II

Κωδικός	Σύντομη περιγραφή	Κωδικός αναθ/σης	Μον. μέτρησης	Έργα >5.0 εκ €	Ποσότητα μελέτης	€
1.01	Χρήση πινακίδων εργοταξιακής σήμανσης.	ΟΙΚ 6541	μήνας	7.6	2.0	15
ΥΣΦ 3.03	Εκσκαφές υπαίθριες στομίων σηράγγων σε έδαφος πάσης φύσεως	ΥΔΡ-6063	m3	2.2	459.5	1 011
3.19.03.06	Κατασκευή μικροσηράγγων με την μέθοδο της ωθούμενης συστοιχίας σωλήνων (Pipe jacking) για σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου Φ 2000 - 2500 mm	ΥΔΡ-6082.1	m	1430	761.5	1 088 888
9.10.06	Παραγωγή, μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση και συντήρηση σκυροδέματος για κατασκευές από σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30	ΥΔΡ 6329	m3	86	228.4	19 646
	Αγορά μηχανήματος rock mtbm					547 320
	Εγκατάσταση και συντήρηση μηχανήματος rock mtbm					109 464
	Εργαζόμενοι					319 200
Σύνολο						2 085 543

Σημειώνεται ειδικά για το κόστος του εργατικού προσωπικού ότι έγινε η παραδοχή οκτάωρης βάρδιας, και θεωρήθηκε μέσο ωρομίσθιο ίσο με 30 €. Επίσης, θεωρήθηκε κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (operating cost) του μηχανήματος rock MTBM προσεγγιστικά ίσο με το 20 % του κόστους αγοράς του (capital cost).

4.7 Σενάριο III - Σχεδιασμός της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο micro-tunneling και κατασκευή φράγματος RCC

Στο εν λόγω σενάριο εξετάστηκε η εναλλακτική περίπτωση κατασκευής φράγματος RCC. Αναφέρεται ότι στην επιλογή τύπου φράγματος λαμβάνονται υπόψιν οι γεωτεχνικές συνθήκες θεμελίωσης, η μορφολογία του εδάφους, τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής, η σεισμικότητα της περιοχής, τα συνοδά έργα, οι διαστάσεις του σώματος του φράγματος, η στεγανότητα, περιβαλλοντικά θέματα, αισθητικοί περιορισμοί, οι χρήσεις γης και η ποιότητα του νερού ανάντη καθώς επίσης και η ταχύτητα κατασκευής (Ευστρατιάδης Α. κ.ά., 2021).

Βάσει τις εμπειρίας στον Ελλαδικό χώρο είναι αποδεκτή η καταλληλότητα της κατασκευής φράγματος βαρύτητας RCC σε βράχο υγιή ή λίγο αποσπασμένο ή ακόμα και σε βράχο με μέτρια αποσάθρωση, όπως παρατηρείται εν προκειμένω, βάσει των στοιχείων της γεωτεχνικής μελέτης της οριστικής μελέτης (Ευστρατιάδης Α. κ.ά., 2021). Όπως προαναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.3.1.2, τα φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC) χαρακτηρίζονται από μεγάλη ταχύτητα κατασκευής καθώς δεν απαιτούν χρήση ξυλότυπων ή σπλισμού. Επίσης μεταξύ των πλεονεκτημάτων τους εντοπίζονται η αδιαπέρατη φύση του σώματος του φράγματος, η ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων ψύξης και δόνησης του συμβατικού σκυροδέματος και η μείωση της χρήσης τσιμέντου χάρη στη δυνατότητα χρήσης παραπροϊόντων της βιομηχανίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένας αντιπροσωπευτικός ρυθμός κατασκευής φραγμάτων RCC ανέρχεται, προσεγγιστικά, στα 30 cm ημερησίως.

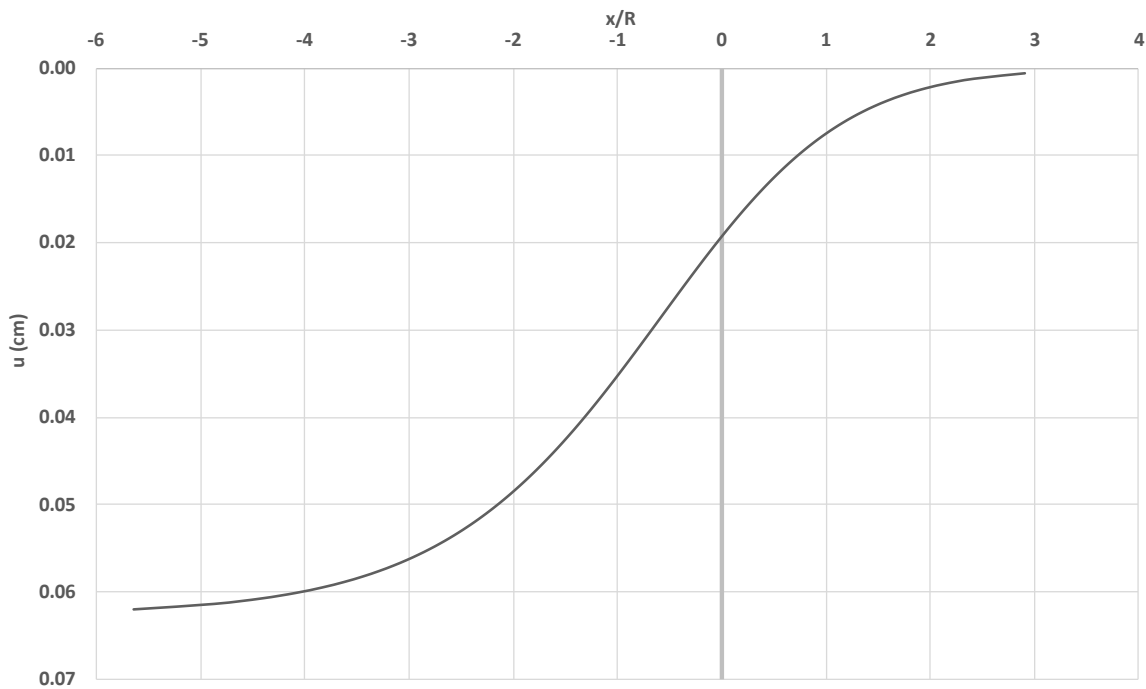
Προκειμένου να επιτευχθεί ρίσκο ίδιου μεγέθους με την περίπτωση κατασκευής χωμάτινου φράγματος, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου 4.4, επιλέχθηκε η εξέταση πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Σχετικά με τα αποτελέσματα των πινάκων 4.4 και 4.5 κρίθηκε εύλογη η εξέταση της κατασκευής σήραγγας διαμέτρου 2 m αντί για 1.5, λόγω του σημαντικά μικρότερου ύψους προφράγματος. Επομένως στο εν λόγω σενάριο (Σενάριο III), εξετάζεται η περίπτωση κατασκευής σήραγγας εκτροπής διαμέτρου 2 m με την ταυτόχρονη κατασκευή φράγματος RCC.

4.7.1 Κατάρτιση του προσομοιώματος της σήραγγας εκτροπής σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων – Διάνοιξη με τη μέθοδο micro-TBM

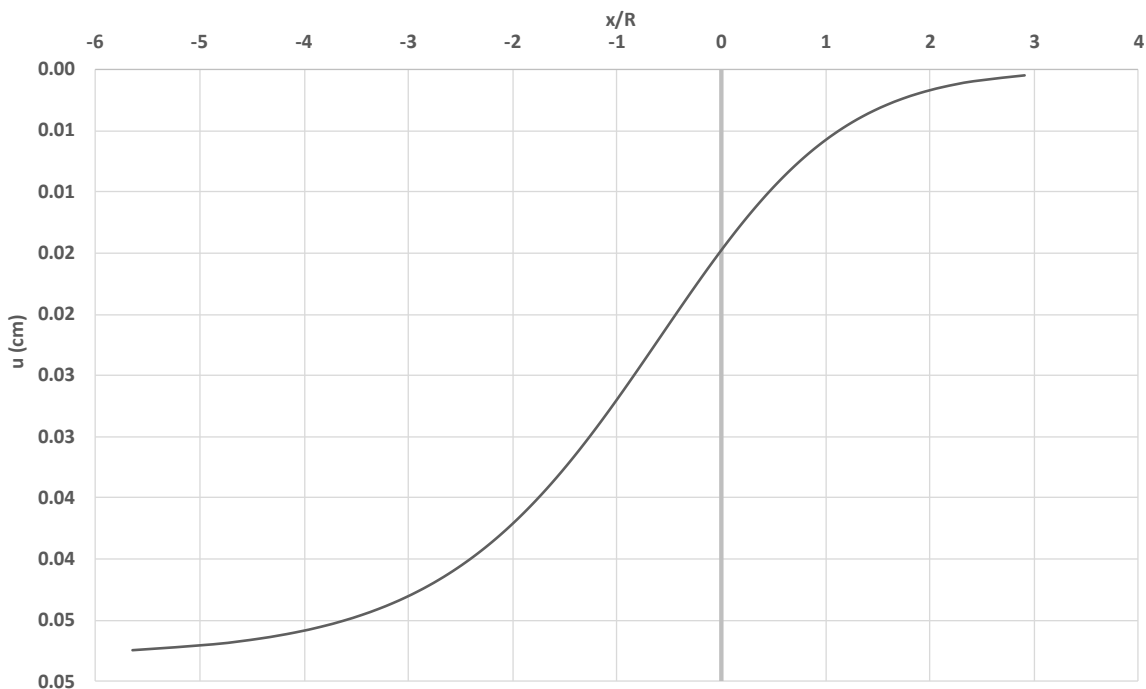
Σε αυτό το σενάριο εξετάστηκε η διάνοιξη τη σήραγγας διαμέτρου 2.0 m με τη μέθοδο micro-TBM. Για την εν λόγω διάνοιξη εξετάστηκε μια διατομή Δ, που εφαρμόζεται τόσο στις καλής ποιότητας βραχώμαζες όσο και στις δυσμενέστερες περιοχές των στομιών, του ρήγματος και των διεπαφών γνεύσιου και γρανιτογνεύσιου.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γνεύσιο (Χ.Θ. 0+350), η περίπτωση των μέγιστων υπερκείμενων σε υγιή γρανιτο-γνεύσιο (Χ.Θ. 0+475) και η περιοχή του ρήγματος σε περιβάλλον γρανιτο-γνεύσιου (Χ.Θ. 0+495). Για τις περιοχές αυτές, διαμορφώθηκαν οι καμπύλες διαμήκους προφίλ μετακινήσεων (εικόνες 4.73, 4.74 και 4.75) και διαμήκους ανάπτυξης του βαθμού αποτόνωσης (4.76, 4.77 και 4.78), βάσει της μεθόδου Chern et al 1998.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

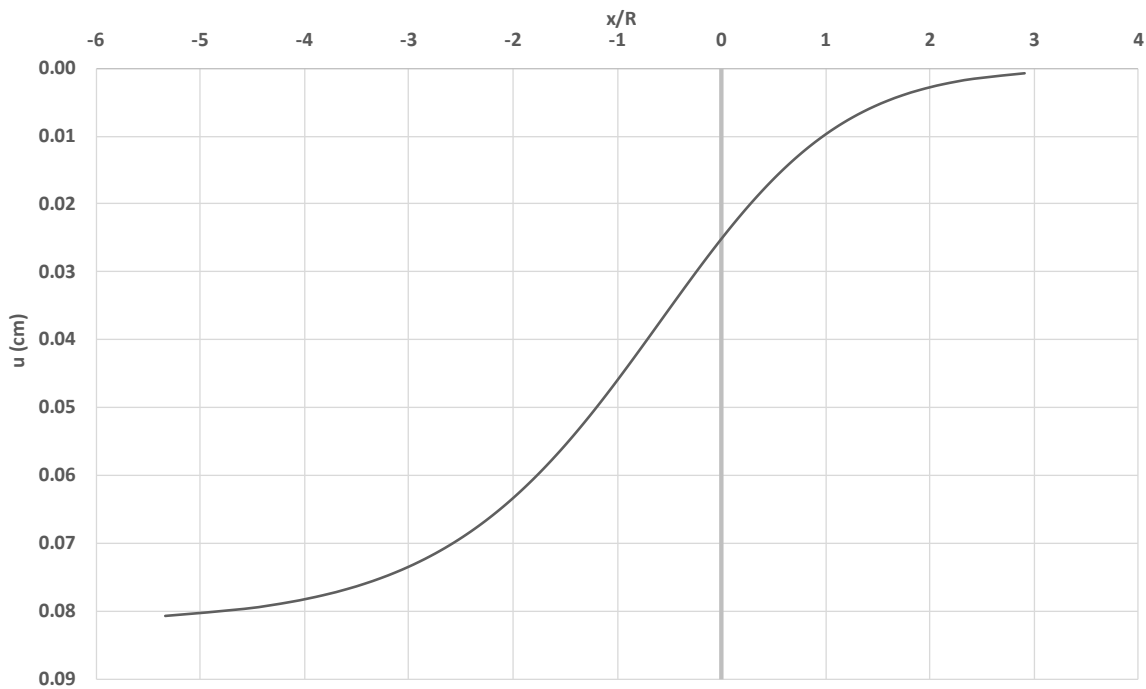


Εικόνα 4.73: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη ΤΕΠ (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 7

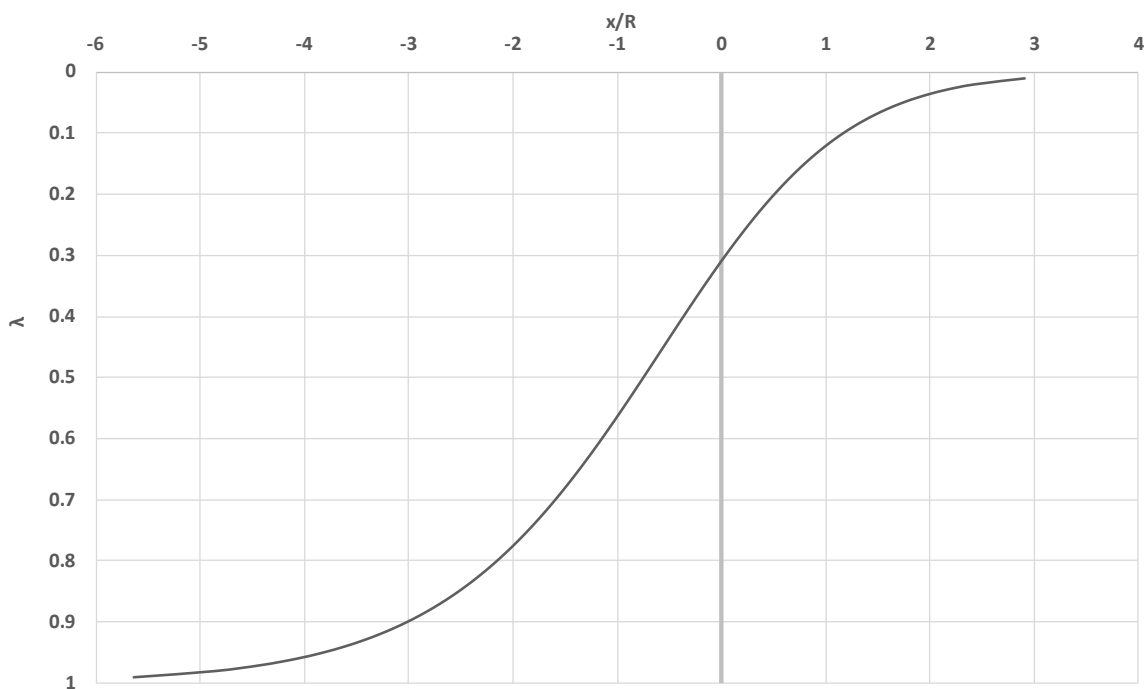


Εικόνα 4.74: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη ΤΕΠ (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 8

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σιράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

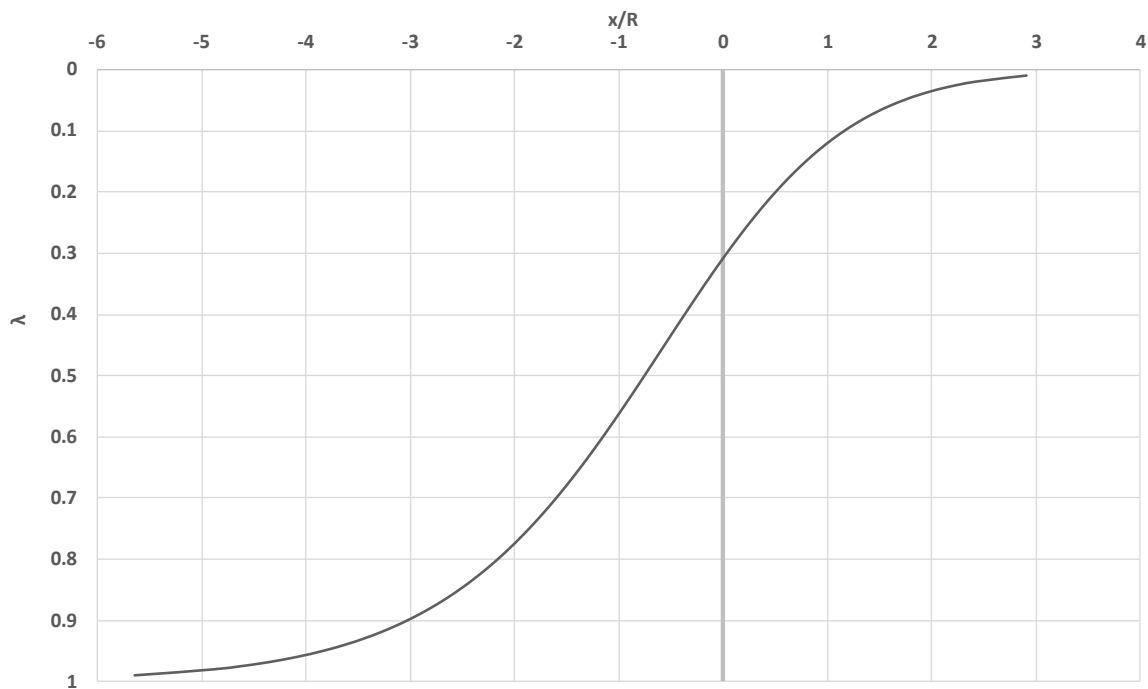


Εικόνα 4.75: Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 9

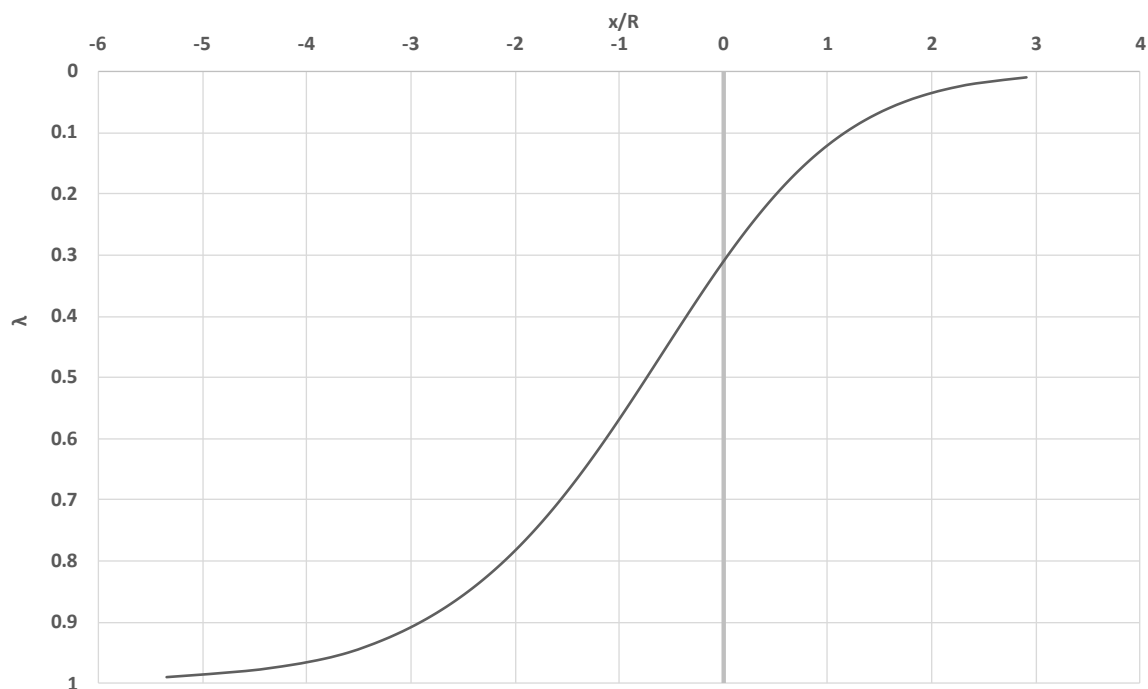


Εικόνα 4.76: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+350), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 7

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



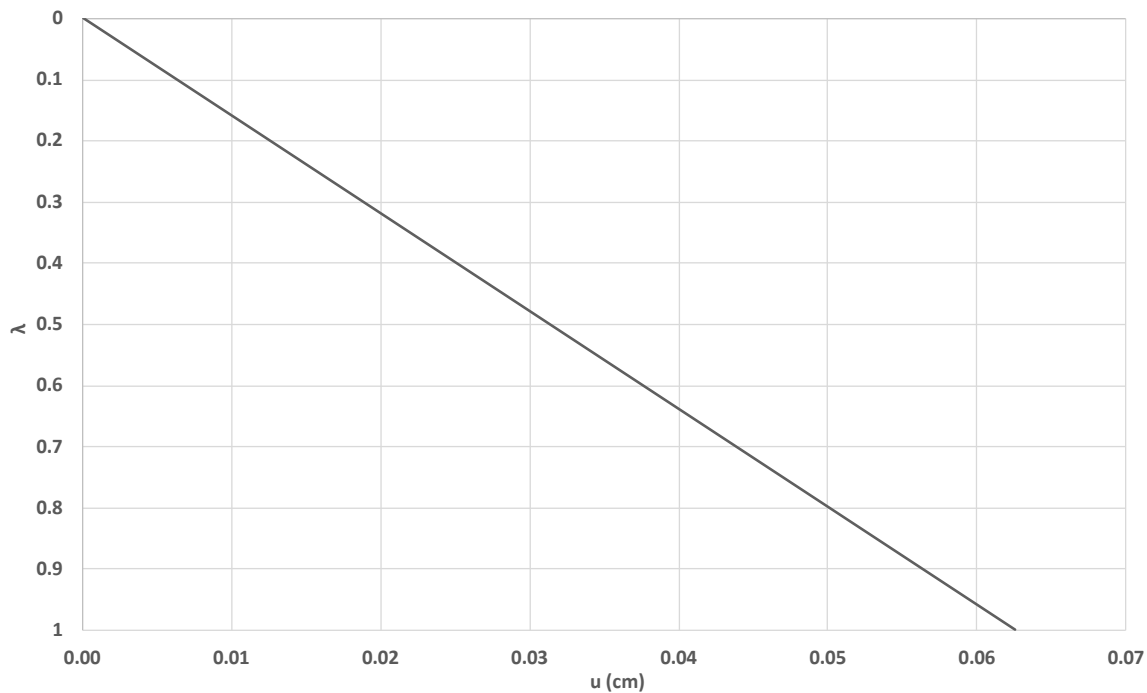
Εικόνα 4.77: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+475), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 8



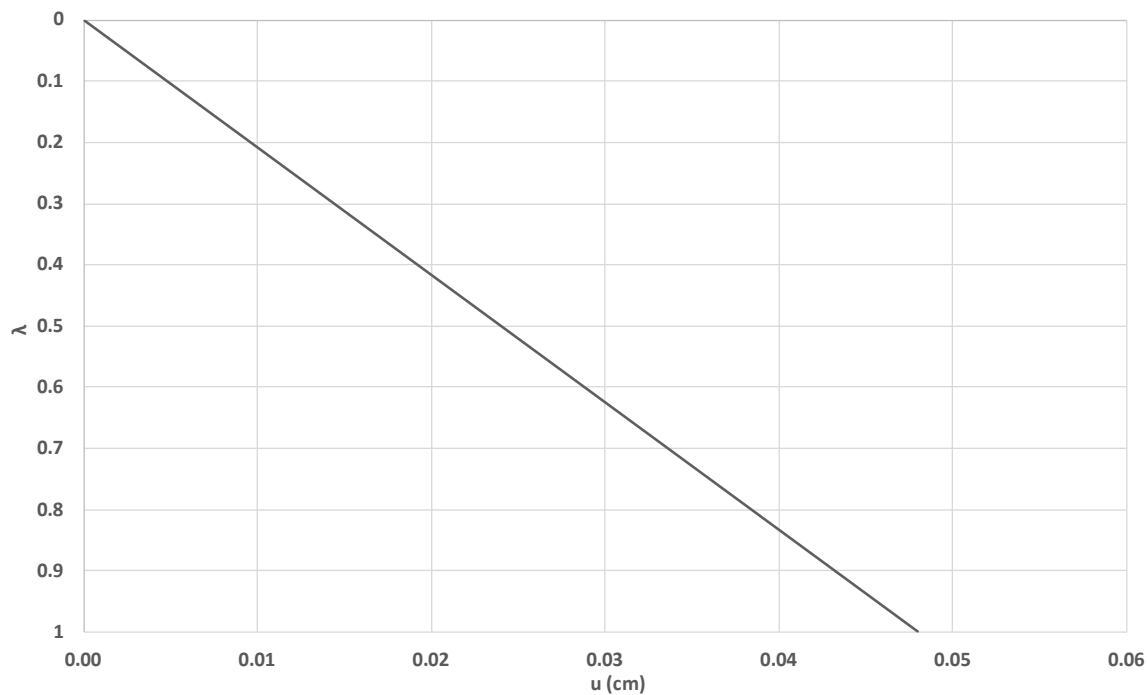
Εικόνα 4.78: Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για τη TEIII (Χ.Θ. 0+495), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998 – Ανάλυση 9

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για ανυποστήρικτη εκσκαφή και για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σιράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς

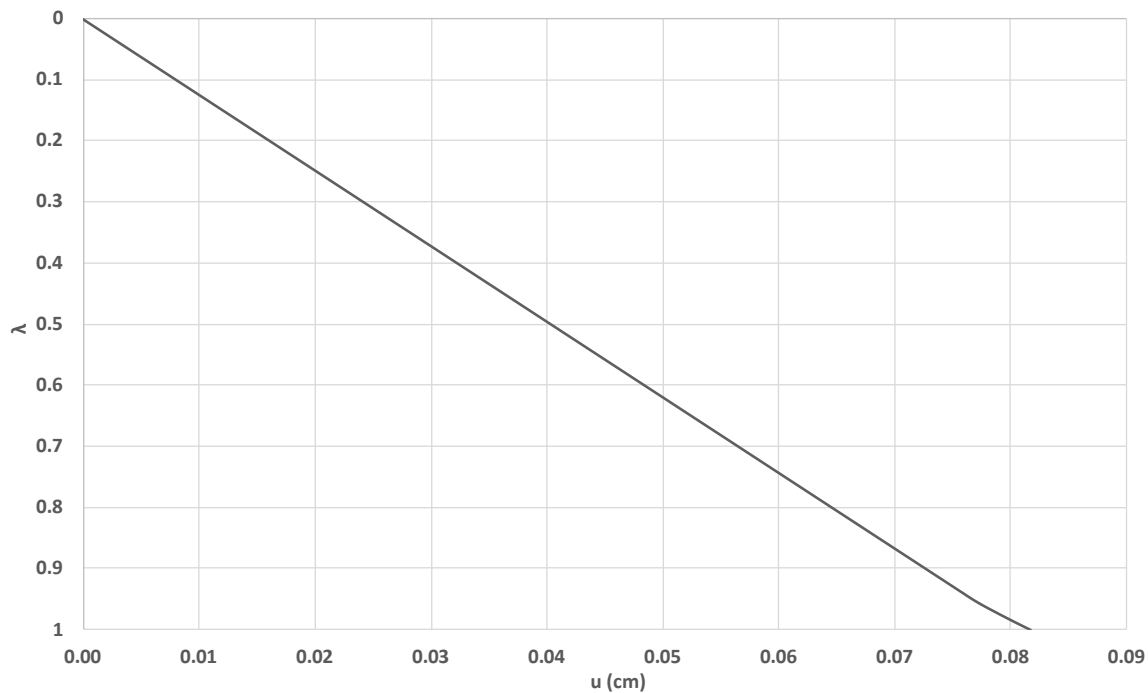


Εικόνα 4.79: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (u - λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+350) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 7



Εικόνα 4.80: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (u - λ) για τη TEII (Χ.Θ. 0+475) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 8

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.81: Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για τη ΤΕΙΙ (Χ.Θ. 0+495) ανυποστήρικτης εκσκαφής – Ανάλυση 9

Σύμφωνα με τα διαγράμματα $\lambda-x/R$, προέκυψε ο βαθμός αποτόνωσης λ και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E σε διάφορες θέσεις από το μέτωπο, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.32. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η σήραγγα ανοίγεται ολομέτωπα σε μία φάση, απαιτήθηκε ο προσδιορισμός του βαθμού αποτόνωσης σε απόσταση ίση με το βήμα προχώρησης ήτοι 1.5 m.

Πίνακας 4.32: Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για τα τρία σημεία ενδιαφέροντος

Σημείο ενδιαφέροντος	Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (m)	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	E (MPa)	Περιγραφή
TEII – 0+350 Ανάλυση 7	0.00	0.30	1570.57	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.67	499.02	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEII – 0+475 Ανάλυση 8	0.00	0.30	1570.57	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.67	499.02	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής
TEIII – 0+495 Ανάλυση 9	0.00	0.31	169.40	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.50	0.68	52.63	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης – Προχώρηση μετώπου εκσκαφής

Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων RS2, ορίζονται ίσα με έξι διαμέτρους περιμετρικά της εκσκαφής. Στον πίνακα 4.33, παρατίθενται οι συντεταγμένες των προσομοιωμάτων (οι οποίες προφανώς είναι κοινές και στα τρία σημεία ενδιαφέροντος).

Πίνακας 4.33: Συντεταγμένες προσομοιώματος (κοινές για τις αναλύσεις 7, 8, 9)

Σημείο	Άξονας X	Άξονας Y
1	12.0	12.0
2	12.0	-12.0
3	-12.0	-12.0
4	-12.0	12.0

Στις αναλύσεις 7, 8 και 9, η τρίτη διάσταση ελήφθη υπόψιν μέσω του βαθμού αποτόνωσης (λ) εφαρμόζοντας τη μέθοδο της χαλάρωσης με το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E) του εδάφους, σύμφωνα με τη σχέση 4.70, όπου E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας και E το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για τον επιθυμητό βαθμό αποτόνωσης λ .

Τα στάδια της προσομοίωσης που ακολουθήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.34 και είναι κοινά για τις αναλύσεις 7, 8 και 9.

Κατά τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις υιοθετήθηκαν ορισμένες βασικές παραδοχές. Συγκεκριμένα, υπενθυμίζεται όπως και στις αναλύσεις του σεναρίου I, πως η βραχώμαζα προσομοιώθηκε ελαστοπλαστικά, θεωρώντας ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωυλικού, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.17. Αξίζει να αναφερθεί ότι όπως και στο σενάριο II, η διάνοιξη γίνεται με micro-TBM γεγονός που αφήνει τη βραχώμαζα αδιατάραχτη ($D=0$).

Πίνακας 4.34: Στάδια αναλύσεων 7, 8 και 9

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Αποτόνωση εκσκαφής με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης από το μέτωπο ($x=-1.50$ m)
3	Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της εκσκαφής. Εφαρμογή και ενεργοποίηση της προσωρινής υποστήριξης.

Οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές παρουσιάζονται ανά ανάλυση και στάδιο στις εικόνες 0.45 έως 0.50.

Η υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος επιτυγχάνεται με τη διατομή άμεσης υποστήριξης τύπου Δ, η οποία αποτελείται από ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) οι ιδιότητες του οποίου συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.35.

Πίνακας 4.35: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Δ
Πάχος (t) (m)	0.30
Μέτρο ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) (MPa)	30000
Λόγος Poisson (ν)	0.20
Θλιπτική αντοχή (f_{ck}) (MPa)	25
Εφελκυστική αντοχή (f_{ctm})	3.75
Ειδικό βάρος (γ_{shot}) (MN/m^3)	0.025
Συμπεριφορά	Ελαστική

Η επιλογή του μηχανήματος micro-TBM βασίζεται στην ίδια λογική του σεναρίου II, όπως αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 4.6.1.

Ως προς τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (3 nodes triangles elements). Το σύνολο των στοιχείων και των ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.36.

Πίνακας 4.36: Σύνολο στοιχείων και κόμβων προσομοιώματος

Στοιχεία (elements)	11054
Κόμβοι (nodes)	5716

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν κυλίσσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα X όσο και κατά τον άξονα Y και τοπικές αρθρώσεις (pins) στα σημεία τομής των αξόνων X και Y, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.45, ομοίως με τις αναλύσεις του σεναρίου I.

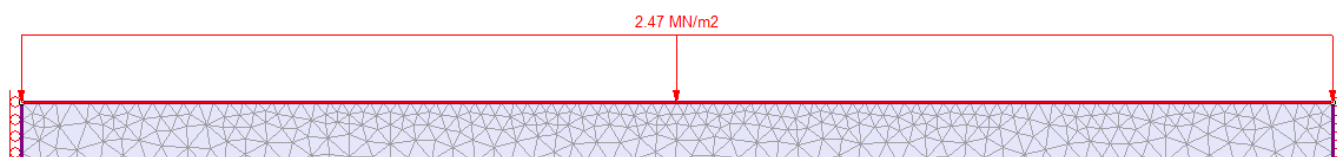
Υπενθυμίζεται επίσης ότι για την προσομοίωση της βραχόμαζας άνω του ανωτέρου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος, το οποίο όπως προαναφέρθηκε ισούται με έξι φορές τη διάμετρο της σήραγγας, εφαρμόστηκε ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο P , όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά για την ανάλυση 7 στην

εικόνα 4.82. Ο υπολογισμός του φορτίου έγινε βάσει της σχέσης 4.71, όπου ΔH η υψομετρική διαφορά μεταξύ της φυσικής στάθμης του εδάφους και του ανώτερου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος και γ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας.

Το ύψος των υπερκειμένων για τις αναλύσεις καθώς και το τελικό φορτίο P , συνοψίζονται στον πίνακα 4.37.

Πίνακας 4.37: Μέγεθος ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου - Σενάριο II

	7	8	9
Ύψος υπερκειμένων (m)	107	82	69
Ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (MN/m ²)	2.470	1.820	1.482

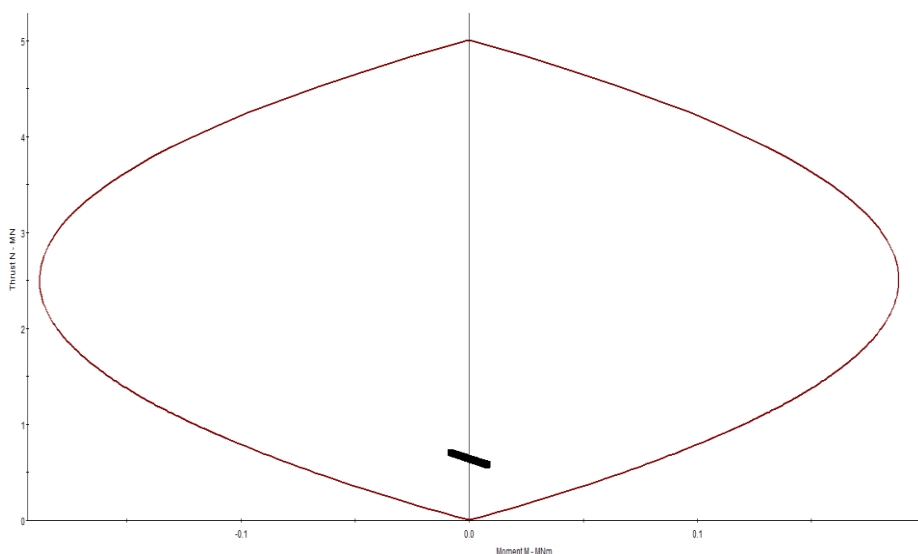


Εικόνα 4.82: Προσομοίωση ανώτερης βραχώμαζας από το αριθμητικό προσομοίωμα με τη χρήση ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου – Ανάλυση 7

4.7.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

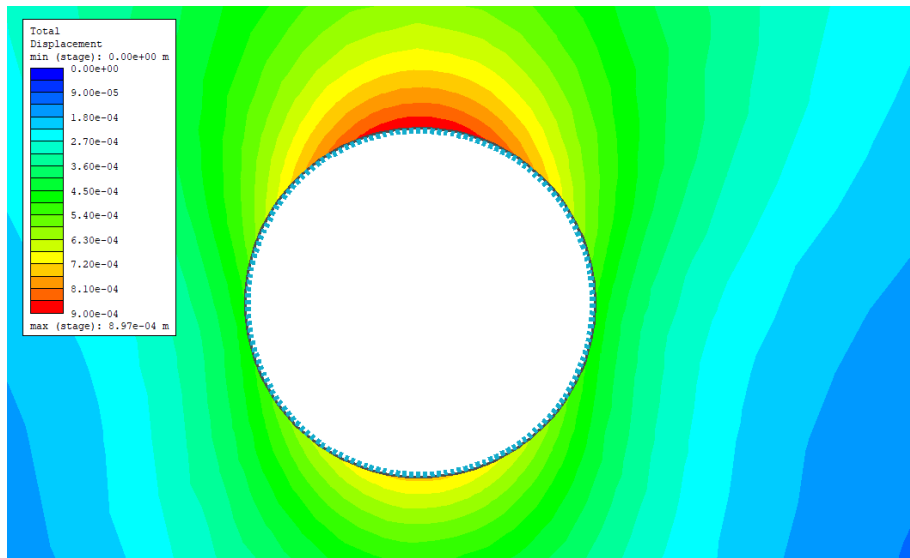
4.7.2.1 ΤΕII – ΧΘ 0+350 – Ανάλυση 7

Αρχικά έγινε προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη θεωρώντας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.83 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.



Εικόνα 4.83: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 7

Με βάση την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.84.



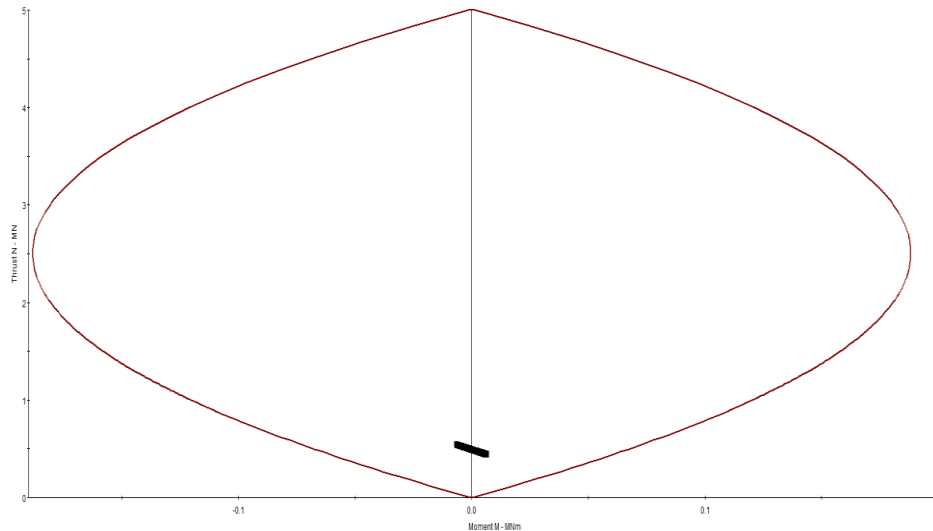
Εικόνα 4.84: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 7

Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 0.9 mm στη στέψη και 0.5 mm στις παρειές.

4.7.2.1 ΤΕΙΙ – ΧΘ 0+475 – Ανάλυση 8

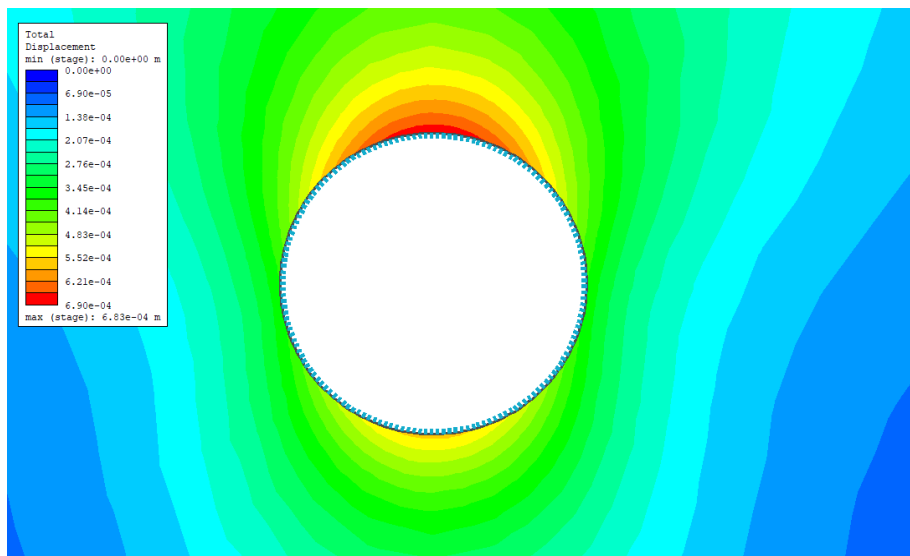
Ομοίως και με την περίπτωση της ανάλυσης 4, αρχικά έγινε προσομοίωση της προσωρινής υποστήριξης για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm και χωρίς την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.85 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.85: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 8

Με βάσει την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.86. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας υπολογίστηκαν ίσες με 0.7 mm στη στέψη και 0.4 mm στις παρειές.

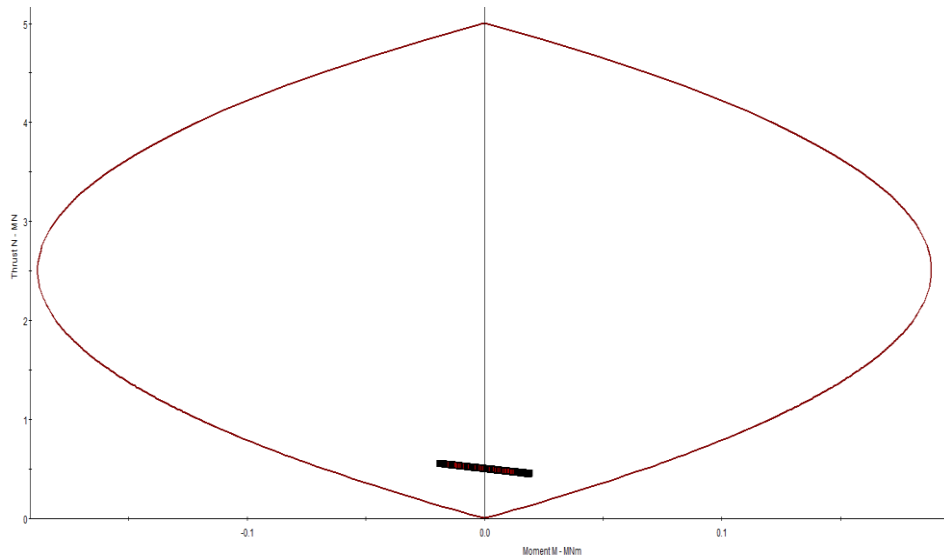


Εικόνα 4.86: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 8

4.7.2.1 ΤΕΙΙΙ – ΧΘ 0+495 – Ανάλυση 9

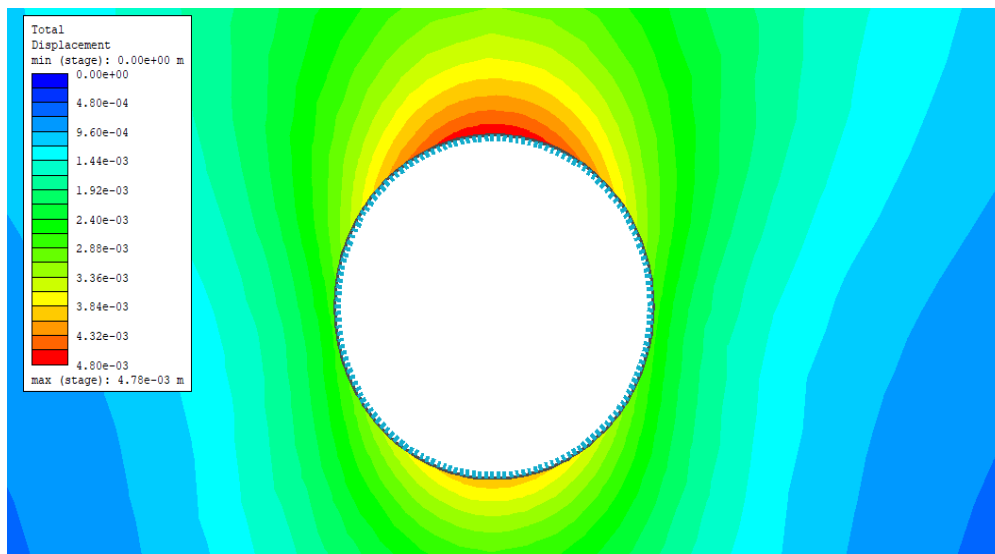
Ομοίως με τις αναλύσεις 4 και 5, αρχικά προσομοιώθηκε η προσωρινή υποστήριξη θεωρώντας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t ίσο με 30 cm. Από τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψε ότι το πάχος αυτό επαρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, διότι δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στην εικόνα 4.87 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας.

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 4.87: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος, βάσει Eurocode 2 – 1992 – Ανάλυση 9

Με βάση την προσωρινή αυτή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.88. Οι ολικές μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας είναι ίσες με 4.8 mm στη στέψη και 2.4 mm στις παρειές.



Εικόνα 4.88: Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής – Ανάλυση 9

Συνοψίζοντας, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης ανά σημείο ενδιαφέροντος παρουσιάζονται στον πίνακα 4.38.

Πίνακας 4.38: Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης

	Αναλύσεις 7,8,9
Φάσεις διάνοιξης	1
Βήμα Προχώρησης	1.50
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (cm)	30

4.7.3 Χρόνος και προϋπολογισμός

Αντικείμενο ενδιαφέροντος στο παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί ο προσδιορισμός του απαιτούμενου κόστους και του απαιτούμενου χρόνου για τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής με τη μέθοδο microtunneling. Θεωρώντας έναν εύλογο ρυθμό προχώρησης ίσο με 15 m/day και μια προσαύξηση της τάξης του 30% λόγω των απρόβλεπτων η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης της διάνοιξης προσδιορίστηκε στις 51 μέρες. Βάσει των περιγραφικών τιμολογίων του δημοσίου σύμφωνα με το Ν. 4412/2016 (Φ.Ε.Κ. 147 Α / 8-8-2016), το συνολικό κόστος για τη διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνοντας υπόψιν τις εκσκαφές των στομίων, τη διάνοιξη με τη χρήση microTBM, την αγορά, την εγκατάσταση και τη συντήρηση του μηχανήματος, το κόστος του σκυροδέματος για την υποστήριξη και το εργατικό προσωπικό προσδιορίστηκε ίσο με 2.0 εκ. ευρώ. Αναλυτικά οι υπολογισθείσες ποσότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.23. Επισημαίνεται ότι στους υπολογισμούς ελήφθησαν υπόψιν οι τιμές για έργα συνολικού προϋπολογισμού υψηλότερου των 5 εκ. €.

Πίνακας 4.39: Επιμέρους υπολογισμοί ποσοτήτων για κοστολόγηση – Σενάριο II

Κωδικός	Σύντομη περιγραφή	Κωδικός αναθ/σης	Μον. μέτρησης	Έργα >5.0 εκ €	Ποσότητα μελέτης	€
1.01	Χρήση πινακίδων εργοταξιακής σήμανσης.	ΟΙΚ 6541	μήνας	7.6	2.0	15
ΥΣΦ 3.03	Εκσκαφές υπαίθριες στομίων σηράγγων σε έδαφος πάσης φύσεως	ΥΔΡ-6063	m3	2.2	204.20	449
3.19.03.05	Κατασκευή μικροσηράγγων με την μέθοδο της ωθούμενης συστοιχίας σωλήνων (Pipe jacking) για σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου Φ 1800 - 2000 mm	ΥΔΡ-6082.1	m	1330	761.46	1 012 742
9.10.06	Παραγωγή, μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση και συντήρηση σκυροδέματος για κατασκευές από σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30	ΥΔΡ 6329	m3	86	228.44	19 646
	Αγορά μηχανήματος rock mtbm					547 320
	Εγκατάσταση και συντήρηση μηχανήματος rock mtbm					109 464
	Έξοδα εργαζομένων					319 200
Σύνολο						2 008 836

Σημειώνεται ειδικά για το κόστος του εργατικού προσωπικού ότι έγινε η παραδοχή οκτάωρης βάρδιας, και θεωρήθηκε μέσο ωρομίσθιο ίσο με 30 €. Επίσης, θεωρήθηκε κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (operating cost) του μηχανήματος rock MTBM προσεγγιστικά ίσο με το 20 % του κόστους αγοράς του (capital cost).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών και μηχανικών μεθόδων κατά τη διάνοιξη σηράγγων εκτροπής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η συμβατική μέθοδος ανατινάξεων – drill and blast – και συγκρίθηκε με τη μηχανική μέθοδο microtunneling. Κεντρικό πυλώνα της εργασίας αποτέλεσε επιπλέον η επίδραση της επιλογής του τύπου του φράγματος στην υδρολογική και στην υδραυλική προσέγγιση και κατ' επέκταση στην επιλογή της διαμέτρου της σήραγγας εκτροπής.

Ειδικότερα, αντικείμενο μελέτης για τη ζητούμενη τεχνικοοικονομική σύγκριση αποτέλεσε η σήραγγα εκτροπής του φράγματος της Τριανταφυλλιάς στη Φλώρινα. Κατά την υφιστάμενη κατάσταση, η σήραγγα εκτροπής διανοίχτηκε με εφαρμογή της μεθόδου drill and blast στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος ενώ θεωρήθηκε καταλληλότερη η κατασκευή χωμάτινου τύπου φράγματος. Κατά τη νέα εναλλακτική προτεινόμενη προσέγγιση, αρχικά αξιολογήθηκαν δεδομένα της βιβλιογραφίας και της οριστικής μελέτης του έργου και διεξήχθησαν βασικά συμπεράσματα γεωτεχνικής φύσης βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε ο νέος προτεινόμενος γεωτεχνικός σχεδιασμός της σήραγγας μελέτης.

Ως προς τα γεωτεχνικά συμπεράσματα που διεξήχθησαν αρχικά πραγματοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας σε τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες TEI, TEII, και TEIII, στην περιοχή των στομιών, στο τμήμα της σήραγγας όπου ο γνεύσιος και ο γρανιτογνεύσιος έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και στην περιοχή πέριξ των σημείων διεπαφής γνεύσιου και γρανιτογνεύσιου καθώς και στην περιοχή του ρήγματος, αντίστοιχα. Ως προς τα βασικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τεχνικογεωλογικών ενοτήτων διακρίνουμε την σχετικά υψηλή αποσάθρωση της TEI και τη σχετικά αδιατάρακτη ή ελαφρώς τεμαχώδη δομή της, καθώς επίσης και την ελαφριά αποσάθρωση και τη διαταραγμένη/στρωματώδη/πτυχωμένη δομή των TEII και TEIII, χαρακτηριστικά που κατατάσσουν το δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) στα διαστήματα 30-40, 70-80 και 40-50, αντίστοιχα.

Σε γενικές γραμμές πρόκειται για βραχώμαζα καλής ποιότητας με εξαίρεση την περιοχή του ρήγματος και της διεπαφής γνεύσιου και γρανιτογνεύσιου καθώς η βραχώμαζα εκεί είναι πιο εξασθενημένη και φέρει φτωχότερες μηχανικές ιδιότητες.

Ως προς τη συμπεριφορά της βραχώμαζας στις σήραγγες και τις πιθανές μορφές αστοχίας της ανάλογα με το μέγιστο ύψος των υπερκείμενων, τη δομή και τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου, προβλέφθηκαν οι πιθανές μορφές αστοχίας της βραχώμαζας. Πιο αναλυτικά, στην TEI στην οποία συναντάται μέγιστο ύψος υπερκείμενων ίσο με 33 m και αντοχή σ_{ci} ίση με 40 MPa, είναι πιθανή η αστοχία υπό μορφή Ch-Wg, ήτοι καταπτώσεις τύπου καμινάδας και σφηνοειδείς ολίσθησης λόγω βαρύτητας. Στην TEII, όπου το μέγιστο ύψος των υπερκείμενων ανέρχεται περί τα 110 m και η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος είναι ίση με 110 MPa, προβλέπεται πιθανή αστοχία υπό μορφή Wg-St, που χαρακτηρίζεται από τοπικές βαρυτικές αστοχίες λόγω βαρύτητας. Τέλος, στην περίπτωση της TEIII, όπου το μέγιστο ύψος των υπερκείμενων ανέρχεται στα 95 m και η αντοχή σ_{ci} είναι ίση με 60 MPa, προσδιορίστηκε η πιθανή αστοχία της βραχώμαζας υπό μορφή Ch-Sh που περιλαμβάνει αστοχία τύπου καμινάδας και μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, συνοδευόμενες κατά περιπτώσεις από εκδηλώσεις διατμητικών αστοχιών σε ζώνες μικρής έκτασης.

Ως προς το υδρολογικό αντικείμενο, υπό το πρίσμα της επιρροής του ρυθμού κατασκευής του εκάστοτε τύπου φράγματος έγινε η επιλογή κατάλληλων περιόδων επαναφοράς οι οποίες ελήφθησαν υπόψιν στους υδρολογικούς και στους υδραυλικούς υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, με την εύλογη παραδοχή ρυθμού ανύψωσης ίσο με 10 cm/day στην περίπτωση χωμάτινου φράγματος και 30 cm/day στην περίπτωση φράγματος RCC και λαμβάνοντας υπόψιν καθυστερήσεις εξαιτίας τυχόν απρόβλεπτων προβλημάτων κατά την κατασκευή ύψους 1 έτους, προσδιορίστηκε ο χρόνος ολοκλήρωσης ίσος με 4 και 2 έτη, αντίστοιχα. Με απώτερο στόχο την εξίσωση του ρίσκου που λαμβάνεται για σχεδιασμό θεωρώντας T περίοδο επαναφοράς και N χρόνο ολοκλήρωσης, κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή περιόδου επαναφοράς 100 και 50 ετών, στην περίπτωση χωμάτινου και RCC φράγματος.

Ακολούθως υλοποιήθηκαν οι υδρολογικοί υπολογισμοί με αφετηρία τις όμβριες καμπύλες περιφερειακών κοντινών περιοχών από όπου και προσδιορίστηκε η βροχή σχεδιασμού για την εκάστοτε περίοδο επαναφοράς η οποία μετασηματίστηκε σε απορροή με χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Στη συνέχεια, για την διερεύνηση της επιρροής της περιόδου επαναφοράς στη διάμετρο της σήραγγας εκτροπής καταρτίστηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον R μοντέλο διόδευσης του πλημμυρογραφήματος εισόδου από το οποίο προκύπτουν ως ορίσματα εξόδου η μέγιστη παροχή εκροής, το απαιτούμενο ύψος του προφράγματος καθώς και το μέγιστο ύψος νερού στην είσοδο της σήραγγας.

Από τη διερεύνηση αυτή για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς, κρίθηκε εύλογη η επιλογή διαμέτρου ίση με 2 και 3 m και περιόδων επαναφοράς 50 και 100 έτη, στην περίπτωση φράγματος RCC και χωμάτινου τύπου, αντίστοιχα.

Εξετάστηκαν τα σενάρια I, II και III, που αντιστοιχούν σε χωμάτινο τύπο φράγματος, σήραγγα διαμέτρου 3 m και διάνοιξη με συμβατικά μέσα, σε χωμάτινο τύπο φράγματος, σήραγγα διαμέτρου 3 m και διάνοιξη με micro-Rock TBM, και φράγμα RCC, με σήραγγα εκτροπής διαμέτρου 2 m και διάνοιξη αυτής ομοίως με χρήση micro-Rock TBM,, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, ο γεωτεχνικός σχεδιασμός υλοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες της περιβάλλουσας βραχώμαζας ενώ οι αναλύσεις, τόσο στην περίπτωση της μεθόδου drill and blast, όσο και στην περίπτωση της μεθόδου microtunneling, εκτελέστηκαν με χρήση του λογισμικού RS2. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του Σεναρίου I, κρίθηκε σκόπιμη η υιοθέτηση δύο τυπικών διατομών άμεσης υποστήριξης A και B, που αποτελούνται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5 cm και αγκύρια διαστελλόμενου τύπου Swellex διαμέτρου 35 mm τοποθετημένα σε κάρναβο 1x3 m και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 15 cm και αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης διαμέτρου 25 mm τοποθετημένα σε κάρναβο 1x1.5 m και μεταλλικά πλαίσια lattice girder επιφάνειας 0.00104 m² ανά 1.5 m. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εφαρμογή της τυπικής διατομής A στην TEII και της πιο βαριάς διατομής B στις TEI και TEIII. Οι μέγιστες αναμενόμενες ολικές μετακινήσεις εντοπίστηκαν στα μέγιστα υπερκείμενα του υγιούς γνευσίου (XΘ 0+350) και ανέρχονται στα 3 mm στη στέψη και σε 1 mm στις παρειές.

Για τα σενάρια II και III, εξετάστηκε η διάνοιξη της σήραγγας με τη μέθοδο microtunneling. Κατόπιν διερεύνησης της εφαρμοσιμότητας του εκάστοτε τύπου micro-TBM κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή του micro-Rock TBM καθώς πρόκειται σε γενικές γραμμές για καλής ποιότητας βραχώμαζας με υψηλό δείκτη γεωλογικής αντοχής ($GSI > 60$) στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας ενώ η βραχώμαζα δεν απαιτεί την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο. Ο εν λόγω τύπος μηχανήματος κρίνεται εύλογος και χάρη στην δυνατότητα εκτέλεσης τιμμεντενέσεων, καθώς και στην παροχή υποστήριξης μέσω αγκυρώσεων, χαλύβδινων τόξων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που κρίνονται απαραίτητα στην περίπτωση της συγκεκριμένης

περιβάλλουσας βραχώμαζας. Ειδικότερα για την περιοχή του ρήγματος αναμένεται η αντιμετώπιση με ειδικές διατάξεις, όπως είναι η εκτέλεση γεωτρήσεων prog drilling.

Πιο αναλυτικά, στο σενάριο II προτείνεται η υποστήριξη με χρήση τυπικής διατομής Γ η οποία πρακτικά αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30 cm και εφαρμόζεται σε όλο το μήκος της σήραγγας. Οι μέγιστες αναμενόμενες ολικές μετακινήσεις εντοπίστηκαν στην περιοχή του ρήγματος (ΧΘ 0+495) και ανέρχονται στα 6 mm στη στέψη και σε 3 mm στις παρειές. Τέλος, μια όμοια τυπική διατομή Δ προτείνεται και στην περίπτωση του σεναρίου III με εφαρμογή της σε όλο το μήκος της σήραγγας. Οι μέγιστες αναμενόμενες ολικές μετακινήσεις εντοπίστηκαν και πάλι στην περιοχή του ρήγματος (ΧΘ 0+495) και ανέρχονται στα 4.8 mm στη στέψη και σε 2.4 mm στις παρειές. Όλα τα μέτρα υποστήριξης των προαναφερθέντων τυπικών διατομών Α,Β,Γ και Δ, επαρκούν όπως αποδείχθηκε με τη χρήση του λογισμικού RS2.

Βασικά κριτήρια στην επιλογή του βέλτιστου σεναρίου είναι η εφαρμοσιμότητα των μέτρων υποστήριξης, ο χρόνος και το κόστος. Τα σχετικά αποτελέσματα για το εκάστοτε σενάριο παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Είναι προφανές ότι για τις προαναφερθείσες παραδοχές κρίνεται σαφώς πιο συμφέρουσα η διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής διαμέτρου 2 m με τη μέθοδο microtunneling με micro-Rock TBM, και η κατασκευή φράγματος RCC. Σημειώνεται πως στην τεχνικοοικονομική σύγκριση, έχουν ληφθεί υπόψιν αποκλειστικά και μόνο τα κόστη που σχετίζονται με τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής και όχι με την κατασκευή του εκάστοτε τύπου φράγματος (χωμάτινου και RCC) και των ιδιαιτεροτήτων τους, καθώς το θέμα αυτό δεν ανταποκρίνεται στους στόχους της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 5.1: Σύνοψη αποτελεσμάτων Σεναρίων I, II και III

	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Διάμετρος	3.0	3.1	2.0
Μέθοδος διάνοιξης	Εκσκαφή - ανατίναξη	Micro-TBM	Micro-TBM
Κόστος	6 378 171	2 085 543	2 008 836
Χρόνος ολοκλήρωσης	191 μέρες	51 μέρες	51 μέρες

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί την απαρχή της ανάπτυξης μιας μεθοδολογίας τεχνικοοικονομικής σύγκρισης μεθόδων διάνοιξης σηράγγων εκτροπής και αξίζει να εμπλουτιστεί με επιπλέον στοιχεία που θα συμβάλουν στην αρτιότητά της.

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμη η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας και την περιοχή του σώματος του φράγματος και του ταμιευτήρα, προκειμένου να είναι πιο εύστοχη και επιστημονικά αποδεκτή η επιλογή του τύπου του φράγματος, η οποία εν προκειμένω βασίστηκε εξολοκλήρου σε οικονομικά και χρονικά κριτήρια.

Στη συνέχεια, χρειάζεται να δοθεί περαιτέρω έμφαση στην συμπερίληψη των περιφερειακών σταθμών για την επιρροή τους στην επιφανειακή αναγωγή των όμβριων καμπυλών, προκειμένου αυτή να ανταποκρίνεται το βέλτιστο δυνατό στα πραγματικά δεδομένα.

Είναι σκόπιμο, επιπλέον, να διερευνηθεί και να βελτιωθεί το στοχαστικό πλαίσιο ως προς την κατηγοριοποίηση των πλημμυρικών επεισοδίων, καθώς και την αντιστοίχιση σε συγκεκριμένα επίπεδα πλημμυρικού ρίσκου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί με την παραγωγή πλήθους συνθετικών πλημμυρογραφημάτων για κάθε περίοδο επαναφοράς, αποφεύγοντας την επιλογή μεμονωμένων πλημμυρικών επεισοδίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγαλιανιώτου, Σ., 2006, Διαστασιολόγηση διατομής χωμάτινου φράγματος υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες, Διαθέσιμο από το ιδρυματικό αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.
2. Αθανασόπουλος, Σ. κ.ά., 2006, Τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Β' Έκδοση, Νέα έργα, Αθήνα.
3. Βασιλειάδης, Κ., Παπαναστασίου, Θ., Σάντα, Α., Πτυχιακή διατριβή, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα, 2015
4. Βγενοπούλου, Ε., Υδροδυναμικά έργα, Σημειώσεις μαθήματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Έργων Υποδομής, ΤΕΙ Πάτρας, 2015
5. Γκούτης, Κ., Κούντρας Κ., Μαυρογιάννης Α., Μιχαλόπουλος Χ., Προμπονάς Μ., Μελέτη υδροδότησης Δήμου Κεντρικών Τζουμέρκων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, 2021
6. Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας, 2023
7. Ευστρατιάδης, Α., Δευκαλίων, Παραδοτέο Π3.1, 2013
8. Ευστρατιάδης, Α., Υδραυλικές κατασκευές – Φράγματα, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, 2021
9. Ευστρατιάδης, Α., Π. Παπανικολάου και Σ. Μίχας, Υδραυλικές κατασκευές – Φράγματα, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, 2021
10. Ευστρατιάδης, Α., Π. Παπανικολάου, Υδραυλικές κατασκευές – Φράγματα, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, 2021
11. Ευστρατιάδης, Α., Π. Κοσιέρης, Υδραυλική και Υδραυλικά Έργα, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, 2023
12. Κούμουλός, Δ., και Θ. Κοργιαλός, Φράγματα από ισχυρό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC): Τεχνολογία κατασκευής και ποιοτικός έλεγχος, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή και Έκθεση Υλικών, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2008.
13. Κύρου, Κ., Μελέτη « Αρδευτικά έργα Αραδιππού – Φράγμα αρχαγγέλου και Καμμίση, Ζ&Α Π. Αντωναρόπουλος και Συνεργάτες Α.Μ.Ε., Ιούνιος 2022.
14. Κουτσογιάννης, Δ., Συντελεστές ομοιομόρφισης σημειακών βροχοπτώσεων, αδημοσίευτο, Αθήνα, 1997.
15. Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
16. Κουτσογιάννης, Δ., Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, Έκδοση 4, 180 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011
17. Μαρίνος, Β. Σχεδιασμός Υπογείων Έργων, Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2021
18. Μαρίνος, Β. Τεχνική Γεωλογία Υπογείων Έργων, Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2021
19. Μουτάφης, Ν.Ι., Π. Παπανικολάου, Υδραυλικές κατασκευές – Φράγματα, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, 2014
20. Ράζος, Η., Κατασκευή αποστραγγιστικής στοάς και αποχετευτικού αγωγού με υπόγεια διάνοιξη, Μεταπτυχιακή διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα, 2012
21. Σαχπάζης, Κ., 2018, Γεωτεχνική Μηχανική των Φραγμάτων. Τόπος έκδοσης: Εκδότης
22. Σιββάς, Κ., Μικροσήραγγες στον Ελλαδικό χώρο, Πτυχιακή διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2014
23. Σοφιανός, Α., Διάνοιξη Σηράγγων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018

24. Στεφανάκος, Ι.Π., Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία, Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2014
25. Υδροεξυγιαντική Λ. Σ. Λαζαρίδης & ΣΙΑ Ε.Ε., Οριστική μελέτη φράγματος Τριανταφυλλιάς Ν. Φλώρινας, 1999
26. Broere, W. (2015). On the face support of microtunnelling TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46, 12–17. doi: 10.1016/j.tust.2014.09.015
27. V. Marinos, M. Benissi, G. Rovolis, K. Korkaris, G. Stoumpos, N. Syrtariotis, K. Aggelidaki, I. Papadatos, M. Panteliadou, D. Papouli, Innovative assessment methodologies to introduce rock mass behaviour into tunnelling - The legacy of Professor Paul Marinos in the Athens Metro, World Tunnel Congress, Greece, Athens, 2023
28. Georgiou, D., Benardos, A., & Nomikos, P. (2023). Effect of the rock mass disturbance due to the tunnel excavation on the tunnel loading, based on numerical simulation. *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World- Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2023*, 569–577. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-69>
29. Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118–135, 1998.
30. Nugroho, J., Silalahi, I. F. R., Soekarno, I., Nugroho, J., Nugroho, E. O., & Heri, B. (n.d.). Potential Sedimentation in the Operation Ciliwung Diversion Tunnel Sedimentation in the Tanjung Api Api Port Banyuasin, Palembang View project Future development for water resources engineering to support environment preservation View project Potential Sedimentation in the Operation Ciliwung Diversion Tunnel (2022). <https://www.researchgate.net/publication/364583354>. doi
31. Singh, P. (2014). Design and Analysis of a Micro Tunnel Boring Machines (TBM). *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 87–93. doi: 10.13189/ujme.2014.020302
32. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1972.
33. Wilkinson, D. (1999). Successful microtunnelling: matters which must be considered, Elsevier (Vol. 14, Issue 2). doi: 10.1016/S0886-7798(00)00020-1
34. Rai, R. K., & Deshmukh, S. A. (n.d.). Comparative Study of Design of Sewer Line Using Hazen-Williams and Manning Equations. *International Journal of Engineering Research*, 1(5), 175–178. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i1/041>
35. Yagiz, S., & Karahan, H. (2011). Prediction of hard rock TBM penetration rate using particle swarm optimization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), 427–433. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.02.013>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γεώτρηση Γ6



Εικόνα 0.1: Γεώτρησης Γ6 - Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 0.00-4.00



Εικόνα 0.2: Γεώτρησης Γ6 - Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 4.00-8.50



Εικόνα 0.3: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 8.50-12.70



Εικόνα 0.4: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 12.70-16.70



Εικόνα 0.5: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 16.70-21.00



Εικόνα 0.6: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 21.00-24.25



Εικόνα 0.7: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 24.25-29.15



Εικόνα 0.8: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 29.15-33.40

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 0.9: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 33.40-37.40



Εικόνα 0.10: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 37.40-41.55



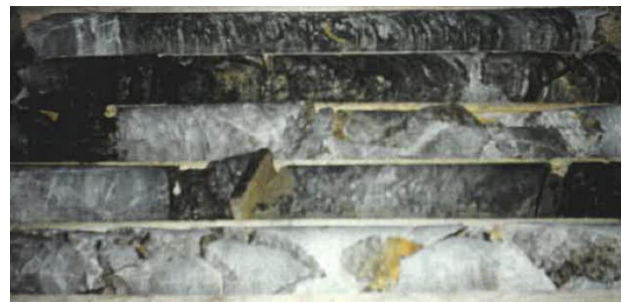
Εικόνα 0.11: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 41.55-49.75



Εικόνα 0.12: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 49.75-50.60



Εικόνα 0.13: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 50.60-54.20



Εικόνα 0.14: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 54.20-58.30



Εικόνα 0.15: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 58.30-62.60



Εικόνα 0.16: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 62.60-66.70

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 0.17: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 66.70-70.65



Εικόνα 0.18: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 70.65-75.30



Εικόνα 0.19: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 75.30-80.20



Εικόνα 0.20: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 80.20-85.25



Εικόνα 0.21: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 85.25-90.10



Εικόνα 0.22: Γεώτρησης Γ6 - Βάθος 90.10-95.00

Γεώτρηση Γ10



Εικόνα 0.23: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 0.00-5.20



Εικόνα 0.24: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 5.20-10.30



Εικόνα 0.25: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 10.30-15.00



Εικόνα 0.26: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 15.00-20.00



Εικόνα 0.27: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 20.00-25.00



Εικόνα 0.28: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 25.00-30.00



Εικόνα 0.29: Γεώτρησης Γ10 - Βάθος 30.00-35.00

Γεώτρηση Γ12



Εικόνα 0.30: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 0.00-5.20



Εικόνα 0.31: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 5.20-10.50



Εικόνα 0.32: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 10.30-15.50



Εικόνα 0.33: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 15.00-20.20



Εικόνα 0.34: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 20.20-25.20

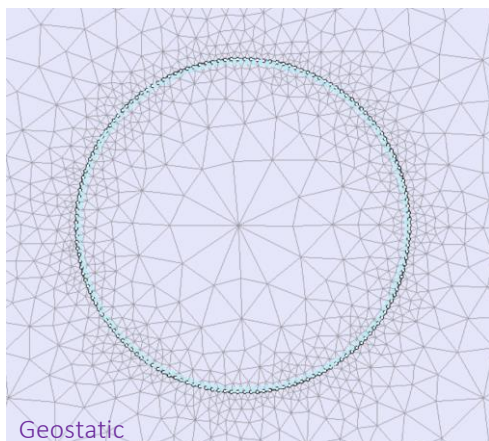


Εικόνα 0.35: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 25.20-30.60

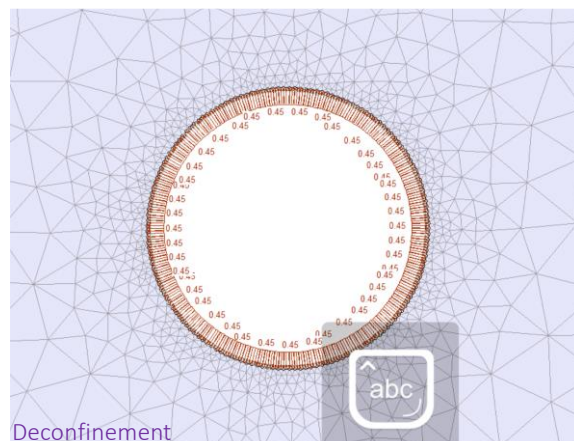


Εικόνα 0.36: Γεώτρησης Γ12 - Βάθος 30.00-35.00

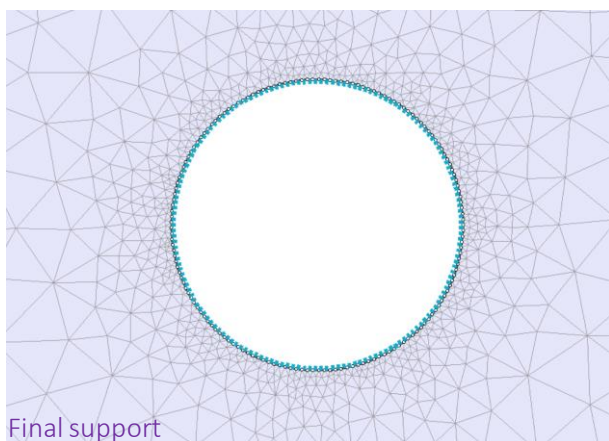
Σενάριο II – Ανάλυση 4,5 και 6



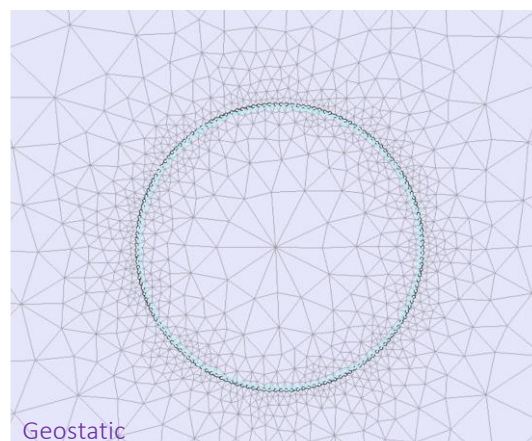
Εικόνα 0.37: Ανάλυση 4 – Στάδιο 1



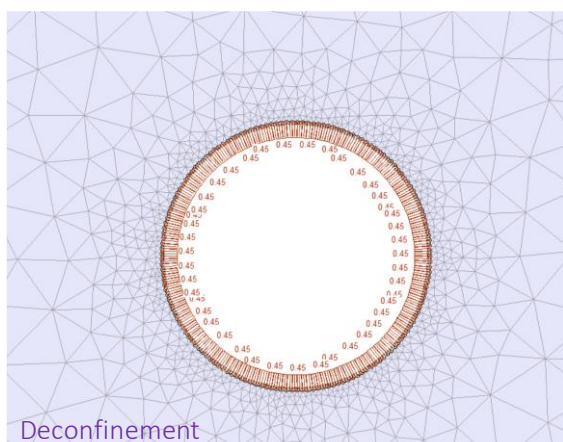
Εικόνα 0.38: Ανάλυση 4 – Στάδιο 2



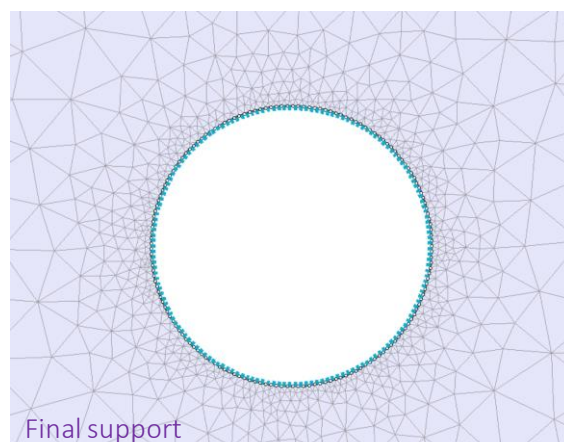
Εικόνα 0.39: Ανάλυση 4 – Στάδιο 3



Εικόνα 0.40: Ανάλυση 5 – Στάδιο 1

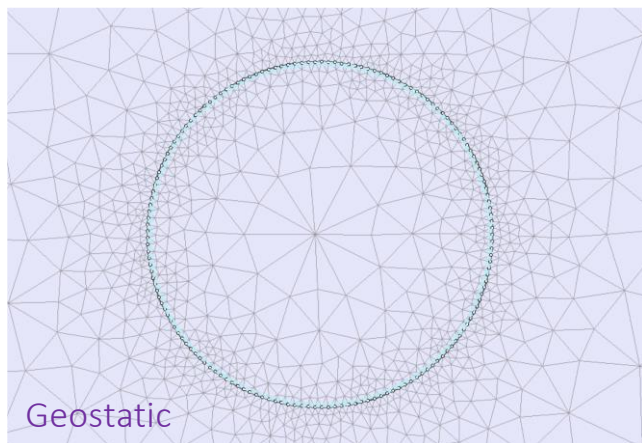


Εικόνα 0.41: Ανάλυση 5 – Στάδιο 2

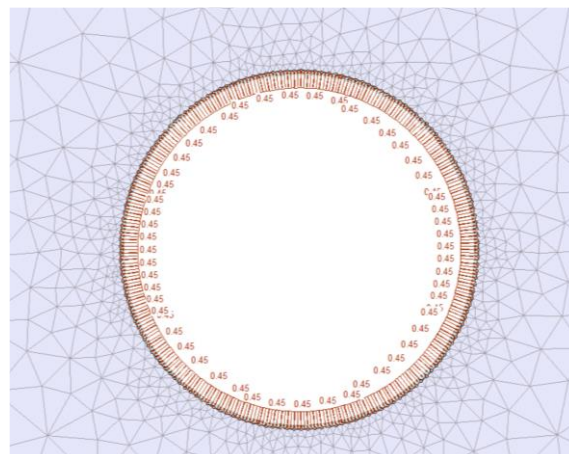


Ανάλυση 5 – Στάδιο 3

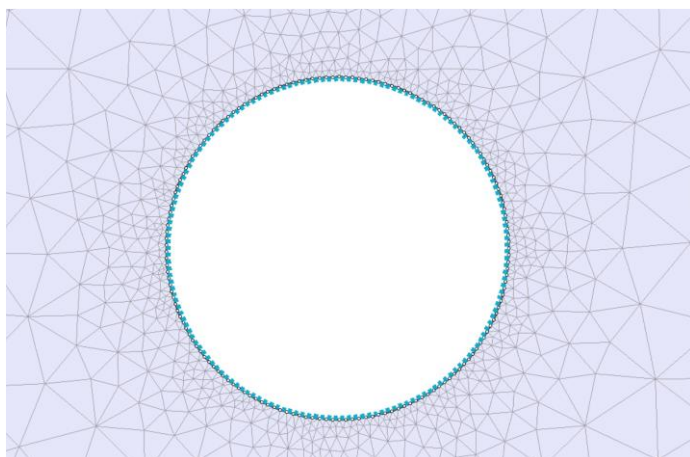
Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 0.42: Ανάλυση 6 – Στάδιο 1

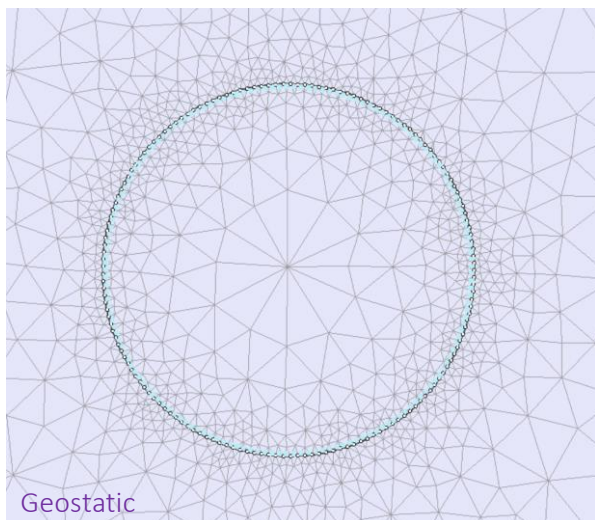


Εικόνα 0.43: Ανάλυση 6 – Στάδιο 2

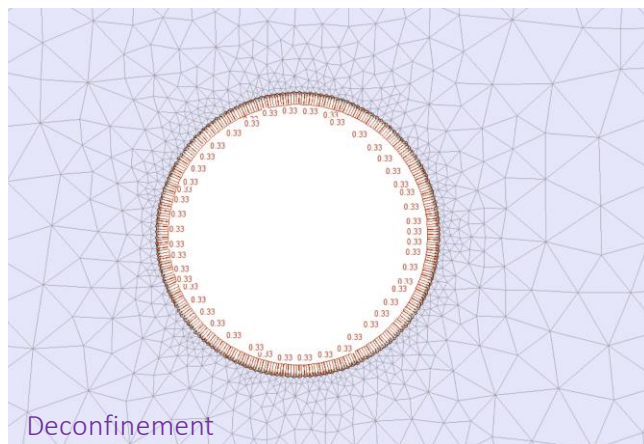


Εικόνα 0.44: Ανάλυση 6 – Στάδιο 3

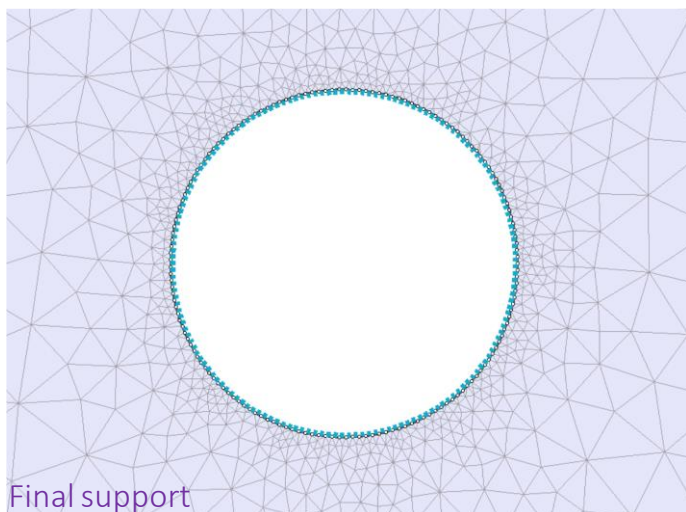
Σενάριο III – Ανάλυση 7,8και 9



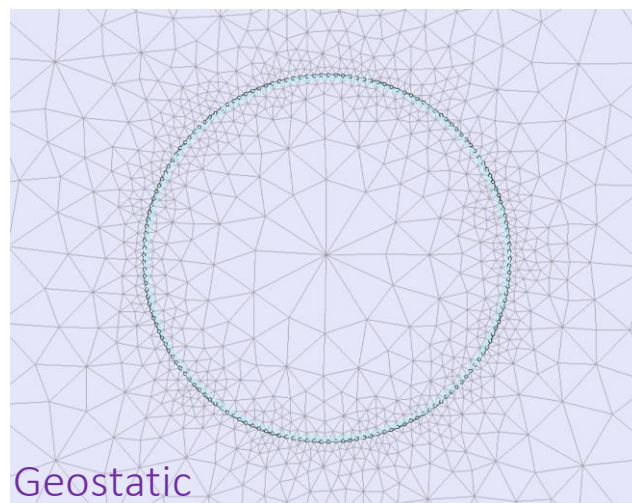
Εικόνα 0.45: Ανάλυση 7 – Στάδιο 1



Εικόνα 0.46: Ανάλυση 7 – Στάδιο 2

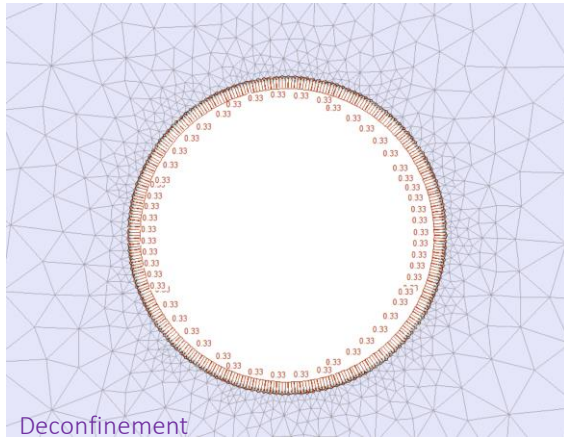


Εικόνα 0.47: Ανάλυση 7 – Στάδιο 3

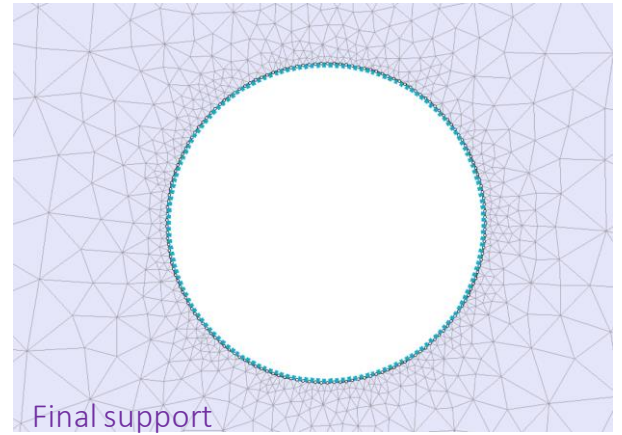


Εικόνα 0.48: Ανάλυση 8 – Στάδιο 1

Τεχνικοοικονομική σύγκριση συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και μεθόδου Micro-TBM - Η περίπτωση της σήραγγας εκτροπής του φράγματος Τριανταφυλλιάς



Εικόνα 0.49: Ανάλυση 8 – Στάδιο 2



Εικόνα 0.50: Ανάλυση 8 – Στάδιο 3