



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΥΠΟΓΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΣΤΑ ΦΗΡΑ : ΤΟ ΦΡΕΑΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΑ ΤΖΟΓΚΑ

Αρχικός Επιβλέπων : Σοφιανός Αλέξανδρος
Τελικός Επιβλέπων : Νομικός Παύλος

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΥΠΟΓΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΣΤΑ ΦΗΡΑ : ΤΟ ΦΡΕΑΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΑ ΤΖΟΓΚΑ

Αρχικός Επιβλέπων : Σοφιανός Αλέξανδρος
Τελικός Επιβλέπων : Νομικός Παύλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / / 2019

Γιούτα – Μήτρα Παρασκευή, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΕΜΠ,

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ,

Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ,

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

Copyright © Δήμητρα Τζόγκα, 2019

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, πρώτον, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σοφιανό Αλέξανδρο, τέως καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, που μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω και να ασχοληθώ με μια ιδέα, που πρωτοπορεί τόσο σε ελληνικό όσο και σε μη εγχώριο επίπεδο και τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Ζαχαρόπουλο Ιωάννη, Μαλαχία Γεώργιο, Μιτσοτάκη Κυριάκο και Παπαθεοδώρου Φαίδωνα για τη συνεργασία και τις χρήσιμες πληροφορίες που μου έδωσαν και συνθέτουν τα μέλη της ομάδας που ασχολείται με την υλοποίηση του έργου.

Δηλώνω, επίσης, την μεγάλη μου εκτίμηση για την κα. Γιούτα – Μήτρα Παρασκευή, μέλος του εργαστηριακού και διδακτικού προσωπικού της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την καθοδήγηση και υποστήριξη στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής διατριβής.

Θα ήθελα, εξίσου, να ευχαριστήσω τον κ. Νομικό Παύλο, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, που δέχθηκε να ορισθεί επιβλέπων καθηγητής μου έστω και τυπικά μετά την συνταξιοδότηση του κου. Σοφιανού, και τον κο. Μπενάρδο Ανδρέα, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να δηλώσω την αμέριστη εκτίμησή μου στους γονείς μου για τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και ως ένδειξη ευγνωμοσύνης τους αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα του τουριστικού κορεσμού του νησιού της Σαντορίνης λειτούργησε ως έναυσμα για την εύρεση επίλυσής του και οδήγησε στην παρουσίαση ενός καινοτόμου υπόγειου έργου συστήματος μεταφοράς φυσικών προσώπων. Το σύστημα μεταφοράς ενώνει τον λιμένα με την πόλη των Φηρών μέσω ενός φρέατος και συνδετήριας σήραγγας. Η παρούσα διπλωματική διατριβή αποτελεί την προμελέτη της κατασκευής φρέατος βάθους 200 m και των ανελκυστήρων που θα διέρχονται εντός αυτού.

Στο 2^ο κεφάλαιο μελετάται η γεωλογική εξέλιξη της Σαντορίνης από τα αρχαία χρόνια μέχρι και σήμερα. Βάσει της ανάλυσης των γεωλογικών σχηματισμών ανά τους ηφαιστειακούς κύκλους, σχεδιάζεται η στρωματογραφία των πετρωμάτων στη περιοχή των Φηρών που θα κατασκευασθεί το σύστημα μεταφοράς και εκτιμώνται οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας.

Το 3^ο κεφάλαιο περιέχει πληροφορίες για την επιλογή της θέσης εξόδου του φρέατος στη πόλη των Φηρών και των τεχνικών χαρακτηριστικών των ανελκυστήρων. Αναλύονται, επίσης, οι δυνατότητες που παρέχει τόσο στο τουριστικό πληθυσμό όσο και στους μόνιμους κατοίκους του νησιού.

Το 4^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην μελέτη της διάνοιξης του φρέατος. Προτείνονται τρεις εναλλακτικές μέθοδοι εκσκαφής σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φρέατος και τη συμπεριφορά των περιβάλλοντων πετρωμάτων. Δίνεται, ακόμη, εκτενής ανάλυση των προβλεπόμενων μέτρων στήριξης, του κύκλου εργασιών για κάθε φάση εκσκαφής και του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Στο 5^ο κεφάλαιο προσομοιώνεται η ολομέτωπη διάνοιξη του φρέατος με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Phase² της Rocscience. Εξετάζεται, αρχικά, η αξιοπιστία και η αντιπροσωπευτικότητα των προσομοιωμάτων σύμφωνα με τις αναλυτικές μεθόδους επίλυσης. Έπειτα, μελετάται η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας για την εκσκαφή του φρέατος, όπου προσομοιώνεται η εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης για κάθε στρώμα ξεχωριστά και συγκρίνεται με τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Προσομοιώνονται, ακόμη, οι φάσεις εκσκαφής και εφαρμογής των μέτρων στήριξης του φρέατος και γίνεται ενδελεχής έλεγχος της απόκρισης των μέτρων στήριξης, όπου εξετάζεται η επάρκεια του οπλισμού και του σκυροδέματος κάθε στρώσης, με απώτερο σκοπό τον καθορισμό των ελάχιστων απαιτήσεων για την επένδυση και ευστάθεια του φρέατος σε βάθος χρόνου.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη προσομοίωση της διάνοιξης του φρέατος και γίνεται η αποτίμηση του συνόλου του έργου.

ABSTRACT

The problem of touristic saturation on the island of Santorini served as a trigger for finding its solution and led to the presentation of an innovative underground transport system project. The transport system connects the port with the city of Fira via a shaft and connecting tunnel. This diploma thesis is the pre-study of the construction of a 200 meter deep shaft and of the elevators that will pass through it.

The geological evolution of Santorini from ancient times is studied. Based on the analysis of the geological formations according to the volcanic cycles, a geological section is produced for the Fira region where the project is to be constructed. The geotechnical parameters of the rock mass are also estimated.

The study contains information about the selection of the exit point in the city of Fira and the technical characteristics of the lifts in the shaft. The opportunities created for both the tourist population and the island's permanent residents are analyzed.

Three alternative excavation methods are proposed according to the geometrical characteristics of the shaft and the behavior of the surrounding rocks. An extensive analysis of the support measures is envisaged. The cycle of each excavation and support phase and the mechanical equipment is also given.

The simulation of the shaft's excavation was carried out by using Rocscience's Phase² finite element software, which contains 2D plane strain analysis as well as 3D axisymmetric analysis. The reliability and representativeness of the simulations are validated according to analytical methods. In addition, the geomechanical behavior of the rock mass is explored for the excavation of the shaft, where the application of the convergence-confinement method is simulated and compared to the theoretical approaches. There is also simulation of the excavation phases and application of the support measures. The adequacy of the reinforcement and the concrete of each layer is also examined, with a view to setting minimum requirements for the support and shaft's stability over time.

Finally, the conclusions drawn from the shaft's simulation and the evaluation of the entire project are presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η ΘΗΡΑΪΚΗ ΓΗ	1
1.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	2
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	4
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ	4
2.1 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ.....	4
2.1.1 Γεωδυναμικό Πλαίσιο Ελληνικού Χώρου	4
2.1.2 Σεισμικότητα.....	5
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ.....	9
2.2.1 Ηφαιστειότητα.....	10
2.2.2 Ηφαιστειακοί Κύκλοι.....	12
2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΦΗΡΩΝ.....	14
2.3.1 Στρωματογραφία	14
2.3.2 Γεωτεχνικές Συνθήκες	18
2.3.3 Ταξινόμηση Βραχομάζας	20
2.3.3.1 Το σύστημα ταξινόμησης RMR	20
2.3.3.2 Ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών Φηρών.....	25
2.4 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	31
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΦΡΕΑΤΟΣ.....	31
3.1 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΣ.....	31
3.1.1 Θέση Σύνδεσης – Είσοδος	31
3.1.2 Τελικός Προορισμός – Έξοδος	32
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ	33
3.3 ΠΟΛΥΩΡΟΦΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ	34
3.3.1 Χώρος Εγκαταστάσεων.....	34
3.3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εγκαταστάσεων	36
3.3.2.1 Ανελκυστήρες.....	36
3.3.2.2 Κυλιόμενες Κλίμακες.....	36
3.3.3 Πυροπροστασία – Πυρασφάλεια.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	38

ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΦΡΕΑΤΟΣ.....	38
4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	38
4.1.1 Εξορυξιμότητα βραχομάζας	38
4.1.2 Μέθοδος Εκσκαφής VSM (Vertical Sinking Machine)	39
4.1.3 Μέθοδος NATM	43
4.1.4 Μέθοδος Raiseboring και Διεύρυνση	45
4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	47
4.2.1 Φυσικό Εντατικό Πεδίο	47
4.2.2 Δευτερογενές Εντατικό Πεδίο.....	48
4.2.3 Ζώνη Επιρροής Φρέατος	50
4.2.4 Σύγκλιση με την προχώρηση του μετώπου.....	51
4.3 ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	54
4.3.1 Εφαρμογή Αγκυρίων	54
4.3.2 Εφαρμογή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (shotcrete).....	56
4.3.2.1 Υλικά	57
4.3.2.2 Παράγοντες Επηρεασμού Εργασιμότητας	59
4.3.2.3 Μέθοδος Παρασκευής	61
4.3.2.4 Οπλισμός Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος	63
4.3.3 Τελική Επένδυση	65
4.3.4 Πρόσθετα Μέτρα	66
4.3.4.1 Πυράντοχες πλάκες (fire protection boards).....	66
4.3.4.2 Προσθήκη ειδικών πρόσθετων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	67
4.3.4.3 Έγχυτο σκυρόδεμα με ίνες πολυπροπυλενίου	67
4.4 ΦΑΣΕΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ.....	68
4.4.1 Κατασκευή Προφρέατος.....	68
4.4.2 Κύκλος Εργασιών Κύριας Βύθισης του Φρέατος.....	70
4.4.2.1 Εκσκαφή.....	71
4.4.2.2 Τοποθέτηση αγκυρίων	72
4.4.2.3 Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	73
4.4.2.4 Τοποθέτηση τελικής επένδυσης	75
4.4.2.5 Παρακολούθηση διάνοιξης	77
4.5 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	77
4.5.1 Εκσκαφέας.....	78
4.5.2 Διατρητικός Εξοπλισμός	83
4.5.3 Εξοπλισμός Εκτόξευσης Σκυροδέματος	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο	88

2D ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΦΡΕΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	88
5.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE ² της ROCSCIENCE.....	88
5.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	88
5.1.2 Προσομοίωση	89
5.1.3 Υπολογιστικό Περιβάλλον Phase ²	91
5.2 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ PHASE ²	92
5.2.1 Αναλυτική Επίλυση	92
5.2.2 Αριθμητική Επίλυση	95
5.2.2.1 Αποτελέσματα αναλύσεων Phase ²	97
5.2.3 Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Αναλυτικής και Αριθμητικής Μεθόδου	103
5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ – ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ στο PHASE ²	106
5.3.1 Αναλυτική Μέθοδος.....	106
5.3.2 Αριθμητική Μέθοδος	109
5.3.2.1 Παράμετροι προσομοιωμάτων.....	109
5.3.2.2 Κατασκευή προσομοιωμάτων σύγκλισης – αποτόνωσης.....	110
5.3.3 Ερμηνεία Καμπύλων Σύγκλισης – Αποτόνωσης	114
5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ στο PHASE ²	118
5.4.1 Κατασκευή Προσομοιωμάτων	118
5.4.2 Προσομοίωση Διάνοιξης του Φρέατος	121
5.4.2.1 Ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης	121
5.4.2.2 Αξονοσυμμετρική ανάλυση	124
5.4.3 Σχολιασμός Προσομοιωμάτων	131
5.4.4 Απόκριση Μέτρων Στήριξης.....	132
5.4.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 – Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45.....	133
5.4.4.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C35/45 – Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45.....	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο	146
ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΣ	146
6.1 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ	146
6.1.1 Ανθρώπινο Δυναμικό	146
6.1.2 Υπολογισμός Κόστους	147
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	148
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	151
Ελληνική – Ξένη Βιβλιογραφία.....	151
Διαδικτυακοί Ιστότοποι	152
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	153
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	153

Στρώμα Ρυοδακτιτικών λάβων Θηρασίας	153
Στρώμα Τόφφων	156
Στρώμα Κίσηρης	158
Στρώμα Ρυοδακτιτικών λάβων Αλωνάκι	161
Στρώμα Πυροκλαστικών	163

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΠΙΝΑΚΩΝ – ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1. Τοπίο καλδέρας της Σαντορίνης	1
Σχήμα 2.Χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου που δείχνει την ενεργό γεωδυναμική κατάσταση, τις κινήσεις των μικροπλακών στην περιοχή και την διαμόρφωση του Ελληνικού-Αιγαίου τόξου.....	5
Σχήμα 3.Χάρτης του Νοτίου Αιγαίου με τις πέντε σεισμο-ηφαιστειακές δομές, οι οποίες πιθανόν αντιστοιχούν σε κανονικές ρηξιγενείς ζώνες	6
Σχήμα 4. Α. Διασπορά σεισμικών επίκεντρων στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστειακού πεδίου της Σαντορίνης.....	6
Σχήμα 5.Χάρτης ενεργών ρηγμάτων της περιοχής του ηφαιστειακού πεδίου Σαντορίνης – Κολούμπο	7
Σχήμα 6.Οι τρεις κατηγορίες (III, II, I) ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες χωρίσθηκε ο Ελληνικός χώρος σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση (ΦΕΚ 1154B/12.8.2003)	8
Σχήμα 7.Κατανομή των επίκεντρων των σεισμών που σημειώθηκαν από 1/1/1964 μέχρι 21/10/2018	8
Σχήμα 8.Η θέση της Σαντορίνης στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου (επάνω δεξιά) και απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Σαντορίνης.	10
Σχήμα 9.Αναπαράσταση της δημιουργίας της Σαντορίνης έως την ύστερη εποχή του Χαλκού	11
Σχήμα 10. Γεωλογικός χάρτης Σαντορίνης (επάνω δεξιά), δομή και περιγραφή των πετρωμάτων στη περιοχή των Φηρών (Druitt)	15
Σχήμα 11.Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στα πρνή της καλδέρας στην περιοχή των Φηρών (Βουγιουκαλάκης).....	16
Σχήμα 12. Α. Κατανομή των πυροκλαστικών αποθέσεων κατά τον πρώτο και δεύτερο εκρηκτικό κύκλο (Journal of Volcanology and Geothermal Research). Το έργο βρίσκεται στη περιοχή των Φηρών στη περιοχή δειγματοληψίας S9(Simmons, Cas, Druitt, & Folkes, 2016) ...	17
Σχήμα 13.Μηκοτομή του πρνού της καλδέρας στο σημείο του έργου.	18
Σχήμα 14.Τοποθεσίες των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν	19
Σχήμα 15.Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σ_{ci}	21
Σχήμα 16.Υπολογισμός RQD	21
Σχήμα 17.Χαρακτηρισμός απόστασης ασυνεχειών.....	22
Σχήμα 18.Τυπικά προφίλ τραχύτητας και οι αντίστοιχες τιμές JRC	23
Σχήμα 19.Ταξινόμηση ασυνεχειών σύμφωνα με το άνοιγμα	23

Σχήμα 20.Θέσεις εισόδου και εξόδου	32
Σχήμα 21.Θέση εξόδου του φρέατος	33
Σχήμα 22.Κάτοψη φρέατος	34
Σχήμα 23.Εξοπλισμός VSM.....	40
Σχήμα 24.Τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος.....	41
Σχήμα 25.Μέθοδος Raiseboring.....	45
Σχήμα 26.Εύρος εφαρμογής εξοπλισμού RBR της εταιρείας Herrenknecht AG	46
Σχήμα 27.Αποτόνωση αστήρικτης και στηριζόμενης ελαστικής βραχομάζας (σύμφωνα με τον Baudendistel, 1985)	49
Σχήμα 28.Ζώνη επιρροής μεγάλης (I) και μικρής (II) σήραγγας (Σοφιανός, 2015).....	50
Σχήμα 29.Καμπύλες μετατόπισης κατά μήκος της σήραγγας σύμφωνα με τους Panet και Chern.....	52
Σχήμα 30.Καμπύλη LDP (Vlachopoulos and Diederichs, 2009)	53
Σχήμα 31.Παθητικό αγκύριο συνεχούς σπειρώματος (ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ)	55
Σχήμα 32.Απλό αγκύριο ολόσωμης πάκτωσης με τσιμεντένεμα	55
Σχήμα 33.Διαδικασία εκτόξευσης σκυροδέματος υγρής μίξης	62
Σχήμα 34.Δικτυωτά πλαίσια τριών και τεσσάρων (διαμήκων) ράβδων.....	64
Σχήμα 35.Όψη φρέατος από το εσωτερικό (Φρέαρ Ρολόι σταθμού Πειραιά μετρό Αθήνας) .	69
Σχήμα 36.Κάτοψη συστοιχίας πασσάλων.....	69
Σχήμα 37.Κολάρο ασφαλείας φρέατος (Φρέαρ Ρολόι σταθμού Πειραιά μετρό Αθήνας)	70
Σχήμα 38.Παράλληλη εκσκαφή και αποκομιδή σε κυκλικό φρέαρ.	72
Σχήμα 39.Κάτοψη προσωρινής υποστήριξης φρέατος	73
Σχήμα 40.Τοποθέτηση δικτυωτού πλαισίου σε δομικό πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ..	74
Σχήμα 41.Ψεκασμός τελικής στρώσης σκυροδέματος.....	74
Σχήμα 42.Σύνδεση σήραγγας - φρέατος.....	75
Σχήμα 43.Τοποθέτηση μεμβράνης στεγανοποίησης	76
Σχήμα 44. Σκυροδέτηση τελικής επένδυσης φρέατος	76
Σχήμα 45.Τεχνικά χαρακτηριστικά εκσκαφέα R924C της Liebherr	79
Σχήμα 46.Α) Εκσκαφέας με βραχίονα 3,2 m και μπούμα 3,03 m Β) Εκσκαφέας με βραχίονα 4,2 m και μπούμα 3,30 m.....	80
Σχήμα 47.Διαστάσεις εκσκαφέα ανάλογα με το μέγεθος του βραχίονα	80
Σχήμα 48.Εκσκαψιμότητα με βραχίονα 3,2 m και μπούμα 3,03 m.....	81
Σχήμα 49.Εκσκαψιμότητα με βραχίονα 4,2 m και μπούμα 3,30 m.....	82
Σχήμα 50.Διατρητικός εξοπλισμός Dino DC400Ri της Sandvik.....	83
Σχήμα 51.Διαστάσεις εξοπλισμού Dino DC400Ri	84
Σχήμα 52.Εύρος απόστασης διάτρησης Dino DC400Ri.....	84
Σχήμα 53.Ρομπότ ψεκασμού σκυροδέματος Minimec της Normet.	85
Σχήμα 54.Τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού Minimec της Normet	86
Σχήμα 55.Διαστάσεις εξοπλισμού Minimec της Normet	87
Σχήμα 56.Εύρος κίνησης βραχίονα εκτόξευσης Minimec της Normet.....	87
Σχήμα 57.Διαδικασία επίλυσης φυσικού προβλήματος	89
Σχήμα 58.Αναπαράσταση αξόνων x, y, z	90
Σχήμα 59.Αξονοσυμμετρική ανάλυση στο χώρο.....	91
Σχήμα 60.Αλληλεπίδραση υποπρογραμμάτων Phase ²	92
Σχήμα 61.Παράμετροι εξισώσεων του Kirsch	93
Σχήμα 62.Πλαστική ζώνη γύρω από άνοιγμα κυκλικής διατομής σε υδροστατικό εντατικό πεδίο.....	108
Σχήμα 63. Στάδιο 1 ^ο φυσικό εντατικό πεδίο.....	110

Σχήμα 64. Προσομοίωμα Ρυοδακτικικών λαβών Θηρασίας στο 2 ^ο στάδιο, έχει γίνει η εκσκαφή και εφαρμόζεται η $p_i = 1,47 \text{ MPa}$	111
Σχήμα 65. Προσομοίωμα Τόφφων στο 2 ^ο στάδιο για $p_i = 2,72 \text{ MPa}$	112
Σχήμα 66. Προσομοίωμα Κίσσηρης στο 2 ^ο στάδιο για $p_i = 0,16 \text{ MPa}$	112
Σχήμα 67. Προσομοίωμα Ρυοδακτικικών λαβών Αλωνάκι στο 2 ^ο στάδιο, με $p_i = 5,76 \text{ MPa}$...	113
Σχήμα 68. Προσομοίωμα Πυροκλαστικά στο 2 ^ο στάδιο για $p_i = 1,77 \text{ MPa}$	114
Σχήμα 69. Αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα φρέατος	120

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Μηχανικές παράμετροι βραχομάζας	19
Πίνακας 2. Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1989)	25
Πίνακας 3. Προσανατολισμός ασυνεχειών σε σήραγγα	25
Πίνακας 4. Προδιαγραφές ανελκυστήρων	36
Πίνακας 5. Προδιαγραφές κυλιόμενων κλιμάκων	37
Πίνακας 6. Ταξινόμηση της εξορυξιμότητας πετρώματος με βάση τους δείκτες σημειακής φόρτισης Is50 και ασυνέχειας If (Petifer and Fookes, 1994) (Σοφινός, 2018)	38
Πίνακας 7. Δείκτης σημειακής φόρτισης Is50 και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS	39
Πίνακας 9. Λόγος χ/R , μετακίνηση δι και μέγιστης μετακίνηση di^∞ κατά Chern και Panet	52
Πίνακας 10. Λόγος χ/R , ακτίνα πλαστικής ζώνης R_{pm} , μετακίνηση u_i και μέγιστη μετακίνηση $u_i \text{ max}$ κατά Vlachopoulos and Diederichs	53
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά απλών αγκυριών κατηγορίας B500C (ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ)	56
Πίνακας 12. Κατηγορίες συνεκτικότητας (EN 206 - 1) δοκιμής κάθισης (EN 12350 - 2)	60
Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά δομικού πλέγματος T188	63
Πίνακας 14. Πρότυπες διατομές δικτυωτών πλαισίων τριών και τεσσάρων ράβδων (Pantex, ALWAG ΤΕΧΝΟ)	65
Πίνακας 8. Τιμές εντατικού πεδίου p_0 και κρίσιμης πίεσης p_i	108
Πίνακας 15. Εσωτερική πίεση p_i και εντατικό πεδίο p_0	109
Πίνακας 16. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (ρυοδακτικές λάβες Θηρασίας)	111
Πίνακας 17. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (τόφφοι)	111
Πίνακας 18. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (κίσσηρης)	112
Πίνακας 19. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (ρυοδακτικές λάβες Αλωνάκι)	113
Πίνακας 20. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (πυροκλαστικά)	113

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Γράφημα 1. Θερμοκρασία Σαντορίνης	27
Γράφημα 2. Κατάσταση καιρού Σαντορίνης	28
Γράφημα 3. Μέγιστη θερμοκρασία Σαντορίνης	28
Γράφημα 4. Ποσότητα υετού Σαντορίνης	29
Γράφημα 5. Ταχύτητα ανέμου Σαντορίνης	29
Γράφημα 6. Ροδόγραμμα ανέμου Σαντορίνης	30
Γράφημα 7. Προσομοίωμα επίπεδης ανάλυσης πυροκλαστικών ($p_0 = 2,175 \text{ MPa}$)	95
Γράφημα 8. Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικής ανάλυσης πυροκλαστικών ($p_0 = 2,175 \text{ MPa}$)	96
Γράφημα 9. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 σε $p_0 = 2,175 \text{ MPa}$ (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	97
Γράφημα 10. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_0 = 2,175 \text{ MPa}$ (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	97

Γράφημα 11.Συνολικές μετακινήσεις σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	98
Γράφημα 12.Μέγιστη κύρια τάση σ_z σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης	98
Γράφημα 13. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης	99
Γράφημα 14. Συνολικές μετακινήσεις σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης	99
Γράφημα 15. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	100
Γράφημα 16. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	100
Γράφημα 17. Συνολικές μετακινήσεις σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης	101
Γράφημα 18. Μέγιστη κύρια τάση σ_z σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης.....	101
Γράφημα 19. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης	102
Γράφημα 20. Συνολικές μετακινήσεις $p_o = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης.....	102
Γράφημα 21. Εφαπτομενική τάση $\sigma_{\theta\theta}$ ελαστικού μέσου	103
Γράφημα 22. Ακτινική τάση σ_{rr} ελαστικού μέσου	103
Γράφημα 23. Ακτινικές μετακινήσεις u_{rr} ελαστικού μέσου	104
Γράφημα 24. Εφαπτομενική τάση σ_{θ} ελαστοπλαστικού μέσου	104
Γράφημα 25. Ακτινική τάση σ_r ελαστοπλαστικού μέσου	104
Γράφημα 26. Ακτινικές μετακινήσεις u_r ελαστοπλαστικού μέσου.....	105
Γράφημα 27.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Ρυοδακτιικές λάβες Θηρασίας	116
Γράφημα 28.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Τόφοι	116
Γράφημα 29.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Κίσσηρης	116
Γράφημα 30.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Ρυοδακτιικές λάβες Αλωνάκι.....	117
Γράφημα 31.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Πυροκλαστικά	117
Γράφημα 32. Στάδιο 1 ^ο εκσκαφή – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	121
Γράφημα 33. Στάδιο 2 ^ο αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 5cm – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	122
Γράφημα 34. 3 ^ο πρόσθεση στρώσης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm με δομικό πλέγμα – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	122
Γράφημα 35. Στάδιο 4 ^ο πρόσθεση στρώσης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm με δικτυωτά πλαίσια – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	123
Γράφημα 36. Στάδιο 5 ^ο πρόσθεση τελικής επένδυσης οπλισμένο σκυρόδεμα 10 cm– συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	123
Γράφημα 37. Στάδιο 6 ^ο αφαίρεση προσωρινής επένδυσης – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)	124
Γράφημα 38. Αξονική δύναμη αγκυρίων (επίπεδη ανάλυση)	124
Γράφημα 39. Στάδιο 1 ^ο φυσικού εντατικού πεδίου – αρχικές συνθήκες (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	125
Γράφημα 40. Στάδιο 2 ^ο εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 1 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	125
Γράφημα 41. Στάδιο 3 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 5 cm και συγχρόνως εκσκαφή 2 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	126

Γράφημα 42. Στάδιο 4 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 3 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	126
Γράφημα 43. Στάδιο 5 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 4 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	127
Γράφημα 44. Στάδιο 52 ^ο ολοκλήρωση προσωρινής υποστήριξης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	127
Γράφημα 45. Στάδιο 53 ^ο τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα της 1 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	128
Γράφημα 46. Στάδιο 102 ^ο ολοκλήρωση τελικής επένδυσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση) ...	128
Γράφημα 47. Στάδιο 103 ^ο αφαίρεση προσωρινής υποστήριξης 1 ^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	129
Γράφημα 48. Στάδιο 153 ^ο τελική επένδυση (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	129
Γράφημα 49. Στάδιο 19 ^ο μέγιστη κύρια τάση σ_z (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	130
Γράφημα 50. Στάδιο 19 ^ο ελάχιστη τάση σ_3 (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	130
Γράφημα 51. Στάδιο 19 ^ο συνολικές μετακινήσεις (αξονοσυμμετρική ανάλυση)	131
Γράφημα 52. Στάδιο 12 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c25/30	133
Γράφημα 53. Στάδιο 52 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 25/30	134
Γράφημα 54. Στάδιο 102 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 25/30	134
Γράφημα 55. Στάδιο 15 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30	135
Γράφημα 56. Στάδιο 52 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30	135
Γράφημα 57. Στάδιο 102 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30	135
Γράφημα 58. Στάδιο 102 ^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	136
Γράφημα 59. Στάδιο 120 ^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	136
Γράφημα 60. Στάδιο 120 ^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	137
Γράφημα 61. Στάδιο 120 ^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	137
Γράφημα 62. Στάδιο 153 ^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	137
Γράφημα 63. Στάδιο 20 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c25/30 με δομικό πλέγμα)	138
Γράφημα 64. Στάδιο 52 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δομικό πλέγμα)	139
Γράφημα 65. Στάδιο 102 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δομικό πλέγμα)	139
Γράφημα 66. Στάδιο 20 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)	139
Γράφημα 67. Στάδιο 52 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)	140
Γράφημα 68. Στάδιο 102 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)	140
Γράφημα 69. Στάδιο 153 ^ο τελική επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45	140
Γράφημα 70. Στάδιο 52 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δομικό πλέγμα)	141
Γράφημα 71. Στάδιο 102 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δομικό πλέγμα)	142
Γράφημα 72. Στάδιο 52 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δικτυωτό πλαίσιο)	142
Γράφημα 73. Στάδιο 102 ^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δικτυωτό πλαίσιο)	143
Γράφημα 74. Στάδιο 52 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 35/45	143
Γράφημα 75. Στάδιο 102 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 35/45	144

Γράφημα 76. Στάδιο 52 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c 35/45	144
Γράφημα 77. Στάδιο 102 ^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c 35/45	144
Γράφημα 78. Στάδιο 153 ^ο τελική επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45.....	145
Γράφημα 79. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0,735$ στο 2 ^ο στάδιο)	153
Γράφημα 80. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0,735$ στο 2 ^ο στάδιο)	153
Γράφημα 81. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0,735$ στο 2 ^ο στάδιο)	154
Γράφημα 83. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	154
Γράφημα 84. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	154
Γράφημα 85. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	155
Γράφημα 86. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο).....	155
Γράφημα 87. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 1,36$ στο 2 ^ο στάδιο)	156
Γράφημα 88. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 1,36$ στο 2 ^ο στάδιο)	156
Γράφημα 89. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 1,36$ στο 2 ^ο στάδιο)	156
Γράφημα 91. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	157
Γράφημα 92. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	157
Γράφημα 93. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	157
Γράφημα 94. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο).....	158
Γράφημα 95. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0,16$ στο 2 ^ο στάδιο)	158
Γράφημα 96. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0,16$ στο 2 ^ο στάδιο)	158
Γράφημα 97. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0,16$ στο 2 ^ο στάδιο).....	159
Γράφημα 98. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0,16$ στο 2 ^ο στάδιο).....	159
Γράφημα 99. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	159
Γράφημα 100. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	160
Γράφημα 101. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	160
Γράφημα 102. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο).....	160
Γράφημα 103. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 2,88$ στο 2 ^ο στάδιο)	161
Γράφημα 104. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 2,88$ στο 2 ^ο στάδιο)	161
Γράφημα 105. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 2,88$ στο 2 ^ο στάδιο).....	161
Γράφημα 107. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	162
Γράφημα 108. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	162
Γράφημα 109. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	162
Γράφημα 110. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο).....	163
Γράφημα 111. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 1,77$ στο 2 ^ο στάδιο)	163
Γράφημα 112. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 1,77$ στο 2 ^ο στάδιο)	163
Γράφημα 113. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 1,77$ στο 2 ^ο στάδιο)	164
Γράφημα 114. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 1,77$ στο 2 ^ο στάδιο)	164
Γράφημα 115. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	164
Γράφημα 116. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	165
Γράφημα 117. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο)	165
Γράφημα 118. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10 ^ο στάδιο).....	165

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΘΗΡΑΪΚΗ ΓΗ

Το ηλιοβασίλεμα είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τον μύθο της Σαντορίνης. Ο λόγος για τον οποίο το κυκλαδονήσι με τα λευκά σπίτια έχει επανειλημμένα ψηφιστεί ως ο πιο δημοφιλής προορισμός της Ευρώπης και αποτελεί αδιαμφισβήτητα έναν από τους κορυφαίους ταξιδιωτικούς προορισμούς παγκοσμίως. Το έτος του 2018 δυο εκατομμύρια τουρίστες υπολογίζεται ότι επισκέφθηκαν τη Σαντορίνη, οι οποίοι μαγνητίστηκαν από την ομορφιά ενός τόπου που μεταμορφώθηκε από το ηφαιστειο το οποίο εξερράγη το 1613 π.Χ. και το οποίο πιστεύεται ότι ενέπνευσε τον Πλάτωνα για τον μύθο της Ατλαντίδας.



Σχήμα 1. Τοπίο καлдέρας της Σαντορίνης

Το νησί έχει φθάσει στην κορυφή από πλευράς τουριστικής δραστηριότητας. Η σεζόν ξεκινά στις αρχές της άνοιξης και τελειώνει στις αρχές του χειμώνα, με διάρκεια 8 μηνών, ενώ το ετήσιο κέρδος υπολογίζεται ότι ξεπερνά το ένα δισ. ευρώ. Η καλπάζουσα αύξηση του τουρισμού έχει συνεισφέρει σημαντικά στην οικονομική άνθιση της Σαντορίνης. Συγχρόνως, όμως, αναδύεται στην επιφάνεια το πρόβλημα του τουριστικού κορεσμού.

1.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Το νησί αντιμετωπίζει πλέον «αστικού τύπου» προβλήματα, όπως ένα ανυπόφορο κυκλοφοριακό και ζήτημα επάρκειας νερού. Η ζήτηση οδηγεί σε συνεχή ανοικοδόμηση του νησιού, η πυκνότητα της οποίας συγκρίνεται πλέον με την Αττική, αφού έχει καλυφθεί κατά 18% από δόμηση, ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό της Αττικής. Με την αξιοζήλευτη επιμήκυνση της τουριστικής περιόδου, οι εργαζόμενοι μένουν στο νησί, με αποτέλεσμα ο αριθμός των μόνιμων κατοίκων να ανέρχεται σε 25.000 από 10.000 σε λιγότερο από μια πενταετία.

Το πρόβλημα εντείνει ο μεγάλος αριθμός κρουαζιερόπλοιων χωρίς χρονικό προγραμματισμό καθημερινά, με δεκάδες χιλιάδες ολιγόωρους επισκέπτες. Η εμπειρία λόγω υψηλού συνωστισμού υποβαθμίζεται, τόσο κατά τη διάρκεια της αποβίβασης και της μεταφοράς όσο και της μετακίνησης στους χώρους ενδιαφέροντος, κυρίως στα Φηρά και την Οία. Οι ανεπαρκείς υποδομές (λιμάνι, αεροδρόμιο, δρόμοι) και κακές υπηρεσίες μεταφορών (ταξί, λεωφορεία, τελεφερίκ) σε συνδυασμό με τον υψηλό μεταφορικό φόρτο δημιουργούν συνωστισμό και δυσφορία στους μετακινούμενους, τουρίστες και κατοίκους.

Ο δήμος Θήρας, για την καλύτερη διαχείριση του κόσμου, επέβαλλε το τελευταίο έτος τον περιορισμό των 8.000 επισκεπτών ημερησίως από την κρουαζιέρα, με βάση μελέτη που ανέθεσε στο πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Η ανάβαση των τουριστών στα Φηρά γίνεται μέσω του τελεφερίκ καθώς τα κρουαζιερόπλοια δένουν στο παλαιό λιμάνι των Φηρών (Γιαλός). Το τελεφερίκ της Σαντορίνης κατασκευάστηκε το 1982 με δωρεά του εφοπλιστή Ευάγγελου Πέτρου Νομικού. Διαθέτει δυναμικότητα 600 επιβατών ανά ώρα και η διαδρομή έχει διάρκεια 3 λεπτά. Συνεπώς, η ομαλή μεταφορά των 8.000 ατόμων ημερησίως είναι πρακτικά αδύνατη. Επιπλέον, η λειτουργία του τελεφερίκ επηρεάζεται άμεσα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες που επικρατούν με κύριες παραμέτρους την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η ανάγκη ύπαρξης εξειδικευμένου προσωπικού, για την εύρυθμη λειτουργία του και την αποφυγή του εγκλωβισμού των επιβατών σε περίπτωση βλάβης καθώς ο εξοπλισμός είναι παλαιωμένος, συνθέτουν μια εμπειρία ιδιαίτερας δυσάρεστη για οποιονδήποτε επιβάτη.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τίθεται, λοιπόν, ως επιτακτική η ανάγκη αναμόρφωσης των υποδομών του νησιού με μόνιμη λύση του ζητήματος της κυκλοφοριακής συμφόρησης, για την ορθή εξυπηρέτηση τόσο των τουριστών όσο και των κατοίκων της Σαντορίνης.

Η παρούσα διπλωματική διατριβή έχει κύριο μέλημα την πρόταση εναλλακτικής λύσης του προβλήματος του τουριστικού κορεσμού, που βασίζεται στη μελέτη των γεωμηχανικών παραμέτρων του χερσαίου περιβάλλοντος του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης στη περιοχή των Φηρών. Κύριοι άξονες της εργασίας αποτελούν η ανάλυση της κατασκευής ενός υπόγειου συστήματος μεταφοράς των επιβατών και η παρουσίαση ενός προσομοιώματος σε όσο το δυνατόν πλησιέστερες πραγματικές γεωτεχνικές συνθήκες.

Το υπόγειο σύστημα μεταφοράς έχει ως αφετηρία το λιμένα των Φηρών όπου βρίσκεται η είσοδος της υπόγειας σήραγγας. Κατά μήκος της οριζόντιας σήραγγας, οι επιβάτες διανύουν μια μικρή απόσταση μέσω κυλιόμενων διαδρόμων. Το πέρας της σήραγγας συνδέεται με κατακόρυφο φρέαρ το οποίο παραλαμβάνει τους επιβάτες και τους μεταφέρει με ανελκυστήρες, τάχιστα στο προορισμό της πόλης των Φηρών.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την κατασκευή του φρέατος, το οποίο θα αποτελέσει το τμήμα της ανέλκυσης των επιβατών. Το σύστημα ανελκυστήρων είναι ικανό να μεταφέρει 1500 άτομα ωριαίως ενώ υπάρχει η δυνατότητα επιπλέον επέκτασης με τη δυναμικότητα να αυξάνεται στα 2250 άτομα την ώρα. Ταυτόχρονα, προβλέπεται η κατασκευή του υπόγειου χώρου στάθμευσης πολλαπλών ορόφων που ικανοποιεί τον παράγοντα της αποσυμφόρησης του συνόλου του νησιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

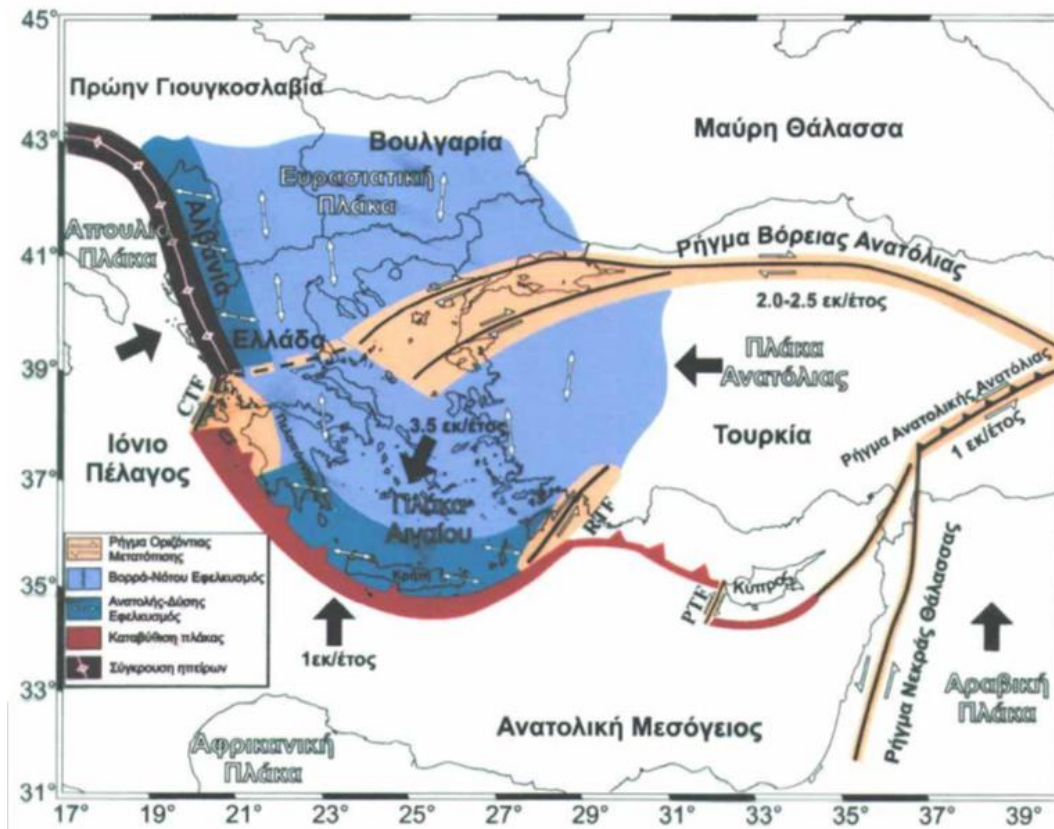
2.1 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Το νησί βρίσκεται στο νότιο Αιγαίο πέλαγος και ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων. Βρίσκεται ανάμεσα στην Ίο και την Ανάφη, 63 ναυτικά μίλια βόρεια της Κρήτης. Η έκταση του νησιού είναι 73 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Απέχει 134 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά και 68 από το λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης. Η θέση της ως σταθμού στις θαλάσσιες επικοινωνίες ανάμεσα στην Κρήτη και την ηπειρωτική Ελλάδα και τα υπόλοιπα κυκλαδίτικα νησιά αλλά και η ηφαιστειακή της προέλευση του εδάφους της από την άλλη καθορίζουν την εξέλιξη του νησιού από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Το νησί ονομαζόταν Στρογγυλή λόγω του σχήματός του, αλλά μετά την τεράστια έκρηξη του ηφαιστείου, τον 17ο αιώνα π.Χ., το κεντρικό της τμήμα καταβυθίστηκε δημιουργώντας την εντυπωσιακή καλντέρα. Σήμερα η Σαντορίνη είναι ένα από τα διασημότερα τουριστικά κέντρα του κόσμου. Είναι επίσης γνωστή για το νεότερο ηφαίστειο της Ελλάδας και από τα πιο ενεργά ηφαίστεια της Ευρώπης με τελευταία ηφαιστειακή δραστηριότητα να σημειώνεται το 1950.

2.1.1 Γεωδυναμικό Πλαίσιο Ελληνικού Χώρου

Στον ελληνικό χώρο έχουμε την σύγκλιση-σύγκρουση της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας με την Αφρικανική πλάκα, με αποτέλεσμα την καταβύθιση του ωκεάνιου φλοιού της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Από το Μέσο Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα, δηλαδή εδώ και 1 εκατομμύριο χρόνια, ο αιγαιακός χώρος βρίσκεται σε μια εκτεταμένη εφελκυστική φάση με κύρια διεύθυνση εφελκυσμού Β-Ν, η οποία επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση των μηχανισμών γένεσης επιφανειακών σεισμών.

Τα ρήγματα στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου έχουν διάφορους προσανατολισμούς, όμως οι διευθύνσεις διαρρήξεων επάνω έχουν σχεδόν σταθερό προσανατολισμό κατά τη διεύθυνση Β-Ν, ιδιότητα η οποία βρίσκεται σε συμφωνία με την άποψη ότι η λιθόσφαιρα του Αιγαίου επεκτείνεται (διαστέλλεται) κατά την ίδια διεύθυνση. Εξαιρεση παρατηρείται μόνο στην περιοχή της λεκάνης του βόρειου Αιγαίου και της βόρειας Τουρκίας (ρήγμα Ανατολίας), όπου επικρατεί δεξιόστροφη κίνηση της μεγάλης ρηξιγενούς ζώνης της Ανατολίας που αποτελείται από δεξιόστροφα ρήγματα, διεύθυνσης με μικρή κανονική ή ανάστροφη συνιστώσα (Κατσένης, 2012).

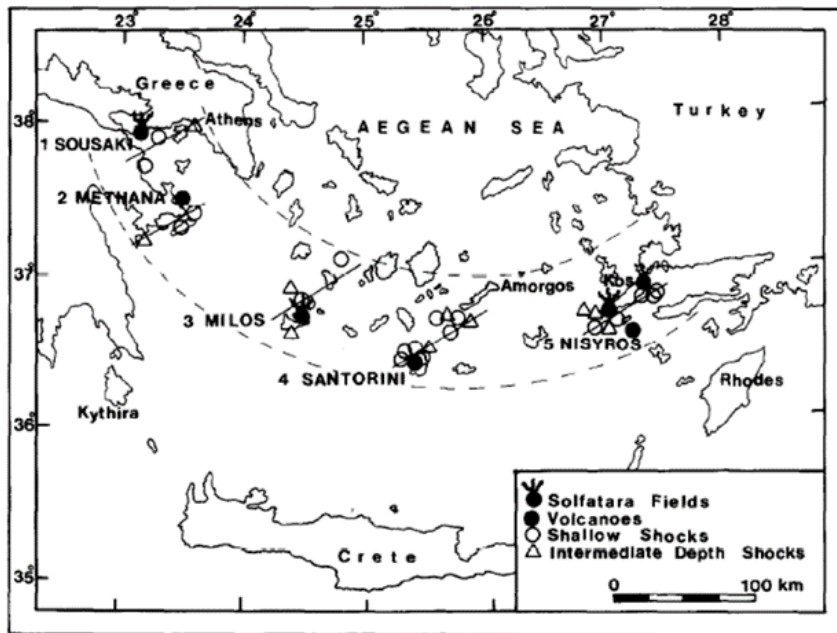


Σχήμα 2.Χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου που δείχνει την ενεργό γεωδυναμική κατάσταση, τις κινήσεις των μικροπλακών στην περιοχή και την διαμόρφωση του Ελληνικού-Αιγαίου τόξου

Αν και η σχετική κίνηση του Αιγαίου ως προς την Ευρασία είναι νοτιοδυτική με ταχύτητα περίπου 4 εκ./έτος, η σχετική διαστολή είναι περίπου 1 εκ./έτος. Ολόκληρη η περιοχή του Αιγαίου παραμορφώνεται κατά 3 εκ./έτος στο βόρειο τμήμα του, 1-2 εκ./έτος στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και 2 εκ./έτος στο νότιο Αιγαίο κατά μήκος της τάφρου της Ανατολίας-βόρειου Αιγαίου. Αποτέλεσμα της καείσδυσης της αφρικανικής πλάκας κάτω από τη μικροπλάκα του Αιγαίου είναι και η δημιουργία πολλών ηφαιστείων ασβεσταλκαλικής σύστασης, τα οποία αποτελούν το ηφαιστειακό τόξο του νότιου Αιγαίου.

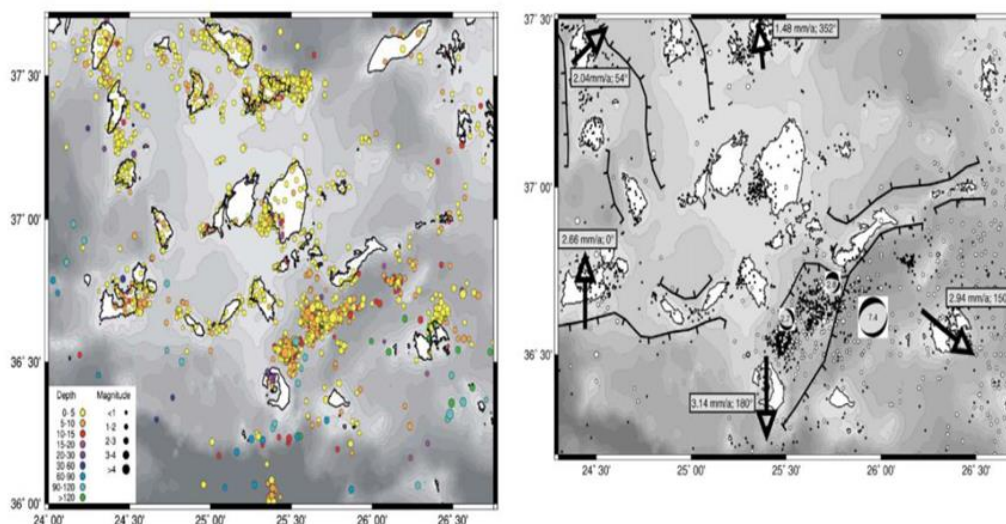
2.1.2 Σεισμικότητα

Το ηφαιστειακό τόξο έχει μήκος 500 km και πλάτος 20 – 40 km και εκτείνεται από την ηπειρωτική Ελλάδα μέχρι την Τουρκία. Στο ελληνικό ηφαιστειακό τόξο περιλαμβάνονται τα ηφαιστειακά κέντρα των Μεθάνων, της Μήλου, της Θήρας, της Νισύρου και της Κώ. Το ηφαιστειακό τόξο αναπτύσσεται παράλληλα με το εξωτερικό τόξο και 150 – 200 km πάνω από την ζώνη καταβύθισης.



Σχήμα 3.Χάρτης του Νοτίου Αιγαίου με τις πέντε σεισμο-ηφαιστειακές δομές, οι οποίες πιθανόν αντιστοιχούν σε κανονικές ρηξιγενείς ζώνες

Τα επίκεντρα των σεισμών (επιφανειακοί και ενδιάμεσου βάθους) στο ηφαιστειακό τόξο βρίσκονται πάνω σε 5 παράλληλες γραμμές οι οποίες περνούν από τα πέντε ηφαιστειακά κέντρα (Σουσάκι – Μέθανα – Μήλος – Σαντορίνη - Νίσυρος). Οι γραμμές αυτές αντιστοιχούν στις διευθύνσεις πέντε κανονικών ρηγμάτων στα οποία εντοπίζονται επιφανειακοί σεισμοί καθώς και διάχυση ηφαιστειακού υλικού. Οι πέντε ζώνες διάρρηξης βρίσκονται σε βάθος 120-150 km. Η διασπορά των σεισμικών επίκεντρων στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης δεν είναι τυχαία αλλά σχετίζεται με την τεκτονική ρηξιγενή δομή.



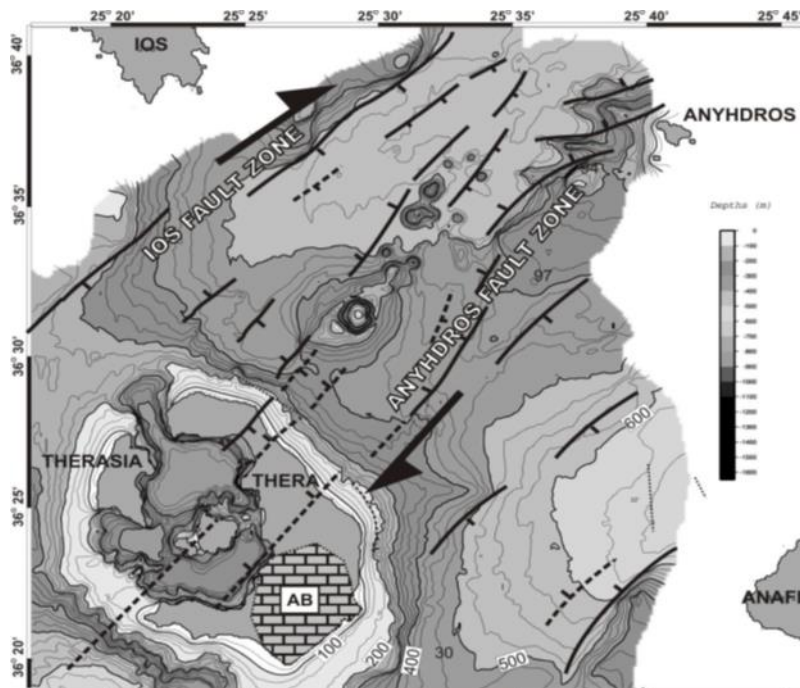
Σχήμα 4. Α. Διασπορά σεισμικών επίκεντρων στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστειακού πεδίου της Σαντορίνης

Β. Κύριες ρηξιγενείς δομές στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστειακού πεδίου της Σαντορίνης

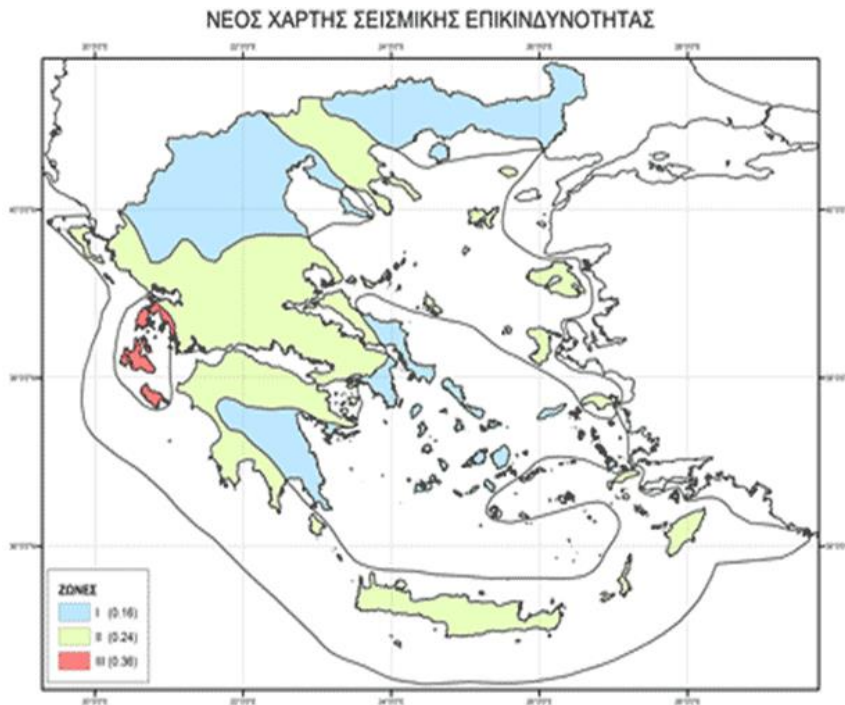
Στη Σαντορίνη το 1995 ιδρύθηκε το Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου Σαντορίνης (ΙΜΠΗΣ). Στόχος του παρατηρητηρίου είναι η προώθηση της ηφαιστειολογικής έρευνας, η συνεισφορά στην καλύτερη εκτίμηση του ηφαιστειακού κινδύνου και η έγκαιρη πρόβλεψη τυχόν επαναδραστηριοποίησης του ηφαιστείου καθώς και η διάψευση τυχόν αναίτιων συναγερμών και φημολογιών σχετικά με το ηφαίστειο της Σαντορίνης. Τα άτομα που δραστηριοποιούνται είναι καθηγητές και ερευνητές από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, το Πανεπιστήμιο Πατρών, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω, στο νησί λειτουργούν τέσσερα δίκτυα παρακολούθησης. Αυτά είναι :

- Χημική Παρακολούθηση
- Θερμική Παρακολούθηση
- Σεισμική Παρακολούθηση
- Τοπογραφική Παρακολούθηση (Στάθμης της θάλασσας και Γεωδαιτική)

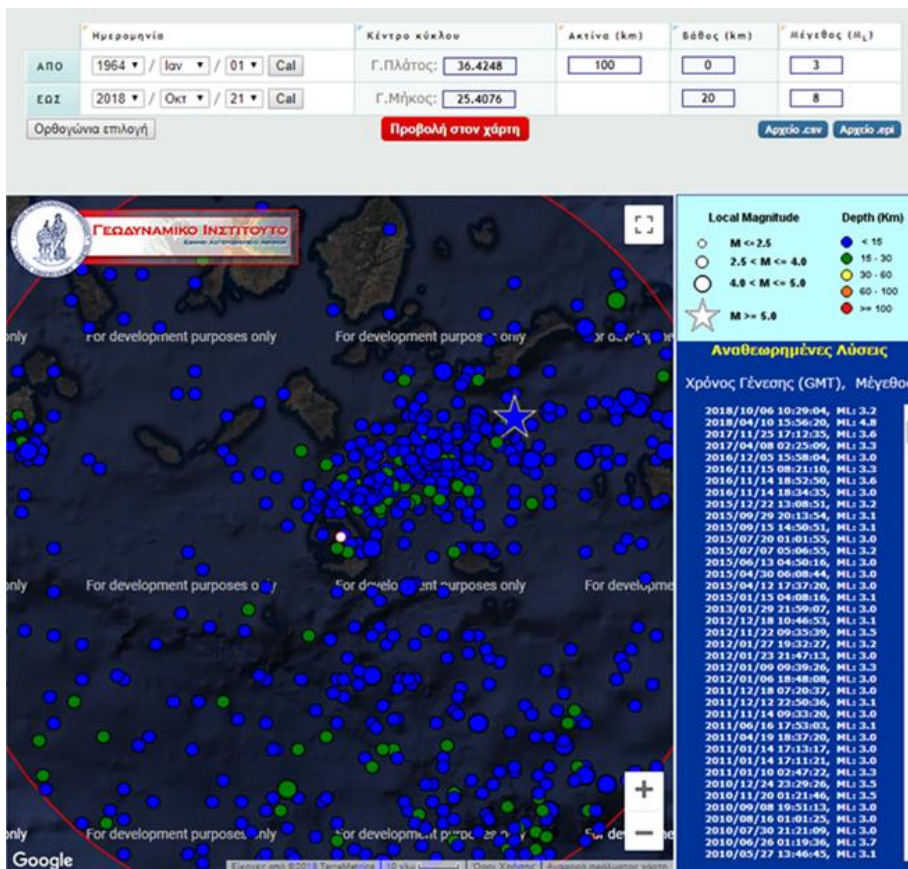
Από συστηματική θαλάσσια, γεωλογική έρευνα και χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής γύρω από την Σαντορίνη, διαφαίνεται ότι η Γραμμή Καμένης – Κολούμπο αποτελεί μία ρηξιγενή ζώνη οριζόντιας ολίσθησης, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για την άνοδο του μάγματος σε όλα τα ηφαιστειακά κέντρα της Σαντορίνης.



Σχήμα 5.Χάρτης ενεργών ρηγμάτων της περιοχής του ηφαιστειακού πεδίου Σαντορίνης – Κολούμπο



Σχήμα 6. Οι τρεις κατηγορίες (III, II, I) ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες χωρίστηκε ο Ελληνικός χώρος σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση (ΦΕΚ 1154B/12.8.2003)



Σχήμα 7. Κατανομή των επίκεντρων των σεισμών που σημειώθηκαν από 1/1/1964 μέχρι 21/10/2018

Η ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης κατατάσσεται στην κατηγορία II ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή η αναμενόμενη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους είναι 235 cm/sec^2 . Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000 όπως τροποποιήθηκε ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003), οι τιμές εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού είναι $A=a \cdot g$ με g την επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/sec}^2$) και είναι οι εξής :

- 0,16g για τη ζώνη I
- 0,24g για τη ζώνη II
- 0,36g για τη ζώνη II

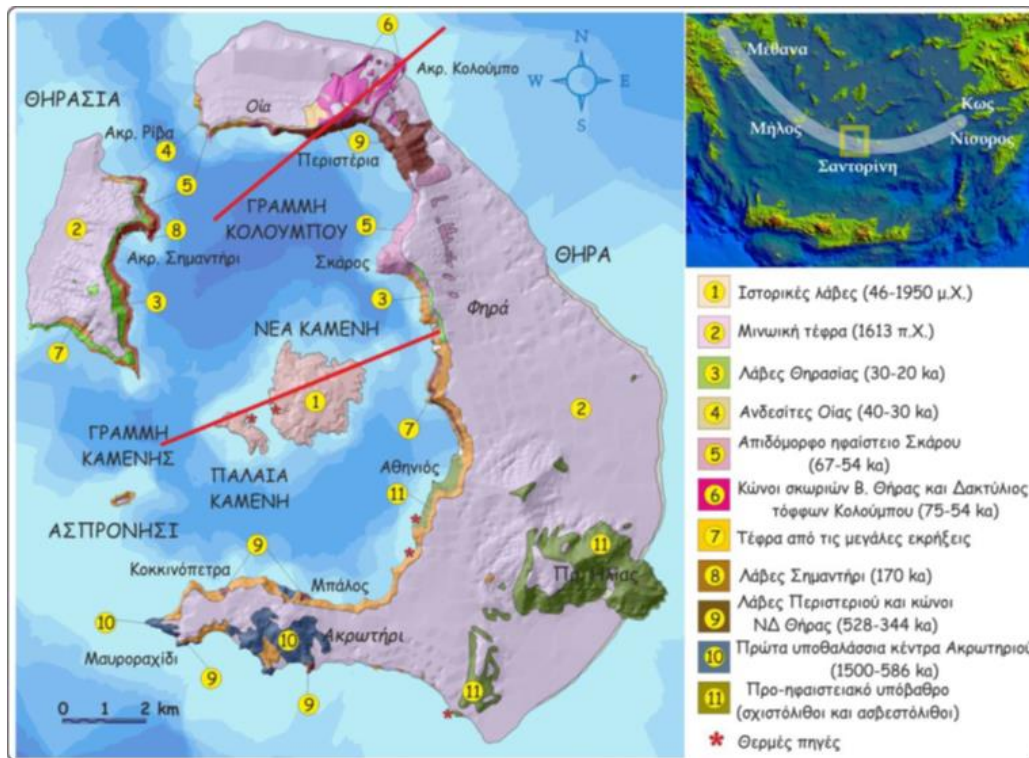
Η κινητική ενέργεια που εκλύεται από ένα σεισμό, αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα εκδήλωσης εδαφικής αστοχίας, ειδικά όταν συντρέχουν παράμετροι όπως οι κλιματικές συνθήκες, οι ισχυρές μορφολογικές κλίσεις των πρανών και τα ασθενή γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Το νησί της Σαντορίνης παρουσιάζει μέτρια σεισμική επικινδυνότητα. Από τις καταγραφές του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών κατά τα τελευταία 54 χρόνια, φαίνεται πως σε ακτίνα 100 km γύρω από το νησί έχουν σημειωθεί μόνο 9 σεισμικές δονήσεις τοπικού μεγέθους ίσου ή μεγαλύτερου των 4,5 Richter καθώς οι υπόλοιπες εκ του συνόλου είναι της τάξης των 3,3 Richter. Το εστιακό βάθος είναι συνήθως μικρότερο των 15 km, κατατάσσοντάς τους στους επιφανειακούς σεισμούς.

2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

Η Σαντορίνη αποτελεί ένα πολυσύνθετο στρωματοηφαίστειο και ένα από τα πιο βίαια εκρηκτικά ηφαίστεια του κόσμου. Το ύψος της καλδέρας κυμαίνεται από 150 έως 350 μέτρα. Η τεράστια καταστροφική έκρηξη που εκδηλώνεται στη Σαντορίνη την Ύστερη Εποχή του Χαλκού, η μεγαλύτερη έκρηξη ηφαιστείου που εκδηλώνεται στον πλανήτη τα τελευταία 10.000 χρόνια, αποθέτει τεράστιους όγκους τέφρας που καλύπτουν και ουσιαστικά διατηρούν τα τεκμήρια της ιδιαίτερα αναπτυσσόμενης κοινωνίας που είχε αναπτυχθεί στο νησί εκείνη την περίοδο. Η γεωλογική – ηφαιστειολογική έρευνα αναπτύσσεται ιδιαίτερα στο νησί, συμβαδίζοντας κατά κάποιο τρόπο με την αρχαιολογική και ιστορική έρευνα. Ένα σημαντικό τμήμα της εστιάζει στη μελέτη των προϊόντων της έκρηξης αυτής, με στόχους τη χρονολόγησή της, τη λεπτομερή ανακατασκευή της εξέλιξής της, την εκτίμηση των επιπτώσεών της στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, της Ανατολικής Μεσογείου και του πλανήτη.

Το προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο της Σαντορίνης εμφανίζεται στο βουνό του Προφήτη Ηλία, στο Μέσα Βουνό, στην ράχη του Γαβρήλου, στον Πύργο, τον Μονόλιθο και το εσωτερικό κομμάτι της καλδέρας ανάμεσα στο ακρωτήριο

Πλάκα και τον Αθηνιό. Τα πετρώματα αυτά αντιπροσωπεύουν ένα παλιό μη ηφαιστειακό νησί, ηλικίας μεγαλύτερης των 100 εκατομμυρίων ετών, παρόμοιο με τα γειτονικά κυκλαδονήσια της Ίου και της Ανάφης. Εμφανίζονται μεταμορφωμένα ασβεστολιθικά πετρώματα και σχιστόλιθοι από το Τριαδικό ως το Τριτογενές, τα οποία πτυχώθηκαν κατά την Αλπική πτύχωση (Βουγιουκαλάκης).



Σχήμα 8. Η θέση της Σαντορίνης στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου (επάνω δεξιά) και απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Σαντορίνης.

2.2.1 Ηφαιστειότητα

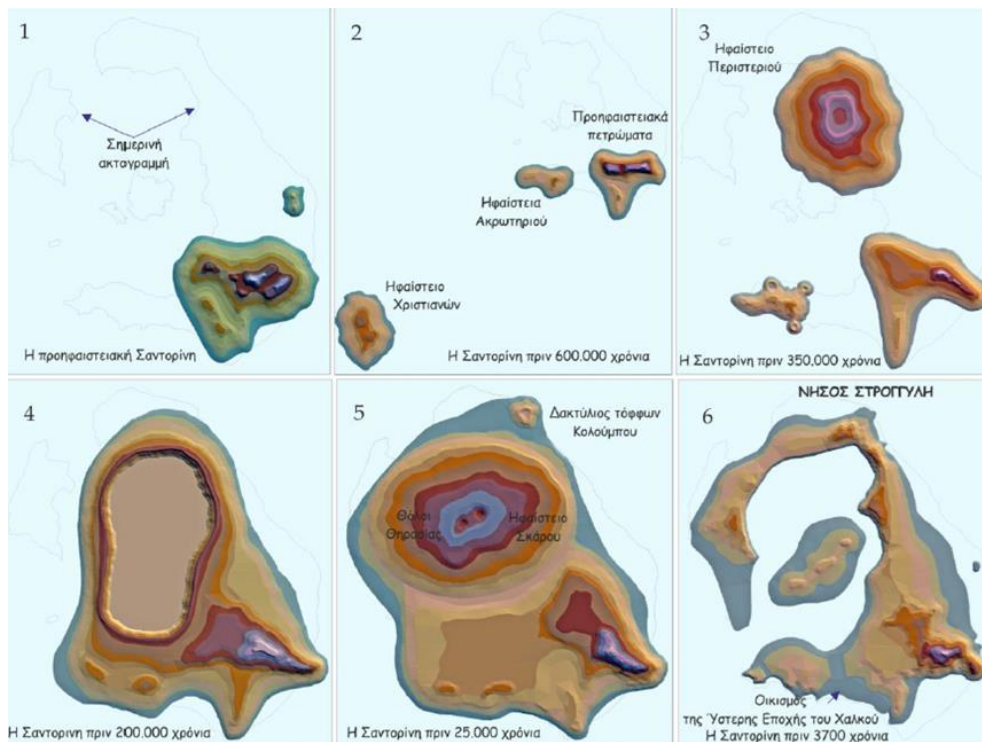
Τη θέση των ηφαιστειακών κέντρων στην περιοχή την ελέγχει μια βαθιά τεκτονική γραμμή, ένα μεγάλο ρήγμα στο φλοιό της γης το οποίο ξεκινά από τα Χριστιανά και καταλήγει στην Αμοργό. Αυτή είναι η κύρια βαθιά δίοδος, η οποία επιτρέπει στο μάγμα να ανέλθει στην επιφάνεια. Το ρήγμα αυτό παραμένει ενεργό μέχρι σήμερα και είναι εκείνο το οποίο έδωσε το μεγαλύτερο μικρού βάθους σεισμό του αιώνα στο Αιγαίο, το σεισμό του 1950 που κατέστρεψε μεγάλο μέρος των οικισμών της Σαντορίνης. Κοντά στην επιφάνεια το ρήγμα διακλαδίζεται σε δύο κύριες ηφαιστειοτεκτονικές ενεργές γραμμές, τη γραμμή Κολούμπου και τη γραμμή Καμένης. Κατά μήκος αυτών των γραμμών εντοπίζονται τα κέντρα όλων των ηφαιστειακών δράσεων τουλάχιστον τα τελευταία 200.000 χρόνια.

Η ηφαιστειότητα στην περιοχή της Σαντορίνης ξεκίνησε πριν από 2,5 εκατομμύρια χρόνια με την εκροή ρυοδακίτικης λάβας από την περιοχή που βρίσκεται σήμερα η χερσόνησος του Ακρωτηρίου ενώ συνέχιζε να παράγει διαφορετικά είδη λάβας και άλλων πυροκλαστικών υλικών. Ωστόσο, ο πιο χαρακτηριστικός τύπος της δραστηριότητας τα τελευταία 200.000 χρόνια είναι η κυκλική κατασκευή ασπιδόμορφων ηφαιστειών που διακόπτεται από μεγάλες εκρήξεις και καταστροφικά φαινόμενα όπως η Μινωική έκρηξη.

Πιο συγκεκριμένα η ηφαιστειακή εξέλιξη της Σαντορίνης μπορεί να χωριστεί σε 5 βασικά στάδια:

- Τα ηφαίστεια του Ακρωτηρίου και κώνοι σκωριών
- Τα ηφαίστεια στα Περιστερία και της Θήρας
- Πρώτος κύκλος εκρήξεων
- Δεύτερος κύκλος εκρήξεων
- Η ασπίδα της Καμένης

Περίπου κάθε 20.000 χρόνια από τότε εκδηλώνεται ένα τεράστιο εκρηκτικό γεγονός που πινάζει δισεκατομμύρια τόνους ηφαιστειακής τέφρας στον αέρα. Ο κύκλος καταστροφής και ανοικοδόμησης του ηφαιστείου επαναλήφθηκε στη Σαντορίνη 12 φορές τα τελευταία 360.000 χρόνια. Έτσι, ενώ τα παχιά στρώματα της τέφρας πιστοποιούν τις μεγάλες εκρήξεις, οι όγκοι των συμπαγών λαβών που ενδιαστρώνονται σε αυτά είναι μάρτυρες της οικοδόμησης των ηφαιστειακών κέντρων τα οποία κατόπιν κατακρημνίστηκαν από τις εκρήξεις.



Σχήμα 9. Αναπαράσταση της δημιουργίας της Σαντορίνης έως την ύστερη εποχή του Χαλκού

2.2.2 Ηφαιστειακοί Κύκλοι

1) Ηφαίστεια Ακρωτηρίου – Χριστιανών

Τα παλαιότερα ηφαιστειακά πετρώματα βρίσκονται στην περιοχή του Ακρωτηρίου και των Χριστιανών. Αποτελούνται από δακτιλικές λάβες, οι οποίες με την μορφή θόλων εξήλθαν από τον θαλάσσιο πυθμένα και σχημάτισαν τα νησιά των Χριστιανών και πιθανότατα ένα νησί στην περιοχή του Ακρωτηρίου. Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι έντονα αλλοιωμένα από την υδροθερμική δράση. Οι πλέον αξιόπιστες ηλικίες, όπως προέκυψε από ραδιοχρονολόγηση των πρώτων χερσαίων λαβών με τη μέθοδο του καλίου – αργού, είναι μεταξύ 645.000 και 585.000 ετών πριν το παρόν (π.π.).

2) Ηφαίστειο Περιστερίου

Στη συνέχεια, η ηφαιστειακή δράση μετατοπίζεται βορειότερα, στην περιοχή μεταξύ της σημερινής Θηρασίας και της βόρειας Θήρας. Εκεί οικοδομείται ένα μεγάλο ασπιδόμορφο ηφαίστειο μεταξύ 530.000 και 430.000 ετών π.π., το ηφαίστειο του Περιστεριού. Σήμερα τα υπολείμματα αυτού του ηφαιστείου αντιπροσωπεύονται από το Μικρό Προφήτη Ηλία και το Μεγάλο Βουνό. Τα προϊόντα είναι ανδεσιπικές λάβες. Συγχρόνως μικρότερα ηφαιστειακά κέντρα δραστηριοποιούνται νοτιότερα στον Μπάλο, Κόκκινη Παραλία και Κοκκινόπετρα σχηματίζοντας κώνους σκωριών βασαλτικής και ανδεσιπικής σύστασης.

3) Πρώτος Κύκλος Εκρήξεων : Ηφαίστειο Θήρας

Στα 350-250 Κα δημιουργείται το ασπιδόμορφο ηφαίστειο της Θήρας, περίπου στο κέντρο της σημερινής καлдέρας, με εκχύσεις λαβών, οι οποίες ένωσαν τα προηγούμενα ηφαιστειακά κέντρα σχηματίζοντας ένα ενιαίο νησί. Το ηφαίστειο της Θήρας δημιουργεί επίσης ένα κύκλο ηφαιστειακών εκρήξεων Πλίνιου τύπου με προϊόντα σκωρίες και κίσηρη (κατώτερη κίσηρη). Τα προϊόντα είναι ανδεσιπικής έως ρυοδακτιλικής σύστασης. Ο κύκλος αυτός και η δραστηριότητα του ηφαιστείου της Θήρας κλείνει περίπου στα 200-180Κα με τον σχηματισμό μιας πρώτης καлдέρας. Τα υπολείμματα από αυτή την καλδέρα αποτυπώνονται στους απότομους βράχους κάτω από τα Φηρά όπου μια ασυνέχεια χωρίζει τις αποθέσεις της ενότητας από τα ανώτερα στρώματα.

4) Δεύτερος Κύκλος Εκρήξεων

Μετά τα 180Κα ακολουθεί ένας άλλος κύκλος ηφαιστειακής δράσης ο οποίος κλείνει με την μεγάλη Μινωική έκρηξη και τον σχηματισμό της σημερινής καλδέρας. Τα προϊόντα είναι βασαλτικής- ανδεσιτικής σύστασης.

5) Μινωική Έκρηξη

Η σημερινή μορφή του νησιού της Σαντορίνης είναι αποτέλεσμα της βίαιης δραστηριότητας του ηφαιστείου στα προϊστορικά χρόνια. Στην πραγματικότητα το νησί οφείλει την ύπαρξή του στο ηφαίστειο. Η τελευταία μεγάλη έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης έγινε πριν 3.600 χρόνια (Μινωική έκρηξη) δηλαδή στο τέλος της εποχής του χαλκού. Η έκρηξη αυτή κατέστρεψε ένα μεγάλο νησί την Στρογγύλη, υπόλειμμα της οποίας αποτελεί σήμερα η Σαντορίνη. Κατά την Μινωική έκρηξη εξήντα εκατομμύρια κυβικά μέτρα ισοδύναμου ξηρού πετρώματος (Dry Rock Equivalent – DRE) (Sigurdsson et al, 2006) από μάγμα σε μορφή καυτής ελαφρόπετρας και στάχτης εκσφενδονίστηκαν στον αέρα σε ύψος 36 χιλιομέτρων πάνω από το νησί, σκεπάζοντας τα τρία νησιά (Θήρα, Θηρασία και Ασπρονήσι). Τα στερεά και τα αέρια που εκτοξεύτηκαν από το ηφαίστειο δημιούργησαν ένα μεγάλο κενό μέσα στο οποίο καταποντίστηκε το κεντρικό του τμήμα δημιουργώντας την σημερινή καλδέρα. Η Μινωική έκρηξη μελετήθηκε λεπτομερώς από πολλούς επιστήμονες και είναι από τις καλύτερα μελετημένες ηφαιστειακές εκρήξεις. Με βάση τα προϊόντα της έκρηξης διακρίνονται τέσσερις φάσεις. Το κέντρο της έκρηξης εντοπίζεται ανάμεσα από τα σημερινά Φηρά και την Νέα Καμένη.

Μινωική Α

Είναι η πρώτη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε αποθέσεις κίσηρης. Οι αποθέσεις αποτελούνται κατά 90% από ανδρόκοκκα κλάσματα λευκής κίσηρης με ρυοδακινική σύσταση (71% SiO₂) και κατά 10% από στάχτη και λιθικά. Οι αποθέσεις προέρχονται από την κατάρρευση της εκρηκτικής στήλης ύψους 36 – 39 km. Η φάση της έκρηξης ήταν προωθούμενη από τα μαγματικά αέρια. Το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 0,5-5m και καλύπτει ομοιόμορφα την προ-Μινωική επιφάνεια του νησιού.

Μινωική Β

Είναι η δεύτερη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε μεγα-πυροκλαστικές αποθέσεις. Οι αποθέσεις αποτελούνται από πολυάριθμα λευκά στρώματα που αποτελούνται κατά 90% από λεπτόκοκκη στάχτη με αποστρογγυλεμένα λιθάρια κίσηρης και κατά 10 – 20% από λιθικά τεμάχια και ογκόλιθους (1 – 2m). Οι αποθέσεις προέρχονται από υδροηφαιστειακές εκρήξεις. Οι ρωγμές και η διάβρωση στον ηφαιστειακό πόρο επέτρεψαν στο θαλασσινό νερό να

εισχωρήσει και να προκαλέσει βίαιες εκρήξεις που κονιορτοποιήσαν το μάγμα και εκτόξευσαν μεγάλα λιθικά θραύσματα. Το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 0,1 – 12m. Κοντά στο κέντρο της έκρηξης οι πυροκλαστικές αποθέσεις έχουν αποθεθεί σε πρηνή με κλίσεις 10 – 30 ° και ύψος 200 – 400m. Χαρακτηριστικές είναι οι διασταυρούμενες δομές των στρώσεων, οι ρυτιδώσεις και οι θίνες καθώς και τα βαθουλώματα που σχηματίζουν τα λιθικά στα χαλαρά υλικά που δείχνουν βαλλιστική μεταφορά.

Μινωική Γ

Είναι η τρίτη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε ροές στάχτης. Οι αποθέσεις αποτελούνται από παχιά στρώματα λεπτόκοκκης στάχτης και κίσηρης που περιέχουν 25 – 30% λιθικά μεγέθους έως και 10m. Έχουν χαοτική και μη ταξινομημένη διάταξη. Το πάχος των αποθέσεων είναι μεγαλύτερο σε τοπογραφικά χαμηλές περιοχές. Στα πρηνή της καλδέρας το μέγιστο πάχος είναι 40m. Η πληθώρα των λιθικών οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την φάση αυτή άρχισε η κατάρρευση του μαγματικού θαλάμου και ο σχηματισμός της καλδέρας.

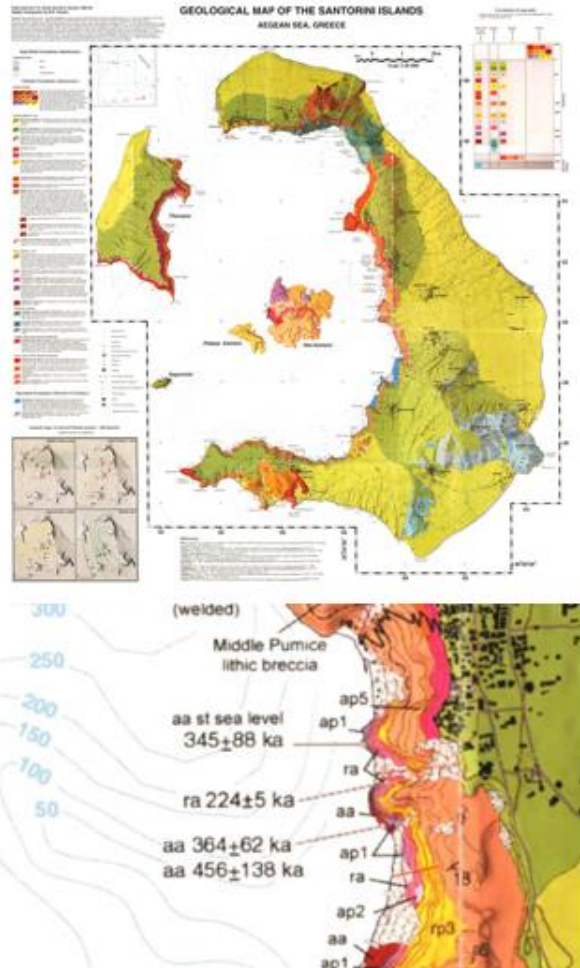
Μινωική Δ

Αυτή είναι η τέταρτη φάση της έκρηξης. Οι αποθέσεις της φάσης αυτής διαφέρουν από αυτές της τρίτης φάσης. Αποτελούνται από πιο λεπτόκοκκα υλικά που περιέχουν μικρά λιθικά και κλάσματα κίσηρης. Η συγκέντρωση όμως των λιθικών είναι μεγαλύτερη (34 – 50%). Οι αποθέσεις στα πρηνή της καλδέρας έχουν μικρό πάχος (0.7 – 2m) ή λείπουν. Τα υλικά της τέταρτης φάσης είναι επεξεργασμένα υλικά της τρίτης φάσης από πλημμύρες κατά την δημιουργία της καλδέρας, από βροχές, τσουνάμι και ανέμους.

2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΦΗΡΩΝ

2.3.1 Στρωματογραφία

Η ασυνέχεια και η πολυπλοκότητα της σχέσης των σχηματισμών είναι προφανής και οφείλεται τόσο στην ιδιαιτερότητα των ηφαιστειακών αποθέσεων, όσο και σε ηφαιστειοτεκτονικά γεγονότα (καλδερικά βυθίσματα κλπ). Για το λόγο αυτό η παρέκταση των σχηματισμών προς το εσωτερικό, κάτω από τα Φηρά, απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη και πολύ καλή γνώση της γεωλογίας του χώρου και των πιθανών σχέσεων των σχηματισμών στο χώρο.

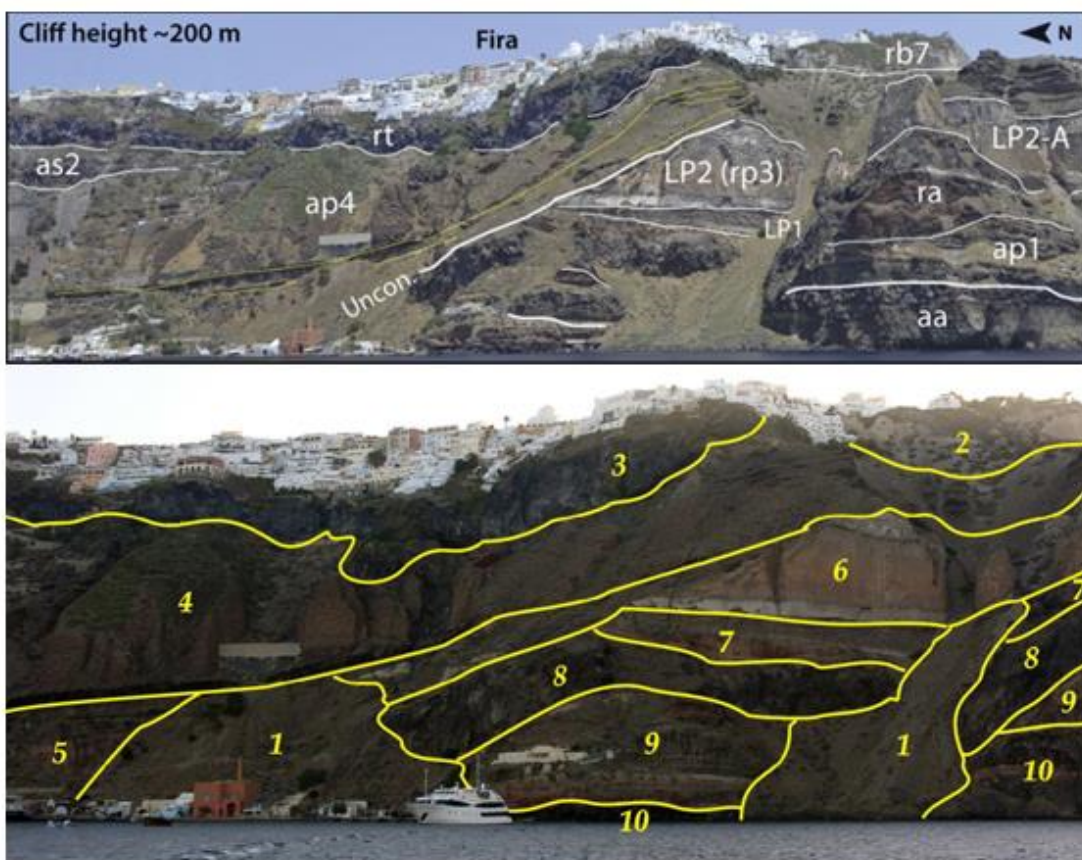


Σχήμα 10. Γεωλογικός χάρτης Σαντορίνης (επάνω δεξιά), δομή και περιγραφή των πετρωμάτων στη περιοχή των Φηρών (Druitt)

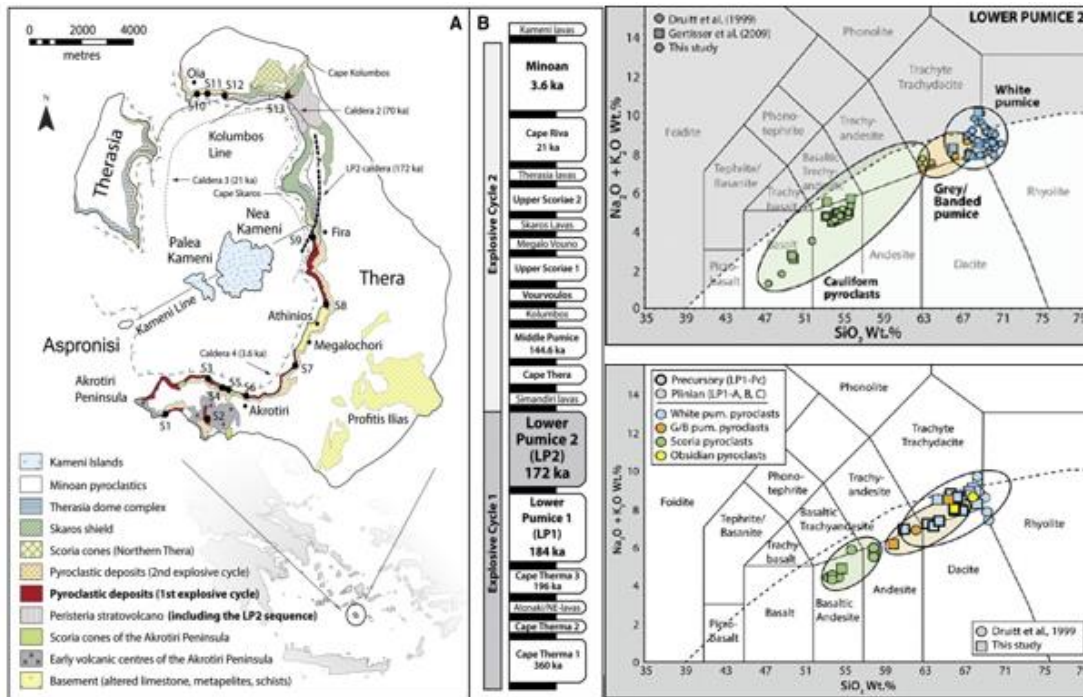
Στο πρανές της καλδέρας του ηφαιστείου της Σαντορίνης, ανάντη του λιμένα των Φηρών, εμφανίζονται μια σειρά από σχηματισμούς του ηφαιστειακού συμπλέγματος της Σαντορίνης. Η δομή των γεωλογικών σχηματισμών είναι σύνθετη με σημαντική τεκτονική παραμόρφωση. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη περιοχή του έργου αποτελούν ηφαιστειακά πετρώματα του Τεταρτογενούς. Η στρωματογραφία κατά ηλικιακή σειρά (από τα νεότερα προς τα παλαιότερα) είναι η εξής :

- Εκχύσεις ρουοδακτικικών λαβών Θηρασίας (3/rt). Εμφανίζονται στα ανώτερα μέρη των τοιχωμάτων της καλδέρας με πάχος 50 m.
- Σχηματισμός ενδιάμεσων τόφφων πυροκλαστικών υλικών (4/ap4). Πρόκειται για μια ακολουθία, η οποία περιλαμβάνει συνεχείς επαναλήψεις από κίσηρη, σκωρίες, ιγνιμπρίτες, λατυποπαγή, τέφρα και εν γένει πυροκλαστικών πετρωμάτων, πάχους έως 40 m περίπου. Ανήκει στο δεύτερο εκρηκτικό κύκλο και περιλαμβάνει τη λεγόμενη μέση σειρά κίσηρης.

- Ρυοδακτική κατώτερη σειρά κίσηρης (6,7/rp3). Περιλαμβάνει δύο μέλη που διακρίνονται καθώς μεταξύ των εκρήξεων έλαβε χώρα διάβρωση, ανήκουν όμως στον πρώτο εκρηκτικό κύκλο. Το ανώτερο μέλος περιλαμβάνει αποθέσεις υπόλευκης ερυθρωπής κίσηρης, με πάχος που κυμαίνεται 20 - 30 m. Περιέχει λιθάρια, τέφρα και λάβες ασυγκόλλητες. Το κατώτερο μέλος περιλαμβάνει πυροκλαστικά (9/ap1) πετρώματα ερυθρωπού χρώματος, πάχους 30 – 50 m. Τα δυο μέλη διαχωρίζονται από μια λεπτή απόθεση εκσφενδονισμένης λευκής κίσηρης πάχους 2 m. Συνολικά, το πάχος είναι 70 m περίπου.
- Εκχύσεις ρυοδακτικών λαβών Αλωνάκι (8/ra). Εμφανίζονται στα κατώτερα μέρη των τοιχωμάτων της καλδέρας με πάχος 40 m.



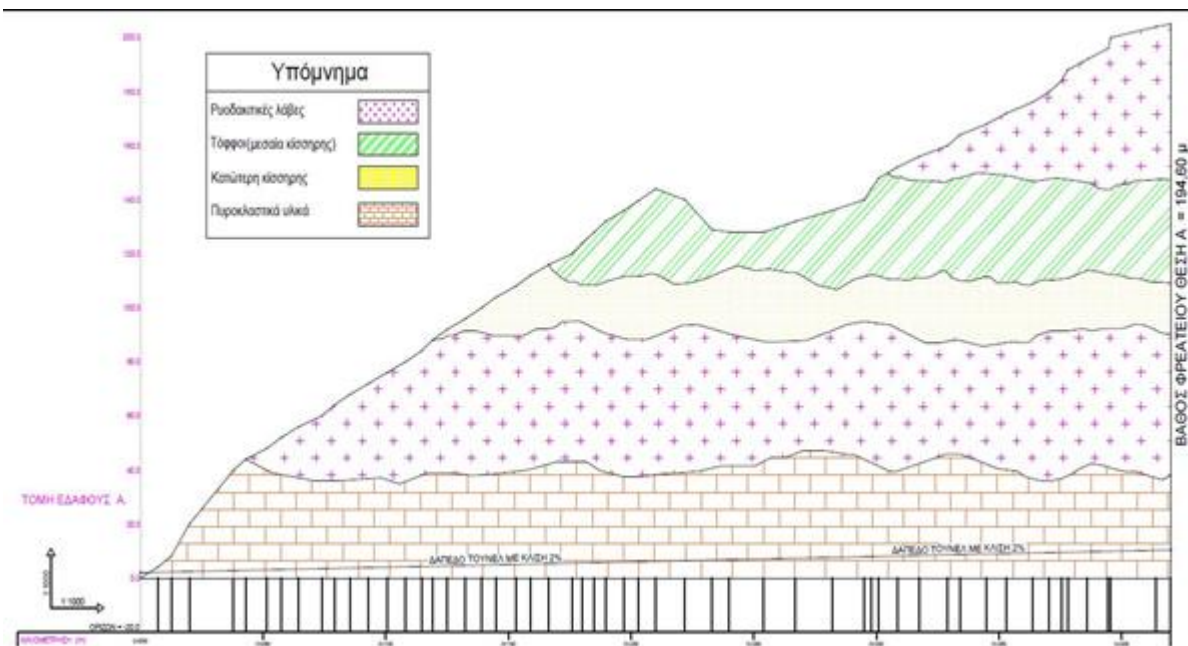
Σχήμα 11. Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στα πρηνή της καλδέρας στην περιοχή των Φηρών (Βουγιουκαλάκης)



Σχήμα 12. Α. Κατανομή των πυροκλαστικών αποθέσεων κατά τον πρώτο και δεύτερο εκρηκτικό κύκλο (Journal of Volcanology and Geothermal Research). Το έργο βρίσκεται στη περιοχή των Φηρών στη περιοχή δειγματοληψίας S9 (Simmons, Cas, Druitt, & Folkes, 2016)

Β. Διαγράμματα που απεικονίζουν το φάσμα της σύνθεσης των σειρών κίσηρης και των πυροκλαστικών αποθέσεων (μπλε σχήματα), όπως φαίνεται η σύσταση είναι ρυοδακίτικής φύσης (Simmons, Cas, Druitt, & Carey, 2017)

Η περιγραφή των πετρωμάτων που συναντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος βασίζεται στα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τους γεωλογικούς χάρτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME), των Druitt & Davies (1995) και τις βιβλιογραφικές αναφορές από την τεχνικογεωλογική έρευνα του ηφαιστειολόγου Γ.Βουγιουκαλάκη και άλλες διεθνείς πηγές. Η ακριβής αποτύπωση της στρωματογραφίας προς το εσωτερικό αποτελεί δύσκολο εγχείρημα εφόσον δεν έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις σε μεγάλο βάθος στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης. Μια προσέγγισή της επιχειρήθηκε, στην παρακάτω γεωλογική τομή. Η τομή σχεδιάστηκε με βάση τη τοπογραφία των χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), των γεωλογικών χαρτών του IGME και Druitt. Η μορφολογία των στρωμάτων αφορά αποθέσεις από τους επάλληλους εκρηκτικούς κύκλους του ηφαιστίου της Θήρας.



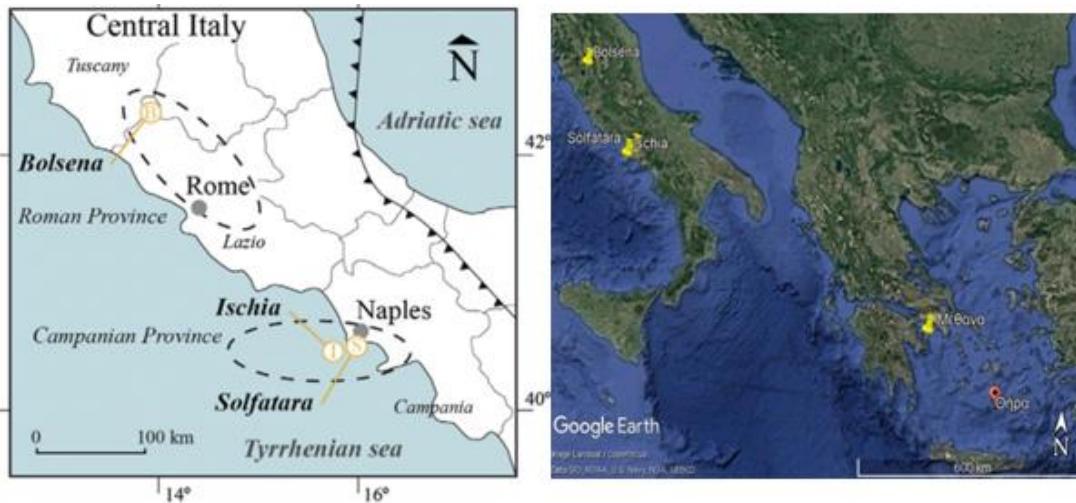
Σχήμα 13.Μηκτομή του πρανούς της καλδέρας στο σημείο του έργου.

2.3.2 Γεωτεχνικές Συνθήκες

Στον ελλαδικό χώρο αντίστοιχες εμφανίσεις πετρωμάτων πιθανόν να υπάρχουν στα ηφαιστειακά κέντρα των Μεθάνων, της Μήλου, της Θήρας, της Νισύρου και της Κώ που περιλαμβάνονται μαζί με τη Σαντορίνη στο ελληνικό ηφαιστειακό τόξο. Κατά τη διαδικασία αναζήτησης σχετικής βιβλιογραφίας και μελετών των μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων που συναντώνται στη περιοχή των Φηρών, βρέθηκαν ορισμένα στοιχεία από δοκιμές δειγμάτων από τη περιοχή των Μεθάνων. Έπειτα από εκτενή έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία επιλέχθηκαν τα στοιχεία από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ερευνών από δείγματα που βρίσκονται στην ευρύτερη ηφαιστειακή περιοχή της Νάπολης (Pola, Crosta, Fusi, & Castellanza, 2014). Ο χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων απορρέει από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, εφελκυσμού, και μονοαξονικής θλίψης σύμφωνα με τις τυπικές διαδικασίες (Pola, Crosta, Fusi, Barberini, & Norini, 2012).

Οι λιθολογίες των δειγμάτων που επιλέχθηκαν προς μελέτη αφορούν :

- Λάβες και πυροκλαστικά ρυοδακτικής σύστασης από τη περιοχή Σολφατάρα (Solfatarata).
- Τόφφοι από το νησί Ίσκια (Ischia).
- Πλινιακή κίσηρης από τη περιοχή της Μπολσένα (Bolsena).



Σχήμα 14. Τοποθεσίες των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των γεωμηχανικών παραμέτρων του άρρηκτου πετρώματος από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών παρόμοιων ηφαιστειακών πετρωμάτων της βιβλιογραφίας. Οι τιμές που λαμβάνουμε υπόψη για την ανάλυση του φρέατος είναι οι μέσες τιμές απομειωμένες ώστε να εκτιμήσουμε τα επιτόπου γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας στη περιοχή του έργου και την ανάλυση αυτών στις δυσμενέστερες συνθήκες. Η επιλογή αυτή γίνεται ώστε εφόσον έχει μελετηθεί το χειρότερο σενάριο και αντιμετωπισθούν τα ανάλογα προβλήματα ευστάθειας του φρέατος, δεν δύναται να τίθενται ζητήματα ασφάλειας σε μελλοντική διάνοση.

	UCS MPa	Ef50 GPa	TS MPa	Ef50 GPa	ν	C MPa	ϕ°	γ KN/m ³
Ρυοδακτικές λάβες Θ.	108,3-20,4	17,5-1,8	9,5-1,8	36,1-3,1	0,1	20,9-10,5	57-26	19,2
Τόφφοι	16,3-5	1,6-0,7	1,5-0,6	4-1,9	0,11	8,4-1,4	26-17	15,1
Κίσηρης	12-6,8	2-1,1	1,4-0,6	3,6-1	0,3	3,2-0,56	39-35	13,2
Ρυοδακτικές λάβες Αλ.	116,7-24	18,4-3	10,4-3	18,8-6,6	0,33	34,3-10,2	57-23	14,7
Πυροκλαστικά	13,3-7	1,6-0,74	2,6-0,8	3,4-1,2	0,13	2,8-0,2	28-19	14,5

Πίνακας 1. Μηχανικές παράμετροι βραχομάζας

Όπου,

- UCS, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε MPa
- Ef50, το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας σε GPa

- TS, η αντοχή σε εφελκυσμό σε MPa
- E_t50, το εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας σε GPa
- ν, ο λόγος poisson
- C, η συνοχή σε MPa
- φ°, η γωνία τριβής σε μοίρες
- γ, το ειδικό βάρος σε KN/m³

2.3.3 Ταξινόμηση Βραχομάζας

Η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας συνδυάζει τις σημαντικότερες παραμέτρους, που επηρεάζουν τη μηχανική της συμπεριφορά, ώστε να διαχωρίσει τη βραχομάζα σε κατηγορίες ποιότητας με κοινά μηχανικά χαρακτηριστικά. Έτσι, είναι δυνατή η συσχέτιση παρόμοιων γεωτεχνικών συνθηκών σε διαφορετικές περιοχές και η μεταφορά της εμπειρίας από προηγούμενα κατασκευασμένα έργα για την κατασκευή νέων έργων σε πετρώματα. Η αρχική φιλοσοφία γύρω από την δημιουργία των διαφόρων μεθόδων γεωτεχνικής ταξινόμησης είναι η εμπειρική εκτίμηση της υποστήριξης των υπόγειων τεχνικών έργων.

2.3.3.1 Το σύστημα ταξινόμησης RMR

Είναι το πρώτο σύστημα που λαμβάνει υπόψη καθαρά ποσοτικά κριτήρια ενώ συνδέεται και με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης σηράγγων. Κύρια εφαρμογή βρίσκει στη διάνοιξη σηράγγων και σε ορυχεία. Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating system - Bieniawski 1989) λαμβάνει υπόψη έξι παραμέτρους:

- την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος
- τον δείκτη RQD
- την απόσταση των ασυνεχειών
- την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
- τις συνθήκες υπόγειου νερού
- τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

1) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})

Η τιμή αυτή προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε άρρηκτο βραχώδες δοκίμιο κυλινδρικού συνήθως σχήματος. Η κατάταξη των πετρωμάτων με βάση τις τιμές αντοχής τους σε ανεμπόδιστη θλίψη δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Ασημομύτη, Μαρίνος, Χρηστάρας, & Βουδούρης, 2015).

Βαθμονόμηση	σ_{ci} (MPa)
Πολύ υψηλή αντοχή	>225
Υψηλή αντοχή	110-225
Μέση αντοχή	55-110
Χαμηλή αντοχή	30-55
Πολύ χαμηλή αντοχή	<30

Σχήμα 15.Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σ_{ci}

2) Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD)

Πρόκειται για ποσοτική εκτίμηση του βαθμού κερματισμού της βραχομάζας που υπολογίζεται άμεσα από βραχώδη δείγματα πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στο στάδιο της δειγματοληψίας. Εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Αθροίζονται οι πυρήνες όλων των βραχωδών τεμαχών μήκος μεγαλύτερου των 10cm και το συνολικό τους μήκος υπολογίζεται σε αναλογία του μήκους πυρηνοληψίας (Σχήμα 5.2). Με το RQD βαθμονομείται η βραχομάζα και δίνονται οι πρώτες πληροφορίες ως προς την ποιότητα του γεωυλικού. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μία ταξινόμηση του πετρώματος με βάση την ποιότητά του (Deere, 1963).

RQD (%)	Ποιότητα πετρώματος
90-100	Εξαιρετική
75-90	Καλή
50-75	Μέτρια
25-50	Πτωχή
0-25	Πολύ πτωχή



Σχήμα 16.Υπολογισμός RQD

3) Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Εκφράζει την κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ασυνεχειών, οι οποίες ανήκουν στο ίδιο σύστημα. Οι μετρήσεις της απόστασης γίνονται επιτόπου και θα πρέπει να γίνονται συστηματικά συμβάλλοντας έτσι στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ενδεικτική πληροφόρηση της απόστασης των ασυνεχειών παρέχει και το RQD. Η απόσταση των ασυνεχειών σε συνδυασμό και με την εμμονή τους (το μήκος που «τρέχουν» μέσα στο

πέτρωμα) καθορίζουν το μέγεθος των μεμονωμένων τεμαχών (block) της βραχομάζας. Η απόσταση χαρακτηρίζεται ως εξής :

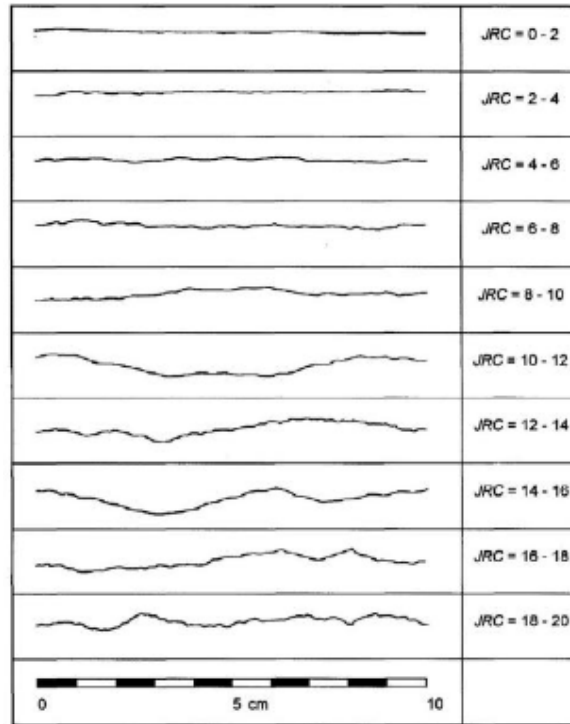
Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών
>2	Πολύ μεγάλη
0.6-2	Μεγάλη
0.2-0,6	Μέση
0.06-0,2	Μικρή
<0.06	Πολύ μικρή

Σχήμα 17.Χαρακτηρισμός απόστασης ασυνεχειών

4) Κατάσταση των ασυνεχειών

Αφορά όλα τα δεδομένα των επιφανειών των ασυνεχειών. Προκύπτει από παρατηρήσεις υπαίθρου σε πλήθος ασυνεχειών και σχετίζεται με την τραχύτητα, το άνοιγμα, την αποσάθρωση των τοιχωμάτων και το υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πιο συγκεκριμένα:

- Η τραχύτητα των ασυνεχειών συνδέεται άμεσα με την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Η φύση μιας ασυνέχειας μπορεί να έχει επίπεδη ή κυματοειδή μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις η επιφάνειά της θα είναι είτε λεία, είτε τραχεία ή ακόμα και ολισθηρή. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής στις ασυνέχειες εκφράζονται μέσω της γωνίας τριβής (ϕ) μιας και η συνοχή (c) τους είναι μηδενική. Η τραχύτητα περιγράφεται μέσω ενός εμπειρικού συντελεστή, του συντελεστή τραχύτητας JRC (Joint Roughness Coefficient). Είναι ο αριθμός που υπολογίζεται από τη σύγκριση μιας συγκεκριμένης ασυνέχειας με τυποποιημένα προφίλ, τα οποία φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 18.Τυπικά προφίλ τραχύτητας και οι αντίστοιχες τιμές JRC

- Το άνοιγμα μεταξύ δύο γειτονικών τοιχωμάτων μιας συγκεκριμένης ασυνέχειας ορίζεται ως η κάθετη απόσταση μεταξύ τους, η οποία μπορεί να είναι πληρωμένη με αέρα ή μόνο με νερό. Σε αντίθεση περίπτωση η ασυνέχεια λέγεται κλειστή. Ακόμα, μπορεί να είναι επουλωμένη με υλικό πλήρωσης όπως άργιλο, ιλύ, ασβεστίτη κ.α. Η παρουσία τέτοιου υλικού είναι καθοριστική στην διακύμανση της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας. Ακολουθώντας, φαίνεται η ημιποσοτική ταξινόμηση σύμφωνα με το άνοιγμα των ασυνεχειών, σύμφωνα με I.S.R.M., 1981:

Χαρακτηρισμός	Άνοιγμα (cm)
Πολύ κλειστές	0.01
Κλειστές	0.01-0.025
Μερικά ανοικτές	0.025-0.05
Ανοικτές	0.05-0.25
Μέτρια πλατιές	0.25-1
Πολύ πλατιές	1-10
Εξαιρετικά πλατιές	10-100

Σχήμα 19.Ταξινόμηση ασυνεχειών σύμφωνα με το άνοιγμα

- Υλικό πλήρωσης είναι το υλικό εκείνο που διαχωρίζει τα γειτονικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Όσο αυξάνεται το πάχος του υλικού με το οποίο είναι πληρωμένη η ασυνέχεια, τόσο μειώνεται η διατμητική της αντοχή.

5) Υδρογεωλογικές συνθήκες

Οι συνθήκες του υπόγειου νερού που επικρατούν στην περιοχή του υπόγειου έργου εκφράζονται ποιοτικά με την ύπαρξη ή μη υπόγειου νερού και ποσοτικά μέσω των υδροστατικών πιέσεων που αναπτύσσονται στις ασυνέχειες. Οι πιέσεις αυτές επηρεάζουν δυσμενώς την ευστάθεια των υπόγειων εκσκαφών.

6) Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με το υπόγειο έργο

Περιγράφεται ποιοτικά από «πολύ ευμενής» έως «πολύ δυσμενής». Μόλις προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που τέμνουν την βραχομάζα, συγκρίνεται με τη γεωμετρία του τεχνικού έργου (τοιχώματα της σήραγγας).

Όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται αναλυτικά στον Πίνακα 2 , όπου σύμφωνα με τον Bieniawski (1989) βαθμολογείται κάθε μία παράμετρος και στη συνέχεια αυτές αθροίζονται. Η βραχομάζα βαθμονομείται για τις παραμέτρους 1 έως 5 ανάλογα με το εύρος τιμών τους και τη σημασία της κάθε παραμέτρου για τη συνολική κατάταξη της βραχομάζας. Υψηλότεροι βαθμοί μίας παραμέτρου υποδηλώνουν καλύτερες συνθήκες βραχομάζας. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επίδραση της κατάστασης (εξαιτίας του ποσοτικού της χαρακτήρα) αλλά του προσανατολισμού των ασυνεχειών. Σκοπός είναι η τελική βαθμονόμηση του πετρώματος και η κατάταξή του σε μία από τις πέντε κατηγορίες ταξινόμησης.

Α.ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ – ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ				
1	Αντοχή πετρωμάτων	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Στην περίπτωση του χαμηλού αυτού εύρους τιμών προτιμάται η αντοχή σε ανεπιθύηστη θλάξη
	Μονατονική αντοχή σε θλάξη	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5-25 MPa 1-5 MPa < 1 MPa
Βαθμολόγηση		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%
	Βαθμολόγηση	20	17	13	8	3
3	Απόσταση ασυνεχειών	> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
	Βαθμολόγηση	20	15	10	8	5
4	Κατάσταση ασυνεχειών (βλέπε πίνακα Ε)	Πολύ τραχείες επιφάνειες Not continuous Χωρίς άνοιγμα Υγρή τοχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm Τοχώματα με ελαφρό βαθμό αποσάθρωσης	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm Τοχώματα με υψηλό βαθμό αποσάθρωσης	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης Υγρό πλήρωσης 5mm πάχος Συνεχές άνοιγμα 1.5 mm	Μαλακό υλικό πλήρωσης > 5 mm πάχος < 5mm πάχος Συνεχές άνοιγμα > 5 mm
	Βαθμολόγηση	30	25	20	10	0
5	Υπεδαφικό νερό	Εισροή ανά 10 m μήκους οθράγγας Πίεση νερού ασυνεχειών Μεγιστή κυρία πίεση Γενικές συνθήκες	Καμία = 0 Ήδη κατάσταση	< 10 litres/min = 0 Υγρή κατάσταση	10-25 litres/min 0.1 - 0.2 Πολύ υγρή κατάσταση	25-125 litres/min 0.2 - 0.5 Ροή στάθμης Ροή συνεχής
	Βαθμολόγηση	10	10	7	4	0

Β. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Προσανατολισμός διεύθυνσης και κλίση ασυνεχειών	Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Μέτριος	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμονομήσεις	0	-2	-5	-10	-12
Σήραγγες	0	-2	-7	-15	-25
Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
Πρανή	0	-5	-25	-50	

Γ. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Κατηγοριοποίηση	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Περιγραφή βραχομάζας	Πολύ καλής ποιότητας	Καλής ποιότητας	Μέτριας ποιότητας	Πτωχής ποιότητας	Πολύ πτωχής ποιότητας

Δ. ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Μέσος χρόνος ευστάθειας	10 χρόνια για 15 m άνοιγμα	6 μήνες για 8 m άνοιγμα	1 εβδομάδα για 5 m άνοιγμα	10 ώρες για 2.5m άνοιγμα	30 λεπτά για 1 m άνοιγμα
Συνεχή βραχομάζα	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Γωνία τριβής βραχομάζας	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Ε. ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ

	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Συνέχεια	6	4	2	1	0
Βαθμολόγηση	6	4	2	1	0
Άνοιγμα	Κανένα	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm
Βαθμολόγηση	6	5	4	1	0
Τραχύτητα	Πολύ τραχεία	Τραχεία	Ελαφρά τραχεία	Λεία	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης
Βαθμολόγηση	6	5	3	1	0
Υλικό πλήρωσης	Κανένα	Σκληρό υλικό πλήρωσης <5mm	Σκληρό υλικό πλήρωσης >5mm	Μαλακό υλικό πλήρωσης <5mm	Μαλακό υλικό πλήρωσης >5mm
Βαθμολόγηση	6	4	2	1	0
Αποσάθρωση	Υγής	Ελαφρά αποσάθρωμένη επιφάνεια	Μέτρια αποσάθρωμένη επιφάνεια	Ισχυρά αποσάθρωμένη επιφάνεια	Πλήρης αποσύνθεση
Βαθμολόγηση	6	5	3	1	0

Πίνακας 2.Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR(Bieniawski, 1989)

Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας		Διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας			
Προχώρηση σύμφωνα με τη κλίση	Προχώρηση αντίθετα με τη κλίση	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Κλίση 0°-20°	Δυσμενής ανεξάρτητα από τη διεύθυνση				

Πίνακας 3.Προσανατολισμός ασυνεχειών σε σήραγγα

2.3.3.2 Ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών Φηρών

Η γεωτεχνική ταξινόμηση των πετρωμάτων της στρωματογραφίας της περιοχής των Φηρών επιλέχθηκε να γίνει σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR. Η βραχομάζα στη περιοχή του έργου με βάση τα στοιχεία των γεωμηχανικών ιδιοτήτων της για τις μέσες τιμές του πίνακα 1, ταξινομείται κατά RMR σύμφωνα με τον πίνακα 2 ως εξής :

Για την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη οι μέσες τιμές είναι 10 ΜΡα, για τα στρώματα των τόφφων, της κίσηρης και των πυροκλαστικών, και 70 ΜΡα για τις ρυοδακτικικές λάβες Θηρασίας και Αλωνάκι (2 και 7 Βαθμοί RMR).

- ⇒ Για την ποιότητα RQD θεωρείται μία μέση τιμή 50 - 75% (13 βαθμοί RMR).
- ⇒ Η απόσταση των ασυνεχειών κυμαίνεται 200 – 600 mm ανάλογα τη συγκεκριμένη θέση μελέτης (10 Βαθμοί RMR).
- ⇒ Για την κατάσταση των ασυνεχειών λαμβάνονται υπόψη παράμετροι της εμμονή, του ανοίγματος, της τραχύτητας, του υλικού πλήρωσης και της διάβρωσης (20 -25 βαθμοί RMR).
- ⇒ Για το υπόγειο νερό θεωρείται μια ύφυγρη έως ξηρή κατάσταση(10-15 βαθμοί RMR).

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία μπορούμε να καταλήξουμε σε δύο τιμές RMR, μία μέγιστη και μία ελάχιστη.

Για τα στρώματα των τόφφων, της κίσηρης και των πυροκλαστικών :

- $RMR_{max} = 2+13+10+25+15 = 65$
- $RMR_{min} = 2+13+10+20+10 = 55$

Για τα στρώματα των ρυοδακτικικών λαβών Θηρασίας και Αλωνάκι :

- $RMR_{max} = 7+13+10+25+15 = 70$
- $RMR_{min} = 7+13+10+20+10 = 60$

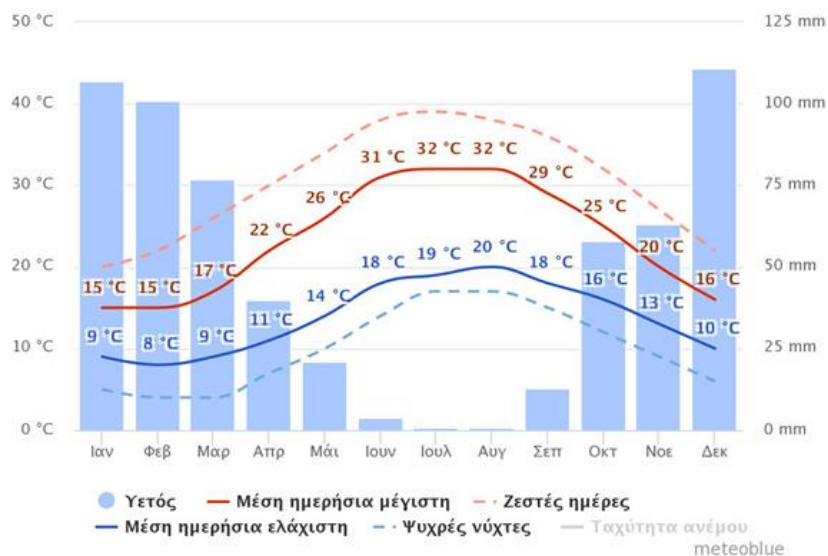
Σημειώνεται, πως η διεύθυνση ασυνεχειών δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη στο φρέαρ. Συνεπώς, για τις μέσες τιμές των γεωμηχανικών ιδιοτήτων τις βραχομάζας, τα πετρώματα ανήκουν στην κατηγορία II-III όπου έχουμε καλής/μέτριας ποιότητας πετρώματα. Εφόσον, απομειώνουμε τη ποιότητα και τις παραμέτρους της βραχομάζας, τα ηφαιστειακά πετρώματα στη περιοχή του έργου στα Φηρά ανήκουν στη κατηγορία III-IV μέτριας/πτωχής ποιότητας κατά RMR.

2.4 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Βιοκλιματικά, η Θήρα ανήκει στον ξηρό θερμο-μεσογειακό τύπο $X > 150$ (X = αριθμός βιολογικά ξηρών ημερών κατά την θερμή περίοδο)και στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό $m > 7^\circ C$ (m = μέση ελάχιστη θερμοκρασία ψυχρότερου μήνα). Παρότι είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων το κλίμα της Σαντορίνης παρουσιάζει την ιδιομορφία να είναι ψυχρότερο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με κάποια άλλα κλιματικά χαρακτηριστικά, φαίνεται να το καθιστούν μοναδικό σε όλη την Ελλάδα. Το σύνολο των χαρακτηριστικών αυτών έχει συνοπτικά ως εξής :

- Η δροσιά, κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, ιδίως κατά την ανατολή του ηλίου. Οφείλεται στο γεγονός ότι οι υδρατμοί που εξατμίζονται την ημέρα από τη θάλασσα, ανερχόμενοι στο ύψος της εσωτερικής πλευράς του νησιού (υψόμετρο 200-300m) διαστέλλονται, λόγω της μικρότερης ατμοσφαιρικής πίεσης και ψύχονται αδιαβατικά ώστε να φτάνουν σε σημείο κορεσμού. Έτσι, εκτός της πρωινής δροσιάς, πολλές φορές, αργά το βράδυ ή πριν χαράξει, παρουσιάζεται και ομίχλη, που σκεπάζει τη κορυφογραμμή της καлдέρας.
- Το χρώμα του εδάφους είναι τεφρό λευκής απόχρωσης και ως εκ τούτου έχει αφενός αυξημένη ακτινοβολία και αφετέρου περιορισμένη απορρόφηση ηλιακής θερμότητας.
- Η υψηλή μέση σχετική υγρασία.
- Η ένταση των ανέμων, σε σύγκριση με τα άλλα Κυκλαδωνήσια, είναι μεγαλύτερη.
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι χαμηλότερη παρότι βρίσκεται νοτιότερα.

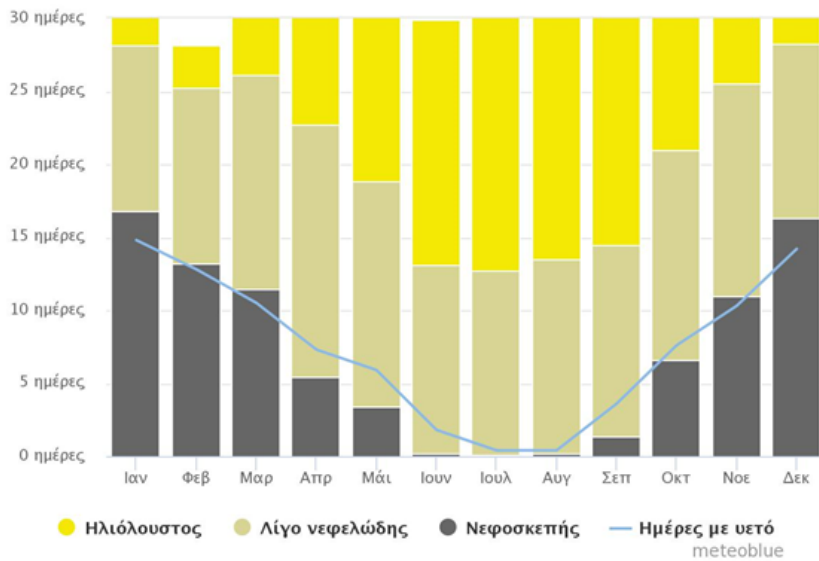
Για την ποσοτική περιγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Ε.Μ.Υ και του μετεο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, από ιστορικά δεδομένα καιρού των τελευταίων 30 ετών.



Γράφημα 1.Θερμοκρασία Σαντορίνης

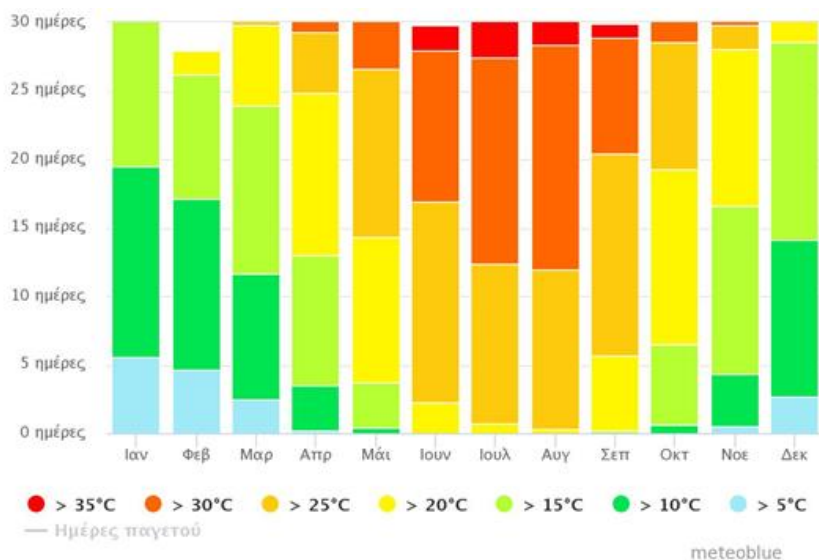
Η συμπαγής κόκκινη γραμμή δείχνει τη μέγιστη θερμοκρασία μιας μέσης ημέρας για κάθε μήνα στη Σαντορίνη. Η συμπαγής μπλε γραμμή δείχνει τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία. Οι ζεστές ημέρες και κρύες νύχτες

(διακεκομμένες κόκκινες και μπλε γραμμές) δείχνουν τον μέσο όρο της πιο ζεστής μέρας και πιο κρύας νύχτας του κάθε μήνα για τα τελευταία 30 χρόνια.



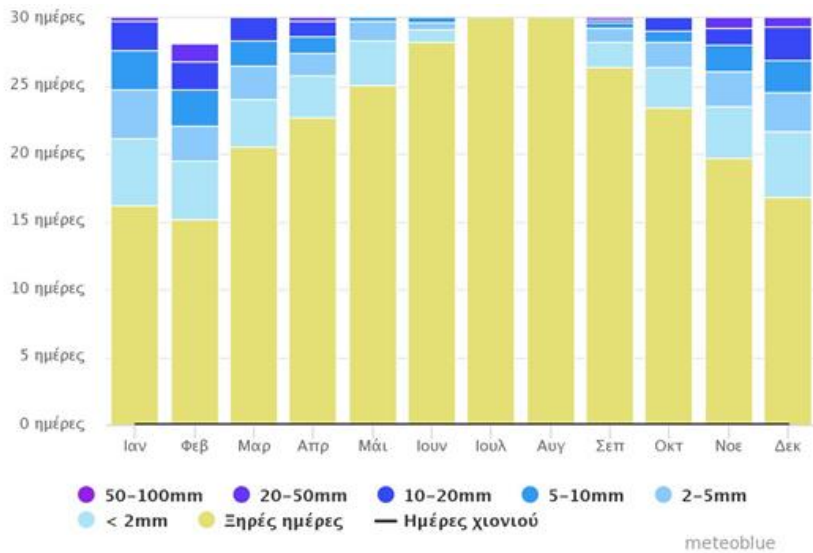
Γράφημα 2. Κατάσταση καιρού Σαντορίνης

Το γράφημα 2 δείχνει τον μηνιαίο αριθμό ημερών με καιρό αίθριο, λίγο νεφελώδη, νεφοσκεπή και τις ημέρες με βροχή. Οι ημέρες με λιγότερο από 20% νεφοκάλυψη θεωρούνται ως αίθριες, με 20-80% νεφοκάλυψη ως νεφελώδεις και με περισσότερα από 80%, ως νεφοσκεπείς.



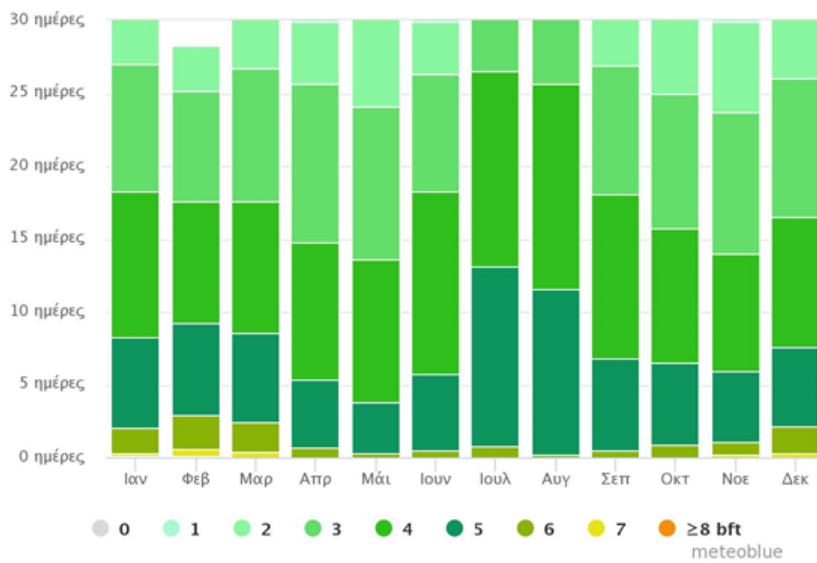
Γράφημα 3. Μέγιστη θερμοκρασία Σαντορίνης

Στο γράφημα 3 εμφανίζονται πόσες ημέρες ανά μήνα επιτυγχάνονται συγκεκριμένες θερμοκρασίες.



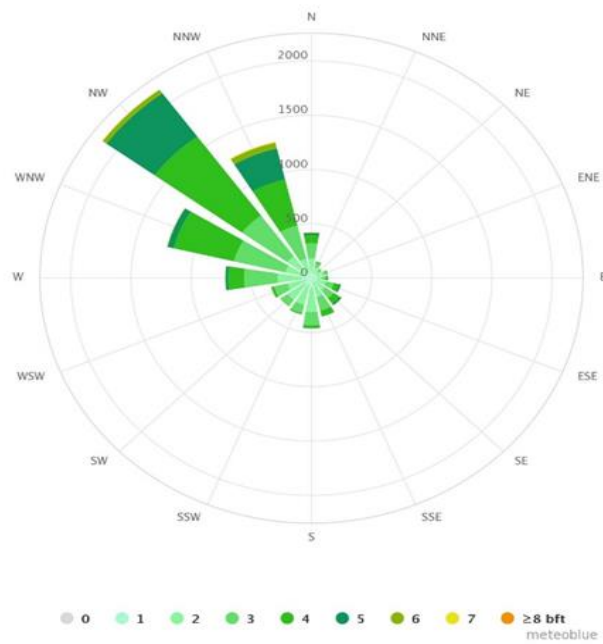
Γράφημα 4. Ποσότητα υετού Σαντορίνης

Το διάγραμμα υετού δείχνει πόσες ημέρες ανά μήνα, επιτυγχάνονται ορισμένα ποσά υετού.



Γράφημα 5. Ταχύτητα ανέμου Σαντορίνης

Στο γράφημα 5 φαίνεται ο αριθμός των ημερών ανά μήνα κατά τις οποίες ο άνεμος φθάνει μια ορισμένη ταχύτητα.



Γράφημα 6.Ροδόγραμμα ανέμου Σαντορίνης

Το ροδόγραμμα δείχνει πόσες ώρες ετησίως ο άνεμος φυσάει από την υποδεικνυόμενη διεύθυνση. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Φεβρουάριος με μέση μέγιστη θερμοκρασία 15° C κι ελάχιστη 8° C, ενώ ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση μέγιστη θερμοκρασία 32° C κι ελάχιστη 19° C. Το μέγιστο ύψος υετού παρατηρείται τους μήνες Δεκέμβριο και Μάρτιο, αλλά ο μήνας με τις περισσότερες ημέρες σε διάρκεια είναι ο Φεβρουάριος. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση παρουσιάζει μέγιστο ύψος τον Ιανουάριο κι ελάχιστο τον Ιούλιο. Οι επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή είναι βόρειοι με βορειοδυτικοί στη διάρκεια του έτους. Οι ένταση σπάνια ξεπερνά τα 8bft, τιμές όμως των 6 bft και άνω είναι συνηθισμένες, με μέση ετήσια 4,6 bft.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΦΡΕΑΤΟΣ

3.1 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΣ

Ο σύγχρονος και γρήγορος ρυθμός ανάπτυξης του πολιτισμού πέραν των νέων δυνατοτήτων που προσφέρει, φέρνει στην επιφάνεια ζητήματα χωροταξικής φέρουσας ικανότητας, εφόσον ο ελεύθερος χώρος ολοένα και περιορίζεται. Το φαινόμενο αυτό πλέον δεν συναντάται μόνο στις μεγάλες πόλεις, αλλά επεκτείνεται και στις μικρότερες αναλογικά. Η εξοικονόμηση χώρου και χρόνου, λοιπόν, κρίνεται ζωτικής σημασίας, συνεπώς, τα υπόγεια οικοδομήματα είναι η απάντηση του προβλήματος. Η Σαντορίνη αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες τουριστικές πρωτεύουσες παγκοσμίως με εκατομμύρια επισκέπτες ετησίως, πολλοί εκ των οποίων έρχονται από γύρω νησιά ή κρουαζιερόπλοια ώστε να θαυμάσουν τα μαγευτικά τοπία της καλδέρας. Καθώς το νησί είναι μικρό ενώ το πλήθος μεγάλο, η εύρεση βέλτιστης λύσης του προβλήματος του τουριστικού κορεσμού δίνει έδαφος στην ανάπτυξη υπογείων έργων για την εξυπηρέτηση των ανθρώπων.

Η προτεινόμενη λύση που μελετάται, είναι ένα σύστημα μεταφοράς επιβατών που συνδέει τη λιμενική ζώνη των Φηρών (παλαιό λιμάνι) με την πόλη των Φηρών. Ειδικότερα, το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει:

- οριζόντια σήραγγα
- κατακόρυφο φρέαρ

3.1.1 Θέση Σύνδεσης – Είσοδος

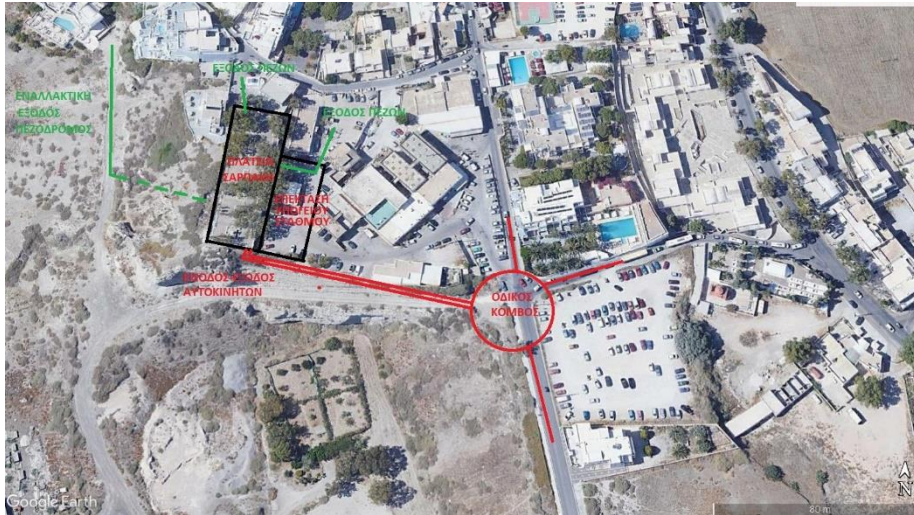
Η είσοδος της σήραγγας θα κατασκευασθεί στο νότιο άκρο του λιμένα των Φηρών. Στο σημείο αυτό γίνεται αναδιαμόρφωση του προβλήτα ώστε να διευκολύνεται η προσέγγιση των πλοίων, αλλά και η πρόσδεσή τους. Αυτό συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής αποβίβασης και επιβίβασης των ατόμων στα πλοία. Οι επιβάτες, έπειτα, διανύουν σε 10 λεπτά, διαμέσου της σήραγγας, μια απόσταση 400 m περίπου μέσω κυλιόμενων διαδρόμων. Καθώς ο ελεύθερος χώρος είναι πολύτιμος, η επικοινωνία της σήραγγας με την επίγεια επιφάνεια πραγματοποιείται κατακόρυφα μέσω φρέατος.



Σχήμα 20.Θέσεις εισόδου και εξόδου

3.1.2 Τελικός Προορισμός – Έξοδος

Το φρέαρ είναι αναπόσπαστο τμήμα του υπόγειου έργου διότι δεν αποτελεί μόνο ένα δίαυλο επικοινωνίας αλλά ένα πολυσύνθετο δόμημα πολλών δυνατοτήτων. Με το πέρας της σήραγγας οι επισκέπτες φθάνουν στον χώρο επιβίβασης των ανελκυστήρων (ασανσέρ), όπου με κατακόρυφη ανύψωση σε διάρκεια μόλις 4 λεπτών βρίσκονται σε υπόγειο χώρο κάτω από τη πόλη. Εν συνεχεία, στο επίπεδο αυτό, με οριζόντια διεύρυνση στεγάζεται υπόγειος πολυώροφος σταθμός. Δίνεται, έτσι, η δυνατότητα επιλογής εναλλακτικών προορισμών ανάλογα με τις επιθυμίες του εκάστοτε επιβάτη, καθώς μπορεί είτε ως πεζός με κυλιόμενες κλίμακες να περιηγηθεί στη πόλη των Φηρών είτε να ενοικιάσει κάποιο όχημα για τις μετακινήσεις του, είτε να επιβιβαστεί ένα από τα λεωφορεία που οδηγούν σε όλα τα σημεία του νησιού. Με το προτεινόμενο σύστημα, ο συνολικός χρόνος, από την αποβίβαση των τουριστών στη λιμενική ζώνη μέχρι την έξοδό τους δεν ξεπερνά τα 20 λεπτά. Η έξοδος του φρέατος, που είναι κι ο τελικός προορισμός των επιβατών, είναι η πλατεία Σαρπάκη στην πόλη των Φηρών.



Σχήμα 21. Θέση εξόδου του φρέατος

Η Πλατεία Σαρπάκη επιλέχθηκε ως θέση εξόδου διότι εξασφαλίζει την εύκολη πρόσβαση των τουριστών στο κέντρο του οικισμού με σύντομες διαδρομές σε πεζόδρομους (Παπαθεοδώρου). Οι ανελκυστήρες καταλήγουν σε υπόγειο όροφο κάτω από την Πλατεία Σαρπάκη σε επίπεδο 5 έως 6 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το επίπεδο αυτό διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να φιλοξενήσει τις δύο κύριες εξόδους και ορισμένα καταστήματα πωλήσεων διαφόρων ειδών. Στη πρώτη κύρια έξοδο προβλέπεται η εγκατάσταση 4 σταθερών κυλιόμενων κλιμάκων, 2 ανερχόμενων και 2 κατερχόμενων, αντίστοιχα. Η δεύτερη κύρια έξοδος θα διανύεται εν πεζή με κατεύθυνση το Δημαρχείο της Σαντορίνης, καθώς το επίπεδο είναι ισόγειο ως προς το εφαπτόμενο οικόπεδο του Δημαρχείου. Επιπλέον, μια τρίτη έξοδος θα διαμορφωθεί σε ενδιάμεσο επίπεδο, στο οποίο θα υπάρχει εναλλακτική στάση από τους ανελκυστήρες. Οι επιβάτες θα έχουν την δυνατότητα να εξέρχονται σε φυσικό έδαφος μέσω υπόσκαφου διαδρόμου και μέσω πεζοδρόμου να ανέρχονται στον οικισμό. Με το τρόπο αυτό, ο κάθε επισκέπτης θα μπορεί να θαυμάσει ή και να φωτογραφήσει τη μοναδική θέα της καλδέρας και τα ευρύτερα τοπία του νησιού, με την άφιξη του.

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ

Το βάθος του φρέατος είναι 200 m και ξεκινάει από το επίπεδο του ορίζοντα της σήραγγας στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (>0 m υψόμετρο). Καθ' όλο το προβλεπόμενο ύψος η διάνοιξη θα πραγματοποιηθεί με ενιαία κυκλική διατομή. Η κυκλική διατομή του φρέατος προτιμάται σε σχεδόν όλες τις γεωτεχνικές συνθήκες εξαιτίας της ομοιόμορφης κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων στη περίμετρο, διασφαλίζοντας μια από τις παραμέτρους της ευστάθειας της κατασκευής. Η επιλογή της διαμέτρου προκύπτει από τις απαιτήσεις επαρκούς χώρου για την εγκατάσταση των 4 εν λειτουργία ανελκυστήρων και την δυνατή μελλοντική εγκατάσταση 2 επιπλέον για την

αύξηση της δυναμικότητας του έργου αλλά και των απαιτήσεων της προσωρινής και μόνιμης επένδυσης.



Σχήμα 22.Κάτοψη φρέατος

Η ωφέλιμη διατομή έχει διάμετρο 12,4 m ενώ η προβλεπόμενη διάμετρος εκσκαφής είναι 14 m. Μεταξύ των δύο διαμέτρων παρεμβάλλονται οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 50 cm και προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με στοιχεία οπλισμού πάχους 25 cm. Σημειώνεται πως από την μελέτη της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη και της απόκρισης των μέτρων στήριξης, επειδή το περιβάλλον πέτρωμα έως τα 150 m είναι ευσταθές συνιστάται να γίνει μια σταδιακή μετάβαση της διαμέτρου εκσκαφής όσο προχωρά η κύρια βύθιση του φρέατος καθώς η προσωρινή υποστήριξη εκεί είναι σαφώς ελαφρύτερη. Η προτεινόμενη διάμετρος εκσκαφής στην αρχή του έργου είναι 13,7 m.

3.3 ΠΟΛΥΩΡΟΦΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

3.3.1 Χώρος Εγκαταστάσεων

Ο υπόγειος σταθμός λεωφορείων και Ι.Χ. οχημάτων είναι σκόπιμο να κατασκευαστεί κάτω από το επίπεδο των κύριων εξόδων των επιβατών. Ο πρώτος όροφος αυτού εξυπηρετεί τα λεωφορεία του ΚΤΕΛ και στα τουριστικά λεωφορεία, ενώ οι υπόλοιποι όροφοι διατίθενται για τη στάθμευση οχημάτων των εταιρειών ενοικίασης και ιδιωτικής χρήσης οχημάτων. Σε κάθε υπόγειο όροφο μπορούν να σταθμεύουν 75 ιδιωτικής χρήσης οχήματα. Συγχρόνως,

για την αύξηση της δυναμικότητας του υπόγειου σταθμού θα αξιοποιηθεί τμήμα του όμορου οικοπέδου του Δημαρχείου.

Η πρόσβαση των λεωφορείων και των ιδιωτικών οχημάτων γίνεται από την οδό νότια της Πλατείας Σαρπάκη. Για την απρόσκοπτη είσοδο και έξοδο των οχημάτων κατασκευάζεται ανισόπεδος οδικός κόμβος στο σημείο που η οδός πρόσβασης στον σταθμό συναντά τη νότια οδική είσοδο-έξοδο στα Φηρά (Σχήμα 20). Επομένως, επιτυγχάνεται η απευθείας επιβίβαση των τουριστών από τους ανελκυστήρες σε λεωφορεία, ενοικιαζόμενα οχήματα ή ταξί και η διακίνηση αυτών προς όλους τους προορισμούς στο νησί. Παράλληλα, αντιμετωπίζεται σε σημαντικό βαθμό το οξυμένο πρόβλημα στάθμευσης και κυκλοφοριακής συμφόρησης τόσο στα Φηρά όσο στο γενικό σύνολο του νησιού. Η θέση του σταθμού στην άκρη του οικισμού, δίπλα στον κύριο υπερτοπικό οδικό άξονα, συμβάλλει στην ποιοτική αναβάθμιση του νησιού ως εξής :

- διευκολύνει την κατάλληλη σύνδεση αυτού με το επαρχιακό οδικό δίκτυο
- περιορίζει την επιβάρυνση των Φηρών από διαμπερή οδική κυκλοφορία
- συμβάλλει στον περιορισμό της παράνομης στάθμευσης στον οικιστικό ιστό.

Στο υπόγειο λειτουργικό επίπεδο χωροθετούνται αναγκαίες υποδομές όπως ο υποσταθμός ηλεκτρικής ενέργειας, τα μηχανοστάσια των ανελκυστήρων, οι δημόσιες τουαλέτες και χρήσεις προς εξυπηρέτηση των επιβατών (χώροι αναμονής, γραφείο πληροφοριών, γραφεία παροχής υπηρεσιών καταστήματα κλπ). Με αποτέλεσμα, να αποφεύγονται πρόσθετες κατασκευές επί της Πλατείας Σαρπάκη που δημιουργούν οπτική ρύπανση ή άλλα προβλήματα. Η αναδιαμόρφωση της πλατείας Σαρπάκη μετά την ολοκλήρωση των έργων θα πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη σημερινή διαμόρφωση της πλατείας και τον παραδοσιακό κυκλαδίτικο χαρακτήρα του οικισμού. Το μικρό μέγεθος και ο χαρακτήρας των αναγκαιών υπέργειων κατασκευών (έξοδοι κλιμάκων, εξαερισμοί κλπ) βοηθούν στην επίτευξη των παραπάνω.

Αξιζει να σημειωθεί πως κατά την εκσκαφή της πλατείας ενδέχεται να υπάρχουν αρχαιολογικά ευρήματα όπως έχει συμβεί σε γειτονικές περιοχές. Στην περίπτωση που κριθεί ότι τα ευρήματα πρέπει να παραμείνουν επί τόπου, τότε θα αναθεωρηθεί κατάλληλα το σχέδιο του υπόγειου σταθμού οχημάτων και θα διαμορφωθεί κατάλληλος προστατευόμενος χώρος έκθεσης.

3.3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εγκαταστάσεων

3.3.2.1 Ανελκυστήρες

Το σύστημα των ανελκυστήρων απαρτίζεται από 4 ανελκυστήρες ταχύτητας 6 m ανά δευτερόλεπτο και χωρητικότητα 26 ατόμων έκαστος. Ο συνολικός χρόνος ανόδου ή καθόδου, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου εισόδου και εξόδου των τουριστών, δεν ξεπερνά τα 4 λεπτά. Οι προβλεπόμενοι ανελκυστήρες είναι ίδιου τύπου και λειτουργούν με συρματόσχοινα. Οι ανελκυστήρες προτείνεται να είναι της εταιρείας MITSUBISHI (Mitsulift) και διαθέτουν τις παρακάτω προδιαγραφές (Μαλαχίας, 2016).

Τύπος ανελκυστήρα	NexWay GM5H1
Κινητήρας	Μόνιμου μαγνήτη χωρίς μειωτήρα στροφών
Ισχύς	70 kW
Ωφέλιμο φορτίο	2000 kg
Αριθμός ατόμων	26
Διαστάσεις φρέατος (πλάτος x βάθος)	2,80m x 2,85m
Διαστάσεις θαλάμου (πλάτος x βάθος x ύψος)	2,10m x 1,95m x 2,40m
Διαστάσεις θύρας θαλάμου (πλάτος x ύψος)	1,10m x 2,10m
Ταχύτητα	6 m/s
Χρόνος διαδρομής	33 sec ≈ 0,5 min
Ικανότητα μεταφοράς / ώρα/ ανελκυστήρα	450 άτομα
Ικανότητα μεταφοράς / ώρα 4 ανελκυστήρων	1600 άτομα
Κόστος / ανελκυστήρα	430.000 €
Κόστος των 4 ανελκυστήρων	1.700.000 €

Πίνακας 4.Προδιαγραφές ανελκυστήρων

Ο κινητήρας των ανελκυστήρων είναι τύπου inverter, συνεπώς, θα επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη λειτουργία ιδιαίτερα όταν κινείται με φορτίο μικρότερο του κανονικού. Επίσης, ο ανωτέρω ανελκυστήρας περιλαμβάνει το σύστημα “ανάκτησης ενέργειας” με το οποίο εξοικονομείται η ενέργεια η οποία συνήθως χάνεται υπό μορφή θερμότητας κατά τη διάρκεια της πέδησης. Κατά αυτό το τρόπο, η ενέργεια αυτή διατηρείται και επιστρέφει στο ηλεκτρικό σύστημα ώστε να χρησιμοποιηθεί σε άλλες λειτουργίες, όπως φωτισμός κλπ. Σε σύγκριση με τους κοινούς ανελκυστήρες, συνολικά η εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται σε ποσοστό 35 - 45% συμβάλλοντας έτσι όχι μόνο περιβαλλοντικά αλλά και στην οικονομικότητα του έργου.

3.3.2.2 Κυλιόμενες Κλίμακες

Οι κυλιόμενες κλίμακες θα εγκατασταθούν από το επίπεδο της τελευταίας στάσης των ανελκυστήρων (υπόγειος λειτουργικός χώρος εξόδων) μέχρι την

επιφάνεια του εδάφους (Πλατεία Σαρπτάκη). Οι κυλιόμενες κλίμακες όπως και οι ανελκυστήρες προτείνεται να είναι της εταιρείας MITSUBISHI (Mitsulift).

Τύπος κλίμακας:	ZI-SE
Ισχύς κινητήρα:	7,5 kW
Ταχύτητα μεταφοράς:	0,5 m/sec
Ικανότητα μεταφοράς:	9000 άτομα/ώρα/κλίμακα
Γωνία κλίσεως:	30ο
Ύψος διαδρομής:	5 m
Πλάτος βαθμίδας:	1,0 m
Υλικό στηθαίων:	Υαλοπίνακες 8 mm
Πρότυπο:	EN-115
Κόστος/ κλίμακα:	100.000 €
Κόστος των 4 κλιμάκων:	400.000 €

Πίνακας 5.Προδιαγραφές κυλιόμενων κλιμάκων

Πρέπει να αναφερθεί πως η λειτουργία των κυλιόμενων κλιμάκων δε θα είναι συνεχής, αλλά θα ενεργοποιείται με τη βοήθεια φωτοκύτταρων όταν διαπιστωθεί η προσέλευση ατόμου για μεταφορά.

3.3.3 Πυροπροστασία – Πυρασφάλεια

Στο φρέαρ θα εγκατασταθεί κλιμακοστάσιο ασφαλείας και πυροπροστασίας, το οποίο θα συνδέεται με το υπόλοιπο τμήμα μέσω πυράντοχου τοιχίου καθ' όλο το ύψος καθώς, επίσης, με το κλιμακοστάσιο διαφυγής σε περίπτωση κινδύνου ή βλάβης. Στο κλιμακοστάσιο αυτό και για κάθε 11m ύψος υπάρχει θύρα για την είσοδο των επιβατών των ανελκυστήρων, όπως επιβάλλεται από τους σχετικούς κανονισμούς.

Η παθητική πυροπροστασία του συγκροτήματος θα εξασφαλιστεί με τη δημιουργία πυροπροστατευόμενου κλιμακοστασίου ασφαλείας στο κατακόρυφο φρέαρ. Στα πλατύσκαλα του κλιμακοστασίου αυτού θα οδηγούν οι θύρες του φρέατος των ανελκυστήρων, οι οποίες επιβάλλεται να εγκατασταθούν κάθε 11m ύψος. Πέραν των ανωτέρω, η παθητική πυροπροστασία εξασφαλίζεται με την χρήση πυράντοχων δομικών υλικών. Στο συγκρότημα προβλέπεται πλήρης ενεργητική πυροπροστασία, η οποία θα περιλαμβάνει ανιχνευτή καπνού και αυτόματη κατάσβεση.

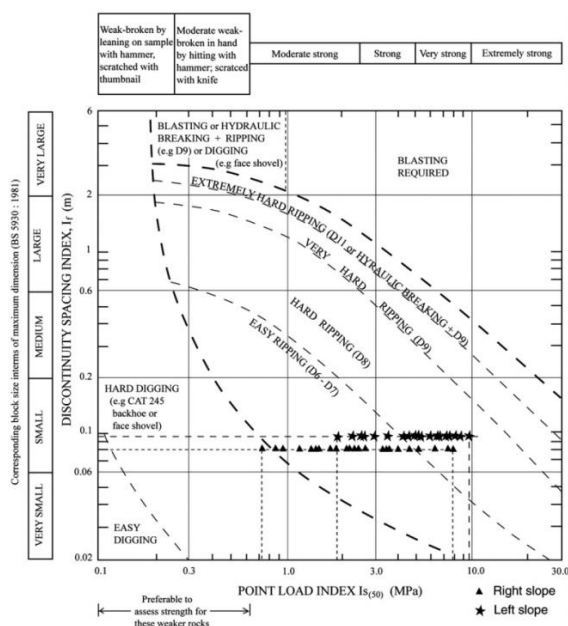
Στα ενεργητικά περιλαμβάνονται συστήματα πυρανίχνευσης, καταιονητήρες νερού ή κατασβεστικού αφρού, εγκατάσταση μόνιμου πυροσβεστικού δικτύου κλπ. Τα μέτρα αυτά στοχεύουν κυρίως τον περιορισμό της επέκτασης της φωτιάς.

4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

4.1.1 Εξορυξιμότητα βραχομάζας

Η συνεχής ανάπτυξη των γεωτεχνικών έργων υποδομής στο αστικό περιβάλλον καθιστά τη χρήση εκρηκτικών απαγορευτική. Αυτό συνέβαλλε σε τεράστια και συνεχή πρόοδο των μηχανών κοπής του πετρώματος, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική εκσκαφή των πετρωμάτων χωρίς τους κινδύνους των ανατινάξεων. Στη Σαντορίνη - μικρό νησί με υψηλά ποσοστά τουρισμού- τα όποια έργα υποδομής οφείλουν να έχουν γνώμονα την ασφάλεια στην επιφάνεια.

Η επιλογή της μεθόδου εκσκαφής είναι ανάλογη των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στη περιοχή του έργου. Για να αποφύγουμε την χρήση εκρηκτικών υλών εξετάζουμε πόσο εύκολα εξορύσσεται η βραχομάζα σύμφωνα με τις γεωμηχανικές της παραμέτρους. Με βάση τους πίνακες 6 και 7, για άνοιγμα ασυνεχίων 200 - 600 mm, η βραχομάζα βρίσκεται στη περιοχή easy με hard digging. Η διάνοιξη με μηχανικά μέσα ενδείκνυται στη περίπτωση αυτή και θα είναι σχετικά εύκολη αφού η βραχομάζα είναι εύκολα εξορύξιμη.



Πίνακας 6. Ταξινόμηση της εξορυξιμότητας πετρώματος με βάση τους δείκτες σημειακής φόρτισης I_{s50} και ασυνέχειας I_f (Petifer and Fookes, 1994) (Σοφιανός, 2018)

	UCS ΜΡα	Is ₅₀ = UCS/20
Ρυοδακτικικές λάβες Θ.	20,4	1,02
Τόφφοι	5	0,25
Κίσηρης	6,8	0,34
Ρυοδακτικικές λάβες Αλ.	24	1,2
Πυροκλαστικά	7	0,35

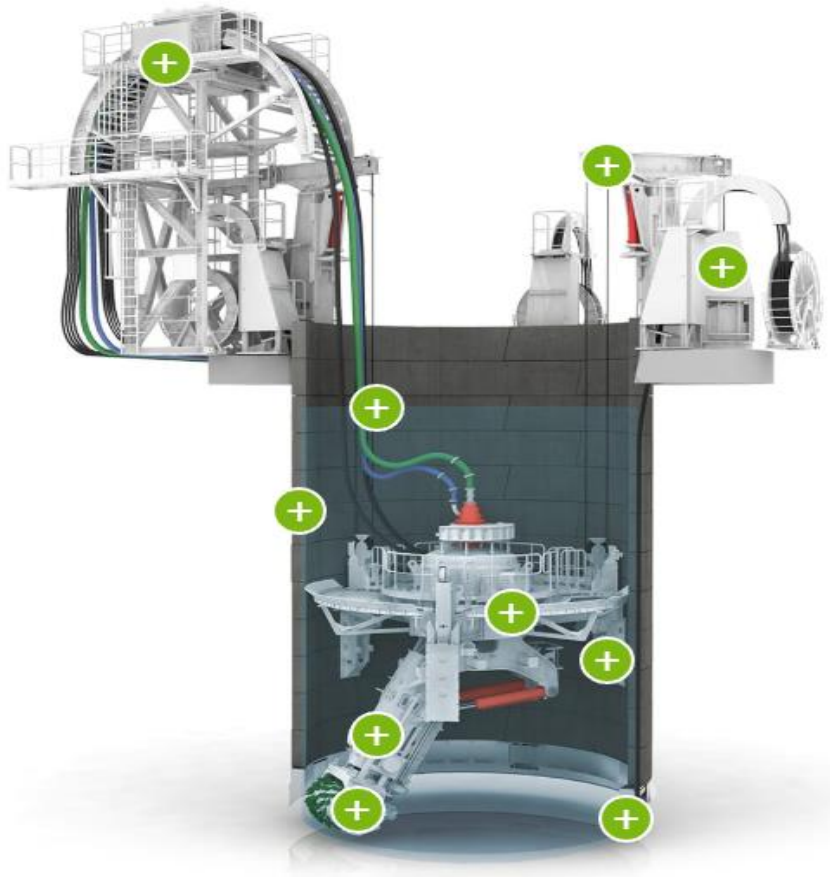
Πίνακας 7. Δείκτης σημειακής φόρτισης Is₅₀ και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS

Τα βαθιά φρέατα δύναται να διανοίγονται είτε από πάνω προς τα κάτω με βύθιση του φρέατος (shaft sinking) είτε αντιστρόφως με ανύψωση του φρέατος (raise). Η αντοχή της βραχομάζας σε συνδυασμό με τα φθοροποιά χαρακτηριστικά της, επιτρέπουν τη μηχανική όρυξη του φρέατος. Εξίσου σημαντικός παράγοντας, στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης, είναι η γεωμετρία του φρέατος. Το φρέαρ είναι κυκλικό με διάμετρο εκσκαφής 14 m και βάθος 200 m, οπότε η μέθοδος θα πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα να εφαρμόζεται σε αυτά τα χαρακτηριστικά. Οι προτεινόμενες μέθοδοι διάνοιξης του φρέατος είναι οι εξής :

- μέθοδος εκσκαφής VSM
- μέθοδος NATM
- μέθοδος raiseboring και διεύρυνση

4.1.2 Μέθοδος Εκσκαφής VSM (Vertical Sinking Machine)

Η μηχανική εκσκαφή μέσω του συστήματος VSM, της μεγαλύτερης εταιρείας κατασκευής μηχανημάτων και εκσκαφής σηράγγων Herrenknecht AG, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού επιτρέπει τη διάνοιξη φρεάτων μεγάλης διατομής σε μεγάλο βάθος. Η τεχνολογία κατακόρυφης διάτρησης μοιάζει με την τεχνολογία κατασκευής σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία (Schmäh, 2007).



Σχήμα 23.Εξοπλισμός VSM

Ο εξοπλισμός VSM περιλαμβάνει τρία κύρια συστήματα :

1) Η μονάδα εκσκαφής.

Αυτή περιλαμβάνει ένα ιστό (μπούμα) στην άκρη της οποίας βρίσκεται η κεφαλή σημειακής κοπής. Η μπούμα διαγράφει κύκλους καθώς κινείται κυκλικά γύρω από το κέντρο του φρέατος και αυξάνει το μήκος της τηλεσκοπικά καθώς προσεγγίζει το έδαφος που πρέπει να αφαιρεθεί. Το μηχάνημα κόβει συμμετρικά το έδαφος του οποίου η αντοχή μπορεί να είναι έως 80 – 120 MPa. Η διαδικασία εκσκαφής λαμβάνει χώρα κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και είναι πλήρως τηλεχειριζόμενη από την επιφάνεια.

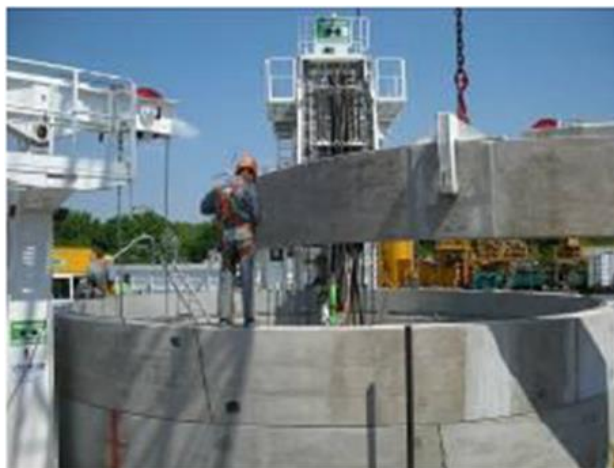
2) Το σύστημα απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής.

Η απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής γίνεται με υδραυλική μεταφορά αυτών. Μια βυθιζόμενη αντλία αμμοχάλικων βρίσκεται επί του περιβλήματος της κοπτικής κεφαλής. Αυτή μεταφέρει το μείγμα νερού και εδάφους, διαμέσου μιας γραμμής μεταφοράς πολφού στην μονάδα διαχωρισμού που είναι εγκατεστημένη στην επιφάνεια. Μια μονάδα φυγοκεντρικού διαχωρισμού μπορεί να προστεθεί στο συγκρότημα διαχωρισμού ώστε να απομακρύνει και τα λεπτά τεμάχια από το πολφό. Αυτό βελτιώνει την μεταφορά των

προϊόντων εκσκαφής και εξασφαλίζει την καθαρότητα του νερού στο φρέατο το οποίο μπορεί περισσότερο εύκολα να απορριφθεί όταν τελειώσει η εκσκαφή του φρέατος.

3) Η μονάδα καταβίβασης.

Η μονάδα καταβίβασης σταθεροποιεί όλη την κατασκευή του φρέατος και εξασφαλίζει την ελεγχόμενη βύθιση της επένδυσης του φρεατίου συγκρατώντας το σύνολο του βάρους. Μόνο όταν κάθε στάδιο της εκσκαφής κάτω από την στάθμη της αιχμής του φρέατος έχει ολοκληρωθεί τότε η επένδυση καταβιβάζεται ομοιόμορφα και με ακρίβεια. Η επένδυση εγκαθίσταται στην επιφάνεια και στις περισσότερες περιπτώσεις φτιάχνεται από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος. Η επένδυση του φρέατος μπορεί να κατασκευασθεί και από επιτόπου σκυρόδεμα. Εδώ η βραδύτερη πρόοδο των εργασιών αντισταθμίζεται από την κατασκευή μιας συνεχής δομής χωρίς συνδέσεις. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ενσωμάτωσης πλήρως στο τοίχιο του φρέατος των δομών εισόδου και εξόδου των μηχανημάτων για τις δραστηριότητες του ωθούμενου σωλήνα.



Σχήμα 24. Τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος

Οι δυνατότητες της τελευταίας γενιάς μηχανημάτων VSM είναι οι ακόλουθες :

- Τα προκατασκευασμένα τμήματα μπορούν να προενταθούν και στη κατακόρυφη διεύθυνση πριν τη καταβίβαση τους, έτσι ώστε οι συνδέσεις των τμημάτων να παραμένουν κλειστές ακόμα και στην περίπτωση μη ομοιόμορφης τριβής.
- Οι ηλεκτρικές συνδέσεις είναι πλήρως στεγανές για να μειωθούν οι λάθος ενδείξεις εξαιτίας εισροής νερού και διάβρωσης των επαφών των καλωδίων, η μέγιστη πίεση νερού για ασφαλή λειτουργία είναι 8 bar.
- Ολοκληρωμένο εναλλακτικό σύστημα αισθητήρων για την αύξηση της αξιοπιστίας.

- Ανάπτυξη μιας ευέλικτης κοπτικής κεφαλής που επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών εργαλείων για τα μαλακά ή για τα σκληρά εδάφη με τη χρήση εναλλάξιμου συστήματος συγκράτησης των κοπτικών.
- Ο εξοπλισμός της επιφάνειας μπορεί να χωρισθεί σε μικρότερες μονάδες για την ευκολότερη σύνδεση σε περιοχές με περιορισμένες διαστάσεις ελεύθερου χώρου.
- Διάμετρος κοπής φρέατος κυμαίνεται από 4,5m έως 16m.
- Το σύστημα είναι κατάλληλο για χρήση σε περιοχές με κυκλοφοριακή συμφόρηση.
- Επένδυση με προκατασκευασμένα στοιχεία ή επιτόπου χυτό σκυρόδεμα.
- Η τελική επένδυση εγκαθίσταται κατά τη διάρκεια της καταβίβασης (δεν χρειάζεται δευτερεύουσα επένδυση μετά το τελείωμα, ακόμα και αν υπάρχει απαίτηση για μια ολοκληρωμένη ηλεκτρική εγκατάσταση στα προκατασκευασμένα στοιχεία).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα :

- Μείωση του χρόνου κατασκευής με χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων. Ειδικά σε βαθιά φρέατα, μπορεί να επιτευχθεί προχώρηση 1-2m ανά βάρδια εργασίας κατά μέσο όρο, ανάλογα με τη διάμετρο και την γεωλογία της περιοχής.
- Ελάχιστος κίνδυνος καθιζήσεων.
- Δεν απαιτείται έλεγχος ή καταβίβαση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.
- Δεν απαιτείται παρουσία προσωπικού εντός του φρεατίου κατά την διάρκεια της κατασκευής.
- Έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου.
- Δυνατότητα εργασίας σε περιορισμένες περιοχές.
- Εγκατάσταση τελικής επένδυσης του φρεατίου.
- Φιλικό προς το περιβάλλον.

Η παραπάνω μέθοδος αποτελεί μια καλή λύση για την εκσκαφή του φρέατος, αφού αντισταθμίζει τους περιορισμούς της μεγάλης διαμέτρου εκσκαφής του φρέατος των 14 m, του βάθους των 200 m, της ασφάλειας τόσο στην επιφάνεια όσο και στο μέτωπο και του κινδύνου καθιζήσεων. Πρέπει να τονιστεί πως η μέθοδος VSM απαιτεί υψηλό κόστος επένδυσης και ο χρόνος απόσβεσης του μηχανήματος και του παρελκόμενου εξοπλισμού είναι σε μεγάλο βάθος χρόνου. Ο παράγοντας αυτός για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετάται είναι καθοριστικός αφού στο συνολικό κόστος του έργου, θα περιλαμβάνονται εξίσου οι κατασκευές των εξόδων από το σταθμό, του υπόγειου χώρου στάθμευσης και της σήραγγας σύνδεσης με το φρέαρ.

4.1.3 Μέθοδος NATM

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunneling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης υπογείων έργων οι οποίες εφαρμόσθηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου (Μ. Καββαδάς, 2004).

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής του ανοίγματος σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Κατά τη μέθοδο NATM η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι ότι η διάνοιξη και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής. Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος του ανοίγματος συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση) και επιπλέον ότι η σύγκλιση αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχώμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η άμεση υποστήριξη ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης

του συνόλου του μήκους του υπόγειου έργου αλλά οπωσδήποτε αφού αυτό ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ. Η τελική επένδυση συνήθως σχεδιάζεται για να αναλάβει τα εξής φορτία:

- Το φορτίο που αναλαμβάνεται από τα αγκύρια στην περίπτωση προσωρινών αγκυρίων ή στην περίπτωση βραχόμαζας με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.
- Μέρος του φορτίου που αναλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μονίμου έργου (δεδομένου ότι κατά την άμεση υποστήριξη το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου).
- Τυχόν αυξημένα μακροχρόνια φορτία της βραχόμαζας λόγω ερπυσμού.
- Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης.
- Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα.
- Τυχόν σεισμική επιφόρτιση.

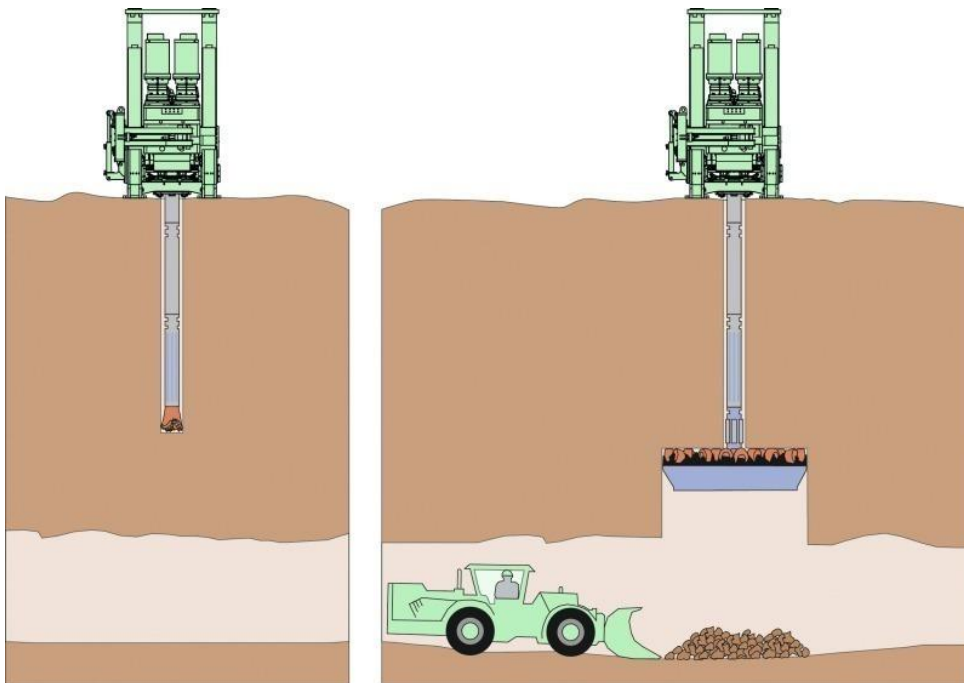
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους διάνοιξη με TBM (μηχανής ολομέτωπης κοπής) ή ασπίδα είναι τα εξής:

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες.
- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μη-κυκλικών διατομών.
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς
- πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).

Η κατασκευή του φρέατος θα πραγματοποιηθεί στη περιοχή της Σαντορίνης, ένα περιβάλλον με ισχυρό τεκτονισμό και σεισμικότητα και σε βραχομάζα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες που αναμένεται όσο αυξάνεται το βάθος της εκσκαφής να αυξάνεται και η σύγκλιση των τοιχωμάτων. Οι παράγοντες αυτοί, σε συνδυασμό με το ευρύτατο πεδίο εφαρμογής της μεθόδου, την ευελιξία και την οικονομικότητα που παρέχει, καθιστούν τη NATM μια ελκυστική επιλογή μεθόδου διάνοιξης του φρέατος.

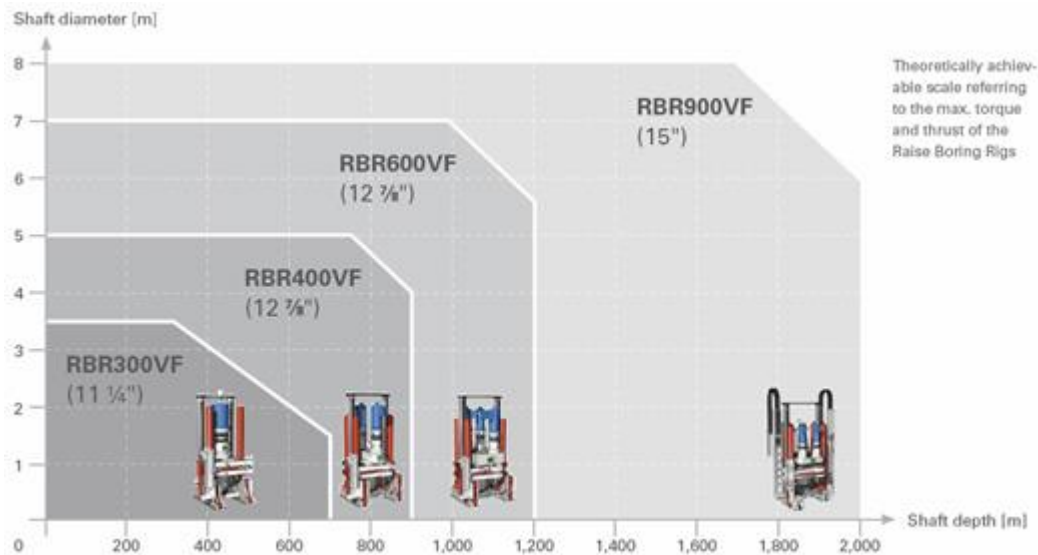
4.1.4 Μέθοδος Raiseboring και Διεύρυνση

Η διάνοιξη του φρέατος επιτυγχάνεται σε δύο φάσεις με συνδυασμό δύο μεθόδων. Η πρώτη φάση γίνεται με μηχανική διάνοιξη raiseboring. Αρχικά, ο εξοπλισμός εδράζεται στο κολάρο του προφρέατος από μονάδα ερπυστριών ή γερανό. Στη συνέχεια, το μηχάνημα διενεργεί μια κατακόρυφη πιλοτική διερευνητική γεώτρηση, κατά την οποία τοποθετείται ειδικό στέλεχος εντός της οπής της γεώτρησης. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου να φτάσει στο απαιτούμενο βάθος, όπου θα ξετρυπήσει στη σήραγγα. Στη συνέχεια, στο κάτω άκρο του στελέχους προσαρμόζεται κοπτική κεφαλή με την επιθυμητή διάμετρο και ξεκινά η εξόρυξη του φρέατος από το επίπεδο της σήραγγας έως την επίγεια επιφάνεια. Το εξορυσσόμενο υλικό συγκεντρώνεται στο δάπεδο της σήραγγας από όπου φορτώνεται και απομακρύνεται.



Σχήμα 25.Μέθοδος Raiseboring

Ο εξοπλισμός raiseboring (RBR) έχει σχεδιαστεί για την κατασκευή φρεάτων τόσο σε χαμηλής ποιότητας πετρώματα όσο και εξαιρετικά υψηλής για βάθος μέχρι 2.000 m. Η όρυξη φρεάτων με RBR είναι ασφαλέστερη, λιγότερο χρονοβόρα και οικονομικότερη από την συμβατική βύθιση τους. Επίσης, ο συμπαγής σχεδιασμός του εξοπλισμού προσφέρει μεγάλη ευελιξία ακόμη και σε περιορισμένους χώρους και είναι επομένως κατάλληλος για ποικίλες εφαρμογές. Ο εξοπλισμός RBR διατίθεται σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα με την απαιτούμενη διάμετρο εκσκαφής του φρέατος και το βάθος.



Σχήμα 26.Εύρος εφαρμογής εξοπλισμού RBR της εταιρείας Herrenknecht AG

Η προβλεπόμενη διάμετρος εκσκαφής του φρέατος είναι 14 m, δεδομένου ότι ο εξοπλισμός RBR δύναται να εξορύξει με διάμετρο το πολύ 8 m, η εκσκαφή του υπολειπόμενου τμήματος επιτυγχάνεται με διεύρυνση. Η δεύτερη φάση εκσκαφής του φρέατος επιτυγχάνεται με συμβατική βύθιση ανά μήκος προχώρησης με μηχανικό εκσκαφέα μεσαίου μεγέθους. Ο εκσκαφέας με σπειροειδή κίνηση γύρω από το μικρό φρέαρ της 1ης φάσης διευρύνει το άνοιγμα μέχρι την διάμετρο των 14 m. Παράλληλα, το εξορυγμένο υλικό εναποτίθεται μέσω του φρέατος μικρού ανοίγματος στο επίπεδο της σήραγγας απ' όπου φορτώνεται και μεταφέρεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το φρέαρ να διευρυνθεί σε όλο το βάθος των 200 m, ενώ στα τελευταία 12 m περίπου θα συνδεθεί με το επίπεδο της σήραγγας. Σε ενδιάμεσο στάδιο για κάθε μήκος προχώρησης γίνεται εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης του φρέατος της τελικής διαμέτρου.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά των πετρωμάτων επιτρέπει την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου που περιγράφηκε. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει ειδική μελέτη για το στρώμα των πυροκλαστικών στα τελευταία 50 m εξαιτίας της έντονης πλαστικής συμπεριφοράς του, καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαταραχή που έχει προκληθεί από τη διάνοιξη της σήραγγας αλλά και από τη διάνοιξη του μικρού φρέατος από το μηχάνημα raiseboring. Με βάση αυτή την μελέτη θα επιλεγεί ανάλογα ο εξοπλισμός raiseboring κατάλληλης διαμέτρου, το οποίο αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ευστάθειας του μικρού φρέατος αφού θα παραμείνει ανεπένδυτο για όλο το διάστημα εκσκαφής της διεύρυνσης.

Η μέθοδος διάνοιξης του φρέατος με raiseboring και διεύρυνση, παρέχει ευελιξία, ασφάλεια και ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου κατασκευής. Η εκσκαφή με raiseboring αποτελεί μια γρήγορη μέθοδο, παράλληλα το τμήμα που απομένει είναι σχετικά μικρό ενώ εξίσου εξοικονομείται χρόνος από την αποκόμιση των προϊόντων, τα οποία με την ολομέτωπη διάνοιξη του φρέατος με NATM φορτώνονται στον κουβά του γερανού και ανελκύνονται στην επιφάνεια. Η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει την διάνοιξη της σήραγγας, σε αντίθεση με τις άλλες προτεινόμενες μεθόδους. Τονίζεται, πως το κόστος επένδυσης του εξοπλισμού raiseboring μαζί με τον παρελκόμενο εξοπλισμό για τη διεύρυνση είναι σχετικά υψηλό και θα πρέπει να αντισταθμίζεται από τον χρόνο απόσβεσης των μηχανημάτων και τον χρόνο της συνολικής κατασκευής του φρέατος.

4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

4.2.1 Φυσικό Εντατικό Πεδίο

Πρωτογενές ή φυσικό εντατικό πεδίο καλείται το επιτόπου προϋπάρχον πεδίο των τάσεων, πριν από την εφαρμογή ανθρώπινης τεχνικής δραστηριότητας. Για το λόγο αυτό, τα πετρώματα στη φυσική τους θέση είναι προσυμπιεσμένα και η υπόγεια διάνοιξη μεταβάλλει το υφιστάμενο εντατικό πεδίο. Γενικά το πρωτογενές εντατικό πεδίο έχει προκύψει ως το αποτέλεσμα γεγονότων της γεωλογικής ιστορίας. Σύμφωνα με μετρήσεις που κατέγραψαν οι Brown & Hoek (1978), οι κατακόρυφες κύριες τάσεις μπορούν να θεωρηθούν συνήθως ότι μεταβάλλονται γραμμικά με το βάθος z και προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_v = \gamma * z \text{ [MPa]}$$

όπου $\gamma = \rho * g$ [KN/m³] το ειδικό βάρος της βραχομάζας.

Οι διευθύνσεις των δύο άλλων κύριων συνιστωσών της τάσης θεωρούνται ότι βρίσκονται στο οριζόντιο επίπεδο. Αντί της τιμής τους, δίνεται ο λόγος τους σε σχέση με την κατακόρυφη κύρια τάση. Ο λόγος αυτός ονομάζεται συντελεστής πλευρικής ώθησης K και οι οριζόντιες τάσεις υπολογίζονται από τη σχέση :

$$\sigma_h = K * \sigma_v \text{ [MPa]}$$

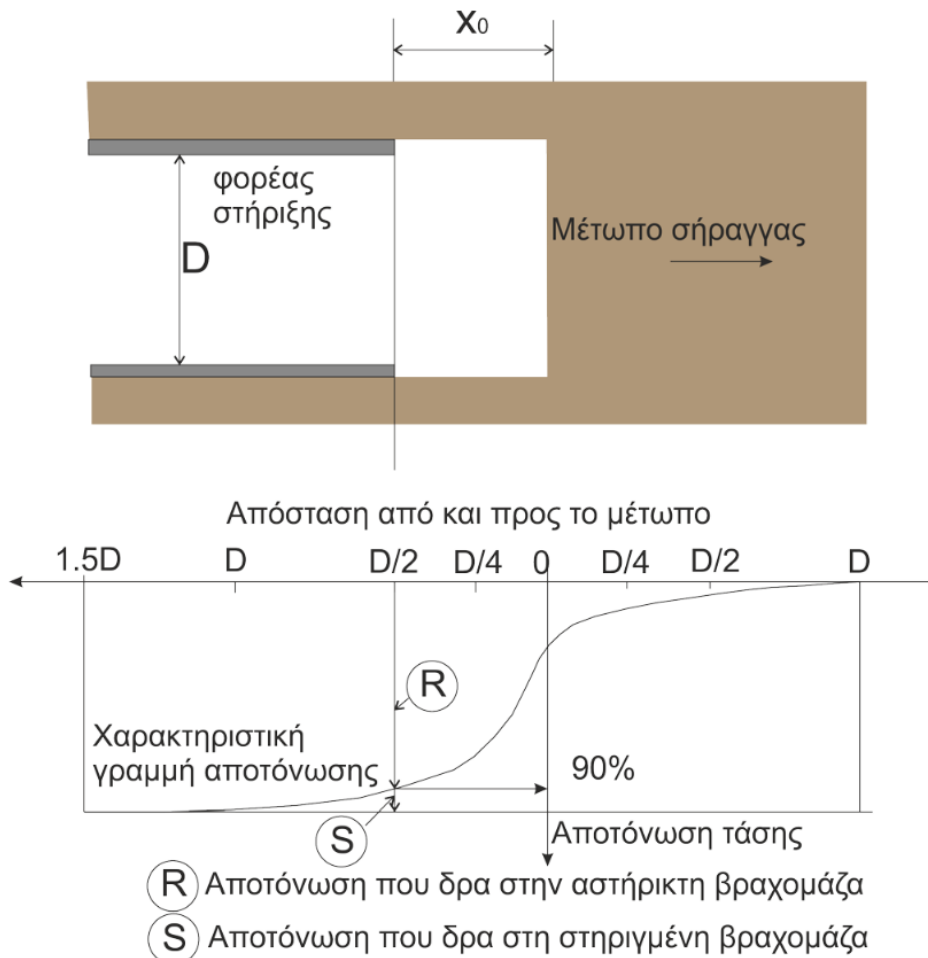
Η εκσκαφή του πετρώματος τροποποιεί τις οριακές συνθήκες στην επιφάνεια πέριξ του υπόγειου ανοίγματος, επομένως οι τάσεις κοντά στη παρειά μεταβάλλονται ενώ αρκετά μακρύτερα οι τάσεις παραμένουν

πρακτικά αναλλοίωτες. Κατά τη μελέτη της εκσκαφής που η αντοχή του πετρώματος είναι χαμηλή ή οι τάσεις του πεδίου είναι υψηλές, γίνεται έλεγχος της θραύσης του πετρώματος στην παρειά της εκσκαφής. Με διαδοχικές αλλαγές στις μεταβλητές του σχεδιασμού επιδιώκουμε τον περιορισμό:

- της έκτασης της αστοχίας στην παρειά της εκσκαφής
- της ζώνης αστοχίας μέσα στο πέτρωμα πέριξ της εκσκαφής
- των προβλημάτων που θα δημιουργηθούν από την ύπαρξη κύριων ασυνεχειών
- της αλληλεπίδρασης των ασυνεχειών με τις θραύσεις του πετρώματος

4.2.2 Δευτερογενές Εντατικό Πεδίο

Η διάνοιξη του υπόγειου έργου μετατρέπει το εντατικό πεδίο, λόγω της μείωσης μέχρι και μηδενισμού των ακτινικών τάσεων στην περιφέρειά του, από πρωτογενές σε δευτερογενές. Η μεταβολή αυτή του εντατικού πεδίου έχει ως συνέπεια τη σύγκλιση των τοιχωμάτων του υπόγειου χώρου. Στην επιφάνεια γύρω από το άνοιγμα παραμένει η αντίσταση της στήριξης μόνο. Αυτή δρα κάθετα στην επιφάνεια της εκσκαφής, που σε περίπτωση ανυποστήρικτης σήραγγας μηδενίζεται. Λόγω της απουσίας διατμητικής συνιστώσας της τάσης στην επιφάνεια εκσκαφής, αυτή αποτελεί τόπο επιπέδων κυρίων τάσεων. Η μεταβολή των τάσεων εντός του πετρώματος προκαλεί παραμορφώσεις, οι οποίες εμφανίζονται ως μετατοπίσεις των παρειών.



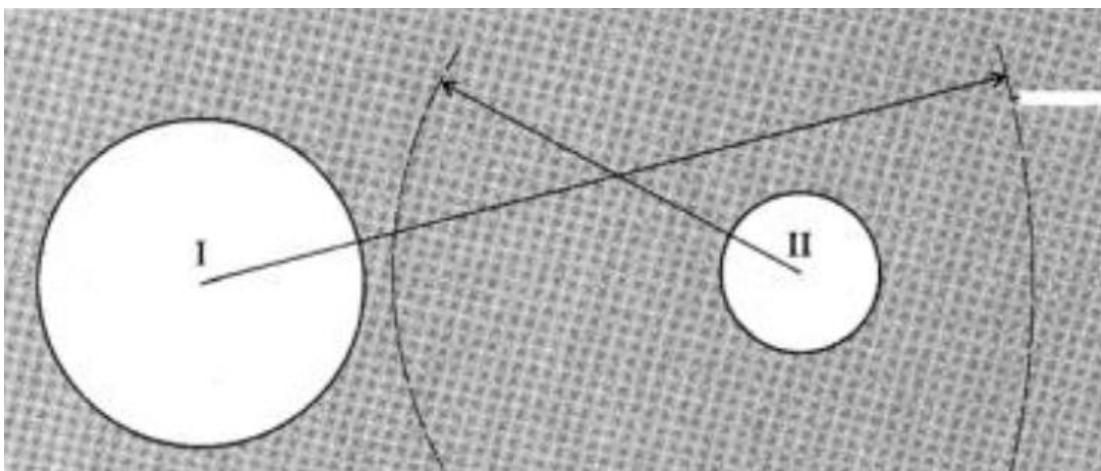
Σχήμα 27. Αποτόνωση αστήρικτης και στηριζόμενης ελαστικής βραχομάζας (σύμφωνα με τον Baudendistel, 1985)

Για όλες τις εγκάρσιες στον άξονα της σήραγγας διατομές σε απόσταση μεγαλύτερη από μία διάμετρο δεξιά ή αριστερά του μετώπου, παρατηρείται ότι η μετατόπιση δεν μεταβάλλεται με την απόσταση από το μέτωπο. Στις διατομές αυτές, $\Delta\epsilon_{zz} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{zy} = 0$, (z ο άξονας της σήραγγας) και επομένως η εντατική κατάσταση χαρακτηρίζεται ως επίπεδη παραμόρφωση. Αντίθετα, στην περιοχή που βρίσκεται μεταξύ μιας διαμέτρου μπρος και πίσω από το μέτωπο, το εντατικό πεδίο μεταβαίνει συνεχώς από το πρωτογενές στο δευτερογενές και ειδικότερα οι συνιστώσες της τάσης και της τροπής στη z διεύθυνση μεταβάλλονται με την απόσταση από το μέτωπο. Τη συνεχή αυτή μετάβαση του εντατικού πεδίου στην πράξη τη μελετούμε σε εγκάρσιες διατομές επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain analysis), στις οποίες ο εσωτερικός χώρος της σήραγγας αποτονώνεται ως συνάρτηση της απόστασης της διατομής από το μέτωπο (Σοφιανός, 2015).

4.2.3 Ζώνη Επιρροής Φρέατος

Οι Brady and Brown (1985) παρουσίασαν ότι σε ένα κυκλικό άνοιγμα μέσα σε πέτρωμα με υδροστατικό πεδίο τάσεων, σε απόσταση πέντε φορές την ακτίνα ($5R$) από το κέντρο του κυκλικού ανοίγματος η εφαπτομενική τάση ($\sigma_{\theta\theta}$) και η ακτινική τάση (σ_{rr}) διαφέρουν από τις τάσεις του υδροστατικού πεδίου ($\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr} = P_0$) κατά 4% μόνο. Μια νέα διάνοιξη, επομένως, σε απόσταση μεγαλύτερη από $5R$ μπορεί να θεωρηθεί ότι διανοίγεται σαν μεμονωμένη εκσκαφή. Με βάση αυτό το όριο μπορεί να υπολογισθεί ο γεωμετρικός τόπος της ζώνης επιρροής της εκσκαφής. Έτσι, δυο ίδιες κυκλικές εκσκαφές (δίδυμες) που διανοίγονται μέσα σε υδροστατικό εντατικό πεδίο τάσεων και τα κέντρα τους βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από $6R$ μπορούν να θεωρηθούν μεμονωμένες εκσκαφές.

Στην περίπτωση όπου οι κυκλικές εκσκαφές δεν είναι ίδιες και η μια είναι μικρότερη σε ακτίνα από την άλλη, τότε παρατηρείται ότι η μεγάλης διαμέτρου κυκλική εκσκαφή I επηρεάζει την μικρής διαμέτρου εκσκαφή II, όμως το αντίθετο δεν ισχύει. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον γίνει πρώτα η διάνοιξη του ανοίγματος I τότε για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς της διάνοιξης II θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη της διάνοιξης I. Αντίθετα, εφόσον έχει προηγηθεί η διάνοιξη του ανοίγματος II αυτό δεν θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της διάνοιξης I. Και στις δυο περιπτώσεις η διάνοιξη II θα επηρεασθεί πριν ή μετά την εκσκαφή από την διάνοιξη I.



Σχήμα 28. Ζώνη επιρροής μεγάλης (I) και μικρής (II) σήραγγας (Σοφιανός, 2015)

Στο παρών και υπό μελέτη έργο, το φρέαρ διαμέτρου 14 m και βάθους 200 m θα συνδεθεί με σήραγγα διαμέτρου 11 m περίπου και μήκους 400 m, ώστε να λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα μεταφοράς. Οι δύο διανοίξεις, συνεπώς, εξαιτίας της μεγάλης ζώνης επιρροής που δημιουργούν θα πρέπει να

βρίσκονται σε συνεχή παρακολούθηση ώστε να αποφευχθούν τυχόν μετακινήσεις στην επιφάνεια αλλά και στο μέτωπο αφού αλληλοεπηρεάζονται.

4.2.4 Σύγκλιση με την προχώρηση του μετώπου

Αν θεωρήσουμε x την απόσταση μεταξύ του εκάστοτε μετώπου και μιας διατομής $A - A'$, τότε $x < 0$ σημαίνει ότι η θέση της διατομής $A-A'$ δεν έχει εκσκαφθεί ακόμη, και $x > 0$ σημαίνει ότι η θέση της διατομής έχει ήδη εκσκαφθεί. Οι Chern et al. (1998), δίνουν την παρακάτω λύση, που βασίζεται σε εμπειρικά στοιχεία έργων.

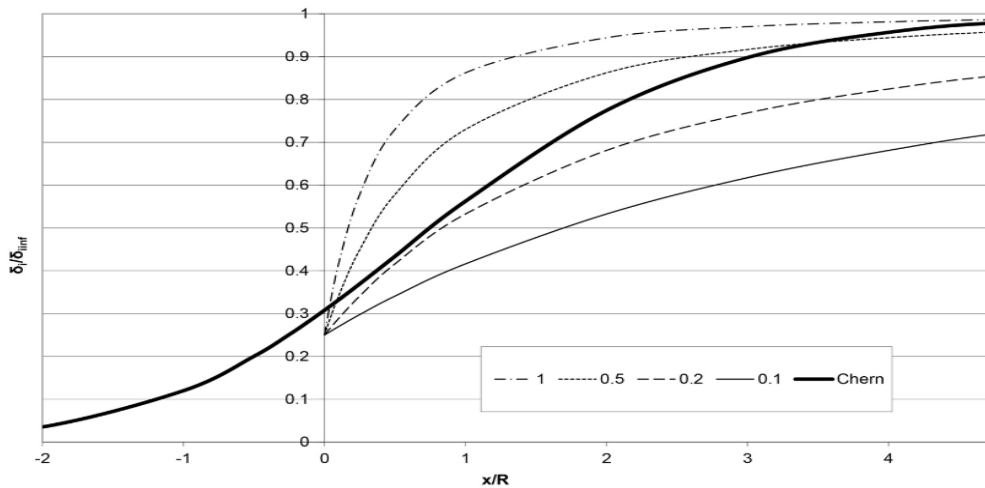
$$\frac{\delta_i(x)}{\delta_{i\infty}} = \left[1 + \exp\left(-0.91 \cdot \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7} \Leftrightarrow \frac{x}{R} = 1.10 \cdot \log \left[\left(\frac{\delta_i(x)}{\delta_{i\infty}} \right)^{-0.588} - 1 \right]$$

Ο Panet (1995) δίνει τις επόμενες σχέσεις για τις καμπύλες μετατόπισης κατά μήκος της σήραγγας, των οποίων η μορφή εξαρτάται από την παράμετρο ξ που χαρακτηρίζει τον βαθμό πλαστικοποίησης του πέτρωματος.

$$\frac{\delta_i(x)}{\delta_{i\infty}} = 0.25 + 0.75 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{\xi}{0.75} \cdot \frac{x}{R}} \right)^2 \right] \Leftrightarrow \frac{x}{R} = \frac{0.75}{\xi} \cdot \left[\sqrt{\frac{0.75}{1 - \frac{\delta_i(x)}{\delta_{i\infty}}} - 1} \right]$$

$$\frac{1}{\xi} = \frac{\delta_{i\infty,unsp}^{plastic}}{\delta_{i\infty,unsp}^{elastic}} = \frac{\delta_{i\infty,unsp}^{plastic}}{\frac{p_0 R}{2G}}; \frac{x}{R} \geq 0$$

$\delta_{i\infty,unsp}^{elastic}, \delta_{i\infty,unsp}^{plastic}$ είναι οι μετατοπίσεις της ανυποστήρικτης σήραγγας σε ελαστικό και ελαστοπλαστικό πέτρωμα και $\delta_{i\infty}$ είναι η πραγματική μετατόπιση της υποστηριγμένης σήραγγας.



Σχήμα 29. Καμπύλες μετατόπισης κατά μήκος της σήραγγας σύμφωνα με τους Panet και Chern

Παρατηρούμε ότι η μετατόπιση στο μέτωπο ($x=0$) ισούται με το 25% της τελικής μετατόπισης. Για ελαστική συμπεριφορά, $\xi=1$ και για $x=+\infty$ (η σήραγγα έχει διανοιχτεί πλήρως) η ακτινική μετατόπιση της ανυποστήρικτης σήραγγας ισούται με $\delta_{i\infty} = \rho_0 \cdot R / 2G$.

Η σχέση του Panet με $\xi=1$ για ελαστική βραχομάζα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των στρωμάτων της ρυοδακτινικής λάβας Θηρασίας, των τόφφων και της ρυοδακτινικής λάβας Αλωνάκι, ενώ για τα ελαστοπλαστικά στρώματα της κίσσηρης και των πυροκλαστικών έγινε χρήση της σχέσης των Chern. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τους υπολογισμούς του λόγου x/R για βήμα προχώρησης ίσο με 1 m και 2 m και ακτίνα R του κυκλικού φρέατος ίση με 7 m, των μετακινήσεων δ_i και της μέγιστης μετακίνησης $\delta_{i\infty}$, η οποία προσδιορίστηκε από την αριθμητική προσομοίωση της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης στο κεφάλαιο 5.3. Ο λόγος $\delta_i / \delta_{i\infty}$ μας δίνει τη παραμόρφωση των παρειών.

		Ρυοδακτινικές λάβες Θ.	Τόφφοι	Κίσσηρ η	Ρυοδακτινικές λάβες Αλ.	Πυροκλαστικά
X=1	x/R	0,14				
	δ_i [cm]	0,084	0,256	0,45	0,185	6,71
	* $\delta_{i\infty}$ [cm]	0,179	0,545	1,31	0,393	19,6
	$\delta_i / \delta_{i\infty}$	0,47	0,47	0,34	0,47	0,5
X=2	x/R	0,28				
	δ_i [cm]	0,11	0,33	0,5	0,24	7,4
	* $\delta_{i\infty}$ [cm]	0,179	0,545	1,31	0,393	19,6
	$\delta_i / \delta_{i\infty}$	0,61	0,61	0,38	0,61	0,56

*Βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 5

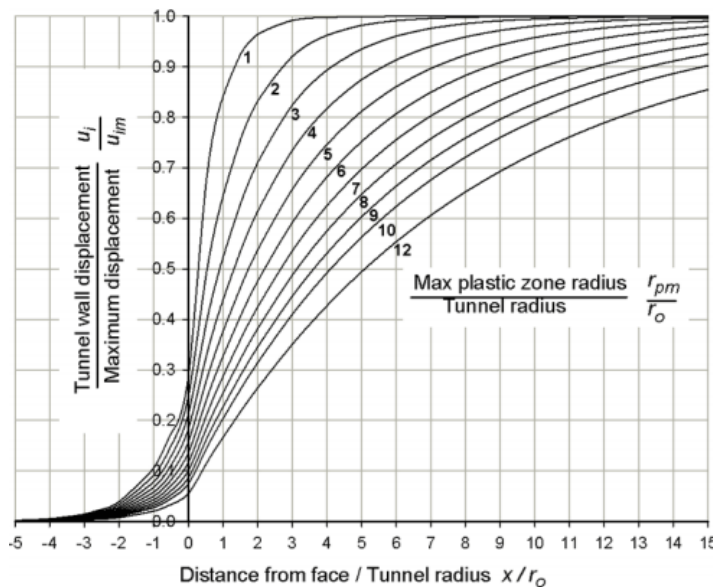
Πίνακας 8. Λόγος x/R , μετακίνηση δ_i και μέγιστη μετακίνηση $\delta_{i\infty}$ κατά Chern και Panet

Από τις σχέσεις των Vlachopoulos and Diederichs, 2009, η μέγιστη ακτίνα της πλαστικής ζώνης, υπολογίστηκε ως :

- 7,5 m για τη κίσηρη σε βάθος 110 m
- 29,7 m για τα πυροκλαστικά σε βάθος 200 m

Ο λόγος της ακτίνας της πλαστικής ζώνης προς την ακτίνα του φρέατος δίνεται από :

$$\frac{r_{pm}}{r_o} = \left[\frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)\sigma_{cm}} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$



Σχήμα 30. Καμπύλη LDP (Vlachopoulos and Diederichs, 2009)

	x	x/R	R _{pm} /R	U _i max	U _i /U _{imax}	U _i
Πυροκλαστικά	1	0,14	4,25	19,6	0,2	3,92
	2	0,28			0,25	4,9
Κίσηρης	1	0,14	1,07	1,31	0,32	0,42
	2	0,28			0,38	0,5

Πίνακας 9. Λόγος x/R, ακτίνα πλαστικής ζώνης R_{pm}, μετακίνηση u_i και μέγιστη μετακίνηση u_i max κατά Vlachopoulos and Diederichs

Βλέπουμε πως από τις σχέσεις των Chern για τα πυροκλαστικά για βήμα προχώρησης ίσο με 1 m η μέγιστη μετακίνηση είναι 6,71 εκατοστά και για βήμα προχώρησης ίσο με 2 m είναι 7,4 εκατοστά, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές εάν παρατηρήσουμε τη καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης του στρώματος (βλ. παράγραφο 5.3) αφορούν πίεση υποστήριξης ρ_i 22,6% σε σχέση με τη κρίσιμη όπου η καμπύλη ξεκινά να σβήνει. Επομένως, αυτό θα ήταν το κατώτατο επιτρεπτό όριο της χαλάρωσης του πετρώματος και της τοποθέτησης της υποστήριξης, η οποία αναλαμβάνει μικρό φορτίο.

Από τη σχέση των Vlachopoulos and Diederichs, φαίνεται πως οι μετακινήσεις των 4 και 5 εκατοστών δίνουν μια πιο ισορροπημένη κατάσταση όπου το πέτρωμα έχει χαλαρώσει ικανοποιητικά και η υποστήριξη αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης. Δεδομένου, πως το φρέαρ σε βάθος μεταξύ 150 m με 200 m έχει μεγάλη σύγκλιση για να διατηρηθεί η ομοιομορφία του μετώπου και προπάντων η ασφάλεια, οι τιμές της πίεσης υποστήριξης p_i και των μετακινήσεων u_i επιλέγονται βάσει των Vlachopoulos and Diederichs. Στα πρώτα τέσσερα στρώματα για βάθος έως 150 m το βήμα προχώρησης ορίζεται 2 m, όπου οι μετακινήσεις είναι μικρές οπότε δεν αναμένονται να εμφανιστούν προβλήματα κατά τη διάνοιξη. Το βήμα προχώρησης στο στρώμα των πυροκλαστικών καθορίζεται ως 1m για την εξασφάλιση ευνοϊκών συνθηκών εργασίας καθώς επίσης, στο βάθος αυτό είναι πρακτικά αδύνατο να ολοκληρώνεται ένας κύκλος εργασιών για 2 m μέσα στη μέρα, οπότε το 1 m συνδυάζει τους παράγοντες ασφάλεια και παραγωγικότητα. Στα υπόγεια έργα επειδή πάντοτε έγκειται ο παράγοντας των απρόσμενων, εάν παρατηρηθεί σύγκλιση των παρειών της εκσκαφής μεγαλύτερης των εκτιμώμενων, η προχώρηση δύναται να προσαρμοστεί στο 1 m. Το προσομοίωμα της επίπεδης παραμόρφωσης και το αξονοσυμμετρικό, της εκσκαφής του φρέατος, που περιγράφονται αναλυτικά στη παράγραφο 5.3, επαληθεύουν και αριθμητικά τις παραπάνω παραδοχές.

4.3 ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

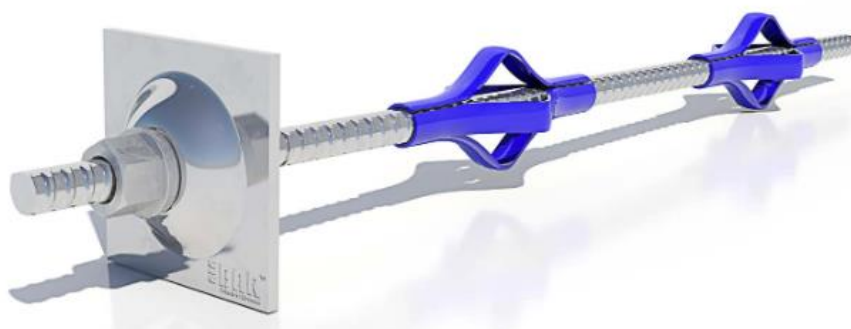
4.3.1 Εφαρμογή Αγκυρίων

Τα αγκύρια βράχου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Τα προεντεταμένα αγκύρια (tensioned cables) που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχόμαζας λόγω της προέντασης.
- Τα παθητικά αγκύρια (rock-bolts) των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Τα παθητικά αγκύρια διακρίνονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (fully bonded) και πρόσφυσης άκρου (end anchored). Τα αγκύρια πρόσφυσης άκρου είναι συνήθως τύπου διαστελλόμενης κεφαλής.

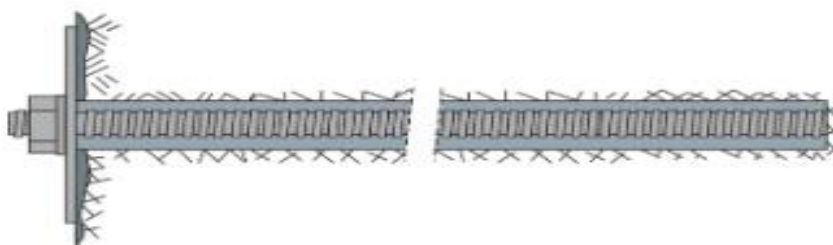
Η βραχομάζα γύρω από το άνοιγμα του φρέατος είναι κερματισμένη με χαμηλές γεωμηχανικές παραμέτρους και δεν έχει τη δυνατότητα να παραλαμβάνει σημαντικές εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις, έτσι εφαρμόζεται συστηματική τοποθέτηση παθητικών αγκυρίων (διαμήκων

χαλύβδινων ράβδων) σε ολόσωμη επαφή με το πέτρωμα λειτουργώντας ως οπλισμός.



Σχήμα 31. Παθητικό αγκύριο συνεχούς σπειρώματος (ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ)

Κατά τη διαδικασία τοποθέτησης των αγκυρίων, αρχικά, διανοίγονται διατρήματα διαμέτρου ελαφρώς μεγαλύτερης απ' ότι του αγκυρίου και μήκους ίσου με το μήκος του αγκυρίου. Έπειτα, τοποθετείται το τσιμεντένιο (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-04) με τη βοήθεια σωλήνα που εισάγεται στο βάθος του διατρήματος (λόγο Ν/Τ 0.30-0.35 τσιμεντένιματος). Στη συνέχεια, αφαιρείται ο σωλήνας καθώς αντλείται στο διάτρημα το ένεμα. Το αγκύριο ωθείται εντός του διατρήματος στο μισό περίπου βάθος και στη συνέχεια του δίνεται μια μικρή κάμψη πριν από την πλήρη ώθησή του εντός αυτού. Η κάμψη χρησιμεύει για τη συγκράτησή του εντός του διατρήματος μέχρι να πήξει το ένεμα. Το μήκος των αγκυρίων που εισέρχονται σε διατρήματα πληρωμένα με πυκνό ένεμα δεν μπορεί γενικά να ξεπερνά τα 5 m, ενώ για μήκη μεγαλύτερα από 5 m, το ένεμα πάκτωσης εισέρχεται στο διάτρημα μετά την τοποθέτηση του αγκυρίου. Όταν πήξει το τσιμεντένιο περνιέται μετωπική πλάκα στο εξωτερικό άκρο του αγκυρίου, η οποία συσφίγγεται με περικόχλιο στο πέτρωμα. Η τοποθέτηση αυτής της μετωπικής πλάκας στοχεύει στην παρεμπόδιση της απόξεσης του αγκυρίου από το πέτρωμα κοντά στο εξωτερικό άκρο όπου οι παραμορφώσεις της βραχομάζας είναι μεγάλες.



Σχήμα 32. Απλό αγκύριο ολόσωμης πάκτωσης με τσιμεντένιο

Το στέλεχος του αγκυρίου είναι χαλύβδινη ράβδος, κυκλικής διαμέτρου, με κοινές ή σπειροειδείς νευρώσεις. Το τσιμεντένιο συνίσταται από τσιμέντο,

λεπτή άμμο και νερό ενώ για ταχύτερη ανάπτυξη της αντοχής δύνανται να περιέχει πρόσμικτα. Η εσωτερική σύζευξη αγκυρίου – ενέματος επιτυγχάνεται με χημική πρόσφυση, ενώ η εξωτερική σύζευξη στο ελεύθερο άκρο της ράβδου με ελαφρά τάνυση (σύσφιξη) του περικοχλίου για ενεργοποίηση της στερέωσης. Η τάνυση πραγματοποιείται με αερόκλειδο στο προεξέχον μήκος του αγκυρίου με τη μεσολάβηση ροδέλας και πλάκας διανομής, ώστε η πλάκα να είναι σε καλή επαφή με το πέτρωμα.

ELEBAR™-G standard range			G20/S	G25/S	G28/S	G32/S	G40/S
Σπείρωμα Thread			G20	G25	G28	G32	G40
Φορά σπειρώματος Thread direction			αριστερόστροφο left hand				
Ονομαστική διάμετρος Nominal diameter	D	mm	20	25	28	32	40
Μέγιστη διάμετρος Max diameter	D_{max}	mm	23	29	32	36	45
Ονομαστική διατομή Nominal cross-section	A	mm²	314	491	616	804	1.256
Ονομαστικό βάρος Nominal weight		kg/m	2,47	3,85	4,83	6,31	9,87
Όριο διαρροής Yield strength	f_{yk}	N/mm² (MPa)	500				
Εφελκυστική αντοχή Tensile strength	f_{tk}	N/mm² (MPa)	550				
Επιμήκυνση Elongation		%	> 10				
Τυπικό φορτίο διαρροής Typical yield load	F_{0,2k}	kN	160	245	310	405	630
Τυπικό φορτίο θραύσεως σε εφελκυσμό Minimum fracture load	F_{tk}	kN	175	270	340	440	690

Πίνακας 10.Χαρακτηριστικά απλών αγκυριών κατηγορίας B500C (ELEBOP AEBE)

Τα αγκύρια συστηματικής παθητικής ενίσχυσης που θα χρησιμοποιηθούν στο φρέαρ διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Κατηγορία B500C απλού τύπου
- Διάμετρο 28 mm
- Μήκος 4 m

4.3.2 Εφαρμογή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (shotcrete)

Ο όρος χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm) τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση (με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα). Με την εκτόξευση σκυροδέματος στα τοιχώματα των εκσκαφών και την ταχεία πρόσφυσή του σε αυτά επιτυγχάνεται η άμεση επένδυσή τους χωρίς τη χρήση καλουπιών. Το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται από το ακροφύσιο σε μία τραχεία επιφάνεια πετρώματος σχηματίζει, αρχικά, ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με

κόκκους άμμου μικρότερους από 0,2 mm. Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μία βάση για την εκτόξευση και συμπύκνωση του υπολοίπου πάχους. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέτρο άμεσης προσωρινής υποστήριξης συνεισφέρει :

- στη στατική ενίσχυση του πετρώματος σε διάφορες κλίμακες
- στη σφράγιση οξειδούμενου ή χαλαρούμενου πετρώματος για αποφυγή της περαιτέρω χαλάρωσης λόγω έκθεσής του σε νερό ή υγρασία
- στον έλεγχο του νερού και της δημιουργίας πάγου

Συγχρόνως, τα πλεονεκτήματά του σε σύγκριση με άλλα μέτρα υποστήριξης είναι :

- η δυνατότητα άμεσης επέμβασης
- η τοποθέτησή του χωρίς χρήση καλουπιών
- η ανεξαρτησία του από τη μορφή της επιφάνειας διάστρωσης
- η συνεργασία του με άλλα μέτρα υποστήριξης

Τα υλικά και η σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η εκτέλεση της εργασίας, οι έλεγχοι, οι απαιτήσεις υγείας – ασφάλειας και ο τρόπος επιμέτρησης εργασιών ορίζονται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00.

4.3.2.1 Υλικά

Η επιλογή του τύπου του τσιμέντου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτάται από τη συμβατότητά του με τους διαθέσιμους επιταχυντές. Ο βέλτιστος χρόνος πήξης επιτυγχάνεται με τον πιο συμβατό συνδυασμό τσιμέντου και επιταχυντή πράγμα το οποίο απαιτεί εργαστηριακές δοκιμές. Η ποσότητα τσιμέντου εξαρτάται από την απαίτηση αντοχής για το μέγιστο κόκκο αδρανών και δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη των 300 kg/m³ (EFNARC, 1996). Μη αναγκαία μεγάλη απαίτηση αντοχής απαιτεί υπερβολικά μεγάλη αναλογία τσιμέντου που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη συστολή ξήρανσης και ρωγμάτωση. Αν χρησιμοποιούνται μη αλκαλικοί επιταχυντές, που δεν μειώνουν την αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς, η ποσότητα του τσιμέντου δύναται να είναι 350-400kg/m³, αρκεί να είναι διαθέσιμη η κατάλληλη άμμος με υψηλή ποσότητα παιπάλης (Μιχαηλίδης, 2015).

Τα ορυκτά πρόσθετα (EN 206-1) στο μείγμα είναι βιομηχανικά παραπροϊόντα, τα οποία βελτιώνουν την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και την ανθεκτικότητά του στη θερμική ρωγμάτωση, στη διαστολή της αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης και στην προσβολή από θειικά. Διακρίνονται σε :

- υδραυλικά (σκωρία υψικαμίνων GGBS, ιπτάμενη τέφρα τύπου W ή C), τα οποία επιβραδύνουν την ανάπτυξη της αντοχής αλλά αυξάνουν την ανθεκτικότητα
- ποζολανικά (πυριτιακή παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα τύπου V ή F), τα οποία βελτιώνουν την ανθεκτικότητα, αυξάνουν τη συνάφεια και τις μηχανικές ιδιότητες αλλά μειώνουν το pH του νερού των πόρων του σκυροδέματος, γι' αυτό πρέπει να είναι περιορισμένη η ποσότητά τους.

Το νερό του μείγματος πρέπει να είναι καθαρό και να μην περιέχει συστατικά που επιβραδύνουν ή επιταχύνουν την ενυδάτωση και θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του EN 1008. Φυσικά νερά (υπόγεια, ποτάμια, λιμναία, βρόχινα) είναι γενικά κατάλληλα. Ο λόγος $N/(T+\text{πρόσθετα})$ έχει μεγάλη σημασία τόσο στην επίτευξη ικανοποιητικής θλιπτικής αντοχής, όσο και στη μείωση του βαθμού της αναπήδησης. Θα πρέπει να είναι μικρότερος του 0,55 (EFNARC, 1996) και προτιμότερο είναι να κυμαίνεται μεταξύ 0,40 και 0,45.

Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος προδιαγράφεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620. Τα αδρανή σκυροδέματος χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη διαβάθμιση των κόκκων (κοκκομετρικά κλάσματα):

- άμμος
- γαρμπίλι
- σκύρα ή χαλίκι

Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λείπει το τελευταίο κλάσμα. Τα αδρανή πρέπει να είναι ελεγμένα έναντι αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης με τα υδραυλικά συνδετικά και τα πρόσμικτα όπως οι επιταχυντές. Οι σημερινές προδιαγραφές τείνουν περισσότερο να είναι απαιτήσεις συμπεριφοράς, δηλαδή να μην απαιτούν συγκεκριμένες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αλλά μόνον ότι το τελικό προϊόν θα πρέπει να έχει μία καθορισμένη αντοχή.

Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω της εφαρμογής του με ψεκασμό, υπάρχουν δύο απαιτήσεις. Ως νωπό σκυρόδεμα απαιτείται να έχει πολύ καλή εργασιμότητα και αντλησιμότητα. Αντίθετα, μετά τον ψεκασμό απαιτείται άμεση ανάπτυξη της αντοχής που να δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής ακόμη και στην οροφή στρώματος σκυροδέματος επαρκούς πάχους που να φέρει το ίδιο του βάρος. Στις σήραγγες συχνά οι απαιτούμενοι χρόνοι αρχικής πήξης είναι μικρότεροι από 3 λεπτά, τελικής πήξης μικρότεροι από 10 λεπτά και ανάπτυξης αντοχής μεγαλύτερης από 5 MPa στις πρώτες 8

ώρες. Οι επιταχυντές είναι χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να αποκτά γρηγορότερα αντοχή και να μπορεί να φέρει φορτία της σήραγγας σε πρώιμα στάδια της διάνοιξης. Εκτός αυτού μειώνουν τον βαθμό της αναπήδησης των αδρανών και επιτρέπουν τη δημιουργία παχύτερων στρώσεων ανά ψεκασμό, την εκτόξευση σε υγρές επιφάνειες με μικρή ροή και την εκτόξευση προς την οροφή. Η εκτίμηση της καταλληλότητας του επιταχυντή θα πρέπει να γίνεται στο εργαστήριο πριν από την έναρξη της κατασκευής, αφού πολλοί επιταχυντές είναι ασύμβατοι με διάφορα τσιμέντα. Οι επιταχυντές προσφέρονται σε μορφή υγρού ή σκόνης. Διακρίνονται σε ελεύθερους αλκαλίων και σε αλκαλιούχους.

Εάν χρησιμοποιείται αυξημένη δόση αλκαλικού επιταχυντή (>6%) η πτώση της αντοχής μπορεί να ξεπεράσει το 50% και αυτό θα οδηγήσει σε αρχική σύνθεση με υψηλό ποσοστό τσιμέντου και άρα υψηλό κόστος. Αντίθετα, η χρήση μη αλκαλικών επιταχυντών δεν επιφέρει μείωση αντοχών. Το πλεονέκτημα των αλκαλικών επιταχυντών, οι οποίοι στην Ευρώπη έχουν καταργηθεί, είναι ο πολύ χαμηλός χρόνος πήξης που προσφέρουν και η δυνατότητα στο χειριστή να εφαρμόζει μεγάλα πάχη στρώσεων χωρίς κόπο με ένα πέρασμα (Μιχαηλίδης, 2015). Για το ίδιο πάχος στρώσης, αν χρησιμοποιηθεί μη αλκαλικός επιταχυντής χρειάζονται τρία ή και τέσσερα περάσματα.

Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος η αναλογία ανάμιξης είναι η εξής (για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2250-2350 kg):

- Τσιμέντο: 400-450 kg
- Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10mm): 1600-1700 kg
- Παιπάλη πυριτίου (micro-silica): 30-50 kg
- Επιταχυντής πήξεως: 10-15 kg
- Νερό: 200-250 kg

4.3.2.2 Παράγοντες Επηρεασμού Εργασιμότητας

Η εργασιμότητα αφορά το έργο που απαιτείται για τη μεταφορά, διάσπρωση και συμπύκνωση του υλικού. Η παρουσία υψηλού ποσοστού πόρων λόγω ελλιπούς συμπύκνωσης στο σκυρόδεμα συνεπάγεται δραστική μείωση της αντοχής του, σε σχέση με το πλήρως συμπυκνωμένο υλικό. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα με ανάλογο έργο (εργασιμότητα) για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή. Η συνεκτικότητα είναι η φυσική ιδιότητα του σκυροδέματος που καθορίζει τη συνοχή του νωπού μείγματος και των επί μέρους υλικών. Σχετίζεται με την ευκολία συμπύκνωσης και ροής του σκυροδέματος και εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα νερού,

την περιεκτικότητα και το είδος του τσιμεντού, τα λεπτόκοκκα και την παιπάλη, την κοκκομετρία και το σχήμα των αδρανών. Ο λόγος N/T επηρεάζει το ποσοστό των κενών – πόρων στο τελικό προϊόν, άρα επηρεάζει καθοριστικά την αντοχή. Με αύξηση του N/T μειώνεται η αντοχή, οπότε δεν προστίθεται νερό στο έργο. Σκυρόδεμα με αυξημένη εργασιμότητα είναι μεν εργάσιμο, αλλά τείνει να εμφανίσει εξίδρωση και απόμιξη. Αντίθετα, σκυρόδεμα με μειωμένη εργασιμότητα είναι δύσκολο να διαστρωθεί και θα είναι δύσκολο να συμπυκνωθεί και πάλι θα έχει απόμιξη. Γενικά, η υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο ή σε λεπτόκοκκα δίνει σκυροδέματα με ψηλή συνοχή (σφιχτά σκυροδέματα). Η κοκκομετρία επηρεάζει την απαίτηση σε νερό για δεδομένη συνεκτικότητα. Πολύ λεπτές άμμοι ή γωνιώδεις απαιτούν ψηλή περιεκτικότητα σε νερό και παράγουν πολύ σφιχτά σκυροδέματα σε N/T, σε αντίθεση με πιο χονδρόκοκκα ή στρογγυλεμένα αδρανή που θα παρήγαγαν καλή εργασιμότητα.

Κατηγορία	Επεξήγηση	Κάθιση σε mm
S1	Ελάχιστο Πλαστικό (Πολύ σφιχτό)	10 έως 40
S2	Μέτρια πλαστικό (Σφιχτό)	50 έως 90
S3	Πλαστικό (Μαλακό)	100 έως 150
S4	Λίγο ρευστό (Πολύ μαλακό)	160 έως 210
S5	Ρευστό	≥ 220

Πίνακας 11.Κατηγορίες συνεκτικότητας (EN 206 - 1) δοκιμής κάθισης (EN 12350 - 2)

Η απόμιξη πρόκειται για το διαχωρισμό (λόγω ιδίου βάρους) των αδρανών κατά τη σκυροδέτηση (διάστρωση και συμπύκνωση). Οφείλεται σε κακή δόνηση και συμπύκνωση, διακρίνεται σε :

- απόμιξη των (χονδρόκοκκων) αδρανών
- αποκόλληση της τσιμεντόπαστας από τα αδρανή (ρευστά σκ/τα)

Συνεπάγεται κακή αντοχή, μεγάλο πορώδες και κόστος επισκευής. και κακή κατασκευή των ξυλοτύπων (προσοχή στη στεγάνωση των σιδηροτύπων στη βάση και στα πλαϊνά). Αποφεύγεται με κατάλληλη μελέτη σύνθεσης και κοκκομετρία, με χρήση χημικών προσθέτων και κατασκευαστικά μέτρα (κατάλληλη δόνηση, μικρές στρώσεις με ανάμιξη μεταξύ τους όσο είναι πλαστική η προηγούμενη στρώση, μείωση της διαδρομής ή του ύψους σκυροδέτησης).

Η εξίδρωση αποτελεί μια μορφή απόμιξης. Πρόκειται για το σταδιακό διαχωρισμό του νερού από το νωπό σκυρόδεμα προς την άνω επιφάνεια, λόγω της σταδιακής καθίζησης – συμπύκνωσης των αδρανών μέσα στο

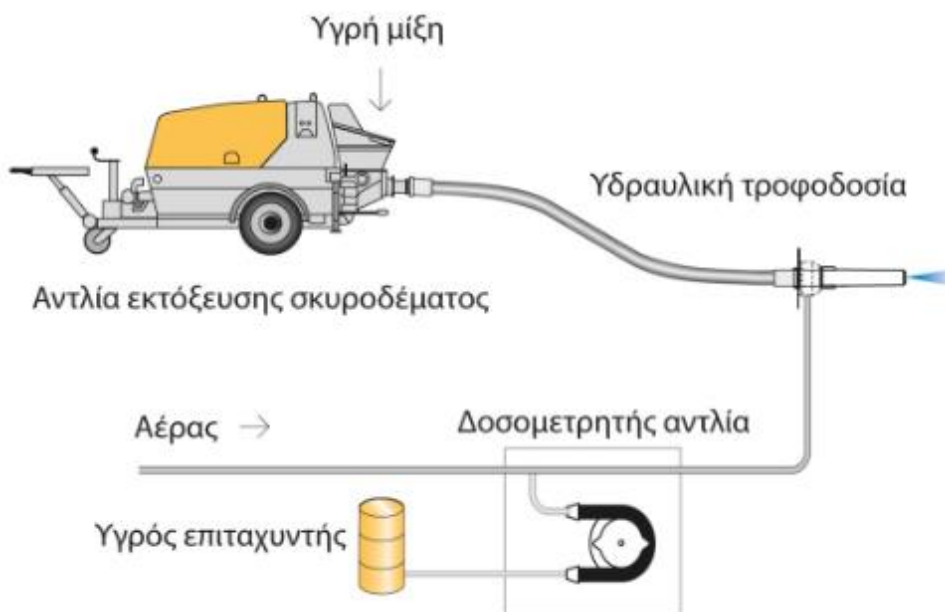
μίγμα. Σχετίζεται με τις τριχοειδείς δυνάμεις που αναπτύσσονται στους πόρους. Μπορεί να προκαλέσει διαφορεική συγκέντρωση υγρασίας της επιφάνειας. Οφείλεται στο υπερβολικό νερό και στη διαβάθμιση των αδρανών, ενώ επιτείνεται με αύξηση του N/T και με την έλλειψη λεπτόκοκκων στο μίγμα (παιπάλη). Παρεμποδίζεται με σκόπιμη ενσωμάτωση φυσαλίδων αέρα και επέκταση του χρόνου έναρξης της πήξης.

4.3.2.3 Μέθοδος Παρασκευής

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το φρέαρ αποτελεί ένα μεγάλο έργο όπου πρόκειται να γίνει κατανάλωση μεγάλης ποσότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ως εκ τούτου προτιμάται η παρασκευή υγρού μίγματος στο εργοτάξιο. Το νωπό σκυρόδεμα έρχεται στη μηχανή εκτόξευσης είτε ως εργοστασιακό (έτοιμο) είτε ως εργοταξιακό, όπως στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εργοταξιακό σκυρόδεμα λέγεται το σκυρόδεμα στο οποίο ο κύριος του έργου ή ο Επιβλέπων έχει πλήρη παρακολούθηση και έλεγχο της παραγωγής σε όλες της φάσεις της. Μπορεί να ελέγχει τα υλικά του σκυροδέματος, τα μηχανήματα παραγωγής, να μεταβάλλει τις αναλογίες συνθέσεως και τη διαδικασία αναμίξεως και μπορεί να ελέγχει το έτοιμο προϊόν σε οποιαδήποτε θέση (μέσα στον αναμικτήρα, μετά την αποφόρτωση, μετά τη μεταφορά κλπ). Τα πλεονεκτήματα της παρασκευής υγρού μίγματος είναι :

- η μεγάλη απόδοση
- το περιβάλλον εργασίας
- η ποιότητα εφαρμογής

Η αναπήδηση είναι μικρή 5 -10 % ενώ η αιωρούμενη σκόνη είναι μειωμένη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ρομπότ βελτιώνοντας την ασφάλεια της εργασίας. Επίσης, επιτυγχάνονται παχύτερες στρώσεις σκυροδέματος με καλύτερη πρόσφυση , η ποιότητα είναι σταθερή και με τη χρήση υπερρευστοποιητών και μικροπυριτίας επιτυγχάνονται υψηλές τιμές τελικής αντοχής έως 100MPa.



Σχήμα 33. Διαδικασία εκτόξευσης σκυροδέματος υγρής μίξης

Το νωπό σκυρόδεμα παρασκευάζεται όπως το κοινό σκυρόδεμα και μεταφέρεται σε σωλήνες με τη βοήθεια αντλιών και την προσθήκη αέρα 7-15 m³/min με πίεση 7 bar. Στη συνέχεια, φτάνει χωριστά από τον επιταχυντή στο ακροφύσιο του εξοπλισμού, από όπου εκτοξεύεται. Η εφαρμογή πραγματοποιείται με πυκνή ροή. Κατά τη μέθοδο πυκνής ροής, το επαρκώς υγρό σκυρόδεμα αντλείται έως το ακροφύσιο με αντλία σκυροδέματος και μετά διασπείρεται με πιεσμένο αέρα σε έναν μετασχηματιστή όπου η ροή του μετατρέπεται σε αραιή. Η κύρια διαφορά από το συμβατικό αντλούμενο σκυρόδεμα έγκειται στην απαίτηση για όσο το δυνατόν λιγότερους παλμούς κατά την διάρκεια μεταφοράς ώστε ο ψεκασμός από το ακροφύσιο να είναι σταθερός. Ο πιεσμένος αέρας, μέσω ενός αεροσυμπιεστή, τροφοδοτείται σε ξεχωριστές σωλήνες προς το ακροφύσιο. Το επιταχυντικό πρόσμικτο προστίθεται από τη μετρητική μονάδα, στον πιεσμένο αέρα λίγο πριν το μετασχηματιστή, ώστε η συγκέντρωσή του να είναι ομοιόμορφη στο σκυρόδεμα. Η δΟΣΟΛΟΓΙΑ είναι συγχρονισμένη με την ποσότητα του σκυροδέματος ώστε να προστίθεται πάντα η προκαθορισμένη ποσότητα του επιταχυντή. Η μέθοδος πυκνής ροής είναι σύγχρονη και υψηλής απόδοσης διαδικασία, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται πάντα όταν προδιαγράφεται σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας και απόδοσης. Τα προτερήματα της εφαρμογής πυκνής ροής, έχουν ως εξής :

- μεγάλη παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι 25 m³/h σε ορισμένες περιπτώσεις
- βελτιωμένες συνθήκες εργασίας στην περιοχή ψεκασμού, λόγω της μικρότερης παραγωγής σκόνης
- υψηλή ποιότητα και ανθεκτικότητα λόγω της ελεγχόμενης σταθερής ποσότητας του νερού ανάμειξης

- μειωμένη αναπήδηση στο μισό έως τέταρτο
- μειωμένο κόστος φθοράς στον εξοπλισμό ψεκασμού
- χαμηλή κατανάλωση αέρα κατά τη διάρκεια του ψεκασμού

4.3.2.4 Οπλισμός Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος

Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα είναι ένα ψαθυρό υλικό με περιορισμένη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη αλλά σημαντική αντοχή σε θλίψη. Εντούτοις, η καταπόνησή του ως υλικό επένδυσης είναι κατά βάση θλιπτική. Ανάλογα με τις συνθήκες καταπόνησής του δύναται να είναι άοπλο ή να οπλίζεται προκειμένου να αναλαμβάνονται τυχόν εφελκυστικές τάσεις. Ο συμβατικός του οπλισμός πραγματοποιείται συνήθως με την τοποθέτηση δομικού πλέγματος (ΤΠ 1501-12-03-08-00, ΕΛΟΤ) σε μία ή δύο στρώσεις. Περαιτέρω ενίσχυσή του δύναται να επιτευχθεί με τον εγκιβωτισμό δικτυωτών πλαισίων.

Στο φρέαρ προβλέπεται να τοποθετηθεί δομικό πλέγμα T188 χάλυβα B500C με τα εξής χαρακτηριστικά :

Δομικό Πλέγμα T188 (Μήκος = 5 m, Πλάτος = 2,15 m)	
Απόσταση διαμήκων ράβδων	150 mm
Απόσταση εγκάρσιων ράβδων	150 mm
Διάμετρος διαμήκων ράβδων	6 mm
Διάμετρος εγκάρσιων ράβδων	6 mm
Διατομή χάλυβα διαμήκων ράβδων	1,88 cm ² / m
Διατομή χάλυβα εγκάρσιων ράβδων	1,88 cm ² / m
Βάρος / πλέγμα	32,9 kg
Βάρος / m ²	3,06 kg / m ²

Πίνακας 12.Χαρακτηριστικά δομικού πλέγματος T188

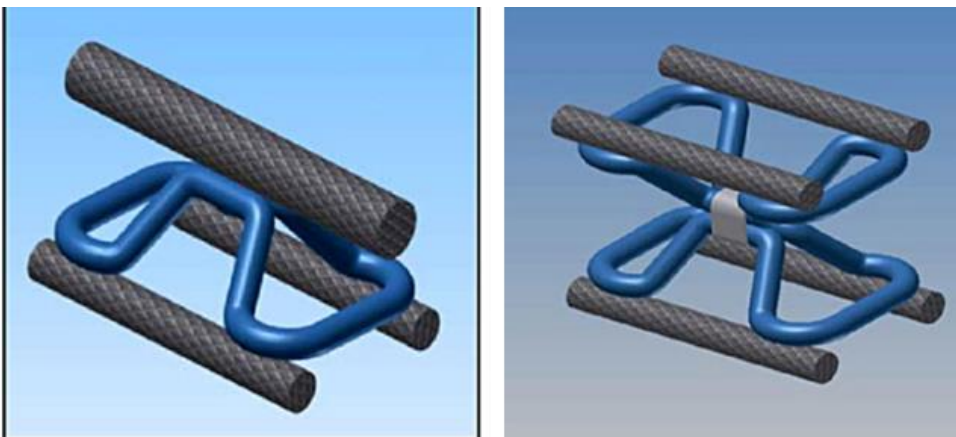
Οι χαλύβδινες νευρώσεις λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων. Οι χαλύβδινες νευρώσεις τοποθετούνται κατά τη διατομή του ανοίγματος και είναι των εξής τύπων:

- Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB100-160
- Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) που αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος
- Συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού (π.χ. 4-6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες σε αποστάσεις της τάξεως του μέτρου)

Τα δικτυωτά πλαίσια αποτελούν ένα μεταλλικό φορέα αποτελούμενο από ράβδους. Τα πλαίσια αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ράβδοι οπλισμού που συνδέονται μεταξύ τους δια ηλεκτροσυγκόλλησης με λεπτότερες ράβδους διαμέτρου 10 - 12 mm, ώστε το σύνολο να αποτελεί μία δικτυωτή δοκό μορφής ζευκτού με ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων και ροπών. Τα μεταλλικά πλαίσια τοποθετούνται στις θεωρητικές γραμμές, κλίσεις και διαστάσεις, με ανοχή ~2cm.

Το σκυρόδεμα ενισχυμένο με δικτυωτά πλαίσια έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο του προφίλ της εκσκαφής
- Επιτρέπει καλύτερο έλεγχο του πάχους του σκυροδέματος που τοποθετείται στο έργο
- Εξασφαλίζει σωστή τοποθέτηση των πλεγμάτων πριν την τοποθέτηση του σκυροδέματος
- Προσδίδει στην επένδυση από σκυρόδεμα μεγαλύτερη ικανότητα υποστήριξης
- Μετατρέπει το κέλυφος του σκυροδέματος σε πιο όλκιμο (το σκυρόδεμα από μόνο του είναι ψαθυρό ακόμα και με ίνες).



Σχήμα 34. Δικτυωτά πλαίσια τριών και τεσσάρων (διαμήκων) ράβδων

Δικτυωτά πλαίσια τριών ράβδων																		
Τύπος	S ₁	S ₂	S ₃	G	H	B	e	F	J _x	W _x	J _y	W _y	Πλάκα σύνδεσης			Πλάκα ποδός		
H1	mm	mm	mm	kg/m	mm	mm	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	Διαστάσεις cm	L cm	G kg	Διαστάσεις cm	G kg	
50	10	26	18	10.0	94	100	4.82	10.40	138	29	89	18	L10.2x1.0x1.0	11.6	1.5	1.0x12.7x12.7	1.2	
	10	30	20	12.3	100	100	5.03	13.35	193	38	106	21		11.6	1.5			
	10	26	18	10.2	114	140	5.79	10.40	223	39	192	27		13.5	1.6			
70	10	30	20	12.5	120	140	5.97	13.35	306	51	232	33		L10.2x1.0x1.0	14.0	1.7	1.0x15.2x15.2	1.7
	10	34	26	17.5	130	140	7.09	19.70	501	71	356	51			14.6	1.8		
	10	26	18	10.7	139	180	7.01	10.40	359	51	337	37			16.7	2.0		
95	10	30	20	13.1	145	180	7.14	13.35	485	66	407	45	L12.4x1.3x1.3		17.1	2.1	1.0x17.8x20.3	2.7
	10	34	26	18.2	155	180	8.44	19.70	774	92	641	71			17.9	2.2		
	12	26	18	11.7	159	220	7.99	10.40	491	61	521	47			19.5	3.6		
115	12	30	20	14.1	165	220	8.09	13.35	658	78	634	58		L12.4x1.3x1.3	19.8	3.7	1.0x20.3x24.1	3.7
	12	34	26	19.2	175	220	9.52	19.70	1040	109	1010	92			20.6	3.8		
	12	26	18	11.7	174	220	8.72	10.40	603	69	521	47			20.6	3.8		
130	12	30	20	14.1	180	220	8.79	13.35	805	87	634	58	L12.4x1.3x1.3		21.1	3.9	1.0x20.3x24.1	3.7
	12	34	26	19.2	190	220	10.33	19.70	1264	122	1010	92			22.2	4.2		

Δικτυωτά πλαίσια τεσσάρων ράβδων																
Τύπος	D	S	G	H	B	F	J _x	W _x	J _y	W _y	Πλάκα σύνδεσης			Πλάκα ποδός		
H1	mm	mm	kg/m	mm	mm	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	Διαστάσεις cm	L cm	G kg	Διαστάσεις cm	G kg	
100	10	18	11.33	136	100	10.20	356	52	173	35	L1.0.1x1.0x1.3	13.3	2.5	1.3x12.7x17.8	2.3	
		20	13.21	140		12.56	456	65	204	41		14.0	2.7			
		22	15.22	144		15.20	570	79	234	47		14.6	4.1			
		26	19.98	152		21.24	851	112	299	59		15.2	2.9			
		30	25.53	160		28.28	1210	151	302	72		16.5	3.1			
140	10	18	11.72	176	140	10.20	637	72	381	54		L1.0.1x1.0x1.3	17.1	3.3	1.3x17.8x22.9	3.7
		20	13.60	180		12.56	807	90	456	65			17.8	3.4		
		22	15.64	184		15.20	1002	109	534	76			18.4	3.5		
		26	20.40	192		21.24	1472	153	699	100			19.1	3.6		
		30	25.92	200		28.28	2059	206	871	124			20.3	3.9		
180	10	18	12.67	216	180	10.20	999	95	670	74	L1.0.1x1.0x1.3		21.3	4.0	1.3x20.3x26.7	5.4
		20	14.55	220		12.56	1260	115	807	90			21.9	4.2		
		22	16.59	224		15.20	1555	139	953	106			22.5	4.3		
		26	21.35	232		21.24	2262	195	1268	141			23.2	4.4		
		30	26.87	240		28.28	3133	261	1808	178			24.4	4.7		
220	12	18	14.58	256	220	10.20	1443	113	1040	95		L1.0.1x1.0x1.3	25.2	4.8	1.6x25.4x30.5	9.6
		20	16.46	260		12.56	1883	139	1399	127			25.9	4.9		
		22	18.50	264		15.20	2231	169	1495	136			27.6	5.0		
		26	23.26	272		21.24	3222	237	2007	182			27.1	5.4		
		30	28.78	280		28.28	4434	317	2567	233			28.1	5.4		

όπου:

S (4 ίδιες), S₁ (1 μεγάλη), S₃ (2 μικρές), οι διαμέτροι των διαμηκών ράβδων,

S₁ και D οι διαμέτροι των συνδετήριων ράβδων,

H₁ και H η εσωτερική και εξωτερική απόσταση των ράβδων, στο επίπεδο του πλαισίου, αντίστοιχα,

e η απόσταση του κέντρου βάρους από το άκρο της μεγάλης ράβδου,

B η εξωτερική απόσταση των ράβδων κάθετα στο επίπεδο του πλαισίου.

Πίνακας 13. Πρότυπες διατομές δικτυωτών πλαισίων τριών και τεσσάρων ράβδων (Pantex, ALWAG TECHMO)

Στο φρέαρ προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν χαλύβδινες νευρώσεις δικτυωτών πλαισίων για τα τελευταία 50 m της διάνοιξης, στο στρώμα των πυροκλαστικών. Τα δικτυωτά πλαίσια είναι τριών διαμήκων ράβδων τύπου 95/12, σύμφωνα με τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα.

4.3.3 Τελική Επένδυση

Το φρέαρ κατασκευάζεται σε περιοχή κοντά στην θάλασσα, οπότε η τοποθέτηση αδιαπέρατης μεμβράνης στεγανοποίησης, επί της επιφάνειας της προσωρινής υποστήριξης, τίθεται υποχρεωτική για τη προστασία της τελικής επένδυσης από τη διήθηση του θαλασσινού νερού. Η εφαρμογή της σκυροδέτησης επιτυγχάνεται από εσωτερικό μεταλλότυπο (καλούπι) πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης και ξεκινά από τη θεμελίωση του φρέατος μέχρι να φθάσει στην επίγεια επιφάνεια.

Τόσο το έγχυτο όσο και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διέπονται από τους ίδιους κανονισμούς και παραμέτρους παρασκευής, όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο

εφαρμογής και στα κοκκομετρικά κλάσματα των αδρανών που εμπεριέχονται. Πιο συγκεκριμένα, το έγχυτο εφαρμόζεται με τη διαδικασία της σκυροδέτησης με καλούπι και χρησιμοποιούνται και τα τρία κοκκομετρικά κλάσματα αδρανών (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα ή χαλίκι), ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ψεκασμό από αυτόματο μηχάνημα και δεν περιέχει σκύρα και χαλίκι. Επίσης, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνήθως οπλίζεται με ελαφριού τύπου οπλισμό (δομικό πλέγμα, δικτυωτά πλαίσια, χαλύβδινες ίνες κλπ) ενώ το οπλισμένο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης με βαρύ οπλισμό, συνήθως από χαλύβδινες ράβδους.

Οι απαιτήσεις του σχεδιασμού της τελικής επένδυσης, πρέπει να μελετώνται ενδελεχώς ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του έργου και να συμμορφώνονται σύμφωνα με τους κανόνες που διέπουν το σχεδιασμό των κατασκευών από σκυρόδεμα του Ευρωκώδικα 2 (Κάππος *et al.*, 2009) και το σχεδιασμό κατασκευών από χάλυβα του Ευρωκώδικα 3 (Αρχές, 2009). Η τελική επένδυση καλείται και ως μόνιμη επένδυση, διότι τα μέτρα υποστήριξης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, των αγκυρίων κλπ (προσωρινή υποστήριξη), ουσιαστικά, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν στην συγκράτηση και ενίσχυση της βραχομάζας, για όσο χρονικό διάστημα χρειαστεί, μέχρι να τοποθετηθεί η τελική επένδυση.

4.3.4 Πρόσθετα Μέτρα

Ο σύγχρονος σχεδιασμός υπογείων έργων προβλέπει την γρήγορη εκκένωση σε περίπτωση πυρκαγιάς μέσω των εξόδων διαφυγής. Παρόλα αυτά, σε ένα μεγάλο έργο υποδομής, όπως το φρέαρ που εξυπηρετεί ένα σύστημα μεταφοράς ανθρώπων, και θεωρείται μόνιμο είναι αναγκαίο να λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα ενίσχυσης της προσωρινής και τελικής επένδυσης, στη περίπτωση πυρκαγιάς. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται ορισμένα μέτρα προστασίας της επένδυσης από πυρκαγιά.

4.3.4.1 Πυράντοχες πλάκες (fire protection boards)

Πρόκειται για πλάκες από γύψο και ίνες υάλου ή άλλα μη εύφλεκτα υλικά. Αποτρέπουν τη διάδοση της φωτιάς και τη μετάδοση της θερμότητας. Οι διαστάσεις τους ποικίλλουν κατά περίπτωση ενώ το πάχος εφαρμογής τους κυμαίνεται από 10 – 50 mm ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού τους και το επιθυμητό επίπεδο προστασίας. Η εφαρμογή τους είναι χρονοβόρα και παρουσιάζει δυσκολίες σε περιπτώσεις καμπύλων κατασκευών (ΣΑΚΚΑΣ, ΝΟΜΙΚΟΣ, ΠΑΝΙΑΣ, 2010).

Πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων μέτρων προστασίας για τους παρακάτω λόγους :

- Τοποθετούνται σε ήδη υπάρχουσες σήραγγες
- Καλύπτουν τη βασική επένδυση, αγωγούς και αρθρώσεις
- Αντικαθίστανται εύκολα σε περίπτωση τοπικής βλάβης
- Λόγω σταθερού πάχους η προστασία της επένδυσης είναι ομοιόμορφη

Μειονεκτούν, όμως, λόγω των παρακάτω :

- Η τοποθέτηση είναι δύσκολη και χρονοβόρα
- Η επιθεώρηση της επένδυσης καθίσταται αδύνατη
- Απαραίτητη η χρήση αναμονών για την τοποθέτηση

4.3.4.2 Προσθήκη ειδικών πρόσθετων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Η σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να περιέχει ορυκτά όπως βερμικουλίτη ή ίνες πολυπροπυλενίου σε μικρό ποσοστό. Τα υλικά αυτά εμποδίζουν την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και την εκρηκτική αποφλοιώση του σκυροδέματος. Το απαιτούμενο πάχος εξαρτάται από την επιτρεπτή θερμοκρασία στη διεπιφάνεια κονιάματος – επένδυσης και από το θερμικό φορτίο σχεδιασμού. Με άλλα λόγια, από την καμπύλη που θα επιλεγεί για το σχεδιασμό της παθητικής πυροπροστασίας και από τον αναμενόμενο χρόνο έκθεσης στην πυρκαγιά. Πάχος μεγαλύτερο από 40 mm θεωρείται ότι προσφέρει ικανοποιητική θερμική μόνωση, καθιστά όμως τη συγκεκριμένη μέθοδο αρκετά ακριβή. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι :

- Εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε σχήμα διατομής σήραγγας
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές
- Μειώνει αισθητά την θερμοκρασία στην επένδυση

Η λύση με το εκτοξευόμενο κονίαμα έχει και τα παρακάτω μειονεκτήματα :

- Δεν προσφέρει ομοιομορφία στην κατασκευή
- Έχει υψηλό κόστος

4.3.4.3 Έγχυτο σκυρόδεμα με ίνες πολυπροπυλενίου

Οι ίνες πολυπροπυλενίου (polypropylene fibers) τοποθετούνται μέσα στο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της παρασκευής του. Με την προσθήκη των ινών πολυπροπυλενίου αποτρέπεται η εκρηκτική αποφλοιώση του σκυροδέματος. Μειονεκτεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους διότι :

- Δεν αποτρέπει την μετάδοση της θερμότητας προς τον οπλισμό της επένδυσης
- Δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε υπάρχουσες σήραγγες.

Τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων είναι τα παρακάτω :

- Είναι σχετικά φθηνή λύση
- Οι ίνες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, έτσι δεν υπάρχει καθυστέρηση στην εφαρμογή
- Αποφεύγεται η αποφλοιώση του σκυροδέματος

Από τις παραπάνω μεθόδους προστασίας της επένδυσης από τη πυρκαγιά, η καλύτερη και προτεινόμενη λύση είναι η προσθήκη ινών προπυλενίου στο έγχυτο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης του φρέατος. Η διαδικασία της προσθήκης ινών προπυλενίου μπορεί να συμπεριληφθεί στη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος αφού το φρέαρ αποτελεί μια εκ νέου κατασκευή και όχι μια ήδη υπάρχουσα ώστε να εφαρμοσθεί κάποια από τις υπόλοιπες λύσεις.

4.4 ΦΑΣΕΙΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ

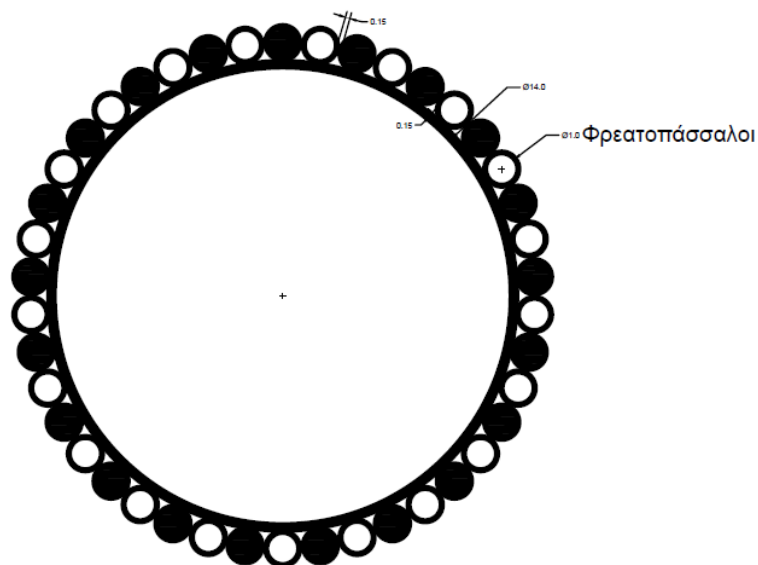
4.4.1 Κατασκευή Προφρέατος

Στην επίγεια επιφάνεια, γύρω από το χώρο που θα διανοιχθεί το φρέαρ, θα στηθεί ο χώρος των εγκαταστάσεων του εργοταξίου. Ο χώρος αυτός θα φιλοξενεί τα γραφεία του προσωπικού, τα οχήματα μεταφοράς, το σύνολο του μηχανολογικού εξοπλισμού, την εγκατάσταση του οικοδομικού γερανού κλπ. Ένας γερανός χρησιμοποιείται για την ανέλκυση των μπαζών, των υλικών, του προσωπικού και του εξοπλισμού που απαιτείται για την εκσκαφή και την επένδυση των τοιχωμάτων. Επομένως, το σύνολο του εργοταξίου και ιδιαίτερα ο γερανός, ο οποίος είναι σε συνεχή λειτουργία και έχει μεγάλο βάρος, ασκεί ένα επιπλέον φορτίο. Για την εξασφάλιση ομαλών συνθηκών της κύριας διάνοιξης του φρέατος, απαιτείται η κατασκευή ενός πλήρως επενδυμένου τμήματος ως προενίσχυση του εδάφους, το οποίο καλείται προφρέαρ.



Σχήμα 35.Όψη φρέατος από το εσωτερικό (Φρέαρ Ρολόι σταθμού Πειραιά μετρό Αθήνας)

Το έδαφος στο οποίο πρόκειται να διανοιχθεί διαθέτει χαμηλές μηχανικές ιδιότητες, για το λόγο αυτό θα γίνει κατασκευή κυκλικής συστοιχίας κατακόρυφων φρεατοπάσσων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η διάμετρος των κατακόρυφων φρεατοπάσσων είναι 1 m και το μήκος διάτρησης 10 m. Ο συνολικός αριθμός των πασσάλων είναι 42, όπου οι μισοί είναι οπλισμένοι και οι μισοί άοπλοι, τοποθετημένοι εναλλάξ. Ο οπλισμός τους είναι διαμήκης $\varnothing 20$ και σπειροειδής $\varnothing 10$. Οι κεφαλές των πασσάλων συνδέονται σε κεφαλόδεσμο κυκλική δοκό από σκυρόδεμα, ώστε η εκσκαφή που θα ακολουθήσει να πραγματοποιηθεί σε στατικά ισχυρό δακτύλιο. Η απόσταση τους από τη διάμετρο εκσκαφής και η μεταξύ τους απόσταση είναι 15 cm, όπως σχεδιάστηκε παρακάτω.



Σχήμα 36.Κάτοψη συστοιχίας πασσάλων

Η κυκλική αυτή δοκός του κεφαλόδεσμου των φρεατοπάσσαλων, αποτελεί μέρος του κολάρου του προφρέατος. Το κολάρο παρέχει ένα άκαμπτο φορέα περίφραξης και μια σταθερή βάση στήριξης των μονάδων βύθισης του φρέατος. Το προφρέαρ επενδύεται με οπλισμένο σκυρόδεμα, στο οποίο τοποθετείται το εσωτερικό κυκλικό καλούπι και προς τα έξω διαμορφώνεται το εξωτερικό καλούπι. Το κολάρο κατασκευάζεται από δακτύλιο σε δακτύλιο από τη θεμελίωσή του προς την επιφάνεια με έγχυση σκυροδέματος. Με την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης το εξωτερικό καλούπι απομακρύνεται.



Σχήμα 37.Κολάρο ασφαλείας φρέατος (Φρέαρ Ρολόι σταθμού Πειραιά μετρό Αθήνας)

4.4.2 Κύκλος Εργασιών Κύριας Βύθισης του Φρέατος

Η ακολουθία της προόδου ενός κύκλου εργασιών διαμορφώνεται σύμφωνα με τα εξής στάδια :

1. Εκσκαφή ολομέτωπη και συγχρόνως αποκομιδή
2. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, διάτρηση οπών και τοποθέτηση αγκυρίων.
3. Τοποθέτηση δομικού πλέγματος, δικτυωτών πλαισίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
4. Τοποθέτηση τελικής επένδυσης μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των 200 m του φρέατος.

Ένας κύκλος εργασιών ολοκληρώνεται σε 2 m βήμα προχώρησης για τα πρώτα 150 m όπου οι γεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές (στρώματα λαβών, τόφφων, κίσηρης) ενώ για τα υπόλοιπα 50 m στο στρώμα των πυροκλαστικών ανά 1 m βήμα προχώρησης.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς του συνόλου των μέτρων στήριξης και ο υπολογισμός της δυνατότητας ανάληψης φορτίου απαιτεί χρήση λογισμικού με θεώρηση παραμορφώσεων 2ας τάξης (Νομικός, 2013). Ο δομητικός έλεγχος, επομένως, των αγκυρίων, των εγκιβωτισμένων πλεγμάτων και πλαισίων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οι στρώσεις του σκυροδέματος και το οπλισμένο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης πραγματοποιείται με τη χρήση λογισμικού αριθμητικής ανάλυσης του προγράμματος Phase². Η ανάλυση των φάσεων της διάνοιξης του φρέατος καθώς και η απόκριση των μέτρων στήριξης αναπτύσσονται στη παράγραφο 5.4.4, μέσα από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τον υπολογισμό των προσομοιωμάτων του φρέατος.

4.4.2.1 Εκσκαφή

Η NATM αποτελεί μια πολύ ευέλικτη μέθοδο διάνοιξης όπου η εκσκαφή της διατομής δύναται να γίνει είτε ολομέτωπη είτε τμηματική είτε με εκσκαφή και ταυτόχρονη στήριξη κλπ. Γενικά δεν υπάρχει περιορισμός στα στάδια του κύκλου εργασιών, αλλά εξαρτώνται από τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν και τη ροή των εργασιών του εκάστοτε εργοταξίου.

Η εκσκαφή, εδώ, πραγματοποιείται με μηχανικό εκσκαφέα ολομέτωπα. Αρχικά, ο εκσκαφέας στέκεται στο μέτωπο μέχρι να έχει εξορυχθεί τουλάχιστον η μισή διατομή του φρέατος. Εν συνεχεία, κατεβαίνει με τις ερπύστριες στο νέο επίπεδο, που δημιουργήθηκε από την εκσκαφή για το δεδομένο μήκος προχώρησης, και συνεχίζει να αποσπά το τοίχωμα του τμήματος που έμεινε ώστε να ολοκληρωθεί η φάση εκσκαφής. Σημειώνεται πως ο εκσκαφέας διαθέτει το επιθυμητό εύρος κινήσεων οπότε μπορεί να εξορύσσει σε 7 m μήκος από το κέντρο του φρέατος και 1 - 2 m βάθος όσο το μήκος προχώρησης. Ο εκσκαφέας, επίσης, είναι εξοπλισμένος με ερπύστριες και έχει τη δυνατότητα να κινείται απρόσκοπτα ανεξάρτητα των ανωμαλιών και της κλίσης του εδάφους.



Σχήμα 38. Παράλληλη εκσκαφή και αποκομιδή σε κυκλικό φρέαρ.

Η αποκομιδή του εξορυσσόμενου υλικού γίνεται ταυτόχρονα με την εκσκαφή. Ο εκσκαφέας αφού αποσπάσει το πέτρωμα το μεταφέρει στο κουβά αποκόμισης υλικού. Ο κουβάς όταν γεμίζει, ανελκύεται από τον γερανό, ο οποίος απορρίπτει το υλικό στην επιφάνεια και καταβιβάζει ξανά τον κουβά για εκ νέου γέμισμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου αποκομιθεί το σύνολο του όγκου του εξορυσσόμενου υλικού για κάθε μέτρο προχώρησης. Ο όγκος του εξορυσσόμενου υλικού είναι :

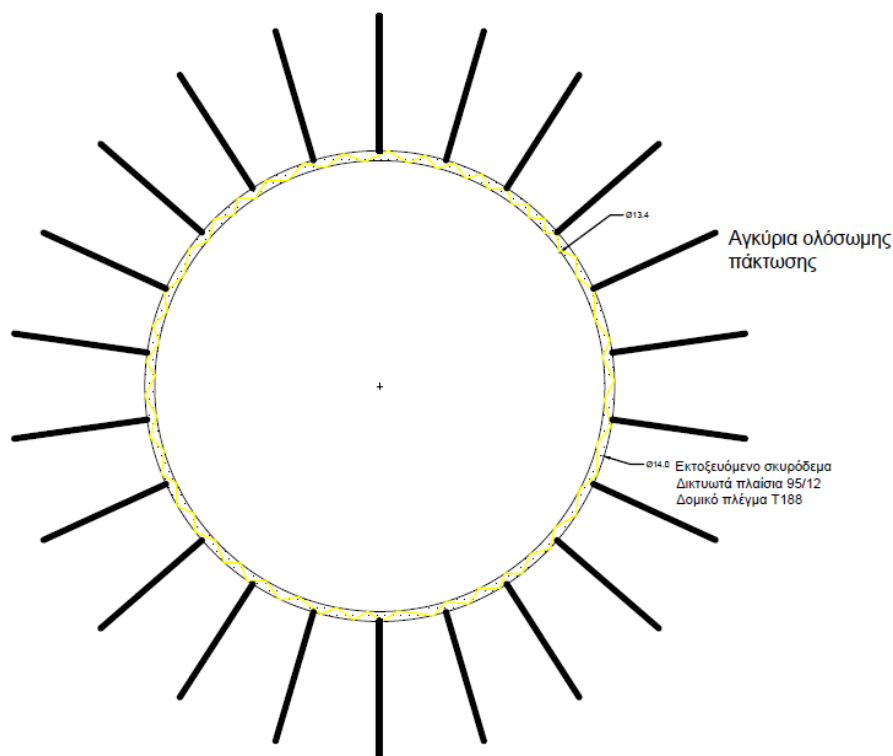
- $V_2 = \pi R^2 * h = 154 * 2 = 308 \text{ m}^3$ (για μήκος προχώρησης $h = 2 \text{ m}$)
- $V_1 = 154 * 1 = 154 \text{ m}^3$ (για μήκος προχώρησης $h = 1 \text{ m}$)
- $V_{\text{ολ}} = 154 * 200 = 30.800 \text{ m}^3$ (για τη συνολική εκσκαφή 200 m του φρέατος)

Ο όγκος του συνολικού εξορυσσόμενου υλικού που προκύπτει από την εκσκαφή των 200 m του φρέατος, θα συλλέγεται από φορτωτή (loader) και θα φορτώνεται σε φορτηγό. Η διανομή του υλικού, καθώς τα πετρώματα είναι ηφαιστειακά με υψηλό ποσοστό σε κίσηρη, μπορεί να γίνεται σε εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου αντί να αποτίθεται σε κάποια περιοχή ως μπάζα.

4.4.2.2 Τοποθέτηση αγκυρίων

Μετά το πέρας της εκσκαφής, οι επιφάνειες που αποκαλύπτονται καθαρίζονται τελείως με αέρα και νερό υπό πίεση για να αφαιρεθούν όλα τα

ίχνη σκόνης, χαλαρών κομματιών, υλικών αναπήδησης, και οποιοδήποτε άλλο επιβλαβές υλικό, ώστε να επιτευχθεί η σωστή διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αρχικά, γεμίζονται οι υπερεκσκαφές και ψεκάζεται μια πρώτη σταθεροποιητική στρώση των 5 cm από εκτοξευόμενο σκυροδέμα , η οποία διεισδύει στους πόρους και στις ρωγμές και δημιουργεί τη βάση για την τοποθέτηση και συμπύκνωση της υπόλοιπης επένδυσης. Στη συνέχεια, διανοίγονται διατρήματα διαμέτρου 57 mm, τα οποία γομώνονται με τσιμεντένεμα και γίνεται η τοποθέτηση της σειράς των αγκυρίων. Τα αγκύρια είναι \varnothing 28 μήκους 4 m και τοποθετούνται σε κάρναβο 3 x 1. Παρακάτω φαίνεται η κάτοψη του φρέατος που σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των μέτρων στήριξης.



Σχήμα 39.Κάτοψη προσωρινής υποστήριξης φρέατος

4.4.2.3 Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στο τρίτο στάδιο, γίνεται η τοποθέτηση του δομικού πλέγματος και των δικτυωτών πλαισίων. Τα πλαίσια τοποθετούνται και στερεώνονται σταθερά στη θέση τους, σφηνώνονται αμέσως στο εξωράχιό τους και διατηρούνται καλά τακαρισμένα, ώστε να μη μπορούν να μετακινηθούν κατά την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή από οποιοσδήποτε άλλες εργασίες. Έπειτα, γίνεται εκτόξευση σκυροδέματος C35/45 σε δύο φάσεις, το οποίο καλύπτει πλήρως το δομικό πλέγμα και τις δικτυωτές δοκούς. Τέλος, τοποθετείται δεύτερο δομικό πλέγμα και γίνεται εκτόξευση μίας προστατευτικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30 mm

που καλύπτει πλήρως το δομικό πλέγμα. Συνολικά, το πάχος της προσωρινής επένδυσης ανέρχεται στα 25 cm.



Σχήμα 40. Τοποθέτηση δικτυωτού πλαισίου σε δομικό πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα



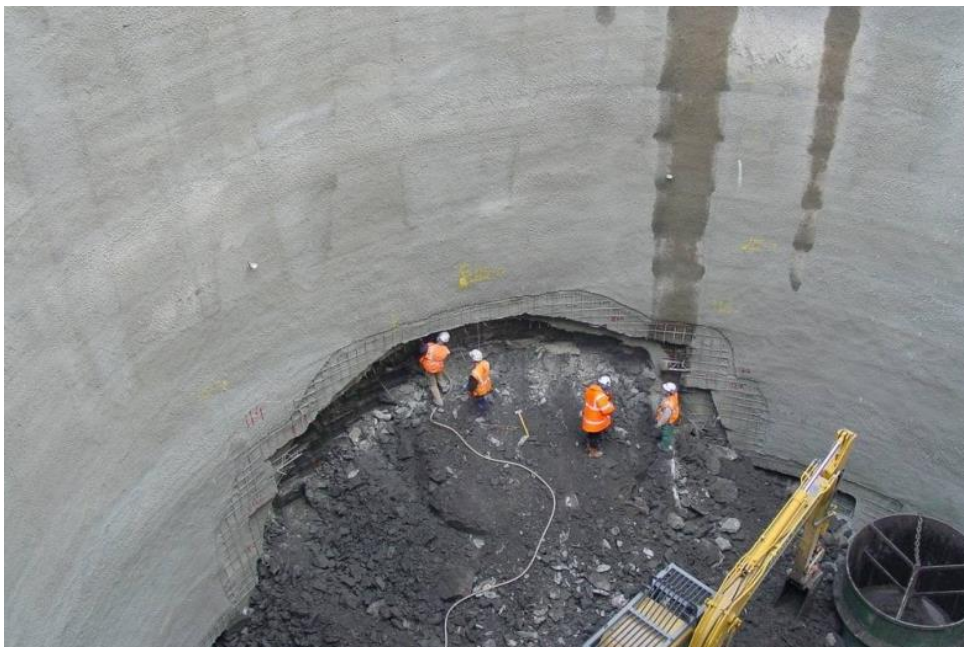
Σχήμα 41. Ψεκασμός τελικής στρώσης σκυροδέματος

Τονίζεται, πως πρέπει να εξασφαλίζεται η καλή συνάφεια μεταξύ των στρώσεων, γι' αυτό πριν από κάθε ψεκασμό η επιφάνεια θα πρέπει να καθαρίζεται καλά από τη σκόνη με ψεκασμό νερού και αέρα. Ο ψεκασμός του σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται πάντα σε υγρή επιφάνεια, χωρίς νερό να ρέει, ώστε να μην απορροφά η (ξηρή) επιφάνεια το νερό του σκυροδέματος, ούτε να αποκολλάται το σκυρόδεμα από τη ροή.

Το σκυρόδεμα θα παρασκευάζεται στο χώρο του εργοταξίου κοντά στο φρέαρ και μέσω μεταλλικού σωλήνα θα καταβιβάζεται στο μέτωπο. Η παρασκευή του σκυροδέματος καθώς και η τεχνική εργασία της διάστρωσης και συμπύκνωσης θα πρέπει να γίνεται σωστά και να είναι σύμφωνη με τους ισχύοντες κανονισμούς. Επίσης, θα πρέπει να παρακολουθείται η πρόβλεψη του καιρού ώστε να διαμορφωθεί ανάλογα η σύνθεση του σκυροδέματος (χαμηλές – υψηλές θερμοκρασίες, καταρρακτώδεις βροχές κλπ).

4.4.2.4 Τοποθέτηση τελικής επένδυσης

Στο στάδιο αυτό έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες της εκσκαφής και εφαρμογής της προσωρινής υποστήριξης της πλήρους διάνοιξης των 200 m του φρέατος και αναμένεται η εκβολή της συνδετήριας σήραγγας στο φρέαρ.



Σχήμα 42.Σύνδεση σήραγγας - φρέατος

Αφού ο χώρος έχει καθαριστεί πλήρως ο εκσκαφέας θα ανελκυθεί στην επιφάνεια και ξεκινήσει η διαδικασία της θεμελίωσης και σκυροδέτησης του φρέατος. Μεταξύ της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της

τελικής επένδυσης, παρεμβάλλεται η τοποθέτηση της αδιαπέρατης μεμβράνης στεγανοποίησης.



Σχήμα 43. Τοποθέτηση μεμβράνης στεγανοποίησης

Η σκυροδέτηση αποτελείται από χαλύβδινες ράβδους $\varnothing 25$ και έγχυτο σκυρόδεμα C35/45, το οποίο τροφοδοτείται μέσω συστήματος αντλίας και σωλήνα στον εσωτερικό μεταλλότυπο (καλούπι) και γίνεται βηματικά μέχρι να φθάσει στην επίγεια επιφάνεια.



Σχήμα 44. Σκυροδέτηση τελικής επένδυσης φρέατος

4.4.2.5 Παρακολούθηση διάνοιξης

Η επιτυχής διάνοιξη και υποστήριξη βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φρέατος και στη συνεχή προσαρμογή των χαρακτηριστικών του. Η επιτόπου παρακολούθηση της συμπεριφοράς γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής αυτών, οι οποίες αφορούν τα εξής:

- Μετακινήσεις του τοιχώματος του φρέατος, της βραχομάζας που περιβάλλει το και της επιφάνειας του εδάφους.
- Πιέσεις της βραχομάζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υδατικές πιέσεις στο έδαφος που περιβάλλει το φρέαρ.
- Δυνάμεις, όπως εφελκυσμό στα αγκύρια, θλίψη/κάμψη στα χαλύβδινα πλαίσια.
- Παροχή διηθήσεων υπογείων υδάτων.

Εάν παρατηρηθεί κάποια αλλαγή στην ισορροπία της διατομής του φρέατος, πέρα της προβλεπόμενης συμπεριφοράς, τότε συνιστάται να ληφθούν τα παρακάτω πρόσθετα μέτρα :

- Μείωση του βήματος προχώρησης
- Αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- Αύξηση του αριθμού και του μήκους των αγκυρίων
- Πύκνωση του δομικού πλέγματος και των δικτυωτών πλαισίων

4.5 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Οι συνθήκες κατασκευής ενός φρέατος, και των σιηράγγων γενικότερα, είναι αντίξοες και αποτελούν ένα από τα πιο απαιτητικά περιβάλλοντα για συνθήκες εργασίας τόσο του προσωπικού όσο και του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η επιλογή των μηχανημάτων αφορά ένα πολυπαραγοντικό ζήτημα που βασίζεται στις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες, τη περιοχή της διάνοιξης, την εκτιμώμενη συμπεριφορά της βραχομάζας, τους περιορισμούς της επιθυμητής γεωμετρίας αλλά και τον συνδυασμό αποδοτικότητας – οικονομικότητας για την επίτευξη της βέλτιστης παραγωγικότητας.

Η διάμετρος εκσκαφής του φρέατος είναι 14 m και η επιφάνεια που αντιστοιχεί είναι περίπου 154 m², η οποία συνιστά ένα αρκετά μεγάλο χώρο που ευνοεί την επιλογή μεγαλύτερης ισχύος μηχανημάτων. Ωστόσο, για την επιτυχία της παράλληλης εργασίας των διαφορετικών μηχανημάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το κατάλληλο μέγεθος τους, όπου τα μηχανήματα προτιμώνται πιο μικρά και ευέλικτα.

4.5.1 Εκσκαφέας

Η χρήση των εκσκαφέων στις διανοίξεις υπογείων έργων είναι διαφορετικών απαιτήσεων από ότι μιας συνηθισμένης επίγειας, για το λόγο αυτό έχουν κατασκευασθεί και χρησιμοποιούνται εκσκαφείς ειδικού τύπου αποκλειστικά για τη διάνοιξη σηράγγων (tunnel excavators). Η λειτουργία αυτού του είδους εκσκαφέα είναι αποτελεσματική όταν το μηχάνημα έχει την ικανότητα να αποσπάσει το πέτρωμα σχετικά εύκολα και γρήγορα και να διατηρεί ταυτόχρονα το απαιτούμενο προφίλ του ανοίγματος με το πιο οικονομικό τρόπο. Ως εκ τούτου, ο εκσκαφέας θα πρέπει να παράγει υψηλή υδραυλική ισχύ αλλά κυρίως να είναι εφοδιασμένος με λειτουργικά εξαρτήματα προσαρμοσμένα στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ο εκσκαφέας που διαθέτει τις παραπάνω ιδιότητες και είναι συμβατός με τη γεωμετρία του φρέατος είναι το μοντέλο R924C της εταιρείας Liebherr. Το συγκεκριμένο μοντέλο εκσκαφέα έχει τη δυνατότητα περιστροφής 360° χωρίς το φορείο να προεξέχει από τις ερπύστριες, καταλαμβάνει έτσι λιγότερο χώρο ενώ παράλληλα είναι ευέλικτος. Επιπλέον, ο βραχίονας του εκσκαφέα εκτός από τη κατακόρυφη και εμπρόσθια κίνηση μπορεί να περιστρέφεται σε θέση 2x 45° ώστε να μπορεί να αποσπάσει το πέτρωμα ακόμη και δύσβατα σημεία. Στη διάνοιξη του φρέατος, η δυνατότητα αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο αφού όχι μόνο επιτρέπει τη διατήρηση της κυκλικής διατομής, αλλά η επιφάνεια της εκσκαφής στα τοιχώματα είναι ομαλή, με λιγότερες προεξοχές και υπερεκσκαφές καθιστώντας καλύτερη την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μετέπειτα στάδιο. Το υδραυλικό σύστημα που χρησιμοποιείται στον εκσκαφέα έχει βελτιστοποιηθεί, ακόμα και για φρεζάρισμα. Η απόσπαση της βραχομάζας εφόσον είναι μέτρια προς φτωχή θα γίνεται με το κουβά του εκσκαφέα ενώ στις περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι πιο ανθεκτικό θα θραύεται τοπικά με τη χρήση σφύρας.

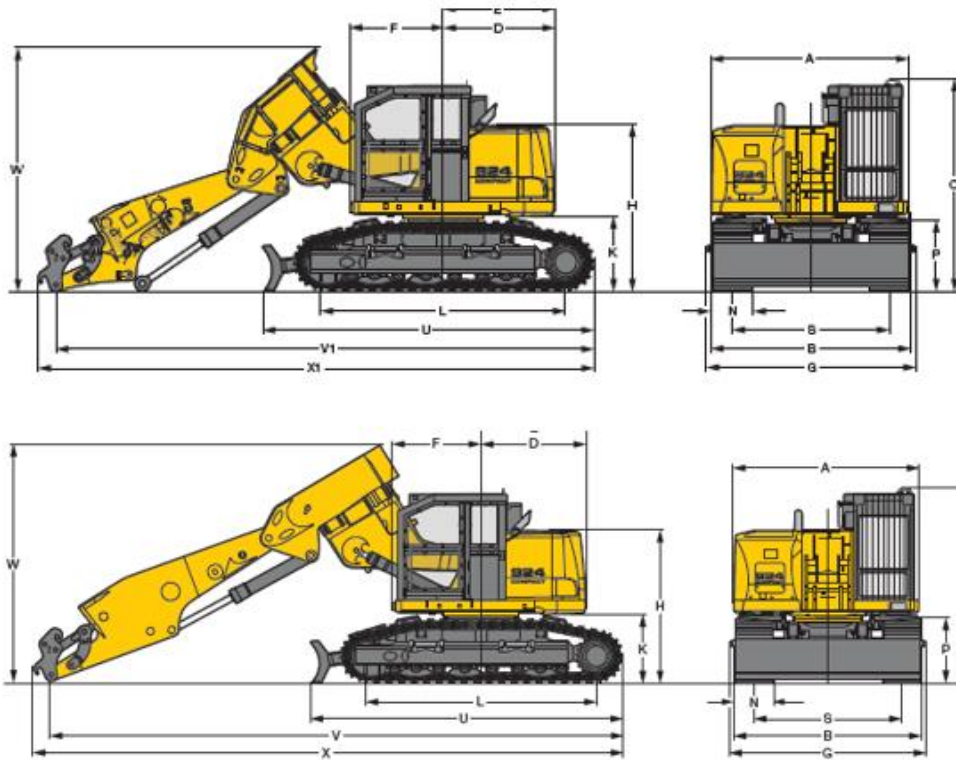


Σχήμα 45. Εκσκαφέας σηράγγων R924C της Liebherr.

Η ισχύς του εκσκαφέα είναι 175 HP, το λειτουργικό βάρος κυμαίνεται από 33 έως 34,5 Tη ανάλογα με το μέγεθος του βραχίονα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σήραγγες ύψους 4,75 - 7,5 m. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκσκαφέα παραθέτονται στο παρακάτω σχήμα.

Engine Rating per ISO 9249 129 kW (175 HP) at 1,800 RPM Model Liebherr D 924 C Type 4 cylinder in-line Bore/Stroke 120/130 mm Displacement 6,56 l Engine operation 4-stroke diesel unit pump system turbo-charged after-cooled reduced emissions Cooling water-cooled and integrated motor oil cooler Air cleaner dry-type air cleaner with pre-cleaner, primary and safety elements Fuel tank 345 l Electrical system 24 V Voltage 24 V Batteries 2 x 135 Ah/12 V Starter 24 V/7.8 kW Alternator three phase current 24 V/100 A Engine idling sensor controlled		Swing Drive Drive by Liebherr swash plate motor Transmission Liebherr compact planetary reduction gear Swing ring Liebherr, sealed single race ball bearing swing ring, internal teeth Swing speed 0-12.7 RPM stepless Swing torque 70.2 kNm Holding brake wet multi-disc (spring applied, pressure released) Option pedal controlled positioning brake	
Hydraulic System Hydraulic pump Positive Control Classic, regulation with Liebherr variable flow swash plate double pump, proportional controller hydraulically steered Max. flow 2 x 214 l/min. Max. pressure 350 bar Pump regulation electro-hydraulic with electronic engine speed sensing regulation, pressure compensation, flow compensation, automatic oil flow optimizer, swing circuit with priority and torque control Hydraulic tank max. 300 l Hydraulic system 1 full flow filter (20 µm) in return line with integrated fine filter area (5 µm) and an additional safety filter Hydraulic oil filter compact cooler, consisting of a water and fuel cooler, sandwiched with hydraulic oil cooler and after-cooler cones and hydrostatically driven fan MCOE selection adjustment of machine performance and the hydraulics via a mode selector to match application EDD for especially economical and environmentally friendly operation POWER for maximum digging power and heavy duty jobs LIFT for lifting FINE for precision work and lifting through very sensitive movements Super-Finish adjustable working speed for grading RPM adjustment stepless adjustment of engine output via the rpm at each selected mode Tool Control fan pre-adjustable pump flows and pressures for add on tools		Operator's Cab Cab according to guidelines for tunnel application: FOPS, FOPS plus Polycarbonate windows on attachment side Operator's seat shock absorbing suspension, adjustable to operator's weight, 6-way adjustable seat Joysticks integrated into adjustable seat consoles Monitoring multi driven display of current operating conditions via the LCD display, Automatic monitoring, display, warning (acoustical and optical signal) and saving machine malfunction data, for example, engine overheating, low engine oil pressure or low hydraulic oil level Noise emission 2009/14/EC L _{max} (surround noise) = 102 dB(A)	
Hydraulic Controls Power distribution via monoblock control valve with integrated safety valves Servo circuit Attachment and swing proportional via joystick levers Travel proportional via foot pedals or removable hand levers -speed pre-selection Additional functions via foot pedals or joystick toggle switch for milling cutter/hammer, 2 x 45° rotator and dozer blade		Undercarriage HD-SL heavy duty, wide gauge and longer crawler length Drive Liebherr swash plate motors with integrated brake valves on both sides Transmission Liebherr planetary reduction gears Travel speed low range - 3.2 km/h high range - 5.3 km/h Net drawbar pull on crawler 205 kN Track components D/D C, maintenance-free Track rollers/Carrier rollers 8/2 Track pads double or triple grouser Tracks sealed and greased Digging locks wet multi-discs (spring applied, pressure released) Brake valve integrated into travel motor	
Attachments Type combination of resistant steel plates and cast steel components Hydraulic cylinders Liebherr cylinders with special seal-system, shock absorbed sealed, low maintenance Pivots sealed, low maintenance Lubrication fully automatic Liebherr central lubrication system (except bucket tilt linkage) Hydraulic connections pipes and hoses equipped with SAE split-flange connections Basic boom 3.05 m or 3.30 m with 2 x 45° rotator Stick 3.20 m or 4.20 m with integrated bucket tilt cylinder Bucket HD ripper bucket with cutting width 700 mm			

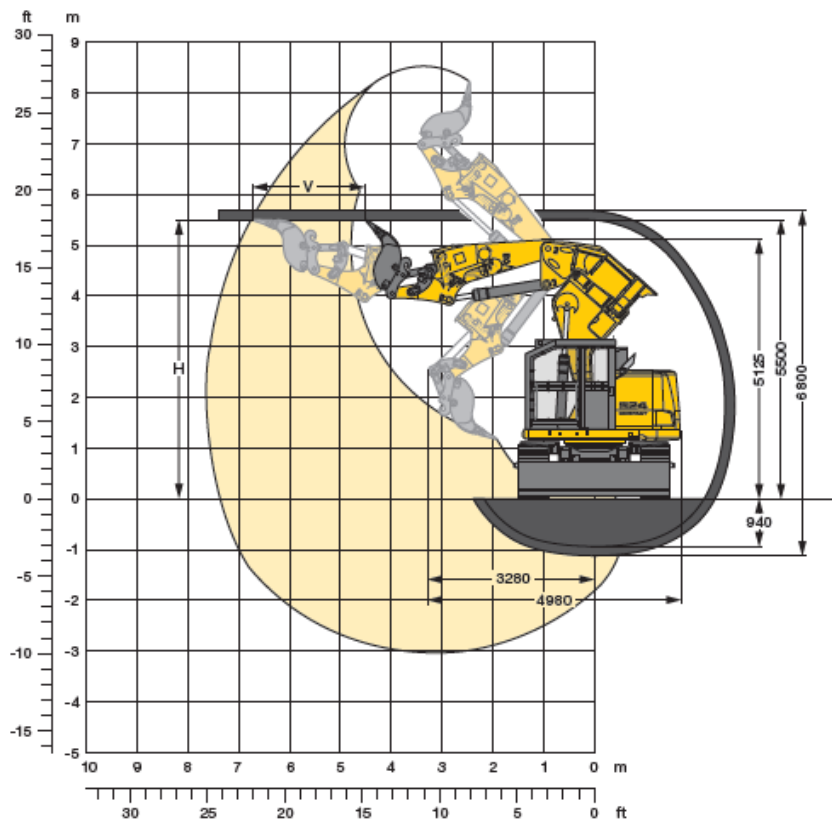
Σχήμα 45. Τεχνικά χαρακτηριστικά εκσκαφέα R924C της Liebherr



Σχήμα 46.Α) Εκσκαφέας με βραχίονα 3,2 m και μπούμα 3,03 m
 Β) Εκσκαφέας με βραχίονα 4,2 m και μπούμα 3,30 m

	mm	Boom 3.03 m with 2 x 45° Rotator and Stick 3.20 m	mm
A	2,990	V	8,080
C	3,230	V1	8,240
D	1,690	W	3,860
E	1,690	W1	3,710
F	1,415	X	8,360
H	2,525	X1	8,510
K	1,145		
L	3,750		
P	1,065	Boom 3.30 m with 2 x 45° Rotator and Stick 4.20 m	mm
S	2,400	V	9,300
U	5,070	W	4,000
N	600	X	9,600
B	3,000		
G	3,160		

Σχήμα 47. Διαστάσεις εκσκαφέα ανάλογα με το μέγεθος του βραχίονα



Digging Envelope

Basic boom bolted in position II of upper carriage

Tunnel height H m	Advance V m
4.75	1.20
5.00	2.05
5.50	2.25
6.00	2.10

Operating Weight and Ground Pressure

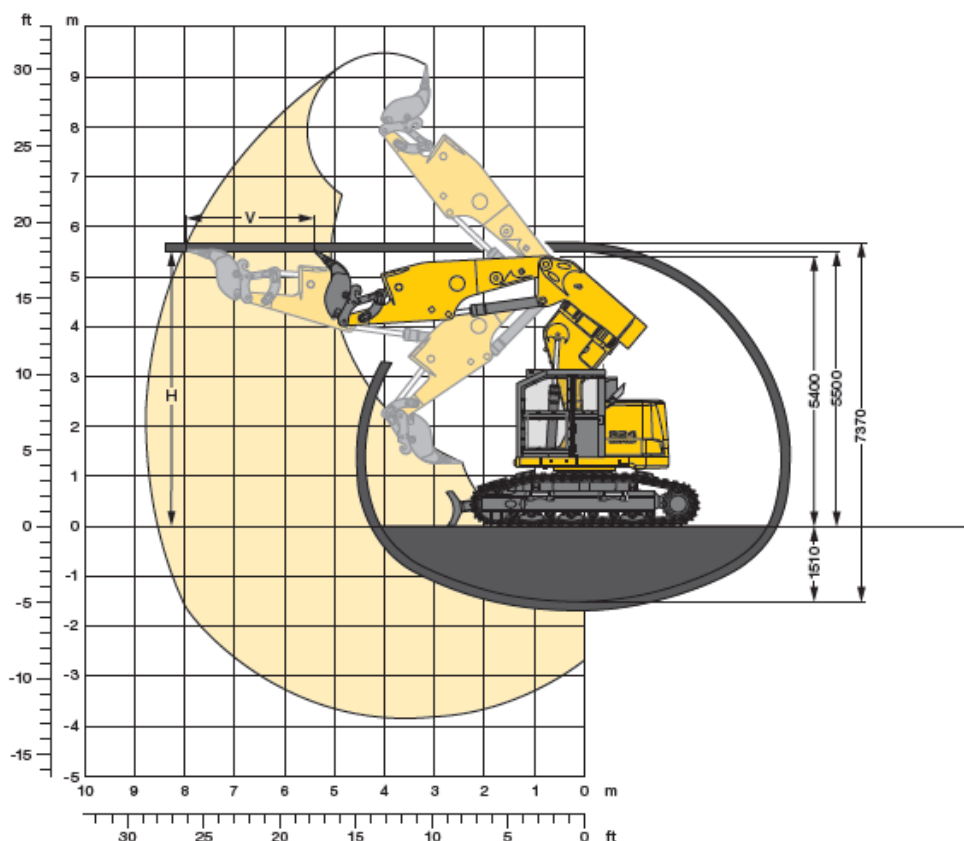
Operating weight includes basic machine with boom 3.03 m, 2 x 45° rotator, stick 3.20 m, quick coupler 48 and bucket 0.16 m³ (700 kg).

Undercarriage		HD-SL
Pad width	mm	600
Weight	kg	33,000
Ground pressure	kg/cm ²	0.68

Digging Forces without Quick Coupler

Max. digging force ISO	kN	142
	t	14.5
Max. breakout force ISO	kN	145
	t	14.8

Σχήμα 48.Εκσκαφιστότητα με βραχίονα 3,2 m και μπούμα 3,03 m



Digging Envelope

Basic boom bolted in position II of upper carriage

Tunnel height H m	Advance V m
5.50	2.50
6.00	2.40
6.50	2.20
7.00	2.10
7.50	1.90

Operating Weight and Ground Pressure

Operating weight includes basic machine with boom 3.30 m, 2 x 45° rotator, stick 4.20 m, quick coupler 48 and bucket 0.16 m³ (700 kg).

Undercarriage	HD-SL
Pad width	600 mm
Weight	34,500 kg
Ground pressure	0.71 kg/cm ²

Digging Forces without Quick Coupler

Max. digging force ISO	kN	116
	t	11.8
Max. breakout force ISO	kN	144
	t	14.7

Σχήμα 49.Εκσκαψιμότητα με βραχίονα 4,2 m και μπούμα 3,30 m.

Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, βλέπουμε πως η απόσταση των 7 m από το κέντρο του φρέατος για την εκσκαφή της ημιδιατομής, βρίσκεται στο εύρος κινήσεων της εκσκαψιμότητας και των δυο μεγεθών βραχίονα. Εφόσον οι διαφορές είναι αμελητέες και δεν επηρεάζουν την συγκεκριμένη εκσκαφή του φρέατος, ο εκσκαφέας με τον μικρότερο βραχίονα καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις. Ο εκσκαφέας καταλαμβάνει ένα χώρο 16 m² (U*G = 16 m²), επομένως, αφήνει επαρκή διαθέσιμο χώρο για τη λειτουργία του εξοπλισμού διάτρησης και εκτόξευσης σκυροδέματος στο στάδιο της

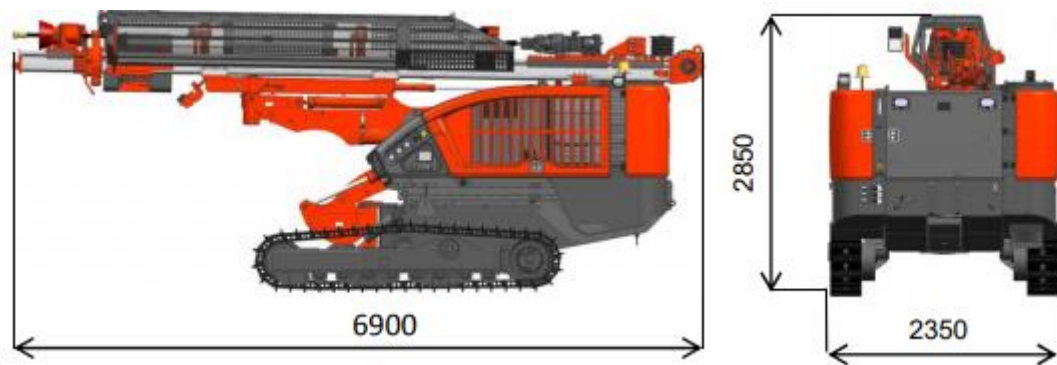
εφαρμογής της προσωρινής υποστήριξης επιτρέποντας την παραλληλία των εργασιών χωρίς τη μετακίνηση του εκσκαφέα στην επιφάνεια. Άλλος ένας λόγος, όπου ο εκσκαφέας θα παραμείνει εντός της εκσκαφής είναι γιατί ο οικοδομικός γερανός έχει τη δυνατότητα να ανελκύσει βάρος 10 -15 Tn, ενώ το βάρος του εκσκαφέα είναι αρκετά μεγαλύτερο. Για την ανέλκυση του εκσκαφέα χρησιμοποιείται ειδικού τύπου βαρύς μετακινούμενος γερανός ο οποίος ενοικιάζεται. Συνεπώς, ο εκσκαφέας θα ανελκυθεί μόνο μία φορά όταν ολοκληρωθεί η εκσκαφή του φρέατος και εάν τυχόν προκύψει κάποιο λειτουργικό πρόβλημα και πρέπει να επισκευασθεί. Εξοικονομείται, λοιπόν, πολύτιμος χρόνος αλλά και χρήματα.

4.5.2 Διατρητικός Εξοπλισμός

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας η διάνοιξη διατρημάτων για την τοποθέτηση των αγκυριών δύναται να είναι πλήρως εκμηχανισμένη. Ο διατρητικός εξοπλισμός λειτουργεί σαν ρομπότ αυτόματα μέσω ασύρματου τηλεχειριστήριου, σύμφωνα με τις εντολές του χειριστή. Σύμφωνα, με τις προδιαγραφές της γεωμετρίας της διάνοιξης του φρέατος, μια επιλογή κατάλληλου διατρητικού εξοπλισμού είναι το μοντέλο Dino DC400Ri της εταιρείας Sandvik.



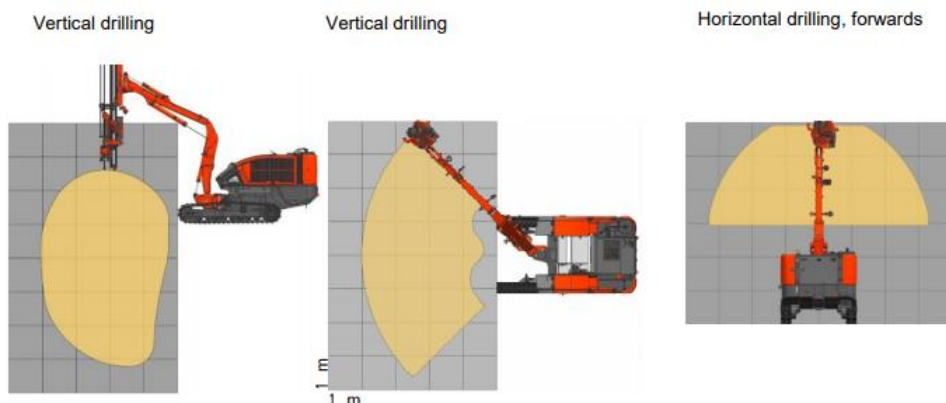
Σχήμα 50. Διατρητικός εξοπλισμός Dino DC400Ri της Sandvik



DIMENSIONS

Weight	abt. 10 000 kg
Width	c, 2350 mm
Height	b, 2850 mm
With roll-over	b, 3000 mm
Total length	a, 6900 mm

Σχήμα 51. Διαστάσεις εξοπλισμού Dino DC400Ri



Σχήμα 52. Εύρος απόστασης διάτρησης Dino DC400Ri

Ο διατρητικός εξοπλισμός Dino DC400Ri αποτελεί μια ιδανική λύση για το φρέαρ καθώς είναι αρκετά μικρός και ευέλικτος καθότι είναι ερπυστριοφόρος και αυτοκινούμενος. Το μηχάνημα αφού είναι πλήρως αυτοματοποιημένο συνδυάζει ταχύτητα, ακρίβεια και ασφάλεια στη διάνοιξη των διατρημάτων σε σχέση με τη χειρωνακτικό εξοπλισμό, το οποίο μεταφράζεται σε υψηλή παραγωγικότητα. Επίσης, το μηχάνημα διαθέτει μικρό βάρος ώστε ο γερανός να το μετακινεί από την επιφάνεια στο μέτωπο. Η καταβίβαση του διατρητικού εξοπλισμού θα γίνεται με την ολοκλήρωση της εκσκαφής στην πρώτη ημιδιατομή, ενώ η ανέλκυση με την τοποθέτηση και της 2^{ης} σειράς αγκυρίων

της δεύτερης ημιδιατομής και θα επαναλαμβάνεται για κάθε μήκος προχώρησης.

4.5.3 Εξοπλισμός Εκτόξευσης Σκυροδέματος

Οι μηχανές υγρής μείξης πλεονεκτούν στα υπόγεια έργα όσον αφορά τη μειωμένη σκόνη, τη μικρότερη απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού, και του λιγότερου επιτόπου εξοπλισμού. Η απαίτηση για ταχύτερη κατασκευή με ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάνω από 10 m³/h προώθησε περαιτέρω την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και τηλεχειριζόμενων συστημάτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, για παρασκευή σκυροδέματος υγρής μίξης, ακόμα και για μικρές πιέσεις, ένα αυτοματοποιημένο μηχάνημα είναι απαραίτητο, καθόσον το βάρος του υγρού σκυροδέματος στο σωλήνα το καθιστά πολύ βαρύ, ώστε να το κρατάει ο άνθρωπος ενώ θα πρέπει να γίνεται και σωστή εκτόξευση. Ο καθαρισμός του εξοπλισμού θα πρέπει να γίνεται μετά από κάθε χρήση. Η ακολουθία των κινήσεων ψεκασμού μπορεί να προγραμματισθεί, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα χειρισμού από έξω από την επικίνδυνη περιοχή κοντά στα τοιχώματα.

Εξαιτίας του περιορισμένου χώρου στο κυκλικό φρέαρ, όπως αναφέρθηκε, για την επίτευξη ευελιξίας, μέγιστης αποδοτικότητας και ορθού προγραμματισμού των εργασιών, απαιτούνται μικρότερου μήκους και όγκου μηχανήματα. Ένα μηχάνημα τέτοιων προδιαγραφών είναι το Minimec της εταιρείας Normet, ο οποίος είναι ειδικά σχεδιασμένος για εργασίες ψεκασμού σκυροδέματος μικρότερης κλίμακας.



Σχήμα 53. Ρομπότ ψεκασμού σκυροδέματος Minimec της Normet.

Ο τηλεσκοπικός βραχίονας είναι τοποθετημένος σε ένα φορέα ερπύστριας, του οποίου μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα και τα δύο ελαστικά μέρη. Με αυτόν τον τρόπο, το μηχάνημα περιστρέφεται εύκολα ακόμη και όταν δεν υπάρχει αρκετός χώρος για ελιγμούς. Τα πόδια στήριξης μπορούν να χαμηλώσουν εξασφαλίζοντας σταθερότητα σε κάθε είδους συνθήκες εδάφους. Τα σημεία ανύψωσης επιτρέπουν την εύκολη και ασφαλή ανύψωση του εξοπλισμού. Το μηχάνημα διαθέτει πετρελαιοκινητήρα 11,5 kW. Οι κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με φρένα, που ενεργοποιούνται κάθε φορά, που ο χειριστής τα απελευθερώνει από το τηλεχειριστήριο, για μεγαλύτερη ασφάλεια. Κάθε κίνηση αλλά και η ταχύτητα του βραχίονα μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας τους διακόπτες του τηλεχειριστηρίου και της μονάδας ελέγχου.

SPRAY BOOM

Telesopic boom extension 2100 mm
 Nozzle rotation 360°
 Nozzle tilt 180°
 Automatic nozzle oscillator
 Boom rotation 110°
 Boom coverage:

- Lateral 6400 mm (with spraying distance 1500 mm)
- Vertical 8000 mm (with spraying distance 1500 mm)

CONCRETE LINE

Concrete hose diameter 65 mm
 Hose length 5 m
 Hose equipped with anti-kink spring
 Necessary clamps and gaskets

ACCELERATOR AND AIR LINE

Boom air line 1 1/4"
 Boom accelerator line 3/4"
 Connection block with quick connectors
 Shut-off and bleed valves

BOOM CONTROL SYSTEM

Two joystick radio remote control for Spray Boom
 Control functions:

- Boom movements
- Nozzle head movements
- Nozzle oscillator on/off

Adjustable movement speeds
 Back-up cable for radio remote

BOOM HYDRAULIC SYSTEM

Electro-hydraulic power pack 7.5 kW / 50Hz / 1450 rpm
 Variable displacement pump:

- 190 bar, 45 L/min
- Hydraulic oil tank capacity 55 L

Proportional boom control valve

HIGH VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEM

400 V / 50 Hz

LOW VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEM

24 V LED working lights
 12 V LED driving and parking lights
 Signal horn
 Warning signal for carrier movements
 Battery charger for remote control

CARRIER

Engine Lombardini 25 LD 425/2 11.5 kW /15 HP
 Battery
 Electric starter
 Fuel tank 5.5 L
 Hydraulic system

- 175 bar, 36 L / min
- Hydraulic oil tank capacity 30 L

Two hydraulic joysticks for tracks and support legs
 Hydraulic drive hub motors
 Spring applied brakes
 Hydraulic support legs
 Two rubber tracks (surface contact 200 x 1300 mm)

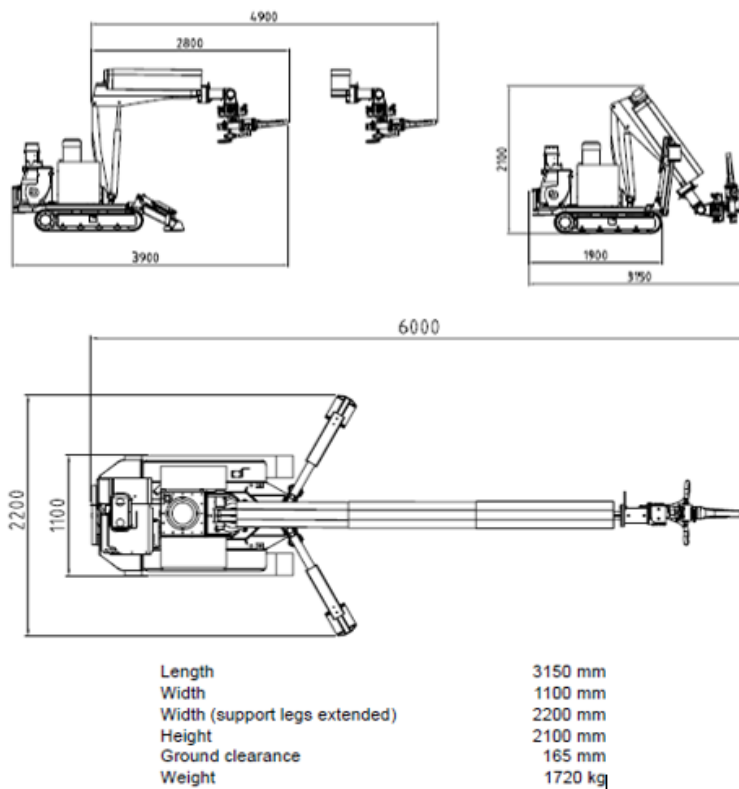
PERFORMANCE

Tramming speed (on flat) 4.5 km / h
 Max tramming incline 20°
 Max tramming incline (sideways) 10°
 Max working incline 10°

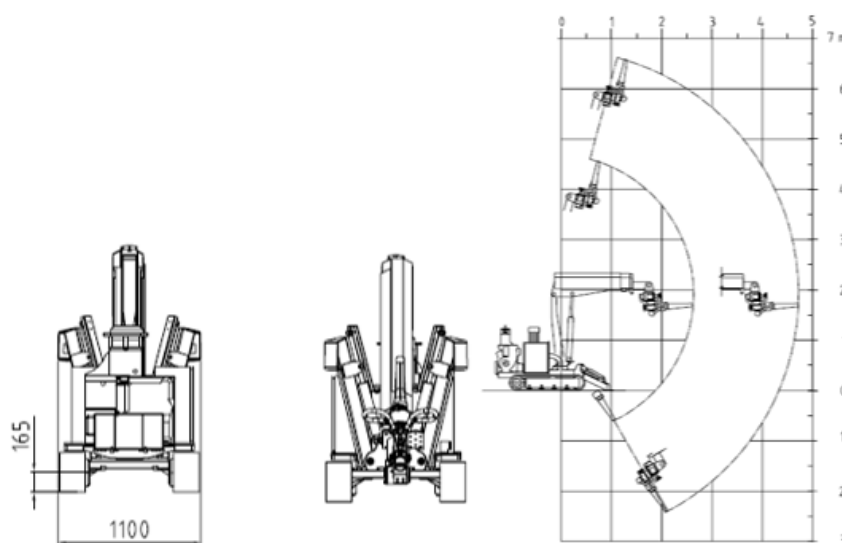
OTHER

6kg hand-held fire extinguisher
 Support leg feet extension blocks

Σχήμα 54.Τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού Minimec της Normet



Σχήμα 55. Διαστάσεις εξοπλισμού Minimec της Normet



Σχήμα 56. Εύρος κίνησης βραχίονα εκτόξευσης Minimec της Normet

Ο τηλεσκοπικός βραχίονας του μηχανήματος μπορεί να καλύψει έως 8 m ύψος και 6,4 m πλάτος με απόσταση ψεκασμού 1,5 m. Με τον επιλεγμένο ταλαντωτή αυτόματου ακροφυσίου, το εύρος ψεκασμού είναι μεγαλύτερο και πιο εκλεπτυσμένο. Επιπλέον, τα ισχυρά φώτα εργασίας LED σε διαφορετικές θέσεις του μηχανήματος εξασφαλίζουν υψηλή ορατότητα χωρίς την ανάγκη για πρόσθετους προβολείς. Το Minimec είναι πιστοποιημένο με CE, πληροί όλες τις απαιτήσεις του κλάδου και συμμορφώνεται με όλους τους κανονισμούς ασφαλείας.

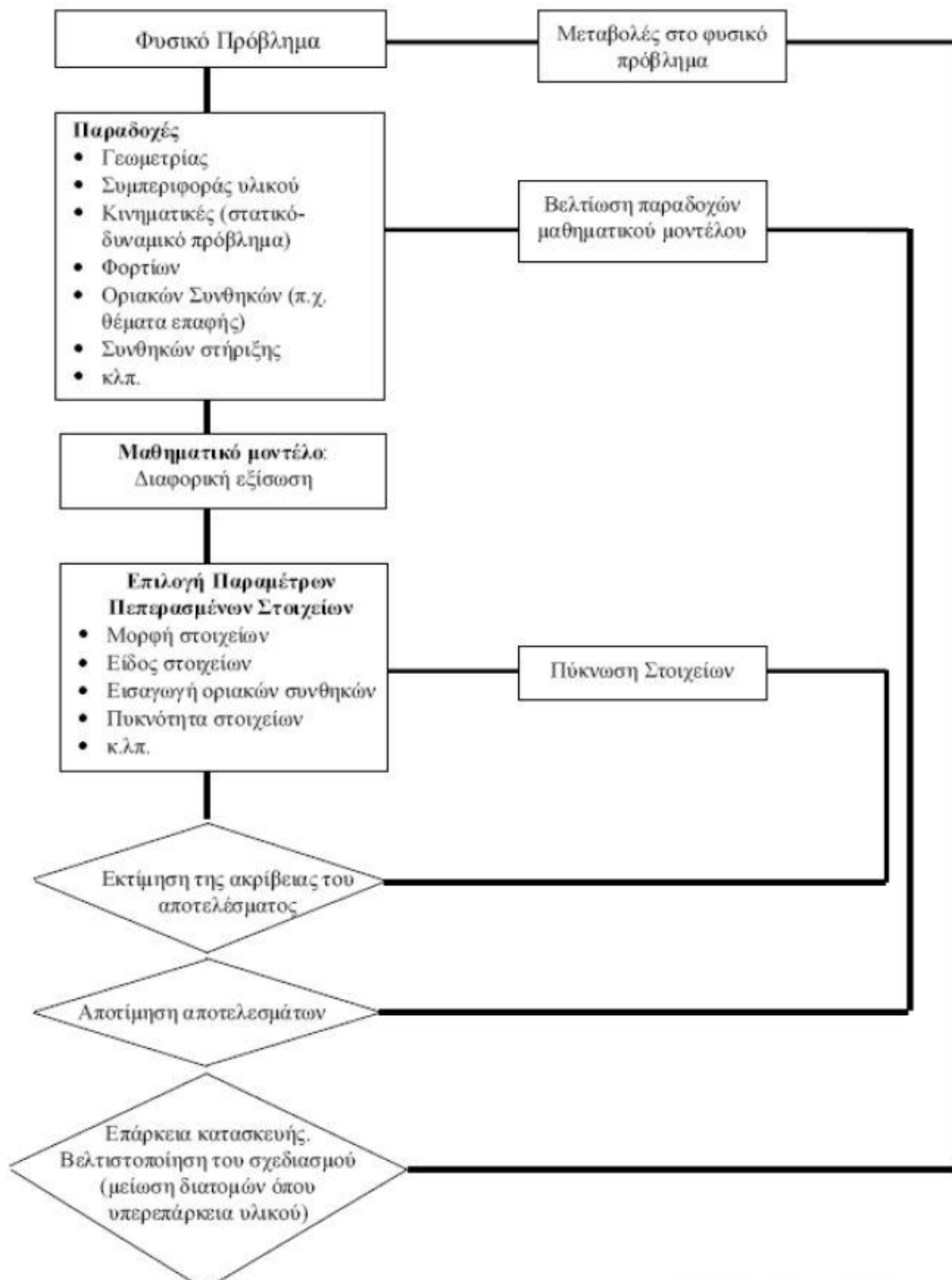
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

2D ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΦΡΕΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE² της ROCSCIENCE

5.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξη της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συντοριακές συνθήκες. Αρχικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση δισδιάστατων φορέων όπως οι μέθοδοι Rayleigh-Ritz και Galerkin, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά συστήματα. Στη συνέχεια επικράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων που εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν σημαντικά τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου. Έτσι σήμερα, χρησιμοποιώντας προγράμματα που στηρίζονται στις αρχές του CAD ο χρήστης είναι σε θέση να μορφώσει, να τροποποιήσει το προσομοίωμα του και να καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases). Μια κατασκευή ή ένα στοιχείο κατασκευής που υποβάλλεται σε φόρτιση αποτελεί το “φυσικό πρόβλημα” που καλείται να υπολογίσει ένας μηχανικός. Για να μπορέσει κανείς να υπολογίσει τη κατασκευή πρέπει να κατασκευαστεί το μαθηματικό προσομοίωμα. Πρέπει να παρασταθεί η γεωμετρία του σώματος. Η διαδικασία αυτή εμπεριέχει προσέγγιση αφού η επιφάνεια προσεγγίζεται από ένα πολυώνυμο. Πρέπει ακόμα να παρασταθεί η συμπεριφορά του υλικού με τα υπάρχοντα μοντέλα. Το ίδιο πρέπει να γίνει με την παράσταση των φορτίων και των συντοριακών συνθηκών.



Σχήμα 57. Διαδικασία επίλυσης φυσικού προβλήματος

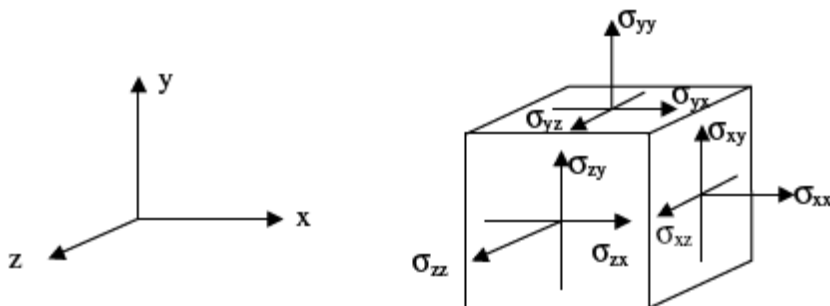
5.1.2 Προσομοίωση

Το PHASE² , ή αλλιώς RS2, είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ειδικού σκοπού το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση των παραμορφώσεων και της ευστάθειας διαφόρων ειδών γεωτεχνικών εφαρμογών, είτε είναι αστικές είτε μεταλλευτικές. Τα φυσικά προβλήματα προσομοιώνονται είτε ως συστήματα “επίπεδης

παραμόρφωσης" (plane strain analysis) είτε ως "αξονοσυμμετρικά" (axisymmetric analysis).

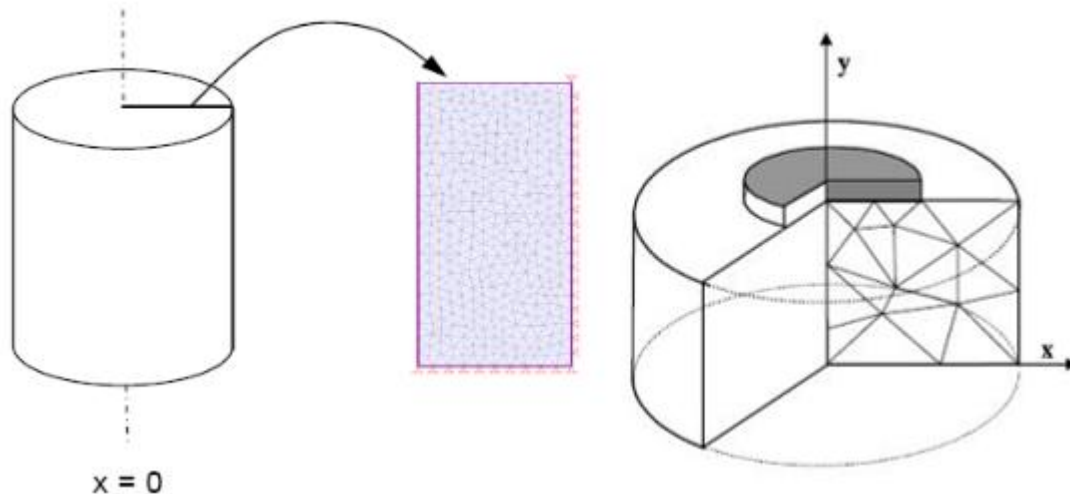
Σε μια ανάλυση "επίπεδης παραμόρφωσης", το κάθε προσομοίωμα μελετάται σε επίπεδο xy με τις δυο κύριες τάσεις (σ_1, σ_3) στο επίπεδο και την τρίτη (σ_z) κάθετα σε αυτό. Οι δυνάμεις που προκύπτουν λόγω επιβαλλόμενων μετακινήσεων αναπαριστούν δυνάμεις ανά μέτρο μήκους και θεωρείται ότι οι εκσκαφές έχουν άπειρο μήκος ως προς την τρίτη διεύθυνση z .

Σε μια "αξονοσυμμετρική" ανάλυση, το κάθε προσομοίωμα μελετάται σε επίπεδο xz με τις δυο τάσεις (σ_z, σ_x) στο επίπεδο και την τρίτη (σ_y) κάθετα σε αυτό. Οι δυνάμεις που υπολογίζονται είναι αυτές που ασκούνται στην περιφέρεια ενός κύκλου και συγκεκριμένα που ασκούνται σε τόξο ενός ακτινίου (1 radian). Οι δυνάμεις λοιπόν που ασκούνται στην περιφέρεια ολόκληρου του κύκλου πρέπει να πολλαπλασιαστούν με 2π . Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που υπολογίζονται σε αξονοσυμμετρικές αναλύσεις προκύπτουν ανά μέτρο μήκους (per width) και όχι ανά ακτίνιο (per radian). Σε μια "αξονοσυμμετρική" ανάλυση, ο άξονας των (x) αναπαριστά τις ακτινικές συντεταγμένες, ο άξονας των (y) αναπαριστά τις αξονικές συντεταγμένες και ο άξονας των (z) αναπαριστά τη διεύθυνση της επαπτομένης.



Σχήμα 58. Αναπαράσταση αξόνων x, y, z

Η χρήση του αξονοσυμμετρικού προσομοιώματος γίνεται για κυκλικές κατασκευές με ομοιόμορφη διατομή κατά μήκος της ακτίνας τους και ομοιόμορφο φορτίο γύρω από τον άξονα συμμετρίας, με τις πιέσεις και τις παραμορφώσεις να είναι ακριβώς οι ίδιες σε οποιαδήποτε διεύθυνση (που ορίζεται από την ακτίνα της κυκλικής κατασκευής). Στα αξονοσυμμετρικά προβλήματα, ο άξονας (x) ορίζει την ακτίνα και ο άξονας (y) ορίζει τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής. Αρνητικές συντεταγμένες $-x$ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή axisymmetric στο Phase² επιτρέπει την πραγματοποίηση μίας τριδιάστατης ανάλυσης με χρήση ενός δισδιάστατου προσομοιώματος. Το προσομοίωμα διαθέτει άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής. Για το λόγο αυτό, το Σχ. 1. δείχνει μία φέτα κυλίνδρου.



Σχήμα 59.Αξονοσυμμετρική ανάλυση στο χώρο

Κάποια θέματα που χρήζουν προσοχής κατά την αξονοσυμμετρική ανάλυση είναι:

- Ο άξονας περιστροφής πρέπει πάντα να ταυτίζεται με τον άξονα $X=0$
- Δεν μπορούν να προσομοιωθούν αγκύρια και ασυνέχειες. Οι επενδύσεις μπορούν να είναι μόνο ελαστικές
- Το τασικό πεδίο πρέπει να είναι επίσης αξονοσυμμετρικό

5.1.3 Υπολογιστικό Περιβάλλον Phase²

Το πρόγραμμα Phase² αποτελείται από τρία υποπρογράμματα.

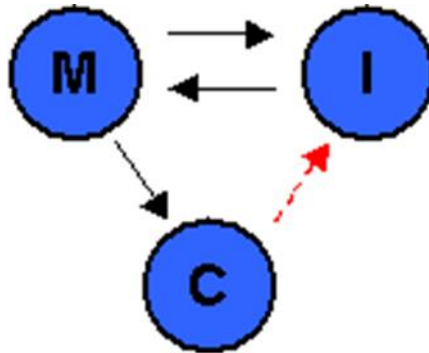
Το προσομοίωμα (model) είναι ένα πρόγραμμα προ-επεξεργασίας, το οποίο χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν και να επεξεργαστούν: τα όριά του, η υποστήριξη, το φυσικό εντατικό πεδίο (in-situ stresses), οι συνοριακές συνθήκες, οι ιδιότητες των υλικών (βραχώμαζα και υποστήριξη), οι ασυνέχειες της βραχώμαζας, αλλά και να δημιουργηθεί το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο υπολογιστής (compute) είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας, το οποίο επεξεργάζεται τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί στο προσομοίωμα (model) και δημιουργεί το επόμενο και τελικό στάδιο, που είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpret). Αν δεν έχει δημιουργηθεί το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος, η επεξεργασία με τον υπολογιστή είναι αδύνατη. Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με την ανάλυση τάσεων των πεπερασμένων στοιχείων για τις τρέχουσες παραμέτρους που διέπουν το προσομοίωμα.

Η οπτικοποίηση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης RS2 πραγματοποιείται μέσω του interpret. Προβάλλεται δυσδιάστατα η γραφική

αναπαράσταση των αποτελεσμάτων (π.χ. τάση, μετατόπιση, συντελεστής ασφαλείας).

Τα model, compute και interpret λειτουργούν ως ανεξάρτητα προγράμματα, ωστόσο, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 60. Αλληλεπίδραση υποπρογραμμάτων Phase²

5.2 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ PHASE²

Η μελέτη της συμπεριφοράς της βραχομάζας πραγματοποιείται με την βοήθεια συνδυασμού αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων. Οι αναλυτικές μέθοδοι αφορούν την θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος ενώ τα προσομοιώματα την αριθμητική προσέγγιση. Καθίσταται, λοιπόν, αναγκαίο οι λύσεις που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους να εξετάζονται και να συγκρίνονται, ώστε να διαπιστώνεται η αξιοπιστία των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

5.2.1 Αναλυτική Επίλυση

Η βραχομάζα συμπεριφέρεται ελαστικά όταν κατά την εφαρμογή δυνάμεων παραμορφώνεται μέχρι την μέγιστη τιμή της χωρίς όμως να διαρρεύσει και να αστοχήσει. Οι εξισώσεις του Kirsch (1898) προέρχονται από την θεωρία της ελαστικότητας και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις τάσεις και μετακινήσεις της βραχομάζας που συμβαίνουν γύρω από ένα κυκλικό άνοιγμα ελαστικής συμπεριφοράς και περιγράφονται ως εξής:

- $\sigma_{rr} = P/2[(1+K)(1 - a^2r^2) - (1-K)(1 - 4a^2r^2 + 3a^4r^4)\cos 2\theta]$ (1.1)

- $\sigma_{\theta\theta} = P/2[(1+K)(1 + a^2r^2) + (1-K)(1 + 3a^4r^4)\cos 2\theta]$ (1.2)

- $\sigma_{r\theta} = P/2[(1-K)(1 + 2a^2r^2 - 3a^4r^4)\sin 2\theta]$ (1.3)

- $u_r = -Pa^2/4Gr[(1+K) - (1-K)\{4(1-\nu) - a^2r^2\}\cos 2\theta]$ (1.4)

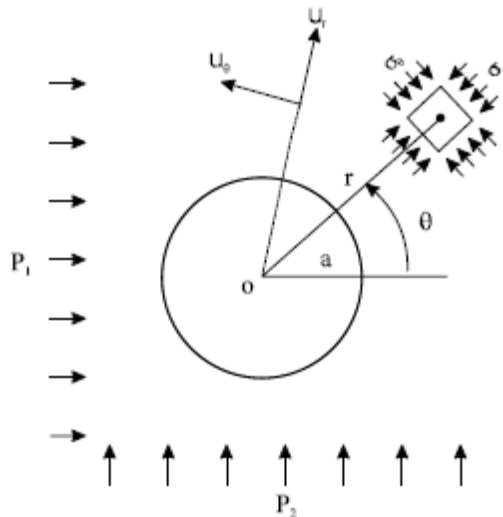
- $u_\theta = -Pa^2/4Gr[(1-K)\{2(1-2\nu) + a^2r^2\}\sin 2\theta]$ (1.5)

όπου:

- σ_{rr} : ακτινική τάση (MPa)
- $\sigma_{\theta\theta}$: εφαπτομενική τάση (MPa)
- $\sigma_{r\theta}$: διατμητική τάση (MPa)
- u_r : ακτινική μετακίνηση (m)
- u_θ : εφαπτομενική μετακίνηση (m)
- P : ένταση εντατικού πεδίου (MPa)
- K : συντελεστής πλευρικών ωθήσεων
- a : ακτίνα της σήραγγας (m)
- r : απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από το κέντρο της σήραγγας (m)
- θ : γωνία του εξεταζόμενου σημείου σε σχέση με το κέντρο της σήραγγας (deg)
- G : μέτρο διάτμησης (GPa)
- ν : λόγος Poisson

Οι εξισώσεις του Kirsch μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για βραχόμαζα η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Συνεχής (Continuous)
- Ομοιογενής (Homogenous)
- Ισότροπη (Isotropic)
- Γραμμικά Ελαστική Συμπεριφορά (Linear Elastic)



Σχήμα 61. Παράμετροι εξισώσεων του Kirsch

Στη περίπτωση που η βραχομάζα συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά κατά την εφαρμογή δυνάμεων, δηλαδή παραμορφώνεται μέχρι την μέγιστη τιμή της και τελικά αστοχεί, οι εξισώσεις του Kirsch δεν ισχύουν. Οι τάσεις και μετακινήσεις της ελαστοπλαστικής βραχομάζας που συμβαίνουν γύρω από ένα κυκλικό

άνοιγμα περιγράφονται σύμφωνα με τις εξισώσεις του Salencon (1969) (Probst & Bassi, 2018) ως εξής :

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$q = 2c \tan(45 + \phi / 2)$$

$$R_0 = a \left(\frac{2}{K_p + 1} \frac{P_0 + \frac{q}{K_p - 1}}{P_i + \frac{q}{K_p - 1}} \right)^{1/(K_p - 1)}$$

$$\sigma_r = -\frac{q}{K_p - 1} + \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)}$$

$$\sigma_\theta = -\frac{q}{K_p - 1} + K_p \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)}$$

$$u_r = \frac{r}{2G} \left[(2\nu - 1) \left(P_0 + \frac{q}{K_p - 1} \right) + \frac{(1 - \nu)(K_p^2 - 1)}{K_p + K_{ps}} \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \right. \\ \left. \left(\frac{R_0}{a} \right)^{(K_p - 1)} \left(\frac{R_0}{r} \right)^{(K_p + 1)} + \left(\frac{(1 - \nu)(K_p K_{ps} + 1)}{K_p + K_{ps}} - \nu \right) \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)} \right]$$

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

όπου:

- σ_r : ακτινική τάση (MPa)
- σ_θ : εφαπτομενική τάση (MPa)
- u_r : ακτινική μετακίνηση (m)
- P_i : εσωτερική πίεση (MPa)
- K_p : συντελεστής αντοχής της βραχομάζας
- a : ακτίνα της σήραγγας (m)
- r : απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από το κέντρο της σήραγγας (m)
- G : μέτρο διάτμησης (GPa)
- K_{ps} : συντελεστής διαστολής της βραχομάζας
- q : μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας (MPa)
- R_0 : ακτίνας της πλαστικής ζώνης
- ν : λόγος Poisson
- ψ : γωνία διαστολής (deg)

5.2.2 Αριθμητική Επίλυση

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Phase² αποτελεί τη αριθμητική μέθοδο επίλυσης προβλημάτων ελαστικής και ελαστοπλαστικής βραχομάζας. Τα προσομοιώματα πραγματοποιούνται σε επίπεδη (plane strain analysis) και αξονοσυμμετρική ανάλυση (axisymmetric analysis). Η περίπτωση που εξετάζεται αφορά κυκλικό φρέαρ ακτίνας $R = 7$ m σε στρώμα πυροκλαστικών υλικών βάθους 150 m, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Το εντατικό πεδίο p_0 είναι υδροστατικό ($K=1$) και ισούται με 2,175 MPa.

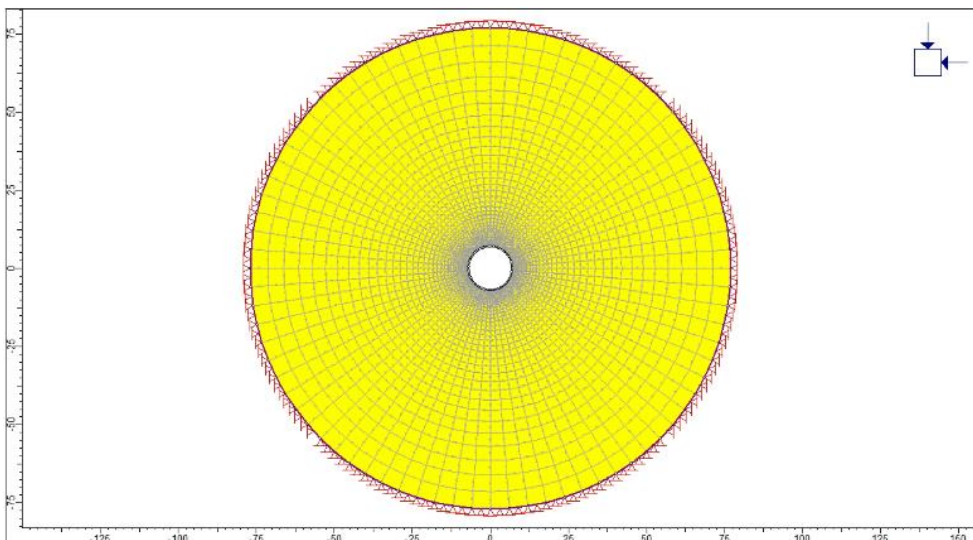
Στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος (mesh type) : Ακτινωτός (radial)
- Είδος διαμέρισης (element type) : Τετράπλευρα 8 κόμβων
- Συντελεστής επέκτασης (expansion factor) : 5
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή (default number of nodes on all excavations) : 300

Και οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είδος Ορίου : κύκλος
- Συντελεστής Επέκτασης : 5

Οι συνοριακές συνθήκες επιλέγεται να είναι κύκλος διότι κατά αυτόν τον τρόπο προσομοιάζουν καλύτερα τον άπειρο χώρο πέριξ του ανοίγματος.

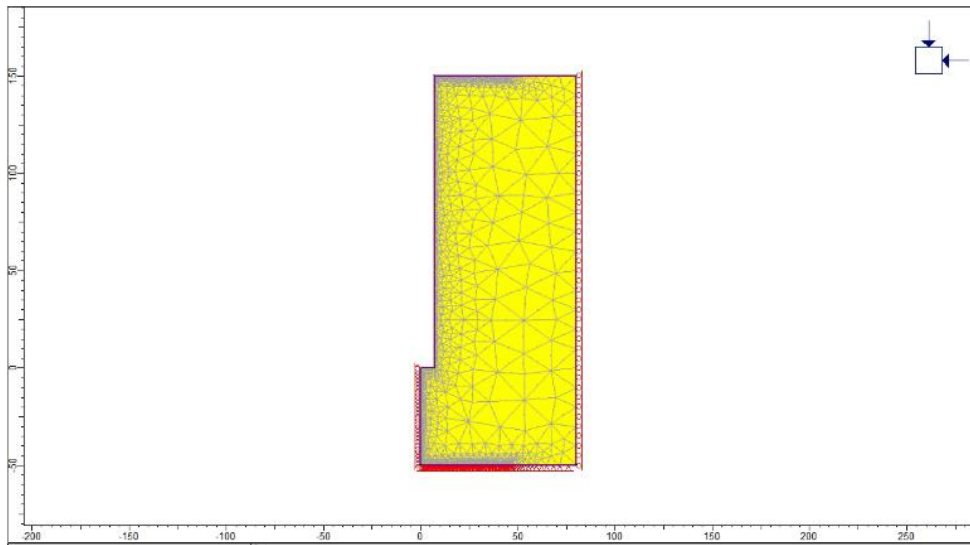


Γράφημα 7. Προσομοίωμα επίπεδης ανάλυσης πυροκλαστικών ($p_0 = 2,175$ MPa)

Στην αξονοσυμμετρική ανάλυση το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος (mesh type) : βαθμωτός (graded)
- Είδος διαμέρισης (element type) : Τρίγωνα 6 κόμβων
- Συντελεστής επέκτασης (expansion factor) : 5
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή (default number of nodes on all excavations) : 90

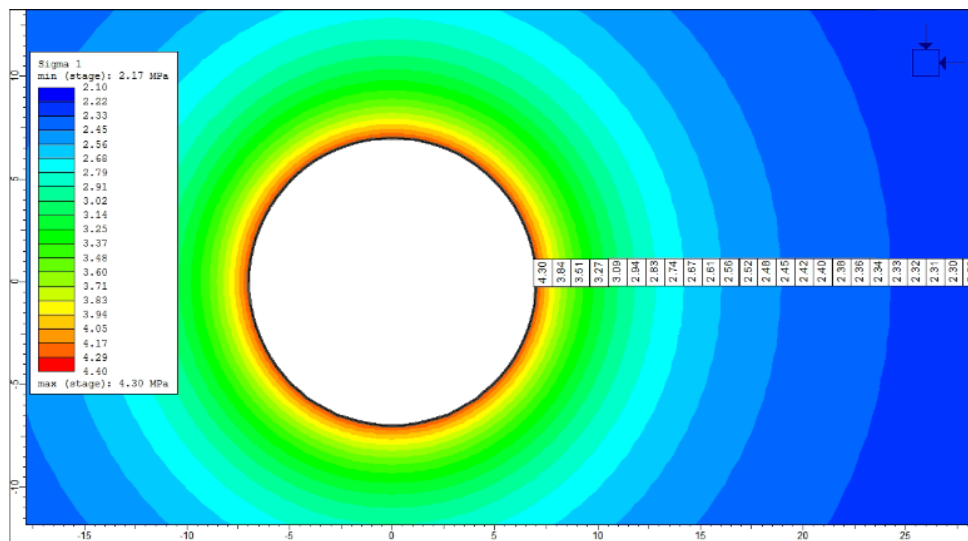
Οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) στο αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα ορίζονται από τα σημεία που διέπουν τη γεωμετρία του φρέατος, τα οποία εισάγουμε.



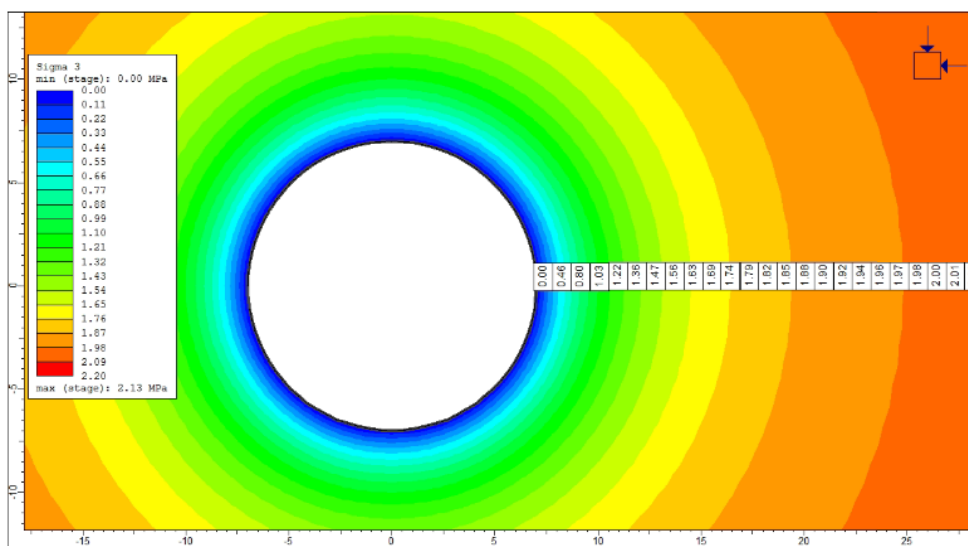
Γράφημα 8. Προσομοίωμα αξονοσυμμετρικής ανάλυσης πυροκλαστικών ($p_0 = 2,175$ MPa)

Η μελέτη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας θα πραγματοποιηθεί κατά μήκος της δεξιάς παρειάς, ωστόσο, οποιοδήποτε σημείο να επιλέξουμε εφόσον το άνοιγμα είναι κυκλικό και το υδροστατικό εντατικό πεδίο είναι αξονοσυμμετρικό, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι ομοιόμορφες γύρω από αυτό.

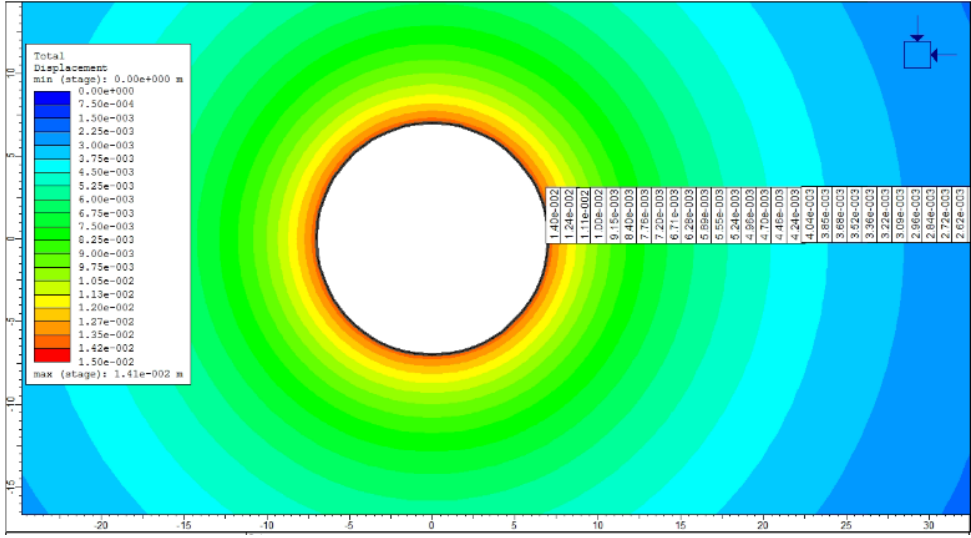
5.2.2.1 Αποτελέσματα αναλύσεων Phase²



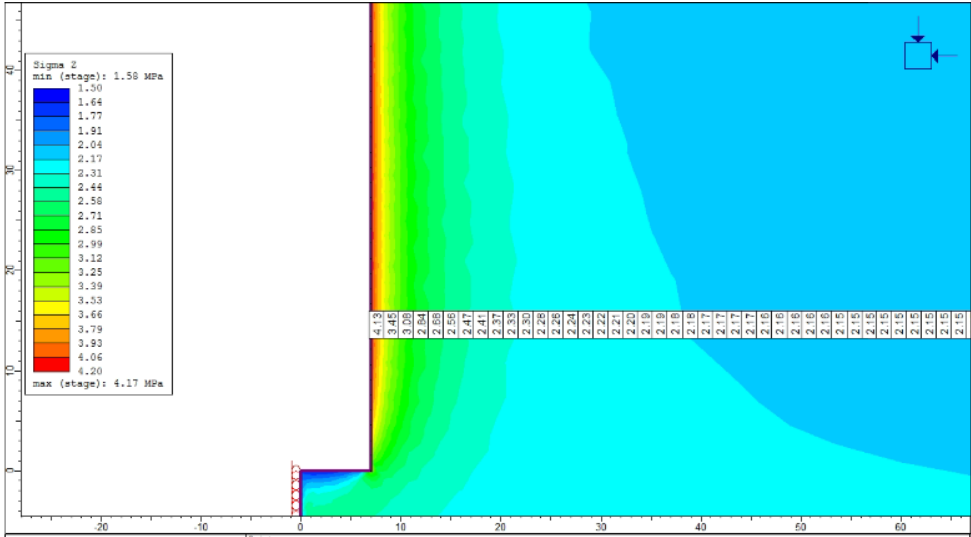
Γράφημα 9.Μέγιστη κύρια τάση σ_1 σε $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



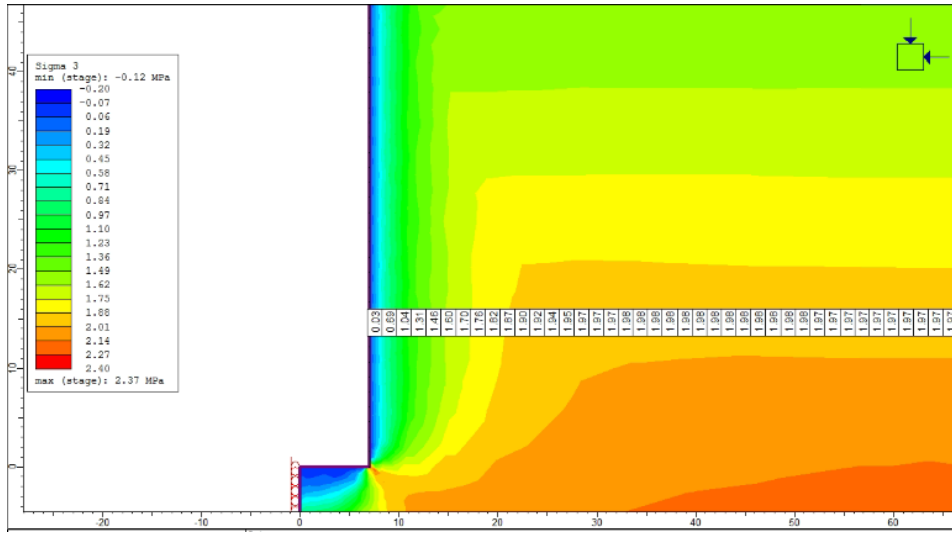
Γράφημα 10.Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



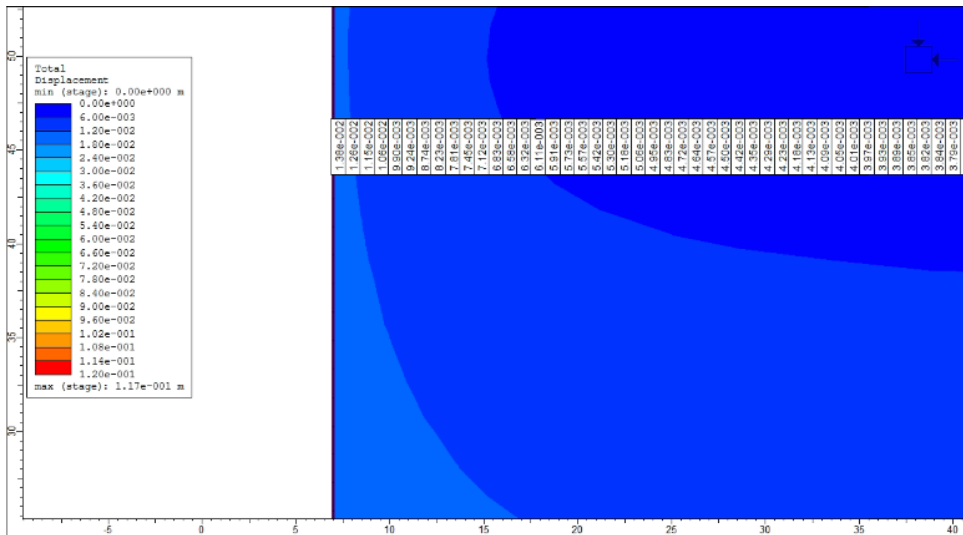
Γράφημα 11. Συνολικές μετακινήσεις σε $\rho_0 = 2,175 \text{ MPa}$ (ελαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



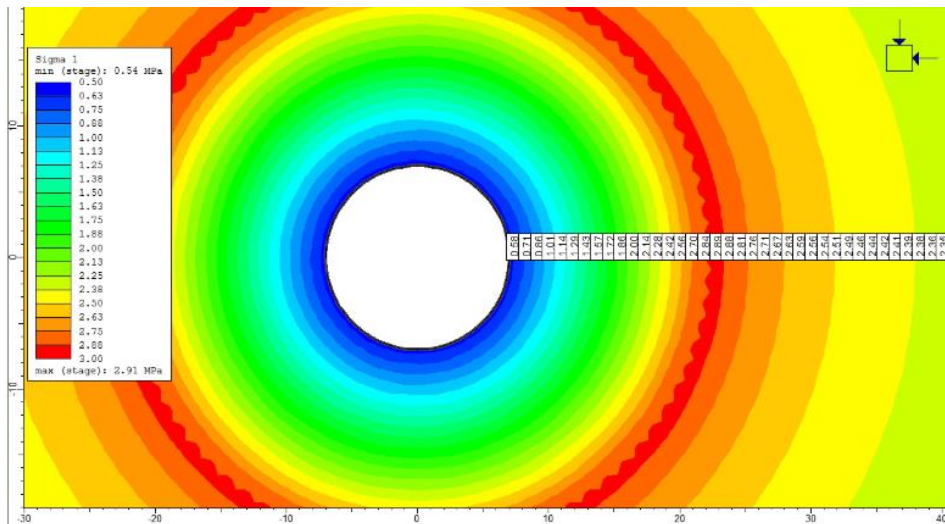
Γράφημα 12. Μέγιστη κύρια τάση σ_2 σε $\rho_0 = 2,175 \text{ MPa}$ (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης



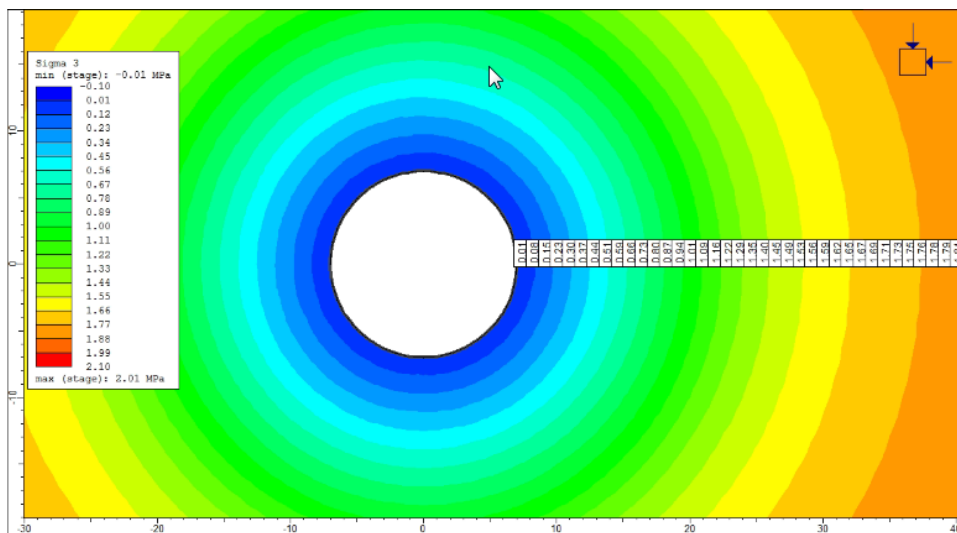
Γράφημα 13. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $\rho_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης



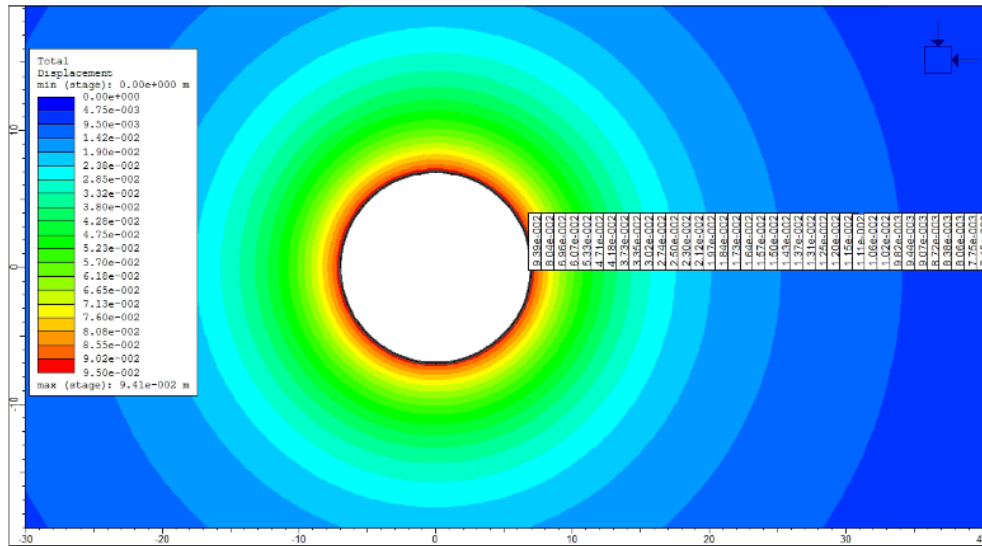
Γράφημα 14. Συνολικές μετακινήσεις σε $\rho_o = 2,175$ MPa (ελαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης



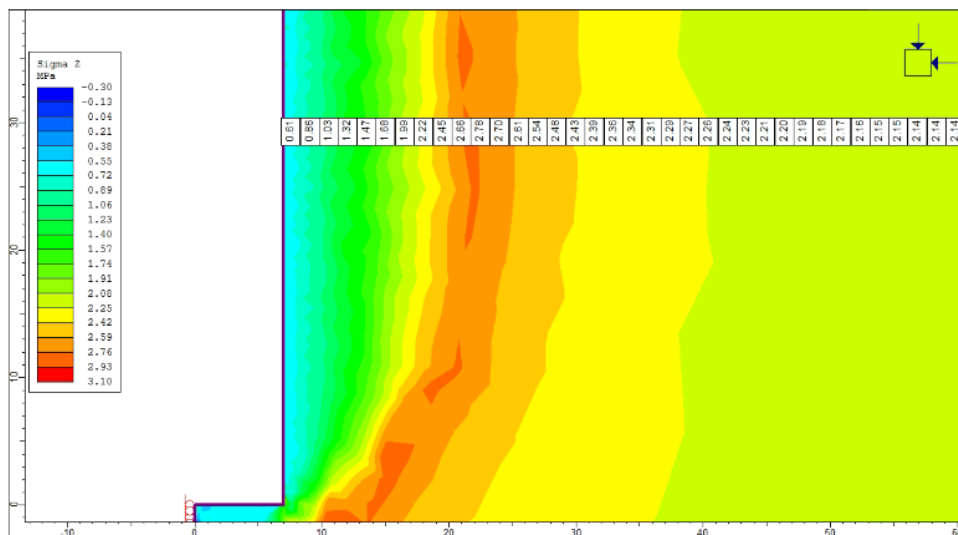
Γράφημα 15. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 σε $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



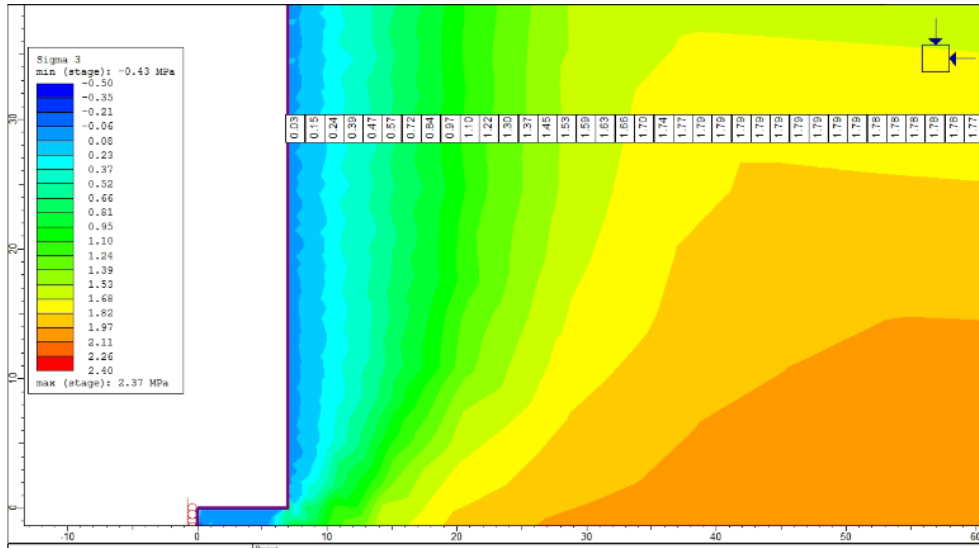
Γράφημα 16. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



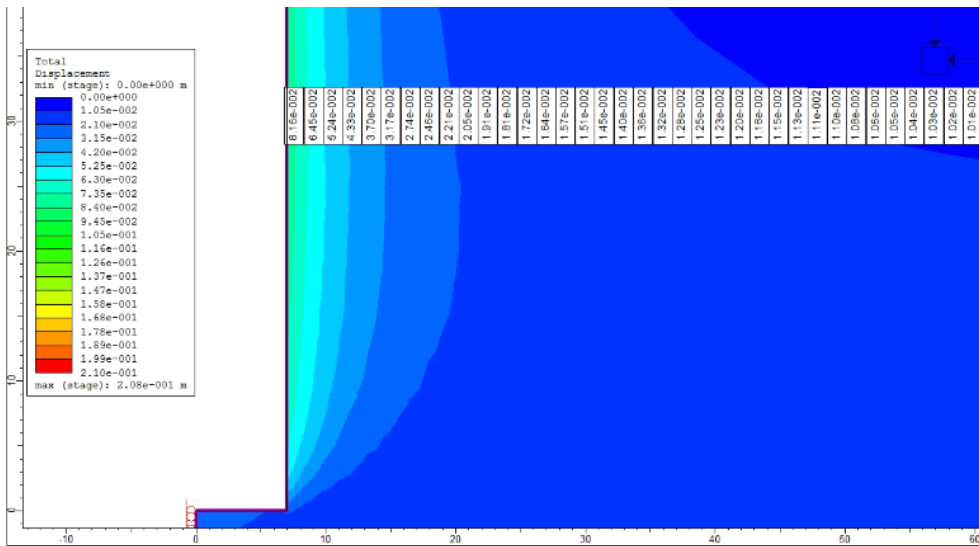
Γράφημα 17. Συνολικές μετακινήσεις σε $\rho_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης



Γράφημα 18. Μέγιστη κύρια τάση σ_z σε $\rho_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης



Γράφημα 19. Ελάχιστη τάση σ_3 σε $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης

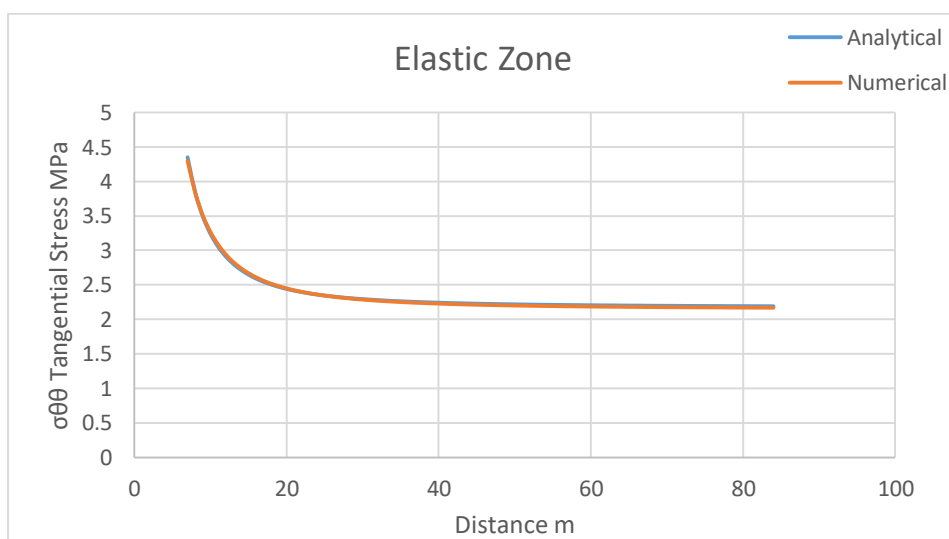


Γράφημα 20. Συνολικές μετακινήσεις $p_0 = 2,175$ MPa (ελαστοπλαστικό μέσο) αξονοσυμμετρικής ανάλυσης

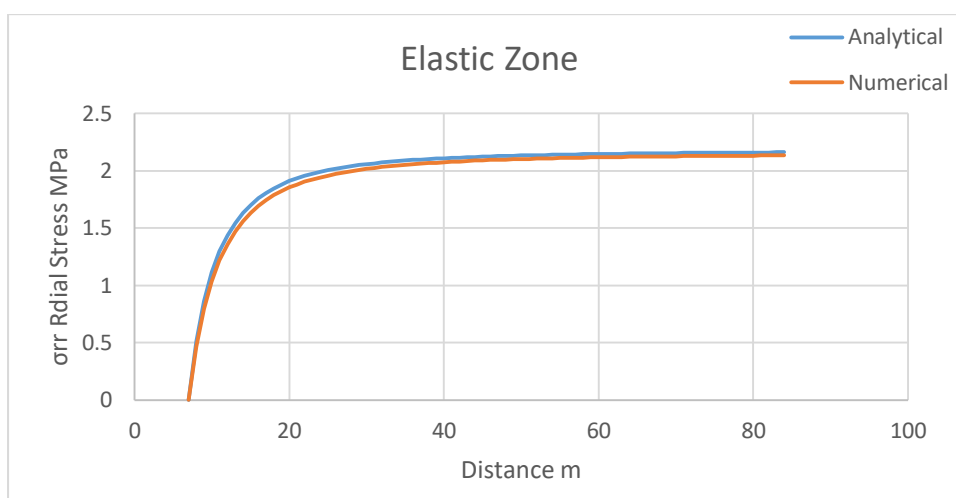
Συγκρίνοντας με μια πρώτη ματιά την επίπεδη και αξονοσυμμετρική ανάλυση οι μέγιστες τάσεις σ_1 και σ_z ταυτίζονται. Ομοίως, οι ελάχιστες τάσεις σ_3 αλλά και οι παραμορφώσεις. Οι τάσεις σ_1 και σ_z αποτελούν την εφαπτομενική τάση ενώ η σ_3 την ακτινική. Παρατηρούμε, επίσης, από τα γραφήματα των προσομοιωμάτων πως σε όλες οι περιπτώσεις η επίπεδη και η αξονοσυμμετρική ανάλυση ταυτίζονται δίνοντας ίδια αποτελέσματα. Επομένως, το πρόβλημα αναπαρίσταται ορθά από το πρόγραμμα Phase².

5.2.3 Σύγκριση Εντατικών Μεγεθών Αναλυτικής και Αριθμητικής Μεθόδου

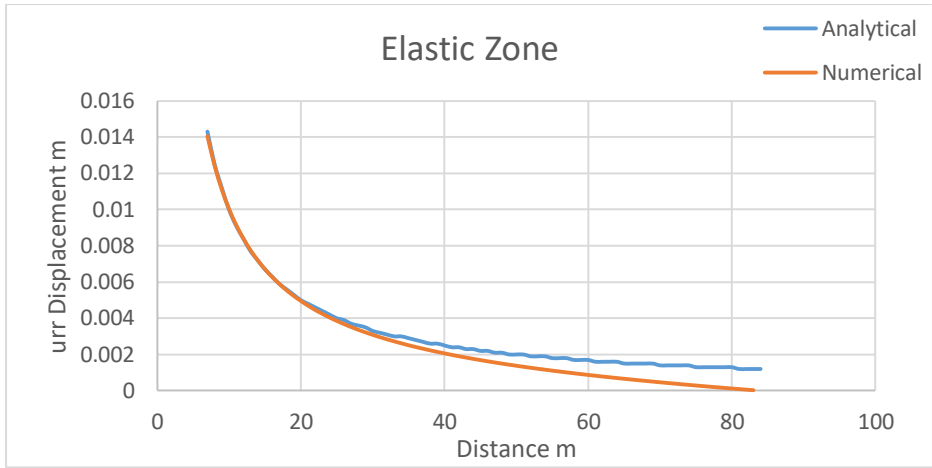
Οι λύσεις που υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις του Kirsch, για την ελαστική βραχομάζα, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των τάσεων και παραμορφώσεων των προσομοιωμάτων του Phase². Στα παρακάτω γραφήματα οι μπλε καμπύλες αναπαριστούν την αναλυτική μέθοδο των εξισώσεων και οι πορτοκαλί τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου. Στον άξονα των τεταγμένων είναι τα εντατικά μεγέθη που υπολογίστηκαν, ενώ ο άξονας των τετμημένων αναπαριστά στην απόσταση από τη παρειά του ανοίγματος του φρέατος.



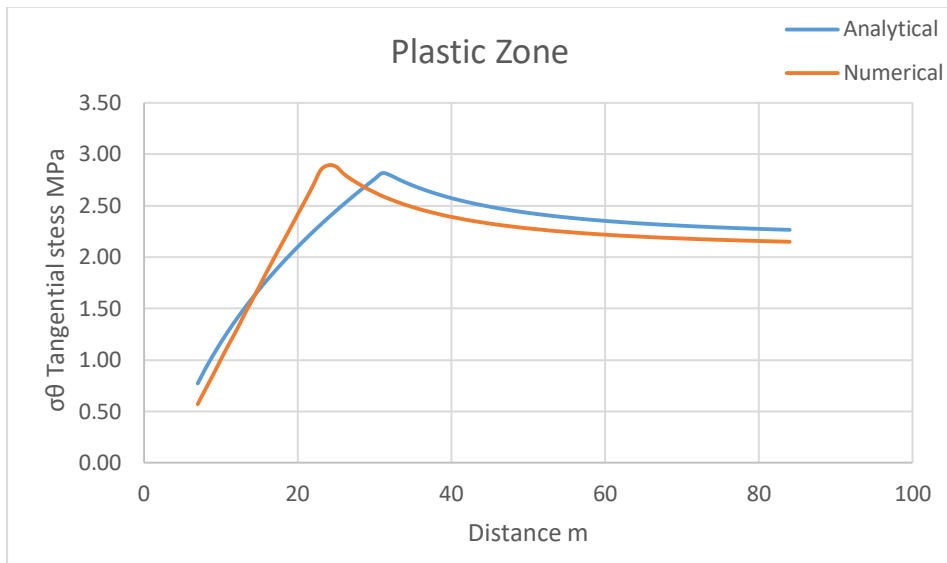
Γράφημα 21. Εφαπτομενική τάση $\sigma_{\theta\theta}$ ελαστικού μέσου



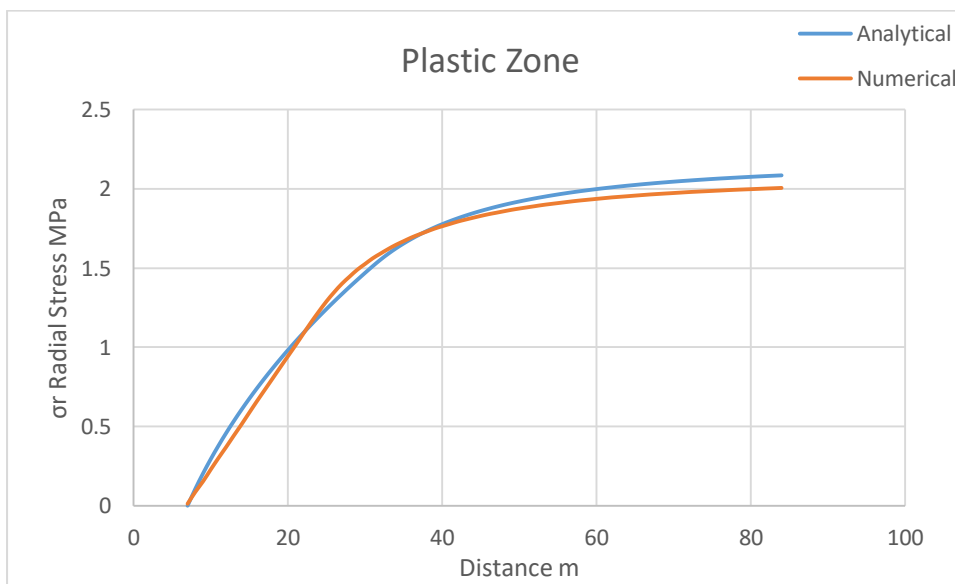
Γράφημα 22. Ακτινική τάση σ_{rr} ελαστικού μέσου



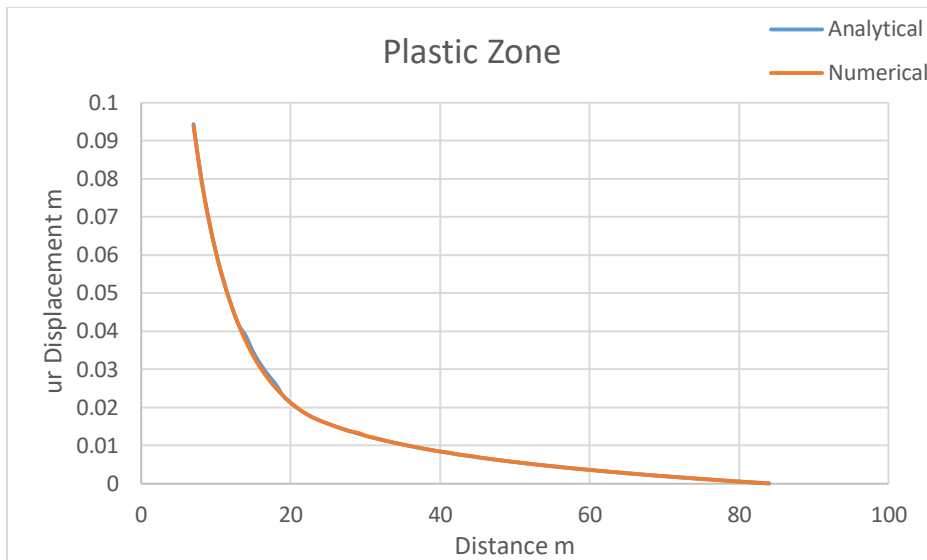
Γράφημα 23. Ακτινικές μετακινήσεις u_{rr} ελαστικού μέσου



Γράφημα 24. Εφαπτομενική τάση σ_{θ} ελαστοπλαστικού μέσου



Γράφημα 25. Ακτινική τάση σ_r ελαστοπλαστικού μέσου



Γράφημα 26. Ακτινικές μετακινήσεις u_r ελαστοπλαστικού μέσου

Διαπιστώνεται από τα γραφήματα της ελαστικής βραχομάζας, ότι οι τάσεις των δύο μεθόδων ανάλυσης συγκλίνουν μεταξύ τους. Ειδικότερα, η εφαπτομενική τάση $\sigma_{\theta\theta}$ του Kirsch είναι η σ_1 της επίπεδης ανάλυσης και η σ_z της αξονοσυμμετρικής. Ομοίως, η ακτινική τάση σ_{rr} είναι οι σ_3 της επίπεδης και αξονοσυμμετρικής και το ίδιο ισχύει και για τις ακτινικές μετακινήσεις u_{rr} , οι οποίες κοντά στο άνοιγμα είναι οι μέγιστες και όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο του φρέατος αυτές μειώνονται και γίνονται ίσες με το μηδέν. Επιπλέον, βλέπουμε πως κοντά στο άνοιγμα, οι μέγιστες τάσεις είναι διπλάσιες του αρχικού εντατικού πεδίου ενώ οι ελάχιστες είναι μηδενικές και όσο αυξάνεται η απόσταση οι τάσεις γίνονται ίσες με το αρχικό υδροστατικό εντατικό πεδίο. Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε πως και οι δύο μέθοδοι περιγράφουν τη συμπεριφορά ελαστικής βραχομάζας.

Τα γραφήματα που αφορούν την ελαστοπλαστική βραχομάζα συγκλίνουν κι αυτά μεταξύ τους. Η εφαπτομενική τάση σ_{θ} του Salençon είναι η σ_1 της επίπεδης ανάλυσης και η σ_z της αξονοσυμμετρικής. Ομοίως, η ακτινική τάση σ_r είναι οι σ_3 της επίπεδης και αξονοσυμμετρικής και το ίδιο ισχύει και για τις ακτινικές μετακινήσεις u_r . Από τις καμπύλες των τάσεων φαίνεται πως κοντά στο άνοιγμα αυξάνονται μέχρι μια μέγιστη τιμή και μετά όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο του φρέατος μειώνονται μέχρι να γίνουν ίσες με το αρχικό εντατικό πεδίο. Οι μετακινήσεις, εντούτοις, στο άνοιγμα είναι μέγιστες ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση μειώνονται έως να μηδενιστούν. Αυτό συμβαίνει στη περίπτωση που η βραχομάζα αστοχεί και δημιουργεί μια ζώνη πλαστικοποίησης γύρω όπου έχει διαρρεύσει ενώ στη συνέχεια παραμένει ελαστική. Είναι φανερό, πως και οι δύο μέθοδοι περιγράφουν σωστά τη συμπεριφορά μιας ελαστοπλαστικής βραχομάζας.

Οι τιμές των εξισώσεων των Kirsch και Salençon είναι ελάχιστα μεγαλύτερες σε ορισμένα σημεία σε σχέση με τις αντίστοιχες των προσομοιωμάτων του Phase². Η μικρή αυτή διαφορά θεωρείται αμελητέα και έγκειται στο γεγονός ότι οι εξισώσεις επειδή είναι θεωρητικές, θεωρούν ότι δεν υπάρχουν συνοριακές συνθήκες και ο χώρος τείνει στο άπειρο. Αντιθέτως, σε ένα προσομοίωμα όσο μεγάλος και να γίνει ο χώρος της μελέτης των πεπερασμένων στοιχείων ποτέ δεν θα μπορεί να είναι άπειρος. Οι συνοριακές συνθήκες και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις αποτυπώνουν με τον βέλτιστο τρόπο το φυσικό πρόβλημα. Συμπεραίνουμε, ότι η θεωρητική προσέγγιση ταυτίζεται με την αριθμητική και το πρόγραμμα Phase² προσφέρει αντιπροσωπευτικές λύσεις.

5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ – ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ στο PHASE²

5.3.1 Αναλυτική Μέθοδος

Η παρακολούθηση των τάσεων εντός της βραχομάζας προσεγγίζεται με τη θεώρησή της ως ένα συνεχές μέσο εντός του οποίου αυτές περιγράφονται ως ένας τανυστής δευτέρας τάξης. Εφόσον πρόκειται να πραγματοποιηθεί διάνοιξη υπογείου φρέατος, απαιτείται η γνώση του φυσικού εντατικού πεδίου προκειμένου να υπολογισθεί η απόκριση της βραχομάζας κατά την κατασκευή του. Η κυκλική διατομή του φρέατος αποτελεί από μαθηματική άποψη το απλούστερο σχήμα υπόγειου επιμήκους ανοίγματος καθώς προσδιορίζεται από τη θέση του κέντρου του και την ακτίνα R (R=7 m). Το υφιστάμενο εντατικό πεδίο p_0 θεωρείται υδροστατικό (K = 1) και ομοιόμορφη πίεση p_1 στήριξης στην επιφάνεια του ανοίγματος. Τόσο το σχήμα όσο και το εντατικό πεδίο είναι αξονοσυμμετρικά και ως εκ τούτου οι τάσεις και οι μετατοπίσεις μεταβάλλονται μόνο με την απόσταση από το κέντρο συμμετρίας.

Κατά τους Vlachopoulos and Diederichs, 2009, (Tunnelling & Interaction, 2008) σύμφωνα με το κριτήριο M – C η αστοχία της βραχομάζας για τις διάφορες τιμές ενεργών τάσεων εκφράζεται ως :

$$\sigma_1' = \sigma_{cm} + k\sigma_3'$$

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των πετρωμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Ο συντελεστής k του κριτηρίου $M - C$ δίνεται από τη σχέση :

$$k = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')}$$

Όπου, σ_1 η αξονική τάση αστοχίας

σ_3 η ενεργός τάση

C η συνοχή

ϕ η γωνία τριβής

Η αστοχία της βραχομάζας πέριξ του ανοίγματος συμβαίνει όταν η εσωτερική πίεση υποστήριξης p_i είναι μικρότερη από μια κρίσιμη πίεση p_{cr} με :

$$p_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1+k}$$

Εάν η εσωτερική πίεση p_i είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη δεν παρατηρείται αστοχία και η συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ελαστική. Η προς τα έξω ακτινική ελαστική μετατόπιση δίνεται από:

$$u_{ie} = \frac{r_o(1+\nu)}{E_m}(p_o - p_i)$$

Όπου, E_m το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας

ν ο λόγος Poisson

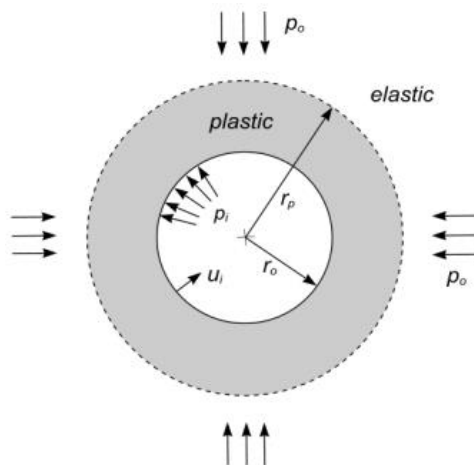
Όταν η εσωτερική πίεση p_i είναι μικρότερη από την κρίσιμη τότε η βραχομάζα αστοχεί και συμπεριφέρεται πλαστικά, ενώ η ακτίνα r_p της πλαστικής ζώνης δίνεται από :

$$r_p = r_o \left[\frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$

Η ακτινική μετατόπιση της πλαστικής ζώνης υπολογίζεται ως :

$$u_{ip} = \frac{r_o(1+\nu)}{E} \left[2(1-\nu)(p_o - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_o} \right)^2 - (1-2\nu)(p_o - p_i) \right]$$

Εάν θέσουμε $p_i=0$ στους παραπάνω τύπους βρίσκουμε την μέγιστη ακτίνα της πλαστικής ζώνης και τη μέγιστη μετακίνηση που εμφανίζεται σε αυτή.



Σχήμα 62. Πλαστική ζώνη γύρω από άνοιγμα κυκλικής διατομής σε υδροστατικό εντατικό πεδίο

Σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους το εντατικό πεδίο και η κρίσιμη πίεση της πλαστικής ζώνης διαμορφώνονται ως εξής :

	p_o	p_{cr}
Ρυοδακτικές λάβες Θ.	2,88	
Τόφφοι	1,36	
Κίσσηρης	1,45	0,16
Ρυοδακτικές λάβες Αλ.	0,735	
Πυροκλαστικά	2,9	1,77

Πίνακας 14. Τιμές εντατικού πεδίου p_o και κρίσιμης πίεσης p_i

Για τη βραχομάζα στα δύο στρώματα των λαβών και των τόφφων δεν αναμένεται αστοχία και πλαστικοποίηση αλλά παραμένει στην ελαστική ζώνη. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης συνεκτικότητάς της βραχομάζας. Για το λόγο αυτό δεν υφίσταται τιμή κρίσιμης πίεσης στην περίπτωση αυτή και οι τιμές εσωτερικής πίεσης που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της σταδιακής χαλάρωσης της βραχομάζας κυμαίνονται από p_o μέχρι μηδέν. Αντίθετα, το στρώμα της κίσσηρης εκτιμάται πως πλαστικοποιείται μερικώς ενώ στο πέμπτο και βαθύτερο στρώμα η ζώνη διαρροής είναι εκτεταμένη. Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν την αναλυτική μέθοδο επίλυσης ενώ οι προσομοιώσεις στο πρόγραμμα Phase² την αριθμητική προσέγγιση επίλυσης.

5.3.2 Αριθμητική Μέθοδος

5.3.2.1 Παράμετροι προσομοιωμάτων

Κατά την πλαστική συμπεριφορά, η βραχομάζα, με την εφαρμογή δυνάμεων, μπορεί να υπερβεί το όριο διαρροής της και να διαρρεύσει, χωρίς την εφαρμογή επιπλέον δυνάμεων, και τελικά να αστοχήσει. Υπάρχουν δυο είδη πλαστικής συμπεριφοράς, η ελαστοπλαστική και η ψαθυρή συμπεριφορά. Κατά την πρώτη, οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές. Κατά την δεύτερη, οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες από την αρχική. Παρακάτω, εξετάζεται η ελαστοπλαστική συμπεριφορά της βραχομάζας κυκλικού φρέατος διαμέτρου $D = 14 \text{ m}$ και ακτίνας $R = 7 \text{ m}$, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Όλες οι παράμετροι των χαρακτηριστικών της βραχομάζας και του εντατικού πεδίου που εισάγονται προκύπτουν από τις μέσες τιμές του πίνακα 1, οι οποίες απομειώθηκαν για την προσομοίωση και γεωτεχνική μελέτη του έργου σε επιτόπου συνθήκες.

Το υφιστάμενο εντατικό πεδίο p_0 θεωρείται υδροστατικό ($K = 1$) και ομοιόμορφη πίεση p_i στήριξης στην επιφάνεια του ανοίγματος ($\sigma_h = \sigma_v = \sigma_z = p_0$). Το εντατικό πεδίο θεωρείται σταθερό (constant) καθώς η εκσκαφή γίνεται σε μεγάλο βάθος.

	γ KN/m ³	H m	p_0	p_i (initial)
Ρυοδακτικές λάβες Θ.	19,2	50	0,735	0,735
Τόφφοι	15,1	90	1,36	1,36
Κίσσηρης	13,19	110	1,45	0,16
Ρυοδακτικές λάβες Αλ.	14,7	150	2,88	2,88
Πυροκλαστικά	14,5	200	2,9	1,77

Πίνακας 8. Εσωτερική πίεση p_i και εντατικό πεδίο p_0

Το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος (mesh type) : Ακτινωτός (radial)
- Είδος διαμέρισης (element type) : Τετράπλευρα 8 κόμβων
- Συντελεστής επέκτασης (expansion factor) : 5
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή (default number of nodes on all excavations) : 300

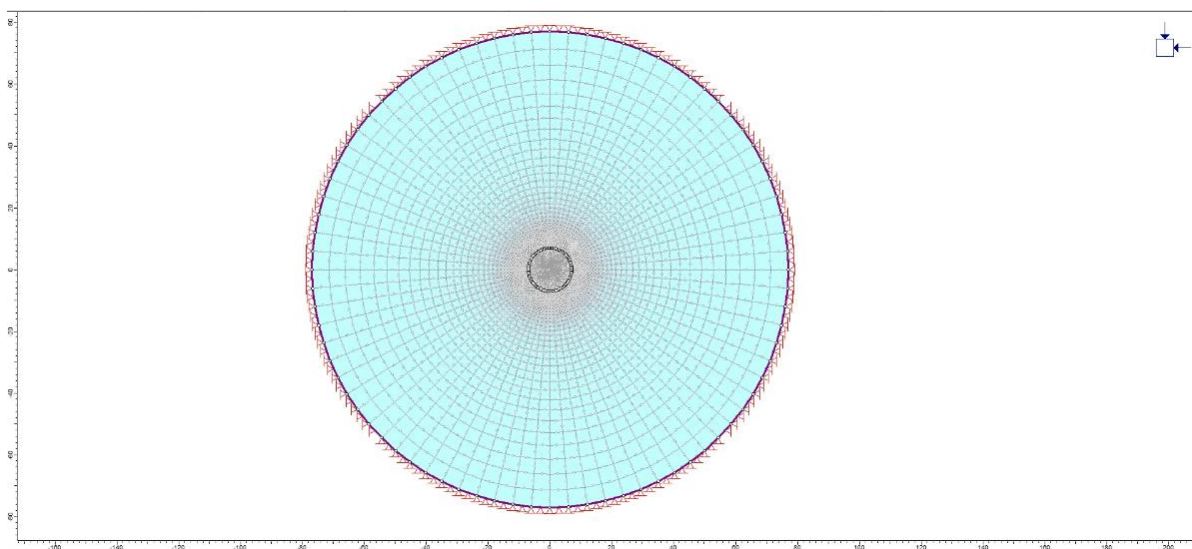
Οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είδος Ορίου : κύκλος
- Συντελεστής Επέκτασης : 5

5.3.2.2 Κατασκευή προσομοιωμάτων σύγκλισης – αποτόνωσης

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase², η μέθοδος σύγκλισης – αποτόνωσης εφαρμόζεται πάντοτε σε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain analysis) και αποτυπώνεται ακολουθώντας μια σειρά βημάτων.

Το 1^ο στάδιο αντικατοπτρίζει πάντοτε το φυσικό εντατικό πεδίο, στο οποίο δεν έχει συμβεί ακόμα η εκσκαφή. Στο 2^ο στάδιο εφαρμόζεται στο άνοιγμα η ομοιόμορφη εσωτερική πίεση p_i , η οποία προσομοιώνει την σταδιακή αποτόνωση της βραχομάζας σύμφωνα με όσα εξετάθησαν στην προηγούμενο παράγραφο και στους πίνακες 14 και 8. Στο συγκεκριμένο στάδιο εφαρμόζεται όλη καθώς δεν έχει ξεκινήσει ακόμη η αποτόνωση. Ο συντελεστής μείωσης επομένως είναι 1. Στα στάδια 3 έως 9 ξεκινά η αποφόρτιση όπου ο συντελεστής μείωσης της p_i είναι <1 , ενώ στο 10^ο στάδιο τείνει στο μηδέν όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη σύγκλιση των τοιχωμάτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, εξετάζουμε την συμπεριφορά του πετρώματος επιτυγχάνοντας την αποτόνωση του.



Σχήμα 63. Στάδιο 1^ο φυσικό εντατικό πεδίο

1. Στρώμα Ρυοδακτικικές λάβες Θηρασίας

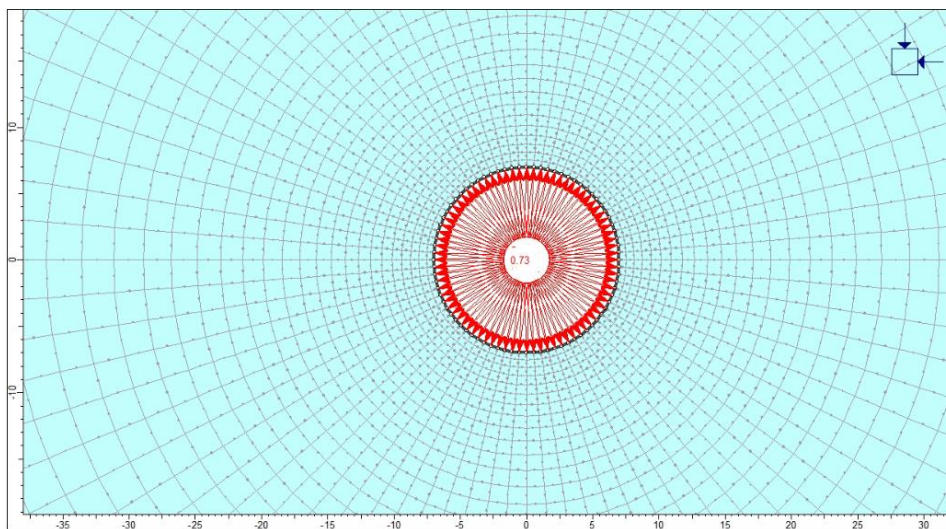
Το στρώμα αυτό εξαιτίας της υψηλής συνεκτικότητας των 10,2 MPa, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, συμπεριφέρεται ελαστικά για το παρόν εντατικό πεδίο $p_o = 0,735$ MPa οπότε, η τιμή της εφαρμοζόμενης εσωτερικής πίεσης υποστήριξης p_i είναι ίση με το του εντατικό πεδίο.

Οι τιμές του συντελεστή μείωσης και της εσωτερικής πίεσης για κάθε ένα από τα 10 στάδια είναι :

Συντελεστής μείωσης									
0	1	0,9	0,7	0,5	0,35	0,25	0,175	0,125	0
Εσωτερική πίεση p_i									
0	0,735	0,66	0,51	0,37	0,26	0,18	0,13	0,09	0

Πίνακας 9. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (ρυσδακιτικές λάβες Θηρασίας)

Οι τιμές της εσωτερικής πίεσης προκύπτουν από των πολλαπλασιασμό του συντελεστή μείωσης με την εφαρμοζόμενη εσωτερική πίεση υποστήριξης.



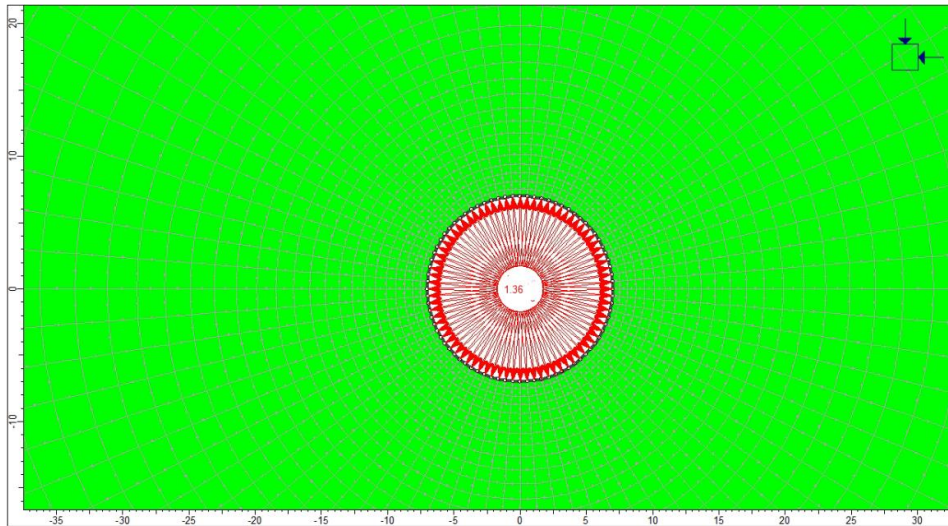
Σχήμα 64. Προσομοίωμα Ρυσδακιτικών λαβών Θηρασίας στο 2^ο στάδιο, έχει γίνει η εκσκαφή και εφαρμόζεται η $p_i = 0,735$ MPa

2. Στρώμα Τόφφοι

Ομοίως με το πρώτο στρώμα, και οι τόφφοι συμπεριφέρονται ελαστικά για το εντατικό πεδίο $p_o = 1,36$ MPa. Οι τιμές του συντελεστή μείωσης και της εσωτερικής πίεσης για κάθε ένα από τα 10 στάδια είναι :

Συντελεστής μείωσης									
0	1	0,9	0,7	0,5	0,35	0,25	0,175	0,125	0
Εσωτερική πίεση p_i									
0	1,36	1,22	0,95	0,68	0,48	0,34	0,24	0,17	0

Πίνακας 10. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (τόφφοι)



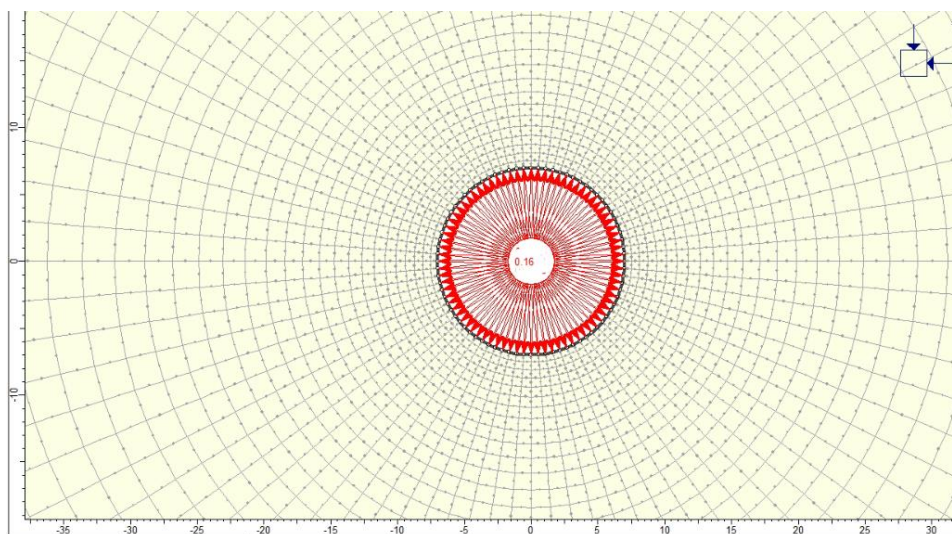
Σχήμα 65. Προσομοίωμα Τόφρων στο 2^ο στάδιο για $p_i = 1,36$ MPa

3. Στρώμα Κίσηρης

Το στρώμα της κίσηρης συμπεριφέρεται ως ελαστοπλαστικό με κρίσιμη πίεση p_{cr} ίση με 0,16 MPa, εδώ εφόσον εξετάζουμε τη συμπεριφορά της βραχομάζας όταν μεταπίπτει σε πλαστική η αρχική τιμή της εσωτερικής πίεσης είναι ίση με της κρίσιμης, άρα οι τιμές του συντελεστή μείωσης και της εσωτερικής πίεσης διαμορφώνονται ως εξής :

Συντελεστής μείωσης										
0	1	0,9	0,7	0,5	0,35	0,25	0,175	0,125	0	0
Εσωτερική πίεση p_i										
0	0,16	0,14	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0	0

Πίνακας 11. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (κίσηρης)



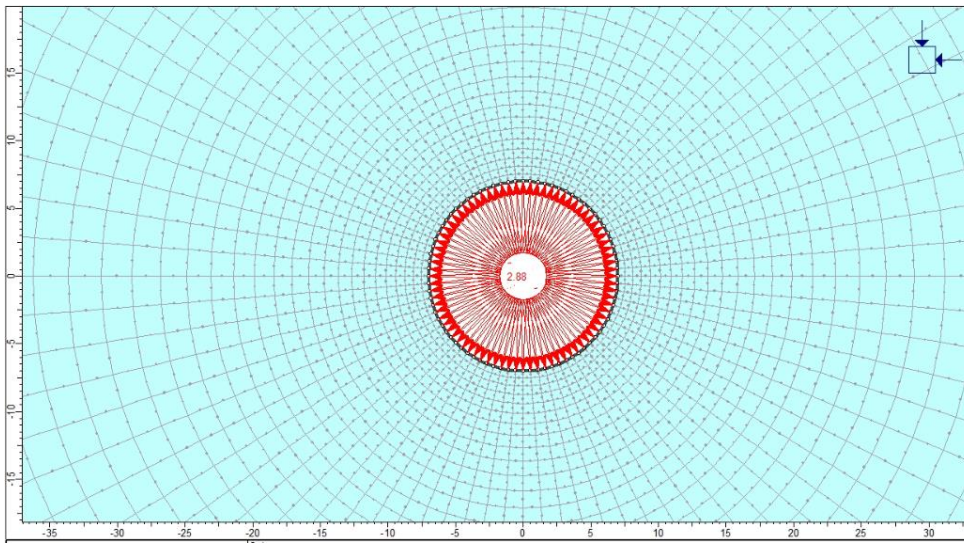
Σχήμα 66. Προσομοίωμα Κίσηρης στο 2^ο στάδιο για $p_i = 0,16$ MPa

4. Στρώμα Ρυοδακτιπικές Λάβες Αλωνάκι

Αντίστοιχα με το πρώτο στρώμα λάβας, εξαιτίας της υψηλής συνεκτικότητας των 10,5 MPa συμπεριφέρεται ελαστικά για εντατικό πεδίο $p_o = 2,88$ MPa. Οι τιμές του συντελεστή μείωσης και της εσωτερικής πίεσης για κάθε ένα από τα 10 στάδια είναι :

Συντελεστής μείωσης									
0	1	0,9	0,7	0,5	0,35	0,25	0,175	0,125	0
Εσωτερική πίεση p_i									
0	2,88	2,59	2,02	1,44	1,01	0,72	0,5	0,36	0

Πίνακας 12. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (ρυοδακτιπικές λάβες Αλωνάκι)



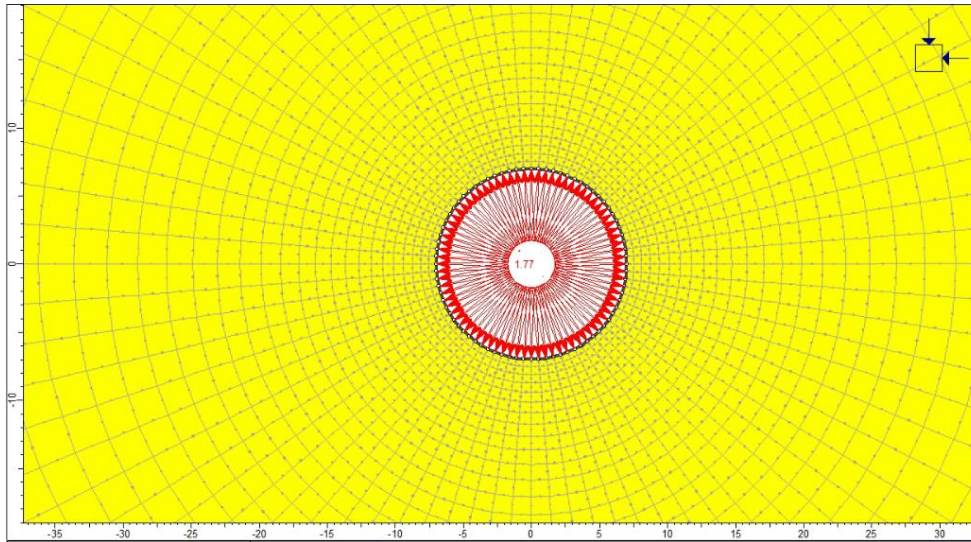
Σχήμα 67. Προσομοίωμα Ρυοδακτιπικών λαβών Αλωνάκι στο 2^ο στάδιο, με $p_i = 2,88$ MPa

5. Στρώμα Πυροκλαστικών

Το στρώμα των πυροκλαστικών αποτελεί το τελευταίο στρώμα και βρίσκεται σε βάθος 200 m σε εντατικό πεδίο $p_o = 2,9$ MPa. Δεδομένου των φτωχών μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας αναμένεται όπως υπολογίστηκε να πλαστικοποιηθεί, με κρίσιμη πίεση $p_{cr} = 1,77$ MPa. Οι τιμές του συντελεστή μείωσης και της εσωτερικής πίεσης είναι οι εξής :

Συντελεστής μείωσης									
0	1	0,9	0,7	0,5	0,35	0,25	0,175	0,125	0
Εσωτερική πίεση p_i									
0	1,77	1,59	1,24	0,89	0,62	0,44	0,31	0,22	0

Πίνακας 13. Συντελεστής μείωσης πίεσης p_i (πυροκλαστικά)



Σχήμα 68. Προσομοίωμα Πυροκλαστικά στο 2^ο στάδιο για $p_i = 1,77 \text{ MPa}$

5.3.3 Ερμηνεία Καμπύλων Σύγκλισης – Αποτόνωσης

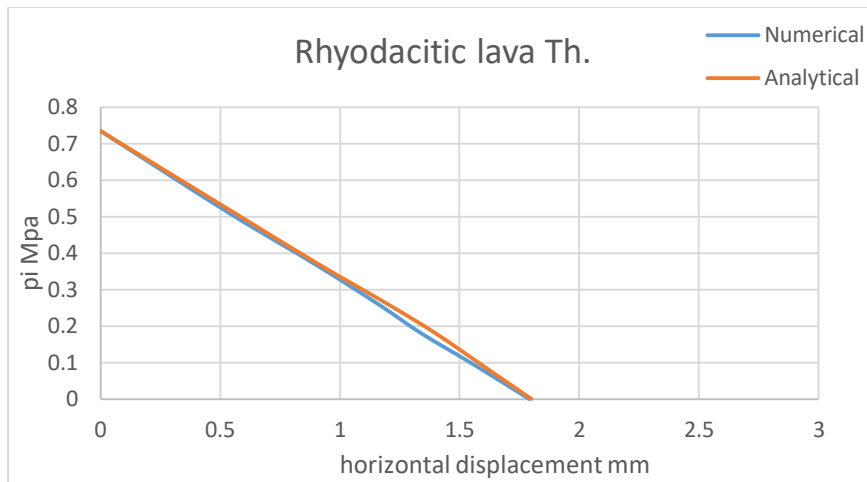
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των παραπάνω προσομοιωμάτων ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης, που εξάγονται μέσω του interpret στο πρόγραμμα Phase², βρίσκονται στο Παράρτημα.

Στα στρώματα των ροδοακτικικών λαβών Θηρασίας, τόφφων και ροδοακτικικών λαβών Αλωνάκι δεν παρατηρούνται σημεία αστοχίας από τα αντίστοιχα γραφήματα του Παραρτήματος, σε όλα τα στάδια, καθώς η βραχομάζα συμπεριφέρεται ως ελαστική. Ειδικότερα, για $p_i = p_o = 0,735$ (στάδιο 2) οι τάσεις σ_1 και σ_3 είναι σταθερές και ίσες με το εντατικό πεδίο p_o (γραφήματα σ_1 και σ_3 για το 2^ο στάδιο του Παραρτήματος). Εντούτοις, για $p_i < p_o$ (στάδια 5 έως 10) τα βέλη και το όριο της παραμόρφωσης δείχνουν πως η διεύθυνση είναι προς το εσωτερικό, δηλαδή η παρειά της εκσκαφής θλίβεται χωρίς όμως να αστοχεί, με το άνοιγμα να κλείνει όπως είναι λογικό αφού η προσφερόμενη πίεση είναι μικρότερη του εντατικού πεδίου. Όλες οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι ομοιόμορφες με αποτέλεσμα το κυκλικό άνοιγμα να κλείνει ομοιόμορφα. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι καθώς η απόσταση από το κέντρο του φρέατος αυξάνεται, η μέγιστη τάση σ_1 μειώνεται και η ελάχιστη τάση σ_3 αυξάνεται μέχρι να γίνουν ίσες με το εντατικό πεδίο p_o (γραφήματα σ_1 και σ_3 για 10^ο στάδιο του Παραρτήματος). Οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων (στάδιο 10) των στρωμάτων αυτών είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών (γραφήματα συνολικών μετακινήσεων Παραρτήματος) με τη παραμόρφωση να είναι το 0,1% περίπου της ακτίνας, οπότε οι συνθήκες διάνοιξης αναμένονται ευνοϊκές και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που θα επιλέξουμε θα είναι ελαφριά χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις.

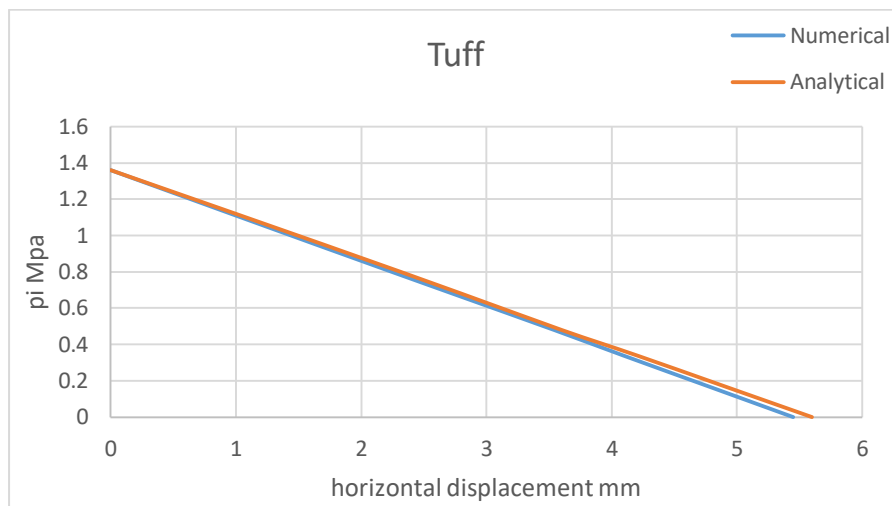
Όσον αφορά τις μετακινήσεις, καθώς αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο του φρέατος αυτές μειώνονται και σε μεγάλη απόσταση τείνουν να γίνουν ίσες με το μηδέν.

Στα στρώματα της κίσηρης και των πυροκλαστικών, όταν η εσωτερική πίεση είναι ίση με τη κρίσιμη πίεση (στάδιο 2) η βραχομάζα συμπεριφέρεται ελαστικά όπως και στα υπόλοιπα στρώματα. Όσο η προσφερόμενη πίεση μειώνεται (στάδιο 10) και γίνεται μικρότερη από της κρίσιμης μέχρις ότου να τείνει στο μηδέν, παρατηρείται πως η μέγιστη κύρια τάση σ_1 αυξάνεται έως να μεγιστοποιηθεί κι έπειτα μειώνεται ώσπου να γίνει ίση με το εντατικό πεδίο. Από τα γραφήματα της σ_1 στο στάδιο 10, παρατηρείται η δημιουργία μιας ζώνης, γύρω από το άνοιγμα, στην οποία μεγιστοποιείται ενώ ταυτόχρονα από τα γραφήματα των σημείων αστοχίας η βραχομάζα φαίνεται να διαρρέει στην ζώνη αυτή. Η ζώνη αυτή ονομάζεται πλαστική στην οποία η βραχομάζα θραύεται (πλαστικοποιείται). Πέραν της πλαστικής ζώνης αφού οι τάσεις τείνουν να ισούνται με το εντατικό πεδίο η βραχομάζα ισορροπεί, ως εκ τούτου η βραχομάζα που διαθέτει τα παραπάνω χαρακτηριστικά καλείται ελαστοπλαστική. Επιπλέον, οι συνολικές μετακινήσεις στη παρειά του φρέατος είναι μέγιστες (στάδιο 10) ενώ μειώνονται όσο η απόσταση αυξάνεται από το άνοιγμα. Στη κίσηρη η μέγιστη μετακίνηση είναι 1,31 cm και η ακτίνα της πλαστικής ζώνης 7,5 m περίπου, άρα η σύγκλιση των τοιχωμάτων του φρέατος είναι μικρή της τάξης 0,2% με τις συνθήκες της διάνοιξης να παραμένουν ευνοϊκές. Στα πυροκλαστικά, όμως, δεν συμβαίνει αυτό. Δεδομένου πως η βραχομάζα έχει χαμηλές μηχανικές ιδιότητες και το στρώμα βρίσκεται σε βάθος 150 - 200 m είναι λογικό το όποιο άνοιγμα να θλίβεται και να κλείνει μέχρι να επέλθει ισορροπία. Ωστόσο, η ακτίνα της πλαστικής ζώνης είναι εκτεταμένη περίπου ίση με 29 m και η συνολική μέγιστη μετακίνηση στο άνοιγμα είναι 19,6 cm, που αντιστοιχεί σε σύγκλιση 2,8% των τοιχωμάτων του φρέατος.

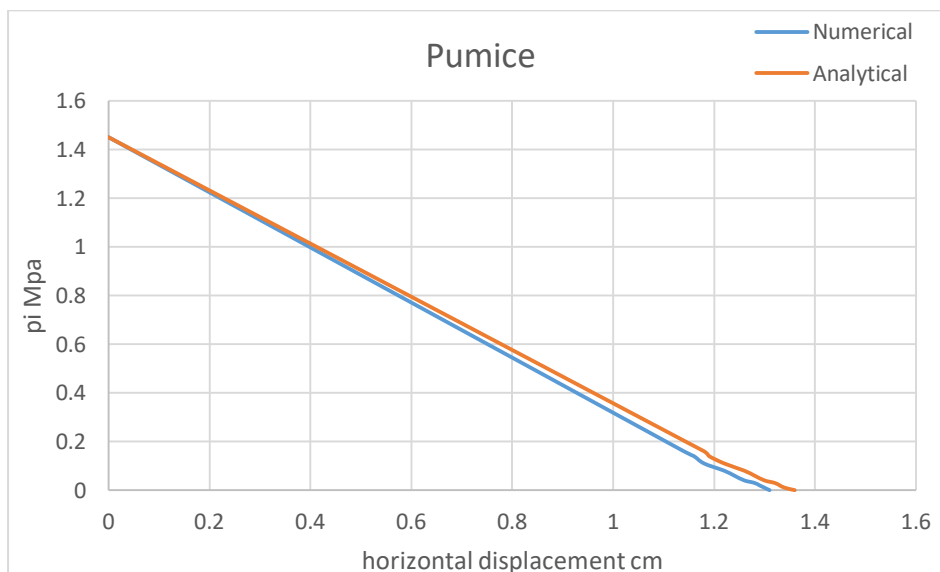
Οι παρακάτω καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης του κάθε στρώματος αναπαριστούν τη συμπεριφορά του πετρώματος για τις τιμές εσωτερικής πίεσης p_i και συνδυάζουν τις δυο μεθόδους επίλυσης. Στον άξονα των τεταγμένων είναι η μετακίνηση της παρειάς του φρέατος και στον άξονα των τεταγμένων είναι πίεση υποστήριξης p_i . Η μπλε καμπύλη (numerical) σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων από το πρόγραμμα Phase². Η πορτοκαλί καμπύλη (analytical) αναπαριστά τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις σχέσεις των Vlachopoulos and Diederichs, 2009. Είναι φανερό πως οι δύο μέθοδοι έχουν πλήρη συμφωνία, αφού οι δυο καμπύλες παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές, άρα η αριθμητική λύση θεωρείται πλήρως αξιόπιστη.



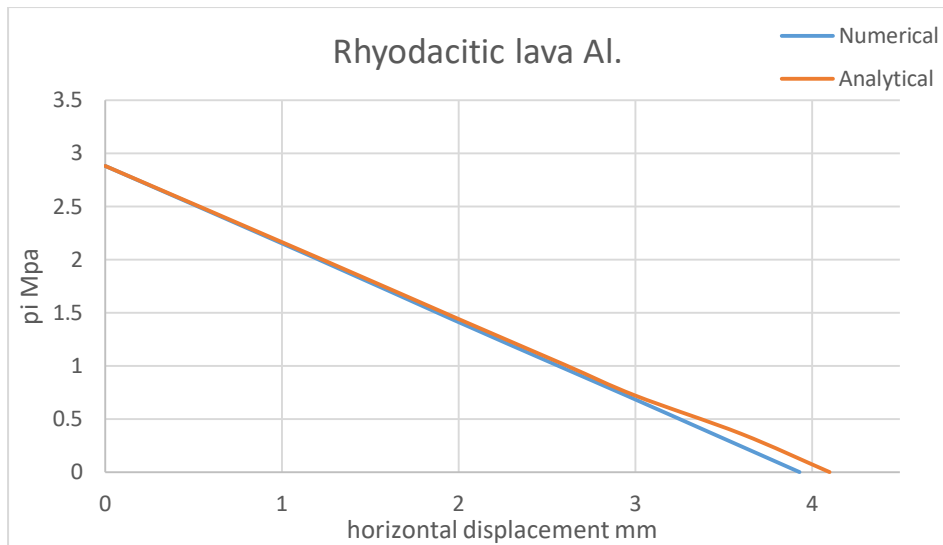
Γράφημα 27. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Ρυοδακτικές λάβες Θηρασίας



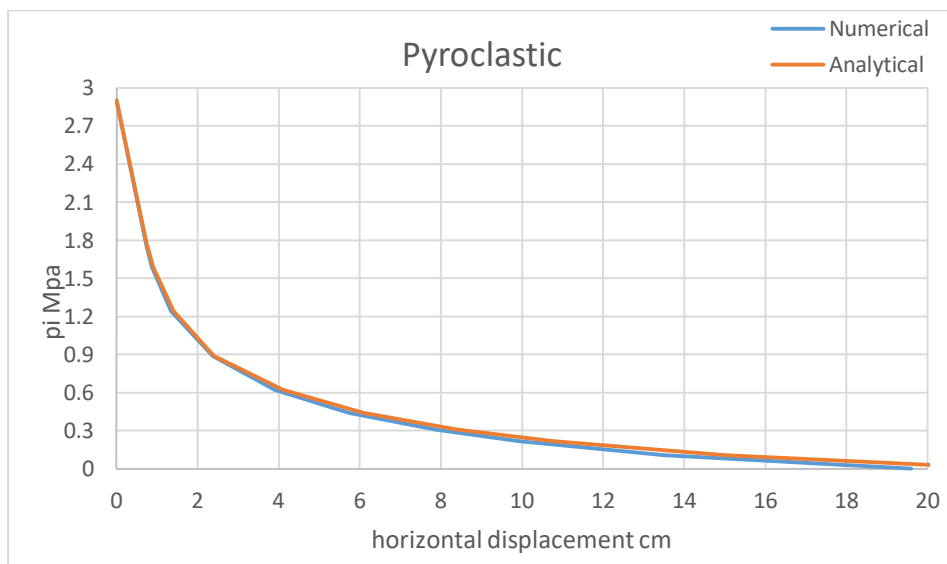
Γράφημα 28. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Τόφφοι



Γράφημα 29. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Κίσσηρης



Γράφημα 30.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Ρυοδακιτικές λάβες Αλωνάκι



Γράφημα 31.Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης Πυροκλαστικά

Παρατηρώντας, τα μεγέθη των μετακινήσεων φαίνεται πως για τα τρία στρώματα που παραμένουν στην ελαστική ζώνη (λάβες, τόφφοι) η μέγιστη μετακίνησή τους είναι της τάξης των χιλιοστών. Στη κίσηρη δημιουργείται μια μικρή πλαστική ζώνη για $p_i < p_{cr} = 0,16$ MPa, με μέγιστη μετακίνηση 1,31 εκατοστά ενώ στα πυροκλαστικά οι μετακινήσεις είναι εντονότερες με δημιουργία μεγάλης ζώνης πλαστικοποίησης όταν $p_i < p_{cr} = 1,77$ MPa. Η μέγιστη μετακίνηση για μηδενική εσωτερική πίεση υποστήριξης είναι 19,6 εκατοστά. Είναι προφανές, πως θα πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη διάνοιξη όσο αυξάνεται το βάθος ιδιαίτερα στα τελευταία 50 m στο στρώμα των πυροκλαστικών όπου εκτιμώνται μετρίου μεγέθους συγκλίσεις. Τα μέτρα υποστήριξης για τα πρώτα 150 m πρόκειται να είναι ελαφρύτερα και όμοια εφόσον η βραχομάζα παραμένει ελαστική σχεδόν, εκτός από το στρώμα της

κίσσηρης, το οποίο είναι μόνο 20 m και δεν αναμένεται να δημιουργεί προβλήματα. Η υποστήριξη στα πυροκλαστικά θα πρέπει να μελετηθεί λεπτομερώς εξαιτίας των αναμενόμενων συγκλίσεων.

Προκειμένου να καθορισθεί το σωστό βήμα προχώρησης της εκσκαφής θα πρέπει να υπολογιστούν οι ανάλογες μετακινήσεις χαλάρωσης της βραχομάζας καθώς και η αντίστοιχη προσφερόμενη πίεση υποστήριξης. Μετά τη χαλάρωση ακολουθεί η τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, η οποία και αναλαμβάνει την υπόλοιπη φόρτιση. Η φάση της χαλάρωσης της βραχομάζας είναι κρίσιμης σημασίας, εφόσον η υποστήριξη που θα τοποθετηθεί θα πρέπει να είναι ικανή να αναλάβει μεγάλο μέρος των τάσεων αλλά όχι τόσο ώστε να αστοχήσει, ενώ παράλληλα οι μετακινήσεις της βραχομάζας να είναι ελεγχόμενες ώστε να ισοροπηθεί αλλά όχι σε σημείο να καταρρεύσει.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ στο PHASE²

5.4.1 Κατασκευή Προσομοιωμάτων

Τα προσομοιώματα της εκσκαφής και των εφαρμοζόμενων μέτρων στήριξης που πρόκειται να μελετηθούν αφορούν μόνο το στρώμα των πυροκλαστικών διότι εκεί αναμένονται οι δυσμενέστερες συνθήκες κατά την εκσκαφή και είναι και το σημείο συμβολής με την σήραγγα. Καθώς τα μέτρα που θα εφαρμοσθούν στο στρώμα αυτό θα είναι τα πιο βαριά, θα υπερκαλύπτουν τις ανάγκες και των υπόλοιπων στρωμάτων. Επομένως, με βάση αυτά, δύναται να επιλεγεί ελαφρύτερου τύπου υποστήριξη για τα υπόλοιπα στρώματα που βρίσκονται πιο κοντά στην επιγεια επιφάνεια. Εάν κατά τη διάνοιξη παρατηρηθεί και μετρηθεί απόκλιση από τις αναμενόμενες συνθήκες στα στρώματα και δημιουργηθούν προβλήματα κατά τη διάνοιξη του φρέατος, συνιστάται να εφαρμοσθούν εναλλακτικά τα βαρύτερα μέτρα στήριξης που προβλέπονται για το στρώμα των πυροκλαστικών.

Η επιλογή του αξονοσυμμετρικού προσομοιώματος στο Phase² επιτρέπει την πραγματοποίηση μίας τριδιάστατης ανάλυσης με χρήση ενός δισδιάστατου προσομοιώματος, αφού διαθέτει άξονα συμμετρίας εκ περιστροφή. Δεδομένου ότι το φρέαρ είναι κυκλικό και το υδροστατικό εντατικό πεδίο αξονοσυμμετρικό, η αξονοσυμμετρική ανάλυση θα μας δείξει τη συμπεριφορά του φρέατος και της βραχομάζας σε πραγματικό χρόνο τρισδιάστατα. Επειδή, όμως θα εφαρμοσθούν όλα τα είδη των μέτρων στήριξης και το αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα δε μπορεί να προσομοιώσει την εφαρμογή αγκυρίων, θα δημιουργηθεί κι ένα προσομοίωμα επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης για την πλήρη εξέταση των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης. Η προσομοίωση της διάνοιξης του φρέατος αφορά την ολομέτωπη εκσκαφή της 14 m διαμέτρου του φρέατος σύμφωνα με τη μέθοδο NATM.

Στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος (mesh type) : Ακτινωτός (radial)
- Είδος διαμέρισης (element type) : Τετράπλευρα 8 κόμβων
- Συντελεστής επέκτασης (expansion factor) : 5
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή (default number of nodes on all excavations) : 300

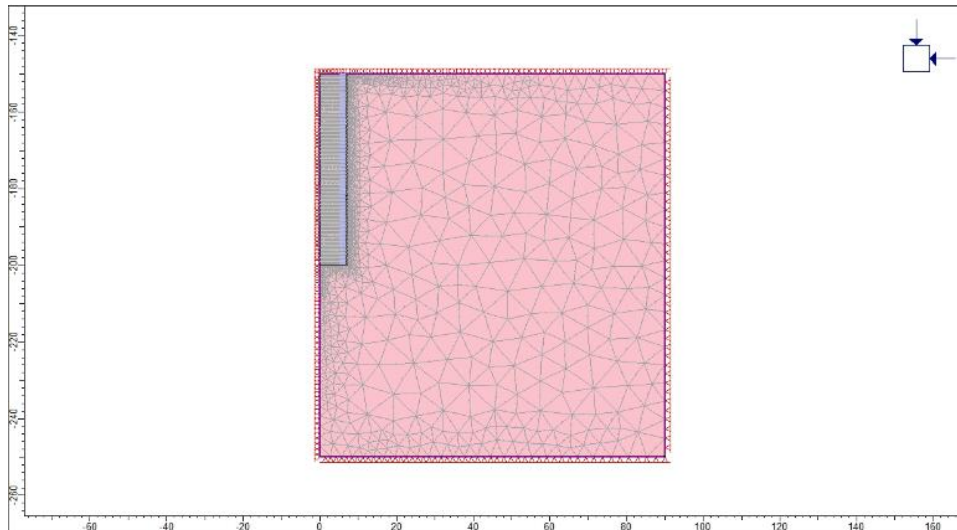
Και οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είδος Ορίου : κύκλος
- Συντελεστής Επέκτασης : 5

Στην αξονοσυμμετρική ανάλυση το πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τύπος (mesh type) : βαθμωτός (graded)
- Είδος διαμέρισης (element type) : Τρίγωνα 6 κόμβων
- Συντελεστής επέκτασης (expansion factor) : 5
- Αριθμός κόμβων στην εκσκαφή (default number of nodes on all excavations) : 90

Οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) στο αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα ορίζονται από τα σημεία που διέπουν τη γεωμετρία του φρέατος, τα οποία εισάγουμε. Για ένα αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα με αριστερό όριο στο $X=0$, θα πρέπει στο όριο αυτό να επιβληθεί περιορισμός μόνο κατά X . Στο κάτω όριο επιβάλλουμε μηδενισμό των μετακινήσεων κατά X και κατά Y (πάκτωση). Στο άνω όριο δεν επιβάλλουμε περιορισμό εάν αυτό αντιπροσωπεύει την ελεύθερη επιφάνεια, επειδή όμως το προσομοίωμά μας ξεκινά 150 m βαθύτερα από την επιφάνεια του εδάφους, αφού αντιπροσωπεύει το στρώμα των πυροκλαστικών, τότε θέτουμε περιορισμό κατά Y . Το δεξί όριο, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύει άπειρη απόσταση από την εκσκαφή, θα πρέπει κατ' αρχάς να είναι σε επαρκή απόσταση ώστε να μην υπάρχει επίδραση από αυτήν. Μπορεί να περιοριστεί είτε κατά X είτε κατά X και Y ταυτοχρόνως χωρίς αισθητή διαφορά στα αποτελέσματα εάν πληρείται ο όρος της απόστασης. Ειδάλλως, η πραγματικότητα θα είναι κάπου ενδιάμεσα. Τονίζεται ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση του δεξιού ορίου από την εκσκαφή, τόσο μικραίνει η σημασία της συνοριακής συνθήκης. Το δεξί όριο στο προσομοίωμα βρίσκεται σε 90 m απόσταση από το κέντρο του φρέατος, η οποία είναι επαρκής αφού είναι μεγαλύτερη της απόστασης 35 m για 5R.



Σχήμα 69. Αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα φρέατος

Το φυσικό εντατικό πεδίο $p_0 = 2,9 \text{ MPa}$ είναι αξονοσυμμετρικό, υδροστατικό ($K=1$) και επιλέγεται ως σταθερό (constant) διότι η διάνοιξη στο στρώμα των πυροκλαστικών πραγματοποιείται σε μεγάλο βάθος κι όχι κοντά στην επιφάνεια οπότε δεν φορτίζεται λόγω βαρύτητας. Οι μηχανικές παράμετροι που εισάγονται αφορούν τα πυροκλαστικά και προκύπτουν από τον πίνακα 1.

Οι φάσεις της διάνοιξης του φρέατος στο προσομοίωμα επίπεδης ανάλυσης προσομοιώνονται σύμφωνα με τα παρακάτω στάδια :

- 1) Εφαρμογή φυσικού εντατικού πεδίου και εσωτερικής πίεσης στήριξης $p_i=0,62 \text{ MPa}$ και εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης
- 2) Τοποθέτηση αγκυριών και σταθεροποιητικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος 5 cm
- 3) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα πάχους 10 cm
- 4) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια πάχους 10 cm
- 5) Οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 50 cm
- 6) Αφαίρεση προσωρινής υποστήριξης των στρώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Οι φάσεις της διάνοιξης του φρέατος στο προσομοίωμα αξονοσυμμετρικής ανάλυσης προσομοιώνονται σύμφωνα με τα παρακάτω στάδια :

- 1) Εφαρμογή φυσικού εντατικού πεδίου – αρχικές συνθήκες
- 2) Εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 1^{ης} φάσης
- 3) Τοποθέτηση σταθεροποιητικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος 5 cm και συγχρόνως εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 2^{ης} φάσης
- 4) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 3^{ης} φάσης
- 5) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 4^{ης} φάσης

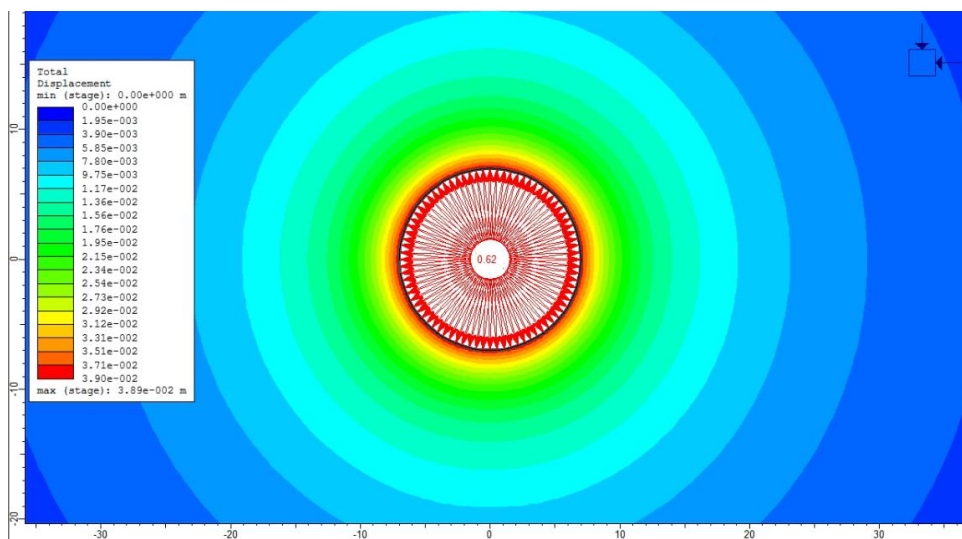
Η παραπάνω διαδικασία τοποθέτησης της προσωρινής επένδυσης επαναλαμβάνεται μέχρι και την εκσκαφή στο βάθος των 200 m στο στάδιο 52. Στο στάδιο 53 τοποθετείται η τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα της 1ης φάσης και ολοκληρώνεται στο στάδιο 102 για όλο το μήκος της διάνοιξης. Στο στάδιο 103 ξεκινά η αφαίρεση της προσωρινής υποστήριξης των στρώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και παραμένει μόνη της η τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η τοποθέτηση της επένδυσης, όπως περιγράφεται στα παραπάνω στάδια, των δύο μεθόδων ανάλυσης αντικατοπτρίζει της πραγματικές φάσεις διάνοιξης όπου η υποστήριξη εφαρμόζεται σε στρώσεις.

5.4.2 Προσομοίωση Διάνοιξης του Φρέατος

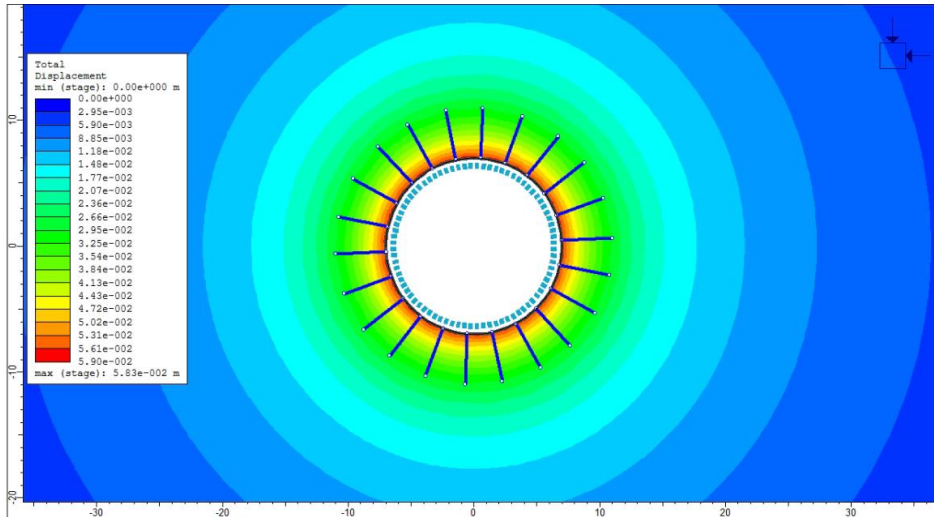
5.4.2.1 Ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης

Αρχικά, στο 1^ο στάδιο εφαρμόζεται το φυσικό εντατικό πεδίο και η εσωτερική πίεσης στήριξης $p_i = 0,62$ MPa, ενώ συγχρόνως γίνεται εκσκαφή 1 m.



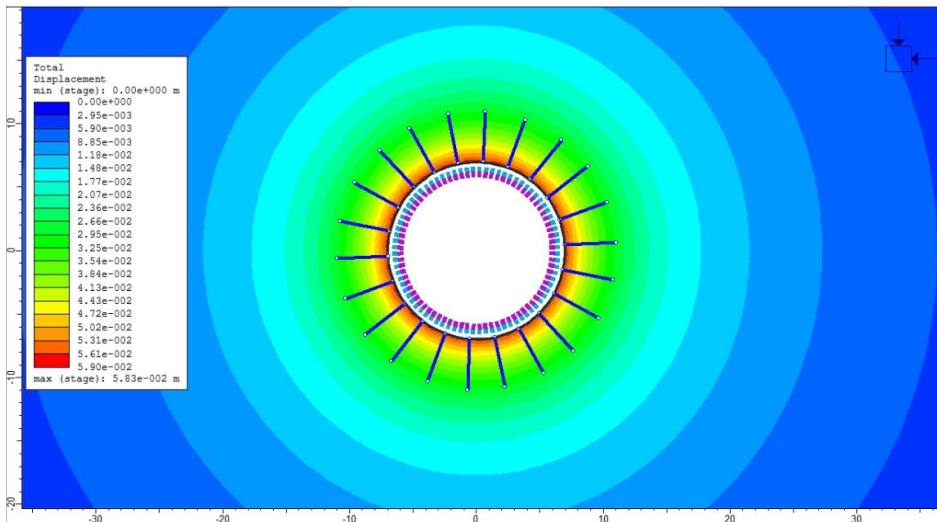
Γράφημα 32. Στάδιο 1^ο εκσκαφή – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)

Στο 2^ο στάδιο τοποθετούνται τα αγκυρία και η πρώτη σταθεροποιητική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5 cm.



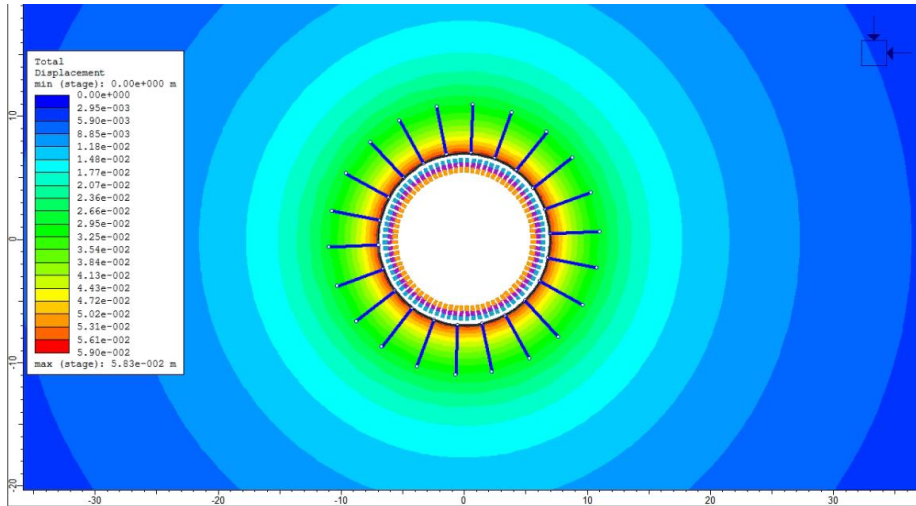
Γράφημα 33. Στάδιο 2^ο αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 5cm – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)

Στο 3^ο στάδιο τοποθετείται η δεύτερη στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10 cm και διπλό δομικό πλέγμα.



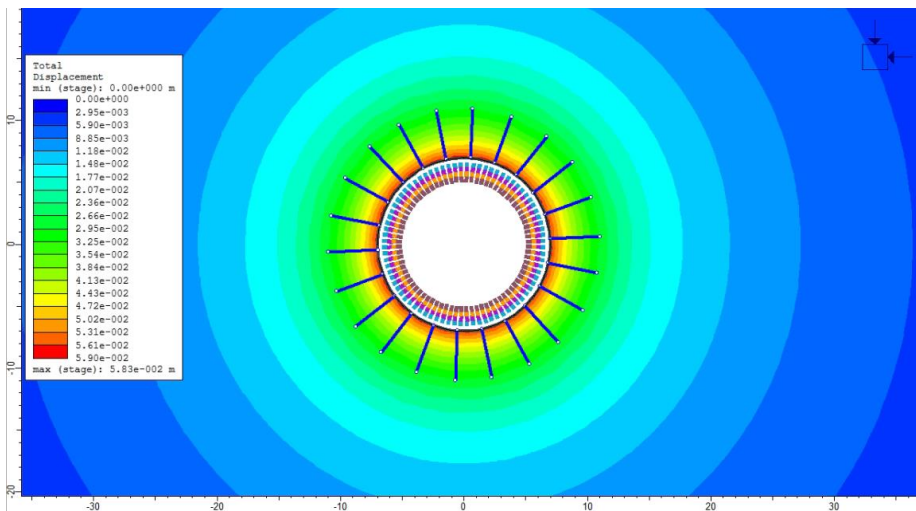
Γράφημα 34. 3^ο πρόσθεση στρώσης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm με δομικό πλέγμα – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)

Στο 4^ο στάδιο τοποθετείται η τρίτη στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10 cm και εγκιβωτισμένα δικτυωτά πλαίσια.



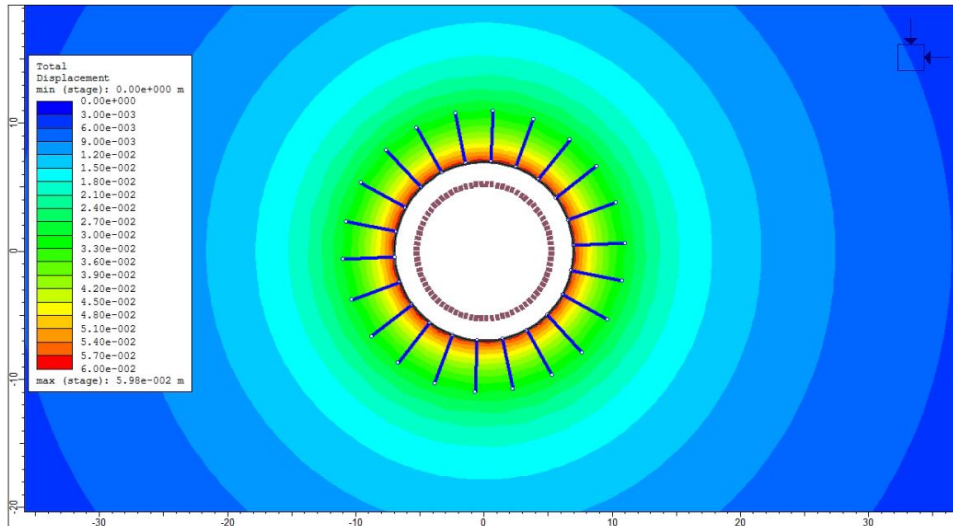
Γράφημα 35. Στάδιο 4^ο πρόσθεση στρώσης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm με δικτυωτά πλαίσια – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)

Στο 5^ο στάδιο τοποθετείται η τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 50 cm.

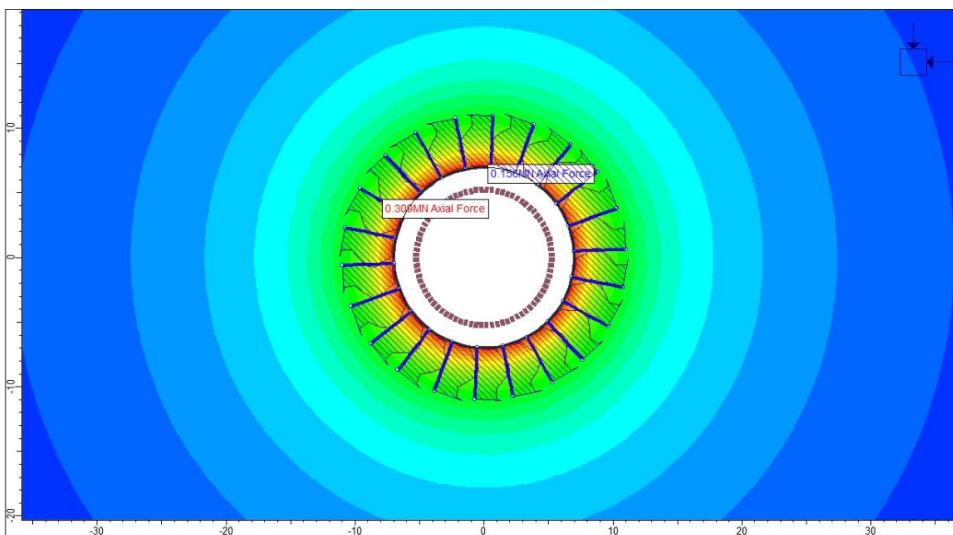


Γράφημα 36. Στάδιο 5^ο πρόσθεση τελικής επένδυσης οπλισμένο σκυρόδεμα 10 cm- συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)

Στο 6^ο στάδιο αφαιρούνται οι παραπάνω στρώσεις της προσωρινής υποστήριξης και μένει μόνο η τελική επένδυση.



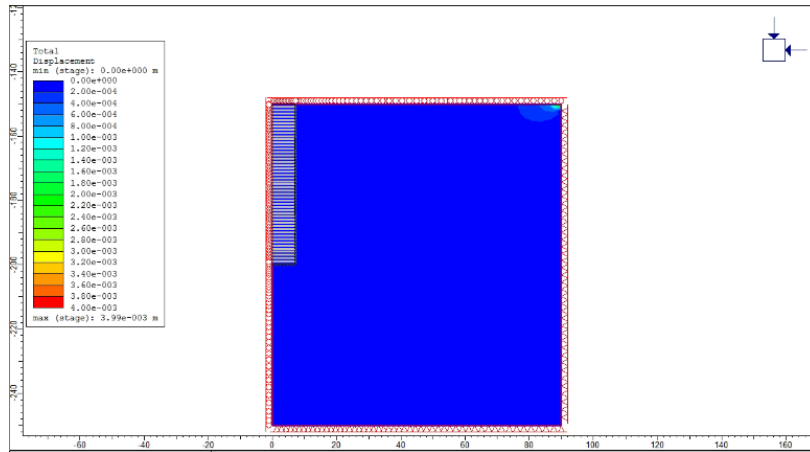
Γράφημα 37. Στάδιο 6^ο αφαίρεση προσωρινής επένδυσης – συνολικές μετακινήσεις (επίπεδη ανάλυση)



Γράφημα 38. Αξονική δύναμη αγκυριών (επίπεδη ανάλυση)

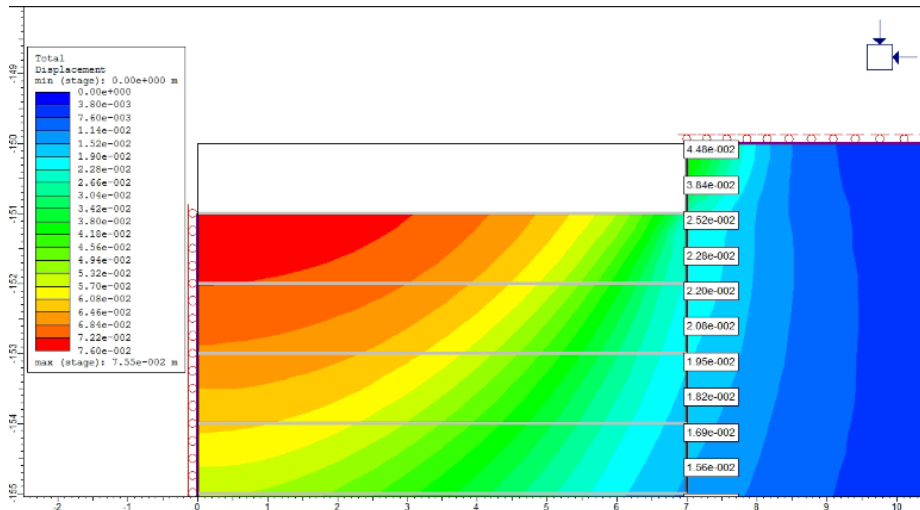
5.4.2.2 Αξονοσυμμετρική ανάλυση

Στο 1^ο στάδιο εφαρμόζεται το φυσικό εντατικό πεδίο, το οποίο αποτελεί τις αρχικές συνθήκες της βραχομάζας πριν την εκσκαφή. Παρατηρούμε πως οι μετακινήσεις, όπως είναι λογικό, είναι μηδενικές.



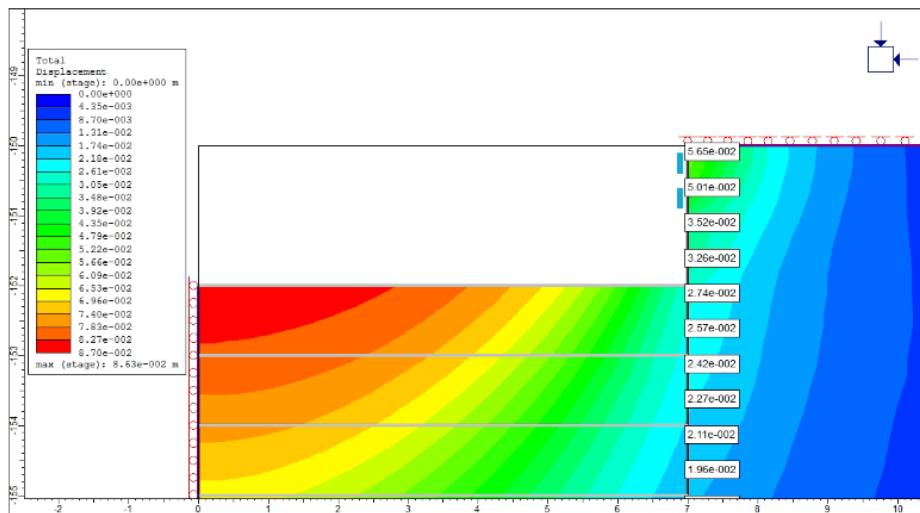
Γράφημα 39. Στάδιο 1^ο φυσικού εντατικού πεδίου – αρχικές συνθήκες (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 2^ο στάδιο γίνεται η πρώτη φάση εκσκαφής για 1 m μήκος προχώρησης. Η μετακίνηση της παρειάς του φρέατος είναι 3,84 cm.



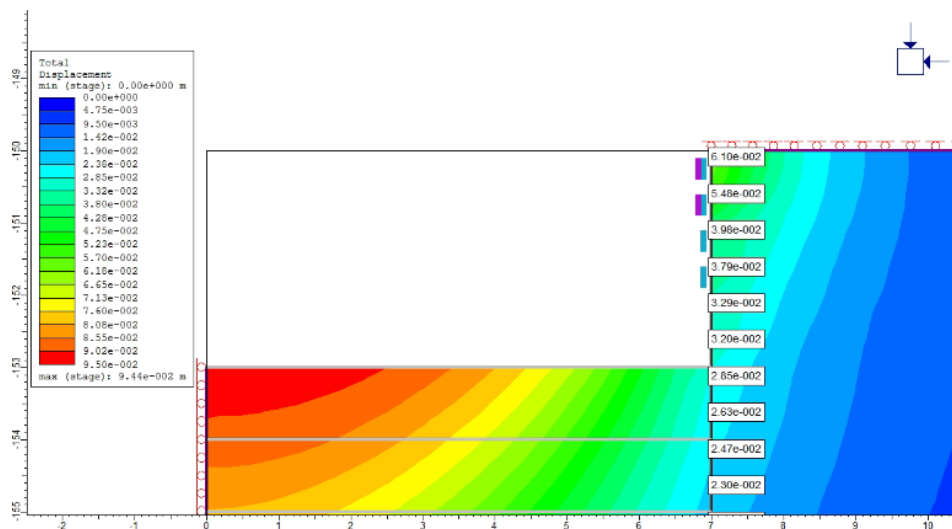
Γράφημα 40. Στάδιο 2^ο εκσκαφή 1 m μήκος προχώρησης 1^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 3^ο στάδιο εφαρμόζεται η σταθεροποιητική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος 5 cm και συγχρόνως η εκσκαφή 1 m της 2ης φάσης. Οι μετακινήσεις στη στρώση του εκτοξευόμενου αυξάνονται σε σχέση με το προηγούμενο στάδιο σε 5cm, ενώ οι μετακινήσεις στη παρειά της 2^{ης} φάσης εκσκαφής είναι 3,5 cm.



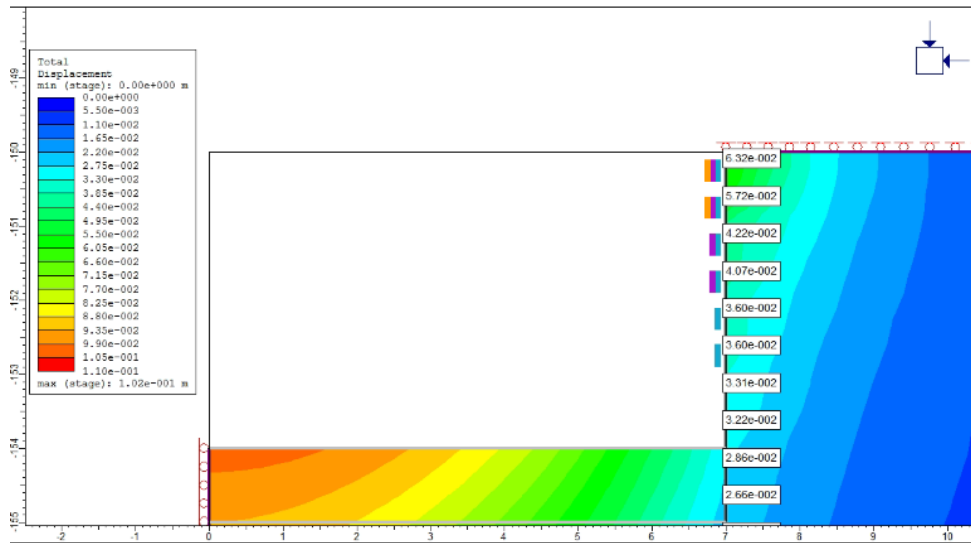
Γράφημα 41. Στάδιο 3^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 5 cm και συγχρόνως εκσκαφή 2^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 4^ο στάδιο τοποθετείται διπλό δομικό πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm στη 1^η φάση εκσκαφής, στη 2^η φάση εκσκαφής εφαρμόζεται η σταθεροποιητική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος 5 cm και συγχρόνως γίνεται εκσκαφή 1 m της 3^{ης} φάσης. Οι μετακινήσεις σε σχέση με το προηγούμενο στάδιο όπως βλέπουμε αυξάνονται.



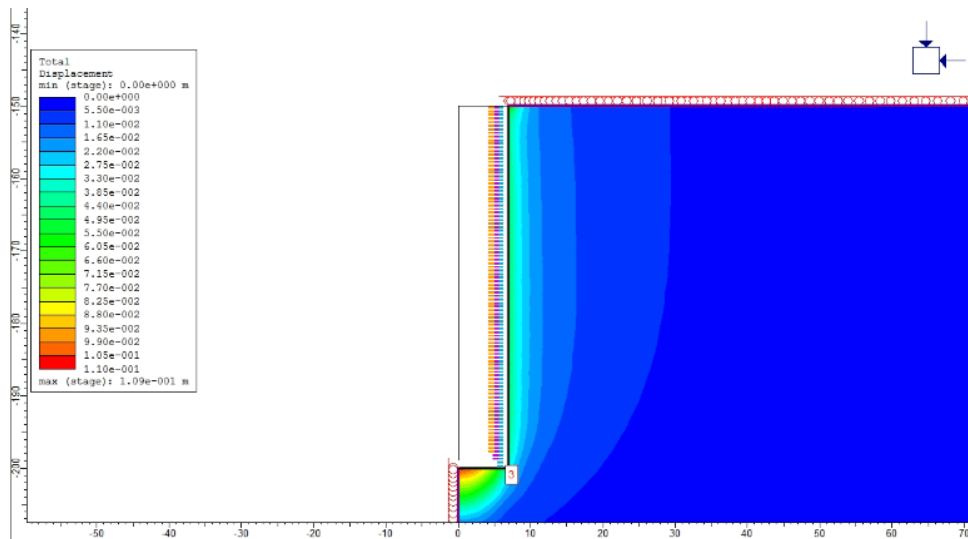
Γράφημα 42. Στάδιο 4^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 3^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 5^ο στάδιο εφαρμόζεται εγκιβωτισμός δικτυωτών πλαισίων σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10 cm στη 1^η φάση εκσκαφής, στη 2^η φάση τοποθετείται διπλό δομικό πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 10 cm, στη 3^η φάση εκσκαφής εφαρμόζεται η σταθεροποιητική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος 5 cm και συγχρόνως γίνεται εκσκαφή 1 m της 4^{ης} φάσης. Από το παρακάτω γράφημα φαίνεται κι εδώ αύξηση των μετακινήσεων στις προηγούμενες φάσεις εκσκαφής.



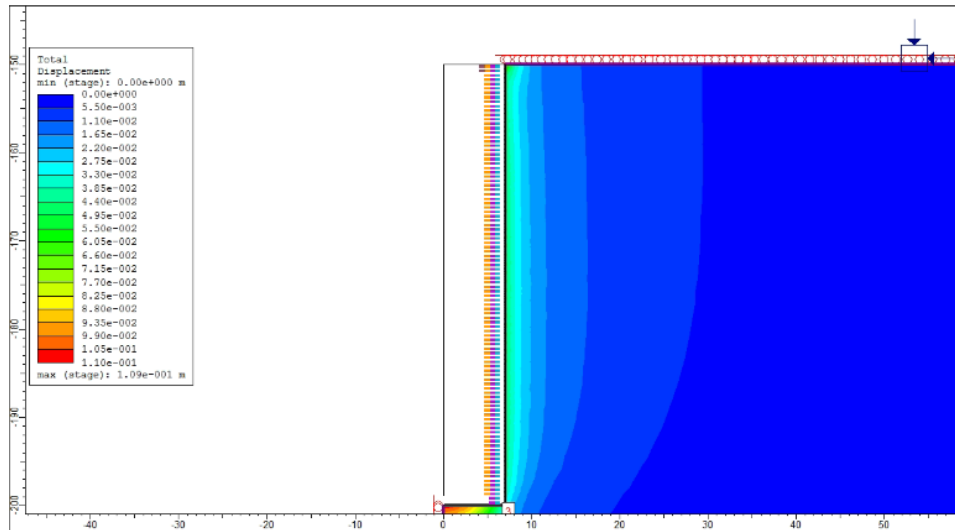
Γράφημα 43. Στάδιο 5^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια πάχους 10 cm και συγχρόνως εκσκαφή 4^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 52^ο στάδιο ολοκληρώνεται η παραπάνω διαδικασία εκσκαφής και τοποθέτησης των στρώσεων της προσωρινής υποστήριξης.



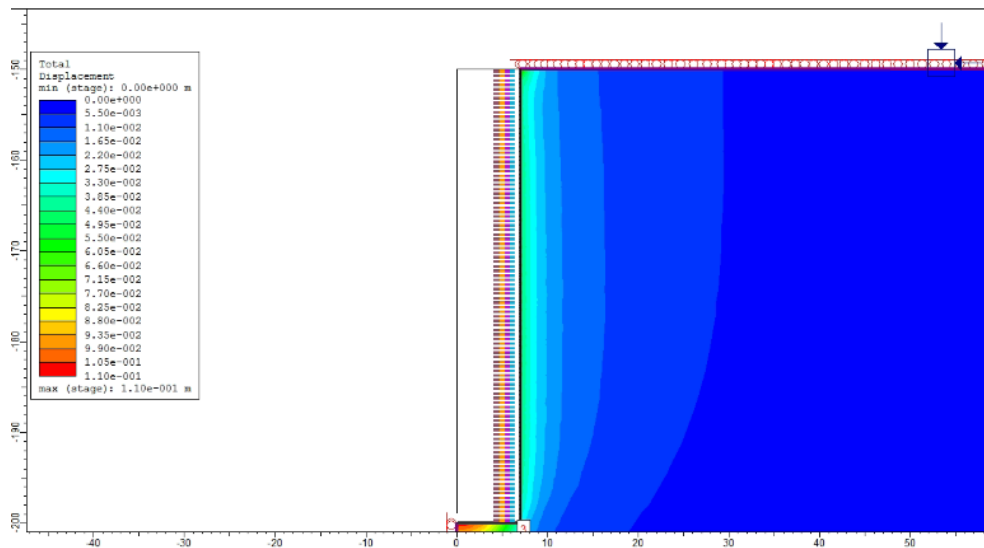
Γράφημα 44. Στάδιο 52^ο ολοκλήρωση προσωρινής υποστήριξης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 53^ο στάδιο ξεκινά η τοποθέτηση της τελικής επένδυσης από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 50 cm.

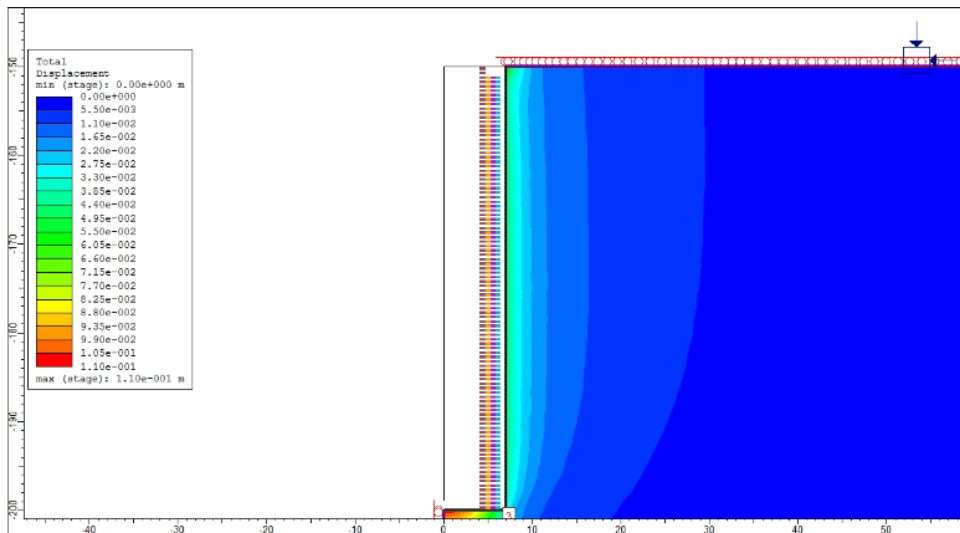


Γράφημα 45. Στάδιο 53^ο τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα της 1^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 102^ο στάδιο έχει ολοκληρωθεί και η τοποθέτηση της τελικής επένδυσης, ενώ στα επόμενα στάδια αφαιρείται η προσωρινή ανά φάση εκσκαφής.

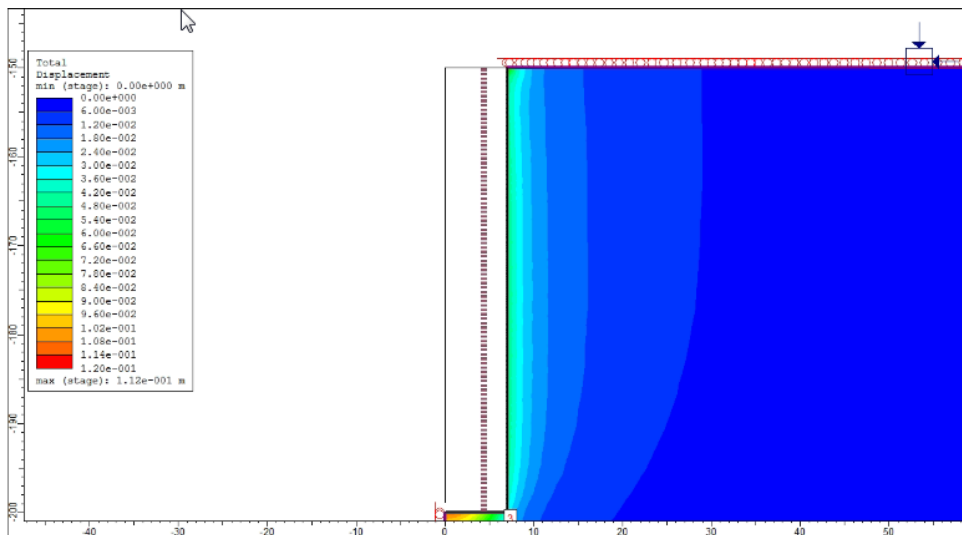


Γράφημα 46. Στάδιο 102^ο ολοκλήρωση τελικής επένδυσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)



Γράφημα 47. Στάδιο 103^ο αφαίρεση προσωρινής υποστήριξης 1^{ης} φάσης (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

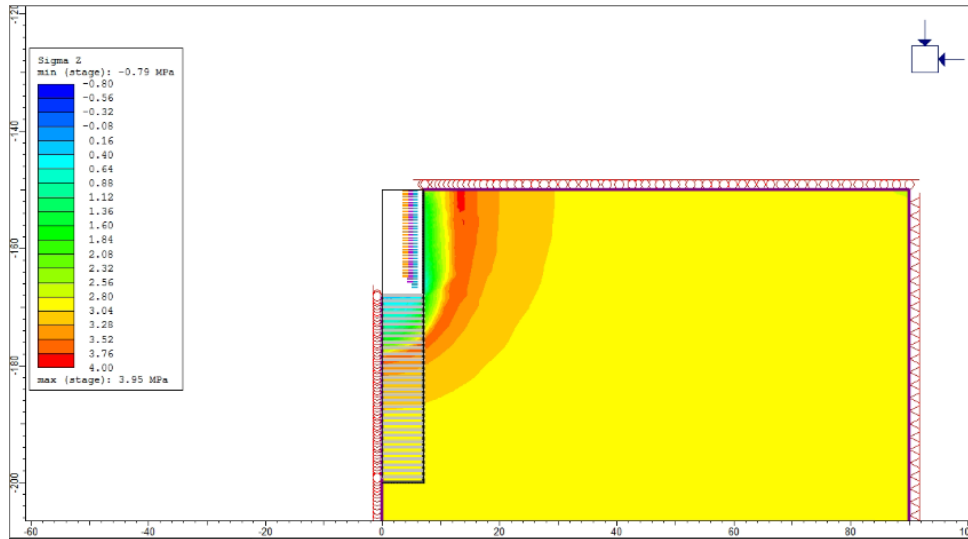
Το 153^ο στάδιο είναι το τελευταίο, στο οποίο έχει αφαιρεθεί συνολικά η προσωρινή επένδυση και παραμένει μόνο η τελική.



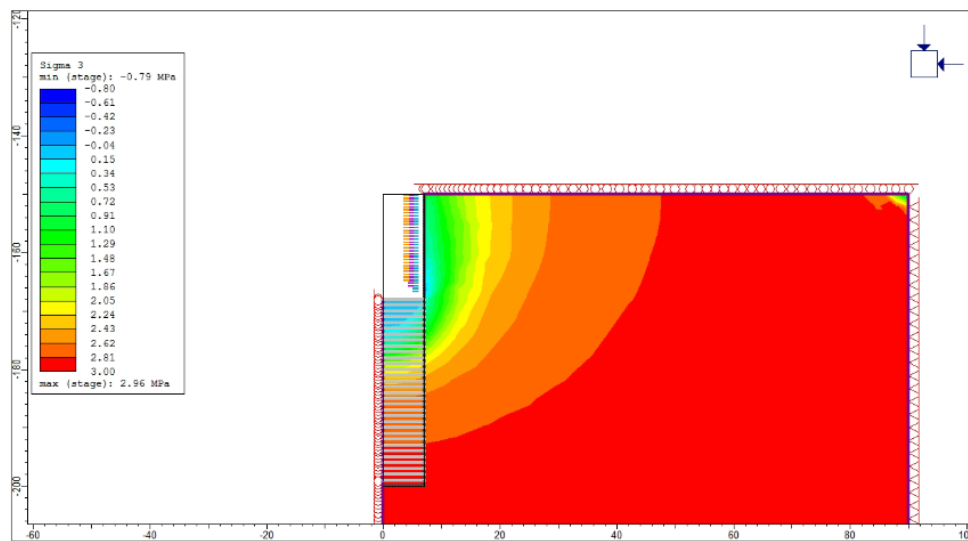
Γράφημα 48. Στάδιο 153^ο τελική επένδυση (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

Στο 19^ο στάδιο έχει γίνει εκσκαφή 15 m και επένδυση των ανώτερων φάσεων. Το στάδιο αυτό βρίσκεται περίπου στη μέση της διάνοιξης των 50 m των πυροκλαστικών και αφορά μια πιο ισορροπημένη κατάσταση στο προσομοίωμα, ώστε να εξετάσουμε τι συμβαίνει στα εντατικά μεγέθη. Η μέγιστη κύρια τάση σ_z φαίνεται να μεγιστοποιείται 10 m πίσω από το μέτωπο του φρέατος κι έπειτα μειώνεται μέχρι να ισούται με το εντατικό πεδίο. Επομένως, στη ζώνη αυτή η βραχομάζα πλαστικοποιείται κι αστοχεί. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική εξίσου για τη διάνοιξη της συνδετήριας σήραγγας, της οποίας η μελέτη θα πρέπει να λάβει υπόψη τη κατάσταση της βραχομάζας από τη διάνοιξη του φρέατος, αφού η σύνδεση θα γίνει στα

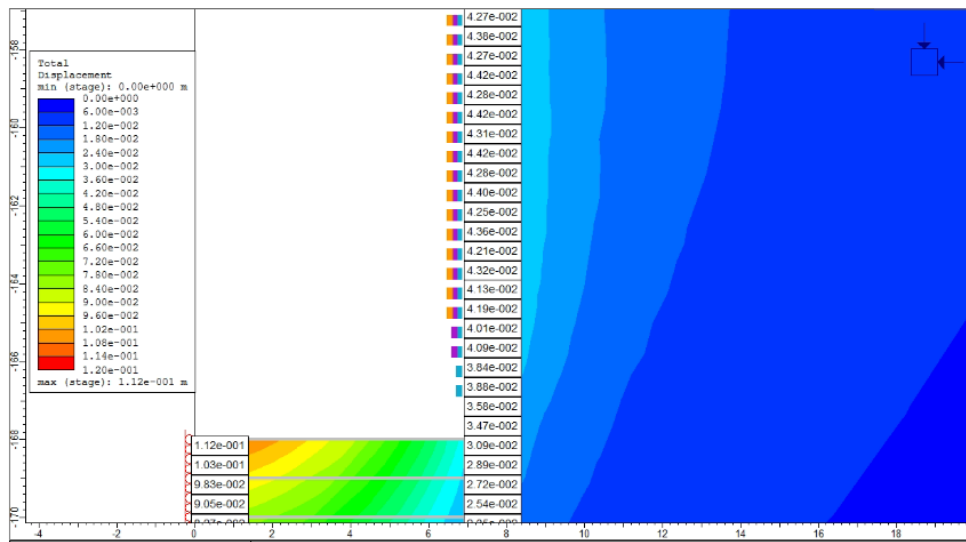
τελευταία 10 m. Η ελάχιστη τάση σ_3 αυξάνεται ομοιόμορφα γύρω από το άνοιγμα μέχρι να ισούται με το εντατικό πεδίο. Η συνολική μετακίνηση στη παρειά κατά τη φάση εκσκαφής του φρέατος είναι περίπου 3,5 cm ενώ όταν έχει προστεθεί και η προσωρινή επένδυση γίνεται περίπου 4,3 cm.



Γράφημα 49. Στάδιο 19^ο μέγιστη κύρια τάση σ_z (αξονοσυμμετρική ανάλυση)



Γράφημα 50. Στάδιο 19^ο ελάχιστη τάση σ_3 (αξονοσυμμετρική ανάλυση)



Γράφημα 51. Στάδιο 19^ο συνολικές μετακινήσεις (αξονοσυμμετρική ανάλυση)

5.4.3 Σχολιασμός Προσομοιωμάτων

Το προσομοίωμα επίπεδης ανάλυσης μας προσφέρει μια γενική εικόνα των μετακινήσεων και της σύγκλισης της παρειάς του φρέατος, καθώς τοποθετούνται οι στρώσεις της προσωρινής και της τελικής επένδυσης. Παράλληλα, όμως, μας παρέχει χρήσιμες πληροφορίες όσο αφορά την κατάσταση των αγκυρίων. Στο γράφημα 38, των αξονικών δυνάμεων η φόρτιση που δέχονται τα αγκύρια είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή σχεδιασμού τους, ως εκ τούτου δεν εμφανίζουν κανένα σημείο αστοχίας. Η συνολική μετακίνηση στη παρειά του φρέατος στο 1^ο στάδιο είναι περίπου 4 cm. Δεδομένου ότι η φάση αυτή αντιπροσωπεύει την εκσκαφή, η τιμή αυτή αναφέρεται στη χαλάρωση του πετρώματος όταν έχει προχωρήσει η εκσκαφή 1 m. Σε επόμενα στάδια, με τη τοποθέτηση της προσωρινής επένδυσης οι συνολικές μετακινήσεις είναι 5,8 cm ενώ όταν αφαιρείται και παραμένει μόνο η τελική επένδυση οι συνολικές μετακινήσεις είναι περίπου 6 cm. Βλέπουμε, λοιπόν, πως με την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης η βραχομάζα έχει ισορροπήσει και δεν δέχεται επιπλέον φόρτιση η επένδυση, αφού η διαφορά των 2 mm στο 5^ο και 6^ο στάδιο είναι αμελητέα.

Το αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα, όπως φαίνεται από τα γραφήματα, μας δίνει μια λεπτομερή εικόνα της κατάστασης σε κάθε στάδιο στο χώρο τρισδιάστατα. Από το γράφημα 48 για το στάδιο 153 όπου μένει μόνο η τελική επένδυση, βλέπουμε πως το άνοιγμα έχει ισορροπήσει καθώς η συνολική μετακίνηση είναι ίδια με πριν. Οι τιμές της αξονοσυμμετρικής ανάλυσης ταυτίζονται με αυτές της επίπεδης παραμόρφωσης, με αμελητέες διαφορές, επομένως τα δυο προσομοιώματα είναι αξιόπιστα, με το αξονοσυμμετρικό να αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα εξαιτίας της δυνατότητας τρισδιάστατης προσομοίωσης.

5.4.4 Απόκριση Μέτρων Στήριξης

Για τον έλεγχο της επάρκειας των μέτρων στήριξης που εφαρμόστηκαν το πρόγραμμα Phase² διαθέτει τη λειτουργία της δημιουργίας γραφημάτων της φέρουσας ικανότητας της υποστήριξης (support capacity plots). Βέβαια, η λειτουργία αυτή περιορίζεται μόνο στον έλεγχο του σκυροδέματος που διαθέτει οπλισμό και είναι ελαστικό για πλαστική συμπεριφορά δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Επιπλέον, δεν δίνει πληροφορίες για το άοπλο σκυρόδεμα, το οποίο στη περίπτωση της διάνοιξης του φρέατος αποτελεί τη πρώτη σταθεροποιητική στρώση που ψεκάζεται πριν την τοποθέτηση των αγκυρίων. Ωστόσο, η στρώση αυτή δεν εφαρμόζεται για να αναλάβει κάποια φόρτιση, αλλά για την έμφραξη ρωγμών, υπερεκσκαφών ώστε να δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη επιφάνεια, έτσι δεν χρειάζεται να εξετάζεται. Οι στρώσεις που εξετάζονται αφορούν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με το δομικό πλέγμα, τα δικτυωτά πλαίσια και τη τελική επένδυση. Τα γραφήματα απόκρισης των μέτρων στήριξης έγιναν με βάση το κριτήριο Carranza-Torres and Diederichs για συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.

Τα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόζονται είναι :

- Παθητικά αγκύρια B500C ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded), μήκους 4 m, διαμέτρου 28 mm, σε κάρναβο 2x1 m
- Δομικό πλέγμα (wire mesh) T188 B500C, ράβδων διαμέτρου 6 mm, απόσταση ράβδων 150 mm
- Χαλύβδινες νευρώσεις δικτυωτών πλαισίων (lattice girders) τριών διαμήκων ράβδων τύπου 95/12
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30
- Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45 με ράβδους B500C διαμέτρου 25 mm

Τα εφαρμοζόμενα μέτρα στήριξης ελέγχονται για την οριακή κατάσταση αστοχίας οπότε θα πρέπει να υπολογιστούν οι παράμετροι των υλικών βάσει συντελεστών ασφαλείας δίνοντας, έτσι, τις τιμές σχεδιασμού των μέτρων στήριξης.

Για τον οπλισμό χάλυβα B500C με όριο διαρροής $f_y = 500$ MPa και συντελεστή ασφαλείας $\gamma_s = 1,15$ προκύπτει η τιμή σχεδιασμού χάλυβα:

- $f_{yd} = f_y / \gamma_s = 435$ MPa

ο λόγος poisson του χάλυβα $\nu = 0,3$ και το μέτρο ελαστικότητας $E = 20$ GPa

Για το σκυρόδεμα C25/30 η χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή $f_{ck} = 25$ MPa και για σκυρόδεμα C35/45 η χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή $f_{ck} = 35$ MPa και συντελεστή ασφαλείας $\gamma_c = 1,5$ προκύπτει η τιμή σχεδιασμού:

- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 16,66$ για σκυρόδεμα C25/30
- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 23,33$ για σκυρόδεμα C35/45

Η θλιπτική αντοχή σ_{cc} του σκυροδέματος είναι το 85% της τιμής σχεδιασμού, δηλαδή :

- $\sigma_{cc} = f_{cd} \times 0,85 = 14,16 \sim 14 \text{ MPa}$ για σκυρόδεμα C25/30
- $\sigma_{cc} = f_{cd} \times 0,85 = 19,8 \sim 20 \text{ MPa}$ για σκυρόδεμα C35/45

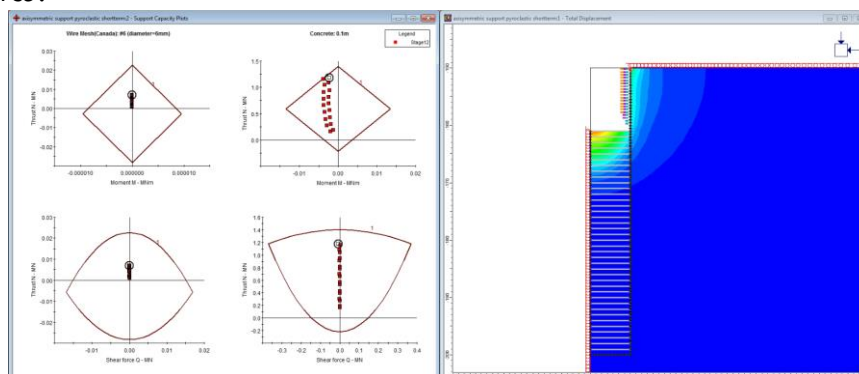
ο λόγος poisson του σκυροδέματος $\nu = 0,2$ και το μέσο μέτρο ελαστικότητας $E = 20 \text{ GPa}$

5.4.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 – Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45

Στα παρακάτω γραφήματα το αριστερό παράθυρο αναφέρεται στην φέρουσα ικανότητα των μέτρων στήριξης και το δεξιό παράθυρο το στάδιο στο οποίο αναφέρονται τα γραφήματα. Τα γραφήματα είναι τέσσερα εκ των οποίων τα δύο αφορούν τη ροπή (moment) και τα άλλα δύο τη διατμητική τάση που επιδέχεται ο οπλισμός (στοιχεία από χάλυβα) και το σκυρόδεμα, αντίστοιχα. Αρχικά, οι στρώσεις της επένδυσης προστίθεται σταδιακά, όπως προηγουμένως, κι έπειτα όλες οι στρώσεις τις προσωρινής επένδυσης μαζί ανά φάση εκσκαφής. Εξετάζουμε κάθε στρώση σκυροδέματος και οπλισμού ξεχωριστά.

1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα

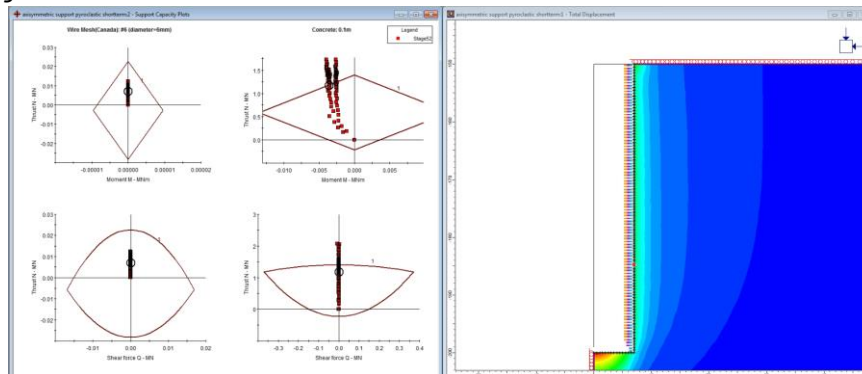
Στο 12^ο στάδιο έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή 10 m και τοποθετηθεί η προσωρινή επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα και δικτυωτά πλαίσια. Για τη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δομικό πλέγμα (μωβ στρώση), βλέπουμε αριστερά στο διάγραμμα των ροπών για το σκυρόδεμα πως ορισμένα σημεία είναι πάνω στο όριο αστοχίας. Τα σημεία αυτά φαίνονται δεξιά στο προσομοίωμα κι αφορούν τη 1^η φάση εκσκαφής κι ενδεχομένως σε επόμενα στάδια η αστοχία να επεκταθεί και πιο κάτω.



Γράφημα 52. Στάδιο 12^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c25/30

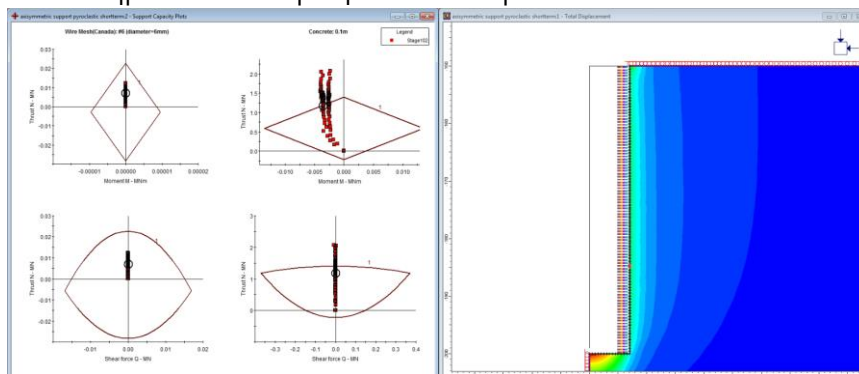
Στο στάδιο 52 όπου ολοκληρώνεται η τοποθέτηση της προσωρινής επένδυσης παρατηρούμε ότι η αστοχία της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δομικό πλέγμα που ξεκίνησε από το 13^ο στάδιο φτάνει μέχρι

το βάθος των 185 m, τόσο από το διάγραμμα της ροπής όσο και της διατμητικής τάσης. Σε επόμενο στάδιο αρχίζει η τοποθέτηση της τελικής επένδυσης.



Γράφημα 53. Στάδιο 52^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 25/30

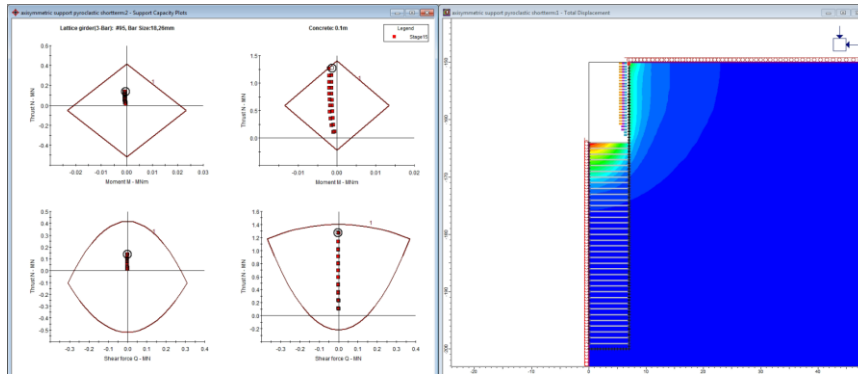
Στο 102^ο στάδιο έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση και της τελικής επένδυσης και φαίνεται πως η στρώση δεν αστοχεί περαιτέρω. Επομένως, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c25/30 με δομικό πλέγμα αστοχεί σε θλίψη για 35 m εκσκαφής, σχεδόν εξ' ολοκλήρου στο στρώμα των πυροκλαστικών.



Γράφημα 54. Στάδιο 102^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 25/30

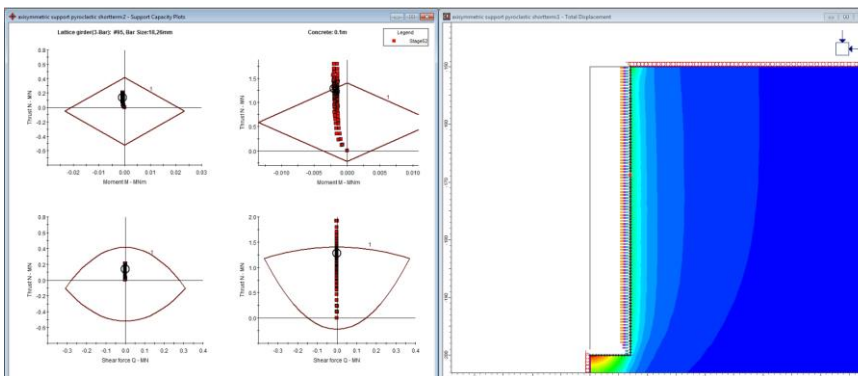
2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο

Στο 15^ο στάδιο έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή 13 m κι έχουν τοποθετηθεί στρώσεις προσωρινής επένδυσης των προηγούμενων σταδίων. Για τη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δικτυωτά πλαίσια (πορτοκαλί στρώση), βλέπουμε κι εδώ από το διάγραμμα ροπής για το σκυρόδεμα, ορισμένα σημεία στο όριο αστοχίας. Σε αυτή τη περίπτωση, εξίσου η αστοχία ξεκινάει στη 1η φάση εκσκαφής.



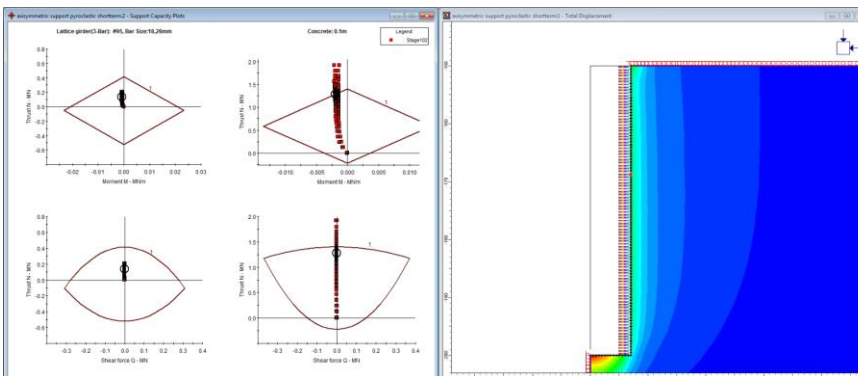
Γράφημα 55. Στάδιο 15^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30

Στο στάδιο 52 η αστοχία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της στρώσης επεκτείνεται για 18 m.



Γράφημα 56. Στάδιο 52^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30

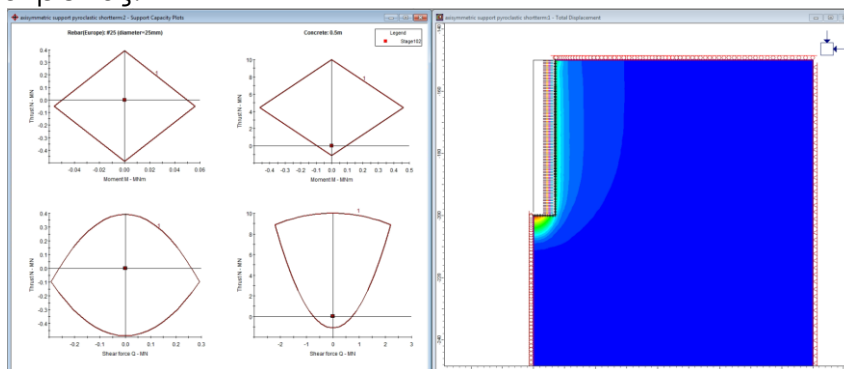
Στο 102^ο στάδιο η αστοχία παραμένει στο ίδιο σημείο, οπότε καταλήγουμε ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στη στρώση με τα δικτυωτά πλαίσια αστοχεί για μεγάλο μέρος της εκσκαφής.



Γράφημα 57. Στάδιο 102^ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c25/30

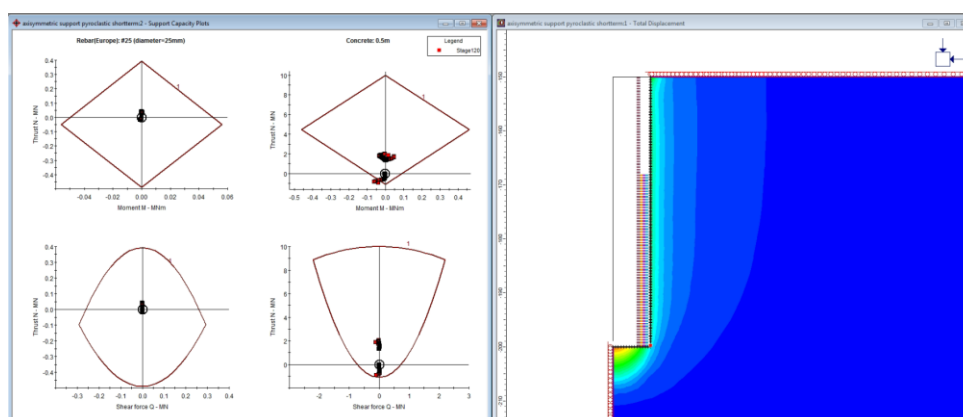
3. Μόνιμη επένδυση – Οπλισμένο σκυρόδεμα

Για το 102^ο στάδιο η τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκεται σε ισορροπία σε όλο το μήκος της εκσκαφής, αφού επιδέχεται μηδενικές δυνάμεις και ροπές.

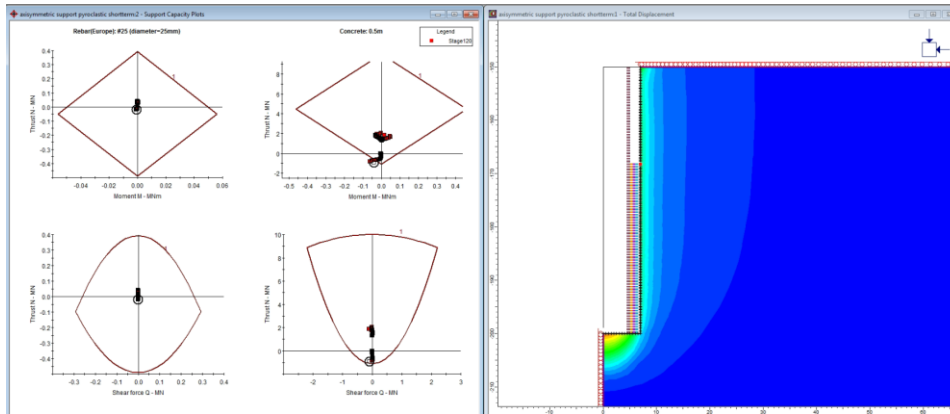


Γράφημα 58. Στάδιο 102^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

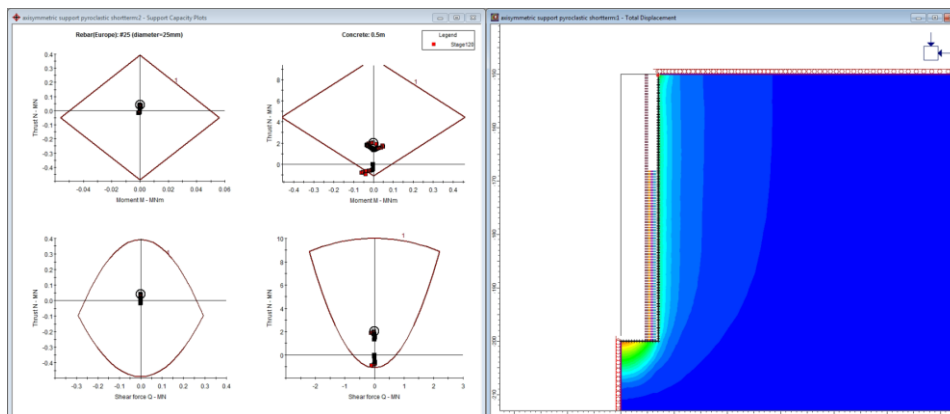
Μετά το 102^ο στάδιο η προσωρινή επένδυση αφαιρείται ώστε να εξετάσουμε ενδελεχώς τη στρώση της τελικής επένδυσης, η οποία θα αναλάβει όλα τα μόνιμα φορτία και παραμορφώσεις και καθορίζει την επάρκεια της κατασκευής του φρέατος σε βάθος χρόνου. Στο 120^ο στάδιο έχει γίνει αφαίρεση της προσωρινής στα πρώτα 12 m, το σημείο αυτό φαίνεται στο γράφημα 100. Παρατηρούμε πως η επένδυση για το τμήμα όπου έχει αφαιρεθεί η προσωρινή υποστήριξη θλίβεται χωρίς να αστοχεί. Αντίθετα, το υπόλοιπο της επένδυσης, όπου δεν έχει αφαιρεθεί, δείχνει την τελική επένδυση στο τμήμα αυτό να εφελκύεται. Το φαινόμενο που βλέπουμε είναι αλλόκοτο και δεν δύναται να συμβαίνει σε πραγματικές συνθήκες.



Γράφημα 59. Στάδιο 120^ο οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

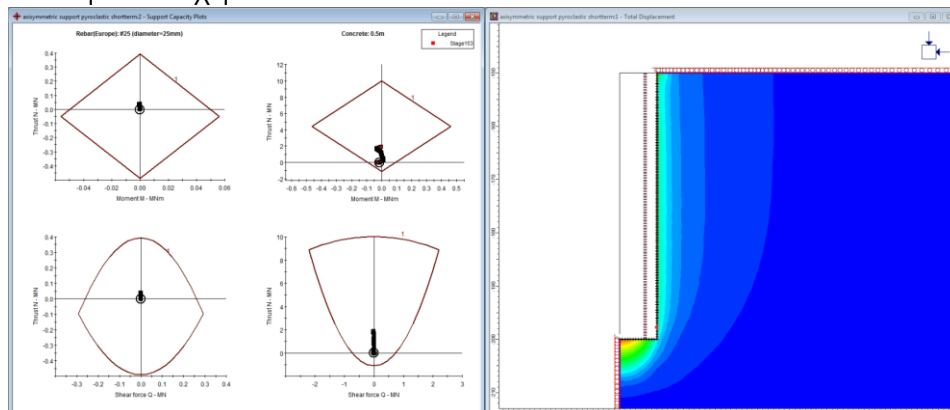


Γράφημα 60. Στάδιο 120° οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45



Γράφημα 61. Στάδιο 120° οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

Στο τελευταίο στάδιο από τα διαγράμματα φαίνεται πως τόσο ο οπλισμός όσο και το σκυρόδεμα είναι εντός των επιτρεπτών ορίων οπότε επαρκούν. Ειδικότερα, το σκυρόδεμα δεν εμφανίζει τη συμπεριφορά που παρατηρήσαμε σε προηγούμενο στάδιο αλλά δέχεται θλιπτικά μόνο φορτία που δεν ξεπερνούν την αντοχή του.



Γράφημα 62. Στάδιο 150° οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

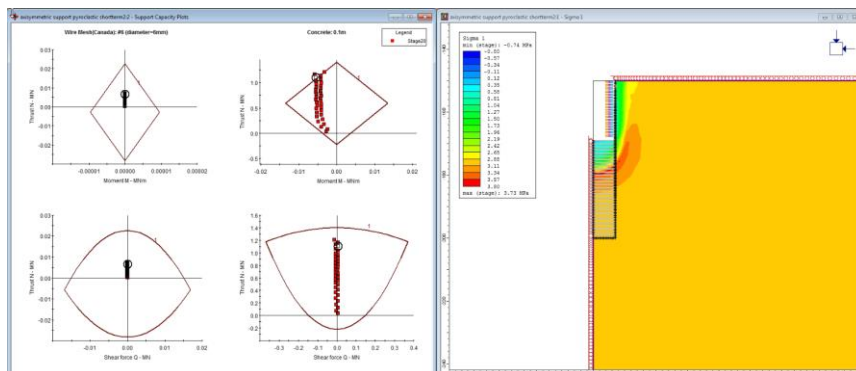
Παρατηρούμε πως όλα τα στοιχεία χαλύβδινου οπλισμού (πλέγμα, δικτυωτά πλαίσια, χαλύβδινες) σε όλα τα στάδια βρίσκονται εντός του ορίου και κοντά

στο μηδέν, όπου επιδέχονται μικρή φόρτιση. Επομένως, η κατηγορία του οπλισμού B500C για όλα τα στοιχεία επαρκεί. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας c25/30 τόσο στη πρώτη όσο και στη δεύτερη στρώση αστοχεί από το 15^ο στάδιο μέχρι το 52^ο για πριν ακόμα να τοποθετηθεί η τελική επένδυση. Από το στάδιο 103 έως το 153 στα οποία η προσωρινή επένδυση αφαιρείται, το σκυρόδεμα c35/45 της τελικής επένδυσης φαίνεται να θλίβεται χωρίς να αστοχεί για τα στάδια που έχει αφαιρεθεί η προσωρινή επένδυση ενώ παράλληλα να εφελκύεται για τα στάδια όπου η προσωρινή δεν έχει αφαιρεθεί ακόμα. Το φαινόμενο αυτό, δεν είναι λογικό και δεν συμβαίνει στη πραγματικότητα. Το πρόγραμμα σε κάθε στάδιο κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς μέχρι να επέλθει ισορροπία και να επιτευχθεί σύγκλιση και λύση του φυσικού προβλήματος με τις παραμέτρους που εμείς θέτουμε. Στο φαινόμενο που αναφέρθηκε, φαίνεται αυτή η λειτουργία και ερμηνεία του προγράμματος. Άλλωστε, στο 153^ο στάδιο έχει αφαιρεθεί όλη η προσωρινή υποστήριξη, το σύστημα έχει ισορροπήσει και η τελική επένδυση βρίσκεται υπό θλίψη εντός του επιτρεπτού ορίου χωρίς να αστοχεί, επιβεβαιώνοντας την παραπάνω αιτιολόγηση του φαινομένου. Συνεπώς, το σκυρόδεμα c35/45 επαρκεί για την επένδυση του φρέατος.

Ωστόσο, παρακάτω θα εξεταστεί και η συμπεριφορά της υποστήριξης όταν προστίθενται όλες οι στρώσεις μαζί της προσωρινής επένδυσης για περισσότερη διερεύνηση.

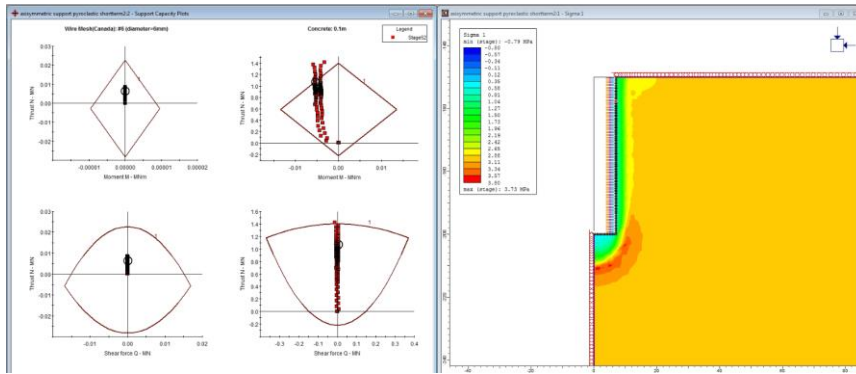
1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα

Στη περίπτωση όπου τοποθετούνται όλες οι στρώσεις προσωρινής επένδυσης σε κάθε στάδιο εκσκαφής, το σκυρόδεμα της στρώσης με το δομικό πλέγμα αστοχεί στο 20^ο στάδιο ενώ στην προηγούμενη περίπτωση από το 13^ο.

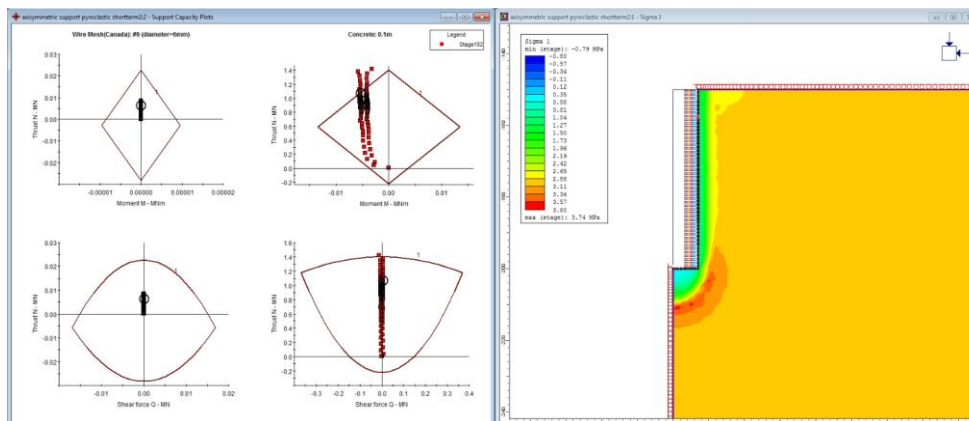


Γράφημα 63. Στάδιο 20^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c25/30 με δομικό πλέγμα)

Επιπλέον, από τα γραφήματα βλέπουμε πως η αστοχία εδώ είναι μειωμένη καθώς εμφανίζεται μόνο μέχρι τα 8 m ενώ προηγουμένως εκτείνονταν έως τα 35 m εκσκαφής.



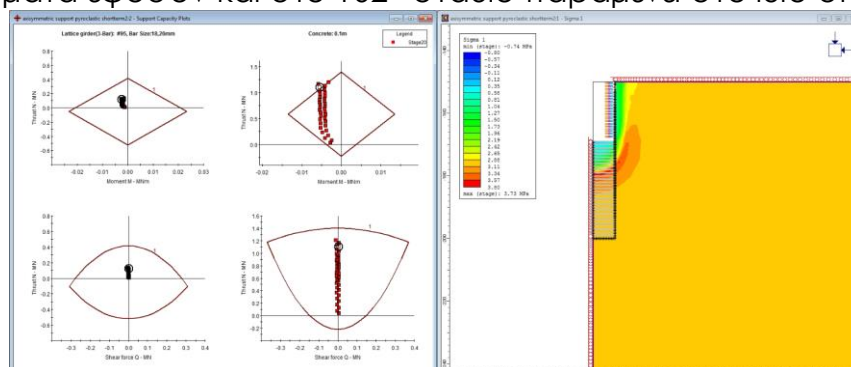
Γράφημα 64. Στάδιο 52^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δομικό πλέγμα)



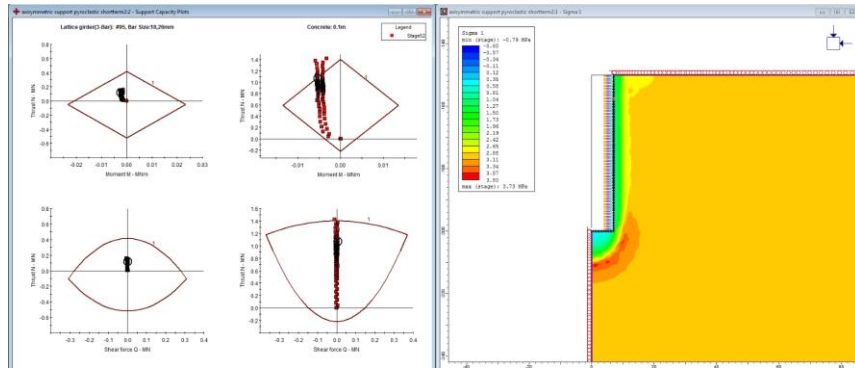
Γράφημα 65. Στάδιο 102^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δομικό πλέγμα)

2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο

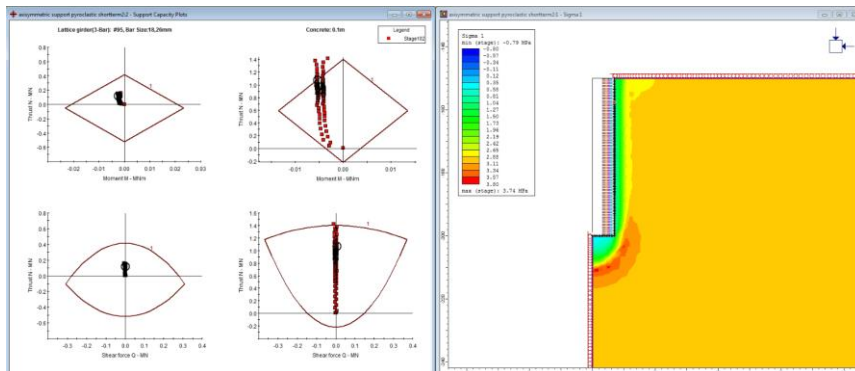
Η συμπεριφορά της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δικτυωτά πλαίσια ταυτίζεται με αυτής με το δομικό πλέγμα. Η αστοχία, ομοίως, ξεκινάει στο 20^ο στάδιο και φτάνει μέχρι το βάθος των 168 m στο στάδιο 52^ο, στο οποίο σταματά εφόσον και στο 102^ο στάδιο παραμένει στο ίδιο σημείο.



Γράφημα 66. Στάδιο 20^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)



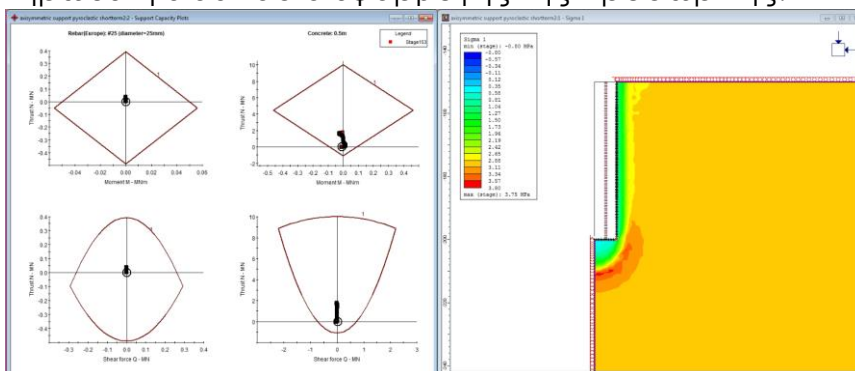
Γράφημα 67. Στάδιο 52^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)



Γράφημα 68. Στάδιο 102^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 25/30 με δικτυωτό πλαίσιο)

3. Μόνιμη επένδυση – Οπλισμένο σκυρόδεμα

Η μόνιμη επένδυση στο στάδιο 153 αναλαμβάνει την ίδια φόρτιση, όπως προηγουμένως, καθώς η αφαίρεση της προσωρινής υποστήριξης γίνεται με τον ίδιο τρόπο ενώ συγχρόνως είναι ανεξάρτητη από τη μέθοδο που αυτή προστίθεται, αφού η τελική επένδυση εφαρμόζεται σε μεταγενέστερο στάδιο όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία εφαρμογής της προσωρινής.



Γράφημα 69. Στάδιο 153^ο τελική επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

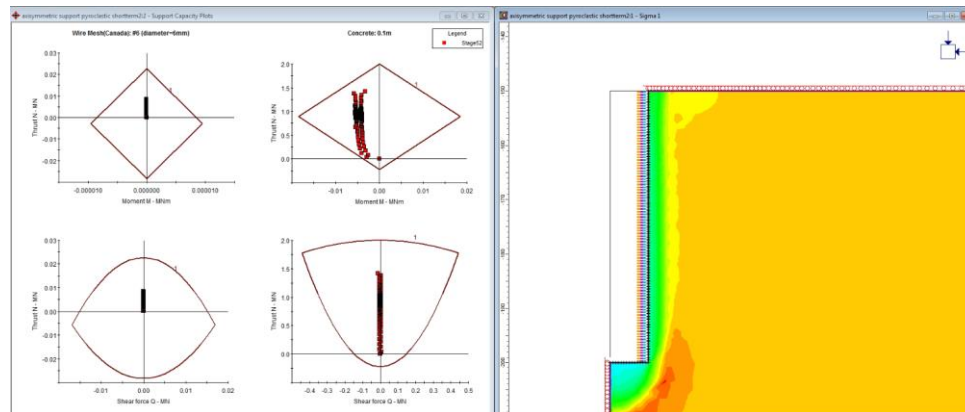
Βλέπουμε πως ακόμα και όταν η προσωρινή υποστήριξη εγκαθίσταται ολόκληρη σε κάθε φάση εκσκαφής, κι όχι μεμονωμένα σε στρώσεις, συνεχίζει να αστοχεί σε μικρότερη όμως έκταση. Ως εκ τούτου το σκυρόδεμα κατηγορίας c25/30 δεν επαρκεί για της απαιτήσεις της προσωρινής υποστήριξης του φρέατος και θα εξετάσουμε περαιτέρω την απόκριση της προσωρινής υποστήριξης για μεγαλύτερη κατηγορία χαρακτηριστικής αντοχής σκυροδέματος c35/45. Η τελική επένδυση δεν εμφανίζει ούτε εδώ σημεία διαρροής, άρα το οπλισμένο σκυρόδεμα από χαλύβδινες ράβδους Ø25 B500C και κατηγορία έγχυτου σκυροδέματος C35/45 σε πάχος 50 cm πληροί τις απαιτήσεις και επαρκεί για τη μόνιμη επένδυση του φρέατος.

5.4.4.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C35/45 – Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45

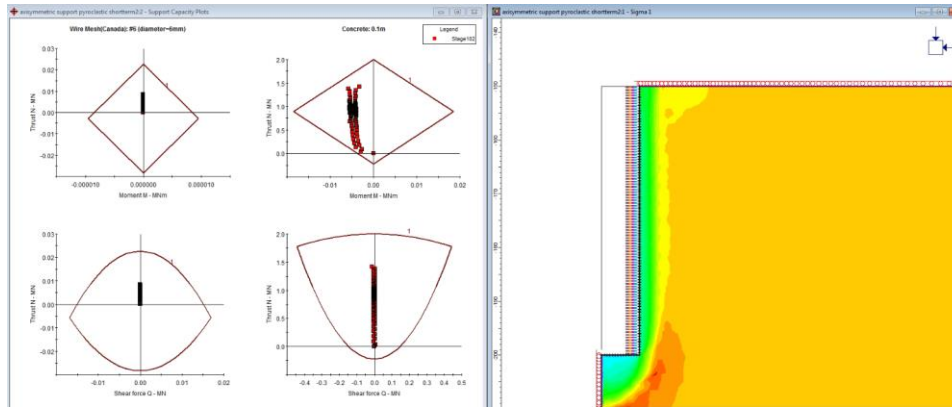
Ο παρακάτω έλεγχος επάρκειας πραγματοποιείται για την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος c35/45 με προσθήκη όλων των στοιχείων της προσωρινής επένδυσης μαζί ανά φάση εκσκαφής. Τέλος, αφού έχει εγκατασταθεί η προσωρινή επένδυση τοποθετείται η τελική επένδυση.

1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα

Από τα στάδια 52 και 102 φαίνεται πως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δομικό πλέγμα σε όλη τη παρειά της εκσκαφής βρίσκεται εντός του ορίου και δεν αστοχεί σε κανένα σημείο.



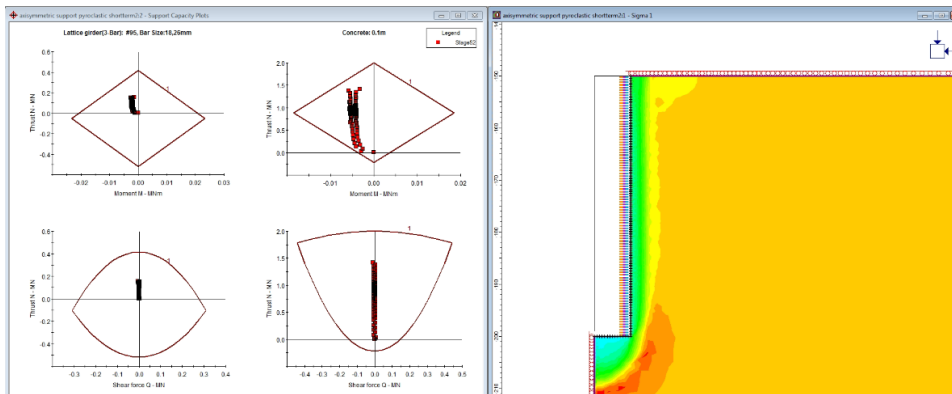
Γράφημα 70. Στάδιο 52^ο προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δομικό πλέγμα)



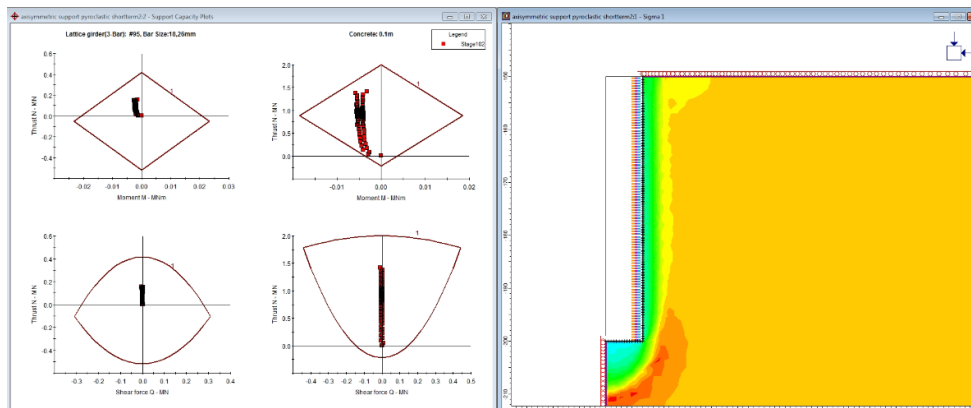
Γράφημα 71. Στάδιο 102° προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δομικό πλέγμα)

2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο

Το σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια στο στάδιο 52 δεν εμφανίζει σημεία αστοχίας και παραμένει ακέραιο έως και το 102°. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι να τοποθετηθεί η τελική επένδυση, μετέπειτα, μπορεί να αναλάβει τα επιβαλλόμενα φορτία και παραμορφώσεις και να συγκρατεί ευσταθές το φρέαρ.



Γράφημα 72. Στάδιο 52° προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δικτυωτό πλαίσιο)

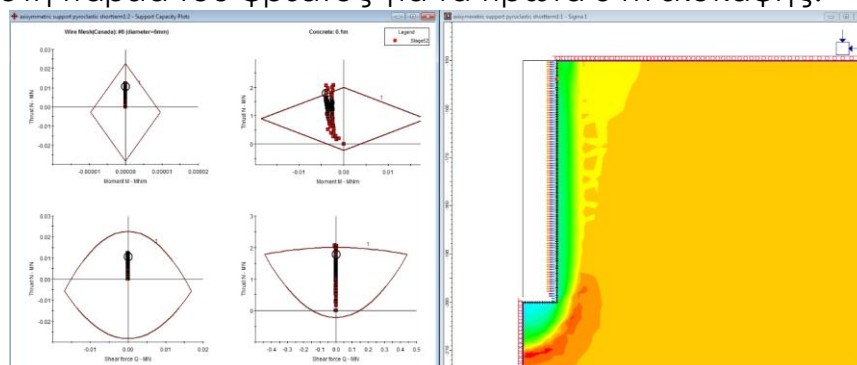


Γράφημα 73. Στάδιο 102° προσωρινή επένδυση (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα c 35/45 με δικτυωτό πλαίσιο)

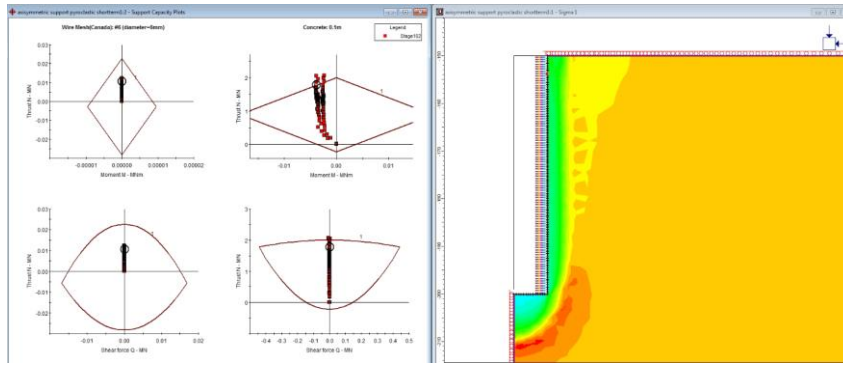
Σε όλα τα στάδια βλέπουμε πως το σκυρόδεμα κατηγορίας c35/45 βρίσκεται εντός των ορίων και δεν αστοχεί σε κανένα σημείο. Συνεπώς, δύναται να χρησιμοποιηθεί στο εκτοξευόμενα σκυρόδεμα της προσωρινής επένδυσης κι ακολούθως θα τη τοποθετήσουμε ανά στρώσεις για να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω αποτελέσματα.

1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα

Στο στάδιο 52° όπου έχει ολοκληρωθεί η εφαρμογή των προσωρινών μέτρων στήριξης, το σκυρόδεμα της στρώσης με το δομικό πλέγμα δείχνει σημείο αστοχίας στη παρειά του φρέατος για τα πρώτα 3 m εκσκαφής.



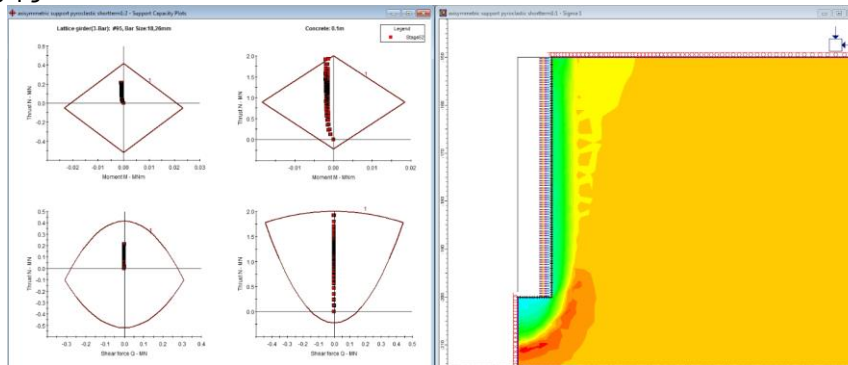
Γράφημα 74. Στάδιο 52° εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 35/45



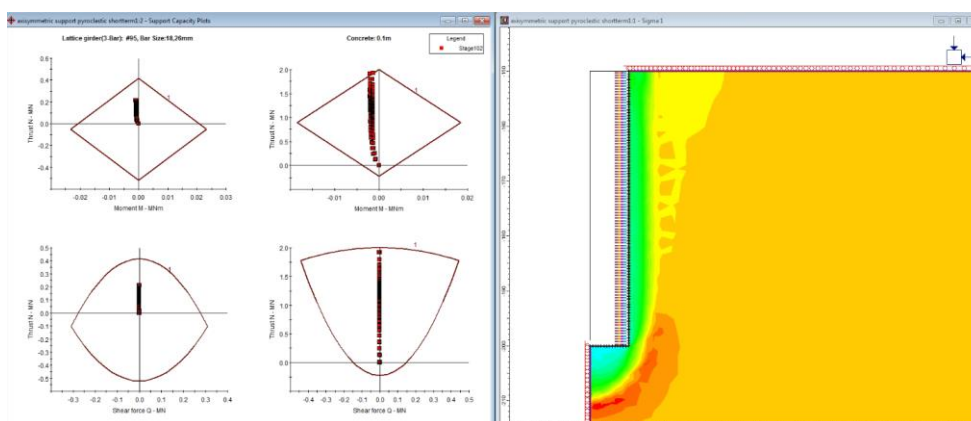
Γράφημα 75. Στάδιο 102° εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με διπλό δομικό πλέγμα c 35/45

2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο

Η στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τα δικτυωτά πλαίσια δεν εμφανίζει σημεία αστοχίας σε όλες τις φάσεις εκσκαφής και τοποθέτησης της υποστήριξης.



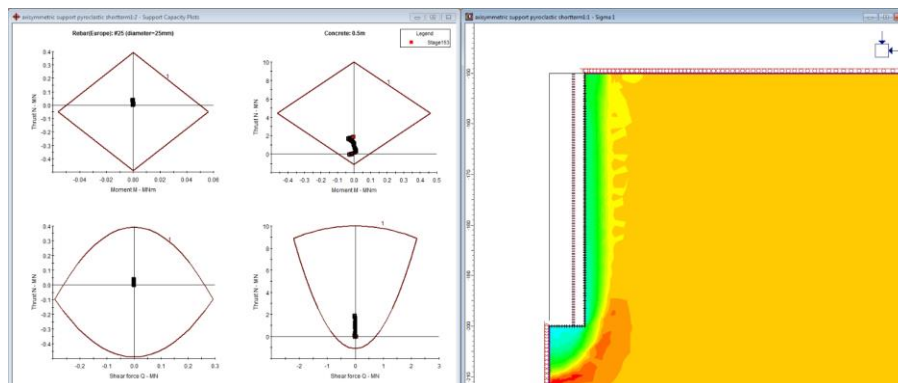
Γράφημα 76. Στάδιο 52° εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c 35/45



Γράφημα 77. Στάδιο 102° εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτό πλαίσιο c 35/45

3. Μόνιμη επένδυση – Οπλισμένο σκυρόδεμα

Η τελική επένδυση εξακολουθεί να ισορροπεί και συγκρατεί ευσταθές το φρέαρ όπως φαίνεται στο γράφημα.



Γράφημα 78. Στάδιο 153° τελική επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα c 35/45

Η πρώτη στρώση που τοποθετείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δομικό πλέγμα φαίνεται να βρίσκεται ελάχιστα εκτός ορίων για τα πρώτα 3 m εκσκαφής. Στη περίπτωση, όμως, που η προσωρινή υποστήριξη εγκαθίσταται σε μία φάση, η πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου δεν αστοχούσε. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο τρόπο τοποθέτησης και αριθμητικού υπολογισμού του προγράμματος Phase² διότι στα άκρα των ορίων των συντοριακών συνθηκών είναι πιο δύσκολο το σύστημα να ισορροπήσει γι' αυτό και η αστοχία περιορίζεται μόνο εκεί. Εάν στο προσομοίωμά μας προσθέταμε το επάνω στρώμα, των ρυοδακτικικών λαβών Αλωνάκι, δεν θα παρατηρούνταν καμία αστοχία. Ειδάλλως, αν πραγματικά το σκυρόδεμα δεν επαρκούσε η αστοχία δεν θα περιοριζόταν στο σημείο αυτό, αλλά θα εκτείνονταν και σε μεγαλύτερο βάθος, όπως συνέβαινε με το σκυρόδεμα κατηγορίας c25/30. Επιπλέον, ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με δικτυωτά πλαίσια δεν βρίσκεται σε κανένα στάδιο εκτός ορίων όπως και η τελική επένδυση.

Συμπερασματικά, από τον έλεγχο της απόκρισης των μέτρων στήριξης το σκυρόδεμα που απαιτείται για την ευστάθεια της επένδυσης του φρέατος είναι κατηγορίας c35/45 σε συνδυασμό με το σύνολο των στοιχείων χάλυβα οπλισμού B500C. Τα μέτρα στήριξης που εξετάστηκαν αφορούν το στρώμα των πυροκλαστικών στα τελευταία 50 m εκσκαφής όπου εκτιμώνται συγκλίσεις. Τα μέτρα στήριξης για τα υπόλοιπα στρώματα όπου συμπεριφέρονται ως ελαστικά κατά το πλείστον θα είναι σαφώς ελαφρύτερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΣ

6.1 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ

6.1.1 Ανθρώπινο Δυναμικό

Η εύρυθμη λειτουργία της διάνοιξης ενός υπογείου έργου κι ενός εργοταξίου γενικότερα εξαρτάται από τον ορθό καταμερισμό των εργασιών, την καλή επικοινωνία και τη κατάρτιση κι εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού. Για την ολομέτωπη εκσκαφή του φρέατος με τη μέθοδο NATM, το συνεργείο που προσλαμβάνεται για όλες τις εργασίες διάνοιξης περιλαμβάνει τους εξής εργαζομένους:

1. Χειριστή εκσκαφέα
2. Χειριστή διατρητικού εξοπλισμού
3. Χειριστή εξοπλισμού εκτοξευόμενου σκυροδέματος
4. Χειριστή οικοδομικού γερανού
5. Χειριστή φορτωτή υλικών αποκόμισης
6. Τεχνίτες – οικοδόμους, τρεις σε αριθμό
7. Μηχανολόγο για την επισκευή και συντήρηση του εξοπλισμού
8. Ηλεκτρολόγο
9. Εργοδηγό
10. Επιστάτη

Συνολικά, ένα συνεργείο 12 ατόμων το οποίο θα εργάζεται 8 ώρες. Το εργοτάξιο θα λειτουργεί όλο το 24 ωρο, επομένως το σύνολο των εργαζομένων που απαιτείται είναι 36, που δουλεύουν σε 3 πλήρεις βάρδιες. Με αυτό το τρόπο, επιτυγχάνεται υψηλή παραγωγικότητα και σε οποιαδήποτε απρόοπτη ανάγκη παρευρίσκονται όλα τα μέλη του συνεργείου στο εργοτάξιο, ώστε να επιλυθεί το ζήτημα κι έτσι δεν σταματά η λειτουργία του εργοταξίου και η διάνοιξη.

Έστω πως το προσωπικό εργάζεται κατά μέσο όρο 22 ημέρες το μήνα και την ημέρα η διάνοιξη προχωράει 1 m τουλάχιστον, τότε η διάνοιξη των 200 m θα έχει ολοκληρωθεί σε 9,1 μήνες συν τις αργίες, τυχόν άδειες και καθυστερήσεις προκύπτουν 10 μήνες. Έστω πως σε μία ημέρα η σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης γίνεται για 2 m, οι εργασίες για το μήκος των 200 m του φρέατος θα ολοκληρωθούν σε 4,5 μήνες. Επομένως, η διάνοιξη του φρέατος, συμπεριλαμβανομένων τυχόν καθυστερήσεων, θα ολοκληρωθεί σε 15 μήνες.

6.1.2 Υπολογισμός Κόστους

Οι 36 εργαζόμενοι θα πληρώνονται για 25 ημέρες /μήνα εργάσιμες κι έστω πως ο μέσος μισθός είναι 2000 € /μήνα τότε το κόστος του συνόλου των μισθών ανά ημέρα για 1 m μήκους ισούται με 2880 ~ 3000 €.

Το κόστος της διάνοιξης, για την ολομέτωπη εκσκαφή του φρέατος με τη μέθοδο NATM, θα υπολογιστεί σε €/m μήκους εκσκαφής κι έπειτα για το σύνολο των 200 m του φρέατος. Το φρέαρ είναι κυκλικό με ακτίνα εκσκαφής 7 m, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- $A_{εκ} = \pi \cdot R^2 = 154 \text{ m}^2$
- $V_{εκ} = A \cdot H = 30.800 \text{ m}^3$
- $V_{εκ1} = 154 \text{ m}^3$

Για την ωφέλιμη διατομή 12,4 m ακτίνας 6,2 m, ισχύουν :

- $A_{\omega\phi} = \pi \cdot R^2 = 120,7 \text{ m}^2$
- $V_{\omega\phi} = A \cdot H = 24.140 \text{ m}^3$
- $V_{\omega\phi1} = 120,7 \text{ m}^3$

Η συνολική επένδυση (προσωρινή και τελική) έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Πάχος προσωρινής επένδυσης 25 cm
- Πάχος τελικής επένδυσης 50 cm
- Συνολικό πάχος 75 cm
- 22 αγκύρια / m μήκους προχώρησης
- 9 πλέγματα / m μήκους προχώρησης
- 132 m χαλύβδινες ράβδοι δικτυωτών πλαισίων / m μήκους προχώρησης
- $V_{\sigma\kappa1} = V_{εκ1} - V_{\omega\phi1} = 33,3 \text{ m}^3$
- $V_{1\tau\epsilon\lambda,\epsilon\pi} = 20,25 \text{ m}^3$
- $V_{\sigma\kappa} = V_{εκ} - V_{\omega\phi} = 6660 \text{ m}^3$
- Βάρος πλέγματος T188 = 33 kg
- Βάρος 22 αγκυρίων $\varnothing 28$, 4 m = $4 \cdot 4,83 \cdot 22 = 425 \text{ kg}$
- Βάρος δικτυωτών πλαισίων ράβδων $\varnothing 26$, $\varnothing 18 = 347,6 \text{ kg}$
- Συνολικό βάρος οπλισμού προσωρινής επένδυσης ανά 1 m προχώρηση = 1069,6 kg

Ο οπλισμός της τελικής επένδυσης έχει μια αναλογία 100 kg/m³, οπότε για 20,25 m³, το βάρος του οπλισμού ισούται με 2025 kg, για 1 m προχώρηση.

Η τιμή του χάλυβα είναι 1€/ kg περίπου, άρα για 3094,6 kg το κόστος του οπλισμού των επενδύσεων είναι 3094,6 €, για 1m προχώρηση. Για το σύνολο του φρέατος το κόστος του οπλισμού είναι 618.920 €.

Η τιμή του σκυροδέματος για C35/45 είναι 200 €/m³ (συμπεριλαμβάνονται τα εργατικά, ο μεταλλότυπος της τελικής επένδυσης κλπ), οπότε το κόστος του

σκυροδέματος είναι 6660 €, για 1 m προχώρηση. Για το σύνολο του φρέατος το κόστος του σκυροδέματος είναι 1.332.000 €.

Αν χρησιμοποιηθεί σε όλο το μήκος του φρέατος η ίδια επένδυση, τότε το συνολικό κόστος είναι 1.950.920 €. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε η προσωρινή επένδυση πιθανώς να είναι σχεδόν η μισή σε οπλισμό και σκυρόδεμα για τα πρώτα 150 m, σύμφωνα με όσα υπολογίστηκαν από τον έλεγχο επάρκειας της υποστήριξης και της συμπεριφοράς της βραχομάζας. Επομένως, στη περίπτωση αυτή το κόστος της υποστήριξης για το σύνολο του φρέατος ανέρχεται στα 1.629.230 €.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το λογισμικό Phase² της Rocscience αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στην προσομοίωση της κατασκευής υπογείων έργων. Τόσο τα προσομοιώματα της ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης όσο και της αξονοσυμμετρικής δίνουν τα ίδια αποτελέσματα και περιγράφουν σε πολύ καλό βαθμό την συμπεριφορά της βραχομάζας. Διαπιστώνεται, επίσης, πως το πρόγραμμα ανταποκρίνεται πλήρως αφού τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων επαληθεύουν τις αναλυτικές λύσεις.

Η εξέταση της συμπεριφοράς της βραχομάζας μπορεί να επιτευχθεί με την προσομοίωση της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης από τα προσομοιώματα ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης. Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν οι καμπύλες που σχεδιάστηκαν, για τα πέντε στρώματα από τα οποία διέρχεται το φρέαρ, συνάδουν, ομοίως, με τους υπολογισμούς από τις αναλυτικές σχέσεις. Η συμπεριφορά, λοιπόν, της βραχομάζας για την ολομέτωπη διάνοιξη του φρέατος περιγράφεται εξαιρετικά από τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν.

Το αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα μας παρέχει μια λεπτομερή εικόνα της κατάστασης στις παρειές του ανοίγματος και πέριξ του φρέατος σε κάθε στάδιο εκσκαφής και υποστήριξης στο χώρο τρισδιάστατα. Οι συνθήκες διάνοιξης, που εκτιμώνται, είναι ευνοϊκές έως το βάθος των 150 m όπου η βραχομάζα δεν εμφανίζει αστοχία. Πέραν του βάθους αυτού η σύγκλιση του τοιχώματος του φρέατος είναι σημαντική και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς θα συνδεθεί με την υπόγεια σήραγγα.

Σύμφωνα με την απόκριση των μέτρων στήριξης που εξετάστηκαν η ελάχιστη κατηγορία σκυροδέματος που απαιτείται είναι C35/45 είτε ως εκτοξευόμενο κατά την προσωρινή υποστήριξη του φρέατος είτε ως έγχυτο στην μόνιμη επένδυση. Ο χαλύβδινος οπλισμός από αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης, δομικό πλέγμα, δικτυωτά πλαίσια και ράβδους συνίσταται να διαθέτει ελάχιστο όριο διαρροής 500 MPa. Τα μέτρα στήριξης που εξετάστηκαν για τα τελευταία 50 m

εκσκαφής, που έχουμε σύγκλιση του ανοίγματος του φρέατος είναι απολύτως επαρκή. Δεδομένου, πως η κατηγορία του σκυροδέματος είναι υψηλής αντοχής και θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοξευόμενο και στην προσωρινή επένδυση, μπορούμε να πούμε ότι μπορεί να συνεισφέρει και στη μακροπρόθεσμη στήριξη του φρέατος, όπως και η μόνιμη επένδυση. Η υποστήριξη στα ανώτερα στρώματα του φρέατος θα είναι σαφώς ελαφρύτερη. Ειδικότερα, το πάχος της προσωρινής επένδυσης προτείνεται να μειωθεί σε 15 cm και να μη γίνει εγκιβωτισμός από δικτυωτά πλαίσια αλλά να περιέχει μόνο δομικό πλέγμα. Η τελική επένδυση είναι υποχρεωτικό να έχει ίδιο οπλισμό και πάχος σε όλο το μήκος του φρέατος, οπότε ισχύουν όσα εξετάστηκαν. Επιπλέον, προβλέπεται να γίνει μια σταδιακή μετάβαση της διαμέτρου εκσκαφής όσο προχωρά η κύρια βύθιση του φρέατος καθώς η προσωρινή υποστήριξη κοντά στην επίγεια επιφάνεια πρόκειται να είναι μικρότερη σε πάχος. Η προτεινόμενη διάμετρος εκσκαφής στην αρχή του έργου είναι 13,7 m.

Κρίνεται αναγκαίο να γίνουν τουλάχιστον δύο διερευνητικές γεωτρήσεις στη περιοχή του έργου, μέχρι το βάθος των 200 m, ώστε να γίνει ακριβής αποτύπωση της στρωματογραφίας και προσδιορισμός των μηχανικών παραμέτρων των ηφαιστειακών πετρωμάτων με εργαστηριακές δοκιμές, εφόσον δεν έχουν πραγματοποιηθεί γεωτρήσεις σε μεγάλο βάθος στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης.

Η προτεινόμενη λύση για την μεταφορά ωριαίως των 1500 ατόμων από τον Λιμένα Φηρών στην Πλατεία Σαρπάκη με το σύστημα ανελκυστήρων, θεωρούμε ότι είναι ο πλέον ενδεικνυόμενος τρόπος τόσο από τεχνικής πλευράς όσο και ασφάλειας, αλλά και κόστους.

Αρχικά, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητη των εξωτερικών συνθηκών και μπορεί να λειτουργεί σε όλες τις εποχές του έτους και σε όλο το εικοσιτετράωρο και παρέχεται η δυνατότητα με εγκατάσταση μελλοντικά 2 επιπλέον ανελκυστήρων να αυξηθεί η ικανότητα ωριαίας μεταφοράς από 1500 άτομα σε 2250 άτομα. Οι οχλήσεις από την διάνοιξη ελαχιστοποιούνται επειδή οι εργασίες είναι σε σημαντικό βαθμό υπόγειες κι ακολούθως ούτε επηρεάζει ούτε αλλοιώνει το περιβάλλον. Οι αναγκαίες για τη λειτουργία του συστήματος χρήσεις και τεχνικές υποδομές, όπως χώροι αναμονής, μηχανοστάσια, εκδοτήρια εισιτηρίων, δημόσιες τουαλέτες, ιατρεία, κλπ και εμπορικές χρήσεις, όπως αναψυκτήριο, πωλητήρια τοπικών προϊόντων, γραφεία παροχής τουριστικών υπηρεσιών κλπ, δεν καταλαμβάνουν τμήματα της λιμενικής ζώνης αλλά εντάσσονται σε υπόσκαφους χώρους που κατασκευάζονται συνδυασμένα με τον κεντρικό διάδρομο πρόσβασης προς τους ανελκυστήρες. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η αισθητική αλλοίωση της περιοχής του λιμανιού και της καлдέρας και διασφαλίζονται καλύτερες συνθήκες εξυπηρέτησης των τουριστών.

Η συντήρηση των μηχανολογικών εγκαταστάσεων και του συνόλου του έργου είναι σχετικά εύκολη και οικονομική διότι όλες οι εγκαταστάσεις είναι στεγασμένες και δεν είναι εκτεθειμένες στη διάβρωση από τις καιρικές συνθήκες. Σημειώνουμε ότι το σύστημα αποτελείται από 4 ανεγκυστήρες και επομένως η συντήρηση ή η αποκατάσταση βλαβών γίνεται χωρίς την ολοσχερή διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, το έργο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση δικτύων υποδομής για την εξυπηρέτηση της λιμενικής ζώνης των Φηρών, όπως δικτύων υδροδότησης, τηλεφωνοδότησης κλπ, έτσι τα δίκτυα αυτά δεν αλλοιώνουν το τοπίο της καλδέρας και είναι εύκολα επισκέψιμα για συντήρηση κλπ. Σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο σύστημα μεταφοράς (τελεφερίκ) πλεονεκτεί κατά πολύ, δεδομένου ότι δύναται να λειτουργεί και να επιτηρείται μόνο με 1- 2 άτομα και επιπλέον απαιτεί πολύ μικρό κόστος συντήρησης. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία είναι πολύ μικρότερη από οποιοδήποτε άλλο σύστημα, καθώς με την χρήση inverter ελαχιστοποιείται το λειτουργικό κόστος.

Το έργο εξυπηρετεί παράλληλα μέρος της ακτοπλοϊκής κίνησης, από και προς τον Πειραιά και τα άλλα νησιά και σημαντικού μέρους των ημερήσιων θαλάσσιων εκδρομών και της συγκοινωνίας προς τη Θηρασιά και το ηφαισείο. Το λιμάνι στο Αθηνιό περιορίζεται στην εξυπηρέτηση κυρίως των οχηματαγωγών και των εμπορικών σκαφών και μέρος μόνον των τουριστικών σκαφών και επομένως θα περιοριστεί η οδική κίνηση προς το Αθηνιό, η οποία σήμερα είναι υπερβολικά αυξημένη. Παράλληλα, το έργο μπορεί να αξιοποιηθεί για μεταφορά εμπορευμάτων όταν δεν είναι ώρες αιχμής για την μεταφορά προσώπων.

Η εγκατάσταση πρόκειται να είναι απόλυτα ασφαλής εφόσον μελετήθηκε από στατικής πλευράς σε δυσμενείς συνθήκες φόρτισης. Επιπλέον, το σύστημα μεταφοράς είναι πλήρως πυροπροστατευόμενο καθ' όσον προβλέπεται να εγκατασταθούν τα πλέον σύγχρονα συστήματα πυρασφάλειας, πέραν του γεγονότος ότι σε τυχόν περίπτωση πυρκαγιάς, οι επισκέπτες θα οδηγούνται στους πυροπροστατευόμενους χώρους από τους οποίους θα διαφεύγουν με ασφάλεια και άνεση προς το περιβάλλον.

Συνεκτιμώντας τον προϋπολογισμό του έργου, αλλά και τα αναμενόμενα έσοδα, ιδιαίτερα κατά την τουριστική περίοδο (από τη μεγάλη άφιξη των επισκεπτών), φρονούμε ότι το όλο έργο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και προβλέπεται να αποσβεσθεί άνετα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Το όφελος από το προτεινόμενο έργο είναι πολλαπλό, όπως προκύπτει από την ανάλυση που προηγήθηκε. Παράλληλα με την αντιμετώπιση του προβλήματος μεταφοράς των τουριστών από τη λιμενική ζώνη στον οικισμό των Φηρών, επιλύει σύνθετα και οξυμένα χωροταξικά προβλήματα του νησιού, προβλήματα πολεοδομικής οργάνωσης και περιβάλλοντος του παραδοσιακού οικισμού που αποτελεί έναν από τους κύριους τουριστικούς πόρους του νησιού και οξυμένα προβλήματα υποδομών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική – Ξένη Βιβλιογραφία

- Druitt. (n.d.). Geological map of Santorini islands.
- Pola, A., Crosta, G. B., Fusi, N., & Castellanza, R. (2014). General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration. *Engineering Geology*, *169*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.11.011>
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V., & Norini, G. (2012). Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics*, *566–567*, 67–86. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.017>
- Probst, G., & Bassi, A. M. (2018). Phase 2. *Tackling Complexity*, 41–63. <https://doi.org/10.4324/9781351287647-4>
- Schmäh, P. (2007). Vertical shaft machines. State of the art and vision. *Acta Montanistica Slovaca*, *12*(1 SPEC.ISSUE), 208–216.
- Simmons, J. M., Cas, R. A. F., Druitt, T. H., & Carey, R. J. (2017). The initiation and development of a caldera-forming Plinian eruption (172 ka Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *341*, 332–350. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.034>
- Simmons, J. M., Cas, R. A. F., Druitt, T. H., & Folkes, C. B. (2016). Complex variations during a caldera-forming Plinian eruption, including precursor deposits, thick pumice fallout, co-ignimbrite breccias and climactic lag breccias: The 184 ka Lower Pumice 1 eruption sequence, Santorini, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *324*, 200–219. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.013>
- Tunnelling, I., & Interaction, T. R. (2008). Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf.
- Αρχές, Δ. Β. (2009). Ευρωκώδικας Ε Ν 1993 Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών.
- Ασημομύτη, Α., Μαρίνος, Β. (επιβλ. καθ. .., Χρηστάρας, Β. (επιβλ. καθ. .., & Βουδούρης, Κ. (επιβλ. καθ. . (2015). Γεωτεχνική Ταξινόμηση Βραχομαζών Φλύσχη Με Τα Συστήματα Gsi Και Rmr Σε Υπόγεια Έργα Του Υψη Μετσοβίτικου, 131. Retrieved from <http://m2015aasi.pdf>

Βουγιουκαλάκης. (n.d.). Η στρωματογραφία των πρανών της καλδέρας στην περιοχή των Φηρών, 1–8.

Κάππος, Α., Θ, Α. Π., Ιγνατάκης, Χ., Θ, Α. Π., Σέξτος, Α., & Θ, Α. Π. (2009). Ευρωκώδικας 2 : Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα Μέρος 1-1 : Γενικοί ή Κανόνες Κ ό και Κανόνες Κ ό για κτίρια ή Κεφάλαια 1-5 Διάρθρωση Ευρωκώδικα 2 Ευρωκώδικας 2 - Μέρος 1-1, 3–5.

Κατσένης, Η. (2012). Θαλάσσια Γεωλογική Δομή Και Σεισμική Στρωματογραφία Της Καλδέρας Της Σαντορίνης.

Μ. Καββαδάς. (2004). 5. Διανοίξη σηραγγών με τη " μεθοδο νατμ " 5.1, 1–15.

Μαλαχίας. (2016). Τεχνική έκθεση συστήματος μεταφοράς, 2, 1–13.

ΣΑΚΚΑΣ, ΝΟΜΙΚΟΣ, ΠΑΝΙΑΣ, Σ. (2010). Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά Fire Protection of Tunnels, 1–7.

Σοφιανός. (2015). Υποστήριξη υπογείων έργων.

Σοφιανός, Α. Ι. (2018). Διάνοιξη Σηράγγων.

Φαίδων Γ. Παπαθεοδώρου. (n.d.). ΕΚΘΕΣΗ 31-5-2018.

Διαδικτυακοί Ιστότοποι

<https://www.sciencedirect.com>

<https://www.herrenknecht.com/de>

<https://www.rocscience.com/>

<https://www.elsevier.com/>

<http://www.gein.noa.gr/el/>

<https://www.meteoblue.com/>

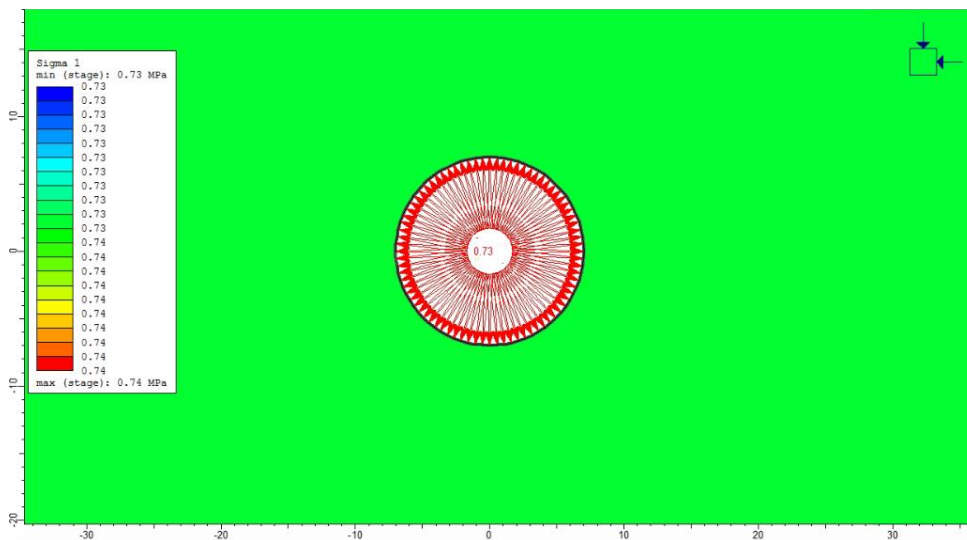
[Guardian: Η Σαντορίνη στο σημείο μηδέν -Πώς ο τουρισμός δίχασε το νησί σε πλούσιους και φτωχούς | iefimerida.gr](#)

<http://www.kathimerini.gr/974820/interactive/epikairothta/ereynes/h-santorinh-dokimazei-tis-antoxes-tis#webdoc>

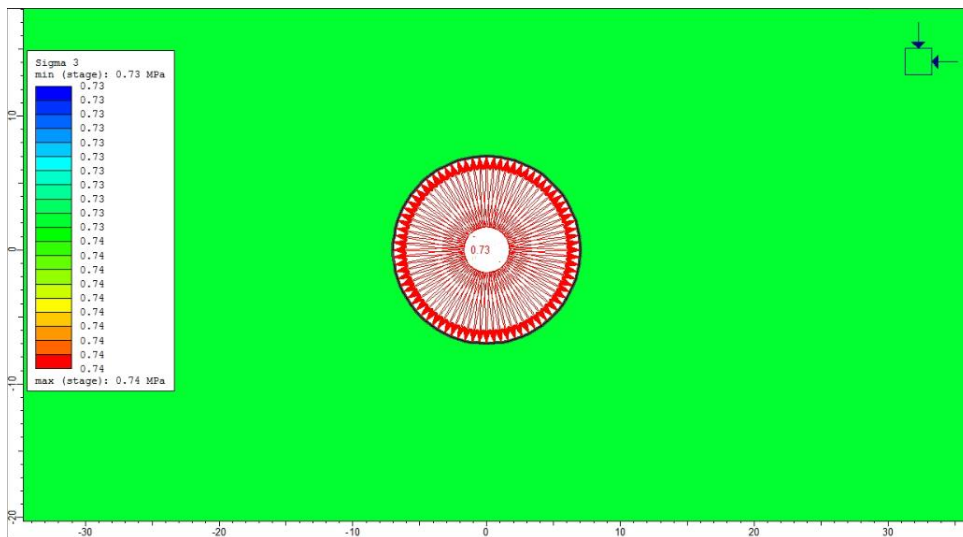
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

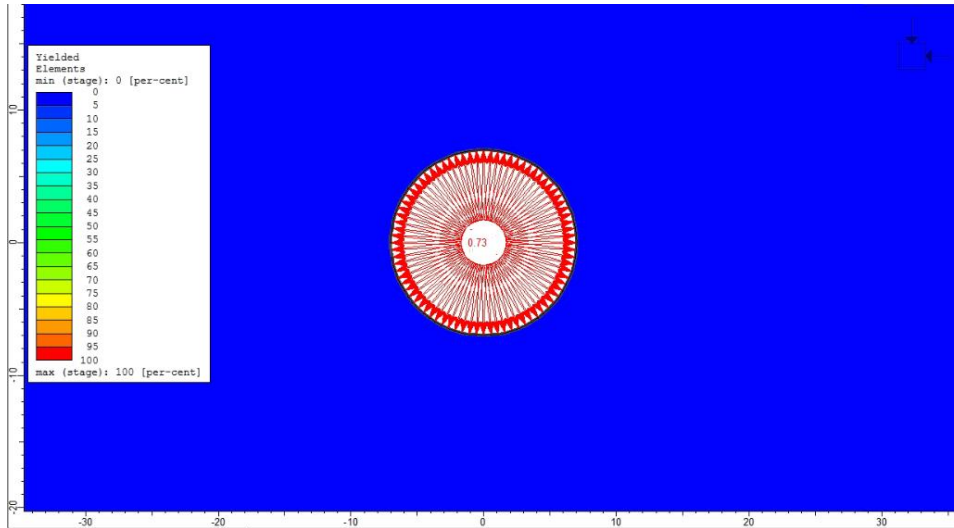
Στρώμα Ρυοδακτικικών λάβων Θηρασίας



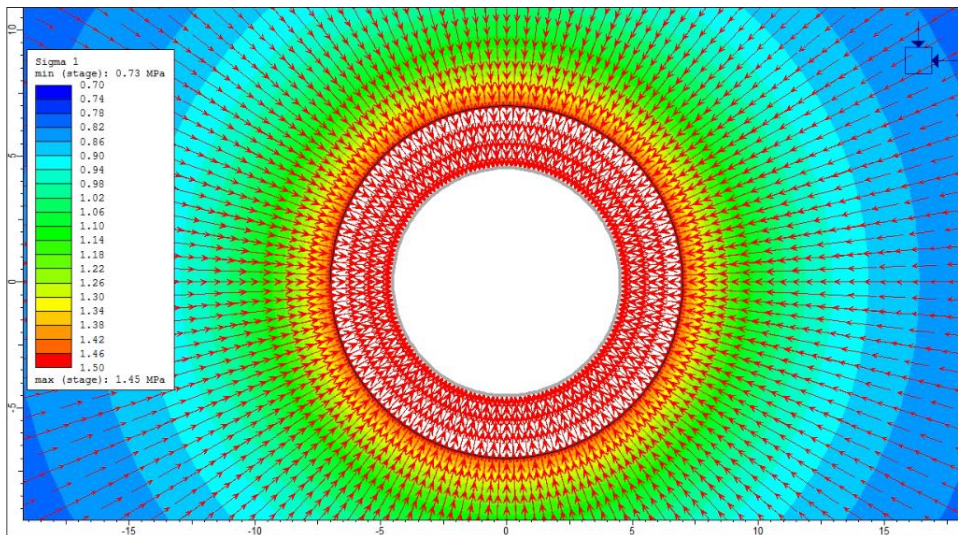
Γράφημα 79. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($r_i = 0,735$ στο 2^ο στάδιο)



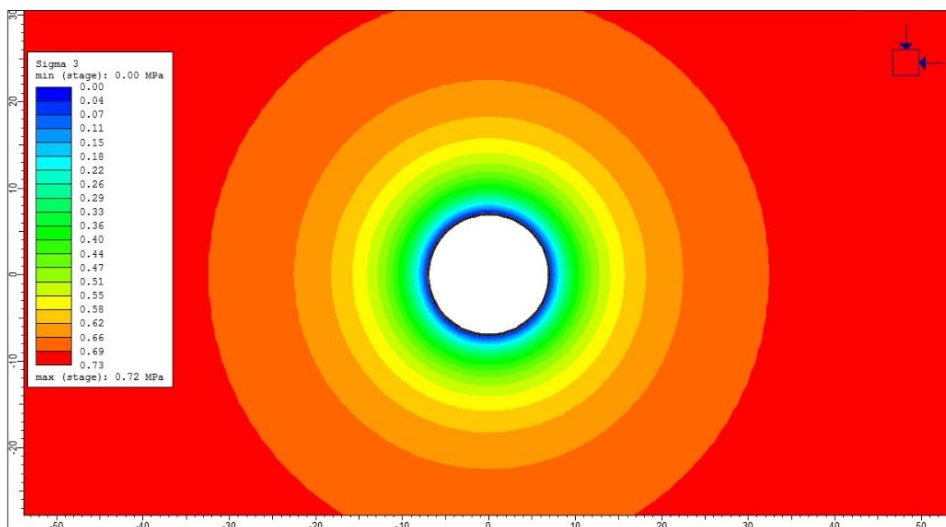
Γράφημα 80. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i = 0,735$ στο 2^ο στάδιο)



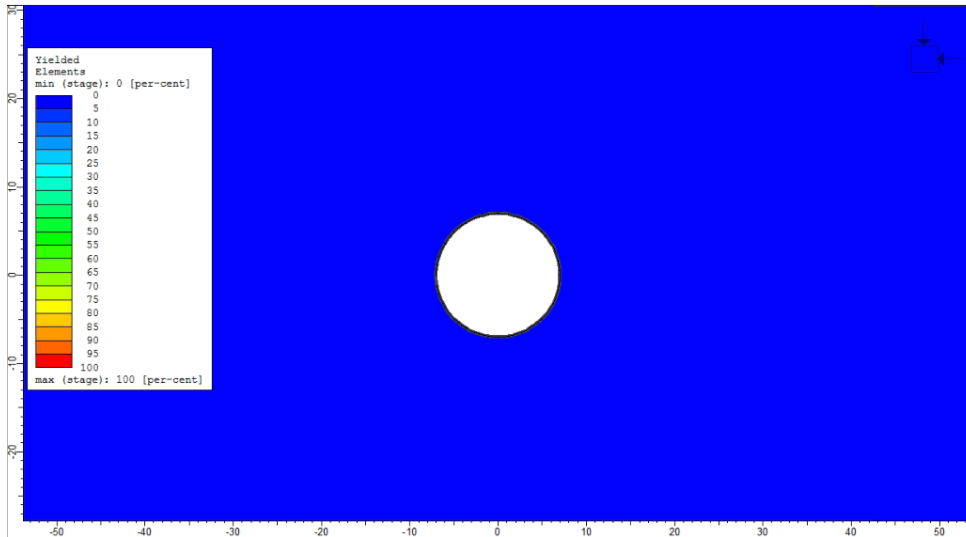
Γράφημα 81. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0,735$ στο 2^ο στάδιο)



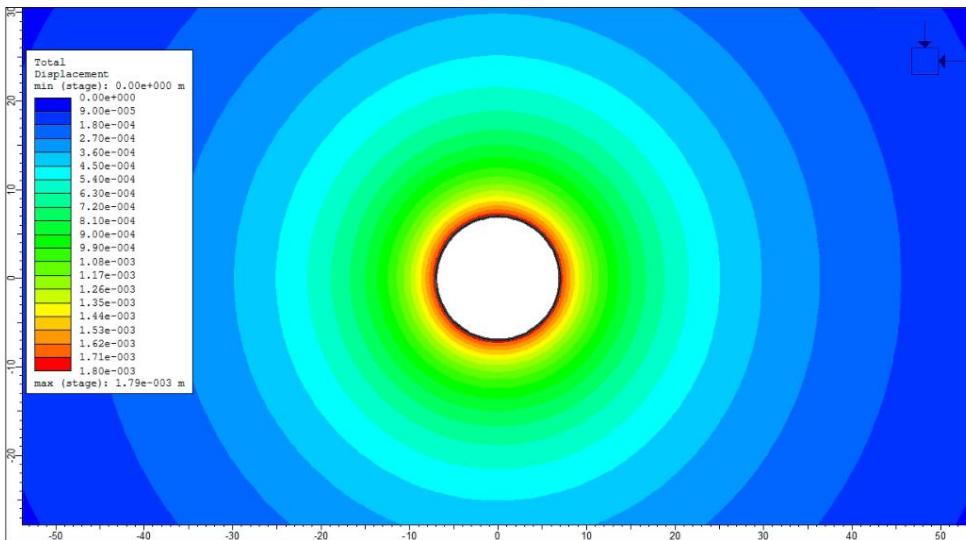
Γράφημα 82. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 83. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

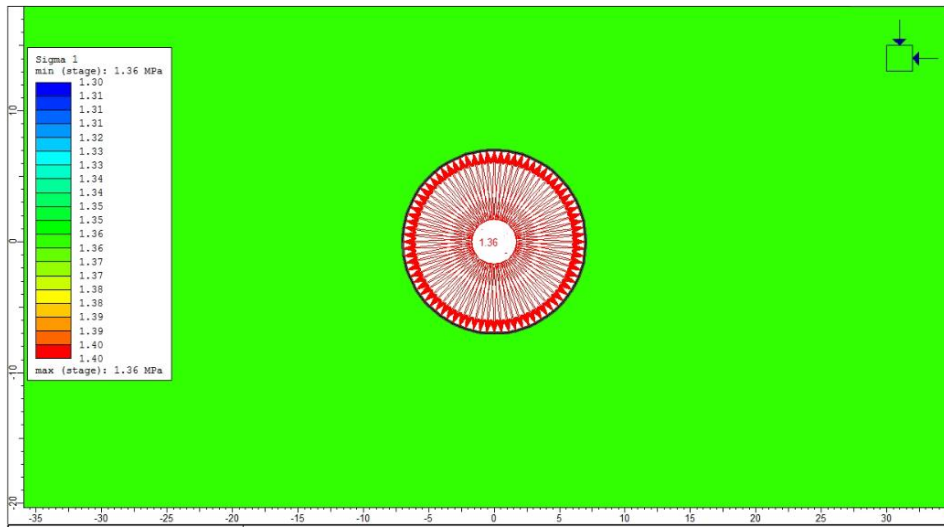


Γράφημα 84. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

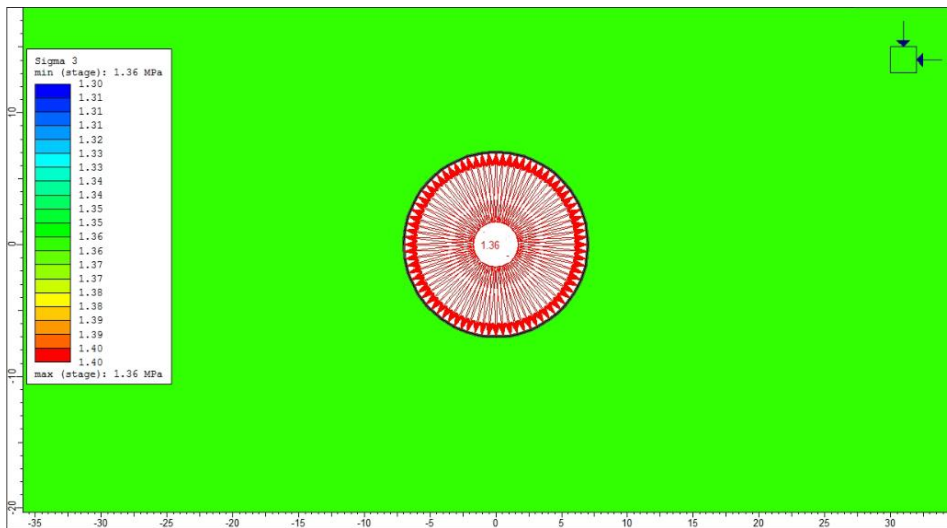


Γράφημα 85. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

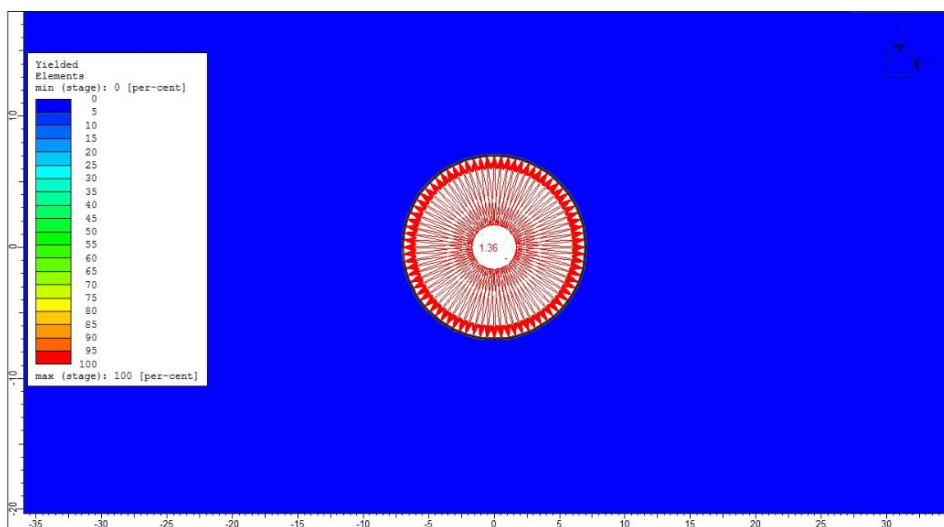
Στρώμα Τόφφων



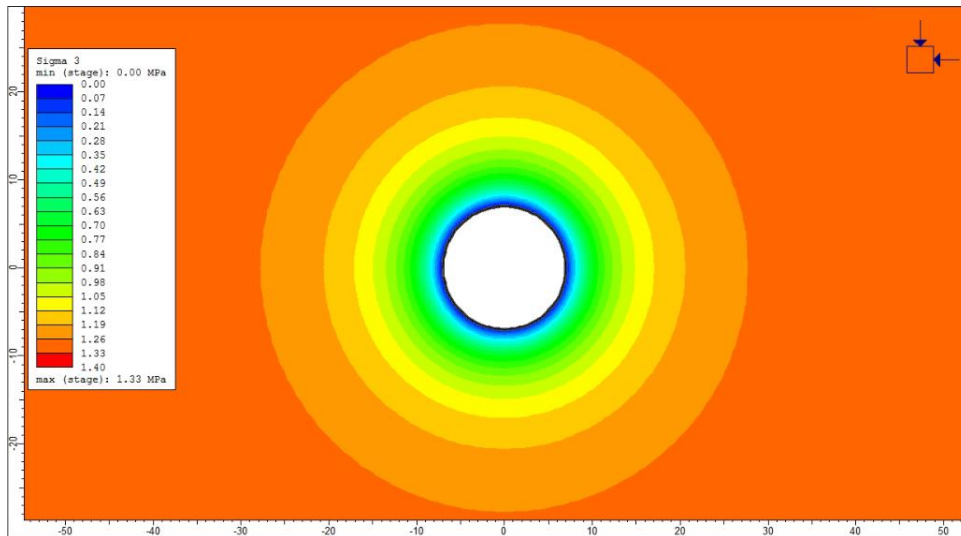
Γράφημα 86. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($r_i = 1,36$ στο 2^ο στάδιο)



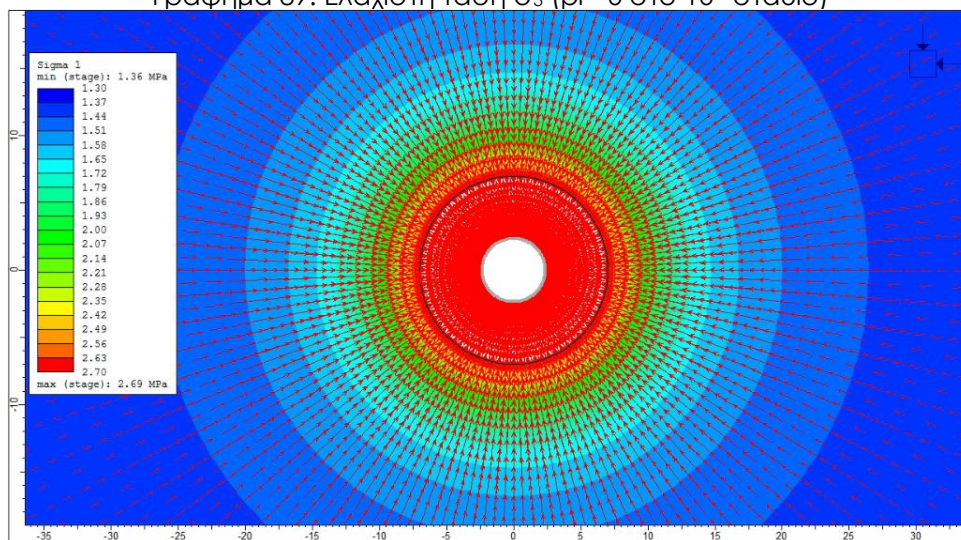
Γράφημα 87. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i = 1,36$ στο 2^ο στάδιο)



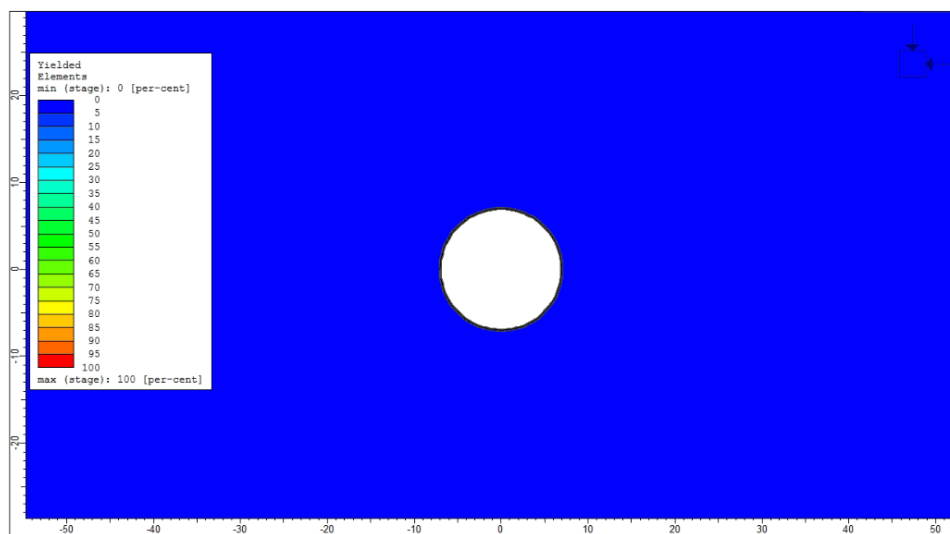
Γράφημα 88. Σημεία αστοχίας ($r_i = 1,36$ στο 2^ο στάδιο)



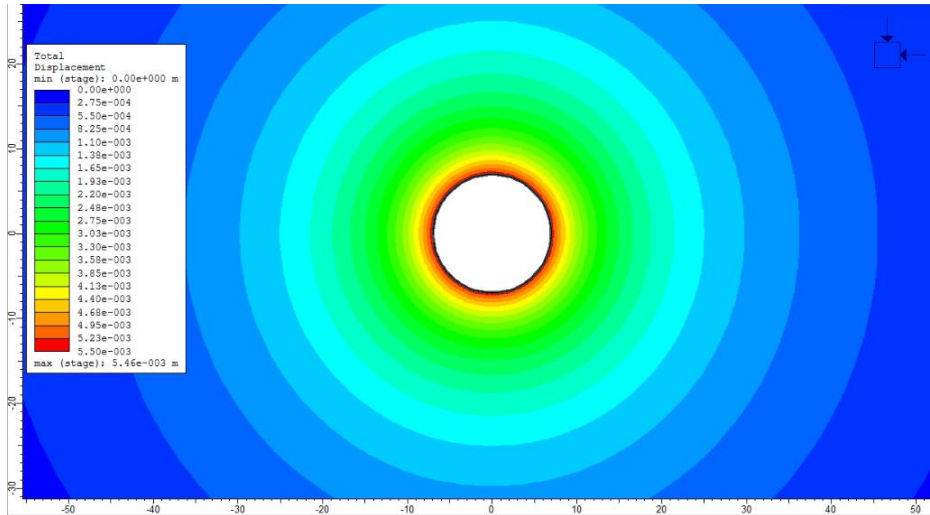
Γράφημα 89. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 90. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

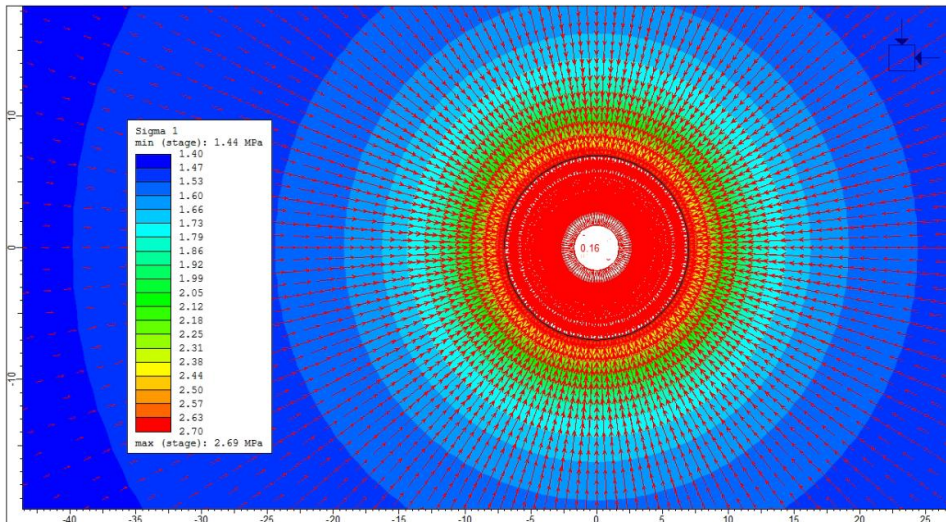


Γράφημα 91. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

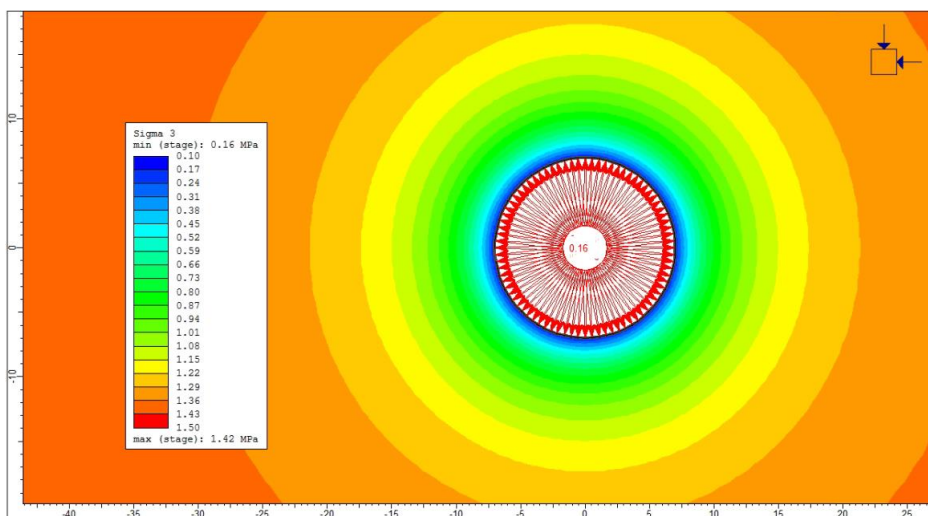


Γράφημα 92. Συνολικές μετακινήσεις ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

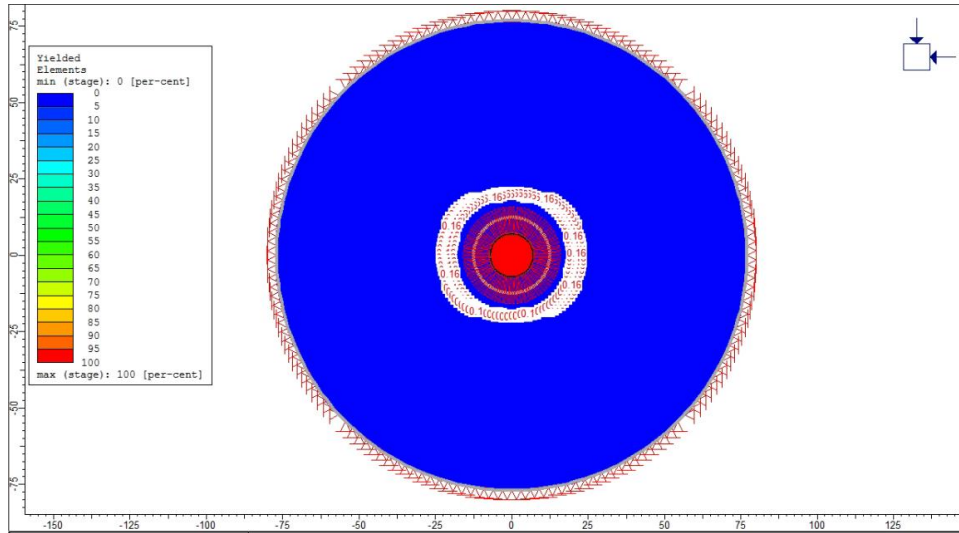
Στρώμα Κίσηρης



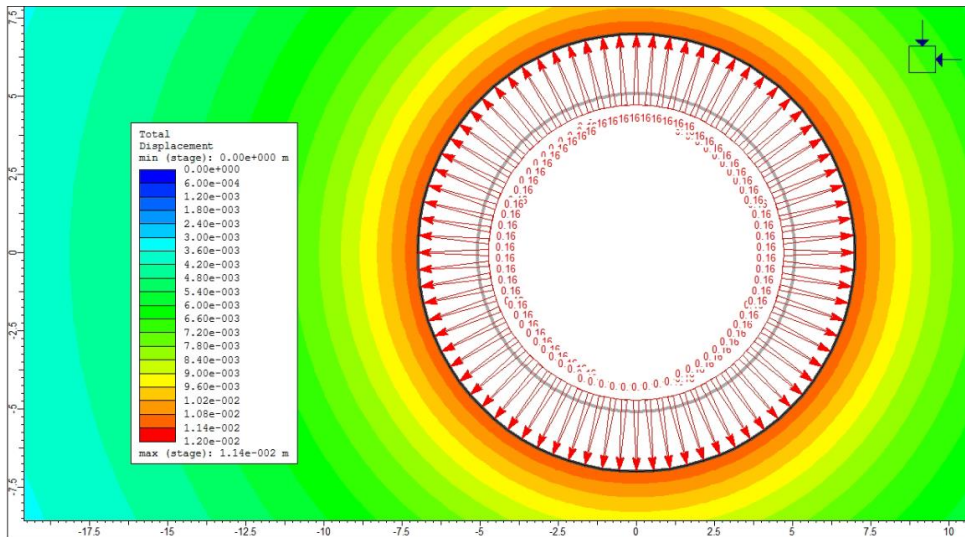
Γράφημα 93. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($r_i=0,16$ στο 2^ο στάδιο)



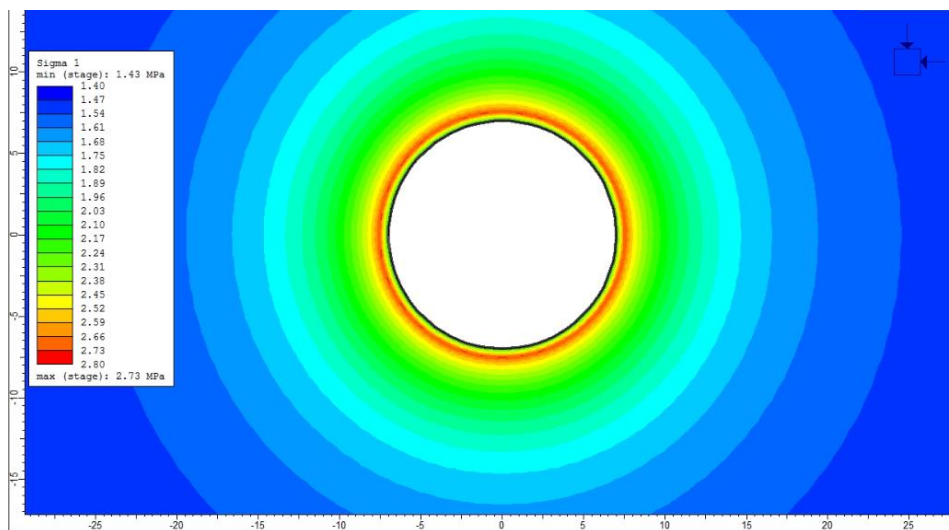
Γράφημα 94. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i=0,16$ στο 2^ο στάδιο)



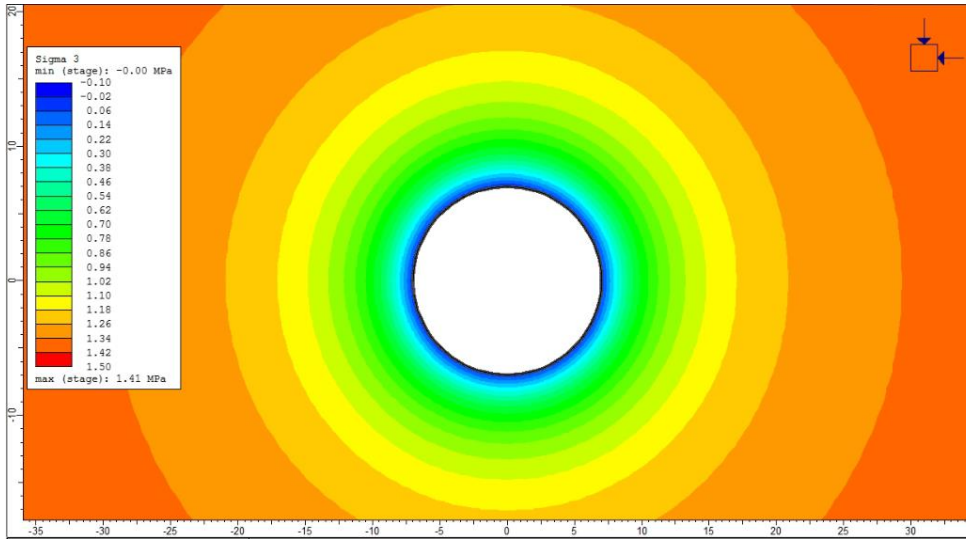
Γράφημα 95. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 0,16$ στο 2^ο στάδιο)



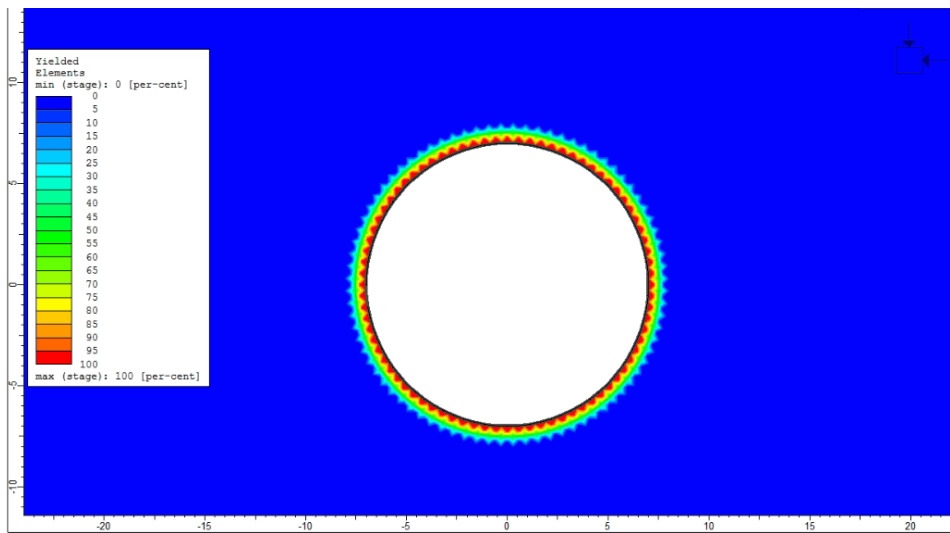
Γράφημα 96. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0,16$ στο 2^ο στάδιο)



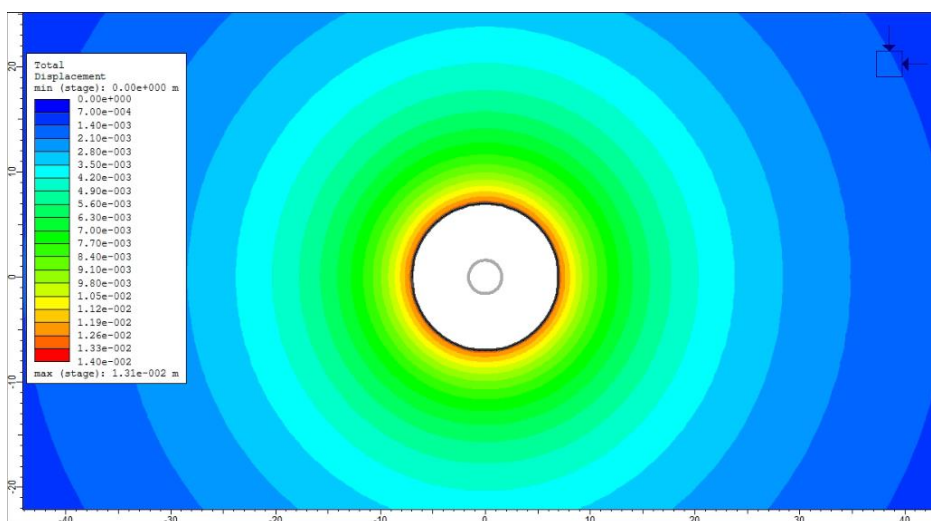
Γράφημα 97. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 98. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

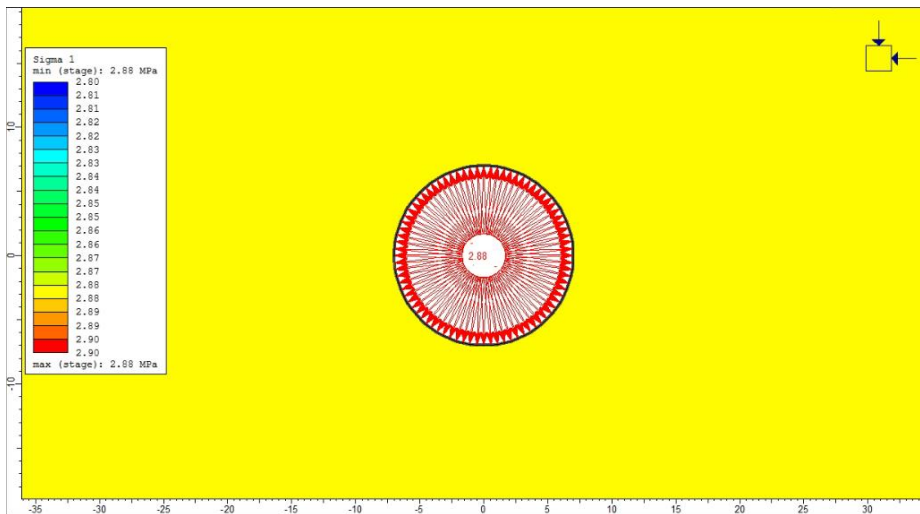


Γράφημα 99. Σημεία αστοχίας ($\rho_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

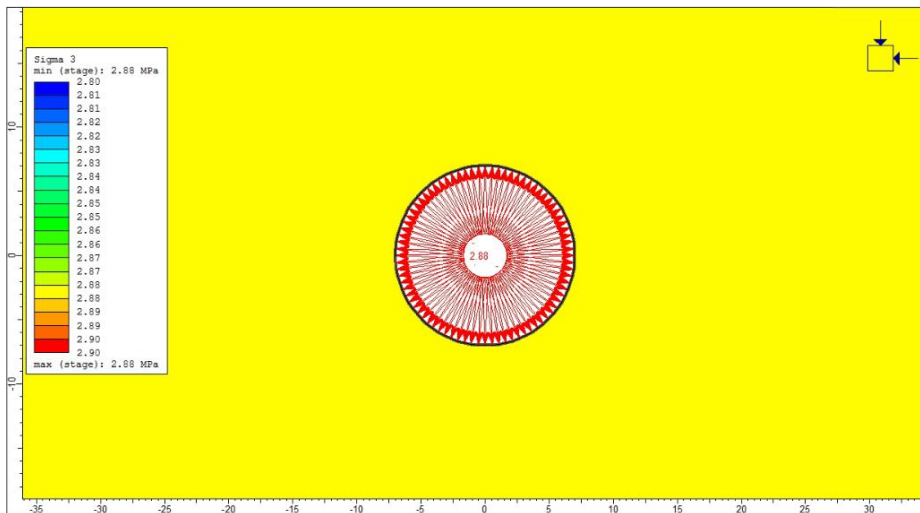


Γράφημα 100. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

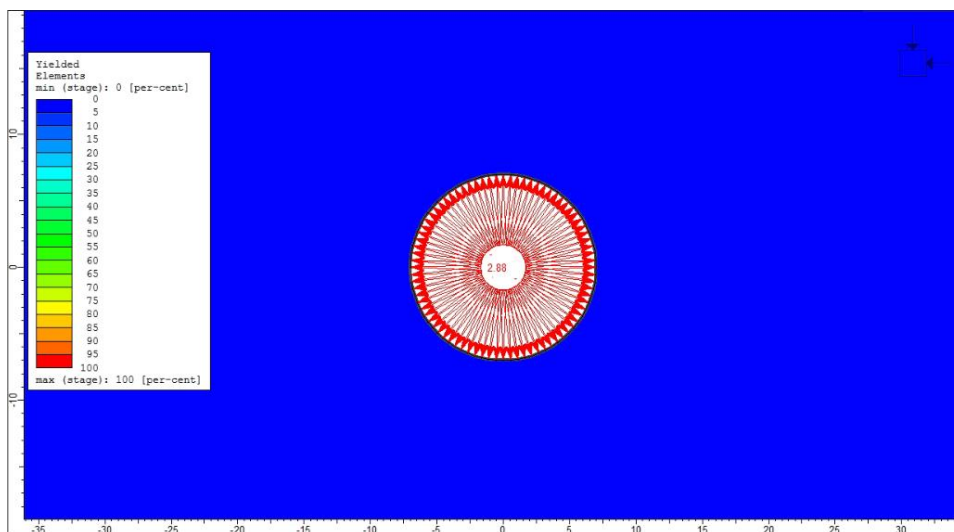
Στρώμα Ρυοδακτιπικών λάβων Αλωνάκι



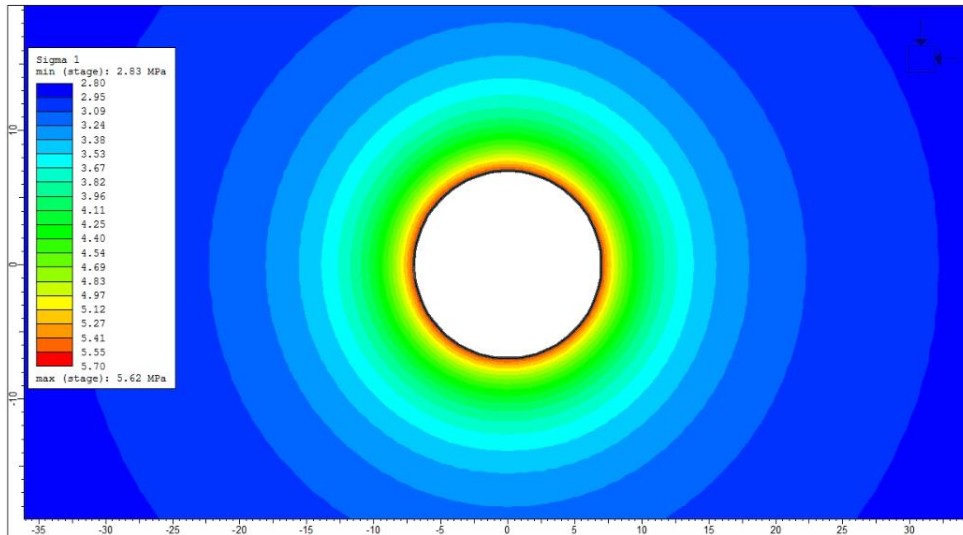
Γράφημα 101. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($r_i=2,88$ στο 2^ο στάδιο)



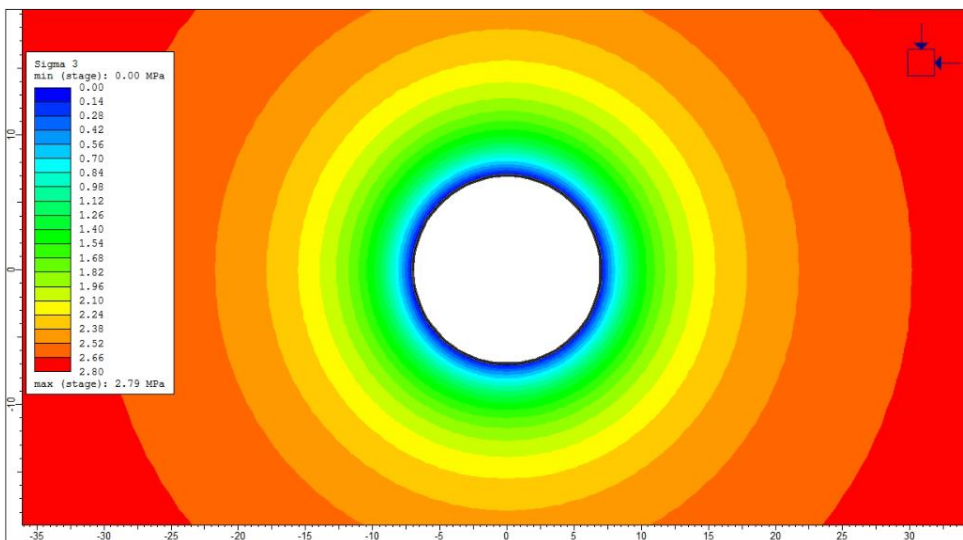
Γράφημα 102. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i=2,88$ στο 2^ο στάδιο)



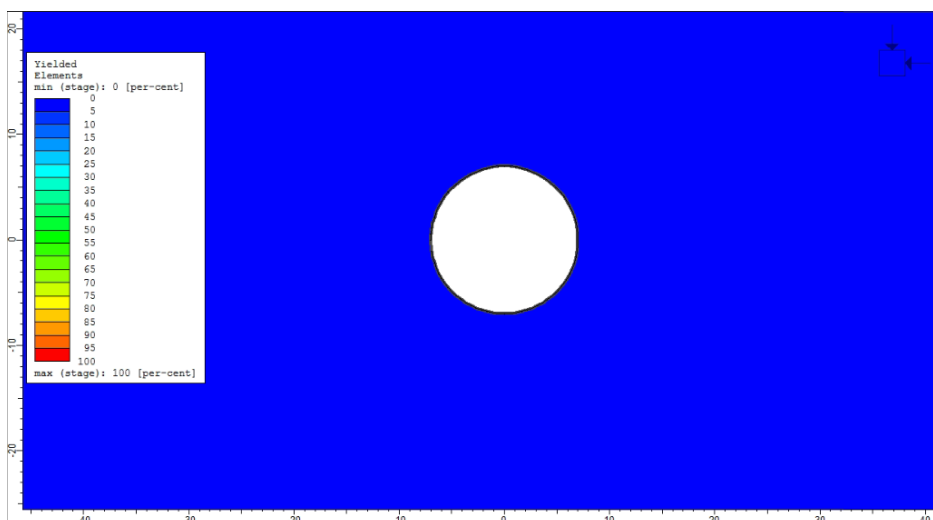
Γράφημα 103. Σημεία αστοχίας ($r_i=2,88$ στο 2^ο στάδιο)



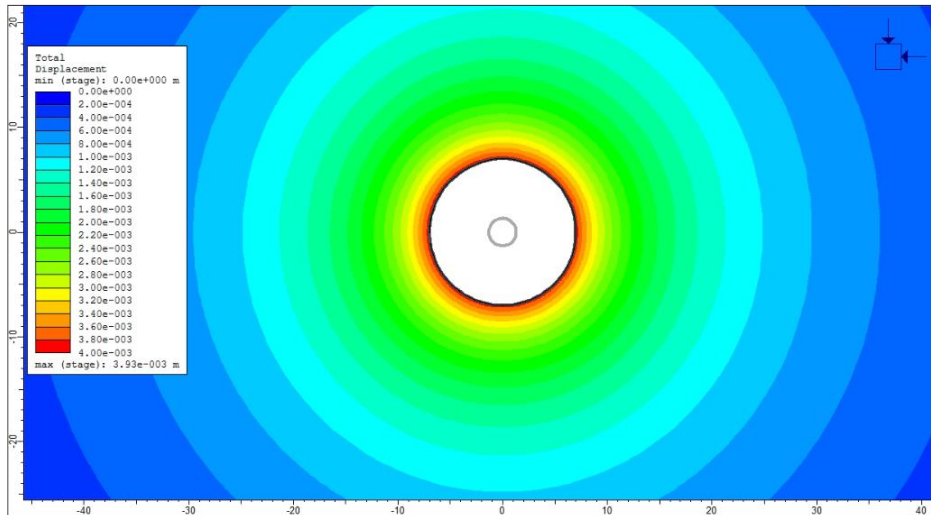
Γράφημα 104. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 105. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

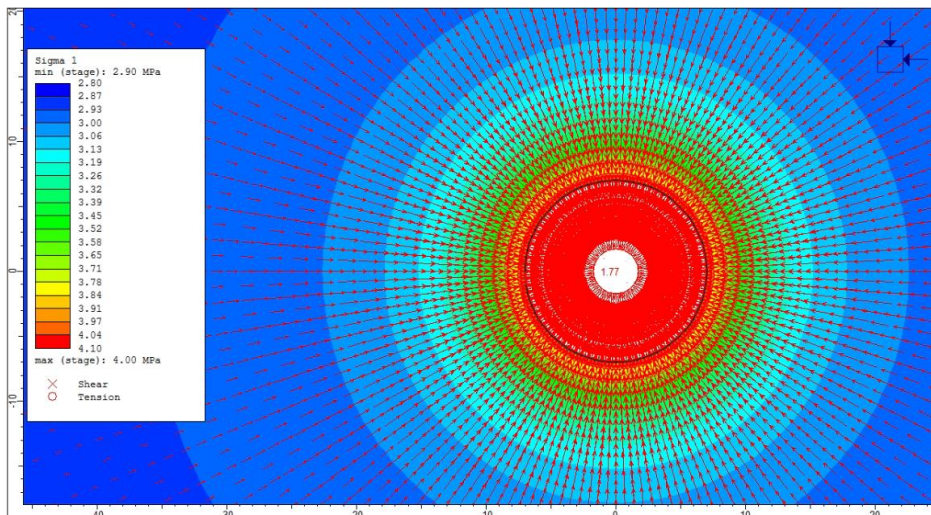


Γράφημα 106. Σημεία αστοχίας ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)

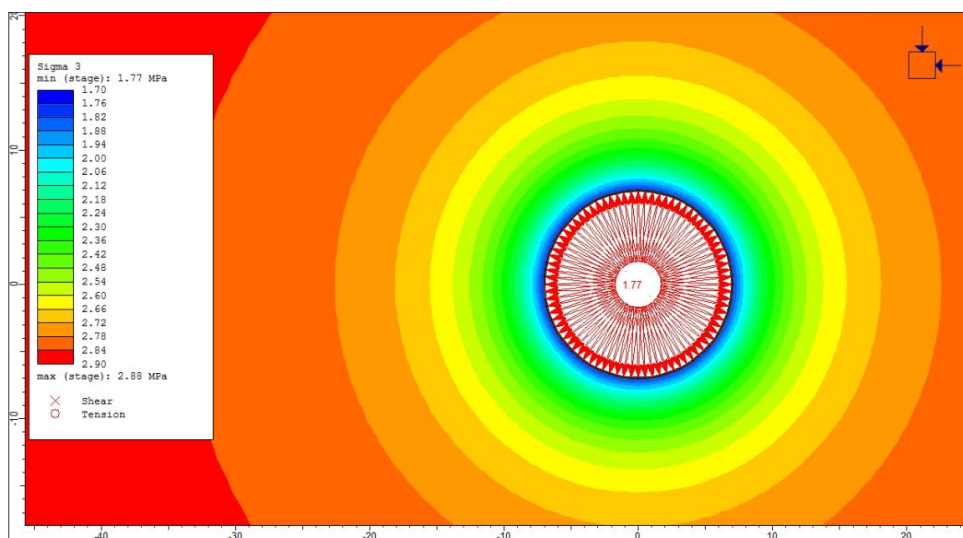


Γράφημα 107. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)

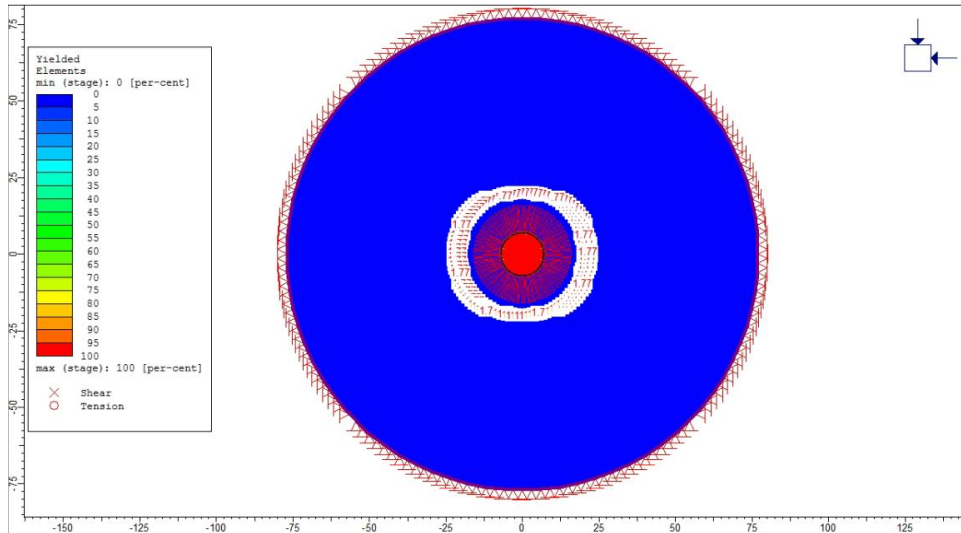
Στρώμα Πυροκλαστικών



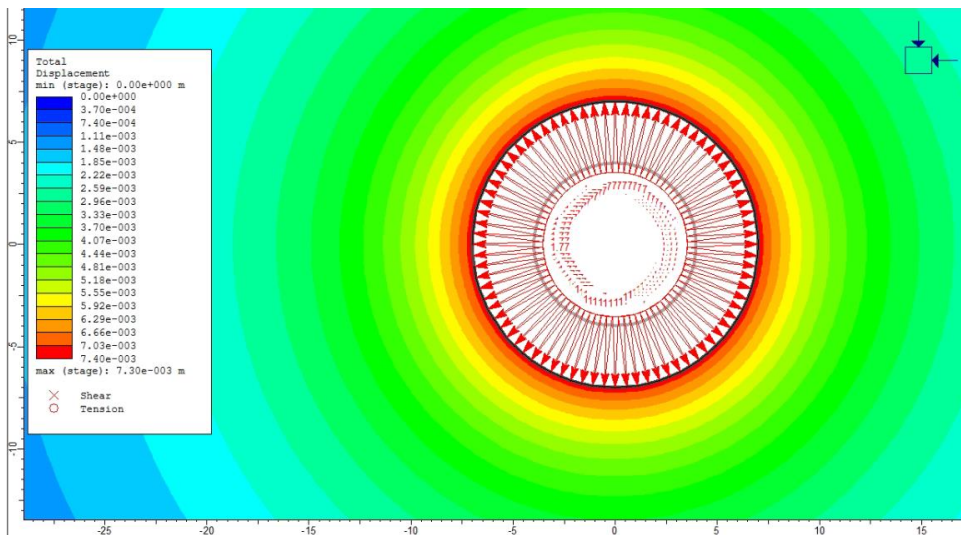
Γράφημα 108. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 1,77$ στο 2^ο στάδιο)



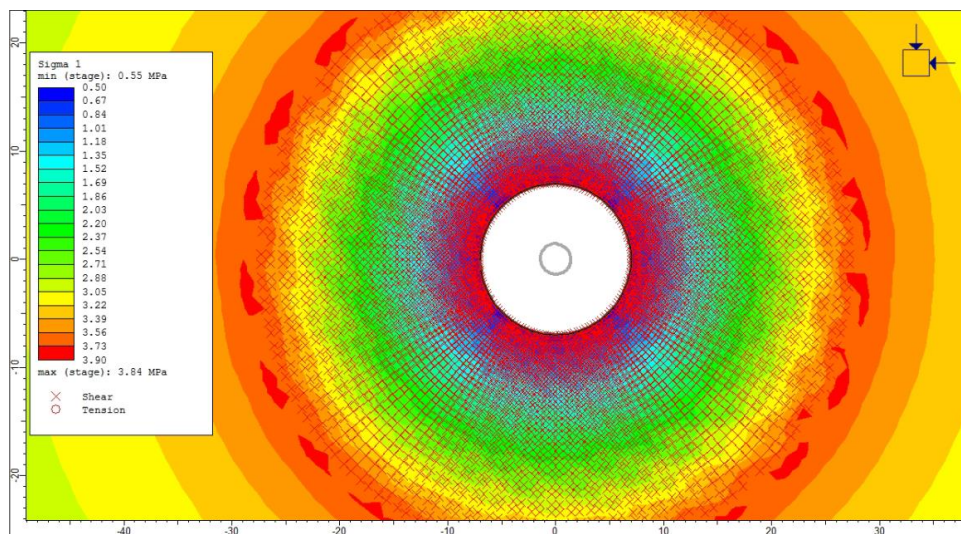
Γράφημα 109. Ελάχιστη τάση σ_3 ($\rho_i = 1,77$ στο 2^ο στάδιο)



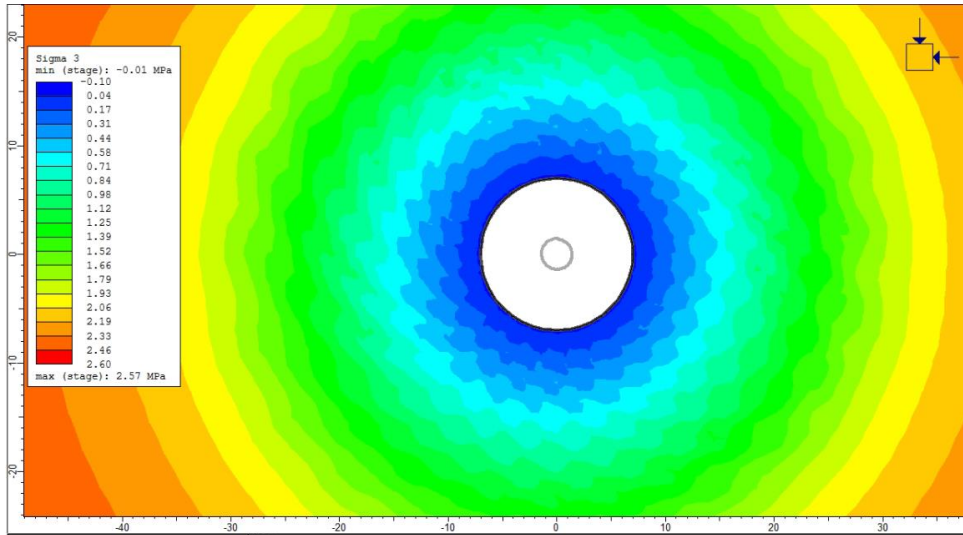
Γράφημα 110. Σημεία αστοχίας ($\rho_i = 1,77$ στο 2^ο στάδιο)



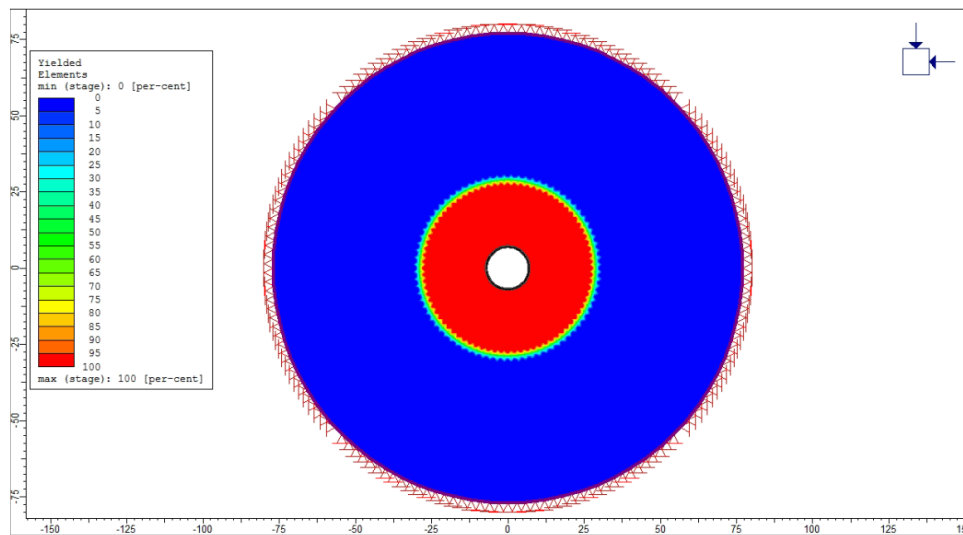
Γράφημα 111. Συνολικές μετακινήσεις ($\rho_i = 1,77$ στο 2^ο στάδιο)



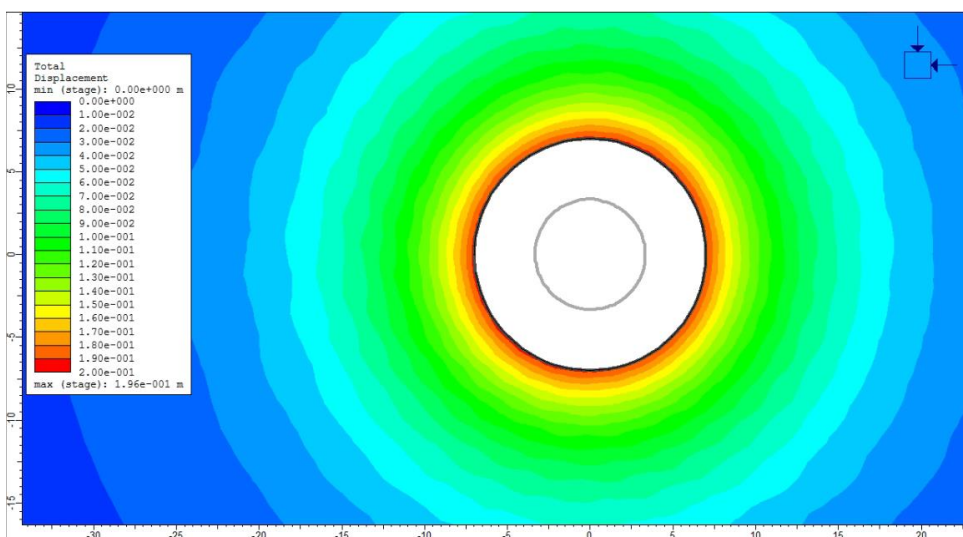
Γράφημα 112. Μέγιστη κύρια τάση σ_1 ($\rho_i = 0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 113. Ελάχιστη τάση σ_3 ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 114. Σημεία αστοχίας ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)



Γράφημα 115. Συνολικές μετακινήσεις ($r_i=0$ στο 10^ο στάδιο)