

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ



ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
ΜΑΚΥΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΤΖΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΠΑΥΛΟΣ Π. ΝΟΜΙΚΟΣ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα τη «Μηχανική συμπεριφορά της σήραγγας Μακύνειας κατά τη διάνοιξη της» και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Η εργασία εκπονήθηκε με επιβλέποντα το Λέκτορα Π. Νομικό.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νομικό, Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π για την άψογη συνεργασία μας και την υπομονετική του επιστημονική καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Σοφιανό Αλέξανδρο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τις ουσιαστικές υποδείξεις του καθ' όλο το διάστημα της συνεργασίας μας για την δημιουργία αυτής της διπλωματικής

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Γιούτα-Μήτρα Παρασκευή, Μεταλλειολόγο Μηχανικό, ΜΔΕ Ε.Μ.Π., για την συνεχή καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στην οικογένεια μου και τους φίλους μου που μου στάθηκαν σε όλη την διάρκεια αυτής της εργασίας αλλά και στο συνολικό διάστημα της φοίτησης μου στο Ε.Μ.Π.

Χατζής Χαράλαμπος

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μηχανική συμπεριφορά της οδικής σήραγγας Μακύνειας που βρίσκεται στο νομό Αιτωλοακαρνανίας και διανοίχθηκε ως μέρος του υπό κατασκευή οδικού άξονα της Ιονίας Οδού. Ύστερα από μία σύντομη εισαγωγή, όπου δίνονται βασικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη σήραγγας και αναπτύσσεται το αντικείμενο της παρούσας, ακολουθούν τα γενικά στοιχεία για την σήραγγα της Μακύνειας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την γεωλογία-υδρογεωλογία και τεκτονική της γενικότερης περιοχής του έργου. Επίσης περιγράφονται οι κατηγορίες βραχώμαζας που προβλέφθηκαν από τον μελετητή του έργου και οι αντίστοιχες κατηγορίες υποστήριξης. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στον τρόπο εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας καθώς και στα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πέρας των εργασιών σημειώνοντας και τις διαφορές μεταξύ μελέτης και κατασκευής. Τέλος υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους παρακολούθησης του έργου κατά την κατασκευή.

Στο κυρίως μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση και μελέτη μιας εκ των διατομών. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος Phase2, όπως επίσης και ο τρόπος ανάλυσης των αποτελεσμάτων που εξάγονται από αυτό. Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να την προσομοίωση των φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης της υπό μελέτη σήραγγας.

Επίσης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συμπεριφορά της βραχώμαζας γύρω από την εκσκαφή, κάτω από διαφοροποιούμενες συνθήκες.

Τέλος το σύνολο των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 9, όπου και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The present diploma thesis focuses on the mechanical behaviour of the Makyneia road tunnel, situated in the prefecture of Aitoloakarnania and constructed as part of the- still under construction- Ionia Odos highway. After a brief introduction, where basic features of the said tunnel are given, some general information about Makyneia tunnel follows. These include geology, hydrogeology and tectonics of the area surrounding the construction site. Additionally we present the rock mass categories used by the project designers and their corresponding support categories. The next part includes the description of the excavation and support procedures of the tunnel, as well as the various materials used throughout the construction, noting any differences between design and construction. Furthermore a part is included, where project monitoring devices are presented, both during the construction period and after its completion.

In the main part of this thesis, a detailed analysis of a cross section is presented. All simulations were realized with the use of the finite element program Phase2.

In Chapter 7 a meticulous reference is made, on the way the program works, as well as the way of analyzing the produced results. This program is used to simulate the tunnel's construction and support phases.

Though the use of Phase2, several tests were made, in order to acquire useful results concerning the rock mass around the excavation, under various circumstances.

In the last part, in Chapter 9, the sum of our simulation results is presented, followed by explanations and comments.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Γενικά για τη σήραγγα της Μακύνειας	19
1.2 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	21
2.1 Γενικά	21
2.2 Γεωλογία.....	24
2.2.1 Γεωλογική Ζώνη περιοχής Μακύνειας.....	24
2.2.2 Γεωμορφολογία της περιοχής.....	26
2.2.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες	28
2.2.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής της κατασκευής του έργου..	29
2.3 Γεωτρήσεις	30
2.4 Εργαστηριακές Δοκιμές	35
2.5 Γεωφυσική Έρευνα.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	40
3.1 Γεωλογικές κατηγορίες.....	40
3.2 Κατηγορία βραχώμαζας Α	41
3.3 Κατηγορία βραχώμαζας Β	42
3.4 Κατηγορία βραχώμαζας C	43
3.5 Κατηγορία βραχώμαζας D	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	49
4.1 Μέθοδος Εκσκαφής.....	49
4.2 Μηχανολογικός Εξοπλισμός	50
4.3 Κατηγορίες υποστήριξης	51
4.4 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης	52

4.5 Προδιαγραφές μέτρων υποστήριξης.....	54
4.5.1 Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα.....	55
4.5.2 Ηλώσεις Βράχου.....	56
4.5.3 Πλαίσια.....	56
4.5.4 Δοκοί Προπορείας.....	57
4.5.5 Ράβδοι Προπορείας.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	60
5.1 Μέθοδος διάνοιξης.....	60
5.2 Διαδικασίες επιμέρους εργασιών.....	61
5.2.1 Διάνοιξη σήραγγας.....	61
5.2.2 Αποκομιδή προϊόντων εκσκαφής.....	61
5.2.3 Ξεσκάρωμα.....	61
5.2.4 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	61
5.2.5 Εργασίες τοποθέτησης αγκυρίων.....	62
5.2.6 Εργασίες τοποθέτησης πλαισίων.....	63
5.2.7 Δοκοί προπορείας.....	63
5.3 Διαφορές από τη μελέτη.....	63
5.4 Πραγματικά μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	64
5.5 Προβλήματα κατά την κατασκευή.....	66
5.6 Μέθοδος αποκατάστασης.....	66
5.7 Αποκατάσταση.....	67
5.8 Εξοπλισμός – Προσωπικό.....	67
5.9 Γεωτεχνική παρακολούθηση.....	68
5.10 Φωτισμός.....	72
5.11.Εξαερισμός και μέτρηση επικίνδυνων αερίων κατά τη διάνοιξη.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	73

6.1 Χρήση της βάσης δεδομένων ACCESS	73
6.2 Γενικά	73
6.3 Εφαρμογή	74
6.4 Αποτελέσματα	76
6.5 Γεωλογία.....	77
6.6 Βήμα προχώρησης.....	78
6.7 Μέθοδος εκσκαφής.....	83
6.8 Μέτρα υποστήριξης.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE2	85
7.1. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase2	85
7.2 Προετοιμασία μοντέλου	86
7.2.1 Εισαγωγή Γεωμετρίας	86
7.2.2 Στάδια εκσκαφής-υποστήριξης	86
7.2.3 Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης.....	86
7.2.4 Ιδιότητες υλικών γεωμάζας	87
7.2.5 Τάσεις πεδίου- Φορτίσεις	87
7.3 Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase2.....	88
7.4 Προετοιμασία μοντέλων προσομοίωσης σήραγγας Μακύνειας	89
7.5 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης σήραγγας Μακύνειας.....	91
7.5.1 Μοντέλα σύγκλισης-αποτόνωσης μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας	92
7.5.2 Μοντέλα χωρίς ρωγματομένη βραχώμαζα.....	92
7.5.3 Μοντέλα με ρωγματομένη βραχώμαζα	93
7.5.4 Μοντέλα με πλήρες ρήγμα	93
7.5.5 Ρυθμίσεις (project settings)	93

7.5.6 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing)	95
7.5.7 Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize)	95
7.5.8 Δημιουργία πλέγματος (Mesh)	96
7.5.9 Συνοριακές συνθήκες (Boundary conditions)	96
7.5.10 Τασικό πεδίο (Field stress)	97
7.5.11 Υποστήριξη (Support)	97
7.6 Ιδιότητες	98
7.6.1 Καθορισμός ιδιοτήτων (Defining Properties)	99
7.6.1.1 Καθορισμός γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών	99
7.6.1.2 Καθορισμός ιδιοτήτων αγκυρίων	101
7.6.1.3 Καθορισμός ιδιοτήτων σκυροδέματος	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	104
8.1 Τελική μορφή και παρουσίαση του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2	104
8.2 Μέθοδος Rabcewicz	108
8.2.1 Γενικά	108
8.2.2 Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας δακτυλίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	109
8.2.3 Υπολογισμός της πίεσης στη βραχόμαζα	110
8.3 Μοντέλα σύγκλισης-αποτόνωσης	111
8.4 Μοντέλα χωρίς ρωγματομένη βραχόμαζα	114
8.4.1 Μετατοπίσεις	116
8.4.2 Διαρροή βραχόμαζας	117
8.4.3 Φόρτιση αγκυρίων	118
8.4.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος	119
8.4.5 Έλεγχος αστοχιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος	122
8.5 Μοντέλα με ρωγματομένη βραχόμαζα	123

8.5.1 Μετατοπίσεις	124
8.5.2 Διαρροή βραχόμαζας.....	125
8.5.3 Φόρτιση αγκυρίων	126
8.5.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	126
8.5.5 Έλεγχος αστοχιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	127
8.6 Μοντέλα με ρωγματωμένη βραχόμαζα και ρήγμα.....	128
8.6.1 Μετατοπίσεις	129
8.6.2 Διαρροή βραχόμαζας.....	131
8.6.3 Φόρτιση αγκυρίων	132
8.6.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	133
8.6.5 Έλεγχος αστοχιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	134
8.7 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης	135
8.7.1 Αποτελέσματα δοκιμών δυστροπίας του ρήγματος	135
8.7.2 Αποτελέσματα φόρτισης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	147

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Χάραξη Ιονίας Οδού	22
Εικόνα 2 : Θέση Σήραγγας Μακύνειας στη γενική χάραξη της Ιονίας Οδού	23
Εικόνα 3 : Ενδείξεις εσωτερικού ερπυσμού σε λεπτότερα στρώματα ψαμμίτη	27
Εικόνα 4 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017 βάθους 12.10 – 16.00m.....	32
Εικόνα 5 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017A βάθους 46.25 – 50.00m.....	32
Εικόνα 6 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017B βάθους 56.30 – 60.20m.....	33
Εικόνα 7 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 018 βάθους 15.70 – 19.70m.....	33
Εικόνα 8 : Πυρήνας γεώτρησης 209 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	34
Εικόνα 9 : Πυρήνας γεώτρησης 210 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	34
Εικόνα 10 : Πυρήνας γεώτρησης 211 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	34
Εικόνα 11 : Πυρήνας γεώτρησης 212 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	35
Εικόνα 12 : Πυρήνας γεώτρησης 214 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	35
Εικόνα 13 : Γραμμές μελέτης M1 και M2 κατά την Γεωφυσική Ανασκόπηση.....	39
Εικόνα 14 : Προσωρινή υποστήριξη	59
Εικόνα 15 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C ₂ στη Χ.Θ. 4+310,7 του δεξιού κλάδου ..	69
Εικόνα 16 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C _{1,2} στη Χ.Θ. 4+178 του δεξιού κλάδου ...	69
Εικόνα 17 : Έξοδος δεξιού κλάδου	70
Εικόνα 18 : Είσοδος αριστερού κλάδου	70
Εικόνα 19 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C _{1,2} στη Χ.Θ. 4+304 του αριστερού κλάδου	71
Εικόνα 20 : Έξοδος αριστερού κλάδου	71
Εικόνα 21 : Στάδια εκσκαφής.....	94
Εικόνα 22 : Αρχικές ρυθμίσεις του μοντέλου	95
Εικόνα 23 : Ρυθμίσεις πλέγματος.....	96
Εικόνα 24 : Εντατικό πεδίο εκσκαφής	97

Εικόνα 25 : Επιλογή αγκυρίων	98
Εικόνα 26 : Επιλογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	98
Εικόνα 27 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά βραχώμαζας A.....	99
Εικόνα 28 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά βραχώμαζας C1	100
Εικόνα 29 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ρήγματος.....	101
Εικόνα 30 : Τεχνικά χαρακτηριστικά αγκυρίων.....	102
Εικόνα 31 : Τεχνικά χαρακτηριστικά οπλισμένου σκυροδέματος.....	103
Εικόνα 32 : Στάδιο 1- Γεωστατικό πεδίο χωρίς παρεμβάσεις.....	105
Εικόνα 33 : Στάδιο 2- Αποτόνωση A φάσης του δεξιού κλάδου πριν την εκσκαφή της..	105
Εικόνα 34 : Στάδιο 3- Αποτόνωση A φάσης του αριστερού κλάδου πριν την εκσκαφή της	106
Εικόνα 35 : Στάδιο 4- Εκσκαφή A φάσης δεξιού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	106
Εικόνα 36 : Στάδιο 5- Εκσκαφή A φάσης αριστερού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	106
Εικόνα 37 : Στάδιο 6- Αποτόνωση B φάσης δεξιού κλάδου πριν την εκσκαφή της.....	107
Εικόνα 38 : Στάδιο 7- Αποτόνωση B φάσης αριστερού κλάδου πριν την εκσκαφή της...	107
Εικόνα 39 : Στάδιο 8- Εκσκαφή B φάσης δεξιού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	107
Εικόνα 40 : Στάδιο 9- Εκσκαφή B φάσης αριστερού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	108
Εικόνα 41 : Μοντέλο χωρίς ρωγματομένη μάζα μετά την εκσκαφή της A φάσης.....	115
Εικόνα 42 : Μοντέλο χωρίς ρωγματομένη μετά της εκσκαφή της B φάσης.....	115
Εικόνα 43 : Διαρροή βραχώμαζας A	117
Εικόνα 44 : Διαρροή βραχώμαζας C1.....	118
Εικόνα 45 : Φόρτιση αγκυρίων με χρήση βραχώμαζας A	118
Εικόνα 46 : Φόρτιση αγκυρίων με χρήση βραχώμαζας C1	119

Εικόνα 47 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος με χρήση βραχόμαζας A	120
Εικόνα 48 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας A	120
Εικόνα 49 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας A	121
Εικόνα 50 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος με χρήση βραχόμαζας C1	121
Εικόνα 51 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας C1 ..	122
Εικόνα 52 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας C1 ..	122
Εικόνα 53 : Μοντέλο με ρωγματομένη μάζα μετά την εκσκαφή της A φάσης.....	124
Εικόνα 54 : Μοντέλο με ρωγματομένη μάζα μετά την εκσκαφή της B φάσης.....	124
Εικόνα 55 : Διαρροή βραχόμαζας	125
Εικόνα 56 : Φόρτιση αγκυρίων	126
Εικόνα 57 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος.....	126
Εικόνα 58 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα	127
Εικόνα 59 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα	127
Εικόνα 60 : Μοντέλο με ρωγματομένη βραχόμαζα και ρήγμα μετά την εκσκαφή της A φάσης.....	129
Εικόνα 61 : Μοντέλο με ρωγματομένη βραχόμαζα και ρήγμα μετά την εκσκαφή της B φάσης.....	129
Εικόνα 62 : Χρήση της επιλογής αρχικής φόρτισης συνεχειών.....	131
Εικόνα 63 : Διαρροή βραχόμαζας	132
Εικόνα 64 : Αξονική φόρτιση αγκυρίων	132
Εικόνα 65 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος.....	133
Εικόνα 66 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα	133
Εικόνα 67 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα	134

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος (http://www.geo.auth.gr).....	24
Σχήμα 2 : Τυπική γεωλογική δομή ζώνης Γαβρόβου (http://www.geo.auth.gr).....	25
Σχήμα 3 : Γεωλογική μηκοτομή του αριστερού κλάδου της σήραγγας.....	30
Σχήμα 4 : Γεωλογική μηκοτομή του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	30
Σχήμα 5 : Κατανομή ερευνητικών γεωτρήσεων κατά μήκος του έργου (ISTRIA ID.D.T.P.050.A)	31
Σχήμα 6 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του αριστερού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA ID.D.T.L.1215.B).....	46
Σχήμα 7 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του δεξιού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA ID.D.T.L.056.A).....	46
Σχήμα 8 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του αριστερού κλάδου κατά την κατασκευή.....	47
Σχήμα 9 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του δεξιού κλάδου κατά την κατασκευή.....	48
Σχήμα 10 : Τυπική διατομή σήραγγας Μακύνειας (ISTRIA ID.D.T.S.1196.A)	58
Σχήμα 11 : Ποσοστά εμφάνισης πετρωμάτων ανά κλάδο σύμφωνα με τη μελέτη.....	77
Σχήμα 12 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC1,2 του αριστερού κλάδου της σήραγγας.....	79
Σχήμα 13 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC2 του αριστερού κλάδου της σήραγγας.....	79
Σχήμα 14 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSD του αριστερού κλάδου της σήραγγας.....	80
Σχήμα 15 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC1,2 του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	81
Σχήμα 16 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC2 του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	81

Σχήμα 17 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSD του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	82
Σχήμα 18 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSB του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	82
Σχήμα 19 : Ποσοστά χρήσης μεθόδων εκσκαφής ανάλογα με τη γεωλογική κατηγορία...	83
Σχήμα 20 : Μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν ανά κλάδο σύμφωνα με την κατασκευή	84
Σχήμα 21 : Ο συσχετισμός των τριών υποπρογραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμα Phase2.....	89
Σχήμα 22 : Σχεδιασμός της γεωμετρίας της δίδυμης σήραγγας Μακύνειας στο AutoCAD90	
Σχήμα 23 : Σχεδιασμός ισοδύναμης κυκλικής διατομής στο AutoCAD.....	91

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 211.....	36
Διάγραμμα 2 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 212.....	36
Διάγραμμα 3 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 214.....	37
Διάγραμμα 4 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης BT1-017	37
Διάγραμμα 5 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης BT1-017A	38
Διάγραμμα 6 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης BT1-017B	38
Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου E/E_0 με την ακτινική μετατόπιση στην οροφή της σήραγγας.....	112
Διάγραμμα 8 : Καμπύλη αποτόνωσης βραχόμαζας A.....	113
Διάγραμμα 9 : Καμπύλη αποτόνωσης βραχόμαζας C1.....	114
Διάγραμμα 10 : Μετατοπίσεις μοντέλου με χρήση βραχόμαζας A	116
Διάγραμμα 11 : Μετατοπίσεις μοντέλου με χρήση βραχόμαζας C1.....	116
Διάγραμμα 12 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων.....	125
Διάγραμμα 13 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την πρώτη δοκιμή.....	136
Διάγραμμα 14 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά τη δεύτερη δοκιμή	137
Διάγραμμα 15 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την τρίτη δοκιμή.....	139
Διάγραμμα 16 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την τέταρτη δοκιμή	140
Διάγραμμα 17 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την πέμπτη δοκιμή.....	142
Διάγραμμα 18 : Διαφοροποιήσεις μετατοπίσεων αριστερού κλάδου κατά τις δοκιμές....	143
Διάγραμμα 19 : Διαφοροποιήσεις μετατοπίσεων δεξιού κλάδου κατά τις δοκιμές.....	144
Διάγραμμα 20 : Ασκούμενες πιέσεις στο δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανάλογα με την κατηγορία βραχόμαζας και τον τύπο μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε	144

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Ακριβείς θέσεις αρχής και τέλους του έργου (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)..	23
Πίνακας 2 : Υπάρχουσες γεωτρήσεις (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	31
Πίνακας 3 : Νέες γεωτρήσεις (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009).....	31
Πίνακας 4 : Περιγραφή γεωλογικών κατηγοριών (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)	40
Πίνακας 5 : Μηχανικά χαρακτηριστικά ψαμμίτη (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009).....	40
Πίνακας 6 : Μηχανικά χαρακτηριστικά ιλυολίθου (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009).....	41
Πίνακας 7 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας A.....	42
Πίνακας 8 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας B	43
Πίνακας 9 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας C	44
Πίνακας 10 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας D.....	45
Πίνακας 11 : Ποσοστά και μήκη συνάντησης των γεωλογικών κατηγοριών σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)	45
Πίνακας 12 : Ποσοστά και μήκη συνάντησης των γεωλογικών κατηγοριών κατά την κατασκευή	47
Πίνακας 13 : Στάδια κατασκευής ανάλογα με την γεωτεχνική κατηγορία	50
Πίνακας 14 : Μηχανολογικός Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάνοιξη	50
Πίνακας 15 : Διατομές και πάχη προσωρινής υποστήριξης (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)52	
Πίνακας 16 : Προβλεπόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης αριστερού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009).....	52
Πίνακας 17 : Προβλεπόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης δεξιού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009).....	53
Πίνακας 18 : Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης ανά κατηγορία σύμφωνα με τη μελέτη ..	53
Πίνακας 19 : Προδιαγραφές υλικών προσωρινής υποστήριξης.....	54
Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά εκτοξευόμενου σκυροδέματος	56
Πίνακας 21 : Χαρακτηριστικά ηλώσεων (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)	56
Πίνακας 22 : Χαρακτηριστικά πλαισίων (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)	57

Πίνακας 23 : Χαρακτηριστικά δοκών προπορείας (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)	57
Πίνακας 24 : Χαρακτηριστικά ράβδων προπορείας (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)	58
Πίνακας 25 : Κατηγορίες υποστήριξης του αριστερού κλάδου κατά την κατασκευή	64
Πίνακας 26 : Κατηγορίες υποστήριξης του δεξιού κλάδου κατά την κατασκευή	65
Πίνακας 27 : Χρησιμοποιηθέντα μέτρα υποστήριξης ανά κατηγορία κατά την κατασκευή	65
Πίνακας 28 : Σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού της διατομής της σήραγγας ($E_0=18000$ MPa)	112
Πίνακας 29 : Σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού της διατομής της σήραγγας με βραχόμαζα C1	113
Πίνακας 30 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας A	123
Πίνακας 31 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας C1	123
Πίνακας 32 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	128
Πίνακας 33 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	128
Πίνακας 34 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	134
Πίνακας 35 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	135
Πίνακας 36 : Διαφοροποίηση της δυστροπίας του ρήγματος κατά τις τέσσερις δοκιμές.	135
Πίνακας 37 : Μετατοπίσεις μοντέλου κατά την αρχική δοκιμή.....	136
Πίνακας 38 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά τη δεύτερη δοκιμή..	138
Πίνακας 39 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά τη δεύτερη δοκιμή	138
Πίνακας 40 : : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την τρίτη δοκιμή ..	139
Πίνακας 41 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την τρίτη δοκιμή.....	140
Πίνακας 42 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την τέταρτη δοκιμή	141
Πίνακας 43 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την τέταρτη δοκιμή	141
Πίνακας 44 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την πέμπτη δοκιμή .	142

Πίνακας 45 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την πέμπτη δοκιμή..... 143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά για τη σήραγγα της Μακύνειας

Η σήραγγα της Μακύνειας είναι δίδυμη οδική σήραγγα με μέσο μήκος κάθε κλάδου περί τα 470m. Η σήραγγα έχει διεύθυνση Δ-Α και είναι μέρος της υλοποίησης του έργου της Ιονίας οδού «ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ ΙΟΝΙΑ ΟΔΟΣ ΑΠΟ ΑΝΤΙΡΡΙΟ ΜΕΧΡΙ ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΠΑΘΕ ΑΘΗΝΑ (Α/Κ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ) – ΜΑΛΙΑΚΟΣ (ΣΚΑΡΦΕΙΑ) ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΤΗΡΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΤΟΥ ΠΑΘΕ ΣΧΗΜΑΤΑΡΙ -ΧΑΛΚΙΔΑ». Βρίσκεται στο Νομό Αιτωλοακαρνανίας, στην περιοχή της Μακύνειας, στο δημοτικό διαμέρισμα Αντιρρίου. Συγκεκριμένα η θέση του έργου βρίσκεται 5km βορειοδυτικά της πόλης του Αντιρρίου. Η σήραγγα διέρχεται από ιλυόλιθους και ψαμμίτες με έντονη τεκτονική καταπόνηση σε κάποιες θέσεις. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο NATM. Η προσωρινή αντιστήριξη σχεδιάστηκε ώστε να αντιμετωπίσει το σύνολο των αναμενόμενων συνθηκών.

1.2 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη της διάνοιξης και της υποστήριξης της οδικής σήραγγας Μακύνειας που βρίσκεται στο νομό Αιτωλοακαρνανίας μεταξύ Μεσολογγίου και Αντιρρίου. Ύστερα από μία σύντομη εισαγωγή, όπου δίνονται βασικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και αναπτύσσεται το αντικείμενο της παρούσας, ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο, όπου παραθέτονται σε λεπτομέρεια τα γενικά στοιχεία για την σήραγγα Μακύνειας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την γεωλογία και τεκτονική της γενικότερης περιοχής του έργου. Επιπλέον γίνεται μια σύντομη αναφορά στον τρόπο εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας καθώς και στα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πέρας των εργασιών. Τέλος υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους παρακολούθησης του έργου κατά την κατασκευή. Στο κυρίως μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση και μελέτη μιας εκ των διατομών που προβλέπει ο μελετητής της σήραγγας κατά την διάνοιξη του έργου, με κατηγορίες βραχομάζας A και C1. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν σε καλές και μέτριες κατηγορίες βραχομάζας σε βάθος έως και 45m. Σκοπός της μελέτης μας ήταν η διερεύνηση της ευστάθειας της τοποθετημένης υποστήριξης.. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το

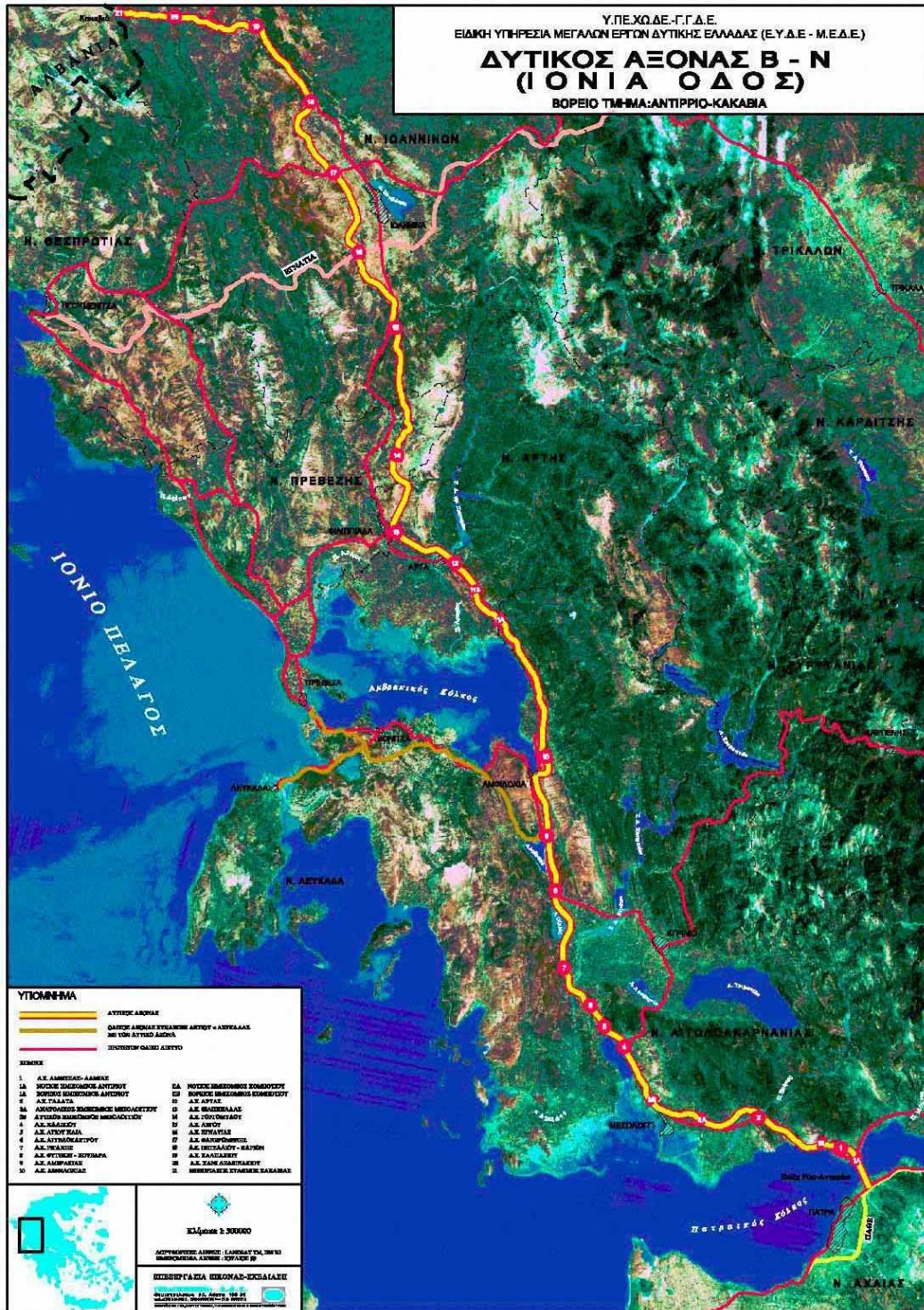
πρόγραμμα Phase2. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μετατοπίσεις και στους δύο κλάδους κάτω από διαφορετικές καταπονήσεις και αλλαγές στην βραχόμαζα γύρω από την εκσκαφή και έγινε σύγκριση με αυτές της μελέτης. Οι αναλύσεις αυτές είχαν ως στόχο την εκτίμηση με αναλυτικές μεθόδους των μετατοπίσεων που συμβαίνουν στη σήραγγα σε διάφορες συνθήκες. Από τα αποτελέσματα αυτά προέκυψε η δυσμενέστερη περίπτωση μετατοπίσεων για τις συγκεκριμένες κατηγορίες βραχόμαζας. Επίσης παρουσιάζεται εκτενώς ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος Phase2 και ο τρόπος ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Περιγράφεται πλήρως η μεθοδολογία δημιουργίας ενός μοντέλου, με βάση τις κατηγορίες που αναφέραμε, με το πρόγραμμα Phase2 και παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, μία σειρά από διαφοροποιήσεις του αρχικού μας μοντέλου, καταλήγουν σε εκτιμήσεις της επίδρασης του τρόπου προσομοίωσης στα αποτελέσματα του προγράμματος. Στο τελευταίο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από όλα όσα μελετήθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα σημαντικότερα γεωλογικά στοιχεία της σήραγγας Μακύνειας. Το σύνολο των στοιχείων που περιλαμβάνονται έχουν ληφθεί από την IR.D.T.069.A και IR.D.T.612.B Γεωλογική και Γεωτεχνική μελέτη αντίστοιχα της μελετητικής εταιρείας ISTRIA General Consulting LTD. Το έργο εκτελέστηκε στα πλαίσια κατασκευής της Ιονίας Οδού Αντίρριο - Ιωάννινα και βρίσκεται στο Νομό Αιτωλοακαρνανίας. Η υπό μελέτη σήραγγα έχει γενική διεύθυνση Δ – Α. Το μέγιστο υπερκείμενο ύψος της σήραγγας είναι 57 m περίπου. Η κατασκευή περιλαμβάνει δίδυμη σήραγγα μονής κατεύθυνσης οι κλάδοι της οποίας διανοίχθηκαν με τη μέθοδο NATM. Η σήραγγα είναι δίδυμη οδική και έχει μέσο μήκος κάθε κλάδου περίπου 470m εκ των οποίων περίπου τα 40m κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο εκσκαφής και επανεπίχωσης, ενώ τα υπόλοιπα κατασκευάστηκαν με υπόγεια διάνοιξη. Η σήραγγα διέρχεται από ιλυόλιθους και ψαμμίτες με έντονη τεκτονική καταπόνηση σε κάποιες θέσεις. Κατά μήκος της σήραγγας εκτελέστηκαν 5 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (άλλες 4 προϋπήρχαν). Επίσης από τον μελετητή έγινε λεπτομερής στατιστική ανάλυση των ευρημάτων των γεωτρήσεων

Ο αριστερός κλάδος της κύριας σήραγγας έχει μήκος 436.3m. Το Cut&Cover εισόδου έχει συνολικό μήκος 19m και το Cut&Cover εξόδου έχει μήκος 59,5m. Ο δεξιός κλάδος έχει μήκος 502,8m με τα Cut&Cover εισόδου και εξόδου να φτάνουν τα μήκη των 19,5m και 42.2m αντίστοιχα. Στις Εικόνες 1 και 2 που ακολουθούν δίνονται η γενική θέση του έργου, και φωτογραφικός χάρτης της περιοχής με τη χάραξη του έργου.



Εικόνα 1 : Χάραξη Ιονίας Οδού



Εικόνα 2 : Θέση Σήραγγας Μακύνειας στη γενική χάραξη της Ιονίας Οδού

Στον Πίνακα 1 φαίνονται αναλυτικά οι ακριβείς χιλιομετρικές θέσεις (Χ.Θ.) και τα μήκη κατασκευής των δύο κλάδων, όπως επίσης και των τμημάτων Cut&Cover.

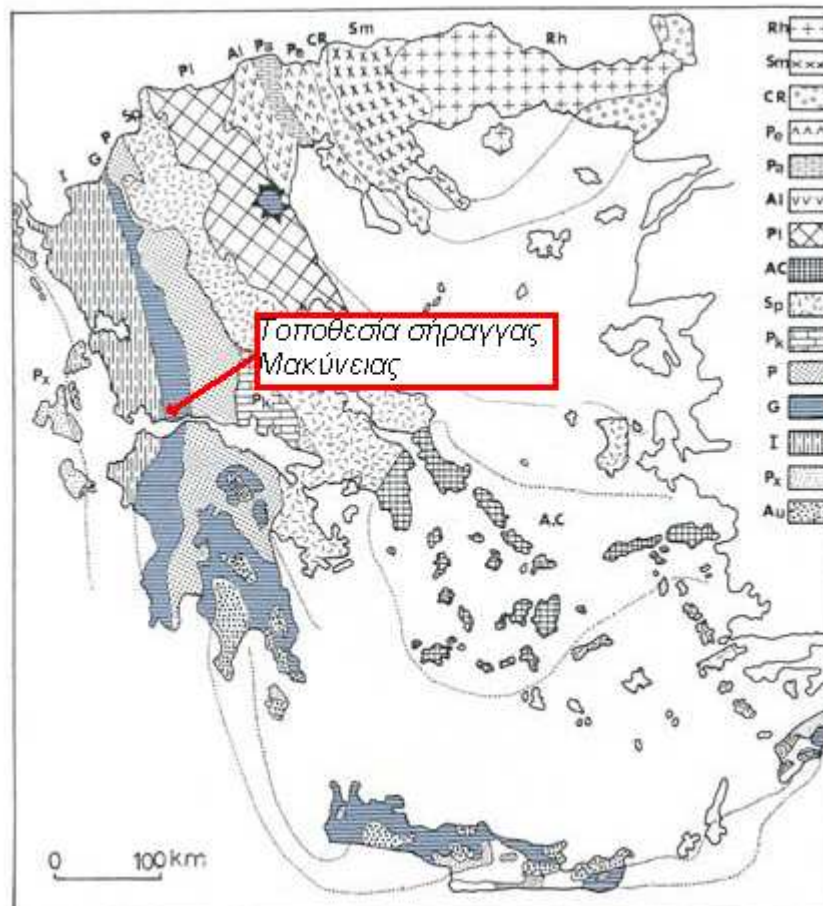
Πίνακας 1 : Ακριβείς θέσεις αρχής και τέλους του έργου (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)

	Χ.Θ. Αρχή Cut and Cover εισόδου	Χ.Θ. Τέλος Cut and Cover εισόδου	Μήκος (m) Cut and Cover εισόδου	Χ.Θ. αρχή υπογείου	Χ.Θ. τέλος υπογείου	Μήκος (m) υπογείου	Χ.Θ. Αρχή Cut and Cover εξόδου	Χ.Θ. Τέλος Cut and Cover εξόδου	Μήκος (m) Cut and Cover εξόδου
Δεξιός κλάδος	3+932,5	3+952	19,5	3+955	4+457,8	502,8	4+457,8	4+500	42,2
Αριστερός κλάδος	3+962	3+981	19	4+017.2	4+453.5	436.3	4+453,5	4+513	59,5

2.2 Γεωλογία

2.2.1 Γεωλογική Ζώνη περιοχής Μακύνειας

Στο Σχήμα 1 δίνεται ο Γεωλογικός χάρτης του Ελλαδικού χώρου με τη διάκριση των Φεωτεκτονικών ζωνών, καθώς και η θέση του έργου, το οποίο κατασκευάζεται στη γεωλογική ζώνη Γαβρόβου Τρίπολης (G)



Σχήμα 1: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος (<http://www.geo.auth.gr>)

Υπόμνημα:

Rh: Μάζα της Ροδόπης

Sm: Σερβομακεδονική μάζα

CR: Περιοδοτική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιανίας)

Ra: Ζώνη Πάικου

Al: Ζώνη Αλμοπίας) = Ζώνη Αξιού

PI: Πελαγονική ζώνη

Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη

Sp: Υποπελαγονική ζώνη

Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας

P: Ζώνη Πίνδου

G: Ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης

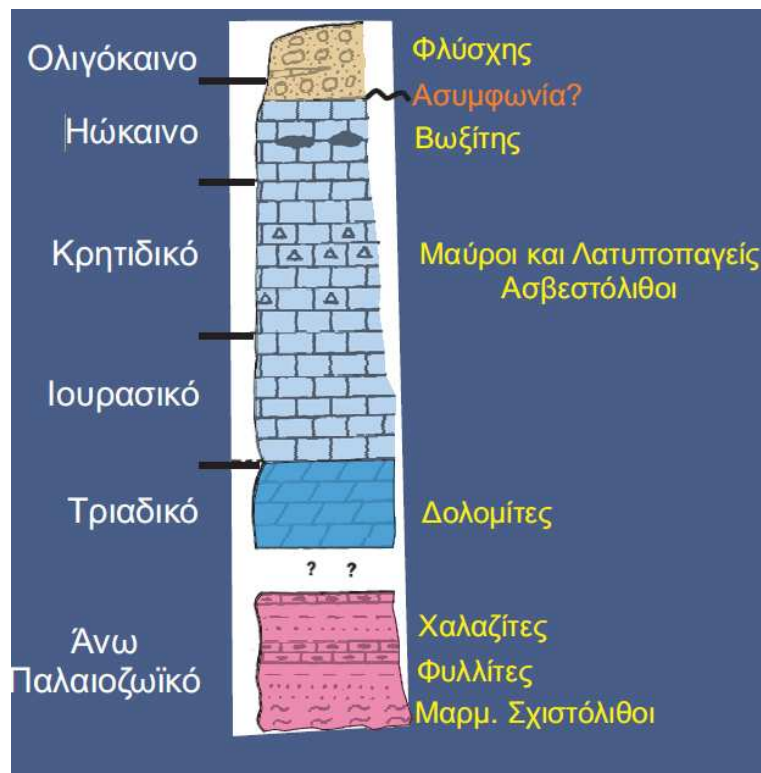
I: Ιόνιος ζώνη

Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια

Au: Ενότητα “Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι” πιθανόν της Ιονίου ζώνης

Η ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης τοποθετείται στην Απούλια Μικροπλάκα με τυπική ανθρακική ιζηματογένεση στους Αλπικούς χρόνους (Τριαδικό-Ηώκαινο). (βλ. Σχήμα 1 και Σχήμα 2)

Η ζώνη θεωρείται σχετικά αυτόχθονη, πάνω στην οποία έχει επωθηθεί σε μεγάλη κλίμακα το αλλόχθονο τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου. Αποτέλεσμα της γεωτεκτονικής τοποθέτησης των δύο ζωνών, είναι τα πετρώματα της Γαβρόβου να αποκαλύπτονται σε πολλές θέσεις υπό μορφή τεκτονικών παραθύρων. Τα στρώματα της ζώνης εμφανίζονται πτυχωμένα σε ανοικτές πτυχές με άξονες ΒΝ που δημιουργήθηκαν κατά την τελική φάση του Ολιγοκαίνου-Κάτω Μειοκαίνου. Η αλπική ανθρακική ιζηματογένεση ξεκινά στο Άνω Τριαδικό και συνεχίζεται σε όλο το Μεσοζωικό και Τριτογενές, μέχρι το Άνω Ηώκαινο. Στο Ανώτερο Ηώκαινο αρχίζει η απόθεση του φλύσχη που έληξε στο τέλος του Ολιγοκαίνου με την τελική φάση της πτύχωσης και την ανάδυση της ζώνης.



Σχήμα 2 : Τυπική γεωλογική δομή ζώνης Γαβρόβου (<http://www.geo.auth.gr>)

2.2.2 Γεωμορφολογία της περιοχής

Η περιοχή κατασκευής της σήραγγας χαρακτηρίζεται από λοφώδες ανάγλυφο σχηματισμών φλύσχη. Στο υδρογραφικό δίκτυο συμμετέχουν χείμαρροι με διεύθυνση ΒΝ και φορά ροής προς νότο. Το κεντρικό τμήμα του έργου διανοίχθηκε σε λοφώδη σχηματισμό με μέγιστο ύψος τα 190m.

Το κυριότερο τμήμα του έργου κατασκευάστηκε μέσα σε σχηματισμούς φλύσχη. Ο φλύσχη αποτελείται από μια σειρά από εναλλαγές στρωμάτων ιλυολίθων, ψαμμιτών, μαργών, ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών. Άλλοτε μπορεί να παρατηρείται ρυθμική εναλλαγή λεπτών στρωμάτων ιλυολίθων και ψαμμιτών ή κροκαλοπαγών κλπ, στην άλλη να υπερτερούν τα ιλυολιθικά υλικά, άλλοτε οι ψαμμίτες με στρώσεις μεγάλου πάχους, άλλοτε οι μάργες κλπ. Δηλαδή μπορεί να αποτελείται από διάφορα (κυρίως) κλαστικά ιζημάτα σε οποιαδήποτε αναλογία. Γενικά όταν υπερτερούν σε πάχος οι στρώσεις των ιλυολίθων όλος ο λιθολογικός σχηματισμός χαρακτηρίζεται από τις ιδιότητές τους (πλαστικότητα, υδατοστεγανότητα, συμπιεστότητα και τάση για κατολίπηση). Αντίθετα όταν η σειρά αποτελείται από παχιά στρώματα ψαμμιτών χαρακτηρίζεται από ευστάθεια των κλιτύων και από υψηλή αντοχή σε φορτία. Συνήθως τα στρώματα του φλύσχη είναι πτυχωμένα και επομένως τεκτονικά καταπονημένα (πολλαπλές ρωγμές, πολλαπλοί θρυμματισμοί κλπ.) και εγκλείουν υπολειμματικές τάσεις.

Στην περιοχή κατασκευής του έργου επικρατεί ο ψαμμίτης. Σύμφωνα με τη γεωλογική μελέτη του έργου οι γεωλογικές δομές του ψαμμίτη που συναντήθηκαν κατά τις εργασίες διάνοιξης της δίδυμης σήραγγας είναι:

1. Λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις, μεσόκοκκοι έως χονδρόκοκοι ψαμμίτες, γκρίζου χρώματος με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων (Ft.st)

Είναι στρώματα όπου επικρατεί ο ψαμμίτης, αναπτυσσόμενος σε μεγάλα πάχη, φτάνοντας μέχρι και τα 30m. Εμφανίζονται μέτρια ως ισχυρά διαστρωμένα με πάχος από 0,3 μέχρι και 1m. Πολύ συχνά η συνέχεια της λιθολογίας διακόπτεται από λεπτές παρεμβολές ιλυολίθου ή εναλλαγές λεπτοστρωματωδών φάσεων ψαμμίτη και ιλυολίθου των οποίων το πάχος δεν ξεπερνά το 1m. Αυτά τα λεπτότερα στρώματα μέσα στους πάγκους εμφανίζονται συμπιεσμένα με ενδείξεις εσωτερικού ερπυσμού συνήθως ενωμένα (βλ. Εικόνα 3). Αυτό το γεγονός δίνει τοπικά την εντύπωση ασυμφωνίας στρωμάτων λόγω διαφορών στις μετρήσεις των κλίσεων των στρωμάτων. Στην πραγματικότητα, αυτό οφείλεται στη διαφορετική συμπεριφορά των σχηματισμών κάτω από διαφορετικά πεδία

τάσεων που συναντώνται στην περιοχή λόγω της λιθολογίας. Σε πολλές περιπτώσεις ο ερπυσμός που παρατηρείται στο ασθενέστερο αλλά πιο πλαστικό στρώμα ιλυόλιθου προκαλεί ρωγματώσεις και ασυνέχειες σε μεγάλα τμήματα τα οποία δεν μπορούν να ακολουθήσουν αυτή την αλλαγή. Αυτές οι ρωγματώσεις, στις περισσότερες των περιπτώσεων χαρακτηρίζονται ως οφειλόμενες σε τεκτονισμό λόγω ετερογενούς ιζηματογένεσης διότι από ότι παρατηρήθηκε η συνέχειά τους διακόπτεται. Η αναδίπλωση του ιλυόλιθου ακολουθείται από ρωγμάτωση του ψαμμίτη η οποία διακόπτεται από τα υποκείμενα στρώματα.



Εικόνα 3 : Ενδείξεις εσωτερικού ερπυσμού σε λεπτότερα στρώματα ψαμμίτη
(ISTRIA IR.D.T.069.A)

2. Ιλυόλιθοι γκριζου έως γκριζοκάστανου χρώματος σε εναλλαγές με λεπτο-μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες (Ft,sl- st)

Είναι ένας σχηματισμός στον οποίο εναλλάσσονται στρώματα ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε πάχη 0,1 έως 0,2m. Σπανιότερα, εμφανίζονται παχύτερα στρώματα στο σχηματισμό όπου η μία από τις δύο φάσεις του φλύσχη επικρατεί στην περιοχή. Παρόλα αυτά, εμφανίζονται σπανιότερα σε αυτό το σχηματισμό δεδομένης της λεπτοστρωματώδους φύσης του ψαμμίτη η οποία ακολουθεί την παραμόρφωση του ιλυολιθικού στρώματος σε μεγαλύτερο ποσοστό. Επομένως, σε πολλές περιοχές τα στρώματα του σχηματισμού εμφανίζονται πτυχωμένα διατηρώντας όμως γενική βορειοανατολική κατεύθυνση. Από τις γεωτρήσεις πρόέκυψε ότι το πάχος της τομής του φλύσχη είναι μεταξύ 20 και 40m.

2.2.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Ο φλύσχη σαν λιθολογική ενότητα θεωρείται αδιαπέρατος σχηματισμός. Οι δυο λιθολογικές φάσεις του φλύσχη έχουν διαφορετικό πρωτογενές πορώδες και κατά συνέπεια παρουσιάζουν διαφορετική πρωτογενή περατότητα. Ενδεικτικά στη συγκεκριμένη περίπτωση η περατότητα του ιλυόλιθου κυμαίνεται από 10^{-6} έως 10^{-4} cm/sec, ενώ του ψαμμίτη λόγω του μεγαλύτερου πορώδους κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-4} cm/sec. Παρόλα αυτά δεν είναι εύκολο να διαχωριστούν στην σήραγγα της Μακύνειας οι διαφορετικές περατότητες των δύο φάσεων του φλύσχη σε συγκεκριμένα τμήματα. Η περατότητα που χαρακτηρίζει το σχηματισμό του φλύσχη, είναι η δευτερογενής που αναπτύσσεται λόγω επιφανειών στρώσης, διακλάσεων και ρηγμάτων και γενικότερα ασυνεχειών, όταν αυτές δεν είναι πληρωμένες. Οι εναλλαγές των ψαμμιτών και ιλυολίθων του φλύσχη, είναι πιθανό να οδηγήσουν στη δημιουργία τοπικών υδροφόρων οριζόντων υπό πίεση, μικρής δυναμικότητας. Στην κατασκευή της σήραγγας, οι οπές αποστράγγισης είναι απαραίτητες για την εκτόνωση των πιέσεων πόρων σε περίπτωση που συναντηθεί επικρεμάμενος υδροφόρος. Σε περιοχές όπου τα ρήγματα τέμνουν τη χάραξη, είναι πιθανόν να παρουσιάζεται μεγαλύτερη εισροή υδάτων, λόγω επιφανειακής κατείδυσης. Γενικά κατά μήκος της χάραξης από πηγάδια και υδρογεωτρήσεις που έχουν μελετηθεί σε προηγούμενη φάση δεν καταγράφηκε στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο επίπεδο της σήραγγας. Τα πιεζόμετρα που τοποθετήθηκαν στην παρούσα φάση δεν έδωσαν στάθμη ύδατος. Από τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει ότι η σήραγγα θα διανοιχτεί υπό στεγνές

συνθήκες με πιθανή εμφάνιση τοπικά υγρασίας έως και πολύ μικρής παροχής επικρεμάμενος υδροφόρος ορίζοντας.

2.2.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής της κατασκευής του έργου

1. Σχηματισμός Ft,st που δομεί τον αρχαιολογικό χώρο της Μακύνειας,

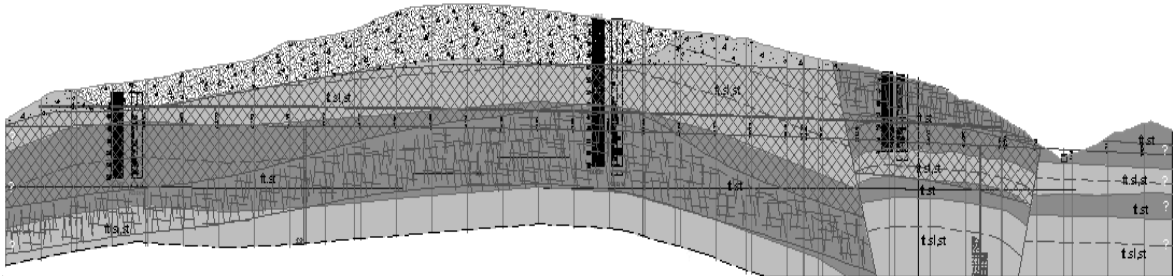
Είναι ένα ογκώδες τμήμα λεπτοστρωματώδους ψαμμίτη του οποίου η επιφάνεια εμφανίζεται διαταραγμένη σε τετραγωνικά κομμάτια μάζας καθορισμένα από κάθετες επιφάνειες στρωσιγένειας και δύο οικογένειες ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες είναι κενές ή μερικώς πληρωμένες με αποσαθρωμένο υλικό.

2. Σχηματισμός Ft,sl-st, που εντοπίζεται ακριβώς κάτω από τον ψαμμίτη.

Αυτός ο συγκεκριμένος σχηματισμός εμφανίζεται ως το ανώτατο στρώμα στο μεγαλύτερο κομμάτι του δεξιού κλάδου. Αποτελείται κυρίως από ιλυόλιθο με σποραδικές λεπτές παρεμβολές ψαμμίτη. Εμφανίζεται σχιστώδης, πιθανόν λόγω εσωτερικού ερπυσμού και γι αυτό το λόγο φαίνεται ιδιαίτερα αποσαθρωμένος επιφανειακά. Εξαιτίας αυτής της αποσάθρωσης, όπως παρατηρείται σε φυσικά και τεχνητά πρνή, δημιουργούνται χαρακτηριστικές δομές υποσκαφής του ιλυολίθου με πιθανή κατολίσθηση υπερκείμενων τεμαχίων ψαμμίτη.

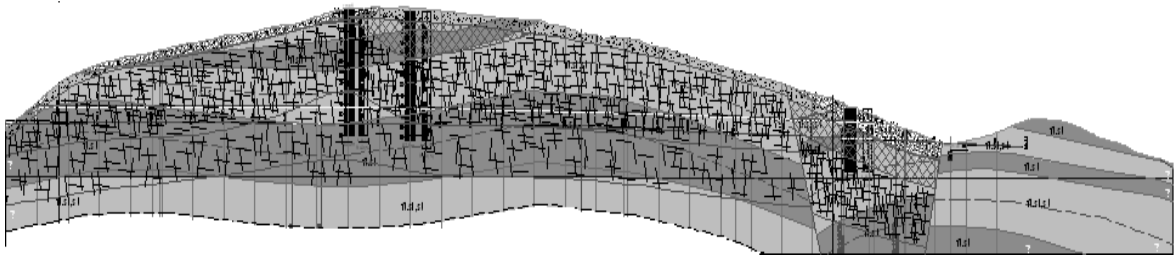
Αυτός ο συγκεκριμένος σχηματισμός συναντήθηκε στην έξοδο του δεξιού κλάδου και στο δάπεδο της εξόδου του αριστερού κλάδου. Το πάχος του σχηματισμού αυτού είναι περίπου 30m ενώ προς την έξοδο φθάνει περίπου τα 15m λόγω της ζώνης αποσάθρωσης.

Στα Σχήματα Σχήμα 3 και Σχήμα 4 δίνεται η γεωλογική μηκτομή των δύο κλάδων της σήραγγας και των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτούς.



Σχήμα 3 : Γεωλογική μηκτομή του αριστερού κλάδου της σήραγγας

(ISTRIA ID.D.T.L051.A)



Σχήμα 4 : Γεωλογική μηκτομή του δεξιού κλάδου της σήραγγας

(ISTRIA ID.D.T.L052.A)



2.3 Γεωτρήσεις

Για την εκτίμηση των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή της κατασκευής του έργου χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από υπάρχουσες γεωτρήσεις. Πιο

συγκεκριμένα συλλέχτηκαν στοιχεία από πέντε γεωτρήσεις στις χλιομετρικές θέσεις που φαίνονται στον Πίνακα Πίνακας 2.

Πίνακας 2 : Υπάρχουσες γεωτρήσεις (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

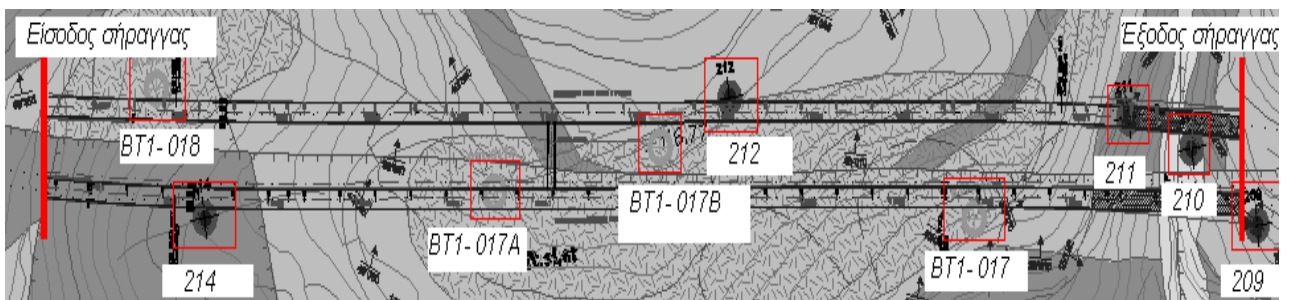
Χ.Θ.	Ημερομηνίες διεξαγωγής	Ονομασία Γεώτρησης	Βάθος (m)
3+867	21/1/05- 27/1/05	209	25
3+882	28/1/05 – 1/2/05	210	25
3+922	2/2/05 – 7/2/05	211	25
4+147	24/1/05 – 8/2/05	212	50
4+437	8/2/05 – 16/2/05	214	35

Επίσης έγιναν τέσσερις νέες γεωτρήσεις για καλύτερη απεικόνιση του υπεδάφους στις χλιομετρικές θέσεις που φαίνονται στον Πίνακα Πίνακας 3.

Πίνακας 3 : Νέες γεωτρήσεις (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

Χ.Θ.	Ημερομηνίες διεξαγωγής	Ονομασία Γεώτρησης	Βάθος (m)
4+004	16/10/07-18/10/07	BT1-017	40
4+185	2/10/07-18/10/07	BT1-017B	60
4+276	4/11/07-8/11/07	BT1-017A	60
4+470	01/11/07-03/11/07	BT1-018	30

Όλες οι γεωτρήσεις κατά μήκος της δίδυμης σήραγγας φαίνονται στο Σχήμα Σχήμα 5.



Σχήμα 5 : Κατανομή ερευνητικών γεωτρήσεων κατά μήκος του έργου (ISTRIA ID.D.T.P.050.A)

Ενδεικτικές εικόνες των πυρήνων των γεωτρήσεων που αντιστοιχούν στα βάθη από τα οποία διέρχεται η σήραγγα φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 4 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017 βάθους 12.10 – 16.00m
(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 5 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017A βάθους 46.25 – 50.00m
(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 6 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 017B βάθους 56.30 – 60.20m
(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 7 : Πυρήνας γεώτρησης BT1 – 018 βάθους 15.70 – 19.70m
(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 8 : Πυρήνας γεώτρησης 209 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 9 : Πυρήνας γεώτρησης 210 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 10 : Πυρήνας γεώτρησης 211 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)



Εικόνα 11 : Πυρήνας γεώτρησης 212 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

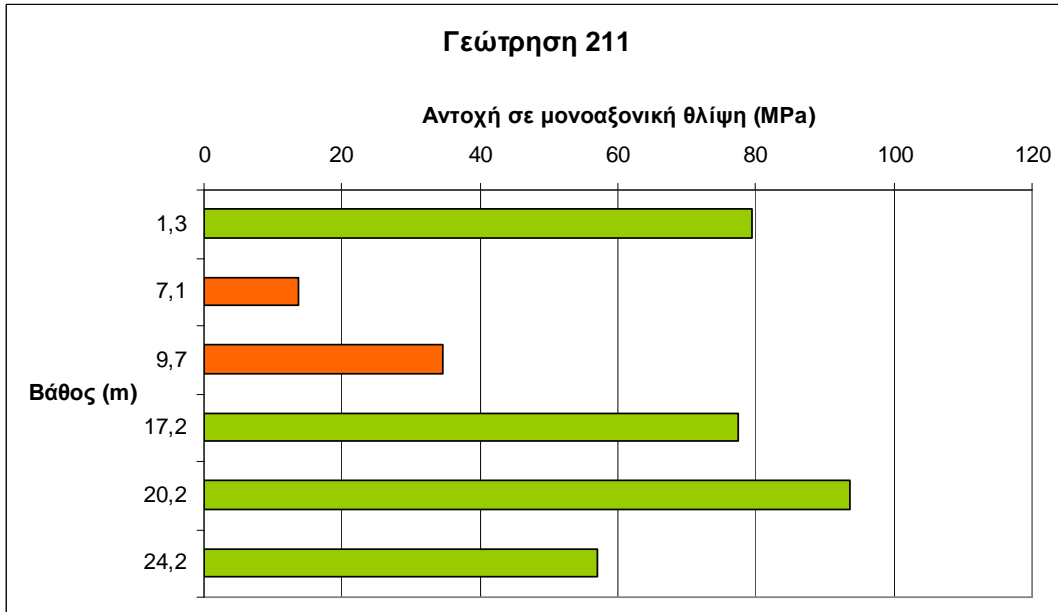


Εικόνα 12 : Πυρήνας γεώτρησης 214 (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

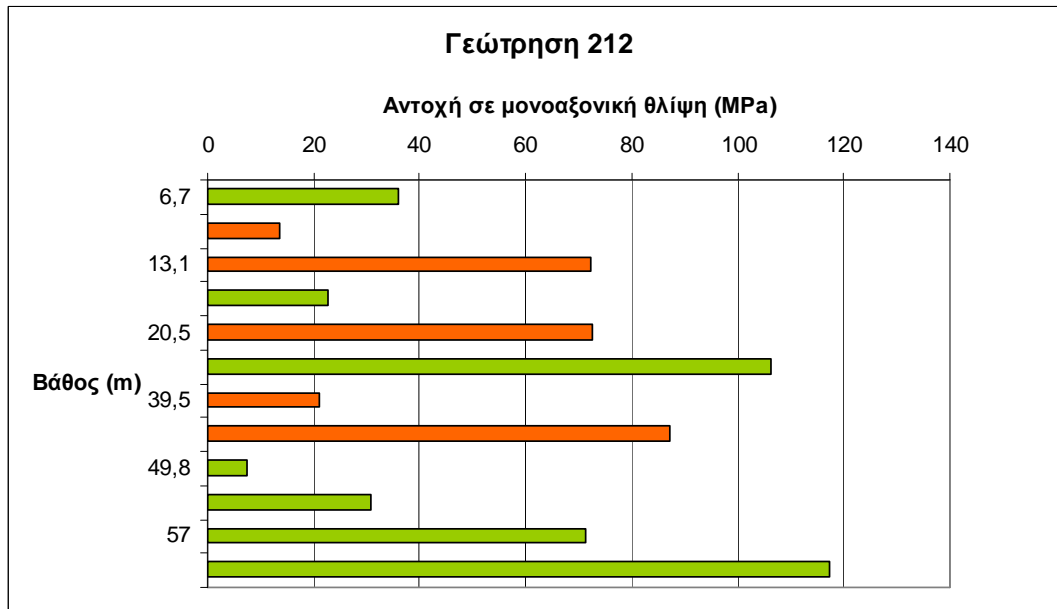
2.4 Εργαστηριακές Δοκιμές

Τα δείγματα των γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας. Εργαστηριακές έρευνες έγιναν σε δοκίμια των νέων γεωτρήσεων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και τα δεδομένα των ήδη υπαρχόντων εργαστηριακών ερευνών από τις παλιές γεωτρήσεις. Παρακάτω φαίνονται τα συνοπτικά αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών όλων των δοκιμών από όλες τις υπάρχουσες γεωτρήσεις:

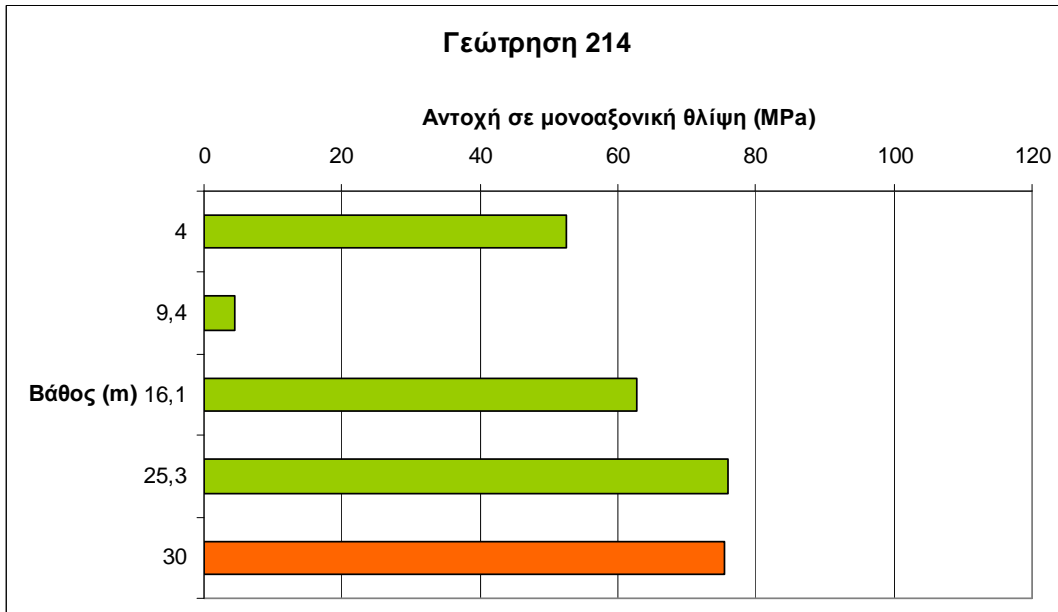
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Σε όλα τα παρακάτω Διαγράμματα (Διαγράμματα Διάγραμμα 1 έως Διάγραμμα 6) τα δοκίμια ψαμμίτη παρουσιάζονται με πράσινο και του ιλυολίθου με πορτοκαλί χρώμα.



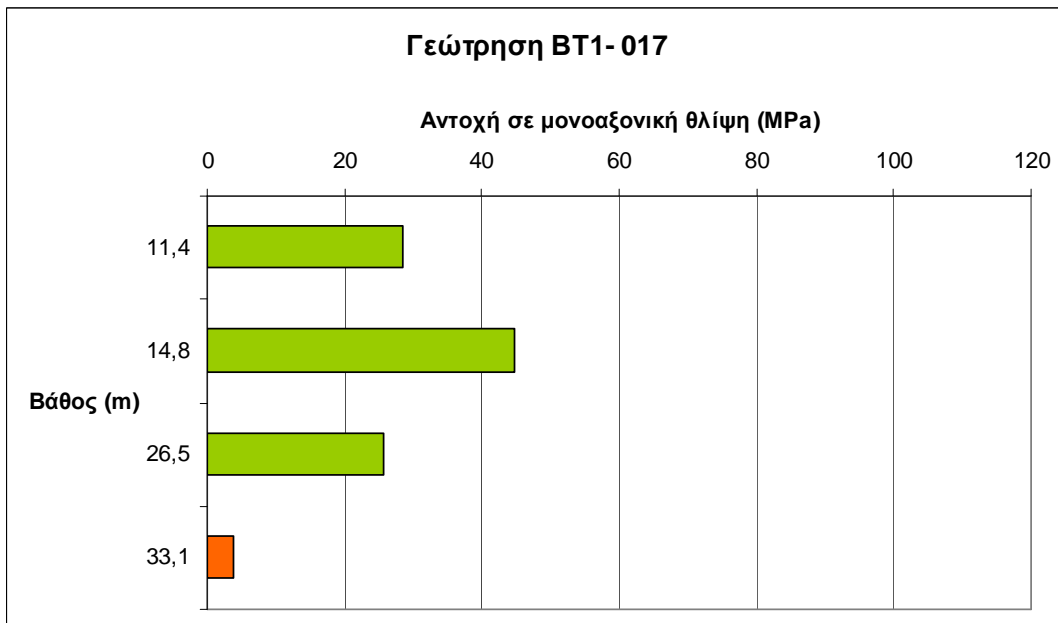
Διάγραμμα 1 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 211



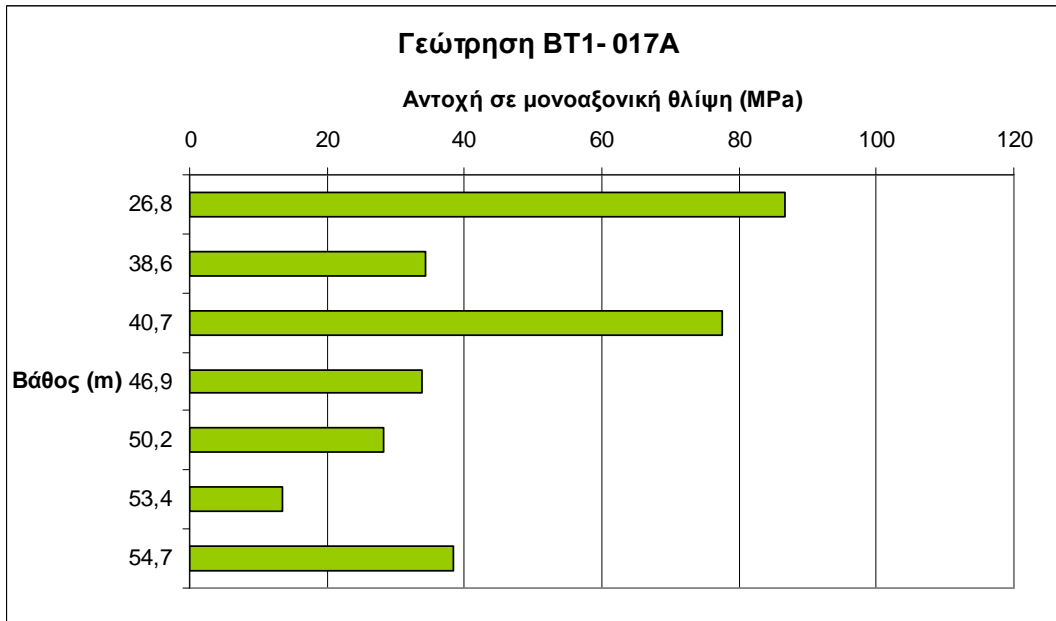
Διάγραμμα 2 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 212



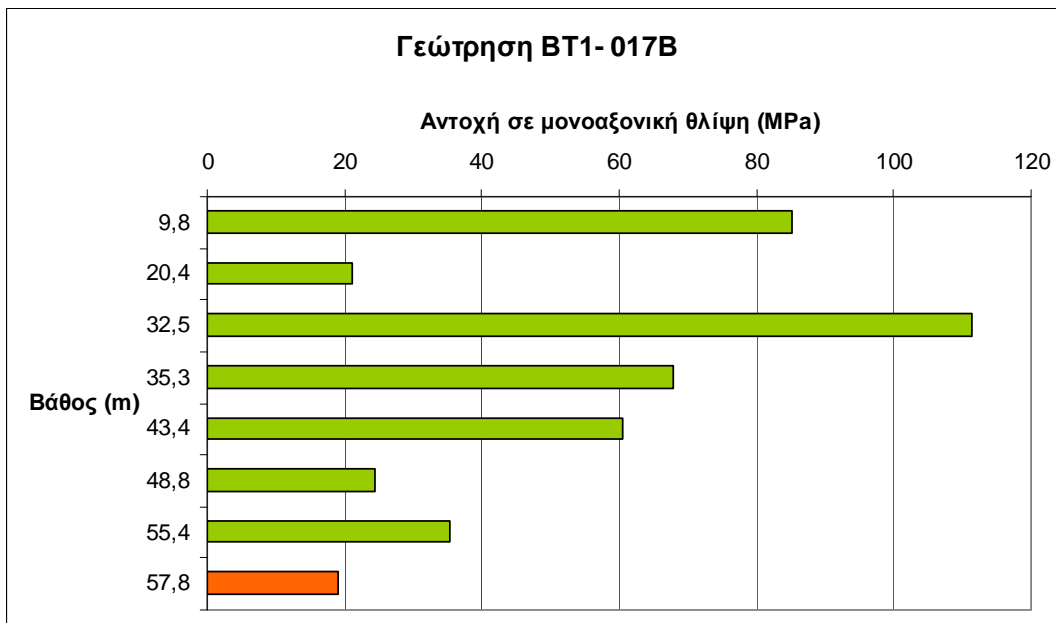
Διάγραμμα 3 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης 214



Διάγραμμα 4 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης ΒΤ1-017



Διάγραμμα 5 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης BT1-017A



Διάγραμμα 6 : Αποτελέσματα δοκιμών στα δοκίμια της γεώτρησης BT1-017B

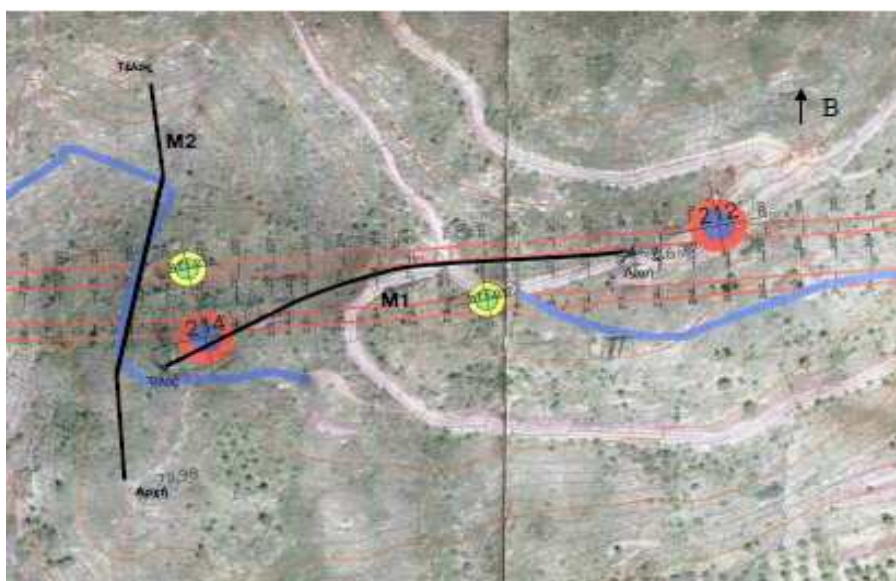
2.5 Γεωφυσική Έρευνα

Εκτός από τις ερευνητικές γεωτρήσεις χρησιμοποιήθηκαν και άλλες μέθοδοι για το χαρακτηρισμό των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή κατασκευής του έργου.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε Γεωφυσική Διασκόπηση κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας της Μακύνειας. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (Διευθυντής του εργαστηρίου: Καθηγητής Βαφείδης Αντώνιος).

Η γεωφυσική έρευνα περιλαμβάνει δύο γραμμές μελέτης M1 και M2, όπως φαίνεται και στην Εικόνα Εικόνα 13, συνολικού μήκους 520m, στις οποίες εφαρμόστηκε η μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής μελέτης, η γραμμή μελέτης M1, μήκους 260m διασχίζει μέρος της σήραγγας, ενώ οι γεωλογικοί σχηματισμοί, σύμφωνα με τις γεωτρήσεις είναι εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών. Στην γραμμή μελέτης M1, υπάρχει η εμφάνιση πιθανού ρήγματος. Στην γεωηλεκτρική τομή M1 παρατηρήθηκαν δύο κύριες γεωηλεκτρικές ζώνες που συνάντησε η σήραγγα, : ιλυολίθους με εναλλαγές ψαμμιτών και ψαμμίτες με εναλλαγές ιλυολίθων. Στο μέσον της γραμμής μελέτης παρατηρήθηκε μία ζώνη πολύ χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία παραπέμπει σε ρήγμα, επαφή ή ασυνέχεια. Στην γεωηλεκτρική τομή M2, η οποία είναι σχεδόν κάθετη με την M1, παρατηρήθηκε μετάβαση υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε χαμηλότερες από νότο προς βορρά, που αποδίδεται κατά αντιστοιχία σε μετάβαση ψαμμιτών σε ιλυολίθους.



Εικόνα 13 : Γραμμές μελέτης M1 και M2 κατά την Γεωφυσική Ανασκόπηση

(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

3.1 Γεωλογικές κατηγορίες

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και των εργαστηριακών δοκιμών δημιουργήθηκαν τέσσερις γεωτεχνικές κατηγορίες για την καλύτερη περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους στην περιοχή κατασκευής του έργου.

Οι κατηγορίες αυτές δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 : Περιγραφή γεωλογικών κατηγοριών (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)

Κατηγορία	Περιγραφή
Έδαφος	Αμμώδης αργιλιώδης και αργιλόδης άμμος, με τεμάχια ψαμμιτικής-ιλυολιθικής σύστασης (μανδύας αποσάθρωσης του ψαμμίτη και υλικά κατολισθήσεων)
A	Ελαφρά κερματισμένος ψαμμίτης και ιλύολιθος με μέτριο βαθμό αποσάθρωσης
B	Μέτρια κατακερματισμένος ψαμμίτης και ιλύολιθος, με μέτριο βαθμό αποσάθρωσης
C	Κατακερματισμένος ψαμμίτης και ιλύολιθος με μεγάλο βαθμό αποσάθρωσης
D	Κατακερματισμένος αποσαθρωμένος- εδαφοποιημένος ψαμμίτης και ιλύολιθος

Επίσης από τις εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές προέκυψαν τα στοιχεία των παρακάτω πινάκων (Πίνακας 5 και Πίνακας 6) για τις μηχανικές ιδιότητες των δύο κύριων φάσεων που συναντήθηκαν:

Πίνακας 5 : Μηχανικά χαρακτηριστικά ψαμμίτη (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)

Δοκιμή	Παράμετρος	Διακύμανση τιμής	Πλήθος τιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Μονοαξονική θλίψη	σ_c (MPa)	19.08 - 117.3	28	73	23.78
	E_{ψ} (GPa)	17.263 – 50	4	32.4	13.46
	ν	0.113 – 0.4	4	0.2	0.13
Δείκτης αντοχής	$I_{50(\alpha)}$ (PMa)	0.368– 10.25	12	5.2	2.64
	$I_{50(d)}$ (MPa)	1.14 – 8.9	18	5.4	2.28

σημειακής φόρτισης					
Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης	σ_T (MPa)	1.87 – 11.6	9	7.4	3.45
Παράμετροι αντοχής ασυνεχειών	c_{app} (kPa)	79 – 307.6	2	193.3	161.64
	ϕ_P (deg)	17 - 42	2	29.5	17.68

Πίνακας 6 : Μηχανικά χαρακτηριστικά ιλυολίθου (ISTRIA IR.D.T.069.A 2009)

Δοκιμή	Παράμετρος	Διακύμανση τιμής	Πλήθος τιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Μονοαξονική θλίψη	σ_c (MPa)	13,6 – 38,29	10	28,7	7,87
	E_w (GPa)	-	-	-	-
	ν	-	-	-	--
Δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης	$I_{50}(\alpha)$ (PMa)	0,035 – 4,04	13	1,2	1,23
	$I_{50}(d)$ (MPa)	0,04 – 2,06	12	0,7	0,61

Πιο αναλυτικά:

3.2 Κατηγορία βραχώμαζας A

Η κατηγορία βραχώμαζας A σχηματίζεται από υγιή ψαμμίτη και ιλυόλιθο σε εναλλαγές, χωρίς ιδιαίτερα σημάδια αποσάθρωσης. Εμφανίζεται ελαφρά κερματισμένη με ασυνέχειες παρακατακόρυφες. Η βραχώμαζα αποτελείται κυρίως από παχυστρωματώδη ψαμμίτη πάχους από 25 έως 30m. Ο ψαμμίτης χωρίζεται τοπικά από μικρού πάχους ενστρώσεις ιλυόλιθου περίπου 1 έως 2cm. Η βραχώμαζα δεν είναι σημαντικά τεκτονισμένη και είναι ελαφρά κερματισμένη με RQD 50-75%. Σε αυτό το τμήμα συναντώνται δύο κύριες οικογένειες ασυνεχειών και το επίπεδο στρώσης. Οι κύριες ασυνέχειες είναι διακλάσεις με κλίση / διεύθυνση κλίσης (84/158) και (86/265) και η στρώση με (24/060). Οι διακλάσεις έχουν εμμονή 5-10m και >10m, είναι επίπεδες έως κυματοειδείς, τραχείες με χαρακτηριστικά ελαφριάς εξαλλοίωσης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά τόπους παρουσιάζονται ζώνες διάτμησης μήκους 0.5 – 1m με εμφανή σημάδια αποσάθρωσης όπου το υλικό εμφανίζεται πιο ιλυολιθικό. Στον Πίνακα Πίνακας 7 παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας A.

Πίνακας 7 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας Α

(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΗ
Φαινόμενο βάρος	$\gamma = 25,8 - 26,5 \text{ KN/m}^3$
Μονοαξονική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ci} = 30 \text{ (ιλυόλιθος) - } 70 \text{ (ψαμμίτης) MPa}$
Εφελκυστική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ti} = 6 - 11 \text{ KPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας δοκιμίου βράχου	$E = 30 - 32 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson δοκιμίου πετρώματος	$\nu = 0,3$
Q	4,16 – 25
RMR _{basic}	56 – 71
RMR	51 – 66
GSI	55 - 65
Αντοχή βραχόμαζας	$\sigma_{cm} = 8 - 10 \text{ MPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας	$E_{cm} = 15 - 20 \text{ GPa}$
Συνοχή βραχόμαζας	$c = 1 - 1,5 \text{ MPa}$
Γωνία διατμητικής αντοχής βραχόμαζας	$\varphi = 50 - 55^{\circ}$
Φαινόμενη συνοχή ασυνεχειών	$c_d = 0,03 - 0,08 \text{ MPa}$
Γωνία τριβής ασυνεχειών	$\varphi_p = 28 - 35^{\circ}$
Περατότητα βραχόμαζας	$K = 10^{-6} - 10^{-4} \text{ cm/sec}$

3.3 Κατηγορία βραχόμαζας Β

Η κατηγορία βραχόμαζας Β σχηματίζεται από ψαμμίτη και ιλυόλιθο μέσης αντοχής με μέτρια αποσάθρωση, με τον ψαμμίτη να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές των παραμέτρων. Στην κατηγορία αυτή άλλοτε υπερτερεί ο ψαμμίτης και άλλοτε ο ιλυόλιθος. Η βραχόμαζα παρουσιάζεται μερικώς διακλασμένη με ασυνέχειες παρακατακόρυφες με RQD 25-50% λόγω της εγγύτητας της ζώνης διάτμησης που διατρέχει παράλληλα την σήραγγα στον αριστερό κλάδο. Σε αυτό το τμήμα συναντώνται δύο κύριες οικογένειες ασυνεχειών και το επίπεδο στρώσης. Οι κύριες ασυνέχειες είναι διακλάσεις με κλίση / διεύθυνση κλίσης (84/158) και (86/265) και η στρώση με (24/060). Οι διακλάσεις έχουν εμμόνη 5-10m και >10m, είναι επίπεδες, λείες έως μετρίως τραχείες. Και σ' αυτήν την κατηγορία κατά τόπους παρουσιάζονται ζώνες διάτμησης μήκους 0.5-1m με εμφανή σημάδια αποσάθρωσης όπου το υλικό εμφανίζεται πιο ιλυολιθικό. Στον Πίνακα Πίνακας 8 παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας Β.

Πίνακας 8 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας Β

(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΗ
Φαινόμενο βάρος	$\gamma = 25,8 - 26,5 \text{ KN/m}^3$
Μονοαξονική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ci} = 30$ (ιλυόλιθος) – 70 (ψαμμίτης) MPa
Εφελκιστική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ti} = 6 - 11 \text{ KPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας δοκιμίου πετρώματος	$E = 30 - 32 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson δοκιμίου βράχου	$\nu = 0,3$
Q	1 – 4,16
RMR _{basic}	40 – 55
RMR	35 – 50
GSI	35 - 50
Αντοχή βραχόμαζας	$\sigma_{cm} = 5,5 - 7,5 \text{ MPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας	$E_{cm} = 4 - 6 \text{ GPa}$
Συνοχή βραχόμαζας	$c = 0,8 - 1,2 \text{ MPa}$
Γωνία διατμητικής αντοχής βραχόμαζας	$\phi = 45 - 50^0$
Φαινόμενη συνοχή ασυνεχειών	$c_d = 0,03 - 0,08 \text{ MPa}$
Γωνία τριβής ασυνεχειών	$\phi_p = 27 - 31^0$
Περατότητα βραχόμαζας	$K = 10^{-6} - 10^{-4} \text{ cm/sec}$

3.4 Κατηγορία βραχόμαζας C

Η κατηγορία βραχόμαζας C σχηματίζεται από αποσαθρωμένο κατακερματισμένο ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη εμφανώς διαταραγμένο – κατακερματισμένο με RQD 10- 25%, χαμηλής έως πολύ χαμηλής αντοχής, προϊόν της ζώνης διάτμησης που σχηματίζεται εκατέρωθεν του ρήγματος. Σε αυτό το τμήμα συναντώνται δύο κύριες οικογένειες ασυνεχειών και το επίπεδο στρώσης. Οι κύριες ασυνέχειες είναι διακλάσεις με κλίση / διεύθυνση κλίσης (84/158) και (86/265) και η στρώση με (24/060). Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι επίπεδες, λείες και τοπικά πληρωμένες με αργιλοαμμώδες υλικό. Η απόσταση των ασυνεχειών εμφανίζεται μικρή, της τάξης των εκατοστών. Στον

Πίνακας 9 παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας C.

Πίνακας 9 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας C
(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΗ
Φαινόμενο βάρος	$\gamma = 25,8 - 26,5 \text{ KN/m}^3$
Μονοαξονική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ci} = 20 \text{ (ιλυόλιθος) - } 50 \text{ (ψαμμίτης) MPa}$
Εφελκιστική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ti} = 2,5 - 6,25 \text{ KPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας δοκιμίου βράχου	$E = 18 - 20 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson δοκιμίου πετρώματος	$\nu = 0,25$
Q	0,04 – 0,18
RMR _{basic}	27 – 40
RMR	22 – 35
GSI	25 – 35
Αντοχή βραχόμαζας	$\sigma_{cm} = 2,7 - 3,5 \text{ MPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας	$E_{cm} = 1 - 2,5 \text{ GPa}$
Συνοχή βραχόμαζας	$c = 0,3 - 0,6 \text{ MPa}$
Γωνία διατμητικής αντοχής βραχόμαζας	$\phi = 40 - 45^0$
Φαινόμενη συνοχή ασυνεχειών	$c_d = 0,03 - 0,08 \text{ MPa}$
Γωνία τριβής ασυνεχειών	$\phi_p = 25 - 27^0$
Περατότητα βραχόμαζας	$K = 10^{-6} - 10^{-4} \text{ cm/sec}$

3.5 Κατηγορία βραχόμαζας D

Η κατηγορία βραχόμαζας D σχηματίζεται από αποσαθρωμένο κατακερματισμένο ιλυόλιθο και ψαμμίτη εμφανώς διαταραγμένο – κατακερματισμένο με RQD 0-10%, χαμηλής έως πολύ χαμηλής αντοχής στη στενή ζώνη των στομιών. Τα χαμηλά υπερκείμενα έχουν ως αποτέλεσμα ο σχηματισμός να παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αποσάθρωσης και αποδόμησης λόγω της άμεσης επαφής του με τα καιρικά φαινόμενα. Ο ιλυόλιθος σε αυτή τη γεωτεχνική ενότητα εμφανίζεται εδαφοποιημένος. Σε αυτό το τμήμα

συναντώνται δύο κύριες οικογένειες ασυνεχειών και το επίπεδο στρώσης. Οι κύριες ασυνέχειες είναι διακλάσεις με κλίση / διεύθυνση κλίσης (84/158) και (86/265) και η στρώση με (24/060). Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι επίπεδες, λείες όπου εμφανίζεται δομή βραχόμαζας. Στον

Πίνακας 10 παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας D.

Πίνακας 10 : Παράμετροι σχεδιασμού γεωτεχνικής ενότητας D

(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΗ
Φαινόμενο βάρος	$\gamma = 22 - 23 \text{ KN/m}^3$
Μονοαξονική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ci} = 10$ (ιλυόλιθος) – 20 (ψαμμίτης) MPa
Εφελκιστική αντοχή δοκιμίου πετρώματος	$\sigma_{ti} = 0,3 - 2,5 \text{ KPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας δοκιμίου πετρώματος	$E = 3 - 8 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson δοκιμίου βράχου	$\nu = 0,25$
Q	<0,01
RMR _{basic}	20 – 29
RMR	15 – 24
GSI	15 – 25
Αντοχή βραχόμαζας	$\sigma_{cm} = 0,7 - 1 \text{ MPa}$
Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας	$E_{cm} = 0,1 - 0,5 \text{ GPa}$
Συνοχή βραχόμαζας	$c = 0,03 - 0,05 \text{ MPa}$
Γωνία διατμητικής αντοχής βραχόμαζας	$\varphi = 35 - 40^0$
Φαινόμενη συνοχή ασυνεχειών	$c_d = 0,03 - 0,08 \text{ MPa}$
Γωνία τριβής ασυνεχειών	$\varphi_p = 25 - 27^0$

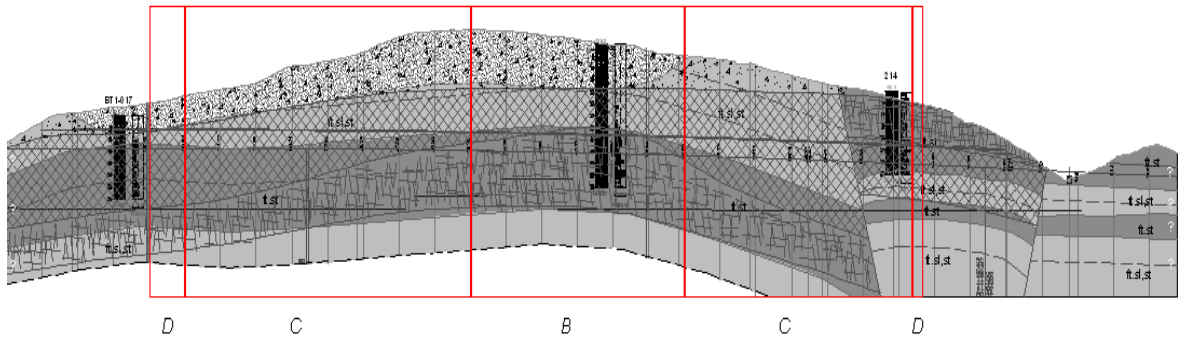
Το ποσοστό εμφάνισης των κατηγοριών βραχομάζας εκτιμήθηκε από τον μελετητή του έργου ανάλογα με τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του πετρώματος. Σύμφωνα με τις πρώτες εκτιμήσεις τα ποσοστά συνάντησης της κάθε κατηγορίας δίνονται στον Πίνακα Πίνακας 11.

Πίνακας 11 : Ποσοστά και μήκη συνάντησης των γεωλογικών κατηγοριών σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

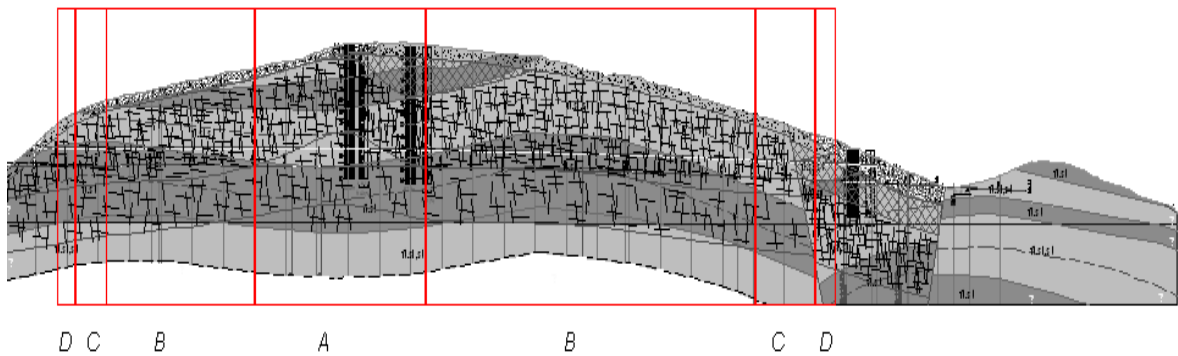
Κατηγορία Βραχόμαζας	ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΚΛΑΔΟΣ		ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	
	Μέτρα ανά κατηγορία κατά τη μελέτη	Ποσοστό(%)	Μέτρα ανά κατηγορία κατά τη μελέτη	Ποσοστό(%)
A	0	0	240	45,28
B	140	27,46	178	33,58

C	333	65,29	84	15,85
D	37	7,25	27	5,28
ΣΥΝΟΛΟ	510	100	530	100

Μία γραφική αναπαράσταση των προβλεπόμενων από τη μελέτη ποσοστών συνάντησης των γεωτεχνικών κατηγοριών ανά κλάδο φαίνεται στα Σχήματα Σχήμα 6 Σχήμα 7.



Σχήμα 6 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του αριστερού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA ID.D.T.L.1215.B)



Σχήμα 7 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του δεξιού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA ID.D.T.L.056.A)



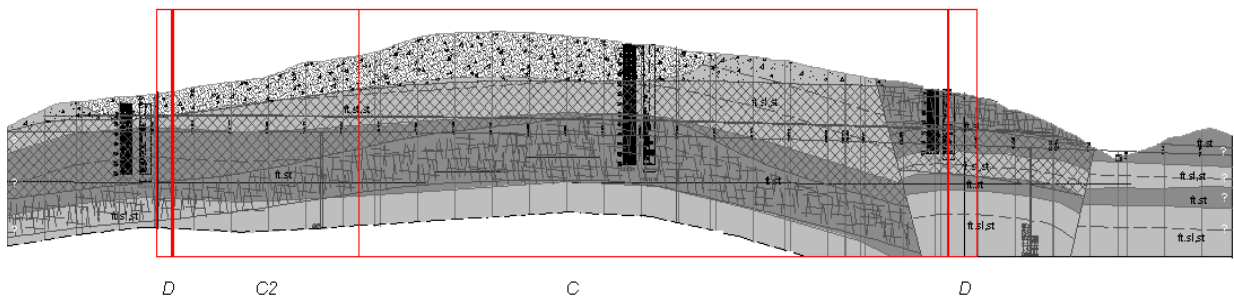
Στην πραγματικότητα όμως η κατάσταση ήταν διαφορετική. Συγκεκριμένα, η κατηγορία A δε χρησιμοποιήθηκε καθόλου, ενώ η κατηγορία C, χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο τμήμα του έργου, με μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες εξηγούνται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12

Πίνακας 12 : Ποσοστά και μήκη συνάντησης των γεωλογικών κατηγοριών κατά την κατασκευή

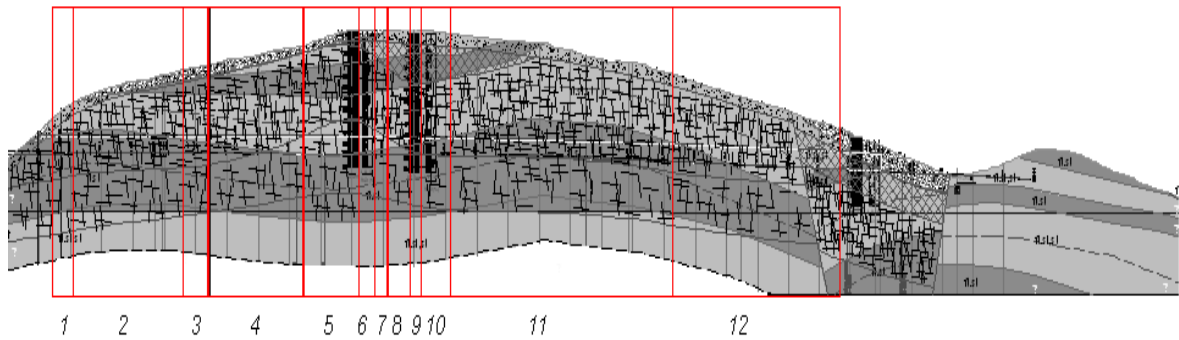
Κατηγορία Βραχώμαζας	ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΚΛΑΔΟΣ		ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	
	Μέτρα ανά κατηγορία κατά την κατασκευή	Ποσοστό(%)	Μέτρα ανά κατηγορία κατά την κατασκευή	Ποσοστό(%)
A	0	0	0	0
B	0	0	39,8	9,19
C	419,58	96,78	344,2	79,47
D	13,98	3,22	49,1	11,34
ΣΥΝΟΛΟ	433,56	100	433,1	100

Μία γραφική αναπαράσταση των κατά την κατασκευή ποσοστών συνάντησης των γεωτεχνικών κατηγοριών ανά κλάδο φαίνεται στα Σχήματα Σχήμα 8 και Σχήμα 9.



Σχήμα 8 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του αριστερού κλάδου κατά την κατασκευή





Σχήμα 9 : Κατανομή γεωτεχνικών κατηγοριών κατά μήκος του δεξιού κλάδου κατά την κατασκευή



Στο Σχήμα Σχήμα 9 φαίνεται η κατανομή των γεωτεχνικών κατηγοριών με αριθμητική αναπαράσταση λόγω πληθώρας εναλλαγών των κατηγοριών. Πιο αναλυτικά οι αριθμοί που φαίνονται αναπαριστούν:

4, 6, 9 → κατηγορία **B**

2, 3, 5, 7, 8, 10, 11 → κατηγορία **C**

1, 12 → κατηγορία **D**

Όπως φαίνεται, η κατάσταση που αντιμετωπίστηκε κατά την κατασκευή ήταν χειρότερη από αυτή που προβλεπόταν, καθώς οι μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας σε ορισμένες περιοχές ήταν πολύ χαμηλές με αποτέλεσμα την εφαρμογή βαρύτερης προσωρινής υποστήριξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

4.1 Μέθοδος Εκσκαφής

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε κυρίως με μηχανικά μέσα, ενώ έγινε τοπική χρήση εκρηκτικών σε ορισμένες περιπτώσεις. Η χρήση μηχανικών μέσων διαταράσσει πολύ λιγότερο την βραχώμαζα και δημιουργεί καλύτερο περιμετρικό προφίλ με πολύ μικρότερες υπερεκσκαφές. Η χρήση εκρηκτικών αποδίδει υψηλούς ρυθμούς προχώρησης αλλά διαταράσσει περισσότερο τη βραχώμαζα και έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες υπερεκσκαφές. Στον αριστερό κλάδο έγινε ταυτόχρονη κατασκευή της Α και Β φάσης με απόσταση περίπου 7m. Για την διάνοιξη του δεξιού κλάδου έγινε πρώτα η διάνοιξη της Α φάσης για όλο το μήκος της σήραγγας και μόλις τελείωσε, ξεκίνησε η εκσκαφή της Β φάσης. Σημειώνεται ότι οι κατηγορίες βραχώμαζας αντιστοιχίστηκαν σύμφωνα με τη μελέτη σε συγκεκριμένες κατηγορίες υποστήριξης. Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSA επιλέχθηκε για την κατηγορία βραχώμαζας – Α. Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSB επιλέχθηκε για την κατηγορία βραχώμαζας – Β. Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSC1, κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSC1/C2 και κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSC2 επιλέχθηκαν για την κατηγορία βραχώμαζας – C. Για τις περιοχές κοντά στα στόμια με χαμηλά υπερκείμενα και εμφάνιση της κατηγορίας βραχώμαζας – D, επιλέχθηκε η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης βράχου PSD. Η κατηγορία υποστήριξης PSD είναι η βαρύτερη και προτάθηκε από το μελετητή να χρησιμοποιηθεί στο κύριο τμήμα της σήραγγας όπου τυχόν απαιτηθεί εξαιτίας πολύ δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών. Στον Πίνακα 13 φαίνεται η μέθοδος εκσκαφής που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε γεωτεχνική κατηγορία.

Πίνακας 13 : Στάδια κατασκευής ανάλογα με την γεωτεχνική κατηγορία

(ISTRIA IR.D.T.612.B 2009)

Γεωτεχνική Κατηγορία	Μέθοδος	Στάδια	% Εφαρμογή
B	Διάτρηση - Ανατίναξη	Άνω διατομή και βαθμίδα	25,41
C1	Διάτρηση - Ανατίναξη	Άνω διατομή και βαθμίδα	37,02
C1.2	Διάτρηση - Ανατίναξη	Άνω διατομή και βαθμίδα	18,51
C2	Διάτρηση - Ανατίναξη	Άνω διατομή και βαθμίδα	6,17
D _{Εισόδου}	Εκσκαφή - Επανεπίχωση	Άνω διατομή και βαθμίδα	3,45
D _{υπογείων}	Μηχανική εκσκαφή	Άνω διατομή και βαθμίδα	5,44
D _{Εξόδου}	Εκσκαφή - Επανεπίχωση	Άνω διατομή και βαθμίδα	3,99

4.2 Μηχανολογικός Εξοπλισμός

Ο διαθέσιμος μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ιδιοκτησία της κατασκευαστικής εταιρείας ΜΟΧΛΟΣ Α.Ε και φαίνεται στον Πίνακα 14..

Πίνακας 14 : Μηχανολογικός Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάνοιξη

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Jumbo Tamrock - Axera	2
Πρέσες για Gunit	2
Εκσκαφέας υπογείων Liebherr 932	1
Σφυρί CAT 325	1
Βαρέλες	3
Φορτηγά	4
Φορτωτής CAT 966	1
Φορτωτής CAT 980	1
Πρέσα τσιμεντενέσεων	1
Γεννήτριες/Compressors	-

Το προσωπικό εργαζόταν σε δύο βάρδιες των 10 έως 12 ατόμων ανά βάρδια. Τις πρωινές ώρες πριν την έναρξη των εργασιών ήταν απαραίτητη η παρουσία λιπαντών και μηχανουργών, συνήθως τέσσερα ή πέντε άτομα. Επίσης για την τοποθέτηση κάθε πλαισίου ήταν παρών Τοπογράφος Μηχανικός. Η έναρξη των εργασιών διάνοιξης ξεκίνησε στις 31/8/2009. Το βήμα προχώρησης ήταν της τάξης των 2-3m τη μέρα για την Α φάση και 15m τη μέρα για τη Β φάση. Σε ορισμένες περιπτώσεις το βήμα προχώρησης της Α φάσης έφτασε και τα 6m, ενώ σε περιοχές που δεν έγινε τοποθέτηση πλαισίων έφτασε και μέχρι τα 6,5-7m.

4.3 Κατηγορίες υποστήριξης

Η ευρύτερη περιοχή και η σήραγγα της Μακύνειας κατασκευάστηκε σε γεωλογικό σχηματισμό φλύσχη που αποτελείται κυρίως από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυόλιθου. Το πάχος κάθε υλικού βραχόμαζας διαφοροποιείται κατά μήκος της χάραξης. Τα υλικά στη διατομή της σήραγγας και πάνω από αυτή εμφανίζονται από μη αποσαθρωμένα έως αποσαθρωμένα. Η βραχόμαζα εμφανίζεται ελαφρά κερματισμένη ως και κατακερματισμένη. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών εμφανίζονται μέτριες ως καλές. Γενικά ο αριστερός κλάδος διανοίχτηκε σε υλικά με πτωχότερες μηχανικές ιδιότητες από τον δεξιό, καθώς επηρεάζεται από ένα ρήγμα σχεδόν παράλληλο με τη χάραξη και με κλίση προς τον αριστερό κλάδο. Κοντά στα στόμια της σήραγγας ο κερματισμός της βραχόμαζας αυξάνεται, ενώ στο κεντρικό τμήμα των δύο κλάδων συναντάται βραχόμαζα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Κατά μήκος του άξονα της σήραγγας η βραχόμαζα διαχωρίζεται σε περιοχές με παρόμοια λιθολογική περιγραφή, όπως και φυσικές ιδιότητες. Σύμφωνα με τη μελέτη η σήραγγα της Μακύνειας διέρχεται από σχηματισμό φλύσχη, ο οποίος κατατάσσεται σε τέσσερις κύριες γεωτεχνικές κατηγορίες βραχόμαζας. Με βάση την κατηγορία βραχόμαζας, της συμπεριφοράς κατά την διάνοιξη, το ύψος των υπερκειμένων και τις υδρογεωλογικές συνθήκες, οι γεωλογικές αυτές κατηγορίες διακρίθηκαν σε πέντε κατηγορίες υποστήριξης της βραχόμαζας:

- κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSA
- κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSB
- κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSC1

- κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSC2
- κατηγορία προσωρινής υποστήριξης PSD

Η κατηγορία PSD προβλέπεται να εφαρμοστεί στα στόμια της σήραγγας και στα πρώτα μέτρα της υπόγειας διάνοιξης όπου έχουμε και τα χαμηλότερα υπερκείμενα.

4.4 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Οι κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης που προτάθηκαν στη μελέτη υποστήριξης έχουν ονομαστεί σύμφωνα με την γεωτεχνική κατηγορία στην οποία χρησιμοποιήθηκαν για ευκολότερη αναφορά (Πίνακας 15).

Τα ποσοστά εμφάνισης της κάθε κατηγορίας υποστήριξης και το προβλεπόμενο βήμα προχώρησης για κάθε κατηγορία στους δύο κλάδους της σήραγγας δίνονται στους Πίνακες 16 Πίνακας 16 και 17..

Πίνακας 15 : Διατομές και πάχη προσωρινής υποστήριξης (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Κατηγορία προσωρινής υποστήριξης	Πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (cm)	Διατομή εκσκαφής (m ²)
PSA	10	93,84
PSB	15	95,36
PSC1/C2	20	96,88
PSC2	20	97,14
PSD	20	104,5
PSD _{υπογείων}	20	104,5

Τα μέτρα υποστήριξης που προτάθηκαν για την κατασκευή για κάθε κατηγορία υποστήριξης φαίνονται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 16 : Προβλεπόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης αριστερού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Κατηγορία	PSA	PSB	PSC1	PSC1/C2	PSC2	PSD
% Κατηγορία	0	25.6	41.5	20.8	6.9	5.2
Μήκος (m)	0	111	180	90	30	22
Διατομή	OC: Διατομή ανοιχτού τόξου					

Βήμα εκσκαφής (m)	2.5	2	1.5	1.5	1.5	1.5
-------------------	-----	---	-----	-----	-----	-----

Πίνακας 17 : Προβλεπόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης δεξιού κλάδου σύμφωνα με τη μελέτη (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Κατηγορία	PSA	PSB	PSC1	PSC1/C2	PSC2	PSD
% Κατηγορία	21.8	61.7	7.2	3.6	1.2	4.5
Μήκος (m)	108.6	307.9	36	18	6	22
Διατομή	OC: Διατομή ανοιχτού τόξου					
Βήμα εκσκαφής (m)	2.5	2	1.5	1.5	1.5	1.5

Πίνακας 18 : Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης ανά κατηγορία σύμφωνα με τη μελέτη

Αγκύρια	Τύπος	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα	S500s, 250kN πλήρως ενεματωμένα
	Μήκος (m)	4	4	4 + 6	4	4 + 6	4
	Διάμετρος (mm)	Φ25	Φ25		Φ25	Φ25	Φ25
	Κάναβος (πεσσοειδής)	2m T x 2m L	1.5m T x 2m L	2m T x 2m L	1m T x 1.5m L	2m T x 2m L	1m T x 1m L
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πάχος Εκτοξ (cm)	7+3	12+3	17+3	17+3	17+3	17+3
	Οπλισμένο Εκτοξ (kg/m ³)	40 μεταλλικές ίνες	40 μεταλλικές ίνες	40 μεταλλικές ίνες	40 μεταλλικές ίνες	40 μεταλλικές ίνες	40 μεταλλικές ίνες
Πλαίσια	HEB	-	-	-	HEB120 ανά βήμα	HEB160 ανά βήμα	HEB180 ανά βήμα
Ράβδοι/ Δοκοί προπορείας	Τύπος		-		-	Ράβδοι	Δοκοί
	Μήκος (m)	-	-	-	-	6m ανά βήμα	12m ανά βήμα
	Διάμετρος (mm)	-	-	-	-	Φ25	Φ114
	Επικάλυψη(m)	-	-	-	-	2	4

	Αξονική απόσταση (cm)	-	-	-	-	40-50	40-50
--	-----------------------	---	---	---	---	-------	-------

4.5 Προδιαγραφές μέτρων υποστήριξης

Τα στοιχεία της υποστήριξης ακολουθούν τις προδιαγραφές που αναγράφονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19 : Προδιαγραφές υλικών προσωρινής υποστήριξης
(ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Προϊόν	Γενικές προδιαγραφές	Λεπτομέρειες
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	C20/25	Το μείγμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος (τσιμέντο, αδρανή, επιταχυντές, λόγος νερού / τσιμέντου, πλαστικοποιητές) θα κατασκευάζεται ύστερα από μελέτη του μείγματος και εργαστηριακές δοκιμές.
Μεταλλικές ίνες	Τύπου Dramix ZP305 40kg/m ³	Μέγιστη εφελκυστική αντοχή >1100 MPa l/d μεταξύ 50 και 75 Μήκος ινών 30mm ±1 Διάμετρος 0,55.
Ίνες προπυλενίου	Τύπου Meyco FIB SP530 6kg/m ³	Αντοχή εφελκυσμού >250 kPa Μήκος ινών 30mm Διάμετρος 2.8μm
Μεταλλικό πλέγμα	T188	Τετράγωνο πλέγμα >150mm Διάμετρος πλέγματος >6mm Εφελκυστική αντοχή >275Mpa
Αγκύρια βράχου/Ράβδοι προπορείας	Φ25, S500s, Φέρουσκ ικανότητα 250kN	Αγκύρια βράχου από απλό νευροχάλυβα ή τύπου μεταλλικού σπειρώματος S500s
Ήλοι με διευρυνόμενο κέλυφος	BOLTEX / Wibolt EXP	Διάμετρος σωλήνα (προ διογκώσεως) Φ41 X 2,0mm Ελάχιστο εγγυημένο φορτίο θραύσης 100kN Διάμετρος διατρήματος Φ32-39 Πίεση νερού για την τοποθέτηση 300bar

Δοκοί προπορείας	Φ114.3, St52	Οι δοκοί προπορείας είναι τύπου St52 και με Εξωτερική διάμετρο 114.3mm, τοποθετούνται σε οπές διαμέτρου άνω των 120mm και έχουν πάχος 6.3mm, κλίση 4° ως της τον άξονα της σήραγγας.
Αυτοδιατρούμενα αγκύρια	Τύπου Ischebeck Titan 30/16	Εξωτερική διάμετρος Φ30 Τάση κάμψης 470Μpa Μέγιστο φορτίο 220kN Μήκος 4m
Πλαίσια	HEB120 HEB160 HEB180	Βάρος 26.7kg/m, 42.6 kg/m, 51.2 kg/m H=120mm, 160mm, 180mm B=120mm, 160mm, 180mm Αντοχή >235Μpa.
Αντιρίδες πλαισίου	Φ20, S500s Φ8, S500s	Φ20 για σύνδεση των πλασίων και Φ8 για συγκόλληση των πλασίων .
Σωλήνες αποστράγγισης	Σωλήνες PVC με σχισμές	Σωλήνες PVC με σχισμές ή διάτρητοι, με εσωτερική ικανότητα πίεσης >6atm. Εξωτερικό κάλυμμα από μη υφαντό γεωύφασμα για το διαχωρισμό του φίλτρου και των λεπτόκοκκων.

4.5.1 Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

Το στατικό πάχος ανά τυπική διατομή είναι οπλισμένο με μεταλλικές ίνες (μήκος 30mm και διάμετρος 0,55mm με αγκυρούμενη γεωμετρία) ώστε να αυξάνεται η ολκιμότητα του και να αντέχει στην παραμόρφωση. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετήθηκε με διαδοχική διάστρωση στρώσεων κατάλληλου πάχους ώστε να επιτυγχάνεται το στατικό πάχος που ορίζεται σε κάθε φάση κατασκευής ενώ η τελική στρώση (μόνο κατά την χρήση μεταλλικών ινών) δεν περιείχε ίνες ώστε να δημιουργηθεί μια ομαλή επιφάνεια για την εγκατάσταση της στεγάνωσης. Τα χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δίνονται στον Πίνακα 20 που ακολουθεί.

Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά εκτοξευόμενου σκυροδέματος
(ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Υλικό κατασκευής	Αντοχή σκυροδέματος (MPa)	Ίνες	Περιεκτικότητα ινών (kg/m ³)	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	E _c (MPa)
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	C20/25	Τύπου Dramix ZP305	40 ή 6	20	15000

4.5.2 Ηλώσεις Βράχου

Οι απλές ηλώσεις βράχου επιτυγχάνουν την εσωτερική στήριξη του πετρώματος και αναλαμβάνουν εφελκυστικές και διατμητικές δυνάμεις. Έγινε χρήση απλών χαλύβδινων ηλώσεων (Φ25, S500s, 250kN) βράχου με χρήση ειδικού τσιμεντένεματος το οποίο τους παρείχε τη δυνατότητα να παραλάβουν φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα όπου απαιτείται. Τα χαρακτηριστικά των ηλώσεων φαίνονται στον Πίνακα 21..

Πίνακας 21 : Χαρακτηριστικά ηλώσεων (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Υλικό κατασκευής / Τύπος	Χάλυβας	Διάμετρος (mm)	Φέρουσα Ικανότητα (kN)	E _b (MPa)
Απλές Ηλώσεις Βράχου με τσιμεντένεμα	S500s	Φ25	250	207000
Τύπου Swellex standard	-	41.0x2.0	100	-

4.5.3 Πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια τοποθετήθηκαν σε κάθε βήμα εκσκαφής της αντίστοιχης κατηγορίας. Έγινε χρήση ΗΕΒ τύπου 120, 160 και 180, βάρους 26.7 kg/m, 42.6 kg/m και

51.2 kg/m αντίστοιχα. Επίσης έγινε προσθήκη αντηρίδων μεταξύ δυο γειτονικών πλαισίων, για την διατήρηση του τοποθετούμενου πλαισίου στην ορθή θέση κατά τις εργασίες εκτόξευσης σκυροδέματος. Στον Πίνακα 22 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 22 : Χαρακτηριστικά πλαισίων (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Υλικό κατασκευής / Τύπος	Χάλυβας	Διάμετρος (mm)	Βάρος (kg/m)	H (mm)	B (mm)	Αντοχή (MPa)
Μεταλλικό πλαίσιο HEB 120	S235	-	26.7	120	120	235
Μεταλλικό πλαίσιο HEB 160	S235	-	42.6	160	160	235
Μεταλλικό πλαίσιο HEB 180	S235	-	51.2	180	180	235
Αντηρίδες πλαισίου	St IV (S500s)	Φ20	-	-	-	-

4.5.4 Δοκοί Προπορείας

Οι δοκοί προπορείας ενισχύουν την ευστάθεια του μετώπου, μειώνουν τις υποχωρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και αναλαμβάνουν τα φορτία της οροφής κυρίως σε κάμψη και διάτμηση. Χρησιμοποιήθηκαν τοπικά δοκοί διαμέτρου $D=114.3\text{mm}$, St52, μήκους 12m με ένεμα και με κλίση 4° . Οι δοκοί χρησιμοποιήθηκαν στην οροφή σε γωνία $\pm 60^{\circ}$ από τον άξονα της σήραγγας. Στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκών προπορείας.

Πίνακας 23 : Χαρακτηριστικά δοκών προπορείας (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Υλικό κατασκευή ς/ Τύπος	Χάλυβας	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος (mm)	Κλίση
Δοκοί Προπορείας	St 52	114.3	6.3	4°

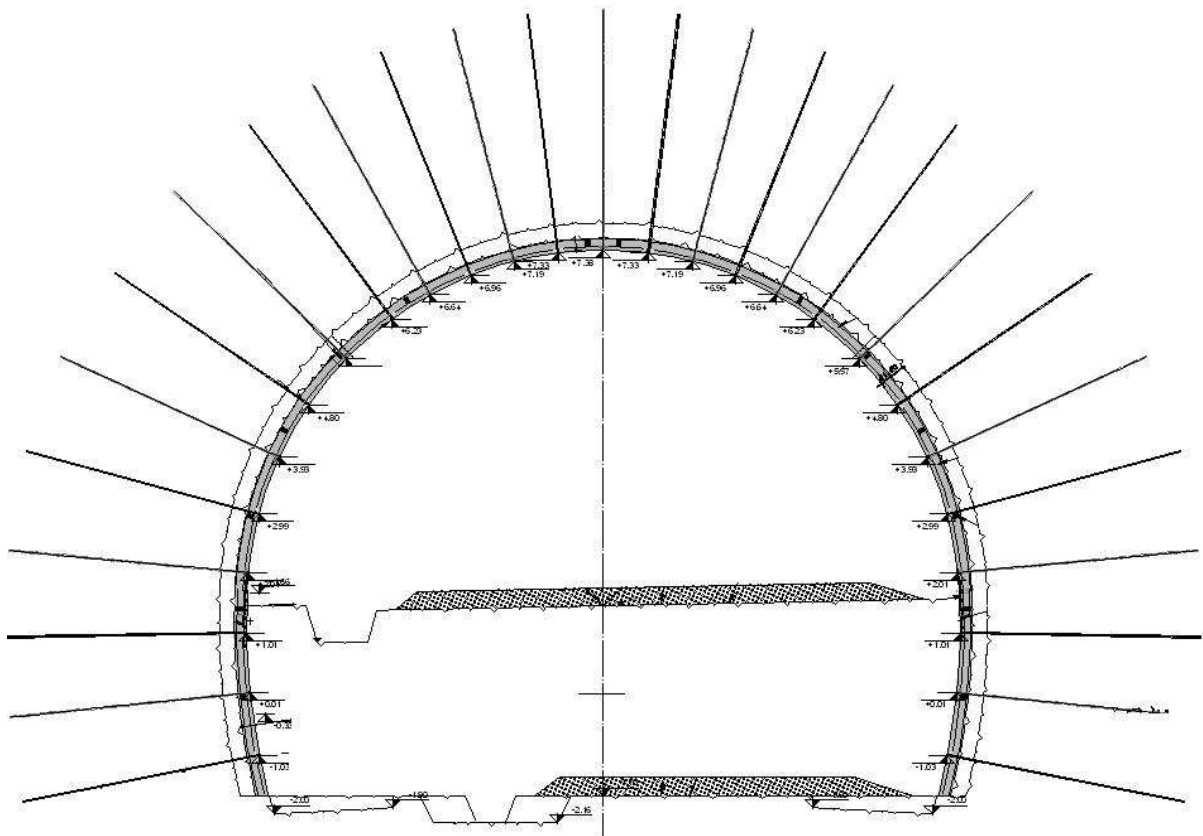
4.5.5 Ράβδοι Προπορείας

Οι ράβδοι προπορείας προστατεύουν το ανυποστήρικτο μέτωπο και την οροφή από τοπικές αστάθειες πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης (εκτοξευόμενο, αγκύρια κ.α. Χρησιμοποιήθηκαν, ανάλογα με την κατάσταση του μετώπου, ράβδοι διαμέτρου Φ25, S500s, φέρουσας ικανότητας 250kN, μήκους 6m κάθε τέσσερα βήματα (4x1m). Τοποθετήθηκαν σε διατρήματα με τσιμεντένεμα και με κλίση από την οριζόντιο 7-10°. Τα χαρακτηριστικά των ράβδων προπορείας παρουσιάζονται στον Πίνακα 24..

Πίνακας 24 : Χαρακτηριστικά ράβδων προπορείας (ISTRIA IR.D.T.591.C 2009)

Υλικό κατασκευής/Τύπος	Χάλυβας	Φέρουσα Ικανότητα (kN)	Διάμετρος (mm)	Κλίση
Ράβδοι προπορείας	St IV (S500s)	250	Φ25	7-10°

Μία τυπική διατομή της σήραγγας της Μακύνειας φαίνεται στο Σχήμα Σχήμα 10. Η τυπική αυτή διατομή είναι της κατηγορίας PSC_{1,2} και χρησιμοποιήθηκε ως προσωρινή υποστήριξη κατά το μεγαλύτερο μέρος της δίδυμης σήραγγας.



Σχήμα 10 : Τυπική διατομή σήραγγας Μακόνειας (ISTRIA ID.D.T.S.1196.A)

Επίσης στην Εικόνα Εικόνα 14 φαίνονται οι εργασίες τοποθέτησης της προσωρινής υποστήριξης μετά την εκσκαφή του μετώπου.



Εικόνα 14 : Προσωρινή υποστήριξη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

5.1 Μέθοδος διάνοιξης

Με βάση τα στοιχεία της μελέτης η εκσκαφή των σιράγγων έγινε με:

- Συστηματική εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες, εκεί που οι συνθήκες το επέτρεπαν
- Συστηματική εξόρυξη με μηχανικά μέσα ή συνδυασμός μηχανικών και εκρηκτικών υλών.

Οι αρχές πάνω στις οποίες στηρίχθηκε η μεθοδολογία κατασκευής βασίζονται σε αυτές της μεθόδου N.A.T.M. (New Austrian Method). Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της έμμεσης υποστήριξης να γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω 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. Η αρχική εκτίμηση είναι η εκσκαφή να γίνει σε δύο φάσεις που θα διαχωρίζονται στη διάμετρο της κυκλικής διατομής περίπου, και κατόπιν όπου προβλέπεται, θα γίνει και η τρίτη φάση εκσκαφής (invert)- κατηγορία PSD. Η πρώτη φάση ανάλογα με την ποιότητα της συναντώμενης βραχώμαζας διαχωρίστηκε σε επιμέρους φάσεις σε περιπτώσεις που υπήρχαν λόγοι άμεσης ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής. Η διάνοιξη έγινε και από τα δύο μέτωπα για τους δύο κλάδους ταυτόχρονα. Η δεύτερη φάση εκσκαφής ξεκίνησε πριν την ολοκλήρωση της διάνοιξης της Α φάσης. Το μέτωπο εκσκαφής του ενός κλάδου προπορευόταν έναντι του διπλανού του έτσι ώστε να μην εμφανιστούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ανακατανομής των τάσεων του ενός κλάδου με τον άλλον.

Η έναρξη των εργασιών έγινε αρχικά στο μέτωπο εξόδου στον αριστερό κλάδο με την κατασκευή της ομπρέλας των forepolling. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα προπλάισια σύμφωνα με τη μελέτη και άρχισε η εκσκαφή του υπογείου τμήματος με την τοποθέτηση του πλαισίου Νο1 της κατηγορίας PSD. Αντίστοιχη αλληλουχία εργασιών έγινε στον δεξιό κλάδο και στη συνέχεια στα μέτωπα της εισόδου.

5.2 Διαδικασίες επιμέρους εργασιών

5.2.1 Διάνοιξη σήραγγας

Η διάτρηση του μετώπου έγινε με αυτοκινούμενα ηλεκτροκίνητα διατρητικά φορεία υπογείων (JUMBO) κάνοντας ταυτόχρονα χρήση ύδατος για την αποφυγή παραγωγής σκόνης.

Τα διατρήματα είχαν διάμετρο 45mm σε κάνναβο και μήκος ανάλογα με την κατηγορία του βράχου. Σε χαλαρά εδάφη και όπου το πέτρωμα επέτρεπε, η εκσκαφή έγινε με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα με παράλληλη χρήση υδραυλικού σφυριού στα σημεία όπου ήταν απαραίτητο.

5.2.2 Αποκομιδή προϊόντων εκσκαφής

Η φόρτωση των προϊόντων εκσκαφής έγινε σε κάθε μέτωπο με ελαστιχοφόρους φορτωτές ενώ η μεταφορά με DUMBER υπογείων ή με ανατρεπόμενα φορτηγά.

Τα προϊόντα εκσκαφής μεταφέρθηκαν, τα μεν κατάλληλα για την κατασκευή μόνιμων υπαίθριων έργων, τα δε ακατάλληλα σε χώρους απόθεσης.

5.2.3 Ξεσκάρωμα

Κατά την εργασία αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής και μετά το πέρας αυτής έγινε ξεσκάρωμα της ελεύθερης επιφάνειας και του μετώπου της σήραγγας, έτσι ώστε να απομακρυνθούν τα χαλαρωμένα από την ανατίναξη τεμάχια βραχώμαζας, μειώνοντας τον κίνδυνο καταπτώσεων και τραυματισμού του προσωπικού.

Το ξεσκάρωμα έγινε μηχανικά με υδραυλικό εκσκαφέα εφοδιασμένο με αποξέστη και χειρονακτικά με παραμίνες. Όπου απαιτήθηκε έγινε χρήση υδραυλικής σφύρας.

5.2.4 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Αμέσως μετά την αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής και το ξεσκάρωμα εφαρμόστηκε η πρώτη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους 3cm για την αποφυγή αποκόλλησης μικρών σφηνών βράχου για καλύτερη τοποθέτηση των αγκυρίων και ασφαλέστερη

τοποθέτηση των πλαισίων. Μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων και των πλαισίων ακολούθησε η δεύτερη στρώση έτσι ώστε να δημιουργηθεί φορέας για τη δυνάμηση των εργασιών διάνοιξης.

Το χρησιμοποιηθέν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ήταν υγρής μορφής και για την εφαρμογή του χρησιμοποιήθηκε πρέσα GUNNITE. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκαν οι απαραίτητοι προσμείκτες, επιταχυντές και η προβλεπόμενη ποσότητα χαλύβδινων ινών.

5.2.5 Εργασίες τοποθέτησης αγκυρίων

Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με το έδαφος και το σημείο τοποθέτησής τους, ήταν κατά κύριο λόγο απλές ηλώσεις βράχου, με ράβδους St IV, και Swellex. Χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένα προϊόντα εξειδικευμένων κατασκευαστών, εκτός των απλών ηλώσεων που κατασκευάστηκαν στο εργοτάξιο.

Η εργασία τοποθέτησής τους έγινε κατά τη διάρκεια των εργασιών διάτρησης ή μετά το πέρας αυτών. Εκκαλέστηκαν με τη βοήθεια κατάλληλου ανυψωτικού μηχανήματος ή φορτωτή, στον κουβά του οποίου προσαρτήθηκε ειδικό καλάθι ασφαλείας για την αποφυγή τραυματισμών.

Οι οπές που διανοίχθηκαν για τοποθέτηση αγκυρίων καθαρίστηκαν με νερό ή αέρα πριν την τοποθέτηση του αντίστοιχου αγκυρίου.

Η διεύθυνση και η διάταξή τους έγινε λαμβάνοντας υπόψη το χαρακτήρα σχηματισμού του βράχου για την καλύτερη στήριξη της βραχόμαζας.

Τα Swellex αποτελούνται από χαλύβδινο σωλήνα που παραμορφώνεται μέσα στην οπή με την πίεση του νερού.

Στα αγκύρια πλήρους πάκτωσης έγινε πρώτα η πλήρωση της οπής με παχύρευστο ένεμα και στη συνέχεια η τοποθέτηση της ράβδου.

Τέλος μετά την στερεοποίηση του τσιμεντενέματος τοποθετήθηκαν τα παξιμάδια για την καλύτερη έδραση της βραχόμαζας.

5.2.6 Εργασίες τοποθέτησης πλαισίων

Τα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινα HEB120, HEB160 ή HEB180. Η μεταφορά των τεμαχίων των πλαισίων κοντά στο μέτωπο έγινε με φορτωτές με τη βοήθεια ειδικού καλαθοφόρου μηχανήματος, σε απόσταση 5-10m από το μέτωπο εκσκαφής. Κάθε πλήρες πλαίσιο κατασκευάστηκε από τρία επιμέρους τεμάχια

5.2.7 Δοκοί προπορείας

Στις κατηγορίες PSC2 έγινε η τοποθέτηση μεταλλικών σωλήνων προπορείας Φ25 μήκους 6m. Η διάτρηση έγινε με το JUMBO και στη συνέχεια έγινε εισπίεση τσιμεντενέματος. Με την τεχνική αυτή έγινε υποστήριξη του μετώπου και του άσκαπτου τμήματος πίσω από αυτό, ώστε η προχώρηση να γίνει κάτω από ασφαλείς συνθήκες. Οι δοκοί προπορείας ήταν σιδηροσωλήνες Φ114 μήκους 12m και τοποθετήθηκαν σε οπές οι οποίες διανοιχθήκαν με κατάλληλο διατρητικό εξοπλισμό.

5.3 Διαφορές από τη μελέτη

Όπως είναι γνωστό οι περιορισμένες σε πλήθος ερευνητικές γεωτρήσεις δεν είναι πάντα αρκετές για την ακριβή αποτύπωση του υπεδάφους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, οι ερευνητικές γεωτρήσεις μπορούν να θεωρηθούν αρκετές, καθώς χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από εννέα συνολικά γεωτρήσεις, νέες και προϋπάρχουσες. Βέβαια κατά την υλοποίηση του έργου συναντήθηκαν διαφορετικές συνθήκες από τις αναμενόμενες, με αποτέλεσμα να προσαρμοστεί και η μέθοδος κατασκευής σε αυτές..

Πιο συγκεκριμένα η ποιότητα της βραχώμαζας που συναντήθηκε ήταν τέτοια, ώστε να χρειαστεί η χρήση της ενδιάμεσης κατηγορίας προσωρινής υποστήριξης, της PSC1/2, η οποία στην ουσία αντικατέστησε τις PSA και PSB στον αριστερό κλάδο.

Παρακάτω φαίνονται οι αλλαγές που έγιναν στις αρχικές εκτιμήσεις ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας που συναντιούνταν κάθε φορά. Εκτός από τη μεγαλύτερη χρήση της μεσαίας κατηγορίας υποστήριξης, μεταβλήθηκε και το ποσοστό χρήσης και των υπόλοιπων κατηγοριών κατά την πορεία κατασκευής του έργου.

Από ότι φαίνεται η κατηγορία PSA, PSB και PSC1 δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου στον αριστερό κλάδο. Αντίθετα η PSC1/2 χρησιμοποιήθηκε κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό

καθώς όπως είπαμε αντικατέστησε τις άλλες τρεις κατηγορίες. Επίσης η κατηγορία PSC2 χρησιμοποιήθηκε σε μεγαλύτερο μήκος, καθώς η τοποθέτηση της βαρύτερης κατηγορίας PSD για το προβλεπόμενο μήκος δεν κρίθηκε αναγκαία.

Το βήμα εκσκαφής στον αριστερό κλάδο ήταν μικρότερο του αναμενόμενου και σε περιοχές έφτασε να είναι και κατά 36% μικρότερο του προβλεπόμενου.

Όσον αφορά στον δεξιό κλάδο, η κατάσταση ήταν παρόμοια. Οι κατηγορίες PSA και PSC1 δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου, ενώ και πάλι έγινε τοποθέτηση της ενδιάμεσης κατηγορίας PSC1/2 και μάλιστα, για άλλη μία φορά σε μεγαλύτερο μήκος από το προβλεπόμενο. Λόγω των σχετικά καλών συνθηκών σε ορισμένα τμήματα, χρησιμοποιήθηκε αρκετά η ελαφριά (χωρίς πλαίσιο) κατηγορία PSB, ενώ αλλού χρησιμοποιήθηκε η βαρύτερη PSC2.

Σε αντίθεση με τον αριστερό κλάδο το βήμα προχώρησης ήταν πολύ καλύτερο του αναμενόμενου. Όπου έπρεπε να γίνει χρήση της PSC1/2 το βήμα μειώθηκε μέχρι και κατά 53%, αλλά σε όλες τις άλλες περιπτώσεις που αποτελούν και την πλειοψηφία του κλάδου το βήμα προχώρησης έφτασε να είναι μέχρι και 15% μεγαλύτερο από το αναμενόμενο.

5.4 Πραγματικά μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Στους Πίνακες 25 και 26 παρουσιάζονται οι κατηγορίες υποστήριξης του αριστερού και δεξιού κλάδου αντίστοιχα.

Πίνακας 25 : Κατηγορίες υποστήριξης του αριστερού κλάδου κατά την κατασκευή

Κατηγορία	PSB	PSC1/C2	PSC2	PSD
% Κατηγορία	-	71.2	25.6	3.2
Μήκος (m)	-	307.2	110.78	13.98
Διατομή	-	OC: Διατομή ανοιχτού τόξου		
Βήμα εκσκαφής (m)	-	1.5	1.22	1

Πίνακας 26 : Κατηγορίες υποστήριξης του δεξιού κλάδου κατά την κατασκευή

Κατηγορία	PSB	PSC1/C2	PSC2	PSD
% Κατηγορία	24.9	18	55.6	1.5
Μήκος (m)	115.1	81.9	255.65	6.8
Διατομή	OC: Διατομή ανοιχτού τόξου			
Βήμα εκσκαφής (m)	2.3	0.7	1.25	1

Στον Πίνακα 27 φαίνονται τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κατηγορία υποστήριξης κατά την κατασκευή.

Πίνακας 27 : Χρησιμοποιηθέντα μέτρα υποστήριξης ανά κατηγορία κατά την κατασκευή

		Κατηγορία			
		PSB	PSC1/C2	PSC2	PSD
Αγκύρια	Τύπος	S500s, 250kN, πλήρως ενεματωμέν α	S500s, 250kN, πλήρως ενεματωμέν α	S500s, 250kN, πλήρως ενεματωμέν α	S500s, 250kN, πλήρως ενεματωμέν α
	Μήκος (m)	4	4	4 + 6	4
	Διάμετρος (mm)	Φ25	Φ25	Φ25	Φ25
	Κάνναβος (πεσσοειδής)	1.5m T x 2m L	1m T x 1.5m L	2m L x 1m L	1m T x 1m L
Εκτοξευόμεν ο σκυρόδεμα	Πάχος Εκτοξ (cm)	12+3	17+3	17+3	17+3
	Οπλισμένο Εκτοξ (kg/m ³)	40, μεταλλικές ίνες	40, μεταλλικές ίνες	40, μεταλλικές ίνες	40, μεταλλικές ίνες
Πλαίσια	HEB	-	HEB120 ανά βήμα	HEB160 ανά βήμα	HEB180 ανά βήμα
Ράβδοι/Δοκοί προπορείας	Τύπος	-	-	Ράβδοι	Δοκοί
	Μήκος (m)	-	-	6m ανά 4 βήματα	12
	Διάμετρος (mm)	-	-	Φ25	Φ114
	Επικάλυψη(m)	-	-	2	4
	Αξονική απόσταση (cm)	-	-	40-50	40-50

5.5 Προβλήματα κατά την κατασκευή

Στις 2/6/2010 κατά τις εργασίες διάνοιξης της Β φάσης στον αριστερό κάδο της Σήραγγας της Μακύνειας συνέβη γεωλογική κατάπτωση στη δεξιά παρειά που ακολουθήθηκε από εισχώρηση του εσωραχείου της προσωρινής υποστήριξης μέσα στη θεωρητική γραμμή της τελικής επένδυσης, η οποία προκλήθηκε από την ανάπτυξη συγκλίσεων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Η κατάπτωση αυτή παρατηρήθηκε στη Χ.Θ. 4+299, δηλαδή περίπου 100m πριν από την έξοδο της σήραγγας.

Στη συγκεκριμένη περιοχή η βραχώμαζα αποτελείται από εναλλαγές μεσοστρωματωδών – παχυστρωματωδών ψαμμιτών και ιλυολίθων. Ζώνες διάτμησης πάχους 1,5 - 2m που αποτελούνται από αργιλο-αμμούχα υλικά καταπονούν και εξασθενούν τοπικά τη βραχώμαζα. Η παρουσία μίας τέτοιας ζώνης στην Χ.Θ 4+294 προκάλεσε γεωλογική κατάπτωση κατά την εκσκαφή της Β φάσης στη δεξιά παρειά της σήραγγας, η οποία με τη σειρά της προκάλεσε την ανάπτυξη μετακινήσεων του κελύφους της αριστερής παρειάς της ευρύτερης περιοχής.

5.6 Μέθοδος αποκατάστασης

Τα άμεσα μέτρα μετά την εκδήλωση της κατάπτωσης ήταν:

- Πλήρωση της υπερεκσκαφής με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Δημιουργία δοκαριού από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην ένωση Α και Β φάσης από την Χ.Θ. 4+292 έως 4+300 πάχους 15cm..
- Επανεπίχωση της β φάσης από την Χ.Θ. 4+270 έως την 4+300.
- Διατήρηση και τοποθέτηση ηλώσεων Φ25 μήκους 6m στην αριστερή παρειά της σήραγγας ανά βήμα εκσκαφής από την Χ.Θ. 4+270 έως 4+285.

Μετά την εφαρμογή των παραπάνω μέτρων υποστήριξης παρουσιάστηκε μείωση των συγκλίσεων και σταδιακός μηδενισμός τους.

Για την αποκατάσταση του κελύφους της Α φάσης εφαρμόστηκαν τα προβλεπόμενα της κατηγορίας PSC1/2 από την Χ.Θ 4+281 έως 4+305.

Μετά την ολοκλήρωση της Α φάσης ξεκίνησε η αποκατάσταση της Β φάσης.

5.7 Αποκατάσταση

Η αποκατάσταση της διατομής ξεκίνησε από τη Χ.θ. 4+305. Η αποξίλωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των μεταλλικών πλαισίων έγινε με παράλληλη χρήση εκσκαφέα υπογείων και υδραυλικής σφύρας. Το βήμα εκσκαφής ήταν 1m και η εφαρμογή της πρώτης στρώσης (αστάρωμα) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ήταν άμεση, με την πρώτη αποκάλυψη της βραχώμαζας. Μετά την τοποθέτηση του πρώτου πλαισίου, ακολούθησαν τα μέτρα υποστήριξης.

5.8 Εξοπλισμός – Προσωπικό

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την αποκατάσταση της σήραγγας ήταν:

- Διατρητικό υπογείων JUMBO
- Υδραυλικός εκσκαφέας
- Πρέσα GUNITE
- Ανατρεπόμενα φορτηγά
- Ηλεκτρογεννήτρια
- Φορτωτής
- Αεροσυμπιεστής
- Υδραυλική Σφύρα
- Πρέσα τσιμεντενέματος

Οι εργασίες εκτελέστηκαν από εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό, το οποίο απαρτίζεται από τις ειδικότητες:

- Μηχανικός υπογείων
- Επιστάτης βάρδιας
- Χειριστής JUMBO
- Χειριστής πρέσας GUNITE
- Χειριστής καλαθοφόρου μηχανήματος

- Οδηγοί
- Πιστολαδότες
- Ηλεκτρολόγος
- Τεχνίτες μηχανημάτων
- Ηλεκτροσυγκολλητής

5.9 Γεωτεχνική παρακολούθηση

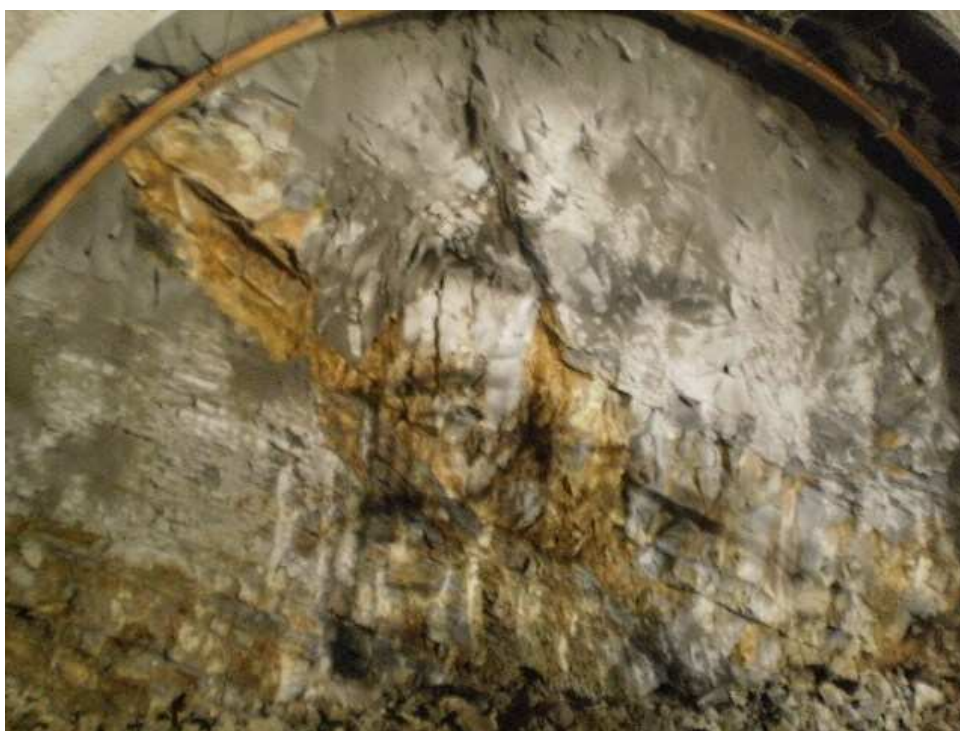
Για την παρακολούθηση της αποκατάστασης έγινε τοποθέτηση μαρτύρων παρακολούθησης μικρομετακινήσεων στην αρχή και το τέλος της περιοχής. Επίσης, μέσα στην περιοχή αποκατάστασης έγινε η εγκατάσταση τριών σταθμών παρακολούθησης μικρομετακινήσεων ανά 6m. Οι σταθμοί παρακολουθούνταν καθημερινά κατά τη διάρκεια των εργασιών της Α και Β φάσης μέχρι τη σταθεροποίηση των μετακινήσεων. Μετά τη σταθεροποίηση των τιμών και για χρονικό διάστημα ενός μήνα οι μάρτυρες παρακολουθούνταν εβδομαδιαίως.

Σε επιλεγμένα αγκύρια της δεξιάς παρειάς τοποθετήθηκαν κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρίων. Οι σταθμοί παρακολουθούνταν καθημερινά κατά τη διάρκεια των εργασιών της Α και Β φάσης μέχρι τη σταθεροποίηση των μετακινήσεων. Μετά τη σταθεροποίηση των τιμών και για χρονικό διάστημα ενός μήνα οι μετρήσεις παρακολουθούνταν εβδομαδιαίως.

Κάποιες χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τη διαδικασία εξόρυξης φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα 15 Εικόνα 20.



Εικόνα 15 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C₂ στη Χ.Θ. 4+310,7 του δεξιού κλάδου



Εικόνα 16 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C_{1,2} στη Χ.Θ. 4+178 του δεξιού κλάδου



Εικόνα 17 : Έξοδος δεξιού κλάδου



Εικόνα 18 : Είσοδος αριστερού κλάδου



Εικόνα 19 : Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C_{1,2} στη Χ.Θ. 4+304 του αριστερού κλάδου



Εικόνα 20 : Έξοδος αριστερού κλάδου

5.10 Φωτισμός

Στα μέτωπα εισόδου και εξόδου της σήραγγας οι χώροι εργασίας ήταν επαρκώς φωτισμένοι κατά τη νύχτα. Στο εσωτερικό της σήραγγας και σε όλο το μήκος της τοποθετήθηκαν λαμπτήρες σε αποστάσεις τέτοιες, ώστε να παρέχεται ο απαιτούμενος φωτισμός. Πίσω από το μέτωπο εκσκαφής υπήρξε αυξημένος φωτισμός με τοποθέτηση λαμπτήρων θυέλης 400W στην οροφή και δύο λαμπτήρων θυέλης 250W στις παρειές της σήραγγας. Ο παραπάνω εξοπλισμός μετακινούνταν ταυτόχρονα με την προχώρηση του μετώπου εκσκαφής. Οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες τοποθετήθηκαν μετά το πέρας της εγκατάστασης των μέτρων υποστήριξης. Επίσης υπήρχε διαθέσιμος ικανός αριθμός κινητών λαμπτήρων για τον φωτισμό διαφόρων θέσεων εργασίας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Γενικά η ένταση του φωτισμού ανταποκρινόταν στις ιδιαιτερότητες της εργασίας και τις ιδιομορφίες του επιβάλλοντος χώρου. Επίσης τα ηλεκτρικά καλώδια ήταν σταθερά βιδωμένα στα τοιχώματα της σήραγγας.

5.11.Εξαερισμός και μέτρηση επικίνδυνων αερίων κατά τη διάνοιξη

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας εγκαταστάθηκε σύστημα εξαερισμού ώστε η σύσταση του αέρα σε όλο το μήκος της να πληροί τους όρους υγιεινής για τους εργαζομένους. Μετά την ανατίναξη ο χώρος του μετώπου αεριζόταν επαρκώς για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 30 λεπτών, ώστε να επιτυγχάνεται αραίωση των παραγόμενων αερίων σε συγκεντρώσεις κάτω των ανωτάτων επιτρεπόμενων ορίων και απαγορευόταν η διέλευση εντός της σήραγγας για 15 λεπτά μετά από κάθε πυροδότηση.

Για τις ανατινάξεις η παροχή αέρα υπολογίστηκε σε $3\text{m}^3/\text{min}$ για κάθε εργαζόμενο και $6\text{m}^3/\text{min}$ για κάθε ντιζελοκίνητο κινητήρα, ενώ η ταχύτητα του ανέμου δεν ήταν μικρότερη από $30\text{cm}/\text{sec}$. Για τη μείωση της ποσότητας σκόνης έγινε διάτρηση με παροχή νερού και κατά τη διάρκεια της αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής οι σωροί των προϊόντων ανατίναξης διατηρούνταν συνεχώς υγροί με κατάβρεγμα. Επίσης γίνονταν μετρήσεις σκόνης και CO με ειδικό μετρητή χειρός σε εβδομαδιαία βάση. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα των μετρήσεων ξεπερνούσαν τα επιτρεπόμενα όρια ($3\text{mg}/\text{m}^3$ και 50ppm αντίστοιχα) τότε αυξανόταν η παροχή αέρα μέχρις ότου οι ρύποι να μειωθούν στα επιτρεπτά όρια. Η απόσταση του ανεμιστήρα από το στόμιο της σήραγγας ήταν μεγαλύτερη των 30m για να μην γίνεται ανακύκλωση των παραγόμενων αερίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Χρήση της βάσης δεδομένων ACCESS

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του Ηλεκτρονικού Μητρώου Ελληνικών Σηράγγων που έχει υλοποιηθεί από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων (Σοφιανός Α.Δ., Γιούτα-Μήτρα Π., Βλάχος Ε.Κ., Ρούσσοσ Ν.Δ) του Ε.Μ.Π. Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μία βάση δεδομένων, κατασκευασμένη μέσω της Microsoft Office Access, η οποία αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο εισαγωγής και σύγκρισης δεδομένων μίας σήραγγας, όπως επίσης και αρχειοθέτησης της.

6.2 Γενικά

Μια Βάση Δεδομένων (ΒΔ) είναι μια σημαντική συλλογή δομημένων πληροφοριών που κρατούνται σε ένα μόνιμο αποθηκευτικό χώρο, πρέπει δε να συνοδεύεται από ένα περιβάλλον για την εύκολη και αποδοτική αποθήκευση και ανάκληση μεγάλου όγκου πληροφορίας (Γιούτα-Μήτρα κ.ά, 2006). Υπάρχουν τέσσερις βασικές δομές ΒΔ, η ιεραρχική, η δικτυακή, η αντικειμενοστραφής και η σχεσιακή. Από αυτές, η σχεσιακή δομή (Chen, 1976), με θεωρητικό υπόβαθρο την σχεσιακή άλγεβρα και τη θεωρία συνόλων είναι η πιο ευέλικτη και εύχρηστη αρκεί να πληρούνται κάποιο βασικοί κανόνες μοντελοποίησης των δεδομένων. Οι σημαντικότεροι κανόνες και περιορισμοί που εξασφαλίζουν την εύρυθμη λειτουργία μίας σχεσιακής ΒΔ είναι η κανονικοποίηση (normalization), η εξασφάλιση μη πλεοναζόντων ή ασυνεπών στοιχείων (data redundancy & inconsistency), η ανεξαρτησία των δεδομένων (data independence), ο έλεγχος ταυτόχρονων προσβάσεων (concurrency control), θέματα προστασίας, θέματα αντιγράφων ασφαλείας. Τα τρία τελευταία αντιμετωπίζονται με παγιωμένες μεθόδους, ενώ η κανονικοποίηση και τα πλεονάζοντα ή ασυνεπή στοιχεία σχετίζονται άμεσα με το περιεχόμενο της πληροφορίας που αποθηκεύεται και αποτελούν ουσιαστικά το μοντέλο οντοτήτων-σχέσεων (Entity-Relationship Model). Το μοντέλο αυτό αποτελεί μία αφαιρετική θεώρηση του πραγματικού κόσμου, αναπαριστώμενου από οντότητες και τις σχέσεις που τις συνδέουν. Η αναπαράσταση του μοντέλου στο λογικό επίπεδο

επιτυγχάνεται με το Διάγραμμα Οντοτήτων-Σχέσεων (E/R Diagram) στο οποίο συμπεριλαμβάνονται οι Οντότητες (Πίνακες) με τα Χαρακτηριστικά των Αντικειμένων τους (Πεδία) καθώς και όλες οι σχέσεις που τα συνδέουν. Οι οντότητες είναι το σημαντικότερο αντικείμενο για το οποίο συλλέγονται πληροφορίες. Πρόκειται για φυσικές έννοιες όπως πρόσωπα, αντικείμενα, τοποθεσίες ή γεγονότα ή και αφηρημένες έννοιες. Δύο ειδικοί τύποι οντότητας είναι οι συσχετιστικές (associative) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πολλαπλών σχέσεων και οι υποκλάσεις (subtype) που χρησιμοποιούνται κατά τις ιεραρχίες γενίκευσης και εξειδίκευσης (generalization - specialization hierarchies) κατά τη διαδικασία προσδιορισμού υπο-ομάδων μέσα σε οντότητες. Οι ειδικές αυτές οντότητες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες κατά την κανονικοποίηση μίας βάσης.

6.3 Εφαρμογή

Η βάση δεδομένων έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων (Γιούτα-Μήτρα κ.ά, 2006) και δομήθηκε με βάση το σχεσιακό μοντέλο και με ιδιαίτερη έμφαση στην εξασφάλιση της αναφορικής ακεραιότητας και της κανονικοποίησης. Ο τελικός σκοπός ήταν τόσο η εύρυθμη λειτουργία όσο και η μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε νέα δεδομένα στο χώρο των τεχνικών διάνοιξης σηράγγων και πιθανές μελλοντικές νέες τεχνολογίες. Κατά τη φάση του καθορισμού της ΒΔ τέθηκε ως πρώτος στόχος η παροχή βασικής γνώσης, όπως π.χ. γεωγραφική τοποθέτηση του έργου, φορέας υλοποίησης και μήκος σήραγγας. Εν συνεχεία, καθορίστηκε το όριο της λεπτομέρειας που θα έπρεπε να συμπεριληφθεί βάσει δύο κριτηρίων: πρώτον το μέγεθος επιβάρυνσης για τις ταχύτητες ανάκτησης των δεδομένων και δεύτερον εάν η πληροφορία εμπίπτει πλέον σε ιδιαίτερη εξειδίκευση. Επί παραδείγματι, για τα μέτρα υποστήριξης έχει συμπεριληφθεί ο προσδιορισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών τους και της ακριβούς θέσης τους στη διατομή του έργου αλλά όχι η εταιρεία κατασκευής τους. Ως γενικές περιοχές ενδιαφέροντος έχουν οριστεί οι εξής: Γενικά και οικονομικά στοιχεία, γεωμετρικά, γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία, συστήματα παρακολούθησης κατά τη διάνοιξη (monitoring) και μετά την ολοκλήρωση του έργου (H/M), στοιχεία τυπικών διατομών υποστήριξης που προβλέπονταν και εάν εφαρμόστηκαν, ιδιαίτερα προβλήματα που προέκυψαν κατά την κατασκευή και η θεραπεία που εφαρμόστηκε και τέλος, χαρακτηριστικά σχέδια σχετικά με τη γεωλογία και την υποστήριξη που εφαρμόστηκε. Η κεντρική σύλληψη στο επίπεδο του εννοιολογικού σχεδιασμού ήταν ότι η πληροφορία που

σχετίζεται με μία σήραγγα μπορεί να χαρακτηρίζει είτε όλη τη σήραγγα είτε ένα τμήμα αυτής. Στην οντότητα *tunnel* περιλήφθησαν όλοι εκείνοι οι χαρακτηρισμοί που αφορούν τη σήραγγα στο σύνολό της και πρόκειται για γενικά και οικονομικά στοιχεία όπως π.χ. Ονομασία, Νομός Τοπωνύμιο, Σκοπός έργου, Μήκος, Φορέας Υλοποίησης, Μελετητής, Κατασκευαστής, Τεχνικός Σύμβουλος, Ημ/νία έναρξης και περάτωσης, Κόστος ανά χλμ. σήραγγας κ.ό.κ. Στοιχεία όπως η μέθοδος διάνοιξης, το βήμα προχώρησης, τα μέτρα υποστήριξης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται, η κατάταξη της βραχομάζας, οι υδρογεωλογικές συνθήκες, κ.ό.κ. τελούν υπό συνεχή μεταβολή κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας. Κάποια από αυτά τα στοιχεία χαρακτηρίζουν μεγάλα τμήματα της σήραγγας ενώ κάποια άλλα μπορεί να μεταβάλλονται και σε κάθε βήμα προχώρησης. Οι δυνατότητες εδώ ήταν δύο: είτε τα μεταβαλλόμενα στοιχεία θα τηρούνταν ανά τακτά και σχετικά μικρά διαστήματα κατά μήκος της σήραγγας είτε θα καθορίζονταν τμήματα της σήραγγας με εν γένει ομοιογενή στοιχεία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο στόχος της εργασίας ήταν η παροχή μίας γενικής και εύχρηστης εικόνας του κάθε έργου και η αποφυγή χρονοβόρων διαδικασιών για την παροχή εξειδικευμένης πληροφορίας, ο ζυγός έκλινε υπέρ της δεύτερης λύσης. Ο καθορισμός τμημάτων του κάθε έργου με σχετική ομοιογένεια ακολούθησε την πάγια τεχνική σχεδιασμού μίας σήραγγας με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία, οπότε ως ομοιογενή τμήματα καθορίστηκαν οι τυπικές διατομές υποστήριξης του κάθε έργου. Όλοι οι χαρακτηρισμοί που μεταβάλλονται μέσα στην ίδια σήραγγα συνοδεύονται και από ένα ποσοστό παρουσίας τους στο συνολικό της μήκος. Με την χωρική αυτή ανεξαρτοποίηση επετεύχθη τόσο η ευελιξία όσο και η ικανοποίηση των κυριότερων κανόνων του σχεδιασμού μίας ΒΔ για πλεονάζοντα στοιχεία.

Η οντότητα *sector* αντιπροσωπεύει τις τυπικές διατομές υποστήριξης και αποτελεί την βασική κατάτμηση του κάθε έργου. Συνδέεται με την οντότητα *tunnel* με σχέση 1÷n απεριόριστης πληθικότητας και περιέχει στοιχεία μεθόδου διάνοιξης, μέγιστης επιτρεπόμενης σύγκλισης, απόστασης γραμμών Α και Β, ποσοστό ύπαρξης στο σύνολο της σήραγγας και, εάν πρόκειται για συμπαγές τμήμα, τις σχετικές Χ.Θ. Η οντότητα αυτή συνδέεται με πιο σύνθετες σχέσεις με τις οντότητες *geological*, *geotechnical*, *excavation_phase* και *support*, οι οποίες περιέχουν αντίστοιχα τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία, το βήμα προχώρησης σε κάθε φάση εκσκαφής και την προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη δυνατότητα εισαγωγής νέων παραμέτρων ενδιαφέροντος όπως π.χ. κάποια καινοτομία στα στοιχεία υποστήριξης ή κάποια γεωτεχνική παράμετρος που δεν έχει συμπεριληφθεί στα επιλέξιμα γεωτεχνικά

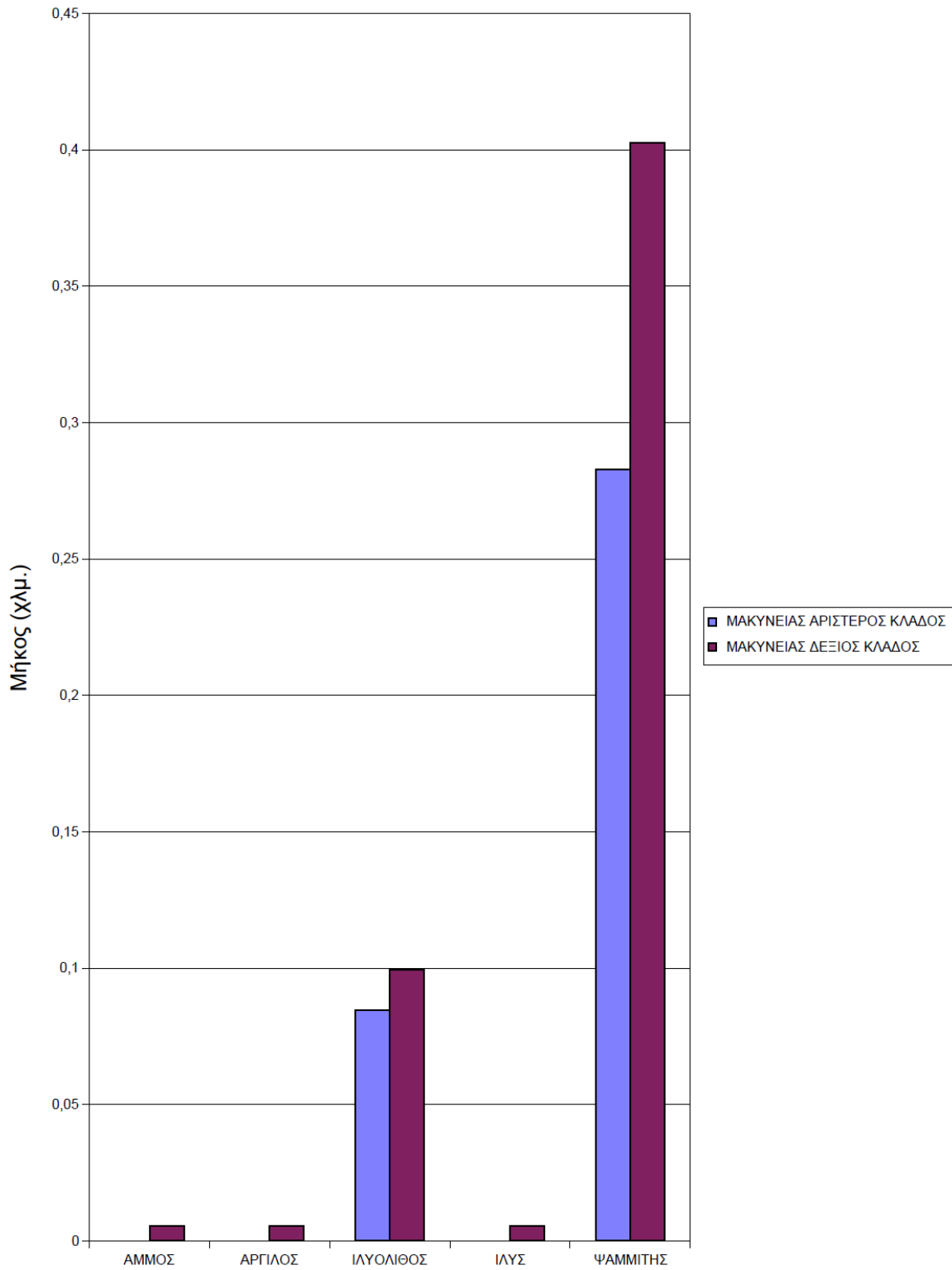
στοιχεία. Τέλος, λόγω της δόμησης που εφαρμόστηκε, καθίσταται δυνατή η εύρεση μίας ή περισσότερων σήραγγων με βάση πολυάριθμα κριτήρια. Πρακτικά, τα κριτήρια εύρεσης δύνανται να είναι τόσα όσα είναι και τα χαρακτηριστικά της κάθε σήραγγας, και μπορούν να λειτουργήσουν και συνδυασμένα.

6.4 Αποτελέσματα

Η πληροφορία που δύναται να εξαχθεί για κάθε σήραγγα από τη βάση δεδομένων έρχεται σε δύο μορφές, τη λεπτομερειακή και την γενική. Η λεπτομερειακή εικόνα αφορά στην τιμή του κάθε χαρακτηριστικού της σήραγγας. Εξυπηρετεί τις ανάγκες εύρεσης συγκεκριμένης πληροφορίας όπως π.χ. τι μήκος είχαν τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν για την ήλωση της οροφής σε συγκεκριμένο τμήμα μίας σήραγγας. Περισσότερο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει η γενική εικόνα που είναι δυνατόν να εξαχθεί για συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος.

Για την παρούσα Διπλωματική εργασία έγινε εισαγωγή στη Βάση Δεδομένων, των διαθέσιμων στοιχείων στη σήραγγα Μακύνειας τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη καθώς και επίσης στοιχείων της κατασκευής, τα οποία αποκτήθηκαν μετά από επίσκεψη στο χώρο κατασκευής της σήραγγας. Στη συνέχεια τα παραπάνω στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε ορισμένα στατιστικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να μας δώσουν μία γενική εικόνα του έργου. Στη συνέχεια φαίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα.

6.5 Γεωλογία



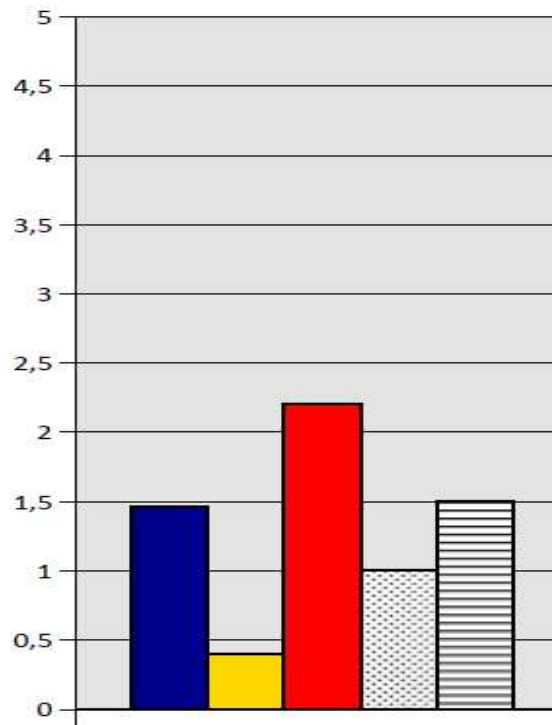
Σχήμα 11 : Ποσοστά εμφάνισης πετρωμάτων ανά κλάδο σύμφωνα με τη μελέτη

Όπως φαίνεται κα από το Σχήμα Σχήμα 11 το μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας πρόκειται να διανοιχθεί σε σχηματισμούς ιλυολίθων και ψαμμιτών, με ιδιαίτερα αυξημένη την παρουσία του ψαμμίτη. Αντίθετα τα αναμενόμενα ποσοστά συνάντησης άμμου, ιλύος και αργίλου είναι πολύ χαμηλά.

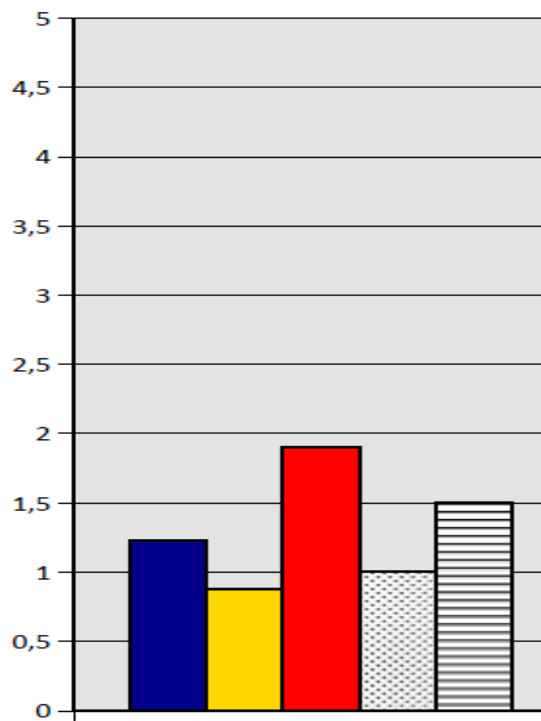
6.6 Βήμα προχώρησης

Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα Σχήμα 12 έως Σχήμα 18) βλέπουμε το βήμα προχώρησης για κάθε γεωτεχνική κατηγορία που συναντήθηκε σε κάθε κλάδο. Τα σιγάματα περιέχουν δεδομένα που αφορούν το ελάχιστο και το μέγιστο βήμα προχώρησης που παρατηρήθηκε κατά την κατασκευή, όπως επίσης και τον μέσο όρο τους προκειμένου να συγκριθεί με τον αντίστοιχο μέσο όρο τον οποίο προβλέπει η μελέτη του έργου.

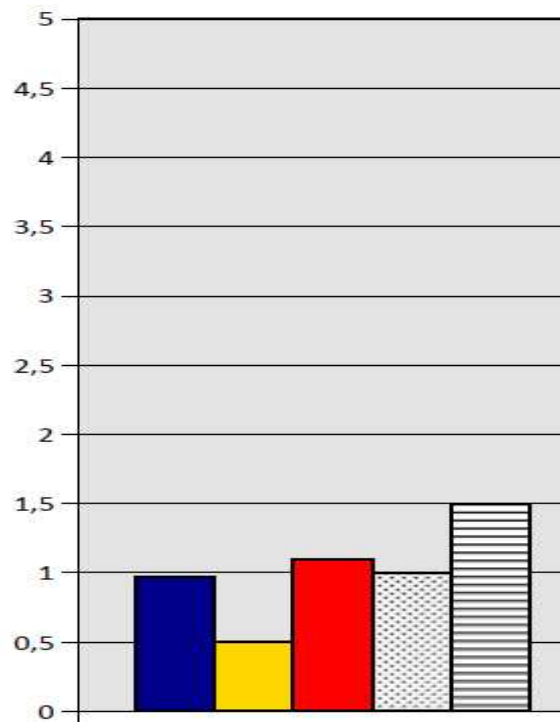
- Μέσο βήμα προχώρησης
- Μέγιστο βήμα προχώρησης (κατασκευή)
- Ελάχιστο βήμα προχώρησης (κατασκευή)
- ▢ Μέγιστο βήμα προχώρησης (μελέτη)
- ▣ Ελάχιστο βήμα προχώρησης (μελέτη)



Σχήμα 12 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC1,2 του αριστερού κλάδου της σήραγγας

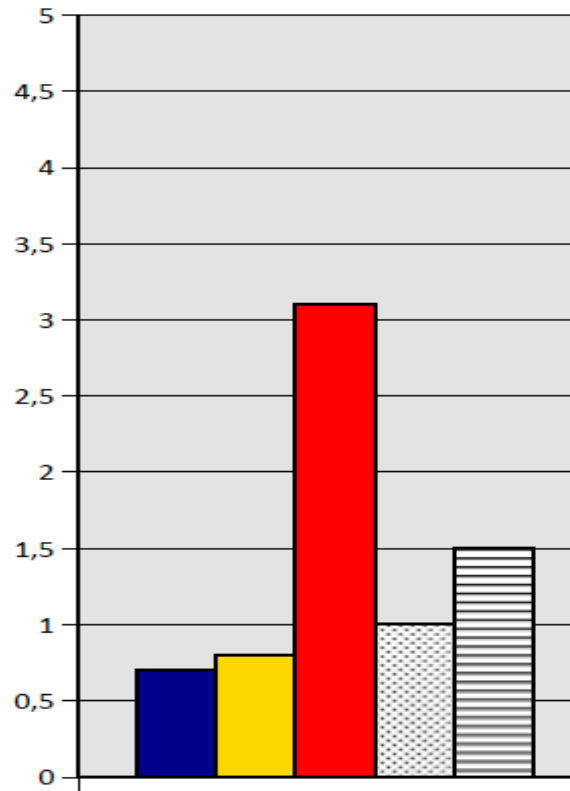


Σχήμα 13 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC2 του αριστερού κλάδου της σήραγγας

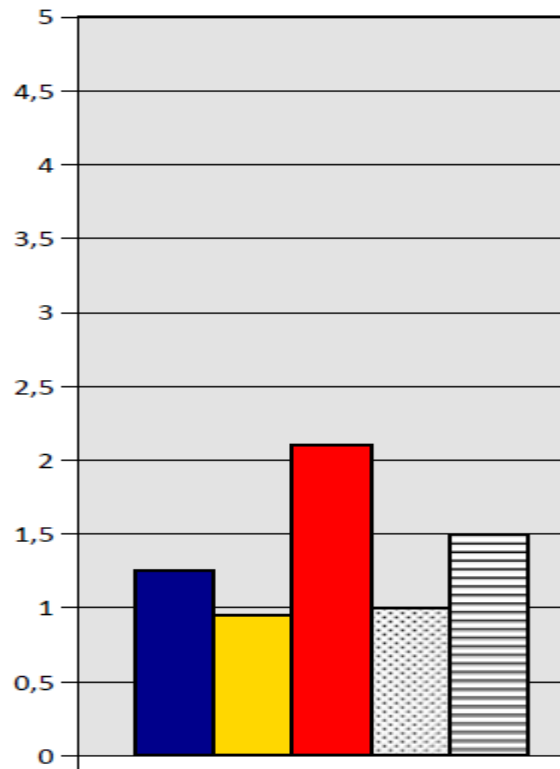


Σχήμα 14 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSD του αριστερού κλάδου της σήραγγας

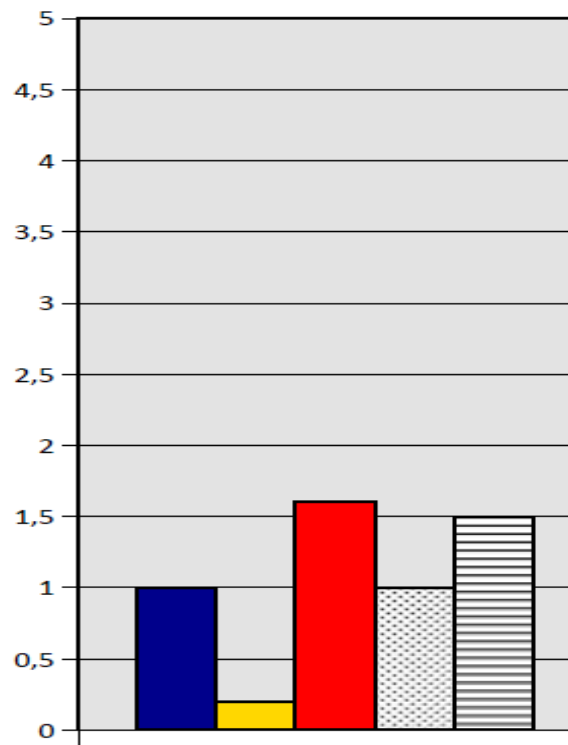
Από τα Σχήματα Σχήμα 12 Σχήμα 13 Σχήμα 14 βλέπουμε ότι ο αριστερός κλάδος είχε γενικά την αναμενόμενη συμπεριφορά, όσο αφορά το βήμα προχώρησης. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η εκσκαφή της κατηγορίας C1,2, όπου οι ρυθμοί προχώρησης ήταν πολύ πιο μεγάλοι από το αναμενόμενο.



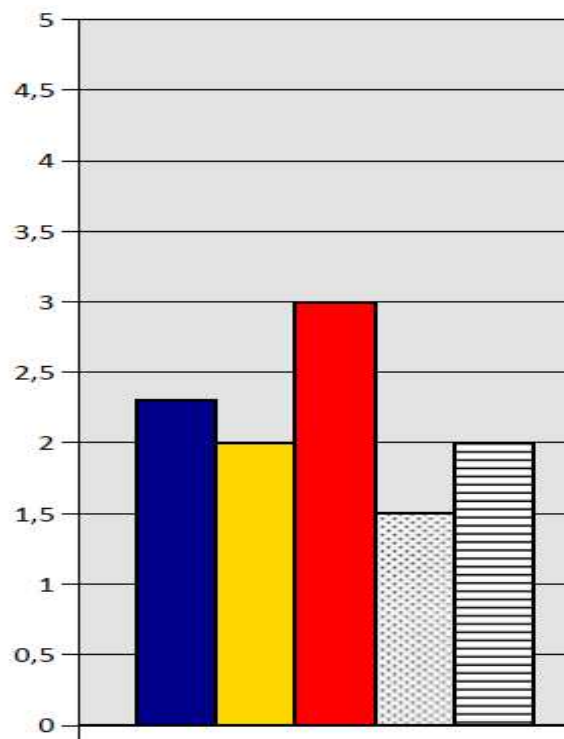
Σχήμα 15 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC1,2 του δεξιού κλάδου της σήραγγας



Σχήμα 16 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSC2 του δεξιού κλάδου της σήραγγας



Σχήμα 17 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSD του δεξιού κλάδου της σήραγγας

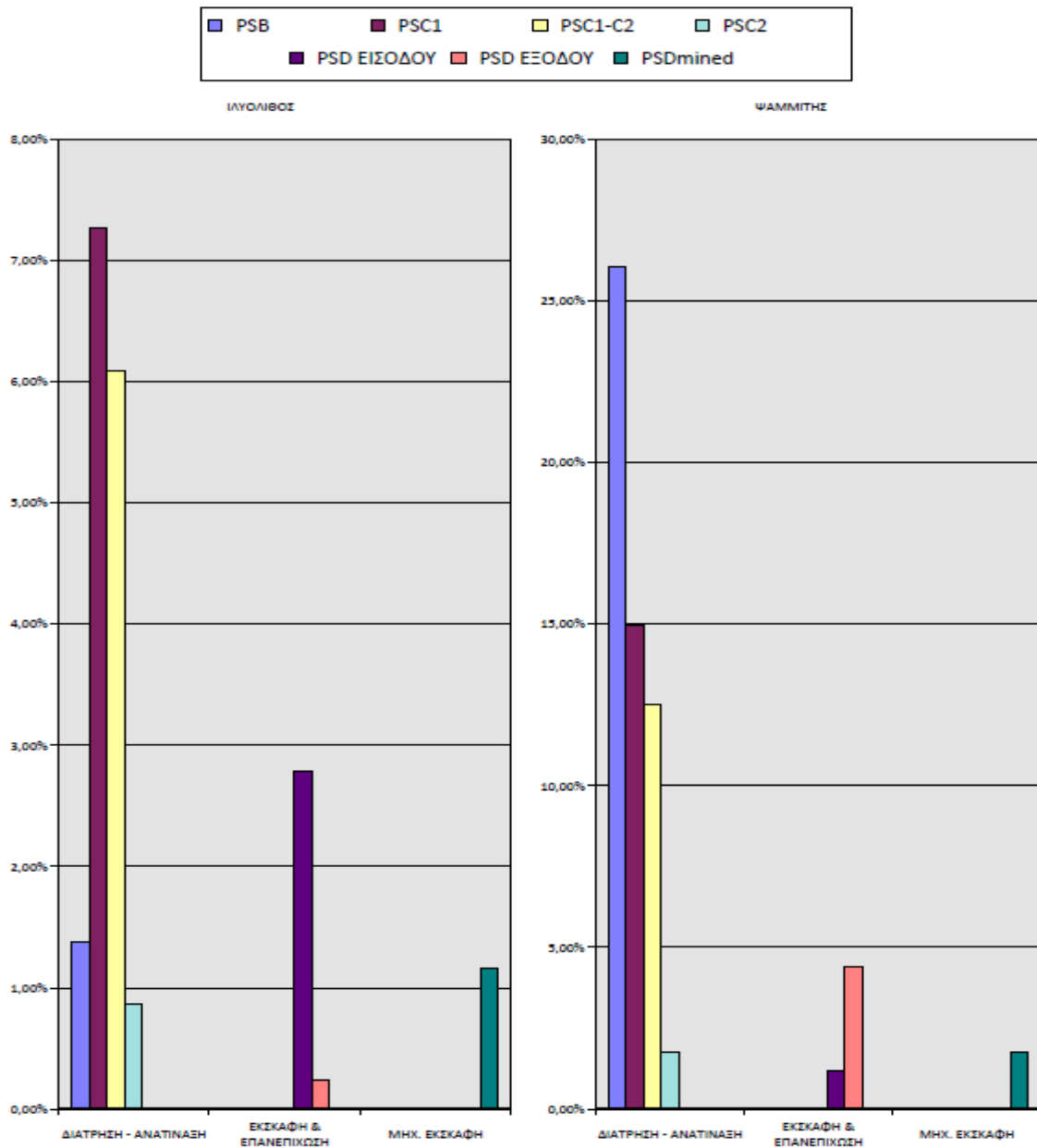


Σχήμα 18 : Ανάλυση βήματος προχώρησης κατηγορίας PSB του δεξιού κλάδου της σήραγγας

Για τον δεξιό κλάδο, στον οποίο αντιστοιχούν τα Σχήματα Σχήμα 15 Σχήμα 18 μπορούμε να πούμε ότι επικράτησε μία μέτρια κατάσταση. Οι ρυθμοί προχώρησης των κατηγοριών C2 και D ήταν καλοί και σύμφωνοι με τη μελέτη. Αντίθετα, στις κατηγορίες C1 και B παρατηρήθηκαν μικρότερα και μεγαλύτερα βήματα προχώρησης αντίστοιχα.

6.7 Μέθοδος εκσκαφής

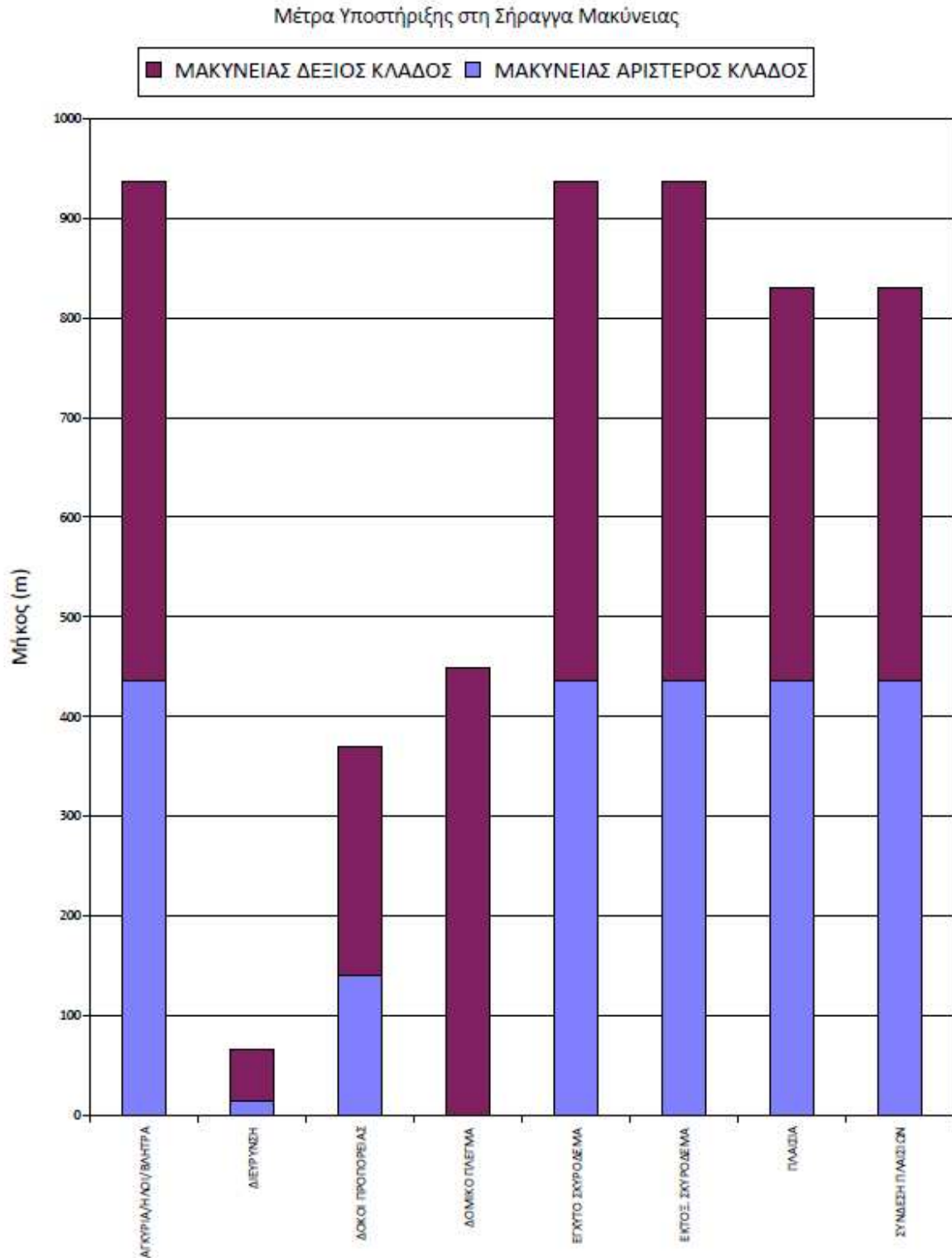
Στο Σχήμα Σχήμα 19 παρουσιάζεται η μέθοδος εκσκαφής ανά γεωτεχνική κατηγορία και πέτρωμα.



Σχήμα 19 : Ποσοστά χρήσης μεθόδων εκσκαφής ανάλογα με τη γεωλογική κατηγορία

6.8 Μέτρα υποστήριξης

Στο Σχήμα Σχήμα 20 παρουσιάζονται τα χρησιμοποιηθέντα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας ως προς το μήκος χρήσης τους και ανά κλάδο.



Σχήμα 20 : Μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν ανά κλάδο σύμφωνα με την κατασκευή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE2

7.1. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase2

Το πρόγραμμα Phase2 είναι ένας διδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα Phase2, περιλαμβάνουν:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις (έως 50 φάσεις)
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων).

Η επίλυση του εκάστοτε μοντέλου στο Phase2 γίνεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με τις δύο κύριες τάσεις στο επίπεδο της διατομής ανάλυσης και μία κύρια τάση κάθετα προς αυτό. Επίσης η διατομή θεωρείται σταθερή κατά μήκος του άξονα της ενώ η εκσκαφή θεωρείται ότι έχει άπειρο μήκος κάθετα προς το επίπεδο της ανάλυσης.

7.2 Προετοιμασία μοντέλου

7.2.1 Εισαγωγή Γεωμετρίας

Η προετοιμασία του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξη κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο βάρος των στοιχείων είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

7.2.2 Στάδια εκσκαφής-υποστήριξης

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας προσομοιώνονται στο Phase2 μέσω σταδίων προσομοίωσης στα οποία είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους (πχ. χαλάρωση υλικού), και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης.

7.2.3 Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης

Το πρόγραμμα είναι προορισμένο για το σχεδιασμό υπογείων εκσκαφών και παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των στοιχείων της υποστήριξης μίας σήραγγας. Η προσομοίωση των αγκυρίων γίνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Το Phase παρέχει

τέσσερα είδη στοιχείου ακυρίων: σημειακής αγκύρωσης, πλήρους πάκτωσης, αγκύρια συρματοσχοίνου, και swellex ή split-set. Τα αγκύρια μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να ορισθεί η μέγιστη και παραμένουσα φέρουσα ικανότητα του ακυρίου. Ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού. Τα στοιχεία δοκού μπορούν επίσης να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά, ενώ είναι δυνατό να ορισθούν διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε στάδιο της ανάλυσης.

7.2.4 Ιδιότητες υλικών γεωμάζας

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο. Προκειμένου για πλαστική συμπεριφορά υλικών διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας είναι τα κριτήρια Mohr-Coulomb και Hoek-Brown. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

- ελαστικά-τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές,
- ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ελάττωση της δυσκαμψίας του υλικού μέσα στη σήραγγα ώστε να προσομοιωθεί η διάνοιξη της εκσκαφής σε στάδια.

7.2.5 Τάσεις πεδίου- Φορτίσεις

Στο Phase2 οι τάσεις πεδίου καθορίζονται να έχουν σταθερές τιμές στις περιπτώσεις εκσκαφών σε μεγάλα βάθη, όταν η επίδραση της βαρύτητας στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης είναι αμελητέα συγκρινόμενη με το μέγεθος των επί τόπου τάσεων. Προκειμένου για εκσκαφές σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να

ορισθεί ένα εντατικό πεδίο λόγω υπερκειμένων γαιών λαμβάνοντας υπόψη της επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma_v = \gamma \cdot h$, όπου γ είναι το ίδιο βάρος των γεωυλικών και το βάθος από την επιφάνεια. Η οριζόντια κύρια τάση, υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma_h = K \cdot \sigma_v$, όπου K ο συντελεστής πλευρικής ώθησης.

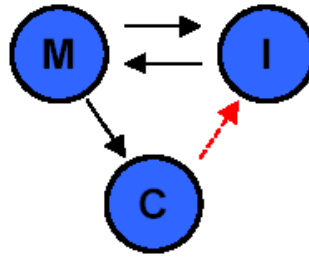
Παράλληλα με τις τάσεις πεδίου, μπορούν να ορισθούν δυνάμεις κάθετα ή παράλληλα προς κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό σύνορο του μοντέλου, όπως και επικόμβιες δυνάμεις στους κόμβους των στοιχείων του μοντέλου κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Η εφαρμογή τέτοιων δυνάμεων είναι απαραίτητη στην περίπτωση αβαθών εκσκαφών όπου υπεισέρχονται στους υπολογισμούς επιφανειακά φορτία, λόγω βάρους υφιστάμενων κτιρίων ή φορτία κυκλοφορίας υπερκείμενης οδού.

7.3 Τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase2

Με το πρόγραμμα Phase2 εύκολα δημιουργείται ένα μοντέλο και κατασκευάζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα γίνεται η ανάλυση των τάσεων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτά γίνονται με τη χρήση των τριών υποπρογραμμάτων από τα οποία αποτελείται το phase2 και είναι: το Μοντέλο (MODEL), ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET). Το Μοντέλο (MODEL) είναι ένα πρόγραμμα προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και τροποποίηση των ορίων του μοντέλου, την υποστήριξη, τις επί τόπου τάσεις, τις οριακές συνθήκες, για την ανάθεση των ιδιοτήτων των υλικών και για τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το phase2 δίνει τη δυνατότητα εύκολης κατασκευής του μοντέλου με διάφορα εργαλεία. Η εκσκαφή, τα σύνορα των υλικών και των σταδίων καθορίζονται με τη βοήθεια εργαλείων σχεδίασης ή απλά με την εισαγωγή συντεταγμένων. Επίσης μπορεί να γίνει προσομοίωση των ασυνεχειών του πετρώματος. Ο χρήστης μπορεί να συμπεριλάβει πίεση πόρων στην ανάλυση ενεργών τάσεων, ορίζοντας υδροφόρους ορίζοντες, πιεζομετρικές επιφάνειες κλπ.

Το Μοντέλο (MODEL), ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η Ερμηνεία των

Αποτελεσμάτων (INTERPRET) λειτουργούν και ως ανεξάρτητα προγράμματα. Μπορούν επίσης να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα Σχήμα 21.



Σχήμα 21 : Ο συσχετισμός των τριών υποπρογραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμα Phase2

- Ο Υπολογιστής (COMPUTE) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET) μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσα από το Μοντέλο (MODEL).
- Ο Υπολογιστής (COMPUTE) πρέπει να τρέξει σε ένα αρχείο πριν να είναι δυνατή η ανάλυση των αποτελεσμάτων με το INTERPRET (κόκκινο βέλος).
- Το Μοντέλο (MODEL) μπορεί να ενεργοποιηθεί από το INTERPRET.

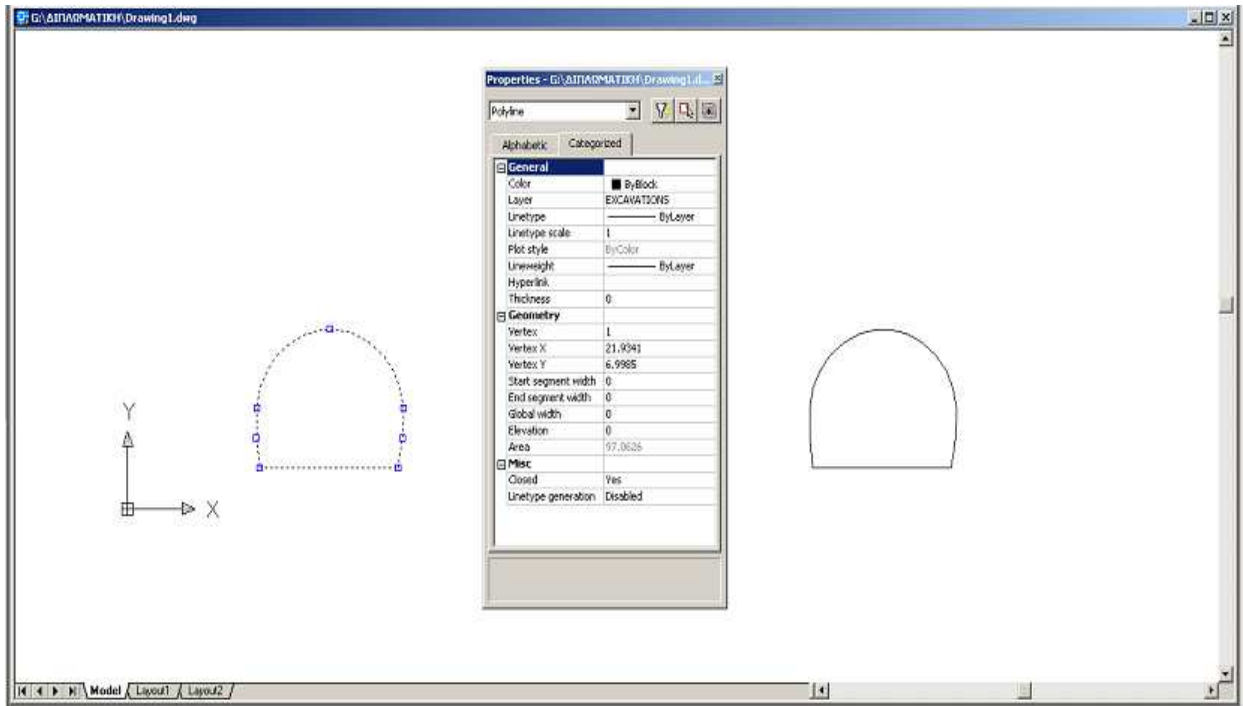
Ο υπολογιστής (COMPUTE) του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει μπορεί να γίνει μόνο εφόσον υπάρχει το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έχουμε αποθηκεύσει το μοντέλο σε ένα αρχείο.

Η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (INTERPRET) είναι το μετά – επεξεργαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και ερμηνεία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων του phase2. Είναι αναγκαίο να τρέξουμε πρώτα το μοντέλο με το COMPUTE, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να δούμε τα αποτελέσματα INTERPRET.

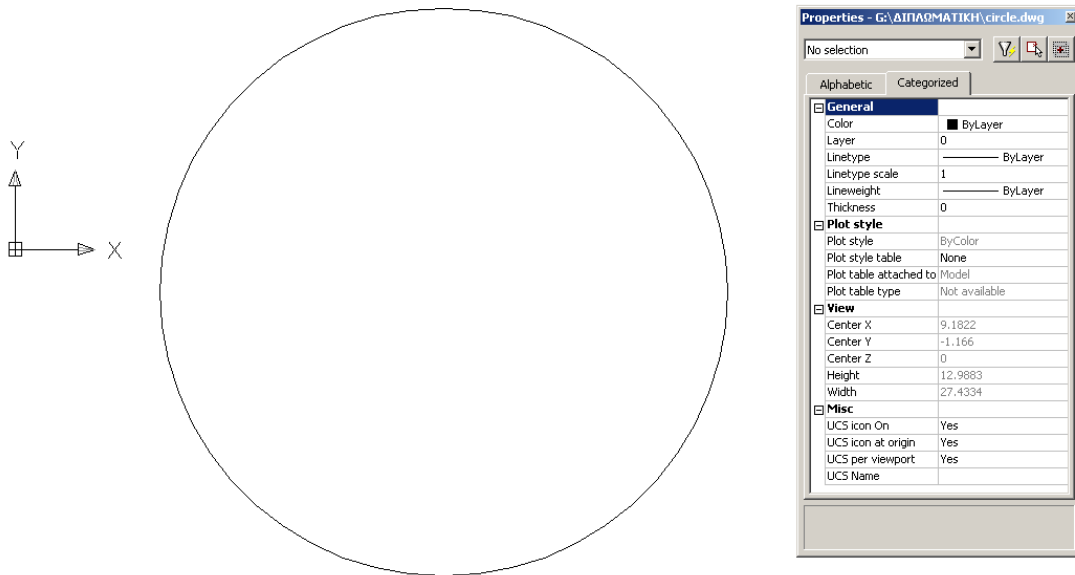
7.4 Προετοιμασία μοντέλων προσομοίωσης σήραγγας Μακύνειας

Για να δημιουργηθούν όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Phase2, έγιναν κάποιες προεργασίες. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε μία ακριβής αναπαράσταση της διατομής της σήραγγας Μακύνειας με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD 2002. Σε αυτό το στάδιο συγκεντρώθηκαν τα γεωμετρικά στοιχεία της σήραγγας όπως δίνονται από τον μελετητή. Με τη χρήση του AutoCAD δημιουργήθηκε η διατομή της δίδυμης σήραγγας, πάνω στην οποία έγιναν όλες οι περαιτέρω αναλύσεις στο Phase2. Επίσης με

τον ίδιο ακριβώς τρόπο δημιουργήθηκε και μία κυκλική διατομή, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη ανάλυση που κάναμε, δηλαδή στο μοντέλο σύγκλισης-αποτόνωσης βραχόμαζας, προκειμένου να δημιουργηθεί η θεωρητική καμπύλη αποτόνωσης. Επομένως δημιουργήθηκαν δύο σχέδια AutoCAD, τα οποία φαίνονται στα Σχήματα Σχήμα 22 Σχήμα 23.



Σχήμα 22 : Σχεδιασμός της γεωμετρίας της δίδυμης σήραγγας Μακύνειας στο AutoCAD



Σχήμα 23 : Σχεδιασμός ισοδύναμης κυκλικής διατομής στο AutoCAD

Στη συνέχεια εισάγαμε το σχέδια αυτά στο πρόγραμμα Phase2 με την εντολή file-import-import DXF και πάνω σε αυτά άρχισε η δημιουργία του κάθε προς ανάλυση μοντέλου.

Επιπλέον για την αναπαράσταση του πραγματικού αναγλύφου την υπερκειμένων της σήραγγας, δώθηκε κλίση της επιφάνειας αυξανόμενη από τον αριστερό (39.5m) προς τον δεξιό κλάδο (46.7m).

7.5 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης σήραγγας Μακύνειας

Σε αυτό το στάδιο παρουσιάζεται συνοπτικά όλα τα μοντέλα, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια της Διπλωματικής εργασίας. Τα μοντέλα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, όπου στην κάθε μία εξετάζονται συγκεκριμένες παράμετροι. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω εν συντομία και τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8.

7.5.1 Μοντέλα σύγκλισης-αποτόνωσης μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

Το πρώτο βήμα ήταν η αναπαράσταση της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της σήραγγας. Για να το καταφέρουμε αυτό πραγματοποιήθηκαν 8 διαδοχικές αποτονώσεις με σταδιακή απομείωση του μέτρου ελαστικότητας στο εσωτερικό της σήραγγας. Ξεκινώντας από το αρχικό μέτρο ελαστικότητας μειώσαμε τα νέα μέτρα ελαστικότητας όπως φαίνεται στον Πίνακα 28 (Κεφάλαιο 8).

Συνολικά η εργασία αυτή έγινε **τρεις** φορές. Η πρώτη πραγματοποιήθηκε για μία **ισοδύναμη κυκλική** διατομή ίδιου εμβαδού με την διατομή της σήραγγας, στην οποία χρησιμοποιήθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας A. Ξεκινώντας από το αρχικό μέτρο ελαστικότητας των $E_0 = 18000$ MPa μειώσαμε διαδοχικά τα μέτρα ελαστικότητας όπως φαίνεται στον Πίνακα 28.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η διαδικασία αποτόνωσης για την πραγματική διατομή της σήραγγα, χρησιμοποιώντας τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας A. Τα βήματα ήταν ίδια με αυτά της πρώτης περίπτωσης και τα δεδομένα είναι αυτά που φαίνονται στον Πίνακα 28 (Κεφάλαιο 8).

Στον τρίτο και τελευταίο κύκλο αποτονώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας κατηγορίας C1 και πάλι για την πραγματική διατομή με τις αποτονώσεις που φαίνονται στον Πίνακα 29. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στην παράγραφο 8.3.

7.5.2 Μοντέλα χωρίς ρωγματομένη βραχώμαζα

Σε αυτήν την κατηγορία μοντέλων προσπαθήσαμε να ελέγξουμε την επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για δύο κατηγορίες βραχώμαζας. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι κατηγορίες A και C1. Δημιουργήθηκαν δύο ξεχωριστά μοντέλα στο Phase2, στα οποία κάθε κατηγορία βραχώμαζας εμφανίζεται μόνη της, χωρίς να αλληλεπιδρά με την άλλη.

Στη συνέχεια εξήχθησαν στοιχεία από το πρόγραμμα για να ελέγξουμε την συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στην παράγραφο 8.4.

7.5.3 Μοντέλα με ρωγματομένη βραχόμαζα

Στην τρίτη κατηγορία μοντέλων αναπαραστάθηκε η δίδυμη σήραγγα με την παρουσία μίας ρωγματομένης μάζας, η οποία μάλιστα τέμνει τον αριστερό της κλάδο, όπως και στην πραγματικότητα. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε βραχόμαζα κατηγορίας A για το κύριο τμήμα την περιβάλλουσας βραχόμαζας, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας C1 για την αναπαράσταση της ρωγματομένης μάζας. Να σημειωθεί ότι στα μοντέλα αυτά επιλέχθηκε να μην προσομοιωθεί το ρήγμα, λόγω του οποίου υπάρχει η ρωγματομένη ζώνη ως διακριτή ασυνέχεια, καθώς αυτό θα γίνει στην επόμενη κατηγορία προσομοιώσεων.

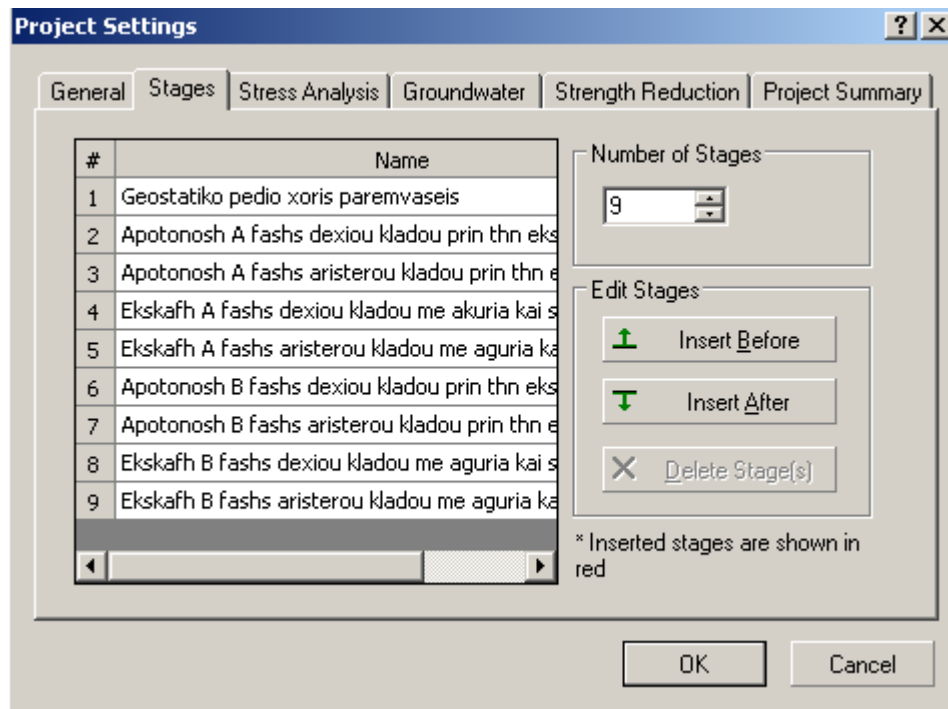
Και σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται πιθανή αστοχία των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στην παράγραφο 8.5.

7.5.4 Μοντέλα με πλήρες ρήγμα

Σε αυτά τα μοντέλα υπάρχει παρουσία ρωγματομένης μάζας, καθώς επίσης και ρήγματος που να τέμνει τον αριστερό κλάδο της. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για αυτές τις δοκιμές περιλαμβάνουν το πλήρες μοντέλο διάνοιξης της σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψη το ρήγμα. Χρησιμοποιήθηκε βραχόμαζα A για τον κύριο όγκο της περιβάλλουσας την σήραγγα βραχόμαζας και κατηγορία βραχόμαζας C1 για την αναπαράσταση της ρωγματομένης μάζας. Επιπλέον δημιουργήθηκαν πέντε μοντέλα, όπου στο καθένα μειώνεται η ακαμψία του ρήγματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στην παράγραφο 8.6.

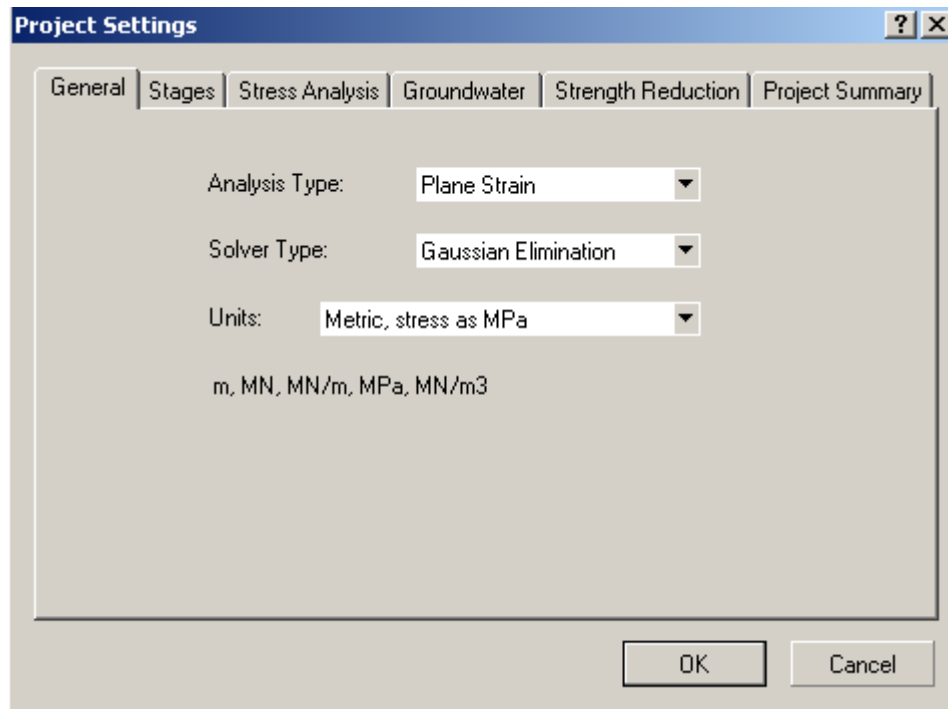
7.5.5 Ρυθμίσεις (project settings)

Όποτε δημιουργείται ένα μοντέλο σε στάδια, το πρώτο πράγμα που πρέπει να οριστεί είναι ο αριθμός των σταδίων στο μενού των Ρυθμίσεων (Project Settings), αφού αυτό θα επηρεάσει τις επακόλουθες επιλογές του μοντέλου. Στα μοντέλα που θα δημιουργήσουμε το πρώτο στάδιο είναι το αρχικό γεωστατικό πεδίο. Η εκσκαφή μας θα πραγματοποιηθεί σε 9 στάδια. Άρα στον αριθμό σταδίων θα επιλέξουμε 9. Τα στάδια αυτά φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα Εικόνα 21.



Εικόνα 21 : Στάδια εκσκαφής

Επιπλέον στις ρυθμίσεις μοντέλου επιλέγουμε και κάποια γενικά στοιχεία σχετικά με το μοντέλο. Επιλέχθηκε το μετρικό σύστημα μονάδων (Metric). Αυτό καθορίζει τις μονάδες μήκους σε m, δύναμης σε MN και μοναδιαίου βάρους σε MN/m^3 . Οι μονάδες αυτές θα χρησιμοποιηθούν στην διάρκεια προσομοίωσης της εκσκαφής. Ως τύπο ανάλυσης επιλέγουμε επίπεδη παραμόρφωση (plane strain). Όλες οι παραπάνω επιλογές φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα Εικόνα 22.



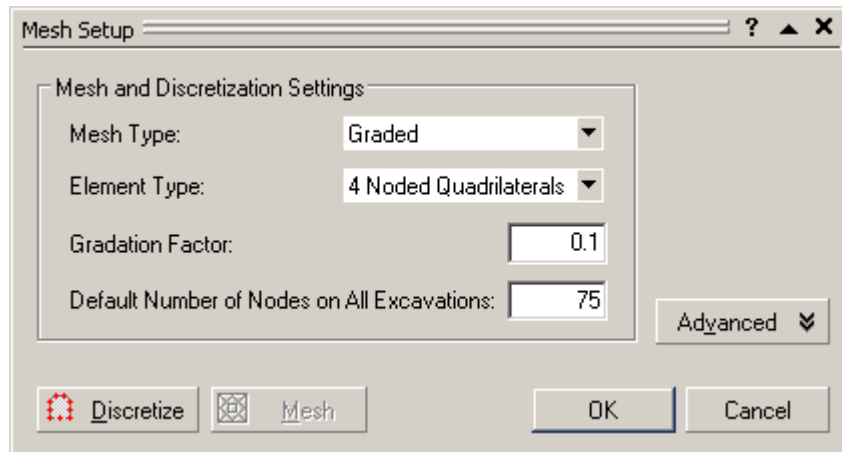
Εικόνα 22 : Αρχικές ρυθμίσεις του μοντέλου

7.5.6 Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing)

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο βήματα. Αρχικά γίνεται διακριτοποίηση των ορίων της εκσκαφής και στη συνέχεια η δημιουργία του πλέγματος.

7.5.7 Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize)

Πριν την παραγωγή του πλέγματος μπορούμε να καθορίσουμε τις διάφορες παραμέτρους δημιουργίας του, όπως φαίνεται στην Εικόνα Εικόνα 23.



Εικόνα 23 : Ρυθμίσεις πλέγματος

Τώρα θα διακριτοποιήσουμε τα όρια. Η διακριτοποίηση των ορίων θα διαμορφώσει το πλαίσιο για το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

7.5.8 Δημιουργία πλέγματος (Mesh)

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται με βάση τη διακριτοποίηση που έχει γίνει, χωρίς άλλη επέμβαση από το χρήστη.

7.5.9 Συνοριακές συνθήκες (Boundary conditions)

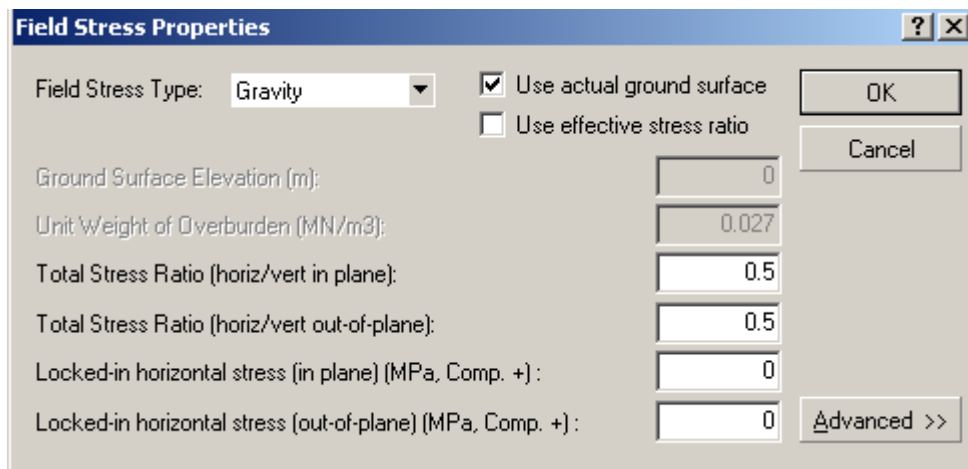
Όταν δημιουργείται το πλέγμα, είναι προκαθορισμένο όλοι οι κόμβοι του εξωτερικού ορίου να έχουν μηδενική μετατόπιση. Αυτό εμφανίζεται με το τριγωνικό σύμβολο της άρθρωσης που βλέπουμε να τοποθετείται σε κάθε κόμβο του εξωτερικού ορίου.

Εφόσον ένα τμήμα του εξωτερικού ορίου του μοντέλου βρίσκεται στην επιφάνεια, πρέπει να ορίσουμε ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι μια ελεύθερη επιφάνεια.

Με το ποντίκι επιλέγουμε τα τμήματα του εξωτερικού ορίου που βρίσκονται στην επιφάνεια.

7.5.10 Τασικό πεδίο (Field stress)

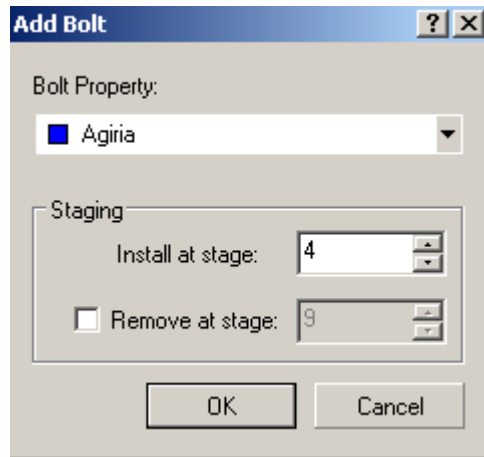
Στο πρόγραμμα Phase2 το τασικό πεδίο μπορεί να καθοριστεί μέσω των κυρίων τάσεων ή μέσω της βαρύτητας. Η κατακόρυφη τάση έχει τιμή που προκύπτει από το επιλεγμένο βάθος που βρίσκεται η σήραγγα μας ($h=45$ m) πολλαπλασιασμένο με το γ [μοναδιαίο βάρος βραχομάζας ($0,0258$ MN/m³)]. Οι οριζόντιες τάσεις εντός και εκτός του επιπέδου ανάλυσης καθορίζονται από τον λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη τάση, που επιλέχθηκε στο 0,5 σε αυτή τη σειρά αναλύσεων. Οι επιλογές αυτές φαίνονται στην Εικόνα Εικόνα 24.



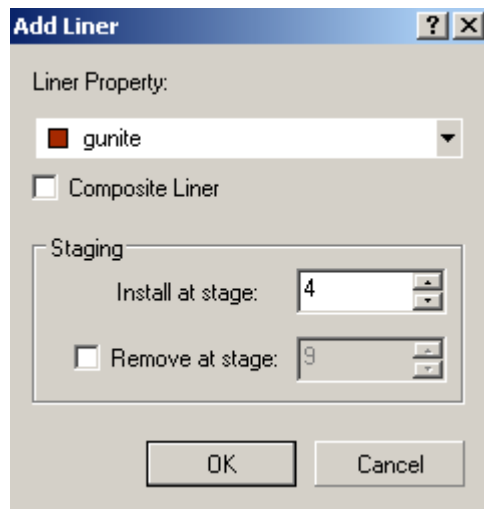
Εικόνα 24 : Εντατικό πεδίο εκσκαφής

7.5.11 Υποστήριξη (Support)

Ως μέτρα υποστήριξης θα χρησιμοποιηθούν αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα 25 Εικόνα 26.



Εικόνα 25 : Επιλογή αγκυρίων



Εικόνα 26 : Επιλογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος

7.6 Ιδιότητες

Το κομμάτι των ιδιοτήτων αφορά αρχικά στον καθορισμό των γεωτεχνικών ιδιοτήτων βραχώμαζας, των μηχανικών ιδιοτήτων των αγκυρίων και των μηχανικών ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αφού όλες αυτές καθοριστούν πλήρως στη συνέχεια ακολουθεί η ανάθεση αυτών στα διάφορα στάδια της διάνοιξης μας βάση του μοντέλου εκσκαφής.

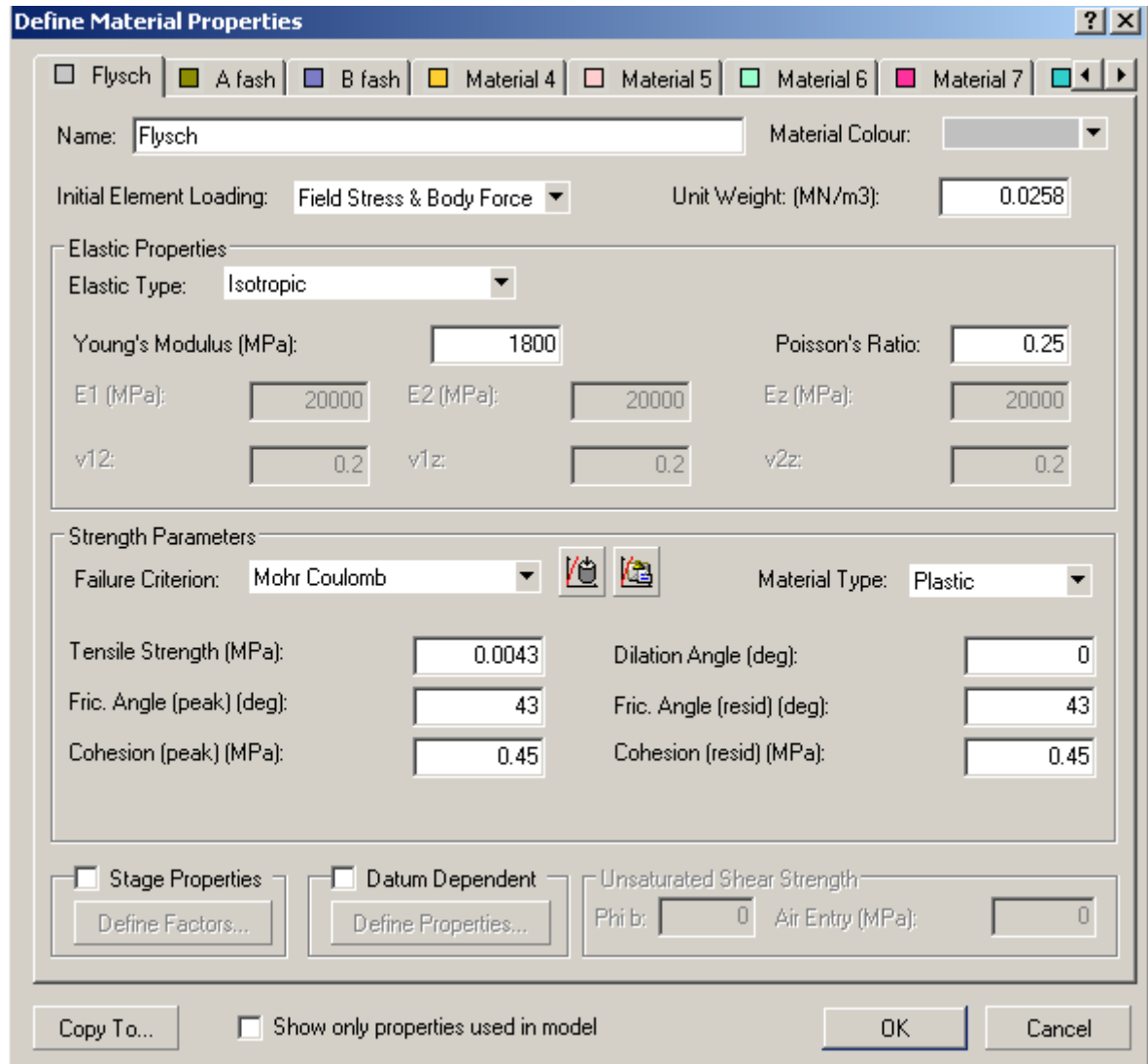
7.6.1 Καθορισμός ιδιοτήτων (Defining Properties)

7.6.1.1 Καθορισμός γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών

Στο στάδιο αυτό της κατασκευής του μοντέλου εισάγονται οι ιδιότητες και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας βάση των γεωλογικών-γεωτεχνικών στοιχείων που βρίσκονται στην μελέτη κατασκευής του έργου.

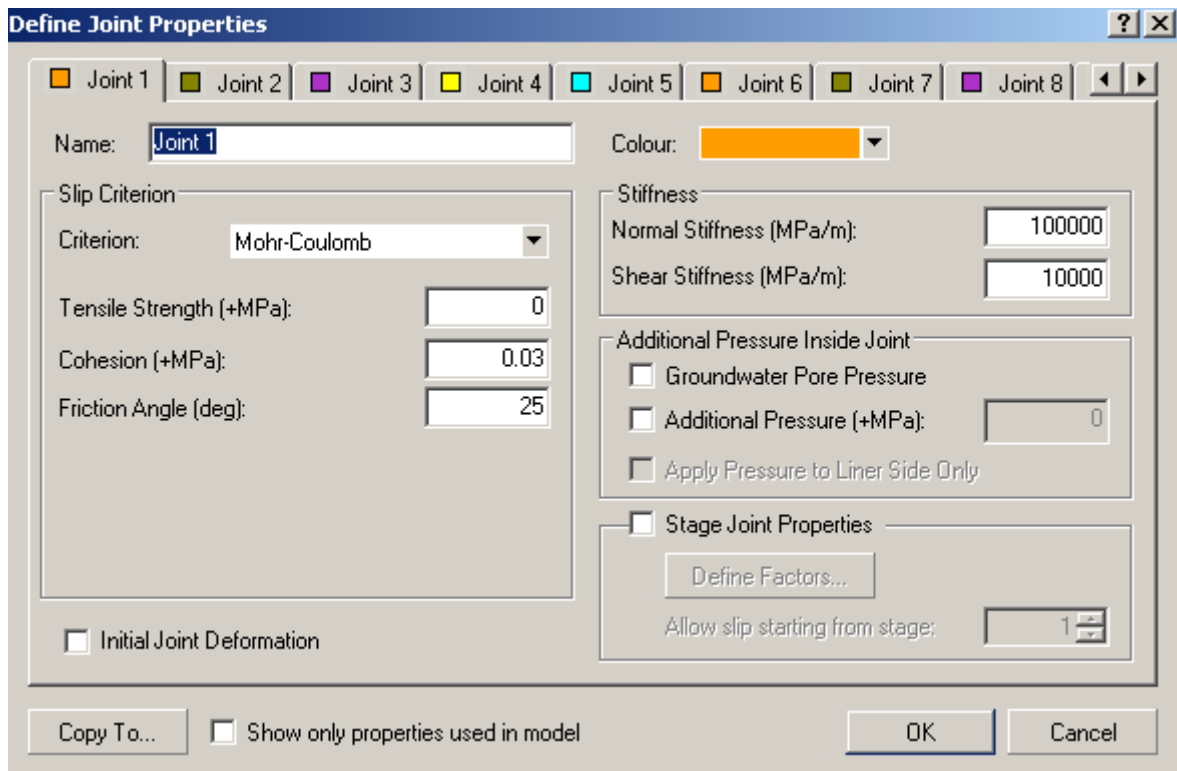
Εικόνα 27 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά βραχομάζας A

Στην Εικόνα Εικόνα 27 βλέπουμε τις παραμέτρους και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήσαμε για να αναπαραστήσουμε τη βραχώμαζα τύπου Α στο μοντέλο μας. Η βραχώμαζα αυτή συναντάται στην συντριπτική πλειοψηφία γύρω από τη δίδυμη σήραγγα για τις αναλύσεις μας.



Εικόνα 28 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά βραχώμαζας C1

Στην Εικόνα Εικόνα 28 βλέπουμε τις παραμέτρους και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήσαμε για να αναπαραστήσουμε τη βραχώμαζα τύπου C1 στο μοντέλο μας. Η βραχώμαζα αυτή εμφανίζεται στην ρωγματομένη ζώνη γύρω από το ρήγμα, το οποίο τέμνει τον αριστερό κλάδο.

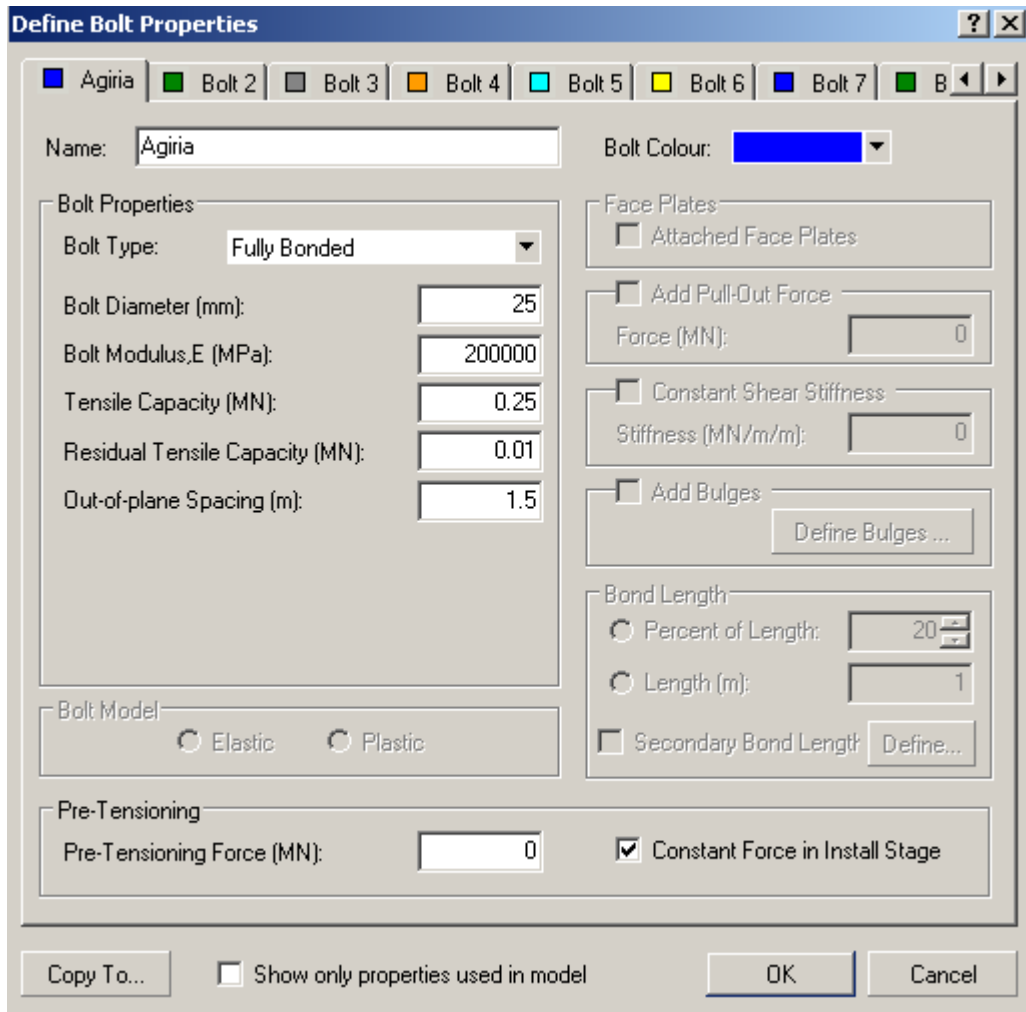


Εικόνα 29 : Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ρήγματος

Στην Εικόνα Εικόνα 29 βλέπουμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε για να τοποθετήσουμε το ρήγμα. Χρησιμοποιήσαμε τις γεωτεχνικές ιδιότητες των ασυνεχειών σε βραχώμαζα τύπου C1.

7.6.1.2 Καθορισμός ιδιοτήτων αγκυρίων

Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα αγκύρια που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι τύπου Πλήρους πάκτωσης. Η τελική καρτέλα παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 30.



Εικόνα 30 : Τεχνικά χαρακτηριστικά ακυρίων

7.6.1.3 Καθορισμός ιδιοτήτων σκυροδέματος

Στο μοντέλο που δημιουργούμε θα τοποθετήσουμε απλό στοιχείο δοκού (standard beam) για την προσομοίωση του σκυροδέματος. Το στατικό πάχος του είναι 17cm. Το μέτρο ελαστικότητας E λαμβάνεται ως $E=15.000 \text{ MPa}$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.

Define Liner Properties

gunite reinforced shotcrete concrete Liner 4 Liner 5 Liner 6 Liner 7 Liner

Name: gunite Colour: ■ Liner Type: Standard Beam

Elastic Properties
 Young's Modulus (MPa): 15000
 Poisson's Ratio: 0.3

Strength Parameters
 Material Type: Elastic Plastic
 Compressive Strength (peak) (MPa): 13.33
 Compressive Strength (residual) (MPa): 13.33
 Tensile Strength (peak) (MPa): 1
 Tensile Strength (residual) (MPa): 0

Stage Liner Properties
 Define Factors...

Geometry
 Thickness (m): 0.17
 Area (m2): 0.1
 Moment of Inertia (m4): 8.3e-005

Include Weight in Analysis
 Unit Weight (MN/m3): 0.02

Pre-Tensioning
 Pre-Tensioning Force (MN): 0

Sliding Gap
 Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

Copy To... Show only properties used in model OK Cancel

Εικόνα 31 : Τεχνικά χαρακτηριστικά οπλισμένου σκυροδέματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

8.1 Τελική μορφή και παρουσίαση του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2

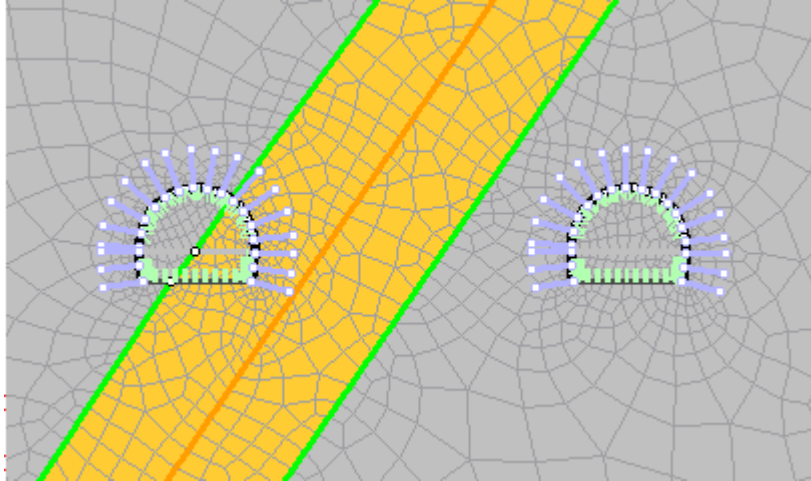
Σε αυτή την παράγραφο δίνονται οι εικόνες των σταδίων των μοντέλων. Τα στάδια που φαίνονται παρακάτω προσομοιώνουν τον τρόπο εκσκαφής και είναι κοινά για όλα τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί.

Η προσομοίωση της σήραγγας Μακύνειας πραγματοποιήθηκε με τα βήματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

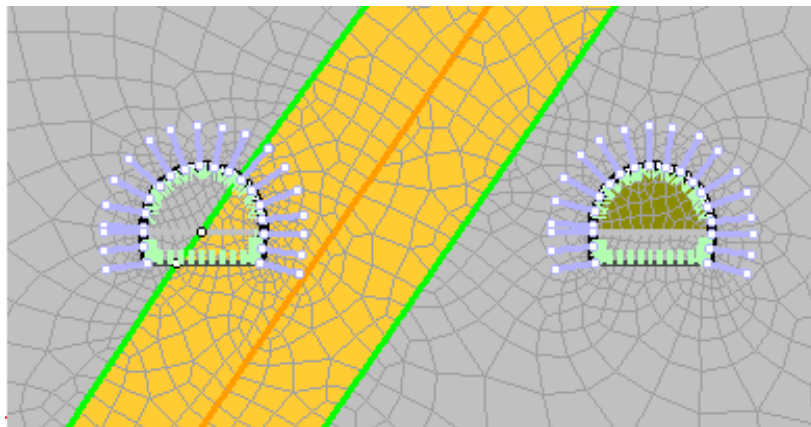
- Το πρώτο στάδιο είναι το γεωστατικό πεδίο, στο οποίο δεν έχει γίνει καμία ανθρώπινη επέμβαση. Στο μοντέλο όμως οι επιπρόσθετες γραμμές που εμφανίζονται είναι τα μέτρα υποστήριξης τα οποία όμως είναι ανενεργά στο στάδιο αυτό και θα τοποθετηθούν στα επόμενα στάδια.
- Η αλλαγή χρώματος της βραχομάζας σηματοδοτεί την αποτόνωση του υλικού μας, ενώ όταν γίνεται τελείως λευκό σημαίνει πως η εκσκαφή στο συγκεκριμένο κομμάτι έχει ολοκληρωθεί.
- Τα εγκατεστημένα αγκύρια εμφανίζονται με έντονο χρώμα ενώ τα μη εγκατεστημένα με πιο αχνό χρώμα.
- Το εγκατεστημένο σκυρόδεμα εμφανίζεται με έντονο χρώμα ενώ το μη εγκατεστημένο με πιο αχνό χρώμα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Σε όλα τα μοντέλα που ακολουθούν και σε όλες τις δοκιμές μας χρησιμοποιήθηκαν βραχομάζες κατηγορίας A και C1. Η κατηγορία A δεν συναντήθηκε κατά την κατασκευή. Εντούτοις η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με κατηγορία A με σκοπό να μελετήσουμε την πιθανή επίδραση των ρηγμάτων (είτε ως ρωγματομένη ζώνη, είτε ως διακριτή ασυνέχεια) στη συμπεριφορά της σήραγγας σε μία καλή κατά τα άλλα βραχομάζα.

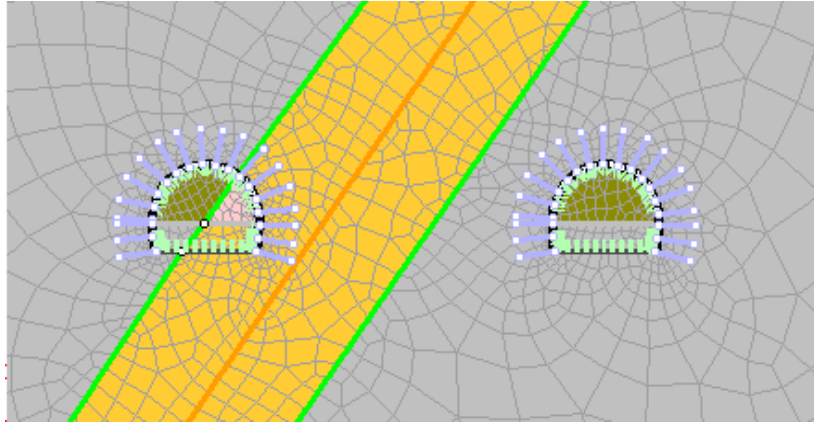
Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνες 32 έως 40) φαίνονται τα στάδια εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας, όπως έγιναν στην πραγματικότητα και είναι κοινά για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν .



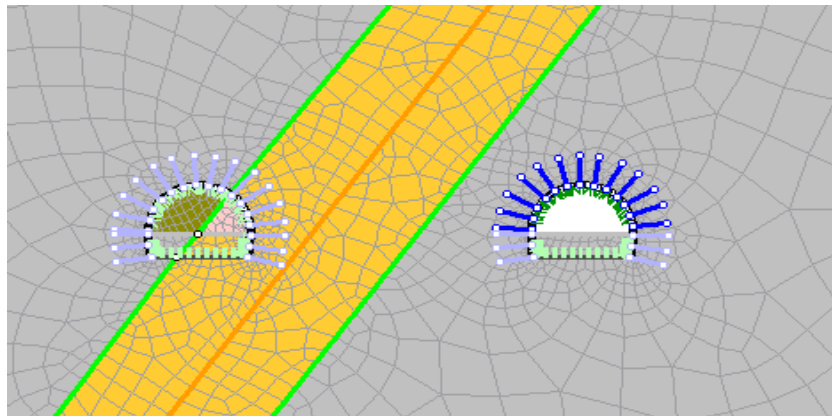
Εικόνα 32 : Στάδιο 1- Γεωστατικό πεδίο χωρίς παρεμβάσεις



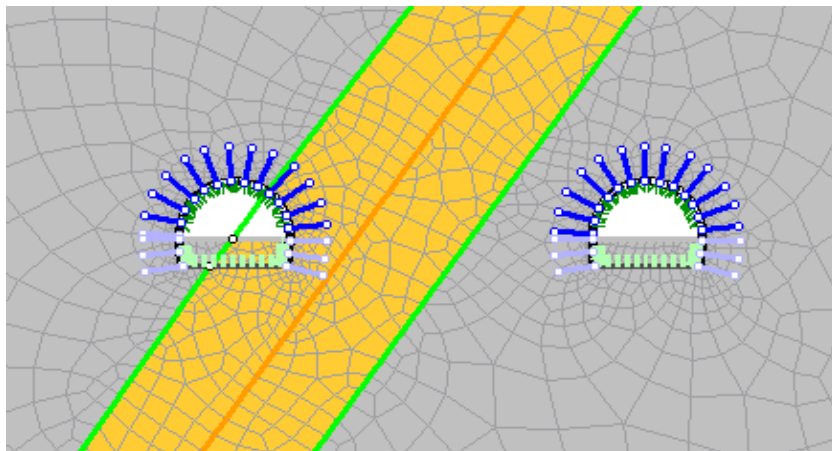
Εικόνα 33 : Στάδιο 2- Αποτόνωση Α φάσης του δεξιού κλάδου πριν την εκσκαφή της



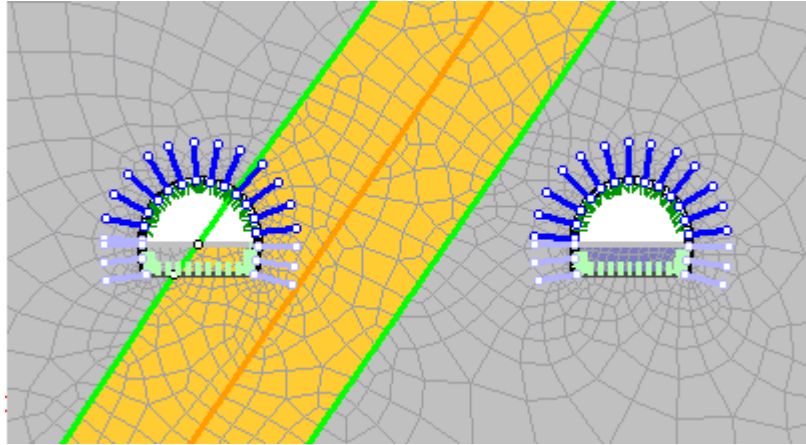
Εικόνα 34 : Στάδιο 3- Αποτόνωση Α φάσης του αριστερού κλάδου πριν την εκσκαφή της



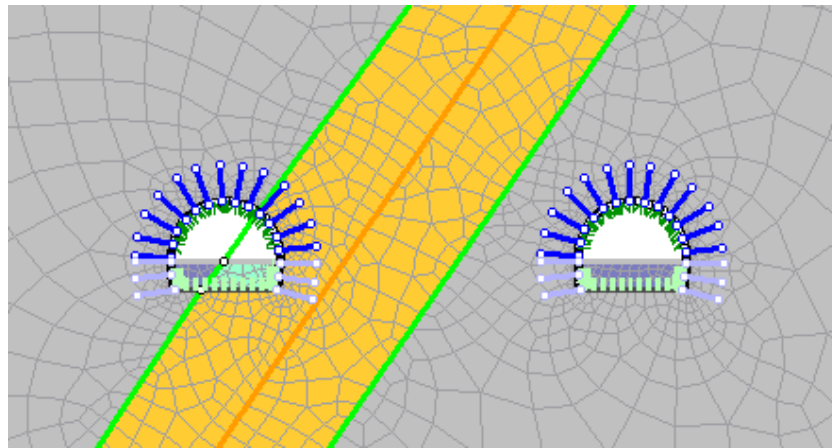
Εικόνα 35 : Στάδιο 4- Εκσκαφή Α φάσης δεξιού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος



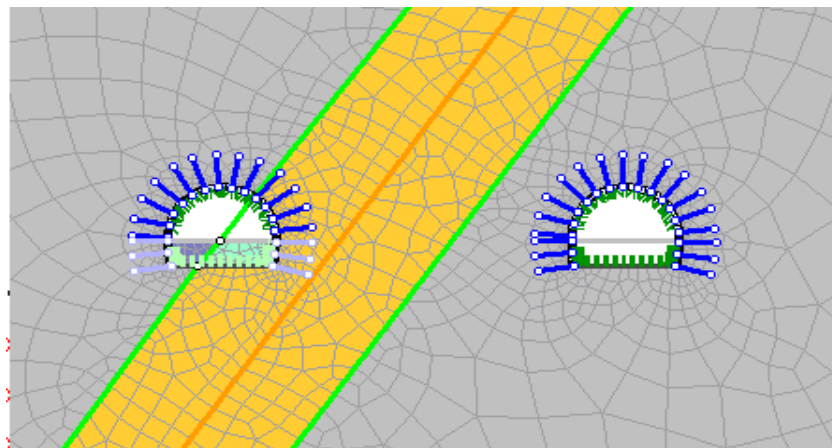
Εικόνα 36 : Στάδιο 5- Εκσκαφή Α φάσης αριστερού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος



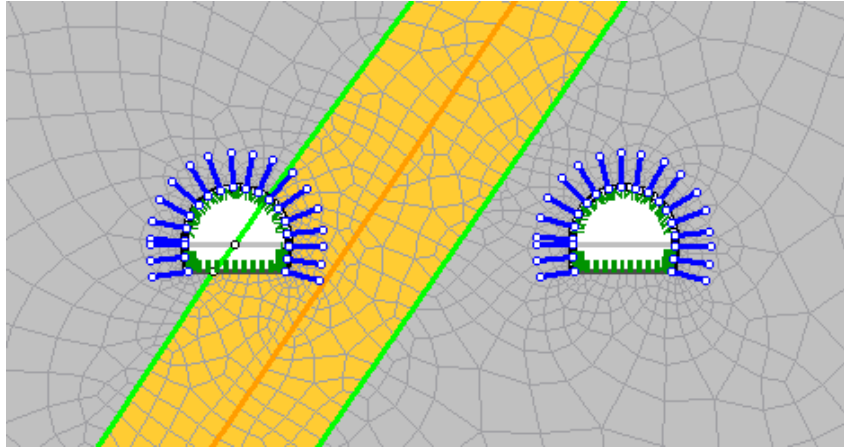
Εικόνα 37 : Στάδιο 6- Αποτόνωση Β φάσης δεξιού κλάδου πριν την εκσκαφή της



Εικόνα 38 : Στάδιο 7- Αποτόνωση Β φάσης αριστερού κλάδου πριν την εκσκαφή της



Εικόνα 39 : Στάδιο 8- Εκσκαφή Β φάσης δεξιού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος



Εικόνα 40 : Στάδιο 9- Εκσκαφή Β φάσης αριστερού κλάδου και τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος

8.2 Μέθοδος Rabcewicz

Σε αυτό το στάδιο πρέπει να αναφέρουμε ότι όλες οι αναλύσεις περιλαμβάνουν και έλεγχο αστοχίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η μέθοδος Rabcewicz, όπως περιγράφεται από τον Μ. Καββαδά (2004). Η μέθοδος Rabcewicz είναι μία προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό της ασκούμενης πίεσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

8.2.1 Γενικά

Η μέθοδος Rabcewicz βασίζεται στο άρθρο των L. Rabcewicz and J. Golser με τίτλο "Principles of dimensioning the supporting system for the New Austrian Tunnelling Method" που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Water Power το Μάρτιο 1973. Κατά τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η επάρκεια του συστήματος άμεσης υποστήριξης μιας σήραγγας, δηλαδή υπολογίζεται ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας του συστήματος άμεσης υποστήριξης. Η μέθοδος Rabcewicz βασίζεται στις εξής παραδοχές (Μ. Καββαδάς 2004):

1. Η διατομή της σήραγγας είναι κυκλική με ακτίνα R . Η παραδοχή αυτή δεν περιορίζει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου επειδή τα αποτελέσματα των υπολογισμών δεν είναι πολύ ευαίσθητα στην τιμή της ακτίνας R . Συνεπώς στις μη-κυκλικές σήραγγες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέση ακτίνα καμπυλότητας του ανώτερου τμήματος της σήραγγας (αφού ο έλεγχος επάρκειας γίνεται στην περιοχή της στέψης της σήραγγας).

2. Οι αρχικές τάσεις είναι ισότροπες, δηλαδή $\sigma_v = \sigma_h = p_0$. Η παραδοχή αυτή είναι αρκετά σημαντική και περιορίζει το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Παρά ταύτα, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιείται με τη θεώρηση

$$p_0 = \max(\sigma_v, \sigma_h) \text{ ή θεωρώντας } p_0 = (\sigma_v + \sigma_h)/2.$$

Η εφαρμογή της μεθόδου Rabcewicz περιλαμβάνει τα εξής στάδια υπολογισμών:

1. Υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα (p_u) των στοιχείων άμεσης υποστήριξης δηλαδή η οριακή πίεση που μπορούν να αναλάβουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα χαλύβδινα πλαίσια και τα αγκύρια.
2. Από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής, τον συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων που αντιστοιχεί στην εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (που υπολογίζεται από τις καμπύλες Panet) και την ακαμψία του δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα/χαλύβδινα πλαίσια, υπολογίζεται η τελική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος βραχόμαζα-υποστήριξη, δηλαδή η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και η αντίστοιχη πίεση (p_l) της βραχόμαζας στην επένδυση της σήραγγας.
3. Υπολογίζεται ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας της άμεσης υποστήριξης από τη σχέση:

$$FS = \frac{P_u}{P_l}$$

8.2.2 Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας δακτυλίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η φέρουσα ικανότητα (p_u) της άμεσης υποστήριξης υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντοχών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος p_u^S , των αγκυρίων p_u^A και των χαλυβδίνων πλαισίων p_u^R από τη σχέση:

$$p_u = p_u^S + p_u^A + p_u^R$$

Όπου:

$$p_u^S = \frac{d \cdot \tau^S}{\left(\frac{b}{2}\right) \sin \alpha^S}$$

$$p_u^A = \frac{f^A \cdot \beta_S}{l \times t}$$

$$p_u^R = \frac{(f^R / L^R) \cdot \tau^R}{\left(\frac{b}{2}\right) \sin \alpha^S}$$

p_u^S είναι η φέρουσα ικανότητα του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους (d) και διατμητικής αντοχής: $\tau^S = 0.20f_c$, όπου (f_c) είναι η θλιπτική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης:

$$\alpha^S = \alpha^R = 45 - \varphi/2 \quad , \quad b = 2R \cos \alpha^S$$

όπου φ είναι η γωνία διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας και R η ακτίνα της σφραγδας.

Στη δική μας περίπτωση υπολογίζουμε τη φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος λαμβάνοντας υπόψη τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των κατηγοριών βραχόμαζας A και C1.

Λαμβάνοντας ως δεδομένα ότι:

$$d=0,17\text{m}$$

$$\tau^S = 4\text{MPa}$$

$$b=3\text{m}$$

και ότι για την κατηγορία βραχόμαζας A ο συντελεστής $\varphi=53^0$ και για την κατηγορία C1 $\varphi=43^0$ υπολογίζουμε τις φέρουσες ικανότητες για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

Επομένως έχουμε:

$$p_u^S = 0.179\text{MPa} \text{ για την κατηγορία βραχόμαζας A και}$$

$$p_u^S = 0.37\text{MPa} \text{ για την κατηγορία βραχόμαζας C1}$$

8.2.3 Υπολογισμός της πίεσης στη βραχόμαζα

Ενώ το παραπάνω βήμα είναι κοινό για όλα τα είδη των αναλύσεων που κάναμε, η ασκούμενη πάνω στη βραχόμαζα πίεση υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε κατηγορία μοντέλων, καθώς οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε κάθε ένα διαφέρουν.

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίσαμε την ασκούμενη πίεση στη βραχόμαζα είναι ο παρακάτω:

Σε κάθε κατηγορία μοντέλων χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Phase2 για να εξάγουμε τη μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στη διατομή σε κάθε δεδομένη κατάσταση. Η τιμή αυτή διαιρέθηκε στη συνέχεια με την ακτίνα της σήραγγας (η οποία προσεγγιστικά θεωρείται κυκλική με ακτίνα 6m). Έτσι προκύπτει η πίεση που ασκείται πάνω στην υποστήριξη. Τέλος για κάθε περίπτωση υπολογίζουμε και τον συντελεστή ασφάλειας.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στις παραγράφους 8.4.5, 8.5.5 και 8.6.5.

8.3 Μοντέλα σύγκλισης-αποτόνωσης

Στο στάδιο αυτό έγιναν μετρήσεις των μέγιστων μετατοπίσεων της σήραγγας, με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Οι δύο πρώτοι τρόποι χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε στοιχεία για την σταθερότητα και τη συμπεριφορά της κάθε βραχόμαζας. Συγκεκριμένα έγινε θεωρητική προσομοίωση της σήραγγας για να εξετάσουμε τις διαφοροποιήσεις που θα είχε το μοντέλο μας, εάν υπήρχε μόνο βραχόμαζα A ή μόνο βραχόμαζα C1. Επίσης η προσομοίωση αυτή θα μας βοηθήσει να προβλέψουμε και την απόκριση της βραχόμαζας, σε περιοχές του έργου όπου επικρατεί η μία ή η άλλη κατηγορία πετρώματος.

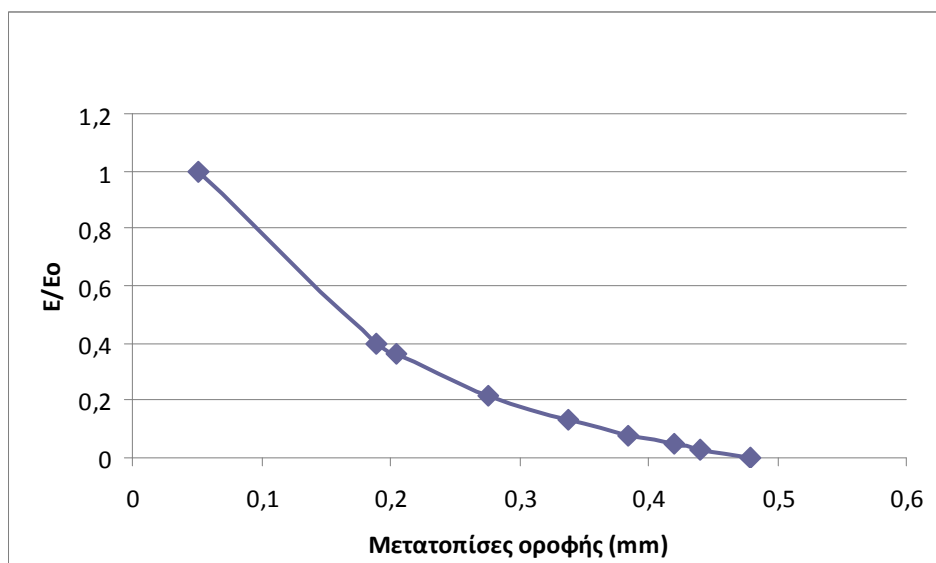
Όπως προείπαμε στο κεφάλαιο 6, για να αναπαραστήσουμε την καμπύλη αποτόνωσης της σήραγγας, πραγματοποιήσαμε 8 διαδοχικές αποτονώσεις του μέτρου ελαστικότητας του μετώπου. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 24 μοντέλα Phase, 8 για κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις.

Ο πρώτος κύκλος προσομοιώσεων περιλαμβάνει μία ισοδύναμη κυκλική διατομή ίδιου εμβαδού με την πραγματική σήραγγα, όπου χρησιμοποιήθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας A. Οι διαδοχικές απομοιώσεις φαίνονται στον Πίνακα 28.

Πίνακας 28 : Σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού της διατομής της σήραγγας ($E_0=18000$ MPa)

α/α	E/E_0	E
1	1	18000
2	0,4	7200
3	0,36	6480
4	0,216	3888
5	0,13	2340
6	0,078	1404
7	0,0466	840
8	0,028	504
9	0	0

Η καμπύλη αποτόνωσης που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία φαίνεται παρακάτω.

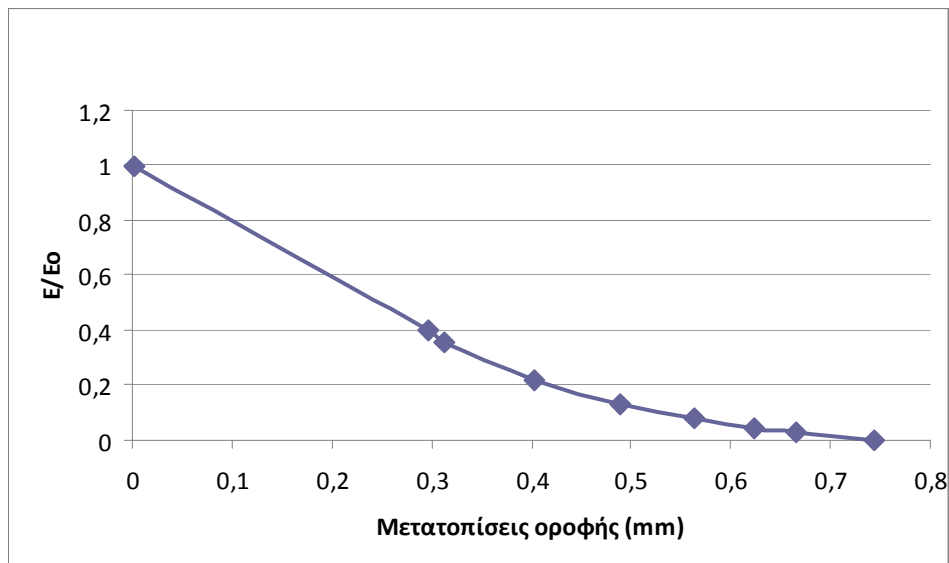


Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου E/E_0 με την ακτινική μετατόπιση στην οροφή της σήραγγας

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η διαδικασία αποτόνωσης για την πραγματική διατομή της σήραγγας, χρησιμοποιώντας τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας Α.

Τα βήματα που έγιναν ήταν ίδια με αυτά της πρώτης αποτόνωσης και τα δεδομένα είναι αυτά που φαίνονται στον Πίνακα 28.

Η καμπύλη αποτόνωσης που προέκυψε σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο Διάγραμμα 8.



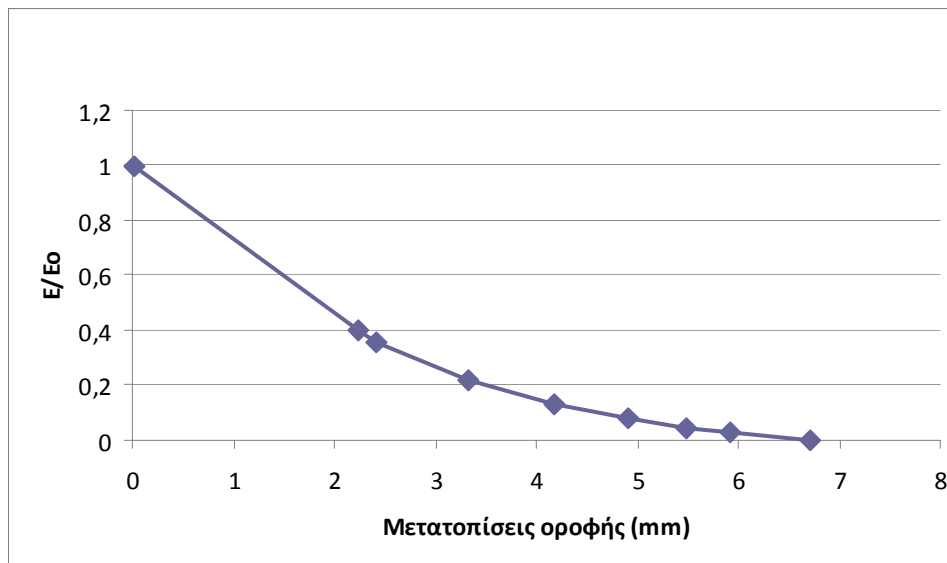
Διάγραμμα 8 : Καμπύλη αποτόνωσης βραχόμαζας Α

Στον τρίτο και τελευταίο κύκλο αποτονώσεων που έγιναν χρησιμοποιήθηκε βραχόμαζα κατηγορίας C1 και πάλι στο πραγματικό μοντέλο με τις αποτονώσεις που φαίνονται στον Πίνακα 29.

Πίνακας 29 : Σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού της διατομής της σήραγγας με βραχόμαζα C1

α/α	E/E ₀	E
1	1	1800
2	0,4	720
3	0,36	648
4	0,216	389
5	0,13	234
6	0,078	140
7	0,0466	84
8	0,028	50
9	0	0

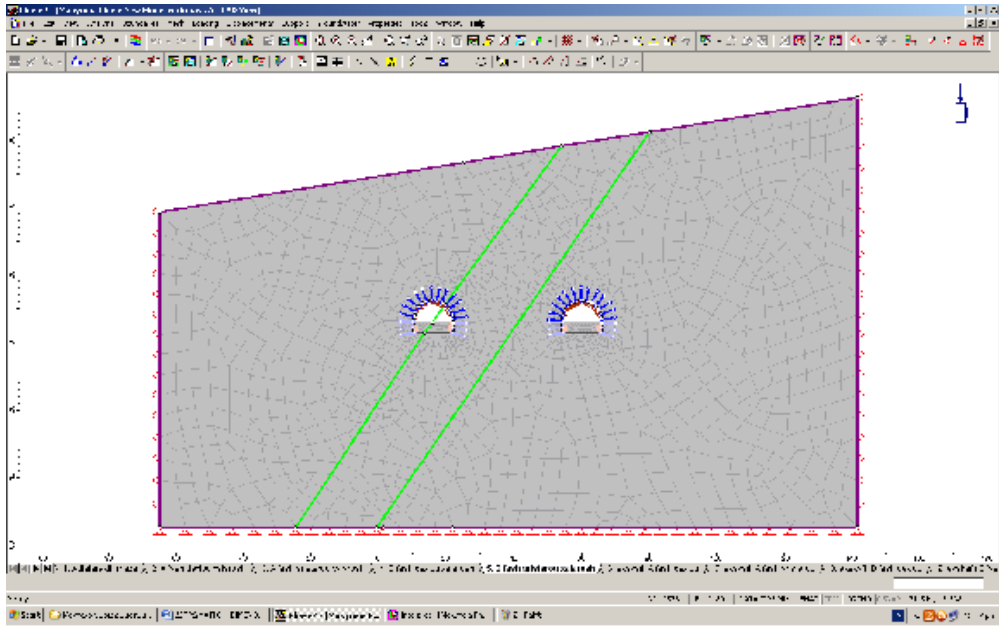
Η τελευταία καμπύλη αποτόνωσης φαίνεται στο Διάγραμμα 9.



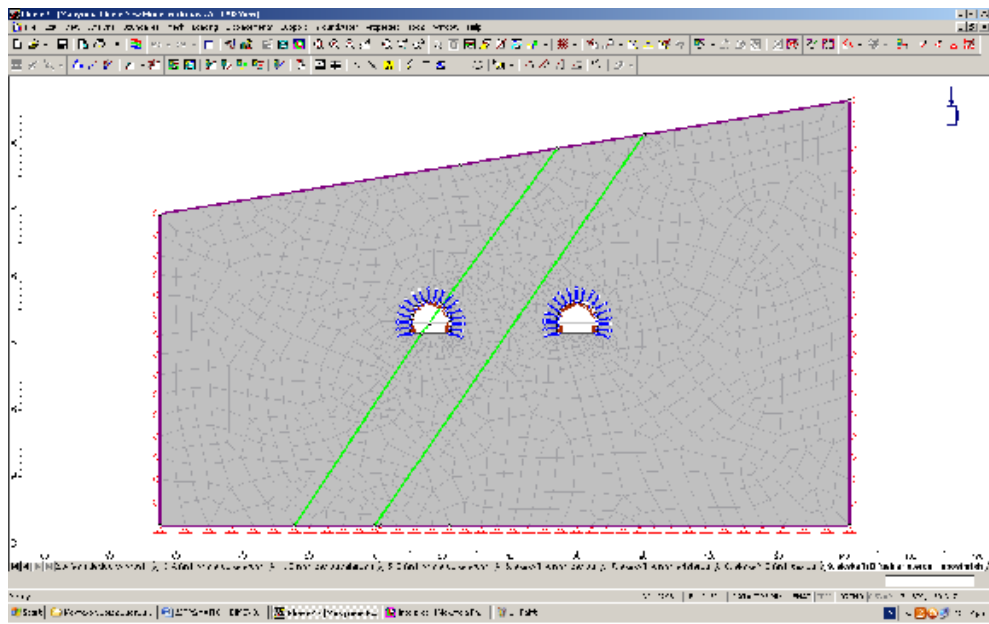
Διάγραμμα 9 : Καμπύλη αποτόνωσης βραχόμαζας C1

8.4 Μοντέλα χωρίς ρωγματωμένη βραχόμαζα

Στην Εικόνα 41 βλέπουμε το μοντέλο χωρίς ρωγματωμένη μάζα μετά την εκσκαφή της Α φάσης και αντίστοιχα στην Εικόνα 42 μετά την εκσκαφή της Β φάσης. Στα μοντέλα αυτά η βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα είναι κατηγορίας Α. Το ίδιο ακριβώς μοντέλο έχει δημιουργηθεί με χρήση βραχόμαζας κατηγορίας C1 γύρω από τη διατομή.



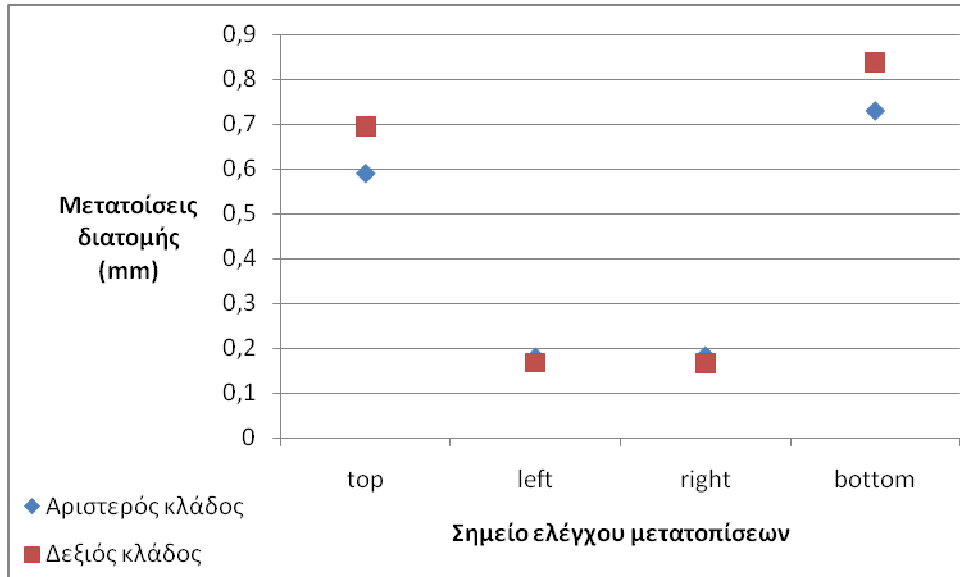
Εικόνα 41 : Μοντέλο χωρίς ρωγματομένη μάζα μετά την εκσκαφή της Α φάσης



Εικόνα 42 : Μοντέλο χωρίς ρωγματομένη μετά της εκσκαφή της Β φάσης

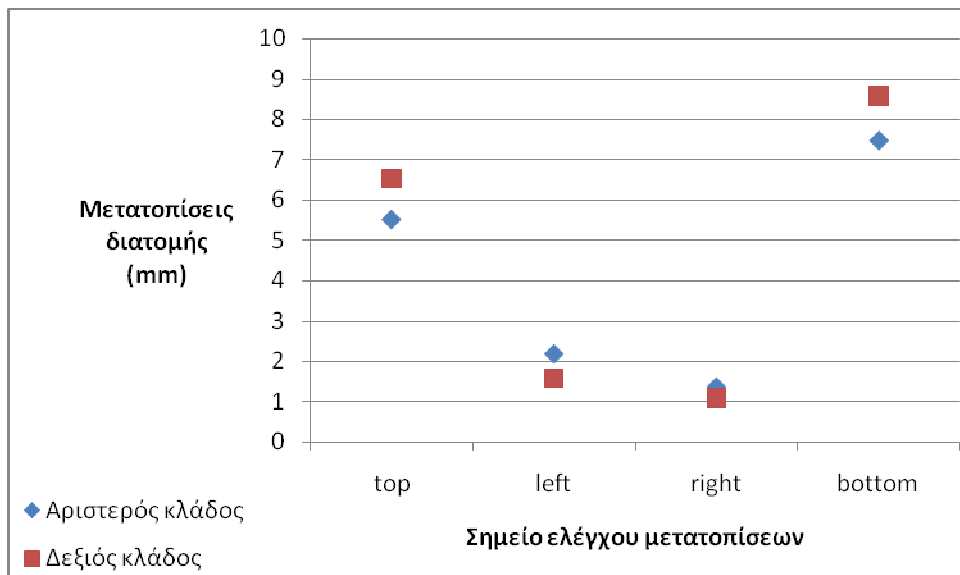
8.4.1 Μετατοπίσεις

Στο Διάγραμμα 10 φαίνονται οι μετατοπίσεις της διατομής που υπολογίστηκαν με βάση τη βραχόμαζα A.



Διάγραμμα 10 : Μετατοπίσεις μοντέλου με χρήση βραχόμαζας A

Στο Διάγραμμα 11 φαίνονται οι μετατοπίσεις της διατομής που υπολογίστηκαν με βάση τη βραχόμαζα C1.

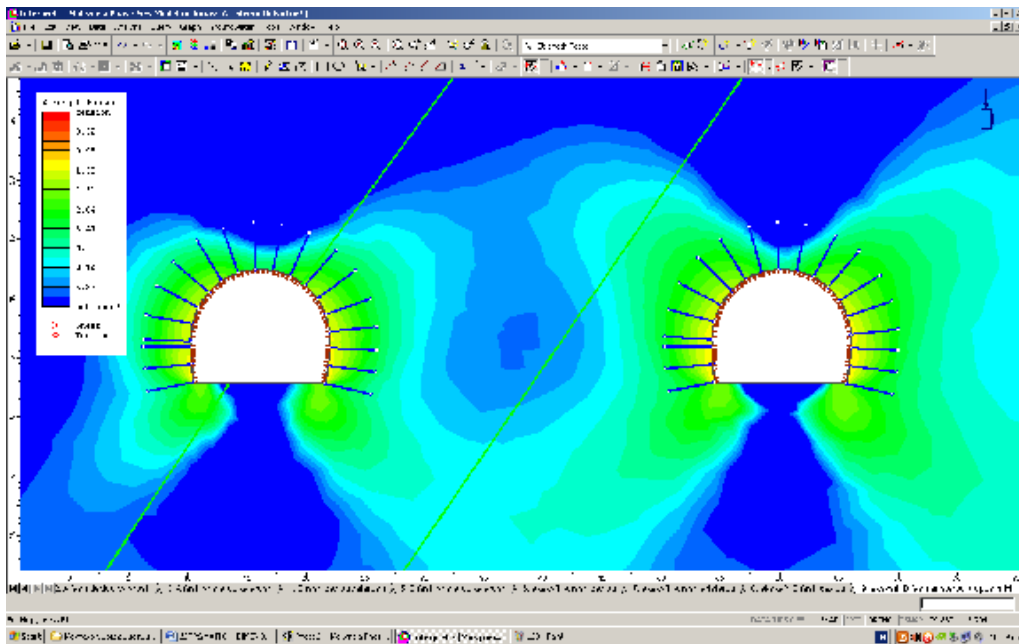


Διάγραμμα 11 : Μετατοπίσεις μοντέλου με χρήση βραχόμαζας C1

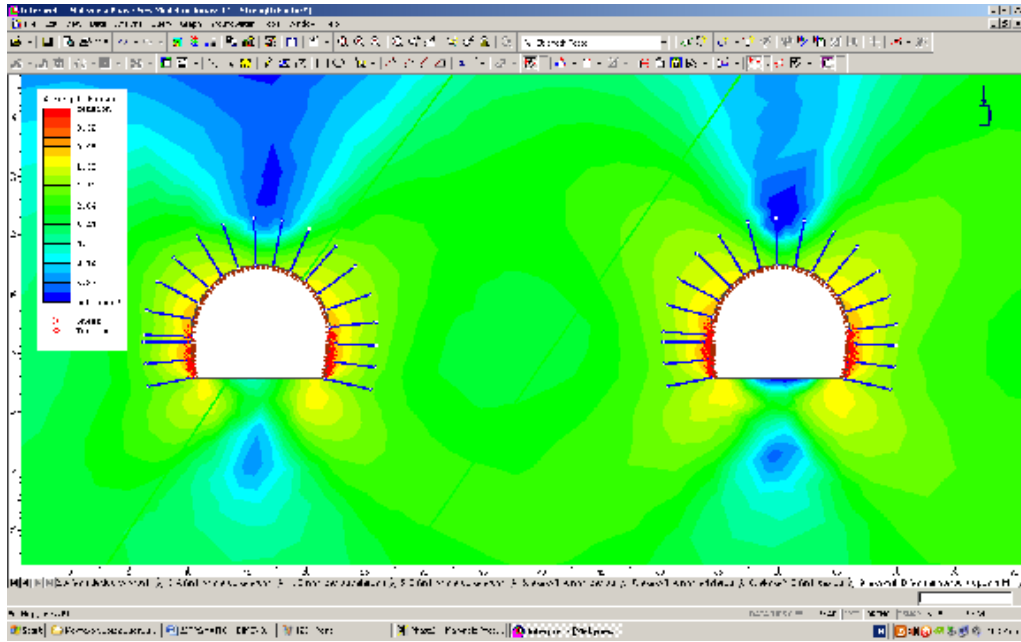
Βλέπουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο δάπεδο της εκσκαφής. Οι μετρήσεις όμως με βραχόμαζα κατηγορίας C1 είναι κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες με κατηγορία A. Αυτό οφείλεται στις χειρότερες μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας κατηγορίας C1.

8.4.2 Διαρροή βραχόμαζας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 43 δεν παρατηρείται διαρροή της βραχόμαζας κατηγορίας A.



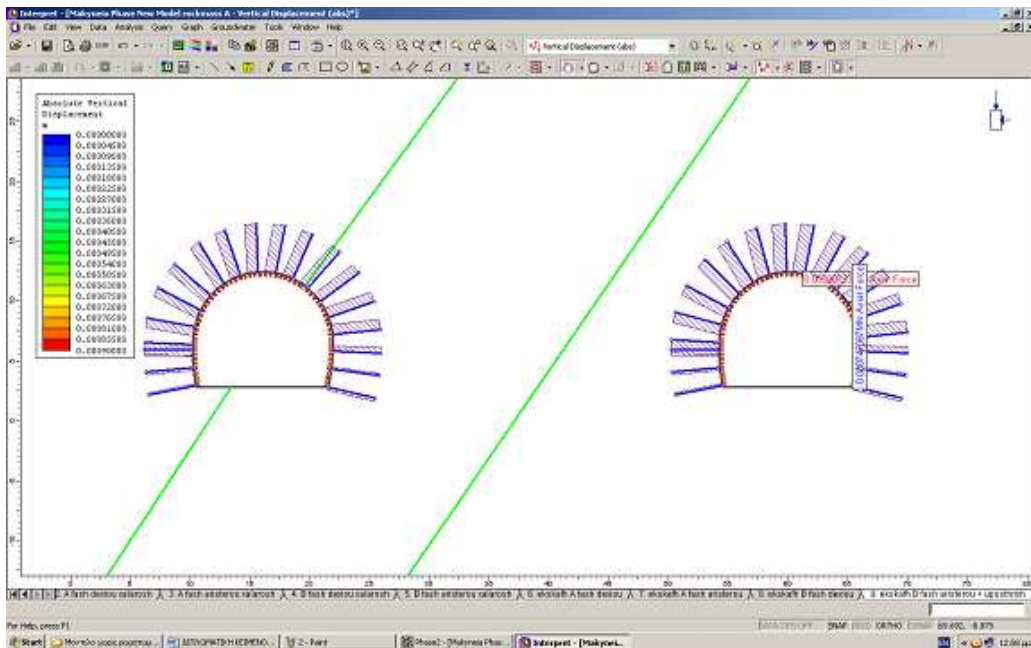
Εικόνα 43 : Διαρροή βραχόμαζας A



Εικόνα 44 : Διαρροή βραχόμαζας C1

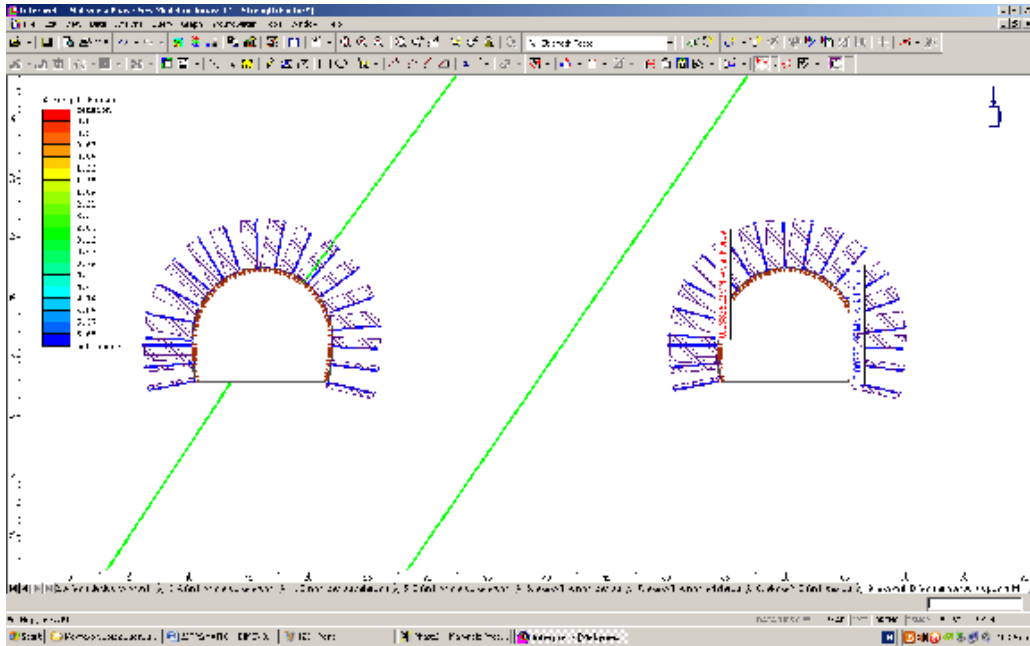
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 44Εικόνα 43 δεν παρατηρείται διαρροή της βραχόμαζας κατηγορίας C1.

8.4.3 Φόρτιση αγκυριών



Εικόνα 45 : Φόρτιση αγκυριών με χρήση βραχόμαζας A

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 45 η μέγιστη φόρτιση αγκυριών με εφαρμογή βραχόμαζας A, παρατηρείται στη δεξιά παρειά του δεξιού κλάδου της σήραγγας.



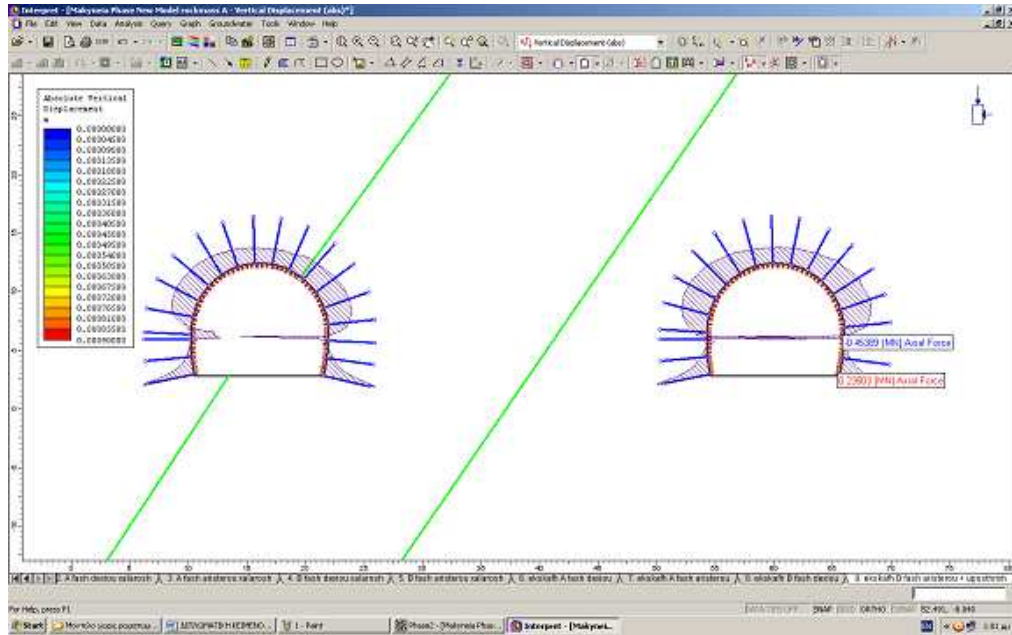
Εικόνα 46 : Φόρτιση αγκυριών με χρήση βραχόμαζας C1

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 46 η μέγιστη φόρτιση αγκυριών με εφαρμογή βραχόμαζας C1, παρατηρείται στην αριστερή παρειά του δεξιού κλάδου της σήραγγας.

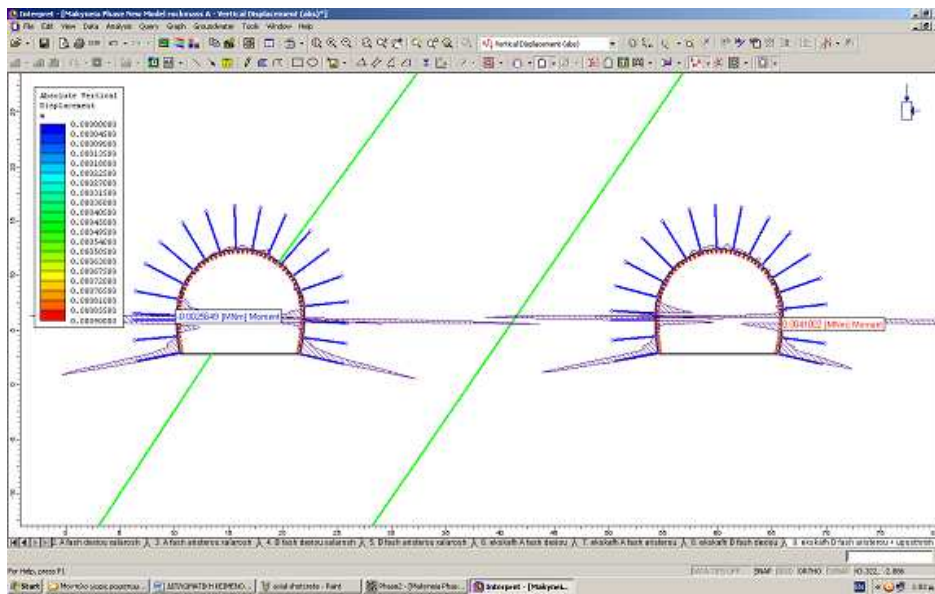
8.4.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στην Εικόνα 47 φαίνεται ότι για εφαρμογή της βραχόμαζας A, η μεγαλύτερη τιμή αξονικής φόρτισης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρείται στη δεξιά παρειά του δεξιού κλάδου της σήραγγας.

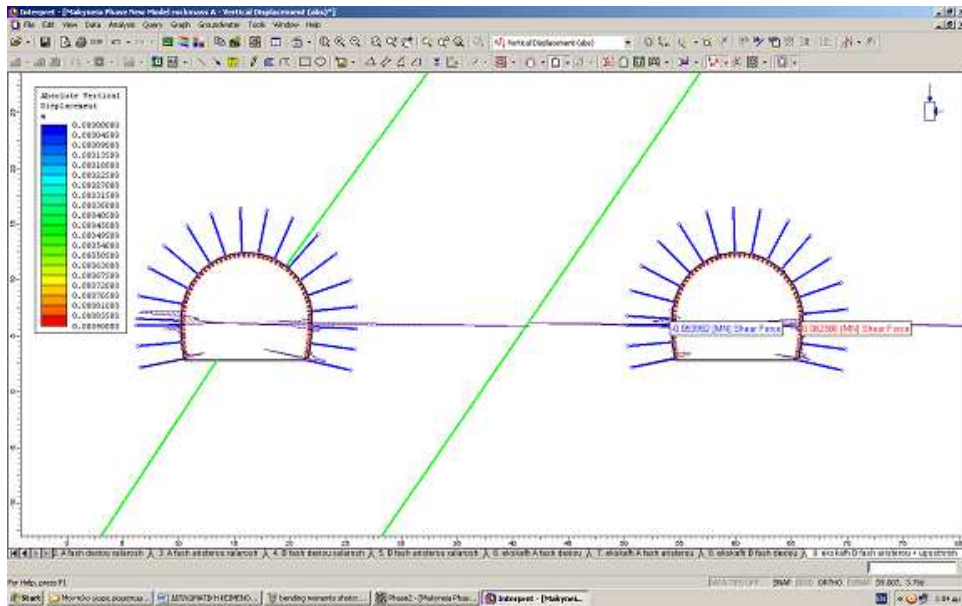
Το ίδιο παρατηρείται και για τις ροπές κάμψης και τις διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 48 και Εικόνα 49 αντίστοιχα.



Εικόνα 47 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος με χρήση βραχόμαζας Α



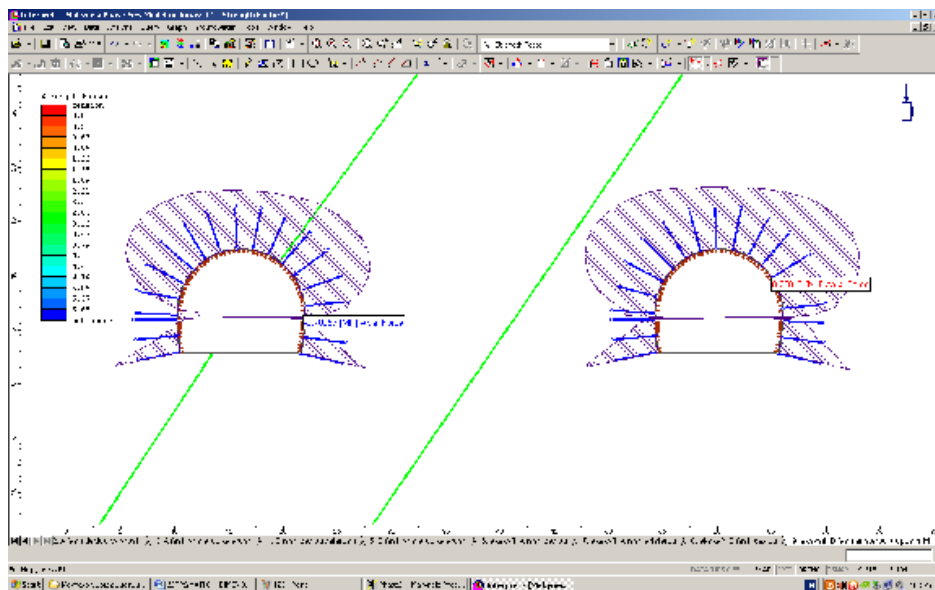
Εικόνα 48 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας Α



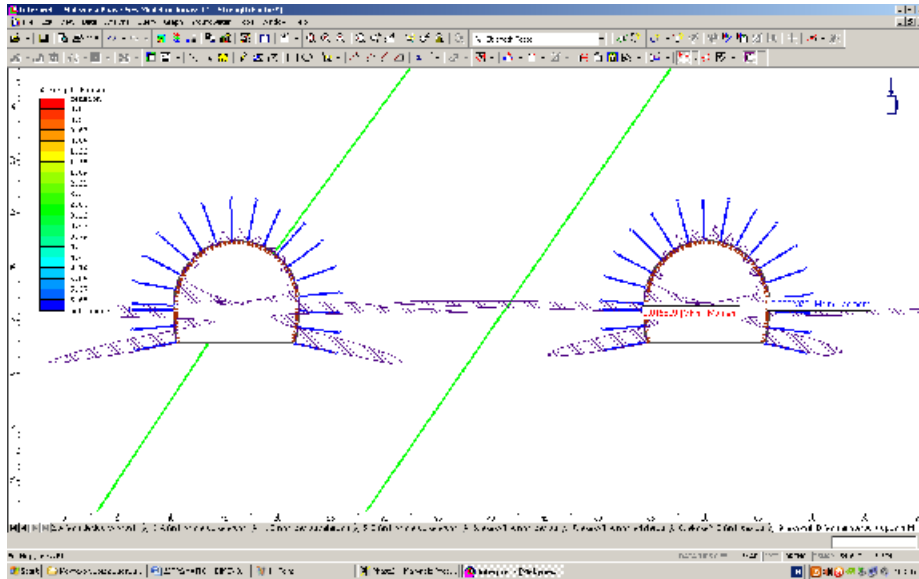
Εικόνα 49 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας A

Στην Εικόνα 50 φαίνεται ότι για εφαρμογή της βραχόμαζας C1, η μεγαλύτερη τιμή αξονικής φόρτισης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρατηρείται στη δεξιά παρειά του δεξιού κλάδου της σήραγγας.

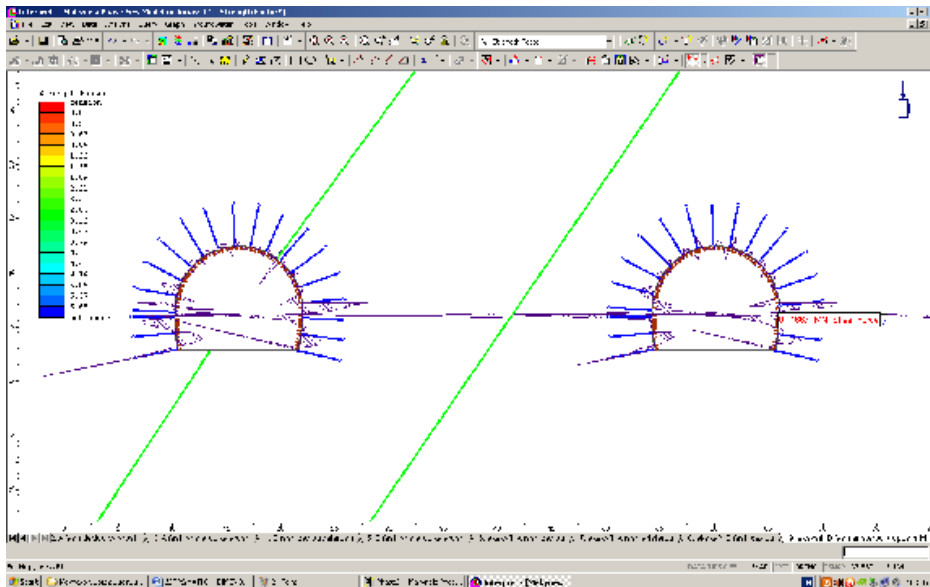
Το ίδιο παρατηρείται διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 52. Αντίθετα οι μεγαλύτερες ροπές κάμψης παρατηρούνται στην αριστερή παρειά του δεξιού κλάδου.



Εικόνα 50 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος με χρήση βραχόμαζας C1



Εικόνα 51 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας C1



Εικόνα 52 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα με χρήση βραχόμαζας C1

8.4.5 Έλεγχος αστοχιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας A δίνεται στον Πίνακα 30.

Πίνακας 30 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας A

Τύπος μοντέλου	Βραχ/ζα	axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
χωρίς ρωγματομενη μάζα	A	0,45389	6	0,075648	0,179486	2,372637

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας C1 δίνεται στον Πίνακα 31.

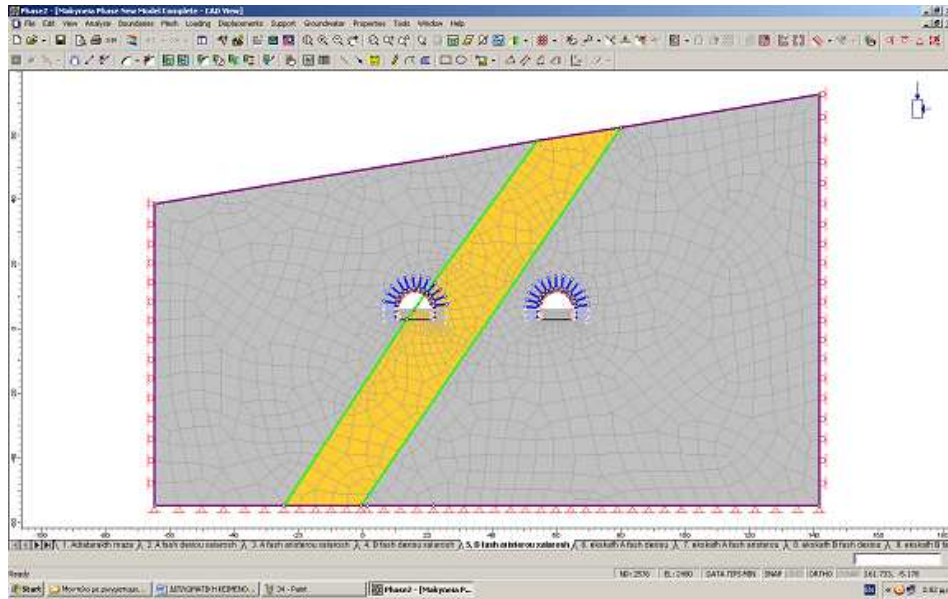
Πίνακας 31 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας C1

Τύπος μοντέλου	Βραχ/ζα	axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
χωρίς ρωγματομενη μάζα	C1	0,78845	6	0,131408	0,377071	2,869462

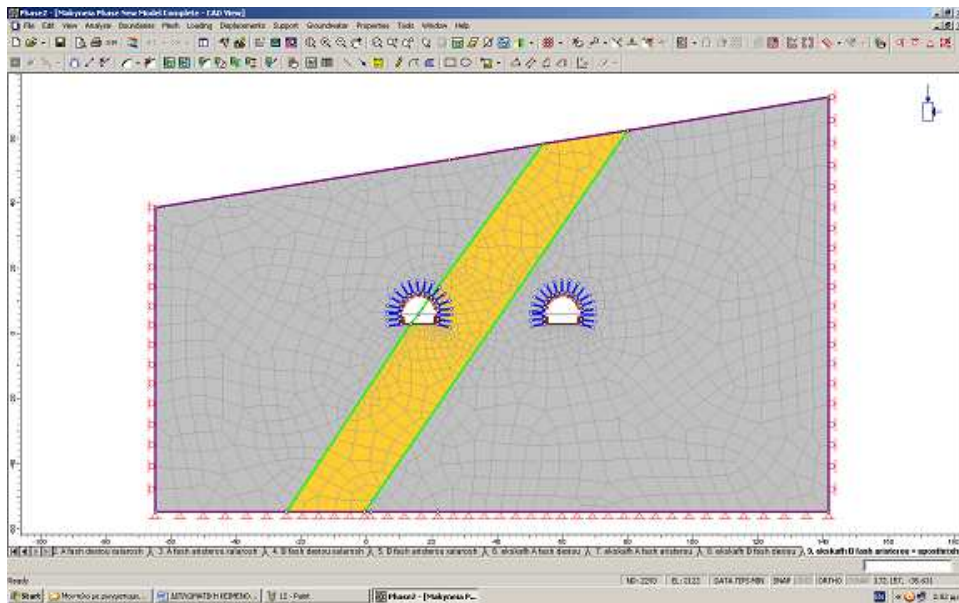
Πιο αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στην παράγραφο 8.8 στο τέλος του κεφαλαίου.

8.5 Μοντέλα με ρωγματομένη βραχόμαζα

Στην Εικόνα 53 βλέπουμε το μοντέλο με ρωγματομένη μάζα μετά την εκσκαφή της A φάσης και αντίστοιχα στην Εικόνα 54 μετά την εκσκαφή της B φάσης. Στα μοντέλα αυτά η βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα είναι κατηγορίας A ενώ η ρωγματομένη μάζα αποτελείται από βραχόμαζα κατηγορίας C1.



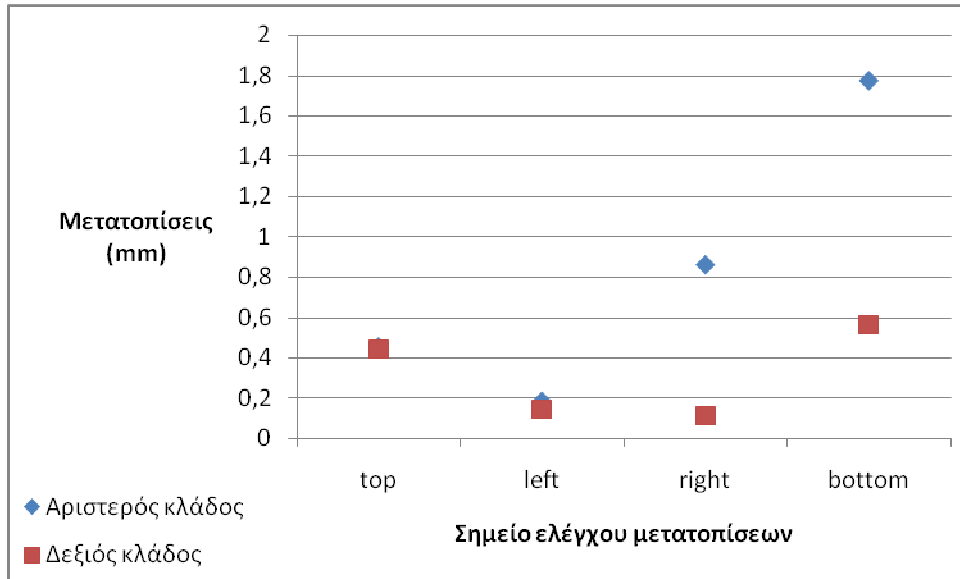
Εικόνα 53 : Μοντέλο με ρωγματωμένη μάζα μετά την εκσκαφή της Α φάσης



Εικόνα 54 : Μοντέλο με ρωγματωμένη μάζα μετά την εκσκαφή της Β φάσης

8.5.1 Μετατοπίσεις

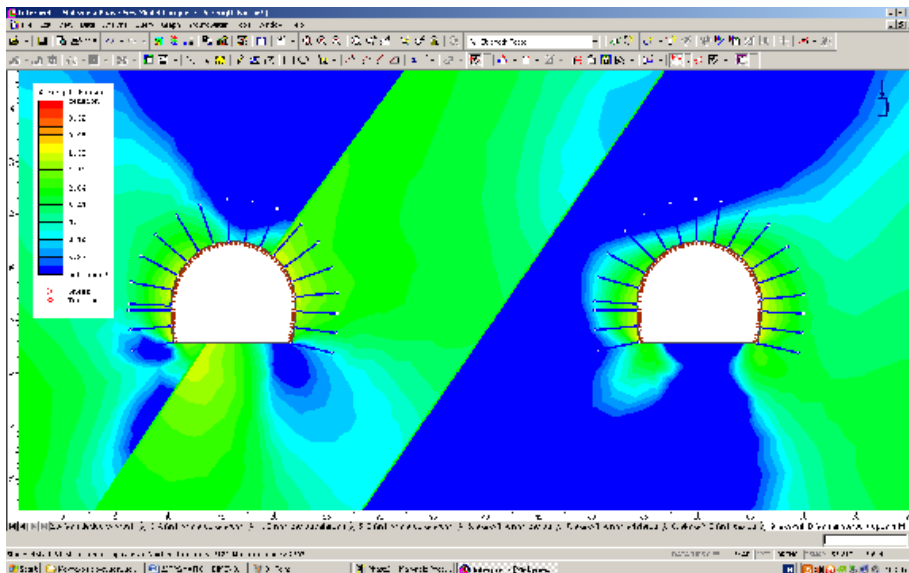
Στο Διάγραμμα 12 φαίνονται οι μετατοπίσεις που μετρήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη ρωγματωμένη μάζα. Όπως είναι αναμενόμενο οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν στο δάπεδο και τη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου.



Διάγραμμα 12 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων

8.5.2 Διαρροή βραχόμαζας

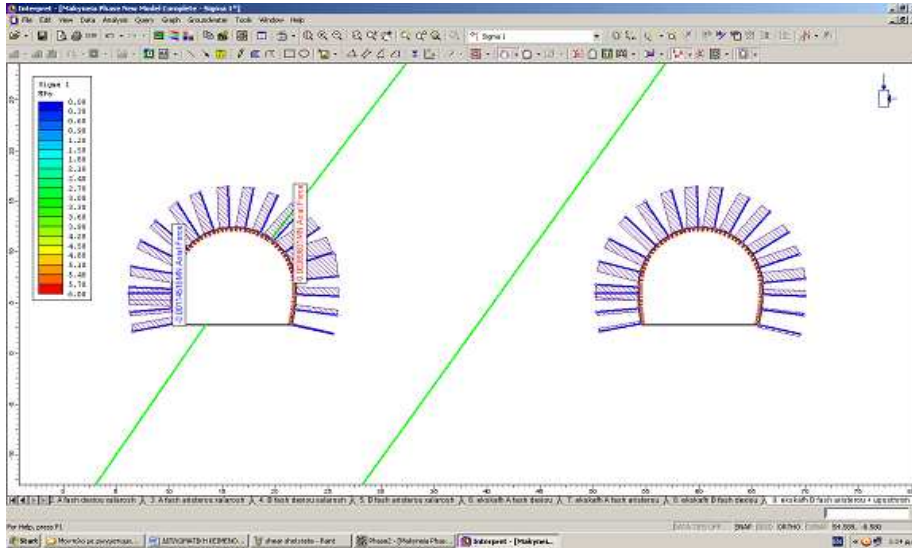
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 55 δεν παρατηρείται διαρροή της βραχόμαζας κατηγορίας Α.



Εικόνα 55 : Διαρροή βραχόμαζας

8.5.3 Φόρτιση αγκυρίων

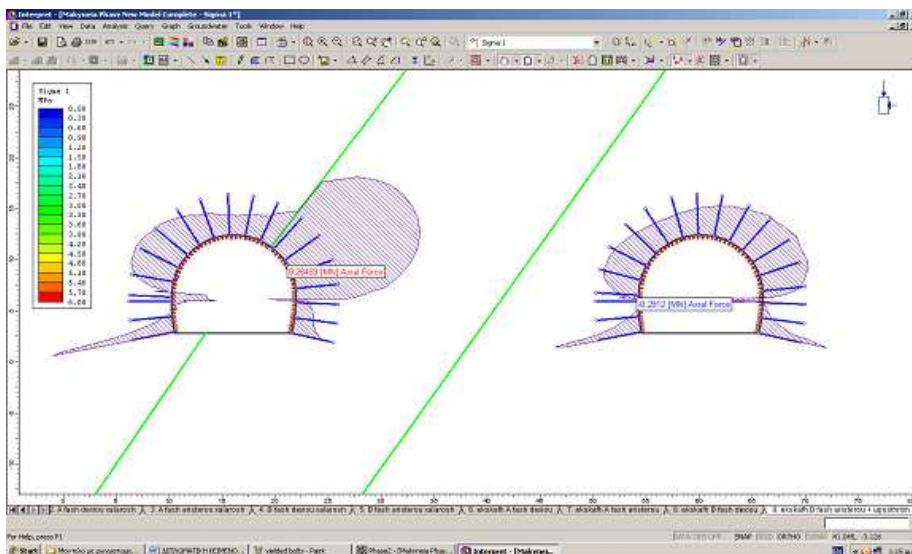
Σε αυτή την περίπτωση οι μεγαλύτερες τιμές αξονικής φόρτισης των αγκυρίων παρατηρήθηκαν στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου



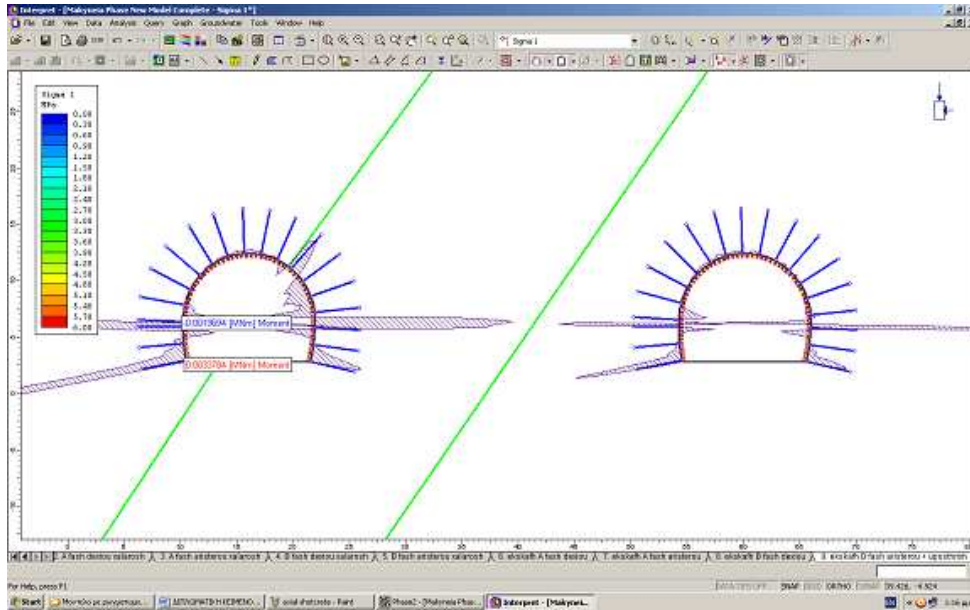
Εικόνα 56 : Φόρτιση αγκυρίων

8.5.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

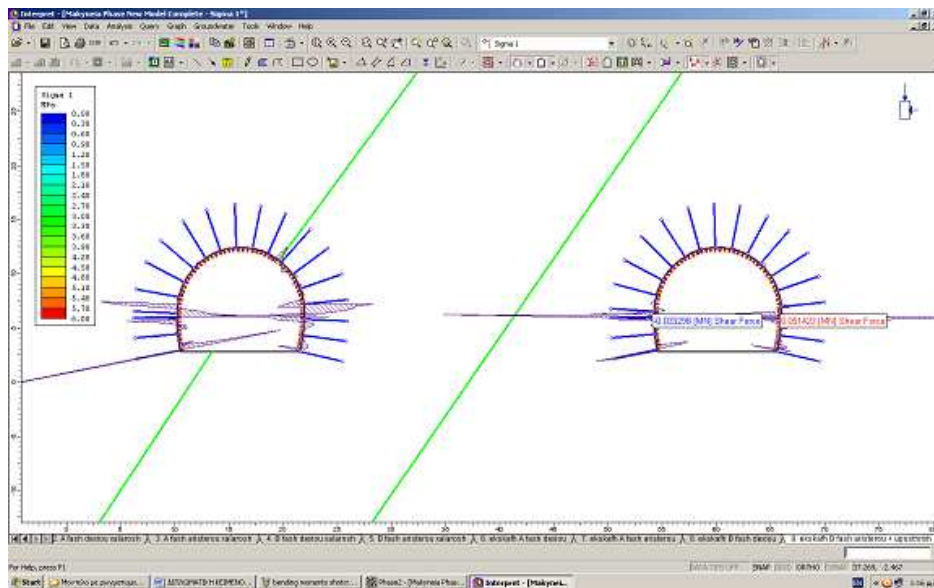
Στην περίπτωση αυτή οι μεγαλύτερες τιμές αξονικής φόρτισης του δακτυλίου σκυροδέματος παρατηρούνται στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου της σήραγγας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 57.



Εικόνα 57 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος



Εικόνα 58 : Ροπές κάμψεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα



Εικόνα 59 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυρόδεμα

8.5.5 Έλεγχος αστογιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την παρουσία ρωγματομένης μάζας και χρήση γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας A δίνεται στον Πίνακα 32.

Πίνακας 32 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τύπος μοντέλου		axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
με ρωγματωμενη μάζα		0,2912	6	0,048533	0,179486	3,698202

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την παρουσία ρωγματωμένης μάζας και χρήση γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας C1 δίνεται στον Πίνακα 33.

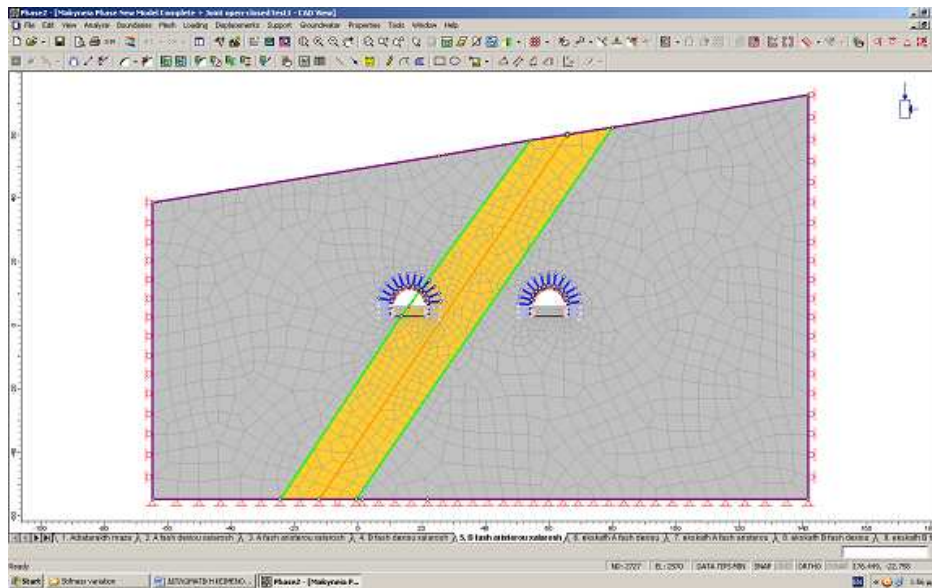
Πίνακας 33 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τύπος μοντέλου		axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
με ρωγματωμενη μάζα		0,2912	6	0,048533	0,377071	7,769325

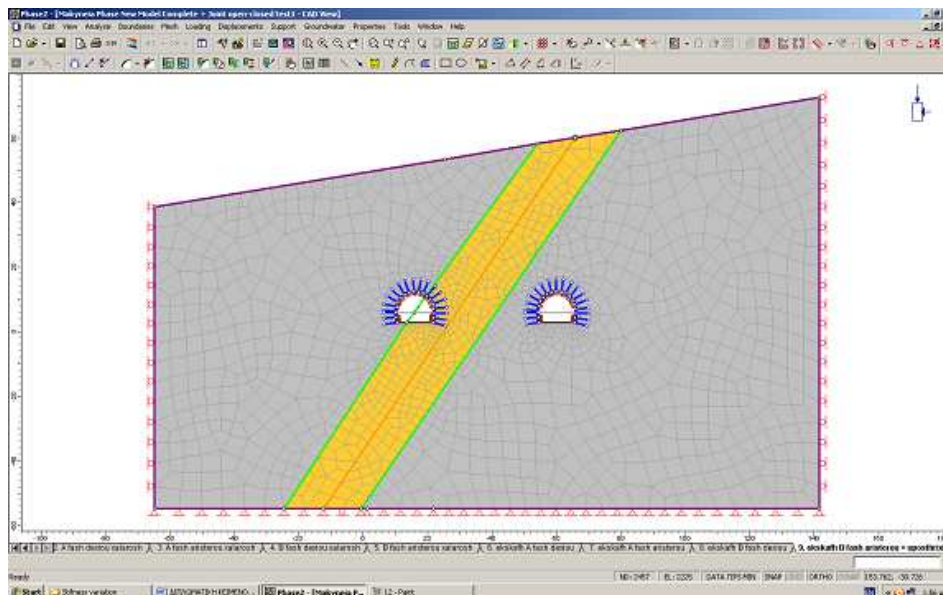
Πιο αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στην παράγραφο 8.8 στο τέλος του κεφαλαίου.

8.6 Μοντέλα με ρωγματωμένη βραχόμαζα και ρήγμα

Στην Εικόνα 60 βλέπουμε το μοντέλο με ρωγματωμένη μάζα και ρήγμα μετά την εκσκαφή της Α φάσης και αντίστοιχα στην Εικόνα 61 μετά την εκσκαφή της Β φάσης. Στα μοντέλα αυτά η βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα είναι κατηγορίας Α ενώ η ρωγματωμένη μάζα αποτελείται από βραχόμαζα κατηγορίας C1.



Εικόνα 60 : Μοντέλο με ρωγματομένη βραχώμαζα και ρήγμα μετά την εκσκαφή της Α φάσης



Εικόνα 61 : Μοντέλο με ρωγματομένη βραχώμαζα και ρήγμα μετά την εκσκαφή της Β φάσης

8.6.1 Μετατοπίσεις

Σε αυτή την ανάλυση εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται στις μετατοπίσεις της σήραγγας, ανάλογα με τις διαφοροποιήσεις της δυστροπίας του ρήγματος που την τέμνει.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε τις ιδιαίτερες ρυθμίσεις που έγιναν στο μοντέλο του Phase για τις συγκεκριμένες αναλύσεις. Η πλειοψηφία των ρυθμίσεων παραμένει ως

έχει. Δηλαδή οι τύποι βραχόμαζας που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις καθώς και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης παραμένουν ίδια με τα αρχικά. Αυτό που αλλάζει είναι οι τιμές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του ρήγματος. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις στις οποίες αλλάζει κάθε φορά η δυστροπία του ρήγματος.

Μετά από κάθε δοκιμή μετρήθηκαν οι νέες μετατοπίσεις σε 4 σημεία περιφερειακά της διατομής. Έγιναν μετρήσεις μετατοπίσεων στην οροφή, την αριστερή, τη δεξιά παρειά και το δάπεδο κάθε κλάδου. Τα αποτελέσματα της κάθε μέτρησης φαίνονται παρακάτω αναλυτικά.

Δοκιμή 1

Η δοκιμή αυτή αποτελεί την αρχική κατάσταση.

Δοκιμή 2

Στην περίπτωση αυτή μειώνεται η ακαμψία του ρήγματος κατά μία τάξη μεγέθους. Οι μετρήσεις που λάβαμε από το πρόγραμμα φαίνονται στην παράγραφο 8.7.

Δοκιμή 3

Στη περίπτωση αυτή μειώνεται η ακαμψία του ρήγματος κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με τη Δοκιμή 2. Οι μετρήσεις που λάβαμε από το πρόγραμμα φαίνονται στην παράγραφο 8.7.

Δοκιμή 4

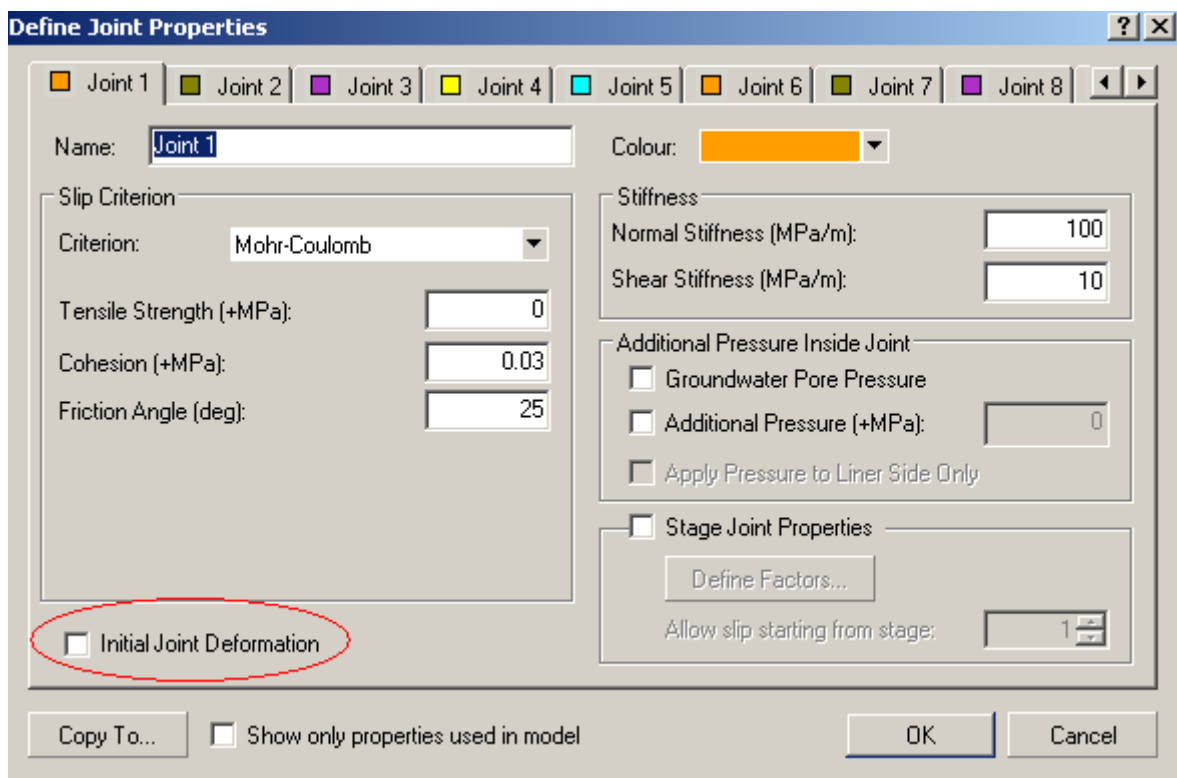
Στη περίπτωση αυτή μειώνεται η ακαμψία του ρήγματος κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με τη Δοκιμή 3. Οι μετρήσεις που λάβαμε από το πρόγραμμα φαίνονται στην παράγραφο 8.7.

Δοκιμή 5

Στην περίπτωση αυτή η δυστροπία του ρήγματος είναι ίδια με τη Δοκιμή 4. Επίσης σε αυτήν την περίπτωση έγινε και μία άλλη παραδοχή, η οποία αφορά την αρχική φόρτιση της ασυνέχειας του ρήγματος. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στη συμπεριφορά του ρήγματος σε σχέση με το φυσικό εντατικό πεδίο.

Αν η επιλογή είναι ενεργή, η παραμόρφωση του ρήγματος βασίζεται τόσο στο φυσικό εντατικό πεδίο, όσο και στις ασκούμενες πιέσεις, λόγω της εκσκαφής. Επομένως, η κατανομή του εντατικού πεδίου στην εγγύτητα του ρήγματος θα διαφέρει από αυτή του φυσικού εντατικού πεδίου.

Αν η επιλογή είναι ανενεργή (όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας στην Εικόνα 62), μόνο η ασκούμενη πίεση που δημιουργείται λόγω της εκσκαφής και των υπερκειμένων λαμβάνονται υπόψη για την παραμόρφωση του ρήγματος.

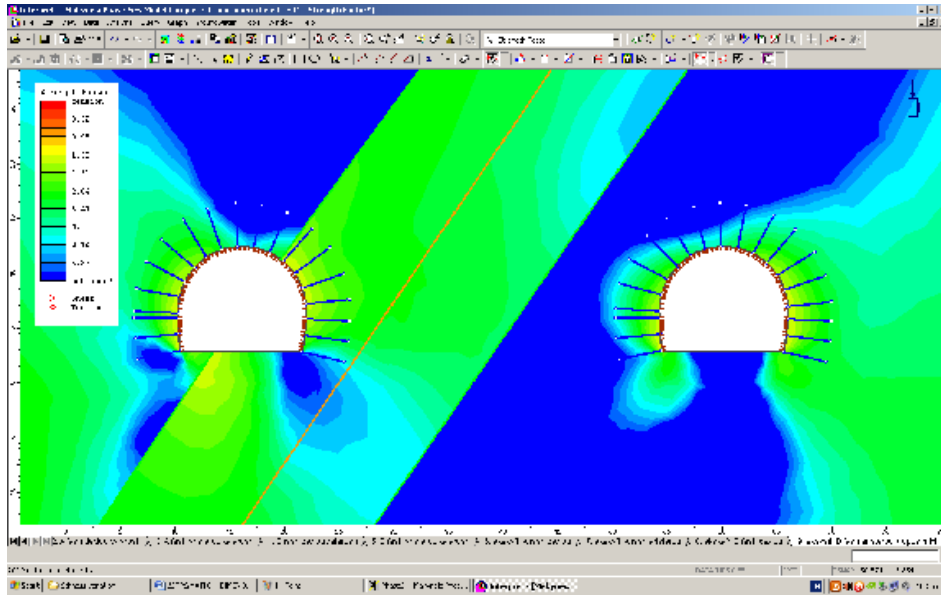


Εικόνα 62 : Χρήση της επιλογής αρχικής φόρτισης συνεχειών

Αναλυτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών φαίνονται στην παράγραφο 8.7.

8.6.2 Διαρροή βραχόμαζας

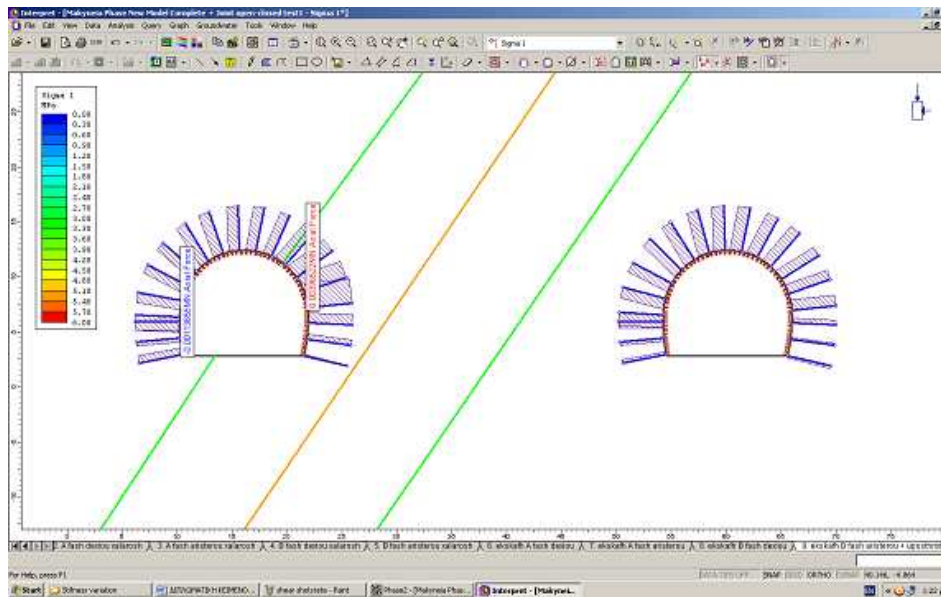
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 63 δεν παρατηρείται διαροή βραχόμαζας σε αυτή την περίπτωση.



Εικόνα 63 : Διαρροή βραχόμαζας

8.6.3 Φόρτιση αγκυριών

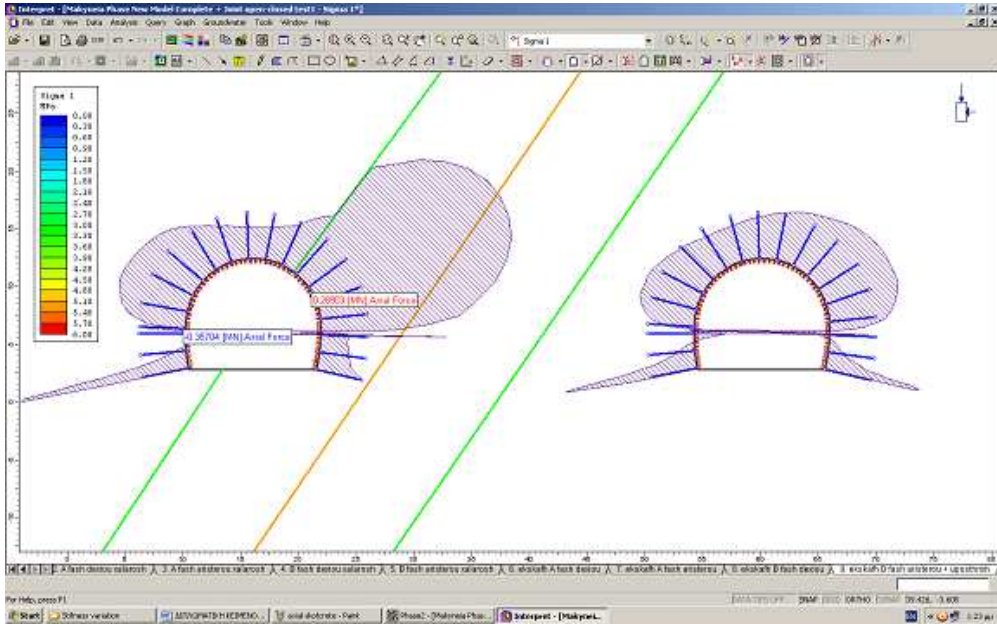
Από την Εικόνα 64 συμπεραίνουμε ότι οι μέγιστες τιμές αξονικής φόρτισης των αγκυριών παρατηρούνται στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου της σήραγγας.



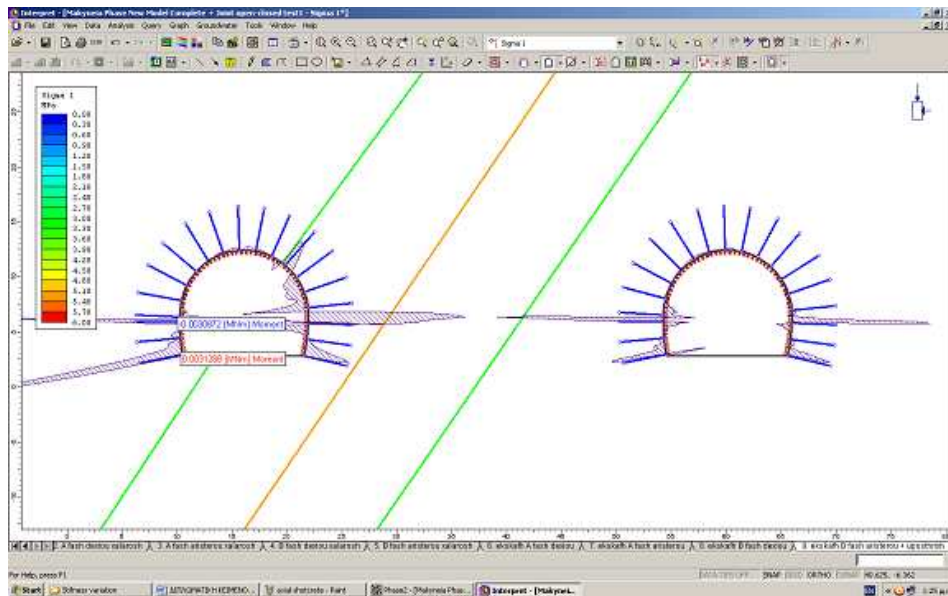
Εικόνα 64 : Αξονική φόρτιση αγκυριών

8.6.4 Φόρτιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

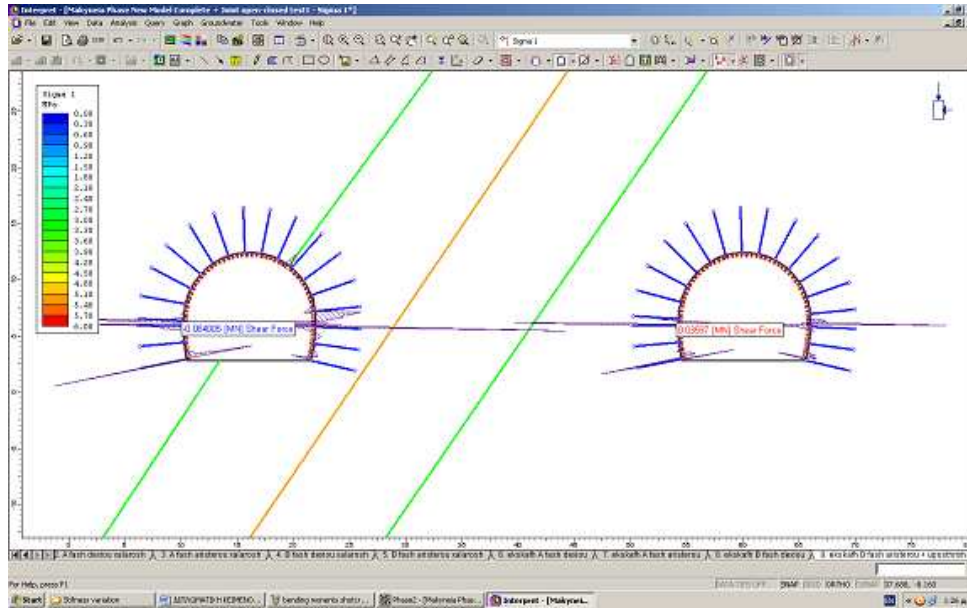
Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της ύπαρξης του ρήγματος, στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου παρατηρούνται επίσης και οι μεγαλύτερες τιμές αξονικής φόρτισης του δακτυλίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 65 : Αξονική φόρτιση σκυροδέματος



Εικόνα 66 : Ροπές κάμψης που ασκούνται στο σκυρόδεμα



Εικόνα 67 : Διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σκυροδέμα

8.6.5 Έλεγχος αστοχιών εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας A δίνεται στον Πίνακα 34.

Πίνακας 34 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τύπος μοντέλου	Δοκιμή	axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
πλήρες ρήγμα	1	0,35704	6	0,059507	0,179486	3,016235
	2	0,35941	6	0,059902	0,179486	2,996345
	3	0,37873	6	0,063122	0,179486	2,843494
	4	0,34458	6	0,05743	0,179486	3,125302
	5	0,52522	6	0,087537	0,179486	2,05041

Η ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατηγορία βραχόμαζας C1 δίνεται στον Πίνακα 35.

Πίνακας 35 : Ασκούμενη πίεση σε δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τύπος μοντέλου	Δοκιμή	axial (MN)	R (m)	pi (MPa)	pu	SF
πλήρες ρήγμα	1	0,35704	6	0,059507	0,377071	6,336621
	2	0,35941	6	0,059902	0,377071	6,294837
	3	0,37873	6	0,063122	0,377071	5,973721
	4	0,34458	6	0,05743	0,377071	6,565753
	5	0,52522	6	0,087537	0,377071	4,30758

Πιο αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στην παράγραφο 8.8 στο τέλος του κεφαλαίου.

8.7 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης

8.7.1 Αποτελέσματα δοκιμών δυστροπίας του ρήγματος

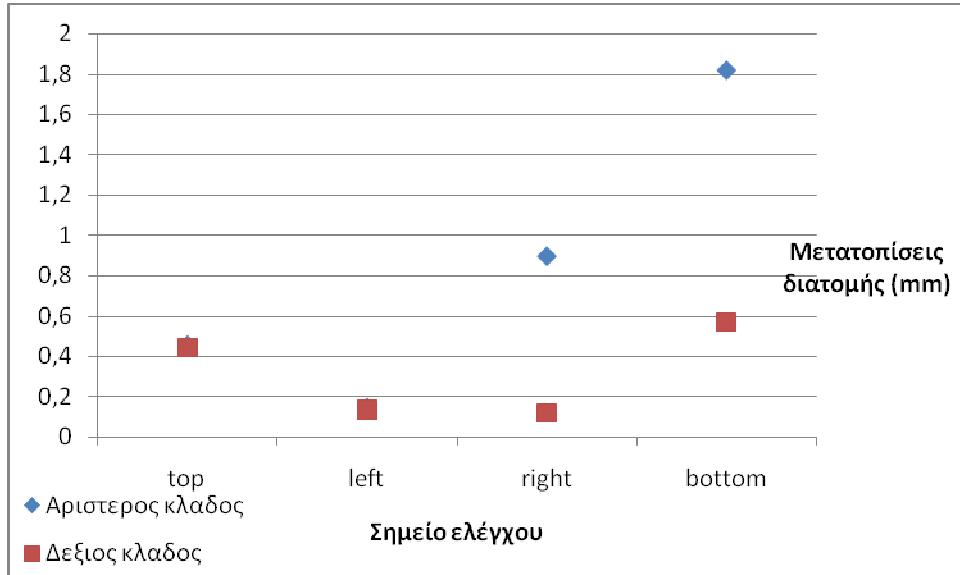
Στον Πίνακα 36 φαίνεται η διαφοροποίηση της δυστροπίας του ρήγματος που έγινε κατά τις δοκιμές που ακολουθούν.

Πίνακας 36 : Διαφοροποίηση της δυστροπίας του ρήγματος κατά τις τέσσερις δοκιμές

Δοκιμή	Normal Stifness (MPa/m)	Shear Stifness (MPa/m)
1	100000	10000
2	10000	1000
3	1000	100
4	100	10

Δοκιμή 1

Κατά την πρώτη δοκιμή οι μετατοπίσεις του μοντέλου που μετρήθηκαν φαίνονται στο Διάγραμμα 13. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται στο δάπεδο και τη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου λόγω της επίδρασης του ρήγματος.



Διάγραμμα 13 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την πρώτη δοκιμή

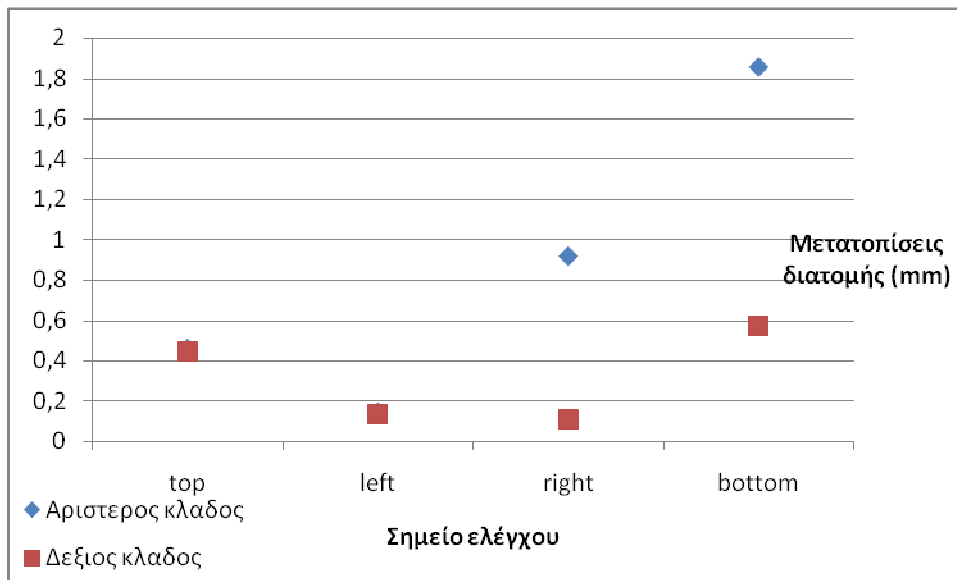
Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 37.

Πίνακας 37 : Μετατοπίσεις μοντέλου κατά την αρχική δοκιμή

	test1	
	Αριστερος κλαδος	Δεξιός κλαδος
top	0,4565	0,4455
left	0,0727	0,02863
right	0,944	0,06467
bottom	1,81104	0,57052

Δοκιμή 2

Κατά τη δεύτερη δοκιμή οι μετατοπίσεις του μοντέλου που μετρήθηκαν φαίνονται στο Διάγραμμα 14. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται στο δάπεδο και τη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου όπως και στην πρώτη δοκιμή και ότι η διαφορά τους δεν είναι μεγάλη.



Διάγραμμα 14 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά τη δεύτερη δοκιμή

Για να έχουμε μία πιο καθαρή εικόνα της μεταβολής που συμβαίνει, συγκρίναμε τις νέες μετατοπίσεις που προέκυψαν με τις αρχικές που φαίνονται στον πίνακα 37 και για του δύο κλάδους ξεχωριστά.

Απ ότι παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή συμβαίνει στις παρειές της σήραγγας και μάλιστα στην αριστερή παρειά, όπου το εύρος της μεταβολής είναι εξαιρετικά μεγάλο. Αντίθετα οι μετρούμενες μετατοπίσεις στην οροφή και το δάπεδο του αριστερού κλάδου είναι μικρότερες. Στην οροφή συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση των μετατοπίσεων.

Πίνακας 38 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά τη δεύτερη δοκιμή

	Αριστερός κλάδος		
	test1	test2	% μεταβολή
top	0,4569	0,4611	0,919238345
left	0,1482	0,1455	-1,82186235
right	0,89606	0,91966	2,633752204
bottom	1,81553	1,85905	2,397096165

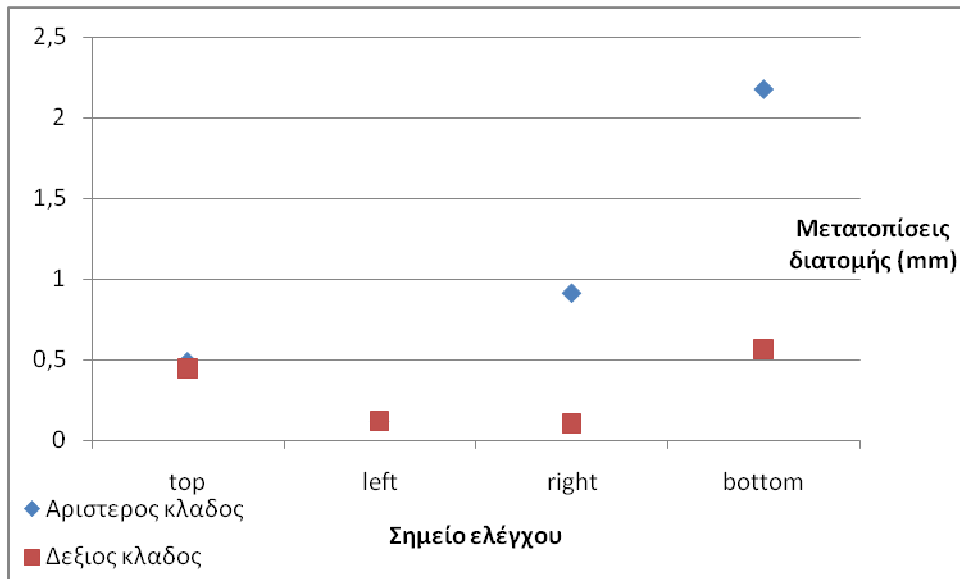
Στον δεξιό κλάδο η εικόνα είναι λίγο διαφορετική. Η δεξιά παρειά του κλάδου σημειώνει αρκετά μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με την αρχική κατάσταση, αλλά η αριστερή μετατοπίζεται περισσότερο σε αυτή την περίπτωση και μάλιστα με εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό μεταβολής. Ταυτόχρονα η οροφή μετατοπίζεται ελάχιστα και στο δάπεδο του δεξιού κλάδου παρατηρούνται μικρές μετατοπίσεις.

Πίνακας 39 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά τη δεύτερη δοκιμή

	Δεξιός κλάδος		
	test1	test2	% μεταβολή
top	0,44545	0,44572	0,060612863
left	0,13247	0,13848	4,536876274
right	0,11195	0,11074	-1,08083966
bottom	0,5705	0,57148	0,171779141

Δοκιμή 3

Κατά την τρίτη δοκιμή οι μετατοπίσεις του μοντέλου που μετρήθηκαν φαίνονται στο Διάγραμμα 15. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται στο δάπεδο και τη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου λόγω της επίδρασης του ρήγματος και ότι είναι σχετικά μεγαλύτερες από αυτές της προηγούμενης μέτρησης.



Διάγραμμα 15 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την τρίτη δοκιμή

Για να έχουμε μία πιο καθαρή εικόνα της μεταβολής που συμβαίνει, συγκρίναμε τις νέες μετατοπίσεις που προέκυψαν με τις αρχικές που φαίνονται στον πίνακα 37 και για του δύο κλάδους ξεχωριστά.

Όπως φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση έχουμε αύξηση των μετατοπίσεων στην αριστερή παρειά του αριστερού κλάδου της σήραγγας. Επίσης οι μετατοπίσεις στη δεξιά παρειά εξακολουθούν να αυξάνονται όσο μειώνεται η ακαμψία του υπάρχοντος ρήγματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχετική μείωση των μετατοπίσεων στην οροφή και το δάπεδο του κλάδου.

Πίνακας 40 : : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την τρίτη δοκιμή

	Αριστερός κλάδος		
	test1	test3	% μεταβολή
top	0,4569	0,4896	7,156927118
left	0,1482	0,1223	-17,4763833
right	0,89606	0,91361	1,958574203
bottom	1,81553	2,17376	19,73142829

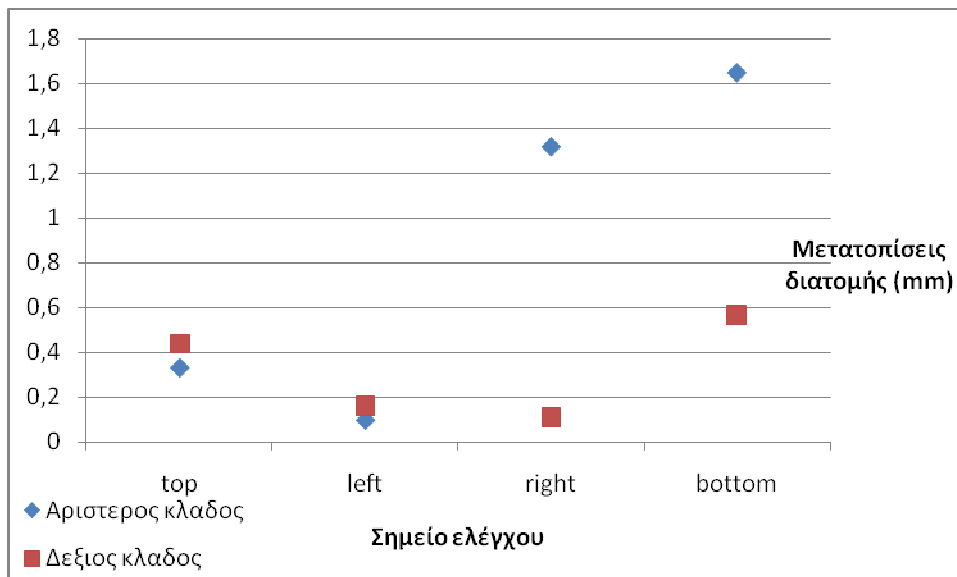
Σε αυτή την δοκιμή παρατηρούμε μία παρόμοια κατάσταση με την προηγούμενη δοκιμή. Η αριστερή παρειά παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη μεταβολή στις μετατοπίσεις αλλά το ποσοστό δεν είναι τόσο υψηλό όσο στην Δοκιμή 2. Παρομοίως η οροφή παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερες και το δάπεδο ελαφρά μικρότερες μετατοπίσεις.

Πίνακας 41 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την τρίτη δοκιμή

	Δεξιός κλάδος		
	test1	test3	% μεταβολή
top	0,44545	0,44611	0,148164777
left	0,13247	0,11957	-9,7380539
right	0,11195	0,101	-9,7811523
bottom	0,5705	0,56473	-1,01139351

Δοκιμή 4

Κατά την τέταρτη δοκιμή οι μετατοπίσεις του μοντέλου που μετρήθηκαν φαίνονται στο Διάγραμμα 16.



Διάγραμμα 16 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την τέταρτη δοκιμή

Για να έχουμε μία πιο καθαρή εικόνα της μεταβολής που συμβαίνει, συγκρίναμε τις νέες μετατοπίσεις που προέκυψαν με τις αρχικές που φαίνονται στον πίνακα 37 και για του δύο κλάδους ξεχωριστά.

Αυτό που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ διαφορετικό από όλες τις άλλες δοκιμές. Εδώ έχουμε εξαιρετικά μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων σε όλα τα σημεία ελέγχου της σήραγγας. Οι μετατοπίσεις αυξάνονται περιφερειακά της διατομής μας σε πολύ μεγάλα ποσοστά.

Πίνακας 42 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την τέταρτη δοκιμή

	Αριστερός κλάδος		
	test1	test4	% μεταβολή
top	0,4569	0,3331	-27,0956446
left	0,1482	0,0991	-33,1309042
right	0,89606	1,3197	47,27808406
bottom	1,81553	1,65039	-9,09596647

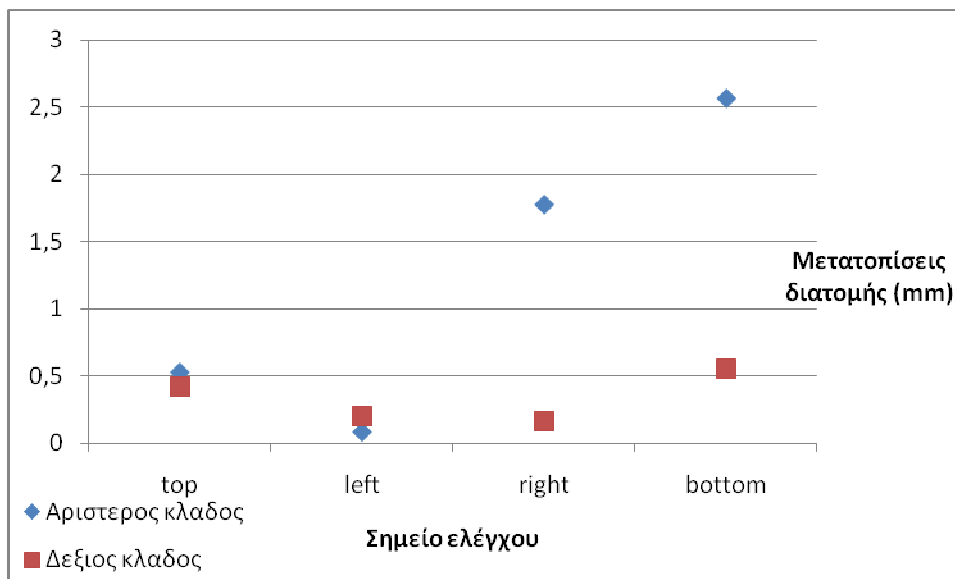
Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο δεξιός κλάδος της σήραγγας. Εδώ η αριστερή παρειά συνεχίζει να παρουσιάζει μεγάλες μετατοπίσεις. Αντίθετα όμως η οροφή, το δάπεδο και η δεξιά παρειά παρουσιάζουν μείωση των μετατοπίσεων και μάλιστα η δεξιά παρειά εμφανίζει πολύ μεγάλη διαφορά στις μετρούμενες μετατοπίσεις.

Πίνακας 43 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την τέταρτη δοκιμή

	Δεξιός κλάδος		
	test1	test4	% μεταβολή
top	0,44545	0,43797	-1,67920081
left	0,13247	0,16297	23,02408092
right	0,11195	0,11058	-1,22376061
bottom	0,5705	0,56791	-0,45398773

Δοκιμή 5

Κατά την πέμπτη δοκιμή οι μετατοπίσεις του μοντέλου που μετρήθηκαν φαίνονται στο Διάγραμμα 17.



Διάγραμμα 17 : Μετατοπίσεις των δύο κλάδων κατά την πέμπτη δοκιμή

Για να έχουμε μία πιο καθαρή εικόνα της μεταβολής που συμβαίνει, συγκρίναμε τις νέες μετατοπίσεις που προέκυψαν με τις αρχικές που φαίνονται στον πίνακα 37 και για του δύο κλάδους ξεχωριστά.

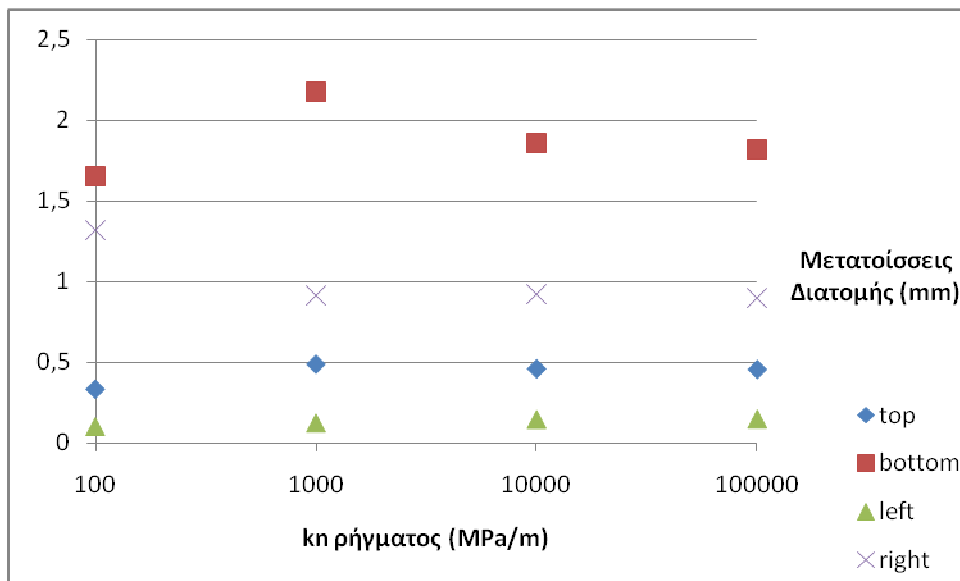
Πίνακας 44 : Σύγκριση μετατοπίσεων του αριστερού κλάδου κατά την πέμπτη δοκιμή

	Αριστερός κλάδος		
	test1	test5	% μεταβολή
top	0,4569	0,526	15,12365944
left	0,1482	0,085	-42,6450742
right	0,89606	1,77174	97,72559873
bottom	1,81553	2,56077	41,04806861

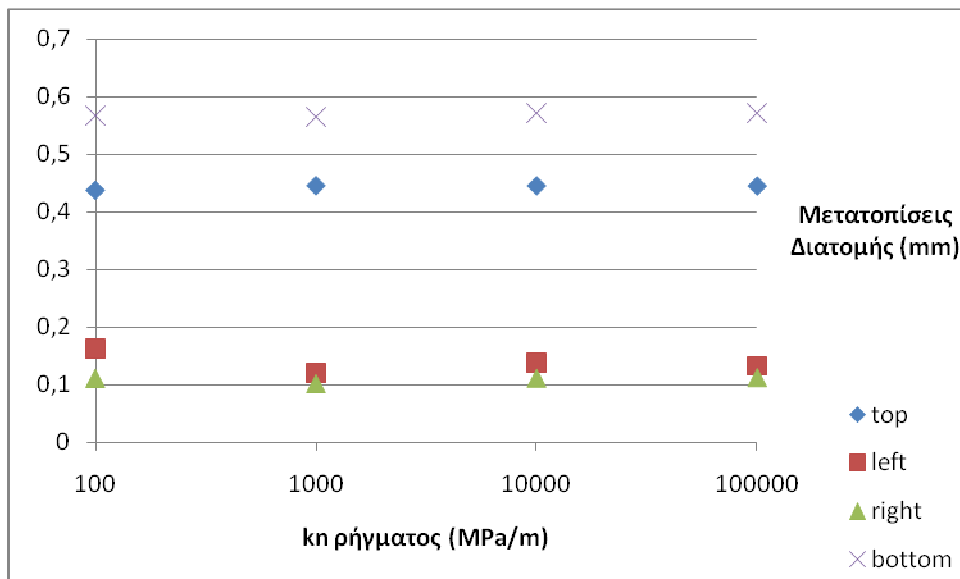
Πίνακας 45 : Σύγκριση μετατοπίσεων του δεξιού κλάδου κατά την πέμπτη δοκιμή

	Δεξιός κλάδος		
	test1	test5	% μεταβολή
top	0,44545	0,4162	-6,56639353
left	0,13247	0,2	50,97757983
right	0,11195	0,1645	46,94059848
bottom	0,5705	0,55237	-3,17791411

Σύγκριση αποτελεσμάτων

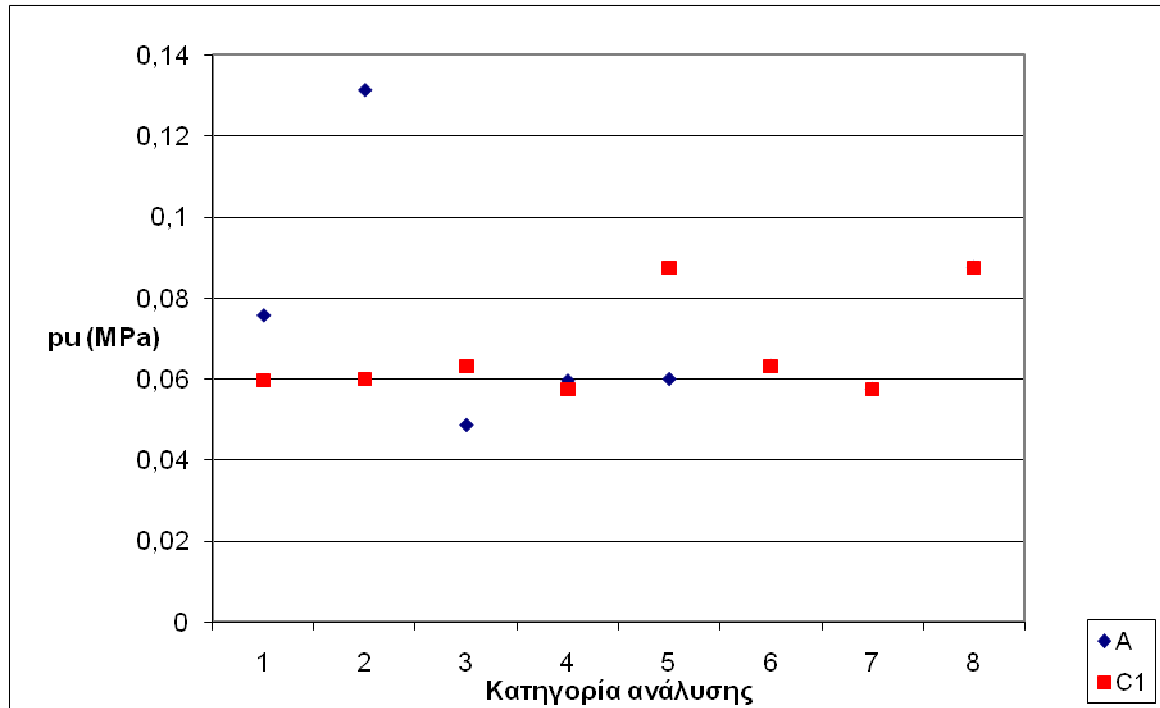


Διάγραμμα 18 : Διαφοροποιήσεις μετατοπίσεων αριστερού κλάδου κατά τις δοκιμές



Διάγραμμα 19 : Διαφοροποιήσεις μετατοπίσεων δεξιού κλάδου κατά τις δοκιμές

8.7.2 Αποτελέσματα φόρτισης εκτοξευόμενου σκυροδέματος



Διάγραμμα 20 : Ασκούμενες πιέσεις στο δακτύλιο εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανάλογα με την κατηγορία βραχόμαζας και τον τύπο μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε

Λόγω μειωμένου χώρου οι αριθμοί 1 έως 8 που αναγράφονται στον οριζόντιο άξονα του Διαγράμματος 20 αναπαριστούν τα παρακάτω:

- 1→ Μοντέλο χωρίς ρωγματωμένη μάζα με χρήση βραχόμαζας κατηγορίας A
- 2→ Μοντέλο χωρίς ρωγματωμένη μάζα με χρήση βραχόμαζας κατηγορίας C1
- 3→ Μοντέλο με ρωγματωμένη μάζα
- 4→ Μοντέλο με πλήρες ρήγμα κατά τη Δοκιμή 1
- 5→ Μοντέλο με πλήρες ρήγμα κατά τη Δοκιμή 2
- 6→ Μοντέλο με πλήρες ρήγμα κατά τη Δοκιμή 3
- 7→ Μοντέλο με πλήρες ρήγμα κατά τη Δοκιμή 4
- 8→ Μοντέλο με πλήρες ρήγμα κατά τη Δοκιμή 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μηχανική συμπεριφορά της οδικής σήραγγας Μακύνειας που βρίσκεται στο νομό Αιτωλοακαρνανίας και διανοίχθηκε ως μέρος του υπό κατασκευή οδικού άξονα της Ιονίας Οδού. Η σήραγγα της Μακύνειας είναι δίδυμη οδική σήραγγα με μέσο μήκος κάθε κλάδου περί τα 470m. Έχει διεύθυνση Δ-Α και είναι μέρος της υλοποίησης του έργου της Ιονίας οδού «ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ ΙΟΝΙΑ ΟΔΟΣ ΑΠΟ ΑΝΤΙΡΡΙΟ ΜΕΧΡΙ ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΠΑΘΕ ΑΘΗΝΑ (Α/Κ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ) – ΜΑΛΙΑΚΟΣ (ΣΚΑΡΦΕΙΑ) ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΤΗΡΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΤΟΥ ΠΑΘΕ ΣΧΗΜΑΤΑΡΙ -ΧΑΛΚΙΔΑ». Βρίσκεται στο Νομό Αιτωλοακαρνανίας, στην περιοχή της Μακύνειας, στο δημοτικό διαμέρισμα Αντιρρίου. Συγκεκριμένα η θέση του έργου βρίσκεται 5km βορειοδυτικά της πόλης του Αντιρρίου. Η σήραγγα διέρχεται από ιλύολιθους και ψαμμίτες με έντονη τεκτονική καταπόνηση σε κάποιες θέσεις. Η περιοχή κατασκευής της σήραγγας χαρακτηρίζεται από λοφώδες ανάγλυφο σχηματισμών φλύσχη. Το υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από χείμαρρους με διεύθυνση ΒΝ και φορά ροής προς νότο. Το κεντρικό τμήμα του έργου διανοίχθηκε σε λοφώδη σχηματισμό με μέγιστο ύψος τα 190m. Το κυριότερο τμήμα του έργου κατασκευάστηκε μέσα σε σχηματισμούς φλύσχη. Οι αρχές πάνω στις οποίες στηρίχθηκε η μεθοδολογία κατασκευής βασίζονται σε αυτές της μεθόδου Ν.Α.Τ.Μ. (New Austrian Method). Η έναρξη των εργασιών έγινε αρχικά στο μέτωπο εξόδου στον αριστερό κλάδο με την κατασκευή της ομπρέλας των forepolling. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα προπλάισια σύμφωνα με τη μελέτη και άρχισε η εκσκαφή του υπογείου τμήματος με την τοποθέτηση του πλαισίου Νο1 της κατηγορίας PSD. Αντίστοιχη αλληλουχία εργασιών έγινε στον δεξιό κλάδο και στη συνέχεια στα μέτωπα της εισόδου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν και αριθμητικές προσομοιώσεις μίας εγκάρσιας φιατομής της σήραγγας. Στις προσομοιώσεις αυτές εξετάστηκε η επίδραση του ρήγματος μεταξύ των δύο κλάδων με δύο τρόπους:

- A) παριστάνοντας το ρήγμα ως ρωγματομένη βραχώμαζα με υποβαθμισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.
- B) προσθέτοντας στο προσομοίωμα (A) μία διακριτή επιφάνεια ασυνέχειας.

Με βάση τα αποτελέσματα που λάβαμε από αυτές τις αναλύσεις μπορούμε να εξάγουμε συνοπτικά τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Ως επί το πλείστον η διατομή της σήραγγας παρουσίασε μικρές μετατοπίσεις, ακόμα και σε συνθήκες που δεν ήταν ευνοϊκές. Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, που προβλέφθηκαν από τη μελέτη του έργου αντιμετώπισαν πάντα επιτυχώς τα εκάστοτε φορτία. Συγκεκριμένα ο συντελεστής ασφαλείας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ο οποίος ελέγχθηκε σε όλες τις αναλύσεις μας ήταν επαρκής.
2. Όσο αφορά στο ρήγμα που τέμνει τον αριστερό κλάδο της σήραγγας, η ακαμψία του επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε, αλλά όχι σε ουσιώδη βαθμό, που σημαίνει ότι η παρουσία του ρήγματος σαν διακριτή ασυνέχεια πρακτικά δεν άλλαξε τα αποτελέσματα των αναλύσεων.
3. Γενικά συμπεραίνουμε ότι για τη συγκεκριμένη περίπτωση και για τις κατηγορίες βραχόμαζας που μελετήθηκαν, η προσομοίωση του ρήγματος σαν ρωγματομένη ζώνη είναι αρκετή για να αναπαραστήσει την επίδρασή του στη μηχανική συμπεριφορά της σήραγγας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΙΣΤΡΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ, 2009. "Τελικός γεωλογικός σχεδιασμός της σήραγγας Μακύνειας (IR.D.T.069.A)", Υπουργείο Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων
- ΙΣΤΡΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ, 2009. "Γεωτεχνική έκθεση και αξιολόγηση στη θέση της σήραγγας της Μακύνειας από Χ.Θ. 3+932,5 έως 4+513 (IR.D.T.612.B)", Υπουργείο Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων
- ΙΣΤΡΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ, 2009. "Ιονία Οδός, Σήραγγα Μακύνειας, Μελέτη Προσωρινής Υποστήριξης, Τεχνική Έκθεση (IR.D.T.591.C)", Υπουργείο Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων.
- Σοφιανός Α.Ι. (2010) Υποστήριξη υπογείων έργων. Αθήνα, Ελλάδα
- Σοφιανός Α.Ι. (2010) Τεχνικές διάνοιξης σηράγγων. Αθήνα, Ελλάδα
- Μ. Καββαδάς (2004) Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων. ΕΜΠ, 2012
- Σοφιανός Α.Δ., Γιούτα-Μήτρα Π., Βλάχος Ε.Κ., Ρούσσοι Ν.Δ, Ηλεκτρονικό Μητρώο Ελληνικών Σηράγγων, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ Ξάνθη, 2006
- Mark Panet The convergence-confinement method
- Rocscience Inc. (2010) Phase2: User's Manual. Ontario, Canada
- <http://www.geo.auth.gr/museum/MammalFiles/Gavrovou.pdf>