

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΟ
ΜΕΤΡΟ Α.Ε. ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΥΡΙΟΠΟΥΛΟΣ
ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ ΤΣΙΡΙΜΩΚΟΣ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒ10111_ΛΙΘΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14776/1
Ημερ. Εισ.: 13/09/2017
Δωρεά: Συγγραφείς
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2016
ΚΥΡ

© 2016 Κωνσταντίνος Κυριόπουλος, Αδαμάντιος Τσιριμώκος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ανήκουν αποκλειστικά στους συγγραφείς και δεν εκφράζουν την επίσημη άποψη της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε..

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Λέκτορα κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επιπλέον, οφείλουμε ευχαριστίες στα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα και τη Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου για τις συμβουλές τους σε θέματα που αφορούν τη διπλωματική μας εργασία. Επίσης, ευχαριστούμε τον Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο γιατί μας επέτρεψε να εργαστούμε στο χώρο του εργαστηρίου της υπολογιστικής γεωτεχνικής μηχανικής και να χρησιμοποιήσουμε μέρος του εξοπλισμού του για την αποπεράτωση του έργου μας. Ευχαριστούμε ακόμη τον Επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου για τις χρήσιμες συμβουλές του κάθε φορά που ζητήσαμε τη βοήθειά του σε θέματα που σχετίζονταν με το αντικείμενο της διπλωματικής μας. Επί προσθέτως θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. για την παραχώρηση των δεδομένων που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας και ιδιαίτερος τον Γεωλόγο της Αττικό Μετρό Α.Ε. κ. Γεώργιο Ροβολή για την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μας εργασίας. Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας και τους γονείς μας για την στήριξή τους.

Κωνσταντίνος Κυριόπουλος – Αδαμάντιος Τσιριμώκος

Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας πρόσβασης της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και παραμετρική ανάλυση ευστάθειας με χρήση αριθμητικών μεθόδων

Κωνσταντίνος Κυριόπουλος, Αδαμάντιος Τσιριμώκος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2016

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Εφραιμίδης, Λέκτορας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας πρόσβασης του Σταθμού Ελληνικό και των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μελέτη και υλοποίηση του έργου με τη χρήση των προγραμμάτων H/Y FLAC 7.0 και PHASE². Επιπλέον ασχολείται με την παραμετρική ανάλυση της κατασκευής μεταβάλλοντας τις υπάρχουσες συνθήκες της περιοχής.

Η σήραγγα αποτελεί τμήμα του έργου «Επέκταση της Γραμμής 2, Τμήμα: Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» που υλοποιήθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία για την σήραγγα πρόσβασης και της περιοχής που κατασκευάστηκε. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την γεωτεκτονική και τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής. Επιπλέον περιγράφονται τα στάδια κατασκευής και τα μέτρα προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του έργου.

Στο κυρίως μέρος παρουσιάζεται η προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας με χρήση των προγραμμάτων FLAC7 και PHASE². Ύστερα από μια σύντομη περιγραφή των 2 προγραμμάτων και του εύρους χρησιμότητας τους σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής παρουσιάζονται διεξοδικά τα στάδια που υιοθετήθηκαν για την προσομοίωση των αναλύσεων. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για διάφορες μεταβλητές, από το FLAC7 και το PHASE² τόσο μεταξύ τους όσο και με τις αναλύσεις και τις επί τόπου μετρήσεις της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

Στην συνέχεια εξετάζεται η παραμετρική ανάλυση του προβλήματος και με τα δυο προγράμματα μεταβάλλοντας διάφορες αρχικές παραμέτρους που συνδέονται με τις ιδιότητες των εδαφικών ενοτήτων, τις συνθήκες φόρτισης, τη διατάραξη του τασικού πεδίου κ.α.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις συγκρίσεις που διεξήχθησαν.

Parametric stability study of tunnel excavation implemented by the ATTIKO METRO S.A. by using numerical simulation methods

Konstantinos Kyriopoulos, Adamantios Tsirimokos

Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 2016

Supervisor: George Efremidis, Lecturer

Abstract

This diploma thesis presents the simulation of the stages of a tunnel excavation and the temporary retaining measures used in the study and implementation of the project using FLAC 7.0 and PHASE² programs. Furthermore it deals with the parametric analysis of the structure by changing the geotechnical and other properties of the region.

The tunnel is part of the project "Extension of Line 2, Section: Agios Dimitrios - Elliniko" which was implemented by the ATTIKO METRO S.A. The first chapters present general information about the tunnel and the geotechnical properties of the region. Moreover they outline not only the steps but also the temporary retaining measures that adopted for the construction of this tunnel.

In the main part of the diploma thesis, the simulation of the structure using FLAC 7.0 and PHASE², is explained. After a short presentation of the two programs, the stages that adopted for the simulation are explained. Next, the results of the two programs are compared to each other as well as with the analysis results and the in-situ results of ATTIKO METRO S.A.

Additionally, the parametric analysis of the problem is presented with both programs by varying the initial parameters and associated with the properties of territorial units, loading conditions, disturbance of stress field.

Finally the results of the analysis and the comparisons between the two programs are presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1. Γενικές πληροφορίες για τη Σήραγγα πρόσβασης του σταθμού «Ελληνικό»	14
2. ΝΕΑ ΑΥΣΤΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	17
2.1. Γενικά για την μέθοδο NATM	17
2.2. Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM	17
2.3. Φάσεις εκσκαφής	19
2.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM	20
3. ΜΕΘΟΔΟΣ – ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	21
3.1. Μεθο ολογία κατασκευής	21
3.2. Στάδια κατασκευής	21
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	22
5. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	25
5.1. Γεωτρήσεις	25
5.2. Γενικές γεωλογικές και σεισμικές συνθήκες	26
5.3. Γεωτεχνική τομή σχεδιασμού	28
5.4. Γεωτεχνικές ενότητες	29
5.4.1. Τεχνητές Επιχώσεις (Σχηματισμός: 1)	30
5.4.2. Εναλλαγές συνεκτικών και σιμεντωμένων υλικών (Σχηματισμοί 5.1 & 5.2)	30
5.4.2.1. Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών(Σχηματισμός 5.1)	30
5.4.2.2. Σχηματισμός σιμεντωμένων κορηματικών υλικών (Σχηματισμός 5.2)	31
5.4.3. Εναλλαγές συνεκτικού και σιμεντωμένου κλαστικού σχηματισμού (Σχηματισμοί 8.1 & 8.2)	32
5.4.3.1. Συνεκτικός Κλαστικός Σχηματισμός (Σχηματισμός 8.1)	32
5.4.3.2. Σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός (Σχηματισμός 8.2)	32
5.4.4. Σχηματισμός μεταψαμμίτη – μεταϊλύλιθου (Σχηματισμός: 10.2β)	33
5.5. Υδρογεωλογικές συνθήκες	33
5.5.1. Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα	33
5.6. Υπολογισμός συντελεστή αρχικής αποτόνωσης	34
5.7. Παραδοχές φορτίσεων	35
6. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ & ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	35
6.1. Γενικά	35
6.2. Προσωρινά μέτρα υποστήριξης	35
6.2.1. Δοκοί προπορείας	36
6.2.2. Ηλώσεις βράχου	37
6.2.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	37
6.2.4. Μεταλλικά πλαίσια	37
6.3. Διαδικασία κατασκευής	38
7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	39
8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ FLAC 7.0 ΚΑΙ PHASE ²	40
8.1. Γενικά για το FLAC7.0	40

8.2.	Γενικά για το Phase2	40
8.3.	Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης	41
8.4.	Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων με τα προγράμματα FLAC 7.0 και Phase ²	42
8.5.	Αναλυτική περιγραφή σταδίων προσομοίωσης	43
8.6.	Κριτήριο αστοχίας	47
9.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC 7.0	48
9.1.	Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (καθιζήσεις)	48
9.2.	Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x	50
9.3.	Ολικές μετατοπίσεις	51
9.4.	Ζώνες πλαστικοποίησης	51
9.5.	Αξονικές δυνάμεις ηλώσεων βράχου	52
9.6.	Παραμορφώσεις ηλώσεων βράχου	53
10.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PHASE ²	55
10.1	Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (καθιζήσεις)	55
10.2.	Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x	57
10.3.	Ολικές μετατοπίσεις	58
10.4.	Ζώνες πλαστικοποίησης	60
10.5.	Αξονικές δυνάμεις ηλώσεων βράχου	60
10.6.	Σύγκριση αποτελεσμάτων των προγραμμάτων FLAC7 και Phase2	61
11.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ FLAC7 ΚΑΙ PHASE ² ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.	63
11.1.	Αξιολόγηση καθιζήσεων	63
11.2.	Αξιολόγηση αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια	66
12.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ «ΕΛΛΗΝΙΚΟ»	67
12.1.	Εισαγωγή	67
12.2.	Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας (Eo) στη στρωματογραφία	67
12.2.1.	Ανάλυση για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0	69
12.2.2.	Ανάλυση με 50% Eo για σχηματισμό 5.1	73
12.2.3.	Ανάλυση με 25% Eo για σχηματισμό 5.1	75
12.2.4.	Ανάλυση με 12,5% Eo για σχηματισμό 5.1	78
12.3.	Μελέτη της επίδρασης ασυνεχειών	80
12.4.	Μεταβολή τιμής επιφανειακού φορτίου	93
12.5.	Παράλληλη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας	97
12.6.	Μεταβολή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων Ko	99
12.7.	Προσομοίωση ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα	100
12.7.1.	1η προσέγγιση με δυναμική ροή (flow) σε κώδικα FLAC 7.0	100
12.7.2.	2η προσέγγιση με στατική λύση (apply pressure)	102
13.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ –ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:	107

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1:** Απόσπασμα τοπογραφικού διαγράμματος ,φύλλο ΑΘΗΝΑΙ, με τη θέση του έργου επέκτασης. Τεχνική έκθεση ΑΜ ΓΕΝΙΚΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ κλ. 1:250.000 ΓΥΣ σελ.14
- Σχήμα 2:** Κάτοψη σταθμού Ελληνικό Αρχείο ΑΜ σελ.16
- Σχήμα3:** Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας. I) Πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη είναι πολύ μεγάλη, II) Κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση έχει μειωθεί σημαντικά, III) Πολύ αργά. Η πίεση έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης της βραχώμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης. (Μ. Καββαδάς, 2004) σελ.18
- Σχήμα 4:** Τυπικές διατομές εκσκαφής με τη μέθοδο NATM (Πηγή:railssystem.net) σελ.20
- Σχήμα 5:** Μέθοδος Top Heading and Bench. σελ.20
- Σχήμα 6:** Τυπική διατομή και προσωρινά μέτρα αντιστήριξης Σήραγγας Πρόσβασης (ΑΡΧΕΙΟ ΑΜ ΑΕ 2007) σελ.23
- Σχήμα 7:**Μηκοτομή σήραγγας πρόσβασης (ΑΡΧΕΙΟ ΑΜ 2007) σελ.24
- Σχήμα 8:** Θέσεις Γεωτρήσεων (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ 2007) σελ.26
- Σχήμα 8.1 :** Απόσπασμα Γεωλογικού χάρτη κλ. 1:50.000, Φύλλο Αθήνα-Πειραιάς (ΙΓΜΕ, 1982). Αττικό Μετρό 2007 σελ.27
- Σχήμα 9:** Αντιπροσωπευτική Γεωτεχνική Τομή (ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007) σελ.29
- Σχήμα 10:** Αγκύριο ολόσωμης πάκτωσης(ekkaif,2016) σελ.37
- Σχήμα 11:** Προσομοίωση Αντιπροσωπευτικής Γεωτεχνικής Τομής σε κώδικα FLAC 7.0 σελ.44
- Σχήμα 12 :** Τελικό στάδιο προσομοίωσης σήραγγας πρόσβασης σε FLAC 7.0 σελ.46
- Σχήμα 13:** Κατακόρυφες μετατοπίσεις (mm) ανυποστήρικτης σήραγγας (FLAC) σελ.49
- Σχήμα 14:** Κατακόρυφες μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC) σελ.49
- Σχήμα 15:** Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC) σελ.50

Σχήμα 16: Ολικές μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC).	σελ.51
Σχήμα 17: Πλαστικοποίηση του εδάφους κατά την εκσκαφή (FLAC)	σελ.52
Σχήμα 18: Αξονικές Δυνάμεις Ηλώσεων Βράχου μετά την εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. (FLAC)	σελ.53
Σχήμα 19: Αξονικές Παραμορφώσεις Αγκυρίων (FLAC)	σελ.53
Σχήμα 20: Γωνιακή Παραμόρφωση Αγκυρίων (FLAC)	σελ.54
Σχήμα 21: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) Ανυποστήρικτης Σήραγγας (Phase2)	σελ.55
Σχήμα 22: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη της Σήραγγας (Phase2)	σελ.56
Σχήμα 23: Οριζόντιες Μετατοπίσεις (mm) Ανυποστήρικτης Σήραγγας (Phase2)	σελ.57
Σχήμα 24: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη της Σήραγγας (Phase2)	σελ.58
Σχήμα 25: Ολικές Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη Σήραγγας (Phase2)	σελ.59
Σχήμα 26: Διευθύνσεις Ολικών Μετατοπίσεων κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη (Phase2)	σελ.59
Σχήμα 27: Ζώνες Πλαστικοποίησης (Phase2)	σελ.60
Σχήμα 28: Αξονικές Δυνάμεις επί των Ηλώσεων Βράχου (Phase2)	σελ.61
Σχήμα 29: Ανάλυση A ($K_0=0,40$) - Δοκοί προπορείας $\Phi 114,3\text{mm}$ (forepoles) – Ελαστοπλαστικές κατακόρυφες μετακινήσεις (ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007)	σελ.64
Σχήμα 30: Σημεία insitu μέτρησης καθιζήσεων από Α.Μ	σελ.64
Σχήμα 31: Αξονικές Δυνάμεις επί των Ηλώσεων Βράχου (ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007)	σελ.66
Σχήμα 32: Θέσεις κύριων γεωτρήσεων	σελ.67
Σχήμα 33: Γεωλογική Γεωτεχνική Υδρογεωλογική Μηκτομή 1 (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ)	σελ.68
Σχήμα 34: Γεωλογική Γεωτεχνική Υδρογεωλογική Μηκτομή 2 (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ)	σελ.69
Σχήμα 35: Προσομοίωση για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0	σελ.70
Σχήμα 36: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις ανάλυσης για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0	σελ.70

Σχήμα 37: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 5.1 100% Eo	σελ.71
Σχήμα 38: Περιβάλλουσα αστοχίας για 100% Eo	σελ.71
Σχήμα 39: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 100% Eo	σελ. 72
Σχήμα 40: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 100% Eo	σελ. 72
Σχήμα 41: Κατακόρυφες μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 50% Eo	σελ.73
Σχήμα 42: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 5.1 50% Eo	σελ.74
Σχήμα 43: Περιβάλλουσα αστοχίας για 50% Eo	σελ.74
Σχήμα 44: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 50% Eo	σελ.74
Σχήμα 45: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 50% Eo	σελ.75
Σχήμα 46: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 25%Eo	σελ.75
Σχήμα47: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 25% Eo	σελ.76
Σχήμα48: Περιβάλλουσα αστοχίας για 25% Eo	σελ.76
Σχήμα 49: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 25% Eo	σελ.77
Σχήμα 50: διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 25% Eo	σελ.77
Σχήμα 51: Κατακόρυφες μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 12,5% Eo	σελ.78
Σχήμα 52: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για εδαφικό σχηματισμό 5.1 12,5% Eo	σελ.78
Σχήμα 53: Περιβάλλουσα αστοχίας για 12,5% Eo	σελ.79
Σχήμα 54: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 12,5% Eo	σελ.79
Σχήμα 55: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 12,5 Eo	σελ.80
Σχήμα 56: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase ² για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.81
Σχήμα 57: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.82
Σχήμα 58: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.83
Σχήμα 59: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.83
Σχήμα 60: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase ² για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.84
Σχήμα 61: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.85
Σχήμα 62: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.86

Σχήμα 63: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.87
Σχήμα 64: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase ² για $\theta=70^\circ$, $d=0,75m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.88
Σχήμα 65: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=0,75m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.89
Σχήμα 66: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=0,75m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.90
Σχήμα 67: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=70^\circ$, $d=0,75m$, $\varphi=35^\circ$	σελ.90
Σχήμα68: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase ² για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$	σελ.91
Σχήμα 69: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$	σελ.92
Σχήμα 70: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$	σελ.93
Σχήμα 71: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύριαγια $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$	σελ.93
Σχήμα 72: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση $75kN/m^2$	σελ.94
Σχήμα 73: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση $100 kN/m^2$	σελ.95
Σχήμα 74: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση $200 kN/m^2$	σελ.95
Σχήμα 75: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση $75 KN/m^2$	σελ.96
Σχήμα 76: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση $100 KN/m^2$	σελ.96
Σχήμα 77: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση $200 KN/m^2$	σελ.97
Σχήμα 78: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια μετά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας	σελ.98
Σχήμα 79: Καθιζήσεις μετά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας	σελ.99
Σχήμα 80: Καθιζήσεις για $K_0=0,6$	σελ.100
Σχήμα 81: Οριζόντιες μετατοπίσεις για $K_0=0,6$	σελ.101
Σχήμα 82: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για Flowtime $1.33 E+05$	σελ.102
Σχήμα 83: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για flowtime $1.33 E+05$	σελ.102
Σχήμα 84: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για flowtime $1.33 E+05$	σελ.103
Σχήμα 85: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για στατική ανάλυση με πίεση πόρων	σελ.104

Πίνακας 1: Τομή ανάλυσης Α - Υπολογισμός ισοδύναμου υλικού δοκών προπορείας Φ114,3mm. (ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007)	σελ.36
Πίνακας 2: Τομή ανάλυσης Β - Υπολογισμός ισοδύναμου υλικού δοκών προπορείας. (ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007)	σελ.36
Πίνακας 3: Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων	σελ.43
Πίνακας 4: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm)	σελ.50
Πίνακας 5: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm)	σελ.56
Πίνακας 6: Περιοριστικές τιμές καθιζήσεων - μετακινήσεων σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Αττικό Μετρό Α.Ε. .	σελ.65

Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας πρόσβασης της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και παραμετρική ανάλυση ευστάθειας με χρήση αριθμητικών μεθόδων

Κυριόπουλος Κωνσταντίνος-Τσιριμώκος Αδαμάντιος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2016

Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραιμίδης Γεώργιος, Λέκτορας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας πρόσβασης του Σταθμού Ελληνικό και των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μελέτη και υλοποίηση του έργου με τη χρήση των προγραμμάτων H/Y FLAC 7.0 και PHASE². Επιπλέον ασχολείται με την παραμετρική ανάλυση της κατασκευής μεταβάλλοντας τις υπάρχουσες συνθήκες της περιοχής.

Η σήραγγα αποτελεί τμήμα του έργου «Επέκταση της Γραμμής 2, Τμήμα: Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» που υλοποιήθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την σήραγγα πρόσβασης και της περιοχής που κατασκευάστηκε. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την γεωτεκτονική και τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής. Επιπλέον περιγράφονται τα στάδια κατασκευής και τα μέτρα προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του έργου.

Στο κυρίως μέρος παρουσιάζεται η προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας με χρήση των προγραμμάτων FLAC7 και PHASE². Ύστερα από μια σύντομη περιγραφή των 2 προγραμμάτων και του εύρους χρησιμότητας τους σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής παρουσιάζονται διεξοδικά τα στάδια που υιοθετήθηκαν για την προσομοίωση των αναλύσεων. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των FLAC7 και το PHASE² για διάφορα μεγέθη και πραγματοποιείται σύγκριση τόσο μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων όσο και με τις αναλύσεις και τις in situ μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

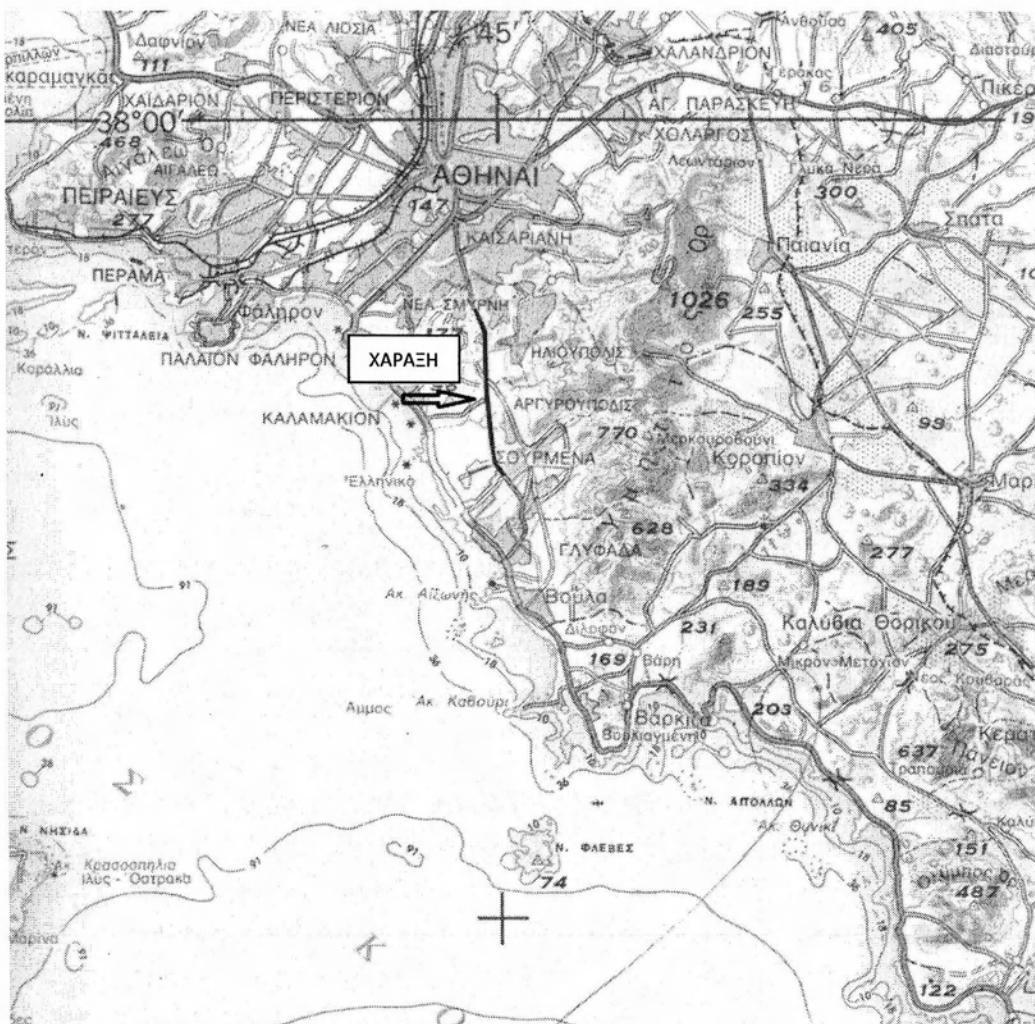
Στην συνέχεια εξετάζεται η παραμετρική ανάλυση του προβλήματος και με τα δυο προγράμματα μεταβάλλοντας διάφορες αρχικές παραμέτρους που συνδέονται με τις ιδιότητες των εδαφικών ενοτήτων, τις συνθήκες φόρτισης, διάνοιξη δίδυμης σήραγγας κ.α.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις συγκρίσεις που διεξήχθησαν.

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικές πληροφορίες για τη Σήραγγα πρόσβασης του σταθμού «Ελληνικό»

Η Σήραγγα πρόσβασης του Σταθμού «Ελληνικό» αποτελεί τμήμα του έργου «Επέκταση της Γραμμής 2, Τμήμα: Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» που πραγματοποιήθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (Κύριος του Έργου). Ανάδοχος της κατασκευής ήταν η κοινοπραξία ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε.- SIEMENS A.G. - VINCI Constructions Grand Projects. Η επέκταση της γραμμής φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Απόσπασμα τοπογραφικού διαγράμματος ,φύλλο ΑΘΗΝΑΙ, με τη θέση του έργου επέκτασης. Τεχνική έκθεση ΑΜ ΓΕΝΙΚΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ κλ. 1:250.000 ΓΥΣ

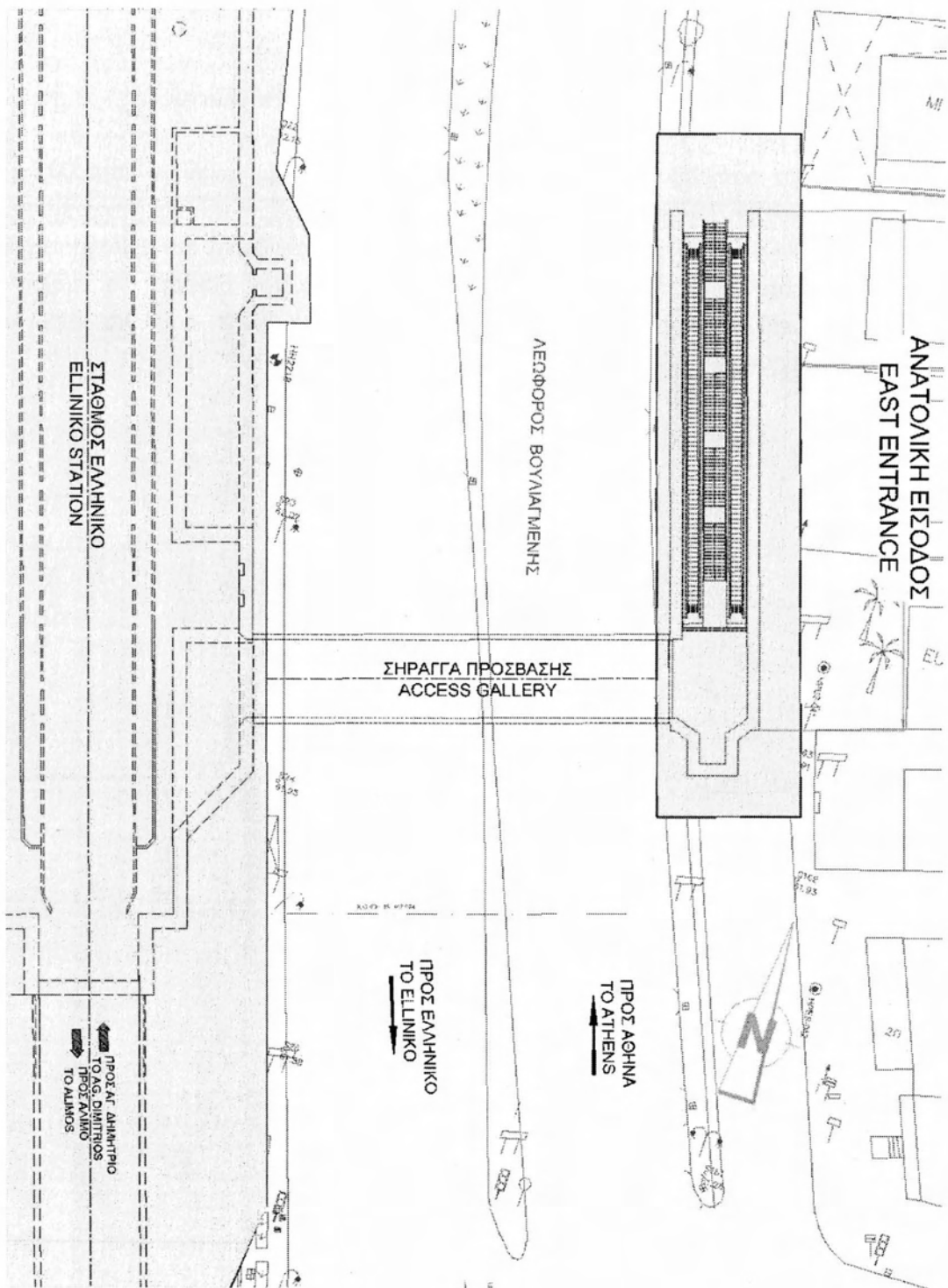
Ο Σταθμός «Ελληνικό» συνίσταται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. Κυρίως τμήμα σταθμού

2. Ανατολική είσοδος σταθμού και

3. Σήραγγα πρόσβασης – Σύνδεσης ανατολικής εισόδου και κυρίως τμήματος σταθμού.

Η σήραγγα πρόσβασης διέρχεται εγκάρσια από τη λεωφόρο Βουλιαγμένης και σύμφωνα με το σχεδιασμό της μελέτης του έργου δεν προκαλούνται επιδράσεις στη λειτουργία της οδού. Η σήραγγα ορύχθηκε υπογείως με χρήση συμβατικής μεθόδου-παραλλαγή της NATM (New Austrian Tunnelling Method). Είναι μήκους 34,85m και κατασκευάστηκε με μηκοτομική κλίση 2,01%. Η διατομή της εκσκαφής είναι αψιδωτή ,με ανάστροφο τόξο, πλάτους 8,0m και ύψος που κυμαίνεται από 6,50m μέχρι 6,80m. Το πάχος των υπερκείμενων κατά μήκος της σήραγγας κυμαίνεται από 9,0m ~ 10,0m περίπου. Η διάνοιξή της πραγματοποιήθηκε με φορά από την ανατολική είσοδο προς το κυρίως τμήμα του σταθμού.



Σχήμα 2: Κάτοψη σταθμού «Ελληνικό», Αρχείο Α.Μ.

2. Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων

2.1. Γενικά για την μέθοδο NATM

Η "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων. Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I). Επιπλέον συχνά χρησιμοποιούνται και αγκύρια βράχου (παθητικά ή προεντεταμένα). Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας (Καββαδάς 2005).

2.2. Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM

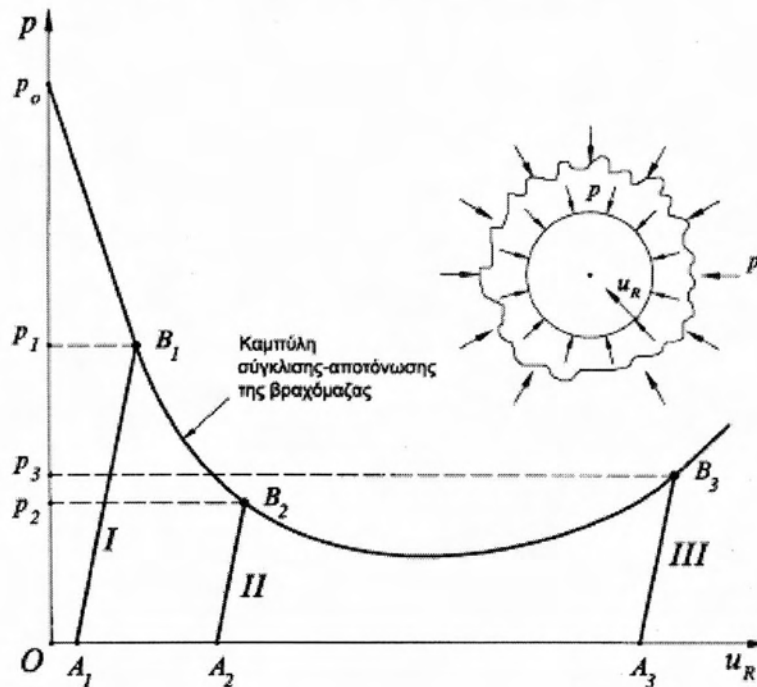
Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (βλέπε Σχήμα 2).

Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής και επιπλέον ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχώμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής. Η παραπάνω αρχή της μεθόδου NATM εξειδικεύεται ως εξής (Καββαδάς 2005):

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνηθίζεται να πραγματοποιείται σε περισσότερες από μία φάσεις. Τυπικές διατομές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3). Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος (σε σχέση με την εκσκαφή της διατομής σε μια φάση) και βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής αποφεύγοντας την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

2. Η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής γίνεται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της

σήραγγας και να αποφευχθεί η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σταδιακής εκσκαφής με μικρά βήματα της τάξεως των 1,0-2,0 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχόμαζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας είναι ταχύτερη).



Σχήμα 3 : Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχόμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας. I) Πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη είναι πολύ μεγάλη, II) Κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση έχει μειωθεί σημαντικά, III) Πολύ αργά. Η πίεση έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης της βραχόμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης (Καββαδάς, 2004).

3. Η άμεση υποστήριξη της διατομής θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχόμαζα (και συνεπώς η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του) και επιπλέον έχει μικρό χρόνο πήξεως (μερικές ώρες). Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κάρναβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχόμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχόμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχόμαζας να παραμορφωθεί διατμητικά προκαλεί την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχόμαζα. Η θλίψη της βραχόμαζας αυξάνει την αντοχή της και μειώνει την παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού.

4. Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής (δηλαδή και στο δάπεδο). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Η δημιουργία κλειστού δακτυλίου με την ταχεία σκυροδέτηση του δαπέδου συντελεί τα μέγιστα στη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας

και στην ευστάθεια της διατομής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχώμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να επενδύεται με σκυρόδεμα το δάπεδο της σήραγγας.

5. Στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχώμαζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθης η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου της εκσκαφής (face instability). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και αποδιοργάνωση της δομής της βραχώμαζας με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου), διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο (δηλαδή αφήνοντας έναν εδαφικό τάκο στον πόδα του μετώπου), ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling), κατασκευή τσιμεντενέσεων, επένδυση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ.

6. Η πυκνότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται στις επιτόπου συνθήκες. Ειδικότερα, η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις της συμπεριφοράς του τμήματος της σήραγγας που έχει ήδη διανοιχθεί (όπως μετρήσεις της σύγκλισης του τοιχώματος, της πίεσης της βραχώμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της θλιπτικής τάσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ). Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε απόκλιση από την προηγούμενη συμπεριφορά θα πρέπει να αξιολογείται και να ερμηνεύεται, στη συνέχεια δε να αντιμετωπίζεται με κατάλληλη προσαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

2.3. Φάσεις εκσκαφής

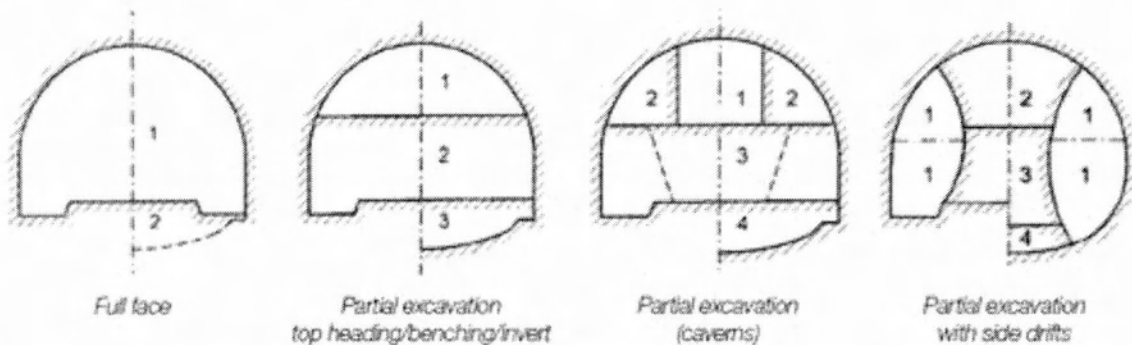
Η εκσκαφή σηράγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

1. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench) (Σχήμα 4).

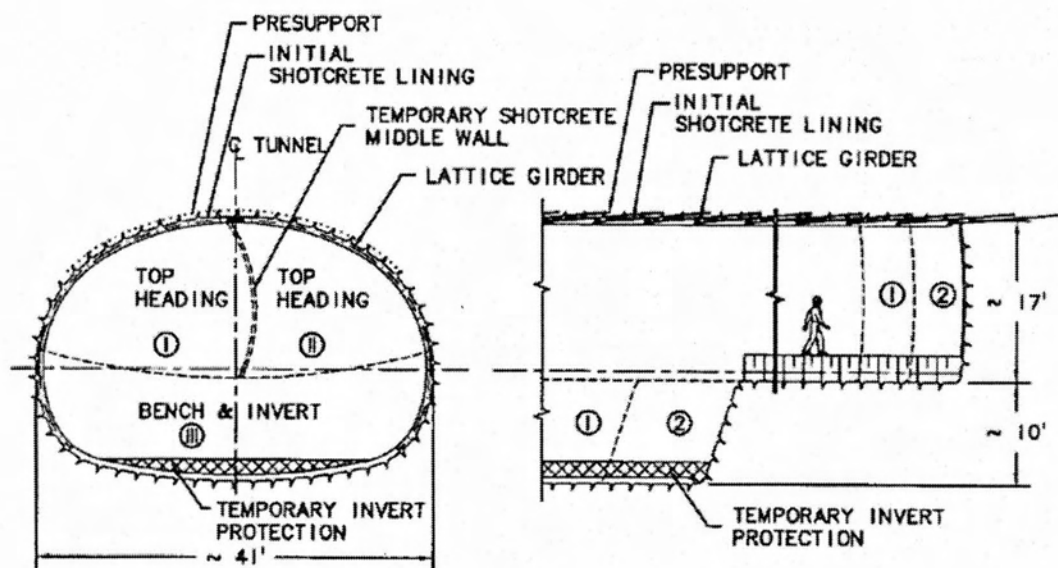
Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφτεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πλόδο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά διάνοιξη της σήραγγας.

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twinside-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας.



Σχήμα 4: Τυπικές διατομές εκσκαφής με τη μέθοδο NATM (Πηγή: www.railsystem.net)



Σχήμα5: Μέθοδος Top Heading and Bench. (Πηγή: www.dr-sauer.com)

2.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (διάνοιξη με TBM ή ασπίδα) είναι τα εξής (Καββαδάς 2005):

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

3. Μέθοδος – Φάσεις κατασκευής σήραγγας πρόσβασης

3.1. Μεθοδολογία κατασκευής

Για την υλοποίηση της σήραγγας πρόσβασης του Σταθμού «Ελληνικό», εκπονήθηκε από τους μελετητές της κοινοπραξίας, “Ομικρον Κάππα Μελετητική ΕΠΕ” και “ Ingenieur büro EDR GmbH” και εγκρίθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. κατάλληλη μεθοδολογία κατασκευής (Τεχνική έκθεση ΛΟΜ1, 2007), ώστε,

1. Να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της υπόγειας εκσκαφής για τις επικρατούσες γεωτεχνικές και υδρολογικές συνθήκες,

2. Να περιορισθούν οι ενδεχόμενες καθιζήσεις και οι οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια εντός των επιτρεπόμενων ορίων, όπως αυτά προσδιορίζονται στον Πίνακα 2.1 του άρθρου 2.7.4.4 των Προδιαγραφών Μελέτης Έργων Πολιτικού Μηχανικού (Π.Μ.Ε.Π.Μ.) της Α.Μ. και

3. Να ικανοποιούνται οι γεωμετρικοί περιορισμοί διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας με τη συμβατική μέθοδο NATM..

3.2. Στάδια κατασκευής

Τα στάδια κατασκευής της σήραγγας πρόσβασης είναι τα εξής:

1. Σκυροδέτηση του κυρίως τμήματος του σταθμού Ελληνικό έως το επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων (+46,30).

2. Απομάκρυνση και διευθέτηση υφιστάμενων δικτύων Οργανισμών Κοινής Ωφέλειας (ΟΚΩ).

3. Τοποθέτηση αγκυρίων fiberglass και εκτέλεση μιας ομπρέλας ελαφρών δοκών προπορείας Φ51mm, μήκους 5m με κλίση όσο η μηκοτομική κλίση της σήραγγας πρόσβασης ώστε να επιτευχθεί με ασφάλεια η εκσκαφή της σήραγγας. Η διατομή εκσκαφής που θα εφαρμοστεί θα είναι αυτή του πλαισίου Νο 1 της τυπικής διατομής με δοκούς προπορείας Φ114,3mm.

4. Αποτάνυση των αγκυρίων της 3^{ης} σειράς του κυρίως τμήματος του σταθμού που επηρεάζεται από την εκσκαφή της σήραγγας πρόσβασης.

5. Εφαρμογή 2 ομπρελών ελαφρών δοκών προπορείας Φ51mm μήκους 6m, με 13,5^ο ανωφερική κλίση, σε απόσταση 3 βημάτων προχώρησης ώστε να επιτευχθεί σταδιακή διεύρυνση της διατομής, για να είναι δυνατή η εφαρμογή της πρώτης ομπρέλας δοκών προπορείας Φ114,3mm, μήκους 9m. Με τις δύο ομπρέλες ελαφρών δοκών προπορείας Φ51mm επιτυγχάνεται σταδιακή διεύρυνση της διατομής μέχρι τη θέση της προβλεπόμενης μέγιστης διεύρυνση ώστε να εξασφαλισθεί ο απαιτούμενος χώρος για την τοποθέτηση του διατρητικού εξοπλισμού τοποθέτησης των δοκών προπορείας Φ114,3mm.

6. Σταδιακή εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας πρόσβασης από την ανατολική είσοδο προς το κυρίως τμήμα του σταθμού σύμφωνα με τα σχέδια και της προβλέψεις της παρούσας μελέτης.

7. Η εκσκαφή της σήραγγας πρόσβασης θα ολοκληρωθεί με την εκτέλεση 4 ομπρελών δοκών προπορείας αποτελούμενες από δοκούς Φ114,3mm.

8. Καθαίρεση των πασσάλων στην προβλεπόμενη ζώνη του κυρίως τμήματος του σταθμού και ολοκλήρωση της διάνοιξης της σήραγγας.

4. Περιγραφή συστήματος προσωρινής αντιστήριξης σήραγγας πρόσβασης

Σύμφωνα με εγκεκριμένη μελέτη, το σύστημα προσωρινής αντιστήριξης της σήραγγας πρόσβασης που διανοίχθηκε με την μέθοδο NATM αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

1. Κέλυφος προσωρινής υποστήριξης πάχους 25cm αποτελούμενο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 και μεταλλικό πλαίσιο HEB120 σε αξονική απόσταση 1m. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε 3 υποστρώσεις των 5cm, 15cm και 5cm. Τα πρώτα 5cm είναι ινοπλισμένα (40kg/m^3). Επιπλέον τοποθετείται ένα δομικό πλέγμα T188.

2. Κέλυφος προσωρινής υποστήριξης μόνιμου ανάστροφου τόξου πάχους 25cm αποτελούμενο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 και διπλό δομικό πλέγμα T188.

3. Εφαρμογή 21 δοκών προπορείας $\Phi 114,3/100,1$ ανά ομπρέλα, πάχους 7,1mm, μήκους 9m, στις 120ο του θόλου με κλίση 7ο σε αξονικές αποστάσεις 40cm, ανά 6 βήματα προχώρησης. Συνολικά τοποθετούνται 4 ομπρέλες δοκών προπορείας. Στις περιοχές συναρμογής της σήραγγας με την ανατολική είσοδο και το κυρίως τμήμα του σταθμού (Περιοχές I, II & III) εφαρμόζονται 3 ομπρέλες, οι οποίες συνίσταται από 25 ελαφρές δοκούς προπορείας $\Phi 51/41$, πάχους 5,0 mm, μήκους 6,0 m για τις περιοχές I, II και 5m για την περιοχή III, στις 120^ο του θόλου σε αξονικές αποστάσεις των 35,0 cm, ανά 3 βήματα προχώρησης.

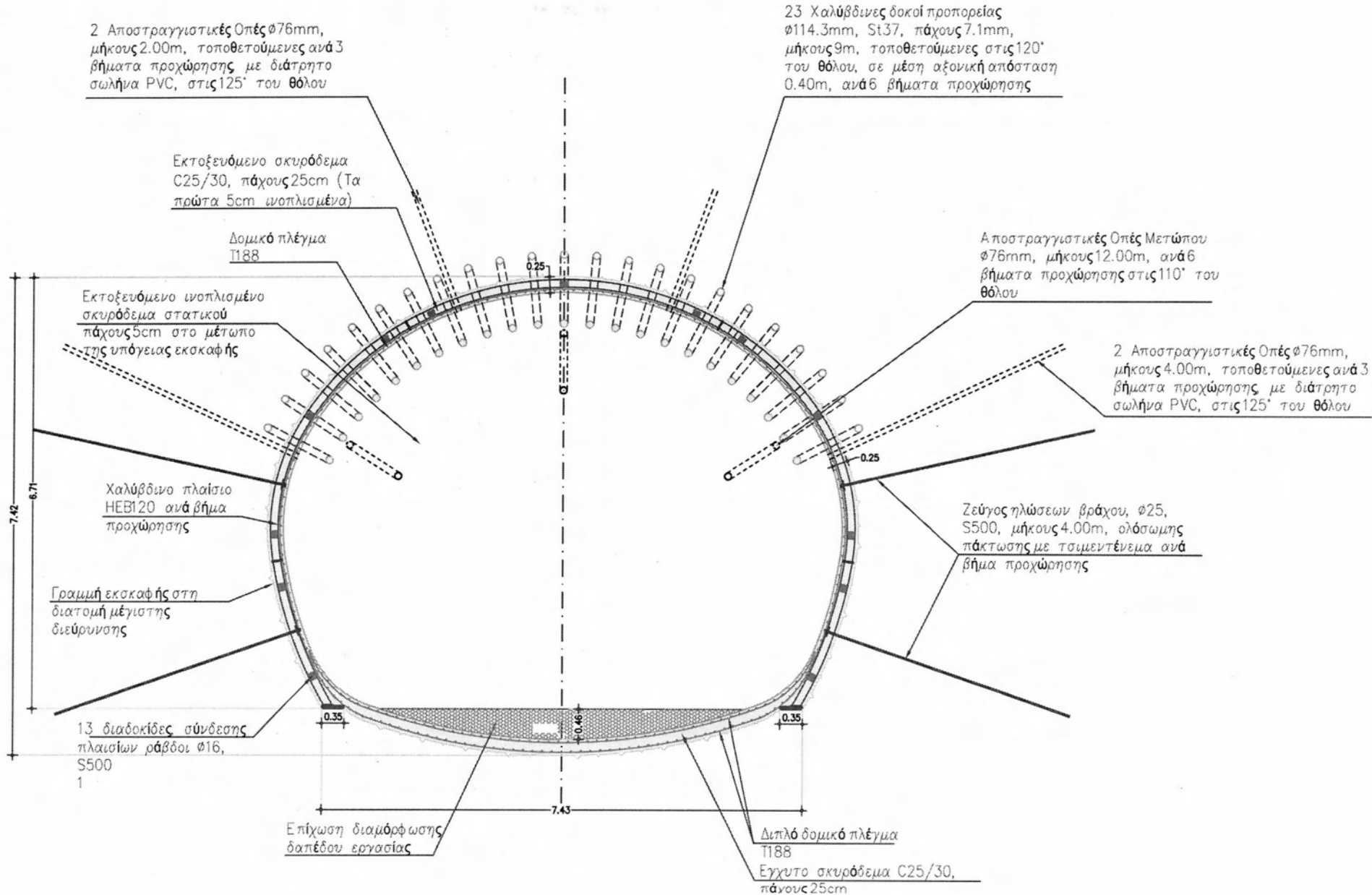
4. Ζεύγη ηλώσεων βράχου με τσιμεντένεμα, $\Phi 25\text{mm}$, S500, μήκους 4,0m. Τοποθετούνται 8 αγκύρια ανά βήμα προχώρησης (4 σε κάθε παρειά).

5. Αποστραγγιστικές οπές $\Phi 76\text{mm}$, με διάτρητο σωλήνα PVC. Εφαρμόζονται 4 αποστραγγιστικές οπές μήκους 4m στην παρειά και 2m στο θόλο της σήραγγας ανά 3 βήματα προχώρησης και 3 αποστραγγιστικές οπές μήκους 12m, στο μέτωπο της σήραγγας ανά 6 βήματα προχώρησης αναλόγως των επιτόπου συνθηκών.

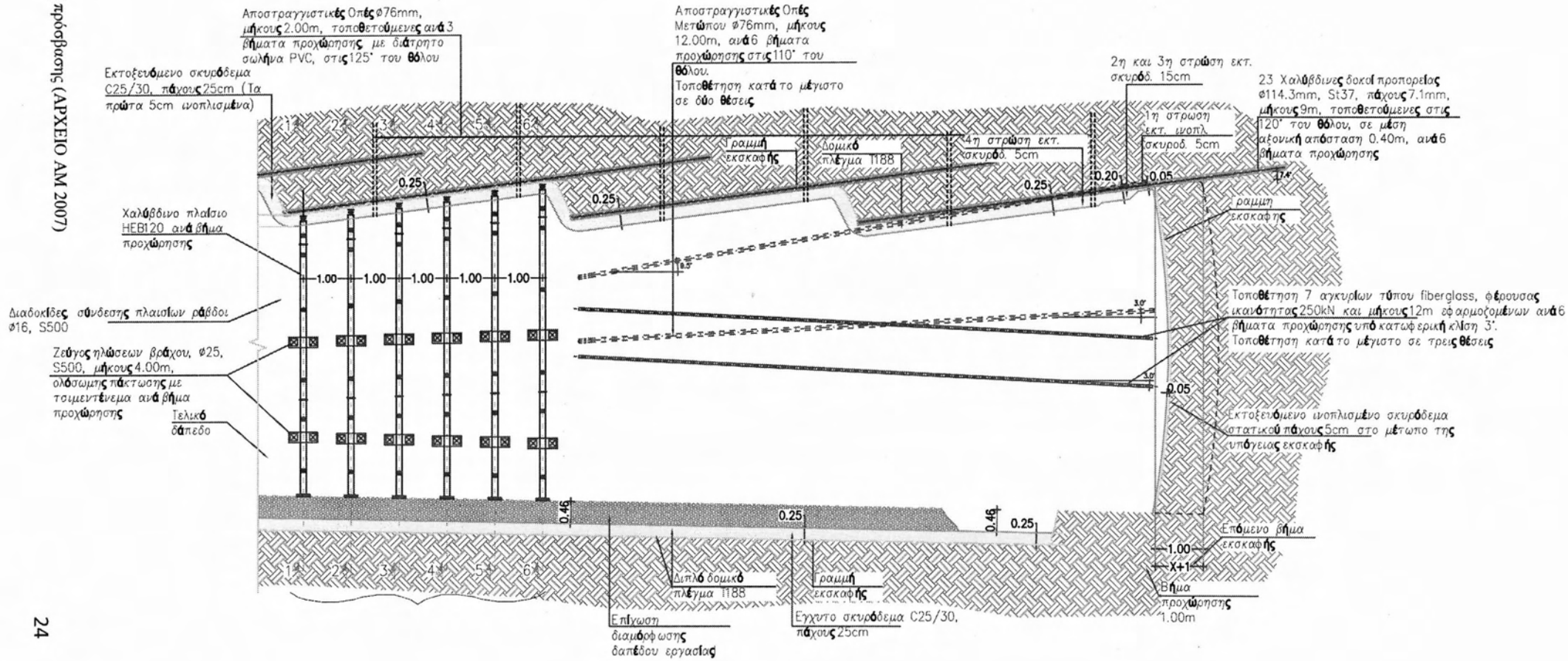
6. Προσωρινά αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass με τσιμεντένεμα, φέρουσας ικανότητας 250kN, μήκους 12,0 m εφαρμοζόμενα ανά 6 βήματα προχώρησης και κατωφερική κλίση 5^ο.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΟΚΩΝ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ
 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΣΩΡΑΧΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΩΡΑΧΙΟΥ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ – ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ
 FOREPOLING INSTALLATION REGION
 GEOMETRY OF THE INNER AND OUTER LINING OF THE TEMPORARY SUPPORT – MINIMUM ENLARGEMENT

Σχήμα 6: Τοπική διατομή και προσωρινά μέτρα αντιστήριξης Σήραγγας Πρόσβασης (ΑΡΧΕΙΟ ΑΜ ΑΕ 2007)



ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ
LONGITUDINAL SECTION OF ACCESS GALLERY



5. Παραδοχές σχεδιασμού

5.1. Γεωτρήσεις

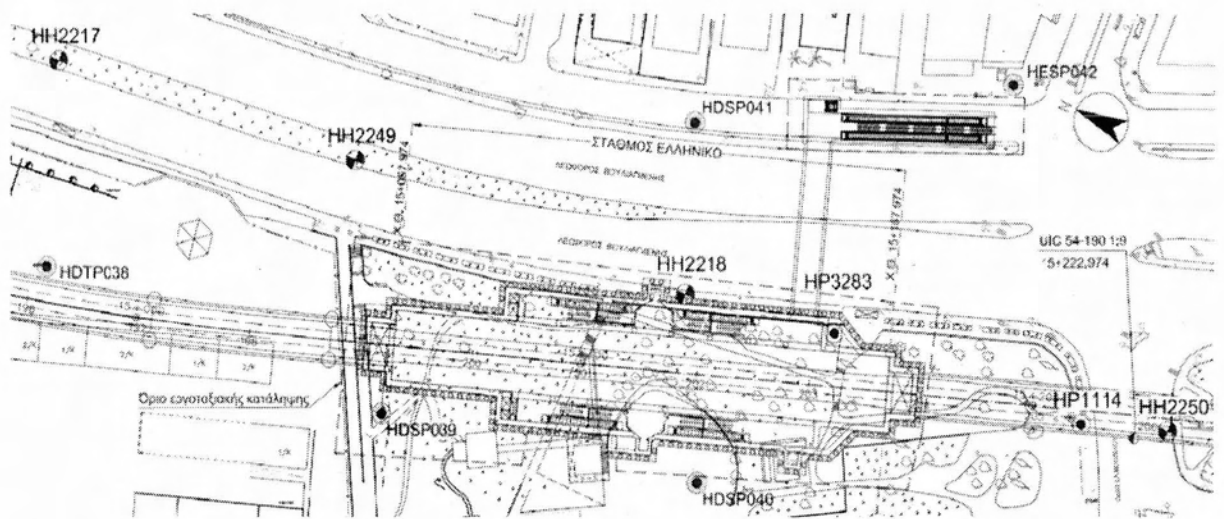
Για τον προσδιορισμό των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών κατά μήκος του έργου εκτελέστηκαν γεωτρήσεις. Από τους πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, λήφθηκαν δείγματα στα οποία διενεργήθηκαν κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές.

Στην άμεση και ευρύτερη περιοχή κατασκευής του Σταθμού Ελληνικό εκτελέστηκαν οι παρακάτω γεωτρήσεις:

1. HH 2217
2. HH 2249
3. HH2218
4. HP 3283
5. HP 1114
6. HH 2250
7. HDTP 038
8. HDSP 039
9. HDSP 040
10. HDSP 041
11. HDSP 042

Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 8.

Με βάση τη θέση τους στο χώρο, παρατηρείται ότι οι υφιστάμενες γεωτρήσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή κατασκευής του σταθμού και εκατέρωθεν αυτού. Από το σύνολο των γεωτρήσεων, γίνεται καταρχήν ο διαχωρισμός τους σε βασικές και συμπληρωματικές. Οι γεωτρήσεις που εμπίπτουν εντός ή επί της γεωμετρικής περιμέτρου του εκάστοτε έργου θεωρούνται ως βασικές και οι γεωτρήσεις που εντοπίζονται σε μία ευρύτερη περίμετρο από το έργο (σε απόσταση περίπου 50m) θεωρούνται ως συμπληρωματικές. Από τις βασικές γεωτρήσεις θα προκύψει η στρωματογραφία του γεωτεχνικού προσομοιώματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις του συστήματος προσωρινής αντιστήριξης. Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών που συμμετέχουν στο εκάστοτε γεωτεχνικό προσομοίωμα, προκύπτουν από την αξιολόγηση τόσο των αποτελεσμάτων των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν σε βασικές και συμπληρωματικές γεωτρήσεις όσο και από την αξιολόγηση ανά σχηματισμό στο σύνολο του έργου

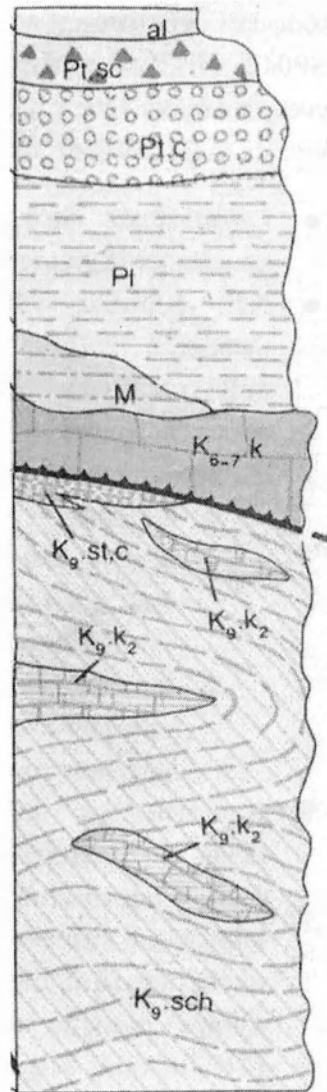
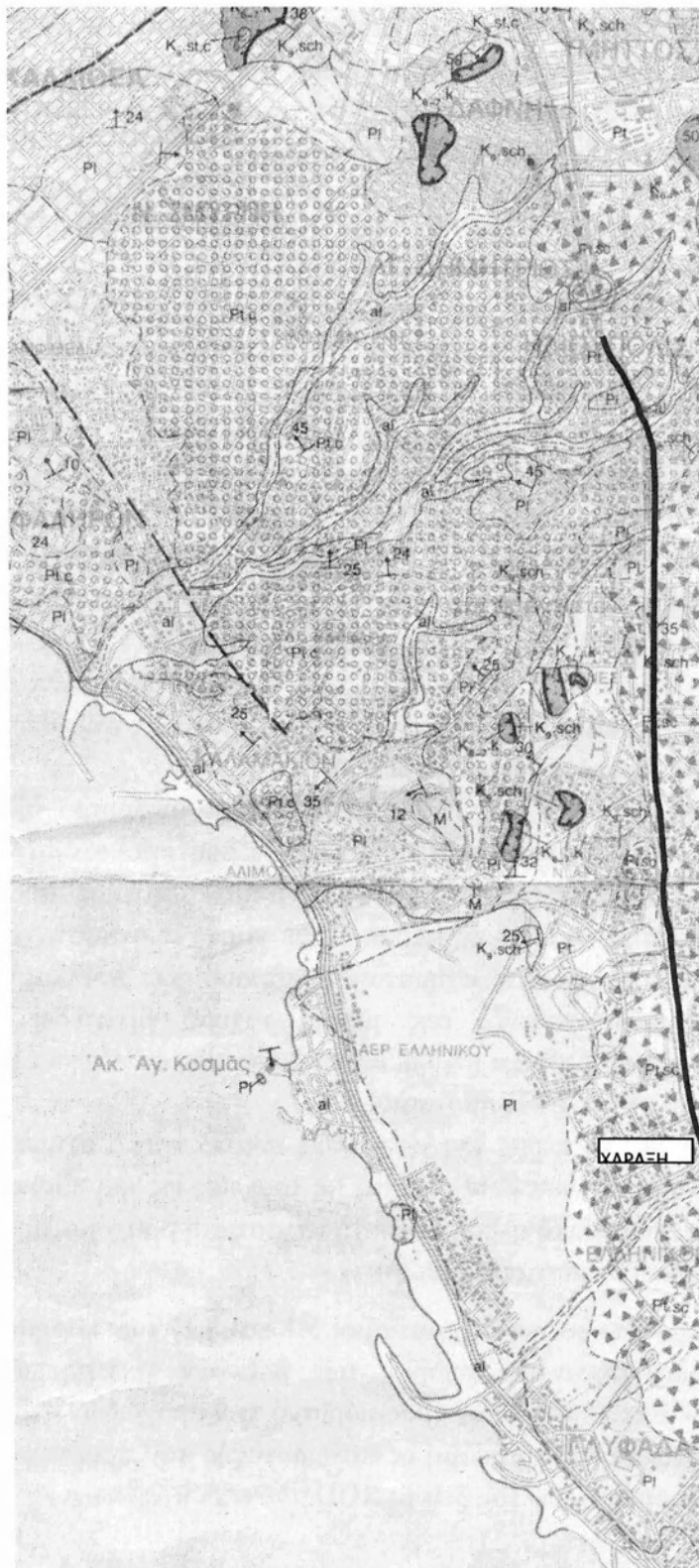


Σχήμα 8: Θέσεις Γεωτρήσεων (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. 2007)

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία και με βάση την κάτοψη της περιοχής, για τη συνδετήρια σήραγγα λαμβάνονται υπόψη ως βασικές οι γεωτρήσεις HDSP041, HESP042, HH2218 και HP3283.

5.2. Γενικές γεωλογικές και σεισμικές συνθήκες

Η γεωλογία στην ευρύτερη περιοχή της χάραξης χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια. Στη στενή περιοχή διέλευσης της χάραξης εντοπίζεται η πολύπλοκη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου της Αθήνας η οποία αντιπροσωπεύεται από λιθολογίες του σχηματισμού των αθηναϊκών σχιστόλιθων. Ειδικότερα στην περιοχή κατασκευής του Σταθμού Ελληνικό παρατηρούνται ποταμοχειμάρειες αποθέσεις και προϊόντα αποσάθρωσης και διάβρωσης. (Σχήμα 8.1).



Σχήμα 8.1 : Απόσπασμα Γεωλογικού χάρτη κλ. 1:50.000, Φύλλο Αθήνα-Πειραιάς (ΓΓΜΕ, 1982), (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. 2007).

- al:** Αλλουβιακές αποθέσεις
- Pt:** Αργίλοι, άμμοι, κροκαλοπαγή
- Pt.sc:** Κώνοι κορημάτων
- Pt.c:** Ποτάμιες αποθέσεις
- PI:** Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και ψαμμίτες
- M:** Αμμοι και ιλύς
- Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι :**
- K₉.sch:** Σχιστόλιθοι
- K₉.k₂:** Ψαμμίτες και κλαστικοί ασβεστόλιθοι
- K₉.st.c:** Ψαμμίτες, σχιστόλιθοι, κροκαλολατυποπαγή
- K₆₋₇k:** Ασβεστόλιθοι κορυφών

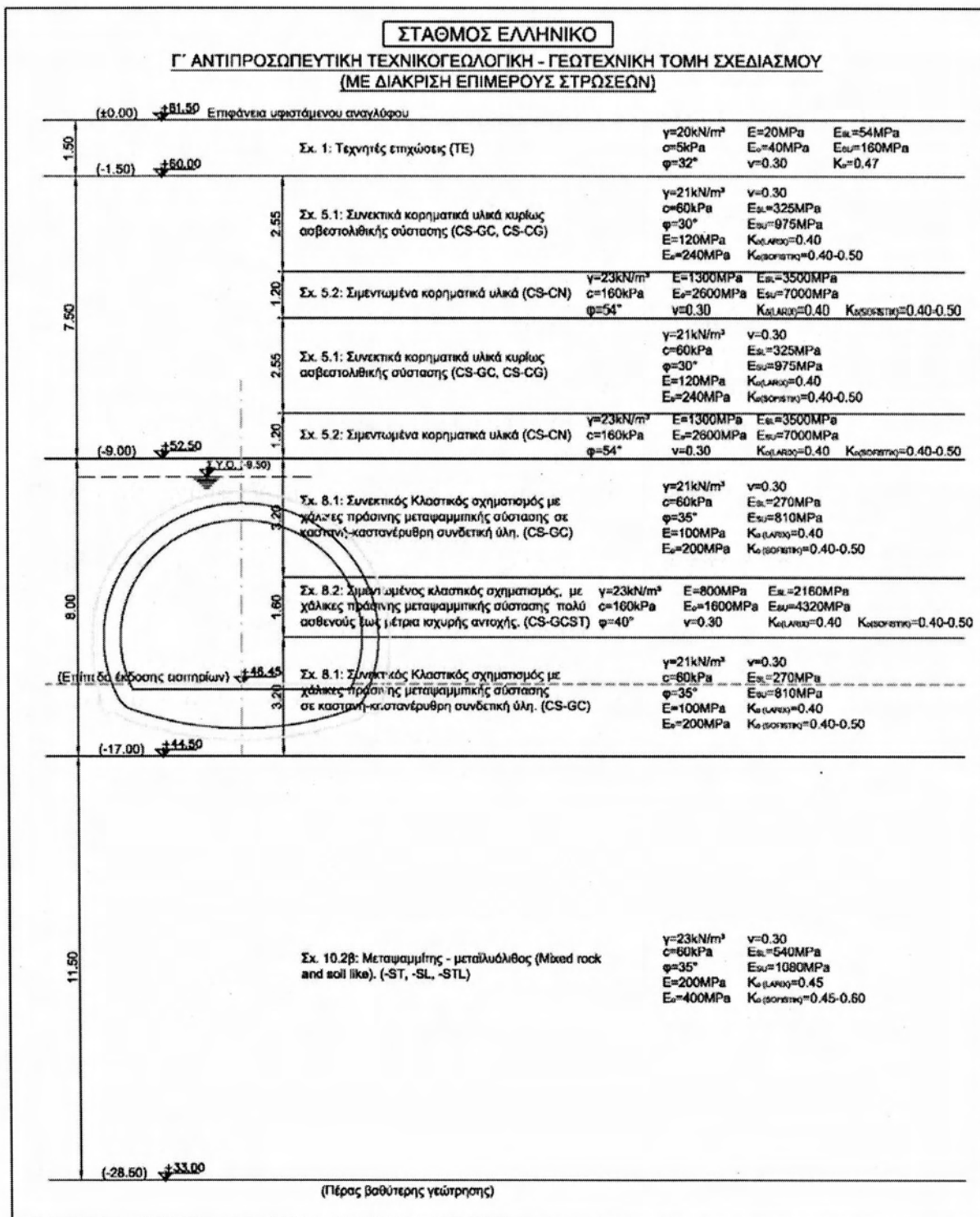
Οι εδαφικοί σχηματισμοί που εντοπίζονται στις θέσεις όρυξης των γεωτρήσεων HDSP041, HESP042, HH2218 και HP3283 ομοιάζουν και παρουσιάζουν ομοιομορφία ως προς τα τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτές συμπεραίνεται ότι στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας :

- Επιφανειακά και μέχρι βάθους 1,50m περίπου εντοπίζονται υλικά τεχνικών επιχώσεων (Σχηματισμός 1).
- Από -1,5m έως -9,0m από την επιφάνεια (από το υψόμετρο +60,00m έως το υψόμετρο +52,50m) του εδάφους, αναπτύσσεται στρώση κορημάτων με ασβεστολιθικούς χάλικες η οποία συνίσταται από εναλλαγές υλικών που χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη μηχανική τους συμπεριφορά ως βραχώδεις ή εδαφικοί σχηματισμοί. Συγκεκριμένα, διακρίνονται τα εξής :
 - Ιλυώδεις – αργιλωδείς αμμώδεις χάλικες, καστανού χρώματος, μαλακά λεπτόκοκκα και ασβεστολιθικής σύστασης αδρόκοκκα συστατικά, ενίοτε και χαλαρές χαλικώδεις ζώνες, οι οποίες εντοπίζονται εντός του κροκαλοπαγούς, ως ζώνες κερματισμού. (Σχηματισμός 5.1).
 - Κροκαλοπαγές, ιλυώδες, αμμώδες, με ανοικτό καστανό έως καστανοκόκκινο συνδετικό υλικό, με χαλίκια έως κροκάλες ασβεστόλιθου, μέτρια ισχυρό έως ισχυρό. (Σχηματισμός 5.2).
- Βαθύτερα, από -9,0m έως -17,0m από την επιφάνεια (από το υψόμετρο +52,50m μέχρι το υψόμετρο +44,50m) εντοπίζεται ο σχηματισμός του κροκαλοπαγούς, ο οποίος αποτελείται από λεπτούς χάλικες πράσινης μεταψαμμιτικής σύστασης κυρίως και ορισμένες λατύπες από λευκό μάρμαρο, με καστανή – καστανέρυθρη συνδετική ύλη. Στην εν λόγω ζώνη ο σχηματισμός παρουσιάζει εναλλαγές από άποψη αντοχής (από πολύ ασθενές έως μέτρια ισχυρό βραχώδες υλικό (Σχηματισμός 8.2), ενώ εντοπίζεται και ισχυρά αποσαθρωμένος σε εδαφικές ζώνες (άργιλο-ιλυώδης άμμος με χάλικες - Σχηματισμός 8.1)
- Από το βάθος των 17m έως το πέρας της γεώτρησης εντοπίζεται ο σχηματισμός του γκριζοπράσινου κερματισμένου μεταψαμμίτη με τραχείες ως και slickensides ασυνέχειες πληρωμένες με αργιλικό υλικό, σε μικτή κατάσταση βραχώμαζας – mixed rock-like & soil-like (Σχηματισμός 10.2β).

Για τον καθορισμό των εδαφικών στρώσεων (Σχηματισμοί 5.1 και 8.1) των κορηματικών και κλαστικών υλικών, αξιολογήθηκαν οι πυρήνες των βασικών γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου. Επιπλέον για τον προσδιορισμό των βραχωδών στρώσεων (Σχηματισμοί 5.2 και 8.2) λήφθηκαν υπόψη ακόμη οι τιμές αντοχής που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές και ο ορισμός τιμών του δείκτη RQD.

5.3. Γεωτεχνική τομή σχεδιασμού

Με βάση τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας πρόσβασης, εγκρίθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. η παρακάτω τεχνικογεωλογική - γεωτεχνική τομή σχεδιασμού όπως προτάθηκε από τον μελετητή (Ο.Κ. Ε.Π.Ε) στην ΕΚΘΕΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ :



Σχήμα 9: Αντιπροσωπευτική Γεωτεχνική Τομή (Εκθεση γεωτεχνικής αξιολόγησης και τεχνική έκθεση ΛΟΜ1,2007)

5.4. Γεωτεχνικές ενότητες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διακριτά για κάθε γεωτεκτονική ενότητα οι προσδιοριζόμενες τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων αντοχής και

παραμορφωσιμότητας, όπως επίσης και οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου.

5.4.1. Τεχνητές Επιχώσεις (Σχηματισμός: 1)

Για την συγκεκριμένη ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι εξής:

- Ειδικό βάρος $\gamma=20\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c = 5\text{kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi=32^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας $E=1200(N+6)=20\text{MPa}$, θεωρείται $N=10$, χαλαρό μη συνεκτικό υλικό
- Λόγος Poisson: $\nu = 0,30$
- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_o = 2 \times E = 40\text{MPa}$
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και
$$= \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_o = 1,35 \times 40 = 54\text{MPa}$$
- Συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = 3 \times E_o = 160\text{MPa}$
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $ESU = 3 \times ESL = 160\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
80% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.
- Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων : $K_o = 0,47$
Βάσει της σχέσης Jaky είναι :
 $K_o = 1 - \sin\varphi = 0,47$.

Για την εκτέλεση των ελαστοπλαστικών αριθμητικών αναλύσεων στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής καθορίζονται τα εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E=(20+40)/2 = 30 \text{ MPa}$, (μέσος όρος των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για μετακινήσεις 1% και 0,1%)

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν όπως αναφέρονται προηγουμένως.

5.4.2. Εναλλαγές συνεκτικών και σιμεντωμένων υλικών (Σχηματισμοί 5.1 & 5.2)

5.4.2.1. Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (Σχηματισμός 5.1)

Για την εν λόγω γεωτεχνική ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι ακόλουθες:

- Ειδικό βάρος: $\gamma=21\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c=60 \text{ kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi= 30^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 120\text{MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,30$

- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_0 = 2 \times E = 240\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_0 = 1.35 \times 240 = 325\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $E_{SU} = 3 \times E_{SL} = 975\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
 80% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.

Για την εκτέλεση των ελαστοπλαστικών αριθμητικών αναλύσεων στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής καθορίζονται τα εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E=120\text{MPa}$.

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν όπως αναφέρονται προηγουμένως.

5.4.2.2. Σχηματισμός σιμεντωμένων κορηματικών υλικών (Σχηματισμός 5.2)

Για την συγκεκριμένη ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι εξής:

- Ειδικό βάρος: $\gamma=23\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c=160\text{ kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi= 54^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 1300\text{MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,30$
- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_0 = 2 \times E = 2600\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_0 = 1.35 \times 2600 = 3500\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $E_{SU} = 3 \times E_{SL} = 7000\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
 85% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.

Για την εκτέλεση των ελαστοπλαστικών αριθμητικών αναλύσεων στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής καθορίζονται τα εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E=1300\text{MPa}$.

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν όπως αναφέρονται προηγουμένως.

5.4.3. Εναλλαγές συνεκτικού και σιμεντωμένου κλαστικού σχηματισμού (Σχηματισμοί 8.1 & 8.2)

5.4.3.1. Συνεκτικός Κλαστικός Σχηματισμός (Σχηματισμός 8.1)

Για την εν λόγω γεωτεχνική ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι ακόλουθες:

- Ειδικό βάρος: $\gamma=21\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c=60\text{ kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi= 35^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 100\text{MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,30$
- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_o = 2 \times E = 200\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_o = 1.35 \times 200 = 270\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $E_{SU} = 3 \times E_{SL} = 810\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
80% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.

Για την εκτέλεση των ελαστοπλαστικών αριθμητικών αναλύσεων στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής καθορίζονται τα εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E=100\text{MPa}$.

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν όπως αναφέρονται προηγουμένως.

5.4.3.2. Σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός (Σχηματισμός 8.2)

Για την συγκεκριμένη ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι εξής:

- Ειδικό βάρος: $\gamma=23\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c=160\text{ kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi= 40^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 800\text{MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,30$
- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_o = 2 \times E = 1600\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_o = 1.35 \times 1600 = 2160\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $E_{SU} = 3 \times E_{SL} = 4320\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
85% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.

Για την εκτέλεση των ελαστοπλαστικών αριθμητικών αναλύσεων στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής καθορίζονται τα εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας $E=800\text{MPa}$.

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν όπως αναφέρονται προηγουμένως.

5.4.4. Σχηματισμός μεταψαμμίτη – μεταίλυόλιθου (Σχηματισμός: 10.2β)

Για την εν λόγω γεωτεχνική ενότητα οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι ακόλουθες:

- Ειδικό βάρος: $\gamma=23\text{kN/m}^3$
- Συνοχή: $c=60\text{ kPa}$
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi=35^\circ$
- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 200\text{MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,30$
- Μέτρο ελαστικότητας για μικρές μετακινήσεις (0,1%) :
 $E_0 = 2 \times E = 400\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες φόρτισης : $E_{SL} = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_0 = 1.35 \times 400 = 540\text{MPa}$.
- Μονοδιάστατο μέτρο συμπίεστικότητας, για μικρές μετακινήσεις (0,1%) και συνθήκες αποφόρτισης : $E_{SU} = 3 \times E_{SL} = 1080\text{MPa}$.
- Μακροχρόνια τιμή μέτρου ελαστικότητας – συμπίεστικότητας :
80% της αντίστοιχης βραχυχρόνιας τιμής, όπως καθορίζεται ανωτέρω.

5.5. Υδρογεωλογικές συνθήκες

5.5.1. Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

Για τον προσδιορισμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή κατασκευής του εν λόγω έργου αξιολογήθηκαν τα σχετικά στοιχεία των υφιστάμενων γεωτρήσεων και ειδικότερα οι μετρήσεις επί των εγκατεστημένων πιεζόμετρων. Σύμφωνα με αυτές προκύπτουν τα παρακάτω:

- Μέση στάθμη εδάφους : +61,5m
- Μέγιστη αναμενόμενη στάθμη σχεδιασμού υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (Υ.Υ.Ο.) : σε βάθος 9,5m (+52.0m)
- Ελάχιστη αναμενόμενη στάθμη σχεδιασμού Υ.Υ.Ο.: σε βάθος 13,5m (+48,0m).

Με δεδομένο ότι κατά τη διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας πρόσβασης θα εκτελείται συστηματική αποστράγγιση του ύδατος μέσω αποστραγγιστικών οπών, δεν έχει ληφθεί υπόψη φόρτιση λόγω υδροστατικής πίεσης στο σύστημα υποστήριξης και συνεπώς η ανωτέρω στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των στατικών

αναλύσεων της παρούσας μελέτης. Από μελέτη της περιοχής πριν την υλοποίηση του έργου, προέκυψε ότι η αρχική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα διαμορφώνεται υψηλότερα από τη στάθμη του δαπέδου εκσκαφής του εν λόγω υπογείου έργου. Όμως εκατέρωθεν της σήραγγας βρίσκονται τα ορύγματα του κυρίως τμήματος και της ανατολικής εισόδου του σταθμού Ελληνικό, τα οποία κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του ανοιχτού ορύγματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατασκευή των εν λόγω ανοικτών ορυγμάτων προηγήθηκε της εκσκαφής της σήραγγας, προκύπτει ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα υποχώρησε χαμηλότερα από το δάπεδο εκσκαφής λόγω των αντλήσεων που διενεργήθηκαν στα ανωτέρω ανοικτά ορύγματα. Επομένως, κατά τη φάση κατασκευής της σήραγγας πρόσβασης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα διαμορφώθηκε στο χαμηλότερο επίπεδο της υπόγειας εκσκαφής οπότε δεν παρουσιάστηκε αξιοσημείωτη εισροή νερών.

5.6. Υπολογισμός συντελεστή αρχικής αποτόνωσης

Για την προσομοίωση των εργασιών εκσκαφής και εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας εκτελέστηκαν κατάλληλες ελαστοπλαστικές αριθμητικές αναλύσεις προσομοίωσης. Κατά την εκτέλεση των εν λόγω αναλύσεων υπεισέρχεται ο συντελεστής αρχικής αποτόνωσης με τον οποίο ελέγχεται στις αριθμητικές αναλύσεις η σταδιακή χαλάρωση της βραχώμαζας κατά την προχώρηση της εκσκαφής. Η ακριβής τιμή της αρχικής αποτόνωσης, όπως επίσης και των αποτονώσεων των ενδιάμεσων σταδίων θα καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη την ακολουθία εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης.

Ο συντελεστής αρχικής αποτόνωσης (λ) χαρακτηρίζει το ποσοστό απομείωσης των αρχικών γεωστατικών τάσεων (σ_0) στην περίμετρο της υπόγειας εκσκαφής σύμφωνα με τη σχέση: $\sigma = (1 - \lambda)\sigma_0$. Εναλλακτικά, κατά την προσομοίωση προσεγγίζεται η απομείωση των αρχικών γεωστατικών τάσεων με την κατάλληλη απομείωση των μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας στην περιοχή της υπόγειας εκσκαφής, από την αρχική τιμή E_0 σε μία απομειωμένη τιμή E_r .

Κατά τη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης των σταδίων κατασκευής της υπόγειας εκσκαφής θα πρέπει να υλοποιούνται τα εξής:

- Εφαρμογή αρχικού γεωστατικού πεδίου (σ_0) σύμφωνα με την αρχική τιμή του K_0 .
- Αποτόνωση στην περιοχή εκσκαφής σύμφωνα με τον αρχικό συντελεστή λ ή το συντελεστή E_r/E_0 .
- Εφαρμογή των προβλεπόμενων μέτρων υποστήριξης για το εν λόγω στάδιο κατασκευής.
- Επανάληψη των σταδίων 2 έως 3 μέχρι την πλήρη εκσκαφή και εφαρμογή του συνόλου των μέτρων υποστήριξης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω και τη θέση όρυξης του υπογείου τμήματος θεωρούνται οι ακόλουθες ενδεικτικές τιμές των συντελεστών αρχικής αποτόνωσης, σταθμίζοντας τη μέση ανάπτυξη των σχηματισμών 5.1 - 5.2, 8.1 - 8.2 και 10.2β στη ζώνη υπόγειας διάνοιξης:

- Εφαρμογή δοκών προπορείας βαρέως τύπου (forepoling) είναι : $E_r/E_0 = 0,60$.

- Εφαρμογή ελαφρών δοκών προπορείας (spiles) είναι: $E_r/E_o = 0,55$.
- Άμεση εφαρμογή μέτρων υποστήριξης κοντά στο μέτωπο εκσκαφής είναι: $E_r/E_o = 0,35$.
- Εφαρμογή μέτρων υποστήριξης στην άνω ημιδιατομή είναι: $E_r/E_o = 0,20$.

5.7. Παραδοχές φορτίσεων

Για τον έλεγχο του συστήματος προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας πρόσβασης του σταθμού Ελληνικό διενεργήθηκαν αναλύσεις με τα προγράμματα FLAC 7.0 και PHASE2 λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραδοχές και φορτίσεις:

1. Επιφανειακά Φορτία: Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένο επιφανειακό φορτίο 50kN/m^2 που θεωρείται ότι αποτελεί το μέγιστο από τις φορτίσεις των υφιστάμενων και μελλοντικών κατασκευών και από τη χρήση του περιβάλλοντος χώρου ως χώρου απόθεσης υλικών εκσκαφής.

2. Υδροστατικές Πιέσεις: Υδροστατική πίεση δεν λήφθηκε υπόψη, διότι διενεργήθηκε συστηματικά και ελεγχόμενα αποστράγγιση της περιβάλλουσας την εκσκαφή εδαφικής μάζας.

6. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης & στάδια κατασκευής

6.1. Γενικά

Η εγκεκριμένη μελέτη, για την πλήρη και τεκμηριωμένη διαστασιολόγηση του συστήματος προσωρινής υποστήριξης της υπόγειας εκσκαφής της σήραγγας πρόσβασης και για τον έλεγχο των καθιζήσεων, περιλάμβανε ελαστοπλαστικές αναλύσεις με εφαρμογή του προγράμματος SOFISTIK. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα διαστασιολογημένα μέτρα προσωρινής υποστήριξης έτσι ώστε με την χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και Phase² να μελετηθεί η καταπόνησή τους, καθώς και οι μετατοπίσεις του εδάφους, μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους.

6.2. Προσωρινά μέτρα υποστήριξης

Τα προσωρινά μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή είναι τα παρακάτω:

- Δοκοί Προπορείας.
- Εκτοξευόμενο Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα.
- Ηλώσεις Βράχου (Αγκύρια).
- Μεταλλικά Πλαίσια HEB120, F_o360.

Ο τρόπος προσομοίωσης των προσωρινών μέτρων υποστήριξης στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω:

6.2.1. Δοκοί προπορείας

Η λειτουργία των δοκών προπορείας βασίζεται στην ενίσχυση και συγκράτηση του εδάφους έναντι καταπτώσεων και δημιουργία τόξου μεταξύ των δοκών λόγω της αυξημένης ακαμψίας. Με βάση τα παραπάνω, για την προσομοίωση των δοκών προπορείας θεωρήθηκε ζώνη πάχους 1,00m (όσο περίπου το πάχος βραχώμαζας που ενισχύεται λόγω της τοποθέτησης των δοκών υπό ανηφορική κλίση), με ενισχυμένη ακαμψία που προσδιορίστηκε βάσει της αναλογίας συμμετοχής των χαλύβδινων δοκών, του τσιμεντένεματος και της βραχώμαζας. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων προσομοίωσης της ενισχυμένης ζώνης του γεωλογικού σχηματισμού με τις δοκούς προπορείας εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από τον Hoek 1999.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται διακριτά οι ισοδύναμες παράμετροι σχεδιασμού που ελήφθησαν υπόψη στην εγκεκριμένη μελέτη για τους δύο τύπους δοκών προπορείας.

ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΖΩΝΗΣ	Εμβαδόν (m ²)	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					E (GPa)
		σ _c (MPa)	σ _t (MPa)	σ' _c (MPa)	σ' _t (MPa)		
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ	0,97434793	0,058				0,1	
ΡΑΒΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	0,005978	240				2,10E+02	
ΕΝΕΜΑ	0,019674	30				20	
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ	1,00	2,08	0,00	0,00	0,00	1,75	

M-C Friction angle - φ (deg):	35	0,610865 rad	M-C k =	3,690168	(1+sinφ)/(1-sinφ)
M-C Cohesion - c (MPa):	0,015		M-C sig-cm =	0,057629 MPa	2*c*sqrt(k)
M-C Equivalent friction angle - φ (deg):	35	0,610865 rad	M-C k =	3,690168	(1+sinφ)/(1-sinφ)
M-C Equivalent cohesion - c (MPa):	0,54		M-C sig-cm =	2,081416 MPa	2*c*sqrt(k)

Πίνακας 1: Τομή ανάλυσης Α - Υπολογισμός ισοδύναμου υλικού δοκών προπορείας Φ114,3mm.(Τεχνική έκθεση ΛΟΜ1, 2007)

ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΖΩΝΗΣ	Εμβαδόν (m ²)	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					E (GPa)
		σ _c (MPa)	σ _t (MPa)	σ' _c (MPa)	σ' _t (MPa)		
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ	0,99124505	0,057629				0,1	
ΡΑΒΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	0,003097	240				2,10E+02	
ΕΝΕΜΑ	0,005658	30				20	
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ	1,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,86	

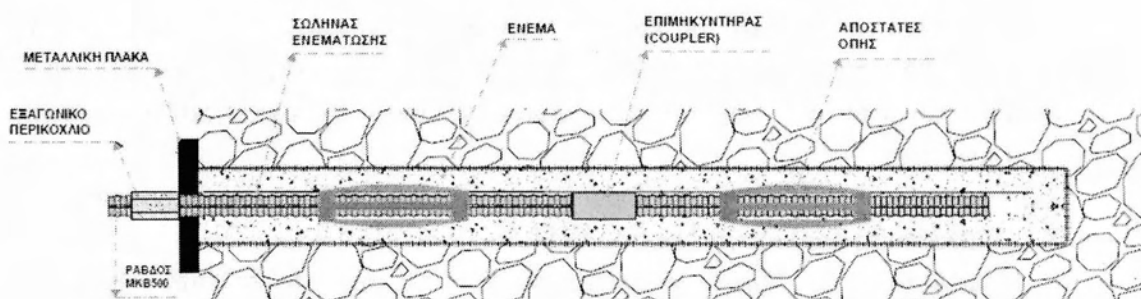
M-C Friction angle - φ (deg):	35	0,610865 rad	M-C k =	3,690168	(1+sinφ)/(1-sinφ)
M-C Cohesion - c (MPa):	0,015		M-C sig-cm =	0,057629 MPa	2*c*sqrt(k)
M-C Equivalent friction angle - φ (deg):	35	0,610865 rad	M-C k =	3,690168	(1+sinφ)/(1-sinφ)
M-C Equivalent cohesion - c (MPa):	0,25		M-C sig-cm =	0,970082 MPa	2*c*sqrt(k)

Πίνακας 2 Τομή ανάλυσης Β - Υπολογισμός ισοδύναμου υλικού δοκών προπορείας. (Τεχνική έκθεση ΛΟΜ1, 2007)

Από τους παραπάνω πίνακες λαμβάνονται οι τιμές συνοχής C=0,25MPa και γωνίας τριβής φ=35° για την ενισχυμένη ζώνη.

6.2.2. Ηλώσεις βράχου

Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι ολόσωμης πάκτωσης και παρουσιάζονται στο σχήμα 10. Με τον όρο αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης αναφερόμαστε σε χαλύβδινες ράβδους με νευρώσεις οι οποίες εισέρχονται εντός οπής σε εδάφη και βράχους. Ενεματώνονται πλήρως ή μερικώς και στο ελεύθερο άκρο στερεώνονται με ειδικό περικόχλιο και τη μεσολάβηση πλάκας διανομής. Δεν εφαρμόζεται φορτίο προέντασης ή μετέντασης, αλλά παραλαμβάνουν τα φορτία που δημιουργεί η εδαφική παραμόρφωση μέσω τριβής. Η λειτουργία τους οφείλεται σε αυτήν ακριβώς τη δυνατότητα των ράβδων να αναλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία στο ελεύθερο άκρο και στην ενίσχυση / συρραφή του εδάφους ή βράχου με την εισαγωγή τάσεων εκ δυνάμεως τριβής. (ekkaif, 2016)



Σχήμα 10: Αγκύριο ολόσωμης πάκτωσης (ekkaif,2016)

Τα αγκύρια προσομοιώθηκαν με ραβδωτά στοιχεία μήκους 4m και κυκλικής διατομής διαμέτρου 0,125m . Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις είναι χάλυβας S500 .

6.2.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης προσομοιώθηκε με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (liner). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προέκυψαν σε αντιστοιχία με τη γεωμετρία της διατομής. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, λήφθηκε υπόψη η ακολουθία της κατασκευής ώστε σταδιακά το κέλυφος να λαμβάνει τις τελικές του αντοχές.

Οι παράμετροι προσομοίωσης που ελήφθησαν υπόψη για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι:

- Μέτρο Ελαστικότητας, E: 15GPa.
- Διατομή Κελύφους: 25cm²/m για την περίμετρο της διατομής και του ανάστροφου τόξου.

6.2.4. Μεταλλικά πλαίσια

Προς την κατεύθυνση της ασφάλειας δεν ελήφθησαν υπόψη στις αναλύσεις τα πλαίσια HEB120.

6.3. Διαδικασία κατασκευής

Οι φάσεις κατασκευής για τις διατομές της σήραγγας πρόσβασης συνοψίζονται στη συνέχεια. Σύμφωνα, με τις εν λόγω φάσεις κατασκευής διαμορφώθηκε κατάλληλο πολυσταδιακό ελαστοπλαστικό αριθμητικό προσομοίωμα (Τεχνική έκθεση ΛΟΜ1 , 2007)

1. Τοποθέτηση δοκών προπορείας. Επανάληψη εργασίας κάθε 6 βήματα προχώρησης (1 βήμα προχώρησης = 1m)
2. Τοποθέτηση τριών αποστραγγιστικών οπών μετώπου εάν απαιτείται από τις επιτόπου συνθήκες, μήκους 12m. Επανάληψη εργασίας στις επόμενες 2 ομπρέλες.
3. Πλήρης εκσκαφή της διατομής πλην της περιοχής του ανάστροφου τόξου. Βήμα προχώρησης 1m.
4. Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων ('ξεσκάρωμα').
5. Εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στο μέτωπο και 5cm στο θόλο και τις παρειές. Τοποθέτηση αγκυριών fiberglass μήκους 12m ανά 6 βήματα προχώρησης εάν προβλέπεται στο αντίστοιχο βήμα.
6. Εγκατάσταση του δομικού μεταλλικού πλαισίου HEB120 και των διαδοκίδων σύνδεσης.
7. Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15cm σε δύο υποστρώσεις.
8. Τοποθέτηση δομικού πλέγματος T188.
9. Τοποθέτηση των ηλώσεων βράχου Φ25, S500, όχι στο τελευταίο εγκατασταθέν μεταλλικό πλαίσιο αλλά στο προηγούμενο, όπου το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει σκληρυνθεί.
10. Τοποθέτηση αποστραγγιστικών οπών μήκους 4m στην παρειά της εκσκαφής και 2m στο θόλο ανά 3 βήματα προχώρησης καθώς και ανακουφιστικών οπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναλόγως των επιτόπου συνθηκών.
11. Εφαρμογή τελικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.
12. Το ανάστροφο τόξο εκσκάπτεται κάθε δύο έως τέσσερα βήματα εκσκαφής αναλόγως των επιτόπου συνθηκών. Τοποθέτηση του σωλήνα DN 100 (επίπεδο-1,65) στο αντίστοιχο μήκος. Εγκιβωτισμός του σωλήνα σε υλικό φίλτρου.
Έλεγχος της γεωμετρίας του ανάστροφου τόξου.
Τοποθέτηση του 1ου δομικού πλέγματος T188 με χρήση αποστατών (ύψος 5cm).
Εφαρμογή 1ης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 20cm.
Τοποθέτηση 2ου δομικού πλέγματος T188 και εφαρμογή τελικής στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.
13. Διαμόρφωση προσωρινού δαπέδου εργασίας με πλήρωση του ανεστραμμένου τόξου στην περιοχή που αντιστοιχεί στα βήματα προχώρησης

7. Αριθμητικές μέθοδοι στην γεωτεχνική μηχανική

Οι εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για τον υπολογισμό της ευστάθειας ενός γεωτεχνικού προβλήματος τείνουν να παραμερισθούν τις τελευταίες δεκαετίες, χάρις την ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων η οποίες σε συνδυασμό με την τεράστια εξέλιξη των Η/Υ προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα επιλύσεων. Αυτό δίνει την δυνατότητα στον μελετητή, επιλέγοντας τα κατάλληλα μοντέλα συμπεριφοράς του υλικού και την κατάλληλη υπολογιστική μέθοδο, να μελετήσει με δοκιμές πως οι διάφοροι παράμετροι επιδρούν στο πρόβλημα και να εξάγει ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα. Επίσης μέσω της επιλογής κατάλληλων καταστατικών νόμων δίνεται η δυνατότητα στον μελετητή να προσομοιώσει μια σειρά παραμέτρων όπως πχ μέτρα αντιστήριξης, υπόγεια νερά κλπ οι οποίες θα είχαν επιπλέον υπολογιστικό κόστος. Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην γεωτεχνική μηχανική χωρίζονται σε δυο κατηγορίες (Hoek, 1999):

- Μέθοδος διακριτών συνόρων, όπου μόνο το σύνορο του εδάφους διακριτοποιείται και η υπόλοιπη βραχώμαζα θεωρείται ως συνεχές μέσο ή υπολογίζεται ένα ισοδύναμο μέσο το οποίο έχει μηχανικές παραμέτρους που αντιστοιχούν στην συμπεριφορά του πραγματικού υλικού.
- Μέθοδος διακριτών περιοχών, κατά την οποία η βραχώμαζα διακριτοποιείται σε στοιχεία ίδιας γεωμετρίας (στοιχεία αναφοράς) τα οποία έχουν κατάλληλες ιδιότητες. Η αλληλεπίδραση αυτών των στοιχείων δίνει την απόκριση της συνολικής βραχώμαζας επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό πιο σύνθετων προβλημάτων. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element methods) και πεπερασμένων διαφορών (finite difference methods) οι οποίες θεωρούν την βραχώμαζα ως συνεχές μέσο. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και η μέθοδος διακριτών στοιχείων (distinct element method) η οποία μοντελοποιεί κάθε ασυνεχή βραχώμαζα ως στοιχείο.

Μέθοδος διακριτών στοιχείων

Σε βραχώμαζες οι οποίες χαρακτηρίζονται από ασυνέχειες, οι παραμορφώσεις στα σημεία των ασυνεχειών μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις παραμορφώσεις στις περιοχές όπου ο βράχος είναι συμπαγής. Επομένως τα τμήματα που δεν έχουν ασυνέχειες μπορούν να θεωρηθούν ως μεμονωμένα σώματα τα οποία έχουν την δυνατότητα να μετατοπιστούν, να περιστραφούν, να έρχονται σε επαφή και να αποκολλούνται. Για την επίλυση χρησιμοποιείται ο δεύτερος νομός του Νεύτωνα και μια σχέση δύναμης-μετατόπισης έτσι ώστε να προσδιοριστεί η μετατόπιση του τμήματος και η δύναμη που ασκεί στα σημεία επαφής με γειτονικά σώματα αντίστοιχα. Αφού επιλεγθεί η γεωμετρία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων σωμάτων επιλέγονται οι δεσμοί μεταξύ τους. Σαν δεσμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελατήρια στις κατάλληλες διευθύνσεις (πχ παράλληλα, κάθετα, στροφικά). Αξίζει να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά βραχομαζών με ασυνέχειες είναι συνήθως μη γραμμική και επομένως η συμβολή κατάλληλων μοντέλων κρίνεται χρήσιμη.

8. Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας πρόσβασης με χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και PHASE²

8.1. Γενικά για το FLAC7.0

Το FLAC 7.0 είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών ιδανικό για αριθμητική προσομοίωση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής. Έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει την πλαστική συμπεριφορά εδαφικών υλικών, πετρωμάτων ή άλλων υλικών. Τα υλικά προσομοιώνονται ως στοιχεία ή ζώνες που μορφώνουν ένα κάναβο ο οποίος μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα τις ανάγκες του προβλήματος.

Το FLAC 7.0 είναι κατάλληλο για (Itasca, 2016)

- την επίλυση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης,
- ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικών,
- εκσκαφή σε φάσεις,
- προσομοίωση των μέτρων υποστήριξης και υπολογισμό της καταπόνησης τους,
- μεταβαλλόμενες τάσεις πεδίου,
- στατική ανάλυση,
- δυναμική ανάλυση (προσομοίωση σεισμού),
- παραμετρική ανάλυση λόγω πρόσβασης στον κώδικα του προγράμματος.

Το FLAC 7.0 δεν διαθέτει κώδικα διακριτών στοιχείων και επομένως δεν έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει τις ασυνέχειες των πετρωμάτων.

8.2. Γενικά για το PHASE2

Το πρόγραμμα H/Y PHASE² είναι ένας δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σύνθετων πολυσταδιακών γεωτεχνικών προβλημάτων. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα PHASE² περιλαμβάνουν (Rocscience, 2016):

- Εκσκαφή σε στάδια,
- Ευστάθεια πρανών,
- Υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα,
- Επίπεδη παραμόρφωση,
- Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικών,
- Διαφορετικά είδη αγκυρίων: σημειακής αγκύρωσης, πλήρους πάκτωσης, αγκύρια συρματοσχοίνου, και swellex ή split-set,
- Μεταβαλλόμενες τάσεις πεδίου,
- Στατική ανάλυση,
- Δυναμική ανάλυση (προσομοίωση σεισμού),

- Ασυνέχειες και ρήγματα πετρωμάτων.

Το PHASE² δίνει την επιλογή στο χρήστη να χρησιμοποιήσει τρικομβικά, τετρακομβικά, εξακομβικά ή οκτακομβικά στοιχεία στις αναλύσεις.

8.3. Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης

- Κάνναβος: Στο πρόγραμμα FLAC 7.0 κατασκευάστηκε τετραγωνικός κάνναβος μεγέθους 60x60 στοιχείων με ισοδιάσταση 0,5X0,5m (30mx 30m) .Η πύκνωση του καννάβου είναι ομοιόμορφη και το πλήθος των στοιχείων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι τετρακομβικά. Μεγαλύτερη πύκνωση δεν προσφέρει κάποια ουσιαστική βελτίωση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα στο Phase² για τη δημιουργία καννάβου χρησιμοποιήθηκε σχεδιαστικό μοντέλο μορφής CAD που διαθέτει το πρόγραμμα. Είναι τετραγωνικός με διαστάσεις 30m x 30m και η διακριτοποίηση του έγινε αυτόματα από ενσωματωμένο υποπρόγραμμα. Στην ανάλυση επιλέχθηκαν τετρακομβικά στοιχεία για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σύγκριση με το FLAC 7.0 .
- Συνοριακές συνθήκες: Χρησιμοποιούνται κυλήσεις κατακόρυφα στα όριά του καννάβου ώστε να επιτρέπουν την κατακόρυφη μετακίνηση του προσομοιωμένου εδάφους. Οριζόντια, στο κάτω άκρο του καννάβου , χρησιμοποιείται άρθρωση η οποία απαγορεύει τις κατά x και y μετακινήσεις.
- Στρωματογραφία: Η στρωματογραφία που προσομοιώθηκε στο FLAC 7.0 και στο Phase² βρίσκεται σε πλήρη συνάφεια με την γεωτεκτονική τομή της περιοχής. Για τις γεωτεχνικές ενότητες χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mohr-Coulomb το οποίο προσομοιώνει καταλλήλως την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών. Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις γεωτεχνικές ενότητες είναι:
 - ο Πυκνότητα (Mass-Density) [kg/m³]
 - ο Μέτρο Ελαστικότητας (E) [Pa]
 - ο Δείκτης Poisson
 - ο Συνοχή (c) [Pa]
 - ο Γωνία τριβής (Φ) [°]
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σήραγγας: Η διατομή της κατασκευής είναι αψιδωτή ,με ανάστροφο τόξο, πλάτους 8,0m και ύψους 6,65m . Το ανώτερο σημείο της εκσκαφής βρίσκεται σε απόσταση 10,32 m από την επιφάνεια του εδάφους ενώ το κατώτερο σημείο του ανάστροφου τόξου σε βάθος 11,0m.
- Δοκοί προπορείας: Για την προσομοίωση των δοκών προπορείας θεωρήθηκε ζώνη πάχους 1,00m εξωτερικά της περιμέτρου του άνω

τιμήματος της διατομής με βελτιωμένες εδαφικές ιδιότητες σύμφωνες με τις αναλύσεις που προηγήθηκαν.

- Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα: Προσομοιώθηκε με 2 γραμμικά στοιχεία: περιμετρικά της αψιδωτής διατομής και περιμετρικά του ανάστροφου τόξου. Η εφαρμογή του έγινε σε περισσότερα από ένα στάδια που παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3
- Αγκύρια (Rockbolts): Τα αγκύρια προσομοιώθηκαν με γραμμικά στοιχεία και για τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά όπως και για τις μηχανικές τους ιδιότητες χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις αναλύσεις που προηγήθηκαν. Το οριακό φορτίο θραύσης για τα αγκύρια είναι ίσο με 200kN.
- Εκσκαφή διατομής: Η εκσκαφή της διατομής υλοποιήθηκε σε περισσότερα από 1 στάδια τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 3
- Αποτόνωση εδάφους: Με τη χρήση του συντελεστή αρχικής αποτόνωσης παρουσιάζεται η σταδιακή χαλάρωση της βραχώμαζας κατά την προχώρηση της εκσκαφής. Κατά την εξέλιξη της ανάλυσης ο συντελεστής μεταβάλλεται έτσι ώστε να προσομοιώνονται καταλλήλως τα αποτονωμένα τμήματα εδάφους.
- Φορτία: Επιφανειακή ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 50kN/m.

8.4. Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων με τα προγράμματα FLAC 7.0 και PHASE²

Τα στάδια τα οποία υιοθετήθηκαν για τις αναλύσεις παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Στάδιο	Περιγραφή Σταδίου	Αρχικός Συντελεστής Αποτόνωσης E/E ₀
1	Αρχικό Εντατικό Πεδίο	100%
2	Αποτόνωση του άνω τμήματος της λόγω εγγύτητας του μετώπου εκσκαφής και τοποθέτηση των δοκών προπορείας	60%
3	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περίμετρο της διατομής με το 50% του συνολικού του πάχους (12,5cm) και το 50% της συνολικής του ακαμψίας (7,5GPa) .	35%
4	Πλήρης εκσκαφή της διατομής εκτός του ανάστροφου τόξου. Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περίμετρο της διατομής με το 100% του συνολικού του πάχους (25cm) και το 50% της συνολικής του ακαμψίας(7,5GPa). Τοποθέτηση αγκυριών.	20% του ανάστροφου τόξου

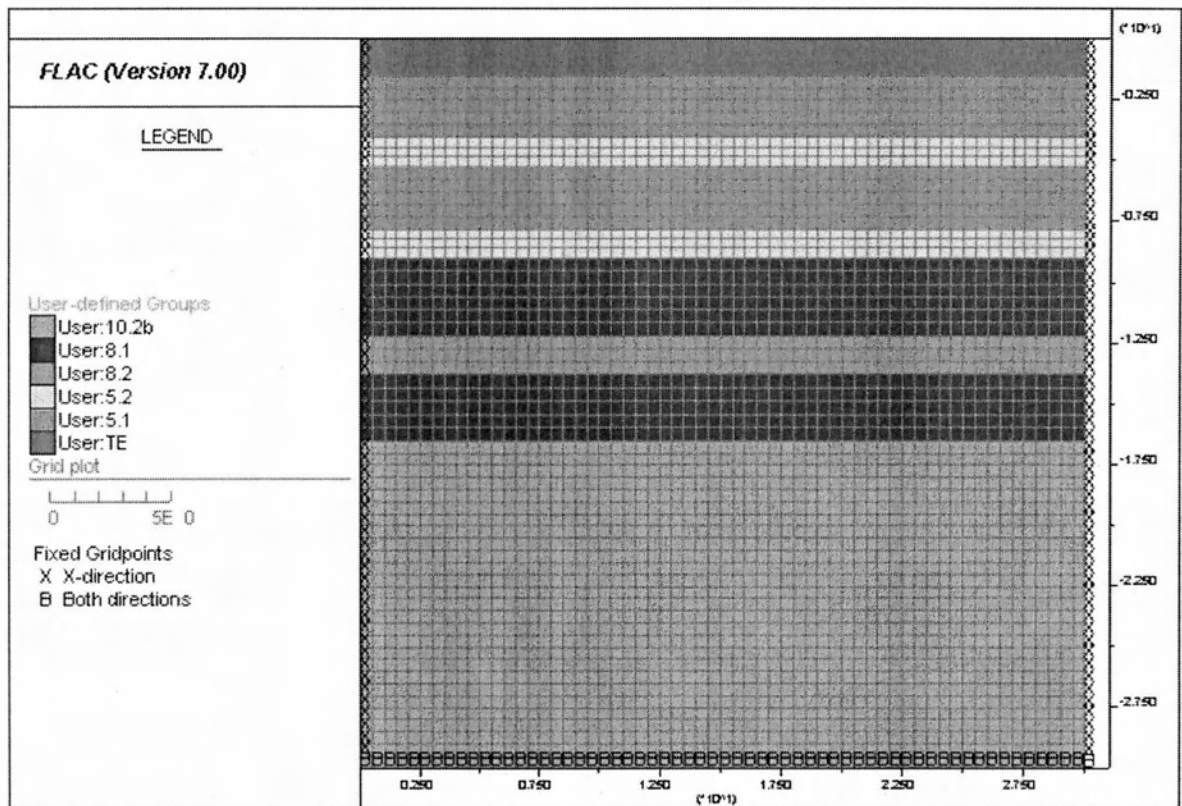
	Επιπλέον αποτόνωση στην περιοχή του ανάστροφου τόξου. Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τμήμα του ανάστροφου τόξου με το 50% του συνολικού του πάχους (12,5cm) και το 50% της συνολικής του ακαμψίας (7,5GPa).	
5	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περίμετρο της διατομής με το 100% του συνολικού του πάχους (25cm) και το 100% της συνολικής του ακαμψίας (15GPa). Πλήρης εκσκαφή του ανάστροφου τόξου. Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τμήμα του ανάστροφου τόξου με το 100% του συνολικού του πάχους (25cm) και το 100% της συνολικής του ακαμψίας (15GPa).	Πλήρης Εκσκαφή Διατομής

Πίνακας 3:Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων

8.5. Αναλυτική περιγραφή σταδίων προσομοίωσης

Στάδιο 1: Αρχικό εντατικό πεδίο

Για το πρόγραμμα FLAC 7.0, αρχικά κατασκευάστηκε κάρναβος με πλήθος στοιχείων 60 x 60 . Η ισοδιάσταση του στοιχείου ισούται με 0,5m. Επομένως το μέγεθός του αντιστοιχεί σε 30m x 30m . Η διακριτοποίηση χαρακτηρίζεται από το πρόγραμμα ιδανική και οποιαδήποτε περαιτέρω πύκνωση δεν αποδίδει αξιόλογες βελτιστοποιήσεις. Αντίστοιχα στο πρόγραμμα PHASE2 ο κάρναβος δημιουργήθηκε με ενσωματωμένο πρόγραμμα CAD με ίδιες διαστάσεις. Η διακριτοποίηση του έγινε αυτόματα και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ομοίως με το FLAC 7.0 τετρακομβικά. Οι γεωτεχνικές ενότητες που παρουσιάζονται σε οριζόντιες στρώσεις προσομοιώνουν με ακρίβεια την γεωτεκτονική τομή της περιοχής όπως φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11: Προσομοίωση Αντιπροσωπευτικής Γεωτεχνικής Τομής σε κώδικα FLAC 7.0

Συγκεκριμένα προσομοιώνονται οι παρακάτω ενότητες:

- Τεχνικές Επιχώσεις (Σχηματισμός: 1): (0 έως -1,5m)
- Σχηματισμός Συνεκτικών Κορηματικών Υλικών (Σχηματισμός 5.1): (-1,5 έως -4,05m)
- Σχηματισμός Σιμεντωμένων Κορηματικών Υλικών (Σχηματισμός 5.2): (-4,05 έως -5,25m)
- Σχηματισμός Συνεκτικών Κορηματικών Υλικών (Σχηματισμός 5.1): (-5.25 έως -7.80m)
- Σχηματισμός Σιμεντωμένων Κορηματικών Υλικών (Σχηματισμός 5.2): (-7.80 έως -9.00m)
- Συνεκτικός Κλαστικός Σχηματισμός (Σχηματισμός 8.1): (-9,00 έως -12,20m)
- Σιμεντωμένος Κλαστικός Σχηματισμός (Σχηματισμός 8.2): (-12,20 έως -13,80m)
- Συνεκτικός Κλαστικός Σχηματισμός (Σχηματισμός 8.1): (-13,80 έως -16.53m)

- Σχηματισμός Μεταψαμμίτη –Μεταϊλύολιθου (Σχηματισμός: 10.2β):(-16.53 έως -30,00m)

Για την προσομοίωση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκαν ως συνοριακές συνθήκες κυλίσεις στα κατακόρυφα άκρα του καννάβου ώστε να επιτρέπονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων και άρθρωση στη βάση για περιορισμό των κατά x και y μετακινήσεών τους. Αυτές οι μετακινήσεις ανταποκρίνονται στους πραγματικούς βαθμούς ελευθερίας του εδάφους. Για το πεδίο των τάσεων χρησιμοποιήθηκε συντελεστής βαρύτητας (επιτάχυνση της βαρύτητας) $g=9,81\text{m/s}^2$ και έγινε επίλυση κάτω από ελαστικές συνθήκες γιατί οι γεωτεχνικές ενότητες σε όλη την έκταση του καννάβου συμπεριφέρονται ελαστικά καθώς έχουν δείκτη Poisson $<0,5$ ($= 0,3$).

Στάδιο 2: Αποτόνωση του άνω τμήματος της λόγω εγγύτητας του μετώπου εκσκαφής και τοποθέτηση των δοκών προπορείας.

Αρχικά μηδενίστηκαν όλες οι μετακινήσεις που προέκυψαν στο 1^ο στάδιο έτσι ώστε να προσομοιωθεί η διαδικασία στερεοποίησης της στρωματογραφίας. Οι καθιζήσεις αυτές έχουν προηγηθεί της κατασκευής της σήραγγας και δεν πρέπει να συνυπολογιστούν στον σχεδιασμό του έργου. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η αψιδωτή διατομή της σήραγγας με τόξο κύκλου ακτίνας 4.14m. Οι δοκοί προπορείας προσομοιώθηκαν με μια ενισχυμένη ζώνη πάχους 1m. Για την αποτόνωση της πρώτης φάσης εκσκαφής πολλαπλασιάστηκε το μέτρο ελαστικότητας του άνω τμήματος εσωτερικά της διατομής με συντελεστή αποτόνωσης $E/E_0 = 0,6$ και έγινε εκ νέου επίλυση.

Στάδιο 3: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στο στάδιο αυτό κατασκευάστηκε το ανάστροφο τόξο της διατομής και εισήχθη εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με πάχος 12,5cm και μέτρο ελαστικότητας $E=7,5$ GPa που αντιστοιχούν στο 50% των συνολικών τους τιμών. Επιπλέον έγινε περεταίρω αποτόνωση του μέτρου ελαστικότητας του άνω τμήματος της διατομής με συντελεστή αποτόνωσης $E/E_0=0,35$.

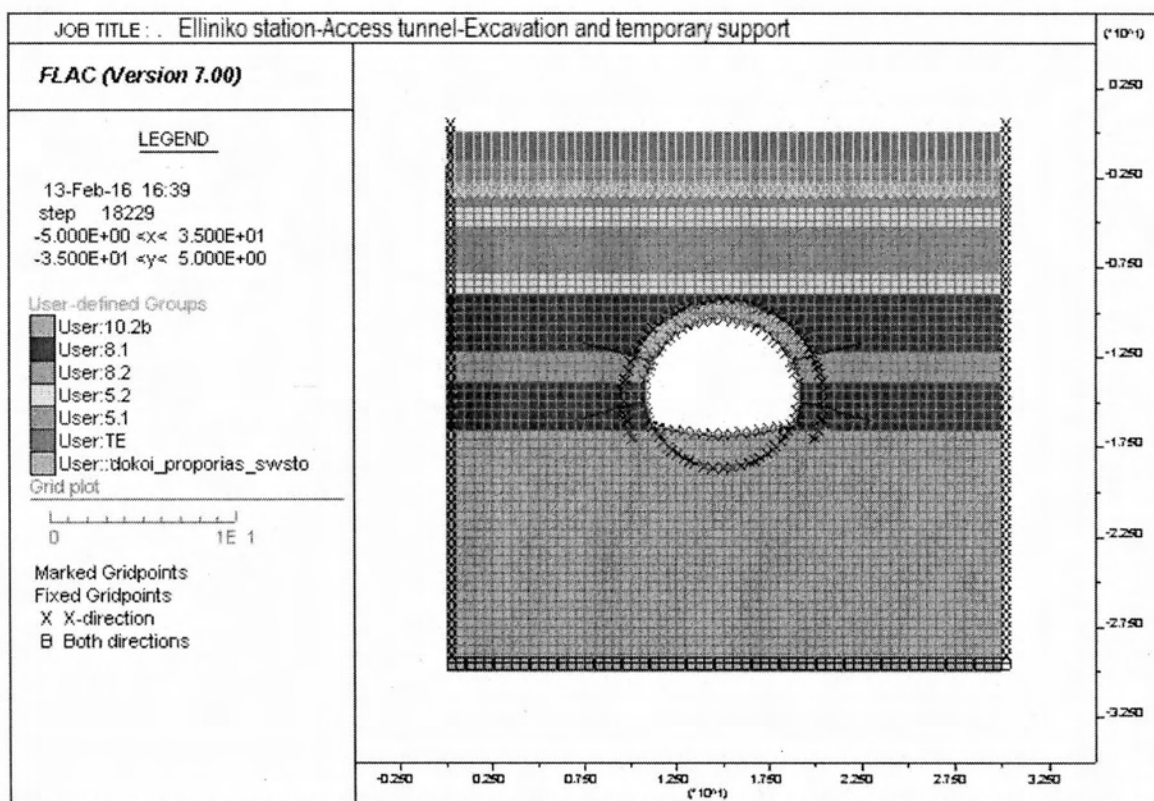
Στάδιο 4: Πλήρη εκσκαφή διατομής πλην του ανάστροφου τόξου, εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τοποθέτηση αγκυριών.

Αρχικά μηδενίστηκαν οι μετακινήσεις που προέκυψαν από τις προηγούμενες αναλύσεις καθώς αυτές δεν επηρεάζουν τα προσωρινά μέτρα αντιστήριξης. Στο στάδιο αυτό επιβλήθηκε επιφανειακή φόρτιση 50kPa στην επιφάνεια του εδάφους. Εφαρμόστηκε το 100% του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (25 cm) περιμετρικά της διατομής με 50% της αντοχής του (7,5GPa) και έγινε πλήρη εκσκαφή της διατομής. Ακόμη

εφαρμόστηκε το 50% του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (12,5cm) στην περιοχή του ανάστροφου τόξου με το 50% του μέτρου ελαστικότητάς του (7,5GPa) και αποτόνωση της περιοχής αυτής με συντελεστή αρχικής αποτόνωσης $E/E_0=20\%$. Στο στάδιο αυτό τοποθετήθηκαν τέσσερα αγκύρια μήκους 4m και κυκλικής διαμέτρου $\Phi 25$. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αγκυριών είναι : $E=200\text{GPa}$, οριακό φορτίο θραύσης $F_{A,Rd}=250\text{KN}$ και γωνία τριβής 30° .

Στάδιο 5: Πλήρη εκσκαφή ανάστροφου τόξου και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στο τελευταίο στάδιο εφαρμόζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα περιμετρικά της διατομής και του ανάστροφου τόξου με 100% του συνολικού του πάχους (25cm) και με το 100% της συνολικής του ακαμψίας (15GPa). Στο σχήμα 12 απεικονίζεται η τυπική διατομή της σήραγγας πρόσβασης μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 5.



Σχήμα 12 : Τελικό στάδιο προσομοίωσης σήραγγας πρόσβασης σε FLAC 7.0

8.6. Κριτήριο αστοχίας

Το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής των βραχομαζών για τις αναλύσεις στα 2 προγράμματα είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό μελετά τις τάσεις σε πιθανά επίπεδα αστοχίας μέσα στο έδαφος. Η αστοχία του εδαφικού υλικού καθορίζεται ως εξής: αν η διατμητική τάση τ σε κάποιο επίπεδο μέσα στο εδαφικό υλικό ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή:

$$\tau = \pm(c' + \sigma' \tan \varphi) \quad (1)$$

Έτσι καθορίζεται ένα ζεύγος από γραμμές στο επίπεδο (σ', τ των τάσεων οι οποίες ονομάζονται περιβάλλουσες αστοχίας. Αν ο ενεργός κύκλος του Mohr, για ένα υπολογιζόμενο στοιχείο, τμήσει τις γραμμές αυτές, τότε ξεπερνιέται η μέγιστη διατμητική αντοχή του υλικού και παρατηρείται αστοχία. Δηλαδή για να υπάρξει ολίσθηση στο επίπεδο της αστοχίας πρέπει να η διατμητική τάση να ξεπεράσει την αντίσταση της εσωτερικής τριβής $\sigma' \tan \varphi$ και της συνοχής c' του εδάφους, που εξαρτώνται από την τιμή της ενεργούς τάσης σ' . Η συνοχή c' αντιπροσωπεύεται ως μια μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας στο επίπεδο (σ', τ) (Muirwood, 1990)

Η μορφή του κριτηρίου Mohr-Coulomb που χρησιμοποιήθηκε είναι η γραμμική $\tau = \pm(c' + \sigma' \tan \varphi)$. Αύτη είναι η πιο απλή μορφή του, η οποία επαρκεί ικανοποιητικά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας όπου επικρατούν σχετικά ευμενής συνθήκες. Υπάρχουν και πιο περίπλοκες, μη γραμμικές εκφράσεις του κριτηρίου για πιο ειδικευμένα προβλήματα. Το γεγονός ότι έχουν πραγματοποιηθεί εργαστηριακές δοκιμές από την Α.Μ. για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων c' και φ , δεν καθιστά αναγκαία την διερεύνηση άλλων κριτηρίων όπως Hoek-Brown (εμπειρικό κριτήριο με βάση in-situ δοκιμές, GSI κλπ) και την σύγκριση των αποτελεσμάτων

9. Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλύσεων με χρήση του προγράμματος FLAC 7.0

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για της παρακάτω φάσεις κατασκευής:

- Φάση 1: εκσκαφή σήραγγας πριν την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης και μόνο με την ύπαρξη δοκών προπορείας.
- Φάση 2: εκσκαφή σήραγγας μετά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης (εκτοξευόμενο ινοπολισμένο σκυρόδεμα, ηλώσεις βράχου)

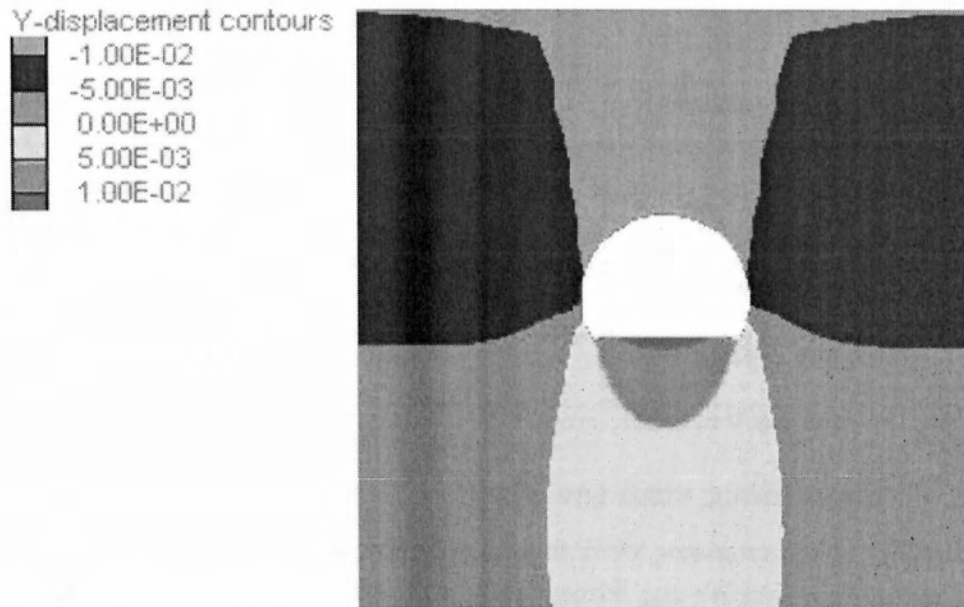
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα προκύπτουν για φόρτιση 50kNσε κάθε φάση. Σε αυτά τα στάδια κατασκευής υπολογίστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (καθιζήσεις) .
- Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x .
- Ολικές μετατοπίσεις.
- Πλαστικοποιημένες περιοχές.
- Αξονικές δυνάμεις ηλώσεων βράχου.
- Γωνιακή παραμόρφωση αγκυρίων.

9.1. Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (καθιζήσεις)

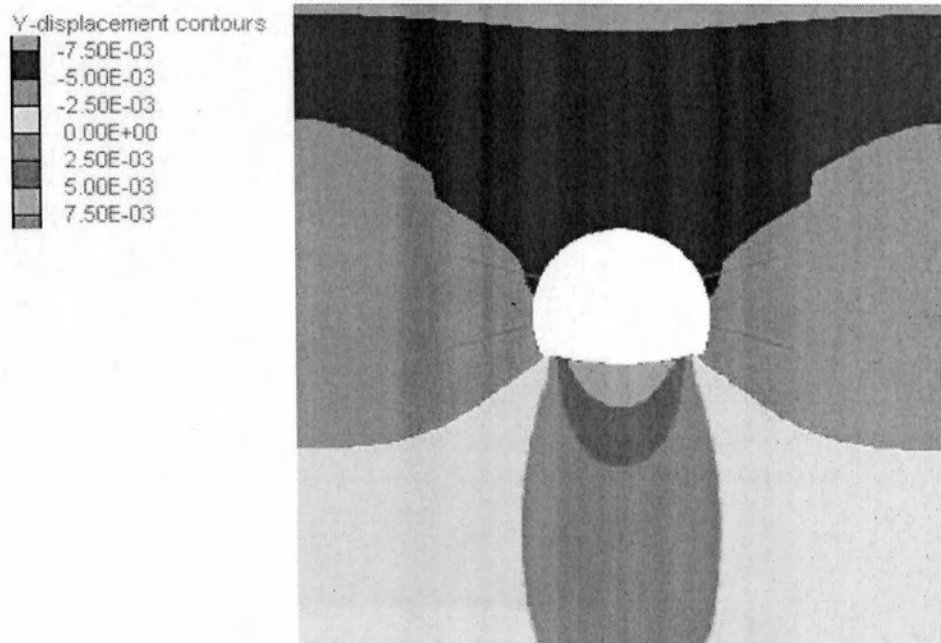
Όπως είναι αναμενόμενο, κατά την διάνοιξη της σήραγγας και τοποθέτηση των μέτρων αντιστήριξης, παρουσιάζονται καθιζήσεις τόσο στην περίμετρο την διατομής όσο και στην ευρύτερη περιοχή του έργου. Για τις δύο φάσεις, από τα σχήματα 13 και 14, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Φάση 1: Στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (0,0 m) παρουσιάζονται καθιζήσεις της τάξεως των 10,0mmστην ευρύτερη περιοχή πάνω από τη σήραγγα πρόσβασης. Το ίδιο μέγεθος μετατόπισης κατά τον άξονα y εμφανίζεται μέχρι την οροφή της σήραγγας. Στα τοιχώματα οι καθιζήσεις κυμαίνονται από 10,0 έως 5,0mmενώ στην περιοχή όπου πρόκειται να κατασκευαστεί το ανάστροφο τόξο το έδαφος αποτονώνεται και παρουσιάζει μια λογική ανύψωση ίση με 10,0mm.



Σχήμα 13: Κατακόρυφες μετατοπίσεις (mm) ανυποστήρικτης σήραγγας (FLAC7)

- Φάση 2: Με την χρήση των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης παρουσιάζεται σημαντική μείωση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα y. Χαρακτηριστικά, οι καθιζήσεις στην ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζουν τιμή 7,5mm σε βάθος έως 1,00m. Στην οροφή του έργου η καθίζηση είναι 5,0mm ενώ στα τοιχώματα δεν ξεπερνά τα 2,5mm. Όσον αφορά την περιοχή του ανάστροφου τόξου οι μετατοπίσεις φτάνουν τα 7,5mm.



Σχήμα 14: Κατακόρυφες μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC7)

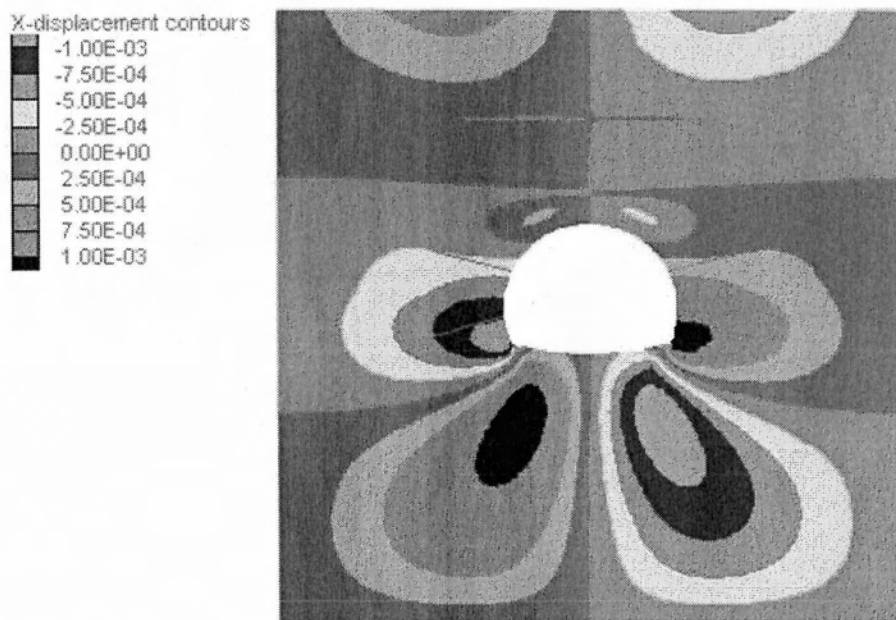
	Φάση 1	Φάση 2
Ελεύθερη Επιφάνεια Εδάφους	-10	-7.5
Οροφή Σήραγγας	-10	-5.0
Τοιχώματα	-5	-2.5
Ανάστροφο Τόξο	+10.0	+7.5

Πίνακας 4: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm)

9.2. Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x

Οι οριζόντιες μετατοπίσεις κατά την διάρκεια της κατασκευής παραμένουν αμελητέες για την μεγαλύτερη έκταση της διατομής και του εδάφους της ευρύτερης περιοχής γύρω από την σήραγγα ενώ μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στα τοιχώματα της διατομής. Χαρακτηριστικά:

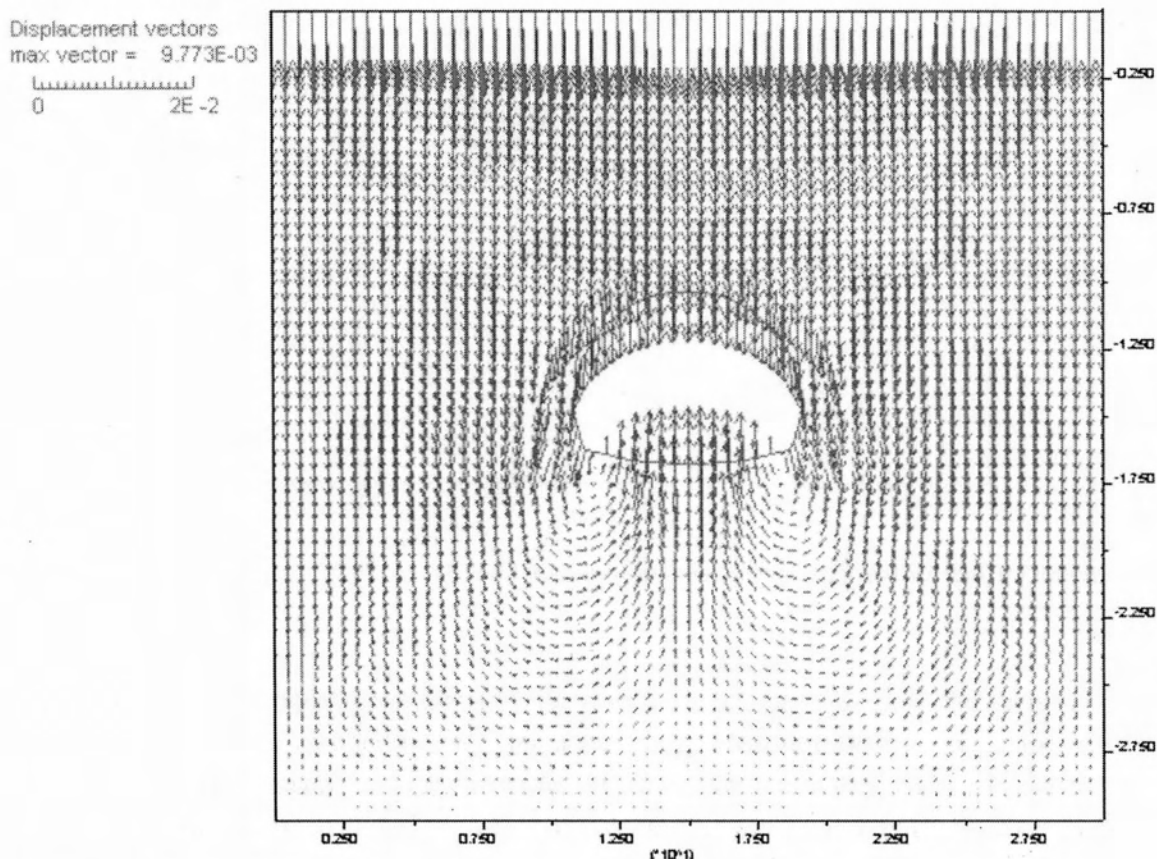
- Φάση 1: έως 4.0 mm σε βάθος 15m με 16m με κατεύθυνση προς το εσωτερικό της εκσκαφής. Οι μετατοπίσεις στο ανάστροφο τόξο παραμένουν σχεδόν μηδενικές.
- Φάση 2: έως 1.0 mm σε βάθος 15.5m με 16.5m με κατεύθυνση προ στο εσωτερικό της εκσκαφής (σχήμα 15). Όπως και στην φάση 1 οι μετατοπίσεις στο ανάστροφο τόξο είναι μηδενικές.



Σχήμα 15: Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC7)

9.3. Ολικές μετατοπίσεις

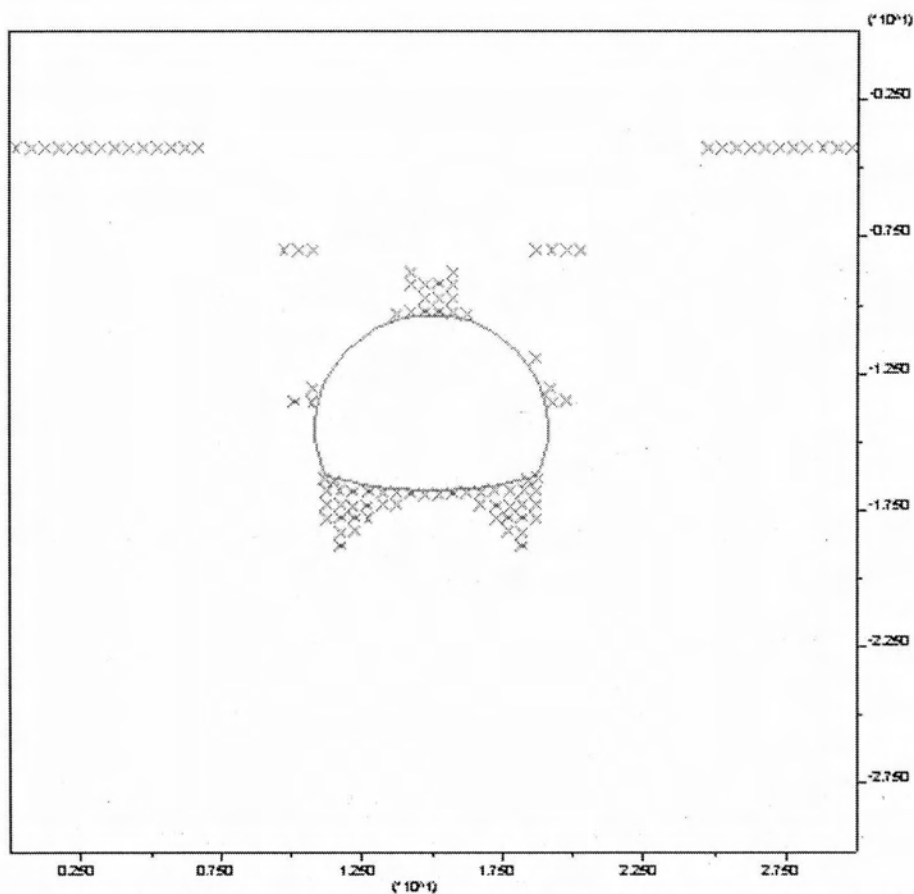
Οι ολικές μετατοπίσεις των κόμβων παρουσιάζονται σαν διανύσματα στο επίπεδο και αποδίδουν μια εικόνα για την ροή των μετακινήσεων στην ευρύτερη περιοχή της γεωλογικής τομής. Οι μέγιστες τιμές κατ' απόλυτη τιμή παρουσιάζονται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους και είναι για την φάση 1 περίπου 14mm ενώ για την φάση 2 είναι περίπου 9,5mm (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Ολικές μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας (FLAC7).

9.4. Ζώνες πλαστικοποίησης

Με βάση τις πλαστικές ιδιότητες που δόθηκαν στα υλικά (συνοχή και γωνία τριβής) και σε συνδυασμό με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb προκύπτουν οι πλαστικοποιημένες περιοχές του εδάφους γύρω από τη σήραγγα πρόσβασης σύμφωνα με το σχήμα 17.



Σχήμα 17: Πλαστικοποίηση του εδάφους κατά την εκσκαφή (FLAC7)

Η πλαστικοποίηση των περιοχών αυτών έχει γίνει σε προγενέστερα στάδια της εκσκαφής και μόνο σε εφελκυσμό ενώ μετά το πέρας της πλήρους εκσκαφής το υλικό έχει επιστρέψει στην ελαστική περιοχή. Η πλαστικοποίηση είναι έντονη στα άκρα του ανάστροφου τόξου όπου η σχετική μετακίνηση του εδάφους είναι αυξημένη όπως και στην περιοχή της οροφής της σήραγγας όπου παρατηρείται η μέγιστη καθίζηση.

9.5. Αξονικές δυνάμεις ηλώσεων βράχου

Τα αγκύρια που χρησιμοποιούνται ως μέτρα προσωρινής αντιστήριξης δέχονται φορτίσεις με αποτέλεσμα να προκύπτουν αξονικές δυνάμεις σε αυτά. Στο σχήμα 18 απεικονίζονται οι δυνάμεις αυτές.



Σχήμα 18: Αξονικές Δυνάμεις Ηλώσεων Βράχου μετά την εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. (FLAC7)

Παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις επί των ηλώσεων βράχου είναι ουσιαστικά αμελητέες (μέγιστη αξονική 7,9kN στα κατώτερα αγκύρια και 5,8 kN στα ανώτερα).

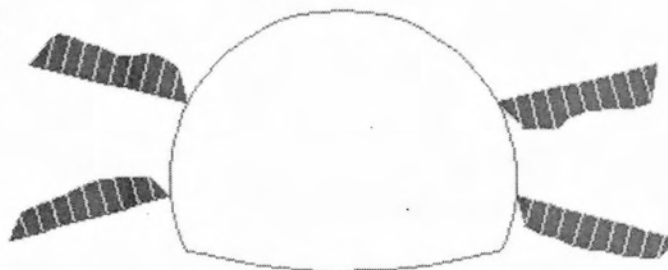
9.6. Παραμορφώσεις ηλώσεων βράχου

Οι αξονικές παραμορφώσεις των αγκυρίων παρουσιάζουν τιμές από $1,27E - 03$ έως $1,59E-3$ (σχήμα 19). Οι ανηγμένες παραμορφώσεις υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (2).

Με βάση τη σχέση (2) η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση των αγκυρίων για παραμόρφωση ίση με 15,9mm και μήκος αγκυρίου 4,00m είναι $0,4E - 3$. Καθώς ο χάλυβας S500 που χρησιμοποιείται διαρρέει για ανοιγμένες παραμορφώσεις μεγαλύτερες από $2,17E-3$, οι αξονικές παραμορφώσεις των αγκυρίων θεωρούνται αμελητέες.

Rockbolt Plot

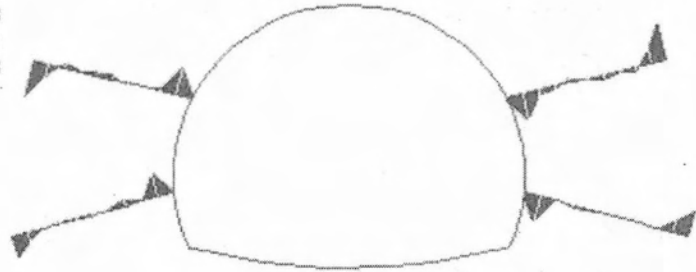
Norm Disp. on Structure Max. Value	
# 3 (Rockb)	1.274E-03
# 4 (Rockb)	-1.363E-03
# 5 (Rockb)	-1.592E-03
# 6 (Rockb)	1.590E-03



Σχήμα 19: Αξονικές Παραμορφώσεις Αγκυρίων (FLAC7)

Η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση παρουσιάζεται στην περιοχή πάκτωσης του αγκυρίου με το σκυρόδεμα και η τιμή της κυμαίνεται από $2,8E-3$ έως $4,5E - 3$ για κάθε αγκύριο.

Rockbolt Plot
■ Ang. Disp. on
Structure Max. Value
3 (Rockb) 3.137E-03
4 (Rockb) -2.778E-03
5 (Rockb) 4.467E-03
6 (Rockb) -4.516E-03



Σχήμα 20: Γωνιακή Παραμόρφωση Αγκυρίων (FLAC7)

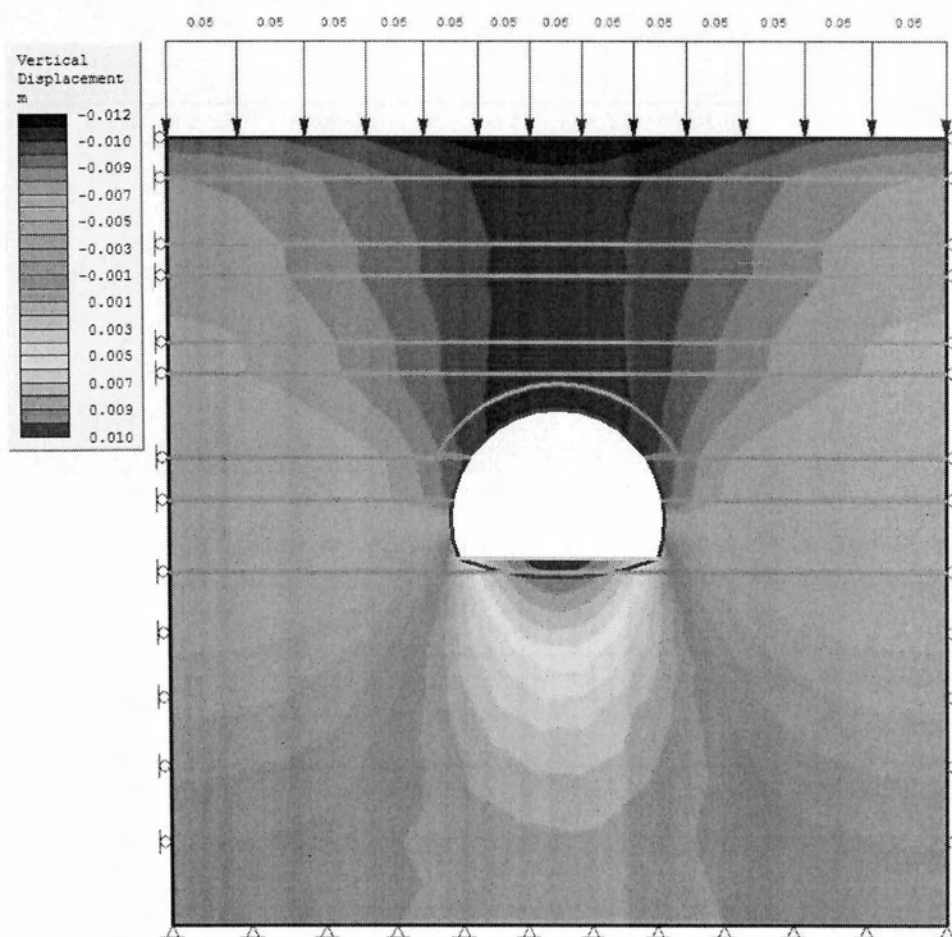
10. Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλύσεων με χρήση του προγράμματος PHASE²

10.1 Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (καθιζήσεις)

Οι μέγιστες καθιζήσεις όπως είναι αναμενόμενο βρίσκονται στον άξονα της σήραγγας.

Για φορτίο 50kN/m:

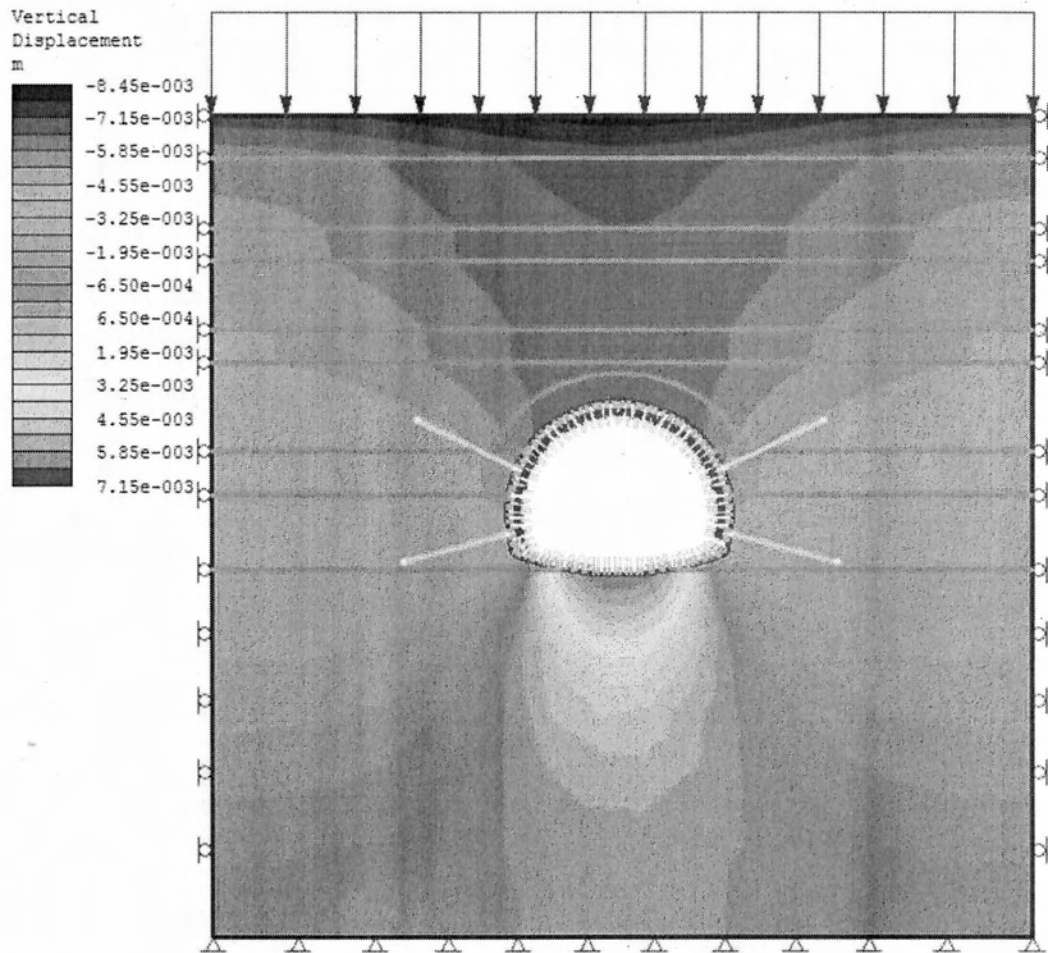
- Φάση 1: Στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους παρατηρείται μέγιστη καθίζηση ίση με 12mm για βάθος περίπου 1m. Από το βάθος -1m μέχρι την οροφή της σήραγγας η καθίζηση παραμένει σταθερή και ίση με 10mm ενώ από την οροφή μέχρι την στέψη μειώνεται σταδιακά από 10mm μέχρι 1mm. Στην στέψη, παρουσιάζεται αποτόνωση του εδάφους το οποίο ανυψώνεται κατά 10mm.(σχήμα 21)



Σχήμα 21: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) Ανυποστήρικτης Σήραγγας (Phase2)

- Φάση 2: Με τη χρήση προσωρινών μέτρων αντιστήριξης, παρουσιάζεται μείωση των μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα στην ελεύθερη επιφάνεια η καθίζηση είναι ίση

με 8mm η οποία μειώνεται στα 7.5mm σε βάθος περίπου 1m. Στην οροφή της σήραγγας ισούται με 6.0mm και στα τοιχώματα κυμαίνεται από 4mm έως 5mm. Τέλος παρατηρείται αποτόνωση της τάξεως των 6mm στην περιοχή του ανάστροφου τόξου. (σχήμα 22)



Σχήμα 22: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη της Σήραγγας (Phase2)

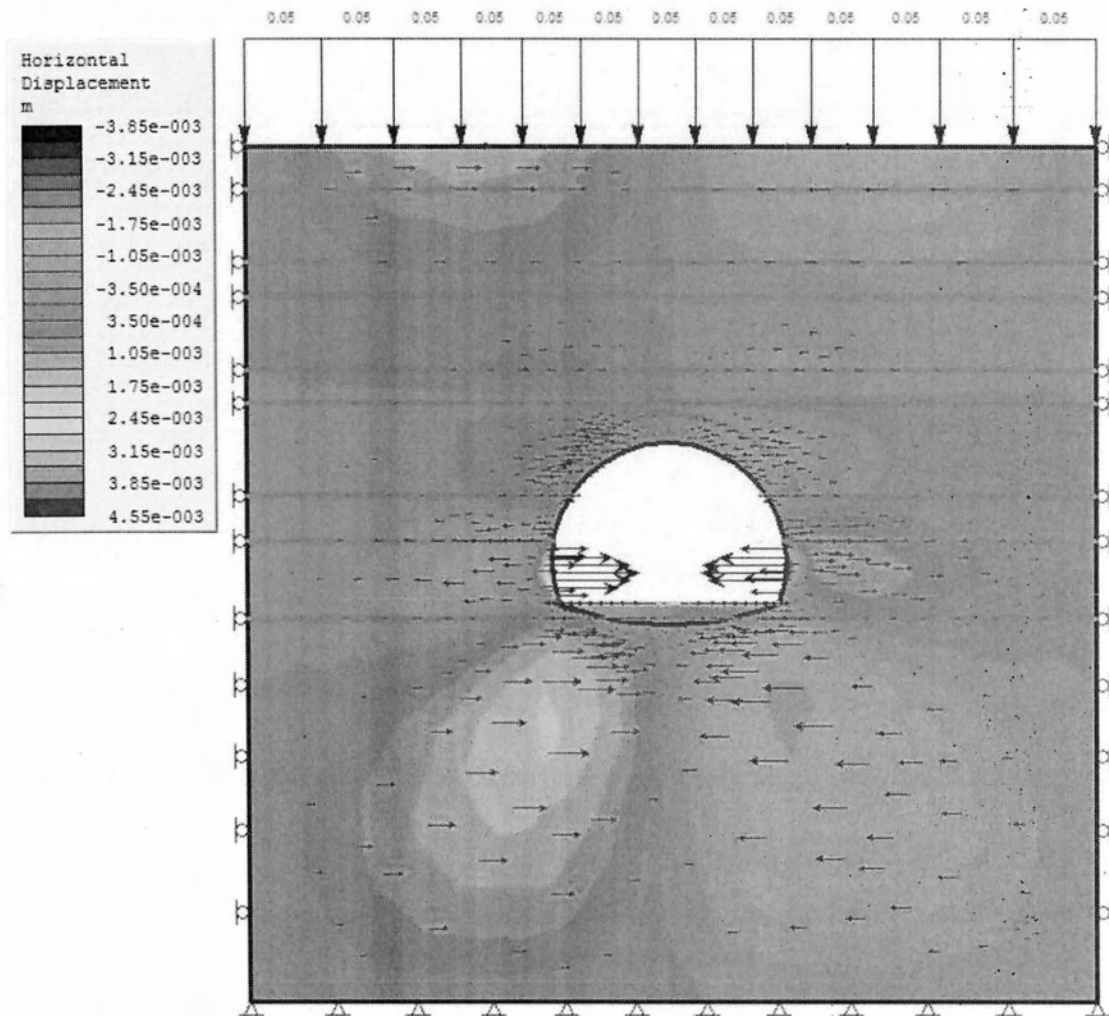
	Φάση 1	Φάση 2
Ελεύθερη Επιφάνεια Εδάφους	-12	-8.0
Οροφή Σήραγγας	-10	-6.0
Τοιχώματα	-5.0	-5.0
Ανάστροφο Τόξο	+10	+6.0

Πίνακας 5: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm)

10.2. Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x

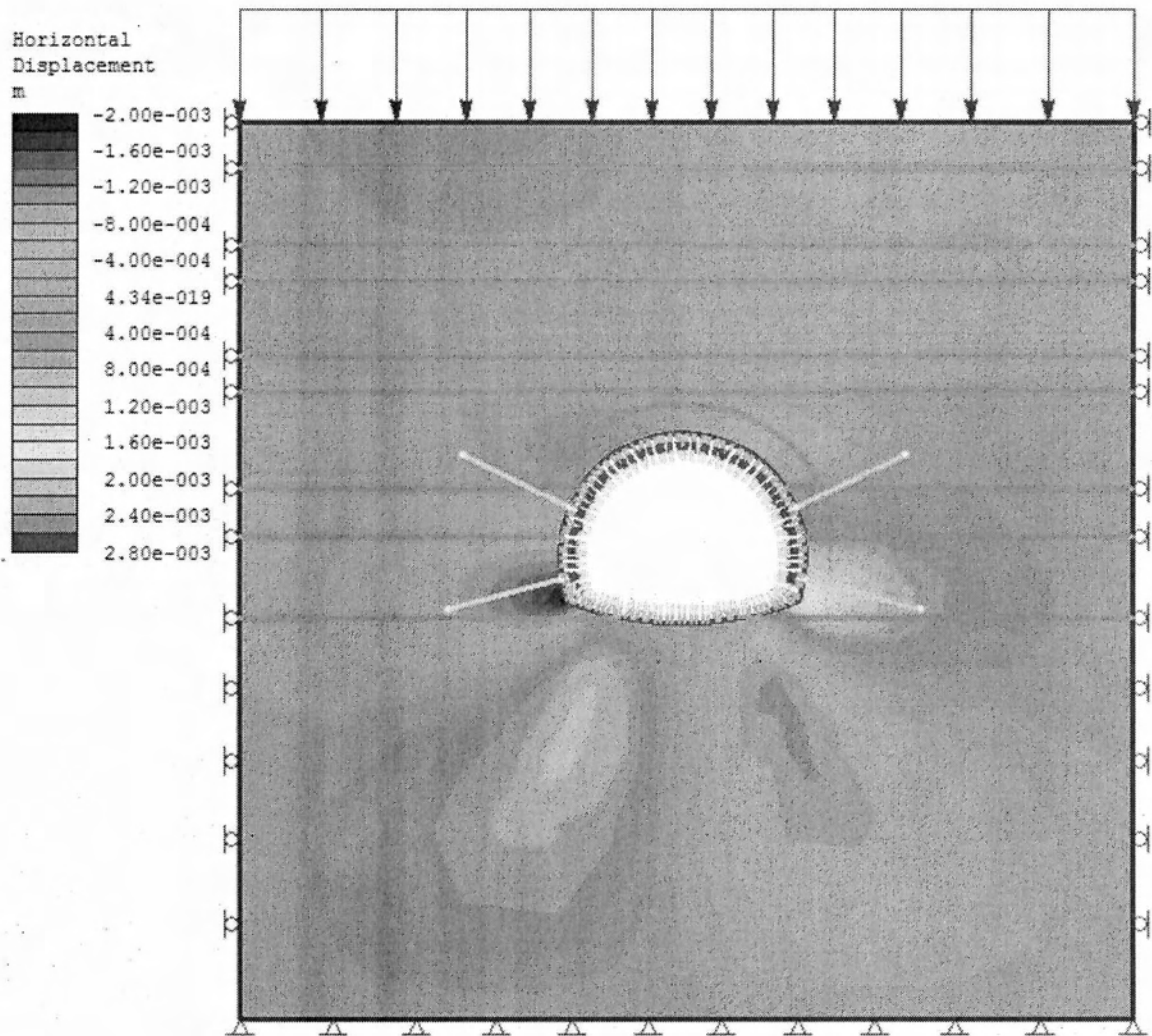
Οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα x παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές στο μεγαλύτερο μέρος της εδαφικής τομής όπως και στην επιφάνεια της διατομής της σήραγγας. Συγκεκριμένα:

- Φάση 1: Στην οροφή και στη στέψη της σήραγγας οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μηδενικές ενώ στα τοιχώματα παρατηρείται μια μετακίνηση έως 4.0mm περίπου προς το εσωτερικό της εκσκαφής. (σχήμα 23)



Σχήμα 23: Οριζόντιες Μετατοπίσεις (mm) Ανυποστήρικτης Σήραγγας (Phase2)

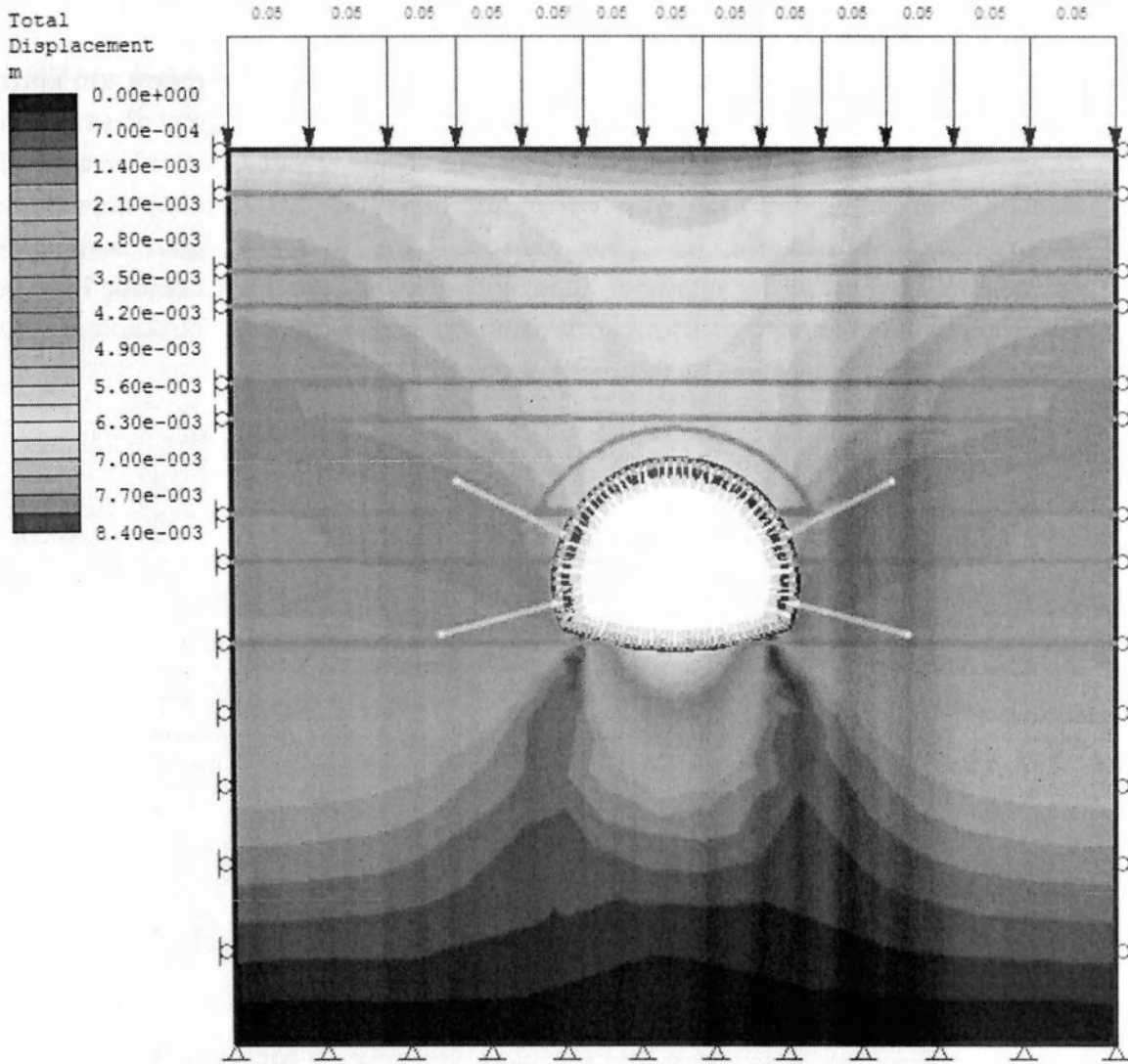
- Φάση 2: Σε αυτό το στάδιο κατασκευής όπου έχουν ολοκληρωθεί και τα μέτρα προσωρινής αντιστήριξης οι μετακινήσεις κατά τον άξονα x παραμένουν μηδενικές στην οροφή και στην περιοχή του αναστρόφου τόξου ενώ στα τοιχώματα της σήραγγας και σε βάθος 15.5m με 16.5m παρατηρείται μια μικρής κλίμακας μετακίνηση μέχρι και 1,9mm. (σχήμα 24)



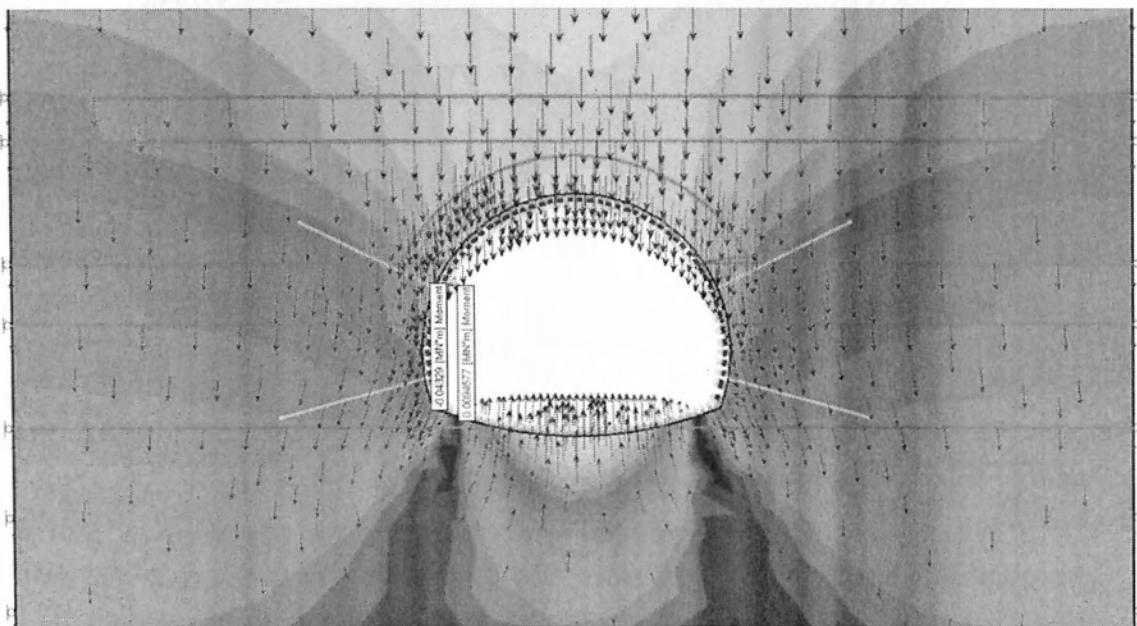
Σχήμα 24: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη της Σήραγγας (Phase2)

10.3. Ολικές μετατοπίσεις

Οι ολικές μετατοπίσεις που προκύπτουν από την ανάλυση παρουσιάζονται αυξημένες στην επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα στη Φάση 1, στην ελεύθερη επιφάνεια πλησιάζουν τα 13,5mm ενώ στο ανώτερο σημείο την εκσκαφής φτάνουν έως 11,0 mm. Όσο αφορά τη Φάση 2, όπου η αντιστήριξη έχει ολοκληρωθεί, οι μετακινήσεις είναι μικρότερες με μέγιστες τιμές 8,4mm στην ελεύθερη επιφάνεια και 6,4 mm στην οροφή της κατασκευής (σχήμα 25 και σχήμα 26).



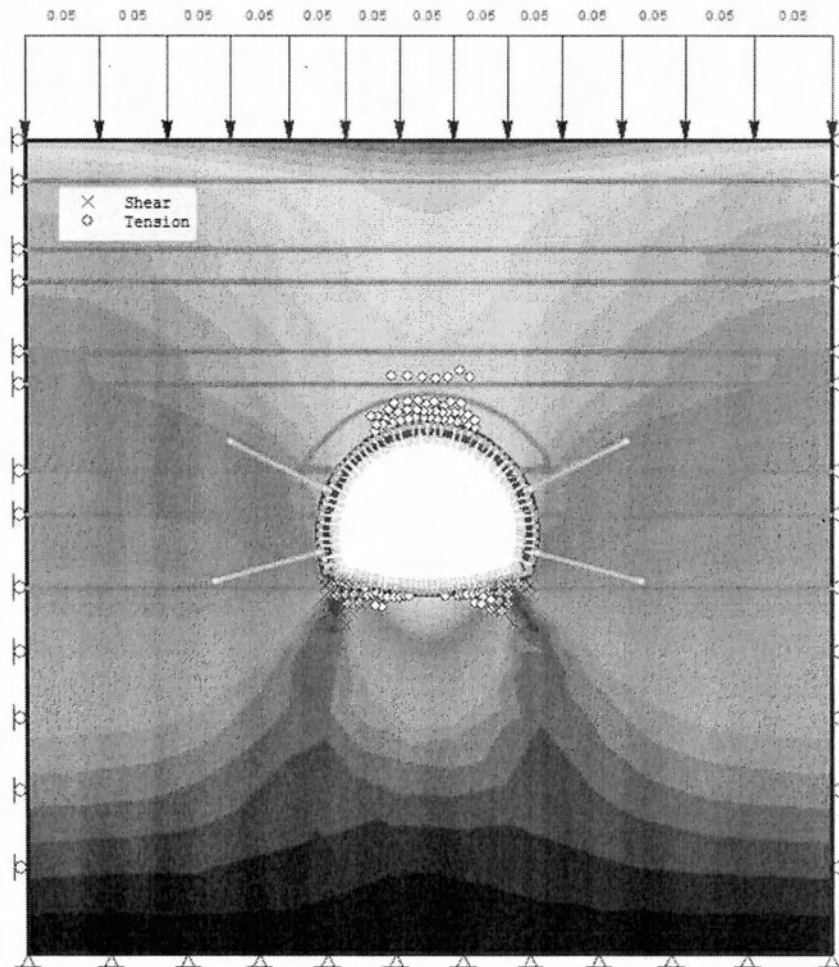
Σχήμα 25: Ολικές Μετατοπίσεις (mm) κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη Σήραγγας (Phase2)



Σχήμα 26: Διευθύνσεις Ολικών Μετατοπίσεων κατά την πλήρη εκσκαφή και υποστήριξη (Phase2)

10.4. Ζώνες πλαστικοποίησης

Οι ζώνες πλαστικοποίησης όπως υπολογίστηκαν από το PHASE² με χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, για την φάση 2, περιλαμβάνουν στοιχεία τα οποία έχουν πλαστικοποιηθεί σε εφελκυσμό και διάτμηση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 27 οι ζώνες πλαστικοποίησης περιορίζονται στην οροφή και στην στέψη της σήραγγας. Στην οροφή παρατηρούνται πλαστικοποιημένα στοιχεία, σε ζώνη πλάτους 1.8m, τα οποία έχουν διαρρεύσει σε εφελκυσμό. Στην στέψη της σήραγγας παρατηρείται επίσης μια ζώνη πλάτους 1.8m, κοντά στους πόδες, ή οποία περιέχει στοιχεία τα οποία έχουν διαρρεύσει σε εφελκυσμό αλλά και κάποια που έχουν διαρρεύσει σε διάτμηση. (σχήμα 27)

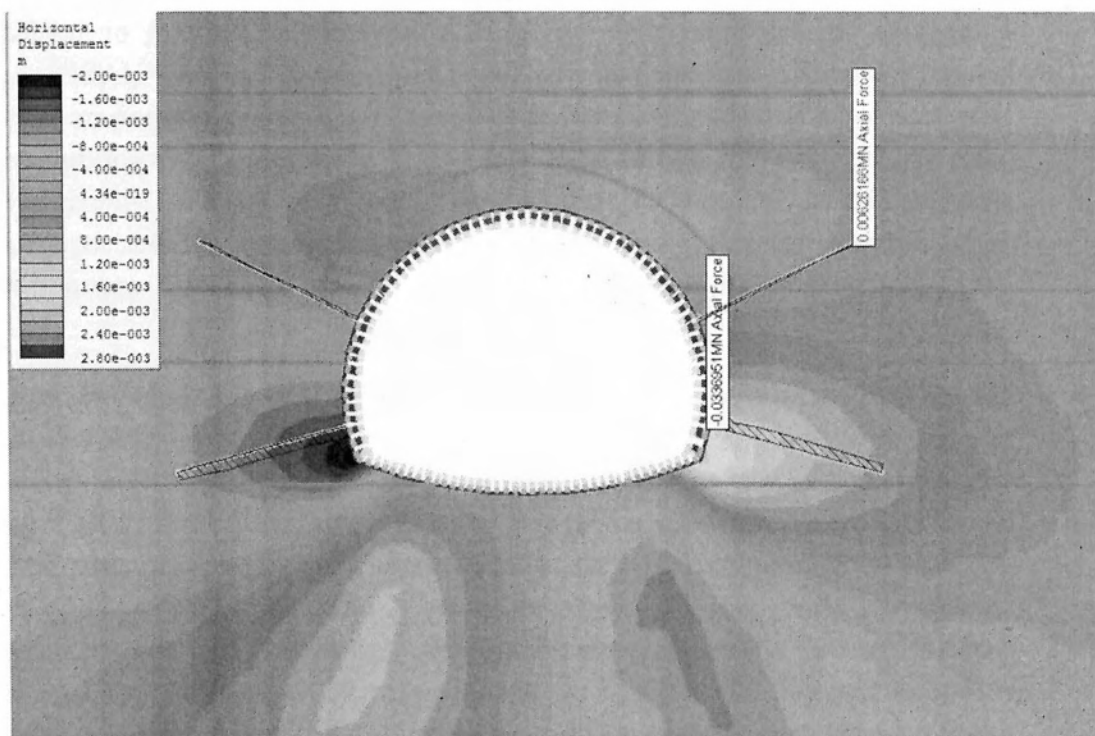


Σχήμα 27: Ζώνες Πλαστικοποίησης (Phase2)

10.5. Αξονικές δυνάμεις ηλώσεων βράχου

Οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στα αγκύρια λόγω των φορτίων που δέχονται παρουσιάζουν μικρές τιμές. Οι ηλώσεις που βρίσκονται στο άνω τμήμα της κατασκευής εμφανίζουν τιμή ίση με 3,6kN ενώ στα αγκύρια που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος η τιμή της αξονικής αυξάνεται και είναι σχεδόν 33kN. (σχήμα 28)

Η χρησιμότητα των ηλώσεων βράχου είναι εμφανής στο σχήμα 28 . Η θέση που έχουν τοποθετηθεί μεγιστοποιεί τη συμβολή τους στον περιορισμό των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων της σήραγγας. Τα αγκύρια βρίσκονται κοντά στις περιοχές που ασκούνται οι μεγαλύτερες τάσεις και οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους γύρω από τη διατομή της σήραγγας.



Σχήμα 28: Αξονικές Δυνάμεις επί των Ηλώσεων Βράχου (Phase2)

10.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων των προγραμμάτων FLAC7 και PHASE2

Με τις αναλύσεις που προηγήθηκαν παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο προγραμμάτων συγκλίνουν και παρουσιάζουν όμοιες μεταβολές στα μεγέθη που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα:

- Οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα y κατά τη Φάση 1 είναι ίδιες σε όλη την έκταση του καννάβου με μια μικρή διαφορά στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους της τάξεως των 2mm. Ομοίως και με την τοποθέτηση των προσωρινών μέτρων αντιστήριξης οι καθιζήσεις που προκύπτουν από τα 2 προγράμματα δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές με μέγιστη απόκλιση ίση με 2,5mm στα τοιχώματα της σήραγγας.
- Οι οριζόντιες μετακινήσεις στην ανυποστήρικτη σήραγγα είναι πανομοιότυπες σε όλη την έκταση του καννάβου με μέγιστη τιμή 4mm. Η τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τις μετακινήσεις κατά τον

άξονα x που προκύπτουν από τα 2 προγράμματα. Η μέγιστη διαφορά παρουσιάζεται στα τοιχώματα και δεν ξεπερνά το 1 mm.

- Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι και οι ολικές μετατοπίσεις δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των δυο προγραμμάτων καθώς αποτελούν το διανυσματικό άθροισμα των x και y μετατοπίσεων.
- Οι ζώνες πλαστικοποίησης είναι κατά βάση ίδιες με μια μικρή διαφοροποίηση στα τοιχώματα της σήραγγας όπου το FLAC7 παρουσιάζει διαρροή σε εφελκυσμό κάποιων στοιχείων στο παρελθόν κάτι που δεν εμφανίζεται στο PHASE². Επίσης στην περιοχή του ανάστροφου τόξου το Phase² παρουσιάζει διαρροή σε διάτμηση κάτι που δεν φαίνεται στο FLAC7. Και στις 2 περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί κριτήριο Mohr-Coulomb με τις πλαστικές ιδιότητες (plastic properties) που αναφέρονται στην περιγραφή των εδαφικών σχηματισμών. Σε κάθε περίπτωση η ζώνες πλαστικοποίησης είναι μικρές και δεν υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας της σήραγγας .
- Οι τιμές των αξονικών δυνάμεων των ηλώσεων βράχου παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ των 2 προγραμμάτων. Οι δυνάμεις στα αγκύρια που βρίσκονται στις ανώτερες θέσεις δεν διαφέρουν ουσιαστικά ενώ στα αγκύρια που βρίσκονται κοντά στο ανάστροφο τόξο η διαφορά που προκύπτει μεταξύ του FLAC7 και του PHASE² είναι σημαντικότερη και είναι περίπου 12kN. Ένας από τους πιθανούς παράγοντες στους οποίους οφείλεται αυτή η απόκλιση είναι η διαφορά που εμφανίζεται στις οριζόντιες μετατοπίσεις γύρω από την περιοχή που βρίσκονται τα κατώτερα αγκύρια. Σύμφωνα με τις αναλύσεις στο FLAC7 οι τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 0,5 mm έως 1mm. Αντίστοιχα στο Phase² η διακύμανση αυτή είναι από 0,75 mm έως 1,5mm.

11. Σύγκριση αναλύσεων FLAC7 και PHASE² με τα αποτελέσματα της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

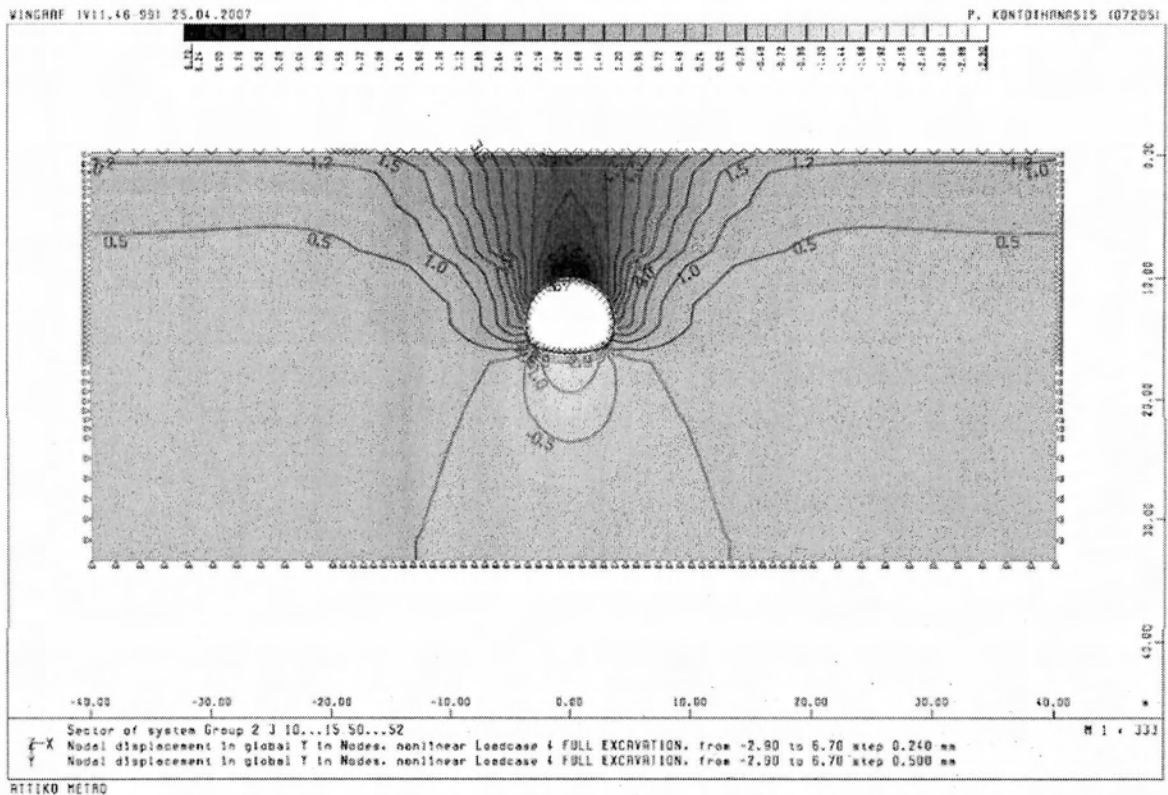
Η διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης της διάνοιξης της βοηθητικής σήραγγας στην εγκεκριμένη από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. μελέτη έγινε με χρήση του λογισμικού SOFiSTiK. Τα στάδια προσομοίωσης που υιοθετήθηκαν για τις αναλύσεις με τον κώδικα SOFiSTiK βρίσκονται σε πλήρη συνάφεια με αυτά των αναλύσεων που ακολουθήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία με χρήση των FLAC7 και PHASE².

11.1. Αξιολόγηση καθιζήσεων

Όπως παρουσιάζεται στις προηγούμενες παραγράφους, κατά την εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας αναμένεται η εκδήλωση καθιζήσεων. Η διάνοιξη της εν λόγω σήραγγας πρόσβασης θα πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο, μετά την όρυξη του κυρίως τμήματος και της ανατολικής εισόδου. Επομένως οι υπολογιζόμενες καθιζήσεις θα είναι επιπρόσθετες αυτών που προηγήθηκαν κατά την διάνοιξη του υπολοίπου έργου, δεδομένου ότι η σήραγγα βρίσκεται εντός της ζώνης επιρροής του κυρίως τμήματος του σταθμού και της ανατολικής εισόδου.

Οι προδιαγραφές του συγκεκριμένου έργου της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, δεν προβλέπουν ανώτατα αποδεκτά όρια για τις συγκλίσεις της προσωρινής επένδυσης σήραγγας και τις καθιζήσεις περιμετρικά της διατομής εκσκαφής. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις των μεγεθών αυτών στη διατομή της κατασκευαζόμενης με συμβατικές μεθόδους σήραγγας είναι πρακτικά δύσκολο να δώσουν απολύτως αξιόπιστα αποτελέσματα και να συσχετίζονται άμεσα με την κατασκευή. Οι στόχοι μέτρησης στο μέτωπο της εκσκαφής δεν είναι εφικτό να τοποθετηθούν εγκαίρως ώστε να καταγράψουν την παραμόρφωση που εκδηλώνεται άμεσα. Έτσι, όταν μπορέσουν να τοποθετηθούν έχει ήδη πραγματοποιηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό της παραμόρφωσης ενώ πολύ συχνά οι στόχοι καταστρέφονται από τα σκαπτικά μηχανήματα ή από τις εργασίες προσωρινής υποστήριξης. Για το λόγο αυτό, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ συνήθως επικεντρώνεται σε μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τις σήραγγες όπως είναι η μέτρηση και χρονική παρακολούθηση των καθιζήσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών θεωρούνται πλέον αξιόπιστα και χρήσιμα για την μελέτη και υλοποίηση της υπόγειας εκσκαφής. Σε κάθε περίπτωση ο μελετητής οφείλει να ελέγχει τις συγκλίσεις της σήραγγας με αναλύσεις και να αξιολογεί τα αποτελέσματά τους.

- Από τις αναλύσεις της μελέτης για $K_0=0,4$ και δοκούς προπορείας $\Phi 114,3$ mm (forepoles) η μέγιστη καθίζηση στον άξονα της σήραγγας είναι της τάξεως των 5.5 mm (σχήμα 29).

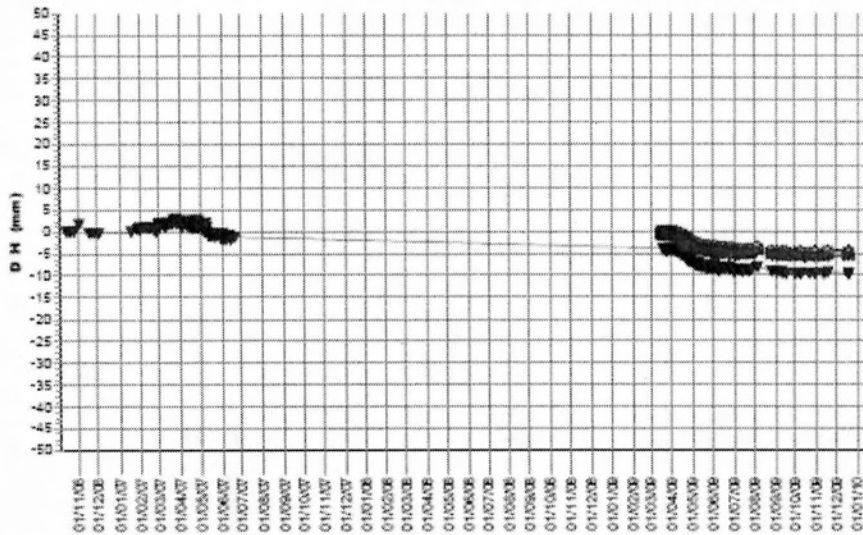


Σχήμα 29: Ανάλυση Α ($K_0=0,40$) - Δοκοί προπορείας $\Phi 114,3\text{mm}$ (forepoles) – Ελαστοπλαστικές κατακόρυφες μετακινήσεις (Τεχνική έκθεση ΛΟΜ1, 2007)

Καθ' όλη την διάρκεια της κατασκευής του έργου αλλά και μετά την αποπεράτωσή του πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των καθιζήσεων σε διάφορα σημεία στην ελεύθερη επιφάνεια πάνω από την σήραγγα από την αρμόδια υπηρεσία της κοινοπραξίας υπό την επίβλεψη της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Στο σχήμα 30 παρουσιάζονται οι θέσεις των καθιζήσεων που μετρήθηκαν σε σημεία πάνω από την σήραγγα.



Σχήμα 30: Σημεία in situ μέτρησης καθιζήσεων από ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.



Σχήμα 30.1: Καθιζήσεις από επί τόπου μετρήσεις σε σχέση με το χρόνο (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

- Από τις επί τόπου μετρήσεις (σχήμα 30.) προκύπτει ότι η μέγιστη καθίζηση στον άξονα της σήραγγας ισούται με 9mm ενώ η μέση τιμή της καθίζησης πάνω από την οροφή της σήραγγας είναι ίση με 7,5 mm.
- Σύμφωνα με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία με χρήση των FLAC7 και PHASE² η μέγιστη καθίζηση στον άξονα της σήραγγας υπολογίστηκε ίση με 7,5 mm στο FLAC7 και 8,0 mm στο PHASE².

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι υπολογισμοί που υλοποιήθηκαν με τα προγράμματα FLAC7 και PHASE² συνάδουν επαρκώς με τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των επιτόπιων μετρήσεων της Α.Μ. σε επίπεδο καθιζήσεων και είναι αποδεκτές σύμφωνα με τις παρακάτω πίνακα προδιαγραφών του έργου:

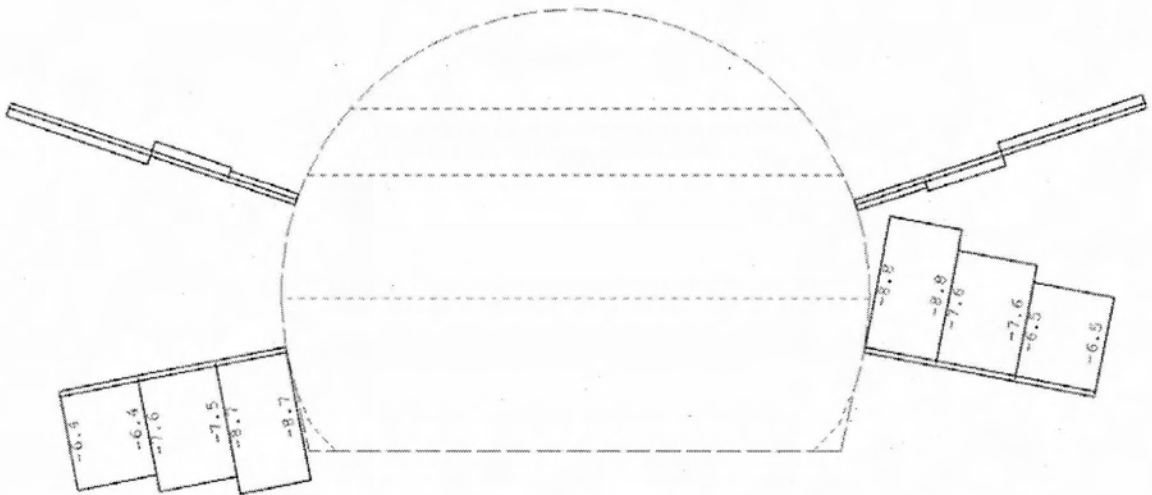
αα.	Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ.	Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή (1)	Άλλα Κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική Καθίζηση, mm	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1:800	1:600	1:600
3	Οριζόντια παραμόρφωση (2)	0,15	0,25	0,30

Πίνακας 6: Περιοριστικές τιμές καθιζήσεων - μετακινήσεων σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Αττικό Μετρό Α.Ε. .

Σημείωση (1) Οποιαδήποτε κτίριο ή κατασκευή από τοιχοποιία, αργολιθοδομή ή παρόμοια δομή, μνημείο ή αρχαιότητα, ήδη βλαμμένα ή τρατά κτίρια, αποχετευτικά συστήματα μεγάλης διατομής, γέφυρες κ.α.(2) Ειδικότερα για θεμελιώσεις κτιρίων που γειτνιάζουν με βαθιές εκσκαφές και ανοικτά ορύγματα.

11.2. Αξιολόγηση αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια

Σύμφωνα με τις αναλύσεις της Α.Μ. οι αξονικές δυνάμεις επί των ηλώσεων βράχου παρουσιάζονται στο σχήμα 31



Σχήμα 31: Αξονικές Δυνάμεις επί των Ηλώσεων Βράχου (Τεχνική έκθεση ΛΟΜΙ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ 2007)

- Παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις επί των αγκυρίων είναι ουσιαστικά αμελητέες (μέγιστη αξονική 10kN) όπως σχολιάζεται και από την Αττικό Μετρό Α.Ε. Συνεπώς οι εφαρμοζόμενες ηλώσεις βράχου κρίνονται επαρκείς.
- Με την χρήση του FLAC7 οι αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια δεν ξεπερνούν τα 7,9kN ενώ με το PHASE² οι δυνάμεις που ασκούνται στα κάτω αγκύρια παρουσιάζουν ελαφρώς αυξημένες τιμές σε σχέση με αυτές του FLAC7 και της Α.Μ..

Με βάση τα παραπάνω οι αναλύσεις με FLAC7 και PHASE² όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις επί των ηλώσεων βράχου συγκλίνουν με τα αποτελέσματα της Αττικό Μετρό Α.Ε.

12. Παραμετρική ανάλυση σήραγγας πρόσβασης του σταθμού «Ελληνικό»

12.1. Εισαγωγή

Οι τιμές των μεγεθών που μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας (εδαφικές μετακινήσεις, αξονικές δυνάμεις στα μέτρα υποστήριξης σήραγγας, ζώνες πλαστικοποίησης κλπ) δεν παρουσιάζουν επικινδυνότητα για την ευστάθεια της σήραγγας. Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της μεταβολής βασικών παραμέτρων του προβλήματος, διατηρώντας σταθερά τα υπάρχοντα μέτρα προσωρινής αντιστήριξης, με σκοπό να προσδιορισθούν οι οριακές τιμές τους για την αστοχία των αγκυρίων και την υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους.

12.2. Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας (Eo) στη στρωματογραφία

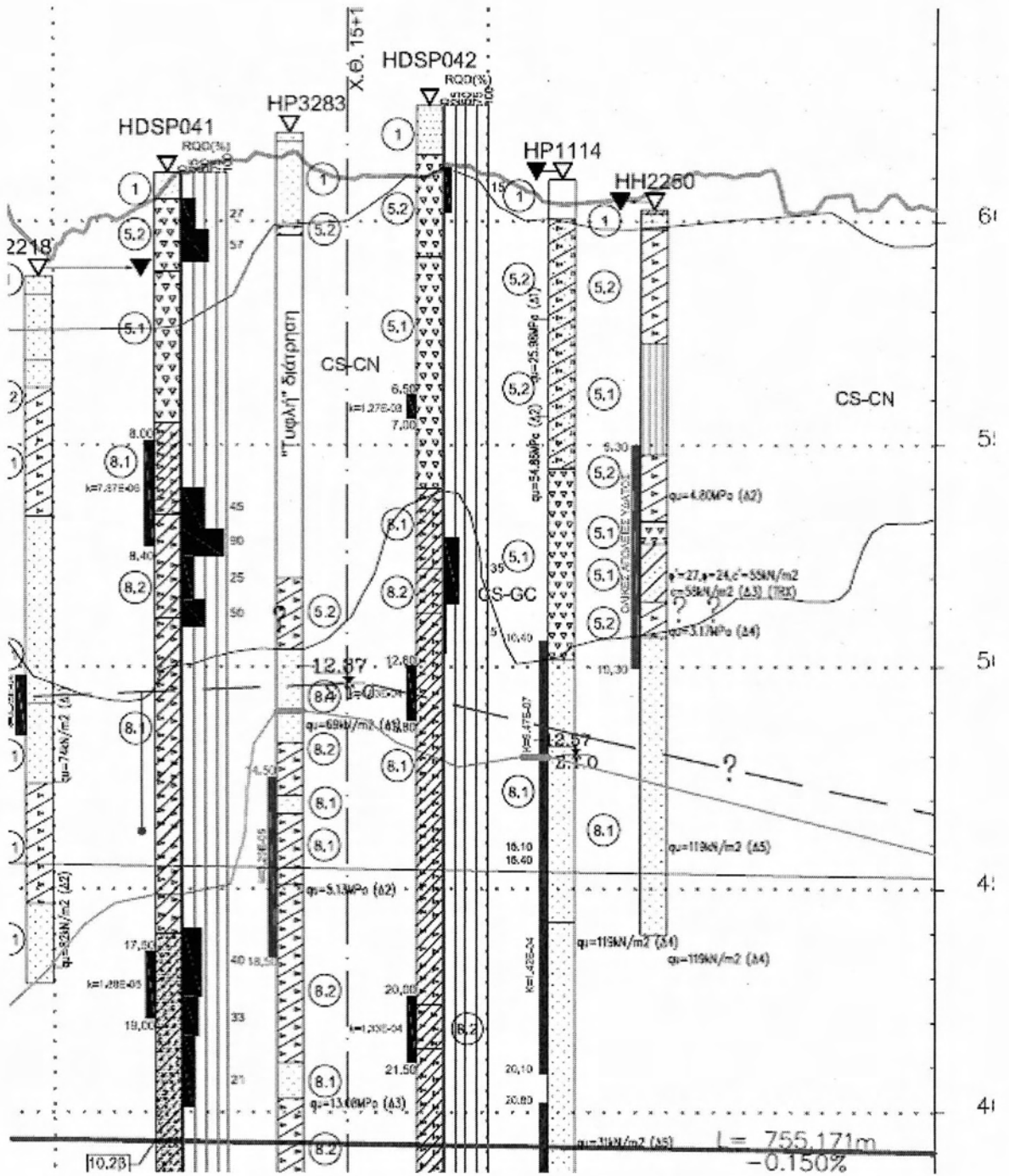
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας (Eo) των υλικών της στρωματογραφίας στις καθιζήσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους, στην οροφή και στη βάση της σήραγγας. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια και τα διαγράμματα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις γεωτρήσεις στην περιοχή γύρω από την σήραγγα παρατηρείται μεγάλη ανομοιογένεια σε σχετικά μικρές αποστάσεις μεταξύ τους.

Στο σχήμα 32 διακρίνονται σε οριζοντιογραφία οι θέσεις και οι αποστάσεις μεταξύ των κύριων γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής γύρω από την σήραγγα πρόσβασης.

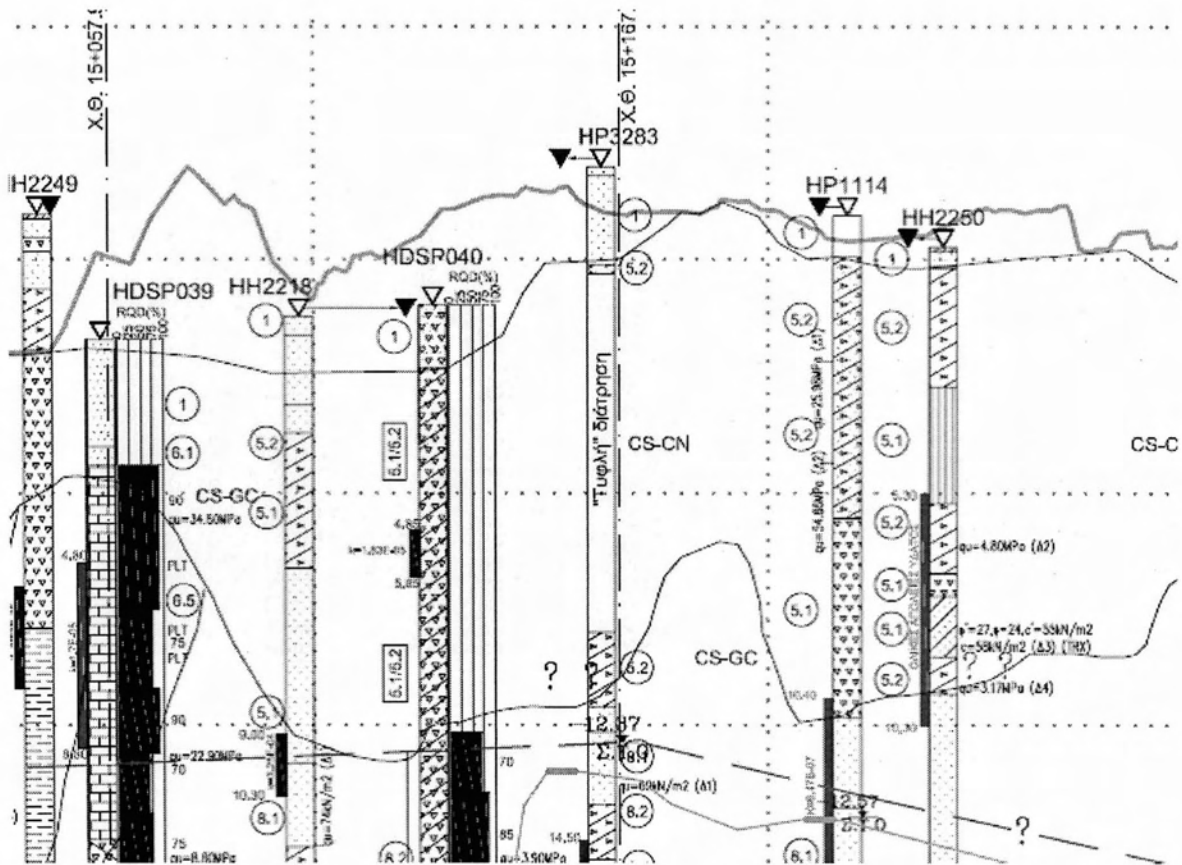


Σχήμα 32: Θέσεις κύριων γεωτρήσεων

Οι σχηματισμοί των γεωτρήσεων HDSP041 , HESP042 , HH2218 , HP3283 φαίνονται στα σχήματα 33 και 34



Σχήμα 33: Γεωλογική - Γεωτεχνική - Υδρογεωλογική Μηκτομή 1 (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

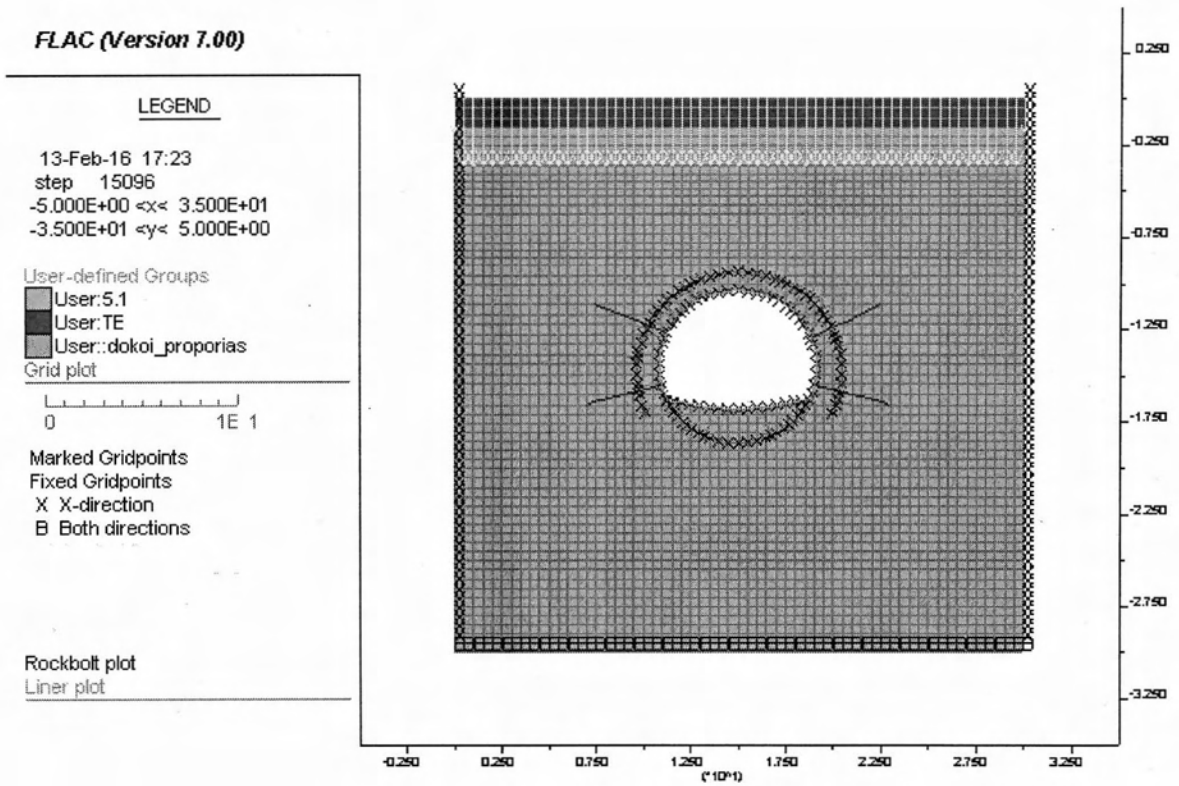


Σχήμα 34: Γεωλογική – Γεωτεχνική –Υδρογεωλογική Μηκοτομή 2 (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

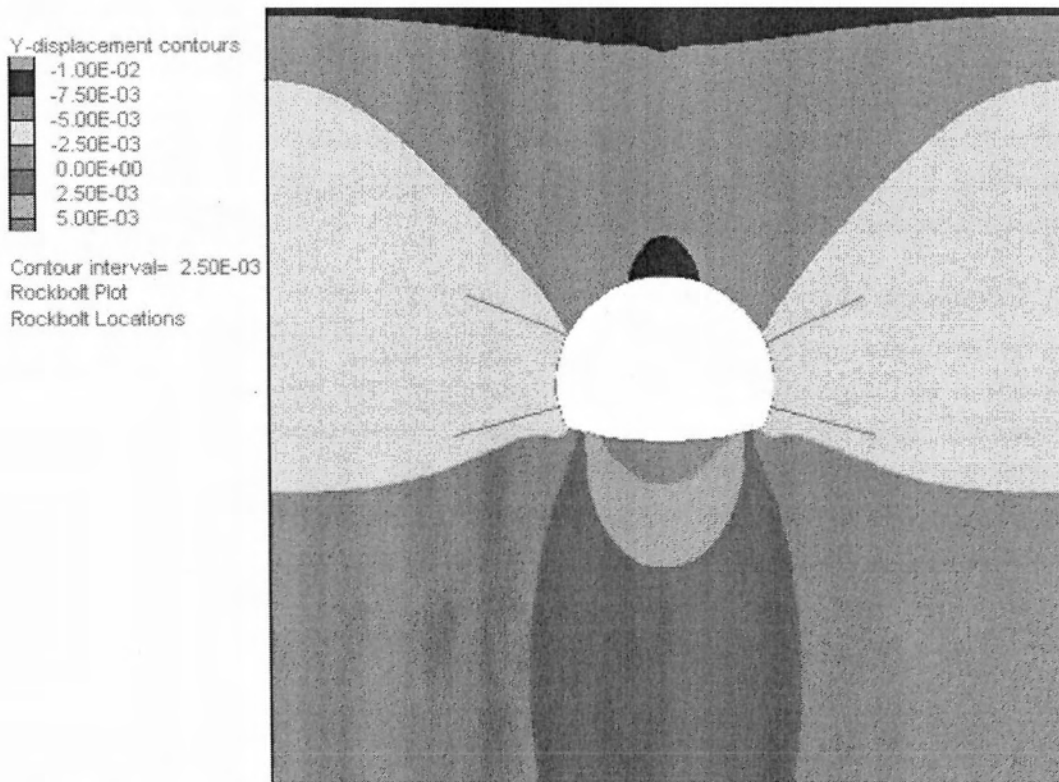
Για την παραμετρική ανάλυση έγινε προσομοίωση της δυσμενέστερης, με βάση το μέτρο ελαστικότητας (E_0), στρωματογραφίας. Η δυσμενέστερη προσομοιώθηκε με τον σχηματισμό Συνεκτικών Κορηματικών Υλικών 5.1 σε όλη την έκταση της γεωλογικής τομής ο οποίος παρουσιάζει το μικρότερο E_0 .

12.2.1. Ανάλυση για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0

Στην ανάλυση αυτή αντικαθίστανται οι γεωλογικοί σχηματισμοί της γεωτεχνικής τομής σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση από την γεωτεχνική ενότητα των Συνεκτικών Κορηματικών Υλικών 5.1 που παρουσιάζει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας ($E_0 = 2 \times E = 240\text{MPa}$) (σχήμα 35). Η προσομοίωση αυτή κρίνεται απαραίτητη αναλογιζόμενοι την ανομοιογένεια των αποτελεσμάτων των γεωτρήσεων.



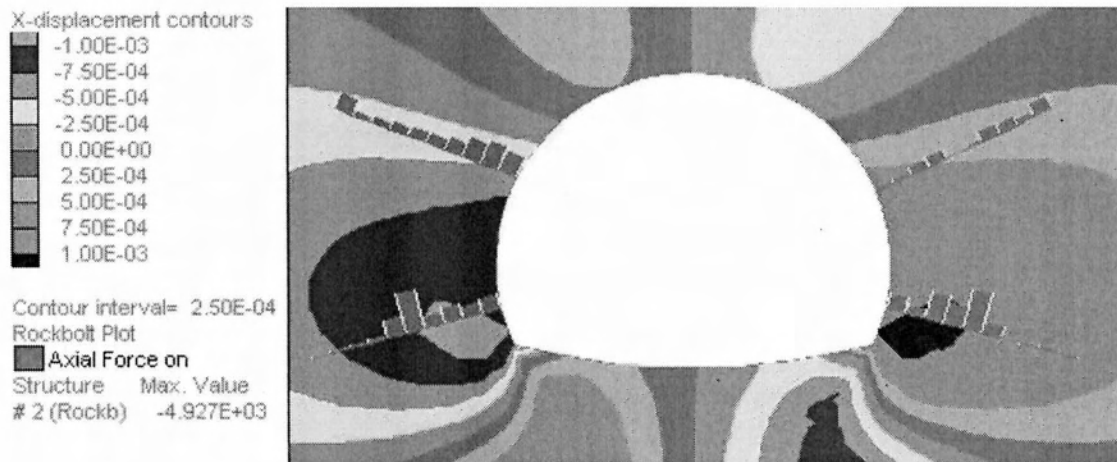
Σχήμα 35: Προσομοίωση για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0



Σχήμα 36: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις ανάλυσης για σχηματισμό 5.1 σε FLAC 7.0

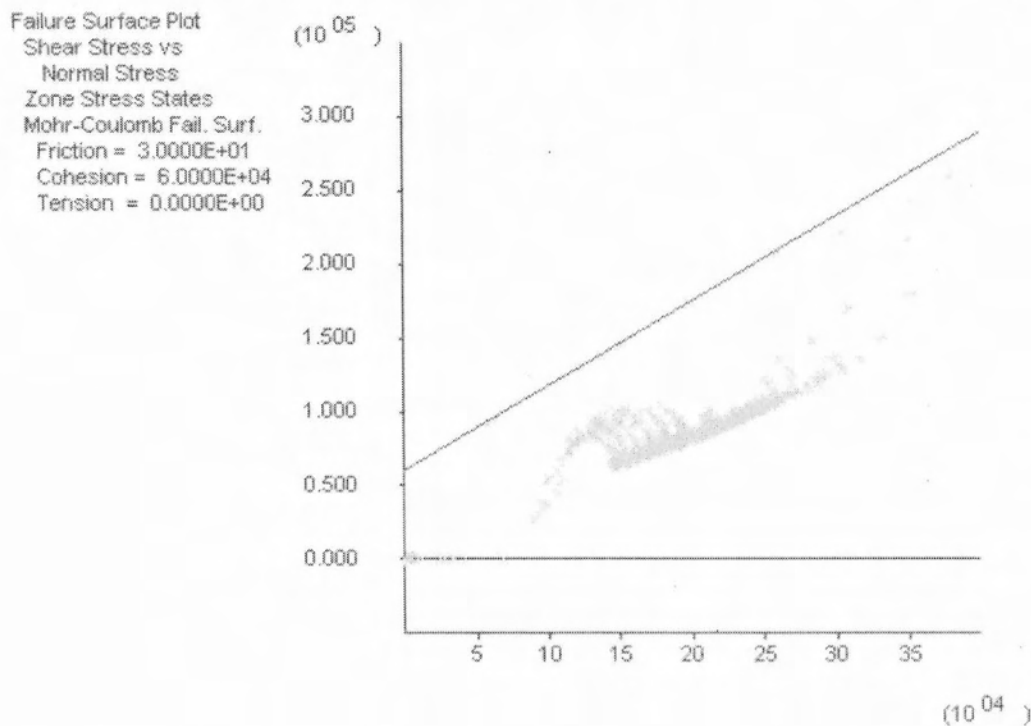
Για την προσομοίωση της σήραγγας με 100% του Eo:

- Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι 10mm .
- Η μέγιστη καθίζηση στην οροφή της σήραγγας είναι 7,5 mm
- Η μέγιστη αποτόνωση στη στέψη -5mm



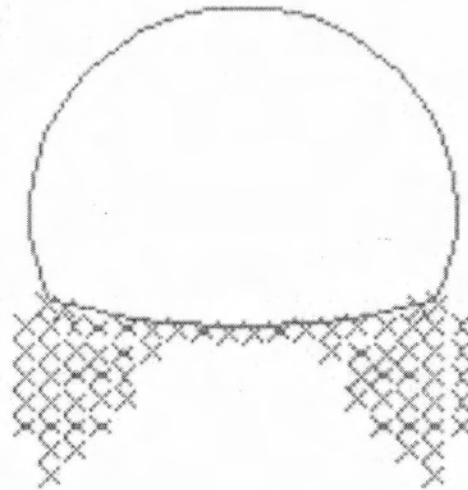
Σχήμα 37: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 5.1 100% Eo (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στα αγκύρια είναι -4,9KN. Για τον εντοπισμό των πλαστικοποιημένων στοιχείων έγινε χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με συνοχή $c=60\text{MPa}$ και γωνία τριβής $\phi=30^\circ$.



Σχήμα 38: Περιβάλλουσα αστοχίας για 100% Eo (FLAC 7.0)

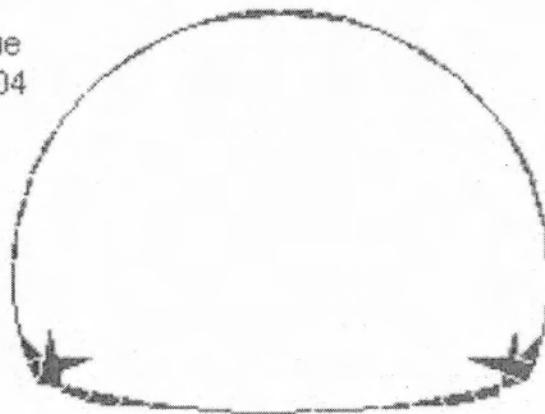
Plasticity Indicator
X elastic, at yield in past



Σχήμα 39: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 100% E₀ (FLAC 7.0)

Η διαρροή κάποιων στοιχείων στην βάση της σήραγγας είναι σε εφελκυσμό και η ακτίνα πλαστικοποίησης είναι 70 cm.

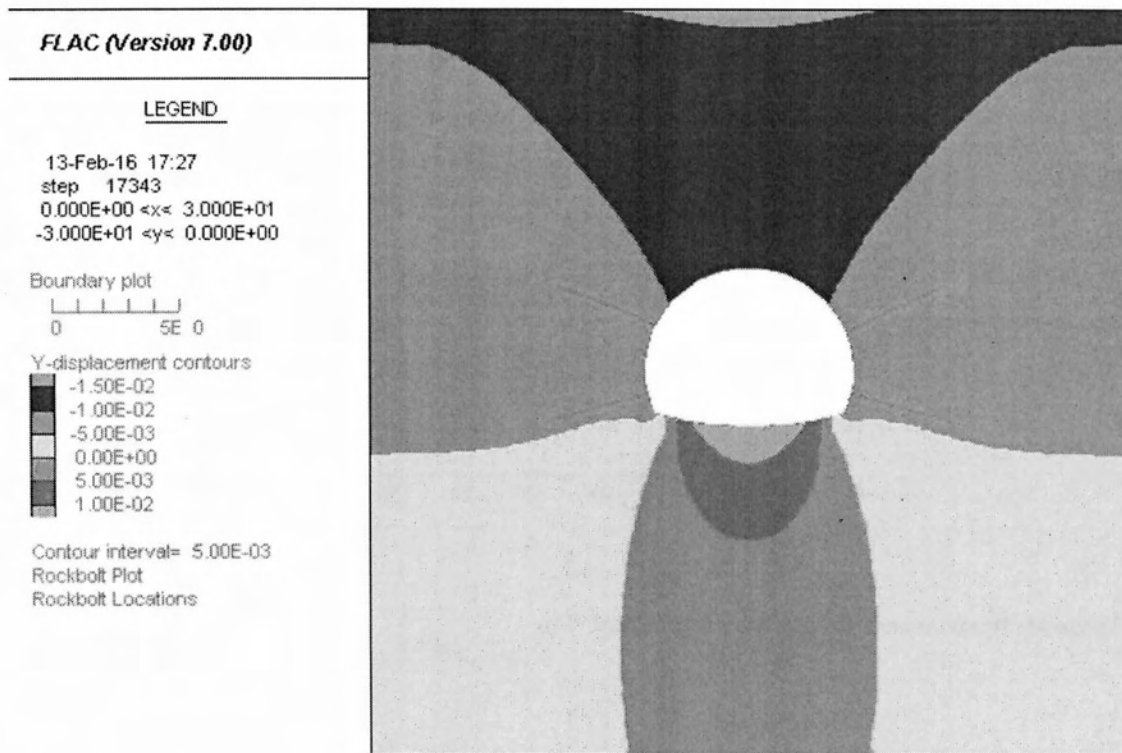
Liner Plot
■ Moment on
Structure Max. Value
1 (Liner) 6.331E+04



Σχήμα 40: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 100% E₀ (FLAC 7.0)

Η μέγιστη ροπή που εμφανίζεται, ισούται με 63 kN.

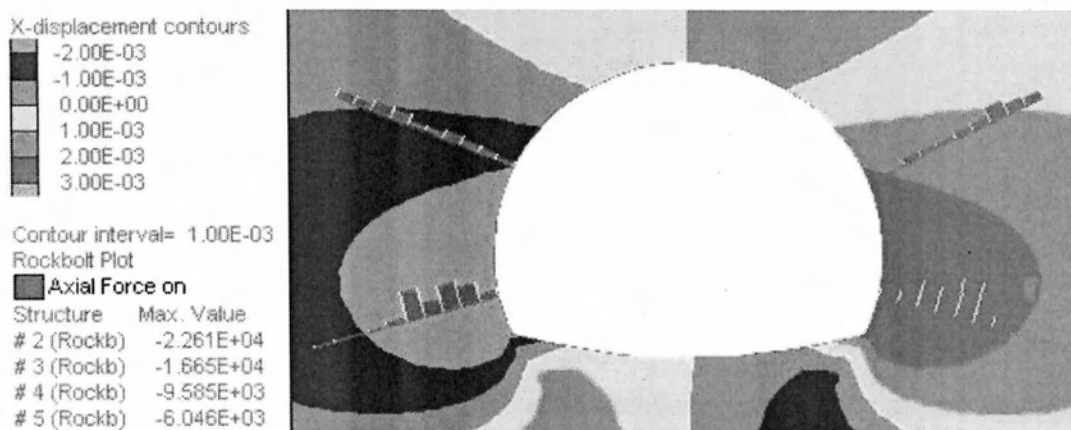
12.2.2. Ανάλυση με 50% Eo για σχηματισμό 5.1



Σχήμα 41: Κατακόρυφες μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 50% Eo (FLAC 7.0)

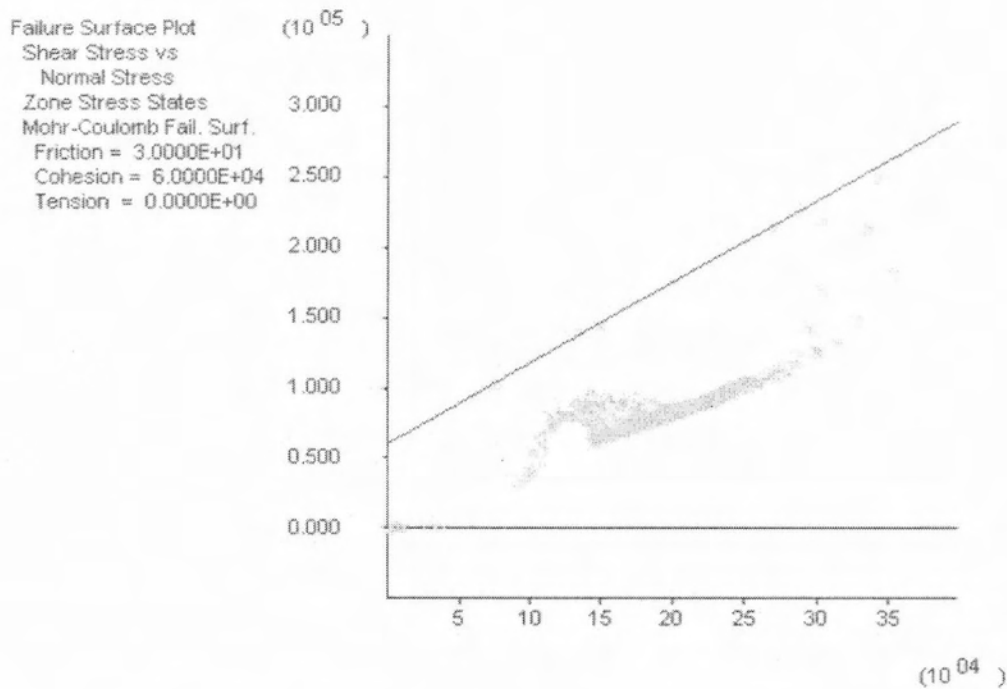
Για την προσομοίωση της σήραγγας με 50% Eo:

- Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι 15mm .
- Η μέγιστη καθίζηση στην οροφή της σήραγγας είναι έως 10mm
- Η μέγιστη αποτόνωση στη στέψη -10 mm



Σχήμα 42: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 5.1 50% Eo (FLAC 7.0)

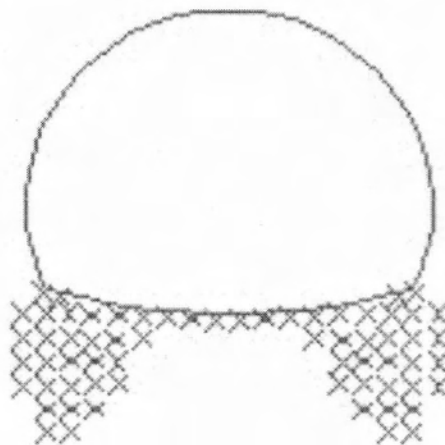
Παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στα αγκύρια είναι -22,6KN



Σχήμα 43: Περιβάλλουσα αστοχίας για 50% E₀ (FLAC 7.0)

Για τον εντοπισμό των πλαστικοποιημένων στοιχείων έγινε χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με συνοχή $c=60\text{MPa}$ και γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$

Plasticity Indicator
 X elastic, at yield in past



Σχήμα 44: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 50% E₀ (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην ελαστική περιοχή .

Liner Plot
 Moment on
 Structure Max. Value
 # 1 (Liner) 9.230E+04



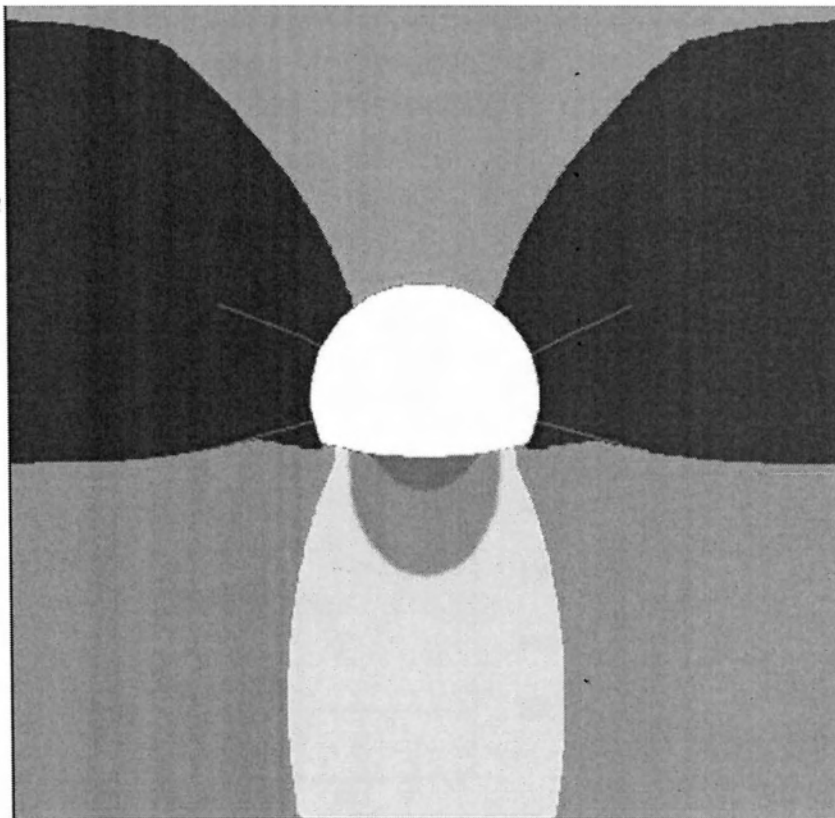
Σχήμα 45: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 50% Eo (FLAC 7.0)

Μέγιστη ροπή 92kNm

12.2.3. Ανάλυση με 25% Eo για σχηματισμό 5.1

Y-displacement contours
 -2.00E-02
 -1.00E-02
 0.00E+00
 1.00E-02
 2.00E-02

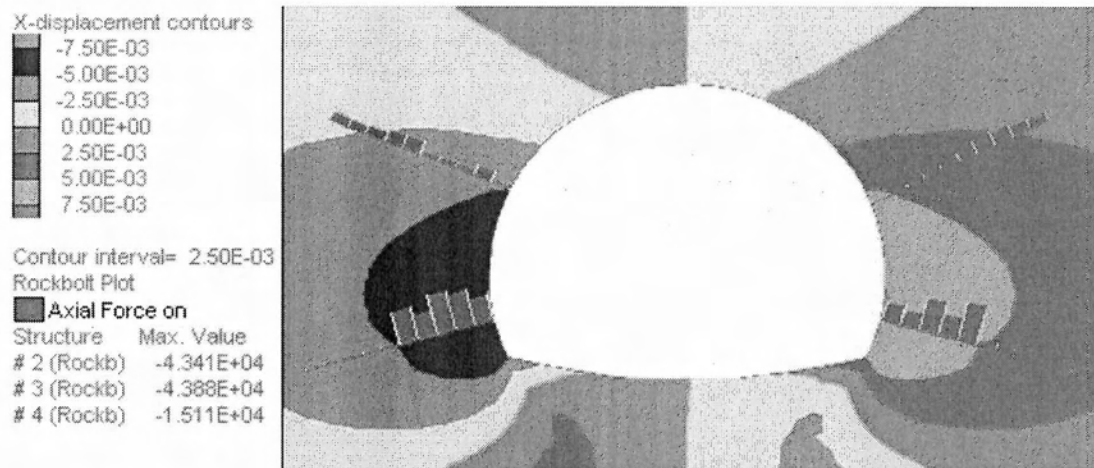
Contour interval= 1.00E-02
 Rockbolt Plot
 Rockbolt Locations



Σχήμα 46: Κατακόρυφες Μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 25% Eo (FLAC 7.0)

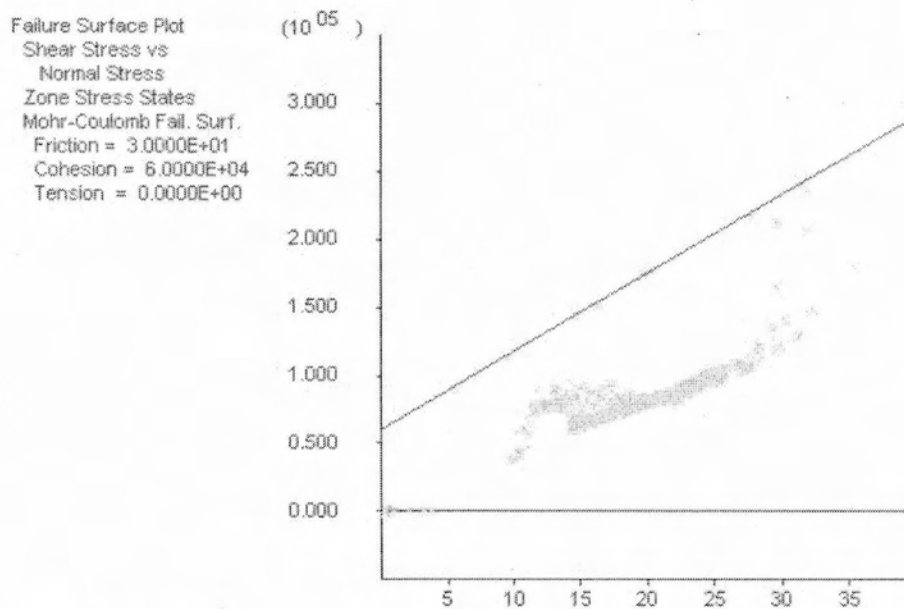
Για την προσομοίωση της σήραγγας με 25% Eo:

- μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι 20mm .
- Η μέγιστη καθίζηση στην οροφή της σήραγγας είναι έως 20mm
- Η μέγιστη αποτόνωση στη στέψη -20 mm



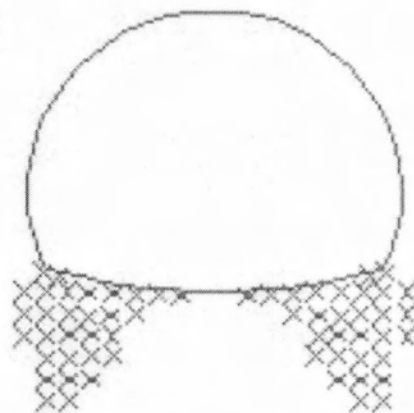
Σχήμα47: Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων για εδαφικό σχηματισμό 25% Eo (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στα αγκύρια είναι -43,8KN. Για τον εντοπισμό των πλαστικοποιημένων στοιχείων έγινε χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με συνοχή $c=60\text{MPa}$ και γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$.



Σχήμα48: Περιβάλλουσα αστοχίας για 25% Eo (FLAC 7.0)

Plasticity Indicator
X elastic, at yield in past



Σχήμα 49: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 25% Eo (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην ελαστική περιοχή

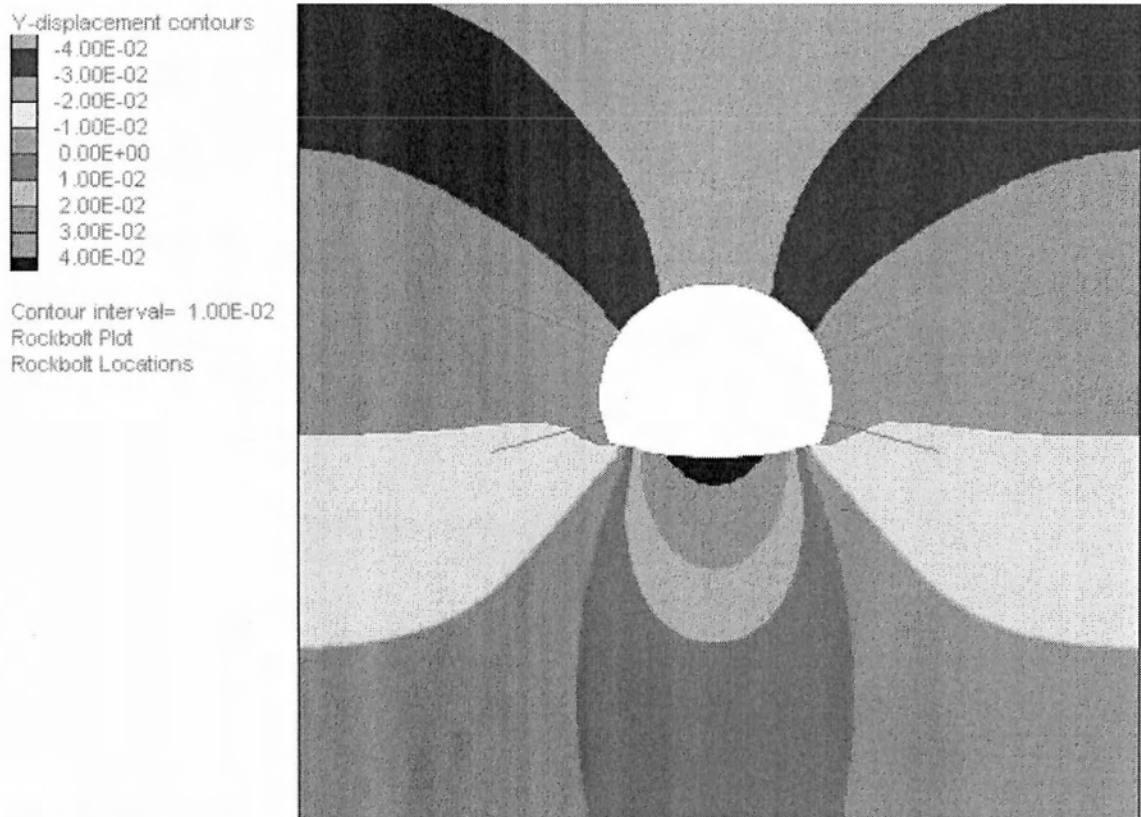
Liner Plot
■ Moment on
Structure Max. Value
1 (Liner) -1.286E+05



Σχήμα 50: διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 25% Eo (FLAC 7.0)

Μέγιστη ροπή -128,6kNm

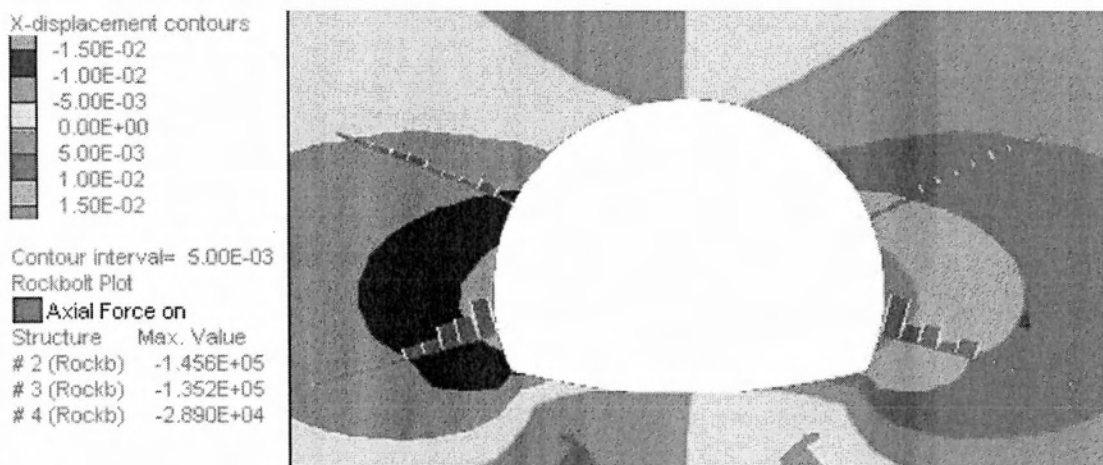
12.2.4. Ανάλυση με 12,5% Eo για σχηματισμό 5.1



Σχήμα 51: Κατακόρυφες μετατοπίσεις ανάλυσης για εδαφικό σχηματισμό 5.1 12,5% Eo (FLAC 7.0)

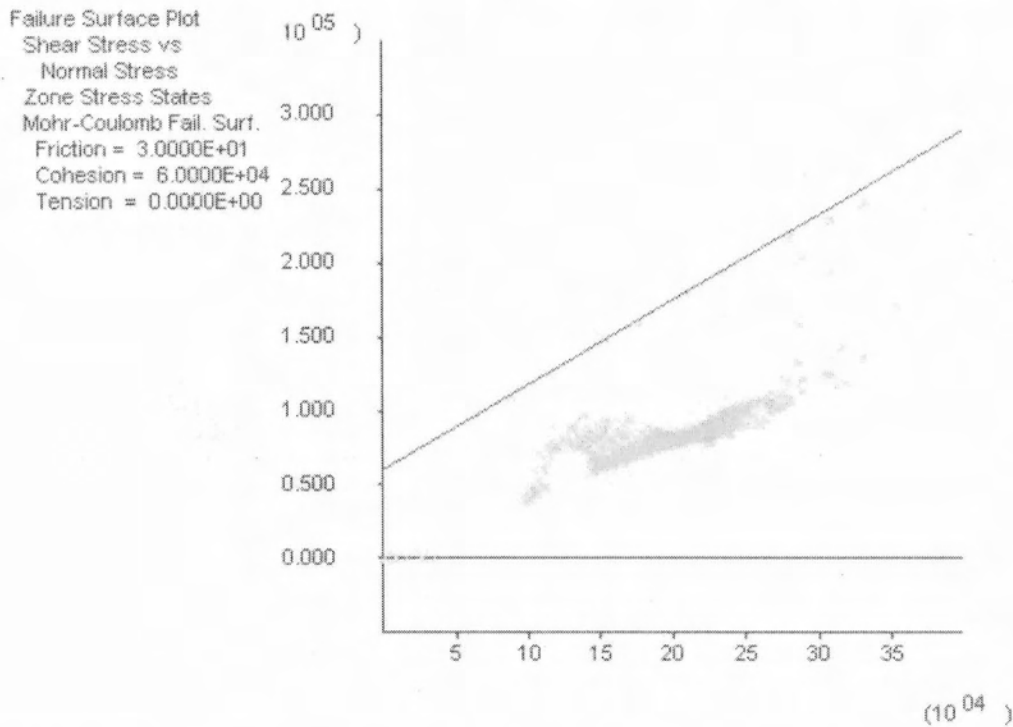
Για την προσομοίωση της σήραγγας με 12,5% Eo:

- Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι 40mm .
- Η μέγιστη καθίζηση στην οροφή της σήραγγας είναι έως 40mm
- Η μέγιστη αποτόνωση στη στέψη -40 mm



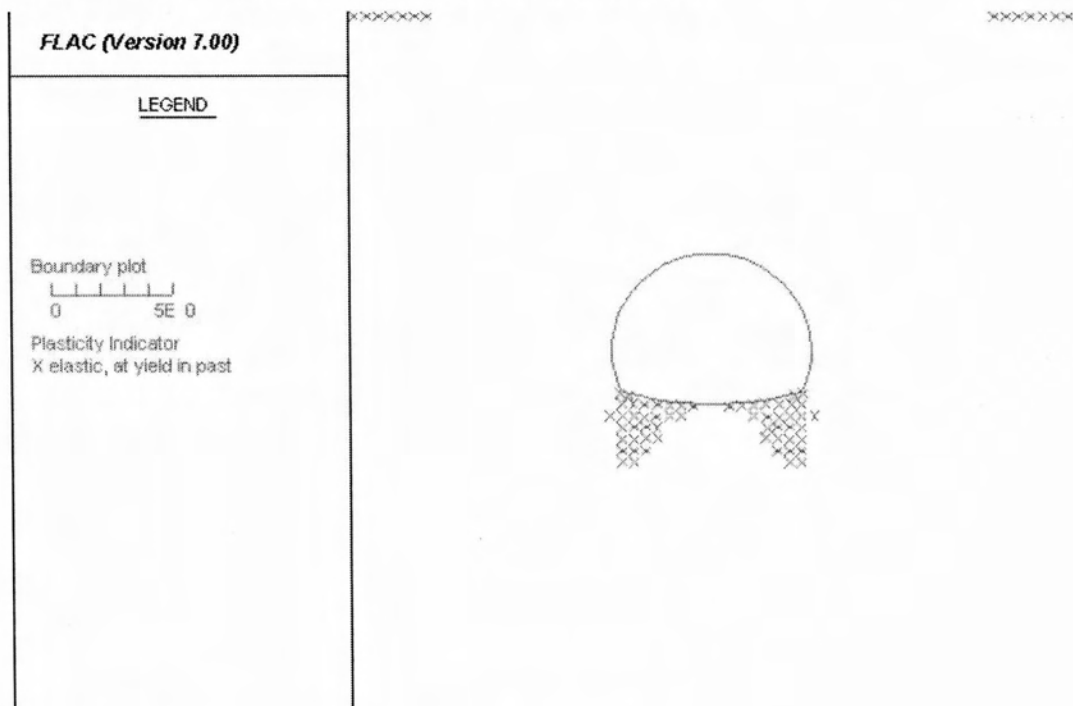
Σχήμα 52: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για εδαφικό σχηματισμό 5.1 12,5% Eo (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στα αγκύρια είναι -145,6KN



Σχήμα 53: Περιβάλλουσα αστοχίας για 12,5% Eo (FLAC 7.0)

Για τον εντοπισμό των πλαστικοποιημένων στοιχείων έγινε χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με συνοχή $c=60\text{MPa}$ και γωνία τριβής $\phi=30^\circ$



Σχήμα 54: Πλαστικοποίηση στοιχείων για 12,5% Eo (FLAC 7.0)

Παρατηρείται ότι όλα τα στοιχεία βρίσκονται στην ελαστική περιοχή.

Liner Plot
■ Moment on
Structure Max. Value
1 (Liner) 1.728E+05



Σχήμα 55: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για 12,5 Eo (FLAC 7.0)

Μέγιστη ροπή -172,8kNm.

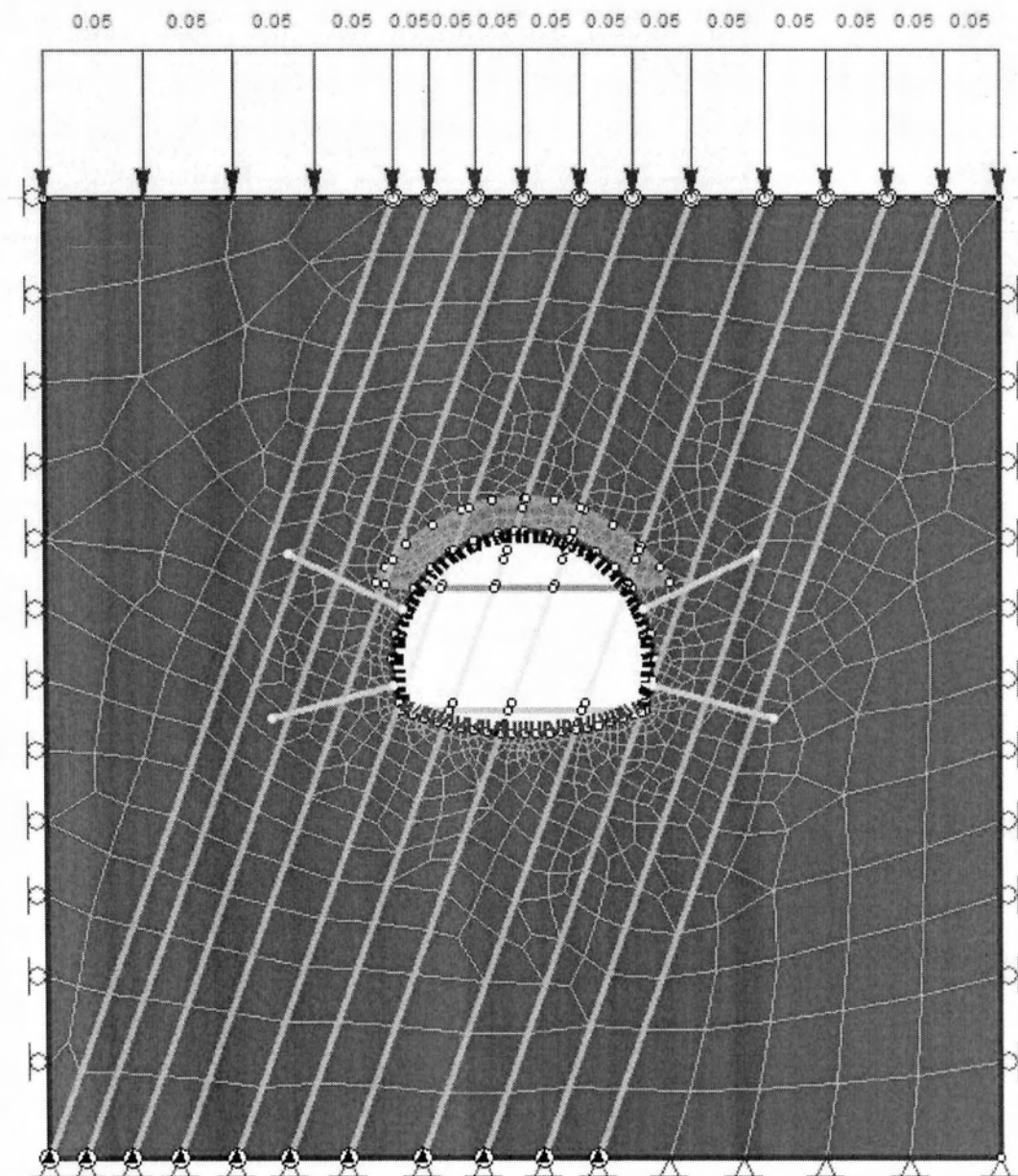
Για μείωση του Eo στο 12,5% η ανοιγμένη παραμόρφωση του αγκυρίου με την μεγαλύτερη καταπόνηση είναι 0,117% < 0,217%. Άρα δεν υπάρχει διαρροή των αγκυρίων ούτε για αυτές τις συνθήκες. Παρ' όλα αυτά όμως οι καθιζήσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους είναι κατά 10mm μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπόμενες από την Αττικό Μετρό.

12.3. Μελέτη της επίδρασης ασυνεχειών

Για την μελέτη της επίδρασης των ασυνεχειών στα μέτρα αντιστήριξης και τις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PHASE² v.6.0. Η συγκεκριμένη έκδοση έχει την ικανότητα να προσημειώσει μια μεμονωμένη ασυνέχεια (διάκλαση) αλλά όχι δίκτυο ασυνεχειών. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα δίκτυο παράλληλων διαρρήξεων/διακλάσεων (joints) με ανοιχτό άκρο στην ελεύθερη επιφάνεια και κλειστό σε βάθος -30.0 m. Οι διακλάσεις τοποθετήθηκαν με απόσταση μεταξύ τους 1,5 m. Θεωρείται ότι ο προσανατολισμός τους είναι κάθετος με το επίπεδο της διατομής και έχουν γωνία θ περίπου 70° (διεύθυνση μέγιστων ολικών μετατοπίσεων αρχικής ανάλυσης). Οι δυσκαμψίες των ελατηριακών σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι προεπιλεγμένες του προγράμματος. Ως εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκε και σε αυτήν την ανάλυση ο σχηματισμός 5.1 ο οποίος έχει τα δυσμενέστερα μηχανικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζει ασυνέχειες. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb με γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ και συνοχή $c=0$. (NTUA, 2016)

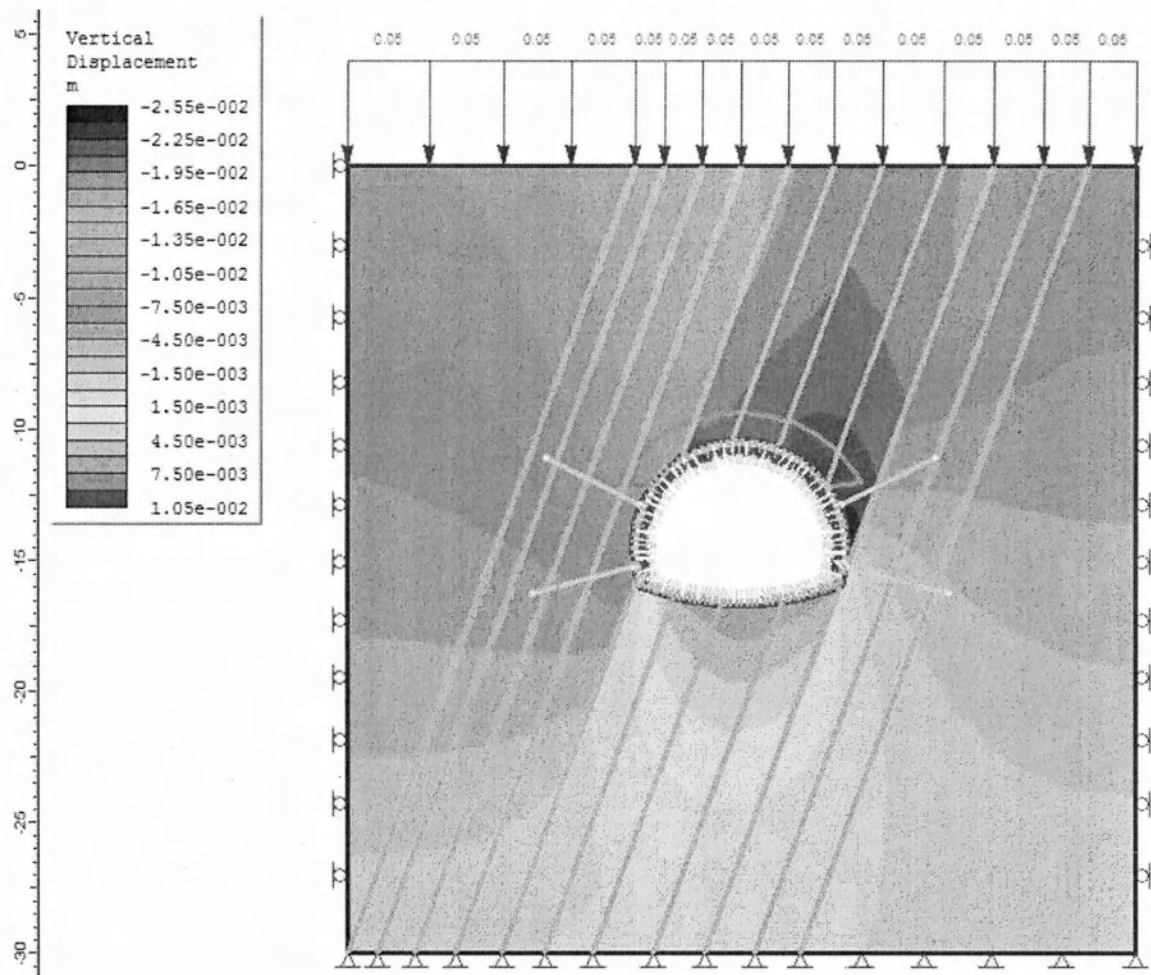
Θα μελετηθούν οι ολικές μετατοπίσεις και η καταπόνηση των μέτρων αντιστήριξης για μεταβολή της γωνίας και τις σχετικής απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών καθώς και η επίδραση της γωνίας τριβής στο κριτήριο αστοχίας.

$\theta=70^\circ$, απόσταση 1,5m, $\varphi=35^\circ$



Σχήμα 56: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase2 για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

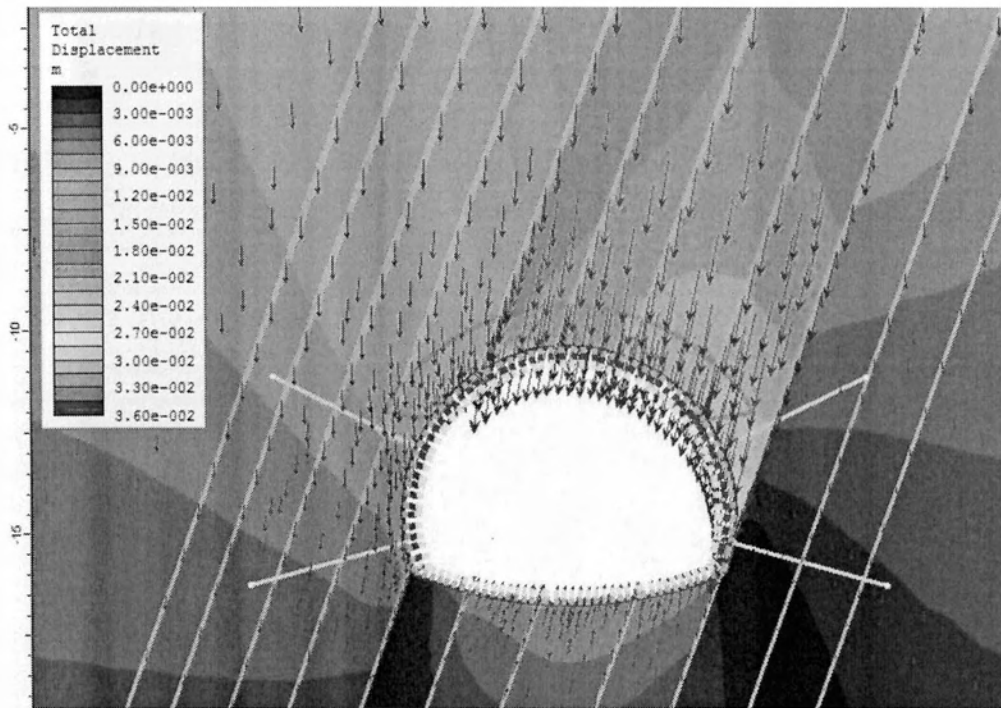
Καθίσεις



Σχήμα 57: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

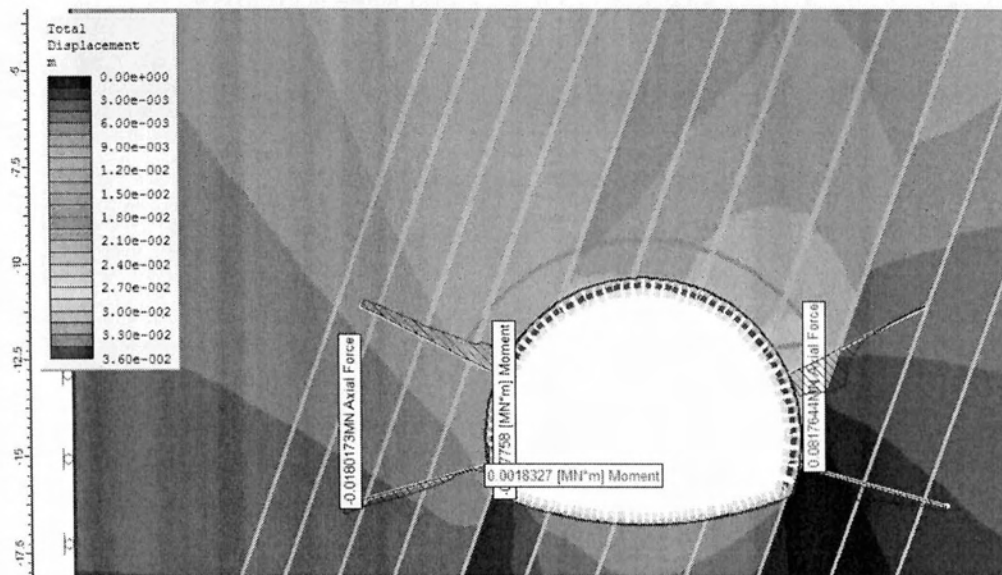
Μέγιστη καθίζηση στην ελεύθερη επιφάνεια: 13.0mm

Ολικές μετατοπίσεις



Σχήμα 58: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5\text{m}$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

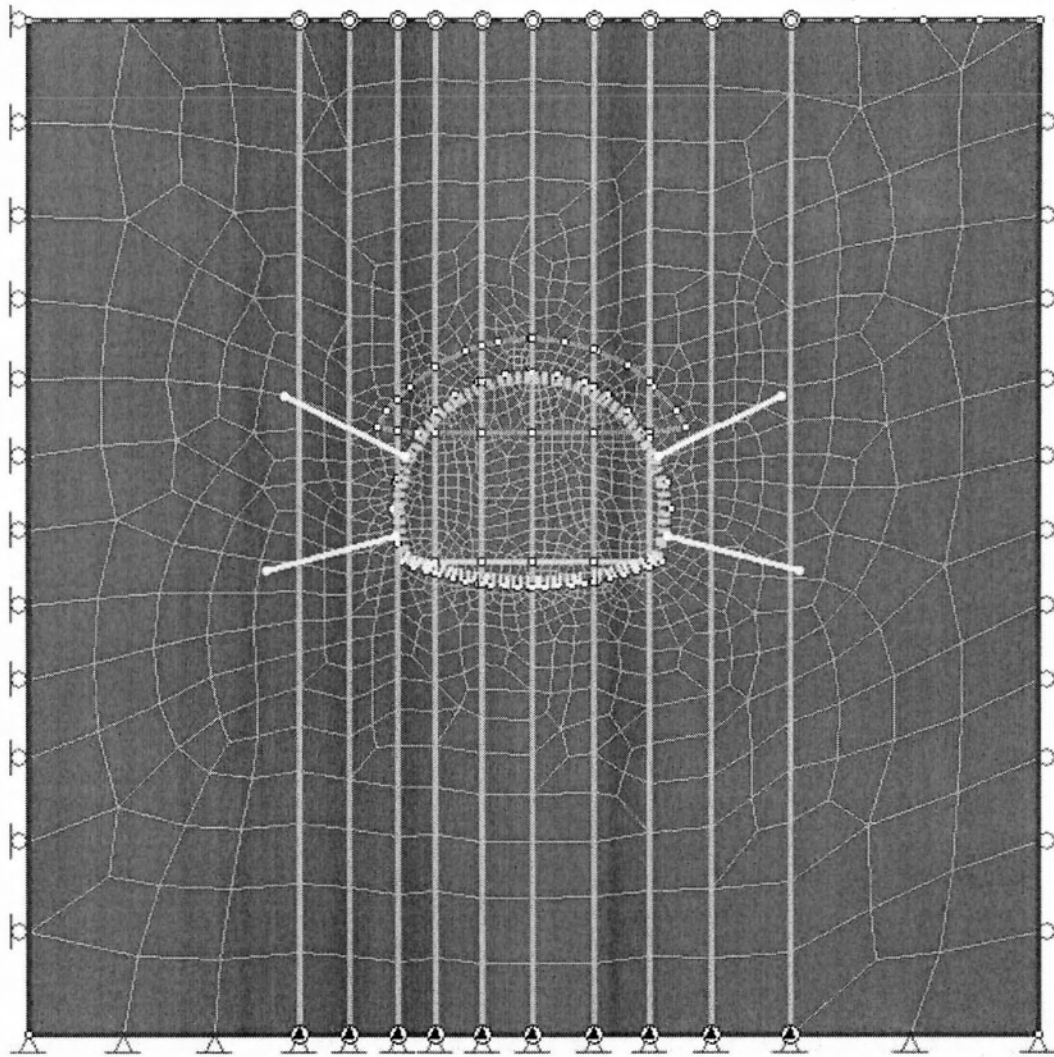
Καταπόνηση μέτρων αντιστήριξης



Σχήμα 59: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=70^\circ$, $d=1,5\text{m}$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

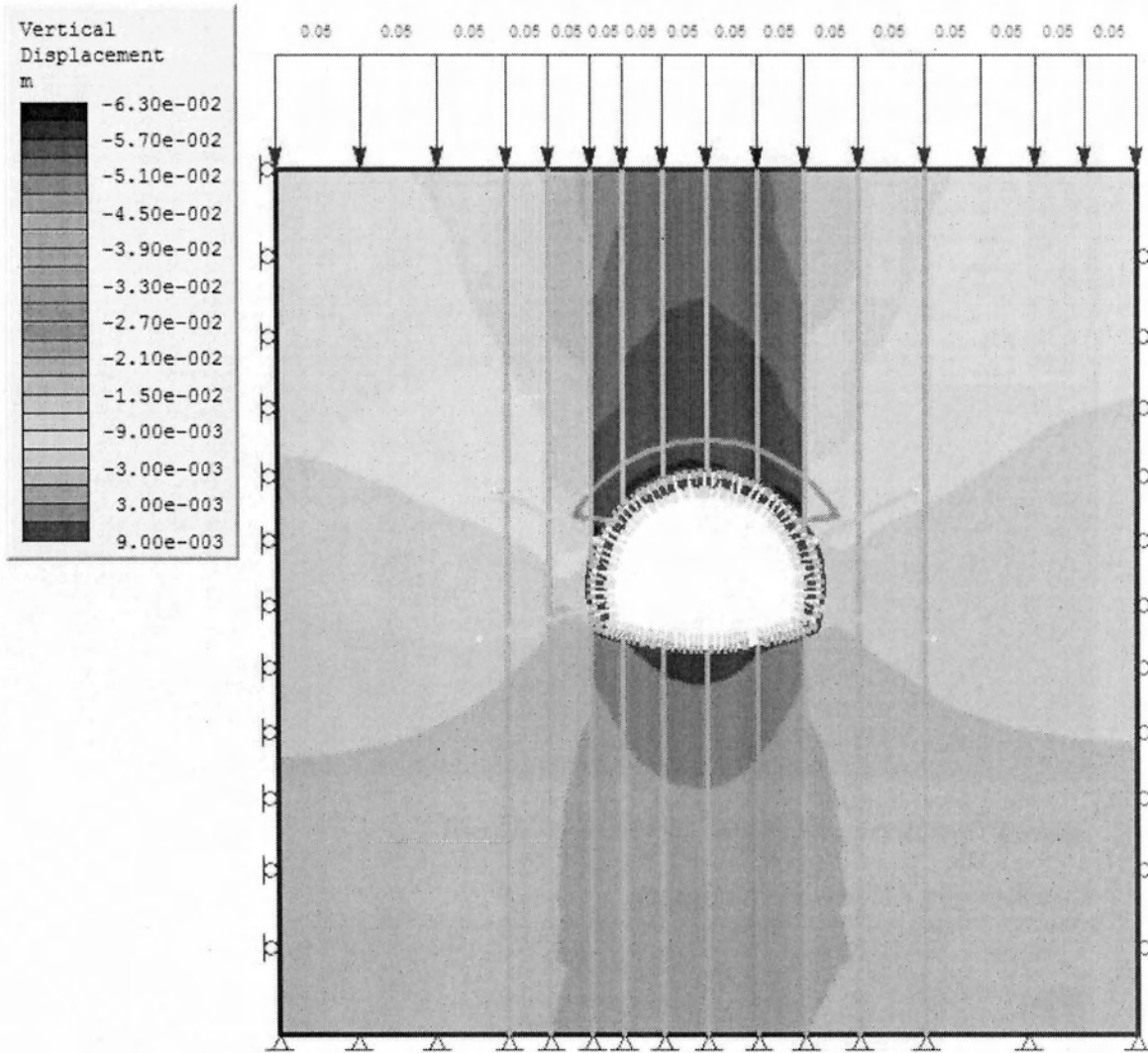
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 90kN,
- Μεγίστη καμπτική ροπή στο σκυρόδεμα 2.23 kN·m

$\theta=90^\circ$, απόσταση 1,5m, $\varphi=35^\circ$



Σχήμα 60: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase² για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$

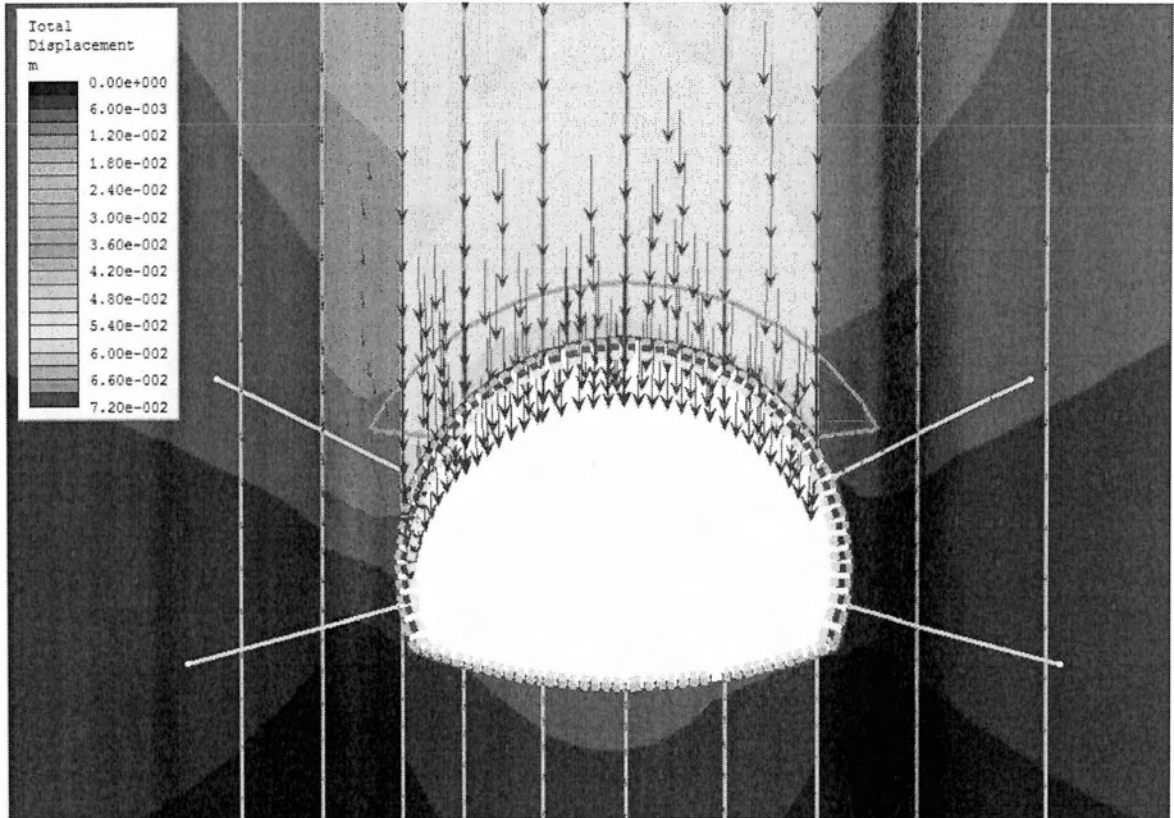
Καθιζήσεις



Σχήμα 61: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=90^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

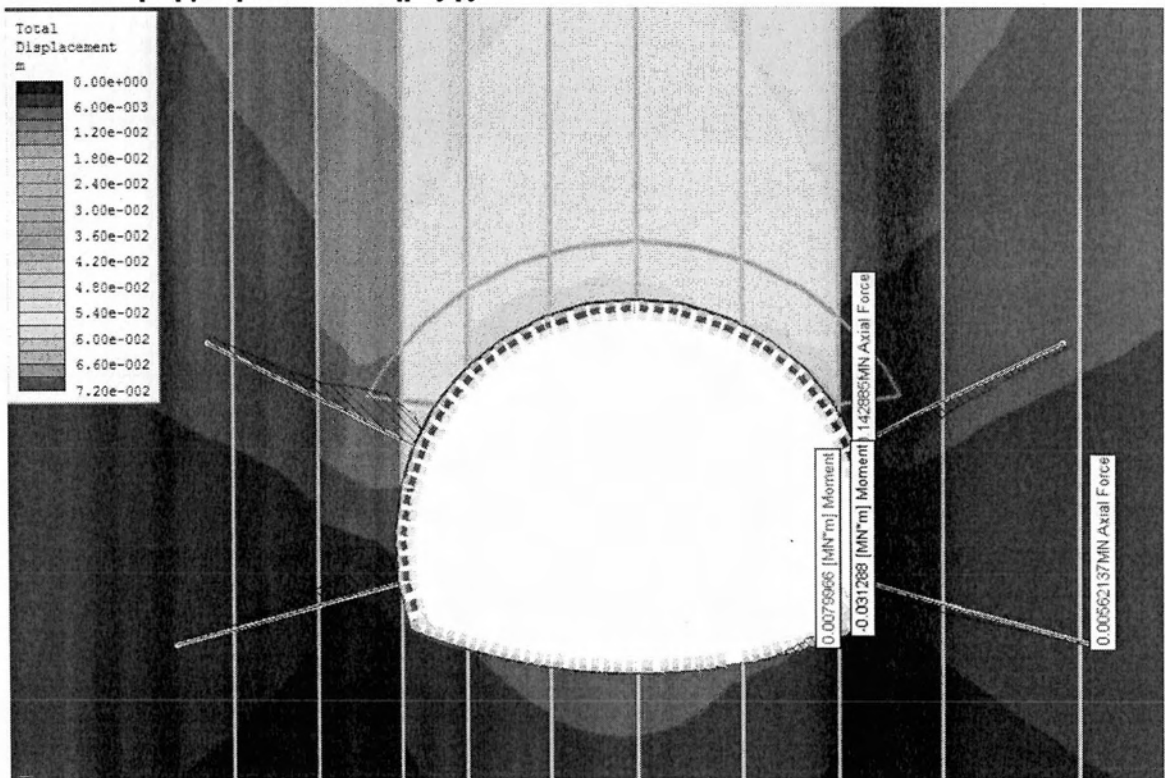
Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια είναι 53.0 mm και έχουν ξεπεράσει τις μέγιστες επιτρεπόμενες καθώς η οριακή τιμή ισούται με 30mm σύμφωνα με τον πίνακα 6.

Ολικές μετατοπίσεις



Σχήμα 62: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=90^0$, $d=1,5m$, $\varphi=35^0$ (Phase2)

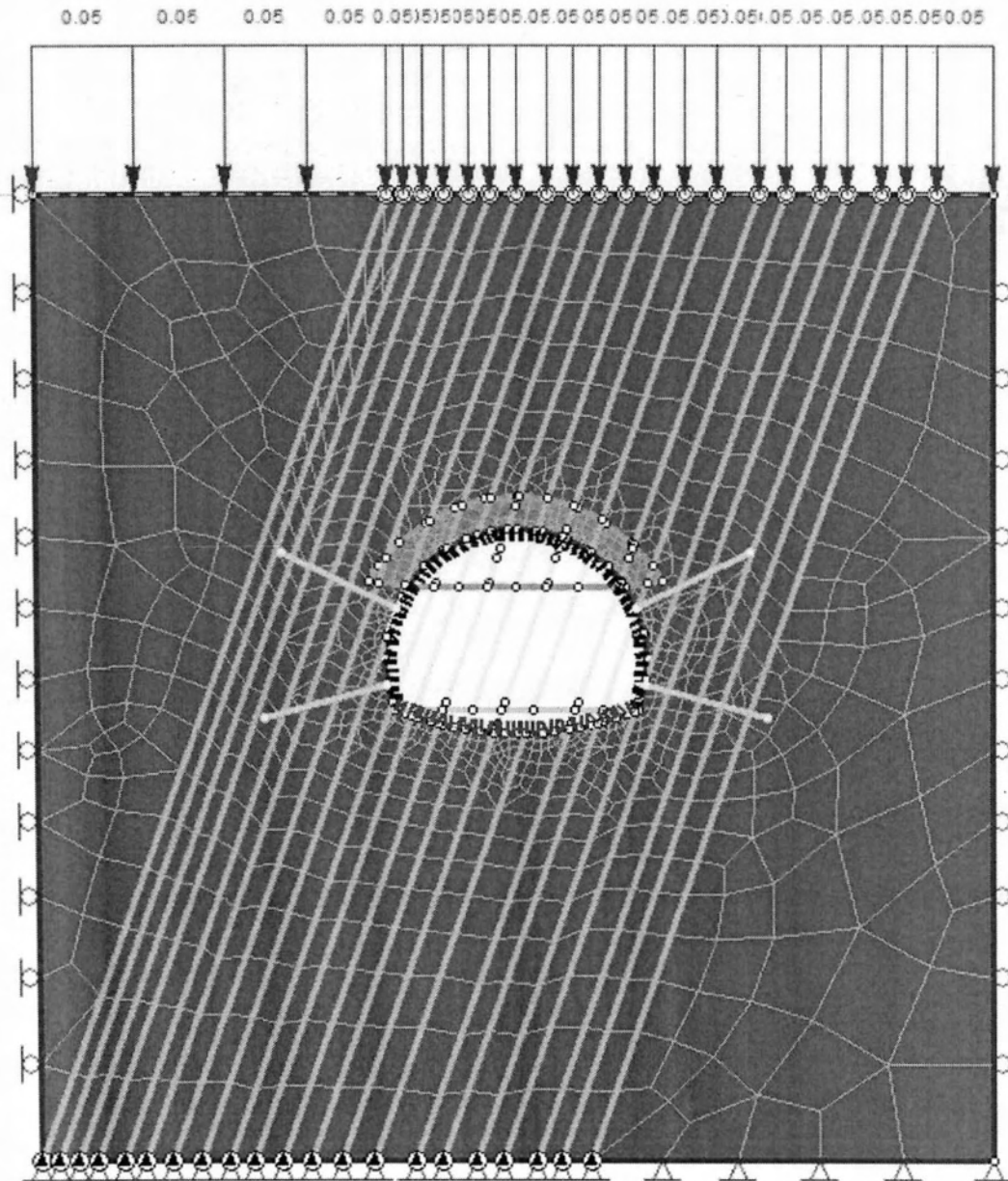
Καταπόνηση μέτρων αντιστήριξης



Σχήμα 63: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=90^0$, $d=1,5m$, $\varphi=35^0$ (Phase2)

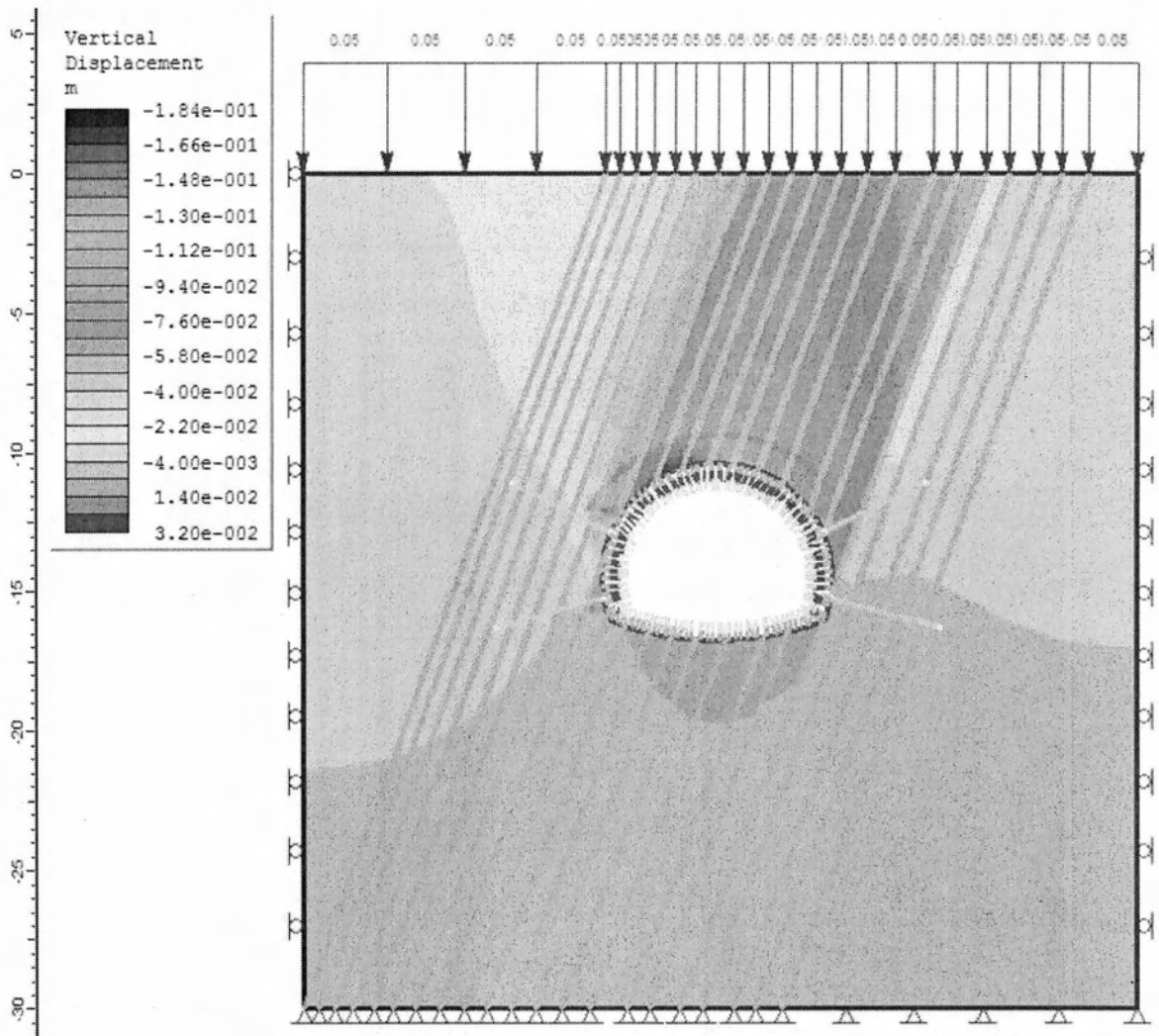
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 142,9kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή στο σκυρόδεμα: 8.0 kN·m

$\theta=70^{\circ}$, απόσταση 0,75m , $\varphi=35^{\circ}$



Σχήμα 64: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase² για $\theta=70^{\circ}$, $d=0,75m$, $\varphi=35^{\circ}$

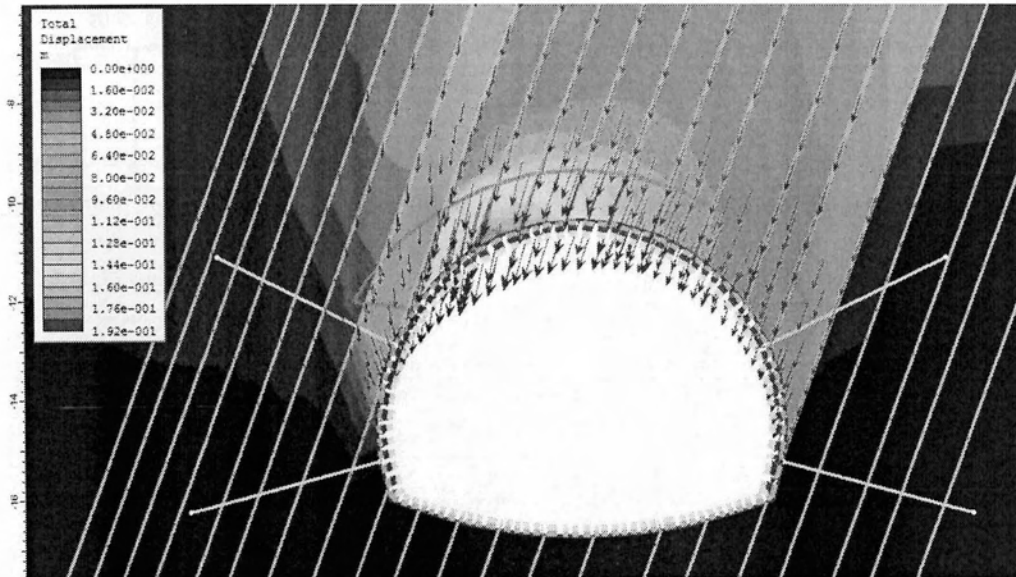
Καθιζήσεις



Σχήμα 65: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=0,75\text{m}$, $\varphi=35^\circ$ (Phase2)

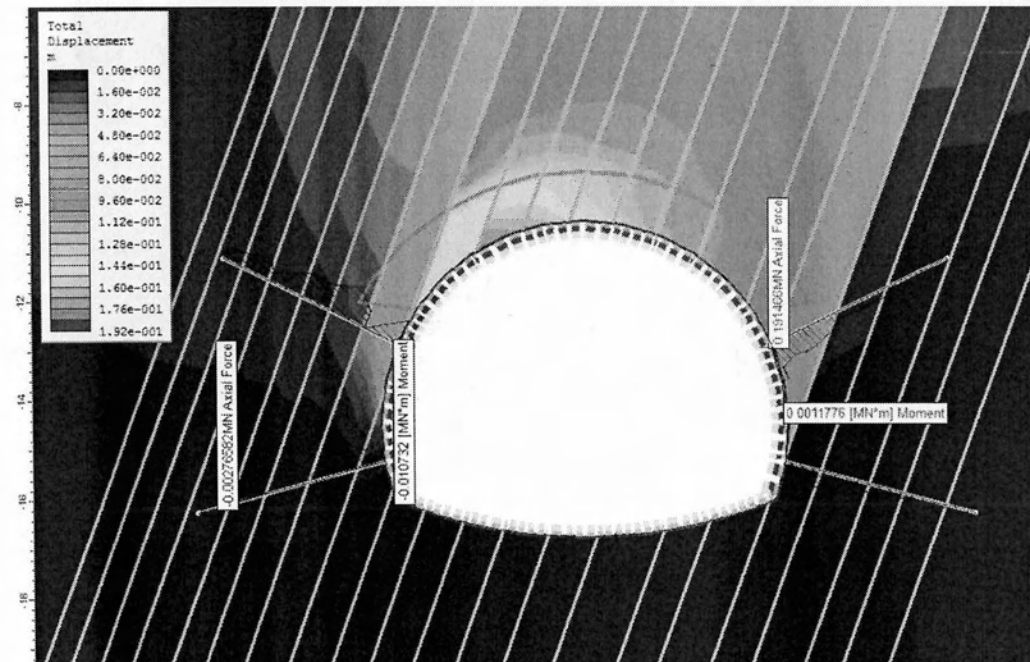
Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους ισούνται με 70.0 mm και έχουν ξεπεράσει τις μέγιστες επιτρεπόμενες (πίνακας 6)

Ολικές μετατοπίσεις



Σχήμα 66: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^{\circ}$, $d=0,75\text{m}$, $\varphi=35^{\circ}$ (Phase2)

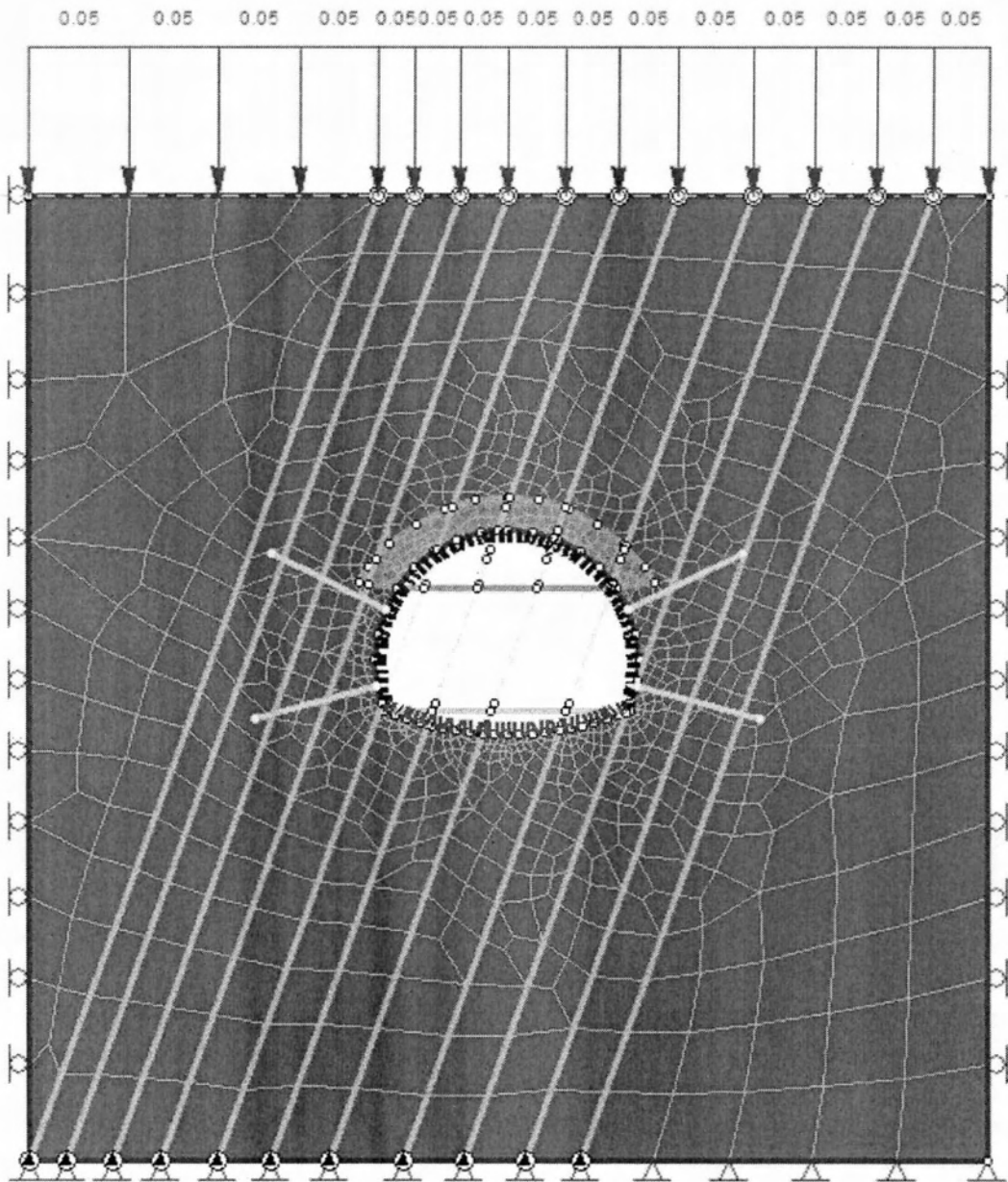
Καταπόνηση μέτρων αντιστήριξης



Σχήμα 67: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια για $\theta=70^{\circ}$, $d=0,75\text{m}$, $\varphi=35^{\circ}$ (Phase2)

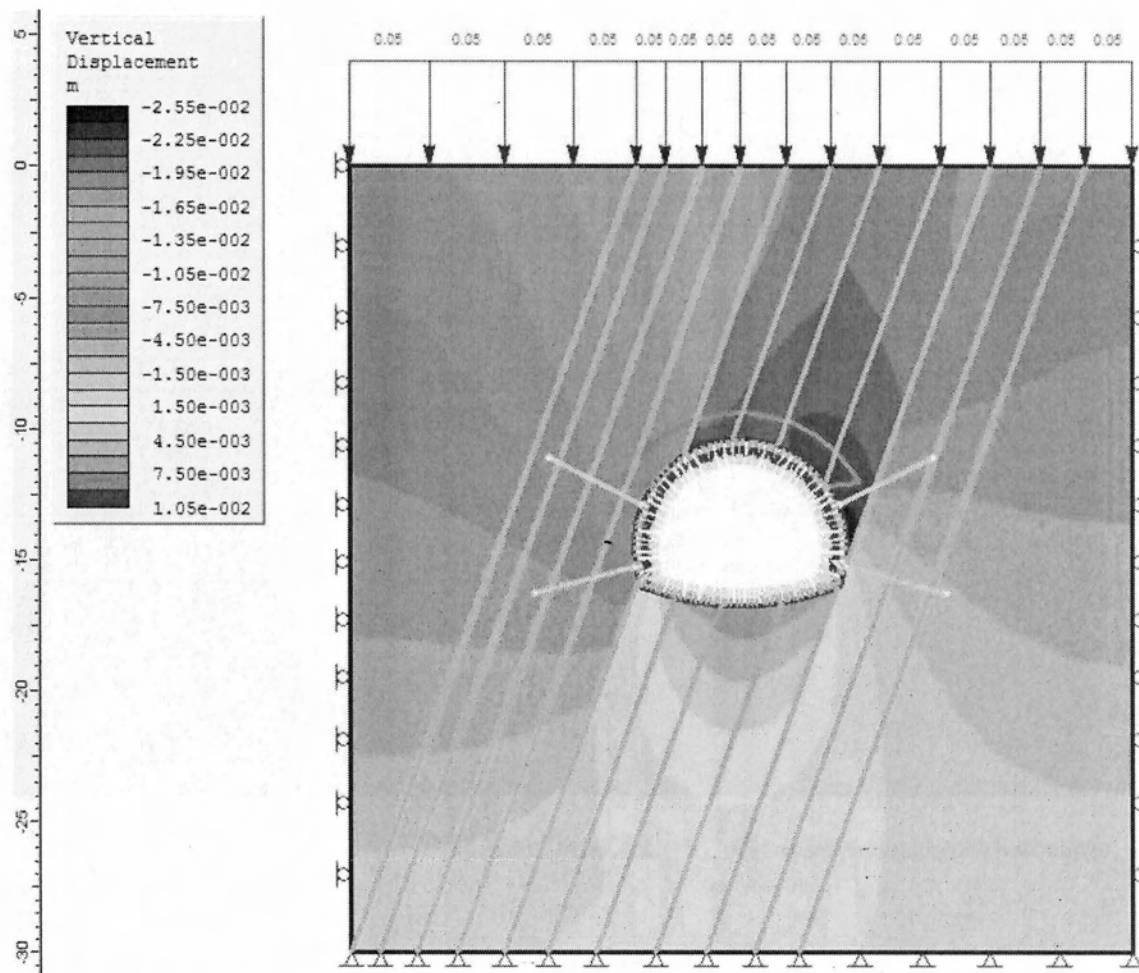
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 194,6kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή στο σκυρόδεμα: -10Kn·m

$\theta=70^\circ$, απόσταση 1,5m , $\varphi=30^\circ$



Σχήμα68: Προσομοίωση ασυνεχειών σε Phase² για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$ (Phase2)

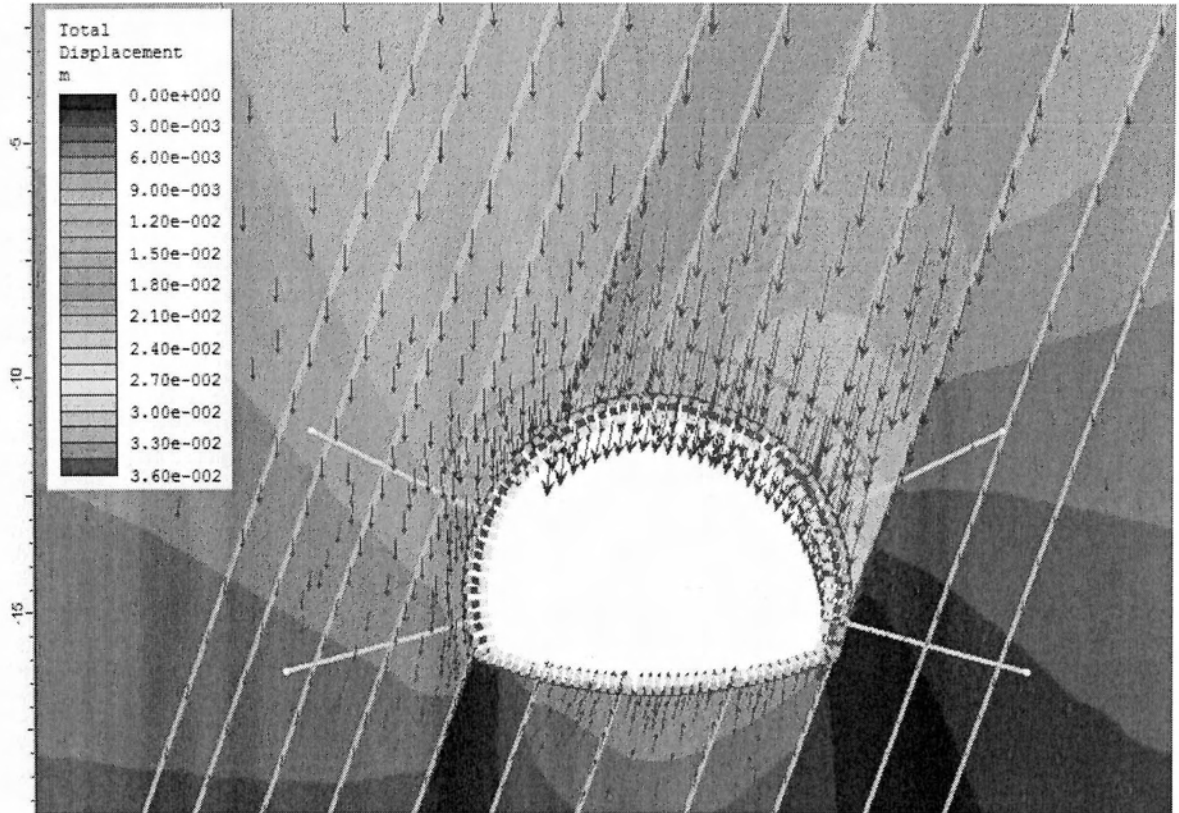
Καθιζήσεις



Σχήμα 69: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για $\theta=70^\circ$, $d=1,5m$, $\varphi=30^\circ$ (Phase2)

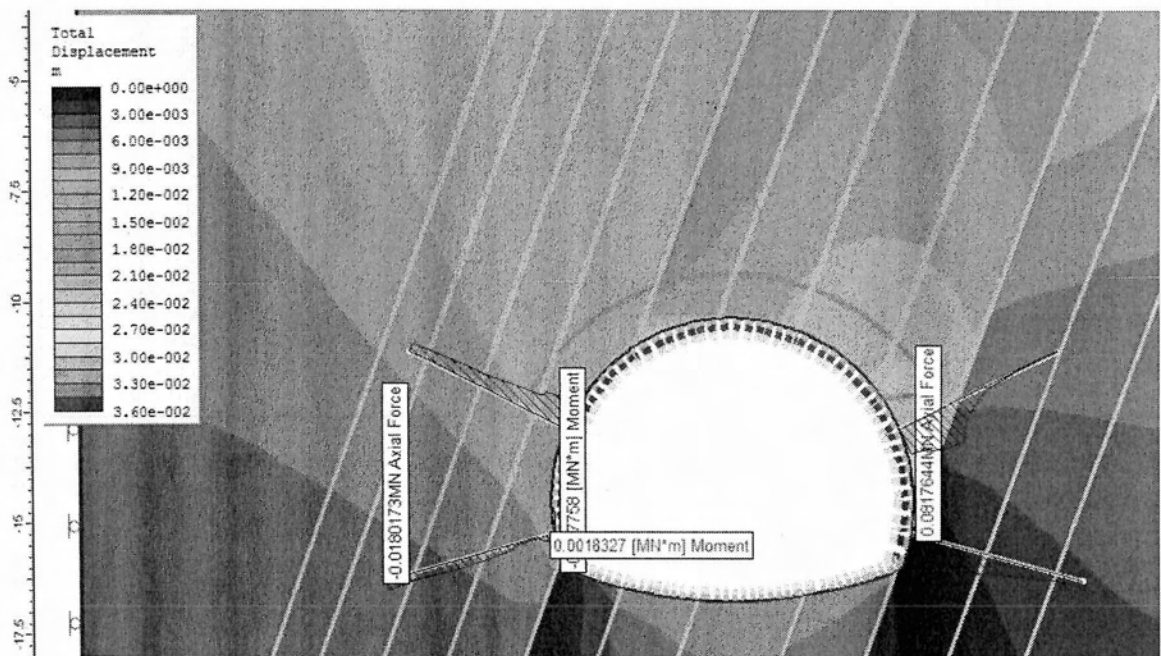
Μέγιστη καθίζηση στην ελεύθερη επιφάνεια: 19mm

Ολικές μετατοπίσεις



Σχήμα 70: Ολικές μετατοπίσεις για $\theta=70^{\circ}$, $d=1,5\text{m}$, $\varphi=30^{\circ}$ (Phase2)

Καταπόνηση μέτρων αντιστήριξης



Σχήμα 71: Διάγραμμα ροπών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αξονικών δυνάμεων στα ακρόγια για $\theta=70^{\circ}$, $d=1,5\text{m}$, $\varphi=30^{\circ}$ (Phase2)

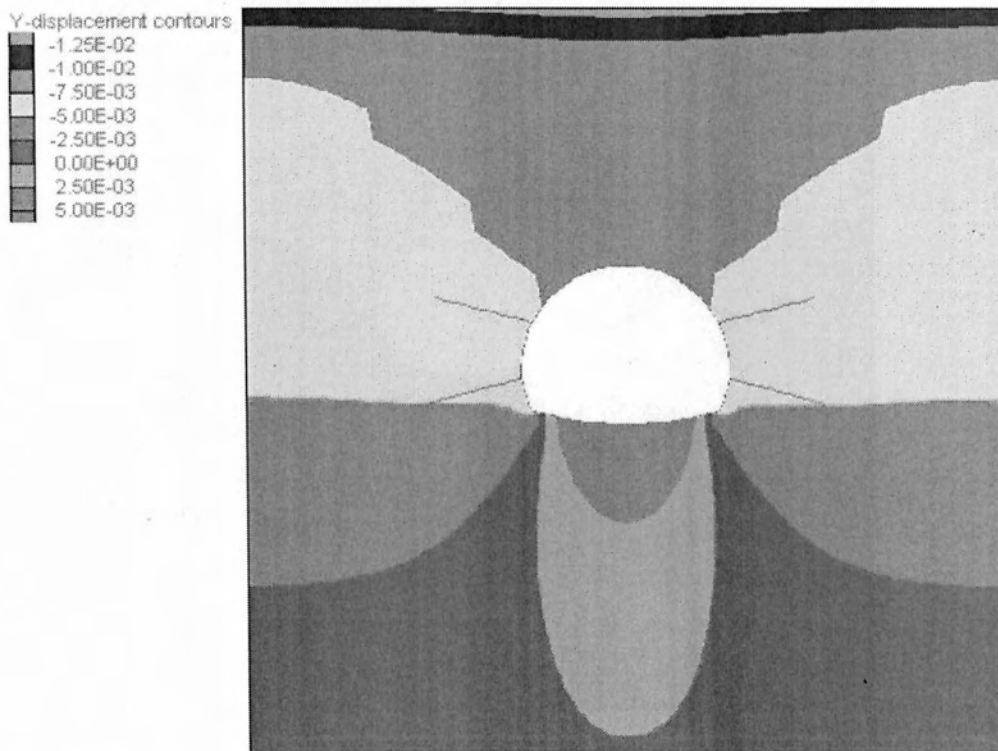
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 81kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή στο σκυρόδεμα: 1.8kN·m

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις προκύπτει ότι η οριακή κατάσταση δίνεται από τον συνδυασμό $\theta=70^\circ$, $d=1,50\text{m}$ και $\varphi=35^\circ$.

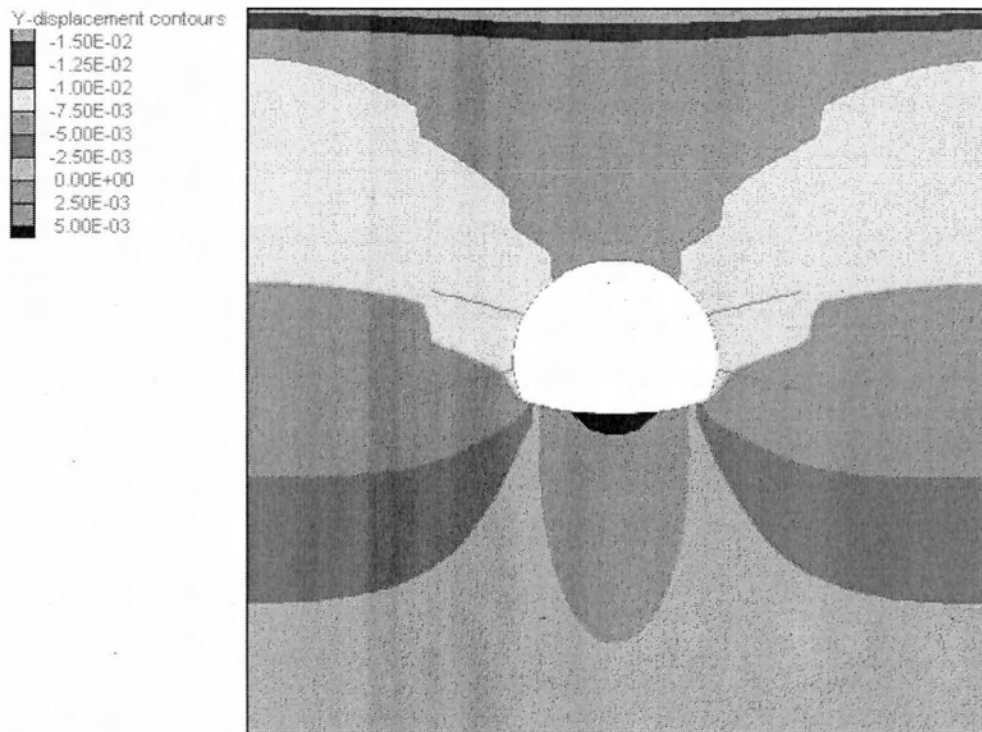
12.4. Μεταβολή τιμής επιφανειακού φορτίου

Μια παράμετρος που μελετήθηκε αποτελεί το επιφανειακό φορτίο που ασκείται στην ελεύθερη επιφάνεια της ευρύτερης περιοχής πάνω από την σήραγγα πρόσβασης. Στις αναλύσεις που διενεργήθηκαν μέχρι τώρα λήφθηκε υπόψη ομοιόμορφο επιφανειακό φορτίο ίσο με 50kN/m² . Κατά τη διαδικασία παραμετροποίησης το φορτίο έλαβε τις ακόλουθες τιμές:

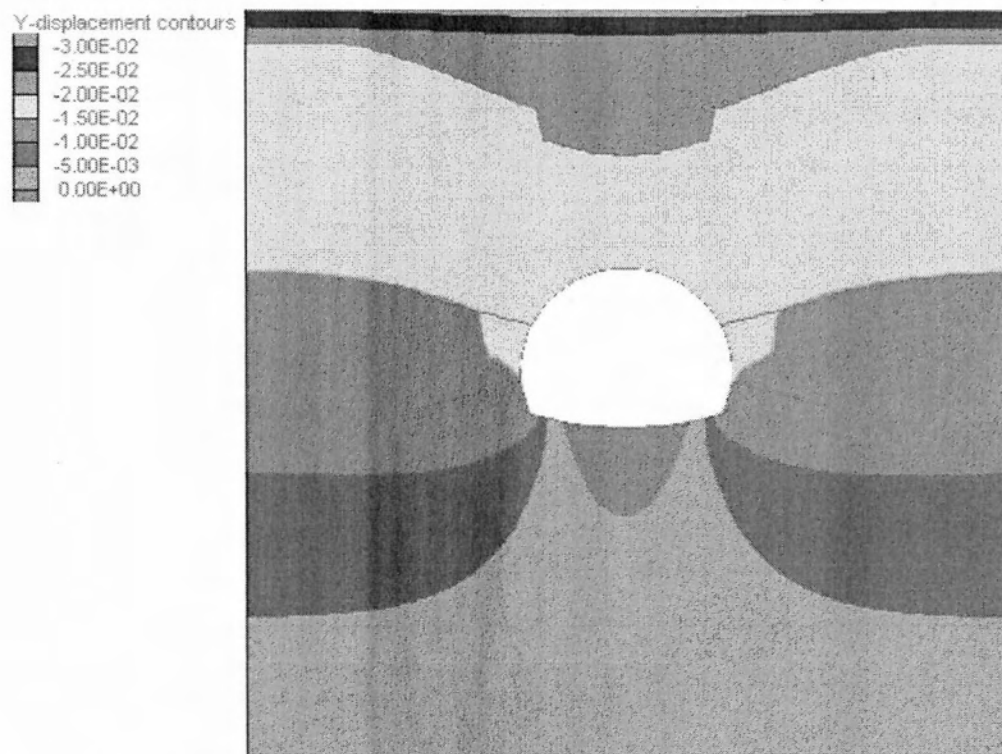
- 75kN/m² (150% της αρχικής φόρτισης) (σχήμα 72)
- 100kN/m² (200% της αρχικής φόρτισης) (σχήμα 73)
- 200kN/m² (400% της αρχικής φόρτισης) (σχήμα 74)



Σχήμα 72: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση 75kN/m² (FLAC 7.0)



Σχήμα 73: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση 100 kN/m² (FLAC 7.0)

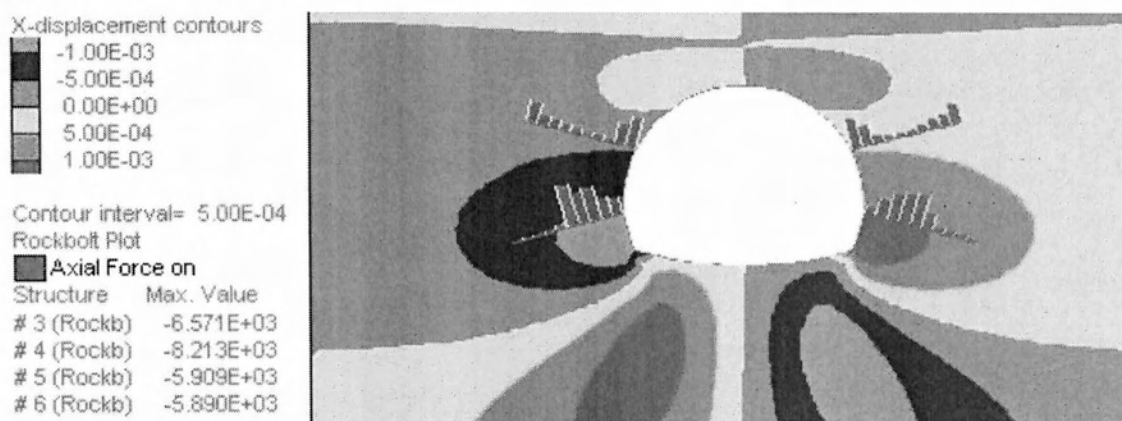


Σχήμα 74: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για φόρτιση 200 kN/m² (FLAC 7.0)

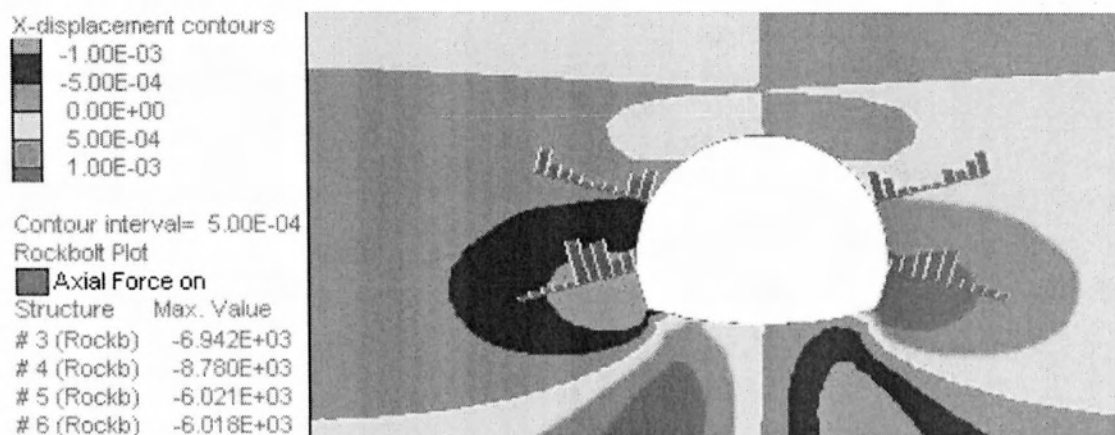
Από τις παραπάνω αναλύσεις και σύμφωνα με τον πίνακα 6 παρατηρούμε ότι για ομοιόμορφο επιφανειακό φορτίο ίσο με 200kN/m^2 η καθίζηση στην ελεύθερη επιφάνεια πάνω από τη σήραγγα είναι ίση με 30mm , τιμή που ισούται με την περιοριστική τιμή για το συγκεκριμένο έργο. Συγκεκριμένα:

- Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους ισούται με 30mm
- Η μέγιστη καθίζηση στην οροφή της σήραγγας ισούται με 20mm
- Η μέγιστη καθίζηση στην περιοχή του ανάστροφου τόξου ισούται με 15mm

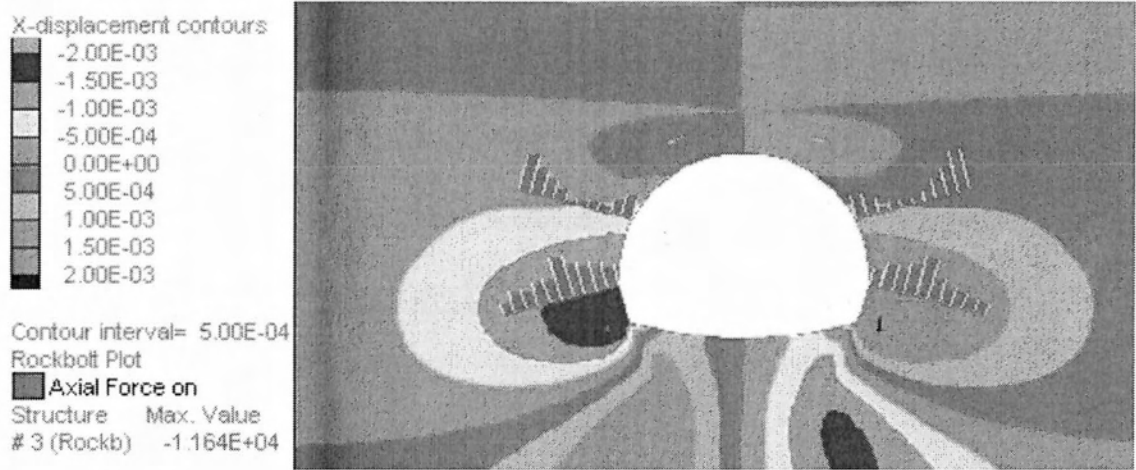
Για φορτίο 200kN/m^2 οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα αγκύρια είναι αυξημένες σε σύγκριση με το φορτίο της αρχικής ανάλυσης με τιμές που φτάνουν έως 12kN .



Σχήμα 75: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση 75 kN/m^2 (FLAC 7.0)



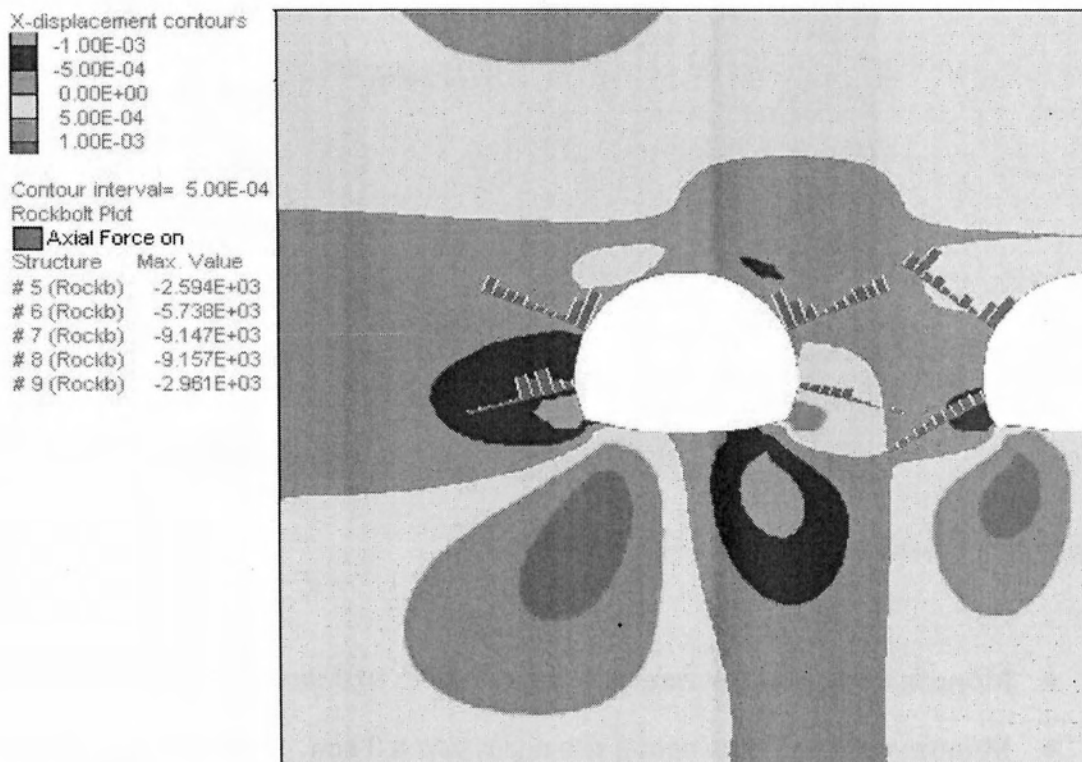
Σχήμα 76: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση 100 kN/m^2 (FLAC 7.0)



Σχήμα 77: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια για φόρτιση 200 kN/m² (FLAC 7.0)

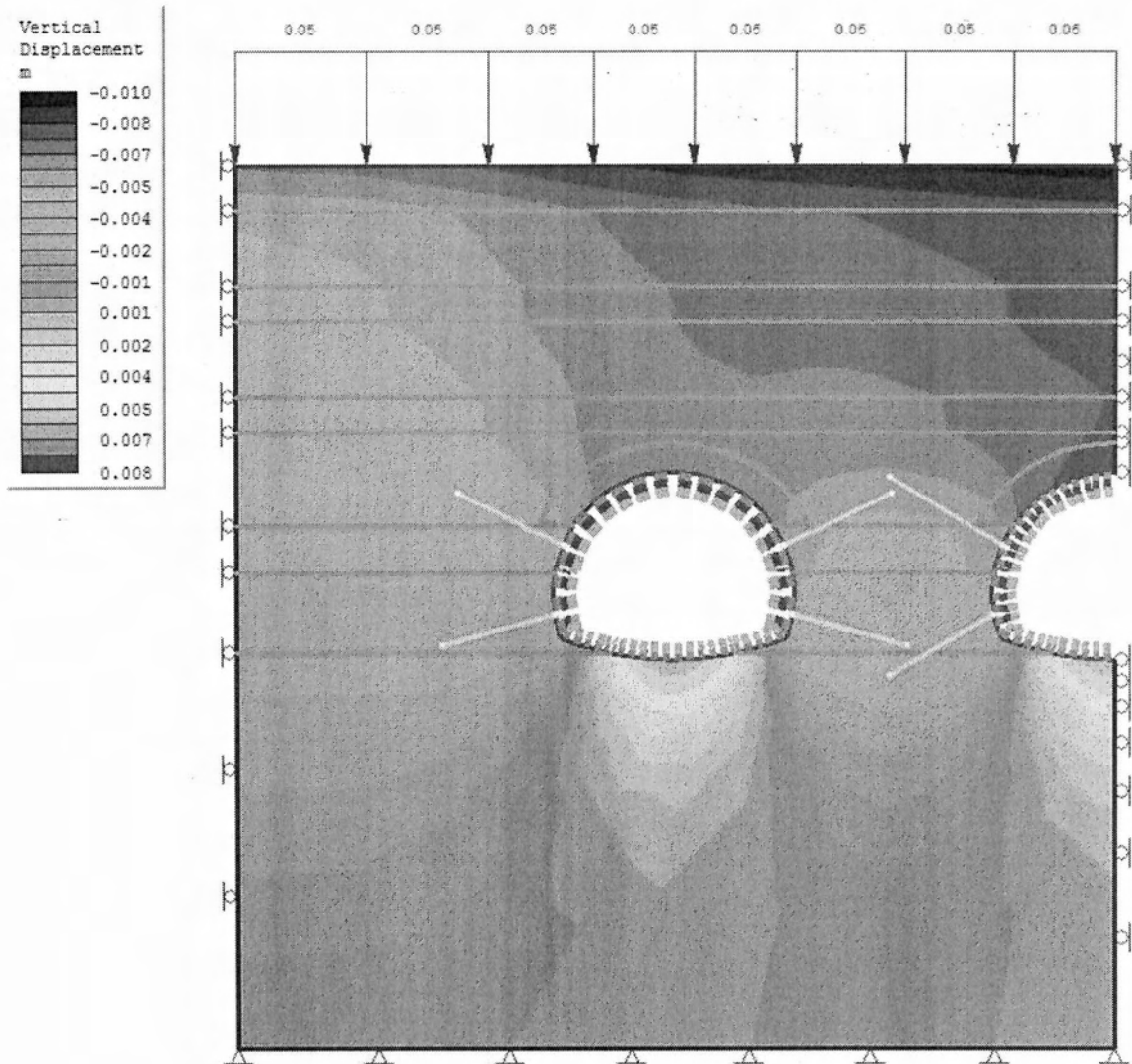
12.5. Παράλληλη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας

Μια παράμετρος που παρουσιάζει ενδιαφέρον στην μελέτη της για το συγκεκριμένο έργο αποτελεί η διάνοιξη δίδυμης σήραγγας. Η σήραγγα αυτή παρουσιάζει όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την σήραγγα πρόσβασης και οι άξονές τους είναι παράλληλοι και απέχουν μεταξύ τους περίπου 15.0 m ενώ η ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου 6.70m. Οι σήραγγες βρίσκονται στο ίδιο βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια ενώ το εδαφικό προφίλ είναι κοινό. Η νέα σήραγγα διανοίγεται και αυτή τη μέθοδο NATM και η κατασκευή της βρίσκεται σε απόλυτη χρονολογική συνάφεια με αυτή της συνδετήριας σήραγγας. Επιπλέον τα στάδια κατασκευής των 2 σηράγγων είναι πανομοιότυπα όπως και τα μετρά προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιούνται με μικρές διαφορές στις ηλώσεις βράχου που θεωρούνται όμως αμελητέες .



Σχήμα 78: Αξονικές δυνάμεις στα ακόρια μετά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας (FLAC 7.0).

Κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δίδυμων σηράγγων παρατηρούνται τα παρακάτω αποτελέσματα σχετικά με τις καθιζήσεις (σχήμα 79):



Σχήμα 79: Καθιζήσεις μετά την διάνοιξη δίδυμης σήραγγας (Phase2)

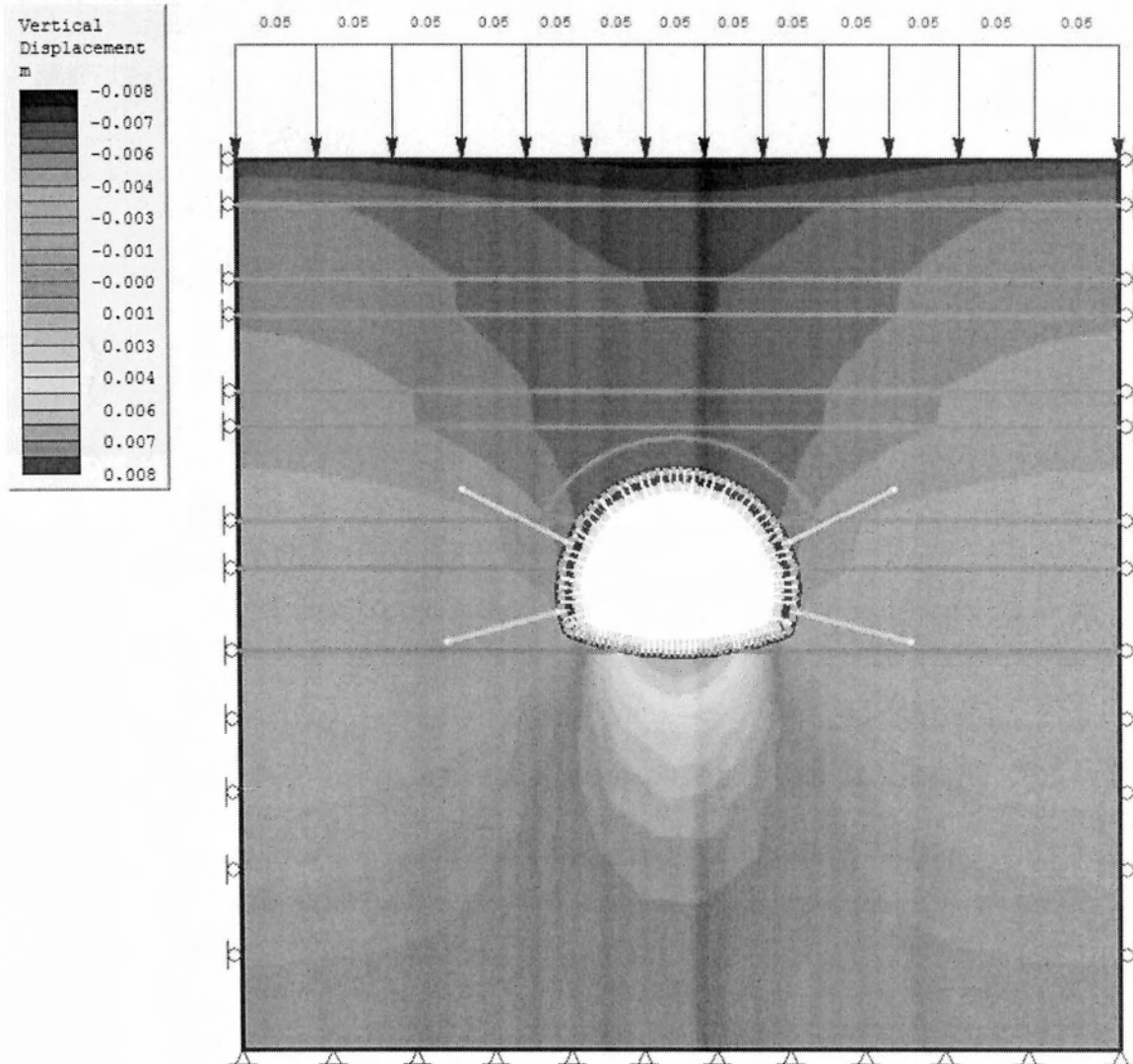
- Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους: 10.0 mm
- Μέγιστη καθίζηση στην οροφή των σηράγγων: 8.0 mm
- Μέγιστη καθίζηση στη στέψη των σηράγγων: 6.0 mm

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό πως η διάνοιξη δίδυμης σήραγγας δεν επηρεάζει την ευστάθεια της σήραγγας πρόσβασης ενώ παράλληλα οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι σχετικά μικρές και εντός των οριακών τιμών των προδιαγραφών (μικρότερες από 30mm). Επιπλέον οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στα αγκύρια δεν ξεπερνούν τα 10.0 kN. Καθώς το μέγεθος των αξονικών δυνάμεων είναι σχεδόν αμελητέο οι ηλώσεις βράχου που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή θεωρούνται επαρκείς .

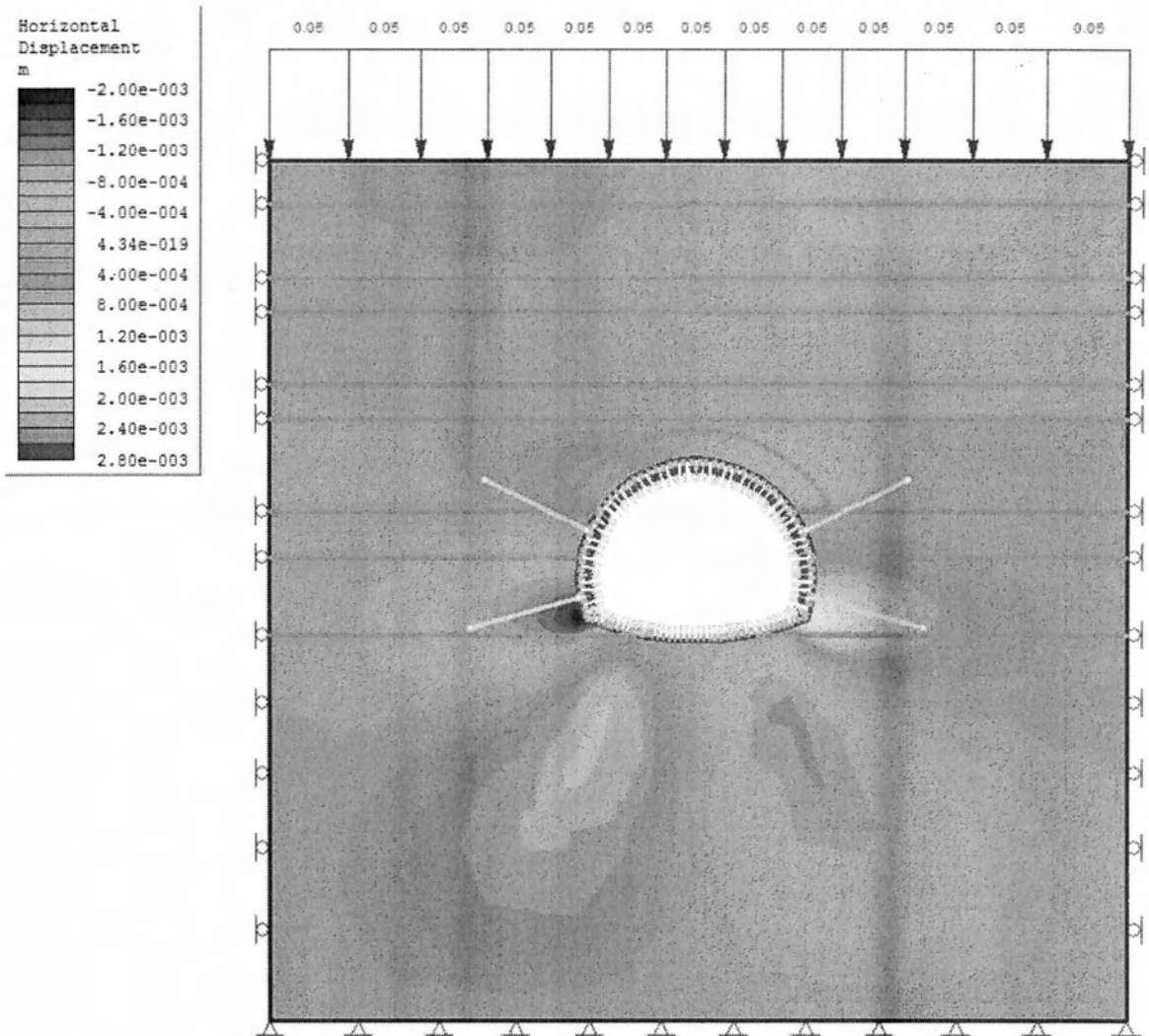
12.6. Μεταβολή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K_0

Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων γεών (K_0) αποτελεί μια βασική παράμετρο που επηρεάζει την πλευρική ώθηση που ασκείται κατά τη γεωστατική κατάσταση, όταν δηλαδή δεν υπάρχουν πλευρικές μετακινήσεις του εδάφους, (Καββαδάς, 2005).

Ο K_0 είναι ο λόγος ενεργών οριζόντιων τάσεων προς τις ενεργές κατακόρυφες τάσεις που ασκούνται σε κάθε βάθος. Δηλαδή: $K_0 = \sigma_h' / \sigma_v'$. Στις αρχικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε $K_0 = 0,4$, τιμή σύμφωνη με τις προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιρροή της τιμής του K_0 στην μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων γύρω από τη διατομή της σήραγγας. Η αύξηση της τιμής του K_0 συνεπάγεται και την αύξηση των σ_h' σύμφωνα με την εξίσωση $K_0 = \sigma_h' / \sigma_v'$. Παρακάτω παρουσιάζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους για $K_0 = 0.6$ (σχήμα 80 και 81)



Σχήμα 80: Καθιζήσεις για $K_0=0,6$ (Phase2).



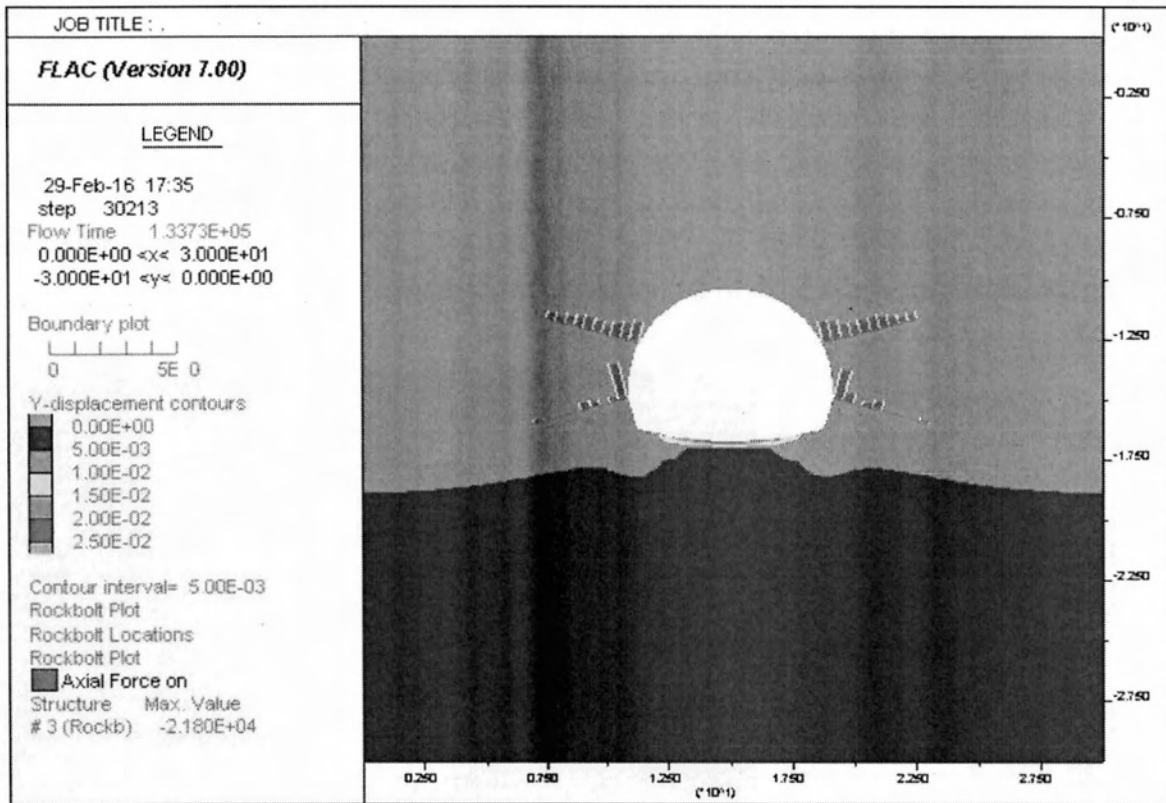
Σχήμα 81:Οριζόντιες μετατοπίσεις για $K_0=0,6$ (Phase2).

Από τις αναλύσεις γίνεται φανερό πως η επίδραση της αύξησης του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων στις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα .

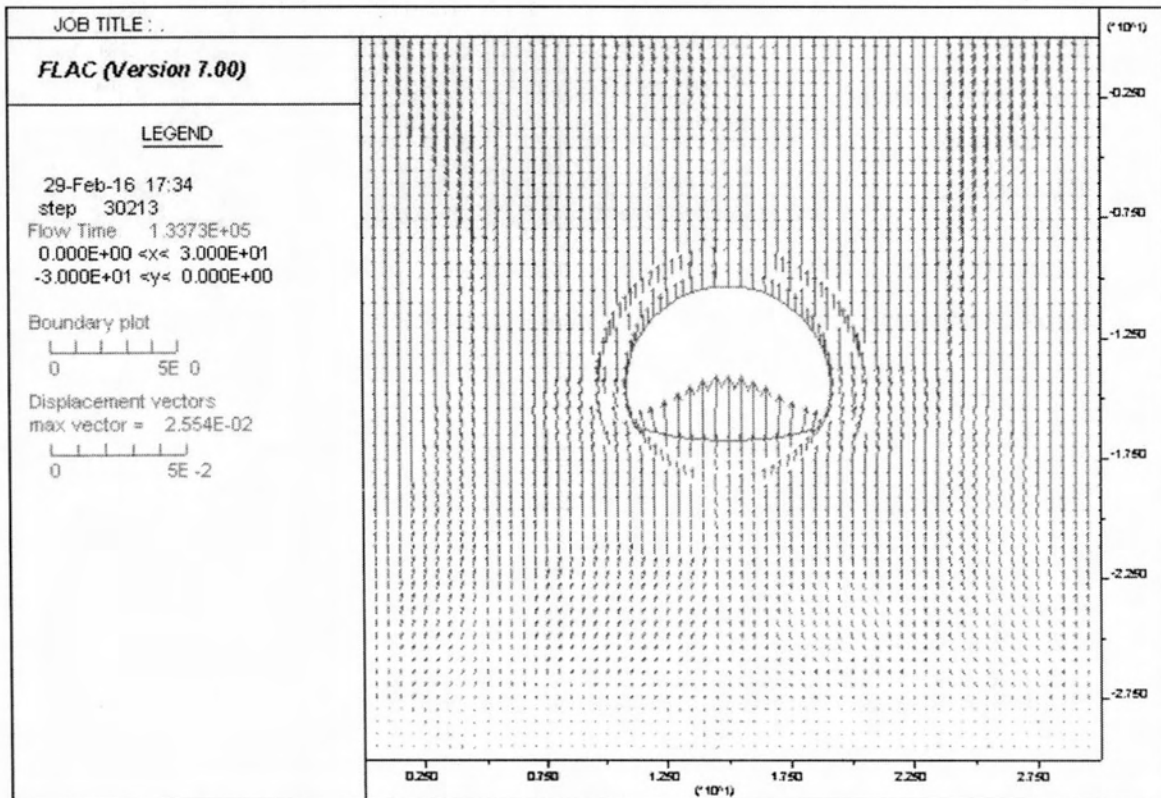
12.7. Προσομοίωση ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα

12.7.1. 1η προσέγγιση με δυναμική ροή (flow) σε κώδικα FLAC 7.0

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής θεωρείται ότι γίνεται πλήρωση της διατομής με νερό, με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά των προσωρινών μέτρων αντιστήριξης. Η προσομοίωση γίνεται με την θεώρηση μιας δυναμικής (εξαρτώμενης με τον χρόνο) ροής από τα μεγαλύτερα βάθη έως την επιφάνεια. Για χρόνο ροής $1,35 \cdot 10^5$ (eq. ratio= 10^{-3}), μηδενίζοντας τις προηγούμενες μετατοπίσεις υπολογίστηκαν οι καθιζήσεις που φαίνονται στο σχήμα 82.



Σχήμα 82: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για Flowtime 1.33 E+05 (FLAC 7.0).

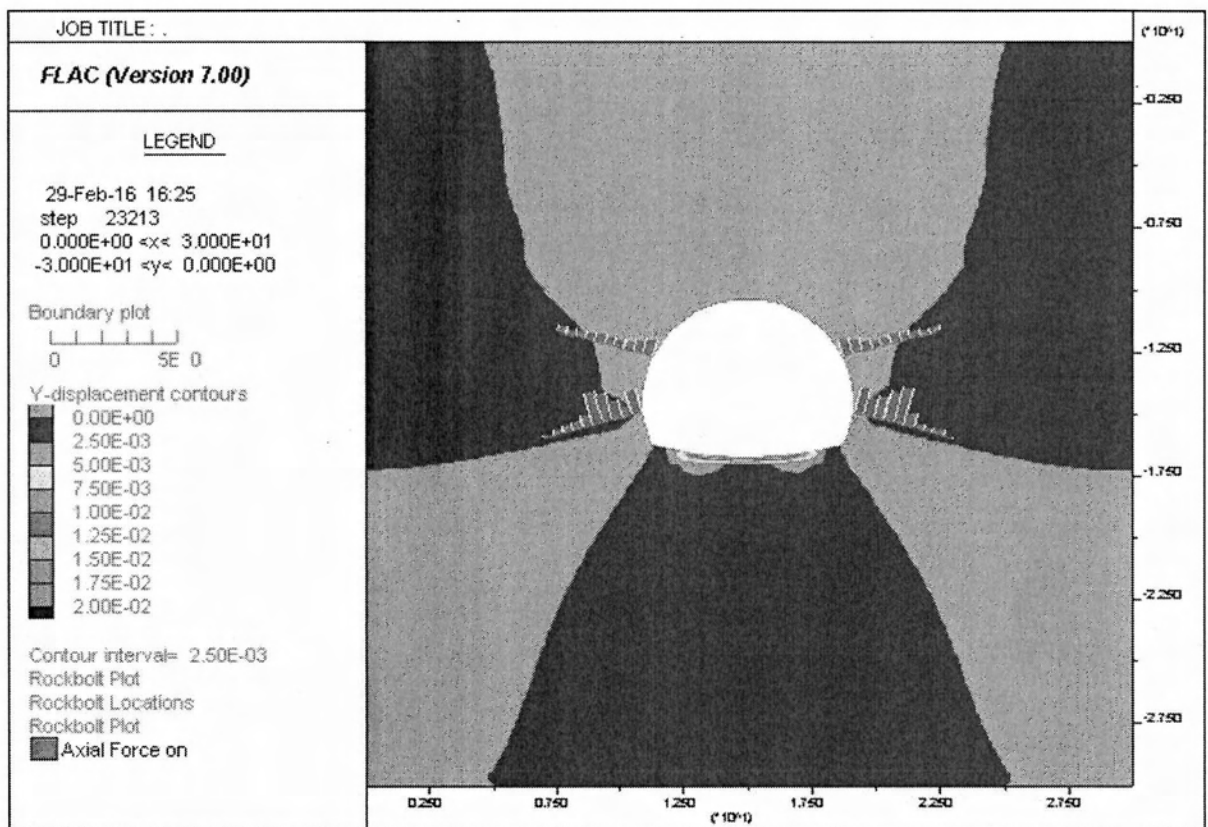


Σχήμα 83: Ολικές μετατοπίσεις για Flowtime 1.33 E+05 (FLAC 7.0).

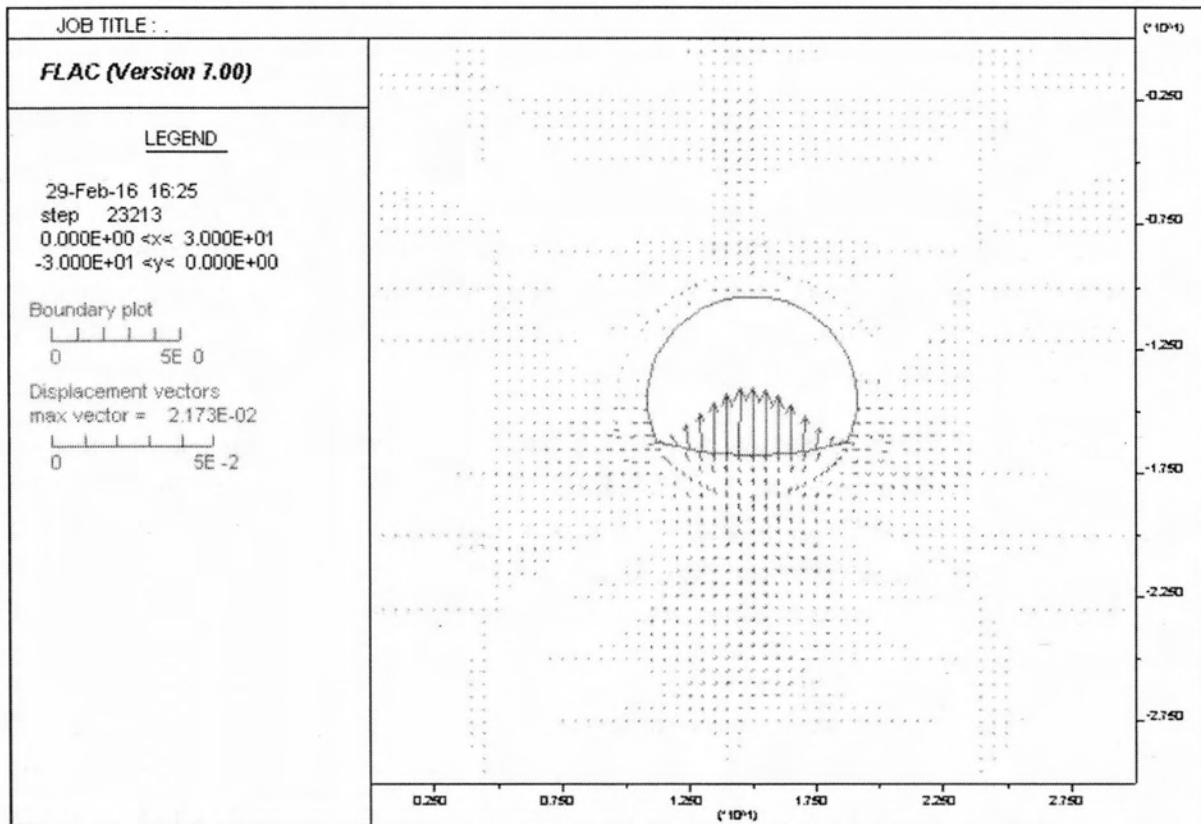
- Παρατηρείται ότι όλο το κέλυφος της σήραγγας ανυψώνεται.

12.7.2. 2η προσέγγιση με στατική λύση (apply pressure)

Κατά την δεύτερη προσέγγιση, μετά την ολοκλήρωση του 5ου σταδίου προσομοίωσης, υπολογίζεται η υδροστατική πίεση πόρων κλείνοντας την μηχανική λειτουργία του προγράμματος (mechanic off). Στην συνέχεια η πίεση πόρων επιβάλλεται γύρω από την σήραγγα σαν εξωτερική φόρτιση με γραμμική κατανομή από την οροφή στο δάπεδο. Ακολουθεί στατική (mech on, flow off) επίλυση, με μηδενισμό των προηγούμενων μετατοπίσεων, η οποία δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:



Σχήμα 84: Κατακόρυφες μετατοπίσεις για στατική ανάλυση με πίεση πόρων (FLAC 7.0).



Σχήμα 85: Ολικές μετατοπίσεις για ανάλυση με πίεση πόρων (FLAC 7.0).

- Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ανύψωση του κελύφους της σήραγγας.

Σημαντικότερες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην βάση της σήραγγας και στις δυο περιπτώσεις και είναι της τάξης των 20mm. Στην ανάλυση με ροή παρουσιάζονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε σχέση με την στατική επίλυση, σε όλη την έκταση της διατομής κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς η ροή γίνεται σε όλη την διατομή. Τέλος οι δυνάμεις των αγκυρίων συγκλίνουν και στις 2 περιπτώσεις με μέγιστη δύναμη ίση με 25 KN.

13. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας πρόσβασης του Σταθμού Ελληνικό και των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μελέτη και υλοποίηση του έργου με τη χρήση προγραμμάτων Πεπερασμένων Στοιχείων και Πεπερασμένων Διαφορών. Επιπλέον ασχολείται με την παραμετρική ανάλυση της κατασκευής έτσι ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του εδάφους και των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης μεταβάλλοντας τις υπάρχουσες συνθήκες του έργου.

Η σήραγγα αποτελεί τμήμα του έργου «Επέκταση της Γραμμής 2, Τμήμα: Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό» της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Ορύχθηκε με εφαρμογή παραλλαγή της μεθόδου NATM, έχει μήκος 34,85 m και μηκοτομική κλίση 2,01% . Η διατομή της είναι αψιδωτή ,με ανάστροφο τόξο, πλάτους 8,00 m και ύψους 6,65 m. Το ανώτερο όριο της εκσκαφής βρίσκεται σε βάθος που κυμαίνεται από 9,0 έως 10,0 m .

Η γεωλογία στην ευρύτερη περιοχή της χάραξης χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια. Στη στενή περιοχή διέλευσης της χάραξης εντοπίζεται η πολύπλοκη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου της Αθήνας η οποία αντιπροσωπεύεται από λιθολογίες του σχηματισμού των αθηναϊκών σχιστόλιθων. Ειδικότερα στην περιοχή κατασκευής του Σταθμού Ελληνικό παρατηρούνται ποταμοχειμάρια αποθέσεις και προϊόντα αποσάθρωσης και διάβρωσης γεγονός που καθιστά χρήσιμη την παραμετρική ανάλυση των εδαφικών συνθηκών. Η γεωτεχνική τομή σχεδιασμού επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων στην περιοχή της κατασκευής. Η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής, σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000, βρίσκεται στη ζώνη Ι με συντελεστή εδαφικής επιτάχυνσης ίσο με 0,16.

Η προσομοίωση των σταδίων διάνοιξης και κατασκευής της σήραγγας πρόσβασης με την χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και PHASE² βρίσκεται σε πλήρη συνάφεια με την διαδικασία υλοποίησης του έργου με βασικούς άξονες τις φάσεις εκσκαφής, τη σταδιακή αποτόνωση του εδάφους, τις επιβαλλόμενες φορτίσεις και την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής αντιστήριξης του έργου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τα δύο προγράμματα συνάδουν και παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις οι οποίες αξιολογούνται ως αμελητέες.

Από την προσομοίωση της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας πρόσβασης στα 2 προγράμματα προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους στο τελικό στάδιο κατασκευής του έργου είναι ίση με 7,50 mm και παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας.
- Τα εδαφικά υλικά στην ευρύτερη περιοχή της διάνοιξης, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, παραμένουν στην ελαστική περιοχή και

- Οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται επί των ηλώσεων βράχου εμφανίζουν μέγιστη τιμή ίση με 7,9 kN σύμφωνα με τις αναλύσεις στο FLAC 7.0 και 33 kN σύμφωνα με το PHASE². Η διαφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στα διαφορετικά μεγέθη που εμφανίζουν οι οριζόντιες μετατοπίσεις γύρω από την περιοχή που βρίσκονται τα κατώτερα αγκύρια. Όμως σε κάθε περίπτωση οι αξονικές δυνάμεις των ηλώσεων θεωρούνται πρακτικώς αμελητέες.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις μετρήσεις και υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν πριν αλλά και κατά τη διάρκεια αποπεράτωσης του έργου και είναι πλήρως αποδεκτά για την υλοποίηση του έργου.

Σύμφωνα με τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο έργο μελετήθηκαν οι ακόλουθες μεταβλητές:

- Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους (E_0): Αρχικά, το μέτρο ελαστικότητας προσομοιώθηκε με τιμή ίση με 240 MPa που αντιστοιχεί σε αυτή που έχει το χαλαρότερο έδαφος της στρωματογραφίας (σχηματισμός 5.1) προσεγγίζοντας έτσι τη δυσμενέστερη γεωτεχνική τομή. Καθώς δεν παρατηρήθηκε αστοχία, ακολουθήθηκε μια διαδικασία μείωσης του E_0 έως τη τιμή που οδηγεί σε μη αποδεκτά αποτελέσματα καθιζήσεων στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.
- Η ύπαρξη ασυνεχειών στη δυσμενέστερη γεωτεκτονική τομή: Κατά την προσομοίωση του εδαφικού προφίλ με το χαλαρότερο εδαφικό υλικό, από αυτά που προέκυψαν από την αξιολόγηση των γεωτρήσεων, εισήχθησαν ασυνέχειες των οποίων μελετήθηκαν η επίδραση της μεταβολής της γωνίας τους (θ), της σχετικής απόστασης μεταξύ τους (d) καθώς και της γωνίας τριβής (ϕ).
- Μεταβολή επιφανειακού φορτίου: Μέσα από την μεταβολή της τιμής της ομοιόμορφης επιφανειακής φόρτισης, προσεγγίστηκε η τιμή της για την οποία προκύπτουν οι οριακά αποδεκτές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.
- Παράλληλη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας: Μέσα από την διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας η οποία παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με την σήραγγα πρόσβασης, υπολογίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους και οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στα αγκύρια.
- Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K_0 : Κατά την παραμετρική ανάλυση σχετικά με τον συντελεστή K_0 , μελετήθηκαν οι επιδράσεις την αύξησης της τιμής του από 0,4 σε 0,6 στα υπολογιζόμενα μεγέθη.
- Ύπαρξη Υδροφόρου Ορίζοντα: Η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα, στα προσωρινά μέτρα αντιστήριξης, με χρονοεξαρτώμενη ροή σε κώδικα FLAC 7.0 και με στατική επιβολή της πίεσης πόρων στο κέλυφος της σήραγγας στο Phase2. Για την ανάλυση αυτή θεωρήθηκε η δυσμενέστερη ελεύθερη επιφάνεια του Υ.Ο. στα +0.00.

Από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και με κριτήριο την μέγιστη επιτρεπόμενη καθίζηση στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους στην ευρύτερη περιοχή πάνω από τη σήραγγα που ισούται με 30 mm, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για μέτρο ελαστικότητας $E_0=30$ MPa , μειωμένο κατά 12,5%, του σχηματισμού 5.1 παρατηρείται μη αποδεκτή καθίζηση στην ελεύθερη επιφάνεια ίση με 40,0 mm.
- Για την ύπαρξη ασυνεχειών στο χαλαρότερο υλικό (5,1) προκύπτουν μη αποδεκτά αποτελέσματα καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους για τους εξής συνδυασμούς:
 - για $\theta=90$, $d=1,5$ m και $\varphi=35$ προκύπτει καθίζηση 53,0mm .
 - για $\theta=70$, $d=0,75$ m και $\varphi=35$ προκύπτει καθίζηση 70,0 mm.
- Κατά την παράλληλη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας παρατηρείται μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους ίση με 10,0 mm και αξονική δύναμη στις ηλώσεις βράχου ίση με 9,00 kN.
- Για ομοιόμορφη επιφανειακή φόρτιση ίση με 200 kN (αύξηση κατά 400% της αρχικής φόρτισης) παρατηρείται καθίζηση 30,0 mm.
- Για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_0=0,6$ οι καθιζήσεις παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές σε σύγκριση με την αρχική ανάλυση ($K_0=0,4$) .
- Η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στην ελεύθερη επιφάνεια οδηγεί σε ανύψωση του ανάστροφου τόξου της σήραγγας κατά 2,5mm.

Αναφορές –Βιβλιογραφία:

1. Goodman, R. E., (1993), "Engineering Geology", John Wiley and Sons Ltd.
2. Hoek E. , Carranza-Torres C, Corkum B. (2002) Hoek–Brown failure criterion, 2002 edition. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting, Toronto, Canada.
3. Hoek, E., and Brown, E.T., (1994), "Underground Excavations in Rock", Spon Press (Taylor & Francis Ltd)
4. Hudson, J. A. and, Harrison, J. P., (2000), "Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles", Pergamon Press Inc (Elsevier Science & Technology)
5. Hudson, J. A. and, Harrison, J. P., (2001), "Engineering Rock Mechanics, Part 2: Illustrative Worked Examples", Pergamon Press Inc (Elsevier Science & Technology)
6. ITASCA Consulting Group (2016), Inc. FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua : FLAC Version 7.0 ,Online Manual Table of Contents
7. Muirwood D. (1990), Soil Behavior And Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Press
8. Rocscience Inc. (2016), Phase2: User's Manual. Ontario, Canada.
9. ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (2007): Σταθμός Ελληνικό - Γενικά γεωλογικά στοιχεία γραμμής - Τεχνική έκθεση αποτελεσμάτων στα πλαίσια 'Συμπληρωματικής γεωτεχνικής έρευνας της επέκτασης 2 του Μετρό Αθήνας'
10. ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε (2007): Σταθμος Ελληνικό – Σήραγγα πρόσβασης εκσκαφή και προσωρινή αντιστήριξη (ΛΟΜ1) Τεχνική έκθεση , Αρ. Εγγράφου 2SS5CW395R902Α.
11. ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (2007): Σταθμος Ελληνικο – Έκθεση γεωτεχνικής αξιολόγησης – Τεχνική έκθεση, Αρ. Εγγράφου 2SS5CW180R901C.
12. Καββαδάς Μ. (2005), Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων, Έκδοση Ε.Μ.Π., Μάρτιος 2005
13. Κούκης, Γ. και Σαμπατακάκης, Ν., (2007), "Γεωλογία Τεχνικών Έργων", Εκδόσεις: Παπασωτηρίου
14. Μπαντής Σ., (2008), "Τεχνική Γεωλογία", Εκδόσεις Gutenberg, Αθήνα.
15. http://ekkaf.gr/online_files/Brochure_Soil_Nails_gr.pdf, (25/02/2016).
16. http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex2/2012/D2_P.pdf , (25/02/2016).
17. www.railsystem.net (25/02/2016).
18. www.dr-sauer.com (25/02/2016).

19. E. Hoek, (1999), Support for very weak rock associated with faults and shear zones, Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement, Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia, 14-19 March, 1999.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125599