



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ
ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων
κατά τη διάνοιξη σηράγγων του Μετρό σε σχέση με
θεωρητικές προεκτιμήσεις»**

Σαπλαχίδη Αλεξάνδρα-Αστερόπη
Επιβλέπων: Βουγιούκας Εμμανουήλ, Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Περιεχόμενα

Πίνακας Γραφημάτων	5
Πίνακες.....	6
Πίνακας Σχημάτων	6
Πίνακας Εικόνων.....	7
Πίνακας Χαρτών	8
Πίνακας Διαγραμμάτων	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
ABSTRACT	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενικά στοιχεία για την κατασκευή του μετρό στην Αθήνα.....	12
1.1 Περιγραφή Έργου	12
1.2 Χαρακτηριστικά αστικού περιβάλλοντος κατά τη σχεδίαση της σήραγγας	14
1.2.1 Κτίρια και Υποδομές.....	14
1.2.2 Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας.....	16
Κεφάλαιο 2: Γεωλογία-Υδρογεωλογία.....	17
2.1 Γεωλογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής του Λεκανοπεδίου	17
2.2 Γεωτεχνική συμπεριφορά σχηματισμών	20
2.2.1 Διαφοροποιήσεις Κατά Μήκος του Άξονα του Έργου	21
2.2.2 Μηχανικές ιδιότητες σχηματισμών	23
2.2.3 Βαθμονόμηση Βραχομάζας.....	26
2.3 Υδρογεωλογικές Συνθήκες	29
2.3.1 Κίνηση Υπόγειου Ύδατος.....	29
2.3.2 Διαπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Γεωτεχνικές Συνθήκες.....	36
3.1 Γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας	36
3.2 Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού (ΓΤΣ).....	37

3.2.1	Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού Υποτιμήματος 1	37
3.2.2	Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού Υποτιμήματος 2	40
3.3	Μεθοδολογία Γεωτεχνικής Παραμέτρου Σχεδιασμού (ΓΠΣ)	44
3.3.1	Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού (ΓΠΣ)	45
3.4	Προσδιορισμός του Καταβιβασμού του Υπόγειου Ορίζοντα	52
3.4.1	Εκτίμηση ακτίνας επιρροής λόγω ταπείνωσης του Υπόγειου ορίζοντα	52
3.4.2	Εκτίμηση καθιζήσεων λόγω ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα.....	53
3.4.3	Εκτίμηση παροχής αντλήσεως και ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα	54
3.5	Εφαρμογή: Εκτίμηση Ακτίνας Επιρροής, Καθιζήσεων και Παροχής στη Σήραγγα Λόγω Ταπείνωσης του Υπογείου Ορίζοντα.....	55
Κεφάλαιο 4: Καθιζήσεις		57
4.1	Θεωρητικές προεκτιμήσεις καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας ..	57
4.1.1	Προσδιορισμός Επιτρεπόμενων Καθιζήσεων	58
4.1.2	Επιφανειακές Καθιζήσεις λόγω Διάνοιξης της σήραγγας και Καταβιβασμού του Υδροφόρου Ορίζοντα.....	59
4.2	Πραγματικές τιμές Καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας	67
4.3	Συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας	71
4.3.1	Σύγκριση Θεωρητικών και Πραγματικών τιμών για τις Συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας	71
4.4	Οριζόντιες και Γωνιακές Παραμορφώσεις.....	78
4.4.1	Σύγκριση Θεωρητικών και Πραγματικών τιμών οριζόντιων και γωνιακών παραμορφώσεων	78
4.5	Πιεζόμετρα	97
4.5.1	Σύγκριση Υψομέτρου Στάθμης Υ.Ο πριν και μετά την εκσκαφή	97
4.6	Συμπεράσματα.....	100
Κεφάλαιο 5: Γεωτεχνική Προσομοίωση Εδαφικών Καθιζήσεων.....		105
5.1	Εισαγωγή	105
5.2	Γενικές Πληροφορίες του Προγράμματος RS2 (PHASE2 V.9.0)	105
5.3	Μοντελοποίηση	105
5.3.1	Γεωμετρία μοντέλου (Geometry)	105

5.3.1.1	Καθορισμός Πεδίου Τάσεων.....	106
5.3.1.2	Ιδιότητες υλικών (Materials and Staging).....	107
5.4	Αριθμητική ανάλυση της διάνοιξης στα τμήματα με τις μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις	108
5.5	Συμπεράσματα Μοντελοποίησης.....	110
Κεφάλαιο 6: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πρόκληση καθιζήσεων στο αστικό περιβάλλον και από την κίνηση του υπόγειου ύδατος στο έργο.....		115
6.1	Ειδική Τρωτότητα και Σχετική Διακινδύνευση Κτιρίων-Κατασκευών.....	115
6.1.1	Καθιζήσεις με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω.....	119
6.1.1.1	Καμπτική Συμπεριφορά.....	120
6.1.1.2	Διατμητική Συμπεριφορά.....	121
6.1.1.3	Καμπτική ή διατμητική συμπεριφορά.....	122
6.1.2	Επιρροή των ταυτόχρονων εδαφικών οριζόντιων παραμορφώσεων	122
6.2	Διαδικασία εκτίμησης των βλαβών στα κτίρια, εξαιτίας των εδαφικών μετακινήσεων.	122
6.3	Επίδραση του Ύδατος στη Συμπεριφορά του Υπόγειου Έργου.....	126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		137

Πίνακας Γραφημάτων

Γράφημα 1: Συσχέτιση Βαθμονομήσεων GSI – MR για τους Αθηναϊκούς Σχιστολίθους.....	27
Γράφημα 2: Συσχέτιση Βαθμονομήσεων GSI – MR για τα Νεογενή.	27
Γράφημα 3: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους - Υποτμήμα A1.....	62
Γράφημα 4: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους - Υποτμήμα A2.....	62
Γράφημα 5: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους -Τμήμα Β.....	63
Γράφημα 6: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC-Υποτμήμα A1.....	63
Γράφημα 8: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE-Υποτμήμα A1.....	64
Γράφημα 9: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SSR-Υποτμήμα A1.....	64
Γράφημα 7: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD-Υποτμήμα A1.....	64
Γράφημα 10: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC-Υποτμήμα A2.....	65
Γράφημα 11: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD-Υποτμήμα A2.....	65
Γράφημα 12: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE-Υποτμήμα A2.....	65
Γράφημα 13: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC- Τμήμα Β.....	66
Γράφημα 14: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD- Τμήμα Β.....	66
Γράφημα 15: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE- Τμήμα Β.....	66
Γράφημα 16: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα με την προώθηση του μετώπου.....	70
Γράφημα 17: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SC.....	79
Γράφημα 18: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SD.....	80
Γράφημα 19: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SE.....	81
Γράφημα 20: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SSR.....	82
Γράφημα 21: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SC.....	83
Γράφημα 22: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β - Κατηγορία SD.....	84
Γράφημα 23: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SE.....	85
Γράφημα 24: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SE1 και SE2.....	86
Γράφημα 25: Αποτελέσματα Χωροσταθμικών μετρήσεων επί των Κτιρίων.....	88
Γράφημα 26: Αποτελέσματα Χωροσταθμικών μετρήσεων επί του εδάφους.....	89
Γράφημα 27: Σχετική Μετατόπιση Σήραγγας.....	93
Γράφημα 28: Επιφανειακή Μετατόπιση.....	93
Γράφημα 29: Οριζόντιες μετατοπίσεις παράλληλα και κάθετα στη δομή.....	95
Γράφημα 30: Ολικές οριζόντιες μετατοπίσεις.....	96
Γράφημα 31: Υψόμετρο Στάθμης Υδροφόρου Ορίζοντα κατά τα έτη 2004-2006 (πριν την εκσκαφή).....	98

Γράφημα 32: Υψόμετρο Στάθμης Υδροφόρου Ορίζοντα κατά τα έτη 2006-2010 (μετά την εκσκαφή)	99
Γράφημα 33: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+343 για κάθε στάδιο εκσκαφής	112
Γράφημα 34: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+472-500 για κάθε στάδιο εκσκαφής	114

Πίνακες

Πίνακας 1: Κατηγορίες αποσάθρωσης ετερογενών υλικών (Πηγή: "The description and classification of weathered rock for engineering purposes" Geol. Soc. Engin. Group Work. Party Report (1995))	26
Πίνακας 2: Κριτήρια διάκρισης υλικών.	27
Πίνακας 3: Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχωδών Σχηματισμών.....	28
Πίνακας 4: Στάθμη υπόγειων υδάτων στις θέσεις των γεωτρήσεων.....	30
Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας.....	33
Πίνακας 6: Επιτρεπόμενες τιμές καθιζήσεων.....	58
Πίνακας 7: Μέγιστες καθιζήσεις λόγω πτώσης του Υ.Ο.....	61
Πίνακας 8: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SC-Τμήμα Α.....	72
Πίνακας 9: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SD-Τμήμα Α.....	72
Πίνακας 10: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SE-Τμήμα Α.....	72
Πίνακας 11: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SSR-Τμήμα Α.....	73
Πίνακας 12: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SC-Τμήμα Β.....	73
Πίνακας 13: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SD-Τμήμα Β.....	73
Πίνακας 14: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SE-Τμήμα Β.....	74
Πίνακας 15: Μετακινήσεις στη σήραγγα ένα μήνα μετά την α' φάση εκσκαφής.....	77
Πίνακας 16: Ένα μήνες μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής(Β' Φάση).....	88
Πίνακας 17: Πριν την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής.....	91
Πίνακας 18: Δυο μήνες μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής (Β' Φάση).....	92
Πίνακας 19: Διακύμανση στάθμης πιεζομέτρων πριν την εκσκαφή.....	97
Πίνακας 20: Διαστάσεις εκσκαφής.....	108
Πίνακας 21: Στάδια προσομοίωσης – Τμήμα Α - Κατηγορία σχεδιασμού SE.....	108
Πίνακας 22: Στάδια προσομοίωσης – Τμήμα Β - Κατηγορία σχεδιασμού SE.....	109
Πίνακας 23: Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού για αργλικές μάργες.....	111
Πίνακας 24: Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού για ψαμμιτικές μάργες.....	113
Πίνακας 25: Κατηγορίες Διακινδύνευσης για κτίρια-κατασκευές.....	115
Πίνακας 26: Ταξινόμηση ορατών βλαβών σε τοίχους με ειδική αναφορά στην ευκολία επισκευής επιχρισμάτων και οπτοπλινθοδομής [Burland et al. (1977)]......	117
Πίνακας 27: Τυπικές τιμές μέγιστης στροφής και καθίζησης κτιρίου για την εκτίμηση του κινδύνου βλαβών [Rankin (1988)]	123

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Απόσπασμα Οριζοντιογραφίας της κύριας σήραγγας από Χ.Θ0+000-Χ.Θ0+500 (με τις θέσεις των γεωτρήσεων), Κλίμακα 1:1000.....	15
Σχήμα 2: Γεωτρήσεις Κατά Μήκος Του Άξονα Του Έργου.....	22

Σχήμα 3: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ1	38
Σχήμα 4: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ2	39
Σχήμα 5: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ3	39
Σχήμα 6: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ4	40
Σχήμα 7: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ5	42
Σχήμα 8: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ6	42
Σχήμα 9: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ7	43
Σχήμα 10: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ8	43
Σχήμα 11: μεταβολής των καθιζήσεων με την απόσταση από τη σήραγγα	53
Σχήμα 12: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας τριπλής τροχιάς-Κατηγορία SE	67
Σχήμα 13: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας τριπλής τροχιάς-Κατηγορία SSR	68
Σχήμα 14: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας διπλής τροχιάς-Κατηγορία SE	68
Σχήμα 15: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας διπλής τροχιάς-Κατηγορία SSR3	69
Σχήμα 16: Στατιστική Επεξεργασία Ασυνεχειών Σήραγγας Διατομής Τριπλής & Διπλής Τροχιάς (από Χ.Θ0+000 έως Χ.Θ0+504).....	70
Σχήμα 17: Οριζοντιογραφία εντός των Χ.Θ0+000 έως Χ.Θ0+400 και Απεικόνιση Εδαφικών Καθιζήσεων	101
Σχήμα 18: Οριζοντιογραφία εντός των Χ.Θ0+400 έως Χ.Θ0+500 και Απεικόνιση Εδαφικών Καθιζήσεων	102
Σχήμα 19: Γεωλογική Τομή και Καθιζήσεις ανά θέση εντός των Χ.Θ0+300 έως Χ.Θ0+360.	103
Σχήμα 20: Γεωλογική Τομή και Καθιζήσεις ανά θέση εντός των Χ.Θ0+200 έως Χ.Θ0+400.	104
Σχήμα 21: Γεωμετρία Μοντέλου.....	105
Σχήμα 22: Εντατικά μεγέθη και ο προσανατολισμός τους όπως ορίζονται στο Phase.....	106
Σχήμα 23: Μέσες τιμές Κύριων Τάσεων για τη Χ.Θ 0+343	106
Σχήμα 24: Μέσες τιμές Κύριων Τάσεων για τη Χ.Θ 0+472-500.....	106
Σχήμα 25: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+343.....	111
Σχήμα 26: Δείκτες Παραμόρφωσης για την Χ.Θ 0+343	111
Σχήμα 27: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+472-500	113
Σχήμα 28: Δείκτες Παραμόρφωσης για την Χ.Θ 0+472-500.....	113
Σχήμα 29: Μοντέλο ισοδύναμης δοκού	118
Σχήμα 30: Καθιζήσεις με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω.....	119
Σχήμα 31: Συνέπειες καθιζήσεων στην ισοδύναμη δοκό.....	120
Σχήμα 32: Διαδικασία εκτίμησης βλαβών μιας κατασκευής από την εδαφική μετακίνηση λόγω εκσκαφής	125

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Καμπύλη επιφανειακών εδαφικών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας	78
Εικόνα 2: Θέση Χωροσταθμικών ακίδων επί του Κτιρίου 33	89
Εικόνα 3: Θέση Χωροσταθμικών ακίδων επί του εδάφους	90
Εικόνα 4: Κατακόρυφες μετακινήσεις των Κτιρίων 33 και 152	92
Εικόνα 5: Γεωλογική Μηκοτομή Χ.Θ 0+149,75.....	77
Εικόνα 6: Γεωλογική Μηκοτομή Χ.Θ 0+426,9.....	77
Εικόνα 7: πιεζόμετρα εταιρείας SISGEO (Cassagrande & drive in).....	97

Εικόνα 8: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής..... 107

Πίνακας Χαρτών

Χάρτης 1: «Χάρτης μετρό Αθήνας»	13
Χάρτης 2: Γεωλογικός Χάρτης Αττικής.....	18
Χάρτης 3: Χάρτης Προσανατολισμού Πρανών Περιοχής Μελέτης	19
Χάρτης 4: Χάρτης Κλίσεων Πρανών Περιοχής Μελέτης.....	19
Χάρτης 5: Γεωμορφολογικός Χάρτης Αττικής.....	29
Χάρτης 6: Υδρογεωλογικός Χάρτης Αττικής.....	35

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) του Ανώτερου Οριζοντα των Νεογενών από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT)	25
Διάγραμμα 2: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) του Κατώτερου Οριζοντα των Νεογενών από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT)	25
Διάγραμμα 3: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) στα υλικά του Ανώτερου Οριζοντα των Αθηναϊκών Σχιστολίθων από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT).	24
Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) σε συμπαγείς οριζοντες και φακοειδείς ζώνες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT).	25

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον καθηγητή μου, κ. Ε. Βουγιούκα για την πολύτιμη βοήθειά του, την ευγένειά του και τη συνεχή παρακολούθηση και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Μ.Νόβακ, Γ. Δημητρίου και Γ.Στούμπο του τμήματος Τεχνικής Γεωλογίας του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. καθώς και τον κυρίους Θ. Γκαβογιάννη και Δ. Αλιφραγκή του τμήματος Δομοστατικών Μελετών του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. για την πολύτιμη βοήθεια τους στη συλλογή των δεδομένων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για τη συνεχή στήριξη τους, που ήταν πολύ σημαντική για την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία διερευνώνται και αναλύονται οι καθιζήσεις που προέρχονται από τη διάνοιξη της σήραγγας για την επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα Αιγάλεω-Χαϊδάρη.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία για την πορεία του Μετρό της Αθήνας μέχρι σήμερα. Επίσης αναλύονται τα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος κατά τη σχεδίαση της σήραγγας και χαρτογραφούνται κτίρια, υποδομές και Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας που μπορούν να επηρεάσουν το σχεδιασμό και την κατασκευή της σήραγγας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος του άξονα του έργου, προκειμένου μέσω των στατιστικών δεδομένων που εξάγονται από τις εργαστηριακές δοκιμές να επιτύχουμε τη γεωμηχανική ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών σύμφωνα με το σύστημα GSI.

Στο τρίτη κεφάλαιο εξετάζονται όλα τα θέματα από γεωτεχνικής σκοπιάς με σκοπό να επιτευχθεί ο σχεδιασμός διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Τα θέματα αυτά αφορούν τις Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού και τις αντίστοιχες Γεωτεχνικές Παραμέτρους Σχεδιασμού σε κάθε υποτμήμα του έργου, για την εκτίμηση της ακτίνας επιρροής, των καθιζήσεων και της παροχής λόγω ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων που προέκυψαν από τη γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση του έργου σε σχέση με τις θεωρητικές προεκτιμήσεις, για να εξεταστεί η πιθανότητα σφάλματος των αρχικών μετρήσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εφαρμόζεται το μοντέλο προσομοίωσης Phase2. Με το μοντέλο αυτό προσομοιώνονται όλα τα γεωτεχνικά προβλήματα που παρουσιάζονται στο έργο, όπου θα εξεταστεί αν τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να βρίσκεται πιο κοντά στις πραγματικές τιμές σε σχέση με το μοντέλο Flac που χρησιμοποιήθηκε από τους μελετητές. Οι αναλύσεις γίνονται διακριτοποιώντας τα στοιχεία του εδάφους σε επιμέρους τριγωνικά 3-κομβικά στοιχεία και εφαρμόζοντας τα κριτήρια αστοχίας της Εδαφομηχανικής σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο του εδάφους.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν οι καθιζήσεις και η κίνηση του υπόγειου νερού στο έργο.

ABSTRACT

In the present thesis the settlements from the tunneling excavation for the extension of line 3 of the Athens Metro in the section from Egaleo station to Chaidari station are investigated, calculated and analyzed.

In the first chapter some general information is presented concerning the progress of the Athens Metro so far. Furthermore, the features of the urban environment are analyzed when designing the tunnel. Buildings, infrastructures and utility gribbs that can affect the designing and construction of the tunnel are charted.

The second chapter briefly outlines geological, hydrogeological and geotechnical conditions faced along the axis of the excavation, in order to achieve the geomechanical classification of the rock formations according to the GSI system, through the statistical data that are deduced by the laboratory tests.

In the third chapter all the geotechnical issues are examined so as the designing of the tunneling excavation and support be accomplished. These issues concern the Geotechnical Capacity Planning and the corresponding Geotechnical Design Parameters in every subsection of the project for the estimation of the influence radius, the settlements and the supply due to the drop of the ground water table.

The fourth chapter deals with the comparison of the actual values of the ground settlements which came from the geomechanical and structive observations with regard to the theoretical predicting estimations, so as the error probability of the initial measurements be examined.

In chapter five the simulation model Phase2 is applied. All the geotechnical problems that are presented in the project are simulated using this model. So, it will be examined whether the results could be closer to the actual values related to the FLAC model which was used by those who studied it. The analyses discretize the soil data in individual triangular three-key elements and apply the failure criteria of the Soil Mechanics in every finite element of the soil.

Finally chapter six presents the environmental effects that the settlements and the move of the ground water cause in the project.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενικά στοιχεία για την κατασκευή του μετρό στην Αθήνα

1.1 Περιγραφή Έργου

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο το δίκτυο συγκοινωνιών της Αθήνας ήταν ολοκληρωτικά κατεστραμμένο. Η μοναδική γραμμή Μετρό που υπήρχε ξεκινούσε από το λιμάνι του Πειραιά και συνέχιζε βόρεια, από την Πλατεία Ομονοίας μέχρι την πλατεία Αττικής.

Το 1978 το κράτος αναγνωρίζοντας την ανάγκη συστηματικού σχεδιασμού, προγραμματισμού και χάραξης οικονομικής πολιτικής στις αστικές συγκοινωνίες, ίδρυσε τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών, που είχε σαν σκοπό τον συντονισμό και την υποστήριξη των τριών εταιρειών συγκοινωνιών που είχαν συσταθεί προγενέστερα και ήταν:

- ❖ Η ιδιωτική εταιρεία Ηλεκτροκίνητων Μεταφορών, που ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία και εκμετάλλευση των τρόλεϊ στην Αθήνα και τον Πειραιά, που στην συνέχεια αντικαταστάθηκε από την κρατική εταιρεία ΗΛΠΑΠ (Ηλεκτροκίνητα Λεωφορεία Πειραιώς-Αθηνών και Προαστίων).
- ❖ Η ιδιωτική εταιρεία των Ελληνικών Ηλεκτροκίνητων Σιδηρόδρομων, η οποία ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία και εκμετάλλευση του Μετρό και της γραμμής τραμ Πειραιάς - Πέραμα, που αντικαταστάθηκε από την κρατική εταιρεία ΗΣΑΠ (Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι Αθηνών-Πειραιώς).
- ❖ Τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία που λειτουργούσαν κάτω από τον έλεγχο των ΚΤΕΛ και το 1978 περιήλθαν στην κατοχή της κρατικής εταιρείας ΕΑΣ (Εταιρεία Αστικών Συγκοινωνιών).

Το 1991 ιδρύεται η Ανώνυμη Εταιρεία "ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ" με σκοπό τη μελέτη, κατασκευή, οργάνωση, διοίκηση, λειτουργία, εκμετάλλευση και ανάπτυξη του δικτύου του Μετρό στην περιοχή του Νομού Αττικής. Σήμερα το έργο αποτελείται από τρεις γραμμές:

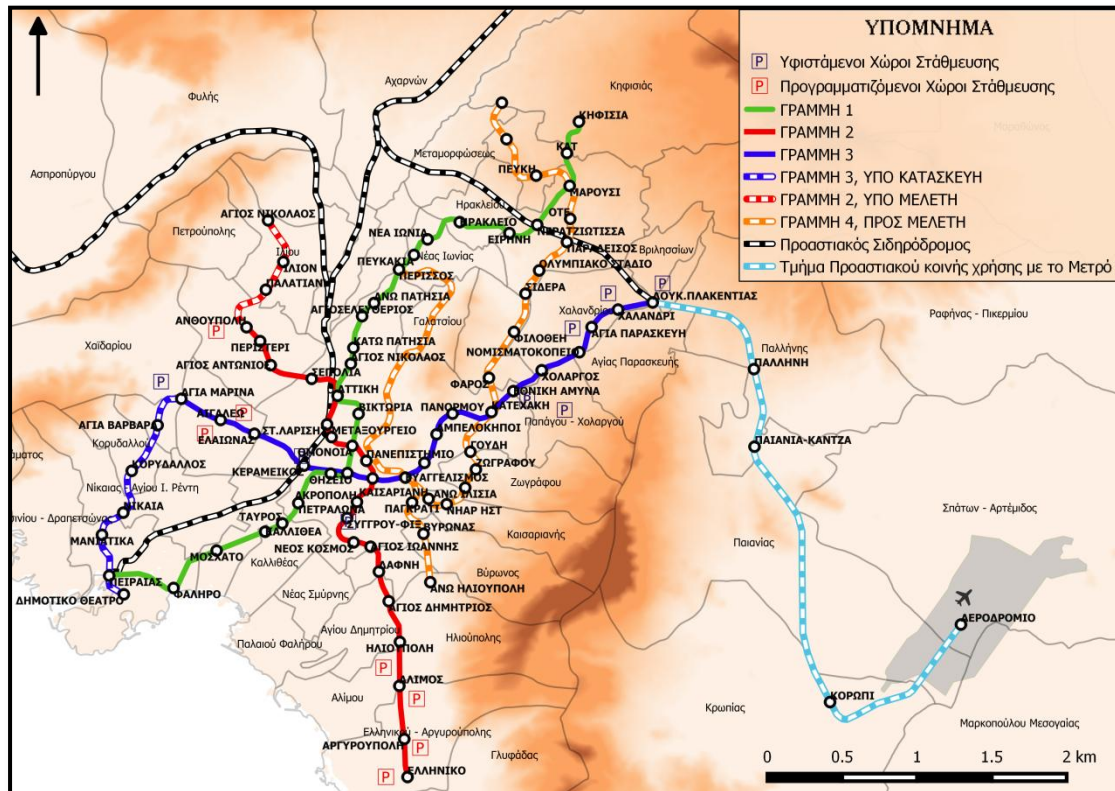
- ❖ Τη γραμμή 1 - που ανήκει στον ΗΣΑΠ, αποτελείται από 24 σταθμούς και εκτείνεται από τον Πειραιά έως την Κηφισιά.
- ❖ Τη γραμμή 2 - του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, αποτελείται από 20 σταθμούς ενώ αναμένεται η κατασκευή 3 ακόμη σταθμών από την Ανθούπολη έως τον Άγιο Νικόλαο.
- ❖ Και τέλος τη γραμμή 3 - του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, που αποτελείται από 21 σταθμούς ενώ αναμένεται η κατασκευή 6 ακόμη σταθμών προς την Αγία Βαρβάρα, τον Κορυδαλλό, τη Νίκαια, τα Μανιάτικα και τον Πειραιά.

Σύμφωνα με τη Μελέτη Ανάπτυξης Μετρό (1995 - 1999), προβλεπόταν η κατασκευή δύο νέων Επεκτάσεων σε υφιστάμενες γραμμές, δηλαδή στη Γραμμή 2 (Πανεπιστήμιο-Εξάρχεια-Αλεξάνδρας-Δικαστήρια-Κυψέλη-Γαλάτσι-Άλσος Βεΐκου) και στη Γραμμή 3 (Πανόρμου-Φάρος-Σίδρα-ΟΑΚΑ-Παράδεισος-Μαρούσι).

Όμως διαπιστώθηκε ότι οι εν λόγω επεκτάσεις δεν ήταν τεχνικά εφικτό, καθώς θα εμφανιζόντουσαν σημαντικές κατασκευαστικές και λειτουργικές αδυναμίες (διακοπή λειτουργίας της γραμμής, σύνθετη κατασκευή, υψηλό κόστος, συχνότητα των δρομολογίων, κ.λπ.).

Σε αυτό το πλαίσιο, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. προχώρησε στη μελέτη και οργάνωση μίας νέας αυτόνομης Γραμμής 4 σε σχήμα U, η οποία θα περιλαμβάνει τα παραπάνω δύο-

ακτινικού χαρακτήρα -σκέλη (Πανεπιστήμιο - Γαλάτσι και Κατεχάκη - Μαρούσι) και κεντρικό τμήμα που θα συνδέει τα προαναφερθέντα ακτινικά τμήματα μέσω των περιοχών Παγκρατίου/Καισαριανής, Άνω Ιλισίων, Ζωγράφου και Γουδή. Η Γραμμή 4 θα έχει ανταπόκριση με τις υφιστάμενες γραμμές, Γραμμές 1 (στους Σταθμούς Μαρούσι, Περισσός), Γραμμή 2 (στον Σταθμό Πανεπιστήμιο) και Γραμμή 3 (στους Σταθμούς Ευαγγελισμός και Κατεχάκη). Στη Γραμμή αυτή προστέθηκε ο κλάδος Ευαγγελισμός - Παγκράτι - Βύρωνας - Υμηττός - Άνω Ηλιούπολη που ουσιαστικά αποτελεί τμήμα της νέας Γραμμής 5, καθώς και οι επεκτάσεις Μαρούσι - Λυκόβρυση και Άλσος Βεΐκου - Περισσός.



Χάρτης 1: «Χάρτης μετρό Αθήνας»

(Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε., Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Αθήνας)

1.2 Χαρακτηριστικά αστικού περιβάλλοντος κατά τη σχεδίαση της σήραγγας

Κατά την επιλογή μίας διαδρομής για την κατασκευή μίας σήραγγας και στη συνέχεια τον καθορισμό της κάθετης και της οριζόντιας χάραξης, οι περιορισμοί που υφίστανται δύνανται να προκαλέσουν κινδύνους για τον σχεδιασμό και την κατασκευή της σήραγγας. Η τελική επιλογή της διαδρομής αποτελεί συνήθως προϊόν ενός συμβιβασμού μεταξύ της ικανοποίησης των λειτουργικών και τεχνολογικών απαιτήσεων και της άμβλυσης ή της αποφυγής των ενδεχόμενων παρεμποδίσεων που συνδέονται με τους περιορισμούς.

1.2.1 Κτίρια και Υποδομές

Τα κτίρια αποτελούν τον πιο συνήθη τύπο εμποδίου, που μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα κατά τον καθορισμό του συνόλου της χάραξης της σήραγγας.

Για την μείωση των πιθανών κινδύνων που συνδέονται με τα κτίρια, θα πρέπει να διεξαχθεί μία εξειδικευμένη εκτίμηση της κατάστασης του κτιρίου και ακολούθως μια αξιολόγηση της επικινδυνότητας της κατάστασης της κατασκευής.

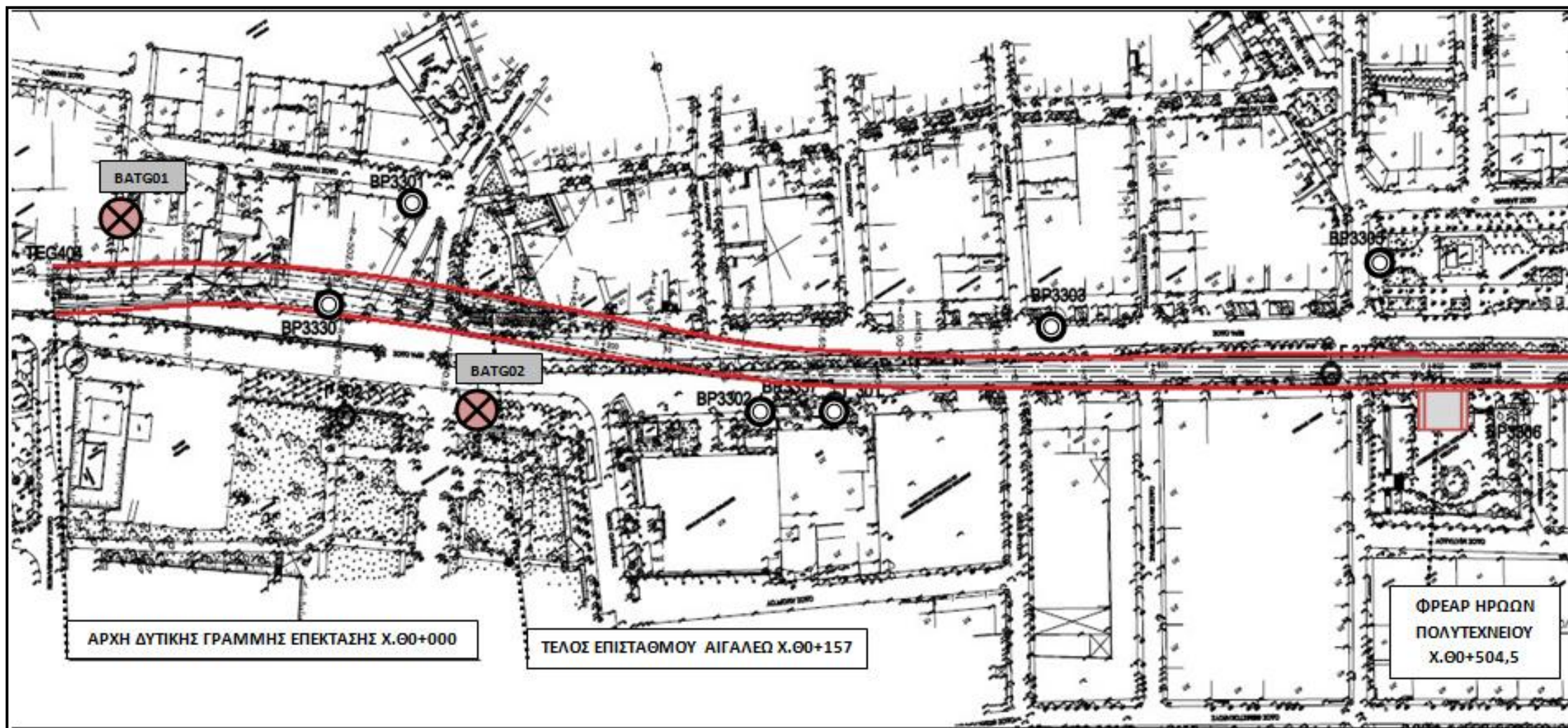
Σημαντικές παρεμβολές που συνδέονται με τις υπάρχουσες υποδομές τόσο πάνω όσο και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους είναι οι:

- ❖ Υπόγειες διαβάσεις και μεγάλες οδικές αρτηρίες
- ❖ Υπόγειες γραμμές συστημάτων
- ❖ Σιδηροδρομικές γραμμές
- ❖ Χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων
- ❖ Σωλήνες ύδρευσης
- ❖ Υπόνομοι.
- ❖ και η παρουσία βαθιάς θεμελίωσης επί πασσάλων

Τέτοια εμπόδια αποτελούν μία ομάδα αυστηρών περιορισμών για τον προσδιορισμό της διαδρομής χάραξης και μπορούν να επιλυθούν μόνο με την μετατόπιση της νέας χάραξης σε άλλο επίπεδο.

Σύμφωνα με το σχήμα 1 της Γενικής Οριζοντιογραφίας κατά μήκος της χάραξης η σήραγγα διέρχεται κάτω από ένα κτίριο μονώροφο, δύο διώροφα και δύο τριώροφα καθώς και κάτω από ένα πρατήριο καυσίμων, έως περίπου τη Χ.Θ.0+200. Στο υπόλοιπο τμήμα της η σήραγγα διέρχεται κάτω από την Ιερά Οδό.

Στην ευρύτερη ζώνη επιρροής της σήραγγας, εκατέρωθεν του άξονα της χάραξης βρίσκονται περίπου τρία κτίρια με περισσότερους από δύο ορόφους, ορισμένα από τα οποία με υπόγειο. Από τα υπόλοιπα κτίρια τρία είναι διώροφα και ένα μονώροφο με υπόγειο, ενώ στο τέλος της χάραξης υπάρχει ένα πεντάροφο κτίριο με υπόγειο, της Εγνατίας Τράπεζας σε απόσταση περί τα 22m από τον άξονα της σήραγγας. Τα περισσότερα από αυτά είναι κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος χτισμένα την τελευταία τριακονταετία.



Σχήμα 1: Απόσπασμα Οριζοντιογραφίας της κύριας σήραγγας από Χ.Θ0+000-Χ.Θ0+500 (με τις θέσεις των γεωτρήσεων), Κλίμακα 1:1000

(Πηγή: Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης-Επέκταση Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω-Χαϊδάρι)

1.2.2 Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας

Δίκτυα κοινής ωφέλειας είναι τα δημόσια δίκτυα ενός αστικού περιβάλλοντος που έχουν τοποθετηθεί υπόγεια.

Η κατασκευή της σήραγγας και των αντίστοιχων σταθμών να επηρεάσουν άμεσα ή έμμεσα τα δίκτυα κοινής ωφέλειας. Σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και η διάτρηση για τις ερευνητικές γεωτρήσεις ή την ενίσχυση του εδάφους μπορεί να χτυπήσουν κατευθείαν κάποιο δίκτυο και να προκαλέσουν ζημιά.

Επομένως, πρέπει να μελετηθεί η ύπαρξη δικτύων κοινής ωφέλειας και να καταγραφούν οι θέσεις τους ώστε να επιλέγει ανάλογα με αυτές η κατάλληλη θέση χάραξης.

Όσον αφορά υπόγειες κατασκευές που μπορεί να επηρεάζουν το έργο, στο τμήμα αυτό έχει εντοπιστεί ένα πηγάδι δεξιά της χάραξης σε λειτουργία και ένας σηπτικός βόθρος καθώς και δύο πηγάδια επιχωματωμένα αριστερά της χάραξης και ένα πηγάδι επί της χάραξης το οποίο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στη Χ.Θ. 0+200 περίπου.

Κεφάλαιο 2: Γεωλογία-Υδρογεωλογία

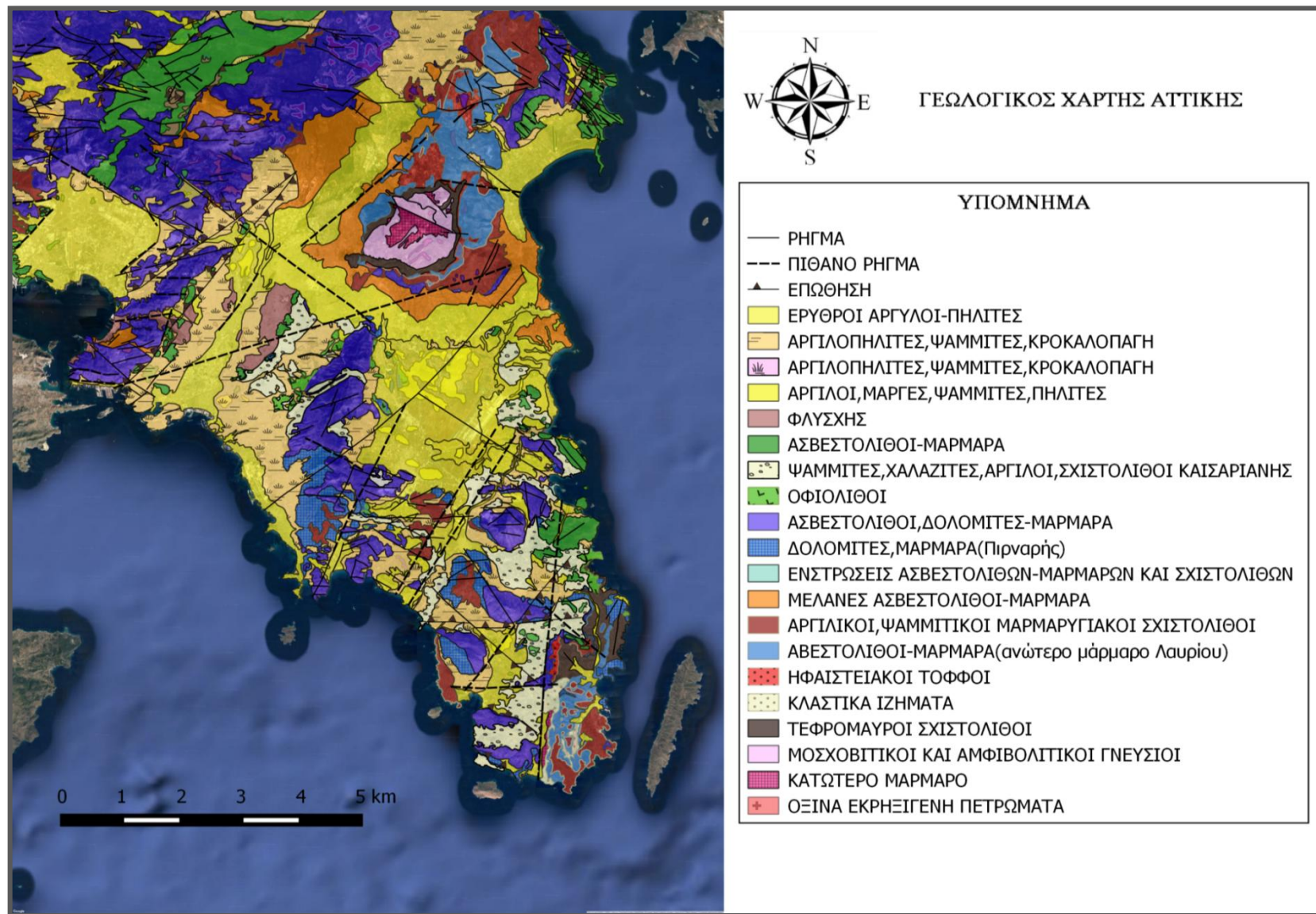
2.1 Γεωλογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής του Λεκανοπεδίου

Η ευρύτερη περιοχή του Λεκανοπεδίου της Αττικής κατά τον Παπανικολάου et al (2004), ανήκει στην ενδιάμεση τεκτονομεταμορφική ζώνη και η τεκτονική της θέση τοποθετείται μέσα στο τεράστιο τεκτονικό παράθυρο Αττικής-Κυκλάδων, το οποίο διακρίνεται στις παρακάτω ενότητες:

- i. Την ενότητα Αττικής που είναι η σχετικά αυτόχθονη, δηλαδή η κατώτερη τεκτονική ενότητα της Αττικής, πάνω στην οποία βρίσκονται επωθημένες διάφορες άλλες ενότητες, όπως της Α.Ελλάδας, Λαυρίου και Αλμυροποτάμου.
- ii. Το μη μεταμορφωμένο κάλυμμα της Αν. Ελλάδας σχηματίζει μια τεκτονική επαφή ΑΒΑ-ΔΝΔ διεύθυνσης στην βόρεια Αττική κατά μήκος των βουνών Αιγάλεω, Ποικίλου και Πάρνηθας. Η επαφή αυτή αποτελεί ένα ρήγμα εφελκυστικής αποκόλλησης. Η επαφή της ενότητας Αττικής με την ενότητα Αλμυροποτάμου έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ στην περιοχή του Αλμυροποτάμου πάνω στους σχηματισμούς της Αττικής.
- iii. Αντίθετα το κάλυμμα της ενότητας Λαυρίου-Αλλόχθονο Αθηνών απαντά σε διάσπαρτες εμφανίσεις σε Αττική και Λαύριο. Η ενότητα Αττικής είναι μεταμορφωμένη και έντονα παραμορφωμένη με διεύθυνση δομών ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ και αποτελείται από μια μεγάλη μάζα μαρμάρων, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολιτικούς κτλ. Μέσα στους σχιστόλιθους υπάρχουν βασικά και υπερβασικά μεταμορφωμένα πετρώματα.

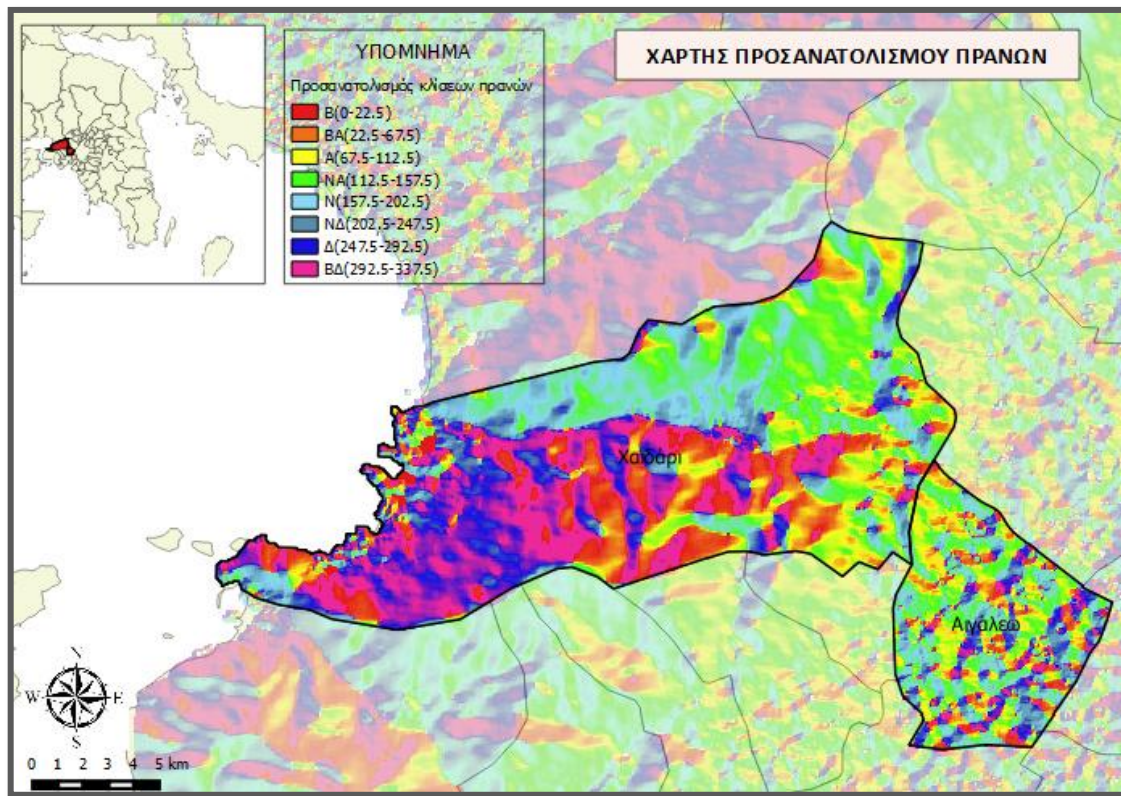
Η στρωματογραφική στήλη του λεκανοπεδίου κλείνει με τα μεταλικά ιζήματα που καλύπτουν ασύμφωνα τα αλπικά ιζήματα και διακρίνονται σε νεογενή (θαλάσσια και λιμναία-λιμνοχερσαία του Μειοκαίνου-Πλειοκαίνου) και τεταρτογενή (Πλειστοκαινικές ποτάμιες αποθέσεις και ανααθμίδες, κορήματα, ριπίδια και κώνοι κορημάτων).

Στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται οι ανώτεροι ορίζοντες της στρωματογραφικής στήλης δηλαδή η υποενότητα των νηριτικών ασβεστολίθων, η υποενότητα των Αθηναϊκών σχιστολίθων, τα λιμναία -λιμνοχερσαία νεογενή και τα τεταρτογενή ιζήματα.



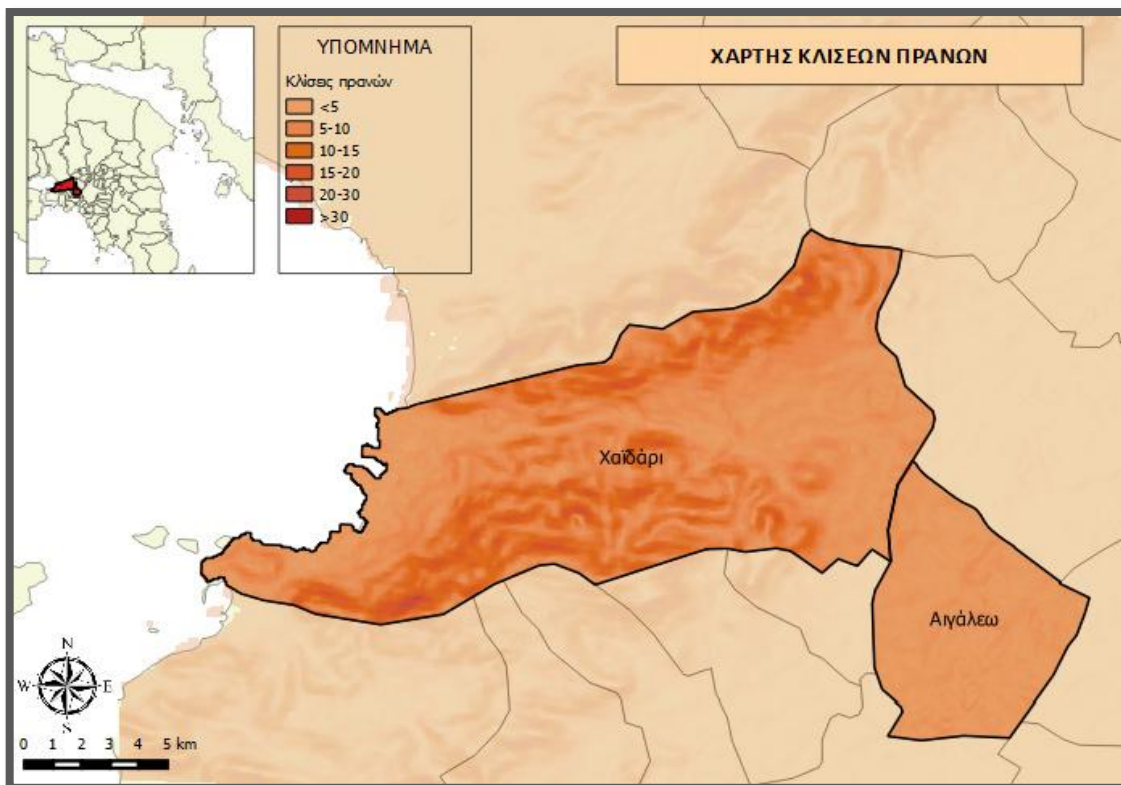
Χάρτης 2: Γεωλογικός Χάρτης Αττικής

(Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)



Χάρτης 3: Χάρτης Προσανατολισμού Πρανών Περιοχής Μελέτης

(Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)



Χάρτης 4: Χάρτης Κλίσεων Πρανών Περιοχής Μελέτης

(Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)

2.2 Γεωτεχνική συμπεριφορά σχηματισμών

Σε αυτή την υποενότητα κατατάσσουμε από γεωτεχνικής απόψεως στις παρακάτω ενότητες τους σχηματισμούς που εντοπίστηκαν στην περιοχή μελέτης μας, οι οποίοι είναι:

A. Επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί

Επιφανειακοί θεωρούνται οι τεταρτογενείς σχηματισμοί και τα παραμένοντα εδάφη των Αθηναϊκών Σχιστολίθων και των νεογενών σχηματισμών.

B. Νεογενή

Εντός των νεογενών σχηματισμών διακρίνονται οι εξής βασικές γεωτεχνικές ενότητες σχηματισμών :

- i. Ο ανώτερος ορίζοντας των νεογενών περιλαμβάνει κυρίως μάργες, ελαφρώς έως πολύ αποσαθρωμένες, καθώς και αργιολίθους.
- ii. Ο κατώτερος ορίζοντας περιλαμβάνει ασβεστιτικούς ιλυόλιθους, ψαμμίτες και κροκαλολατυποπαγή. Τα υλικά του κατώτερου ορίζοντα εμφανίζουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με του ανώτερου ορίζοντα. Μέσα στα υλικά αυτά σε μεγάλα βάθη υπάρχουν ενσπρώσεις λιγνίτη, που όμως δεν επηρεάζουν το έργο.
- iii. Κατά θέσεις εντός της λεκάνης των νεογενών, υπάρχουν μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι μέτρια έως υψηλής αντοχής και χαμηλής αποσάθρωσης. Οι σχηματισμοί αυτοί απαντώνται σε μεγάλα βάθη γεγονός που δεν επηρεάζει την διάνοιξη της σήραγγας στο κομμάτι που μελετάμε.

C. Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

Ο σχηματισμός διακρίνεται με βάση τη διακύμανση των μηχανικών και λιθολογικών του χαρακτηριστικών.

- i. Ο ανώτερος ορίζοντας τους αποτελείται από εναλλαγές μεταψαμμιτών και μεταίλυολίθων, με μηδενική έως μέτρια αποσάθρωση κατά θέσεις.
- ii. Ο κατώτερος περιλαμβάνει γραουβάκες και αργιλικούς σχιστόλιθους, με μηδενική έως μέτρια αποσάθρωση με κατά τόπους υψηλή όμως, ενώ παρουσιάζουν μικρότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους ανώτερους ορίζοντες.
- iii. Παρουσιάζονται βραχώδεις παρεμβολές αρκετά συμπαγείς, χαμηλής αποσάθρωσης, που στην ουσία δεν επηρεάζουν τον σχεδιασμό του έργου. Αυτές οι παρεμβολές περιέχουν δύο κατηγορίες υλικών. Στην πρώτη έχουμε φακοειδείς ζώνες ασβεστιτικού ψαμμίτη έως κρυσταλλικού ασβεστολίθου ελαφρώς κερματισμένου. Μέσα στη μάζα των υλικών του ανώτερου ορίζοντα εμφανίζονται ασβεστιτικοί ψαμμίτες έως κρυσταλλικοί ασβεστολίθοι, ελαφρώς καρστικοποιημένοι. Στο έργο δεν εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση πέρα από τον σταθμό του Χαϊδαρίου που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την εκσκαφή. Οι βραχώδεις παρεμβολές γραουβακών και φακών Επιδοιτικών Σχιστολίθων εντός του κατώτερου ορίζοντα των Αθηναϊκών σχιστολίθων, απαντώνται σε μεγάλα βάθη που δεν επηρεάζουν τη διάνοιξη των σηράγγων αλλά παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με τους αργιλικούς

σχιστολίθους που τους περιβάλλουν και επομένως δεν μπορούν να ενσωματωθούν μαζί τους από γεωτεχνικής απόψεως.

2.2.1 Διαφοροποιήσεις Κατά Μήκος του Άξονα του Έργου

Στην παρούσα εργασία μελετάμε το κομμάτι από το Φρέαρ Άλσους (Χ.Θ 0+000) έως το Φρέαρ Ηρώων Πολυτεχνείου (Χ.Θ 0+500). Κατά μήκος της χάραξης απαντώνται οι παρακάτω σχηματισμοί:

❖ **Τμήμα Α: από Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+120**

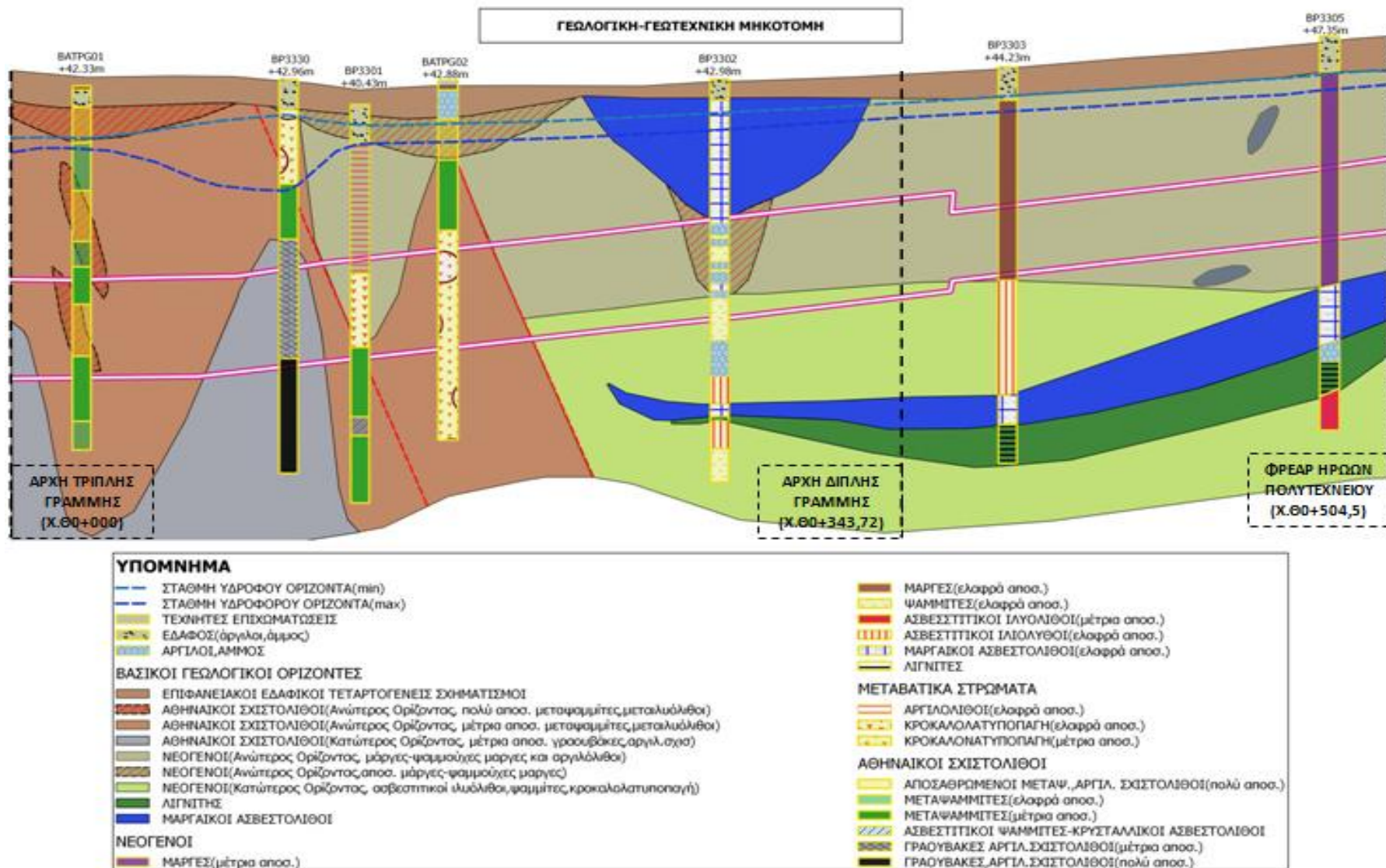
Στο τμήμα αυτό ο περιβάλλον σχηματισμός είναι οι Αθηναϊκοί σχιστολίθοι του Ανώτερου και Κατώτερου Ορίζοντα. Το φυσικό έδαφος κυμαίνεται από +43m έως +43.5m, ενώ το απόλυτο υψόμετρο της ερυθράς βαίνει από +14,7m στο +16,5m και τέλος η ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από +37m έως +39,4m.

❖ **Τμήμα Β: από Χ.Θ. 0+120 έως Χ.Θ. 0+180**

Εδώ βρίσκουμε τη μεταβατική ζώνη μεταξύ του Αθηναϊκού Σχιστολίθου(ανώτερος ορίζοντας) και της τάφρου των νεογενών. Το φυσικό έδαφος κυμαίνεται από +42,5m έως +43m, ενώ το απόλυτο υψόμετρο της ερυθράς βαίνει από το +16.5m στο +18,7m. Η ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από +38m έως +38,7m.

❖ **Τμήμα Γ: από Χ.Θ. 0+180 έως τη Χ.Θ. 0+500**

Στο τελευταίο τμήμα της περιοχής μελέτης ο περιβάλλον σχηματισμός είναι οι ανώτεροι ορίζοντες των νεογενών. Το φυσικό έδαφος κυμαίνεται από +42,5m έως +56,5m, ενώ το απόλυτο υψόμετρο της ερυθράς βαίνει από +18.5m έως +38.8m. Η ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από +38,7m έως 50m.



Σχήμα 2: Γεωτρήσεις Κατά Μήκος Του Άξονα Του Έργου (Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)

2.2.2 Μηχανικές ιδιότητες σχηματισμών

Σε αυτή την υποενότητα περιγράφονται μερικά στατιστικά δεδομένα που προέρχονται από τις εργαστηριακές δοκιμές των γεωτεχνικών ερευνών. Προσδιορίστηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές θλιπτικής αντοχής του βράχου (σ_{ci}) που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των σχηματισμών αλλά και για το σχεδιασμό των έργων. Η τιμή θλιπτικής αντοχής που προκύπτει από κάθε δοκιμή αποτελεί κάτω όριο της θεωρητικής αντοχής άρρηκτου βράχου (σ_{ci}) που θα αναμενόταν εφόσον αυτό είχε πραγματικά μηδενική αποσάθρωση και πλήρη απουσία ασυνεχειών.

A. Ανώτερος Ορίζοντας Νεογενών

Τα εδαφικά υλικά του σχηματισμού συναντώνται είτε επιφανειακά σαν μανδύας αποσάθρωσης του βραχώδους υλικού είτε σε στρώσεις μέσα στο σχηματισμό. Από τις εργαστηριακές δοκιμές που έλαβαν χώρα προέκυψαν τα ακόλουθα:

Κοκκομετρία-ποσοστό λεπτοκόκκων (διερχόμενου κόσκινου N° 200)	18 έως 99%
Δείκτης Πλαστικότητας (PI)	από NP (μή πλαστικό) έως 40 %
Διατμητική αντοχή από αστράγγιστες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CU)	$c = 12,8-37,1 \text{ kPa}$, $\phi = 17-31^\circ$
Διατμητική Αντοχή από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές με αρχική στερεοποίηση και μέτρηση πιέσεων πόρων (CU_{pp})	$c = 22-32 \text{ kPa}$, $\phi = 17-20^\circ$
Διατμητική Αντοχή από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές χωρίς αρχική στερεοποίηση (UU)	$c = 63-82 \text{ kPa}$, $\phi = 6^\circ$
Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης (συνεκτικού) εδαφικού δείγματος	$q_u = 98- 652 \text{ kPa}$

Συμπερασματικά οι παραπάνω τιμές αντοχών που προέκυψαν θεωρούνται χαμηλές και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού αφού αναφέρονται αποκλειστικά στις εδαφικές στρώσεις που παρεμβάλλονται στο βραχώδη ορίζοντα χωρίς να καθορίζουν και τη γεωτεχνική συμπεριφορά του.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Θλιπτική Αντοχή¹	$\sigma_c=0,26-9,55 \text{ MPa}$, $\bar{\sigma}_c=2,84 \text{ MPa}$
Εφελκυστική Αντοχή (από δοκιμές Brazilian)	$\sigma_t=0,50-2,48 \text{ MPa}$, $\bar{\sigma}_t=1,07 \text{ MPa}$
Αντοχή σε δοκιμή σημειακής φόρτισης	$Is_{50}=0,10 - 0,76 \text{ MPa}$, $Is_{50}=0,32 \text{ MPa}$
Θλιπτική Αντοχή (ανηγμένη από δοκιμές σημειακής φόρτισης)	$\sigma_c=1,30-9,82 \text{ MPa}$, $\bar{\sigma}_c=4,17 \text{ MPa}$

¹ Εάν δεν ληφθούν υπ' όψιν οι παραπάνω τιμές η μέση τιμή αντοχής προκύπτει $\sigma_c=3,64 \text{ MPa}$. Παρακάτω παρατίθεται στο διάγραμμα 1 η πυκνότητα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Οι τιμές $\sigma_c=0,26-0,63 \text{ MPa}$ καταδεικνύουν μικροδομές που αποτελούνται από συστήματα ασυνεχειών (επιφανειών μειωμένης αντοχής) γεγονός που δεν τα καθιστά αντιπροσωπευτικά του άρρηκτου βράχου για το υπ' όψιν υλικό.

Διατμητική Αντοχή Ασυνεχειών	$\phi' = 21,5-24,0^\circ$, $\bar{\phi}' = 22,8^\circ$, $c' = 0,09-0,10\text{MPa}$, $\bar{c}' = 0,095\text{MPa}$ (από δύο δοκιμές διάτμησης ασυνεχειών)
Θλιπτική αντοχή (σχεδιασμού) του άρρηκτου βράχου	$\sigma_{ci} = 3,00- 6,00\text{MPa}$

Από τις δοκιμές πρεσσιομέτρου (Menard) προέκυψαν οι τιμές «πρεσσιομετρικού» μέτρου $E_M = 22-384 \text{ MPa}$, οι οποίες θεωρούνται χαμηλές και μη αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού.

B. Κατώτερος Ορίζοντας Νεογενών.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής που πραγματοποιήθηκαν στο εδαφικό κλάσμα του σχηματισμού προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Κοκκομετρία-ποσοστό λεπτοκόκκων (διερχόμενου κόσκινου N° 200)	23 έως 68%
Δείκτης Πλαστικότητας (PI)	από NP (μή πλαστικό) έως 20 %
Διατμητική αντοχή από αστράγγιστες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CU)	$c = 12,1 \text{ kPa}$, $\phi = 32,5^\circ$
Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης (συνεκτικού) εδαφικού δείγματος	$q_u = 57-585 \text{ kPa}$.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με του ανώτερου ορίζοντα παρατηρούμε ότι έχουμε χαμηλότερο ποσοστό λεπτοκόκκων και χαμηλότερη πλαστικότητα.

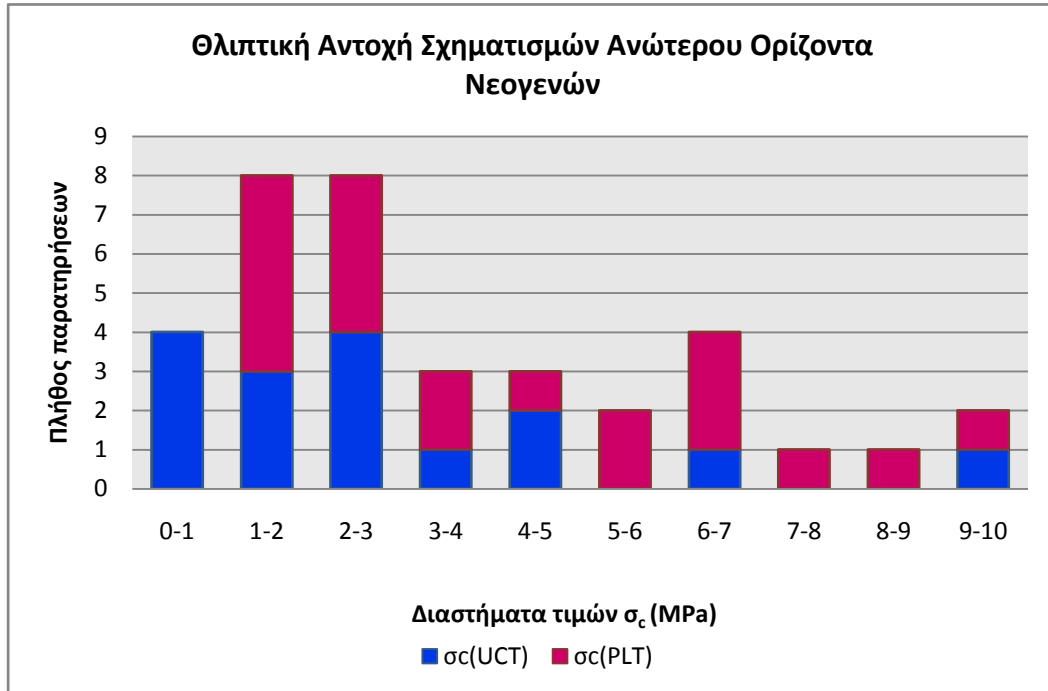
Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω για τον ανώτερο ορίζοντα οι τιμές αυτές θεωρούνται χαμηλές και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού για τους ίδιους ακριβώς λόγους.

Οι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής στο σχηματισμό αυτό έδωσαν τα εξής χαρακτηριστικά αποτελέσματα:

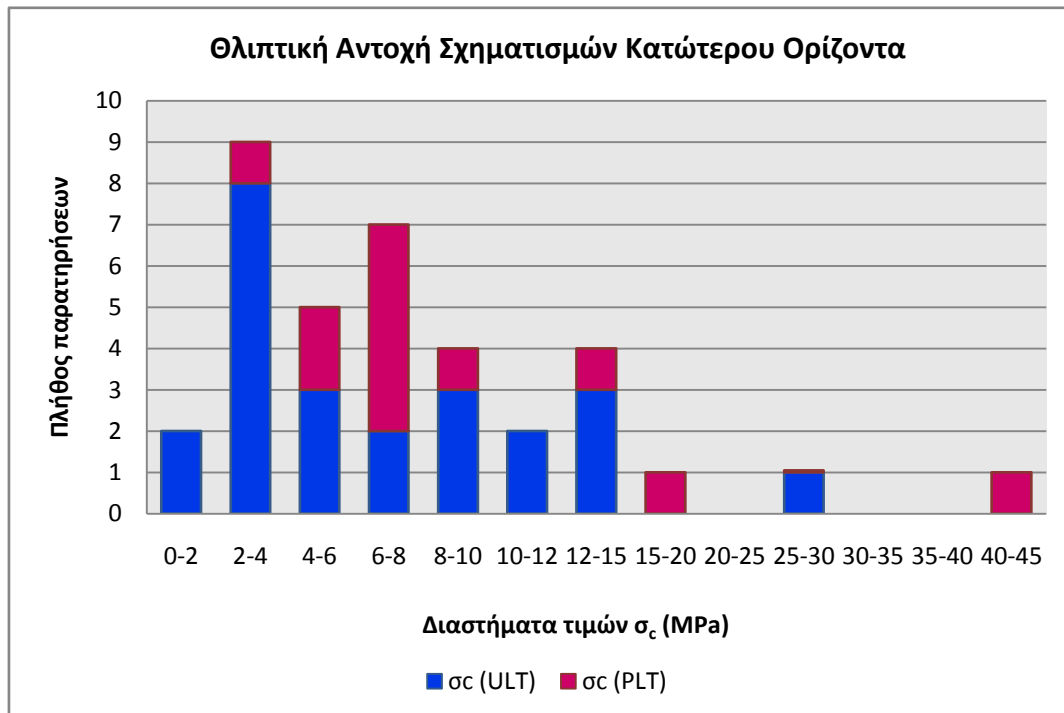
Θλιπτική Αντοχή	$\sigma_c = 1,36-28,97\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_c = 7,33\text{MPa}$
Εφελκυστική Αντοχή (από δοκιμές Brazilian)	$\sigma_t = 1,19 \text{ MPa}$ (1 δοκιμή σε ψαμμούχα μάργα)
Αντοχή σε δοκιμή σημειακής φόρτισης	$I_{S50} = 0,26-2,08\text{MPa}$, $\bar{I}_{S50} = 0,76\text{MPa}$
Θλιπτική Αντοχή (ανηγμένη από δοκιμές σημειακής φόρτισης)	$\sigma_c = 3,38-41,50\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_c = 11,10\text{MPa}$
Διατμητική Αντοχή Ασυνεχειών	$\phi' = 17,0-43,0^\circ$, $\bar{\phi}' = 27,3^\circ$, $c' = 0,08-0,20\text{MPa}$, $\bar{c}' = 0,13\text{MPa}$
Θλιπτική αντοχή (σχεδιασμού) του άρρηκτου βράχου	$\sigma_{ci} = 5-10\text{MPa}$.

Από τις δοκιμές πρεσσιομέτρου (Menard) που εκτελέστηκαν προέκυψαν οι τιμές «πρεσσιομετρικού» μέτρου $E_M = 63 - 328 \text{ MPa}$. Επιπλέον σε μία δοκιμή που έγινε σε εναλλαγές ασβεστολίθου-λιγνίτη (γεώτρηση BP3337, βάθος πυθμένα δοκιμής 34,5m) προέκυψε $E_M = 211\text{MPa}$.

Οι παραπάνω τιμές θεωρούνται χαμηλές, μη αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού, και προκύπτουν από τον αρχικό κύκλο φόρτισης όπου η επιρροή της διατάραξης του σχηματισμού λόγω της διάτρησης είναι σημαντική.



Διάγραμμα 1: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) του Ανώτερου Οριζοντα των Νεογενών από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT)



Διάγραμμα 2: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) του Κατώτερου Οριζοντα των Νεογενών από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT)

C. Ανώτερος Ορίζοντας Αθηναϊκών Σχιστολίθων

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρίως επιφανειακά σαν μανδύας αποσάθρωσης του βραχώδους υλικού, αλλά και σε στρώσεις μέσα στο σχηματισμό. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής παρατίθενται παρακάτω.

Κοκκομετρία-ποσοστό λεπτοκόκκων (διερχομένα κοσκίνου N° 200)	από 15 έως 52%
Δείκτης Πλαστιμότητας (PI)	από NP (μή πλαστικό) έως 27 %
Διατμητική Αντοχή από αστράγγιστες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CU)	$c = 0,5-33,1 \text{ kPa}$, $\phi = 18,5-34^\circ$
Διατμητική Αντοχή από στραγγιζόμενες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CD)	$c' = 3,4-22 \text{ kPa}$, $\phi' = 22-30,5^\circ$
Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης (συνεκτικού) εδαφικού δείγματος	$q_u = 53-158 \text{ kPa}$. Σε μία δοκιμή (γεώτρηση <i>BBTPG10</i> , βάθος 14m) προέκυψε $q_u = 486 \text{ kPa}$

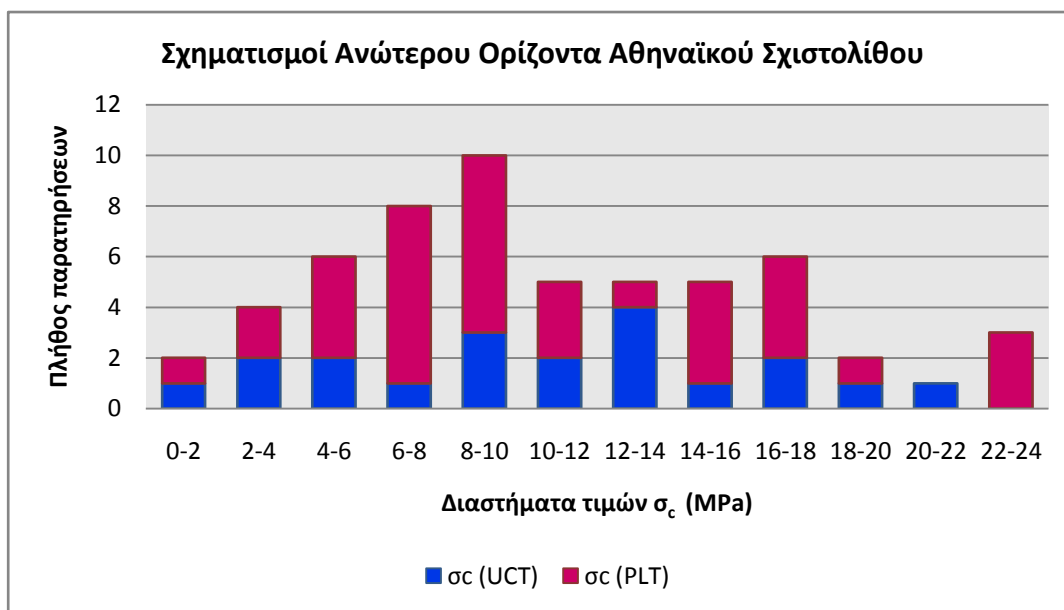
Οι σχετικές τιμές που ελήφθησαν σε δείγμα της **γεώτρησης BP3309**, δηλαδή ποσοστό λεπτοκόκκων 86% και $PI=45\%$, δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικές καθώς το υλικό αντιστοιχεί στη μεταβατική ζώνη μεταξύ αθηναϊκού σχιστολίθου και νεογενών.

Οι τιμές αυτές θεωρούνται χαμηλές και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού για τους ίδιους ακριβώς λόγους με τους ανωτέρω σχηματισμούς.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής προέκυψαν οι εξής χαρακτηριστικές τιμές:

Θλιπτική Αντοχή	$\sigma_c=1,59-20,08\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_c=10,63\text{MPa}$
Εφελκυστική Αντοχή (από δοκιμές Brazilian)	$\sigma_t=0,24-3,91\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_t=1,49\text{MPa}$
Αντοχή σε δοκιμή σημειακής φόρτισης	$I_{S50}=0,15-1,78\text{MPa}$, $\bar{I}_{S50}=0,83\text{MPa}$
Θλιπτική Αντοχή (ανηγμένη από δοκιμές σημειακής φόρτισης)	$\sigma_c=1,95-23,14\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_c=10,82\text{MPa}$
Διατμητική Αντοχή Ασυνεχειών	$\phi' = 20-52^\circ$, $\bar{\phi}' = 34,8^\circ$, $c' = 0,12-0,18\text{MPa}$, $\bar{c}' = 0,15\text{MPa}$
Θλιπτική αντοχή (σχεδιασμού) του άρρηκτου βράχου	$\sigma_{ci} = 6-14\text{MPa}$

Από τις δοκιμές πρεσσιομέτρου (Menard) προέκυψαν οι τιμές «πρεσσιομετρικού» μέτρου σε αρχική φόρτιση που βρίσκονται στο διάστημα $E_M = 30-232 \text{ MPa}$ ενώ για τον κύκλο επαναφόρτισης κυμαίνονται από $E_M = 327-371 \text{ MPa}$. Οι τιμές που προκύπτουν θεωρούνται γενικώς χαμηλές, μη αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού.



Διάγραμμα 3: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) στα υλικά του Ανώτερου Οριζοντα των Αθηναϊκών Σχιστολίθων από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT).

D. Κατώτερος Οριζοντας Αθηναϊκών Σχιστολίθων

Από τις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Κοκκομετρία-ποσοστό λεπτοκόκκων (διερχόμενα κοσκίνου Νο 200)	από 7 έως 52%
Δείκτης Πλαστιμότητας (PI)	από NP (μή πλαστικό) έως 24 %.
Διατμητική Αντοχή από αστράγγιστες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CU)	$c = 13,3 \text{ kPa}$, $\phi = 30,5^\circ$
Διατμητική Αντοχή από στραγγιζόμενες δοκιμές απευθείας διάτμησης με αρχική στερεοποίηση (CD)	$c' = 2,1 - 33,6 \text{ kPa}$, $\phi' = 17-26^\circ$
Δοκιμή Ανεμπόδιστης Θλίψης (συνεκτικού) εδαφικού δείγματος	$q_u = 54-185 \text{ kPa}$.

Οι παραπάνω τιμές αντοχών θεωρούνται χαμηλές και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αντιπροσωπευτικές του σχηματισμού.

Στα συγκεκριμένα υλικά έγινε περιορισμένος αριθμός δοκιμών βραχομηχανικής από τις οποίες προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Αντοχή σε δοκιμή σημειακής φόρτισης (3 δοκιμές)	$Is_{50}=0,35-1,35\text{MPa}$, $\bar{Is}_{50}=0,77\text{MPa}$
Θλιπτική Αντοχή (ανηγμένη από δοκιμές σημειακής φόρτισης)	$\sigma_c=4,49-17,49\text{MPa}$, $\bar{\sigma}_c=10,05\text{MPa}$.
Θλιπτική αντοχή (σχεδιασμού) του άρρηκτου βράχου του κατώτερου οριζοντα των αθηναϊκών σχιστολίθων στην περιοχή τιμών	$\sigma_{ci} = 6-12\text{MPa}$

Οι βραχώμαζες του κατώτερου ορίζοντα των αθηναϊκών σχιστολίθων εμφανίζουν χαμηλότερου βαθμού ποιότητα σε σχέση με του ανώτερου, τα δείγματα που ελήφθησαν από συμπαγέστερα τεμάχια της κατώτερης ενότητας παρουσίασαν υψηλές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων. Έτσι, η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος δεν φαίνεται να διαφοροποιείται από τις αντίστοιχες τιμές των υλικών του ανώτερου ορίζοντα.

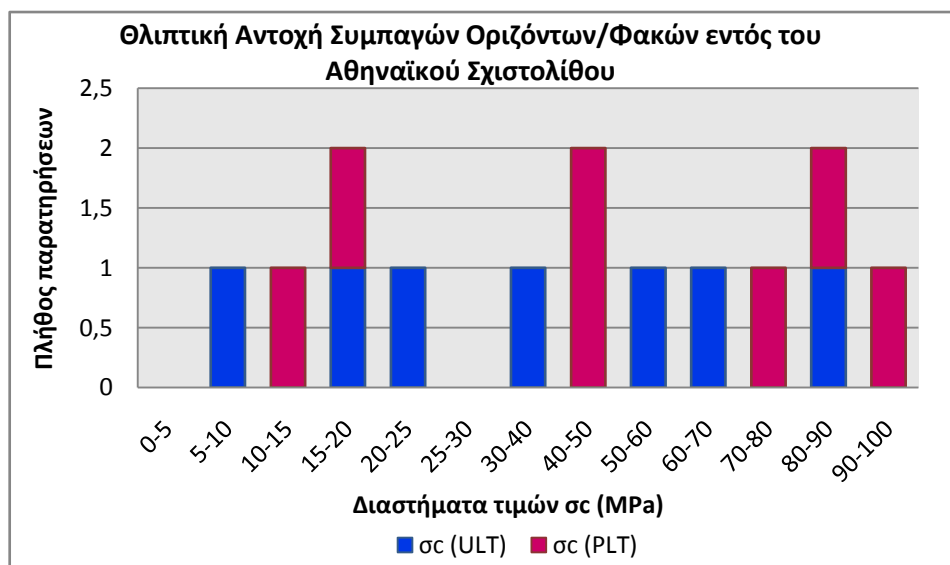
Από τις δοκιμές πρεσσιομέτρου (Menard) οι τιμές «πρεσσιομετρικού» μέτρου σε αρχική φόρτιση βρίσκονται στο διάστημα $E_M = 27-371$ MPa και για τον κύκλο επαναφόρτισης κυμαίνονται από $E_M = 304-631$ MPa, ενώ σε μία δοκιμή που εκτελέστηκαν κύκλοι δεύτερης και τρίτης επαναφόρτισης (**BBTPG10, βάθος πυθμένα 35,5m**) προέκυψε $E_M = 4864$ MPa. Οι τιμές που αντιστοιχούν σε επαναφόρτιση προσεγγίζουν τις αναμενόμενες επί τόπου τιμές Μέτρου Ελαστικότητας των σχηματισμών.

Ε. Οριζόντες/φακοειδείς ζώνες Ασβεστολίθων-Επιδοτιτικών Σχιστολίθων εντός της ενότητας των Αθηναϊκών Σχιστολίθων.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής προέκυψαν συνολικά οι εξής τιμές:

Θλιπτική Αντοχή	$\sigma_c = 7,8-80,26$ MPa, $\bar{\sigma}_c = 39,78$ MPa
Εφελκυστική Αντοχή (από δοκιμές Brazilian)	$\sigma_t = 3,02-10,50$ MPa, $\bar{\sigma}_t = 5,94$ MPa
Αντοχή σε δοκιμή σημειακής φόρτισης	$I_{S50} = 0,81-4,54$ MPa, $\bar{I}_{S50} = 2,81$ MPa
Θλιπτική Αντοχή (αηγημένη από δοκιμές σημειακής φόρτισης)	$\sigma_c = 10,53-90,8$ MPa, $\bar{\sigma}_c = 54,0$ MPa
Διατμητική Αντοχή Ασυνεχειών (1 δοκιμή)	$\phi' = 56,0^\circ$, $c' = 0,17$ MPa
Θλιπτική αντοχή (σχεδιασμού) του άρρηκτου βράχου	$\sigma_{ci} = 25-50$ MPa

Από μία δοκιμή πρεσσιομέτρου (Menard) που εκτελέστηκε στη ζώνη του ασβεστόλιθου εντός του κατώτερου ορίζοντα των αθηναϊκών σχιστολίθων (**BR3335, βάθος πυθμένα 35,5m**) προέκυψε ότι το «πρεσσιομετρικό» μέτρο σε κύκλο αρχικής φόρτισης είναι $E_M = 1041$ MPa. Η τιμή αυτή θεωρείται χαμηλή, μη αντιπροσωπευτική του σχηματισμού, και προέκυψε στην αντίστοιχη δοκιμή από τον αρχικό κύκλο φόρτισης όπου η επιρροή της διατάραξης του σχηματισμού λόγω της διάτρησης είναι σημαντική.



Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα Πυκνοτήτων Αντοχών Θλίψης (σ_c) σε συμπαγείς οριζόντες και φακοειδείς ζώνες του Αθηναϊκού Σχιστολίθου από εργαστηριακές δοκιμές Μονοαξονικής Θλίψης (UCT) και Σημειακής Φόρτισης (PLT).

2.2.3 Βαθμονόμηση Βραχομάζας

Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται οι βαθμονομήσεις κατά G.S.I και M.R της βραχομάζας που εκτελέστηκαν στις γεωτρήσεις των νεογενών σχηματισμών. Ενώ πιο αναλυτικά βρίσκονται στο παράρτημα.

A. Βαθμονομήσεις κατά το σύστημα M.R.

Για τη βαθμονόμηση της βραχομάζας στο σύστημα M.R. ακολουθήθηκαν οι οδηγίες που περιγράφονται στο Παράρτημα Δ.

B. Βαθμονομήσεις κατά το σύστημα G.S.I.

Εκφράζει αριθμητικώς την απομείωση των σταθερών του υλικού, αναλόγως της ρηγματώσεως της βραχομάζας (Hoek & Marinos, 2000 και Marinos & Hoek, 2000)². Λόγω της ετερογένειας των υλικών χρησιμοποιήθηκαν διαγράμματα GSI για τους Αθηναϊκούς σχιστολίθους (φλύσχης, Marinos & Hoek, 2001).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΥΛΙΚΑ		
Ζώνη	Αναλογία Υλικού	Χαρακτηριστικά
I	100% ΣΚΛΗΡΟ	Συμπεριφέρεται σαν βράχος. Εφαρμογή αρχών βραχομηχανικής στον προσδιορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού.
II	90% ΣΚΛΗΡΟ 10% ΜΑΛΑΚΟ	Μαλακό υλικό κατά μήκος των ασυνεχειών. Επηρεάζονται από την παρουσία του η διατμητική αντοχή, η παραμορφωσιμότητα και η διαπερατότητα
III	90-50% ΣΚΛΗΡΟ 10-50% ΜΑΛΑΚΟ	Ο αλληλοκλειδωμένος βραχώδης σκελετός επηρεάζει την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα. Το μαλακό υλικό επηρεάζει την διαπερατότητα
IV	50-30% ΣΚΛΗΡΟ 50-70% ΜΑΛΑΚΟ	Ο αλληλοκλειδωμένος βραχώδης σκελετός επηρεάζει την αντοχή Το μαλακό υλικό ή τα προϊόντα αποσάθρωσης στις ασυνέχειες επηρεάζουν την παραμορφωσιμότητα και την περατότητα
V	<30% ΣΚΛΗΡΟ 70-100% ΜΑΛΑΚΟ	Η συμπεριφορά καθορίζεται από το μαλακό υλικό. Η παρουσία πυρήνων δεν πρέπει να αγνοείται στις κατασκευές.
VI	ΠΑΡΑΜΕΝΟΝ ΕΔΑΦΟΣ	Συμπεριφέρεται σαν έδαφος, ωστόσο τα υπολείμματα δομής μπορεί να έχουν κάποια επίδραση στις ιδιότητες

Πίνακας 1: Κατηγορίες αποσάθρωσης ετερογενών υλικών (Πηγή: "The description and classification of weathered rock for engineering purposes" Geol. Soc. Engin. Group Work. Party Report (1995))

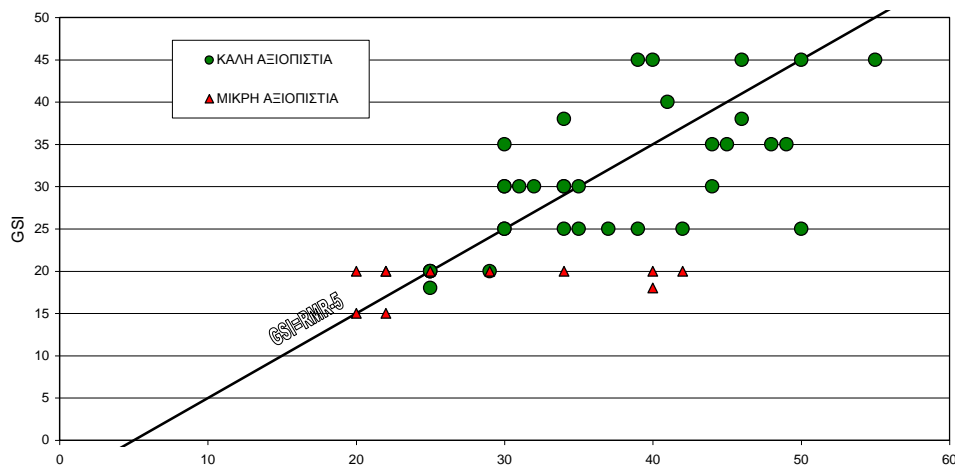
² Η πρόσφατη επίλυση του κριτηρίου Hoek and Brown γίνεται με το πρόγραμμα Roclab που μπορεί να αναζητηθεί ελεύθερα στο διαδίκτυο. (www.roscience.com).

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την διάκριση των σκληρών και μαλακών υλικών, ή των εδαφοποιημένων, βραχωδών και ενδιάμεσων φάσεων των πυρήνων των γεωτρήσεων, περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

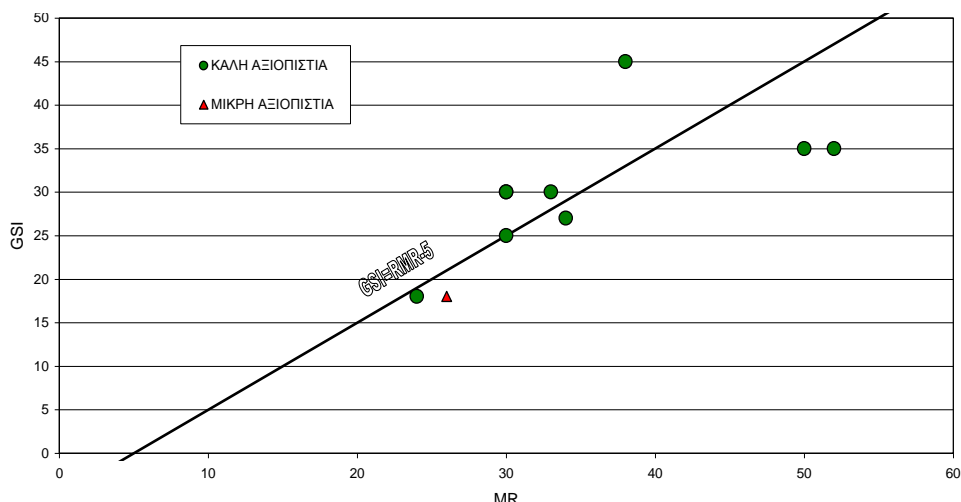
Κριτήρια	Μαλακά-Εδαφοποιημένα (ε)	Ενδιάμεσα	Σκληρα-Βραχωδη (β)
Διείσδυση με μαχαίρι	>1.5 cm	0.2 – 1.5 cm	<0.2 cm
Χάραξη	Με νύχι	-	Με μαχαίρι
Σπάσιμο με το χέρι	Κομμάτια < 20 cm	Κομμάτια 20 cm	Δεν σπάει
Διάλυση στο νερό	ναι	-	οχι

Πίνακας 2: Κριτήρια διάκρισης υλικών.

Η εκτίμηση του δείκτη έγινε με βάση το διάγραμμα για τους ρηγματωμένους βράχους. Η αξιολόγηση των εκτιμήσεων έγινε με βάση τις συστάσεις για τα πιο πιθανά πεδία του GSI για τις ελληνικές βραχομάζες (Μαρίνος Β., Μαρίνος Π και Hoek E. στο “ Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI. Εφαρμογή, Συστάσεις, Περιορισμοί και Πεδία Μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του Πετρώματος” Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου ΕΓΕ (2004)).



Γράφημα 1: Συσχέτιση Βαθμονομήσεων GSI – MR για τους Αθηναϊκούς Σχιστολίθους



Γράφημα 2: Συσχέτιση Βαθμονομήσεων GSI – MR για τα Νεογενή.

Στα παραπάνω γραφήματα γίνεται ο συσχετισμός των τιμών GSI και MR για τις γεωτρήσεις της συμπληρωματικής γεωτεχνικής έρευνας όπου φαίνεται ότι για μεν τα νεογενή καλός συσχετισμός των εκτιμήσεων με βάση και την προτεινόμενη από τον Hoek (1989) σχέση, για δε τους Αθηναϊκούς σχιστολίθους οι τιμές του GSI είναι ελαφρά συντηρητικές.

C. Γεωμηχανική Ταξινόμηση Σχηματισμών

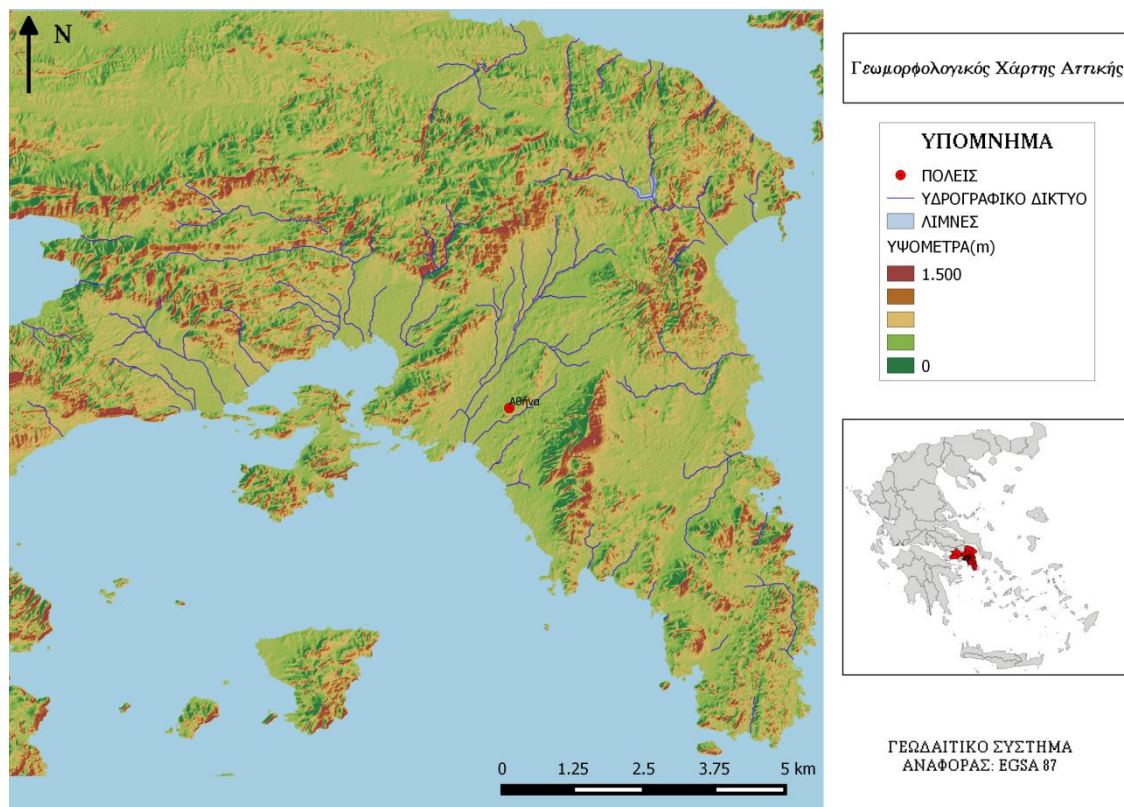
Με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI) για λόγους ταξινόμησης και εκτίμησης της γεωτεχνικής συμπεριφοράς οι βραχώδεις σχηματισμοί κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Τύπος Εδάφους	Κύριες Κατηγορίες Σχηματισμών	Περιγραφή
Βράχος	Μαλακός Βράχος (SR)	(1) Πολύ σκληροί συνεκτικοί εδαφικοί σχηματισμοί και πλήρως εξαλλοιωμένοι βραχώδεις σχηματισμοί με τιμές $N_{SPT} > 50$ (2) Βραχώδεις σχηματισμοί πολύ ασθενούς αντοχής με $GSI < 15$
	Βράχος Ε (RE)	Βραχώδεις σχηματισμοί ασθενούς αντοχής με $15 < GSI < 20$
	Βράχος Δ (RD)	Βραχώδεις σχηματισμοί ασθενούς έως πολύ ασθενούς αντοχής με $20 < GSI < 25$
	Βράχος Γ (RC)	Βραχώδεις σχηματισμοί με $25 < GSI < 35$
	Βράχος Β (RB)	Βραχώδεις σχηματισμοί με $35 < GSI < 45$
	Βράχος Α (RA)	Βραχώδεις σχηματισμοί με $GSI > 45$

Πίνακας 3: Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχωδών Σχηματισμών

2.3 Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης. Επίσης θα γίνει αναφορά σε επί μέρους θέματα όπως τη υδρολιθολογική συμπεριφορά των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών, τη κίνηση του υπόγειου ύδατος, τις διακυμάνσεις των επιμέρους υδροφόρων οριζώντων και οι υδρογεωλογικές ενότητες που δημιουργούνται.



Χάρτης 5: Γεωμορφολογικός Χάρτης Αττικής (Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)

2.3.1 Κίνηση Υπόγειου Ύδατος

Προκειμένου να μελετηθεί η κίνηση του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή μελέτης έλαβε χώρα πλήθος γεωτρήσεων, από τις οποίες προέκυψε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ο επιφανειακός και αναπτύσσεται σε βάθος 3m εντός των κορηματικού των τεταρτογενών αποθέσεων και του αμμοχαλικώδους μανδύα των Αθηναϊκών σχιστολίθων. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις, ενώ τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται αύξηση της στάθμης του λόγω της περιορισμένης χρήσης των υφιστάμενων υδροληπτικών έργων.

Εντός των Αθηναϊκών Σχιστολίθων και των νεογενών σχηματισμών αναπτύσσονται υδροφόροι ορίζοντες μικρής δυναμικότητας που τροφοδοτούνται από τους γειτονικούς ορεινούς όγκους. Οι ορίζοντες αυτοί αναμένεται να είναι επάλληλοι, μερικώς υπό πίεση και η κυκλοφορία του νερού πιθανότατα να βρίσκεται εντός των ζωνών αυξημένου βαθμού κερματισμού και βαθιών αξόνων πτυχών.

Γεώτρηση	Υψηλότερη τιμή στάθμης υπόγειων υδάτων		Χαμηλότερη τιμή στάθμης υπόγειων υδάτων	
	Βάθος στάθμης (m)	Υψόμετρο στάθμης (m)	Βάθος στάθμης (m)	Υψόμετρο στάθμης (m)
TEG404	-4,00 (-1,70 κατά τη διάτρηση)	+39,75 (+42,05 από τη διάτρηση)	-	-
BATPG01	-5,30 (-3,70 κατά τη διάτρηση)	+37,03(+38,63 από τη διάτρηση)	-6,34	+35,99
BP3330	-3,40 (-1,00 κατά τη διάτρηση)	+39,56 (+41,96 από τη διάτρηση)	-11,30	+31,66
Γ302	-2,80 (κατά τη διάτρηση)	+40,10 (από τη διάτρηση)	-	-
BP3301	-2,04	+38,39	-4,00	+36,43
BATPG02	-4,00	+38,88	-4,30	+38,58
BP3302	-3,35 (-2,00 κατά τη διάτρηση)	+39,63 (+40,98 από τη διάτρηση)	-5,10	+37,88
Γ301	-4,00 (-3,60 κατά τη διάτρηση)	+38,95 (+39,35 από τη διάτρηση)	-	-
BH3303	-4,70 (κατά τη διάτρηση)	+39,53 (από τη διάτρηση)	-	-
Γ377	-4,00 (κατά τη διάτρηση)	+42,57 (από τη διάτρηση)	-5,10 (κατά τη διάτρηση)	+41,47 (από τη διάτρηση)
BP3305	-4,00	+43,35	-5,42	+41,93
BP3306	-3,90	+44,69	-17,63	+30,96

Πίνακας 4: Στάθμη υπόγειων υδάτων στις θέσεις των γεωτρήσεων

Όπως παρατηρούμε και παραπάνω στον συγκεντρωτικό πίνακα η στάθμη των υπογείων υδάτων βρέθηκε σε μικρό βάθος, που κυμαίνεται με βάση του συνόλου των μετρήσεων από -1,00 έως -5,30m κάτω από το φυσικό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, στο κομμάτι της χάραξης Χ.Θ. 0+000 έως Χ.Θ. 0+100, όπου κυριαρχούν οι Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι, η στάθμη των υπογείων υδάτων κυμαίνεται από -1,0 έως -4,0m, κάτω από το φυσικό έδαφος, ενώ στο κομμάτι(Χ.Θ. 0+100 έως Χ.Θ.0+500) των Νεογενών η στάθμη των υπογείων υδάτων κυμαίνεται από -2,00 έως -4,70m.

Αυτές οι στάθμες βρίσκονται πολύ κοντά στην επαφή του επιφανειακού μανδύα πλήρους αποσάθρωσης και του συμπαγούς τμήματος των μειωμένης διαπερατότητας υποκείμενων βραχωδών σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή. Με βάση όσο προαναφέρθηκαν η αναμενόμενη στάθμη των υδάτων ανά τμήμα είναι:

- 1) Για το υποτμήμα της σήραγγας που διανοίγεται μέσα στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο (Χ.Θ. 0+000 έως Χ.Θ. 0+120)
 - ❖ Μέσο απόλυτο υψόμετρο επιφανείας φυσικού εδάφους: +43,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +43,0 έως +44,0m).
 - ❖ Μέση αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (μέση Σ.Υ.Ο.): βάθος 3,0m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +40,50m).
 - ❖ Ανώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.): βάθος 1,0m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +42,50m).
 - ❖ Κατώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (min Σ.Υ.Ο.): βάθος 5,0m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +38,50m).
- 2) Για το υποτμήμα της σήραγγας που διανοίγεται μέσα στη μεταβατική ζώνη (Χ.Θ. 0+120 έως Χ.Θ. 0+180)
 - ❖ Μέσο απόλυτο υψόμετρο επιφανείας φυσικού εδάφους: +42,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +42,0 έως +42,50m).
 - ❖ Μέση αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (μέση Σ.Υ.Ο.): βάθος 3,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +38,50m έως +39,0m).
 - ❖ Ανώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.): βάθος 1,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +40,50m έως +41,0m).
 - ❖ Κατώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (min Σ.Υ.Ο.): βάθος 5,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +36,50m έως +37,0m).
- 3) Για το υποτμήμα της σήραγγας μέσα στα Νεογενή υλικά (Χ.Θ. 0+180 έως Χ.Θ. 0+500)
 - ❖ Μέσο απόλυτο υψόμετρο επιφανείας φυσικού εδάφους: +45,0m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +42,0 έως +48,0m).
 - ❖ Μέση αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (μέση Σ.Υ.Ο.): βάθος 3,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +38,50m έως +44,50m).
 - ❖ Ανώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.): βάθος 1,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +40,50m έως +46,50m).
 - ❖ Κατώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (min Σ.Υ.Ο.): βάθος 5,50m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +36,50m έως +42,50m).

2.3.2 Διαπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών

Κατά τη διάτρηση των γεωτρήσεων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο των γεωτεχνικών ερευνών, εκτελέστηκαν επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας τύπου Maag και Lugeon σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς αντίστοιχα.

Σκοπός αυτών των δοκιμών ήταν η εκτίμηση της διαπερατότητας των σχηματισμών από τους οποίους συνίσταται το υπέδαφος της περιοχής. Στον **πίνακα 5** περιγράφονται όλες οι δοκιμές που έλαβαν χώρα για κάθε γεώτρηση.

Γεώτρηση	Τύπος δοκιμής	Βάθος δοκιμής (m)	Μέσος συντελεστής διαπερατότητας k (cm/sec)	Γεωτεχνική κατάταξη σχηματισμών
BATPG01	Maag	15-15,7	-	Σχιστόλιθοι (αποσαθρωμένοι μεταψαμμίτες)
	Maag	27,4-28	-	Σχιστόλιθοι (μεταψαμμίτες)
BP3330	Maag	13,7-15,7	$2,2 \times 10^{-6}$	Σχιστόλιθοι (μεταψαμμίτες)
	Maag	18,5-20,5	$3,5 \times 10^{-6}$	Σχιστόλιθοι (αργιλικόι σχιστόλιθοι)
	Maag	24-25,5	$3,8 \times 10^{-6}$	Σχιστόλιθοι (αργιλικόι σχιστόλιθοι)
	Maag	28,8-30,7	$4,5 \times 10^{-7}$	Σχιστόλιθοι (αποσαθρωμένοι αργιλικόι σχιστόλιθοι)
BP3301	Lugeon	9,2-14,2	$2,13 \times 10^{-4}$ ($0,99 - 37,0 \times 10^{-5}$)	Λατυποπαγές με ενστρώσεις αργιλολίθου
	Maag	19-20,5	$7,50 \times 10^{-6}$	Λατυποπαγές
	Maag	23,5-24,9	$1,50 \times 10^{-5}$	Λατυποπαγές
	Maag	29-30,4	$1,20 \times 10^{-5}$	Σχιστόλιθοι (μεταψαμμίτες)
BATPG02	Maag	13,4-14,4	$3,05 \times 10^{-5}$	Νεογενή (μαργαϊκός ασβεστόλιθος)
	Maag	21,5-23	$9,83 \times 10^{-6}$	Λατυποπαγές
BP3302	Lugeon	10-15	-	Νεογενή (μαργαϊκός ασβεστόλιθος)
	Lugeon	14,95-19,95	$0,81 \times 10^{-5}$ ($0,62 - 0,94 \times 10^{-5}$)	Νεογενή (εναλλαγές μάργας και μαργαϊκού)

	Lugeon	19,5-24,5	$1,97 \times 10^{-3}$ ($1,08-3,24 \times 10^{-3}$)	ψαμμίτη) Νεογενή (εναλλαγές μάργας, μαργαϊκού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστολίθου)
	Lugeon	25-30	$5,43 \times 10^{-4}$ ($3,13-8,66 \times 10^{-4}$)	Νεογενή (Ασβεστιτικός λυόλιθος και ψαμμίτες)
BH3303	Lugeon	10-15	Απώλειες >75 lt/min	Νεογενή (μάργα)
	Lugeon	15-20	$1,96 \times 10^{-6}$ ($0,92-5,92 \times 10^{-6}$)	Νεογενή (μάργα και ασβεστιτικός λυόλιθος)
	Lugeon	19,7-24,7	$8,88 \times 10^{-6}$ ($0,38-1,24 \times 10^{-5}$)	Νεογενή (μάργα)
BP3305	Maag	14-15	2×10^{-7}	Νεογενή (μάργα)
	Maag	18,5-20,2	-	Νεογενή (μάργα)
	Maag	22,5-24,4	8×10^{-7}	Νεογενή (μάργα)
BP3306	Lugeon	10,3-15,3	$2,3 \times 10^{-5}$ ($2-3 \times 10^{-5}$)	Νεογενή (μάργα)
	Lugeon	16-21	1×10^{-5} ($0,6-1,8 \times 10^{-5}$)	Νεογενή (ασβεστιτικός ηλιόλιθος)
	Lugeon	20,6-25,6	$4,4 \times 10^{-5}$ ($3,7-5,8 \times 10^{-5}$)	Νεογενή (ασβεστιτικός ηλιόλιθος και μαργαϊκός ασβεστόλιθος)

Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας.

Στο αρχικό κομμάτι της σήραγγας εμφανίζεται κυρίως Αθηναϊκός Σχιστόλιθος. Θεωρητικά οι σχηματισμοί που τον συνιστούν παρά την ετερογένειά τους, μπορούν να χαρακτηριστούν ως σχηματισμοί χαμηλής διαπερατότητας. Αυτό βέβαια καθορίζεται κυρίως από τις διαρρήξεις που συναντώνται στη μάζα τους.

Στη **γεώτρηση BATPG01** (Βάθους -15 έως -15,7m και από -27,4 έως -28m), έλαβαν χώρα δύο δοκιμές Maag για τις στρώσεις μεταψαμμίτη εντός του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που έδειξαν πρακτικά μηδενικές απώλειες υδάτων, γεγονός που επιβεβαιώνει και τα όσα προαναφέρθηκαν παραπάνω. Επομένως, οι εισροές υδάτων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας εκτιμάται ότι θα είναι περιορισμένες. Σύμφωνα με την υδρογεωλογική μελέτη του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε (αρ.Σχ. 3GWOCW18OC902B) προτάθηκε συντελεστής

διαπερατότητας για τους σχιστόλιθους $k=2,49 \times 10^{-8}$ m/sec και $k=3,58 \times 10^{-7}$ m/sec στη μεταβατική ζώνη.

Οι μεγάλες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας λαμβάνονται κυρίως στα χαλαρά, κερματισμένα και αποσαθρωμένα τμήματα των μαργαϊκών σχηματισμών που, όπου και παρατηρήθηκε ολική απώλεια υδάτων, όπως αποδεικνύεται και στη γεώτρηση BP3302 (σε βάθος από -10 έως -15m), και στη γεώτρηση BH3303 (σε βάθος από -10 έως -15m).

Επίσης αυξημένες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας παρατηρήθηκαν στη στρώση κερματισμένου λατυποπαγούς με ενστρώσεις μάργας στη γεώτρηση BP3301 (σε βάθος από -9 έως -14m) στην περιοχή της μεταβατικής ρηξιγενούς ζώνης των Νεογενών και του Αθηναϊκού Σχιστολίθου, όπως και στρώση εναλλαγών μάργας, μαργαϊκού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστολίθου της γεώτρησης BP3302 (σε βάθος > από 15m).

Στο τμήμα των νεογενών και λατυποπαγών παρατηρήθηκε διακύμανση της διαπερατότητας κατά τις δοκιμές. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στον τύπο των δοκιμών (όπου οι δοκιμές Lugeon δίνουν συνήθως υψηλότερες τιμές του μέσου συντελεστή διαπερατότητας), είτε στην αυξημένη πυκνότητα των διαρρήξεων των χαλαρών και διαπερατών υλικών.

Όταν οι αυξημένες τιμές αναφέρονται σε απομονωμένες υδραυλικά στρώσεις, τότε δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς αναφέρονται σε περιστασιακές εμφανίσεις τους. Έτσι ο μέσος συντελεστής διαπερατότητας των Νεογενών κυμαίνεται στην τάξη του $k=10-5 \text{ cm/sec}$. Όμως λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία ζωνών αυξημένης διαπερατότητας που προσδιορίστηκαν σε κάποιες δοκιμές, προτάθηκε ο συντελεστής των νεογενών που θα χρησιμοποιηθεί να είναι μεγαλύτερος από την τιμή που προαναφέρθηκε. Για αυτό σύμφωνα με την υδρογεωλογική μελέτη (αρ. Σχ. 3GWOCW18OC902B) προτάθηκε ο συντελεστής διαπερατότητας των Νεογενών να είναι $k=9,48 \times 10^{-7}$ m/sec.

Συνοψίζοντας από τα παραπάνω, προτείνονται για τους υπολογισμούς οι ακόλουθες τιμές του μέσου συντελεστή διαπερατότητας, μεταβιβατικότητας και εναποθήκευσης για το σύνολο των σχηματισμών που ενοπίστηκαν κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής:

❖ Τμήμα από Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+150

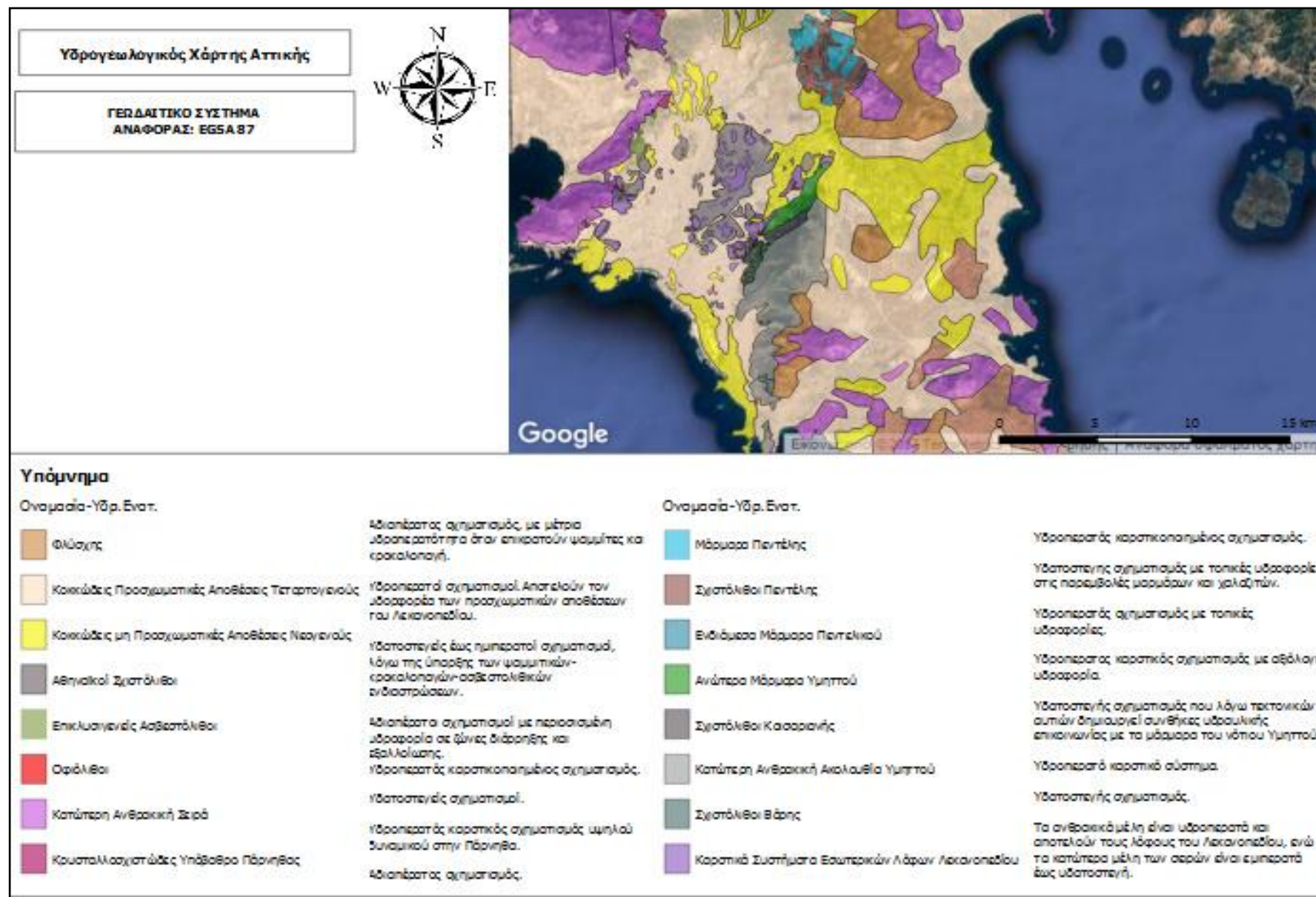
Ο συντελεστής διαπερατότητας υπολογίστηκε ότι ισούται με $k=2,49 \times 10^{-8}$ m/sec ο συντελεστής μεταβιβατικότητας $T=1,12 \times 10^{-6}$ m²/sec και εκτιμήθηκε συντελεστής εναποθήκευσης $S=0,005$.

❖ Τμήμα από Χ.Θ. 0+150 έως Χ.Θ 0+190

Ο συντελεστής διαπερατότητας υπολογίστηκε ότι ισούται με $k=3,6 \times 10^{-7}$ m/sec ο συντελεστής μεταβιβατικότητας $T=1,6 \times 10^{-5}$ m²/sec και εκτιμήθηκε συντελεστής εναποθήκευσης $S=0,005$.

❖ Τμήμα από Χ.Θ. 0+190 έως τη Χ.Θ 0+500

Ο συντελεστής διαπερατότητας υπολογίστηκε ότι ισούται με $k=9,48 \times 10^{-7}$ m/sec ο συντελεστής μεταβιβατικότητας $T=4,27 \times 10^{-5}$ m²/sec και εκτιμήθηκε συντελεστής εναποθήκευσης $S=0,005$.



Χάρτης 6: Υδρογεωλογικός Χάρτης Αττικής (Πηγή: Ιδία Επεξεργασία)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Γεωτεχνικές Συνθήκες

3.1 Γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται όλα τα θέματα από γεωτεχνικής σκοπιάς, με σκοπό να επιτευχθεί ο σχεδιασμός διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Τα θέματα αυτά αφορούν:

- ❖ Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού (ΓΤΣ) και οι αντίστοιχες Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού (ΓΠΣ), για τις αναλύσεις της προσωρινής υποστήριξης της κύριας σήραγγας με πεπερασμένα στοιχεία.
- ❖ Τα φορτία σχεδιασμού της τελικής επένδυσης της κύριας σήραγγας.
- ❖ Την εκτίμηση της ποσότητας εισροών και των απαιτούμενων αντλήσεων κατά τη διάνοιξη της κύριας σήραγγας.
- ❖ Την εκτίμηση των καθιζήσεων και την επίδραση τους.

Στο πρώτο υποτμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+120 οι σχηματισμοί που συναντώνται χαρακτηρίζονται ως ασθενούς έως πολύ ασθενούς αντοχής, ενώ κατά θέσεις απαντώνται στρώσεις με μεγαλύτερη αντοχή.

Στο δεύτερο υποτμήμα Χ.Θ. 0+120 έως 0+180 βρίσκεται η επαφή Αθηναϊκών Σχιστολίθων και νεογενών, που είναι τεκτονικής προέλευσης. Τα υλικά αυτής της μεταβατικής ζώνης είναι συγγενικά με την ενότητα των σχιστολίθων για αυτό και ο σχεδιασμός της σήραγγας θα βασιστεί στις τομές γεωτεχνικού σχεδιασμού που θα εφαρμοστούν και στους σχιστολίθους.

Στο τελευταίο τμήμα Χ.Θ 0+180 έως 0+500 οι ανώτεροι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ασθενούς έως μέτριας αντοχής, ενώ κατά θέσεις υπάρχουν πολύ αποσαθρωμένοι και εξαλοιωμένοι σχηματισμοί. Συναντώνται επίσης στρώσεις συμπαγούς έως μέτρια αποσαθρωμένου μαργαϊκού ασβεστολίθου με μέτρια υψηλής έως υψηλής αντοχής, που χαρακτηρίζεται από μέτριας έως καλής ποιότητας βραχομάζα και υψηλό γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI=40-60).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, διακρίνονται τα ακόλουθα στρώματα με βάση τα οποία θα διαμορφωθούν οι Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της σήραγγας στο τμήμα που εξετάζεται:

- ❖ Στρώμα I : Επιφανειακός σχηματισμός (Στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή)
- ❖ Στρώμα II : Σχιστόλιθοι (Κατηγορίες από Βράχος Γ έως Μαλακός Βράχος)
- ❖ Στρώμα III : Νεογενή (Κατηγορίες από Βράχος Β έως Βράχος Ε)

Όλες οι σήραγγες του Αττικό Μετρό έχουν σχεδιαστεί και διανοιχτεί με την παραδοχή συνθηκών πλήρους στραγγιζόμενων περιοχών. Το τμήμα που μελετάμε είναι χαμηλής διαπερατότητας, η επίδραση στην ακτίνα επιρροής της ζώνης στράγγισης είναι μικρή, άρα η ζώνη υποβιβασμού των υπόγειων υδάτων θα είναι περιορισμένη.

3.2 Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού (ΓΤΣ)

Τα τμήματα σχεδιάστηκαν με τη δυσχερέστερη ΓΤΣ, ανεξαρτήτως των εδαφικών συνθηκών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ενδεχόμενη επιβάρυνση των σηράγγων από μεγαλύτερα εδαφικά φορτία, λόγω ανακατανομής των τάσεων στο έδαφος από την κατασκευή των φρεάτων προσβολής των σηράγγων.

3.2.1 Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού Υποτμήματος 1

- ❖ Διάνοιξη σήραγγας μέσα στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο (Χ.Θ.0+000 έως 0+120) και στη μεταβατική ζώνη (Χ.Θ.0+120 έως 0+180)

Για το συγκεκριμένο υποτμήμα προτάθηκαν 4 τυπικές Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού, οι ΓΤΣ-1, ΓΤΣ-2, ΓΤΣ-3 και ΓΤΣ-4.

Υπολογιστικό Καθεστώς Υπογείων Υδάτων

- Μέσο απόλυτο υψόμετρο επιφανείας φυσικού εδάφους: +43,5m
- Μέση αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (μέση Σ.Υ.Ο.): βάθος 3m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +40,5m).
- Ανώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.): βάθος 1m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +42,5m).
- Κατώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (min Σ.Υ.Ο.): βάθος 5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο +38,5m).

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-1

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Γ** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +43,5 έως +40m). Το στρώμα αυτό αποτελείται από τεφροπράσινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και θραύσματα. Από γεωμηχανικής απόψεως κατατάσσεται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).
- Στρώμα II-1: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +40m). Αποτελείται κυρίως από καστανοπράσινους έως καστανότεφρους μεταψαμμίτες και μεταιλυόλιθους.

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-2

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Δ** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +43,5 έως +40m). Τα στρώματα είναι τεφροπράσινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και θραύσματα. Γεωμηχανικός ταξινομούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil – Cohesionless).
- Στρώμα II-2: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +40m). Είναι καστανοπράσινοι έως καστανότεφροι μεταψαμμίτες και μεταιλυόλιθοι ή κριζοκύανοι έως σκούροι κυανοί μεταιλυόλιθοι/αργιλικόι σχιστόλιθοι-γραουβάκες.

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-3

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Ε** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

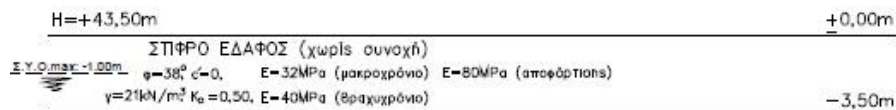
Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +43,5 έως +40m). Στο κομμάτι αυτό έχουμε τεφροπράσινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και θραύσματα και γεωμηχανικά ταξινομούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).
- Στρώμα II-3: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +40m), που είναι καστανοπράσινοι έως καστανότεφροι μεταψαμμίτες και μεταιυόλιθοι ή γκριζοκύανοι έως σκούροι κυανοί μεταιυόλιθοι/αργιλικόι σχιστόλιθοι-γραιουβάκες

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-4

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Μαλακός βράχος** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Στρωματογραφία εδάφους:

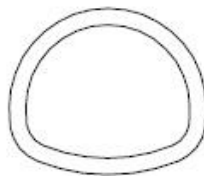
- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +43,5 έως +40m). Το στρώμα αυτό αποτελείται από τεφροπράσινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και θραύσματα και ταξινομείται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil – Cohesionless).
- Στρώμα II-4: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +40m), στο στρώμα αυτό συναντάμε καστανοπράσινους έως καστανότεφρους μεταψαμμίτες και μεταιυόλιθοι ή γκριζοκύανους έως σκούρους κυανούς μεταιυόλιθους/αργιλικούς σχιστόλιθους-γραιουβάκες.



Σ.Υ.Ο.μ.π: -5,00m

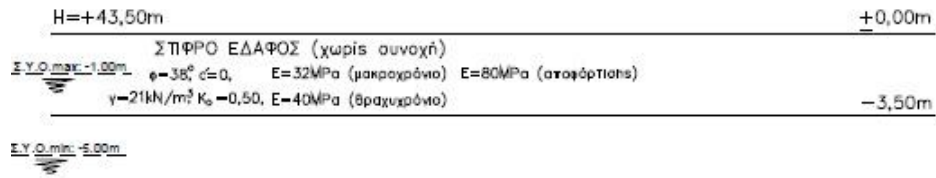
ΒΡΑΧΟΣ Γ (Σχιστολίθων)

$\gamma=23\text{kN/m}^3$ GSI=25-35,
 $\phi=38^\circ$ $c=70\text{kPa}$,
 $K_0=0,50$,
 $E=800\text{MPa}$ (βραχυχρόνιο)
 $E=680\text{MPa}$ (μακροχρόνιο)
 $E=1600\text{MPa}$ (αποφόρτιση)



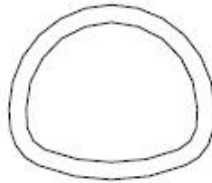
-40,00m

Σχήμα 3: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ1



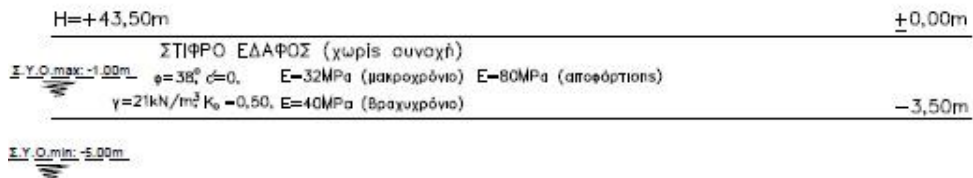
ΒΡΑΧΟΣ Δ (Σχιστολίθων)

$\gamma=23\text{kN/m}^3$ $GSI=20-25$,
 $\phi=35^\circ$ $c=50\text{kPa}$,
 $K_0=0,50$,
 $E=500\text{MPa}$ (βραχυχρόνιο)
 $E=425\text{MPa}$ (μακροχρόνιο)
 $E=1000\text{MPa}$ (αποφόρτιση)



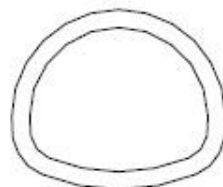
-40,00m

Σχήμα 4: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ2



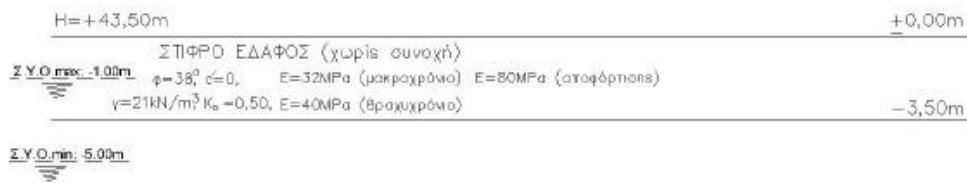
ΒΡΑΧΟΣ Ε (Σχιστολίθων)

$\gamma=23\text{kN/m}^3$ $GSI=15-20$,
 $\phi=30^\circ$ $c=40\text{kPa}$,
 $K_0=0,50$,
 $E=350\text{MPa}$ (βραχυχρόνιο)
 $E=300\text{MPa}$ (μακροχρόνιο)
 $E=700\text{MPa}$ (αποφόρτιση)



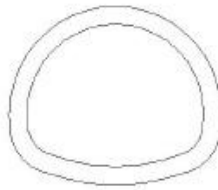
-40,00m

Σχήμα 5: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ3



ΜΑΛΑΚΟΣ ΒΡΑΧΟΣ (Σχιστολίθων)

γ=23kN/m³ GSI<15,
φ=28° c=35kPa,
K₀=0,50,
E=250MPa (βραχυχρόνια)
E=200MPa (μακροχρόνια)
E=500MPa (αποφόρτιση)



-40,00m

Σχήμα 6: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ4

3.2.2 Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού Υποτμήματος 2

❖ Διάνοιξη σήραγγας μέσα στα Νεογενή (Χ.Θ. 0+180 έως 0+500)

Στο υποτμήμα αυτό προτείνονται 4 Γεωτεχνικές Τομές Σχεδιασμού, οι ΓΤΣ-5, ΓΤΣ-6, ΓΤΣ-7, και ΓΤΣ-8.

Υπολογιστικό Καθεστώς Υπογείων Υδάτων

- Μέσο απόλυτο υψόμετρο επιφανείας φυσικού εδάφους: +45m.
- Μέση αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (μέση Σ.Υ.Ο.): βάθος 3,5m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +38,5m έως +44,5m).
- Ανώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.): βάθος 1,5m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +40,5m έως +46,5m).
- Κατώτερη αναμενόμενη στάθμη υπογείων υδάτων (min Σ.Υ.Ο.): βάθος 5,5m (διακύμανση απόλυτου υψομέτρου από +36,5m έως +42,5m).

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-5

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Β** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας
Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα Ι: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +45 έως +41,5m), εδώ έχουμε καστανή, καστανοπράσινη έως καστανοκόκκινη σιφρή

αργιλώδη έως ιλυώδη άμμο με χαλίκια και λατύπες. Γεωμηχανικώς ταξινομούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).

- Στρώμα III - 1: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +41,5m) με κίτρινες έως λευκές μάργες με ψαμμιτικές παρεμβολές, ψαμμούχε μάρες, αργιλόλιθους, τεφρούς έως πράσινους ασβεστιτικούς ιυόλιθους.

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-6

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Γ** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +45 έως +41,5m). Το στρώμα κυριαρχείται από καστανή, καστανοπράσινη έως καστανοκόκκινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και λατύπες, ενώ γεωμηχανικά ταξινομούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).
- Στρώμα III - 2: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +41,5m), όπου έχουμε κίτρινες και λευκές μάργες με παρεμβολές ψαμμιτών, ψαμμούχες μάργες, αργιλόλιθους, τεφρούς έως πράσινους ασβεστιτικούς ιυόλιθους.

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-7

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Δ** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

Στρωματογραφία εδάφους:

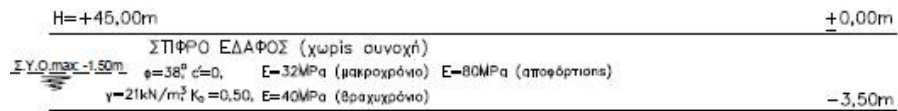
- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +45 έως +41,5m). Στο τμήμα αυτό το στρώμα I αποτελείται από καστανή, καστανοπράσινη έως καστανοκόκκινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και λατύπες. Γεωμηχανικώς τοποθετούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).
- Στρώμα III - 3: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +41,5m) και σε αυτό το στρώμα συναντάμε κίτρινες έως λευκές μάργες με παρεμβολές ψαμμιτών, ψαμμούχες μάργες, αργιλόλιθους, τεφρούς έως πράσινους ασβεστιτικούς ιυόλιθους.

Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-8

Πεδίο εφαρμογής τομής σχεδιασμού: **Βράχος Ε** στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

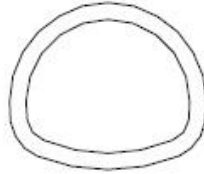
Στρωματογραφία εδάφους:

- Στρώμα I: Βάθος από 0 έως -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο από +45 έως +41,5m), αποτελείται από καστανή, καστανοπράσινη έως καστανοκόκκινη στιφρή αργιλώδης έως ιλυώδης άμμος με χαλίκια και λατύπες. και γεωμηχανικώς ταξινομούνται σε στιφρό έδαφος χωρίς συνοχή (Stiff soil-Cohesionless).
- Στρώμα III - 4: Βάθος > -3,5m (μέσο απόλυτο υψόμετρο < +41,5m), με κίτρινες έως λευκές μάργες με παρεμβολές ψαμμιτών, ψαμμούχες μάργες, αργιλόλιθους, τεφρούς έως πράσινους ασβεστιτικούς ιυόλιθους.



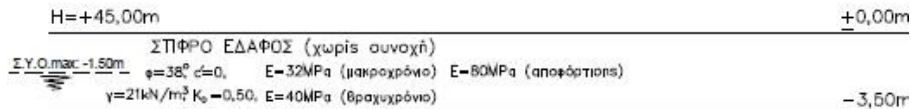
ΒΡΑΧΟΣ Β (Νεογενών)

$\gamma=23kN/m^3$ $GSI=35-45$,
 $\phi=36^\circ$ $c=60kPa$,
 $K_0=0,50$,
 $E=1200MPa$ (βραχυχρόνιο)
 $E=1080MPa$ (μακροχρόνιο)
 $E=2400MPa$ (αποφόρτιση)



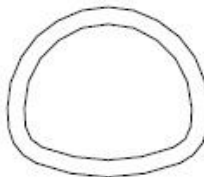
-40,00m

Σχήμα 7: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ5



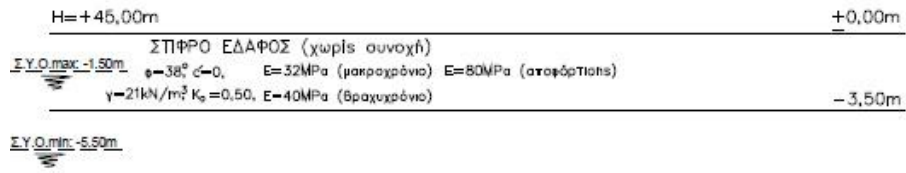
ΒΡΑΧΟΣ Γ (Νεογενών)

$\gamma=23kN/m^3$ $GSI=25-35$,
 $\phi=35^\circ$ $c=50kPa$,
 $K_0=0,50$,
 $E=750MPa$ (βραχυχρόνιο)
 $E=640MPa$ (μακροχρόνιο)
 $E=1500MPa$ (αποφόρτιση)



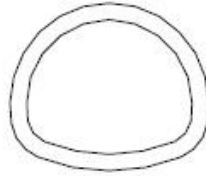
-40,00m

Σχήμα 8: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ6



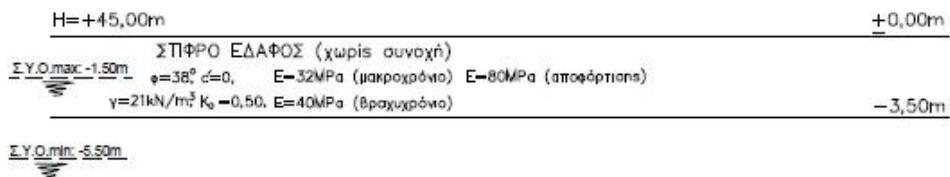
ΒΡΑΧΟΣ Δ (Νεογενών)

$\gamma=23\text{kN/m}^3$ $GSI=20-25$,
 $\phi=32^\circ$ $c=45\text{kPa}$,
 $K_0=0,50$,
 $E=450\text{MPa}$ (βραχυχρόνιο)
 $E=380\text{MPa}$ (μακροχρόνιο)
 $E=900\text{MPa}$ (αποφόρτιση)



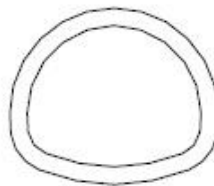
-40,00m

Σχήμα 9: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ7



ΒΡΑΧΟΣ Ε (Νεογενών)

$\gamma=23\text{kN/m}^3$ $GSI=15-20$,
 $\phi=32^\circ$ $c=35\text{kPa}$,
 $K_0=0,50$,
 $E=300\text{MPa}$ (βραχυχρόνιο)
 $E=250\text{MPa}$ (μακροχρόνιο)
 $E=600\text{MPa}$ (αποφόρτιση)



-40,00m

Σχήμα 10: Σκαρίφημα Γεωτεχνικής Τομής Σχεδιασμού ΓΤΣ8

3.3 Μεθοδολογία Γεωτεχνικής Παραμέτρου Σχεδιασμού (ΓΠΣ)

Η μεθοδολογία προσδιορισμού των ΓΠΣ βασίζεται στην συνεκτίμηση:

- ❖ Των αποτελεσμάτων εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών
- ❖ Των έμμεσων ή εμπειρικών συσχετίσεων
- ❖ Των συμπερασμάτων από εμπειρία στα εξεταζόμενα υλικά και τέλος
- ❖ Των προβλέψεων των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (ϕ' , c') και του μέτρου ελαστικότητας (E) μέσω της Γεωτεχνικής/Γεωλογικής Ταξινόμησης (δείκτης GSI) και των εμπειρικών συσχετίσεων που κάνουν χρήση των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown.

Από αυτές προκύπτει ένα εύρος διακύμανσης τιμών της αντοχής/παραμόρφωσης. Ως μη αντιπροσωπευτικές τιμές θεωρούνται:

- A. Οι εργαστηριακές δοκιμές όπου γίνεται απλή αξιολόγησή τους, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα αναξιόπιστα αποτελέσματα (οι μη αντιπροσωπευτικές τιμές).
- B. Οι αξιολογήσεις συσχετίσεων όπου δεν λαμβάνονται υπόψη αναξιόπιστες τιμές.
- C. Όταν δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία από τις δοκιμές τότε γίνεται εμπειρική εξέταση των υλικών και των κατασκευών (f_{su} , L_{min}).
- D. Οι προβλέψεις παραμέτρων αντοχής GSI και κυρίως αυτές που λαμβάνονται από τις ΕΑΑ των ερευνών. Πρέπει να τονίσουμε ότι οι τιμές θλιπτικής αντοχής σ_{ci} του άρρηκτου βράχου βασίζονται στα εργαστηριακά αποτελέσματα. Οι εφαρμόζουσες τιμές της παραμέτρου m_i του κριτηρίου Hoek-Brown λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία, όπως οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c' , ϕ' .

Οι εκτιμήσεις παραμέτρων αντοχής έγιναν σύμφωνα με το λογισμικό Rock Lab βάση της μεθοδολογίας Hoek (2002). Σύμφωνα με αυτό το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας υπολογίζεται συναρτήση του γεωλογικού δείκτη αντοχής και της μονοαξονικής αντοχής του άρρηκτου βράχου με τη σχέση:

$$E_{rm} = \frac{\sqrt{\sigma_{ci}}}{100} * 10^{\frac{GSI-10}{4}} \quad (1)$$

Σε μια πιο πρόσφατη ερευνητική εργασία των Hoek & Diederichs (2005) πρότειναν δύο εμπειρικές σχέσεις:

$$E_{rm} = 100.000 \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left[\frac{(75+25D-GSI)}{11} \right]}} \right) \quad (2)$$

$$E_{rm} = E_i \left(0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left[\frac{(60+15D-GSI)}{11} \right]}} \right) \quad (3)$$

Η συνάρτηση (2) είναι συναρτήση μόνο του GSI και του δείκτη διατάραξης της βραχομάζας D, ενώ η (3) περιλαμβάνει και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου και η χρησιμοποιείται μόνο με αξιόπιστες μετρήσεις του E_i . Όταν όμως οι τιμές αυτές δεν είναι αξιόπιστες λόγω ετερογένειας του πετρώματος εξαιτίας του κατακεραματισμού και

εξαλλοίωσης του, που επηρεάζουν τα εργαστηριακά αποτελέσματα, τότε η σχέση χρησιμοποιείται έμμεσα. Συγκριτικοί υπολογισμοί των τριών σχέσεων έδειξαν ότι η σχέση (2) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές E_{rm} και η (3) σε χαμηλότερες.

3.3.1 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού (ΓΠΣ)

Οι αναλύσεις έλαβαν χώρα με τη χρήση ενεργών τιμών εδαφικών παραμέτρων, σε στραγγιζόμενες συνθήκες. Λόγω της χαμηλής διαπερατότητας των σχηματισμών, οι πιέσεις των πόρων θεωρητικά μένουν αμετάβλητες σε μικρή απόσταση γύρω από τη σήραγγα και ίσες με την αρχική υδροστατική πίεση. Στα τοιχώματα, οι πιέσεις των πόρων είναι μηδενικές λόγω των αποστραγγιστικών οπών.

Προκειμένου να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα μαζί με το ΓΠΣ πρέπει να συνυπολογιστούν και οι ακόλουθες παράμετροι:

- i. Ο αρχικός υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών K_0 (για γεωστατικές τάσεις). Πιο συγκεκριμένα για τις αναλύσεις της προσωρινής αντιστήριξης και της μόνιμης επένδυσης των σηράγγων λαμβάνεται ως ελάχιστος συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών $K_0=0,5$ καθώς αναφερόμαστε σε βραχώδεις σχηματισμούς. Το $K_0=0,5$ αντιστοιχεί σε γραμμικά ισότροπο ελαστικό μέσο με λόγο Poisson $\nu=0,3$ από τη σχέση $K_0=\nu/(1-\nu)$. Αυτή η τιμή λαμβάνει υπόψη και τη διατάραξη του εδάφους που προκαλείται λόγω της εκσκαφής.
- ii. Η ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης των σηράγγων. Έγινε με διαδοχικά βήματα αποτόνωσης της βραχομάζας μέχρι τη θέση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης και στη συνέχεια ολοκλήρωση της αποτόνωσης. Ο βαθμός αποτόνωσης εξαρτάται από τη θέση εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης.
- iii. Η ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Εδώ η ανάλυση έγινε με απλά ραβδωτά προσομοιώματα, που επιβάλλεται το σύνολο των γεωστατικών φορτίων καθώς και τα υδροστατικά φορτία. Εναλλακτικά, τα φορτία που επιβαρύνουν την τελική επένδυση της σήραγγας, μπορούν να ληφθούν από ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, όπου:
 - ❖ Η τελική επένδυση έχει ενεργοποιηθεί.
 - ❖ Τα προσωρινά αγκύρια και το κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχουν απενεργοποιηθεί.
 - ❖ Το μέτρο ελαστικότητας E (Young's modulus) της βραχομάζας γύρω από την κατασκευή έχει μειωθεί στην μακροχρόνια τιμή του για να ληφθεί υπόψη η ερπυστική συμπεριφορά της βραχομάζας.
 - ❖ Προσομοιώνεται η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα

Οι παραπάνω ενέργειες είναι εκείνες που προκαλούν τη φόρτιση της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Εφόσον οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στην κατασκευή θα συναθροιστούν με τα εδαφικά φορτία, τα τελευταία υπολογίζονται με τα υπό άνωση φαινόμενα βάρη τους ($\gamma' = \gamma - \gamma_w$). Τα εδαφικά φορτία που υπολογίζονται με την προηγούμενη μέθοδο, δεν πρέπει να υπολείπονται από έναν συμβατικό συνδυασμό νεκρών φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση της σήραγγας, και περιλαμβάνουν:

- ❖ κατακόρυφη πίεση ίση με: $p_v = \gamma' B$, όπου $\gamma' =$ το υπό άνωση φαινόμενο βάρος της βραχομάζας γύρω από τη σήραγγα, και $B =$ το πλάτος εκσκαφής της σήραγγας.
- ❖ οριζόντια πίεση ίση με: $p_h = K_o p_v$, όπου η τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_o , αντιστοιχεί στη βραχομάζα γύρω από τη σήραγγα.

Υπομήμα 1, Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ. 0+180

Η διάνοιξη της σήραγγας όπως προ είπαμε γίνεται μέσα στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο και στη μεταβατική ζώνη.

Στρώμα I

Στο στρώμα αυτό οι υδραυλικές παράμετροι δεν εφαρμόζονται γιατί το στρώμα αυτό βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας είναι οι ακόλουθες:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=21 \text{ kN/m}^3$
Γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi'=38^\circ$ (ή $\phi'=35^\circ$ για ελαφρά συνεκτικούς σχηματισμούς)
Συνοχή	$c'=0$ (ή $c'=10 \text{ kPa}$ για ελαφρά συνεκτικούς σχηματισμούς)
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E=40 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 40 \text{ MPa}=80 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών (για γεωστατικές τάσεις)	$K_o=0,5$

Οι μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E=0,8 \times 40 \text{ MPa}=32 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα II - 1

Υπερισχύουν οι παρακάτω υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k=2,49 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Οι βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας είναι:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	$GSI =25-35$
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' =38^\circ$ συνοχή: $c' =70 \text{ kPa}$

Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	E=800 MPa
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	E=2 × 800 MPa=1600MPa
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	E = 0,85 × 800 MPa = 680 MPa
Λόγος Poisson	v=0,3
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	K _o =0,5

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα II - 2

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 2,49 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Οι βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας είναι:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI =20-25
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' =35^\circ$ συνοχή: $c' =50 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	E=500 MPa
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	E=2 × 500 MPa=1000MPa
Λόγος Poisson	v=0,3
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	K _o =0,5

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): E = 0,85 × 500 MPa = 425 MPa

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα II - 3

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 2,49 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο

αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Οι βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI =1-205
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 30^\circ$ συνοχή: $c' = 40 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E=350 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 350 \text{ MPa}=700\text{MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_o=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,85 \times 350 \text{ MPa} = 300 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα II - 4

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 2,49 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποστύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Οι βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI = <15
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 28^\circ$ συνοχή: $c' = 35 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E=250 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 250 \text{ MPa}=500\text{MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_o=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,80 \times 250 \text{ MPa} = 200 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Υπομήμα 2, Χ.Θ. 0+180 έως Χ.Θ. 0+500

Η διάνοιξη λαμβάνει χώρα μέσα στα Νεογενή.

Στρώμα I

Οι υδραυλικές παράμετροι δεν εφαρμόζονται λόγω του ότι το στρώμα αυτό βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=21 \text{ kN/m}^3$
Γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 38^\circ$ (ή $\phi' = 35^\circ$ για ελαφρά συνεκτικούς σχηματισμούς) Συνοχή: $c' = 0$ (ή $c' = 10 \text{ kPa}$ για ελαφρά συνεκτικούς σχηματισμούς)
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E = 40 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E = 2 \times 40 \text{ MPa} = 80 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu = 0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_0 = 0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,80 \times 40 \text{ MPa} = 32 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα III - 1:

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 9,48 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη).
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI = 35-45
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 36^\circ$ συνοχή: $c' = 60 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E = 1200 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	$E=2 \times 1200 \text{ MPa} = 2400 \text{ MPa}$

σε αποφόρτιση	
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_0=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,90 \times 1200 \text{ MPa} = 1080 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα III-2

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 9,48 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI = 25-35
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 35^\circ$ συνοχή: $c' = 50 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E = 750 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 750 \text{ MPa}=1500 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_0=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,85 \times 750 \text{ MPa} = 640 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα III - 3

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 9,48 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI = 20-25
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 32^\circ$ συνοχή: $c' = 45 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E = 450 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 450 \text{ MPa}=900 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_0=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,85 \times 450 \text{ MPa} = 380 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

Στρώμα III - 4

Υδραυλικές παράμετροι:

- Συντελεστής διαπερατότητας $k = 9,48 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, ($3,58 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ μεταβατική ζώνη)
- Οι υδροστατικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας δεν λαμβάνονται υπόψη για την προσωρινή υποσύλωση, ενώ στην τελική επένδυση λαμβάνονται μόνο αυτές που αντιστοιχούν στην ανώτερη στάθμη των υπογείων υδάτων (max Σ.Υ.Ο.).

Βραχυχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για την ανάλυση της εκσκαφής και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας:

Φαινόμενο βάρος	$\gamma=23 \text{ kN/m}^3$
Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας	GSI = 15-20
Παράμετροι κριτηρίου αστοχίας κατά Mohr-Coulomb: γωνία διατμητικής αντοχής	$\phi' = 32^\circ$ συνοχή: $c' = 35 \text{ kPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε φόρτιση	$E = 300 \text{ MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε αποφόρτιση	$E=2 \times 300 \text{ MPa}=600 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0,3$
Υπολογιστικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων γαιών	$K_0=0,5$

Μακροχρόνιες παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας για ανάλυση της τελικής επένδυσης της σήραγγας:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus): $E = 0,85 \times 300 \text{ MPa} = 250 \text{ MPa}$

Οι υπόλοιπες μακροχρόνιες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έχουν τις ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες βραχυχρόνιες παραμέτρους.

3.4 Προσδιορισμός του Καταβιβασμού του Υπόγειου Οριζοντα

Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων και την εκτέλεση των απαραίτητων αντλήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας θα προκληθεί σταδικός καταβιβασμός της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου οριζοντα.

Η πτώση της στάθμης των υπογείων υδάτων, προκαλεί μια σειρά από επιφανειακές καθιζήσεις λόγω μεταβολής των ενεργών τάσεων του εδάφους, τόσο κατά μήκος του άξονα των σηράγγων όσο και των γύρω περιοχών από όπου διέρχεται η χάραξη.

3.4.1 Εκτίμηση ακτίνας επιρροής λόγω ταπείνωσης του Υπόγειου οριζοντα

Η ακτίνα επιρροής (R) γύρω από τη σήραγγα, όπου θα προκληθούν επιφανειακές καθιζήσεις λόγω ταπείνωσης του υδροφόρου οριζοντα μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση:

$$R = 1500(H - h_w) * \sqrt{k}$$

H= Η απόσταση του υδροφόρου οριζοντα από το αδιαπέρατο στρώμα.

h_w = Η απόσταση της τελικής στάθμης των υπογείων υδάτων μέσα στη σήραγγα από το αδιαπέρατο στρώμα μετά τον καταβιβασμό του υδροφόρου οριζοντα.

k= Ο μέσος συντελεστής διαπερατότητας του εδάφους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση ισχύει μόνο για γραμμική περιοχή αποφόρτισης του υδροφόρου οριζοντα.

Στην περίπτωση που μελετάμε ο υδροφορέας είναι συνολικού πάχους H, μετρούμενος με βάση την αρχική στάθμη του υπογείου οριζοντα (ΑΣΥΟ) και αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικού μέτρου E_{s1} αλλά πρακτικά ίδιας περατότητας k, με την ΑΣΥΟ να βρίσκεται εντός του άνω στρώματος.

Το άνω στρώμα μέτρου E_{s1} λαμβάνεται με πάχος h που αντιστοιχεί στο τμήμα του στρώματος αυτού που βρίσκεται κάτω από την ΑΣΥΟ ενώ το κάτω στρώμα μέτρου E_{s2} λαμβάνεται με πάχος H-h και το κάτω όριο του θεωρείται και όριο του υδροφορέα σε επαφή με το υποκείμενο αδιαπέρατο και πρακτικά απαραμόρφωτο υπόβαθρο.

Αν θεωρήσουμε την τελική στάθμη το υπογείου οριζοντα (ΤΣΥΟ) μετά από καταβιβασμό (s) σε κάποια θέση και τις αντίστοιχες πιέσεις πόρων ως υδροστατικές, διακρίνονται για τις ανάγκες υπολογισμού καθιζήσεων οι εξής ζώνες:

- Ζώνη (1): Το τμήμα του στρώματος [Σ1] που βρίσκεται πάνω από την ΤΣΥΟ στην συγκεκριμένη θέση.
- Ζώνη (2): Το τμήμα του στρώματος [Σ1] που βρίσκεται κάτω από την ΤΣΥΟ στην συγκεκριμένη θέση, με την προϋπόθεση ότι στην συγκεκριμένη θέση η ΤΣΥΟ βρίσκεται εντός του στρώματος [Σ1], εάν δηλαδή ισχύει $s < h$.
- Ζώνη (3): Το τμήμα του στρώματος [Σ2] που βρίσκεται πάνω από την ΤΣΥΟ στην συγκεκριμένη θέση, με την προϋπόθεση ότι στην συγκεκριμένη θέση η ΤΣΥΟ βρίσκεται εντός του στρώματος [Σ2], εάν δηλαδή ισχύει $s > h$.

- Ζώνη (4): Το τμήμα του στρώματος [Σ2] που βρίσκεται κάτω από την ΤΣΥΟ στην συγκεκριμένη θέση. Εάν H_1 , H_2 , H_3 και H_4 είναι τα αντίστοιχα πάχη των ζωνών (1), (2), (3) και (4) τότε θα είναι:

- § Για $s \leq h$: $H_1 = s$, $H_2 = h - s$, $H_3 = 0$, $H_4 = H - h$
- § Για $s \geq h$: $H_1 = h$, $H_2 = 0$, $H_3 = s - h$, $H_4 = H - s$

Για την αντίστοιχη η μέση αύξηση ($\Delta\sigma'_i$) της κατακόρυφης ενεργού τάσης στη ζώνη (i) προκύπτει αναλόγως :

- $\Delta\sigma'_1 = 0,50 H_1 \gamma_w$
- $\Delta\sigma'_2 = 0,50 H_1 \gamma_w$, έχοντας νόημα μόνον όταν $s \leq h$
- $\Delta\sigma'_3 = (H_1 + 0,50 H_3) \gamma_w$, έχοντας νόημα μόνον όταν $s \geq h$
- $\Delta\sigma'_4 = s \gamma_w$

Η μορφή της μεταβολής των καθιζήσεων με την απόσταση από τη σήραγγα και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προαναφερθείσας προσέγγισης φαίνονται στο σκαρίφημα που ακολουθεί.

3.4.2 Εκτίμηση καθιζήσεων λόγω ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα

Η καθίζηση του εδάφους που προκαλεί ο καταβιβασμός του υδροφόρου ορίζοντα οφείλεται στην αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\Delta\sigma'$) και στη συμπίεστίτητα του εδάφους. Η παράμετρος που ελέγχει το φαινόμενο είναι το μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης στο κλάδο αύξησης της φόρτισης E_{SL} .

Έτσι η καθίζηση δ είναι:

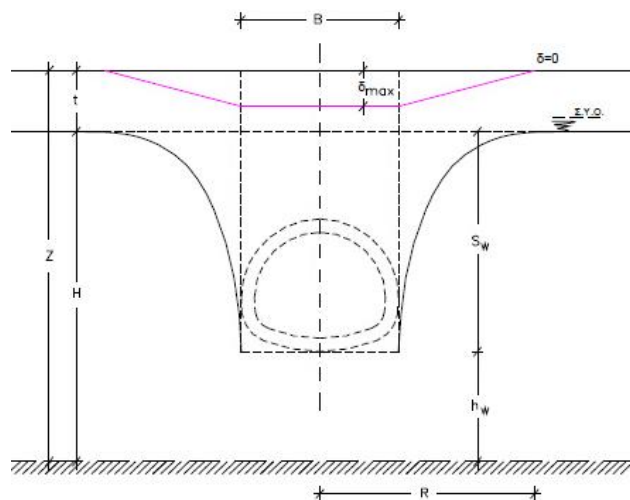
$$\delta = \sum (h_i \Delta\sigma'_i / E_{SLi})$$

h_i = Το πάχος κάθε ζώνης i $\sum h_i = H$

$\Delta\sigma'_i$ = Η μέση αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης στη ζώνη i

E_{SLi} = Το μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης στον κλάδο φόρτισης για το υλικό της ζώνης i .

Η μέθοδος αυτή ακολουθείται όταν ο υδροφορέας είναι συνολικού πάχους H , με βάση την αρχική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικού μέτρου E_{SL} , αλλά πρακτικά ίδιας διαπερατότητας K με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να βρίσκεται εκτός του άνω στρώματος (E_{SL}).



Σχήμα 11: Μεταβολή των καθιζήσεων με την απόσταση από τη σήραγγα

Το E_{SL1} λαμβάνεται με πάχος h και αντιστοιχεί στο στρώμα που βρίσκεται κάτω από την ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ το E_{SL2} με πάχος $H-h$ και είναι το κάτω όριο (δηλ. το όριο του υδροφορέα σε επαφή με το υποκείμενο αδιαπέρατο και απαραμόρφωτο υπόβαθρο).

3.4.3 Εκτίμηση παροχής αντλήσεως και ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα

Θεωρείται μια ισοδύναμη σήραγγα μεγάλου μήκους και πλάτους B . Ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα (s) γίνεται έως τη βάση της σήραγγας. Η απόσταση (x) μετριέται από τα πλευρικά τοιχώματα.

Ο καταβιβασμός του υδροφόρου ορίζοντα (s) σε απόσταση (x) σε χρόνο (t) δίνεται από τη σχέση του Theis:

$$s = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{kB}(R - x)}$$

$Q=H$ μέση αντλούμενη παροχή μέσα από τη σήραγγα ανά μέτρο.

$$R = H \text{ ακτίνα επιρροής } R = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{s}}$$

$T=kH=H$ υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου στρώματος.

$k=O$ μέσος συντελεστής διαπερατότητας

$H=To$ πάχος του υδροφόρου

$s=Σ$ συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφορέα

$B=$ Πλάτος της σήραγγας

Αν S_w θεωρείται ο καταβιβασμός της στάθμης στο εσωτερικό της σήραγγας τότε ο τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$S_w = H - \sqrt{H^2 - Q \frac{R}{kb}} \quad \text{ή}$$
$$Q = kb \left(\frac{S_w}{R} \right) (2H - S_w)$$

τότε:

$$s = H - \sqrt{H^2 - \left(1 - \frac{x}{R}\right) (2H - S_w) S_w}$$

$s=H$ μεταβολή ταπείνωσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε απόσταση (x) από το πλευρικό τοίχωμα συναρτήση του χρόνου (t).

3.5 Εφαρμογή: Εκτίμηση Ακτίνας Επιρροής, Καθιζήσεων και Παροχής στη Σήραγγα Λόγω Ταπείνωσης του Υπογείου Οριζοντα

Στο Υποτμήμα 1, Χ.Θ. 0+000 έως Χ.Θ. 0+180 (Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-3) θα εφαρμόσουμε την παραπάνω μέθοδο σε κατηγορία Βράχου Ε. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Αρχική στάθμη υπογείων υδάτων (ΑΣΥΟ) : βάθος -3m
- Τελική στάθμη υπογείων υδάτων (ΤΣΥΟ) και πυθμένας σήραγγας : βάθος -32m
- Συντελεστής διαπερατότητας: $k = 2,5 \times 10^{-8}$ m/sec
- Βάθος αδιαπέρατου στρώματος: -45m
- Απόσταση τελικής στάθμης από αδιαπέρατο στρώμα: $h_w = 45 - 32 = 13$ m
- Μέγιστος καταβιβασμός υπογείου οριζοντα στη θέση της σήραγγας: $s_w = 32 - 3 = 29$ m
- Μέσο πλάτος σήραγγας: $B = 13$ m
- Μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (για μικρές παραμορφώσεις): $E_{SL} = 945$ MPa
- Πάχος υδροφορέα: $H = 45 - 3 = 42$ m
- Αγωγιμότητα του υδροφόρου στρώματος: $T = k H = 10^{-6}$ m²/sec
- Αποθηκευτικότητα του υδροφόρου στρώματος: $S = 0,005$
- Ειδικό βάρος νερού : $\gamma_w = 10$ kN/m³

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές, λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Ακτίνα επιρροής

Το πλάτος της ζώνης επιρροής μέσα στην οποία θα προκληθούν επιφανειακές καθιζήσεις λόγω της ταπείνωσης του υπόγειου οριζοντα προκύπτει ίσο με $R = 7$ m περίπου.

Καθιζήσεις

Η μέγιστη καθίζηση του εδάφους στην περιοχή του άξονα της κύριας σήραγγας είναι $\delta_{max} = 8,5$ mm περίπου, και μειώνεται σταδιακά με την απομάκρυνση από τον άξονα της σήραγγας μέχρι την ακτίνα επιρροής. Οι καθιζήσεις λόγω ταπείνωσης του υπογείου οριζοντα προκαλούν πολύ μικρές κλίσεις καθιζήσεων. Η μέση κλίση καθιζήσεων είναι της τάξης του 1:1750. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι ο καταβιβασμός του υπόγειου οριζοντα δεν αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές καθιζήσεις εξαιτίας της μεταβολής των ενεργών τάσεων γύρω από τη σήραγγα.

Παροχή

Η μέγιστη παροχή άντλησης της σήραγγας είναι της τάξης του $Q = 0,05 - 0,04$ m³/ώρα ανά τρέχον μέτρο εκσκαφής της σήραγγας (σε διάστημα 15 έως 30 ημερών μετά την έναρξη των εκσκαφών της σήραγγας) και θα μειωθεί ακόμη περισσότερο με το χρόνο ($Q = 0,03$ m³/ώρα ανά τρέχον μέτρο εκσκαφής της σήραγγας μετά την παρέλευση 2 μηνών από την έναρξη των εκσκαφών). Η υπολογισθείσα παροχή άντλησης είναι πολύ μικρή και δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα στις εργασίες διάνοιξης της σήραγγας.

Στο Υποτμήμα 2, Χ.Θ. 0+180 έως Χ.Θ. 0+500 (Γεωτεχνική Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-7) θα εφαρμόσουμε την παραπάνω μέθοδο σε κατηγορία Βράχου Ε. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Αρχική στάθμη υπογείων υδάτων (ΑΣΥΟ) : βάθος -3,5m

- Τελική στάθμη υπογείων υδάτων (ΤΣΥΟ) και πυθμένας σήραγγας : βάθος -24m
- Συντελεστής διαπερατότητας: $k = 9,5 \times 10^{-7}$ m/sec
- Βάθος αδιαπέρατου στρώματος: -45m
- Απόσταση τελικής στάθμης από αδιαπέρατο στρώμα: $h_w = 45-24= 21$ m
- Μέγιστος καταβιβασμός υπογείου οριζοντα στη θέση της σήραγγας: $s_w=243,5=20,5$ m
- Μέσο πλάτος σήραγγας: $B = 11$ m
- Μέτρο μονοδιάστατης παραμόρφωσης (για μικρές παραμορφώσεις): $E_{SI}=810$ MPa
- Πάχος υδροφορέα: $H = 45-3,5=41,5$ m
- Αγωγιμότητα του υδροφόρου στρώματος: $T = k H = 3,94 \times 10^{-5}$ m² /sec
- Αποθηκευτικότητα του υδροφόρου στρώματος: $S = 0,005$
- Ειδικό βάρος νερού : $\gamma_w = 10$ kN/m³

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές, λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Ακτίνα επιρροής

Το πλάτος της ζώνης επιρροής μέσα στην οποία θα προκληθούν επιφανειακές καθιζήσεις λόγω της ταπείνωσης του υπόγειου οριζοντα προκύπτει ίσο με $R = 30$ m περίπου.

Καθιζήσεις

Η μέγιστη καθίζηση του εδάφους στην περιοχή του άξονα της κύριας σήραγγας είναι $\delta_{max}=8$ mm περίπου, και μειώνεται σταδιακά με την απομάκρυνση από τον άξονα της σήραγγας μέχρι την ακτίνα επιρροής. Η μέση κλίση καθιζησης είναι της τάξης του 1:5250. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι ο καταβιβασμός του υπόγειου οριζοντα δεν αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές καθιζήσεις εξαιτίας της μεταβολής των ενεργών τάσεων γύρω από τη σήραγγα

Παροχή

Η μέγιστη παροχή άντλησης της σήραγγας είναι της τάξης του $Q = 0,3-0,23$ m³/ώρα ανά τρέχον μέτρο εκσκαφής της σήραγγας (σε διάστημα 15 έως 30 ημερών μετά την έναρξη των εκσκαφών της σήραγγας), και θα μειωθεί ακόμη περισσότερο με το χρόνο ($Q = 0,15$ m³/ώρα ανά τρέχον μέτρο εκσκαφής της σήραγγας μετά την παρέλευση 2 μηνών από την έναρξη των εκσκαφών). Η υπολογισθείσα παροχή άντλησης είναι πολύ μικρή.

Κεφάλαιο 4: Καθιζήσεις

4.1 Θεωρητικές προεκτιμήσεις καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας

Η κίνηση του εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατασκευή των υπογείων έργων. Οι καθιζήσεις είναι αναπόφευκτες συνέπειες της κατασκευής τους. Η σχέση μεταξύ των επιφανειακών καθιζήσεων και βάθους εκσκαφής δεν είναι γραμμική.

Εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων όπως οι γεωλογικές και οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η γεωμετρία του ανοίγματος, το βάθος της εκσκαφής, η μέθοδος εκσκαφής η εμπειρία των τεχνιτών και η διαχείριση. Είναι πάρα ταύτα ξεκάθαρο ότι μια αβαθής σήραγγα παρουσιάζει πιο έντονες καθιζήσεις σε σχέση με μια βαθιά.

Κατά την διάρκεια της εκσκαφής οι εδαφικές συνθήκες γύρω από τη σήραγγα διαταράσσονται. Πάντα ο όγκος του εδάφους που απομακρύνεται είναι μεγαλύτερος από τον όγκο που θα καταλαμβάνει η σήραγγα. Ο επιπλέον αυτός όγκος ονομάζεται απώλεια εδαφικού όγκου (V_L).

Ένας από τους κύριους σκοπούς των αριθμητικών αναλύσεων που έλαβαν χώρα είναι ο υπολογισμός των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, για κάθε κατηγορία σχεδιασμού, ούτως ώστε να εκτιμηθεί το δυναμικό πρόκλησης βλαβών τους σε παρακείμενες κατασκευές αλλά και για να αποτελέσουν μια βάση για τον ορισμό ορίων επιφυλακής και συναγερού σε σχέση με τις μετρήσεις του προγράμματος γεωδομητικής παρακολούθησης καθώς και της ζώνης επιρροής της σήραγγας.

Έτσι με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις που παρουσιάστηκαν για τα Τμήματα Α και Β αντίστοιχα, προκύπτουν για κάθε κατηγορία υποστήριξης, οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Με βάση τις υπολογιζόμενες καθιζήσεις υπολογίζεται η καμπύλη των γωνιακών παραμορφώσεων. Με τον ίδιο τρόπο αφού εξαχθούν οι οριζόντιες μετακινήσεις υπολογίζεται η καμπύλη των ανηγμένων οριζοντίων μετακινήσεων.

Στις τιμές των υπολογιζόμενων μέγιστων καθιζήσεων, μετά την ολοκλήρωση της διατομής εκσκαφής, προστίθεται και η τιμή της μέγιστης καθιζήσης λόγω του καταβιβασμού του Υδροφόρου Ορίζοντα της εκάστοτε κατηγορίας σχεδιασμού για κάθε ένα από τα Υποτμήματα Α1 και Α2 καθώς και για το Τμήμα Β.

4.1.1 Προσδιορισμός Επιτρεπόμενων Καθιζήσεων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι επιτρεπόμενες τιμές για τη συνολική καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, τη γωνιακή παραμόρφωση και την οριζόντια παραμόρφωση σύμφωνα με τις θεωρητικές προεκτιμήσεις.

	Ευαίσθητο κτίριο ή κατασκευή	Άλλα κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
Συνολική καθίζηση	20mm	25mm	30mm
Γωνιακή παραμόρφωση	1/800	1/600	1/600
Οριζόντια παραμόρφωση	0,15%	0,25%	0,3%

Πίνακας 6: Επιτρεπόμενες τιμές καθιζήσεων

Η ζώνη μετάβασης από διπλή σε τριπλή διατομή έχει μήκος 7m μεταξύ των Χ.Θ.0+343,72 έως Χ.Θ.0+350,72. Η διάνοιξη γίνεται είτε ακολουθώντας τη κατηγορία υποστήριξης SE ή SSR. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του μετώπου σχεδιάστηκαν τρεις διατάξεις υποστήριξης και έχουν ως εξής:

- Κατηγορία F1, όπου εφαρμόζεται στο πεδίο υποστήριξης κατηγορίας SD
- Κατηγορία F2, όπου εφαρμόζεται στην κατηγορία SE και τη
- Κατηγορία F3, όπου εφαρμόζεται στην κατηγορία SSR

Στην 1^η περίπτωση αναμένεται το μέτωπο εκσκαφής να είναι εύθρυπτο, όπου πιθανότατα να εκδηλώνονται καταπτώσεις τεμαχών αν δεν ληφθούν μέτρα προσωρινής υποστήριξης.

Στην 2^η και 3^η περίπτωση το μέτωπο αναμένεται ευσταθές και υπάρχει κίνδυνος αν δεν ληφθούν μέτρα σταθεροποίησης καθώς επιβαρύνεται και από την παρουσία ασυνεχειών στο μέτωπο. Τέλος η κατηγορία F2 εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις συνθηκών ιδιαίτερα ασταθούς μετώπου ανεξάρτητα της εφαρμοζόμενης κατηγορίας υποστήριξης.

Ενώ στην περίπτωση μεταξύ των Χ.Θ.0+349 έως Χ.Θ.0+500 σχεδιάστηκαν τρεις κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης και έχουν ως εξής:

- Η ΓΤΣ-2 (Βράχος Γ) αντιμετωπίζεται με την Κατηγορία SC.
- Η ΓΤΣ-3 (Βράχος Δ) αντιμετωπίζεται με την Κατηγορία SD.
- Οι ΓΤΣ-4 (Βράχος Ε) και ΓΤΣ-5 (υπερκείμενος Μαλακός βράχος με Βράχο Δ στο μέτωπο) αντιμετωπίζονται με την Κατηγορία SE.

4.1.2 Επιφανειακές Καθιζήσεις λόγω Διάνοιξης της Σήραγγας και Καταβιβασμού του Υδροφόρου Ορίζοντα

Για να υπολογιστούν οι καθιζήσεις λήφθηκαν απλοποιητικά προσομοιώματα με πραγματικές υδρογεωλογικές λεπτομέρειες, με κατάλληλα προσαρμογή παραμέτρων υπολογισμού ώστε να αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των πραγματικών μεγεθών.

Η ανάλυση ροής και καθιζήσεων έγινε με το πρόγραμμα FLAC. Στην προκειμένη περίπτωση ορίστηκε η γεωμετρία του μέσου και οι συνοριακές συνθήκες ροής. Στη συνέχεια γίνεται διαδοχική επίλυση των εξισώσεων ροής και συνέχειας, προσδιορίζοντας έτσι τις μεταβολές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και των πιέσεων των πόρων μέχρι να επέλθει υδραυλική ισορροπία. Οι καθιζήσεις που θα προκύψουν θα είναι αποτέλεσμα της αύξησης των ενεργών τάσεων από τον καταβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα.

Για τις συνοριακές συνθήκες ορίζεται συνεχής και απεριόριστη υδραυλική τροφοδοσία από τα πλευρικά σύνορα των προσομοιωμάτων.

Η τροφοδοσία από την ακόρεστη ζώνη (διήθηση ομβρίων) δεν λαμβάνονται άμεσα υπόψιν αλλά έμμεσα μέσω ορισμού της ακτίνας επιρροής της σήραγγας R. Στο εσωτερικό της σήραγγας ορίζεται πίεση P=0.

Στάδιο 1: Ορισμός μηχανικών-υδραυλικών ιδιοτήτων

- Τμήμα A: στάθμη υ.ο σε βάθος 3m από την επιφάνεια του εδάφους.
- Τμήμα B: στάθμη υ.ο σε βάθος 3,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Στάδιο 2: Διάνοιξη σήραγγας, ορισμός συνοριακών υδραυλικών συνθηκών στο εσωτερικό της σήραγγας, P=0. Ανάλυση ροής έως οι εισροές να εξισωθούν με τις εκροές.

Στάδιο 3: Ανάλυση καθιζήσεων. Έχουμε σταθερή την κατανομή των πιέσεων πόρων. Προσδιορίζονται οι καθιζήσεις που προκαλούνται εξαιτίας αύξησης των ενεργών τάσεων από τον καταβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα.

Ανάλυση ροής

- Τμήμα A:
 - ❖ A1: Χ.00+000-0+120: Αθ. Σχιστόλιθος με $k=2,5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$
 - ❖ A2: Χ.00+120-0+180: Μεταβατική ζώνη με $k=3,6 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$
- Τμήμα B: Χ.00+180-0+500: Νεογενή με $k=9,48 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$

Υδραυλικό πλάτος επιρροής της σήραγγας³

$$R = cS_w \sqrt{k} \quad \text{Σχέση Sichardt(1928)}$$

R= ακτίνα επιρροής (m)

S_w = ύψος καταβιβασμού του υ.ο (m)

k= διαπερατότητα βραχομάζας (m/s)

c= σταθερά, όπου για γραμμικό στραγγιστήριο παίρνει τιμή c=1500

Άρα για το:

- Τμήμα A:
 - ❖ A1: $S_w=28,3\text{m}$, $k=2,5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$, $c=1500 \Rightarrow R=6,7\text{m}$

³ Είναι η απόσταση πέραν της οποίας ο υδροφόρος ορίζοντας δεν επηρεάζεται από την άντληση υδάτων από τη σήραγγα.

- ❖ A2: $S_w=28,3\text{m}$, $k=2,6 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$, $c=1500 \Rightarrow R=25,5\text{m}$
- Τμήμα B: $S_w=19,3\text{m}$, $k=9,48 \cdot 10^{-7}\text{m/s}$, $c=1500 \Rightarrow R=28,5\text{m}$

Στη συνέχεια οι εισροές εξισώνονται με τις εκροές όταν έχουμε υδραυλική ισορροπία, οπότε η παροχή που προκύπτει για το Υποτμήμα A1 ισούται με $Q_{A1}=0.4 \cdot 10^{-5}\text{ m}^3/\text{sec}$, για το Υποτμήμα A2 ισούται με $Q_{A2}=0.20 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3/\text{sec}$ ενώ για το Τμήμα B με $Q_B=0.24 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3/\text{sec}$ αντίστοιχα. Δηλαδή κατά μέγιστο $Q_A=0.08\text{ m}^3/\text{h}$ και $Q_B=0.09\text{ m}^3/\text{h}$ ανά μέτρο μήκους σήραγγας για τα Τμήματα A και B-Γ αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως υπολογίσθηκαν οι εισροές στη σήραγγα στην θεωρητική περίπτωση που η εκσκαφή πραγματοποιείται ακαριαία και δεν έχουμε ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου οριζοντα δηλαδή αμέσως μετά τη διάνοιξη της σήραγγας, με βάση τη σχέση κατά Kolymbas D. & Wagner P.⁴:

$$Q = \frac{2\pi k h_1}{\ln(2h_1 / r)}$$

όπου:

k , η διαπερατότητα της βραχώμαζας (m/sec)

h_1 , το ύψος της στήλης νερού μέχρι το κέντρο μιας ισοδύναμης κυκλικής σήραγγας (m)

r , η ακτίνα της σήραγγας (m)

Επομένως με βάση τα παραπάνω έχουμε:

- Υποτμήμα A1: για $k=2.50 \cdot 10^{-8}\text{ m/sec}$, $h_1=23.00\text{ m}$ και $r=6.30\text{ m} \Rightarrow Q_{A1}=0.18 \cdot 10^{-5}\text{ m}^3/\text{sec}$
- Υποτμήμα A2: για $k=3.60 \cdot 10^{-7}\text{ m/sec}$, $h_1=23.00\text{ m}$ και $r=6.30\text{ m} \Rightarrow Q_{A2}=0.26 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3/\text{sec}$
- Τμήμα B: για $k=9.48 \cdot 10^{-7}\text{ m/sec}$, $h_1=13.50\text{ m}$ και $r=6.30\text{ m} \Rightarrow Q_B=0.55 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3/\text{sec}$

Δηλαδή κατά μέγιστο $Q_A=0.10\text{ m}^3/\text{h}$ και $Q_B=0.19\text{ m}^3/\text{h}$ ανά μέτρο μήκους σήραγγας.

Οι μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους λόγω καταβιβασμού του υδροφόρου οριζοντα για κάθε τμήμα και για κάθε κατηγορία σχεδιασμού συνοψίζονται στον πίνακα 7, ενώ στα γραφήματα 3,4 και 5 παρουσιάζεται η καμπύλη των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους για κάθε κατηγορία σχεδιασμού για τα Υποτμήματα A1, A2 και το Τμήμα B αντίστοιχα.

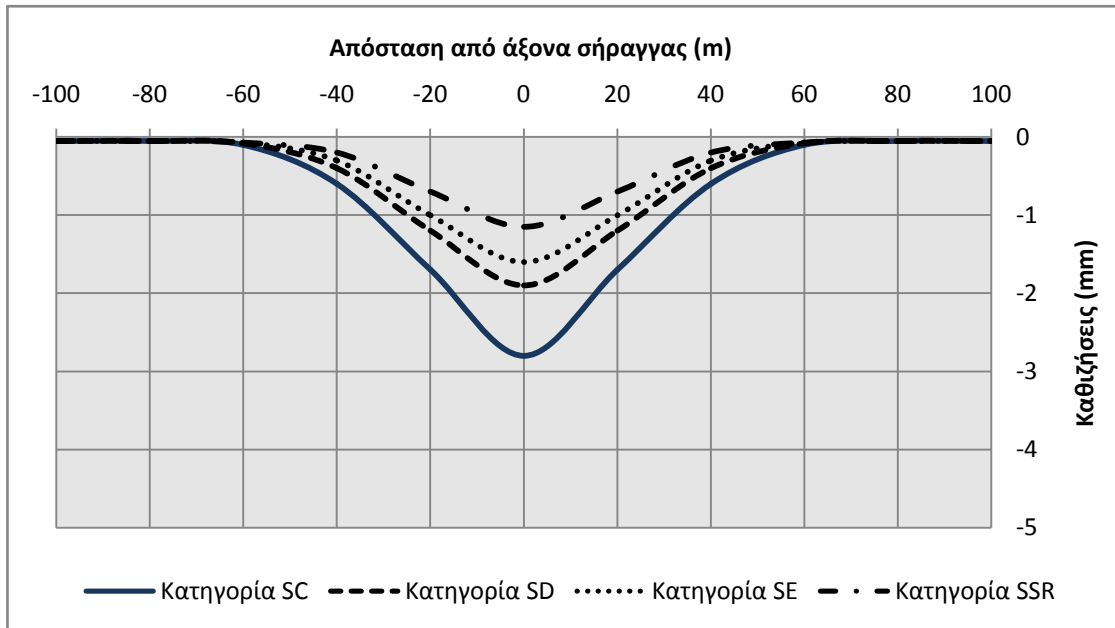
⁴ Kolymbas, D., Wagner, (2006) Groundwater ingress to tunnels. Tunnelling and underground space technology (in press)

Κατηγορία σχεδιασμού	Μέγιστες καθιζήσεις (mm)									
	ΤΜΗΜΑ Α							ΤΜΗΜΑ Β		
	Υποτμήμα Α1				Υποτμήμα Α2					
	SC	SD	SE	SSR	SC	SD	SE	SC	SD	SE
Ολοκλήρωση άνω ημιδιατομής	4.90	9.00	15.60	17.70	4.90	9.00	15.60	5.10	9.60	15.30
Ολοκλήρωση διατομής εκσκαφής	5.30	9.50	19.70	21.80	5.30	9.50	19.70	5.70	10.40	18.50
Καθιζήσεις λόγω πτώσης Υ.Ο. (mm)	1.20	1.70	2.00	2.90	2.10	2.70	3.10	1.30	2.20	3.30
Υπολογιστική Καθίζηση s (mm)	6.50	11.20	21.70	24.70	7.40	12.20	22.80	7.00	12.60	21.80
Τιμή Αναφοράς R= s (mm)	6.50	11.50	22.00	25.00	7.50	12.50	23.00	7.00	13.00	22.00
Όριο Επιφυλακής T = 0.80 R (mm)	5.50	9.50	17.50	20.00	6.00	10.00	18.50	6.00	10.50	18.00
Όριο Συναγερμού L = 1.20 R (mm)	8.00	14.00	26.50	30.00	9.00	15.00	28.00	8.50	16.00	26.50

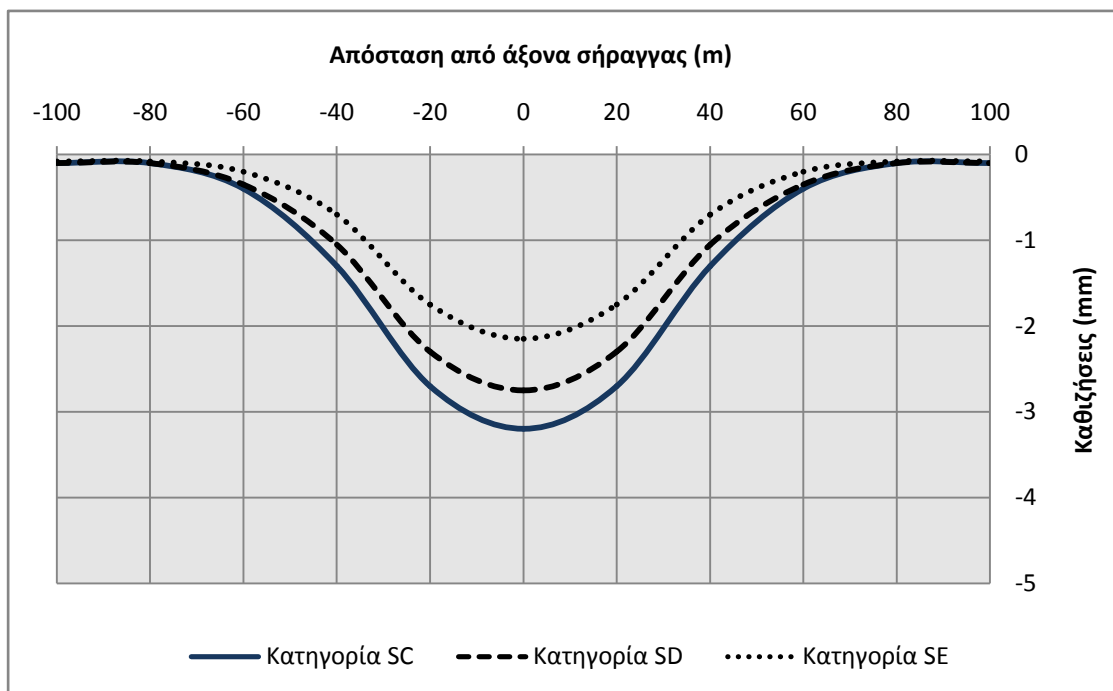
Πίνακας 7: Μέγιστες καθιζήσεις λόγω πτώσης του Υ.Ο

Η τιμή επιφυλακής προσδιορίζεται ως το 80% της τιμής αναφοράς ενώ το όριο συναγερμού λαμβάνεται ως το 120% της τιμής αναφοράς, ενώ τα όρια αυτά προσδιορίζονται για τα μεν όρια επιφυλακής σε 15mm και 20mm για ευαίσθητα κτίρια και για άλλα κτίρια, δρόμους, δίκτυα ΟΚΩ αντίστοιχα, για τα δε όρια συναγερμού σε 20mm και 30mm αντίστοιχα.

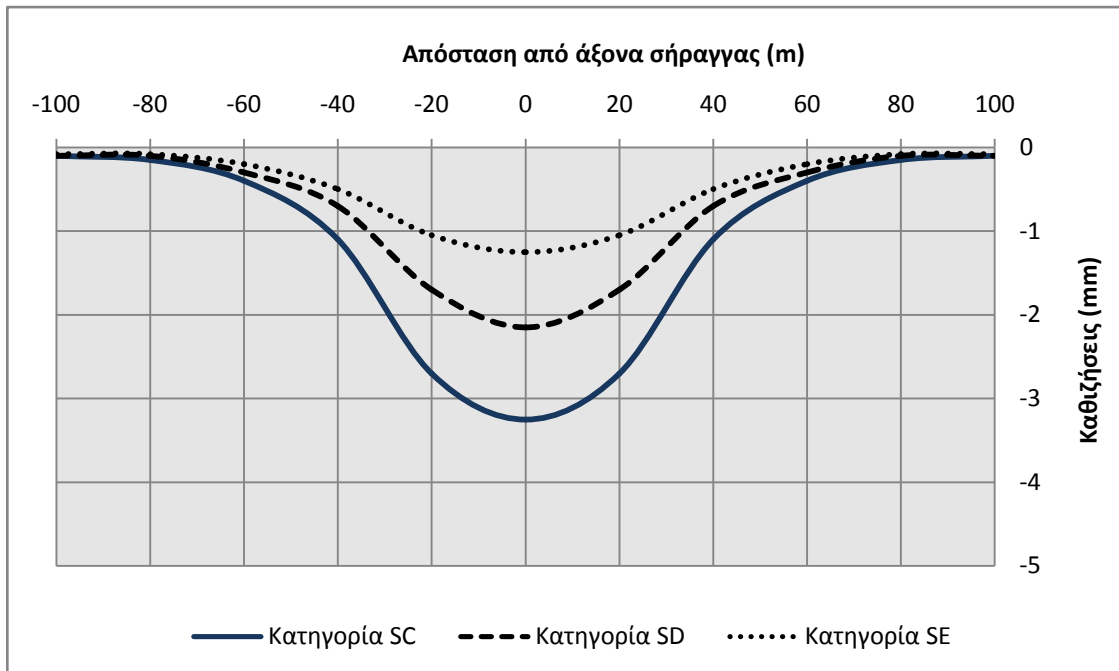
Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται για τα Υποτμήματα Α1, Α2 και για το Τμήμα Β αντίστοιχα για όλες τις κατηγορίες, ξεχωριστά η καμπύλη των υπολογιζόμενων καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους λόγω διάνοιξης της σήραγγας, η καμπύλη των καθιζήσεων λόγω καταβασμού του Υδροφόρου Ορίζοντα καθώς και η καμπύλη των συνολικών καθιζήσεων.



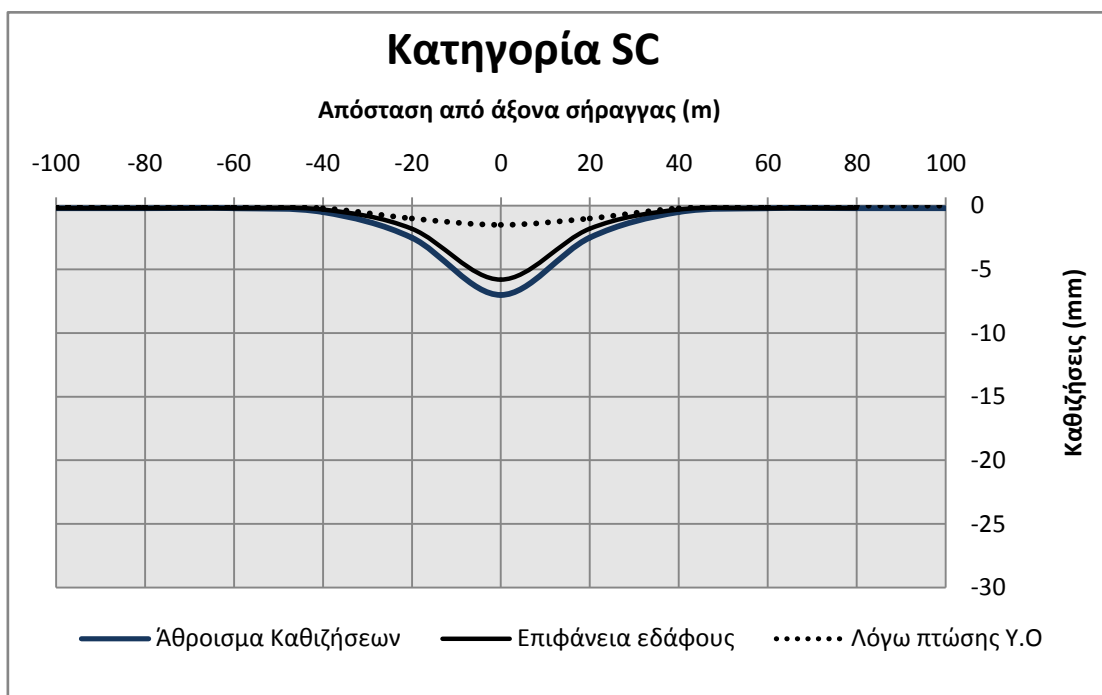
Γράφημα 3: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους - Υπομήμα Α1



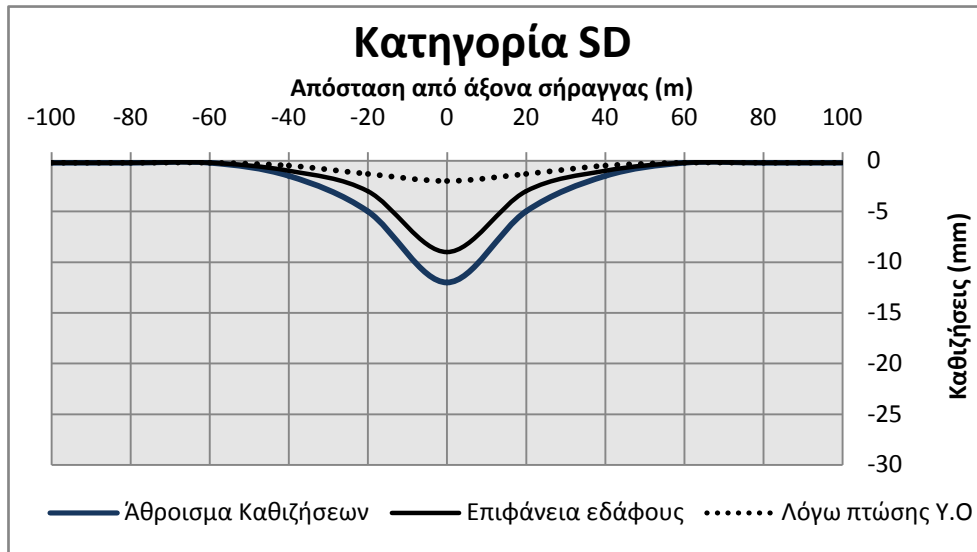
Γράφημα 4: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους - Υπομήμα Α2



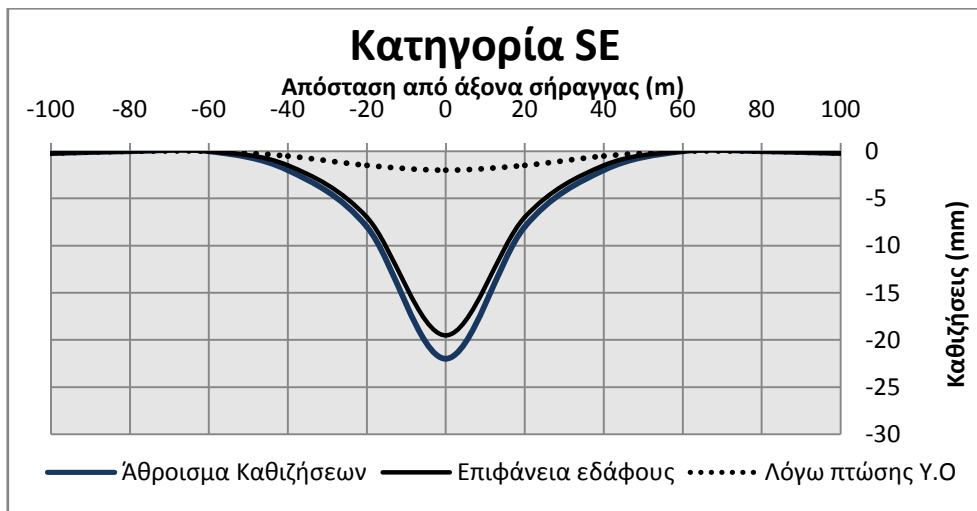
Γράφημα 5: Καμπύλη καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους -Τμήμα Β



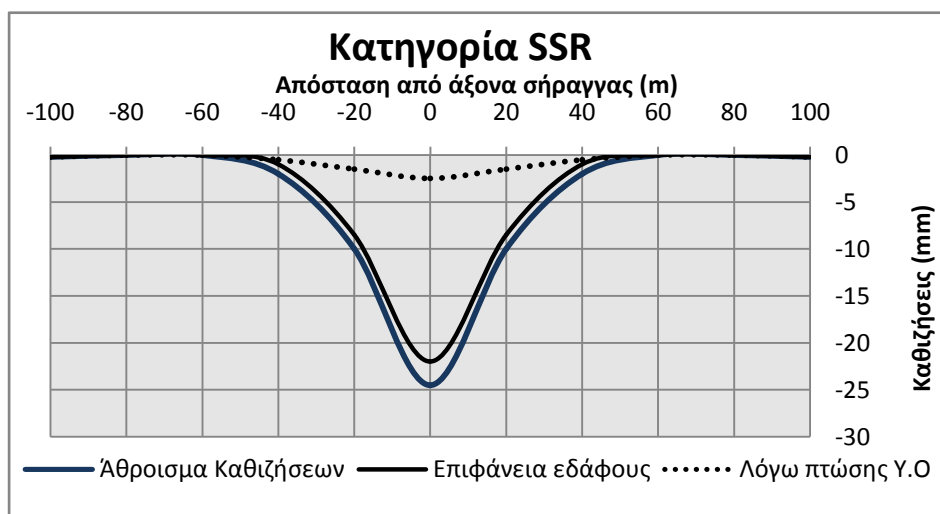
Γράφημα 6: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC-Υποτμήμα Α1



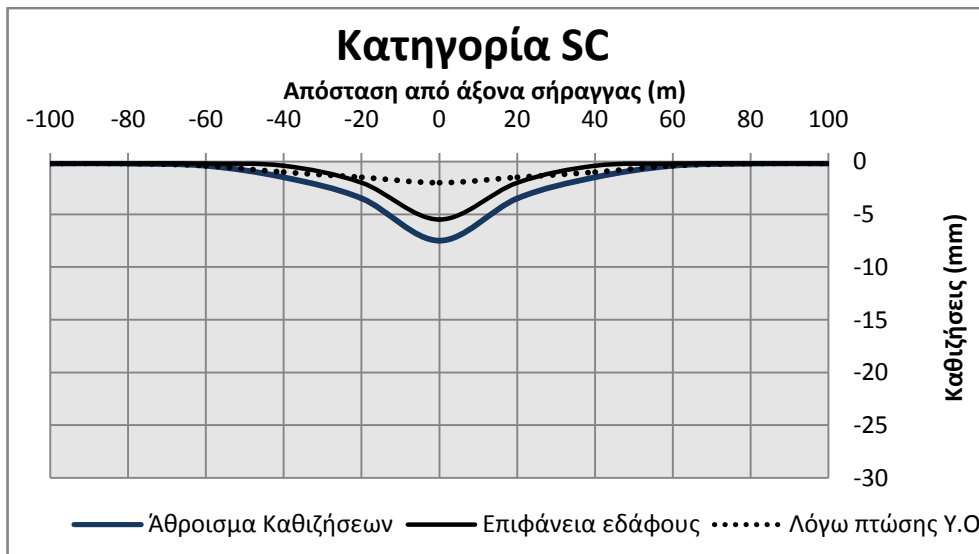
Γράφημα 7: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD-Υποτμήμα Α1



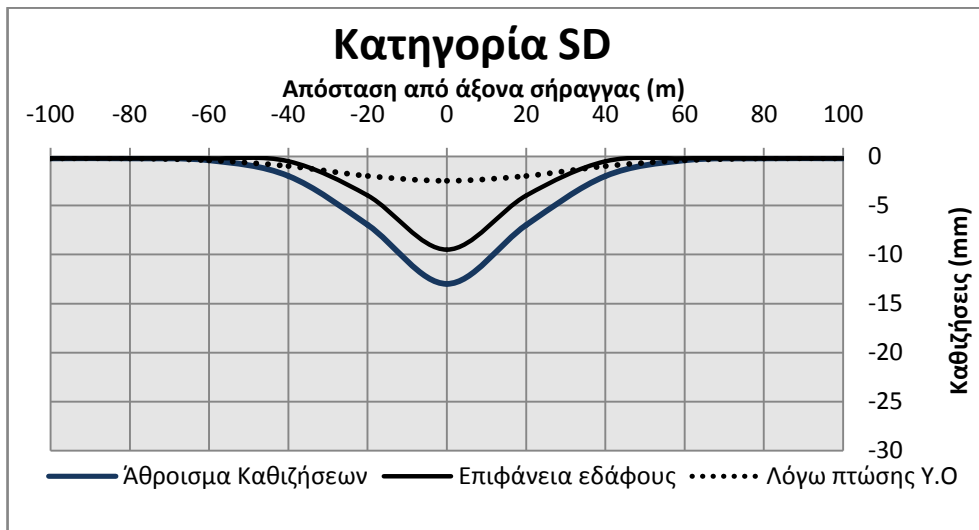
Γράφημα 8: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE-Υποτμήμα Α1



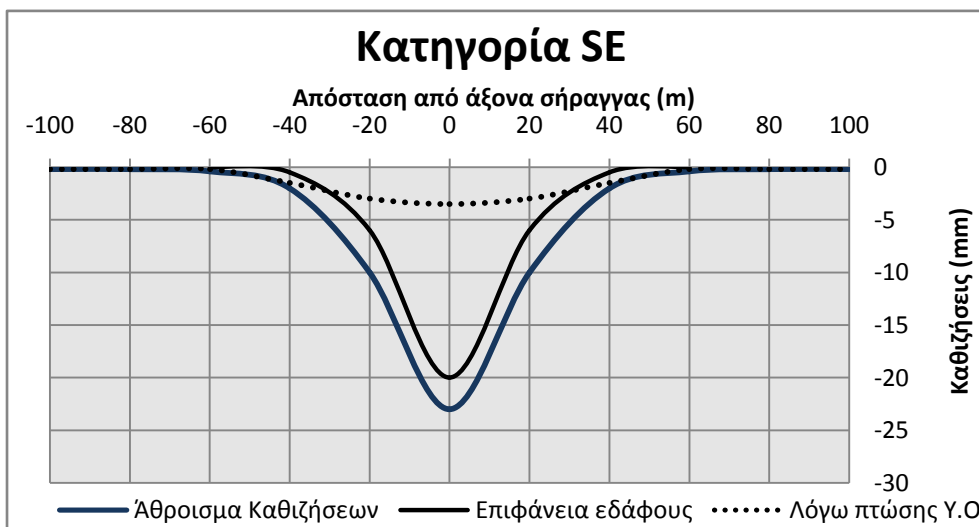
Γράφημα 9: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SSR-Υποτμήμα Α1



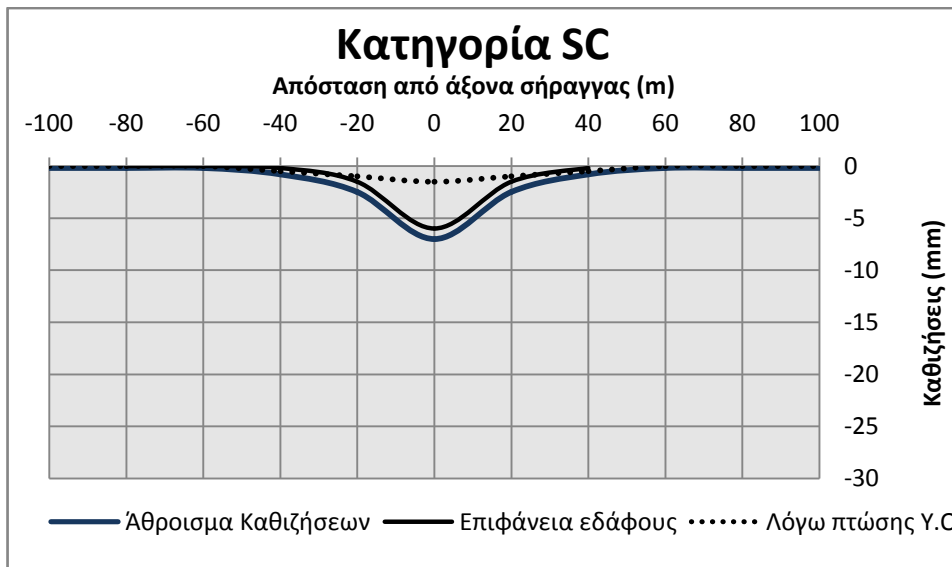
Γράφημα 10: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC-Υποτμήμα Α2



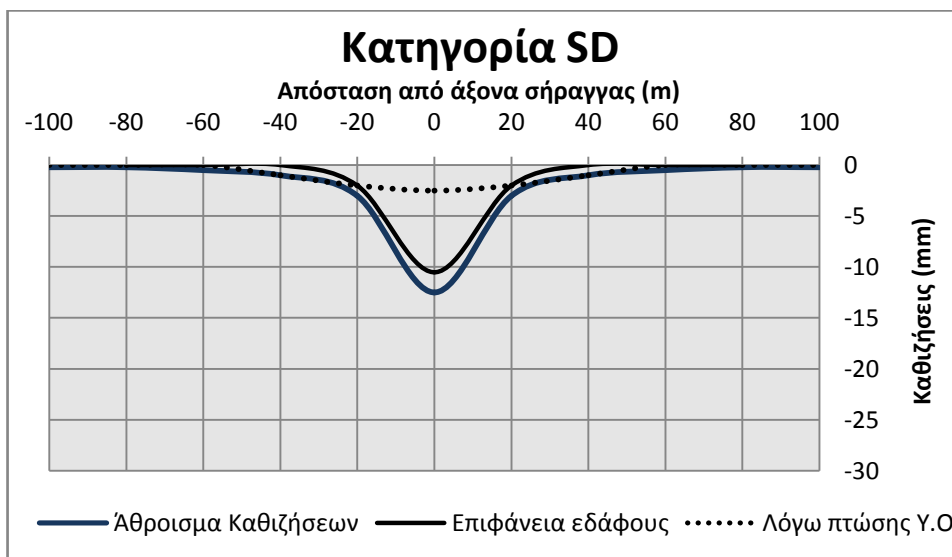
Γράφημα 11: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD-Υποτμήμα Α2



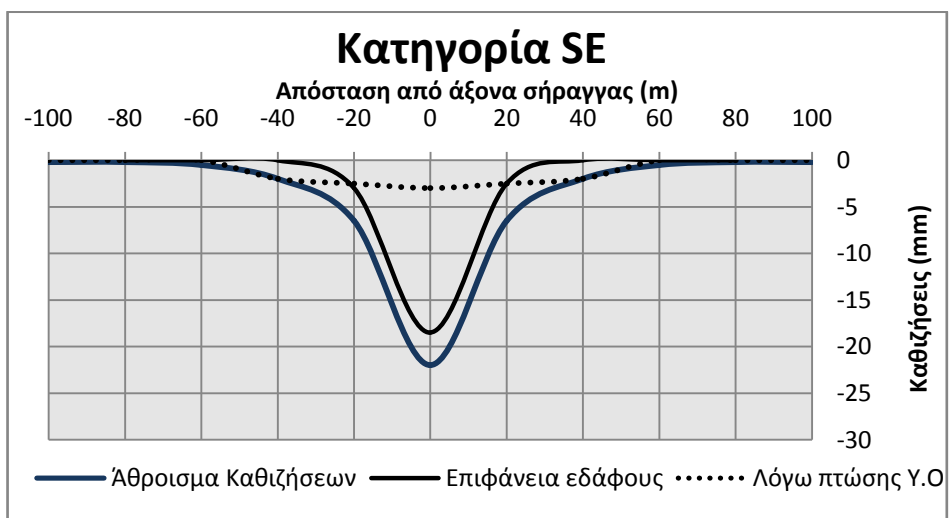
Γράφημα 12: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE-Υποτμήμα Α2



Γράφημα 13: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SC- Τμήμα Β



Γράφημα 14: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SD- Τμήμα Β

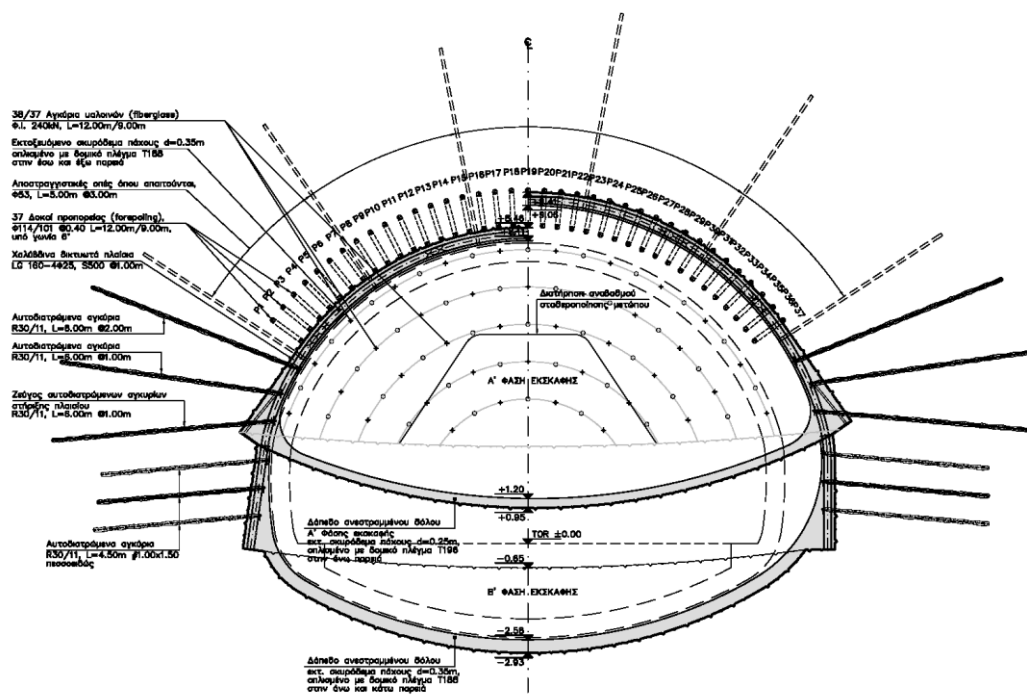


Γράφημα 15: Καμπύλες καθιζήσεων - Κατηγορία SE- Τμήμα Β

4.2 Πραγματικές τιμές Καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας

Η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιήθηκε με συμβατικά μηχανικά μέσα, ξεκινώντας από τα δύο φρέατα προς εκατέρωθεν διευθύνσεις.

Με βάση τις θεωρητικές προεκτιμήσεις των ενδεχόμενων επιφανειακών καθιζήσεων, τις εισροές των υδάτων στη σήραγγα, τη συμπεριφορά του μετώπου και του ανυποστήρικτου τμήματος καθώς την γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση το σύστημα GSI, από την Χ.Θ. 0+000 έως την Χ.Θ. 0+270 περίπου εφαρμόστηκε η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης SE, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.

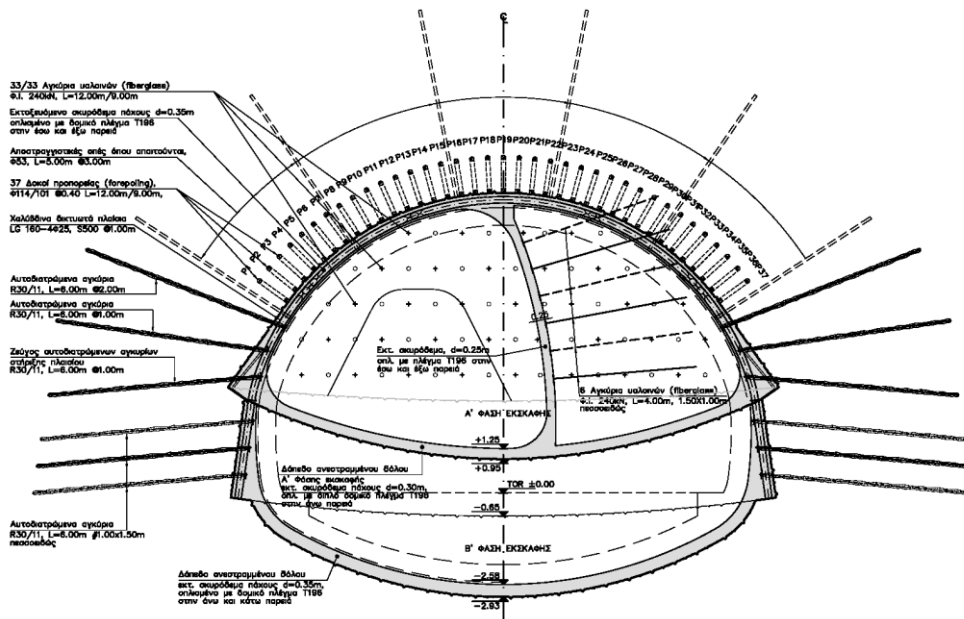


Σχήμα 12: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας τριπλής τροχιάς-Κατηγορία SE

Η διάνοιξη της Α' φάσης έγινε με ολομέτωπη εκσκαφή, αλλά διατηρήθηκε αναβαθμός για τη σταθεροποίηση του μετώπου όπου και τοποθετήθηκαν αγκύρια υαλοϊνών μήκους 12m/9m. Επίσης διαμορφώθηκε δάπεδο ανεστραμμένου θόλου σε κάθε φάση.

Εφαρμόστηκαν 37 δοκοί προπορείας με σωλήνες \varnothing 114/101, μήκους 12m/9m, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0,35m με διπλό δομικό πλέγμα T188 και χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια. Αυτοδιατρώμενα αγκύρια μήκους 6m τοποθετήθηκαν στην Α' φάση εκσκαφής και μήκους 4,5m στη Β' φάση.

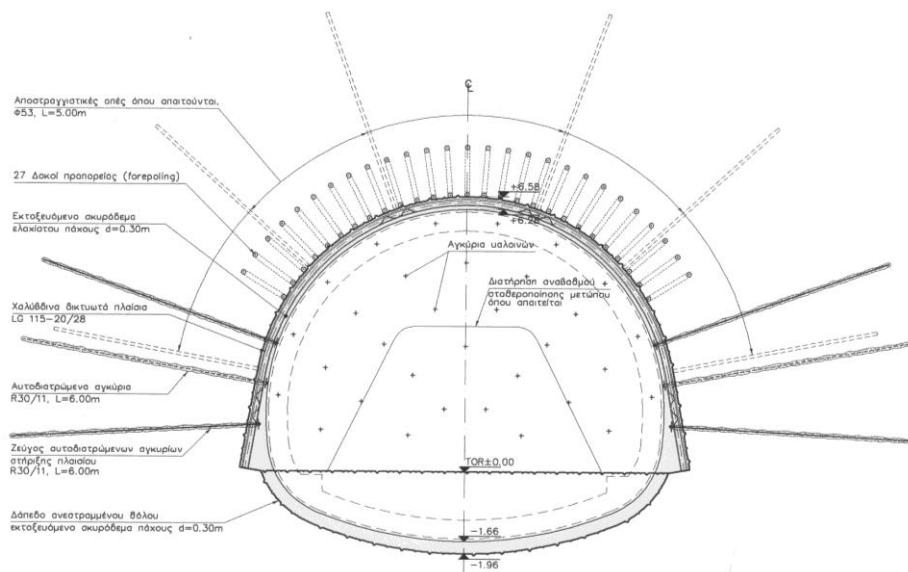
Περί την Χ.Θ 0+343 εκδηλώθηκε απότομη αύξηση των επιφανειακών καθιζήσεων που σημειακά έφθασαν τα 25mm. Έγινε τμηματοποίηση της Α' φάσης εκσκαφής(σε Α1' και Α2') και πύκνωση των αγκυριών μετώπου. Επιπλέον ελήφθησαν πρόσθετα μέτρα, που περιέλαβαν μείωση της υστέρησης της δεξιάς από την αριστερή πλευρική στοά σε 4-5m από 9m και συνεπώς μείωση της απόστασης σκυροδέτησης ενιαίου δαπέδου ανεστραμμένου θόλου από το μέτωπο διάνοιξης.



Σχήμα 13: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας τριπλής τροχιάς-Κατηγορία SSR

Βέβαια όμως με την προώθηση του μετώπου παρουσιάστηκε περαιτέρω αύξηση των μέγιστων καθιζήσεων. Το αποτέλεσμα ήταν να εφαρμοστούν αυτομάτως βαρύτερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της SSR και έτσι οι καθιζήσεις περιορίστηκαν στα 50-55mm, με αποτέλεσμα η διάνοιξη της τριπλής σήραγγας να ολοκληρωθεί χωρίς προβλήματα.

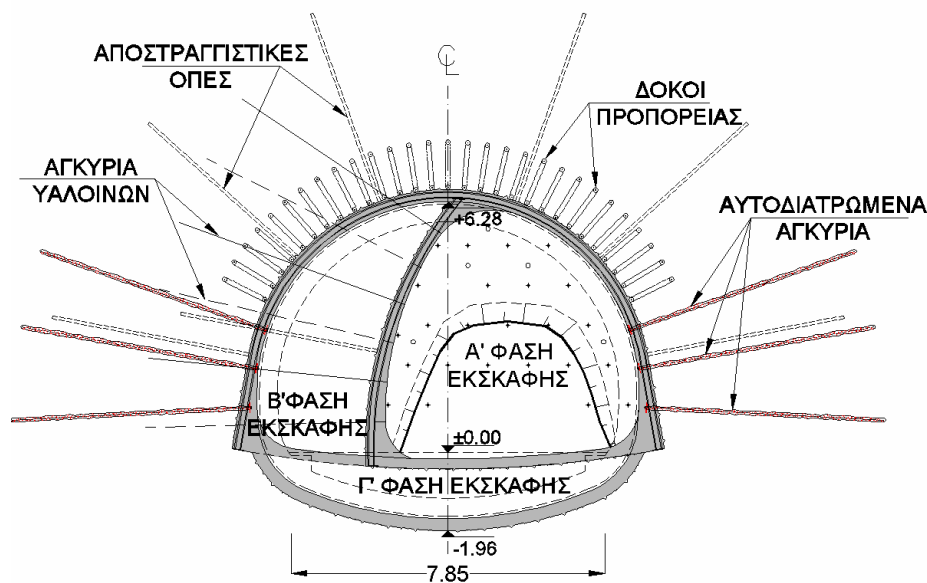
Όσον αφορά τώρα στο τμήμα της διπλής τροχιάς από Χ.Θ 0+349 έως Χ.Θ 0+500 η διάνοιξη έγινε με μέτρα υποστήριξης κατηγορίας SE. Η διάνοιξη της Α' φάσης έγινε με ολομέτωπη εκσκαφή, διατήρηση αναβαθμού σε συνδυασμό με εφαρμογή αγκυριών υαλοϊνών μήκους 12m/9m, αλλά χωρίς δάπεδο ανεστραμμένου θόλου στην Α' φάση.



Σχήμα 14: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας διπλής τροχιάς-Κατηγορία SE

Περιμετρικά της σήραγγας τοποθετήθηκαν 27 δοκοί προπορείας με σωλήνες $\varnothing 114/101$, μήκους 12m/9m, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0,30m με διπλό δομικό πλέγμα T188 και χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια. Αυτοδιατρώμενα αγκύρια μήκους 6m τοποθετήθηκαν στις παρειές της σήραγγας στην Α' φάση εκσκαφής.

Κατά τη διάνοιξη της διπλής σήραγγας στο τμήμα από το θάλαμο προσβολής του φρέατος Ηρώων Πολυτεχνείου από τη Χ.Θ 0+472,43 έως Χ.Θ 0+500 παρουσιάστηκαν επιφανειακές καθιζήσεις που υπερέβησαν τα επιτρεπόμενα όρια της μελέτης φθάνοντας τοπικά έως και τα 100mm. Άμεσα λήφθηκαν μέτρα που αφορούσαν σε εφαρμογή βαρύτερης κατηγορίας της SSR3.

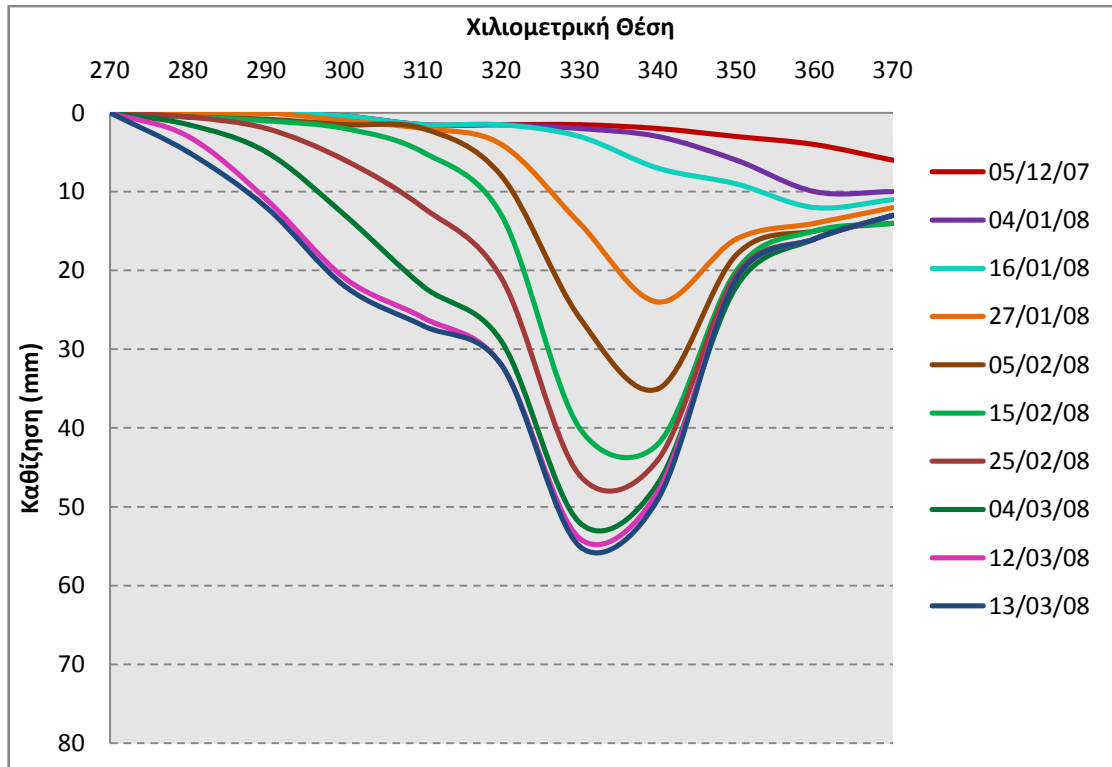


Σχήμα 15: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας διπλής τροχιάς-Κατηγορία SSR3

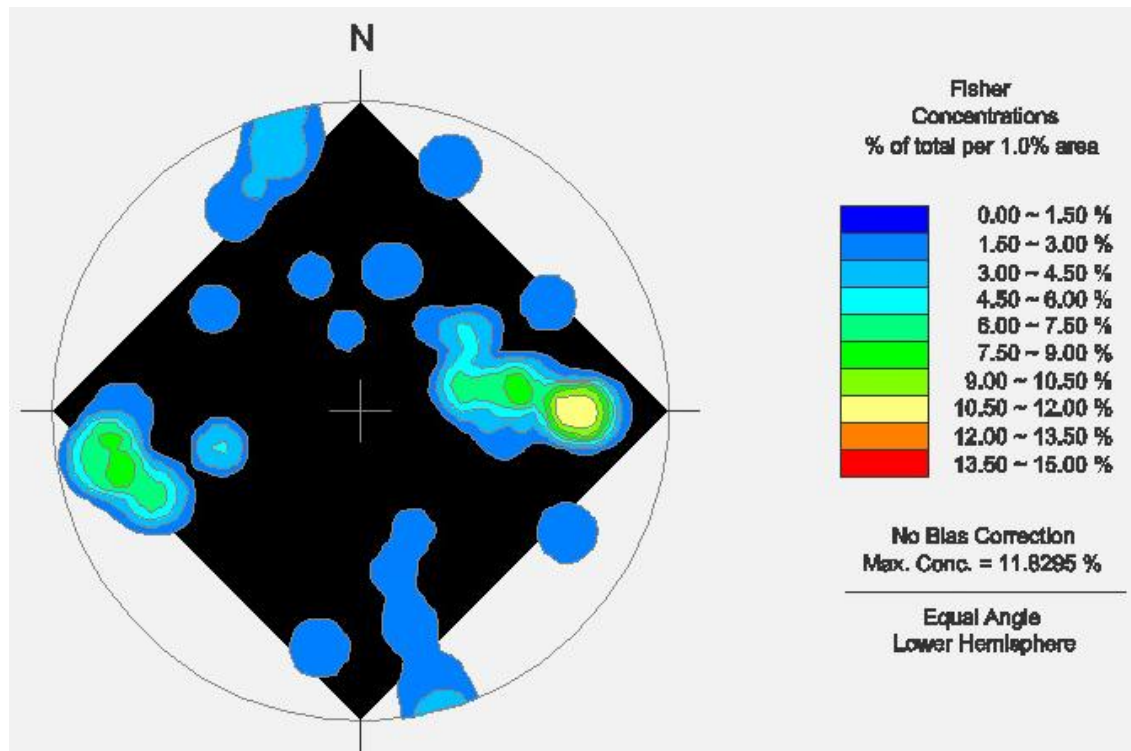
Εφαρμόστηκε κατακόρυφη τμηματοποίηση της άνω ημιδιατομής και διακρίθηκαν τρεις φάσεις εκσκαφής (Α', Β' και Γ') με διαμόρφωση δαπέδου ανεστραμμένου τόξου σε κάθε φάση. Κατασκευάστηκε ομπρέλα 14 δοκών προπορείας στην Α' φάση και 15 δοκών προπορείας στη Β' φάση με σωλήνες $\varnothing 114/101$, μήκους 12m/8m. Η απόσταση μεταξύ Α' και Β' φάσης εκσκαφής ήταν μεγαλύτερη των 16m και αντίστοιχη ήταν και η απόσταση μεταξύ Β' και Γ' φάσης εκσκαφής.

Επιπλέον έγινε πύκνωση των αγκυρίων υαλοϊνών και συστηματική αποστράγγιση της βραχώμαζας μπροστά από το μέτωπο. Τα υπόλοιπα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που εφαρμόστηκαν ήταν ίδια με αυτά της κατηγορίας SE για τη σήραγγα διπλής τροχιάς. Επίσης αυξήθηκε η συχνότητα των μετρήσεων των οργάνων γεωμηχανικής παρακολούθησης. Η διάνοιξη της σήραγγας συνεχίστηκε με ελεγχόμενες καθιζήσεις και αποφεύχθηκαν αστάθειες της βραχώμαζας.

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζονται συνολικά οι καθιζήσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της εκσκαφής στη Χ.Θ 0+343 :



Γράφημα 16: Εξέλιξη των επιφανειακών καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα με την προώθηση του μετώπου



Σχήμα 16: Στατιστική Επεξεργασία Ασυνεχειών Σηράγγας Διατομής Τριπλής & Διπλής Τροχίας (από Χ.00+000 έως Χ.00+504)

Συμπέρασμα

Με βάση τα στοιχεία που μελετήθηκαν προκύπτει ότι οι παράγοντες που συνέβαλαν στην εκδήλωση αυτών των έντονων καθιζήσεων στο τμήμα όπου πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη της τριπλής σήραγγας και διπλής σήραγγας ήταν τα εξής:

- ❖ Τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν υποβαθμισμένα σε σχέση με αυτά που είχαν προεκτιμηθεί με βάση την γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχομάζας.
- ❖ Τα υπερκείμενα στρώματα παρουσίασαν μικρότερο πάχος.
- ❖ Η ύπαρξη υπόγειων υδάτων στην περιοχή του μετώπου.
- ❖ Ο περιορισμένος χώρος καθώς η μετάβαση από διπλή σε τριπλή τροχιά επέβαλε την τοποθέτηση δοκών προπορείας μήκους 6m αντί για 12m που ίσχυε στην περίπτωση της διπλής.

4.3 Συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας

4.3.1 Σύγκριση Θεωρητικών και Πραγματικών τιμών για τις Συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας

➤ Θεωρητικές Τιμές

Σύγκλιση ονομάζεται η σχετική μετατόπιση δύο σημείων στο όριο μιας εκσκαφής. Η μέτρηση πραγματοποιείται, με τηλεσκοπική ράβδο ή ράβδο invar ή ταινία κάτω από σταθερή ένταση, που τοποθετείται μεταξύ δύο σημείων μέτρησης στην επιφάνεια του πετρώματος.

Με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις, οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις στο εσωτερικό της διατομής εκσκαφής (συγκλίσεις) στις θέσεις τοποθέτησης των στόχων μετρήσεως, για τις κατηγορίες ανάλυσης SC, SD, SE και SSR, ορίζονται οι τιμές αναφοράς, τα όρια επιφυλακής καθώς και τα όρια συναγεμού για χρήση τους στην διαχείριση των μετρήσεων γεωδομητικής παρακολούθησης.

Με βάση το κριτήριο Chern για το όριο επιφυλακής I (όπου οι εργασίες μπορούν να συνεχιστούν κανονικά) είναι:

$$\epsilon_c = \delta_c / r_{(\%) } = 0,7\% \div 1,0\% \Rightarrow \delta_c = r \epsilon_c \Rightarrow \delta_c = 5(0,7\% \div 1,0\%) \Rightarrow \delta_c = 35 \div 50 \text{ mm}$$

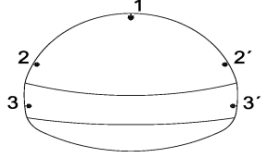
Οι μετακινήσεις αυτές είναι σημαντικές και θα οδηγούσαν σε μη αποδεκτές καθιζήσεις στην επιφάνεια. Παρ' όλα αυτά δίνουν μια ένδειξη για το πόσο υψηλές μπορούν να είναι οι συγκλίσεις και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια προτού αρχίσουν να εμφανίζονται βλάβες στην επένδυση.

ΤΜΗΜΑ Α

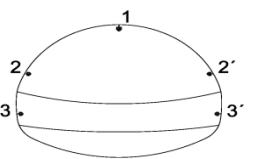
Το τμήμα Α της χάραξης διέρχεται μέσα από το σχηματισμό των Αθηναϊκών Σχιστόλιθων καθώς και τη μεταβατική ζώνη μεταξύ των Σχιστόλιθων και των Νεογενών. Το ύψος των υπερκείμενων γαιών κυμαίνεται από 16,5-20,5m. Για τις αναλύσεις συνεχούς μέσου λήφθηκε το ύψος των υπερκείμενων γαιών ίσο με H=20,5m.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σύμφωνα με το πρόγραμμα FLAC για τον υπολογισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στο εσωτερικό της διατομής εκσκαφής στις

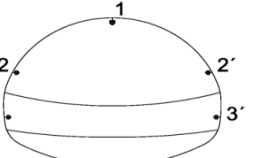
θέσεις τοποθέτησης των στόχων μετρήσεων σε χαρακτηριστικά στάδια ανάλυσης που συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες για τις κατηγορίες σχεδιασμού SC, SD, SE και SSR.

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	0.00	-0.35	-
	y_d	-8.40	-4.60	-
9	x_d	0.00	0.60	0.80
	y_d	-8.80	-5.70	-0.30

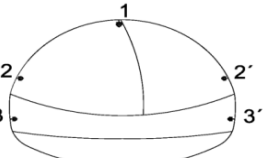
Πίνακας 8: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SC-Τμήμα A

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	-0.00	-0.70	-
	y_d	-14.60	-8.30	-
9	x_d	0.00	0.90	0.60
	y_d	-15.20	-10.20	-0.20

Πίνακας 9: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SD-Τμήμα A

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	0.00	1.90	-
	y_d	-23.60	-15.80	-
9	x_d	0.00	4.40	1.50
	y_d	-28.40	-23.20	-0.20

Πίνακας 10: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SE-Τμήμα A

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2 / 2'	3 / 3'

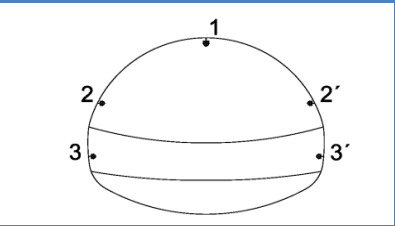
6	x_d	0.30	6.60	-
	y_d	-10.90	-13.40	-
11	x_d	0.80	2.60 / 1.50	-
	y_d	-24.80	-19.20 / -9.50	-
14	x_d	-0.70	4.50 / -2.10	2.00 / -2.60
	y_d	-29.50	-26.10 / -17.50	-0.80 / -1.20

Πίνακας 11: Υπολογιζόμενες συγκλίσεις-Κατηγορία σχεδιασμού SSR-Τμήμα Α

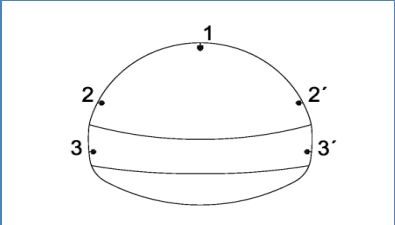
ΤΜΗΜΑ Β

Το Τμήμα Β της χάραξης διέρχεται μέσα από το σχηματισμό των Νεογενών. Στο υπό εξέταση τμήμα το ύψος των υπερκειμένων γαιών κυμαίνεται από 11,5-16,5m. Για τις αναλύσεις συνεχούς μέσου έχει ληφθεί το ύψος των υπερκειμένων γαιών ίσο με $H=11.50m$.

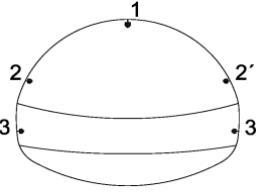
Επίσης, τα στάδια ανάλυσης για κάθε κατηγορία σχεδιασμού SC, SD και SE περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	0.00	-0.40	-
	y_d	-7.00	-3.90	-
9	x_d	0.00	0.40	0.60
	y_d	-7.60	-5.00	-0.15

Πίνακας 12: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SC-Τμήμα Β

Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	0.00	-0.70	-
	y_d	-12.60	-6.90	-
9	x_d	0.00	0.40	0.35
	y_d	-13.40	-8.60	0.00

Πίνακας 13: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SD-Τμήμα Β

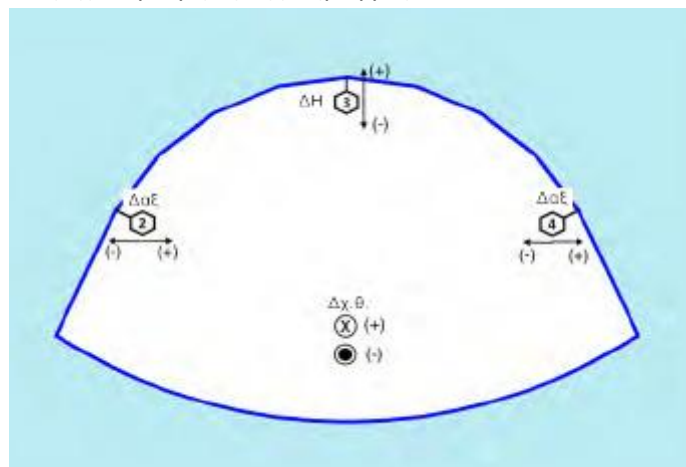
Στάδιο	Μετακίνηση (mm)			
		1	2	3
6	x_d	0.00	-0.50	-
	y_d	-19.60	-11.00	-
	x_d	0.05	0.90	-
	y_d	-9.30	-1.40	-
	x_d	0.05	0.50	-
	y_d	-8.00	-1.10	-
9	x_d	0.00	1.40	0.60
	y_d	-23.00	-16.10	0.10

Πίνακας 14: Στάδια προσομοίωσης-Κατηγορία σχεδιασμού SE-Τμήμα Β

➤ Πραγματικές Τιμές

Οι 3D μετρήσεις των συγκλίσεων καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής της σήραγγας. Μετά την εκσκαφή του κάθε μετώπου και τοποθέτηση των προσωρινών μέτρων υποστήριξης τοποθετούνται τρισδιάστατοι στόχοι. Η εκσκαφή της σήραγγας έγινε σε δυο φάσεις. Οι στόχοι της α' φάσης είναι τρεις. Σε κάθε τρισδιάστατο στόχο (2,3,4) καταγράφονται οι μετακινήσεις τους κατά τις τρεις κατευθύνσεις Δz, Δακτ. και Δχ.θ.

Η μετακίνηση κατά Δz υποδεικνύει την κατακόρυφη μετατόπιση με θετικές μετρήσεις προς τα πάνω και αρνητικές προς τα κάτω. Η μετακίνηση κατά Δακτ. υποδεικνύει την οριζόντια μετατόπιση κάθετα στον άξονα της σήραγγας με θετικές μετρήσεις προς τα δεξιά και αρνητικά προς τα αριστερά. Τέλος η μετακίνηση κατά Δχ.θ υποδεικνύει την οριζόντια μετατόπιση πάνω στον άξονα της σήραγγας με θετικές μετρήσεις κατά την χιλιομέτρηση και αρνητικές αντίθετα στην χιλιομέτρηση της σήραγγας.



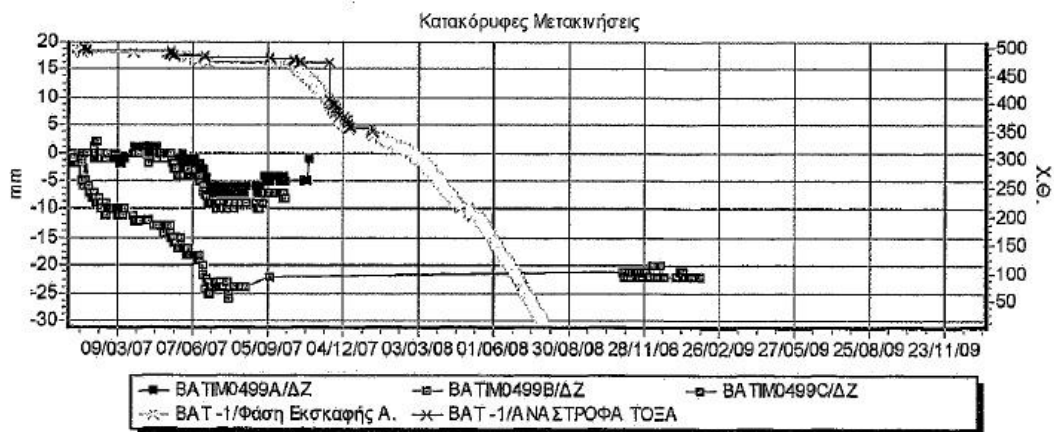
Εικόνα 1: Διατομή της α' φάσης της σήραγγας και των τρισδιάστατων στόχων

Η συχνότητα των μετρήσεων ξεκινά με τη μέτρηση αναφοράς, ακολουθούν ημερήσιες μετρήσεις κατά προτίμηση την ίδια ώρα της μέρας για 30 ημέρες, εξακολουθούν ημερήσιες

μέχρι τη στιγμή που ο ρυθμός μετακίνησης μειωθεί ασυμπτωτικά με διαφορές μικρότερες της μόνιμης επένδυσης και σταδιακά με την πρόοδο των εργασιών και την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης καταστρέφεται η προσωρινή και αφαιρούνται και τα όργανα.

Η συχνότητα των μετρήσεων ακολουθεί μία φόρμα με ημερήσιες μετρήσεις για τις 15 πρώτες ημέρες, με εβδομαδιαίες για τις επόμενες δέκα και μηνιαίες μέχρι την περάτωση του έργου.

Σε κάθε διάγραμμα φαίνονται οι μετακινήσεις και των τρισδιάστατων στόχων κατά μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε σχέση με το χρόνο. Στην εικόνα 2 φαίνεται ένα τέτοιο διάγραμμα μετακινήσεων κατά Δz. Στον ένα κάθετο άξονα έχουμε μετακινήσεις σε mm και στον άλλον τον χρόνο. Οι μετακινήσεις κατά Δz παρουσιάζονται βάση του κάθετου άξονα στα δεξιά όπου έχουμε τις μετακινήσεις σε mm και του οριζόντιου άξονα που έχουμε τον χρόνο σε ημερομηνίες. Επίσης στο ίδιο διάγραμμα έχουμε και τη θέση του μετώπου εκσκαφής σε σχέση με το χρόνο. Αυτό παρουσιάζεται από τη μαύρη γραμμή που δείχνει την Χ.Θ του μετώπου στον κάθετο άξονα αριστερά σε κάθε ημερομηνία στον οριζόντιο άξονα. Τα διαφορετικά σχήματα στο κάτω μέρος του διαγράμματος αντιστοιχούν στον κάθε ένα τρισδιάστατο στόχο στην συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση.



Εικόνα 2: Διάγραμμα μετακινήσεων κατά Δz στην Χ.Θ 0+499

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετακινήσεις (mm) της σήραγγας ανά χιλιομετρική θέση ένα μήνα μετά την α' φάση εκσκαφής και αρχή της β' φάσης. Σε κάποιες θέσεις απουσιάζουν οι μετρήσεις μετακινήσεων των στόχων, επειδή λόγω της θέσης τους στη διατομή της σήραγγας κατά τη διάρκεια των εργασιών συνήθως καταστρέφονται με αποτέλεσμα να μην έχουμε πολλές μετρήσεις.

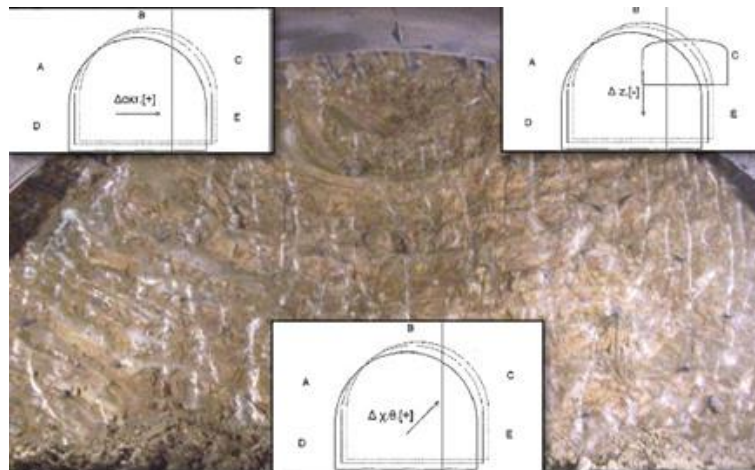
Χ.Θ	Μετακινήσεις mm		
	Σημείο3	Σημείο 2	Σημείο X
0+499	Δz	Δακτ	Δχθ
0+499	-	-5	-
0+495	-25	-20	-
0+491	-	-	-
0+487	-	-	-
0+483	-	-	-
0+479	-	-	-

0+473	-3	-	-
0+469	-	-	-
0+460	-	-	-
0+453	-	-	-
0+449	-	-	-
0+445	-	-	-
0+439	-	-	-
0+430	-	-	-
0+422	-	-	-
0+415	-	-	-
0+403	-	-	-
0+391	-	-	-
0+382	-	-	-
0+371	0	-3	4
0+360	-7	-2	2
0+351	-10	-1	-1
0+342	-25	0	-4
0+337	-38	1	-4
0+299	-	-	-
0+290	-	-	-
0+280	-	-	-4
0+270	-5	5	-5
0+260	-12	5	-9
0+252	-11	-1	-4
0+242	-8	-3	-3
0+234	-12	-2	-2
0+226	-6	-3	-4
0+216	-3	-4	0
0+206	-3	3	6
0+198	-3	-7	-7
0+188	-5	1	0
0+177	-5	0	-4
0+168	-	-	6
0+158	-2	-2	-2
0+149	1	0	-5
0+138	-	-	-
0+128	-	-	-
0+118	-	-	-
0+108	-	-	-
0+98	-	-	-
0+88	-	-	-
0+79	-	-	-

0+70	-12	0	-3
0+60	-5	-	-
0+49	-5	2	3
0+39	-3	-1	0
0+30	-9	3	1
0+19	0	-1	4
0+04	0	0	0

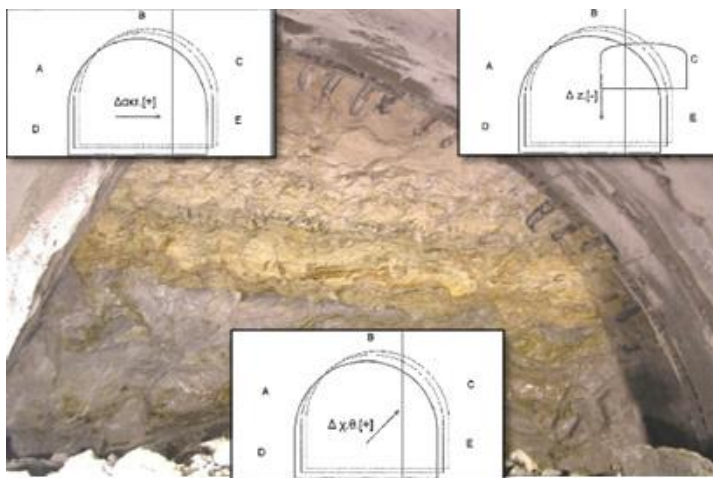
Πίνακας 15: Μετακινήσεις στη σήραγγα ένα μήνα μετά την α' φάση εκσκαφής

Στο τμήμα Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+180 συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκσκαφή με τις θεωρητικές προεκτιμήσεις (Πίνακας 9) για τη σύγκλιση στο εσωτερικό της σήραγγας επιβεβαιώνονται σε μεγάλο βαθμό και βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων.



Εικόνα 3: Γεωλογική Μηκτομή Χ.Θ 0+149,75

Στο τμήμα Χ.Θ 0+180 έως Χ.Θ 0+500, μετά το πέρας της Α' Φάσης εκσκαφής παρουσιάστηκαν υψηλότερες τιμές κατακόρυφων μετακινήσεων που ξεπερνούσαν τις



αρχικές προεκτιμήσεις που θα έφθαναν έως τα -19,6mm (Πίνακας 13). Οι τιμές με τις μεγαλύτερες συγκλίσεις εντοπίστηκαν κυρίων στις Χ.Θ 0+337 έως Χ.Θ 0+343 που κυμάνθηκαν από -25 έως -38mm και στη Χ.Θ 0+495 έφθασαν τα -25mm.

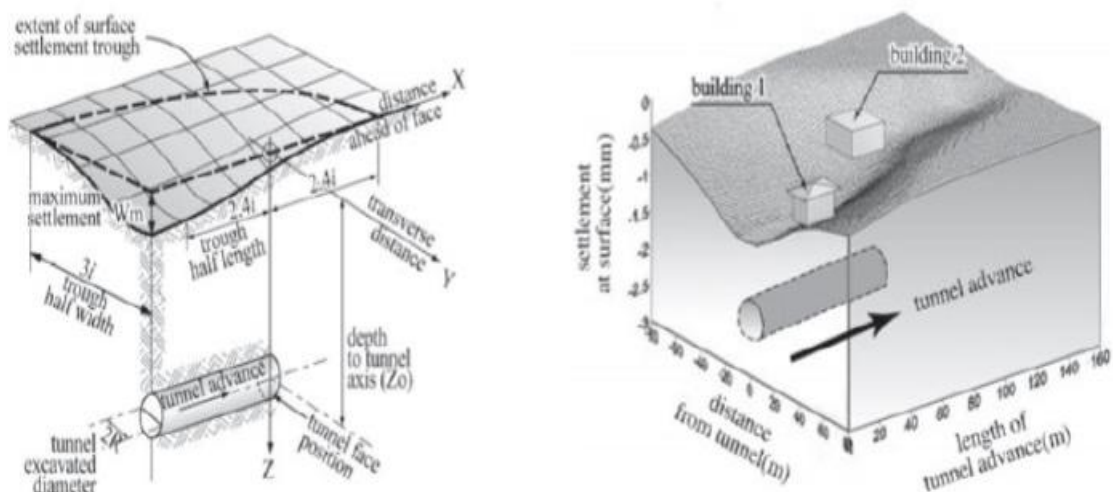
4.4 Οριζόντιες και Γωνιακές Παραμορφώσεις

4.4.1 Σύγκριση Θεωρητικών και Πραγματικών τιμών οριζόντιων και γωνιακών παραμορφώσεων

➤ Θεωρητικές Τιμές

Ανεξαρτήτως της μεθόδου εκσκαφής, η διάνοιξη της σήραγγας μπορεί να προκαλέσει μετακινήσεις γύρω από το άνοιγμα, που μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακές καθιζήσεις. Αυτές οι μετακινήσεις μπορεί να διαφέρουν σε ένταση, διασπορά και ταχύτητα διάδοσης, που με τη σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε παρακείμενες κατασκευές.

Οι υπολογιζόμενες καμπύλες των γωνιακών παραμορφώσεων, για κάθε κατηγορία σχεδιασμού, συγκρίνονται με τα επιτρεπόμενα όρια 1/800 και 1/600 για ευαίσθητα και μη ευαίσθητα κτίρια αντίστοιχα, ενώ οι υπολογιζόμενες καμπύλες οριζόντιων παραμορφώσεων συγκρίνονται με τα επιτρεπόμενα όρια 0,15% και 0,30% για ευαίσθητα και μη ευαίσθητα κτίρια αντίστοιχα.

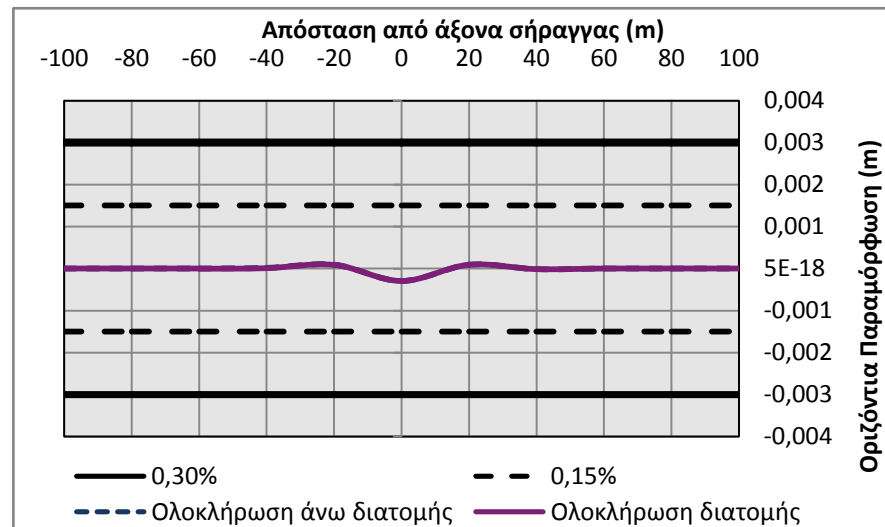
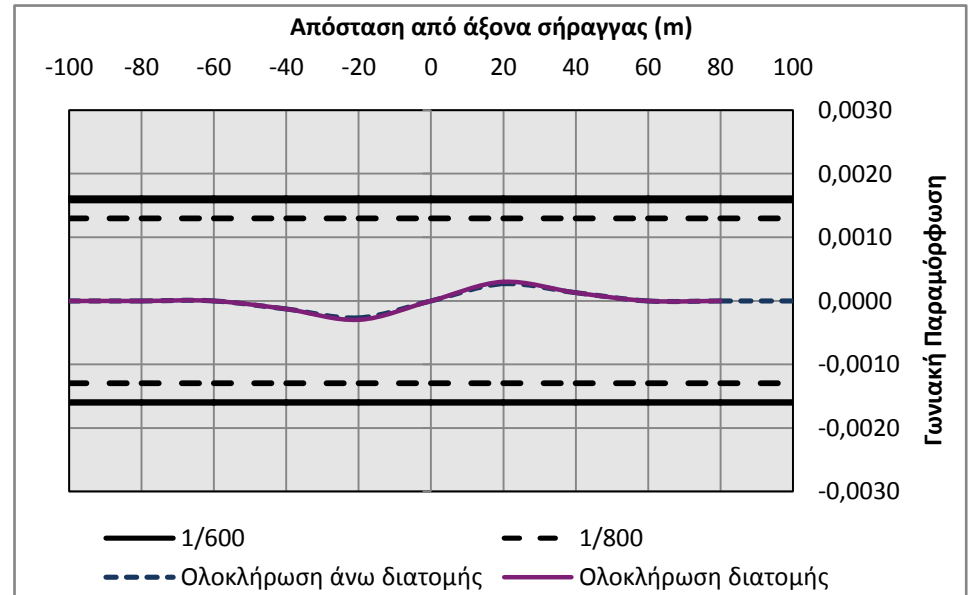
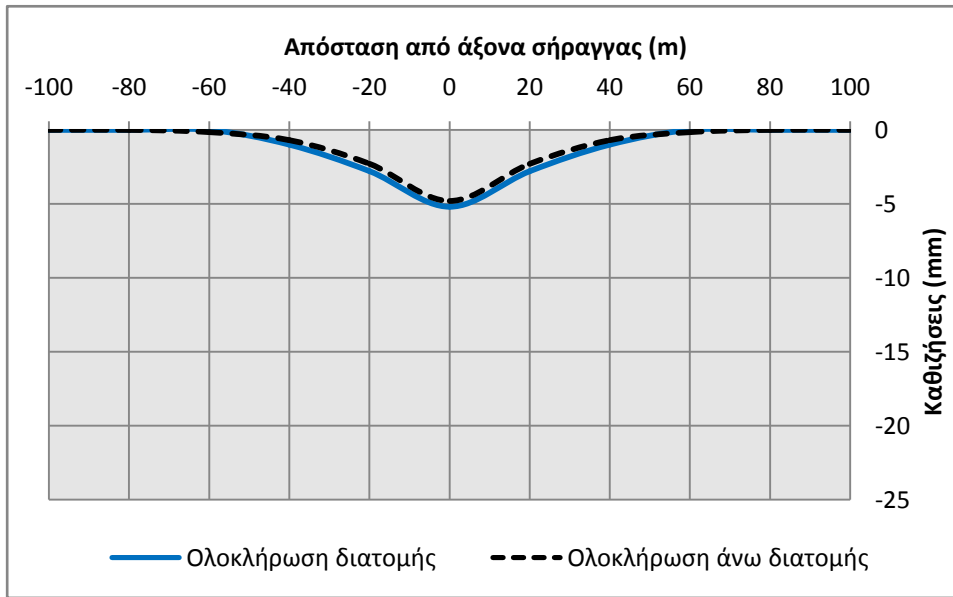


Εικόνα 5: Καμπύλη επιφανειακών εδαφικών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για το Τμήμα Α(Χ.Θ0+000 έως Χ.Θ0+180) και Τμήμα Β(Χ.Θ0+180 έως Χ.Θ0+500) οι πιθανές καμπύλες καθιζήσεων, οριζόντιων και γωνιακών παραμορφώσεων (για κάθε κατηγορία σχεδιασμού) που προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης FLAC.

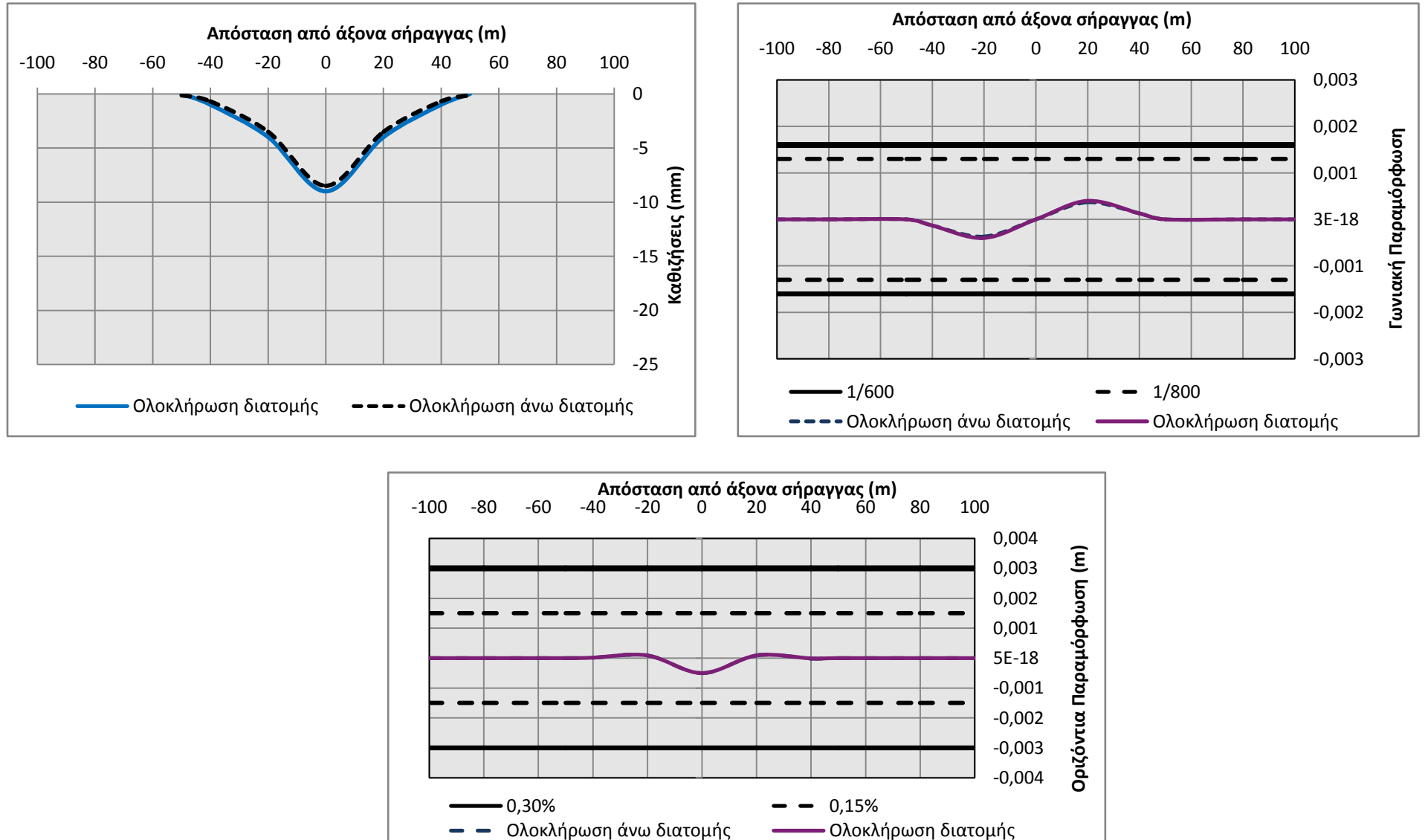
Διευκρινίζεται ότι τα προσομοιώματα SE1 και SE2 ακολουθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της κατηγορίας SE.

Κατηγορία SC



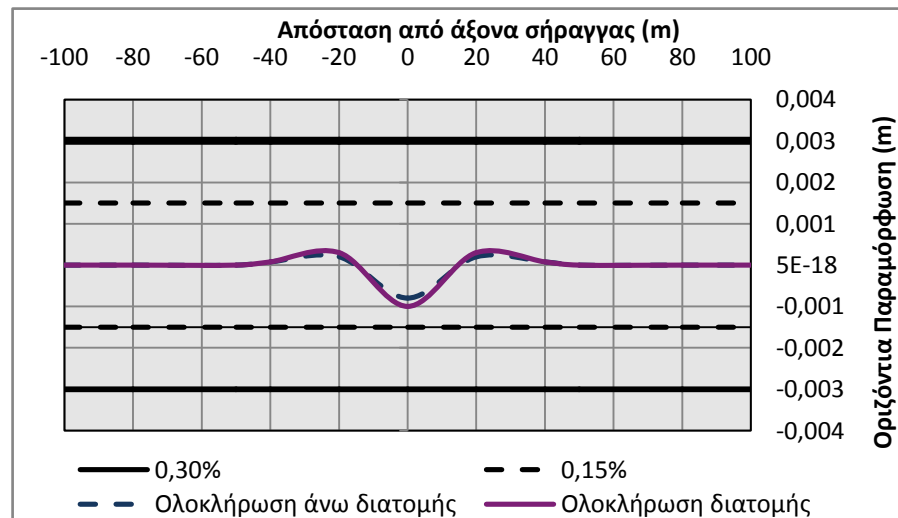
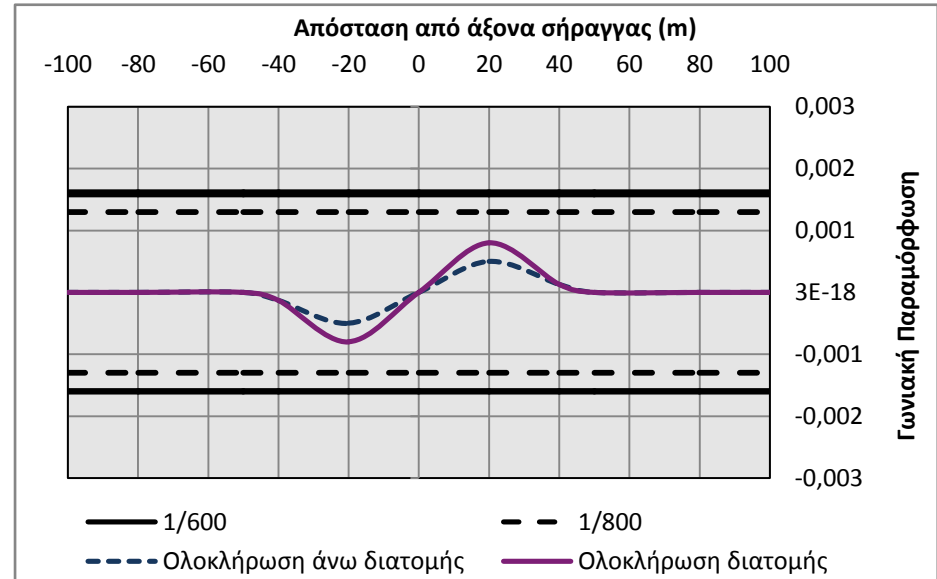
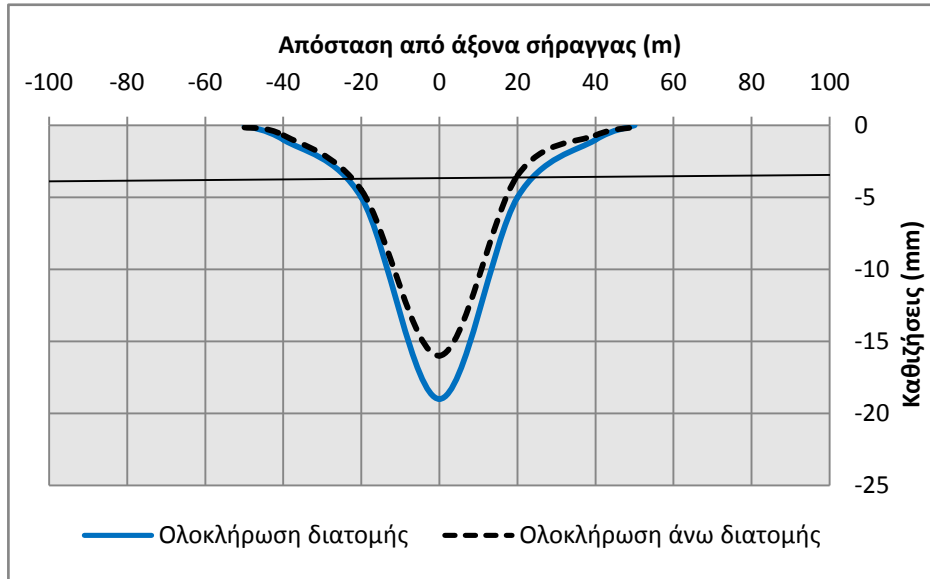
Γράφημα 17: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SC

Κατηγορία SD



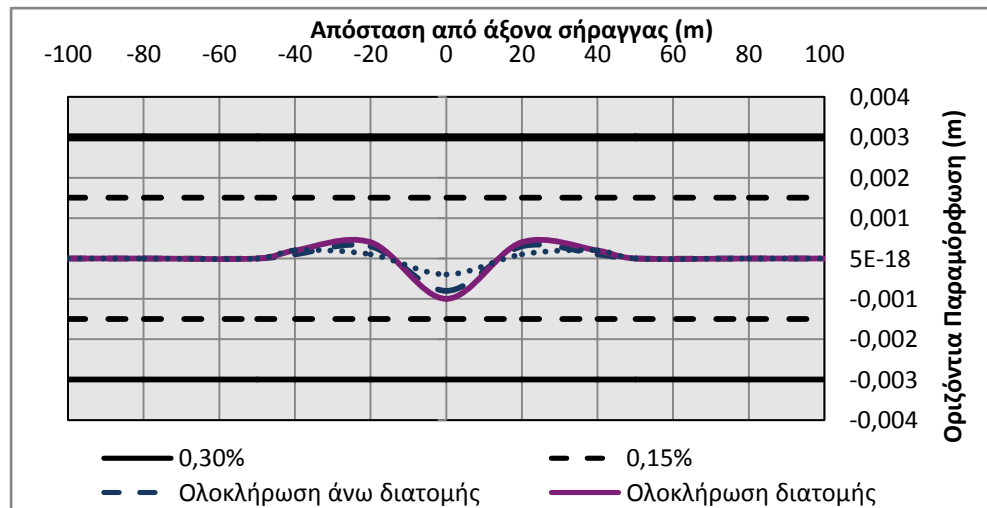
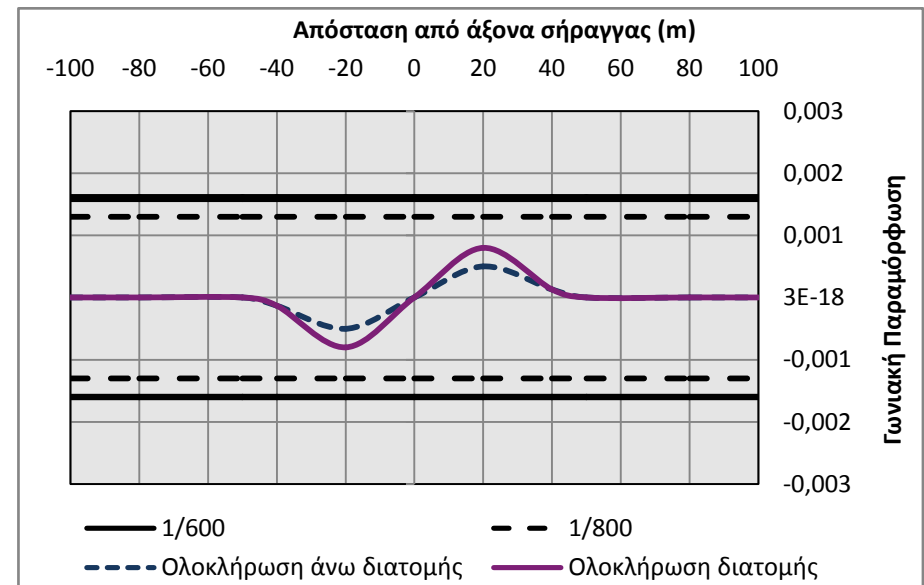
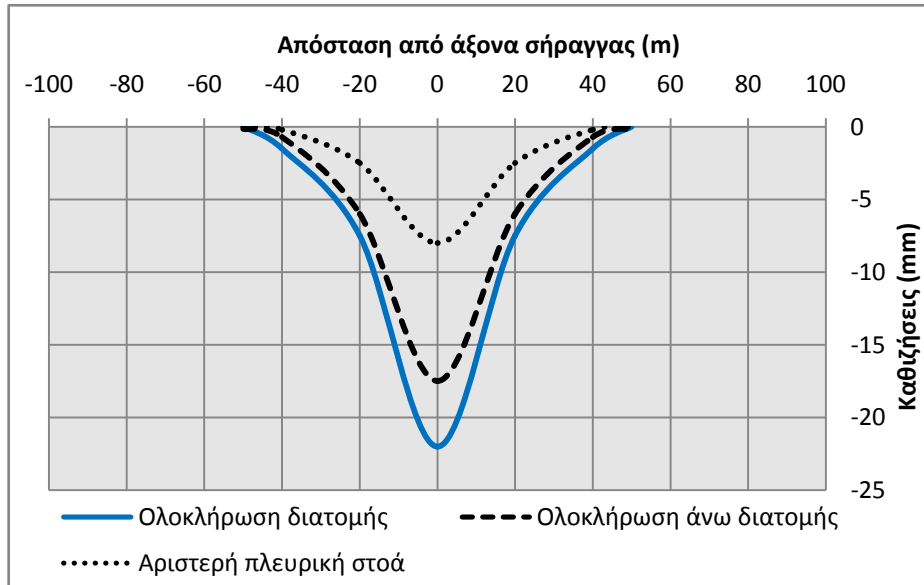
Γράφημα 18: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SD

Κατηγορία SE



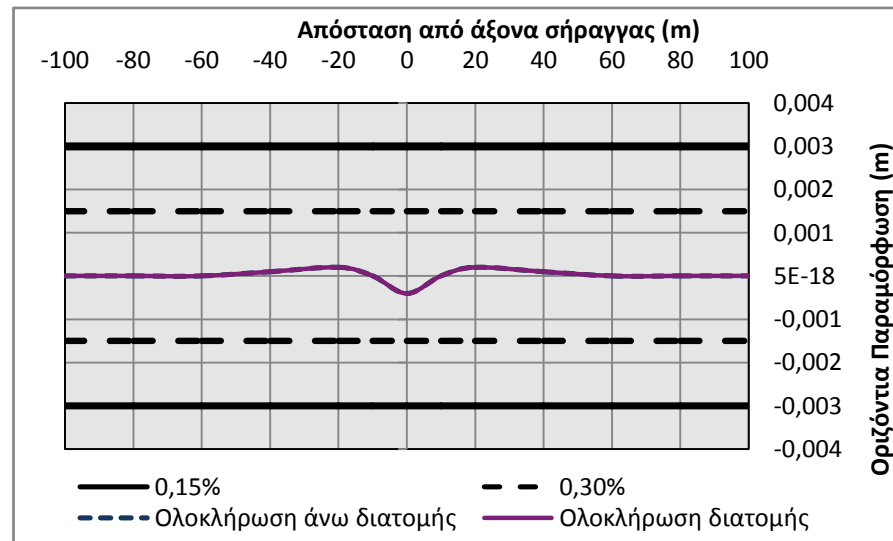
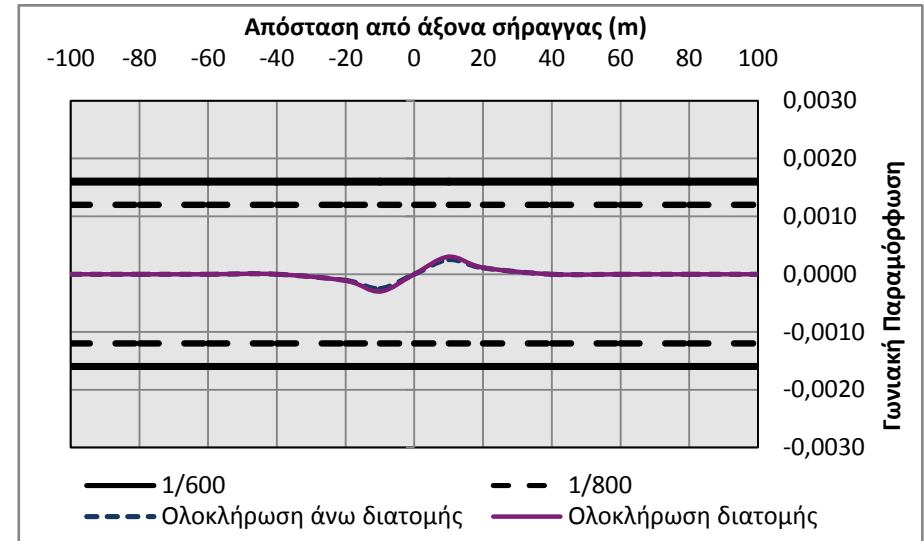
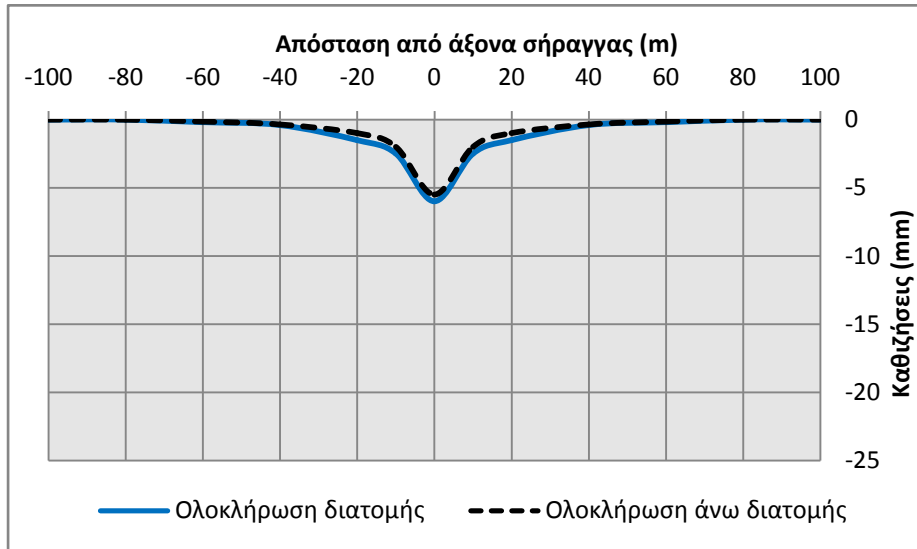
Γράφημα 19: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SE

Κατηγορία SSR



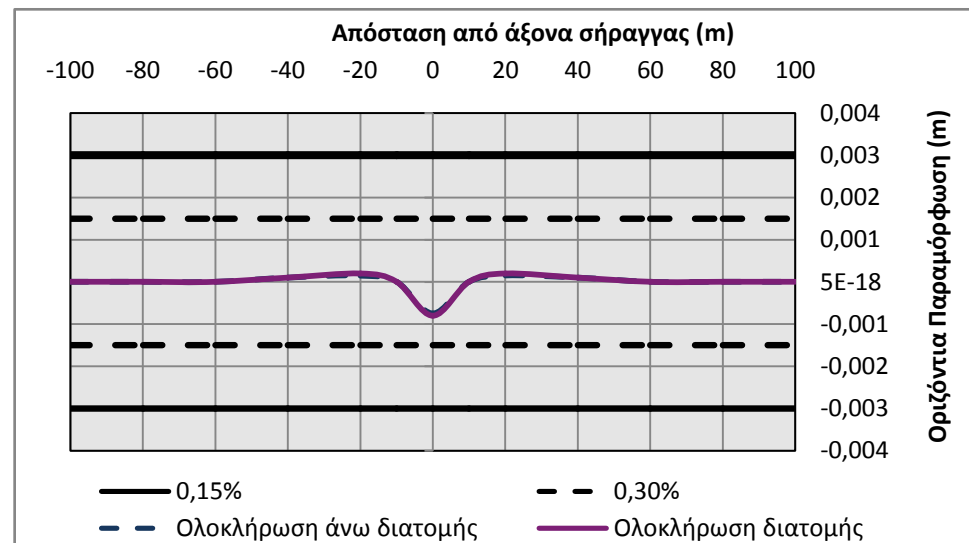
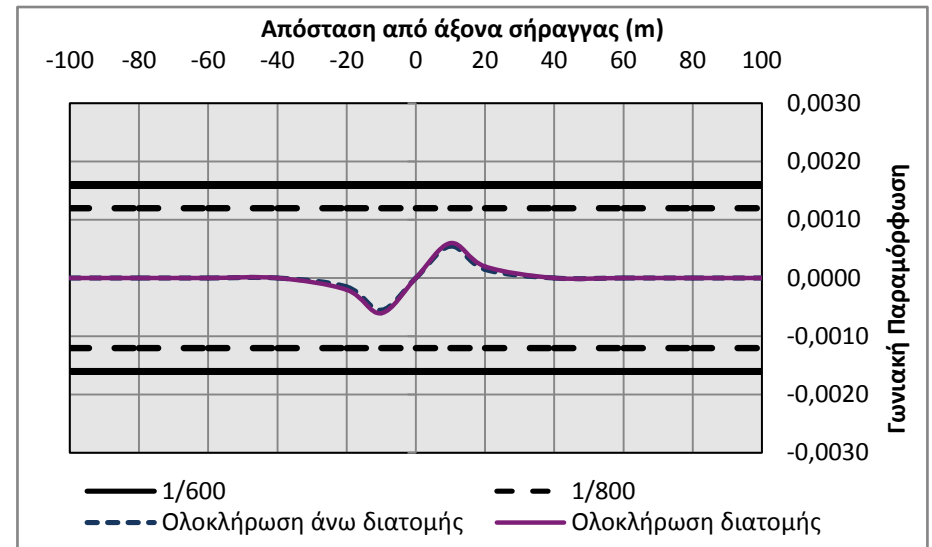
Γράφημα 20: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Α - Κατηγορία SSR

Κατηγορία SC



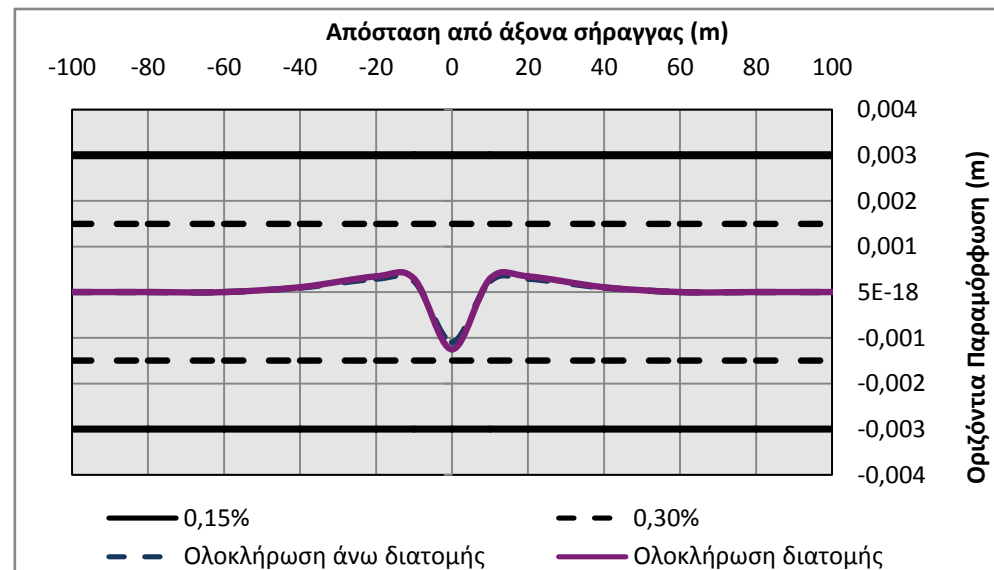
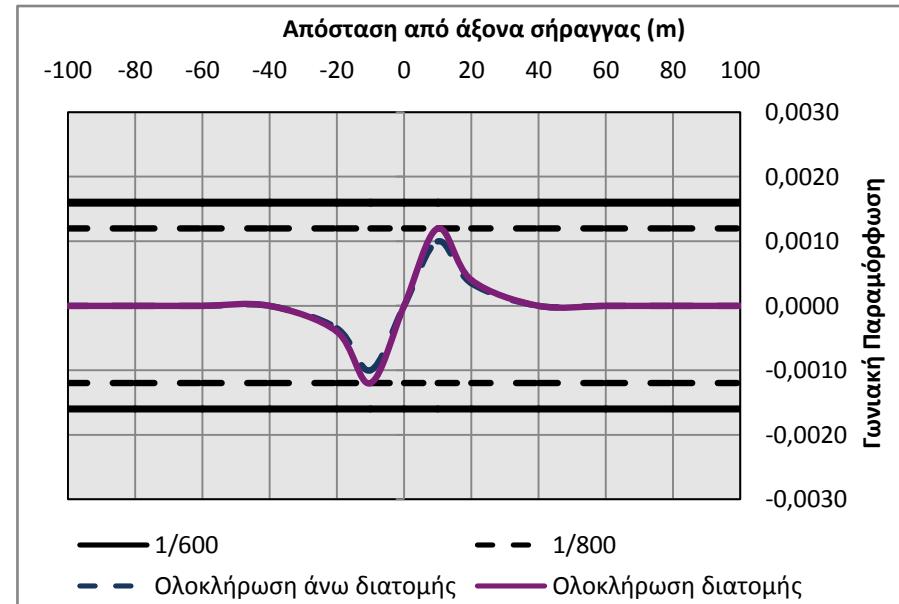
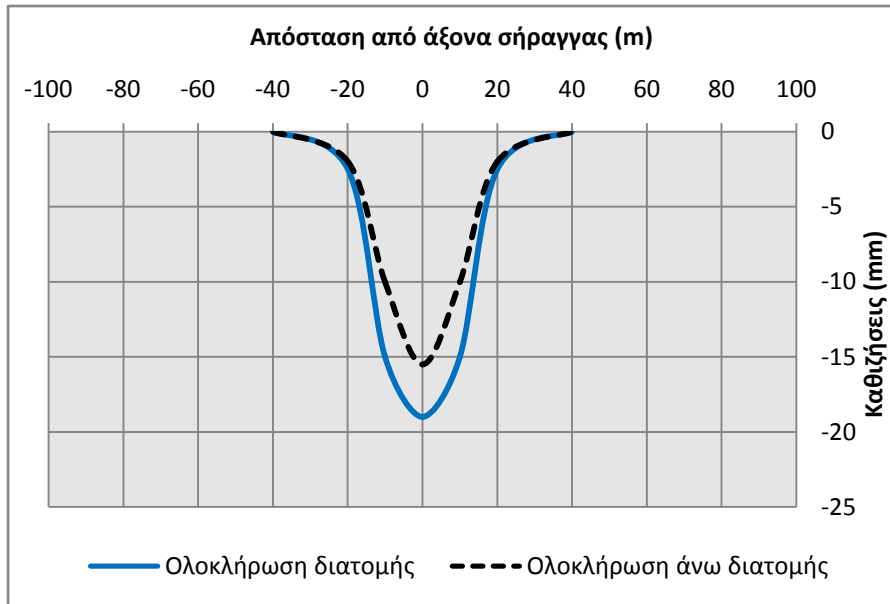
Γράφημα 21: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SC

Κατηγορία SD



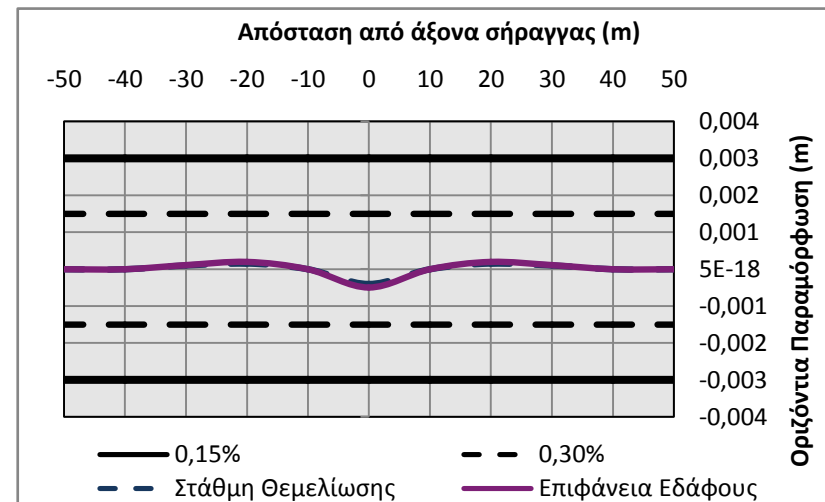
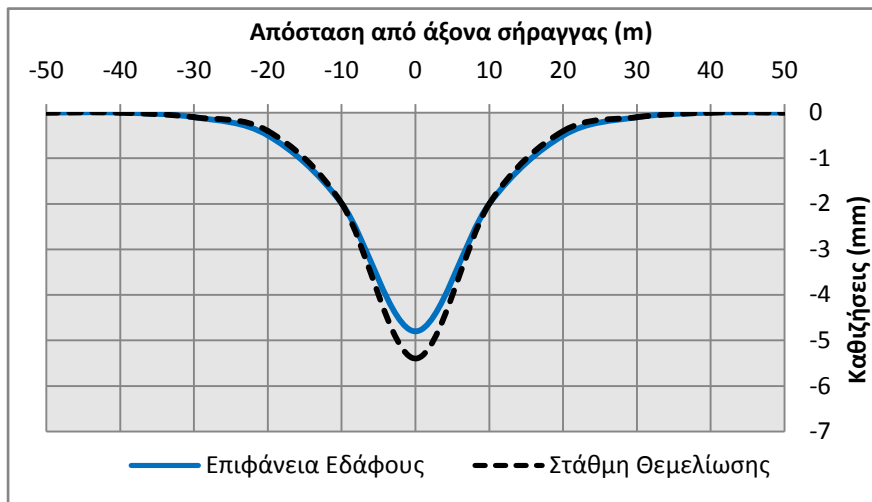
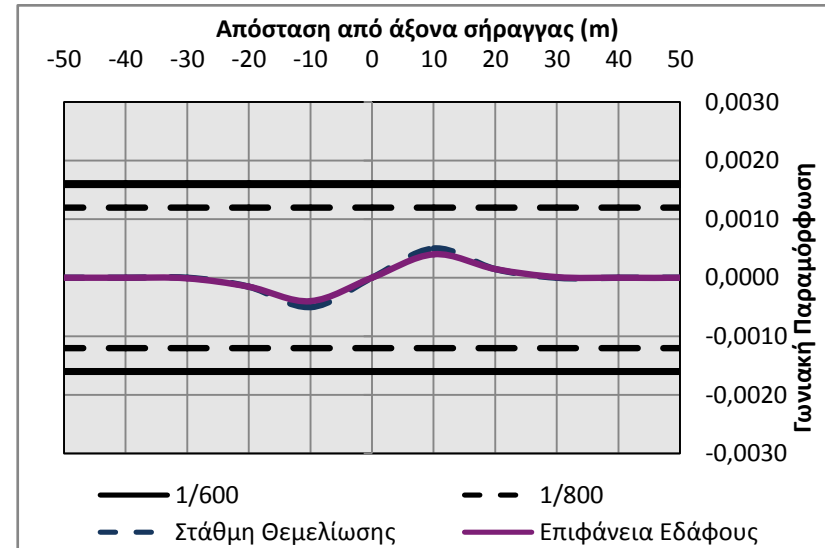
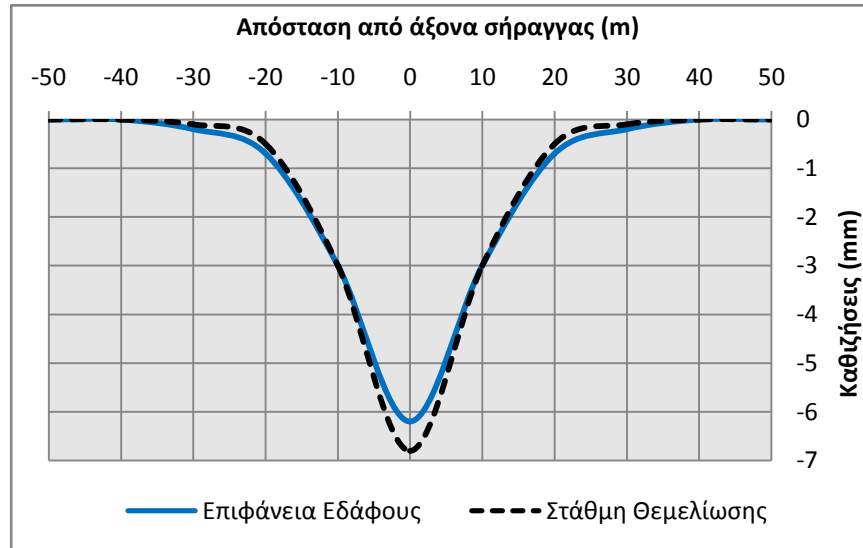
Γράφημα 22: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β - Κατηγορία SD

Κατηγορία SE



Γράφημα 23: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SE

Κατηγορία SE1 και SE2



Γράφημα 24: Καμπύλες καθιζήσεων, οριζοντίων και γωνιακών παραμορφώσεων Τμήμα Β- Κατηγορία SE1 και SE2

➤ Πραγματικές Τιμές

Οι μετρήσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη θέση στελέχωσης του οργάνου, επομένως διαχωρίζονται σε αυτά που λαμβάνονται επί χωροσταθμικών ακίδων επιφανείας (όπως στο οδόστρωμα ή στα πεζοδρόμια) και εναλλακτικά επί των κτιρίων ή επί ράβδων βαθιάς πάκτωσης.

Οι χωροσταθμικές ακίδες επί της επιφανείας ή επί των κτιρίων είναι της μορφής βίδας πάκτωσης από γαλβανισμένο χάλυβα, με στέλεχος μήκους 10cm και διαμέτρου 1cm, με κεφαλή από τμήμα σφαίρας διαμέτρου 3cm, με το τμήμα του στελέχους που πακτώνεται να είναι σπείρωμα με σκοπό τη διασφάλιση της μέγιστης δυνατής συνάφειας πάκτωσης.

Όσο αφορά στην τοποθέτησή τους, αυτή θα πρέπει να γίνεται στο βαθύτερο δυνατό σημείο και χωρίς να προεξέχουν πέραν της κεφαλής τους, έτσι ώστε να μην καταστεί αιτία για τραυματισμούς διερχομένων στην επιφάνεια αλλά και να μην καταστραφεί από οποιαδήποτε εξωγενή παράγοντα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με ελάχιστη ακρίβεια του $\pm 1\text{mm}$ ανά χιλιόμετρο. Οι υπολογισμοί των υψομέτρων θα πραγματοποιούνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Για τις μετρήσεις θα χρησιμοποιούνται ψηφιακοί χωροβάτες ακριβείας $\pm 0.3\text{mm}$ ανά χιλιόμετρο. Ακόλουθα τα στοιχεία των μετρήσεων διασταυρώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα με στοιχεία από αποσπάσματα των τοπογραφικών διαγραμμάτων της περιοχής όπου πραγματοποιείται το έργο.

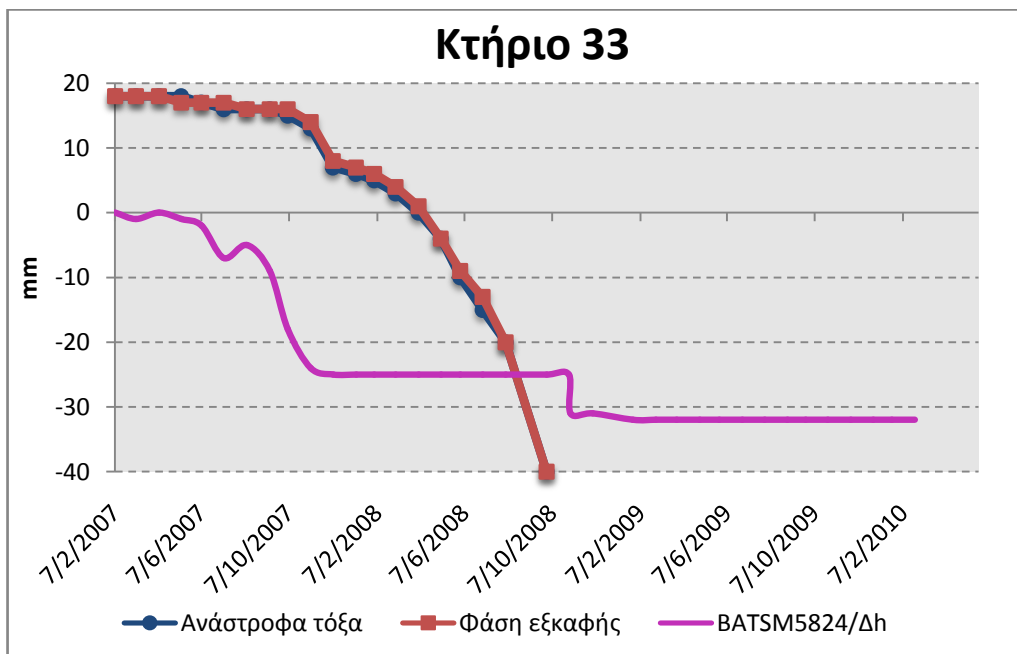
Στο έργο μας οι χωροσταθμικές ακίδες τοποθετήθηκαν τόσο στο οδόστρωμα όσο και σε κτίρια εντός των Χ.Θ 0+270 έως Χ.Θ 0+500. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατακόρυφες μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τις χωροσταθμικές ακίδες στα κτήρια ένα μήνα μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης εκσκαφής.

Χ.Θ	Μετακινήσεις mm	
	Δz	
	max	min
Κτίριο 144-145-146	-5	-4
Κτίριο 147-148	-4	-3
Κτίριο 149-150	-5	-3
Κτίριο 151	-5	-4
Κτίριο 33	-30	-4
Κτίριο 32	-5	-1
Κτίριο 29-30-31	-	-
Κτίριο 152-153-ΚΟΛΩΝΑ ΔΕΗ	-24	-5
Κτίριο 156-3Π	-	-4
Κτίριο 157-2Π-154	-14	-6
Κτίριο 155-158	-23	-11
Κτίριο 26-27-28	-11	-7
Κτίριο 25	-	0
Κτίριο 159-168	-20	-6
Κτίριο 160-161	-	-

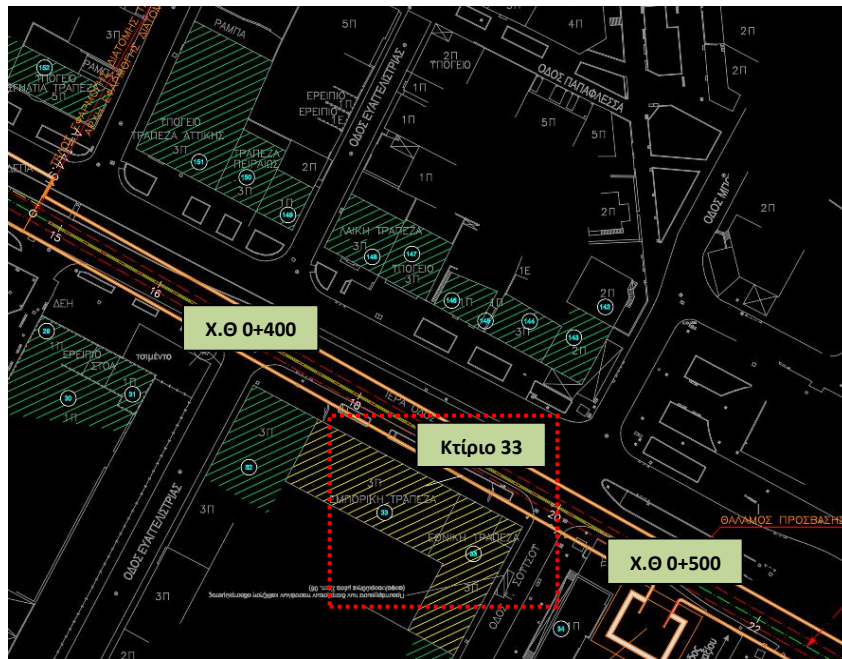
Κτίριο 162-163-164	-5	-
Κτίριο 166-167	-16	-12
Κτίριο 165-ΑΣΠΙΣ-ΚΟΛΩΝΑ ΔΕΗ	-16	-4
Κτίριο 170-172	-13	-5
Κτίριο 169-181-MANTRA	-12	-3
Κτίριο 173-175-180	-13	-4
Κτίριο 182-183	-4	-1
Κτίριο 174-176	-13	-4
Κτίριο 177-178-179	-6	-2
Κτίριο 184-186	-4	0
Κτίριο 24	-4	-1

Πίνακας 16: Ένα μήνες μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής(Β' Φάση)

Οι μετρήσεις έδειξαν μέγιστες επιφανειακές μετατοπίσεις που έφθασαν τα 30mm κατά το χρονικό διάστημα 11/08-04/10 (Κτίριο 33-Χ.Θ 0+410-420) και ξεπέρασαν τις αρχικές προεκτιμήσεις, ενώ οι υπόλοιπες μετρήσεις που κατεγράφησαν κυμάνθηκαν εντός των επιτρεπόμενων τιμών που είχαν προταθεί κατά την αρχική μελέτη του έργου.

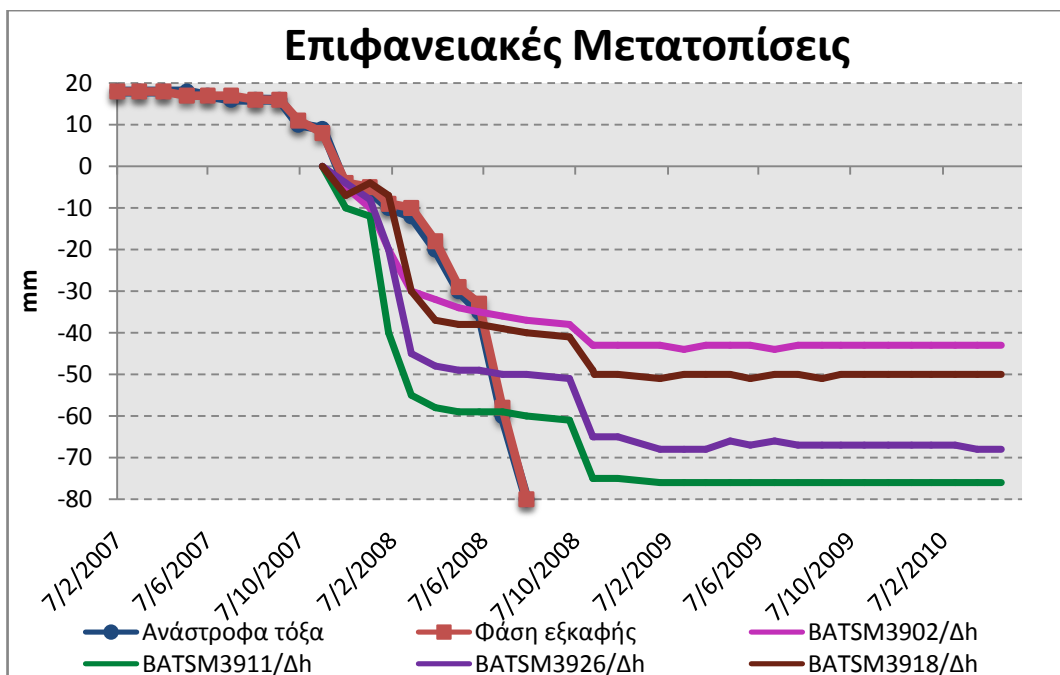


Γράφημα 25: Αποτελέσματα Χωροσταθμικών μετρήσεων επί των Κτιρίων

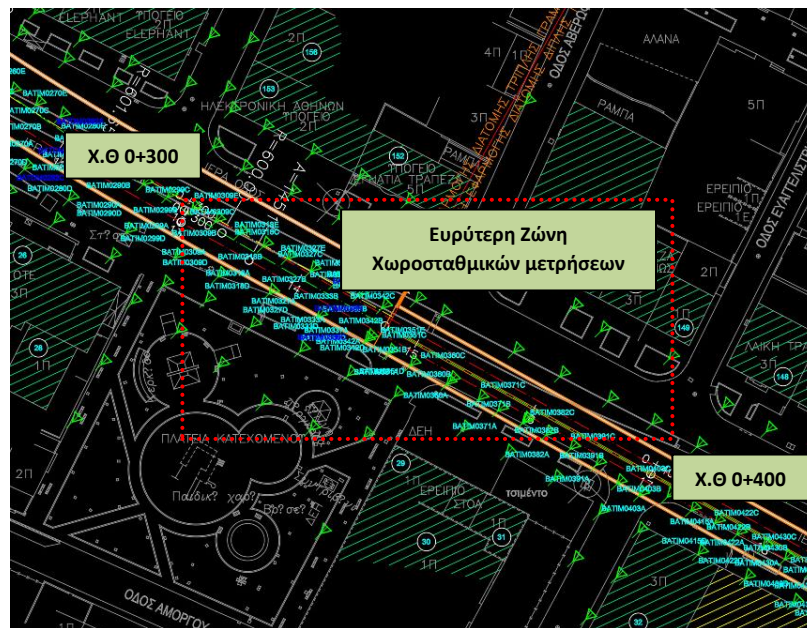


Εικόνα 6: Θέση Χωροσταθμικών ακίδων επί του Κτιρίου 33

Οι χωροσταθμικές ακίδες που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του οδοστρώματος έδειξαν πολύ υψηλότερες επιφανειακές καθιζήσεις που τοπικά έφθαναν μέχρι και τα 75mm. Οι μετρήσεις αυτές ήταν εντός των χιλιομετρικών θέσεων που έλαβαν χώρα οι έντονες καθιζήσεις στο έργο μας γεγονός που επιβεβαιώνει την ανωμαλία αυτή. Όμως παρατηρούμε ότι αυτές συνεχίζονται και μετά το πέρας της Α' Φάσης Εκσκαφής μέχρι που περιορίστηκαν καθώς λήφθηκαν καλύτερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης με σκοπό να συνεχιστεί η εκσκαφή. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες καθιζήσεις που προέκυψαν σε όλη την έκταση των μετρήσεων.



Γράφημα 26: Αποτελέσματα Χωροσταθμικών μετρήσεων επί του εδάφους



Εικόνα 7: Θέση Χωροσταθμικών ακίδων επί του εδάφους

Προκειμένου να γίνουν μετρήσεις ολικών μετακινήσεων σε τρεις διαστάσεις εγκαθίστανται ανακλαστήρες στα κτίρια και στις κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής του έργου. Η ελάχιστη ακρίβεια των ανακλαστήρων έγκειται στα $\pm 1\text{mm}$ και η ακρίβεια των μετρήσεων ολικών μετακινήσεων σε τρεις διαστάσεις θα είναι $\pm 2\text{mm}$.

Όταν ολοκληρωθούν με επιτυχία οι μετρήσεις ακολουθεί η αξιολόγηση τους. Από αυτή τη διαδικασία προκύπτει ο χαρακτηρισμός των ανώμαλων μετρήσεων, εφόσον υπάρχουν. Η παρουσίασή τους γίνεται σε οριζοντιογραφίες και σε διαγράμματα κατακόρυφων μετακινήσεων της επιφανείας και των επιφανειακών κατασκευών συναρτήσει του χρόνου και της προώθησης του μετώπου εκσκαφής.

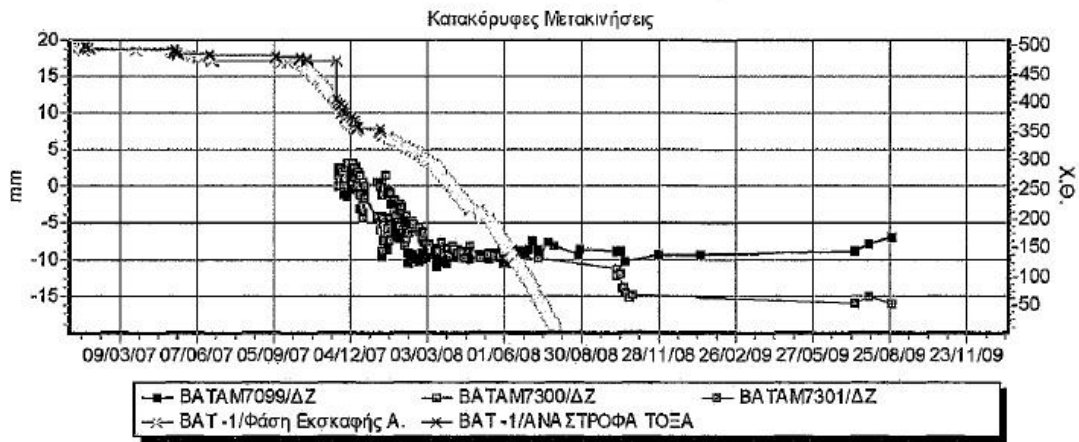
Οι μετρήσεις αυτές αναφέρονται στην παρακολούθηση των στόχων σε κτίρια και κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής του έργου.

Η μέτρηση των ολικών μετακινήσεων πραγματοποιείται με χρήση ηλεκτρονικών γεωδαιτικών σταθμών υψηλής ακρίβεια, σε ανακλαστήρες (στόχους ή πρίσματα). Όσο αφορά στους ανακλαστήρες, αυτοί τοποθετούνται σε όλα τα κτίρια με ελάχιστο αριθμό δύο σε κάθε κτίριο, ενώ για κτίρια άνω των τριών ορόφων με τουλάχιστον δύο ανά τρεις ορόφους κτιρίων.

Η εγκατάσταση του δικτύου και η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιούνται 30 ημέρες πριν από την έναρξη των εκσκαφών, ενώ η έναρξη των καθημερινών μετρήσεων τουλάχιστον 15 ημέρες πριν από την ημερομηνία έναρξης των εκσκαφών. Οι ημερήσιες μετρήσεις εξακολουθούν μέχρι τη στιγμή που η διαφορά τους να είναι μικρότερη των 2mm για 10 συνεχόμενες ημερήσιες μετρήσεις. Η συχνότητα μειώνεται στη μία φορά την εβδομάδα για τρεις επιπλέον μήνες, και αργότερα μία φορά το μήνα μέχρι την ολοκλήρωση του έργου.

Σε κάθε διάγραμμα φαίνονται οι μετακινήσεις και των τρισδιάστατων στόχων κατά μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε σχέση με το χρόνο. Στην εικόνα 8 φαίνεται ένα τέτοιο διάγραμμα μετακινήσεων κατά Δz. Στον ένα κάθετο άξονα έχουμε μετακινήσεις σε mm και

στον άλλον τον χρόνο. Τα διαφορετικά σχήματα στο κάτω μέρος του διαγράμματος αντιστοιχούν στον κάθε ένα τρισδιάστατο στόχο στην συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση.



Εικόνα 8: Διάγραμμα μετακινήσεων κατά Δz στο Κτίριο 152 (Χ.Θ 0+465)

Χ.Θ	Μετακινήσεις mm					
	Δz		Δχθ		Δακτ	
	max	min	max	min	max	min
Κτίριο 32-33	-9	3	-5	3	-1	15
Κτίριο 144	-3	0	-2	-	-3	-
Κτίριο 147-148	-4	-	-4	-1	-	3
Κτίριο 150-151	-8	-4	-2	-1	-3	4
Κτίριο 152	-11	-8	0	5	-14	-10
Κτίριο 25	0	5	-3	5	0	4
Κτίριο 165-168	-15	-4	-6	3	-16	-5
Κτίριο 158-163	-6	1	-5	4	-7	0
Κτίριο 170-172	-	-	-	-	-	-
Κτίριο 176-179	-	-	-	-	-	-
Κτίριο 184-185-186-24	-	-	-	-	-	-

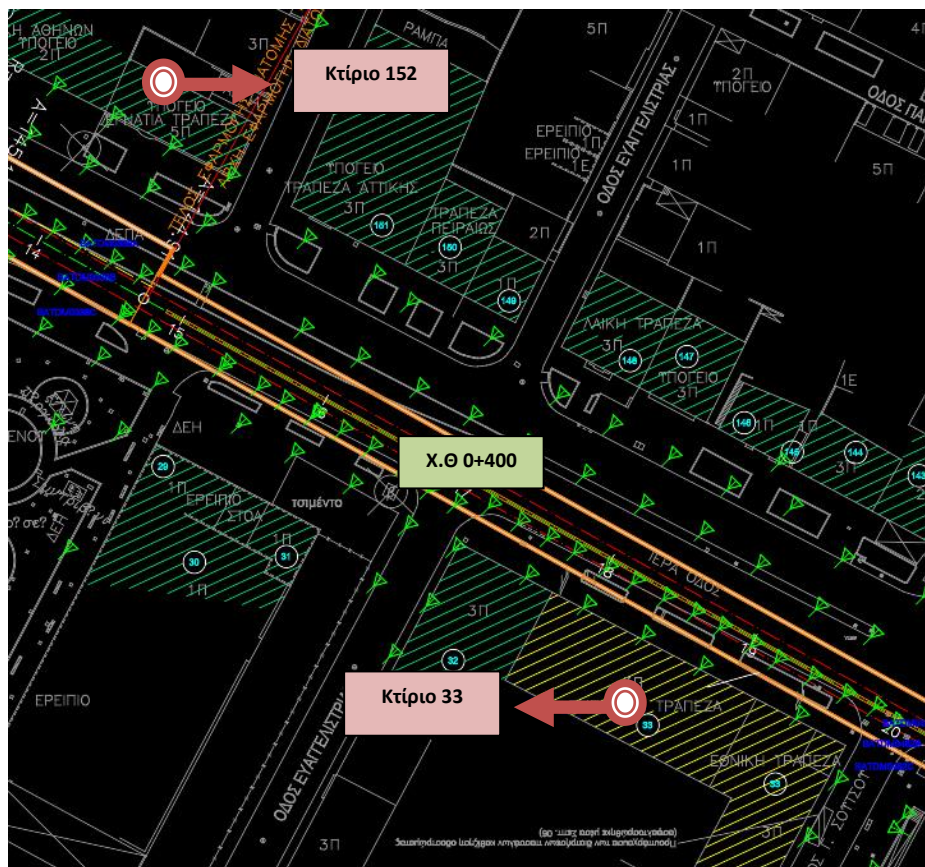
Πίνακας 17: Πριν την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής

Χ.Θ	Μετακινήσεις mm					
	Δz		Δχθ		Δακτ	
	max	min	max	min	max	min
Κτίριο 32-33	-8	3	-5	4	-6	12
Κτίριο 144	0	3	-4	1	-4	1
Κτίριο 147-148	-2	1	-3	2	-5	4
Κτίριο 150-151	-	-	-	-	-	-

Κτίριο 152	-15	-10	4	10	-25	-18
Κτίριο 25	1	9	-1	4	0	4
Κτίριο 165-168	-18	-6	-7	3	-16	-9
Κτίριο 158-163	-7	1	-5	2	-8	-4
Κτίριο 170-172	-7	-6	0	6	-6	-1
Κτίριο 176-179	-9	-3	-4	1	-11	-3
Κτίριο 184-185-186-24	-7	3	-3	1	-5	5

Πίνακας 18: Δυο μήνες μετά την ολοκλήρωση της Α' Φάσης Εκσκαφής (Β' Φάση)

Στο έργο μας οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις παρουσιάστηκαν στο κτίριο 152 της τάξεως των 15mm εντός των Χ.Θ 0+465. Η τιμή αυτή βρίσκεται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια των θεωρητικών προεκτιμήσεων για τα ευαίσθητα και μη κτίρια (20-25mm). Ενώ για τα Κτίρια 165-168 είχαμε καθιζήσεις έως 18mm στην Χ.Θ0+180 με Χ.Θ 0+200 σαν συνέπεια αστάθειας του μετώπου κατά την εκσκαφή.



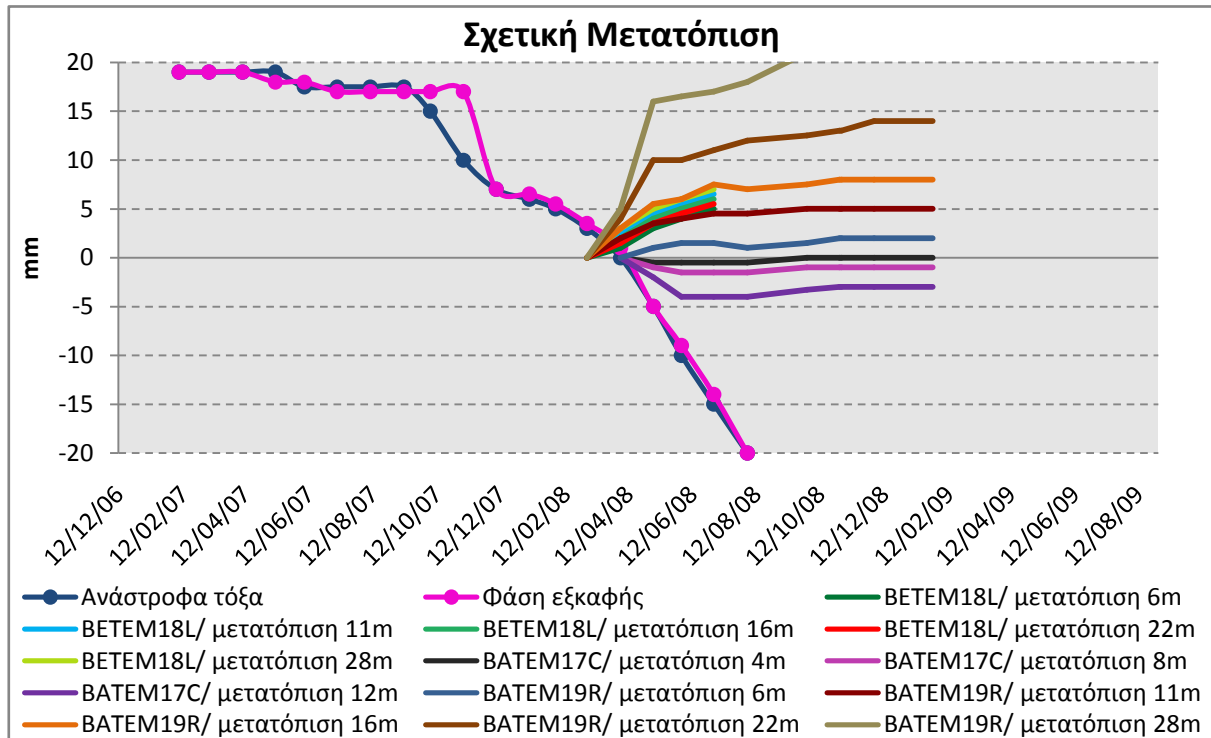
Εικόνα 9: Κατακόρυφες μετακινήσεις των Κτιρίων 33 και 152

❖ Εκτασιόμετρα

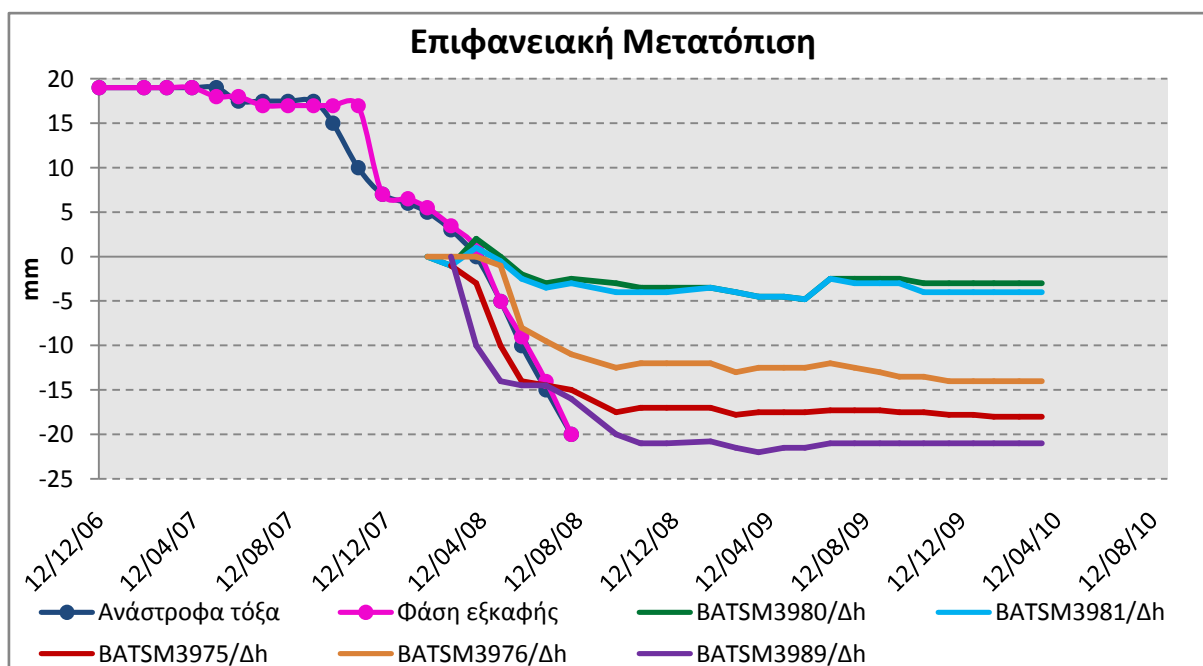
Για τη μέτρηση της καθίζησης ή ανύψωσης της σήραγγας και της σχετικής μετατόπισης χρησιμοποιούνται εκτασιόμετρα μεταξύ ενός σημείου πακτωμένου στη βραχομάζα και

σημείου μέτρησης στο όριο συνήθως της εκσκαφής τύπου ράβδου. Οι ράβδοι είναι από ίνες υάλου ή χαλύβδινες για εκτασιόμετρα μεγάλου μήκους. Τα εκτασιόμετρα τοποθετούνται σε γεωτρήσεις στο περιβάλλον έδαφος σε διατομές που απέχουν μεταξύ τους κατά μέγιστο 250m.

Στην περιοχή μελέτης μας τοποθετήθηκαν 3 εκτασιόμετρα στις γεωτρήσεις BBTEM18L, BBTEM17C και BBTEM19R μεταξύ των Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+500 όπου προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την σχετική και επιφανειακή μετατόπιση.



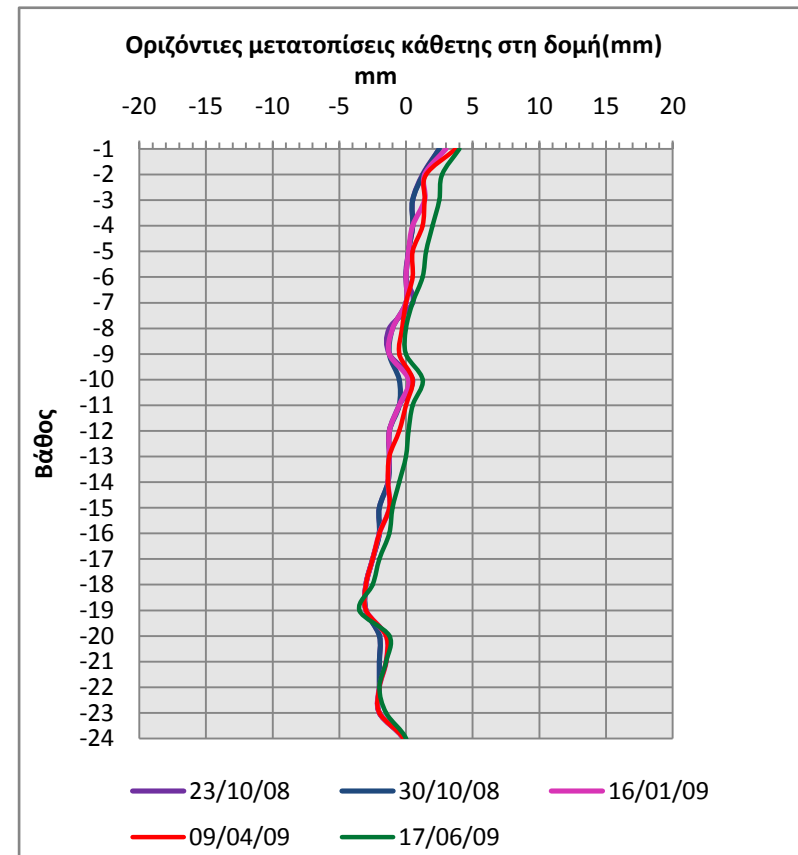
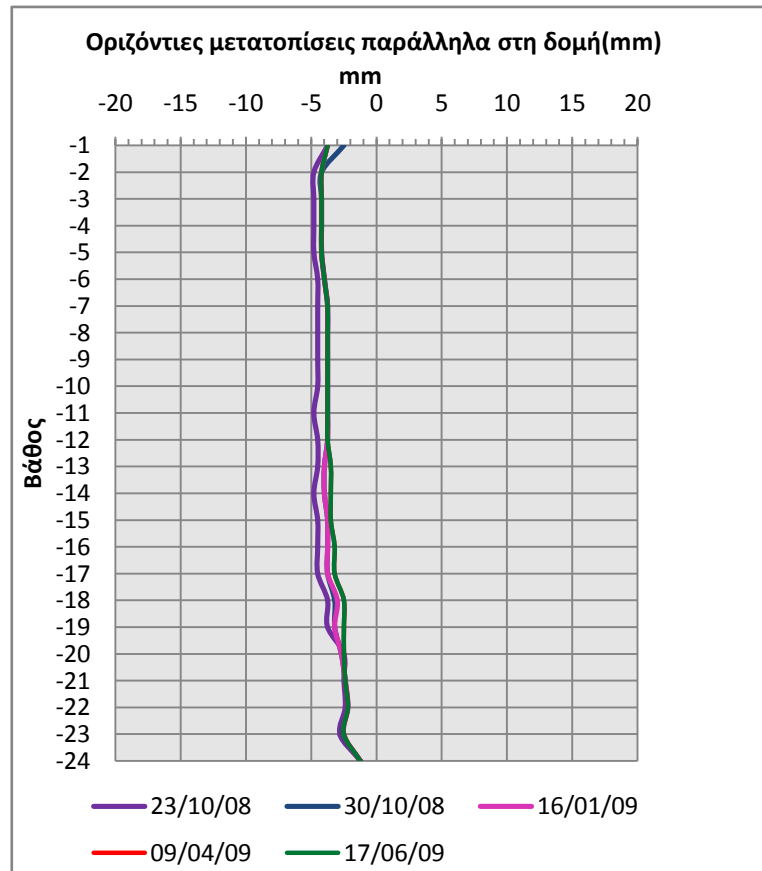
Γράφημα 28: Σχετική Μετατόπιση Σήραγγας



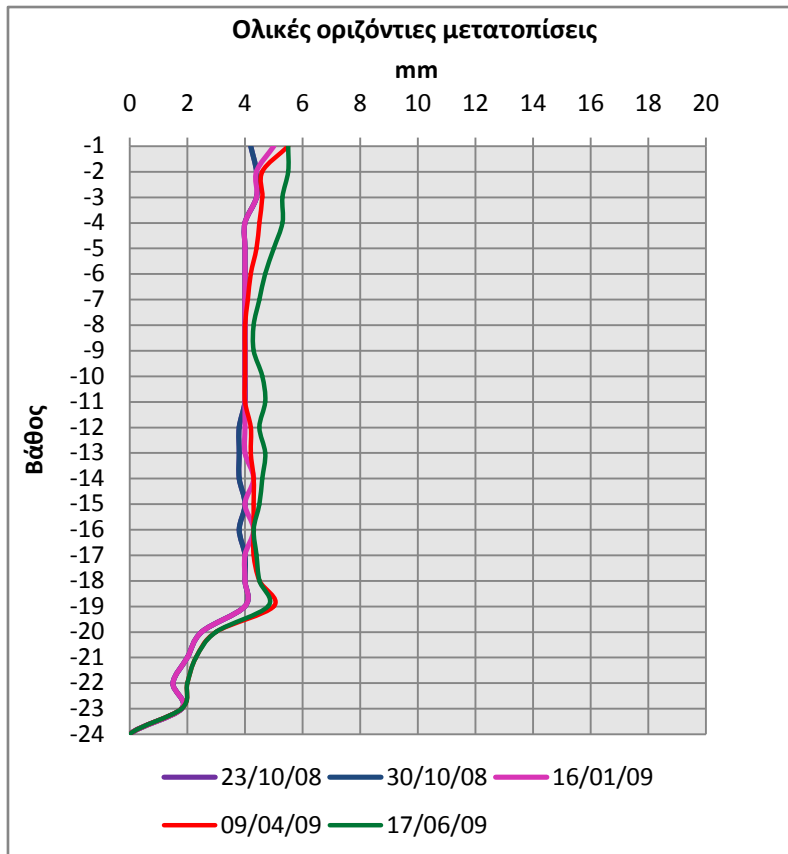
Γράφημα 27: Επιφανειακή Μετατόπιση

❖ Κλισιόμετρα

Προκειμένου να καταγραφούν οι οριζόντιες κινήσεις του εδάφους, γίνεται χρήση κλισιομετρικών σωλήνων, που τοποθετούνται στις γεωτρήσεις. Η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης είναι $\pm 6\text{mm}$, για 25m μήκος. Στο έργο μας τοποθετήθηκε μόνο ένα στη γεώτρηση ΒΑΤΝΜ11 (Χ.Θ0+270), όπου τα αποτελέσματα του παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα.



Γράφημα 29: Οριζόντιες μετατοπίσεις παράλληλα και κάθετα στη δομή



Γράφημα 30: Ολικές οριζόντιες μετατοπίσεις

Παρατηρήσεις

Σε ότι αφορά τη σχετική μετατόπιση παρατηρούμε ότι για το εκτασιόμετρο στη γεώτρηση BBTEM18L (μεταξύ Χ.Θ0+250-Χ.Θ0+320) έχουμε σχετική ανύψωση της σήραγγας, δηλαδή μεταξύ του σημείου της βραχομάζας και του αντίστοιχου σημείου μέτρησης στο όριο της εκσκαφής για το χρονικό διάστημα 3/08 έως 7/08.

Για τη BBTEM17C (μεταξύ Χ.Θ 0+200-Χ.Θ 0+270) παρατηρήθηκε σχετική καθίζηση για το χρονικό διάστημα 4/08 έως 1/09. Πιθανότητα η καθίζηση αυτή να οφείλεται στην ύπαρξη ζώνης αυξημένης περατότητας που επηρέασε την αντοχή των σχηματισμών και τέλος για τη BBTEM19R (Χ.Θ0+240-Χ.Θ0+470) υψηλότερη σχετική ανύψωση μεταξύ του 3/08 έως 1/09.

Όλες αυτές οι τιμές συγκρινόμενες με τις τιμές που υπολογιστήκαν από το προσομοίωμα FLAC για τις συγκλίσεις στο εσωτερικό της σήραγγας επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της μεθόδου. Τέλος οι επιφανειακές καθιζήσεις που παρατηρούμε εντός των Χ.Θ 0+30 έως Χ.Θ 0+300 είναι εντός των ορίων σχεδιασμού που έχουν υπολογιστεί από τις θεωρητικές προεκτιμήσεις.

4.5 Πιεζόμετρα

4.5.1 Σύγκριση Υψομέτρου Στάθμης Υ.Ο πριν και μετά την εκσκαφή

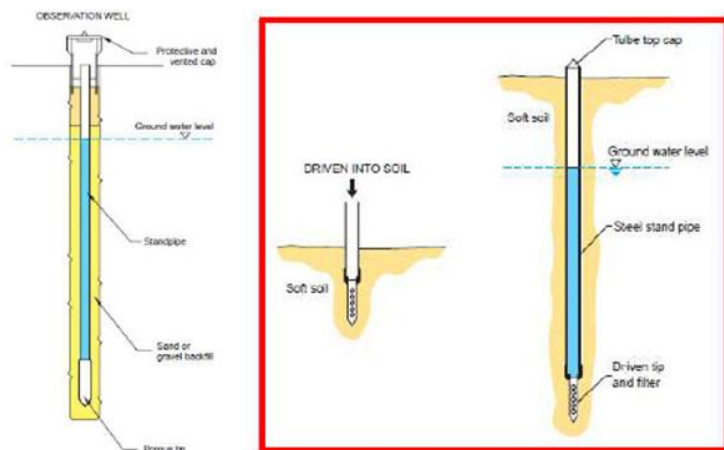
Για την εκτίμηση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα στην περιοχή του έργου, μετά το τέλος των γεωτρήσεων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο των γεωτεχνικών ερευνών, σε επιλεγμένες θέσεις (εντός των Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+300) τοποθετήθηκαν πιεζομετρικοί σωλήνες ανοικτού τύπου και ελήφθησαν δύο μετρήσεις (μία ανά μήνα) της μεταβολής της στάθμης των υπογείων υδάτων. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται τα στοιχεία, οι μέσες στάθμες και η διακύμανση της στάθμης των πιεζομέτρων πριν από την εκσκαφή.

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ(m)	ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ(m)	ΒΑΘΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ(m)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΗΣ(m)	ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ(m)
BATPG01	42,333	37	5,30-6,34	37,033-35,993	1,04
BATPG02	42,877	36,5	4,2	38,677	-
BP3301	40,429	40,5	2,35-4,00	38,079-36,429	1,65
BP3330	42,959	40	3,42-11,30	39,539-31,659	7,84
BP3302	42,975	40,90	3,35÷5,10	39,625÷37,875	1,75

Πίνακας 19: Διακύμανση στάθμης πιεζομέτρων πριν την εκσκαφή.

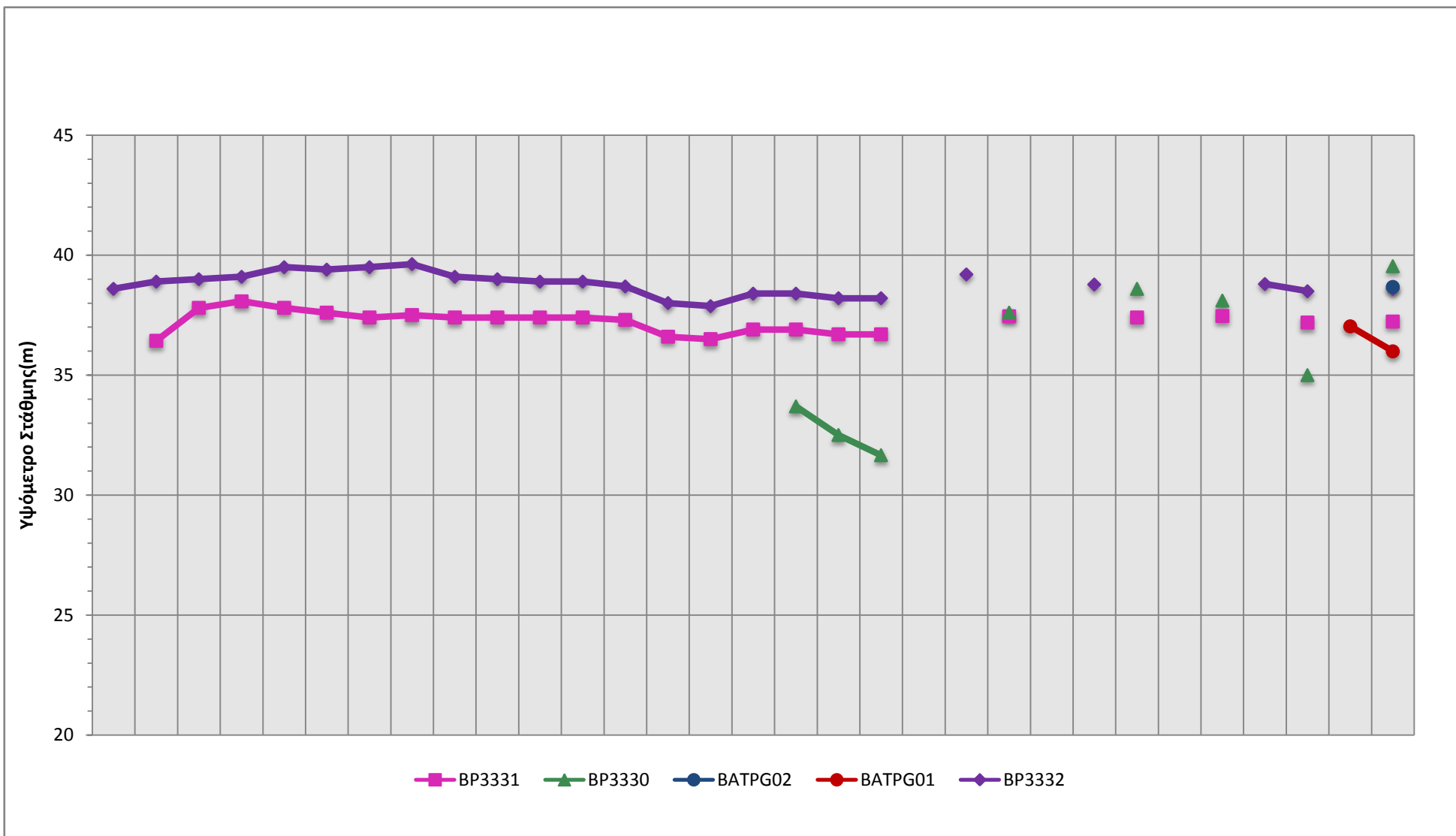
Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται αρχικά τουλάχιστον 30 ημέρες πριν την έναρξη των εργασιών σε κάθε τμήμα του έργου και ακολουθούν καθημερινές μετρήσεις για μία εβδομάδα. Πιο αναλυτικά, στις σήραγγες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται δύο φορές την εβδομάδα μέχρι το μέτωπο διάνοιξης να προσεγγίσει τα 150m, εξακολουθούν οι μετρήσεις κάθε δεύτερη μέρα μέχρι το μέτωπο να απομακρυνθεί στα 200m από το πιεζόμετρο και καταλήγουν σε εβδομαδιαίες λήψεις μέχρι την ολοκλήρωση του έργου.

Στις περιοχές των φρεάτων και των σταθμών οι μετρήσεις ξεκινούν με μία φορά την εβδομάδα μέχρι την έναρξη των εκσκαφών, ακολουθούν με δύο φορές την εβδομάδα για όλη τη διάρκεια των εκσκαφών και καταλήγουν σε εβδομαδιαία διαστήματα μέχρι την ολοκλήρωση των αρχιτεκτονικών τελειωμάτων.

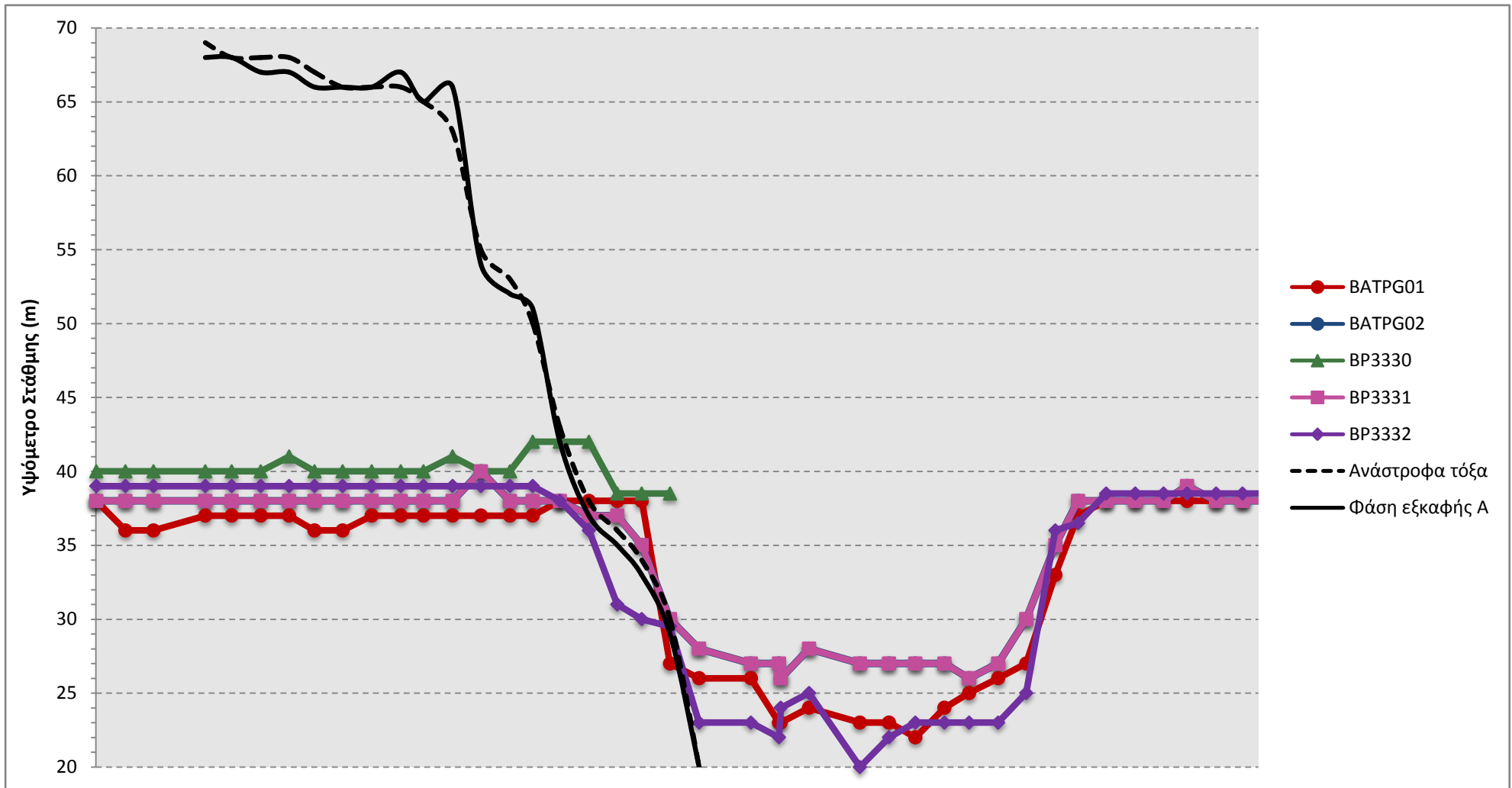


Εικόνα 10: πιεζόμετρα εταιρείας SIGGEO (Cassagrande & drive in)

Στο συγκεκριμένο τμήμα πριν και κατά τη διάρκεια της εκσκαφής η στάθμη των υπόγειων υδάτων κυμάνθηκε ως εξής:



Γράφημα 31: Υψόμετρο Στάθμης Υδροφόρου Ορίζοντα κατά τα έτη 2004-2006 (πριν την εκσκαφή)



Γράφημα 32: Υψόμετρο Στάθμης Υδροφόρου Οριζοντα κατά τα έτη 2006-2010 (μετά την εκσκαφή)

Παρατηρήσεις

Όπως παρατηρούμε από τη μελέτη των γραφημάτων, διαπιστώθηκε σημαντική πτώση στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μετά το πέρας της Α' φάσης εκσκαφής. Στους Αθηναϊκούς Σχιστόλιθους παρατηρείται μικρότερη επιρροή του καταβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με τα Νεογενή. Αυτό οφείλεται στο πολύ χαμηλής διαπερατότητας τμήμα τους, όπου το πολύ μικρό πλάτος επιρροής οδήγησε σε αυτό το αποτέλεσμα.

Ο σχηματισμός των νεογενών κατά θέσεις είναι έντονα ρηγματωμένος με αποτέλεσμα το νερό του υδροφόρου ορίζοντα να περνάει μέσω των ασυνεχειών, γεγονός που πιθανότατα επηρέασε την συνοχή και αντοχή του σχηματισμού.

4.1 Συμπεράσματα

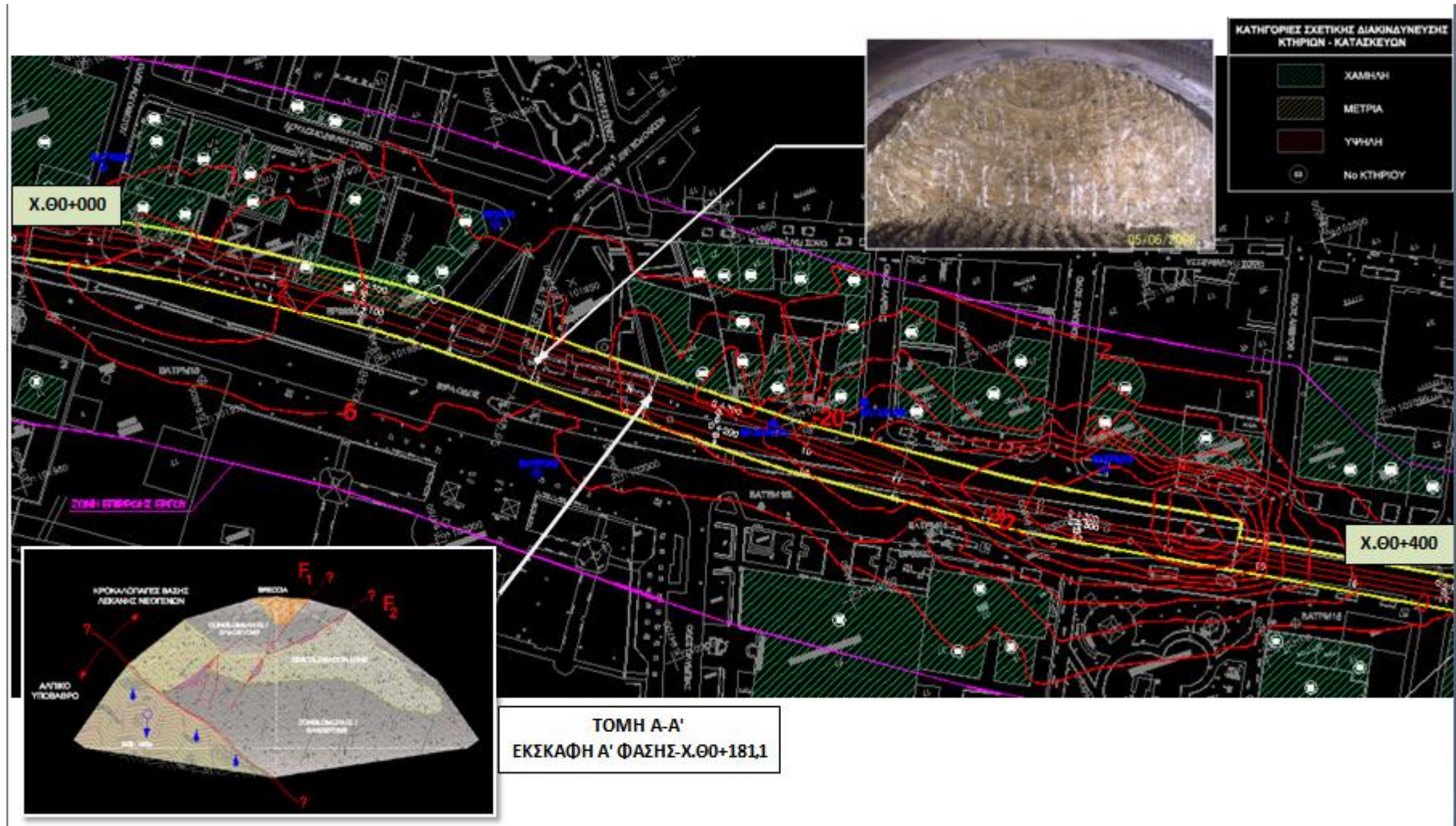
Η λεπτομερής γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση όλων των στοιχείων στις μελέτες εφαρμογής, ο αναλυτικός σχεδιασμός της σήραγγας καθώς και η ενδεδειγμένη γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση του εδάφους και των δομικών στοιχείων κατά την εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, συντέλεσαν στην επιτυχή και ασφαλή διάνοιξή της.

Η μελέτη εφαρμογής της σήραγγας, περιείχε εκτός των εναλλακτικών κατηγοριών προσωρινής υποστήριξης και του εκτεταμένου προγράμματος γεωμηχανικής παρακολούθησης, μέτρα αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων σε περιπτώσεις αποκλίσεων από τις αρχικές εκτιμηθείσες συνθήκες. Σε συνδυασμό με τη συνεχή καταγραφή και αξιολόγηση των γεωτεχνικών συνθηκών και των μετρήσεων των οργάνων γεωμηχανικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή της σήραγγας, επιτεύχθηκε έγκαιρη λήψη μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων που συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας διπλής και τριπλής τροχιάς. Παρακάτω παραθέτονται οι τομές και οι οριζοντιογραφίες που περιγράφουν τις μετακινήσεις του εδάφους σε όλη την έκταση του έργου.

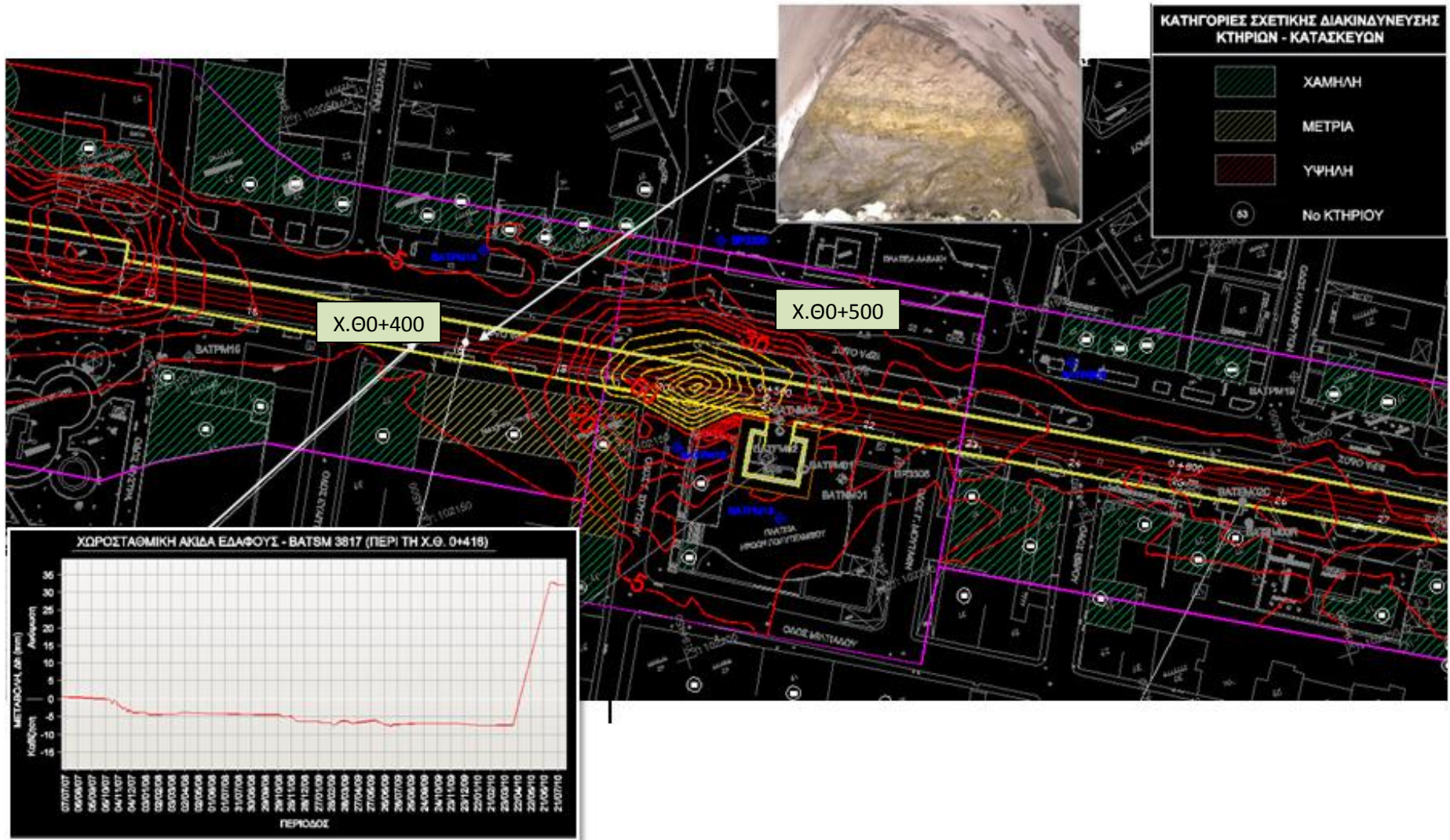
Όπως βλέπουμε στην οριζοντιογραφία μεταξύ των Χ.Θ 0+300-360 και Χ.Θ 0+450-500 οι πραγματικές τιμές είναι μεγαλύτερες από τις θεωρητικές προεκτιμήσεις και αυτό γιατί οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τμηματική θεώρηση του έργου από την κατηγοριοποίηση του γεωλογικού σχηματισμού στην ευρύτερη ομάδα των Νεογενών.

Εμβαθύνοντας όμως βλέπουμε δύο γεωλογικούς σχηματισμούς που σε συνδυασμό και με την έντονη ρωγμάτωση αναμένεται να έχουν μικρότερες τιμές των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας προκειμένου να οδηγηθήκαμε σε αυτά τα αποτελέσματα.

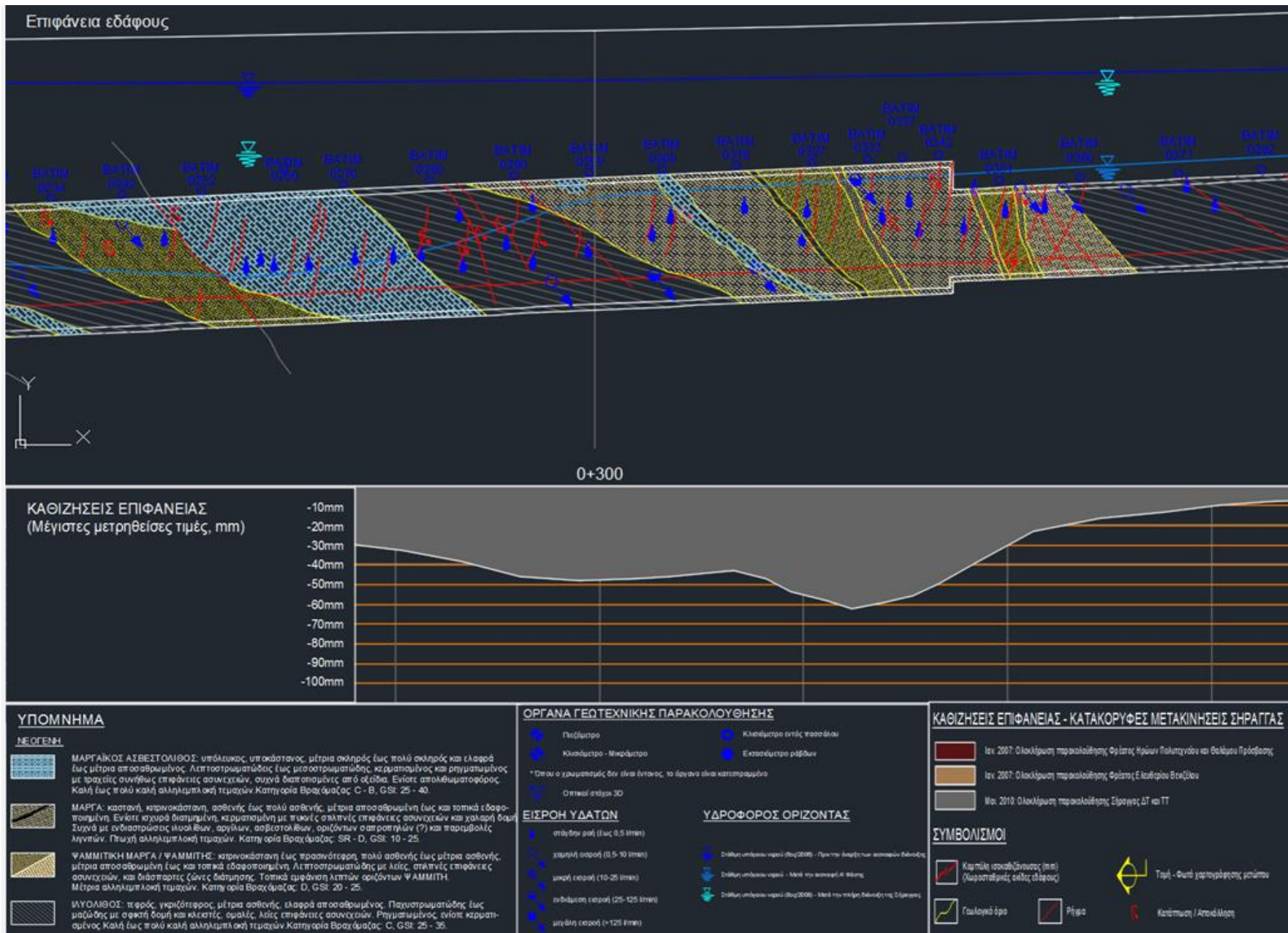
Σχήμα 17: Οριζοντιογραφία εντός των Χ.Θ0+000 έως Χ.Θ0+400 και Απεικόνιση Εδαφικών Καθιζήσεων



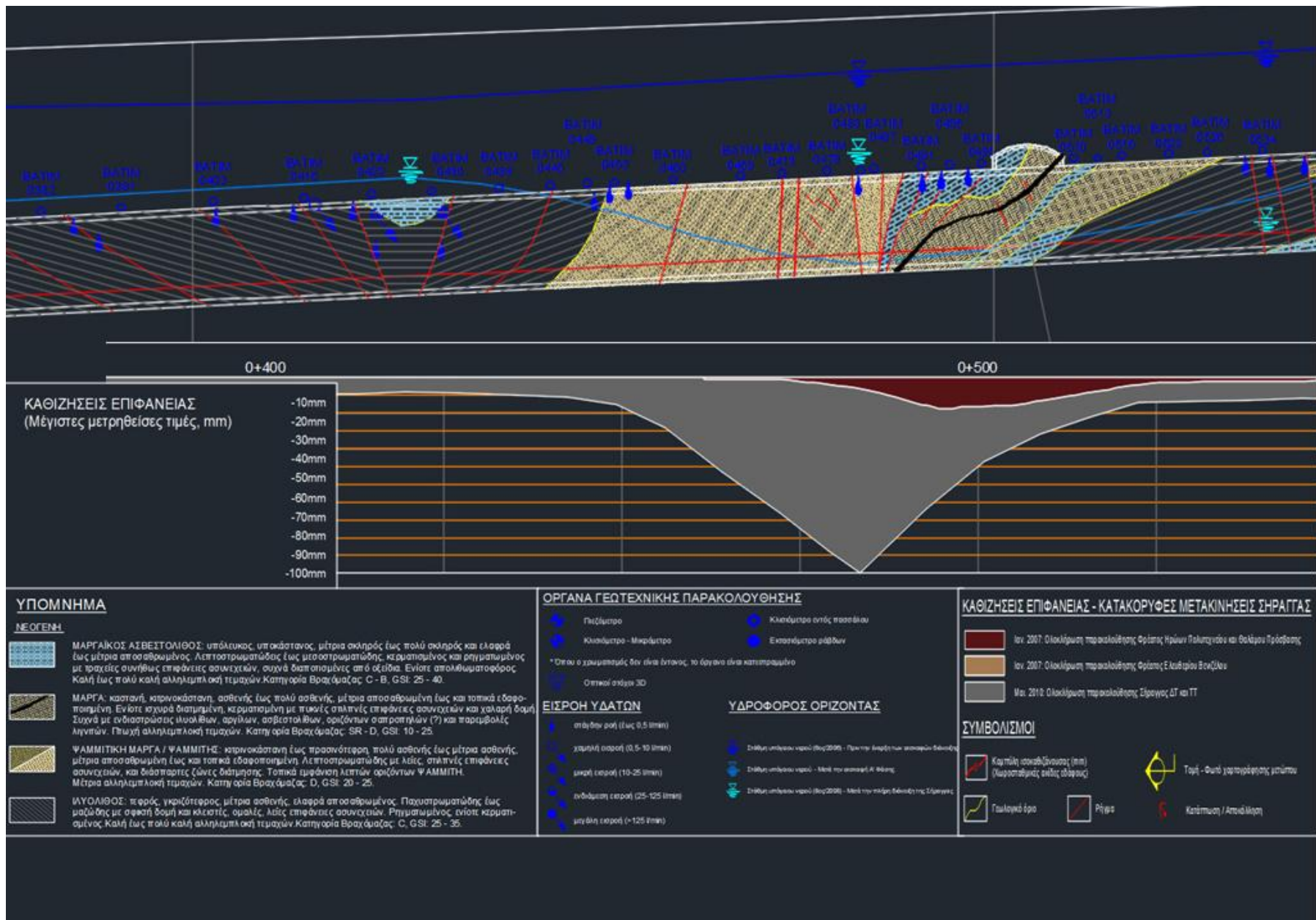
Σχήμα 18: Οριζοντιογραφία εντός των Χ.Θ0+400 έως Χ.Θ0+500 και Απεικόνιση Εδαφικών Καθιζήσεων



Σχήμα 19: Γεωλογική Τομή και Καθιζήσεις ανά θέση εντός των Χ.00+300 έως Χ.00+360



Σχήμα 20: Γεωλογική Τομή και Καθιζήσεις ανά θέση εντός των Χ.Θ0+200 έως Χ.Θ0+400



Κεφάλαιο 5: Γεωτεχνική Προσομοίωση Εδαφικών Καθιζήσεων

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των εδαφικών καθιζήσεων στις Χ.Θ0+343 και Χ.Θ0+472-500, όπου έλαβαν χώρα οι μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις. Στόχος της έρευνας είναι η χρήση των γεωφυσικών μοντέλων για την ακριβέστερη και όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσέγγιση του μηχανισμού των εδαφικών καθιζήσεων, οι οποίες σχετίζονται με τη μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και τη λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος του άξονα του έργου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό πρόγραμμα RS₂ (Phase2 v.9.0) της Rocscience.

5.2 Γενικές Πληροφορίες του Προγράμματος RS₂ (PHASE2 v.9.0)

Το λογισμικό RS₂ (Phase2) αφορά πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο πραγματοποιεί δισδιάστατες αναλύσεις για τον υπολογισμό των τάσεων, των παραμορφώσεων και των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους.

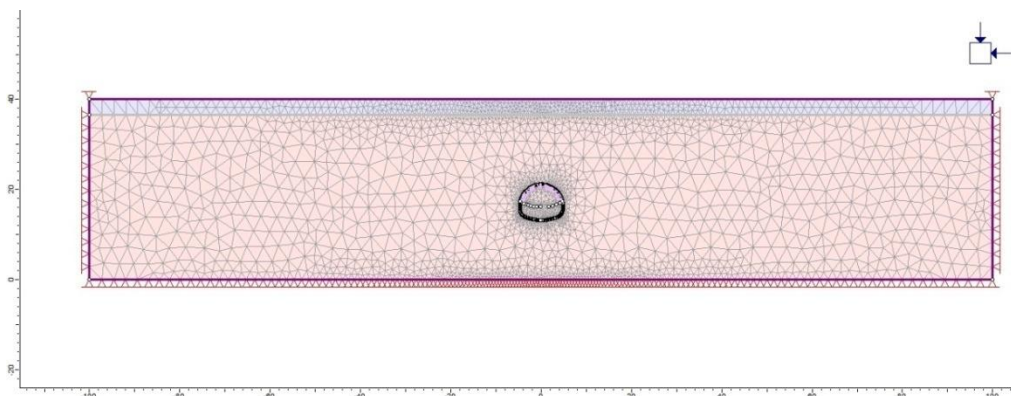
Οι αναλύσεις γίνονται διακριτοποιώντας τα στοιχεία του εδάφους σε επιμέρους τριγωνικά 3-κομβικά στοιχεία (πεπερασμένα στοιχεία) και εφαρμόζοντας τα κριτήρια αστοχίας της Εδαφομηχανικής (όπως κριτήρια Mohr-Coulomb, Hoek-Brown κ.ά.) σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο του εδάφους.

Επομένως, με το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνονται γεωτεχνικά προβλήματα όπως προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα, ελαστικής ή πλαστικής συμπεριφοράς υλικών, προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού, προβλήματα ασυνεχειών στη γεωμάζα κ.ά.

5.3 Μοντελοποίηση

5.3.1 Γεωμετρία μοντέλου (Geometry)

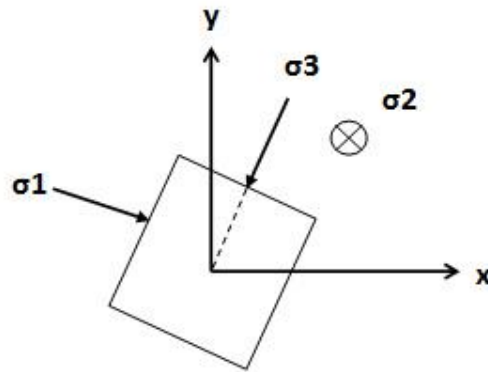
Πραγματοποιείται σχεδίαση του περιγράμματος της εκσκαφής και η διακριτοποίηση του περιγράμματος σε στοιχειώδη τμήματα. Μετά τον σχεδιασμό στο επίπεδο διατομής Οxy, είναι απαραίτητη η εισαγωγή του αντίστοιχου περιγράμματος της υβριδικής επιφάνειας από την οποία θα περικλείεται η εκσκαφή και θα οριοθετείται η περιοχή μελέτης.



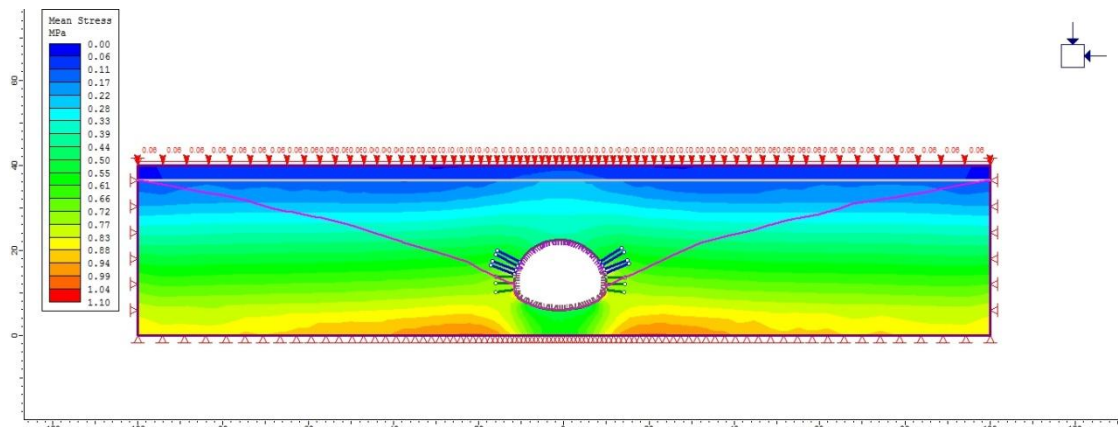
Σχήμα 21: Γεωμετρία Μοντέλου

5.3.1.1 Καθορισμός Πεδίου Τάσεων

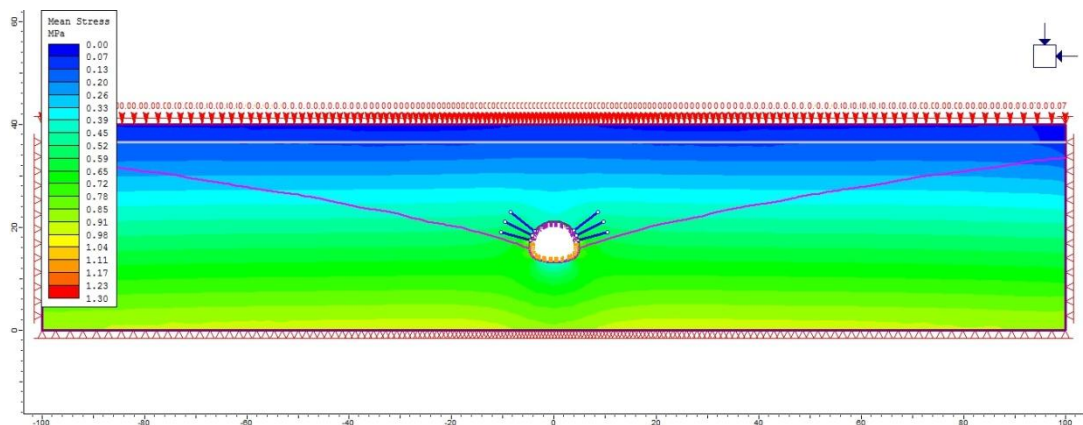
Στο Phase το εντατικό πεδίο περιγράφεται με τις δυο κύριες τάσεις στο επίπεδο Oxy , δηλαδή την αξονική κύρια τάση σ_1 , την πλευρική κύρια τάση σ_2 και την γωνία προσανατολισμού τους ως προς το καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων xOy , που ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της σ_3 με τον θετικό ημιάξονα Ox , καθώς και από την τιμή της τάσης στον x -άξονα.



Σχήμα 22: Εντατικά μεγέθη και ο προσανατολισμός τους όπως ορίζονται στο Phase



Σχήμα 23: Μέσες τιμές Κύριων Τάσεων για τη Χ.Θ 0+343



Σχήμα 24: Μέσες τιμές Κύριων Τάσεων για τη Χ.Θ 0+472-500

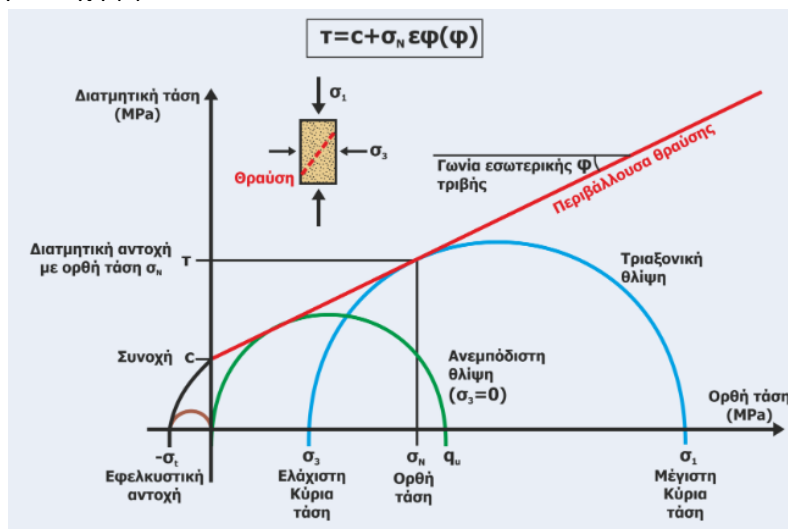
5.1.1.1 Ιδιότητες υλικών (Materials and Staging)

Εδώ καθορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των υλικών που δομούν την περιοχή μελέτης (γωνία τριβής ϕ , συνοχή c , μέτρο ελαστικότητας Young E , λόγος του Poisson ν), το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε καθώς και τον τύπο του υλικού μέσου (ελαστικού ή πλαστικού). Στις προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν, τα υλικά ορίστηκαν με ελαστική συμπεριφορά, ενώ το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν του Mohr-Coulomb.

❖ Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση των εδαφικών μοντέλων ήταν αυτό του Mohr-Coulomb. Πρόκειται για ένα απλό κριτήριο σύμφωνα με το οποίο η αστοχία του υλικού συμβαίνει όταν η διατμητική τάση (τ), σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος, ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n στο επίπεδο αυτό (Σοφιανός, 2008). Σύμφωνα με το κριτήριο, η αντοχή καθορίζεται από δύο παραμέτρους στο επίπεδο διατμητική αντοχή (τ)-ορθή τάση (σ):

- την κλίση ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) και
- τη συνοχή (c).



Εικόνα 11: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής.

Η ευθεία της περιβάλλουσας θραύσης είναι μια κατά προσέγγιση ευθεία που εφάπτεται στους κύκλους. Η περιβάλλουσα δηλώνει την ευστάθεια στην περιοχή των τάσεων που βρίσκονται κάτω από αυτή. Τα σημεία επαφής της περιβάλλουσας με τους κύκλους αφορούν τις κρίσιμες τιμές των τάσεων που οδηγούν σε αστοχία. Η διατμητική αντοχή περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\tau = \sigma_N \tan \phi(\phi) + c$$

5.4 Αριθμητική ανάλυση της διάνοιξης στα τμήματα με τις μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις

Μελετήθηκαν τα τμήματα στις Χ.Θ0+343 και Χ.Θ0+472,43-500 που έλαβαν χώρα οι μεγαλύτερες καθιζήσεις. Αυτά τα τμήματα διέρχονται μέσα από το σχηματισμό των Νεογενών, όπου οι διαστάσεις της εκσκαφής είναι:

	Τμήμα Α (Χ.Θ 0+343)	Τμήμα Β (Χ.Θ 0+472,43-500)
Πλάτος	B=14.5m	B=9.6m
Ύψος	H=16.5m	H=8m

Πίνακας 20: Διαστάσεις εκσκαφής

Για την ανάλυση της σήραγγας τριπλής γραμμής (Τμήμα Α) το ύψος των υπερκείμενων γαιών είναι 17.4m και για τη σήραγγα διπλής γραμμής (Τμήμα Β) 18.9m αντίστοιχα. Ενώ τα στάδια προσομοίωσης συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες, όπου ακολουθήθηκαν και στην αρχική μελέτη για την κατηγορία σχεδιασμού SE.

Στάδιο	Απόσταση από το μέτωπο	1-λ	Εκτοξευμένο σκυρόδεμα	Αγκύρια
0	Στάδιο ισορροπίας υπό αρχικές γεωστατικές τάσεις	-	-	-
1	Επιβολή φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους	-	-	-
2	Εκσκαφή άνω ημιδιατομής	0.50m	0.48	-
3	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος (νεαρό σκυρ/μα)	1.50m	0.40	d' = 0.30m E' = 15GPa
4	Τοποθέτηση αγκυρίων και ωρίμανση σκυρ/τος	2.50m	0.32	d _{ολ} = 0.35m E = 31GPa Αυτοδιατρώμενα αγκύρια R30/11, Φ.Ι. 320kN, L=6.00m, @2.00m Αυτοδιατρώμενα αγκύρια R30/11, Φ.Ι. 320kN, L=6.00m, @1.00m
5	Προχώρηση μετώπου	6.50m	0.14	-
6	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος στο δάπεδο ανεστραμμένου θόλου	>6.50m	0.00	d _{ολ} = 0.25m E = 31GPa
7	Εκσκαφή βαθμίδας	1.50m	0.50	-
8	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος (νεαρό σκυρ/μα) και τοποθέτηση αγκυρίων	4.50m	0.25	d' = 0.30m E' = 15GPa Αυτοδιατρώμενα αγκύρια R30/11, Φ.Ι. 320kN, L=4.50m, κάρναβος # 1.00x1.50m πεσοσειδώς
9	Εκσκαφή δαπέδου ανεστραμμένου θόλου και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος	>9.00m	0.00	d _{ολ} = 0.35m E = 31GPa

Πίνακας 21: Στάδια προσομοίωσης – Τμήμα Α - Κατηγορία σχεδιασμού SE

Στάδιο	Απόσταση από το μέτωπο	1-λ	Εκτοξευμένο σκυρόδεμα	Αγκύρια
0	Στάδιο ισορροπίας υπό αρχικές γεωστατικές τάσεις	-	-	-
1	Επιβολή φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους	-	-	-
2	Εκσκαφή θόλου	0.50m	0.48	-
3	Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος (νεαρό σκυρ/μα)	1.50m	0.39	d' = 0.25m E' = 15GPa
4	Τοποθέτηση αγκυρίων και σκλήρυνση σκυρ/τος	2.50m	0.33	d _{ολ} = 0.30m E = 31GPa
5	Προχώρηση μετώπου	6.50m	0.14	-
6	Ολοκλήρωση εκσκαφής και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυρ/τος	>6.50m	0.00	d _{ολ} = 0.30m E = 31GPa

Πίνακας 22: Στάδια προσομοίωσης – Τμήμα Β - Κατηγορία σχεδιασμού SE

Στην επιφάνεια του εδάφους έχει εφαρμοσθεί ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο με τιμή ίση με 15kN/m^2 , που αντιπροσωπεύει το φορτίο οδικής κυκλοφορίας και ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο με τιμή ίση με 50kN/m^2 , που αντιπροσωπεύει επί το δυσμενέστερο το φορτίο κτιρίων 5 ορόφων, που είναι τα μέγιστα που συναντώνται στη περιοχή διέλευσης της σήραγγας. Επίσης έγιναν αλλαγές στις παραμέτρους που χαρακτήριζαν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος, δηλαδή α) στις ελαστικές ιδιότητες (Elastic properties) και β) στις παραμέτρους αντοχής (Strength parameters).

Η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού (beam elements) και τα αγκύρια με στοιχεία καλωδίου (cable elements).

Τα αγκύρια που τοποθετούνται είναι αυτοδιατρώμενα, ενώ στο προσωρινό τοίχωμα της πλευρικής στοάς τοποθετούνται αγκύρια υαλοϊνών. Οι ιδιότητες των αγκυρίων προσδιορίζονται ως εξής:

Αυτοδιατρώμενα αγκύρια

Κάθε αγκύριο έχει εξωτερική διάμετρο $D_{εξ}=0.030\text{m}$ και εσωτερική διάμετρο $D_{εσ}=0.011\text{m}$

- Ποιότητα χάλυβα: S500s
- Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα: $E = 200\text{ GPa}$
- Εμβαδόν διατομής: $A = 446 \times 10^{-6}\text{ m}^2$
- Φέρουσα ικανότητα αγκυρίου: $= 320\text{ kN}$
- Όριο διαρροής αγκυρίου Yield: $= 260\text{ kN}$
- Γωνία τριβής διεπιφάνειας εδάφους-ενέματος: $\text{Sfriction} = 20^\circ$
- Περίμετρος εκτιθέμενη: $Perimeter = \pi(D + 2t) = 3.14 \times 0.065 = 204.10 \times 10^{-3}\text{ m}$

Αγκύρια υαλοϊνών

Κάθε αγκύριο έχει φέρουσα ικανότητα 240kN και ισοδύναμη διάμετρο $d = 0.018\text{m}$

- Ισοδύναμο εμβαδόν διατομής: $A = 3.14 \times 0.018^2 / 4 = 2.54 \times 10^{-4} \text{m}^2$
- Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα: $E = 40 \text{ GPa}$
- Όριο διαρροής αγκυρίου: $\text{Yield} = 240\text{kN}$
- Γωνία τριβής διεπιφάνειας εδάφους-ενέματος: $\text{Sfriction} = 0^\circ$

Σε ότι αφορά τα υδραυλικά στοιχεία, στο εσωτερικό της σήραγγας ορίζεται πίεση $P=0$ και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα στα 3.5m πριν από την εκσκαφή. Η διαπερατότητα των νεογενών ορίστηκε σε $k=9.48 \times 10^{-7} \text{m/sec}$.

5.5 Συμπεράσματα Μοντελοποίησης

Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου προσομοίωσης έπρεπε να γίνει έλεγχος αν τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή στην πραγματικότητα.

Έγινε επαναξιολόγηση των γεωλογικών τομών και των γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή. Έτσι διαπιστώθηκε ότι τοπικά στις θέσεις όπου έλαβαν χώρα οι υψηλές καθιζήσεις, ο σχηματισμός των νεογενών αποτελείται από αργιλικές και ψαμμιτικές μάργες έντονα ρηγματωμένες.

❖ Τμήμα Α(Χ.Θ 0+343)

Το τμήμα αυτό αποτελείται από αργιλικές μάργες. Οι αργιλικές μάργες είναι μίγμα αργιλικών με ανθρακικά. Στις μάργες η κυκλοφορία του νερού είναι περιορισμένη, όμως υπάρχει η δυνατότητα εισροής των υδάτων του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της έντονης ρηγμάτωσης, όπου η κυκλοφορία του νερού γίνεται κυρίως μέσω του δευτερογενούς πορώδους τους, δηλαδή μέσω των επίπεδων ασυνεχειών. Έτσι ο σχηματισμός γίνεται πλαστικός και παρουσιάζει έντονη θράυση με αποτέλεσμα να εκδηλωθούν καθιζήσεις. Αυτό οφείλεται στην λεγόμενη ανθεκτικότητα στη χαλάρωση (slaking durability), που αποτελεί στην ουσία την "αντίσταση" του πετρώματος στη χρονικά γρήγορη αποσάθρωση που επέρχεται από το σπάσιμο των δεσμών των ορυκτολογικών του συστατικών. Αυτό συμβαίνει σε μερικά αργιλικά πετρώματα όταν διαβραχούν και κάτι τέτοιο μπορεί να επηρεάσει άμεσα τη "ζωή" ενός τεχνικού έργου.

Οι τιμές που δόθηκαν στις ελαστικές ιδιότητες και παραμέτρους αντοχής του πετρώματος δεν ήταν τυχαίες αλλά δόθηκαν πραγματικές τιμές που είχαν βρεθεί σε αντίστοιχο έργο και συγκεκριμένα στην διάνοιξη της Σήραγγας Πλατάνου-Τράπεζας, στην περιοχή Κιάτου-Αιγίου.

Οι μελετητές βασίστηκαν στις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις για να οδηγηθούν στις σχετικές τιμές που δόθηκαν στις ελαστικές ιδιότητες και παραμέτρους αντοχής. Οι σχέσεις είναι οι εξής:

- (1) Κατά Stroud-Butler (1975): Για $PI=9.8\%$, $F_2=900$

$$E = F_2 N_{SPT}$$

για $N_{SPT}=100$, έχουμε $E=90\text{MPa}$

- (2) Κατά Butler (1975) για σκληρές αργίλους από δοκιμές πρότυπης διείδυσης:

$$E_u = N_{SPT} (1.0 \div 1.2) \cong 100\text{MPa} \quad \text{Poisson } \nu=0.3$$

$$\text{από } E_u = \frac{3E}{2(1+\nu)} \quad E=87\text{MPa}$$

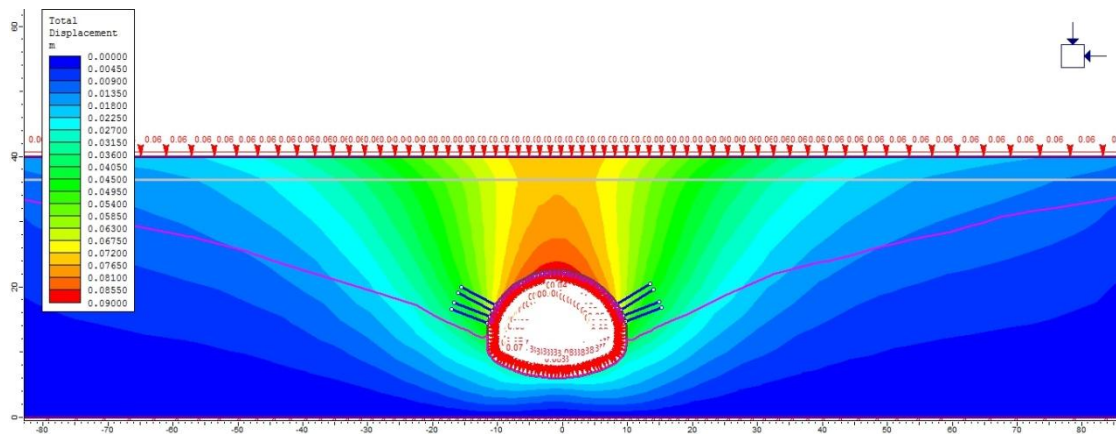
(3) Κατά Duncan-Buchignami (1976) υπό αστράγγιστες συνθήκες: Για $PI < 30\%$, $E_u = (600)_{cu}$ και $c_u = 390 \text{ kN/m}^2$, τότε $E_u = 234 \text{ MPa}$ Poisson $\nu = 0.3$

τότε από $E_u = \frac{3E}{2(1+\nu)} \quad E=200\text{MPa}$

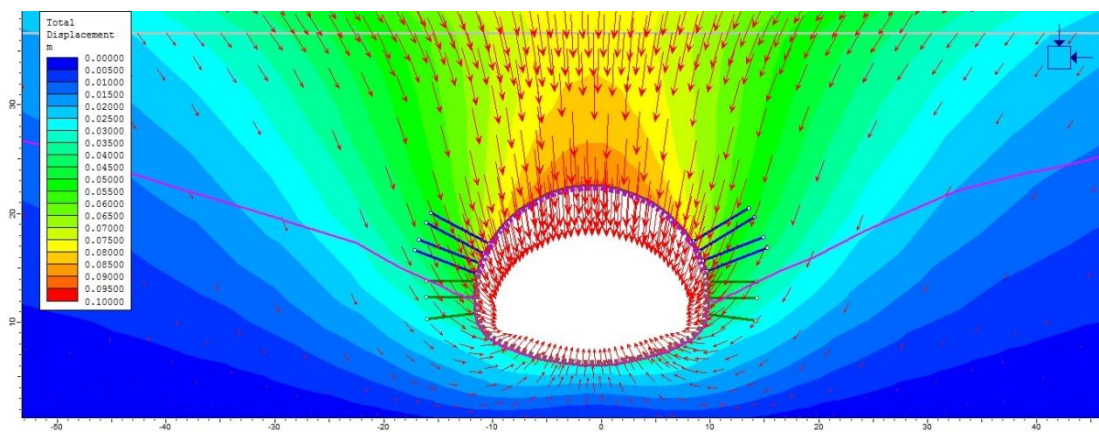
Από την συναξιολόγηση των παραπάνω σχέσεων και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών των δειγμάτων λήφθηκαν οι παρακάτω παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού:

Σχηματισμός	Γωνία τριβής (φ°)	Συνοχή c(kPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E(MPa)
Αργιλικές Μάργες	27°-32°	100-50 kPa	100-120 MPa

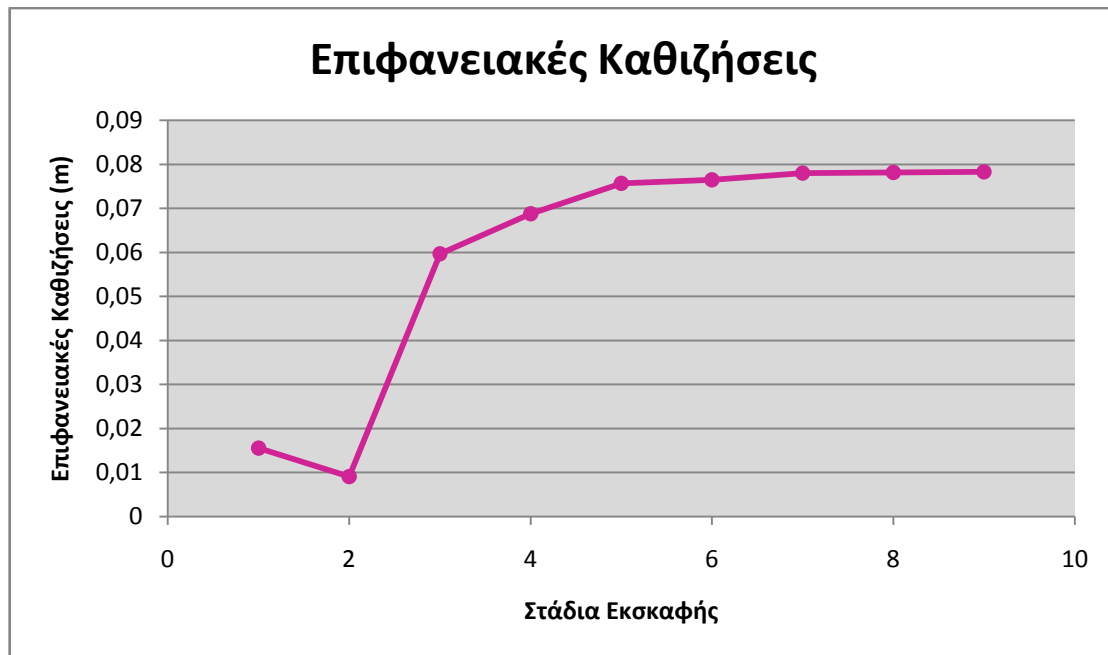
Πίνακας 23: Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού για αργιλικές μάργες



Σχήμα 25: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+343



Σχήμα 26: Δείκτες Παραμόρφωσης για την Χ.Θ 0+343



Γράφημα 33: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+343 για κάθε στάδιο εκσκαφής

❖ Τμήμα Β (Χ.Θ 0+472-500)

Το τμήμα αυτό αποτελείται από εναλλαγές αργιλικής μάργας, ψαμμιτικής μάργας και κατά τόπους μαργαϊκών ασβεστόλιθων που κατατάσσονται στην κατηγορία των νεογενών σχηματισμών.

Τα ψαμμιτικά και κροκαλοπαγή υλικά σχηματίζονται κατά ανάλογο τρόπο από τη μεταφορά προϊόντων της αποσάθρωσης με τη διαφορά ότι το μέγεθος των ψαμμιτών δεν ξεπερνά τα 2mm.

Βασικό χαρακτηριστικό των ψαμμιτικών μαργών είναι η παρουσία κενών που συνδέονται άμεσα με την παρουσία νερού που σε συνδυασμό και με την έντονη ρηγματώση πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στη θεμελίωση ενός τεχνικού έργου.

Σημειώνεται επίσης ότι η παρουσία νερού μειώνει συνήθως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, με αποτέλεσμα να προκληθεί χαλάρωση της συνοχής του πετρώματος. Έτσι όταν βρισκόμαστε σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους είναι δυνατόν να προκληθούν επιφανειακές καθιζήσεις.

Οι τιμές που δόθηκαν στις ελαστικές ιδιότητες και παραμέτρους αντοχής του πετρώματος ήταν πραγματικές τιμές που αφορούσαν μαργαϊκό υλικό με ενδιαστρώσεις κροκαλοπαγούς (αφού το κροκαλοπαγές και ψαμμιτικό υλικό έχουν τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά) που είχαν βρεθεί σε αντίστοιχο έργο και συγκεκριμένα στην διάνοιξη της Σήραγγας Πλατάνου-Τράπεζας, στην περιοχή Κιάτου-Αιγίου.

Το μέτρο ελαστικότητας εκτιμάται από τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις:

- Για βάθη > 20m

Κατά Schultze και Menzenbach (1961) για αμμοχάλικο με $N_{SPT}=100$ έχουμε:

$$E = C_1 + C_2 N_{SPT} = 38 + 10,5 \times 100 \approx 109 MPa$$

Κατά Tassios και Anagnostopoulos (1974) για αμμοχάλικο για $\alpha=40$ και $c=10$ έχουμε:

$$E = a + c(N_{SPT} \pm 6) = 40 + 10(100 \pm 6) \approx 104 MPa$$

Κατά Stround και Butler (1975) για $PI=6,3\%$ έχουμε $f_2=900$ άρα από τον τύπο:

$$E = f_2 N_{SPT} \text{ για } N_{SPT} = 100 \text{ τότε } E = 90.000 \text{ kN/m}^2 = 90 \text{ MPa}$$

➤ Για βάθη <20m

Κατά Schultze και Menzenbach (1961) για αμμοχάλικο με $N_{SPT}=48$ έχουμε:

$$E = C_1 + C_2 N_{SPT} = 38 + 10,5 \times 48 \approx 50 \text{ MPa}$$

Κατά Tassios και Anagnostopoulos (1974) για αμμοχάλικο για $a=40$ και $c=10$ έχουμε:

$$E = a + c(N_{SPT} \pm 6) = 40 + 10(48 \pm 6) \approx 50 \text{ MPa}$$

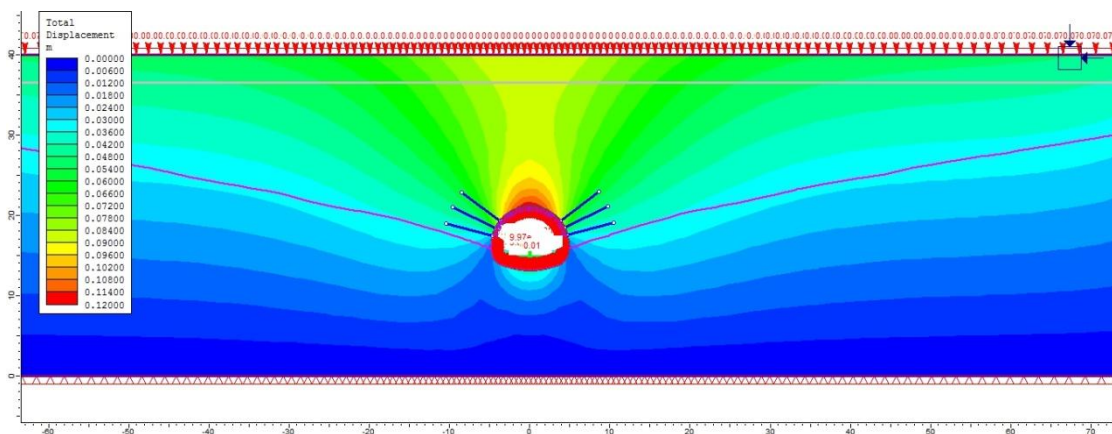
Κατά Stround και Butler (1975) για $PI=6,3\%$ έχουμε $f_2=900$ άρα από τον τύπο:

$$E = f_2 N_{SPT} \text{ για } N_{SPT} = 48 \text{ τότε } E = 43.200 \text{ kN/m}^2 = 43 \text{ MPa}$$

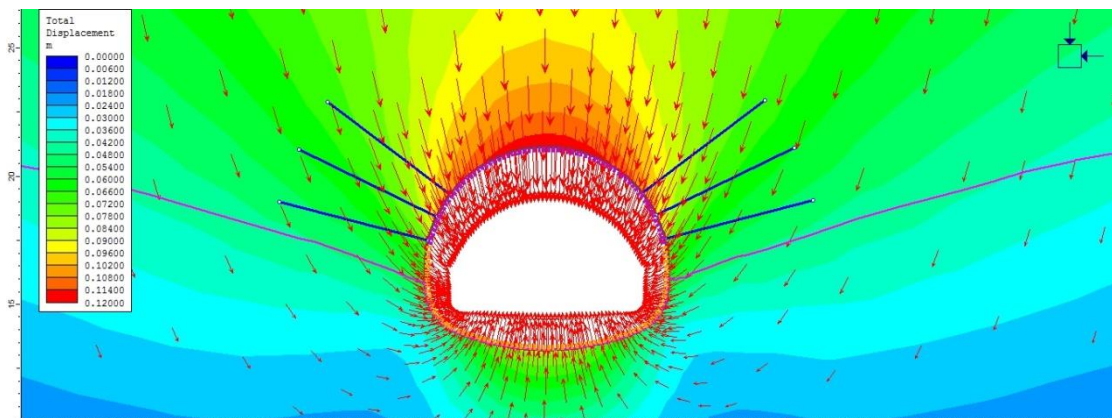
Από την συναξιολόγηση των παραπάνω σχέσεων και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών των δειγμάτων λήφθηκαν οι παρακάτω παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού:

Σχηματισμός	Γωνία τριβής (φ°)	Συνοχή c (kPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)
Ψαμμτικές Μάργες	25 ⁰ -30 ⁰	30-40 kPa	40-100 MPa

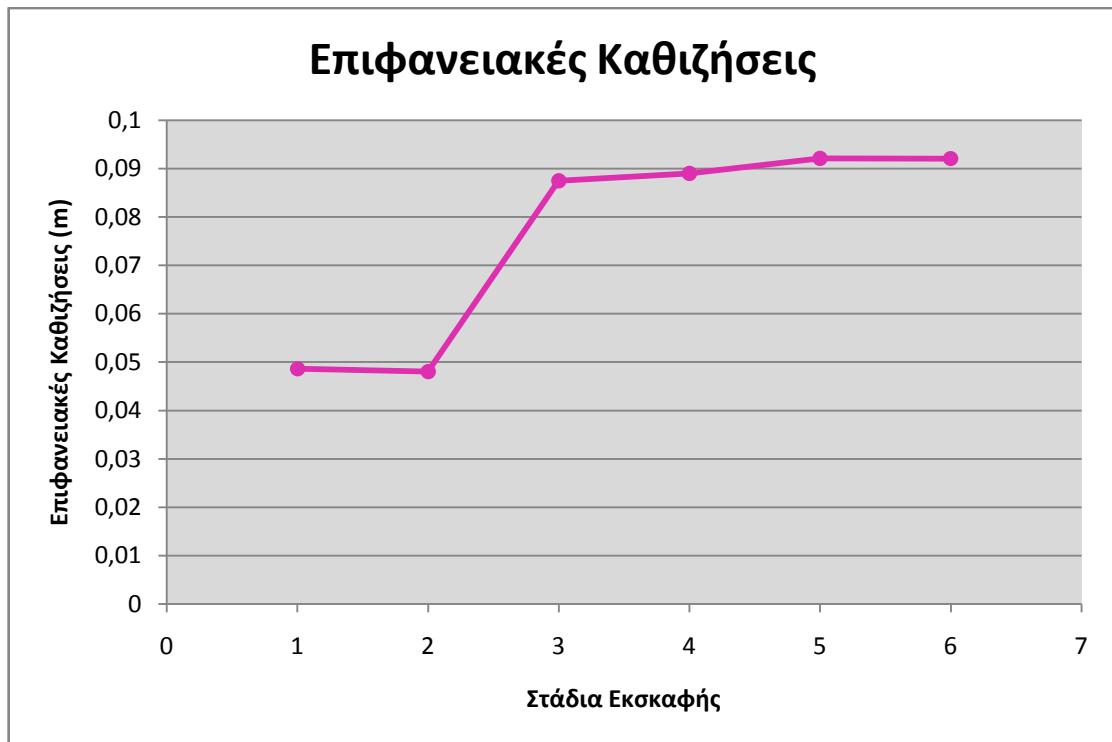
Πίνακας 24: Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού για ψαμμτικές μάργες



Σχήμα 27: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+472-500



Σχήμα 28: Δείκτες Παραμόρφωσης για την Χ.Θ 0+472-500



Γράφημα 34: Επιφανειακές Καθιζήσεις για την Χ.Θ 0+472-500 για κάθε στάδιο εκσκαφής

Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω στο μοντέλο προσομοίωσης, προέκυψε ότι οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων έφθασαν τα 50-90mm για τα δυο τμήματα αντίστοιχα, όπου οι τιμές αυτές είναι πλέον πιο κοντά στις πραγματικές τιμές.

Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκε τμηματική μελέτη του έργου για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων και όχι τοπική έρευνα, που θα ήταν πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί από οικονομικής απόψεως για αυτό και σε κάθε περίπτωση οι ενδεχόμενες αστοχίες αντιμετωπίζονται επιτόπου με αλλαγή των μέτρων αντιστήριξης.

Κεφάλαιο 6: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πρόκληση καθιζήσεων στο αστικό περιβάλλον και από την κίνηση του υπόγειου ύδατος στο έργο.

6.1 Ειδική Τρωτότητα και Σχετική Διακινδύνευση Κτιρίων-Κατασκευών

Η κατασκευή των υπόγειων έργων προκαλεί αναπόφευκτες διαταραχές στο περιβάλλον έδαφος, που ενδέχεται να προξενήσουν καθιζήσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους και στα κτίρια-κατασκευές της ζώνης επιρροής του έργου καθώς και στις ίδιες τις κατασκευές του έργου.

Πραγματοποιείται απογραφή, αναγνώριση και αποτίμηση της σπουδαιότητας και ειδικής τρωτότητας των κτιρίων και κατασκευών που περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον τις παραμέτρους που αφορούν το προσδιορισμό του δείκτη τρωτότητας. Πραγματοποιείται αρχικά Τεχνική Έκθεση με κατάλληλους πίνακες που παρέχουν στοιχεία των κτιρίων-κατασκευών όπως είναι η θέση τους, τα δομητικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους κ.α. Στη συνέχεια γίνεται οριζοντιογραφία της περιοχής με ένδειξη των κατασκευών του Μετρό, της ζώνης επιρροής και όλων των κτιρίων-κατασκευών με αρίθμηση τους, ενώ τέλος παραθέεται και φωτογραφική τεκμηρίωση αυτών.

Κάθε κτίριο-κατασκευή ταξινομείται σε μια από τις τρεις κατηγορίες Σχετικής Διακινδύνευσης:

A/A	Κατηγορία Σχετικής Διακινδύνευσης	Πιθανή βλάβη κτιρίου (προκαλούμενη από τη κατασκευή του έργου)
1	ΧΑΜΗΛΗ (πράσινο)	Πολύ ελαφριά έως ελαφριά βλάβη, ενεργοποίηση και επιδείνωση υφιστάμενων παλαιών ρωγμών.
2	ΜΕΣΗ (κίτρινο)	Ελαφριά έως μέτρια βλάβη, κυρίως αρχιτεκτονικές βλάβες και ρηγματώσεις.
3	ΥΨΗΛΗ (κόκκινο)	Μέτρια έως σημαντική βλάβη και μικρή δομητική βλάβη.

Πίνακας 25: Κατηγορίες Διακινδύνευσης για κτίρια-κατασκευές

Τα επίπεδα των βλαβών μπορούν να εκτιμηθούν, χρησιμοποιώντας κριτήρια που βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και δοκιμαστικά μοντέλα, με κατάλληλες σχέσεις κλίμακας.

Για την εκτίμηση των βλαβών των κτιρίων ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- ❖ Εκτίμηση της εδαφικής μετακίνησης υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου», όπου οι υπάρχουσες ανωδομές είτε αγνοούνται τελείως, είτε χαρακτηρίζονται ως απολύτως εύκαμπτες.
- ❖ Εξέταση της επίδρασης της ακαμψίας του κτιρίου στην εδαφική μετακίνηση υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου».
- ❖ Εκτίμηση της παραμόρφωσης του κτιρίου, που βασίζεται στην αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.
- ❖ Εκτίμηση του επιπέδου των βλαβών.

Αν το επίπεδο των βλαβών που προκύψει δεν είναι αποδεκτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη μέτρα προστασίας. Τα μέτρα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν έλεγχο στις κατασκευαστικές διαδικασίες, αλλαγή των μεθόδων κατασκευής, αύξηση της ακαμψίας του συστήματος υποστήριξης, βελτίωση του εδάφους, ενίσχυση των θεμελιώσεων και των κατασκευών ή επιλογή διαφορετικής θέσης. Μπορεί, επίσης, να εξεταστεί η επισκευή και η αντικατάσταση της κατασκευής.

Οι μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση της συμπεριφοράς, αλλά συχνά τα δεδομένα παραμορφώσεων και καθιζήσεων των κατασκευών, είναι ελλιπή και οι συγκρίσεις με τις μετακινήσεις ελευθέρου πεδίου μη διαθέσιμες. Βέβαια οι φυσικές και αριθμητικές προσομοιώσεις επιτρέπουν τέτοιες συγκρίσεις.

Οι βλάβες στις κτιριακές υποδομές μπορούν να φέρουν τις εξής μορφές:

1. Όταν η φέρουσα τοιχοποιία είναι προσανατολισμένη κάθετα στην εκσκαφή με τοίχο αντιστήριξης, τείνει να αναπτύξει διατμητική και πλευρική παραμόρφωση στο επίπεδο της θεμελίωσης, εξαιτίας της μετακίνησης του εδάφους που, αρχικά, εμφανίζεται στο μπροστινό μέρος του κτιρίου.
2. Η προς τα κάτω μετατόπιση του κτιρίου λόγω της εκσκαφής είναι δυνατόν να προκαλέσει παραμόρφωση στο άκρο της φέρουσας τοιχοποιίας και συγκέντρωση ρωγμών κοντά στην πρόσοψη του κτιρίου ή στην πρώτη στήλη των παραθύρων.
3. Για μια κατασκευή χωρίς πλευρικούς περιορισμούς και σε περίπτωση που υπάρχει κάποιος χαλαρός σύνδεσμος ή η ρωγμάτωση συνεχίζει να αναπτύσσεται προς τα πάνω, μπορεί να προκληθεί άνοιγμα ρωγμών σε κάμψη στους ανώτερους ορόφους.
4. Για μεγάλο εύρος καθιζήσεις, όπως είχαμε και στην περίπτωση του έργους που μελετήσαμε, όσο η κίνηση του εδάφους εκτείνεται σε βάθος κάτω από την κατασκευή, η τοιχοποιία μπορεί να αναπτύξει καμπτική παραμόρφωση και ανάπτυξη ρωγμών στην κορυφή του κτιρίου εξαιτίας μεγάλης τιμής του λόγου L/H (όπου L = το μήκος του κτιρίου που υπόκειται στην εδαφική μετακίνηση και H = το ύψος του κτιρίου).

Για την εκτίμηση των βλαβών μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο βλαβών, κατά Burland et al. (1977), με βάση το μέγιστο εύρος ρωγμής όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Κατηγορία ορατών βλαβών	Συνήθης βαθμός κινδύνου	Περιγραφή τυπικής βλάβης ⁵ /Ευκολία επισκευής	Προσεγγιστικό εύρος ρωγμής ⁶ (mm)
0	Αμελητέος	Τριχοειδής ρωγμές.	< 0,1
1	Πολύ μικρός	Λεπτές ρωγμές που μπορούν εύκολα να αντιμετωπιστούν με βάψιμο. Η βλάβη περιορίζεται γενικώς στα 'τελειώματα' εσωτερικής τοιχοποιίας. Ρωγμές στην εξωτερική τοιχοποιία ή σε εξωτερικά	< 1

⁵ Για την εκτίμηση του βαθμού της βλάβης πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση της στο κτίριο ή στην κατασκευή.

⁶ Το εύρος της ρωγμής είναι ένας μόνο από τους παράγοντες για την εκτίμηση της κατηγορίας βλάβης και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται σαν το μοναδικό κριτήριο.

		τούβλα είναι ορατές με επιθεώρηση σε κοντινή απόσταση.	
2	Μικρός	Ρωγμές ευκόλως πληρούμενες. Πιθανώς απαιτείται ξανά βάψιμο. Επαναδιανοιχθείσες ρωγμές είναι δυνατόν να καλυφθούν με κατάλληλα υλικά. Οι ρωγμές είναι εμφανείς εξωτερικά και μπορεί να απαιτηθεί καθαρισμός και πλήρωση, ώστε να εξασφαλιστεί υδατοστεγανότητα. Οι πόρτες και τα παράθυρα μπορεί να παρουσιάζουν μικρή δυσκολία σε άνοιγμα/κλείσιμο.	1-5
3	Μέτριος	Οι ρωγμές απαιτούν μερική αποκάλυψη (άνοιγμα) και μπορεί να επιδιορθωθούν από εξειδικευμένους τεχνίτες. Επαναλαμβανόμενες ρωγμές μπορεί να καλυφθούν με κατάλληλες επενδύσεις. Καθαρισμός των εξωτερικών τούβλων και πιθανώς, μικρός αριθμός τούβλων θα πρέπει να αντικατασταθεί. Οι πόρτες και τα παράθυρα δεν ανοιγοκλείνουν. Οι σωληνώσεις μπορεί να σπάσουν. Η υδατοστεγανότητα συνήθως έχει τρωθεί.	5-15 ή αριθμός ρωγμών ≥ 3
4	Σοβαρός	Εκτεταμένες εργασίες επισκευής, που περιλαμβάνουν σπάσιμο και αντικατάσταση τμημάτων τοιχοποιίας, κυρίως πάνω από πόρτες και παράθυρα. Πόρτες και παράθυρα παραμορφώνονται και το δάπεδο παρουσιάζει σημαντική κλίση ⁷ . Οι τοίχοι αποκλίνουν σημαντικά από την κατακόρυφο ή εμφανίζουν φουσκώματα, μερική απώλεια στήριξης των δοκών. Σπάσιμο σωληνώσεων.	15-25 αλλά, επίσης, εξαρτάται από τον αριθμό των ρωγμών
5	Πολύ σοβαρός	Απαιτούνται σημαντικές επιδιορθώσεις, συμπεριλαμβανομένης μερικής ή πλήρους ανακατασκευής. Απώλεια στήριξης δοκών και σημαντική κλίση τοίχων, οι οποίοι χρειάζονται υποστήριξη. Τα παράθυρα έχουν σπάσει λόγω παραμόρφωσης. Κίνδυνος αστάθειας.	Συνήθως > 25 αλλά εξαρτάται από τον αριθμό των ρωγμών

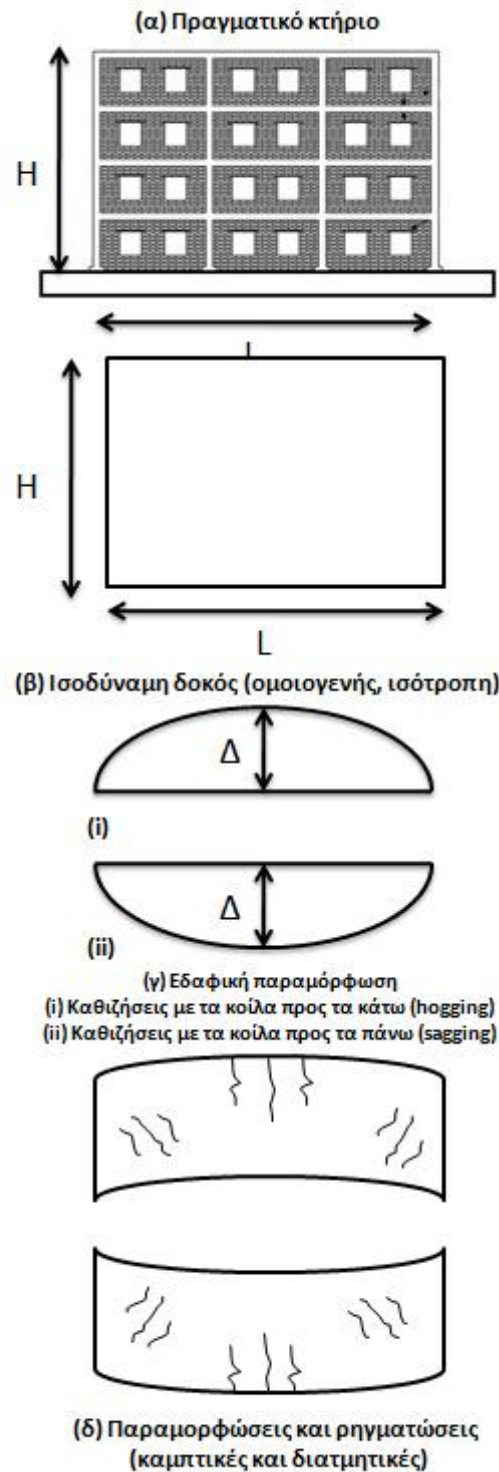
Πίνακας 26: Ταξινόμηση ορατών βλαβών σε τοίχους με ειδική αναφορά στην ευκολία επισκευής επιχρισμάτων και οπτοπλινθοδομής [Burland et al. (1977)].

Οι κατηγορίες ορατών βλαβών 0, 1 και 2 αφορούν την αισθητική των κτιρίων, οι κατηγορίες 3 και 4 καθορίζουν το βαθμό λειτουργικότητας των κτιρίων και η κατηγορία 5 επηρεάζει τη στατική ευστάθεια και επάρκεια των κτιρίων.

Με βάση το μοντέλο αυτό υιοθετείται το μοντέλο της ισοδύναμης δοκού για τον υπολογισμό των μέγιστων παραμορφώσεων ενός κτιρίου που προκαλούνται από τις μετακινήσεις του εδάφους. Στο μοντέλο αυτό, η κάθε πλευρά του κτιρίου του σχήματος 29α προσομοιώνεται με μια ισοδύναμη ισότροπη ελαστική δοκό μήκους L και ύψους H όπως

⁷ Τοπικές αποκλίσεις της κλίσης ως προς την οριζόντιο ή την κατακόρυφο μεγαλύτερες του 1/100 είναι συνήθως εύκολα ορατές. Συνολικές αποκλίσεις μεγαλύτερες από 1/150 είναι ανεπιθύμητες.

φαίνεται στο σχήμα 29β, η θεμελίωση της οποίας θεωρείται ότι ακολουθεί τις μετακινήσεις του εδάφους. Για τις επιβαλλόμενες εδαφικές παραμορφώσεις του σχήματος 29γ το κτίριο υφίσταται καθιζήσεις αντίστοιχα με τα κοίλα προς τα πάνω (sagging) ή προς τα κάτω (hogging). Και για τις δύο περιπτώσεις το κτίριο υπόκειται σε δυο μορφές παραμορφώσεων, την καμπτική και τη διατμητική σχήμα 29δ.



Σχήμα 29: Μοντέλο ισοδύναμης δοκού

Στην περίπτωση της καμπτικής συμπεριφοράς η μέγιστη ένταση σημειώνεται στην πάνω ή κάτω παρειά περί το μέσον του μήκους με αποτέλεσμα την εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών όπως φαίνεται στο σχήμα 29δ. Στην περίπτωση της διατμητικής συμπεριφοράς η ένταση έχει κλίση 45° με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών στα ακραία τέταρτα του τμήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 29δ.

Η συνολική παραμόρφωση Δ της ισοδύναμης δοκού για καμπτική και διατμητική ένταση υπολογίζεται από τον τύπο:

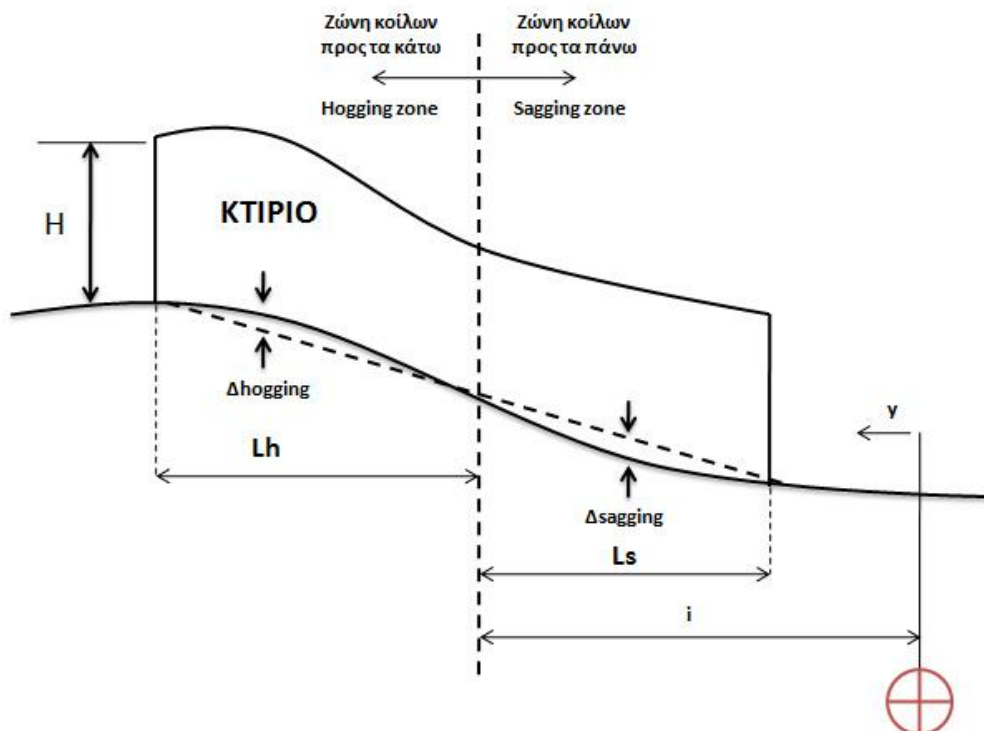
$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \left(1 + \frac{18EI}{L^2HG} \right) \quad [\text{Timoshenko (1957)}]$$

Στην πραγματικότητα, οι δυο μορφές παραμορφώσεων συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητος ο υπολογισμός τόσο της καμπτικής όσο και της διατμητικής έντασης έτσι έστω να ληφθεί υπόψη η μέγιστη.

Βεβαίως, το αν η συμπεριφορά είναι κυρίως καμπτική ή διατμητική εξαρτάται και από τον λόγο μορφής $\alpha=L/H$ της δοκού. Για μεγάλες τιμές L/H διέπουν οι καμπτικές παραμορφώσεις, ενώ για μικρές τιμές το λόγου διέπουν οι διατμητικές παραμορφώσεις.

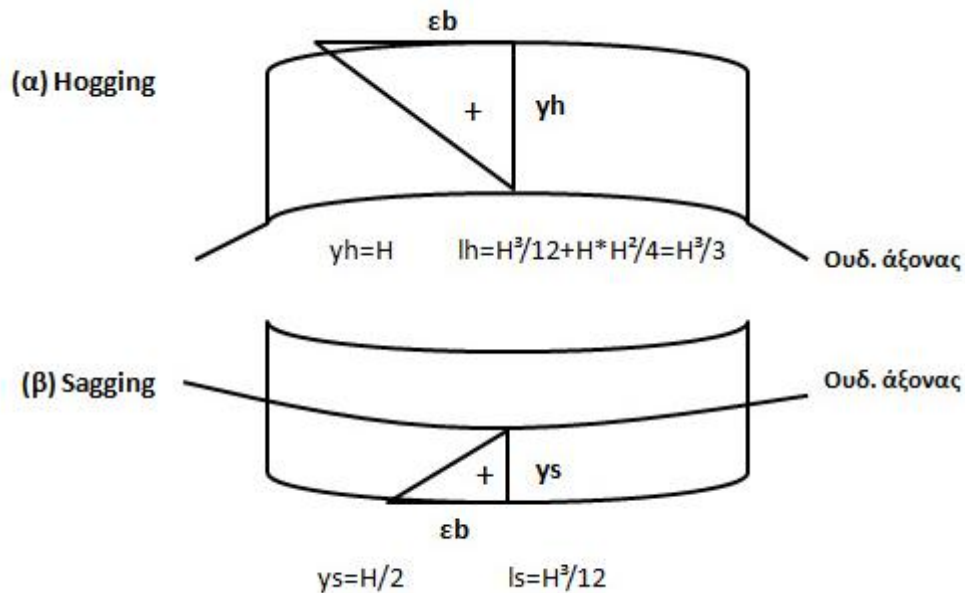
6.1.1 Καθιζήσεις με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω

Στο σχήμα 30 παρουσιάζεται ενδεικτικώς κτίριο μεγάλου μήκους, περί το σημείο καμπής της καμπύλης των καθιζήσεων. Το κτίριο υφίσταται διαδοχικώς, από το τμήμα του προς τη σήραγγα (όπου οι μέγιστες καθιζήσεις) προς το απομακρυσμένο τμήμα του (όπου οι ελάχιστες καθιζήσεις), βυθίσεις με τα κοίλα προς τα πάνω (sagging) ή προς τα κάτω (hogging).



Σχήμα 30: Καθιζήσεις με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω

Έτσι διακρίνονται δύο επιμέρους τμήματα του κτιρίου, που αναλύονται και ελέγχονται χωριστά. Το πλησιέστερο τμήμα έχει χαρακτηριστικά H , L_h και Δh . Από άποψη καμπτικής συμπεριφοράς, οι δυο καταστάσεις καθιζήσεων έχουν διαφορετικές συνέπειες στην ισοδύναμη δοκό, όπως φαίνεται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31: Συνέπειες καθιζήσεων στην ισοδύναμη δοκό

Δηλαδή, στην περίπτωση των κοίλων προς τα κάτω (σχήμα 31α) ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται στην κάτω παρειά της δοκού και η απόσταση y_h από την πλέον εφελκυσμένη πάνω παρειά είναι ίση με H και η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης δοκού είναι ίση με $I_h=H^3/3$. Αντιθέτως, στην περίπτωση των κοίλων προς τα πάνω (σχήμα 31β) ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται στο μέσο του ύψους και η απόσταση y_s από την πλέον εφελκυσμένη κάτω παρειά είναι ίση με $H/2$ και η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης δοκού είναι ίση με $I_s=H^3/12$.

6.1.1.1 Καμπτική Συμπεριφορά

Η ανηγμένη παραμόρφωση λόγω καμπτικής λειτουργίας ϵ_b υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\Delta}{L} = \left(1 + \frac{HL^2}{18I} \times \frac{G}{E} \right) \epsilon_b \max$$

όπου:

$\frac{\Delta}{L}$ η γωνιακή παραμόρφωση που προκύπτει από τα σχετικά διαγράμματα, λαμβάνοντας υπόψη τους ορισμούς του σχήματος 30.

L , H το μήκος και το ύψος του κτιρίου.

Για τις καταστάσεις sagging ή hogging, με βάση όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.1.1 ισχύουν τα εξής:

$$\frac{\Delta_s}{L_s} = \frac{1}{5} \left(\frac{L_s}{1.2H} + \frac{H}{L_s} \frac{E}{G} \right) \epsilon_b \max \quad (1)$$

$$\frac{\Delta h}{Lh} = \frac{1}{10} \left(\frac{Lh}{1.2H} + \frac{4HE}{LhG} \right) \varepsilon b_{max} \quad (2)$$

Για τις ίδιες τιμές Δ/L , L/H και E/G , οι τιμές εb_{max} είναι πάντα μεγαλύτερες για καταστάσεις hogging αντί για καταστάσεις sagging. Για καμπτόμενες δοκούς με μεγάλο λόγο μορφής $L/H \geq 4$ οι ανηγμένες παραμορφώσεις εb_{max} (εφελκυσμός από κάμψη) είναι σχεδόν διπλάσιες για hogging απ' ότι για sagging.

6.1.1.2 Διατμητική Συμπεριφορά

Κατ' αντιστοιχία με την καμπτική συμπεριφορά στο μέσον της ισοδύναμης αμφιέριστης δοκού, στα άκρα της, σε περιοχές που απέχουν περίπου $L/4$ από αυτά, διέπουν οι διαγώνιες μέγιστες εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις εd_{max} . Αναλόγως του λόγου μορφής L/H του κτιρίου, είναι κρίσιμες οι εd_{max} , για $L/H \leq 1 \div 1.5$ ή οι εb_{max} για $L/H \geq 2 \div 2.5$. Όπως αποδεικνύεται, στα ακραία τέταρτα του μήκους, η εd_{max} συνδέεται με το μέγιστο συνολικό βέλος κάμψης Δ στο μέσο της δοκού, ως εξής:

$$\frac{\Delta}{L} = \left(1 + \frac{HL^2 E}{18I G} \right) \varepsilon d_{max}$$

όπου:

Η ροπή αδράνειας I εξαρτάται από την κατάσταση της βύθισης (sagging ή hogging).

Για τις καταστάσεις sagging ή hogging, ισχύουν τα εξής:

$$\frac{\Delta s}{Ls} = \left(1 + \frac{2L^2 E}{3H^2 G} \right) \varepsilon d_{max} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta h}{Lh} = \left(1 + \frac{L^2 E}{6H^2 G} \right) \varepsilon d_{max} \quad (4)$$

Για τις ίδιες τιμές Δ/L , L/H και E/G , οι τιμές εd_{max} είναι πάντοτε μεγαλύτερες για κατάσταση hogging απ' ότι για κατάσταση sagging. Για διατεμνόμενες δοκούς με μικρό λόγο μορφής, $L/H \leq 0.5$ οι ανηγμένες παραμορφώσεις εd_{max} είναι σχεδόν ίσες για hogging και για sagging.

6.1.1.3 Καμπτική ή διατμητική συμπεριφορά

Οι εδαφικές μετακινήσεις που σχετίζονται με εκσκαφές συνήθως αναπτύσσονται υπό τη μορφή ταξιδεύοντος κύματος, που προοδευτικά εισβάλλει στη θεμελίωση του κτιρίου. Οφιανόμενος λόγος μορφής L/H του κτιρίου αρχικώς έχει μικρές τιμές της τάξεως του 1 και προοδευτικά αυξάνει, αναλόγως και του πραγματικού L/H, όσο επηρεάζεται μεγαλύτερο μήκος του κτιρίου. Έτσι, οι αρχικές παραμορφώσεις του πλησιέστερου άκρου του κτιρίου είναι κυρίως διατμητικές, ενώ προοδευτικά αναπτύσσονται συνδυασμένες καμπτικές/διατμητικές παραμορφώσεις προς το μέσον και το άλλο άκρο του κτιρίου.

6.1.2 Επιρροή των ταυτόχρονων εδαφικών οριζόντιων παραμορφώσεων

Πέραν των βυθίσεων από τις κάθε είδους εκσκαφές, και λόγω των ταυτόχρονων οριζόντιων μετακινήσεων εδάφους, επιβάλλεται ταυτοχρόνως και οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση ϵh στο κτίριο ή στα επιμέρους τμήματά του υπό sagging ή hogging, η οποία υπολογίζεται από την διαφορά των οριζόντιων μετακινήσεων δια του αντίστοιχου μήκους.

Για καμπτική συμπεριφορά η συνολική ανηγμένη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στην ακραία παρειά στο μέσο της δοκού δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon b t = \epsilon h + \epsilon b \max \quad (5)$$

Για τη διατμητική συμπεριφορά η συνολική ανηγμένη διαγώνια εφελκυστική παραμόρφωση στα διατεμνόμενα άκρα της δοκού δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon d t = \epsilon h \left(\frac{1 - \nu}{2} \right) + \sqrt{\epsilon h^2 \left(\frac{1 - \nu}{2} \right)^2 + \epsilon d \max^2} \quad (6)$$

Ο συντελεστής Poisson ν είναι είτε ο πραγματικός, είτε ο ισοδύναμος/φαινόμενος, με βάση τις τιμές E/G, λαμβάνοντας τιμές εκτός του πεδίου 0÷0.5 που ισχύει για ομοιογενή και ισότροπα ελαστικά υλικά.

Η επαλληλία της εδαφικής ϵh με τις παραμορφώσεις $\epsilon b \max$ και $\epsilon d \max$ της ισοδύναμης δοκού είναι άμεση σε καταστάσεις sagging, ενώ υιοθετείται σε καταστάσεις hogging γενικώς δυσμενέστερες.

6.2 Διαδικασία εκτίμησης των βλαβών στα κτίρια, εξαιτίας των εδαφικών μετακινήσεων.

Η εκτίμηση των βλαβών στα κτίρια, εξαιτίας της εδαφικής μετακίνησης που προήλθε από την εκσκαφή, συμβάλει στα στάδια σχεδιασμού του έργου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις εξής φάσεις:

Πρώτη φάση εκτίμησης

- i. Εκτιμάται η εδαφική μετακίνηση ελευθέρου πεδίου, οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες μετακινήσεις, από εμπειρικές και ημιεμπειρικές σχέσεις, δοκιμές φυσικών μοντέλων ή αριθμητικές δοκιμές, για μια δεδομένη εκσκαφή.

- ii. Ελέγχεται, αν η κατασκευή βρίσκεται μέσα στη ζώνη επιρροής του προφίλ της εδαφικής μετακίνησης.
- iii. Αν βρίσκεται μέσα στη ζώνη επιρροής, προσδιορίζεται η μέγιστη καθίζηση και η μέγιστη στροφή που αναμένονται κατά μήκος της κατασκευής. (Πίνακας 18)
- iv. Αν η μέγιστη καθίζηση ή στροφή βρίσκονται κάτω από τα όρια, η έρευνα τελειώνει σε αυτό το βήμα. Αν η μέγιστη καθίζηση ή στροφή είναι πάνω από τα όρια, ακολουθείται η δεύτερη φάση εκτίμησης.

Κατηγορία κινδύνου	Μέγιστη στροφή κτιρίου	Μέγιστη καθίζηση κτιρίου (mm)	Περιγραφή κινδύνου
1	Μικρότερη από 1/500	Μικρότερη από 10	Αμελητέος: επιφανειακές βλάβες απίθανο
2	1/500 - 1/200	10 - 50	Μικρός: πιθανή επιφανειακή βλάβη που είναι απίθανο να έχει κατασκευαστική σημασία
3	1/200 - 1/50	50 - 75	Μέτριος: αναμένεται επιφανειακή βλάβη και πιθανή κατασκευαστική βλάβη των κτιρίων, πιθανή βλάβη σε σχετικά άκαμπτους αγωγούς
4	Μεγαλύτερη από 1/50	Μεγαλύτερη από 75	Υψηλός: αναμένεται κατασκευαστική βλάβη στα κτίρια, βλάβη στους άκαμπτους αγωγούς και πιθανή βλάβη στους υπόλοιπους αγωγούς

Πίνακας 27: Τυπικές τιμές μέγιστης στροφής και καθίζησης κτιρίου για την εκτίμηση του κινδύνου βλαβών [Rankin (1988)]

Δεύτερη φάση εκτίμησης

- i. Χρησιμοποιείται η εδαφική μετακίνηση ελευθέρου πεδίου και θεωρείται ότι η κατασκευή συμμορφώνεται με την μετακίνηση αυτή.
- ii. Προσδιορίζεται η μεταβολή στην κλίση του εδάφους, μεταξύ γειτονικών τμημάτων, θεωρώντας ότι η μεταβολή αυτή ισούται με τη σχετική στροφή.
- iii. Προσδιορίζεται η οριζόντια (πλευρική) παραμόρφωση της εδαφικής μετακίνησης ελευθέρου πεδίου, μεταξύ γειτονικών τμημάτων.
- iv. Αν οι υπολογισμένες διατμητικές παραμορφώσεις είναι υψηλές σε όλο το ύψος της κατασκευής ή αν υπάρχουν μεγάλες προϋπάρχουσες κατακόρυφες αρθρώσεις, προσδιορίζεται η καμπτική παραμόρφωση στην κορυφή μιας κτιριακής μονάδας, χρησιμοποιώντας το ύψος της κτιριακής μονάδας και την ακτίνα μιας καμπυλότητας της εδαφικής μετακίνησης.
- v. Αν η κατηγορία βλαβών που προκύπτει από το κριτήριο παραμορφωσιακής κατάστασης είναι αποδεκτή, η ανάλυση σταματάει σε αυτό το βήμα. Αν δεν είναι αποδεκτή, ακολουθείται η τελική φάση εκτίμησης.

Τελική φάση εκτίμησης

- i. Χρησιμοποιείται η μεταβολή της εδαφικής κλίσης από την καθίζηση ελευθέρου πεδίου, που προσδιορίστηκε στο βήμα (ii) της 'Δεύτερης φάσης εκτίμησης'.
- ii. Προσδιορίζεται η σχετική ακαμψία μεταξύ εδάφους και κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη τα ανοίγματα του κτιρίου (Σχήμα 30).
- iii. Εκτιμάται η κανονικοποιημένη γωνιακή παραμόρφωση, από τη σχέση μεταξύ κανονικοποιημένης γωνιακής παραμόρφωσης, σχετικής ακαμψίας και λόγου μεταβολής της εδαφικής κλίσης προς την παραμόρφωση της κατασκευής λόγω ρωγμών. Έπειτα, καθορίζεται η γωνιακή παραμόρφωση.

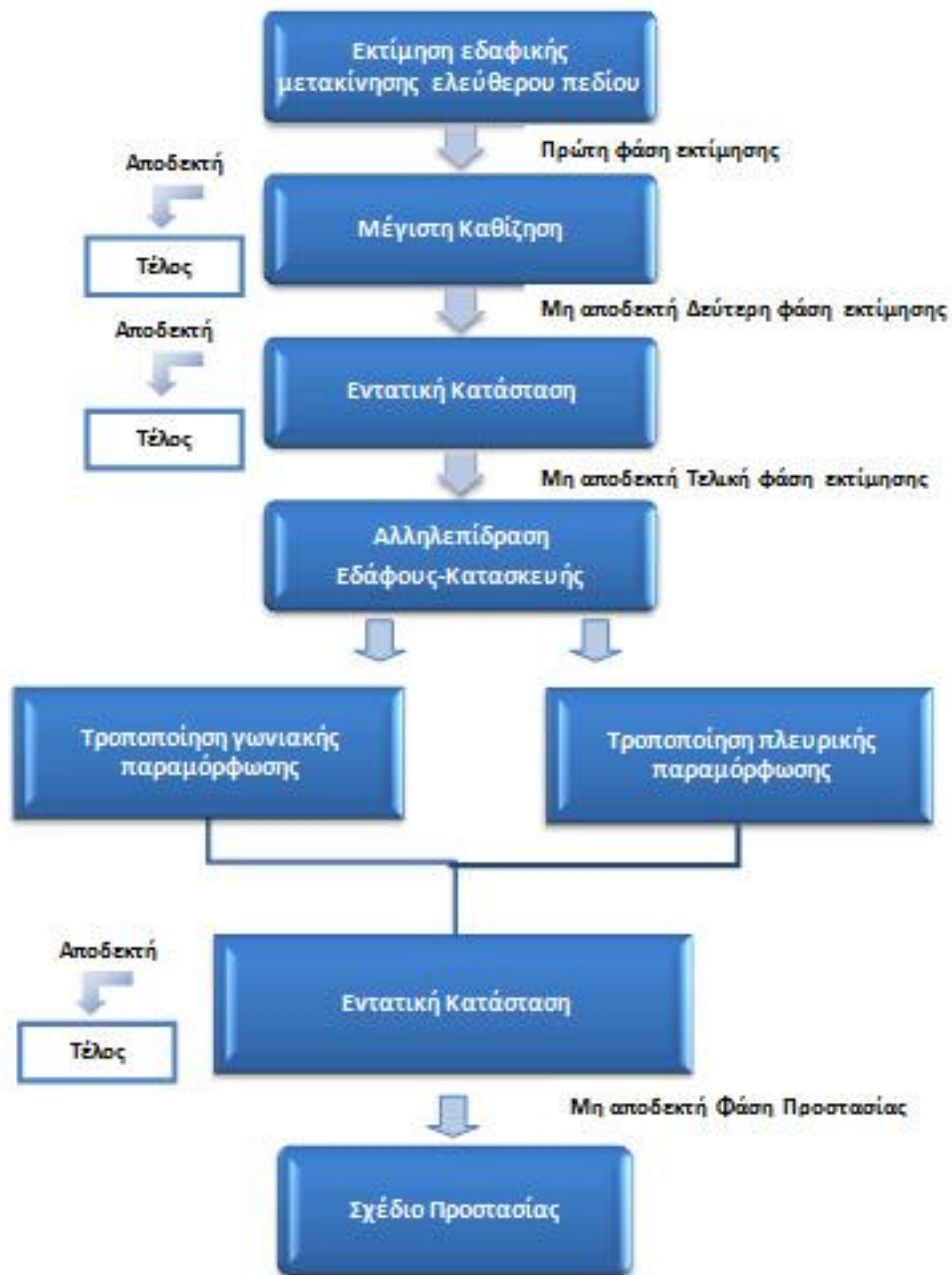
- iv. Από τις πλευρικές παραμορφώσεις, που προσδιορίστηκαν στο βήμα (iii) της 'Δεύτερης φάσης εκτίμησης' προσδιορίζεται η πλευρική παραμόρφωση, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες, όπως η διεπιφάνεια μεταξύ εδάφους-κατασκευής, διατμητικές ρωγμές που εκτείνονται σε ανώτερα επίπεδα ορόφων, προϋπάρχουσες ρωγμές στην κορυφή του κτιρίου, επίπεδα αδυναμίας και περιορισμούς που προέρχονται από δοκάρια, συνδέσεις ή την οροφή.
- v. Προσδιορίζεται μια κατηγορία βλαβών, από το γενικευμένο κριτήριο παραμορφωσιακής κατάστασης, χρησιμοποιώντας τη γωνιακή παραμόρφωση και την πλευρική παραμόρφωση.
- vi. Αν το επίπεδο βλαβών, από το βήμα (v) της 'Τελικής φάσης εκτίμησης' είναι αποδεκτό, η ανάλυση σταματάει σε αυτό το βήμα. Αν δεν είναι αποδεκτό, προσδιορίζονται κατάλληλα μέτρα προστασίας ή μέσα μετρίασης των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων, όπως περιγράφονται στην 'Φάση προστασίας'.

Φάση προστασίας

Πραγματοποιείται ένα σχέδιο προστασίας, για την αποφυγή των βλαβών ή τον περιορισμό των βλαβών σε αποδεκτά επίπεδα, που αφορά:

- ❖ την πηγή των εδαφικών μετακινήσεων (σήραγγα ή εκσκαφή),
- ❖ την τροποποίηση/αντικατάσταση του εδάφους και
- ❖ την ενίσχυση του κτιρίου.

Η διαδικασία εκτίμησης των βλαβών μιας κατασκευής, σύμφωνα με τις παραπάνω φάσεις, παρουσιάζεται στο σχήμα 32.



Σχήμα 32: Διαδικασία εκτίμησης βλαβών μιας κατασκευής από την εδαφική μετακίνηση λόγω εκσκαφής (M.Son and E.J.Cording, 2005)

6.3 Επίδραση του Ύδατος στη Συμπεριφορά του Υπόγειου Έργου

Η εντατική κατάσταση σ' ένα υπόγειο έργο, εξαρτάται κυρίως από τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Το υπόγειο νερό συγκεντρώνεται στους πόρους των γεωυλικών (πρωτογενές πορώδες) και σε τυχόν ασυνέχειες που το διασχίζουν (δευτερογενές πορώδες).

Η βασική επίδραση του νερού είναι στις κύριες τάσεις και την πίεση των πόρων της βραχομάζας. Η μείωση της ενεργής τάσης έχει άμεση επίδραση στη διατμητική αντοχή της βραχομάζας, που είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης ορθής τάσης.

Βασική επίπτωση της ύπαρξης των υπόγειων υδάτων είναι η ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων στην προσωρινή επένδυση αλλά και η εμφάνιση εκλεκτικών ροών διαμέσου ασυνεχειών και άλλων διαπερατών ενστρώσεων του μέτρω. Οι ροές αυτές μπορεί να προκαλέσουν απόπλυση του υλικού πλήρωσης και αυτό με τη σειρά του μείωση της ευστάθειας του εδάφους.

Επίσης λόγω συμπύκνωσης του γεωυλικού από την απομάκρυνση του νερού που περιέχει κάτω από τα φορτία των κατασκευών ή από το ίδιο το βάρος του γεωυλικού μπορεί να προκληθούν καθιζήσεις.

Τέλος μια ακόμα επίπτωση είναι η υπόγεια διάβρωση εξαιτίας διαφυγών λόγω απομάκρυνσης των κόκκων του υλικού που παρασύρονται από την υπόγεια ροή

Για αυτό το λόγο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνονται μέτρα για την αποστράγγιση των υπόγειων υδάτων. Τα μέτρα αυτά αφορούν αποστραγγιστικές και ανακουφιστικές οπές στο μέτρω και στο θόλο αμέσως μετά την εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ. (2007) Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι. Έκθεση αξιολόγησης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ. (2007) Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι. Έκθεση γεωτεχνικής αξιολόγησης-Κύρια σήραγγα από Φρέαρ Άλσους έως Φρέαρ Ηρώων Πολυτεχνείου Χ.Θ 0+000 έως Χ.Θ 0+504,54.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ. (2007) Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι. Προσωρινή υποστήριξη σήραγγας διατομής τριπλής γραμμής από Χ.Θ. 0+000 έως Χ.Θ. 0+349.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ. (2007) Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι. Προσωρινή υποστήριξη σήραγγας διατομής διπλής γραμμής από Χ.Θ. 0+349 έως Χ.Θ. 0+929.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ. Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι, Σταθμός Μετεπιβίβασης Χαϊδάρι, Αμαξοστάσιο Ελαιώνα
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.-ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ.(2010) Μελέτες Εφαρμογής Επέκτασης Γραμμής 3, Τμήμα Αιγάλεω - Χαϊδάρι, Σταθμός Μετεπιβίβασης Χαϊδάρι, Αμαξοστάσιο Ελαιώνα, Τελική έκθεση γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης-Επέκταση Γραμμής 3 προς Χαϊδάρι.
- BURLAND, STANDING, MAIR (2004), Advances in geotechnical engineering. Ground performance and building response due to tunneling-The Skempton conference
- BURLAND, TAYLOR, MAIR (1996), Geotechnical aspects of underground construction in soft ground.
- BURLAND, STANDING, JARDINE (2001), Building response to tunneling. Case studies from construction of the Jubilee extension, London.
- ΓΙΑΤΑΓΑΝΑ Ξ. (2014) Επέκταση του μετρό Αθήνας, γραμμή 3, τμήμα Χαϊδάρι-Πειραιάς, ΕΜΠ Αθήνα.
- ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ Γ., ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΥ Μ., (2006), Κατασκευή και μηχανική των σιηράγγων και των υπόγειων έργων, Χανιά.
- ΜΑΡΙΝΟΣ Γ., ΜΠΕΝΙΣΗ Μ., ΚΟΡΚΑΡΗΣ Κ.(2001), Διερεύνηση επί των συνθηκών που προκαλούν καθιζήσεις κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σιηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Εμπειρίες από την κατασκευή του Μετρό Αθηνών. 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, 537-544, Αθήνα.
- ΜΑΡΙΝΟΣ Π., ΜΑΡΙΝΟΣ Β., ΣΤΟΥΜΠΟΣ Γ., ΝΟΒΑΚ Μ., ΚΟΡΚΑΡΗΣ Κ., ΜΠΕΝΙΣΗ Μ.(2004), Η συμπεριφορά του "Αθηναϊκού Σχιστόλιθου" στη χρήση μηχανήματος σιηράγγων τύπου ασπίδας ανοικτού μετώπου. Εμπειρίες από τη διάνοιξη της σήραγγας της επέκτασης του μετρό των Αθηνών προς Περιστέρη. 10^ο Διεθνές Γεωλογικό Συνέδριο, Θεσσαλονίκη.
- ΝΑΚΟΥ Φ.Α., ΜΑΥΡΟΜΑΤΗ Χ.Ζ., ΜΠΟΥΣΟΥΛΑΣ Ν.Ζ., (2010), Διάνοιξη Σήραγγας Διπλής και Τριπλής Τροχιάς με Συμβατικά Μηχανικά Μέσα-Επέκταση Γραμμής 3

Μετρό Αθηνών, Τμήμα Αιγάλεω-Χαϊδάρι, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος

- ΠΑΠΑΥΓΕΡΗ Γ., ΑΡΒΑΝΙΤΗ Α. (2012), Βαθείς Εκσκαφές σε Αστικό Χώρο: Η περίπτωση του σταθμού Μετρό 'Αγ. Βαρβάρα', ΕΜΠ Αθήνα.
- ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ Ν., (2007), Τεχνικά χαρακτηριστικά πετρωμάτων-επίδραση των γεωλογικών χαρακτηριστικών των γεωϋλικών στα τεχνικά έργα.
- ΣΩΤΗΡΧΟΣ Α., (2011), Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά τη διάνοιξη των σηράγγων Πλατάνου και Τράπεζας της Σ.Γ.Υ.Τ Κιάτου-Αιγίου. Εφαρμογή αναλυτικών προσεγγίσεων για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης αντιστήριξης και περιβάλλουσας βραχομάζας., Πάτρα.
- ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ Γ., (2009), Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων., Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Πίνακας Α.1 : Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών Βραχομηχανικής

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c	
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{50}			
	m		MPa	MPa	MPa	MPa	$^{\circ}$ (deg)	MPa	
II-1. Ανώτερος Ορίζοντας Νεογενών									
BP3303	4,70	Ασβ. Αργιολ.	2,35						
BP3303	6,65	Ασβ. Αργιολ.			0,18	2,28			
BP3303	8,65	Ασβ. Αργιολ.			0,16	2,02			
BP3303	15,55	Ασβ. Αργιολ.	4,61						
BP3303	18,15	Ασβ. Αργιολ.			0,28	3,64			
BP3306	30,30	Ασβ. Ιλυόλιθος	6,45						
BP3308	29,30	Μάργα	1,88						
BP3308	30,05	Μάργα			0,57	7,41			
BP3305	6,35	Μάργα	1,39						
BP3305	8,50	Μάργα			0,12	1,56			
BP3305	9,05	Μάργα			0,10	1,30			
BP3305	9,65	Μάργα			0,16	2,02			
BP3308	11,60	Μάργα			0,18	2,34			
BP3308	13,30	Μάργα			0,41	5,27			
BP3308	14,15	Μάργα			0,36	4,68			
BP3308	15,70	Μάργα	3,33						
BP3308	15,90	Μάργα	5,00						
BP3308	18,70	Μάργα			0,14	1,82			
BP3308	19,35	Μάργα			0,76	9,82			
BP3308	21,55	Μάργα			0,50	6,44			
BP3308	22,65	Μάργα			0,47	6,05			
BP3308	25,25	Μάργα	9,55						
BP3308	26,95	Μάργα			0,53	6,89	24,00	0,09	
BP3308	28,15	Μάργα			0,42	5,46	21,50	0,10	
BP3308	6,00	Μάργα			0,25	3,25			
BP3305	23,30	Μάργα-Λ. Ψαμ.	2,39						
BATPG03	16,10	Ψαμ. Μάργα	0,40	0,66	0,11	1,37			
BATPG03	17,70	Ψαμ. Μάργα	0,54	0,62	0,65	8,39			
BATPG03	19,35	Ψαμ. Μάργα	0,26	0,50	0,12	1,50			
BATPG03	13,20	Ψαμ. Μάργα	0,63						
BATPG03	6,50	Ψαμ. Μάργα	1,48	2,48					

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ						
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ		
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c	
	m		MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa	
BP3309	14,80	Ψαμμίτης	2,38						
BP3302	17,15	Ψαμμίτης	2,83						
II-1. Ανώτ. Ορίζ. Νεογενών			Μέσος όρος	2,84	1,07	0,32	4,17	22,75	0,10
			Τυπική απόκλιση	2,51	0,95	0,20	2,64	1,77	0,01
			Μεσαία τιμή	2,37	0,64	0,27	3,45	22,75	0,10
			Πλήθος τιμών	16	4	20	20	2	2
			MIN	0,26	0,50	0,10	1,30	21,50	0,09
			MAX	9,55	2,48	0,76	9,82	24,00	0,10
II-2. Κατώτερος Ορίζοντας Νεογενών									
BP3303	22,10	Ασβ. Ιλυολιθος			0,43	5,53			
BP3303	24,85	Ασβ. Ιλυολιθος	11,57						
BP3303	28,60	Ασβ. Ιλυολιθος	9,43		0,58	7,48			
BP3303	32,30	Ασβ. Ιλυολιθος	14,11						
BP3306	32,05	Ασβ. Ιλυόλιθος			0,26	3,38			
BP3308	31,55	Ασβ. Ιλυόλιθος	6,49				25,00	0,20	
BP3308	33,10	Ασβ. Ιλυόλιθος			0,57	7,41	43,00	0,10	
BP3308	35,05	Ασβ. Ιλυόλιθος	13,00		0,58	7,54			
BP3308	36,30	Ασβ. Ιλυόλιθος			0,65	8,45			
BP3308	37,85	Ασβ. Ιλυόλιθος	9,76						
BP3333	27,65	Ασβ. Ιλυόλιθος	14,21						
BP3333	31,55	Ασβ. Ιλυόλιθος	11,86						
BP3333	34,85	Ασβ. Ιλυόλιθος	28,97		2,08	41,50			
BP3333	37,50	Ασβ. Ιλυόλιθος			1,42	18,40			
BP3302	32,50	Ιλυόλιθος	5,73						
BP3302	38,50	Ιλυόλιθος	1,89						
BP3306	35,10	Ιλυόλιθος	8,51						
BP3306	15,90	Ιλυόλιθος	2,66						
BP3306	19,60	Ιλυόλιθος			0,36	4,62	24,50	0,15	
BP3306	22,05	Ιλυόλιθος	3,21				33,00	0,08	
BP3303	37,70	Λιγνίτης			0,49	6,31			
BP3305	35,70	Λιγνίτης	4,26						
BATPG03	23,00	Ψαμ. Μάργα	1,36	1,19	0,59	7,67			
BP3306	27,85	Ψαμμίτης	4,88		1,15	14,95			
BP3302	23,10	Ψαμμίτης	2,82						

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σπηραγγών του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c	
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}			
	m		MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa	
BP3309	18,35	Λατυποπ.	2,38						
BP3309	20,10	Λατυποπ.	2,84						
BP3309	21,70	Λατυποπ.					21,00	0,11	
BP3309	24,85	Λατυποπ.					17,00	0,14	
BP3309	25,90	Λατυποπ.	7,10						
BP3309	29,90	Λατυποπ.	2,38						
BP3309	34,15	Λατυποπ.	3,32						
BP3309	39,40	Λατυποπ.	3,28						
II-2. Κατώτ. Οριζ. Νεογενών		Μέσος όρος	7,33	1,19	0,76	11,10	27,25	0,13	
		Τυπική απόκλιση	6,22	-	0,53	10,47	9,36	0,04	
		Μεσαία τιμή	5,31	1,19	0,58	7,51	24,75	0,13	
		Πλήθος τιμών	24	1	12	12	6	6	
		MIN	1,36	1,19	0,26	3,38	17,00	0,08	
		MAX	28,97	1,19	2,08	41,50	43,00	0,20	
II-3. Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος Λεκάνης Νεογενών									
BP3302	3,45	Μαργ. Ασβ.			1,51	19,57			
BP3302	4,65	Μαργ. Ασβ.			3,13	62,60			
BP3302	5,65	Μαργ. Ασβ.			2,24	44,80			
BP3302	6,55	Μαργ. Ασβ.			1,92	24,96			
BP3302	7,65	Μαργ. Ασβ.	23,74		3,34	66,80			
BP3302	8,65	Μαργ. Ασβ.			2,29	45,70			
BP3302	9,05	Μαργ. Ασβ.			1,66	21,52			
BP3302	10,10	Μαργ. Ασβ.			2,86	57,10			
BP3302	12,25	Μαργ. Ασβ.			0,98	12,68			
BP3302	13,95	Μαργ. Ασβ.			1,42	18,40			
BP3303	33,50	Μαρ. Ασβεστ.	28,72						
BP3306	23,90	Μαρ. Ασβεστ.	25,80						
BP3306	25,80	Μαρ. Ασβεστ.	21,65						
BP3333	9,40	Μαρ. Ασβεστ.			1,29	16,71	32,00	0,11	
BP3333	18,50	Μαρ. Ασβεστ.	19,11				36,00	0,10	
BP3333	20,60	Μαρ. Ασβεστ.	12,67						
BP3333	23,40	Μαρ. Ασβεστ.			2,79	55,70			
BP3305	26,35	Μαρ. Ασβεστ.			0,31	4,03			
BP3305	27,65	Μαρ. Ασβεστ.			1,56	20,22			

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σιηράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c	
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}			
	m		MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa	
BP3305	29,35	Μαρ. Ασβεστ.			1,06	13,78			
BP3333	12,90	Μαρ. Ασβεστ.			1,75	22,69			
BP3308	24,35	Μαρ. Ασβεστ.	11,92						
BP3333	5,15	Μαρ. Ασβεστ.			1,60	20,80			
II-3. Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος			Μέσος όρος	20,52	-	1,86	31,06	34,00	0,11
			Τυπική απόκλιση	6,38	-	0,82	19,76	2,83	0,01
			Μεσαία τιμή	21,65	-	1,66	21,52	34,00	0,11
			Πλήθος τιμών	7	-	17	17	2	2
			MIN	11,92	-	0,31	4,03	32,00	0,10
			MAX	28,72	-	3,34	66,80	36,00	0,11
III-1. Ανώτερος Ορίζοντας Αθηναϊκού Σχιστολίθου									
BP3328	14,35	Ασβ. Μεταψαμ.	12,23						
BP3328	17,70	Ασβ. Μεταψαμ.			0,57	7,35	23,00	0,14	
BP3328	21,80	Ασβ. Μεταψαμ.	8,18				36,00	0,12	
BP3328	24,65	Ασβ. Μεταψαμ.			1,13	14,69			
BP3328	27,15	Ασβ. Μεταψαμ.			0,72	9,36			
BP3328	35,45	Ασβ. Μεταψαμ.			1,08	14,04			
BP3329	11,25	Ασβ. Μεταψαμ.	3,23						
BP3329	14,90	Ασβ. Μεταψαμ.	12,60						
BP3329	23,65	Ασβ. Μεταψαμ.	16,02		1,19	15,47			
BP3329	28,40	Ασβ. Μεταψαμ.	6,47		1,45	18,85			
BP3329	32,10	Ασβ. Μεταψαμ.			1,26	16,38	43,00	0,18	
BP3329	35,80	Ασβ. Μεταψαμ.	11,15						
BP3304	9,45	Ασβ. Ψαμμίτης	9,49		0,74	9,56			
BP3304	12,15	Ασβ. Ψαμμίτης	12,50		0,55	7,15			
BP3304	18,25	Ασβ. Ψαμμίτης			1,05	13,65			
BP3304	22,55	Ασβ. Ψαμμίτης			0,73	9,43			
BP3304	14,75	Ασβ. Ψαμμίτης			0,25	3,25			
BP3304	16,95	Ασβ. Ψαμμίτης			0,36	4,62			
BP3301	30,15	Μεταψαμμ.			0,77	10,01			
BP3301	33,55	Μεταψαμμ.			0,66	8,58			
BP3311	5,35	Μεταψαμμ.					52,00	0,14	
BP3311	7,80	Μεταψαμμ.			0,75	9,75			

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c	
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}			
	m		MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa	
BP3311	11,45	Μεταψαμμ.					20,00	0,15	
BP3311	14,30	Μεταψαμμ.	11,91						
BP3311	15,85	Μεταψαμμ.			0,49	6,31			
BATPG01	29,78	Μεταψαμμ.			0,58	7,54			
BATPG01	34,90	Μεταψαμμ.			0,47	6,11			
BATPG01	35,50	Μεταψαμμ.			1,33	17,29			
BASPG04	24,25	Μεταψαμμ.	8,34	2,25					
BASPG04	25,50	Μεταψαμμ.	15,93		1,78	23,14			
BASPG05	8,15	Μεταψαμμ.	2,90	3,91					
BASPG05	11,00	Μεταψαμμ.	20,08	0,24	0,52	6,76			
BASPG07	6,25	Μεταψαμμ.		0,81	1,25	16,25			
BP3307	11,75	Μεταψαμμ.	12,87						
BP3307	14,10	Μεταψαμμ.	16,46						
BP3312	3,45	Μεταψαμμ.			0,72	9,30			
BP3312	7,45	Μεταψαμμ.			0,31	4,03			
BP3312	7,95	Μεταψαμμ.			0,33	4,29			
BP3314	4,85	Μεταψαμμ.			0,85	11,05			
BATPG01	6,45	Μεταψαμμ.	1,59	0,25	0,15	1,95			
BATPG01	7,70	Μεταψαμμ.			0,73	9,49			
BASPG04	20,45	Μεταψαμμ.			1,22	15,86			
BASPG07	12,55	Μεταψαμμ.			1,73	22,49			
BASPG07	14,08	Μεταψαμμ.			0,85	10,99			
BBTPG08	12,10	Μεταψαμμ.			1,27	16,51			
BH3315	15,60	Μεταψαμμ.	5,66						
BP3301	27,15	Μεταψαμμ.			1,74	22,56			
BP3330	6,75	Μεταψαμμ.			0,31	3,97			
BP3330	8,05	Μεταψαμμ.			0,38	4,88			
BASPG04	15,00	Μεταψαμμ.			0,57	7,41			
BASPG04	16,10	Μεταψαμμ.	5,41						
BP3307	15,45	Μεταψαμμ.	19,58						
III-1. Ανώτ. Ορίζ. Αθηναϊκού Σχιστ.		Μέσος όρος	10,63	1,49	0,83	10,82	34,80	0,15	
		Τυπική απόκλιση	5,41	1,58	0,44	5,71	13,44	0,02	
		Μεσαία τιμή	11,53	0,81	0,73	9,49	36,00	0,14	
		Πλήθος τιμών	20	5	37	37	5	5	

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σιηράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
			ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c
m	MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa		
		MIN	1,59	0,24	0,15	1,95	20,00	0,12
		MAX	20,08	3,91	1,78	23,14	52,00	0,18
III-2. Κατώτερος Οριζοντας Αθηναϊκού Σχιστολίθου								
BP3311	29,45	Μεταψαμ.-Γραουβ.			0,35	4,49		
BP3311	32,15	Μεταψαμ.-Γραουβ.			0,63	8,19		
BP3311	39,65	Μεταψαμ.-Γραουβ.			1,35	17,49		
III-2. Κατώτ. Ορίζ. Αθηναϊκού Σχιστ.		Μέσος όρος			0,77	10,05		
		Τυπική απόκλιση			0,52	6,70		
		Μεσαία τιμή			0,63	8,19		
		Πλήθος τιμών			3	3		
		MIN			0,35	4,49		
		MAX			1,35	17,49		
III-3. Συμπαγείς ζώνες Αθηναϊκού Σχιστολίθου								
BBTPG09	8,90	Ασβεστ.	60,80	3,02				
BBTPG09	9,60	Ασβεστ.	80,26	5,85				
BP3301	22,85	Ασβεστόλιθ.			4,54	90,80		
BP3328	11,65	Ασβεστόλιθος	23,12					
BP3328	31,50	Ασβεστ. Ψαμμ.	7,80					
BP3329	18,65	Ασβεστ. Ψαμμ.	16,06		4,38	87,60		
BP3329	20,15	Ασβεστ. Ψαμμ.			0,81	10,53	56,00	0,17
BBTPG09	33,90	Γραουβάκης - Αργιλ. Σχιστολ		10,50	2,48	49,60		
BBTPG11	32,50	Επιδοσιτικός χλωριτικός ασβεστιτικός Σχιστόλιθος	35,92	3,07	1,45	18,79		
BBTPG11	33,55	Επιδοσιτικός χλωριτικός ασβεστιτικός Σχιστόλιθος	54,47	7,25	2,10	42,00		
BBTPG09	30,55	Γραουβάκης - Αργιλ. Σχιστολ			3,94	78,70		
		Μέσος όρος	39,78	5,94	2,81	54,00	56,00	0,17
		Τυπική απόκλιση	26,38	3,13	1,48	32,63	-	-

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ					
			ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ (BRAZILIAN) ΑΝΤΟΧΗ σ_t	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PLT)	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_{c50} ΣΕ ΜΟΝΟ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
	m		ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ σ_c		Μέση ΑΝΤΟΧΗ I_{s50}	ΒΑΣΕΙ Μέσης ΑΝΤΟΧΗΣ I_{s50}	ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ϕ	ΣΥΝΟΧΗ c
III-3. Συμπαγή υλικά Αθηναϊκού Σχιστ.			MPa	MPa	MPa	MPa	° (deg)	MPa
		<i>Μεσαία τιμή</i>	35,92	5,85	2,48	49,60	56,00	0,17
		<i>Πλήθος τιμών</i>	7	5	7	7	1	1
		<i>MIN</i>	7,80	3,02	0,81	10,53	56,00	0,17
		<i>MAX</i>	80,26	10,50	4,54	90,80	56,00	0,17

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αποτελέσματα Επί Τόπου Δοκιμών και Μετρήσεων

Πίνακας Β.1 – Δοκιμές Πρεσσιόμετρου Menard

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΒΑΘΟΣ (m) ΠΥΘΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΤΡΟ E_M ΑΡΧΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΜΕΤΡΟ E_M ΕΠΑ-ΝΑΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ
BR 3334	1	3.7	43,8	-	Αποσαθρωμένος ΜΑΝΔΥΑΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3334	2	6.1	110,5	-	Αποσαθρωμένος ΜΑΝΔΥΑΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3334	3	9.1	228,9	-	Ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ
BR 3334	4	12	232,1	-	Ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ
BR 3334	5	15.1	219,5	-	Ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ
BR 3334	6	18.1	162,3	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	7	22.1	218,7	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	8	24.5	170,0	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	9	28.1	131,9	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	10	31.1	161,0	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	11	34.9	183,3	-	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	12	36.5	112,0	-	ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3334	13	39.7	250,5	-	ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΣ (Αποδιοργανωμένος)
BR 3335	1	4.00	63,4	-	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3335	2	7.60	60,7	-	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3335	3	11.00	38,5	-	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3335	4	14.60	29,8	-	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3335	5	18.00	127,5	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	6	20.30	69,3	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	7	23.40	65,6	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	8	26.40	26,8	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	9	29.50	40,0	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	10	32.70	60,0	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3335	11	35.80	1040,7	-	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3335	12	39.10	219,7	-	Εναλλαγές ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ με ασβεστιτικό ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3337	1	3.30	474,4	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3337	2	6.40	212,9	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3337	3	9.30	468,8	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3337	4	13.30	366,0	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3337	5	15.70	22,2	-	ΙΛΥΣ με ΨΑΜΜΙΤΙΚΕΣ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ
BR 3337	6	18.10	384,3	-	ΙΛΥΣ με ΨΑΜΜΙΤΙΚΕΣ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ
BR 3337	7	18.90	23,8	-	ΙΛΥΣ με ΨΑΜΜΙΤΙΚΕΣ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ
BR 3337	8	20.30	25,2	-	ΙΛΥΣ με ΨΑΜΜΙΤΙΚΕΣ ΕΝΣΤΡΩΣΕΙΣ
BR 3337	9	24.30	149,7	-	ΨΑΜΜΙΤΗΣ
BR 3337	10	27.40	144,3	-	Ιλυώδης ΑΜΜΟΣ
BR 3337	11	30.30	99,7	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ
BR 3337	12	33.60	327,7	-	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σπηραγγών του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΒΑΘΟΣ (m) ΠΥΘΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΤΡΟ E_M ΑΡΧΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΜΕΤΡΟ E_M ΕΠΑ-ΝΑΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ
BR 3337	13	34.50	210,9	-	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ -ΛΙΓΝΙΤΗΣ -ΑΜΜΟΣ
BR 3337	14	35.30	63,4	-	Εναλλαγές ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ με ΨΑΜΜΙΤΗ
BR 3337	15	37.70	218,9	-	Εναλλαγές ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ με ΨΑΜΜΙΤΗ
BASRG06	1	3,7	51,5	-	Αργιλώδης Άμμος - Μεταψαμμίτης
BASRG06	2	7	40,6	-	Αργιλώδης Άμμος - Μεταψαμμίτης
BASRG06	3	10,1	75,3	-	Μεταψαμμίτης - Μεταίλυόλιθος
BASRG06	4	14,5	101,6	-	Μεταψαμμίτης - Μεταίλυόλιθος
BASRG06	5	19,3	75,1	326,4	Μεταψαμμίτης - Μεταίλυόλιθος
BASRG06	6	24	119,2	370,5	Μεταψαμμίτης - Μεταίλυόλιθος
BASRG06	7	29	188,4	664,2	Γραουβάκης – Αργιλικός Σχιστόλιθος
BASRG06	8	33,5	242,4	303,6	Γραουβάκης – Αργιλικός Σχιστόλιθος
BBTPG10	1	35,5	370,8	630,9 - 4864,4	Αργιλικός Σχιστόλιθος

Πίνακας Β.2 - Δοκιμές Διαπερατότητας τύπου Maag

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΜΗΚΟΣ ΑΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ (m)	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/sec)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)			
BP3301	19	20,5	1,5	$7,48 \times 10^{-6}$	-
	23,5	24,9	1,4	$1,49 \times 10^{-5}$	-
	29	30,4	1,4	$1,20 \times 10^{-5}$	-
BP3304	13	14,7	1,7	$1,73 \times 10^{-5}$	-
	17,5	19,8	2,3	$8,81 \times 10^{-6}$	-
	25	26,7	1,7	$6,84 \times 10^{-6}$	-
BP3305	14,00	15,00	1,00	$2,00 \times 10^{-7}$	-
	18,50	20,20	1,70	~ 0	Κατά την εκτέλεση της δοκιμής δεν παρατηρήθηκε απώλεια υδάτων
	22,50	24,40	1,50	$8,03 \times 10^{-7}$	-
BP3307	8,80	10,49	1,69	$5,17 \times 10^{-5}$	-
	12,00	15,30	3,30	$1,33 \times 10^{-5}$	-
	16,00	19,80	3,80	$8,75 \times 10^{-6}$	-
	23,00	26,10	3,10	$5,80 \times 10^{-6}$	-
BP3309	13,50	15,80	2,30	$6,86 \times 10^{-6}$	-
BP3310	7,50	9,50	2,00	~ 0	Κατά την εκτέλεση της δοκιμής δεν παρατηρήθηκε απώλεια υδάτων
	12,00	14,14	2,14	$9,43 \times 10^{-8}$	-
	18,50	21,40	2,90	~ 0	Κατά την εκτέλεση της δοκιμής δεν παρατηρήθηκε απώλεια υδάτων
BP3311	7,50	9,60	2,10	$1,24 \times 10^{-5}$	-
BP3312	9,20	10,30	1,10	$3,02 \times 10^{-5}$	-
	14,00	14,80	0,80	$7,26 \times 10^{-5}$	-

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σιράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΜΗΚΟΣ ΑΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	(m)	k (cm/sec)	
	18,50	20,20	1,70	$3,99 \times 10^{-6}$	-
	23,50	25,00	1,50	$2,46 \times 10^{-6}$	-
	27,50	29,70	2,20	$1,92 \times 10^{-6}$	-
	12,50	14,50	2,00	$2,33 \times 10^{-6}$	-
BP3313	18,90	19,90	1,00	$2,31 \times 10^{-5}$	-
	23,60	25,50	1,90	$1,30 \times 10^{-5}$	-
	28,30	30,20	1,90	$1,59 \times 10^{-5}$	-
	9,00	10,00	1,00	$7,87 \times 10^{-5}$	-
BP3314	13,50	15,50	2,00	$3,26 \times 10^{-5}$	-
	18,00	19,50	1,50	$2,85 \times 10^{-5}$	-
	23,50	25,50	2,00	$5,37 \times 10^{-6}$	-
	28,00	29,50	1,50	$1,22 \times 10^{-5}$	-
	9,50	11,10	1,60	$6,53 \times 10^{-5}$	-
BH3315	14,00	15,40	1,40	$4,16 \times 10^{-5}$	-
	15,40	18,00	2,60	$1,82 \times 10^{-5}$	-
	21,20	23,60	2,40	$2,03 \times 10^{-5}$	-
	28,60	31,30	2,70	$1,08 \times 10^{-5}$	-
	BP3329	7,70	9,50	1,80	~ 0
14,20		15,90	1,70	$2,26 \times 10^{-5}$	-
BP3330	13,70	15,70	2,00	$2,16 \times 10^{-6}$	-
	18,50	20,50	2,00	$3,54 \times 10^{-6}$	-
	24,00	25,50	1,20	$3,82 \times 10^{-6}$	-
	28,80	30,70	1,90	$4,53 \times 10^{-7}$	-
BATPG01	15	15,7	0,70	~ 0	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
	27,4	28	0,60	~ 0	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος - Αργ. Σχιστόλιθος
BATPG02	13,4	14,4	1,00	$1,7 \times 10^{-3}$	Ψαμμίτης
	21,5	23	1,50	$1,1 \times 10^{-3}$	Τεκτ. Λατυποπαγές
BATPG03	8	9,2	1,20	$2,7 \times 10^{-5}$	Ψαμ. Μάργα
	20,3	21	0,70	$5,6 \times 10^{-5}$	Ψαμ. Μάργα - Ιλυόλιθος
BASPG04	5,1	5,6	0,50	$6,8 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης
	18	20	2,00	$2,8 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
BASPG05	9,3	10,1	0,80	$1,3 \times 10^{-3}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
	17	18	1,00	$4,7 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
	25,3	25,5	0,20	$5,9 \times 10^{-5}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
BASRG06	10	10,5	0,50	$1,4 \times 10^{-3}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
	17	17,5	0,50	$8,5 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
BASPG07	5	5,8	0,80	$2,1 \times 10^{-3}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
BBTPG08	12,5	13	0,50	$6,4 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος
	23	23,8	0,80	$3,3 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταϊλουόλιθος

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΜΗΚΟΣ ΑΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	(m)	k (cm/sec)	
ΒΒΤΡG09	12,3	13	0,70	$1,3 \times 10^{-3}$	Μεταψαμμίτης - Μεταίλουλιθος
	23	24,2	1,20	$4,1 \times 10^{-5}$	Γραουβάκης – Αργιλ. Σχιστόλιθος
ΒΒΤΡG10	4,8	6	1,20	$5,2 \times 10^{-4}$	Αργιλώδης Άμμος - Μεταψαμμίτης
	14,5	15	0,50	$3,1 \times 10^{-4}$	Μεταψαμμίτης - Μεταίλουλιθος
	26,8	27,4	0,60	$1,9 \times 10^{-4}$	Γραουβάκης – Αργιλικός Σχιστόλιθος
ΒΒΤΡG11	12,5	12,8	0,30	$1,9 \times 10^{-4}$	Γραουβάκης – Αργιλικός Σχιστόλιθος
	22,5	23,2	0,70	$4,4 \times 10^{-5}$	Γραουβάκης – Αργιλικός Σχιστόλιθος

Πίνακας Α.3 - Δοκιμές Διαπερατότητας τύπου Lugeon

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	(kg/cm ²)	K (cm/sec)	K _M (cm/sec)	
ΒΡ3301	9,20	14,20	1,70	$9,88 \times 10^{-5}$	$2,13 \times 10^{-4}$	-
			2,70	$1,20 \times 10^{-4}$		
			3,30	$2,58 \times 10^{-4}$		
			2,30	$3,70 \times 10^{-4}$		
			1,64	$2,17 \times 10^{-4}$		
ΒΡ3302	10,00	15,00	Ολικές απώλεια υδάτων με μέγιστη παροχή αντλίας 75 lt / min			
ΒΡ3302	14,95	19,95	1,29	$6,21 \times 10^{-4}$	$8,10 \times 10^{-4}$	-
			1,64	$8,20 \times 10^{-4}$		
			1,88	$9,35 \times 10^{-4}$		
			1,66	$8,00 \times 10^{-4}$		
			1,12	$8,73 \times 10^{-4}$		
ΒΡ3302	19,50	24,50	0,93	$1,08 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-3}$	-
			1,02	$1,58 \times 10^{-3}$		
			0,42	$3,24 \times 10^{-3}$		
ΒΡ3302	25,00	30,00	1,50	$3,13 \times 10^{-4}$	$5,43 \times 10^{-4}$	-
			2,07	$4,87 \times 10^{-4}$		
			2,29	$6,70 \times 10^{-4}$		
			1,58	$8,66 \times 10^{-4}$		
			1,45	$3,79 \times 10^{-4}$		
ΒΗ3303	10,00	15,00	Στο 4 ^ο λεπτό του δεύτερου βήματος (2 Atm) οι απώλειες νερού ήταν περισσότερες από 75 lt/min (μέγιστη παροχή αντλίας)			
ΒΗ3303	15,00	20,00	1,65	$5,92 \times 10^{-6}$	$1,96 \times 10^{-6}$	-
			2,65	0		
			3,65	0		
			2,65	$9,22 \times 10^{-7}$		

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	(kg/cm ²)	K (cm/sec)	K _M (cm/sec)	
BH3303	19,70	24,70	1,65	2,95 x 10 ⁻⁶	8,88 x 10 ⁻⁶	-
			1,57	1,09 x 10 ⁻⁵		
			2,57	5,69 x 10 ⁻⁶		
			3,57	1,16 x 10 ⁻⁵		
			2,57	3,80 x 10 ⁻⁶		
BP3306	10,30	15,30	1,20	1,97 x 10 ⁻⁵	2,27 x 10 ⁻⁵	-
			2,20	2,16 x 10 ⁻⁵		
			3,20	3,03 x 10 ⁻⁵		
			2,20	2,20 x 10 ⁻⁵		
			1,20	1,97 x 10 ⁻⁵		
BP3306	16,00	21,00	1,25	5,68 x 10 ⁻⁶	1,01 x 10 ⁻⁶	-
			2,25	1,05 x 10 ⁻⁵		
			3,25	1,82 x 10 ⁻⁵		
			2,25	1,05 x 10 ⁻⁵		
			1,25	5,68 x 10 ⁻⁶		
BP3306	20,60	25,60	1,28	3,70 x 10 ⁻⁵	4,38 x 10 ⁻⁵	-
			2,28	4,34 x 10 ⁻⁵		
			3,28	5,80 x 10 ⁻⁵		
			2,28	4,27 x 10 ⁻⁵		
			1,28	3,81 x 10 ⁻⁵		
BH3308	9,40	14,40	1,20	3,94 x 10 ⁻⁶	7,51 x 10 ⁻⁶	-
			2,20	7,53 x 10 ⁻⁶		
			3,20	1,47 x 10 ⁻⁵		
			2,20	7,42 x 10 ⁻⁶		
			1,20	3,94 x 10 ⁻⁶		
BH3308	14,40	19,40	1,50	4,53 x 10 ⁻⁶	7,97 x 10 ⁻⁶	-
			2,50	8,34 x 10 ⁻⁶		
			3,50	1,44 x 10 ⁻⁵		
			2,50	8,06 x 10 ⁻⁶		
			1,50	4,53 x 10 ⁻⁶		
BH3308	19,80	24,80	1,33	1,80 x 10 ⁻⁵	2,24 x 10 ⁻⁵	-
			2,33	2,05 x 10 ⁻⁵		
			3,33	3,58 x 10 ⁻⁵		
			2,33	2,02 x 10 ⁻⁵		
			1,33	1,76 x 10 ⁻⁵		
BP3309	14,70	19,70	17,40	1,40x10 ⁻⁷	8,17 x 10 ⁻⁶	-
			18,40	1,07 x 10 ⁻⁵		
			19,40	1,38 x 10 ⁻⁶		
			18,40	9,28 x 10 ⁻⁶		
			17,40	6,87 x 10 ⁻⁶		
BP3309	20,80	25,80	17,35	7,73 x 10 ⁻⁷	4,87 x 10 ⁻⁷	-
			18,35	3,99 x 10 ⁻⁷		

«Συγκρίσεις πραγματικών τιμών εδαφικών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σιηράγγων του Μετρό σε σχέση με θεωρητικές προεκτιμήσεις»

2016-2017

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	(kg/cm ²)	K (cm/sec)	K _M (cm/sec)	
				19,35	1,26 x 10 ⁻⁶	
			18,35	0		
			17,35	0		
BP3309	25,40	30,40	17,35	2,81 x 10 ⁻⁷	6,94 x 10 ⁻⁷	-
			18,35	1,26 x 10 ⁻⁶		
			19,35	1,26 x 10 ⁻⁶		
			18,35	6,64 x 10 ⁻⁷		
			17,35	0		
BP3310	20,60	25,60	1,28	0	0	Μηδενικές απώλειες ύδατος κατά τη δοκιμή
			2,28	0		
			3,28	0		
			2,28	0		
			1,28	0		
BP3311	10,50	15,50	1,27	5,59 x 10 ⁻⁶	2,26 x 10 ⁻⁶	-
			2,27	2,08 x 10 ⁻⁶		
			3,27	3,62 x 10 ⁻⁶		
			2,27	0		
			1,27	0		
BP3311	14,60	19,60	0,77	9,22 x 10 ⁻⁶	5,63 x 10 ⁻⁶	-
			1,27	5,59 x 10 ⁻⁶		
			1,77	1,34 x 10 ⁻⁵		
			1,27	0		
			0,77	0		
BP3311	20,40	25,40	0,95	2,49 x 10 ⁻⁵	3,81 x 10 ⁻⁵	-
			1,45	4,24 x 10 ⁻⁵		
			1,95	5,58 x 10 ⁻⁵		
			1,45	3,26 x 10 ⁻⁵		
			0,95	3,49 x 10 ⁻⁵		
BP3328	10,60	15,60	1,55	6,38 x 10 ⁻⁵	5,99 x 10 ⁻⁵	-
			2,55	5,59 x 10 ⁻⁵		
			3,55	6,06 x 10 ⁻⁵		
			2,55	5,58 x 10 ⁻⁵		
			1,55	6,33 x 10 ⁻⁵		
BP3328	15,00	20,00	1,28	3,86 x 10 ⁻⁵	4,19 x 10 ⁻⁵	-
			2,28	3,40 x 10 ⁻⁵		
			3,28	3,69 x 10 ⁻⁵		
			2,28	6,31 x 10 ⁻⁵		
			1,28	3,71 x 10 ⁻⁵		
BP3328	19,60	24,60	1,40	2,03 x 10 ⁻⁵	2,15 x 10 ⁻⁵	-
			2,40	2,22 x 10 ⁻⁵		
			3,40	2,48 x 10 ⁻⁵		
			2,40	2,02 x 10 ⁻⁵		
			1,40	1,99 x 10 ⁻⁵		

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ (kg/cm ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ Κ (cm/sec)	ΜΕΣΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ Κ _Μ (cm/sec)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)				
BP3329	15,30	20,30	1,38	4,42 x 10 ⁻⁵	5,03 x 10 ⁻⁵	-
			2,38	5,13 x 10 ⁻⁵		
			3,38	6,04 x 10 ⁻⁵		
			2,38	5,20 x 10 ⁻⁵		
			1,38	4,34 x 10 ⁻⁵		
BP3329	20,10	25,10	1,44	5,08 x 10 ⁻⁵	5,89 x 10 ⁻⁵	-
			2,44	6,04 x 10 ⁻⁵		
			3,44	6,99 x 10 ⁻⁵		
			2,44	6,08 x 10 ⁻⁵		
			1,44	5,26 x 10 ⁻⁵		
BP3333	5,90	10,90	1,36	1,05 x 10 ⁻⁴	9,57 x 10 ⁻⁵	-
			2,36	8,51 x 10 ⁻⁵		
			3,36	1,00 x 10 ⁻⁴		
			2,36	8,33 x 10 ⁻⁵		
			1,36	1,05 x 10 ⁻⁴		
BP3333	10,40	15,40	1,51	9,81 x 10 ⁻⁵	9,40 x 10 ⁻⁵	-
			2,51	8,54 x 10 ⁻⁵		
			3,45	1,04 x 10 ⁻⁴		
			2,51	8,55 x 10 ⁻⁵		
			1,51	9,65 x 10 ⁻⁵		
BP3333	14,90	19,90	1,49	8,35 x 10 ⁻⁵	8,15 x 10 ⁻⁵	-
			2,49	7,80 x 10 ⁻⁵		
			3,49	8,60 x 10 ⁻⁵		
			2,49	7,70 x 10 ⁻⁵		
			1,49	8,29 x 10 ⁻⁵		
BP3333	20,80	25,80	1,91	7,84 x 10 ⁻⁵	7,88 x 10 ⁻⁵	-
			2,91	7,59 x 10 ⁻⁵		
			3,91	8,61 x 10 ⁻⁵		
			2,91	7,57 x 10 ⁻⁵		
			1,91	7,76 x 10 ⁻⁵		